



**Untersuchungen zur Optimierung des Systems Basis-
abdichtung für den Standort Hattorf des Werkes Werra,
Haldenerweiterung Phase 3 (RM HA3)**

- Zwischenbericht -

**Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungsergebnisse
der Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH und
der upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH**

Im Auftrag der:
K+S Minerals and Agriculture GmbH
Postfach 10 20 29
34111 Kassel

08.12.2021



Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Anforderungen / Prüfumfang	1
2.1	Anforderungen	1
2.2	Verwendete Unterlagen	3
2.3	Durchgeführte Untersuchungen	3
3	Laboruntersuchungen	4
3.1	Grundmaterialien	4
3.1.1	Korngrößenverteilung	4
3.1.2	Glühverlust.....	6
3.1.3	Kalkgehalt	7
3.1.4	Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert.....	7
3.2	Bentonit IBECO SEAL 80	8
3.2.1	Wassergehalte	8
3.2.2	Korngrößenverteilung	9
3.3	Dichtung untere Lage (uL)	9
3.3.1	Kornverteilung.....	10
3.3.2	Proctorversuche.....	10
3.3.3	Wasserdurchlässigkeit	12
3.3.4	Scherfestigkeit	15
3.4	Dichtung obere Lage (oL)	16
3.4.1	Korngrößenverteilung	16
3.4.2	Proctorversuche.....	17
3.4.3	Wasserdurchlässigkeit	19
3.4.4	Scherfestigkeit	21
4	Zusammenfassung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse.....	22
5	Fortschreibung der Materialvorgaben.....	24



1 Veranlassung

Die K+S Minerals and Agriculture GmbH (nachfolgend K+S) betreibt am Standort Hattorf eine ESTA-Rückstandshalde, für die zur Standortsicherung das Vorhaben Haldenerweiterung Hattorf (RM HA) in drei Phasen umgesetzt wird. In der genehmigten Phase 1 ist die Flächenvorbereitung der Haldenaufstandsfläche mit Errichtung des Systems Basisabdichtung (SyBa) abgeschlossen. Die Phase 2 wurde mit Stand 08/2021 beantragt und befindet sich in Genehmigung. Für die geplante Beantragung und Inanspruchnahme der Phase 3 soll die in Phase 1 genehmigte und in Phase 2 beantragte Basisabdichtung in Form einer zweilagigen mineralischen Dichtung bei gleichwertiger haldenspezifischer Eignung optimiert werden.

In diesem Zusammenhang hat K+S die Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH (nachfolgend GB) und die upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH (nachfolgend upi) beauftragt, basierend auf den Eignungsuntersuchungen zum System Basisabdichtung gemäß dem Materialkonzept Zielitz Untersuchungen zu deren Fortschreibung / Konkretisierung für das Werk Werra unter Verwendung regional verfügbarer Materialien (Gesteinskörnungen) sowie gleicher Additive / Hilfsstoffe (Bentonit und Polymer) durchzuführen. Der vorliegende Bericht fasst die vorliegenden Untersuchungsergebnisse der beiden Ingenieurbüros zusammen.

2 Anforderungen / Prüfumfang

2.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die herzustellenden unteren und oberen Lagen der zweilagigen mineralischen Dichtung sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die angegebenen Parameter sind in der Eignungsprüfung nachzuweisen bzw. zu ermitteln.

Die Durchlässigkeit (Lagen und gesamt) wurde von K+S auf Basis eines Nachweises der Gleichwertigkeit zum System aus Phase 1 und 2 vorgegeben, um die angestrebte Optimierung des SyBa durch Reduzierung der Dicke der Einzellagen sowie der Gesamtlagenstärke zu erreichen. Die weiteren Anforderungen gemäß Tabelle 1 entsprechen denen in den Antragsunterlagen zu den Phasen 1 (Planfeststellungsbeschluss vom 10.10.2018) und 2 RM HA (Antrag Stand 08/2021) bzw. in Bezug auf Glühverlust, Kalkgehalt, pH-Wert und Leitfähigkeit denen im QMP, der in Anlehnung an die „Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards“ der LAGA-ad hoc-Arbeitsgruppe „Deponietechnik“ zur Errichtung des SyBa in Phase 1 aufgestellt und umgesetzt wurde.

Tabelle 1: Anforderungen an das Dichtungssystem

Vorgaben und Parameter / Grenzwerte	Dichtungsschicht, untere Lage (uL)	Dichtungsschicht, obere Lage (oL)
Dichtigkeit und Festigkeit		
Durchlässigkeitsbeiwert	$k_f \leq 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$	$k_f \leq 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$
Gesamtdurchlässigkeit	wie Einzellagen	
Reibungswinkel	$\varphi' \geq 30^\circ$	$\varphi' \geq 35^\circ$
Aufbau und Zusammensetzung		
Schichtdicke	$\geq 10 \dots 15 \text{ cm}$	$\geq 20 \dots 25 \text{ cm}$ (inkl. Opferschicht)
Korngruppe	0/2 mm	0/8 mm
Kornform	rund oder doppelt gebrochen	rund oder doppelt gebrochen
Kornabstufung	0/2 ohne Ausfallkörnung	angenähert an Fullerkurve
Tonzugabe	$\geq 20 \text{ Gew. \%}$	$> 12 \text{ Gew. \%}$
Polymerzugabe - Gemäß Phase 1 und Antrag Phase 2 - Gewählt in Anlehnung an Materialkonzept Zielitz (Band 3.29.1N2)	0,4 bis 0,6 Gew. % $\geq 0,4 \text{ Gew. \%}$	0,4 bis 0,6 Gew. % keine
Verdichtungsgrad D_{Pr}	Ergebnis der Eignungsuntersuchung	
Einbauwassergehalt	Ergebnis der Eignungsuntersuchung	
Glühverlust	$\leq 1,5 \%$	$\leq 1,5 \%$
Kalkgehalt	$\leq 15,0 \%$	$\leq 15,0 \%$
pH-Wert	4,5 – 10,0	4,5 – 10,0
elektrische Leitfähigkeit	$\leq 500 \mu\text{S/cm}$	$\leq 500 \mu\text{S/cm}$

In den im Band 3.29.1N2 dokumentierten Langzeituntersuchungen zum Durchlässigkeitsbeiwert der mineralischen Dichtung des Materialkonzepts Zielitz sind als Additive in der unteren und oberen

Lage das Bentonit IBECO SEAL 80 der Fa. IMERYS sowie in der unteren Lage ein Polymer mit dem Produktnamen Argipol P, geliefert von der Fa. Phrikolat, eingesetzt worden.

Um auf den Erfahrungen und Langzeitznachweisen zum Materialkonzept Zielitz aufbauen zu können, wurde bei den gegenständlichen Eignungsuntersuchungen das gleiche Bentonitprodukt sowie ein Polymerprodukt verwendet, das eine vergleichbare chemische Zusammensetzung und Struktur zum Polymer Argipol P aufweist. Zur Gleichwertigkeit des Polymerprodukts Polimac der Fa. BDC International b.v. liegt ein entsprechender Untersuchungsbericht (Band 3.29.2N 3, Anlage 4) vor.

2.2 Verwendete Unterlagen

Grundlage der zusammenfassenden Bewertung der durchgeführten Untersuchungen zur Optimierung des Systems Basisabdichtung für das Werk Werra bilden die folgenden Berichte:

- [1] Untersuchungen zur Optimierung des Systems Basisabdichtung für den Standort Hattorf des Werkes Werra, Haldenerweiterung Phase 3 (RM HA3), Zwischenbericht, upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH, Bearbeitungsstand: 24.11.2021
- [2] Untersuchungen zur Optimierung des Systems Basisabdichtung für den Standort Hattorf des Werkes Werra, Haldenerweiterung Phase 3 (RM HA3), Zwischenbericht, Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH, Bearbeitungsstand: 25.11.2021

2.3 Durchgeführte Untersuchungen

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurden an den Ausgangsmaterialien die folgenden klassifizierenden Kennwerte bestimmt:

- Wassergehalt nach DIN EN ISO 17892-1
- Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4
- Glühverlust nach DIN 18128
- Kalkgehalt nach DIN 18129
- pH-Wert nach DIN ISO 10390
- elektrische Leitfähigkeit nach DIN ISO 11265



Für die Materialmischungen der oberen (oL) und unteren Lage (uL) wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4
- Proctor nach DIN 18127, normal und modifiziert (Variation der Verdichtungsenergie)
- k-Wert-Untersuchungen nach DIN EN ISO 17892-11 bzw. DIN 18130
- direkte Scherversuche nach DIN 18137-3 bzw. DIN EN ISO 17892-10

3 Laboruntersuchungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Laboruntersuchungen der Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH und der upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH zusammenfassend dargestellt. Weitergehende Angaben und Details zu den Untersuchungen, Materialien und Versuchsrandbedingungen können den Dokumentationen in den Berichten [1] und [2] entnommen werden.

3.1 Grundmaterialien

3.1.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der Grundmaterialien wurde durch kombinierte Sieb-Schlämmanalyse bzw. Nasssiebung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. In Tabelle 2 sind die ermittelten Massenanteile der einzelnen Grundmaterialien von GB und upi zusammengefasst. Die Abbildungen 1 bis 4 zeigen die ermittelten Kornzusammensetzungen der einzelnen Materialien.

