

## **Tongrube Waltrop** **Ehem. Jacobi Tonwerke**

### **Eignungsprüfung des Tonmaterials für deponietechnische Zwecke gemäß den bundeseinheitlichen Qualitätsstandards und Empfehlungen zur Gewinnung, Aufbereitung und Einbau des Tonmaterials**

**Auftraggeber: BMR Boden- und Mineralstoffrecycling GmbH**  
**Zur Pannhütt 49e**  
**45731 Waltrop**

Stand: 14. Juli 2023

Dokument: N:\2\_Projekte\L-8460 BMR Kramer, Tongrube Waltrop\Bericht\L-8460 BRM Kramer EP\_BQS Tongrube Waltrop.docx

**45329 Essen** • Carnaperhof 8-10  
Tel.: 0201 999 864 -00 Fax: -69  
info@limes-essen.de  
www.limes-essen.de

GF: Dipl.-Ing. Peter Schreiber  
Dipl.-Ing. Rolf Woltering

Verwaltungssitz:  
Eiland 3 45134 Essen  
HRB Dortmund 18037  
StNr. 112/5760/3170  
Ust-IdNr. DE 220984172

Sparkasse Essen BIC SPESDE3EXXX  
IBAN DE76360501050000267021



Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17020 **akkreditierte Inspektionsstelle** und nach DIN EN ISO/IEC 17025 **akkreditiertes Prüflabor**. Die Akkreditierungen gelten für die in den Urkunden aufgeführten Prüf- und Inspektionsverfahren.

Durch Erlass des Ministeriums für Verkehr NRW vom 02.12.2020 – 58.73.08.02-000014 – in Nordrhein-Westfalen und durch die Bundesanstalt für Straßenwesen für die Fachgebiete/Prüfungsarten A1, A3, D0, D3, I1, I2, I3, K0 und K3 gem. **RAP Stra 15** bundesweit anerkannt.

## Inhaltsverzeichnis

Blatt

1	VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG.....	7
2	ANFORDERUNGEN AN DAS TONMATERIAL ZU DEPONIETECHNISCHEN ZWECKEN .....	8
3	ERGEBNISSE DER DURCHGEFÜHRTEN UNTERSUCHUNGEN.....	9
3.1	Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen „Grauer“ Ton aus [11] .....	9
3.1.1	Korngrößenverteilungen .....	9
3.1.2	Proctordichte, Korndichte, Verdichtungsgrad und Luftporengehalt .....	10
3.1.3	Wassergehalte .....	10
3.1.4	Wasserdurchlässigkeit.....	10
3.1.5	Zustandsgrenzen .....	11
3.1.6	Kalkgehalt.....	11
3.1.7	Glühverlust .....	11
3.1.8	Wasseraufnahmefähigkeit .....	11
3.1.9	Scherfestigkeit .....	11
3.1.10	Kompressionsversuch.....	12
3.1.11	Einaxiale Druckfestigkeit .....	12
3.1.12	Chemische Untersuchungen.....	12
3.1.13	Balkenbiegezugversuch .....	12
3.1.14	Zusammenfassung der bodenmechanischen Ergebnisse .....	13
3.2	Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen „Gelber“ Ton.....	14
3.2.1	Korngrößenverteilungen .....	14
3.2.2	Proctordichte, Korndichte, Verdichtungsgrad und Luftporengehalt .....	14
3.2.3	Wassergehalte .....	15
3.2.4	Wasserdurchlässigkeit.....	15
3.2.5	Zustandsgrenzen .....	15
3.2.6	Kalkgehalt.....	16
3.2.7	Glühverlust .....	16
3.2.8	Wasseraufnahmefähigkeit .....	16
3.2.9	Scherfestigkeit .....	16
3.2.10	Kompressionsversuch.....	16
3.2.11	Einaxiale Druckfestigkeit .....	17
3.2.12	Chemische Untersuchungen.....	17
3.2.13	Balkenbiegezugversuch .....	17
3.2.14	Zusammenfassung der bodenmechanischen Ergebnisse .....	17



3.3	Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen „Übergangshorizont“ .....	18
3.3.1	Korngrößenverteilungen .....	18
3.3.2	Proctordichte, Korndichte, Verdichtungsgrad und Luftporengehalt .....	19
3.3.3	Wassergehalte .....	20
3.3.4	Wasserdurchlässigkeit.....	20
3.3.5	Zustandsgrenzen .....	20
3.3.6	Kalkgehalt.....	20
3.3.7	Glühverlust .....	21
3.3.8	Wasseraufnahmefähigkeit .....	21
3.3.9	Scherfestigkeit .....	21
3.3.10	Kompressionsversuch.....	21
3.3.11	Einaxiale Druckfestigkeit .....	21
3.3.12	Chemische Untersuchungen.....	21
3.3.13	Zusammenfassung der bodenmechanischen Ergebnisse .....	22
3.4	Weitergehende Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit („Gelber Ton“).....	23
3.4.1	Durchführung von Nullmessungen.....	23
3.4.2	Beständigkeit gegen Sickerwasser .....	23
3.4.3	Elektrische Leitfähigkeit.....	24
3.4.4	DOC.....	24
3.4.5	Widerstand gegen hohe hydraulische Belastung .....	24
3.4.6	Beständigkeit gegenüber Temperaturen.....	25
3.4.7	Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen .....	25
3.5	Weitergehende Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit („Grauer Ton“) .....	26
3.5.1	Durchführung von Nullmessungen.....	26
3.5.2	Beständigkeit gegen Sickerwasser .....	26
3.5.3	Elektrische Leitfähigkeit.....	27
3.5.4	DOC.....	27
3.5.5	Widerstand gegen hohe hydraulische Belastung .....	27
3.5.6	Beständigkeit gegenüber Temperaturen.....	28
3.5.7	Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen .....	28
4	FAZIT .....	29

## Tabellenverzeichnis

Blatt

Tabelle 1: Anforderungen an das Tonmaterial.....	8
Tabelle 2: Laborergebnisse „grauer Ton“ .....	13
Tabelle 3: Laborergebnisse „gelber Ton“ .....	18
Tabelle 4: Laborergebnisse „Übergangshorizont“ .....	22

## Abbildungsverzeichnis

Blatt

Abbildung 1: Begleitende pH-Wert Messung im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („gelber Ton“) .	23
Abbildung 2: Bestimmung der elektr. LF im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („gelber Ton“).....	24
Abbildung 3: Begleitende pH-Wert Messung im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („grauer Ton“).	26
Abbildung 4: Bestimmung der elektr. LF im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („grauer Ton“) .....	27

## ANLAGENVERZEICHNIS

### Anlage Bezeichnung

- 1** **Lageplan**
- 2** **Ergebniszusammenstellung Feld- und Laborprüfungen („Grauer“ Ton)**
  - 2.1 Ergebnisliste Laborprüfungen
  - 2.2 Bestimmung der Korngrößenverteilungen
  - 2.3 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte
  - 2.4 Bestimmung der Proctordichten
  - 2.5 Bestimmung der Korndichten
  - 2.6 Bestimmung der Konsistenzgrenzen
  - 2.7 Bestimmung der Kalkgehalte
  - 2.8 Bestimmung der Glühverluste
  - 2.9 Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
  - 2.10 Bestimmung der Scherfestigkeit
  - 2.11 Bestimmung des Steifemoduls
  - 2.12 Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit
  - 2.13 Bestimmung der chemischen Parameter gemäß DepV
  - 2.14 Nachweis der Langzeitbeständigkeit in weitergehenden Versuchen zur Wasserdurchlässigkeit
  - 2.15 Balkenbiegeversuch zur Bestimmung der Verformungseigenschaften
- 3** **Ergebniszusammenstellung Feld- und Laborprüfungen („Gelber“ Ton)**
  - 3.1 Ergebnisliste Laborprüfungen
  - 3.2 Bestimmung der Korngrößenverteilungen
  - 3.3 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte
  - 3.4 Bestimmung der Proctordichten
  - 3.5 Bestimmung der Korndichten
  - 3.6 Bestimmung der Konsistenzgrenzen
  - 3.7 Bestimmung der Kalkgehalte
  - 3.8 Bestimmung der Glühverluste
  - 3.9 Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
  - 3.10 Bestimmung der Scherfestigkeit
  - 3.11 Bestimmung des Steifemoduls
  - 3.12 Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit
  - 3.13 Bestimmung der chemischen Parameter gemäß DepV
  - 3.14 Nachweis der Langzeitbeständigkeit in weitergehenden Versuchen zur Wasserdurchlässigkeit
  - 3.15 Balkenbiegeversuch zur Bestimmung der Verformungseigenschaften
- 4** **Ergebniszusammenstellung Feld- und Laborprüfungen („Übergangshorizont“)**
  - 4.1 Ergebnisliste Laborprüfungen
  - 4.2 Bestimmung der Korngrößenverteilungen
  - 4.3 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte
  - 4.4 Bestimmung der Proctordichten
  - 4.5 Bestimmung der Korndichten
  - 4.6 Bestimmung der Konsistenzgrenzen
  - 4.7 Bestimmung der Kalkgehalte
  - 4.8 Bestimmung der Glühverluste
  - 4.9 Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
  - 4.10 Bestimmung der Scherfestigkeit
  - 4.11 Bestimmung des Steifemoduls
  - 4.12 Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit
  - 4.13 Bestimmung der chemischen Parameter gemäß DepV

## Quellenverzeichnis

- [1] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I S. 3005) geändert worden ist
- [2] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (12/2014): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 1-0 „Technische Maßnahmen betreffend die geologische Barriere“ vom 04.12.2014, veröffentlicht am 20.03.2015
- [3] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (12/2014): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 2-0 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten – übergreifende Anforderungen“ vom 04.12.2014, veröffentlicht am 20.03.2015
- [4] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (11/2020): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 2-1 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen“ vom 02.12.2020, veröffentlicht am 15.03.2021
- [5] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (12/2014): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-0 „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten – Übergreifende Anforderungen“ vom 04.12.2014, veröffentlicht am 20.03.2015
- [6] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (12/2020): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-1 „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus natürlichen mineralischen Baustoffen“ vom 02.12.2020, veröffentlicht am 15.03.2021
- [7] Landesamt für Wasser und Abfall NRW (LWA): Mineralische Deponieabdichtungen; Richtlinie Nr. 18, Düsseldorf 1993; reproduzierte Originalfassung mit aktualisierenden Hinweisen aus dem Jahr 2006
- [8] Gemeinsames Merkblatt des Bayrischen Landesamtes für Umwelt (LfU) und des Landesamtes für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV): Mineralische Deponieabdichtungen, LfU-Deponie-Info – Merkblatt 1, LANUV-Arbeitsblatt6; Augsburg/Recklinghausen 2009
- [9] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2015): Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme, Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung, LANUV Arbeitsblatt 13; dritte aktualisierte Neuauflage Recklinghausen 2015
- [10] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT): GDA-Empfehlungen, Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage, 1997
- [11] LIMES GmbH, Essen; Tongrube Waltrop, Orientierende Eignungsprüfung und Empfehlung zur Gewinnung, Aufbereitung und Einbau des Tonmaterials, Pr.-Nr. L-8460, Stand: 2. September 2022

## 1 Veranlassung und Zielsetzung

Die BMR Boden- und Mineralstoffrecycling GmbH (im Folgenden BMR), Waltrop, betreibt die Tongrube Waltrop der ehem. Jacobi Tonwerke GmbH. Die Tongrube Waltrop erstreckt sich über eine Gesamtfläche von 120.000 m<sup>2</sup>. Es stehen grundsätzlich zwei verschiedene Tonqualitäten, die der Einfachheit halber als „gelber“ Ton und „grauer“ Ton bezeichnet werden, zur Verfügung. Der gelbe Ton steht oberflächennah in einer durchschnittlichen Mächtigkeit von ca. 4 m an und ist in Teilen bereits durch den ehemaligen Besitzer (Jacobi Tonwerke) abgebaut und für die Keramik- und Ziegelherstellung verwendet worden. Nach Schätzungen des ehemaligen Grubenbetreibers stehen noch ca. 120.000 m<sup>3</sup> gelbes Tonmaterial zur Verfügung.

Der unterlagernde graue Ton ist ebenfalls durch den ehemaligen Grubenbetreiber abgebaut und verwendet worden, ist jedoch mit einer geschätzten Verfügbarkeit von 450.000 m<sup>3</sup> in größerer Menge und Mächtigkeit vorhanden.

Die momentane Gestaltung der Tongrube mit Zwischenplateaus ermöglicht es darüber hinaus auch einen sogenannten Übergangshorizont bzw. eine Wechselzone zwischen gelben und grauen Ton zu untersuchen.

