

Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 3

Band 3.29.1N2 der Antragsunterlage

Nachweise für das System Basisabdichtung im Pilotvorhaben Zielitz

Vorhabenträger:

K+S Minerals and Agriculture GmbH
Werk Werra, Standort Hattorf
Hattorfer Straße
36269 Philippsthal



Verfasser:

upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH
Breite Straße 30
39576 Stendal



.....
Dipl.-Ing. (FH) Nico Gose

Impressum

Fassung: März 2021
Ansprechpartner: Nico Gose
Telefon: 03931/68920
Fax: 03931/689299
e-Mail: n.gose@upi-umweltprojekt.de
Web: www.upi-umweltprojekt.de



Ergebnisse im Überblick:

Zur Reduzierung des Sicker-/Haldenwassereintrages in den Untergrund eine **zweilagige mineralische Dichtung entwickelt** und im Rahmen eines Pilotvorhabens am Standort Zielitz, unter Berücksichtigung der maßgebenden haldenspezifischen chemischen und mechanischen Beanspruchungen, erprobt.

Inhalt des vorliegenden Bandes ist die **zweilagige mineralische Dichtung**

- Ermittlung der maßgebenden haldenspezifischen chemischen und mechanischen Beanspruchungen zur Bemessung der zweilagigen mineralischen Dichtung des Systems Basisabdichtung
- **Nachweis der Funktionalität, Wirksamkeit und Gebrauchstauglichkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung** durch Laboruntersuchungen unter Berücksichtigung des Standes der Technik und Wissenschaft, sowie die Haldenkörperspezifik berücksichtigende Versuche
- **Nachweis der Herstellbarkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung** im Rahmen des Pilotversuches

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	7
2	Zweilagige mineralische Dichtung	7
2.1	Technische Lösung	7
2.2	Untersuchungsergebnisse	9
2.2.1	Laboruntersuchungen	9
2.2.2	Untersuchungen an der Pilothalde und der Erweiterung der Pilothalde	33
2.3	Fazit	33
	Literaturverzeichnis	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Aufbau der technischen Lösung für eine zweilagige mineralische Dichtung des SyBa im Pilotvorhaben ZI	8
Abbildung 2-2:	Scherspannungs-Weg-Diagramm der oberen Dichtungsschicht (Sättigung = 1, gesättigt)	13
Abbildung 2-3:	Schema zum modifizierten Kompressionsversuch (links mit Vertikallast, rechts mit Vertikal- und Horizontallast).....	14
Abbildung 2-4:	Versuchsaufbau mit Kastenwiderlager, Stufe B (30 cm zweilagige mineralische Dichtungsschicht)	15
Abbildung 2-5:	Kompressionsversuch V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (30 cm, Untergrund ca. 2 cm Kies 0/8)	16
Abbildung 2-6:	Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (30 cm, Untergrund ca. 2 cm Kies 0/8).....	16
Abbildung 2-7:	Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (30 cm, Untergrund ca. 2 cm Kies 0/8).....	17
Abbildung 2-8:	Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (15 cm, Untergrund ca. 30 cm Sand-Schluff-Gemisch)	18
Abbildung 2-9:	Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (15 cm, Untergrund ca. 20 cm Sand-Schluff-Gemisch, 11 cm Stirnwand)	19
Abbildung 2-10:	Kompressionsversuch H/V-Last, einlagige Dichtung (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$) 15 cm, Untergrund ca. 20 cm Sand-Schluff-Gemisch, ohne Stirnwand).....	20
Abbildung 2-11:	Seitenansicht Kastenwiderlager einlagige Dichtung (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$).....	21
Abbildung 2-12:	Kompressionsversuch H/V-Last, einlagige Dichtung (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$).....	21
Abbildung 2-13:	Kompressionsversuch, Vergleich der eingeleiteten Spannungen zwischen der zweilagigen mineralischen Dichtung gemäß Abbildung 2-1 und den einlagigen Dichtungen (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$).....	22
Abbildung 2-14:	Kompressionsversuch, Vergleich der Wege zwischen der zweilagigen mineralischen Dichtung gemäß Abbildung 2-1 und den einlagigen Dichtungen (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$)	23
Abbildung 2-15:	Quellhebungsversuch in Anlehnung an den Pulverquellhebungsversuch nach Huder/Amberg.....	24

Abbildung 2-16:	Quellhebungsversuch, IBECO Seal 80 (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 0,98 \text{ g/cm}^3$)	24
Abbildung 2-17:	Quellhebungsversuch, Bentonit-Polymer-Mischung (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 1,04 \text{ g/cm}^3$)	25
Abbildung 2-18:	IBECO Seal 80 (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 0,94 \text{ g/cm}^3$)	25
Abbildung 2-19:	Bentonit-Polymer-Mischung (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 0,97 \text{ g/cm}^3$)	26
Abbildung 2-20:	Secursol 3301 (Einbauwassergehalt 1,8 M.-%; $\rho_E = 0,87 \text{ g/cm}^3$)	26
Abbildung 2-21:	Verformung des Probekörpers (durch zwei gegenüberliegende halbkreisförmige Widerlager)	28
Abbildung 2-22:	Rückverformung der mineralischen Dichtung mit definierter Auflast.....	28
Abbildung 2-23:	Wasserdurchlässigkeitsbestimmung der zweilagigen mineralischen Dichtung, Feinanteil Dreischichttonmineral, hochviskose vollsynthetische bzw. halbsynthetische Polymere basierend auf Polyacrylamid	29
Abbildung 2-24:	Wasserdurchlässigkeitsbestimmung der zweilagigen mineralischen Dichtung, Feinanteil Zweischichttonmineral, hochviskose vollsynthetische bzw. halbsynthetische Polymere basierend auf Polyacrylamid	29
Abbildung 2-25:	Wasserdurchlässigkeitsbestimmung der zweilagigen mineralischen Dichtung, Feinanteil Dreischichttonmineral, hochviskose vollsynthetische bzw. halbsynthetische Polymere basierend auf Polyacrylamid, Einbau im Stahlzylinder)	31
Abbildung 2-26:	Darstellung der Ergebnisse aus den CT-Untersuchungen.....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Zusammensetzung der oberen Dichtungsschicht.....	8
Tabelle 2-2:	Zusammensetzung der unteren Dichtungsschicht.....	9
Tabelle 2-3:	Zusammensetzung des Haldenwassers am Standort Zielitz (HW)	10
Tabelle 2-4:	Proctordichten (100 %) der oberen/ unteren Dichtungsschicht (Feinanteil: IBECO Seal 80)	11
Tabelle 2-5:	Ergebnisse der Rahmenscherversuche der oberen Dichtungsschicht (Auszug).....	12
Tabelle 2-6:	Ergebnisse der Kreisringscherversuche der unteren Dichtungsschicht (Auszug).....	12

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Abschlussbericht Bauüberwachung, Stand 21.03.2016
Anlage 2:	Zwischenbericht, Zwischenauswertung von Langzeituntersuchungen, Langzeitbeständigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes der mineralischen Dichtung des Materialkonzeptes Zielitz

1 **Veranlassung**

Am Standort des Werkes Zielitz der K+S KALI GmbH werden in einem Pilotvorhaben wissenschaftliche Untersuchungen von neuen verbesserten technischen Lösungen zur Minimierung der Emissionen von Rückstandshalden, d. h. zur Vermeidung/Verminderung des Eintrags von Haldenwasser in den Untergrund durch eine Basisabdichtung, durchgeführt. Unter Berücksichtigung des typischen Haldenkörperverhaltens – hohe Auflast verbunden mit entsprechenden vertikalen und horizontalen Spannungseinträgen und Verformungen, viskoplastisches Verhalten, Löslichkeit, Rekristallisation und chemische Beanspruchung – wurden technische Lösungen und Untersuchungsmethoden gemäß dem Stand der Technik in der Kaliindustrie und dem Stand der Wissenschaft angewendet und weiterentwickelt. Das Pilotvorhaben besteht aus Laborversuchen, einer Lysimeterstation auf der Halde 2 (nicht Gegenstand dieses Berichtes) und der Pilothalde mit Erweiterung.

2 **Zweilagige mineralische Dichtung**

2.1 **Technische Lösung**

Unter Berücksichtigung der haldenspezifischen Besonderheiten und der Praxiserfahrungen aus der Kaliindustrie bei der Ausführung von Basisabdichtungen lassen sich folgende grundlegende Anforderungen zur Entwicklung einer unter den Bedingungen von Rückstandshalden der Kaliindustrie geeigneten Basisabdichtung ableiten:

- Basisabdichtung bestehend aus zwei mineralischen Dichtungsschichten mit differenzierten standortangepassten geotechnischen Parametern (Verformbarkeit, Scherfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit),
- chemische Eignung der verwendeten Dichtungsbaustoffe unter besonderer Berücksichtigung des Haldenwasserangriffs,
- hinreichende Verformbarkeit und Selbstheilungsvermögen sowie
- Sicherung der Wirksamkeit und Langzeitsicherheit unter Einsatzbedingungen.
- Technische Lösung der zweilagigen mineralischen Dichtung besteht aus folgender Rezeptur:
 - untere Lage: Sand-Bentonit-Polymer-Gemisch;
 - obere Lage: Kies-Sand-Bentonit gemäß Fullerkurve, Größtkorn 8 mm

Unter Berücksichtigung des Kenntnisstandes über die Verformungen an der Haldenbasis wurde das System Basisabdichtung (im weiteren SyBa) bestehend aus einer zweilagigen mineralischen Dichtung mit differenzierten mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie Einrichtungen zur Haldenwasserfassung entwickelt. Das SyBa vermeidet/vermindert aufgrund seiner an das Haldenkörperverhalten angepassten mechanischen und hydraulischen Eigenschaften den Eintrag von Haldenwasser in den Untergrund.

Die Abbildung 2-1 zeigt den Aufbau des am Standort Zielitz entwickelten technischen Lösungsansatzes für eine Basisabdichtung unter einer Rückstandshalde.

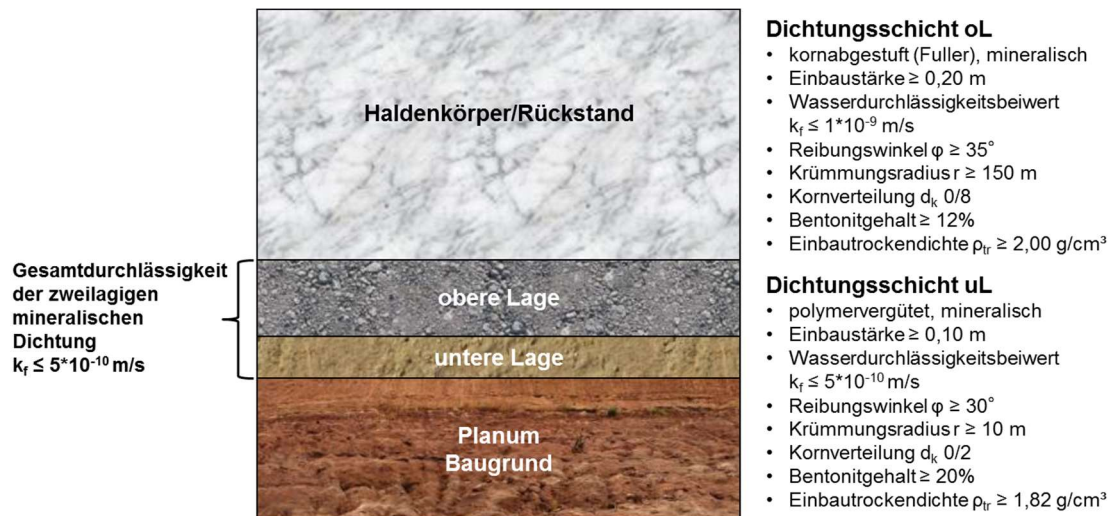


Abbildung 2-1: Aufbau der technischen Lösung für eine zweilagige mineralische Dichtung des SyBa im Pilotvorhaben ZI

Die im Zuge der Herstellung der in den mineralischen Dichtungsschichten verwendeten Korngruppen (Sand 0/2, Kies 2/8) wurden im Wesentlichen im Kies- und Baustoffwerk Barleben (Widersdorfer Straße 3, 39126 Magdeburg-Barleber See) gewonnen. Vergleichende Untersuchungen mit Gesteinskörnungen (Sand 0/2, Kies 2/8) aus anderen Vorkommen der Region Zielitz bestätigten ebenfalls die Eignung.