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Untersuchungsergebnisse von GB und upi mit geringen verfahrensbedingten Abweichungen.

Tabelle 2: Mittlere Massenanteile der Grundmaterialien

	Ton [%]		Schluff [%]		Sand [%]		Kies [%]	
	GB	upi	GB	upi	GB	upi	GB	upi
Oberzella 0/1	7,1	6,7	12,3	15,4	74,2	71,6	6,5	6,4
Immelborn 2/8	-	-	0,2	0,1	1,6	1,6	98,2	98,3
Immelborn 0/8	-	-	0,4	0,1	61,0	64,3	38,6	35,5
Fambach I+II 0/2	-	-	0,4	0,2	89,8	90,7	9,8	9,2

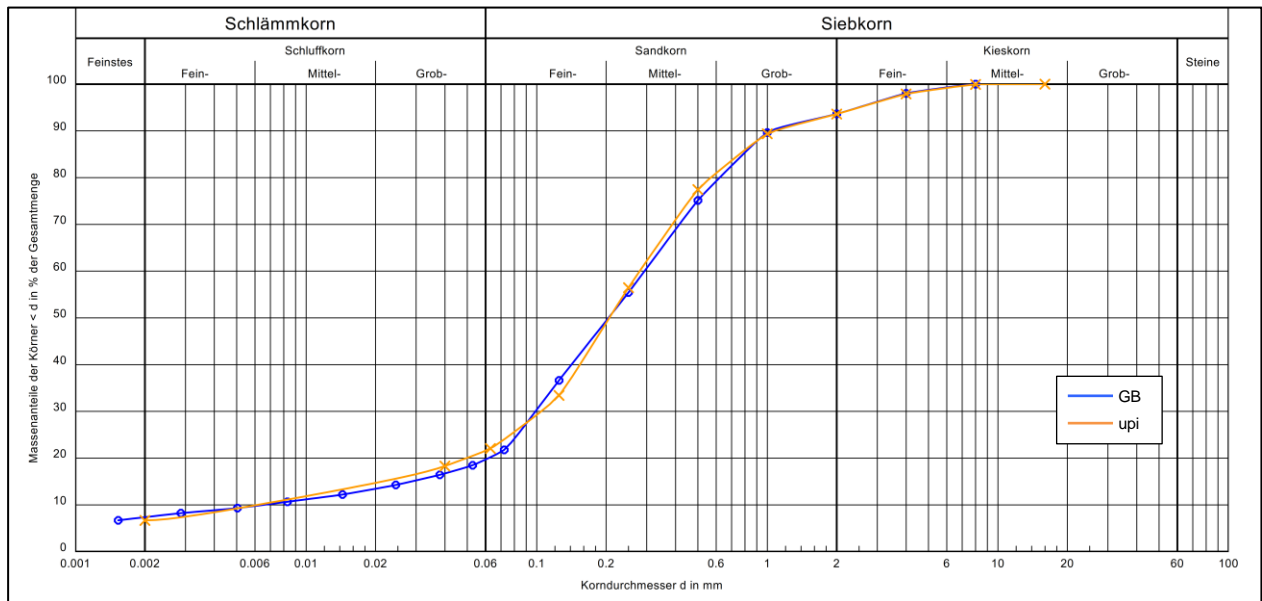


Abbildung 1: Körnungslinie Oberzella 0/1

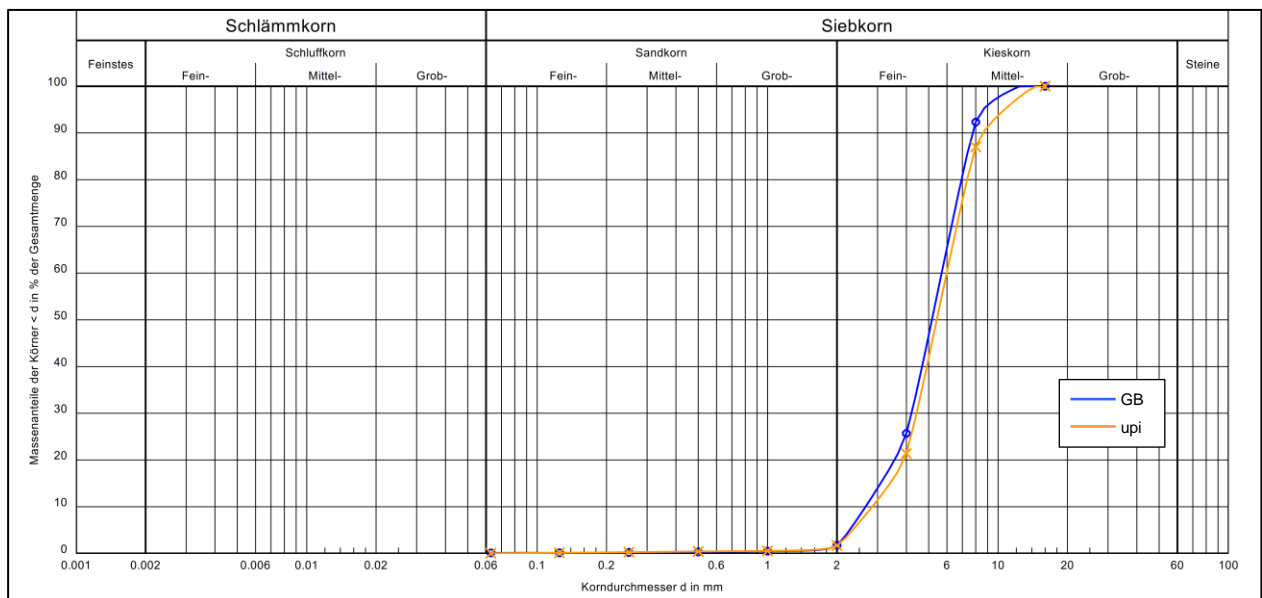


Abbildung 2: Körnungslinie Immelborn 2/8

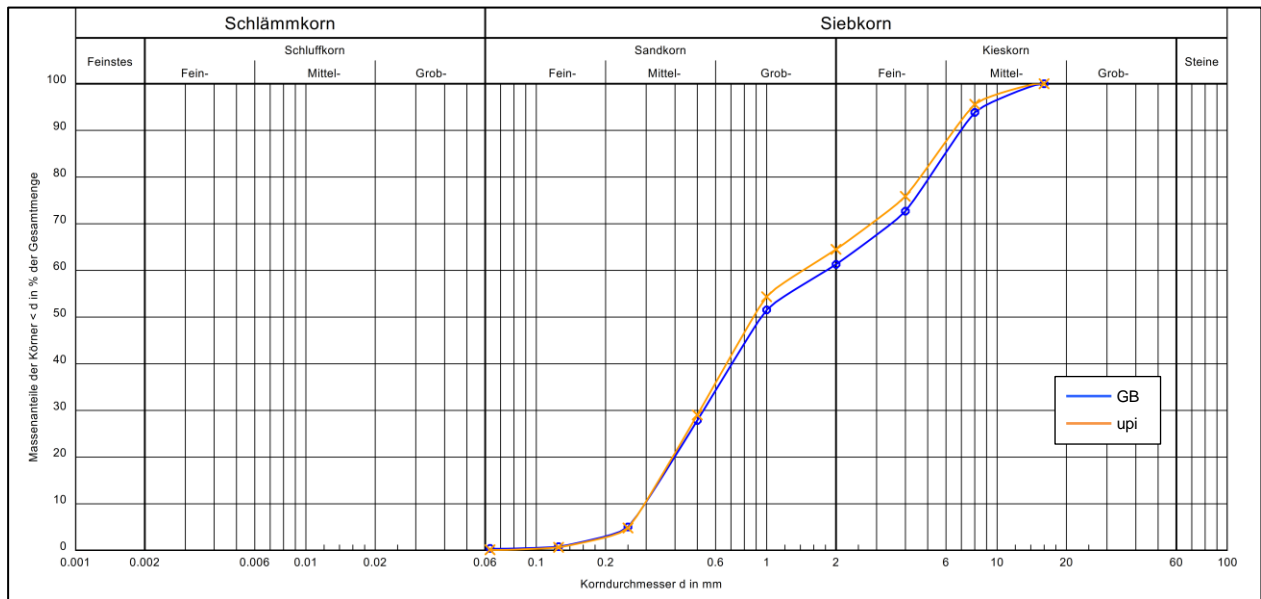


Abbildung 3: Körnungslinie Immelborn 0/8

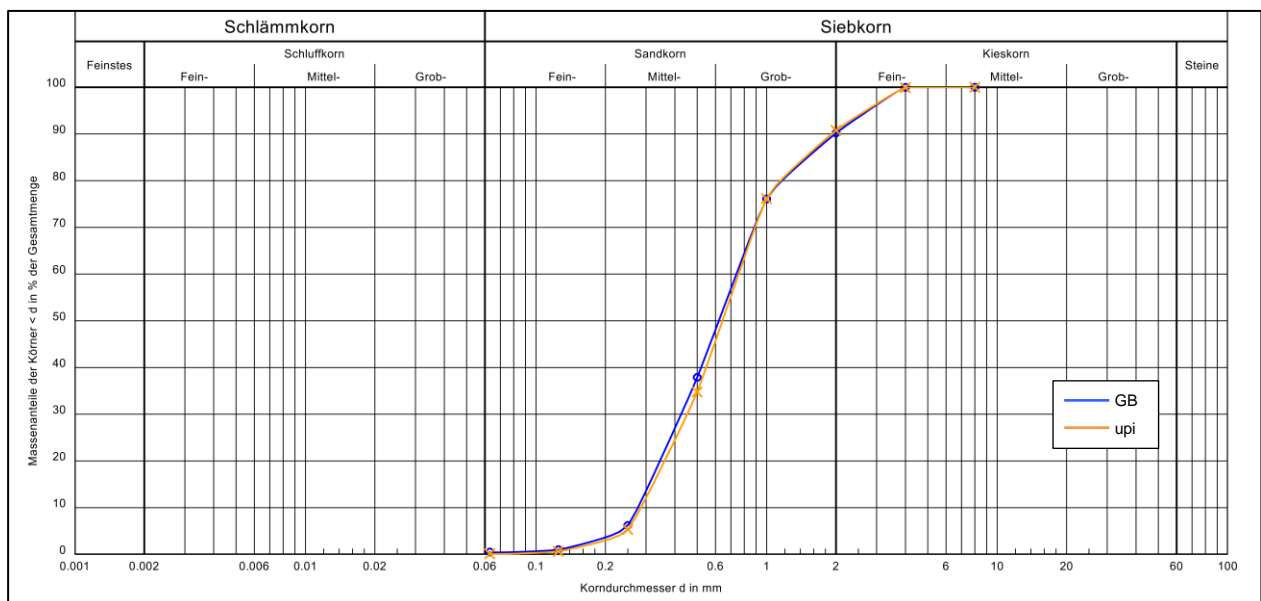


Abbildung 4: Körnungslinie Fambach 0/2

3.1.2 Glühverlust

Der Glühverlust wurde gemäß DIN 18128 bestimmt. Die ermittelten Glühverluste der einzelnen Materialien von GB und upi sind in Tabelle 3 vergleichend aufgeführt. Die Abweichungen der Untersuchungsergebnisse von GB und upi sind gering. Die Anforderungen werden eingehalten.

Tabelle 3: Glühverluste der Grundmaterialien

	mittlerer Glühverlust [%] GB	mittlerer Glühverlust [%] upi	Anforderung erfüllt?
Anforderung	≤ 1,50		-
Oberzella 0/1	1,32	1,20	ja
Immelborn 2/8	0,69	0,73	ja
Immelborn 0/8	0,31	0,35	ja
Fambach I+II 0/2	0,20	0,28	ja

3.1.3 Kalkgehalt

Der Kalkgehalt wurde gemäß DIN 18129 bestimmt. Die gemittelten Kalkgehalte der jeweiligen Materialien sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Abweichungen der Untersuchungsergebnisse von GB und upi bewegen sich in der erwartbaren Größenordnung natürlicher Materialien. Die gestellten Anforderungen werden sicher eingehalten.

Tabelle 4: Mittlerer Kalkgehalt der Grundmaterialien

	mittlerer Kalkgehalt [%] GB	mittlerer Kalkgehalt [%] upi	Anforderung erfüllt?
Anforderung	≤ 15		-
Oberzella 0/1	0,35	0,41	ja
Immelborn 2/8	5,68	3,90	ja
Immelborn 0/8	0,42	0,51	ja
Fambach I+II 0/2	2,21	3,00	ja

3.1.4 Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert

An den Grundmaterialien wurden die elektrische Leitfähigkeit gemäß DIN ISO 11265 sowie der pH-Wert gemäß DIN ISO 10390 bestimmt. Die Ergebnisse von GB und upi sind der nachfolgenden Tabelle 5 und Tabelle 6 zu entnehmen.

Die Abweichungen der Untersuchungsergebnisse von GB und upi sind gering. Die Anforderungen werden eingehalten.

Tabelle 5: Mittlerer pH-Wert der Grundmaterialien

	mittlerer pH-Wert [-] GB	mittlerer Glühverlust [-] upi	Anforderung erfüllt?
Anforderung	4,5 - 10,0		-
Oberzella 0/1	7,8	7,4	ja
Immelborn 2/8	8,1	8,0	ja
Immelborn 0/8	7,3	7,8	ja
Fambach I+II 0/2	7,7	8,8	ja

Tabelle 6: Mittlere elektrische Leitfähigkeit der Grundmaterialien

	mittlere elekt. Leitfähigkeit [μS/cm] GB	mittlere elekt. Leitfähigkeit [μS/cm] upi	Anforderung erfüllt?
Anforderung	≤ 500		-
Oberzella 0/1	51,7	44,3	ja
Immelborn 2/8	56,2	53,3	ja
Immelborn 0/8	77,0	71,0	ja
Fambach I+II 0/2	66,7	60,3	ja

3.2 Bentonit IBECO SEAL 80

3.2.1 Wassergehalte

Es wurde der Ausgangs- bzw. Anlieferungswassergehalt des gelieferten Dreischichttonminerals IBECO SEAL 80 gemäß DIN EN ISO 17892-1 bestimmt. Er beträgt 11,3 % (GB) bzw. 11,2 % (upi) und entspricht damit den Angaben des Produktdatenblattes (11 ± 3 %).

Tabelle 7: Wassergehalt IBECO SEAL 80

	Wassergehalt w [%]	
	GB	upi
Ibeco Seal 80	11,3	11,2

3.2.2 Korngrößenverteilung

Ebenso wie an den Ausgangsmaterialien wurden auch am Zusatzstoff IBECO SEAL 80 Korngrößenverteilungen gemäß DIN EN ISO 17892-4 mittels kombinierter Sieb-/Schlämmanalyse durchgeführt. Die Massenanteile der ermittelten Kornfraktionen von GB und upi sind Tabelle 8 zu entnehmen. Die graphische Darstellung der Korngrößenverteilungen zeigt Abbildung 5. Es ist eine gute Übereinstimmung der ermittelten Kornverteilungen des untersuchten Bentonits von GB und upi festzustellen.

Tabelle 8: Kornzusammensetzung IBECO SEAL 80

	Ton [%]		Schluff [%]		Sand [%]	
	GB	upi	GB	upi	GB	upi
Ibeco Seal 80	76,7	-	15,6	93,8	7,6	6,2

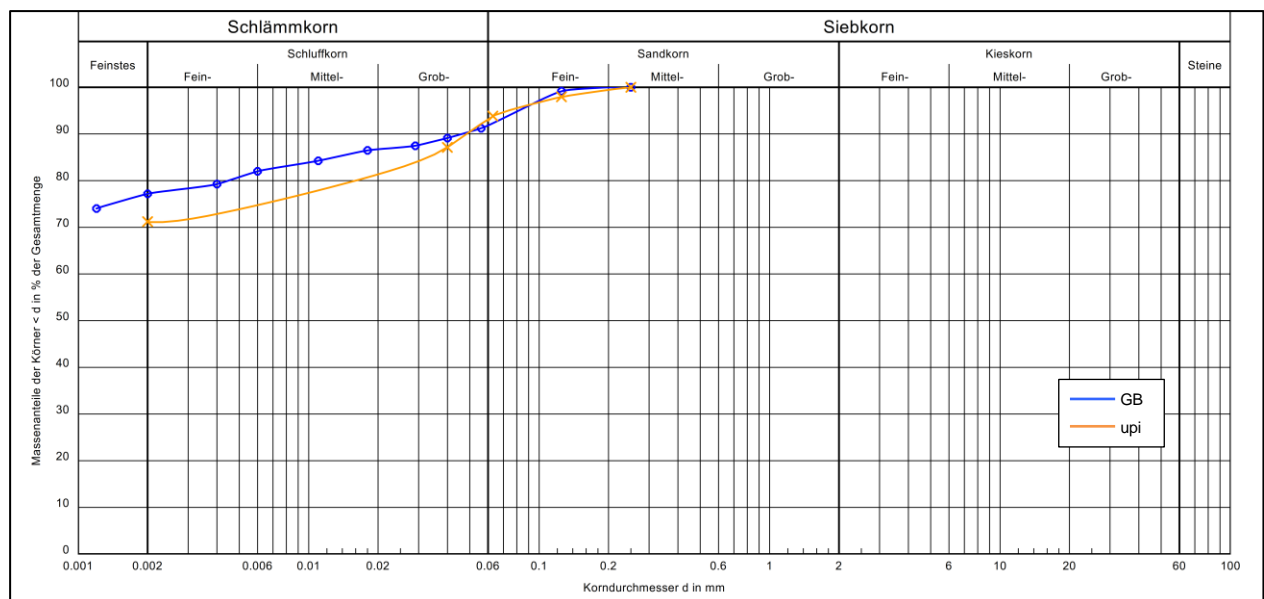


Abbildung 5: Körnungsband IBECO SEAL 80

3.3 Dichtung untere Lage (uL)

Die Dichtung der unteren Lage (uL) wurde gemäß der Vorgabe mit dem folgenden Mischungsverhältnis hergestellt:

