

## **Anforderungen an die Deponierung von MBA-Abfällen**

J. Dach

### **61 Einleitung**

Das Bundesumweltministerium hat mit Datum vom 15.03.2000 den 1. Entwurf für eine „Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (AbfAbIV)“ vorgelegt [1], in der die Ablagerung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle bei Einhaltung modifizierter Zuordnungswerte und bei Umsetzung begleitender zusätzlicher deponietechnischer Maßnahmen auch längerfristig zugelassen wird. Der Verordnungsentwurf gründet sich auf den Bericht des Umweltbundesamtes vom September 1999 zur „ökologischen Vertretbarkeit der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung“ [2], in dem die wesentlichen Anforderungen vorgeschlagen wurden. Dem Bericht des Umweltbundesamtes gingen zahlreiche, insgesamt rd. 5jährige Forschungsarbeiten im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ sowie Forschungsprojekte der Länder Hessen und Niedersachsen voraus, in denen u.a. das biochemische und physikalische Deponieverhalten von Abfällen nach MBA intensiv untersucht wurde [z.B. 3-7]. Weiterhin wurden zwischenzeitlich verschiedene Deponiekonzepte für MBA Deponien entwickelt [8,9] und in großtechnischen Versuchen erste Erfahrungen gesammelt [10-12].

Vor dem Hintergrund des wissenschaftlichen Kenntnisstandes und der Praxiserfahrungen stellen sich bei der Bewertung der Anforderungen des Verordnungsentwurfes an die Deponierung von MBA-Abfällen zwei zentrale Fragen, die im weiteren diskutiert werden:

- Sind die Anforderungen wissenschaftlich begründet?
- Sind die Anforderungen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand in der Praxis nach dem Stand der Technik einhaltbar?

### **62 Anforderungen an die Eigenschaften des abzulagernden Abfalls**

Die stofflichen Anforderungen (Zuordnungskriterien) an Abfälle nach MBA, die nach dem 1.6.2005 noch abgelagert werden dürfen, sind in Anhang 2 und §4 (1) Nr.2 des Verordnungsentwurfes definiert.

## 62.1 Festigkeit

Die Anforderungen an die Festigkeit (Anhang 2, Nr. 1) entsprechen den Anforderungen an Abfälle der Deponieklasse 2 nach Anhang B der TA Siedlungsabfall und sind für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle in der Regel problemlos einhaltbar. Bei Einhaltung dieser Werte und Beachtung des Standes der Technik im Deponiebau sind keine besonderen Probleme hinsichtlich der Standsicherheit zu erwarten.

## 62.2 Gehalt an organischer Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz im Trockenrückstand (oTS) der Originalsubstanz wird in Anhang 2 Nr. 3 bestimmt als Glühverlust mit 30 Gew.-% und als TOC mit 18 Gew.-% festgelegt.

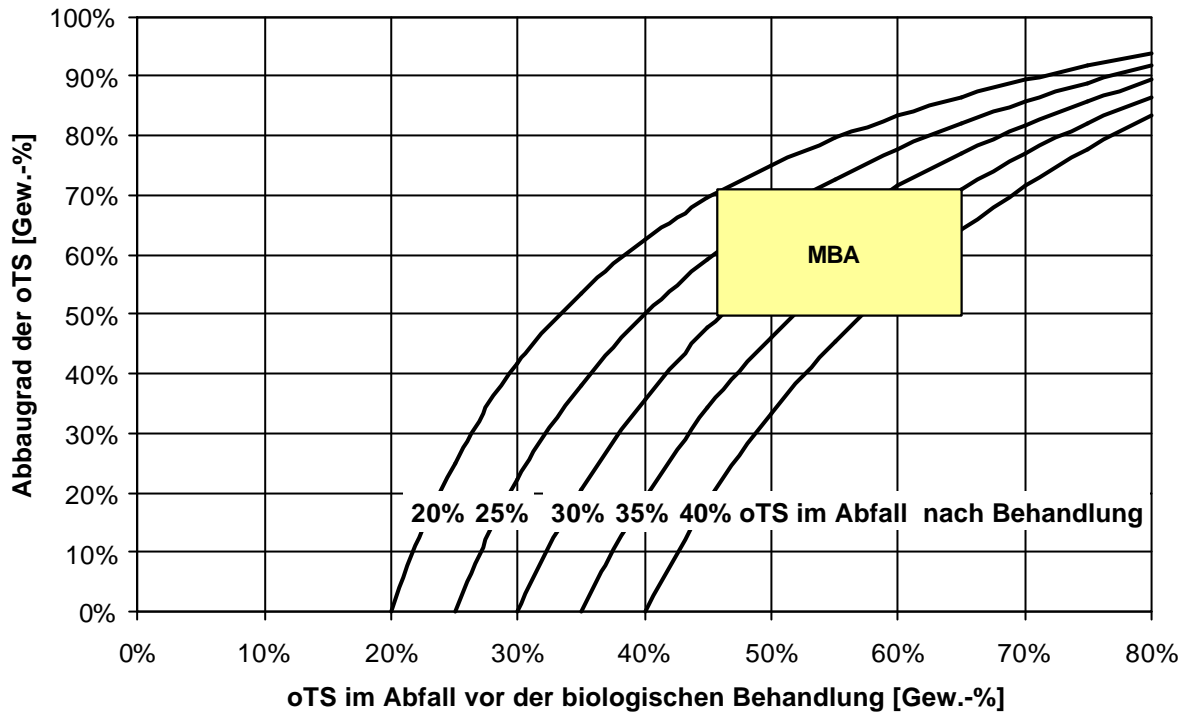
Der Glühverlust läßt keine direkte Aussage über die Mobilisierbarkeit organischer Verbindungen infolge chemisch-biologischer Reaktionen oder physikalischer Vorgänge unter Deponiebedingungen (Deponiegasbildung, Sickerwasserbelastung) zu. Es gibt somit aus deponietechnischer Sicht keine Notwendigkeit zur Begrenzung des Glühverlustes und keinen richtigen oder falschen, vertretbaren oder unvertretbaren Glühverlust. Die Mobilisierbarkeit organischer Verbindungen läßt sich zutreffender über andere Parameter (Atmungsaktivität, Gasbildung, TOC im Eluat) beschreiben.

Eine Begrenzung ist nur aus abfallwirtschaftlicher Sicht begründbar. Ein geringer Glühverlust zwingt zu einer sehr weitgehenden Ausschleusung heizwertreicher Bestandteile in der MBA (s. Abschnitt 2.3).

Es stellt sich die Frage, ob der Glühverlust nach dem Stand der Technik einhaltbar ist: Bestimmend für den Gehalt an organischer Substanz im behandelten Abfall ist die Zusammensetzung des Ausgangsabfalls und die Vorbehandlungstechnik:

- Im mechanischen Behandlungsschritt werden organikreiche, zum großen Teil biologisch schwer abbaubare Fraktionen wie Kunststoffe (Siebüberlauf) etc. abgetrennt und damit die biologisch leichter abbaubaren Fraktionen im Siebunterlauf angereichert.
- Im biologischen Behandlungsschritt (zumeist nur für Siebunterlauf) wird der biologisch verfügbare Anteil infolge des Abbaus reduziert.

Wie weitgehend der Abbau des organischen Anteils erfolgt, hängt vorwiegend von der Zusammensetzung des Inputs der biologischen Behandlung und der Behandlungsdauer sowie ferner von der eingesetzten Technik ab. Bei funktionstüchtigen Systemen werden Abbauraten von 50 bis 70 % der organischen Trockensubstanz (oTS) erreicht. Systembedingt verbleibt immer ein Anteil an organischer Substanz der gar nicht oder nur bei extrem langer Behandlungsdauer biologisch abgebaut werden kann. Die genaue Beziehung zwischen Rottedauer und Abbauergebnis kann nur anlagen- und abfallspezifisch festgestellt werden.



**Abb. 1** Zusammenhang zwischen oTS Gehalt im Abfall vor und nach der biologischen Behandlung und dem Abbaugrad

Die Abfälle nach mechanischer Aufbereitung haben in der Regel einen Gehalt an organischer Trockensubstanz zwischen rd. 55 und 65 Gew.-%, in Ausnahmefällen auch weniger. Unter diesen Prämissen ergeben sich die Anteile an organischer Substanz im abzulagernden Rottegut wie in Abbildung 1 dargestellt.