Die Zusammensetzungen der im Rahmen der Vor- und Laboruntersuchungen (vgl. Kapitel 2.2.1) entwickelten Rezepturen sind für die obere Dichtungsschicht in Tabelle 2-1 und für die untere Dichtungsschicht in

Tabelle 2-2 dargestellt. Der in den Laboruntersuchungen verwendete Wassergehalt beträgt für die obere/untere Dichtungsschicht ca. 10/12 %.

Tabelle 2-1: Zusammensetzung der oberen Dichtungsschicht

	Anteil [Gew.-%]
Bentonit	12,0
Sand 0/2	36,8
Kies 2/8	51,2

Tabelle 2-2: Zusammensetzung der unteren Dichtungsschicht

	Anteil [Gew.-%]
Polymer	0,4
Bentonit	19,6
Sand 0/2	80,0

2.2 Untersuchungsergebnisse

2.2.1 Laboruntersuchungen

Das Untersuchungsprogramm zur Eignungsprüfung/ -feststellung der technischen Lösungen für Basisabdichtungen wurde in Anlehnung an den Stand der Technik und der Wissenschaft entwickelt.

Bestandteil des konzipierten Untersuchungsprogrammes sind Standard-Laboruntersuchungen aus den Bereichen Grundbau und Bodenmechanik. Darüber hinaus wurden modifizierte Versuchsdurchführungen, die das spezifische Haldenkörperverhalten von Rückstandshalden berücksichtigen, durchgeführt.

Das Untersuchungsprogramm setzt sich wie folgt zusammen:

- Voruntersuchungen zur Materialauswahl (bodenmechanische Standarduntersuchungen)
- entwickeltes Nachweisverfahren bestehend aus folgenden Teiluntersuchungen:
 - Proctorversuche
 - Scherfestigkeitsuntersuchungen
 - modifizierte Kompressionsversuche unter Ansatz der Haldenaufplast (Vertikal- und Horizontallast)
 - Quellversuche an unterschiedlichen Feinstbestandteilen (Bentoniten und Bentonit-Polymer-Gemischen sowie an gering quellfähigen Tonmineralen) unter Verwendung von verschiedenen Prüfflüssigkeiten (entlüftetes Leitungswasser im weiteren LW und Haldenwasser im weiteren HW).
 - Modifizierte Verformungsversuche (Belastung der mineralischen Dichtung durch das Einfügen einer vertikalen Scherfuge mit anschließender Überdrückung) zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes zum Nachweis der Funktionalität und Wirksamkeit unter den nicht vermeidbaren haldeninduzierten Verformungen im Untergrund.
 - modifizierte Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes in Triaxialzellen unter Verwendung von Haldenwasser des Standortes Zielitz und Hattorf (Langzeituntersuchungen teilweise seit 2010)

- CT-Untersuchungen an verformten und unverformten Probekörpern

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden an Gesteinskörnungen (Sand 0/2, Kies 2/8) aus verschiedenen Vorkommen die Parameter:

- Wassergehalt nach DIN 18121-1,
- Korngrößenverteilung nach DIN 18123,
- Gehalt an organischer Substanz nach DIN 18128,
- Karbonatgehalt nach DIN 18129,
- pH-Wert nach DIN ISO 10390 sowie
- elektrische Leitfähigkeit nach DIN ISO 11265

bestimmt.

Die Zusammensetzung des in den Laborversuchen verwendeten Haldenwassers entnommen am Standort Zielitz (im folgenden HW) ist in der Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: Zusammensetzung des Haldenwassers am Standort Zielitz (HW)

	min.	max.	Mittelwert
NaCl	194,9	215,8	203,6
KCl	45,2	55,9	52,1
MgCl ₂	39,3	51,6	46,3
MgSO ₄	13,5	15,7	14,5
CaSO ₄	0,7	1,0	0,8
Gesamtsalzgehalt	296,0	333,0	317,4
Dichte	1,201	1,221	1,2
pH-Wert	6,0	6,6	6,5

Proctorversuche

Die Ermittlung der Trockendichte der oberen und unteren Dichtungsschicht bei optimalem Wassergehalt erfolgte nach DIN 18127 für die im Pilotvorhaben verwendeten Baustoffe. In der Tabelle 2-4 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Es wurden pro Dichtungsschicht jeweils zwei Versuche durchgeführt.

Tabelle 2-4: Proctordichten (100 %) der oberen/ unteren Dichtungsschicht (Feinanteil: IBECO Seal 80)

	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	Wassergehalt w [%]
obere Dichtung	1,960	7,9
obere Dichtung	1,956	7,8
untere Dichtung	1,813	12,9
untere Dichtung	1,829	11,6

Die Einbautrockendichte wurde unter Berücksichtigung der vorstehenden Ergebnisse für den Einbau im Feld für die Pilothalde in der oberen Dichtungsschicht mit $\rho_{tr} \geq 2,00$ g/cm³ und in der unteren Dichtungsschicht mit $\rho_{tr} \geq 1,81$ g/cm³ gewählt.

Scherfestigkeitsuntersuchungen

Im Rahmen der Eignungsprüfung/ -feststellung wurden an der entwickelten Lösungsvariante Scherfestigkeitsuntersuchungen nach DIN 18137 (Bestimmung von Reibungswinkel und Kohäsion) durchgeführt. Für die obere Dichtungsschicht wurde unter Berücksichtigung der materialtechnischen Eigenschaften der Einzelkomponenten als Anforderung an die mechanische Widerstandsfähigkeit ein Reibungswinkel von $\varphi \geq 35^\circ$ festgelegt. Der Mindestreibungswinkel für die untere Dichtungsschicht beträgt ca. $\varphi \geq 30^\circ$. Die Scherparameter der unteren Dichtungsschicht wurden aufgrund der Kornverteilung (Größtkorn 2 mm) im Kreisringschergerät (Querschnitt 40 cm²) ermittelt. Die Scherparameter der oberen Dichtungsschicht mussten aufgrund der Kornverteilung (Größtkorn 8 mm) im Rahmenschergerät (l/b = 30/30 cm) durchgeführt werden. Alle Versuche wurden undrainiert (Versuchsdurchführung unter Wasser) mit einer Schergeschwindigkeit $v_{scher} = 0,01$ mm/min durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse der oberen Dichtungsschicht sind in der Tabelle 2-5, die Untersuchungsergebnisse der unteren Dichtungsschicht in der Tabelle 2-6 dargestellt.

Tabelle 2-5: Ergebnisse der Rahmenscherversuche der oberen Dichtungsschicht (Auszug)

Versuchsgerät/ Randbedingungen	Reibungswinkel φ_u [°]	Kohäsion c_u [kN/m ²]	Einbautrockendichte [g/cm ³]	Einbauwasser-gehalt [%]	Ausbauwasser-gehalt [%]
Rahmenschergerät (Proctorwassergehalt)	39,52	36,67	ca. 2,00	7,9	n. b.
Rahmenschergerät	39,52	43,33	ca. 2,00	7,8	n. b.
Rahmenschergerät (Sättigungsgrad 1, gesättigt)	39,35	36,00	ca. 2,00	12,0	12,6 - 13,0

Tabelle 2-6: Ergebnisse der Kreisringscherversuche der unteren Dichtungsschicht (Auszug)

Versuchsgerät/ Randbedingungen	Reibungswinkel φ_u [°]	Kohäsion c_u [kN/m ²]	Einbautrockendichte [g/cm ³]	Einbauwasser-gehalt [%]	Ausbauwasser-gehalt [%]
Rahmenschergerät (Proctorwassergehalt)	29,4	56,8	< 1,8	11,5	11,6
Kreisringschergerät (Sättigungsgrad 1)	31,9	75,3	1,81	17,3	n. b.
Kreisringschergerät (Sättigungsgrad 1, gesättigt)	33,5	44,4	1,81	17,4	n. b.
Kreisringschergerät (Sättigungsgrad 1, gesättigt)	33,0	51,4	1,81	17,4	n. b.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Anforderungen an die Scherfestigkeit von den untersuchten Dichtungsmaterialien eingehalten werden. Lediglich bei einem Versuch der unteren Dichtungsschicht wurde der festgelegte Mindestreibungswinkel ($\varphi = 30^\circ$) geringfügig unterschritten, was auf die Einbaurandbedingungen (Einbaudichte < 1,8) zurückzuführen ist. Weiterhin ist festzustellen, dass die Mindestreibungswinkel auch bei gesättigtem Material eingehalten werden, da der Scherwiderstand in den Dichtungsmaterialien durch die mineralischen Zuschlagsstoffe Kies und Sand infolge der Reibungskräfte an den Kontaktstellen der Einzelkörner (Mikroreibung), der Reibungskräfte durch Verschiebung und Verdrehung der Einzelkörner (Makroreibung) sowie der Kräfte, die in der Scherzone des dicht gelagerten Materials die Auflockerung behindern (Dilatationseffekt), erzeugt wird.

In der Abbildung 2-2 ist exemplarisch ein Scherspannungs-Weg-Diagramm der oberen kornabgestuften Dichtung dargestellt. Hierin ist zu erkennen, dass die Restscherfestigkeit

(Scherfestigkeit im Bruchzustand) nicht signifikant abnimmt und somit die Spannungen auch bei plastischer Verformung der Dichtungsschicht in den Untergrund übertragen werden können. Das Materialverhalten der beschriebenen gemischtkörnigen Dichtungen weist unter Berücksichtigung der haldentypischen Beanspruchungen signifikant bessere anwendungstechnische Eigenschaften (Verformbarkeit, mechanische und chemische Widerstandsfähigkeit) im Gegensatz zu Schichtenaufbauten aus Ton auf.

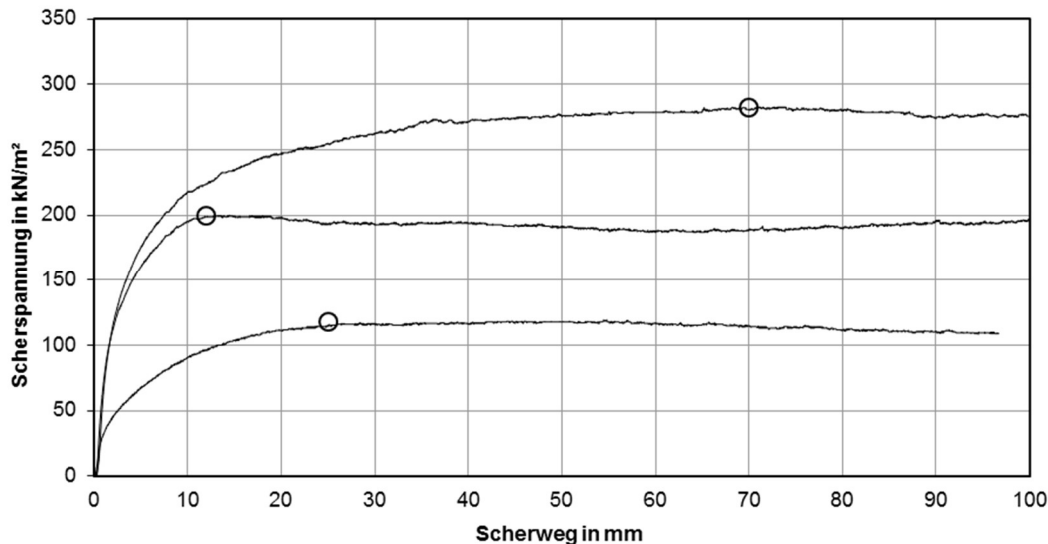


Abbildung 2-2: Scherspannungs-Weg-Diagramm der oberen Dichtungsschicht (Sättigung = 1, gesättigt)

Modifizierte Kompressionsversuche

Mit dem eindimensionalen Kompressionsversuch nach DIN 18135 (Ödometerversuch) wird das Konsolidationsverhalten von Böden untersucht, die bei Verhinderung von seitlichen Verformungen einer stufenweisen Laständerung unterworfen werden. Hierbei wird eine Entwässerung nur in axialer Richtung zugelassen.

