Reinert, Patrick

Vom Fachbereich VI
Raum- und Umweltwissenschaften
der Universität Trier

zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Genehmigte Dissertation

„Langzeitverhalten des Deponiekörpers bei Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Siedlungsabfällen und den damit verbundenen Auswirkungen der Deponieverordnung auf Materialeinbau und Deponiebetrieb“

Betreuender und Berichterstattender:
Prof. Dr. J.-F. Wagner
Prof. Dr. G. Rettenberger

Berichterstattender:
Prof. Dr. J. B. Ries

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 18.12.2014

Schweinfurt 2016

Meiner Frau

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsarbeit entstand am Lehrstuhl für Geologie im Fachbereich Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier. Sie ist ein Zeugnis der hervorragenden Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl Geologie der Universität Trier und dem Fachbereich BLV, Fachrichtung Gebäudetechnik, Versorgungstechnik, Energietechnik der Fachhochschule Trier.

Für die wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Jean-Frank Wagner, der mir stets die notwendige fachliche und organisatorische Freiheit bei der Durchführung meiner Arbeit ließ.

Danken möchte ich meinem Mentor, Herrn Prof. Dr. Gerhard Rettenberger: zum einen für die Möglichkeit meiner Mitarbeit im Lehr- und Forschungsbereich für Abfalltechnik an der Fachhochschule Trier und zum anderen für die Diskussionen und Anregungen zu dieser Arbeit sowie die Übernahme des Korreferats.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Geologie gilt mein Dank für die Unterstützung bei administrativen Arbeiten und Laboranalysen sowie für die fachlichen Diskussionen und Anregungen zu dieser Arbeit.

Für die finanzielle Förderung meiner Arbeit danke ich der Nikolaus Koch Stiftung Trier sowie dem Land Rheinland-Pfalz für die Förderung im Rahmen des Sonderprogramms „Kooperationskorridor FH - Universität“.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **5**

Inhaltsverzeichnis **7**

Abbildungsverzeichnis **11**

Abbildungsverzeichnis Anhang **13**

Tabellenverzeichnis **15**

Abkürzungsverzeichnis, Symbole **16**

Kurzfassung **19**

Abstract **20**

1 Einleitung **21**

1.1 Problemstellung 22

1.2 Ziele der Arbeit 24

1.3 Untersuchungsmethodik 24

2 Entsorgungstechnische Grundlagen **27**

2.1 Abfallablagerungsverordnung 27

2.1.1 Anwendungsbereich 28

2.1.2 Begriffsbestimmungen 28

2.1.3 Anforderungen an die Ablagerung von behandelten Abfällen 28

2.1.4 Untersuchungs- und Nachweispflichten 29

2.1.5 Übergangsregelungen 29

2.1.6 Ordnungswidrigkeiten 30

2.1.7 Zuordnungskriterien für Deponien allgemein und für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle gemäß Anhang 1 und 2 der Abfallablagerungsverordnung 30

2.1.8 Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen gemäß Anhang 3 der Abfallablagerungsverordnung 34

2.1.9 Vorgaben zur Analytik gemäß Anhang 4 der AbfAblV und deren Parameter zur Beschreibung der Ablagerungsfähigkeit 38

2.2 Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes vom 27. April 2009 und Deponieverordnung vom 27. April 2009 40

2.2.1 Hintergründe der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes 41

2.2.2 Die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes als Artikelverordnung 42

2.2.3 Regelungsinhalte der neuen Deponieverordnung 43

2.3 Beschreibung der wichtigsten Zuordnungswerte zur Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen 44
2.3.1 DOC und TOC im Eluat 44
2.3.2 Atmungsaktivität AT_4 46
2.3.3 Gasbildungsrate nach 21 Tagen (GB_{21}) 47
3 Untersuchungsmethodik und angewandte Verfahren 49
3.1 Grundlagen der Probennahme von festen Abfällen aus Haufwerken und abgelagertem MBA-Abfall nach LAGA PN 98 49
3.1.1 Überprüfung der Homogenität/Heterogenität/Inhomogenität 50
3.1.2 Volumen-/Massenbestimmung 50
3.1.3 Ermittlung der Größtkomponente 51
3.1.4 Festlegung der Mindestanzahl an Einzel-, Misch- und Sammelproben 51
3.1.5 Festlegung der Mindestvolumen der Einzelproben 52
3.1.6 Verjüngung zur Laborprobe 52
3.2 Standardisierung der Probennahme, Probenaufbereitung und Analytik für Parameter der AbfAblV gemäß ASA-Standard /RAL-RG 504 52
3.3 Untersuchungen im Deponiekörper 54
3.3.1 Temperaturentwicklung im Deponiekörper 57
3.3.2 Messung der Deponiegaskonzentration im Untergrund 57
3.3.3 Deponiegasmessung an der Deponieoberfläche 59
3.3.4 Sickerwassererfassung 60
3.3.5 Porenwasserdrücke 62
3.4 Untersuchungen im Labor 64
3.4.1 Korngrößenverteilung 64
3.4.2 Proctordichte 65
3.4.3 Bestimmung der Zulässigkeits- und Zuordnungskriterien gemäß Deponieverordnung für die Eluatkriterien 66
3.4.4 Durchlässigkeitsuntersuchung 67
3.4.5 Modifizierte Durchlässigkeitsuntersuchung mittels statischer Wassersäule 69
4 Herkunft und Charakterisierung des mechanisch- biologisch behandelten Abfalls 71
4.1 Abfallbehandlung 71
4.1.1 System und Konzept der Abfallbehandlung 74
4.2 Ablagerung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls auf der Deponie 75

4.2.1 Anlieferung 76
4.2.2 Materialsammlung 76
4.2.3 Materialeinbau 77
4.2.4 Abdeckung des eingebauten Materials 79
4.3 Probleme und Auswirkungen auf den Deponiebetrieb 79
4.4 Zusammensetzung des Restabfalls und Abfallkennwerte 81
4.5 Zusammenfassende Charakterisierung des Untersuchungsmaterials 83
5 Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Langzeitverhalten von MBA-Deponien 85
5.1 Untersuchungen im Deponiekörper 85
5.1.1 Temperaturmessung 85
5.1.2 Deponiegasmessung 86
5.1.2.1 Deponiegasmessungen im Deponiekörper 88
5.1.2.2 Deponiegasmessungen an der Oberfläche 91
5.1.2.3 Deponiegasprognose 92
5.1.3 Porenwasserdrücke 93
5.2 Laborversuche 95
5.2.1 Korngrößenverteilung 95
5.2.2 Wassergehalt des zu deponierenden Materials im Vergleich mit Material aus dem Testfeld 96
5.2.3 Proctordichte 97
5.2.4 Vergleich der Zuordnungskriterien vor und nach der Ablagerung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls im Testfeld nach 24 Monaten 99
5.2.5 TOC im Feststoff 102
5.2.6 Wasserdurchlässigkeit 103
5.3 Zusammenfassung 104
6 Zusammenfassende Bewertung und Interpretation der Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Untersuchungen in Bezug auf den zukünftigen Umgang mit MBA-Deponien 107
6.1 Rahmenbedingungen 107
6.2 Deponiebetrieb und Material im Anlieferungszustand 107
6.3 Ablagerungsdichte, Einbauwassergehalt und Wasserdurchlässigkeit 108
6.4 Temperatur- und Wassergehaltsentwicklung mit Bestimmung des Einflusses auf das Deponieinventar und das Emissionsverhalten 110

6.5 Porenwasserdrücke und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Standsicherheitsbetrachtung von MBA-Deponien.....112

6.6 Deponiegasemissionen.....113

6.7 Gesetzliche Entwicklungen während der wissenschaftlichen Untersuchungen und der damit verbundenen Auswirkungen auf den Deponiebetrieb bzw. das Deponieinventar und die vorliegenden Untersuchungsergebnisse 114

6.8 Notwendige Anpassungen der Deponietechnik für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle und Handlungsempfehlungen für Deponiebetreiber bezogen auf die neue Deponieverordnung vom 27.04.2009 116

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für weitere Untersuchungen 119

8 Literatur 121

Curriculum Vitae.....135

Anhang 137

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Parameter, die eine Auswirkung auf die Emissionsquellen einer MBA-Deponie haben bzw. in einer Wechselwirkung zu ihnen stehen ..23

Abb. 2-1: Zusammenhang AT_4/TOC im Eluat im Grenzwertbereich [DACH, WARNSTEDT, MÜLLER 2006] 33

Abb. 2-2: Zuordnungswerte für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle vor und nach der Novellierung der AbfAblV mit Angabe der zulässigen Überschreitungsbereiche [KETELSEN 2006]....34

Abb. 2-3: Erreichte Einbaudichten bei den großtechnischen Verdichtungsversuchen [MAAK 2001]....37

Abb. 2-4: Zusammenhang zwischen TOC_{Eluat} und ausgetragener TOC-Fracht im DSR-Sickerwasser bis zum Wasser-Feststoff-Verhältnis von 1 l_n/kg TM [SOYEZ ET AL. 2000]....45

Abb. 2-5: Zusammenhang zwischen AT_4 und dem extrapolierten Sauerstoffverbrauchspotenzial [SOYEZ ET AL. 2000]....46

Abb. 2-6: Zusammenhang zwischen Gasbildung GB_{21} im Gärtest und GB_{200} im DSR [SOYEZ ET AL. 2000]....47

Abb. 3-1: Ablaufplan der Probennahme und Probenaufbereitung von Abfallproben gemäß ASA e.V. [ROHRING, BAHN, MERTENSKÖTTER, SCHÜTT 2007]....53

Abb. 3-2: Schematischer Aufbau des Versuchsfeldes mit Messinstrumenten zur In- situ-Messung sowie Gasbrunnen und Sickerwasserbrunnen für alternierende Untersuchungen (Abkürzungen im Text erklärt) 55

Abb. 3-3: Lageplan des Deponieabschnittes vor Testfeldeinrichtung 56

Abb. 3-4: Ansicht von „unten“ auf das mit Folien abgedeckte Versuchsfeld 56

Abb. 3-5: Temperatursensor Pt100 (Bild links) und Data Logger....57

Abb. 3-6: Tiefendifferenzierte Deponiegasmessstellen, abgeändert [LFU BADEN-WÜRTTEMBERG 2001] 58

Abb. 3-7: Porenwasserdruckgeber....63

Abb. 3-8: Schematischer Aufbau des Versuchsfeldes zur Bestimmung der Porenwasserüberdrücke mittels künstlich erzeugter Überlagerung....63

Abb. 3-9: Proctorkurven von Materialien aus der MBA Lüneburg [ENTENMANN 2005] 66

Abb. 3-10: Schema einer Dreiaxialzelle [FEHRER 2002] 68

Abb. 4-1: Fließbild der mechanisch-biologischen Behandlungsanlage vor den Umbaumaßnahmen [INGENIEURGRUPPE RUK GMBH 2005] 75

Abb. 4-2: Dünnschichteinbau mit einer Raupe 76

Abb. 4-3: Sackbildung nach Verdichtung mit einer Schaffußwalze (Abdruck 15x12 cm) 77

Abb. 4-4: Mit Glattmantelwalze geglättetes Material (Größtkorn 35mm) 78

Abb. 4-5: Stauwasser unterhalb der Folie 80

Abb. 4-6: Korngrößenverteilung des MBA-Materials nach DIN 18123 82

Abb. 5-1: Mittlere Temperaturverläufe im MBA-Testfeld in unterschiedlichen Einbautiefen bezogen auf das Testfeld aus Abb. 3-2 86

Abb. 5-2: Zeitlicher Verlauf der Deponiegaszusammensetzung und Produktion (übersetzt) [RETTENBERGER 2005] 87

Abb. 5-3: Vol.-Konzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2), σ (O_2) in verschiedenen Tiefen der Gasbrunnen GB 1= 1,30 m; GB 2= 2,00 m; GB 3= 3,00 m; GB 4= 2,50 m; GB 5= 3,50 m; GB 6= 4,00 m; GB 7= 3,80 m; GB 8= 1,80 m und GB 9= 5,00 m) mit Beginn der Ablagerung 89

Abb. 5-4: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) über die Tiefen der Gasbrunnen GB 1= 1,30 m; GB 2= 2,00 m; GB 3= 3,00 m; GB 4= 2,50 m; GB 5= 3,50 m; GB 6= 4,00 m; GB 7= 3,80 m; GB 8= 1,80 m und GB 9= 5,00 m) nach einem Zeitraum von 500 Tagen 89

Abb. 5-5: Mittlere Gasbildung des hochverdichtet eingebauten mechanisch-biologisch behandelten Abfalls an der Probe SWH 0805/07 bei einem Wassergehalt von 40 Gew.-% und der durchschnittlichen Temperatur von ca. 24°C 91

Abb. 5-6: Gasprognose des MBA-Restabfalls, Deponierungsbeginn 2003, Halbwertszeit drei Jahre 92

Abb. 5-7: Gasprognose des MBA-Restabfalls, Deponierungsbeginn 2003, Halbwertszeit zehn Jahre 93

Abb. 5-8: Porenwasserdruckverläufe während des Versuchszeitraumes mit einer durch Auflast simulierten Ablagerungshöhe 94

Abb. 5-9: Bedeutung der Ablagerungszeit für den Verlauf der Korngrößenverteilung bei Trockensiebung und einem Größtkorn von 35 mm 95

Abb. 5-10: Wassergehalt des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls nach Probennahme aus dem Testfeld. Ablagerungsdauer zwischen 1-2 Jahren 96

Abb. 5-11: Proctorkurve, bestimmt an MBA-Material aus dem Haufwerk im Testfeld 98

Abb. 5-12: Analyse der Eluatkriterien an Proben des Testfeldes 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf pH-Wert, Zink, Blei, Nickel, Kupfer 99

Abb. 5-13: Analyse der Eluatkriterien an Proben des Testfeldes 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf die Leitfähigkeit 100

Abb. 5-14: Vergleich der Eluatkriterien an Proben des Testfeldes bei Materialanlieferung und 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf den TOC im Eluat 101

Abb. 5-15: Vergleich von Proben des Testfeldes bei Materialanlieferung und 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf den TOC im Feststoff 103

Abb. 5-16: Durchlässigkeitsbeiwert des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls bei einer Siebung vor Rotte auf < 34mm. 104

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abb. A- 1: Mächtigkeit der Ablagerung im Bereich des Testfeldes 137

Abb. A- 2: Pflanzenwachstum unterhalb der Folie des abgedeckten Testfeldes . 137

Abb. A- 3: Kleinpflanzen die durch die Folie hindurch gewachsen sind 138

Abb. A- 4: Schaffußwalze mit demontierbarer Bandage zum Umbau auf Glattmantelwalze 138

Abb. A- 5: Proctorprobe 20 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 25 %-WG ft. (rechts) 139

Abb. A- 6: Proctorprobe 30 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 35 %-WG ft. (rechts) 139

Abb. A- 7: Proctorprobe 40 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 45 %-WG ft. (rechts) 140

Abb. A- 8: Proctorprobe 50 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 55 %-WG ft. (rechts) 140

Abb. A- 9: Proctorprobe 60 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 65 %-WG ft. (rechts) 141

Abb. A- 10: Proctorprobe 70 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 75 %-WG ft. (rechts) 141

Abb. A- 11: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 1 bei einer Tiefe von 1,30 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn 142

Abb. A- 12: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 2 bei einer Tiefe von 2,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn 142

Abb. A- 13: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 3 bei einer Tiefe von 3,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....143

Abb. A- 14: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 4 bei einer Tiefe von 2,50 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....143

Abb. A- 15: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 5 bei einer Tiefe von 3,50 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....144

Abb. A- 16: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 6 bei einer Tiefe von 4,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....144

Abb. A- 17: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 7 bei einer Tiefe von 3,80 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....145

Abb. A- 18: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 8 bei einer Tiefe von 1,80 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....145

Abb. A- 19: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 9 bei einer Tiefe von 5,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn....146

Abb. A- 20: Probenbezeichnung und Zuordnung der Haufwerk-Proben 146

Abb. A- 21: Liste der Probennummern mit Zuordnung der Entnahmestelle 147

Abb. A- 22: Fortsetzung der Liste der Probennummern mit Zuordnung der Entnahmestelle....148

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Vergleich der Zuordnungskriterien für Deponien nach Abfallablagerungsverordnung Stand 24.07.2002 und Novellierung vom 13.12.2006. Die Werte in Klammern geben den Zuordnungswert vor der Novellierung der AbfAblV an.....31

Tab. 2-2: Wirkungspfade und Maßnahmen des optimierten Deponiebetriebes nach AbfAblV [RETTENBERGER; FRICKE 1999; ÜBERARBEITET] 36

Tab. 2-3: Wichtigste Änderungen des Anhangs 4 der AbfAblV mit Novellierung vom 13.12.2006 [ANONYM 2001] 38

Tab. 3-1: Mindestanzahl der Einzel-/Misch-/Sammel- und Laborproben in Anhängigkeit vom Prüfvolumen [LAGA PN 98 2001].....51

Tab. 4-1: Auszug aus den Mittelwerten der Anlieferungsanalysen des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls.....82

Tab. 5-1: Werte der Proctoruntersuchungen mit mechanisch-biologisch behandeltem Abfall des Testfeldes.....97

Tab. 6-1: Veränderung der Wirkungspfade und Maßnahmen des optimierten Deponiebetriebes nach Inkrafttreten der Deponieverordnung vom 16.07.2009 [URSPRÜNGLICH: RETTENBERGER; FRICKE 1999; ÜBERARBEITET].....115

Abkürzungsverzeichnis, Symbole

Abkürzungen

AbfAblV	Abfallablagerungsverordnung
AT_4	Atmungsaktivität in vier Tagen
BImSchV	Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
DepV	Deponieverordnung
DepVerwV	Deponieverwertungsverordnung
DK	Deponieklasse
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (engl. dissolved organic carbon)
DSR	Deponiesimulationsreaktor
FM	Feuchtmasse
GB	Gasbrunnen
GB_{21}	Gasbildungsrate in 21 Tagen
GB_{200}	Gasbildungsrate in 200 Tagen - Langzeitversuch
k. A.	keine Angabe
MBA	Mechanisch-biologische-Abfallbehandlung
MBA-Deponie	Deponie mit mechanisch-biologisch behandelten Abfällen
l_n	Normliter
RABA	Restabfallbehandlungsanlage
TA-Abfall	Technische Anleitung Abfall
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TOC	Total organic carbon/Gesamt Kohlenstoff

Symbole

A	Querschnittsfläche in m^2
d_m	Materialdichte in Mg/m^3
ε	luftführender Porenanteil
FM	Feuchtmasse in kg
GV	Glühverlust in %
n_a	Porenanteil in %
p	Druck (absolut) in Pa
$p_Ü$	Überdruck in Pa

p_D	Differenzdruck in Pa
p_{Gas}	Partialdruck des Gases in Pa
$t_{½}$	Halbwertszeit in a
TM	Trockenmasse in kg
V	Volumen in m³
$\dot{V}$	Volumenstrom in m³/h oder l/h
WG	Wassergehalt in %

Kurzfassung

Mechanisch-biologisch behandelte Abfälle zeigen im Vergleich mit unbehandelten Siedlungsabfällen völlig veränderte geomechanische Eigenschaften auf. Das Emissionspotenzial ist weitgehend reduziert. Dies erforderte eine Anpassung der Deponietechnik bezüglich Materialeinbau und Deponiebetrieb. Um sowohl das Deponieverhalten der mechanisch-biologisch behandelten Abfälle sowie das verbleibende Emissionspotenzial beurteilen zu können, wurde in dieser Arbeit ein breit angelegtes Untersuchungsprogramm im Deponiefeld umgesetzt, welches zum Ziel hat, das Langzeitverhalten des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls im Deponiefeld zu beschreiben. Hieraus wurden Empfehlungen für Deponiebetreiber abgeleitet, die eine langfristige Sicherung der gesetzlichen Anforderungen an das Ablagern von MBA-Material gewährleisten. Somit wird der Forderung nach einem nachhaltigen Schutz der Umwelt Rechnung getragen. Eine solche Sicherung ermöglicht einen langfristig ökonomisch und ökologisch tragbaren Deponiebetrieb und somit die nötige Planungssicherheit für Deponiebetreiber.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass MBA-Deponien unter den beschriebenen Bedingungen ohne größere Probleme betrieben werden können. Durch die mechanisch-biologische Behandlung wurde jedoch der gesamte Bereich der Ablagerung neu definiert.

Schwerpunkt des Untersuchungsprogramms war die Untersuchung der Temperatur- und Feuchtigkeitsentwicklung im Deponiekörper, der daraus resultierenden Auswirkungen auf die Zusammensetzung und Menge des Deponiegases sowie die Beurteilung der geotechnischen Erfordernisse an das abzulagernde Material und das Deponiefeld. Hierbei stand die Untersuchung von Porenwasserdrücken im Vordergrund.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Temperaturniveaus im Deponiekörper mit ca. 16-25°C etwas unter den von DSR lagen. Die Deponiegaszusammensetzung weicht ebenfalls etwas von den Ergebnissen aus DSR ab. Die Deponiegasmenge liegt im erwarteten Bereich und lässt Rückschlüsse auf das Gasphasenmodell zu. An den Zuordnungskriterien konnten keine wesentlichen Veränderungen oder Abbauraten bezogen auf das Ursprungsmaterial beobachtet werden. Die Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen sollten weiterhin unter der Maßgabe: verdichteter Dünnschichteinbau, Profilierung mit 5-10% Gefälle, Einbauwassergehalt 30-35 %, geringstmögliche Einbaufläche und einer arbeitstägigen Abdeckung des Deponiefeldes mit wasserundurchlässigem Material in regenintensiven Monaten und im Winter erfolgen.

Ein Deponiebetrieb nach den Vorgaben des Anhanges 5, Nr. 6 der Deponieverordnung, nach dem ein Deponiebetreiber den Anfall von Sickerwasser so gering zu halten hat, wie dies nach dem Stand der Technik möglich ist, ist somit umsetzbar. Aufgrund der geringen Sickerwassermengen und des verdichteten Materialeinbaus stellt der Deponiekörper mit MBA-Material kein umweltrelevantes Gefährdungspotenzial bezogen auf die Deponiegasemissionen dar, insofern nach Abschluss des Deponiekörpers eine Methanoxidationsschicht als Oberflächenabdichtung aufgebracht wird.

Abstract

Biological-mechanically treated waste displays completely changed geometrical characteristics than untreated municipal solid waste. The emission potential is reduced considerably. This demanded an adaption of the waste disposal technology with regard to material emplacement and waste site operation. For the evaluation of both biological-mechanically treated waste´s dumping behaviour as well as the remaining emission potential a diversified research programme on the waste field had been implemented for this paper aimed at showing the long-term behaviour of the biological-mechanically treated waste during site operation. From this study recommendations had been derived for landfill operators to guarantee a long-term compliance with legal stipulations for landfilling of MBT material. This allows the demand for a lasting protection of the environment to be met. Such a compliance enables a long-term, economically and ecologically acceptable waste site operation and consequently the planning reliability necessary for landfill operators.

Previous experience has shown that MBT waste sites can be operated according to the conditions described without serious problems. However by biological- mechanical treatment the complete area of disposal is being re-defined.

The research programme´s main focus was based on the study of temperature and humidity development inside the body of waste and the resulting impacts on the mixture and quantity of the landfill gas as well as the evaluation of geotechnical requirements with regard to material of waste storage and the waste field itself. The main emphasis was on the examination of pore water pressures.

Results have shown that the temperature levels of approx. 16-25°C were considerably below the expected values. On the other side the mixture and quantity of the landfill gas were found to be within the expected levels and even allow for conclusions on the gas phase model. On the classification criteria no essential transformation or degradation rates could be observed. The requirements referring to the placement of biological-mechanically treated waste still should be effected in compliance with: Compressed thin layer emplacement, profiling with 5-10 % down-grade, material moisture content 30 – 35 %, smallest possible emplacement area and a daily waste field cover with water-impermeable material during rainy months and winter time.

A landfill operation according to the specifications of annex 5, no 6 of the Ordinance on landfills (“DepV”), which stipulates that landfill operators keep the leachate as low as possible with current technology, is therefore realisable.

Due to small quantities of leachate and the compressed thin layer emplacement the landfill body containing biological-mechanically treated waste does not present an environmental risk potential with regard to landfill gas emissions if after closure of the landfill body as surface sealing a layer of methane oxidation is applied.

1 Einleitung

Mit dem Erlass der Abfallablagerungsverordnung (AbfAblV) vom 20.02.2001 wurde durch den Gesetzgeber die Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland geregelt. Nach der Verordnung bestand ein Ablagerungsverbot für Abfälle, deren Anteil an organischem Trockenrückstand der Originalsubstanz, bestimmt als TOC, größer 18 Masse-% (oder Heizwert 6000 kJ/kg) bzw. die Atmungsaktivität (AT_4) größer 5 mg/g ist [ANONYM 2001]. Seit dem 16. Juli 2009 ist die neue Deponieverordnung als Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009 in Kraft. In die neue Deponieverordnung wurde die Abfallablagerungsverordnung implementiert und selbige aus Gründen der Deregulierung gestrichen.

Die Absicht der Gesetzgebung war mit Einführung der Abfallablagerungsverordnung eindeutig vorgegeben. Die in Anhang 2 der AbfAblV [ANONYM 2001] genannten Parameter führen dazu, dass bei mechanisch-biologischer Behandlung der Siedlungsabfälle die Emissionen der Gas- und Flüssigphase vorweggenommen werden. Aufgrund der Behandlung werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften des zu deponierenden Materials grundlegend verändert. Mit dem Ende der Übergangsfrist vom 31.05.2005 war somit ein mechanisch-biologisch behandeltes Material abzulagern, welches zwar die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Parameter einhält, aber dessen geotechnische Eigenschaften sowie dessen Langzeitverhalten im Deponiekörper bislang noch nicht bekannt waren.

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen an verschiedenen Instituten im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt. Trotzdem kann bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung aufgrund von neuesten Gesetzgebungen noch immer nicht von einem einheitlichen Stand der Technik gesprochen werden. Langzeitmessungen in Deponien mit mechanisch-biologisch behandelten Abfällen, bei denen die Abfälle der AbfAblV entsprechen, liegen nicht vor. Bis auf wenige Rottedeponien, bei denen das untersuchte Material allerdings nicht immer der AbfAblV entsprach, wurden die meisten Daten im Rahmen von ein- bis dreijährigen Untersuchungen in Lysimeter- oder Deponiesimulationsreaktoren gewonnen.

Trotz der relativ großen Anzahl der bereits durchgeführten Versuche fordern nahezu alle Autoren, das Defizit bei den Übertragungs- und Interpretationsmodellen durch neue Forschungsvorhaben abzustellen. Dieser Forderung der einschlägigen Literatur soll durch notwendige Langzeituntersuchungen im großtechnischen Maßstab Rechnung getragen werden. Auf Grund der geringen Ablagerungsmengen, deren Zuordnungskriterien der Abfallablagerungsverordnung entsprechen, gab es bislang noch keine Untersuchungen, die diesem Anforderungsprofil gerecht wurden. Dieser Mangel an Erfahrung und Wissen auf dem Bereich der Ablagerungseigenschaften des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls führte zum Thema der vorliegenden Arbeit.

1.1 Problemstellung

Bei allen Verfahren der Abfallbehandlung oder Abfallbeseitigung bleiben Reststoffe zurück. Dieses Material ist in letzter Konsequenz aufgrund seiner Bedenklichkeit gegenüber der Umwelt zu deponieren. Somit ist der Endpunkt aller Abfallströme die Deponie. Die sich aus der Abfallbehandlung und der Deponierung der Reststoffe ergebenden Emissionen dürfen nach TASi 1.1 [ANONYM 1993] und seit dem 16. Juli 2009 nach DepV [ANONYM 2009] nicht auf zukünftige Generationen verlagert werden. Um dieser zentralen Aufgabe gerecht zu werden, muss während des Betriebes und der Nachsorge einer Deponie den unterschiedlichsten Anforderungen an den Immissions-, Gewässer- und Landschaftsschutz Rechnung getragen werden. Das Emissionsverhalten einer Deponie wird dabei maßgeblich von der deponierten Abfallart und deren Behandlung bestimmt.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei ausschließlich auf das abzulagernde Deponat aus der mechanisch-biologischen Behandlung. Durch die mechanisch-biologische Behandlung soll der Abbau der organischen Substanz im Abfall einer Deponierung vorweggenommen werden. Die Behandlung der Abfälle hat maßgebliche Auswirkungen auf die Charakteristik des abzulagernden Materials:

- Reduzierung der biologisch abbaubaren Stoffe,
- biologische Stabilisierung der Reststoffe,
- Gewichts- und Volumenreduktion,
- Verringerung des Gasbildungspotenzials,
- Verminderung des Wassergehaltes,
- eventuell Homogenisierung,
- Erzielung höherer Einbau- und Ablagerungsdichten,
- geringere hydraulische Leitfähigkeit,
- Hygienisierung.

Es verändert sich im Vergleich mit der herkömmlichen Hausmülldeponie neben der Zusammensetzung des abzulagernden Materials auch die Materialstruktur. Die Einbaubedingungen werden dabei durch die Wassergehalte sowie die veränderte Korngrößenverteilung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls bestimmt. Die MBA-Deponien weisen durch diese völlig veränderten Parameter höhere Einbaudichten und ein verringertes Porenvolumen auf. [SOYEZ ET AL. 2000]

Bedingt durch die höheren Einbaudichten und das niedrigere Porenvolumen nimmt die Wasserwegsamkeit ab. Zwar zeigen alle bisher durchgeführten Untersuchungen, dass das Gasbildungspotenzial bei mechanisch-biologisch behandelten Abfällen um ca. 90 % reduziert werden kann [SCHEELHAASE 2002], jedoch ist das Entgasungspotenzial entscheidend abhängig vom Wassergehalt, von der Temperatur, der Wasserbewegung, der Lagerungsdichte und der Partikelgröße. Unter realen Deponiebedingungen kann es bei einem hoch verdichteten Einbau zu einer Verringerung der Gas-

wegigkeit kommen. Bei den „hohen“ Wassergehalten der MBA-Deponie ist es möglich, dass der gesamte Porenraum wassergesättigt ist und somit ein ungehindertes Strömen der Gase behindert wird. Nach Beobachtungen von STEGMANN kam es in Hafenschlick zum Einschluss von geringen Faulgasmengen. Die Gaswegigkeit kann wie im Falle einer hoch verdichteten MBA-Deponie so stark beeinträchtigt werden, dass eine Freisetzung der Gase unterbleibt. [STEGMANN 1987]

Abb. 1-1: Parameter, die eine Auswirkung auf die Emissionsquellen einer MBA-Deponie haben bzw. in einer Wechselwirkung zu ihnen stehen

Durch die mechanisch-biologische Behandlung der Abfälle wird somit der gesamte Bereich der Deponierung beeinflusst. In den letzten Jahren standen für eine großtechnische Untersuchung noch keine ausreichenden Abfallmengen zur Verfügung. Bisher durchgeführte Untersuchungen beziehen sich somit auf Laboruntersuchungen bzw. auf Untersuchungen in Deponiesimulationsreaktoren (DSR). Das für diese Dissertation zur Verfügung stehende Deponiefeld wurde bereits seit Oktober 2002 mit AbfAblV-konformem Material betrieben.

1.2 Ziele der Arbeit

Ausgangspunkt der Arbeit sind die zuvor beschriebenen Veränderungen des Deponieinventars. Durch die Kenntnis der veränderten Parameter und Bedingungen der Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle sollen unter anderem die Zusammenhänge des teilweise vorweggenommenen Abbaupotenzials mit dem Langzeitverhalten von MBA-Deponien untersucht werden. Daraus ableitend sollen Rückschlüsse für eine Gefährdungsabschätzung einer MBA-Deponie gezogen werden.

Somit ist es Ziel dieser Arbeit, mittels geeigneter Untersuchungsmethoden und eines breit gefächerten Untersuchungsprogramms den Deponiebetreibern Wege aufzuzeigen, die zum einen einen ökologisch sinnvollen Deponiebetrieb sicherstellen und zum anderen auch ökonomische Gesichtspunkte berücksichtigen und diese in Einklang bringen.

Das Untersuchungsprogramm ist so konzipiert, Zusammenhänge erkennbar zu machen, so dass diese im Ergebnis auf folgende Ziele zusammengefasst werden können:

- Beurteilung des Deponieinputs sowie der Betriebsweise einer MBA-Deponie gemäß AbfAblV [ANONYM 2001] bzw. Deponieverordnung [ANONYM 2009],
- Vergleich des vorweggenommenen Abbaupotenzials mit dem vorhandenen Abbaupotenzial von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen,
- Vergleich von geotechnischen Parametern und Randbedingungen einer MBA-Deponie mit einer herkömmlichen Hausmülldeponie,
- Prognose bezüglich des Deponienachsorgezeitraums,
- Durchführung einer Gefährdungsabschätzung bezüglich der Emissionen Gas und Sickerwasser, die von einer MBA-Deponie ausgehen,
- Festlegung von Zielwerten für den Betrieb von MBA-Deponien,
- Empfehlungen zur Betriebsweise von MBA-Deponien.
- Gewinnung von Daten über das Deponieverhalten im großtechnischen Maßstab

1.3 Untersuchungsmethodik

Um die zuvor beschriebenen Ziele zu erreichen, wurde ein groß angelegtes Untersuchungsprogramm ausgearbeitet. Das Untersuchungsprogramm wurde sowohl in einem Testfeld einer im Betrieb befindlichen Deponie als auch im Labor über einen längeren Zeitraum durchgeführt.

Zur Erreichung der Ziele wurden folgende Untersuchungen konzipiert:

- Charakterisierung der Untersuchungsmethodik und der Probennahme gemäß AbfAblV Anhang 4, [ANONYM 2001],
- Untersuchungen der Temperatur und der Deponiegasentwicklung im Testfeld,

- Untersuchung der Porenwasserdrücke im Zusammenhang mit der Standsicherheit von MBA-Deponien,
- Untersuchung des abgelagerten Materials bezüglich der Zuordnungskriterien gemäß Anhang 2 der AbfAblV.

Mit den Ergebnissen der Untersuchungen ist ein Abgleich mit den gesetzten Zielen möglich. Mittels der Schlussfolgerungen soll ein Abgleich vorgenommen werden, der neue Betriebsweisen aufzeigt, die den Deponiebetreibern eine Vereinfachung der Ablagerung sowie der Betriebsweise ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit ist entsprechend den oben genannten Zielen und Methodiken untergliedert. Im ersten Teil der Arbeit werden der allgemeine Aufbau sowie das Thema der Untersuchung dargestellt. Dem besseren Verständnis der Arbeit dienen die Erläuterungen der entsorgungstechnischen Grundlagen sowie die Zusammenfassung der gesetzlichen Vorgaben.

Nach den theoretischen Überlegungen und entsorgungstechnischen Grundlagen werden die Untersuchungsmethoden erläutert. Die Untersuchungsmethodik wird beginnend mit den Methoden der Probennahme sowie anschließend untergliedert in die Teile „Untersuchungen im Deponiekörper“ und „Untersuchungen im Labor“ systematisch beschrieben. Der Beschreibung des Untersuchungsprogramms folgt die Charakterisierung des zu untersuchenden Materials. Im Vordergrund stehen dabei die Beschreibung der Herkunft sowie die Beschreibung der Einbaubedingungen und Einbauverfahren.

Die Ergebnisse des Untersuchungsprogramms werden analog dem Aufbau des Kapitels der Untersuchungsmethodik ausgewertet. Die Arbeit wird abgeschlossen mit einer zusammenfassenden Diskussion der Ergebnisse und Bewertung der Ergebnisse sowie den Schlussfolgerungen und Empfehlungen für weitere Untersuchungen und deren Anwendung durch die Deponiebetreiber.

2 Entsorgungstechnische Grundlagen

Alle Verfahren und Methoden in der Abfallwirtschaft haben ihre Vor- und Nachteile und sie haben sich in mehr als 100 Jahren immer weiterentwickelt. Sie sind geprägt durch den technischen Fortschritt, so dass die Abfallwirtschaft immer energieaufwendiger und technisch komplexer geworden ist. Die technisch immer komplexer werdenden Anlagen sind nicht zuletzt ein Ergebnis von immer wieder neuen gesetzlichen Entwicklungen. Die folgenden Kapitel fassen die wesentlichen gesetzlichen Entwicklungen der letzten 30 Jahre zusammen. Dabei stehen Gesetze und Verordnungen mit Auswirkungen auf die Deponierung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen im Vordergrund.

2.1 Abfallablagerungsverordnung

Die Abfallablagerungsverordnung führt wesentliche Inhalte der TASi, die als Verwaltungsvorschrift keine unmittelbar wirkende Rechtsnorm ist, in eine rechtsverbindliche Form über. Dabei wird die Verordnung um Bestimmungen für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle ergänzt. Ein Beispiel hierfür sind die in der Abfallablagerungsverordnung unverändert übernommenen Grenzwerte für die Deponieklassen I und II der TASi. Die Grenzwerte wurden gemäß Anhang 2 der AbfAblV um die Zuordnungskriterien für Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle erweitert.

Mit der „Verordnung zur Umsetzung der Ratsentscheidung vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien“ [ANONYM 2006] setzte die Bundesregierung die Richtlinie 2003/33/EG der Europäischen Union in nationales Recht um. Die Verordnung beinhaltet Anpassungen der Abfallablagerungsverordnung, der Deponieverordnung und der Deponieverwertungsverordnung. Die Änderungen sind in die Abfallablagerungsverordnung mit Stand vom 13.12.2006 mit eingeflossen.

Ein Großteil dieser Arbeit wurde vor der Novellierung der Abfallablagerungsverordnung vom 13.12.2006 und Implementierung der Abfallablagerungsverordnung in die Deponieverordnung vom 16.07.2009 durchgeführt. Bei der Implementierung hat dies im Wesentlichen einen Einfluss auf die entfallenen Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen. Die in Anhang 3 der AbfAblV aufgeführten Punkte wurden bereits mit Novellierung der AbfAblV wesentlich verändert und entfielen ganz im Zuge der neuen Deponieverordnung.

Das untersuchte Material entspricht aus diesem Grund ausschließlich den Zuordnungskriterien der Abfallablagerungsverordnung mit Stand vom 20. Februar 2001 und den Einbaubedingungen des Anhangs drei der AbfAblV. In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Festlegungen der AbfAblV und die Änderungen der Novelle der Abfallablagerungsverordnung vom 13.12.2006 ausgearbeitet. Dies gewährleistet bei der abschließenden Ergebnisauswertung eine Rückverfolgbarkeit von Verbesserungen oder Verschlechterungen gegenüber der Ursprungsfassung der Abfallablagerungsverordnung.

2.1.1 Anwendungsbereich

Die Abfallablagerungsverordnung gilt für die Ablagerung von Siedlungsabfällen und Abfällen, die wie Siedlungsabfälle entsorgt werden können, bzw. die Behandlung von Siedlungsabfällen und Abfällen zum Zweck der Einhaltung der Zuordnungskriterien.

Die AbfAblV ist für die Betreiber und Inhaber von Deponien und Behandlungsanlagen sowie die Besitzer von Siedlungsabfällen zur Beseitigung bindend. Die Grundsätze (§ 4) und Grundpflichten (§ 5) des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [ANONYM 2001] bleiben durch die AbfAblV unberührt.

2.1.2 Begriffsbestimmungen

Unter Siedlungsabfällen werden gemäß AbfAblV Abfälle aus Haushaltungen sowie andere Abfälle, die aufgrund ihrer Beschaffenheit und/oder ihrer Zusammensetzung den der Haushaltungen ähnlich sind, verstanden.

Weitere bedeutende Begriffsdefinitionen sind die Beschreibung der Deponieklassen sowie die mechanisch-biologische Abfallbehandlung. Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung ist die Aufbereitung oder Umwandlung von Siedlungsabfällen mittels einer Kombination aus mechanischen, physikalischen (z.B. zerkleinern, sortieren) und biologischen Verfahren (z.B. Rotte, Vergärung) [ANONYM 2001].

Mit der Novellierung wurden zwei neue Begriffsdefinitionen in die AbfAblV implementiert. Es handelt sich dabei um die Begriffe der „Grundlegenden Charakterisierung“ und „Schlüsselparameter“. Ziel der Aufnahme dieser beiden Definitionen ist die Ermittlung und Bewertung aller Parameter, die notwendig sind, um langfristig eine sichere Deponierung des Abfalls gewährleisten zu können. Hierzu sind Angaben über Art, Herkunft, Zusammensetzung, Homogenität, Auslaugbarkeit und sonstige typische Eigenschaften und die Untersuchungshäufigkeit notwendig. Mittels der Schlüsselparameter, die für die Annahmekontrolle eine hohe Bedeutung haben, wird gewährleistet, dass der Abfall den Zuordnungskriterien entspricht und somit die Zulässigkeit einer Ablagerung gegeben ist.

2.1.3 Anforderungen an die Ablagerung von behandelten Abfällen

Mechanisch-biologisch behandelte Abfälle dürfen nur dann abgelagert werden, wenn die Abfälle die Zuordnungskriterien des Anhanges 2 sowie die Anforderungen des Anhanges 3 an den Einbau der behandelten Abfälle einhalten. Eine Vermischung mit anderen Abfällen zur Erreichung der Zuordnungskriterien ist nicht gestattet. Die Zuordnungskriterien gemäß Anhang 2 der AbfAblV sind in Kapitel 2.1.5 beschrieben. Die Abforderungen an den Einbau des behandelten Abfalls gemäß Anhang 3 werden detailliert in Kapitel 2.1.8 zusammengefasst.

2.1.4 Untersuchungs- und Nachweispflichten

Deponiebetreiber haben vor einer ersten Annahme eines Abfalls eine grundlegende Charakterisierung des Abfalls durchzuführen und müssen dabei die Schlüsselparameter festlegen. Der Abfallerzeuger muss hierfür dem Deponiebetreiber gemäß § 8 Abs. 8 der Deponieverordnung mindestens folgende Angaben machen [ANONYM 2002]:

- Angabe und Beschreibung der Behandlungsmethode
- Angaben gemäß der verantwortlichen Erklärung gemäß Nachweisverordnung und den damit verbundenen analytischen Nachweisen über die Einhaltung der Zuordnungskriterien des Anhanges 1 oder 2 für die betroffene Deponieklasse.
- Vorschlag für die Benennung der Schlüsselparameter
- Bei regelmäßigen und größeren Anliefermengen von mechanisch-biologisch behandeltem Abfall müssen mindestens folgende Schlüsselparameter untersucht werden:
- Organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz bestimmt als TOC; oder Brennwert H_o;
- DOC im Eluat (vor der Novelle wurde auf TOC untersucht)
- Biologische Abbaubarkeit des Trockenrückstandes der Originalsubstanz bestimmt als Atmungsaktivität AT_4 oder bestimmt als Gasbildungsrate im Gärtest GB_{21}

Darüber hinaus müssen die Deponiebetreiber bei jeder Abfallanlieferung unverzüglich eine Annahmekontrolle durchführen, die mindestens aus einer Sichtkontrolle besteht. Die Sichtkontrolle umfasst die Prüfung des Abfalls auf Aussehen, Konsistenz, Farbe und Geruch.

Ergeben sich bei der Sichtkontrolle Anhaltspunkte, dass die Anforderungen an die Beschaffenheit der Abfälle für die vorgesehene Ablagerung nicht eingehalten werden oder gar Differenzen zwischen den Begleitpapieren und dem angelieferten Abfall bestehen, so ist unverzüglich eine Kontrollanalyse durchzuführen. Fortführend hat der Deponiebetreiber bei regelmäßigen Anlieferungen mindestens einmal jährlich bzw. je angefangene 2000 Mg angeliefertem Abfall eine solche Kontrollanalyse (Anhang 4) auf die Parameter des Anhangs 2, Abs. 1 der AbfAblV durchzuführen. Aus den Kontrollanalysen sind Rückstellproben zu bilden. Die Ergebnisse aus den Kontrollanalysen sind in das Betriebstagebuch zu übernehmen und auf Verlangen der Behörde vorzulegen. In das Betriebstagebuch sind ebenfalls die vom Deponiebetreiber anzufertigenden arbeitstägigen Aufzeichnungen über die Einhaltung der in Anhang 3 AbfAblV vorgegebenen Einbaukriterien aufzunehmen.

2.1.5 Übergangsregelungen

Die Übergangsregelung, Abfälle mit hohen organischen Anteilen ohne eine weiterführende Behandlung auf einer Deponie abzulagern, lief mit dem 31. Mai 2005 ab. Darüber hinaus dürfen Siedlungsabfälle und Abfälle, die wie Siedlungsabfälle ent-

sorgt werden können und der Deponieklasse II, Anhang 1 entsprechen, oder mechanisch-biologisch behandelte Abfälle, die die Zuordnungskriterien des Anhanges 2 einhalten, bis zum 15. Juli 2009 auf Altdeponien abgelagert werden. Dies ist nur dann zulässig, wenn die Anforderungen des § 3 Abs. 1 der Deponieklasse II bis auf Nummer 10.3.1 und 10.3.2 der TA Siedlungsabfall [ANONYM 1993] eingehalten werden.

Die vorgenannten Ausnahmen können nur dann zugelassen werden, wenn das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Von einer Befristung kann in Einzelfällen abgesehen werden, wenn nachgewiesen ist, dass die Schutzziele nach Nummer 10.3.1 und 10.3.2 der TA Siedlungsabfall durch andere gleichwertige technische Sicherungsmaßnahmen gewährleistet sind.

2.1.6 Ordnungswidrigkeiten

Ordnungswidrig im Sinne des § 61 Abs. 1 Nr. 5 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes handelt, wer vorsätzlich oder fahrlässig [ANONYM 2001]

- entgegen § 3 Abs. 1 Satz 1, Abs. 3 oder 4 Satz 1 oder § 4 Abs. 1 Satz 1 Abfälle ablagert oder vermischt,
- entgegen § 4 Abs. 2 Nr. 1 eine dort genannte Anforderung nicht einhält,
- entgegen § 4 Abs. 2 Nr. 2 Halbsatz 1 nicht sicherstellt, dass Restemissionen an Deponiegas vor Austritt in die Atmosphäre oxidiert werden oder entgegen § 5 Abs. 2 Satz 1 oder Abs. 3 Satz 1 und 2 eine Annahmekontrolle oder eine Kontrollanalyse nicht, nicht richtig, nicht vollständig oder nicht rechtzeitig durchführt.

2.1.7 Zuordnungskriterien für Deponien allgemein und für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle gemäß Anhang 1 und 2 der Abfallablagerungsverordnung

Die angelieferten Abfälle sind den Zuordnungskriterien gemäß nachfolgender Tab. 2-1 zuzuordnen. Lässt die zuständige Behörde Abweichungen von den in Tabelle genannten Zuordnungswerten zu, so darf die maximale Überschreitung das Dreifache des jeweiligen Zuordnungswertes für die Deponieklasse II betragen. Eine Überschreitung für die Parameter TOC und DOC ist nicht zulässig, insofern diesem nicht anderweitige Regelungen entgegenstehen. Die Einschränkung auf das Dreifache des Zuordnungswertes gilt nicht für die Parameter:

- Glühverlust,
- extrahierbare lipophile Stoffe,
- Chrom (VI),
- Ammoniumstickstoff,
- Cyanid und
- AOX.

Tab. 2-1: Vergleich der Zuordnungskriterien für Deponien nach Abfallablagerungsverordnung Stand 24.07.2002 und Novellierung vom 13.12.2006. Die Werte in Klammern geben den Zuordnungswert vor der Novellierung der AbfAblV an.

Nr.	Parameter	Zuordnungskriterien		
		Anhang 1		Anhang 2
		Deponieklasse I	Deponieklasse II	MBA Deponie
1	**Festigkeit**			
1.01	Flügelscherfestigkeit	≥ 25 kN/m^2	≥ 25 kN/m^2	**gestrichen** (≥ 25 kN/m^2)[2]
1.02	Axiale Verformung	≤ 20 %	≤ 20 %	**gestrichen** (≤ 20 %)
1.03	Einaxiale Druckfestigkeit	≥ 50 kN/m^2	≥ 50 kN/m^2	**gestrichen** (≥ 50 kN/m^2)[2]
2	**Organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz**			
2.01	bestimmt als Glühverlust	≤ 3 Masse-%	≤ 5 Masse-%	k. A. (k. A.)
2.02	bestimmt als TOC	≤ 1 Masse-%	≤ 3 Masse-%	≤ 18 Masse-%
3	**Extrahierbare lipophile Stoffe der Originalsubstanz**			
		≤ 0,4 Masse-%	≤ 0,8 Masse-%	≤ 0,8 Masse-%
4	**Eluatkriterien**			
4.01	pH-Wert	5,5-13,0	5,5-13,0	5,5-13,0
4.02	Leitfähigkeit	≤ 10.000 µS/cm	≤ 50.000 µS/cm	≤ 50.000 µS/cm
4.03	DOC; vor der Novellierung bestimmt als TOC	**≤ 50 mg/l** (≤ 20 mg/l)	**≤ 80 mg/l** (≤ 100 mg/l)	**≤ 300 mg/l** (≤ 250 mg/l)
4.04	Phenole	≤ 0,2 mg/l	≤ 50 mg/l	≤ 50 mg/l
4.05	Arsen	≤ 0,2 mg/l	**≤ 0,2 mg/l** (≤ 0,5 mg/l)	≤ 0,5 mg/l
4.06	Blei	≤ 0,2 mg/l	≤ 1 mg/l	≤ 1 mg/l
4.07	Cadmium	≤ 0,05 mg/l	≤ 0,1 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.08	Chrom-VI	≤ 0,05 mg/l	≤ 0,1 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.09	Kupfer	≤ 1 mg/l	≤ 5 mg/l	≤ 5 mg/l
4.10	Nickel	≤ 0,2 mg/l	≤ 1 mg/l	≤ 1 mg/l
4.11	Quecksilber	≤ 0,005 mg/l	≤ 0,02 mg/l	≤ 0,02 mg/l
4.12	Zink	≤ 2 mg/l	≤ 5 mg/l	≤ 5 mg/l
4.13	Fluorid	≤ 5 mg/l	**≤ 15 mg/l** (≤ 25 mg/l)	≤ 25 mg/l
4.14	Ammoniumstickstoff	≤ 4 mg/l	≤ 200 mg/l	≤ 200 mg/l
4.15	Cyanide, leicht freisetzbar	≤ 0,1 mg/l	≤ 0,5 mg/l	≤ 0,5 mg/l
4.16	AOX	≤ 0,3 mg/l	≤ 1,5 mg/l	≤ 1,5 mg/l
4.17	Wasserlöslicher Anteil, Abdampfrückstand	≤ 3 Masse-%	≤ 6 Masse-%	≤ 6 Masse-%
4.18	Barium (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 5 mg/l	≤ 10 mg/l	k. A.
4.19	Chrom, gesamt (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 0,3 mg/l	≤ 1 mg/l	k. A.
4.20	Molybdän (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 0,3 mg/l	≤ 1 mg/l	k. A.
4.21	Antimon (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 0,03 mg/l	≤ 0,07 mg/l	k. A.

