

Ziegelbruch - ein alternatives Dichtungsmaterial für Deponien

Zusammenfassung

Die Betreiber zahlreicher Altdeponien stehen vor der Aufgabe, diese regelgerecht abzuschließen. Die Aufwendungen für die Regelabdeckungen nach TA Siedlungsabfall sind sehr hoch, so dass kostengünstigere und genehmigungsfähige Alternativen begrüßt werden.

Am Lehrstuhl Abfallwirtschaft der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus wurde erfolgreich ein Baumaterial für Deponien unter Verwendung von schwer absetzbarem Ziegelbruch entwickelt, das als mineralischer Dichtungsstoff für temporäre und Endabdeckungen geeignet ist. Die Kennwerte, insbesondere die Durchlässigkeit und die Trockenrissbeständigkeit, weisen das gefundene Materialgemisch auch als Alternative zur Regelabdeckung aus.

Einleitung

Die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASI) gibt mit ihren Fristen gemäß Ziffer 12 für sehr viele Deponien einen klaren zeitlichen Rahmen bezüglich eines regelgerechten Abschlusses. Insbesondere in den neuen Bundesländern ist die Anzahl der Deponien, die in den nächsten Jahren zum Abschluss kommen, groß. Dafür sind große Mengen an Tonmineralien erforderlich, sofern die Regelabdeckung nach TASI zum Einsatz kommt. Die eingeschränkte Verfügbarkeit der qualitativ und quantitativ erforderlichen Tonmineralien und die Tatsache, dass in vielen Baustoffrecyclingunternehmen durch den industriellen Umbruch große Mengen bisher schlecht verwertbaren Ziegelabbruchmaterials anfallen, führte zur Entwicklungsidee dieses Baustoffes. Sie war außerdem getragen von dem Gedanken, dass Ziegel im wesentlichen aus thermisch veränderten Tonen und Sanden bestehen, deren Verwitterungsendprodukte mit hoher Wahrscheinlichkeit auch wieder Tone und Sande sein werden. Damit kann der Forderung nach Langzeitbeständigkeit in ausreichender Weise genügt werden, da das Material keinerlei organische Stoffe - mit Ausnahme sehr geringer zufälliger Beimengungen - enthält

Am Lehrstuhl Abfallwirtschaft der BTU Cottbus wurde unter Förderung des Südbrandenburgischen Abfallzweckverband (SBAZV) Zossen und des LUA der Einsatz von Ziegelmauerwerksrecyclingmaterial für Oberflächenabdeckungen untersucht. Vorrangiges Entwicklungsziel war es zunächst, ein geeignetes Material für die temporären Abdeckungen bis zum Abklingen der Setzungen zu finden. Im Laufe der Untersuchungen konnte allerdings der Anspruch erhöht werden, da die Materialeigenschaften auch einen Einsatz für endgültige Abdichtungen erhoffen lassen.

Zielstellungen der Untersuchungen

Nach dem Nachweis der grundsätzlichen Eignung in Vorversuchen sollten folgende Teilziele erreicht werden:

- ▶ Erzielung mechanischer Eigenschaften, die denen von natürlichen Tonmineralien nahekommen und die Anforderungen der TASI erfüllen,
- ▶ Gewährleistung der Mischbarkeit und der Einbaubarkeit,
- ▶ Verringerung der Durchlässigkeit mit dem Ziel der Zulassungsfähigkeit für Abdichtungen,
- ▶ Minimierung des Anteils an Zumischungen anderen Materials

Die Dichtwirkung wird durch ein abgestimmtes Korngemisch aus Ziegelbruch erreicht, dessen verbleibendes Lückenvolumen durch Feinkorn und quellfähige Tone aufgefüllt wird.

Es sind schon zahlreiche Dichtmaterialien vorgeschlagen worden, die kornabgestuftes Material aus verschiedenen Grundstoffen verwenden (vgl. Tabelle 1), die Verwendung von Ziegelbruch ist jedoch neu.

Tabelle 1: Bisher realisierte Abdichtmassen aus mineralischen Gemischen. [1-5]

Einsatzort	Verarbeitetes Material	Art und Menge des Zuschlagstoffes	K_f -Werte in m/s	Anwendungsgebiet
Main-Kinzig-Kreis, 1981	Schluff	Montigel F 3,5 kg/m ²	$1 \cdot 10^{-9} - 7,5 \cdot 10^{-9}$	Basisabdichtung
1988 von Fa. Liebherr	Moränekies 0 / 63 mm	Bentonit, Wasser	k.A.	Oberflächenabdichtung
1988 von Fa. Liebherr	Tongestein 0 - 40 mm	Bentonit, Wasser	k.A.	Oberflächenabdichtung
1988 von Fa. Liebherr	lehmhaltige Erde, 0 - 2 mm	Wasser	k.A.	pumpfähige Unterwasserdichtschicht
1980	Braunkohlenasche	20 - 33 % Trass, 1 - 13 % Wasserglas, Wasser	10^{-11}	Basisabdichtung
1976 Dortmund	Bergematerial	1,0 % Bentonit (Montigel F), 1,3 % Kalksteinfüller	$1 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-11}$	Basisabdichtung
Bonn	65 % Kiesel-sand, 35 % Lehm	1-3% Tonmehl (Bentonit + Tonmehl), 0,07% Portil, Chemikalien	$3 \cdot 10^{-10}$	Basisabdichtung
Kreis Heinsberg	Schluffboden	30 % Tonmehl	$2 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-11}$	Basisabdichtung
Kreis Ebersberg / Bayern	gut abgestufter Kiessand	a) toniger Lehm b) Ziegeleiton c) 2,5 % Montigel F	a) $1 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-9}$ b) $1 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-9}$ c) $1,4 \cdot 10^{-10}$	Basisabdichtung
Norddeutschland Eckernförde	Geschiebelehm, - Geschiebemergel	a) Geschiebemergel; Feinsand, b) Sand, 3% Bentonit	a) $3,5 \cdot 10^{-9}$ b) $1 \cdot 10^{-9}$	Basisabdichtung

