



INSTITUT FÜR GEOTECHNIK
STUTTGART

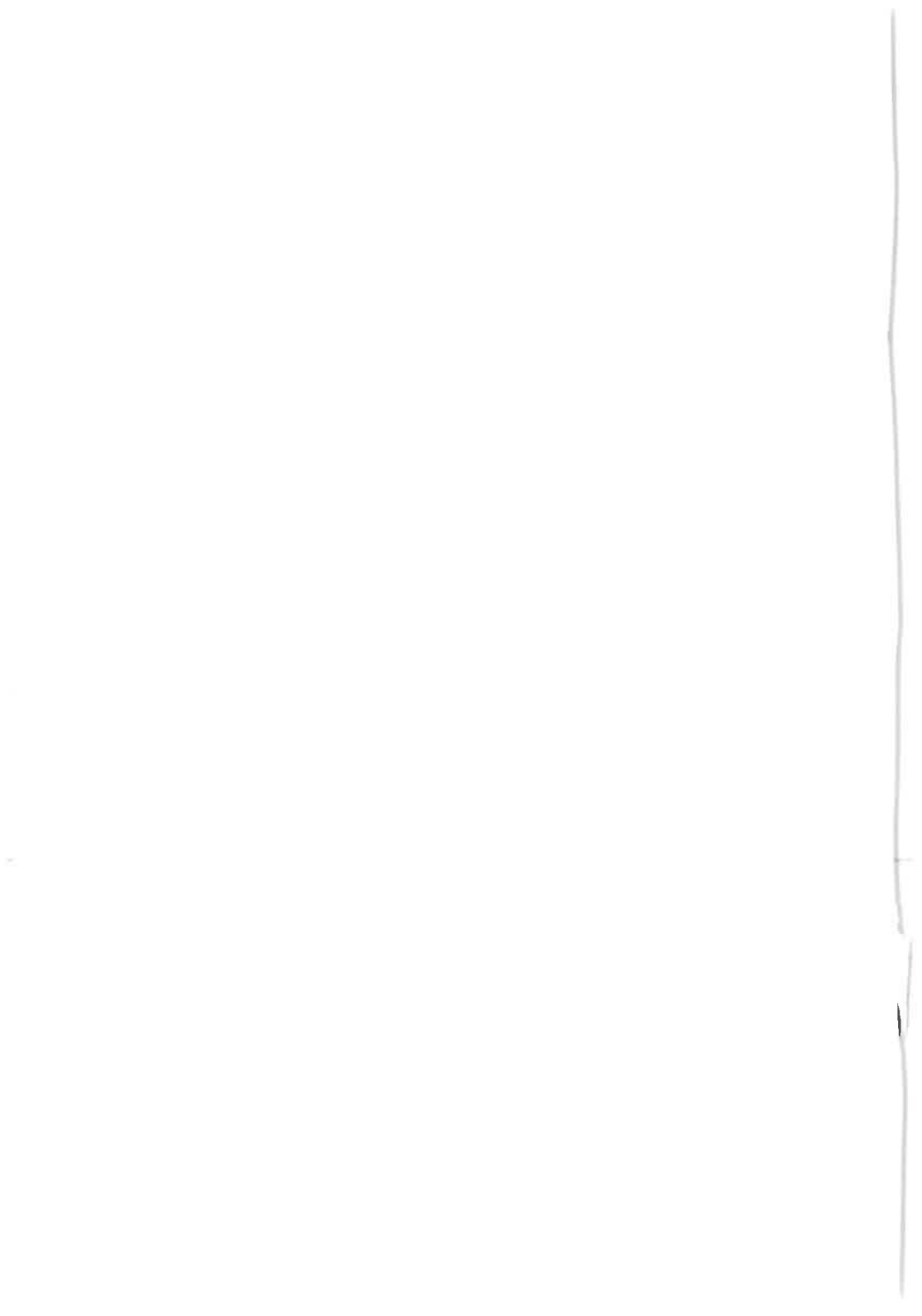
1998

Mitteilung 44

Herausgeber P.A. Vermeer

Irene Fiechter-Scharr

Beeinflussung von Erdbaustoffen durch
Beimischen eines organophilen Bentonits





**INSTITUT FÜR GEOTECHNIK
STUTTGART**

1998
Mitteilung 44
Herausgeber P.A. Vermeer

Irene Fiechter-Scharr

**Beeinflussung von Erdbaustoffen durch
Beimischen eines organophilen Bentonits**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. P.A. Vermeer
Institut für Geotechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart
Telefon 0711/685-2436
Telefax 0711/685-2439
e-mail: vermeer@igs.uni-stuttgart.de

ISBN 3-921837-44-3

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 1998 im Eigenverlag des Instituts für Geotechnik.

Beeinflussung von Erdbaustoffen durch Beimischen eines organophilen Bentonits

Von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung,

vorgelegt von

IRENE FIECHTER-SCHARR

geboren in Bozen, Südtirol.

Hauptberichter: em. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. U. SMOLTCZYK
Mitberichter: PD Dr.-Ing. habil. F.T. MADSEN (ETH Zürich)

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 1998

III

Vorwort der Herausgeber

Die Sicherheit von Deponien gegen Eluat-Austritte in das Grundwasser hängt von der langfristig wirksamen Abschottung des Deponiegutes ab, die durch konstruktive oder mineralische Dichtungsschichten bzw. durch deren kombinierte Anwendung gewährleistet werden soll. Dabei wird aber in der Regel nur der konvektive Schadstofftransport berücksichtigt, während die Diffusion von Schadstoffen bzw. deren Sorption in den Dichtungsschichten bzw. im Eluat oder im Deponiegas nicht erfaßt wird, da sie im Durchlässigkeitsbeiwert nicht erscheint.

Technisch aufbereitete Bentonite, die unter dem Namen "Organobentonit" in der Industrie der Mineralöle und Anstrichmittel eingesetzt werden, haben hohe Adsorptionseigenschaften für organische Stoffe und Schwermetalle und bieten sich daher auch als zusätzlicher Schutz gegen Schadstoff-Diffusion an. Unklar blieb bisher, wie die bodenmechanischen Eigenschaften mineralischer Dichtungen beeinflußt werden, wenn Organobentonit beigemischt wird. In der vorliegenden Arbeit von Irene Fiechter wird diesen Effekten in einer breit angelegten systematischen Untersuchung unter Einbeziehung aller relevanten Parameter der Prüfflüssigkeit, der Bodenart, des Bentonitanteils sowie der Mischtechnik nachgegangen.

Wir sind der Auffassung, daß durch diese Forschungsergebnisse eine bestehende Lücke in der Grundlagenforschung geschlossen wird, auch wo diese von der Autorin noch kritisch beurteilt und Hypothesen vorsichtig angeboten werden. Auf einem Spezialgebiet, das einem Bauingenieur eher fremd ist, werden die Arbeitsergebnisse verständlich und nachvollziehbar aufbereitet und so weit verdichtet, daß sie in der Praxis des Erdbaus der Deponien unmittelbar angewendet werden können. Damit ist nicht nur ein Denkanstoß für die wissenschaftliche Beschäftigung mit derartigen Produkten, sondern durchaus eine solide Basis für den Einsatz von Organo-bentoniten beim Deponiebau gegeben.

Smolczyk

Vermeer

Vorwort der Autorin

Die vorliegende Arbeit entstand als Dissertation während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart und während des Erziehungsurlaubs für meine Tochter.

Die großzügige Förderung durch die FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KARLSRUHE ermöglichte den experimentellen Teil des Projekts. Bei der Fa. SÜD-CHEMIE AG bedanke ich mich für das Interesse an dem Forschungsthema und die Organobentonit-Lieferungen. Ebenso bedanke ich mich bei den Firmen ROBERT BOPP STEINBRUCHBETRIEBE GmbH & Co. in Talheim und BHS in Sonthofen für das große Engagement und die Hilfe bei der Durchführung der Einnischversuche. Der Firma FHF STRASSENTTEST danke ich für die Kooperationsbereitschaft auf dem Gebiet der Durchlässigkeitsanlagen.

Für die Möglichkeit der Realisierung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Smolczyk meinen persönlichen Dank aussprechen. Herrn Prof. Dr.-Ing. P.A. Vermeer danke ich für das entgegengebrachte Interesse und die Möglichkeit der Fortsetzung meiner Arbeit unter seiner Institutsleitung. Sowohl für die Übernahme des Mitberichts als auch für die zahlreichen Gespräche und Diskussionen während meiner Aufenthalte an der ETH Zürich möchte ich mich bei Herrn PD Dr.-Ing. F.T. Madsen herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Geotechnik sowie den wissenschaftlichen Hilfskräften und Diplomanden für die wertvollen Hinweise und die tatkräftige Unterstützung. Im besonderen danke ich Herrn Mößner, Frau und Herrn Sooss für ihren Einsatz und ihre Energie bei der Durchführung der zahlreichen Versuche.

Meinen Freunden und Bekannten und insbesondere meiner Freundin Nina danke ich für die ständige und uneingeschränkte Bereitschaft, so manches fachliche Problem zu lösen und für die antreibenden Äußerungen zur Vollendung der Arbeit. Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern für die unermüdliche Hilfe und die Geduld vor allem während der Endphase der Promotion bedanken. Meinem Mann Thomas und meiner Tochter Lisa gilt mein herzlicher Dank. Sie verstanden es, eine harmonische und abwechslungsreiche Atmosphäre zu schaffen, in der es mir immer wieder möglich war, Kraft und Energie zu schöpfen.

Irene Fiechter-Scharr

Kurzfassung

Die besonderen Eigenschaften organophiler Bentonite werden schon seit langem auf dem Gebiet der Farben-, Lack- und Mineralölindustrie ausgenutzt. Anfang der neunziger Jahre wurde begonnen, über eine Anwendung dieser Bentonite in der Deponietechnik nachzudenken. Eine Vergütung mineralischer Abdichtungsmaterialien mit denselben, wie sie in der Deponiebasis einzubauen sind, verbessert deren Adsorptionsvermögen gegenüber Schadstoffe aus dem Deponiesickerwasser. In der bisherigen Forschung beschränkte man sich überwiegend auf Adsorptionsuntersuchungen. Geotechnische Fragestellungen sind bis heute noch nicht ausreichend geklärt.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Beeinflussung geotechnischer Eigenschaften verschiedener bindiger Böden durch das Einmischen eines semiorganophilen Bentonits zu untersuchen. Dabei wurde die Verarbeitbarkeit und das Verhalten der Organobentonit-Mischungen nach Schadstoffkontakt intensiv betrachtet, um daraus praktische Hinweise für den Einsatz unter Deponiebedingungen geben zu können.

Das Untersuchungsprogramm umfaßte neben Einmischversuchen von Hand, im Modellzwangsmischer und im Zwangsmischer unter Baustellenbedingungen auch Versuche zur Bestimmung der Verdichtbarkeit, des Quell- bzw. Flüssigkeitsaufnahmevermögens und der Plastizität. Durchlässigkeitsuntersuchungen in Triaxialzellen mit Wasser und einer Testlösung mit anschließender Scherfestigkeitsbestimmung im Triaxialgerät bildeten den Schwerpunkt der wissenschaftlichen Auswertung.

Es konnte nachgewiesen werden, daß sich der Organobentonit trotz hydrophoben Charakters sehr gut mit bindigen Böden verarbeiten und verdichten läßt. Die Änderungen in den plastischen Eigenschaften der vergüteten Abdichtungsmaterialien sind je nach Porenlösung unterschiedlich und nicht vorhersagbar. Die Wasser-Durchlässigkeit steigt bei den Organobentonit-Mischungen an, wobei dieser Anstieg durch den Wechsel der Porenlösung vermindert wird. Die Entwicklung des effektiven Reibungswinkels und der effektiven Kohäsion wird sowohl durch eine Organobentonit-Zugabe als auch durch eine Durchströmung mit veränderten Porenlösung wesentlich beeinflusst.

Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse kann ein semiorganophiler Bentonit als Vergütungsmittel zur Verbesserung der Adsorptionsfähigkeit mineralischer Abdichtungsmaterialien empfohlen werden, ohne dabei die geotechnischen Eigenschaften entscheidend zu beeinflussen.

Summary

The special properties of organophilic bentonites have been utilized in the paint, varnish and oil industries for a long time. Since the early nineties these bentonites are applied in the construction of waste disposals. Incorporating the bentonites into clayey soils, which are used in the base of the landfill, improves their adsorption capacity regarding harmful substances in the leakage water. Until now only adsorption tests were conducted, geotechnical questions are not settled sufficiently.

The aim of this research work was to investigate the influence of a semiorganophilic bentonite on the geotechnical properties of different clayey soils. The workability and the behaviour of the mixtures after contact with harmful substances were examined to give some practical notes for the construction of landfills.

The testing programme included mixing the bentonite into the soils manually, with a labscale mixer and a rotating pan mixer as well as determining the compactability, the swelling potential and the plasticity. The main emphasis of the scientific evaluation was laid on hydraulic conductivity tests in triaxial cells with water and testing fluid, which were followed by shear strength tests in the triaxial equipment.

Despite its hydrophobic character the organobentonite can be mixed into the clayey soils excellently and the modified soils can be compacted sufficiently. The changes in the plastic properties of the improved sealing materials depend on the pore fluid and are not predictable. The hydraulic conductivity of the organobentonite mixtures increases, but this increase will be reduced by changing the pore fluid. The development of the effective friction angle and the effective cohesion is influenced substantially by the addition of organic bentonite as well as by the flow with different fluids.

Considering all results a semiorganophilic bentonite can be recommended as an additive for improving the adsorption capacity of mineral sealing materials without influencing the geotechnical properties essentially and thus for the application in the bases of waste disposals.

INHALT

Seite

Bezeichnungen	3
1 Einleitung und Problemstellung	5
1.1 Allgemeines	5
1.2 Fragestellung und Zielsetzung	8
1.3 Gliederung der Arbeit und Untersuchungsprogramm	12
2 Grundlagen - Stand der Technik	13
2.1 Tonmineralogie	13
2.1.1 Aufbau der Tonminerale	13
2.1.2 Wechselwirkungen zwischen Ton und Porenlösung	17
2.2 Einfluß der Tonminerale auf die Bodeneigenschaften	19
2.3 Gefüge und Festigkeit verdichteter bindiger Böden	25
2.4 Einfluß von Chemikalien auf die Bodeneigenschaften	28
2.4.1 Auswirkungen der Porenlösung auf die Tonminerale	28
2.4.2 Änderung der Durchlässigkeit	29
2.4.3 Veränderte plastische Eigenschaften	31
2.4.4 Mechanische Eigenschaften	32
2.4.5 Wechselwirkungen mit Deponiesickerwässern	36
2.5 Bentonit - Organobentonit	40
2.5.1 Gewinnung, Einsatzgebiete und Aktivierung von Bentonit	40
2.5.2 Organobentonite	42
2.6 Durchlässigkeit feinkörniger Böden	45
3 Verwendete Materialien	50
3.1 Versuchsböden	50
3.1.1 Geologie	50
3.1.2 Klassifikationsergebnisse	52
3.1.3 Tonmineralogische Untersuchungen	56
3.2 Organobentonit	57
3.3 Prüfflüssigkeiten	58
4 Methodik, Umfang und Ergebnisse der Vorversuche	63
4.1 Einmischversuche	63
4.1.1 Herstellung der Mischungen für die Eignungsuntersuchungen	63
4.1.2 Versuche im Labor-Zwangsmischer	65
4.1.3 Großtechnische Mischversuche	66
4.2 Eignungsuntersuchungen	67
4.2.1 Hilfsgrößen für die Auswertung weiterer Laborversuche	70
4.2.2 Zustandsgrenzen	71

4.2.3	“Wasser”-Aufnahmeversuche	73
4.2.4	Verdichtung	74
4.2.5	Durchlässigkeit	75
4.2.6	Triaxialversuche	81
5	Einfluß der Mischtechnik	83
5.1	Homogenität von in situ-Mischungen	84
5.2	Verteilung des Wassers in einer Mischung	85
5.3	Die Verarbeitbarkeit von Organobentonit	88
5.4	Empfehlungen für die Praxis	91
6	Bewertung der Laborergebnisse	93
6.1	Plastische Eigenschaften	93
6.1.1	Einfluß des Organobentonits auf die Plastizität	93
6.1.2	Wechselwirkungen mit organischen Testlösungen	95
6.1.3	Prüfbarkeit Triethanolamin	101
6.2	“Kontaktversuche” mit Wasser und Triethanolamin	102
6.2.1	Flüssigkeitsaufnahmevermögen des Organobentonits	103
6.2.2	Wasseraufnahme der Organobentonit-Mischungen	104
6.2.3	Auswirkung von Triethanolamin auf Kapillarkräfte und Quellvermögen	107
6.3	Verdichtbarkeit	108
6.4	Durchströmungsverhalten	113
6.4.1	Vorversuche zur Abschätzung des Durchlässigkeitsverhaltens	113
6.4.2	Zusammenhang zwischen Gefüge und Durchlässigkeit	115
6.4.3	Das Durchströmungsverhalten mit Organobentonit vergüteter Böden	120
6.5	Scherfestigkeit	130
6.5.1	Die Entwicklung des effektiven Reibungswinkels	131
6.5.2	Einfluß einer Wasser-Durchströmung auf die effektive Kohäsion	133
6.5.3	Wie wirkt sich Triethanolamin auf die effektive Kohäsion aus?	136
7	Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse im Hinblick auf einen Praxiseinsatz	140
7.1	Einmischen von Organobentonit	140
7.2	Geotechnische Eigenschaften vergüteter Böden in Verbindung mit organischen Lösungen	141
7.3	Anpassung der Richtlinien an die Forschungsergebnisse	145
7.4	Ausblick	146
	Literatur	147
	Anhang	153

Bezeichnungen

In der vorliegenden Arbeit wurden einige Begriffe, Symbole und Definitionen gemäß DIN 1080, Teil 6 (03/80) verwendet. Dort nicht aufgeführte und davon abweichende Bezeichnungen sowie selbst definierte Begriffe sind nachfolgend zusammengestellt:

KAK	[mval/100 g Ton] [meq/100 g Ton]	Kationenaustauschkapazität
T, O	[-]	Tetraeder-, Oktaederschicht
k, k_f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
k_{10}	[m/s]	auf 10 °C normierter Durchlässigkeitsbeiwert
v, v_f	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
Q	[m³/s]	Durchfluß
A	[m²]	Querschnittsfläche
V	[m³]	Flüssigkeitsvolumen
t	[s]	Zeit
Δl	[m]	Fließlänge, Probenhöhe
Δh	[m]	hydraulischer Druckhöhenunterschied
i	[-]	hydraulischer Gradient $i = \Delta h / \Delta l$
K	[m²]	Bodenkenngröße
η	[Ns/m²]	dynamische Viskosität
α	[-]	Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung der Zähigkeit des Wassers (DIN 18130)
κ	[Siemens/cm]	elektrische Leitfähigkeit (DIN 38404 - C8)
<u>M1, M2,</u> <u>M3, M4</u>	[-]	Mischungsbezeichnungen
w_{95} (n.S.)	[%]	Wassergehalt bei einem Verdichtungsgrad von 95 % bzw. 98 % auf der nassen Seite der Proctorkurve
w_{98} (n.S.)		

$I_{p \text{ chem}}$	[%]	Plastizität einer mit Chemikalie aufbereiteten Bodenprobe
i_p	[-]	bezogene Plastizität: $i_p = I_{p \text{ chem}} / I_p$
σ_3	[kPa]	isotroper Zelldruck
u_0, p_1	[kPa]	Sättigungsdruck an der Probenoberseite (Oberwasserdruck) nach DIN 18130
p_2	[kPa]	Druck an der Probenunterseite (Unterwasserdruck) nach DIN 18130
σ_m	[kPa]	$\sigma_m = \sigma_3 - \frac{1}{2} (p_2 + p_1)$; mittlere Spannung in der Probe
V_p	[m³]	Porenvolumen
PAR	[-]	Porenaustauschrate: $PAR = V / V_p$
$V_{gl}^M, V_{gl}^{OB}, V_{gl}^B$	[%]	Glühverlust der Mischung, des Organobentonits und des Bodens
OB	[%]	Anteil des Organobentonits in der Mischung
c'_{Ri}	[kPa]	effektive Kohäsion der laborverdichteten, nicht durchströmten und unvergüteten Lößlehmproben nach RILLING (1994)
c'_T, c'_W	[kPa]	effektive Kohäsion der mit Triethanolamin bzw. Wasser durchströmten Proben

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Allgemeines

In den siebziger Jahren wurden erstmals Probleme der Grundwasserverschmutzung durch Deponiesickerwässer und der Belastung der Atmosphäre durch Deponiegase festgestellt, und diese stehen bis heute im Blickpunkt öffentlichen Interesses. Dieses Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt geht sowohl von Altlasten und Altablagerungen als auch von Deponieneubauten aus. Um dies zumindest für Deponieneubauten für die Zukunft zu vermeiden, werden Empfehlungen und Vorschriften erarbeitet, die ständig den Praxiserfahrungen und den Forschungsergebnissen angepaßt werden (EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES "GEOTECHNIK DER DEPONIEEN UND ALTLASTEN" - GDA, TA SIEDLUNGSABFALL).

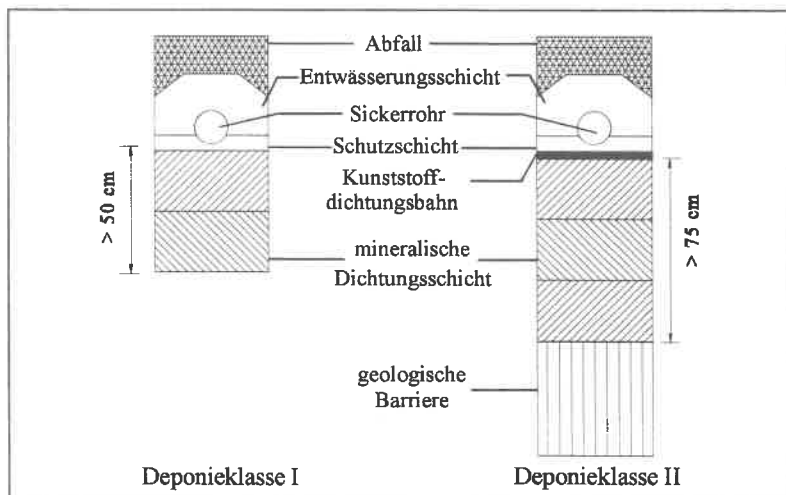


Abb. 1.1: Regelabdichtungen nach TA SIEDLUNGSABFALL (1993)

Die TA SIEDLUNGSABFALL (1993) fordert eine Vorbehandlung des Mülls vor Einlagerung in eine Deponie und schreibt die Ausführung einer Kombinationsdichtung als Regelabdichtung für die Deponieklasse II vor (Abb. 1.1). Sie dient als Vergleichsdichtung, wenn für alternative Abdichtungssysteme die Gleichwertigkeit nachzuweisen ist. Konkrete Angaben über Art und Durchführung der entsprechenden Eignungsnachweise werden zur Zeit beim Deutschen Institut für Bautechnik erarbeitet.

So wurden in der Deponiepraxis bereits künstliche Doppelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen, Bentokiesdichtungen, Mehrfachdichtungssysteme mit Kontrollschicht, Asphaltbetondichtungen und mineralische Abdichtungen mit Edelstahlfolie hergestellt, und über eine Abdichtung aus Glas wird zur Zeit in Fachkreisen nachgedacht (Abb. 1.2).

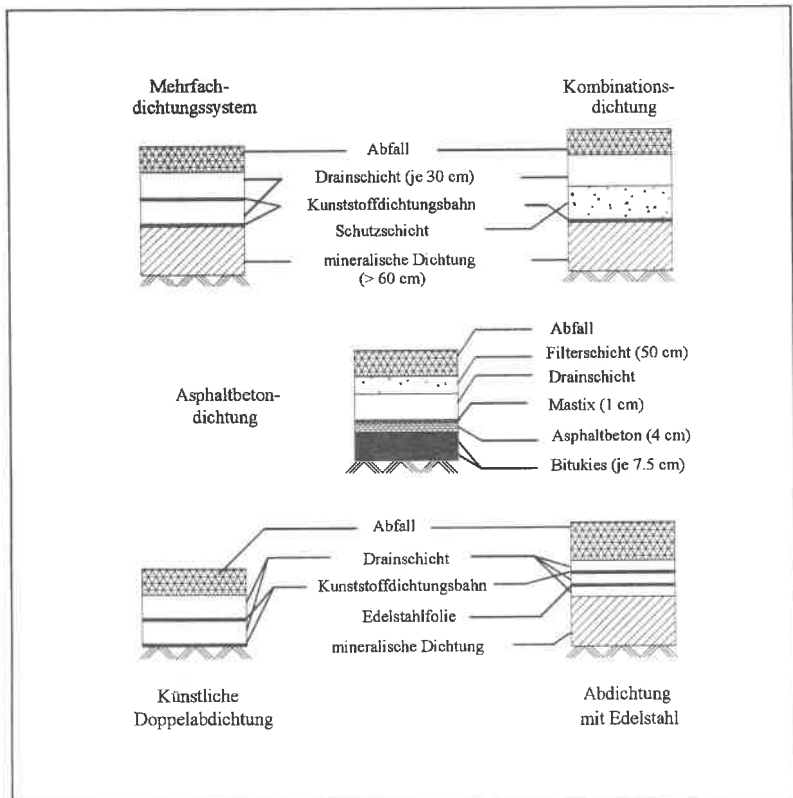


Abb. 1.2: Ausführungsalternativen für mineralische Basisabdichtungen (PREGL, 1994)

Obwohl in Deutschland ein Großteil des Mülls verbrannt und das Müllvolumen durch Kompostierung zusätzlich reduziert wird, besteht weiterhin Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Deponietechnik, insbesondere bei der Weiterentwicklung geeigneter Abdichtungssysteme, da die klassische Siedlungsabfalldeponie mit nicht behandelten Abfällen bis zum Jahr 2005 erhalten bleibt und alternative Entsorgungswege, wie z.B. Verbrennungsanlagen, noch nicht ausreichend zur Verfügung stehen.

An die mineralischen Abdichtungsmaterialien werden Material- und Einbauanforderungen gestellt, wobei der Forderung nach Dichtigkeit, ausgedrückt über den Durchlässigkeitsbeiwert k nach DARCY, besonderes Augenmerk geschenkt wird (Tab. 1.1). Diese Betrachtung berücksichtigt allerdings nur den konvektiven Schadstofftransport durch eine Abdichtung, der jedoch nicht maßgebend für den Schadstoffdurchbruch sein muß (GRAY & WEBER, 1984; STOCKMEYER, 1993). Zusätzliche Transportmechanismen, wie Diffusion und Sorption von gelösten Substanzen in einem flüssigen oder gasförmigen Medium, verschiedene Zusammensetzungen von Deponiesickerwässern und physikochemische Reaktionen zwischen Schadstoff und Boden werden in den Vorschriften nicht ausreichend berücksichtigt.

Materialanforderungen				
Feinstanteil < 2 μm	Bodenart	Org. Substanz [%]	Kalkgehalt V_{ca} [%]	Durchlässigkeit k [m/s]
≥ 20 %, davon 50 % Tonmin.	möglichst UM / TL / TM oder TA	≤ 5	≤ 15	$\leq 5 \cdot 10^{-10}$, bei $i = 30$
Einbauanforderungen				
Verdichtungsgrad D_{pr} [%]		Luftporengehalt n_a [%]		Einbauwassergehalt w [%]
> 95 je Lage		≤ 5 , falls $w < w_{\text{pr}}$ u. $w > w_{95}$ (n.S.)		$w_{\text{pr}} < w < w_{95}$ (n.S.)

Tab. 1.1: Material- und Einbauanforderungen nach TA ABFALL, Anhang E (1991)

Die mineralische Basisabdichtung einer Deponie hat die Aufgabe, den Schadstoffaustritt aus dem Deponiekörper in den Untergrund langfristig zu begrenzen und unterliegt im Laufe ihrer Betriebszeit und nach der Verfüllung vielfältigen Einwirkungen:

- ☐ Frost, Austrocknung und Erosion infolge von Wind und Regen während des Einbaus,
- ☐ Reaktionswärme infolge Müllumsetzung,

- mechanische Spannungen und Verformungen infolge Auflast aus Fahrzeugbetrieb, aus dem Gewicht der Drainage- und Schutzschicht und aus überlagertem Abfall, Untergrundsetzungen infolge inhomogenen Untergrundaufbaus und nicht gleichmäßiger Auflast,
- chemische, physikalische und biochemische Wechselwirkungen infolge Deponie-sickerwasser- und Deponiegaskontakt.

Aufgrund dieser komplexen Problematik und der Tatsache, daß die wenigsten Deponiestandorte eine ausreichend mächtige, natürliche Schadstoffbarriere aufweisen, gewinnt die intensive Erforschung geeigneter mineralischer Dichtstoffe immer mehr an Bedeutung. Deshalb ist von großem Interesse, inwieweit die bodenmechanischen Eigenschaften beeinflußt bzw. modifiziert werden und ob insgesamt langfristig stabile Zustände erreicht werden können.

Die Eignung von neu entwickelten Mischungen ist dabei für alle nicht zu vermeidenden Standardbeanspruchungen sowohl durch Laborversuche als auch durch geotechnische Großversuche nachzuweisen.

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Eine langfristige Dichtigkeit der mineralischen Basisabdichtung einer Deponie ist eine Hauptforderung bei der Problemlösung in der Mülldeponierung. Der konvektive Transport wird bei nichtbindigen Böden von der Verdichtungsfähigkeit bestimmt, die wiederum von der Kornverteilung, dem Wassergehalt und der aufgebrauchten Energie abhängig ist. Bei bindigen Böden besteht allein zwischen Trockendichte und Durchlässigkeit jedoch kein zwingender Zusammenhang. Die Tonmineralart und das Gefüge des Bodens sind dabei entscheidende Parameter. Eine Verringerung des Schadstoffaustrags aus einer Deponie kann nur dann erreicht werden, wenn der Einfluß der Konvektion, der Diffusion, der Sorption und der Abbau der Schadstoffe auf den Transport berücksichtigt wird, deren Wechselwirkungen untereinander erkannt und für die jeweiligen Belange optimal ausgenutzt werden.

Seit den achtziger Jahren erlangt die Tonmineralogie auf dem Gebiet der Deponietechnik besondere Bedeutung. So wurde das breite Adsorptionsspektrum der im Deponiebau eingesetzten Tone hinsichtlich verschiedenster Schadstoffe umfassend analysiert. Die Fähigkeit bindiger Böden organische Schadstoffe zu adsorbieren hängt meistens mit einer Änderung im Durchlässigkeitsverhalten zusammen.

Da die Zusammensetzung des Abfalls während der Deponierung erheblichen Schwankungen unterliegt, bestehen hinsichtlich der stattfindenden chemisch-biologischen Abbauprozesse sowohl im Müllkörper als auch im Abdichtungssystem Unsicherheiten. Eine Nachbildung der umfangreichen Naturvorgänge im Modellmaßstab ist somit nur bedingt möglich. Um gegenüber Deponiesickerwasser unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung ein Höchstmaß an Dichtheit und Langzeitstabilität zu erzielen, wird von der Anwendung reiner Tone oder von "Monoschichten" aus nur einer Mischung als Abdichtungsmaterial abgeraten. Je nach anfallendem Deponiesickerwasser werden mehrlagige Konstruktionen aus verschiedenen Tonsorten oder Vergütungen empfohlen (Abb. 1.3; BRANDL, 1988; CZURDA, 1992).

Eine optimale Schadstoffretention kann nur durch Erhöhung der Adsorptionskapazität und gleichzeitige Verringerung der Durchlässigkeit des Abdichtungsmaterials erreicht werden. STOCKMEYER (1993) weist die herausragenden Adsorptionseigenschaften für organische Schadstoffe und Schwermetalle an technisch modifizierten Bentoniten, den sog. **ORGANO-BENTONITEN** nach. Ein Durchbruch organischer Schadstoffe durch eine mineralische Dichtschicht kann durch geeignete Organobentonit-Zugabe erheblich verzögert werden, wobei die Schadstoffretention beachtlich gesteigert wird. Die besonderen Eigenschaften der Organobentonite werden bereits in der Mineralöl-, der Farben- und Lackindustrie und bei der Teerverwertung ausgenutzt. Eine Anwendung in der Deponietechnik steht bisher noch aus.

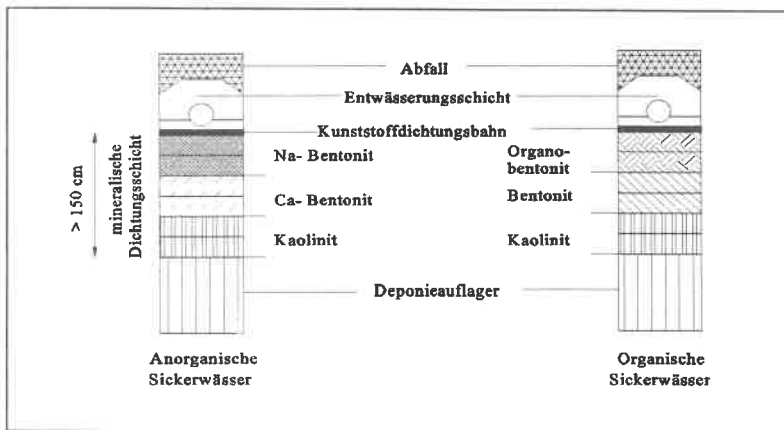


Abb. 1.3: Mehrlagige Konstruktionen nach CZURDA (1992)

In Abb. 1.4 ist ein "Sandwich"-Aufbau einer möglichen Standardbasisabdichtung dargestellt, der der geforderten Regelabdichtung nach TA SIEDLUNGSABFALL entspricht. Dieses kombinierte Dichtungssystem besteht aus drei Elementen unterschiedlicher Funktion. Eine intakte Kunststoffdichtung unterbindet die Konvektion des Deponiesickerwassers und schützt dadurch die darunterliegende mineralische Abdichtung. Aufgrund der chemischen Verwandtschaft zwischen polymeren Dichtwerkstoffen und bestimmten organischen Verbindungen (im wesentlichen Kohlenwasserstoffe und chlorierte Kohlenwasserstoffe) können Schadstoffe diese Sperre infolge Diffusion passieren und werden in der mit Organobentonit vergüteten Schicht festgehalten bzw. sorbiert. Ein Durchwandern von Schwermetallionen konnte bisher nicht nachgewiesen werden. HDPE-Dichtungsbahnen (Polyethylen hoher Dichte) gelten wegen ihres unpolaren Aufbaus als "absolut dicht" gegenüber stark polaren Molekülen, wie z.B. Wasser (HOLZLÖHNER et al., 1994). Da eine Langzeitstabilität für Kunststoffdichtungsbahnen nicht garantiert wird und Fehlstellen infolge falscher Verlegungstechnik auftreten können, übernimmt die mineralische Abdichtungsfolge die Schutzfunktion des Untergrundes. Während eine geringe Durchlässigkeit des Dichtungstons den konvektiven Transport einschränkt, kann eine Vergrößerung der Abdichtungsmächtigkeit und eine möglichst hohe Verdichtung die Schadstoffdiffusion in Richtung Untergrund und Grundwasser verzögern. Quelfähige Tonminerale im Abdichtungsmaterial sorbieren viele anorganische Verbindungen, der Organobentonit hält organische und schwermetallhaltige Schadstoffe zurück (STOCKMEYER, 1993). Bei dieser kombinierten Abdichtung werden die durchströmungsverhindernden Eigenschaften der Kunststoffdichtungsbahn zusammen mit den Adsorptionseigenschaften der Feinstkornfraktion des Bodens genutzt. Eine langfristige Abdichtung einer Deponie kann damit erreicht werden.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Eignung und die Praxistauglichkeit eines mehrlagigen, mit Organobentonit vergüteten Aufbaus untersucht. Dabei standen folgende Gesichtspunkte im Vordergrund:

- ☐ Ändert die Zugabe eines Organobentonits zu herkömmlichen Dichtungstönen deren Verarbeitbarkeit?
- ☐ Wie verhalten sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von mineralischen Abdichtungsmaterialien nach der Vergütung mit Organobentonit?
- ☐ Wie verändern sich die geotechnisch relevanten Eigenschaften der Mischungen nach längerem Schadstoffkontakt?
- ☐ Kann Organobentonit als Zuschlagstoff zu mineralischen Dichtmaterialien eingesetzt und den planenden, bauausführenden und bauüberwachenden Institutionen empfohlen werden? Wie lauten konkrete Hinweise für den Praxiseinsatz von Organobentonit?