In der Regel ergeben sich nach der biologischen Behandlung Restorganikgehalte zwischen 30 und 40 Gew.-% oTS. Restorganikgehalte im abzulagernden Abfall von 30 Gew.-% oTS oder darunter werden nur bei sehr hohen Abbauleistungen und bzw. oder bei geringen Organikgehalten im Abfall vor der Behandlung (Entsorgungsgebiete mit hohen Ofenheizungs- und damit Ascheanteil) erreicht. Durch eine zusätzliche Absiebung nach der biologischen Behandlung kann noch eine gewisse Reduktion des Organikgehaltes und damit des Glühverlustes erreicht werden. Die bislang vorliegenden Erfahrungen an großtechnischen MBA haben gezeigt, dass ein Glühverlust von < 30 Gew.-%, auch bei langen Rottezeiten, nur selten erreicht wird.

Es werden sich somit in der Praxis Unsicherheiten ergeben, ob der Zuordnungswert für den Glühverlust tatsächlich verfahrenstechnisch sicher erreicht wird. Wünschenswert ist eine Glühverlustfestlegung von 35 Gew.-%, die den Praxiserfahrungen und dem Stand der Technik Rechnung trägt. Hierdurch würde auf der einen Seite die abfallwirtschaftliche Lenkungswirkung zur Abschöpfung der heizwertreichen Fraktion auch weitgehend erreicht. Andererseits wäre ein solcher Zuordnungswert von MBA nach dem Stand der Technik auch sicher erreichbar.

### 62.3 Oberer Heizwert

Neben dem Glühverlust sieht der Verordnungsentwurf in §4 Abs.1 Nr. 2 vor, dass der obere Heizwert des abzulagernden Abfalls 6.000 kJ/kg nicht übersteigen darf.

Der Heizwert eines mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfalls steht in engem Verhältnis zum Anteil an organischer Substanz und dem Wassergehalt. Je höher der Gehalt an organischer Substanz und je niedriger der Wassergehalt, desto höher ist der Heizwert.

Beim Heizwert muss unterschieden werden zwischen dem unteren Heizwert  $H_u$  (spezifischer Heizwert) und dem oberen Heizwert  $H_o$  (spezifischer Brennwert). Beide unterscheiden sich durch die zur Verdampfung des enthaltenen und entstehenden Wassers benötigte Wärmemenge.

Im Hinblick auf eine Verbrennung ist der untere Heizwert des Abfallgemisches von Interesse, da dieser direkt angibt, welche Wärmemenge in einem Verbrennungsprozess effektiv freigesetzt werden kann. Der untere Heizwert  $H_u$  eines weitgehend gerotteten, feuchten Restabfallgemisches mit z.B. einem Glühverlust von 30 Gew.-% und einem Wassergehalt von 35 Gew.-% liegt bei ca. 2.500 bis 3.500 kJ/kg Feuchtsubstanz und ist somit für eine selbstgängige Verbrennung nicht mehr geeignet. Dieses Abfallgemisch kann jedoch durchaus noch einen oberen Heizwert von 6.000 kJ/kg oder mehr aufweisen.

Mit einem oberen Heizwert von 6.000 kJ/kg wird im wesentlichen der Organikgehalt des Abfalls begrenzt. Der obere Heizwert reiner nativ-organischer Substanz liegt bei rd. 20.000 kJ/kg TS, so dass der o.g. Heizwert von 6.000 kJ/kg TS bei einem Abfallgemisch mit einem Glühverlust von rd. 30 Gew.-% zu erwarten ist, dessen Organikanteil überwiegend aus nativ-organischer Substanz (Holz, Papier etc.) besteht. Bei höheren Gesamtanteilen an organischer Substanz (> 30 Gew.-%) bzw. höheren Anteilen an nicht nativ-organischer Substanz (Kunststoffe bis 40.000 kJ/kg) wird dieser Wert überschritten. Es können also durchaus Situationen in der Praxis auftreten, in denen zwar der Glühverlust von 30 Gew.-% eingehalten wird, der obere Heizwert von 6.000 kJ/kg trotzdem überschritten wird.

Der obere Heizwert läßt, wie auch der Glühverlust, keine direkte Aussage hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit und Eluierbarkeit organischer Stoffe zu. Seine Einführung in die Verordnung beruht auf abfallwirtschaftlichen, nicht auf deponietechnischen Überlegungen. Insgesamt ist er im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit der Deponierung von nachrangiger Bedeutung.

Hinsichtlich der technischen Erreichbarkeit gilt, wie beim Glühverlust, dass er mit einem hohen Aufwand in der mechanischen Nachbereitung erkaufte werden muss. Derzeit liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen vor, ob der obere Heizwert verfahrenstechnisch in MBA sicher erreichbar ist.

#### **62.4 Eluatkriterien**

Die Eluatwerte nach Anhang 2, Nr. 4 des Verordnungsentwurfes entsprechen denen des Anhang B der TA Siedlungsabfall für die Deponieklasse II bis auf den TOC im Eluat. Dieser wurde von 100 auf 250 mg/l heraufgesetzt.

Eine (ökologisch motivierte bzw. wissenschaftliche) Begründung für die Eluatwerte der TA Siedlungsabfall ist nicht bekannt. Die Eluatwerte wurden seinerzeit wohl pragmatisch (was können Schlacken aus MVA nach dem St.d.T einhalten?) festgelegt. In zahlreichen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Eluatwerte jedoch auch von mechanisch-biologisch oder unbehandelten Siedlungsabfällen, bis auf den TOC, problemlos eingehalten werden können, so dass sie kein Gütekriterium für eine Vorbehandlung darstellen. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung des Erwartungsbereiches für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle aufgrund verschiedener Untersuchungen [5, 14] und den Zuordnungswerten des Anhangs 2.

**Tab. 1** Erwartungsbereich der Eluatwerte mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle auf Grundlage verschiedener Messungen [5,14]

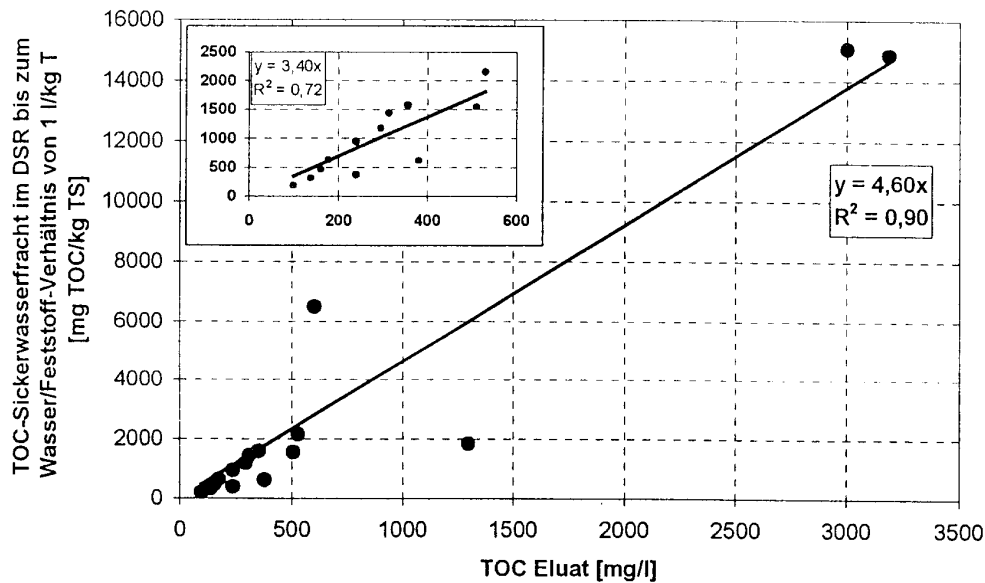
Parameter	Einheit	Zuordnungswerte nach Anhang 2 Entwurf der AbfAbIV	üblicher Wertebereich für Abfälle nach MBA
pH-Wert	[/]	5,5 – 13,0	7,0 - 8,0
Leitfähigkeit	[ $\mu$ S/cm]	$\leq 50.000$	1.700 - 4.000
TOC	[mg/l]	$\leq 250$	< 100 – 350
Phenole	[mg/l]	$\leq 50$	< 0,01
Arsen	[mg/l]	$\leq 0,5$	< 0,0001 - 0,07
Blei	[mg/l]	$\leq 1$	< 0,01 - 0,20
Cadmium	[mg/l]	$\leq 0,1$	< 0,001 - 0,02
Chrom-VI	[mg/l]	$\leq 0,1$	< 0,005 – 0,03
Kupfer	[mg/l]	$\leq 5$	< 0,1 – 2,0
Nickel	[mg/l]	$\leq 1$	0,01 – 0,02
Quecksilber	[mg/l]	$\leq 0,02$	< 0,0001 - 0,001
Zink	[mg/l]	$\leq 5$	0,1 – 1,0
Fluorid	[mg/l]	$\leq 25$	< 0,5
Ammonium-N	[mg/l]	$\leq 200$	< 1 – 10
Cyanide, leicht freisetzbar	[mg/l]	$\leq 0,5$	< 0,01
AOX	[mg/l]	$\leq 1,5$	< 0,1 - 0,4
Wasserlöslicher Anteil	[Masse-%]	$\leq 6$	< 0,2 – 4,0

Eine Ausnahme hinsichtlich der Aussagefähigkeit bezüglich des Deponieverhaltens stellt der TOC im Eluat dar. Hier können Zusammenhänge für mechanisch-biologisch vorbehandelte und unbehandelte Abfälle zwischen dem TOC im Eluat und den über das Sickerwasser austragbaren Kohlenstofffrachten (Sickerwasserbelastungspotential) gefunden werden. Einen solchen Zusammenhang zeigt Abbildung 2.

