

# Tonschlacken als Mineralische Abdichtung

Wolfgang Oltmanns<sup>1)</sup>, Matthias Rosenberg<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> PROF. RODATZ UND PARTNER, Braunschweig

<sup>2)</sup> INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK, TU Braunschweig

## Clay slags as mineral sealing

### Abstract

Based on the knowledge and in the tradition about Bentokies sealing, a new mineral assembly was developed, extensively proved, and utilized. The new material, called clay slags, is used as a system of surface sealing for waste disposals. Clay slags consist of slags which are produced by the steel industry and are improved with clay flour and bentonite. The assembly is produced in field factories and conventionally installed. Clay slags are characterized by very good, almost weather-independent applicableness, very high firmness and stability. The new material features very weak permeability robustness against climatic influences and economics.

### Zusammenfassung

Als mineralische Komponente im Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie wurde in der Tradition von Bentokies-Abdichtungen der neue Dichtungsbaustoff Tonschlacken entwickelt, umfänglich nachgewiesen und eingesetzt. Tonschlacken sind mit Tonmehl und Bentonit vergütete Schlacken der Stahlindustrie, werden feldfabrikmäßig produziert und konventionell eingebaut. Tonschlacken zeichnen sich durch sehr gute, nahezu witterungsunabhängige Einbaubarkeit, sehr schwache Durchlässigkeit, sehr hohe Festigkeit/Standicherheit, Robustheit gegen Witterungseinflüsse und Wirtschaftlichkeit aus.

### Schlüsselworte

Oberflächenabdichtung, Tonschlacken, Schlacken, Tonmehl, Bentonit, Gleichwertigkeitsnachweis, Qualitätssicherung, Witterungsbeständigkeit

### Keywords

surface sealing, clay slags, slags, clay flour, bentonit, equality certificate, quality assurance, weather stability

## 1 Veranlassung

Nach Abwägung verschiedenster Vorgehensweisen wurde die Oberflächenabdeckung heterogener, teils thixotroper und generell gering tragfähiger Substrate (Steifigkeit  $E^* \approx 0,5 \text{ MN/m}^2$ , Festigkeit  $c_u^* \approx 5 - 40 \text{ kN/m}^2$ ) in Erdbecken in Anlehnung an das sog. 'Regelsystem' der TA Abfall als bestmögliche Sicherung einer Deponie beschlossen. Das Sicherungs- und Monitoringkonzept wurde nach intensiver Erörterung in einer Projektgruppe mit Vertretern der Genehmigungs- und Fachbehörden sowie des Betreibers und Planers und diversen Fachgutachtern erarbeitet. Beteiligt waren PROF. RODATZ

UND PARTNER zusammen mit dem INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK bei der Material- und Verfahrensentwicklung von Tonschlacken.

Die erforderlichen Eigenschaften der mineralischen Komponente als temporäre Abdeckung und in dem Kombinationsdichtungssystem sind im Wesentlichen:

- Einbaubarkeit/Verdichtbarkeit auf dem sensitiven Untergrund
- Festigkeit/Steifigkeit als Tragwerkskomponente bei der geplanten Profilierung
- Duktilität bei absehbaren Verformungen
- Witterungsbeständigkeit und Rissesicherheit (auch im Bauzustand)
- Robustheit gegen geometrische und/oder bautechnische Imperfektionen
- Prüfbarkeit als qualifizierter Dichtungsbaustoff
- Zuverlässigkeit als langfristige Flächenabdichtung
- Verträglichkeit am Deponiestandort in bau- u. ökochemischer Hinsicht
- Wirtschaftlichkeit (Herstellung/Gewinnung, Einbau, Kontrolle/Wartung)

Aufgrund labortechnischer Untersuchungen, Wirtschaftlichkeits- und Rechtsprüfungen sowie Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Oberflächenabdichtungssystems sind konventionelle Tondichtungen, vergütete organogene Materialien, Geokunststoffe, Kapillarsperren und geringmächtige 'Kunstaböden' verworfen worden. Entwickelt wurde deshalb der neue Dichtungsbaustoff 'Tonschlacken'.

Mit Ton vergütete Böden hatten sich bereits im Wasserbau bewährt, als Mitte der 80iger Jahre regional mangels gewinnbarer Tonvorkommen mit Tonmehl und Bentonit vergütete Kiese ('Bentokies') im Deponiebau eingesetzt wurden. Aufbauend darauf wurden projektspezifisch gemischtkörnige Reststoffe recherchiert, die nach technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien den vorbeschriebenen Anforderungen genügen.

Im Zuge der Recherchen wurden ab 2001 u. a. Stahlwerk- und Hochofenschlacken (LDS und AHS) als Reststoffe der Stahlproduktion geo- und verfahrenstechnisch sowie analytisch untersucht. Die Schlacken werden von der Fa. ERICH FRIEDRICH, Salzgitte (EF) als zertifizierter Baustoff, u. a. für den Verkehrswegebau, vermarktet. Die Verfügbarkeit und Lieferkapazität ist (deponiebaupraktisch) unbegrenzt.