- 80 % Grundmaterial Fambach Körnung 0/2
- 19,6 % IBECO SEAL 80
- 0,4 % Polymer

3.3.1 Kornverteilung

Die Korngrößenverteilung der Materialmischung wurde durch kombinierte Sieb-/Schlämmanalyse nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. In Tabelle 9 sind die ermittelten Massenanteile von GB und upi vergleichend zusammengefasst. Abbildung 6 zeigt die ermittelten Kornzusammensetzungen. Die Auswertung zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Tabelle 9: Kornzusammensetzung Mischung untere Lage

	Ton [%]		Schluff [%]		Sand [%]		Kies [%]	
	GB	upi	GB	upi	GB	upi	GB	upi
untere Lage	10,7	-	3,6	18,9	79,0	73,7	6,7	7,4

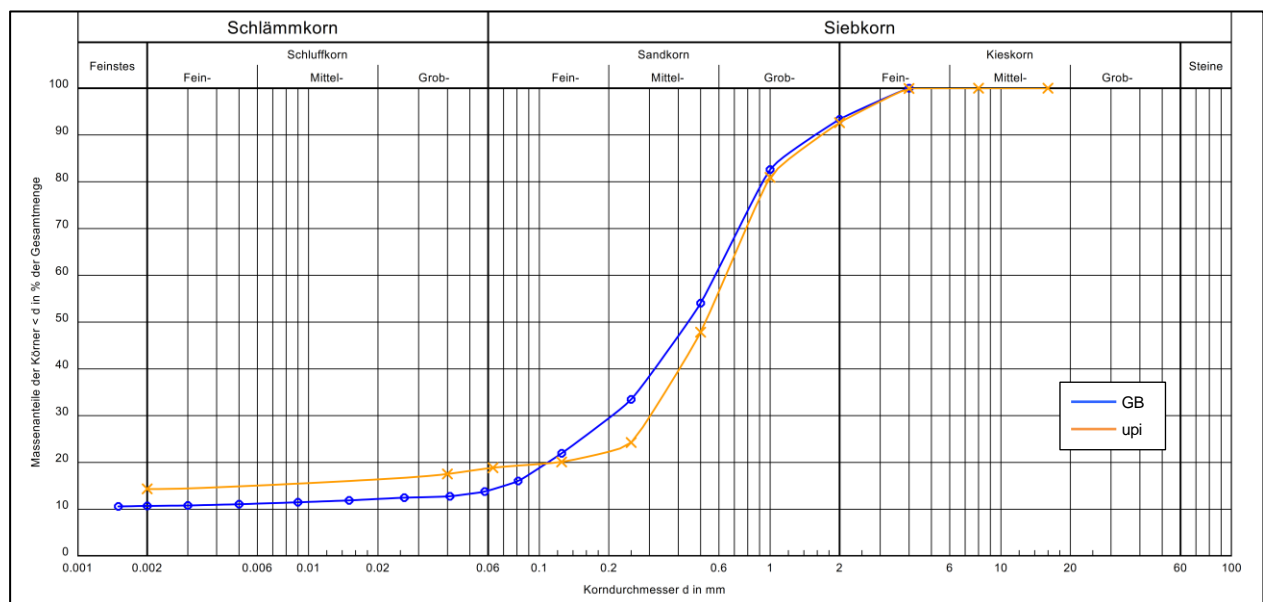


Abbildung 6: Körnungslinie Materialmischung untere Lage

3.3.2 Proctorversuche

Zur Ermittlung der erzielbaren Dichte der Materialmischung der unteren Lage in Abhängigkeit vom Wassergehalt wurden Proctorversuche mit einer Variation der Verdichtungsenergie durchgeführt. Auf der Grundlage der vorliegenden Erfahrungen der Bauausführung der Basisabdichtung am Standort Zielitz sollte abstimmungsgemäß im Rahmen der Eignungsuntersuchungen eine Trockendichte von mindestens 1,8 g/cm³ angestrebt werden. Die durchgeführten Proctorversuche ergaben,

dass dieser Zielwert mit einer projektbezogenen Modifikation der Verdichtungsenergie erzielt werden kann. Die Trockendichte von $\rho_{Pr} \geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ kann mit einem 5-lagigen Einbau und der Verwendung eines Fallgewichtes mit 2,5 kg und 25 Schlägen je Schicht erreicht werden.

Die Randbedingungen und Ergebnisse der Proctorversuche an der Materialmischung der unteren Lage mit Standardverdichtung gemäß DIN 18127 und mit projektbezogener Modifikation der Verdichtungsenergie sind in der Tabelle 10 vergleichend zusammengefasst. Die Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung der ermittelten Ergebnisse von GB und upi mit geringen Abweichungen. Die ermittelten Abweichungen befinden sich in einer erwartbaren Bandbreite, die durch versuchs- und verfahrenstechnische Randbedingungen zu begründen sind.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Proctorversuche an der Materialmischung untere Lage (uL)

Serie	Fallgewicht [kg]	Anzahl der Schichten	Schläge je Schicht	Energie [MNm/m³]	GB		upi	
					$\rho_{Pr} [\text{g/m}^3]$	$w_{Pr} [\%]$	$\rho_{Pr} [\text{g/m}^3]$	$w_{Pr} [\%]$
1 ¹⁾	2,5	3	25	0,6	1,764	14,7	1,776	15,7
3 ³⁾	2,5	4	25	0,8	1,770	15,0	-	-
4 ³⁾	2,5	5	25	1,0	1,810	14,2	1,843	14,4

¹⁾ Standardproctor gemäß DIN 18127

³⁾ projektbezogene Modifikation

Abbildung 7 zeigt die graphische Auswertung der durchgeführten Proctorserien.

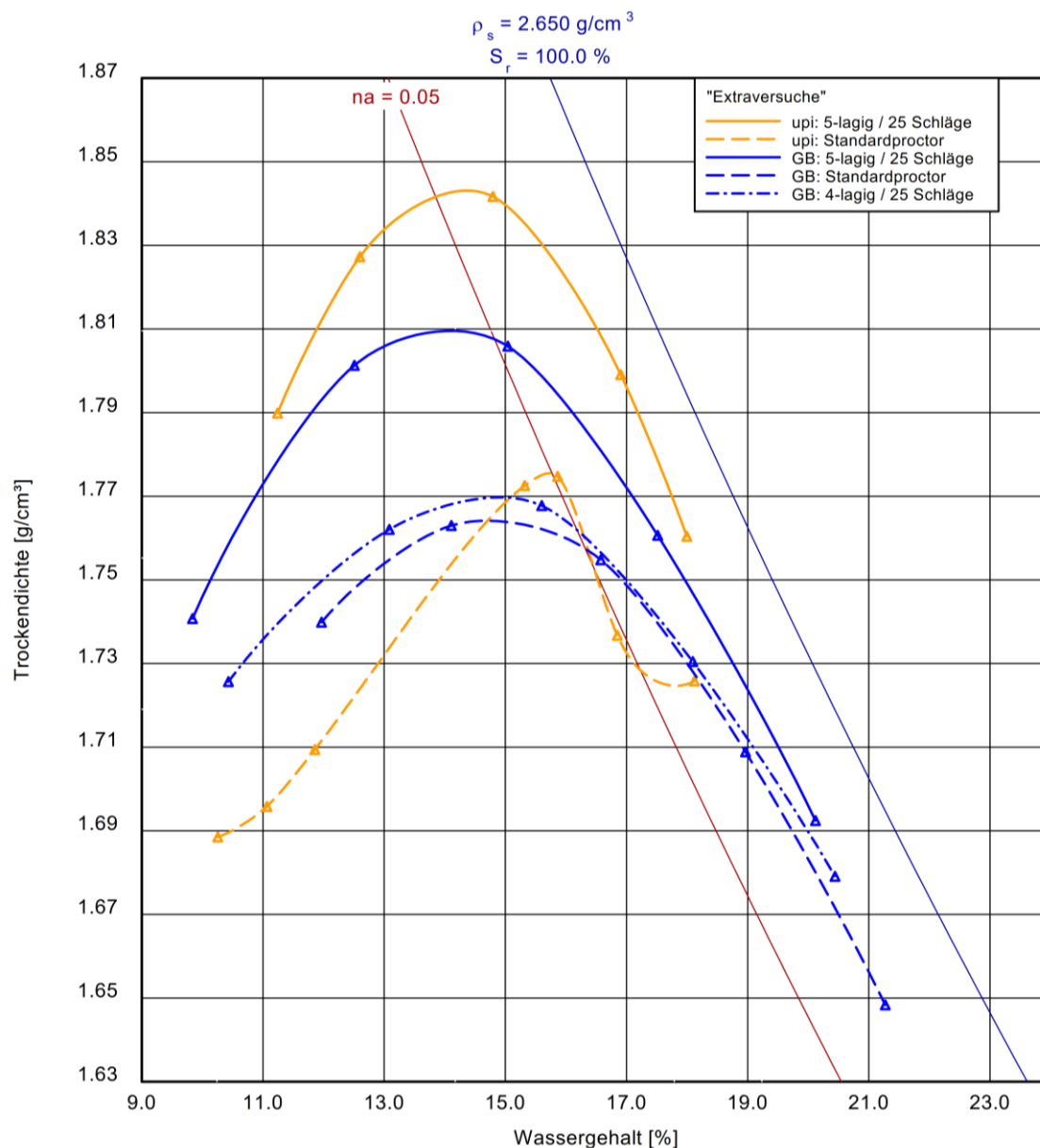


Abbildung 7: Ergebnisse der Proctorserien untere Lage; GB und upi

3.3.3 Wasserdurchlässigkeit

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts nach DIN 18130 erfolgte an zylindrischen Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 100 mm die entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.3.2 im Proctorversuch verdichtet hergestellt wurden. Nach dem Einbau der Proben in die Triaxialzelle schloss sich gemäß Vorgabe eine fünftägige „Reifezeit“ ohne Durchströmung an. Nachfolgend wurden die Prüfkörper mit Haldenwasser (Standort Hattorf) und einem Gradienten von $i = 30$ hydraulisch beaufschlagt.