Mit dem speziell für die Lastsituation an verschiedenen Bereichen der Basis von Rückstandshalden entwickelten Versuchsgerät zur Durchführung eines modifizierten Kompressionsversuches wurden zwei realitätsnahe grundsätzliche Lastverhältnisse unter konservativen Gesichtspunkten (Eintrag von Vertikalspannung sowie Eintrag von Vertikal- und Horizontalspannung) simuliert. Die gewählten Horizontal- und Vertikalspannungen wurden unter Berücksichtigung der Erkenntnisse und Berechnungen der Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach (2009; Konzeptstudie zur Entwicklung einer emissionsarmen Haldenwirtschaft, Bericht Nr. IK/UPI-02) ermittelt. Hierzu wurde für die Versuchsstufe A (Vertikalspannung, vgl. Abbildung 2-3 links) eine ebene quadratische Lastplatte mit Seitenlängen von 350 mm und für die Versuchsstufe B (Horizontal- und Vertikalspannung, vgl. Abbildung 2-3 rechts) eine geneigte Lastplatte für die Einleitung der Spannungen verwendet.

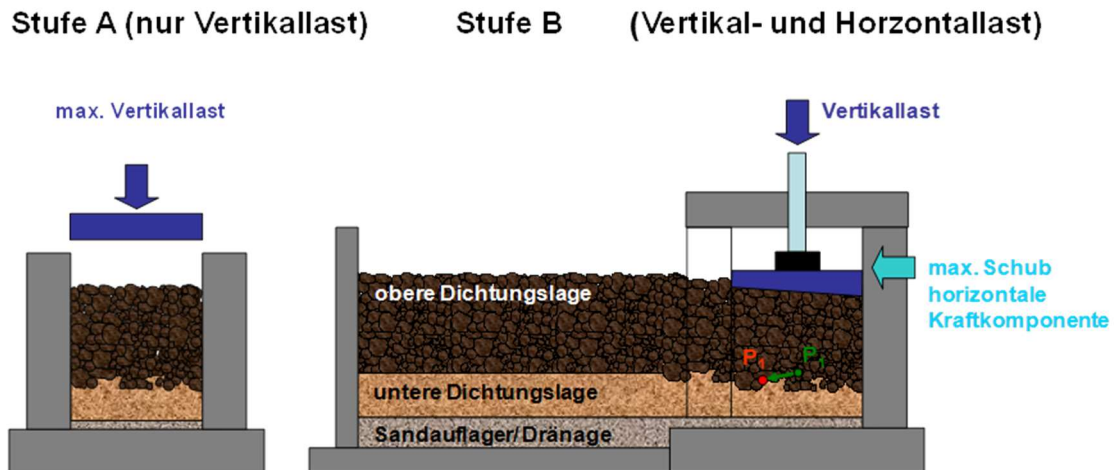


Abbildung 2-3: Schema zum modifizierten Kompressionsversuch (links mit Vertikallast, rechts mit Vertikal- und Horizontallast)

Abweichend zur Versuchsstufe A wurde bei Versuchsstufe B das Kastenwiderlager gemäß Abbildung 2-4 so gestaltet, dass eine horizontale Verformung zugelassen werden konnte. Bei diesem Versuch ist es möglich, die Maximallasten unter der Halde bei einem sehr ungünstigen horizontal/vertikal Verhältnis (im ca. 2/3 Punkt der Haldenböschung ausgehend vom Böschungsfuß) auf den Schichtenaufbau aufzubringen. Der Neigungswinkel ist so abgestimmt, dass bei voller Vertikallast gleichzeitig die maximale in einer FEM-Betrachtung ermittelte Schubspannung im Bereich der Haldenaufstandsfläche übertragen wird (IK/ upi 2009; Konzeptstudie zur Entwicklung einer emissionsarmen Haldenwirtschaft, Bericht Nr. IK/UPI-02). Im Rahmen der Versuche wurden permanent, mit einer Frequenz von 1 HZ, die aufgebrachte Spannung (Kraftmessdose zwischen Lastplatte und Druckzylinder) sowie der zurückgelegte Weg (zwei gegenüberliegende Wegmesser auf der Lastplatte) aufgezeichnet.

Untersucht wurden einlagige mineralische Dichtungen (Ton) mit Reibungswinkel im Bereich von $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$ sowie zweilagige mineralische Dichtungen gemäß dem entwickelten technischen Lösungsansatz ohne und mit natürlich anstehendem Baugrund der Standorte Zielitz und Hattorf. Im Bereich des Kastenwiderlagers ist keine Auflast als stützend wirkende Komponente aus der sukzessiv abnehmenden Böschung berücksichtigt worden.

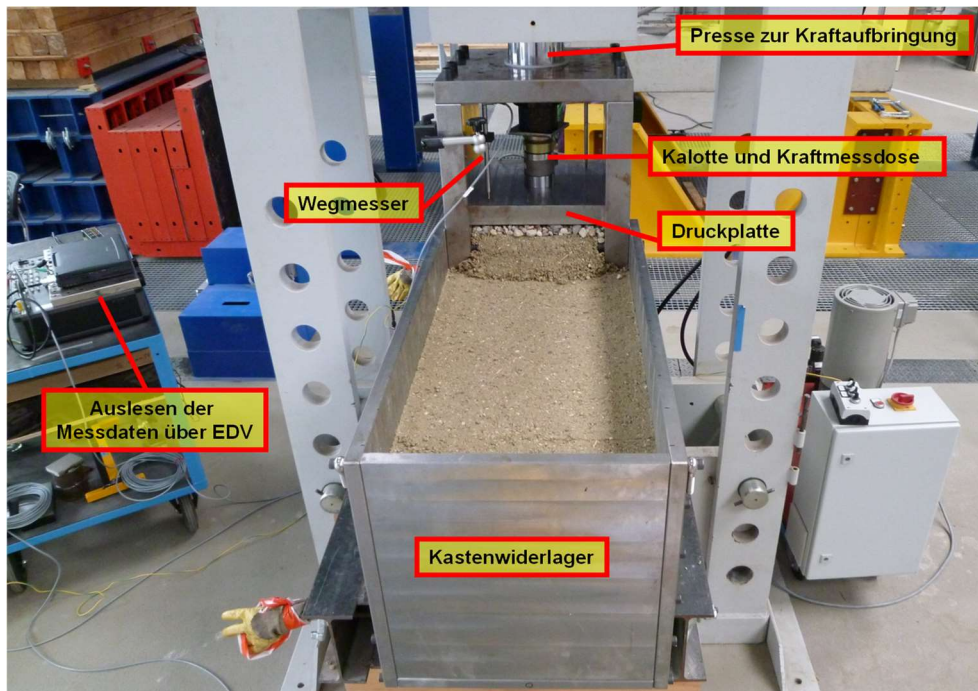


Abbildung 2-4: Versuchsaufbau mit Kastenwiderlager, Stufe B (30 cm zweilagige mineralische Dichtungsschicht)

Nachfolgend sind zusammenfassend die Ergebnisse für die entwickelte technische Lösungsvariante (zweilagige mineralische Dichtung) unter Verwendung variiert Rezepturen der Tonmehl-Polymer-Gemische (Secursol 3301®, IBECO Seal 80®, Polymere: hochviskos vollsynthetisch bzw. halbsynthetisch basierend auf Polyacrylamid) und der verwendeten Gesteinskörnungen (Sand 0/2, Kies 2/8) dargestellt. Die Dichtungsmaterialien wurden in der tatsächlichen Mächtigkeit von insgesamt 30 cm (10 cm untere Dichtungsschicht und 20 cm obere Dichtungsschicht) auf einem geringmächtigen Sand-Kies-Gemisch (Korngruppe 0/8, Höhe max. 2 cm) in das Versuchsgerät eingebaut. Dabei wurden Einbautrockendichten in der unteren Lage mit $\rho_d \geq 1,82 \text{ g/cm}^3$ und in der oberen Lage mit $\rho_d \geq 2,00 \text{ g/cm}^3$ realisiert.

Der Lasteintrag erfolgte stufenweise mit Laststufen von ca. 400 kN/m^2 (400 kN/m^2 entspricht einer Rückstandshaldenhöhe von 20 m bei einer Rückstandswichte von 20 kN/m^3). Die einzelnen Laststufen wurden mit Unterbrechungen von 20 min auf den Schichtenaufbau aufgetragen (zeitlich geraffter Lasteintrag, konservative Randbedingungen). Sofern während des Versuches kein Bruchzustand erreicht wurde, umfassten die abgeschlossenen Versuche sechs (entspricht einer Haldenhöhe von 120 m) bzw. bis neun Laststufen (entspricht einer Haldenhöhe von 180 m).

Die Abbildung 2-5 zeigt das Ergebnis des modifizierten Kompressionsversuches mit ausschließlich Vertikalkomponente ohne Kastenwiderlager und somit unter Ausschluss einer seitlichen Verformung. Aufgrund der gewählten Auflast entsprechend einer 120 m hohen Halde wurde in sechs Belastungsstufen eine Gesamtlast von ca. 2.400 kN/m^2 aufgebracht. Die vertikale Höhenreduzierung der Probe infolge Kompaktion betrug bis zu 25 mm.

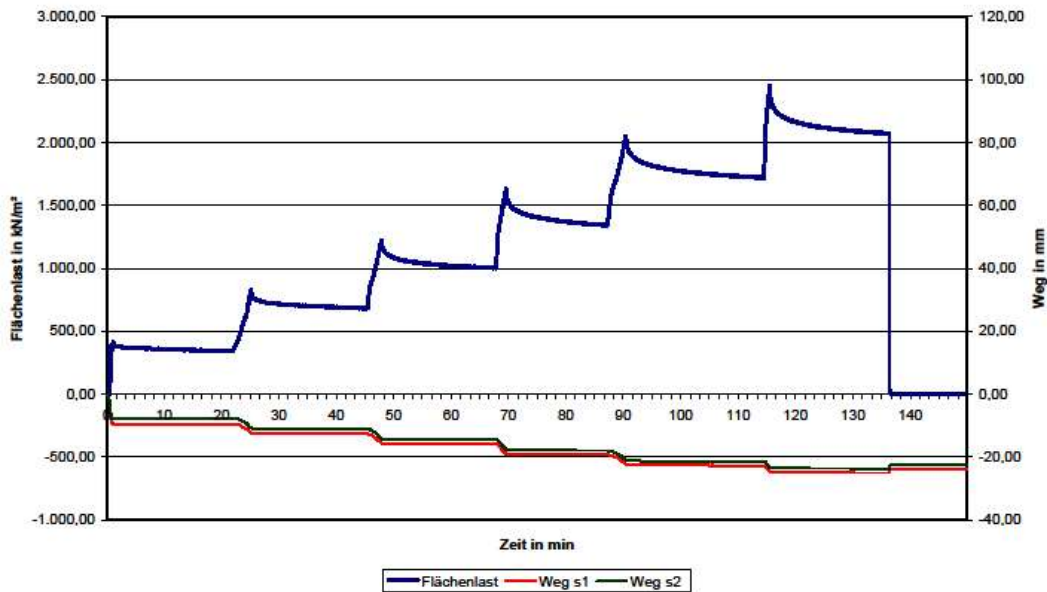


Abbildung 2-5: Kompressionsversuch V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (30 cm, Untergrund ca. 2 cm Kies 0/8)

Der in Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 dargestellte Kompressionsversuch erfolgt unter den gleichen Randbedingungen wie der in Abbildung 2-5, jedoch wurde wie oben beschrieben eine seitliche Stahlplatte durch ein seitliches Kastenwiderlager und die ebene Lastplatte durch eine geneigte Lastplatte ersetzt. Bei nahezu identischer Lastbeaufschlagung wie im Vertikalversuch (vgl. Abbildung 2-5) verdoppelte sich die ermittelte Vertikalverformung, was auf die Kompaktion sowie das seitliche Ausweichen der Probe zurückzuführen ist. Jedoch konnte bei diesem Versuch ein Versagen der Probe, auch unter den konservativen Randbedingungen (keine stützende Kraft auf dem seitlichen Kastenwiderlager infolge Auflast durch Haldenböschung), nicht festgestellt werden.