- Wie müssen Labor- und begleitende Felduntersuchungen in Abstimmung mit dem Aufbereitungs- und dem Einbauverfahren durchgeführt werden, damit eine verlässliche Aussage über das Verhalten von Organobentonit-Mischungen im Deponieinsatz getroffen werden kann? Gibt es eine einfache geotechnische Methode, womit die Homogenität einer Mischung schnell festgestellt werden kann?

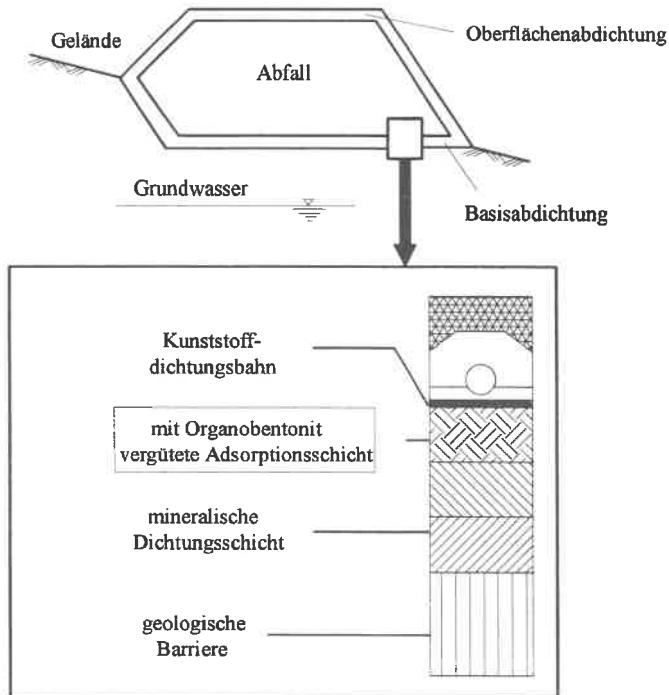


Abb. 1.4: "Sandwich"-Aufbau einer Basisabdichtung mit Organobentonit

Ziel war die Entwicklung eines ökonomisch und ökologisch verträglichen Deponieabdichtungssystems mit Organobentonit unter der Voraussetzung, daß die gestellten Anforderungen im Hinblick auf eine langfristige Gebrauchsfähigkeit eingehalten werden.

1.3 Gliederung der Arbeit und Untersuchungsprogramm

Zur Bearbeitung des beschriebenen Forschungsthemas werden im Kap. 2 tonmineralogische und geotechnische Grundlagen, sowie der aktuelle Stand der Deponietechnik erläutert. Dabei steht der Einfluß der Tonminerale und die Auswirkung von Chemikalien auf die bodenmechanischen Eigenschaften von Dichtungstonen im Vordergrund. Nach einer ausführlichen Beschreibung der verwendeten Bodenarten, des Organobentonits und der ausgewählten Prüflüssigkeiten (Kap. 3) wird der Umfang und die Methodik der durchgeführten Laboruntersuchungen und der großmaßstäblichen Einmischversuche näher erläutert (Kap. 4). In Kap. 6 werden schließlich die Laborergebnisse interpretiert und miteinander korreliert, damit diese bei der Durchführung der in situ-Mischversuche berücksichtigt werden können. Um Empfehlungen für einen Praxiseinsatz von Organobentonit aussprechen zu können, wird die Verarbeitbarkeit unter Baustellenbedingungen geprüft und versucht, die Homogenität der erhaltenen Mischungen mit einfachen Standardversuchen zu beurteilen (Kap. 5). Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse verglichen und zusammengefaßt und auf praktische Anwendungen übertragen. Der Ausblick für eine an diese Untersuchungen anschließende Forschung beendet die vorliegende Arbeit.

Folgendes Untersuchungsprogramm wurde zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens festgelegt:

Voruntersuchungen:

Anpassung der Versuchstechnik, Auswahl von Dichtungstonen, Organobentonit und Prüflüssigkeiten

Laboruntersuchungen:

- ☐ Mischversuche im Laborzwangsmischer
- ☐ Plastizität der Organobentonit-Boden-Mischungen mit verschiedenen Prüflüssigkeiten
- ☐ Wasseraufnahmefähigkeit bzw. Quellverhalten
- ☐ Verdichtbarkeit der Mischungen
- ☐ Durchströmungsversuche mit einer Testlösung und Wasser
- ☐ Scherfestigkeitsuntersuchungen von verdichteten, nicht durchströmten Proben und von mit Wasser und Testlösung durchströmten Proben

Felduntersuchungen:

Einmischversuche im 1:1 Zwangsmischer

2 Grundlagen - Stand der Technik

2.1 Tonmineralogie

In der Bodenmechanik wird ein feinkörniger Boden nicht allein nach der Korngrößenverteilung beurteilt, sondern es werden vorrangig dessen plastische Eigenschaften untersucht. Der Unterschied zwischen Tonen und Schluffen kann nur über deren Plastizität festgestellt werden. Geochemische und mineralogische Untersuchungen haben gezeigt, daß innerhalb des Feinstkornanteils ($< 2 \mu\text{m}$) stets Tonminerale enthalten sind, die aufgrund ihrer besonderen Merkmale sowohl die mechanischen als auch die physikalischen Eigenschaften eines bindigen Bodens maßgebend beeinflussen. Die Mineralogie ist somit Grundlage für das Verständnis geotechnischer Eigenschaften wie Plastizität, Quellverhalten, Verdichtungsfähigkeit, Festigkeit und Durchlässigkeitsverhalten.

2.1.1 Aufbau der Tonminerale

Hauptvertreter der Tonminerale sind Kaolinit, Illit, Montmorillonit, deren spezifische Eigenschaften in Tab. 2.1 zusammengestellt sind, und Chlorit. Alle Tonminerale sind aus den gleichen zwei Kristallbausteinen aufgebaut: die Tetraedereinheit (T), in der vier Sauerstoffionen ein Metallkation (meistens Silizium und Aluminium) umgeben und die Oktaedereinheit (O), bei welcher Sauerstoffionen und Hydroxylgruppen ein Metallkation (z.B. Aluminium-, Magnesium- oder Eisenion) einschließen (Abb. 2.1). Beide Einheiten sind zu Elementarschichten vereinigt, die unterschiedlich je nach Tonmineral angeordnet sein können (Abb. 2.2).

Kaolinit ist ein zweischichtiges Mineral, dessen Elementarschicht aus einer Tetraeder- und einer Oktaedereinheit besteht (TO). Das Kristallplättchen wird aus vielen Elementarschichten gebildet, die untereinander durch Wasserstoffbrücken verbunden sind. Die Bindungen der Elementarschichten sind so stark, daß die Zwischenschichträume (innere

Oberflächen) für Wassermoleküle nicht zugänglich sind. Kaolinit quillt nicht bei Wasserzugabe.

	Kaolinit	Illit	Montmorillonit
Durchmesser der Schichten [nm]	100 - 5000	100 - 5000	30 - 300
Anzahl der Elementarschichten	25 - 80 TO	5 - 80 TOT	5 - 12 TOT
Schichtabstand [Å]	7,1	10	9,6 - ∞ innerkrist. Quellen
Spez. Oberfläche [m ² /g]	10 - 150	50 - 200	600 - 800
Isomorpher Ersatz	kaum	häufig; vor allem in T-Schichten; Ausgleich durch K-Ionen	häufig; vor allem in O-Schichten; Aus- gleich durch aus- tauschbare Kationen
Zwischenschichtbindung	O - OH	K-Ionen	O - O
Kationenaustauschkapazität [mval/100 g Ton]	3 - 15	10 - 40	80 - 150

Tab. 2.1: Merkmale verschiedener Tonminerale nach MITCHELL (1993)

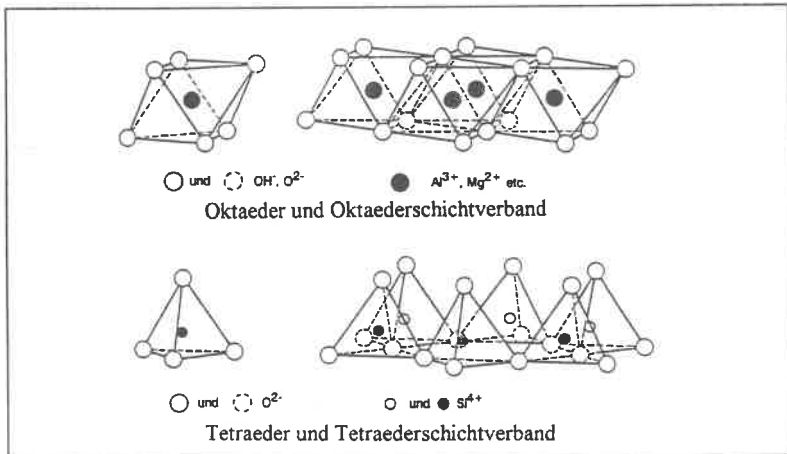


Abb. 2.1: Strukturmodelle einer Oktaeder- und Tetraedereinheit (GRIM, 1968)

Illit, Montmorillonit und Chlorit sind Dreischichtminerale, wobei eine Oktaederschicht von zwei Tetraederschichten eingeschlossen ist (TOT). Beide Seiten der Elementarschicht werden von Sauerstoffionen begrenzt, so daß eine gewisse elektrostatische Abstoßung zwischen den Elementarschichten erfolgt (Abb. 2.2). Die Silizium- und Aluminiumionen im Kristallverband können durch Ionen niedrigerer Wertigkeit ersetzt sein, was zu einer negativen Schichtladung an den Oberflächen der Tonteilchen führt. Dieser Vorgang wird als isomorpher Ersatz bezeichnet. Zum elektrostatischen Ausgleich der negativen Ladung werden zwischen den Elementarschichten positive Ionen gebunden. Die an den äußeren Oberflächen angelagerten Ionen sind austauschbar. Bei den quellfähigen Tonmineralen sind auch die Zwischenschichtkationen austauschbar. Die Menge dieser Kationen wird als Kationenaustauschkapazität (KAK) bezeichnet und wird in [mval/100 g Ton] angegeben. Als Smekite wird eine Gruppe der Dreischichttonminerale mit bestimmter Schichtladung bezeichnet. Montmorillonit ist neben z.B. Saponit, Hectorit und Beidellit ein typischer Vertreter.

Beim Illit wird die negative Ladung durch Kaliumionen kompensiert, die einen starken Zusammenhalt der Schichtpakete bewirken. Die Schichtzwischenräume ermöglichen daher keine Aufnahme von Wasser. Chlorit wird durch Oktaederschichten stabilisiert ($(\text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+})_3 (\text{OH})_6$), die die negative Ladung der TOT-Schichten ausgleichen. Die negative Ladung der Montmorillonitoberfläche ist viel kleiner als die des Illits und wird meistens durch Natrium ($1+$)-, Calcium ($2+$)- und Magnesium ($2+$)-Ionen ausgeglichen. Diese Kationen sind nicht besonders stark an die Tonkristalloberflächen gebunden, was dazu führt, daß diese Kationen ausgetauscht werden und sich Wassermoleküle unter Aufweitung der Zwischenschichten an die Kationen anlagern können. Somit ist der Abstand der Schichtpakete veränderlich, und man spricht von innerkristalliner Quellung.

Die meisten Böden enthalten Tonminerale mit sog. Wechsellagerungsstrukturen ("mixed-layer-minerals"). Innerhalb dieser Kristalle sind zwei oder mehrere Schichttypen regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet. Illit/Smektit-Wechsellagerungen treten aufgrund ihres natürlichen Vorkommens am häufigsten auf. Auch diese Minerale sind bedingt quellfähig.

Während die Oberflächen der Tonminerale immer negativ geladen sind, sind die Kanten bei sauren und neutralen Elektrolytlösungen ($\text{pH} \leq 7$) positiv und bei basischen ($\text{pH} \geq 7$) negativ geladen. Ursache hierfür ist der Einfluß des Elektrolyts auf die Dissoziation der Hydroxylgruppen an den Kanten der Tonminerale. Bei hohem pH-Wert ist die Bereitschaft des H^+ -Ions in Lösung zu gehen größer, was zu negativ geladenen Kanten führt. Teilchen mit negativen Kanten und Oberflächen stoßen sich ab, und es bildet sich ein disperses Gefüge. Ein geringer pH-Wert bewirkt bevorzugte Kanten-Flächen-Kontakte

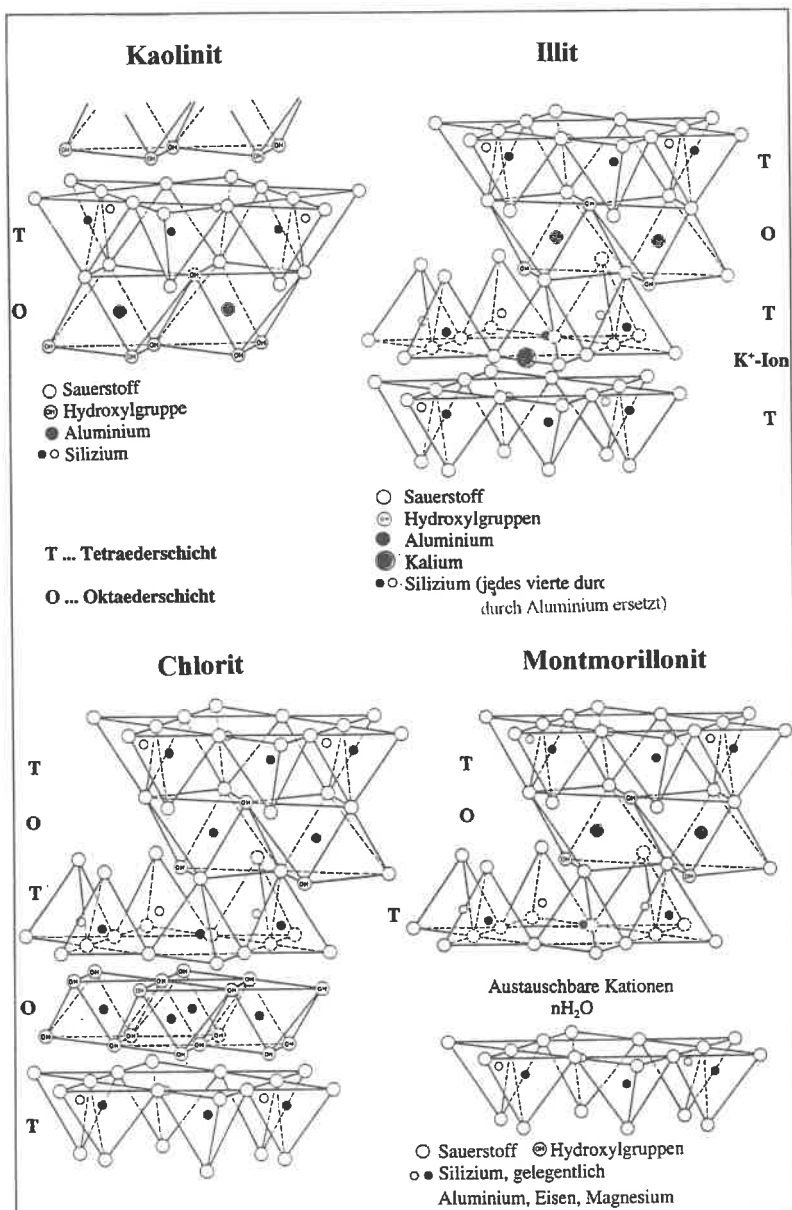


Abb. 2.2: Kristallstruktur von Kaolinit, Illit, Chlorit und Montmorillonit (GRIM, 1968)

und somit eher eine Kartenhausstruktur. Diese Vorgänge lassen sich in Tonsuspensionen sichtbar machen. Das Gefüge eines verdichteten Tons wird in Kap. 2.3 beschrieben.

Wie in der Literatur werden die Begriffe "Gefüge" und "Struktur" eines Tons auch in der vorliegenden Arbeit gleichbedeutend verwendet. MITCHELL (1993) gibt eine Definition, wonach "Gefüge" sich auf die Anordnung der Partikel und Porenräume im Boden beschränkt und die "Struktur" eines Bodens sowohl die Partikelanordnung als auch die Kräfte zwischen diesen berücksichtigt. Er bemerkt, daß die Begriffe manchmal austauschbar verwendet werden, es jedoch besser wäre, "Struktur" für die Beschreibung der kombinierten Auswirkungen aus Gefüge und Kräfte zwischen den Partikeln zu verwenden.

Der Zusammenhang zwischen Umladung der Kanten und Gefüge des Tones wird bei der Bestimmung der Kornverteilung durch die Zugabe eines Dispergierungsmittels ausgenutzt. Durch die Anlagerung einer polyanionischen Verbindung an die Kanten erhält die Suspension eine disperse Struktur. Dadurch werden die Tonaggregate zerkleinert, und die reale Korngröße der Feinstfraktion wird ermittelt.

2.1.2 Wechselwirkungen zwischen Ton und Porenlösung

Die komplexen Zusammenhänge zwischen Tonmineralen und Porenlösung sind nicht nur für das tonmineralogische Verständnis, sondern auch für die Geotechnik und insbesondere für die Deponietechnik von größter Bedeutung. Da die auftretenden Kräfte zwischen den Tonmineralen komplex sind und deren Wechselwirkungen durch verschiedenste Randbedingungen beeinflusst werden können, wird im folgenden dieser Sachverhalt zusammengefaßt und vereinfacht dargestellt.

Die negative Oberflächenladung der Tonminerale und der zum Ladungsausgleich vorhandene Ionenschwarm an der Tonmineraloberfläche werden als "diffuse" oder "elektrische Doppelschicht" bezeichnet, dessen Ausdehnung durch den Chemismus der Porenlösung beeinflusst wird. Nähern sich einzelne Tonminerale in Wasser, dann wirken ab einem bestimmten Abstand Kräfte zwischen ihnen. Aufgrund der negativen Überschuladung an den Tonmineraloberflächen, stoßen sich die Teilchen ab (Coulombsche Kräfte). Diese abstoßenden Kräfte sind abhängig von der jeweiligen Größe der Doppelschichten. Da sich die Doppelschichten durch Änderungen in der Porenlösungen verkleinern können, reduzieren sich dabei auch die abstoßenden Kräfte zwischen den Tonpartikeln. Zusätzlich zu den abstoßenden Kräften wirken anziehende Van-der-Waals-Kräfte, die nicht durch die Porenlösung beeinflussbar sind. Eine resultierende Abstoßung bewirkt eine disperse Struktur des sedimentierten Tons, bei zunehmenden Anziehungskräften entsteht eine

Kartenhausstruktur. Da nur die abstoßenden Kräfte von Veränderungen im Boden-Porenlösung-System abhängen, sind Änderungen in den Systemeigenschaften (Doppelschichten) für die jeweilige Tonstruktur verantwortlich (LAMBE & WHITMAN, 1969).

Die Ausdehnung der diffusen Doppelschicht d , welche die Größe der wirkenden Kräfte zwischen den Tonpartikeln regelt, kann unter vereinfachten Annahmen durch die Formel

$$d = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot D \cdot k \cdot T}{2 n_0 \cdot e^2 \cdot v^2}}$$

beschrieben werden, wobei ϵ_0 die Influenzkonstante des Vakuums (oder auch: elektrische Feldkonstante genannt, $8,85419 \cdot 10^{-12}$ C/Vm), D [-] die Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit, T [°K] die Temperatur, n_0 [Ionen/m³] die Ionenkonzentration, v [-] die Valenz der Kationen, k die BOLTZMANNsche Konstante ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/°K) und e die Elementarladung ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C) sind (MITCHELL, 1993). Ist die Doppelschicht durch eine hohe Elektrolytkonzentration der Porenlösung oder durch niedrigen Wassergehalt dünn ausgebildet, so ist die Anziehung durch die Van-der-Waals-Kräfte höher als die abstoßenden Kräfte der gleich geladenen Schichtflächen. Die negativen Flächen und die positiven Kanten ziehen sich an, und die Teilchen koagulieren. Der Ton weist eine Kartenhausstruktur mit großen Poren auf. Neben Ionenart, Ionenkonzentration und pH-Wert verursachen die dielektrischen Eigenschaften der Porenlösung eine Veränderung der Doppelschicht. Die Gleichung zeigt, daß eine Abnahme der Dielektrizitätskonstante der Porenlösung eine Abnahme der Ausdehnung der Doppelschicht und eine Zunahme der anziehenden Kräfte zur Folge hat. Die Umorientierung der Partikel bewirkt Schrumpfungen, Durchlässigkeitszunahmen, Abnahme der Zusammendrückbarkeit und Änderungen der Scherfestigkeit.

Die Wechselwirkungen zwischen der Porenlösung und der Doppelschicht, die daraus resultierenden Gefügeänderungen und die Auswirkungen auf die Durchlässigkeit sind in Tab. 2.2 aufgezeigt. Grundlage für diese Zusammenhänge sind theoretische Überlegungen, nach denen ein koagulierter Ton größere, durchflußwirksamere Poren aufweist und somit durchlässiger als ein disperser ist. Bei solcher Betrachtung wurden die gewählten Versuchsaapparaturen, die Aufbereitungsmethoden der Proben und die Art des Permeants nicht explizit berücksichtigt. Eine Übertragung der in Tab. 2.2 genannten Zusammenhänge auf mögliche Wechselwirkungen zwischen einem Ton und einer Mehrstofflösung, wie z. B. mineralisches Abdichtungsmaterial und Deponiesickerwasser, ist wegen der verschiedenen, die Struktur des Tons unterschiedlich beeinflussenden Reaktionen nicht möglich. Selbst qualitative Aussagen oder Tendenzen in bezug auf mögliche Struktur- bzw. Durchlässigkeitsänderungen können demnach nach Meinung der Autorin nur unzureichend getroffen werden.

Eigenschaft der Porenflüssigkeit	Änderung der Parameter	Änderung der Doppelschicht	Gefüge-änderung	Einfluß auf Durchlässigkeit
Dielektrizitätskonstante	Zunahme Abnahme	Zunahme Abnahme	dispers geflockt	Abnahme Zunahme
Elektrolytkonzentration	Zunahme Abnahme	Abnahme Zunahme	geflockt dispers	Zunahme Abnahme
Kationenvalenz	Zunahme Abnahme	Abnahme Zunahme	geflockt dispers	Zunahme Abnahme
Kationengröße	Zunahme Abnahme	Zunahme Abnahme	dispers geflockt	Abnahme Zunahme
pH-Wert	Zunahme Abnahme	Zunahme Abnahme	dispers geflockt	Abnahme Zunahme
Anionenadsorption	Zunahme Abnahme	Zunahme Abnahme	dispers geflockt	Abnahme Zunahme

Tab. 2.2: Einfluß der Porenflüssigkeit auf die Doppelschicht, das Gefüge und die Durchlässigkeit nach MADSEN & MITCHELL (1989)

Das Zusammenspiel zwischen Ton und Porenlösung ist in einer Suspension wegen des höheren Flüssigkeitsgehalts ausgeprägter, da sich die Tonpartikel entsprechend der veränderten Kräftesituation ungehindert umordnen und andere Strukturen ausbilden können. Tonproben, die mit Porenlösungen aufbereitet und danach konsolidiert werden, zeigen trotz geringeren Flüssigkeitsgehalts ebenfalls Veränderungen im Durchströmungsverhalten (MICHAELS & LIN, 1954). Tone, die im Labor oder im Feld auf einen Wassergehalt eingestellt und anschließend verdichtet werden, bilden entsprechend ihrem Wassergehalt und abhängig von der Verdichtungsart ebenfalls eine bestimmte Struktur aus (SEED & CHAN, 1959).

2.2 Einfluß der Tonminerale auf die Bodeneigenschaften

Das bodenmechanische Verhalten feinkörniger Böden läßt sich weitgehend aus der Tonmineralzusammensetzung und der Tonstruktur erklären. MITCHELL (1993) unterschied dabei neben Materialparametern, wie Menge und Art der Mineralien, die adsorbierten Kationen, Korngröße und -form, Zusammensetzung der Porenflüssigkeit, auch Zustandsfaktoren, wie Wassergehalt, Dichte, Überlagerungsdruck, Temperatur und Gefüge.

Neben der Korngrößenverteilung ist die **Plastizität** ein signifikantes Bestimmungsmerkmal für eine ausreichende Klassifizierung bindiger Böden. Durch die Einteilung in Bodengruppen mit ähnlichem stofflichen Aufbau und annähernd gleichen bodenphysikalischen Parametern können Rückschlüsse auf die bautechnischen Eigenschaften wie Scherfestigkeit, Verdichtungsfähigkeit, Durchlässigkeit usw. gezogen werden.

Die Fließ- und die Ausrollgrenze definieren die Größe des plastischen Bereichs eines Bodens und geben Hinweise auf die Empfindlichkeit gegenüber Wassergehalts- bzw. Porenflüssigkeitsänderungen. Aufgrund der mechanischen Aufbereitung der Bodenprobe kann die natürlich vorhandene Bodenstruktur mit diesem Klassifikationsversuch nicht beschrieben werden. Die aufgebrachte äußere Kraft wirkt den inneren Kräften zwischen den Mineralien entgegen, deren Größe durch den jeweiligen Wassergehalt und dem Chemismus der Porenlösung bestimmt ist. Die Bestimmung der Fließgrenze im CASA-GRANDE-Gerät kann mit einem Scherversuch verglichen werden, wonach die Fließgrenze einem definierten Wassergehalt entspricht, bei dem der Boden eine bestimmte Scherfestigkeit aufweist (nach CASAGRANDE ca. 2,5 kPa).

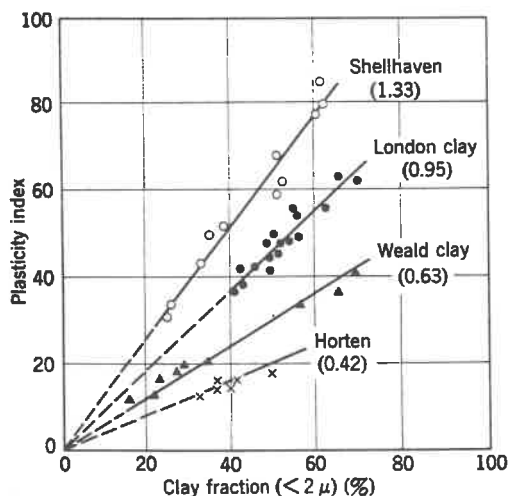


Abb. 2.3: Zusammenhang zwischen Plastizitätszahl und Feinstfraktion in Abhängigkeit der Aktivitätszahl (LAMBE & WHITMAN, 1969)

Die Plastizität nimmt grundsätzlich mit abnehmender Korngröße, steigender spezifischer Oberfläche und Oberflächenladung, sowie mit zunehmendem Anteil an quellfähigen

Tonmineralen zu, wobei die Kräfte zwischen den Tonteilchen eine entscheidende Rolle spielen (Abb. 2.3). Die Größe der Kräfte wird durch die Wertigkeit der Ionen an den Tonmineraloberflächen, die Dielektrizitätskonstante, die Elektrolytkonzentration, den pH-Wert der Porenlösung sowie die Umgebungstemperatur bestimmt.

Die Grenzen zwischen den verschiedenen Plastizitätszuständen eines Bodens sind willkürlich festgelegt, so daß es nach LAMBE & WHITMAN (1969) unwahrscheinlich ist, die Fließgrenze eines bestimmten Bodens allein mit der "Dicke" der adsorbierten Wasserschicht in Zusammenhang zu bringen.

Je nach den Kationenbelägen der Tonminerale ergibt sich für quellfähige und nicht quellfähige Tonminerale ein unterschiedliches Plastizitätsverhalten (MÜLLER-VONMOOS et al., 1985; HASENPATT, 1988): Bei Kaolinit und Illit mit Calciumionen als Gegenionen ist die Ausdehnung der Doppelschichten klein, die Anziehungskräfte überwiegen, und die Teilchen bilden eine Kartenhausstruktur. In den großen Poren kann viel Wasser aufgenommen werden, was zu einer hohen Plastizität führt. In der Natrium-Form (geringere Valenz wie Calcium) sind die Doppelschichtabstände größer, die Tonteilchen wegen ihrer starken Flächen-Flächen-Abstoßung dispergiert und dementsprechend Fläche zu Fläche orientiert. Das Wasser ist gleichmäßig verteilt und mit Wasser gefüllte Großporen fehlen weitgehend. Eine geringere Plastizität ist die Folge. Dagegen ist bei quellfähigen Tonmineralen (Montmorillonit) die Plastizität überwiegend von dem Quellvermögen abhängig. Bei Calciumionen als Gegenionen ist der Schichtabstand kleiner als bei Natriumionen. Deshalb ist die Plastizität im Gegensatz zu Kaolinit/Illit in der Natrium-Form größer als in der Calcium-Form. Grundsätzlich nimmt die Plastizität bzw. die Fließgrenze vom Kaolinit über Illit zum Montmorillonit bei gleicher Kationenbelegung zu (MÜLLER-VONMOOS et al., 1985).

Neben den Kationenbelägen hat der pH-Wert der Porenlösung und somit die Kantenladung eine entscheidende Auswirkung auf die abstoßenden Kräfte zwischen den Tonmineralen (MÜLLER-VONMOOS et al., 1985; HASENPATT, 1988). Kaolinit und Illit zeigen nach einer negativen Umladung der Kanten eine deutliche Abnahme der Fließgrenze. Infolge des kleineren Flächen-Kanten-Verhältnisses von Kaolinit ist die Auswirkung dort deutlicher zu sehen.

SKEMPTON stellte erstmals 1953 fest, daß für eine bestimmte mineralische Zusammensetzung der Feinstfraktion die Plastizitätszahl linear mit dem Tongehalt zunimmt und daß dies mit der Zunahme der benetzbaren Oberflächen bei abnehmender Korngröße zusammenhängt. Diese lineare Beziehung wird als **Aktivität eines Tones** I_A bezeichnet und wird wie folgt definiert:

$$I_A = \frac{I_P}{m_{dT} / m_d}$$

m_{dT} steht für die Trockenmasse der Feinstfraktion ($< 2 \mu\text{m}$) und m_d für die Trockenmasse des Bodens ($< 0,4 \text{ mm}$). MITCHELL (1993) geht davon aus, daß mit zunehmender Aktivität der Einfluß der Feinstfraktion, der austauschbaren Kationen und der Zusammensetzung der Porenflüssigkeit auf die Bodeneigenschaften zunimmt.

Dennoch läßt sich die tonmineralogische Zusammensetzung eines feinkörnigen Bodens allein durch die Bestimmung der Atterberggrenzen oder der Aktivität der Tone nicht zwangsläufig vorhersagen. Eine tonmineralogische Bestimmung der Feinstfraktion gewinnt dann an Bedeutung, wenn die aus der Klassifikation der Proben erwarteten bodenmechanischen Eigenschaften deutlich von den gemessenen Werten abweichen.

Das **Quell-Schrumpf-Verhalten** von Tonmineralen ähnelt den entsprechenden Plastizitätseigenschaften. D.h. je plastischer ein Ton ist, desto größer wird sein Quell- und Schrumpfvermögen sein (Abb. 2.4). Besonders stark quellen und schrumpfen smektitreiche Böden. Illitische Böden liegen mit ihrem Quellverhalten zwischen den smektitischen und kaolinitischen. Neben den mineralogischen Aspekten hängen das Quell- und Schrumpfmaß zusätzlich vom Wassergehalt und der Tonmineralstruktur ab.

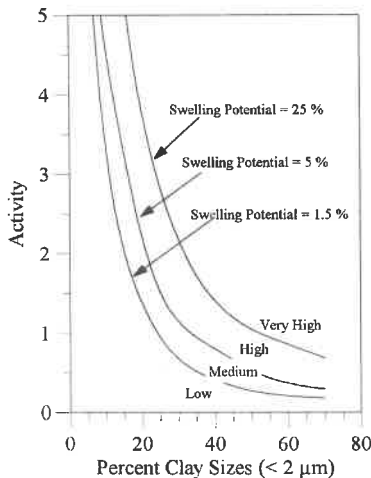


Abb. 2.4: Quellpotential in Abhängigkeit von Feinstfraktion und Aktivität (MITCHELL, 1993)

Der Quellvorgang läßt sich prinzipiell in zwei Abschnitte einteilen: die innerkristalline Quellung (Hydratation der austauschbaren Kationen bei Montmorillonit) und die osmotische Quellung (verursacht durch Unterschiede in der Ionenkonzentration auf der Tonmineraloberfläche und der Porenlösung). Das Quellen von Tonen ist durch Wasserentzug reversibel, wodurch er sich deutlich von der Anhydritquellung unterscheidet. Nach MADSEN & MÜLLER-VONMOOS (1988) hängt der osmotische Quelldruck vom Abstand der von Wasser zugänglichen Tonmineraloberflächen, von der Wertigkeit der austauschbaren Kationen und von der Elektrolytkonzentration der Porenflüssigkeit ab.

Die **Zusammendrückbarkeit** gesättigter Tonmineralproben nimmt vom Kaolinit über den Illit zum Montmorillonit zu. Die Auswirkung von verschiedenen, adsorbierten Kationen und Elektrolytkonzentrationen auf die Kompressibilität ist bei stark zusammendrückbarem Material wie Montmorillonit am größten. Die Dauer der Verformungsvorgänge unter konstanter Belastung wird mit zunehmender Plastizität länger. Generell kann gesagt werden, daß das viskoelastische Verhalten eines Bodens und die Neigung zum Kriechen mit zunehmenden organischen Bestandteilen und zunehmender Plastizität zunimmt.