Unbehandelte Siedlungsabfälle (insbesondere organikreiche Abfälle wie Hausmüll etc.) weisen  $TOC_{Eluat}$ -Werte i.d.R. im Bereich von über 1000 mg/l bis zu mehreren Tausend mg/l auf. Diese Werte korrespondieren mit hohen organischen Sickerwasserfrachten, die insbesondere in der sauren Phase einer Deponie auftreten.

Durch die mechanisch-biologische Vorbehandlung sind die Eluatwerte auf einen Bereich von <100 bis 350 mg/l reduzierbar. In der Deponie tritt infolge der Stabilisierung keine saure Phase mehr auf und somit sind auch die organischen Sickerwasserfrachten (Reduktion um 80 bis >90 %) wesentlich geringer. Im Umkehrschluß bedeutet dies, dass ab einem  $TOC_{Eluat}$ -Wert von weniger als 350 mg/l eine saure Phase in der Deponie mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Hier wäre demnach auch ein deponietechnisch begründeter Zuordnungswert anzusiedeln.

Der TOC im Eluat und damit die organische Sickerwasserfracht läßt sich jedoch bei einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlung nicht beliebig weit reduzieren. Ab einer gewissen Behandlungsdauer verharrt der TOC im Eluat praktisch auf einem Niveau und kann, unabhängig von der Anlagentechnik, praktisch nicht mehr oder nur noch bei wirtschaftlich nicht mehr vertretbaren Rottezeiten (Jahre) weiter reduziert werden. Dieses Niveau liegt in Abhängigkeit des Abfalls irgendwo zwischen den bereits erwähnten < 100 und 350 mg/l.



**Abb. 2** Zusammenhang zwischen TOC im Eluat und ausgetragener Sickerwasserfracht [15] (Hohe Werte: unbehandelter Abfälle, Ausschnittsvergrößerung: MBA-Abfälle)

Der Verordnungsentwurf sieht nun einen Eluatwert von 250 mg/l vor. Anlagen, die aufgrund ihrer Abfallzusammensetzung nur ein nicht weiter reduzierbares Niveau zwischen 250 und 350 mg/l erreichen, werden den Zuordnungswert folglich also, trotz verfahrenstechnischer Anstrengungen, unter Umständen nicht einhalten können. Da der TOC im Eluat nicht genau vorhergesagt werden kann, wird hieraus bei der Umsetzung von MBA ein planerisches Risiko entstehen. Dies könnte weitestgehend reduziert werden, wenn der Eluatwert auf 300 mg/l festgelegt würde. Die saure Phase einer Deponie könnte auch mit diesem Wert noch sicher vermieden werden.

## 62.5 Biologische Stabilität

Da weder der Glühverlust noch der TOC oder der obere Heizwert eine direkte Aussage über das Emissionspotenzial, also die Stoffmenge die unter Deponiebedingungen biologisch abgebaut und damit freigesetzt werden kann, zulassen, werden zwei biologische Aktivitätsparameter [12] verwendet, die eine solche Aussage ermöglichen. Nach Anhang 2, Nr. 5 des Entwurfs der Deponieverordnung sind dies

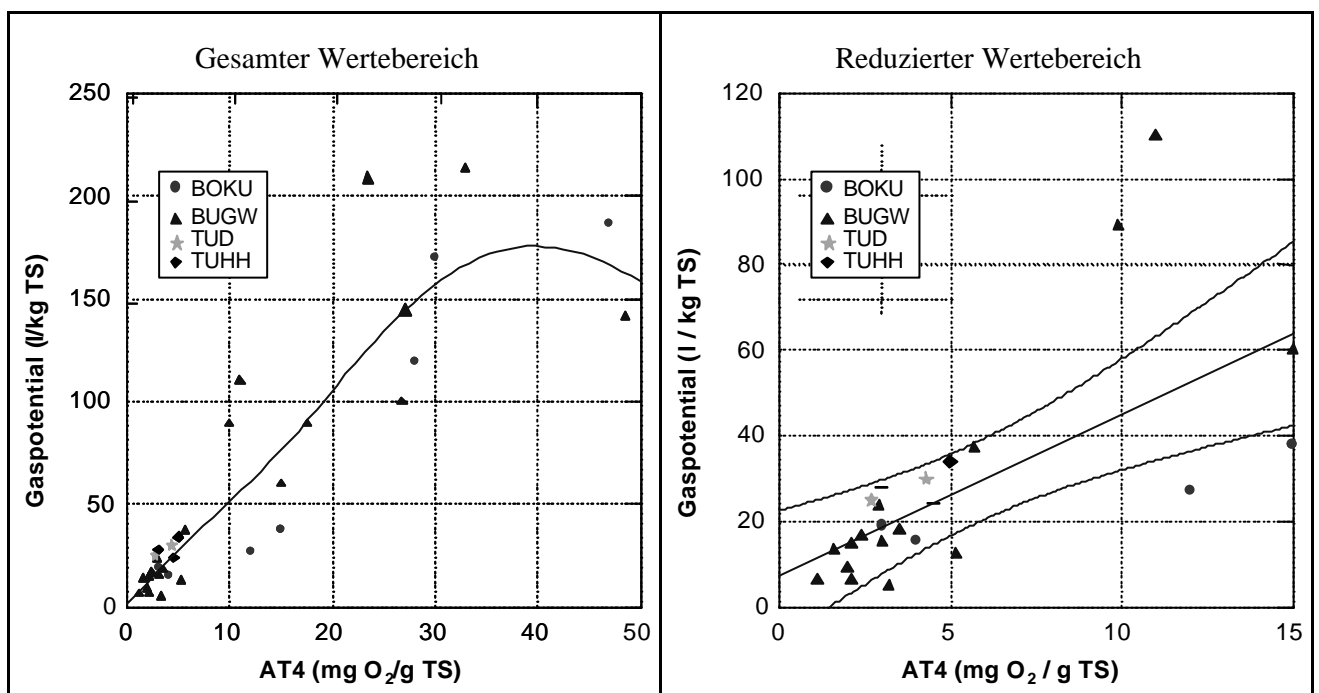
- Atmungsaktivität  $AT_4 < 5 \text{ gO}_2/\text{kg TS}$ : Spezifischer Sauerstoffverbrauch (Atmung) einer feuchten Abfallprobe bei definierter Temperatur innerhalb von 96 Stunden (4 Tage) im Labortest.
- Gasbildung  $GB_{21} < 20 \text{ NI} / \text{kg TS}$ : Spezifische Gasbildung einer Abfallprobe im Labortest bei definierter Temperatur und unter anaeroben Bedingungen innerhalb von 21 Tagen.

Beide Parameter beschreiben eine biologische Aktivität, also die Freisetzung bzw. den Verbrauch von Stoffwechselprodukten in einer definierten Zeit. Aufgrund der vorliegenden Forschungsergebnisse kann mit Hilfe dieser biologischen Aktivitäten das Emissionspotenzial an abbaubarer (bzw. eluierbarer) organischer Substanz, also die langfristig aus der Deponie freisetzbare Menge organischer Substanz, abgeschätzt werden. In Langzeitversuchen wurde das Verhältnis von Aktivitätsparametern und Emissionspotenzialen untersucht. Nach statistischen Auswertungen [13, 17] zahlreicher Untersuchungen ergeben sich für einen  $AT_4$ -Wert von  $5 \text{ g O}_2/\text{kg TS}$  folgende Zusammenhänge:

**Tab 2** Biologische Aktivitäten und Emissionspotenziale

Aktivitäten		Emissionspotenziale	
Atmungsaktivität AT <sub>4</sub> [gO <sub>2</sub> /kg TS]	Gasbildung GB <sub>21</sub> [NI/kg TS]	Deponiegaspotenzial [NI / kg TS]	Sickerwasserbelastungspotenzial [g TOC / kg TS]
<b>5</b>	<b>£ 10</b>	<b>20 bis 40</b>	<b>0,3 bis 3,0</b>

Bei einem mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfall, der die Anforderung einer Atmungsaktivität AT<sub>4</sub> von 5 g O<sub>2</sub>/kg TS gerade noch einhält, liegt der GB<sub>21</sub> i.d.R. unter 10 NI/kg TS. Dies bedeutet, dass der Zuordnungswert für die Atmungsaktivität den strengeren der beiden Zuordnungswerte darstellt. Bei einer Atmungsaktivität von 5 g O<sub>2</sub>/kg TS ist ein langfristig freisetzbare Gaspotenzial von maximal rd. 40 NI/kg TS zu erwarten. (Vgl. Abbildung 3)



**Abb. 3** Zusammenhang zwischen Atmungsaktivität und Gasbildungspotenzial [13]

Bei einem Gasbildungspotenzial von weniger als 40 NI/kg TS kann nach vorliegenden Berechnungen [5,8,9,17] auf eine aktive Entgasung verzichtet werden, zudem sind bei diesem Wert die zeitabhängigen Setzungen infolge des Masseabbaus in der Deponie nur noch sehr gering, so dass hieraus keine Gefahren mehr resultieren. Der Zuordnungswert für die Atmungsaktivität ist somit aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse sinnvoll.

Die bisherigen Erfahrungen auf großtechnischen MBA haben gezeigt, dass die Atmungsaktivität von 5 g/kg TS einen strengen, jedoch bei entsprechender Nachrottendauer durchaus erreichbaren Grenzwert darstellt.

### 62.6 Durchlässigkeitsbeiwert

Mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfall muss nach Anhang 2, Nr. 8 des Verordnungsentwurfes einen Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (im Laborversuch) von  $10^{-8}$  m/s einhalten.

Die hydraulische Durchlässigkeit ist für die Sickerwasserbildung an offenen Einbauflächen von Bedeutung. Soweit der Durchlässigkeitsbeiwert so gering ist, dass ein Oberflächenabfluss entsteht und dieser von der Deponie abgeführt wird, vermindert sich theoretisch die Sickerwasserneubildung auf offenen Abfallflächen. Nach temporärer Abdeckung und Abdichtung der Deponie ist der Durchlässigkeitsbeiwert des Abfallkörpers für die Sickerwasserneubildung hingegen belanglos, da diese dann durch die Abdeckung/Oberflächenabdichtung (und nicht durch den Deponiekörper) limitiert wird.

Die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit von Abfällen nach MBA ist gegenüber thermisch vorbehandelten aber auch unbehandelten Abfällen verringert. Während für thermisch vorbehandelte bzw. unbehandelte Abfälle Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  im Bereich von  $10^{-4}$  bis  $10^{-6}$  m/s typisch sind, wurden bei mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen  $k_f$ -Werte im Bereich von  $10^{-6}$  bis  $10^{-10}$  m/s gemessen. Der Kenntnisstand bezüglich der Wasserdurchlässigkeit von MBA-Abfällen kann wie folgt zusammengefasst werden:

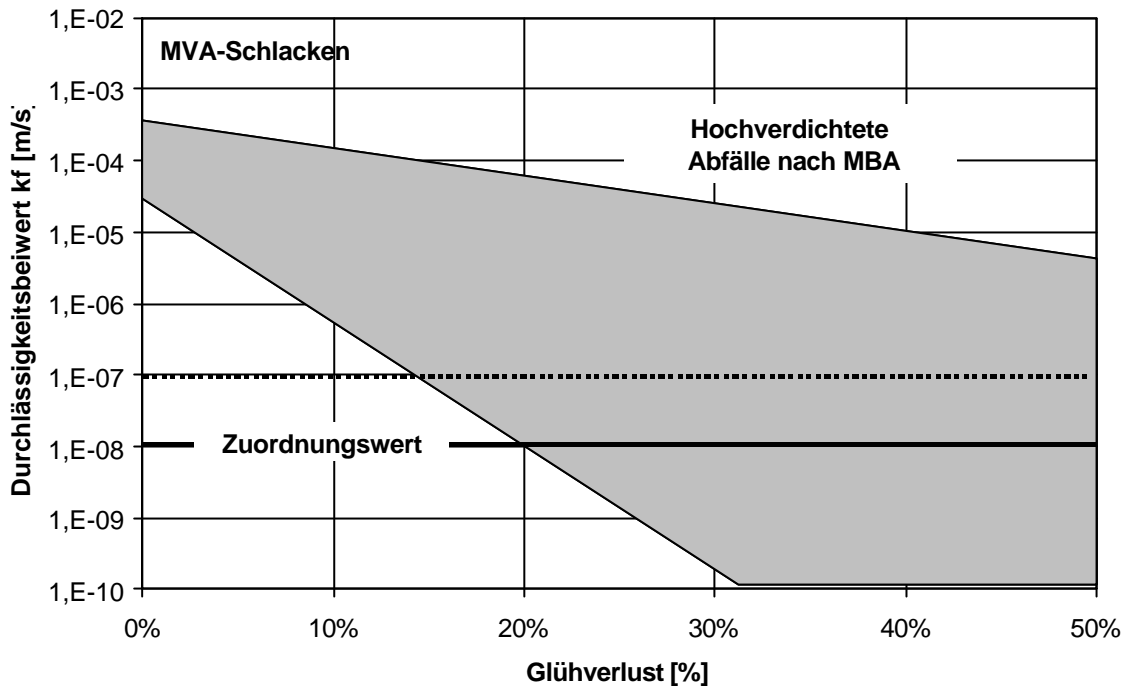
1. Mit zunehmender Verdichtung und damit vermindertem Porenvolumen findet eine Abnahme der Durchlässigkeit statt. Es konnte gezeigt werden, daß im Vergleich zur offenen Schüttung ( $k_f$   $10^{-2}$  bis  $10^{-3}$  m/s) die Durchlässigkeit bei gleichem Abfall und hochverdichteter Lagerung auf einen Bereich zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-8}$  m/s reduziert werden kann [18].
2. Tendenziell geringere Durchlässigkeiten ergeben sich bei höheren Gehalten an Organik (u.a. quellfähige Organik, Kunststoffe) und hohen Einbauwassergehalten [7,18,19].
3. Bei hochverdichteten (200-400 kN/m<sup>2</sup> = 10-30 m Müllauflast) MBA-Abfallkörpern wurden Durchlässigkeitsbeiwerte in Laborversuchen im Bereich von  $10^{-5}$  bis  $10^{-10}$  m/s gemessen [5,7]. Ob eine geringe Durchlässigkeit  $<10^{-8}$  m/s nach einer Verdichtung auch an der Abfalloberfläche auftritt, ist bislang hingegen nicht systematisch erkundet worden.
4. Es nicht bekannt, ob die geringe Durchlässigkeit eine zeitlich stabile oder veränderliche Eigenschaft des Abfalls ist.

Eine Zusammenstellung verschiedener Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit des Organikgehaltes zeigt Abbildung 4. Von den hier dargestellten 10 Messungen, die alle an hochverdichteten (Auflast 200 bis 400 kN/m<sup>2</sup>) Abfallkörpern gemessen wurden, wiesen vier Messungen einen Durchlässigkeitsbeiwert  $<10^{-8}$  m/s auf.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass sehr geringe Durchlässigkeiten ( $<10^{-8}$  m/s) unter Deponiebedingungen auftreten können, jedoch nicht zwangsläufig auftreten müssen und, dass die genauen Randbedingungen, unter denen eine geringe Durchlässigkeit auftritt, erst ansatzweise bekannt sind.

Auch wenn noch ein gewisses technisches Optimierungspotenzial hinsichtlich der Einbaubedingungen vorhanden ist, muss es als sehr kritisch betrachtet werden, ob der Zuordnungswert sicher (im gleitenden Durchschnitt, lt. Anhang 4, Nr. 3.2) einhaltbar ist. Das vorhandene Optimierungspotenzial sollte nicht überschätzt werden, da nach bisherigem Kenntnisstand tendenziell geringere Durchlässigkeiten bei höheren Glühverlusten (Folienanteilen) und höheren Wassergehalten, also Bedingungen, die den sonstigen Anforderungen der Deponieverordnung zuwider laufen, auftreten. Es existiert somit zur Zeit kein Stand der Technik, der die Einhaltung gewährleisten kann.





**Abb. 4** Durchlässigkeitsbeiwert hochverdichteter Abfallkörper nach MBA in Abhängigkeit des Glühverlustes, Meßwerte nach [5,6,18]

### 63 Anforderungen an die Deponietechnik

Neben den Anforderungen an den Abfall werden im Verordnungsentwurf eine Reihe von Anforderungen an die Einbau- und Deponietechnik gestellt, die über das bislang in der TA Siedlungsabfall definierte Niveau hinausgehen.

#### 63.1 Monodeponieabschnitte

Die Ablagerung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle darf grundsätzlich nur auf Monoabschnitten der Deponiekategorie II erfolgen (§4 (1) Nr. 1). Für einen durch die Genehmigungsbehörde befristeten Zeitraum dürfen die Abfälle jedoch auch auf Altdeponien (vor dem 1.6.1993 zugelassene Deponien), die mindestens über eine Basisabdichtung und Sickerwasserfassung verfügen (§6 (1) Nr. 5), abgelagert werden. Weiterhin dürfen sie auch außerhalb von Monoabschnitten für einen befristeten Zeitraum abgelagert werden (§6 (1) Nr. 6).

Die Definition eines technischen Mindeststandards (Basisabdichtung und Sickerwasserfassung bzw. Deponiekategorie II) für die Ablagerung der Abfälle ist zielführend, da die von MBA-Abfall ausgehenden Sickerwasseremissionen keineswegs so unbedenklich sind, dass eine Emission in den Untergrund in Kauf genommen werden könnte. Deponien ohne Basisabdichtung entsprechen nicht dem Stand der Technik.

Dagegen ist die Forderung nach Monoabschnitten wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Wenn mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle unbehandelte Siedlungsabfälle überlagern, wird die Sickerwasserbelastung durch die untere Schicht der unbehandelten Siedlungsabfälle, durch die das Sickerwasser hindurchtreten muss, determiniert. Die Entgasung einer durch mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle überlagerten Schicht von unbehandelten Siedlungsabfällen stellt deponietechnisch kein nennenswertes Problem dar. Es ergibt sich somit kein nennenswerter Vorteil.

Die Forderung kann vielmehr zu dem Ergebnis führen, dass hochwertig ausgebaute Deponiekapazitäten für Restverfüllungen nicht genutzt werden und statt dessen ggf. sogar neue (Mono)abschnitte gebaut werden. Soweit der Spielraum der Übergangsregelungen jedoch von den Genehmigungsbehörden mit Augenmaß genutzt wird, können diese Folgen vermieden werden.

### **63.2 Deponiegasfassung**

Grundsätzlich ist entstehendes Deponiegas zu fassen. Eine Fassung ist nach dem Verordnungsentwurf nicht erforderlich, wenn keine Deponiegasbildung in erheblichem Umfang erfolgt und dies gegenüber der zuständigen Behörde nachgewiesen wird. In diesem Fall hat der Deponiebetreiber nach Verfüllung eines Deponieabschnittes sicherzustellen, dass die Restemissionen an Deponiegas das Oberflächenabdichtungssystem passieren können und vor Austritt in die Atmosphäre oxidiert werden (§4 (2) Nr.2).

Nach den vorliegenden Erfahrungen und Berechnungen [5,9] kommt es bei Einhaltung der Stabilitätskriterien zu nur noch sehr geringen Deponiegasemissionen, die keine aktive Entgasung mehr rechtfertigen. Die Unterschreitung dieses „erheblichen Umfangs“ wird in der Praxis auch mit Hilfe von Absaugversuchen und FID-Begehungen nachweisbar sein. Insgesamt ist also die Möglichkeit, bei einem entsprechenden Nachweis auf (überflüssige) technische Entgasungsanlagen zu verzichten, angemessen. Die Forderung nach Verfüllungsende ggf. eine Schutzentgasung (Methanoxidationsfilter oder ähnliches) zu installieren, ist ebenfalls zielführend und technisch umsetzbar.

### **63.3 Reduzierung der Einbaufläche**

In §4 (2) Nr.2 wird auf die Einhaltung des Anhangs 3 verwiesen, in dem noch weitergehende Anforderungen an den Einbau der Abfälle gestellt werden. Die Einbaufläche soll auf das im Einbaubetrieb geringst mögliche Maß (< 5% der Gesamtablagerungsfläche) reduziert werden. Nicht beschickte Flächen sind mit undurchlässigen Materialien abzudecken und der Niederschlag kontrolliert abzuleiten (Anhang 3, Nr.1).

Die Reduzierung der Einbaufläche zielt vorrangig auf die Reduktion der Sickerwasserneubildung während der Betriebsphase ab. Die Sickerwasserbildung und -entsorgung während der Betriebsphase bei Deponien nach dem Stand der Technik, die über eine Abdichtung, Entwässerung und Sickerwasserreinigungsanlage verfügen, stellt aber vorrangig ein wirtschaftliches und kein ökologisches Problem dar, da ja mit dem gefassten und gereinigten Sickerwasser nur sehr geringe Frachten in die Umwelt gelangen. Die ökologische Bedeutung der Sickerwasserbildung während der Betriebsphase wird bei Deponien nach dem Stand der Technik überbewertet.

Die Minimierung der offenen Einbaufläche stellt nach vorliegenden Erfahrungen eine wirksame Maßnahme zur Verminderung der Sickerwasserbildung dar, da nur auf diesen Flächen, soweit keine geringen Durchlässigkeiten zu einem Oberflächenwasserabfluss führen, noch Niederschlagswasser ungehindert einsickern kann. Durch eine temporäre Folienabdeckung kann schon in der Betriebsphase die Sickerwasserneubildung auf entsprechend abgedeckten Flächen praktisch vollständig unterbunden werden. Auf offenen Einbauflächen beträgt die Sickerwasserneubildung noch 5 bis 25 % des Jahresniederschlags [9]. Allerdings ist die Sickerwasserbildung aufgrund der weitgehenden Abdeckung hier insgesamt nur noch von geringer Bedeutung.

Im Rahmen von Deponiekonzepten [9] konnte gezeigt werden, dass sich bei einer geeigneten Verfüllungsstrategie die Kosten für temporäre Abdeckungsmaßnahmen in engen Grenzen halten lassen. Die jeweils aktuelle Einbaufläche sollte solange wie möglich betrieben werden. Damit werden temporäre Abdeckungsmaßnahmen im Laufe der Betriebsphase nur ein- maximal zweimal notwendig. Beispielsweise fallen bei einer zweimaligen Abdeckung mit einer verschweißten, temporären Folie spezifische Herstellungskosten von jeweils 15 DM/m<sup>2</sup>, einer mittleren Deponiehöhe von 10 m und einer Einbaudichte von 1,3 Mg/m<sup>3</sup> im Mittel rd. 3 DM/Mg für temporäre Abdeckungsmaßnahmen an.

Die Begrenzung der Einbaufläche auf maximal 5% der Ablagerungsfläche stellt eine sehr strenge Forderung dar. Zu kritisieren ist hier der Bezug auf die Ablagerungsfläche, die je nach Deponiegeometrie sehr unterschiedlich ausfallen kann. Sinnvoller wäre ein Bezug z.B. auf die jährliche Ablagerungsmenge. Nach Erfahrungen im Deponiebetrieb wären folgende Richtwerte [9] für die Einbaufläche in Abhängigkeit der eingebauten Abfallmenge sinnvoll:

- < 25.000 Mg/a                      rd. 0,5 ha
- < 50.000 Mg/a                      rd. 1,0 ha
- < 75.000 Mg/a                      rd. 1,5 ha

Auf diesen Flächen ist ein ordnungsgemäßer Einbaubetrieb ohne technische Schwierigkeiten möglich. Unter der Annahme, dass der Einbau nur an 100 Tagen pro Jahr stattfindet, ergibt sich ein mittleres Höhenwachstum der Einbaufläche an einem Einbautag von rd. 4 cm.

Zusammenfassend bleibt also, daß die Forderung nach Minimierung der Einbaufläche im Prinzip zielführend ist, jedoch mit der Anforderung „5 % der Ablagerungsfläche“ eine starke, im Einzelfall nur mit hohem Aufwand umsetzbare Beschränkung erfolgt, die angesichts der ökologischen Bedeutung der Sickerwasserbildung während der Betriebsphase nicht angemessen ist.