Grundsätzlich ist diesen vorgestellten Verfahren gemeinsam, dass regional vorhandene, geringe Kosten verursachende Materialien als Alternative zu der kostenintensive Vorgabe der TASI gesucht wurden, ohne dabei das dieser Regelabdichtung zu Grunde liegende Prinzip eines großen Pufferpotentials für emittierende Schadstoffe durch großes Speichervolumen zu verlassen. Daher standen bei den Untersuchungen die Gleichwertigkeitsbetrachtungen nach [10] und die behördliche Genehmigungsfähigkeit im Vordergrund.

Allgemeine Anforderungen an die Dichtung

In Tabelle 2 sind die allgemein bekannten Material- und Einbauparameter für mineralisches Dichtungsmaterial nach den Verwaltungsvorschriften TA Siedlungsabfall und TA Abfall [11] zusammengestellt, um sie mit den Werten der untersuchten Dichtungsalternative zu vergleichen.

Tabelle 2: Anforderungen an die mineralische Oberflächenabdichtung

Material und Einbauparameter	TA Abfall (Anhang E) gültig auch für DK I und DK II nach TASI
Stärke der Dichtung	0,5 m
k_f -Wert	$\leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s
Suffosionsbeständigkeit	ja
Feinstkorngehalt (< 0,002 mm)	≥ 20 %
Tonmineralgehalt	≥ 10 %
Größtkorn	20 mm
Stückigkeit (Konglomerate)	≤ 32 mm
Kalziumkarbonatgehalt	≤ 15 %
Einbauwassergehalt	$w_{pr}^1 < w < w_{0,95}^2$
Luftporenanteil bei Abweichungen im Wassergehalt n_a	≤ 5 %
Einbaudichte D_{pr}	≥ 95 %
Anteil fein verteilte org. Substanz	≤ 5 %

Die Eignungsprüfungen für mineralisches Dichtungsmaterial wurden nach folgenden Standards durchgeführt:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18 123
- Bestimmung des Wassergehaltes nach DIN 18 121
- Bestimmung der Konsistenzgrenzen und der abgeleiteten Werte nach DIN 18 122
- Bestimmung der Wasseraufnahme nach DIN 18 122
- Bestimmung des Gehaltes an organischen Bestandteilen nach DIN 18 128
- Bestimmung des Kalkgehaltes nach Scheibler
- Bestimmung der PROCTOR-Dichte nach DIN 18 127
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18 130 Teil 2
- Bestimmung der Festigkeit und Zusammendrückbarkeit

Darüber hinaus hat das LUA Brandenburg eine "Richtlinie zur Sicherung und zum geordneten Abschluss von Abfalldeponien mit geringem Gefährdungspotential" [9] erarbeitet. Damit soll der

¹ w_{pr} = Wassergehalt bei 100 % Proctordichte

² $w_{0,95}$ = Wassergehalt bei 95 % Proctordichte auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve

Aufwand für die Oberflächenabdeckungen entsprechend den nach dieser Richtlinie abgeschätzten Gefährdungspotential optimiert werden. Die Richtlinie ordnet die Altdeponie in zwei Kategorien ein:

- Kategorie A: kein relevantes Gefährdungspotential nach schutzgutbezogenem Aspekt
 Kategorie B: latentes bzw. akutes Gefährdungspotential unter dem Aspekt der Schutzgutbezogenheit. [9]

Die anzuwendenden Qualitätskriterien dieser Richtlinie wurden ebenfalls bei den Untersuchungen berücksichtigt

Für einen informatorischen Überblick sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 die Zuordnungskriterien zur Kategorisierung der Abfalldeponien aufgeführt, sowie anschließend in Kurzdarstellung die zu treffenden Maßnahmen aufgeführt worden.

Tabelle 3: Zuordnungskriterien zur Einstufung von Abfalldeponien in die Kategorie A [9]

Kriterium	Kategorie A1	Kategorie A2	
Art der abgelagerten Abfälle	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, nicht kontaminierter Bauschutt	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, nicht kontaminierter Bauschutt	
Nutzung	sensible Nutzungen werden nicht betroffen	sensible Nutzungen werden nicht betroffen	
Deponievolumen	< 25.000 m ³	25.000 m ³ - 150.000 m ³	< 80.000 m ³
Lage zu Trinkwasserschutz-zonen (TWSZ)	außerhalb von TWSZ oder innerhalb von TWSZ III/2	außerhalb von TWSZ oder innerhalb von TWSZ III/2	innerhalb von TWSZ II oder TWSZ III/1
Grundwasserleiter	geschützt oder ungeschützt	geschützt oder ungeschützt	ausreichend geschützt

Tabelle 4: Zuordnungskriterien zur Einstufung von Abfalldeponien in die Kategorie B [9]