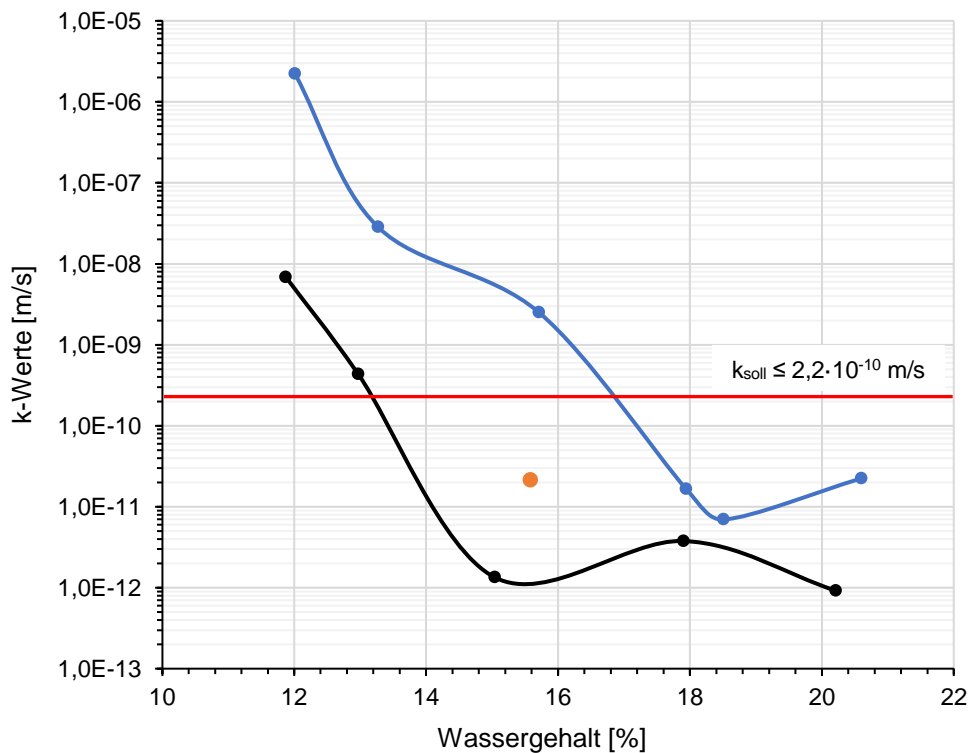
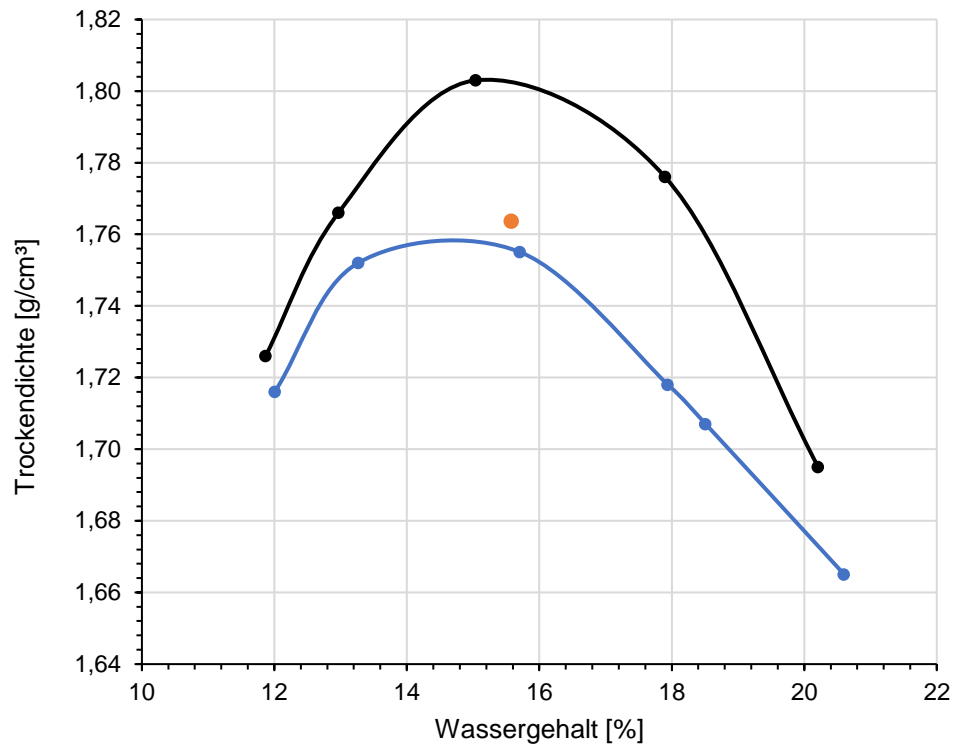


Abbildung 8: Darstellung der Abhängigkeit der k-Werte vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte
 blaue Linie: GB: Standardverdichtung gemäß Proctor (Serie 1)
 oranger Punkt: GB: mod. Verdichtung, 4 Lagen à 25 Schläge, Mittelw. $n = 3$, w_{opt} .
 schwarze Linie: upi: mod. Verdichtung, 5 Lagen à 25 Schläge, (Serie 4)

Die Versuchsergebnisse belegen die für das untersuchte Materialgemisch zu erwartende sehr ausgeprägte Abhängigkeit des k -Wertes vom Einbauwassergehalt. Eine Darstellung der Abhängigkeit der ermittelten k -Werte vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte zeigt Abbildung 8. Hierbei zeigt die blaue Linie die Ergebnisse der Proben, die mit Standardverdichtung gemäß Proctor (GB, $A = 0,6 \text{ MNm/m}^3$, 3 Lagen à 25 Schläge) hergestellt wurden. Der orange Punkt zeigt den Mittelwert von drei Proben mit w_{opt} , die mit modifizierter Verdichtung (GB, $A = 0,8 \text{ MNm/m}^3$, 4 Lagen à 25 Schläge) hergestellt wurden. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse der Proben von upi. Hierbei erfolgte ebenfalls eine modifizierte Verdichtung jedoch mit 5 Lagen à 25 Schlägen ($A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$).

Im Rahmen der Untersuchungen des GB führt die erhöhte Verdichtungsenergie nicht zu einer signifikanten Zunahme der Trockendichte im Bereich des Proctorwassergehaltes. Hinsichtlich des k -Wertes weisen jedoch die Proben, die mit höherer Verdichtungsenergie hergestellt wurden (Serie 3, $A = 0,8 \text{ MNm/m}^3$), deutlich geringere k -Werte auf (oranger Punkt in Abbildung 8). Mit k -Werten zwischen $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ und $3,3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ ist zudem die quantitative Streuung der ermittelten Ergebnisse deutlich geringer im Vergleich zu den Proben, die mit Standardverdichtung nach DIN 18127 hergestellt wurden.

In Tabelle 11 sind die ermittelten k -Werte der Dichtungsproben des GB mit $A = 0,8 \text{ MNm/m}^3$ (4 Lagen à 25 Schläge) und die zugehörigen Einbauparameter zusammengefasst.

Tabelle 11: k_{10} -Werte uL, Proben GB, modifiziert verdichtet ($A = 0,8 \text{ MNm/m}^3$, 4 Lagen à 25 Schläge)

Probe	w	ρ_d	k_{10} -Wert
	%	g/cm^3	m/s
uL-P1*- w_{opt}	15,14	1,774	$1,2 \cdot 10^{-11}$
uL-P2*- w_{opt}	15,58	1,759	$3,3 \cdot 10^{-11}$
uL-P3*- w_{opt}	16,01	1,758	$1,7 \cdot 10^{-11}$

In Tabelle 12 sind die ermittelten k -Werte der Dichtungsproben von upi mit $A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$ (5 Lagen à 25 Schläge) und die zugehörigen Einbauparameter zusammengefasst. Von upi wurden Durchlässigkeitsbeiwerte für die Materialmischung der unteren Lage zwischen $2,7 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$ und $5,4 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ ermittelt.