#### **63.4 Ableitung des Oberflächenabflusses**

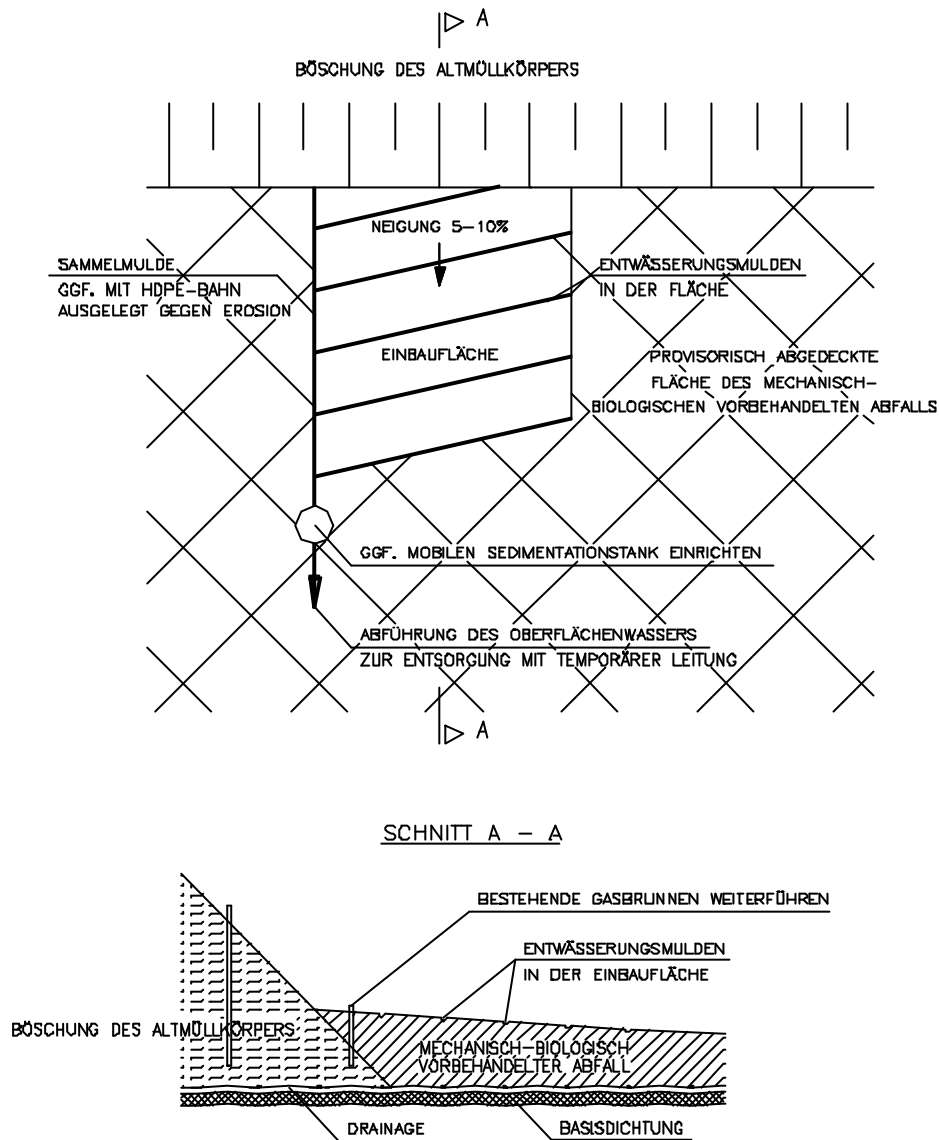
Der Verordnungsentwurf verlangt eine arbeitstägige Profilierung des Einbaubereiches zur Ableitung des Oberflächenabflusses. Zur gezielten und kontrollierten Ableitung des Niederschlagswassers ist die Oberfläche zu glätten oder mit undurchlässigen Materialien abzudecken. Offene geglättete Einbauflächen sollen ein Gefälle von 10% nicht überschreiten (Anhang 3, Nr. 2)

Die hydraulische Leitfähigkeit ist bei ungesättigten Verhältnissen abhängig vom Sättigungszustand und damit der Saugspannung der oberflächennahen Bereiche und nur bei vollständiger Sättigung abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit (und vom Druckgradienten) im Abfall. Bei hohen Sättigungen und/oder geringen Leitfähigkeiten tritt Oberflächenabfluss auf, während im umgekehrten Fall das Wasser, je nach Anfangsbedingungen, auch vollständig infiltrieren kann. Ein geringer Durchlässigkeitsbeiwert allein ist somit kein Garant dafür, daß Niederschlagswasser vorwiegend oberflächlich immer abläuft.

Wie in Abschnitt 2.6 erwähnt, kann derzeit nicht zuverlässig vorausgesagt werden, ob geringe hydraulische Leitfähigkeiten tatsächlich im Einbaufeld eintreten bzw. sich systematisch erzielen lassen. Vorliegende Beobachtungen im Rahmen von großtechnischen Versuchen hierzu zeigen divergierende Ergebnisse:

- Bei der Ablagerung von Abfall der MBA Bassum wurde auch unter starken Beregnungsbedingungen kein nennenswerter Abfluss festgestellt [11].
- Bei der Ablagerung von Abfall der MBA Meisenheim wurde sowohl in Beregnungsversuchen, als auch bei Naturbeobachtungen bei Regenintensitäten, die Starkregenereignissen entsprechen, Oberflächenabfluss gemessen [12].

Im Falle einer geringeren hydraulischen Leitfähigkeit des Abfalls ist die arbeitstägliche Glättung der Einbaufläche (z. B. mit einem Walzenzug), wie sie der Entwurf vorsieht, sinnvoll, um die Speicherung (Pfützenbildung in Vertiefungen und Unebenheiten) von Wasser an der Oberfläche nach Regenereignissen zu minimieren. In solchen Vertiefungen gespeichertes Wasser infiltriert nachträglich in den Deponiekörper und führt zu einer Vernässung und Verschlammung der Einbaufläche und damit zu einer Behinderung des Einbaubetriebes.



**Abb. 5** Geneigte Einbaufäche mit Muldensystem zur Abführung des Oberflächenabflusses [9]

Weiterhin sollte in diesem Fall die Einbaufäche mit einem Gefälle von 5 bis 10 % geneigt werden, um bei Regenereignissen den Oberflächenabfluss auch abführen zu können. Nach großtechnischen Versuchen auf der Deponie Meisenheim [12] eignet sich zur Abführung des Oberflächenwassers auf der abgewalzten und geneigten Oberfläche ein Muldensystem, das direkt in den verdichteten Abfall eingedrückt wird. Über diese Mulden kann das Oberflächenwasser an einem zentralen Tiefpunkt der Einbaufäche gesammelt und von dort der weiteren Entsorgung zugeführt werden. Eine Einbaufäche mit einem solchen Muldensystem zeigt beispielhaft Abbildung 5.

Das abfließende Oberflächenwasser ist nach den wenigen, bislang vorliegenden Erfahrungen im Vergleich zu Sickerwasser nur leicht verschmutzt (CSB-Konzentrationen im Bereich von 150 bis 400 mg/l nach [12]), muß jedoch einer Behandlung zugeführt werden.

Zusammenfassend verbleibt also, dass bislang noch nicht sicher vorhersehbar ist, ob auf den Einbaufächen überhaupt Oberflächenabfluss auftritt. Soweit dieser auftritt, sind die Anforderungen des Verordnungsentwurfs (Glättung, Neigung, Fassung) sinnvoll.

### 63.5 Proctordichte und Einbauwassergehalt

In Anhang 3 Nr. 3 werden weiterhin Anforderungen an die Verdichtung, den Einbauwassergehalt und die Proctordichte gestellt: Zur Gewährleistung eines gering durchlässigen Deponiekörpers ist der Abfall im Dünnschichtverfahren hochverdichtet einzubauen. Hierfür muss der Einbauwassergehalt zwischen dem Wassergehalt bei 95% Proctordichte (auf dem „trockenen Ast“, also links vom Optimum) und dem optimalen Proctorwassergehalt liegen. Die erforderliche Verdichtungsenergie für den Einbau der Abfälle (Anzahl der Überfahrten, abhängig vom Verdichtungsgerät) zum Erreichen von 95 % Proctordichte ist in einem Feldversuch festzustellen. Nach jeweils 1.000 Tonnen eingebauten Abfalls ist die Einhaltung einer Verdichtung des Deponiekörpers von mindestens 95 % Proctordichte nachzuweisen.