Das **Durchströmungsverhalten** von feinkörnigen Böden hängt neben den jeweiligen Zustandsfaktoren auch von den Materialparametern ab (MITCHELL, 1993). Eine grundsätzliche, tonmineralspezifische Aussage über Größenordnungen des Durchlässigkeitsbeiwerts kann deshalb nur unzureichend getroffen werden. Vergleicht man verschiedene Tone mit ähnlichen Zustandsfaktoren (Wassergehalt, Dichte, Struktur usw.), so nimmt die Durchlässigkeit vom Smektit über den Illit zum Kaolinit zu.

Bei nichtbindigen Böden wird die **Scherfestigkeit** in erster Linie durch Reibungskräfte zwischen den Körnern hervorgerufen. Man spricht deshalb von einem korngestützten Gefüge (SCHUSTER, 1986). Bei bindigen Böden sind Oberflächenkräfte und auftretende Kapillarspannungen Ursache für Bindungskräfte zwischen den Körnern. Das Wirken dieser Anziehungskräfte kann als Kohäsion gemessen werden. Wenn die großen Körner in einer feinkörnigen Matrix eingebettet sind (matrixgestütztes Gefüge), wird die Scherfestigkeit des Materials fast ausschließlich durch strukturabhängige Scherkräfte im Tonanteil bestimmt.

KENNEY (1959) stellte für normal konsolidierte Böden mit zunehmender Plastizitätszahl (bis maximal 100) einen abnehmenden effektiven Scherwinkel fest. Er wies ebenfalls darauf hin, daß für extrem plastische Tone, wie Montmorillonit, infolge der langsam abnehmenden Porenwasserdrücke nur schwer die Spannungs-Festigkeitsbeziehung bestimmt werden kann (Abb. 2.5). Nach Untersuchungen von SONDEREGGER (1985) an Kaolinit, Illit und Montmorillonit mit unterschiedlicher Ionenbelegung im Ringscherapparat besteht keine einfache Beziehung zwischen Plastizitätszahl und Restscherfestigkeit.

MÜLLER-VONMOOS et al. (1985) stellten fest, daß bei Kaolinit und Illit die Restscherfestigkeit mit steigender Plastizität zu-, bei Montmorillonit abnimmt. Bei unbekannter tonmineralogischen Zusammensetzung eines Bodens darf somit die Restscherfestigkeit nicht in Beziehung zur Plastizitätszahl gesetzt werden. Danach ist das Scherverhalten von Tonen vor allem von der Teilchenform der Tonminerale, der Oberflächenladung und nicht von der Kantenladung abhängig. Anhand von Scherversuchen im Ringscherapparat konnte der Einfluß verschiedener Gegenionen untersucht werden: Das Scherverhalten von

Kaolinit ist unabhängig von der Ionenbelegung und beruht weitgehend auf "Korn-zu-Korn-Reibung" der verhältnismäßig "dicken" Plättchen mit einem kleinen "Durchmesser-zu-Dicken-Verhältnis". Die Kaolinitplättchen regeln sich beim Abscheren nur unvollständig "Fläche-zu-Fläche" ein und bilden rauhe Scherflächen. Illit mit seinen dünnen, plättchenförmigen Teilchen mit großem "Durchmesser-zu-Dicken-Verhältnis" zeigte eine deutliche Abhängigkeit des Scherverhaltens von den Gegenionen. Bei einer Natrium-Belegung sind die Illit-Teilchen in der Scherfläche Fläche gegen Fläche angeordnet. Montmorillonit zeigt einen hohen Scherfestigkeitsabfall von der maximalen zur Restscherfestigkeit und lange Scherwege bis zum Erreichen der Restscherfestigkeit. Dies ist wahrscheinlich auf ein Verschieben der Schichten oder Schichtpakete zurückzuführen und mit einer deutlichen Ausbildung von glatten Gleitflächen verbunden.

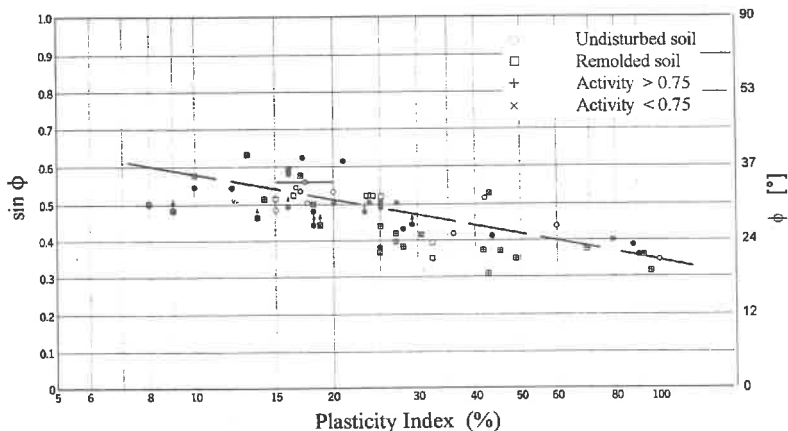


Abb. 2.5: Zusammenhang zwischen Scherwinkel und Plastizitätszahl (KENNEY, 1959)

STOCKMEYER (1993) führte Scherfestigkeitsuntersuchungen mit Mischungen aus einem schluffigen Sand und organisch modifizierten Tönen durch. Er stellte dabei fest, daß die Bestimmung der Scherfestigkeitsparameter in einem Ringscherapparat nicht auf reale Deponieverhältnisse übertragbar ist und empfahl deshalb die Durchführung von Triaxialversuchen. Bei einer Vergütung von 10 % wurde keine Änderung der Scherfestigkeit gemessen, obwohl theoretisch eine Abnahme der Scherfestigkeit infolge des zu erwartenden Quellvermögens des Zusatzmittels auftreten hätte müssen.

Die Zusammenhänge zwischen den für die Geotechnik relevanten Eigenschaften und den Tonmineralarten sind vereinfacht in folgender Tabelle zusammengefaßt:

	Kaolinit	Illit	Montmorillonit
Plastizität	-----	Zunahme	----->
Restscherfestigkeit	-----	Abnahme	----->
Kriechverformungen	-----	Zunahme	----->
Scherwinkel	-----	Abnahme	----->
Zusammendrückbarkeit	-----	Zunahme	----->
Dauer d. Verformungszustände	-----	Zunahme	----->
Schrumpffähigkeit	-----	Zunahme	----->
Durchlässigkeit	-----	Abnahme	----->

Tab. 2.3: Bodenphysikalisches und -mechanisches Verhalten verschiedener Tonminerale

2.3 Gefüge und Festigkeit verdichteter bindiger Böden

Künstliche Verdichtung ist eine bewährte Technik, die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften bindiger Böden durch Veränderung ihres natürlichen Wassergehalts und ihrer Dichte entscheidend zu verbessern. Tonböden können mit dem Wassergehalt nicht nur ihr Volumen, sondern auch ihr Gefüge ändern. Das Ausmaß hängt vom Tongehalt, der Tonmineralzusammensetzung und den austauschbaren Kationen ab. Der Zusammenhang zwischen dem bodenmechanischen Verhalten und dem Gefüge verdichteter Böden wurde in den fünfziger Jahren intensiv von LAMBE (1958 a, b) und SEED & CHAN (1959) untersucht.

Ausgehend von der Theorie der diffusen Doppelschichten schlug LAMBE (1958 a) ein Gefügemodell für künstlich verdichtete Böden vor (Abb. 2.6): Plastische Böden, die mit einem geringeren als dem optimalen Wassergehalt verdichtet werden (A) und zur Ausbildung der Doppelschicht zu wenig Wasser haben, zeigen eine Kartenhausstruktur mit willkürlichen Flächen-Kanten-Kontakten. Kartenhausstruktur steht im allgemeinen für einen geringen Grad an Partikelausrichtung und für eine geringe Trockendichte. Ein zunehmender Wassergehalt unterstützt die Partikelorientierung, und eine höhere Dichte sind die Folge. Böden, die bei optimalem Wassergehalt verdichtet werden (B), besitzen

eine Kombination aus Kartenhausgefüge und disperser Struktur. Die Dichten nehmen einen Maximalwert an. Eine weitere Erhöhung des Wassergehalts verringert nochmals die Elektrolytkonzentration in der Porenlösung (C). Dies führt zu einer weiteren Vergrößerung der Doppelschicht und eine Abnahme der anziehenden Kräfte. Der Grad der Partikelorientierung nimmt zu, und das Gefüge ändert sich in Richtung dispers. Obwohl Tonböden mit einem Wassergehalt auf der nassen Seite der Proctorkurve ein deutlich disperses Gefüge mit Flächen-Flächen-Kontakten zeigen, benötigt das vorhandene Wasser ein größeres Volumen, so daß die Trockendichte abnimmt (C). Durch eine Erhöhung der Verdichtungsenergie kann die Kartenhausstruktur eines auf der trockenen Seite der Proctorkurve verdichteten Bodens in ein eher geordnetes, disperses Gefüge überführt werden (E, D).

Das Ausmaß einer Strukturänderung eines künstlich verdichteten Bodens ist neben der Wasserzugabe auch von der jeweiligen Bodenart, der Art der Verdichtung und der Verdichtungsenergie abhängig. Zusätzlich können Zusatzstoffe die Eigenschaften der Porenlösung verändern, so daß eine Umorientierung der Partikel stattfinden kann. Neben einer sinkenden Elektrolytkonzentration, einer zunehmenden Dielektrizitätskonstanten und einem ansteigenden pH-Wert in der Porenlösung bewirken ein erfolgter Kationenaustausch der höher durch geringer wertigen Ionen im Ton, eine Anionenadsorption (z.B. Phosphate) und eine abnehmende Umgebungstemperatur eine Erhöhung der abstoßenden Kräfte. Das Gefüge ändert sich in Richtung dispers (Kap. 2.1).

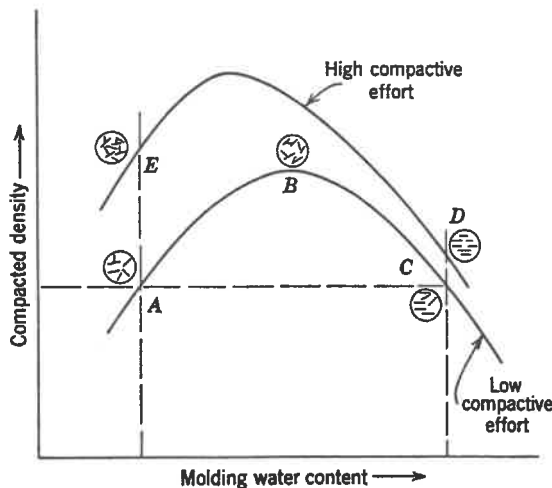


Abb. 2.6: Auswirkung der Verdichtung auf die Tonstruktur (LAMBE, 1958)

Den Überlegungen von LAMBE folgend, untersuchten SEED & CHAN (1959) den Einfluß der Struktur und verschiedener Verdichtungsmethoden auf das Festigkeitsverhalten künstlich verdichteter Tonböden. Während des Abschervorgangs zeigten Proben mit gleicher Dichte, gleichem Wassergehalt, aber unterschiedlicher Struktur ein voneinander abweichendes Scherverhalten. Sie kamen zu dem Schluß, daß sich der Einfluß der Struktur auf die Porenwasserdruckentwicklung beschränkt und daher die effektive Scherfestigkeit während undrainierter Versuche unverändert bleibt.

Nach zahlreichen Festigkeitsuntersuchungen an verdichtetem Lößlehm im Labor und im Feld wies RILLING (1994) nach, daß eine Abhängigkeit zwischen der effektiven Kohäsion und den Einbaubedingungen und somit der Bodenstruktur existiert. Der effektive Reibungswinkel der Proben ist unabhängig von den Einbaubedingungen und ändert sich proportional zur Fließgrenze (Abb. 2.7).

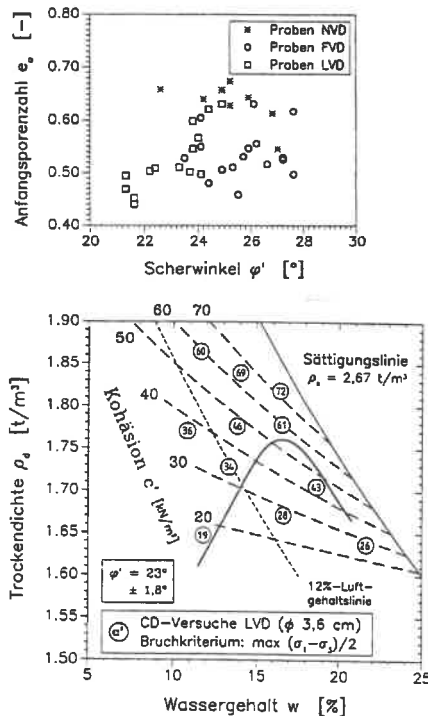


Abb. 2.7: Effektive Scherparameter eines künstlich verdichteten Lößlehms (NVD ... natürlich verdichtet, FVD ... im Feld verdichtet, LVD ... im Labor verdichtet, RILLING, 1994)

2.4 Einfluß von Chemikalien auf die Bodeneigenschaften

Unter natürlichen Bedingungen besteht zwischen Boden und Porenflüssigkeit ein chemisches Gleichgewicht, das langfristig durch geologische Umwandlungsprozesse oder durch äußere Einflüsse verändert werden kann. Der Austausch der natürlich vorhandenen Porenlösung durch ein "fremdes" Sickerwasser stellt eine Störung des Ist-Zustandes dar

2.4.1 Auswirkungen der Porenlösung auf die Tonminerale

WIENBERG (1990) unterschied bei den Wechselwirkungen organischer Substanzen mit Tonen zwischen "spezifischen" und "unspezifischen Interaktionen". Unter unspezifischen Interaktionen verstand er Wechselwirkungen, die das kolloidchemische Verhalten der Tone, jedoch nicht deren Kristallstruktur bzw. Tonmineralbestand, beeinflussen. Ursache des wechselnden kolloidchemischen Verhaltens ist die veränderte elektrische Eigenschaft der Doppelschicht im Tonmineral. Sich ändernde Doppelschichten ergeben Änderungen im vorhandenen Gefüge, was die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften der Tone beeinflusst (Kap. 2.3). Bei spezifischen Interaktionen werden direkt chemische Bindungen mit der Feststoffphase ausgebildet (Adsorption von Ionen), wobei feinkörnige Böden je nach Tonmineralbestand und Schadstoff ein unterschiedliches Adsorptionsvermögen zeigen. WIENBERG kam zu dem Schluß, daß sowohl spezifische als auch unspezifische Interaktionen die Eigenschaften und die Funktionsfähigkeit einer mineralischen Deponieabdichtung bestimmen.

Je nach chemischen Eigenschaften der Porenlösung sind unterschiedliche Reaktionen mit den Tonmineralen zu erwarten (WIENBERG, 1990). Abhängig vom Säuregrad der Porenlösung, den Temperatur- und Druckbedingungen greifen anorganische Säuren bevorzugt die Oktaeder-Bausteine der Tonminerale an. Die Protonen der Säure (H^+) ersetzen die austauschbaren Gegenionen an den Oberflächen. Anorganische basische Lösungen reagieren mit Kaoliniten stärker als mit Tonen aus der Illit- oder Montmorillonit-Gruppe, wobei besonders die Tetraeder-Bausteine gelöst werden. Dies liegt in dem unterschiedlichen Kanten-Flächen-Verhältnis begründet. Organische Säuren lösen das Silizium der Tetraeder-Schichten stärker als anorganische. Und organische Basen gehen mit den negativen Tonmineraloberflächen stabile Bindungen ein, wodurch sich das kolloidchemische Verhalten der Tonminerale stark ändert, ohne das Kristallgitter anzugreifen.

2.4.2 Änderung der Durchlässigkeit

Die Forschung auf dem Gebiet der Wechselwirkungen zwischen Boden und flüssigem Schadstoff und deren Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften begann bereits in den fünfziger Jahren in Amerika. MICHAELS & LIN (1954) zeigten, daß die Durchlässigkeit von Kaolinit-Proben mit konstanter Porenzahl bei organischen Permeanten mit abnehmender Dielektrizitätskonstante (Wasser, Methanol, Aceton, Dioxan, Cyclohexan) zunimmt. Dazu wurde eine Suspension aus getrocknetem Kaolinit und organischer Testflüssigkeit hergestellt und anschließend in einer Durchströmungszelle mit festen Wandungen konsolidiert und durchströmt.

Praxisbezogene Untersuchungen über die Verträglichkeit zwischen Chemikalien und künstlich verdichteter Böden wurden in den frühen achtziger Jahren intensiv begonnen, als Schadensfälle bei Altdeponien bekannt wurden. Dazu wurden vor allem Durchströmungsversuche mit verschiedenen Schadstoffen durchgeführt. Es zeigten sich große Unterschiede und Widersprüche innerhalb der Versuchsergebnisse, die auf die Bodenarten und deren Mineralzusammensetzung, die chemischen Testflüssigkeiten, die Probenherstellung und die Durchlässigkeitsapparaturen zurückzuführen sind.

MADSEN & MITCHELL (1989) faßten zahlreiche Untersuchungen über die Auswirkungen von verschiedenen chemischen Testlösungen auf die Durchlässigkeit zusammen, wobei nach der verwendeten Durchströmungsapparatur, dem Boden und dem Probenzustand nach der Herstellung unterschieden wurde.

Bei einer Durchströmung von vier Tonböden mit konzentrierten, organischen Flüssigkeiten (Essigsäure, Anilin, Methanol, Aceton, Ethylenglycol, Heptan) wurde im Vergleich zur Durchströmung mit Wasser eine 10 bis 1000fach höhere Durchlässigkeit beobachtet (ANDERSON et al., 1985). Dabei wurden die Proben im Ausstechzylinder bei optimalem Wassergehalt verdichtet und ohne Sättigung darin durchströmt. Eine visuelle Prüfung ergab kleine Risse und eine blockige Struktur. Da die Zunahme nicht allein auf die Dichte und Viskosität der Flüssigkeit zurückgeführt werden konnte, wurde die Ursache in den geringen Dielektrizitätskonstanten der Testflüssigkeiten im Vergleich zu Wasser, gesehen. Geringere Dielektrizitätskonstanten von organischen Substanzen bewirken Strukturänderungen und Durchlässigkeitserhöhungen infolge abnehmender Doppelschichtabstände (Kap. 2.1).

BOWDERS (1985) beobachtete ebenfalls einen Anstieg der Durchlässigkeit während einer Durchströmung mit konzentrierten organischen Chemikalien (Methanol, Essigsäure, Trichlorethylen (TCE), Heptan) im Gerät mit festen Wandungen. Diese Zunahme wurde

mit dem durch abnehmende Doppelschichtabstände herbeigeführten Schrumpfvorgang in Verbindung gebracht. Gering konzentriertes Methanol (< 80 %) führte zu einer Abnahme der Durchlässigkeit. Die Ursache hierfür wurde in der abnehmenden Elektrolytkonzentration bzw. dem zunehmenden Doppelschichtabstand und dem dadurch hervorgerufenen Schwellvorgang gesehen. Schwer wasserlösliche Verbindungen (TCE, Heptan) durchströmten die Kaolinit- und Chlorit/Illit-Proben in den Triaxialzellen infolge ihrer Oberflächen- und Kapillarspannung nicht. Wohingegen bei einer Durchströmung im Ausstechzylinder ohne einwirkende, effektive Spannungen auf die Proben sehr große Durchlässigkeitsänderungen registriert wurden. Die Durchströmungsvorgänge mit konzentrierter oder gelöster Essigsäure werden überwiegend durch Lösungs- und Ausfällungsprozesse statt durch Veränderungen im Bodengefüge kontrolliert.

Verdünnte organische Lösungen (< 80 %; Methanol, Essigsäure, Heptan, TCE) hatten nach BOWDERS & DANIEL (1987) geringe Auswirkungen auf die Durchlässigkeit eines Kaolinites und eines Illit/Chlorits unabhängig vom Versuchsgerät. Zur einfachen Abschätzung einer möglichen Ton-Schadstoff-Reaktion wurden Suspensionen mit den Testlösungen hergestellt. Alle Suspensionen mit konzentrierten Chemikalien flockten aus. Dagegen konnte bei Suspensionen mit verdünnten Lösungen oder Wasser kein Absinken der Feinstteilchen beobachtet werden. Durchlässigkeitsversuche im Ausstechzylinder zeigten, daß nur dann Veränderungen in der Durchlässigkeit feststellbar waren, wenn während der Schlämmanalyse eine Ausflockung stattfand. Es wurde nachgewiesen, daß in Wasser gelöste Verbindungen mit einer Dielektrizitätskonstante größer als 60 kein Ausflocken der Feinstteilchen verursachen. Lösungen mit organischen Verbindungen können aufgrund ihrer Dielektrizitätskonstante keine Gefügeänderungen im verdichteten Boden hervorrufen. Es sei denn, andere charakteristische Eigenschaften der Testlösung, wie Elektrolytkonzentration oder Valenz verursachen eine Veränderung der Doppelschicht (DANIEL et al., 1988).

Durchlässigkeitsuntersuchungen mit Chemikalien sind im Gegensatz zu Versuchen mit Wasser erheblich vom verwendeten Versuchsgerät (Ausstechzylinder, Oedometer-, Triaxialzelle) und dem Versuchsablauf abhängig. Dabei zeigen Durchlässigkeitszellen mit festen Wandungen grundsätzlich höhere Durchlässigkeitsbeiwerte als Durchströmungszellen mit flexiblen Wänden, da auftretende Materialschrumpfungen und daraus entstehende Randumläufigkeiten durch die gering wirkenden effektiven Spannungen in den Proben nicht "überdrückt" werden können (FOREMAN & DANIEL, 1986; BOWDERS et al., 1986; BOWDERS & DANIEL, 1987).

Die Auswirkungen des Gefüges und des Spannungszustands der Proben auf die Änderungen der Durchlässigkeit wurden von YANG & BARBOUR (1992) untersucht. Die Versuchsergebnisse bestätigten, daß auf unterschiedliche Art verdichtete Proben ("static compac-

tion, kneading compaction, slurring“) verschiedene Anfangsstrukturen aufweisen können. Elektronenmikroskopaufnahmen zeigten deutlich eine unterschiedliche Anordnung der Tonaggregate und eine andere Verteilung der Makroporen zwischen den Aggregaten. Eine Durchströmung mit einer Salzlauge in einer Oedometerzelle bewirkte eine Kontraktion der Tonaggregate. Die daraus resultierende Volumenänderung hatte keine Auswirkungen auf das Gefüge der einzelnen Tonpartikel in den Aggregaten. Die veränderte Durchlässigkeit wurde auf die größer werdenden Makroporen zurückgeführt, die infolge zusammenziehender Tonaggregate und seitlicher Entspannung entstanden. Die Zunahme der Durchlässigkeit infolge des Salzlaugen-Kontakts konnte durch Erhöhung der Vertikalspannung rückgängig gemacht werden.

2.4.3 Veränderte plastische Eigenschaften

Die Plastizität eines feinkörnigen Bodens wird zum einen durch die Korngröße, die spezifische Oberfläche bzw. Oberflächenladung der Tonminerale und den Anteil an quellfähigen Tonmineralen beeinflusst, zum anderen spielen die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Porenlösung eine entscheidende Rolle.

Da der Säuregrad einer Porenlösung die Oberflächenladung der Tonminerale und damit das Gefüge entscheidend beeinflusst, bewirkt dieser vor allem bei Tonmineralen mit hohem Kanten-Flächen-Verhältnis (z.B. Kaolinit) ein verändertes Plastizitätsverhalten. Bei niedrigem pH-Wert ($\text{pH} < 7$) treten an den Kanten der Tonminerale positive Ladungen auf, die sich mit den negativen Flächen zu einem kartenhausartigen Gefüge mit großen, flüssigkeitsgefüllten Zwischenräumen verknüpfen. Die Fließgrenze erhöht sich. Eine Erhöhung des pH-Werts bewirkt eine Abnahme der positiven Kantenladungen, eine Zerstörung der Kartenhausstruktur und eine Reduzierung der Fließgrenze.

BOWDERS & DANIEL (1987) beobachteten, daß verdünnte Essigsäure einen geringen Anstieg der Fließ- und Ausrollgrenze von Kaolinit zur Folge hatte. Illit/Chlorit zeigte dagegen keine Plastizitätsänderungen bei Methanol- und Essigsäure-Lösungen. Neutrale organische Verbindungen mit einer Dielektrizitätskonstante größer als 40 veränderten die Atterberggrenzen der beiden Tone nicht wesentlich.

Nach Untersuchungen von DANIEL et al. (1984) zerstörte konzentriertes Methanol und Xylol die Plastizität des untersuchten Smektit, Illits und Chlorits. Ein Kaolinit erfuhr keine Plastizitätsänderungen mit konzentriertem Methanol. FOREMAN & DANIEL (1986) bestätigten diese Ergebnisse und ergänzten, daß Kaolinit, Illit und Smektit keine Plastizität mehr bei der Verwendung von konzentriertem Heptan aufwiesen.

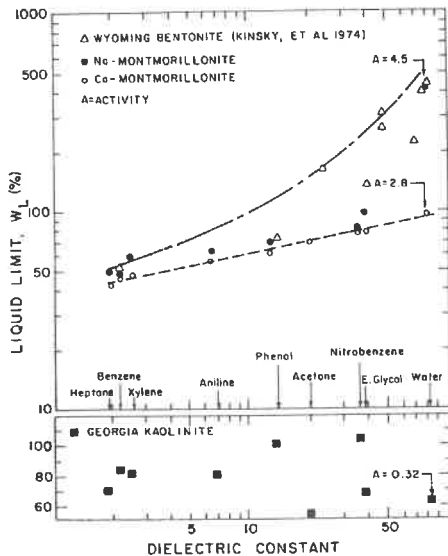


Abb. 2.8: Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante der Porenlösung und der Fließgrenze für Montmorillonite und Kaolinit (ACAR et al., 1985)

Neben der Art und der Konzentration der Ionen und dem pH-Wert der Porenlösung kann die Polarität organischer Verbindungen die Zustandsgrenzen beeinflussen. Der Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstanten und Fließgrenzen ist allerdings nach ACAR et al. (1985) nur für Montmorillonite eindeutig. Im Gegensatz dazu zeigte Kaolinit bei verschiedenen Flüssigkeiten mit gleicher Polarität sehr unterschiedliche Werte für die Fließgrenze (Abb. 2.8). Dieses Verhalten wurde auf die Empfindlichkeit der positiven Kanten in bezug auf pH-Wert-Änderungen zurückgeführt. Dennoch sind mögliche Plastizitätsänderungen durch organische Flüssigkeiten bei Kaoliniten geringer als bei quellfähigen Tönen.

2.4.4 Mechanische Eigenschaften

Während die Auswirkungen von organischen und anorganischen Chemikalien auf die hydraulische Durchlässigkeit eingehend untersucht wurden, gibt es nur wenige Arbeiten über eventuelle Änderungen der Festigkeit und der Plastizität. Diese Eigenschaften sind jedoch für Standsicherheitsprobleme und Rißgefährdungen der Basisabdichtung von besonderer Bedeutung. Bekannte Beispiele für Auswirkungen von Veränderungen im Chemismus des Tons auf seine mechanischen Eigenschaften sind die sensitiven Tone in Kanada und Norwegen.

Das Konzept der effektiven Spannungen ($\sigma' = \sigma - u$), das von TERZAGHI 1925 formuliert wurde, ermöglicht eine sinnvolle Anwendung dieser Prinzipien für bautechnische Probleme, die früher nur auf empirische Weise gelöst werden konnten. LAMBE (1960) erkannte, daß die klassische Theorie der effektiven Spannungen auch Aufschluß über die elektrischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte in kohäsiven Böden geben kann. OLSON &

MESRI (1970) diskutierten verschiedene Mechanismen, die die Zusammendrückbarkeit verschiedener Tone bestimmen, und folgerten, daß Smektiten primär durch das physikalisch-chemische Modell und Kaolinite durch das mechanische Modell beschreibbar sind.

Untersuchungen von SRIDHARAN & VENKATAPPA RAO (1973) hatten die eindimensionale Volumenänderung von gesättigtem Kaolinit und Montmorillonit nach Kontakt mit organischen Chemikalien zum Gegenstand. Dazu wurde ein erweitertes Konzept der effektiven Spannungen formuliert, das die elektrischen Kräfte zwischen den Partikeln berücksichtigt:

$$\sigma' = \sigma - u - R + A$$

(σ' ... effektive Spannung, σ ... äußere, totale Spannung, u ... Porenwasserdruck, R ... flächenbezogene Abstoßungskräfte, A ... flächenbezogene Anziehungskräfte).

Die Ergebnisse der Oedometer- und Scherkastenversuche bestätigten, daß zwei Mechanismen die Volumenänderung von Tönen prinzipiell beeinflussen: Bei nicht quellfähigen Tönen spielen vorwiegend Schubwiderstände zwischen den Partikeln eine Rolle; bei quellfähigen Tönen sind primär die abstoßenden Kräfte, die zwischen den Doppelschichten der Tonminerale wirken, Ursache für eine Volumenänderung. Natürliche Böden können beide Mechanismen gleichzeitig zeigen, und je nach dominierendem Tonmineral überwiegt das entsprechende Volumenänderungsprinzip. Die Kompressionsversuche mit Kaolinit ergaben, daß die Porenzahlen bei einer bestimmten Laststufe mit zunehmender Dielektrizitätskonstante der Porenflüssigkeit abnehmen, wohingegen bei Montmorillonit entgegengesetztes Verhalten zu beobachten waren (Abb. 2.9).

Abb. 2.10 zeigt einen Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante der Chemikalien und drainiertem Reibungswinkel φ' bzw. Kohäsion c' für Kaolinit und Montmorillonit. Mit zunehmender Dielektrizitätskonstante nehmen sowohl der Reibungswinkel als auch die Kohäsion unabhängig von der Tonart ab. Bei Kaolinit wird der Reibungswiderstand zwischen den Kontaktpunkten der Partikel durch die niedrigen Dielektrizitätskonstanten erhöht, wohingegen bei aktiven Tönen diese Zunahme auf die zunehmenden Anziehungskräfte zwischen den Partikeln zurückzuführen ist. Eine Zunahme der Dielektrizitätskonstante bewirkt somit eine Abnahme der anziehenden Kräfte, eine Erhöhung der abstoßenden Kräfte und folglich eine Abnahme der aufnehmbaren effektiven Spannungen. Diese Auswirkungen sind bei Montmorillonit deutlicher als bei Kaolinit beobachtet worden. Das erweiterte Spannungskonzept konnte somit experimentell nachvollzogen werden.

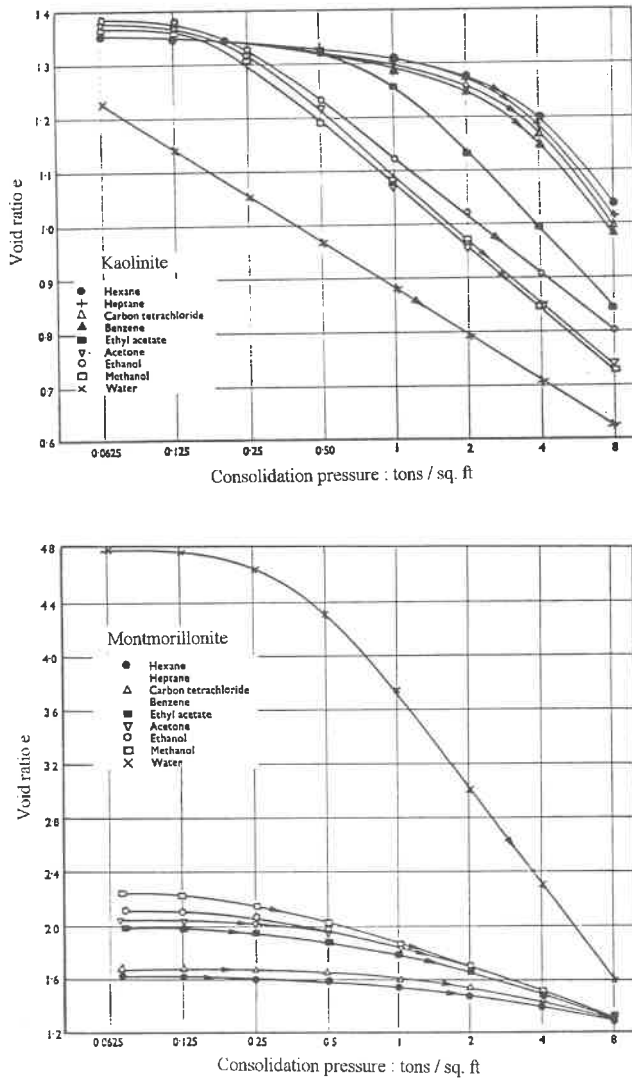


Abb. 2.9: Eindimensionale Konsolidation von Kaolinit und Montmorillonit mit verschiedenen organischen Verbindungen (SRIDHARAN & VENKATAPPA RAO, 1973)

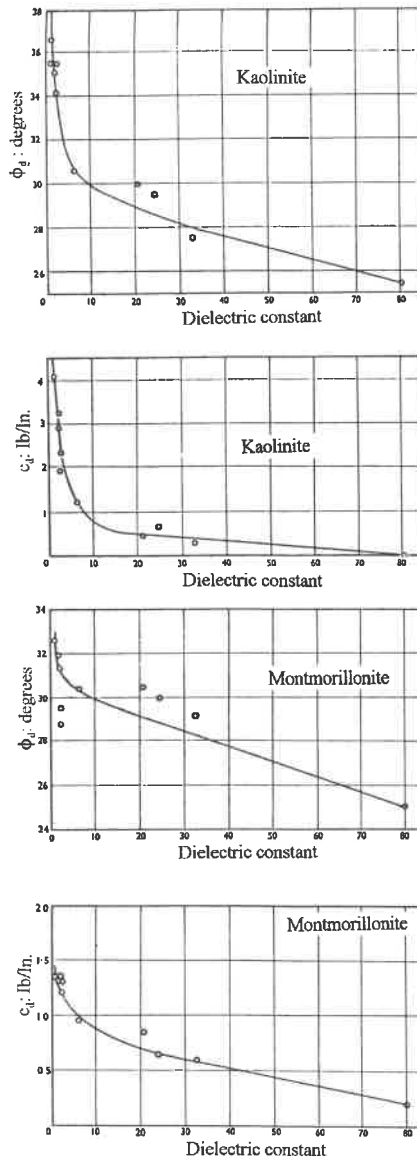


Abb. 2.10: Einfluß der Dielektrizitätskonstante auf Reibungswinkel und Kohäsion von Kaolinit und Montmorillonit (SRIDHARAN & VENKATAPPA RAO, 1973)

MOORE & MITCHELL (1974) zeigten ebenfalls analytische Methoden zur Beschreibung der elektromagnetischen Kräfte in Böden auf. Dabei stellt die Dielektrizitätskonstante der Porenflüssigkeit den entscheidenden Parameter dar. Flügelsondierungen und Triaxialversuche an einem mit organischen Flüssigkeiten durchströmten Kaolinit dienten der Verifizierung der theoretischen Annahmen. Abb. 2.11 zeigt den Zusammenhang zwischen der normierten (auf die mit Wasser durchströmten Proben bezogen), undrainierten Scherfestigkeit und der Dielektrizitätskonstante der Porenflüssigkeit für einen Kaolinit.

