

# "Trockener" Einbau von mineralischen Dichtungsschichten; Grundlagen und Praxiserfahrungen

Dr. Beate Vielhaber, Dipl.-Ing. Jens Locker, Dipl.-Ing. Dirk Hütteroth, Dr. Torsten Junge,  
Dr. habil. Stefan Melchior

## Inhalt

1	Einführung .....	1
2	Materialien und Prozesse .....	2
2.1.	Bodenphysikalische Prozesse bei der Herstellung mineralischer Dichtschichten ...	3
2.2.	Einsatz von vorgetrocknetem Material .....	4
2.3.	Einsatz und Wirkung von Zuschlagstoffen (Branntkalk / Braunkohlenflugasche).....	5
3	Fallbeispiele.....	6
3.1.	Oberflächenabdichtung Deponie Zerbst.....	6
3.2.	Deponie Haferteich, bei Schleswig .....	7
3.3.	Deponie Kirschenplantage (Basisdichtung).....	8
3.4.	Deponie Kuhstedt, Lkr. Rotenburg / Wümme (Testfeld).....	9
3.5.	Oberflächenabdichtung Deponie Rödelberg .....	9
3.6.	Tabellarische Zusammenstellung der Kennwerte.....	10
4	Feststellungen und Empfehlungen .....	11
5	Fazit.....	13
6	Literatur .....	13

## 1 Einführung

Die nachfolgenden Ausführungen gehen zurück auf die Ergebnisse des Status-Workshops „Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“, der am 31.01./01.02.02 in Höxter von der Unterarbeitsgruppe 7 „Oberflächenabdichtungssysteme“ des AK 6.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik durchgeführt wurde (RAMKE et al., 2002b<sup>1</sup>).

Die Diskussion zur Austrocknungsgefährdung bindiger mineralischer Dichtschichten (BMD) wird seit langem z. T. kontrovers geführt, vor allem seit Ergebnisse aus den Testfelduntersuchungen auf der Deponie Hamburg-Georgswerder auf das Versagen der dort untersuchten BMD ohne obenliegende Kunststoffdichtungsbahn hinwiesen (MELCHIOR, 1993).

Die Regelanforderungen zu den Materialeigenschaften und zum Einbau von BMD leiten sich bis heute aus der TA Abfall (1991), Anhang E, ab, in der u.a. der Tongehalt mit Min-

<sup>1</sup> Eine Kurzfassung ist seither auf Tagungen vorgestellt worden, z.B. Karlsruher Deponie-Seminar, Oktober 2002 (RAMKE et. al., 2002a) oder 14. Nürnberger Deponieseminar 2003.

destwerten und der Einbauwassergehalt in Relation zum Proctorwassergehalt der Erdstoffe festgelegt wurden. Der Einbauwassergehalt muss nach TA Abfall über dem Proctorwassergehalt, d.h. auf dem nassen Ast der Proctorkurve liegen. Dieses ist bis dato überwiegende Einbaupraxis. Auch die Deponieverordnung (DepV, 2002) verweist zum Einbau von tonmineralischen Dichtungen trotz vieler diesbezüglicher kritischer Eingaben im Verlauf der Anhörungen im Gesetzgebungsverfahren unverändert auf die Vorgaben der TA Abfall.

Den Workshop-Ergebnissen zufolge steigt das Schrumpfpotenzial bei ausgeprägt plastischen Bodengruppen und bei deren Einbau auf der nassen Seite der Proctor-Verdichtungskurve. Die Rissweiten nehmen entsprechend zu. Empfehlungen lauten daher: Der Einbau sollte unter Berücksichtigung der zulässigen maximalen Durchlässigkeit so trocken wie technisch möglich erfolgen, um das Schrumpfpotenzial möglichst gering zu halten (keine Porenwasserüberdrücke beim Einbau).

Hierzu gibt es bereits Erfahrungen aus der Deponiebau-Praxis. Eine Zusammenstellung von ausgewählten Einsatzfällen und die dabei in der Praxis gewonnenen Erfahrungen, sowohl technisch als auch wirtschaftlich, sind Inhalt dieses Beitrages. Fachleute aus der Baupraxis haben die Thematik „Trockeneinbau“ von BMD unter verschiedenen Aspekten diskutiert. Dabei wurde auch Fragestellungen nachgegangen, die sich im Zusammenhang mit dem Trockeneinbau bereits aus der Auswertung des o.g. Workshops ergaben (siehe RAMKE et al., 2002b, S.126f.). Hinzu kamen die Dokumentation von Erfahrungen mit der Erdstoffzusammensetzung, mit der Einbautechnik (Einbaugerät, Anzahl Überfahrungen, Lagenstärke) sowie mit der Steuerung des Wassergehaltes (um z.B. bei Ausgangsmaterialien mit zu hohem Wassergehalt auf den trockenen Ast der Proctorkurve zu kommen).