Unter Berücksichtigung von Voruntersuchungen an dem Tonmaterialien sind für den Bau von mineralischen Abdichtungen vorbereitende Maßnahmen zur Gewinnung, Homogenisierung und Aufbereitung des Tonmaterials erforderlich, um das Material anforderungskonform verwenden zu können. Zu diesem Zweck wurden in der Tongrube Fräsfelder angelegt, in denen eine Homogenisierung bzw. Zerkleinerung auf eine Aggregatgröße von < 32 mm sowie eine gezielte Wasserzugabe erprobt wurde. Anschließend wurde in Probefeldern unter realistischen Einbaubedingungen getestet, wie die Tonmaterialien eingebaut, verdichtet und überprüft werden können. Der Bau dieser Versuchsfelder sowie die Auswertung der Laboruntersuchungen wurde durch die LIMES GmbH, Essen (im Folgenden **LIMES**), in einem Bericht zusammengefasst [11]. Ergänzend zu diesen Untersuchungen und den gewonnenen Ergebnissen fand im Jahr 2023 durch Mitarbeiter der LIMES GmbH eine weitere Probenahme auf dem Gelände der Tongrube Waltrop statt, bei dem in vier Schürfen an den Materialien des „gelben“ und des „grauen“ Tons Proben entnommen wurden. An diesen Proben wurden alle ergänzenden Parameter zur Langzeitbeständigkeit (im Wesentlichen wurden Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen unter Berücksichtigung von verschiedenen Einflussfaktoren durchgeführt), welche zu einer vollständigen Eignungsuntersuchung gemäß Bundeseinheitlicher Qualitätsstandards noch ausstehen, ermittelt.

Die LIMES GmbH, Essen (im Folgenden **LIMES**), wurde von der BMR mit der Begutachtung der Fräsfelder und anschließenden Eignungsuntersuchung des Tonmaterials beauftragt. Grundlage der Eignungsprüfung sind die aktuellen Regelwerke der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards BQS 1-0, 2-0 bzw. 2-1 sowie 5-0 bzw. 5-1 [2 bis 6].

Mit dem vorliegenden Bericht beschreibt die LIMES die Ergebnisse der weiterführenden Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit gemäß BQS an natürlichen Baustoffen zur Errichtung einer Deponiebasis- bzw. Oberflächenabdichtung für den „gelben“ und „grauen“ Ton.

Die grundsätzlichen Ergebnisse der Eignungsuntersuchungen, die in 2022 durchgeführt wurden, sind der Vollständigkeit halber in den Kapitel 3.1 bis 3.3 in diesem Bericht zusammengefasst aufgeführt und in den Anlagen dokumentiert.

Im **Anhang 1** zu diesem Bericht ist das Gutachten von Dr. Krakow Rohstoffe GmbH beigelegt. In diesem Gutachten aus dem Jahr 2018 (Projekt Nr. 17-091) sind im Kapitel II.12 bis II.14 weitergehende Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 12677 (RFA-Analyse der Haupt- und Spurenelemente), der semiquantitative Phasenmineralbestand (RDA-Analyse der Tonminerale) und die Kationenaustauschkapazität KAK durchgeführt worden. Darüber hinaus wurden noch charakteristische, bodenmechanische Parameter untersucht und bewertet.

## 2 Anforderungen an das Tonmaterial zu deponietechnischen Zwecken

Die Anforderungen an das Tonmaterial für deponietechnische Zwecke sind nachfolgend zusammengestellt:

**Tabelle 1:** Anforderungen an das Tonmaterial

Prüfmerkmal	Prüfung gem.	Soll-Wert	Bemerkung
- Körnungslinie	DIN 18 196 DIN EN ISO 17892-4	Tonmineralanteil $\geq 10\%$ Tonanteil $d_{0,002\text{ mm}} \geq 20\text{ Gew.-%}$	<i>Empfehlungen des LANUV Merkblattes Nr. 6 [8]</i>
- Gesamttongehalt	LANUV Merkblatt Nr. 13	GT $\geq 260\text{ kg/m}^2$ (DK I und II) GT $\geq 1.300\text{ kg/m}^2$ (DK III)	<i>Nur für die geotechnische Barriere relevant [9]</i>
- Wassergehalt	DIN EN ISO 17 892-1	einbau- und verdichtbar Wassergehalt $w_n \approx w_{\text{opt.}}$ , wenn $w_n \leq w_{\text{opt.}}$ , dann ist ein Luftporenanteil $n \leq 5\%$ einzuhalten	<i>Aufbereitung, gezielte Wasserzugabe, Homogenisierung</i>
- Proctordichte	DIN 18 127	einbau- und verdichtbar	<i>Aufbereitung, gezielte Wasserzugabe, Homogenisierung</i>
- Verdichtungsrad	DIN 18125-2	$D_{\text{Pr}} \geq 95\%$ (feinkörnige Böden)	
-Luftporengehalt	DIN 18125-2		
- Durchlässigkeit	DIN EN ISO 17892-11	$k \leq 5,0\text{E-}09\text{ m/s}^1$ $k \leq 1,0\text{E-}09\text{ m/s}^2$ $k \leq 5,0\text{E-}10\text{ m/s}^3$	
- Zustandsgrenzen	DIN EN ISO 17892-12	<i>Empfehlung:</i> $w_L \geq 35\%$ $I_C \geq 0,75$	
- Kalziumcarbonatanteil	DIN 18 129	$\leq 15\%$ , ggf. $30\%$ (Basis) $\leq 30\%$ (OFA)	
- organische Bestandteile	DIN 18 128	$\leq 5\%$ (bei natürlichen organogenen Böden)	
- Scherversuch	DIN EN ISO 17892-10	Standicherheit	
- Wasseraufnahme	DIN 18 132	keine	
- Korndichte	DIN EN ISO 17892-3	zur Charakterisierung	
- Schadstoffgehalte	DepV, Anhang 3, Tab. 2, Spalte 4 bzw. 5	Nachweis	
- Beständigkeit gegenüber Sickerwasser, Gas, Temperatur, Wassergehaltsänderungen	BQS 2-0 und 2-1 BQS 5-0 und 5-1	Nachweise	

<sup>1)</sup> Grenzwert für eine geologische/geotechnische Barriere in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III)

<sup>2)</sup> Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK I und II)

<sup>3)</sup> Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III) und in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK III)



### 3 Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Die Kontrolluntersuchungen wurden gemäß [2 bis 8] durchgeführt. Die Probennahme und Bearbeitung der Proben erfolgte nach den vorgeschriebenen DIN-Normen und Prüfvorschriften. Nachfolgend sind die festgestellten bodenmechanischen Ergebnisse beschrieben und in der **Anlage 2 bis 4** zusammenfassend dargestellt.

#### 3.1 Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen „Grauer“ Ton aus [11]

##### 3.1.1 Korngrößenverteilungen

Im Rahmen des Probefeldes wurde das Tonmaterial an insgesamt 2 Bodenproben hinsichtlich der Korngrößenverteilung untersucht. Der untersuchte Boden ist hauptsächlich ein stark sandiges Ton-Schluff-Gemisch, das gemäß DIN 18196 der Bodengruppe der mittelplastischen Tone zuzuordnen ist. Der Tongehalt schwankt in den Grenzen von 27,0 bis 28,0 Gew.-%. Der Schluffanteil beträgt 40,1 bis 40,9 Gew.-%. Die Sandgehalte liegen zwischen 31,0 und 32,9 Gew.-%. Der Anteil der Kornfraktion  $d > 2$  mm (Kiesanteil) liegt bei allen untersuchten Proben bei maximal 0,1 Gew.-%.

Der Tongehalt liegt damit über der Empfehlung des LANUV-Merkblattes Nr. 6 von  $\geq 20$  %. Der Tonmineralgehalt wurde seitens der LIMES GmbH nicht bestimmt. Untersuchungen des ehem. Tongrubenbetreibers zeigen jedoch, dass der Anforderungswert für den Tonmineralgehalt von  $\geq 10$  % sicher eingehalten wird.

Der Gesamttongehalt als Maßgabe für das Schadstoffrückhaltevermögen der geotechnischen Barriere wurde für jede Probe gemäß LANUV-Arbeitsblatt Nr. 13, Kapitel 1.2.2, S. 11, berechnet.

$$GT = 10 \cdot c_t \cdot \rho_d \cdot d$$

mit	
GT	Gesamttongehalt in kg/m <sup>2</sup>
$c_t$	spezifischer Tongehalt in Gew.-%
$\rho_d$	Trockendichte in t/m <sup>3</sup> (oder Proctordichte *0,95 in t/m <sup>3</sup> )
d	Dicke der geotechnischen Barriere in m

Der Gesamttongehalt bezogen auf eine Dicke der geotechnischen Barriere von 1,0 m (DK I bzw. DK II-Bereich) schwankt in den Grenzen von  $GT = 443,7$  bis  $496,9$  kg/m<sup>2</sup> und hält die Anforderungen von  $GT \geq 260$  kg/m<sup>2</sup> sicher ein.

Der Gesamttongehalt bezogen auf eine Dicke der geotechnischen Barriere von 5,0 m (DK III-Bereich) schwankt in den Grenzen von  $GT = 2.218,7$  bis  $2.484,6$  kg/m<sup>2</sup> und hält die Anforderungen von  $GT \geq 1.300$  kg/m<sup>2</sup> sicher ein.

Die einzelnen Körnungslinien sind der **Anlage 2.2** zu entnehmen. In der **Anlage 2.1** ist eine statistische Auswertung durchgeführt worden. Sämtliche Körnungslinien entsprechen den in Kapitel 2 aufgelisteten Anforderungen.

An den Proben, die für den Nachweis der Langzeitbeständigkeit verwendet wurden, sind ergänzend 2 Korngrößenverteilungen bestimmt worden. Die Ergebnisse zeigen insgesamt einen höheren Schluffanteil und einen geringeren Sandanteil. An einer Probe wird der empfohlene Tongehalt von  $T > 20\%$  leicht unterschritten. Die Gesamttongehalte werden jedoch bei Ansatz einer minimalen Trockendichte von  $1,644$  t/m<sup>3</sup> ( $D_{pr} = 95\%$ ) durchgängig sicher erreicht.

### 3.1.2 Proctordichte, Korndichte, Verdichtungsgrad und Luftporengehalt

Seitens der Limes wurden zwei Proctorversuche durchgeführt. Für die in enger Bandbreite liegenden Körnungsbänder wurde eine Proctordichte von  $\rho_{Pr} = 1,73 \text{ t/m}^3$  mit einem optimalen Wassergehalt von  $w_n = 16,5$  und  $17,1 \%$  ermittelt. Die einzelnen Proctorversuche sind der **Anlage 2.4** zu entnehmen. In der **Anlage 2.1** ist eine statistische Auswertung durchgeführt worden.

Zur Ermittlung des Verdichtungsgrades wurden an den insgesamt 5 entnommenen ungestörten Proben die Trockendichten ermittelt. Unter Zugrundelegung eines Bezugsproctors von  $\rho_{Pr} = 1,73 \text{ t/m}^3$  wurden Verdichtungsgrade zwischen  $D_{Pr} = 96,6 \%$  bis  $104,5 \%$  festgestellt. Der geforderte Wert beträgt  $D_{Pr} \geq 95,0 \%$ . Bei Zugrundelegung der Proctordichte von  $\rho_{Pr} = 1,73 \text{ t/m}^3$  sind somit bei den entnommenen Proben keine Grenzwertunterschreitungen des geforderten Verdichtungsgrades zu verzeichnen.

Im Baufeld wird die Proctordichte gemäß QMP in regelmäßigen Intervallen überprüft und bei Abweichungen entsprechend verifiziert.

Die entsprechenden Korndichten wurden an insgesamt 2 Bodenproben ermittelt und liegen bei  $2,626$  und  $2,641 \text{ t/m}^3$ . Bei den Bodenproben, bei denen eine Bestimmung der Korndichte nicht durchgeführt wurde, erfolgte die Berechnung des Luftporengehaltes unter Zugrundelegung der gemittelten Korndichte von  $2,63 \text{ t/m}^3$ . Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1** und der **Anlage 2.5** zu entnehmen.

Von dem eingebauten mineralischen Material wurden mit den gemittelten Korndichten, Trockendichten und Wassergehalten die Luftporengehalte berechnet. Diese liegen im Bereich zwischen  $n_a = 4,3$  bis  $11,8$ . Die Anforderung von  $n_a \leq 5,0 \%$  wurde damit bei 4 von 5 Proben nicht erfüllt. Der Grenzwert für den Luftporengehalt ist zwingend einzuhalten, wenn der Einbau auf dem „trockenen Ast“ der Proctorkurve erfolgt, wie im Probefeld praktiziert. Zukünftig ist eine Bewässerung anzustreben, die im Bereich zwischen  $16,8$  und  $22,4$  liegt und damit auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve, auch um eine bessere Verarbeitbarkeit zu erzielen.

### 3.1.3 Wassergehalte

Die an 9 Proben ermittelten Wassergehalte aus den Ausstechzylinderproben und den Mischproben liegen in einem Bereich zwischen  $w_{nat.} = 9,7$  bis  $16,8 \%$ . Der Einbauwassergehalt liegt teilweise deutlich unter dem optimalen Wassergehalt  $w_{opt.}$ . Beim Einbau sollte der Wassergehalt unter Berücksichtigung der Bezugsproctoren auf  $w = 16,5$  bis  $22,0 \%$  eingestellt werden, um eine gute Verarbeitbarkeit und einen anforderungskonformen Luftporengehalt zu erzielen. Der geforderte Verdichtungsgrad ist auch bei Unterschreitung des optimalen Wassergehaltes erzielbar.