Tabelle 12: k_{10} -Werte uL, Proben upi, modifiziert verdichtet ($A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$, 5 Lagen à 25 Schläge)

Probe	w	ρ_d	k_{10} -Wert
	%	g/cm^3	m/s
035	14,02	1,843	$5,4 \cdot 10^{-13}$
036	14,01	1,843	$2,7 \cdot 10^{-12}$

3.3.4 Scherfestigkeit

An der Materialmischung der unteren Lage wurden direkte Rahmenscherversuche gemäß DIN EN ISO 17892-10 durchgeführt. Seitens GB erfolgte die Ausführung der Scherversuche im Unterauftrag durch die RWTH Aachen, Institut für Geomechanik und Untergrundtechnik. Der dort verwendete Scherrahmen hat Abmessungen von 6 x 6 cm. Der Scherversuch wurde bestehend aus insgesamt vier Teilversuchen mit Normalspannungen von 200 kN/m², 400 kN/m², 600 kN/m² und 1.200 kN/m² ausgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Scherrahmens betrug 0,01 mm/min. Der Einbau der Materialmischung in den Scherrahmen erfolgte nach einer fünftägigen „Reifezeit“. Die Konsolidationszeit im Scherrahmen betrug 24 Stunden.

Die Ermittlung der Scherparameter der Materialmischung der unteren Lage erfolgte seitens upi im Unterauftrag durch die IHU Geologie und Analytik GmbH im direkten Scherversuch in einem runden Scherrahmen mit einem Durchmesser von 7,1 cm. Der Scherversuch wurde bestehend aus insgesamt vier Teilversuchen mit Normalspannungen von 100 kN/m², 200 kN/m², 400 kN/m² und 600 kN/m² ausgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Scherrahmens betrug 0,04 mm/min. Der Einbau der Materialmischung in den Scherrahmen erfolgte nach einer fünftägigen „Reifezeit“ in einer Triaxialzelle. Die Konsolidationszeit im Scherrahmen betrug 4 Stunden.

Die Ergebnisse und die Randbedingungen der durchgeführten Scherversuche von GB und upi an der Materialmischung der unteren Lage sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Randbedingungen und Ergebnisse der durchgeführten Scherversuche an der Materialmischung der unteren Lage

	GB	upi
Anzahl der Teilversuche	4	4
Normalspannungen [kN/m ²]	200	100
	400	200
	600	400
	1.200	600
Scherrahmen:		
- Abmessungen [cm]	6 x 6	Ø 7,1
- Fläche A [cm ²]	36	40
Einbaudichte [g/cm ³]	1,72	1,84
Einbauwassergehalt [%]	14,6	13,6
Konsolidierungszeit [h]	24	4
Schergeschwindigkeit [mm/min]	0,01	0,04
Reibungswinkel φ' [°]	31,6	37,2
Kohäsion c' [kN/m ²]	66,0	21,3
Reibungswinkel $\varphi'_{c=0}$	34,8	38,5

3.4 Dichtung obere Lage (oL)

Die Dichtung der oberen Lage (oL) wurde gemäß Vorgabe mit dem folgenden Mischungsverhältnis hergestellt:

- 48 % Grundmaterial Immelborn Körnung 2/8
- 40 % Grundmaterial Fambach Körnung 0/2
- 12 % IBECO SEAL 80

3.4.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der Materialmischung wurde durch kombinierte Sieb-/Schlämmanalyse nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. In Tabelle 14 sind die ermittelten Massenanteile von GB und upi vergleichend zusammengefasst. Abbildung 9 zeigt die ermittelten Kornzusammensetzungen. Die Auswertung zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Tabelle 14: Kornzusammensetzung Mischung obere Lage

	Ton [%]		Schluff [%]		Sand [%]		Kies [%]	
	GB	upi	GB	upi	GB	upi	GB	upi
obere Lage	-	-	10,5	11,3	38,0	37,8	51,5	50,9

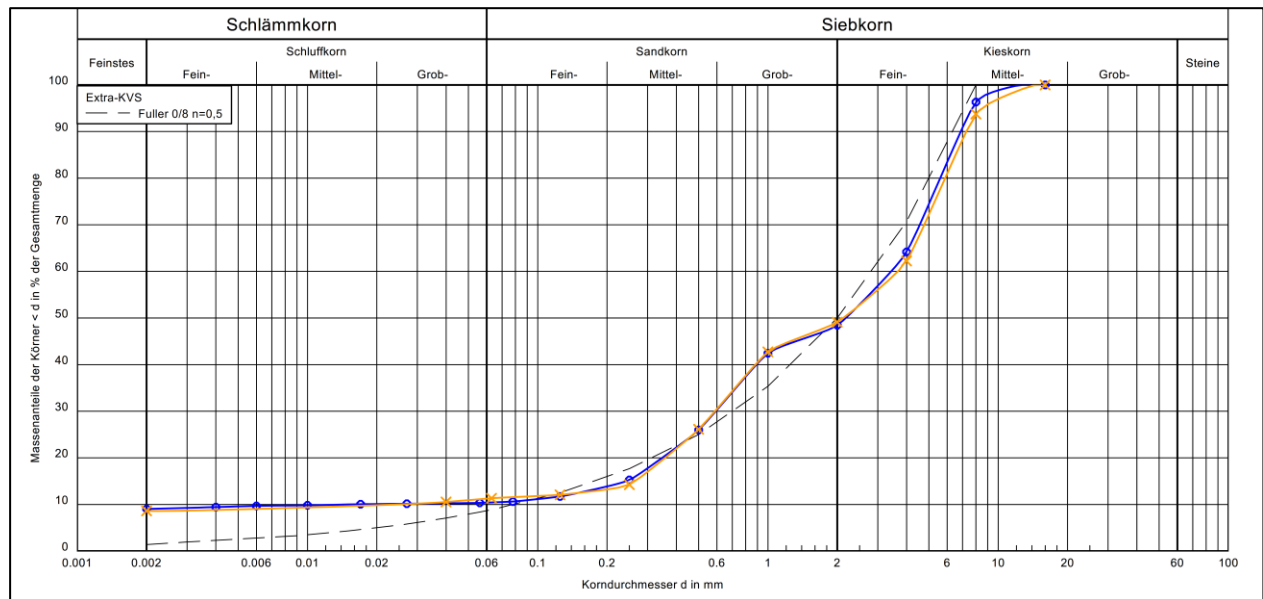


Abbildung 9: Körnungsband obere Lage

3.4.2 Proctorversuche

Zur Ermittlung der erzielbaren Dichte der Materialmischung der oberen Lage in Abhängigkeit vom Wassergehalt wurden Proctorversuche mit einer Variation der Verdichtungsenergie durchgeführt. Auf der Grundlage der vorliegenden Erfahrungen der Bauausführung der Basisabdichtung am Standort Zielitz sollte abstimmungsgemäß im Rahmen der Eignungsuntersuchungen eine Trockendichte von mindestens $1,93 \text{ g/cm}^3$ angestrebt werden. Die durchgeführten Proctorversuche ergaben, dass dieser Zielwert mit einer projektbezogenen Modifikation der Verdichtungsenergie erzielt werden kann. Die Trockendichte von $\rho_{Pr} \geq 1,93 \text{ g/cm}^3$ kann mit einem 5-lagigen Einbau und der Verwendung eines Fallgewichtes mit 2,5 kg und 25 Schlägen je Schicht erreicht werden.

Die Randbedingungen und Ergebnisse der Proctorversuche an der Materialmischung der oberen Lage mit Standardverdichtung gemäß DIN 18127 und mit projektbezogener Modifikation der Verdichtungsenergie sind in der Tabelle 15 vergleichend zusammengefasst. Die Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung der ermittelten Ergebnisse von GB und upi.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Proctorversuche an der Materialmischung obere Lage (oL)

Serie	Fallgewicht [kg]	Anzahl der Schichten	Schläge je Schicht	GB		upi	
				ρ_{Pr} [g/m ³]	W _{Pr} [%]	ρ_{Pr} [g/m ³]	W _{Pr} [%]
1 ¹⁾	2,5	3	25	1,888	13,3	1,881	12,7
3 ³⁾	2,5	5	25	1,938	12,7	1,933	12,3