Von Seiten der Baupraktiker wurden der Einbau von vorgeschrumpftem Material, der Einsatz von Zuschlagsstoffen beurteilt, und Erfahrungen, Kostenangaben sowie Empfehlungen vorgelegt. Dabei war wichtig, die Aufwendungen für den Trockeneinbau im Vergleich zum herkömmlichen Einbau zu bewerten.

Eine Zusammenstellung von ausgewählten Fallbeispielen folgt in Kap. 3.

## **2 Materialien und Prozesse**

Zu den technischen Möglichkeiten des trockenen Einbaus gibt es seit langem Erfahrungen und Einsatzbeispiele, in denen von den Vorgaben des technischen Regelwerkes abgewichen wurde. Sie lassen sich wie folgt unterscheiden:

- Einsatz definierter Materialmischungen, z.B. gemischtkörnige Dichtungen wie *Bentokies*, *DYWIDAG-Mineralgemisch* ("Trockendichtung") oder *Trisoplast®*, denen von vorneherein beim Mischvorgang ein nur geringer Wasseranteil zugegeben wird.
- Einbau eines „herkömmlichen“ Materials bzw. natürlichen Erdstoffes mit Wassergehalten auf dem trockenen Ast der Proctorkurve, dazu evtl.
  - gezielte Trocknung durch Einwirken der Witterung (Verdunstung)
  - Zugabe von Fremdstoffen, die Wasser chemisch binden.

Bislang wurde dem Trockeneinbau vor allem entgegen gehalten, dass die notwendige höhere Verdichtungsenergie bzw. Zuschlagsstoffe kostentreibend wirken. Die eher seltene Realisierung der *DYVIDAG-Trockendichtung* oder der *Bentokies-Dichtung* sprechen dafür.

Es gibt Vorschläge, die Bodenaggregate ggf. „vorgetrocknet“ beim Einbau zu erhalten oder partiell anzufeuchten. Wenn das einzubauende Material zu feucht sein sollte, kann das Einfräsen von Branntkalk Abhilfe zu schaffen (HORN, 2001; HORN & JUNGE, 2002).

Im folgenden werden letztere Ansätze näher beschrieben.

## 2.1. Bodenphysikalische Prozesse bei der Herstellung mineralischer Dichtungsschichten

Wasserspannungen, die infolge von Verdunstung oder Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln auf mineralische Dichtungsschichten wirken, sind um Größenordnungen höher als die mechanischen Spannungen, unter deren Einfluss sie hergestellt wurden. Einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % entspricht eine Wasserspannung von nahezu  $10^5$  kPa. Pflanzen vermögen dem Boden Wasser zu entziehen, welches mit 1500 kPa gespannt ist.

Überschreiten die kontraktiven Meniskenkräfte die Höhe der mechanischen Vorverdichtung, kommt es zu einer weiteren Annäherung von Bodenpartikeln. Die zusätzliche hydraulische Verdichtung führt zur Entstehung von Rissen im Dichtungsbauwerk. Neben der mechanischen Vorverdichtung des Dichtungselementes ist daher dessen hydraulischer Vorverdichtungszustand für die Schrumpfrissanfälligkeit verantwortlich. Er wird bestimmt durch die maximale Wasserspannung, welche in der Vorgeschichte eines Erdstoffes zur Einregelung von Bodenpartikeln geführt hat.

Partikeleinregelung über Meniskenzug ist naturgemäß an das Vorhandensein von Porenwasser gebunden. Je trockener ein Erdstoff verarbeitet wurde, desto weniger intensiv können daher Schrumpfvorgänge ablaufen. Hieraus folgt, dass ein hoch verdichteter, vergleichsweise trockener, aggregierter Erdstoff in doppelter Hinsicht reduziert schrumpfanfällig

reagiert. Er verfügt über eine hydraulische Vorverdichtung und die Wirkung von Meniskenkräften ist aufgrund des reduzierten Porenwasseranteils gegenüber einem feucht verarbeiteten Erdstoff herabgesetzt.

BMD, welche auf dem nassen Ast der Proctorkurve verdichtet wurden, liefern demzufolge ideale Voraussetzungen für ein intensives Schrumpfverhalten. Ihr Schrumpfpotenzial nimmt mit steigendem Wasserangebot deutlich zu (BAUER et al. 2001).

Durch Wasserüberschuss während des Verdichtungsprozesses kommt es zu einer Homogenisierung, in der historische, weniger schrumpfanfällige Aggregatstrukturen weitestgehend zerknetet werden. Der zunehmende Wasseranteil verhindert die größtmögliche Annäherung der Bodenpartikel, welche im Maximum der Proctorkurve erreicht ist. Eine gleichmäßige Verteilung von Feststoff und Wasser bietet ideale Voraussetzungen für die Übertragung von Wasserspannungen, welche eine Kontraktion der Bodenpartikel bewirken.

Die kontraktive Wirkung von Wasserspannungen wird ebenfalls deutlich bei der Anfeuchtung sehr trockener, unvollständig verdichteter Erdstoffe. Sie reagieren bei erstmaligem Wasserkontakt in der Form einer Schrumpfung.

## **2.2. Einsatz von vorgetrocknetem Material**

Der Einbau bindiger mineralischer Dichtungsmaterialien kann auf dem trockenen Ast oder auf dem Scheitel der Proctorkurve oder mit Erhöhung der Verdichtungsarbeit auf 100% der modifizierten Proctordichte erfolgen.

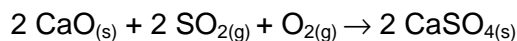
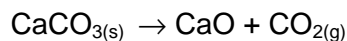
Die daraus resultierenden höheren Verdichtungswerte bzw. Trockendichten bei gleichzeitig reduziertem Einbauwassergehalt verringern das Schrumpfpotenzial und erfordern ggf. einen dünnlagigen Einbau bei gleichzeitiger Erhöhung der Anzahl der Verdichtungsübergänge mit Erdbaugeräten, die im Versuchsfeld zu optimieren sind (entspricht soweit gängiger Praxis).

Häufig ist ein bindiger Dichtungsbaustoff nicht mit dem optimalen Wassergehalt verfügbar, sondern muss bewässert oder getrocknet werden. Zur Trocknung kann das natürliche Sättigungsdefizit zur freien Atmosphäre ausgenutzt werden, indem das Material „liegengelassen“ wird. Dieser Vorgang ist recht langwierig und muss ggf. unter Dach erfolgen, um niederschlagsbedingte Vernässung zu vermeiden.

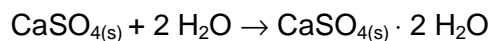
### 2.3. Einsatz und Wirkung von Zuschlagstoffen (Branntkalk / Braunkohlenflugasche)

Um den Prozess der Trocknung zu beschleunigen und zugleich kontrollierter ablaufen zu lassen, können Zuschlagsstoffe eingesetzt werden, die dem Erdstoff durch chemische Prozesse Wasser entziehen. Im technischen Erdbau werden hierzu z.B. Branntkalk oder Flugasche eingesetzt. Beide enthalten zu verschiedenen Anteilen Calciumoxid, das mit Wasser zu Calciumcarbonat reagiert. Im Detail laufen folgende Reaktionen ab:

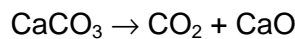
Zur Rauchgasentschwefelung wird Schwefel durch zugemischtes  $\text{CaCO}_{3(s)}$  in Form von Kalk als Anhydrit,  $\text{CaSO}_4$  gebunden:



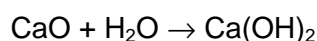
Die Hydratisierung führt zur Umwandlung von Anhydrit zu Gips:



Als Nebenprodukt entsteht Calciumoxid („gebrannter Kalk“):



Durch das Zuführen von Wasser entsteht Calciumhydroxid:



Das Calciumhydroxid reagiert über einen langen Zeitraum mit dem  $\text{CO}_2$  aus der Luft zu  $\text{CaCO}_3$ .

Flugasche hat hinsichtlich des Korngrößenspektrums den Charakter von Sand und enthält ca. 50% CaO. Die Wirkung von Flugasche ist ähnlich wie Branntkalk und bewirkt eine Bodenstabilisierung. In bestimmten Regionen ist Flugasche aufgrund der Ortsnähe zu industriellen Rauchgasreinigungsanlagen ab Werk unentgeltlich erhältlich.

Branntkalk ist feinkörniger und sollte einen CaO-Anteil von 90-95 % haben. Der Lieferzustand bzw. die Lagerart und -dauer sind daher wichtig: durch Überlagerung besteht die Gefahr des Ablöschens. 14 Tage Lagerung im Silo sind Maximum. Sobald Branntkalk teilge-

löscht ist und der CaO-Anteil unter 80 % fällt, ist er für den Gebrauch im Erdbau untauglich. Die Kosten betragen für Branntkalk 50 – 70 €/t, zzgl. ca. 20€ für Transport und Verteilung.

Für die Bodenverbesserung und –verfestigung kommen verschiedene Bindemittel, einschließlich Feinkalke und Kalkhydrate in Betracht. Die Unterscheidung zwischen den einzelnen Baukalen erfolgt dabei nach DIN 1060 anhand des Gehalts an CO<sub>2</sub> in Gew.%. Von Weißfeinkalk zu hochhydraulischem Kalk steigt der Gehalt an CO<sub>2</sub> von 5 % auf 15 %.

Verbrennungsrückstände aus Kohle sind nutzbar in Abhängigkeit von Herkunft der Braunkohle (siehe Bericht der SIG Hessen 2003).

Hinsichtlich der Zugabemenge differiert diese (in % bezogen auf die Trockenmasse des Bodens) zwischen 2% Feinkalk zum Zweck der Bodenverbesserung (Sofortwirkung) und 12% bei hochhydraulischem Kalk bei Bodenverfestigung (Langzeitwirkung). Im Dichtungsbau sollte zur Untermischung von Anteilen von 5% (Flugasche) bzw. 2% (Branntkalk) ein Fräsvorgang ausreichend sein.

Der Kalkgehalt muss für seine Anwendung durchdacht angepasst sein. 1 - 1,5% Zugabe ist Maximum. Sobald der Anteil an CaO zu hoch wird, verbleiben noch reaktionsfähige Reste an CaOH, die eine ungewollte Verfestigung (vollständiger Verlust der Plastizität) herbeiführen können. Wenn im umgebenden Erdstoff ein Mangel an reaktionsfähigem CO<sub>2</sub> besteht, entsteht aufgrund der Reaktion von Ca mit Kieselsäure und Aluminaten *Puzzolan* („Zementstein“). Erwünscht ist dagegen bei ausreichend CO<sub>2</sub>-Zufuhr die Carbonatisierung. Die unerwünschte Verfestigung zu *Puzzolan* ist ein monatelanger Prozess und daher nicht unmittelbar feststellbar. Es gibt Möglichkeiten, das reaktive freie Ca(OH)<sub>2</sub> messtechnisch erfassen zu können (pH-Messung, Indikator Phenolphthalein), der Nachweis im Feld ist mit pH-Papier problemlos möglich.

### **3 Fallbeispiele**

#### **3.1. Oberflächenabdichtung Deponie Zerbst**

Der Bauvertrag sah vor, mittelplastisches Material als mineralische Dichtungsschicht einzusetzen, das auf der trockenen Seite der Proctorkurve eingebaut werden musste. Des Weiteren wurde ein EV<sub>2</sub> auf der Oberfläche von > 25 MN/m<sup>2</sup> gefordert.

##### Material:

Das wirtschaftlich zur Verfügung stehende Material war ein ausgeprägt plastischer Ton mit einem optimalen Wassergehalt in Größenordnung von 24 % und einem natürlichen Wassergehalt zwischen 24 und 29 %. Die Erreichung der Anforderung des Verformungsmoduls EV<sub>2</sub>

> 25 MN/m<sup>2</sup> schien mit diesem ausgeprägt plastischen Ton ebenfalls fraglich. Um die oben gesteckten Anforderungen zu erfüllen, wurden Eignungsprüfungen mit unterschiedlicher Sandzugabe gefahren. Im Ergebnis dieser Eignungsprüfungen stellte sich die 50 %ige Sandzugabe mittels Einfräsen als das wirtschaftlich vertretbare Verfahren, das die Vertragsbedingung erfüllt, heraus. Bei dem Sand handelte es sich um normalen Sand 0/2 "von der Wand".

### Überwachung und Empfehlungen

Der resultierende Wassergehalt des Gemisches lag niedriger als der Mittelwert der Ausgangswassergehalte der beiden Materialien, was vermutlich auch auf die Belüftungswirkung beim Fräseinsatz zurückzuführen ist. Der Kf-Wert des Gemisches war nur geringfügig durchlässiger als der Kf-Wert des reinen Tones, was auf den relativ großen Anteil des Tones im Gemisch zurückzuführen ist. Das Material war an der Oberfläche teilweise so weit heruntergetrocknet, dass es im Einbaufeld teilweise bewässert werden musste. Das dabei beobachtete Schrumpfverhalten an der Oberfläche (Rissebildung) war deutlich günstiger als bei einer reinen Tonoberfläche, die ähnlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt wurde. Der geforderte Verformungsmodul konnte ebenfalls aufgrund der ausgewogenen Ton-Sand-Struktur erreicht werden. Bei der Ausführung ist insbesondere auf eine gute Durchmischung der beiden unterschiedlichen Materialien zu achten. Je nach Wassergehalt und Gefüge der Ausgangsstoffe waren bis zu 5 Fräsübergänge notwendig.

## **3.2. Deponie Haferteich, bei Schleswig**

Bei der Deponie Haferteich handelt es sich um eine Altdeponie, die mit einer Oberflächenabdichtung (12 ha) abgeschlossen werden sollte. Die Einlagerung von Abfällen war bereits Ende der 70er beendet, so dass keine größeren Setzungen mehr zu erwarten waren. Es wurde kein abfallrechtliches, sondern ein wasserrechtliches Genehmigungsverfahren durchgeführt, das die Anforderungen nach TA Si (1993) nur zum Teil umsetzte.

### Dichtungsmaterial und Einbau

Das Dichtungsmaterial stammt aus einem Zwischenlager in Flensburg-Harrislee und lagerte mehrere Jahre in SL-Haferteich. Es ist vom Ursprung Beckenton (40 – 50% Ton) und hat einen höheren Carbonatanteil als nach TAsi zulässig. Der natürliche Wassergehalt betrug 27-29%, mit recht inhomogener Verteilung. Oberhalb der Dichtung wurde eine „Wasserspeicherschicht“ aus 10-15 cm Feinsand angeordnet.

Es wurde Branntkalk (Weißfeinkalk) mit 1% Anteil bezogen auf die feuchte Bodenmasse zugegeben. Das Dichtungsmaterial wurde mit Raupen breit gefahren. Der Branntkalk wurde mit einem landwirtschaftlichen Kalkstreuer aufgebracht und mit einem Bodenstabilisator ca. 30 cm tief eingearbeitet. Die Schütthöhe betrug 0,38 m, die Zielhöhe 0,30 m. Die Verdichtung wurde mit sechs Walzenübergängen mit einer Trapezfußwalze vibrierend ausgeführt („knetende“ Verdichtung). Die Zugabemenge betrug 15-18 kg/m<sup>3</sup> bzw. 5-6 kg/m<sup>2</sup>, was den optimalen Wassergehalt um 2-3% auf die trockene Seite der Proctorkurve brachte.

### Überwachung und Empfehlungen

Die Überwachung fand mit einer Vielzahl von Proctorproben statt: pro 2000 m<sup>2</sup> eine Kurve, um sicherzustellen, dass auf dem trockenem Ast eingebaut ist.

Branntkalkzugabe bewirkt Aggregation. Die Aggregatgröße ist steuerbar, die Zielgröße betrug ca. 25 mm („Pseudosand“). Je höher der Kalkanteil, desto feiner ist die Aggregation. Ein Prozent Branntkalkzugabe setzte den k-Wert bei vorliegendem Material um etwa zwei 10er Potenzen herab.

Ideal ist, wenn das Dichtungsmaterial homogen „trocken“ ist, d.h. ohne Wassergehaltsgradienten innerhalb Aggregate (empfohlen ca. 1500 hPa Wasserspannung). Nachfolgendes Anfeuchten oder Trocknen eines bindigen Erdstoffes führt zu Inhomogenisierung, die die Zugfestigkeit herabsetzt.

Zum Einfluss der Branntkalkzugabe auf die bodenphysikalischen Eigenschaften (Verlauf der Proctorkurve, Aggregatstabilität u.a.) siehe auch JUNGE & HORN (2001).

## **3.3. Deponie Kirschenplantage (Basisdichtung)**

### Dichtungsmaterial und Einbau

Bei dem Dichtungsmaterial handelt es sich um ein Werksgemisch aus je zur Hälfte Ton und Kies-Sand-Gemisch: Dem Ton wurden Kies und etwas Wasser zugegeben, die Miete wurde überdacht gelagert.

### Empfehlungen

Vorteilhaft war, dass ein sehr zügiger Einbau möglich wurde. Durch die homogene Mischung ist die Qualitätssicherung weitgehend sichergestellt. Das Dichtungsplanum ist sehr eben und standfest herstellbar, gering schrumpffempfindlich, ideal z.B. für den Einbau von Asphalt-dichtungen.



### 3.4. Deponie Kuhstedt, Lkr. Rotenburg / Wümme (Testfeld)

(HUPE et al. 2002)

Das Dichtungsmaterial, zu dem keine Angaben zu Wassergehalten vorliegen, musste „getrocknet“ werden.

#### Empfehlungen

Brantkalk als Zuschlagsstoff wurde verworfen, da eine erhebliche Veränderung der Materialkennwerte und –eigenschaften befürchtet wurde.

Das Material wurde mit unterschiedlichen Baumaschinen mehrfach umgelagert. Zeitdruck und nasse Witterungsverhältnisse erschwerten das Vorgehen erheblich. Fräsen unterstützt den Trocknungsprozess deutlich.

Es wird statische Verdichtung mit langsamer Fahrt empfohlen, da bei dynamischer Verdichtung Porenwasser aus dem tonigen Material freigesetzt wurde, was zu vermeiden ist.

### 3.5. Oberflächenabdichtung Deponie Rödelberg

Im Leistungsverzeichnis war vorgegeben, dass das Dichtungsmaterial im eingebauten Zustand eine geringe Rissanfälligkeit aufweisen muss.

#### Material

Der natürliche Wassergehalt des Dichtungsmaterials lag deutlich auf dem nassen Ast der Proctorkurve. Die Empfehlungen aus Laboruntersuchungen bzw. der Fremdüberwachung lauteten daher: Der Einbauwassergehalte soll möglichst bei  $W_{opt}$  bzw. 15-17% liegen. Wenn diese Forderung nicht umsetzbar ist, soll eine Vergütung des Dichtungsmaterials, z.B. durch Zugabe von Tonmehl, erfolgen.

#### Überwachung und Empfehlungen

Es gab während der Eignungsuntersuchungen erhebliche Probleme mit der Akzeptanz des Lößlehms hinsichtlich der Rissanfälligkeit. Daraus resultierten verschiedene Vorschläge zur Abhilfe durch Zuschlagsstoffe:

a) Tonmehl: Die Auswirkung der Zugabe von Tonmehl ( $w = 2-3 \%$ , kaolinitisch) wurde in Stufen von 0, 3, 4, 6% untersucht. Der Tonmehlzusatz führte zwar zu einer geringen Wassergehaltsabnahme. Die Schrumpfgrenze erhöhte sich jedoch erheblich von  $w = 17$  auf 21%.

b) Brantkalk: Brantkalk-Zusatz war von der Fremdüberwachung wegen des dann zu hohen  $\text{CaCO}_3$ -Gehaltes in der Dichtung abgelehnt worden.

Positive Ergebnisse wurden schließlich durch „Liegenlassen“ des Materials erzielt: Der Lößlehm wurde ausgebreitet, in 0,5 m Dicke locker geschüttet und ab Herbst liegengelassen. Über Winter war das Material ohne besondere Schutzmaßnahmen der Witterung und Frost ausgesetzt. Im Frühjahr stellte sich heraus, dass das Material 2 - 4% Wassergehalt abgegeben hatte. Niederschlagswasser hatte ablaufen können (es bestand eine südwestexponierte Hanglage).

Zur Herstellung der Dichtung wurde dann die Hälfte der lockeren Schüttung abgeschoben, einmal gefräst, verdichtet (6 bis 8 Übergänge, dynamisch).

Die von der FÜ geforderten Verdichtungswerte, Einbauwassergehalte und Durchlässigkeiten waren somit ohne Zusätze, sondern allein durch Wasserabgabe in die Atmosphäre erreicht worden. Nachteilig war hierbei allenfalls der Zeitfaktor zu bewerten, der seinerseits erhebliche Kosten im Baubetrieb verursachen kann.

### Kosten

Anhaltswerte hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit für die mögliche Reduktion von Wassergehalten in einem bindigen Material:

- ▶ 1-2%: Trocknung an der Luft allein ausreichend
- ▶ 3-5 %: Trocknung an der Luft möglich, jedoch kostentreibend
- ▶ ab 5 %: Trocknung wirtschaftlich vertretbar nur durch Zuschlagsstoffe

### **3.6. Tabellarische Zusammenstellung der Kennwerte**

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der verfügbaren Kennwerte der Dichtungen bzw. der eingesetzten Erdstoffe bei den vorgestellten Standorten.

	Zerbst	Haferteich	Kirschenplantage	Kuhstedt	Rödelberg
k-Wert, gefordert: erreicht:	< $1 \times 10^{-9}$ m/s < $5 \times 10^{-11}$ m/s	< $5 \times 10^{-9}$ m/s	< $1 \times 10^{-10}$ m/s < $1 \times 10^{-11}$ m/s	< $5 \times 10^{-9}$ m/s	< $1 \times 10^{-9}$ m/s < $1 \times 10^{-10}$ m/s
Verdichtungsgrad $D_{pr}$	> 97 %	95-100% auf dem trockenen Ast	100 – 105 %	> 95%	> 95%
Schichtstärke	2 x 0,25 m	1 x 0,30 m		1 x 0,30 m	2 x 0,25 m

	Zerbst	Haferteich	Kirschenplantage	Kuhstedt	Rödelberg
Material	Ton-Sand-Gemisch (TM) 50 / 50 %	Beckenton (40-50% T); TA	Ton TA (50 %), Kies – Sand 0-8 mm (50 %)	stark toniger Schluff	Lößlehm: 10%T, 85% U, 5%S
Wassergehalt $W_{nat}$	Ton: 24...29 % Sand: 4...6 %	27 – 29%, inhomogen	Einbau bei 2% < $W_{opt}$ bis $W_{opt}$		18,9% + 2,8%
W opt	15,5 %				15,1%
Schrumpfgrenze					15,5%
Carbonat	15 %	< Grenzwert TA Si			< 20 %
Ansprechpartner / Quelle	Dipl.-Ing. Locker, Bad Hersfeld	Dr. Junge, Kiel	Dipl.-Ing. Hütteroth, Immenhausen	HUPE et al. (2002)	Dipl.-Ing. Locker, Bad Hersfeld

Tab. 1 Übersicht von Kennwerten der einzelnen Fallbeispiele

## 4 Feststellungen und Empfehlungen

### Kalkgehalt / -zugabe

Der Kalkgehalt als Anforderung spielt eine immer geringere Rolle als einschränkendes Kriterium für den Einsatz von Erdstoffen in Oberflächenabdichtungen. Insofern ist aus dieser Sicht die Branntkalkzugabe in den genannten Mengen unproblematisch. Sie bewirkt jedoch Veränderungen des bindigen Erdstoffes, die bewertet werden muss:

Es ist davon auszugehen, dass die Plastizität durch CaO-Zugabe eingeschränkt wird. Die Forderung der TASI nach möglichst schadloser Anpassung der mineralischen Oberflächenabdichtung an Setzungen des Abfallkörpers erfordert eine gewisse Plastizität des Dichtungsmaterials. Hier liegt ein Widerspruch zwischen der Forderung nach minimierter Schrumpffähigung und der Fähigkeit zum Anpassen an Setzungen. Da jedoch Siedlungsabfalldeponien seit 1.06.2005 ausschließlich von vorbehandeltem Abfall beschickt werden, sinkt das Ausmaß der Setzungen zukünftig. In jedem Fall ist hierzu eine standortbezogene Beurteilung erforderlich.

### Einbau

Je weniger Feinkorn im mineralischen Dichtungsmaterial enthalten ist, desto geringer ist die einzusetzende Verdichtungsenergie. Die Verdichtungsenergie ist bei 97% auf trockener Seite unwesentlich höher gegenüber nassem Ast. Die Zahl der Walz-Übergänge steigt etwa von 6 auf 8 (einfach), die Mehrkosten sind unwesentlich. Voraussetzung ist, dass das Widerlager einen  $E_{V2}$ -Wert von > ca. 20-25 MN/m<sup>2</sup> aufweist

Eine Reduzierung der Lagenstärke ist für den Einbau auf der trockenen Seite nicht erforderlich. Eine dynamische Verdichtung ist erforderlich.

Das Aufbringen von Branntkalk kann mittels Kalkstreuer erfolgen. Zum Fräsen dienen z.B. Schlepper mit angebauter Fräse (Stützrad hinten wegen Vorverdichtung in den Spuren „ungünstig“), in der Regel wird eine Arbeitstiefe von 30-35 cm erreicht. Es wird empfohlen, die Gerätetechnik bereits in der Ausschreibung zu spezifizieren. Gerätschaften aus dem Dammbau sollten aufgrund ihrer Größe nicht vorrangig gewählt werden, da im Deponiebau eine höhere Wendigkeit erforderlich ist.

Ein Mudhog oder „Schlammschwein“ (stat. Anlage) ist günstig für die Mischung steinhaltiger Böden.

Eine hohe Verdichtungsarbeit ist baupraktisch nur mittels Kompaktor realisierbar, der jedoch für den Deponiebau zu schwerfällig bzw. zu wenig wendig ist. Die in der Regel eingesetzte Technik der vibrierenden, dynamischen Verdichtung mit einer Stampffußwalze mobilisiert Wasser. Dies ist im Sinne des „Horn'schen“ Ansatzes ungünstig.

Fräsen erzeugt eine Stückigkeit von 15 - 30 mm. Die Mehrkosten liegen bei 1 € / m<sup>3</sup> je Fräsdurchgang, Mischkosten mit stat. Anlage bei ca. 5 € / m<sup>3</sup>.

Hinsichtlich des Arbeitsschutzes müssen Vorsichtsmaßnahmen beim Verarbeiten getroffen werden (Haut-, Augen- und Atemschutz). Für Maschinen ist Branntkalk relativ unproblematisch.

#### Anforderung an das Dichtungsmaterial

Nicht jedes Material eignet sich für den Trockeneinbau. Regionale Unterschiede der Materialverfügbarkeit sind maßgeblich und entscheidend für Preisgestaltung. In der Bauausschreibung müssen Anforderungen und Randbedingungen sauber formuliert werden. So wäre z.B. die Forderung „schrumpfarm“ an das bindige Dichtungsmaterial zu unpräzise.

#### Schadstoffgehalt der Zuschlagstoffe

Untersuchungen der SIG Hessen (2003) zeigen, dass das Mischmaterial unter Zuschlag von Filterstaub hinsichtlich des Austrags von umweltrelevanten Inhaltsstoffen, bis auf einen erhöhten Sulfatwert, keine Auffälligkeiten aufweist. Die weiteren Parameter bleiben unterhalb des Zuordnungswerte LAGA Z 1.2. Nach Einschätzung der Verfasser kann die leichte Überschreitung des Sulfatwertes unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in den Aschen im Normalbetrieb mit geringeren Werten gerechnet werden muss und zudem der Einbauort der

Bodenverbesserung eine Überdeckung mit verdichteten Boden gewährleistet, der den Aus-  
trag weiter minimiert, toleriert werden.

Evtl. sollte die oberste Lage der Dichtung wegen des direkten Kontakts zur Dränschicht (und  
damit der Gefahr der Lösung und Verfrachtung von Schadstoffen) aus unbelastetem minera-  
lischen Material hergestellt werden.

## 5 Fazit

Dieser Beitrag sollte zeigen, dass der Trockeneinbau, d.h. der Einbau von BMD auf dem  
trockenen Ast der Proctorkurve, mit bestimmten Zuschlagsstoffen oder Einbautechniken  
praktikabel ist. Eventuelle Mehrkosten des reinen Einbauprozesses sind unerheblich. Kos-  
tenbestimmend sind eher die Materialverfügbarkeit und –eigenschaften oder Zuschlagstoffe  
oder die Bauzeitverlängerung durch Trocknung oder Mischung. Nicht jedes Material ist für  
den Trockeneinbau geeignet, insofern bleibt die optimale Verarbeitung eines Erdstoffes der  
Eignungsprüfung und den Empfehlungen der Fremdüberwachung vorbehalten.

## 6 Literatur

BAUER, B., H. TAUBNER & R. TIPPKÖTTER (2001): Messung der mechanischen und hydrau-  
lischen Verdichtungsempfindlichkeit von bindigen Substraten mit einem verbesserten Proc-  
torversuch. Wasser & Boden 53, 27 – 30.

JUNGE, T. & R. HORN (2001): Branntkalk zur Trocknung von Substraten für den Bau von De-  
ponieabdichtungen – Möglichkeiten und Probleme. Wasser & Boden 53, 4-6.

HORN, R. (2001): Verbesserung der Langzeitbeständigkeit durch modifizierte mineralische  
Abdichtungssysteme. In: LANU Schleswig-Holstein, 12. Abfalltagung, Nov. 2001 in Neumünster.  
Vortragsmanuskript, 12 S.

HORN, R. & T. JUNGE (2002): Wege zur langfristig sicheren Abdichtung von Mülldeponien mit  
mineralischen Dichtschichten. In: EGLOFFSTEIN / BURKHARDT / CZURDA (Hrsg.) (2002): Ober-  
flächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in Forschung und Pra-  
xis Bd. 125, Erich-Schmidt-Verlag. S. 167 – 182.

HUPE, K., K.-U. HEYER, A. UNGER & R. STEGMANN (2002): Versuchsfelder auf der Altdeponie  
Kuhstedt für standortangepasste Oberflächenabdichtungssysteme. In: RAMKE et al. (2002)  
(Hrsg.): Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-  
Oberflächenabdichtungssystemen. Status-Workshop, Höxter. Höxteraner Berichte zu ange-  
wandten Umweltwissenschaften, Band 3. FH Lippe und Höxter. S. 177-183.

MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Univ. Hamburg. Hamb. Bodenkundl. Arb. 22, 330 S. + Anhang.

RAMKE, H.-G., S. MELCHIOR, U. MAIER-HARTH, E. GARTUNG, K.-J. WITT, G. HEIBROCK & K. BOHNE (2002a): Ergebnisse des Status-Workshops „Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“. In: EGLOFFSTEIN / BURKHARDT / CZURDA (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 125, Erich-Schmidt-Verlag. S. 115–266.

RAMKE, H.-G., E. GARTUNG, G. HEIBROCK, W. LÜKEWILLE, S. MELCHIOR, B. VIELHABER, K. BOHNE, U. MAIER-HARTH & K.-J. WITT (Hrsg.) (2002b): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Tagungsband zum Status-Workshop. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften. Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter, Band 03 (Nov. 2002), ISBN 3-9807985-2-6.

SIG Hessen (2003): Alternatives Bodenverbesserungsmaterial zur Verwendung im Lärmschutzwall. Eignungsprüfung. Bericht der Dr.-Ing. Steffen Ingenieurgesellschaft in Hessen. Unveröffentlicht. 6 S.

### Regelwerke

TA Abfall (1991): Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, 12. März 1991 (GMBl. S. 139, ber. S. 469).

TA Siedlungsabfall (1993): Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, 14. Mai 1993 (BAnz. Nr. 99a).

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV vom 10.07.2002)

Dr. Beate Vielhaber  
Zweckverband Abfallwirtschaft  
Region Hannover  
Karl-Wiechert-Allee 60 c  
30625 Hannover  
Email: [beate.vielhaber@aha-region.de](mailto:beate.vielhaber@aha-region.de)

Dipl.-Ing. Jens Locker  
HERMANN KIRCHNER  
Bauunternehmung  
Hermann-Kirchner-Straße 6  
36251 Bad Hersfeld  
Email: [jens.locker@kirchner.de](mailto:jens.locker@kirchner.de)

Dipl.-Ing. Dirk Hütteroth  
SIG - HESSEN INGENIEURE  
Prof. Steffen, Hütteroth & Schröder GmbH  
Ziegeleiweg 2  
34376 Immenhausen  
Email: [dirk-huetteroth@sig-hessen.de](mailto:dirk-huetteroth@sig-hessen.de)

Dr. Torsten Junge, Kiel  
Email: [t\\_junge@freenet.de](mailto:t_junge@freenet.de)

Dr. habil. Stefan Melchior  
melchior + wittpohl  
Ingenieurgesellschaft  
Karolinenstraße 6  
20357 Hamburg  
Email: [melchior@mplusw.de](mailto:melchior@mplusw.de)