Sämtliche Versuchsergebnisse sowie eine statistische Auswertung sind der **Anlage 2.1** zu entnehmen.

### 3.1.4 Wasserdurchlässigkeit

An 5 Ausstechzylinderproben in der Bandbreite zwischen  $D_{Pr} = 96,6 \%$  bis  $104,5 \%$  wurden die Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen gemäß DIN EN ISO 17892-11 durchgeführt. Die Ergebnisse liegen zwischen  $k_f = 1,0 \cdot 10^{-12}$  bis  $8,8 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ . Die bei einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  ermittelten Ergebnisse liegen dementsprechend im Anforderungsbereich von  $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ . Wir gehen davon aus, dass mit Einstellung des Wassergehaltes auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve ( $w = 16,5$  bis  $22 \%$ ) und Einhaltung der Luftporengehalte eine deutliche Verringerung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes mit Werten, die durchgängig bei  $k \leq 5,0 \text{ E-10 m/s}$  (kritischster, einzuhaltender Wert der DepV für mineralische Dichtungen) liegen werden, zu erzielen ist.

In den geplanten, weiteren Untersuchungen des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes sind künstlich hergestellte Proben bei  $D_{pr} = 95 \%$  (minimaler Anforderungswert des Verdichtungsgrades auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve) und unter Berücksichtigung von wasserdurchlässigkeitsbeeinflussende Faktoren (wie Temperatur (Frost- und Schwindrisse), Wassergehaltsänderungen und Sickerwasserangriffe) zu untersuchen.

Sämtliche Versuchsergebnisse sowie eine statistische Auswertung sind der **Anlage 2.1** zu entnehmen. Weiterhin sind die zeitlichen Verläufe in der **Anlage 2.3** dargestellt.

### 3.1.5 Zustandsgrenzen

Die Zustandsgrenzen wurden an 2 Proben untersucht. Die Fließgrenze wurde zu  $w_L = 39,6$  und  $41,3 \%$  bestimmt. Die Ausrollgrenze beträgt  $w_A = 14,1$  bis  $14,2 \%$ . Die Zustandsform des Materials kann mit Konsistenzzahlen zwischen  $I_c = 0,892$  bis  $1,031$  als steif bis halbfest charakterisiert werden. Die geforderte Konsistenzzahl  $I_c \geq 0,75$  und die Anforderungen an die Fließgrenze von  $w_L \geq 35 \%$  werden eingehalten. Das Material ist ein mittelplastischer Ton. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1 bzw. 2.6** zu entnehmen.

### 3.1.6 Kalkgehalt

Der Kalkgehalt wurde an 2 Proben bestimmt. Die Werte schwanken im Bereich zwischen  $23,5$  und  $25,0 \%$ . Der Kalziumcarbonatanteil liegt somit unter dem Maximalwert von  $30 \text{ Gew.-%}$  der BQS 5-0 bzw. 5-1 für Oberflächenabdichtungssysteme. In Basisabdichtungssystemen ist das Material nur einbaubar, wenn nachgewiesen wird, dass die Wirksamkeit der mineralischen Dichtung hierdurch nicht beeinträchtigt wird. In der Regel ist gemäß BQS 2-1 ein Grenzwert von  $V_{Ca} \leq 15 \%$  in Basisabdichtungssystemen einzuhalten, wenn mit kalkaggressivem Sickerwasser zu rechnen ist. Dies ist projektspezifisch zu prüfen. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1** und der **Anlage 2.7** zu entnehmen.

### 3.1.7 Glühverlust

Der Glühverlust wurde an 2 Proben bestimmt. Die ermittelten Werte liegen bei  $2,5$  und  $2,8 \%$ . Der Anteil an organischer Substanz liegt somit unter dem Maximalwert von  $5 \text{ Gew.-%}$  der BQS 2-1 bzw. 5-1 für natürliche organogene Böden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1** und der **Anlage 2.8** zu entnehmen.

### 3.1.8 Wasseraufnahmefähigkeit

Die Wasseraufnahmefähigkeit wurde an 2 Proben bestimmt. Die Werte schwanken im Bereich zwischen  $w_{max} = 52,1$  und  $53,8 \%$ . Die Werte liegen im materialtypischen Bereich (niedrige Wasseraufnahmekapazität) und dienen nur der charakteristischen Beschreibung des Materials. Für die Wasseraufnahmefähigkeit sind keine Anforderungen oder Grenzwerte benannt. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1** und der **Anlage 2.9** zu entnehmen.

### 3.1.9 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit wurde an einer Probe gemäß DIN EN ISO 17892-10 im direkten Scherversuch bei einem Verdichtungsgrad von  $D_{pr} = 95 \%$  bestimmt. Der Reibungswinkel im Bruchzustand beträgt  $\phi' = 22,4^\circ$ . Die Kohäsion wurde zu  $c' = 8,3 \text{ kN/m}^2$  bestimmt. Der Nachweis der Standsicherheit für das Abdichtungssystem ist auf Grundlage der Ergebnisse zu erstellen bzw. zu verifizieren. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1 und der Anlage 2.10** zu entnehmen.

### 3.1.10 Kompressionsversuch

Der Kompressionsversuch wurde gemäß DIN EN ISO 17892-5 durchgeführt. Die Proben wurden hierzu, bei dem eingestellten natürlichen Wassergehalt mit Proctorenergie auf  $D_{Pr} = 95\%$  verdichtet, in einen Prüfcylinder eingebaut. Es wurden 5 Laststufen mit Auflastspannungen von  $\sigma = 50, 100, 200, 400$  und  $800 \text{ kN/m}^2$  aufgebracht und die vollständig abgeklungene, spezifische Setzung dokumentiert. Der Prüfcylinder wurde im Versuchsstand unter Wasser eingespannt. Das Steifemodul beträgt  $E_s = 22,3 \text{ MN/m}^2$  bei einer resultierenden Auflastspannung von  $800 \text{ kN/m}^2$ . Die ermittelten Ergebnisse können für geotechnische Nachweise (z.B. Setzungsberechnungen) in einem Abdichtungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1 und der Anlage 2.11** zu entnehmen.

### 3.1.11 Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde gemäß DIN EN ISO 17892-7 bestimmt. Der Probekörper wurde im Proctortopf mit einem eingestellten Wassergehalt von  $w = 22,6\%$  auf eine Trockendichte von  $1,650 \text{ g/cm}^3$  verdichtet. Der resultierende Verdichtungsgrad beträgt damit unter Berücksichtigung der Bezugsproctoren  $D_{Pr} = 95\%$ . Die ermittelte Druckfestigkeit der Mischprobe beträgt unter Berücksichtigung der eingestellten Randparameter  $q_u = 92,6 \text{ kN/m}^2$  bei einer Bruchstauchung von  $15,8\%$ . Die ermittelten Ergebnisse können für geotechnische Nachweise in einem Abdichtungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1 und der Anlage 2.12** zu entnehmen.

### 3.1.12 Chemische Untersuchungen

Die Bestimmung der chemischen Schadstoffparameter gemäß DepV, Anhang 3, Tabelle 2, Spalte 5, erfolgte im Unterauftrag durch die gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 als Prüflabor akkreditierte Biomar GmbH mit Sitz in Gladbeck. Der Prüfbericht inkl. dem Probenbegleitprotokoll gemäß DIN 19757:2009-07 ist diesem Schreiben als Anlage beigefügt.

Im Prüfbericht der Biomar GmbH (Prüfberichts-Nr. 2022/2572 vom 27.07.2022) werden die Zuordnungswerte der Spalte 5 (DK 0) mit Ausnahme des Parameter Glühverlustes vollumfänglich eingehalten. Gemäß Fußnote 2a zur Tabelle 2 des Anhangs 3 der DepV sind für Bodenmaterial ohne Fremdbestandteile Überschreitungen beim Glühverlust bis 5 Masse-% zulässig, so dass diese Überschreitung nicht relevant ist. Im Übrigen ist gemäß Fußnote 2 zur Tabelle 2 des Anhangs 3 der DepV die Parameter TOC und Glühverlust gleichwertig anzuwenden, so dass die Einhaltung jeweils nur eines Parameters für eine Bewertung erforderlich ist.

### 3.1.13 Balkenbiegezugversuch

Zur Versuchsdurchführung wurde das Material mit einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 22,3\%$  in einer Prüfform mit den Abmessungen  $200 \times 50 \times 50$  (L x B x H in mm) gleichmäßig verdichtet eingebaut (Trockendichte  $\rho_d = 1,64 \text{ t/m}^3$ ). Der Probekörper wurde anschließend aus der Prüfform ausgeschalt und umgehend danach dem Versuchsstand der Biegezugprüfung überführt.

Der **Biegezugversuch** wurde in Anlehnung an DIN EN 12390-5 mit einer Geschwindigkeit von  $v = 0,5 \text{ mm/min}$  und einer Stützweite von  $d = 160 \text{ mm}$  durchgeführt. Bei Maximalkraft wurde eine Biegedehnung von  $\epsilon_{fm} = 1,36\%$  ermittelt. Die projektbezogene Vorgabe an die Grenzdehnung ist mit den vorliegenden Werten abzugleichen. Ein erste Rissbildung konnte bei einem Stichmaß von  $h > 1,04 \text{ mm}$  beobachtet werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.15** zu entnehmen.



### 3.1.14 Zusammenfassung der bodenmechanischen Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass sich das Material bei Einstellung des Wassergehaltes gut als Dichtungsmaterial eingesetzt werden kann. Die Einhaltung der projektspezifischen Anforderungen ist jeweils in einem Probefeld zu überprüfen. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse liefert die nachfolgende **Tabelle**.

**Tabelle 2:** Laborergebnisse „grauer Ton“

Prüfmerkmal	Prüfung gem.	Soll-Wert	Probenanzahl		Ergebnisse		Anford. erfüllt
			Soll	Ist	Min	Max	
Kornverteilung [%] Ton/Schluff/Sand/Kies	DIN EN ISO 17892-4	T ≥ 20	2 -	2 2	27,0/40,1/31,0/0,0 19,0/61,7/13,8/0,5	28,0/40,96/32,9/0,1 24,0/64,2/15,1/1,7	ja
Gesamttongehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	LANUV Nr. 13	GT ≥ 260 (DK I u. II) GT ≥ 1.300 (DK III)	5 5	7 7	443,7 2.218,7	496,9 2.484,6	Ja ja
K-Wert [m/s]	DIN EN ISO 17892-11	k ≤ 5,0E-09 m/s <sup>1</sup> k ≤ 1,0E-09 m/s <sup>2</sup> k ≤ 5,0E-10 m/s <sup>3</sup>	5	5	1,0E-12	8,8E-10	Ja Ja Nein**
Wassergehalt [%]	DIN EN ISO 17892-1	16,5 – 22,0*	5	9	9,7	16,8	Nein***
Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]	DIN 18125-2	≥ 1,644*	5	5	1,67	1,81	ja
Verdichtungsgrad [%]	DIN 18125-2	≥ 95,0	5	5	96,6	104,5	ja
Luftporengehalt [%]	DIN 18125-2	≤ 5,0	5	5	4,3	11,8	Nein**
Proctordichte [g/cm <sup>3</sup> ] opt. Wassergehalt [%]	DIN 18127	Projektspezifisch prüfen	2 2	2 2	1,73 16,5	1,73 17,1	ja ja
Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]	DIN EN ISO 17892-3	Projektspezifisch prüfen	2	2	2,626	2,641	ja
Fließgrenze [%]	DIN EN ISO	≥ 35	2	5	39,6	41,3	ja
Konsistenzzahl [-]	17892-12	≥ 0,75	2	5	0,892	1,031	ja
Glühverlust [%]	DIN 18128	≤ 5,0	2	2	2,5	2,8	ja
Kalkgehalt [%]	DIN 18129	≤ 15,0 Nur bei kalkaggressivem Sickerwasser in einer Basisabdichtung relevant ≤ 30,0 Grundsätzliche Anforderung (OFA und Basis)	2	2	23,5	25,0	Nein  ja
Wasseraufnahmekapazität [%]	DIN 18132	Projektspezifisch prüfen	2	2	52,1	53,8	ja
Reibungswinkel [° ] Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]	DIN EN ISO 17892-10	Projektspezifisch prüfen	1 1	1 1	22,4 8,3		ja ja
Steifemodul Es [MN/m <sup>2</sup> ] bei 800 kN/m <sup>2</sup> Auflastspannung	DIN EN ISO 17892-5	Projektspezifisch prüfen	1	1	22,3		ja
Druckfestigkeit [kN/m <sup>2</sup> ] Bruchstauchung [%]	DIN EN ISO 17892-7	Projektspezifisch prüfen	1	1	92,6 15,8		ja
Balkenbiegeversuch (Dehnung in %)	i.A. an DIN EN 12390-5	Projektspezifisch prüfen	1	1	1,36		Ja
chem. Parameter	DepV, A 3, Tab. 2	Spalte 5	1	1	Unter Berücksichtigung der Fußnote 2a zu nebenstehender Tabelle 2 im Anhang 3 der DepV vollumfänglich eingehalten		ja

<sup>1</sup>) Grenzwert für eine geologische/geotechnische Barriere in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III)

<sup>2</sup>) Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK I und II)

<sup>3</sup>) Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III) und in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK III)

\* basierend auf den Ergebnissen der Mischproben

\*\* sicher erzielbar, bei Einbau auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve

\*\*\* Einstellung des Wassergehaltes auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve erforderlich

## 3.2 Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen „Gelber“ Ton

### 3.2.1 Korngrößenverteilungen

Im Rahmen des Probefeldes wurde das Tonmaterial an insgesamt 2 Bodenproben hinsichtlich der Korngrößenverteilung untersucht. Der untersuchte Boden ist hauptsächlich ein sandiges Ton-Schluff-Gemisch, das gemäß DIN 18196 der Bodengruppe der mittelplastischen Tone zuzuordnen ist. Der Tongehalt schwankt in den Grenzen von 29,3 bis 35,1 Gew.-%. Der Schluffanteil beträgt 38,2 bis 44,2 Gew.-%. Die Sandgehalte liegen zwischen 26,5 und 26,7 Gew.-%. Der Anteil der Kornfraktion  $d > 2$  mm (Kiesanteil) liegt bei allen untersuchten Proben bei 0,0 Gew.-%.