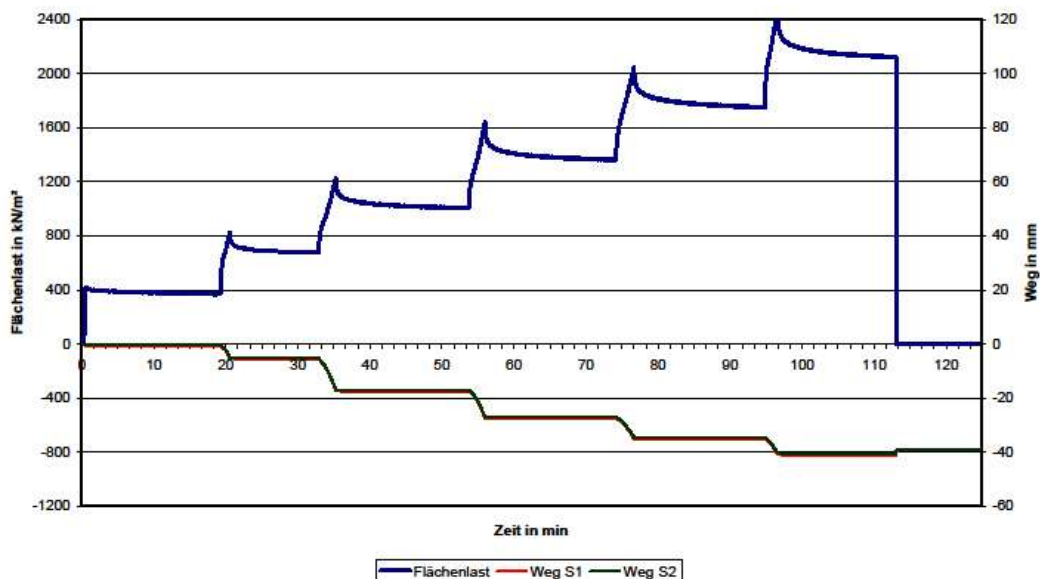


Abbildung 2-6: Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (30 cm, Untergrund ca. 2 cm Kies 0/8)



Abbildung 2-7: Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (30 cm, Untergrund ca. 2 cm Kies 0/8)

Im folgenden Versuch wurde die Gesamtmächtigkeit der Basisabdichtung auf 15 cm reduziert, weil die insgesamt zur Verfügung stehende Einbauhöhe mit 45 cm begrenzt ist und der Einfluss des Baugrundes am Standort Zielitz (Unterlagerung: Sand-Schluff-Gemisch, ca. 30 cm mächtig) untersucht wurde. Der Aufbau des Versuches erfolgte grundsätzlich wie der in Abbildung 2-6 dargestellte Versuch, jedoch wurden 9 Laststufen (ca. 3.600 kN; vergleichbar mit einer 180 m hohen Halde) mit geneigter Lastplatte aufgebracht. Die Verformungen nahmen bei diesem Versuch erwartungsgemäß zu, jedoch konnte kein Versagen des Schichtenaufbaus festgestellt werden.

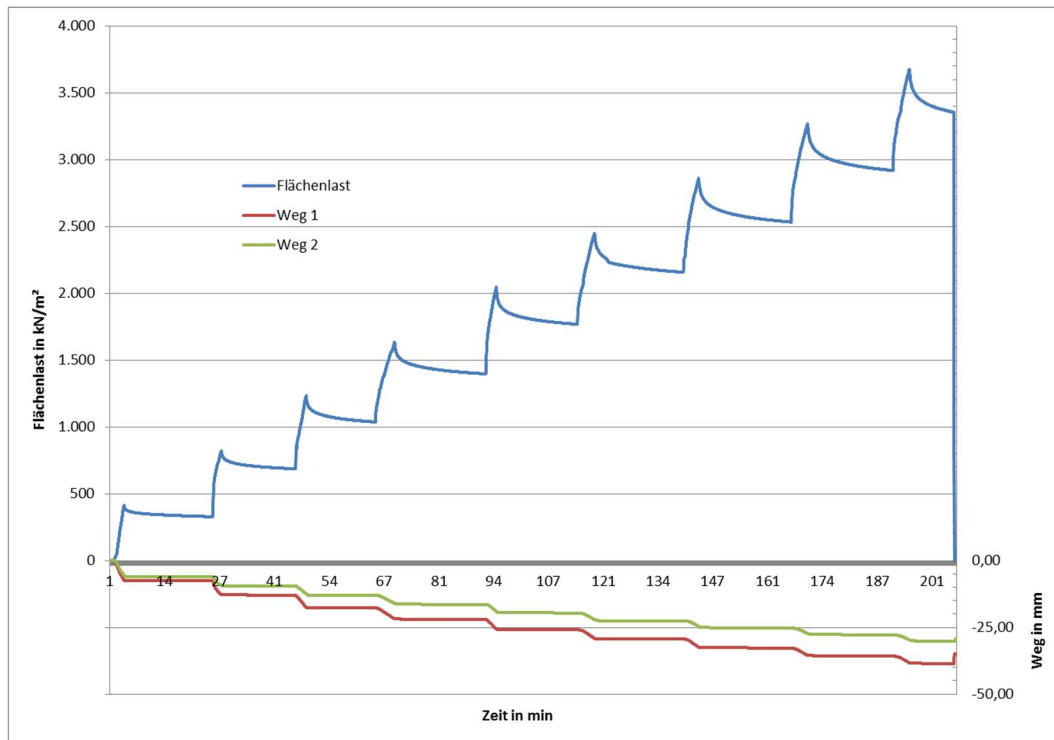


Abbildung 2-8: Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (15 cm, Untergrund ca. 30 cm Sand-Schluff-Gemisch)

Die nächste Versuchsstufe erfolgte gemäß Abbildung 2-8, jedoch wurde die Höhe der Stahlplatte an der Stirnseite des Kastenwiderlagers auf 11 cm reduziert, um ungehindert eine horizontale Verformung zuzulassen.

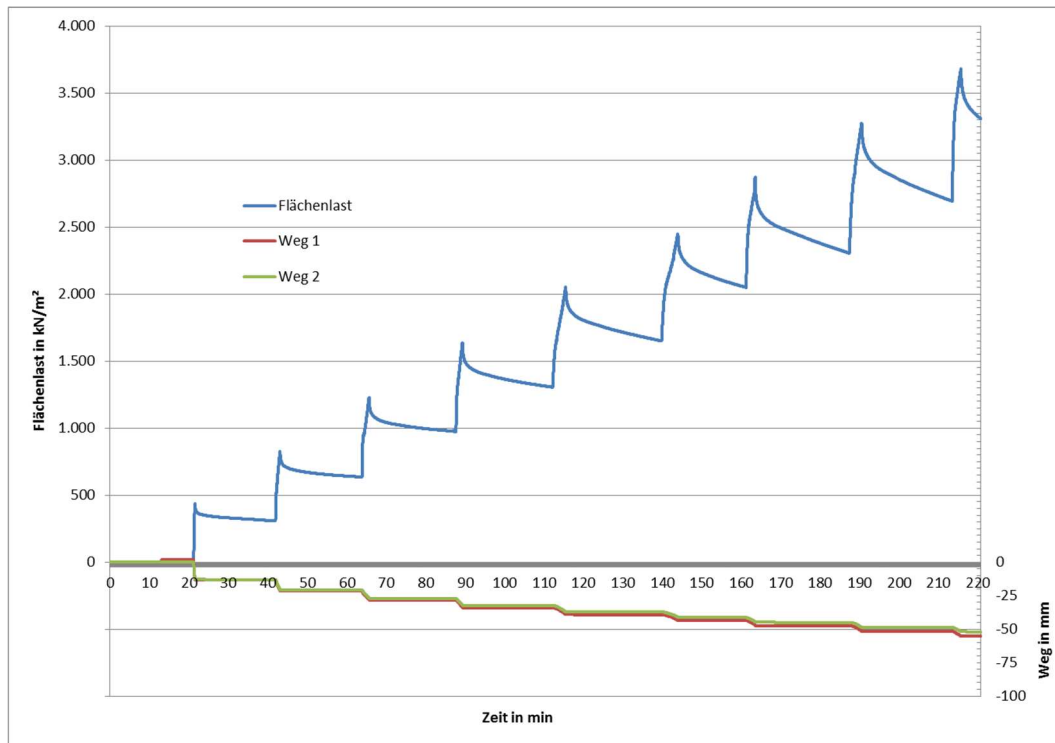


Abbildung 2-9: Kompressionsversuch H/V-Last, zweilagige mineralische Dichtung (15 cm, Untergrund ca. 20 cm Sand-Schluff-Gemisch, 11 cm Stirnwand)

Bei diesem Versuch wurden, den Erwartungen entsprechend, höhere Verformungen gemessen, jedoch konnte ein Versagen des Schichtenaufbaus infolge horizontaler Verformung nicht festgestellt werden (vgl. Abbildung 2-9).

Im Rahmen der vorstehenden Versuche wurden bei den Versuchsdurchführungen mit unterlagerten realem Baugrund Verformungen/ Dehnungen bis 20 % (rechnerisch) erzeugt, die im Rahmen der durchgeführten CT-Untersuchungen keinen Einfluss auf die Funktionalität und Wirksamkeit auf die mineralische Dichtung erkennen lassen.

Da die vorstehenden Kompressionsversuche keine geotechnischen Standardversuche sind, wurden vergleichende Untersuchungen mit einlagigen Dichtungsmaterialien (Ton mit Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$) durchgeführt. Ziel war die vergleichende Untersuchung des Verhaltens der einlagigen Dichtung mit der zweilagigen mineralischen Dichtung (Aufbau vgl. Abbildung 2-1) bei gleichen Randbedingungen.

Der in Abbildung 2-10 dargestellte Versuch beschreibt eine 15 cm mächtige einlagige Dichtung (Ton) auf dem ca. 30 cm Sand-Schluff-Gemisch. Es wurden insgesamt 5 Laststufen mit je 400 kN/m² bis zu einer Maximallast von 2.000 kN/m² aufgebracht. Ein Versagen der Tondichtung ist durch die deutliche Zunahme der gemessenen vertikalen Verformungen in der zweiten und dritten Laststufe zu erkennen (siehe Abbildung 3-9). Aufgrund der fehlenden Stirnplatte des Kastenwiederlagers konnte das horizontale Ausweichen der gesamten Dichtungsschicht unter Lastzunahme beobachtet werden. Der Rückgang der vertikalen Verschiebungen in der vierten und fünften Laststufe ist darauf zurückzuführen, dass die einlagige Dichtung (Ton) im Lastbereich vollständig seitlich verschoben wurde

und die weitere Zunahme der Last durch das Korngerüst des unterlagernden Sand-Schluff-Gemisch aufgenommen wurde. Dieser Sachverhalt konnte nach Ausbau visuell bestätigt werden (vgl. Abbildung 2-11 und Abbildung 2-12).

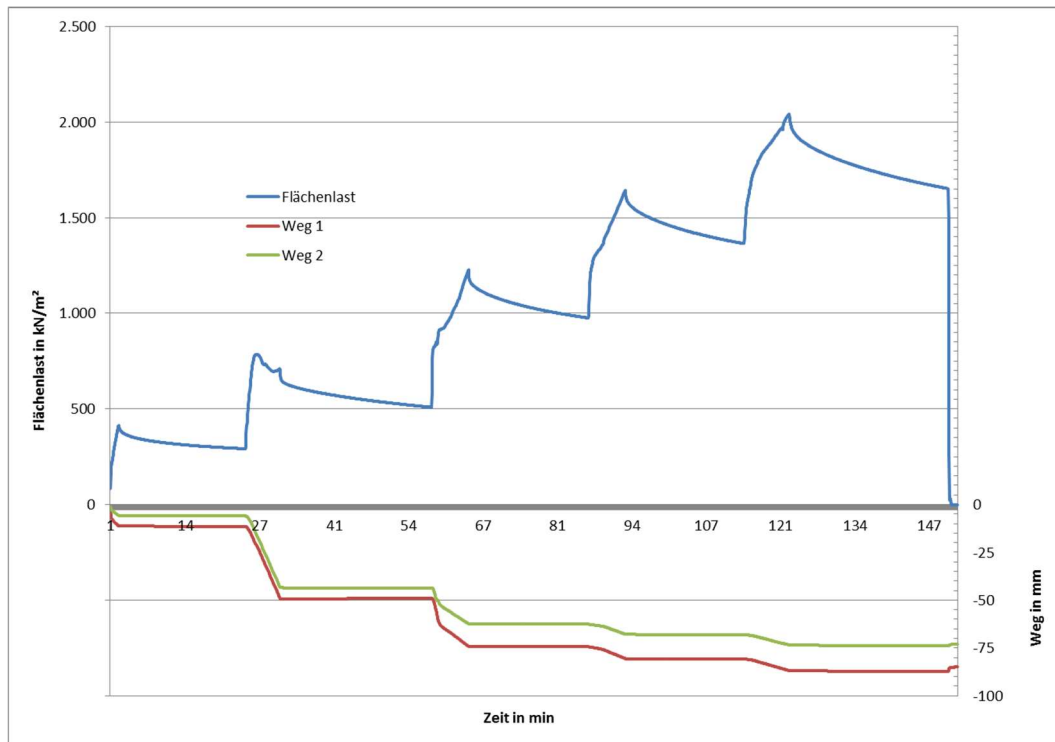


Abbildung 2-10: Kompressionsversuch H/V-Last, einlagige Dichtung (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$) 15 cm, Untergrund ca. 20 cm Sand-Schluff-Gemisch, ohne Stirnwand)