4.22	Selen (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 0,03 mg/l	≤ 0,05 mg/l	k. A.
4.23	Chlorid (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 1.500 mg/l	≤ 1.500 mg/l	k. A.
4.24	Sulfat (nach Novellierung neu aufgenommen)	≤ 2.000 mg/l	≤ 2.000 mg/l	k. A.
5	**Biologische Abbaubarkeit des Trockenrückstandes der Originalsubstanz**			
	Bestimmt als Atmungsaktivität - AT_4			≤ 5 mg/g
	Bestimmt als Gasbildungsrate im Gärtest - GB_{21}			≤ 20 l_n/kg
6	**Brennwert (H_o)** (Oberer Brennwert H_o)			
				≤ 6.000 kJ/kg

Quelle: ANONYM 2001; Anhang 1 und 2 Stand v. 20.02.2001 sowie ANONYM 2001 Stand v. 13.12.2006

Die wesentlichen Anpassungen an neueste wissenschaftliche Erkenntnisse, die in der Novellierung der AbfAblV gründeten, sind die Streichung der Festigkeitsparameter Flügelscherfestigkeit, axiale Verformung und einaxiale Druckfestigkeit für die mechanisch-biologisch behandelten Abfälle des Anhanges 2 der AbfAblV gemäß Tab. 2-1. Die Festigkeit ist nach Anhang 4 Nr. 3.1.4 zu ermitteln.

In Kategorie 4, den Eluatkriterien gemäß Tab. 2-1, wurde unter der Nummer 4.03 der Summenparameter TOC (Total Organic Carbon), der die Summe des in den gelösten und partikulären Wasserinhaltsstoffen organisch gebundenen Kohlenstoffs ist, durch den Summenparameter DOC (Dissolved Organic Carbon) ersetzt. Der DOC ist die Summe des in den gelösten Wasserinhaltsstoffen organisch gebundenen Kohlenstoffs. Als gelöst gelten diejenigen Stoffe, welche einen Filter mit der Porenweite 0,45 µm passieren. Die Zuordnungskriterien für die DK I wurden von ≤20 mg/l auf ≤50 mg/l, für die DK II von ≤100 mg/l auf ≤80 mg/l und für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle von ≤250 mg/l auf ≤300 mg/l angepasst.

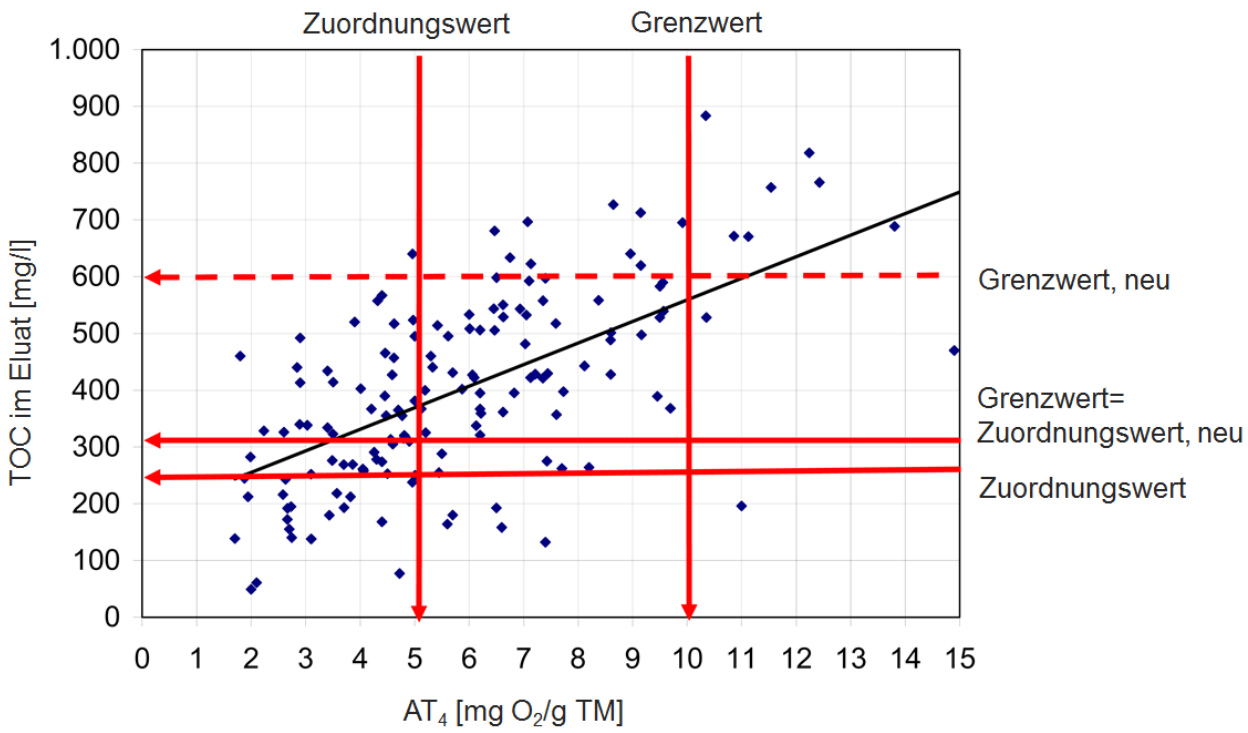


Abb. 2-1: Zusammenhang AT_4/TOC im Eluat im Grenzwertbereich [DACH, WARNSTEDT, MÜLLER 2006]

Damit wurde auf die bereits vor Einführung der AbfAblV geforderten Empfehlungen einer Vielzahl von Experten reagiert. Die Gründe für die späte Anhebung der Grenzwerte mit Novelle vom 13.12.2006 sind die nachgewiesenen Probleme der Einhaltbarkeit in den mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen sowie die Zweifel an der Notwendigkeit dieser niedrigen Ablagerungsgrenzwerte aufgrund des Multibarrierensystems (Oberflächen- und Basis-Kombidichtungen sowie Sickerwassererfassung und Sickerwasserreinigung). Als weiterer Grund kann die fehlende Korrelation zwischen dem alten Grenzwert von TOC_{Eluat}=250 mg/l und dem AT_4-Grenzwert von 5 mg O_2/g TM genannt werden. So zeigten bereits Untersuchungen 1999, dass der Grenzwert der Atmungsaktivität, AT_4= 5 mg O_2/g TM mit einem TOC_{Eluat}= ca. 300 mg/l korreliert. [FRICKE, MÜLLER, ET AL. 1999]. Man erkennt in Abb. 2-1 eine erhebliche Schwankungsbreite, z.B. bei einem AT_4= 5 mg O_2/g TM eine Bandbreite für den TOC_{Eluat} von ca. 100-650 mg/l.

Auswertungen von Betriebsergebnissen aus zwölf mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen zeigen nach KETELSEN 2006 bei einem AT_4-Wert von 5 mg/g TM einen korrespondierenden TOC_{Eluat}/DOC-Wert von 350 mg/l. Eine Grenzwertanhebung des TOC_{Eluat}/DOC-Wertes mit Novellierung der AbfAblV von 250 mg/l auf 300 mg/l entspricht demnach einem AT_4-Mittelwert von < 4 mg/g TM (Abb. 2-2).

Die Anhebung des 80.Perzentilwertes auf 600mg/l ist den laboranalytischen Schwankungsbreiten geschuldet und gibt den Anlagenbetreibern sowie den Überwachungsbehörden mehr Sicherheit im Vollzug der AbfAblV.

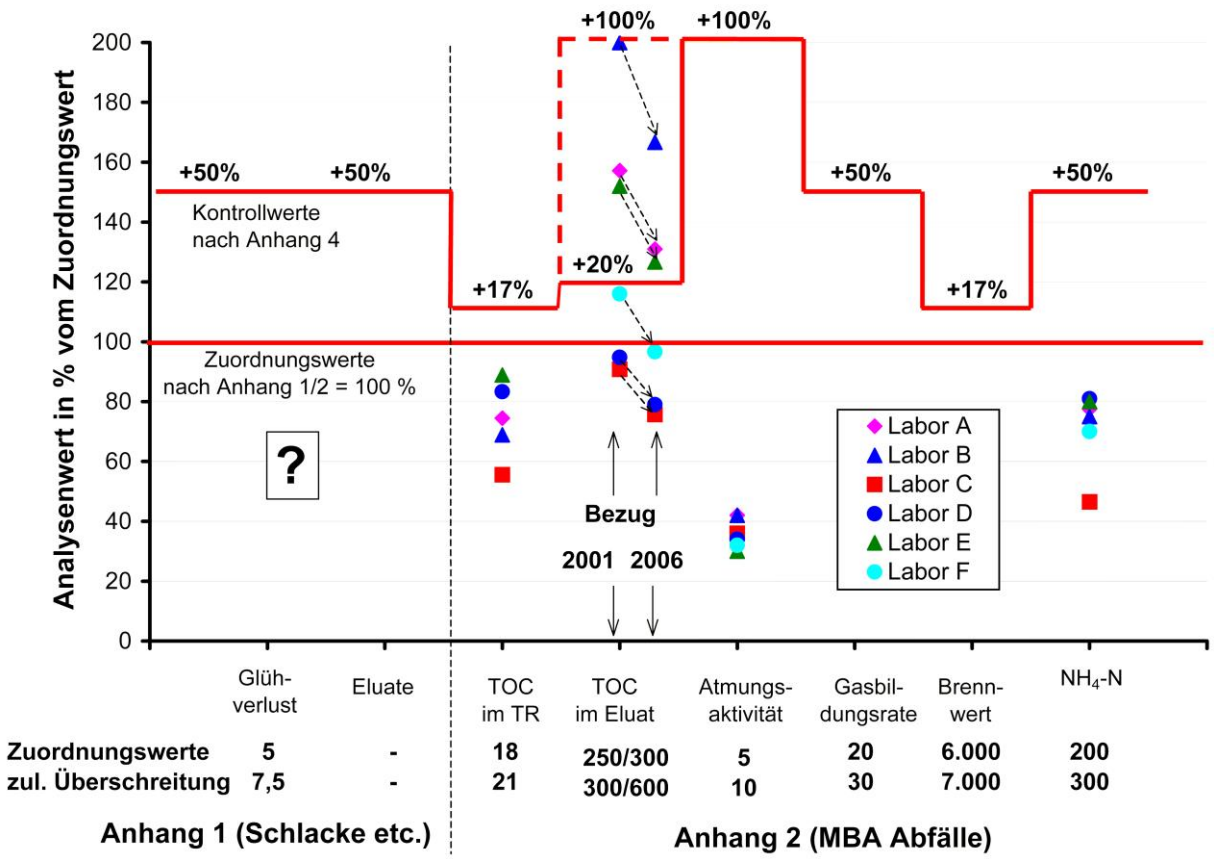


Abb. 2-2: Zuordnungswerte für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle vor und nach der Novellierung der AbfAblV mit Angabe der zulässigen Überschreitungsbereiche [KETELSEN 2006]

Für die DK II wurden die Zuordnungsparameter Arsen von ≤0,5 mg/l auf ≤0,2 mg/l und Fluorid von ≤25 mg/l auf ≤15 mg/l abgesenkt. Gänzlich neu in die AbfAblV wurden mit der Novellierung die Nummern 4.18 bis 4.24 aufgenommen. Die neuen Zuordnungswerte gemäß Tab. 2-1 sind Barium, Chrom gesamt, Molybdän, Antimon, Selen, Chlorid und Sulfat.

2.1.8 Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen gemäß Anhang 3 der Abfallablagerungsverordnung

Um mechanisch-biologisch behandelte Abfälle ablagern zu dürfen, mussten die Anforderungen der Deponieklasse II und die Kriterien für MBA-Abfälle (Tab. 2-1) des Anhangs 2 der AbfAblV eingehalten werden. Eine Deponierung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen setzte voraus, dass bei der Behandlung der Abfälle die heizwertreiche Fraktion sowie sonstige verwertbare Fraktionen abgetrennt wurden.

Damit eine ordnungsgemäße Ablagerung der MBA-Abfälle gewährleistet war, waren die Anforderungen des Anhangs 3 der AbfAblV einzuhalten:

- Reduzierung der Einbaufläche auf das im Einbaubetrieb geringstmögliche Maß. Nicht beschickte Flächen sind mit geeigneten Materialien abzudecken, eine kontrollierte Ableitung des Oberflächenwassers zu gewährleisten (Anhang 3; Nr. 1). Erfahrungen mit dem Einbau von MBA-Abfällen hatten gezeigt, dass die bislang geforderte arbeitstägige Abdeckung neben gravierenden betriebstechnischen Erschwernissen auch nachteilige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Einbaubereich hatten. Die geänderten Anforderungen an die Ablagerung geben den Genehmigungsbehörden die Möglichkeit, Abdeckungsmaßnahmen bei Bedarf zu fordern oder auf diese Maßnahmen zu verzichten. Dies lässt den Deponiebetreibern eine größere Auswahl an geeigneten betriebstechnischen Mitteln.
- Arbeitstägige Profilierung des Einbaubereiches mit 5-10 % Gefälle, Glättung der Einbauoberfläche. Mit der Novellierung wurde die bisher bindend vorgeschriebene Abdeckung mit wasserundurchlässigen Materialien zur gezielten und kontrollierten Ableitung des Niederschlagswassers aufgeweicht. In der Neufassung der AbfAblV muss nur abgedeckt werden, insofern es erforderlich ist, weitere bautechnische Maßnahmen zur Minimierung des Eintrags von Niederschlagswasser zu treffen. (Anhang 3; Nr. 2).
- Um einen möglichst gering durchlässigen Deponiekörper zu erreichen, ist der Abfall im Dünnschichtverfahren verdichtet einzubauen. In der Erstfassung der AbfAblV wurde noch ein „hochverdichteter“ Materialeinbau vorgeschrieben. Die höchstmögliche Verdichtbarkeit ist durch die Einstellung eines optimalen Wassergehaltes der Abfälle sicherzustellen.

  Die höchstmögliche Einbaudichte (Trockendichte) in Abhängigkeit des Wassergehaltes (möglichst nicht mehr als 55 Masse-% bezogen auf die Trockenmasse) und der aufgebrachten Verdichtungsenergie ist in einem Versuchsfeld zu ermitteln. Während des Deponiebetriebes ist nach Einbau von jeweils 5000m³ oder 5000Mg nachzuweisen, dass mindestens 95% der so ermittelten höchstmöglichen Einbaudichte erreicht werden. Die wesentliche Änderung im Anhang 3; Nr. 3 ist die Änderung des Bezugwertes des Wassergehaltes von bisher 35 Masse-% bezogen auf den Feuchtegehalt auf heute 55 Masse-% bezogen auf die Trockenmasse [BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2006]. Damit wurden die widersprüchlichen Angaben im Anhang 3 zum Wassergehalt mit einem Bezugswert von 35 Masse-% bezogen auf den Feuchtegehalt und der Analyse des Wassergehaltes gemäß Anhang 4, Punkt 2.8 nach DIN 18121, Teil 1 mit Bezug auf die Trockenmasse klargestellt.
- Neu in Anhang 3 aufgenommen wurde, dass mechanisch-biologisch behandelte Abfälle nicht gemeinsam mit Gipsabfällen oder gefährlichen Abfällen abgelagert werden dürfen (Anhang 3; Nr. 4).

In Tab. 2-2 sind die in Anhang 3 definierten Anforderungen der AbfAblV und deren Wirkungspfade aufgeführt. Durch die Reduzierung der Einbaufläche soll die Minimierung des Wassereintrages in den Deponiekörper und gleichzeitig der Austritt von Deponiegas verringert werden. In der einschlägigen Literatur finden sich in Abhängigkeit der Einbaufläche zur Abfallmenge folgende Angaben [DACH 2000]:

- bis 25.000 Mg/a < 0,5 ha
- bis 50.000 Mg/a < 1,0 ha
- bis 100.000 Mg/a < 2,0 ha

Die dabei nicht genutzten Ablagerungsflächen sollten mit Kunststoffdichtungsbahnen abgedeckt werden. Für eine entsprechende betriebstechnische Abdeckung ist Sorge zu tragen.

Tab. 2-2: Wirkungspfade und Maßnahmen des optimierten Deponiebetriebes nach AbfAblV [RETTENBERGER; FRICKE 1999; ÜBERARBEITET]

Wirkungspfad	Maßnahmen nach AbfAblV für den Deponiebetrieb	Wirkung der Maßnahmen
Sickerwasser	Reduzierung der Einbaufläche auf das im Einbaubetrieb geringstmögliche Maß	Verringerung des Eintrages von Niederschlagswasser und damit Minimierung der Sickerwasserbildung
	Der Arbeitsbereich ist arbeitstägig mit einem Gefälle zwischen 5 und 10 % zu profilieren Zur gezielten und kontrollierten Ableitung des Niederschlagswassers ist die Oberfläche zu glätten und soweit erforderlich sind weitere bautechnische Maßnahmen zur Minimierung des Eintrages von Niederschlagswasser zu treffen.	Verbesserung der Fließeigenschaften des Niederschlagswassers und Vermeidung stehender Wasserflächen, was zu einer Minimierung des Versickerns von Oberflächenwasser in den Deponiekörper führt Verhinderung von Erosion an der Oberfläche des MBA-Outputs.
	Der Abfall ist im Dünnschichtverfahren verdichtet einzubauen Durch Einstellung des optimalen Wassergehaltes der Abfälle ist eine höchstmögliche Verdichtbarkeit zu gewährleisten	Verringerung des Eintrages von Niederschlagswasser und damit Minimierung der Sickerwasserbildung, Vermeidung von Presswasser
	Materialeinbau soll nur bei trockenem Wetter erfolgen	Vermeidung von Wasseraufnahme des MBA-Output und somit Vermeidung von Konsolidierungswasser
Deponiegas	Reduzierung der Einbaufläche auf das im Einbaubetrieb geringstmögliche Maß	Minimierung der Deponiegasemissionen
Setzungen	Verdichteter Dünnschichteinbau mittels Schaffuß- und Glattmantelwalze	Gewährleistung hoher Verdichtung und Minimierung des Porenvolumens, so dass sich keine relevanten Setzungen ergeben
	Einbaubetrieb nur bei trockenem Wetter	Vermeidung von Wasseraufnahme des MBA-Outputs und somit Vermeidung von Setzungen durch Konsolidierungsvorgänge

Ein Materialeinbau sollte prinzipiell nur bei trockenem Wetter durchgeführt werden. Praktische Erfahrungen zeigen, dass feuchte Einbaubedingungen erhebliche praktische Schwierigkeiten bei der Verdichtung und Profilierung der behandelten Abfälle hervorrufen. Das Material wird unter feuchten Einbaubedingungen schnell sumpfig und nicht mehr für die Einbaugeräte, wie Raupe und Walze, befahrbar. Aufgrund schlechter Deponiegeometrien sollte bei der Deponieprofilierung ein Gefälle von 5 % nach Möglichkeit nicht überschritten werden. Durch den Einsatz einer Glattmantelwalze kann der Oberflächenabfluss verstärkt werden.

Mittels des Dünnschichteinbaus (30 bis 50 cm) werden hohe Verdichtungsgrade für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle erzielt. Um einen besonders hohen Verdichtungsgrad erzielen zu können, ist es wichtig, das Material auf den richtigen Wassergehalt einzustellen. Eventuelle Porenwasserüberdrücke sind aus Standsicherheitsgründen beim Materialeinbau zu verhindern. Bezüglich der Wahl eines geeigneten Einbaugerätes zur Verdichtung der Abfälle sind in der Literatur unterschiedliche Aussagen zu finden [RETTENBERGER, FRICKE 1999; KÜHLE-WEIDEMEIER, DOEDENS, VON FELDE 2001; MAAK 2001]. Die erreichten Einbaudichten der verschiedenen Verdichtungsgeräte sind in der Abb. 2-3 dargestellt. Durch die hier erreichten hohen Einbaudichten der Abfälle wird mit sehr geringen Setzungen gerechnet.

Die Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen gemäß Anhang 3 der Abfallablagerungsverordnung entfielen bei der Implementierung der Abfallablagerungsverordnung in die neue Deponieverordnung.

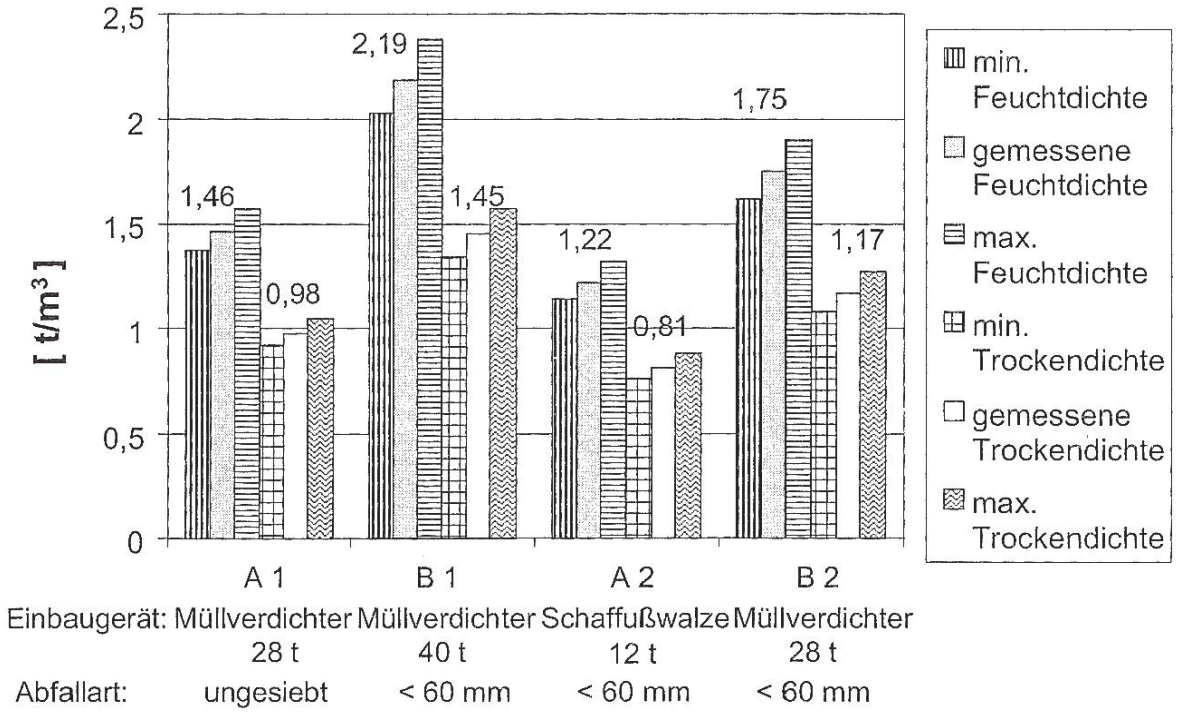


Abb. 2-3: Erreichte Einbaudichten bei den großtechnischen Verdichtungsversuchen [MAAK 2001]

2.1.9 Vorgaben zur Analytik gemäß Anhang 4 der AbfAblV und deren Parameter zur Beschreibung der Ablagerungsfähigkeit

Der Anhang 4 wurde mit der Novellierung der AbfAblV vom 13.12.2006 grundlegend überarbeitet. Die wesentlichen Änderungen sind in der nachfolgenden Tab. 2-3 gegenübergestellt.

Tab. 2-3: Wichtigste Änderungen des Anhangs 4 der AbfAblV mit Novellierung vom 13.12.2006 [ANONYM 2001]

Analytik	**Vorgaben nach AbfAblV** Stand: Art. 2 V v. 24.7.2002 I 2807	**Vorgaben nach AbfAblV** Stand: Art. 1 V v. 13.12.2006 I 2806
Sach- und Fachkunde	keine Regelung	Die Probennahme nach § 5 ist von Personen durchzuführen, die über die für die Durchführung der Probennahme erforderliche Sachkunde verfügen.
	keine Regelung	Die Probeuntersuchungen nach § 5 sind von einer unabhängigen nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierten Untersuchungsstelle durchzuführen. Die zuständige Behörde kann darüber hinaus widerruflich weitere Stellen zulassen.
Probennahme	Nach Richtlinie PN 2 /78 K der Länderarbeitsgemeinschaft für Abfall (LAGA). Es wurden Ergänzungen und Vereinfachungen zu den Parametern: Homogenität, Heterogenität und Anzahl der Proben festgelegt.	Nach LAGA-Richtlinie PN 98 (Stand 12/01)
Bestimmung der Parameter	keine Angaben	Der Aufschluss zur anschließenden Bestimmung des in Königwasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen erfolgt nach DIN EN 13657 (Ausgabe Januar 2003) Charakterisierung von Abfällen.
Festigkeit	Flügelscherfestigkeit (DIN 4096) Axiale Verformung (DIN 18136) Einaxiale Druckfestigkeit (DIN 18136)	Die Untersuchungen der axialen Verformung sowie der einaxialen Druckfestigkeit werden nach denselben Normen durchgeführt. Lediglich die Jahre zu verwendenden Ausgaben wurden aktualisiert. Die Festigkeit ist darüber hinaus in Anlehnung an die DIN 18137-3 und GDA-Empfehlung E 3-8 als Scherfestigkeit im direkten Scherversuch zu bestimmen. Die Nennreibungsfläche von mindestens 900cm² sollte für Abfälle > 25mm eingehalten werden. Abfälle < 25mm können auch auf Geräten mit kleinerer Nennreibungsfläche untersucht werden. Die Abfälle sind mit den entsprechenden Einbaudichten sowie dem eingestellten Wassergehalt aus den Versuchsfeldern in die Geräte einzubauen.
Glühverlust	Glühverlust des Trockenrückstandes der Originalsubstanz nach DIN 38414-S3 (Ausgabe November 1985)	Glühverlust des Trockenrückstandes der Originalsubstanz nach DIN ISO 11465 (Ausgabe Dezember 1996). Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Mas-

		se - Gravimetrisches Verfahren E DIN EN 14346 (Ausgabe September 2004) Charakterisierung von Abfällen - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts.
TOC	Gesamtkohlenstoff (TOC) des Trockenrückstandes der Originalsubstanz nach DIN 38409-H3 (Ausgabe Juni 1983)	Gesamtkohlenstoff (TOC) des Trockenrückstandes der Originalsubstanz nach DIN EN 13137 (Ausgabe Dezember 2001)
Extrahierbare lipophile Stoffe	Extraktion nach Richtlinie KW /85 der LAGA „Bestimmung des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen in Abfällen“ und anschließende gravimetrische Bestimmung nach DIN 38409-H17 (Ausgabe Mai 1981)	LAGA Richtlinie KW/04 - Bestimmung des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen in Abfällen (Stand 16. November 2004)
Eluat	Eluatherstellung nach DIN 38414-S4	Eluatherstellung nach DIN EN 12457-4 (Ausgabe Januar 2003)
TOC im Eluat	Gesamtkohlenstoff im Eluat nach DIN EN 1484 (Ausgabe August 1997)	keine Angaben
DOC im Eluat	keine Angaben	Gelöster organischer Kohlenstoff nach DIN EN 1484 (Ausgabe August 1997). Untersuchung bei einem pH-Wert zwischen 7,5 und 8.
Blei im Eluat	DIN 38406-E2 (Ausgabe Juli 1998) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)	E DIN ISO 11047 (Ausgabe Mai 2003) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Cadmium im Eluat	DIN EN ISO 5961 (Ausgabe Mai 1998) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)	E DIN ISO 11047 (Ausgabe Mai 2003) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Chrom (VI)	DIN 38405-D24 (Ausgabe Mai 1987)	E DIN ISO 11047 (Ausgabe Mai 2003) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Kupfer im Eluat	DIN 38406-E7 (Ausgabe September 1991) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998	E DIN ISO 11047 (Ausgabe Mai 2003) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Nickel im Eluat	DIN 38406-E11 (Ausgabe September 1991) DIN 38406-E12 (Ausgabe März 1988)	E DIN ISO 11047 (Ausgabe Mai 2003) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Zink im Eluat	DIN 38406-E8-1 (Ausgabe Oktober 1980) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998	E DIN ISO 11047 (Ausgabe Mai 2003) DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Cyanide im Eluat	DIN 38405-D4-2 (Ausgabe Dezember 1988)	DIN 38405-D14-2 (Ausgabe Dezember 1988)
AOX im Eluat	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) werden bestimmt nach DIN EN 1485 (Ausgabe November 1996)	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) werden bestimmt nach DIN EN ISO 9562 (Ausgabe Februar 2005)
Barium im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Chrom gesamt im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)

Molybdän im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Antimon im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998) DIN EN ISO 11969 (Ausgabe November 1996)
Selen im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 11885 (Ausgabe April 1998)
Chlorid im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 10304-2 (Ausgabe November 1996)
Sulfat im Eluat	keine Angabe	DIN EN ISO 10304-2 (Ausgabe November 1996)
Thallium im Eluat	keine Angabe	DIN 38406-26 (Ausgabe Juli 1997)
Heizwert bzw. Brennwert	Brennwert nach DIN 51900, Teil 1 (Ausgabe April 2000) DIN 51900, Teil 2 und 3 (Ausgabe August 1977)	Heizwert nach DIN 51900, Teil 1 (Ausgabe April 2000) DIN 51900, Teil 2 und 3 (Ausgabe August 1977)

2.2 Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes vom 27. April 2009 und Deponieverordnung vom 27. April 2009

Mit Erlass der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes am 27. April 2009 hat das Bundeskabinett laut dem damaligen Bundesumweltminister Sigmar Gabriel das deutsche Deponierecht deutlich vereinfacht und entschlackt. Sigmar Gabriel zu der neuen Verordnung: "Wir haben heute das über die Jahre gewachsene, zersplitterte Deponierecht zu einer übersichtlichen Regelung zusammengeführt. Die Anwendung wird damit für Behörden und Betreiber sehr viel leichter." [BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2008].

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, gab es eine Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften, Technischen Anleitungen und Bestimmungen zum deutschen Deponierecht. Mit dem Kabinettsbeschluss wurden die Anforderungen der so genannten Deponieverordnung, der Abfallablagerungsverordnung sowie der Deponieverwertungsverordnung in einem Regelwerk zusammengefasst. Die Regelungen der Abfallablagerungsverordnung wurden dabei inhaltsgleich übernommen. Die Abfallablagerungsverordnung sowie die Deponieverwertungsverordnung wurden mit Erlass der neuen Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes aufgehoben. Zudem wurden drei Verwaltungsvorschriften (TA-Abfall, TA-Siedlungsabfall und die Abfallverwaltungsvorschrift über Anforderungen zum Schutz des Grundwassers bei der Lagerung und Ablagerung von Abfällen) aus den 90er Jahren zum mittlerweile veralteten Stand der Abfallbeseitigung gestrichen.

Die neue Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts führt somit die bestehenden Regelungen zusammen und entflechtet durch den Wegfall der Verwaltungsvorschriften das von Gabriel zitierte „zersplitterte Deponierecht“.

2.2.1 Hintergründe der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes

Die verheerenden Auswirkungen der bereits zuvor beschriebenen dorfeigenen Müllkippen, auf der die Bürger und mittelständische Unternehmen nach dem Prinzip der kurzen Wege ihre Abfälle bis weit in die 80er Jahre loswerden konnten waren der Grund für den Erlass der 2. Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (TA Abfall) 1991 und 1993 der 3. Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (TA Siedlungsabfall).

Mehr als 50.000 dieser „wilden“ Kippen gab es in der Bundesrepublik Deutschland. Natürlich hatten diese Kippen keine Abdichtungssysteme im heutigen Sinne, und Deponievolumen wurde "gewonnen", indem man Deponiebrände nicht sofort und effektiv bekämpfte. Als Folge dieses nachlässigen Verhaltens wurde das Grundwasser kontaminiert. Gerüche, Deponiegas, Staub- und Feststoffverwehungen wurden zum Problem für die umliegenden Gemeinden und Städte.

Ziel der TA Abfall und der TA Siedlungsabfall war die bundeseinheitliche Sicherstellung einer umweltverträglichen und langfristig sicheren Deponierung von Abfällen. Dabei stand die Einführung eines Abdichtungssystems nach dem Multibarrierenkonzept im Vordergrund, welche sowohl für die Ablagerung von gefährlichen wie auch von Siedlungsabfällen geeignet war.

Nach Vorgaben der TA Siedlungsabfall sollte die Ablagerung unbehandelter organikreicher Siedlungsabfälle zum 1. Juni 2005 beendet werden. Als Verwaltungsvorschriften hatten die Regelwerke den Nachteil, dass sie nur den Ermessensrahmen von Behörden begrenzen, im Einzelfall die Behörden aber auch abweichende Entscheidungen treffen können. Somit fehlte den Deponiebetreibern Planungssicherheit. Die Vorgaben der TA Siedlungsabfall wurden dementsprechend landesspezifisch unterschiedlich ausgelegt.

Mit Einführung der Abfallablagerungsverordnung wurden diese Anforderungen an die Ablagerung von Siedlungsabfällen und an die Errichtung und den Betrieb der hierfür zulässigen Deponien rechtlich verbindlich definiert. Wesentlichstes Merkmal der Abfallablagerungsverordnung sind die speziellen Deponiezuordnungskriterien für mechanisch-biologisch behandelte Siedlungsabfälle.

Mit der Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen (30. BImSchV) wurden die Ablagerungsanforderungen um Anforderungen zum Stand der Technik von mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen zusätzlich begleitet. Mit dem Inkrafttreten der Deponieverordnung am 1. August 2002 wurde zur Sicherung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung ein weiterer Meilenstein gesetzt.

Die Deponieverordnung enthält detaillierte technische, betriebliche und organisatorische Anforderungen an Errichtung, Beschaffenheit, Betrieb, Stilllegung sowie Nachsorge von Deponien und Langzeitlagern. Wie in der Abfallablagerungsverordnung werden auch in der Deponieverordnung die meisten der betrieblichen und technischen Anforderungen durch die „Verrechtlichung“ und Einbeziehung der entsprechenden Regelungen der TA Siedlungsabfall und der TA Abfall definiert.

In der am 1. September 2005 in Kraft getretenen Deponieverwertungsverordnung wurden ähnlich strenge Anforderungen an die Verwertung von Abfällen gestellt wie an die Beseitigung. Ergebnis all dieser Regelungen ist, dass keine Abfälle mehr auf Deponien entsorgt werden dürfen, wenn sie nicht spezifische Zuordnungswerte einhalten.

Immer wieder wurden die drei Verordnungen unter Einbeziehung der Verwaltungsvorschriften wegen ihrer Komplexität und Verflechtungen von Planern, Bauherren, Betreibern und den Aufsichtsbehörden kritisiert. Die Betroffenen stellten teilweise fest, dass das deponiespezifische Regelungsgeflecht in manchen Bereichen sogar die Anwendung neuester Entwicklungen erschwere. Das Bundesumweltministerium stellte sich aus diesen Gründen der Aufgabe, das historisch gewachsene, aber auch zersplitterte Deponierecht zu einer einheitlichen Regelung zusammenzuführen.

Die neue Deponieverordnung ist als Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009 am 16. Juli 2009 in Kraft getreten.

2.2.2 Die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes als Artikelverordnung

Die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes ist als Artikelverordnung angelegt. Mit Artikel 1 wurden die bestehenden drei Verordnungen DepV, AbfAblV und die DepVerwV sowie die drei Verwaltungsvorschriften TA Abfall, TA Siedlungsabfall, und die erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Grundwasserschutz zusammengeführt und als Deponieverordnung neu erlassen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die neue Deponieverordnung nicht nur die alte Deponieverordnung ersetzt hat, sondern zugleich die Anforderungen der Abfallablagerungsverordnung und der Deponieverwertungsverordnung neu integriert. Mit dem Inkrafttreten der Verordnung am 16. Juli 2009 wurden die genannten Rechtsverordnungen sowie drei Verwaltungsvorschriften aufgehoben. Die entsprechende Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Aufhebung dieser Verwaltungsvorschriften wurde am 24. September 2008 durch die Bundesregierung beschlossen.

Durch Artikel 2 der Verordnung wird die Richtlinie über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie für solche Unternehmen, die nicht unter den Anwendungsbereich des Bundesberggesetzes fallen, umgesetzt (Gewinnungsabfallverordnung).

Artikel 3 dient der Anpassung der 30. BImSchV an die durch die Aufhebung der Abfallablagerungsverordnung veränderte Rechtslage.

Artikel 4 regelt das Inkrafttreten der Verordnung und hebt die Deponieverordnung, die Deponieverwertungsverordnung und die Abfallablagerungsverordnung auf.

2.2.3 Regelungsinhalte der neuen Deponieverordnung

In der neuen Deponieverordnung sind alle deponiespezifischen Vorgaben der Europäischen Union umgesetzt. Dabei erfolgte nahezu eine vollständige Umsetzung der europäischen Vorgaben. Allerdings wurde an dem Vorbehandlungsgebot für Siedlungsabfälle aus der Abfallablagerungsverordnung festgehalten. Unterschieden wird noch nach vier oberirdischen Deponieklassen und einer Untertagedeponieklasse. Bisher gab es unter Berücksichtigung der Monodeponieklassen zehn zugelassene Deponieklassen. Die Untertagedeponie im Nicht-Salinar, sprich salzlosen Gestein, wird gegenüber dem bestehenden Regelwerk ersatzlos gestrichen. Untertagedeponien sind damit nur noch im Salzgestein (Salinar) zulässig.

Die Anforderungen an die geologische Barriere und die Abdichtungssysteme wurden entsprechend dem Wunsch der meisten Länder, Deponiebetreiber und der Wirtschaft flexibler gestaltet. In Anhang 1 ist für Geokunststoffe (Kunststoffdichtungsbahnen), Polymere und Dichtungskontrollsysteme für Dichtungsbahnen eine zentrale Zulassung gefordert. Diese ist durch die Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) oder nach harmonisierten Spezifikationen nach der europäischen Bauproduktenrichtlinie zu erteilen, wenn diese den deutschen Stand der Technik erfüllen. Dieser Standard wird im Wesentlichen darüber bestimmt, dass Abdichtungssysteme oder dessen Abdichtungskomponenten nachweislich über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren beständig sind.

Laut Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit lässt sich gerade am Beispiel der Abdichtungssysteme verdeutlichen, weshalb eine ausschließliche Zusammenführung der bestehenden Vorschriften zu kurz gegriffen hätte. Bei der Erarbeitung der Abfallablagerungsverordnung standen sowohl Bundesregierung wie Länder unter einem erheblichen Zeitdruck, so dass die Gelegenheit nicht genutzt werden konnte, neueste Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik in befriedigendem Maße einzubeziehen und die entsprechenden materiellen Anforderungen der TA Abfall weiter zu entwickeln [BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2009].

Die meisten Oberflächenabdichtungen der letzten Jahre wurden nicht als Regelsystem nach TA Abfall bzw. TA Siedlungsabfall, sondern als gleichwertige Alternativsysteme ausgeführt. Diesem Beleg der Notwendigkeit einer flexibleren Gestaltung der Abdichtungssysteme wurde mit der neuen Deponieverordnung Rechnung getragen.

Die Anforderungen zur Abfallannahme, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, nehmen den Abfallerzeuger stärker in die Verantwortung. An der bisherigen Regelung, dass die Abfallannahme im Rahmen einer grundlegenden Charakterisierung zu prüfen ist und danach regelmäßig die Einhaltung der Schlüsselparameter zu überwachen ist, wird festgehalten. Jedoch nimmt die neue Verordnung den Abfallerzeuger deutlich stärker in die Verantwortung und überlässt dem Deponiebetreiber im Wesentlichen die Aufgabe einer Kontrolle der korrekten Klassifizierung. Diese Verfahrensmodifikation wurde notwendig, um die Überwachungsanforderungen stärker an die Anforderungen der Nachweisverordnung anzugleichen.

Die Möglichkeiten, auf Abfalluntersuchungen verzichten zu können, wurden EU-rechtskonform erweitert. Im Zuge der Vereinfachungen wurde auch geprüft, ob der bisherige Umfang der zu untersuchenden Parameter beibehalten werden muss. Für TOC, Glühverlust, DOC und bei Antimon werden die geltenden Ausnahmen der Deponieverordnung beibehalten. Um weiterhin reproduzierbare Kontrollergebnisse zu erhalten, werden in Anhang 4 der Verordnung die einschlägigen Analysevorschriften festgelegt.

Eine wesentliche Änderung bei der Implementierung der Abfallablagerungsverordnung in die Deponieverordnung stellt der Wegfall des Anhanges 3 der Abfallablagerungsverordnung dar. Dort wurden die Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen detailliert beschrieben. Zudem entfielen die Anforderungen an die Einbaubedingungen. Durch den Entfall der Anforderungen erhalten die Deponiebetreiber wesentlichen Freiraum bei der Deponieführung und dem Deponiebetrieb.

2.3 Beschreibung der wichtigsten Zuordnungswerte zur Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Vielzahl von Zuordnungswerten und Zuordnungskriterien beschrieben. Diese Zuordnungswerte sind mit der vorweggenommenen Behandlung und den technischen Anforderungen an die Deponietechnik im Großen und Ganzen mit vertretbarem Aufwand zu erreichen. Die Anforderungen an die biologische Stabilität und den organischen Anteil des Abfalls sind sehr hoch. Sie haben maßgeblichen Einfluss auf die Vorbehandlung sowie den Deponiebetrieb. Aus diesem Grund sollen die wichtigsten Zuordnungswerte detailliert beschrieben werden.

Die wichtigsten Zuordnungswerte mechanisch-biologisch behandelter Abfälle sind:

- Organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz bestimmt als TOC
- DOC im Eluat
- Biologische Abbaubarkeit des Trockenrückstandes der Originalsubstanz bestimmt als Atmungsaktivität AT_4 oder als Gasbildungsrate im Gärtest GB_{21}

2.3.1 DOC und TOC im Eluat

Der TOC im Eluat umfasst den gesamten organischen Kohlenstoff im Eluat. „Er soll die zu erwartenden Kohlenstoffverbindungen im Abfall charakterisieren, die gelöst vorliegen und für biologische Abbauprozesse verfügbar sind. Sie stellen damit potenzielle Umweltbelastungen dar. Damit ist aber noch keine Aussage über die Abbaubarkeit oder die toxischen Eigenschaften der Kohlenstoffverbindungen gemacht“ [SOYEZ ET AL. 2000, S. 74].

Der TOC im Eluat stellt einen der aussagekräftigsten Werte hinsichtlich des Deponieverhaltens dar. Es können Zusammenhänge für mechanisch-biologisch vorbehandelte und unbehandelte Abfälle in Bezug auf den TOC im Eluat und die über das Sickerwasser ausgetragenen Kohlenstofffrachten beobachtet werden [SCHEELHAASE 2002; DACH 2000]. Ein solcher Zusammenhang zwischen TOC_{Eluat} und der Gasbildung ist in Abb. 2-4 eindeutig zu erkennen.

Der in der AbfAblV für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle ursprünglich festgesetzte Grenzwert für TOC ≤ 250 mg/l stellte sich in der Praxis als eine sehr große Herausforderung für die Anlagenbetreiber dar. Studien zeigten, dass der TOC im Eluat und die damit verbundene organische Sickerwasserfracht bei der Vorbehandlung der Abfälle sich nicht beliebig weit reduzieren lassen. Dach [DACH 2000] fand heraus, dass ab einer gewissen Behandlungsdauer der TOC nahezu auf einem Level stagniert. Der TOC kann dann unabhängig von der Anlagentechnik praktisch nicht mehr mit wirtschaftlich vertretbaren Maßnahmen gesenkt werden. Hierzu wären Rottezeiten von evtl. Jahren notwendig. Dach [DACH 2000] beziffert das Niveau des TOC in Abhängigkeit des Abfalls auf ca. < 100 und 350 mg/l.

Diesen Erkenntnissen wurde bei der Novellierung der AbfAblV mit Einführung des neuen Summenparameters DOC (Dissolved Organic Carbon) Rechnung getragen. Der DOC ist die Summe des in den gelösten Wasserinhaltsstoffen organisch gebundenen Kohlenstoffs. Als gelöst gelten diejenigen Stoffe, welche einen Filter mit der Porenweite 0,45 µm passieren. Die Zuordnungskriterien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle wurden von ≤250 mg/l auf ≤300 mg/l angehoben. Dies entspricht den Forderungen der einschlägigen Literatur. [DACH 2000; SOYEZ ET AL. 2000] Die saure Phase einer Deponie kann selbst mit dem neuen Grenzwert noch sicher vermieden werden. [SOYEZ ET AL. 2000, S. 64]

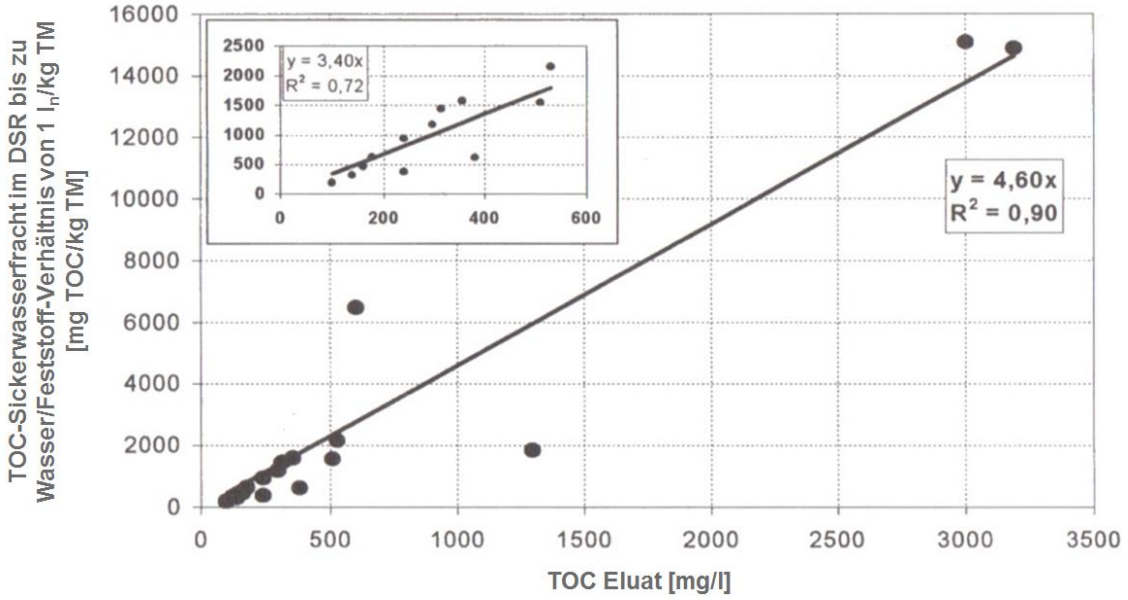


Abb. 2-4: Zusammenhang zwischen TOC_{Eluat} und ausgetragener TOC-Fracht im DSR-Sickerwasser bis zum Wasser-Feststoff-Verhältnis von 1 l_n/kg TM [SOYEZ ET AL. 2000]

2.3.2 Atmungsaktivität AT_4

„Der AT_4 stellt den Sauerstoffverbrauch einer definierten Probemenge unter festgelegten Untersuchungsbedingungen dar. Er wird in der Fachwelt üblicherweise auch als ‚Atmungsaktivität' bezeichnet, obgleich es sich um einen reinen Verbrauchswert und nicht um die als Momentanwert zu bestimmende Aktivität handelt" [SOYEZ ET AL. 2000, S. 64]. „Die Bestimmung des AT_4 erfolgt mit Sapromat, Respiromat oder einem gleichwertigen Gerät" [ANONYM 2001, ANHANG 4]. Der AT_4 erlaubt eine Aussage über den Restgehalt und die biologische Verfügbarkeit der bioabbaubaren Anteile in Abfallproben. Bei der Analyse werden jedoch nur die aerob abbaubaren Anteile erfasst, wohingegen die biologischen Aktivitäten der Deponie wesentlich durch anaerobe Prozesse bestimmt werden. Der AT_4 kann zwar nicht die realen Bedingungen auf einer Deponie widerspiegeln, wodurch seine Aussagekraft eingeschränkt wird, jedoch kann angenommen werden, dass anaerob umsetzbare Stoffe ebenso unter aeroben Bedingungen abbaubar sind [SOYEZ ET AL. 2000]. Tendenziell sind hier somit eher höhere Werte als unter anaeroben Bedingungen zu erwarten. Für den AT_4 gilt ein Grenzwert von 5 mg O_2/g TM. Dieses Stabilitätsniveau entspricht einem TOC im Eluat von ca. 300 mg/l. Dem AT_4-Wert von 5 mg O_2/g TM entspricht nach bisherigen Erfahrungen eher ein GB_{21} von 10-15 ml/g TM. Ein Grenzwert von GB_{21}= 20 mg/l TM ist daher die schwächere Forderung. Überdies ist auch bis heute die Korrelation zwischen AT_4 und GB_{21} an Großanlagen nicht nachgewiesen, so dass der GB_{21} eher als zusätzlicher Kontrollparameter geeignet ist. [DACH 2000]

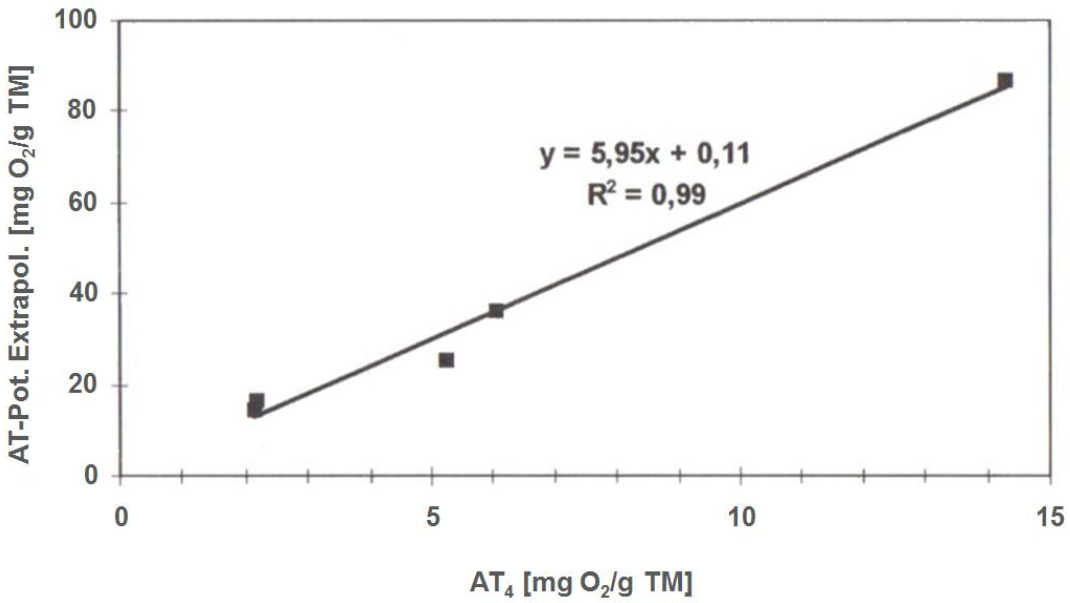


Abb. 2-5: Zusammenhang zwischen AT_4 und dem extrapolierten Sauerstoffverbrauchspotenzial [SOYEZ ET AL. 2000]

In Untersuchungen von SOYEZ ET AL. 2000 wurden zur Bestimmung des gesamten Sauerstoffverbrauchspotenzials Proben auf AT_{10} sowie AT_{40} untersucht und daraus mit empirischen Extrapolationen das Potenzial der Proben ermittelt. Der Zusammenhang mit dem AT_4 ist in Abb. 2-5 dargestellt. Danach gibt der AT_4 etwa ein Sechstel des gesamten potenziellen Sauerstoffverbrauchs wieder.

2.3.3 Gasbildungsrate nach 21 Tagen (GB_{21})

Das Gasbildungsverhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen im anaeroben Milieu, wie es auf der Deponie vorliegt, ist von besonderem Interesse. Es kann durch Gärtests ermittelt werden, bei denen die Probenmengen unter definierten Bedingungen unter Luftanschluss beprobt werden [BOCKREIS 2000]. Die Bestimmung des Gesamtpotenzials kann auch bei der Bestimmung der Gasbildungsrate mehrere hundert Tage beanspruchen. Aufgrund der kürzeren Versuchsdauer wurde der GB_{21}, also eine Versuchsdauer von 21 Tagen, als standardisiertes Verfahren vorgeschlagen. Es zeigt sich in Abb. 2-6 eine enge Korrelation mit Langzeituntersuchungen in Deponiesimulationsreaktoren (DSR) [SOYEZ ET AL. 2000].

Mittels der bestimmten biologischen Aktivität des behandelten Abfalls lässt sich das Emissionspotenzial an abbaubarer organischer Substanz abschätzen. Somit ist die langfristig durch eine mechanisch-biologische Abfalldeponie zu erwartende Menge an organischer Substanz (Sickerwasserbelastung, Deponiegasneubildung) abschätzbar.

Untersuchungen von Dach und Soyez [SOYEZ ET AL. 2000, DACH 2000] ergaben, dass bei einem mechanisch-biologisch behandelten Abfall, der den Grenzwert für AT_4 von 5 mg O_2/kg TM gerade noch einhält, der entsprechende GB_{21} i.d.R. unter 10 l_n/kg TM liegt. Das ist gleichbedeutend damit, dass der Zuordnungswert für die „Atmungsaktivität“ (AT_4) den strengeren der beiden Zuordnungswerte darstellt.

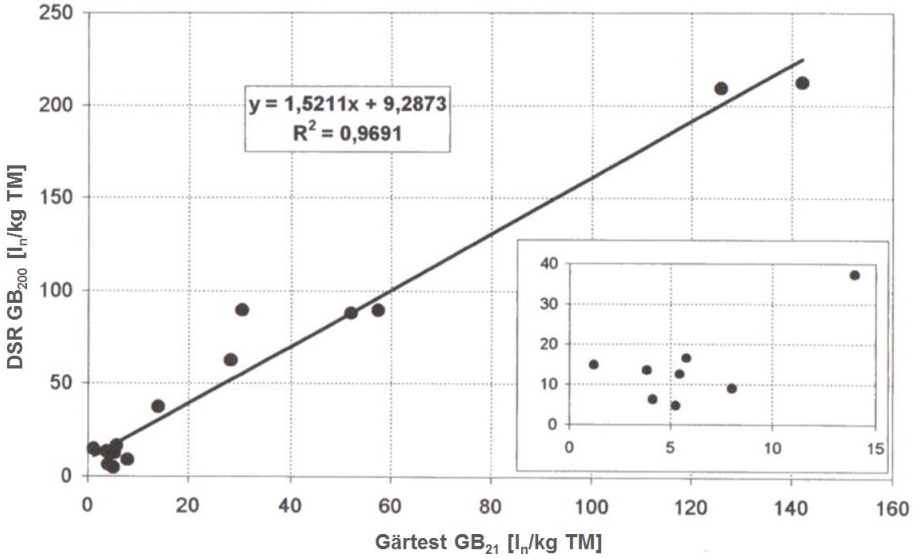


Abb. 2-6: Zusammenhang zwischen Gasbildung GB_{21} im Gärtest und GB_{200} im DSR [SOYEZ ET AL. 2000]

Die zentralen Stabilitätsparameter für eine umweltverträgliche Ablagerung und die damit verbundenen Überwachungen während des geregelten Deponiebetriebes stellen somit der organische Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz bestimmt als TOC, der DOC im Eluat sowie die biologische Abbaubarkeit des Trockenrückstandes der Originalsubstanz bestimmt als Atmungsaktivität AT_4 oder als Gasbildungsrate im Gärtest GB_{21} dar. Diese Werte lassen eine Aussage über die Reaktivität der Organik und die damit verbundenen Emissionen einer MBA-Deponie zu.

3 Untersuchungsmethodik und angewandte Verfahren

Die Umsetzung der AbfAblV führte dazu, dass bei mechanisch-biologischer Behandlung der Siedlungsabfälle die physikalischen und chemischen Eigenschaften des zu deponierenden Materials grundlegend verändert wurden. Mit dem Ende der Übergangsfrist vom 31.05.2005 wurde somit ein zu deponierendes Material geschaffen, dessen Eigenschaften mit den bisherigen Erfahrungen mit unbehandelten Abfällen nicht zu vergleichen waren. Um die geotechnischen Eigenschaften sowie das Langzeitverhalten des Deponieinventars beschreiben zu können, wurde ein umfangreiches Analyseprogramm mit In-situ-Messungen im Deponiekörper erarbeitet. Die folgenden Kapitel beschreiben die theoretischen Grundlagen der durchgeführten Analysen und In-situ-Messungen. Alle Beprobungen und Analysen erfolgten gemäßen den gesetzlichen Bestimmungen, Vorgaben von Arbeitsgemeinschaften und nach den einschlägigen DIN-Normen bzw. VDI-Normen.

Das untersuchte Material entspricht ausschließlich den Zuordnungskriterien und Anforderungen an den Einbau aus der Abfallablagerungsverordnung mit Stand vom 20. Februar 2001. Den folgenden Kapiteln ist somit immer die Abfallablagerungsverordnung mit Stand vom 20.02.2001 zu Grunde gelegt.

3.1 Grundlagen der Probennahme von festen Abfällen aus Haufwerken und abgelagertem MBA-Abfall nach LAGA PN 98

Eine erfolgreiche Laboranalyse beginnt bereits bei den Probennahmen. Das Resultat der Analyse kann dabei nur so gut sein wie die Repräsentanz der entnommenen Probe, wobei die Art und Weise der Probennahme meist von den Analysen bestimmt wird.

Ziel der Probenentnahme ist die Gewinnung von Teilmengen, die zur Ermittlung charakteristischer Merkmale von Abfällen geeignet sind. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, inwieweit diese Teilmengen als repräsentativ für die Gesamtmenge gelten können. Aus diesem Grund erfolgen alle Probennahmen gemäß der „Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen“ [LAGA PN 98 2001].

Die Abfallablagerungsverordnung verweist für die Durchführung der Probennahme auf die LAGA PN 98. Die Richtlinie dient der Vereinheitlichung der Probennahme von festen und stichfesten Abfällen. Zur praktischen Durchführung der Probennahme müssen nach LAGA PN 98 die folgenden Arbeitsschritte bzw. Voruntersuchungen berücksichtigt werden:

- Überprüfung der Homogenität/Heterogenität/Inhomogenität
- Volumen-/Massenbestimmung
- Ermittlung der Größtkomponente
- Festlegung der Mindestanzahl an Einzel-, Misch- und Sammelproben
- Festlegung der Mindestvolumen Einzelproben und Verjüngung zur Laborprobe

Die LAGA-Richtlinie unterscheidet bei der Probennahme zwischen drei Situationen:

- Probennahme aus ruhenden Abfällen
- Probennahme aus bewegten Abfällen
- Probennahme aus Transportfahrzeugen und verpackten Materialien mit einer Kontrolle der Container vor Anlieferung

Proben aus ruhenden Abfällen (z.B. Haufwerken) können entweder direkt entnommen werden oder sie werden durch eine rasterartige Beprobung nach Ausbreitung des Materials auf einer ebenen Fläche gezogen. Im Fall der Haufwerksbeprobung werden in der LAGA PN 98 die folgenden Möglichkeiten aufgezeigt:

- Anlegen von Schürfschlitzen
- Probennahme mittels Probennahmewerkzeug (Bohrstock, Probenstecher, Probennahmespeer, Schneckenbohrer; jeweils Entnahme einer Einzelprobe in unterschiedlichen Tiefen)
- Probennahme mittels Großgerät (Bagger, Radlader; Entnahme von Einzelproben an den Seitenwänden)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurden Proben mittels Schneckenbohrer sowie eines Probenstechers aus dem Deponiekörper entnommen.

3.1.1 Überprüfung der Homogenität/Heterogenität/Inhomogenität

Nach Definition der Richtlinie müssen zur Prüfung der Homogenität folgende Abfalleigenschaften durch organoleptisch-sensorische Ansprache bzw. Tests herangezogen werden:

- Änderung in der Farbgebung
- Änderung in der Korn-/Stückformverteilung
- Änderung der Korn-/Stückgrößenverteilung
- Änderung in der Konsistenz (Wassergehalt)
- Geruch und Gasentwicklung und ggf. Fingerprobe

Das untersuchte Material wies eine weitgehende homogene Beschaffenheit auf, so dass keine Teilchargen differenziert beprobt werden mussten.

3.1.2 Volumen-/Massenbestimmung

Die Anzahl der zu entnehmenden Misch- und Sammelproben richtet sich nach der Menge des zu untersuchenden Materials. Eine Ermittlung der Einbautrockendichte erfolgte auf der Deponie mittels Einbauversuchen. Dabei konnte eine Einbautrockendichte von 1,11 bis 1,14 g/cm³ gemessen werden.

3.1.3 Ermittlung der Größtkomponente

Als Größtkomponente wird das überwiegend in einer Grundmenge vorkommende größte Korn bzw. Stück bezeichnet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass evtl. vorhandene einzelne größere Stücke oder in einem geringeren Prozentsatz (< 5 Vol-%) enthaltene gröbere Fraktionen nicht zur Bestimmung des Größtkomponentendurchmessers herangezogen werden. Das Größtkorn des MBA-Outputs der mechanisch-biologischen Behandlungsanlage hat einen Durchmesser von < 35 mm.

3.1.4 Festlegung der Mindestanzahl an Einzel-, Misch- und Sammelproben

Die Begriffe Einzel-, Misch-, Sammel- und Laborproben sind wie folgt definiert:

- Einzelprobe: Probenmenge, die bei einem einzelnen Probeentnahmevorgang entnommen wird. Sie ist örtlich und zeitlich eng auf eine Entnahmestelle begrenzt.
- Mischprobe (Sammelprobe): eine Probe, die durch Vereinigen und Vermischen von Einzelproben (Mischproben) einer Gesamtmenge entsteht.
- Laborprobe: für die Untersuchung im Labor aus einer Misch- oder Sammelprobe hergestellte Teilprobe. Aus ihr werden die Proben für Einzeluntersuchungen, z.B. für Analysen, entnommen.

Tab. 3-1: Mindestanzahl der Einzel-/Misch-/Sammel- und Laborproben in Anhängigkeit vom Prüfvolumen [LAGA PN 98 2001]

Volumen der Grundmenge	Anzahl der Einzelproben	Anzahl der Mischproben	Anzahl der Sammelproben	Anzahl der Laborproben
bis 30 m³	8	2	keine	2
bis 60 m³	12	3	keine	3
bis 100 m³	16	4	keine	4
bis 150 m³	20	5	keine	5
bis 200 m³	24	6	keine	6
bis 300 m³	28	7	keine	7
bis 400 m³	32	8	keine	8
bis 500 m³	36	9	keine	9
bis 600 m³	40	10	keine	10
bis 700 m³	44	10 + (1)	1	11
bis 800 m³	48	10 + (2)	1	11
bis 900 m³	52	10 + (3)	1	11
bis 1000 m³	56	10 + (4)	2	12
bis 1100 m³	60	10 + (5)	2	12
bis 1200 m³	64	10 + (6)	2	12
		je angefangene 100 m³ je eine Mischprobe	je angefangene 300 m³ je eine Sammelprobe	je angefangene 300 m³ je eine Laborprobe

Nach Tab. 3-1 ergibt sich durch Interpolation für eine Ablagerungsmenge von ca. 7000 m³ eine Gesamtprobenanzahl in Höhe von 296. Daraus resultieren 74 Misch- und 22 Sammelproben. Aus den Misch- und Sammelproben sind dann 32 Laborproben zu erstellen.

3.1.5 Festlegung der Mindestvolumen der Einzelproben

Das Mindestvolumen jeder Einzelprobe wird in Abhängigkeit von der maximalen Korn-/Stückgröße gemäß Tabelle 6 der LAGA PN 98 festgelegt. Danach ergibt sich für eine maximale Korngröße von 35 mm ein Mindestvolumen der Einzelprobe von zwei Litern. Das Mindestvolumen der Laborprobe wird aufgrund fehlender Erfahrungen mit einem Sicherheitszuschlag versehen und auf 10 Liter festgelegt.

3.1.6 Verjüngung zur Laborprobe

Die Verjüngung zur Laborprobe erfolgte durch Aufkegeln und Vierteln mittels Probenkreuz. Zur Verjüngung wurden die Einzelproben zu einer Misch-/Sammelprobe auf einer Kunststoffplatte aufgesetzt und gründlich durchmischt. Der entstandene Kegel wurde anschließend viermal umgesetzt.

Durch das Vierteln mittels Probenkreuz und Verwerfung der gegenüberliegenden Viertel wurde die Probe bis auf die gewünschte Menge der Laborprobe verjüngt. Bei der Teilung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls wurde besonders wegen der unterschiedlichen Korn- und Komponentengrößen darauf geachtet, dass keine Entmischung der Laborprobe zu einer fehlerhaften Probe führte.

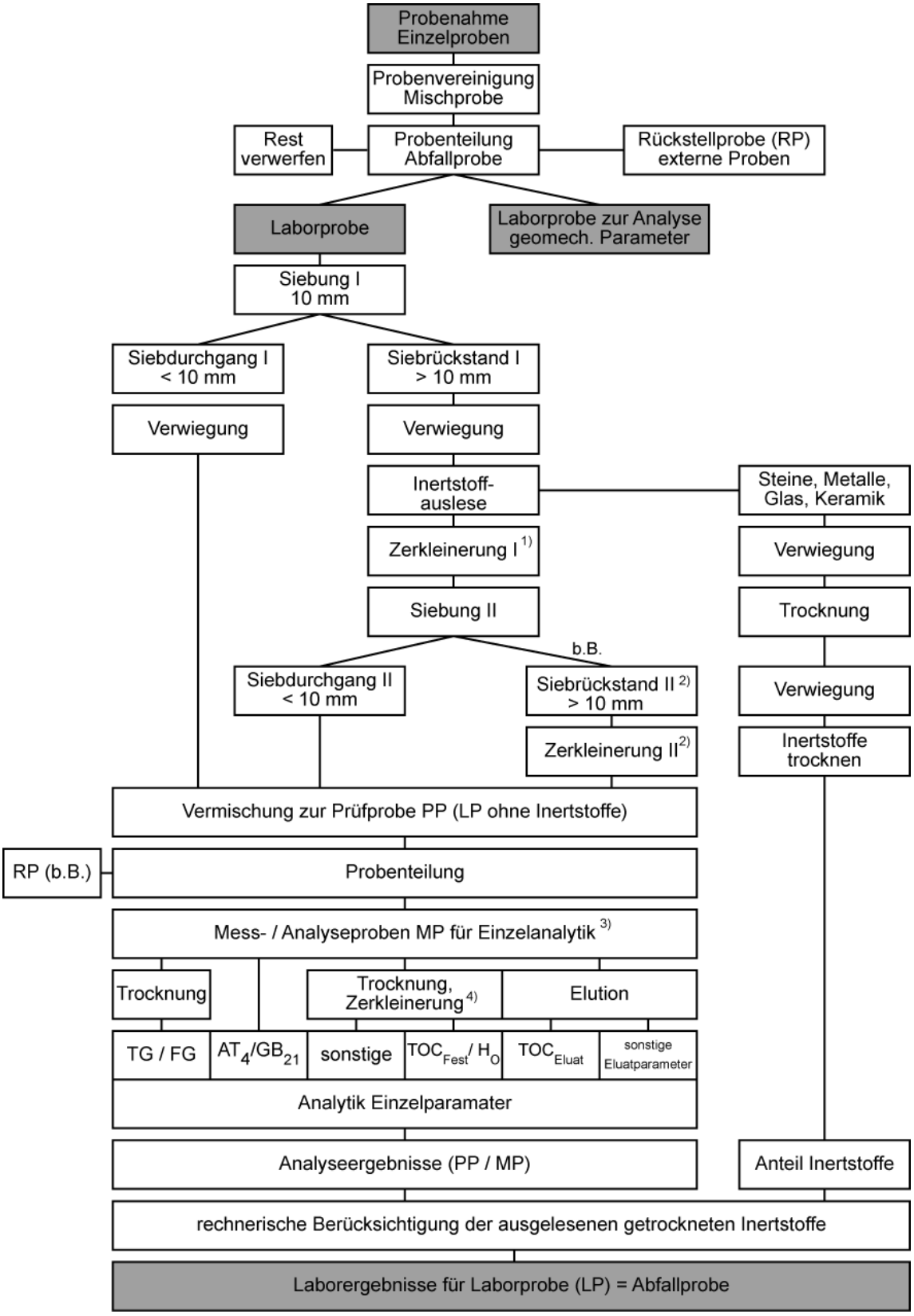
3.2 Standardisierung der Probennahme, Probenaufbereitung und Analytik für Parameter der AbfAblV gemäß ASA-Standard /RAL-RG 504

Nach über zweijähriger Erfahrung mit Untersuchungen und Analysen der Ablagerungsparameter und einer Vielzahl von durchgeführten Ringversuchen zeigten sich immer wieder hohe Schwankungsbreiten in den Fremdlaboren und betriebseigenen Laboren [ROHRING, BAHN, MERTENSKÖTTER, SCHÜTT 2007].

Aus den Abweichungen, die teilweise bis zu 100% betrugen, resultierte eine Initiative der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e.V., kurz ASA e.V., die eine standardisierte Vorgehensweise bei der Durchführung der Analysen unter Beachtung aller gesetzlichen Vorschriften für die Probennahme, Probenaufbereitung und Analyse als Ziel hatte.

Dabei standen die Verringerung der Schwankungsbreiten bei den Ergebnissen, die Vereinheitlichung der Vorgehensweise sowie die Reproduzierbarkeit der Nachweise zur Einhaltung der Ablagerungskriterien im Vordergrund.

Die über zweijährigen Bemühungen der ASA e.V. wurden mit der Zertifizierung des Prozesses durch das Deutsche Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., RAL, unter der Nummer „RAL-RG 504“ abgeschlossen.



1) Bei Bedarf Stickstoff-Kühlung / Trocknung
2) entfällt, wenn Zerkleinerung 1 keinen Siebüberlauf erzeugt (Zerkleinerung mit Siebkorn)
3) analysespezifische Probenaufbereitung gemäß Vorschriften der ABfAblV
4) weitere Zerkleinerung zur Herstellung einer analysenfeinen Probe
b.B.: bei Bedarf

Abb. 3-1: Ablaufplan der Probennahme und Probenaufbereitung von Abfallproben gemäß ASA e.V. [ROHRING, BAHN, MERTENSKÖTTER, SCHÜTT 2007]

Der in Abb. 3-1 beschriebene ASA-Standard untergliedert sich in drei Bereiche: die Probennahme, die Probenaufbereitung und die Analytik. Dem gesamten ASA-Standard liegen die AbfAblV und die darin festgelegten Analysevorschriften nach DIN, LAGA, etc. zugrunde.

Grundlage der Probennahme ist die unter Kapitel 3.1 beschriebene Richtlinie LAGA PN 98. Für die anstehenden Analysen ist es von größter Bedeutung, eine repräsentative Probe zu erhalten, damit spätere Analysenergebnisse entsprechend bewertet werden können. Die Anzahl der Proben hängt dabei wie bereits in Tab. 3-1 beschrieben von dem Volumen der zu beprobenden Grundmenge ab. In Abhängigkeit zur maximalen Korngröße wird ein Mindestvolumen der Einzelprobe gefordert. Die Erfahrung der letzten Jahre hat gezeigt, dass das Austragsmaterial in den meisten Fällen gemäß der Korngrößenverteilung unterhalb von 50mm liegt. Anstelle der durch die LAGA PN98 vorgeschriebenen 4 Liter Probenvolumen empfiehlt der ASA Standard 10 Liter Probenvolumen.

Die im ASA-Standard RAL-RG 504 beschriebenen Arten der Probennahme:

- die manuelle Probennahme vom Band,
- die manuelle Probennahme aus dem Haufwerk und
- die automatisierte Probennahme entsprechend einer Vorrichtung,

sind sehr praxisorientiert beschrieben. Nach der Beschreibung zum Vorgehen bei der Probennahme wird die ebenfalls sehr wichtige Konservierung und Verpackung der Probe beschrieben. Als Anhang sind dem ASA-Standard RAL-RG 504 ein Ablaufplan, in dem jeder einzelne Schritt erläutert wird, sowie ein Probennahmeprotokoll mit den notwendigen Angaben für die Genehmigungsbehörde beigefügt.

Der im ASA-Standard beschriebene Untersuchungsumfang für die wesentlichen Parameter $TOC_{Feststoff}$, H_o, $DOC_{im\ Eluat}$ und AT_4 gemäß AbfAblV bzw. Deponieverordnung ist in der Anlage 3 des ASA-Standards ausführlich beschrieben.

3.3 Untersuchungen im Deponiekörper

Grundsätzlich wurden bei den In-situ-Untersuchungen des Deponiekörpers zwischen kontinuierlichen und alternierenden Untersuchungen unterschieden.

Die Art der jeweils anzuwendenden Untersuchungsmethode richtete sich dabei nach dem Untersuchungsziel und den örtlichen Verhältnissen. Das Versuchsfeld mit einer Größe von 15 x 45 Metern wurde wie in Abb. 3-2 dargestellt aufgebaut.

Mit Beginn der Versuchsfeldeinrichtung wurden erste Bohrlöcher zur Erkundung des Untergrundes angefertigt. Im Zuge dieser ersten Testbohrungen stellte sich bei der Inspizierung der Bohrlöcher heraus, dass sich über Nacht Wasser in den Löchern angesammelt hatte. Um die Herkunft und die Ursache des Wassers genau zu ergründen, wurden weitere Löcher gebohrt, die unmittelbar nach dem Herausziehen der Bohrspindel ausgebaut wurden. Dieser Ausbau erfolgte mittels Kunststoffrohren, die im unteren Bereich mit verschiedenen Perforierungslängen versehen wurden.

Es wurde angedacht, mittels der nachträglich angelegten „Sickerwasserbrunnen“ Pumpversuche und Sickerwasseranalysen durchzuführen (Kapitel 3.3.4).

Der schematische Aufbau des Testfeldes wird in Abb. 3-2 dargestellt. Im Testfeld wurden im Wesentlichen folgende Mess- bzw. Testeinrichtungen eingesetzt:

- BL 1-4= Testfeldecken als Bezugsgrößen zur Einmessung des Testfeldes
- TF 1-15= Temperatursensoren zur Bestimmung der Temperatur im Deponieinneren bezogen auf unterschiedliche Einbautiefen (Kapitel: 3.3.1)
- GB 1-9= Gasbrunnen zur Messung der Deponiegaskonzentration im Untergrund (Kapitel: 3.3.2)
- S 1-5= Sickerwasserbrunnen zur Bestimmung der Sickerwassermenge und Sickerwasseranalyse in unterschiedlichen Tiefen (Kapitel: 3.3.4)
- P 1-6= Porenwasserdrucksensoren in unterschiedlichen Einbautiefen und Überlagerungen (Kapitel: 3.3.5)

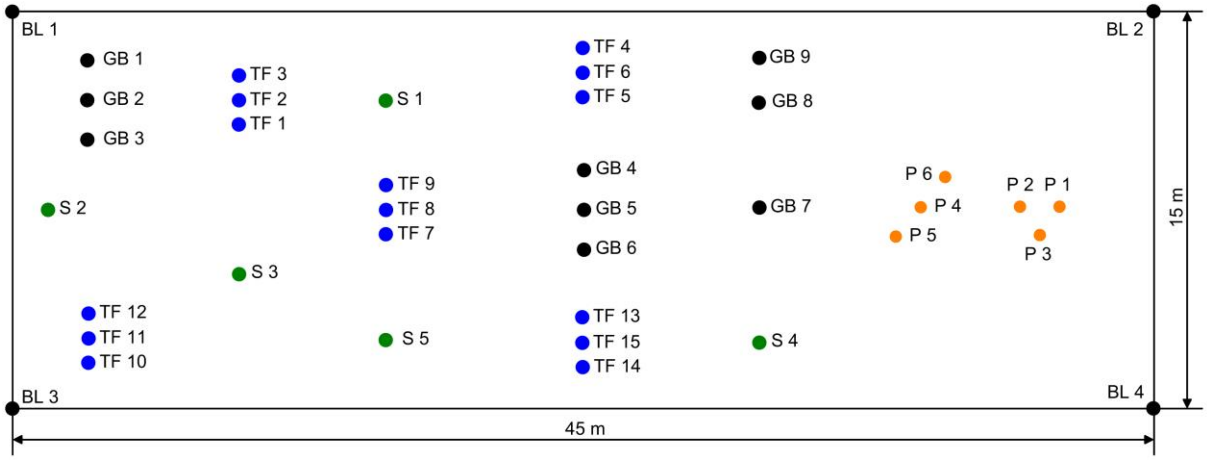


Abb. 3-2: Schematischer Aufbau des Versuchsfeldes mit Messinstrumenten zur In-situ-Messung sowie Gasbrunnen und Sickerwasserbrunnen für alternierende Untersuchungen (Abkürzungen im Text erklärt)

Direkt neben dem abgelagerten MBA-Deponat befindet sich eine Deponie mit herkömmlich abgelagertem unbehandeltem Hausmüll. Das Deponat des Testfeldes war vor Beginn der Testfeldeinrichtung mit einem Gefälle > 5 % versehen und mittels Folie abgedeckt. Der Einbau des MBA-Deponats erfolgte diskontinuierlich zirka einmal pro Monat. Bis zum Einbau des Materials wurden Haufwerke in unmittelbarer Nähe des Einbaufeldes errichtet, die immer mit Folie abgedeckt wurden.

Während der gesamten Versuchsphase war es nicht notwendig, neues MBA-Deponat im Bereich des Versuchsfeldes einzubauen. Hierzu wurde ein weiterer Deponieabschnitt oberhalb des Versuchsfeldes genutzt. Durch Anpassung der Gefälle konnte verhindert werden, dass Sickerwasser in den Bereich des Versuchsfeldes eindrang.

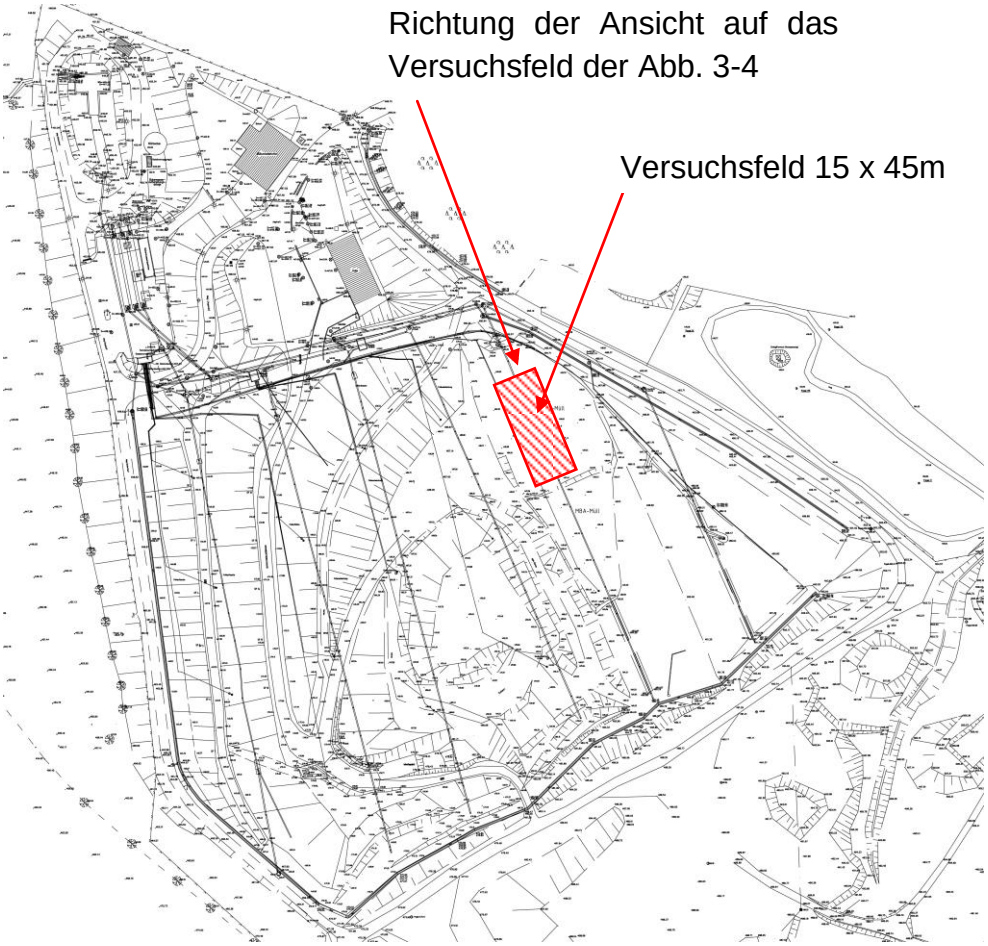


Abb. 3-3: Lageplan des Deponieabschnittes vor Testfeldeinrichtung

Abb. 3-4: Ansicht von „unten“ auf das mit Folien abgedeckte Versuchsfeld

3.3.1 Temperaturentwicklung im Deponiekörper

Die 15 Temperatursonden wurden an fünf unterschiedlichen Stellen im Versuchsfeld jeweils in die Tiefen von zirka 0,9 m, 1,8 m, 2,6 m, 3,6 m und 4,6 m eingebracht. Das Messprinzip beruht auf einem Pt100, der an ein Datenloggersystem angeschlossen ist, der die Daten insitu erfasst.

Abb. 3-5: Temperatursensor Pt100 (Bild links) und Data Logger

3.3.2 Messung der Deponiegaskonzentration im Untergrund

Um eine eventuelle Deponiegaskonzentration im Untergrund des Deponiekörpers messen zu können, wurden wie in Abb. 3-2 dargestellt neun Deponiegasmessstellen mit unterschiedlichen Tiefen eingerichtet. Für die Deponiegasmessstellen wurden folgende Ausbautiefen gewählt:

- GB 1, GB 4, GB 7 = 2,0 m
- GB 2, GB 5, GB 8 = 4,0 m
- GB 3, GB 6, GB 9 = 6,0 m

Die Gasmessstellen wurden so ausgebaut, dass der untere Meter als Schlitzfilterrohr und der obere Teil als Vollrohr ausgeführt wurden (Abb. 3-6). Das Bohrloch wurde vor dem Einrammen des Gasbrunnens einen Meter hoch mit Kies aufgefüllt, in den anschließend das Rohr eingerammt wurde. Der zwischen Bohrloch und Gasbrunnen existierende Spalt wurde bis zur Oberkante des Deponiekörpers mit Bentonit aufgefüllt, um die Gasdichtheit zu gewährleisten. Somit konnten Bypassströmungen entlang des Gasbrunnens vermieden werden, die zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt hätten.

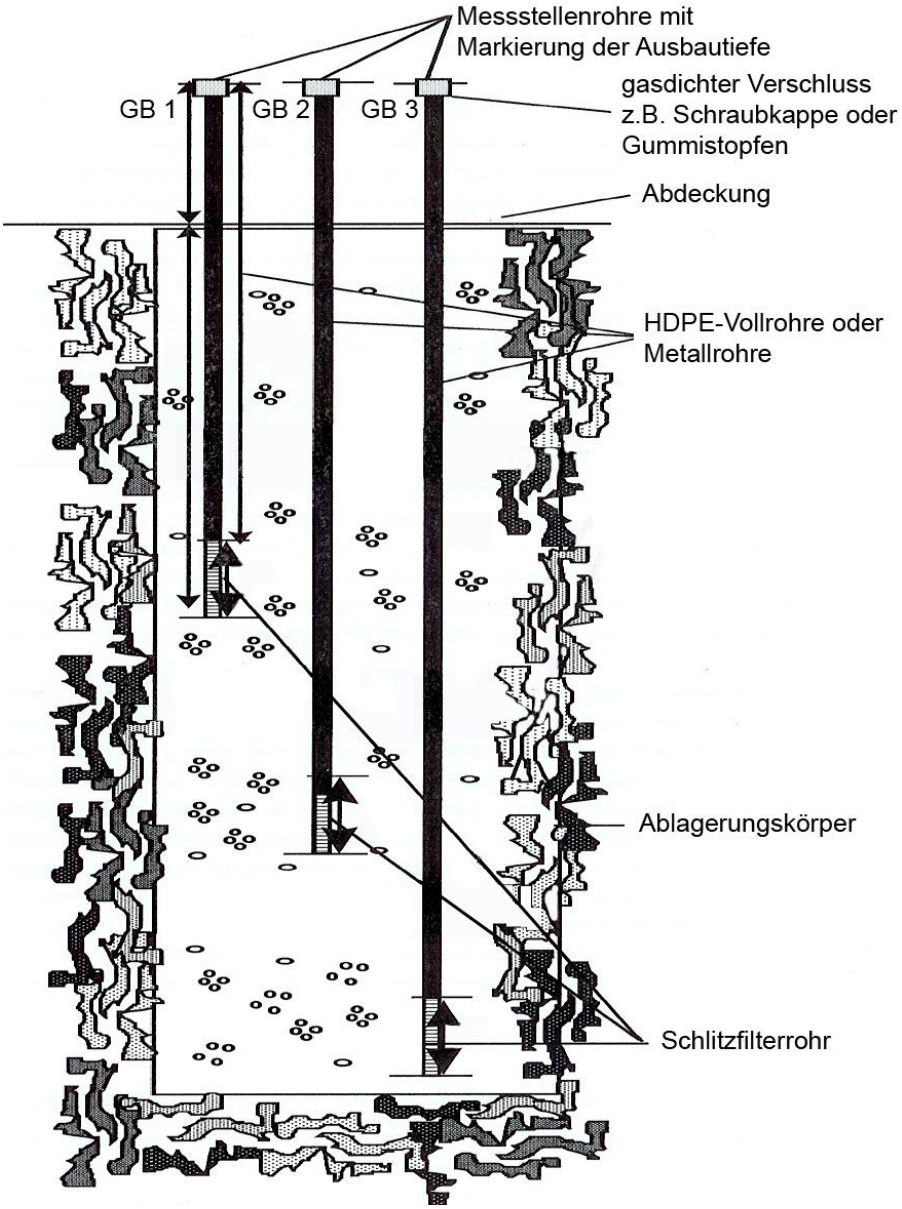


Abb. 3-6: Tiefendifferenzierte Deponiegasmessstellen, abgeändert [LFU BADEN-WÜRTTEMBERG 2001]

Unmittelbar nach dem Ausbau der Messstellen musste die Luft in den Messstellen GB 1-9 gemäß Abb. 3-6 fünfmal ausgetauscht werden, wobei eine maximale Austauschrate von 4 l/min nicht überschritten werden sollte. Zur Gewinnung repräsentativer Daten aus tiefendifferenzierten Messstellen muss eine Mindeststandzeit zwischen Messstellenausbau und Beprobung von einer Woche liegen [LFU BADEN-WÜRTTEMBERG 2001]. Empfehlenswert ist ein Zeitraum von zwei Wochen. Während dieser Standzeit ist die Messstelle mit einer dicht schließenden Kappe versehen worden. [LFU BADEN-WÜRTTEMBERG 2001]

Vor Beginn der ersten Probennahme wurde der Ruhedruck in der Messstelle ermittelt. Aufgrund der sehr geringen Drücke im Bereich von wenigen Pascal war ein geeignetes Messgerät zu wählen. Vor der ersten Entnahme von Gasproben musste das Volumen der Messstelle einmal ausgetauscht werden. Diese Maßnahme war notwendig, weil es nach dem Öffnen der Verschlusskappe und dem Anschluss der Mess- und Probennahmeeinrichtung zu einem Lufteintrag in die Messstelle und somit zu einer Verdünnung der Gaskonzentration kommen konnte.

Während der Absaugung wurden die Temperatur und der Saugdruck ermittelt. Der sich aufbauende Saugdruck kann Hinweise auf die Funktionstüchtigkeit und Eignung der Messstelle geben. Hohe Unterdrücke weisen dabei auf ein verstopftes Filterrohr oder einen Wassereinstau hin. Zur Ermittlung der Konzentration der Hauptgase CH_4, CO_2, N_2 und O_2 wurden an der Messstelle tragbare Analysegeräte angeschlossen. Die Konzentration der Gase wurde dabei von den Analysegeräten in Volumen-Prozent (Vol-%) angegeben. Als zweite Variante der Absaugung wurden die abgesaugten Gase in Gasfolienbeutel abgefüllt und unmittelbar im Anschluss an die Probennahme im Labor analysiert.

Zur Absicherung der an Ort und Stelle ermittelten Gaszusammensetzung wurde jede fünfte Probe einem solchen Gasfolienbehälter zugeführt. Anschließend wurde die Probe in einem Gaschromatographen analysiert und dabei die N_2-Konzentration mitbestimmt. Die N_2-Konzentration wird dabei häufig als Differenz zu 100 % von der Summe der Volumenkonzentration von CH_4, CO_2 und O_2 errechnet. Bei dieser Vorgehensweise ist aber keine Kontrollmöglichkeit gegeben. Aus diesem Grund erfolgt die Überprüfung durch einen Gaschromatographen.

3.3.3 Deponiegasmessung an der Deponieoberfläche

Bei der Deponiegasmessung an der Geländeoberfläche unterscheidet man zwischen punktuellen und flächigen Deponiegasemissionen.

Punktuelle Gasemissionen können an Setzungs- oder Schrumpfrissen auftreten. Dort können sich bei Verdünnung mit Luft brennbare oder explosionsfähige Gasgemische bilden. Darüber hinaus können enthaltene Spurenstoffe Vergiftungen oder Geruchsbelästigungen verursachen.

Flächige Gasemissionen können je nach Art und Beschaffenheit der Oberfläche räumlich und zeitlich variieren. Die auftretenden Methankonzentrationen sind meist gering. Probleme können einzelfallspezifisch Geruchsbelästigungen oder Beeinträchtigungen der Vegetation bereiten. In bestimmten Fällen können vergleichbare Gefahren wie bei punktuellen Gasemissionen auftreten.

Bei der Untersuchung der oberflächigen Gasemissionen des Versuchsfeldes war aufgrund des behandelten Materials mit nur sehr geringen flächigen Gasemissionen zu rechnen. Die vorhandenen Emissionen könnten je nach Oberflächenbeschaffenheit und Witterungsverhältnissen jedoch stark schwanken.

Bei der Deponiegasmessung an der Geländeoberfläche wurde das freigesetzte Gasvolumen bestimmt. Hierzu wurde eine Kiste mit einem definierten Volumen auf den Deponiekörper gesetzt und die über die Zeit freigesetzte Menge gemessen. Ähnlich wie bei der Begehung mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) wird die Kiste auf die Untersuchungsfläche aufgesetzt und leicht angedrückt, jedoch ohne Abdichtung gegenüber der atmosphärischen Luft. Die Deponiegasmessung an der Oberfläche erstreckte sich auf den gesamten Bereich der Ablagerung. Für die Dichte der Messpunkte wurde ein Raster von fünf Metern gewählt. Legt man dieses Raster über das geplante Versuchsfeld von 15 x 45 Metern, ergeben sich 27 Teilflächen. In jeder Teilfläche wird an mindestens einer zufällig gewählten Stelle die Messung durchgeführt.

3.3.4 Sickerwassererfassung

Eine umfassende Analyse des anfallenden Sickerwassers bzw. Oberflächenwassers war auf dem untersuchten Abschnitt nicht möglich. Die bauseitliche Trennung der Sickerwassererfassung zwischen den Deponieabschnitten für unbehandelte Siedlungsabfälle und mechanisch-biologisch behandelte Abfälle wurde nicht entsprechend den hierfür notwendigen Anforderungen ausgeführt. Es sind Überläufe von Sickerwasser aus dem Deponiefeld des unbehandelten Siedlungsabfalls nicht auszuschließen. Eine strikte Trennung der Sickerwässer aus den beiden Deponieabschnitten bzw. umfassende chemische Analysen sind somit ausgeschlossen. Erst mit Inbetriebnahme des neuen Deponieabschnittes für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle wären eine Erfassung der Sickerwassermengen an der Deponiebasis und eine Analyse der Konzentrationen zuverlässig möglich.

Eine Analyse und eine Beprobung der Sickerwässer aus dem neuen Deponieabschnitt im Rahmen der Dissertation waren nicht möglich, da die Analysearbeiten bereits vor Eröffnung des neuen Deponieabschnittes abgeschlossen waren.

Die in Kapitel 3.3 beschriebenen Probleme der mit Sickerwasser gefüllten Bohrlöcher führten jedoch bereits in einem sehr frühen Versuchsstadium dazu, dass in der Planungsphase des Versuchsfeldes Sickerwasserbrunnen berücksichtigt wurden. Der Ausbau der Sickerwasserbrunnen erfolgte mittels Kunststoffrohren, die analog den Deponiegasmessstellen (Abb. 3-6) im unteren Bereich perforiert und nach oben als Vollrohr ausgeführt wurden. Das Bohrloch wurde vor dem Einrammen des Sicker-

wasserrohres einen Meter hoch mit Kies aufgefüllt, in den anschließend das Rohr eingerammt wurde. Der zwischen Bohrloch und Gasbrunnen existierende Spalt wurde komplett mit Bentonit aufgefüllt, um die Gasdichtheit zu gewährleisten. Somit konnte das Einsickern von Regen- bzw. Oberflächenwasser in den Deponiekörper entlang des Sickerwasserbrunnenrohres vermieden werden.

Erfahrungen zur Qualität der Sickerwässer aus Deponien, die ausschließlich mit MBA-Material verfüllt wurden, liegen bis zum Beginn der vorliegenden Arbeit kaum vor. Bei einer Vielzahl von Versuchen in Deponiesimulationsreaktoren konnten lediglich Grundtendenzen zu den langfristigen Sickerwasseremissionen aufgezeigt werden. Aus diesem Grund wurden in den vergangenen Jahren verstärkt Versuche mit Testfeldern durchgeführt, um das tatsächliche Emissionsgeschehen besser beschreiben zu können. Erste Ergebnisse zeigen, dass nach Niederschlägen wiederholt erhöhte Konzentrationen vorliegen, insgesamt jedoch eine eindeutig abnehmende Tendenz in der Höhe der Belastung zu erkennen ist. Auffällig ist hierbei ein hoher Anteil an Schwebstoffen im Oberflächenwasser, der durch den so genannten Splash-Effekt hervorgerufen wird. Hierbei werden durch die kinetische Energie des auf den MBA-Output auftreffenden Regentropfens feinste Teile aus dem Abfall gelöst, die dann durch das Wasser abtransportiert werden [MÜNNICH, FRICKE 2005].

Zusammenfassend lassen die bisherigen Erfahrungen zum Sicker- und Oberflächenwasser von MBA-Deponien Folgendes erkennen [MÜNNICH, FRICKE 2005]:

- Das Oberflächenwasser kann aufgrund der teils hohen Konzentration an chemischen Verbindungen und Schwebstoffen nicht unmittelbar in oberflächennahe Gewässer eingeleitet werden.
- Die Staunässe auf der Oberfläche ist durch die Abdeckung des Deponiekörpers mit der Folie entstanden. Das bestätigen Untersuchungsergebnisse von Fricke, Soyez. et al. 2005. Aus diesem Grund wurde mit der Novellierung der AbfAblV im Februar 2007 auf eine Abdeckung des Deponiekörpers durch wasserundurchlässige Materialien verzichtet.
- Untersuchungen von [GALLENKEMPER, ROHRING 2007] zeigen, dass das Wasser in das behandelte und eingebaute Material versickert und dort eine 0,1-0,2 m dicke wassergesättigte Schicht bildet. Diese Schicht kann aber nach einer Abdeckung mittels der wasserundurchlässigen Folien nicht wieder abtrocknen, was dazu führt, dass die Deponieoberfläche unbefahrbar wird und somit kein bzw. nur erschwert neues Deponat eingebaut werden kann.
- Ein großer Teil der Sickerwasserbelastungen ist an die Schwebstoffe gebunden, so dass mit einfachen Verfahren wie Sedimentation oder Filtration die Belastung des Sickerwassers deutlich reduziert werden kann.
- Das Oberflächenwasser nicht abgedeckter Bereiche muss ebenfalls gefasst und gereinigt werden.
- Die Sickerwasserbehandlungsanlagen müssen bei der Auslegung an die Höhe der Belastung angepasst werden.

3.3.5 Porenwasserdrücke

Unter dem Porenwasserdruck versteht man im klassischen Sinne die Spannung in den wassergefüllten Poren des Bodens. Der Porenwasserdruck setzt sich zusammen aus dem hydrostatischen Druck, der der Höhe des Grundwasserstandes entspricht, und einem Porenwasserüberdruck. In Böden mit geringer Wasserdurchlässigkeit entsteht ein Porenwasserüberdruck, wenn sich infolge einer auf den Boden aufgebrachten äußeren Belastung der einem Gleichgewichtszustand entsprechende Wassergehalt nur allmählich einstellen kann. Der Porenwasserüberdruck wird normalerweise durch allmähliches Abströmen des Porenwassers abgebaut. Besteht jedoch nicht die Möglichkeit des Abströmens des Porenwassers, so ist zu befürchten, dass der Porenwasserüberdruck einen kritischen Zustand einnimmt und somit letztlich die Standsicherheit der Deponie gefährdet wäre. Es könnte in diesem Fall zu Setzungsfließrutschungen kommen. Ursachen für solche Setzungsfließrutschungen können sein:

- Wasserströmungen und -drücke,
- Sackungen,
- Schwingungseintrag durch Maschinen und Fahrzeuge,
- Brüche instabiler Böschungen.

Die Porenwasserdrücke werden maßgeblich von der Höhe des Druckspiegels und deren zeitlicher Variabilität kontrolliert. Dabei sind die positiven Porenwasserdrücke für die Standsicherheitsbeurteilung von wesentlicher Bedeutung, da diese die Scherfestigkeit des Abfalls deutlich reduzieren können.

In zahlreichen Publikationen geologischer Herkunft wird darauf verwiesen, dass der Geländebruch bzw. die Setzungsfließrutschung ein Resultat des auftretenden Niederschlages und der daraus resultierenden Porenwasserdrücke ist. Aber auch höhere Bodenfeuchten und damit einhergehende Verringerungen der Kohäsion führen zu den beschriebenen Rutschungen.

Aufgrund der unterschiedlichen Einbautiefen im Testfeld wurden elektrische Porenwasserdruckgeber für die Untersuchung der Porenwasserdrücke ausgewählt. Mit den ausgewählten Porenwasserdruckgebern konnten Porenwasserdrücke bis max. 50 bar gemessen werden. In dem Gehäuse des Porenwasserdruckgebers aus Edelstahl ist ein elektrischer Druckaufnehmer mit dem Verbindungskabel wasserdicht eingegossen. Der Porenwasserdruck wird über einen Filter in den Druckaufnehmer geleitet und in ein Ausgangssignal im mV Bereich proportional zum Messwert gewandelt. Zum Einpressen ist der Aufnehmer mit einem Gewinde versehen, auf welches eine Einpresshülse für Gestängeanschluss aufgeschraubt wird. Die Erfassung der Messwerte erfolgte vollautomatisch über einen Datenloggersystem.

Abb. 3-7: Porenwasserdruckgeber

Die Sonden wurden gemäß Abb. 3-8 in unterschiedliche Tiefen des Deponiekörpers eingebaut. Anschließend wurden im Bereich der Porenwasserdruckgeber Stahlplatten auf dem Deponiekörper verlegt, auf die wiederum Kippmulden gefüllt mit Sand gestellt wurden. Diese Schüttmulden erzeugten mit ihrem Gewicht pro Fläche eine zusätzlich simulierte Überlagerung der Sonden von ca. 15m.

Die Porenwasserdrucksonden wurden mittels Spiralbohrungen in folgenden Tiefen des Deponiekörpers platziert und das Bohrloch anschließend mit Bentonit abgedichtet:

- P 1 = 1,30 m inkl. zusätzlicher Überlagerung ⇒ 16,30 m
- P 2 = 1,80 m inkl. zusätzlicher Überlagerung ⇒ 16,80 m
- P 3 = 0,90 m inkl. zusätzlicher Überlagerung ⇒ 15,90 m
- P 4 = 2,20 m inkl. zusätzlicher Überlagerung ⇒ 17,20 m
- P 5 = 2,70 m inkl. zusätzlicher Überlagerung ⇒ 17,70 m
- P 6 = 1,80 m inkl. zusätzlicher Überlagerung ⇒ 16,80 m

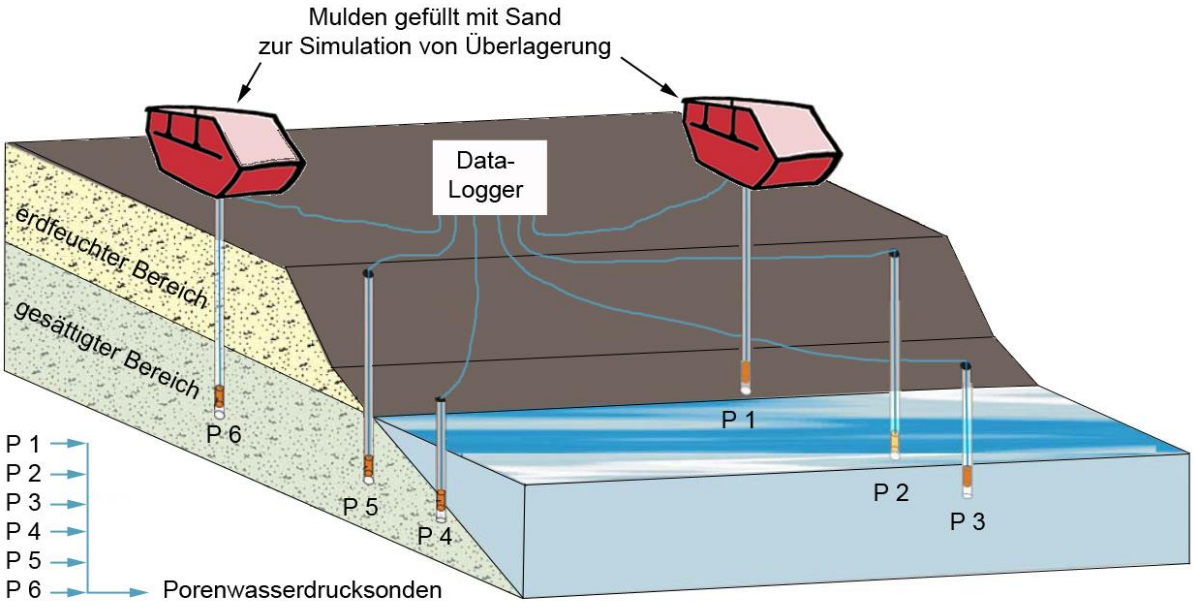


Abb. 3-8: Schematischer Aufbau des Versuchsfeldes zur Bestimmung der Porenwasserüberdrücke mittels künstlich erzeugter Überlagerung

3.4 Untersuchungen im Labor

Neben den Untersuchungen im Deponiefeld wurden umfassende Untersuchungsreihen im geotechnischen Labor durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Proben der Ausstechversuche als auch noch nicht eingebautes Material untersucht. Ziel der Untersuchungen war es, die Ergebnisse aus dem Labor und dem praktischen Deponiebetrieb zu vergleichen. Aus diesen Vergleichen sollen Handlungsanweisungen erarbeitet werden, die den Planungsbüros, den Entsorgern sowie den Deponiebetreibern eine gesicherte Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben ermöglichen.

Bei den labortechnischen Untersuchungen werden vor allem die Parameter

- Kornverteilung,
- Wassergehalt,
- Proctordichte,
- Atmungsaktivität und
- Eluatkriterien
- Durchlässigkeit

untersucht.

3.4.1 Korngrößenverteilung

Alle Böden setzen sich aus verschiedenen Korngrößen zusammen. Die Kornverteilung gibt dabei den Gewichtsanteil der einzelnen Kornfraktionen an der Gesamtprobe wieder. Der Versuch zur Korngrößenverteilung wird nach DIN 18123 durchgeführt. Dabei werden Böden bzw. im vorliegenden Fall das MBA-Material mit Korngrößen über 0,063 mm durch Trennen der vorhandenen Korngruppen mittels Siebung bestimmt. Enthält der zu untersuchende Boden keine Korngrößen unter 0,063 mm, so wird die Trockensiebung angewandt. Bei Böden, die auch Anteile von Korngrößen unter 0,063 mm enthalten, wird hingegen die Korngrößenverteilung durch Siebung nach nassem Abtrennen der Feinteile ermittelt. Da im vorliegenden Fall zwar mit Korngrößen unter 0,063 mm zu rechnen ist, diese aber nur in sehr geringem Umfang vorhanden sind, wurde lediglich eine Trockensiebung durchgeführt. Die gewählten Maschenweiten zur Korngrößenverteilung lagen bei: 0,063, 0,125, 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0, 16,0 und 31,5 mm.

Bei der Kornverteilung von mechanisch-biologisch behandelten Restabfällen aus diversen Behandlungsanlagen ist eine unterschiedliche Kornverteilung zu beobachten. Diese wechselnde Kornverteilung ist ein Grund für die unterschiedliche Verdichtbarkeit der Abfälle. Es wurden in Untersuchungen von MAAK 2001, BIDLINGMAIER ET AL. 1999, DACH 1998 UND ENTENMANN 2005 Trockendichten von 0,71-1,45 Mg/m³ TM erzielt. Ob diese Trockendichten auch im großtechnischen Maßstab zu erreichen sind, ist maßgeblich vom Material und den Verdichtungsgeräten abhängig.

3.4.2 Proctordichte

Verdichtung im Sinne der DIN 18127 ist eine Erhöhung der Trockendichte (Verringerung des Porenanteils) des Bodens durch mechanische Einwirkungen. Ziel des Proctorversuches ist es, die Trockendichte eines Bodens nach Verdichtung unter festgelegten Versuchsbedingungen als Funktion des Wassergehaltes festzustellen. Die Ergebnisse dienen sowohl zur Abschätzung der erreichbaren Dichte des einzubauenden Materials als auch zur Feststellung des Langzeitverhaltens der Einbaudichte von Proben aus dem Deponiekörper. Seine Ergebnisse lassen weiterhin erkennen, bei welchen optimalen Wassergehalten ein Material sich günstig verdichten lässt, um bestimmte Trockendichten zu erreichen.

Nach DIN 18127 wird die Probe in einen Versuchszylinder aus Stahl mit festgelegten Abmessungen durch ein festgelegtes Fallgewicht aus festgelegter Höhe und nach einem festgelegten Arbeitsverfahren verdichtet. Der Versuch besteht dabei aus mindestens fünf Einzelversuchen, die sich jeweils durch einen anderen Wassergehalt der Bodenprobe voneinander unterscheiden. Üblicherweise wird der Proctorversuch an bindigen und nicht bindigen organischen Böden durchgeführt; im Rahmen der Untersuchungen wird er an mechanisch-biologisch behandelten Abfällen durchgeführt. Aus den Versuchen erhält man einen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt w und der Trockendichte ρ_d, aus dem sich die Proctordichte ρ_{Pr} und der optimale w_{Pr} bestimmen lassen.

Die volumenbezogene Verdichtungsarbeit beträgt nach DIN 18127 W≈ 0,6 MNm/m³. Beim modifizierten Proctorversuch beträgt sie hingegen 2,70 MNm/m³. Das Maximum der Kurve aus Abb. 3-9 wird als Proctordichte ρ_{Pr} bezeichnet. Der diesem Punkt zugeordnete Wassergehalt gibt den Proctorwassergehalt w_{Pr} wieder. Je flacher sich die Proctorkurve darstellt, umso geringer ist die Abhängigkeit der Verdichtung vom Wassergehalt. Demnach würde eine horizontale Linie bedeuten, dass die Verdichtung des Abfalls bei gleich bleibender Verdichtungsarbeit vom Einbauwassergehalt unabhängig wäre. Aus Abb. 3-9 ist zu erkennen, dass je trockener der Abfall zur Deponie angeliefert wird, die Verdichtungsenergie umso höher sein muss, um mehr Abfall pro Volumeneinheit einbauen zu können.

Um bei den beschriebenen Einbaubedingungen den Austritt von Press- und Konsolidierungswasser aus dem Abfallkörper zu vermeiden, ist die Einstellung des Wassergehaltes bei der Deponierung von besonderer Bedeutung. Die AbfAblV schrieb zum Einbau die Errichtung eines Versuchsfeldes vor, mit dem eine optimale Verdichtung bei einem Wassergehalt < 35 Gew.-% FS zu erreichen ist. KÜHLE-WEIDEMEIER, DOEDENS, VON FELDE 2001 erreichten je nach untersuchter Kornfraktion Proctordichten σ_{Pr} von 0,700-1,004 Mg/m³ TM bei Proctorwassergehalten w_{Pr} von 23,0 - 40,0 Gew-% FS. Ähnliche Ergebnisse zeigen auch die Untersuchungen von BIDLINGMAIER ET AL. 1999, DACH 1998, COLLINS ET AL. 1998 und ENTENMANN 2005.

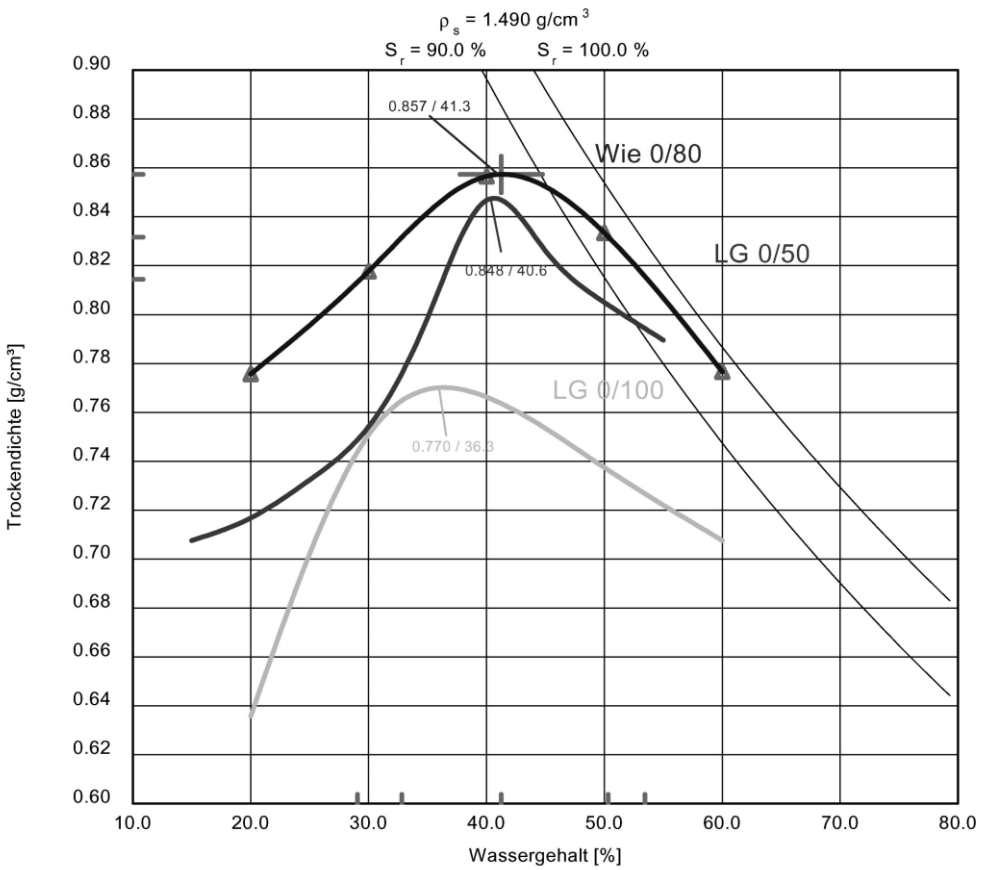


Abb. 3-9: Proctorkurven von Materialien aus der MBA Lüneburg [ENTENMANN 2005]

3.4.3 Bestimmung der Zulässigkeits- und Zuordnungskriterien gemäß Deponieverordnung für die Eluatkriterien

Die Eluatkriterien werden unter Anhang 3 der Deponieverordnung in viele Parameter, wie in Tab. 2-1 bereits ausführlich beschrieben, unterschieden.

Es wurden systematische Parameter der Eluatkriterien untersucht, um mit deren Vergleich von Beginn der Ablagerung Rückschlüsse auf die Sickerwasseremissionen zu gewinnen. Laut DACH 2000 stellen die Grenzwerte für die Eluatkriterien kein Gütekriterium dar, da die Grenzwerte durch mechanisch-biologische Abfallbehandlung ohne größere Probleme erreicht werden können. Lediglich der TOC stellt eine größere Herausforderung für die Vorbehandlung dar. Selbiger TOC im Eluat hat auch entscheidende Aussagekraft bezüglich des Deponieverhaltens. Es können Zusammenhänge zwischen dem mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfall und der ausgetragenen Kohlenstofffracht gefunden werden [SCHEELHASE 2002].

In den MBA-Deponien ist aufgrund der niedrigen TOC-Frachten damit zu rechnen, dass wegen der weitgehenden Stabilität des Materials keine saure Phase mehr eintritt. Somit sind die zu erwartenden organischen Frachten des Sickerwassers deutlich geringer als bei herkömmlichen Hausmülldeponien.

Die Betriebserfahrungen der vergangenen Jahre haben jedoch gezeigt, dass es zum einen Probleme mit der Analyse des TOC bzw. DOC gibt und zum anderen Proble-

me, den Grenzwert TOC verfahrenstechnisch zu erreichen [BOCKREIS, STEINBERG 2006; CUHLS, HAFERMANN, CLEMENS 2006; DACH, WARNSTEDT, MÜLLER 2006; DOEDENS 2006]. Die enormen Schwankungsbreiten bei der Analyse, die in diesem Bereich durch die Heterogenität des Materials sowie die Schwierigkeit einer repräsentativen Probennahme bedingt sind, sollen durch zuvor beschriebene standardisierte Probennahmeverfahren und Vergleich mit der Materialanalyse vor Deponierung vermieden werden.

Für das Untersuchungsprogramm wurden der DOC (vor der Novellierung bestimmt als TOC) sowie die die Eluatkriterien: Kupfer, Nickel, Cadmium, Blei und Zink nach den aufgeführten Normen aus Abb. 2-1 analysiert:

3.4.4 Durchlässigkeitsuntersuchung

Mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfall weist eine grundlegend andere Zusammensetzung auf als nicht vorbehandelter Siedlungsabfall. Somit ergeben sich ebenfalls andere Sickerwasserwegsamkeiten als in bisherigen Deponien. Bevorzugte Sickerwasserwege können nur durch Risse oder ungleichmäßige Verdichtung entstehen. Der Abfluss infolge eines Niederschlagsereignisses kann wie folgt vereinfacht beschrieben werden [FEHRER 2002]:

$$N = A + V \pm R \qquad \text{Gl. 3-1}$$

N Niederschlag
A Abfluss
V Verdunstung
R Rückhalt und Speicherung

Nach dem Einbauwassergehalt von 30-35 % nach alter AbfAblV ist der eingebaute Abfall nahe gehend gesättigt eingebaut. Somit erfolgt keine Speicherung des Sickerwassers im Deponiekörper. Da die Verdunstungsrate im Wesentlichen durch die Umgebungstemperatur und das Sättigungsdefizit der Luft bestimmt wird, kann in erster Näherung die Verdunstung bei einem Regenereignis vernachlässigt werden. So reduziert sich die Gleichung auf:

$$N = A_O + A_U \qquad \text{Gl. 3-2}$$

A_O Oberflächenabfluss

A_U Basisabfluss

Empfehlungen von ENTENMANN 2005 sprechen von einem Einbauwassergehalt und 29 % FS. Somit ist eine vereinfachte Betrachtung mit Oberflächenabfluss und Basisabfluss nicht möglich. Bei solch geringen Einbauwassergehalten ist die Respiration mit zu berücksichtigen.

Die Durchlässigkeit eines Materials wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f, der in Durchlässigkeitsversuchen bestimmt wird, angegeben. Der k_f-Wert wird üblicherweise im Labor mit fallender oder konstanter Druckhöhe durchgeführt. Er wird mittels dem Darcy'schen Gesetz berechnet:

$$k_f = \frac{v}{i} \qquad \text{Gl. 3-3}$$

Bei Durchlässigkeitsversuchen mit konstanter Druckhöhe wird die hydraulische Höhe ϕ während des Versuchs konstant gehalten. In Versuchen mit fallender Druckhöhe ändert sich hingegen die hydraulische Höhe ϕ während des Versuchs mit der Zeit t. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f wird üblicherweise im gesättigten Zustand angegeben.

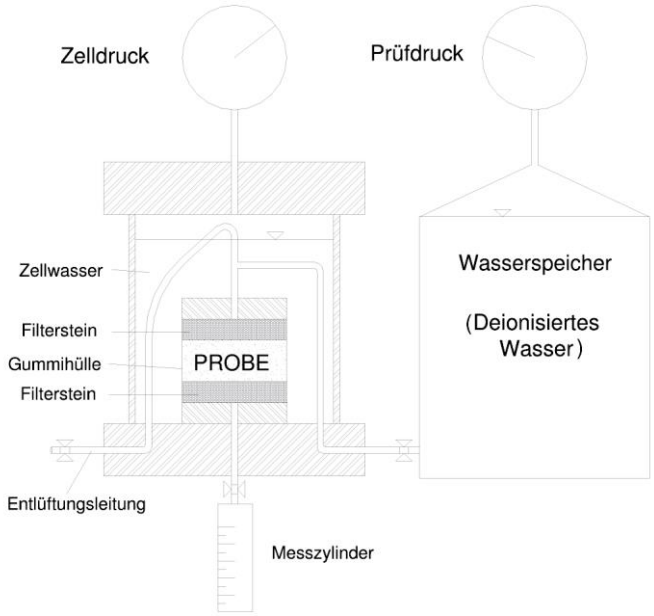


Abb. 3-10: Schema einer Dreiaxialzelle [FEHRER 2002]

Bei der Dreiaxialzelle wird ein Zelldruck erzeugt, der die Probe isotrop belastet (Abb. 3-10). Der Zelldruck wird dabei durch Druckluft erzeugt und wirkt auf das sich in der Zelle befindliche Zellwasser. Die Probe hat einen Durchmesser von 100 mm und befindet sich in einer Gummihülle in der Zelle. Durch die Druckluft wird die Gummihülle mit Druck beaufschlagt und presst sich an die Probe, wodurch Umläufe des umströmenden Wassers um die Probe herum verhindert werden. Es ist darauf zu achten, dass der Zelldruck so groß gewählt ist, dass die Probe während der Durchströmung bruchsicher bleibt. Die Durchströmung der Probe erfolgt vertikal von unten nach oben. Die durchgeströmte Menge wird aufgefangen und gemessen. Die Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit erfolgte nach DIN 18130 Teil 1.

Neben der Ermittlung der Durchlässigkeit mit dem standardisierten Verfahren der Dreiaxialzellen wurde das mechanisch-biologisch vorbehandelte Material noch mittels eines modifizierten Durchlässigkeitsversuchs untersucht. Ziel war es größere Durchmesser und längere Proben zu untersuchen.

3.4.5 Modifizierte Durchlässigkeitsuntersuchung mittels statischer Wassersäule

Bei der modifizierten Durchlässigkeitsuntersuchung, wurde die zu untersuchende Probe in einem eigens dafür hergestellten Rohr gemäß dem Standard Proctor-Versuch verdichtet. Hierzu wurde gemäß der Norm Material in den „Proctorzylinder“ gegeben und anschließend mit 25 Schlägen mit einem 2,5 kg schweren Hammer verdichtet. Der Vorgang wurde so lange wiederholt bis eine Höhe von ca. 200mm der zu untersuchenden Probe erreicht war.

Anschließend wurde die Probe auf eine Wasserdurchlässige Unterlage gestellt. Die in das Rohr eingebaute Probe wurde dann mit ca. 150mm Wassersäule überschüttet. Die Messung der Zeit begann nach kompletter Füllung des Rohres. Der Durchlässigkeitsbeiwert der gesättigten Probe wurde wie folgt berechnet. [PIMOLTHAI, 2010]

$$k = \left(\frac{a \cdot L}{A \cdot t}\right) \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_3}\right) \qquad \text{Gl. 3-4}$$

a = Fläche der Wassersäule (cm²)

h_1 = Anfangshöhe der Wassersäule (cm)

h_3 = Endhöhe der Wassersäule (cm)

t = Zeit (s)

L = Länge der Probe (cm)

A = Fläche der Probe (cm²)

k = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

4 Herkunft und Charakterisierung des mechanisch- biologisch behandelten Abfalls

Die ähnlichen Abfallbehandlungsverfahren und die Vorgaben der Zuordnungskriterien des Anhanges 2 der ehemaligen AbfAblV bzw. des Anhangs 3 der DepV führen zu einer Vergleichmäßigung des Deponieinputs. Bisher vorliegende Untersuchungen zeigen aber auch, dass alle Größen weiterhin von den abfallspezifischen (z.B. Korngröße) sowie örtlichen Randbedingungen (z.B. Witterung, Einbaugeräte, usw.) abhängig sind. Aus diesem Grund sind auch in Zukunft Einzeluntersuchungen für den jeweiligen Deponiebetrieb notwendig. Im Rahmen dieser Einzeluntersuchungen wird im Folgenden eine detaillierte Beschreibung der Abfallbehandlung und der anschließenden Deponierung des Siedlungsabfalls des Testfeldes vorgenommen. Aus den ersten Erfahrungen und Problemen des Einbaus wurde das zuvor beschriebene Untersuchungsprogramm für das Testfeld erstellt.

Ziel der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung ist eine umweltverträgliche Aufbereitung und Behandlung von Restmüll und ähnlichen Abfällen: einerseits für eine emissionsarme Ablagerung und andererseits für die Gewinnung einer heizwertreichen Fraktion. Durch den weitgehenden Abbau der reaktiven organischen Substanz und den Aufbau von stabilen organischen Verbindungen (Huminstoffe) kommt es zu einer Stabilisierung der verbleibenden Organik. So wird die Gasbildung deutlich reduziert; zurück bleibt ein biologisch weitgehend stabiles Material.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung ASA e.V. existieren in der Bundesrepublik Deutschland 50 mechanisch-biologische Behandlungsanlagen. Eine Anlage befindet sich derzeit in der Planungs-/Bauphase. Inklusive der in Planung bzw. Bau befindlichen Anlage beträgt die zukünftige maximale Gesamtkapazität an mechanisch-biologischer Behandlungs- bzw. Anlagenkapazität in Deutschland: 5.703.600 Mg/a. [ASA, 2005]

Die mechanisch-biologische Behandlungsanlage, in der das Deponat des Testfeldes behandelt wurde, besteht seit 1985 und wurde bis 1997 anderweitig genutzt. Für die neue Nutzung als mechanisch-biologische Behandlungsanlage musste die Anlage umfassend modifiziert werden. Mit dem Bau des Methanisierungsreaktors wurde 1997 begonnen; 1998 mit dem Bau der Nachrotte. Seit Fertigstellung und Inbetriebnahme der Vergärung im Jahre 1999 läuft die Anlage mit einer Kapazität von 24.000 Mg/a. Am 1. Januar 2005 wurde die Kapazität aufgrund gestiegener Abfallmengen um ca. 15.000 Mg/a auf insgesamt ca. 41.000 Mg/a gesteigert. Um diese Jahresmenge in der bisherigen Anlage behandeln zu können, wurde ein umfangreicher Anlagenumbau notwendig.

4.1 Abfallbehandlung

In der Anlage werden die heizwertreichen und an mikrobiell abbaubarer, organischer Substanz armen Anteile des Abfalls bei der Behandlung abgetrennt und einer thermischen Verwertung zugeführt. Die verbleibenden heizwertarmen, dafür aber an mik-

robiell abbaubarer organischer Substanz reichen Anteile sollen so biologisch behandelt werden, dass sie die Ablagerungskriterien der Abfallablagerungsverordnung (AbfAblV /DepV) einhalten und anschließend auf einer Deponie entsorgt werden können.

Nach der mechanischen Aufbereitung des Siedlungsabfalles mittels einer Cascadenmühle, Siebung, Sichtung, FE- und NE-Abscheider sowie der biologischen Intensivbehandlung in der Restabfallbehandlungsanlage (RABA), dessen Produkt ein entwässerter Hydrolyse-Reststoff ist, erfolgte eine 11-tägige geschlossene Nachrotte in den Rotteboxen und eine anschließende 10- bis 11-wöchige offene Nachrotte auf der teilweise überdachten Rottefläche.

Die Rotteboxen wurden auf Grund ihres veränderten Verwendungszwecks technisch höherwertig ausgestattet. Sie wurden besser gegen Wasseraustritte abgedichtet. Außerdem kann im Gegensatz zu den Bioabfallrotteboxen das Abgas während des Befüllens abgesaugt werden, so dass bei der Befüllung mit Hydrolyse-Reststoff geringere Emissionen auftreten als bei der Befüllung der restlichen Boxen mit Bioabfall.

Wie zuvor beschrieben, wurde aufgrund gestiegener Abfallmengen ein erneuter Umbau der Anlage notwendig. Die Abfälle werden in der neuen Anlage über den auch bisher verwendeten Anlieferungsbereich mit Schleusen bei der RABA angeliefert. Die Beschickung der Anlage erfolgt zunächst mit dem bestehenden System. Es zweigt aber kurz vor dem Eintrag in die Cascadenmühle ein Gurtförderer ab, der den Abfall innerhalb des Gebäudes der RABA in einen eingehausten Tiefbunker bei der neuen Anlage nach dem VM-Press-Verfahren fördert. Nur bei Ausfall des VM-Press-Verfahrens wird der Abfall an der Abzweigung weiter in Richtung der Cascadenmühle gefördert.

Aus dem Tiefbunker bei dem VM-Press-Verfahren wird der Abfall mit einem Greiferbagger aufgenommen und auf die Presse aufgegeben. Die trockene Fraktion wird über Gurtförderer zu einem Verladesystem verbracht und dort in Container verladen. Die feuchte Fraktion wird mittels eines neuen Transportbandes zu dem bestehenden Transportsystem in Richtung Vergärungsanlage gefördert. Die Presse einschließlich der zu- und abführenden Systeme steht in einer Halle, aus der das Abgas, analog dem Abgas aller anderen Einrichtungen der RABA, abgesaugt und der Abgasbehandlungsanlage zugeführt wird.

Da die Abfallmenge bei Nutzung des VM-Press-Verfahrens nach der untersuchten Stoffstrombilanz trotz des zusätzlichen Abfalls gegenüber dem derzeitigen Zustand bei Erhöhung des Anteils zur thermischen Verwertung abnimmt, kann die Behandlungszeit im Gärreaktor und damit die Abbauleistung im Gärreaktor gegenüber dem derzeitigen Zustand erhöht werden.

Nach der Vergärung und der Entwässerung wird der Hydrolyse-Reststoff in Container verladen. Es werden offene Container verwendet, zur nachrotte transportiert und dort im geschlossenen Anlieferungsbereich, der ohne Schleusen gebaut wurde, abgekippt. Die fehlenden Schleusen werden durch einen ausreichenden Luftwechsel im Anlieferungsbereich und durch eine entsprechende Steuerung des Einfahrtstores ausgeglichen. Hierzu wurde zusätzlich zum bestehenden Einfahrtstor ein Schnell-

lauftor eingebaut. Dieses Tor wird nur kurz bei der Einfahrt oder der Ausfahrt eines Fahrzeuges geöffnet, ansonsten ist es geschlossen.

Im Anlieferungsbereich wird der Abfall mittels Radlader aufgenommen und auf eine Dosiereinrichtung aufgegeben. Von dieser wird der Abfall auf das Eintragssystem gegeben. Mit dem nicht gekapselten Eintragssystem wird der Abfall aus dem Anlieferbereich in eine nicht geschlossene Halle über den Rotteboxen gefördert und von dort in eine der Rotteboxen abgeworfen. Während der Befüllung ist das Dach der Rottebox geöffnet. Die Rottebox wird während der Zeit, in der das Boxendach geöffnet ist, durch das dort vorhandene System über die Belüftungsrinnen im Boden der Box abgesaugt.

Der Luftaustausch in der Halle über den Rotteboxen, in der sich das nicht gekapselte Eintragssystem befindet, erfolgt dadurch, dass diese Halle nicht den gesamten Raum dicht umschließt, sondern in den Wänden Austauschflächen zur Umgebungsluft besitzt. Eine Abdichtung und Absaugung der Halle ist aufgrund des großen Hallenvolumens nicht notwendig. Außerdem ist die Einkapselung des bestehenden Eintragssystems technisch nur sehr aufwendig möglich, da die Verfahrbarkeit des Eintragssystems erhalten bleiben muss. Eine Einkapselung ist allerdings auch nicht erforderlich, weil beim Eintrag in die Boxen nur vernachlässigbare Emissionen im Vergleich zur Gesamtemission bei der Durchführung der MBA entstehen.

In den Rotteboxen findet eine 14-tägige erste Phase der geschlossenen Nachrotte mit dem Hauptziel der Aerobisierung des Hydrolyse-Reststoffes statt. Danach wird das Rottegut aus den Rotteboxen entnommen, im Anlieferungsbereich erneut auf das Eintragssystem aufgegeben und in andere Rotteboxen eingetragen. Dort findet eine etwa 5- bis 6-wöchige zweite Phase der geschlossenen Nachrotte statt. Während der beiden Phasen wird das Rottegut von Schnecken durchfahren, um einen Sauerstoffeintrag und eine gleichmäßige Rotte zu erreichen. Am Ende der zweiten Phase wird der Zuordnungswert des Anhangs 2 der AbfAblV /Anhang 3 der DepV für die Atmungsaktivität sicher eingehalten. Von einer Einhaltung des Zuordnungswertes des Anhangs 2 der AbfAblV /Anhang 3 DepV für den im Eluat bestimmten TOC kann hingegen nicht sicher ausgegangen werden. Bis zur sicheren Unterschreitung dieses Wertes ist eine weitere dritte Nachrottephase erforderlich.

Die dritte Nachrottephase wird auf einer überdachten, ansonsten aber offenen Fläche durchgeführt. Bei dieser etwa 4-wöchigen dritten Nachrottephase entstehen nur noch sehr geringe Emissionen, da im Abfall nach der zweiten Nachrottephase kaum noch mikrobiell abbaubare organische Substanzen vorhanden sind. Dies ist dadurch belegt, dass die Werte für die Atmungsaktivität (AT_4) von 5 mg O_2/g TM vor der dritten Nachrottephase sicher unterschritten werden. Nach dem Aufsetzen auf die Nachrottefläche finden bis zum Abtransport auf die Deponie keine Umsetzvorgänge mehr statt. Aufgrund der nur noch sehr geringen Sauerstoffzehrung ist zudem nur noch eine sehr geringe Luftmenge zur Belüftung erforderlich. Entsprechend tritt kaum Abgas aus den Mieten aus.

4.1.1 System und Konzept der Abfallbehandlung

Da das gesamte Material des Testfeldes aus dem Anlagenkonzept vor dem letzten Umbau der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung stammt, wird nachfolgend das ehemalige Anlagenkonzept nochmals detailliert beschrieben.

Seit dem 01.01.2002 wurde die MBA-Anlage mit den Verfahrensstufen

- mechanische Aufbereitung (Cascadenmühle, Siebung, Sichtung) in der Restabfallbehandlungsanlage (RABA),
- biologische Intensivbehandlung mittels Vergärung und anschließender Entwässerung in der RABA,
- geschlossene Nachrotte des bei der biologischen Intensivbehandlung entstehenden Hydrolyserestoffes (HR) in den Rotteboxen,
- offene Nachrotte auf der teilweise überdachten Nachrottefläche neben den Rotteboxen

für die Behandlung von Hausabfällen betrieben. [INGENIEURGRUPPE RUK GMBH 2005]

Abb. 4-1 zeigt ein Fließdiagramm des Zustandes der mechanisch-biologischen Behandlungsanlage vor Abschluss der Umbaumaßnahmen im Jahr 2005. Dargestellt ist ein Fließbild für die Abfallbehandlung und die Abgasbehandlung sowie die Werte der dabei auftretenden Emissionen. [INGENIEURGRUPPE RUK GMBH 2005]

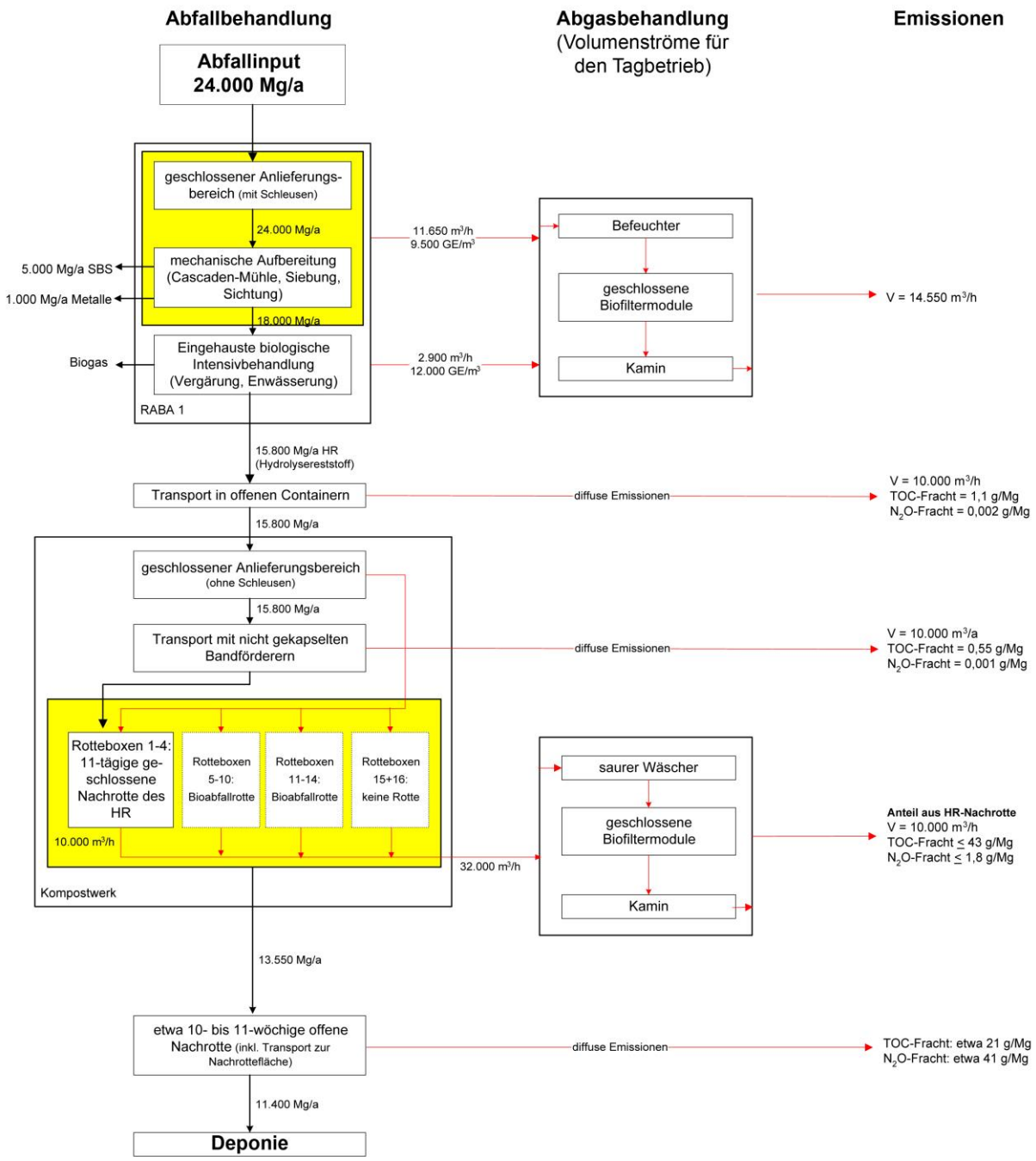


Abb. 4-1: Fließbild der mechanisch-biologischen Behandlungsanlage vor den Umbaumaßnahmen [INGENIEURGRUPPE RUK GMBH 2005]

4.2 Ablagerung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls auf der Deponie

Zwischen 2004 und 2006 wurde ein neues 3,5 ha großes Deponiefeld für MBA-Abfälle geplant und realisiert. Bis zum Abschluss der Bauarbeiten wurde der MBA-Output auf einem gesonderten Teilabschnitt eines Deponiefeldes für unbehandelten Hausmüll abgelagert. Auf diesem Teil der Deponie wurde bereits seit Oktober 2002 AbfAblV konformes Material abgelagert.

4.2.1 Anlieferung

Nach mechanisch-biologischer Behandlung des Siedlungsabfalls und abschließender offener Nachrotte erfolgt die Anlieferung des Materials auf der Deponie mittels Containerfahrzeugen. Die Container werden oberhalb der Einbaufläche abgekippt, anschließend wird das Material von einem Radlader zu einem Berg aufgeschüttet. Bis eine ausreichende Menge bei entsprechender Witterung für den Materialeinbau vorhanden ist, bleibt der MBA-Output als Aufschüttung abgedeckt liegen. Die Abdeckung erfolgt durch eine „Silofolie“ mit folgenden Abmaßen: L= 50m, B= 14m, T= 200µm. Diese wird dachziegelartig aufgelegt, um das Eindringen von Oberflächenwasser zu verhindern. Damit bei Wind oder Sturm die Folie auf dem Deponiekörper liegen bleibt, wird sie mit Altreifen oder Gurtförderbändern beschwert.

4.2.2 Materialsammlung

Liegt dem Deponiebetreiber eine ausreichend lange Schönwettervorhersage vor und ist genügend Material vorhanden, wird die Folie von der Materialaufschüttung und der Einbaufläche entfernt. Da die Entfernung der Beschwerung (durch Reifen und Gummibänder) und der Folien händisch erfolgen muss, nimmt diese Arbeit zirka 12 bis 16 Mannstunden in Anspruch. Mit der in der AbfAblV geforderten Abdeckung vor Novellierung der AbfAblV war somit ein enormer Arbeitsaufwand verbunden.

Abb. 4-2: Dünnschichteinbau mit einer Raupe

4.2.3 Materialeinbau

Probleme beim Befahren der Einbaufläche traten bei MAAK 2001 und BEHREND 2002 auf. Teilweise sanken hier die Einbaugeräte wie schwere Kompaktoren in das MBA-Material ein. Gerade beim Anstieg des Wassergehaltes aus betrieblichen Gründen ist eine Staunässe an der Oberfläche des abgelagerten Materials zu beobachten. Einen besonderen Stellenwert bezüglich des Wasserhaushaltes einer MBA-Deponie nimmt die oberflächige Profilierung ein.

Um zu Beginn der Ablagerung eine möglichst große Ablagerungsfläche gegen eindringendes Niederschlagswasser zu schützen, wurde der Abfall mit einem Mindestgefälle von einem Prozent eingebaut. Die nach AbfAblV geforderten 5-10 %Gefälle wurden, sobald es die Höhe der Profilierung zuließ, hergestellt. Der Einbau des MBA-Outputs erfolgt auf der Deponie mittels einer Raupe in Deponieausführung. Die Raupe weist als Kennwerte ein Gewicht von 22 Mg und eine Kettenbreite von 60 cm auf. Mit der Raupe und zusätzlich mit Hilfe eines Radladers wird der Abfall im hochverdichteten Dünnschichtverfahren auf den Deponiekörper aufgebracht.

Abb. 4-3: Sackbildung nach Verdichtung mit einer Schaffußwalze (Abdruck 15x12 cm)

Der Siedlungsabfall wird mit einer Schichtstärke von circa 40 cm auf den Deponiekörper aufgebracht (Abb. 4-2). Dabei wird das Material bereits während des Einbaus mit der Planierraupe mehrfach überfahren und somit vorverdichtet. Anschließend wird das vorverdichtete Material mit einer Schaffußwalze hochverdichtet.

Durch den Walzprozess mit eingeschalteter Vibration wird das Material deutlich zusammengedrückt. Beim Einbau des Materials unmittelbar über der Basisabdichtung wird das Rüttelwerk aus Sicherheitsgründen noch nicht zugeschaltet, da es ansonsten zu einer Beschädigung der Basisabdichtung kommen könnte. Erst ab einer Einbauhöhe von zwei Metern wird die Vibration dem Walzprozess zugeschaltet. Der verwendete Walzenzug wiegt circa 12,9 Megagramm und hat eine Arbeitsbreite von 2,1 Metern. Um die vorgeschriebene Proctordichte zu erreichen, muss das abgelagerte Material mindestens dreimal von dem Walzenzug überfahren werden. Dieser Wert wurde in einem Testfeld gemäß AbfAblV ermittelt.

Durch die Verdichtung mit der Schaffußwalze entsteht eine profilierte Materialoberfläche. Um diese Sackbildung (Abb. 4-3) durch die Schaffüße vor der Abdeckung der Deponie zu vermindern, wird der Deponieabschnitt noch einmal mit einer Glattmantelwalze überfahren. Durch diesen Prozess entsteht wieder eine glatte Abfalloberfläche, und die Gefahr von Rissen in der Folie aufgrund von Übergehung der Plane wird minimiert (Abb. 4-4).

Abb. 4-4: Mit Glattmantelwalze geglättetes Material (Größtkorn 35mm)

4.2.4 Abdeckung des eingebauten Materials

Nach Beendigung des Materialeinbaus muss nach AbfAblV Anhang 3 der Einbaubereich arbeitstägig mit einem wasserundurchlässigen Material abgedeckt werden. Dies erfolgte mittels Folien, die in den Randbereichen und den Flächen ausreichend punktuell durch Beschwerung, beispielsweise mit Sandsäcken oder Altreifen, gegen Windeinwirkung geschützt wurden. Bei der Abdeckung ist darauf zu achten, dass die Folien in den Übergängen in Richtung des Gefälles dachziegelartig überlappt werden, so dass kein Niederschlagswasser unter die Abdeckung eindringen kann. Das Abdecken der Einbaufläche von 50x25 Metern erfordert ca. 14 bis 16 Arbeitsstunden.

Mit Novellierung der Abfallablagerungsverordnung wurde die verpflichtende arbeitstägige Abdeckung der Einbaufläche abgeschafft.

4.3 Probleme und Auswirkungen auf den Deponiebetrieb

Zur Ermittlung der Dichtwirkung von MBA-Abfällen wurden bereits Untersuchungen im Labormaßstab an der Universität Trier und der Fachhochschule Trier durchgeführt. Dabei wurde in der Anfangszeit der Durchlässigkeitsversuche häufig eine Abnahme des k_f-Wertes festgestellt. Ursachen hierfür waren zum einen die Aufsättigung und zum anderen die Konsolidierung aufgrund der Seitendruckeinwirkung. Nach dieser anfänglichen Abnahme des k_f-Wertes reagierten die MBA-Materialien sehr empfindlich auf zunehmende hydraulische Gradienten, d.h., mit zunehmenden Gradienten nahm die Durchlässigkeit zu. Ebenso konnte festgestellt werden, dass der größte vorhandene Korndurchmesser einen entscheidenden Einfluss auf die Verdichtbarkeit des Materials hat.

Ziel dieser Arbeiten war es, bestimmte ausgewählte Abfälle hinsichtlich ihrer Eignung als Abdichtungsmaterialen zu untersuchen. Weiterhin sollte der Wassertransport in nicht homogenen, relativ grobkörnigen Abfallgemischen zur Bewertung der Durchlässigkeit mechanisch behandelter Abfälle mit Hilfe eines neu entwickelten Wassertransportmodells untersucht werden [MINLIANG XIE 2002]. Da die Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt wurden, sollen nun in einem nächsten Schritt Untersuchungen im halbtechnischen und technischen Maßstab durchgeführt werden. In diesen Untersuchungen soll bewiesen werden, dass die mechanisch-biologische Abfallbehandlung sowohl in ökologischer als auch in ökonomischer Hinsicht konkurrenzfähig zur Abfallverbrennung ist.

Erste Ergebnisse aus den Materialeinbau begleitenden Untersuchungen im großtechnischen Maßstab zeigten starke Probleme mit Staunässe unterhalb der aufgebrachten Folie. Nach dem Aufdecken der Einbaufläche (Abb. 4-5), auf der bereits mehrfach MBA-Output abgelagert wurde, zeigte sich eine sehr nasse und schlammige Oberfläche. Eine Verschlammung der Oberfläche wurde auch von MAAK, D.; POSER, H. 1999 beobachtet. Die Verschlammung ist aller Voraussicht nach auf den hohen Einbauwassergehalt von 40 % FS zurückzuführen.

Abb. 4-5: Stauwasser unterhalb der Folie

In Abb. 4-5 ist deutlich die feuchte Oberfläche zu erkennen. Die Wasserstauung hatte zur Folge, dass so lange kein Material in diesem Deponieabschnitt eingebaut werden konnte, bis er in den Sommermonaten wieder aufgetrocknet war. Das MBA-Material wurde daher in diesem Zeitraum oberhalb dieses Deponieabschnittes eingebaut.

Untersuchungen von GALLENKEMPER, ROHRING 2007 zeigten, dass auf den Deponien Münster und Ennigerloh, die keine Oberflächenabdichtung nach Materialeinbau erhalten hatten, ebenfalls ein solches Stauwasser auftrat. Die Untersuchungen von Gallenkemper und Rohring zeigten, dass das Regenwasser in den Deponiekörper versickert und dort eine ca. 0,1 m bis 0,2 m starke wassergesättigte Schicht bildet. Wenn diese Schicht mittels einer Raupe abgeschoben wird, so findet man unter dieser bis zu 0,2 m starken Schicht wieder trockenes MBA-Deponat. Die Beobachtungen von Gallenkemper und Rohring zeigten auch, dass nur bei sehr starken Regenereignissen Wasser auf der mit 5-% Gefälle angelegten Deponie stehen blieb.

Die zuvor beschriebenen Wassereinstauungen unterhalb der Folie sind auf die Kondenswasserbildung unterhalb der Folie zurückzuführen. Durch die Folie konnte das Wasser, welches im MBA-Deponat eingeschlossen ist, nicht verdunsten und führte so dazu, dass die Deponieoberfläche nicht befahrbar war.

Neben den negativen Begleiterscheinungen der Wasseransammlungen an der Deponieoberfläche, die durch das Aufbringen der Folien begründet sind, konnte ein weiterer negativer Nebeneffekt festgestellt werden. Auf Deponieabschnitten, auf denen längerfristig kein neues Material abgelagert wurde, bildete sich unterhalb der Folie in

den Sommermonaten ein reges Pflanzenwachstum. Teilweise durchdrangen palmenähnliche Gewächse oder Schilf die Folie und wuchsen außerhalb des abgedeckten Deponiekörpers weiter (vgl. Bilder im Anhang).

Die mit Novellierung der Abfallablagerungsverordnung nicht mehr bindend vorgeschriebene Abdeckung der MBA-Deponie ist eine vom Gesetzgeber ermöglichte Maßnahme, um einen reibungslosen Deponiebetrieb sicherstellen zu können. Hierdurch kann das durch Regenereignisse in den Deponiekörper eingedrungene Regenwasser bei guter Witterung verdunsten, und einem neuen Materialeinbau steht nichts im Wege.

Nicht in Betrieb befindliche Deponieabschnitte sollten jedoch aufgrund der eventuell entstehenden Porenwasserdrücke (vergl. Kapitel 5.1.3) auch zukünftig mit einer wasserdichten Abdeckung versehen werden. Diese abgedeckten Deponieabschnitte müssen dann bei Bedarf für einen erneuten Materialeinbau rechtzeitig abgedeckt werden, damit über den Vedunstungsprozess das gestaute Kondenswasser den Deponiekörper verlassen kann.

4.4 Zusammensetzung des Restabfalls und Abfallkennwerte

Bisherige Erkenntnisse aus der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen führten zu der Erkenntnis, dass durch das neue Material die Ablagerungsdichte steigt, die Wasserdurchlässigkeit abnimmt sowie eine veränderte Scherfestigkeit eintritt. Diese veränderten Randbedingungen des Deponieinventars gegenüber herkömmlich unbehandelt abgelagertem Hausmüll werden nachfolgend für das Material des Testfeldes beschrieben.

Wie alle Materialien setzt sich auch Abfall aus verschiedenen Korngrößen zusammen. Die Kornverteilung gibt dabei den Gewichtsanteil der einzelnen Kornfraktionen an der gesamten Analyseprobe an. Für das untersuchte Material wurde eine Trockensiebung veranschlagt. Nachteil der Trockensiebung ist, dass der Feinkornanteil kleiner Durchmesser 0,063 mm nicht berücksichtigt wird. In der einschlägigen Literatur wird dieser Kornfraktion ein entscheidender Einfluss auf die Durchlässigkeitsbeiwerte und andere bodenmechanische Kennwerte zugesprochen. Da der Anteil der Kornfraktion kleiner 0,063 mm nach Trockensiebung sehr gering ausfiel, wurde auf eine weitere Schlämmanalyse verzichtet. [MEHLHORN, G. 1995; MÖLLER, G. 1998]

Die mittels Trockensiebungen [DIN 18123, 1996] ermittelte Korngrößenverteilung ist in Abb. 4-6 dargestellt. Anhand der Sieblinie kann eine Benennung und Klassifizierung des Materials in Anlehnung an die bautechnische Vorgehensweise erfolgen. Der Feinkornanteil (d < 0,063 mm) liegt bei 1,1 % und damit unter der 5 %-Grenze. Somit wird das Material des Testfeldes als nicht bindig eingestuft.

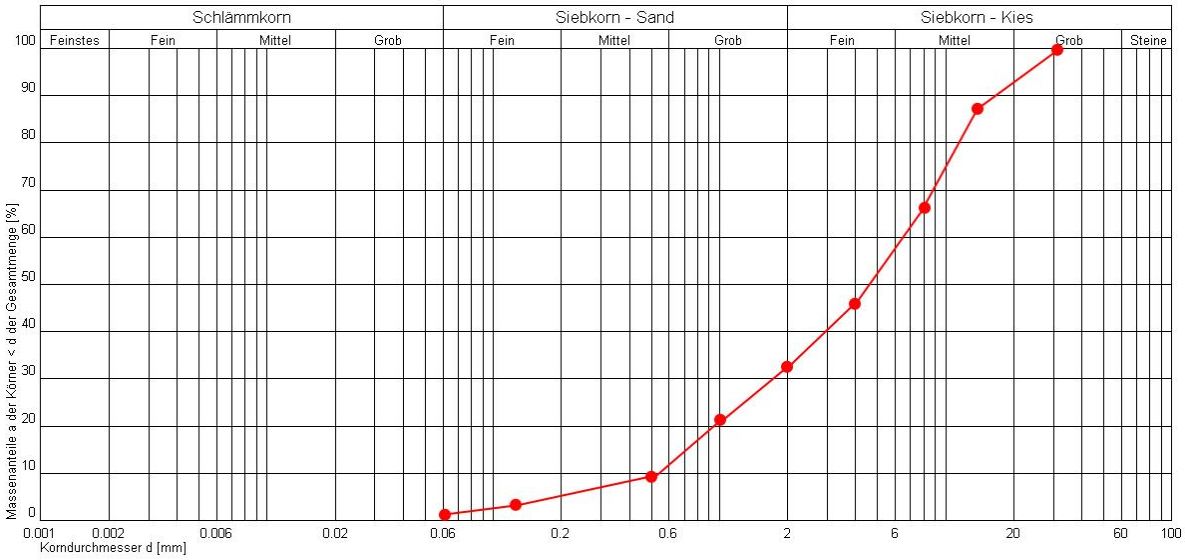


Abb. 4-6: Korngrößenverteilung des MBA-Materials nach DIN 18123

Die Höhe der erreichten Verdichtung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen ist im Wesentlichen vom Wassergehalt des zu deponierenden Materials abhängig und unterliegt prinzipiell ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie mineralische Böden. Aus diesem Grund können Proctorversuche nach DIN 18127 eine grundsätzliche Aussage zur Beschreibung des Verdichtungsverhaltens zulassen. Der Verlauf der Proctorkurve und die Proctorkennwerte sind für ein Material charakteristisch und können je nach Wert für die Klassifizierung genutzt werden. Diverse Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Proctordichte und der Proctorwassergehalt von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen sehr stark schwanken können.

Üblich ist ein Materialeinbau auf der trockenen Seite der Proctorkurve. Dies kompensiert mögliche Niederschläge während des Materialeinbaus. Zur Untersuchung des Verdichtungsverhaltens wurden In-situ-Untersuchungen auf dem Testfeld durchgeführt. Begleitend zu den Untersuchungen im Testfeld wurden Proctorversuche im Labor durchgeführt.

Beim Materialeinbau mittels Raupe und Schaffußwalze wurden im vorliegenden Testfeld Einbautrockendichten von 1,11 bis 1,14 g/cm³ gemessen. Diese Werte konnten bei einem Einbauwassergehalt von 35-40 % erreicht werden.

Die wichtigsten Zuordnungskriterien, die im Wesentlichen die Ablagerung des angelieferten Materials bestimmen und in den nachfolgenden Kapiteln Rückschlüsse auf Abbauraten im Deponiekörper zulassen sollen, wiesen im Mittel die Werte aus Tab. 4.1 auf.

Tab. 4-1: Auszug aus den Mittelwerten der Anlieferungsanalysen des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls

Parameter	Einheit	1. Halbj. 2003	2. Halbj. 2003	1. Halbj. 2004	2. Halbj. 2004	1. Halbj. 2005	2. Halbj. 2005	1. Halbj. 2006
AT_4	mg O_2/g	2,68	2,57	3,03	2,43	2,03	2,13	2,21
TOC Feststoff	%	16,9	17,0	16,9	16,9	17,2	16,9	17,0
pH-Wert	-	7,21	7,38	7,57	7,48	7,66	7,41	7,37
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	1990	2200	1980	2330	2710	2690	2500
TOC im Eluat	mg/l	159,6	210,5	151,3	193,6	226,9	180,2	216,3

Alle Werte beziehen sich auf die FM

4.5 Zusammenfassende Charakterisierung des Untersuchungsmaterials

Das in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage anfallende zu deponierende Material entsprach dem vollen Umfang der Zuordnungskriterien der Abfallablagerungsverordnung. Hierzu zählten die damals noch notwendige arbeitstägige Abdeckung des Deponiekörpers mittels wasserundurchlässigem Material, hochverdichteter Materialeinbau im Dünnschichtverfahren sowie die Profilierung des Einbaubereiches mit einem Gefälle zwischen 5 und 10% und der Einbau bei einem bestimmten Wassergehalt. Weiterhin wurden die Abfälle nicht mit anderen Materialien vermischt, sodass ausschließlich MBA-Deponat im Versuchsfeld abgelagert wurde.

Die Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen gemäß Anhang 3 der Abfallablagerungsverordnung [ANONYM 2001] wurden mit Inkrafttreten der Deponieverordnung am 16. Juli 2009 ersatzlos gestrichen [ANONYM 2009]. Diese Maßnahme wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit Deregulierungsmaßnahmen begründet [BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2008]. Die Streichung der Anforderungen lässt aufgrund der Tatsache, dass das Testfeld den Anforderungen des Anhanges 3 der AbfAblV entsprach, den Rückschluss zu, dass die Deregulierungsmaßnahmen sinnvoll angesetzt wurden.

Ein Vergleich des im Testfeld abgelagerten Materials mit Material aus anderen Behandlungsanlagen hat gezeigt, dass das Größtkorn der Siebanalyse von 35mm deutlich kleiner ist als das von anderen Behandlungsanlagen. Das Größtkorn hat für viele geotechnische Parameter eine wichtige Bedeutung. Untersuchungen von FEHRER 2002 zeigten, dass mit abnehmender Stückgröße einerseits der Brennwert und andererseits der Glühverlust abnehmen. Weiterhin sinkt mit abnehmender Stückgröße der TOC- und der Wassergehalt. [FEHRER 2002]

Abschließend ist festzuhalten, dass das Testfeld bereits seit Oktober 2002 mit AbfAblV-konformem Material betrieben wurde und somit mittels der Ergebnisse aus Kapitel 5 hinreichend Rückschlüsse auf Abbauraten und Langzeitverhalten des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls gezogen werden können.

5 Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Langzeitverhalten von MBA-Deponien

Die nachfolgenden Ergebnisse sind das Resultat aus Untersuchungen im Testfeld und im Labor. Die Arbeiten erstreckten sich über den Zeitraum März 2004 bis Januar 2007. Nachfolgend werden für jeden durchgeführten Versuch die Ergebnisse dargestellt.

Ziel ist es, das Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen nach der Ablagerung aufzuzeigen. Mittels der Ergebnisse sollen Rückschlüsse auf das Austragsverhalten und die Austragsgeschwindigkeit gezogen werden. Weiterhin sollen aus den Ergebnissen konkrete Rückschlüsse auf den Deponiebetrieb gezogen werden.

5.1 Untersuchungen im Deponiekörper

Die nachfolgenden Ergebnisse können grob unter dem Punkt Emissionsverhalten einer MBA-Deponie zusammengefasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Emissionsverhalten vielschichtig sein kann. Die wesentlichen Emissionen einer Deponie sind die Temperaturentwicklung im Deponiekörper, die Deponiegasbildung sowie der Sickerwasserpfad. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Parameter Temperatur, Deponiegas im Untergrund und an der Deponieoberfläche dargestellt. Neben den direkten Emissionen des Deponiekörpers wird noch ein wesentlicher Parameter der Standsicherheitsbetrachtung untersucht. Hierbei handelt es sich um die im freien Porenraum entstehenden Porenwasserdrücke.

5.1.1 Temperaturmessung

In den mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen wird das vom Abfall ausgehende Emissionspotenzial weitgehend abgebaut. Jedoch zeigen auch andere Untersuchungen, dass von den behandelten Abfällen immer noch ein nicht zu unterschätzendes Emissionspotenzial ausgeht. Untersuchungen von KÜHLE-WEIDEMEIER (A) 2004 zeigten Temperaturentwicklungen in MBA-Deponien von bis zu 58°C. Der AT_4 des untersuchten Materials lag hier jedoch zwischen 5 und 10 mg O_2/g TM.

Abb. 5-1 dokumentiert den Temperaturverlauf im Testfeld. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass sich die Temperatur zwischen den Einbautiefen deutlich unterscheidet. In der größten Einbautiefe mit 4,60 m wird die Temperatur im Deponiekörper durch die Außentemperatur nicht beeinflusst, befindet sich jedoch mit im Schnitt ca. 40°C auf einem sehr hohen Niveau. Bei den geringeren Einbautiefen zeigt sich eine Beeinflussung der Temperatur im Deponiekörper in den Wintermonaten durch die niedrigen Außentemperaturen. Insgesamt ist festzustellen, dass nur bei einer Sonde Temperaturen auf dem hohen Niveau von bis zu ca. 41°C gemessen wurden. Auffällig ist dabei, dass die Temperatur der Sonde mit einer Einbautiefe von 3,60 m im Mittel ca. 18°C unterhalb der Temperaturwerte der Sonde aus 4,60 m liegen. Dass die Temperatursonden mit den Einbautiefen 0,90 m, 1,80 m, 2,60 m und 3,60 m auf un-

gefähr vergleichbarem Niveau liegen und bei einer „normalen“ Außentemperatur fast gleiche Werte aufzeigen (Zeitraum Juli-August 2006), lässt den Rückschluss zu, dass es sich bei den hohen Temperaturen aus der Einbautiefe 4,60 m um einen Hot Spot handelt.

Gegen die Theorie, dass es sich bei der Ursache für diesen Hot Spot nicht um biologische Abbauprozesse, sondern um chemische Reaktionen handelt, spricht, dass nur ein einziger dieser Hot Spots im Deponiekörper bei 15 Sonden festgestellt wurde. Die von KÜHLE-WEIDEMEIER (A) 2004 angeführten hohen Temperaturen in Kunststoffmonodeponien und Schlackedeponien, die auf chemische Reaktionen zurückzuführen sind, können auf das Testfeld nicht übertragen werden. Es ist aufgrund der gemessenen Temperaturen bereits von einem sehr weitgehend stabilen Material auszugehen.

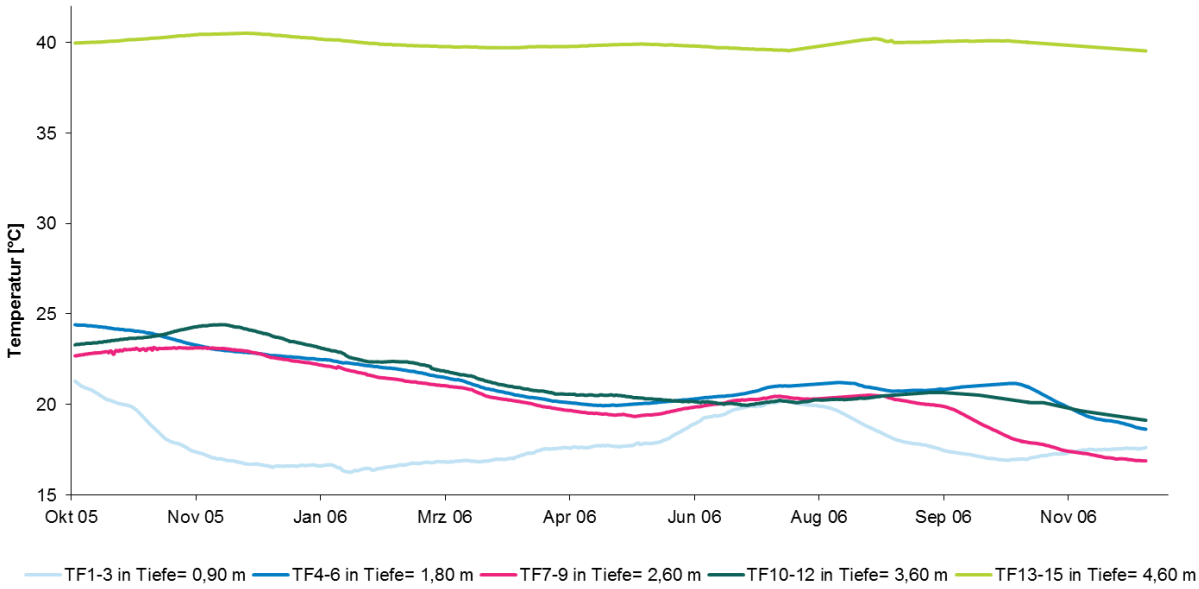


Abb. 5-1: Mittlere Temperaturverläufe im MBA-Testfeld in unterschiedlichen Einbautiefen bezogen auf das Testfeld aus Abb. 3-2

Gemäß RETTENBERGER 2004 zeigen auch herkömmliche Deponien, dass keine kurzzeitigen, sondern lediglich jahreszeitliche Schwankungen bei der Temperaturmessung festzustellen sind, diese aber mit der Tiefe abnehmen. Selbiges kann bei MBA Deponien festgestellt werden. Dies bedeutet im Rückschluss auch, dass Niederschlag und Sonneneinstrahlung keinen Einfluss auf das abgelagerte Material haben.

5.1.2 Deponiegasmessung

Die Temperatur alleine kann kein Indiz für den Abbauprozess des abgelagerten Materials sein. Hierbei spielt noch eine Vielzahl weiterer Parameter eine entscheidende Rolle; wichtigster Parameter ist aufgrund der langjährigen Erfahrung mit herkömmlichen Hausmülldeponien die Bestimmung der Gasphase.

Die Abbauprozesse innerhalb eines Deponiekörpers verlaufen in unterschiedlichen Phasen, die durch eine Veränderung der Gaszusammensetzung gekennzeichnet sind. Abb. 5-2 verdeutlicht den Phasenwechsel und die unterschiedliche Gaszusammensetzung in der jeweiligen Gasphase. In den Phasen I-III setzt die Deponiegasbildung ein. In Phase IV hat sich eine stabile Deponiegasbildung entwickelt. Während der Phase V ist ein langsamer Rückgang der Deponiegasentwicklung zu verzeichnen. Der Porenraum ist komplett mit Deponiegas gefüllt. Die Phase VI ist durch einen stetigen Rückgang der Deponiegasentwicklung gekennzeichnet. In den Deponiekörper können Luftgase eindringen. Eine fortschreitende Aerobisierung des Deponiekörpers erfolgt in Phase VII. Es entsteht Kohlenstoffdioxid. Das Methan-Kohlenstoffdioxid-Verhältnis ändert sich. Phase VIII: Die Ablagerung ist weitestgehend aerob. Es tritt so gut wie keine Methankonzentration mehr auf. Es kommt zu geringfügig erhöhten Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im Porenraum des Deponiekörpers. Mit Phase IX hat weitestgehend eine Inertisierung stattgefunden. Die Gasphase im Porenraum entspricht dem von natürlichem Gestein bzw. Boden [RETTENBERGER 2004].

Nach RETTENBERGER 2004 können die Analysebefunde bei entsprechenden Probennahmen zur Zuordnung einer Phase nach dem Gasphasenmodell aus Abb. 5-2 herangezogen werden. Zu beachten ist, dass die Werte von Untersuchungen abgeleitet wurden und bei der Anwendung in der Praxis in einem gewissen Rahmen Abweichungen auftreten können. Hinzu kommt, dass noch kein Beweis dafür geführt wurde, dass das Gasphasenmodell auf MBA-Deponien übertragbar ist.

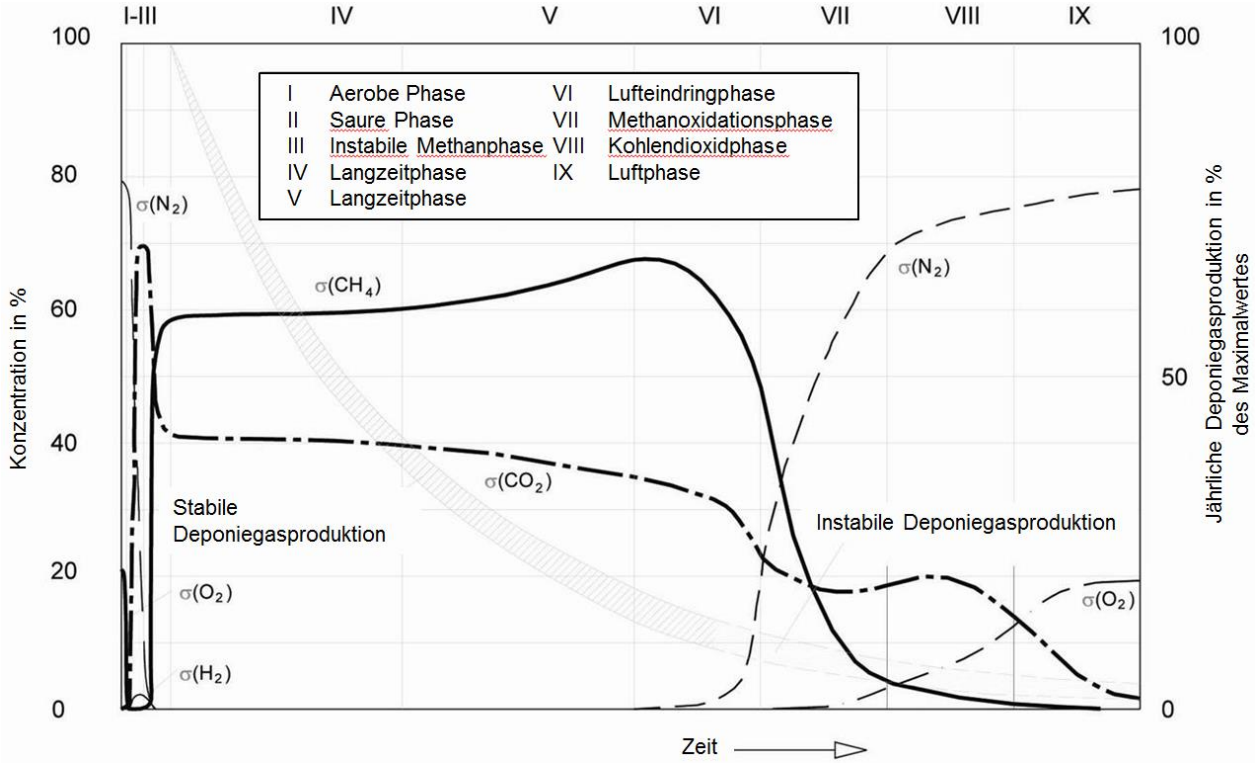


Abb. 5-2: Zeitlicher Verlauf der Deponiegaszusammensetzung und Produktion (übersetzt) [RETTENBERGER 2005]

5.1.2.1 Deponiegasmessungen im Deponiekörper

Alle bisher durchgeführten Untersuchungen bestätigen, dass es durch die mechanisch-biologische Abfallbehandlung zu einer beträchtlichen Reduktion der Deponiegasproduktion kommt. Das Gasbildungspotenzial kann bei biologisch vorbehandelten Abfällen um ca. 90 % reduziert werden [SCHEELHAASE 2002]. Gaspotenzialmessungen in DSR zeigten, dass bei mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen von einem Gasbildungspotenzial in Höhe von 15 bis 30 l_n/kg TM ausgegangen werden kann. Das Gasbildungspotenzial ist entscheidend von Wassergehalt, Temperatur, Wasserbewegung, Lagerungsdichte und Partikelgröße abhängig. Unter realen Deponiebedingungen kann es bei einem hochverdichteten Einbau zu einer Verringerung der Gaswegigkeit kommen. Bei den „hohen“ Wassergehalten der MBA-Deponie ist es möglich, dass der gesamte Porenraum wassergesättigt ist und somit ein ungehindertes Strömen der Gase behindert wird. Nach Beobachtungen von STEGMANN 1987 kam es in Hafenschlick zum Einschluss von geringen Faulgasmengen. Die Gaswegigkeit kann wie im Falle einer hochverdichteten MBA-Deponie so stark beeinträchtigt sein, dass eine Freisetzung der Gase unterbleibt.

Um eine Vergleichbarkeit des Gasphasenmodells sowie einen Rückschluss auf die zuvor genannten Bedingungen zu ermöglichen, wurden die aus dem Testfeld gezogenen Proben auf die Parameter Methan (CH_4), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) analysiert. Neben der Zusammensetzung des Deponiegases wurde auch die gebildete Gasmenge untersucht. Die durchschnittliche Zusammensetzung der Deponiegase sowie die Deponiegaszusammensetzung in den unterschiedlichen Tiefen des Testfeldes sind in Abb. 5-3 und Abb. 5-4 dargestellt.

Entgegen Untersuchungsergebnissen von BOCKREIS 2004, in denen der Anteil von Kohlenstoffdioxid bei unbehandeltem Abfall deutlich höher war als bei dem von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, zeigt sich in den Analyseergebnissen aus den Tabellen Abb. A- 11 bis Abb. A- 19 des Anhanges ein erhöhter Anteil an Kohlenstoffdioxid im MBA-Abfall, der dafür steht, dass sich das Material kurz nach Ablagerung in der instabilen Methanphase (Gasphase III) befindet. Das übliche Verhältnis von Methan zu Kohlenstoffdioxid aus unbehandelten Abfällen von 60:40 stellt sich erst nach einiger Ablagerungszeit ein. Die meisten Ablagerungsabschnitte wechseln innerhalb von 100 bis 150 Tagen nach Beginn der Ablagerung in die Langzeitphase (Gasphase IV).

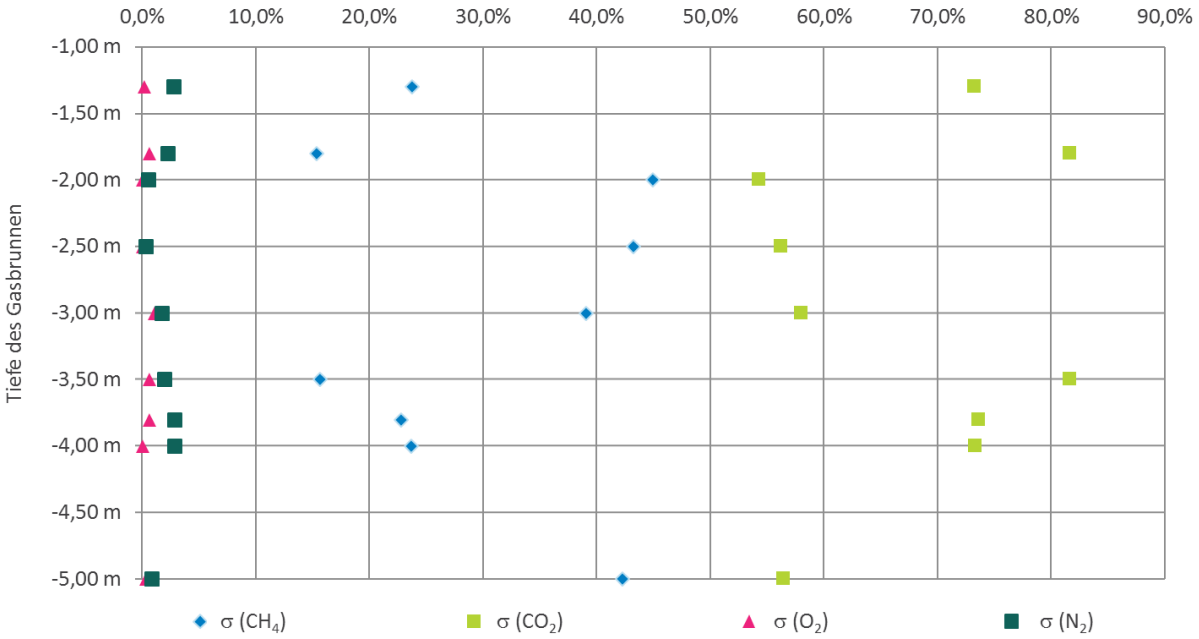


Abb. 5-3: Vol.-Konzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2), σ (O_2) in verschiedenen Tiefen der Gasbrunnen GB 1= 1,30 m; GB 2= 2,00 m; GB 3= 3,00 m; GB 4= 2,50 m; GB 5= 3,50 m; GB 6= 4,00 m; GB 7= 3,80 m; GB 8= 1,80 m und GB 9= 5,00 m) mit Beginn der Ablagerung

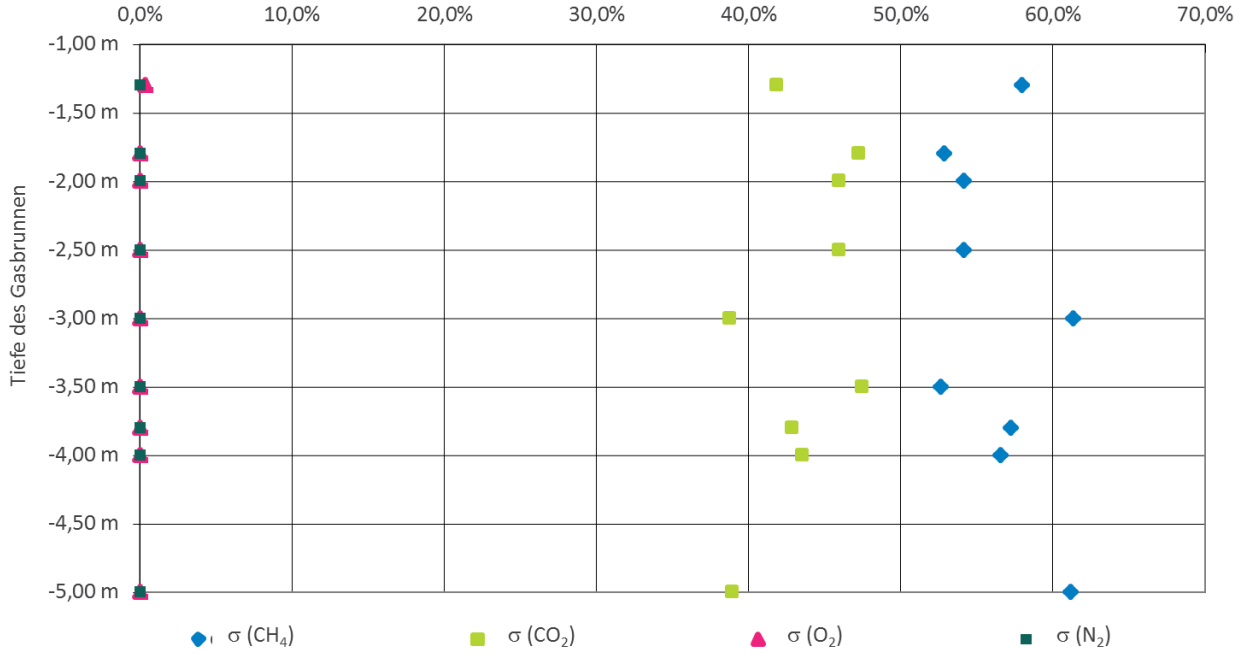


Abb. 5-4: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) über die Tiefen der Gasbrunnen GB 1= 1,30 m; GB 2= 2,00 m; GB 3= 3,00 m; GB 4= 2,50 m; GB 5= 3,50 m; GB 6= 4,00 m; GB 7= 3,80 m; GB 8= 1,80 m und GB 9= 5,00 m) nach einem Zeitraum von 500 Tagen

Untersuchungen von BOCKREIS, STEINBERG 2004 zeigten, dass die Zusammensetzung des gebildeten Gases bei mechanisch-biologisch behandelten Abfällen unterschiedlich zu dem von unbehandelten Abfällen ist, jedoch liegt der Anteil an Kohlenstoffdioxid bei den mechanisch-biologisch behandelten Abfällen deutlich niedriger als bei unbehandelten.

Die von BOCKREIS, STEINBERG 2004 gewonnenen Ergebnisse können durch die Ergebnisse aus den Abb. 5-3 und Abb. 5-4 nicht bestätigt werden. Der Anteil an Kohlenstoffdioxid für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle aus diesem Testfeld liegt in vergleichbarer Nähe des Gasphasenmodells für herkömmlichen Hausmüll.

Der nach DIN 18130 bestimmte mittlere k_f-Wert des Testfeldes liegt bei $1E^{-8}$ m/s. Damit entspricht der mittlere k_f-Wert des Testfeldes den Erwartungen von DACH, OBERMANN, JAGER, OSTROWSKI, 1997 für feinkörnigere mechanisch-biologisch behandelte Abfälle. Somit ist von einer verminderten Infiltration von Niederschlag auszugehen, die bereits in der Beschreibung des Testfeldes angedeutet wurde.

Der mechanisch-biologisch behandelte Abfall des Testfeldes wurde mit einem Wassergehalt von vierzig Gewichtsprozent hochverdichtet in das Testfeld eingebaut. Aufgrund des immer mit Folie abgedeckten Testfeldes konnte die Wassersättigung des Testfeldmaterials nicht bis zur Feldkapazität ansteigen. Lediglich die obersten 30 cm des Testfeldes wiesen eine Wassersättigung bis zur Feldkapazität auf. Diese Sättigung kann aber auf die Kondensatbildung unterhalb der Folie zurückgeführt werden.

Messungen von DACH, OBERMANN, JAGER, OSTROWSKI 1997 ergaben, dass bei steigender Wassersättigung analog der gasgängige Anteil des Porenvolumens abnimmt. Beobachtet wurde auch, dass bei Einbau des Abfalls im feuchten Zustand von Beginn an nur sehr geringe Gasvolumenanteile zur Verfügung stehen. In diesem Fall konnten nahezu keine Gasdurchlässigkeiten mehr festgestellt werden.

Im untersuchten Testfeld ist vermutlich durch die Abdeckung mittels Folie die Gaswegigkeit noch gegeben, da keine relevanten Gasdrücke messbar waren. Aufgrund der niedrigen Gasbildungsrate von 25 l_n/kg TM (Abb.: 5-5) ist jedoch eine aktive Entgasung unter ökologischen sowie ökonomischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll.

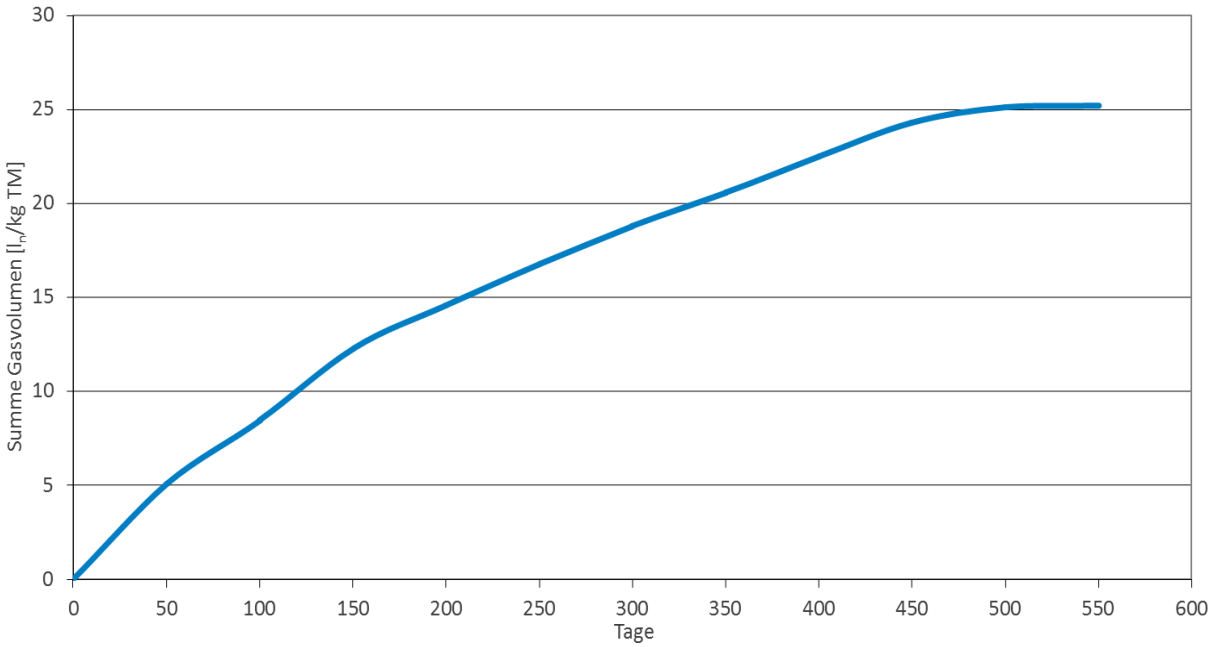


Abb. 5-5: Mittlere Gasbildung des hochverdichtet eingebauten mechanisch-biologisch behandelten Abfalls an der Probe SWH 0805/07 bei einem Wassergehalt von 40 Gew.-% und der durchschnittlichen Temperatur von ca. 24°C

5.1.2.2 Deponiegasmessungen an der Oberfläche

Die Deponiegasmessungen an der Deponieoberfläche dienen der Ergründung der Methanmengen, die an der Deponieoberfläche auftreten. Analog dem Restgaspotenzial von ca. 25 l_n/kg TM konnte nach SOYEZ ET AL. 2000 von Methanmengen zwischen 0,55 bis 0,95 l/m²·h ausgegangen werden. Nach SOYEZ ET AL. 2000 ist eine konventionelle aktive Entgasung über Gasbrunnen bei diesen Mengen unzweckmäßig.

Der Versuch wurde in Anlehnung an die Vorgaben der AbfAblV für den GB21 Test durchgeführt. Hierzu wurde eine nach unten offene Box mit einem definierten Volumen von 10 l, in den Deponiekörper eingerammt. Die Umgebungstemperatur konnte während des Versuchs über 24 h nicht beeinflusst werden.

An die Box wurde ein Eudiometerrohr gefüllt mit Sperrflüssigkeit angeschlossen. Diese Sperrflüssigkeit wird durch das entstehende Gas verdrängt. Gemessen werden konnte eine mittlere Methanmenge von 0,51 l/m²·h. Die freigesetzte Methanmenge ist dabei bezogen auf ein Gasbildungspotenzial von 25 l_n/kg TM des Testfeldmaterials.

5.1.2.3 Deponiegasprognose

Um eine Gasprognose erstellen zu können, muss die Halbwertszeit für die Gasbildung abgeschätzt werden. Nach Untersuchungen von SCHEELHAASE 2002 [vgl. HEYER 1997] kann die Halbwertszeit mit drei bis zehn Jahren angenommen werden. Längere Halbwertszeiten führen zu einer geringeren Gasbildung. Der Emissionszeitraum steigt an, wobei die gebildeten Gasmengen zurückgehen. Aufgrund der geringen Temperaturen im Deponiekörper sind möglicherweise auch längere Halbwertszeiten möglich.

Die zu erwartende Deponiegasmenge kann mittels einer Deponiegasprognose nach TABASARAN 1976 berechnet werden. Die Deponiegasprognose wurde unter folgenden Annahmen durchgeführt. Die Halbwertszeit liegt zwischen drei und zehn Jahren, Ablagerungsbeginn im Jahr 2002, Ablagerungsende im Jahr 2020, 40 % WG, Gaspotenzial 25 l_n/kg TM.

Ablagerungsmengen:

- 2003 6913 Mg
- 2004 8345 Mg
- 2005 6966 Mg
- 2006 3000 Mg
- 2007-2020 ca. 8000 Mg/a

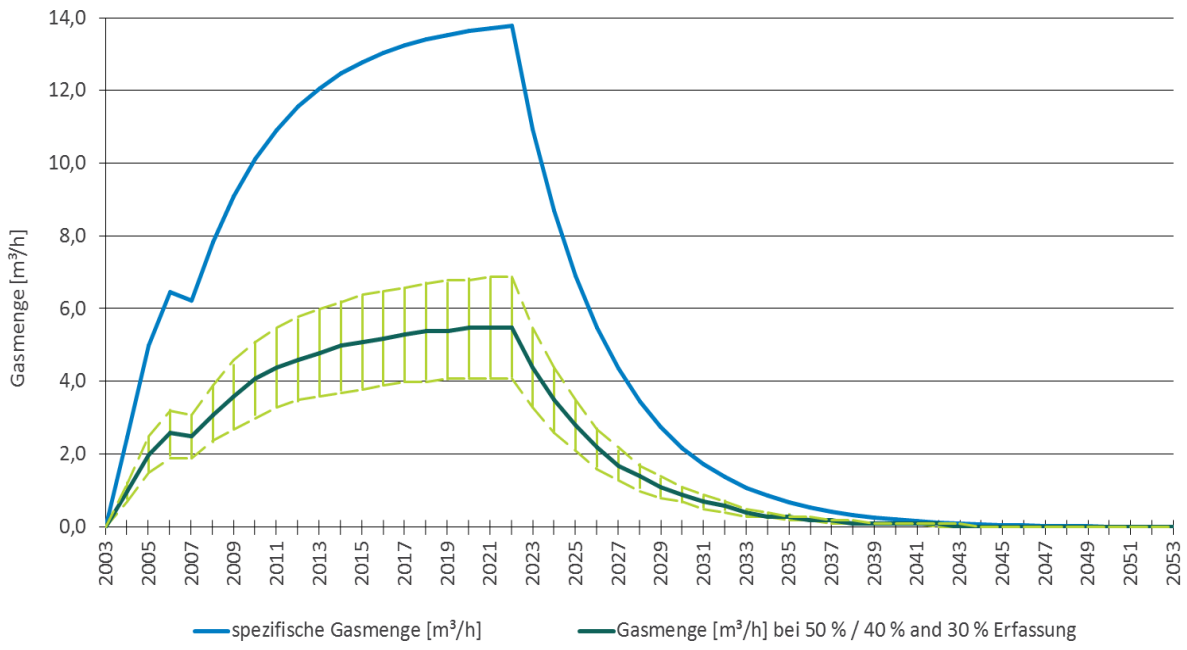


Abb. 5-6: Gasprognose des MBA-Restabfalls, Deponierungsbeginn 2003, Halbwertszeit drei Jahre

Um das langfristige Emissionsverhalten und somit das Gaspotenzial von MBA-Deponien beurteilen zu können, ist die Atmungsaktivität bezogen auf die Trockensubstanz gut geeignet [HÖRING 1997]

Trotz einer geringen Halbwertszeit von drei Jahren ergibt sich eine maximale Gasbildung von 13,8 m³/h nach Abb. 5-6. Die maximale Gasbildung für eine Halbwertszeit von zehn Jahren (Abb. 5-7) liegt bei 10 m³/h.

Diese geringen Gasmengen lassen sich nicht mehr effektiv fassen und nutzen. Daher sind passive Entgasungsmaßnahmen wie eine methanoxidierende Abdeckung anzustreben. Eine solche Maßnahme kann mit Hilfe der Rekultivierungsschicht umgesetzt werden [FIGUEROA 1998].

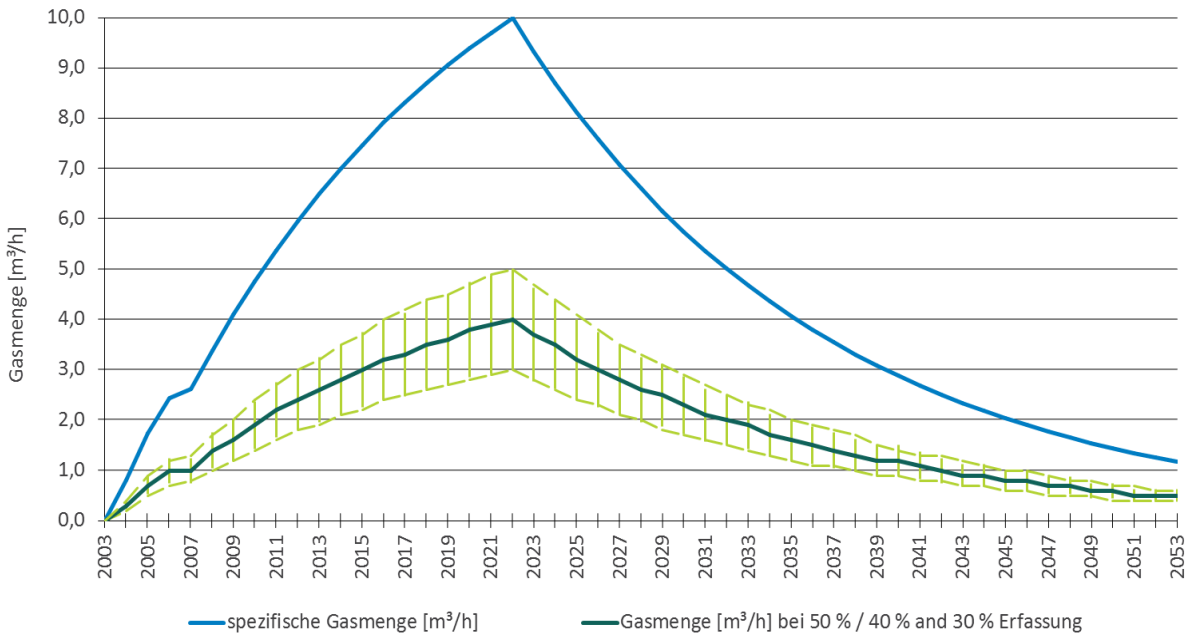


Abb. 5-7: Gasprognose des MBA-Restabfalls, Deponierungsbeginn 2003, Halbwertszeit zehn Jahre

5.1.3 Porenwasserdrücke

Unter dem zu untersuchenden Porenwasserdruck versteht man die Spannung in den wassergefüllten Poren des Bodens oder wie in diesem Fall dem mechanisch-biologisch behandelten Abfall. Der Porenwasserdruck besteht aus den beiden Parametern: hydrostatischer Druck, der der Höhe des Grundwasserstandes entspricht, und dem Porenwasserüberdruck.

Da der ermittelte k_f-Wert des Testfeldes bei $1E^{-8}$ m/s liegt, handelt es sich um ein Material mit geringer Wasserdurchlässigkeit. Dadurch können Porenwasserüberdrücke entstehen.

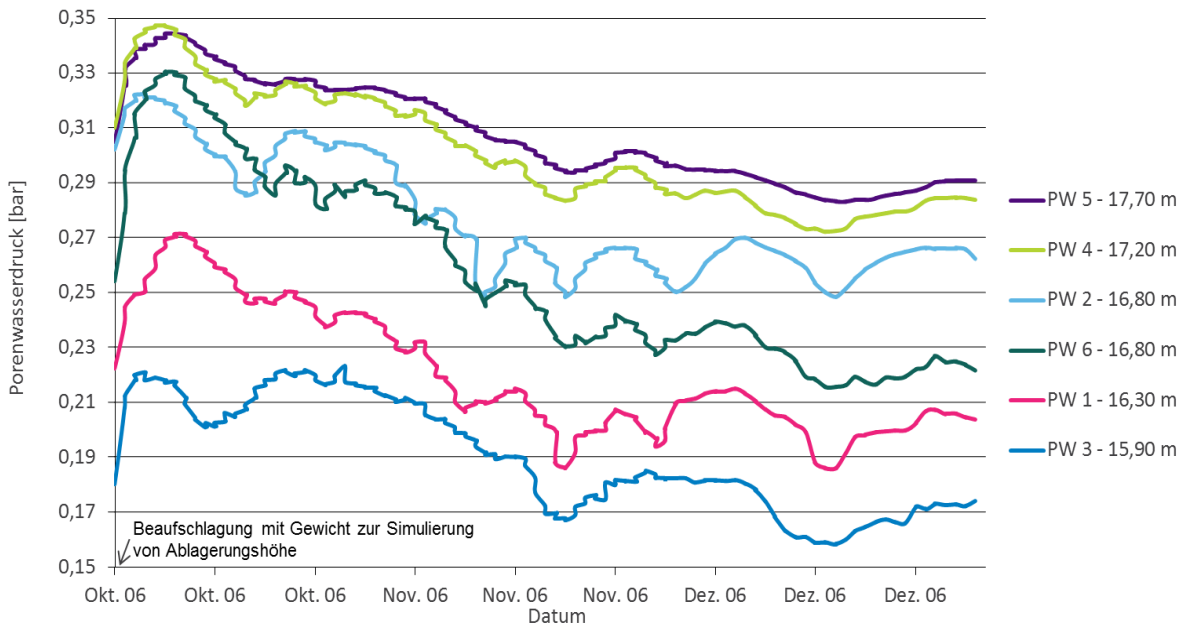


Abb. 5-8: Porenwasserdruckverläufe während des Versuchszeitraumes mit einer durch Auflast simulierten Ablagerungshöhe

Die Sonden wurden gemäß Legende in unterschiedliche Tiefen des Deponiekörpers eingebaut und anschließend mit einer künstlichen Last beaufschlagt. Die Last erzeugte mit ihrem Gewicht pro Fläche eine zusätzlich simulierte Überlagerung der Sonden von ca. 15 m.

Somit ergeben sich für die Porenwasserdrucksonden die folgenden simulierten Einbautiefen bzw. Überlagerungshöhen:

- P 1 = 16,30 m
- P 2 = 16,80 m
- P 3 = 15,90 m
- P 4 = 17,20 m
- P 5 = 17,70 m
- P 6 = 16,80 m

Bei allen Porendrucksonden ist ein signifikanter Anstieg des Porenwasserdrucks nach Aufbringung der künstlichen Last festzustellen. Die gemessenen Porenwasserdruckänderungen während der Beaufschlagung mit Last betrugen bis zu $\Delta u = 0{,}40$ bar. Das Material ist bestrebt, den durch die äußerlich aufgebrachte Last gestiegenen Porendruck wieder in den Gleichgewichtszustand zu bringen. Der Porenwasserüberdruck baut sich dabei durch allmähliches Abströmen des Porenwassers ab. Der Porenwasserdruck baut sich innerhalb von 14 Tagen deutlich ab, erreicht aber erst nach 60 Tagen wieder seinen Ausgangswert. Im weiteren Verlauf des Versuchszeitraumes baut sich der Porendruck kontinuierlich, aber sehr langsam ab.

Bei Porendrücken zwischen minimal 160 mbar und maximal 350 mbar sind kritische Porenwasserüberdrücke nicht zu befürchten. Somit besteht im Inneren des Testfeldes die Möglichkeit des Abströmens des Porenwassers, auch wenn dies nur sehr langsam erfolgt. Letztlich ist die Standsicherheit der Deponie durch Porenwasserdrücke nicht gefährdet. Setzungsfließrutschungen waren während des Untersuchungszeitraumes nicht zu erkennen.

5.2 Laborversuche

Im Labor werden sowohl die Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen wie auch die der Stabilitätskriterien des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls erarbeitet. Dabei wurden sowohl die Proben der Ausstechversuche als auch noch nicht eingebautes Material untersucht. Ziel sind vergleichende Untersuchungen aus dem Labor und dem praktischen Deponiebetrieb.

5.2.1 Korngrößenverteilung

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung erfolgte nach DIN 18123. Insgesamt wurden 20 Abfallproben analysiert. Die gewählten Maschenweiten zur Korngrößenverteilung lagen bei: 0,063, 0,125, 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0, 16,0 und 31,5 mm. Die mittlere Korngrößenverteilung des Ausgangsmaterials ist in Abb. 5-9 in „Rot“ dargestellt. In „Grün“ ist die mittlere Korngrößenverteilung der Materialproben aus dem Testfeld nach ca. zwei Jahren Ablagerungsphase dargestellt.

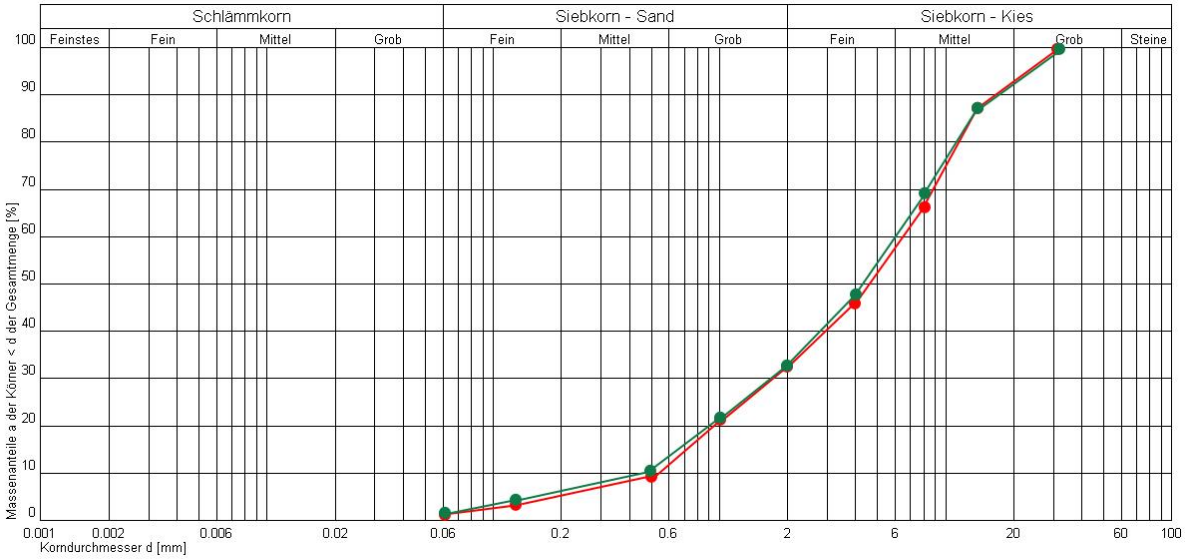


Abb. 5-9: Bedeutung der Ablagerungszeit für den Verlauf der Korngrößenverteilung bei Trockensiebung und einem Größtkorn von 35 mm

Die Körnungslinien weichen nur geringfügig im Bereich 0,125 mm bis 1,0 mm und 2,0 mm bis 16,0 mm ab. Die Gegenüberstellung der Körnungslinien zeigt, dass die Ablagerungsdauer keinen Einfluss auf den Feinkorngehalt bzw. den Verlauf der Körnungslinie ausübt. Untersuchungen von SCHEELHASE 2002 zeigten ebenfalls, dass die Rottedauer in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung keinen Einfluss auf

den Feinkorngehalt bzw. den Verlauf der Körnungslinie hat. Die mechanische Aufbereitungsstufe der Abfallbehandlung bestimmt die spätere Größenverteilung der Abfallpartikel.

Das analysierte Material aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung ist zwar optisch homogener als unbehandelter Siedlungsabfall, jedoch kann auch bei mechanisch-biologisch behandelten Abfällen nicht von homogenem Material gesprochen werden. Hierzu sind das Material und seine Kornformen zu unterschiedlich. Durch diese Heterogenität - begründet aus Folienanteilen, Porengrößenverteilungen und unterschiedlichen Eigenschaften aufgrund des Organikanteils - kann das MBA-Material nur unzureichend durch die Korngrößenverteilung erfasst werden [SCHEELHASE 2002].

Anhand der Sieblinie kann eine Benennung und Klassifizierung des Materials in Anlehnung an die bautechnische Vorgehensweise erfolgen. Der Feinkornanteil (d < 0,063 mm) liegt bei 1,1 % und damit unter der 5 %-Grenze. Somit wird das Material des Testfeldes als nicht bindig eingestuft.

5.2.2 Wassergehalt des zu deponierenden Materials im Vergleich mit Material aus dem Testfeld

Der für den Einbau des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls optimale Wassergehalt wird vor der Anlieferung des Materials auf der Deponie während der Rottephase in der Abfallbehandlungsanlage auf 40 Gew-% eingestellt.

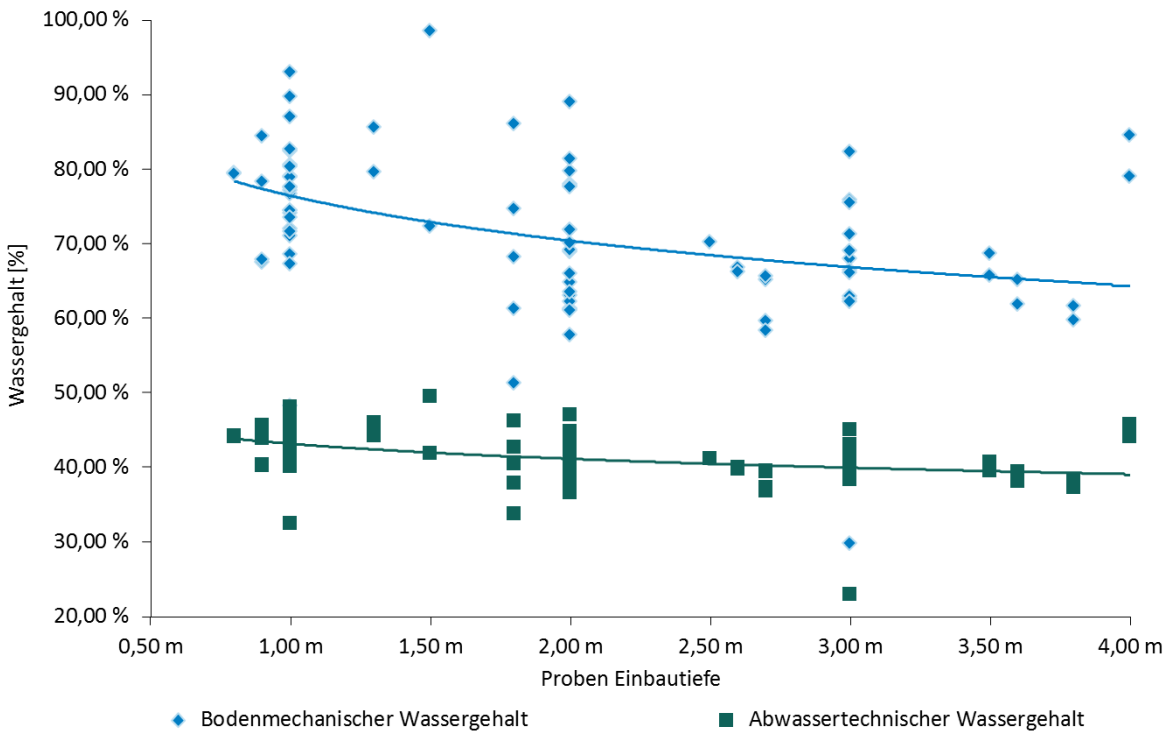


Abb. 5-10: Wassergehalt des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls nach Probennahme aus dem Testfeld. Ablagerungsdauer zwischen 1-2 Jahren

Trotz der arbeitstägigen Abdeckung der Deponiefläche steigt der Wassergehalt des abgelagerten Materials von den eingestellten 40 Gew.-% auf einen Wassergehalt zwischen 60 und 80 Gew.-% an. Eine Korrelation zwischen dem Anstieg des Wassergehaltes und der entnommenen Tiefe des Testfeldes kann nicht abgeleitet werden. Da die analysierten Proben mittels Spiralbohrer aus dem Testfeld entnommen wurden, ist nicht auszuschließen, dass sich im Deponiekörper ab einer nicht zu definierenden Tiefe eine wassergesättigte Zone eingestellt hat. Der Beleg für eine wassergesättigte Zone wäre nur durch einen Schürf zu erbringen, der aber im Bereich des Testfeldes nicht ausgeführt werden konnte.

5.2.3 Proctordichte

Mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle weisen im Vergleich zu nicht vorbehandelten Abfällen deutlich veränderte Eigenschaften auf. Dies äußert sich insbesondere in den erreichbaren Einbaudichten und den Durchlässigkeiten.

Wie aber aus Tab. 5-1 ersichtlich ist, liegen die Trockendichten zwischen 0,64 und 0,72 g/cm³. Die Optimalen Wassergehalte sind stark schwankend und liegen zwischen 20,09 und 55,17 %. Dies entspricht einem auf die Feuchtmasse bezogenen (abwassertechnischen) Wassergehalt von 16,70 bis 35,55 %. Es wird also deutlich, dass die Optimalen Wassergehalte erheblichen Schwankungen bei unterschiedlichen Materialien unterliegen. Die Feuchtdichte ergibt sich dabei zwischen 0,77 und 1,04 g/cm^3.

Tab. 5-1: Werte der Proctoruntersuchungen mit mechanisch-biologisch behandeltem Abfall des Testfeldes

Probennummer	t_r [Wochen]	Φ_{max} [mm]	w_{pr} [%]	ρ_{tr} [g/cm³]	ρ_{ft} [g/cm³]
SWH 0805/01	10	< 34 mm	20,09	0,64	0,77
SWH 0805/07	10	< 34 mm	31,38	0,69	0,90
SWH 0805/06	10	< 34 mm	35,75	0,70	0,95
SWH 0805/10	10	< 34 mm	41,34	0,71	1,01
SWH 0805/04	10	< 34 mm	49,60	0,72	1,07
SWH 0805/05	10	< 34 mm	55,17	0,67	1,04

t_r= Rottedauer; Φ_{max}= Durchmesser des Größtkorns; w_{pr}= Proctorwassergehalt; ρ_{tr}= Einbautrockendichte; ρ_{ft}= Einbaufeuchtdichte

Damit liegt die theoretisch ermittelte Trockeneinbaudichte bei einem Wassergehalt zwischen 35 und 40 % von 0,70 bis 0,71 g/cm³ deutlich unter den im Testfeld ermittelten Werten. Beim Materialeinbau mittels Raupe und Schaffußwalze wurden im vorliegenden Testfeld Einbautrockendichten von 1,11 bis 1,14 g/cm³ gemessen. Diese Werte konnten ebenfalls bei einem Einbauwassergehalt von 35-40 % erreicht werden.

In jedem Fall ist bedeutsam, dass die mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfälle sich in Abhängigkeit des Wassergehaltes unterschiedlich verdichten lassen, also ausgeprägte Proctorkurven aufweisen. Eine solche ist in Abb. 5-11 dargestellt.

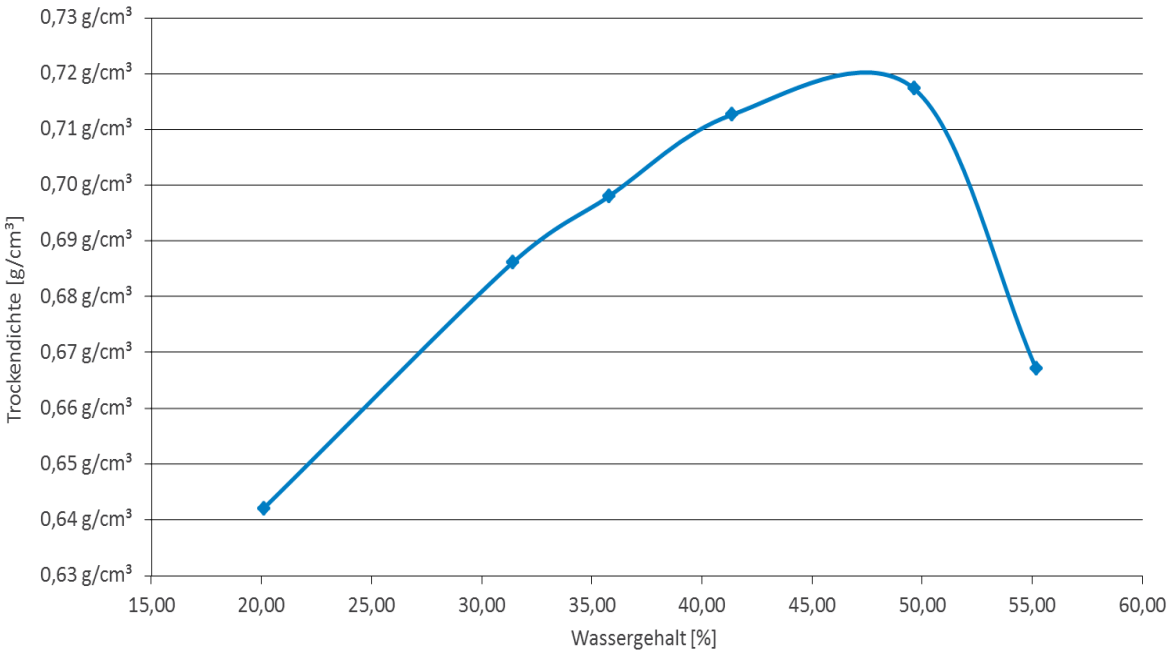


Abb. 5-11: Proctorkurve, bestimmt an MBA-Material aus dem Haufwerk im Testfeld

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich das Material im realen Deponiefeld deutlich verdichteter einbauen lässt, als es die Theorie vermuten lässt. Somit können mechanisch-biologisch behandelte Abfälle mit einer hohen Dichte in die Deponie eingebaut werden, wobei die Abfälle dann nur noch eine geringe Durchlässigkeit aufweisen. Würde man die Abfälle nicht mit einer hohen Dichte einbauen, dann müsste gleichwohl davon ausgegangen werden, dass sich die Abfälle unter Auflast nach einer bestimmte Zeit verdichten werden, was wiederum zu einer Abnahme der Durchlässigkeit führen wird. Aber auch ohne diesen Effekt wird die Durchlässigkeit des Abfallkörpers im Laufe der Zeit abnehmen. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Deponien, sofern Wasser hinzutreten kann, im Laufe der Zeit aufsättigen werden, so dass es im Laufe der Zeit auf solchen Deponieflächen Pfützenbildung mit einer Moorbildung geben könnte. Entsprechende Gegenmaßnahmen müssten getroffen werden.

5.2.4 Vergleich der Zuordnungskriterien vor und nach der Ablagerung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls im Testfeld nach 24 Monaten

Verglichen mit den pH-Ausgangswerten, die vor der Ablagerung in den Grenzen 7,21 und 7,66 lagen, haben sich zur Abb. 5-12 die pH-Werte nicht verändert. 24 Monate nach der Ablagerung liegen die pH-Werte zwischen 6,82 und 7,83. Gemäß Deponieverordnung liegt der Grenzwert zwischen 5,5 und 13 und wird somit sicher eingehalten.

Von 90 analysierten Proben wies für das Eluatkriterium Kupfer nur eine Probe einen höheren Wert als den gesetzlich erlaubten Grenzwert von ≤ 5 mg/l auf. Die Überschreitung lag bei 6,31 mg/l. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass das Eluatkriterium Kupfer ebenfalls zuverlässig eingehalten wird. Eine Reduktion des Kupferanteils während der Ablagerungszeit kann nicht bestätigt werden.

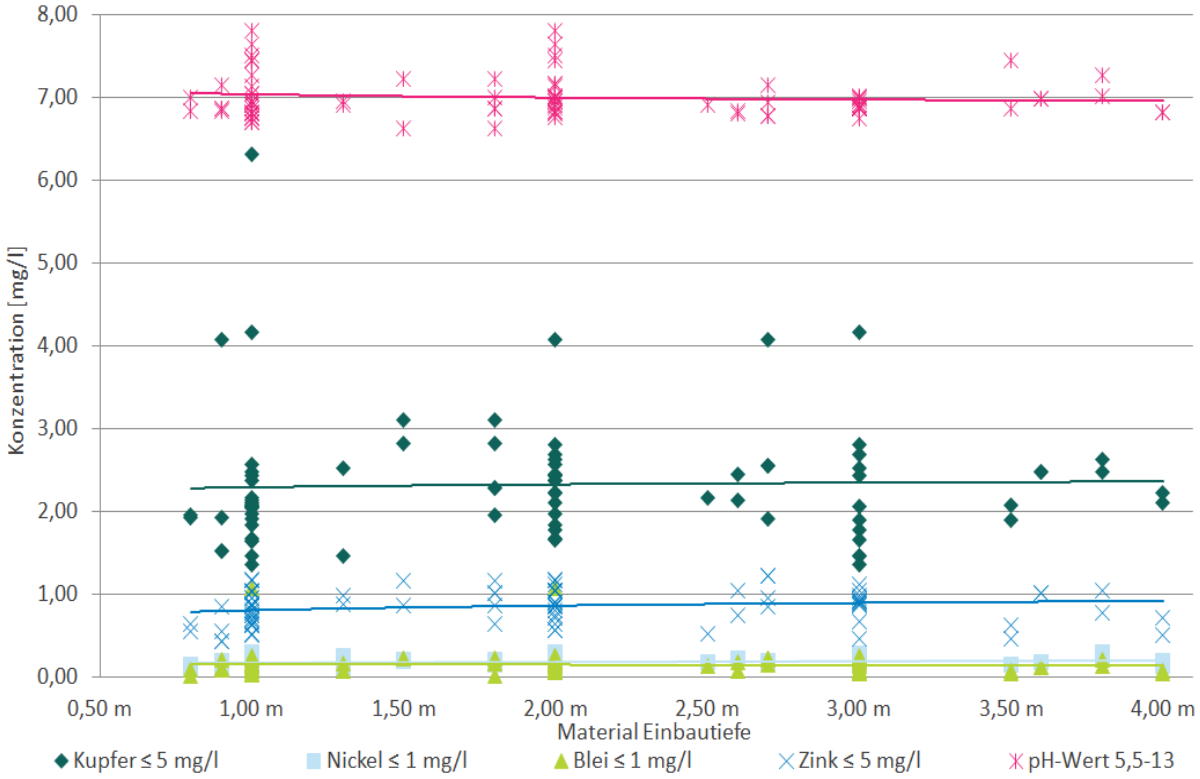


Abb. 5-12: Analyse der Eluatkriterien an Proben des Testfeldes 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf pH-Wert, Zink, Blei, Nickel, Kupfer

Die weiteren Zuordnungskriterien Nickel mit einem Grenzwert von ≤ 1 mg/l, Blei mit einem Grenzwert von ≤ 1 mg/l und Zink mit einem Grenzwert von ≤ 5 mg/l liegen deutlich unter den in der Deponieverordnung festgelegten Grenzwerten.

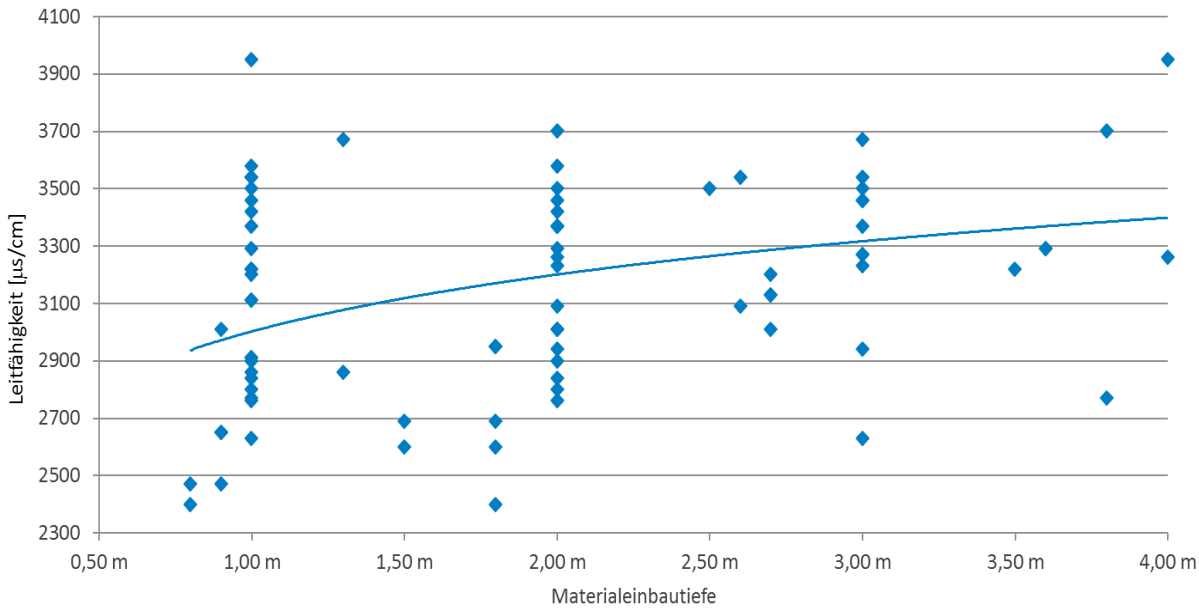


Abb. 5-13: Analyse der Eluatkriterien an Proben des Testfeldes 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf die Leitfähigkeit

In Abb. 5-13 sind die analysierten Werte für die elektrische Leitfähigkeit des abgelagerten Materials nach 24 Monaten dargestellt. Der Maximalwert für die elektrische Leitfähigkeit liegt bei 4130 µs/cm und bei einem Minimalwert von 2100 µs/cm. Vor Ablagerung lagen die Werte für die elektrische Leitfähigkeit auf vergleichbarem Niveau. Der noch in der Abfallablagerungsverordnung gültige Grenzwert von ≤ 50.000 µs/cm wird somit zuverlässig eingehalten. Mit Implementierung der Abfallablagerungsverordnung in die Deponieverordnung wurde der Grenzwert von ≤ 50.000 µs/cm nicht übernommen und ersatzlos gestrichen.

In früheren Untersuchungen [DACH 2000] hat sich bereits gezeigt, dass bis auf den TOC im Eluat alle Eluatwerte zuverlässig eingehalten werden können, so dass sie keinen geeigneten Aussageparameter für die Güte der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung darstellen. Ausgeschlossen von dieser fehlenden Aussagekraft ist der TOC im Eluat. Zwischen dem TOC im Eluat und den über das Sickerwasser ausgetragenen Kohlenstofffrachten können Zusammenhänge gefunden werden.

Ein Vergleich der Ausgangsfrachten des TOC im Eluat mit den über den Sickerwasserpfad ausgetragenen Kohlenstofffrachten war aufgrund der fehlenden Trennung zwischen einem Deponiefeld, auf dem herkömmlicher, unbehandelter Hausmüll abgelagert war, und dem angrenzenden Testfeld nicht möglich. Durch die bekannte Größenordnung des TOC im Eluat der Anlieferungsanalyse vor Ablagerung des Materials ist aber eine Beurteilung der Tendenz nach 24 Monaten der Ablagerung möglich.

Aus Abb. 5-14 wird ersichtlich, dass der Abbauprozess im Deponiekörper nur sehr langsam vonstattengeht. Der durchschnittliche Kohlenstoffaustrag im Deponiekörper nach 24 Monaten Ablagerungsphase betrug lediglich 9,40 mg/l an TOC im Eluat. Der

sehr niedrige Austrag kann durch die hohe Ablagerungsdichte und den damit wesentlich verlangsamt ablaufenden Umsetzungsprozessen begründet werden. Durch die Abdeckung des Testfeldes finden nahezu keine Wasserbewegungen und Umlagerungsbewegungen statt. Infolgedessen füllen sich die Porenräume mit Gasblasen, was wiederum eine wesentliche Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit zur Folge hat.

Nach SCHEELHASE 2002 laufen unter diesen Voraussetzungen die Stoffwechselprozesse sehr langsam oder gar unvollständig ab. Dies hat eine deutliche Verlängerung der Halbwertszeiten zur Folge, was sich wesentlich auf die Deponiegasprognose auswirkt.

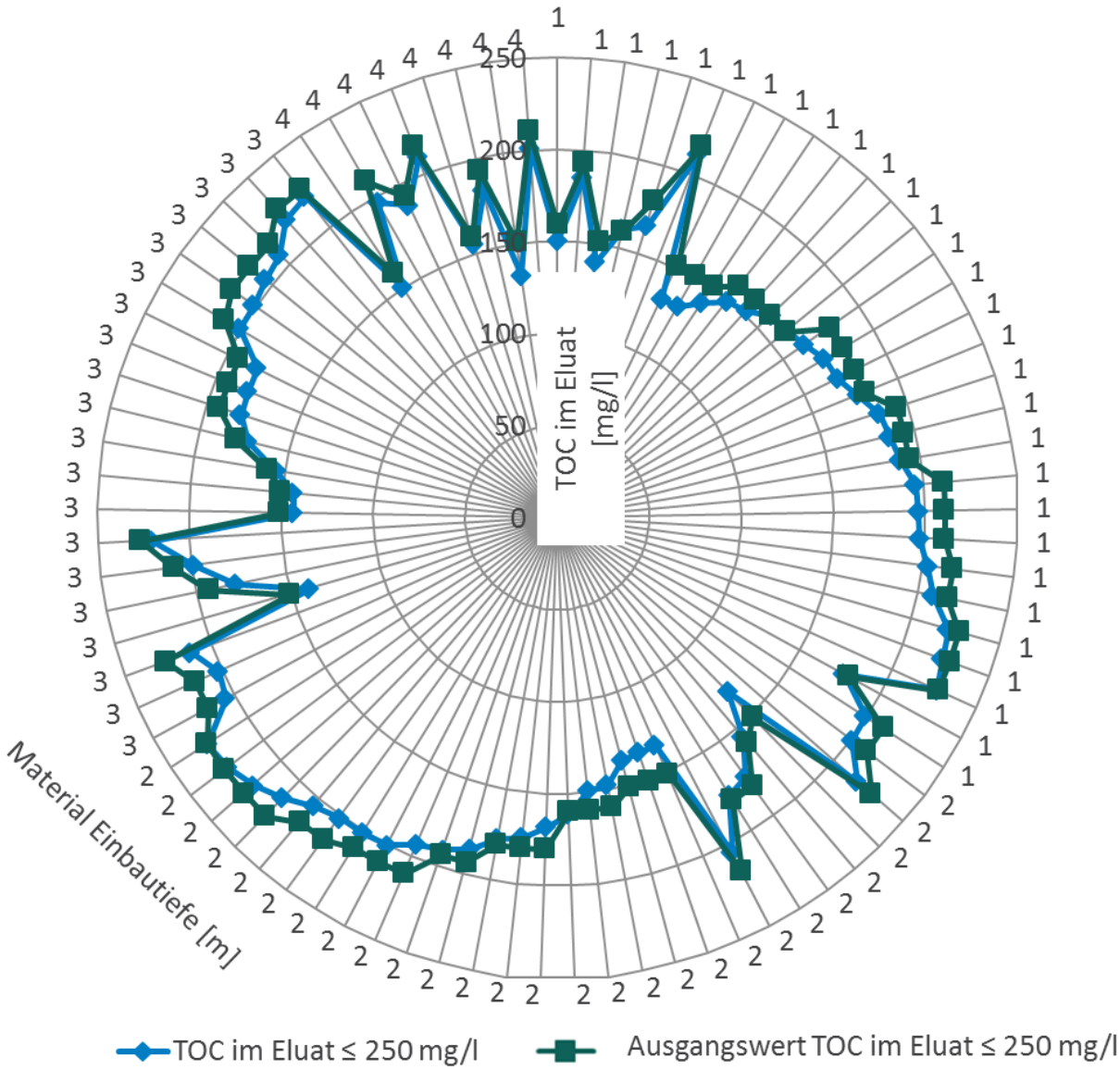


Abb. 5-14: Vergleich der Eluatkriterien an Proben des Testfeldes bei Materialanlieferung und 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf den TOC im Eluat

5.2.5 TOC im Feststoff

Die Ergebnisse aus den Analysen des TOC im Feststoff der Anlieferungsanalyse und dem anschließenden Vergleich mit den Ergebnissen der Analyse nach 24 Monaten Ablagerung zeigen ähnlich wie bei der Beurteilung des TOC im Eluat nur sehr geringe Abbauraten.

Aus Abb. 5-15 wird ersichtlich, dass bei der Bilanzierung des Kohlenstoffaustrages des im Feststoff enthaltenen Kohlenstoffs nur sehr geringe Mengen über die Gasphase durch biologische Umsetzungsprozesse aus dem Deponiekörper ausgetragen werden. Der durchschnittliche Kohlenstoffaustrag aus dem Feststoff im Deponiekörper nach 24 Monaten Ablagerungsphase betrug lediglich 0,16 Gew-%. Der sehr niedrige Austrag kann durch die hohe Ablagerungsdichte und die damit wesentlich verlangsamt ablaufenden Umsetzungsprozesse begründet werden. Zusätzlich können aufgrund der Abdeckung des Deponiekörpers mit wasserundurchlässigem Material keine Auswaschungsvorgänge in der Deponie erfolgen.

Nach SCHEELHASE 2002 werden bei mechanisch-biologisch stabilisierten Abfällen weniger als 5 % des Kohlenstoffinventars langfristig freigesetzt. Der überwiegende Anteil des vorhandenen Kohlenstoffs ist auf Dauer im Feststoff festgelegt.

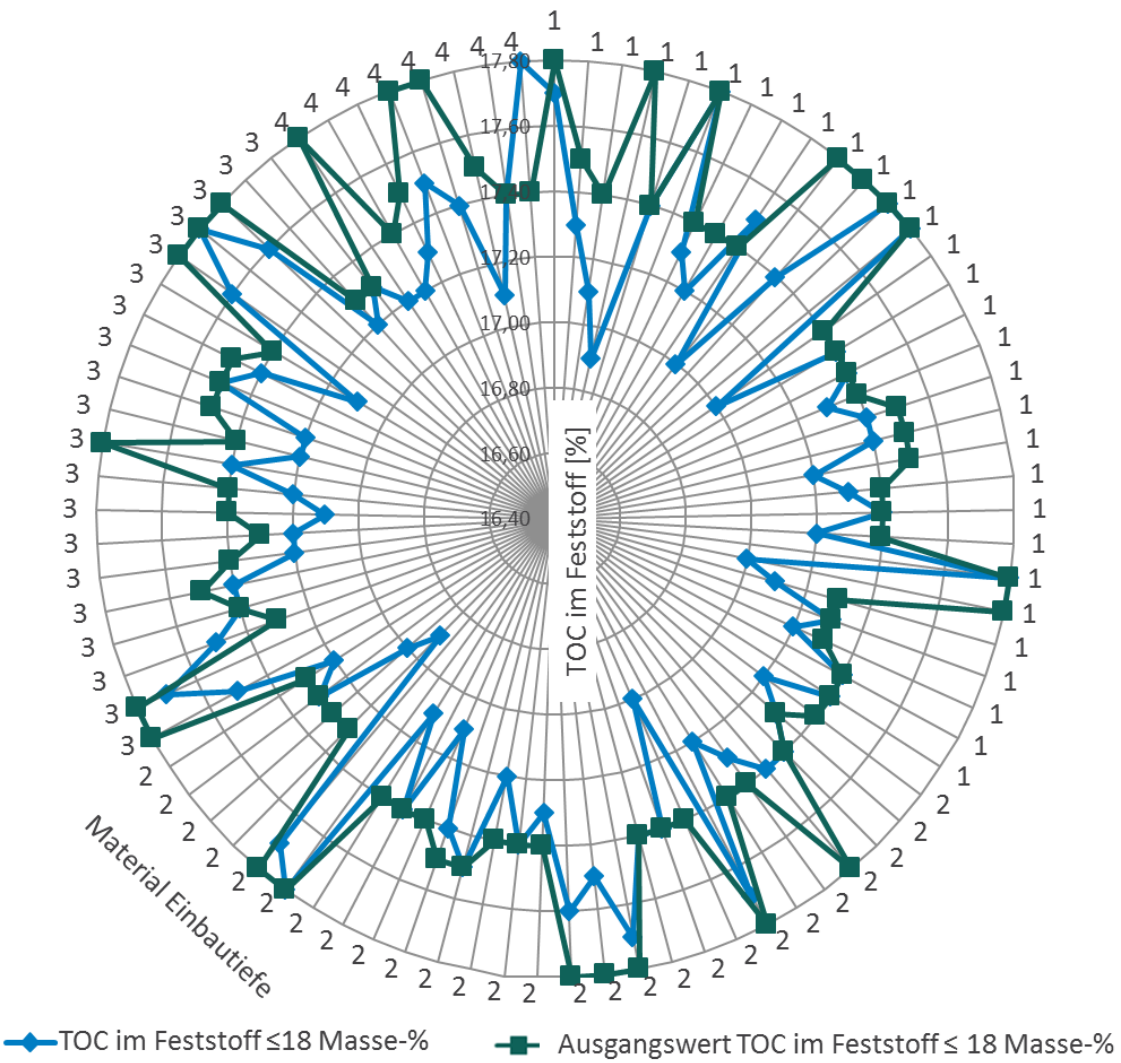


Abb. 5-15: Vergleich von Proben des Testfeldes bei Materialanlieferung und 24 Monate nach der Ablagerung analysiert auf den TOC im Feststoff

5.2.6 Wasserdurchlässigkeit

Die Durchlässigkeitsbeiwerte weichen in der Fachliteratur teilweise erheblich voneinander ab. So stellt KÜHLE WEIDEMEIER (B) 2004 Schwankungen um ca. vier Zehnerpotenzen von 10^{-5} bis 10^{-10} m/s fest.

Die vorliegenden Untersuchungen aus dieser Arbeit bestätigen die Theorie, von BIDLINGMAIER 1999 dass ein Bezug zwischen der Wasserdurchlässigkeit und der erreichbaren Einbaudichte besteht. Neben der Einbaudichte spielt für die Wasserdurchlässigkeit auch der Anteil an Kunststoff im Material eine entscheidende Rolle [XIE 2003]. Dies spiegeln auch die Ergebnisse der Abb. 5-16 wider. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der aufgeführten Proben liegen mit:

- 9,95E-09 m/s (Probe: SWH 0805/02), Einbaudichte 0,72 g/cm³
- 3,95E^{-08} m/s (Probe: SWH 0805/03), Einbaudichte 0,69 g/cm³
- 5,59E^{-09} m/s (Probe: SWH 0805/05), Einbaudichte 0,72 g/cm³
- 4,58E^{-09} m/s (Probe: SWH 0805/06), Einbaudichte 0,71 g/cm³

vergleichbar niedrig. Alle Proben bei einem Wassergehalt von 40 % eingebaut.

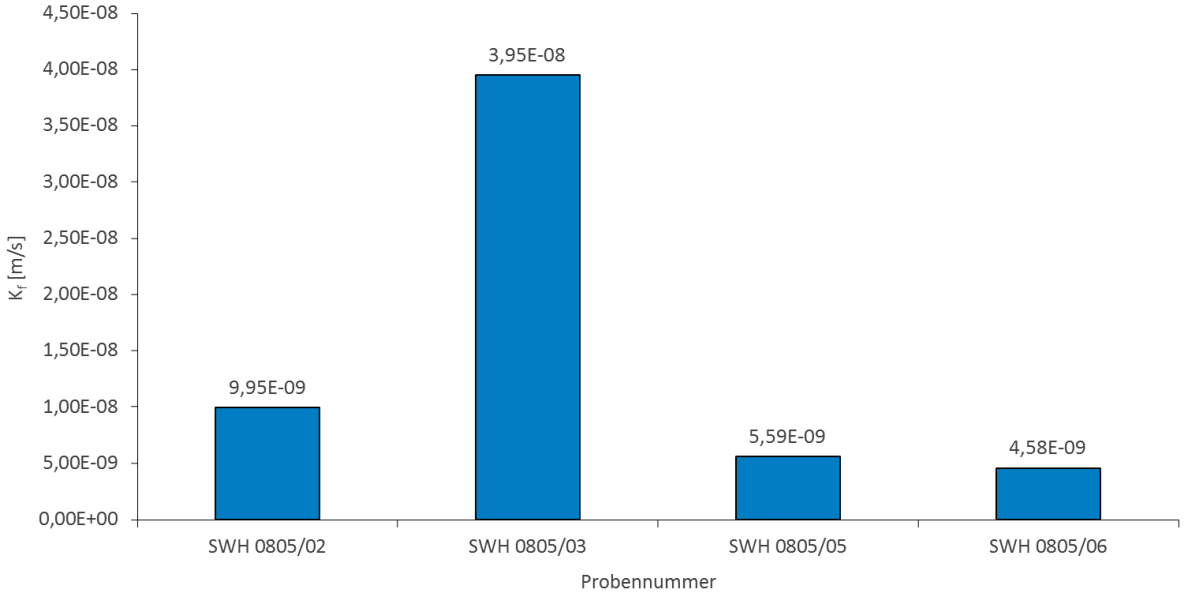


Abb. 5-16: Durchlässigkeitsbeiwert des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls bei einer Siebung vor Rotte auf < 34mm.

Die hydraulische Leitfähigkeit des Materials wird somit stark von der Einbaudichte, der Materialzusammensetzung (Anteil und Größe der Kunststoffteile) beeinflusst [XIE 2003; PIMOLTHAI 2010]. Die Wasserhaltekapazität nimmt mit zunehmender Einbaudichte aufgrund des geringeren Porenvolumens ab [KÜHLE WEIDEMEIER (B) 2004].

5.3 Zusammenfassung

In der Vergangenheit wurden mit mechanisch-biologisch behandelten Abfällen zahlreiche Untersuchungen in Deponiesimulationsreaktoren durchgeführt. Mit den Untersuchungen in den Deponiesimulationsrektoren wurde versucht, einzelne Vorgänge innerhalb des Deponiekörpers zu beschreiben und die Ergebnisse auf die Deponie zu übertragen. Im Vordergrund stand dabei die Beschreibung des Ablagerungsverhaltens des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls und der damit verbundenen Emissionen. So wurden die Qualität und die Quantität des Deponiegases und die Emissionen des Sickerwasserpfades bestimmt.

Mit den vorliegenden Ergebnissen ist es nun möglich, Vergleiche zwischen den Ergebnissen aus den Deponiesimulationsreaktor-Untersuchungen und den realen Deponiebedingungen zu ziehen. [SOYEZ ET AL. 2000 und SCHEELHASE 2002]

Hierzu wurde in dieser Arbeit eine Vielzahl von unterschiedlichen Untersuchungen an mechanisch-biologisch behandelten Abfällen durchgeführt. So erfolgten In-situ-Untersuchungen im Deponiekörper bezüglich der Temperatur und Gasentwicklung. Parallel wurden im Labor Untersuchungen zum Verhalten des Materials im Anlieferungszustand und nach 24 Monaten der Ablagerung durchgeführt. Im Vordergrund stand dabei die Beurteilung auf die Auswirkungen der Zuordnungskriterien innerhalb der Ablagerungsdauer.

Neben der Beurteilung der Zuordnungskriterien standen aber auch Ergebnisse im Vordergrund, die Rückschlüsse auf einen optimierten Deponiebetrieb zulassen. So vor allem die während der Testphase noch gesetzlich vorgeschriebene arbeitstägige Abdeckung des Deponiefeldes mit wasserundurchlässigen Materialien. Der Einsatz dieser Maßnahme hat maßgeblichen Einfluss auf das gesamte Deponieverhalten. So kam es in den Sommermonaten unterhalb der Folie zu massivem Pflanzenwachstum, wie Schilf und ähnlichen Gewächsen. Die Pflanzen durchdrangen teilweise die Folie und ermöglichten so punktuellen Eintritt von Regenwasser.

Unterhalb der Folien setzte schnell eine Kondensatbildung ein und weichte die oberen 30-40 cm des Deponiefeldes komplett auf und machte bis zur Abtrocknung durch Offenlegung einen Materialeinbau zunächst in diesem Deponieabschnitt unmöglich. Weitere Konsequenzen des abgedeckten Deponiefeldes liegen aber auch in den direkten Auswirkungen auf das Gasbildungspotenzial sowie dem damit verbundenen Austrag von Kohlenstofffrachten über den Gasweg und den Sickerwasserpfad.

Die Untersuchung der möglichen Porenwasserüberdrücke steht ebenfalls in Verbindung mit dem Wassergehalt innerhalb des Deponiekörpers. Durch die Folienabdeckung funktionierte das Testfeld ähnlich einer Deponie für unbehandelte Siedlungsabfälle. Es konnte kein Regenwasser in den Deponiekörper eindringen, und somit wurden die Porenwasserdrücke langsam aber kontinuierlich abgebaut. Wie sich die Porendrücke eines offenen Testfeldes ohne Folienabdeckung entwickeln, konnte nicht untersucht werden.

6 Zusammenfassende Bewertung und Interpretation der Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Untersuchungen in Bezug auf den zukünftigen Umgang mit MBA-Deponien

6.1 Rahmenbedingungen

Spätestens mit Inkrafttreten der Abfallablagerungsverordnung zum 1. Juni 2005 änderte sich die Zusammensetzung des zu deponierenden Abfalls grundlegend. Die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte aus dem Betrieb von Siedlungsabfalldeponien sind auf den abzulagernden MBA-Output nur bedingt übertragbar. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Forschungsprojekten auf dem Gebiet der Abfallbehandlung und der Deponierung von MBA-Abfällen durchgeführt. Aufgrund der geringen Abfallmengen, die den Anforderungen der Abfallablagerungsverordnung entsprachen, konnte das Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen nur mit Kleinstmengen in Deponiesimulationsreaktoren oder im Labor erfolgen.

Im Testfeld der vorliegenden Arbeit wurde bereits seit Ende 2002 abfallablagerungsverordnungskonformes Material deponiert. Das Testfeld ermöglichte es erstmals, großtechnische Erfahrungen mit dem Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen unter realen Bedingungen zu sammeln. Unter realen Deponiebedingungen ist im Vergleich mit den Untersuchungen aus den Laborversuchen mit einem abweichenden Ablagerungs- und Emissionsverhalten der mechanisch-biologisch behandelten Abfälle zu rechnen.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Übertragungs- und Interpretationsmodelle für die Untersuchungen aus den Deponiesimulationsreaktoren veröffentlicht. Wesentlich zu nennen sind hier die Veröffentlichungen von SOYEZ ET AL. 2000 und SCHEELHASE 2002. Die nachfolgend zusammengefassten Ergebnisse der Langzeituntersuchungen werden nicht nur mit dem Ausgangsmaterial im Anlieferungszustand verglichen, sondern auch deren Ergebnisse mit den Erfahrungen und Ergebnissen aus den Deponiesimulationsreaktoren.

6.2 Deponiebetrieb und Material im Anlieferungszustand

Der im Testfeld eingebaute mechanisch-biologisch behandelte Abfall entspricht bereits seit Ende des Jahres 2002 im vollen Umfang den Anforderungen der Abfallablagerungsverordnung. Der Abfall wird nach einer mechanisch-biologischen Behandlung des Siedlungsabfalls und abschließender offener Nachrotte auf der Deponie angeliefert. Das Deponiefeld wird arbeitstägig mittels einer wasserundurchlässigen Folie in dachziegelartiger Verlegungsform abgedeckt.

Das Material wurde unter den im Jahr 2003 geltenden Gesetzen im hochverdichteten Dünnschichteinbau mittels Raupe und Schaffußwalze in das Deponiefeld eingebaut. Abschließend erfolgten einige Überfahrten mit einer Glattmantelwalze, um Vertiefungen der Schaffüße zu glätten und somit die Bildung von Pfützen auf der Folie zu verhindern. Die Aufbringung der Folienabdeckung stellte ein arbeitsintensives Unterfangen dar, welches zwischen 6 und 8 Stunden mit zwei Arbeitern in Anspruch nahm.

Während der Deponierungsphase traten immer wieder Probleme beim Befahren der Einbaufläche auf. Ursache der Probleme war eine auftretende Staunässe unterhalb der Folie, die die ersten 30 cm der Materialoberfläche völlig aufweichte und bis zur Abtrocknung unbefahrbar machte. Eine Verschlammung der Oberfläche wurde auch von MAAK, D.; POSER, H. 1999 beobachtet. Die Verschlammung ist nach den Ergebnissen der Untersuchungen auf den hohen Einbauwassergehalt von 40 % zurückzuführen und wird zusätzlich durch die Folienabdeckung begünstigt. Durch die Folienabdeckung entsteht bei größeren Temperaturwechseln so genanntes Kondensat- bzw. Schwitzwasser unterhalb der Folie. Mit Novellierung der Abfallablagerungsverordnung vom April 2007 wurde die zwingend vorgeschriebene Anforderung der arbeitstägigen Abdeckung gelockert (vgl. Kapitel 6.7).

Neben den negativen Begleiterscheinungen der Wasseransammlungen an der Deponieoberfläche, die durch das Aufbringen der Folien begründet sind, konnte ein weiterer negativer Nebeneffekt festgestellt werden. Auf Deponieabschnitten, auf denen längerfristig kein neues Material abgelagert wurde, bildete sich unterhalb der Folie in den Sommermonaten ein reges Pflanzenwachstum. Teilweise durchdrangen palmenähnliche Gewächse oder Schilf die Folie und wuchsen außerhalb des abgedeckten Deponiekörpers weiter (vgl. Bilder im Anhang).

6.3 Ablagerungsdichte, Einbauwassergehalt und Wasserdurchlässigkeit

Die Höhe der erreichten Verdichtung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen ist im Wesentlichen vom Wassergehalt des zu deponierenden Materials abhängig und unterliegt prinzipiell ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie mineralische Böden. Neben dem Wassergehalt wird die Ablagerungsdichte aber auch von der Korngrößenverteilung bestimmt.

Durch die ermittelte Korngrößenverteilung bei Anlieferung des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls lässt sich anhand der Sieblinie eine Benennung und Klassifizierung des Materials in Anlehnung an die bautechnische Vorgehensweise durchführen. Der Feinkornanteil (d < 0,063 mm) liegt bei kleiner 1,1 % und damit unter der 5 %-Grenze, die das Material des Testfeldes somit als nicht bindig einstuft.

Der Vergleich der Körnungslinien des Anlieferungszustandes und des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls 24 Monate nach der Ablagerung ergab nur geringfügige Abweichungen im Bereich 0,125 mm bis 1,0 mm und 2,0 mm bis 16,0 mm. Damit hat die Ablagerungsdauer keinen Einfluss auf den Feinkorngehalt bzw. den Verlauf der Körnungslinie. Untersuchungen von SCHEELHASE 2002 zeigten ebenfalls,

dass die Rottedauer in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung keinen Einfluss auf den Feinkorngehalt bzw. den Verlauf der Körnungslinie hat. Die mechanische Aufbereitungsstufe der Abfallbehandlung bestimmt die spätere Größenverteilung der Abfallpartikel.

Aufgrund der Heterogenität von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen kann nicht von einem homogenen Material gesprochen werden. Hierzu sind die Kornformen des MBA-Materials zu unterschiedlich. Durch diese unterschiedlichen Kornformen – begründet aus Folienanteilen, Porengrößenverteilungen und unterschiedlichen Eigenschaften aufgrund des Organikanteils – kann das MBA-Material nur unzureichend durch die Korngrößenverteilung erfasst werden [SCHEELHASE 2002].

In zahlreichen Proctorversuchen wurden mit unterschiedlichen Proben Trockendichten zwischen 0,64 und 0,72 g/cm³ ermittelt, wobei die optimalen Wassergehalte starken Schwankungen unterlagen. Dabei lagen die optimalen Wassergehalte zwischen 20,09 und 55,17 %. Dies entspricht einem auf die Feuchtmasse bezogenen (abwassertechnischen) Wassergehalt von 16,70 bis 35,55 %. Es wird deutlich, dass die optimalen Wassergehalte erheblichen Schwankungen bei unterschiedlichen Materialien unterliegen. Die Feuchtdichte lag dabei zwischen 0,77 und 1,04 g/cm^3.

Die theoretisch ermittelte Trockeneinbaudichte lag bei einem Wassergehalt zwischen 35 und 40 % von 0,70 bis 0,71 g/cm³ deutlich unter den im Testfeld ermittelten Werten. Beim Materialeinbau mittels Raupe und Schaffußwalze wurden im vorliegenden Testfeld Einbautrockendichten von 1,11 bis 1,14 g/cm³ gemessen. Diese Werte konnten ebenfalls bei einem Einbauwassergehalt von 35-40 % erreicht werden.

Die Proctoruntersuchungen im Labor können somit nur bedingt auf das reale Deponieverhalten übertragen werden. Die in Anhang 3 der Abfallablagerungsverordnung aufgeführte Anforderung an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen bezüglich eines gering durchlässigen Deponiekörpers und den Nachweis einer höchstmöglichen Verdichtbarkeit mittels Versuchsfeld zur Ermittlung der höchstmöglichen Einbaudichte (Trockendichte) hatte somit absolute Relevanz (vgl. Kapitel 6.7).

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich das Material im realen Deponiefeld deutlich kompakter einbauen lässt, als es die Theorie vermuten lässt. Somit können mechanisch-biologisch behandelte Abfälle mit einer hohen Dichte in die Deponie eingebaut werden, wobei die Abfälle dann nur noch eine geringe Durchlässigkeit aufweisen. Dies bestätigen die geringen Durchlässigkeitsbeiwerte der Laborproben mit 9,95E^{-09} m/s (Probe: SWH 0805/02), 3,95E^{-08} m/s (Probe: SWH 0805/03) und 5,59E^{-09} m/s (Probe: SWH 0805/05) sowie 4,58E^{-09} m/s (Probe: SWH 0805/06). Die hydraulische Leitfähigkeit des Materials wird stark von der Einbaudichte und der Materialzusammensetzung, vor allem dem Anteil der Kunststoffteile beeinflusst. Die Wasserhaltekapazität nimmt mit zunehmender Einbaudichte aufgrund des geringeren Porenvolumens ab.

Würde man die Abfälle nicht mit einer hohen Dichte einbauen, dann müsste gleichwohl davon ausgegangen werden, dass sich die Abfälle unter Auflast nach einer bestimmte Zeit verdichten werden, was wiederum zu einer Abnahme der Durchlässig-

keit führen wird. Aber auch ohne diesen Effekt wird die Durchlässigkeit des Abfallkörpers im Laufe der Zeit abnehmen. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Deponien, sofern Wasser hinzutreten kann, im Laufe der Zeit aufsättigen werden, so dass es auf solchen Deponieflächen Pfützenbildung bzw. Moorbildung geben könnte. Entsprechende Gegenmaßnahmen müssten getroffen werden.

6.4 Temperatur- und Wassergehaltsentwicklung mit Bestimmung des Einflusses auf das Deponieinventar und das Emissionsverhalten

Nahezu alle Reaktionen im Deponiekörper sind stark temperaturabhängig. Mit steigender Temperatur nimmt die chemische Reaktionsgeschwindigkeit stark zu. Zwar wird in den mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen das vom Abfall ausgehende Emissionspotenzial weitgehend abgebaut (bis zu 90%). Jedoch zeigen andere Untersuchungen, dass von den behandelten Abfällen immer noch ein nicht zu unterschätzendes Emissionspotenzial ausgeht. So zeigten auch Untersuchungen von KÜHLE-WEIDEMEIER (A) 2004 Temperaturentwicklungen in MBA-Deponien von bis zu 58°C. Der AT_4 des untersuchten Materials lag hier jedoch zwischen 5 und 10 mg O_2/g TM.

Der Temperaturverlauf im Testfeld zeigt, dass sich die Temperatur zwischen den Einbautiefen deutlich unterscheidet. In der größten Einbautiefe mit 4,60 m wird die Temperatur im Deponiekörper durch die Außentemperatur nicht beeinflusst, befindet sich jedoch mit im Schnitt ca. 40,08°C auf einem sehr hohen Niveau.

Bei den geringeren Einbautiefen zeigt sich eine Beeinflussung der Temperatur im Deponiekörper in den Wintermonaten durch die niedrigen Außentemperaturen. Insgesamt ist festzustellen, dass nur bei einer Sonde Temperaturen auf dem hohen Niveau von bis zu ca. 41°C gemessen wurden. Auffällig ist dabei, dass die Temperatur der Sonde mit einer Einbautiefe von 3,60 m im Mittel ca. 18°C unterhalb der Temperaturwerte der Sonde aus 4,60 m liegt. Dass die Temperatursonden mit den Einbautiefen 0,90 m, 1,80 m, 2,60 m und 3,60 m auf ungefähr vergleichbarem Niveau liegen und bei einer „normalen“ Außentemperatur fast gleiche Werte aufzeigen (Zeitraum Juli bis August 2006), lässt den Rückschluss zu, dass es sich bei den hohen Temperaturen aus der Einbautiefe 4,60 m um einen Hot Spot handelt.

Gegen die Theorie, dass es sich bei der Ursache für diesen Hot Spot nicht um biologische Abbauprozesse, sondern um chemische Reaktionen handelt, spricht, dass nur ein einziger dieser Hot Spots im Deponiekörper bei 15 Sonden festgestellt wurde. Die von KÜHLE-WEIDEMEIER (A) 2004 angeführten hohen Temperaturen in Kunststoffmonodeponien und Schlackedeponien, die auf chemische Reaktionen zurückzuführen sind, können auf das Testfeld nicht übertragen werden. Es ist aufgrund der gemessenen Temperaturen bereits von einem sehr weitgehend stabilen Material auszugehen.

Gemäß RETTENBERGER 2004 zeigen auch herkömmliche Deponien, dass keine kurzzeitigen, sondern lediglich jahreszeitliche Schwankungen bei der Temperaturmessung festzustellen sind, diese aber mit der Tiefe abnehmen. Selbiges kann bei MBA-Deponien festgestellt werden. Dies bedeutet im Rückschluss auch, dass Niederschlag und Sonneneinstrahlung keinen Einfluss auf das abgelagerte Material haben.

DACH 1998 berechnete für mechanisch-biologische Abfalldeponien eine Temperatur zwischen 13°C und 16°C. Großlysimeteruntersuchungen von HENNECKE 1998 zeigten bereits gemessene Temperaturen von 25°C bis 30°C. Nach Untersuchungen von SCHEELHASE 2002 ist von Temperaturen ≤ 30°C auszugehen.

Das Optimum der mesophilen Bakterienstämme liegt im Bereich von 30°C - 35°C, während die Gruppe der thermophilen ihren optimalen Stoffwechsel bei 50°C - 60°C erreicht. Ein Anstieg der Temperatur führt in der Regel zu erhöhter Bakterienaktivität. Unterhalb des entsprechenden Temperaturoptimums verringert sich die Stoffwechseltätigkeit, die Methanproduktion nimmt erheblich ab oder kommt gänzlich zum Erliegen. Der Anteil an Kohlenstoffdioxid nimmt zu. Zu hohe Temperaturen würden zu Schädigungen der Bakterien bis hin zur Abtötung der Biogasbildner führen. Da die durchschnittliche Deponietemperatur deutlich unterhalb des Optimums der mesophilen Bakterienstämme liegt, bleibt fraglich, ob eine langfristige Deponiegasbildung im Deponiekörper stattfinden kann. [DAUBER 1993]

Wesentlichen Einfluss auf die Deponiegasbildung hat neben der Temperatur auch der Wassergehalt des Deponiekörpers. Die durch den Wassergehalt bedingte Feuchtigkeit des Deponiekörpers beeinflusst wesentlich die mikrobielle Aktivität des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls. RETTENBERGER 2004 zeigte auf, dass Niederschlagsereignisse die Durchlässigkeit des Abfallkörpers beeinflussen und die Temperatur im Deponiekörper dahingehend verändern können, dass das mikrobielle Leben im Deponiekörper maßgeblich verändert wird. Bei Wassergehalten größer 60 % WG tritt das semiaquatische System in das aquatische System über, wobei sich die Mikroorganismen in flockiger bis suspendierter Form in der wässrigen Phase verteilen [SCHEELHASE 2002]. Vor der Ablagerung des Materials liegt der eingestellte Wassergehalt bei maximal 40 Gew.-%. Nach 24 Monaten der Ablagerung stieg der Wassergehalt des untersuchten Materials auf 60 bis 80 Gew.-% an.

Eine Korrelation zwischen dem Anstieg des Wassergehaltes und der entnommenen Tiefe des Testfeldes konnte nicht abgeleitet werden. Da die analysierten Proben mittels Spiralbohrer aus dem Testfeld entnommen wurden, ist nicht auszuschließen, dass sich im Deponiekörper ab einer nicht definierbaren Tiefe eine wassergesättigte Schicht gebildet hat. Der Beleg für eine wassergesättigte Zone wäre nur durch einen Schürf zu erbringen, der aber im Bereich des Testfeldes nicht ausgeführt werden konnte.

Der stark angestiegene Wassergehalt ist aufgrund der Abdeckung mit wasserundurchlässigem Material hauptsächlich auf Konsolidierungsvorgänge zurückzuführen. Ergebnisse aus Erbenschwang zeigten innerhalb der elfmonatigen Messperiode eine Setzung von 1,25 % jedoch bei einem AT_4 von ca. 20 mg O_2/g TM. Aus dem höheren

Potenzial an Atmungsaktivität resultiert ein größeres Setzungspotenzial. [KÜHLE-WEIDEMEIER (B) 2004].

Aufgrund des kontinuierlichen Materialeinbaus waren Setzungsmessungen im Bereich des Testfeldes nicht möglich. Die vorliegenden Erfahrungen aus Erbenschwang und anderen Untersuchungen sowie der wesentlich niedrigere AT_4 des Testfeldes lassen den Rückschluss zu, dass eine Setzung kleiner 1 % für das Testfeld zu erwarten ist.

6.5 Porenwasserdrücke und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Standsicherheitsbetrachtung von MBA-Deponien

Bei allen Porendrucksonden ist ein signifikanter Anstieg des Porenwasserdrucks nach Aufbringung der künstlichen Last festzustellen. Die gemessene Porenwasserdruckänderungen während der Beaufschlagung mit Last betrugen bis zu Δ u = 0,40 bar. Das Material ist bestrebt, den durch die äußerlich aufgebrachte Last gestiegenen Porendruck wieder in den Gleichgewichtszustand zu bringen. Der Porenwasserdruck baut sich dabei durch allmähliches Abströmen des Porenwassers ab.

Der Porenwasserdruck baut sich innerhalb von 14 Tagen deutlich wieder ab, erreicht aber erst nach 60 Tagen wieder seinen Ausgangswert. Im weiteren Verlauf des Versuchszeitraumes baute sich der Porendruck kontinuierlich, aber sehr langsam ab.

Untersuchungen von OBERMANN 2000, FRIEDRICH 2002 und KÜHLE-WEIDEMEIER (A) 2004 zeigen, dass bei Simulierungen mit dem Modell WATFLOW, in dem die Eigenschaften des zu simulierenden Abfalls sehr genau angepasst werden können, 900 mbar bis hin zu 2.200 mbar Porenwasserüberdruck entstehen können. Diese Werte beziehen sich ebenfalls auf eine Deponiehöhe von 10-15 m. Bei den Werten von OBERMANN 2000 UND KÜHLE-WEIDEMEIER (A) 2004 fällt auf, dass die maximalen Porenwasserüberdrücke erst etwa ab 12 m oberhalb der Deponiebasis auftreten. Im Modell von FRIEDRICH 2002 sind die maximalen Porenwasserüberdrücke jedoch basisnah angesiedelt. Bei allen Modellrechnungen wurde jedoch eine Niederschlagsmenge berücksichtigt, die im Testfeld aufgrund der wasserundurchlässigen Abdeckung nicht vorhanden war.

Bei Porendrücken des Testfeldes zwischen minimal 160 mbar und maximal 350 mbar sind kritische Porenwasserüberdrücke nicht zu befürchten. Somit besteht im Inneren des Testfeldes die Möglichkeit des Abströmens des Porenwassers, auch wenn dies nur sehr langsam erfolgt. Letztlich ist die Standsicherheit dieser Deponie durch Porenwasserdrücke nicht gefährdet. Während des gesamten Untersuchungszeitraumes waren keine Stabilitätsprobleme zu erkennen. Wie sich Porenwasserdrücke bei einer fehlenden Abdeckung und damit eindringendem Niederschlagswasser verhalten, konnte während des Untersuchungszeitraumes nicht eruiert werden, da das Testfeld kontinuierlich abgedeckt war (vgl. Kapitel 6.7).

Nicht in Betrieb befindliche Deponieabschnitte sollten jedoch auch in Zukunft aufgrund der möglichen Porenwasserdrücke mit einer wasserdichten Abdeckung versehen werden. Diese abgedeckten Deponieabschnitte müssen dann bei Bedarf für einen erneuten Materialeinbau jedoch rechtzeitig abgedeckt werden, damit über den Verdunstungsprozess das gestaute Kondenswasser den Deponiekörper verlassen kann.

Sollten bei anderen Deponien dennoch Porenwasserüberdrücke zu erwarten sein, so ist es nur schwer möglich, diese durch betriebliche Maßnahmen zu mindern. In diesem Fall wäre eine Rückkehr zur Abdeckung bzw. das Vorsehen von Dränagelagen empfehlenswert. Zur Beurteilung der Standsicherheit kann das Einrichten von Porenwasserdruckaufnehmern im Deponiekörper eine sinnvolle Maßnahme darstellen.

6.6 Deponiegasemissionen

Das Gasbildungspotenzial kann nach Untersuchungen von SCHEELHAASE 2002 bei biologisch vorbehandelten Abfällen um ca. 90 % reduziert werden. Die Gaspotenzialmessungen in DSR zeigten, dass bei mechanisch biologisch vorbehandelten Abfällen das Entgasungspotenzial nur noch bei 15 bis 30 l_n/kg TM liegt.

Die Untersuchungen im Testfeld ergaben, dass vermutlich aufgrund der arbeitstägigen Abdeckung mittels Folie die Gaswegigkeit noch gegeben ist. Relevante Gasdrücke waren im Feld nicht messbar. Aufgrund der niedrigen Gasbildungsrate von 25 l_n/kg TM ist jedoch eine aktive Entgasung unter ökologischen sowie ökonomischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll umzusetzen.

Entgegen Untersuchungsergebnissen von BOCKREIS 2004, in denen der Anteil von Kohlenstoffdioxid bei unbehandeltem Abfall deutlich höher war als bei dem von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, zeigt sich in den Analyseergebnissen der Testfeldproben ein deutlich erhöhter Anteil an Kohlenstoffdioxid im Deponiegas aus dem Testfeld, der dafür steht, dass sich das Material kurz nach Ablagerung in der instabilen Methanphase (Gasphase III) befindet. Das übliche Verhältnis von Methan zu Kohlenstoffdioxid aus unbehandelten Abfällen von 60:40 stellt sich erst nach einiger Ablagerungszeit ein. Innerhalb von 100 bis 150 Tagen nach Materialeinbau wechseln die meisten Ablagerungsbereiche in die Langzeitphase (Gasphase IV).

Untersuchungen von BOCKREIS, STEINBERG 2004 zeigten, dass die Zusammensetzung des gebildeten Gases bei mechanisch-biologisch behandelten Abfällen unterschiedlich zu dem von unbehandelten Abfällen ist. Der Anteil an Kohlenstoffdioxid bei den mechanisch-biologisch behandelten Abfällen liegt deutlich niedriger als bei unbehandelten. Die Ergebnisse des Testfeldes zeigen abweichende Werte zu den Untersuchungen von BOCKREIS, STEINBERG 2004. Der Anteil an Kohlenstoffdioxid in den Gasproben aus dem Testfeld liegt in vergleichbarer Nähe des Gasphasenmodells für herkömmliche Hausmülldeponien.

Grundlage der Ergebnisse für die Deponiegasemissionen sind der mittlere k_f-Wert des Testfeldes von $1E^{-8}$ m/s sowie der hochverdichtete Materialeinbau bei einem Wassergehalt von 40 Gew.-%. Damit entspricht der mittlere k_f-Wert des Testfeldes den Erwartungen von DACH, OBERMANN, JAGER, OSTROWSKI, 1997 für feinkörnigere mechanisch-biologisch behandelte Abfälle. Es ist von einer verminderten Infiltration des Niederschlags auszugehen, sollte das Testfeld nicht mehr mit Folie abgedeckt werden.

Die zu erwartenden Methanemissionen an der Deponieoberfläche liegen analog einem Restgaspotenzial von ca. 25 l_n/kg TM nach SOYEZ ET AL. 2000 zwischen 0,55 bis 0,95 l/m²·h. Gemessen wurde im Testfeld eine etwas geringere mittlere Methanmenge von 0,51 l/m²·h. Nach SOYEZ ET AL. 2000 ist bei diesen Mengen eine konventionelle aktive Entgasung über Gasbrunnen nicht zweckmäßig. Alternativ sollten passive Entgasungsmaßnahmen wie eine methanoxidierende Abdeckung angestrebt werden. Eine solche Maßnahme kann mit Hilfe der Rekultivierungsschicht umgesetzt werden [FIGUEROA 1998].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass von einem so weitreichend stabilisierten mechanisch-biologisch behandelten Abfall kein umweltrelevantes Gefährdungspotenzial bezüglich der Gasemissionen mehr ausgeht, insofern nach Abschluss eines Deponieabschnittes passive Entgasungsmaßnahmen getroffen werden.

6.7 Gesetzliche Entwicklungen während der wissenschaftlichen Untersuchungen und der damit verbundenen Auswirkungen auf den Deponiebetrieb bzw. das Deponieinventar und die vorliegenden Untersuchungsergebnisse

Ein Großteil dieser Arbeit wurde vor der Novellierung der Abfallablagerungsverordnung vom 13.12.2006 und der Überführung der Abfallablagerungsverordnung in die Deponieverordnung vom 16.07.2009 durchgeführt. Bei der Überführung der Abfallablagerungsverordnung in die Deponieverordnung hat dies im Wesentlichen einen Einfluss auf die entfallenen Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen. Die in Anhang 3 der AbfAblV aufgeführten Punkte wurden bereits mit Novellierung der AbfAblV wesentlich verändert und entfielen ganz im Zuge der Verabschiedung der Deponieverordnung. In Tab. 6-1 sind die Auswirkungen der neuen Deponieverordnung auf die jeweiligen Wirkungspfade aufgezeigt.

Tab. 6-1: Veränderung der Wirkungspfade und Maßnahmen des optimierten Deponiebetriebes nach Inkrafttreten der Deponieverordnung vom 16.07.2009 [URSPRÜNGLICH: RETTENBERGER; FRICKE 1999; ÜBERARBEITET]

Wirkungspfad	Maßnahmen nach DepV für den Deponiebetrieb	Konsequenzen bzw. Auswirkungen auf das Deponieinventar und den Deponiebetrieb
Sickerwasser	Entfall der Reduzierung der Einbaufläche auf das im Einbaubetrieb geringstmögliche Maß.	Der ursprünglich verringerte Eintrag von Niederschlagswasser und die damit verminderte Sickerwasserneubildung werden umgekehrt. Bei großer nicht abgedeckter Einbaufläche wird der Sickerwasseranfall deutlich steigen und somit die Behandlungs- und Betriebskosten zur Reinigung/Klärung des Deponiesickerwassers wesentlich verteuern.
	Entfall der Profilierung des Arbeitsbereiches mit einem Gefälle zwischen 5 und 10 %. Keine gezielte und kontrollierte Ableitung des Niederschlagswassers mehr notwendig. Die Oberfläche ist nicht zwingend zu glätten und weitere bautechnische Maßnahmen zur Minimierung des Eintrages von Niederschlagswasser sind nicht zwingend zu treffen.	Bei nicht abgedecktem Deponiefeld und gering verdichtetem Einbau ist mit größeren Niederschlagsmengen, die in den Deponiekörper eindringen, zu rechnen. Das Sickerwasser muss anschließend kostenintensiv behandelt werden. Es kommt zu Erosionen an der Oberfläche des MBA-Materials. Es entwickeln sich Porenwasserüberdrücke, diese führen zu einer Herabsetzung der Standsicherheit des Deponiekörpers.
	Der Abfall muss nicht mehr im Dünnschichtverfahren verdichtet eingebaut werden. Der optimale Wassergehalt wird nicht mehr bindend vorgeschrieben, um eine höchstmögliche Verdichtbarkeit zu gewährleisten.	Anstieg des Porenvolumens und damit Erhöhung des Eintrages von Niederschlagswasser. Gefahr der Entwicklung von Porenwasserüberdrücken und somit Herabsetzung der Standsicherheit des Deponiekörpers. Durch das gestiegene Porenvolumen und den größeren Wassergehalt steigt die Deponiegasentwicklung. Die Gaswegigkeit nimmt zu und die Bedingungen für die Bildung von Deponiegas werden durch die höheren Wassergehalte verbessert.
	Materialeinbau kann, soweit technisch möglich, bei jedem Wetter erfolgen.	Während des Materialeinbaus kann Niederschlagswasser in den Deponiekörper eindringen. Der Sickerwasseranfall steigt deutlich und somit werden sich die Behandlungs- und Betriebskosten zur Reinigung/Klärung des Deponiesickerwassers verteuern. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass Einbaugeräte im feuchten Material stecken bleiben und sich Presswasser bildet.
Deponiegas	Die Einbaufläche muss nicht mehr auf das im Einbaubetrieb geringstmögliche Maß beschränkt werden.	Die Deponieabschnitte können bei großen Einbauflächen nicht mehr mit Methanoxidationsschichten passiv entgast werden.

		Bei großen Einbauflächen kann viel Niederschlagswasser in den Deponiekörper eindringen und somit Kosten bei der Behandlung verursachen bzw. die Bildung von Deponiegas begünstigen.
Setzungen	Kein hochverdichteter bzw. verdichteter Dünnschichteinbau mittels Schaffuß- und Glattmantelwalze vorgeschrieben.	Das benötigte Deponievolumen steigt an, die Kosten für den benötigten Deponieraum werden teurer. Das vormals minimierte Porenvolumen steigt an, und aufgrund der fehlenden Abdeckung kann das eintretende Regenwasser zur Entwicklung von Porenwasserüberdrücken führen und die Standsicherheit des Deponiekörpers deutlich herabsetzen. Die Gaswegigkeit nimmt zu. Es wird zu deutlichen Setzungen im Deponiekörper kommen, die ebenfalls die Standsicherheit des Deponiekörpers gefährden können.

6.8 Notwendige Anpassungen der Deponietechnik für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle und Handlungsempfehlungen für Deponiebetreiber bezogen auf die neue Deponieverordnung vom 27.04.2009

Mechanisch-biologisch behandelte Abfälle zeigen völlig veränderte geomechanische Eigenschaften und das Emissionspotenzial ist weitgehend reduziert. Dies erforderte eine Anpassung der Deponietechnik bezüglich Materialeinbau und Deponiebetrieb.

Durch die Anforderungen des Anhanges 3 der Abfallablagerungsverordnung wurden klare Vorgaben bezüglich Einbaufläche, Gefälle, Einbaudichte, Wassergehalt und Deponieabdeckung getroffen. Festgestellt werden konnte, dass durch diese Vorgaben und die vorangegangene Behandlung des Abfalls der Deponiekörper ein einheitlicheres Emissionsverhalten aufweist als herkömmliche Hausmülldeponien. Mit Inkrafttreten der neuen Deponieverordnung vom 27.04.2009 entfiel die Vorgabe der Anforderungen an den Einbau von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen. Den Deponiebetreibern wird somit ein erweiterter Handlungsspielraum eingeräumt. Um einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Deponiebetrieb sicherzustellen, sollten jedoch die nachfolgenden Maßnahmen berücksichtigt werden.

Der mechanisch-biologisch behandelte Abfall sollte auch zukünftig verdichtet in den Deponiekörper eingebaut werden. Hierzu eignen sich die in dieser Arbeit beschriebenen Methoden. Der verdichtete Einbau mit den damit einhergehenden hohen Ablagerungsdichten und dem weitgehend vorweggenommenen Abbau organischer Substanz lässt nur noch geringfügige Setzungen zu. Die geringen Setzungen verringern das Potenzial der Gefahr von Standsicherheitsproblemen und wirken sich positiv auf passive Methanoxidationsschichten aus, da diese Oberflächenabdichtungssysteme nicht durch große Setzungen beschädigt werden können.

Aufgrund der hohen Einbaudichten sind die Deponiekörper für Wasser- und Deponiegas deutlich undurchlässiger. Durch die zusätzlich aufgebrachte wasserundurchlässige Folie fallen nur sehr geringe Sickerwassermengen an und reduzieren so die Behandlungskosten für das Sickerwasser. Der Einbauwassergehalt sollte zur Erreichung einer optimalen Ablagerungsdichte und zur Vermeidung von Presswasser zwischen 30 – 35 % liegen. Durch den niedrigen Einbauwassergehalt und die zusätzliche Abdeckung des Deponiekörpers mittels Folie können Porenwasserüberdrücke vermieden werden, was sich ebenfalls positiv auf die Standsicherheit des Deponiekörpers auswirkt. Das Gefälle sollte zwischen 5 - 10 % liegen, damit Oberflächenwasser ablaufen kann. Eine Abdeckung der Deponieabschnitte ist in den Monaten mit verstärktem Regenaufkommen sowie im Winter sinnvoll. Während der Sommermonate kann das Deponiefeld unabgedeckt betrieben werden, da bei geringen Niederschlagsmengen und dem niedrigen Durchlässigkeitsbeiwert bei verdichtetem Einbau nicht mit großen Sickerwassermengen an der Deponiebasis zu rechnen ist.

Das im Testfeld beobachtete Kondenswasser unterhalb der Folie sowie das in den oberen Bereich des Deponiekörpers eingedrungene Regenwasser kann bei Sonnenschein und Wind relativ schnell abtrocknen, und ein weiterer Materialeinbau ist ohne größere Behinderung des Deponiebetriebes möglich. Im Herbst, Winter und Frühjahr sollte das Deponiefeld jedoch mit wasserundurchlässigem Material abgedeckt werden, um Erosionen an der Oberfläche zu verhindern und eine Aufsättigung des Deponiekörpers mit den Folgen von Porenwasserüberdrücken und erhöhtem Sickerwasseraufkommen zu vermeiden.

Auf eine aktive Deponiegasfassung kann aufgrund der niedrigen Deponiegasmengen verzichtet werden. Nach Abschluss des Deponiefeldes sollte eine methanoxidierende Oberflächenabdichtung aufgebracht werden. Zu diesem Zweck ist die Einbaufläche des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls möglichst gering zu halten, damit ein Deponieabschnitt schnellstmöglich mit einer Methanoxidationsschicht abgeschlossen werden kann und somit das klimaschädliche Methan oxidiert wird.

Ein Deponiebetrieb nach diesen Vorgaben entspricht den Forderungen des Anhanges 5, Nr. 6 der Deponieverordnung, nachdem ein Deponiebetreiber den Anfall von Sickerwasser so gering zu halten hat, wie dies nach dem Stand der Technik möglich ist. Aufgrund der geringen Sickerwassermengen und des verdichteten Materialeinbaus stellt der Deponiekörper mit mechanisch-biologisch behandelten Abfällen kein umweltrelevantes Gefährdungspotenzial bezogen auf die Deponiegasemissionen dar, insofern nach Abschluss des Deponiekörpers eine Methanoxidationsschicht als Oberflächenabdichtung aufgebracht wird.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Abfalldeponien sind und bleiben mindestens bis zum Jahre 2020 in Deutschland Bestandteil unseres ökonomischen und ökologischen Abfallentsorgungssystems. Das Abfallentsorgungssystem bedarf als solches einer permanenten Optimierung im Spannungsfeld zwischen zumutbarer ökonomischer Belastung und ökologischen Erfordernissen. Die Deponie stellt ein Bauwerk dar, das sich bisher durch seine unabsehbar langen Nachsorgezeiträume auszeichnete und nur mit Hilfe von Prognosen bewertet werden konnte. Die Erstellung solcher Prognosen ist von entscheidender Bedeutung für Deponiebetreiber und nachfolgende Generationen. Denn sowohl die Abfallbehandlung als auch die Abfallablagerung sind mit direkten und indirekten Umweltbelastungen verbunden.

Bei allen abfallwirtschaftlichen Maßnahmen fallen Kosten an, die vom Abfallerzeuger bzw. letztendlich der Gesellschaft zu tragen sind. Daraus folgt die Aufgabe einer ökologischen Optimierung des gesamten abfallwirtschaftlichen Systems, also auch der Deponien, unter der Berücksichtigung der ökologischen und ökonomischen Randbedingungen.

Die vorliegende Arbeit spricht Empfehlungen für Deponiebetreiber aus, die eine langfristige Sicherung der gesetzlichen Anforderungen an das Ablagern von MBA-Material gewährleisten. Somit wird der Forderung nach einem nachhaltigen Schutz der Umwelt Rechnung getragen. Eine solche Sicherung ermöglicht einen langfristig ökonomisch und ökologisch tragbaren Deponiebetrieb und somit die nötige Planungssicherheit für Deponiebetreiber.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass MBA-Deponien unter den beschriebenen Bedingungen ohne größere Probleme betrieben werden können. Im zuvor beschriebenen Spannungsfeld zwischen zumutbarer ökonomischer Belastung und ökologischen Erfordernissen sollte vor allem die Auswirkung der Oberflächenabdeckung mit wasserundurchlässigem Material untersucht werden. Die Auswirkungen einer nicht gegebenen arbeitstägigen Abdeckung erstrecken sich über die zu behandelnden Sickerwassermengen, Standsicherheitsbedenken aufgrund von Porenwasserüberdrücken bis hin zu fehlender Gaswegigkeit aufgrund von Wassersättigung.

Im Testfeld konnten keine Untersuchungen hinsichtlich Sickerwassermenge und Sickerwasserqualität durchgeführt werden. Das Restemissionspotenzial eines mechanisch-biologisch behandelten Abfalls ist jedoch aufgrund der weitgehenden Stabilisierung nur über den Wasserpfad der Deponie zu bewerten. Bei zukünftigen Untersuchungen sollten die Sickerwassermenge und die Sickerwasserqualität beurteilbar sein.

Die Notwendigkeit weiterführender großtechnischer Untersuchungen wurde ebenfalls von MINGLIANG XIE 2002, ENTENMANN 2005, KÖLSCH 2004, KÜHLE-WEIDEMEIER 2001 und MÜNNICH 2005 hervorgehoben.

8 Literatur

ANONYM 1993. Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz TASi – TA Siedlungsabfall vom 14. Mai 1993, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, Bundesanzeiger Nr. 99a

ANONYM 1994. KrW-/AbfG – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen vom 27. September 1994

ANONYM 1999. Abfalldeponierichtlinie (1999/31/EG): Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien (ABl. Nr. L 282 vom 05/11/1999 S. 0016 – 0016).

ANONYM 2001. AbfAblV – Abfallablagerungsverordnung (2001): Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen vom 20. Februar 2001, zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 13.12.2006 I 2860

ANONYM 2002. DepV − Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) vom 24.07.2002, BGBl. I 2807, zuletzt geänd. BGBl. I (2004) 2190.

ANONYM 2003. (2003/33/EG) Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG (ABl. Nr. L 11 vom 16.01.2003 S. 11)

ANONYM 2006. Verordnung zur Umsetzung der Ratsentscheidung vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien, BGBl., Jg. 2006, Teil 1, Nr. 59, vom 16.12.2006.

ANONYM 2009. Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung − DepV) Ausfertigungsdatum: 27.04.2009, zuletzt geändert BGBl. I S. 900

ASA 2005. MBA-Steckbriefe 2005/2006, Erfassung und Auflistung aktueller Daten über mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlagen in Deutschland, Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA) e.V., Ennigerloh 2005

ASA 2006. Neubewertung der Vorgaben der AbfAblV zur Qualität des MBA-Deponats − insbesondere TOC Eluat, Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA) e.V., http://www.asa-ev.de/fileadmin/download/rubrik/05_Stellungnahme/ASA_Neubewertung_Vorgaben_AbfAblV.pdf, eingesehen am: 20.12.2006

BAUER, J.; MÜNNICH, K.; FRICKE, K. 2007. Influence of hydraulic properties on the stability of landfills, in: Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium Cagliari, Italien 2007

BAUER, J.; MÜNNICH, K.; FRICKE, K. 2008. Bestimmung von Festigkeitskenngrößen für MBA-Reststoffe, Müll und Abfall, 03/2008, Seiten 122-127, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2008

BAUER, J.; MÜNNICH, K.; FRICKE, K. 2009. Response of MBT residues in large scale triaxial compression tests, in: Sardinia 2009, 12th International Waste Management and Landfill Symposium Cagliari, Italien 2009

BEHREND, A. 2002. Betriebserfahrungen beim Einbau von MBA Abfällen, in: Fachtagung Mechanisch-biologische Abfallbehandlung mit Ablagerung und Verwertung, Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Behandlung (ASA), Hannover 2002

BIDLINGMAIER, W.; SCHEELHASE, T.; MAILE, A. 1999. Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll auf der Deponie, Hrsg. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Förderkennzeichen 1490952, Essen 1999

BLÜMEL, W.; GALLENKEMPER, B.; WILMSMEIER, D. 2010. Zur Standsicherheit von MBA-Deponien, Internationale 8. Abfalltage, ASA e.V. vom 24.-26. Februar 2010, Hannover 2010

BOCKREIS, A.; STEINBERG, I.; 2006. Schwankungsbreiten bei der Analytik von Zuordnungskriterien (AbfAblV), http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C28895714_N28893981_ L20_D0_I598, Eingesehen am: 13.12.2008

BOCKREIS, A.; STEINBERG, I.; 2004. Emissionen mechanisch-biologisch behandelter Abfälle bei der Deponierung- eine Bilanz aus Langzeitversuchen, in: Abfallforschungstag 2004; Hrsg. M. Kühle-Weidemeier, Wasteconsult International, Cuvillier Verlag, Göttingen 2004

BOCKREIS, A.; BROCKMANN, C.; JAGER, J. 2000. Testmethoden für die Bewertung der Ablagerungseignung von MBA-Abfällen, in: Die Zukunft der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung, Hrsg. Soyez, K. et al., Brandenburgische Umwelt Berichte, Band 6, Potsdam 2000

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2006. Begründung für die Verordnung zur Umsetzung der Ratsentscheidung vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien, in der Fassung des Kabinettbeschlusses vom 08. Februar 2006, Berlin 2006

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2008. http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/gabriel-deponierecht-wird-einfacher/;
Eingesehen am: 04.12.2009

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT 2009. http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/neue_rechtsvorschriften/doc/41593.php;
Eingesehen am: 04.12.2009

COLLINS, H.-J.; BRAMMER, F.; MAAK, D. 1998. Ergebnisse der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung bei mehrjährigem Praxisbetrieb, EP EntsorgungsPraxis; 16. Jhrg., Seiten 26-29 und 36-41, Bertelsmann Verlag, Gütersloh 1998

CUHLS, C.; HAFERMANN, C.; CLEMENS, J.; 2006. Differenzierung des Parameters DOC im Eluat http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C28901366_N28893981_L20_D0_I598, Eingesehen am: 13.12.2008

DACH, J.; DANHAMER, H.; OBERMANN, I. 1999. Prognose der Sickerwasser-, Deponiegas- und Temperaturentwicklung von Deponien mit MBA-Abfällen, ZAF-Heft 14 der TU Braunschweig, S 23 – 35, Braunschweig 1999

DACH, J.; OBERMANN, I.; JAGER, J.; OSTROWSKI, M.-W. 1997. Wasser- und Gastransport in Deponien mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, Wasser & Boden, Nr. 06, Jhrg.: 49, S. 9 – 14, Parey Buchverlag, Berlin 1997

DACH, J. 2000. Anforderungen an die Deponierung von MBA-Abfällen, Brandenburgische Umweltberichte (BUB), Nr. 6, Seiten 98-113, 2000

DACH, J. 1998. Deponiegas- und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach mechanisch-biologischer Abfallbehandlung, Schriftenreihe WAR, Band 107, Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt, Dissertation, Darmstadt 1998

DACH, J.; TIEBEL-PAHLKE, C., 2003. Deponiekonzeptionen für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle, http://www.atus.de/fachtexte/Deponiekonzeption.pdf, Eingesehen am 03.12.2003

DACH, J.; WARNSTEDT, A.; MÜLLER, G.; 2006. Erfahrungen und Optimierungsansätze zur Einhaltung des TOC im Eluat , http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C28902409_N28893981_L20_D0_I598, Eingesehen am: 13.12.2008

DANHAMER, H.; JAGER, J. 1999. Gasbildung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle, EP EntsorgungsPraxis; 4. Jhrg., Seiten 36-42, Bertelsmann Verlag, Gütersloh 1998

DAUBER, S. 1993. Einflußfaktoren auf die anaeroben biologischen Abbauvorgänge, in: Böhnke B., Bischofsberger W. und Seyfried C. F. (Hrsg.), Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg − New York 1993

DOEDENS, H. 2006. Status der Erreichung der Ablagerungskriterien in MBA, http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C28894080_N28893981_L20_D0_I598, Eingesehen am: 13.12.2008

DOEDENS, H.; GALLENKEMPER, B.; KETELSEN, K.; KRANERT, K.; FRICKE, K. 2007. Status MBA in Deutschland, Müll und Abfall, 12/2007, Seiten 576 - 597, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2007

DREXLER, K. 1999. Temperaturentwicklung und Gasproduktion in Deponien für Rückstände aus der thermischen Behandlung, ZAF-Heft 14 der TU Braunschweig, S 37– 50, Braunschweig 1999

ENTENMANN, W. 2010. Betrieb, Verdichtungskontrolle und Standsicherheit von MBA-Deponien, Müll und Abfall, 11/2010, Seiten 544 - 550, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2010

ENTENMANN, W. 2005. Einbauversuche mit AbfAblV- konformen MBA-Output, in: 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 8, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Münster 2005

FEHRER, K. 2002. Geotechnisches Verhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, Institut für Wasservorsorge, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft, Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Diplomarbeit, Wien 2002

FIGUEROA, R.-A. 1998. Gasemissionsverhalten abgedichteter Deponien: Untersuchung zu Gastransport durch Oberflächenabdichtungen sowie zum mikrobiellen Abbau von Methan und FCKWs in Rekultivierungsschichten, Hamburger Berichte, Band 13, Economica Verlag, Bonn 1999

FRICKE, K.; MÜLLER, W.; ET AL. 1999. Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponierung. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben TP 2/1 im BMBF-Verbund, „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, CD mit den Abschlussberichten sämtlicher Teilprojekte, Hrsg. Universität Potsdam, Potsdam 2001

FRICKE, K.; MÜLLER, W.; ET AL. 2002. Stabilitätskriterien für biologisch behandelten Restmüll, Konsequenzen für den Bau und Betrieb von MBA-Anlagen und Deponien, Müllhandbuch, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2002

FRIEDRICH, R. 1998. Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4 TASi für die Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 110, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1998

GALLENKEMPER, G.; ROHRING, D. 2007. Praxiserfahrungen mit dem Einbau von MBA-Deponat im Deponiebetrieb, Müll und Abfall, 12/2007, Seiten 580-584, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2007

HEERENKLAGE, J.; STEGMANN, R. 2006. Bestimmung der Stabilitätskriterien von MBA-Material in der Praxis, in: Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft, Deponietechnik 2006, Band 29, Hrsg. Stegmann, R.; Rettenberger, G., Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart 2006

HEISS-ZIEGLER, C.; FEHRER, K. 2003. Geotechnical behaviour of mechanically-biologically pre-treated waste (MSW), Proceedings Sardinia 2003, International Waste Management and Landfill Symposium, Hrsg.: T. H. Christensen, R. Cossu & R. Stegmann, Sardinien 2003

HENNCKE, D. 1999. Deponieverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen, Shaker Verlag, Aachen 1999

HEYER, K.-U.; STEGMANN, R. 1997. Abschlussbericht zum Teilvorhaben 4 im BMBF-Verbundvorhaben Deponiekörper: „Langfristiges Gefährdungspotential und Deponieverhalten von Ablagerungen“, Förderkennzeichen BMBF: 1460799 D3, Hamburg 1997

HÖRING, K.; EHRIG, H.-J. 1997. Langfristige Emissionen aus Ablagerungen mechanisch-biologisch vorbehandelter Restabfälle, in: 5. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Münster 1997

HUBER, W.; KOTTMAIR, A.; HERTEL, M.; HOPPENHEIDT, K. 2000. Ablagerung von biologisch vorbehandeltem Restabfall − Praktische Erfahrungen bei einem großtechnischen Versuch auf der Deponie Erbenschwang, Umweltpraxis, Nr. 3, S. 40 – 45, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2000

HUPE, K. 2006. Einbauversuche mit MBA-Reststoffen: Erfahrung von der Deponie Hillern, in: Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft, Deponietechnik 2006, Band 29, Hrsg. Stegmann R., Rettenberger G., Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart 2006

INGENIEURGRUPPE RUK GMBH 2005; Projektierungsunterlagen zum Umbau einer MBA zur Einhaltung der 30. BImSchV, Stuttgart 2005

KETELSEN, K. 2006. Einfluss von Abfallzusammensetzung, Verfahrenstechnik und Anlagenbetrieb, MBA Workshop Hannover vom 06.09.2006, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz, Hannover 2006

KETELSEN, K. 2000. Kosten der mechanisch-biologischen Behandlung, in: Die Zukunft der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung, Hrsg. Soyez, K. et al., Brandenburgische Umwelt Berichte, Band 6, S. 237 – 252, Potsdam 2000

KIPPENBERGER, F.; WOLLENWEBER, J. 1998. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Mechanisch-Biologischen Restabfallbehandlungsanlage (MBA) im Vergleich zur Ablagerung bzw. thermischen Behandlung von Restabfällen, Müll und Abfall, 06/1998, Seiten 384 - 388, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1998

KLÜMPER, A. 1998. Untersuchung und Bewertung des geotechnischen Verhaltens von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen auf Grundlage der Bestimmung ausgewählter bodenmechanischer (abfallmechanischer) Parameter, Universität Gesamthochschule Essen, Diplomarbeit, Essen 1998

KOCKEL, R. 1995. Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Heft 24, Ruhr Universität Bochum, Dissertation, Bochum 1995

KÖLSCH, F. 1996. Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 133/96, Braunschweig 1996

KÖLSCH, F. 2004. Geotechnische Erfordernisse für Deponien nach 2005, in: Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft, Deponietechnik 2004, Band 22, Hrsg. Stegmann, R.; Rettenberger, G., Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart 2004

KÖLSCH, F. 2003. Standsicherheitsuntersuchung auf der Deponie Hildesheim-Heinde, 1. Symposium Umweltgeotechnik, Bauhaus-Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, Hrsg.: Witt, Katzenbach, Heft 10, Band 2, Weimar 2003

KÜHLE-WEIDEMEIER, M. 2007. Probenahme und Aufbereitung von Abfallproben aus der MBA, in: Abfallforschungstag 2007; Hrsg. M. Kühle-Weidemeier, Wasteconsult International, Cuvillier Verlag, Göttingen 2007

KÜHLE-WEIDEMEIER, M.; LANGER, U.; HOHMANN, F. 2007. Anlagen zur mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung, Zusammenfassender Abschlussbericht, Umweltforschungsplan (2006) des Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 206 33 301 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Göttingen 2007

KÜHLE-WEIDEMEIER (A), M. 2004,. Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Restabfälle in Deutschland, Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Hannover 2004

KÜHLE-WEIDEMEIER (B), M. 2004. Klasse 2 Deponievolumen und Abfallbehandlung angesichts des Auslaufens von Übergangsvorschriften 2005/2009, in: Abfallforschungstag 2004; Hrsg. M. Kühle-Weidemeier, Wasteconsult International, Cuvillier Verlag, Göttingen 2004

KÜHLE-WEIDEMEIER, M. 2005. Basics and concepts for landfilling of MBT output, in: International Symposium MBT 2005; Hrsg. M. Kühle-Weidemeier, Wasteconsult International, Cuvillier Verlag, Göttingen 2005

KÜHLE-WEIDEMEIER, M.; DOEDENS, H.; VON FELDE, D. 2001. Die Deponierung von MBA-Output, in: 7. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 4, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Münster 2001

KÜHLE-WEIDEMEIER, M.; LANGER, U. 2006. Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle, Müll und Abfall, 04/2006, Seiten 202 - 209, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2006

LAGA PN 98 2001. Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2002

LFU BADEN-WÜRTTEMBERG 2001. Durchführung von Deponiegasmessungen bei Altablagerungen, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Altlasten und Grundwasserschadensfälle 34, Karlsruhe 2001

MAAK, D. 2001. Einbautechnik mechanisch-biologisch behandelter Abfälle, in: Abluftbehandlung bei MBA und Deponiebetrieb − Konsequenzen für die Praxis, Schriftenreihe des ANS e.V., Band 42, Hrsg. Fricke, Burth, Dicht, Wallmann, Kaiserslautern 2001

MAAK, D.; POSER, H. 1999. Auswirkungen der veränderten Abfalleigenschaften auf den Deponiebetrieb, in: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen, Zentrum für Abfallforschung, Heft 14, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 1999

MEHLHORN, G. 1995. Der Ingenieurbau, Grundwissen Hydrotechnik/Geotechnik, Ernst & Sohn, Berlin 1995

MÖLLER, G. 1998. Geotechnik: Teil 1/Bodenmechanik, Werner Verlag, Düsseldorf 1998

MÜNNICH, K. 1999. Hydraulische Kenngrößen von mechanisch-biologisch behandeltem Abfall, ZAF-Heft 14 der TU Braunschweig, S. 11 – 22, Braunschweig 1999

MÜNNICH, K.; BAUER, J. 2006. Ablagerung von MBA Deponat – geomechanische Parameter und Standsicherheit für Deponien, in: Internationale 6. ASA-Abfalltage, Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung MBA in Bewährung, Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Behandlung (ASA), S. 327 – 3337, Hannover 2006

MÜNNICH, K.; FRICKE, K. 2005. Qualität von Sicker- und Oberflächenwasser von MBA-Deponien, in: 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 8, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Münster 2005

MÜNNICH, K.; BAUER, J.; BAHR, T.; FRICKE, K. 2005. Landfilling of pre-treated waste – Consequences for the construction and operation of landfills, Conference “The future of residual waste management in Europe” 2005, Luxemburg 2005

MÜNNICH, K.; BAUER, J.; FRICKE, K. 2005. Ablagerungen von MBA-Material − Konsequenzen für Bau und Betrieb der Deponie, in: Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft, Deponietechnik 2006, Band 29, Hrsg. Stegmann R., Rettenberger G., Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart 2006

MÜNNICH, K.; BAUER, J.; FRICKE, K. 2005. Spezifische Aspekte von MBA-Deponien: Deponieverhalten des Rottegutes, bauliche Einrichtungen und Anforderungen an den Betrieb, Schriftenreihe des ANS 46, Orbitverlag, Weimar 2005

MÜNNICH, K.; ZIEHMANN, G.; FRICKE, K. 2003. Hydraulic behaviour of mechanical biological pre-treated waste, Proceedings Sardinia 2003, International Waste Management and Landfill Symposium, Hrsg.: T. H. Christensen, R. Cossu & R. Stegmann, Sardinien 2003

MÜNNICH, K.; ZIEHMANN, G. 2000. Anforderungen an die Konzeption von MBA-Deponien unter Berücksichtigung des Wasserhaushaltes und der Stabilität, Schriftenreihe des ANS e.V., Band 40, Hrsg. Fricke, Burth, Dicht, Wallmann, Wiesbaden 2000

MÜNNICH, K.; BAUER, J.; FRICKE, K. 2010. Einfluss des Einbauwassergehaltes auf das Langzeitverhalten von MBA-Deponien, in: Deponietechnik 2010, Hamburger Berichte 35 (Hrsg.: Stegmann, Rettenberger, Bidlingmaier, Bilitewski, Fricke, Heyer), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart 2010

OBERMANN, I. 2000. Ermittlung des Einflusses der Einbaukennwerte auf das Ablagerungsverhalten von MBA-Abfällen mit dem Simulationsmodell WATFLOW, Wasser und Abfall, Heft 9, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2000

PIMOLTHAI, P. 2010. Comparative Study of physical and Chemical Characteristics of the Mechanically and Biologically Treated Waste from Luxembourg, Germany and Thailand, Fachbereich VI - Geographie/Geowissenschaften, Universität Trier, Dissertation, Trier 2010

PORSCHKE, A. 2000. Ziele einer zukünftigen Abfallwirtschaft und erforderliche Maßnahmen, in: Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft, Deponietechnik 2000, Band 16, Hrsg. Stegmann R., Rettenberger G., Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart 2000

PREGL, O. 1999. Handbuch der Geotechnik: Auszug für die Lehrveranstaltung Erd- und Grundbau 1, Eigenverlag des Institutes für Geotechnik, Universität für Bodenkultur, Wien 1999

RAMKE, H.-G. 2002. Probenahme, Probenaufbereitung und Untersuchung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle, Fachgespräch Feststoffuntersuchung 2002, Fachtagung in der Bildungsstätte Essen des BEW, Essen 2002

RAMKE, H.-G. 1992. Druck-Setzungsverhalten biologisch vorbehandelten Hausmülls in: Standsicherheiten im Deponiebau, Fachseminar, IGB, Braunschweig Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Heft 37, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 1992

REIFF, C.; MARX, B. 1999. Feldversuche zur Ermittlung der Einbaudichte von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen mit unterschiedlichen Verdichtungsgeräten, ZAF-Heft 14 der TU Braunschweig, S. 131 – 150, Braunschweig 1999

REINERT, P.; RETTENBERGER, G.; WAGNER, J.F. 2007. Gasbildung in stabilisierten Deponien am Beispiel einer MBA-Deponie, in: Stilllegung und Nachsorge von Deponien, Schwerpunkt Deponiegas 2007, Trier Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 17, Hrsg. Rettenberger, Stegmann, Trier 2007

RETTENBERGER, G. 2004. Untersuchung zur Charakterisierung der Gasphase in Abfallablagerungen, Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft, sowie Abfallwirtschaft e.V. (FEI), Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart 2004

RETTENBERGER, G. (2004). Untersuchungen zur Charakterisierung der Gasphase in Abfallablagerungen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 82, Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München 2004

RETTENBERGER, G. 2005. Die MBA-Deponie – Änderung der Inventareigenschaften und Auswirkungen auf den Deponiebetrieb, Perspektiven von Deponien- Stilllegung und Nachnutzung nach 2005, Beiträge zur Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 42, Hrsg.: Bilitewski, Werner, Stegmann, Rettenberger, S. 42 – 48, Dresden 2005

RETTENBERGER, G. 2005. Erfahrungen mit dem Einbau von MBA-Material, Zeitgemäße Deponietechnik 2005, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 84, Hrsg.: Kranert, S. 69 – 75, Stuttgart 2005

RETTENBERGER, G. 2005. Die Deponierung von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall gemäß Abfallablagerungsverordnung, KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr. 10, S. 1134 – 1139, DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef 2005

RETTENBERGER, G. 2005. Landfill gas characterization over time – the 9-phase-model, Proceedings Sardinia 2005, 10th International Waste Management and Landfill Symposium, Hrsg.: T. H. Christensen, R. Cossu & R. Stegmann, Sardinien 2005

RETTENBERGER, G.; FRICKE, K. 1999. „Schicht auf Schicht“. In: Müllmagazin 4/1999; S. 32-37, Rhombos Verlag Berlin, Berlin 1999

ROHRING, D.; BAHN, S.; MERTENSKÖTTER, T.; SCHÜTT, B. 2007. ASA-Standard/RAL-RG 504, Standardisierung der Probenahme , Probenaufbereitung und Analytik für Parameter gemäß der AbfAblV, Müll und Abfall,12/2007, Seiten 585-587, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2007

ROHRING, D. 2006. Standardisierung der Probenahme und Analytik für Parameter der AbfAblV, in: Internationale 6. ASA-Abfalltage, Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung MBA in Bewährung, Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Behandlung (ASA), S. 217 - 233, Hannover 2006

SCHEELHASE, T. 2000. Stabilitätskenngrößen für mechanisch-biologisch vorbehandelte Restabfälle, Wasser und Abfall, März 2000, Seiten 52 – 57, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2000

SCHEELHASE, T.; BIDLINGMAIER, W. 2000. Einfluss der mechanisch-biologischen Behandlung auf die Ablagerungseigenschaften der Abfälle, Wasser und Abfall, Juli/August 2000, Seiten 52 – 56, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2000

SCHEELHASE, T. 2002. Der Kohlenstoffaustrag aus Abfalldeponien mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrstuhl Abfallwirtschaft, Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft, Dissertation, Weimar 2002

SCHREINER, M.; KREYSING, K. 1998. Geotechnik Hydrogeologie, Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Springer Verlag, Berlin 1998

SCHULTE, B.; ENTENMANN, W. 2006. Ablagerung von MBA Deponat Einbaubetrieb und Einbaugeräte, in: Internationale 6. ASA-Abfalltage, Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung MBA in Bewährung, Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Behandlung (ASA), S. 311 – 325, Hannover 2006

SOYEZ; ET AL. 2000. Mechanisch-biologische Abfallbehandlung: Technologien, Ablagerungsverhalten und Bewertung, Gesamtdarstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 120, Hrsg. Soyez, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2000

STATISTISCHES BUNDESAMT 2004. Umwelt Abfallentsorgung 2002, Fachserie 19, Reihe 1, Hrsg. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2004

TABASARAN, O. 1976. Überlegungen zum Problem Deponiegas, Müll und Abfall, Heft 7; Erich Schmidt Verlag, S. 204, 1976

UMWELTBUNDESAMT 2000. Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000, Hrsg. Umweltbundesamt, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2000

VAN FELDE, D. 1999. Ablagerung von mechanisch biologisch vorbehandelter Abfälle – Ergebnisse der Niedersächsischen Demonstrationsanlage, in: 6. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 2, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Münster 1999

WAGNER, J.-F.; RETTENBERGER, G.; REINERT, P. 2007. Modern landfill technology – landfill behaviour of mechanical-biological pretreated waste, in: Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinien 2007

WENDT, P.; ENTENMANN, W. 2005. Einbauversuche mit AbfAblV- konformen MBA-Output, in: 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 8, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Münster 2005

WURZ, H. 1999. Auswirkungen mechanisch-biologischer Restabfallbehandlung auf das Deponieverhalten, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wasservorsorge, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft, Diplomarbeit, Wien 1999

XIE, M. 2002. Untersuchungen zur Verwertung von Abfällen in Abdichtungssystemen für Deponien und Altablagerungen, Fachbereich Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier, Dissertation, Trier 2002

XIE, M.; ALDENKORTT, D.; WAGNER,J.-F.; RETTENBERGER, G. 2006. Effect of plastic fragments on hydraulic characteristics of pretreated municipal solid waste, in: Canadian Geotechnical Journal, Band 43, Ausgabe: 12, Seiten: 1333-1343, Ottawa (Canada) 2006

ZIEHMANN, G.; MÜNNICH, K.; FRICKE, K. 2002. Einbau von MBV-Materialien in Deponien, in: Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft, Deponietechnik 2002, Band 18, Hrsg. Stegmann, R.; Rettenberger, G., Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart 2002

ZIEHMANN, G.; MÜNNICH, K. 2001. Qualität und Quantität des Oberflächenabflusses bei der Deponierung von MBA-Abfällen, Schriftenreihe des ANS e.V., Band 42, Hrsg. Fricke, Burth, Dicht, Wallmann, Kaiserslautern 2001

Curriculum Vitae

Geb. am 25.06.1977 in Prüm
Deutsche Staatsangehörigkeit

Berufspraxis

Manager Technology Systems (Technischer Leiter) Johnson Matthey Catalysts GmbH	08.2013 – heute
Design Group und After Sales Service Manager Johnson Matthey Catalysts GmbH	04.2009 – 07.2013
Project Manager Flue Gas Treatment Johnson Matthey Catalysts GmbH	01.2008 – 03.2009
FERCHAU Engineering GmbH in Schweinfurt Tätig für Johnson Matthey Catalysts GmbH	08.2007 – 12.2007
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geologie der Universität Trier	09.2005 – 07.2007
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehr- und Forschungsbereich für Abfalltechnik an der FH-Trier	08.2003 – 08.2005
ANDREAS STIHL AG & Co. KG; Maschineneinrichter	03.1997 – 04.1997

Berufsbegleitende Ausbildung

Promotion Universität Trier, Fachbereich Geologie	02.2006 – 12.2011
Promotionszulassungsstudium Universität Trier, Fachbereich Geologie	08.2003 – 02.2006

Studium

Studium der Versorgungstechnik (Fachrichtung Energie- und Umwelttechnik an der FH-Trier)	10.1999 – 07.2003
Praxissemester bei SITA Wagner GmbH in Neuwied Thema: „Die Zukunft der Speiseresteverwertung“	04.2002 – 08.2002

Berufsausbildung

Ausbildung zum Industriemechaniker bei der ANDREAS STIHL AG & Co. KG	09.1993 – 02.1997
Zivildienst in Behindertenwerkstatt und Altenheim	05.1997 – 04.1998

Schulausbildung

Fachoberschule Gerolstein	08.1998 – 07.1999
Realschule Prüm	08.1987 – 07.1993
Grundschule Prüm	08.1983 – 07.1987

Anhang

Abb. A- 1: Mächtigkeit der Ablagerung im Bereich des Testfeldes

Abb. A- 2: Pflanzenwachstum unterhalb der Folie des abgedeckten Testfeldes

Abb. A- 3: Kleinpflanzen die durch die Folie hindurch gewachsen sind

Abb. A- 4: Schaffußwalze mit demontierbarer Bandage zum Umbau auf Glattmantelwalze

Abb. A- 5: Proctorprobe 20 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 25 %-WG ft. (rechts)

Abb. A- 6: Proctorprobe 30 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 35 %-WG ft. (rechts)

Abb. A- 7: Proctorprobe 40 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 45 %-WG ft. (rechts)

Abb. A- 8: Proctorprobe 50 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 55 %-WG ft. (rechts)

Abb. A- 9: Proctorprobe 60 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 65 %-WG ft. (rechts)

Abb. A- 10: Proctorprobe 70 %-WG ft. (links) und Proctorprobe 75 %-WG ft. (rechts)

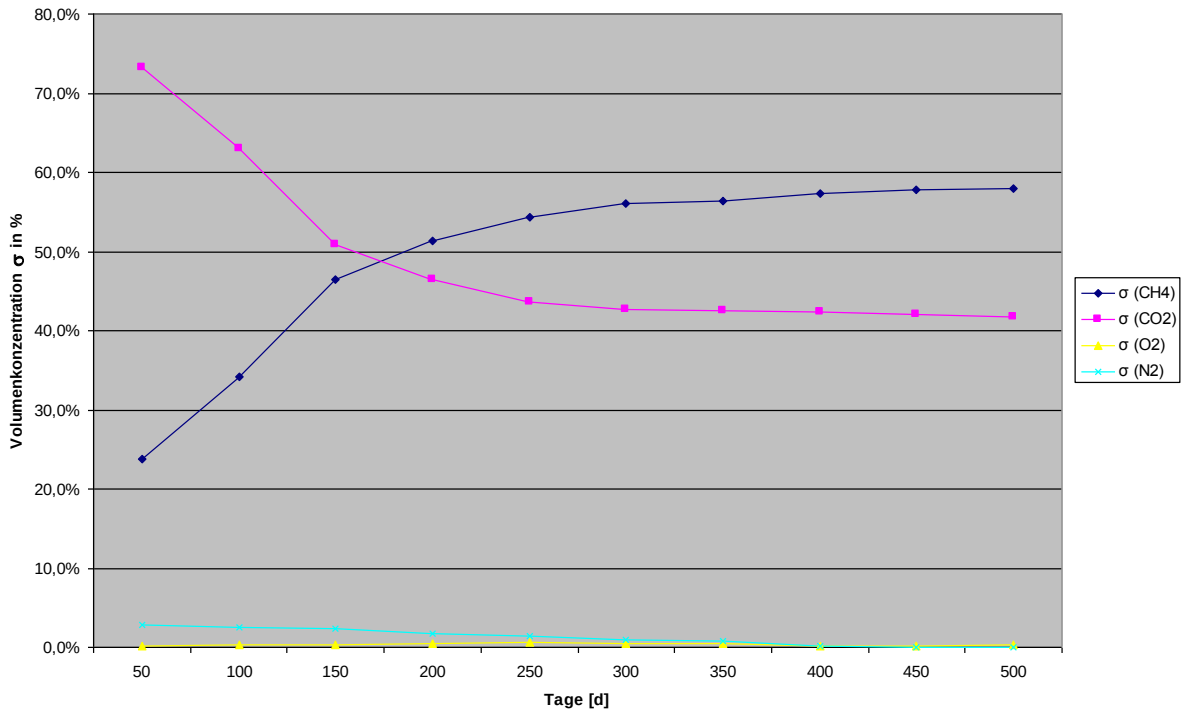


Abb. A- 11: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 1 bei einer Tiefe von 1,30 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

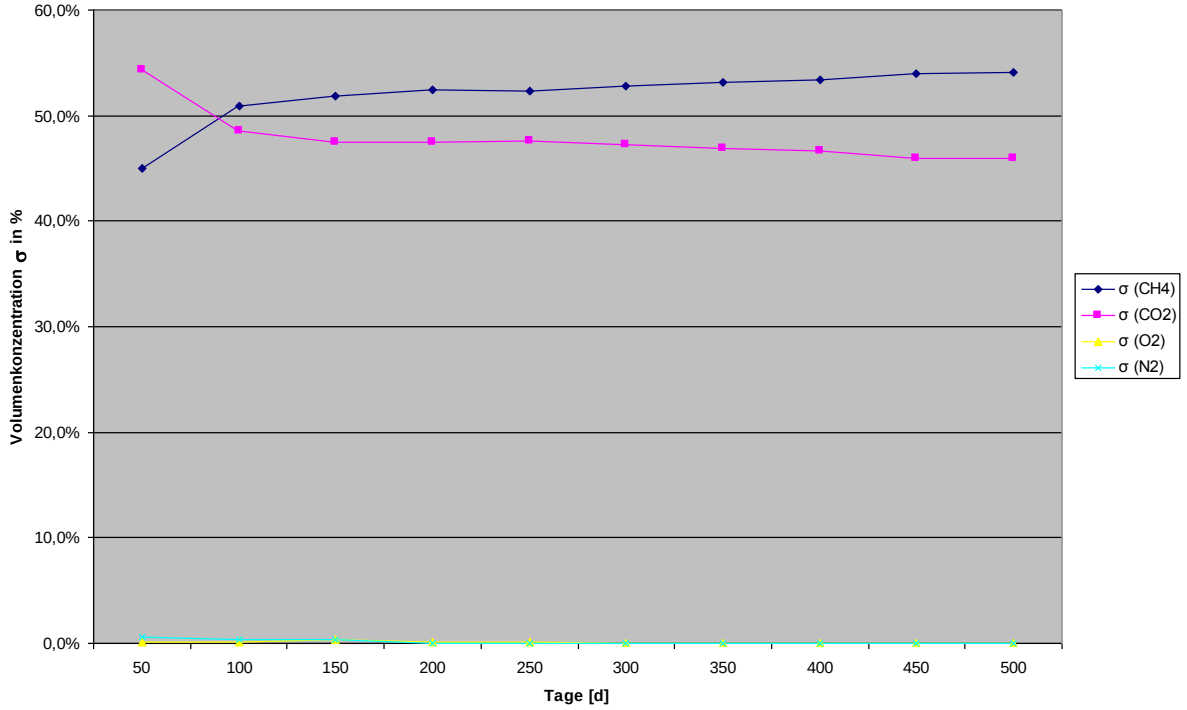


Abb. A- 12: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 2 bei einer Tiefe von 2,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

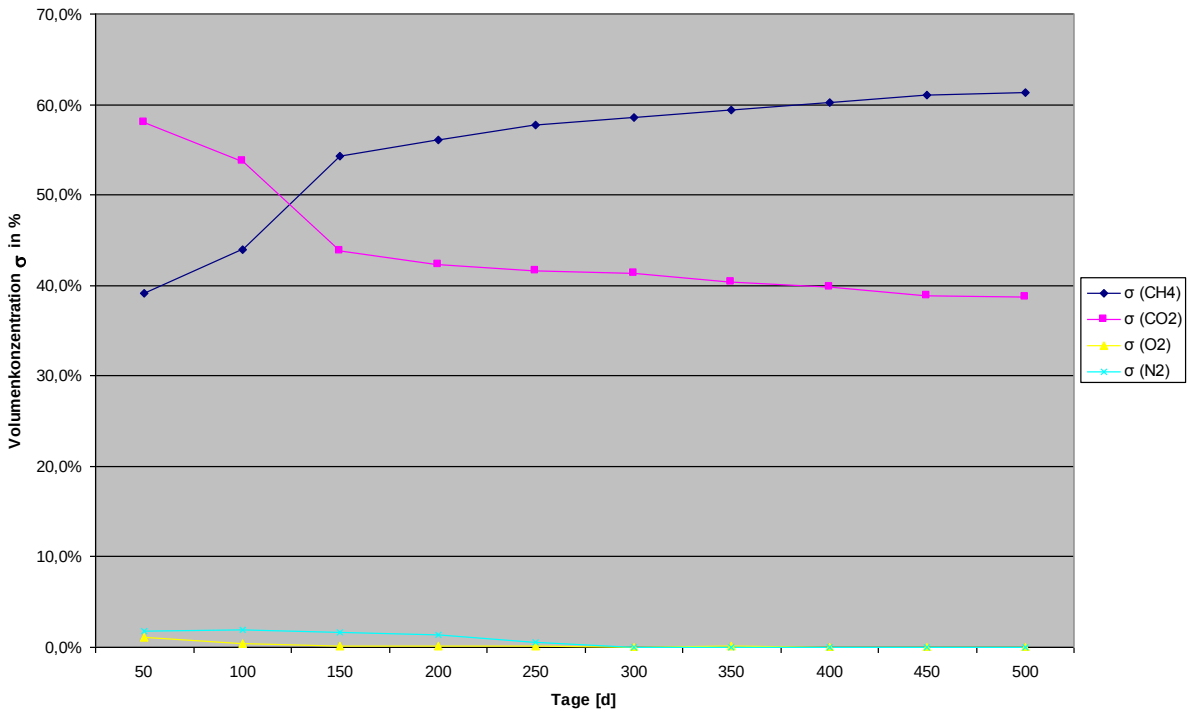


Abb. A- 13: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 3 bei einer Tiefe von 3,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

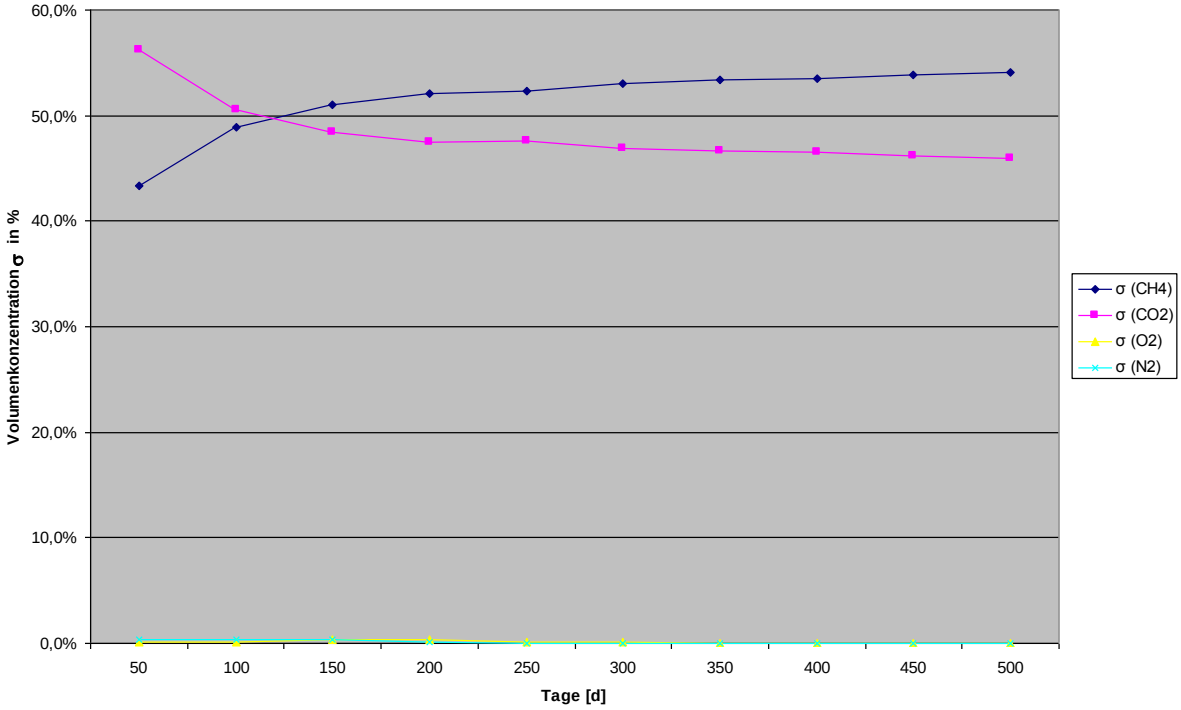


Abb. A- 14: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 4 bei einer Tiefe von 2,50 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

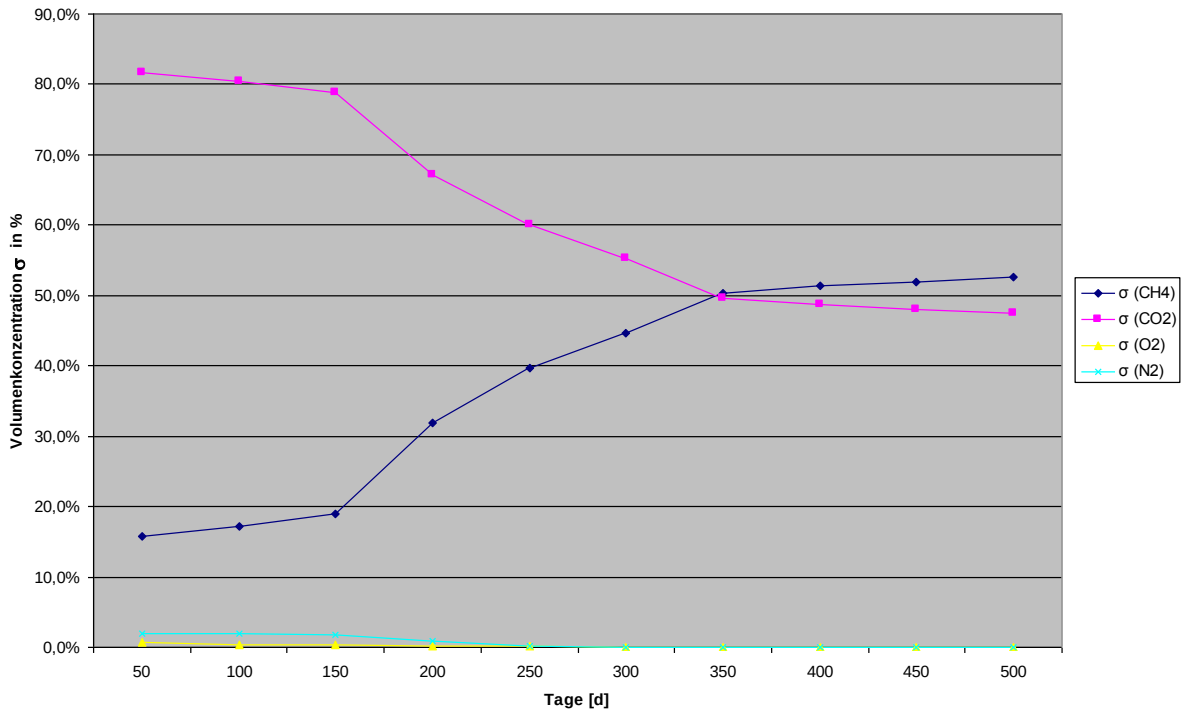


Abb. A- 15: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 5 bei einer Tiefe von 3,50 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

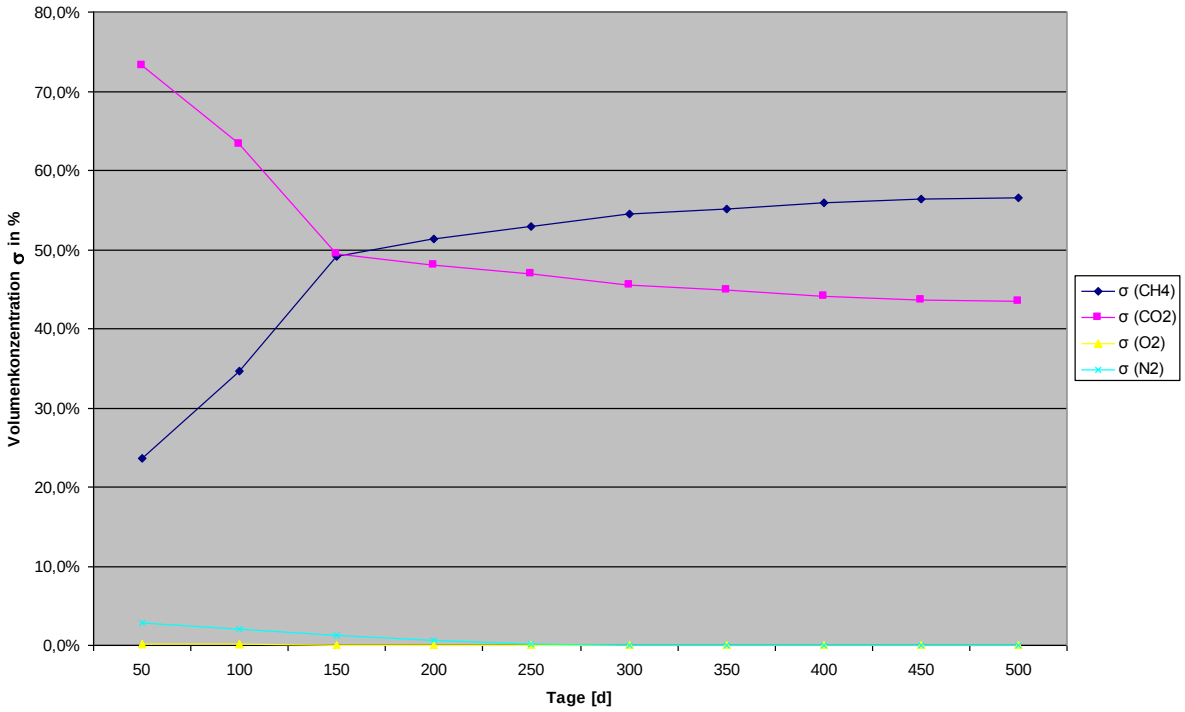


Abb. A- 16: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 6 bei einer Tiefe von 4,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

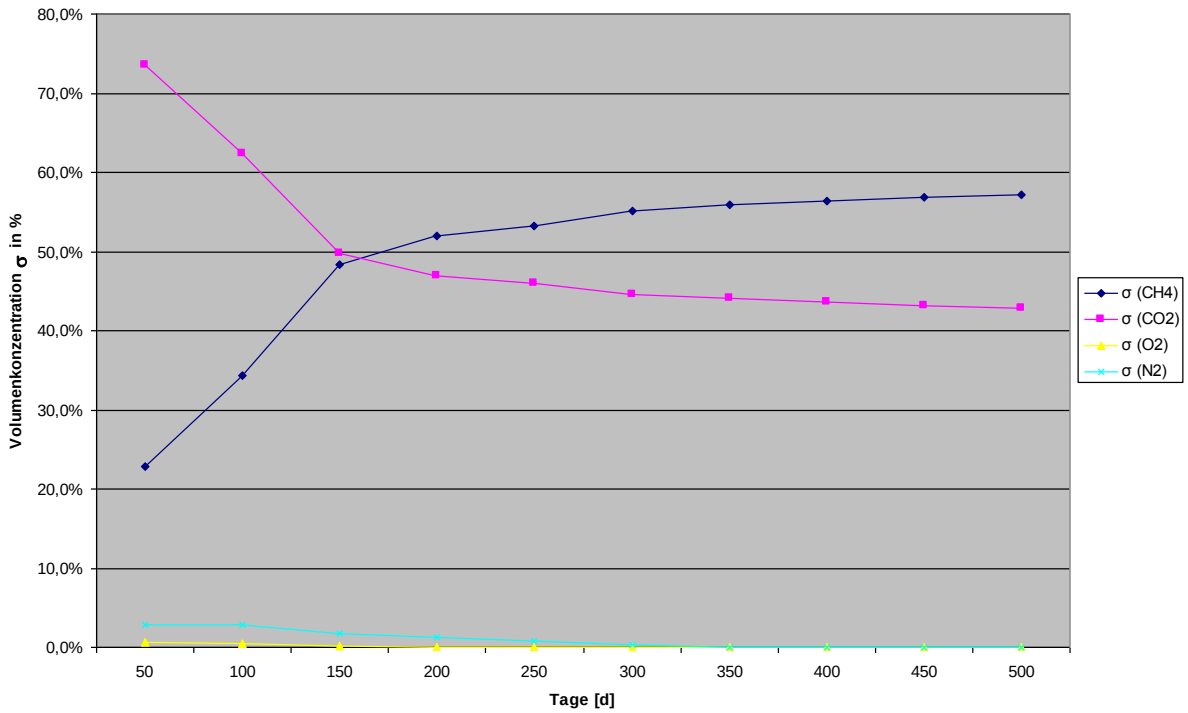


Abb. A- 17: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 7 bei einer Tiefe von 3,80 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

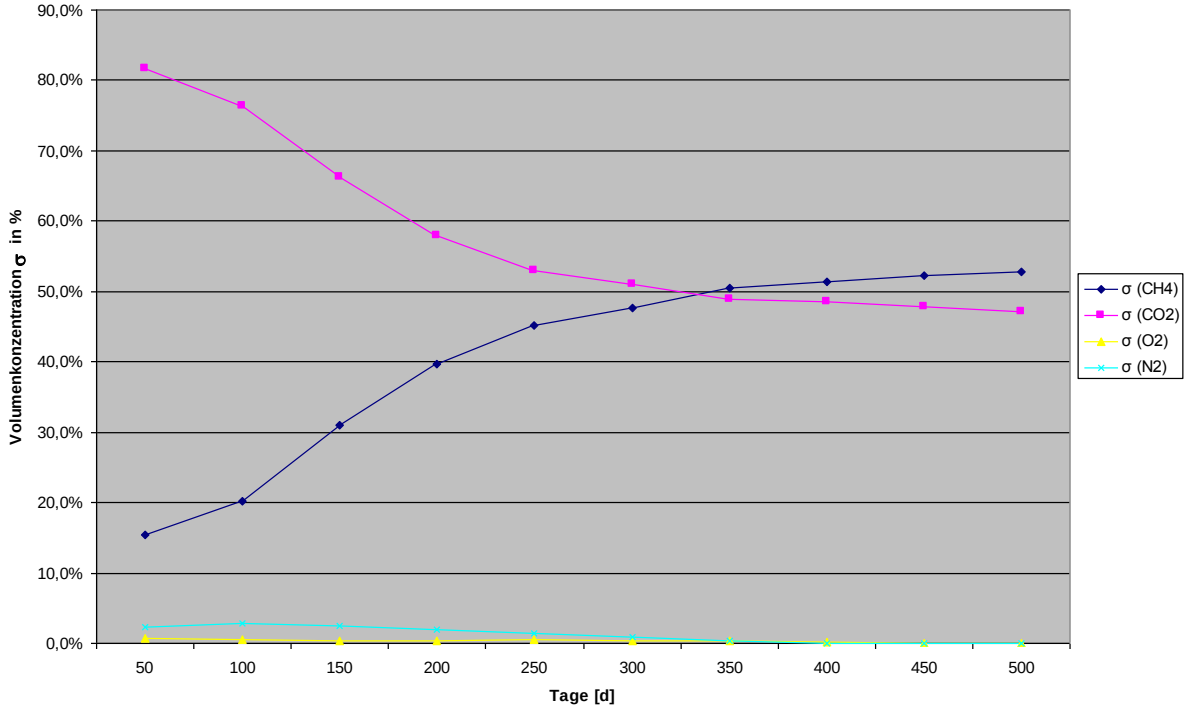


Abb. A- 18: Volumenkonzentration von $\sigma(CH_4)$, $\sigma(CO_2)$, $\sigma(N_2)$ und $\sigma(O_2)$ in Gasbrunnen GB 8 bei einer Tiefe von 1,80 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

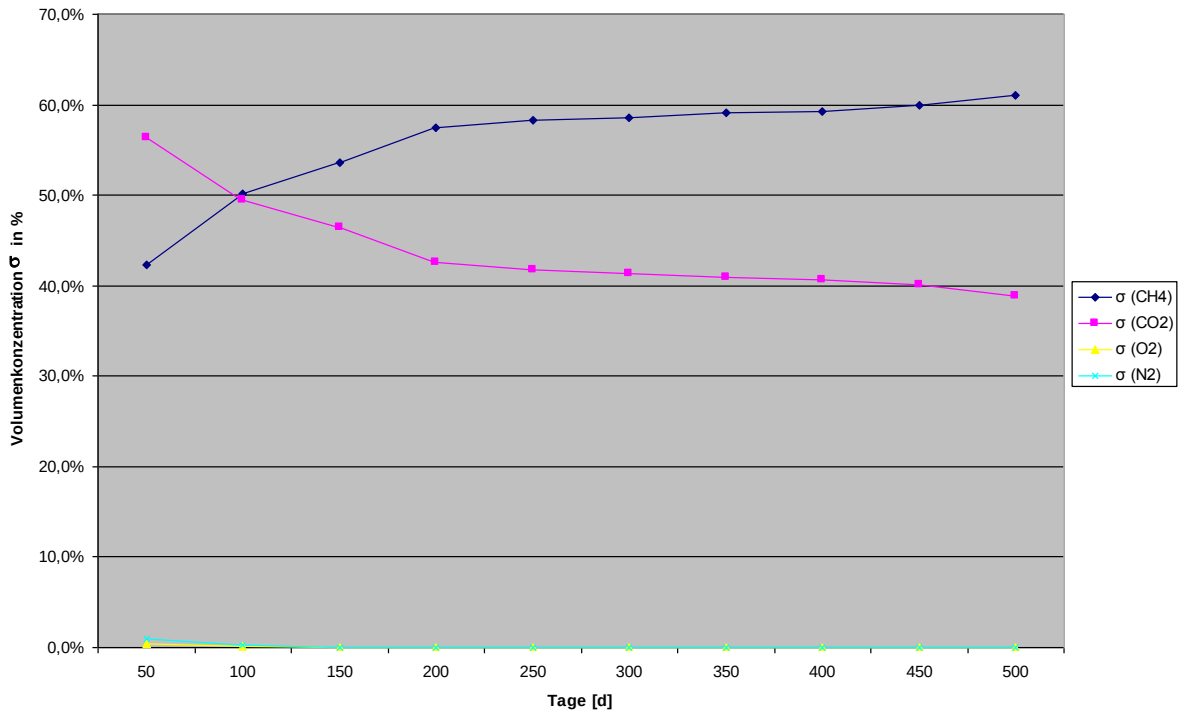


Abb. A- 19: Volumenkonzentration von σ (CH_4), σ (CO_2), σ (N_2) und σ (O_2) in Gasbrunnen GB 9 bei einer Tiefe von 5,00 m. Tage [d] ab Ablagerungsbeginn.

Datum	Probennummer	Typ der Entnahme
01.09.2005	SWH 0805/01	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
01.09.2005	SWH 0805/02	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
05.09.2005	SWH 0805/04	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
07.09.2005	SWH 0805/05	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
09.09.2005	SWH 0805/06	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
12.09.2005	SWH 0805/07	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
12.09.2005	SWH 0805/08	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
12.09.2005	SWH 0805/09	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98
12.09.2005	SWH 0805/10	Haufwerksentnahme nach LAGA PN 98

Abb. A- 20: Probenbezeichnung und Zuordnung der Haufwerk-Proben

Nr.	Datum	Ort Probenahme	Tiefe der Entnahme	Bodenmechanischer Wassergehalt [%]	Abwassertechnischer Wassergehalt [%]	Cadmium Cd - [mg/l] <l 0,1 mg/l	Kupfer Cu - [mg/l] <l 5 mg/l	Nickel Ni - [mg/l] <l 1 mg/l	Blei Pb - [mg/l] <l 1 mg/l	Zink Zn - [mg/l] <l 5 mg/l	pH-Wert	Leitfähigkeit [µs/cm] <l 50.000 µs/cm	TOC im Eluat [mg/l] <l 250 mg/l	TOC im Feststoff [Masse-%] <= 18 Masse-%
1	14.12.2006	GB 1	1,30 m	79,65 %	44,34 %	0,00	1,46	0,11	0,07	0,88	6,96	2860	177,1	17,80 %
2	14.12.2006	GB 2	1,00 m	79,13 %	44,17 %	0,00	2,10	0,13	0,11	0,74	7,51	2800	176,1	17,10 %
3	14.12.2006	GB 2	2,00 m	78,04 %	43,83 %	0,00	1,66	0,17	0,08	1,05	6,96	3230	226,4	16,60 %
4	14.12.2006	GB 3	1,00 m	77,94 %	43,80 %	0,00	1,65	0,12	0,03	0,70	7,04	3110	222,3	17,50 %
5	14.12.2006	GB 3	2,00 m	79,78 %	44,38 %	0,00	2,22	0,15	0,13	1,04	7,16	3370	193,3	15,90 %
6	14.12.2006	GB 3	3,00 m	77,41 %	43,63 %	0,00	1,47	0,14	0,05	0,92	6,88	3270	207,9	16,20 %
7	14.12.2006	GB4	1,00 m	74,48 %	42,69 %	0,00	2,04	0,16	0,17	1,03	6,71	2910	183,6	16,80 %
8	23.01.2007	GB4	2,00 m	64,82 %	39,33 %	0,00	2,23	0,14	0,07	0,72	6,82	3260	186,3	16,90 %
9	23.01.2007	GB 5	1,00 m	78,97 %	44,12 %	0,00	1,68	0,14	0,08	0,86	6,96	3290	170,1	16,80 %
10	14.12.2006	GB 5	2,00 m	61,23 %	37,98 %	0,00	2,44	0,18	0,20	0,89	6,99	3370	205,2	17,50 %
11	14.12.2006	GB 5	3,00 m	62,62 %	38,51 %	0,00	2,06	0,18	0,09	0,95	6,75	3460	204,8	16,60 %
12	14.12.2006	GB 6	1,00 m	67,45 %	40,28 %	0,01	1,97	0,30	1,07	1,18	7,81	3370	163,9	16,10 %
13	14.12.2006	GB 6	2,00 m	75,20 %	42,92 %	0,00	2,81	0,21	0,14	0,86	7	3500	174,5	16,60 %
14	14.12.2006	GB 6	3,00 m	75,96 %	43,17 %	0,00	2,52	0,25	0,17	0,99	6,91	3670	182,3	17,30 %
15	14.12.2006	GB 6	4,00 m	79,09 %	44,16 %	0,00	2,10	0,20	0,04	0,51	6,82	3950	201,2	17,70 %
16	23.01.2007	GB 7	1,00 m	61,06 %	37,91 %	0,00	2,37	0,12	0,08	0,64	6,8	2760	160,2	16,40 %
17	23.01.2007	GB 7	2,00 m	68,94 %	40,81 %	0,00	2,37	0,17	0,06	0,57	6,91	3010	200,3	17,10 %
18	23.01.2007	GB 7	3,00 m	68,09 %	40,51 %	0,00	4,17	0,28	0,21	0,88	6,91	3540	222,2	17,10 %
19	23.01.2007	GB 8	1,00 m	68,58 %	40,68 %	0,00	2,44	0,17	0,17	0,80	6,76	2840	220,8	16,50 %
20	23.01.2007	GB 8	2,00 m	77,82 %	43,76 %	0,00	2,69	0,20	0,26	0,91	6,88	2940	201,3	16,90 %
21	23.01.2007	GB 9	2,00 m	68,03 %	40,49 %	0,00	2,07	0,15	0,07	0,63	7,45	3220	181,0	16,60 %
22	14.12.2006	S 2	0,80 m	79,49 %	44,29 %	0,00	1,95	0,15	0,02	0,64	7	2400	185,3	16,50 %
23	14.12.2006	S 2	1,50 m	69,11 %	40,87 %	0,00	3,10	0,21	0,23	1,17	6,63	2690	200,2	17,20 %
24	23.01.2007	S 4	0,90 m	78,34 %	43,93 %	0,00	1,52	0,15	0,10	0,43	6,86	2650	166,2	17,10 %
25	14.12.2006	S 4	1,80 m	74,72 %	42,77 %	0,00	2,29	0,20	0,17	1,02	6,86	2950	173,6	17,40 %
26	14.12.2006	S 4	2,70 m	65,27 %	39,49 %	0,00	2,55	0,20	0,23	1,22	6,77	3130	140,3	17,20 %
27	23.01.2007	S 5	0,90 m	67,61 %	40,34 %	0,00	1,92	0,11	0,09	0,55	6,84	2470	160,8	17,70 %
28	14.12.2006	S 5	1,80 m	60,22 %	37,59 %	0,00	2,82	0,20	0,23	0,87	7,23	2600	155,9	17,70 %
29	23.01.2007	S 5	2,70 m	60,46 %	37,68 %	0,00	4,08	0,19	0,21	0,85	7,15	3010	178,4	16,80 %
30	14.12.2006	TF 10-12	1,00 m	79,60 %	44,32 %	0,00	1,91	0,16	0,15	0,95	6,94	3200	185,6	17,20 %
31	14.12.2006	TF 10-12	2,00 m	69,18 %	40,89 %	0,00	1,83	0,18	0,15	1,17	7,65	3580	190,6	17,40 %
32	14.12.2006	TF 10-12	3,00 m	62,99 %	38,65 %	0,00	1,78	0,16	0,07	1,12	7,01	3460	201,3	15,80 %
33	14.12.2006	TF 10-12	3,60 m	61,95 %	38,25 %	0,00	2,48	0,18	0,12	1,02	6,98	3290	210,3	16,10 %
34	23.01.2007	TF 1-3	1,00 m	63,19 %	38,72 %	0,00	1,36	0,16	0,08	0,68	6,87	2630	140,7	16,90 %
35	23.01.2007	TF 1-3	2,60 m	66,90 %	40,08 %	0,00	2,14	0,22	0,07	0,75	6,81	3540	202,3	17,40 %
36	14.12.2006	TF 13-15	2,00 m	60,73 %	37,78 %	0,00	2,45	0,22	0,18	1,04	6,84	3090	160,8	17,70 %
37	14.12.2006	TF 13-15	3,80 m	61,13 %	37,94 %	0,00	2,63	0,25	0,21	1,04	7,02	3700	182,6	16,30 %
38	23.01.2007	TF 4-6	1,00 m	72,04 %	41,87 %	0,00	2,48	0,30	0,13	0,78	7,27	2770	208,1	16,40 %
39	23.01.2007	TF 4-6	2,00 m	71,86 %	41,81 %	0,00	2,57	0,21	0,21	1,04	7,13	3420	201,5	16,60 %
40	23.01.2007	TF 7-9	1,00 m	76,72 %	43,41 %	0,00	6,31	0,13	0,25	0,85	7,45	2900	160,7	15,90 %
41	23.01.2007	TF 7-9	2,50 m	70,32 %	41,29 %	0,00	2,17	0,18	0,13	0,53	6,91	3500	205,4	16,20 %
42	23.01.2007	TF 7-9	3,50 m	68,74 %	40,74 %	0,00	1,89	0,15	0,04	0,47	6,86	4130	197,4	17,50 %
44	09.08.2007	GB 2	1,00 m	77,25 %	43,58 %	0,00	1,46	0,11	0,07	0,88	6,96	2860	131,5	17,80 %
45	09.08.2007	GB 2	2,00 m	71,87 %	41,82 %	0,00	2,10	0,13	0,11	0,74	7,51	2800	134,6	17,10 %
46	09.08.2007	GB 3	3,00 m	71,32 %	41,63 %	0,00	1,66	0,17	0,08	1,05	6,96	3230	173,4	16,60 %
47	09.08.2007	GB 4	1,00 m	74,19 %	42,59 %	0,00	1,65	0,12	0,03	0,70	7,04	3110	196,9	17,50 %
48	09.08.2007	GB 5	2,00 m	63,15 %	38,71 %	0,00	2,22	0,15	0,13	1,04	7,16	3370	213,2	15,90 %
49	09.08.2007	GB 5	3,00 m	66,50 %	39,94 %	0,00	1,47	0,14	0,05	0,92	6,88	3270	154,9	16,20 %
50	09.08.2007	GB 6	1,00 m	74,53 %	42,70 %	0,00	2,04	0,16	0,17	1,03	6,71	2910	196,0	16,80 %
51	09.08.2007	GB 6	4,00 m	69,47 %	40,99 %	0,00	2,23	0,14	0,07	0,72	6,82	3260	133,3	16,90 %
52	09.08.2007	GB 7	2,00 m	70,13 %	41,22 %	0,00	1,68	0,14	0,08	0,86	6,96	3290	136,4	16,80 %
53	09.08.2007	GB 7	3,00 m	62,34 %	38,40 %	0,00	2,44	0,18	0,20	0,89	6,99	3370	201,6	17,50 %
54	09.08.2007	GB 8	1,00 m	78,81 %	44,08 %	0,00	2,06	0,18	0,09	0,95	6,75	3460	226,2	16,60 %
55	09.08.2007	GB 8	2,00 m	61,32 %	38,01 %	0,01	1,97	0,30	1,07	1,18	7,81	3370	220,2	16,10 %
56	09.08.2007	GB 9	3,00 m	66,07 %	39,78 %	0,00	2,81	0,21	0,14	0,86	7	3500	219,4	16,60 %
57	09.08.2007	GB1	1,30 m	61,63 %	38,13 %	0,00	2,52	0,25	0,17	0,99	6,91	3670	198,9	17,30 %
58	09.08.2007	GB3	1,00 m	77,51 %	43,67 %	0,00	2,10	0,20	0,04	0,51	6,82	3950	195,1	17,70 %
59	09.08.2007	GB3	2,00 m	61,11 %	37,93 %	0,00	2,37	0,12	0,08	0,64	6,8	2760	134,2	16,40 %
60	09.08.2007	GB4	2,00 m	62,25 %	38,37 %	0,00	2,37	0,17	0,06	0,57	6,91	3010	147,3	17,10 %
61	09.08.2007	GB5	1,00 m	67,39 %	40,26 %	0,00	4,17	0,28	0,21	0,88	6,91	3540	168,8	17,10 %
62	09.08.2007	GB6	2,00 m	74,52 %	42,70 %	0,00	2,44	0,17	0,17	0,80	6,76	2840	167,8	16,50 %
63	09.08.2007	GB6	3,00 m	72,13 %	41,91 %	0,00	2,69	0,20	0,26	0,91	6,88	2940	181,7	16,90 %
64	09.08.2007	GB7	1,00 m	77,38 %	43,62 %	0,00	2,07	0,15	0,07	0,63	7,45	3220	132,6	16,60 %
65	09.08.2007	P 31	1,80 m	61,02 %	37,90 %	0,00	1,95	0,15	0,02	0,64	7	2400	132,3	16,50 %
66	09.08.2007	S 4	1,80 m	68,26 %	40,57 %	0,00	3,10	0,21	0,23	1,17	6,63	2690	205,2	17,30 %

Abb. A- 21: Liste der Probennummern mit Zuordnung der Entnahmestelle

Nr.	Datum	Ort Probenahme	Tiefe der Entnahme	Bodenmechanischer Wassergehalt [%]	Abwassertechnischer Wassergehalt [%]	Cadmium Cd - [mg/l] 0,1 mg/l ≤	Kupfer Cu - [mg/l] 5 mg/l ≤	Nickel Ni - [mg/l] 1 mg/l ≤	Blei Pb - [mg/l] 1 mg/l ≤	Zink Zn - [mg/l] 5 mg/l ≤	pH-Wert	Leitfähigkeit [µs/cm] 50.000 µs/cm ≤	TOC im Eluat [mg/l] 250 mg/l ≤	TOC im Feststoff [Masse-%] <= 18 Masse-%
67	09.08.2007	S 5	0,90 m	67,94 %	40,45 %	0,00	1,52	0,15	0,10	0,43	6,86	2650	140,5	17,10 %
68	09.08.2007	S 5	1,80 m	71,49 %	41,69 %	0,00	2,29	0,20	0,17	1,02	6,86	2950	177,1	17,40 %
69	09.08.2007	S 5	2,70 m	62,34 %	38,40 %	0,00	2,55	0,20	0,23	1,22	6,77	3130	220,8	17,20 %
70	09.08.2007	S2	0,80 m	64,06 %	39,05 %	0,00	1,92	0,11	0,09	0,55	6,84	2470	150,6	17,70 %
71	09.08.2007	S2	1,50 m	72,42 %	42,00 %	0,00	2,82	0,20	0,23	0,87	7,23	2600	216,6	17,70 %
72	09.08.2007	S4	0,90 m	69,46 %	40,99 %	0,00	4,08	0,19	0,21	0,85	7,15	3010	211,6	16,80 %
73	09.08.2007	S4	2,70 m	65,74 %	39,67 %	0,00	1,91	0,16	0,15	0,95	6,94	3200	199,3	17,20 %
74	09.08.2007	TF 10-12	1,00 m	77,67 %	43,72 %	0,00	1,83	0,18	0,15	1,17	7,65	3580	202,7	17,40 %
75	09.08.2007	TF 10-12	2,00 m	66,06 %	39,78 %	0,00	1,78	0,16	0,07	1,12	7,01	3460	177,2	15,80 %
76	09.08.2007	TF 10-12	3,60 m	65,18 %	39,46 %	0,00	2,48	0,18	0,12	1,02	6,98	3290	188,1	16,10 %
77	09.08.2007	TF 10-12	3,00 m	66,19 %	39,83 %	0,00	1,36	0,16	0,08	0,68	6,87	2630	143,6	16,90 %
78	09.08.2007	TF 1-3	1,00 m	62,49 %	38,46 %	0,00	2,14	0,22	0,07	0,75	6,81	3540	149,3	17,40 %
79	09.08.2007	TF 1-3	2,60 m	66,28 %	39,86 %	0,00	2,45	0,22	0,18	1,04	6,84	3090	212,3	17,70 %
80	09.08.2007	TF 13-15	2,00 m	61,09 %	37,92 %	0,00	2,63	0,25	0,21	1,04	7,02	3700	224,8	16,30 %
81	09.08.2007	TF 13-15	3,80 m	61,72 %	38,16 %	0,00	2,48	0,30	0,13	0,78	7,27	2770	155,1	16,40 %
82	09.08.2007	TF 4-6	1,00 m	71,11 %	41,56 %	0,00	2,57	0,21	0,21	1,04	7,13	3420	188,8	16,10 %
83	09.08.2007	TF 4-6	2,00 m	63,54 %	38,85 %	0,00	4,07	0,13	0,25	0,85	7,45	2900	148,9	15,90 %
84	09.08.2007	TF 7-9	1,00 m	71,68 %	41,75 %	0,00	2,17	0,18	0,13	0,53	6,91	3500	152,4	16,20 %
85	09.08.2007	TF 7-9	2,50 m	69,10 %	40,87 %	0,00	1,89	0,15	0,04	0,47	6,86	4130	144,4	17,50 %
86	09.08.2007	TF 7-9	3,50 m	65,76 %	39,67 %	0,00	2,07	0,15	0,07	0,63	7,45	3220	150,6	16,60 %

Abb. A- 22: Fortsetzung der Liste der Probennummern mit Zuordnung der Entnahmestelle