



Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen

LANUV-Fachbericht 25



Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen

LANUV-Fachbericht 25

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2010



IMPRESSUM

Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Autoren: Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann, Dr. I. Obernosterer
Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH, Aachen

Projektbetreuung: Dr. Michael Tiedt (LANUV NRW)

Titelfoto: Büro Düllmann

ISSN: 1864-3930 LANUV-Fachberichte

Informations-
dienste: Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschafts-
dienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von
Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet.
Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2	
Inhaltsverzeichnis	3	
Einführung	6	
1	Vorgaben nach DepV	10
1.1	Anforderungen nach dem Stand der Technik	10
1.2	Besondere Anforderungen an die geologische Barriere und das Basisabdichtungssystem	11
1.3	Besondere Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem	11
1.4	Rekultivierungsschicht	13
2	Material- und Einbauparameter nach LfU-/LANUV-Arbeitsblatt	14
2.1	Vorbemerkungen	14
2.2	Mineralisches Dichtungsmaterial Basisabdichtungssystem.....	14
2.3	Mineralisches Dichtungsmaterial Oberflächenabdichtungssystem.....	15
2.4	Nachweis der Eignung.....	15
2.5	Anmerkungen zur Gültigkeit des Eignungsnachweises	16
3	Nachweis der Beständigkeit	17
3.1	Allgemeines	17
3.2	Begriffsdefinitionen	17
3.2.1	Dauerbeständigkeit.....	17
3.2.2	Langzeitbeständigkeit	17
3.3	Maßgebende nicht-mechanische Einwirkungen	18
3.4	Nachweis der Beständigkeit	20
3.5	Einwirkungs- bzw. Zustandsphasen	21
4	Beschreibung der Einwirkungen und Zuordnung zu Zustandsphasen	23
4.1	Basisabdichtungssysteme	23
4.2	Oberflächenabdichtungssysteme	23
5	Anforderungen an die Leistung von Dichtungssystemen	28
5.1	Allgemeines	28
5.2	Abgrenzung Einzeldichtung - Kombinationsdichtung	28
5.3	Einschätzungen zur Dauer der Leistungsfähigkeit	31
5.4	Dichtigkeit	31
5.5	Beständigkeitsrisiken	33

6	Diskussion der Einwirkungen auf ein Dichtungssystem und deren Risiken....	34
6.1	Chemische Einwirkungen	34
6.1.1	Deponiesickerwasser.....	34
6.1.1.1	Vorbemerkungen	34
6.1.1.2	Art der Einwirkung	34
6.1.1.3	Intensität der Einwirkungen	34
6.1.1.4	Mögliche Auswirkungen einer Sickerwasser-Beaufschlagung	36
6.1.1.5	Einfluss der Versuchsbedingungen	36
6.1.1.6	Praxisbeispiele.....	37
6.1.1.7	Schlussfolgerungen, Empfehlungen	40
6.1.2	Aggressive flüssige Medien	41
6.1.3	Infiltrierendes Niederschlagswasser	41
6.1.3.1	Einwirkungspotenzial	41
6.1.3.2	Nachweisgrundlagen	41
6.2	Biologische Einwirkungen.....	42
6.2.1	Mikroorganismen und Pilze	42
6.2.2	Pflanzen.....	42
6.2.2.1	Beschreibung des Phänomens	42
6.2.2.2	Nachweisgrundlagen	43
6.2.2.3	Mögliche Gegenmaßnahmen	43
6.2.2.4	Bewertung möglicher Maßnahmen	45
6.2.3	Tiere.....	45
6.3	Physikalische Einwirkungen	46
6.3.1	Temperatur aus dem Deponiekörper	46
6.3.1.1	Beschreibung des Phänomens.....	46
6.3.1.2	Möglichkeit oder Unmöglichkeit der Vermeidung temperaturinduzierter Wassergehaltsänderungen.....	46
6.3.2	Witterung	46
6.3.2.1	Beschreibung der Phänomene	46
6.3.2.2	Art der Einwirkung	46
6.3.3	Auswirkungen einer Wassergehaltsänderung in einer mineralischen Dichtung	47
6.3.3.1	Beschreibung des Phänomens.....	47
6.3.3.2	Bodenphysikalische Ursachen für Volumenabnahmen bei Wassergehaltsreduktion	49
6.3.3.3	Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Plastizität	63
6.3.3.4	Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Bodenfestigkeit	65
6.3.3.5	Auswirkung des Wassergehaltes auf die Verdichtungsfähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit.....	73
6.3.3.6	Einfluss natürlicher Materialstreuungen.....	78
6.3.3.7	Zusammenfassende Bewertung der physikalischen Einwirkungen	81
6.4	Hydraulische Einwirkungen und Beständigkeit.....	87
6.4.1	Beschreibung der Phänomene	87
6.4.2	Erscheinungsformen hydrodynamisch bedingter Bodeninstabilität	87
6.4.2.1	Kolmation.....	87
6.4.2.2	Suffosion.....	87
6.4.2.3	Erosion.....	89
6.4.3	Grenzkriterien für Gefügeveränderungen von mineralischen Dichtungsmaterialien.....	90
6.4.3.1	Suffosionskriterien	90

6.4.3.2	Erosionskriterien	91
6.4.4	Bewertung.....	92
6.5	Mechanische Einwirkungen	93
6.5.1	Beschreibung der Einwirkungen	93
6.5.2	Bewertung, Nachweisverfahren	93
6.6	Schlussfolgerungen, Handlungsempfehlungen	93
6.6.1	Vorbemerkungen	93
6.6.2	Probleme der Nachweisführung	94
6.6.3	Handlungsempfehlungen.....	95
6.6.3.1	Teil I: Projektdaten.....	97
6.6.3.2	Teil II: Erweiterte Materialcharakterisierung durch Laborversuche.....	97
6.6.3.3	Teil III: Auswertung und Bewertung, Abschätzung der Rissgefährdung.....	98
7	Quellen.....	100
Anhang	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems	11
Tabelle 2	Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems	12
Tabelle 3	Einwirkungen für Beständigkeitsnachweise	18
Tabelle 4	Maßgebende Kriterien und Einwirkungen für die Beurteilung von Deponieabdichtungssystemen aus natürlichen mineralischen Baustoffen	19
Tabelle 5	Zustandsphasen von Basis- und Oberflächenabdichtung	21
Tabelle 6	Einwirkungs- und Auswirkungsszenarien bei Basisabdichtungen	24
Tabelle 7	Einwirkungs- und Auswirkungsszenarien bei Oberflächenabdichtungen	26
Tabelle 8	Sickerwasserbelastungen	35
Tabelle 9	Durchwurzelungstiefen typischer Deponiepflanzen	42
Tabelle 10	Tiefenabhängige Schutzwirkungen der Rekultivierungsschicht	44
Tabelle 11	Beziehungen zwischen Konsistenz I_C und 1-axialer Druckfestigkeit q_u	66
Tabelle 12	Vorgehen zur Abschätzung der Rissgefährdung und Modifizierung der projektspezifischen Eignungsprüfung zur Beurteilung der Leistungsdaten einer feinkörnigen mineralischen Dichtung	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Konzentrationsverlauf (quantitativ) polarer und unpolarer Schadstoffe in der Kombinationsabdichtung	30
Abbildung 2	Wasserleitfähigkeit $k = f(\psi)$ für verschiedene Bodenarten	32
Abbildung 3	Kationen, Tonproben - Eluat	37
Abbildung 4	Verteilung der 1-axialen Druckfestigkeit und der undränierten Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe	38
Abbildung 5	Proctor-Kurve eines Dichtungsbodens (TM)	50
Abbildung 6	Einfluss der Verdichtung auf die Struktur von Tonen [8]	51
Abbildung 7	Einfluss der Aggregatgröße auf das Gefüge bei Einbau auf dem trockenen Ast der Proctorkurve [30-1]	52
Abbildung 8	Zusammenhang zwischen dem optimalen Wassergehalt w_{Pr} und der Proctordichte ρ_{Pr} bei verschiedenen Aggregatgrößen und Verdichtungsenergien (normaler und verbesserter Proctorversuch; Rätiger Ton) [30-1]	53
Abbildung 9	Feinkörnige Bodenstruktur (nach Heibroek [35-1])	54
Abbildung 10	Schematische Darstellung des Schrumpfverhaltens eines bindigen, aggregierten Bodens nach der Potenzialtheorie	55
Abbildung 11	Einfluss von Einbauwassergehalt und Art der Verdichtung bei einem tonigen Schluff	56
Abbildung 12	Proctor- und Schrumpfkurve eines kaolinitreichen Tones (TM)	57

Abbildung 13	Proctor- und Schrumpfkurven eines normal und modifiziert verdichteten hochplastischen Tones (TA) (Düllmann, 2010)	58
Abbildung 14	Proctor- und Schrumpfkurven eines normal und modifiziert verdichteten leichtplastischen Tones (TL) (Düllmann, 2010)	59
Abbildung 15	Schrumpfkurven eines Dichtungsmaterials (TM) bei unterschiedlichem Einbauwassergehalt	60
Abbildung 16	Schrumpfkurven von normal verdichteten Proctorproben eines hochplastischen Tones (TA)	61
Abbildung 17	Volumetrische Gesamtschrumpfungen ε_v [%] in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt für normal- und modifiziert verdichtete leicht-starkplastische Dichtungsmaterialien (DÜLLMANN, 2010)	61
Abbildung 18	Beziehung zwischen Volumenschrumpfung $\Delta\varepsilon_v$ und der Wassergehaltsänderung Δw für einen hochplastischen Ton (TA)	62
Abbildung 19	Lineare Schrumpfmaße ε_L , abgeleitet aus Änderungen des Durchmessers (\varnothing) und der Höhe (h)	63
Abbildung 20	Abgrenzung plastischen Materialverhaltens nach [106]	64
Abbildung 21	Plastizitätsdiagramm mit Bodengruppen nach DIN 18196 [106]	65
Abbildung 22	Einfluss des Einbauwassergehaltes und der Verdichtungsart auf die Festigkeit eines tonigen Schluffs	67
Abbildung 23	Proctor-Kurve eines verdichteten Bodens	68
Abbildung 24	Zugfestigkeiten und –dehnungen eines TM-Tones nach Wendling [73-1] ($T = 20^\circ \text{C}$, $e = 0,75 - 0,78$, $\theta = \text{veränderlich}$)	70
Abbildung 25	Abhängigkeit der Zugfestigkeit σ_z vom volumetrischen Wassergehalt θ und unterschiedlichen Versuchsbedingungen (nass, optimal, trocken) nach [79]	71
Abbildung 26	Abhängigkeit der Bruchdehnung ε_z vom volumetrischen Wassergehalt θ und unterschiedlichen Verdichtungsbedingungen (nass, optimal, trocken) nach [79]	71
Abbildung 27	Einfluss der Verdichtungsarbeit und des Einbauwassergehaltes auf den k-Wert	74
Abbildung 28	Durchlässigkeitsbeiwert k und Trockendichten ρ_d	75
Abbildung 29	Kurven gleicher Durchlässigkeit von Schluff-Proben	76
Abbildung 30	Auswirkung der Verdichtungsmethode auf den k-Wert	77
Abbildung 31	Einfluss natürlicher Streuungen im Einbauwassergehalt und Verdichtungsgrad auf den mittleren k-Wert einer mineralischen Flächendichtung	78
Abbildung 32	Statistische Kennwerte für die Hauptfraktionen eines Tons (TM)	79
Abbildung 33	Statistische Maßzahlen und Häufigkeitsverteilungen der Grenzwassergehalte	80
Abbildung 34	Diagramm zur Bestimmung des maßgebenden Porendurchmessers	91

Einführung

Die Novelle der *Deponieverordnung (DepV)* wurde am 29.04.2009 veröffentlicht und trat am 16.07.2009 in Kraft [83]. Mit dieser neuen Verordnung wurden die bestehenden Anforderungen des Deponierechts, die bislang in drei Verordnungen und zwei Verwaltungsvorschriften (*AbfAbIV*, *alte DepV*, *DepVerwV*, *TASi*, *TAA*) festgeschrieben waren, zusammengefasst. Neben dieser redaktionellen Überarbeitung erfolgen auch inhaltliche Änderungen, die u. a. auch die technischen Anforderungen für die Basis- und die Oberflächenabdichtung betreffen.

Die Anforderungen an die Herstellung mineralischer Abdichtungen waren bislang in Anhang E der *TA Abfall* bzw. *TA Siedlungsabfall* geregelt. In Nordrhein-Westfalen fand darüber hinaus die *LWA-Richtlinie Nr. 18* Anwendung [111]. An die Stelle dieser Regelwerke trat nun Anhang 1 der neuen *DepV*. Die Verwaltungsvorschriften wurden aufgehoben, womit auch die Festlegung konkreter Vorgaben für natürliche, mineralische Dichtungsmaterialien in einem Regelwerk verloren ging.

Um dem entgegenzuwirken, legten die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Bayern die Material- und Einbauanforderungen an Dichtungsmaterialien in modifizierter Form in einem gemeinsamen Merkblatt nieder [114].

Die neue *DepV* regelt in Anhang 1, Nr. 2.1.1 dass "Das Abdichtungssystem, die Materialien und die Herstellung der Systemkomponenten und deren Einbau sowie die Eigenschaften dieser Komponenten im Einbauzustand so gewählt werden müssen, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen ist."

Für die kunststofftechnischen Komponenten in einem Abdichtungssystem ist das Langzeitverhalten von Geokunststoffen mittlerweile gut erforscht und eine Quantifizierung der Beständigkeitseigenschaften synthetischer Materialien grundsätzlich möglich. Andererseits schwindet zunehmend das Vertrauen in die tonmineralischen Komponenten, nach dem vereinzelt bei Aufgrabungen Reduktionen im Einbauwassergehalt, Trockenrisse und durchwurzelte Dichtungen nachgewiesen wurden. Bindige Böden und hier insbesondere Tone sind zwar aufgrund ihrer Genese als sehr stabil und aufgrund ihrer Kornverteilung als sehr gering wasserdurchlässig einzustufen, die Natur zeigt aber auch am Beispiel der meisten Tongruben, die in den vergangenen Jahrzehnten z.B. als Standort für Sonderabfalldeponien ausgewählt wurden und zwischenzeitlich in großer Zahl in den Zustand äußerst gefährlicher Altlasten übergegangen sind, dass durch tektonische und klimatische Einwirkungen Gefügeänderungen, wasserwirksame Trennflächen und Schrumpfrisse entstehen können. Für die vielfältigen Arten mineralischer Abdichtungskomponenten und deren Zusammenwirken mit anderen Bauteilen des Abdichtungssystems mangelt es dagegen an standardisierten Nachweisverfahren. Insofern besteht Konkretisierungsbedarf.

Die Langzeitbeständigkeit mineralischer Dichtungen war in ihrer nun mehr als 30-jährigen Entwicklungsgeschichte immer wieder Gegenstand der Diskussion. Während anfangs fast nur Basisabdichtungen betrachtet wurden, traten seit Mitte der 90er Jahre Oberflächenab-

dichtungen in den Mittelpunkt des Interesses. In jüngster Zeit wurden zudem verstärkt alternative Dichtungsmaterialien untersucht.

Im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens soll der vorliegende Erkenntnisstand über die Langzeitstabilität mineralischer Abdichtungskomponenten und ihrer die Funktionalität einer Kombinationsabdichtung beeinflussenden Wechselwirkungen mit anderen Systemkomponenten zusammengefasst sowie die Methoden für die Erbringung derartiger Nachweise herausgearbeitet werden. Ziel des Vorhabens ist es, eine Handlungsempfehlung in Form eines Kriterienkataloges zu erstellen, die als Grundlage für die Aufstellung der erforderlichen Nachweise einer langfristigen Funktionserfüllung herangezogen werden kann.

1 Vorgaben nach DepV

1.1 Anforderungen nach dem Stand der Technik

Das Abdichtungssystem, die Materialien und die Herstellung der Abdichtungskomponenten und deren Einbau sowie die Eigenschaften dieser Komponenten im Einbauzustand müssen so gewählt werden, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen ist. Abweichend hiervon gilt bei Kontrollsystemen für Konvektionssperren ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren.

Im Übrigen sind mindestens folgende Kriterien und Einwirkmechanismen unter den besonderen Randbedingungen in Deponieabdichtungssystemen zu berücksichtigen:

1. Dichtigkeit, gemessen an den Anforderungen der Tabellen 1 und 2,
2. Verformungsvermögen, um unvermeidbare Setzungen aufzunehmen,
3. Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanisch einwirkenden Kräften,
4. Widerstandsfähigkeit gegen hydraulische Einwirkungen (Suffosion und Erosion),
5. Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Einwirkungen,
6. Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen,
7. Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten nachteiligen Materialveränderungen,
8. gesicherte, reproduzierbare und qualitätsüberwachte Vorfertigung von Abdichtungskomponenten,
9. gesicherte, die Funktionalität wahrende und qualitätsüberwachte Herstellung sowie Einbau der Abdichtungskomponenten und des Abdichtungssystems, insbesondere unter Einbeziehung geeigneter Maßnahmen zum Schutz vor auflastbedingten Beschädigungen,
10. bei Vorgabe einer einzuhaltenden Durchflussrate: geeignete Nachweise,
11. bei mineralischen Abdichtungskomponenten: Materialzusammensetzung, Einbautechnik und Einbindung im Abdichtungssystem, um eine sehr niedrige Durchlässigkeit zu erreichen und die Gefahr einer Trockenrissbildung zu minimieren,
12. bei Deponieersatzbaustoffen: Einhaltung der zusätzlichen Anforderungen der §§ 14 und 15 *DepV*,
13. bei einer mineralischen Entwässerungsschicht: DIN 19667, Ausgabe Mai 1991, Dränung von Deponien - Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb.

1.2 Besondere Anforderungen an die geologische Barriere und das Basisabdichtungssystem

Der dauerhafte Schutz des Bodens und des Grundwassers ist durch die Kombination aus geologischer Barriere und einem Basisabdichtungssystem im Ablagerungsbereich nach Tabelle 1 Nr. 2 bis 4 zu erreichen. Bei Erfordernis von zwei Abdichtungskomponenten sollen diese aus einer Konvektionssperre (Kunststoffdichtungsbahn oder Asphaltabdichtung) über einer mineralischen Komponente bestehen. Die mineralische Komponente ist in der Regel mehrlagig herzustellen. Die Abdichtungskomponenten sind vor auflastbedingten Beschädigungen zu schützen.

Tabelle 1 Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems

Nr.	System-Komponente	DK 0	DK I	DK II	DK III
1	obere Schicht der geologischen Barriere ¹⁾	$k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s $d \geq 1,00$ m	$k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s $d \geq 1,00$ m	$k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s $d \geq 1,00$ m	$k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s $d \geq 5,00$ m
2	Erste Abdichtungskomponente ²⁾	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
3	Zweite Abdichtungskomponente ²⁾	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
4	Mineralische Entwässerungsschicht ³⁾ , $k \geq 1 \cdot 10^{-3}$ m/s	$d \geq 0,30$ m	$d \geq 0,50$ m	$d \geq 0,50$ m	$d \geq 0,50$ m

- 1) Der Durchlässigkeitsbeiwert k ist bei einem Druckgradienten $i = 30$ (Laborwert nach DIN 18130-1, Ausgabe Mai 1998, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche) einzuhalten.
- 2) Werden Abdichtungskomponenten aus mineralischen Bestandteilen hergestellt, müssen diese eine Mindestdicke von 0,50 m und einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bei einem Druckgradienten von $i = 30$ (Laborwert nach DIN 18130-1, Ausgabe Mai 1998, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche) einhalten. Werden Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungskomponente eingesetzt, darf ihre Dicke 2,5 mm nicht unterschreiten.
- 3) Wenn nachgewiesen wird, dass es langfristig zu keinem Wasseranstau im Deponiekörper kommt, kann mit Zustimmung der zuständigen Behörde
 - a) bei Deponien der Klasse 0 auf die Entwässerungsschicht verzichtet,
 - b) bei Deponien der Klasse I, II und III die Entwässerungsschicht mit einer geringeren Schichtstärke oder anderer Körnung hergestellt werden.

1.3 Besondere Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem

Das Oberflächenabdichtungssystem ist nach Tabelle 2 zu errichten.

Bei Erfordernis von zwei Abdichtungskomponenten sollen diese Komponenten aus verschiedenen Materialien bestehen, die auf eine Einwirkung (z.B. Austrocknung, mechanische Perforation) so unterschiedlich reagieren, dass sie hinsichtlich der Dichtigkeit fehlerausgleichend wirken.

Tabelle 2 Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems

Nr.	System-Komponente	DK O	DK I ⁵⁾	DK II ⁶⁾	DK III
1	Ausgleichsschicht	nicht erforderlich	ggf. ⁷⁾ erforderlich	ggf. ⁷⁾ erforderlich	ggf. ⁷⁾ erforderlich
2	Gasdränschicht	nicht erforderlich	nicht erforderlich	ggf. ⁸⁾ erforderlich	ggf. ⁸⁾ erforderlich
3	Erste Abdichtungskomponente	nicht erforderlich	erforderlich ²⁾	erforderlich ²⁾	erforderlich ³⁾
4	Zweite Abdichtungskomponente	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich ²⁾	erforderlich ³⁾
5	Entwässerungsschicht ⁴⁾ d ≥ 0,30m, k ≥ 1 · 10 ⁻³ m/s, Gefälle > 5%	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
6	Rekultivierungsschicht/technische Funktionsschicht	erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich

- 1) Die Ausgleichsschicht kann bei ausreichender Gasdurchlässigkeit und Dicke die Funktion der Gasdränschicht nach Nummer 2 mit erfüllen
- 2) Werden Abdichtungskomponenten aus mineralischen Materialien verwendet, müssen diese einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei einem Druckgradienten von $i = 30$ (Laborwert nach DIN 18130-1, Ausgabe Mai 1998, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil I: Laborversuche) einhalten. Abweichend von Satz 1 können mineralische Abdichtungskomponenten, deren Wirksamkeit nicht mit Durchlässigkeitsbeiwerten beschrieben werden kann, eingesetzt werden, wenn sie im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 20 mm/Jahr Durchfluss aufweisen. Werden Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungskomponente eingesetzt, darf ihre Dicke 2,5 mm nicht unterschreiten.
- 3) Werden Abdichtungskomponenten aus mineralischen Materialien verwendet, müssen diese einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bei einem Druckgradienten von $i = 30$ (Laborwert nach DIN 18130-1, Ausgabe Mai 1998, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil I: Laborversuche) einhalten. Abweichend von Satz 1 können mineralische Abdichtungskomponenten, deren Wirksamkeit nicht mit Durchlässigkeitsbeiwerten beschrieben werden kann, eingesetzt werden, wenn sie im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 10 mm/Jahr Durchfluss aufweisen. Werden Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungskomponente eingesetzt, darf ihre Dicke 2,5 mm nicht unterschreiten.
- 4) Die zuständige Behörde kann auf Antrag des Deponiebetreibers Abweichungen von Mindestdicke, Durchlässigkeitsbeiwert und Gefälle der Entwässerungsschicht zulassen, wenn nachgewiesen wird, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht dauerhaft gewährleistet sind.
- 5) An Stelle der Abdichtungskomponente, der Entwässerungsschicht und der Rekultivierungsschicht kann eine als Wasserhaushaltsschicht nach Nummer 2.3.1.1 bemessene Rekultivierungsschicht zugelassen werden, wenn das Sickerwasser vollständig gefasst und in freiem Gefälle abgeleitet wird. Andernfalls darf der Durchfluss durch die Wasserhaushaltsschicht im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 20mm/Jahr betragen.
- 6) An Stelle der zweiten Abdichtungskomponente und der Rekultivierungsschicht kann eine als Wasserhaushaltsschicht nach Nummer 2.3.1.1. bemessene Rekultivierungsschicht eingebaut werden. Wird die erste Abdichtungskomponente als Konvektionssperre ausgeführt, kann an Stelle der zweiten Abdichtungskomponente auch ein Kontrollsystem für die Konvektionssperre eingebaut werden. In diesem Fall ist im Bereich von Stellen, an denen das Dränwasser gesammelt und abgeleitet wird, unmittelbar unter der Konvektionssperre eine zweite Abdichtungskomponente einzubauen. Sätze 1 bis 3 gelten bei Deponien oder Deponieabschnitten, auf denen Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle Klärschlämme und andere Abfälle mit hohen organischen Anteilen abgelagert worden sind, mit der Maßgabe, dass der Deponiebetreiber Maßnahmen nach § 26 Abs. 4 zur Beschleunigung biologischer Abbauprozesse und zur Verbesserung des Langzeitverhaltens nachweislich erfolgreich durchführt.
- 7) Das Erfordernis richtet sich nach Nummer 2.3 Satz 2.
- 8) Das Erfordernis richtet sich nach Anhang 5 Nummer 7.

1.4 Rekultivierungsschicht

Für eine Rekultivierungsschicht, die nicht als technische Funktionsschicht genutzt wird, gilt Folgendes:

1. Die Dicke, die Materialauswahl und der Bewuchs der Rekultivierungsschicht sind nach den Schutzanforderungen der darunter liegenden Abdichtungskomponenten (weitestgehende Vermeidung einer Durchwurzelung der Entwässerungsschicht, keine sonstige Beeinträchtigung der langfristigen Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht, Schutz der Systemkomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung, Folgenutzungen) zu bemessen. Eine Mindestdicke von 1 m darf nicht unterschritten werden.
2. Das Material soll eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 140 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Rekultivierungsschicht, aufweisen.
3. Durch die Auswahl eines geeigneten Bewuchses soll die Oberfläche vor Wind- und Wassererosion geschützt und eine möglichst hohe Evapotranspiration erreicht werden.
4. Das eingesetzte Material muss Anhang 3 Nummer 2 entsprechen. Es muss sichergestellt sein, dass nur solches Material eingesetzt wird, dass das in der Entwässerungsschicht gefasste Wasser nach den wasserrechtlichen Vorschriften eingeleitet werden kann.

2 Material- und Einbauparameter nach LfU-/LANUV-Arbeitsblatt

2.1 Vorbemerkungen

Das vorliegende *LfU/LANUV-Arbeitsblatt 6* [114] aktualisiert bzw. modifiziert die bisher gültigen Anforderungen an die Herstellung mineralischer Abdichtungen nach Anhang E der *TA Abfall* bzw. *TA Siedlungsabfall* und dem in Nordrhein-Westfalen gültigen *LWA-Merkblatt Nr. 18* [111] und geht davon aus, dass die stoffliche Beständigkeit mineralischer Materialien als gegeben vorausgesetzt werden kann und sich der Nachweis der Beständigkeit auf die Behandlung der durch Wassergehaltsänderungen verursachte Gefügebildung (Austrocknung und Schrumpfung) beschränken kann. Hinsichtlich Material- und Einbauparameter gelten für Basis- und Oberflächenabdichtungen die nachfolgend beschriebenen Anforderungen.

2.2 Mineralisches Dichtungsmaterial Basisabdichtungssystem

- a) Die Kornabstufung des mineralischen Materials ist so zu wählen, dass ein Austragen von Feinstbestandteilen nicht möglich ist (Suffosionsbeständigkeit). Der Anteil an Feinstkorn $< 2 \mu\text{m}$ (DIN 18123) sollte mindestens 20 Gew.-% betragen.
- b) Der Anteil und die Art der aktiven Tonminerale ist auf das im Einzelfall erforderliche Adsorptionsvermögen abzustimmen (mindestens 10 Massen-%).
- c) Böden mit Holz, Wurzeln und anderen Fremdstoffen dürfen nicht verwendet werden. Die im Boden verteilte organische Substanz darf 5 Gew.-% nicht überschreiten. Der Karbonatanteil darf nicht mehr als 30 Massen-% betragen.
- d) Das mineralische Material muss im eingebauten Zustand den zu berechnenden Verformungen plastisch folgen können. Auflastbedingte Verformungen des Dichtungsaufagers dürfen die Funktionstüchtigkeit der Deponieabdichtungssysteme nicht nachteilig beeinträchtigen.
- e) Das Dichtungsmaterial muss im eingebauten Zustand homogen sein und einen gleichmäßigen Einbauwassergehalt aufweisen.
- f) Jede eingebaute Lage mineralischen Materials muss mindestens einen Verdichtungsgrad $D_{Pr} > 95 \%$ aufweisen. Für gemischtkörnige Dichtungsmaterialien gilt ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} > 97 \%$.
- g) Der Einbauwassergehalt (w) muss über dem Proctorwassergehalt (w_{Pr}) liegen. Es gilt: $w_{Pr} < w < w(0,95)$. Wird davon abgewichen, ist durch Erhöhung der Verdichtungsenergie ein Luftporenanteil $n_a \leq 5 \%$ einzuhalten. Für gemischtkörnige Dichtungsmaterialien gilt ein Luftporenanteil von $n_a < 3 \%$.
- h) Für gemischtkörniges, mit Tonmehlen vergütetes mineralisches Dichtungsmaterial kann der Anteil an Feinstkorn nach Buchstabe a und der Anteil an aktiven Tonmineralgehalten nach Buchstabe b abweichen.

2.3 Mineralisches Dichtungsmaterial Oberflächenabdichtungssystem

- a) Die Kornabstufung des mineralischen Materials ist so zu wählen, dass ein Austragen von Feinstbestandteilen nicht möglich ist (Suffosionsbeständigkeit).
- b) Die aktiven/quellfähigen Tonminerale sind zu begrenzen. Die Rekultivierungsschicht ist so auszulegen, dass keine schädlichen Wasserspannungen auf die mineralische Dichtung einwirken können. Zur Austrocknungsempfindlichkeit ist ein Gutachten vorzulegen, welches auch den vorgesehen dauerhaften Schutz der mineralischen Oberflächenabdichtungskomponente (z.B. Art und Stärke der Rekultivierungsschicht) am Standort berücksichtigt. Hierzu ist der jeweilige Stand der Technik (z.B. *GDA-Empfehlungen*) zu berücksichtigen.
- c) Böden mit Holz, Wurzeln und anderen Fremdstoffen dürfen nicht verwendet werden. Die im Boden verteilte organische Substanz darf 5 Gew.-% nicht überschreiten. Der Karbonatanteil darf nicht mehr als 30 Massen-% betragen.
- d) Das mineralische Material muss im eingebauten Zustand den zu berechnenden Verformungen plastisch folgen können. Auflastbedingte Verformungen des Dichtungsaufagers dürfen die Funktionstüchtigkeit der Deponieabdichtungssysteme nicht nachteilig beeinträchtigen.
- e) Das Dichtungsmaterial muss im eingebauten Zustand homogen sein und einen gleichmäßigen Einbauwassergehalt aufweisen.
- f) Jede eingebaute Lage mineralischen Materials muss mindestens einen Verdichtungsgrad $D_{Pr} > 95 \%$ aufweisen, Für gemischtkörnige Dichtungsmaterialien gilt ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} > 97 \%$.

2.4 Nachweis der Eignung

Neben dem Nachweis der ausreichenden Verfügbarkeit auf der Grundlage von Bohrungen und Schürfen und gezielten geologisch-petrografischen sowie ingenieurgeologischen Untersuchungen sind an dem mineralischen Material die nachfolgend aufgeführten Laborversuche durchzuführen. Die Anzahl der Einzelproben ist nach der Streuung s oder dem Variationskoeffizienten v festzulegen, darf aber die Mindestzahl drei nicht unterschreiten.

- Klassifizierung nach *DIN 18196*
 - Bestimmung der Korngrößenverteilung nach *DIN 18123 (Ausgabe 11/96)*,
 - Bestimmung des Wassergehaltes nach *DIN 18121-1 (Ausgabe 4/98)*,
 - Bestimmung der Konsistenzgrenzen und der abgeleiteten Werte nach *DIN 18122-1 (Ausgabe 7/97)* und *DIN 18122-2 (Ausgabe 9/00)*,
 - Bestimmung der Wasseraufnahme nach *ENSLIN/NEFF DIN 18132 (Ausgabe 12/95)*,

- Bestimmung des Glühverlustes *DIN 18128 (Ausgabe 12/02)*,
- Bestimmung des Kalkgehaltes nach *SCHEIBLER DIN 18129 (Ausgabe 11/96)*,
- Geologische Beschreibung, Gesteinsbeschreibung, Bestimmung der Tonminerale (qualitativ).
- Bestimmung der Proctordichte nach *DIN 18127 (Ausgabe 11/97)*
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach *DIN 18130-1 (Ausgabe 5/98)*
- Bestimmung der Festigkeit und Zusammendrückbarkeit
 - Dreiaxialer Druckversuch, *DIN 18137-2 (Ausgabe 12/90)*
 - Direkter Scherversuch, *DIN 18138-3 (Ausgabe 8/90)*
 - Einaxialer Druckversuch, *DIN 18136 (Ausgabe 11/03)*
 - Kompressionsversuch, *DIN (E) 18135 (Ausgabe 6/99)*

2.5 Anmerkungen zur Gültigkeit des Eignungsnachweises

Der Eignungsnachweis für ein Dichtungsmaterial erfolgte bisher in der Regel unabhängig von einem konkreten Deponiebauvorhaben, damit auch weitgehend unabhängig von den speziellen Standortverhältnissen (Lage, Form, Neigung) und speziellen Überlegungen zum kurz- und langfristigen Wasserhaushalt in Teilschichten auf der Grundlage von speziellen Wasserhaushaltsberechnungen. Zumindest über Nr. 2.3 Ziffer b) ist für Oberflächenabdichtungen jetzt im Zusammenhang mit dem Kriterium Auswirkungen möglicher Wassergehaltsänderungen (Austrocknungs- und Rissempfindlichkeit) ein konkreter Projektbezug erforderlich und ein entsprechender Nachweis der dauerhaften Funktionsfähigkeit zu führen. In Fachkreisen, zuletzt beim Fachgespräch Mineralische Deponieabdichtungen des LANUV am 06.07.2010 in Recklinghausen herrscht jedoch weitgehende Einigkeit darüber, dass es allenfalls bei Anwendung sehr dicker (> 2 – 3 m) Rekultivierungsschichten möglich erscheint, für mineralische Abdichtungsschichten einen solchen Nachweis für mindestens 100 Jahre (siehe auch Abschnitt 3.2.2) zu führen, der die strengen Vorgaben der *DepV* nach Einbeziehung aller möglichen äußeren Einwirkungen berücksichtigt.

3 Nachweis der Beständigkeit

3.1 Allgemeines

Im Hinblick auf die langfristige Funktionsfähigkeit einzelner Komponenten und des Gesamtsystems - dies betrifft vor allem die Aspekte Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit - nimmt der Begriff Beständigkeit eine zentrale Stellung ein. Unter Beständigkeit wird dabei allgemein ein Materialverhalten verstanden, bei dem sich unter den maßgebenden Einwirkungen die relevanten Eigenschaften des Dichtungssystems innerhalb eines geforderten Zeitraums nicht unzulässig verändern bzw. die Eigenschaften müssen auch nach Beendigung der Einwirkung noch gegeben sein. Veränderungen bzw. Alterungsprozesse können dabei äußere oder innere Ursachen haben (s. *DIN 50035*) [108]. Diese überwiegend nicht-mechanischen Einwirkungen sind in ihren möglichen Auswirkungen insbesondere auf die Dichtigkeit und die mechanische Widerstandsfähigkeit nachzuweisen.

3.2 Begriffsdefinitionen

3.2.1 Dauerbeständigkeit

Unter Dauerbeständigkeit wird nach den DIBt-Grundsätzen [86] ein Verhalten verstanden, bei dem der Erhalt der maßgebenden dichtenden und mechanischen Eigenschaften des Dichtungselementes nach dem Stand der Technik über Zeiträume, die mehrere hundert Jahre umfassen, angenommen werden kann.

3.2.2 Langzeitbeständigkeit

Unter Langzeitbeständigkeit wird ein Verhalten verstanden, bei dem der Erhalt der maßgebenden dichtenden und mechanischen Eigenschaften für den Zeitraum von 50 bis 100 Jahren angenommen werden kann.

Nach *DepV* ist die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen für einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachzuweisen.

3.3 Maßgebende nicht-mechanische Einwirkungen

Die Beständigkeit der Materialien ist gegenüber den in Tabelle 3 genannten und in Kapitel 4 näher beschriebenen nicht-mechanischen Einwirkungen im Rahmen der generellen Eignungsbeurteilung nachzuweisen. In Tabelle 4 sind zusätzliche die von den beschriebenen Einwirkungen mit betroffenen Kriterien Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit aufgeführt und die möglichen Interaktionen dargestellt.

Tabelle 3 Einwirkungen für Beständigkeitsnachweise
nach [86], [87]

Einwirkung	Beständigkeit zu untersuchen bei
Deponiesickerwasser	Basisdichtung
infiltriertes Niederschlagswasser	Oberflächendichtung
aggressive flüssige Medien	Basisdichtung
Mikroorganismen, Pilze	Basisdichtung / Oberflächendichtung
Pflanzen	Basisdichtung / Oberflächendichtung
Tiere	Basisdichtung / Oberflächendichtung
Temperaturen	Basisdichtung / Oberflächendichtung
Witterung	Basisdichtung / Oberflächendichtung
Wassergehaltsänderungen	Basisdichtung / Oberflächendichtung

Tabelle 4 Maßgebende Kriterien und Einwirkungen für die Beurteilung von Deponieabdichtungssystemen aus natürlichen mineralischen Baustoffen nach [86]

Kriterien		Einwirkungen nach Abschn.	Deponiesickerwasser	infiltriertes Niederschlagswasser	aggressive Medien	Mikroorganismen	Pflanzen	Tiere	Temperaturen	Witterung	Wassergehaltsänderung	mechanische Einwirkungen	Hydraulische Einwirkungen
I	Dichtigkeit gegenüber												
I.1	Deponiesickerwasser		B						B		B	B	B
I.2	aggressiven Medien				B				B		B		
I.3	infiltriertem Niederschlagswasser			O					O		O	O	O
II	Mechanische Widerstandsfähigkeit												
II.1	Standssicherheit und Verformungssicherheit								B/O		B/O	B/O	B/O
II.1	Hydraulische Widerstandsfähigkeit										B/O	B/O	B/O
III	Beständigkeit gegenüber												
III.1	Deponiesickerwasser		B						B				
III.2	Infiltrierendes Niederschlagswasser			O					O				
III.3	aggressive Medien				B				B				
III.4	Mikroorganismen, Pilze					B/O			B/O				
III.5	Tiere, Pflanzen						O	O	O				
III.6	Witterung								B/O				
III.7	Wassergehaltsänderungen									B/O			

3.4 Nachweis der Beständigkeit

Beim Nachweis der Beständigkeit der Dichtungselemente nach den DIBt-Grundsätzen sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die Nachweise können durch Versuche, theoretische Verfahren oder belegte Praxiserfahrung erbracht werden.
- Die Beständigkeitsnachweise müssen auf die besonderen Empfindlichkeiten des zu untersuchenden Materials abgestimmt sein.
- Bei der materialspezifischen Untersuchung sind innere und äußere Alterungsvorgänge zu betrachten.
- Die Beständigkeitsnachweise sind unter Berücksichtigung von Art, Dauer, Richtung und Angriffspunkt der Einwirkungen auf das Dichtungselement im eingebauten Zustand zu erbringen. Dabei sind gleichzeitig Temperatureinwirkungen zu berücksichtigen.
- Durch Temperatur- und/oder Konzentrationserhöhungen einwirkender Medien oder Erhöhung mechanischer Beanspruchungen können Zeitraffungen vorgenommen werden, die eine Abschätzung der Funktionsdauer für die geforderten Zeiträume ermöglichen. Die Zulässigkeit derartiger verschärfender Prüfungen ist materialspezifisch nachzuweisen. Die für den Nachweis der Dichtigkeit erforderlichen Prüfmedien müssen daher nicht in jedem Fall identisch sein mit denen, die für die Nachweise der Beständigkeit verwendet werden.
- Beim Beständigkeitsnachweis können günstig wirkende Auflasten von max. 15 kN/m² auf der Oberflächendichtung und 200 kN/m² auf der Basisdichtung gleichzeitig berücksichtigt werden.
- Beim Nachweis der Beständigkeit gegenüber nicht mengenmäßig begrenzten aggressiven Medien muss die Konzentration der Inhaltsstoffe über die Versuchsdauer konstant gehalten werden.
- Für die zeitlich begrenzte Einwirkung ist ggf. zu untersuchen, ob und in welchem Umfang sich bei Beendigung dieser Einwirkungen veränderte Materialeigenschaften regenerieren.
- Die Beständigkeit ist gegeben, wenn die geforderten dichtenden und mechanischen Eigenschaften des betrachteten Dichtungselements erhalten bleiben. Ggf. sind Veränderungen durch entsprechende Korrekturfaktoren, additive Sicherheitselemente oder andere Maßnahmen zu berücksichtigen.

3.5 Einwirkungs- bzw. Zustandsphasen

In Anlehnung an die *DIBt-Grundsätze* und unter Berücksichtigung der Deponieverordnung werden folgende Einwirkungsphasen (Tabelle 5) unterschieden.

Tabelle 5 Zustandsphasen von Basis- und Oberflächenabdichtung

Phase	Zustand
0	Basisdichtung im Bauzustand
I	Basisdichtung vor der Verfüllung
II	Basisdichtung während der Verfüllung Oberflächendichtung im Bauzustand
IIIa	Dichtungen in Nachsorgephase
IIIb	Dichtungen nach der Entlassung aus der Nachsorge

Die einzelnen Phasen lassen sich wie folgt näher beschreiben:

- Phase 0 Basisdichtung im Bauzustand
Belastung durch Herstellungsmaßnahmen, Witterung, Eigengewicht
- Phase I ¹⁾ Basisdichtung ganz oder teilweise freiliegend oder durch Schutz- bzw. Entwässerungsschichten abgedeckt
Belastungen z.B. durch Witterung, Eigengewicht, Fahrzeuge, Massenkräfte
- Phase II ¹⁾ Basisdichtung zunehmend mit Abfall bedeckt
Belastung durch zunehmende Auflasten, Setzungen, hohen Sickerwasseranfall mit maximaler Schadstoffbelastung bei ggf. erhöhten Temperaturen
volle Funktionsfähigkeit aller Elemente der Dichtung
Phase II endet mit der Herstellung der Oberflächendichtung.
- Phase IIIa ²⁾ durch Oberflächendichtung reduzierter Sickerwasseranfall auf der Basisabdichtung
Belastung der Oberflächendichtung durch Setzungsverformungen und infiltriertes Niederschlagswasser
volle Funktionsfähigkeit aller Elemente von Oberflächen- und Basisdichtung
- Phase IIIb ³⁾ Annahme zeitlich begrenzter Wirksamkeit bzw. Ausfall der Oberflächen- und Basisentwässerung
größere Aufstauhöhen auf der Dichtung
Veränderung der Funktionsfähigkeit der Oberflächen- und Basisdichtung z.B. durch begrenzte Beständigkeit von Dichtungselementen ⁴⁾

Zu den Phasen sind folgende Bemerkungen zu machen:

- 1) Phasen I und II können zeitlich parallel auftreten.
- 2) Der Übergang von Phase IIIa zu Phase IIIb wird durch Beständigkeitsgrenzen einzelner Dichtungselemente bestimmt. Ein Zeitraum von 100 Jahren muss mindestens erreicht werden.
- 3) Phase IIIb ist zeitlich unbegrenzt.
- 4) Wenn z.B. die Konvektionssperre langfristig als nicht voll wirksam anzusehen ist, muss ein anderes Dichtungselement (z.B. eine mineralische Dichtung) die Langzeitsicherung der Dichtung der Deponie übernehmen.

4 Beschreibung der Einwirkungen und Zuordnung zu Zustandsphasen

Nachfolgend werden zunächst die maßgebenden chemischen, biologischen und physikalischen Einwirkungen behandelt, mit denen im Regelfall zu rechnen ist und die in die Eigenschaftsbewertung eingehen müssen. Dabei werden Basis- und Oberflächenabdichtungen getrennt behandelt. Die Nachweismöglichkeiten und der derzeitige Stand der Nachweisführung und Beurteilung folgt in Kapitel 5.

4.1 Basisabdichtungssysteme

Nachfolgend sind die Einwirkungen nach Art, Einwirkungszeitraum und daraus resultierenden möglichen Beanspruchungen und Auswirkungen in Tabelle 6 zusammengestellt.

4.2 Oberflächenabdichtungssysteme

Tabelle 7 enthält die entsprechenden Informationen zu den mineralischen Oberflächenabdichtungen.

Tabelle 6 Einwirkungs- und Auswirkungsszenarien bei Basisabdichtungen

Gruppe	Einwirkungen	Nr.	Art der Einwirkung	örtlich+ zeitlich begrenzt.	Häufigkeit der Einwirkung			Depo-nieklasse			Zustandsphase				Beanspruchungen und mögliche Auswirkungen	
					ständig	veränderlich	außer-gewöhnlich	I	II	III	0	I	II	IIIa		IIIb
I	chemische	1	Sickerwasser		x	x	x	x	x	x				x	x	Schadstoffbelastung u. Überstau initiieren Diffusions- u. Konvektionsprozesse sowie Sorption u. Ausfällungen im Porenraum, Prozesse werden durch Temperatur verstärkt, Folge: Strukturveränderungen, Gefügebildungen, Veränderung der Biege- und Dehnsteifigkeit, Erhöhung des k-Wertes
		2	aggressive flüssige Medien (Prüfflüchtigkeiten)	x		x								x	x	Lösungs- u. Erosionsvorgänge in Kontaktflächen, verstärkte Diffusions-, Konvektions- und Sorptionsprozesse, Folge: Strukturveränderungen, Gefügebildung u. Spannungen in der Dichtungslage bei veränderter Steifigkeit (s. u. 1), verstärkt durch Temperatur und hydraulische Belastung, gemindert evtl. durch Auflasten, Beeinflussung des k-Wertes
II	biologische	3	Mikroorganismen und Pilze	x		x							x	x	x	Metabolisierung organischer und anorganischer Stoffe, von der Oberfläche an beginnend, Entwässerung von Feinporen, Verstärkung durch Temperatur u. hydraulische Belastung, Auswirkungen auf die Dichtigkeit und Beständigkeit
		4	Pflanzen	x		x								x		Biologisch, chemisch-physikalische Einwirkung bei lange offen liegenden Teilflächen, Perforation, Hohlrumbildung durch absterbende Wurzeln, Entzug von Bodenfeuchtigkeit, Auflockerung, Beeinflussung des k-Wertes
		5	Tiere	x		x								x	x	x

Tabelle 6 Einwirkungs- und Auswirkungsszenarien bei Basisabdichtungen (Fortsetzung)

Gruppe	Einwirkungen	Nr.	Art der Einwirkung	örtlich+ zeitlich begrenzt.	Häufigkeit der Einwirkung			Depo- nieklasse			Zustandsphase				Beanspruchungen und mögliche Auswirkungen	
					stän- dig	verän- derlich	außer- gewöhn- lich	I	II	III	0	I	II	IIIa		IIIb
III	physikalische	6	Tempera- tur (aus Deponie- körper)	x	x	x (zeitl. Begr.)	x	x	x				x	x	x	Wassergehalts- u. Wasserspannungsänderungen, Beschleuni- gung von Alterungsprozessen in der Dichtung, Verstärkung diffu- siver, konvektiver u. sorptiver Prozesse, direkte Einwirkung auf Dichtigkeit und die Verformungseigenschaften
		7	Witterung		x		x	x	x	x	x	x				Temperatur- u. Feuchtigkeitseinwirkungen von der Oberfläche, durchfeuchtungs-/Verdunstungs-Wechsel mit Auswirkungen auf die Dichtigkeit, Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, Spannungen und Risse
		8	Wasser- gehalts- änderun- gen		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	abnehmende Wassergehalte bedingen steigende Wasserspan- nung, Schrumpfvorgänge u. Rissbildungen, Veränderung der me- chanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Bruchdehnung, Zugfestig- keit) mit direktem Einfluss auf die Dichtigkeitseigenschaften, zu berücksichtigen sind Auflasten, sie können diesen Effekt reduzie- ren oder aufheben (s. unter 9)
		9	Mechani- sche Einwir- kungen	x	x (SiWa + T)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	ständige und veränderliche Lasten aus dem Deponiekonzept, Lasten führen zu Setzungen, die auf die Dichtung einwirken, mög- liche Veränderungen nach 8) sind zu berücksichtigen, bei Über- schreitung von materialspezifischen Grenzwerten negative Aus- wirkungen auf die Dichtigkeit u. Standsicherheit
		10	Hydrauli- sche Einwir- kungen	x	x	x	x	x	x				x	x	x	Aufstau beeinflusst Permeationsvorgänge, Durchbruchzeit und Durchflussrate von Schadstoffen, bei hohen hydraulischen Gra- dienten Auswirkungen auf die Erosions- und Suffosionssicherheit, oberflächige Erosionsvorgänge (s.a. unter 7)

Tabelle 7 Einwirkungs- und Auswirkungsszenarien bei Oberflächenabdichtungen

Gruppe	Einwirkungen	Nr.	Art der Einwirkung	örtlich+ zeitlich begrenzt.	Häufigkeit der Einwirkung			Depo-nieklas-se				Zustandsphase			Bemerkungen und mögliche Auswirkungen		
					stän-dig	ver-änder-lich	außer-ge-wöhn-lich	I	II	III	0	I	II	III a		IIIb	
I	chemische	1	Infiltrier-tes Nie-derschlag s-wasser		x	x (bei Was-ser-auf-stau)	x (bei Was-ser-auf-stau)	x	x	x					x	x	Schadstoffe aus Niederschlag und Deckschichten und Einwirkun-gen aus Temperatur, mech. Lasten, Wasser und ggf. aufgezwun-genen Verformungen
II	biologische	2	Mikro-organis-men	(X)		(X)		x	x	x					x	x	Metabolisierung organischer und anorganischer Stoffe, von der Oberfläche an beginnend. Entwässerung von Feinporen. Verstär-kung durch Temperatur und hydraulische Belastung. Auswirkun-gen auf die Dichtigkeit und Beständigkeit
		3	Pflanzen	x		x		x	x	x					x	x	Biologisch, chemisch-physikalische Einwirkung bei lange offen liegenden Teilflächen. Perforation, Hohlraumbildung durch abster-bende Wurzeln, Entzug von Bodenfeuchtigkeit, Auflockerung. Beeinflussung des k-Wertes.
		4	Tiere					x	x	x					x	x	Auflockerung, Perforation der Dichtung, Beeinträchtigung von dichtenden und mechanischen Eigenschaften.

Tabelle 7 Einwirkungs- und Auswirkungsszenarien bei Oberflächenabdichtungen (Fortsetzung)

Gruppe	Einwirkungen	Nr.	Art der Einwirkung	örtlich+ zeitlich begrenzt.	Häufigkeit der Einwirkung			Depo- nieklas- se				Zustandsphase				Bemerkungen und mögliche Auswirkungen		
					stän- dig	ver- änder- lich	außer- ge- wöhn- lich	I	II	III	0	I	II	III a	IIIb			
III	physikalische	5	Tempera- tur (aus Deponie- körper)	(X)	x		(X)	x	x	x				x	x	x	Wassergehalts- und Wasserspannungsänderungen, Beschleunigung von Alterungsprozessen, Einwirkung auf die Dichtigkeits- und Verformungseigenschaften.	
		6	Witterung			x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	Temperatur- und Feuchtigkeitseinwirkungen von der Oberfläche. Durchfeuchtungs-/Verdunstungs-Wechsel mit Auswirkungen auf die Dichtigkeitseigenschaften. Veränderungen des mechanischen Eigenschaften, Spannungen und Risse
		7	Wasser- gehalts- änderun- gen			x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	Abnehmende Wassergehalte bedingen steigende Wasserspannung. Folgen sind Schrumpfvorgänge und Rissbildungen. Veränderung der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit), Bruchdehnung, Zugfestigkeit) mit direktem Einfluss auf die Dichtigkeitseigenschaften. Zu berücksichtigen unter 9), Auflasten können diesen Effekt reduzieren oder aufheben
		8	Mechani- sche Einwir- kungen		x	x	X (Si- Wa+T)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Zug-, Druck- und Schubspannungen aus äußeren Lasten und aufgezwungenen Verformungen (Setzungen) des Auflagers, Auswirkungen auf Standsicherheit und Dichtigkeit möglich auch unter Berücksichtigung der Veränderungen nach 7.
		9	Hydrauli- sche Einwir- kungen		x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	Aufstau beeinflusst Permeationsvorgänge. Mögliche Auswirkungen auf Erosions- und Suffosionssicherheit. Hydrostatische und hydrodynamische Auswirkungen auf die Standsicherheit sind möglich.

5 Anforderungen an die Leistung von Dichtungssystemen

5.1 Allgemeines

Die Anforderungen an Dichtungssysteme lassen sich verkürzt durch die Kriterien **Dichtigkeit** und **Langzeitfunktion** beschreiben. Die Anforderungen an die Dichtigkeit lassen sich über einen maximalen k-Wert oder eine unter den gegebenen klimatischen und deponiespezifischen Randbedingungen akzeptierbare Permeationsrate vorgeben. Die Langzeitfunktion schließt die **Standicherheit** des Gesamtsystems und alle Aspekte der **Beständigkeit** ein, das heißt alle möglichen Veränderungen der Leistungsfähigkeit in dem betrachteten Lebenszyklus eines Abdichtungssystems. Hinsichtlich der zu fordernden Leistungsfähigkeit unterscheiden sich Oberflächenabdichtungssysteme signifikant von Basisabdichtungssystemen.

Von einem **Oberflächenabdichtungssystem** (OAD) ist zu fordern, dass es über lange Zeiträume die Zusickerung von in der Regel weitgehend unbelastetem, allenfalls schwach mineralisiertem Niederschlagswasser in den Abfallkörper auf ein zulässiges Maß begrenzt und ggf. eine unkontrollierte Emission von Deponiegas verhindert. Bei dem Oberflächenabdichtungssystem wirken Tragschicht, Dichtung, Drainage- und Rekultivierungsschicht interaktiv zusammen, wobei der jeweilige Einzelanteil an der Leistungsfähigkeit unterschiedlich sein kann. Generell gilt, dass die Komponente hydraulisch dominant ist, die die geringste Wasserdurchlässigkeit aufweist.

Von dem **Basisabdichtungs-System** (BAD) ist zu fordern, dass es über lange Zeiträume die Aussickerung von mehr oder weniger stark kontaminiertem Sickerwasser aus dem Deponiekörper verhindert oder minimiert. Auch bei dem Basisabdichtungssystem wirken mit Geologischer Barriere, Auflagerschicht, Dichtung und Dränageschicht mehrere Komponenten interaktiv zusammen, wobei aber die Dichtigkeit der Dichtung wieder die entscheidende hydraulische Dominanz hat.

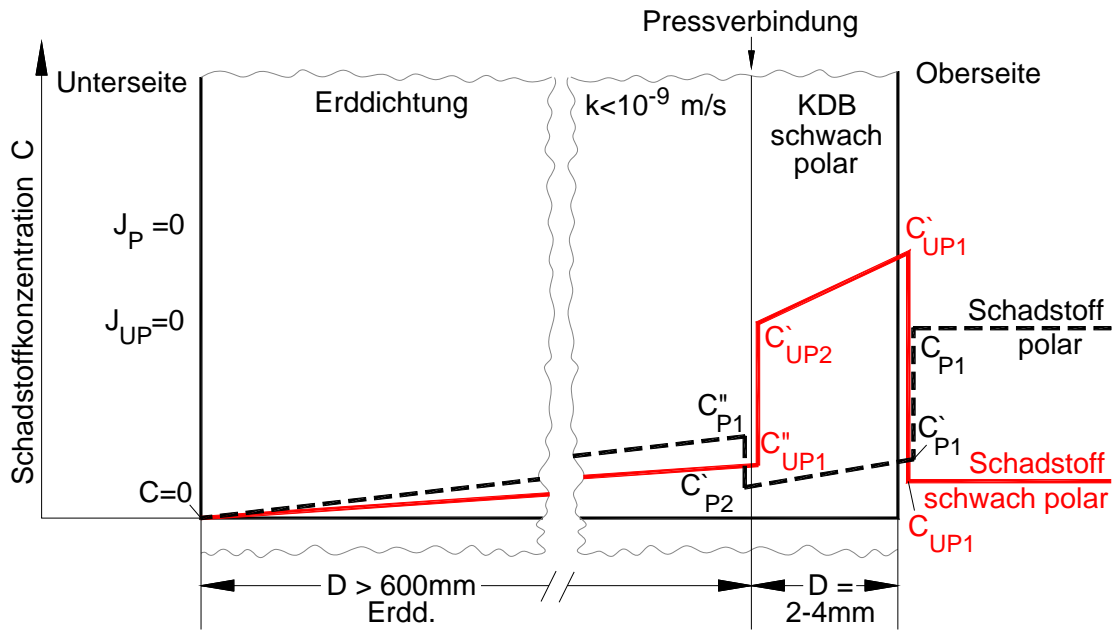
5.2 Abgrenzung Einzeldichtung - Kombinationsdichtung

Während für DK I-Deponien an der Basis und an der Oberfläche Einzeldichtungen - auch mineralisch - zulässig sind, werden für DK II- und DK III-Deponien nach DepV grundsätzlich zwei Abdichtungskomponenten gefordert. Bei Erfordernis von zwei Abdichtungskomponenten an der Basis soll diese aus einer Konvektionssperre (Kunststoffdichtungsbahn oder Asphaltabdichtung) über einer i. d. R. mehrlagigen mineralischen Komponente bestehen. Im zweilagigen Oberflächenabdichtungssystem sollen zwei verschiedene Materialien verwendet werden, die auf Einwirkungen (z.B. Austrocknung, mechanische Perforation) unterschiedlich reagieren und hinsichtlich der Dichtigkeit fehlerausgleichend wirken. Bei Verzicht auf eine Konvektionssperre ist ein Kontrollfeld bis zum Ende der Nachsorgephase zu betreiben, in dem die Einhaltung maximaler Durchflussraten nachgewiesen wird. Die entsprechenden maximalen Durchflussraten betragen im fünfjährigen Mittel bei DK II 20 mm/a und bei DK III 10 mm/a.

Die Kombinationsabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn und mineralischer Dichtung wurde in der Deponiepraxis zunächst für die Deponiebasis konzipiert. Ihre spezifischen Vorteile sind:

- die Kunststoffdichtungsbahn wirkt als Konvektionssperre und als Diffusionssperre für anorganische Schadstoffe. Wasserdampftransport wird durch die KDB nahezu vollkommen unterbunden,
- die Diffusion organischer Schadstoffe ist umgekehrt proportional zur Schichtdicke der mineralischen Dichtung, sie nimmt mit zunehmender Schichtdicke ab,
- die mineralische Dichtung verfügt gegenüber Schwermetallen über ein gewisses Adsorptionsvermögen und ver- bzw. behindert den Austrag organischer Schadstoffe,
- der Verbundeffekt beim Pressverbund führt dazu, dass die Kombination aus Kunststoffdichtungsbahn und mineralischer Dichtung eine effizientere Schutzwirkung gegenüber dem Schadstoffaustritt an der Deponiebasis bewirkt, als es der Summe der Einzelwirkungen der Komponenten entspricht,
- bei Verlust der oberen Abdichtungskomponente (KDB) verbleibt die mineralische Dichtung (MD) als langfristig wirksamstes Element (Ewigkeitskomponente),
- das Abdichtungssystem ist redundant, d.h. die zweite Komponente dient als Reserve für den Ausfall der ersten Komponente,
- im Versagensverhalten unterschiedlich (Elemente aus unterschiedlichen Materialien),
- in der Versagensabfolge zeitlich versetzt (das zweite (untere) Element ist noch wirksam, wenn das erste Element versagt).

Obwohl an der Deponieoberfläche andere Einwirkungsszenarien herrschen, wurde die Kombinationsdichtung auch für die Deponieoberfläche übernommen. Die unmittelbar stoffbezogenen Wirkungen bzw. das chemisch-physikalische Wirkungsprinzip der Kombinationsdichtung (siehe Abbildung 1) kommen an der Oberfläche aber überhaupt nicht zum Tragen und es verbleibt lediglich die redundante Wirkung von zwei Abdichtungselementen zur Unterbindung bzw. Minderung der Durchsickerung, die Leistungsfähigkeit selbst wird dadurch aber nicht erhöht.



$$J_p = \frac{C_{p1}}{D_{Erdd.}} \quad J_{up} = \frac{C_{up1}}{D_{Erdd.}}$$

C_{p1} ; C_{up1} = Schadstoffkonzentrationen, Sickerwasser
 C'_{p1} ; C'_{up1} = Schadstoffkonzentrationen, KDB
 C''_{p2} ; C''_{up2} = Schadstoffkonzentrationen, KDB
 C''_{p1} ; C''_{up1} = Schadstoffkonzentrationen, Erdichtung

Abbildung 1 Konzentrationsverlauf (quantitativ) polarer und unpolarer Schadstoffe in der Kombinationsabdichtung nach [1]

Aufgrund der dargestellten Systemwirkung wird die Kombinationsdichtung in Basisabdichtungssystemen generell als sehr wirksam anerkannt und es bestehen offensichtlich keine Zweifel an ihrer Dauerbeständigkeit, solange nicht außergewöhnliche Einwirkungen (z.B. hohe Temperaturen im Deponiekörper infolge exothermer Reaktionen einwirken (siehe auch Kapitel 6.3.1)).

Im Oberflächenabdichtungssystem übernimmt die Kunststoffdichtungsbahn dagegen andere Funktionen:

- Konvektionssperre gegenüber eindringendem Niederschlagswasser,
- Konvektionssperre gegenüber austretendem Deponiegas,
- Schutz der mineralischen Dichtung vor Austrocknung,
- Schutz der mineralischen Dichtung vor biologischer Aktivität (Durchwurzelung, Wühltätigkeit von Tieren).

Im Idealfall bildet die Kombination ein redundantes System aus zwei unabhängig voneinander wirkenden Abdichtungskomponenten. Nach Unwirksamwerden der Kunststoffdichtungsbahn (> 100 Jahre) soll die mineralische Dichtung die dauerhafte Abdichtungsfunktion (siehe auch Kapitel 3.2) übernehmen. Abweichend von dieser auf der Grundlage der *TA Abfall* und der *TASi* entwickelten und in der Deponiepraxis etablierten Betrachtungsweise ist in der *DepV* kein Hinweis auf das systematische Zusammenwirken der beiden Abdichtungskomponenten einer Kombinationsabdichtung (Redundanzprinzip, zeitliche Folge der Wirkungsentfaltung) enthalten. Alle Abdichtungskomponenten müssen ab dem Einbau voll wirksam sein und ihre Funktionstüchtigkeit über mindestens 100 Jahre (s. a. Abschn. 3.2.2) erhalten.

5.3 Einschätzungen zur Dauer der Leistungsfähigkeit

Bisher ist die Frage ungeklärt, ob über o. a. Zeiträume (>> 100 Jahre) geordnete Vegetationspflegemaßnahmen und eine Wurzelsperre in Ansatz gebracht werden können oder ein Schutz der mineralischen Dichtung vor Austrocknung aus physikalischer Sicht überhaupt möglich ist. Wahrscheinlich unterliegt nach Versagen der Kunststoffdichtungsbahn die mineralische Dichtung zumindest partiell den gleichen Einwirkungen wie die alleinige mineralische Dichtung im Regelsystem für DK I, lediglich zeitversetzt. Auf lange Sicht dürfte die Kombinationsdichtung damit nur so gut sein wie es der Langzeitwirkung der mineralischen Komponente entspricht [37].

Die mineralische Langzeitkomponente ist offensichtlich mit größeren Unsicherheiten behaftet als die Kunststoffdichtungsbahn, weshalb es aus ingenieurtechnischer Sicht schwierig erscheint, mit dem derzeitigen Kenntnisstand zum Systemverhalten - dies gilt gleichermaßen für rein mineralische Oberflächenabdichtungen wie auch für die Kombilösungen - unter den speziellen Bedingungen an der Deponieoberfläche und im Deponiekörper Einwirkungsszenarien und Beständigkeitsbeurteilungen von mehr als 100 Jahren zu betrachten und zu bewerten.

Bei realistischer Einschätzung ist davon auszugehen, dass es das nachsorgefreie Oberflächenabdichtungssystem wie auch die nachsorgefreie Deponie im Regelfall nicht geben wird und deshalb auch auf langfristige Unterhaltungsmaßnahmen nicht verzichtet werden kann (siehe auch Kapitel 5.4). Reparaturen und ggf. auch ein Neubau einzelner Systemkomponenten sind deshalb in die langfristige Betrachtung mit einzubeziehen.

Ein Problem dürfte auch darin bestehen, dass die Notwendigkeit für Sanierungsmaßnahmen - bei einer mit einer Kunststoffdichtungsbahn abgedeckten mineralischen Dichtung nach mehr als 100 Jahren - zu einem unbestimmten Zeitpunkt in der Zukunft liegt [37], wenn die Deponie längst aus der Nachsorge entlassen sein wird oder sein sollte.

5.4 Dichtigkeit

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Dichtigkeit und damit an die Leistungsfähigkeit werden naturgemäß von den lokalen, objektspezifischen Randbedingungen wie Klima, Gesamtwasserhaushalt der Deponie, Abfallzusammensetzung, Reaktions- und Elutionsverhalten des Abfalls sowie wirtschaftlichen Überlegungen zur Entsorgung von Sickerwasser bestimmt. Die in der *DepV* (siehe auch Kapitel 1.2) vorgegebenen maximalen k-Werte sind angemessen und empirisch als erreichbar abgesichert.

Die reale Neubildung von Sickerwasser wird in der Regel erheblich von den über diese maximalen k -Werte berechenbaren Werten der Neubildung bzw. Permeation abweichen. Günstig wirkt sich aus, dass die Wasserdurchlässigkeit nach *DIN 18130* unter Laborbedingungen für relativ hohe Gradienten und weitgehende Wassersättigung ($S_r = 1$) ermittelt wird. Tatsächlich dürften nach dem Potenzialkonzept für einen Boden zumindest in Teilbereichen der Dichtung nur teilgesättigte Bedingungen vorliegen. Mit abnehmendem Sättigungsgrad bzw. mit zunehmender Saugspannung nimmt die Wasserleitfähigkeit aber materialspezifisch ab [64] (s. Abbildung 2).

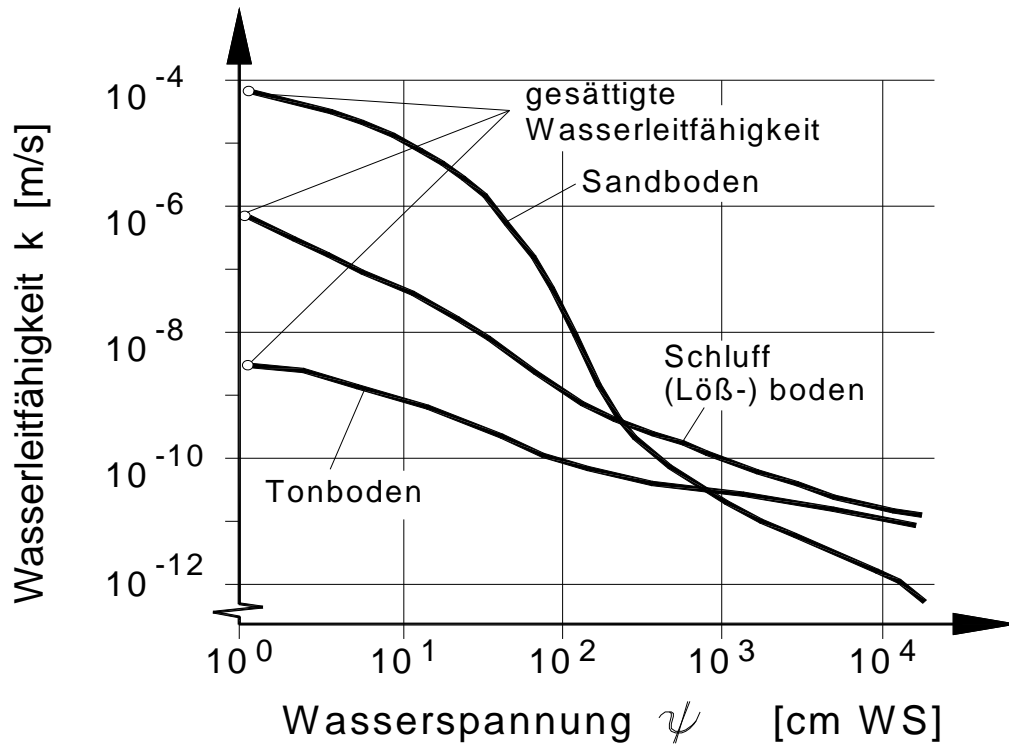


Abbildung 2 Wasserleitfähigkeit $k = f(\psi)$ für verschiedene Bodenarten nach [64]

Eine weitere Überschätzung der Wasserleitfähigkeit wird durch den versuchstechnisch gewählten hohen Gradienten $i = 30$ verursacht. Der lineare Ansatz des Darcy'schen Filtergesetzes auch bei niedrigen bis sehr niedrigen Gradienten, die sehr viel mehr der Deponiewirklichkeit entsprechen, führt zu k -Werten, die gerade bei sehr gering durchlässigen Materialien überschätzt werden. Unter Berücksichtigung der i_0 -Problematik dürften berechnete Durchtrittszeiten und Durchtrittsmengen tatsächlich entsprechend niedriger ausfallen.

Eine weitere ungünstige Annahme bei der Durchsickerungsberechnung - dies gilt gleichermaßen für OAD und BAD - ist bereits der Rechenansatz für den hydraulischen Gradienten i . Er wird üblicherweise mit:

$$i = \frac{d + h_A}{d}$$

berechnet, wobei d die Dicke der Dichtung und h_A die Überstauhöhe ist. Daraus folgt, dass bei einer Überstauhöhe $h_A \rightarrow 0$ immer noch ein Gradient $i = 1,0$ vorhanden ist und in Verbin-

dung mit dem k -Wert für gesättigte Bedingungen ($k = k_R$) zu einer endlichen Versickerung führt. Der obige Ansatz gilt strenggenommen aber nur für ein sehr poröses und stark durchlässiges Material, das bei fehlendem Nachschub von der Oberseite allein infolge des Gravitationspotenzials leer läuft und erst im Grenzfall der völligen Entleerung den Gradienten $i = 0$ liefert.

Bei feinkörnigen Materialien - selbst bei weitgehender Wassersättigung - ist dieser Fall jedoch auszuschließen und für die Definition des Gradienten wäre folgender Ansatz zutreffender:

$$i = \frac{h_A}{d}$$

Die Außerachtlassung dieses Sachverhaltes führt gerade bei geringen Übersauhöhen h_A z.B. in OAD-Systemen zu einer Überschätzung des Gradienten i und damit der rechnerisch ermittelten Durchtrittsmenge. Die Überschätzung der rechnerisch eingesetzten k -Werte (s.o.) verstärkt diesen Effekt zusätzlich.

Die vorangehende Bewertung der Dichtigkeit gilt ausschließlich für ein in seiner Porenstruktur homogenes tonmineralisches Dichtungsmaterial. Bei einem z.B. durch überkritische Wassergehaltsänderungen in seiner Struktur veränderten Material mit Schrumpf- oder Zugrissbildungen gelten völlig andere hydraulische Gesetzmäßigkeiten.

5.5 Beständigkeitsrisiken

In der Bau-, Betriebs- und Nachsorgephase können zahlreiche Alterungseffekte aus chemischen, biologischen und physikalischen Einwirkungen auftreten, die einzeln oder in Kombination die Langzeitfunktion beeinträchtigen können. Einen vereinfachten Überblick geben Tabelle 6 und Tabelle 7 in Kapitel 4.

6 Diskussion der Einwirkungen auf ein Dichtungssystem und deren Risiken

6.1 Chemische Einwirkungen

6.1.1 Deponiesickerwasser

6.1.1.1 Vorbemerkungen

Die Beaufschlagung mit Deponie-Sickerwasser hat Relevanz ausschließlich für Basisabdichtungen. Art und Zusammensetzung des Wassers und auch ihre zeitliche Veränderung können projektspezifisch sehr unterschiedlich sein. Zusätzlich ist in Übereinstimmung mit Einschätzungen von *Kohler* [49], *Obernosterer* [57], [58] und *Wienberg* [74] festzustellen, dass sich Art und Umfang spezifischer und unspezifischer Reaktionen aufgrund der Vielfalt an Einflussparametern, Synergieeffekten nur sehr eingeschränkt voraussagen lassen. Deshalb wird auch eine Übertragung von Versuchsergebnissen auf die Praxis immer nur unter Vorbehalt möglich sein.

6.1.1.2 Art der Einwirkung

Bei einer Einzeldichtung (DK I) ist die Einwirkung von chemischen Inhaltsstoffen im Sickerwasser in den Phasen II bis IIIb (siehe Kapitel 4.1) direkt. In den Kombinationsdichtungen der DK II und DK III-Deponien ist ein direkter Sickerwasserkontakt erst nach Ausfall oder Schaden der Kunststoffdichtungsbahn (Phase IIIb) als Konvektionssperre gegeben. In dem davor liegenden Zeitintervall (Phase II und IIIa) wirken Kunststoffdichtungsbahn und mineralische Dichtung nach dem in Kapitel 5.2 beschriebenen chemisch-physikalischen Wirkungsprinzip als Kombi-System zusammen. Wegen der quasi Null-Konvektion und Null-Diffusion der Kunststoffdichtungsbahn mit anorganischen Schadstoffen verbleibt in der mineralischen Dichtung lediglich ein diffuser Schadstofftransport organischer Schadstoffe.

6.1.1.3 Intensität der Einwirkungen

Bei der direkten Beaufschlagung mit Sickerwasser ist die Intensität der Beaufschlagung deponiespezifisch sehr unterschiedlich. Als Orientierungswerte werden in Tabelle 8 die Sickerwasserbelastungen nach *Ehrig* [31] angegeben. Die maximalen Konzentrationen wirken nicht gleichzeitig bei allen Parametern. Erhöhte Temperaturen sind ebenfalls von Einfluss und können Reaktionen verstärken oder verzögern.

Tabelle 8 Sickerwasserbelastungen
nach [31]

Parameter	Einheit	TA-Si DK I (Typ I)	TA-Si DK II (Typ II)	TA-A DK III (Typ III)	Übergangsdeponien		
					ohne Vorbehandlung		mit mech.-biol. Vorbehandlung
					bis 10 a	nach 10 a	
pH	-	7 - 9	7 - 11	6 - 11(12)	5 - 8,5	7 - 9	7 - 9
BSB 5	mg/	< 100	< 1000	< 1000	< 10000	< 1000	< 1000
CSB		< 500	< 2500	< 5000	< 20000	< 3000	< 3000
Phenol		< 1	< 40	< 60	< 40	< 40	< 40
Kohlenwas- serstoffe		< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
AOX		< 0,1	< 1	< 5	< 3	< 3	< 1
LCKW		< 0,1	< 0,5	< 5	< 0,6	< 0,6	< 0,2
PCB		< 2	< 10	< 20	< 10	< 10	< 10
BTX	µg/l			< 100			
TCDD		(TE(ng/l))	< 1	< 5	< 10	< 5	< 5
SO ₄	mg/l	< 3000	< 10000	< 15000	< 2000	< 500	< 2000
Cl		< 5000	< 20000	< 40000	< 3000	< 3000	< 3000
NH ₄	mgN/l	< 100	< 1000	< 3000	< 1500	< 1500	< 1000
NO ₃ +NO ₂		< 100	< 1000	< 1000	< 50	< 50	< 1000
Ca	mg/l	< 3000	< 3000	< 3000	< 1000	< 200	< 500
Na		< 3000	< 10000	< 10000	< 1000	< 1000	< 1000
K		< 3000	< 10000	< 10000	< 1000	< 1000	< 1000
Fe		< 500	< 1000	< 2000	< 1000	< 50	< 500
Zn		< 10	< 10	< 50	< 100	< 10	< 10
As		< 100	< 1000	< 1000	< 500	< 500	< 500
Pb	µg/l	< 50	< 1000	< 1000	< 500	< 500	< 500
Cd		< 10	< 500	< 1000	< 100	< 100	< 100
Cr		< 50	< 1000	< 1000	< 500	< 500	< 500
Cu		< 50	< 1000	< 1000	< 500	< 500	< 500
Ni		< 50	< 1000	< 3000	< 500	< 500	< 500
Hg		< 5	< 100	< 50	< 10	< 10	< 10

6.1.1.4 Mögliche Auswirkungen einer Sickerwasser-Beaufschlagung

Die Interaktion zwischen tonmineralischer Dichtung und Sickerwasser kann Auswirkungen auf folgende Materialeigenschaften einzeln - oder in Kombination verstärkt - haben:

- Mechanische Widerstandsfähigkeit (Bruch- und Verformungsverhalten),
- Plastizität,
- Schrumpfverhalten,
- Wasserbindevermögen,
- Durchlässigkeitsverhalten.

Die Änderung der Materialeigenschaften kann dabei auf folgende Einzelprozesse zurückgeführt werden:

- Auflösung nicht tonmineralischer Beimengungen, wie z.B.:
 - Karbonate,
 - organische Substanzen,
 - Fe-Oxide und -hydroxide,
 - Sulfate, Sulfite.
- Austauschreaktionen der Tonminerale durch Umbelegung (z.B. Natrium→Calcium),
- Langfristige Illitisierung der Smectite durch Fixierung der Kalium-Ionen mit in der Folge möglichen Strukturveränderungen,
- Anorganische Austauschreaktionen und Ausfällungs- und Zementierungsprozesse,
- Ein- und/oder Anlagerung organischer Substanzen oder hydrophob wirkender Moleküle.

Betroffene bodenphysikalische Kenngrößen können sein:

- Veränderungen der Fließgrenze w_L , der Plastizitätszahl I_P und der Wasseraufnahme w_A nach *ENSLIN*,
- Beeinflussung der Schrumpfgrenze w_S ,
- Steifigkeit, ausgedrückt z.B. durch die Konsistenzzahl I_C , 1-axiale Druckfestigkeit und Flügelscherfestigkeit τ_{FS} sowie Zugfestigkeit und Bruchdehnung.

6.1.1.5 Einfluss der Versuchsbedingungen

Veränderungen im bodenphysikalischen Verhalten sind abhängig von der Versuchsdurchführung und der Konzentration der Prüfmedien. Der Batch-Versuch (Schüttel-Versuch) z.B. ist im Vergleich zur Langzeitdurchströmung (Perkolations-Versuch) die viel aggressivere Beanspruchung (Zeitraffereffekt) und für spezifische Reaktionen (z.B. Lösung von Beimengungen, Illitisierung quellfähiger Tonminerale) geeignet. Für die Untersuchung unspezifischer Interaktionen liefert der Durchströmungsversuch über lange Zeiträume (Jahre) die bessere Annäherung an reale Praxisbedingungen. Diese Prüfzeit steht in der Regel nicht zur Verfügung.

6.1.1.6 Praxisbeispiele

Erste systematische Untersuchungen zu den möglichen chemischen Reaktionen wurden 1987 am Niederrhein (Geldern-Pont) in einem Ton-Versuchsfeld ($F = 1000 \text{ m}^2$) nach 8 Jahren Sickerwasser-Beaufschlagung auf einer Hausmülldeponie (DK II) durchgeführt. Als wesentliche Ergebnisse sind damals ermittelt worden [18], [20]:

- Mineralogisch-chemische Befunde
 - Das obere Drittel der 60 cm starken Tondichtung (TA) mit einem aktiven Tonmineralanteil $> 10 \%$ zeigt signifikante Austausch-Reaktionen und Einlagerung von Ausfällungsprodukten sowie Braunverfärbungen im Porenraum.
 - Konvektive und diffusive Vorgänge führen in der oberen Zone zu deutlichen Konzentrationszunahmen (Abbildung 3) ausgewählter Kationen.

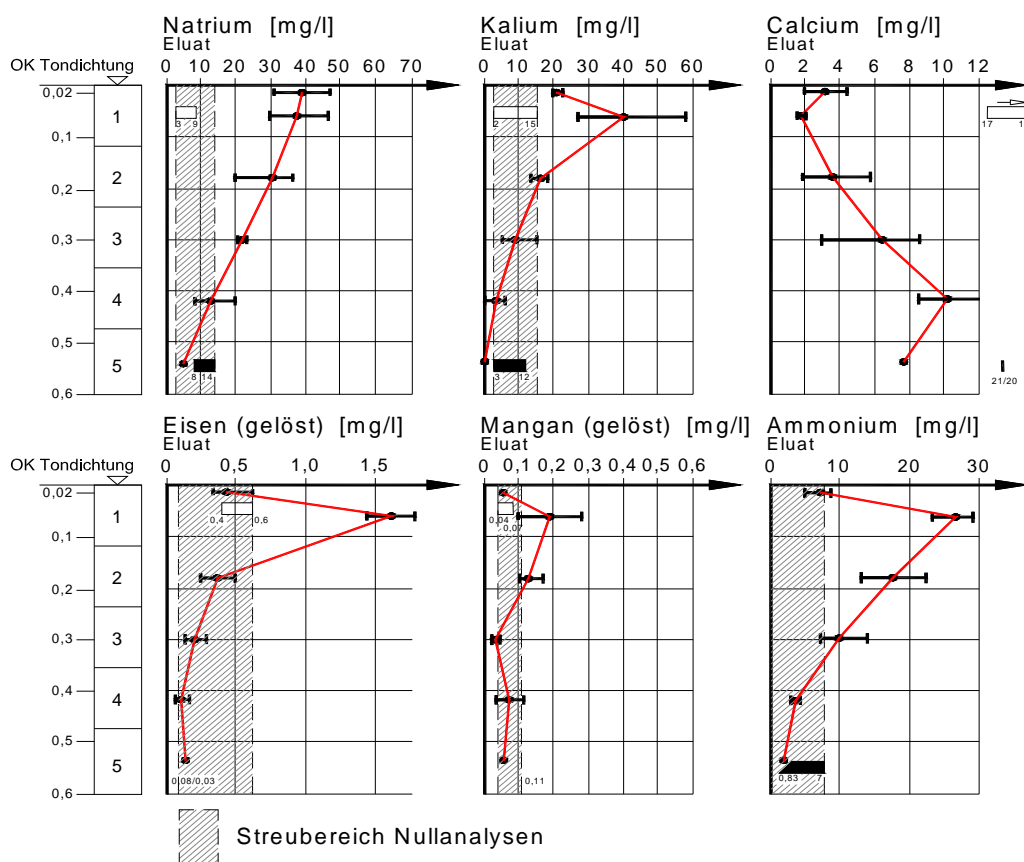


Abbildung 3 Kationen, Tonproben - Eluat
Daten der Siedlungsabfalldéponie Geldern-Pont

- Bodenphysikalische Ergebnisse
 - Keine signifikanten Veränderungen des Wassergehaltes im Vergleich zur Null-Messung über die gesamte Schichtmächtigkeit.

- Konsistenzzahlen I_C , q_u -Werte und τ_{FS} -Werte im oberen Bereich deutlich erhöht, bei signifikanter Abnahme der Fließgrenze w_L und der Plastizität I_p .
- Die mineralogischen und hydrochemischen Einwirkungen führen zu dem erstmals dokumentierten Phänomen der "Verfestigung" bzw. "Versprödung" bereits nach 8 Jahren SiWa-Angriff. Hiervon ausgenommen waren lediglich die oberen ca. 2 cm.
- Eine nachteilige Veränderung des Einbau-k-Wertes wurde weder in Labor- noch in Geländeversuchen (Standrohr-Versickerungsmethode) ermittelt.

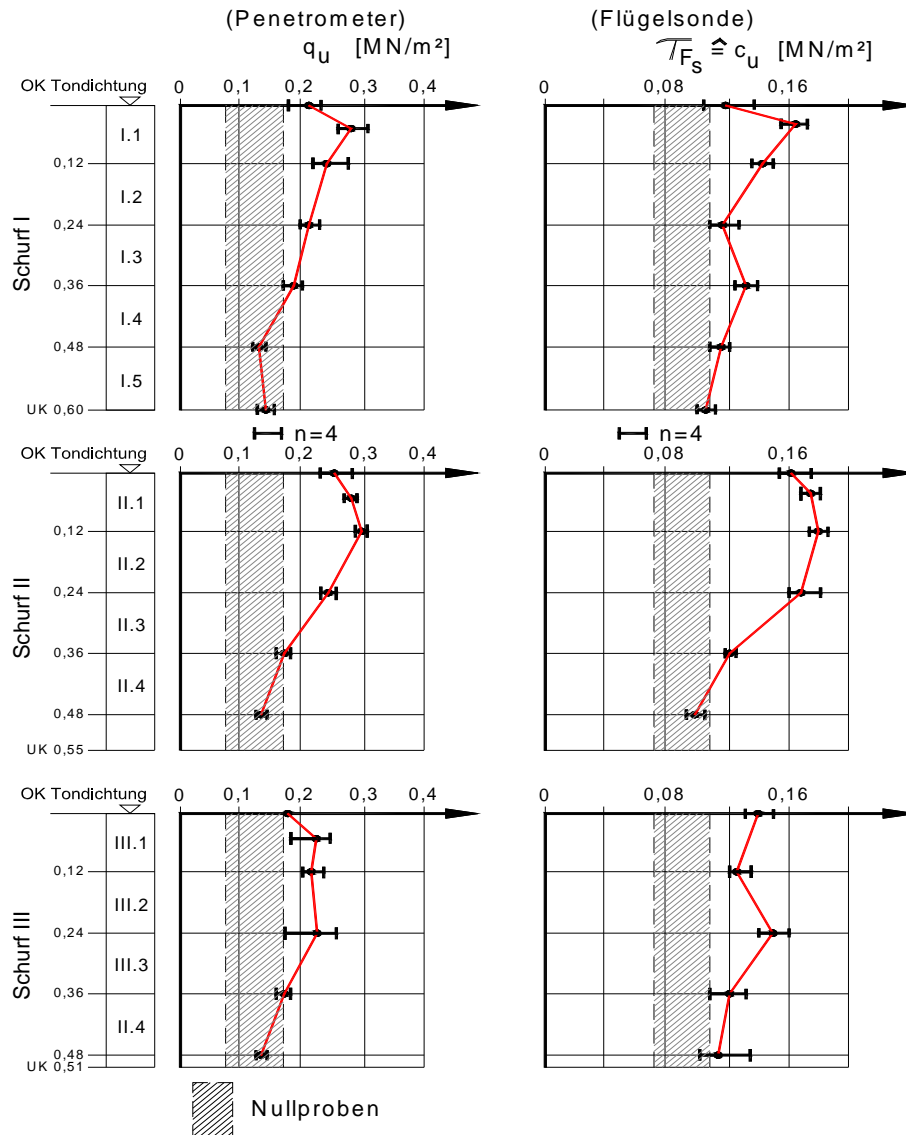


Abbildung 4 Verteilung der 1-axialen Druckfestigkeit und der undrained Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe
Daten der Tondichtung der Siedlungsabfalldéponie Geldern-Pont

Untersuchungen von *Obernosterer* [57], [58] in einem Verbundvorhaben des Umweltbundesamtes und der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)* zur Langzeitbeständigkeit tonmineralischer Deponieabdichtungen mit reaktionsfähigen Beimengungen bei Sickerwasser-Angriff kommen zu folgendem Ergebnis:

- Austauschreaktion und Illitisierungsprozesse bei den Tonmineralen finden nachweislich statt, gleiches gilt für:
- anorganische Austauschreaktionen sowie Ein- und Anlagerung organischer Substanzen,
- je höher die Konzentration der Prüflüssigkeit, desto höher der Einfluss auf die Fließgrenze und die Plastizität,
- Auflösung der Bindemittel (Porezemente) bzw. reaktionsfähigen Beimengungen erhöht die Fließgrenze und Plastizität der Tonproben mit überwiegend niedrigem Anteil aktiver Tonminerale im Ausgangsmaterial,
- k-Wert-Änderungen wurden über eine Prüfzeit von 18 Monaten nicht beobachtet,
- Ausfällungen in der Porenlösung (Salze) infolge Wassergehaltsreduktion erhöhen die Schrumpfgrenze,
- organische Komponenten mit hohem Reifegrad im mineralischen Dichtungsmaterial wirken sich bei Sickerwasserkontakt nicht negativ aus,
- die Auflösung von reaktionsfähigen Beimengungen ist abhängig von:
 - Beschaffenheit der Prüflösung,
 - pH-Wert,
 - Elektrolytgehalt.
- Lösung von Eisenoxiden und -hydroxiden bevorzugt bei stark organischen Sickerwässern,
- beschleunigend wirken niedriger pH-Wert, hoher Elektrolytgehalt sowie mikrobielle Prozesse,
- Eisenhydroxide sind beständiger als Karbonate,
- die festgestellten Materialveränderungen sind im Batch-Versuch deutlich stärker als im Durchströmungsversuch.

Die Untersuchungen kommen weiter zu folgenden wichtigen Vorschlägen für die Praxis:

- eine Limitierung des Gipsanteils auf 5 % in der Gesamtprobe ist angemessen und begründet,
- Anhebung des max. zulässigen Carbonat-Gehaltes auf mindestens 20-30 Massen-%,
- Begrenzung des Organik-Gehaltes auf 5 %, wobei dessen Einhaltung auf der Basis einer TOC-Messung unter Berücksichtigung eines Faktors 2 zu prüfen ist (Kohlenstoffanteil = 50 % der Gesamtmasse).

Untersuchungen von *Schröder* [67], [68] beschäftigen sich mit der Wechselwirkung von künstlich eingestellten und natürlichen Deponie-Sickerwässern mit tonmineralischen Phasen.

Vier in Nordrhein-Westfalen großtechnisch eingesetzte Tone (TA) mit weitgehender Illit-Kaolinit-Dominanz (12-21 mVal/100 g) wurden in statischen (Durchströmung) und dynamischen

schen Prüfsystemen (Batch-Versuche) sowie in quasi-statischen Diffusionsversuchen geprüft. Als wesentliche Ergebnisse sind zu nennen:

- Anorganische Prüfflüssigkeiten führen zwar zu Austauschreaktion, nicht aber zu signifikanten Beeinflussungen der bodenphysikalischen Eigenschaften.
- Organische Substanzen in den Prüfmedien führen dagegen zu einer deutlichen Reduktion der Fließgrenze w_L , der Plastizität I_P und des w_A -Wertes.
- Am unempfindlichsten auf organische Sickerwasser-Komponenten reagiert ein inaktiver Ton mit hohem gereiftem Organik-Gehalt (~ 12 %) [39].
- Die k-Werte werden bei allen vier untersuchten Tönen trotz partieller Veränderungen in den klassifizierenden Kennwerten von dem Sickerwasser bei Einwirkungszeiten von maximal 13 Monaten nicht nachteilig verändert.
- Die Schwermetalladsorption ist für alle Tone nachweisbar. Organische Substanz adsorbiert dabei höhere Schwermetallanteile als quellfähige Tonminerale.
- Die auf die Dicke der mineralischen Dichtung hochgerechnete Adsorptionsfähigkeit ist in jedem Fall aber verschwindend gering im Vergleich zu dem Schadstoffangebot in einer Deponie und wird damit in Bezug auf die Gesamtsicherheit einer Deponie völlig überbewertet. Für die Schadstoffadsorption spielt die gemäß EU-Richtlinie und *DepV* aufgewertete geologische Barriere eine wesentlich größere Rolle.

6.1.1.7 Schlussfolgerungen, Empfehlungen

Aus den dargestellten Zusammenhängen und Praxisbeispielen wird deutlich, dass trotz möglicher Veränderungen chemischer und mineralogischer Art bei Sickerwasser-Angriff nach der derzeitigen Beurteilungsgrundlage die abdichtende Wirkung der mineralischen Komponente nicht beeinträchtigt wird. Bei einer Deponie der Klasse I spielen wegen der ohnehin relativ niedrigen zulässigen chemischen Belastung, bei DK II und DK III-Deponien wegen des erst später möglichen Zeitpunktes des Angriffs (Phase IIIb nach Ausfall der Kunststoffdichtungsbahn), mögliche Versprödungseffekte bzw. Festigkeitszunahmen durch chemisch-mineralogische Prozesse keine Rolle, weil dem System Basisdichtung zu diesem späten Zeitpunkt keine Verformungen (Setzungen, Setzungsunterschiede) mehr aufgeprägt werden.

Entgegen der bisherigen Auffassung, die im Wesentlichen noch von dem theoretischen Wirkungsprinzip der Kombidichtung geprägt ist und wonach nur bei entsprechender tonmineralogischer Zusammensetzung (quellfähige Tonminerale in der Feinstkornfraktion) ein Adsorptionsvermögen und eine Begrenzung des diffusiven Schadstofftransportes unterstellt wird, verhalten sich tonmineralische Dichtungen mit einer Dominanz nicht quellfähiger Tonminerale (z.B. Illite, Kaolonite) in der Regel chemisch wesentlich stabiler.

Da, wie sich leicht zeigen lässt, in einer Gesamt-Schadstoffbilanz einer Deponie das nutzbare Adsorptionspotenzial einer in der Dicke begrenzten Dichtungslage ohnehin nur sehr eingeschränkt ist, sollte man diesen scheinbaren Vorteil zukünftig aufgeben zugunsten einer höheren Schadstoffresistenz einer Dichtung, die eher bei einer Dominanz nicht aktiver Tonminerale gegeben ist. Damit ist die bisherige Forderung nach einem Mindestfeinkorngehalt von 20 % und davon mindestens die Hälfte aus quellfähigen, adsorptionsfähigen Tonmineralen fachlich nicht mehr zu begründen und sollte deshalb zukünftig entfallen. Zudem ist an-

zumerken, dass die meisten technisch nutzbaren Tonvorkommen - dies gilt insbesondere für die niederrheinische Bucht - diesen "Qualitäts"-Anspruch ohnehin nicht erfüllen.

6.1.2 Aggressive flüssige Medien

Diese Einwirkungen gelten nur für Basisabdichtungen.

Besondere Einwirkungen aggressiver flüssiger Medien entfallen nach Tabelle 6 für DK I-Deponien, gleiches gilt für DK II- und DK III-Deponien, bei denen wegen der geforderten Konvektionssperre in den Phasen II und IIIa (Anordnung einer Kunststoffdichtungsbahn über der mineralischen Dichtung) kein Kontakt mit aggressiven flüssigen Medien möglich ist.

6.1.3 Infiltrierendes Niederschlagswasser

6.1.3.1 Einwirkungspotenzial

Die chemischen Reaktionen von infiltrierendem Niederschlagswasser sind wegen der in der Regel allenfalls schwachen Mineralisierung für natürliche tonmineralische Materialien völlig unkritisch und treten weit hinter die Belastung aus einem Sickerwasser an der Basis zurück. Eine andere Beurteilung ist u. U. bei mineralischen Dichtungsstoffen vorzunehmen, bei denen die Dichtwirkung ausschließlich durch Zugabe eines aktiven oder aktivierten, nach Wasserzugabe im Porenraum aufgequollenen Tonmehls (z.B. Bentonit) erzielt wird. Die Beständigkeit der dichtenden Eigenschaften des Bentonits kann sich unter dem Einfluss des Porenwassers bei verschiedenen Härten, pH-Werten zwischen 4-11 und ggf. auch oxidierenden und reduzierenden Bedingungen nachteilig verändern, im Wesentlichen durch irreversible Schrumpfprozesse. Dieser Schrumpfprozess ist aber nicht zu verwechseln mit der Schrumpfung infolge Wasserverlusten durch Trocknung nach Kapitel 6.3, die sich auf die Gesamtprobe bezieht. Bei einem mit Bentonit vergüteten Mischboden bleibt die mineralische Matrix bei einem Kationenaustausch weitgehend stabil, lediglich die Schichtgitterabstände der Porenfüllung (Tonminerale), ggf. verstärkt durch Wassergehaltsreduktionen, reduzieren sich bei gleichzeitiger Zunahme der Durchlässigkeit. Bei von vornherein größerer mengenmäßiger Zumischung von Calcium-Bentonit kann diese nachteilige Austauschreaktion vermieden werden.

6.1.3.2 Nachweisgrundlagen

In Analogie zu den ‚*Bentonitmatten-Grundsätzen*‘ der LAGA [89] sind mögliche Veränderungen der Kationenbelegung und ihre Auswirkungen auf die Dichtungseigenschaften zu überprüfen. Als Nachweisgrundlage für mögliche Veränderungen der Kationenbelegung können folgende Verfahren Verwendung finden:

- Quellvermögen nach *AT TM D 5890*,
- Wasseraufnahme nach *ENSLIN/NEFF (DIN 18132)*,
- Triaxiale k-Wert-Versuche an verdichteten Prüfkörpern der Ausgangsmischung und Beaufschlagung mit einer speziell eingestellten Prüflösung als Durchströmungsmedium (z.B. NaCl- oder KCl-Lösung bestimmter Konzentration). In Anleitung an die Vorgehensweise bei „Bentonitmatten“ ist von einer Salzbelastung der Bodenlösung des Rekultivierungsbodens und der Entwässerungsschicht von 0,005 ml/l ($\hat{=}$ ca. 1.000 $\mu\text{S/cm}$ in einer Calciumchloridlösung) auszugehen.

6.2 Biologische Einwirkungen

6.2.1 Mikroorganismen und Pilze

Natürliche tonmineralische Dichtungen und kornabgestufte gemischt- oder grobkörnige Dichtungen mit oder ohne mineralischem Additivzusatz sind gegenüber Mikroorganismen und Pilzen absolut unempfindlich. Dies gilt sowohl an der Basis als auch an der Oberfläche. Ein entsprechender Nachweis ist deshalb entbehrlich.

6.2.2 Pflanzen

6.2.2.1 Beschreibung des Phänomens

Die Durchwurzelung spielt ausschließlich für die Oberflächenabdichtung eine Rolle, wenn sie bis in die Dichtungsschicht reicht. Die Abnahme der Leistungsfähigkeit (Dichtigkeit) kann durch folgende Effekte bewirkt werden [113]:

- Erzeugung von bevorzugten Wasserleitbahnen, vor allem beim Absterben von Wurzeln,
- Entzug von Wasser und damit Erzeugung hoher Wasserspannungen (siehe auch Kapitel 6.3) und Zugrissbildung im Dichtungsmaterial.

Die Durchwurzelungstiefe hängt von der Pflanzenart sowie von den örtlichen Gegebenheiten ab, wie: geomechanische Bodenbeschaffenheit (Kornverteilung, Lagerungsdichte) und Bodenwasserangebot. Die Durchwurzelungstiefe und Durchwurzelungsintensität (Zahl der Wurzeln/dm²) kann dabei stark variieren. Generell nimmt die Durchwurzelungsintensität mit der Tiefe ab. Durchwurzelungstiefen typischer Pflanzen auf Deponieoberflächen sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Bei einer Tiefe von 1,50-1,80 m ist das Wurzelwachstum nur noch schwach ausgeprägt, kann aber - wie Baumbewuchs - aber auch deutlich tiefer reichen.

Tabelle 9 Durchwurzelungstiefen typischer Deponiepflanzen
nach [113]

Pflanzenart		Wurzeltiefe
Geruchlose Kamille	<i>Matricaria perforata</i>	0,70 m
Roter Schwingel	<i>Festuca rubra</i>	0,80 m
Ackerkratzdistel	<i>Cirsium arvense</i>	1,50 - 3,00 m
Glatthafer	<i>Arrhenatherum elatius</i>	1,10 - 2,00 m
Krauser Ampfer	<i>Rumex crispus</i>	1,30 - 3,20 m
Stumpfblätriger Ampfer	<i>Rumex obtusifolius</i>	1,50 - 3,00 m
Pfeilkresse	<i>Cardaria draba</i>	1,20 m
Gemeiner Löwenzahn	<i>Taraxacum officinale</i>	0,70 - 2,00 m
Mehlige Königskerze	<i>Verbascum lychnitis</i>	1,50 m

6.2.2.2 Nachweisgrundlagen

Gesonderte Nachweisverfahren zum Problempunkt Wurzelwachstum existieren nicht und sind auch in Zukunft nicht zu erwarten.

6.2.2.3 Mögliche Gegenmaßnahmen

Z. Zt. werden verschiedene Maßnahmen diskutiert, die Einwirkung von Pflanzen durch Wurzelbildung auf die mineralische Dichtungskomponente zu unterbinden. Die wichtigsten sind:

- fachgerechte Aussaat und häufige Mahd von Gräsern zumindest in den ersten Jahren zwecks Förderung eines dichten Grasbestandes und damit Zurückdrängung der Ansiedlung tief wurzelnder Kräuter,
- Maßnahmen zur Begrenzung des Tiefenwachstums von Baumwurzeln, z.B. durch "Auf den Stock setzen",
- Optimierung des Wasserhaushaltes durch gezielte Materialauswahl und gezielten Materialeinbau, festzumachen an den Begriffen hohe nutzbare Feldkapazität (nFK) und Mindestluftporengehalte n_a (siehe Tabelle 10),
- Schaffung einer guten Nährstoffversorgung und damit guten pflanzenphysiologischen Voraussetzungen,
- Nutzung der Dränschicht als kapillarbrechende Schicht,
- Nutzung der Kunststoffdichtungsbahn bei DK II und DK III als Wurzelsperre. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass langfristig nach Ausfall der KDB die Schutzwirkung für die MD verloren geht.

Tabelle 10 Tiefenabhängige Schutzwirkungen der Rekultivierungsschicht nach [113]

Tiefe	Merkmale	Schutzfunktion für das Dichtungssystem
30 cm	Lebensbedingungen nur für untypische Pflanzengesellschaften (z.B. Rasen)	keine
100 cm	<u>pflanzen-physiologische Mindestanforderungen</u> bei hoher Feldkapazität und Nährstoffversorgung ausreichend erfüllt	Durchwurzelung und Austrocknung nur unzureichend begrenzt
130 cm	bei hoher bis sehr hoher Feldkapazität und guter Nährstoffversorgung <u>gute pflanzen-physiologische Voraussetzungen</u>	geringe Austrocknungsgefahr bei kapillarbrechender Schicht und geeigneter Witterung; schwache Durchwurzelung ausreichender Schutz bei gering empfindlichen Dichtungskomponenten und in Verbindung mit technischen Maßnahmen
150 - 160 cm	bei sehr hoher Feldkapazität und guter Nährstoffversorgung optimale <u>pflanzen-physiologische Voraussetzungen</u>	keine Austrocknungsgefahr bei geeigneter Witterung und kapillarbrechender Schicht; sehr schwache Durchwurzelung ausreichender Schutz auch bei empfindlichen Dichtungskomponenten in Verbindung mit technischen Maßnahmen
180 cm	bei hoher Feldkapazität und guter Nährstoffversorgung <u>optimale pflanzen-physiologische Voraussetzungen</u>	keine Austrocknungsgefahr bei kapillarbrechender Schicht; keine Durchwurzelung
200 cm	nur noch tiefwurzelnde Pflanzen (außer Bäumen)	geringe Austrocknungsgefahr auch ohne kapillarbrechende Schicht; keine Durchwurzelung

6.2.2.4 Bewertung möglicher Maßnahmen

Bei der Bewertung ist ein Aspekt voranzustellen, der bei den Überlegungen zum Schutz gegen Durchwurzelung bisher nicht ausreichend berücksichtigt wird: die Langzeitsicherheit. Diese ist unter vegetations- und bodenkundlichen Gesichtspunkten überhaupt nicht sicherzustellen. Bei den in Kapitel 3.2 diskutierten Funktionszeiten für Systemkomponenten ist weder die zeitliche Entwicklung des Systems Boden und des Wurzelraums noch eine langfristige Abschätzung des Wasserhaushaltes möglich. Die oben beschriebenen Möglichkeiten sind zwar grundsätzlich als Einzelmaßnahmen oder auch in Kombination theoretisch denkbar, sie versagen aber in der praktischen "Deponiewirklichkeit". Für Deponiebetreiber ist der Zeitmaßstab in der Regel sehr viel begrenzter.

Eine Schädigung der mineralischen Dichtung durch Wurzelwachstum ist nur durch eine ausreichend mächtige Rekultivierungsschicht zu verhindern, wobei alle günstig wirkenden Maßnahmen wie: gezielte Ansaat, häufige Mahd, auf den Stock setzen von Bäumen, Optimierung von pflanzen-physiologischen Voraussetzungen, möglichst lockerer Einbau einer im nFK-Wert optimierten Rekultivierungsschicht eher unberücksichtigt bleiben sollten. Die natürliche, langfristig unkontrollierbare Sukzession der Pflanzen und standortspezifische Entwicklung des Systems Boden und Wurzelraum lassen sich nicht steuern und unterbinden, weshalb bei der Wahl der Dicke der Rekultivierungsschicht eher mit worst-case-Ansätzen gearbeitet werden sollte. Daraus ließen sich für ein durchschnittliches kontinentales Klima und ca. 800 mm Jahresniederschlag Dicken von mindestens 1,50-2,00 m ableiten.

Der Schutz der mineralischen Dichtung durch eine KDB kann als technische Maßnahme befristet zwar sehr wirksam sein, bei einer sehr langfristigen Betrachtung muss aber mit dem Ausfall der KDB als Wurzelsperre und mit einer - dann zwar zeitverzögerten - Einwirkung auf die mineralische "Ewigkeits"-Komponente (siehe auch Kapitel 5.2) gerechnet werden.

Die in der *DepV* (siehe auch Kapitel 1.4) enthaltenen Vorgaben

- Mindestdicke 1 m,
- lockerer Einbau,
- nFK = 140 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Rekultivierungsschicht,

erscheinen nach o. a. Ausführungen wenig geeignet, den langfristigen oder sogar den dauerhaften Durchwurzelungsschutz für die mineralische Dichtungskomponente sicherzustellen.

6.2.3 Tiere

Grundsätzlich ist auf Deponien mit dem Auftreten von Wühltieren zu rechnen (Feldmäuse, Wanderratten, Kaninchen, Maulwürfe). Die Grabtiefe kann z.B. bei Kaninchen mehrere Meter betragen und würde somit potenziell auch die Beständigkeit der mineralischen Oberflächenabdichtung gefährden. Erfahrungen aus dem Deichbau zeigen allerdings, dass mineralische Dichtungen von den Nagetieren in der Regel nicht durchdrungen werden, weil der hohe Verdichtungsgrad die Wühltiere abschreckt [91].

6.3 Physikalische Einwirkungen

6.3.1 Temperatur aus dem Deponiekörper

6.3.1.1 Beschreibung des Phänomens

Bei Deponiekörpern, in denen Abbauprozesse oder chemische Prozesse (z.B. Aschekörper mit latent hydraulischen Eigenschaften) zu einer Wärmeentwicklung führen, ist immer eine Gefährdung für die Dichtung gegeben, dies gilt sowohl für das Oberflächen- wie auch für das Basisabdichtungssystem. Durch den temperaturinduzierten Feuchtefluss zur jeweils kälteren Seite (siehe hierzu auch Kapitel 6.3.3.1) können Wassergehaltsänderungen auftreten, die die mechanische Widerstandsfähigkeit wiederum verändern kann. Überlagert werden diese Vorgänge - dies gilt ausschließlich für die Oberflächenabdichtung - durch jahreszeitliche Temperaturwechsel an der Oberseite der mineralischen Dichtung in Abhängigkeit von der ausgleichenden Dämmfunktion der Drän- und Rekultivierungsschicht und durch druck- und temperaturinduzierte Wasserdampftransporte in der Entwässerungsschicht und Auflager- bzw. Gasdränschicht. Bei einem nach oben gerichteten Temperaturgradienten ist für die Oberflächenabdichtung - ob in der Form als Einzel- oder Kombinations- bzw. Verbunddichtung - immer die Gefahr einer Feuchteveränderung gegeben, bei einer Kombidichtung dann, wenn wegen der beschränkten Auflast kein durchgängiger Pressverbund sichergestellt wird.

6.3.1.2 Möglichkeit oder Unmöglichkeit der Vermeidung temperaturinduzierter Wassergehaltsänderungen

Da nachträgliche Wassergehaltsänderungen bzw. dadurch verursachte Saugspannungsänderungen und Feuchte Transporte in der Regel temperaturinduziert sind und einen komplexen Zusammenhang bilden, wird auf die zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen sowie Empfehlungen in Kapitel 6.3.3.7 verwiesen.

6.3.2 Witterung

6.3.2.1 Beschreibung der Phänomene

Die Witterungseinflüsse beziehen sich bei mineralischen Dichtungskomponenten auf Niederschlag, Wind, Temperatur und sind in der Regel beschränkt auf einzelne Zustandsphasen nach Tabelle 6 und Tabelle 7.

Als veränderlich angreifende Einwirkungen sind zu berücksichtigen:

- Einwirkungen im Bauzustand oder bei freiliegenden, fertigen Dichtungsabschnitten (Phasen 0, I, II),
- periodische Frosteinwirkungen der freiliegenden oder gering überschütteten tonmineralischen Dichtung.

6.3.2.2 Art der Einwirkung

Mögliche negative Einwirkungen von Niederschlag, Wind und Temperaturen im Bauzustand auf tonmineralische Materialien müssen und können durch baubetriebliche und planerische Konzepte unterbunden werden. Gleiches gilt für bereits fertiggestellte, aber noch nicht über-

schüttete Teilflächen. Eine generelle Einordnung nach dem Gefährdungsgrad mineralischer Materialien gegenüber solchen Einwirkungen ist nicht möglich, weil die einzelnen Reaktionen auf solche Einwirkungen unterschiedlich sein können.

Ein hoch plastischer Ton reagiert im Vergleich zu einem Schluff aufgrund der deutliche höheren Plastizität unempfindlicher auf Regen und Frost, dagegen deutlich empfindlicher auf Sonneneinstrahlung und Wind bei und nach der Verarbeitung durch die induzierten Austrocknungs- und Schrumpfeffekte (siehe auch Kapitel 6.3).

Ein gesondertes Problem stellt die Frosteinwirkung freiliegender oder nicht ausreichend überdeckter Dichtungen in Zwischenzuständen dar. Während in Hochdeponien abhängig von einer gut abgestimmten Bau- und Betriebsplanung, durch den rechtzeitigen Einbau der Filterschicht und des Rekultivierungsbodens an der Oberfläche bzw. einer ersten Müllschicht an der Basis die Frostproblematik in der Regel ohne Schutzmaßnahmen beherrscht werden kann, kann sich bei Grubendeponien in Abhängigkeit von ihrer Böschungsneigung für den Frostschutz ein ernsthaftes und rechtzeitig zu berücksichtigendes Problem ergeben [24]. Eine Bewertung der Frostgefährdung kann dann nur auf der Grundlage einer statistischen Auswertung regionaler Temperaturdaten für einen konkreten Deponiestandort erfolgen und der Festlegung eines maßgebenden Frostindex FI ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), dem das Dichtungselement standhalten muss.

Im Zustand der planmäßigen Überdeckung einer Oberflächenabdichtung ist bei den zu erwartenden Systemabmessungen für die Rekultivierungsschicht einschließlich Dränschicht ein Temperaturangriff auszuschließen, nicht jedoch ein zeitweise deutlicher Temperaturabfall in der unteren Zone der Überdeckung und in der Folge ein aufwärts gerichteter Temperaturgradient (siehe auch Kapitel 6.3.3.1).

6.3.3 Auswirkungen einer Wassergehaltsänderung in einer mineralischen Dichtung

6.3.3.1 Beschreibung des Phänomens

Die physikalische Ursache von Trockenrissen ist die Volumenabnahme mit der Abgabe von Porenwasser bei ausgeprägten Matrixspannungen oder infolge thermischer Einwirkungen (s. auch Kapitel 5.4).

Als **Hauptprobleme** und **Risiken** für die Beständigkeitsbeurteilung können derzeit angeführt werden:

- Tonmineralische Oberflächenabdichtungen im Regelsystem für DK I
 - konvektiver Wasserdampftransport und Durchwurzelung können zur Austrocknung von mineralischen Dichtungen führen,
 - Austrocknung kann zu nicht reversiblen Trockenrissen führen und zur Unwirksamkeit der mineralischen Dichtung,
 - nicht ausreichende Erkenntnisse über das Schrumpf- und Quellverhalten, die Zug- und Scherfestigkeit feinkörniger Böden sowie über der bodenstrukturell bedingten Beziehungen zwischen Wassergehalt oder Sättigungsgrad und der Wasserspannung.

- Kombinationsabdichtung im Regelsystem DK II und DK III (OAD)
 - im eingebauten, funktionsfähigen Zustand liegt jedes Dichtungsmaterial in einem spezifischen Wassergehaltsbereich, dem eine bestimmte Matrixspannung zuzuordnen ist,
 - jede Reduktion des Wassergehalts in der Nutzungsphase einer mineralischen Dichtung führt zu Volumenänderungen (Schrumpfen),
 - Trockenrisse entstehen in einer mineralischen Dichtung immer dann, wenn ein kritischer, materialspezifischer Wassergehalt unter- und die Zugfestigkeit des Materials überschritten werden,
 - eine potenzielle Rissgefährdung liegt dann vor, wenn zu irgendeinem Zeitpunkt der Einbauwassergehalt unterschritten wird.
 - Bei mineralischen Dichtungsmaterialien ist die Rissbildung konsequente Folge der Volumenreduktion und tritt je nach Einbauwassergehalt bereits bei wesentlich geringeren Saugspannungen auf als bei den Maximalwerten im Bereich der labormäßig ermittelten Schrumpfgrenze.
 - Ursache für die Wassergehaltsänderungen ist ein abwärts gerichteter, anisothermer Temperaturgradient (Deponieoberfläche wärmer als Deponiekörper oder bezogen auf die Basisabdichtung: Deponiekörper wärmer als der Untergrund). Der Feuchtefluss erfolgt vom wärmeren immer in Richtung des kälteren Randes. Die Größe, Richtung und die Richtungsdauer hängen somit direkt von der Temperatur im Deponiekörper und von der Oberfläche bzw. Deponiebasis ab. Bei Oberflächenabdichtungen sind kritische Phasen hinsichtlich der Austrocknung besonders im Sommer bei gleichzeitig "abgekühltem" Deponiekörper bzw. im Winter bei noch aktiven Deponiekörpern zu erwarten [71].
 - Bei konstanten Auflastbedingungen und konstanten Temperaturen wird eine Entwässerung und damit Trocknung einer mineralischen Dichtung auch dann ausgelöst, wenn entweder durch Wurzeln Wasser entzogen wird, oder durch benachbarte Schichten ein höheres Matrixpotenzial aufgeprägt wird, so dass ein Potenzialgefälle und ein konvektiver Wassertransport entstehen. Auslösende Faktoren können sein:
 - Einfluss von unterschiedlich großen Luftdrücken außerhalb und innerhalb von Deponien,
 - durch Druckgradienten induzierte Porenluftströmungen und Wasserdampftransporte in der Dränageschicht oberhalb der mineralischen Dichtung, insbesondere bei Haldendeponien und bei zu grober Körnung (kein Haftwasser),
 - durch Temperatur und Druckgradienten induzierte Porenluft(gas)strömungen in Gasdränageschichten unterhalb der mineralischen Dichtung sowohl bei Einzel- als auch Kombidichtungen.
 - Saugspannungs-Potenzialunterschiede bei Auflagerung einer im Feuchtegehalt optimal eingestellten tonmineralischen Dichtungslage auf einem relativ trockenen Untergrund. Dies gilt sowohl für Oberflächen- als auch Basisabdichtungen.

- Für die Wirksamkeit der einzelnen Abdichtungskomponenten bestehen in der Kombi- bzw. Verbunddichtung die gleichen Risiken - allenfalls zeitversetzt - wie bei ihrer alleinigen Betrachtung.
- Langfristig zu erwartende ungleichmäßige Setzungen und Sackungen des Abfallkörpers können zu überkritischen Verformungen führen, ggf. verstärkt durch eine Abnahme der Dehnsteifigkeit infolge von Austrocknungs-Effekten. Einen gleichen Effekt können aber auch chemische Ausfällungen (z.B. Eisen, Calcit) im Porenraum bewirken [18, 20].

6.3.3.2 **Bodenphysikalische Ursachen für Volumenabnahmen bei Wassergehaltsreduktion**

Materialauswahl und Einbauanforderungen

In der bisherigen Deponiepraxis werden zwecks Erzielung niedriger k-Werte für feinkörnige Bodensubstrate (Tone, Schluffe, Lehme, mit Tonmehl vergütete Böden) hinsichtlich der Verdichtung folgende Forderungen erhoben (siehe auch Kapitel 2):

- Einbaudichte: $> 95 \% D_{Pr}$ ($> 97\% D_{Pr}$) (bei gemischtkörnigen Böden)
- Einbauwassergehalt: $w_{Pr} < w < w(0,95)$
- Luftporengehalt n_a : $< 5 \%$ ($< 3 \%$) (bei gemischtkörnigen Böden)

Für die Basisabdichtung wird zusätzlich gefordert, dass der Tongehalt (Feinstkorn) mindestens 20 Massen-% beträgt und je nach Einzelfallbetrachtung mindestens 10 Massen-% Tonminerale mit einem hohen Adsorptionsvermögen vorliegen. Bei einer solchen Materialzusammensetzung liegt erfahrungsgemäß bereits ein Material im mittelplastischen Bereich (TM), bei Tongehalten oder aktiven Tonmineralen auch im hoch plastischen Bereich (TA) vor.

Mit den vorangehenden Material- und Einbauanforderungen, insbesondere durch die Verknüpfung von Mindestverdichtungsgrad mit einem maximalen Luftporenanteil liegt eine Mindestwassersättigung von $S_r \geq 90 \%$ vor. Unter baupraktischen Gesichtspunkten erzielt man damit eine optimale Dichtwirkung bei relativ geringen Saugspannungen. Abbildung 5 zeigt diese Zusammenhänge [79].

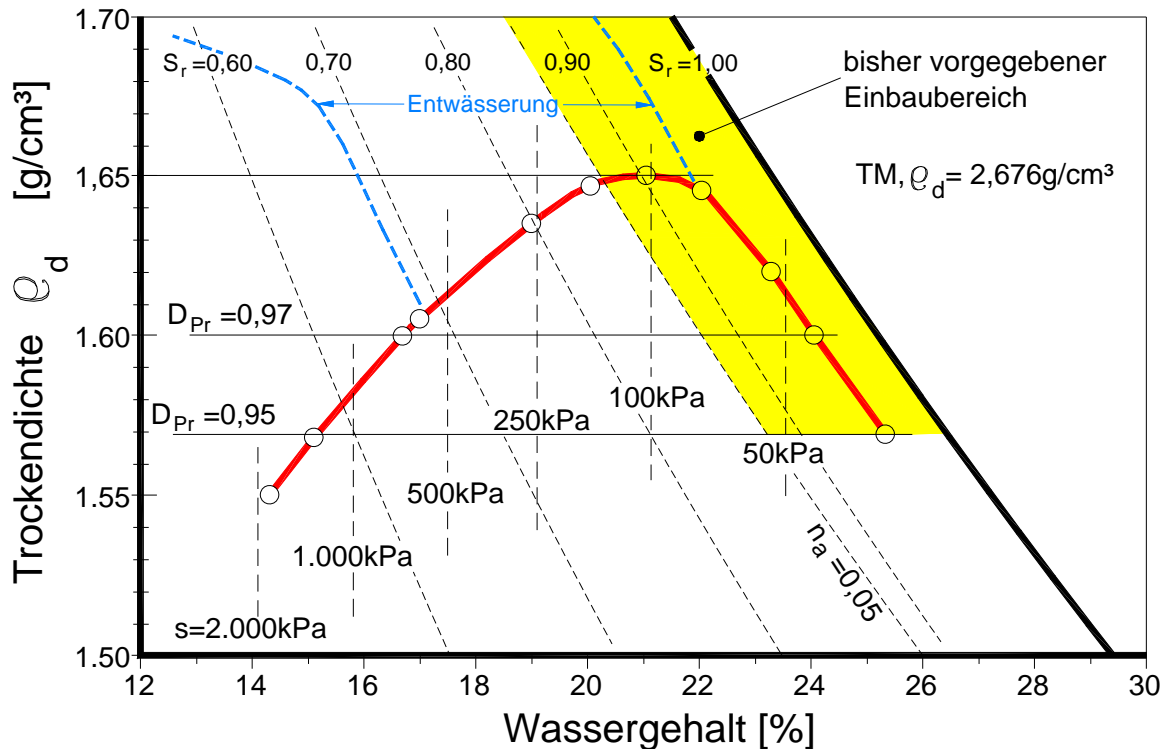


Abbildung 5 Proctor-Kurve eines Dichtungsbodens (TM) mit zugehörigen Sättigungslinien, Saugspannungen beim Einbau und Pfade bei Entwässerung (gepunktete Linien) nach Witt [78]

Bindige Böden, die für mineralische Dichtungen verwendet werden, zeigen aber bei Reduktion des Wassergehaltes (gravimetrisch oder volumetrisch) immer eine Volumenreduktion, die wie folgt beschrieben werden kann (s.a. Abbildung 21):

$$\frac{\Delta V}{V_0} \text{ oder } e = f(w)$$

Da zwischen der Saugspannung s und dem Wassergehalt (w bzw. θ) ein funktionaler Zusammenhang besteht, kann die materialspezifische Entwässerungskurve auch in der Form $s = f(w$ bzw. $\theta)$ oder $s = f(S_r)$ angeschrieben werden.

Erkenntnisse zur Bodenstruktur

Bereits sehr frühe Untersuchungen von *Seed* und *Chan* [69] kommen zu dem Ergebnis, dass die bodenphysikalischen Eigenschaften verdichteter Tonböden nicht allein von der Dichte sondern auch von der bei der Verdichtung entstehenden Bodenstruktur abhängen. Generell zeigen danach mit niedrigem Wassergehalt verdichtete Proben eine scheinbar unregelmäßige Anordnung der Tonteilchen, während sich bei höherem Wassergehalt eine gerichtete Struktur einstellt. Sie ist umso stärker ausgeprägt, je höher der Wassergehalt bei der Verdichtung ist. Noch frühere Untersuchungen von *Bouche* [8] zeigen den in Abbildung 6 dargestellten qualitativen Zusammenhang zwischen Teilchenorientierung und einfacher bzw.

verbesserter Proctordichte. Als Erklärung für die strukturabhängigen Eigenschaften kann die Scherbeanspruchung bei der Verdichtung angeführt werden.

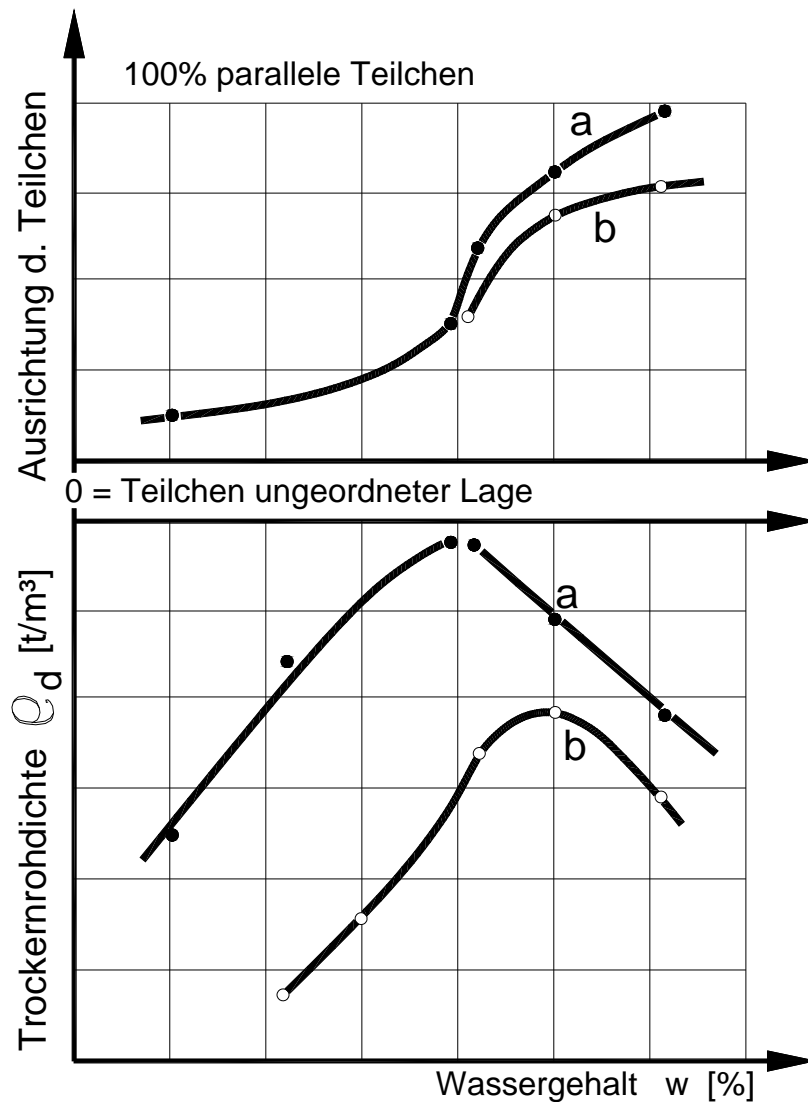


Abbildung 6 Einfluss der Verdichtung auf die Struktur von Tonen [8]

Die Bodenstruktur und die Verdichtungskennwerte selbst (w_{Pr} , ρ_{Pr}) werden in sehr starkem Maße auch von der Aggregatgröße, d.h. von der Intensität der Vorzerkleinerung, beeinflusst. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Gefügestruktur normal verdichteter Proctorprüfkörper in Abhängigkeit von der Aggregatgröße für einen mittelplastischen Ton auf dem trockenen Ast der Proctorkurve.

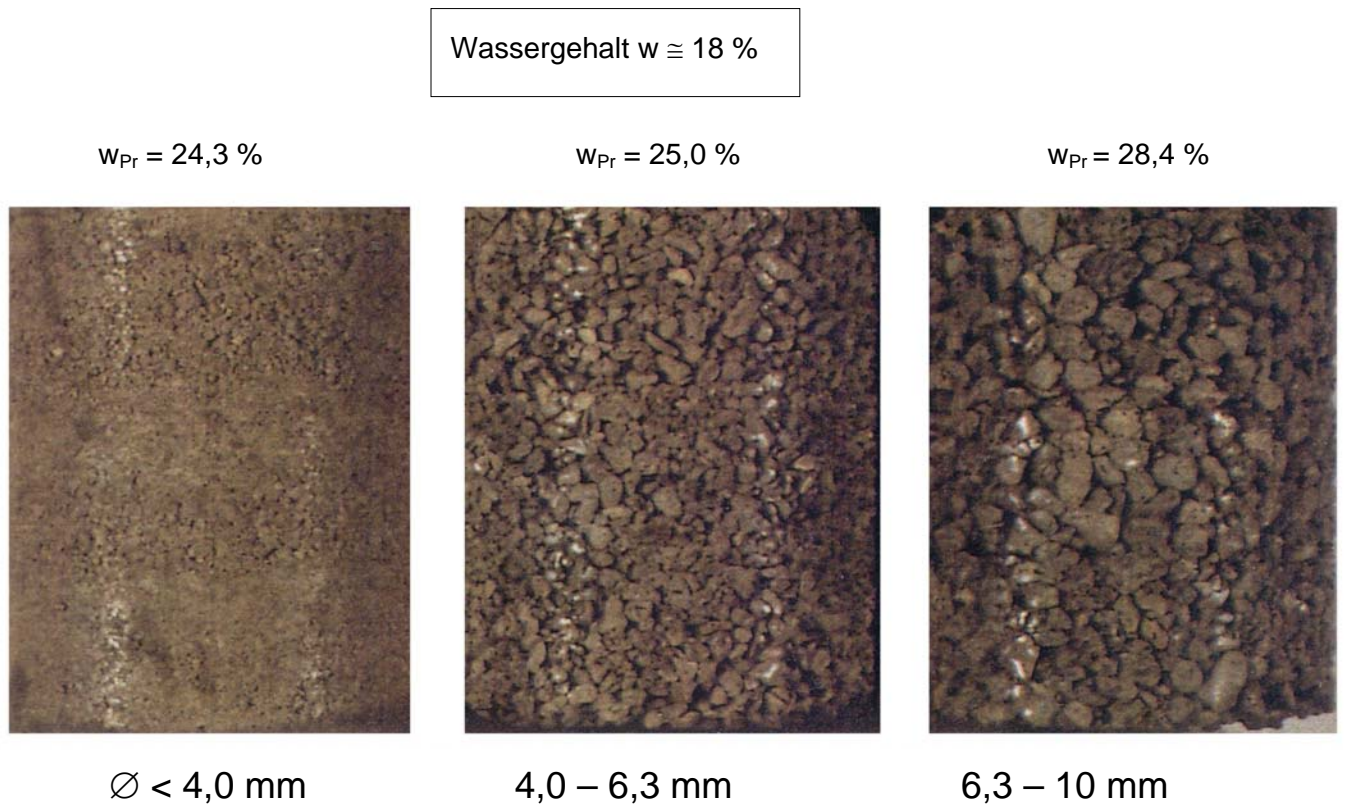


Abbildung 7 Einfluss der Aggregatgröße auf das Gefüge bei Einbau auf dem trockenen Ast der Proctorkurve [30-1]

Der Einfluss der Aggregatgröße nimmt mit Zunahme des Wassergehaltes ab, ist jedoch auch bei höheren Wassergehalten in der Regel noch erkennbar.

Die Aggregatgröße zeigt auch signifikante Auswirkungen auf die Proctordichte ρ_{Pr} und den Proctorwassergehalt w_{Pr} (Abbildung 7 und 8).

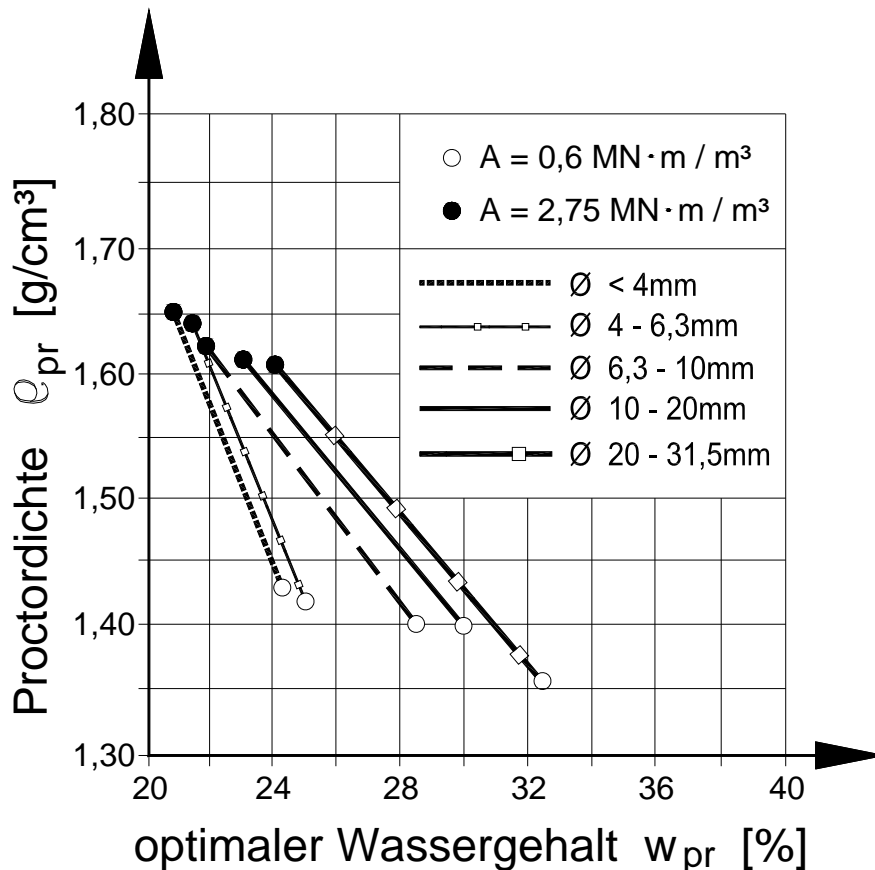


Abbildung 8 Zusammenhang zwischen dem optimalen Wassergehalt w_{pr} und der Proctordichte ρ_{pr} bei verschiedenen Aggregatgrößen und Verdichtungsenergien (normaler und verbesserter Proctorversuch; Rätiger Ton) [30-1]

Den Schrumpfvorgang beeinflussende Parameter

Schrumpfprozesse sind charakteristisch für feinkörnige Böden und damit ganz wesentlich von der Struktur dieser Böden abhängig. Im Gegensatz zu nichtbindigen, rolligen Böden aus mineralischen Einzelkörnern unterschiedlicher Größe bestehen Tone aus einzelnen Tonpartikeln, in größerem Maße jedoch aus einem Konglomerat von sog. Tonaggregaten. Alle Strukturformen – Tonpartikel, Tonaggregate, Mischformen mit Sand- und Schluffkörnern – besitzen Porenräume, in denen sich Wasser anlagern kann. Abbildung 9 zeigt einen Strukturschnitt nach Heibrock [35-1] mit typischen Inter- und Intraaggregatporen und möglichen Strukturen der Tonpartikel innerhalb der einzelnen Aggregate.

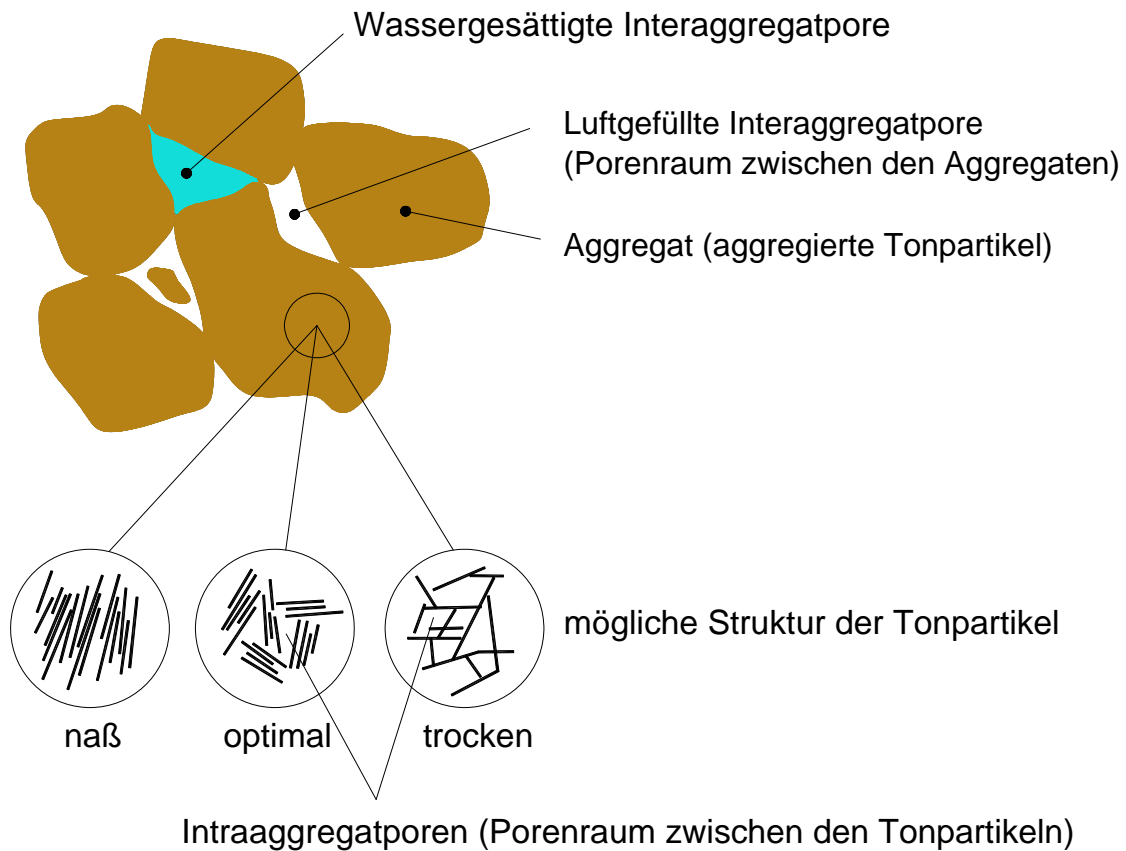


Abbildung 9 Feinkörnige Bodenstruktur (nach Heibrock [35-1])

Der Schrumpfprozess selbst ist nach der Potenzialtheorie von der Wechselwirkung zwischen dem Porenwasser und der Bodenstruktur abhängig. Eine schematische Darstellung dieses Prozesses ist in Abbildung 10 nach Zeh [79] dargestellt. Mit Reduktion des Wassergehaltes bzw. des Sättigungsgrades nimmt das Volumen des Materials ab und die Wasserspannung zu.

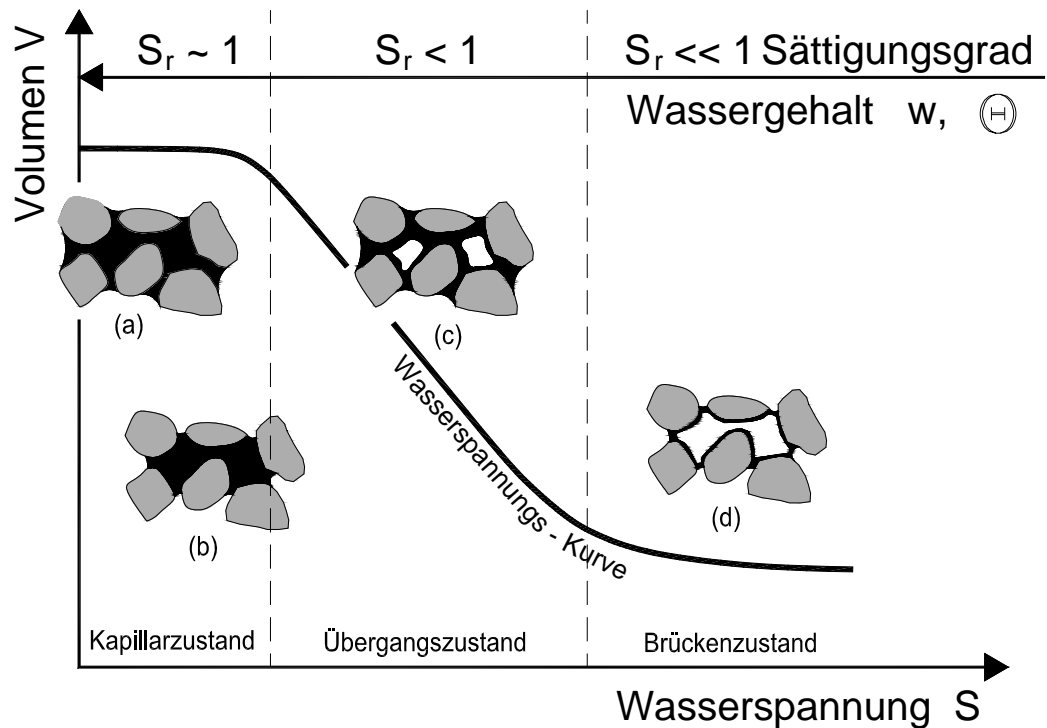


Abbildung 10 Schematische Darstellung des Schrumpfverhaltens eines bindigen, aggregierten Bodens nach der Potenzialtheorie samt Verteilung der Porenluft und des Porenwassers in der Bodenstruktur nach [79]

Die Größe und Anzahl der Interaggregatporen sowie die Struktur der Tonminerale nach Abbildung 9 wird in starkem Maße von Konsolidierungs- und Verdichtungs Vorgängen in Verbindung mit dem Ausgangswassergehalt w beeinflusst.

Bereits in sehr frühen, grundlegenden Untersuchungen von *Mitchell* [55] zeigte sich, dass für das Schrumpfmaß neben dem Einbauwassergehalt auch die Art der Verdichtung einen entscheidenden Einfluss hat (Abbildung 11).

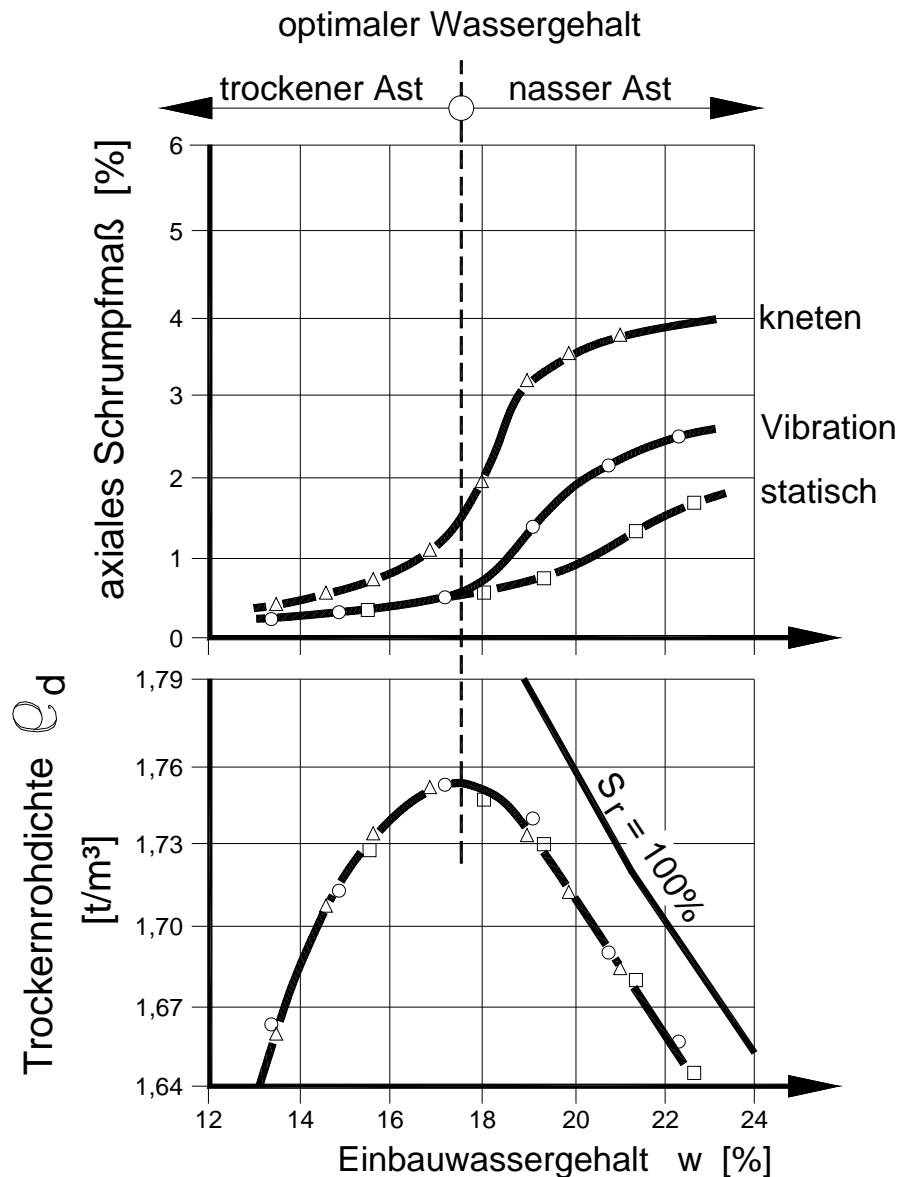


Abbildung 11 Einfluss von Einbauwassergehalt und Art der Verdichtung bei einem tonigen Schluff
nach [55]

Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen Untersuchungen von *Bauer et al.* [5] in Abbildung 12 und aktuelle Untersuchungen von *Düllmann* in Abbildung 13 und 14. Trocknet man die Proctor-Proben bis auf $w = 0$ herunter, steigen die Trockendichten ρ_d auf die Werte $\rho_{d(s)}$ an. Trägt man die $\rho_{d(s)}$ -Werte für $w = 0$ abweichend vom tatsächlichen Verlauf der Schrumpfpfade (siehe Abbildung 5) direkt über den entsprechenden ρ_d -Werten auf, erhält man eine materialspezifische Schrumpfkurve. Der vertikale Abstand zur Proctorkurve gibt das Schrumpfpotenzial an, das mit zunehmendem Einbauwassergehalt deutlich ansteigt. Das Schrumpfpotenzial steigt ebenfalls mit zunehmender Plastizität an (TL \rightarrow TA) und nimmt bei modifizierter, d.h. höherer Verdichtung ab (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14).

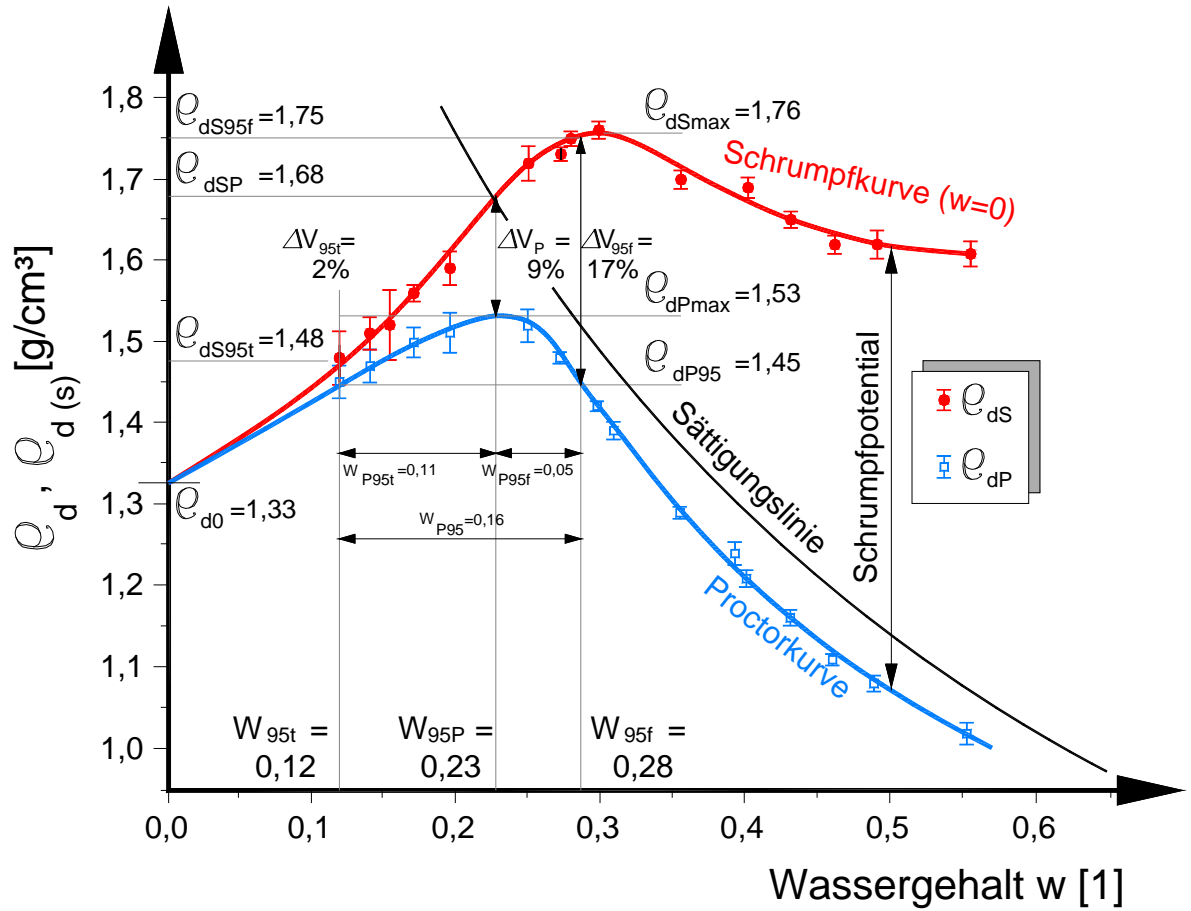


Abbildung 12 Proctor- und Schrumpfkurve eines kaolinitreichen Tones (TM) nach [5]

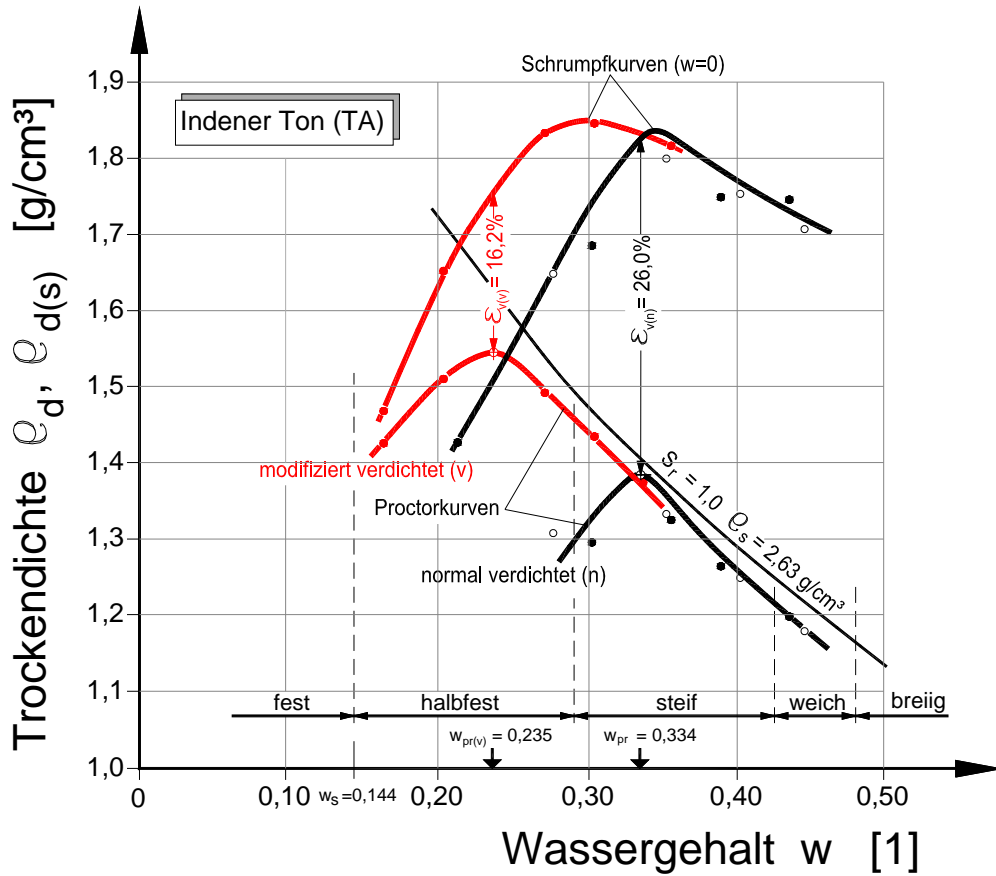


Abbildung 13 Proctor- und Schrumpfkurven eines normal und modifiziert verdichteten hochplastischen Tones (TA) (Düllmann, 2010)

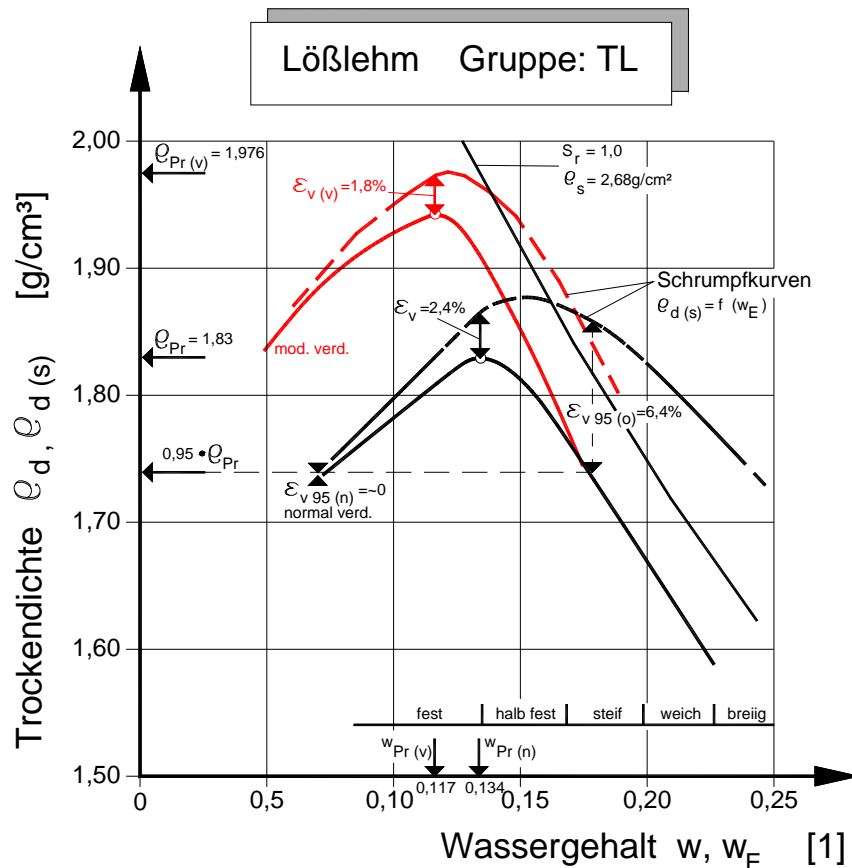


Abbildung 14 Proctor- und Schrumpfkurven eines normal und modifiziert verdichteten leichtplastischen Tones (TL) (Düllmann, 2010)

Initiierung des Schrumpfprozesses und dessen Auswirkungen

Feinkörnige Böden können nur unter der Voraussetzung der Konstanz der wesentlichen Einbauparameter Volumen bzw. Trockendichte und Wassergehalt als langfristig dichtes Material eingestuft werden. Wie die Abbildungen 15 und 16 beispielhaft zeigen, verlaufen die Schrumpfkurven bei Wassergehaltsreduktion unabhängig vom Einbauwassergehalt bzw. Anfangssättigungsgrad und der durch Verdichtung erzeugten Porenstruktur zunächst parallel zur Sättigungslinie, d.h. die Wasserabgabe erfolgt weitgehend volumenproportional. Diese volumenproportionale Wasserabgabe charakterisiert den **Normalschrumpfungszustand** [45, 47]. Da diese volumenproportionale Wasserabgabe jedoch begrenzt ist, entstehen durch Matrixspannungen induzierte Dehn- bzw. Zugrisse, womit das ursprünglich dichte Material seine Eigenschaften verliert. Der Anteil der **Restschrumpfung** unterhalb der rechnerischen Schrumpfgrenze w_s ist nach den Abbildungen 15 und 16 vernachlässigbar klein. Auch diese Abbildungen zeigen, dass die Größe der volumetrischen Schrumpfung ϵ_v (i. w. Normalschrumpfung) in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Verdichtungszustand mit abnehmendem Einbauwassergehalt zurückgeht. Gleichzeitig nehmen wegen der Gültigkeit des Potenzialkonzeptes (siehe Abbildung 10) mit abnehmendem Wassergehalt die Wasser- bzw. Saugspannung zu.

Abbildung 17 zeigt die Beziehung $\varepsilon_v = f(w_E)$ in einer Übersicht für typische Dichtungsmaterialien in NRW, die das gesamte Spektrum der natürlichen feinkörnigen Böden abdecken (TL bis TA). Aus aktuellen Untersuchungen von *Düllmann* folgt weiter, dass für diese Böden eine nahezu lineare Beziehung zwischen der volumetrischen Schrumpfung ε_v und dem Einbauwassergehalt w_E besteht und die Steigung der Ausgleichsgeraden für die untersuchten Tone nahezu gleich groß ausfällt.

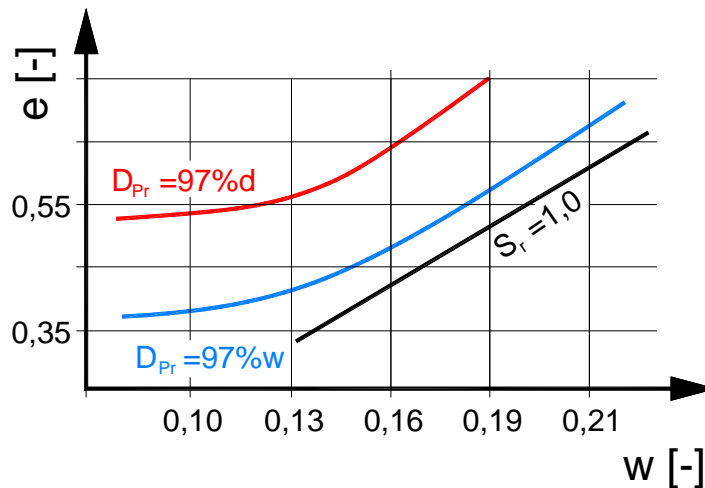


Abbildung 15 Schumpfkurven eines Dichtungsmaterials (TM) bei unterschiedlichem Einbauwassergehalt

w: nass, d: trocken

e: Porenzahl, w: Wassergehalt
nach [79] [78]

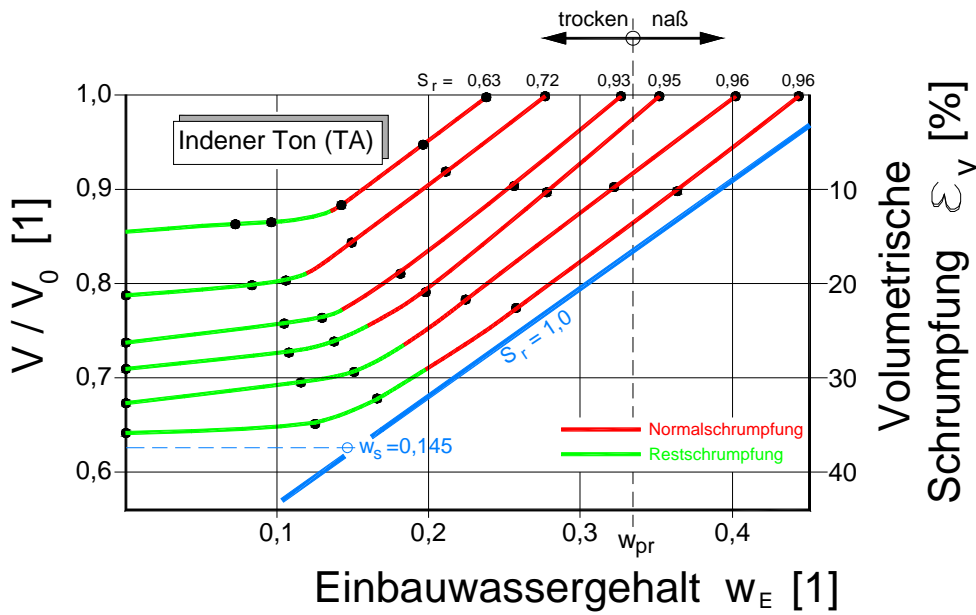


Abbildung 16 Schrumpfkurven von normal verdichteten Proctorproben eines hochplastischen Tones (TA)

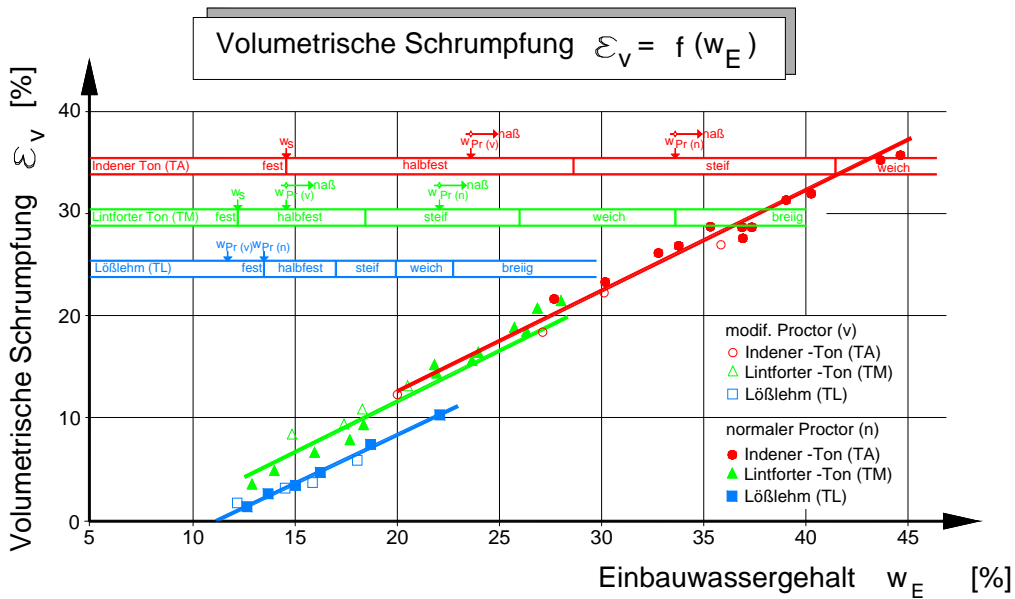


Abbildung 17 Volumetrische Gesamtschrumpfungen ε_v [%] in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt für normal- und modifiziert verdichtete leicht-stark-plastische Dichtungsmaterialien (DÜLLMANN, 2010)

Aus der Darstellung in Abbildung 17 folgt weiter, dass die Gesamtschrumpfmaße ε_v zwar mit abnehmendem Einbauwassergehalt abnehmen, die relativen Schrumpfmaße $\Delta\varepsilon_v/\Delta w$ aber nahezu konstant sind. Lediglich der Wassergehaltsbereich, über den diese Konstanz vor-

liegt, nimmt mit Abnahme der Bindigkeit bzw. Plastizität gemäß Definition nach DIN 18196 ab.

Der auf dem nassen und trockenen Ast der Proctorkurve (normal oder modifiziert verdichtet) untersuchte TA-Ton (siehe Abbildung 18) zeigt z.B. bei einer Wassergehaltsreduktion um 1 % eine volumetrische Schrumpfung von 1,2 %. Die für die leicht-mittelplastischen Tone nach Abbildung 17 gültigen Werte liegen in der gleichen Größenordnung. Der Einbau auf dem trockenen Ast lässt sich damit nicht mit einem günstigeren, stabilisierenden Vorschrumpfungseffekt [45, 47] begründen, der tatsächliche Vorteil liegt vielmehr darin, dass bei einem trockenen Einbau die Wahrscheinlichkeit abnimmt, dass der Einbauwassergehalt durch äußere Einwirkungen unterschritten wird, da nach dem Potenzialkonzept bereits beim Einbau Saugspannungen $s > 1000$ KPa (siehe Abbildung 5 und 10) vorliegen.

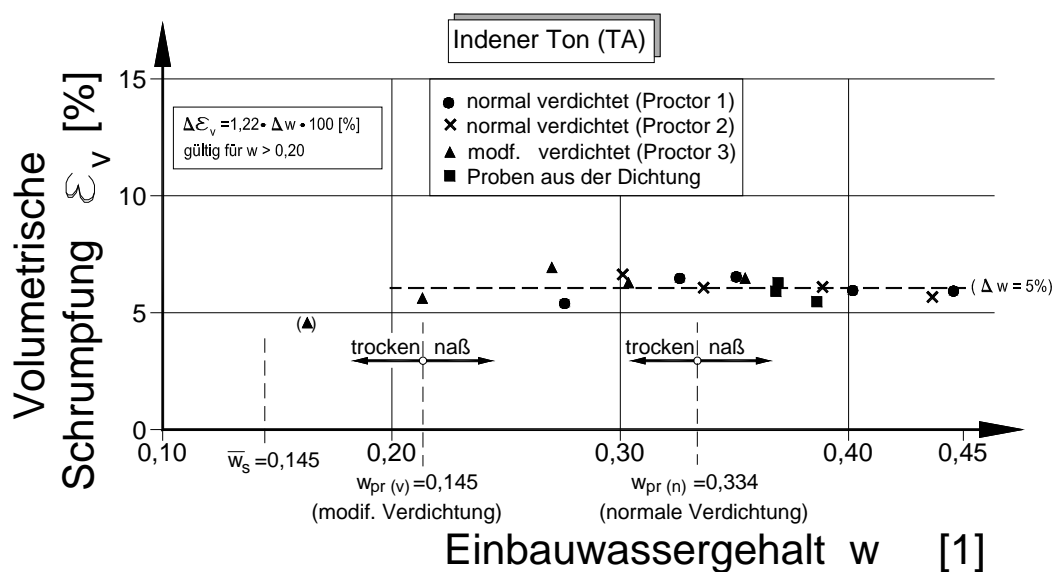


Abbildung 18 Beziehung zwischen Volumenschrumpfung $\Delta \varepsilon_v$ und der Wassergehaltsänderung Δw für einen hochplastischen Ton (TA)

Isotropie des Schrumpfprozesses

Die eindimensionale bzw. lineare Schrumpfung ε_L kann bei isotropem Materialverhalten näherungsweise wie folgt abgeschätzt werden:

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_v}{3} \quad [\%]$$

Eine Berechnung der linearen Schrumpfung aus den Veränderungen des Probendurchmessers (\varnothing) und der Höhe (h) liefert beispielsweise für den TA-Ton den Zusammenhang nach Abbildung 18. Die aus der Höhenänderung abgeleiteten ε_L -Werte unterscheiden sich nur unwesentlich von den über die Durchmesseränderung ermittelten Werten. Im Gegensatz zu vielen natürlich gebildeten feinkörnigen Böden sind verdichtet eingebaute, aufbereitete Materialien in ihrem Schrumpfverhalten als eher isotrop zu bezeichnen.

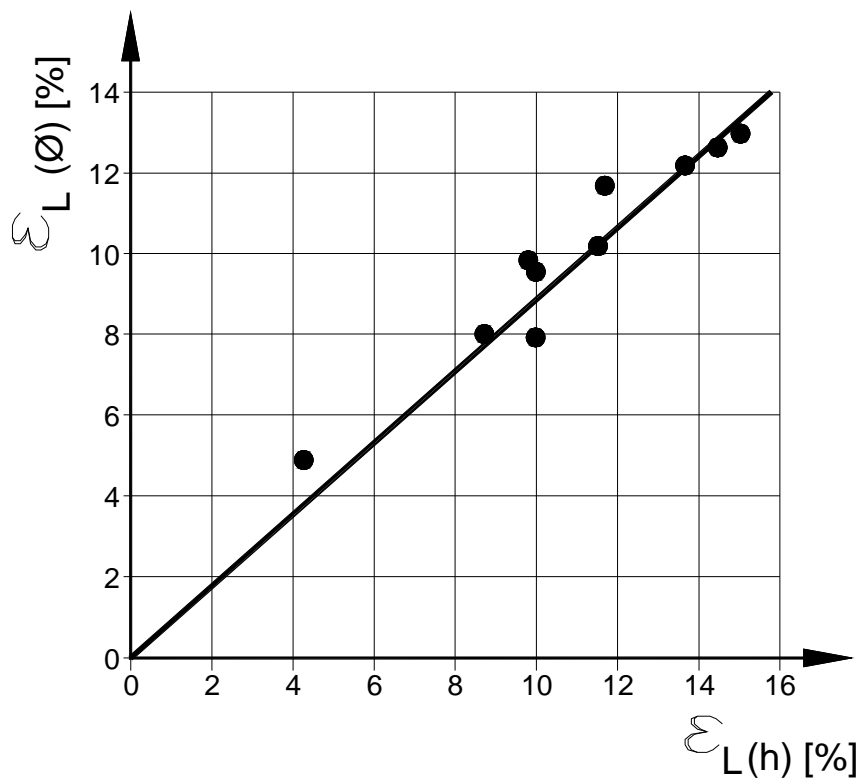


Abbildung 19 Lineare Schrumpfmaße ϵ_L , abgeleitet aus Änderungen des Durchmessers (\varnothing) und der Höhe (h)

6.3.3.3 Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Plastizität

Weil u. a. im *LfU/LANUV-Arbeitsblatt Nr. 6* [114] gefordert wird, dass das mineralische Material im eingebauten Zustand aufgezwungenen Verformungen plastisch folgen muss, wird nachfolgend auf den Begriff der Plastizität im bodenmechanischen Sinne näher eingegangen.

Als plastische **Verformung** eines Körpers wird in der Kontinuumsmechanik die irreversible Änderung seiner Form unter der Einwirkung einer äußeren Kraft verstanden. Diese Änderung kann als Längenänderung oder als Winkeländerung in Erscheinung treten. Die zugehörige Eigenschaft eines Werkstoffes nennt man **Plastizität** (Definition 1) bzw. Duktilität. Im Gegensatz dazu würde ein elastischer Stoff seine ursprüngliche Form wieder einnehmen und ein spröder Stoff ohne oder mit nur geringer plastischer Verformung mit sofortigem Versagen reagieren - man spricht von Sprödbuch. Das plastische Verformungsverhalten hängt u. a. vom Spannungszustand, der Temperatur, der Belastungsart und der Belastungsgeschwindigkeit ab. Üblicherweise wird bei einer plastischen Verformung Volumenkonstanz bei geringer bzw. fehlender Sprödigkeit unterstellt.

Der Begriff der **Plastizität** wird in der Bodenmechanik auch als Wassergehaltsdifferenz I_p zwischen dem Wassergehalt an der Fließgrenze w_L und dem entsprechenden Wert an der Ausrollgrenze w_P definiert (Definition 2). w_L beschreibt bei einem mineralischen Material den Übergang von der flüssigen zur breiigen, w_P den Übergang von der steifen zur halbfesten

Zustandsform I_c (siehe Abbildung 20). Die Differenz I_p zwischen diesen beiden materialspezifischen Kennwerten wird auch Plastizitätszahl oder **Bildsamkeit** bezeichnet und dient zur Charakterisierung feinkörniger Böden nach *DIN 18196* und zur Eingruppierung dieser Böden im Casagrande-Diagramm (Abbildung 21).

Die Plastizitätszahl I_p gibt danach an, innerhalb welcher Wassergehaltsspanne ein feinkörniges Material in der breiig bis steifen Zustandsform oder ein Übergang von der bereits flüssigen in die halbfeste Zustandsform vorliegt. Bei ausgeprägt plastischen Tonen mit nennenswertem Tonmineralgehalt ist dieser Wassergehaltsbereich relativ groß, nimmt in Richtung leicht plastische Tone, d.h. mit abnehmendem Feinkornanteil, jedoch sehr schnell auf Werte $I_p < 10\%$ ab.

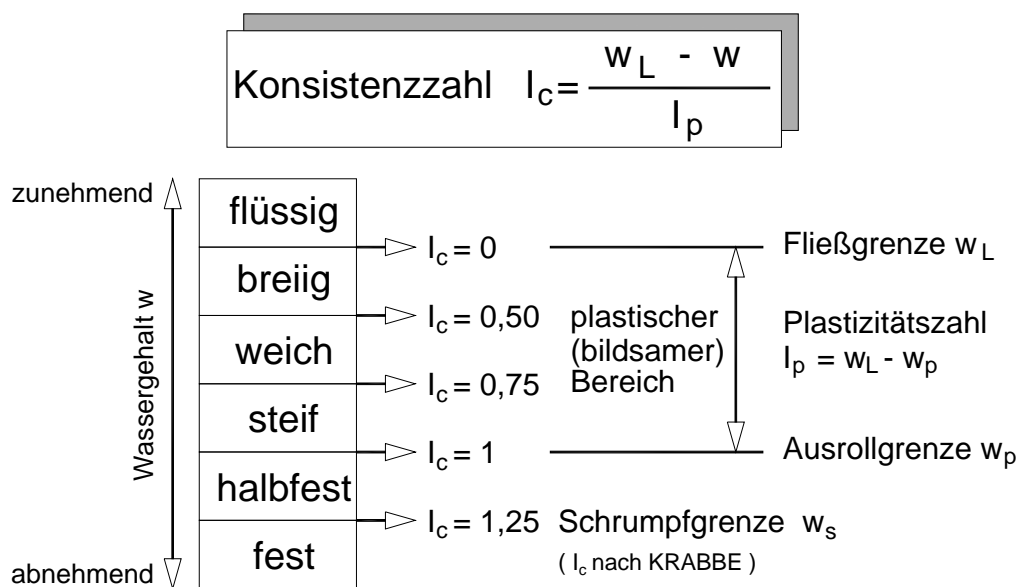


Abbildung 20 Abgrenzung plastischen Materialverhaltens nach [106]

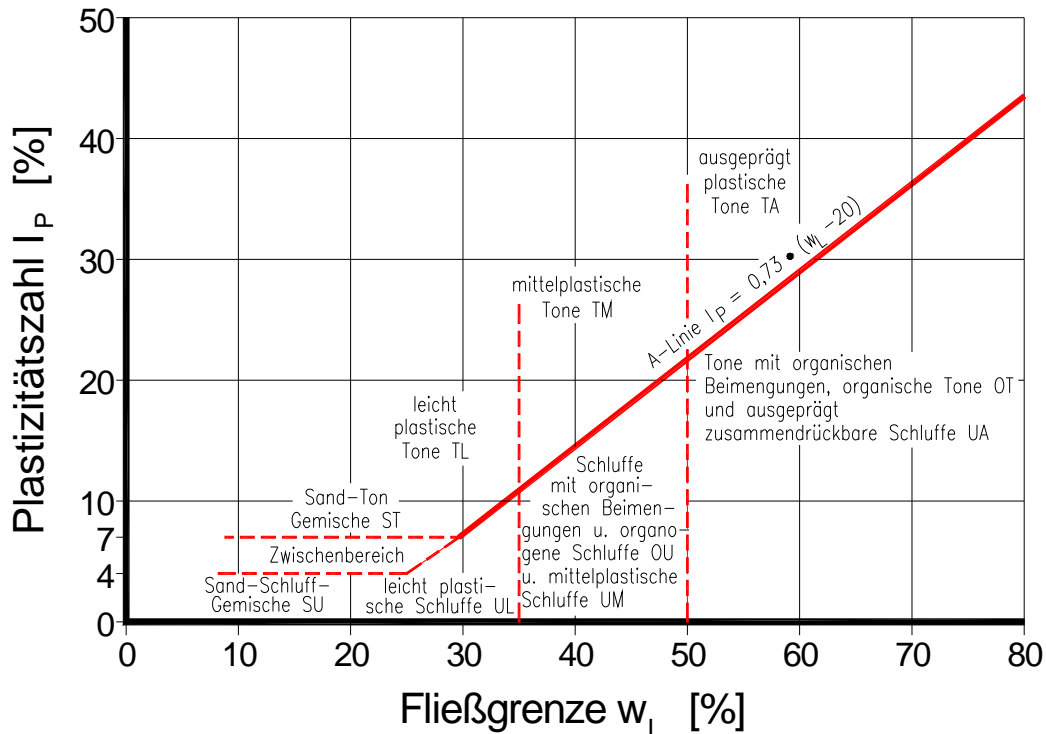


Abbildung 21 Plastizitätsdiagramm mit Bodengruppen nach DIN 18196 [106] nach Casagrande

Der Begriff der Plastizität nach Definition 2 ist erst über den vorhandenen Wassergehalt mit der Konsistenzzahl (Abbildung 21) und diese wiederum mit Festigkeitsparametern (Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Bruchstauchung, Zugdehnung Biegezugfestigkeit) verknüpft. Daraus folgt, dass sich Wassergehaltsänderungen bestimmter Größe bei schwachbindigen Böden stärker auswirken als bei einem starkbindigen Material. Eine plastische Verformung im Sinne der Definition 1 ist damit eher bei einem starkbindigen Material im Konsistenzbereich weich/steif zu erwarten, aber verbunden mit dem Risiko des größeren Schrumpfpotenzials.

6.3.3.4 Auswirkungen des Wassergehaltes auf die Bodenfestigkeit

Die z. Zt. diskutierten Vorschläge zur Erhöhung des strukturellen Widerstandes durch Einbau auf dem trockenen Ast der Proctor-Kurve bleiben naturgemäß nicht ohne Auswirkungen auf die Festigkeit, hier insbesondere auf die Zugfestigkeit und Dehnsteifigkeit von Böden. Diese Parameter sind aber letztlich mit entscheidend für die Bewertung der Langzeitfunktion. Für eine vertiefte Eignungsbeurteilung der feinkörnigen Böden stehen damit die Eigenschaften der Tonminerale sowie ihrer Aggregatformen auch in ihren komplexeren Verbindungen mit weiteren Kornfraktionen wie Schluffen und Sanden und ihre Wechselwirkung mit dem Bodenwasser im Vordergrund.

Druckfestigkeit, Bruchstauchung, Steifemodul

Bereits eine einfache Betrachtung des Zusammenhangs zwischen der Konsistenz und der 1-axialen Druckfestigkeit q_u liefert hierzu erste Erkenntnisse. Mit zunehmender Konsistenzzahl I_C bzw. abnehmendem Wassergehalt nimmt bei gleichbleibender, materialspezifischer Fließ- und Ausrollgrenze die Festigkeit zu, die Bruchstauchung ε_B jedoch ab (Tabelle 11). Die Zielgrößen q_u , ε_B und E_s lassen sich in genormten Versuchen ermitteln (siehe auch Abschnitt 2.4).

Tabelle 11 Beziehungen zwischen Konsistenz I_C und 1-axialer Druckfestigkeit q_u nach [70]

Zustandsform Steifigkeit	I_C [1]	q_u [kN/m ²]
breiig	< 0,5	< 25
weich	0,5 - 0,75	25 - 50
steif	> 0,75 - 1,0	50 - 200
halbfest	>1,0 ($w \leq w_s$)	200 - 400
fest	>> 1,0 ($w \ll w_s$)	> 400

Abbildung 22 zeigt für einen tonigen Schluff die erforderliche Spannung σ , um in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und der Verdichtungsart eine Stauchung von 5 % zu erzielen. Auf dem trockenen Ast steigt die erforderliche Spannung bzw. der daraus ableitbare Steifemodul E_s bis um den Faktor 10 an.

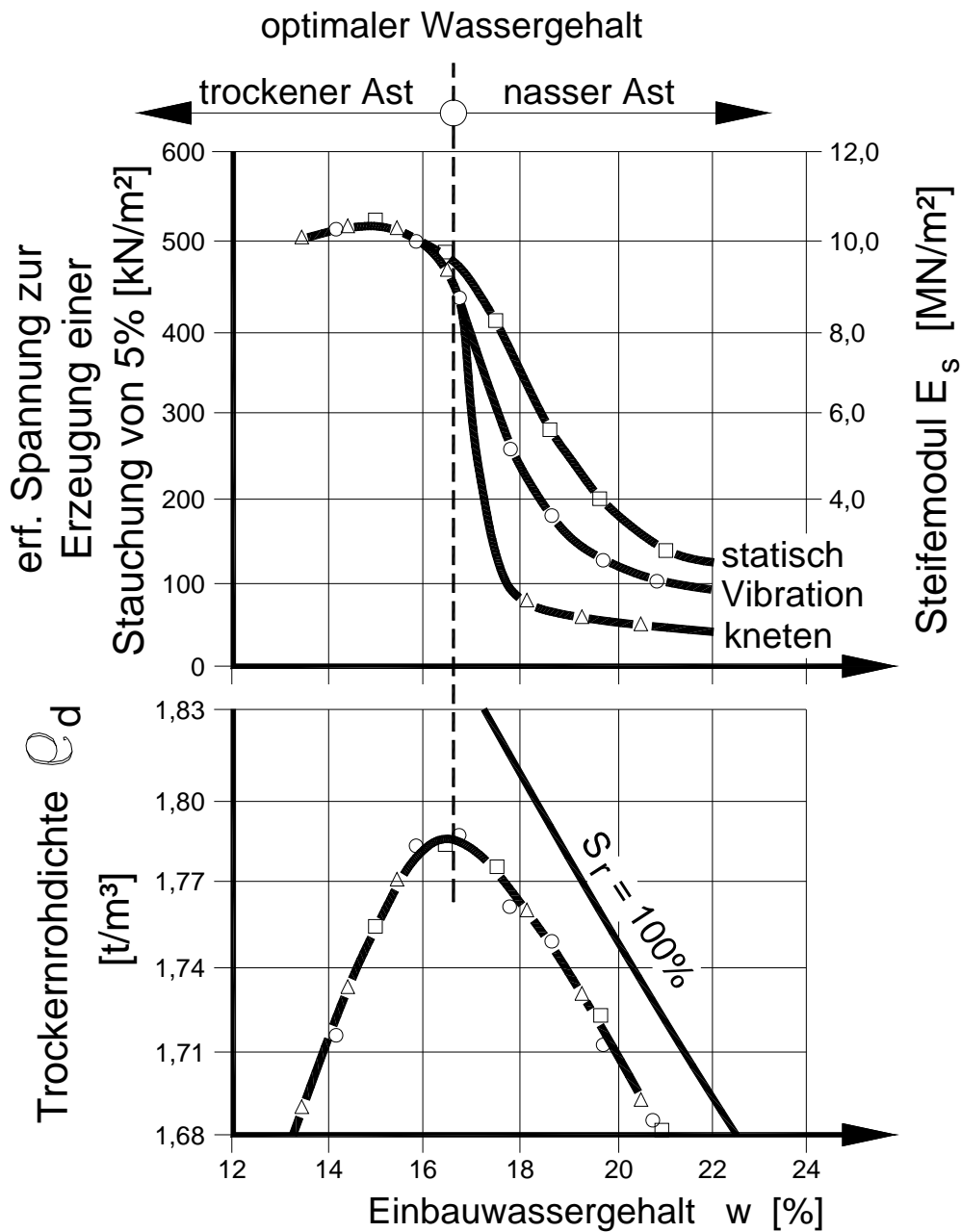


Abbildung 22 Einfluss des Einbauwassergehaltes und der Verdichtungsart auf die Festigkeit eines tonigen Schluffs nach [55]

Abbildung 23 zeigt beispielhaft für einen kiesigen, sandigen Schluff die Abhängigkeit der Trockendichte ρ_d vom Einbauwassergehalt für einen normal und einen verbessert (v) verdichteten Proctor-Versuch. Zusätzlich dargestellt ist der Eindringwiderstand der Proctor-Nadel als Maß für die Bodenfestigkeit sowie der Konsistenzbalken ($I_c = f(w)$). Deutlich wird der sehr schnelle Übergang in den halbfesten und festen Konsistenzbereich bei Unterschreitung des bisher üblichen Einbaubereichs auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve (siehe auch Kapitel 6.3.3.3).

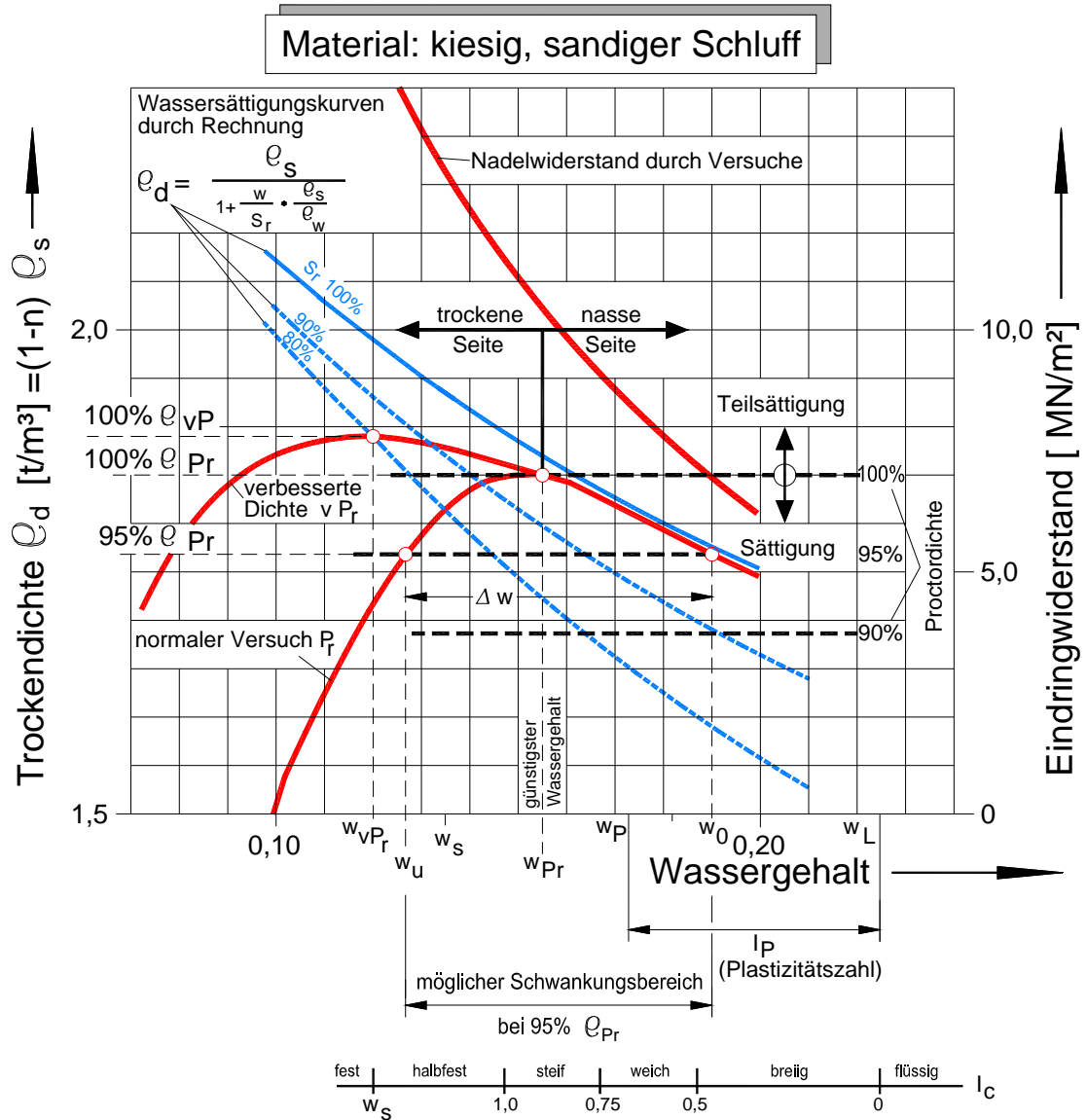


Abbildung 23 Proctor-Kurve eines verdichteten Bodens
 Abhängigkeit der Trockendichte vom Wassergehalt, Wassersättigungslinien und Eindringungswiderstand der Proctor-Nadel sowie Konsistenzbalken nach [27]

Zugfestigkeit σ_z , Bruchdehnung ε_z , Dehnsteifigkeit

Die Zugfestigkeit ist versuchstechnisch generell schwer zu bestimmen, bereits geringe Inhomogenitäten können die Zugfestigkeit auf Null herabsetzen. Ein weiteres Problem ist, dass bisher keine genormten Versuche zur Verfügung stehen. In der Praxis kommen indirekte oder direkte Zugversuche mit jeweils mehreren Unterarten zur Anwendung. Einen Überblick

über die verschiedenen Versuche liefert Zeh [79]. Für die wasserspannungs- bzw. wasser-
gehaltsabhängige Zugfestigkeit bindiger Böden und deren Bruchverhalten kommen nach
[65], [73-1] und [79] eigentlich nur direkte Zugversuche in Betracht. Neben den versuchs-
technischen Schwierigkeiten kommt hinzu, dass die Prüfgröße σ_z in komplexer Weise von
verschiedenen Einflussgrößen abhängig ist.

Nach Wendling [73-1] lässt sich die Abhängigkeit wie folgt angeben:

$$\sigma_z = f(\theta = f(\psi), e, I_\sigma, T, KV, v) \quad \text{mit:}$$

θ = volumetrischer Wassergehalt [cm^3/cm^3]

ψ = Wasserspannung [KPa] oder [cm]

e = Porenzahl [1]

I_σ = Spannungszustand

T = Temperatur [$^\circ\text{C}$] bzw. [K]

KV = Kornverteilung

v = Verformungsgeschwindigkeit [mm/min]

Die Untersuchungen von Wendling an einem kaolinitischen Ton (TA) mit unterschiedlichen
Wassergehalten und unterschiedlichen Porenzahlen, unterschiedlichen Temperaturen und
Anfangsspannungszuständen kommen zusammengefasst zu folgenden Ergebnissen (siehe
Abbildung 24):

- Mit Zunahme des volumetrischen Wassergehaltes bzw. Abnahme der Wasserspannung θ für Proben etwa gleicher Porenzahl steigt die Zugfestigkeit bis zu einem materialspezifischen Maximalwert an. Für größere θ -Werte nehmen die Zugfestigkeiten dagegen wieder ab.
- Die Zugdehnungen nehmen bei einer Zunahme des Wassergehaltes bzw. Abnahme der Wasserspannung θ ständig zu.
- Versuche mit größerer Einbautrockendichte bzw. kleinerer Porenzahl e ergeben größere Zugfestigkeiten und Zugdehnungen.
- Eine Erhöhung der Versuchstemperatur führt zu einer Abnahme der Zugfestigkeiten und der –dehnungen.
- Eine Erhöhung des Anfangsspannungszustandes (Druck) erhöht tendenziell beide Zugeigenschaften.

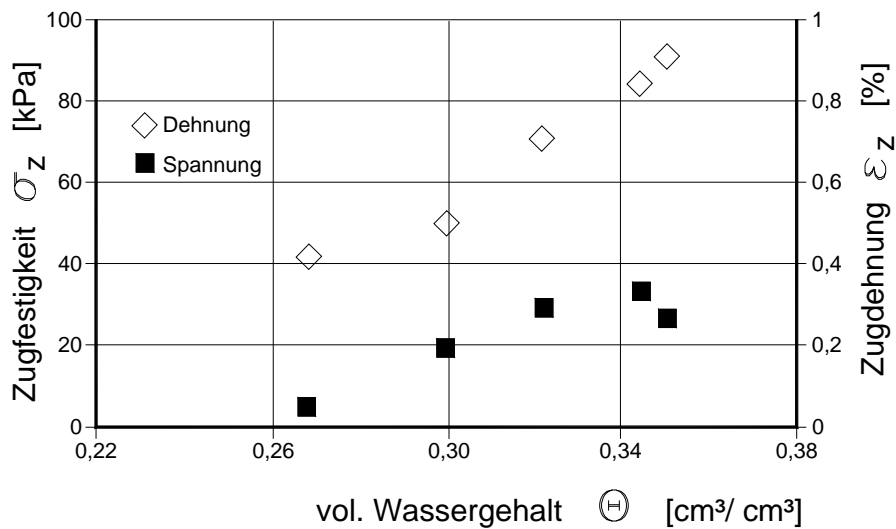


Abbildung 24 Zugfestigkeiten und –dehnungen eines TM-Tones nach Wendling [73-1] ($T = 20^\circ \text{C}$, $e = 0,75 - 0,78$, $\theta = \text{veränderlich}$)

Untersuchungen von Zeh [79] liefern Ergebnisse für einen mittelplastischen Ton (TM), der mit optimalem, unter- und über-optimalem Wassergehalt ($97\% D_{Pr}$) mit Proctorenergie verdichtet und anschließend durch Wasserlagerung bzw. Abtrocknen auf variable volumetrische Wassergehalte eingestellt wurde. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen die Unterschiede innerhalb eines Bodens infolge unterschiedlicher initialer Verdichtung und der daraus entstehenden Struktur und deren Auswirkungen auf das Schrumpfverhalten, die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung und den daraus ableitbaren Dehnungsmodul bei variierenden Wassergehalten in verdichteten bindigen Böden. Als wesentliche Ergebnisse können genannt werden:

- Auf dem feuchten Ast der Proctorkurve hergestellte Proben erreichen nach Abtrocknung die höchsten Zugfestigkeiten, dicht gefolgt von den „optimalen“ Proben. Die trockenen hergestellten Proben fallen dagegen deutlich ab (siehe Abbildung 25).

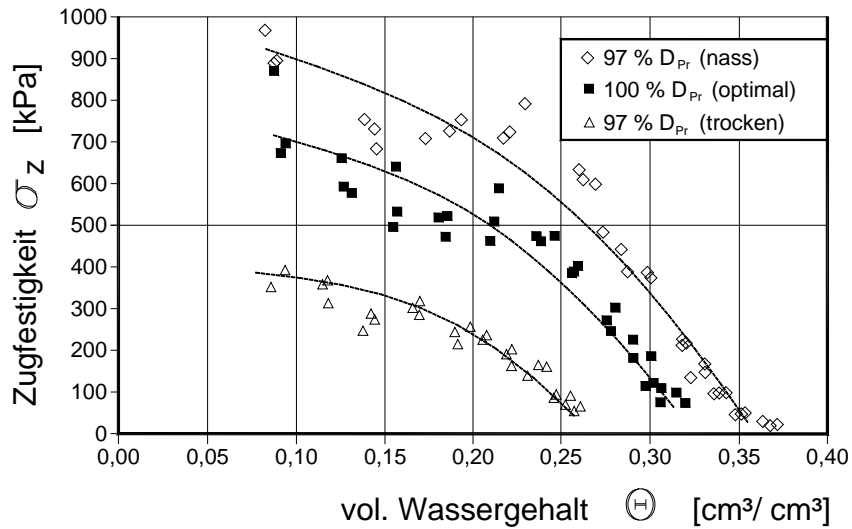


Abbildung 25 Abhängigkeit der Zugfestigkeit σ_z vom volumetrischen Wassergehalt θ und unterschiedlichen Versuchsbedingungen (nass, optimal, trocken) nach [79]

- Die Größtwerte der Bruchdehnung ε_z werden für nass-optimal verdichtete Proben ermittelt, die trockenen Proben fallen dagegen ab, d.h. bei weit geringeren Dehnungen tritt der Bruch ein (siehe Abbildung 26).

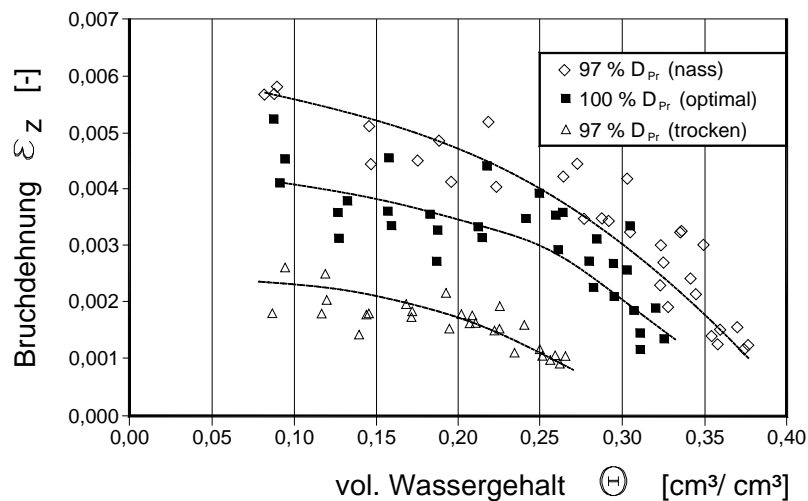


Abbildung 26 Abhängigkeit der Bruchdehnung ε_z vom volumetrischen Wassergehalt θ und unterschiedlichen Verdichtungsbedingungen (nass, optimal, trocken) nach [79]

- Die größten Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen bei den auf dem nassen Ast verdichteten Proben korrespondieren sehr gut mit den beschriebenen Strukturvorstellungen für Substrate mit bevorzugt disperser (paralleler) Struktur und sehr kleinen und weniger Interaggregatporen (Abbildung 9)
- Der Einfluss der Struktur infolge Verdichtung und des Wassergehaltes sind damit von entscheidender Bedeutung für das Festigkeitsverhalten verdichteter feinkörniger bzw. bindiger Böden.
- Ein höherer Widerstand mineralischer, feinkörniger Dichtungsböden ist dann zu erwarten, wenn sie geringfügig unterhalb des optimalen Proctor-Wassergehaltes eingebaut und verdichtet werden. Das Schrumpfpotenzial ist dadurch deutlich geringer, Zugfestigkeit sowie Dehnungsmodul bzw. Zugdehnung bleiben noch ausreichend hoch.

Ein Näherungswert für die Zugfestigkeit kann mit einem auf der Bruchtheorie von Griffith basierenden Ansatz von Frydman [31-1] abgeleitet werden:

$$\sigma_z = q_u/8 \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{mit:}$$

$$q_u = 1\text{-axiale Druckfestigkeit}$$

Unter Zugrundelegung eines Dichtungsmaterials, das im Grenzbereich ($\sigma = 0$) die MOHR/COULOMB-Bedingung ($\varphi' \neq 0$, $c' \neq 0$, gerade Bruchlinie) erfüllt, kann dieser Grenzversagensfall mit:

$$\sigma_z = c' \cdot \cos \varphi' / (1 + \sin \varphi')$$

beschrieben werden mit:

$$c' = \text{wirksame Kohäsion} [\text{kN/m}^2]$$

$$\varphi' = \text{wirksamer Reibungswinkel} [\text{Grad}]$$

Ein spezielles Problem stellt die **Biegerissgefährdung** einer Dichtung dar, die durch z.B. muldenförmige Zwangsverformungen und daraus resultierender Biegebeanspruchung entstehen kann. Wegen der geringen Bruchdehnung leicht- und mittelplastischer oder unteroptimal eingebauter stark plastischer Böden kommt es bereits bei relativ geringen Biegebeanspruchungen zu Strukturrissen. Sie entstehen immer dann, wenn die aufgeprägte Randfaserdehnung ε_{RF} die materialspezifische Bruchdehnung ε_z überschreitet. Nach Witt [78] kann bei leicht- bis mittelplastischen Böden eine signifikante Zunahme der Durchlässigkeit bereits bei einer plastischen Dehnung von $\varepsilon_{pl} \approx 0,2 \%$ erwartet werden, was etwa einem Biegeradius von $r = 150 \text{ m}$ entspricht. In der *NRW-Richtlinie Nr. 18* [111] ist der max. zulässige Krümmungsradius noch mit $r = 200 \text{ m}$ angegeben worden. Günstige Einwirkungen aus einem Überlagerungsdruck und daraus verursachter gegensinniger (günstigen) Querdehnung sind dabei nicht berücksichtigt und auch eher nur für Basisabdichtungssysteme zu erwarten.

Eine weitere mit der Materialfestigkeit zusammenhängende Rissgefährdung kann aus dem Einbau der mineralischen Dichtung selbst resultieren. Hierbei spielt neben dem Energieeintrag (Walzengewicht) und der Plastizität oder Festigkeit des Materials auch die Verformbar-

keit der Auflagerschicht - dies gilt insbesondere für Oberflächenabdichtungssysteme - eine Rolle. Bei hoher Verdichtung können in relativ trocken eingebauten, spröde reagierende Materialien (siehe auch Kapitel 6.3.3.3) Walzrisse entstehen. Diese werden zwar häufig in der Deponiepraxis durch Einsatz einer leichten Glattmantelwalze oberflächennah geschlossen, sie bleiben aber in der Dichtungslage als Mikrorisse weiter angelegt und sind häufig Ausgangspunkte für spätere Risse, initiiert durch Volumenschrumpfungen und/oder Biegebeanspruchungen [78].

6.3.3.5 Auswirkung des Wassergehaltes auf die Verdichtungsfähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit

Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Verdichtungsfähigkeit sowie Festigkeit ist zu ergänzen durch Überlegungen zum Dichtigkeitsverhalten, der neben der mechanischen Widerstandsfähigkeit wesentlichsten Kenngröße zur Beurteilung der langfristigen Funktionsfähigkeit. Bereits aus sehr frühen eigenen Versuchen [16], [23] konnte abgeleitet werden, dass die Kornverteilung, Mineralogie und die Materialstruktur einschließlich ihrer Varianz die Zielgröße k-Wert stark beeinflussen. Ähnlich wie die Druck- oder Zugfestigkeit ist damit der k-Wert sehr stark vom Einbauwassergehalt abhängig. Bei gleichem Energieeintrag wird mit abnehmendem Wassergehalt nicht nur eine abnehmende Trockendichte erzielt, sondern auch eine ungünstigere Struktur (Inter-Aggregat-Poren) mit in der Folge deutlichen k-Wert-Zunahmen. Abbildung 27 bis 29 zeigen die Verhältnisse beispielhaft für verschiedene feinkörnige, normalverdichtete und modifiziert verdichtete Materialien.

Erst durch eine deutliche Erhöhung der Verdichtungsarbeit können danach bessere Strukturbedingungen und wieder geringere k-Werte erzielt werden. In den vorliegenden Beispielen ist jedoch zu beachten, dass der Unterschied in der Verdichtungsarbeit zwischen "normal" und "verbessert" bereits beim Faktor 4,5 liegt.

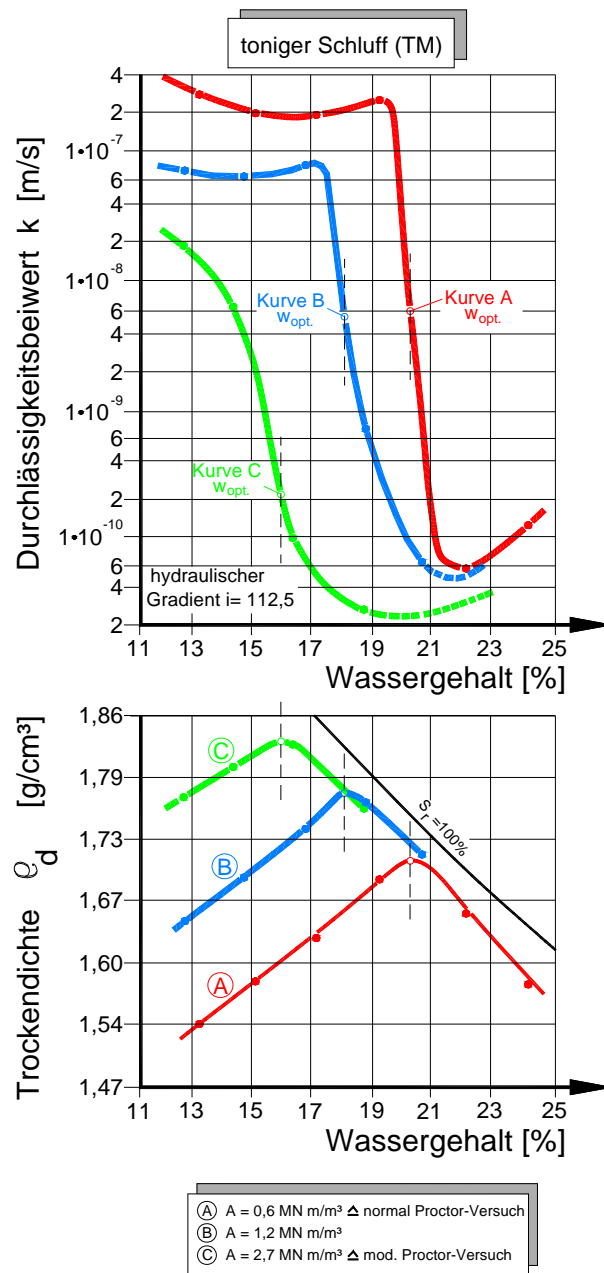


Abbildung 27 Einfluss der Verdichtungsarbeit und des Einbauwassergehaltes auf den k-Wert nach [55]

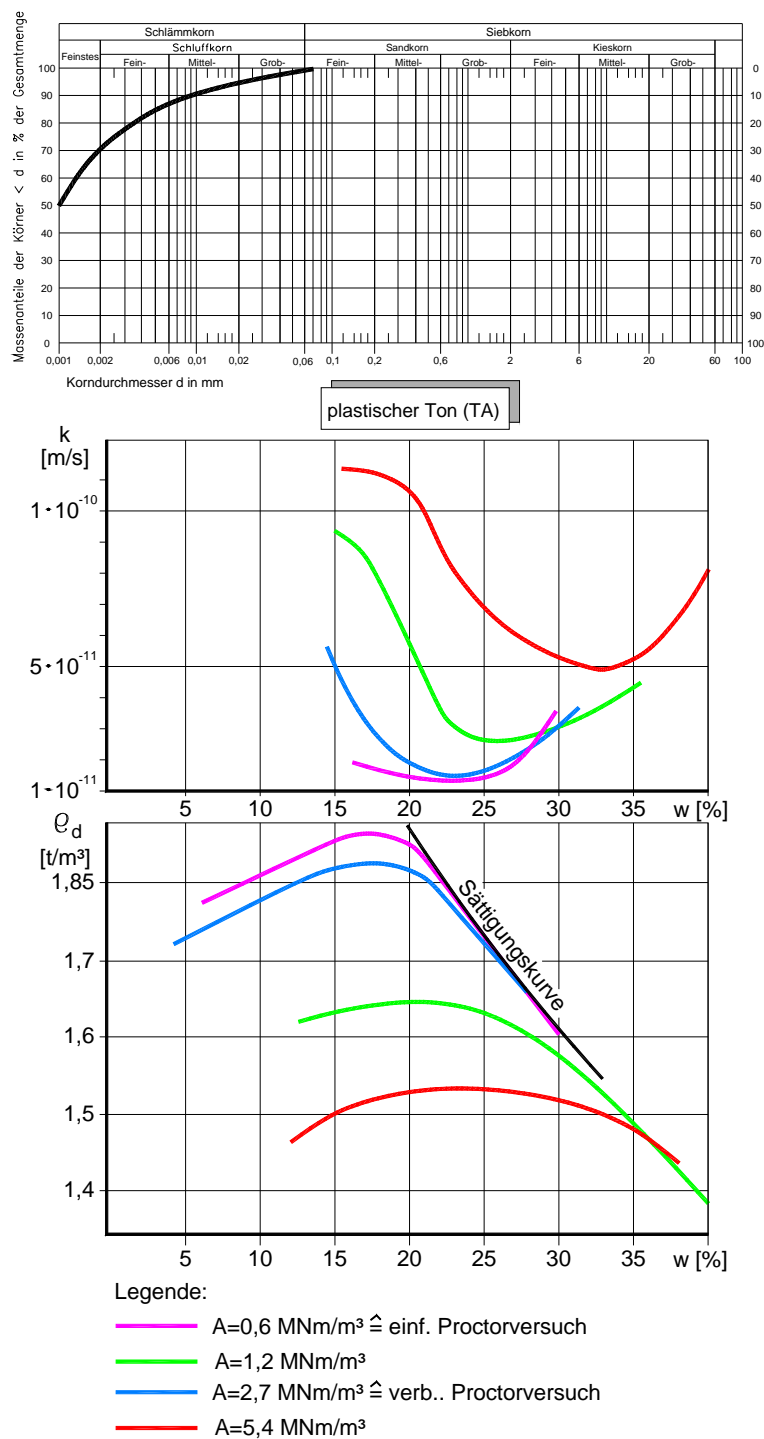


Abbildung 28 Durchlässigkeitsbeiwert k und Trockendichten ρ_d in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt w und der Verdichtungsarbeit A für einen ausgeprägt plastischen Ton (TA) nach [16]

Die Durchlässigkeit wird des Weiteren auch von der Art der Verdichtung beeinflusst. Eine knetende Verdichtung führt im Vergleich zur statischen Verdichtung entsprechend den vorangehenden Ausführungen zu einer mehr dispersen Bodenstruktur auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve und folglich zu einem niedrigeren k-Wert. Abbildung 30 zeigt die Verhältnisse für einen toniger Schluff (TM). Im trockenen Bereich sind dagegen die Unterschiede vernachlässigbar, auch die Proctor-Kurven sind identisch.

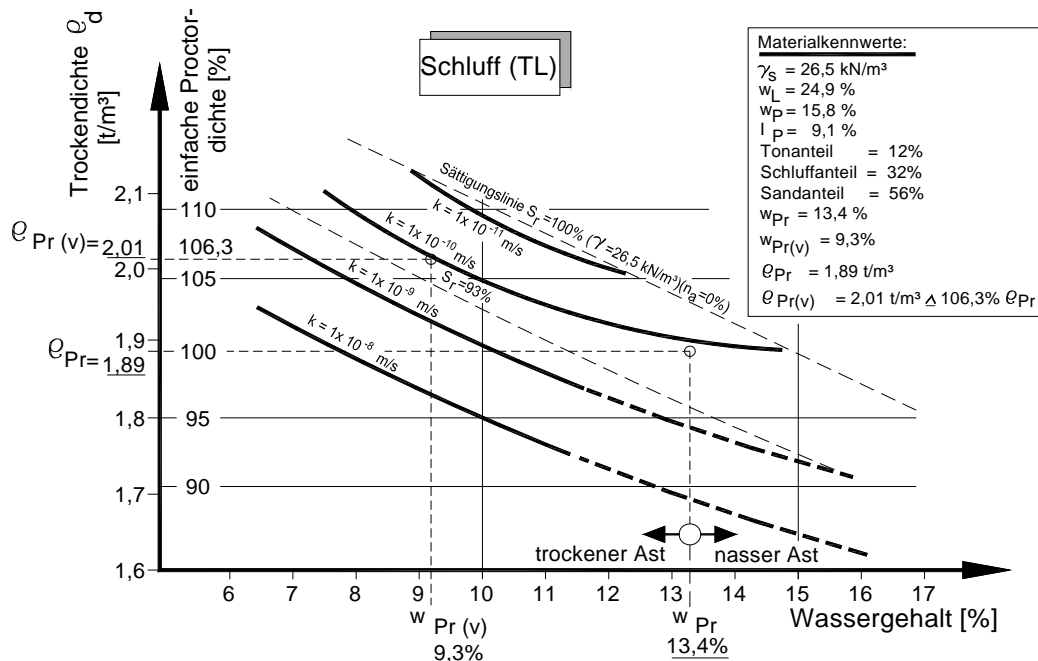


Abbildung 29 Kurven gleicher Durchlässigkeit von Schluff-Proben in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und von der erzielten Trockendichte im Proctor-Versuch normal und modifiziert verdichtet nach [16]

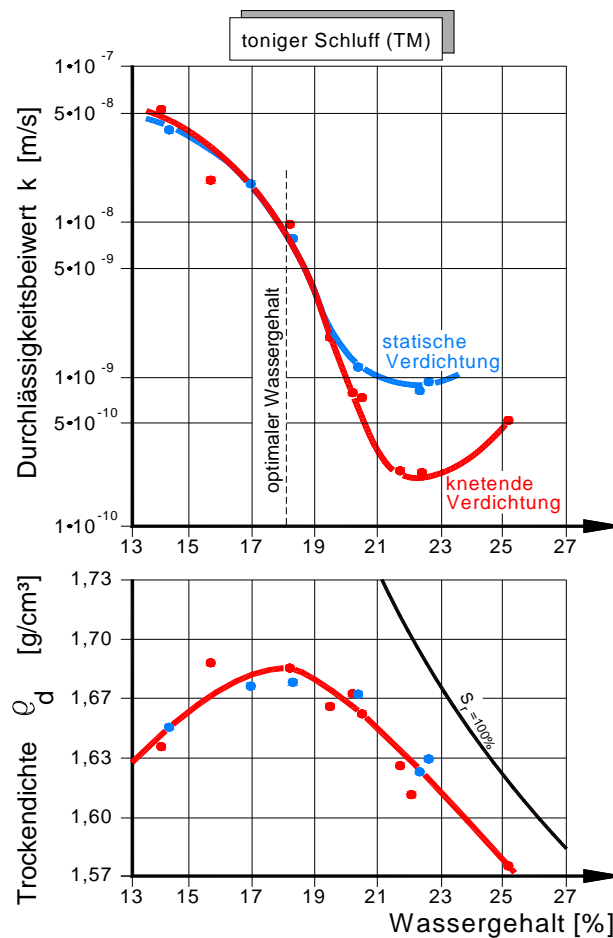


Abbildung 30 Auswirkung der Verdichtungsmethode auf den k -Wert nach [55]

Für die Durchlässigkeit einer mineralischen Dichtungsschicht sind auch die natürlichen, selbst bei einer maschinellen Aufbereitung nicht ganz vermeidbaren Streuungen im Einbauwassergehalt zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für schwach bindige natürliche Böden. In Abbildung 31 ist hierfür ein Beispiel angeführt. In technisch hergestellten Mineralgemischen können die Streuungen bei den maßgebenden Parametern dagegen deutlich reduziert werden.

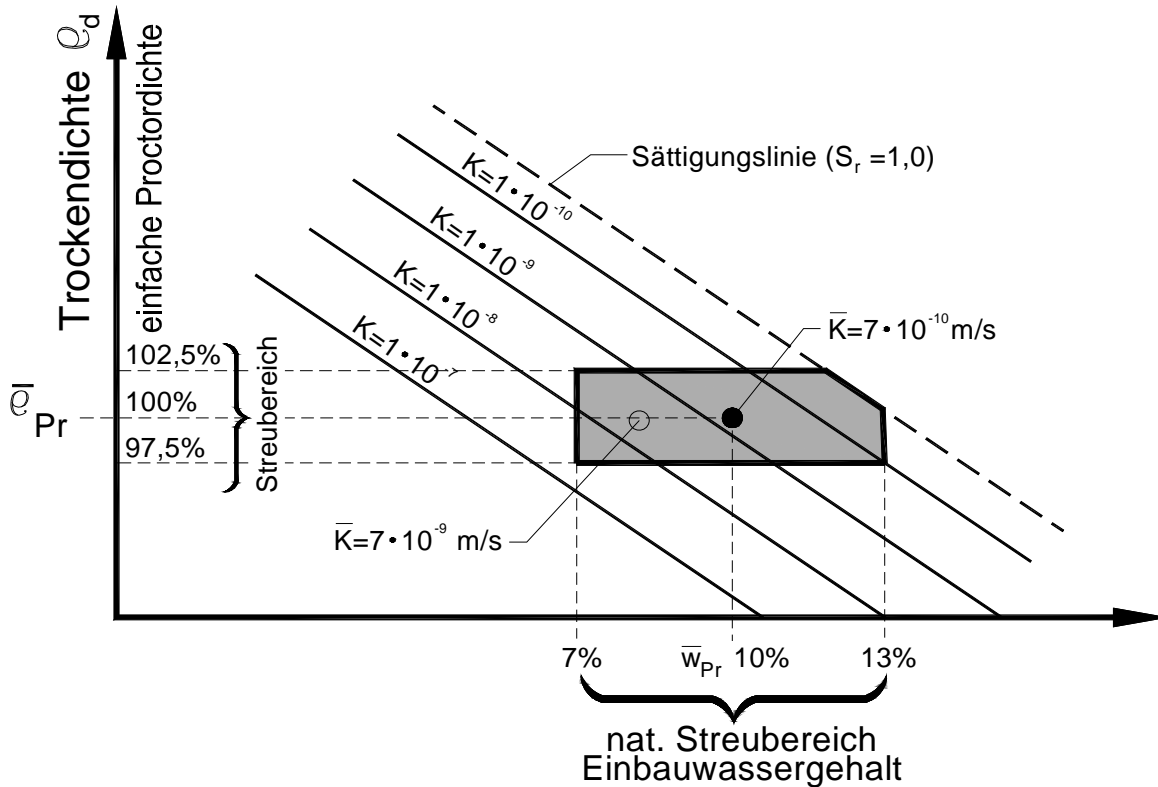


Abbildung 31 Einfluss natürlicher Streuungen im Einbauwassergehalt und Verdichtungsgrad auf den mittleren k -Wert einer mineralischen Flächendichtung
 ohne untere Begrenzung durch eine Teilsättigungslinie; n_a = beliebig nach [16]

Geht man in dem Beispiel nur von den Mittelwerten für w_{Pr} (10 %) und ρ_{Pr} (100 %) aus, lässt sich aus dem Diagramm ein maßgebender k -Wert von $\sim 7 \cdot 10^{-10}$ m/s ablesen. Wird jedoch eine realistische natürliche Streuung des Einbauwassergehaltes mit $w = \bar{w}_{Pr} \pm 3\%$ und die der erreichten Proctordichte mit $\rho_{Pr} = \bar{\rho}_{Pr} \pm 2,5\%$ berücksichtigt, wird der gewichtete Mittelwert jetzt mit ca. $7 \cdot 10^{-9}$ m/s, d.h. ca. eine Zehnerpotenz größer bestimmt. Dieser nachteilige Einfluss kann nur dadurch ausgeglichen werden, dass Bodenpartien mit einem Wassergehalt $< w_{Pr}$ stärker verdichtet werden.

6.3.3.6 Einfluss natürlicher Materialstreuungen

Ein weiterer Aspekt bei der Abschätzung zuverlässiger Materialkennwerte (mechanische Eigenschaften, Dichtigkeit) sind die natürlichen Streuungen der Gewinnungsstelle, die sich durch Aufbereitung zwar einengen, aber nicht völlig eliminieren lassen. Im Regelfall nehmen die natürlichen Streuungen mit zunehmender Bindigkeit zu. Natürliche tonmineralhaltige Böden stehen damit in Bezug auf Materialstreuung im Gegensatz zu sog. Kunstböden (z.B. *Trisoplast*, *Bentokies*, *Mineralgemisch System Dykerhoff*), die nach bestimmten Rezepturen bereits fremd überwacht mit reproduzierbarer Qualität maschinell hergestellt werden.

In Abbildung 32 sind zum Vergleich die Einzelfractionen eines natürlichen Tonvorkommens (Lintforter Ton) und in Abbildung 33 der natürliche Wassergehalt im Vergleich zu den Grenzwassergehalten dargestellt worden. Dieser Ton ist bei einer großen Zahl von Deponieprojekten zum Einsatz gekommen. Eine Reduzierung der Streubreite ist nur durch eine gezielte Aufbereitung möglich.

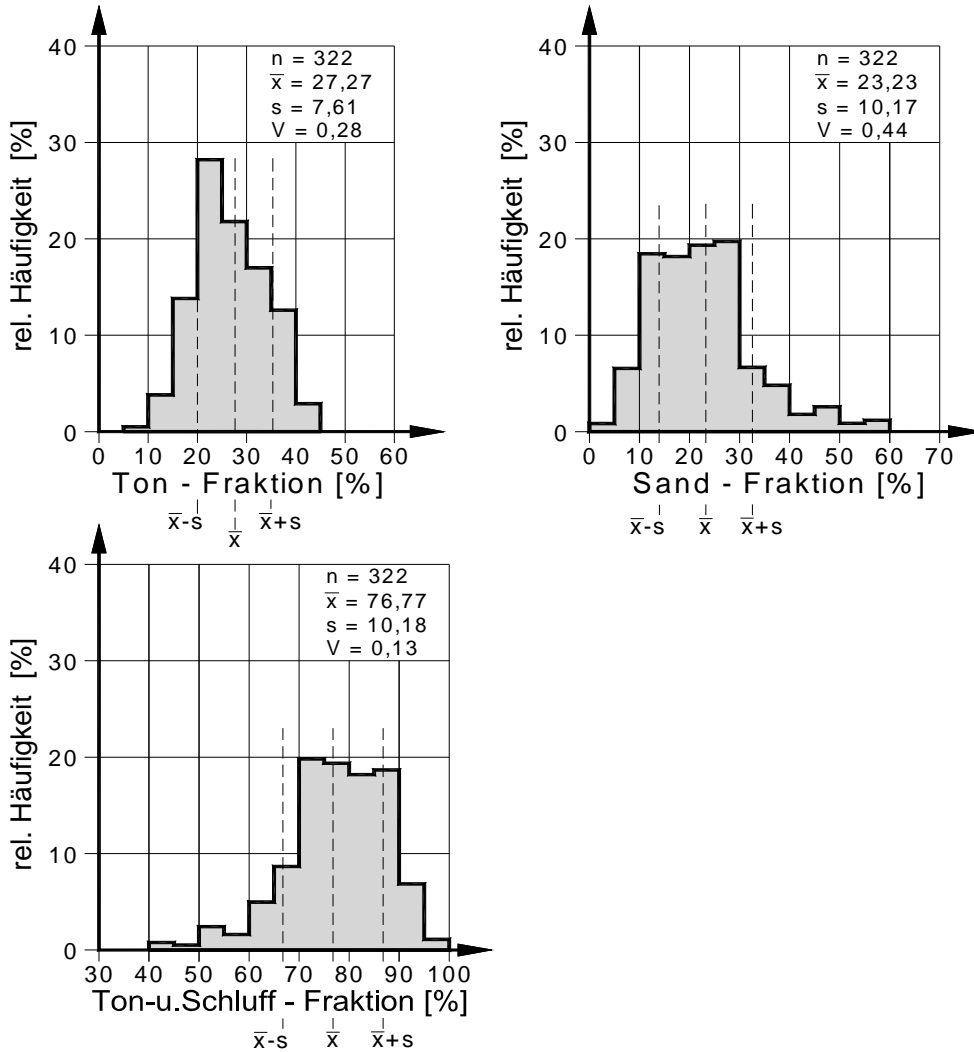


Abbildung 32 Statistische Kennwerte für die Hauptfraktionen eines Tons (TM) (Lintforter Ton) [16]

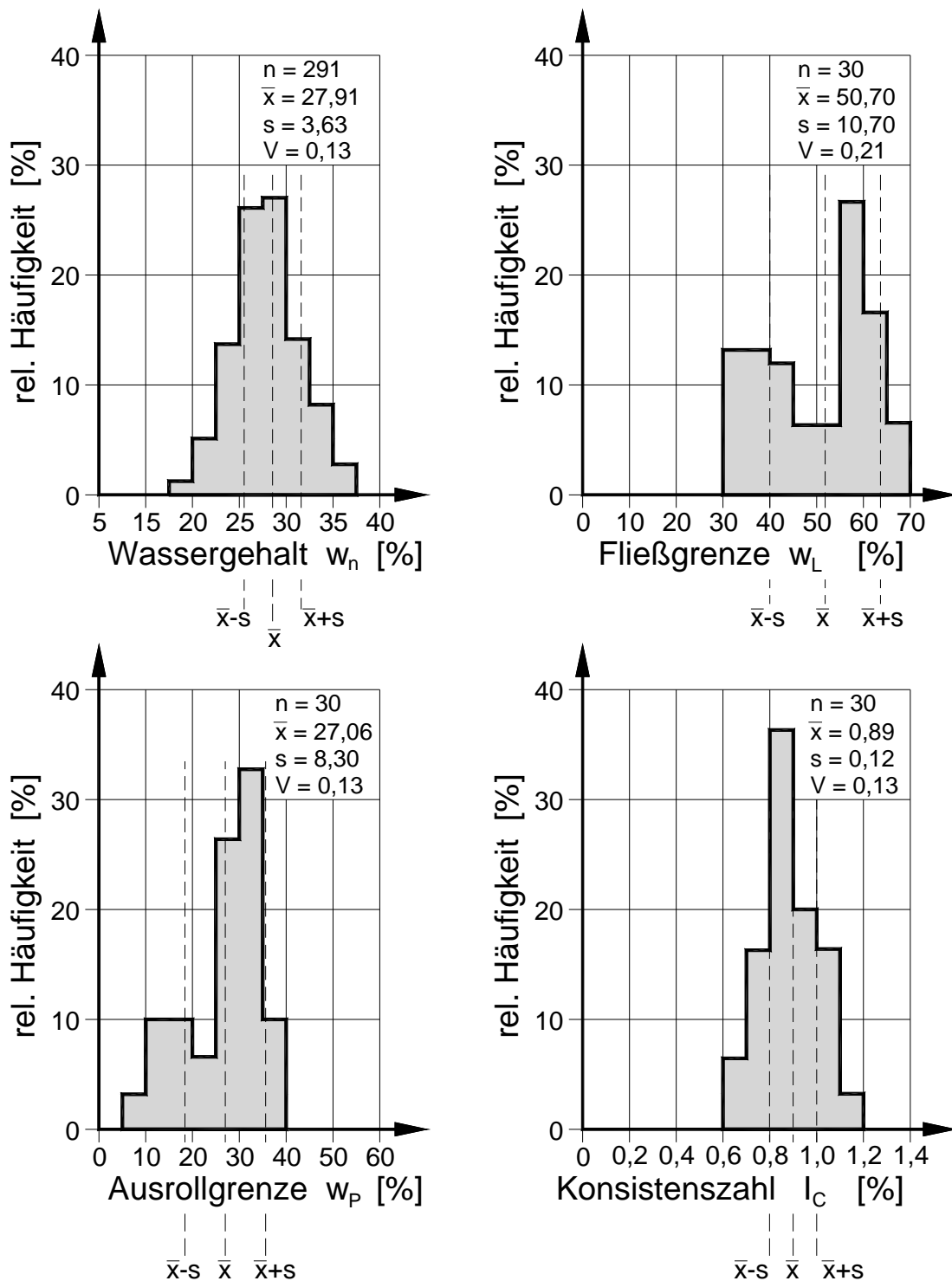


Abbildung 33 Statistische Maßzahlen und Häufigkeitsverteilungen der Grenzwassergehalte für eine Ton-Gewinnungsstelle Lintforter Ton [16]

6.3.3.7 Zusammenfassende Bewertung der physikalischen Einwirkungen

Bewertung der Einwirkungen aus Wassergehaltsänderungen

Nachfolgend werden u. a. die Ergebnisse eines Status-Workshops am 30.11/ 01.12.2006 in Höxter [60] wiedergegeben. Gleichzeitig werden aber auch weitergehende Fragen aufgeworfen.

- Die **kurzzeitig** (in den Anfangsjahren nach Aufbringen der Dichtung) zu erwartende Permeationsrate und der kurzzeitige Wirkungsgrad des Oberflächenabdichtungssystems können für permeable Systeme nur mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen prognostiziert werden.
- Komplexe Wasserhaushaltsmodelle haben aber den Nachteil, dass die Ergebnisse von einer Vielzahl von Einflussparametern abhängen, die nur innerhalb einer plausiblen Spannweite wählbar sind. Eine Eichung über reale Datensätze der Vergangenheit (z.B. Testfeldergebnisse) können damit zur Optimierung der Berechnung zwar herangezogen werden, sie liegen aber relativ selten vor. Gleiches gilt für die Einführung von im Rahmen von Eignungsprüfungen nachgewiesenen Durchlässigkeitsbeiwerten auch für teilgesättigte Bedingungen.
- Im Vergleich zur kurzzeitigen Prognose des Systemverhaltens wirft die **Langzeitprognose** noch größere Probleme auf.
- Ein umfassender Nachweis ist derzeit nicht leistbar und wird vermutlich auch in Zukunft nicht leistbar sein, da die langfristigen Einwirkungen und Wechselwirkungen in den Systemen zu komplex sind, um durch Modelle abgebildet werden zu können. Dieser Einschätzung stimmten die Workshop-Teilnehmer einvernehmlich zu. Beispiele für nicht geklärte und bis auf weiteres nicht klärbare Phänomene sind:
 - Die zeitliche Entwicklung des Systems Boden und des Wurzelraumes in der Rekultivierungsschicht lassen eine langfristige Berechnung des Wasserhaushaltes nicht mit ausreichender Genauigkeit zu. Wie entwickelt sich überhaupt ein solches System, das nach neuesten "Erkenntnissen" möglichst wenig verdichtet und mit einem bestimmten Mindest-Luftporengehalt eingebaut werden soll, wenn es im Laufe des betrachteten Lebenszyklus unzähligen Frost-/Tau-Wechseln und Austrocknungs-/Durchfeuchtungswechseln sowie Vegetationswechseln ausgesetzt ist?
 - Ist es überhaupt zielführend, eine hohe Feldkapazität für Rekultivierungsböden zu fordern, wenn sie gleichzeitig einen hohen Anreiz für eine hohe Vegetationsdichte und ein entsprechend starkes Wurzelwachstum bietet und damit auch den Wasserverbrauch begünstigt? Sind umgekehrt steinige Magerböden mit entsprechend zurückgedrängter Vegetation und geringerem Wasserverbrauch u. U. nicht die geeignetere Lösung?
 - Die zeitliche Entwicklung der Leistungsfähigkeit der Dränageschicht ist über die angedachten Zeiträume ebenfalls nicht prognostizierbar.
 - Die Funktionsdauer der Kunststoffdichtungsbahn in der Kombidichtung lässt sich bisher nur halbquantitativ abschätzen. Die häufig vertretene Auffassung, dass eine Kunststoffdichtungsbahn trotz alterungsbedingter Schädigungen weiterhin eine z.B.

gegenüber Wasserdampf flächenhaft wirkende Konvektionssperre darstellt erscheint eher spekulativ und damit wenig geeignet für seriöse, langfristige Sicherheitsbetrachtungen.

- Die temperaturinduzierten Wassertransporte in der mineralischen Dichtung unter der Kunststoffdichtungsbahn lassen sich zwar dem Grundsatz nach modellieren, eine zuverlässige Prognose der Veränderungen der Eigenschaften der mineralischen Dichtung ist aber für die erforderlichen Zeiträume nicht leistbar. Bereits sehr kleine Änderungen der Randbedingungen können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Gleiches gilt für luftdruck- und/oder temperaturinduzierte Wasserdampftransporte in den Grenzschichten (Dränschicht, Auflager).
- Eine langfristige Prognose muss bereits daran scheitern, dass die derzeitigen Klimadaten sich zukünftig stark verändern können.
- Alterungsprozesse können damit nur auf der Grundlage empirisch gewonnener Erkenntnisse berücksichtigt werden, z.B. durch Zuschläge auf die Wasserdurchlässigkeit oder Abschlüsse auf mechanische Eigenschaften (z.B. Dehnsteifigkeit) [76].

Bodenphysikalische Einwirkungen und einbautechnische Reaktionen hinsichtlich Materialauswahl und -verarbeitung

- Das Minimum der Durchlässigkeit wird bei einem Wassergehalt erreicht, der etwas höher als der optimale Wassergehalt bei Proctordichte liegt. Das Minimum der k-Werte wird bei einem Wassergehalt erreicht, der umso weiter oberhalb des optimalen Wassergehaltes liegt, je bindiger der Erdstoff ist. Diese Wassergehalte liegen häufig bereits sehr dicht an der Sättigungslinie.
- Bei einem Einbau oberhalb des Proctor-Optimums wird eine eingeregeltere Struktur mit deutlich kleineren Porenradien erzeugt bei gleichzeitig relativ niedrigen Saugspannungen im Bereich $s < 200 \text{ kPa}$ ($p_F \leq 3,3$)
- Der Einfluss einer knetenden Verdichtung (Stampffußwalze) wirkt sich ausschließlich auf der "nassen" Seite aus und führt dort zu signifikant niedrigeren k-Werten. Im trockenen Bereich ist dieser Einfluss vernachlässigbar.
- Mit abnehmendem Wassergehalt erfolgt generell eine Zunahme des k-Wertes auf dem trockenen Ast der Proctor-Kurve aufgrund der sich einstellenden bimodalen Porenverteilung.
- Allein in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt können materialspezifisch k-Wert-Unterschiede von bis zu drei Zehnerpotenzen auftreten [16]. Die Unterschiede steigen mit abnehmender Bindigkeit an, sie sind bei einem Ton kleiner als bei einem Schluff oder Erdbeton.
- Natürliche Materialstreuungen und Streuungen im Einbauwassergehalt wirken sich bei stärker bindigen Böden deutlich geringer aus als bei schwachbindigen Böden oder künstlichen Mineralgemischen (z.B. Erdbeton).

- Bei gleicher aufgeprägter Saugspannung - temperaturinduziert oder durch benachbarte Schichten verursacht - ist eine höhere Initialspannung der Dichtung, wie sie bei unter - optimalem Einbau gegeben ist, immer günstiger.
- Eine Reduktion des Einbau-Wassergehaltes oder eine nachträglich induzierte Reduktion des Wassergehaltes im eingebauten Zustand führt aber immer zu einer Abnahme der Fähigkeit des Materials auf Zug, Druck- und/oder Biegebeanspruchung "plastisch" zu reagieren. Die Neigung zu einem spröden Materialverhalten nimmt damit signifikant zu.
- Die absoluten Schrumpfmaße ε_v nehmen mit zunehmendem Anfangssättigungsgrad und zunehmender Feinkörnigkeit zu. Die Maße der relativen volumetrischen Schrumpfung $\Delta\varepsilon_v/\Delta w$ liegen bei einer Reduktion des Einbau-Wassergehaltes oder einer nachträglich induzierten Reduktion des Wassergehaltes im eingebauten Zustand in vergleichbarer Größenordnung zunächst weitgehend unabhängig davon, ob es sich um einen TL, TM- oder TA-Boden handelt
- Als wesentlich ist aber festzuhalten, dass für die Erzeugung einer Wassergehaltsänderung Δw auf dem trockenen gegenüber dem nassen Ast eine exponentiell größere Saugspannungsänderung notwendig ist.
- Für die Schrumpfrisssgefährdung dürfte danach nicht – wie bisher unterstellt – das durch Materialauswahl und Einstellung des Einbauwassergehaltes steuerbare absolute volumetrische (ε_v) oder lineare Schrumpfmaß (ε_L) sein, sondern vielmehr das Maß der relativen Schrumpfung $\Delta\varepsilon_v/\Delta w$ bzw. $\Delta\varepsilon_L/\Delta w$. Geht man in Analogie zur Biegerisssgefährdung (s. Abschn. 6.3.3.3) davon aus, dass nach [78] bereits bei plastischen Dehnungen von $\varepsilon_{pl} \sim 0,2 \%$ signifikante k-Wertzunahmen bei TL- und TM-Böden zu erwarten sind, ergeben sich weitgehend unabhängig von der Materialart relativ kleine zulässige Wassergehaltsänderungen Δw_{zul} .
- Die generelle k-Wert Zunahme auf dem trockenen Ast der Proctor-Kurve lässt sich zwar durch eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit bis zu einem gewissen Grad rückgängig machen, dies aber nur zu Lasten der mechanischen Widerstandsfähigkeit und ist ohne Walzschäden grundsätzlich nur unter der Voraussetzung möglich, dass diese hohe Energie projektspezifisch auch in den Boden eingetragen werden kann.
- Der qualitative Einfluss von Einbauwassergehalt und Trocknungsverlauf ist auf alle nicht quellfähigen Böden übertragbar.
- Der genaue Vorgang des Rissbeginns in einer tonmineralischen Dichtung ist sehr komplex, die Grenzbedingungen lassen sich z. Zt. zwar noch nicht in einem geschlossenen Ansatz befriedigend quantifizieren, aber durch das zusammengetragene Wissen und von verschiedenen Wissenschaftlern durchgeführte Experimente nachvollziehbar erklären. Er dürfte im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängen:
 - Material- und einbaubedingte Partikel-, Poren- und Aggregatstruktur sowie Aggregatfestigkeit als bestimmende Einflussgrößen für die Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit (Dehnsteifigkeit),
 - Überlagerungsdruck und Querdehnung,

- von der Saugspannung abhängige Zugfestigkeit des Materials,
 - Dauer der Beanspruchung,
 - Dicke der Dichtung. Risse reichen bis in eine Tiefe, bis zu der Änderungen der Saugspannungen stattfinden. Dünne Dichtungslagen reagieren damit empfindlicher als dicke.
- Es liegen erste experimentelle Ansätze vor, den Rissbeginn dünner Bodenschichten (5 cm) in einer Festwandzelle zu überprüfen [48]. Ihre Übertragbarkeit auf reale Bedingungen ist jedoch wegen der begrenzten Probenstärke (s. o.) noch nicht abschließend geklärt.

Abgrenzung Oberflächenabdichtungen - Basisabdichtungen

In Bezug auf Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen ergeben sich hinsichtlich der Initiierung und der Auswirkungen von Wassergehaltsänderungen auf die Zielgrößen Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit sowie der Beständigkeit dieser Eigenschaften große Unterschiede.

Basisabdichtungen

Unter der wesentlichen Voraussetzung, dass ein Temperaturgradient zwischen Deponieuntergrund (geologische Barriere) und Deponiekörper oder sonstige Potenzialunterschiede dauerhaft ausgeschlossen werden können und ein regelkonformer Standort vorliegt, ist sowohl für die tonmineralische Einzeldichtung (DK I) wie auch für die mineralische Dichtungslage der Kombinationsdichtung (DK II, DK III) eine kritische Wassergehaltsänderung eher nicht zu erwarten. Eine Einschränkung hinsichtlich der Materialauswahl und eine Abweichung von der derzeitigen Anforderung auf Einbau mit einem Luftporengehalt von $n_a \leq 5 \%$, was etwa einem Sättigungsgrad $\geq 90 \%$ entspricht, ist daher nicht vorzunehmen. Das eingeregelterte Porengefüge und plastische Materialverhalten tonmineralreicher Böden, die in der Regel günstigeren k-Werte sowie die höheren mechanischen Widerstände sind an der Basis ein ganz wesentlicher Aspekt für die Gesamtsicherheit der Deponie. Natürliche tonmineralische Böden, die als Verwitterungsboden oder Sediment das Endprodukt einer langen Entwicklungsgeschichte im geologischen Zeitmaßstab darstellen, bieten damit gute Voraussetzungen für ein Dichtungsmaterial, solange nicht gegen bestimmte Schutzbestimmungen verstoßen wird. Im Falle der Kombidichtung an der Basis wäre ein solcher Verstoß gegeben, wenn z.B. aufgrund von exothermen Reaktionen im Deponiekörper (z.B. bestimmte Aschedeponien) und in deren Folge ein hoher Temperaturgradient von innen nach außen entsteht. Der durch den Temperaturgradienten induzierte Feuchtefluss (siehe auch Kapitel 5.5) zur kalten Seite würde langfristig zwangsläufig zu einer irreversiblen Schädigung der mineralischen Komponente führen. Eine ähnlich schädigende Wirkung würde z.B. auch von einem grundwasserfernen Dichtungsaufleger hoher Kapillarität ausgehen. Sie steht dann zum Zeitpunkt des Ausfalls der KDB nicht mehr als langfristig wirkende technische Barriere zur Verfügung. Mit einer vergleichbaren Schädigung einer mineralischen Einzeldichtung (DK I) wäre zu rechnen, wenn mit der exothermen Reaktion im Deponiekörper zumindest über einen bestimmten Zeitraum das Entstehen von Sickerwasser und damit eine natürliche Befeuchtung der Dichtungsoberseite behindert würde. Eine solche Schädigung wäre auch bei einer späteren Wiederbefeuchtung durch Sickerwasser nicht rückgängig zu machen. Diese nach-

teiligen Folgen können wirksam nur durch einen Verzicht auf die Kunststoffdichtungsbahn und Ersatz durch eine zweite mineralische Dichtungskomponente begegnet werden, die in der Betriebsphase direkt mit Sickerwasser beaufschlagt werden.

Die Vorgabe eines Mindestgehaltes an quellfähigen Tonmineralien ist nicht zu begründen und sollte zukünftig entfallen. Die im Vergleich zum gesamten Schadstoffpotenzial absolut vernachlässigbare Adsorptionskapazität steht in keinem Verhältnis zu der möglichen Beeinträchtigung des Durchlässigkeitsverhaltens durch chemisch-mineralogische Prozesse.

Oberflächenabdichtungen

Das Grundkonzept der Kombidichtung (siehe auch Kapitel 5.2) geht davon aus, dass die mineralische Dichtungskomponente eine deutlich längere Wirksamkeitsdauer hat als die Kunststoffdichtungsbahn. Einen belastbaren positiven Nachweis hierfür gibt es bisher aber nicht, zum einen weil solche Systeme erst seit wenigen Jahrzehnten Anwendung finden, zum anderen weil die Bereitschaft von Deponiebetreibern nicht besonders groß ist, einen solchen Nachweis z.B. durch Freilegung zu führen. Dort, wo aber nachgeschaut wurde, haben tonmineralische Oberflächenabdichtungen häufig eine nachlassende Wirkung gezeigt [36], [37].

Aus den Darstellungen in den vorangegangenen Abschnitten wird deutlich, dass hinsichtlich der Zielgrößen Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit und deren Dauerbeständigkeit sehr komplexe und sich teilweise ausschließende Abhängigkeiten bestehen. Eine einfache Reduktion der Problemlösung auf die Empfehlungen:

- Verwendung von leicht- bis mittelplastischen Böden oder von gemischtkörnigen Bodenmaterialien,
- Einbau unterhalb des optimalen Wassergehaltes der Proctor-Kurve,
- Erhöhung der Verdichtungsarbeit zur weiteren Struktur- und damit k-Wert-Verbesserung,

ist nicht zielführend. Dies gilt sowohl für mineralische Einzeldichtungen (DK I) als auch mineralische Dichtungslagen in Kombination z.B. mit überlagernder Kunststoffdichtungsbahn. Die Komplexität wird zudem dadurch erhöht, dass nach der Bewertung und Prognosesicherheit der Einwirkungen eine gesicherte Langzeitprognose zum Wasserhaushalt erhebliche Probleme aufwirft, ja praktisch derzeit unmöglich erscheint.

Bei mineralischen Einzelabdichtungen (DK I) ergeben sich aus der Anforderung nach Beständigkeit gegenüber Zwangsverformungen und Trockenrissen zudem gegensätzliche Anforderungen an das Dichtungsmaterial.

Bei weitgehend setzungsfreiem Deponiekörper sind gleichermaßen feinkörnige Böden der Gruppen TL-TA einsetzbar, bei größeren Verformungen und damit kleineren Biegeradien ist dagegen ein ausgeprägt plastischer Ton (TA) nach wie vor günstiger. Die plastischen Eigenschaften nehmen mit dem Anteil toniger Bestandteile und dem Einbauwassergehalt zu. Die einzuhaltende Bruchdehnung des Materials ist aber immer im Zusammenhang mit den Anforderungen aus der Trockenrissgefährdung zu sehen. Es bleibt aber festzuhalten, dass die mechanische Beanspruchbarkeit natürlicher feinkörniger Materialien sich bei den gegebenen Spannungszuständen nur in engen Grenzen variieren lässt.

Die Beanspruchungen durch periodischen Wasserentzug infolge aufgeprägt hoher Saugspannungen können realistisch nur durch geeignete Schutzmaßnahmen verhindert werden. Solche Maßnahmen können sein [36, 76]:

- Robuster Systemaufbau und damit Schutz der Abdichtung durch eine an die Standortbedingungen angepasste Rekultivierungsschicht größerer Mächtigkeit mit dem Effekt der Vergleichsmäßigung oder sogar des weitgehenden Wegfalls der thermischen Beanspruchung in einer Dichtung.
- Größere Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht sind dabei wichtiger als hohes Wasserspeichervermögen, angepasster Bewuchs, optimale pflanzen-physiologische Voraussetzungen und gute Nährstoffversorgung.
- Vermeidung einer Luftzirkulation (Kaminwirkung) in einer zeitweise trockenfallenden Dränschicht durch konstruktive Maßnahmen.
- Zusätzlicher Schutz der mineralischen Dichtung durch eine Kapillarschutzschicht (Sand oder Vlies) oder eine Entwässerungsschicht feinerer Körnung.
- Keine Gasdränschicht als unmittelbares Dichtungsaufleger, in der druck- oder temperaturabhängige Gasbewegungen und Feuchtetransporte stattfinden können.
- Vermeidung einer Temperaturübertragung aus dem Deponiekörper infolge exothermer Umsetzungsreaktionen auf die Unterseite der Dichtung und Auflagerschicht.
- Die Verwendung von kornabgestuften, weitgehend schrumpffresistenten gemischtkörnigen Böden.
- Leicht- bis mittelplastische Böden bieten dagegen a priori keine Sicherheit gegen eine Trockenrissgefährdung. Bei einer solchen Materialpräferenz ist zu beachten, dass die aufnehmbaren Bruchdehnungen so klein sind, dass schon bei einer geringfügigen Schrumpfung Risse oder zumindest eine Schwächung auftreten kann. Die Einhaltung der zu fordernden Mindest-k-Werte ist gesondert zu überprüfen.

Für die Kombidichtung (DK II und III) gelten dem Grunde nach die gleichen Überlegungen wie für die Einzeldichtung, wenn die Funktionsfähigkeit der mineralischen Dichtungskomponente über die "kurzfristige" Lebensdauer der Kunststoffdichtungsbahn hinaus voll wirksam bleiben soll. Ob diese Forderung generell zu erheben ist, dürfte neben der Deponieklasse auch vom jeweiligen Einzelfall (siehe auch Kapitel 5.3) abhängen. Dabei sind folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- DK I: Die Stoffgehalte des Deponats liegen häufig im geogenen Rahmen, weshalb keine Anforderungen an eine langfristig zu minimierende Durchsickerung bestehen dürften.
- DK II: Die Stoffgehalte der Deponie wie auch die Inhaltsstoffe im Sickerwasser dürften infolge der Abbauprozesse - ggf. unterstützt durch technische Maßnahmen - zurückgehen. Hier ist zu prüfen, ob nach Ausfall der KDB eine geringere Abdichtungswirkung standortspezifisch im Rahmen einer Gesamtbetrachtung ggf. akzeptiert werden kann.

- DK III: Eine für sehr lange Zeiträume funktionsfähige OAD und damit auch Dauerbeständigkeit der mineralischen Komponente lange über die Funktionsdauer der Kunststoffdichtungsbahn hinaus sind Grundvoraussetzungen für diesen Deponietyp. Die Lösung kann nach derzeitiger Einschätzung eigentlich nur in der Kombination einer robusten, optimierten Rekultivierungsschicht und einer hochwertigen, gemischtkörnigen mineralischen Dichtungskomponente unter einer Kunststoffdichtungsbahn bestehen. Gemischtkörnige Dichtungsmaterialien sind jedoch relativ biegesteif und setzen voraus, dass in ihrem Lebenszyklus keine oder nur minimale mechanische Beanspruchungen einwirken. Fein-, mittel- oder hochplastische Tone können nur dann eingesetzt werden, wenn in Bezug auf die Trockenrissgefährdung eine kritische Wassergehaltsänderung sicher ausgeschlossen werden kann.

6.4 Hydraulische Einwirkungen und Beständigkeit

6.4.1 Beschreibung der Phänomene

Bei der Durchsickerung mineralischer Dichtungsstoffe kann es zu Stoffumlagerungen kommen, die die Beständigkeit der Dichtungsschicht beeinträchtigen können. Besonders gefährdet sind künstliche schwach bindige Lockergesteinsmischungen wie Erdbeton. Stoffumlagerungen können aber auch in leicht plastischen Böden, z.B. Schluffe, eintreten. Die folgenden Ausführungen gelten daher ausschließlich für diese Böden. Mittel- und hochplastische Tone (TM, TA) sind hiervon in der Regel nicht betroffen.

Bei der An- bzw. Durchströmung von porösen Medien durch Wasser unterscheidet man grundsätzlich zwischen drei mechanischen Stoffumlagerungsvorgängen, die die bodenmechanischen Eigenschaften des betreffenden Mediums verändern können:

1. Kolmation (oder auch Kolmatation)
2. Suffosion
3. Erosion

6.4.2 Erscheinungsformen hydrodynamisch bedingter Bodeninstabilität

6.4.2.1 Kolmation

Unter Kolmation versteht man danach die Ablagerung von feinem Material aus dem Sickerwasser an der Oberfläche eines porösen Körpers oder in den Poren bzw. Hohlräumen desselben.

Bezogen auf das Dichtungselement ist die Kolmation ein gewünschter Effekt, da sie zur Dichteerhöhung und damit zur Durchlässigkeitsverminderung beiträgt. Sie wird in Dichtungen mit aktiver Rissicherung (z.B. System *Kügler*) gezielt in Anspruch genommen.

6.4.2.2 Suffosion

Unter Suffosion versteht man die Umlagerung und den Transport von Teilchen der feineren Fraktionen eines Erdstoffes (Skelettfüllung) im vorhandenen Porenraum des Erdstoffes (Erdstoffeskelett) durch das Sickerwasser, so dass es nicht zur Zerstörung der Erdstoffstruktur bzw. des mineralischen Dichtungselementes selbst kommen muss.

Neben der mechanischen Suffosion spricht man von der chemischen Suffosion bei Lösung und Abtransport von Substanzen bedingt durch die chemische Zusammensetzung von Sickerwasser.

In nicht- bzw. schwachbindigen Lockergestein bewirkt die Suffosion u.a.:

- die Veränderung der Kornzusammensetzung, der Kohäsion und des Reibungswinkels,
- die Erhöhung des Porenvolumens, des Durchlässigkeitsbeiwertes, des Sickerwaserdurchflusses und des Sickerwasserströmungsdruckes,
- die Vorbereitung der Erosion bei langandauernder Suffosion.

Unterteilt wird die Suffosion in drei Hauptformen:

- innere Suffosion,
- äußere Suffosion,
- Kontaktsuffosion.

Innere Suffosion bezeichnet die Umlagerung der feinen Bestandteile einer künstlichen Lockergesteinsmischung innerhalb der Lage. In Richtung der Durchsickerung werden die Feinbestandteile an geeigneter Stelle wieder abgelagert, so dass die Dichtungslage dann Bereiche mit Fehlkörnung aufweist.

Äußere Suffosion wird durch den Austrag von Feinbestandteilen aus der Lockergesteinslage heraus charakterisiert, dies kann bei aufsteigender geeigneter Sickerwasserströmung der Fall sein.

Kontaktsuffosion ist gekennzeichnet durch den Austrag der Feinbestandteile der Dichtungsschicht in die gröberen Poren der angrenzenden Schicht, also bei Kontakt von Dichtung zum anstehenden Untergrund.

Je nach Kornzusammensetzung der Bodenmischung einer mineralischen Abdichtung sowie Standort und angenommenem Durchströmungsmechanismus einer Deponie sind alle drei Suffosionsformen unter ungünstigen Umständen denkbar.

Als Sonderform der Suffosion kann man die Röhrenbildung ansehen, sofern das Korngefüge hierdurch nicht zerstört wird (Übergang zur inneren Erosion).

Faktoren, die zur Röhrenbildung führen können, sind Wurzellöcher, Risse und Zonen relativ höherer Durchlässigkeit oder niedrigerer Dichte entlang möglicher Fließwege.

Im Erdbau ist in sandigen Schluffen und schluffigen Sanden bei ausreichend hohem Gradienten Röhrenbildung bekannt. Stark- und mittelbindige Böden sind aufgrund der Bindungskräfte zwischen den einzelnen Tonmineralen gegenüber Belastung durch das Strömungsgefälle deutlich stabiler als schwachbindige Böden, in dem im Deponiebau üblichen Gradientenbereich sogar durchweg als stabil zu bewerten.

6.4.2.3 Erosion

Erosion ist die Umlagerung und der Transport der Teilchen fast aller Fraktionen eines Erdstoffes an der freien Oberfläche eines Erdstoffkörpers oder im Inneren desselben, in größeren bereits vorhandenen oder sich im Prozess der Auswaschung erst bildenden, meist röhrenförmigen Hohlräumen, durch fließendes Wasser, so dass es zur ständig fortschreitenden Zerstörung der Erdstoffstruktur kommt.

Im Hinblick auf die Wirkung einer mineralischen Abdichtung einer Deponie ist gerade die Erosionsbeständigkeit der mineralischen Dichtungsschicht von entscheidender Bedeutung, da die Erosion einzelner Bodenteilchen der Abdichtung bei Durchströmung von Wasser einen sich selbst mit der Zeit verstärkenden Faktor darstellt, kann eine einmal entstandene Fehlstelle im Laufe der Zeit zur Zerstörung der gesamten Abdichtung führen.

Man unterscheidet drei Formen der Erosion, die stets zur Strukturzerstörung des Erdstoffes, zumindest aber zu erheblichen Fehlstellen im Erdstoff führen.

- äußere Erosion,
- innere Erosion,
- Kontakterosion.

Die **äußere Erosion** kennzeichnet den Austrag und die Fortführung von Kornpartikeln an der freien Oberfläche einer Dichtungslage. Bei Verwendung von mineralischen Lockergesteinsmischungen für ein Dichtungselement kann man die äußere Erosion ausschließen. Dagegen ist die äußere Erosion in jedem Fall an den Flanken einer noch nicht verfüllten Deponie im Bereich der seitlichen Basisabdichtung durch exogene Einwirkung (Verwitterung, Niederschläge) möglich. Diese exponierten Bereiche sind bezüglich der Abdichtung besonders gefährdet und deshalb gut zu schützen.

Innere Erosion ist charakterisiert durch den Austrag einzelner Partikel in größeren bereits vorhandenen oder sich im Prozess der Auswaschung erst bildenden, meist röhrenförmigen Hohlräumen. Mit zunehmender Sickerströmung bzw. Querschnittsvergrößerung des Transportweges werden immer größere Lockergesteinspartikel der Dichtungsschicht herausgelöst. Innere Erosion in bindigen Erdstoffen ist entweder eine Folgeerscheinung bereits erfolgter Kontakterosion (vergleichbar der rückschreitenden Erosion) oder eine Folge von durch den Einbau bedingter Inhomogenitäten, die zur Röhrenbildung als Mischphänomen zwischen Erosion und Suffosion (vgl. Suffosion) führen.

Von primärer Bedeutung ist die **Kontakterosion** an Grenzflächen von Dichtungsstoff gegen andere Umgebungsmaterialien. Die feineren Bestandteile der Dichtungslage werden in die größeren Porenräume eines angrenzenden Korngerüsts hineintransportiert. Durch die Austragungsvorgänge kommt es dann auch zu Umlagerungen des gröberen Kornmaterials an der Grenzfläche zur erodierten Lage.

Der Vorgang der Kontakterosion eines bindigen Erdstoffes bei Durchsickerung besteht in einem Ablösen von Aggregaten aus dem Erdstoff bei Überschreiten der Zugfestigkeit (d.h. des inneren Zusammenhaltes) durch den Strömungsdruck des durchsickernden Wassers. Die Größe dieser Aggregate richtet sich nach den mineralogischen Eigenschaften des Materials und den Einbaubedingungen. Mit steigendem Plastizitätsindex, zunehmendem Wasser-

gehalt und wachsender Verdichtung erfolgt auch eine Vergrößerung der sich ablösenden Aggregate [50]. Die abgelösten Aggregate sind etwa gleich den Porengrößen der angrenzenden größeren Schichten (z.B. Filterschicht), dies gilt für Porendurchmesser von 5-10 mm [61].

6.4.3 Grenzkriterien für Gefügeveränderungen von mineralischen Dichtungsmaterialien

Unter der Bedingung, dass infolge unzureichender Dichtigkeit eine Sickerwasserströmung auftritt, können sich Suffosions- und Erosionsvorgänge einstellen und die Dauerbeständigkeit der mineralischen Dichtung beeinträchtigen; die Beständigkeit der bevorzugt schwachbindigen Erdstoffe stellt sich damit als Filterproblem dar.

6.4.3.1 Suffosionskriterien

In der Anfangsphase jeder Erosionserscheinung tritt eine Suffosion auf. Sie wird von folgenden Parametern des Erdstoffes und der Sickerwasserströmung beeinflusst:

- Geometrie und Abstufung der Körner,
- Geometrie der Poren,
- mechanische Eigenschaften des Erdstoffes,
- Richtung des Sickerwasserstromes,
- Geschwindigkeit bzw. hydraulisches Gefälle der Sickerwasserströmung.

Bei der Untersuchung der Suffosionssicherheit sind also **geometrische Bedingungen** des Erdstoffes und **geohydraulische Einflüsse** zu unterscheiden.

Entsprechend diesen beiden Merkmalen muss einmal der Nachweis gegenüber der Möglichkeit der **geometrischen Suffosion** und zum zweiten auch gegenüber der **hydraulischen Suffosion** geführt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Nachweis der geometrischen Suffosionssicherheit den Nachweis der hydraulischen Suffosionssicherheit erübrigt.

Der Grad der geometrischen Suffosionssicherheit ergibt sich aus dem Vergleich des maßgebenden Korndurchmessers der betrachteten Kornverteilung eines Erdstoffes und dem maßgebenden Porendurchmesser der gleichen Kornverteilung unter Berücksichtigung eines Schlupfmaßes F [63]:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{\min, \text{vorh}}}{\underbrace{F \cdot d_p}} \geq 1,5$$

$d_{\min \text{ zul.}}$

mit:

$d_{\min, \text{vorh}}$ = kleinster Korndurchmesser des untersuchten Bodens (aus Kornverteilung) [m]

d_p = ideeller mittlerer Porenkanaldurchmesser [m] des angrenzenden Materials

$$F = \underbrace{0,455 \cdot \sqrt[6]{U}}_f \cdot e \cdot d_{17} \quad (\text{siehe Abbildung 34})$$

e = Porenzahl [-]

U = Ungleichförmigkeitszahl = $\frac{d_{60}}{d_{10}}$ [-]

d_{17} = Korndurchmesser bei 17 % Siebdurchgang [m]

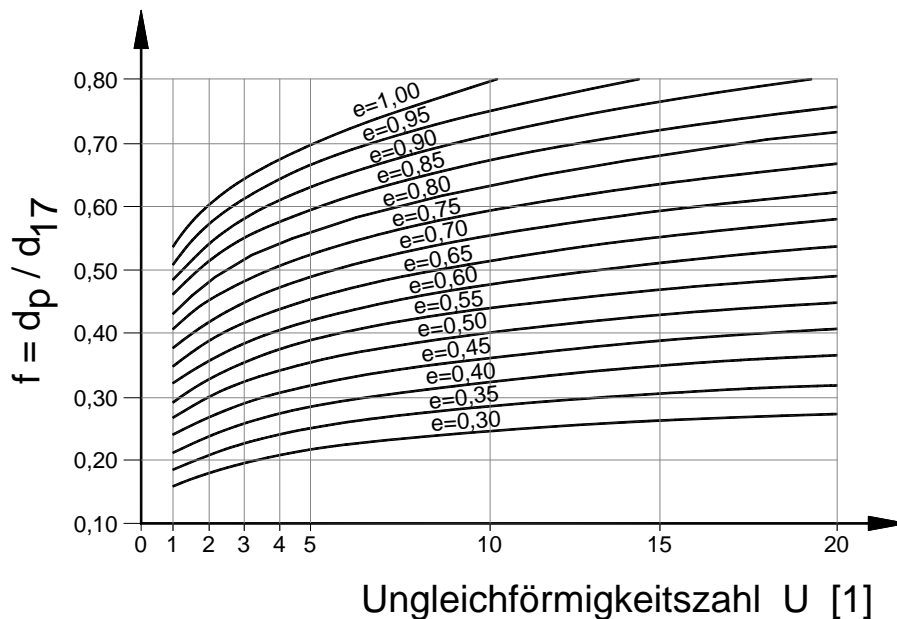


Abbildung 34 Diagramm zur Bestimmung des maßgebenden Porendurchmessers

$$d_p = f \cdot d_{17}$$

Die Stabilität bindiger Feinteile in gemischtkörnigen Böden gegen Suffosion wird neben den Korngrößenverhältnissen auch von der Kohäsion geprägt [12]. Hierbei bewirkt eine Verringerung der Kohäsion auch eine Verringerung der Suffosionssicherheit und umgekehrt [82].

6.4.3.2 Erosionskriterien

Das Erosionspotential ist abhängig vom Bodentyp und seinen chemischen Eigenschaften, dem Verdichtungswassergehalt und der chemischen Zusammensetzung des durchsickernden Wassers.

Die Erosionsbeständigkeit von bindigen mineralischen Dichtungselementen bei Durchsickerung von Wasser ist von mehreren Faktoren abhängig. Wesentlich sind hierbei die Kornverteilung und die Porengröße des angrenzenden Filtermaterials, der hydraulische Gradient im Dichtungselement, der Tongehalt und die Plastizität sowie die Eigenfestigkeit (Zugfestigkeit) des Dichtungsmaterials. Die Betrachtung hinsichtlich der Beständigkeit mineralischer Dichtungsstoffe gegen Kontakterosion stellt sich als **Filterproblem** dar.

Kontakterosion verhindernde Faktoren sind kleinerer mittlerer Porendurchmesser der angrenzenden Schicht, erhöhte Zugfestigkeiten des Dichtungsmaterials und verringertes hydraulisches Gefälle. Die Umkehrung dieser Faktoren bewirkt eine Erhöhung der Kontakterosionsgefahr.

Zum Nachweis der Kontakterosion müssen folgende Angaben bekannt sein:

Dichtungsmaterial:	- Zugfestigkeit bzw. Kohäsion - Wichte - Kornverteilung - Neigungswinkel der Schichtgrenze
angrenzende Schicht:	- Kornverteilung - Porenanteil
hydraulische Angaben:	- Gradient - Wichte der durchsickernden Flüssigkeit

Rechnerisch kann die Sicherheit gegen Kontakterosion durch folgende Gleichungen ermittelt werden:

$$\eta = \frac{3 \cdot c_u}{8 \cdot d_p (\gamma_w \cdot i + \gamma)}$$

Rehfeld [62]

$$\eta = \frac{1,5 \cdot c_u}{d_p (\gamma_w \cdot i + \gamma)}$$

Davidenkoff [13]

$$\eta = \frac{6,2 \cdot \tan \varphi' \cdot c_u}{4 \cdot d_p i \cdot \gamma_w}$$

Müllner [56]

mit:

d_p = ideeller mittlerer Porenkanaldurchmesser [m] des angrenzenden Materials (siehe a. Abbildung 34)

c_u = nicht entwässerte Kohäsion [kN/m²]

γ_w = 10⁴ N/m³ = Wichte Wasser

γ = Wichte Dichtungsboden [kN/m³]

i = Gradient [-]

Hiervon abweichende Formeln sind in der *GDA-Empfehlung E3-7* und im *LWA-Merkblatt Nr. 18* [111] angegeben. Sie bedürfen der Überprüfung und ggf. Korrektur.

6.4.4 Bewertung

Bei gut abgestuften Mischböden als Dichtungsmaterial und entsprechender Abstufung des Materials der Auflagerschicht oder bei feinkörnigen Böden mit einer Mindestkohäsion von $c_u \geq 10$ kN/m² besteht eigentlich immer eine ausreichende Sicherheit gegen hydraulische

Instabilität. Die in der Regel günstige Beurteilung resultiert auch daraus, dass die für den Wasserbau entwickelten Kriterien auf mineralische Dichtungsschichten und den Übergang zu anderen Grenzsichten wegen des extrem geringen Feuchtetransportes nicht mehr zutreffen und eigentlich nicht mehr von einer "Durchströmung" gesprochen werden kann. Bei einer nach den *LAGA-Grundsätzen* [88] zulässigen Durchflussrate q treten an der Grenzfläche Dichtung/Auflager rechnerisch z.B. nur wenige cm^3/m^2 und Stunde über.

Neben den behandelten rechnerischen Verfahren können die entsprechenden Nachweise auch experimentell geführt werden.

6.5 Mechanische Einwirkungen

6.5.1 Beschreibung der Einwirkungen

Abdichtungen an der Deponiebasis und Deponieoberfläche können durch Setzungen bzw. Setzungsunterschiede so beansprucht werden, dass sie ihre Abdichtungsfunktion verlieren. Die Verformungen können zu Zugriss- oder Scherzonenbildung führen.

6.5.2 Bewertung, Nachweisverfahren

Auf der Seite der Beanspruchung lässt sich die Biegerissgefährdung nur durch einen standfesten Untergrund (Basis) oder eine Begrenzung der Verformung durch einen homogenen Aufbau des Deponiekörpers und einen Dichtungsbau an der Oberfläche erst nach Abklingen der wesentlichen Setzungen beeinflussen. Grundlagen für die Beurteilung des jeweiligen Zustandes können dabei nur auf der Grundlage von regelmäßigen Verformungsmessungen gewonnen werden. Der Widerstand gegen Biegebeanspruchungen lässt sich nur geringfügig durch die Auswahl des Dichtungsmaterials beeinflussen. Die einaxiale Bruchdehnung liegt je nach Plastizität und Wassersättigung bei $\varepsilon_z < 0,5 \%$. Die elastischen Eigenschaften liegen noch ein bis zwei Zehnerpotenzen niedriger und sind damit absolut vernachlässigbar. Die plastischen Eigenschaften nehmen zwar mit dem Ton- und Einbauwassergehalt zu, dieser günstige Effekt ist aber vor dem Hintergrund der sich dann einstellenden größeren Trockenrissgefährdung zu bewerten. Während die Beanspruchungen aus der Biegerissgefährdung nach den *GDA-Empfehlungen* [109] ermittelt werden können, sind für die Zugrissgefährdung infolge Wassergehaltsänderungen die Überlegungen nach Kapitel 6.3 maßgebend.

6.6 Schlussfolgerungen, Handlungsempfehlungen

6.6.1 Vorbemerkungen

Die *Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen* sind erstmalig vom Deutschen Institut für Bautechnik (DiBt) 1995 herausgegeben worden [86]. 1997 erfolgte die Herausgabe der *Zulassungsgrundsätze für Dichtungsschichten aus natürlichen mineralischen Baustoffen in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien* [87]. Sie beziehen sich auf Bauprodukte oder Baustoffe für die Herstellung gleichwertiger alternativer mineralischer Dichtungsschichten, die als Ersatz für die in den seinerzeit gültigen Technischen Anleitungen (*TA Abfall*, *TA Siedlungsabfall*) beschriebenen mineralischen Dichtungsschichten in den Regelabdichtungssystemen Verwendung finden. Die Zulassungsgrundsätze von 1997 konkretisieren dabei die allgemeinen Grundsätze

von 1995 für mineralische Dichtungsmaterialien. Wesentlich für beide Grundsatzpapiere ist die Annahme, dass die in den Technischen Anleitungen genannten tonmineralischen Regelabdichtungen alle Anforderungen an die Langzeitbeständigkeit erfüllen und - ohne dass dafür jemals ein entsprechender Nachweis geführt worden ist - als Maßstab für den Gleichwertigkeitsnachweis herangezogen werden können. In die gleiche Richtung gehen auch die "*Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme*" der LAGA [88] und darauf aufbauende spezielle Ausarbeitungen für bestimmte Varianten wie "*Bentonitmatten-Grundsätze*" [89].

Unter Bezug auf die DepV (siehe auch Kapitel 1) muss damit zukünftig aber auch für die tonmineralischen Baustoffe, die in Abdichtungssystemen Verwendung finden, die Eignung gegenüber den Behörden nachgewiesen werden. Der Nachweis gilt als geführt, wenn eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung der Länder für eine Abdichtungskomponente oder ein Abdichtungssystem vorliegt. Zu diesem Zweck ist ab 2010 eine neue *LAGA Ad-hoc-AG Deponietechnik* eingerichtet worden, die diese Grundsätze für die Nachweisführung auch natürlicher tonmineralischer Abdichtungen erarbeiten soll.

6.6.2 Probleme der Nachweisführung

Die bisher vorliegenden Grundsätze sind ausschließlich auf projektunabhängige Eignungsnachweise angewendet worden (z.B. geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD), *Trisoplast*, *METHA-Schlick*, *Bentokies* u. a. vergütete Mineralgemische mit speziellen Rezepturen) und Materialien, die im Vergleich zu natürlichen feinkörnigen Materialien i. d. R. deutlich unempfindlicher auf Wassergehaltsänderungen reagieren. All diesen Materialien und Systemen ist gemein, dass es sich um quasi technisch hergestellte Produkte handelt, deren Eigenschaften gezielt und in engen Toleranzen reproduzierbar und steuerbar sind sowie maschinell bereits eigen- und fremdüberwacht hergestellt werden. Es handelt sich darüber hinaus um patentgeschützte Systeme, die für den allgemeinen Markteinsatz konzipiert worden sind. Es handelt sich damit um ein gegenüber natürlichem, tonmineralischem Material völlig anderes Material- und Vermarktungskonzept.

Natürliche, tonmineralische Materialien sind zwar bisher auch einer Eignungsprüfung unterzogen worden, diese beschränkte sich aber im Wesentlichen auf Klassifizierungsversuche und den Zusammenhang zwischen Proctordichte und k-Wert. Gesonderte Untersuchungen zur Dauerbeständigkeit wurden nicht gefordert, sie wurde mit den Vorgaben nach *TA Abfall* und *TA Siedlungsabfall* (siehe auch Kapitel 6.6.1) als gegeben unterstellt.

Tonmineralische Materialien haben im Vergleich zu den maschinell hergestellten "Kunstaböden" den Nachteil, dass sie nur in einem regional begrenzten Vorkommen verfügbar sind und deshalb auch in der Regel bisher nur Eignungsnachweise für den Einzelfall vorgelegt wurden.

Erschwert wird die Nachweisführung auch dadurch, dass natürliche tonmineralische Materialien bereits aufgrund ihrer geologischen Entwicklung immer mit mehr oder weniger großen Streuungen behaftet sind (siehe auch Kapitel 6.3.3.6), die durch derzeit angewendete Aufbereitungsverfahren zwar eingeeignet werden, die Materialkonstanz der am Markt konkurrierenden "Kunstaböden" aber bei weitem nicht erreichen können. Damit sind für einen Eignungs-

nachweis sehr unterschiedliche Ausgangsvoraussetzungen gegeben, die zwangsläufig auch Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit der Verwertung dieser Materialien haben werden.

Ein weiteres Problem ist die bisherige Praxis der Nachweisführung und die Formulierung der Anforderungen an ein mineralisches Dichtungsmaterial in einem mehr oder weniger starren System von Prüfwerten und Einbauanforderungen. Es sollte deshalb ersetzt werden durch eine Festlegung von Zielwerten durch den Planer und die Genehmigungsbehörde, die die Besonderheiten des einzelnen Standortes (Setzungsprozesse, Klima, etc.) berücksichtigen und die bei der Materialauswahl und beim Bau des Dichtungssystems einzuhaltenden Prüfgrößen und Prüfwerte konkretisiert. Statt starrer Prüfgrößen- und Prüfwerte sollte ein Kriterienkatalog aufgestellt werden, anhand dessen die Eignung eines Materials im Einzelfall zu bewerten ist.

6.6.3 Handlungsempfehlungen

Aus den Darlegungen in den Kapiteln 6.1 bis 6.5 wird deutlich, dass das zentrale Problem für tonmineralische Dichtungsmaterialien der Nachweis der langfristigen Beständigkeit der Zielgrößen Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit gegenüber Einwirkungen ist, die im Wesentlichen auf Wassergehaltsänderungen in den gegenüber normalen Ingenieurbauwerken als extrem lang anzusetzenden Lebenszyklen zurückzuführen sind. Chemische Prozesse treten dagegen deutlich zurück.

Eine pauschale Forderung z.B. gemäß *LAGA-Grundsätzen* den Nachweis zu führen, dass die Abdichtungskomponente gegenüber relativen Wassergehaltsänderungen von bis zu 10 Gew.-% (bezogen auf den empfohlenen Einbauwassergehalt) schrumpfrissunempfindlich ist, ist nach Witt [78] zu allgemein, stellt kein physikalisch abgesichertes Kriterium dar und ist von vornherein auf natürliche mineralische Abdichtungsmaterialien nicht anwendbar. Während für Bentonitmatten ein solcher Wert unproblematisch ist, reißt ein gering, mittel- oder hochplastischer Ton bereits irreversibel bei sehr viel niedrigeren Werten.

Die notwendige stärkere Konzentration auf die Abhängigkeit der Zielgrößen Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit von den im Lebenszyklus einer Deponie auf den Wassergehalt einwirkenden Prozessen hat zwangsläufig zur Folge, dass die physikalisch-mechanische Materialcharakterisierung gegenüber der dtz. Praxis erweitert werden muss. Die frühzeitige Abklärung der gegenseitigen Beeinflussung einzelner Parameter bzw. Zielgrößen, insbesondere die nach Kap. 6.3, für ein konkretes Material ist unverzichtbar. Sie muss bereits vor einem Ausschreibungsverfahren vorliegen. Nur auf diese Weise kann rechtzeitig entschieden werden, ob ein bestimmtes Material die Kriterien nach Abschn. 6.6.2 im Einzelfall überhaupt erfüllen kann.

Nachfolgend wird hierfür ein erstes Konzept entwickelt (siehe Tabelle 12), das die folgende Teile umfasst:

- Teil I: Zusammenstellung der Projektdaten und projektspezifische Anforderungen an ein Dichtungsmaterial
- Teil II: Erweiterte physikalisch-mechanische Materialcharakterisierung in Laborversuchen
- Teil III: Aus- und Bewertung unter Verwendung der Informationen der Teile 1 und 2

Tabelle 12 Vorgehen zur Abschätzung der Rissgefährdung und Modifizierung der projektspezifischen Eignungsprüfung zur Beurteilung der Leistungsdaten einer feinkörnigen mineralischen Dichtung

Daten	Beschreibung	Parameter / Daten / Ergebnis	Bemerkungen	
Teil I:	Deponiestandort	Lage, Klima (Wetterdaten), Exposition		
	Art der Dichtung (OAD, BAD, ED, KD)	Aufbau, Form, Neigung		
	Abdichtungsmaterial (MD, MB)	Art, Klassifikation nach DIN 18196		
	Technische Vorgaben Erforderliche Dichtigkeit erforderliche Scherfestigkeit max. mögl. Verformungsbeanspruchung Mögliche bzw. zulässige Wassergehalts- bzw. Wasserspannungsänderungen	Labor-k-Wert k_{\min} $\varphi', c', \varphi'_{Ers.}, c_u, \varphi_u$ $\varepsilon_{\max. \text{zul.}}$ aus Setzungsabschätzungen, abgemindert mit einem Teilsicherheitsbeiwert aus Wasserhaushaltsberechnungen		
Teil II:	Laborversuche (erweiterte Materialcharakterisierung)	Klassifikationsversuche	nach DIN 18196	s. Abschn. 2.4
		Verdichtungsverhalten nach Proctor	Normalverdichtung und verbesserte Verdichtung, Ermittlung von $\rho_{Pr}, \rho_{Pr(v)}, W_{Pr}, W_{Pr(v)}$	s. Abschn. 2.4
		Durchlässigkeitsversuche	Bestimmung an allen Proctor-Prüfkörpern Darstellung der Beziehung $k = f(\rho_d, w, A_{Pr})$	s. Abschn. 6.3.3.5
		Schrumpfversuche	Aufnahme der Schrumpfkurven von nach Proctor verdichteten Proben. Darstellung $\Delta V/V$ oder Porenzahl $e = f$ (Wassergehalt, Saugspannung)	s. Abschn. 6.3.3.2
		Bestimmung der Wasserspannungskurve	Darstellung der Funktion Wasserspannung = f (volumetrischer Wassergehalt) für unterschiedliche Dichten entsprechend den Proctor-Kurven	s. Abschn. 6.3.3.2
		Zugversuche	Darstellung der wassergehaltsabhängigen Zugfestigkeit Bruchdehnung ε_{Br} an Prüfkörpern mit unterschiedlichem Einbauwassergehalt und unterschiedlicher Verdichtungsarbeit	s. Abschn. 6.3.3.4
		ggf. Sonderversuche	z.B. Ermittlung des Grenzwassergehaltes und des Rissbeginns in einer Festwand-Zelle nach Witt et al. [48]	
Teil III: Aus- und Bewertung			s. Abschn. 6.6.3.3	

6.6.3.1 Teil I: Projektdaten

Neben einer allgemeinen und speziellen Erfassung der Projektdaten (Tabelle 12) und des Standortes sind vom geotechnischen Planer die mechanischen Anforderungen an das Dichtungsmaterial aus dem Deponie- und Sicherheitskonzept heraus zu ermitteln:

- Dichtigkeitsanforderungen (k-Werte) für das konkrete Deponieprojekt,
- Anforderungen an die Scherfestigkeit (φ' , c' , c_u) auf der Grundlage von Standsicherheitsnachweisen für Bau- und Betriebszustände (Anfangs- und Endstandsicherheit) und Formulierung charakteristischer Mindestwerte,
- Anforderungen an das Biegezugverhalten ($\varepsilon_{\max \text{ zul.}}$) aus Verformungsnachweisen bzw. Setzungsabschätzungen für Basis und Oberfläche der Deponie.
- Abschätzung möglicher Wassergehalts- bzw. Wasserspannungsänderungen aus Modellberechnungen unter Berücksichtigung eines ausreichenden Teilsicherheitsbeiwertes zur Abdeckung der Prognoseunsicherheit.

6.6.3.2 Teil II: Erweiterte Materialcharakterisierung durch Laborversuche

Die erweiterte Materialcharakterisierung ist von dem Lieferanten des Dichtungstones beizustellen. Hierzu gehören:

- **Klassifikationsversuche** nach *DIN 18196* und weitgehend nach Kapitel 2 auch zur Erfassung natürlicher Materialstreuungen (Standardabweichung s , Variationskoeffizient v) mit Angabe charakteristischer Kennwerte (Bemessungswerte).
- **Verdichtungsverhalten** nach Proctor (*DIN 18127*)
 - Neben der normalen Verdichtung sind auch modifiziert verdichtete Prüfkörper oder mit speziell festgelegter Verdichtungsarbeit verdichtete Prüfkörper herzustellen.
- **Durchlässigkeitsversuche**
 - Die Versuche (*DIN 18130, T1*) sind auf alle Bereiche der Proctor-Kurve (nass und trocken) zu erweitern und der Zusammenhang:
$$k = f(A_{Pr}, w, \rho_d)$$
grafisch darzustellen.
- Direkte **Scherversuche** oder triaxiale Druckversuche nach *DIN 18137, T3* und *DIN 18137, T2* Ermittlung der charakteristischen Scherparameter (φ' , c' und c_u) für Standsicherheitsberechnungen (Anfangs- und Endzustand).
- **Schrumpfversuche**
 - Bestimmung des Schrumpfpotenzials und des Einflusses der Bodenstruktur an Prüfkörpern, die abweichend von *DIN 18122, T2* mit unterschiedlichem Einbauwassergehalt und unterschiedlicher Verdichtungsarbeit (zumindest normal und modifiziert verdichtet) hergestellt worden sind.

- Ableitung bodenspezifischer **Wasserspannungskurven** (Wasserspannungs-Wassergehaltsabhängigkeit, Strukturverhalten) an verdichteten Proben entsprechend der Probenvorbereitung für k-Wert-Bestimmungen und Schrumpfversuche.

- **Mechanische Widerstandsfähigkeit**

- Zugversuche bis zum Bruchversagen an Bodenproben mit einheitlicher Bodenstruktur (bei konstanter Zuggeschwindigkeit), die jedoch im Wassergehalt variiert werden. Die Bodenstruktur ist dabei vom Einbauwassergehalt und der jeweiligen Verdichtungsarbeit bei Herstellung der Prüfkörper abhängig.

6.6.3.3 Teil III: Auswertung und Bewertung, Abschätzung der Rissgefährdung

Mit den Untersuchungen nach Kapitel 6.6.3.2 ist zunächst nur eine weitergehende Charakterisierung des Dichtungsmaterials durch den geotechnischen Planer möglich im Hinblick auf:

- k-Wert-Verlauf in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt, Einbaudichte und daraus abgeleitet von der Bodenstruktur.
- Eingrenzung der für die Einhaltung eines maximalen k-Wertes maximal zulässigen Reduktion des Einbauwassergehaltes bei Limitierung der Verdichtungsarbeit z.B. aufgrund der deponiespezifischen Randbedingungen (im Wesentlichen Tragfähigkeit des Auflagers).
- Verlauf der Schrumpfkurven $\Delta V/V$ oder $e = f$ (Wassergehalt, Saugspannung) für Proben mit unterschiedlichem Einbauwassergehalt und unterschiedlicher Verdichtungsarbeit.
- Darstellung der Beziehungen:

Zugfestigkeit = f (Wasserspannung)
= f (volum. Wassergehalt)

Bruchdehnung = f (Wasserspannung)
= f (volum. Wassergehalt)

für Proben mit unterschiedlichem Einbauwassergehalt, unterschiedlicher Einbaudichte und Abtrocknungsgrad.

Mit diesen Informationen kann vom geotechnischen Planer eine Aussage darüber getroffen werden, bis zu welchem unter-optimalen Einbau-Wassergehalt bei projektspezifischer Limitierung der Verdichtungsarbeit (z.B. abhängig von den Auflagerbedingungen) die maximal zulässigen k-Werte, Zugdehnungen und Zugspannungen nach Kapitel 6.6.3.1 noch eingehalten werden können. Damit ist eine Optimierung des Material- und Einbaukonzeptes hinsichtlich der Kriterien Dichtigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Biegezugbeanspruchung grundsätzlich möglich.

Mit den empfohlenen Zusatzuntersuchungen kann auch in Abhängigkeit von dem Einbauwassergehalt, der Verdichtungsarbeit und der durch sie erzeugten Bodenstruktur eine zuverlässige Aussage zur relativen Schrumpfung und zum Restschrumpfungspotenzial bei induzierten Wassergehaltsänderungen gemacht werden. Diese Information reicht aber i.d.R.

nicht aus, um eine Quantifizierung der Rissgefährdung selbst - Risskriterium $Z = f(\text{Saugspannung})$ - vorzunehmen. Im Gegensatz zur Beurteilung der Biegezuggefährdung fehlt bei der Schrumpfrissbeurteilung eine eindeutig definierbare Einwirkungsgröße, z.B. die unter den gegebenen Standortbedingungen und den gewählten Systemabmessungen für das Dichtungssystem möglichen langfristigen Wassergehaltsschwankungen bzw. -änderungen.

Wegen der vorhandenen Prognoseunsicherheit besteht bis auf weiteres nur die Möglichkeit, die aus Wasserhaushaltsmodellen ableitbaren Beanspruchungen mit entsprechend hohen Zuschlägen (Teilsicherheiten) zu versehen und die Bemessungsgrundlage „Modellrechnung“ durch konkrete Messungen in einem auf Langzeitbeobachtungen ausgelegten Probefeld zu ergänzen und möglicherweise bereits unter vergleichbaren Bedingungen gewonnene Testfelderergebnisse in die Bewertung mit einzubeziehen.

7 Quellen

Literatur

- [1] August, Tazky-Gerth, Preuschmann, Jakob: Permeationsverhalten von Kombinationsabdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen. F + E Vorhaben 10203412, BAM, Berlin, Abschlussbericht 1992.
- [2] August, Tazky-Gerth: Die Wirkungsweise der Kombinationsabdichtung aus wissenschaftlicher Sicht. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Heft 65, 1992
- [3] August, Holzlöhner, Meggyes (Hrsg.): Optimierung von Abdichtungssystemen. Ergebnisse der Forschungsarbeiten im BMBF Verbundforschungsvorhaben "Weiterentwicklung von Abdichtungssystemen", Springer-Verlag, 1998
- [4] August, Stief: Zur Gleichwertigkeit von Deponieabdichtungen; Was ist mit wem und warum gleichwertig? Fragen und Antworten. - in: Tagungsband, 18. Fachtagung "Die sichere Deponie", SKZ Würzburg, 2002
- [5] Bauer, Taubner, Tippkötter: Messung der mechanischen und hydraulischen Verdichtungsfähigkeit von bindigen Substraten mit einem verbesserten Proctor-Versuch. Wasser und Boden, Band 53, 2001
- [6] Bauer, Horn, Taubner, Tippkötter: Primäre und sekundäre Grobporen in mineralischen Oberflächenabdichtungen. Müll und Abfall, Heft 10, 2004
- [7] Berger, Dunger: Vergleichende Simulationsrechnungen mittels der Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodelle HELP und BOHWAHALD, Proc. Weiterbildungsseminar des DGFZ e.V.: Simulation zum Halden- und Deponiewasserhaushalt, Dresden, 2000
- [8] Bouche: - Propriétés physiques et mécaniques des sols fins compactés. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Public 20, 1952
- [9] Brauns: Einfluss von Feuchteänderungen auf das Verhalten von feinkörnigen Böden bei Teilsättigung. FE-Vorhaben TH Karlsruhe (unveröffentlicht), 1999.
- [10] Brauns, Schneider, Gottheil: Wasserverlust und Schrumpfen bei mineralischen Dichtungen aus geotechnischer Sicht. Geotechnik, Vol. 23, Heft 1, 2000
- [11] Chapuis, Mbonimpa, Dagenais, Aubertin: A linear graphical method to predict the effect of compaction on the hydraulic conductivity of clay liners and covers. Bull. Eng. Geol. Env. 65, 2006
- [12] Davidenkoff: Deiche und Erddämme. Werner Verlag, Düsseldorf, 1964
- [13] Davidenkoff: Anwendung von Filtern im Wasserbau. Werner Verlag, Düsseldorf, 1976
- [14] Düllmann: Geotechnische Anforderungen an mineralische Deponiebasisabdichtungen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Heft 15, Erich-Schmidt-Verlag, 1985
- [15] Düllmann: Bodenphysikalische Untersuchung und Bewertung von mineralischen Stoffen für Deponie-Basisabdichtungen. Abschlussbericht zu einem FE-Vorhaben im Auftrag des Landes NRW, 1985

- [16] Düllmann: Mineralische Deponiebasisabdichtungen - Anforderungen an die Eignungsprüfung und Qualitätskontrolle. Mitteilungen zur Ingenieur- und Hydrogeologie, Aachen, Heft 24, 1986
- [17] Düllmann: Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen; Erfahrungsbericht über die Freilegung von Versuchsfeldern auf der Deponie Geldern-Pont. Seminarveranstaltung: Neuzeitliche Deponietechnik, Ruhruniversität Bochum, 1987
- [18] Düllmann: FE-Vorhaben: Schadensanalyse mineralischer Deponiebasisabdichtungen (unveröffentlicht), bearbeitet im Auftrag des Landes NRW., 1987
- [19] Düllmann: Geotechnische und baubetriebliche Einflüsse auf die Dichtigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton - Ergebnisse von Praxisversuchen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 19, Erich-Schmidt-Verlag, 1987
- [20] Düllmann, Echle, Cevrim: Tonmineralogische, chemische und bodenphysikalische Veränderungen in einer Ton-Versuchsfläche. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Heft 4, 1988
- [21] Düllmann, Echle, Cevrim: Geotechnische und mineralogische Veränderungen in einer Tondichtung nach mehrjährigem Sickerwasserkontakt. 7. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Bensheim, 1989
- [22] Düllmann: Untersuchungen zur chemischen Beständigkeit von mineralischen Deponieabdichtungen. FE-Vorhaben im Auftrag des Landes NRW, 1990
- [23] Düllmann: Factors affecting hydraulic conductivity of compacted clay liners. Mitt. Ing. und Hydrogeologie, Band 37, 1990
- [24] Düllmann, Hilpüsch: Zum Problem der Auswirkungen von Frost auf feinkörnige Deponieabdichtungen und technische Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung. 9. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Garmisch-Partenkirchen, 1993
- [25] Düllmann: Influence of frost on fine-grained landfill liners and technical preventive measures. 6th. International Landfill Symposium, Cagliari, Band 4, 1997
- [26] Düllmann: Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen; LGA-Veröffentlichung, Heft 51, 1998
- [27] Düllmann: Bestimmung der Festigkeit von Abfällen. Merkblatt Nr. 35 des LUA NRW, Essen, 2002
- [28] Düllmann: Schutzziele und Sicherheit von Deponien - Mitt. Ing. und Hydrogeologie, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Heft 80, RWTH-Aachen, 2002
- [29] Düllmann: Deponieabdichtungselemente. Mineralische Lösungen versus Geokunststoffe. 5. Geokunststoff-Kolloquium der Fa. Naue, Bad Lauterberg/Harz, 2007
- [30] Düllmann: Das Multibarrierensystem im Wandel? 8. Niedersächsisches Bodenschutzforum, Hannover, 2007
- [30-1] Djamadi: Geologische und Geotechnische Einflüsse auf das Verdichtungs- und Durchlässigkeitsverhalten selektiv granulierter Tertiärtone der Niederrheinischen Bucht. Dissertation RWTH Aachen. Mitteilungen zur Ingenieur- und Hydrogeologie. Bd. 42, 1991
- [31] Ehrig: Sickerwassermenge und Qualität. Entsorgungspraxis Spezial Nr. 9, Erich-Schmidt-Verlag., 1989

- [31-1] Frydman: Triaxial- and Tensile-strength Tests on Stabilised Soil. 3. Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1958
- [32] Gorantonaki, Schröder, Echle, Düllmann: Zum Verhalten von Abdichtungstonen bei Kontakt mit sauren Deponie-Sickerwässern. Wasser & Boden, Heft 5, 1994
- [33] Gottheil, Brauns: Thermische Einflüsse auf die Dichtwirkung von Kombinationsdichtungen-Testfelderergebnisse, in 13. Nürnberger Deponieseminar, Heft 76, 1997
- [34] Griffith, Joshi: Change in pore size distribution due to consolidation of clays, Geotechnique, Vol. 39, 1989
- [35] Hartge, Horn: Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag, Stuttgart, 1999
- [35-1] Heibrok: Zur Rissbildung durch Austrocknung in mineralischen Abdichtungsschichten an der Basis von Deponien. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 26, 1996
- [36] Henken-Mellies: Wirksamkeit und Wasserhaushalt einer mineralischen Deponieoberflächenabdichtung: Ergebnisse von Langzeituntersuchungen an einem Großlysimeter. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften. Band 3, Höxter, 2002
- [37] Henken-Mellies: Kombinationsabdichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen. Status-workshop. Höxter, 2006
- [38] Henken-Mellies: Water Balance and Effectiveness of Mineral Landfill Covers- Results of Large Lysimeter Test-Fields. Schanz, T. (Ed.). Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proc. in Physics, Vol. 112, 2007
- [39] Hilpüsch: Geologie und Materialeigenschaften des 7A-Tones (Liegendton der Indener Schichten) im Tagebau Inden. Dipl.-Arbeit am Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie der RWTH-Aachen (unveröffentlicht), 1990
- [40] Holzlöhner: Austrocknung und Rissbildung in mineralischen Schichten der Deponiebasisabdichtung. Wasser und Boden, Heft 5, 1992
- [41] Horn: Mineralische Deponie-Flächendichtungen aus gemischtkörnigen Böden. Bau-technik 69, 1989
- [42] Horn, Junge: Wege zur langfristig sicheren Abdichtung von Mülldeponien mit mineralischen Dichtschichten. Egloffstein/Burkhardt/Czurda (Hrsg.). 2002: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 125, Erich-Schmidt-Verlag, 2002
- [43] Horn, Baumgartl: Wege zur langfristigen sicheren Abdichtung von Mülldeponien mit mineralischen Dichtschichten. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 125, Erich-Schmidt-Verlag, 2002
- [44] Horn: Verbesserung der Langzeitbeständigkeit von Oberflächenabdichtungen durch modifizierte Abdichtungssysteme. Müll und Abfall, 2002
- [45] Horn: Analyse des Austrocknungsverhaltens von mineralischem Bodenmaterial anhand von Laboruntersuchungen. Höxteraner Bericht zu angewandten Umweltwissenschaften. Band 3, Höxter, 2002

- [46] Horn: Wirkung von periodischer Trocknung und Wiederbewässerung auf die Schrumpfrissbildung von künstlich erzeugten Gemischen aus groben Körnern und quellfähigem Material. Müll und Abfall, Heft 10, 2003
- [47] Horn: Empfehlungen zur Herstellung nicht schrumpfanfälliger mineralischer Wasserspeicherschicht für Deponieoberflächenabdichtungssysteme. Müll und Abfall, Heft 2, 2004
- [48] Köditz, Witt, Maubeuge: Laboratory tests on the effect of static load to the desiccation of GBR-C. Proc. 3rd Europ. Geosynthetic Conf., München, 2004
- [49] Kohler: Beständigkeit mineralischer Dichtstoffe gegenüber organischen Prüfflüssigkeiten - Empfehlungen für Deponiebauer und Deponiebetreiber. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 30. Erich-Schmidt-Verlag, 1989
- [50] Jeschke: Selbstdichtung in Stauanlagen bei Erosion bindiger Dichtungselemente. WWT, Jg. 25, 1975
- [51] Kunde, Düllmann, Kuntsche: Tonabdichtungen für Deponien - Neue Erkenntnisse aus Eignungsuntersuchungen. Braunkohle 5/88, 1988
- [52] Leussink, Visweswaraiya, Brendlin: Beitrag zur Kenntnis der bodenphysikalischen Eigenschaften von Mischböden. TH Karlsruhe, Heft 16, 1964
- [53] Melchior: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtige Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 22, 1993
- [54] Melchior, Vielhaber: Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen mit und ohne Entwässerungsschicht. Höxteraner Berichte zu angewandeten Umweltwissenschaften. Band 3, Höxter, 2002
- [55] Mitchell: Permeability of compacted clay. Journal Soil Mech. Found. Div., SM4, 4392, 1965
- [56] Müllner: Beitrag zur Untersuchung der Erosionssicherheit bindiger Mischböden bei vertikaler Durchströmung. Gesamthochschule Kassel, 1991
- [57] Obernosterer, Düllmann: Dauerbeständigkeit von nicht tonmineralischen Beimengungen in Dichtungstonen unter Deponiebedingungen. 10. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Freiburg, 1995
- [58] Obernosterer: Bodenphysikalische Beständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen mit reaktionsfähigen Beimengungen bei Sickerwasserangriffen. Dissertation TH Aachen. Mitt. Ing.- und Hydrogeologie; Heft 74, 2002
- [59] Obernosterer, Krob: Bewertungshilfe für Deponien in NRW, in: Mitt. Ing.- und Hydrogeologie, Nr. 50, RWTH Aachen, 2002
- [60] Ramke, Witt, Bräcker, Tiedt, Düllmann, Melchior: Ergebnisse des Status-workshops „Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme“, 2007, in: Ramke, Witt, Bräcker, Tiedt: Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme – Status-workshop. Höxteraner Berichte zur angewandten Umweltwissenschaft, Band 6 (2007), Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter
- [61] Rehfeld: Die Erosionsbeständigkeit bindiger Lockergesteine. Wiss. Z. TU Dresden 16, 1967

- [62] Rehfeld: Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber der Wirkung des Sickerwassers. WWT, Jg. 18, 1968
- [63] Reuter, Klengel, Pasek: Ingenieurgeologie. Verlag Deutsch, Frankfurt, 1978
- [64] Scheffer, Schachtschabel: Handbuch der Bodenkunde. Enke-Verlag, Stuttgart, 1998
- [65] Scherbeck: Geotechnisches Verhalten mineralischer Deponie-abdichtungsschichten bei ungleichförmiger Verformungseinwirkung. Dissertation Ruhr-Universität Bochum. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Heft, 16, 1992
- [66] Schick: Die pF-Kurve bindiger Böden bei großen Wasserspannungen., Bautechnik, Band 79, 2002
- [67] Schröder: Bodenphysikalische Untersuchungen zum Einfluss von Deponiesickerwässern auf die Dichtstoffeigenschaften von Tonen bei statischen und dynamischen Reaktionssystemen. Dissertation TH Aachen. Mitt. Ing. und Hydrogeologie, Heft 52, 1993
- [68] Schröder, Düllmann: Eignung von Tonen aus Braunkohlentagebauen als Deponie-Barrierematerial. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 3/94, 1994
- [69] Seed, Chan: Structure and strength characteristics of compacted clays. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 77, 1959
- [70] Terzaghi, Peck: Soil Mechanics in Engineering Practics. Wiley and Sons, New York, 1961
- [71] Vielhaber: Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen - Feldversuche in bindigen mineralischen Dichtungen unter Kunststoffdichtungsbahnen. Dissertation TU Hamburg, 1995
- [72] Vielhaber: Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen - Feldversuche, Aufgrabungen, Berechnungen. Veröff. des LGA, Heft 76., 1997
- [73] Wagner: Mineralveränderungen bei der Migration von Schwermetalllösungen durch Tongesteine. Schriftenreihe Angewandte Geologie, 4, Karlsruhe, 1988
- [73-1] Wendling: Untersuchungen zur Entstehung von Austrocknungsrisse in mineralischen Deponieabdichtungen. Veröffentlichungen Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau, TU Kaiserslautern, Heft 10, 2004
- [74] Wienberg: Zum Einfluss organischer Schadstoffe auf Deponietone - Teil 1: Unspezifische Interaktionen. Abfallwirtschaftsjournal 2; Nr. 4, 1990
- [75] Witt, Zeh, Fabian: Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen. Müll und Abfall, Heft 11, 2004
- [76] Witt: Plädoyer für eine angemessene Betrachtung des Langzeitaspektes bei der Planung und der Genehmigung von Oberflächenabdichtungen. Egloffstein et al. (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2005, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 135, Erich-Schmidt-Verlag, 2005
- [77] Witt, Zeh: Wirkungsweise von Kapillarschutzschichten für mineralische Oberflächenabdichtungen. Henken-Mellies (Hrsg.): 16. Nürnberger Deponieseminar 2005, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 84, 2005

- [78] Witt: Überlegungen zu geotechnischen Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme. Status-workshop "Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme", Höxter, 2006
- [79] Zeh: Die Zugfestigkeit bindiger Böden als Kriterium der Rissgefährdung mineralischer Oberflächenabdichtungen. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar 2007. Schanz, Witt (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik Weimar, Heft 13, 2007
- [80] Zeh, Witt: The Tensile Strength of Compacted Clays as Affected by Suction and Soil Structure. Schanz, T. (Ed.): Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proc. in Physics, Vol. 112, 2007
- [81] Zepp: Bericht über das alternative Oberflächenabdichtungssystem auf der ZD Castrop-Rauxel, Ruhr-Universität Bochum, 2005
- [82] Ziems: Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber der Wirkung des Sickerwassers. WWT, Jg. 17, 1967

Technische Bezugsdokumente

Bundesweite Dokumente

- [83] Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV) vom 16.07.2009
- [84] TA Abfall - Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, 1991
- [85] TA Siedlungsabfall (TA Si) - Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, 1993
- [86] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) - Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen, 1995
- [87] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) - Zulassungsgrundsätze für Dichtungsschichten aus natürlichen mineralischen Baustoffen in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien, 1997
- [88] LAGA - Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme. LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnische Vollzugsfragen", 2004
- [89] LAGA: Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen als mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien „Bentonitmatten-Grundsätze“, 2007
- [90] Ad-hoc-AG Boden (2005) - Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover.

DIN Normen

- [91] DIN 4020 (2003) - Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke.
- [92] DIN 18122, T 1 (1997) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.
- [93] DIN 18122, T 2 (2000) - Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte: - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze.
- [94] DIN 18123 (1996) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- [95] DIN 18127 (1997) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Proctor-Versuch.
- [96] DIN 18128 (2002) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes.
- [97] DIN 18129 (1996) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Kalkgehaltsbestimmung.
- [98] DIN 18130 T1 (1998) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche.
- [99] DIN 18132 (1995) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.
- [100] DIN 18134 (1993) - Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte: Plattendruckversuch.
- [101] DIN 18135 (E) (1999) - Eindimensionaler Kompressionsversuch.
- [102] DIN 18136 (2003) - Baugrund: Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch.
- [103] DIN 18137, T1 (1990) - Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte: Bestimmung der Scherfestigkeit; Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen.
- [104] DIN 18137, T2 (1990) Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte: Bestimmung der Scherfestigkeit; Triaxial-Versuch.
- [105] DIN 18137, T3 (2002) - Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit; Direkter Scherversuch.
- [106] DIN 18196 (2006) - Erd- und Grundbau: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- [107] DIN 19667 (2009) - Dränung von Deponien.
- [108] DIN 50035, T2 (1989) - Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien, Polymere Wirkstoffe.

GDA-Empfehlungen

- [109] GDA Empfehlung E 2-13, 1997: Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungsschichten. In Neff (Hrsg.): GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, Ernst & Sohn.
- [110] GDA Empfehlung E 2-30, 2004: Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. Bautechnik 75 (9), Version 2004, www.gdaonline.de.

Dokumente für das Land Nordrhein-Westfalen

- [111] Landesamt für Wasser und Abfall NRW: Richtlinie Nr. 18: Mineralische Deponieabdichtungen, Abfallwirtschaft NRW, Düsseldorf, 1993
- [112] Landesumweltamt NRW: Merkblatt Nr. 42, Gleichwertigkeit von Deponiesystemkomponenten. Teil 1: Geologische Barriere, nicht veröffentlichter Entwurf
- [113] Landesumweltamt NRW: Gleichwertigkeit von Deponiesystemkomponenten. Teil 2: Oberflächenabdichtungssystem, nicht veröffentlichter Entwurf
- [114] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW: Deponie-Info – Merkblatt 1/ LANUV-Arbeitsblatt Nr. 6: Mineralische Deponieabdichtungen, Augsburg/Recklinghausen, 2009

Anhang

Verwendete Abkürzungen

BAD	Basisabdichtungssystem
ED	Einzelichtung
KD	Kombinationsdichtung
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
MB	Mischboden
MD	Mineralische Dichtung
OAD	Oberflächenabdichtungssystem