Der Tongehalt liegt damit über der Empfehlung des LANUV-Merkblattes Nr. 6 von  $\geq 20$  %. Der Tonmineralgehalt wurde seitens der LIMES GmbH nicht bestimmt. Untersuchungen des ehem. Tongrubenbetreibers zeigen jedoch, dass der Anforderungswert für den Tonmineralgehalt von  $\geq 10$  % sicher eingehalten wird.

Der Gesamttongehalt als Maßgabe für das Schadstoffrückhaltevermögen der geotechnischen Barriere wurde für jede Probe gemäß LANUV-Arbeitsblatt Nr. 13, Kapitel 1.2.2, S. 11, berechnet.

$$GT = 10 \cdot c_t \cdot \rho_d \cdot d$$

mit	
GT	Gesamttongehalt in kg/m <sup>2</sup>
$c_t$	spezifischer Tongehalt in Gew.-%
$\rho_d$	Trockendichte in t/m <sup>3</sup> (oder Proctordichte *0,95 in t/m <sup>3</sup> )
d	Dicke der geotechnischen Barriere in m

Der Gesamttongehalt bezogen auf eine Dicke der geotechnischen Barriere von 1,0 m (DK I bzw. DK II-Bereich) schwankt in den Grenzen von  $GT = 470,4$  bis  $566,9$  kg/m<sup>2</sup> und hält die Anforderungen von  $GT \geq 260$  kg/m<sup>2</sup> sicher ein.

Der Gesamttongehalt bezogen auf eine Dicke der geotechnischen Barriere von 5,0 m (DK III-Bereich) schwankt in den Grenzen von  $GT = 2.352,1$  bis  $2.834,3$  kg/m<sup>2</sup> und hält die Anforderungen von  $GT \geq 1.300$  kg/m<sup>2</sup> sicher ein.

Die einzelnen Körnungslinien sind der **Anlage 3.2** zu entnehmen. In der **Anlage 3.1** ist eine statistische Auswertung durchgeführt worden. Sämtliche Körnungslinien entsprechen den in Kapitel 2 aufgelisteten Anforderungen.

An den Proben, die für den Nachweis der Langzeitbeständigkeit verwendet wurden, sind ergänzend 2 Korngrößenverteilungen bestimmt worden. Die Ergebnisse zeigen insgesamt einen höheren Schluffanteil und einen geringeren Sandanteil. Die Gesamttongehalte werden jedoch bei Ansatz einer minimalen Trockendichte von  $1,610$  t/m<sup>3</sup> ( $D_{Pr} = 95\%$ ) durchgängig sicher erreicht.

### 3.2.2 Proctordichte, Korndichte, Verdichtungsgrad und Luftporengehalt

Seitens der Limes wurden zwei Proctorversuche durchgeführt. Für die in enger Bandbreite liegenden Körnungsbänder wurden Proctordichten von  $\rho_{Pr} = 1,69$  und  $1,70$  t/m<sup>3</sup> mit einem optimalen Wassergehalt von  $w_n = 18,5$  und  $19,0$  % ermittelt. Die einzelnen Proctorversuche sind der **Anlage 3.4** zu entnehmen. In der **Anlage 3.1** ist eine statistische Auswertung durchgeführt worden.

Zur Ermittlung des Verdichtungsgrades wurden an den insgesamt 5 entnommenen ungestörten Proben die Trockendichten ermittelt. Unter Zugrundelegung eines Bezugsproctors von  $\rho_{Pr} = 1,70$  t/m<sup>3</sup> wurden Verdichtungsgrade zwischen  $D_{Pr} = 97,3$  % bis  $100,5$  % festgestellt. Der geforderte Wert beträgt  $D_{Pr} \geq 95,0$  %. Bei Zugrundelegung der Proctordichte von

$\rho_{Pr} = 1,70 \text{ t/m}^3$  sind somit bei den entnommenen Proben keine Grenzwertunterschreitungen des geforderten Verdichtungsgrades zu verzeichnen.

Im Baufeld wird die Proctordichte gemäß QMP in regelmäßigen Intervallen überprüft und bei Abweichungen entsprechend verifiziert.

Die entsprechenden Korndichten wurden an insgesamt 2 Bodenproben ermittelt und liegen bei 2,610 und 2,612  $\text{t/m}^3$ . Bei den Bodenproben, bei denen eine Bestimmung der Korndichte nicht durchgeführt wurde, erfolgte die Berechnung des Luftporengehaltes unter Zugrundelegung der gemittelten Korndichte von 2,61  $\text{t/m}^3$ . Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1** und der **Anlage 3.4** zu entnehmen.

Von dem eingebauten mineralischen Material wurden mit den gemittelten Korndichten, Trockendichten und Wassergehalten die Luftporengehalte berechnet. Diese liegen im Bereich zwischen  $n_a = 3,4$  bis 7,0. Die Anforderung von  $n_a \leq 5,0 \%$  wurde bei 2 von 5 Proben nicht erfüllt. Diese Proben wurden auf dem „trockenen Ast“ der Proctorkurve eingebaut. Die 3 Proben mit anforderungskonformen Luftporengehalten  $< 5\%$  wurden im optimalen Bereich bzw. auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve eingebaut. Zukünftig ist eine Bewässerung anzustreben, die im Bereich zwischen 18,5 und 23,0 („nasser“ Ast der Proctorkurve) liegt, wodurch auch die Verarbeitbarkeit des Tonmaterials verbessert wird

### 3.2.3 Wassergehalte

Die an 9 Proben ermittelten Wassergehalte aus den Ausstechzylinderversuchen und den Mischproben liegen in einem Bereich zwischen  $w_{nat.} = 17,1$  bis 19,9 %. Der Einbauwassergehalt liegt hauptsächlich im optimalen Bereich. Beim Einbau sollte der Wassergehalt unter Berücksichtigung der Bezugsproctoren auf  $w = 18,5$  bis 23,0 % eingestellt werden, um eine gute Verarbeitbarkeit und einen anforderungskonformen Luftporengehalt zu erzielen. Der geforderte Verdichtungsgrad ist auch bei Unterschreitung des optimalen Wassergehaltes erzielbar.

Sämtliche Versuchsergebnisse sowie eine statistische Auswertung sind der **Anlage 3.1** zu entnehmen.

### 3.2.4 Wasserdurchlässigkeit

An 5 Ausstechzylinderproben in der Bandbreite zwischen  $D_{Pr} = 97,3 \%$  bis 100,5 % wurden die Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen gemäß DIN EN ISO 17892-11 durchgeführt. Die Ergebnisse liegen zwischen  $k_f = 3,1 \cdot 10^{-12}$  bis  $1,1 \cdot 10^{-10}$  m/s. Die bei einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  ermittelten Ergebnisse liegen dementsprechend im Anforderungsbereich von  $k \leq 5,0 \cdot 10^{-10}$  m/s (kritischster, einzuhaltender Wert der DepV für mineralische Dichtungen).

In den geplanten, weiteren Untersuchungen des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes sind künstlich hergestellte Proben bei  $D_{Pr} = 95 \%$  (minimaler Anforderungswert des Verdichtungsgrades auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve) und unter Berücksichtigung von wasserdurchlässigkeitsbeeinflussende Faktoren (wie Temperatur (Frost- und Schwindrisse), Wassergehaltsänderungen und Sickerwasserangriffe) zu untersuchen.

Sämtliche Versuchsergebnisse sowie eine statistische Auswertung sind der **Anlage 3.1** zu entnehmen. Weiterhin sind die zeitlichen Verläufe in der **Anlage 3.3** dargestellt.

### 3.2.5 Zustandsgrenzen

Die Zustandsgrenzen wurden an 2 Proben untersucht. Die Fließgrenze wurde zu  $w_L = 43,9$  und 44,2 % bestimmt. Die Ausrollgrenze beträgt  $w_A = 13,1$  bis 14,2 %. Die Zustandsform des Materials

kann mit Konsistenzzahlen zwischen  $I_c = 0,840$  bis  $0,868$  als steif charakterisiert werden. Die geforderte Konsistenzzahl  $I_c \geq 0,75$  und die Anforderungen an die Fließgrenze von  $w_L \geq 35$  % werden eingehalten. Das Material ist ein mittelplastischer Ton. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1 bzw. 3.6** zu entnehmen.

### 3.2.6 Kalkgehalt

Der Kalkgehalt wurde an 2 Proben bestimmt. Die Werte schwanken im Bereich zwischen 25,8 und 28,4 %. Der Kalziumcarbonatanteil liegt somit unter dem Maximalwert von 30 Gew.-% der BQS 5-0 bzw. 5-1 für Oberflächenabdichtungssysteme. In Basisabdichtungssystemen ist das Material nur einbaubar, wenn nachgewiesen wird, dass die Wirksamkeit der mineralischen Dichtung hierdurch nicht beeinträchtigt wird. In der Regel ist gemäß BQS 2-1 ein Grenzwert von  $V_{Ca} \leq 15$  % in Basisabdichtungssystemen einzuhalten, wenn mit kalkaggressivem Sickerwasser zu rechnen ist. Dies ist projektspezifisch zu prüfen. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1** und der **Anlage 3.7** zu entnehmen.

### 3.2.7 Glühverlust

Der Glühverlust wurde an 2 Proben bestimmt. Die ermittelten Werte liegen bei 3,4 und 3,8 %. Der Anteil an organischer Substanz liegt somit unter dem Maximalwert von 5 Gew.-% der BQS 2-1 bzw. 5-1 für natürliche organogene Böden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1** und der **Anlage 3.8** zu entnehmen.

### 3.2.8 Wasseraufnahmefähigkeit

Die Wasseraufnahmefähigkeit wurde an 2 Proben bestimmt. Die Werte schwanken im Bereich zwischen  $w_{max} = 64,2$  und  $65,8$  %. Die Werte liegen im materialtypischen Bereich (mittlere Wasseraufnahmekapazität) und dienen nur der charakteristischen Beschreibung des Materials. Für die Wasseraufnahmefähigkeit sind keine Anforderungen oder Grenzwerte benannt. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1** und der **Anlage 3.9** zu entnehmen.

### 3.2.9 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit wurde an einer Probe gemäß DIN EN ISO 17892-10 im direkten Scherversuch bei einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 95$  % bestimmt. Der Reibungswinkel im Bruchzustand beträgt  $\varphi' = 25,4^\circ$ . Die Kohäsion wurde zu  $c' = 2,0$  kN/m<sup>2</sup> bestimmt. Der Nachweis der Standsicherheit für das Abdichtungssystem ist auf Grundlage der Ergebnisse zu erstellen bzw. zu verifizieren. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1 und der Anlage 3.10** zu entnehmen.

### 3.2.10 Kompressionsversuch

Der Kompressionsversuch wurde gemäß DIN EN ISO 17892-5 durchgeführt. Die Proben wurden hierzu, bei dem eingestellten natürlichen Wassergehalt mit Proctorenergie auf  $D_{Pr} = 95$  % verdichtet, in einen Prüfszylinder eingebaut. Es wurden 5 Laststufen mit Auflastspannungen von  $\sigma = 50, 100, 200, 400$  und  $800$  kN/m<sup>2</sup> aufgebracht und die vollständig abgeklungene, spezifische Setzung dokumentiert. Der Prüfszylinder wurde im Versuchsstand unter Wasser eingespannt. Das Steifemodul beträgt  $E_s = 34,96$  MN/m<sup>2</sup> bei einer resultierenden Auflastspannung von  $800$  kN/m<sup>2</sup>. Die ermittelten Ergebnisse können für geotechnische Nachweise (z.B. Setzungsberechnungen) in einem Abdichtungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 2.1 und der Anlage 2.11** zu entnehmen.