Im Folgenden werden die Entwicklungsschritte von der theoretischen Produktidee über labortechnische Untersuchungen und Optimierung der Rezeptur sowie die verfahrenstechnische Optimierung im Versuchsfeld (0,3 ha im Winter 2002/3) bis zum Einsatz im Baufeld (3,0 ha im Sommer 2003) skizziert. Der Nachweis der Gleichwertigkeit - richti-

ger: Besserwertigkeit - zur 'Regelabdichtung', die Methoden und Ergebnisse umfangreicher Eigen- und Fremdprüfungen sowie Nachuntersuchungen der Tonschlacken über bisher fünf Jahre werden erläutert.

## 2 Tonschlackenproduktion

### 2.1 Komponenten

Als Grundkomponente für Tonschlacken wurden Schlacken der Körnung 0/16 verwendet, die durch die folgenden Korngrößenanteilklassen charakterisiert sind:

Ø < 0,06 mm	(Schluff-/Tonfraktion)	5 ± 3 %
Ø 0,06 - 2 mm	(Sandfraktion)	45 ± 10 %
Ø 0,2 - 16 mm	(Kiesfraktion)	45 ± 10 %
Ø 16 - 32 mm	(Überkorn)	< 5 %

Die Kornverteilung wurde n. DIN 18 123-5 je 500 m<sup>3</sup> Schlackeneinsatz während der Tonschlackenproduktion kontrolliert.

Der Wassergehalt wurde n. DIN 18 121 je 500 m<sup>3</sup> Schlackeneinsatz überwacht. Im Produktionsprozess wurde der Einbauwassergehalt mit Leitungswasserzugabe eingestellt.

Die Analytik der Schlacken gewährleistete die bau- und ökochemische Verträglichkeit am Standort. Nach den aktuellen Zulässigkeitskriterien der Deponieverwertungsverordnung (DepVerwV, 2008) für den Einsatz von Deponieersatzbaustoffen in der Abdichtungskomponente von Oberflächenabdichtungssystemen werden die Schlacken der Spalte 4, Tab. 2 im Anhang 3 der DepVerwV zugeordnet.

Tonmehl der Fa. STEPHAN SCHMIDT, Langenernbach und Bentonit der SÜDCHEMIE, München sind werkmäßig aufbereitete Standardprodukte der Bauindustrie und werden - baupraxisüblich - qualitätsgesichert in Silofahrzeugen zugeliefert.

### 2.2 Verfahrenstechnik

Theoretisch Erfolg versprechende Rezepturen wurden zunächst labortechnisch mit Ton- und Bentonitanteilen zwischen 5 und 30 % bzgl. der Herstellbarkeit, Homogenität, Durchlässigkeit und Festigkeit untersucht. Die danach projektspezifisch favorisierte Rezeptur wurde detailliert bezüglich der Sensibilität bei variierenden Komponenten geprüft und für das Versuchsfeld großtechnisch in einem stationären Chargenmischer mit händischer Dokumentation der Komponentenzugabe realisiert.

Das geprüfte Produktionsergebnis erfüllte die materialtechnischen Vorgaben; die Produktionsleistung und die Methodik der Dokumentation waren jedoch noch unbefriedi-

gend. Die Tonschlacken für das Baufeld wurden deshalb in einer mobilen Mischanlage kontinuierlich produziert und nach Massenanteilen mit kalibrierten Messeinrichtungen erfasst und dokumentiert. Die Feldfabrik mit Materiallager (Schlackenhalde, Tonsilos) war auf dem Betriebsgelände der Firma ERICH FRIEDRICH stationiert (Abbildung 1).

Nach verfahrenstechnischer Einstellung der Mischanlage (Abbildung 1) wurden 2003 in drei Wochen 13.000 t Tonschlacken produziert. Die Toleranz der Rezeptur war auf Grundlage der umfangreichen Voruntersuchungen festgelegt für Schlacken  $m_S \pm 3 \%$  Trockenmasse, Tonmehl  $m_T \pm 2 \%$  und Bentonit  $m_B \pm 1 \%$ .