¹⁾ Standardproctor gemäß DIN 18127

³⁾ projektbezogene Modifikation

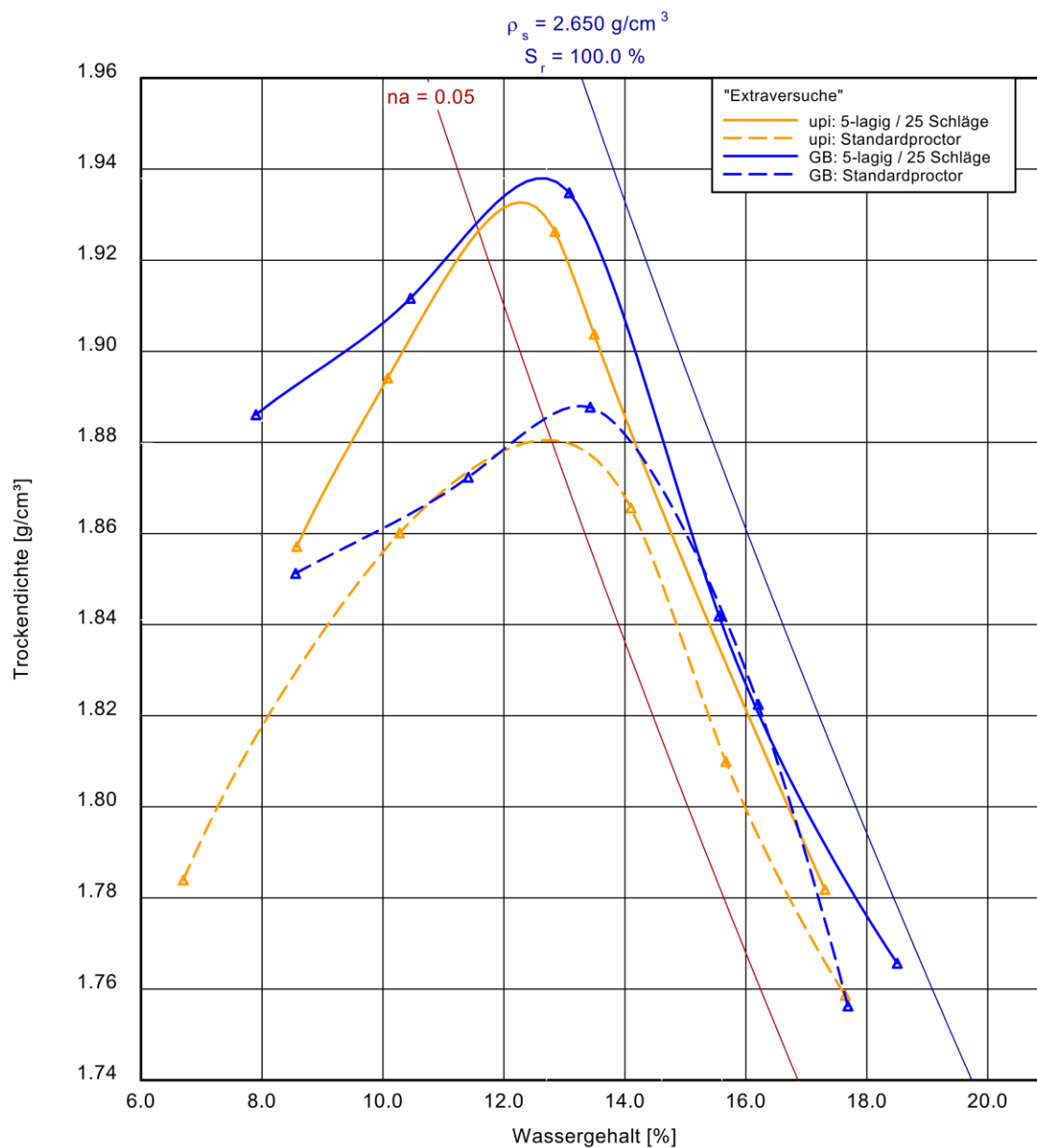


Abbildung 10: Ergebnisse der Proctorserien obere Lage; GB und upi

3.4.3 Wasserdurchlässigkeit

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts nach DIN 18130 erfolgte für die Materialproben der oberen Lage analog zu den Untersuchungen an der unteren Lage. Nach dem Einbau der Proben in die Triaxialzelle schloss sich eine fünftägige „Reifezeit“ ohne Durchströmung an. Nachfolgend wurden die Prüfkörper mit Haldenwasser (Standort Hattorf) und einem Gradienten von $i = 30$ hydraulisch beaufschlagt.

Eine Darstellung der Abhängigkeit der ermittelten k -Werte vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte zeigt Abbildung 11. Hierbei zeigt die blaue Linie die Ergebnisse der Proben, die mit modifizierter Verdichtung hergestellt wurden (GB, $A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$, 5 Lagen à 25 Schläge). Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse der Proben von upi, die mit Standardverdichtung nach DIN 18127 hergestellt wurden (upi, $A = 0,6 \text{ MNm/m}^3$, 3 Lagen à 25 Schläge). Der grüne Punkt zeigt den Mittelwert von drei Proben von upi, die bei w_{opt} mit modifizierter Verdichtung hergestellt wurden (upi, $A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$, 5 Lagen à 25 Schläge).

In Tabelle 16 sind die ermittelten k -Werte der Dichtungsproben des GB mit $A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$ (5 Lagen à 25 Schläge) und die zugehörigen Einbauparameter zusammengefasst. Für die Proben der Serie 3 der oberen Lage mit Proctorwassergehalt werden k -Werte zwischen $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ und $4,1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ dokumentiert.

Tabelle 16: k_{10} -Werte oL, Proben GB, modifiziert verdichtet ($A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$, 5 Lagen à 25 Schläge)

Probe	w	ρ_d	k_{10} -Wert
	%	g/cm^3	m/s
oL-WE3	13,08	1,935	$1,7 \cdot 10^{-11}$
oL-P1*- w_{opt}	13,38	1,928	$3,4 \cdot 10^{-11}$
oL-P2*- w_{opt}	12,88	1,932	$4,1 \cdot 10^{-11}$

In Tabelle 17 sind die ermittelten k -Werte der Dichtungsproben von upi mit $A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$ (5 Lagen à 25 Schläge) und die zugehörigen Einbauparameter zusammengefasst. Von upi wurden Durchlässigkeitsbeiwerte für die Materialmischung der oberen Lage zwischen $1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ und $3,1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ ermittelt.

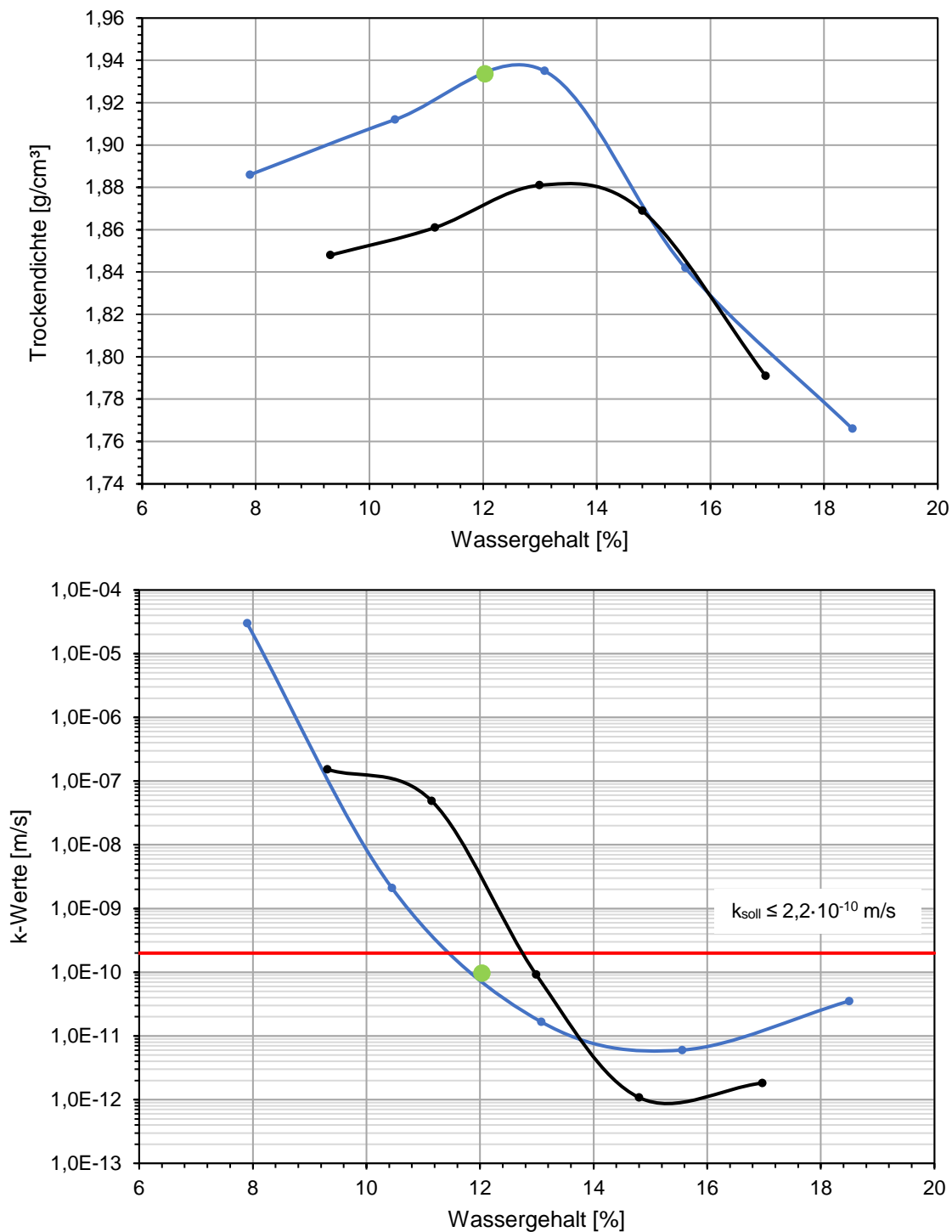


Abbildung 11: Darstellung der Abhängigkeit der k-Werte vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte

blaue Linie: GB: mod. Verdichtung, 5 Lagen à 25 Schläge, (Serie 3)

schwarze Linie: Standardverdichtung gemäß Proctor (Serie 1)

grüner Punkt: upi: mod. Verdichtung, 5 Lagen à 25 Schläge, Mittelw. n = 3, w_{opt}.