Kriterium	Kategorie B1		Kategorie B2	
Art der abgelagerten Abfälle	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Bauschutt, sonstiges, keine Abfälle mit hohem Schadstoffgehalt		Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Bauschutt, sonstiges, keine Abfälle mit hohem Schadstoffgehalt	
Deponievolumen	80.000/150.000 m ³ - 500.000 m ³		> 500.000 m ³	
Lage zu Trinkwasserschutz-zonen (TWSZ)	außerhalb von TWSZ oder innerhalb von TWSZ III/2	innerhalb von TWSZ II oder TWSZ III/1	innerhalb von TWSZ II oder TWSZ III/1	gleichgültig
Grundwasserleiter	geschützt oder ungeschützt	ausreichend geschützt	ungeschützt	Deponiebasis im Grundwasser, Überschwemmungsgebiet

Für Deponien der **Kategorien A1 und A2** ist im allgemeinen eine Profilierung des Deponiekörpers und die Abdeckung mit einer Rekultivierungsschicht mit einer Mächtigkeit von mindestens 0,5 m ausreichend. Dabei soll das Niederschlagswasser von der Oberfläche durch ein Gefälle von mindestens 5 % abgeleitet und so ein Wasseraufstau verhindert werden. Bei Deponien der Kategorie A2 sind zusätzlich Maßnahmen zur Böschungssicherung und die Installation von Pegeln zur Überwachung der Grundwasserqualität im Abstrom der Deponie erforderlich. [9]

Die bedeutenden Abfalldeponien der **Kategorie B** erfordern höher- und hochwertige Sicherungsmaßnahmen. Bei Deponien der Kategorie B1 ist die Errichtung einer temporären Oberflächenabdichtung erforderlich, wobei der k_f -Wert zwischen 1×10^{-7} m/s und 1×10^{-9} m/s liegen soll. Der Einbau erfolgt zweilagig mit einer Mächtigkeit von mindestens 0,5 m. Zusätzlich sind eine Entwässerungsschicht mit einer Mächtigkeit von 0,3 m und eine Rekultivierungsschicht mit mindestens 0,5 m Mächtigkeit aufzubringen. Ist die Deponie gasproduzierend, sind weitere Maßnahmen zur sicheren Gasfassung notwendig. [9]

Deponien der Kategorie B2 erfordern grundsätzlich eine Kombinationsabdichtung nach TASI, wobei in Einzelfällen auch ein Abdichtungssystem der Deponieklasse I zum Einsatz kommen kann. Da diese Sicherungsmaßnahmen erst nach dem Abklingen der Setzungen im Deponiekörper und des Deponieuntergrundes sinnvoll sind, werden bis zu diesem Zeitpunkt **temporäre Abdichtungen** aufgebracht. [9]

Die Richtlinie des LUA Brandenburg sieht auch den Einsatz von Baurestmassen bei der Sicherung von Deponien vor. Die eingesetzten Stoffe müssen definierte Qualitätsanforderungen erfüllen, die ebenfalls Bestandteil der Richtlinie sind. [9]

Damit sind zumindest im Land Brandenburg die Voraussetzungen für den Einsatz des vorliegenden alternativen Dichtungsmaterials gegeben.

Anforderungen an die Dichtung aus bodenmechanischer Sicht

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) fordert in seinen bauaufsichtlichen Zulassungen für alternative Dichtungselemente in Deponieabdichtungssystemen die Erfüllung der Leistungen - Dichtigkeit, mechanische Widerstandsfähigkeit, Beständigkeit, Herstellbarkeit - , die im Zulassungsfall zu erfüllen sind [10]. Diese Leistungen von Deponieabdichtungsschichten sind in der Tabelle 5 aufgelistet.

Entwicklungsaufgabe

Bei der Entwicklung des Dichtungsmaterials als kornabgestufte Mischung sollten folgende Aufgaben gelöst werden:

- S Herstellung der Kornabstufung möglichst preiswert mit industriellen Verfahren,
- S Vermeiden von aufwendigen Klassier- und Mischprozessen,
- S Reduzierung des notwendigen Tonmineraleinsatzes ,
- S Erfüllung der Dichtigkeitsanforderungen sowohl für temporäre Abdeckungen als auch für endgültige Abdichtungen,
- S geringer verfahrenstechnischer und energetischer Aufwand für den Einbau,
- S Gewährleistung der Mischbarkeit und Einbaubarkeit für den großtechnischen Einsatz,
- S Vermeidung der Bildung von Schrumpfrissen bei Austrocknung.

Tabelle 5: Leistungen von Deponieabdichtungsschichten [10]

Leistungen	Eigenschaften	Einwirkungen
Dichtigkeit	Konvektionsverhalten - Durchtrittszeit - Durchflußrate Diffusionsverhalten - Induktionszeit - Permeationsrate Sorptionsverhalten - Adsorption	- hydraulischer Gradient - Schadstoff - Temperatur - Schadstoff - Konzentrationsgradient - Temperatur - Schadstoff - Konzentration der Lösung
Mechanische Widerstandsfähigkeit	Verhalten bei mechanischer Belastung S Standsicherheit S Verformungssicherheit S hydraulische Widerstandsfähigkeit	Mechanische Einwirkungen: - Verformungen aus Setzungen - Kräfte aus Verformungen - Kräfte aus Neigung und Auflast - Verkehrslasten - Wasserspannungen - Sonderlasten Hydraulische Einwirkungen: - Strömungskräfte
Beständigkeit	Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen	Chemische Einwirkungen: - Sickerwasser - aggressive flüssige Medien - Gase
	Beständigkeit gegenüber physikalischen Einwirkungen	Physikalische Einwirkungen: - Temperaturen - Feuchtigkeit - UV-Strahlung
	Beständigkeit gegenüber biologischen Einwirkungen	Biologische Einwirkungen: - Mikroorganismen, Pilze - Pflanzen - Tiere
Herstellbarkeit	Einbaubarkeit S mechanische Empfindlichkeit S Witterungsempfindlichkeit S Eigenschaften der Materialien im eingebauten Zustand S Anschlüsse und Durchdringungen S Prüfbarkeit S Reparierbarkeit	- Einbaubeanspruchungen - Witterung

Als Material für die Durchlässigkeitsuntersuchungen sollte aufbereiteter Mauerwerksschotter dienen. Dazu wurde industriell aufbereitetes Material einer örtlichen Recyclinganlage verwendet. Weiterhin wird der beim Brechvorgang entstehende und abgesaugte Flugstaub verwendet, der die erforderlichen Feinstkornanteile < 63 µm bildete. Nach Angaben des Unternehmens fallen bei einem Tagesdurchsatz von ca. 800 t Mauerwerksschotter pro Tag ungefähr 1-3% Flugstaub an.

Experimentelle Untersuchungen

Um eine optimale Kornabstufung des Ziegelmaterials zu erreichen, wurde eine Berechnung der Anteile mit der Regressionsgleichung für die FULLER-Kurve vorgenommen [7, 8]:

$$a = (d/D)^n$$

mit: a Siebdurchgang [%],
 d betrachteter Korndurchmesser [mm],
 D größter Korndurchmesser des Gemisches [mm],
 n variabler Exponent.

Der variable Exponent n beträgt für annähernd runde Körner 0,5. Bei Abweichungen von der Kugelform wird ein kleinerer Exponent gewählt, der zwischen 0,5 und 0,3 liegt. [7, 8]
 Aufgrund der Bruchform des Ziegelmaterials wurde ein Exponent von n = 0,3 gewählt. Das Größtkorn wurde mit D = 5 mm festgelegt.

Für die Ermittlung der Erreichen der Mengenanteile des Dichtungsgemisches mit einer Kornabstufung nach FULLER wurde ein Gleichungssystem aufgestellt, dessen Lösung die Zusammensetzung des Feststoffgemisches nach Korngrößenfraktionen ergibt:

$$m_i / m_{ges} = (x_i + z_i) / (x_{ges} + z_{ges})$$

mit: m_i Massen der Korngrößenfraktion i gemäß FULLER-Kurve
 m_{ges} Summe der Massenanteile bei einer Zusammensetzung gemäß FULLER-Kurve
 x_i Anteil der Korngrößenfraktion i
 x_{ges} Summe der Massenanteile gemäß Siebkurve in der Korngrößenfraktion i
 z_i Anteil der Zuschläge je Korngrößenfraktion i
 z_{ges} Summe der Massenanteile an Zuschlagstoffen in der Korngrößenfraktion i

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde ein hinsichtlich Durchlässigkeit und Verfügbarkeit der Anteile optimiertes Dichtungsgemisch mit den Trockenanteilen gemäß Tabelle 6 gefunden.

Tabelle 6: Zusammensetzung des optimierten Gemisches

Körnung	Prozent
0 - 8 mm	15
0 - 4 mm	76
Flugsand	4
Tonmehl	3
Bentonit	2

SCHMIDT [19] führte orientierende Untersuchungen durch und bestätigte die grundsätzliche Eignung des Dichtungsgemisches. Die von ihm konstruierten Messzellen wurden von OBER [23] verbessert, der die Ergebnisse durch zahlreiche Versuche unter Verwendung von 15 Messzellen statistisch sicherte.

Die Analyse der experimentell optimierten Korngrößenverteilung ergab eine Körnungslinie entsprechend der Abbildung 1.

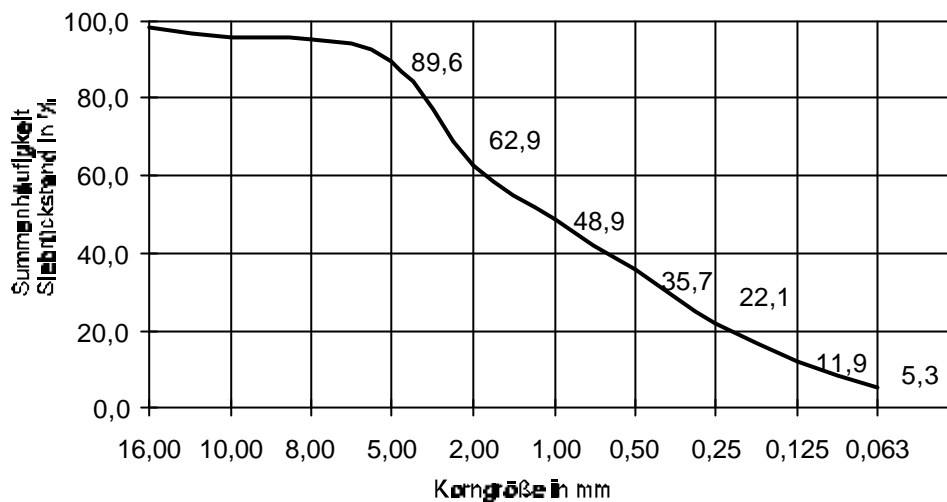


Abbildung 1: Körnungslinie des optimierten Dichtungsgemisches

Großversuch

In den Grundsätzen des DIBt [10] werden die Einwirkungen auf Oberflächenabdichtungen aufgeführt. Um möglichst praxisnah Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen durchführen zu können, wurde ein Lysimeter errichtet, in dem eine derartige Dichtungsschicht im Maßstab 1:1 mit einer Fläche von 3,14 m² eingebaut werden kann. Der Lysimeterbehälter nach FRIEDRICH [18] besteht aus 1 Stahlbetonbehälter NW 200 nach DIN 4034 T1 und 4 Brunnenschachtringen NW 200 nach DIN 4060 mit einer Gesamtbauhöhe von ca. 4000 mm.

Die Masse des einbaubaren Dichtungsmaterials sowie deren Querschnittsfläche in dieser Apparatur vermindern den Einfluss zufälliger Abweichungen in der Zusammensetzung, von Strukturinhomogenitäten und der Randgängigkeit. Die geforderten Aufstauhöhen (s. Tabelle 15) nach [10] können durch einen in der Höhe variablen Überlauf eingehalten werden. Das Lysimeter wird durch eine weitestgehend gas- und dampfdichte Abdeckung abgeschlossen.

Herstellung und Einbau der Dichtungsschicht

Das Gemisch wurde aus den Komponenten Friedländer Blautonmehl, Bentonit (Montigel F), Flugstaub und Ziegelbruch-Brechsand 0-4mm bzw. 0-8 mm gemäß der optimierten Zuschlagsmengen (Tabelle 6) in einem handelsüblichen Beton-Freifall-Mischer mit einem Arbeitsvolumen von 75 Litern hergestellt. Beim Mischen ist auf eine Zugabe der Komponenten vom Grobkörnigeren zu den Feinstpartikelkomponenten hin zu achten. Damit wird eine gute Verteilung der Feinteilchen im Haufwerk erreicht. Brechsand und Flugstaub werden mit natürlichem Wassergehalt eingegeben, Bentonit und Tonmehl in trockenem Zustand. Die zum Erreichen des optimalen Wassergehaltes nötige Wassermenge wird hinzu gegeben. Die Mischdauer soll mindestens 1 Minute betragen.

Da die Einbaubedingung nach TASI simuliert werden soll, wurde beim Einbau praxisrelevant vorgegangen. Es wurde dreilagig eingebaut und verdichtet.

Das eingebaute Material hat eine erdfeuchte, leicht plastische Konsistenz. Es kann ohne Entstehung von Rissen eingebaut werden. Dies bedingt sich durch den Einbau des Gemisches mit einem Wassergehalt, der ca. 1-2 % im feuchten Ast der PROCTOR-Kurve liegt. Insgesamt wurden mehr als 3000 kg des Dichtstoffes in das Lysimeter eingebracht.

Über der Schicht wurde sofort nach dem Einbau eine 5 cm mächtige Wassersäule aufgestaut. Das Kiesbett des Lysimeters wird vor dem Einbau wassergesättigt. So konnte bereits nach kurzer Zeit im Anschluss an den Einbau die erste Durchflussmessung erfolgen. Sobald keine wesentlichen Veränderungen des Durchflusses mehr messbar waren, wurde in regelmäßigen Abständen die Aufstauhöhe erhöht.

Der Gleichwertigkeitsnachweis nach den Grundsätzen des DIBt erfolgte unter den dort genannten Konventionen. Dabei sind auch die Effekte bei der Einwirkung von Auflasten, Verformungen, Wassergehaltsänderungen und anderen Beanspruchungen zu berücksichtigen. [10]

In Tabelle 7 sind die ermittelten bodenmechanischen Kenngrößen zusammengestellt. Untersuchungen zur Scherfestigkeit wurden am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der BTU Cottbus durchgeführt.

Tabelle 7: Bodenmechanische Kenngrößen des Gemisch

Bodenmechanische Kenngrößen	
Dichte ρ_{PR} 100%	1,9669 g/cm ³
Trockendichte	1,6235 g/cm ³
PROCTOR-Wassergehalt w_{PR} 100%	0,23
Einbaudichte	1,95 g/cm ³
Einbautrockendichte	1,58 g/cm ³
Einbauwassergehalt	0,24

Abb. 2 stellt die Körnungslinie des Gemisches dar. Diese wurde durch Trockensiebung ermittelt. Der Anteil unter 63 µm wurde mit 5,3 Massen% ermittelt. Der tatsächliche Anteil liegt bei ungefähr 10 Massen%, wenn die Körnungslinie mittels Naßsiebung, wie vergleichsweise durchgeführt, erstellt wird.

Zusammenfassung der Ergebnisse aus bodenmechanischer Sicht

Die Auswertung der bodenmechanischen Kenngrößen ergibt:

Fließgrenze	$w_L = 41,5 \%$
Ausrollgrenze	$w_p = 31,2 \%$
Plastizitätszahl	$I_p = w_L - w_p = 10,3 \%$
Schrumpfgrenze	$w_s = w_L - 1,25 I_p = 28,6 \%$
Konsistenzzahl	$I_c = (w_L - w) / I_p = 1,8 \%$
	$w = \text{Einbauwassergehalt, hier } 23 \%$;
Liquiditätszahl	$IL = 1 - I_c = 0,85$

Wasseraufnahmevermögen	$w_A = 65,7 \%$
Ungleichförmigkeitszahl	$U = 18,75$
Krümmungszahl	$C = 0,75$

Verbale Beurteilung:

1. Es liegt ein mineralisches Gemisch vor, das als mittelplastischer Schluff bezeichnet werden kann.
2. Das Gemisch ähnelt den Bodengruppen UM und SI. Je nach Beurteilungskriterium lässt es sich als UM (toniger Schluff) oder SI (Terrassensand) bezeichnen [13].
3. Die Plastizitätszahl I_p von ungefähr 10 weist darauf hin, dass schon bei geringen Änderungen des Wassergehaltes große Änderungen der Konsistenz zu erwarten sind [14]
4. Die Wasseraufnahmefähigkeit w_A liegt bei ungefähr 65 %. Je größer w_A ausfällt, um so mehr neigt das Gemisch zum Schwellen [14].
5. Der erzielte Verdichtungsgrad liegt bei $D_{Pr} = \rho_d / \rho_{Pr} = 1,51 / 1,95 \text{ g/cm}^3 = 78 \%$.
6. Der optimale Wassergehalt liegt bei 23 Masse-%, bezogen auf die Gesamttrockenmasse.
7. Die Berechnungen zur Standsicherheit des Materials haben nur orientierenden Charakter. Bei Annahme eines inneren Reibungswinkels von 25° und Vernachlässigung der Kohäsion ergibt sich ein möglicher Böschungswinkel von 19° . Dies entspricht in etwa der Steigung 1:3.
8. Nach Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Bodenarten lt. ZTVE-StB 76 und Bodenbeurteilung DIN 18 196 [13] ergeben sich unterschiedliche Bewertungen. Eine exakte Bewertung muß der Feldversuch bringen.
9. Die Gehalte an Gesamtkohlenstoff (1,02 Gew.-%) und Gesamtkarbonat (ca.8% Gew.-%) liegen deutlich unterhalb der nach TASI geforderten Grenzwerte.

Damit erscheint aus bodenmechanischer Sicht, unter Anwendung der E 3 -1 "Eignungsprüfungen mineralischer Oberflächen- und Basisabdichtungen" [20], dass das untersuchte Material für den Einbau als Oberflächenabdichtungsmaterial tauglich ist.

In den bisherigen Versuchen wurde die Möglichkeit erfolgreich untersucht, Mauerwerkrecyclingmaterial so zu modifizieren, dass er die gesetzlichen Anforderungen und geforderten Leistungen an Deponiedichtungsmaterialien erfüllen kann. Die Möglichkeiten der Modifikation beziehen sich vor allem auf die Kornzusammensetzung.

Die Untersuchungen haben folgendes gezeigt:

- Eine Abstimmung der Körnungslinie nach der FULLER-Kurve erzielt das gewünschte Ergebnis in Bezug auf die Dichtigkeit,
- der nötige Anteil an Feinstkorn (Bentonit, Tonmehl) kann zu bestimmten Anteilen durch Flugstaub aus dem Bauschutttaufbereitungsprozess ersetzt werden,
- um den bodenmechanischen Anforderungen gerecht zu werden, sollte der Anteil an Tonmineralien nicht unter 3 Masse% liegen (Dichtigkeit, Konsistenzgrenzen),
- die Einstellung des optimalen Einbauwassergehaltes durch PROCTOR-Versuch verbessert die Durchlässigkeitswerte erheblich.

Das Dichtungsmaterial ist gut zu verarbeiten. Wesentliche Anbackungen an Arbeitsgeräten wurden während des gesamten Beschickungsvorganges nicht bemerkt. Eine gute Verbindung zum

Lysimeterrand ist ebenfalls erreicht worden. Der Einbauwassergehalt muss allerdings in sehr engen Grenzen ($< \pm 1,5 \%$) eingehalten werden, um die vorstehend beschriebenen Eigenschaften zu gewährleisten.

Durch kontrollierte Kornzusammensetzung und gute Misch- bzw. Einbauvorgänge entsteht eine Dichtungsschicht mit einer Einbaudichte von $1,85 - 1,95 \text{ t/m}^3$ und Durchlässigkeitswerten zwischen $3 \cdot 10^{-9}$ und $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. Dies erfüllt auf jeden Fall die Forderungen des LUA Brandenburg für temporäre Deponieabdichtungen.

Die Rissefreiheit des Dichtungsmaterials, welche sowohl bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ im Trockenschrank getrockneten Proben als auch beim Ausbau der Testschicht im Lysimeter festgestellt werden konnte, ist als besondere positive Eigenschaften hervorzuheben.

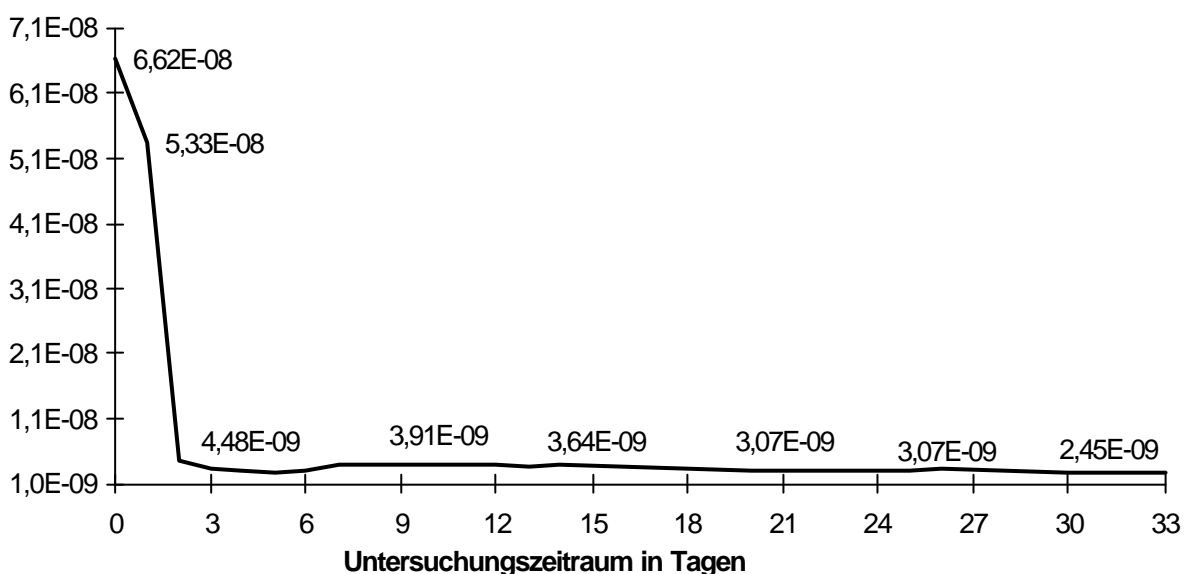


Abbildung 2: Entwicklung der Durchlässigkeit bei 5 cm Aufstauhöhe

Wasserdurchlässigkeit

Abbildung 2 stellt beispielhaft die Entwicklung der Wasserdurchlässigkeit bei einer Aufstauhöhe von 5 cm dar. Der hydraulische Gradient beträgt $i = 1,1$. Die angegebenen Werte sind auf 10°C korrigiert worden.

Der Durchlässigkeitsbeiwert nähert sich erst allmählich einem konstanten Wert. Nach Ansicht der Verfasser können die Ursachen hierfür folgende sein:

- Die maximale Wassersättigung des Gemisches wird erst nach längerer Versuchszeit erreicht.
- Durch Quellen der Tonminerale (Tonmehl und Bentonit) verengen sich die Porenweiten im Gemisch, wodurch die Durchlässigkeit herabgesetzt wird.
- Durch das Gewicht der aufgestauten Wassersäule wird das Gemisch zusammengedrückt, wodurch sich die Lagerungsdichte erhöht und die Porenweiten abnehmen.
- Durch Soffosion erfolgt die allmähliche Verminderung des hydraulischen Durchmessers.

Die sicherer Einhaltung der nach dem Deutschen Institut für Bautechnik empfohlenen Durchlässigkeitswerte für die Deponieklassen I und II geht aus den Vergleich in Tabelle 8 hervor.

Tabelle 8: Vergleich der erreichten Durchlässigkeitswerte mit den Anforderungen nach dem Deutschen Institut für Bautechnik [10]

Aufstauhöhe h	5 cm	10 cm	15 cm	30 cm	150 cm
DK I/II					
d = 50 cm	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
$k_f = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s					
DK III					
d = 50 cm	$5,5 \cdot 10^{-10}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$8,0 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$
$k_f = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s					
erreichter	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	$1,28 \cdot 10^{-9}$	k.A.
K_f-Wert					

Kostenbetrachtung

Die auftretenden Kosten unterliegen sehr starken Schwankungen entsprechend der örtlichen Bedingungen. Folgende Annahmen lagen der Preisberechnung zugrunde:

- Kosten für Mauerwerksschotter, Flugsand: 9,00 DM/t
- Kosten für Tonmehl: 100,00 DM/t
- Kosten für Bentonit MONTIGEL F: 300,00 DM/t

Kosten für Brauchwasser wurden vernachlässigt, da

- die Preise für Wasser schwanken,
- die benötigten Wassermassen vom Feuchtegehalt des Mauerwerksschotters abhängen (in der Regel lag der Wassergehalt bei 8-10%),
- eventuell auch Regenwasser verwendet werden kann.

Es wurde eine Trockendichte von 1,5 t/m³ angenommen. Dies bedeutet, dass für den Einbau eines m² bei 0,5 m Aufbauhöhe etwa 750 kg Material verbraucht wird. Aus der Tabelle 9 gehen unter Berücksichtigung vorgenannter Bedingungen die Materialkosten je m² Dichtungsfläche unter Verwendung von Preisangaben eines örtlichen Bauschutt-Recyclingunternehmens hervor.

Tabelle 9: Darstellung der Materialkosten in DM/m²

Körnung	Ma.-%	Kosten in DM/m ²
0 - 4 mm	76	5,13
4 - 8 mm	15	0,68
Flugsand	4	0,27
Tonmehl	3	2,25
Bentonit MONTIGEL F	2	4,5
Gesamt pro m²		12,83

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein aus Mauerwerksschotter, Tonmehl und Bentonit zusammengesetztes Abdichtungsmaterial hergestellt, das in seinen bodenmechanischen Eigenschaften und Durchlässigkeitswerten einem Vergleich mit bisher üblichen mineralischen Abdichtungsmaterialien für Deponien standhält. Als besondere Vorteile sind die gute Einbaufähigkeit und die Trockenrissbeständigkeit zu nennen. Es kann erwartet werden, dass als Verwitterungsendprodukt dieses Gemisches ein tonähnliches Material entsteht, dessen Dichtungseigenschaften sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht verschlechtern werden. Insofern ist die Langzeitbeständigkeit gegeben.

Die Kosten für das Material und den Einbau liegen nach den bisherigen Ermittlungen [21], [22] bei ca. 90 - 95 Prozent im Vergleich zur Regelabdeckung nach TASI. Entscheidender Vorteil ist der Einsatz bisher wenig oder nicht verwertbaren Ziegelabbruchmaterials und der geringe Einsatz an zusätzlichen Tonmineralien. Als Nachteil ist der aufwendige Mischprozess zu nennen, der auch wesentliche Ursache für die relativ hohen Kosten ist, aber sicherlich durch den Test auf einem Versuchsfeld weiter optimiert werden kann.

Das Dichtungsmaterial aus Ziegelbruch kann insbesondere dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn Ziegelbruch in unmittelbarer Nähe in großen Mengen zur Verfügung steht, aus Abrissmaßnahmen zu beschaffen ist oder bereits schon aufgehaldet vorliegt.

Literaturverzeichnis

- [1] BLANK, P., BLAUT, H.: Erfahrungen mit der Bentonit-Einmischdichtung mit anstehenden Böden beim Bau der Mülldeponie Gelnhausen-Hailer. In: Beihefte zu Müll und Abfall, H.24, Mineralische Deponieabdichtung, 1987, S.117 - 122 ;
- [2] Bodenmaterial zu Abdichtmassen verrührt. In: Baupraxis Magazin, 1988, S. 16
- [3] KLEY, WOLFRAM: Dichtungsmaterial aus Braunkohlenkraftwerksaschen- Laborversuche und erste Zwischenergebnisse . In: Sonderdruck Müll und Abfall 7/80;
- [4] STEFFEN, DR.-ING. HEINZ: Möglichkeiten der Basisabdichtung von Mülldeponien unter besonderer Berücksichtigung zusammengesetzter mineralischer Abdichtungen aus Erdbaustoffen; In: s + t 35, 1981, 6, S.30-34;
- [5] ALBIKER, B.: Erfahrungen mit Deponieabdichtungen in Schmelzwassersanden Norddeutschlands. In: Beihefte zu Müll und Abfall, H.24, Mineralische Deponieabdichtung, 1987, S.123 - 127 ;
- [6] CZURDA, K.: Bindige mineralische Barrieren. In: Tagungsunterlagen: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung? VDI-Seminar 27.-28.09.1995 in Karlsruhe. Burkhardt, G., Egloffstein, Th. (Hrsg.): Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 37, 1995;
- [7] HORN, ARMIN: Mineralische Deponie-Flächendichtungen aus gemischtkörnigen Böden. In: Bautechnik 66, 1989, Heft 9, S. 311 - 318;
- [8] FINSTERWALDER, BEINE: Abdichtungssysteme aus DYWIDAG-Mineralgemisch - Grundlagen und Erfahrungen. In: Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes Nürnberg, Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien, 8. Nürnberger Deponieseminar 1992;
- [9] LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (HRSG.): Richtlinie zur Sicherung und zum geordneten Abschluss von Abfalldeponien mit geringem Gefährdungspotential. Eigenverlag, Potsdam 1996
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK; Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen, November 1995
- [11] BUNDESRAT: Beschluß des Bundesrates zur Dritten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall). 652. Sitzung am 12.02.1993, Drucksache 594/92 (Beschluß), Bonn: Verlag Dr. Hans Heger 1993

- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG; DIN 18 123: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag Köln, 1983.
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG; DIN 18 196: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag Köln, 1987.
- [14] GUDEHUS, G.; Bodenmechanik; Stuttgart 1981; Enke Verlag.
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG; DIN 18 122 T1: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung der Zustandsgrenzen. Beuth Verlag Köln, 1987.
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG; DIN 18 132: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung des Wassergehaltes. Beuth Verlag Köln, 1995.
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG; DIN 18 127: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben: PROCTOR-Versuch. Beuth Verlag Köln, 1997
- [18] FRIEDRICH, STEFFEN: Konstruktion eines Lysimeters zur Untersuchung des Deponieverhaltens von Abfällen; Diplomarbeit; BTU Cottbus, LS Abfallwirtschaft , 1997.
- [19] SCHMIDT, OLAF: Studie zum Vergleich und Einsatz alternativer Oberflächenabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung lokaler Bedingungen; BTU Cottbus, LS Abfallwirtschaft; 1996
- [20] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK: Empfehlungen der Arbeitskreise zur "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - Berlin: Ernst, 1997
- [21] MASKE, RENÉ: Ermittlung der Kosten für das alternative Dichtungsmaterial im Vergleich zum Regelsystem; Studienarbeit, BTU Cottbus, LS Abfallwirtschaft , 1998.
- [22] KREMSER, SILKE: Erarbeitung einer Einbautechnologie einschl. Kostenplanung für den Einbau eines neuartigen Deponieabdichtungsmaterials für ein Versuchsfeld...; Studienarbeit, BTU Cottbus, LS Abfallwirtschaft, 1998.
- [23] OBER, STEFAN: Optimierung der Zusammensetzung eines neuartigen mineralischen Dichtungsmaterials für Deponien, Diplomarbeit; BTU Cottbus, LS Abfallwirtschaft, 1998