### 3.2.11 Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde gemäß DIN EN ISO 17892-7 bestimmt. Der Probekörper wurde im Proctortopf mit einem eingestellten Wassergehalt von  $w = 23,1 \%$  auf eine Trockendichte von  $1,620 \text{ g/cm}^3$  verdichtet. Der resultierende Verdichtungsgrad beträgt damit unter Berücksichtigung der Bezugsproctoren  $D_{Pr} = 95 \%$ . Die ermittelte Druckfestigkeit der Mischprobe beträgt unter Berücksichtigung der eingestellten Randparameter  $q_u = 99,2 \text{ kN/m}^2$  bei einer Bruchstauchung von  $23,6 \%$ . Die ermittelten Ergebnisse können für geotechnische Nachweise in einem Abdichtungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.1** und der **Anlage 3.12** zu entnehmen.

### 3.2.12 Chemische Untersuchungen

Die Bestimmung der chemischen Schadstoffparameter gemäß DepV, Anhang 3, Tabelle 2, Spalte 5, erfolgte im Unterauftrag durch die gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 als Prüflabor akkreditierte Biomar GmbH mit Sitz in Gladbeck. Der Prüfbericht inkl. dem Probenbegleitprotokoll gemäß DIN 19757:2009-07 ist diesem Schreiben als Anlage beigefügt.

Im Prüfbericht der Biomar GmbH (Prüfberichts-Nr. 2022/2574 vom 27.07.2022) werden die Zuordnungswerte der Spalte 5 (DK 0) mit Ausnahme des Parameter Glühverlustes vollumfänglich eingehalten. Gemäß Fußnote 2a zur Tabelle 2 des Anhangs 3 der DepV sind für Bodenmaterial ohne Fremdbestandteile Überschreitungen beim Glühverlust bis 5 Masse-% zulässig, so dass diese Überschreitung nicht relevant ist. Im Übrigen ist gemäß Fußnote 2 zur Tabelle 2 des Anhangs 3 der DepV die Parameter TOC und Glühverlust gleichwertig anzuwenden, so dass die Einhaltung jeweils nur eines Parameters für eine Bewertung erforderlich ist.

### 3.2.13 Balkenbiegezugversuch

Zur Versuchsdurchführung wurde das Material mit einem Wassergehalt von  $w_{95} = 23,3 \%$  in einer Prüfform mit den Abmessungen  $200 \times 50 \times 50$  (L x B x H in mm) gleichmäßig verdichtet eingebaut (Trockendichte  $\rho_d = 1,61 \text{ t/m}^3$ ). Der Probekörper wurde anschließend aus der Prüfform ausgeschalt und umgehend danach dem Versuchsstand der Biegezugprüfung überführt.

Der **Biegezugversuch** wurde in Anlehnung an DIN EN 12390-5 mit einer Geschwindigkeit von  $v = 0,5 \text{ mm/min}$  und einer Stützweite von  $d = 160 \text{ mm}$  durchgeführt. Bei Maximalkraft wurde eine Biegedehnung von  $\epsilon_{fm} = 1,57 \%$  ermittelt. Die projektbezogene Vorgabe an die Grenzdehnung ist mit den vorliegenden Werten abzugleichen. Ein erste Rissbildung konnte bei einem Stichmaß von  $h > 1,36 \text{ mm}$  beobachtet werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 3.15** zu entnehmen.

### 3.2.14 Zusammenfassung der bodenmechanischen Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass sich das Material bei Einstellung des Wassergehaltes gut als Dichtungsmaterial eingesetzt werden kann. Die Einhaltung der projektspezifischen Anforderungen ist jeweils in einem Probefeld zu überprüfen. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse liefert die nachfolgende **Tabelle**.



**Tabelle 3: Laborergebnisse „gelber Ton“**

Prüfmerkmal	Prüfung gem.	Soll-Wert	Probenanzahl		Ergebnisse		Anford. erfüllt
			Soll	Ist	Min	Max	
Kornverteilung [%] Ton/Schluff/Sand/Kies	DIN EN ISO 17892-4	T ≥ 20	2	4	29,3/38,2/26,5/0,0 25,2/58,6/9,9/0,1	35,1/44,2/26,7/0,0 25,9/64,7/15,3/0,2	Ja
Gesamttongehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	LANUV Nr. 13	GT ≥ 260 (DK I u. II)	5	7	470,4	566,9	Ja
		GT ≥ 1.300 (DK III)	5	7	2.352,1	2.834,3	ja
K-Wert [m/s]	DIN EN ISO 17892-11	k ≤ 5,0E-09 m/s <sup>1)</sup> k ≤ 1,0E-09 m/s <sup>2)</sup> k ≤ 5,0E-10 m/s <sup>3)</sup>	5	5	3,1E-12	1,1E-10	Ja Ja ja
Wassergehalt [%]	DIN EN ISO 17892-1	18,5 – 23,0*	5	9	17,1	19,9	(ja)**
Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]	DIN 18125-2	≥ 1,615*	5	5	1,65	1,71	ja
Verdichtungsgrad [%]	DIN 18125-2	≥ 95,0	5	5	97,3	100,5	ja
Luftporengehalt [%]	DIN 18125-2	≤ 5,0	5	5	3,4	7,0	(ja)**
Proctordichte [g/cm <sup>3</sup> ] opt. Wassergehalt [%]	DIN 18127	Projektspezifisch prüfen	2	2	1,69	1,70	ja
			2	2	18,5	19,0	ja
Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]	DIN EN ISO 17892-3	Projektspezifisch prüfen	2	2	2,610	2,612	ja
Fließgrenze [%]	DIN EN ISO	≥ 35	2	5	43,9	44,2	ja
Konsistenzzahl [-]	17892-12	≥ 0,75	2	5	0,840	0,868	ja
Glühverlust [%]	DIN 18128	≤ 5,0	2	2	3,4	3,8	ja
Kalkgehalt [%]	DIN 18129	≤ 15,0	2	2	25,8	28,4	Nein
		Nur bei kalkaggressivem Sickerwasser in einer Basisabdichtung relevant ≤ 30,0 Grundsätzliche Anforderung (OFA und Basis)					ja
Wasseraufnahmekapazität [%]	DIN 18132	Projektspezifisch prüfen	2	2	64,2	65,8	ja
Reibungswinkel [° ] Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]	DIN EN ISO 17892-10	Projektspezifisch prüfen	1	1	25,4		ja
			1	1	2,0		ja
Steifemodul Es [MN/m <sup>2</sup> ] bei 800 kN/m <sup>2</sup> Auflastspannung	DIN EN ISO 17892-5	Projektspezifisch prüfen	1	1	35,0		ja
Druckfestigkeit [kN/m <sup>2</sup> ] Bruchstauchung [%]	DIN EN ISO 17892-7	Projektspezifisch prüfen	1	1	99,2		ja
					23,6		
Balkenbiegeversuch (Dehnung in %)	i.A. an DIN EN 12390-5	Projektspezifisch prüfen	1	1	1,57		ja
chem. Parameter	DepV, A 3, Tab. 2	Spalte 5	1	1	Unter Berücksichtigung der Fußnote 2a zu nebenstehender Tabelle 2 im Anhang 3 der DepV vollumfänglich eingehalten		ja

<sup>1)</sup> Grenzwert für eine geologische/geotechnische Barriere in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III)

<sup>2)</sup> Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK I und II)

<sup>3)</sup> Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III) und in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK III)

\* basierend auf den Ergebnissen der Mischproben

\*\* sicher erzielbar, bei Einbau auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve

\*\*\* Einstellung des Wassergehaltes auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve erforderlich

### 3.3 Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen „Übergangshorizont“

#### 3.3.1 Korngrößenverteilungen

Im Rahmen des Probefeldes wurde das Tonmaterial an insgesamt 2 Bodenproben hinsichtlich der Korngrößenverteilung untersucht. Der untersuchte Boden ist hauptsächlich ein stark sandiges Ton-Schluff-Gemisch, das gemäß DIN 18196 der Bodengruppe der mittelplastischen Tone zuzuordnen ist. Der Tongehalt schwankt in den Grenzen von 22,0 bis 23,6 Gew.-%. Der Schluffanteil beträgt 46,8 bis 46,9 Gew.-%. Die Sandgehalte liegen zwischen 28,7 und 30,3 Gew.-%. Der Anteil der Kornfraktion d > 2 mm (Kiesanteil) liegt bei allen untersuchten Proben bei maximal 0,9 Gew.-%.

Der Tongehalt liegt damit über der Empfehlung des LANUV-Merkblattes Nr. 6 von  $\geq 20 \%$ . Der Tonmineralgehalt wurde seitens der LIMES GmbH nicht bestimmt. Untersuchungen des ehem. Tongrubenbetreibers zeigen jedoch, dass der Anforderungswert für den Tonmineralgehalt von  $\geq 10 \%$  sicher eingehalten wird.

Der Gesamttongehalt als Maßgabe für das Schadstoffrückhaltevermögen der geotechnischen Barriere wurde für jede Probe gemäß LANUV-Arbeitsblatt Nr. 13, Kapitel 1.2.2, S. 11, berechnet.

$$GT = 10 \cdot c_t \cdot \rho_d \cdot d$$

mit	
GT	Gesamttongehalt in $\text{kg}/\text{m}^2$
$c_t$	spezifischer Tongehalt in Gew.-%
$\rho_d$	Trockendichte in $\text{t}/\text{m}^3$ (oder Proctordichte $\cdot 0,95$ in $\text{t}/\text{m}^3$ )
d	Dicke der geotechnischen Barriere in m

Der Gesamttongehalt bezogen auf eine Dicke der geotechnischen Barriere von 1,0 m (DK I bzw. DK II-Bereich) schwankt in den Grenzen von  $GT = 376,2$  bis  $413,6 \text{ kg}/\text{m}^2$  und hält die Anforderungen von  $GT \geq 260 \text{ kg}/\text{m}^2$  sicher ein.

Der Gesamttongehalt bezogen auf eine Dicke der geotechnischen Barriere von 5,0 m (DK III-Bereich) schwankt in den Grenzen von  $GT = 1.881,0$  bis  $2.068,0 \text{ kg}/\text{m}^2$  und hält die Anforderungen von  $GT \geq 1.300 \text{ kg}/\text{m}^2$  sicher ein.

Die einzelnen Körnungslinien sind der **Anlage 4.2** zu entnehmen. In der **Anlage 4.1** ist eine statistische Auswertung durchgeführt worden. Sämtliche Körnungslinien entsprechen den in Kapitel 2 aufgelisteten Anforderungen.

### 3.3.2 Proctordichte, Korndichte, Verdichtungsgrad und Luftporengehalt

Seitens der Limes wurden zwei Proctorversuche durchgeführt. Für die in enger Bandbreite liegenden Körnungsbänder wurden Proctordichten von  $\rho_{Pr} = 1,78$  und  $1,80 \text{ t}/\text{m}^3$  mit einem optimalen Wassergehalt von  $w_n = 14,9$  und  $15,5 \%$  ermittelt. Die einzelnen Proctorversuche sind der **Anlage 4.4** zu entnehmen. In der **Anlage 4.1** ist eine statistische Auswertung durchgeführt worden.

Zur Ermittlung des Verdichtungsgrades wurden an den insgesamt 5 entnommenen ungestörten Proben die Trockendichten ermittelt. Unter Zugrundelegung eines Bezugsproctors von  $\rho_{Pr} = 1,79 \text{ t}/\text{m}^3$  wurden Verdichtungsgrade zwischen  $D_{Pr} = 98,2 \%$  bis  $101,3 \%$  festgestellt. Der geforderte Wert beträgt  $D_{Pr} \geq 95,0 \%$ . Bei Zugrundelegung der Proctordichte von  $\rho_{Pr} = 1,79 \text{ t}/\text{m}^3$  sind somit bei den entnommenen Proben keine Grenzwertunterschreitungen des geforderten Verdichtungsgrades zu verzeichnen.

Im Baufeld wird die Proctordichte gemäß QMP in regelmäßigen Intervallen überprüft und bei Abweichungen entsprechend verifiziert.

Die entsprechenden Korndichten wurden an insgesamt 2 Bodenproben ermittelt und liegen bei  $2,632$  und  $2,645 \text{ t}/\text{m}^3$ . Bei den Bodenproben, bei denen eine Bestimmung der Korndichte nicht durchgeführt wurde, erfolgte die Berechnung des Luftporengehaltes unter Zugrundelegung der gemittelten Korndichte von  $2,64 \text{ t}/\text{m}^3$ . Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.5** zu entnehmen.

Von dem eingebauten mineralischen Material wurden mit den gemittelten Korndichten, Trockendichten und Wassergehalten die Luftporengehalte berechnet. Diese liegen im Bereich zwischen  $n_a = 4,8$  bis  $10,6$ . Die Anforderung von  $n_a \leq 5,0 \%$  wurde bei 4 von 5 Proben nicht erfüllt. Der Grenzwert für den Luftporengehalt ist zwingend einzuhalten, wenn der Einbau auf dem „trockenen

Ast" der Proctorkurve erfolgt, wie im Probefeld praktiziert. Zukünftig ist eine Bewässerung anzustreben, die im Bereich zwischen 15,0 und 19,7 („nassen“ Ast der Proctorkurve) liegt, auch um eine bessere Verarbeitbarkeit zu erzielen.