Der Verordnungsentwurf geht zunächst von der These aus, dass mit einem hochverdichteten Einbau bei entsprechend eingestelltem Wassergehalt ein geringe Durchlässigkeit hergestellt werden kann. Für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle ist diese These bislang jedoch unbewiesen. Es wurden noch keine Untersuchungsergebnisse veröffentlicht, die einen solchen Schluß zuließen. Erfahrungen aus dem konventionellen Erdbau können hier insbesondere aufgrund des im Vergleich zu Böden immer noch sehr hohen Organikanteils des Abfalls nicht übertragen werden. In Abschnitt 2.6 wurde bereits dargelegt, dass sich die geringsten Durchlässigkeiten bei sehr feuchtem Einbau und hohen Organikanteilen einstellen.

Im Hinblick auf die Erreichung einer möglichst hohen Trockeneinbaudichte und die Vermeidung von Konsolidierungs- bzw. Preßwasser ist jedoch die Forderung nach Steuerung des Wassergehaltes auf Grundlage des Wassergehalts sinnvoll. Die erreichbare Trockeneinbaudichte hängt vom Wassergehalt beim Einbau ab. Vorliegende Proctorversuche zeigen, dass das Optimum bei Einbauwassergehalten im Bereich von 25 bis 35 Gew.-% zu erwarten ist, wobei bei organikärmeren Abfällen der Einbauwassergehalt tendenziell geringer ist als bei Abfällen mit höheren Restorganikgehalten. Ein Beispiel für eine Proctorkurve zeigt Abbildung 6.

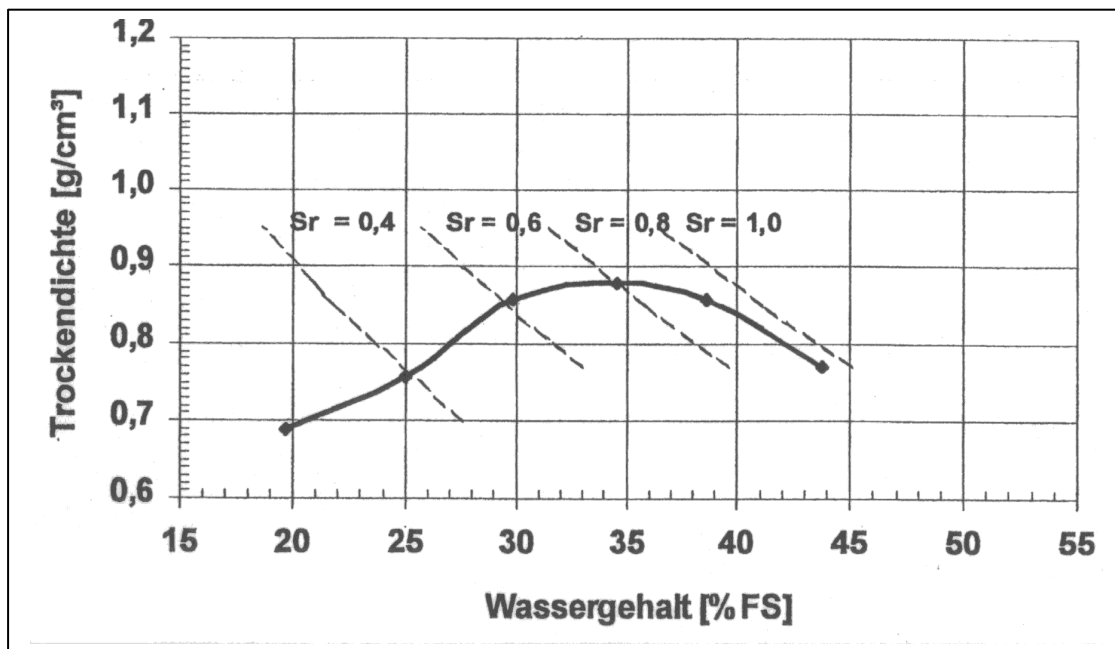


Abb. 6 Proctorkurve eines Abfalls der MBA Lüneburg (16 Wochen, Glühverlust 31 %) [20] ( $S_r$  = Isolinien der relativen Sättigung: im Proctoroptimum rd. 60 Vol.-%)

Der Abfall mit einem Glühverlust von 31 Gew.-%, der zumindest annähernd den Anforderungen des Anhangs 2 entspricht, wies ein Optimum im Proctorversuch von rd. 0,87 Mg TS/m<sup>3</sup> bei einem Wassergehalt von rd. 35 Gew.-% auf. Der 95 %-Wert der Trockeneinbaudichte (0,83 Mg TS/m<sup>3</sup>) wird auf dem trockenen Ast bei einem Wassergehalt von rd. 27 Gew.-% erreicht. Im vorliegenden Fall müßte sich der Einbauwassergehalt also zwischen 27 und 35 Gew.-% bewegen. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Abfalls lag allerdings bei  $k_f = 9,8 \cdot 10^{-8}$  m/s, also fast eine Zehnerpotenz über dem Zuordnungswert nach Anhang 2!

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Steuerung des Einbauwassergehaltes nach dem Verordnungsentwurf hinsichtlich der Verdichtung und der Verhinderung von Konsolidierungswasseraustritten sinnvoll ist. Die Steuerung ist jedoch kein Garant zur Erreichung einer geringen Durchlässigkeit.

## 64 Zusammenfassung

Das Bundesumweltministerium hat mit Datum vom 15.03.2000 den 1. Entwurf für eine „Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen“ vorgelegt, in der die Ablagerung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle bei Einhaltung modifizierter Zuordnungswerte und bei Umsetzung begleitender zusätzlicher deponietechnischer Maßnahmen auch längerfristig auf Deponien der Klasse II oder vergleichbar zugelassen wird. Die Anforderungen lassen sich in Anforderungen an den Abfall (Zuordnungswerte) und an die Deponietechnik unterteilen

Die Anforderung an den Abfall müssen insgesamt als streng eingestuft werden.

- Die Zuordnungswerte für die **biologische Stabilität** (Atmungsaktivität  $AT_4 < 5$  mg/g TS, Gasbildung im Gärtest  $GB_{21} < 20$  NI/kg TS, TOC im Eluat  $< 250$  mg/l) beruhen im wesentlichen auf den wissenschaftlichen Kenntnisstand, daß bei Einhaltung dieser Werte nur noch eine sehr geringe Deponiegasbildung (keine Entgasung mehr erforderlich) und geringe Setzungen auftreten. Eine saure Phase, in der hohe organische Sickerwasserbelastungen auftreten, kann bei Einhaltung der Werte vermieden werden. Die Anforderungen können von MBA nach dem Stand der Technik in der Regel eingehalten werden. Beim TOC im Eluat kann es jedoch in der Praxis zu Problemen kommen, da dieser nur eingeschränkt verfahrenstechnisch beeinflussbar ist und nach vorliegenden Erfahrungen nicht immer der Zuordnungswert erreicht werden kann.
- Die Anforderungen an den **Organikgehalt** (Glühverlust  $< 30$  Gew.-%, TOC  $< 18$  Gew.-%, oberer Heizwert  $< 6.000$  kJ/kg) sind aus deponietechnischer Sicht nicht nachvollziehbar, da mit diesen Parametern im Gegensatz zu den obigen Stabilitätsparametern keine Aussage über das Emissions- oder Setzungsverhalten der Abfälle getroffen werden kann. Die Parameter sind somit vorwiegend abfallwirtschaftlich und nicht deponietechnisch motiviert, da zur Einhaltung ein erheblicher Teilstrom in eine thermische Verwertung/Beseitigung gelenkt werden muß. Dabei sind die Zuordnungswerte so streng bemessen, daß sie mit MBA nach dem St.d.T. auch bei hoher Effizienz der Stoffstromtrennung und bei hohen biologischen Abbauleistungen nur schwer erreichbar sind. In der Praxis sicherer einhaltbar und in Hinblick auf das Deponieverhalten ohne signifikanten Qualitätsverlust wäre ein Glühverlustwert von 35 Gew.-% (TOC 21 Gew.-%, oberer Heizwert 7.000 kJ/kg).
- Weiterhin wird ein **Durchlässigkeitsbeiwert** im Laborversuch von  $k_f < 10^{-8}$  m/s gefordert. Nach vorliegendem Kenntnisstand ist fraglich, ob dieser Wert mit Abfällen, die den sonstigen Zuordnungswerten und Einbaubedingungen entsprechen sicher und systematisch eingehalten werden kann. Es existiert kein Stand der Technik, der die Einhaltung des Wertes gewährleistet. Es bleibt abzuwarten, in wieweit durch Optimierung der Zuordnungswert eingehalten werden kann.

