

# Erste Erfahrungen mit der Umsetzung der bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) in der Praxis

Dr. Thomas Egloffstein & Dipl.- Ing. Gerd Burkhardt<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Einführung .....	97
2. Inkrafttreten – Rechtsverbindlichkeit – Vorgehensweise anhand von Erfahrungsbeispielen“ .....	98
3. Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen aus fachtechnischer Sicht .....	111
4. Resümee und Fazit.....	112
5. Literatur .....	113

## 1. Einführung

Mit Inkrafttreten der Deponievereinfachungsverordnung, Artikel 1 Deponieverordnung (DepV) im Jahre 2009, fand ein Paradigmenwechsel von den früheren starren Vorgaben der TA Abfall und TA Siedlungsabfall (z.B. Regelabdichtungen, zahlreiche Material- und Einbauparameter sowie Prüfanforderungen im Anhang E der TA Abfall / TASi) zu vereinfachten Vorgaben an Systemkomponenten statt. Diese z. T. mit Anforderungen an die Mächtigkeit und den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert hinterlegten Systemkomponenten sind für bestimmte Deponieklassen erforderlich bzw. für niedrigere Deponieklassen nicht erforderlich. Für den Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems wird dies in Anhang 1, Tabelle 1, für den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems in Tabelle 2 der DepV festgelegt. An einige Systemkomponenten wurden Zielvorgaben gestellt (wie z. B. an die Durchsickerung von Wasserhaushaltsschichten oder Kapillarsperren). Statt der früheren zahlreichen Material- und Einbauparameter sowie Prüfanforderungen wird für einzelne Abdichtungskomponenten und Baustoffe in der DepV, Anhang 1, Nr. 2.1 nunmehr gefordert: „Für die Verbesserung der geologischen Barriere und technische Maßnahmen als Ersatz für die geologische Barriere sowie das Abdichtungssystem dürfen Materialien, Komponenten oder Systeme nur eingesetzt werden, wenn sie dem Stand der Technik nach Nummer 2.1.1 der DepV entsprechen und wenn dies der zuständigen Behörde nachgewiesen worden ist. Zum Nachweis sind der zuständigen Behörde prüffähige Unterlagen vorzulegen. Als Nachweis nach Satz 1 ist für Geokunststoffe, Polymere und serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme die Zulassung dieser Materialien, Komponenten oder Systeme durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung nach Nummer 2.4 erforderlich. Für sonstige Materialien, Komponenten oder Systeme kann der Nachweis nach Satz 1 dadurch erbracht werden, dass für diese eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung der Länder vorliegt“ (DepV Nr. 2.1 Allgemeine Anforderungen). „Für die bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen nach Nummer 2.1 Satz 4 sowie für den Einsatz von natürlichem, ggf. vergütetem Boden- und Gesteinsmaterial aus der Umgebung sowie von Abfällen definieren die Länder Prüfkriterien und legen Anforderungen an den fachgerechten Einbau sowie an das Qualitätsmanagement in bundeseinheitli-

---

<sup>1</sup> Dr. Dipl.-Geol. Thomas Egloffstein & Dipl.- Ing. Gerd Burkhardt, ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH, Auf der Breit 11, 76227 Karlsruhe, Tel.: (07 21) 9 44 77-0, Fax: (0721) 9 44 77-70, E-Mails: egloffstein@icp-ing.de, burkhardt@icp-ing.de

chen Qualitätsstandards fest. Bundeseinheitliche Qualitätsstandards werden von den Ländern in geeigneter Form öffentlich zugänglich gemacht“ (DepV Nr. 2.1.2. Bundeseinheitliche Qualitätsstandards). Die zwischenzeitlich (Stand 27.08.2013) veröffentlichten 22 bundeseinheitlichen Qualitätsstandards auf der Homepage der LAGA (<http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>) definieren demnach die Anforderungen und Prüfkriterien für den fachgerechten Einbau und das Qualitätsmanagement und den Rahmen für den vom Antragsteller zu erstellenden Eignungsnachweis als Vorlage für die bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung durch die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“.

## 2. Inkrafttreten – Rechtsverbindlichkeit – Vorgehensweise anhand von Erfahrungsbeispielen“

Die bundeseinheitlichen Qualitätsstandards werden von der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ erarbeitet, von der LAGA Hauptversammlung verabschiedet und anschließend auf der Homepage der LAGA veröffentlicht. Da die Deponieverordnung im Anhang 1 unter Punkt 2.1.2 explizit darauf verweist, sind sie nach Veröffentlichung unmittelbar und ohne Übergangsfristen gültig. Dies betrifft Bauherrn und Baufirmen als auch die zuständigen Behörden bei genehmigten und laufenden Deponiebaumaßnahmen unmittelbar. Zusätzliche, bislang noch nicht geltende Anforderungen greifen in den Bauvertrag ein.

### 2.1 Anwendung des BQS 1-0 „Technische Maßnahmen betreffend die geologischen Barriere“

Erweiterungen von Deponien waren in den vergangenen Jahren relativ selten, es gibt mittlerweile aber zunehmend Projektbeispiele, wo bestehende Deponien erweitert werden sollen. Bei dem hier beschriebenen Projekt handelt es sich um eine Deponie der Deponieklasse III in der Planungsphase, deren geologische Barriere zwar vorhanden ist, welche aber in ihrer natürlichen Beschaffenheit nicht die Mindestanforderungen an Wasserdurchlässigkeit und Mächtigkeit erfüllt.

Sie kann sie nach Anhang 1 Nummer 1.2 Ziffer 3 Satz 2 DepV durch technische Maßnahmen vervollständigt oder verbessert werden. Ziffer 3 Satz 3 eröffnet dabei die Möglichkeit, die Mindestdicke auf 0,5 Meter zu reduzieren, wenn durch eine entsprechend geringere Wasserdurchlässigkeit eine gleiche Schutzwirkung erreicht wird. Bei einer technischen Maßnahme zur Verbesserung oder Vervollständigung der geologischen Barriere kann die Mindestdicke unter den Voraussetzungen von Anhang 1 Nr. 1.2 Ziffer 3 auf bis zu 0,5 m reduziert werden. Zwischen der Mindestdicke von 1 m bzw. 5 m nach Tabelle 1 (DK I/II bzw. DK III) bzw. und der Mindestdicke nach Nr. 1.2 Ziffer 3 von 0,5 m (beide Anh. 1, DepV), kann in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert der technischen Maßnahme interpoliert werden. Für die Vergleichsberechnung ist mit einem Wasserüberstau von 5,0 m über der Abdichtungskomponente zu rechnen. Aufgrund der fachlichen Bewertung des Schadstoffrückhaltevermögens des für eine technische Maßnahme vorgesehenen Materials kann eine größere Dicke erforderlich werden, als sie sich aus der Vergleichsberechnung ergibt. Der BQS 1-0 gibt auch den Hinweis, dass die erforderliche Verdichtung bei der Herstellung die Verwendung hoch plastischer Tone einschränkt.

Bei einer Deponie, die über keine geologische Barriere verfügt, kann die geologische Barriere durch technische Maßnahmen geschaffen werden. Als Maßgabe wird hierfür in Anhang 1 Nummer 1.2 Ziffer 4 genannt, dass die technische Maßnahme in der in der DepV Anhang 1, Nummer 2.2 Tabelle 1 Nummer 1 enthaltenen Mindestdicke hergestellt wird. Im Falle einer DK III Deponie sind dies  $d \geq 5$  m mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Ob eine geologische Barriere vorhanden und diese ausreichend ist, entscheidet die

zuständige Behörde ggf. unter Hinzuziehung weiterer Fachstellen, z. B. der geologischen Landesdienste.

Das Schadstoffrückhaltevermögen ist eine grundsätzliche Anforderung zur Funktionserfüllung einer geologischen Barriere und ist daher auch bei technischen Maßnahmen zu berücksichtigen. Tonmineralien wirken sich günstig auf das Schadstoffrückhaltevermögen einer geologischen Barriere aus und sollten daher in einem bestimmten Mindestmaß (jedoch keine Anforderung definiert) enthalten sein (LANUV Arbeitsblatt 13).

Für technische Maßnahmen kommen in erster Linie natürliche Baustoffe (ortsnah zu gewinnende Tone und Lehme) zum Einsatz. Diese können durch Hilfsmittel verbessert werden.

Die Eignung der Baustoffe und Hilfsmittel ist gegenüber der zuständigen Behörde im jeweiligen Einzelfall nachzuweisen. Es gelten die gleichen materiellen Kriterien wie bei mineralischen Basisabdichtungen und daher auch die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards für mineralische Basisabdichtungskomponenten BQS 2-0 bis BQS 2-3.

Aufgrund der sehr niedrigen Zuordnungswerte des Anhangs 3, Tabelle 2, Spalte 4 Geologische Barriere der DepV, werden auch als Deponieersatzbaustoffe im Wesentlichen nur natürliche mineralische Baustoffe zum Einsatz kommen können. Die Eignung der Baustoffe und Hilfsmittel ist gegenüber der zuständigen Behörde im jeweiligen Einzelfall nachzuweisen. Hierbei sind die materiell gleichen Kriterien zu berücksichtigen wie bei mineralischen Basisabdichtungen.