### 3.3.3 Wassergehalte

Die an 9 Proben ermittelten Wassergehalte aus den Ausstechzylinderversuchen und den Mischproben liegen in einem Bereich zwischen  $w_{\text{nat.}} = 12,7$  bis 16,0 %. Der Einbauwassergehalt liegt teilweise deutlich unter dem optimalen Wassergehalt  $w_{\text{opt.}}$ . Beim Einbau sollte der Wassergehalt unter Berücksichtigung der Bezugsproctoren auf  $w = 15,0$  bis 19,7 % eingestellt werden, um eine gute Verarbeitbarkeit und einen anforderungskonformen Luftporengehalt zu erzielen. Der geforderte Verdichtungsgrad ist auch bei Unterschreitung des optimalen Wassergehaltes erzielbar.

Sämtliche Versuchsergebnisse sowie eine statistische Auswertung sind der **Anlage 4.1** zu entnehmen.

### 3.3.4 Wasserdurchlässigkeit

An 5 Ausstechzylinderproben in der Bandbreite zwischen  $D_{\text{pr}} = 98,2$  % bis 101,3 % wurden die Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen gemäß DIN EN ISO 17892-11 durchgeführt. Die Ergebnisse liegen zwischen  $k_f = 1,2 \cdot 10^{-10}$  bis  $4,5 \cdot 10^{-10}$  m/s. Die bei einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  ermittelten Ergebnisse liegen dementsprechend im Anforderungsbereich von  $k \leq 5,0 \cdot 10^{-10}$  m/s (kritischster, einzuhaltender Wert der DepV für mineralische Dichtungen).

In den geplanten, weiteren Untersuchungen des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes sind künstlich hergestellte Proben bei  $D_{\text{pr}} = 95$  % (minimaler Anforderungswert des Verdichtungsgrades auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve) und unter Berücksichtigung von wasserdurchlässigkeitsbeeinflussende Faktoren (wie Temperatur (Frost- und Schwindrisse), Wassergehaltsänderungen und Sickerwasserangriffe) zu untersuchen.

Sämtliche Versuchsergebnisse sowie eine statistische Auswertung sind der **Anlage 4.1** zu entnehmen. Weiterhin sind die zeitlichen Verläufe in der **Anlage 4.3** dargestellt.

### 3.3.5 Zustandsgrenzen

Die Zustandsgrenzen wurden an 2 Proben untersucht. Die Fließgrenze wurde zu  $w_L = 37,0$  und 38,7 % bestimmt. Die Ausrollgrenze beträgt  $w_A = 13,9$  bis 14,2 %. Die Zustandsform des Materials kann mit Konsistenzzahlen zwischen  $I_c = 0,994$  bis 1,021 als steif bis halbfest charakterisiert werden. Die geforderte Konsistenzzahl  $I_c \geq 0,75$  und die Anforderungen an die Fließgrenze von  $w_L \geq 35$  % werden eingehalten. Das Material ist ein mittelplastischer Ton. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1 bzw. 4.6** zu entnehmen.

### 3.3.6 Kalkgehalt

Der Kalkgehalt wurde an 2 Proben bestimmt. Die Werte schwanken im Bereich zwischen 37,4 und 42,8 %. Der Kalziumcarbonatanteil liegt somit über dem Maximalwert von 30 Gew.-% der BQS 5-0 bzw. 5-1 für Oberflächenabdichtungssysteme. In Basisabdichtungssystemen ist das Material nur einbaubar, wenn nachgewiesen wird, dass die Wirksamkeit der mineralischen Dichtung hierdurch nicht beeinträchtigt wird. In der Regel ist gemäß BQS 2-1 ein Grenzwert von  $V_{\text{Ca}} \leq 15$  % in Basisabdichtungssystemen einzuhalten, wenn mit kalkaggressivem Sickerwasser zu rechnen ist. Der Einsatz des Materials ist demnach nur mit Einzelfallzustimmung der Behörde möglich. Dies ist projektspezifisch zu prüfen. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.7** zu entnehmen.

### 3.3.7 Glühverlust

Der Glühverlust wurde an 2 Proben bestimmt. Die ermittelten Werte liegen bei 2,5 und 2,9 %. Der Anteil an organischer Substanz liegt somit unter dem Maximalwert von 5 Gew.-% der BQS 2-1 bzw. 5-1 für natürliche organogene Böden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.8** zu entnehmen.

### 3.3.8 Wasseraufnahmefähigkeit

Die Wasseraufnahmefähigkeit wurde an 2 Proben bestimmt. Die Werte schwanken im Bereich zwischen  $w_{\max} = 51,6$  und  $58,1$  %. Die Werte liegen im materialtypischen Bereich (niedrige Wasseraufnahmekapazität) und dienen nur der charakteristischen Beschreibung des Materials. Für die Wasseraufnahmefähigkeit sind keine Anforderungen oder Grenzwerte benannt. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.9** zu entnehmen.

### 3.3.9 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit wurde an einer Proben gemäß DIN EN ISO 17892-10 im direkten Scherversuch bei einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 95$  % bestimmt. Der Reibungswinkel im Bruchzustand beträgt  $\phi' = 23,0^\circ$ . Die Kohäsion wurde zu  $c' = 11,0$  kN/m<sup>2</sup> bestimmt. Der Nachweis der Standsicherheit für das Abdichtungssystem ist auf Grundlage der Ergebnisse zu erstellen bzw. zu verifizieren. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.10** zu entnehmen.

### 3.3.10 Kompressionsversuch

Der Kompressionsversuch wurde gemäß DIN EN ISO 17892-5 durchgeführt. Die Proben wurden hierzu, bei dem eingestellten natürlichen Wassergehalt mit Proctorenergie auf  $D_{Pr} = 95$  % verdichtet, in einen Prüfszylinder eingebaut. Es wurden 5 Laststufen mit Auflastspannungen von  $\sigma = 50, 100, 200, 400$  und  $800$  kN/m<sup>2</sup> aufgebracht und die vollständig abgeklungene, spezifische Setzung dokumentiert. Der Prüfszylinder wurde im Versuchsstand unter Wasser eingespannt. Das Steifemodul beträgt  $E_s = 19,9$  MN/m<sup>2</sup> bei einer resultierenden Auflastspannung von  $800$  kN/m<sup>2</sup>. Die ermittelten Ergebnisse können für geotechnische Nachweise (z.B. Setzungsberechnungen) in einem Abdichtungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.11** zu entnehmen.

### 3.3.11 Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde gemäß DIN EN ISO 17892-7 bestimmt. Der Probekörper wurde im Proctortopf mit einem eingestellten Wassergehalt von  $w = 19,7$  % auf eine Trockendichte von  $1,710$  g/cm<sup>3</sup> verdichtet. Der resultierende Verdichtungsgrad beträgt damit unter Berücksichtigung der Bezugsproctoren  $D_{Pr} = 95$  %. Die ermittelte Druckfestigkeit der Mischprobe beträgt unter Berücksichtigung der eingestellten Randparameter  $q_u = 104,9$  kN/m<sup>2</sup> bei einer Bruchstauchung von  $14,2$  %. Die ermittelten Ergebnisse können für geotechnische Nachweise in einem Abdichtungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse sind der **Anlage 4.1** und der **Anlage 4.12** zu entnehmen.

### 3.3.12 Chemische Untersuchungen

Die Bestimmung der chemischen Schadstoffparameter gemäß DepV, Anhang 3, Tabelle 2, Spalte 5, erfolgte im Unterauftrag durch die gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 als Prüflabor akkreditierte Biomar GmbH mit Sitz in Gladbeck. Der Prüfbericht inkl. dem Probenbegleitprotokoll gemäß DIN 19757:2009-07 ist diesem Schreiben als Anlage beigelegt.

Im Prüfbericht der Biomar GmbH (Prüfberichts-Nr. 2022/2573 vom 27.07.2022) werden die Zuordnungswerte der Spalte 5 (DK 0) mit vollumfänglich eingehalten.

### 3.3.13 Zusammenfassung der bodenmechanischen Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass sich das Material bei Einstellung des Wassergehaltes gut als Dichtungsmaterial eingesetzt werden kann. Die Einhaltung der projektspezifischen Anforderungen ist jeweils in einem Probefeld zu überprüfen. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse liefert die nachfolgende **Tabelle**.

**Tabelle 4:** Laborergebnisse „Übergangshorizont“

Prüfmerkmal	Prüfung gem.	Soll-Wert	Probenanzahl		Ergebnisse		Anford. erfüllt
			Soll	Ist	Min	Max	
Kornverteilung [%] Ton/Schluff/Sand/Kies	DIN EN ISO 17892-4	T ≥ 20	2	2	22,0/46,8/28,7/0,8	23,6/46,9/30,3/0,9	ja
Gesamttongehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	LANUV Nr. 13	GT ≥ 260 (DK I u. II) GT ≥ 1.300 (DK III)	5 5	7 7	376,2 1.881,0	413,6 2.068,0	Ja ja
K-Wert [m/s]	DIN EN ISO 17892-11	k ≤ 5,0E-09 m/s <sup>1</sup> k ≤ 1,0E-09 m/s <sup>2</sup> k ≤ 5,0E-10 m/s <sup>3</sup>	5	5	1,2E-10	4,5E-10	Ja Ja ja
Wassergehalt [%]	DIN EN ISO 17892-1	15,0 – 19,7*	5	9	12,7	16,0	Nein***
Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]	DIN 18125-2	≥ 1,70*	5	5	1,76	1,81	ja
Verdichtungsgrad [%]	DIN 18125-2	≥ 95,0	5	5	98,2	101,3	ja
Luftporengehalt [%]	DIN 18125-2	≤ 5,0	5	5	4,8	10,6	Nein**
Proctordichte [g/cm <sup>3</sup> ] opt. Wassergehalt [%]	DIN 18127	Projektspezifisch prüfen	2 2	2 2	1,78 14,9	1,80 15,5	ja ja
Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]	DIN EN ISO 17892-3	Projektspezifisch prüfen	2	2	2,632	2,645	ja
Fließgrenze [%]	DIN EN ISO 17892-12	≥ 35	2	5	37,0	38,7	ja
Konsistenzzahl [-]		≥ 0,75	2	5	0,994	1,021	ja
Glühverlust [%]	DIN 18128	≤ 5,0	2	2	2,5	2,9	ja
Kalkgehalt [%]	DIN 18129	≤ 15,0 Nur bei kalkaggressivem Sickerwasser in einer Basisabdichtung relevant ≤ 30,0 Grundsätzliche Anforderung (OFA und Basis)	2	2	37,4	42,8	Nein  nein
Wasseraufnahmekapazität [%]	DIN 18132	Projektspezifisch prüfen	2	2	51,6	58,1	ja
Reibungswinkel [°]	DIN EN ISO 17892-10	Projektspezifisch prüfen	1	1	23,0		ja
Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]			1	1	11,0		ja
Steifemodul Es [MN/m <sup>2</sup> ] bei 800 kN/m <sup>2</sup> Auflastspannung	DIN EN ISO 17892-5	Projektspezifisch prüfen	1	1	19,9		ja
Druckfestigkeit [kN/m <sup>2</sup> ] Bruchstauchung [%]	DIN EN ISO 17892-7	Projektspezifisch prüfen	1	1	104,9 14,2		ja
chem. Parameter	DepV, A 3, Tab. 2	Spalte 5	1	1	vollumfänglich eingehalten		ja

<sup>1)</sup> Grenzwert für eine geologische/geotechnische Barriere in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III)

<sup>2)</sup> Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK I und II)

<sup>3)</sup> Grenzwert für eine mineralische Abdichtungskomponente in einem Basisabdichtungssystem (DK I bis III) und in einem Oberflächenabdichtungssystem (DK III)

\* basierend auf den Ergebnissen der Mischproben

\*\* sicher erzielbar, bei Einbau auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve

\*\*\* Einstellung des Wassergehaltes auf dem „nassen“ Ast der Proctorkurve erforderlich

### 3.4 Weitergehende Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit („Gelber Ton“)

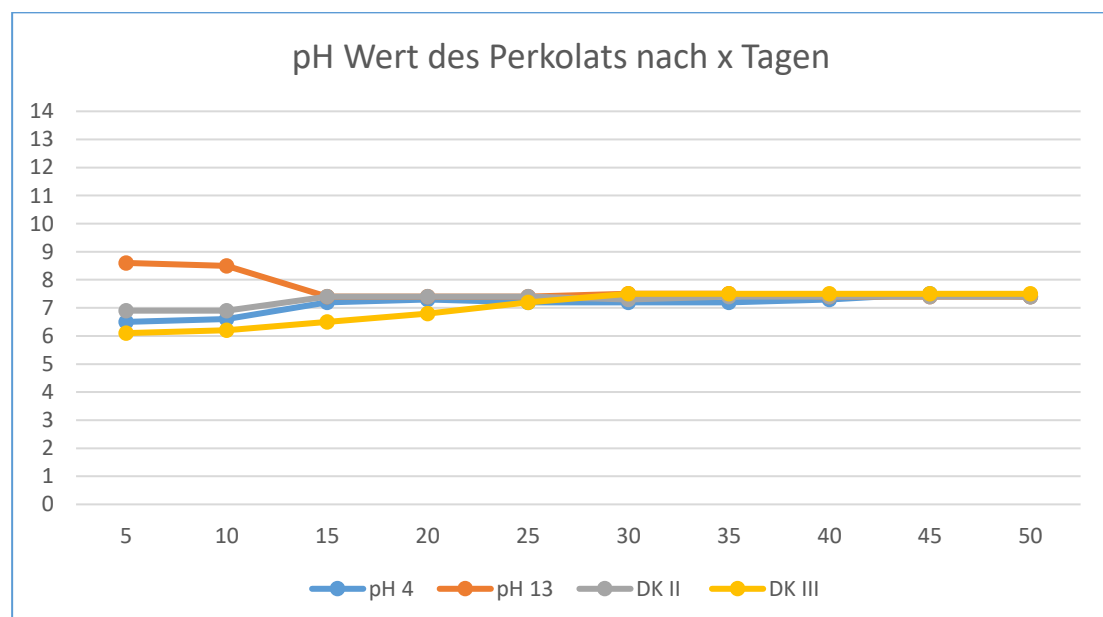
Die Probenahme und Bearbeitung der Proben erfolgte nach den vorgeschriebenen DIN-Normen und Prüfvorschriften. Nachfolgend sind die festgestellten bodenmechanischen Ergebnisse beschrieben und in der **Anlage 3.1** und der **Anlage 3.14** zusammenfassend dargestellt.