Weiterhin sind Anforderungen an die Deponietechnik definiert, die zwar ebenfalls als streng zu bewerten sind, jedoch in der Summe mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand einzuhalten sind.

- Mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfall ist auf **Monoabschnitten** abzulagern, wofür es aber aus deponietechnischer Sicht nur in Ausnahmefällen Gründe geben könnte. Allerdings kann hier die Genehmigungsbehörde befristete Ausnahmen zulassen.
- Hinsichtlich des Deponiegases ist nachzuweisen, daß keine erhebliche **Deponiegasbildung** mehr auftritt. Nach Verfüllungsende sind ggf. Schutzentgasungsmaßnahmen (Methanoxidationsfilter etc.) zu ergreifen. Diese Regelung ist zielführend und technisch umsetzbar.
- Die **Einbaufläche** darf nur noch 5% der Ablagerungsfläche betragen; nicht beschickte Flächen müssen mit undurchlässigen Materialien abgedeckt werden. Hierdurch wird eine weitgehende und effiziente Sickerwasserminimierung erreicht. Diese Forderung kann bei optimierter Verfüllungsplanung auch mit vertretbarem Aufwand umgesetzt werden, wenn auch die Bezugsgröße „Ablagerungsfläche“ unglücklich gewählt ist. Allerdings ist kritisch zu hinterfragen, warum bei einer Beschränkung auf eine sehr kleine Einbaufläche noch strenge (einhaltbare?) Anforderungen an die Durchlässigkeit gestellt werden müssen, da die Sickerwasserneubildung durch die Abdeckungsmaßnahmen schon weitestgehend minimiert wird. Nach Abdichtung der Deponie ist die Durchlässigkeit ohne Belang, da die Sickerwasserneubildung durch diese limitiert wird.
- Es sind nach der Verordnung definierte Vorkehrungen zur **Ableitung von Oberflächenabfluß** zu treffen. Diese Vorkehrungen sind prinzipiell sinnvoll. Allerdings ist bislang noch unklar, ob und wann überhaupt Oberflächenabfluß auftritt. Die wenigen Praxisergebnisse ergeben hier noch kein einheitliches Bild. Wahrscheinlich tritt Oberflächenabfluß nur bei Starkregenereignissen auf.
- Zur Optimierung der Einbaudichte muß nach der Verordnung der **Einbauwassergehalt** im Bereich des Proctorwassergehaltes eingestellt werden. Diese Maßnahme ist hinsichtlich der Dichtoptimierung und hinsichtlich der Verhinderung von Konsolidierungswasseraustritten sinnvoll. Allerdings muß bezweifelt werden, ob durch Einstellung des Wassergehaltes und hoher Verdichtung tatsächlich die beabsichtigten geringen Durchlässigkeiten erreicht werden.

Zusammenfassend ergibt sich, daß die technischen Anforderungen an die Deponietechnik im großen und ganzen zielführend und mit vertretbarem Aufwand auch einhaltbar sind. Die Anforderungen an die biologische Stabilität der Abfälle sind streng jedoch einhaltbar. Die Anforderungen an den organischen Gehalt sind nicht deponietechnisch motiviert und mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand nur schwer einhaltbar. Eine geringfügige Erhöhung der Zuordnungswert für den organischen Anteil, den TOC im Eluat und den Durchlässigkeitsbeiwert, würde die Umsetzung von MBA-Deponien in der Praxis vereinfachen, ohne dass es zu einer merklichen Verschlechterung der ökologischen Auswirkungen der Deponien käme.

## 65 Literatur

- [1] Entwurf der Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (AbfAbIV) vom 15.03.2000.
- [2] Umweltbundesamt Berlin (III.4), Bericht zur „ökologischen Vertretbarkeit“ der mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen einschließlich deren Ablagerung, Berlin 1999.
- [3] Jäger, J., Dach, J., Danhamer, H., Reinhardt, T., Obermann, I., Theissen, M., Bildung und Schadstoffbelastung der Abluft und Gase bei der mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen und deren anschließender Deponierung, Teilprojekt der TU-Darmstadt des BMBF-Verbundvorhabens Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen, Darmstadt 1996 bis 1998.
- [4] Jäger, J., Fricke, K., Schwing, E., Dach, J., Müller, W., Wallmann R., Lohf, A., Herr, C., Mechanisch-biologische Restmüllbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag des Landes Hessen und der Südhessischen Arbeitsgemeinschaft Abfall (SAGA), TH Darmstadt in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen IGW, Darmstadt 1996 bis 1998.

- [5] Dach, J.: Zur Deponiegas- und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach mechanisch-biologischer Abfallbehandlung, Dissertation an der TU Darmstadt, Schriftenreihe des Instituts für WAR, Bd. 107, Darmstadt 1998.
- [6] Hennecke, D., Deponieverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen – Entwicklung eines Parametersatzes und Risikoanalyse (Dissertation), Shaker Verlag 1998.
- [7] Obermann, I., Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponien vorbehandelter Siedlungsabfälle, Dissertation an der TU Darmstadt, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft 107, 1999.
- [8] Fricke / Friedrich (Hrsg.), Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4 TASI für die Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen auf der Deponie „Lübben-Ratsvorwerk“, Erich Schmidt Verlag, 1998.
- [9] Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein, Ablagerung mechanisch-biologisch behandelte Abfälle in Schleswig-Holstein, Bd. 2a bis 2c, Deponiekonzepte für die Deponien Wittorferfeld, Damsdorf/Tensfeld und Niemark, Aufgestellt durch Björnson Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz und ATUS Ingenieurgesellschaft Hamburg, 2000.
- [10] Rettenberger, G., Fricke, K., Schicht auf Schicht, Müllmagazin 4/99.
- [11] von Felde, D., Ablagerung mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle, Ergebnisse der niedersächsischen Demonstrationsanlagen 6. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münster 1999.
- [12] Maak, D., Poser, H., Auswirkungen der veränderten Abfalleigenschaften auf den Deponiebetrieb, in: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen, Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der TU Braunschweig, Heft 14, 1999.
- [13] Fricke, K., Müller, W., Wallmann, R., Hake, J., Turk, T., Bidlingmaier W., Doedens, H., Technische Anforderungen an die mechanisch biologische Restabfallbehandlung, in Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.) Bio- und Restabfallbehandlung IV, Baeza Verlag Witzenhausen, 2000.
- [14] Lepom, Parameter zur Charakterisierung von m.-b. vorbehandeltem Restmüll, in: Uni Potsdam 1996: BMBF-Verbundvorhaben MBA, 1. Tagungsband, Potsdam 1996, hier: S. 206 ff.
- [15] Höring K., Ehrig, H.-J., Anforderungen an und Bewertung von biologischer Vorbehandlung für die Ablagerung, BMBF-Ergebnispräsentation „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, 7.-8.09.99, Potsdam.
- [16] Danhamer, H. und Jager, J., Sickerwasseremissionen von mechanisch-biologisch und thermisch vorbehandelten Siedlungsabfällen, Entsorgungspraxis 9/99, S. 31-35. Danhamer & Jager 1999.
- [17] Ehrig, H.-J., Ablagerungsverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen – Übersicht, in: BMBF (Hrsg.), Verbundvorhaben Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen, Potsdam, 7.-8. September 1999.
- [18] Bidlingmaier, W., Rechberger, M., Maile, A., Scheelhaase T., Bedeutung der Wasser- und Gasleitfähigkeit für das Emissionsverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen unter Berücksichtigung von Einbaudichte und Wassergehalt. in: BMBF (Hrsg.), Verbundvorhaben Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen, Potsdam, 7.-8. September 1999.
- [19] Münnich, K., Hydraulische Kenngrößen von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall, in Zentrum für Abfallforschung (Hrsg.): Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen, ZAF-Reihe, Bd. 14, Braunschweig, 1999.
- [20] Bidlingmaier, W., Maile, A., Abfallmechanische und geotechnische Eigenschaften mechanisch-biologisch vorbehandelter Restabfälle, Abschlussbericht des BMBF-Verbundforschungsvorhaben, unveröffentlicht, 1999.

### **Anschrift des Autors:**

Dr.-Ing. Joachim Dach  
 Björnson Beratende Ingenieure GmbH  
 Maria Trost 3  
 56068 Koblenz  
 Tel.: 0261/8851-181  
 E-Mail: [J.Dach@bjoernsen.de](mailto:J.Dach@bjoernsen.de) oder [jdach@rz-online.de](mailto:jdach@rz-online.de)