Durch das Basisabdichtungssystem austretendes Sickerwasser darf sich zwischen der Basisabdichtung und der geologischen Barriere nicht lateral ausbreiten. Technische Maßnahmen sind daher so auszuführen, dass die Abdichtungskomponente der Deponiebasis an Sohle und Böschung unmittelbar und vollflächig von der geologischen Barriere in der erforderlichen Dicke unterlagert wird. Ergänzend zu Punkt 2.5.3 „Verbund von Lagen und Schichten“ des BQS 2-0 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten – übergreifende Anforderungen“ ist daher ein Pressverbund zwischen der verbesserten / vervollständigten oder technisch hergestellten geologischen Barriere und einer aufliegenden Basisabdichtungskomponente zwingend erforderlich. Das für technische Maßnahmen vorgesehene Material sollte hinsichtlich seines Schadstoffrückhaltevermögens auch im Zusammenwirken mit der ggf. vorhandenen natürlichen geologischen Barriere von der zuständigen Behörde unter Hinzuziehung weiterer Fachstellen, z. B. der geologischen Landesdienste, bewertet werden.

Bei dem oben angesprochenen Projekt ist die Deponieaufstandsfläche ebenerdig und muss zum Anschluss an den bestehenden Bereich um ca. 1-1,5 m angehoben werden. Hinzu kommen Überhöhungen zur Einhaltung der Mindestgefälle von 1 % in Längsrichtung.

**Erfahrungen mit dem BQS 1-0:** Der BQS 1-0 hält sich relativ nahe an die DepV. Über die DepV hinausgehend ist die Betonung des Schadstoffrückhaltevermögens, des für technische Maßnahmen zur Verbesserung oder Vervollständigung der geologischen Barriere vorgesehenen Materials, ohne allerdings Anforderungen, z.B. an die Kationenaustauschkapazität, zu benennen. Es wird lediglich ausgesagt, dass eine größere Dicke erforderlich werden kann, als sich dies nach der Vergleichsberechnung über die Wasserdurchlässigkeit ergibt. Dies ist durchaus berechtigt. Bei der Wasserdurchlässigkeit, welche in Zehnerpotenzen gemessen wird, kann durch die Wahl geeigneter, sehr gering durchlässiger Materialien diese um den Faktor 10, 100 oder gar noch höher, erniedrigt werden. Dadurch kann, über die nach BQS 1-0 anzustellende Vergleichsrechnung über die Permeationsrate  $q$  bei einem Wasserüberstau von 5 m, die erforderliche Schichtdicke der geologischen Barriere ( $DK\ III \geq 5\ m$ ) um eine Größenordnung d.h. auf 0,5 m verringern werden:

5 m	Mächtigkeit der geologischen Barriere nach DepV			
1,00E-09 m/s	kf-Wert der geologischen Barriere nach DepV			
5 m	Wasserüberstau auf der geologischen Barriere nach BQS 1-0			
2,0 [-]	Hydraulischer Gradient i in der geologischen Barriere nach DepV und BQS 1-0: $i = h/l$			
2,00E-09 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · s	Permeationsrate durch die geologische Barriere nach DepV und BQS 1-0: $q = k * i$			
0,5 m	<b>Verringerte Mächtigkeit der geologischen Barriere</b>			
11,0 [-]	daraus resultierender hydraulischer Gradient i			
1,82E-10 m/s	<b>Dafür erforderlicher kf-Wert für die gleiche Permeationsrate</b> nach DepV und BQS 1-0: $k = q / i$			

Das Schadstoffrückhaltevermögen hingegen ist, neben dem spezifischen Adsorptionsvermögen des eingesetzten Materials, sehr stark an die Masse des Sorbenten, heißt i. W. die Dicke der geologischen Barriere geknüpft. Deshalb ist das Schadstoffrückhaltevermögen, auch mit hoch sorptionsfähigen Tonen wie z.B. Smectiten oder durch Beimischung von z.B. Zeolithen i.W. aus bodenphysischen/-mechanischen Gründen (Tragfähigkeit, Verarbeitbarkeit, Verdichtbarkeit, Durchlässigkeit), nur in einem begrenzten Umfang zu erhöhen (s.a. oben Hinweis in BQS 1-0 auf Herstellbarkeit). Das Schadstoffrückhaltevermögen einer 5 m mächtigen geologischen Barriere lässt sich eben nur sehr schwer in einer verbesserten oder vervollständigten geologischen Barriere mit deutlich verringerter Mächtigkeit unterbringen.

Die Anbindung der technischen Barriere an die Basisabdichtung im Sinne des „Pressverbundes“ und das Verbot der Durchdringung der technischen Barriere sind ebenfalls konkretisierende, über die DepV hinausgehende, aber im „Geist“ der DepV liegende Anforderungen.

## 2.2 BQS 2-0 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten – übergreifende Anforderungen und BQS 2-1 aus natürlichen mineralischen Baustoffen

### 2.2.1 BQS 2-0 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten – übergreifende Anforderungen

Erfahrungen zu bereits durchgeführte Baumaßnahmen für mineralische Basisabdichtungskomponenten zum BQS 2-0 und 2-1 liegen bei den Verfassern noch nicht vor, es wurden bisher lediglich QM-Pläne für Basisabdichtungen und Untersuchungskonzepte für Eignungsnachweise für natürliche mineralische Basisabdichtungskomponenten erstellt, welche mit den zuständigen Behörden noch abgestimmt werden sollen. Dennoch soll an dieser Stelle auf erste Erfahrungen aufgrund der grundsätzlich theoretischen Auseinandersetzungen mit dem Thema eingegangen werden.

In BQS 2-0 wird bezüglich Pkt. 2.1.1. „Anforderung an die Abdichtungswirkung“ gefordert, dass die Anforderung an den Durchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$  m/s auch bei einer Randfaserdehnung, die sich bei einer Krümmung der Abdichtungskomponente mit einem Krümmungsradius von  $R = 200$  m ergeben, eingehalten werden muss. Ein Krümmungsradius von 200 m entspricht einer (kreisförmigen) Setzungsmulde von 10 m Durchmesser, in deren Mitte eine Setzung von 6,25 cm auftritt. Das LWA NRW Merkblatt Nr. 18 „Mineralische Deponieabdichtungen (LWA 1993)“, schrieb zu Verformungseigenschaften: „Nach dem derzeitigen Kenntnisstand kann ein entsprechender Nachweis entfallen, wenn bei mindestens mittelplastischem feinkörnigem Boden der zu erwartende Krümmungsradius den Wert von  $R = 200$  m nicht unterschreitet“. Nach Auffassung der Verfasser ist dies bei Basisabdichtungen in der Regel gewährleistet, da zum einen die verwendeten Dichtungsmaterialien diese plastischen Eigenschaften erfüllen und zum anderen, da die herrschenden Spannungszustände an der Deponiebasis (Auflast) der Rissentstehung entgegen wirken. Hinsichtlich des Nachweises der Abdichtungswirkung von plastischen mineralischen Dichtungsmaterialien gemäß Pkt. 2.1.2 wirken sich höhere Auflasten ( $600 \text{ kN/m}^2$ ) grundsätzlich günstig auf den

Durchlässigkeitsbeiwert aus. Die sinnngemäße versuchstechnische Umsetzung der Anforderung „verformbar bis Krümmungsradius 200 m ohne Erhöhung der Durchlässigkeit“ wäre theoretisch ein Verformungs-Durchlässigkeitsversuch im Drucktopf nach van Asbeck, bei dem durch Absenkung des Auflagers der Probe eine gezielte Verformung erzeugt und gleichzeitig die Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden kann. Dieser wurde allerdings primär für Asphaltabdichtungen entwickelt. Der geforderte versuchstechnische Nachweis der „Verformbarkeit“ im Rahmen der Bauausführung gemäß Pkt. 2.2.3 ist der Biegezugversuch gemäß GDA E 2-13. Bei diesem wird in Abhängigkeit des Wassergehaltes an einem Balken ermittelt, ab welcher Durchbiegung sich Risse zeigen, d.h. die Grenzdehnung überschritten wird. Für leicht bis mittelplastische Dichtungsmaterialien ergibt sich nach Erfahrungswerten abhängig vom Wassergehalt im Bereich des optimalen Wassergehaltes eine Grenzdehnung bis zum Eintreten des ersten Risses in der Größenordnung ca. 0,5 %. Dies entspricht Krümmungsradien in der Größenordnung von ca. 10 m. Höhere Auflasten überdrücken die Zugspannung in der Abdichtung und wirken somit der Rissbildung entgegen. Versuche ohne höhere Auflasten als die genannten 200 bzw. 600 kN/m<sup>2</sup> liegen somit auf der „sicheren Seite“.

Im Hinblick auf die Bewertung der Abdichtungswirkung bei Temperaturen von 10 bis 40 °C ist gemäß DIN 18130 der im Versuch festgestellte Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der temperaturabhängigen Viskosität des Wassers auf eine Vergleichstemperatur von 10° C umzurechnen. Dieser Wert muss die Anforderung  $k_f \leq 5 \cdot 10^{-10}$  m/s erfüllen. Aufgrund des Verbotes der Ablagerung von unvorbehandelten Abfällen kommen nur noch mineralische Abfälle zur Ablagerungen. Die Ablagerung von chemisch reaktiven mineralischen Abfällen, die Wärme entwickeln (z.B. ohne 3-monatige Alterung abgelagerte HMVA-Schlacken bzw. Aschen), ist zu verhindern. Wesentlich höhere Temperaturen als 10 – 12 °C sollten aus diesem Grund der Vergangenheit angehören.

Die Anforderungen gemäß Punkt 2.2.4 „Nachweis der hydraulische Widerstandsfähigkeit“ gegenüber inneren Erosions- und Suffusionsvorgängen bei einem Aufstau von 500 cm, sollte für ein leicht bis mittelplastisches, mineralisches Dichtungsmaterial, bei einer üblichen Probenhöhe von 12 cm =>  $i = h/l = 41,7$ , kein Problem darstellen, ebenso wenig wie die konstruktive Verhinderung derartig hoher Aufstauhöhen durch geeignete wirksame Dränageschichten.

Für die „Beständigkeit gegenüber Sickerwasser“ gemäß Pkt. 2.3.2.1, ist die Sickerwasserbeschaffenheit maßgeblich von Bedeutung. Der BQS nennt unter Verweis auf den LANUV Fachbericht 24 worst-case-Bedingungen für die einzelnen Deponieklassen von:

- Elektrische Leitfähigkeit 20.000 µS/cm
- pH-Wert 4 - 13
- DOC 5.000 mg/l

In Einzelfällen können die Art und Aggressivität des Sickerwassers nach den abzulagernden Abfällen abgeschätzt werden. Dies macht für bestimmte Deponien mit absehbar geringeren Sickerwasserkonzentrationen sicherlich Sinn. Gemäß den Sickerwasserkonzentrationen im LANUV Fachbericht 24 „liegen die pH-Werte, abgesehen von Ausnahmen, im neutralen bis schwach alkalischen Bereich“. Der angegebene DOC von 5.000 mg/l ist 50 bis 100-fach über dem zulässigen DOC-Zuordnungswert (Schüttelversuch DEV S4 W:F = 10:1) nach Tabelle 2, Anhang 3 der DepV DK I bis III. Nach dem LANUV Fachbericht 24 liegt das 75 % Quantil der untersuchten DK II Anorganikdeponien beim DOC bei 110 mg/l, der Medianwert bei 25 mg/l. Dem hingegen ist die elektrische Leitfähigkeit als Summenparameter für i.W. die Salzbildner mit 8.250 µS/cm im Median und 27.400 µS/cm beim 75-% Quantil für Deponien für mineralische Abfälle eher etwas zu gering vorgegeben. Nach Erfahrungswerten aus früheren Durch-

strömungsversuchen für mineralische Abdichtungen mit Schwermetalllösungen und Chrom VI sowie aktuellen Durchströmungsversuchen von Bentonitmatten mit Deponiesickerwässern, Schlackeeluaten und  $\text{CaCl}_2$ -Lösungen steht nach Ansicht der Verfasser nicht zu erwarten, dass Sickerwässer aus Anorganikdeponien der Deponieklassen DK I und II, ggf. abgesehen von Ausnahmen, erkennbare nachteilige Auswirkungen auf die Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungen haben werden. Hohe Auflasten für Basisabdichtungen im Bereich von mehreren hundert  $\text{kN/m}^2$  wirken zudem erniedrigend auf die Durchlässigkeit. Falls z. B. für DK III Deponien höhere Anforderungen an die Beständigkeit von mineralischen Abdichtungen gestellt werden, kann dies durch die Wahl eines geeigneten, chemisch stabilen, d. h. im Wesentlichen kaolinitischen Tons, ohne nennenswerte Anteile an quellfähigen (reaktiven) Tonmineralen wie Smectiten, geschehen.

Der Nachweis der Beständigkeit nach Pkt. 2.3.3 zu den Punkten 2.3.2.2 „biologische Einwirkungen“ und 2.3.2.3 „Temperaturen“ wird u.E. durch theoretische Verfahren und belegte Praxiserfahrungen erbracht werden müssen. Zu dem Punkt 2.3.2.5 „Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen“ können z.B. Austrocknungsversuche z.B. über gesättigten Salzlösungen im Trockenschrank zur Einstellung bestimmter relativer Luftfeuchtigkeiten und Wasserspannungen durchgeführt werden. Oder es können Versuche zur Ermittlung der materialspezifischen Wassergehalte bei bestimmten Wasserspannungen im Druckplattenextraktor (z.B. 250, 500, 1000 hPa) und die gezielte Einstellung dieser ermittelten Wassergehalte an Proben für Durchlässigkeitsversuche durchgeführt werden. Hierfür gibt es jedoch keine Anforderungen und Vorgaben, so dass die Wahl geeigneter Testmethoden durch einen Gutachter vorgeschlagen und mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden muss. Wirklich sinnvolle und für die Fragestellung aussagekräftige Versuche sind, auch wegen der zusätzlichen positiv wirkenden Auflastspannungen, sehr schwierig und sollten sich für die Frage des Austrocknungsverhaltens auf mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten beschränken. Für die Frage der Beständigkeit gegenüber Witterung (Pkt. 2.3.2.4) wird man sich auf entsprechende Schutzmaßnahmen konzentrieren.

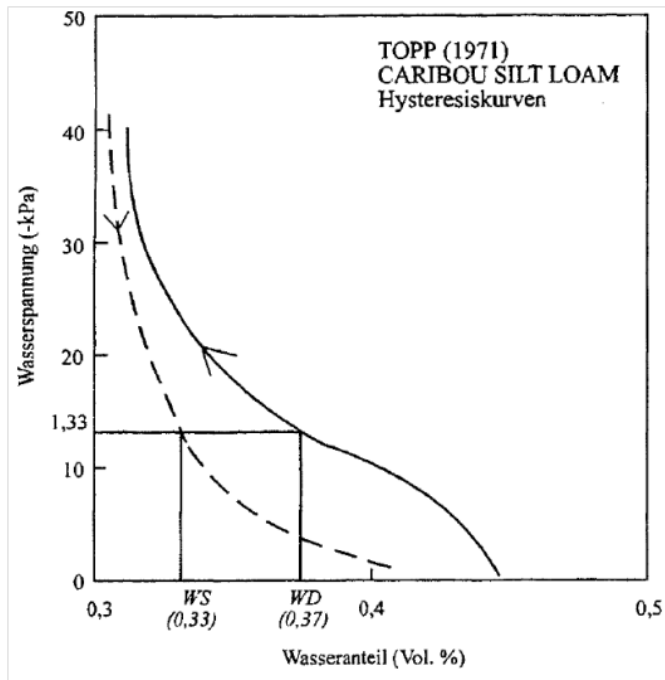
## **2.2.2 BQS 2-1 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen**

Die grundsätzlichen Materialanforderungen in BQS 2-1 sind i.W. identisch mit dem Anhang E der TA Abfall bzw. TASI. Zur Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte bei 10 – 40 °C und den günstig ( $200 \text{ kN/m}^2$ ) und „ungünstig“ ( $600 \text{ kN/m}^2$ ) auf die Durchlässigkeit wirkenden Auflasten siehe die Ausführungen oben.

Zu Punkt 4.5 a) „Wassergehalts-/Wasserspannungscharakteristik unter Berücksichtigung von ggf. auftretenden Synäreseffekten“ z.B. durch die Überdruckmethode nach Richard (Druckplattenextraktor) lässt sich Folgendes bemerken.

Die Abbildung 1 zeigt die Hysterese der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung eines schluffigen Lehms.

Die Verfasser fragen sich, welche Schlussfolgerungen aus Wasserspannungskurven für ein mineralisches Dichtungsmaterial für die Fragestellung der Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen an der Deponiebasis gezogen werden können und regen an, Versuche zum Austrocknungsverhalten auf mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten zu beschränken.



**Abbildung 1: Hysterese der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung eines schluffigen Lehms und möglicher Bereiche des Wassergehalts WD-WS, wenn eine bestimmte Wasserspannung (-1,33 kPa) vorgegeben ist (Topp 1971)**

**Erfahrungen mit dem BQS 2-0 / 2-1:** Wie anfangs geschrieben, liegen den Verfassern noch keine praktischen Erfahrungen mit den BQS 2-0 / 2-1 vor. Die theoretische Auseinandersetzung mit den beiden BQS im Rahmen einer Planung, einer Fremdprüfung (bisher nur Eignungsprüfungen) und für Konzepte im Rahmen von Angeboten zur Erstellung von Eignungsnachweisen für mineralische Abdichtungskomponenten an der Deponiebasis, lassen aber ein erstes Meinungsbild zu. Neben vielen altbekannten Vorgaben aus dem Anhang E der TA Abfall /TASi gibt es zwei u.E. versuchstechnisch schwierig zu lösende Fragestellungen, die nach Ansicht der Verfasser aufgrund der Randbedingungen bei Basisabdichtung nicht unbedingt erforderlich sind (hohe Auflasten, keine Temperaturgradienten von innen nach außen mehr, bei vorhandener geologischer Barriere als bindiges Lockergestein wahrscheinlich kapillare Anbindung an das Grundwasser). Hierzu gehören der Nachweis der Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen, der bei der Oberflächenabdichtung deutlich wichtiger ist und die Dichtigkeit bei Verformungen im Biegezugversuch, da die geforderte Stabilität des Untergrundes und die vorherrschenden auflastbedingten Spannungen die Rissentstehung bei mineralischen Dichtungsmaterialien verhindern.

### 2.3 BQS 4-1 „Trag- und Ausgleichsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen

Mit am meisten Einfluss auf das Baugeschehen bei der Erstellung einer Oberflächenabdichtung hat der BQS 4-1 für Trag-, Ausgleichs- und auch Gasdränschichten (Veröffentlicht am 20.03.2012), der an alle Baumaterialien, natürliche wie auch speziell Deponieersatzbaustoffe, bisher nicht gekannte bauphysikalische Material- und Beständigkeitsanforderungen stellt, die bis dato lediglich von Abdichtungskomponenten gefordert wurden. Gemäß der Anforderungen der DepV bzw. BQS 4-1 muss auch für Trag- und Ausgleichsschichten eine Funktionserfüllung unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen werden. Hierbei sind für Trag- und Ausgleichsschichten folgende Kriterien und Einwirkmechanismen zu berücksichtigen:

- das Verformungsvermögen
- die Standsicherheit und Tragfähigkeit
- die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanisch einwirkenden Kräften
- die Beständigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Einwirkungen
- die Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten nachteiligen Materialveränderungen
- bei Deponieersatzbaustoffen die Einhaltung der zusätzlichen Anforderungen nach §§ 14 und 15 DepV

Für den Nachweis der mechanischen Widerstandsfähigkeit sind die Kornfestigkeit unter dynamischer Einwirkung gemäß GDA E 3-12 Nr. 3.9 (Kornzertrümmerungsversuch im Proctorzylinder mit 192 Schlägen) oder 3.10 (im Versuchsfeld) und die Scherfestigkeit gemäß GDA 3-12, Nr. 3.12 durch Versuche (direkter Scherversuch, Triaxialversuch oder Kipptischversuch) nachzuweisen.

Die Beständigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Einwirkungen ist, ausgenommen bei Materialien mit offensichtlicher Unempfindlichkeit (Begründung erforderlich) gegen Temperaturen, Sickerwasser und Gasen, nachzuweisen.

Der Nachweis gegenüber alterungsbedingten nachteiligen Materialveränderungen kann durch Versuche, theoretische Verfahren oder belegte Praxiserfahrung erbracht werden.

Beim Einsatz von Deponieersatzbaustoffen als Trag-, Ausgleichs oder Gasdränschicht (dies war gängige Praxis, z. B. belastete Böden, aufbereiteter Bauschutt, Gemische, HMVA-Schlacken, Gleisschotter) sind zum Nachweis der dauerhaften Funktionserfüllung ergänzend zu Kurzzeituntersuchungen zum Nachweis der chemischen, biologischen und physikalischen Beständigkeit Langzeituntersuchungen oder Versuche mit Zeitraffereffekten zu wählen. Die Wahl geeigneter Testmethoden ist unter Hinzuziehung eines für die speziellen Fragestellungen zur Langzeitstabilität erfahrenen Gutachters zu bestimmen. Die speziellen Bedingungen wie z.B. die Herkunft und Charakteristik der Deponieersatzbaustoffe, die Testdauer, die Temperatur und das Modell-Sickerwasser (reduzierende/ oxidierende Bedingungen, pH 4-13, elektrische Leitfähigkeit 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , DOC bis 5.000 mg/l) müssen beachtet und mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden. Diese Formulierung findet sich so oder ähnlich in allen BQS, die sich mit Ersatzbaustoffen befassen (BQS 2-3 Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen, BQS 5-3 mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen sowie BQS 3-2 Mineralische Entwässerungsschichten in Basisabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen (s.u.) und BQS 6-2 Mineralische Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen).

Ein gutachterlicher Nachweis ist gemäß der im BQS gewählten Formulierung nicht ausreichend. In einem Fall, in dem die Verfasser selbst die Fremdprüfung für u.a. die Trag- und Ausgleichsschicht durchführen, erlaubte die zuständige Behörde eine gutachterliche Beurteilung der eingesetzten Ersatzbaustoffe wie gebrochener Bauschutt und HMVA-Schlacke, da der BQS 4-1 in eine genehmigte und bereits laufende Baumaßnahme eingegriffen hatte. In einem anderen Fall war der zuständigen Behörde der Nachweis der Beständigkeit einer HMVA-Schlacke gegenüber Deponiegaskondensat wichtig. Dies sollte durch einen 14-tägigen Einlagerungsversuch in vor Ort entnommenen Deponiegaskondensat und einer Durchlässigkeitsprüfung vorher/nachher nachgewiesen werden. Deponiegaskondensate haben ein breites Spektrum an pH-Werten (Erfahrungswerte ca. pH 3 bis 8 i.d.R. leicht sauer) und Salzgehalten (Erfahrungswerte elektr. Leitfähigkeit ca. 200 bis 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

**Erfahrungen mit dem BQS 4-1:** Der BQS 4-1 greift massiv in die gängige Baupraxis bei Oberflächenabdichtungen von Deponien ein, denn er definiert erstmalig Anforderungen an



die Trag-, Ausgleichs und Gasdränschicht die zuvor nur an Abdichtungssysteme gestellt worden waren. Er schreibt z.B. unter Punkt 3.4 „Mechanische Widerstandsfähigkeit“ Kornzertrümmerungsversuche und Scherversuche für Trag- und Ausgleichschichtmaterialien vor, die nach jahrzehntelanger Erfahrung und auf der Grundlage von Tabellenwerken (z.B. EAU DGGT 2012, Türke 1999, DIN 1055 „Lastannahmen für Bauten“) auf der „sicheren Seite“ liegend abgeschätzt werden konnten.

Die Beständigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Einwirkungen wie Temperatur, Sickerwasser, Gase, alterungsbedingter Materialveränderungen ist i.d.R. durch Versuche, letzteres auch durch theoretische Verfahren oder belegte Praxiserfahrung nachzuweisen.

Nur bei offensichtlicher Unempfindlichkeit gegenüber den genannten Einwirkungen kann auf Nachweise verzichtet werden. Für den Einsatz von Deponieersatzbaustoffen sind Versuche zwingend vorgeschrieben. Dies wird nach Ansicht der Verfasser dazu führen, dass gegenüber der bisherigen Praxis deutlich weniger Deponieersatzbaustoffe in Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschichten eingesetzt werden.

## **2.4 Anwendung des BQS 5-0 Mineralische Oberflächenabdichtungen – „übergreifende Anforderungen“ sowie des BQS 5-1 „...aus natürlichen mineralischen Baustoffen“**

Für mineralische Basis- und Oberflächenabdichtungen gab es in der Vergangenheit die Anforderungen des Anhang E der TA Abfall, auf den auch die TA Siedlungsabfall (TASi BMU 1993) verwiesen hat. Nach Inkrafttreten der Deponieverordnung (2009) gab es zunächst nur den Hinweis in der DepV darauf, dass Abdichtungssysteme dem Stand der Technik und einem bundeseinheitlich gewährleisteten Qualitätsstandard entsprechen müssen, der gegenüber der zuständigen Behörde nachzuweisen war. Dieser Nachweis galt als geführt, wenn eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung der Länder für eine Abdichtungskomponente oder ein Abdichtungssystem vorliegt.

In der 1. Änderungsverordnung der DepV (2011) wurde festgelegt, dass für die bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen für den Einsatz von natürlichem, ggf. vergütetem Boden- und Gesteinsmaterial aus der Umgebung sowie von Abfällen, die Länder Prüfkriterien definieren und Anforderungen für den fachgerechten Einbau sowie an das Qualitätsmanagement in bundeseinheitlichen Qualitätsstandards festlegen.

Diese erschienen 2010 für Oberflächenabdichtungen mit BQS 5-0 „...übergreifende Anforderungen“, BQS 5-1 „...aus natürlichen...“, BQS 5-2 „...aus vergüteten mineralischen Baustoffen“ und BQS 2-3 „... aus Deponieersatzbaustoffen“. Analog und inhaltlich entsprechend den leicht unterschiedlichen Anforderungen der DepV weitgehend deckungsgleich dazu erschienen 2011 die BQS 2-0, 2-1, 2-2 und 2-3 für mineralische Basisabdichtungskomponenten.

Bisherige Berührungspunkte zu den o.g. BQS gab es zum BQS 5-0 für eine bereits existierende temporäre mineralische Oberflächenabdichtung, die in das endgültige Oberflächenabdichtungssystem eingebunden werden sollte. Die zuständige Behörde nahm die Anforderungen des BQS 5-0 in die Genehmigung für die mineralischen Oberflächenabdichtung auf. Des Weiteren wurde für eine geplante mineralische Oberflächenabdichtung für eine DK II Deponie ein Qualitätsmanagementplan gemäß BQS 5-0 und 5-1 für die zuständige Behörde erstellt, um eine Genehmigung für diese Maßnahme zu erlangen.

Bei den durchzuführenden Eignungsuntersuchungen, beim Nachweis der grundsätzlichen Herstellbarkeit in Probefeldern sowie bei der Qualitätsprüfung hat man sich bei BQS 5-1 am Anhang E der TA Abfall orientiert. Hier sind keine gravierenden Unterschiede zu verzeichnen.

Zusätzlich wird beim Kriterium Dichtigkeit/Abdichtungswirkung der Nachweis der Dichtigkeit des verformten Dichtungselements bei ein- und zweiachsialer Verformung verlangt, bei der nachzuweisen ist, bis zu welcher Dehnung die Dichtigkeit gegeben ist. Desweiteren soll eine Abschätzung der Auswirkungen von Fehlstellen und Imperfektionen innerhalb der mineralischen Dichtungsschicht auf die Systemdurchlässigkeit vorgenommen werden.

Hinsichtlich der mechanischen Widerstandsfähigkeit werden lediglich Konkretisierungen hinsichtlich der Versuchsrandbedingungen vorgenommen. Bei der hydraulischen Widerstandsfähigkeit werden unter „Nachweisgrundlage“ Langzeit-Durchströmungsversuche und/oder ein pin hole test gefordert.

Die umfangreichsten zusätzlichen Anforderungen bilden die Nachweise zur Beständigkeit über  $\geq 100$  Jahre, wie sie in Tabelle 2 des BQS 5-0 sowie unter Pkt. 2.3 „Beständigkeit“ sowie unter Bezug auf BQS 5-0 im BQS 5-1 unter Pkt. 4 „Beständigkeit“ aufgeführt sind.

Tab. 2: Tabelle 1 aus BQS 5-0: Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Nachweise

Kriterien / Einwirkungen	Leistungsfähigkeit	Nachweise
Beständigkeit	Langzeitbeständigkeit ( $\geq 100$ Jahre)	zeitraffende Reaktorsimulation oder mineralogische Analogien
	Dauerbeständigkeit der die Standsicherheit beeinflussenden Komponenten	zeitraffende Reaktorsimulation oder mineralogische Analogien
	beständig gegen aggress. Niederschlagswasser (pH 4 – pH 11)	k-Wert – Bestimmung mit pH-stabilisiertem Wasser
	beständig gegen Mikroorganismen, Pilze (Erhöhung Corg < 1 %)	Eingrabversuch
	beständig gegen Pflanzenwurzeln (Wurzelanteil < 1 Gew.-%)	Wurzeltest
	schrumpfrissunempfindlich bei relativer Wassergehaltsänderung von bis zu 10 Gew.-%	Trocknen
	Deponiegasbeständig	Durchströmungsversuch

Während bei der Durchsicht der Tabelle 1 des BQS 5-0 der Eindruck entsteht, dass die aufgeführten Versuche zwingend durchzuführen sind, wird nachfolgend unter Pkt. 2.3.3 „Nachweis der Beständigkeit“ ausgeführt: „Die Nachweise können durch Versuche, theoretische Verfahren oder belegte Praxiserfahrung erbracht werden“. Auch die Nachweise „zeitraffende Reaktorsimulation“ oder „mineralogische Analogien“ in Tabelle 1 können u.E. in Richtung Laborversuche oder gutachterliche Abhandlung interpretiert werden. Sowohl in BQS 5-0 als auch in BQS 5-1 wird bei der Beständigkeit gegenüber Pflanzenwurzeln lediglich von Schutzmaßnahmen nicht mehr vom Wurzeltest der Tabelle 1 gesprochen. In BQS 5-1 wird der mineralischen Oberflächenabdichtungskomponente aus natürlichen mineralischen Baustoffen eine chemische Beständigkeit attestiert, ein Nachweis in Form eines Durchströmungsversuches kann entfallen. Dies trifft auch auf die Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen und Pilzen zu. Diese Nachweise werden im Wesentlichen von BQS 5-3 für mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen gefordert. Bewegt man sich im Bereich natürliche mineralische Baustoffe des BQS 5-1 sind diese Diskrepanzen zu BQS 5-0 verwirrend.

Für die Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen wird in BQS 5-1 die Nachweisgrundlage „Überdruckmethode nach Richard“ genannt (Druckplattenextraktor) und für den „Einfluss von zyklischen Wassergehaltsänderungen auf das Schrumpf- und Quellverhalten und auf die Dichtigkeit“ soll die Nachweisgrundlage im Einzelfall festgelegt werden.

**Erfahrungen mit dem BQS 5-0 / 5-1:** Der BQS 5-0 und 5-1 ist hinsichtlich der durchzuführenden

Eignungsuntersuchungen, beim Nachweis der grundsätzlichen Herstellbarkeit in Probefeldern sowie bei der Qualitätsprüfung nahe an den altbekannten Anforderungen gemäß Anhang E der TA Abfall. Neu bzw. zusätzlich ist ein höherer Detailierungsgrad hinsichtlich der Anforderungen, z.B. an die Abdichtungswirkung und versuchstechnisch vergleichsweise aufwändiger Versuche, wie der Nachweis, bis zu welcher Dehnung die Dichtigkeit gegeben ist. Der Nachweis der hydraulischen Widerstandsfähigkeit mittels Langzeit-Durchströmungsversuchen bei einer Aufstauhöhe von 1,5 m ist mit einem normalen Durchlässigkeitsversuch bei  $i = 30$  mit verlängerter Laufzeit zu erbringen. Bei einigen Nachweisen ist absehbar, dass alternativ eher die erforderlichen Schutzmaßnahmen dargestellt werden, als dass der Nachweis der Beständigkeit geführt wird, einerseits weil dieser nicht näher beschrieben ist, andererseits aber auch weil dieser nur sehr schwer durchzuführen ist (z.B. Beständigkeit gegenüber Temperaturen).

Versuchstechnisch aufwendiger, jedoch wohl zwingend durchzuführen sind die Nachweise der Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen und den Einfluss von zyklischen Wassergehaltsänderungen auf das Schrumpf und Quellungsverhalten und auf die Dichtigkeit.

## 2.5 Anwendung des BQS 7-1 „Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“

Der BQS 7-1 Rekultivierungsschichten ist sicherlich einer der seit Veröffentlichung im August 2011 am häufigsten benutzten bundeseinheitlichen Qualitätsstandards, da der Abschluss und die Rekultivierung von Deponien derzeit die meistbetriebenen Maßnahmen im Deponiebereich sind. Der vorliegende Bundeseinheitliche Qualitätsstandard 7-1 ist die fachliche Grundlage, auf der die Eignung von Rekultivierungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen von der zuständigen Behörde zu beurteilen ist (BQS 7-1 2011). Die Rekultivierungsschicht ist die oberste Komponente des Oberflächenabdichtungssystems von Deponien. Die Aufgaben der Rekultivierungsschicht sind in BQS 7-1 (2011) Seite 3 unten und Seite 4 detailliert beschrieben.

Hervorgehoben werden sollen an dieser Stelle folgende Aufgaben und Funktionen:

- Langfristiger Schutz des Entwässerungssystems vor hydraulischer Überlastung (Dampfspeicherung reduzieren und dämpfen), Durchwurzelung sowie sonstiger Beeinträchtigungen (z.B. Verschlammung)
- Schutz der Abdichtungskomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkungen sowie vor Austrocknung (Vermeidung hoher Wasserspannungen)
- Mechanisch stabiler Pflanzenstandort mit ausreichendem Wasser- und Nährstoffangebot, Optimierung des Wasserhaushalts

Die Anforderungen an die Dicke der Komponente „Rekultivierungsschicht“ sind unter Berücksichtigung der Standortbedingungen und des Bewuchses zu bemessen. Die in der DepV genannte Mindestdicke von 1 m reicht gemäß BQS 7-1 meist nicht aus, um die Entwässerungsschicht oder eine mineralische Abdichtungskomponente, ohne darüber liegende Konvektionssperre, zu schützen und eine nachhaltige Rekultivierung zu gewährleisten.

Die Anforderung an die nutzbare Feldkapazität sind wie zu erwarten deckungsgleich zur DepV, es werden aber zusätzlich Anforderungen an die Luftkapazität von  $\geq 8$  Vol.-% nach Fertigstellung aufgenommen. Unter Punkt 2 „Anforderung an die Komponente“ werden weitere generelle Anforderungen definiert die von der Rekultivierungsschicht zu erfüllen sind:

- Ein ausreichendes Infiltrationsvermögen und eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit um Stauwasserbildung zu vermeiden
- Beständigkeit gegen Erosion durch Wind- und Wasser wie auch innere Erosion und Suffusion
- Geringes Lösungs- und Auswaschungspotential indem Stoffe im Boden in Lösung gehen und diese Lösung durch versickerndes Wasser ausgewaschen wird.<sup>2</sup>
- Der Humusgehalt im Oberboden sollte 2 – 4 M.-% betragen. Es werden ergänzend eine Reihe von DIN-Normen zur Nährstoffversorgung und zu Boden- und Pflanzenarbeiten genannt.
- Das zur Rekultivierung eingesetzte Bodenmaterial soll keine schädlichen Bodenveränderungen aufweisen (Spalte 9 in Tab. 2, Anh. 3 DepV ist einzuhalten) und das in der Entwässerungsschicht gefasste Bodensickerwasser soll ohne weitere Behandlung in den Vorfluter eingeleitet werden können.

Die Rekultivierungsböden werden gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden 2005) bzw. gemäß DIN 4220 (Ausgabe 11/2008) in ein Bodendreieck für Feinböden ( $< 2$  mm) Sand-Schluff-Ton eingruppiert. Der BQS 7-1 unterscheidet in eine Bodenkategorie „A“ von Böden mit 10 – 50 % Schluff, 0 – 17 % Ton und 33 – 90 % Sand (Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Sl4, Slu), für welche die Wahrscheinlichkeit groß sein soll, dass Sie geeignet sind und bereits bei der Mindestmächtigkeit von 1,0 m unter Beachtung der Anforderungen an die Gewinnung, Herstellung und Lagerung sowie den Einbau des Rekultivierungsbodens die Anforderungen an die nutzbare Feldkapazität von  $\geq 140$  mm und die Luftkapazität von  $\geq 8$  Vol.-% erreicht werden. Für die im Bodendreieck ebenfalls eingezeichnete Böden der Kategorie „B“ (0 – 100 % Schluff, 0 – 25 % Ton, 0 – 83 % Sand (St3, Ls4, Ls3, Ls2, Lu teilweise Ut4, Uls, Ut2, Ut3, Us, Uu) ist die Wahrscheinlichkeit einer Eignung geringer, dennoch können auch diese Böden für eine Rekultivierungsschicht geeignet sein.

Die qualitative Einstufung in die Kategorien „A“ und „B“ weicht deutlich von der Einstufung nach LANUV (2010/12) Arbbl. 13, Abb. 18 ab, welche die Feinbodenarten nach besonders geeignet, geeignet, eingeschränkt geeignet und nicht geeignet einstuft, und nach Ansicht der Autoren die realistischere Einstufung darstellt. Bodenmaterial mit einer geringeren nFK kann geeignet sein, wenn die Mächtigkeit entsprechend erhöht wird. Ein begrenzender Faktor für die Erhöhung der Mächtigkeit ist die Tiefe des effektiven Wurzelraumes des Bewuchses zuzüglich der kapillaren Steighöhe, da das dort gespeicherte Bodenwasser von den Pflanzen wieder aufgenommen und verdunstet werden soll. Deshalb macht die Erhöhung der Schichtdicke bei sandigen Böden zur Kompensation geringer nFK-Werte nur sehr begrenzt Sinn, da diese zum einen eine relativ geringen effektive Durchwurzelungstiefe haben (ca. 0,5 – 0,6 m) und zum Anderen eine relativ geringe kapillare Steighöhe (0,1 – 1 m). Mit abnehmender nFK sinken bei sandigen Böden i.d.R. auch die mittlere effektive Durchwurzelungstiefe und die kapillare Steighöhe.

---

<sup>2</sup> Dies betrifft i. W. lösliche Bodensalze, weniger die Carbonate bzw. die noch schwerer löslichen Silikate die nur sehr langsam durch Hydrolyse gelöst werden. Allerdings sind meist geringe Mengen an Kohlensäure und Huminsäure im Wasser gelöst, wodurch die Lösung vieler Minerale erleichtert wird. Einer der schnellsten bodenbildenden Prozesse ist die Entkalkung, d.h. die Auswaschung von im Boden vorhandenem fein verteiltem Kalk durch Kohlensäureverwitterung.

Reine Tone gelten als i.d.R. nicht geeignet, reine Sande können zum Mischen mit schluffreichen Böden verwendet werden. Bei schluffreichen Böden ist dem Einbau und der Standsicherheit sowie der Erosionsempfindlichkeit besonderes Augenmerk zu schenken.

Die Rekultivierungsschicht soll gemäß Kapitel 4 des BQS 7-1 „Entwurf und Bemessung“ zur Erfüllung der spezifischen Schutzfunktion dimensioniert werden. Als Grundlagen genannt sind hierfür der Niederschlag (Durchschnitts-, Extremereignisse, jahreszeitliche Verteilung, Starkregenhäufigkeit und –intensität), die maximale Frosteindringtiefe, die potentielle Verdunstung sowie die klimatischen Wasserbilanz, der Wasserverbrauch der vorgesehenen Vegetation vom Entwicklungsstadium bis zum Zielzustand, die Eigenschaften des verwendeten Bodens, die Tiefenentwicklung der Pflanzenwurzeln in Abhängigkeit von Bewuchs und Boden. Schutzerfordernisse von mineralischen Abdichtungskomponenten gegen Durchwurzelung und Austrocknung sind zu beachten, sofern kein wirksamer Austrocknungsschutz vorhanden ist. Die Exposition der Deponie (Lage, Höhe) und der Flanken (Himmelsrichtung) sind im Hinblick auf Austrocknung und Frost zu berücksichtigen.

Die Rekultivierungsschicht soll aus zwei Lagen bestehen, dem humushaltigen Oberboden mit einer Schichtdicke von in der Regel 30 cm und dem Unterboden, der wenig organische Substanz enthalten sollte. Im Bedarfsfall kann eine dritte, am Übergang zur Entwässerungsschicht als Filterschicht ausgebildete Lage vorgesehen werden.

Die Mindestmächtigkeit der Rekultivierungsschicht richtet sich nach der nutzbaren Feldkapazität, der Wurzeltiefe der zur Anpflanzung vorgesehenen Bewuchsarten, der Frosteindringtiefe und der Art der Abdichtungskomponenten. Bei locker geschütteten Bodenmaterialien ist mit Sackungen in der Größenordnung von 10 % der Einbaumächtigkeit zu rechnen und entsprechend überhöht einzubauen.

Das Wasserspeichervermögen der Rekultivierungsschicht ist so zu bemessen, dass das im Boden gespeicherte Wasser ausreicht um den Pflanzen auch in Trockenperioden gute Bedingungen zu liefern. Die untere Zone der Rekultivierungsschicht sollte bei austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten ganzjährig feucht bleiben.

Der BQS 7-1 gibt Hinweise, wie sich die Art der unterlagernden Abdichtungskomponenten auf die Funktionen der Rekultivierungsschicht auswirken.

Bei Konvektionssperren als Abdichtungskomponente (KDB oder Asphalt) ist die Dicke der Rekultivierungsschicht vorrangig auf die Windwurfgefahr der im Verlauf von Jahrzehnten in der Umgebung vorherrschenden und auf der Deponie zu erwartenden Waldtypen zu bemessen.

Bei mineralischen Abdichtungskomponenten als oberste Abdichtungskomponente ist die Dicke der Rekultivierungsschicht nach der Wurzeltiefe der in der Umgebung vorherrschenden und auf der Deponie zu erwartenden Waldtypen zu bemessen.

Bei mineralischen Abdichtungskomponenten als oberste Abdichtungskomponente und einer Dicke der Rekultivierungsschicht, die nicht nach der Wurzeltiefe der in der Umgebung vorherrschenden und auf der Deponie zu erwartenden Waldtypen bemessen ist, bedarf die Deponieoberfläche im Hinblick auf die Vegetation einer dauerhaften Pflege.

**Erfahrungen mit dem BQS 7-1:** Der BQS 7-1 liefert zahlreiche zusätzliche und hilfreiche Informationen zur Erstellung einer Rekultivierungsschicht in Anlehnung an eine Wasserhaushaltschicht. De facto werden dabei aber einige wesentliche Anforderungen definiert und konkretisiert, die in der DepV nicht gefordert werden. Die wesentliche zusätzliche Anforderung ist die Forderung nach einer Luftkapazität von  $\geq 8$  Vol.-% und den hierfür erforderlichen lockeren Einbau der Rekultivierungsschicht. Nach unseren Erfahrungen ist eine Luftkapazität von  $\geq 8$  Vol.-% bei vielen Böden nur durch Einlegen des Bodens mit dem Langarm-

bagger zu erreichen. Der Hinweis unter Punkt 9.2 auf eine zeitnahe Abnahme nach Einbau ist berechtigt, „da sich die bodenphysikalischen Eigenschaften durch Bodenreifung und Sackungen verändern“. Hiervon am meisten betroffen ist die Luftkapazität als Maß für das Volumen der weiten Grobporen ( $> 50 \mu\text{m}$ ), die am stärksten auf Bodenverdichtungen reagieren. Obwohl als „Sollwert“ definiert ist die Luftkapazität für Rekultivierungsschichten u.E. für viele ansonsten gut geeignete Böden zu hoch angesetzt. Eine wie wir meinen pragmatische Umsetzung dieser Anforderung erreichten wir in Abstimmung mit der zuständigen Behörde bei einer laufenden Baumaßnahme nach Veröffentlichung von BQS 7-1, mit der Anforderung LK im Mittel  $\geq 6 \text{ Vol.-%}$ , alle Einzelwerte  $\geq 4 \text{ Vol.-%}$ .

## 2.6 Erste Erfahrungen mit dem BQS 9-1 „Qualitätsmanagement – Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssystemen“ – Akkreditierung

Der jüngste BQS 9-1 „Qualitätsmanagement – Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssystemen“ vom 27.08.2013 (zuletzt geändert am 25.09.2013) ist die „Ausführungsbestimmung“ für die Umsetzung der 2. Änderungsverordnung der DepV vom 01.05.2013, wonach gemäß Anhang 1, Punkt 2.1 Satz 16:

„Die fremdprüfende muss Stelle nach DIN EN ISO/IEC 17020: 2012-07... als Inspektionsstelle für die Fremdprüfung im Deponiebau und nach DIN EN ISO/IEC 17025: 2005-08... als Prüflaboratorium akkreditiert sein“. Spezielle Prüfungen können vom Fremdprüfer an eine unabhängige Institution vergeben werden, die für diese Prüfungen akkreditiert ist. Im Rahmen einer Übergangsregelung unter § 28 DepV kann bis zum 01.05.2015 als fremdprüfende Stelle auch beauftragt werden, wer nicht abschließend nach Anhang 1 Nummer 2.1 Satz 16 akkreditiert ist, sich aber nachweislich im Akkreditierungsverfahren befindet und über ausreichendes fach- und sachkundiges Personal verfügt.

Der BQS 9-1 gilt für die Fremdprüfung folgender Komponenten und Systeme der Deponieabdichtungssysteme:

- Rekultivierungs-, Wasserhaushalts- und Methanoxidationsschichten,
- mineralische Schutz- und Speicherschichten,
- mineralische Entwässerungsschichten,
- mineralische Dichtungen,
- geosynthetische Tondichtungsbahnen,
- Kapillarsperren,
- Trag- und Ausgleichsschichten und
- technische Maßnahmen betreffend die geologische Barriere.

Hat eine fremdprüfende Stelle den Anspruch alle mineralischen Dichtungssysteme als Inspektionsstelle und Prüflabor zu prüfen, so ist eine Akkreditierung nach 55 Normen bzw. Normenteilen, Vorschriften oder technischen Regelwerken erforderlich. Mindestens jedoch ist die Akkreditierung als Inspektionsstelle für die DIN EN 12620 I „Gesteinskörnungen für Beton“, die DIN 18196 I „Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für Bautechnische Zwecke“ und die TP Gestein StB. Abschn. 3.1.4 u. 3.1.5– „Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau“ erforderlich (Stand 27.08.2013). Mit der letzten Überarbeitung des BQS 9-1 vom 25.09.2013 kamen noch weitere 5 Normen bzw. Normenteile hinzu (DIN EN 932-1 und 2, DIN 18137-1, DIN 18682-1 und -2) hinzu. Die fremdprüfende Stelle muss zusätzlich nach DIN EN ISO/IEC 17025 als Prüflaboratorium für weitere 18 Prüfvorschriften akkreditiert sein. Weitere 32 spezielle Prüfungen könnten an eine unabhängige Institution vergeben werden, die für diese Prüfungen akkreditiert ist.

Auf die in der Fremdprüfung für mineralische Deponieabdichtungskomponenten einschlägig tätigen Institute und i.W. Ingenieurbüros kommen in den verbleibenden knapp 15 Monaten bis zum Stichtag 31.05.2015 anspruchsvolle und auch kostenintensive Aufgaben der Akkreditierung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) zu. Erforderlich ist auch ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001.

Nach einer Schätzung der Autoren wird dieser Aufwand für der Akkreditierung an Fremdkosten für die DAkkS sowie eine externe Beratung durch in der Akkreditierung spezialisierte Fachleute und externe Kalibrierungskosten für Prüfgeräte sowie Eigenkosten für die Erstellung der Unterlagen, Kalibrierungen etc. in der Größenordnung von 100 T€ betragen. Hinzu kommen jährliche Überwachungsaudits zu der die DAkkS i.d.R. mit je zwei Personen die Inspektionsstelle und das Prüflabor prüft und nach 5 Jahren eine Reakkreditierung. Dies ist für ein mittelständiges Ingenieurbüro eine Menge Geld in einem Bereich in dem die Honorare aus wettbewerbsgründen sowieso im unteren Bereich angesiedelt sind. Der Aufwand für die Akkreditierung muss zwangsläufig dazu führen, dass die Honorare für diese Ingenieurleistungen steigen werden.

Die deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) lädt am 27. März 2014 ihre Zielgruppe, die fremdprüfenden Stellen, zu einer kostenpflichtigen Informationsveranstaltung zur Akkreditierung nach Deponieverordnung in das NH Berlin Alexanderplatz, Landsberger Alle 26-32 nach 10249 Berlin ein.

### **3. Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen aus fachtechnischer Sicht**

Mit Inkrafttreten der Deponieverordnung 2009 wurden statt der früheren zahlreichen Material- und Einbauparameter sowie Prüfanforderungen nach Anhang E der TA Abfall für einzelne Abdichtungskomponenten und Baustoffe nunmehr festgelegt, dass nur noch Materialien, Komponenten oder Systeme eingesetzt werden dürfen, wenn sie dem Stand der Technik nach Nummer 2.1.1 der DepV entsprechen und wenn dies der zuständigen Behörde nachgewiesen worden ist. Für Materialien, Komponenten oder Systeme kann der Nachweis dadurch erbracht werden, dass für diese eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung nach einem bundeseinheitlichem Qualitätsstandard der Länder (BQS) vorliegt. In den Jahren 2010 bis 2013 wurden zwischenzeitlich 22 BQS auf der Homepage der LAGA veröffentlicht (zwei weitere sind noch in Bearbeitung) und treten auf der Grundlage der DepV mit der Veröffentlichung in Kraft. Dies konnte und kann immer noch in bereits erteilte Genehmigungen und laufende Baumaßnahmen eingreifen und kann zu zusätzlichen Untersuchungen und zu Nachträgen zum Bauvertrag führen. Die BQS sind, wenn sie Varianten vergleichbarer oder ähnlicher Komponenten betrachten sehr ähnlich aufgebaut (z. B. die BQS für die verschiedenen mineralischen Basis- und Oberflächenabdichtungen), sie können sich aber auch grundlegend unterscheiden.

Vier BQS, nämlich „Mineralische Entwässerungsschichten aus natürlichen Baustoffen für Basis- (BQS 3-1) und Oberflächenabdichtungen (BQS 6-1), BQS 5-6 „Kapillarsperren“ und BQS 8-1 „Rohrleitungen, Schächte und Bauteile in Basis- und Oberflächenabdichtungen“ verweisen lediglich auf Empfehlungen (GDA E2-14, 3-12, 4-2, 5-1, 5-6 für natürliche Entwässerungsschichten, GDA E2-33 Entwurf für Kapillarsperren) oder Güterichtlinien (SKZ TÜV LGA 2010), die jeweils von technisch-wissenschaftlichen Vereinigungen erarbeitet wurden.

Zu den Varianten der Basis- und Oberflächenabdichtungen gibt es jeweils noch einen BQS „Übergreifende Anforderungen“. Im Hinblick auf die in diesem Beitrag betrachteten BQS gibt es Unterschiede z.B. zwischen dem BQS 1-0 „Geologische Barriere“ der die Anforderungen der DepV lediglich konkretisiert und ergänzt (z. B. nähere aber nicht konkrete Ausführungen

zum Adsorptionsvermögen) und dem BQS 7-1 „Rekultivierungsschichten“ der mit der Forderung, die Luftkapazität soll  $\geq 8$  Vol.-% betragen, deutlich über die DepV hinausgehende Anforderungen stellt. Diese können bei vielen Böden Einfluss auf das Einbauverfahren und damit einen höheren bautechnischen Aufwand zur Folge haben.

Relativ stark in die gewohnte Deponiebaupraxis bei Oberflächenabdichtungen greift der BQS 4-1 Trag- Ausgleichs- und Gasdränschichten ein. Vor dem Inkrafttreten des BQS 4-1 waren, außer der früher vorgegebenen Dicke von 0,5 m und der Forderung, dass die Ausgleichsschicht aus homogenem, nichtbindigem und verdichteten Material bestehen sollte (TA Abfall / TAsi), keine weiteren Anforderungen gestellt worden.

Sofern das Deponiegas in der Ausgleichsschicht nicht gefasst und abgeleitet werden konnte, wurde eine zusätzlich aufzubringende, 30 cm dicke Gasdränschicht oberhalb der Ausgleichsschicht gefordert, an die lediglich eine Anforderungen an den Calciumcarbonatgehalt von  $\leq 10$  MA.-% gestellt wurde (TA Abfall / TAsi). Dies hat sich mit dem BQS 4-1 stark verändert, da eine Reihe von Anforderungen definiert wurden, die man früher nur an Abdichtungssysteme und –komponenten gestellt hatte.

Insbesondere wenn Deponieersatzbaustoffe eingesetzt werden sind Langzeituntersuchungen oder Versuche mit Zeitraffereffekten zum Nachweis der Funktionserfüllung über einen Zeitraum von 100 Jahren vorgeschrieben. Deponieersatzbaustoffe wie z. B. belastete Boden, aufbereiteter Bauschutt, Gemische, HMVA-Schlacken oder Gleisschotter wurden für Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschichten gerne verwendet und erfüllten ihre Aufgabe. Die nun deutlich erhöhten Anforderungen werden nach Ansicht der Verfasser oftmals dazu führen, dass Deponieersatzbaustoffe als Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschichten nicht mehr bzw. nur noch eingeschränkt eingesetzt werden.

Für weitere Informationen zur Thematik „Oberflächenabdichtungen mit Deponieersatzbaustoffen gemäß DepV und BQS“ bzw. zur „Planung von Oberflächenabdichtungssystemen auf der Grundlage von DepV und BQS“ verweisen wir auf Egloffstein & Burkhardt (2013) bzw. Burkhardt & Egloffstein (2014).

#### 4. Resümee und Fazit

Die BQS sind insgesamt noch zu neu, um sich bereits ein abschließendes Urteil darüber bilden zu können. Sie sind auch nicht in Stein gemeißelt, sondern können entsprechend den Erfahrungen aus der Umsetzungspraxis den Erfordernissen angepasst werden. Neben vielen durchaus positiv zu bewertenden Aspekten müssen sich einige Anforderungen noch in der Praxis bewähren. Etwas mehr Klarheit und Durchgängigkeit würden sich die Autoren bezüglich der Formulierungen zu den erforderlichen Nachweisen wünschen. So ist z.B. in BQS 5-0 Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten - Übergreifende Anforderungen in Tabelle 1 unter „Nachweise zur Beständigkeit“ zum Einen „zeitraffende Reaktorsimulation“ und zum Anderen „mineralogische Analogien“ gefordert. Ersteres würden wir als Versuch mit aggressiven Medien, letzteres als gutachterlichen Nachweis interpretieren. Nachfolgend werden in Tabelle 1 als „Nachweis für die Beständigkeit“ gegenüber aggressiven Niederschlagswasser, Mikroorganismen, Pflanzenwurzeln, Austrocknung und Deponiegas eindeutig Versuche verlangt (k-Wert-Bestimmung mit pH-stabilisiertem Wasser, Eingrabsversuch, Wurzeltest, Trocknen, Durchströmungsversuch). Unter Punkt 2.3.3 „Nachweis der Beständigkeit“ wird dem hingegen ausgeführt: „Die Nachweise können durch Versuche, theoretische Verfahren oder belegte Praxiserfahrung erbracht werden“. Dem können wir zwar fachlich ohne Abstriche zustimmen, sehen aber nicht nur hier die Gefahr einer sehr unterschiedlichen Auslegung durch die zuständigen Behörden, was für bundeseinheitliche Qualitätsstandards eigentlich nicht der Fall sein sollte.



Aufgrund der Unsicherheit bei allen Beteiligten bezüglich der Auslegung und Anwendung der BQS werden vermutlich Maßnahmen i. W. zur Rekultivierung von Deponien bzw. Deponieabschnitten verschoben werden. Falls sie nicht aufschiebbar sind, werden oft die Systemkomponenten gewählt, welche hinsichtlich der Nachweisführung die geringsten Schwierigkeiten erwarten lassen. Vermutlich werden daher vermehrt Kunststoffdichtungsbahnen für Deponien der Klasse I und die Kombination geosynthetische Tondichtungsbahn / Kunststoffdichtungsbahn für Deponien der Klasse II ausgeführt. Auch die Verwertung von Ersatzbaustoffen in Trag-, Ausgleichs- und Dränageschichten sowie in der mineralischen Dichtungskomponente wird durch die Verpflichtung, zum Nachweis der dauerhaften Funktionserfüllung Langzeituntersuchungen oder Versuche mit Zeitraffereffekten zur chemischen, biologischen und physikalischen Beständigkeit durchzuführen, erschwert. Diese Versuche sollen nach der Wahl geeigneter Testmethoden durch einen für die speziellen Fragestellungen zur Langzeitbeständigkeit erfahrenen Gutachter und nach vorheriger Abstimmung mit der zuständigen Behörde durchgeführt werden. Bei einem im eigenen Haus untersuchtem Beispiel für Ersatzbaustoffe für eine Entwässerungsschicht nahm die reine Versuchsdauer ca. 2 Monate und der Vor- und Nachlauf bis zur Zustimmung durch die zuständige Behörde insgesamt ca. 6 Monate in Anspruch. Bei einem anderen Beispiel aus der Praxis als fremdprüfende Stelle hat sich der eigentliche Baubeginn aufgrund der im Vorfeld nicht ausreichend beachteten Vorgaben der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards um eine Bausaison verschoben.

## 5. Literatur

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Bräcker, W. (2013): Umgang der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ mit Erfahrungen aus der Anwendung Bundeseinheitlicher Qualitätsstandards und den Eignungsbeurteilungen. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2013. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Bd. 24, Karlsruhe.
- Burkhardt, G., Egloffstein, Th. (2014): Planung von Oberflächenabdichtung gemäß DepV und BQS. In: Kranert, M. (Hrsg.) Zeitgemäße Deponietechnik 2014, Stgt. Ber. zur Abfallwirtsch., Bd. 112.
- BQS 1-0 LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik (2011): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 1-0 „Technische Maßnahmen betreffend die geologische Barriere“.
- BQS 2-0 (2010): „Mineralische Basisabdichtungskomponenten – Übergreifende Anforderungen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 2-1 (2010): „Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 3-2 „Mineralische Entwässerungsschichten in Basisabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 4-1 (2011): „Trag- und Ausgleichschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 5-0 (2010): „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten – Übergreifende Anforderungen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 5-1 (2010): „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.

- BQS 5-3 (2010): „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 6-2 Mineralische Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- BQS 7-1 (2011): „Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“.
- BQS 9-1 (2013): „Qualitätsmanagement - Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssystemen“. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>
- DepV BMU (2009/13): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). 2. Änderungsverordnung vom 01.05.2013, [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/depv\\_aenderung\\_arbeitsmodus.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/depv_aenderung_arbeitsmodus.pdf).
- DIN 1055-2 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Bodenkenngößen, November 2012, Beuth Verlag Berlin.
- DIN 14414 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2004): Geokunststoffe. Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der chemischen Beständigkeit bei der Anwendung in Deponien. August 2004, Beuth Verlag Berlin.
- EAU DGGT (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT). Ernst & Sohn, Berlin.
- Egloffstein, Th., Burkhardt, G. (2013): Oberflächenabdichtung mit Deponieersatzbaustoffen – Eignungsnachweis und -beurteilung, Genehmigung nach DepV & BQS, Qualitätssicherung.  
In: Kranert, M. (Hrsg.) Zeitgem. Deponietechnik 2013., Stgt. Ber. zur Abfallwirtsch., Bd. 109.
- Egloffstein, Th., Burkhardt, G. (2013): Erste Erfahrungen mit der Umsetzungen Bundeseinheitlicher Qualitätsstandards in der Praxis. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2013. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Bd. 24, Karlsruhe.
- GDA E2-14 Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (2011): Basis-Entwässerung von Deponien. [www.gdaonline.de/empfehlung.html](http://www.gdaonline.de/empfehlung.html).
- GDA E2-33 (2011): Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen – Entwurf.
- GDA E3-12 (2011): Eignungsprüfungen mineralischer Entwässerungsschichten.
- GDA E4-2 (2011): Herstellung von mineralischen Entwässerungs- und Schutzschichten.
- GDA E5-1 (1997): Grundsätze des Qualitätsmanagements. GDAonline.de.
- GDA E5-6 (2011): Qualitätsüberwachung bei mineralischen Entwässerungsschichten. Eignungsprüfungen mineralischer Entwässerungsschichten.  
[www.gdaonline.de/empfehlung.html](http://www.gdaonline.de/empfehlung.html).
- Hartge, H., Horn, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag Stuttgart.
- LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) (2010): Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung. LANUV-Arbeitsblatt 13.

- LANUV (2010/12): Beschaffenheit von Deponiesickerwasser in Nordrhein-Westfalen.  
LANUV-Fachbericht 24. <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/>.
- LWA Landesamt für Wasser und Abfall NRW (1993): Nr. 18 Mineralische  
Deponieabdichtungen – Richtlinie. Düsseldorf.
- SKZ/TÜV – LGA (2010): Güterichtlinie Rohre, Rohrleitungsteile, Schächte und Bauteile in  
Deponien. <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- TA Abfall BMU (1991): Gesamtfassung der Zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum  
Abfallgesetz (TA Abfall) - Technische Anleitung zur Lagerung,  
chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von  
besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12.03.1991. Außer Kraft seit  
15.07.2009.
- TA Si BMU (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA  
Siedlungsabfall, Kabinettsbeschluß vom 21.04.1993), Bundesanzeiger, 45. Jahrg.  
Nummer 99a, 14.05.1993. Außer Kraft seit 15.07.2009.
- Topp, G. C. (1971): Soil water hysteresis in silt loam an clay loams soils. *Water  
Resource Res.* 7, 914-920 In: Kastanek, F. (1996): Kritische Bemerkungen zur  
Bestimmung der Wasserspannung im Boden mit der Blockmethode. *Die  
Bodenkultur* 47 (4) 223-233.
- Türke, H. (1999): *Statik im Erdbau*. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