#### 3.4.1 Durchführung von Nullmessungen

Um die nachfolgenden Versuche einordnen zu können wurden im Labor der LIMES Nullmessungen am gelben Ton durchgeführt. Bei diesen Messungen kamen Probekörper zum Einsatz, welche mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 23,3 \%$  im Proctortopf verdichtet wurden. Die an den Nullproben ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen im Bereich von  $k = 6,3 \times 10^{-11}$  bis  $7,3 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ .

#### 3.4.2 Beständigkeit gegen Sickerwasser

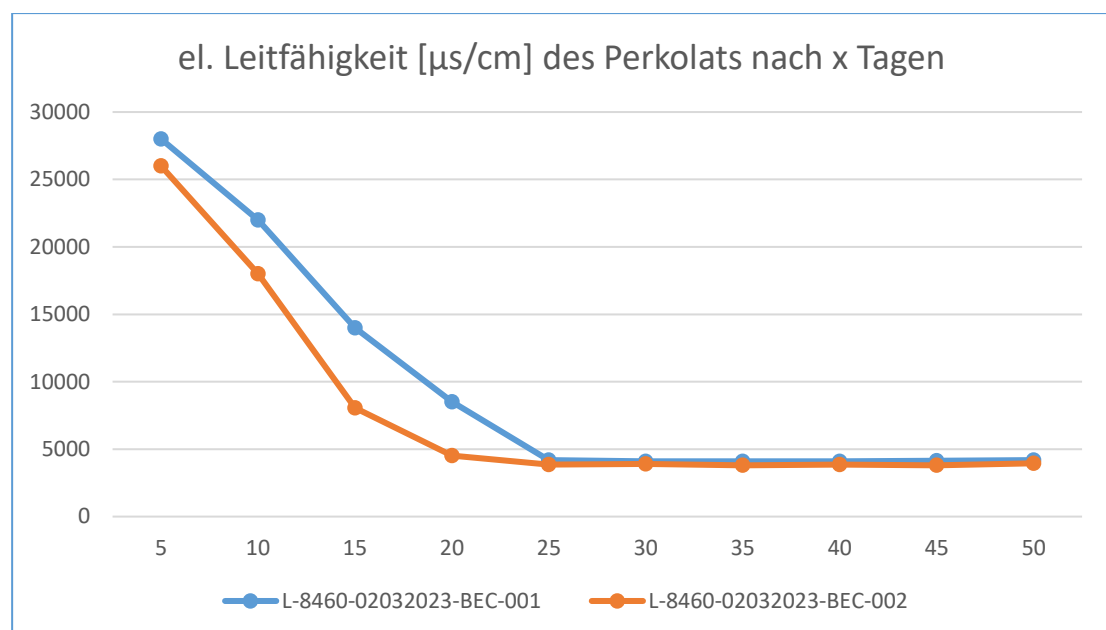
Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Sickerwasser der Deponieklassen II und III auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 23,3 \%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Als Perkolat wurde jeweils ein Modellsickerwasser einer Deponie der Deponiekategorie II und der Deponiekategorie III verwendet. Ebenfalls wurden parallel dazu im gleichen Aufbau Versuche mit Prüfflüssigkeiten  $\text{pH} = 4$  und  $\text{pH} = 13$  durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass keine der Prüfflüssigkeiten einen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 2,5 \times 10^{-11}$  bis  $1,2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die höchste Anforderung an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  sicher ein. Am aus den Probekörpern ausgetretenen Perkolat wurde in regelmäßigen Abständen der pH-Wert ermittelt. Die ermittelten Werte sind in der folgenden Grafik dargestellt.



**Abbildung 1:** Begleitende pH-Wert Messung im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („gelber Ton“)

### 3.4.3 Elektrische Leitfähigkeit

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von elektrischer Leitfähigkeit auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95\%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 23,3\%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Als Perkolat wurde eine Prüflüssigkeit mit einer elektrischen Leitfähigkeit von  $30.000 \text{ } \mu\text{s/cm}$  verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Prüflüssigkeit keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 1,4 \times 10^{-11}$  und  $1,8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die höchste Anforderung an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  sicher ein. Am aus den Probekörpern ausgetretenen Perkolat wurde in regelmäßigen Abständen die elektrische Leitfähigkeit ermittelt. Die ermittelten Werte sind in der folgenden Grafik dargestellt.



**Abbildung 2:** Bestimmung der elektr. LF im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („gelber Ton“)

### 3.4.4 DOC

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses eines erhöhten DOC-Wertes auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95\%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 23,3\%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Als Perkolat wurde eine Prüflüssigkeit mit einem DOC-Wert von  $1.100 \text{ g/l}$  verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Prüflüssigkeit keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 3,3 \times 10^{-11}$  und  $7,7 \times 10^{-11}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die höchste Anforderung an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  sicher ein.

### 3.4.5 Widerstand gegen hohe hydraulische Belastung

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von hoher hydraulischer Belastung auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95\%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 23,3\%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 42$  statt. Als Perkolat



wurde entlüftetes Leitungswasser verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die hohe hydraulische Belastung keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 6,5 \times 10^{-11}$  und  $6,7 \times 10^{-11}$  m/s im Bereich der Nullmessungen und halten die höchste Anforderung an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10}$  m/s sicher ein.

### 3.4.6 Beständigkeit gegenüber Temperaturen

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von unterschiedlichen Temperaturbedingungen auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95} \% = 23,3 \%$  im Proctortopf verdichtet. Der grundlegende Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Anders als zum Standardaufbau wurden die Triaxialzellen inklusive des verwendeten Perkolates in einem Kälteschrank bei  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  bzw. einem Wasserbad bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  gelagert. Als Perkolat wurde entlüftetes Leitungswasser verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die unterschiedlichen Temperaturbedingungen keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper haben. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 5,8 \times 10^{-11}$  und  $7,7 \times 10^{-11}$  m/s bei  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $k = 7,2 \times 10^{-11}$  und  $9,2 \times 10^{-11}$  m/s bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die höchste Anforderung an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10}$  m/s sicher ein.

### 3.4.7 Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Wassergehaltsänderungen auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,61 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95} \% = 23,3 \%$  im Proctortopf verdichtet.

Die Probekörper wurden nach Herstellung in einen Kälteschrank überführt, in welchem konstant ein Klima von  $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $rF = 60 \%$  herrschte. Dort wurden die Proben belassen, bis sich ein Wassergehalt von  $w = 16,9 \%$  eingestellt hat, der einer Saugspannung von  $pF = 3,2$  (1,58 bar) entspricht. Im nächsten Schritt wurde an dem getrockneten Probekörper die Wasserdurchlässigkeit ermittelt. Der grundlegende Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 60$  statt. Als Perkolat wurde entlüftetes Leitungswasser verwendet. Nach Abschluss des Versuches wurden die Probekörper erneut unter den o.g. Bedingungen getrocknet. Insgesamt wurden an den Probekörpern vier Nass-Trocken-Zyklen durchgeführt.

Durch die erste Trocknungsphase erfuhr der Probekörper eine Volumenreduktion von ca. 3 %, wodurch sich der Verdichtungsgrad von ursprünglich  $d_{pr} = 95 \%$  auf  $d_{pr} = 98 \%$  erhöhte. In den folgenden Zyklen nahm die Volumenreduktion ab, während die Trockendichte weiter anstieg. Mit jedem Trocknungsvorgang nahm der Ausbauwassergehalt nach der Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit ab, da die Probekörper eine höhere Ausgangstrockendichte hatten, welche einen verringerten Luftporengehalt zur Folge hatte.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die, durch die Trocken-Nass-Zyklen bedingten Änderungen der Trockendichte keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper haben. Die jeweils nach den Trocknungszyklen bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen zwischen  $k = 5,3 \times 10^{-11}$  und  $8,2 \times 10^{-11}$  m/s. Sie halten die höchste Anforderung an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10}$  m/s sicher ein.

### 3.5 Weitergehende Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit („Grauer Ton“)

Die Probennahme und Bearbeitung der Proben erfolgte nach den vorgeschriebenen DIN-Normen und Prüfvorschriften. Nachfolgend sind die festgestellten bodenmechanischen Ergebnisse beschrieben und in der **Anlage 2.1** und der **Anlage 2.14** zusammenfassend dargestellt.

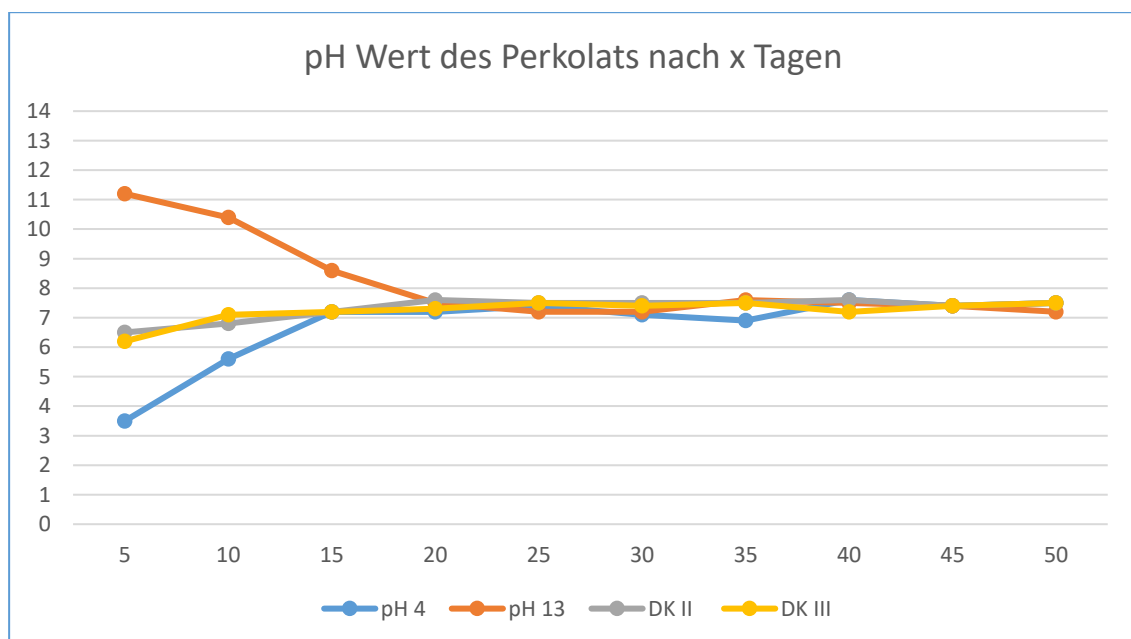
#### 3.5.1 Durchführung von Nullmessungen

Um die nachfolgenden Versuche einordnen zu können wurden im Labor der LIMES Nullmessungen am gelben Ton durchgeführt. Bei diesen Messungen kamen Probekörper zum Einsatz, welche mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95 \%} = 22,3 \%$  im Proctortopf verdichtet wurden. Die an den Nullproben ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen im Bereich von  $k = 7,4 \times 10^{-11}$  bis  $3,2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ .

#### 3.5.2 Beständigkeit gegen Sickerwasser

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Sickerwasser der Deponieklassen II und III auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95 \%} = 22,3 \%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Als Perkolat wurde jeweils ein Modellsickerwasser einer Deponie der Deponieklasse II und der Deponieklasse III verwendet. Ebenfalls wurden parallel dazu im gleichen Aufbau Versuche mit Prüfflüssigkeiten  $\text{pH} = 4$  und  $\text{pH} = 13$  durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass keine der Prüfflüssigkeiten einen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 7,8 \times 10^{-11}$  bis  $3,7 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die Anforderungen an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  sicher ein.

Am aus den Probekörpern ausgetretenen Perkolat wurde in regelmäßigen Abständen der pH-Wert ermittelt. Die ermittelten Werte sind in der folgenden Grafik dargestellt.