Tabelle 17: k_{10} -Werte oL, Proben upi, modifiziert verdichtet ($A = 1,0 \text{ MNm/m}^3$, 5 Lagen à 25 Schläge)

Probe	w	ρ_d	k_{10} -Wert
	%	g/cm^3	m/s
031	12,03	1,933	$3,1 \cdot 10^{-11}$
032	12,03	1,935	$1,7 \cdot 10^{-10}$
033	12,03	1,933	$9,0 \cdot 10^{-11}$

3.4.4 Scherfestigkeit

An der Materialmischung der oberen Lage wurden direkte Rahmenscherversuche gemäß DIN EN ISO 17892-10 durchgeführt. Seitens GB erfolgte die Ausführung der Scherversuche im Unterauftrag durch die RWTH Aachen, Institut für Geomechanik und Untergrundtechnik. Der dort verwendete Scherrahmen hat Abmessungen von 15 x 15 cm. Der Scherversuch wurde bestehend aus insgesamt drei Teilversuchen mit Normalspannungen von 200 kN/m², 600 kN/m² und 1.200 kN/m² ausgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Scherrahmens betrug 0,1 mm/min.

Die Ermittlung der Scherparameter der Materialmischung der oberen Lage erfolgte seitens upi im Unterauftrag durch die IGU Ingenieurgesellschaft im direkten Scherversuch in einem Scherrahmen mit Abmessungen von 30 x 30 cm. Der Scherversuch wurde bestehend aus insgesamt vier Teilversuchen mit Normalspannungen von 100 kN/m², 200 kN/m², 300 kN/m² und 600 kN/m² ausgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Scherrahmens betrug 0,05 mm/min.

Die Ergebnisse und die Randbedingungen der durchgeführten Scherversuche von GB und upi an der Materialmischung der oberen Lage sind in der Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Randbedingungen und Ergebnisse der durchgeführten Scherversuche an der Materialmischung der oberen Lage

	GB	upi
Anzahl der Teilversuche	3	4
Normalspannungen [kN/m ²]	200	100
	600	200
	1.200	300
		600
Scherrahmen:		
- Abmessungen [cm]	15,3 x 15,3	30 x 30
- Fläche A [cm ²]	232,6	900
Einbaudichte [g/cm ³]	1,93	1,93
Einbauwassergehalt [%]	13,0	12,3
Konsolidierungszeit [h]	24	24
Schergeschwindigkeit [mm/min]	0,1	0,04
Reibungswinkel φ' [°]	35,5	36,8
Kohäsion c' [kN/m ²]	14,1	54,2
Reibungswinkel $\varphi'_{c=0} = 34,8^\circ$	36,1	39,9

4 Zusammenfassung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Die Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH und die upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH wurde von der K+S GmbH beauftragt, basierend auf den Eignungsuntersuchungen zum System Basisabdichtung gemäß dem Materialkonzept Zielitz laborative Untersuchungen zu deren Fortschreibung / Konkretisierung für das Werk Werra unter Verwendung regional verfügbarer Materialien (Gesteinskörnungen) sowie gleicher Additive / Hilfsstoffe (Bentonit und Polymer) durchzuführen. Der vorliegende Bericht fasst die vorliegenden Untersuchungsergebnisse der beiden Ingenieurbüros zusammen.

In einem ersten Schritt wurden die für die Untersuchungen vom Auftraggeber gelieferten Grundmaterialien und Additive untersucht. Hierbei wurden die gestellten Anforderungen erfüllt, bei einer insgesamt guten Übereinstimmung der Ergebnisse beider Ingenieurbüros.

Im nächsten Schritt der Untersuchungen wurden Testmischungen für die untere und obere Lage hergestellt. Zur Bewertung des Einflusses der aufgetragenen Verdichtungsenergie auf die erzielbare Materialdichte wurden unterschiedliche Proctorserien für die untere und obere Lage durchgeführt. Die Versuchsergebnisse belegen die für die untersuchten Materialgemische zu erwartende ausgeprägte Abhängigkeit des k -Wertes vom Einbauwassergehalt. Im Rahmen der Untersuchungen führt eine geringe Erhöhung der Verdichtungsenergie nicht unmittelbar zu einer signifikanten Zunahme der Trockendichte im Bereich des Proctorwassergehaltes. Hinsichtlich des k -Wertes weisen jedoch die Proben, die mit höherer Verdichtungsenergie hergestellt wurden, deutlich geringere k -Werte auf. Zudem ist die quantitative Streuung der ermittelten k -Werte deutlich geringer im Vergleich zu den Proben, die mit Standardverdichtung nach DIN 18127 hergestellt wurden.

Auf der Grundlage der vorliegenden Erfahrungen der Bauausführung der Basisabdichtung am Standort Zielitz wurde die erforderliche Verdichtungsenergie ermittelt, mit der für die Materialmischung der unteren Lage eine Trockendichte von $\rho_d \geq 1,80 \text{ g/cm}^3$ und für die Materialmischung der oberen Lage eine Trockendichte von $\rho_d \geq 1,93 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden kann.

Die durchgeführten Durchlässigkeitsuntersuchungen ergeben für die Materialmischung der unteren Lage (uL) zum jetzigen Stand der Untersuchungen mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f \leq 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ (GB) und $k_f \leq 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$ (upi). Für die Materialmischung der oberen Lage (oL) ergeben die durchgeführten Durchlässigkeitsuntersuchungen zum jetzigen Stand der Untersuchungen mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f \leq 3,1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ (GB) und $k_f \leq 9,7 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ (upi).

Die gestellte Anforderung von $k_{f,soll} \leq 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ wird somit von beiden Materialmischungen eingehalten. Es ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass die Langzeit-Durchlässigkeitsuntersuchungen beider Materialmischungen der oberen und unteren Lage noch nicht abgeschlossen sind.

Die Ergebnisse der durchgeführten Scherversuche beider Ingenieurbüros dokumentieren die Einhaltung der gestellten Anforderungen an den Reibungswinkel von $\varphi'_{uL} \geq 30^\circ$ und $\varphi'_{oL} \geq 35^\circ$.

Im Rahmen der vergleichenden Bewertung der Untersuchungsergebnisse beider Ingenieurbüros ist festzustellen, dass die bisher gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse der laborativen Untersuchungen insgesamt plausibel und widerspruchsfrei sind. Die Ergebnisse der durchgeführten Unter-

suchungen werden von den beiden Ingenieurbüros wechselseitig bestätigt. Die quantitative Übereinstimmung der Untersuchungsergebnisse ist unter Berücksichtigung der in Bezug auf die Verarbeitung sehr anspruchsvollen Materialmischungen als mehrheitlich gut zu bewerten.

Zusammenfassend werden zum jetzigen Stand der durchgeführten laborativen Eignungsuntersuchungen die gestellten Materialanforderungen vollständig eingehalten. Hieraus kann die grundsätzliche Eignung der untersuchten Materialmischungen der oberen und unteren Lage des Systems Basisabdichtung für die Phase 3 der Haldenerweiterung Hattorf abgeleitet werden.

5 Fortschreibung der Materialvorgaben

Die gestellten Materialanforderungen an die Dichtungsmaterialien der oberen und unteren Lage sind in Abschnitt 2.1, Tabelle 1 zusammengefasst. Auf der Grundlage der Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen sind die Anforderungen entsprechend fortzuschreiben. Tabelle 19 fasst die empfohlenen Zielgrößen hinsichtlich Proctordichte, Verdichtungsgrad und Wassergehalt beim Einbau zusammen.

Tabelle 19: Anforderungen an das Dichtungssystem

Vorgaben und Parameter / Grenzwerte	Dichtungsschicht, untere Lage (uL)	Dichtungsschicht, obere Lage (oL)
Proctordichte ¹⁾ ρ_{Pr}	$\geq 1,77 \text{ g/cm}^3$	$\geq 1,88 \text{ g/cm}^3$
Einbaudichte ρ_d	$\geq 1,82 \text{ g/cm}^3$	$\geq 1,93 \text{ g/cm}^3$
Verdichtungsgrad D_{Pr}	$\geq 103 \% D_{Pr}$	$\geq 103 \% D_{Pr}$
Wassergehalt bei Einbau	$W_{\text{Einbau}} \geq 14,5 \text{ Gew.}\%$	$W_{\text{Einbau}} \geq 13,0 \text{ Gew.}\%$

¹⁾ Standardproctor gemäß DIN 18127


Dr.-Ing. M. Nendza

Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Austel'.

Dipl.-Ing. P. Austel

upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH