

Die Deponierung von MBA-Abfällen

Matthias Kühle-Weidemeier

Wasteconsult international

1 Rechtliche Anforderungen an den Einbau von MBA-Output in Deutschland

An den Einbaubetrieb stellt die AbfAbIV folgende Anforderungen:

- Reduzierung der Einbaufläche auf das im Einbaubetrieb geringstmögliche Maß
- Abdeckung nicht beschickter Flächen mit geeigneten Materialien
- Gezielte und kontrollierte Ableitung von Oberflächenwasser
- Einbaubereich arbeitstägig mit Gefälle zwischen 5 % und 10 % profilieren
- Oberfläche ist zu glätten und mit wasserundurchl. Materialien abzudecken
- Abfalleinbau im Dünnschichtverfahren, höchst mögliche Verdichtung
- Bestimmung der höchst möglichen Einbaudichte im Versuchsfeld. Bei Änderung der Abfallzusammensetzung ist die höchstm. Verdichtung erneut zu bestimmen.
- Nachweis der Einbaudichte je 5.000 m³ bzw. Mg während des Deponiebetriebs
- MBA-Abfälle dürfen auf bereits abgelagerten Abfällen mit hohem biol. abbaubaren Anteil (z. B. unvorbehandelter Hausmüll) nur abgelagert werden, wenn
 - dies nicht zu einer Beeinträchtigung der Gasfassung aus diesen Abf. führt,
 - die Infiltration von Wasser zur Aufrechterhaltung biologischer Abbauprozesse in diesen Abfällen technisch möglich oder nicht erforderlich ist,
 - es nicht zu unkontrollierten Gasaustritten kommt.

Einige dieser Anforderungen oder deren Auslegung werden kontrovers diskutiert, z.B. die Forderung nach wasserundurchl. Abdeckung der Oberfläche von MBA-Einbaubereichen. Anh. 3, Nr. 2 AbfAbIV ist hierzu unklar, weil die Abdeckung im Gegensatz zur Profilierung nicht ausdrükl. arbeitstägig gefordert ist. Der Einbau im Dünnschichtverfahren mit höchstmöglicher Verdichtung ist angesichts aktueller Erkenntnisse kritisch zu sehen. Bei Gemischtablagerung von MBA-Abfällen mit Abfällen wechselnder Art und Herkunft, sind jeweils vorab Versuchsfelder mit Nachweisführung erforderlich. Dies ist in der Praxis unrealistisch und führt zu einer unangemessenen Einschränkung der Gemischtablagerung.

2 Eigene Untersuchungen (am ISAH)

Im Auftrag der Abfallwirtschaft des LK Schaumburg (SHG) wurden Siebfraktionen < 150 / 60 / 40 / 20 mm aus 5 MBA-Pilotversuchen (je ca. 35 Mg Input) untersucht (Kühle-Weidemeier, 2003). Die Fraktionen < 60 mm hielten die Anforderungen gem. Anh. 2 AbfAbIV ein.

Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebs Hannover wurden an der Deponie Lahe zwei Testfelder aus vollstromvergorenen Siedlungsabfall aus Frankreich errichtet, der nachgerottet und zur Absenkung des Heizwertes (keine Abfalltrennung in F) auf < 30 mm abgesiebt wurde (Kühle-Weidemeier, 2003). Abgesehen vom oberen Heizwert (TOC TS n.b.) war das Material dann AbfAbIV-konform. Es unterschied sich deutlich von vergleichbaren Siebfraktionen aus SHG und hatte einen beinahe torfigen Charakter. Wesentlichen Anteil daran dürften die Auffaserung von Abfallbestandteilen durch mechanische Beanspruchung in der Valorga Vergärungsanlage, die Schwerstoffabscheidung in der mechanischen Behandlung sowie Feinstoffaustrag über die Flüssigphase haben. Ein aktuell untersuchtes, vollstromvergorenes Material aus Deutschland zeigt ähnliche mechanische Eigenschaften.

3 Geomechanische Eigenschaften von MBA-Output

MBA-Output hat eine wesentlich feinere und homogenere Kornstruktur als unbehandelter Abfall. Dadurch lassen sich seine geomechanischen Eigenschaften besser mit den klassischen Untersuchungsmethoden der Bodenmechanik beschreiben.

3.1 Korngrößenverteilung Grobkorn

Insbesondere die mechanische Behandlung wirkt sich erheblich auf die Korngrößenverteilung im Abfall und dessen geomechanische Eigenschaften aus. Jager et al. (1999) untersuchten den Outputs von älteren MBA sowie aus Pilotversuchen. Die Abfälle unterscheiden sich durch einen deutlich größeren Feinkornanteil (Bild 1) von durch Doedens et al. (2000) an der MBA Lüneburg untersuchten Abfällen. Im Abfall MB-WS1 war der Feinkornanteil < 1 mm mit 52 Gew.-% am höchsten. Jager et al. (1999) führen dies auf hohe Ascheanteile durch Entsorgungsgebiete mit Ofenheizungen zurück. Der Anteil < 1 mm liegt zwischen 22 und 34 Gew.-% (MBA Lüneburg ca. 17 %). Die Fraktion < 10 % umfasst bereits zwischen 58 und 87 % des MBA-Outputs (Lüneburg 47 %).

Die Korngrößenverteilung im Feinkornbereich (0 – 2 mm) hat in der Bodenmechanik vor allem Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften eines Bodens. Hohe Partikelanteile im Schluff- und Tonbereich führen zu niedrigen Wasserdurchlässigkeiten. Tonpartikel

begünstigen Gleitvorgänge. Die Korngrößenverteilung im Mittel- und Feinkornbereich ist außerdem für die Filterstabilität zwischen Abfall und Dränschichten von Bedeutung.

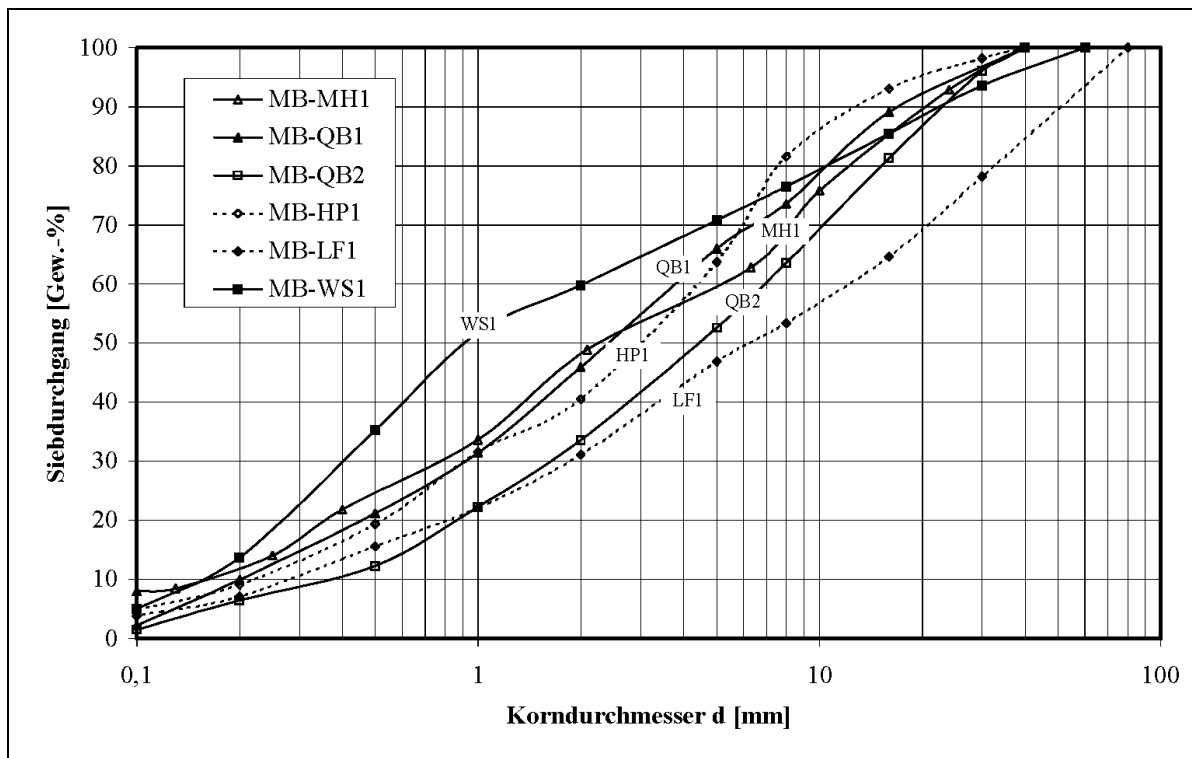


Bild 1: Korngrößenverteilung (% TS) unterschiedl. Abfälle (Jäger et al., 1999)

Am Material aus SHG wurde die Korngrößenverteilung vor und nach der biologischen Behandlung verglichen. Wie z.B. Bild 2 zeigt, ist keine deutliche Veränderung festzustellen. Mindestens vier Fünftel der Masse des Rotteoutputs entfielen auf den Körnungsbereich 0 – 40 mm. Absiebungen des Rotteoutputs auf < 40 mm und erst recht auf < 60 mm, wirken sich auf den zu deponierenden Massenanteil also nur verhältnismäßig gering aus.

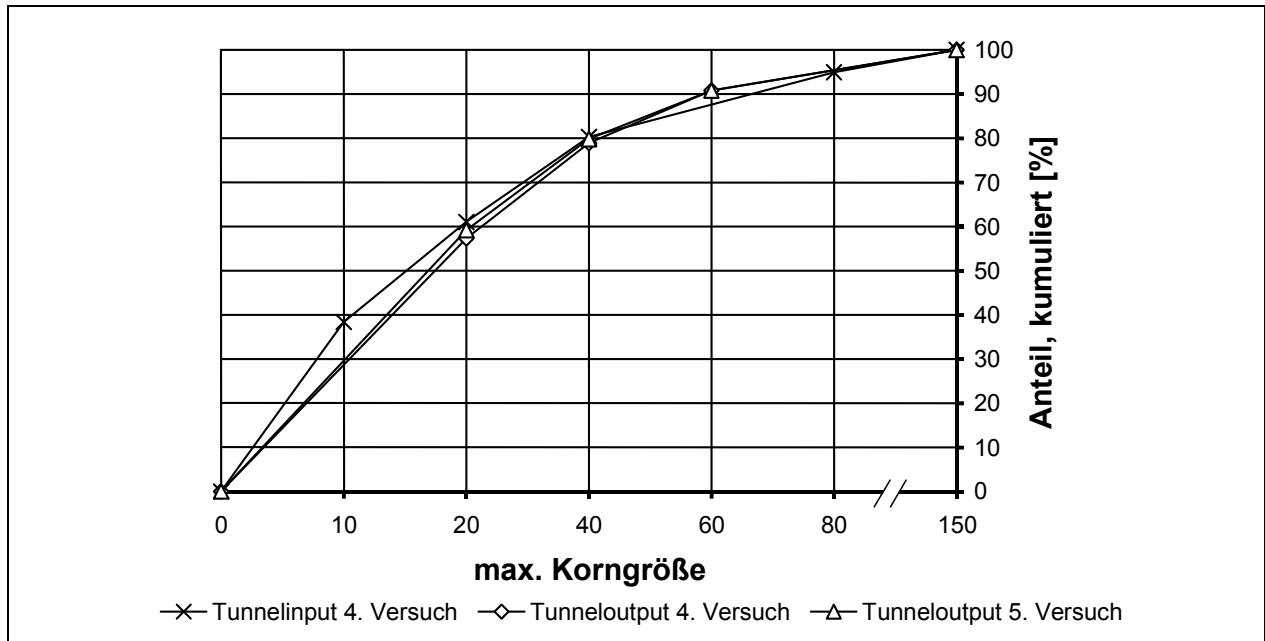


Bild 2: Korngrößenverteilung Rottein- und -output %FS (Kühle-Weidemeier, 2003)

3.2 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Stabilisierungskriterien

Bild 3 zeigt die Analyseergebnisse der einzelnen Siebfraktionen aus dem 3. Versuch SHG. Die übrigen Versuche im LK SHG zeigten ein ähnliches Verhalten.

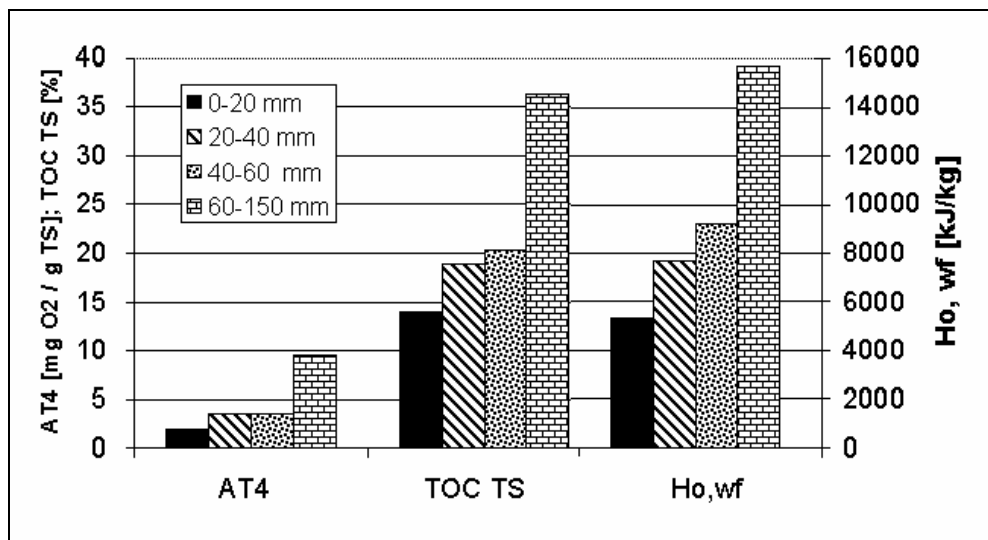


Bild 3: Kennwerte einzelner Siebfraktionen Rotteoutput (Kühle-Weidemeier, 2003)

Um den für die Einhaltung der Grenzwerte gem. AbfAbIV notwendigen Siebschnitt zu ermitteln, wurden die Eigenschaften des Siebdurchganges bei unterschiedlichen Sieb Lochgrößen ermittelt. Als Beispiel ist Versuch 2 dargestellt, in dem ein wesentlich heizwertreicheres Material als in Versuch 3 zum Einsatz kam. Zur Erzeugung eines ablage-

rungsfähigen Materials war eine Absiebung auf < 60 mm notwendig. Der Grenzwert für den oberen Heizwert wurde erst in der Siebfraction < 20 mm unterschritten.

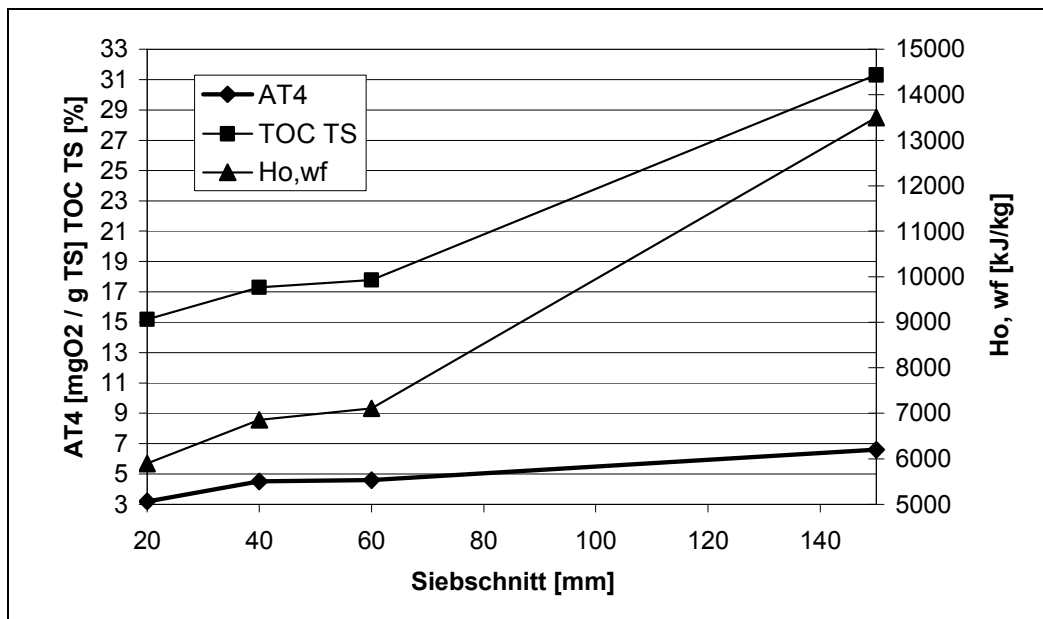


Bild 4: Siebschnittabhängigkeit AT₄, TOC, H_o, Vs.2 SHG (Kühle-Weidemeier, 2003)

3.3 Feinkorn

An der Fraktion 0 – 20 mm aus dem 5. Versuch im LK SHG wurde auch die Korngrößenverteilung im Feinkornbereich untersucht (Bild 5). Die Korngrößenverteilung < 0,063 mm wurde mit dem HELOS[®]-Laserbeugungssystem der Sympatec GmbH bestimmt, da sich der Siebdurchgang < 0,063 mm nur in sehr geringem Maße absetzte, so dass die Korngrößenbestimmung über die Sedimentation nicht möglich war.

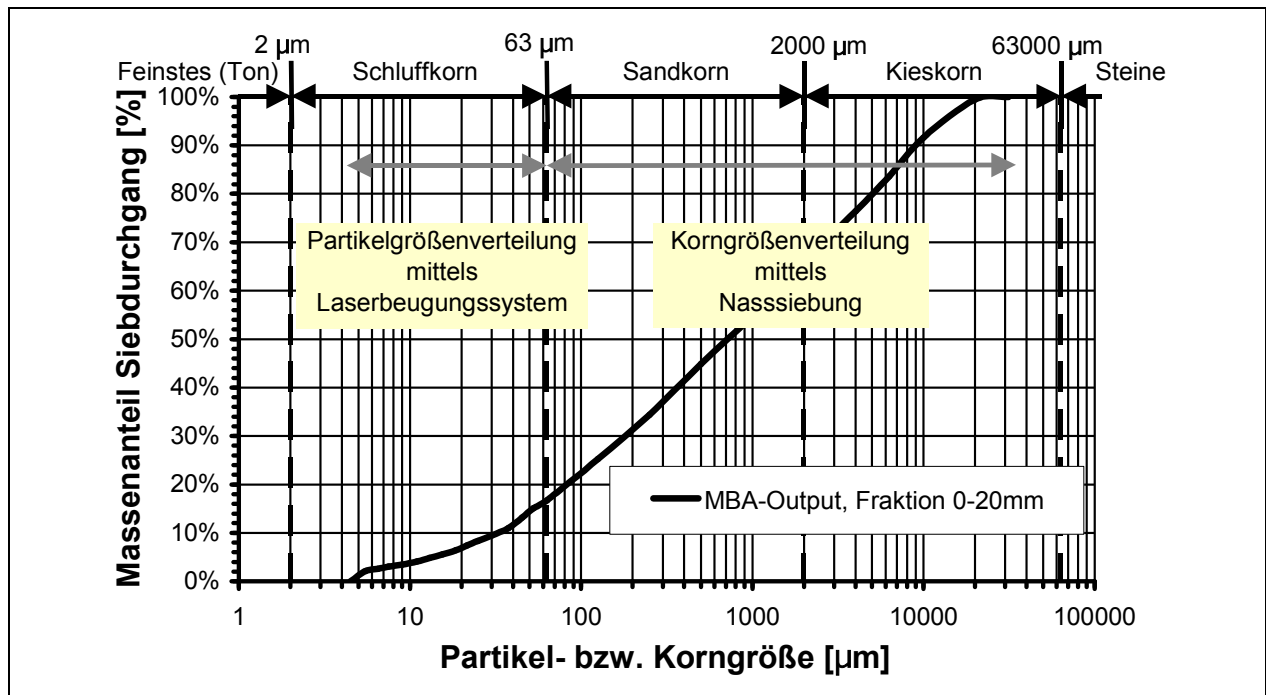


Bild 5: Korngrößenverteilung Fraktion 0-20 mm SHG (Kühle-Weidemeier, 2003)

3.4 Beurteilung der Filterstabilität zum Basisabdichtungssystem

In Tabelle 1 ist die Kornverteilungscharakteristik verschiedener MBA-Outputfraktionen den Eigenschaften eines Filterkieses einer Basisdrainage gegenübergestellt. Die weit verbreitete Prüfung der Filterstabilität nach Terzaghi kann hier nicht angewendet werden, weil sie nur bei einem Ungleichförmigkeitsfaktor $U < 2$ gültig ist (Schneider, 1992). Auch andere Filterregeln, die auf den Überlegungen von Terzaghi basieren, oder die Filterregel nach Cistin/Ziems (in Wittmann, 1982), sind für die Mehrheit der aufgeführten Materialien nicht verwendbar. Außerdem gehen die Filterregeln von einer kugeligen Gestalt der Partikel aus (Kezdi, 1970), die für einen großen Teil der Bestandteile des MBA-Outputs nicht gegeben ist. Von den Eigenschaften entspricht das Material im Einbauzustand eher stabilen bindigen Böden. Es enthält feine, abgestufte Partikel zwischen den groben Bestandteilen, so dass mit keinem nennenswerten Feinmaterialaustrag zu rechnen ist (Blümel, 2003).

Tabelle 1: Kennzahlen zur Prüfung der Filterstabilität (Kühle-Weidemeier, 2003)

	Kies 16/32*	H Lahe 0-30 mm	SHG 0-20 mm	SHG 0-40 mm	SHG 0- 60 mm	SHG 0-150 mm	LG*
d ₁₀ (mm)		0,4	0,03	0,043	0,052	0,061	0,45
d ₁₅ (mm)	16	0,7	0,053	0,082	0,10	0,12	0,8
d ₅₀ (mm)	28	2,7	0,73	2,1	4,1	7,0	11
d ₆₀ (mm)		4,0	1,5	5,3	10	20	12
d ₈₅ (mm)	36	10	7,3	24	35	44	31
U (=d ₆₀ /d ₁₀)		10	50	123	192	328	27

*Werte für Kies und LG 0-100 mm aus Doedens et al. (2000)

In Perkolationsversuchen (Doedens et al., 2000) wurde eine Dränage (16-32 mm) unter einer 1 m Schicht MBA-Material nicht verschlammte. Es gibt daher keine Hinweise darauf, dass eine Filterschicht zwischen MBA-Material und Dränage erforderlich ist. Zusätzliche Sicherheit wird erreicht, wenn in der Dränage Kies 8-32 statt 16-32 mm verwendet wird, in den kleine Abfallstücke nicht so leicht eingetragen werden können.

3.5 Scher- und Zugverhalten

Ziehmann (1999) untersuchte im Großschergerät (2·1 m) an Abfällen aus der MBA-Meisenheim die Auswirkungen biologischer und mechanischer Behandlung.

Tabelle 2: Einfluss der Abfallbehandlung auf Scherparameter (Ziehmann, 1999)

Parameter	Einheit	unbe- handelt	biologisch behandelt	mech.- biol. be- handelt	mech.-biologisch behandelt; < 60 mm
zugkraftaufnehmende Komponenten (Dim. 1+2)*	Gew.- %	>25	>25	<25	<5
Zugwinkel	°	30-35	30-35	15	~0
Reibungswinkel	°	30	35	35-38	35-38
Kohäsion	kN/m ²	15	15	15	15

* Dim. 1: „Eindimensional“, eine lange Seite (Bänder); Dim. 2: 2 lange Seiten (Plastiktüten, Folien)

Wie Tabelle 2 zeigt, wird die Kohäsion durch die Abfallbehandlung nicht beeinflusst. Die biologische Behandlung wirkt sich auf den Scherwinkel aus, der etwas ansteigt. Die mechanische Behandlung führt nur zu einer geringfügigen Erhöhung des Scherwinkels, die durch die Absiebung auf < 60 mm nicht verändert wird. Durch die mechanische Behandlung vor der Rotte reduziert sich der Zugwinkel von 30 - 35 auf 15 Grad. Durch die Absiebung < 60 mm nach der Rotte geht er schließlich gegen null.

Tabelle 3: Scherversuche an MBA-Feinfraktionen (Daten aus Fehrer, 2002)

MBA	Oberpullendorf	Allerheiligen			Einheit
Probe, Größtkorn	OP25	AH12	AH40	AH80	mm
AT ₄	1,8	12,9	k.A.	k.A.	mg O ₂ / gTS
Glühverlust	32,5	32,5	39,9	45,1	Gew.-% TS
Ho, wf	6.240	6.130	8.700	10.370	kJ/kg TS
Reibungswinkel	32,6	31,5	36,2	39,5	°
Kohäsion	6,0	9,5	6,7	4,2	kN/m²

3.6 Kompressionsverhalten

Der auflastabhängige Steifemodul beträgt nach DGGT (1997) bei Frischmüll im Mittel

$$E_s = -200 + 11,7 \cdot \sigma \quad [\text{kN/m}^2] .$$

Jessberger et al. (1990) recherchierten und untersuchten den Steifemodul von Abfällen und fanden Werte von 0,3-4,0 MN/m². Ziehmann (1999) untersuchte mechanisch-biologisch behandelte Abfälle. Dabei wurde der Steifemodul für das Ende der jeweiligen Laststufe (Z1) und bei Setzungen < 0,1% der Ausgangshöhe innerhalb von 24 Stunden (Z2) ermittelt. Die MBA führt entsprechend der Werte in Tabelle 4 zu einer deutlichen Erhöhung des Steifemoduls, die sich durch Absiebung nach der Rotte noch vergrößert.

Tabelle 4: Steifemoduln von MBA Abfall bei $\sigma = 280-420 \text{ kN/m}^2$ (Ziehmann, 1999)

Behandlung	mechanisch-biologisch	mechanisch-biologisch <60mm
Z 1	3,8 MN/m ²	4,3 MN/m ²
Z 2	5,1 MN/m ²	7,9 MN/m ²

Bidlingmaier et al. (1999) ermittelten an Output < 60 mm aus Meisenheim (MH2-36w) und < 100 mm der MBA Lüneburg die Werte in Tabelle 5. Bei niedrigen Laststufen erreicht das feinere MH2-36w höhere Steifemoduln, während LBG-16w bei höheren Auflasten die größere Festigkeit zeigt. Eine Erklärung dafür gaben Bidlingmaier et al. nicht.

Tabelle 5: Steifemodul E_s , Trockendichte D_t , Porenanteil n , Sättigungsgrad s_t bei Wasserhaltekapazität r mit zunehmender Auflast (Bidlingmaier, 1999)

Laststufe	MH2-36w				LBG-16w			
	E_s	D_t	n	S_r	E_s	D_t	n	S_r
	[kN/m ²]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[kN/m ²]	[Mg/m ³]	[-]	[-]
0	-	0,82	0,64	0,76	-	0,63	0,70	0,76
50	355	0,96	0,58	-	239	0,80	0,62	-
100	1670	0,99	0,57	-	905	0,86	0,59	-
200	1947	1,06	0,54	-	1570	0,94	0,55	-
400	2904	1,16	0,50	-	2973	1,05	0,50	-
600	4514	1,24	0,46	1,0	4977	1,12	0,47	1,0
800*	6438*	1,30*	0,43*	-	14105*	1,15*	0,45*	-
1000*	9857*	1,35*	0,41*	-	32737*	1,16*	0,45*	-

* extrapolierte Werte

Düllmann (2002) ermittelte die in Tabelle 6 aufgeführten Steifemoduln für das Material der Testfelder auf der Deponie Lahe. Für das organikreiche Material sind die Werte hoch und liegen über den von Bidlingmaier (1999) ermittelten Werten.

Tabelle 6: Steifemoduln des Materials H 0 – 30 mm (Werte aus Düllmann, 2002)

Laststufe [MN/m ²]	E_s [kN/m ²]
25 – 50	0,73
50 – 100	1,48
100 – 200	2,46
200 - 400	4,92

Die 3 Fraktionen aus SHG zeigen im Last-Setzungsverhalten und hinsichtlich der Steifemoduln untereinander ein sehr ähnliches Verhalten. Mit steigendem Größtkorn steigt der Steifemodul. Die Steifigkeit liegt deutlich unter der des „Hannoveraner“ Materials.

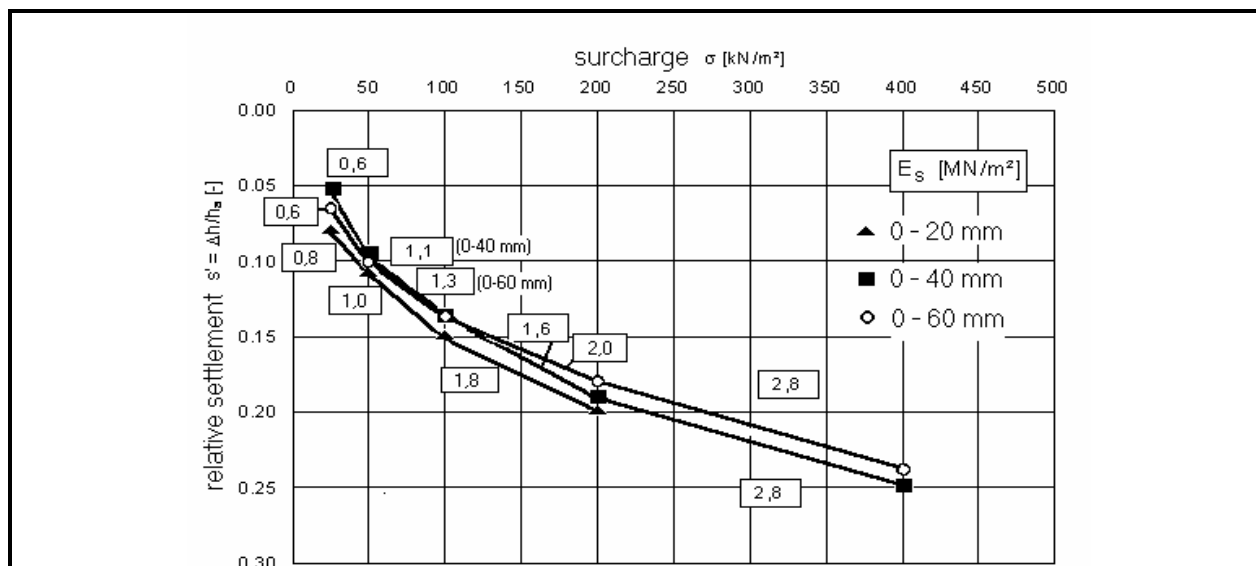


Bild 6: Last-Setzungsverhaltens v. Fraktionen aus SHG (Kühle-Weidemeier, 2003)

4 Hydraulische Eigenschaften

Reicht die Durchlässigkeit des Abfalls nicht, um durch Konsolidierungsvorgänge freiwerdendes Wasser und ggf. Deponiegas abzuführen, kann es zu standsicherheitsbeeinträchtigenden Porenwasserdrücken kommen. Während für Rohabfälle Durchlässigkeitsbeiwerte um 10^{-4} bis 10^{-7} m/s dokumentiert sind, betragen diese bei MBA-Abfällen 10^{-5} - 10^{-10} m/s. Neuere Untersuchungen deuten darauf hin, dass die bisher am MBA-Output ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte wegen zu kleiner Messzellen und Randumläufigkeiten oft zu hoch sein dürften (Ramke, 2001). Fehrer (2002) ermittelte an Proben aus Oberpullendorf und Allerheiligen Durchlässigkeiten von 10^{-8} – 10^{-11} m/s, die mit zunehmendem Größtkorn anstiegen und mit steigender Einbaudichte abnahmen. Das Material SHG (Tab. 7) zeigt mit steigender Korngröße zunehmende Durchlässigkeit.

Tabelle 7: Durchlässigkeitsbeiwerte Material SHG (Kühle-Weidemeier, 2003)

Korngröße	mm	0-20			0-40			0-60			
Ausgangsmaterial		V4	V5		V4	V5		V4	V5		
AT4	mgO ₂ /gTS	1,4	1,2		1,7	1,5		2,0	1,9		
Heizwert Ho	kJ/kg	4400	5400		4427	5348		4738	5960		
Glühverlust	%TS	22	27		22	26		23	28		
Durchlässigkeitsbeiwert	Labor	a	a	b	a	a	b	a	a	b	
	m/s	7,8*E-8	3,7*E-9	2,3*E-10	6,5*E-6	3,6*E-6	7,0*E-10	6,2*E-6	5,2*E-5	1,8*E-8	
Wassergehalt	%TS	56	70	72	58	64	67	57	70	54	
Einbaudichte	feucht	g/cm ³	1,2	1,4	1,4	1,1	1,2	1,4	1,2	1,0	1,3
	trocken	g/cm ³	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,6	0,9

Bild 7 zeigt die starke Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Auflast und damit verbunden von der Lagerungsdichte am Beispiel des Testmaterials Dep. Lahe. Bei in-situ Messungen wurden zu den Laborwerten vergleichbare Ergebnisse erzielt.

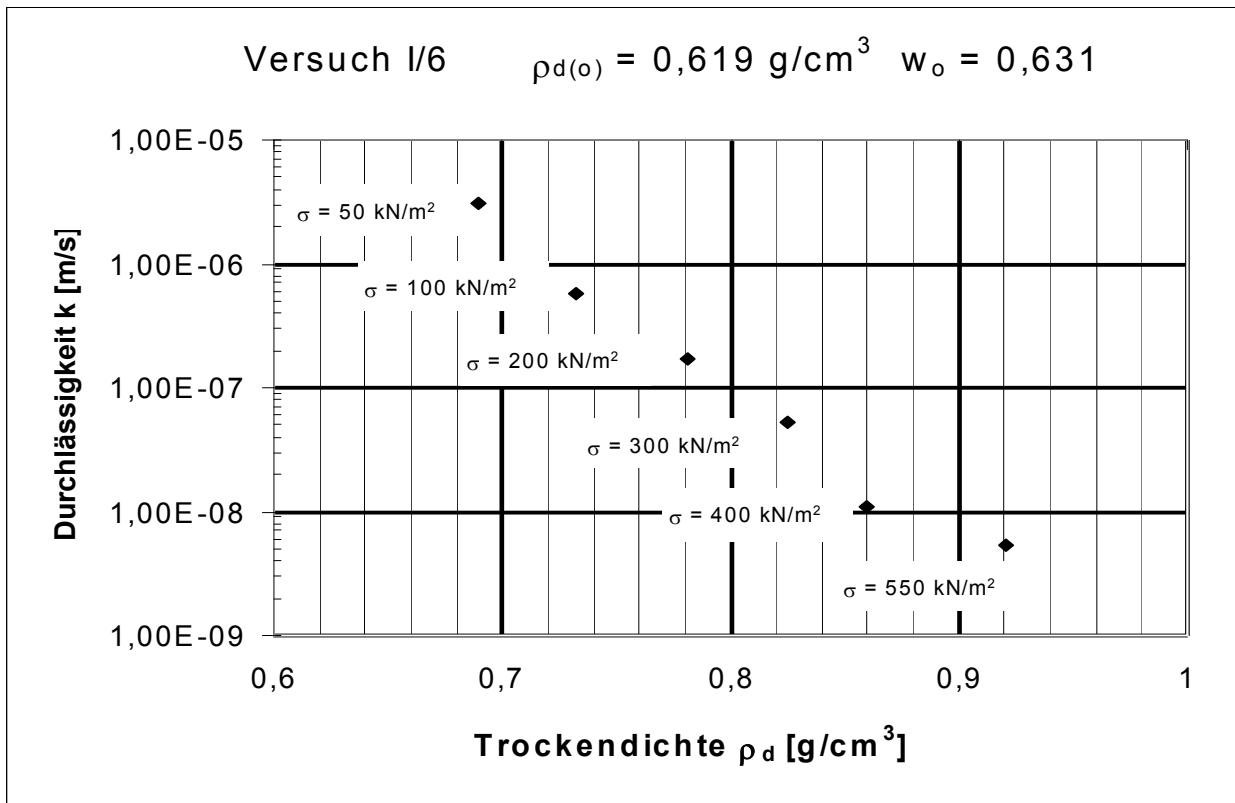


Bild 7: k_f abhängig v. Normalspannung σ und Trockendichte ρ_d , (Düllmann, 2002)

In Bild 9 ist die Proctorkurve des Materials H 0 – 30 mm und die Abhängigkeit des k_f -Wertes vom Einbauwassergehalt dargestellt. Eine spätere Befeuchtung des bereits eingebauten Materials hat keinen Einfluss auf die Durchlässigkeit (Düllmann, 2002).

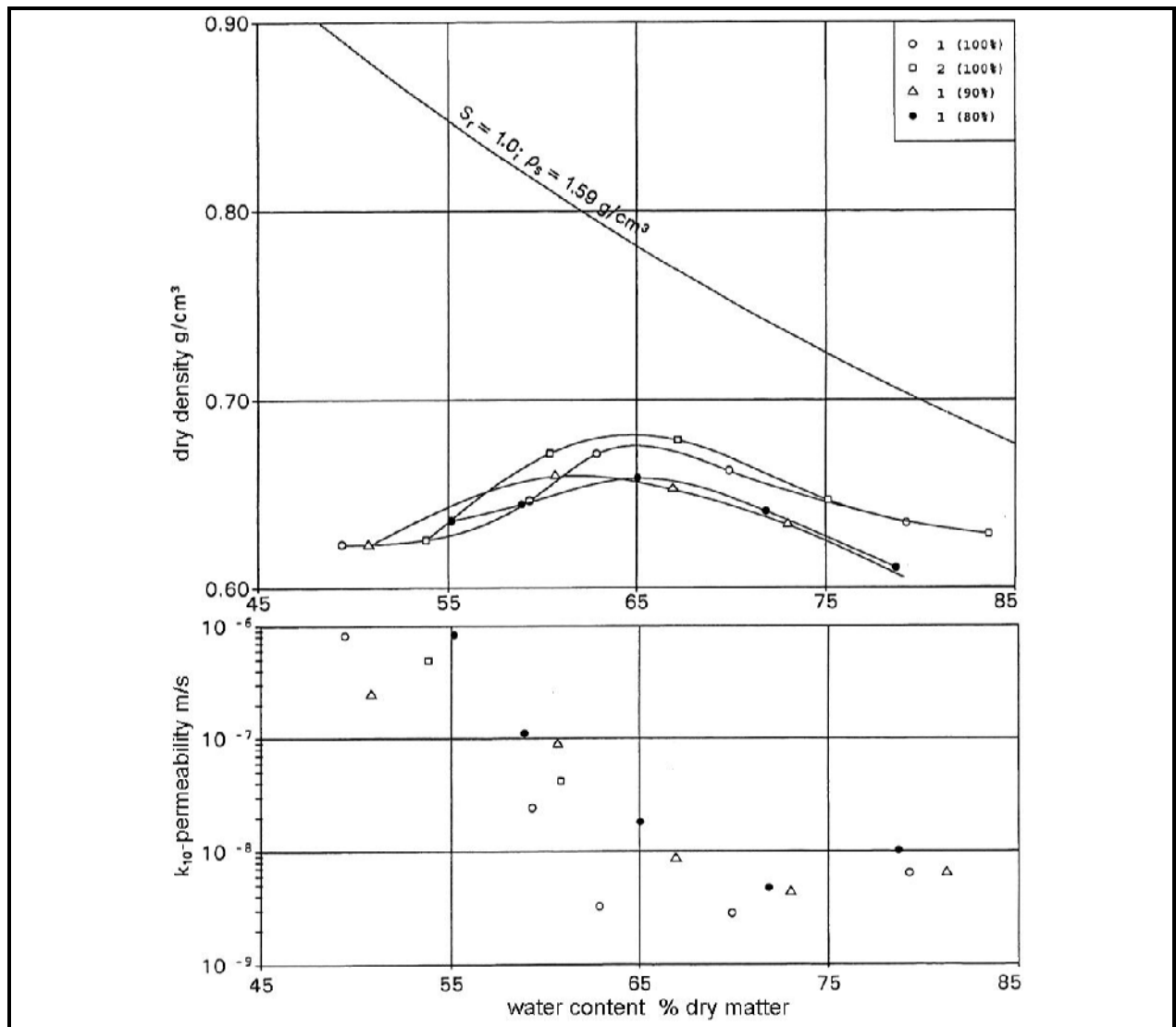


Bild 9: Proctorkurve & Durchlässigkeit H 0-30 mm Dep. Lahe (Düllmann, 2002)

4.1 Übersicht über die geomechanischen Eigenschaften der Materialien aus dem LK Schaumburg (SHG) und den Untersuchungen auf den Testfeldern an der Deponie Lahe (H)

Die nachfolgende Tabelle zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der geomechanischen Untersuchungen. Die beim Steifemodul angegebenen geklammerten Werte für Versuch 4 unterliegen einem Fehler durch nicht DIN-konforme Versuchsdurchführung.

Tabelle 7a: Ergebnisse der geomechanischen Untersuchungen

Korngröße		mm	0-20			0-40			0-60			0-30
Ausgangsmaterial			aerob V4	aerob V5		aerob V4	aerob V5		aerob V4	aerob V5		anaerob + Nachrotte
Probenbezeichnung			SHG 130	SHG 149		SHG 129	SHG 148		SHG 128	SHG 147		H III/1; I/6
AT4	mgO ₂ /gTS		1,4	1,2		1,7	1,5		2,0	1,9		3,61
Heizwert Ho	kJ/kg		4400	5400		4427	5348		4738	5960		>8800
Originalwassergehalt	% FS		38	41		35	38		34	38		31
Korndichte	g/cm ³											1,59
Glühverlust	%TS		22	27		22	26		23	28		34
Einbauwassergehalt	%FS		36	41		37	46		36	41		39
	%TS		56	70		58	84		57	70		65
Einbau- dichte	feucht	g/cm ³	1,40	1,50		1,40	1,50		1,40	1,40		1,09
	trocken	g/cm ³	0,90	0,90		0,90	0,90		0,90	0,80		0,67
Scherwinkel	Bruch Gleiten	°	33 33	-- 34	34 34	36 36	35 35	35 27			>35	
Kohäsion c'		kN/m ²	38 21	-- 16	43 21	23 11	35 20	49 62			18	
Steifemodul	25-50	MN/m ²	(0,84)	0,80		(1,07)	0,50		(0,94)	0,60		0,73
E _s bei einer	50-100	MN/m ²	(1,99)	1,00		(1,59)	1,10		(1,49)	1,30		1,48
Auflast von [kN/m ²]	100-200	MN/m ²	(1,87)	1,80		(1,68)	1,60		(2,44)	2,00		2,46
	200-400	MN/m ²	(3,29)	--		(2,88)	2,80		(3,03)	2,80		4,92
Durchlässigkeits- beiwert	Labor		a	a	b	a	a	b	a	a	b	b
	m/s		7,8*E-8	3,7*E-9	2,3*E-10	6,5*E-6	3,6*E-6	7,0*E-10	6,2*E-6	5,2*E-5	1,8*E-8	E-6 bis E-9
Wassergehalt	%TS		56	70	72	58	64	67	57	70	54	variiert
Einbau- dichte	feucht	g/cm ³	1,2	1,4	1,4	1,1	1,2	1,4	1,2	1,0	1,3	variiert
	trocken	g/cm ³	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,6	0,9	variiert

5 Einbauverhalten

5.1 Einbaudichte und -verfahren

Untersuchungen mit auf < 40 mm abgeseibtem Rotteaustrag der RABA Bassum im Rahmen eines Feldversuches (von Felde, 1999) ergaben, dass der Einsatz von Kompaktoren auf feuchtem Rottegut (mit Kompaktor schlecht befahrbar) zu keinem befriedigenden Verdichtungsergebnis führt. Erst durch Glätten der Oberfläche und Nachverdichten mit einem Walzenzug wurden gute Verdichtungswirkungen erzielt.

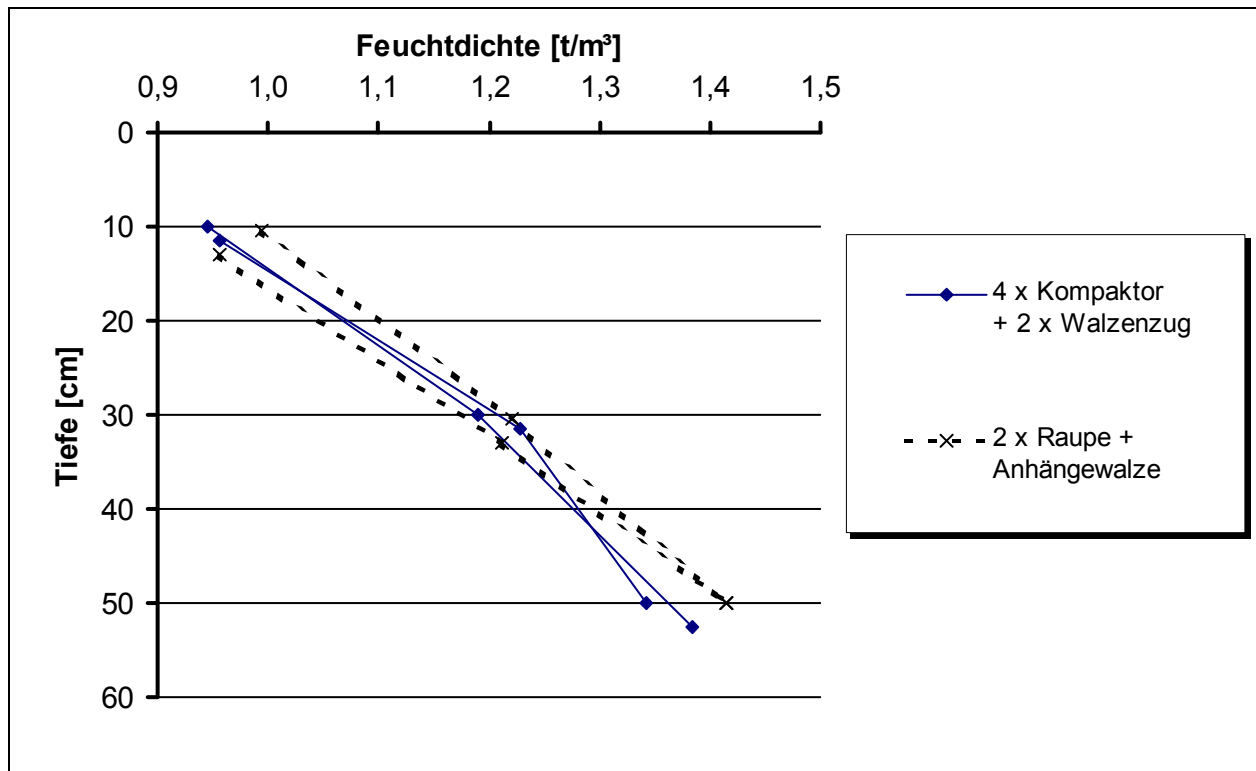


Bild 10: Verdichtungsgerät und Einbaudichten Material < 40mm (von Felde, 1999)

Eine Kombination aus Raupe zum Ausbreiten und anschließendem Verdichten mit einer Vibrationsanhängewalze ergab eine gute Verdichtung auf 1,4 t FS/m³ in 50 cm Tiefe und war auch bei widrigen Witterungsbedingungen einsetzbar (Doedens et al. 2000).

Reiff & Marx (1999) kamen für auf < 60 mm abgeseibtes Material aus der Kaminzugrotte hinsichtlich der Befahrbarkeit zu ähnlichen Ergebnissen, erzielten jedoch mit dem Kompaktor eine bessere Verdichtung. Das aus der MBA Meisenheim stammende, feinkornreiche Material ermöglicht eine hohe Einbaudichte.

Tab. 8: Verdichtungserfolg unterschiedlicher Einbaugeräte (Reiff & Marx, 1999)

Parameter	Einheit	Kompaktor 37 t	Walzenzug 13 t	Kompaktor 28 t
Wassergehalt	%	35,1	33,3	32,9
Feuchtdichte	t _{FS} / m ³	2,19	1,22	1,75
Trockendichte	t _{TS} / m ³	1,45	0,81	1,17

An der Deponie Lahe wurde Feld 1 m aus 30 cm und Feld 2 aus 50 cm Lagen (vor Verdichtung) errichtet. Bild 11 zeigt auf Basis bedingt genauer Vermessungsergebnisse den Verdichtungserfolg in Abhängigkeit von der Anzahl der Übergänge. Nach dem 3. Übergang sind bereits ca. 75 – 95 % der mit 5 Übergängen erzielbaren Verdichtung erreicht. Da das Material durch Auflast (wie in einer Deponie) gut kompressibel ist, sind max. 3 Übergänge zur Erzielung einer hohen Ablagerungsdichte nötig.

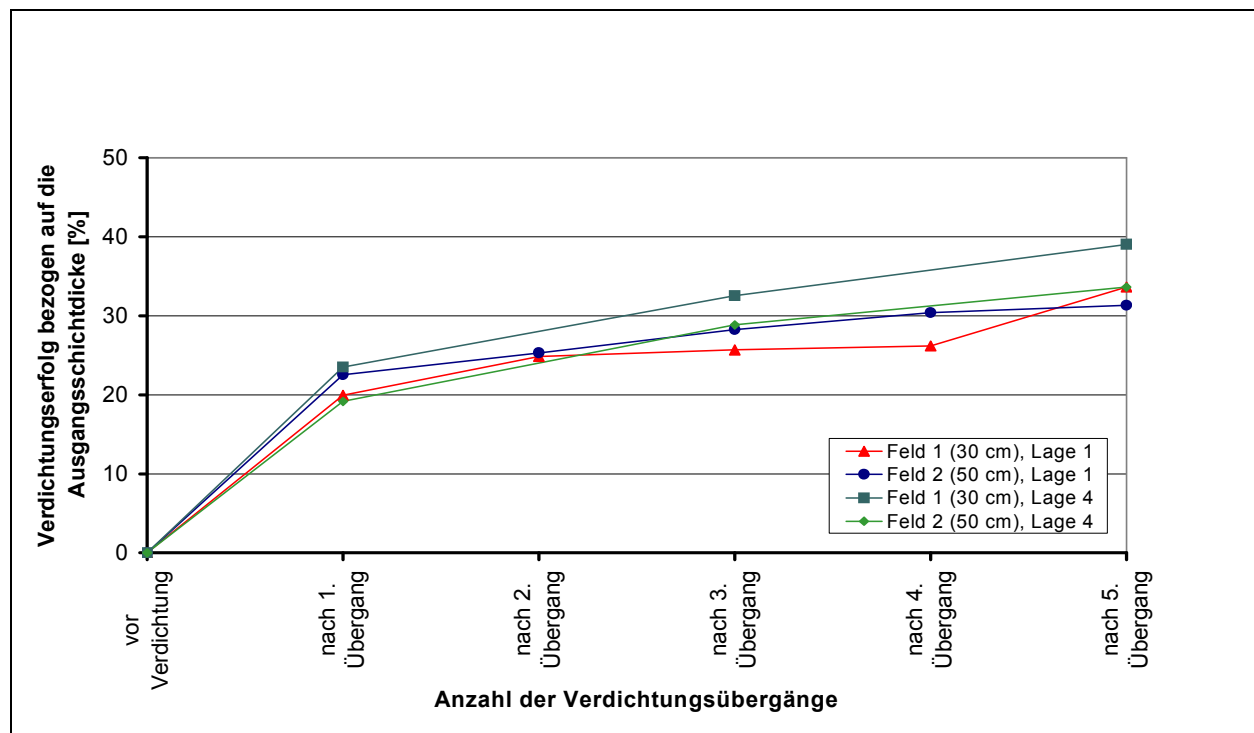


Bild 11: Verdichtungserfolg und Anzahl der Übergänge (Kühle-Weidemeier, 2003)

Die Vermessungsergebnisse wurden durch Beprobung sämtlicher Lagen nach Fertigstellung der Tesfelder ergänzt. Insgesamt ergab sich, dass bei den 50 cm-Lagen keine schlechtere Verdichtung erzielt wurde als bei 30 cm Lagenstärke. Für das 50 cm Feld wurden höhere Trockendichten ermittelt als für das 30 cm Feld (Bild 12). Dieses liegt an Ungenauigkeiten aufgrund der mit 15 cm sehr kurzen Stutzenlänge beim 30 cm Feld (Stutzenlänge im 50 cm Feld 25 cm). Statische und dynamische Verdichtung mit einer 16,5 t Stampffußwalze waren ebenbürtig. Auf Feld 2 ergab sich sogar ein leichter Vorsprung für die statische Verdichtung. Die niedrige Einbaudichte ist auf das Material und nicht auf das Einbaugerät zurückzuführen.

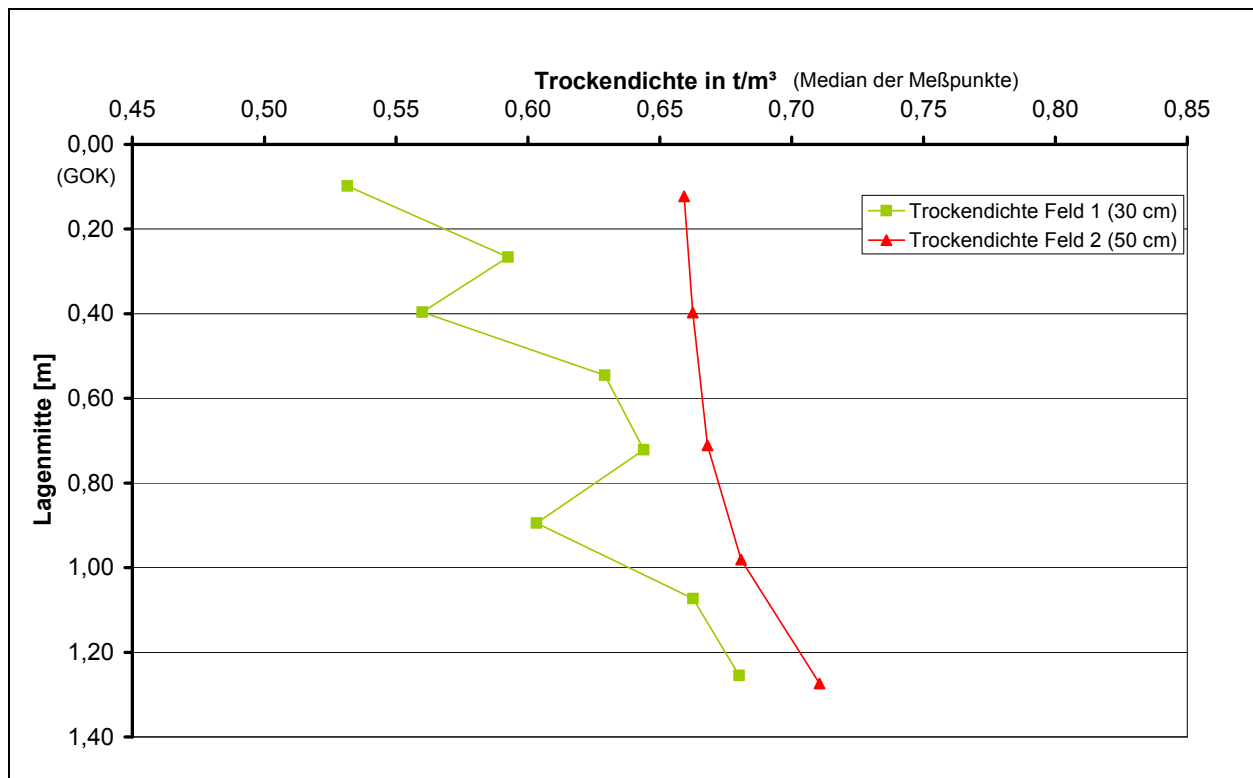


Bild 12: Liniendiagramm Trockendichte Feld 1 und 2 (Kühle-Weidemeier, 2003)

5.2 Befahrbarkeit

Bei allen MBA-Deponien (Anlagen aktuellen Typs) kommt es durch Vernässung der Oberfläche zu Befahrbarkeitsproblemen. Für den Transport der Abfälle sind daher befestigte Wege (z.B. Betonbohlen oder aus Bauschutt) notwendig. Nur bei durchgehend trockener Witterung ist das Material direkt mit dem LKW befahrbar. Die Materialverteilung sollte daher mit einer Raupe oder dem Kompaktor (mit Schild) erfolgen.

6 Wasserhaushalt von MBA-Deponien

6.1 Modellierung der hydraulischen Verhältnisse

Die hydraulischen Verhältnisse in einer Deponie werden vor allem bestimmt durch

- die Infiltration von Niederschlagswasser,
- den Durchlässigkeitsbeiwert des Deponates und
- das im Einbauzustand im Material enthaltene Wasser (Einbauwassergehalt).

Das im Einbauzustand enthaltene Wasser beeinflusst über das Sättigungsdefizit und seine abbau-, auflast- bzw. konsolidierungsbedingte Freisetzung insbesondere den Porenwasserdruck und die Abflussverhältnisse. Porenwasserdruck beeinflusst die Standsi-

cherheit der Deponie und ist daher von Bedeutung für die Deponiekonstruktion. Bei gleichmäßigen Materialeigenschaften in der Deponie entsteht Porenwasserdruck zuerst in den unteren Abfalllagen, die die stärkste Kompression durch Auflast erfahren. Maßnahmen zur Verhinderung von Porenwasserdruck, oder der Kompensation seiner Auswirkungen, müssen daher am Deponiefuß (also frühzeitig) beginnen. Dach (1998) leitete aus Versuchen in Deponiesimulationsreaktoren ab, dass unter Deponiebedingungen ab Einbauwassergehalten von 30-35 % mit dem Austritt von Press- und Konsolidierungswasser gerechnet werden muss.

Friedrich (2002) hat ein hydraulisches Modell entwickelt, das qualitativ das Vorhandensein von Porenwasserdrücken in einer senkrechten Säule in der Deponie prüfen kann. Das Modell basiert auf den geomechanischen Untersuchungen Düllmanns und wurde mit Niederschlags- und Abflussdaten der MBA-Deponie Bassum kalibriert. Es wurde eine 50 m hohe Deponie aus dem Material H 0 – 30 mm (Ausgangswassergehalt 30 % FS) simuliert.

- In der simulierten Deponie kommt es bei Höhen über 20 m zu Porenwasserüberdrücken, die sich von der Basis nach oben ausbreiten.
- Eine schnelle Aufhöhung der Deponie, verschärft die Situation, da dem unten liegenden Material weniger Zeit zum Dränieren bei niedrigen Auflasten mit höheren Durchlässigkeiten bleibt.
- Wirksame Dränageschichten zur Ableitung von Porenwasserdrücken müssen einen deutlich geringeren vertikalen Abstand als 5 m haben.

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ wurde von Obermann (1999) das Modell WATFLOW entwickelt. Es kann detailliert an die Eigenschaften des zu simulierenden Abfalls angepasst werden. Nachfolgend werden zunächst 4 von Obermann (2000) verglichene Modellrechnungen dargestellt. Die Simulationen MBA und MBA(1) beziehen sich auf ein Material mit einem Glühverlust von 30 % (oberer Heizwert ca. 6.150 kJ/kg bzw. TOC_{TS} ca. 15,6 % gem. Korrelationen in Kühle-Weidemeier, 2003), welches mit Blick auf den TOC auch nach dem 1.6.2005 ablagerbar wäre. Szenario MBA(1) unterscheidet sich durch eine höhere Einbautrockendichte und einen entsprechend geringeren Durchlässigkeitsbeiwert von den Übrigen. Die für das Szenario MBA angesetzten Werte für Einbaudichte und Durchlässigkeit tendieren in die Richtung des Materials H 0 – 30 mm, während das Szenario MBA(1) eher den Fraktionen 0 – 20 und 0 . 40 mm aus den Versuchen im LK SHG entspricht.

Das Material in MBA(2) hat einen Glühverlust von 20 %, was deutlich unter demjenigen des Materials < 20 mm aus dem LK SHG liegt; die Deponierung eines solchen Materials ist daher unwahrscheinlich. Auch Obermann kommt zu dem Ergebnis, dass in MBA-Deponien z.T. mit erheblichen Porenwasserdrücken zu rechnen ist (Obermann, 2000).

Wie im Modell von Friedrich (2002) zeigt sich in WATFLOW, dass steigende Aufhängeschwindigkeit der Deponie das Risiko von Porenwasserüberdrücken erhöht.

Tabelle 8: Eingabeparameter ausgewählter Simulationen (Obermann, 2000)

Bezeichnung	Einheit	MBA	MBA(1)	MBA(2)	MVA
Simulationsdauer	a	50			
Dauer der Einbauphase	a	20			
Niederschlag	mm/a	810			
potentielle Verdunstung	mm/a	660			
Deponieaufbau	m/a	2,0	2,0	2,0	1,6
Glühverlust	Gew.-%	30	30	20	3
Einbautrockendichte bei Abfalleinbau	Mg/m ³	0,77	0,86	1,0	1,30
Porenanteil bei Abfalleinbau	Vol.-%	62	57	57	48
Wassergehalt bei Abfalleinbau	Vol.-%	40	50	32	30
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei Porenanteil von 50 Vol.-%	m/s	1,0E-07	1,0E-09	1,0E-06	1,0E-04
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei aktueller Einbaudichte (berechnet)	m/s	1,3E-05	1,7E-08	1,7E-05	4,5E-05
Steifemodul des Abfalls bei Spannung von 200 kN/m ²	MN/m ²	1,0	1,6	1,6	∞

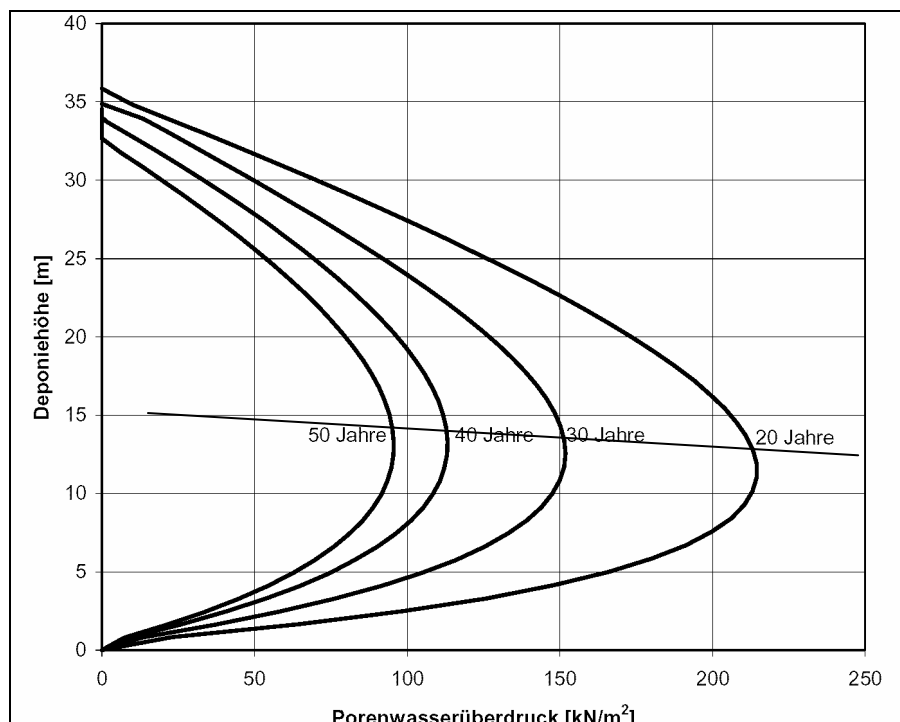


Bild 9: Porenwasserdruck in einer 40 m hohen MBA-Deponie; Jahre nach Einbaubeginn (verändert aus Obermann, 2000 in Kühle-Weidemeier, 2003)

Für das Szenario MBA(1) hat Obermann (2000) in Bild 9 den bis weit in den Nachsor-gezeitraum hineinreichenden Porenwasserüberdruck dargestellt, aus dessen langsa- mem Abbau sich langanhaltende Setzungsvorgänge ergeben. Die Berechnung sieht allerdings keine temporären Abdeckungen während der Einbauphase vor. Die maxima- len Porenwasserüberdrücke treten erst etwa 12 m oberhalb der Deponiebasis auftreten. Im Modell von Friedrich, das sich aber auf den Einbauzeitraum beschränkt, sind sie ba- sisnah.

Obermann (2003) war bereit, einige Szenarien für die Materialien Dep. Lahe sowie LK SHG zu berechnen (Tabelle 9). Bei allen berechneten Modellen ist die Aufbringung der Oberflächenabdichtung unmittelbar nach Ablagerungsende veranschlagt.

Tabelle 9: Szenarien und Eingabewerte (Kühle-Weidemeier, 2003)

Name Simulation	Mate- rial mm	De- po- nie- höhe	Aufhö- hung	Einbau- wasserge- halt	Max. Wasse- rant. / Porenv.	k_f gesät- tigt bei 50% Po- renvolu- men	Einbau- dichte TS	Steife- modul bei Es 200	Nieder- schlag	Wasser- durchtritt Oberflächenabd.
		m	m/a	(%FS) $\frac{m^3}{m^3}$	$\frac{m^3}{m^3}$	m/s	$\frac{Mg}{m^3}$	$\frac{kN}{m^2}$	mm/a	mm/a
Hnorm	30	40	2	(35%) 0,36	0,58	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,67	2460	810	8
S20norm	20	40	2	(35%) 0,48	0,57	$7,5 \cdot 10^{-11}$	0,90	1800	810	8
S40norm	40	40	2	(35%) 0,48	0,58	$5,6 \cdot 10^{-11}$	0,90	1600	810	8
S60norm	60	40	2	(35%) 0,43	0,62	$1,0 \cdot 10^{-10}$	0,80	2000	810	8
H45wg	30	40	2	(45%) 0,55	0,58	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,67	2460	810	8
S40wg45	40	40	2	(ges.) 0,58	0,58	$5,6 \cdot 10^{-11}$	0,90	1600	810	8
H20m	30	20	2	(35%) 0,36	0,58	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,67	2460	810	8
S40_20m	40	20	2	(35%) 0,48	0,58	$5,6 \cdot 10^{-11}$	0,90	1600	810	8

Grundmodelle fett eingerahmt, variierte Parameter **fett** gedruckt (H=Dep. Lahe, S=SHG)

Konform zu den Feldversuchen wurde für das Material H 0–30 mm kein Oberflächenab- fluss errechnet. Bei den Materialien aus SHG hatte die Fraktion 0–60 mm den gerings- ten Oberflächenabfluss, was zum höchsten k_f -Wert der Proben aus SHG passt. Bei al- len Siebfraktionen aus SHG wurde die Entstehung von Porenwasserdruck errechnet. Eine Reduzierung der Deponiehöhe auf 20 m konnte den Porenwasserdruck verringern, aber nicht verhindern. Steigender Einbauwassergehalt führt zu steigendem Porenwa- serdruck. Bei den Simulationen mit dem Material H 0 – 30 mm traten im Widerspruch zum Modell von Friedrich keine Porenwasserüberdrücke auf. Dieses dürfte auf den un- gewöhnlich hohen Steifemodul zurückzuführen sein, der in WATFLOW unmittelbar in die dynamische Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes eingeht.

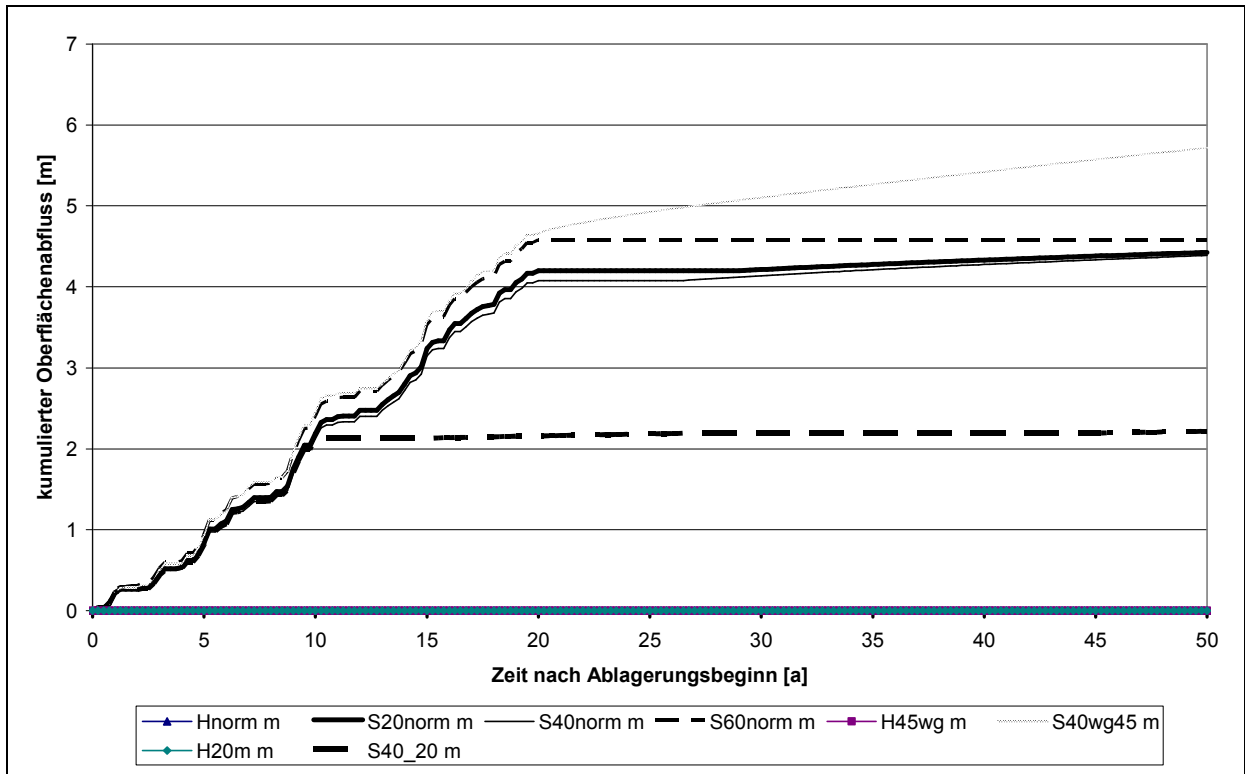


Bild 11: Kumulierter Oberflächenabfluss n. WATFLOW (Kühle-Weidemeier, 2003)

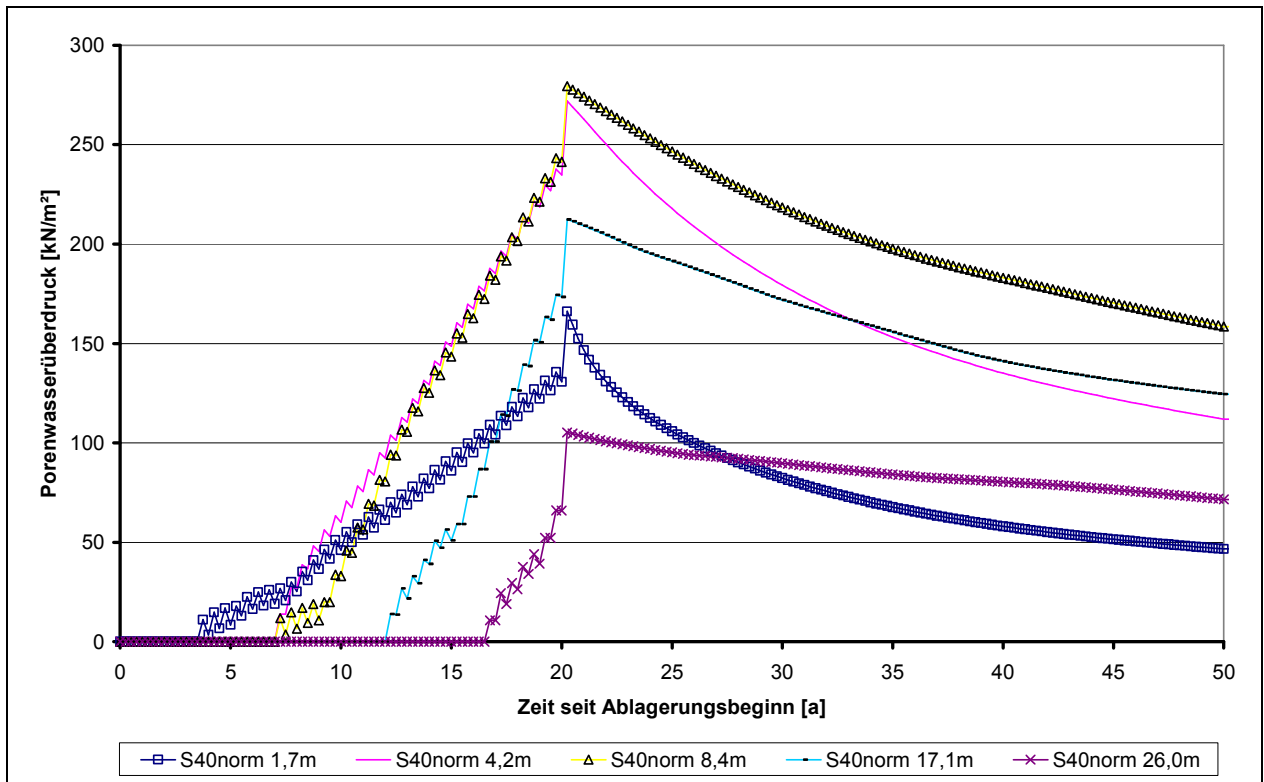


Bild 12: Porenwasserdruck SHG 0-40 mm, 40 m Deponiehöhe nach WATFLOW (Kühle-Weidemeier, 2003)

6.2 Oberflächenabfluss

Beim Einbauversuch mit Output < 40 mm der RABA Bassum (700m², Gefälle 5-7%, 3 Dünnschichtlagen, Regenspende 74 mm) wurde nur in LKW-Fahrspuren Oberflächenabfluss festgestellt. Dieser war behandlungsbedürftig (von Felde, 1999). Die Beregnung erfolgte mit extremer Intensität (Güllewagen).

Maak & Poser (1999) führten Beregnungsversuche mit feinkornreichem Kaminzugrottematerial aus der MBA Meisenheim < 60 mm durch. Sie erzielten einen höheren Oberflächenabfluss, der ebenfalls behandlungsbedürftig war. Schwere Einbaugeräte waren vorteilhaft für die langfristige Erzielung eines Oberflächenabflusses. Durch den hohen Feinkornanteil konnte bereits oberflächennah eine hohe Einbaudichte erreicht werden.

Auf den Testfeldern an der Deponie Lahe wurden Beregnungsversuche mit einer Niederschlagshöhe von 20 mm/h durchgeführt (Starkregen). Einen Monat später wurden die Felder ein weiteres Mal bewässert. Tabelle 10 zeigt Kenndaten der Bewässerungen und die Belastung des gefassten Oberflächenwassers. Bei der ersten Bewässerung setzte erst nach 11,5 Stunden und einem Niederschlag von 230 mm auf Feld 1 Oberflächenabfluss ein. Auf Feld 2 war auch nach 12,75 Stunden und einem Niederschlag von 245 mm kein Oberflächenabfluss erzielbar. Bei der zweiten Bewässerung setzte der Oberflächenabfluss deutlich früher ein (2,5 h auf Feld 1, 4,25 h Feld 2). Es flossen maximal 18 % des Niederschlags oberflächlich ab. Niederschläge von 20 mm/h treten in unserer Region nicht über einen so langen Zeitraum auf, so dass auf vergleichbarem Material unter natürlichen Bedingungen bei einem Gefälle von 6% kaum mit Oberflächenabfluss zu rechnen ist. Es kommt jedoch zu einer stark erschwerten Befahrbarkeit. Ca. 30 cm unter der Oberfläche herrschte starke Vernässung und örtlich (am Fuß des Feldes) ein Wassereinstau. Das Oberflächenwasser hielt die Grenzwerte des 51. Anh. AbwV für Direkteinleitung bei den in Tabelle 10 fett markierten Werten nicht ein.

Tabelle 10: Kenndaten der Berechnungsversuche und Belastung des Oberflächenabflusses von den Testfeldern Deponie Lahe (Kühle-Weidemeier, 2003)

Parameter	Einheit	Abfluss nach 4 Tagen (abgedeckt) 30 cm Lagenstärke		Abfluss nach 5 Wochen 30 cm Lagenstärke		Abfluss nach 5 Wochen 50 cm Lagenstärke		Grenzwert 51. Anhang AbwV
		homo-genisiert	filtriert	homo-genisiert	filtriert	homo-genisiert	filtriert	
Abflussbeginn	h:min	11:25		2:30		4:15		
Niederschlag bis Abflussbg.	mm (=L/m ²)	230		50		85		
		homo-genisiert	filtriert	homo-genisiert	filtriert	homo-genisiert	filtriert	Direkt-einleitung
CSB	mg O ₂ /L	840	790	479	383	156	111	200
BSB ₅	mg O ₂ /l	24	24	4,8	7,5	3,8	4,8	20
NO ₂ -N	mg/L		7,5		0,28		0,2	2
N-ges.			19,6		6,98		5,1	70

7 Standsicherheit von MBA-Deponien

Anhand der ermittelten Werte für die Materialien H und SHG wurde die Standsicherheit von Böschungen aus diesen Materialien rechnerisch überprüft. Simuliert wurde eine 20 m und eine 40 m hohe Deponie. Diese Berechnungen wurden allerdings vor dem Hintergrund durchgeführt, die maximale Standsicherheit dieser Materialien zu bestimmen. Dabei wurden jegliche Porenwasserdrücke ausgeklammert. **Dies wird in der Praxis jedoch nicht der Fall sein!** Unter den genannten Voraussetzungen ergab sich für eine 20 m lange Böschung bei einem Sicherheitsbeiwert von 2 eine mögliche Steigung von ca. 1:2 und bei 40 m von ca. 1:2,25 (Kühle-Weidemeier, 2003). Als Verkehrslast wurde 36t Kompaktor 2 m von der Böschungskante angesetzt. Wurde in Anbetracht des bereits weitgehenden Entzugs von bewehrenden Bestandteilen und fortgeschrittenen Abbaus organischer Inhaltsstoffe der Sicherheitsbeiwert auf Erdbauübliche 1,3 abgemindert, ergaben sich natürlich steilere Böschungen.

Berechnungen, die die Existenz von Wasser im Deponiekörper berücksichtigen, wurden von Blümel & Müller-Kirchenbauer (2004) durchgeführt. Es wurde ein Sicherheitsbeiwert von 1,4 angesetzt. Die Berechnungen ergaben, dass mit den gewählten Rechenwerten der Scherparameter von $\varphi = 35^\circ$ und $c = 15 \text{ kN/m}^2$ Böschungsneigungen zwischen 1:3,5 und 1:3 mit ausreichender Sicherheit realisierbar sind, bei geringer Böschungshöhe evtl. auch noch begrenzt steiler. Die Wasserstände wurden überwiegend auf einem Niveau gewählt, das etwa der halben Böschungshöhe entspricht. Damit sollte

der Einfluss des Porenwasserdruckes berücksichtigt werden. Bei geringen Wassergehalten und langsamer Deponieerhöhung sowie nur teilweiser Wassersättigung wird dieser in situ wahrscheinlich ggf. geringer ausfallen. **Bei Einbau von annähernd Wassergesättigtem Material aus Fehlchargen oder Vergärungsanlagen mit zu geringer Trocknung reuziert sich die Standsicherheit allerdings deutlich!**

Die rechnerischen Untersuchungen sind als Parameterstudie einzustufen. Sie ersetzen nicht den im Anwendungsfall erforderlichen standortspezifischen Standsicherheitsnachweis mit den geomechanischen Parametern des jeweils örtlichen Deponates. Hierbei ist insbesondere bei der Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter darauf zu achten, dass die Randbedingungen im Laborversuch auf die Verhältnisse in situ übertragbar sind (Einbaudichten, Auflastspannungen, Wassersättigungsgrad, Entwässerungsbedingungen etc.) und dass die Rechenwerte aus abgeminderten Versuchswerten gebildet werden.

Zur Entspannung des Porenwasserdruckes sollten grundsätzlich Dränagen z. B. aus wasserdurchlässigen Abfällen vorgesehen werden. Beim Einbau von Dränlagen oder von Rigolensystemen ist darauf zu achten, dass diese u.U. ungünstigere geomechanische Parameter als das MBA-Material aufweisen können. Dies beim Standsicherheitsnachweis entsprechend zu berücksichtigen. Dazu müssen die Materialeigenschaften vor dem Einbau ermittelt werden.

In jedem Fall ist eine Anlagen- und standortspezifische Standsicherheitsberechnung erforderlich! Es wird keinerlei Gewähr für die Richtigkeit der Berechnungen und der gewählten Ansätze übernommen.

8 Fazit und Empfehlungen

- Zur Einhaltung der Grenzwerte für H_0 / TOC TS ist i.d.R. eine Absiebung auf min. < 60 mm notwendig. Abgelagert werden also ca. 25-45 % des MBA-Inputs.
- Hinsichtlich der Filterstabilität ist eine Trenn- / Filterschicht zwischen dem MBA-Deponat und der Basisdränschicht voraussichtlich nicht notwendig. Vorsorglich kann statt Kies 16/32 mm ggf. Kies 8/32 mm für die Dränschicht verwendet werden.
- Geomechanisch verhält sich MBA-Output im Vergleich zum Rohabfall so:
 - Scherfestigkeit und Kohäsion vergleichbar;
 - Zugfestigkeit nahezu null;
 - Steifemodul deutlich erhöht;
 - Proctorwassergehalt ca. 25-40% FS.
- Hohe Ablagerungsdichten in MBA-Deponien werden weniger durch die Einbauverdichtung als durch die Auflast der überlagernden Abfälle erreicht. Die zu erwartenden

den Einbaudichten liegen materialspezifisch oberflächennah zwischen 1,0 und 1,5 g/cm³ FS bzw. 0,7 bis 1,0 g/cm³ TS und steigen bei zunehmender Überlagerung an.

- Erhöhung der Einbaulagenstärke von 30 cm auf 50 cm hat keine negativen Auswirkungen auf die Einbaudichte.
- Nach 3 Verdichtungsübergängen werden ca. 80-90% des Verdichtungserfolges nach 5 Übergängen erreicht. Max. 3 Verdichtungsübergänge sind ausreichend. Jede Verdichtungsüberfahrt verschlechtert die Befahrbarkeit der MBA-Abfälle.
- Statische Verdichtung ist dynamischer min. gleichwertig, tendenziell sogar besser.
- Die Durchlässigkeit (k_f) nimmt mit steigender Ablagerungsdichte und damit Ablagerungstiefe um mehrere Zehnerpotenzen ab (am Deponiefuß k_f ca. 10^{-7} - 10^{-10} m/s). Damit steigt das Risiko der Entstehung von Porenwasser(über)drücken.
- Im Interesse einer guten Standfestigkeit und Befahrbarkeit sollten die MBA-Abfälle möglichst trocken eingebaut und vor Vernässung geschützt werden.
- Bei nicht zu feuchtem Deponat sind voraussichtlich maximale Böschungsneigungen von ca. 1:3 – 1:3,5 möglich. In jedem Fall ist eine individuelle Standsicherheitsberechnung notwendig!
- Zur Verhinderung oder Kompensation von Instabilitäten durch Porenwasserdruck können Dränlagen oder Stützdämme mineralischen Abfällen innerhalb der Deponie sinnvoll sein.
- In Abhängigkeit vom oberflächennahen Sättigungsdefizit, oberflächennaher Durchlässigkeit und von der Oberflächenneigung tritt Oberflächenabfluss auf oder nicht. Oberflächenwasser ist i.d.R. behandlungsbedürftig.
- Vernässungserscheinungen erschweren ein Befahren der verdichteten Oberfläche der eingebauten MBA-Abfälle mit LKW; daher Transport der behandelten Abfälle mittels LKW über befestigte Wege (z. B. Betonbohlen oder Bauschutt) oder durch kettenbetriebene Fahrzeuge im Einbaubereich.
- Als Kurzzeitabdeckung in Phasen ohne Einbau eignen sich dicht gewebtes Bändchengewebe (ausreichende Dichtigkeit prüfen) oder strukturierte KDB (d ca. 1,5 mm) aus PEHD oder robustem PP. Einweglösungen sind weniger empfehlenswert.
- Aus logistischen Gründen scheint ein phasenweiser Einbau unter Einschaltung eines überdachten Zwischenlagers sinnvoll.
- Um unnötig viele Einzeluntersuchungen zu vermeiden, ist die Entwicklung von Standardparametersätzen für abgegrenzte Typen von MBA-Output notwendig und sinnvoll.

9 Literatur

- Bidlingmaier, W.; Scheelhaase, T.; Maile, A. 1999 Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll auf der Deponie; Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3.1 des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Universität Gesamthochschule Essen, Fachbereich 10 – Bauwesen, Fachgebiet Abfallwirtschaft.
- Blümel, W. 2003 Persönliche Mitteilung.
- Blümel, W.; Müller-Kirchenbauer, A. 2004 Unveröffentlichte Berechnungen am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Hannover.
- Dach, J.; Danhamer, H.; Obermann, I. 1999 Prognose der Sickerwasser-, Deponiegas- und Temperaturentwicklung von Deponien mit MBA-Abfällen. In: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der TU Braunschweig, Heft 14, S. 23 – 36.
- DGGT 1997 GDA-Empfehlungen: Geotechnik der Deponien und Altlasten. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.(Hrsg.). Verlag Ernst & Sohn.
- Doedens, H.; von Felde, D.; Cuhls, C.; Ketelsen, K.; Bröker, E.; Fehre, E.; Giebel, B. 2000 Wissenschaftliche Begleitung der drei großtechnischen Demonstrationsanlagen zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen in Niedersachsen. Endbericht. Institut für Siedlungswasserwirtschaft u. Abfalltechnik der Universität Hannover, Hannover und Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Entsorgung, Hannover.
- Doedens, H.; Kühle-Weidemeier, M. 2001 MBA-Pilotversuche mit Abfällen aus dem LK Schaumburg, Wissenschaftliche Begleitung Versuche 1-3. Ergebnisbericht. Unveröffentlicht. Im Auftrag der Abfallwirtschaft Landkreis Schaumburg.
- Doedens, H.; Kühle-Weidemeier, M. 2002 a Praktische Untersuchungen zum Deponieverhalten von aerob und anaerob mechanisch-biologisch behandelten Abfällen sowie ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Ablagerungsdichte und Durchlässigkeit in-situ. Ergebnisbericht. März 2002. Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Hannover. Unveröffentlicht.
- Doedens, H.; Kühle-Weidemeier, M. 2003 a MBA-Pilotversuche mit Abfällen aus dem LK Schaumburg, Wissenschaftliche Begleitung Versuche 4 und 5. Ergebnisbericht. Unveröffentlicht. Im Auftrag der Abfallwirtschaft Landkreis Schaumburg.

- Düllmann, H. 2002 Untersuchungen zum Einbau von MBA-Abfällen auf der Zentraldeponie Hannover. Laboruntersuchungen zum Verdichtungs-, Durchlässigkeits-, Last-Setzungs- und Scherverhalten. Februar 2002. Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Hannover.
- EAU 1990 Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, Häfen und Wasserstraßen, EAU 1990. Hrsg. vom Arbeitsausschuß „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechn. Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., 8. Auflage. Verlag Ernst und Sohn, Berlin. S. 97.
- Fehrer, K. 2002 Geotechnisches Verhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen. Diplomarbeit, Universität f. Bodenkultur, Wien.
- Heiss-Ziegler, C.; Fehrer, K. 2003 Geotechnical Behaviour of Mechanically – Biologically Pre-Treated Municipal Solid Waste (MSW). In: Sardinia 2003, ninth international waste management and landfill symposium, proceedings. Hrsg: Christensen, T.; Cossu, R.; Stegmann, R.
- Jäger J.; Danhamer, H.; Dach, J.; Reinhardt, T.; Ostrowski, M.W.; Obermann, I.; Glesner, M.; Theisen, M. 1999 Ablagerungsverhalten und Deponiesimulation, Endbericht zum Teilvorhaben 4/2 des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“. Universität Darmstadt.
- Jessberger, H.L. 1990 Stoffeigenschaften von Abfall im Hinblick auf Standsicherheitsuntersuchungen an Abfalldeponien. In: Jessberger, H.L, Neuzzeitliche Deponietechnik. Berichte vom 2. Deponie-Seminar Bochum, 10-11. Oktober 1990.
- Jessberger H.L.; Kockel, R.; Graßl, P. 1990 Forschungsbericht 90-2: Abschlußbericht zur Untersuchung der Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit von Hausmüll, Lehrst. für Grundb. u. Bodenmech., Ruhr-Universität Bochum.
- Kühle-Weidemeier, M. 2003 Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Restabfälle in Deutschland. Dissertation am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH) der Universität Hannover.
- Maak, D.; Poser, H. 1999 Auswirkungen der veränderten Abfalleigenschaften auf den Deponiebetrieb. In: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 14.
- Münnich, K. 1999 Hydraulische Kenngrößen von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall. In: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 14.
- Obermann, I. 1999 Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponien vorbehand-

- delter Siedlungsabfälle. Dissertation. In: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt (Hrsg.): Mitteilungen, Heft 107, 1999.
- Obermann, I. 2000 Ermittlung des Einflusses der Einbaukennwerte auf das Ablagerungsverhalten von MBA-Abfällen mit dem Simulationsmodell WATFLOW. In: Wasser und Abfall, 2000, Heft 9.
<http://www.deponie-stief.de/fachlit/pdf/obermannwua00.pdf>
- Obermann, I. 2003 Berechnungen mit dem Modell WATFLOW mit zwei am ISAH näher untersuchte MBA-Output-Materialien. Unveröffentlicht. Ergebnisse in Kühle-Weidemeier (2003).
- Ramke, H.G. 2001 Untersuchung der Ablagerungseigenschaften und des Durchlässigkeitsverhaltens mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle. In: Ramke, H-G. (Hrsg.): Regionaltagung Abfallwirtschaft, Deponietechnik und Altlastensanierung - Konsequenzen der Ablagerungsverordnung – Tagungsband.
- Reiff, C.; Marx, B. 1999 Feldversuche zur Ermittlung der Einbaudichte von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen mit unterschiedlichen Verdichtungsgeräten. In: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 14.
- Rettenberger, G. 1997 Emissionsverhalten hochverdichteter Abfälle – Erfahrungen aus dem Rückbauprojekt Burghof. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) Verbundvorhaben Deponiekörper, 2. Statusseminar 04./05.02.1997 in Wuppertal, BMBF.
- Schneider, K.-J. 1992 Bautabellen, mit Berechnungshinweisen, Beispielen und europäischen Vorschriften. 10. Auflage. Werner Verlag. S.13.40
- von Felde, D. 1999 Ablagerung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle. Ergebnisse der niedersächsischen Demonstrationsanlagen. In: Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 2, 6. Münsteraner Abfallwirtschaftstage.
- Wittmann, L. 1982 Sicherheitsaspekte bei der Filterbemessung. In: Wasserwirtschaft 72, 1982.
- Ziehmann, G. 1999 Veränderung des mechanischen Verhaltens durch die mechanische und biologische Vorbehandlung. In: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 14, S. 1 - 9.

Anschrift des Verfassers

Dr.-Ing. Matthias Kühle-Weidemeier

Wasteconsult international

Robert-Koch-Str. 48 b

30853 Langenhagen

Tel. 0511 23 59 383

FAX 0511 23 59 384.

E-Mail info@wasteconsult.de

www.wasteconsult.de



wasteconsult
INTERNATIONAL
Dr.-Ing. Matthias Kühle-Weidemeier
www.wasteconsult.de

Beratung
Pilotversuche
Planung
Ausschreibung
Bau- und Betriebsüberwachung

Robert-Koch-Str. 48 b
30853 Langenhagen
Tel. 0511 23 59 383
FAX 0511 23 59 384
info@wasteconsult.de