Abbildung 2-11: Seitenansicht Kastenwiderlager einlagige Dichtung (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$)



Abbildung 2-12: Kompressionsversuch H/V-Last, einlagige Dichtung (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$)

In den folgenden Abbildungen sind Vergleichsuntersuchungen an drei einlagigen mineralischen Dichtungsmaterialien (Ton) mit Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$ mit verschiedenen Wassergehalten und der zweilagigen mineralischen Dichtung dargestellt. Die Versuchsrandbedingungen wurden identisch (mit Stirnwand am Kastenwiderlager, Einbauhöhe ca. 30 cm) gewählt. In der Abbildung 2-13 sind die Vertikalspannungen und in der Abbildung 2-14 die entsprechenden Verformungen (Mittelwerte der jeweils zwei Wegmesser) dargestellt. Die grüne Kurve zeigt die zweilagige mineralische Dichtung, die

in Rottönen dargestellten Kurven die einlagigen mineralischen Dichtungen (Ton) mit Wassergehalten von größer 30 %, ca. 28 % und kleiner 26 %. Es wurde festgestellt, dass die einlagigen mineralischen Dichtungen (mit Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$ und Wassergehalten $< 30 \%$, 28% , $> 30 \%$) unter den haldentypischen Verformungsbedingungen versagen. Es zeigte sich, dass sich die Dichtungsschichten der zweilagigen mineralischen Dichtung unter Auflast und Verformung weitergehend verzahnen und keine Störungen erkennbar sind, was in den CT-Untersuchungen nachgewiesen werden konnte. Weiterhin nahm die zweilagige mineralische Dichtung alle Laststufen auf, ohne infolge horizontaler Verformung zu versagen.

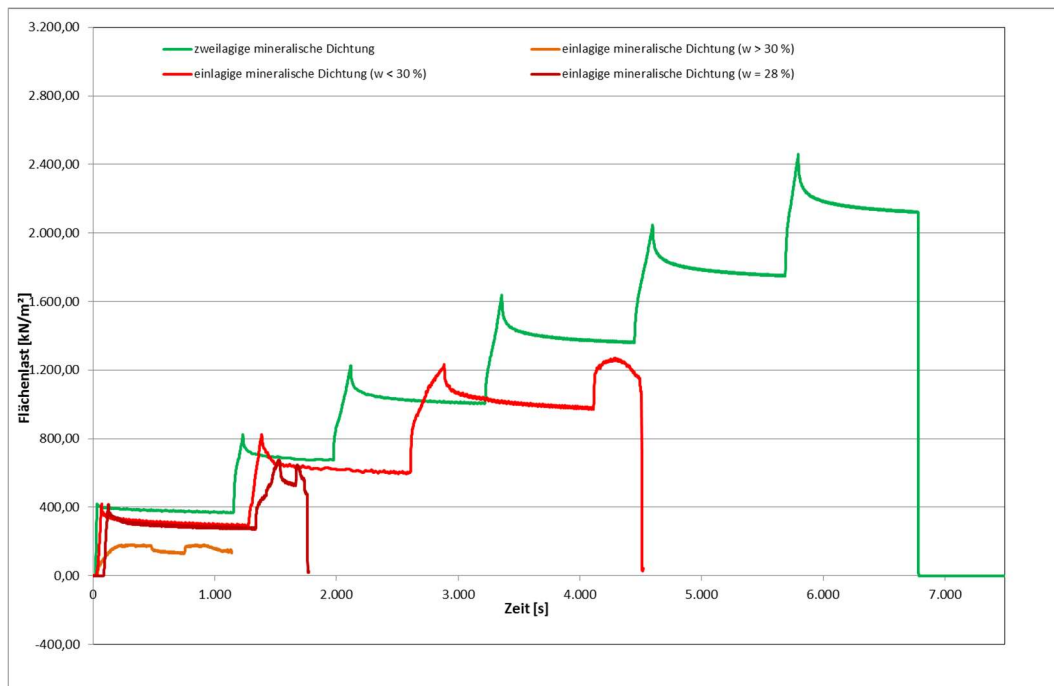


Abbildung 2-13: Kompressionsversuch, Vergleich der eingeleiteten Spannungen zwischen der zweilagigen mineralischen Dichtung gemäß Abbildung 2-1 und den einlagigen Dichtungen (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$)

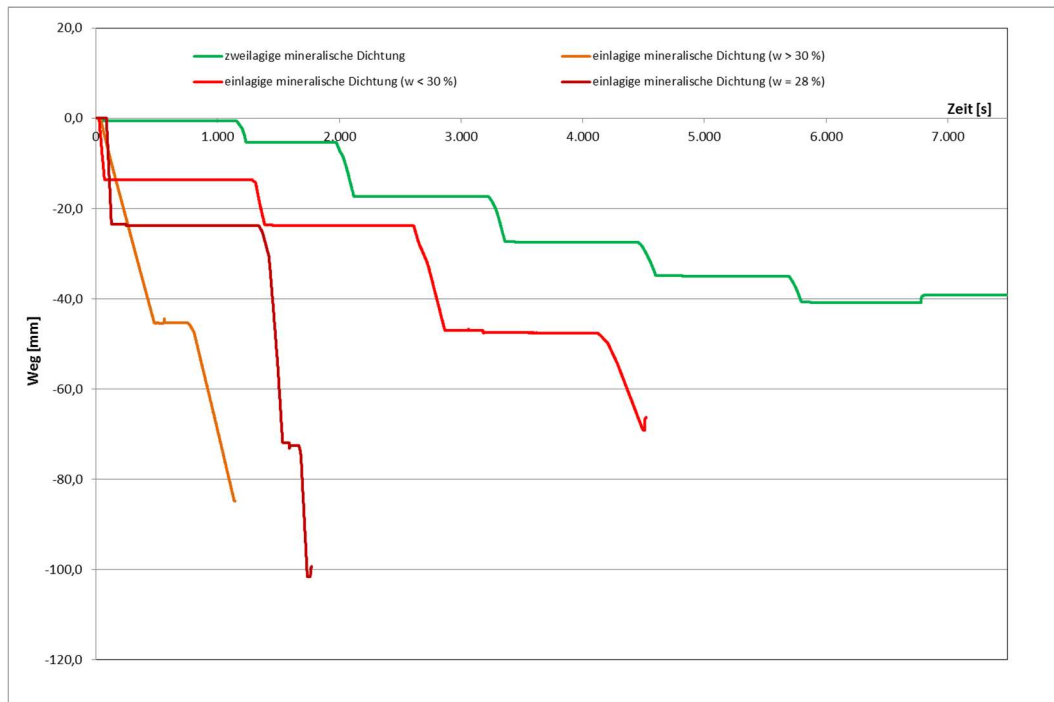


Abbildung 2-14: Kompressionsversuch, Vergleich der Wege zwischen der zweilagigen mineralischen Dichtung gemäß Abbildung 2-1 und den einlagigen Dichtungen (Ton, Reibungswinkel im Bereich $20^\circ \leq \varphi_i \leq 25^\circ$)

Quellhebungsversuche

Haldenwasser beeinflusst das Quellverhalten von Dreischichttonmineralen. Zur Quantifizierung des Verhaltens wurden vergleichende Quellhebungsversuche in Anlehnung an den Pulverquellversuch nach Huder/Amberg mit den Prüfflüssigkeiten Haldenwasser des Standortes Zielitz (HW Zusammensetzung vgl. Tabelle 2-3) und entlüftetes Leitungswasser durchgeführt und dabei die axiale Höhenänderung über die Zeit ermittelt. Die Proben wurden hierbei methodenbedingt durch einen Kunststoffdeckel ($\sigma_v = 0,14 \text{ kN/m}^2$) belastet. Die pulverförmigen Proben wurden in zylindrischen Quelltöpfen mit festem Boden eingebracht, komprimiert und die Lagerungsdichte ermittelt. Die Prüfflüssigkeit wurde über 4 Bohrungen, welche sich unmittelbar über der Bodenplatte befinden, hinzugefügt. Die Ermittlung der Höhenänderung der Proben erfolgte regelmäßig durch mittig auf den kreisrunden Platten installierten Präzisionsmessuhren (vgl. Abbildung 2-15).

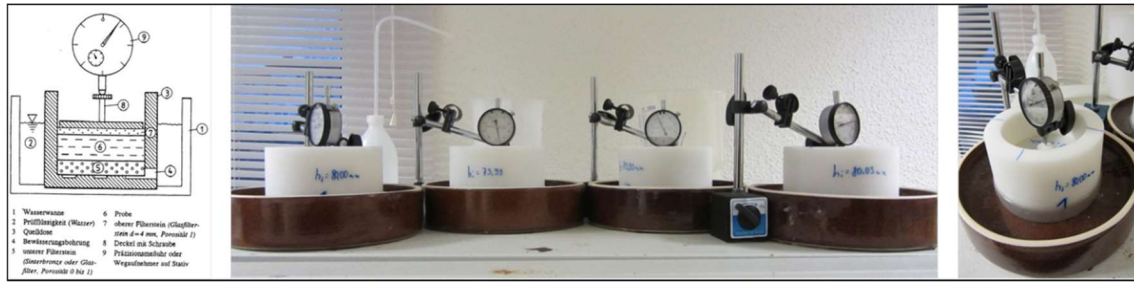


Abbildung 2-15: Quellhebungsversuch in Anlehnung an den Pulverquellhebungsversuch nach Huder/Amberg

Die Abbildung 2-16 und Abbildung 2-17 zeigen das Quellverhalten des Dreischichttonminerals IBECO Seal 80® von S&B Industrial Minerals sowie von einem Bentonit-Polymer-Gemisch (bestehend aus IBECO Seal 80® und Zugabe eines Polymers; hochviskos vollsynthetisch bzw. halbsynthetisch basierend auf Polyacrylamid) mit Prüfflüssigkeit LW, welches nach ca. 20 Tagen durch die Prüfflüssigkeit HW ersetzt wurde. Der natürliche Wassergehalt der Proben wurde nicht verändert. Durch Austausch der Prüfflüssigkeit (Entnahme von entlüftetem Leitungswasser LW und Zugabe von Haldenwasser HW) wurde eine degressive Verringerung des Quellvolumens um ca. 10 % festgestellt.

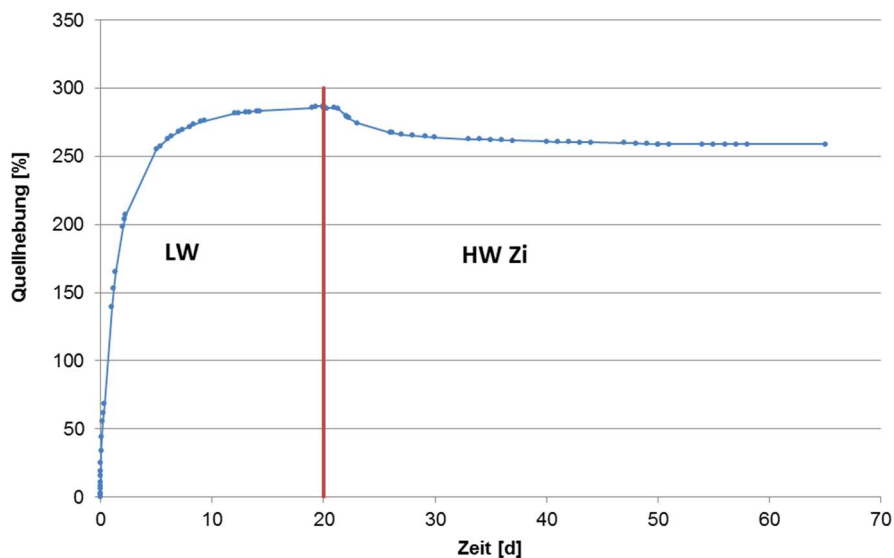


Abbildung 2-16: Quellhebungsversuch, IBECO Seal 80 (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 0,98 \text{ g/cm}^3$)

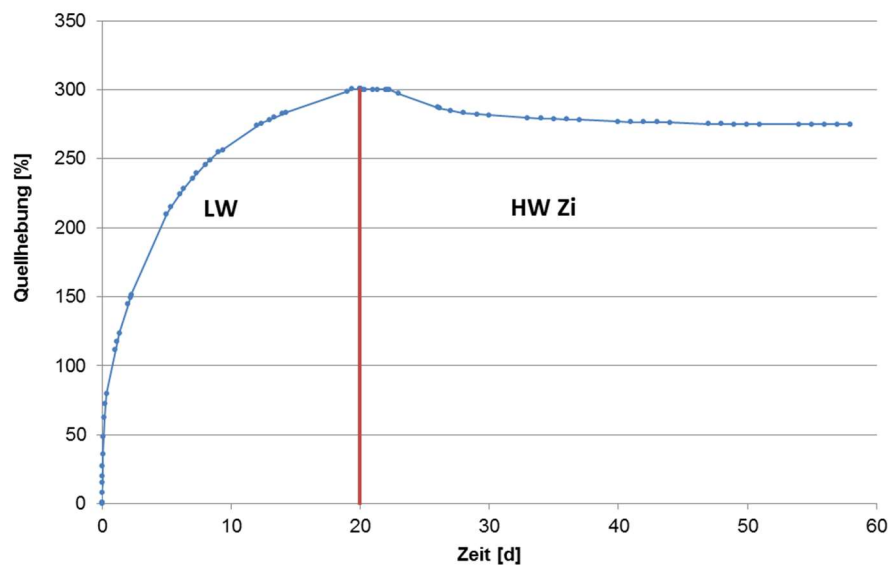


Abbildung 2-17: Quellhebungsversuch, Bentonit-Polymer-Mischung (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 1,04 \text{ g/cm}^3$)

Die Abbildung 2-18 und Abbildung 2-19 zeigen das Quellverhalten des Dreischichttonminerals IBECO Seal 80® allein sowie in Verbindung mit Polymer (hochviskos vollsynthetisch bzw. halbsynthetisch basierend auf Polyacrylamid) unter Einfluss von HW. Die hierbei gemessene Quellhebung ist um ca. 75 % geringer als die Quellhebung bei Verwendung von LW (vgl. Abbildung 2-16 und Abbildung 2-17). Der Austausch der Prüfflüssigkeit HW mit LW lässt erkennen, dass das Quellpotential reversibel ist (vgl. Abbildung 2-18 und Abbildung 2-19).

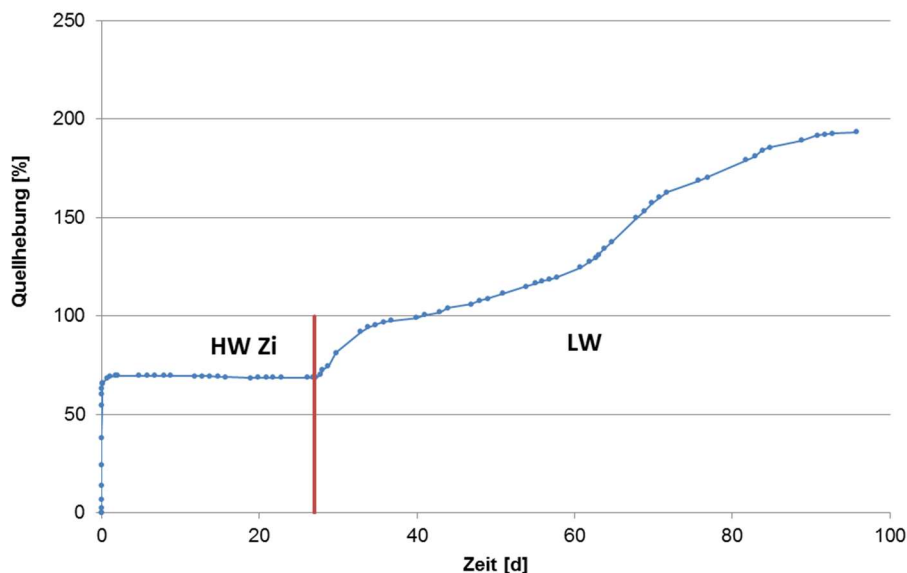


Abbildung 2-18: IBECO Seal 80 (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 0,94 \text{ g/cm}^3$)

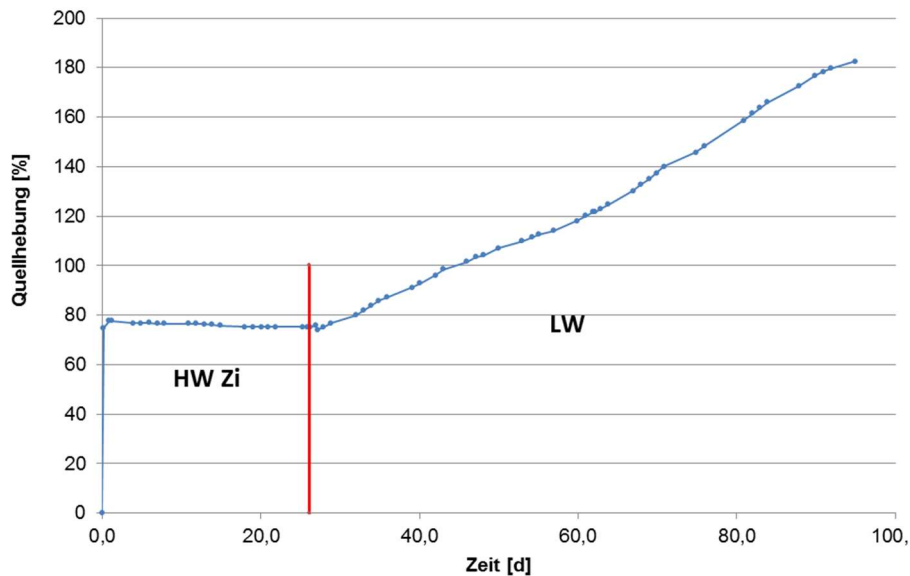


Abbildung 2-19: Bentonit-Polymer-Mischung (Einbauwassergehalt 9,9 M.-%; $\rho_E = 0,97 \text{ g/cm}^3$)

Es ist nicht auszuschließen, dass die gemessenen Hebungen durch Adsorptions- bzw. Kapillarkräfte beeinträchtigt werden, daher wurden vergleichende Untersuchungen mit einem Zweischichttonmineral mit Prüfflüssigkeit LW durchgeführt (vgl. Abbildung 2-20).

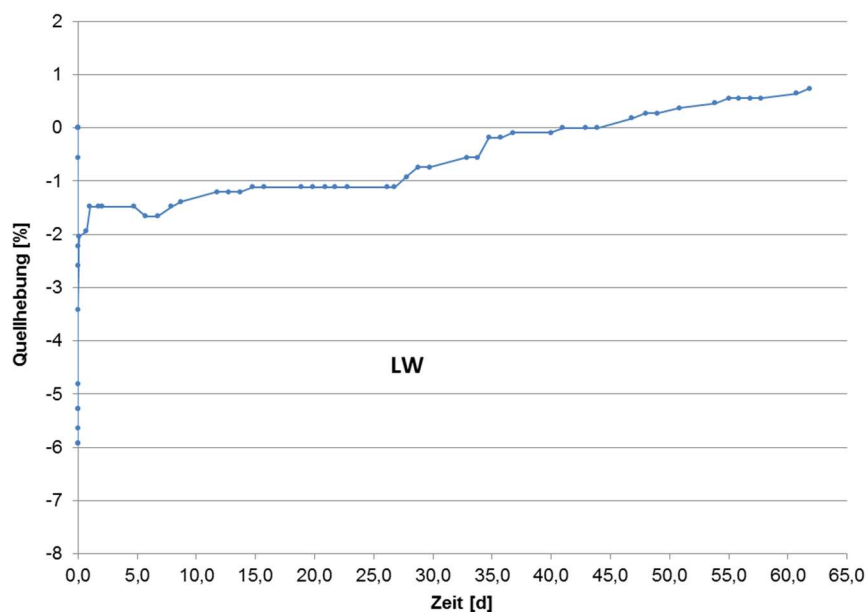


Abbildung 2-20: Secursol 3301 (Einbauwassergehalt 1,8 M.-%; $\rho_E = 0,87 \text{ g/cm}^3$)

Abbildung 2-20 zeigt erwartungsgemäß, dass bei Zweischichttonmineralen im Gegensatz zu Dreischichttonmineralen unter Einfluss von entlüftetem Leitungswasser (LW) keine signifikanten Quellhebungen zu verzeichnen waren.

Die Quellversuche wurden unter verschiedenen Randbedingungen in einem Zeitraum von bis zu 70 Tagen durchgeführt. Die Untersuchungen zeigen, dass das Quellverhalten von

Dreischichttonmineralen durch Haldenwasser im Vergleich zu entlüftetem Leitungswasser eingeschränkt ist, jedoch nicht vollständig unterbunden wird. Das Quellhebungspotenzial bei unter entlüftetem Leitungswasser gequollenen Proben wird durch die Zugabe von Haldenwasser um ca. 10 % ($270 / 300 = 0,9$, vgl. Abbildung 2-17) verringert, dieser Prozess ist degressiv. In den mit Haldenwasser gefüllten offenen Vorlagebehältern konnten nach einigen Tagen Kristallisationsprozesse infolge Verdunstung beobachtet werden. In den Probekörpern selber bzw. in den Quelltöpfen konnten im Zuge des Rückbaus hingegen keine Kristallisationsvorgänge festgestellt werden.

Modifizierte Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen

Gemäß GDA E2-13 sollen sich mineralische Abdichtungsschichten gegenüber einwirkenden Setzungen unempfindlich verhalten und ihre Abdichtungsfunktion auch im verformten Zustand erhalten. Durch die auflastbedingten Spannungseinträge von Rückstandshalden wird der Untergrund horizontal und vertikal verformt und somit die mineralische Dichtung gedehnt/ gestaucht und gekrümmt.

Zur Nachbildung der Verformungsverhältnisse (in Anlehnung an GDA E 2-13, Verformungsnachweis für mineralische Dichtungsschichten) wurden zylinderförmige Probekörper mit einem Durchmesser von $d = 10$ cm und einer Höhe von $h = 12$ cm (4 cm untere Lage; 8 cm obere Lage) verformt (vgl. Abbildung 2-21 sowie Abbildung 2-22) und anschließend die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes durchgeführt. Hierzu wurden die Probekörper durch zwei gegenüberliegende halbkreisförmige Auflager belastet und so eine vertikale Verformung/Störung induziert (vgl. Abbildung 2-21). Anschließend wurden die Probekörper mit zwei kreisrunden Widerlagern überdrückt (vgl. Abbildung 2-22). Die hierbei eingesetzte Kraft ist von der Haldenhöhe abhängig. Es wurden zwei Haldenbereiche in der Böschung (Abstand vom Böschungsfuß ca. 33 m → Haldenhöhe 25 m, Haldenmantelzone/ Abstand vom Böschungsfuß ca. 150 m → Haldenhöhe 120 m, Haldenkernzone) untersucht. Die Zusammensetzung der in den (modifizierten) Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen untersuchten Proben ist im Kapitel 2.1 beschrieben.