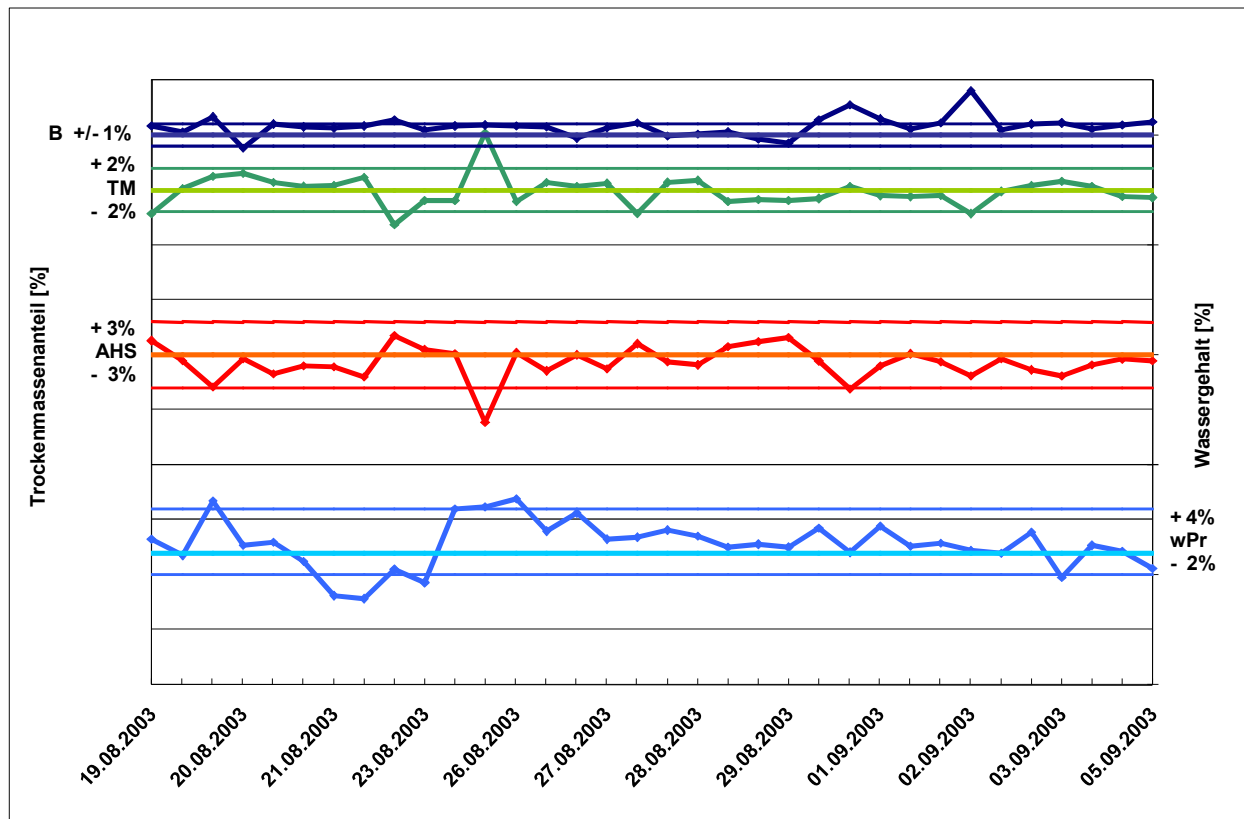
Nachgewiesen sind bei der gewählten Rezeptur Varianzen für Schlacken  $m_S \pm 5 \%$ , Tonmehl  $m_T \pm 3 \%$  und Bentonit  $m_B \pm 2 \%$ . Der planmäßige Einbauwassergehalt betrug  $w_{ETS} = w_{Pr}$  bis  $w_{ETS} = w_{Pr} + 2 \%$  mit Toleranzen  $\min. w_{ETS} = w_{Pr} - 2 \%$  und  $\max. w_{ETS} = w_{Pr} + 4 \%$ . Die Homogenität des Mischgutes wurde durch Eigen- und Fremdprüfungen organoleptisch und aufgrund des Wassergehaltes mit  $\max. \Delta w = \pm 4 \%$  der Einzelprobe vom Mittel einer Serie von drei Teilproben überwacht.

Das dokumentierte und geprüfte Produktionsergebnis (Abbildung 2)) weist Tonschlacken als sehr homogenen - und entsprechend prüfbar (s. u.) - Dichtungsbaustoff aus.

Das einbaufertige Mischgut wurde nach Prüfung im Zwischenlager - generell binnen eines Tages - mit Lkw 'just in time' an den Einbauort auf der Deponie transportiert. Ausnahmsweise längere Verweilzeiten im Zwischenlager waren unerheblich bezüglich der Verarbeitbarkeit und Dichte/Durchlässigkeit der Tonschlacken.



**Abbildung 1** Feldfabrik für die Produktion von Tonschlacken



**Abbildung 2** Dokumentation der Tonschlackenproduktion

Das Versuchsfeld nach den einschlägigen Regularien, insbesondere der GDA-E 3-5: 'Versuchsfelder für mineralische Abdichtungsschichten', teils mehrlagig mit Schichten bis  $D = 3 \times 25$  cm wurde im nasskalten Winter 2002/3 realisiert. Nach den (dennoch) positiven Ergebnissen wurden im heißen Sommer 2003 auf 3 ha Tonschlacken als temporäre Abdichtung  $D \geq 20$  cm eingebaut. Die höhenrichtige Verteilung (mit marginalem Vorhaltemaß von 1 - 2 cm) und die Verdichtung des locker-krümeligen Mischgutes war bei trockener und heißer sowie bei regnerischer und frostiger Witterung mit konventionellen Erdbaugeräten sehr gut realisierbar. Die Einbauleistung mit Raupe, Bagger und Walze betrug bis 1.000 t/AT. Ausformungen für Gräben, Wälle und Umbauungen von Brunnen, Pegeln etc. konnten komfortabel mit Großgeräten ohne Qualitätsverlust bearbeitet werden. Das verdichtete Planum war mit Geräten schadlos befahrbar. Durch Frost, Regen und Hitze nahm die Tonschlacke keinen Schaden.

Für die erforderliche zuverlässige Wasserableitung auf den planmäßig gering geneigten Flächen wurden Walzkanten bis max.  $\Delta \approx 2$  cm und Wellen mit min. Neigung  $\approx 1$  % toleriert. Die mittels Glattmantelwalze bearbeitete Oberfläche der Tonschlacken ist nach fachgutachtlicher Beurteilung ohne Weiteres als KDB-Auflager geeignet.

Bedingt auch durch die Homogenität des Dichtungsbaustoffes konnte die Verdichtung der Tonschlacken gem. FGSV 547 'Flächendeckende dynamische Verdichtungsprüfung' gesteuert, dokumentiert und gezielt geprüft werden.

Die Tonschlacken wurden mit 1 - 3 Übergängen mit einer 8 t -Walze auf  $D_{Pr} \geq 95 \%$  verdichtet. Auf tragfähigerem Untergrund sind materialbedingt leicht höhere Verdichtungsgrade erzielbar. Das Ergebnis der Verdichtungskontrolle bzgl. der Moduln  $E_{Vib}$  des walzenintegrierten Verfahrens je  $100 \text{ m}^2$  klassiert mit  $\Delta E_{Vib} = 5 \text{ MN/m}^2$  zeigt Abbildung 3. Zusätzlich wurden im Rahmen der Eigen- u. Fremdprüfung konventionell u. a. Schürfe hergestellt und beprobt (s. Abschnitt 3: Tonschlackenparameter).

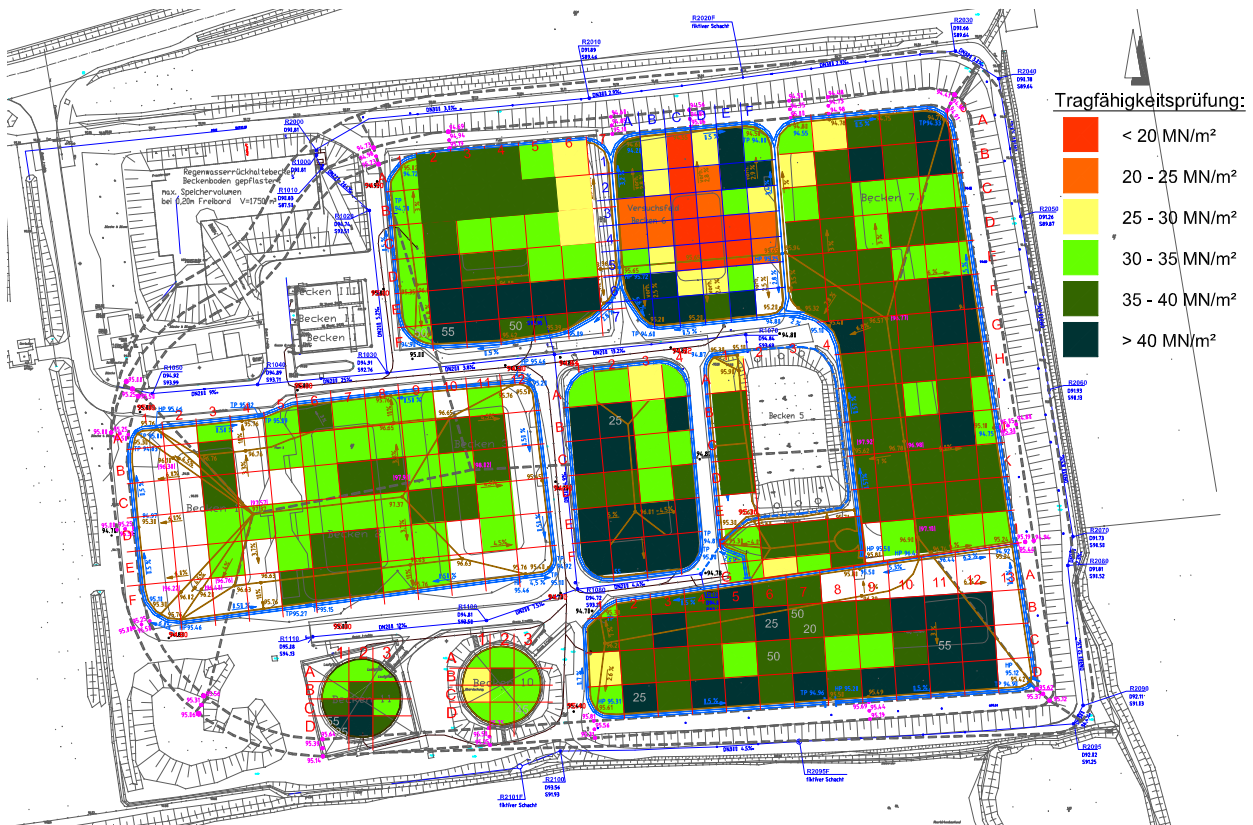


Abbildung 3 Ergebnis der (quantitativen) flächendeckenden Verdichtungsprüfung

### 3 Tonschlackenparameter

#### 3.1 Prüfstrategie

Die Strategie zur Prüfung der Parameter folgte der Empfehlung GDA E 5-8 'Qualitätslenkung und statistische Prüfkriterien'. Die Methodik der Qualitätsbewertung ist in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen Erdbauarbeiten (ZTVE-Stb 94, Abschn. 14) ausführlich erläutert. Die Prüfstrategie wurde in einem projektspezifischen Qualitätsmanagementplan festgelegt. Die Prüfmethode, der bauzeitliche Prüfumfang und die Organisation orientierten sich an denen für konventionelle Tonabdichtungen. Zusätzlich wurde die eingebaute Tonschlackenabdichtung über bisher fünf Jahre mit Blick auf deren Beständigkeit nachuntersucht.



### 3.2 Verdichtung

Die walzenintegrierte Messung steuerte die Verdichtungsarbeit und lieferte qualitative Verdichtungsergebnisse (Zielgröße  $E_{Vib} \geq 25 \text{ MN/m}^2$ ) sowie Hinweise auf bevorzugte Prüflokationen. Bei der Direkten Dichteermittlung wurde die geforderte Dichte  $\rho_d \geq \rho_{d, 95}$  i. M. nachgewiesen. Die 5 % - Fraktile betrug jedoch  $\rho_d < \rho_{d, 95}$  mit Qualitätszahlen  $Q = 0,5$  bzw.  $0,6$  (E-/F-Prüfung). Diese Qualitäten sind kleiner als nach ZTVE-Stb 94 gefordert ( $Q \geq 0,88$  resp.  $Z > 80 \%$ ) oder n. GDA empfohlen ( $Q \geq 1,65$  resp.  $Z > 95 \%$ ). Ursächlich dafür waren die gezielten Beprobungen und die Störung/Auflockerung der Proben bei der Probennahme mittels Stechzylinder. Ermittelt wurden damit untere Grenzwerte der tatsächlichen Verdichtung. Unbeschadet dessen wurde die geforderte Dichtigkeit (s. Abschnitt 3.4) nachgewiesen. Auch unter Würdigung der organoleptisch festgestellten kompakten Struktur der Tonschlacken und der realisierbaren Verdichtungsarbeit über vg. Substraten waren die Ergebnisse akzeptabel.

### 3.3 Schichtdicke

Die planmäßige Einbauschichtdicke betrug bei der temporären Abdeckung  $D \geq 20 \text{ cm}$  im verdichteten Zustand und wurde nachgewiesen mit  $D = 23,2 \text{ cm}$  i. M. mit 5 % Fraktile  $D_{95} = 20,6 \text{ cm}$ . Im Weiteren werden Dicken  $D_{95} \geq 20,0 \text{ cm}$  (Schütthöhe  $D \leq 25 \text{ cm}$ ) mit der Qualität  $Q \geq 1,65$  ( $Z \geq 95 \%$ ) vorgesehen.

Der mehrlagige Einbau war bautechnisch ohne Einschränkungen problemlos möglich. Der Lagenverbund wurde in Schürfen begutachtet. Dabei wurden keine Fugen zwischen den Einbaulagen festgestellt. Der Lagenverbund war einwandfrei.

### 3.4 Durchlässigkeit

Die Beprobung der verdichtet eingebauten Tonschlacken mit dem bei Tondichtungen gängigen Verfahren mit Stechzylindern ( $D = 96 \text{ mm}$ ,  $H = 120 \text{ mm}$ ) in Anlehnung an DIN 18 125, T. 2 für Korn- $\emptyset > 2 \text{ mm}$  max. 10 % bzw. DIN 4021 (Korn- $\emptyset$  max. 5 mm (Feinkies)) für Sonderprobennahmen war prüftechnisch grenzwertig.

Die an diesen Proben der eingebauten Tonschlacken ermittelbaren Parameter repräsentieren den ungünstigen Grenzfall niedriger Steifigkeit/Festigkeit und Dichte und hoher Durchlässigkeit. Parallel zu den Prüfungen an Stechzylinder-Proben wurden deshalb im Rahmen der Materialentwicklung Laborprüfungen an Proben mit authentischem Material bei äquivalenter Dichte durchgeführt (s. a. GDA-E 5 - 2 'Qualitätsüberwachung bei mineralischen Oberflächen- und Basisabdichtungen'). Die Durchlässigkeit wurde im Triaxialversuch DIN 18 130 - 1 TX- DE-ST-SB-2 ( $i = 30$ ,  $\Delta p = 0,2 \text{ bar}$ ) und im Stechzylinder DIN 18 130 - 1 ZY-DE-ST-2 ( $i = 30$ ) ermittelt.

Die statistischen Parameter der Durchlässigkeit  $k_{10}$  sind:

	N [1]	Mittel [ $10^{-10}$ m/s]	5 % - Fraktil [ $10^{-10}$ m/s]
E-Laborproben	28	1,3	4,8
E-Feldproben	28	7,6	11
F-Laborproben	20	1,8	4,6
F-Feldproben	24	1,3	3,0

Die Dichtigkeit von Tonschlacken wurde bezüglich der Zuverlässigkeit  $Z > 95$  % resp. der erforderlichen Qualitätszahl  $Q \geq 1,65$  im Spiegel des 'Regelsystems' geprüft.

	Q [1]
E-Laborproben	1,8
E-Feldproben	- 1,1
F-Laborproben	1,9
F-Feldproben	3,5

Die Auswertungen zeigen nahezu identische Durchlässigkeiten der EÜ-Laborproben und F-Labor- und F-Feldproben. Signifikant verschieden sind jedoch die E-Feldproben. Die Art und die Termine der Probennahmen sowie die Festlegung der Prüfstellen bei E- und F-Prüfungen waren ähnlich. Der Unterschied ist darin begründet, dass die Proben bei E-Prüfungen direkt und ohne Probenvorbereitung - s. DIN 18 130, Abschn. 6.4 - aus bzw. in dem Stechzylinder in die Versuchseinrichtung eingebaut bzw. geprüft wurden. Dieses Prozedere ist für gemischtkörnige offensichtlich Abdichtungen wenig geeignet und wird im Weiteren nicht favorisiert.

Trotz schwieriger Einbaubedingungen und grenzwertiger Probennahmen zeigten die E- und F-Proben  $Q \geq 1,65$  bezüglich  $k_{10} \leq 5,0 \cdot 10^{-10}$  m/s ('Regelsystem'). Der Forderwert  $k \leq 5,0 \cdot 10^{-10}$  m/s der DepV für mineralische Abdichtungen ist nachgewiesen.

Zusätzlich zu den vorbeschriebenen Untersuchungen wurden Infiltrimeter zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Feldversuch getestet. Zum Einsatz kamen ein auf die Flächenabdichtung zerstörungsfrei aufgesetztes Haubeninfiltrimeter der Fa. UGT, Berlin und ein flach in die Flächenabdichtung eingegrabenes Standrohrinfiltrimeter (E DIN 18 130-2) des LBEG, Hannover. Die Versuchstechnik der Infiltrimeter (Umläufigkeit, Verdunstung, Versuchsdauer) und die Interpretation resp. projektspezifische Korrelation der Feldmethoden (3D) bei teilgesättigten Schichten begrenzter Mächtigkeit an Laborversuchen (1D) zur Durchlässigkeit  $k_{10}$  bei  $i = 30$  erscheint danach entwicklungsfähig. Weitere Untersuchungen dazu sind initiiert; Details und Ergebnisse werden beizeiten veröffentlicht.



### 3.5 Festigkeit, Steifigkeit und Verformbarkeit

Der Reibungswinkel  $\varphi'$  und die Kohäsion  $c'$  nach Direkten Scherversuche n. DIN 18 137 betragen

Reibungswinkel  $\varphi_k' = 45^\circ$

Kohäsion  $c_k' = 50 \text{ kN/m}^2$

Die Steifigkeit (E-Modul) nach Einaxialen Druckversuchen n. DIN 18 136 beträgt

Steifigkeit  $E_k = 20 \text{ MN/m}^2$

Bei dem rechnerischen Nachweis der Verformbarkeit gem. GDA E 2-13 werden Verformungseinwirkungen und -widerstände der Abdichtung verglichen; erdstatisch wird die Öffnung von Rissen geprüft, wobei lokale Scherzonen akzeptabel und offene Risse nicht tolerabel sind. Die Auflast erf.  $\sigma_0$  ( $\eta = 1,0$ ) zur Überdrückung von Zugspannungen ist beschrieben mit

$$\text{erf. } \sigma_0 > 2 \cdot c_k' \cdot \tan(45^\circ + \varphi_k'/2)$$

Danach müsste die Auflastspannung erf.  $\sigma_0 > 240 \text{ kN/m}^2 \gg$  vorh.  $\sigma_0$  betragen. Bei einer konventionellen Tondichtung mit  $\varphi_k' \approx 25^\circ$  und  $c_k' \approx 20 \text{ kN/m}^2$  müsste danach die Auflastspannung erf.  $\sigma_0 > 60 \text{ kN/m}^2$  resp. die Überbauung mind. 3 m betragen!

Die erforderliche Kohäsion erf.  $c'$ , die eine verformungsinduzierte Biegezugbeanspruchung mit Scherzonenbildung zulässt, soll nach GDA E 2-13 ermittelt werden mit

$\gamma$  Wichte des Abdichtungsmaterials

$d$  Dicke der Abdichtungsschicht

$\sigma_0$  Überlagerungsspannung

$q_z$  Einaxiale Zugfestigkeit

RE Steifigkeitsverhältnis (Druck/Zug)

$F_{1,2}$  Faktoren [GDA E 2-13, Bild 2-13.3]

$$\text{erf. } c' = (1/2 \cdot \gamma \cdot D + \sigma_0) \cdot F_1 - \sigma_0 (1/3 + 1/12 \cdot \text{RE}) \cdot F_2 + q_z (2/3 - 1/12 \cdot \text{RE}) \cdot F_2$$

Ist vorh.  $c_k' < \text{erf. } c'$  werden Scherzonen und ist vorh.  $c_k' > \text{erf. } c'$  Zugrisse erwartet. Bei einer Auflastspannung  $\sigma_0 = 18 \text{ kN/m}^2$  beträgt danach die Kohäsion erf.  $c' \approx -5 \text{ kN/m}^2$  für Tonschlacken - und zum Vergleich für eine konventionelle Ton (s. o.) erf.  $c' \approx 0 \text{ kN/m}^2$ .

Der Nachweis der zul. Scherzonenbildung (Rissefreiheit) kann für eine kohäsive mineralische Abdichtung über den rechnerischen Spannungsnachweis nicht geführt werden.

Sofern die Spannungsuntersuchung die Rissefreiheit nicht nachweist, soll nach GDA E 2-13 der Nachweis der maßgebenden Verformungseinwirkung in Bezug zu dem Verformungskennwert des Materials (Zugdehnung  $\varepsilon_{zq} > 2,0 \cdot \varepsilon_{RF}$ ) geführt werden.

Die max. Dehnungen  $\varepsilon_{RF}$  (und Längungen  $\varepsilon_{\Delta l}$  der KDB) betragen nach GDA E 2-13 mit

D Schichtstärke der mineralischen Abdichtung

max.  $\kappa$  Krümmungsmaximum (= max.  $w''(x) = 1/R$ )

R Krümmungsradius

$$\varepsilon_{RF} = 2/3 \cdot D \cdot \max. \kappa + \varepsilon_{\Delta l}$$

$$\varepsilon_{\Delta l}(x) = [w'(x) / \sin(\arctan w'(x))] - 1$$

Die GDA E 2-16 sieht eine Handlungserfordernis bei einer Dehnung  $\varepsilon \geq 0,2 \%$  (im Gebrauchszustand ohne Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten).

Anhand der projektspezifisch bei Probelastungen ermittelten Setzungen resp. Deformationen wurde die max. Randfaserzugdehnung  $\varepsilon_{RF}$  für die Tonschlacken numerisch ermittelt. Entsprechend DIN 1054 wurden Einwirkungen mit der Teilsicherheit  $\gamma_G = 1,35$  und Widerstände mit  $\gamma_{EP} = 1,40$  eingeführt. Die max. Dehnungen der Abdichtung betragen  $\varepsilon_{RF} < 0,3 \%$  und die aufnehmbaren max. Zugspannungen  $\sigma_h = 30 \text{ ./. } 40 \text{ kN/m}^2$ . Im planmäßigen Gebrauchszustand - analog zur GDA E 2-16 - betragen die maximalen Dehnungen  $\varepsilon \ll 0,1 \%$ . Die Verträglichkeit von Deformationen ist nachgewiesen.

## 4 Gleichwertigkeitsnachweis

Auf der Grundlage der (hier skizzierten) ausführlichen und teilweise mehrjährigen Untersuchungen konnte die Eignung der Tonschlacken für das endgültige Oberflächenabdichtungssystem nach den Kriterien der 'Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen', der 'Eignungsbeurteilung von unter Verwendung von Abfällen hergestellten mineralischen Deponieoberflächenabdichtung' sowie der 'Deponieverwertungsverordnung' nachgewiesen werden.

Behandelt wurden dabei u. a. die Dichtigkeit von Anschlüssen und Durchdringungen, Auswirkungen von Fehlstellen und Imperfektionen, Verformbarkeit, Scherfestigkeit in Schichtgrenzen, hydraulische Widerstandsfähigkeit, Wassergehaltscharakteristik, Toxizität, Bioverfügbarkeit etc. pp. (s. a. Abschnitt 3).

Aufgrund der werkmäßigen Herstellung, robusten Bauweise mit praxisbewährten Erdbaugeräten, sehr schwachen Durchlässigkeit und der Qualitätskontrolle bei der Produktion und Herstellung konnte die Dicke der mineralischen Abdichtung mit  $D = 2 \cdot 20 \text{ cm}$  gewählt werden. Der bewährte zweilagige Einbau wurde, obgleich bautechnisch bei Tonschlacken nicht zwingend, beibehalten.

Nach vgl. Grundsätzen für den Nachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen ist eine mineralische Abdichtung u. a. dann gleichwertig zu dem sogenannten 'Regelsystem' mit  $D = 50 \text{ cm}$  und  $k \leq 5,0 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ , wenn in der späten Nachbetriebsphase nach Ausfall der Kunststoffdichtung bei Oberflächenabdichtungen mit einer Neigung  $N \leq 10 \%$  die Durchsickerung  $q \leq 8,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  bei Aufstauhöhen von 30 cm beträgt.

Die Eignungsbeurteilung von unter Verwendung von Abfällen hergestellten Deponieabdichtungen lässt diese Permeationsrate zu bei rechnerischem Nachweis unter Verwendung nachgewiesener charakteristischer Materialkennwerte  $k_k$  und Faktoren zur Berücksichtigung langzeitiger Veränderungen  $A_{1,n}$  und Streuungen beim Einbau  $A_2$  sowie mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m$ , mithin für die Durchlässigkeit  $k$

$$\text{cal } k = A_i \cdot k_k \cdot \gamma_m$$

hier	$A_{1,i} = 2,0$	potenzielle Änderung geringanteiliger, aktivierter Bentonite
	$A_2 = 1,0$	keine Streuungen wg. werkmäßiger, kontrollierter Produktion
	$\gamma_m = 1,0$	wg. der Qualitätssicherung mit Feld- und Laborversuchen

Zur Gewährleistung der zulässigen maximalen Permeation wird die Durchlässigkeit der mineralischen Abdichtung bei  $D = 2 \cdot 20 \text{ cm}$  festgelegt mit

$$k_k \leq 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

Die Durchlässigkeit  $k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  im 'Regelsystem' und hier für  $k_k \leq 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  ist für Tonschlacken mit  $k = 1,3 \text{ ./. } 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  (i. M.) nachgewiesen. Infolge der gering tragfähigen Unterlage und der bisher vergleichsweise gering möglichen Verdichtung  $D_{Pr} \geq 95 \%$  war das Ziel  $k_k \leq 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  mit  $k_k \leq 3,0 \text{ ./. } 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  (5 % - Fraktile) mit Feldproben noch nicht erreicht. Die vorlaufenden labortechnischen Eignungsprüfungen, u. a. mit  $D_{Pr} \geq 97 \%$ , und die nachlaufenden Feldbeprobungen zeigten Durchlässigkeiten  $k_{10} \approx 1 \text{ ./. } 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ . Mit dem auf tragfähigerer Unterlage möglichem Einbau  $D_{Pr} \geq 97 \%$  für die sehr gut verdichtbaren Tonschlacken ist  $k_k \leq 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  zuverlässig erreichbar. Der konkrete Nachweis wird praxisüblich im Versuchsfeld vor Beginn der Bauausführung erbracht.

## 5 Zusammenfassung

Für die zunächst temporäre Oberflächenabdichtung und spätere Profilierung mit kombinierter Abdichtung sowie Trag-/Ausgleichsschicht über säulenstabilisierten Deponaten sind nach labortechnischen Eignungsversuchen, Wirtschaftlichkeits- und Rechtsprüfungen sowie insbesondere wegen der Nachweise zur Herstell- und Einbaubarkeit, Beständigkeit und Analytik konventionelle Tondichtungen, Geokunststoffe, Kapillarsperren und geringmächtige 'Kunstaböden' verworfen worden. Aufbauend auf langjährige Erfahrungen mit 'Bentokies' wurde projektspezifisch das neue Mischgut 'Tonschlacken' aus Schlacken der Stahlindustrie, Tonmehl und Bentonit entwickelt, in umfangreichen, teils mehrjährigen Untersuchungen dessen Eignung nachgewiesen und als mineralische Abdichtung eingesetzt. Die Nachweise und die Untersuchungen sowie der Einsatz von 'Tonschlacken' zeigten folgende Eigenschaften:

- sehr gute Einbau- und Verdichtbarkeit, auch auf gering tragfähigem Untergrund
- hohe Festigkeit/Steifigkeit resp. hohe Standsicherheit
- mäßige Duktilität und die Erfordernis von Verformungsnachweisen
- Witterungsbeständigkeit und Rissesicherheit (auch im Bauzustand)
- Robustheit gegen geometrische und/oder bautechnische Imperfektionen
- Prüfbarkeit als qualifizierter Dichtungsbaustoff
- Zuverlässigkeit als langfristige mineralische Flächenabdichtung
- die Eignung als unmittelbares KDB-Auflager
- Verträglichkeit am Deponiestandort in bau- u. ökochemischer Hinsicht
- Wirtschaftlichkeit (Verfügbarkeit der Rezepturkomponenten; feldfabrikmäßige Produktion; Tonschlacken-Zulieferung 'just in time'; Mischgut-Lagerfähigkeit; Einbau mit konventionellen Erdbaugroßgeräten; praxisübliche Qualitätssicherung).

Dem weiteren Einsatz von 'Tonschlacken' aus Schlacken, Tonmehl und Bentonit mit Durchlässigkeiten  $k_{10} \leq 2,3 \cdot 10^{-10}$  m/s, Schichtdicken von  $D = 2 \cdot 20$  cm und Verdichtungsgraden  $D_{Pr} \geq 97\%$  als qualifizierte Mineralische Abdichtung steht demnach nichts entgegen.

Unbeschadet dessen sind die Rezeptur der 'Tonschlacken' und Bestimmungen der Durchlässigkeit im Feldversuch noch entwicklungsfähig; Entsprechendes ist initiiert.

## 6 Literatur

- |   |      |  |
|---|------|--|
| Bundesmin. für Umwelt,<br>Naturschutz u. Reaktorsich.                                   | 2008 | Verordnung über Deponien und Langzeitlager<br>(Deponieverordnung - DepV)   |
| H.-G. Dymek, W. Oltmanns  | 2006 | Stabilisierung einer Schlammdeponie; Chr.-Veder-<br>Kolloquium, TU Graz  |
| Zentr. Unterstützungstelle<br>Abfall, Gentechnik und Ge-<br>rätensicherheit, Hildesheim | 2005 | Eignungsbeurteilung von unter Verwendung von Ab-<br>fällen hergestellten mineralischen Deponieoberflä-<br>chenabdichtung; Abfallwirtschaftsfakten 11 |
| Deutsche Gesellschaft für<br>Geotechnik (DGGT)  | 2001 | Merkblatt für die Herstellung, Bemessung und Quali-<br>tätssicherung von Stabilisierungssäulen zur Unter-<br>grundverbesserung                       |
| Forschungsgesellschaft<br>für Str.-u. Verkehrswesen                                     | 1997 | Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und<br>Richtl. für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTVE-Stb 94)  |
| Forschungsgesellschaft<br>für Str.-u. Verkehrswesen,<br>Köln                            | 1997 | Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im<br>Straßenbau TP - StB - Flächendeckende dynami-<br>sche Prüfung der Verdichtung (FDVK)            |
| Deutsche Gesellschaft für<br>Geotechnik (DGGT)  | 1997 | GDA-Empfehlungen, Geotechnik der Deponien und<br>Altlasten; Verl. Ernst & Sohn - Aktualisierungen jew.<br>in BAUTECHNIK 9                            |
| Deutsches Institut für Bau-<br>technik (DIBt)   | 1997 | Zulassungsgrundsätze für Dichtungsschichten aus<br>natürlichen mineralischen Baustoffen in Basis- und<br>Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien |

### **Anschrift der Verfasser**

Dipl.-Ing. Wolfgang Oltmanns  
 PROF. RODATZ UND PARTNER, Beratende Ingenieure für Geotechnik GmbH  
 Nußbergstraße 17  
 D-38102 Braunschweig  
 Telefon +49 531 7 01 36 11  
 Email: w.oltmanns@rup-geotechnik.com  
 Website: www.rup-geotechnik.de

Dr.-Ing. Matthias Rosenberg  
 Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig  
 Gaußstraße 2  
 D-38106 Braunschweig  
 Telefon +49 531 391 27 32  
 Email: m.rosenberg@tu-bs.de  
 Website: www.igb-tubs.de