**Abbildung 3:** Begleitende pH-Wert Messung im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („grauer Ton“)

### 3.5.3 Elektrische Leitfähigkeit

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von elektrischer Leitfähigkeit auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95\%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 22,3\%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Als Perkolat wurde eine Prüfflüssigkeit mit einer elektrischen Leitfähigkeit von  $30.000 \mu\text{s/cm}$  verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Prüfflüssigkeit keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 8,2 \times 10^{-11}$  und  $1,3 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die Anforderungen an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  sicher ein.

Am aus den Probekörpern ausgetretenen Perkolat wurde in regelmäßigen Abständen die elektrische Leitfähigkeit ermittelt. Die ermittelten Werte sind in der folgenden Grafik dargestellt.

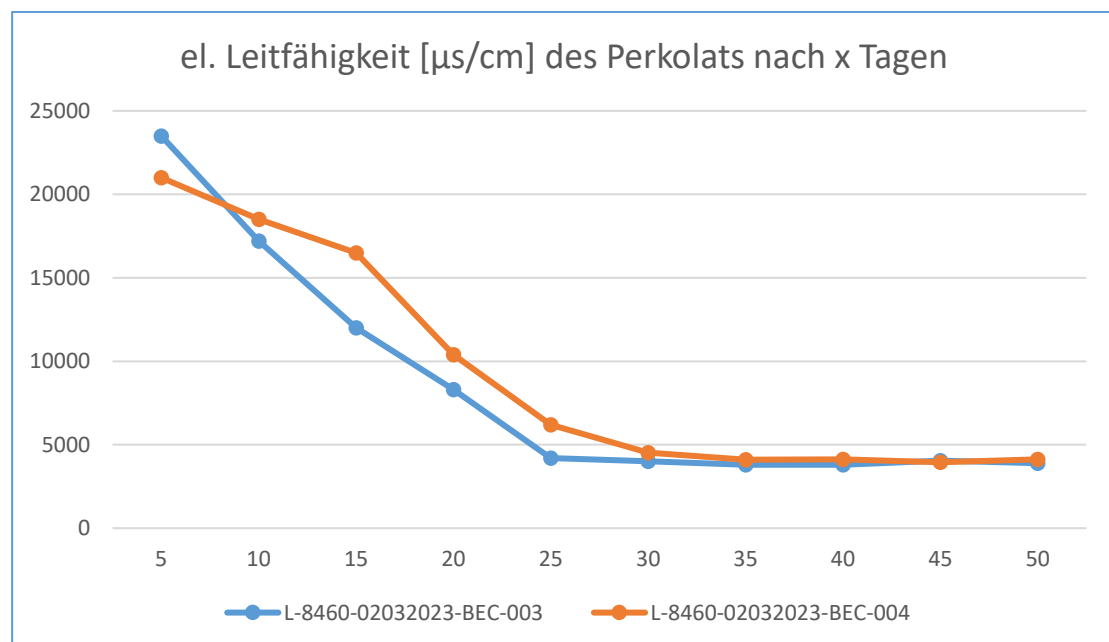


Abbildung 4: Bestimmung der elektr. LF im Perkolat der k-Wert-Bestimmung („grauer Ton“)

### 3.5.4 DOC

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses eines erhöhten DOC-Wertes auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95\%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 22,3\%$  im Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Als Perkolat wurde eine Prüfflüssigkeit mit einem DOC-Wert von  $1.100 \text{ g/l}$  verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Prüfflüssigkeit keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 7,5 \times 10^{-11}$  und  $3,2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die Anforderungen an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  sicher ein.

### 3.5.5 Widerstand gegen hohe hydraulische Belastung

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von hoher hydraulischer Belastung auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95\%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95\%} = 22,3\%$  im

Proctortopf verdichtet. Der Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 42$  statt. Als Perkolat wurde entlüftetes Leitungswasser verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die hohe hydraulische Belastung keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper hat. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 1,6 \times 10^{-10}$  und  $2,8 \times 10^{-10}$  m/s im Bereich der Nullmessungen und halten die Anforderungen an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10}$  m/s sicher ein.

### 3.5.6 Beständigkeit gegenüber Temperaturen

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von unterschiedlichen Temperaturbedingungen auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95} \% = 22,3 \%$  im Proctortopf verdichtet. Der grundlegende Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 30$  statt. Anders als zum Standardaufbau wurden die Triaxialzellen inklusive des verwendeten Perkolates in einem Kälteschrank bei  $10 \text{ °C}$  bzw. einem Wasserbad bei  $40 \text{ °C}$  gelagert. Als Perkolat wurde entlüftetes Leitungswasser verwendet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die unterschiedlichen Temperaturbedingungen keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper haben. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen mit  $k = 8,0 \times 10^{-11}$  und  $8,4 \times 10^{-11}$  m/s bei  $10 \text{ °C}$  und  $k = 1,9 \times 10^{-10}$  und  $4,3 \times 10^{-10}$  m/s bei  $40 \text{ °C}$  im Bereich der Nullmessungen und halten die Anforderungen an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10}$  m/s sicher ein.

### 3.5.7 Beständigkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen

Im Labor der LIMES wurden Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Wassergehaltsänderungen auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von  $d_{pr} = 95 \%$  ( $\rho_d = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) und einem Wassergehalt von  $w_{95} \% = 22,3 \%$  im Proctortopf verdichtet.

Die Probekörper wurden nach Herstellung in einen Kälteschrank überführt, in welchem konstant ein Klima von  $T = 15 \text{ °C}$  und  $rF = 60 \%$  herrschte. Dort wurden die Proben belassen, bis sich ein Wassergehalt von  $w = 15,1 \%$  eingestellt hat, der einer Saugspannung von  $pF = 3,2$  (1,58 bar) entspricht. Im nächsten Schritt wurde an dem getrockneten Probekörper die Wasserdurchlässigkeit ermittelt. Der grundlegende Versuchsaufbau fand analog zur klassischen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von  $i = 60$  statt. Als Perkolat wurde entlüftetes Leitungswasser verwendet. Nach Abschluss des Versuches wurden die Probekörper erneut unter den o.g. Bedingungen getrocknet. Insgesamt wurden an den Probekörpern vier Nass-Trocken-Zyklen durchgeführt.

Durch die erste Trocknungsphase erfuhr der Probekörper eine Volumenreduktion von  $4 \%$ , wodurch sich der Verdichtungsgrad von ursprünglich  $d_{pr} = 95 \%$  auf  $d_{pr} = 99 \%$  erhöhte. In den folgenden Zyklen nahm die Volumenreduktion ab, während die Trockendichte weiter anstieg. Mit jedem Trocknungsvorgang nahm der Ausbauwassergehalt nach der Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit ab, da die Probekörper eine höhere Ausgangstrockendichte hatten, welche einen verringerten Luftporengehalt zur Folge hatte.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die, durch die Trocken-Nass-Zyklen bedingten Änderungen der Trockendichte keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Probekörper haben. Die jeweils nach den Trocknungszyklen bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte liegen zwischen  $k = 7,3 \times 10^{-11}$  und  $2,0 \times 10^{-10}$  m/s und somit im Bereich der Nullmessungen. Sie halten die Anforderungen an eine mineralische Dichtung im Deponiebau von  $k_f \leq 5,0 \times 10^{-10}$  m/s sicher ein.

## 4 Fazit

Die in [11] dokumentierte Aufbereitung, Homogenisierung und Einbauweise sowie die Darstellung der bodenmechanischen Ergebnisse zeigen, dass das Material bei Einstellung des Wassergehaltes und Einbau auf der „nassen“ Seite der Proctorkurve eine anforderungsgerechte Erstellung des Probefeldes ermöglicht.

Des Weiteren können folgende Empfehlungen und Bewertungsgrundlagen festgelegt werden:

- Einstellung der Aggregatgröße  $d \leq 32$  mm im Abbaufeld der Tongrube durch den Tongrubenbetreiber
- Aufbereitung, Homogenisierung und Einstellung des Wassergehaltes im Abbaufeld der Tongrube durch den Tongrubenbetreiber:
  - „grauer“ Ton =>  $w = 16,5$  bis  $22,0$  %
  - „gelber“ Ton =>  $w = 18,5$  bis  $23,5$  %
  - Übergangshorizont =>  $w = 15,0$  bis  $19,7$  %
- Empfohlenes Vorlagemaß (unverdichtet) für den Einbau jeweils  $d = 0,36$  bis  $38$  m, Einbau mittels GPS-gesteuerter Raupe
- Befeuchtung des Tonmaterials zum Verdunstungsausgleich je nach Erfordernis
- Mindestens 3 Verdichtungsübergänge (Hin- und Rückfahrt) mit einer Stampffußwalze (Gewicht  $> 13$  t, Einstellung: Tiefenamplitude und minimale Geschwindigkeit)
- Bezugsproctordichte:
  - „grauer“ Ton =>  $\rho_{Pr} = 1,73$  g/cm<sup>3</sup>
  - „gelber“ Ton =>  $\rho_{Pr} = 1,70$  g/cm<sup>3</sup>
  - Übergangshorizont =>  $\rho_{Pr} = 1,79$  g/cm<sup>3</sup>
- Bezugskorndichte:
  - „grauer“ Ton =>  $\rho_s = 2,63$  g/cm<sup>3</sup>
  - „gelber“ Ton =>  $\rho_s = 2,61$  g/cm<sup>3</sup>
  - Übergangshorizont =>  $\rho_s = 2,64$  g/cm<sup>3</sup>
- Beachtung und Überprüfung der empfohlenen Einbauwassergehaltsgrenzen und des Verdichtungsrades im Versuchs- und Baufeld
- Abschälen der Stege der Stampffußwalze und Profilieren der oberen Dichtungslage mittels Raupe auf die geforderte Mindestmächtigkeit
- Mindestens 3 Verdichtungsübergänge (Hin- und Rückfahrt) mit einer Glattmantelwalze (Gewicht  $> 13$  t) auf der oberen, abgeschobenen Dichtungslage zur Erreichung einer glatten, homogenen Oberfläche, ggf. Nacharbeit mit einer Tandemwalze oder Glättung mit einem Baggerlöffel
- Bei Einhaltung der Grenzwerte für Verdichtungsgrad, Luftporengehalt, Einbauwassergehalt und Tonanteil ist der Grenzwert für den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 5,0$  E-10 m/s sicher erzielbar.

*Hinweis: Im Übergangshorizont ist das Material stark kalkhaltig und überschreitet den Anforderungswert von  $V_{Ca} = 30$  % deutlich. Der Einsatz des Materials ist projektspezifisch zu prüfen und nur mit Einzelfallzustimmung der Behörde möglich.*

Des Weiteren wurde aufbauend auf den Erkenntnissen aus [11] folgende weitergehende Untersuchungen vorgenommen, die für den geplanten deponietechnischen Einsatz gemäß BQS 2-0 bzw. 2-1 sowie 5-0 bzw. 5-1 erforderlich sind:

- Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes bei einem künstlich hergestellten minimalen Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 95$  %.
- Ergänzende Prüfungen zum Langzeitverhalten und der Beständigkeit gegenüber unterschiedlichen Temperaturen zwischen  $10$  und  $40$  °C (Frost- und Schwindrisse), Sickerwassereinflüssen ( $pH = 4 - 13$ ,  $DOC > 1.000$  mg/l, elektr. Leitfähigkeit  $> 30.000$   $\mu$ S/cm), biologische Einwirkungen und Wassergehaltsänderungen. Hierfür wurden weitere modifizierte Versuche

zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes unter bestimmten Rand- bzw. Milieubedingungen durchgeführt.

- Bestimmung der Verformungseigenschaften im Balkenbiegezugversuch.

Alle weitergehenden Versuche belegen die Anforderungskonformität in Bezug auf die aktuell gültigen Regelwerke der DepV und den BQS 2-0 bzw. 2-1 sowie 5-0 bzw. 5-1. Der Grenzwert für den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 5,0$  E-10 m/s ist auch durch die weitergehenden Versuche unter verschiedenen Milieubedingungen und hydraulischen Belastungen sicher nachweisbar.

Die geprüften Tonmaterialien aus den verschiedenen Horizonten sind in deponietechnischen Maßnahmen sowohl in der Basisabdichtung als auch in der Oberflächenabdichtung unter den o.a. Anmerkungen und Randbedingungen einsetzbar.

In Zusammenfassung aller vorliegenden Prüfergebnisse wird hiermit festgestellt, dass gegen die zum Einsatz gebrachten Materialien und Verarbeitungstechnologien keine Bedenken zum Einsatz in einer geotechnischen Barriere oder mineralischen Dichtung bestehen.

Die erzielten Ergebnisse sind projektspezifisch zu prüfen und vor einem großmaßstäblichen Einbau in einem Versuchsfeld zu bestätigen.

Essen, 14. Juli 2023



Dipl.-Ing. P. Schreiber  
*Leiter der Inspektionsstelle  
Verantwortlicher Fremdprüfer  
Berichtsverfasser*



Dipl.-Ing. R. Woltering  
*Leiter des Prüflabors*



LIMES GMBH  
INSPEKTION + MATERIALPRÜFUNG