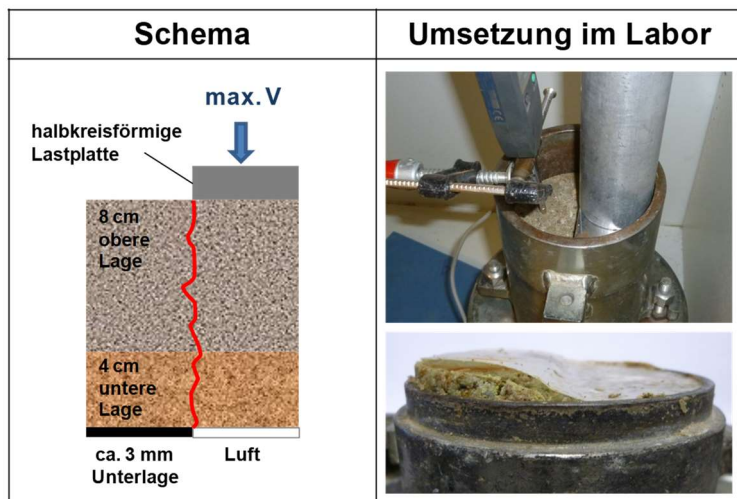


Abbildung 2-21: Verformung des Probekörpers (durch zwei gegenüberliegende halbkreisförmige Widerlager)

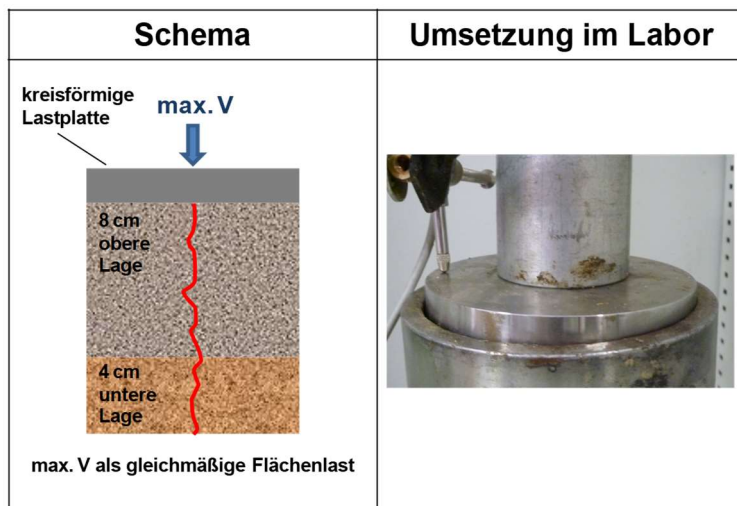


Abbildung 2-22: Rückverformung der mineralischen Dichtung mit definierter Auflast

Gemäß DIN 18130-1 ist als Prüflässigkeit Haldenwasser des Standortes Zielitz (vgl. Tabelle 2-3) zur Simulation realistischer chemischer Beanspruchungen verwendet worden. Die Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen erfolgten zur statistischen Absicherung als Mehrfachuntersuchungen an „unverformten Proben“ (Ausgangssituation) sowie an den oben beschriebenen „verformten Proben“ (Verformungssituation). In der Abbildung 2-23 sind die Ergebnisse (Auszug) der Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen unter Verwendung von Dreischichttonmineral und Polymer (hochviskos vollsynthetisch bzw. halbsynthetisch, basierend auf Polyacrylamid) dargestellt. Die Untersuchungen in Abbildung 2-24 zeigen die Ergebnisse (Auszug) der Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen unter Verwendung von Zweischichttonmineral und Polymer (hochviskos vollsynthetisch bzw. halbsynthetisch, basierend auf Polyacrylamid).

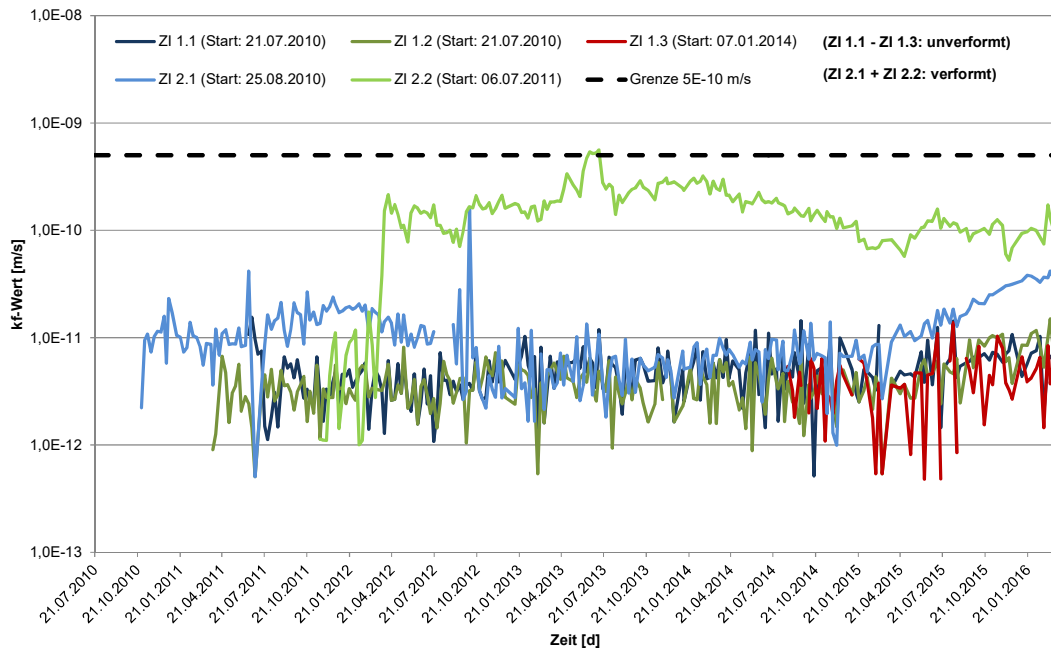


Abbildung 2-23: Wasserdurchlässigkeitsbestimmung der zweilagigen mineralischen Dichtung, Feinanteil Dreischichttonmineral, hochviskose vollsynthetische bzw. halbsynthetische Polymere basierend auf Polyacrylamid

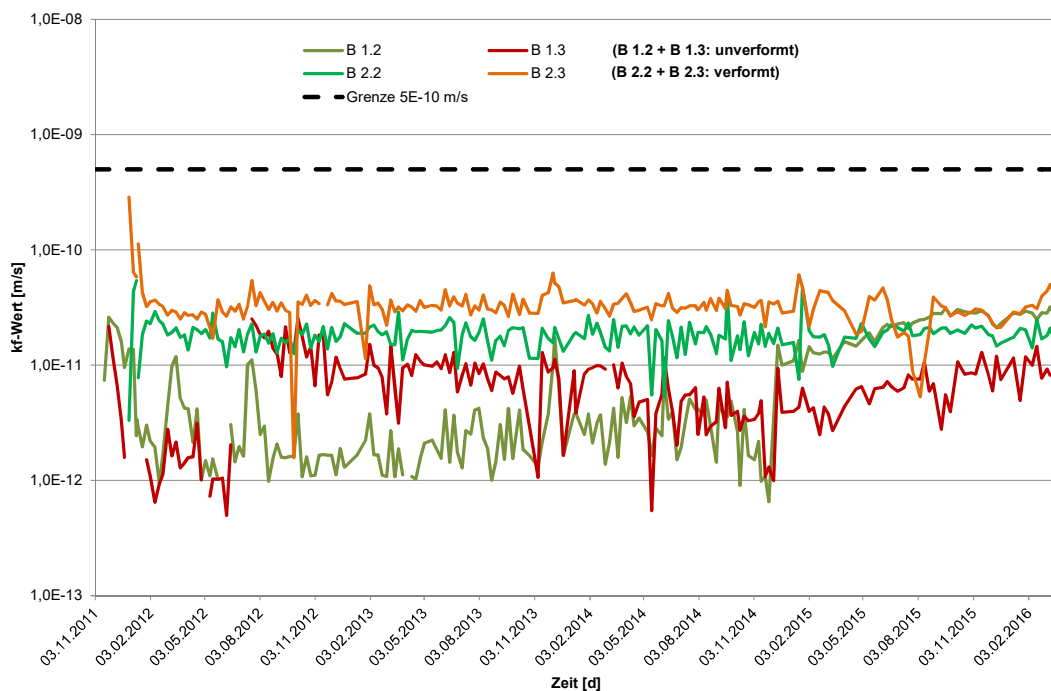


Abbildung 2-24: Wasserdurchlässigkeitsbestimmung der zweilagigen mineralischen Dichtung, Feinanteil Zweischichttonmineral, hochviskose vollsynthetische bzw. halbsynthetische Polymere basierend auf Polyacrylamid

Die vorstehenden Abbildungen zu den Langzeitversuchen seit 2010, welche weiterhin durchgeführt werden, zeigen, dass die Anforderungen an die Dichtigkeit für die zweilagi-

gen mineralischen Dichtungen unter Verwendung von Zweischicht- und Dreischichttonminerale eingehalten werden. Die Versuche zeigen damit die chemische Beständigkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung gegenüber dem Prüfmedium Haldenwasser. Vergleichende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Herkunft des Haldenwassers (Zielitz oder Hattorf) keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen hat. Weiterhin konnten aufgrund der nahezu konstanten Temperaturverhältnisse im Labor keine Kristallisationserscheinungen in geschlossenen Versuchsaufbauten (Triaxialzelle) oder in den Probekörpern festgestellt werden.

Zur Untersetzung der Versuchsergebnisse wurden ergänzend weitere Wasserdurchlässigkeitsversuche unter Randbedingungen gestartet, welche die bautechnologischen Verhältnisse am Haldenstandort berücksichtigen.

Nach Vorversuchen unter herkömmlichen Einbaubedingungen nach DIN 18130-1 (Vermeidung von Lufteinschlüssen im Versuchsgerät) und Versuchen unter „trockenen Einbaubedingungen“, d. h. alle Einzelkomponenten des Versuchsstandes (Kopf- und Fußplatte, Plexiglasrohr, Verbindungen, Leitungen etc.) sowie Filterstein und Filterpapier waren beim Einbau in die Triaxialzelle trocken, wurde eine Versuchsreihe als Langzeit-Wasserdurchlässigkeitsversuch mit folgenden angepassten Versuchsrandbedingungen, welche die bautechnologischen Randbedingungen beim Einbau der mineralischen Dichtung unter Praxisbedingungen berücksichtigen, gestartet:

- „trockene Versuchseinbaubedingungen“ (d. h. Einbau in die Triaxialzelle mit trockenem Filterstein und -papier),
- Begrenzung der radialen Ausdehnung beim Quellvorgang durch Zwischenlagerung der Probekörper in Stahlzylindern (d. h. Zwischenlagerung außerhalb der Triaxialzelle, anschließender Einbau des Probekörpers mit Stahlzylinder in die Triaxialzelle – vertikale Ausdehnung des Probekörpers während der Zwischenlagerung wird durch eine fehlende Auflast nicht behindert) sowie
- Erhöhung des Zeitabstandes zwischen Herstellung/ Einbau des Probekörpers und Versuchsstart in der Triaxialzelle.

Die Ergebnisse (Auszug) sind in der Abbildung 2-25 dargestellt.

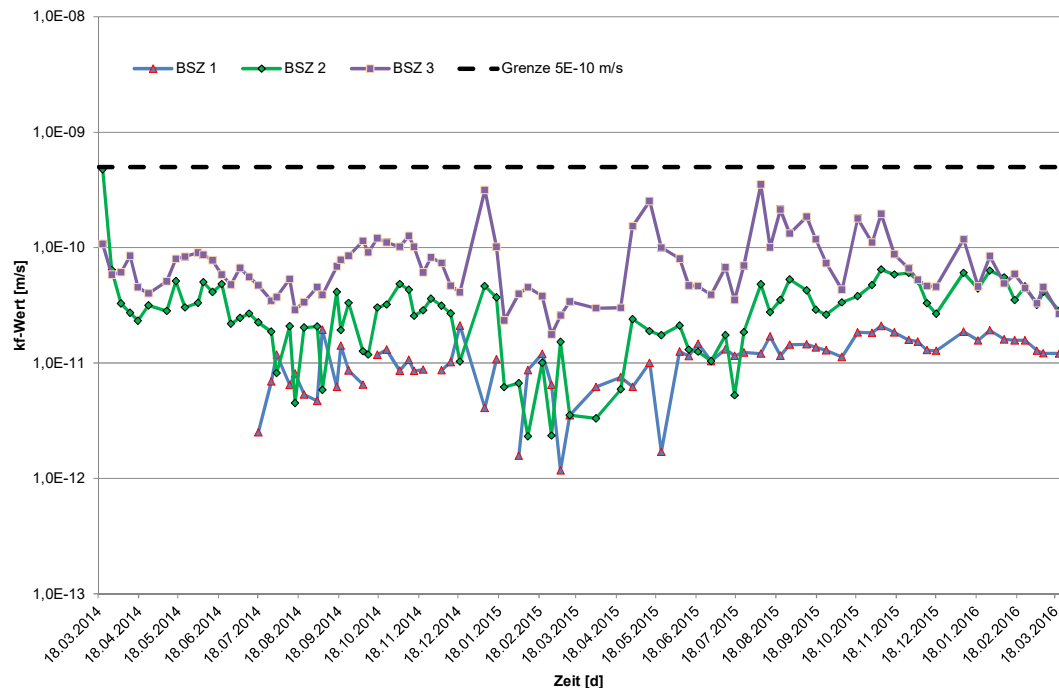


Abbildung 2-25: Wasserdurchlässigkeitsbestimmung der zweilagigen mineralischen Dichtung, Feinanteil Dreischichttonmineral, hochviskose vollsynthetische bzw. halbsynthetische Polymere basierend auf Polyacrylamid, Einbau im Stahlzylinder)

Auch unter Berücksichtigung im Labor simulierter typischer bautechnologischer Randbedingungen konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen an die Dichtigkeit eingehalten werden konnten; d.h. $k_f \leq 5,0E-10$ m/s.

CT-Untersuchungen

Mithilfe der Computertomografie lassen sich parallele Körperschichten in definierten Abständen überlagerungsfrei darstellen. Die um die Längsachse des Probekörpers rotierende Röntgenquelle erzeugt dabei einen Fächerstrahl, der den Körper durchdringt und in Abhängigkeit der Dichte des Körpers unterschiedlich stark abgeschwächt von den gegenüberliegenden Detektoren erfasst wird. Der Grad der Absorptionen wird als Grauwerte ausgegeben, wobei Bereiche mit geringer Dichte (z.B. Luft) schwarz und mit zunehmender Dichte in verschiedenen Grautönen bis weiß dargestellt werden.

Zielstellung der Untersuchungen war die über den Stand der Technik hinausgehende zerstörungsfreie Visualisierung des Verhaltens der unteren und oberen Dichtungsschicht sowie der Grenzschicht (insbesondere die Verlagerung der Einzelpartikel) nach Verformung im modifizierten Kompressionsversuch. In der Abbildung 2-26 sind 4 Einzelbilder einer CT-Untersuchung beispielhaft dargestellt.

Im Bild oben links der Abbildung 2-26 ist ein Schnitt durch die obere Dichtungsschicht erkennbar. Charakteristisch ist ihr Gefügebild (Kornverteilung mit Größtkorn 8 mm). Im Bild unten rechts ist ein Schnitt durch die untere Dichtungsschicht erkennbar. Charakteristisch ist ihr Gefügebild (Kornverteilung mit Größtkorn 2 mm). Im Bild (oben rechts/ unten

links) sind die Schnitte der im Verlauf der Verformung erfolgten Durchdringung/ Verzahnung der oberen und unteren Dichtungsschicht zu erkennen.

Der Versuch zeigt, dass nach der Verformung der oberen und unteren Dichtungsschicht durch reale Belastungen weder Risse noch Fehlstellen erkennbar sind, sich die Schichten untereinander verzahnen und damit insgesamt das System der zweilagigen Dichtungsschicht seine Dichtigkeitseigenschaften auch im verformten Zustand beibehält.

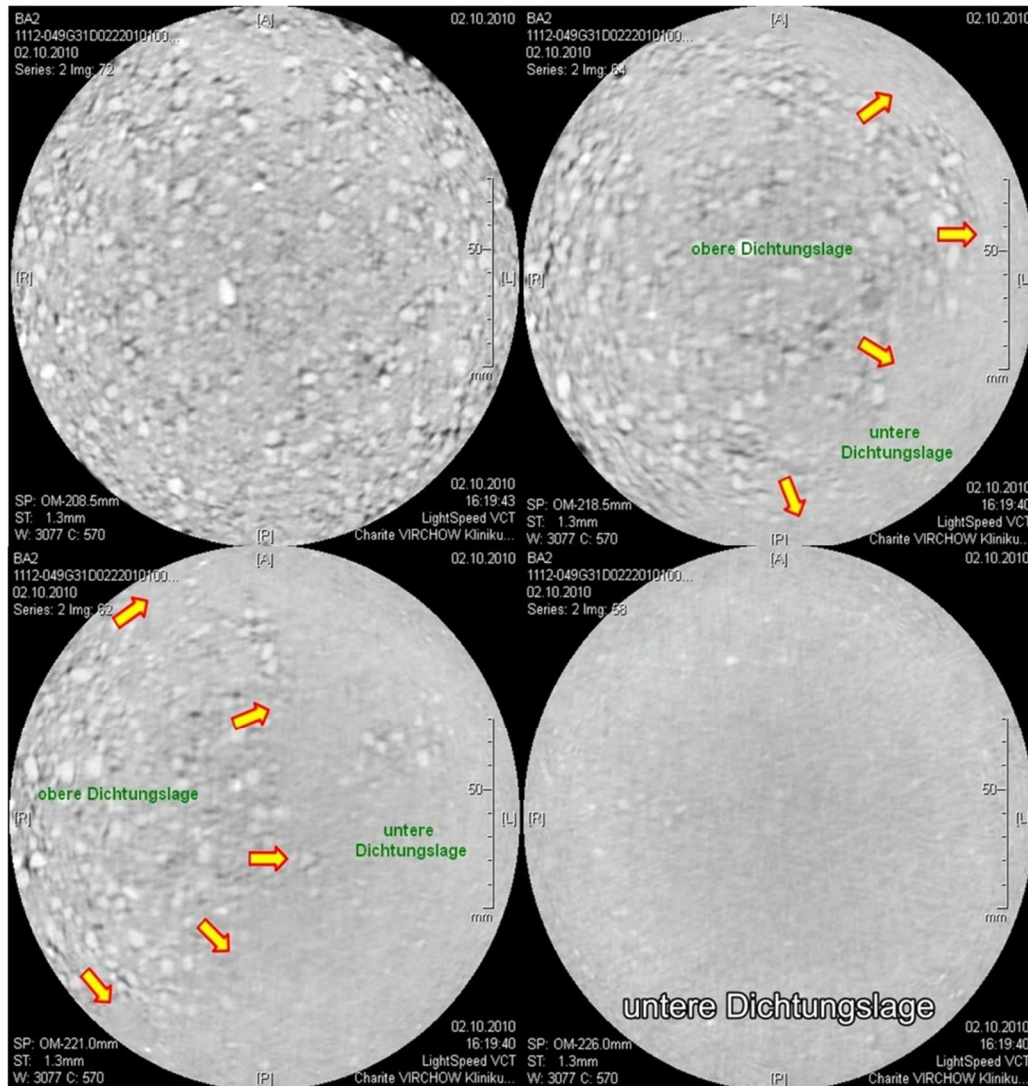


Abbildung 2-26: Darstellung der Ergebnisse aus den CT-Untersuchungen

Die v. g. Versuche, insbesondere die Quellhebungs- und Wasserdurchlässigkeitsversuche, zeigen, dass die chemische Beständigkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung unter Verwendung von Dreischichttonmineralen in Verbindung mit hochviskosen vollsynthetischen bzw. halbsynthetischen Polymeren (basierend auf Polyacrylamid) gegenüber Haldenwasser dann sichergestellt ist, wenn eine hinreichende Quellung bei Eigenfeuchte eingehalten wird; d.h. beim Einsatz von Dreischichttonmineralen ist eine salzwasserunbeeinflusste Quellzeit von ≥ 5 d einzuhalten.

Durch die Berücksichtigung der Quellzeit der zweilagigen mineralischen Dichtung kann ein erhöhter technologischer Aufwand im Zuge der Errichtung im Feld notwendig sein. Demgegenüber stehen die Vorteile einer größeren Bandbreite der notwendigen Einbauwassergehalte zur Sicherstellung der notwendigen Einbauparameter. Dies wird im Rahmen des Qualitätsmanagementplanes bei der Bauausführung berücksichtigt.

2.2.2 Untersuchungen an der Pilothalde und der Erweiterung der Pilothalde

Im Zuge der Errichtung der Pilothalde erfolgte der Nachweis der technischen Machbarkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung (vgl. Anlage 1: Abschlussbericht der Bauüberwachung, Stand 21.03.2013). Hierbei wurden die Tragfähigkeit an der Oberfläche des verdichteten Planums ermittelt und die gewählte Einbautechnologie zur Herstellung der mineralischen Dichtung unter Einhaltung der Einbauparameter (Wassergehalt, Trockendichte, Lagenstärke) nachgewiesen. Die Untersuchungsergebnisse bilden die Basis der Parameter zur Herstellung der zweilagigen mineralischen Dichtung des Systems Basisabdichtung. Unterhalb der mineralischen Dichtung wurden drei Lysimeter errichtet. Die gemessenen Abflüsse in den Bodenlysimetern übersteigen die tatsächlichen Niederschlagsereignisse, d.h. die Messergebnisse sind unplausibel und können für die weiteren Betrachtungen nicht verwendet werden. Die Ursachen hierfür sind zurzeit nicht bekannt. Im Zuge des geplanten Rückbaus der Pilothalde sollen hierzu weitergehende Erkenntnisse gewonnen werden. Kontrolluntersuchungen zur Ermittlung des k_f -Wertes an den Einbaumaterialien und an gewonnenen gestörten bzw. ungestörten Proben der zweilagigen mineralischen Dichtung haben $k_f \leq 5,0E-10$ m/s gezeigt.

2.3 Fazit

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den vorstehenden Untersuchungen ableiten:

- Die Eignung der zweilagigen mineralischen Dichtung des SyBa konnte unter Berücksichtigung des Haldenkörperverhaltens und der haldenkörperspezifischen Bedingungen nach dem Stand der Wissenschaft und Technik im Labormaßstab gemäß den Vorgaben einer Eignungsprüfung nachgewiesen werden. Begleitende und weitergehende Laboruntersuchungen zeigen, dass unter Berücksichtigung bautechnologischer Anforderungen diesen durch Anpassung der Einbaubedingungen Rechnung getragen werden kann.
- Die chemische Beständigkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung unter Verwendung von Dreischichttonmineralen in Verbindung mit hochviskosen vollsynthetischen bzw. halbsynthetischen Polymeren (basierend auf Polyacrylamid) gegenüber Haldenwasser ist dann sichergestellt, wenn eine hinreichende Quellung bei Eigenfeuchte eingehalten wird; d.h. beim Einsatz von Dreischichttonmineralen ist eine salzwasserunbeeinflusste Quellzeit von ≥ 5 d einzuhalten. Durch die Berücksichtigung der Quellzeit der zweilagigen mineralischen Dichtung kann ein erhöhter technologischer Aufwand im Zuge der Errichtung im Feld notwendig sein. Demgegenüber stehen die Vorteile einer größeren Bandbreite der notwendigen Einbauwassergehalte zur Sicherstel-

lung der notwendigen Einbauparameter. Dies wird im Rahmen des Qualitätsmanagementplanes bei der Bauausführung berücksichtigt.

- Die Eignung von zweilagigen mineralischen Dichtungen unter Verwendung von Zweischichttonmineralen in Verbindung mit hochviskosen vollsynthetischen bzw. halbsynthetischen Polymeren (hochviskos vollsynthetisch bzw. halbsynthetisch basierend auf Polyacrylamid) wurde im Rahmen von Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen an verformten und unverformten Proben nachgewiesen. Der Bereich des notwendigen Einbauwassergehaltes ist eng, was einen erhöhten bautechnologischen Aufwand zur Sicherung der Trockeneinbaudichte zur Folge haben kann. Dies muss im Rahmen des Qualitätsmanagementplanes bei der Bauausführung berücksichtigt werden.
- Langzeitversuche zum Nachweis des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes $k_f \leq 5,0E-10$ m/s der mineralischen Dichtung mit einem $i = 30$ beginnend im Jahre 2010 belegen bisher die chemische Beständigkeit und die Abdichtungswirkung der zweilagigen mineralischen Dichtung sowohl unter Verwendung von Zwei- als auch von Dreischichttonmineralen.
- Der Nachweis der technischen Machbarkeit, Funktionalität und Wirksamkeit sowie Gebrauchstauglichkeit der zweilagigen mineralischen Dichtung ist im Rahmen des Pilotvorhabens (Labor- und Feldversuche) erfolgt und muss vor Beginn der Bauausführung für den Standort Hattorf unter Berücksichtigung der konkreten bautechnologischen Anforderungen und der verwendeten Rezepturen für die obere und untere Lage nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

IKI upi, 2009, *Konzeptstudie zur Entwicklung einer emissionsarmen Haldenwirtschaft*,
Bericht Nr. IK/UPI-02