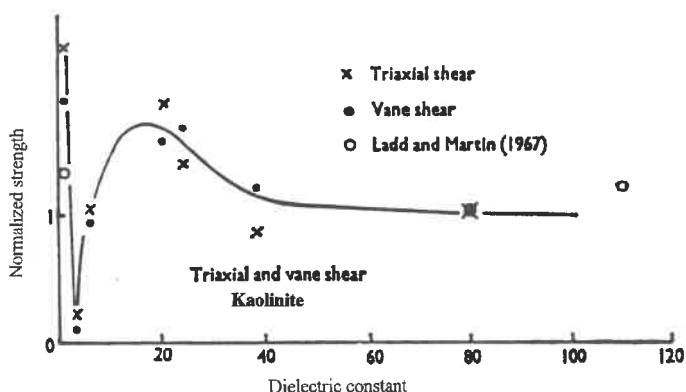


Abb. 2.11: Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Dielektrizitätskonstante (MOORE & MITCHELL, 1974)

2.4.5 Wechselwirkungen mit Deponiesickerwässern

Aufgrund von Schadensfällen bei Altdeponien wurden gegen Ende der achtziger Jahre praxisorientierte Untersuchungen mit natürlichen Deponiesickerwässern begonnen. Dennoch ist die Frage "Veränderung der geotechnischen Eigenschaften von verdichteten Tonen durch Deponiesickerwässer" bis heute nicht ausreichend geklärt. Ebenso wenig sind die Wechselwirkungen von mit Organobentonit vergüteten Böden mit verdünnten Chemikalien oder Deponiesickerwässern erforscht.

Die Menge und die Schadstofffracht eines Deponiesickerwassers werden vom eindringenden Niederschlagswasser und den wasserbildenden Prozessen im Deponieinneren bestimmt. Sickerwässer, deren chemische Zusammensetzung von der Abfallart, dem Deponiealter, dem Entnahmezeitpunkt und dem Entnahmeort abhängig ist, variieren von Deponie zu Deponie. Laboruntersuchungen mit einem speziellen Deponiesickerwasser

stellen deshalb spezifische Einzelversuche dar und lassen nur beschränkt Rückschlüsse auf andere Deponiestandorte zu. Eine Übertragung der durchgeführten Versuche auf "ähnliche" Situationen ist deshalb nur bedingt zulässig.

Falls im Laufe der Betriebszeit einer Deponie Leckagen in der Kunststoffdichtungsbahn auftreten oder die Diffusionsdichtheit derselben nicht ausreicht, können zahlreiche Schadstoffe in Form von Sickerwasser mit den anorganischen Mineralphasen des Dichtungsmaterials in Wechselwirkung treten. Somit sind die auftretenden bodenmechanischen Veränderungen des mineralischen Abdichtungsmaterials eine Funktion der chemischen Wechselwirkung zwischen fester und flüssiger Phase.

Deponiesickerwässer enthalten anorganische und organische Bestandteile. In der quantitativen Analysetechnik werden die organischen Inhaltsstoffe summarisch durch die Parameter CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf = Gesamtheit der Huminsäuren, fulvoähnlichen Substanzen, niedrigen Fettsäuren) und BSB₅ (biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen) beschrieben. Diese stellen jedoch nur Kennziffern dar, die keinerlei Rückschlüsse auf das Reaktionsverhalten eines bestimmten Inhaltstoffes ermöglichen.

Durchströmungsuntersuchungen im Triaxialgerät von DANIEL & LILJESTRAND (1984) mit fünf verschiedenen Tönen, natürlichen und künstlichen Sickerwässern zeigten, daß natürliche Deponiesickerwässer mit geringen Konzentrationen an Organika keinen Einfluß auf die Durchlässigkeit hatten (BRUNELLE et al., 1987). Ein hoher Gehalt an gelösten, organischen Bestandteilen beeinflusste jedoch die Tonstruktur.

Plastizitätsuntersuchungen von DANIEL et al. (1988) an drei verschiedenen Böden (jeweiliges Hauptmineral: Chlorit, Smektit, Illit) mit drei natürlichen Deponiesickerwässern (pH 1,5 - 7,1) zeigten, daß sich die Atterberggrenzen nur bei dem smektitreichen Boden änderten (Reduzierung der Plastizitätszahl um maximal 15 %). Die Durchlässigkeitsversuche in Triaxialzellen und im Gerät mit festen Wandungen ergaben, daß kein Permeant eine signifikante Zunahme des k-Werts bewirkte. Die Ursache hierfür wurde in den kaum von Wasser abweichenden Dielektrizitätskonstanten gesehen. Es wurde nicht ausgeschlossen, daß Elektrolytkonzentration und Valenz des Sickerwassers eine Erhöhung der Durchlässigkeit verursachen könnten.

ECHLE et al. (1988), DÜLLMANN et al. (1989) und BRACKE et al. (1991) untersuchten mineralogisch, geochemisch und bodenphysikalisch das mineralische Abdichtungsmaterial einer Basisabdichtung nach 8-jährigem Betrieb einer Hausmülldeponie auf eine mögliche Veränderung. Unter dem Einfluß des Sickerwassers zeigte sich eine Umwandlung der quellfähigen Smekтите zu Mixed Layer Illit/Smektit und eine partielle Auflösung der Karbonate in den oberen 20 cm der Basisabdichtung. (Nach Meinung von MADSEN wird

der Smektit durch die Aufnahme von Kaliumionen teilweise in einen Kalium-Smektit umgewandelt und nicht in einen Illit/Smektit.) Dies wurde mit der hohen Ionenkonzentration des Sickerwassers in Zusammenhang gebracht. In der gesamten Tondichtung wurde eine Anreicherung von organischen Bestandteilen aus dem Sickerwasser festgestellt: im oberen Bereich stark polare Heteromoleküle, im unteren und mittleren Bereich mittel- bis unpolare Verbindungen. Geotechnische Untersuchungen ergaben sowohl eine abnehmende Fließgrenze und Plastizität als auch eine Verfestigung im oberen Bereich der Abdichtung infolge des veränderten Mineralbestandes.

GORANTONAKI (1992) untersuchte die mineralogischen und chemischen Auswirkungen von drei sich unterscheidenden Sickerwässern auf tertiäre Tone. Es fanden überwiegend Austauschreaktionen zwischen den Tönen und den Sickerwässern statt, wobei die ursprünglich austauschbaren Kationen der Tone durch Alkalien aus dem Sickerwasser verdrängt wurden. Die Überführung eines Alkali-Montmorillonits in einen Erdalkali-Montmorillonit kann unter Deponiebedingungen zu Schrumpfungen führen. Im smektitreichen Ton wurden "möglicherweise" strukturelle Veränderungen ("Illitisierung") festgestellt, wobei diese in Gegenwart von Calcit verhindert oder verzögert werden konnten. Im smektitreichen Ton nimmt die Quellfähigkeit durch Einlagerung von organischen Verbindungen in den Zwischenschichten ab. Dessen Wasseraufnahmefähigkeit und plastische Eigenschaften werden ebenfalls stark beeinflusst. Es wurde festgestellt, daß für das Langzeitverhalten einer Deponieabdichtung der Gehalt an organischen Substanzen und Alkalien im Sickerwasser eine entscheidende Rolle spielt. Dagegen ist der Einfluß des pH-Werts eher gering.

SCHRÖDER (1993) führte an denselben Tönen mit denselben Sickerwässern wie GORANTONAKI bodenphysikalische Untersuchungen durch (Sieb-, Schlämmanalyse, Atterberggrenzen, Wasseraufnahmefähigkeit und Durchlässigkeit). Seine Arbeit zeigte deutlich, daß Tone mit unterschiedlicher mineralogisch-geochemischer Zusammensetzung in ihren bodenphysikalischen Kennwerten auf verschiedenartige Deponiesickerwässer unterschiedlich reagieren. Ein schwach basisches, elektrolytarmes Deponiesickerwasser (pH 7 - 8; elektrische Leitfähigkeit 6 mSiemens/cm) verursachte bei allen Tönen keine Plastizitätsänderung, wohingegen sowohl ein basisches (pH 9 - 10) als auch ein schwach saures (pH 6), elektrolytreiches, organisches Sickerwasser (≥ 110 mS/cm; CSB ≈ 20.000 mg/l) eine deutliche Änderung der plastischen Eigenschaften bewirkte. Bei den smektitreichen Böden nahm die Fließgrenze infolge Anlagerung von organischen Bestandteilen aus dem Sickerwasser an die Tonminerale ab. Bei einem smektitarmen, organischen Ton wurde eine 56 %ige Zunahme der Plastizitätszahl festgestellt. Die Durchlässigkeit aller untersuchten Tone blieb bei den verschiedenen Sickerwässern über den gesamten Untersuchungszeitraum von 19 Monaten unverändert.

ZEIGER (1993) wies nach, daß sich die Durchlässigkeit von natürlichen Tonproben (Hauptmineral: Corrensit/Illit und Illit/Mixed Layer Illit/Smektit) nach Beaufschlagung mit zwei Deponiesickerwässern (pH 8,3/ 8,7; elektrische Leitfähigkeit 38,2/ 63,8 mS/cm; CSB 266/ 5090 mg/l) aufgrund der Verstopfung der Poren durch Ausfällungsprodukte eher verringerte. Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des direkten Kontaktbereichs zwischen Proben und Sickerwasser ließen deutliche Gefügeänderungen in den obersten Millimetern erkennen (Abb. 2.12). Es entstand ein hochporöses Skelettgefüge, ähnlich einem Wabengefüge. Die Konsistenzgrenzen verschoben sich zu höheren Ausrollgrenzen und vor allem höheren Fließgrenzen, was die Plastizität unabhängig vom Sickerwasser deutlich erhöhte. Auswirkungen auf die drainierte und undrainierte Scherfestigkeit des Abdichtungsmaterials waren nicht festzustellen.

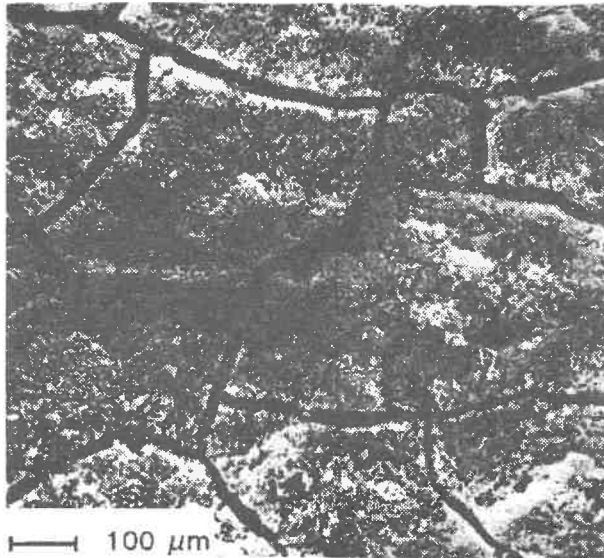


Abb. 2.12: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Tonprobe nach Sickerwasserkontakt (ZEIGER, 1993)

BRACKE et al. (1991) berichteten über geochemische Veränderungen einer Deponieabdichtung und Anreicherungen von organischen Substanzen und Schwermetallen aus dem Sickerwasser im gesamten Profil, obwohl keine Durchströmung derselben festgestellt wurde.

GOODALL & QUIGLEY (1977) bemerkten erhebliche Kontaminationen des Deponieuntergrundes bis in große Tiefen, obwohl die hydraulischen Gradienten für eine Strömung in das Deponieinnere sorgten und die errechneten Eindringtiefen deutlich geringer ermittelt wurden. Die Diffusion der Schadstoffe durch die tonige Abdichtung dominierte somit gegenüber der Konvektion.

Auch SCHNEIDER & GÖTTNER (1991) kamen aufgrund ihres zweijährigen Feldversuchs zu dem Schluß, daß die Diffusion der maßgebende Transportmechanismus im Schadstoffaus-
trag einer Deponie ist. Sie forderten eine Minimierung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser, einen Mehrschichtenaufbau der mineralischen Dichtung und Adsorption der austragbaren Schadstoffe an die mineralische Dichtung und den Untergrund.

2.5 Bentonit - Organobentonit

2.5.1 Gewinnung, Einsatzgebiete und Aktivierung von Bentonit

Bentonit wurde erstmals 1890 im Ford Benton, USA abgebaut und ist ein natürlich vorkommender Ton, welcher neben Smektit (Montmorillonit) noch Begleitmineralien wie Quarz, Glimmer, Feldspat, Pyrit, Kalk usw. enthält. Er wird vorwiegend im Tagebau gewonnen, wobei auf eine möglichst reine Qualität geachtet wird, da eine spätere Verbesserung nahezu unmöglich ist. Die spätere Trocknung, Zerkleinerung und Klassierung erfolgt oft in einem Prozeßschritt.

Die Verwendung von Bentonit zur Herstellung von thixotropen Suspensionen ist in der Bohrindustrie und im Bergbau schon seit langem bekannt. Auf dem Gebiet der Geotechnik werden die außergewöhnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Tone, wie große Oberfläche, negative Flächenladung, innerkristalline Quellfähigkeit, bereits vielfältig ausgenutzt. Weitere Einsatzgebiete von Bentonit sind in Tab. 2.4 nach Industriezweigen zusammengefaßt. Durch chemisch-technische Aktivierungsprozesse können aus einem Rohbentonit modifizierte Bentonite für spezielle Anwendungen hergestellt werden. Man unterscheidet dabei sauer, alkalisch und organisch aktivierte Bentonite. Für Bohrspülungen und Stützsuspensionen werden bevorzugt Natrium-Bentonite eingesetzt, da diese besonders quellfähig und thixotrop sind. Da weltweit nur wenige natürliche Natrium-Bentonit-Lagerstätten existieren, werden die höherwertigen Ursprungslösungen durch Einmischen von Soda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) in das bergfeuchte Material durch Natriumionen ersetzt. Es entsteht ein hochquellfähiger Aktiv-Bentonit mit erhöhter

Plastizität, Viskosität und Thixotropie. Eine Aktivierung mit Salzsäure ergibt sog. Bleicherden, die zu Entfärbungs-, Reinigungs- und Stabilisierungszwecke in der Papier-, Nahrungsmittel- und Mineralölindustrie eingesetzt werden.

Industriezweig	Bleicherde	Rohbentonit (Ca-Bentonit)	Aktiv-Bentonit	Organophiler Bentonit
Gießereiindustrie		Formsandbinder für spezielle Formsande	Formsandbinder für synthetische Formsande	Formsandbinder für wasserfreie Formsande
Nahrungsmittel- industrie	Raffination, Entfärbung, Reinigung und Stabilisierung pflanzlicher und tieri- scher Öle und Fette			
Chemische Industrie	Katalysatoren, Insektizide und Fungizide, Füllstoff, Trocken- mittel, Wasser- und Abwasserreinigung, Adsorptionsmittel für radioaktive Stoffe, Schwermetalle usw.			
Mineralöl- industrie	Raffination, Entfärbung, Reinigung von Ölen, Fetten und Wachsen			Schmierfett- verdickung
Teerverwertung			Teer-, Asphaltanstriche; Thixotropie- rung von Teer/Wasser Emulsionen	
Baundustrie		Stützsuspensionen für Schlitzwände und Schildvortrieb, Untergrundabdich- tung		
Bohrindustrie		Bohrspülungen für Salzwasser	thixotrope Suspensionen für Bohrspü- lungen	
Farben- und Lackindustrie			Verdickungs-, Stabilisierungsmittel für Farben und Lacke	
Deponietechnik			Zuschlagstoff für mineralische Abdich- tungsmaterialien	

Tab. 2.4: Einsatzgebiete der Bentonite (SÜD-CHEMIE AG)

Zur Reduzierung der Durchlässigkeit von mineralischen Dichtungsmaterialien wird bevorzugt Aktiv-Bentonit eingesetzt, der bei Wasserkontakt erheblich quillt. Dadurch werden die Porenräume ausgefüllt und die Sickerwege im Boden verschlossen. Findet ein Austausch der Natrium-Gegenionen des Aktivbentonits durch höherwertige Metallionen statt, kontrahieren die Zwischenschichten im Bentonit. Dieser Vorgang kann besonders bei Vergütungen von mineralischen Deponieabdichtungen mit Aktiv-Bentonit schwerwiegende Folgen haben. Der Kontakt zwischen einem elektrolytreichen Deponiesickerwasser

und einer mit Natrium-Bentonit vergüteten Abdichtungsschicht könnte zu einer sukzessiven Umwandlung von Natrium- zu Calcium-Bentonit führen. Dies hätte eine Erhöhung der Durchlässigkeit infolge Porenvergrößerung zur Folge.

In der Deponietechnik hat die Fähigkeit der Schadstoffadsorption neben der geringen Durchlässigkeit der Dichtungsmaterialien eine entscheidende Bedeutung. Wasserlösliche Bestandteile der Deponiesickerwässer können in die Zwischenschichten der unbehandelten Tone vordringen und dort sorptiv eingelagert werden (s. Kap. 2.1). Hydrophobe, unpolare Bestandteile, zu denen die meisten organischen Verbindungen gehören, lagern sich aufgrund ihrer wasserabweisenden Eigenschaften kaum an die Tonkristalle an und können somit auch nicht festgehalten bzw. immobilisiert werden. Soll nun die Sorptionsfähigkeit eines Tons für organische Verbindungen erhöht werden, kann er durch eine organische Aktivierung wasserabweisende Eigenschaften erhalten. Je nach Grad der Hydrophobierung verliert der Ton seine Quelfähigkeit mit Wasser.

2.5.2 Organobentonite

Organobentonit (auch: organophiler bzw. organisch aktivierter Bentonit, Organoton) entsteht, wenn aktivierter oder unbehandelter Bentonit mit polaren, langkettigen organischen Molekülen (quartäre Alkylammoniumverbindungen, Tensidkationen) belegt wird. Je nach verwendetem organischen Kation und dem Anteil des Kationenaustauschvermögens des Rohbentonits, der belegt werden soll, lassen sich verschiedene Organobentonite mit unterschiedlichsten Oberflächeneigenschaften herstellen (Tab. 2.5).

	TIXOSORB	TIXOSORB VZ	TIXOGEL VP	TIXOGEL VZ	VISCOGEL B4
org. Kation	DMDA	OBDM	DMDA	OBDM	DMDA
Austausch bez. auf KAK	50 %	50 %	100 %	100 %	100 %
Rohbentonit	Ca	Ca	Na	Na	Na
Herstellung	trocken	trocken	naß	naß	naß

Tab. 2.5: Merkmale einiger Organobentonite nach STOCKMEYER (1993);
(DMDA ... Dimethyldioctadecylammonium, OBDM ... Octadecylbenzyltrimethylammonium)

Die ursprünglich hydrophilen (wasseranziehenden) Zwischenschichten des Tons werden durch die nachträgliche Einlagerung hydrophob (wasserabweisend) und gleichzeitig

organophil (organische Verbindungen anziehend). In diesen modifizierten Zwischenschichten können nun bevorzugt organische und unpolare Verbindungen eingelagert und adsorbiert werden. Eine thixotrope Verdickung und Gelstruktur sind die Folge. Ein Organobentonit kann somit durch die Wahl des Tensidkations und der Höhe der Belegung gezielt für bestimmte Schadstoffe zugeschnitten werden oder zusammen mit anderen Organobentoniten verschiedene Klassen von Schadstoffen adsorbieren.

Die großtechnische Herstellung von Organobentonit kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen: Beim Naßverfahren wird die gewünschte Menge Ammoniumsalz einer Ton-suspension (meistens Natrium-Bentonit) unter Zusatz von Dispergierungsmittel, Wärmezufuhr und mechanischer Arbeit zugegeben. Durch vorheriges Abtrennen der Nichttonminerale erhält man sehr reine Organobentonite, die gefiltert, getrocknet und gemahlen werden.

Beim Trockenverfahren wird das Ammoniumsalz in die angefeuchtete Bentonitmasse (meistens Calcium-Bentonit) eingeknetet, diese ebenfalls getrocknet, gemahlen und verpackt. Nichttonminerale wie Quarz und Karbonate werden dabei nicht entfernt. Produkte, die nach dem Trockenverfahren hergestellt werden, sind aufgrund der einfacheren Verfahrenstechnik kostengünstiger.

Nach einer 50 %igen Belegung der Schichtoberflächen mit organischen Kationen entstehen sowohl hydrophile als auch hydrophobe Adsorptionsplätze in getrennten Zwischenschichten (semiorganophile Bentonite). In den hydrophilen Zwischenschichten bleiben die Quellfähigkeit bei Wasserzufuhr und das Adsorptionsvermögen bezüglich Schwermetallen erhalten. In den organophilen Schichten können unpolare organische Verbindungen über Van-der-Waals-Kräfte an die organischen Kationen und über elektrostatische Kräfte oder Wasserstoffbrücken-Bindungen an die Tonoberfläche angelagert werden. Dabei ordnen sich die Alkylketten unter Schichtaufweitung annähernd senkrecht zur Tonoberfläche an. Damit sind eine deutliche Erhöhung der Viskosität und der Thixotropie verbunden (Abb. 2.13). Schadstoffgemische können auf unterschiedliche Weise an die Oberfläche des Organobentonits angelagert werden (Tab. 2.6).

Semiorganophile Bentonite sind aufgrund ihrer vielfältigen Adsorptionsmechanismen zum Zweck der Schadstoffimmobilisierung im Deponiebau hervorragend geeignet. Sie werden aber auch auf anderen Gebieten der Umwelttechnik eingesetzt. Abwasser- und Abluftreinigung, Stabilisierung und Verfestigung flüssiger organischer Abfälle und Immobilisierung organischer Schadstoffe im kontaminierten Bodenaushub und Bauschutt gehören zu den Anwendungsgebieten der Organobentonite. Eine Anwendung im Deponiebau zur Erhöhung der Schadstoffretention in der Basisabdichtung und in Dichtwänden fand bisher noch nicht statt.

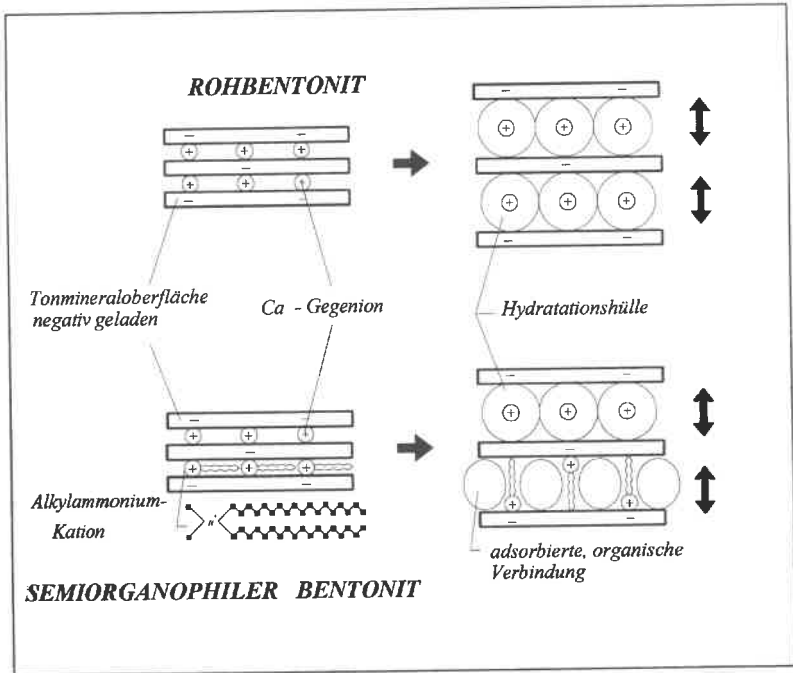


Abb. 2.13: Rohbentonit und semiorganophiler Bentonit und deren Adsorptionsmechanismen (modifiziert nach STOCKMEYER, (1993))

Das unterschiedliche Sorptionsverhalten von unbehandeltem Bentonit und Organobentonit wurde am Beispiel von Phenol und chlorierten Phenolen bisher am deutlichsten aufgezeigt (WIEDEMANN, 1995). Ein unbehandelter Rohbentonit ist kaum in der Lage, z.B. Phenol bzw. Phenolderivate aus einer wässrigen Lösung zu adsorbieren, da diese mit Wasser um die Adsorptionsplätze konkurrieren. Wasser kann auch etwaig angelagertes Phenol remobilisieren. Organobentonite hingegen stellen durch ihre Hydrophobierung Plätze für eine hydrophobe Bindung von Phenolen zur Verfügung. Deshalb können Phenole in großem Maße an Organobentoniten mit langkettigen Ammoniumverbindungen aus wässrigen Lösungen entfernt und wirksam gebunden werden.

Eigenschaft des Schadstoffs		Beispiel	Bindungsart	Ort der Adsorption
organisch	polar	Alkohole, Ketone (Aceton)	Ion-Dipol (Solvathülle um Gegenion)	hydrophile Zwischenschicht
	unpolar	Toluol, Xylol, aliphatische u. aromatische Kohlenwasserstoffe	Van-der-Waals-Kräfte	organophile Zwischenschicht
	mit Hydroxy- (-OH) bzw. Aminogruppe (-NH ₂)	Alkohole, Amine	Wasserstoffbrücken	an Sauerstoff-Atome der Silikatoberflächen
	mit Nitro- (-NO ₂) bzw. Carbonylgruppe (-CO)	Aldehyde, Ketone (Aceton)	Wasserstoffbrücken	an OH-Gruppen der Tonmineralkanten
Kationen		Schwermetalle	elektrostatisch	Silikatflächen
Anionen		Sulfate	elektrostatisch	Tonmineralkanten

Tab. 2.6: Adsorptionsmechanismen bei Organobentoniten

Untersuchungen auf dem Gebiet der biochemischen Langzeitstabilität von Organobentoniten ergaben, daß zumindest die quartären Ammoniumverbindungen mit langen Alkylketten schwer abbaubar und somit widerstandsfähig gegenüber mikrobiellen Angriffen sind (WIEDEMANN, 1995).

2.6 Durchlässigkeit feinkörniger Böden

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f eines Bodens ist eine extrem schwankende Größe, möglicherweise die fehleranfälligste in der geotechnischen Praxis. Die Durchsicht der in der Literatur dargestellten Laboruntersuchungen ergab, daß nur wenige Standardmethoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit wassergesättigter Bodenproben zur Verfügung stehen (DIN 18130). Die beträchtlichen Unterschiede zwischen den in der Praxis verwendeten Versuchsgäräten führen zu Ergebnissen mit einer Streubreite von zwei bis drei Zehnerpotenzen für identische Bodenproben. Um vergleichbare und aussagekräftige Resultate zu erhalten, müssen Durchlässigkeitsversuche sorgfältig durchgeführt und ausgewertet und interpretiert werden.

Unter der Voraussetzung, daß sich während des Versuchs eine laminare Strömung in der Probe einstellt und sich die Eigenschaften der Porenflüssigkeit und des Bodens während

des Beobachtungszeitraums nicht ändern, kann der Durchlässigkeitsbeiwert k_f einer Bodenprobe nach dem Fließgesetz von DARCY gemäß unten stehender Gleichung bestimmt werden. Sie stellt das Grundgesetz für eine lineare, eindimensionale Strömung im Boden infolge der Schwerkraft dar.

$$k_f [m/s] = \frac{v_f}{i} = \frac{Q}{A \cdot i} = \frac{V \cdot \Delta l}{t \cdot A \cdot \Delta h}$$

Die Filtergeschwindigkeit v_f ist dabei der Durchfluß Q bezogen auf die Probenquerschnittsfläche A senkrecht zur Fließrichtung. Der Durchfluß entspricht demjenigen Flüssigkeitsvolumen V , das in der Zeit t aus der Fläche A tritt ($Q = V/t$), und das hydraulische Gefälle i ist der hydraulische Druckhöhenunterschied Δh bezogen auf die Fließlänge bzw. Probenhöhe Δl . Der Höhenunterschied Δh ergibt sich aus der Druckdifferenz an Probenober- und -unterseite.

Der Durchlässigkeitsbeiwert stellt eine vom Boden (Korngröße, Porenanteil, mineralogische Zusammensetzung, Gefüge, Sättigungsgrad), der Porenflüssigkeit (Dichte, Viskosität) und den chemischen Wechselwirkungen zwischen Boden und Porenflüssigkeit (Art der Chemikalie, Polarität, Säuregrad) abhängige Größe dar. Um eine von den physikalischen Eigenschaften der Porenflüssigkeit unabhängige Bodenkenngröße K zu erhalten, müssen die temperaturabhängigen Größen, wie Dichte ρ und dynamische Viskosität η der Porenflüssigkeit [Ns/m^2] und die Erdbeschleunigung g , berücksichtigt werden. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, daß keine chemischen Reaktionen zwischen Boden und Prüfflüssigkeit stattfinden (KEZDI, 1964).

$$K [m^2] = \frac{\eta}{g \cdot \rho} k_f$$

Verringert sich der durchströmbare Porenanteil einer Bodenprobe infolge äußerer Belastung bei gleicher Porenflüssigkeit, nimmt der Durchlässigkeitsbeiwert k_f bzw. der K -Wert ab. Eine sich ändernde Porencharakteristik infolge chemischer Reaktionen zwischen Porenflüssigkeit und Matrix hat Auswirkungen sowohl auf den k_f - als auch auf den K -Wert des Bodens. Bleiben die Eigenschaften und der Zustand des Bodens unverändert und wechselt die Dichte bzw. die Viskosität der Porenflüssigkeit, so hat dies ebenfalls einen Einfluß auf den k_f -Wert, nicht jedoch auf die Bodenkenngröße K .

Da die Temperatur der Porenflüssigkeit dessen dynamische Viskosität und Dichte entscheidend beeinflusst, muß die Flüssigkeitstemperatur T während des Versuchs registriert und ein auf die mittlere Bodentemperatur von $10^\circ C$ normierter k_{10} -Wert ermittelt werden (DIN 18130).

$$k_{10} = \alpha \cdot k_f = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \cdot k_f$$

Das Durchströmungsverhalten einiger Bodenarten kann ober- bzw. unterhalb bestimmter hydraulischer Gradienten von dem linearen Fließverhalten nach DARCY abweichen, da die Trägheits- bzw. Adsorptionskräfte bei der Formulierung der DARCY-Gleichung vernachlässigt werden. Bei grobkörnigen Böden kann die Fließgeschwindigkeit bei wachsendem Gradienten aufgrund von Trägheitskräften abnehmen. Dies wird als postlinearer Strömungsbereich bezeichnet. Der Einfluß der Adsorptionskräfte bei feinkörnigen Böden bewirkt bei kleinen hydraulischen Gradienten ebenfalls eine Abnahme der Fließgeschwindigkeit. Die Durchlässigkeitsbeiwerte werden somit außerhalb des DARCY-Bereichs kleiner errechnet. Der Übergang zwischen dem linearen und turbulenten Bereich liegt nach REUTER (1988) für einen mittelplastischen Ton bei einem hydraulischen Gradienten von 1500.

Eine Abnahme des Doppelschichtabstandes infolge veränderter physikalisch-chemischer Parameter der Porenflüssigkeit kann zu einer Aggregation der Bodenpartikel und im Gesamten zu einem Reißen der Bodenprobe führen. Die dadurch entstehenden, großen, durchströmbaren Porenkanäle verursachen höhere Durchflußgeschwindigkeiten in den Makroporen. Erosionserscheinungen sind die Folge, welche vor allem in Standrohrgeräten mit festen Wandungen festgestellt werden können. Durch das Aufbringen eines Seitendrucks in Triaxialzellen können die vergrößerten Poren "überdrückt" werden. Dadurch ist der Anstieg der Durchlässigkeit im Vergleich zu Standrohrgeräten deutlich geringer oder gar nicht vorhanden.

Wie bereits in Kap. 2.3 erläutert, hat das Gefüge eines Tons einen entscheidenden Einfluß auf seine Durchlässigkeit. Sind die abstoßenden Kräfte zwischen den Tonmineralen groß und überwiegt deshalb in einer Tonprobe eine disperse Anordnung der Tonpartikel, reduziert sich die Wasserdurchlässigkeit erheblich. Die Ursache liegt darin, daß die mittlere Porengröße in dispersen Gefügen wesentlich kleiner als in geflochten ist. Nach der Theorie von LAMBE (1958b) bildet sich eine disperse Tonstruktur bei zunehmendem Wassergehalt aus, was zu einer besseren Verschiebbarkeit der Tonpartikel infolge größerer Wasserhüllen führt. So ist eine auf der nassen Seite der Proctorkurve verdichtete Tonprobe undurchlässiger als eine auf der trockenen bei gleicher Trockendichte. Maximal erreichbare Dichten bzw. kleinste Porenzahlen sind somit kein Maß für geringe Durchlässigkeit.

Für eine direkte Bestimmung der Durchlässigkeit für gering durchlässige Tone schlägt die DIN 18130 verschiedene Versuchszellen, wie den Ausstechzylinder, die Kompressionszelle oder die Triaxialzelle, vor. Je nach Versuchsgerät können bei gleichem Untersuchungsmaterial und ähnlichen Randbedingungen z.T. erhebliche Unterschiede im k -Wert ermittelt werden. Ursache hierfür können Sättigung, Randumläufigkeiten und unterschiedliche Spannungszustände in der Probe sein (MADSEN & MITCHELL, 1989; BOWDERS et al., 1986; BRUNELLE, 1987). In Tab. 2.7 sind Vor- und Nachteile der Versuchsaappareturen zusammengefaßt, die bei der Geräteauswahl zu berücksichtigen sind. Für eine optimale Übertragung der natürlichen Zustände in den Labormaßstab zeigen Durchströmungsversuche in Triaxialzellen die größte Flexibilität und die geringsten Fehlereinflüsse.

	Ausstechzylinder ("compaction mold")	Kompressionszelle ("consolidation cell")	Triaxialzelle ("flexible wall")
aufbringbare, äußere Spannung	keine aufbringbar, nur Spannung infolge Verdichtung und Strömung	vertikale Spannung	Seiten-, Strömungs- und Sättigungsdruck
Übertragung auf Feldbedingungen	bedingt	gut	sehr gut
Wirtschaftlichkeit	billig und einfach	schnell und einfach	teuer und aufwendig
Erfassung	Wassermengen; Schrumpf- und Quellmaß nicht meßbar	Wassermengen, Deformationen	Wassermengen, Deformationen, Spannungen
Sättigung	nicht möglich	nicht möglich	mit "back pressure"
Fehlerquellen	Randumläufigkeiten durch Schrumpfungen, Ende der Probensättigung indirekt feststellbar	Randumläufigkeiten; kleine Probenabmessungen; Sättigung indirekt feststellbar	keine Randumläufigkeiten, da überdrückt

Tab. 2.7: Gegenüberstellung der Durchströmungszellen nach DIN 18130

Der GDA-Arbeitskreis empfiehlt für die Eignungsuntersuchungen von mineralischen Abdichtungsmaterialien eine Versuchseinrichtung, mit der Veränderungen im Durchlässigkeitsverhalten und der Inhaltsstoffe der Prüfflüssigkeit festgestellt werden können. So wurden die Forderungen und Hinweise der DIN 18130 an Deponieanforderungen angepaßt, konkretisiert und erweitert. Die Empfehlungen des GDA-Arbeitskreises, die abweichend von der DIN 18130 formuliert wurden, sind in Tab. 2.8 zusammengestellt. Diese wurden weitestgehend bei der Versuchsdurchführung (Kap. 4.2.5) eingehalten.

	GDA-EMPFEHLUNGEN	DIN 18130 TEIL 1
Probenabmessungen (ϕ , h)	für gemischtkörnige Böden: $\phi \geq 10$ cm; h $\approx$ 9 cm für feinkörnige Böden: geringer als o.g. Werte	Verh. Größtkorn zu ϕ bzw. h: ungleichförmiger Boden: 1:5, gleichförmiger Boden: 1:10, bindiger Boden: $\phi \leq 3,6$ cm.
Empfohlenes Versuchsgerät für feinkörnige Böden	Dreiaxialversuch mit konstantem Gradienten, isotroper Spannungszustand, Seitendruck = 0,3 bar + Porenwasserdruck	je nach Anwendungsfall unterschiedlich, für Dreiaxialversuch gilt: Seitendruck = 1,2 $\times$ Strömungsdruck
Durchströmungsrichtung und Porenflüssigkeit	von unten nach oben; mit entlüftetem Leitungswasser bzw. Chemikalien	beide Richtungen; Wasser, weder entlüftet noch entmineralisiert
Versuchsablauf	weitgehende Wassersättigung vor Versuchsbeginn anzustreben	ggf. Wassersättigung in Abh. des Sättigungsgrads der Probe
hydraulischer Gradient	i = 30 oder realistisches i	je nach Anwendungsfall
Dauer des Versuchs	bis k-Wert konstant	keine Aussagen

Tab. 2.8: Vergleich der Vorgaben der GDA-EMPFEHLUNGEN und der DIN 18130

3 Verwendete Materialien

3.1 Versuchsböden

Für die Laboruntersuchungen wurden drei verwitterte Böden unter den Gesichtspunkten ihrer Praxisrelevanz im südwestdeutschen Deponiebau ausgewählt. Die engere Auswahl der Erdbaustoffe erfolgte nach folgenden Kriterien:

- ☐ Die Böden sollten als mineralische Abdichtungsmaterialien für Deponien gemäß den Anforderungen der TA ABFALL, Anhang E (Kap. 1.1, Tab. 1.1) geeignet sein.
- ☐ Sie sollten bereits für mineralische Abdichtungen entweder im Deponie- oder im Dammbau verwendet worden sein. Erfahrungen des Instituts für Geotechnik auf dem Gebiet der künstlich verdichteten Böden sollten ausgenutzt werden können.
- ☐ Die Materialien sollten hinsichtlich mineralogischer, bodenphysikalischer und geomechanischer Eigenschaften unterschiedlich einzustufen sein.

Ein **Opalinuston** aus Frickenhausen bei Nürtingen und ein **Tertiärton** aus Malsch bei Heidelberg wurden diesen Anforderungen gerecht. Für die Eignungsuntersuchungen und Einmischversuche im Labor und den Großversuchen im Zwangsmischer wurde ein **Lößlehm** aus Talheim bei Heilbronn verwendet, dessen bodenmechanische Eigenschaften bereits durch die Arbeit von RILLING (1994) bekannt sind.

3.1.1 Geologie

Der für die Labor- und Mischversuche verwendete Lößlehm wurde aus dem Steinbruch der Firma ROBERT BOPP GmbH & Co. in Talheim bei Heilbronn entnommen (Abb. 3.1). In diesem Gebiet wurde folgender Schichtaufbau vorgefunden: Die obersten 5 bis 10 m bestehen aus einer Löß- bzw. Lößlehmschicht mit Einlagerungen von Hochterrassenschotter. Darunter folgt der Lettenkeuper mit einer Mächtigkeit von 3 bis 5 m, der aus Tonen, Tonmergeln mit Dolomitbänken und feinkörnigen, tonigen Sandsteinen zusam-

mengesetzt ist. Daran schließt der 70 bis 80 m mächtige Obere Muschelkalk an, ein Kalkstein mit Ton- und Mergelsteinlagen. Der dort anstehende Lößlehm wurde niemals geologisch vorbelastet und stellt somit einen normalkonsolidierten bzw. erstverdichteten Boden dar (RILLING, 1994).

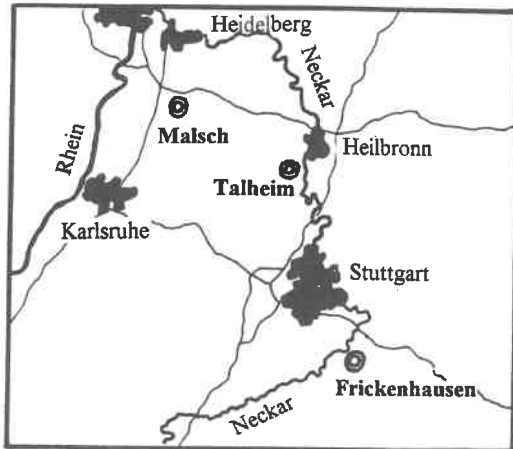


Abb. 3.1: Entnahmestellen der Versuchsmaterialien

Löß besteht aus feinstem Mineralstaub alpiner Gesteine. Im frischen Zustand ist der Löß gelblich braun, feinsandig, kalkhaltig und wasserdurchlässig (60 - 80 % Quarz, 10 - 20 % Feldspat und 10 - 20 % Kalk). Durch einsickerndes Regenwasser wurde der Kalk im Laufe der Zwischen- und Nacheiszeit aufgelöst und in unterschiedlichen Tiefen als Kalkknollen, sog. Lößkindel, ausgefällt. Durch diese Entkalkung und der Umwandlung von Feldspat zu Tonmineralen wird oberflächennah Löß zu Lößlehm verwandelt. Der kalkfreie Lößlehm ist deutlich dunkler gefärbt als der Löß und weist einen höheren Feinstanteil auf.

Opalinuston, der nach der Verwitterung ein zäher, dunkelgrauer bis dunkelbrauner kalkarmer Ton ist, wird in der untersten Stufe des Mittleren Jura (Braunjura α) angetroffen. In Süddeutschland und der Nordschweiz ist er weit verbreitet, wo er u.a. als Abdichtungsmaterial für Sondermüll- und Reststoffdeponien verwendet wird. Der für die Untersuchungen verwendete Opalinuston wurde aus einer Tongrube einer Ziegelei in Frickenhausen entnommen, wo er zutage tritt (Abb. 3.1)

Das gesamte Schichtpaket des Braunjura α (80 - 130 m mächtig) besteht aus einer mächtigen Folge von dunklen, schiefrigen und blättrig zerfallenden Tonen und Tonmergeln, die diagenetisch verfestigt und stark überkonsolidiert sind. In den mittleren und höheren Lagen stellen sich härtere Tonmergelbänke, sowie knollige und bankartig entwickelte Lagen von mergeligen Kalken ein. In den unteren Lagen findet man verhältnismäßig viele Versteinerungen. Der Name Opalinus stammt von der weißen, opalisierenden Aragonitschale des Ammoniten "*Lioceras opalinum*". Darunter schließen die Schichten des oberen und mittleren Lias an. Der Jurensismergel, ein grauer, mergeliger Ton mit Platten- und Knollenlagen aus festem Mergelkalk, besitzt eine Mächtigkeit von ca. 0,2 - 12 m. Darunter befindet sich der Posidonienschiefer (ca. 9 m), ein feinschichtiger, dunkelgrauer, bituminöser Mergelschiefer.

Der für die Versuche eingesetzte Tertiärton stammt ebenfalls aus einer Tongrube in der Nähe von Malsch, 20 km südlich von Heidelberg (Abb. 3.1). Dieses Tonvorkommen wird bis heute zur Ziegelherstellung benutzt und befindet sich neben der ersten Sonderabfalldeponie Baden-Württembergs.

Aufgrund zahlreicher Baugrundaufschlüsse kann der geologische Schichtenaufbau dieses Gebietes folgendermaßen beschrieben werden: In den Mittleren Pechelbronner Schichten (Oligozän) trifft man Ton-, Tonmergelsteine mit wasserleitenden Konglomeratbänken an. Der bedeutendste Wasserleiter ist das Jurakonglomerat (Oligozän), das von Zimtschluffsteinen und einer Wechselfolge aus Schluffmergel und Kalksandstein überlagert wird. Die Unteren Pechelbronner Schichten (Eozän) bestehen im wesentlichen aus Ton- und Schluffmergeln (entnommener Tertiärton), die teilweise zu Ton- und Schluffsteinen verfestigt sind. Sie sind Grundwassernichtleiter mit einer sehr geringen Durchlässigkeit. Der Lymnäenmergel (Eozän) setzt sich aus Schluffsteinen mit wasserführenden Sand- und Kalksteinbänken zusammen, die 30 % der Gesamtmächtigkeit ausmachen.

3.1.2 Klassifikationsergebnisse

Für die Laboruntersuchungen wurde jeweils mindestens 250 kg möglichst homogener Boden in Eimer abgefüllt und anschließend im Labor klassifiziert. Die Abb. 3.2 bis 3.4 zeigen die Bandbreite der Kornverteilungen der drei Böden. Danach handelt es sich bei dem Lößlehm um einen tonigen, sandigen Schluff, bei dem Opalinuston um einen schwach sandigen Ton und Schluff und bei dem Tertiärton um einen stark schluffigen, schwach sandigen Ton bis stark tonigen, sandigen Schluff.

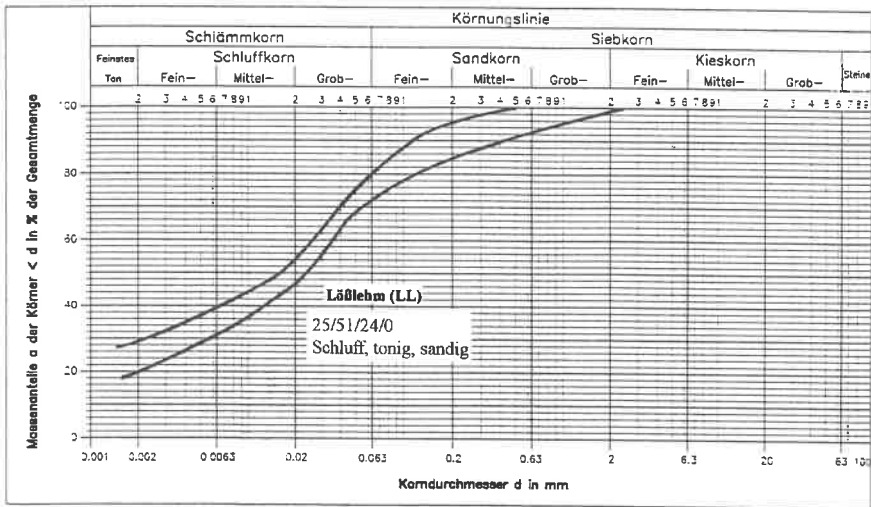


Abb. 3.2: Kornverteilungsband des Lößlehms (9 Analysen)

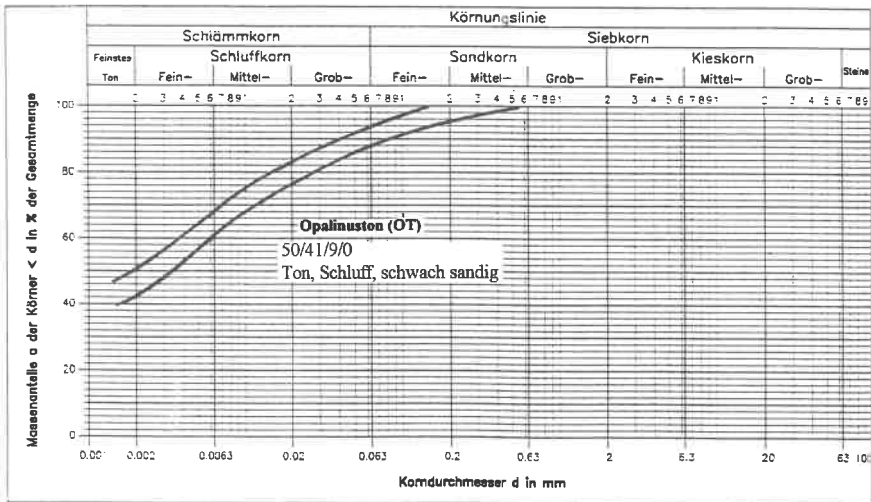


Abb. 3.3: Kornverteilungsband des Opalinustons (4 Analysen)

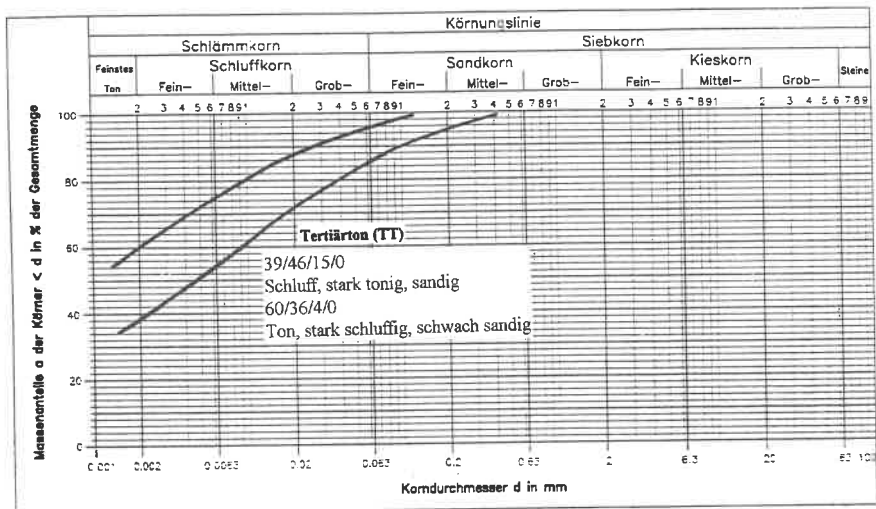


Abb. 3.4: Kornverteilungsband des Tertiärtons (7 Analysen)

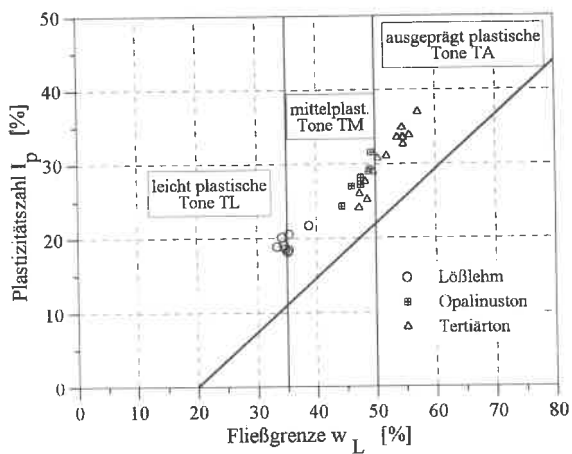


Abb. 3.5: Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE

Um die ausgewählten Böden nach ihrer Plastizität einstufen zu können, wurden die Plastizitätszahlen in Abhängigkeit der Fließgrenze in das Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE eingetragen (Abb. 3.5). Nach DIN 18196 ist der Lößlehm als leicht- bis mittelplastischer Ton (TL und TM), der Opalinuston und der Tertiärton als mittelplastischer bis ausgeprägt plastischer Ton (TM und TA) zu klassifizieren.

Die Klassifikationsversuche ergaben die in Tab. 3.1 dargestellten, gemittelten Bodenkennwerte. Ein Vergleich mit den Materialanforderungen gemäß TA ABFALL läßt erkennen, daß alle geforderten Parameter eingehalten werden, und somit eine zusätzliche Vergütung mit einem Tonmehl oder einem Bentonit zur Verbesserung der Eigenschaften nicht erfolgen mußte.

	Lößlehm	Opalinuston	Tertiärton	TA ABFALL
nat. Wassergehalt w_n [%]	18,0 (8 / 1,5) ¹	22,2 (6 / 2,6)	17,8 (15 / 3,7)	keine Angabe
Fließgrenze w_L [%]	35,2 (8 / 1,6)	47,5 (6 / 1,9)	51,1 (15 / 3,8)	UM/TL/ TM oder TA
Ausrollgrenze w_p [%]	15,8 (8 / 1,2)	19,5 (6 / 0,9)	21,0 (15 / 1,2)	
Plastizitätszahl I_p [%]	19,4 (8 / 1,3)	27,9 (6 / 2,4)	30,7 (15 / 4,2)	
Zustandsform	steif	steif	steif - halbfest	keine Angabe
Schrumpfgrenze w_s [%]	13,7 (1 / -)	17,9 (1 / -)	16,0 (1 / -)	keine Angabe
Feinstanteil < 2 μ m [%]	25 (9 / 3)	47 (4 / 2)	49 (7 / 7)	> 20
Aktivitätszahl I_A [-]	0,8	0,6	0,6	keine Angabe
Kalkgehalt V_{ca} [%]	1,9 (4 / 0,4)	0,0 (4 / 0,0)	3,6 (4 / 0,6)	≤ 15
Glühverlust V_g [%]	3,7 (4 / 0,03)	6,9 (4 / 0,09)	7,3 (4 / 0,26)	≤ 5 "org. Substanz"
Korndichte ρ_s [g/cm ³]	2,67 (12 / 0,02)	2,69 (7 / 0,02)	2,73 (5 / 0,01)	keine Angabe

Tab. 3.1: Mittelwerte der Klassifikationsergebnisse und Forderungen der TA AB-FALL

¹ (Anzahl der Versuche / Standardabweichung)

3.1.3 Tonmineralogische Untersuchungen

Ein feinkörniger, in der Geotechnik als Ton eingestufter Boden ist meistens ein Mineralgemisch, bei dem die Tonminerale nur eine, im Feinstanteil enthaltene, komplexe Komponente darstellen. Sein bodenmechanisches Verhalten läßt sich weitgehend aus der Struktur und den Eigenschaften der Tonminerale erklären. Wenn sich die aus der Klassifikation der Proben angenommenen, bodenmechanischen Parameter deutlich von den gemessenen Werten unterscheiden, gewinnen tonmineralogische Untersuchungen an Bedeutung. Neben Sonderfragestellungen im Grundbau ist das Zusammenspiel der klassischen Bodenuntersuchungen mit den tonmineralogischen Erkenntnissen für Themen der Umweltgeotechnik unerlässlich.

Im Tonmineralogischen Labor der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich wurden der Kalkgehalt, unterschieden nach Calcit, Dolomit und Siderit, die Korngrößenverteilung der Gesamtprobe und die Tonmineralzusammensetzung ermittelt. Die Versuchsmethoden der Tonmineralogie unterscheiden sich deutlich von denen der Geotechnik, so daß darin die Ursache auftretender Abweichungen in den Ergebnissen zu sehen ist. So wird z.B. bei der Bestimmung der Kornverteilung die Probe im Probenteiler in 8 gleiche Teile zerlegt und nach Zugabe von Calgonlösung mit Ultraschall dispergiert. Infolge dieser mechanischen Behandlung werden vorhandene Aggregate in Einzelkörner zerlegt. Bei einer Schlämmanalyse nach DIN 18123 werden diese Aggregate trotz Zugabe eines Dispergierungsmittels als Schluffkorn ermittelt.

Die mineralogische Zusammensetzung der Proben wurde röntgenographisch an einer Pulveraufnahme ebenfalls im Tonmineralogischen Labor ermittelt. Hierbei werden die Probenpräparate Röntgenstrahlen unter bestimmten Winkeln ausgesetzt, die nach dem Gesetz der BRAGG'schen Reflexion bei gewissen Kristallgitterabständen reflektiert werden. Mit der bekannten, gerätespezifischen Wellenlänge und dem Anstrahlwinkel läßt sich der Gitterabstand der Kristalle ermitteln, der charakteristisch für eine bestimmte Mineralart ist. Die Röntgendiagramme der einzelnen Böden sind im Anhang 1, Abb. A1 bis Abb. A3 zusammengestellt. Hierbei ist die Intensität über den Anstrahlwinkel aufgetragen. Aus der integralen Intensität der Reflexe können Rückschlüsse auf die quantitative, tonmineralogische Zusammensetzung der Böden gezogen werden.

Zur Identifizierung der quellfähigen Tonminerale wird die Veränderung der Schichtabstände bei der Anlagerung von Ethylenglycol ausgenutzt. Die meisten Smekтите sorbieren Ethylenglycol in ihren Doppelschichten und weiten dabei die Schichtabstände auf. Dies ist eindeutig in den veränderten Anstrahlwinkeln in den Röntgendiffraktogrammen erkennbar.

Tab. 3.2 enthält einen Überblick über die quantitative Zusammensetzung der Feinstfraktion ($< 2 \mu\text{m}$) und dem Anteil der quellfähigen Tonminerale am Gesamtmaterial. Dazu wurden Versuche nach zwei unabhängigen Verfahren (XRD- und FTIR-Versuche (Fourier-Transformation-Infrarot)) durchgeführt.

Der verwendete Lößlehm kann danach als illitischer Ton bezeichnet werden, wobei nur 33% des Gesamtmaterials Tonminerale und maximal 15 % quellfähig sind. Opalinuston hat im Vergleich dazu einen fast doppelt so hohen Feinstanteil. 59 % des Gesamtmaterials sind Tonminerale, jedoch nur maximal 19 % quellfähig. Der Tertiärton hat von allen drei Ausgangsmaterialien den höchsten Feinstanteil (82 %), somit den höchsten Tonmineralanteil und den größten Gehalt an quellfähigen Tonmineralen (max. 25 %).

		Lößlehm	Opalinuston	Tertiärton
Korngrößenverteilung	$< 63 \mu\text{m}$	87	99	99
	$< 2 \mu\text{m}$	34	62	82
Zusammensetzung der Tonfraktion, Zahlen in Klammern: Tonmineralanteil am Gesamtmaterial	Quarz	2	8	4
	Kaolinit	2 (1)	19 (12)	13 (11)
	Chlorit	10 (3)	$< 10 (< 6)$	20 (16)
	ML Illit/Smektit	45 (15)	30 (19)	30 (25)
	Illit	$< 40 (< 14)$	35 (22)	$< 30 (< 25)$
Karbonatgehalt am Gesamtmaterial, davon:		< 5	< 5	5
	Calcit	65	50	< 95
	Dolomit	30	25	5
	Siderit	5	25	< 5

Tab. 3.2: Tonmineralogische Untersuchungen der Ausgangsmaterialien (alle Angaben in [%])

3.2 Organobentonit

STOCKMEYER (1993) stellte in seinen Untersuchungen fest, daß aus der Vielzahl der Organobentonite ein semiorganophiler Bentonit aufgrund seines breiten Adsorptionsspektrums am besten als Zusatzstoff zu Deponieabdichtungsmaterialien geeignet ist. Für die geplanten Untersuchungen wurde deshalb dieser Organobentonit mit der Produktbezeichnung TIXOSORB der Firma SÜD-CHEMIE AG, Moosburg verwendet. Er wird aus unge-reinigtem Calcium-Bentonit aus bayrischen Lagerstätten im Trockenverfahren hergestellt. Der Rohbentonit, dessen Zwischenschichten Calcium- und Magnesium-Ionen enthalten,

wird dabei nur zu 50 % seines Kationenaustauschvermögens (80 - 100 meq/ 100 g Ton) mit einem bestimmten organischen Kation (Dimethyldioctadecylammonium) belegt. Dadurch entstehen in diesem organisch aktivierten Bentonit sowohl hydrophile als auch hydrophobe Adsorptionsplätze in getrennten Zwischenschichten (Kap. 2.5).

Wenn nachfolgend der Einfachheit halber von Organobentonit die Rede ist, wurde immer der oben beschriebene TIXOSORB eingesetzt (Anhang 2). Die Vergütung der tonigen Böden mit Organobentonit wurde für die Eignungsuntersuchungen zu 3 % und 6 % festgelegt, um die damit zusammenhängenden, bodenmechanischen Veränderungen des Abdichtungsmaterials eindeutig dem jeweiligen Organobentonit-Anteil zuordnen zu können (Kap. 6). Für eine verbesserte Sperrwirkung der mineralischen Deponiebasisabdichtung genügen geringere Zugaben an Organobentonit, so daß zusätzlich das Einmischen einer 1 %-Dosierung zu Lößlehm während der großtechnischen Mischversuche untersucht wurde (Kap. 5).

3.3 Prüfflüssigkeiten

Aus der Vielzahl möglicher Chemikalien und Gemische wurde eine Vorauswahl nach folgenden Gesichtspunkten getroffen:

- ☐ Die Auswahl sollte sich auf organische Verbindungen mit technischer Bedeutung beschränken, da ein Einsatz von Organobentonit nur dann Zweck hat. Die Testlösungen sollten eine bestimmte Gruppe im natürlichen Sickerwasser repräsentieren. Wegen mangelndem Praxisbezug werden konzentrierte Einstofflösungen ausgeschlossen.
- ☐ Die Flüssigkeiten sollten gut wasserlöslich, weder toxisch, leicht flüchtig oder korrosiv sein, damit deren Handhabung und Entsorgung unproblematisch sind. Ebenso sollte sich die chemische Zusammensetzung während der Versuchsdauer nicht ändern.
- ☐ Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit der Testlösung sollten sich deutlich von Leitungswasser unterscheiden, damit ein möglicher Schadstoffdurchbruch durch Eluatuntersuchungen registriert werden kann und große Änderungen in den Bodeneigenschaften hervorgerufen werden.
- ☐ Durch das Verarbeiten und das Durchströmen der Mischungen mit der Testlösung sollte sich deren Gefüge ändern oder ggf. deren Minerale umwandeln.

Für die Laboruntersuchungen wurden ausschließlich die in Tab. 3.3 aufgezählten Einstoff- und Mehrstofflösungen verwendet, auch wenn in der vorliegenden Dissertation für diese Testlösungen oftmals die Chemikalienbezeichnung ohne Konzentrationsangabe benutzt

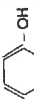
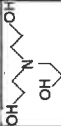
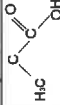
wurde. Zusätzlich zu der Konzentration, dem pH-Wert, der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstanten der verwendeten Mischungen sind weitere physikalisch-chemische Eigenschaften der konzentrierten Ausgangsverbindungen zusammengestellt. Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit wurden am Institut für Geotechnik bestimmt, während die Dielektrizitätskonstanten der Mischungen teilweise nach dem Gesetz von CLAUSIUS-MOSOTTI berechnet (BOWDERS, 1985, Anhang 3) und teilweise im Versuch am Institut für Physikalische Chemie der Universität Stuttgart ermittelt wurden.

Phenole (Hydroxybenzole) sind Vertreter der aromatischen Kohlenwasserstoffe und stellen aufgrund ihrer technischen Bedeutung und ihrem häufigen Einsatz (Herstellung von Lacken, Sprengstoffen, Farbstoffen und Kunstharzen, Arznei- und Holzkonservierung) einen Großteil der umweltgefährdenden Stoffe dar. Phenol fällt bei der Erdölraffination in beträchtlichen Mengen an und kann sich bei der Verschmelzung von Ölschiefer, Braunkohle und organischen Reststoffen bilden. Je nach Anzahl der OH-Gruppen unterscheidet man ein-, zwei- oder dreiwertige Phenole. Zu den einwertigen Verbindungen zählt u.a. das Phenol, das 1834 von dem Chemiker RUNGE bei der Fraktionierung von Steinkohleteer entdeckt wurde. Für den schwach sauren Charakter sind die Hydroxylgruppen am Benzolring verantwortlich. Phenolverbindungen in kontaminierten Böden von ehemaligen Kokereistandorten sind mikrobiell nicht leicht angreifbar und können sogar den Abbau anderer Schadstoffe behindern.

ZEIGER (1993) verwendete für seine Durchströmungs- und Batchversuche wässrige Lösungen mit verschiedenen Konzentrationen von Phenol. STOCKMEYER (1993) durchströmte seine Proben ebenfalls mit einer Phenollösung und untersuchte den Diffusionsvorgang in einem schluffigen Sand.

Essig- und Propionsäure gehören zu der Gruppe der gesättigten Carbonsäuren und enthalten als funktionelle Gruppe die sog. Carboxylgruppe ($-COOH$). Diese enthält eine stark polare $C=O$ Doppelbindung und einer ebenfalls polaren OH -Bindung. Je größer die Anzahl der C-Atome im Molekül, desto weniger ausgeprägt ist der hydrophile Charakter der Flüssigkeit, da der unpolare Teil die Eigenschaften bestimmt.

Während des chemischen Umsetzungsprozesses des Abfalls in der sog. "jungen Phase" (die ersten 6-12 Monaten nach Mülleinlagerung) vergären Kohlenhydrate und Fette zu Essigsäure. Essigsäure ist somit ein wichtiger Bestandteil des Deponiesickerwassers, das durch einen niedrigen pH-Wert während dieser Zeit gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund wird zur Prüfung der chemischen Beständigkeit von HDPE-Dichtungsbahnen auch ein Essig-Propionsäuregemisch (je 50 Vol %) verwendet. Eine Durchströmung von Tönen mit konzentrierter Essigsäure oder stark verdünnter Lösung zeigte eine Änderung des Durchlässigkeitsverhaltens aufgrund von Karbonat- bzw. Eisenoxidauflösungen und

Eingesetzte Prüfungen					Eigenschaften der konzentrierten Substanzen				
Konzentration	pH-Wert [-]	el. Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Dielektrizitätskonst. [-]	Formel	Struktur	Löslichkeit in Wasser [g/l]	Dielektrizitätskonst. [-]	Dichte bei 20°C [g/cm^3]	
Entionisiertes Wasser	/	7	82,6	H_2O		/	82,6	0,998	
Leitungswasser	/	329							
Phenol	1 %	27	78,9 ²	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$		86	13,1	1,072	
Triethanolamin	1 %	134	81,2 ¹	$\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$		∞	29,36	1,12	
Essigsäure/ Propionsäure (1:1)	10 %	1 400	36,4 ¹	$\text{CH}_3\text{-COOH}$		∞	6,15	1,049	
				$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-COOH}$		∞	3,44	0,992	
synth. Sickerwasser: Natriumacetat	[mol/l]: 0,15	11 100	$\approx 81^3$	$\text{CH}_3\text{COONa}^a$	/	1190	6,15	1,049	
Essigsäure	0,15			$\text{CH}_3\text{-COOH}$		∞			
Glycin	0,05			$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$		250			
Salicylsäure	0,007			$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$		1,8			
Hausmüllsickerwasser	/	23 700	$\approx 80^4$	/	/	/	/	/	

Tab. 3.3: Chemisch-physikalische Eigenschaften der Prüflüssigkeiten

² nach CLAUDIUS-MOSOTTI (siehe Anhang)³ Institut für Physikalische Chemie, Universität Stuttgart⁴ nach DANIEL (1988)

infolge Salzausfällungen (BOWDERS, 1985; EVANS et al., 1985; ANDERSON et al., 1985; SIMONS et al., 1984).

Triethanolamin ist ein tertiäres Amin. Die Amine können als Derivate des Ammoniaks aufgefaßt werden, wobei die H-Atome des Moleküls (NH_3) durch organische Reste (hier: Ethanol) ersetzt werden können. Der hydrophile Charakter der Amine nimmt ebenfalls mit zunehmender Kohlenstoffanzahl ab. Die auffallendste Eigenschaft der Aminogruppe ist ihre Fähigkeit, Protonen zu binden. Sie reagieren deshalb als Base. Triethanolamin ist aufgrund seiner drei polaren Hydroxylgruppen unbegrenzt mit Wasser mischbar. Aufgrund der polaren (OH-Gruppen) und unpolaren (C-C-Ketten) Abschnitte des Moleküls wird von einer Adsorption an Tonmineralen ausgegangen.

Das vom GDA-Arbeitskreis zur Eignungsprüfung von Abdichtungsmaterialien empfohlene **synthetische Sickerwasser** wurde speziell für Auslaugtests von Abfällen von HAM et al. (1980) entwickelt. Dabei wurde getrockneter und gemahlener Abfall in Säulenversuchen mit dieser Auslaugungsflüssigkeit beaufschlagt, und das entstehende Eluat chemisch untersucht. Das Modellsickerwasser stellt ein abgepuffertes Gemisch diverser organischer Säuren mit einem pH-Wert von 4,7 (durch Natriumacetat konstant gehaltener pH-Wert) dar. Es soll die Zusammensetzung von Deponiesickerwässern während der essigsäuren Methangärung simulieren. Untersuchungen von SCHRÖDER (1993), SCHNEIDER (1992), GORANTONAKI (1992) und REUTER (1988) hatten dieses Chemikaliengemisch bereits als Gegenstand ihrer Untersuchungen.

EHRIG (1988) stellte jedoch fest, daß die pH-Werte von 400 verschiedenen, untersuchten Deponiesickerwässern meistens deutlich höher als derjenige im synthetischen Sickerwasser existierende waren, so daß der chemische Modellcharakter der synthetischen Lösung anzuzweifeln ist (SCHNEIDER, 1992). Die dadurch resultierende Überbeanspruchung des Dichtungsmaterials sollte deshalb bei den Eignungsnachweisen berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde für die Untersuchungen ebenfalls ein **natürliches Sickerwasser** der Hausmülldeponie "Burghof" der Gemeinde Vaihingen-Horheim, Kreis Ludwigsburg, verwendet. Es stammte von dem älteren Deponieabschnitt, der zwischen 1978 und 1988 verfüllt worden war. Der abgelagerte Müll der Deponie "Burghof" setzt sich aus 32 % Gewerbemüll, 24 % Bauschutt und leicht kontaminiertes Material, 18 % Haus- und Sperrmüll, 14 % Dammbaumaterial, 12 % Klärschlamm und 1 % Gießereisand zusammen. Im Anhang 4 (Tab. A2) sind die Daten des Sickerwassers zusammengestellt.

Leitungswasser und entionisiertes Wasser wurden neben den Prüfflüssigkeiten als Referenzflüssigkeiten bei allen Versuchen verwendet. Auftretende Plastizitäts- oder Struktur-

änderungen können somit eindeutig auf Wechselwirkungen zwischen Boden und Chemikalie zurückgeführt werden.

4 Methodik, Umfang und Ergebnisse der Vorversuche

4.1 Einmischversuche

Für eine Anwendung von Organobentonit in der Deponiepraxis ist es wichtig, die Verarbeitbarkeit des teilweise hydrophoben Zusatzmittels zu überprüfen. Nach einfachen Hand-Einmischversuchen wurden Modellversuche in einer Labormischstation durchgeführt, dessen Ausführung einer Zwangsmischanlage entspricht. Die daraus gezogenen Erkenntnisse sollten Aufschluß über den Mischvorgang geben, um daraus ein gezieltes Untersuchungsprogramm für großmaßstäbliche Mischversuche unter Praxisbedingungen zu erstellen.

4.1.1 Herstellung der Mischungen für die Eignungsuntersuchungen

Am Entnahmeort wurde das für die Laboruntersuchungen notwendige Material in Eimer abgefüllt (mindestens 250 kg pro Boden) und vor Untersuchungsbeginn in einer Labormischmaschine mit Schneideinsatz gleichmäßig durchmischt. Dabei wurden der steife bis halbfeste Opalinus- und der Tertiärton zu Aggregaten < 1 cm zerkleinert. Die Krümelgröße des steifen Lößlehms war bei gleicher Mischdauer sehr viel kleiner.

Um die Mischbarkeit von Organobentonit mit tonigen Materialien beurteilen und die optimale Reihenfolge bei der Mischungsherstellung festlegen zu können, wurden in Vorversuchen Mischungen mit identischem Endwassergehalt aus Opalinuston, 6 % Organobentonit und Wasser hergestellt, wobei die Reihenfolge der Zugabe und der Wassergehalt des Ausgangsmaterials variiert wurden:

- M1: Trocknung des Bodens (105 °C) → Einmischen von Organobentonit → Einmischen von Wasser
- M2: Trocknung des Bodens an der Luft → s. M1
- M3: Einmischen von Organobentonit in den naturfeuchten Boden → Einmischen von Wasser
- M4: Einmischen von Wasser in den naturfeuchten Boden → Einmischen von Organobentonit

Die vier Mischungen zeigten trotz identischer Zusammensetzung unterschiedliche Färbungen. Abb. 4.1 zeigt eine schematische Darstellung der nach der Aufbereitung entstandenen Boden-Wasser-Organobentonit-Mischungen. In der Mischung M1 sind die durch die Ofentrocknung aufgespaltenen, sehr kleinen Bodenaggregate mit Organobentonit umgeben. Das zugegebene Wasser benetzt die entstandene, große Oberfläche. Das Trocknen des Tons an der Luft genügt nicht zur vollständigen Aufspaltung der Aggregate zu kleineren Körnern (M2). Das gespeicherte Wasser in den Zwickeln der Körner erhöht den Ausgangswassergehalt des Tons. Der zunehmende Wassergehalt des Ausgangsmaterials vor der Organobentonit-Zugabe bewirkt eine weitere Vergrößerung der Aggregate mit kleiner werdenden Oberflächen (M3 und M4). Im Vergleich zu M1 ist der Organobentonit in der Bodenmatrix nicht mehr homogen verteilt. Der Homogenisierungsgrad der Mischungen nimmt in der Reihenfolge M1 - M2 - M3 - M4 ab. Eine optimale Verteilung des Organobentonits im Dichtungsmaterial garantiert beste Ergebnisse in der Schadstoffadsorption und einheitliche bodenmechanische Eigenschaften.

Die Mischung M1 zeigte zwar in bezug auf die Verteilung des Organobentonits im Boden die besten Resultate, kann aber aufgrund der herstellungsbedingten Staubeentwicklung und der zeitintensiven Trocknung des Ausgangsmaterials nicht für die Praxis empfohlen werden. Im Hinblick auf die zur Zeit verwendete Verfahrenstechnik zum Einmischen von Zusatzmitteln gilt die Mischung M3 als die für die Praxis praktikabelste Lösung. Für die durchgeführten Eignungsuntersuchungen wurde deshalb das Organobentonit nach dieser Methode eingemischt.

Von den drei Böden wurden jeweils drei Versuchsmischungen hergestellt und für die Untersuchungen vorgehalten: Ausgangsmaterial ohne Zusatzmittel und Mischungen mit je 3 und 6 % Organobentonit. Der Organobentonit wurde lagenweise in den naturfeuchten Boden eingebracht, mit einer Schaufel grob durchmischt und anschließend ohne Wasserzugabe maschinell eingearbeitet. Es zeigte sich bereits zu diesem Zeitpunkt, daß sich bei Lößlehm die besten Resultate hinsichtlich Vermischbarkeit und Homogenisierungsgrad erreichen lassen. Dies ist auf die im Vergleich zu Opalinus- und Tertiärton grobkörnigere Zusammensetzung und den damit zusammenhängenden Mahl- und Kneteffekt zwischen den Partikeln zurückzuführen. Die Herstellung einer optisch homogenen Mischung aus

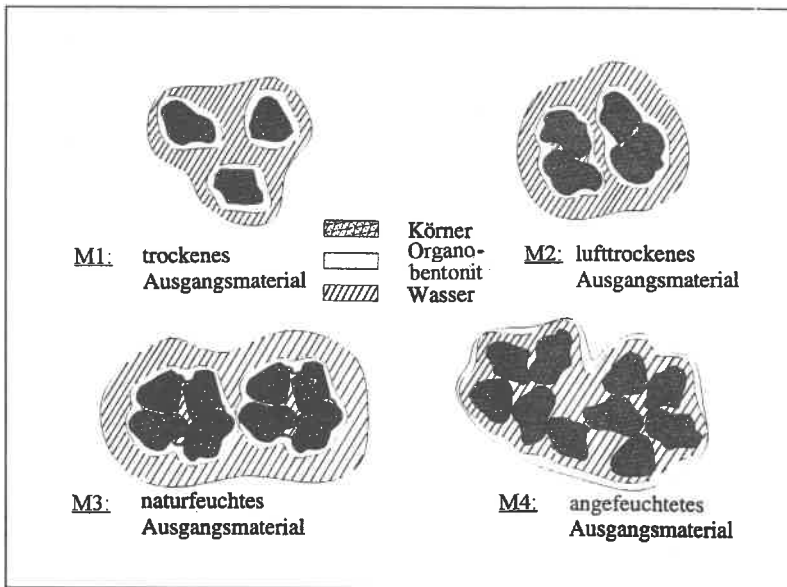


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Aggregatzusammensetzung

erdfeuchtem Ausgangsmaterial und Organobentonit war um so schwieriger, je feinkörniger bzw. je plastischer der Boden war. Erst durch längere Mischdauer konnte eine ausreichend homogene Mischung erzielt werden. Ursachen hierfür werden sowohl in den teilweise hydrophoben Eigenschaften des Organobentonits als auch in der Kornverteilung und der Plastizität der Böden gesehen

4.1.2 Versuche im Labor-Zwangsmischer

Nach den Erfahrungen mit der Mischungsherstellung für die Eignungsuntersuchungen wurden Einmischversuche mit Lößlehm im kleinen Modellmaßstab durchgeführt. Dazu wurde eine Labormischstation der Firma BHS in Sonthofen (Herstellerbezeichnung LES-20) eingesetzt. Der Doppelwellentrogmischer mit einem Aktivvolumen von 38 l besitzt zwei gegenläufig arbeitende Mischwellen mit 8 mm starken Mischpaddeln und eine Bodenentleerklappe, die manuell nach einer bestimmten Mischzeit zu öffnen ist. Der Antrieb erfolgt über einen Flachgetriebemotor. Der Befülltrichter wird durch ein klappbares Gittergewebe und einen Sicherheitsendschalter abgesichert (Abb. 4.2).

Damit nicht Inhomogenitäten des Ausgangsmaterials falsche Ergebnisse lieferten, wurde ca. 220 kg des Lößlehms in einer Mischmaschine mit Schneideinsatz gleichmäßig durchmischt, danach Wassergehalt und Glühverlust bestimmt. In den Versuchen wurden die Mischzeit, die Organobentonit-Menge, die Beschickungsreihenfolge und der Wassergehalt der Mischung variiert. Neben einer visuellen Einstufung stellte sich heraus, daß die Bestimmung des Glühverlusts nach DIN 18128 zur Ermittlung des Homogenisierungsgrades geeignet ist, falls das Ausgangsmaterial in sich nicht zu sehr streut. Die statistische Auswertung von 10 Mischversuchen ergab folgende richtungsweisenden Resultate:

- ❑ Das Mixed-in-plant-Verfahren ist geeignet, Organobentonit mit bindigem Boden zu vermischen. Die optimale **Reihenfolge der Beschickung** lautet wie folgt: Zuerst den Mischtrog mit bindigem Boden füllen, danach den Organobentonit einrieseln und später die entsprechende Menge an Wasser einmischen. Es konnten dabei keine Entmischungserscheinungen festgestellt werden.
- ❑ Mischungen mit einem **Wassergehalt** geringer als der optimale zeigen eine schlechte Verteilung des Organobentonits, da sich die Knetwirkung der Mischpaddel nicht vollständig ausbilden kann. Bei sehr hohen Wassergehalten ($w > w_{95}$ (n.S.)) treten Adhäsionsprobleme im Mischtrog auf, was ebenfalls zu schlechten Mischergebnissen führt. Für eine optimale Mischqualität sind Mischungen entsprechend den Richtlinien für Abdichtungsmaterialien mit einem Wassergehalt zwischen w_p und w_{95} (n.S.) herzustellen.
- ❑ Bei feuchten Mischungen ($w \approx w_{95}$ (n.S.)) bewirkte eine Verdopplung der **Mischzeit** keine Verbesserung der Mischqualität; bei einer größeren Organobentonit-Menge wurde die Homogenität dadurch deutlich verbessert. Geringe Mengen an Organobentonit konnten durch längere Mischzeiten zufriedenstellend verteilt werden. Eine für den großmaßstäblichen Zwangsmischer optimale Mischzeit konnte nicht ermittelt werden, da die Größe des Labormischers nicht auf die Korngröße des Bodens abgestimmt war.

4.1.3 Großtechnische Mischversuche

Nach den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen im Labor wurden Mischungen aus Lößlehm und Organobentonit in einer stationären Zwangsmischanlage auf dem Gelände der Firma ROBERT BOPP Steinbruchbetriebe GmbH & Co. in Talheim bei Heilbronn hergestellt (Abb. 4.3). Der Doppelwellentrogmischer, ebenfalls von der Firma BHS, Sonthofen im Jahr 1992 gebaut, hat einen Nenninhalt von 2,25 m³. Es können darin maximal 2 t Mischung je Charge hergestellt werden. Das Einmischverfahren (Mixed-in-plant) arbeitet witterungsunabhängig und ist für Mischungen mit hydrophoben Organobentoniten im Vergleich zu anderen Methoden besonders geeignet. Die verschiedenen

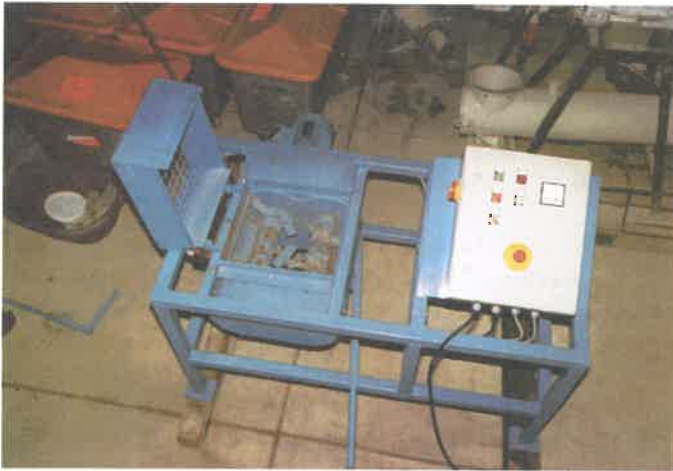


Abb. 4.2: Labormischstation der Firma BHS, Sonthofen

Komponenten eines Abdichtungsgemisches können damit auch bei geringen Dosierungen exakt nach Rezept zu einer qualitativ hochwertigen Mischung verarbeitet werden.

Als bindiger Boden wurde zur Herstellung der Dichtungsmischungen der Lößlehm verwendet, wie er für die geotechnischen Eignungsuntersuchungen und die Versuche im Labormischer eingesetzt wurde. Mit diesem Boden wurden 8 Mischungen zu je 1 t unter Baustellenbedingungen erzeugt, wobei jede Mischung doppelt hergestellt und anschließend beprobt wurde.

Vor Beginn des Großversuchs wurde die gesamte Anlage gewartet, aufgetankt und kalibriert. Nach Auswahl des Entnahmeorts wurde der Lößlehm mit Hilfe eines Radladers über eine Rampe an einen Kastenbeschicker übergeben, der die Abgabe in das Sternsieb regelt, wo Steine und Körner > 63 mm entfernt werden. Das Ausgangsmaterial gelangt danach über ein Förderband in den Doppelwellenchargenmischer, in dem zwei gegenläufig arbeitende Wellen mit Mischarmen den Boden chargenweise vermischen. Der bindige Lößlehm wird mit dieser Mischerart intensiv durchwalkt, und nach einer von der Bodenart, dem Organobentonit und dem zugegebenen Wasser abhängigen Mischzeit verläßt er unter laufendem Betrieb die Mischtrommel. Dadurch wird Entmischungsvorgängen vorgebeugt, und die Mischungsqualität bleibt erhalten.

Das Zusatzmittel wird üblicherweise in einem Silo vorgehalten und über Schneckenförderer dem Mischer zugegeben. Die Dosierung erfolgt über computergesteuerte Waagen, wobei die Witterung und der Wassergehalt des Ausgangsmaterials berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Gesamtmenge an Organobentonit für die Einmischversuche wurde das Zusatzmittel vor dem Mischer auf das Förderband mit dem Boden gestreut. Danach erfolgte die Zugabe von Wasser im Mischer entsprechend den Vorgaben, ebenfalls computergesteuert. Die fertige Mischung gelangt über ein Förderband zur Verladestation, wo es von einem Radlader aufgenommen und zu Mieten aufgeschüttet wurde.

In den feuchten Lößlehm wurde 1 %, 3 % oder 6 % Organobentonit eingestreut und danach die entsprechende Wassermenge für einen Wassergehalt w_{98} (n.S.) zugegeben. Um die Verarbeitbarkeit und die Mischqualität einer sehr feuchten Mischung zu untersuchen, wurde eine 3 %-Mischung auf einen Wassergehalt eingestellt, der größer als w_{95} (n.S.) war. Nachdem das Wasser eingesprüht worden war, wurde an drei festgelegten Mischzeitpunkten (10 s, 30 s und 60 s) Material stichprobenartig aus dem Mischer entnommen und im Labor untersucht.



Abb. 4.3: Stationäre Mischanlage der Firma ROBERT BOPP, Talheim

4.2 Eignungsuntersuchungen

4.2.1 Hilfsgrößen für die Auswertung weiterer Laborversuche

Der **Wassergehalt** einer Mischung wurde stets durch Ofentrocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz festgestellt (DIN 18121, Teil 1). Das Schnelltrocknungsverfahren im Mikrowellenherd hatte neben einer erheblichen Geruchsbelästigung durch den Organobentonit um 1 bis 2 % höhere Wassergehaltswerte zur Folge. Wenn für die Versuchsauswertung die Tonmineralzusammensetzung der Böden und die damit zusammenhängenden Eigenschaften entscheidend waren, wurden die Proben bei 60 °C getrocknet.

Die **Korndichte** ist zur Auswertung der Sedimentationsanalyse und zur Ermittlung der Phasenanteile im Boden notwendig. Ihre Bestimmung erfolgte auch für die Organobentonit-Mischungen trotz starkem Aufschäumen im Kapillarpiknometer gemäß DIN 18124. Die Ergebnisse sind aufgrund der teilweise hydrophoben Eigenschaften des Organobentonits als kritisch zu bewerten, da die Aggregate allein durch den Trocknungs- und Kochvorgang in Wasser nicht vollständig aufgeschlossen werden können. Nach Auffassung der Autorin werden deshalb mit dieser Methode zu niedrige Korndichten für Organobentonit-Mischungen bestimmt. Dies hat jedoch für die weiteren Untersuchungen keine nachteiligen Effekte.

Dem Versuch zur Bestimmung des **Glühverlustes** nach DIN 18128 liegt die Annahme zugrunde, daß organische Bodenbestandteile (z.B. Holz, Humus) im Gegensatz zu mineralischen im Muffelofen bei 550 °C verbrannt werden können. Der Massenverlust der Probe wird jedoch nicht allein durch den oxidierten, organischen Kohlenstoff verursacht, sondern teilweise auch durch Freisetzung von Kristallwasser aus der Probe. Sehr hohe Glühverlustwerte können u.a. auch infolge der Zersetzung von CaCO_3 in CO_2 und CaO verursacht sein. Böden mit hohem Karbonatgehalt zeigen somit hohe Glühverlustwerte (FALKE, 1995). Organische Beimengungen in Böden speichern viel Wasser, erhöhen dadurch den Porenanteil und verschlechtern somit die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften. Die organische Substanz eines Abdichtungsmaterials ist deshalb im Deponiebau auf 5 % beschränkt (Tab. 1.1).

Zur quantitativen Bestimmung des **Gesamtkarbonatanteils** in den Böden wird die Versuchsanordnung nach SCHEIBLER verwendet (DIN 18129). Während einer Behandlung der kalkhaltigen Probe mit Salzsäure wird CO_2 gasförmig frei. Die Menge gibt Aufschluß über den Kalkgehalt. Eine näherungsweise Abgrenzung des Calcit- vom Dolomitanteil kann nur über die Versuchszeit erfolgen. Kommt ein kalkhaltiger Boden mit einem Deponiesickerwasser in Kontakt, verkleinert sich dessen Durchlässigkeitsbeiwert infolge

Schlamm- und Ausfällungen, bis alles Karbonat vollständig entfernt ist. Der Kalkgehalt im Boden wirkt sich verringern auf die Plastizität aus und erhöhend auf das Verformungs-Festigkeitsverhalten.

Die Ermittlung der **Korngrößenverteilung** aller Böden erfolgte standardmäßig nach DIN 18123. Zur Verhinderung der Koagulation wurde das Dispergierungsmittel Natriumpyrophosphat zugegeben. Um mögliche Gefügeänderungen eines Bodens während einer Durchströmung mit einer Chemikalie festzustellen, wurden in Vorversuchen Lößlehm und Tertiärton ohne und mit 6 % Organobentonit mit 1 %iger Triethanolaminlösung aufgeschlämmt und beobachtet. Zur Abschätzung einer möglichen Reaktion zwischen Dispergierungsmittel und Chemikalie wurden Versuche auch ohne Dispergierungshilfe durchgeführt (Kap. 6.4.1).

4.2.2 Zustandsgrenzen

Um vorab einfach und schnell mögliche Änderungen der Durchlässigkeit oder der Scherfestigkeit durch Chemikalienkontakt und durch Zugabe von Organobentonit abschätzen zu können, wurden in "Indexversuchen" die Zustandsgrenzen der Dichtungsmischungen mit Wasser und mit verschiedenen Testlösungen ermittelt (Kap. 3.3). Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, daß sich mögliche Veränderungen in den hydraulischen und mechanischen Eigenschaften einstellen können, wenn die Porenlösung die Plastizität bzw. das Gefüge des Bodens beeinflusst. Wenn durch eine ausreichende Versuchsanzahl mit der entsprechenden Kombination aus Dichtungston und Prüflösung nachgewiesen werden kann, daß Änderungen im Plastizitätsverhalten ausgeschlossen sind, ist es möglich, auf zeit- und kostenintensive Durchlässigkeits- bzw. Scherversuche zu verzichten (ACAR et al., 1985; BOWDERS & DANIEL, 1987).

Für die Indexversuche mit den organischen Testlösungen wurde das Probenmaterial an der Luft auf einen Wassergehalt getrocknet, der kleiner als der Wassergehalt an der Ausrollgrenze war. Eine unnötige Verdünnung der Prüflösung mit dem Porenwasser wurde dadurch vermieden. Anschließend wurden die Proben mit den Testflüssigkeiten vermischt und unter dem Abzug bereitgestellt.

Die Dauer der Kontaktzeit zwischen Chemikalie und Boden wurde nach Vorversuchen festgelegt. Dazu wurde stellvertretend für die organischen Lösungen das synthetische Sickerwasser verwendet, mit dem die Proben aufbereitet wurden. Nach einer, zwei und drei Wochen wurden die Fließ- und Ausrollgrenzen in Anlehnung an DIN 18122 bestimmt ($I_{p, chem}$). Abb. 4.4 zeigt, daß Veränderungen in den Zustandsgrenzen eher auf versuchsbedingte Streuungen als auf die Kontaktzeit zwischen Boden und Testlösung zurück-

zuführen sind. Aus diesem Grund wurde für die weiteren Plastizitätsuntersuchungen eine einheitliche Einwirkzeit von 4 bis 6 Tagen festgelegt.

Von den 3 Ausgangsmaterialien und den 6 Mischungen wurden aus insgesamt 77 Versuchen die Zustandsgrenzen herkömmlich mit Wasserzugabe ermittelt (DIN 18122, TEIL 1). Dazu wurden 200 bis 300 g der Probe mit destilliertem Wasser mindestens 4 Tage lang eingeweicht. Nur bei den Lößlehmproben wurden die Körner über 0,4 mm abgesiebt, ehe sie zu einer Paste aufgearbeitet wurden. Je feinkörniger die Proben waren, desto größer war der mechanische und zeitliche Aufwand, bis die Tonaggregate zu einer homogenen Masse verarbeitet waren. Dies ist auch die Ursache für die relativ großen Versuchsstreuungen bei der Fließgrenzenbestimmung. Die Ergebnisse der Standardversuche mit Wasser dienten als Bezugswerte für die Untersuchungen mit den organischen Testlösungen. Die Resultate aller 267 durchgeführten Versuche sind im Anhang 5 (Tab. A3) zusammengestellt und die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für jede Kombination ermittelt.

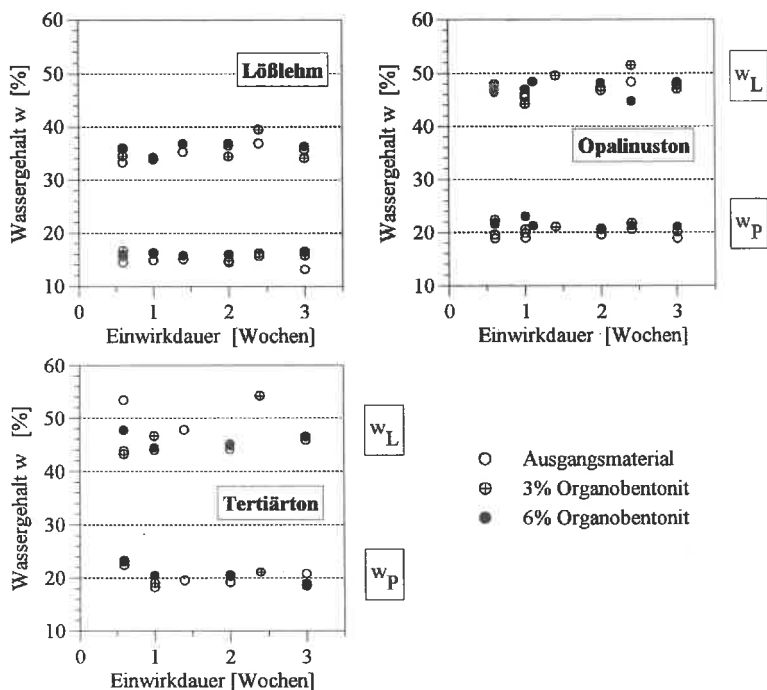


Abb. 4.4: Einfluß der Einwirkdauer von synthetischem Sickerwasser auf die Zustandsgrenzen

4.2.3 "Wasser"-Aufnahmeversuche

Da bei feinkörnigen Böden meistens die tonmineralogische Zusammensetzung ausschlaggebend für deren bautechnische Eigenschaften und für mögliche Strukturveränderungen infolge chemischer Reaktionen ist, kann die Kornverteilung allein keine Auskunft über das Materialverhalten unter Deponiebedingungen geben. Um sowohl das Verhalten der Tonminerale als auch des Organobentonits gegenüber möglicher Porenflüssigkeiten ausreichend abschätzen zu können, müssen entsprechende "Kontakt-Versuche" durchgeführt werden.

Der Wasseraufnahmeversuch nach ENSLIN-NEFF wird in den EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES "GEOTECHNIK DER DEPONIE UND ALTLASTEN" als ein geotechnischer Eignungsversuch für die Beurteilung der Abdichtungsmaterialien vorgeschlagen. Dieser gibt einen Anhalt über die Art der Tonminerale im Feinkornanteil $< 0,4$ mm.

In **Vorversuchen** wurde geklärt, wie groß der Fehlereinfluß der Probenmenge, der Abmessungen der Proben und der Trocknungstemperatur auf die Versuchsergebnisse ist. Dazu wurde reiner, bei 60°C bzw. 105°C getrocknetes Organobentonit in einer Menge von $0,2$ g bzw. $1,0$ g als Kegel aufgeschüttet (Abb. 4.5).

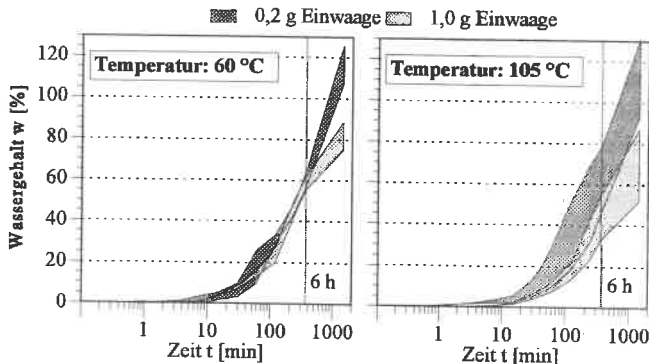


Abb. 4.5: Wasseraufnahme des Organobentonits

Die Temperatur zur Trocknung der Proben hat keinen Einfluß auf den Verlauf der Wasseraufnahme. Lediglich die Streubreite der Ergebnisse ist bei 105°C größer als bei 60°C . Die Tonminerale werden somit nicht nachhaltig durch die erhöhte Trocknungstemperatur

verändert. Diese Erkenntnis wird auf die verwendeten Böden übertragen, da deren Smektitanteil und damit deren maximale Wasseraufnahme deutlich geringer als bei dem Organobentonit sind. Für alle weiteren Untersuchungen wurde die Proben bei 105 °C getrocknet.

Der Einfluß der Probeneinwaage zeigt sich erst nach ca. 6 Stunden Versuchsdauer. Größere Probenmengen ergeben eine um ca. 25 % geringere Wasseraufnahmefähigkeit. Geringe Pulvermengen (0,2 g) nehmen wenig Wasser auf, was aufgrund der zu großen Skaleneinteilung der Meßpipette zu Ableseungenauigkeiten und damit verbunden zu größeren Versuchsstreuungen führt. Die Vorversuche deuten darauf hin, daß eine ansteigende Trocknungsdauer der Proben (> 24 h) höhere Wasseraufnahmewerte zur Folge hat. Dabei wird das adsorptiv und wahrscheinlich auch das kristallin gebundene Wasser aus den Partikeln entfernt.

Verdunstungs- und Wasserausdehnungsfehler infolge Temperaturschwankungen während des Versuchsablaufs können quantitativ nur durch ein zweites, baugleiches Gerät ohne Probe bestimmt werden, wobei im Vorfeld sicherzustellen ist, daß beide Geräte unter denselben Randbedingungen dieselben Ergebnisse liefern. Der Einfluß dieser Fehler ist nach ca. 4 Stunden bemerkbar und kann eine Änderung des Wassergehalts von bis zu 60 % beim 24 Stunden-Wert verursachen.

In den **Hauptuntersuchungen** wurde das Aufnahmevermögen des reinen Organobentonits getestet (Kap. 6.2). Ebenso wurden die Folgen einer Organobentonit-Vergütung auf die Wasseraufnahme der tonigen Böden beobachtet. Mit den Kenntnissen des Organobentonit-Triethanolamin-Verhaltens und den Wechselwirkungen zwischen Boden und Organobentonit konnte das Schadstoff-Aufnahmevermögen der Böden und deren Mischungen diskutiert werden. Dazu wurden die Proben in das herkömmliche ENSLIN-Gerät eingerieselt und ohne Veränderungen der Apparatur mit der Triethanolaminlösung in Kontakt gebracht.

4.2.4 Verdichtung

Mit dem Proctorversuch kann ein Zusammenhang zwischen der Trockendichte und dem Wassergehalt der Boden-Organobentonit-Mischungen festgestellt und die Proctordichte ρ_{pr} und der optimale Wassergehalt w_{pr} bestimmt werden. Das Ergebnis des Proctorversuchs gibt an, bei welchem Wassergehalt sich das vergütete Abdichtungsmaterial günstig verdichten läßt. Was unter günstig zu verstehen ist, wird in den Einbauanforderungen für mineralische Basisabdichtungen in der TA ABFALL, Anhang E festgelegt (Kap. 1.1) und ist im Anhang 6 (Abb. A5) graphisch dargestellt. Diesen Forderungen liegt zugrunde, daß

Abdichtungsmaterialien mit einem Wassergehalt größer als der optimale eine größere Plastizität und eine geringe Durchlässigkeit aufweisen und daß Abdichtungsschichten mit einem Wassergehalt zwischen w_{pr} und w_{95} (n.S.) noch mit herkömmlichen Geräteinsatz hergestellt werden können. Um größere Volumenänderungen und Rißanfälligkeiten infolge Wasseraustritt zu minimieren, wird bei der Herstellung der Abdichtung eine möglichst hohe Trockendichte angestrebt.

Die Ausgangsböden und deren Mischungen mit Organobentonit wurden mit einfacher Verdichtungsarbeit von $0,6 \text{ MNm/m}^3$ im Proctortopf verdichtet, die in ihrer Wirkung i.d.R. derjenigen von im Deponiebau eingesetzten Verdichtungsgeräten entspricht. Es wurden mindestens drei Proctorversuche je Mischung gemäß DIN 18127 durchgeführt, wobei bei Opalinus- und Tertiärton nach dem Einmischen von Wasser eine Durchfeuchtungszeit von mindestens 48 Stunden eingehalten wurde. Mit diesem Vorgehen war gewährleistet, daß sich das zugegebene Wasser bei diesen ausgeprägt plastischen Böden gleichmäßig in den Aggregaten verteilt hat.

Die Mittelwert- und die Grenzkurven der Proctorversuche, die die Streubreite der Versuchsergebnisse angeben, sind im Anhang 7 (Abb. A6 bis A8) für jede Bodenart und deren Mischungen dargestellt. Dabei sind die optimalen Wassergehalte w_{pr} , die Proctordichten ρ_{pr} , die Korndichten ρ_s , sowie die Wassergehalte und die Trockendichten bei einem Verdichtungsgrad D_{pr} von 95 % auf der nasse Seite der Proctorkurve (w_{95} (n.S.)) der Tab. A4 im Anhang 8 zu entnehmen.

4.2.5 Durchlässigkeit

Um das Durchströmungsverhalten der mit Organobentonit vergüteten Dichtungsmaterialien beurteilen zu können, sollte eine Durchlässigkeitsanlage mit Triaxialzellen entsprechend den GDA-EMPFEHLUNGEN zum Einsatz kommen. Dabei wurde angestrebt, daß das hydraulische Gefälle während des Versuchs annähernd konstant bleibt und ein isotroper statischer Zelldruck σ_3 auf die Proben einstellbar ist. Die durchgeführten Versuche haben nach DIN 18130 folgende Kurzbezeichnung:

Prüfung DIN 18130 - TX - DE - ST - U0.

Im Rahmen dieser Arbeit war eine grundlegende Neuentwicklung einer Versuchsanlage nicht notwendig, so daß in Zusammenarbeit mit der Firma STRASSENTES, Alzenau, eine Anlage konzipiert wurde, die folgenden Anforderungen entspricht:

- ☐ Mit dem Prüfstand, dessen Werkstoffe nach Beständigkeitsuntersuchungen mit verschiedenen Testlösungen festgelegt wurden, kann die Durchlässigkeit von künstlich verdichteten und ggf. von ungestörten Bodenproben bestimmt werden.
- ☐ Die Abmessungen der Triaxialzellen sind auf die verwendeten Böden abgestimmt, damit ein für die Bodenzusammensetzung repräsentativer k -Wert ermittelt wird.
- ☐ Da teilgesättigte Proben aufgrund der mit Luft gefüllten Poren eine geringere Durchlässigkeit haben, ist zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse eine Wassersättigung der Proben möglich.
- ☐ Da unbehandeltes Leitungswasser Luft enthält, und diese sich während des Durchströmungsvorgangs in der Probe festsetzen kann, wird das Wasser vollautomatisch entlüftet und steht unbegrenzt zur Verfügung.
- ☐ Um die temperaturabhängigen Größen der Prüf-flüssigkeit bei der Auswertung exakt berücksichtigen zu können, wird die Temperatur der Flüssigkeit bestimmt.
- ☐ Eine Möglichkeit zur Eluatentnahme an der Probenausströmseite ist vorzusehen, damit mögliche chemische Veränderungen in der Probe oder ein Schadstoffdurchbruch festgestellt werden können. Der Versuchsablauf darf dadurch nicht gestört werden.
- ☐ Die ein- und ausströmenden Flüssigkeitsvolumina sind zuverlässig abzulesen, und die eingestellten Drücke sind nachregulierbar.
- ☐ Das hydraulische Gefälle kann für jeweils drei Zellen stufenlos und gleich eingestellt werden.
- ☐ Randumläufigkeiten verursachen bei "undurchlässigen" Bodenproben eine Verfälschung der Ergebnisse. Zur Vermeidung kann ein konstanter isotroper Seitendruck aufgebracht werden.
- ☐ Um Verdunstungsfehler zu vermeiden, ist der Strömungskreislauf komplett geschlossen. Undichtigkeiten im Prüfsystem können durch ausreichende Kontrollmöglichkeiten erkannt werden.

Abb. 4.6 zeigt eine Gesamtansicht der Durchlässigkeitsanlage, bestehend aus einer Grund- und zwei Erweiterungseinheiten mit je drei Meßstellen. Die Grundeinheit verfügt über eine Wasserentlüftungsstation, die alle Einheiten vollautomatisch mit entlüftetem Leitungswasser versorgt. Die Vorratsbehälter aus Plexiglas für das Zellwasser befinden sich im Unterschrank jeder Einheit und werden ebenfalls automatisch befüllt. Die zentrale Ablaufsteuerung hinter der Frontplatte übernimmt alle Steuerungsaufgaben selbständig. Die Druckluftversorgung wird zur Steuerung von Strömungs-, Sättigungs- und Zelldruck verwendet. Zur Einstellung dieser Drücke sind je ein Druckregler und je ein Manometer in der Frontseite der Anlage eingebaut, die bis zu einem Maximaldruck von 750 kPa ausgelegt sind. An der Vorderseite sind sog. "Medientrenner", bestehend aus einem Plexiglasgehäuse und einer säureresistenten Kunststoffmembran, angebracht, die den unkontaminierten Meß- von dem evtl. kontaminierten Fließkreislauf trennen. Ein direkter

Kontakt der Prüflüssigkeit mit der Meßeinrichtung und der Druckregleinrichtung ist somit ausgeschlossen. Jeder Meßstelle sind zwei Paar Volumenmeßpipetten unterschiedlicher Größe (10 und 50 ml) zugeordnet, die je nach Bodenart und Ablesezeitraum ausgewählt werden können und mit denen sowohl die einlaufende als auch die auslaufende Flüssigkeitsmenge der Probe bestimmt werden können. Über die verschiedenen Bedienblöcke können die Meßpipetten befüllt bzw. entleert, die Prüflüssigkeit aus dem Vorratsbehälter in die Trennmembranen gefüllt und die Fußplatten der Druckzellen mit Prüflüssigkeit gespült werden.

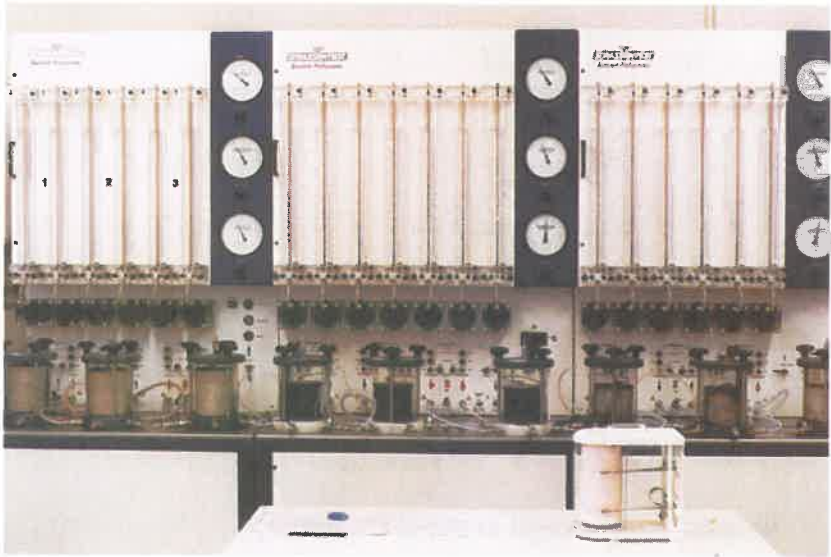


Abb. 4.6: Gesamtansicht der Durchlässigkeitsanlage mit neun Triaxialzellen

Der Aufbau der Durchströmungszelle und der Meßkreislauf sind in Abb. 4.7 schematisch dargestellt. Zum Schutz vor Diffusion des Durchströmungsmediums in das Zellwasser wurden alle Bodenproben mit Teflonband umwickelt und mit einer Neoprenhülle ummantelt. Die Chemikalienbeständigkeit von Neopren im Vergleich zu Latex wurde während Vorversuchen nachgewiesen. Aus demselben Grund wurden als Abschluß der Proben an Ober- und Unterseite V4A-Filterplatten verwendet. Jeweils zwei O-Ringe an Ober- und Unterseite verhinderten den Eintritt von Seitenwasser in die Probe. An der Probenausströmseite befand sich eine Vorrichtung zur Eluatentnahme. Damit können mit einer Spritze kontrolliert jeweils 5 ml Eluat zu einem beliebigen, vom Versuchsablauf unabhängigen Zeitpunkt entnommen, in Glasfläschchen abgefüllt und chemisch untersucht werden.

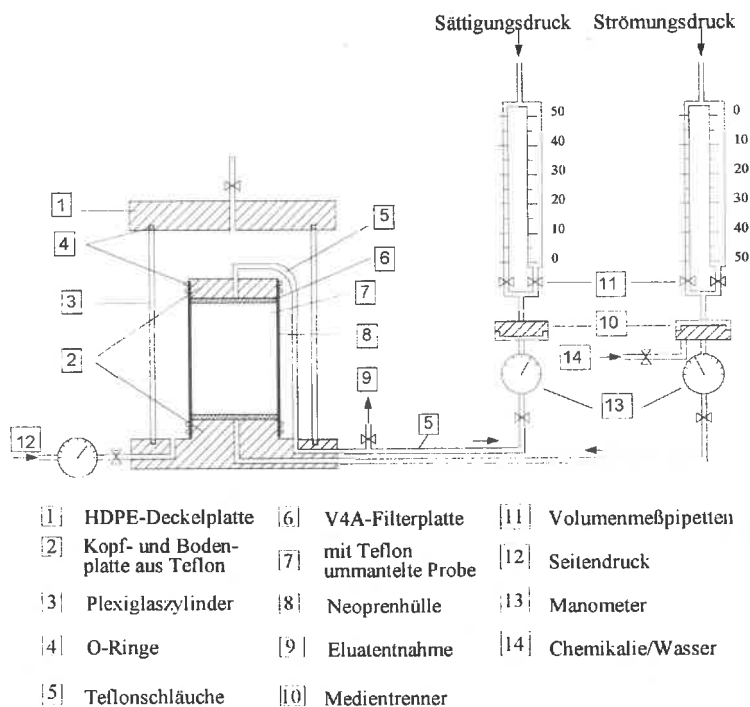


Abb. 4.7: Triaxialzelle und Meßkreislauf

Das während der Durchströmungsversuche austretende Porenwasser wurde auf elektrische Leitfähigkeit (DIN 38404 - C8; Meßtemperatur 25 °C) und pH-Wert (DIN 38404 - C5) untersucht. Damit kann festgestellt werden, wann das Porenflüssigkeit-Feststoff-System eine stabile Gleichgewichtsphase erreicht hat, wobei vor allem die relativen Änderungen während der Durchströmung von Interesse waren. Nach REUTER (1988) können mithilfe dieser beiden Parameter mögliche Ionenanlagerungen (Adsorption) bzw. Ionenausspülungen (Desorption) aus den Bodenproben qualitativ erfaßt werden. Für die pH-Messung wurde ein pH-Meter der Firma DEUTSCHE METROHM in Filderstadt, für die Leitfähigkeitsmessung ein Meßgerät der Firma WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE-WERKSTÄTTEN WTW in Weilheim verwendet.

Das aus einer Bodenprobe stammende Eluat besitzt aufgrund der enthaltenen Ionen eine elektrische Leitfähigkeit. Ihre Größe wird sowohl von der Menge und Art der Ionen als

auch von der Temperatur des Meßguts bestimmt. Der pH-Wert ist als der negative dekadische Logarithmus des Zahlenwertes der in [mol/l] angegebenen Wasserstoffionen definiert. Dieser kann sich durch chemische, physikalische oder biologische Vorgänge schnell ändern und ist somit ein Indiz für Reaktionsvorgänge in den Bodenproben.

Wie bereits in Kap. 4.1.1 beschrieben, wurde das Ausgangsmaterial im Labormischer mit Organobentonit und Wasser homogenisiert, danach im Ausstechzylinder entsprechend den Vorgaben verdichtet, anschließend ausgepreßt und sorgfältig in die Druckzellen eingebaut. Der Durchmesser der Proben lag bei ca. 9,6 cm, die Probenhöhe variierte zwischen 4 und 8 cm. Vor Beginn der eigentlichen Durchströmung wurden die gesamte Anlage und die einzelnen Druckzellen auf Undichtigkeiten geprüft. Die Verbindungsleitungen zu den Druckzellen, die Druckzellen selbst und die Leitungen im Gerät wurden so lange durchströmt, bis alle Lufteinschlüsse entfernt waren. Je nach Bodenart und vorhandenem Anfangssättigungsgrad wurde der Sättigungsdruck zwischen 200 und 300 kPa (DIN 18130, Tab. 3) eingestellt und während des Versuchs konstant gehalten. Die Festlegung des hydraulischen Gradienten erfolgte über den Strömungsdruck, der an der Unterseite der Probe anlag. Die Trennmembranen und die Volumenmeßeinrichtungen wurden auf die Ausgangsposition gebracht, die Druckzellen an die Leitungen angeschlossen und die Ventile geöffnet.

Jeder Versuch begann je nach Einbauzustand der Probe mit einer gleichzeitig stattfindenden Sättigungs- und Konsolidationsphase, deren Verlauf und Ende durch eine Kontrolle der ein- und ausströmenden Wassermengen definiert werden kann. Falls diese in einem bestimmten Zeitintervall gleich und konstant waren, galt diese Phase als beendet, und die eigentliche, stationäre Durchströmungsphase begann. Täglich wurden für jede Zelle sowohl die ein- als auch die auslaufenden Volumina, die Zeit und die Temperatur registriert und der Durchlässigkeitsbeiwert k_f nach DARCY berechnet (Kap. 2.6).

Da eine Durchströmung ausschließlich mit Wasser keine Aussagen über die Eignung der Boden-Organobentonit-Mischungen unter Deponiebedingungen zuläßt, wurden zusätzlich Durchlässigkeitsversuche mit 1 %iger Triethanolaminlösung ausgeführt. Die verwendete Testflüssigkeit ergab sich aus den im Vorfeld untersuchten Plastizitätsänderungen mit den Ausgangsmaterialien (Kap. 6.1.3). Eine Durchströmung der Proben mit natürlichem Sickerwasser hätte eine spezielle Deponiesituation simuliert und wäre aufgrund der zeitlichen Veränderung des Sickerwassers weder reproduzierbar noch repräsentativ gewesen. Nur die Triethanolaminlösung zeigte ähnliches Verhalten bei den Plastizitätsuntersuchungen.

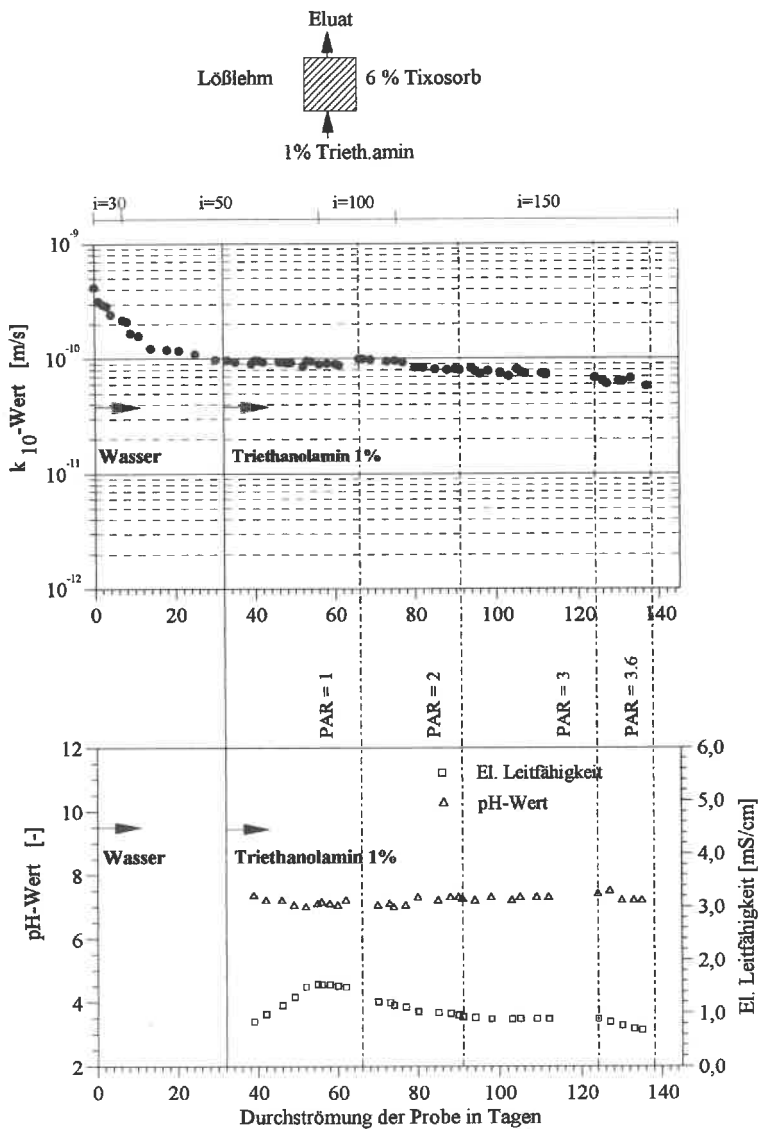


Abb. 4.8: Beispiel einer graphischen Auswertung eines Durchlässigkeitsversuchs k_{10} - Normierung auf 10°C (DIN 18130)

Alle Versuche begannen zuerst mit einer Durchströmung der Proben mit entlüftetem Leitungswasser von unten nach oben. Nach Abschluß der Sättigung und Konsolidation wurde das Leitungswasser bei einigen Proben gegen die Triethanolaminlösung ausgetauscht und der Versuch so lange fortgesetzt, bis das Porenvolumen ausreichend durch die Testflüssigkeit ersetzt war, keine nennenswerten Änderungen im Eluat festgestellt wurden und der ermittelte k_f -Wert nahezu konstant über die Zeit verlief. Das Ende der Durchlässigkeitsversuche war je nach Bodenart und gewähltem hydraulischen Gradient unterschiedlich. Maßgebend dafür war die Annahme, daß bei einer Durchströmung der Proben mit einer Flüssigkeitsmenge, die ca. dem doppelten Porenvolumen entsprach, das ursprüngliche Porenwasser nahezu vollständig verdrängt und durch die Testlösung ersetzt wurde. Gleichzeitig sollten die chemischen Analysen das Ende möglicher Reaktionen zwischen Probe und Permeant aufzeigen. Damit dies zeitlich akzeptabel war, wurden die hydraulischen Gradienten unter Berücksichtigung des linearen Strömungsbereichs maximal festgelegt und lagen je nach Bodenart zwischen 30 und 400. Abb. 4.8 zeigt ein Beispiel für die graphische Auswertung der Durchströmungsversuche. Nach der Durchströmung wurden alle Proben vorsichtig ausgebaut, Wassergehalt und Feuchtdichte bestimmt und an demselben Tag für die folgenden Scherfestigkeitsversuche vorbereitet.

Auf diese Weise wurden alle Mischungen in insgesamt 43 Durchlässigkeitsversuchen mit Leitungswasser und mit Triethanolamin beaufschlagt. Die Versuchsdauer lag dabei zwischen 43 und 160 Tagen. 39 Proben wurden nach der Durchströmung ausgebaut und im Triaxialgerät abgeschert. Im Anhang 9 (Tab. A5) sind die Versuchsauswertungen und die Randbedingungen dargestellt.

4.2.6 Triaxialversuche

Die Größe der Scherfestigkeit ist besonders für Standsicherheitsprobleme bzw. für die Rißgefährdung einer mineralischen Abdichtungsschicht von besonderer Bedeutung, da Festigkeitsüberschreitungen in steilen Deponieböschungen oder unter Aufstandsflächen von Gasbrunnen die Funktionstüchtigkeit des Dichtungssystems gefährden. Die Festigkeit des Abdichtungssystems muß ebenfalls ausreichend groß sein, um den Fahrverkehr von Radladern, Raupenfahrzeugen und Kompaktoren während der Bau- und Betriebszeit schadlos aufnehmen zu können. Im End- bzw. Betriebszustand einer Deponie kann für die mineralische Basisabdichtungsschicht von konsolidierten, drainierten Randbedingungen ausgegangen werden. Für erdstatische Berechnungen sind daher die effektiven Scherparameter φ' und c' als Eingangsgrößen anzusetzen.

Gemäß STOCKMEYER bildet nur die Festigkeitsbestimmung im Triaxialgerät nach einer Durchströmung der Proben in demselben reale Deponieverhältnisse wider. Die durch-

geführten Triax-Versuche sollten zeigen, ob eine Wasser-Durchströmung das Gefüge und somit die Festigkeit unvergüteter Proben beeinflusst. Es blieb bisher unerforscht, inwieweit allein die Zugabe von Organobentonit zum Ausgangsmaterial die Festigkeit verschlechtert und ob eine mögliche Reaktion des Organobentonits mit Triethanolamin Auswirkungen auf die bodenmechanischen Kennwerte hat.

Für die Scherfestigkeitsuntersuchungen wurden die mit Wasser und Triethanolaminlösung durchströmten Proben aus der WD-Anlage entnommen und jeweils drei Triaxproben mit einem Durchmesser von ca. 3,6 cm und einer Höhe von ca. 8 cm für Mehrprobenversuche herausgearbeitet. Die effektiven Scherparameter wurden in triaxialen Scherversuchen (CD) unter konsolidierten und drainierten Bedingungen gemäß DIN 18137 bestimmt. Zu Vergleichszwecken wurden Proben ohne vorherige Durchströmung unter gleichen Versuchsbedingungen abgesichert, wobei die Einbaudaten den Ausbaudaten der Proben aus der WD-Anlage entsprachen. Zur Bestimmung der Scherfestigkeit wurden CD-Versuche im Standard-Triaxialgerät (System STIRIZ, Hamburg) durchgeführt, das so konstruiert ist, daß sämtliche Versuchsarten entsprechend DIN 18137, TEIL 2 ausgeführt werden können.

Die Versuchsdurchführung erfolgte im gleichen Gerät wie für die Untersuchungen von RILLING (1994). Um seine Erkenntnisse in bezug auf Scherfestigkeit ausnutzen zu können, wurden auch dieselben Druckeinstellungen und dieselbe zeitliche Abfolge gewählt. Nach dem Einbau wurden sowohl die nicht durchströmten als auch die durchströmten Proben mit 300 kPa wassergesättigt (mittels "back pressure"-Technik), um einerseits die während der Verdichtung im Proctortopf entstandenen Verspannungen in den Proben zu lösen (RILLING, 1994) und andererseits den ursprünglichen Spannungszustand der Proben in der WD-Anlage wiederherzustellen. Nach isotroper Konsolidation mit 400 kPa wurden die Proben unter verschiedenen effektiven Seitendrücken von 100, 200 und 400 kPa gegen einen Sättigungsdruck von 100 kPa abgesichert. Die gewählte Versuchsgeschwindigkeit von 0,36 mm/h garantierte, daß keine Porenwasserüberdruckbildung in den Proben auftrat. Als Bruchkriterium bei der Versuchsauswertung galt das Erreichen eines Höchstwerts für die Hauptspannungsdifferenz ($\sigma'_1 - \sigma'_3$).

Die Ergebnisse der Triaxialversuche einschließlich der Ein- und Ausbaudaten sowie Versuchsrandbedingungen sind getrennt nach Bodenart und Durchströmungsgeschichte tabellarisch im Anhang 10, Tab. A6 zusammengefaßt.

5 Einfluß der Mischtechnik

Ein natürlich anstehender, bindiger Boden ist häufig wechselnd zusammengesetzt und besitzt daher sich verändernde geotechnische Eigenschaften. Für die Herstellung einer funktionierenden künstlichen Abdichtungsschicht in einer Deponie muß garantiert sein, daß Homogenität, Wassergehalt und Dichte der Abdichtungsschicht optimal den Forderungen entsprechen. Falls diese nicht mit dem anstehenden Boden eingehalten werden können, müssen mit hochwertiger Verfahrenstechnik Zusatzstoffe nach bestimmtem Rezept eingemischt werden.

Bei einer Mischung mit Organobentonit handelt es sich wie bei Beton und Asphalt um ein wertvolles Abdichtungsmaterial, das ein Verarbeiten im Zwangsmischer erfordert. Das Mixed-in-plant-Verfahren ist aufgrund der Witterungsunabhängigkeit, der erzielbaren Qualität bzw. Homogenität des Abdichtungsmaterials und des flexiblen Einsatzes für das Einmischen von Organobentonit dem Mixed-in-place-Verfahren vorzuziehen. Die im Vergleich hohen Herstellkosten sind einem optimalen Homogenisierungsgrad gegenüberzustellen. Das hochwertige Mischgut kann mit diesem Verfahren vor dem Einbau auf Eignung kontrolliert, optimiert und evtl. zwischengelagert werden.

Ziel der in Kap. 4.1 beschriebenen Einmischversuche war es, den Begriff der Qualität bzw. Homogenität für Organobentonit-Mischungen zu definieren und die Verteilung des Wassers und des Organobentonits im Mischgut mittels einfacher, geotechnischer Standardversuche zu bestimmen. Dies ist vor allem für die Qualitätsprüfung einer Deponie von großem Interesse, wenn für mineralische Basisabdichtungen geringe Vergütungen genügen und wenn an das Verarbeiten des teilweise hydrophoben Organobentonits besondere Anforderungen gestellt werden.

5.1 Homogenität von in situ-Mischungen

Im Anhang E der TA ABFALL (3.1.1, Abschnitt f) wird für mineralische Dichtungsschichten als Schutz- und Vorsorgemaßnahme für die Qualitätssicherung einer Deponie u.a. folgendes gefordert:

“... Sofern das mineralische Material zur Erreichung einer homogenen Dichtungsmasse durch Zerkleinern oder Einmischen von Feinkornzugaben behandelt wird, hat dies in Zwangsmischern zu erfolgen (Mixed-in-plant-Verfahren)...”

Eine weitergehende Definition des Begriffs der “homogenen Dichtungsmasse” wird jedoch in der TA ABFALL nicht explizit gegeben. Während der Qualitätsprüfungen im Labor wird bisher versucht, die Homogenität des einzubauenden Materials über die Bestimmung der Dichte, des Wassergehalts, der Kornverteilung sowie ggf. der Plastizität zu beschreiben. Der Homogenitätsnachweis im Probefeld findet bisher durch visuelle Kontrollen an Bodenproben aus Schürfen und durch anschließende Durchlässigkeitsbestimmungen im Standrohrgerät statt. Die Homogenität gilt als ausreichend, wenn der Variationskoeffizient 20 % nicht überschreitet (ABFALLWIRTSCHAFT IN NRW, RICHTLINIEN “MINERALISCHE ABDICHTUNGEN”, 1993).

Nach Meinung der Autorin kann bei dem o.g. Variationskoeffizient keinesfalls von einer homogenen Organobentonit-Mischung gesprochen werden. Weiter sind die erwähnten Versuche nicht eindeutig genug, um die Organobentonit-Verteilung beurteilen zu können, da entweder Organobentonit selbst damit nicht bestimmbar ist oder Streuungen in den Versuchsergebnissen erheblich schwankende Organobentonit-Gehalte vortäuschen können. Es fehlen daher zuverlässige, schnelle und aussagekräftige geotechnische Versuche, um die Homogenität bzw. Qualität von Organobentonit-Mischungen im Labor und in situ zu bestimmen.

In der Gießereitechnik stellt sich bei der Wiederaufbereitung von Formsanden die Frage, wie die zum Binden eingebrachte Bentonitmenge überprüft werden kann. Zur Lösung dieses Problems wurde das Methylenblau-Verfahren entwickelt. Dabei wird die Eigenschaft des Bentonits, den Farbstoff Methylenblau zu adsorbieren, genutzt. Dieses Verfahren wurde zur Güteüberwachung von mit Bentonit vergüteten mineralischen Abdichtungsmaterialien von KNÜPFER (1990) erfolgreich eingesetzt, ist jedoch zur Bestimmung der Organobentonit-Menge und -Verteilung aufgrund anderer Adsorptionseigenschaften und wegen des hohen Aufwands ungeeignet.

Da die betrachteten Abdichtungsmischungen aus den drei Komponenten, Boden, Organobentonit und Wasser zusammengesetzt sind, muß das Ziel sein, daß jeder Bestandteil für sich homogen in der Gesamtmasse verteilt ist. Es galt nun, für die Zusatzstoffe Wasser und Organobentonit einen Versuch ausfindig zu machen, der Aussagen über die homogene Verteilung im Abdichtungsmaterial zuließ. Für den Zusatzstoff Wasser ist die Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18121 für diesen Zweck aufschlußreich und ausreichend. Für den Zusatzstoff Organobentonit wurde im Hinblick auf Schnelligkeit, Dauer, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit aus der Vielzahl von Klassifikationsversuchen die Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 18128 ausgewählt. Da der verwendete Organobentonit einen hohen Glühverlust im Vergleich zum Lößlehm besitzt, können mit diesem Versuch geringe Schwankungen in der Organobentonit-Menge ausreichend genau festgestellt werden.

5.2 Verteilung des Wassers in einer Mischung

Um die Auswirkungen einer unterschiedlichen Wassermenge auf das Mischergebnis beurteilen zu können, wurden eine "feuchte" (w_{98} (n.S.)) und eine "sehr feuchte" ($w > w_{95}$ (n.S.)), den Forderungen der TA ABFALL nicht entsprechende 3 %-Mischung hergestellt.

Darüber hinaus wurde beobachtet, inwieweit das zugegebene Organobentonit die Verteilung des Wassers in den Mischungen beeinflusst. Dazu wurden Mischungen mit unterschiedlichem Organobentonit-Gehalt auf einen Wassergehalt w_{98} (n.S.) gebracht. Entsprechend der in Abb. 6.7 dargestellten Proctorkurven benötigt die 6 %-Mischung im Vergleich zur 1 %-Mischung eine deutlich größere Wassermenge. Wie sich das Mehrangebot an Wasser mit dem sehr hohen Anteil an wasserabstoßendem Organobentonit verhält, war ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Wertet man die Versuchsergebnisse aus, indem der Quotient aus dem vorhandenen Ist-Wert zum gewünschten Soll-Wert des Wassergehalts gebildet wird, und trägt man diesen und die Variationskoeffizienten der Wassergehalte über die Mischdauer auf, so entstehen die in Abb. 5.1 und Abb. 5.2 dargestellten Kurvenverläufe.

Abb. 5.1 zeigt, daß sich sowohl die feuchte (w_{98} (n.S.)) als auch die sehr feuchte Mischung ($w > w_{95}$ (n.S.)) mit zunehmender Mischdauer asymptotisch dem Mischungsziel (optimale Verteilung des Wassers) nähert, wobei der Wassergehalt zum jeweiligen Mischzeitpunkt immer geringer als der einzustellende ist. Es wurden keine Wassergehalte festgestellt, die größer als der erwünschte waren. Demzufolge verteilt sich das zugegebene Wasser nicht sofort auf das Mischmaterial, sondern die Oberflächen der Mischtrommel bzw. der Mischpaddel nehmen einen erheblichen Teil der Flüssigkeit auf, was auch

während der Versuchsdurchführung zu erkennen war. Diese Erscheinung ist unabhängig von den eingesetzten Mischungsbestandteilen.

Die Quotienten $w_{\text{ist}} / w_{\text{soll}}$ der sehr feuchten Mischung sind während der gesamten Mischzeit deutlich geringer als bei der feuchten Mischung. Die Variationskoeffizienten beider Mischungen nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender Mischdauer ab. Die Streuung der Wassergehaltswerte in der sehr feuchten Mischung übersteigt die der feuchten. Das Mischungsergebnis der feuchten Mischung nach 10 s entspricht dem einer Mischdauer von 50 s bei der sehr feuchten Mischung. Um gleiche Mischungsqualitäten zu erreichen, sind sehr feuchte Mischungen wesentlich länger zu mischen als feuchte. Es besteht somit ein erheblicher zeitlicher und ökonomischer Mehraufwand für die Herstellung einer feuchten Mischung.

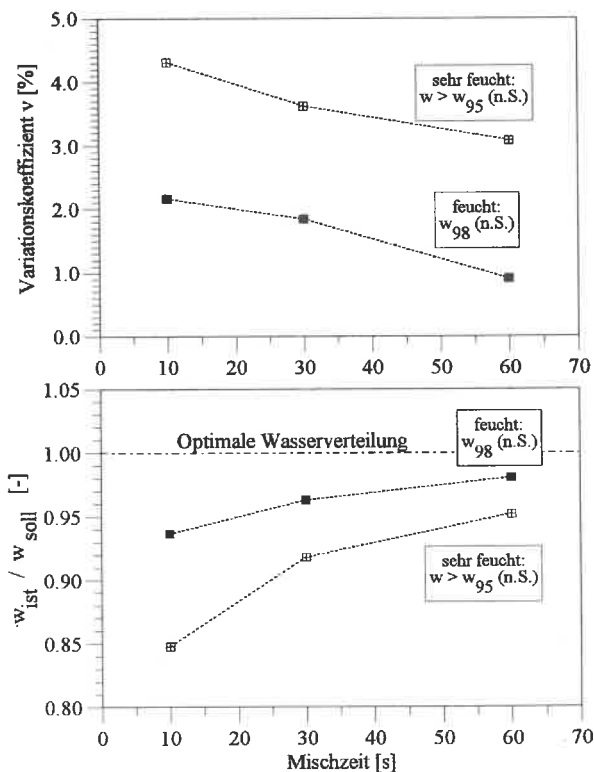


Abb. 5.1: Verteilung des Wassers in einer 3 % Organobentonit-Mischung mit unterschiedlichem Wassergehalt (12 Versuche je Mischzeitpunkt)

Für eine abschließende Beurteilung der Wasserverteilung in einer Mischung ist ein ausschließlicher Vergleich der Wassergehalte nicht ausreichend. Erst durch die Berücksichtigung der Variationskoeffizienten können eindeutige Aussagen über die gleichmäßige Verteilung getroffen werden.

Die Auftragung der Variationskoeffizienten über die Mischdauer bestätigt die obige Aussage, wonach eine zunehmende Wassermenge eine längere Mischzeit benötigt, bis eine optimale Verteilung in der Bodenmatrix erreicht ist. Bei Mischungen hingegen, wie sie für ein Abdichtungsmaterial eingesetzt werden könnten (hier: $w = w_{98}$ (n.S.)), werden nach 60 Sekunden bereits zufriedenstellende Mischergebnisse erzielt.

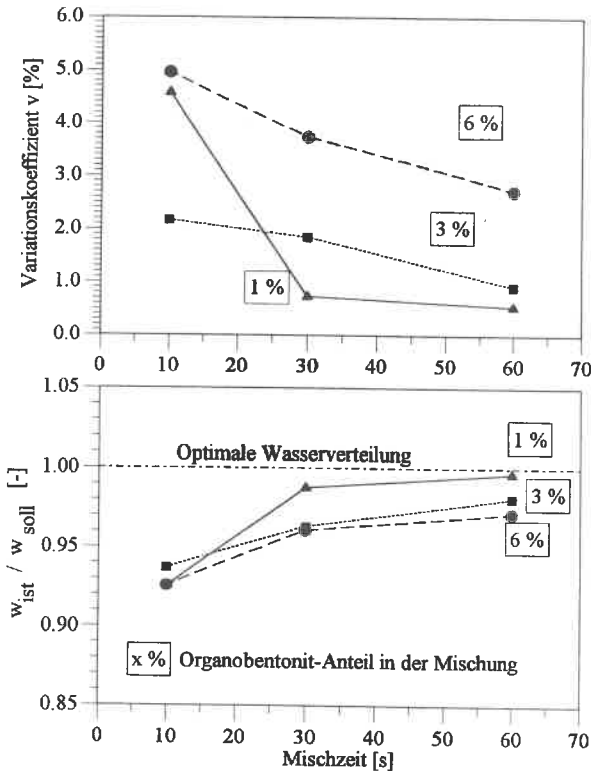


Abb. 5.2: Verteilung des Wassers in Mischungen mit unterschiedlichen Organobentonit-Anteilen (12 Versuche je Mischzeit)

Abb. 5.2 veranschaulicht den Einfluß von Organobentonit auf das Einmischergebnis von Wasser. Je größer die für eine Vergütung vorgesehene Menge an Organobentonit ist, desto länger muß das Wasser eingemischt werden, um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers zu erreichen: Eine 1 %-Zugabe ist bereits nach 30 Sekunden zufriedenstellend erfolgt, eine 6 %-Mischung benötigt eine Mischzeit von mehr als 2 Minuten. An den Verläufen der Variationskoeffizienten ist erkennbar (Abb. 5.2), daß die Wassergehalte innerhalb der 1 %-Mischung bereits nach 30 Sekunden Mischzeit kaum differieren. Wohingegen die Wassergehaltsstreuungen in der 6 %-Mischung nach einer Minute deutlich größer sind als bei den Mischungen mit geringerem Organobentonit-Anteil.

Es können zwei Ursachen genannt werden:

1. Zum Zwecke des Vergleichs sollten alle Mischungen mit demselben Einbauwassergehalt von $w_{98}(n.S.)$ hergestellt werden. Entsprechend den Proctorkurven für Lößlehm in Abb. 6.7 (oben) nimmt die einzumischende Wassermenge mit zunehmendem Organobentonit-Gehalt zu. Zunehmende Wassermenge bedeutet aber längere Mischdauer für ein zufriedenstellendes Mischergebnis (Abb. 5.1).
2. Mit steigender Organobentonit-Vergütung in einem Boden werden auch die teilweise hydrophoben Eigenschaften des Organobentonits dominanter. Je mehr Organobentonit einzumischen bzw. vorhanden ist, desto aufwendiger ist die gleichmäßige Verteilung des Wassers in der Mischung.

5.3 Die Verarbeitbarkeit von Organobentonit

Um eine Vorstellung von der Verteilung des Organobentonits im feuchten Ausgangsmaterial zu erhalten, wurden von jeder Mischung zu jedem Mischzeitpunkt mindestens 12 Proben für die Bestimmung des Glühverlustes entnommen. In Tab. 5.1 sind die Versuchsergebnisse der einzelnen Mischungen zusammengefaßt und statistisch ausgewertet. Da der Organobentonit TIXOSORB einen im Vergleich zu den mineralischen Ausgangsmaterialien hohen Glühverlust besitzt, können mit diesem Versuch bei Mischungen mit geringer Dosierung von 1 % Organobentonit Schwankungen im Mischgut von $\pm 0,5$ % festgestellt werden.

Aus den Glühverlustwerten des Lößlehms (V_g^B) und des Organobentonits (V_g^{OB}) kann entsprechend dem gewünschten Organobentonit-Anteil in der Mischung (Soll OB) ein

theoretischer Soll-Wert für den Glühverlust der Mischung (Soll V_{gl}^M) nach folgender Gleichung ermittelt werden (Herleitung siehe Anhang 11). Dieser Wert kann als Bezug für die im Versuch ermittelten Glühverluste (Ist V_{gl}^M) herangezogen werden.

$$\text{Soll } V_{gl}^M = \frac{V_{gl}^{OB} \cdot \text{Soll OB} + V_{gl}^B}{\text{Soll OB} + 1}$$

Aus den im Versuch bestimmten Glühverlusten (Ist V_{gl}^M) kann entsprechend der tatsächlich vorhandene Organobentonit-Prozentsatz in der jeweiligen Mischungsprobe (Ist OB) berechnet und dem gewünschten Organobentonit-Anteil (Soll OB) gegenübergestellt werden (Anhang 11). Entspricht der vorhandene Ist-Wert dem gewünschten Organobentonit-Soll-Wert, wurde eine 100 % homogene Mischung mit optimal verteiltem Organobentonit hergestellt, was praktisch nie zu erreichen ist.

$$\text{Ist OB} = \frac{\frac{V_{gl}^B}{\text{Ist } V_{gl}^M} - 1}{1 - \frac{V_{gl}^{OB}}{\text{Ist } V_{gl}^M}}$$

Man erkennt in Tab. 5.1, daß die Glühverlust-Mittelwerte (Ist V_{gl}) keine eindeutige Tendenz nach den verschiedenen Mischzeitpunkten zeigen. Vielmehr nehmen die Standardabweichungen und entsprechend die Variationskoeffizienten mit zunehmender Mischdauer erheblich ab. Der ermittelte Glühverlust der entnommenen Stichproben schwankt innerhalb einer Mischung somit nur gering. Der Organobentonit ist im Mischgut besser verteilt.

Bezieht man den ermittelten Glühverlust der Mischung (Ist V_{gl}^M) auf den theoretisch berechneten (Soll V_{gl}^M), und trägt man diese bezogenen Glühverluste über die Mischzeit auf, so zeigt Abb. 5.3, daß bei einer Mischzeit von 10 s in den Abdichtungsmischungen teilweise wenig Organobentonit vorhanden ist, aber auch größere Organobentonit-Anhäufungen festzustellen sind. Erst mit andauernder Mischzeit verteilt sich das Organobentonit im bindigen Boden. Der Glühverlust aller Mischungen liegt nach 60 s Mischzeit maximal 5 % über dem theoretisch ermittelten. Dies bedeutet, daß bei dieser Mischdauer die erzielbare Mischgüte im Zwangsmischer für geringe Dosierungen (1 %) bei +/- 0,5 % liegt und mit zunehmendem Organobentonit-Anteil (6 %) auf +/- 1,7 % steigt. Eine noch längere Mischdauer würde bei geringen Dosierungen die Mischungsqualität nicht erheblich verbessern, vielmehr wäre der Durchsatz und damit die Leistung der Mischungsanlage erheblich verringert. Höher dosierte Mischungen (ab 3 % Organobentonit) und sehr

feuchte Mischungen (ab $w = w_{95}$ (n.S.)) benötigen für ein zufriedenstellendes Mischergebnis annähernd 2 Minuten Mischzeit.

Organobentonit-Anteil (Soll OB) [%]	Mischdauer [s]	Anzahl d. Versuche [-]	Mittelwert (Ist V_g) [%]	Standardabweichung [-]	Variationskoeff. [%]	Errechneter Org. ben.-Ant. (Ist OB) [%]
100 (TIXOSORB)	/	6	24,3	0,11	0,47	/
0 (Lößlehm)	/	28	3,8	0,50	13,36	/
1	10	12	4,2	0,27	6,36	2,3
	30	12	4,4	0,07	1,67	3,2
	60	12	4,0	0,06	1,42	1,4
3	10	12	4,2	0,36	8,73	2,1
	30	12	4,7	0,09	1,83	4,7
	60	12	4,5	0,08	1,83	3,7
3 (feucht)	10	12	5,2	0,32	6,22	7,3
	30	12	5,1	0,05	1,04	6,6
	60	12	4,6	0,04	0,83	4,0
6	10	12	5,3	0,15	2,77	8,3
	30	12	5,4	0,07	1,22	8,7
	60	12	5,2	0,06	1,16	7,7

Tab. 5.1: Glühverlustwerte der Mischungen nach verschiedenen Mischzeitpunkten

Bemerkenswert ist, daß mit dem Zwangsmischverfahren immer höhere Organobentonit-Anteile im Mischgut festgestellt wurden als erwartet. Die Ursache liegt wahrscheinlich darin, daß der Lößlehm zuerst der laufenden Mischtrommel zugeführt wird und wegen des natürlichen Wassergehalts teilweise an der Mischtrommel klebt. Ein Teil des bindigen Bodens nimmt deshalb nicht am Mischvorgang teil. Es wird somit eine geringere Menge an Lößlehm mit Organobentonit vermischt, der Organobentonit-Anteil in der fertigen Mischung ist größer, und man befindet sich auf der sicheren Seite in bezug auf die gewünschte Sorptionserhöhung des Abdichtungsmaterials. Diese verfahrensbedingte Erscheinung kann zu Beginn des Mischvorgangs in Abhängigkeit des Bodens und des Wassergehalts quantitativ ermittelt und die Organobentonit-Menge entsprechend verringert werden.

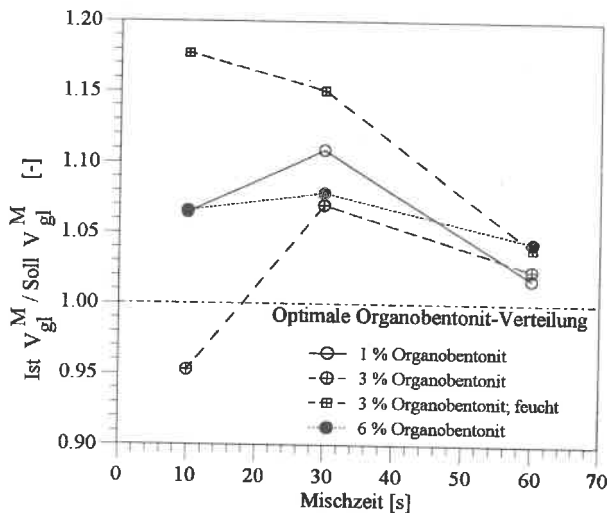


Abb. 5.3: Einmischbarkeit von Organobentonit

5.4 Empfehlungen für die Praxis

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Einmischversuche mit Organobentonit können für den Deponiebau folgende Empfehlungen ausgesprochen werden:

Tone und tonige Schluffe als Ausgangsböden für Abdichtungsmaterialien neigen bei einer Vergütung mit Organobentonit während des Mischvorgangs zwar zu einer Klumpenbildung, Mischungen mit Organobentonit sind aber dennoch prinzipiell herstellbar. Eine homogene Einmischung des Organobentonits und optimale Befeuchtung sind erschwert, können aber durch die Reihenfolge der Beschickung (Boden → Organobentonit → Wasser), durch eine der Organobentonit-Menge angepasste Mischzeit und durch die zugegebene Wassermenge positiv beeinflusst werden.

Da stark tonhaltige Böden einerseits stets mit veränderten Sickerwässern in Wechselwirkung treten und dabei die bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowohl verbessert als auch verschlechtert werden können und andererseits zugegebenes Wasser nur mit erheblichen Aufwand zufriedenstellend eingemischt werden kann, werden solche Böden nicht als Ausgangsmaterial für Abdichtungsmischungen empfohlen. Für Organobentonit-Mischungen sind grobkörnige Böden zu bevorzugen, deren große Körner einen Mahl- und Kneteffekt während des Mischprozesses bewirken. Zur Verbesserung der

Mischbarkeit und der Mischungsqualität wird daher empfohlen, entsprechend der Füllerkurve einen gewissen Anteil Größtkorn zu haben, die Korngröße aber auf maximal 63mm zu begrenzen. Falls nur sehr gleichkörniges Material oder solches mit Fehlkörnungen zur Wahl steht, kann dieses durch Zugabe eines geeigneten Füllers gezielt verbessert werden. Die Eignung als Abdichtungsmaterial darf durch diese Art des Vorgehens nicht verschlechtert werden.

6 Bewertung der Laborergebnisse

6.1 Plastische Eigenschaften

Im Rahmen dieser Arbeit konnten folgende Fragen mit der in Kap. 4.2.2 beschriebenen Methode beantwortet werden:

- ☐ In welchem Maß beeinflussen die teilweise hydrophoben Eigenschaften des Organobentonits die Benetzbarkeit der Körner und somit die Plastizität der feinkörnigen Böden?
- ☐ Inwiefern verändern organische Prüfflüssigkeiten die Zustandsgrenzen von Dichtungstonen und deren Mischungen mit Organobentonit?
- ☐ Welche Testlösung hat ähnliche Effekte auf die Plastizität wie das entnommene Deponiesickerwasser, und kann diese für weitere geotechnische Untersuchungen als repräsentative Modellflüssigkeit eingesetzt werden?

6.1.1 Einfluß des Organobentonits auf die Plastizität

Die Ergebnisse von 77 Plastizitätsuntersuchungen an Boden-Organobentonit-Proben sind in Tab. 6.1 zusammengefaßt. Die Zustandsgrenzen und die Plastizitätszahlen der Böden ohne Organobentonit nehmen vom Lößlehm über den Opalinuston zum Tertiärton hin zu. Dies hängt einerseits mit dem zunehmendem Feinstanteil und andererseits mit den darin enthaltenen, quellfähigen Tonmineralen zusammen.

Tab. 6.1 zeigt, daß sich die Plastizität aller drei Bodenarten durch die Zugabe von Organobentonit erhöht. 6 % Organobentonit in der Lößlehm-Mischung bewirkt einen Anstieg der Plastizitätszahl um 7 % (Erhöhung von I_p um 1,4 %), wobei sich die Fließ- und Ausrollgrenze in gleichem Maße verändern. Diese Zunahme der Plastizitätszahl beträgt dagegen beim Tertiärton 3 % und beim Opalinuston nur 2 %. Die Standardabweichung ist

erwartungsgemäß bei den Fließgrenzen höher als bei den Ausrollgrenzen und nimmt vom Lößlehm über den Opalinuston zum Tertiärton zu. Die Ursache liegt in der Probenaufbereitung, da ein erheblicher Mehraufwand notwendig ist, bis eine gleichmäßige Paste von Opalinus- und Tertiärton hergestellt werden kann.

	Organo- bentonit- Anteil [%]	Anzahl der Versuche [-]	Fließgrenze w_L (Stand. abw.) [%]	Ausrollgrenze w_p (Stand. abw.) [%]	Plastizitätszahl I_p (Stand. abw.) [%]
Lößlehm	0	8	35,2 (1,6)	15,8 (1,2)	19,4 (1,3)
	3	6	36,0 (1,1)	16,5 (0,6)	19,5 (0,9)
	6	7	37,8 (1,1)	17,0 (0,7)	20,8 (1,2)
Opalinuston	0	6	47,3 (1,9)	19,4 (0,9)	27,9 (2,4)
	3	7	50,0 (2,2)	21,8 (1,1)	28,2 (2,4)
	6	5	50,7 (2,6)	22,3 (1,0)	28,4 (2,6)
Tertiärton	0	15	51,8 (3,4)	21,1 (1,1)	30,7 (3,8)
	3	12	53,0 (3,4)	21,6 (0,8)	31,4 (2,9)
	6	11	53,4 (5,4)	21,9 (0,8)	31,5 (5,3)

Tab. 6.1: Fließ-, Ausrollgrenzen und Plastizitätszahlen der Mischungen

Berechnet man für jede Mischung die enthaltenen quellfähigen Tonminerale aus den mit Wasser quellfähigen Tonmineralen des Organobentonits (50 %, da halb belegt mit Tensiden) und des Ausgangsbodens und setzt diese mit den Plastizitätszahlen der verschiedenen Mischungen in Bezug, so erhält man die in Abb. 6.1 dargestellten Kurven. Eine Zugabe von halborganophilisiertem Bentonit erhöht bei allen Böden den Anteil an mit Wasser quellfähigen Tonmineralen, wodurch eine Vergrößerung der Plastizität die Folge sein muß. Die Zunahme der Plastizität infolge Organobentonit ist bei Lößlehm am deutlichsten zu erkennen. In Abhängigkeit des im Ausgangsmaterial vorhandenen Anteils an quellfähigen Mineralien spielt der zugegebene Organobentonit eine entscheidende Rolle bei der Veränderung der plastischen Eigenschaften der Abdichtungsmischung. D.h. je weniger der Boden Tonminerale enthält, desto erheblicher wird seine Plastizität vergrößert. Die teilweise hydrophoben Eigenschaften des verwendeten Organobentonits bewirken also keine abnehmenden plastischen Eigenschaften, sondern entsprechen eher der Forderung, wonach das mineralische Material den Untergrundverformungen plastisch folgen soll (TA ABFALL, Anhang E, 1.1, Abschnitt d).

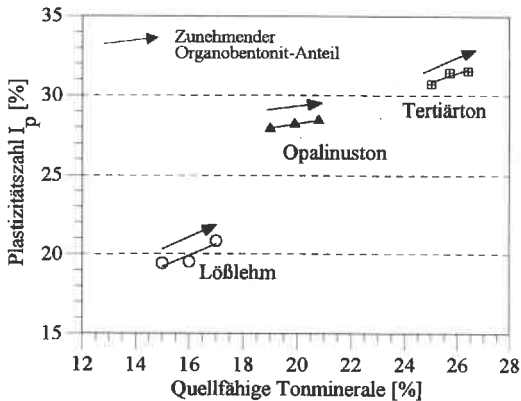


Abb. 6.1: Zusammenhang zwischen quellfähigen Tonmineralen und Plastizität

6.1.2 Wechselwirkungen mit organischen Testlösungen

Natürliche Böden enthalten im Regelfall ausschließlich Wasser als Porenflüssigkeit. Wird wie bei den durchgeführten Plastizitätsuntersuchungen das Porenwasser durch eine chemische Lösung ersetzt, müsste der Begriff Wassergehalt richtigerweise in "Flüssigkeitsgehalt" umbenannt werden. Da jede chemische Verbindung und jedes Gemisch einen im Vergleich zu Wasser unterschiedlichen Dampfdruck und Siedepunkt besitzen, sind die veränderten chemisch-physikalischen Bedingungen bei der Bestimmung des Flüssigkeitsgehalts zu berücksichtigen. Sind die Poren z.B. mit einer Salzlösung gefüllt, verdampft während der Ofentrocknung nur das Wasser, das Salz verbleibt im trockenen Boden und wird als Trockensubstanz mitgerechnet. Amin- und Glycollösungen verdampfen komplett ohne Rückstände und werden als verdampfte Flüssigkeitsmenge berücksichtigt.

Welche Auswirkungen das veränderte Verhältnis der verdampften "Wassermasse" zur Trockenmasse des Bodens auf die Definition des "Wassergehalts" hat, blieb bisher in der Literatur unbedacht und sollte daher weiter wissenschaftlich untersucht werden. Der Flüssigkeitsgehalt von Bodenproben mit veränderter Porenlösung darf daher nur nach vorheriger Prüfung als Korrelationsgröße für bodenmechanische Zusammenhänge verwendet werden.

Da für die in diesem Kapitel aufgeführten Versuche nur Verbindungen geringerer Konzentration (< 10 %) verwendet wurden und somit der Wasser-Anteil in den Flüssigkeiten

überwiegt, ist davon auszugehen, daß der oben erwähnte Sachverhalt die Wassergehaltsbestimmung der Proben nicht beeinflußt.

Die Eigenschaften sowohl der Tonminerale im Ausgangsboden als auch des zugegebenen Organobentonits werden durch die chemisch-physikalischen Eigenschaften einer veränderten Porenlösung beeinflusst. Ändert sich die Plastizität einer Organobentonit-Mischung, kann dessen Ursache nur schwer zugeordnet werden. Die Elektrolytkonzentration und die Dielektrizitätskonstante der Porenlösung haben einen Einfluß auf die Abmessungen der Doppelschichten aller Tonminerale. Der pH-Wert der Lösung kann zu einer Umladung der Tonmineralkanten führen. Diese komplexen Vorgänge finden im Boden und im Organobentonit parallel statt und können die Struktur und damit zusammenhängend die Plastizität verändern.

Wird die Plastizitätszahl mit einer Prüflüssigkeit $I_{p, \text{chem}}$ auf die konventionell bestimmte Plastizitätszahl mit Wasser I_p bezogen, so ergibt sich eine bezogene Plastizität i_p für jede Mischung und jede Prüflüssigkeit, die Aufschluß darüber gibt, wie die Auswirkungen der Porenlösung auf die Plastizität sind. In den Abb. 6.2 bis 6.4 ist der Quotient i_p über den pH-Wert, die Dielektrizitätskonstante und die Elektrolytkonzentration der entsprechenden Porenlösungen für alle drei Bodenarten aufgetragen. Abhängigkeiten zwischen der Plastizität und den die Doppelschicht der Tonminerale beeinflussenden Größen (Elektrolytkonzentration, Dielektrizitätskonstante) sind für alle Bodenarten nicht feststellbar. Die Auftragung der bezogenen Plastizität über den pH-Wert der Lösung zeigt ein Parabel-Band mit dem Scheitel zwischen pH 4 und 6, worin alle Versuchspunkte enthalten sind (Abb. 6.2).

Dies führt zur folgenden Interpretation: Die Plastizität des unvergüteten Lößlehms vergrößert sich mit allen organischen Testlösungen im Vergleich zu Wasser um maximal 20 %, wobei im sauren wie im basischen Bereich eine leichte Zunahme festzustellen ist. Die Mischungen mit Organobentonit zeigen ähnliche, mit dem pH-Wert ansteigende Kurvenverläufe; die bezogene Plastizität wird mit steigendem Organobentonit für alle Lösungen geringer als die des unvergüteten Materials. Die 3 %-Mischung ist mit allen organischen Lösungen gerade noch plastischer als mit Wasser bzw. gleich plastisch ($i_p \geq 1,0$). Eine 6 %-Vergütung reduziert die Chemikalien-Plastizität weiter, wobei die Mehrzahl der organischen Lösungen eine geringere Plastizität als mit Wasser verursacht ($i_p < 1,0$).

Opalinuston und Tertiärton zeigen ähnliche Zusammenhänge zwischen pH-Wert und Plastizität wie Lößlehm, während die Plastizitätsänderungen innerhalb des pH-Wert-Spektrums weit ausgeprägter sind (Erhöhung bei Opalinuston um 35 %, bei Tertiärton um 45 %). Die geringe Krümmung des Parabel-Bandes von Lößlehm und seinen Mischungen

ist gleichbedeutend mit geringen Plastizitätsänderungen infolge pH-Wert-Erhöhung. Lößlehm-Mischungen sind daher im Vergleich zu Opalinus- und Tertiärton-Mischungen in bezug auf chemische Wechselwirkungen mit den organischen Testlösungen geringer empfindlich. Unter Berücksichtigung der tonmineralogischen Zusammensetzung der Böden (Kap. 3.1.3) können die bisher bekannten, wissenschaftlichen Aussagen bestätigt werden, wonach die Empfindlichkeit gegenüber Chemikalien mit zunehmendem Feinst- und ansteigendem quellfähigen Tonanteil, mit steigender spezifischer Oberfläche und wachsender Oberflächenladung der Tonminerale größer wird.

Eine Zugabe von Organobentonit zeigte nur bei Lößlehm mögliche Tendenzen in der Plastizitätsentwicklung. Dabei nimmt mit zunehmendem Organobentonit-Gehalt die Chemikalien-Plastizität unabhängig von der organischen Lösung ab. Grund hierfür kann der geringe Tonanteil im Boden und dem im Vergleich dazu hohen Organobentonit-Gehalt sein. Auftretende schwache Reaktionen zwischen den Tonmineralen im Lößlehm und den Chemikalien werden durch Veränderungen im Organobentonit durch organische Verbindungen übertroffen. Die beiden anderen Bodenarten zeigen aufgrund ihres vielfältigen und großen Mineralbestandes erhebliche chemische Wechselwirkungen, die nicht zugeordnet werden können. Es werden keine klaren Abhängigkeiten zwischen Chemikalien-Plastizität und Organobentonit festgestellt. Für Eignungsuntersuchungen mit Organobentonit genügt es somit nicht, nur die Wasser-Plastizität des mineralischen Ausgangsmaterials untersucht zu haben und über allgemeine Faustregeln die zu erwartende Plastizität der mineralischen Abdichtungsschicht nach Sickerwasserkontakt hochzurechnen. Zu unterschiedlich, zu vielfältig und von zu vielen Randbedingungen abhängig sind die chemischen und tonmineralogischen Vorgänge, die Plastizitätsveränderungen bei feinkörnigen Böden vor allem mit Deponiesickerwasser bewirken.

Da Änderungen in der Plastizität vom Anteil an Zwischenschichtwasser bestimmt werden, mit Gefügeumbildungen einhergehen, diese von den abstoßenden bzw. anziehenden Kräften zwischen den Tonmineralen abhängen und da das Kräftegleichgewicht wiederum von tonmineralogischen Gegebenheiten und chemisch-physikalischen Zuständen der Porenflüssigkeit beeinflusst wird, ist eine Korrelation zwischen einer geotechnischen Größe und z.B. einem einzigen Flüssigkeitsparameter nicht ausreichend. Sämtliche, die Kräfte in den Tonmineralen beeinflussenden Größen sind zu betrachten, damit geotechnische Veränderungen im Abdichtungsmaterial korrekt interpretiert werden können.

In den Abb. 6.2 bis 6.4 ist die theoretisch zu erwartende Plastizitätsänderung von Kaolinit bzw. Illit infolge des entsprechenden Flüssigkeitsparameters mit Pfeilen dargestellt. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, daß alle anderen chemisch relevanten Parameter konstant sind. So bewirkt eine Erhöhung des pH-Werts eine Umladung der Tonmineralkanten und dadurch eine Abnahme der Fließgrenze bzw. der Plastizität. Da die

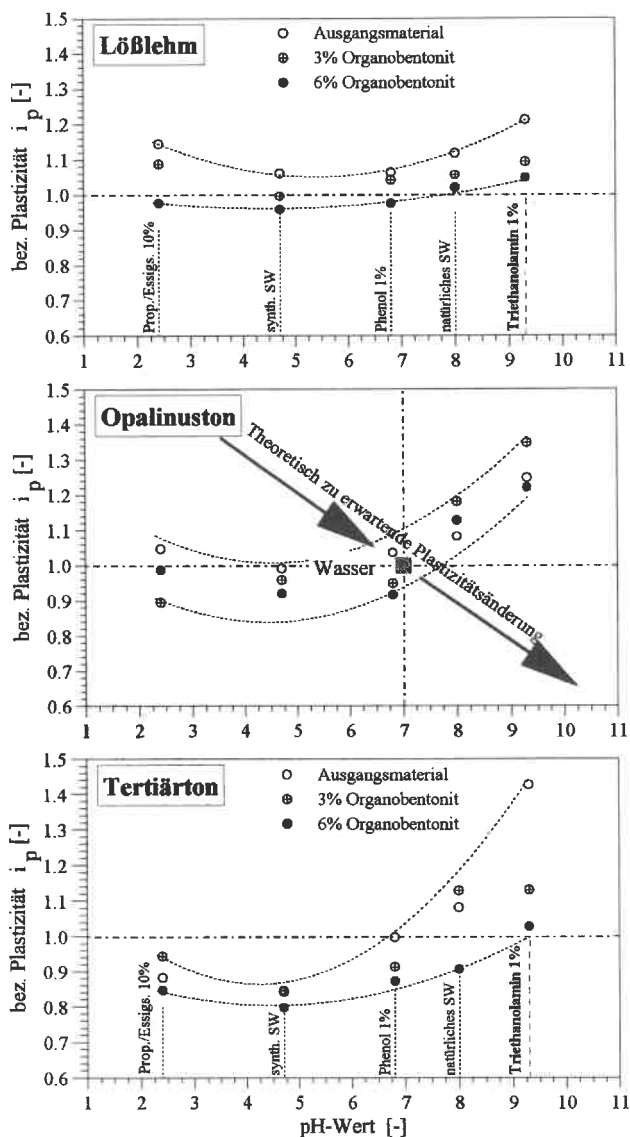


Abb. 6.2: Änderung der Plastizität in Abhängigkeit des pH-Werts der Porenlösung

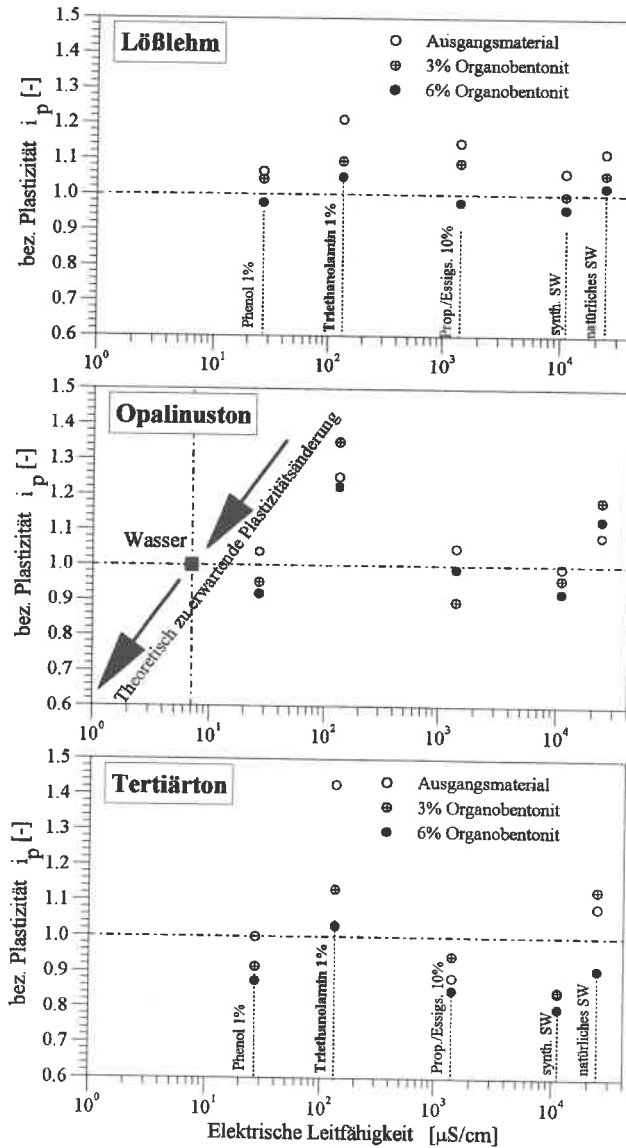


Abb. 6.3: Änderung der Plastizität in Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der Porenlösung

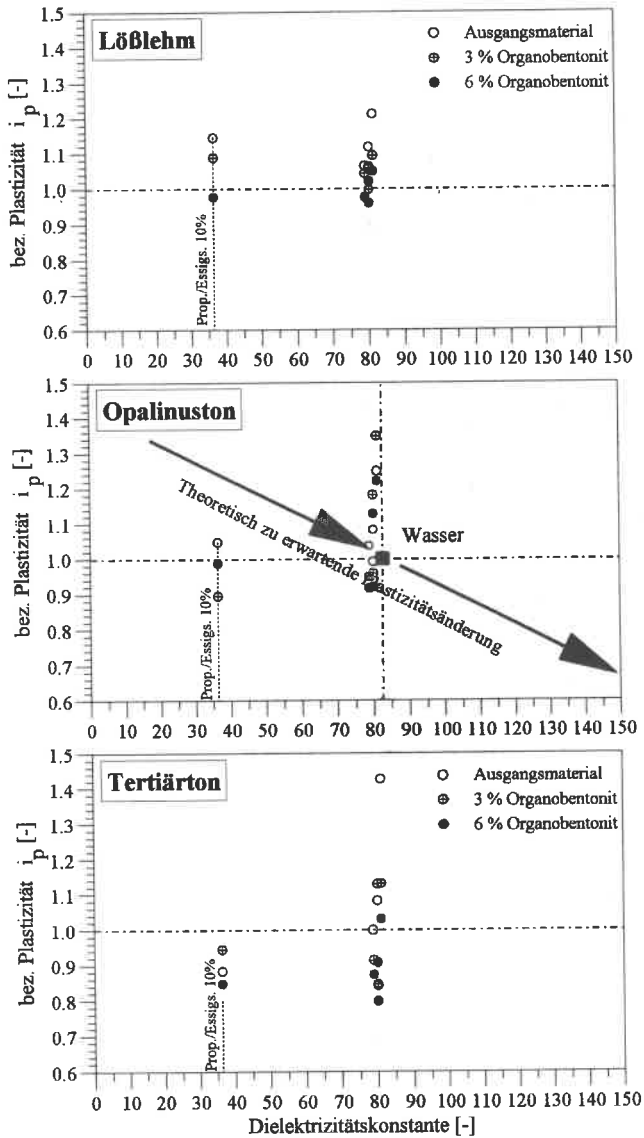


Abb. 6.4: Änderung der Plastizität in Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante der Porenlösung

Plastizitätszahlen auf die Wasser-Plastizitätszahlen bezogen wurden, muß die theoretische Kurve jeweils durch den Fixpunkt Wasser gehen, der durch seinen pH-Wert und den Wert der bezogenen Plastizität von 1,0 eindeutig definiert ist. Teilt man durch diesen Punkt das Schaubild in 4 Quadranten, so müßten die Versuchspunkte mit zunehmendem pH-Wert von links oben nach rechts unten wandern (Abb. 6.2). Eine Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit ergibt, daß mit abnehmenden Leitfähigkeitswerten die abstoßenden Kräfte zunehmen und die Fließgrenze für Kaolinit/Illit abnimmt (Abb. 6.3). Die Dielektrizitätskonstanten der Testlösungen unterscheiden sich, mit Ausnahme der Essig-Propionsäure, kaum von dem Wasser-Wert, so daß dieser Parameter für die Auswertung der Ergebnisse als konstant angenommen werden kann (Abb. 6.4).

Man erkennt, daß sich nicht alle Versuchspunkte innerhalb der entsprechenden Quadranten befinden und deshalb diesen einfachen, theoretischen Vorstellungen nicht entsprechen. Die Annahme wird bestätigt, daß Plastizitätsentwicklungen in feinkörnigen Böden durch chemische Porenlösungen von weitaus mehr Parametern abhängig sind. Da sich die verwendeten Böden im enthaltenen Tonmineralanteil deutlich unterscheiden und darin jeweils eine Mischung aus verschiedenen Tonmineralarten enthalten sind, ist eine Interpretation der Plastizitätsverläufe komplex, wenn zusätzlich mit so unterschiedlichen Chemikalien gearbeitet wurde. Die Abhängigkeit der Plastizität vom pH-Wert kann hier somit als zufällig angesehen werden. Die Versuchspunkte dürfen also nicht zu Kurven verbunden werden, denn Plastizitätszahlen eines Bodens mit einer bisher unbekannten Porenlösung können ohne Plastizitätsversuche nicht vorhergesagt werden.

Es kann somit zusammengefaßt werden, daß die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Tonmineralen, Organobentonit und chemischen Porenlösungen mannigfaltig und die daraus entstehenden, möglichen Änderungen im bodenphysikalischen Verhalten auch mit bestem wissenschaftlichen Verständnis nicht zuverlässig vorhersehbar sind. Verallgemeinerungen, Übertragungen auf andere Böden bzw. Korrelationen zwischen Tonmineralbestand, Porenflüssigkeit und geotechnischen Kennwerten sind daher nur mit besonderer Vorsicht durchzuführen.

6.1.3 Prüfflüssigkeit Triethanolamin

Die Frage der Modellflüssigkeit zur Simulation bestimmter Deponiezustände ist ein viel diskutiertes und umstrittenes Thema (Kap. 2.4). Zur Vereinheitlichung der Untersuchungen und Vereinfachung der Interpretation der Ergebnisse empfiehlt der Arbeitskreis GDA "pH-stabilisiertes Deponiesickerwasser" oder eine Prüfflüssigkeit zu verwenden, die nach Erfahrung über die Zusammensetzung eines Deponiesickerwassers ausgewählt werden soll. Wenn keine Erfahrungswerte vorliegen, sollten eine anorganische und organische

Säure und eine Metallsalzlösung bestimmter Zusammensetzung verwendet werden. Ebenso wird das in dieser Dissertation ebenfalls benutzte, synthetische Sickerwasser für Durchlässigkeitsuntersuchungen empfohlen.

Eignungsuntersuchungen mit einem natürlichen Deponiesickerwasser ergeben situationsgebundene Erkenntnisse, deren generelle Übertragung auf eine bestimmte Deponieklasse und auf die Lebensdauer einer Deponie daher unzulässig und nicht repräsentativ ist.

Da die in einem Müllkörper stattfindenden chemischen, biologischen und physikalischen Prozesse vielfältig und spezifisch sind, ist eine mögliche Sickerwasserzusammensetzung schwer abzuschätzen. Die Verwendung der vier von dem GDA-Arbeitskreis vorgeschlagenen Chemikalien für die Eignungsversuche ergibt unterschiedliche Ergebnisse, die eine Prognose für den Einbauzustand nicht sicher zulassen. Nach Meinung der Autorin sind daher für eine Folgenabschätzung eines Sickerwasserdurchtritts Modellflüssigkeiten oder auch flüssige Modellmischungen nicht ausreichend.

In Abb. 6.2 erkennt man, daß das natürliche Deponiesickerwasser die Plastizität aller unvergüteten Böden und fast aller Mischungen (Ausnahme: Tertiärton mit 6% Organobentonit) erhöht. Das synthetische Sickerwasser, das das Deponiesickerwasser während der Anfangsphase simulieren soll, bewirkt bei allen Mischungen, mit Ausnahme des unvergüteten Lößlehms, eine deutliche Reduktion der Plastizität im Vergleich zu Wasser und natürlichem Sickerwasser. Den größten und den dem natürlichen Sickerwasser ähnlichsten Einfluß auf die Plastizität hat für alle drei Böden die 1%ige Triethanolaminlösung. Sie wurde deshalb für die weiteren Eignungsuntersuchungen verwendet. Die Wahl der Testflüssigkeit erfolgte demnach nicht nach dem Kriterium "chemisch ähnliche Reaktionen wie Deponiesickerwasser", sondern eine Flüssigkeit sollte gefunden werden, die das bodenphysikalische Verhalten des Abdichtungsmaterials ähnlich beeinflusst wie das Deponiesickerwasser.

6.2 "Kontaktversuche" mit Wasser und Triethanolamin

Unter "Kontaktversuche" werden diejenigen Versuchsarten verstanden, bei denen trockener, zerkleinerter Boden mit einer Flüssigkeit in Kontakt gebracht wird und dabei das Verhalten der Probe und der Verlauf der Flüssigkeitsaufnahme beobachtet wird. Ein Kontaktversuch zwischen Boden und Wasser ist der Wasseraufnahmeversuch nach ENSLIN-NEFF, der im Jahr 1995 genormt wurde (DIN 18132). Andere chemische Lösungen können ebenfalls mit dieser Versuchsausrüstung getestet werden, wobei deren besondere chemisch-physikalischen Eigenschaften im Versuchsablauf Berücksichtigung finden müssen, um eine korrekte Flüssigkeitsaufnahme bestimmen zu können. Nach

SCHRÖDER (1993) kann der Verlauf eines *Wasseraufnahmeversuchs* zusammengefaßt in folgende Abschnitte eingeteilt werden:

1. Aufnahme von *Adsorptionswasser* entweder nur an den äußeren Tonmineraloberflächen bei allen Tonmineralarten oder auch in den Zwischenschichträumen bei quellfähigen Tonmineralen (Hydratation der Kationen)
2. Aufnahme von *Kapillarwasser* (infolge von Kapillarkräften aufsteigendes Wasser)

Wenn der Begriff "Wasser" durch "polare Flüssigkeit" ersetzt wird, kann diese Aufteilung sinngemäß ohne Einschränkung auf Aufnahmeversuche mit polaren Testchemikalien übertragen werden. Die Dauer und die zeitliche Reihenfolge der Vorgänge sind von der Zusammensetzung des Festkörpers und der Art der Porenlösung abhängig. So kann zum einen die Wasseraufnahmefähigkeit feinkörniger Böden durch eine Organobentonit-Zugabe beeinträchtigt werden, zum anderen kann eine veränderte Porenlösung das Verhalten toniger Böden verändern. Die Untersuchung der Organobentonit-Mischungen mit einer chemischen Testlösung erfaßt somit zwei sich überschneidende Vorgänge.

6.2.1 Flüssigkeitsaufnahmevermögen des Organobentonits

Abb. 6.5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme und der Triethanolamin-Aufnahme des Organobentonits und zum Vergleich die Wasseraufnahme eines aktivierten Calcium-Bentonits. Bemerkenswert ist, daß sich die Aufnahmen von Wasser und Triethanolamin bei dem Organobentonit innerhalb der 24 Stunden kaum voneinander unterscheiden. Es ist davon auszugehen, daß das Wasseraufnahmevermögen des Organobentonits nicht durch die geringe Menge an Triethanolamin (1 %) beeinflusst wird. Die Konzentration der veränderten Porenlösung genügt somit nicht, eine Änderung der Kapillarkräfte bzw. des Quellvorgangs im Organobentonit innerhalb 24 Stunden zu verursachen.

Weiter ist zu beobachten, daß der Organobentonit im Gegensatz zum aktivierten Calcium-Bentonit erst nach 10minütiger Versuchsdauer Flüssigkeit anzusaugen beginnt und dieser Vorgang selbst nach 24 Stunden noch nicht beendet ist. Die Fähigkeit des verwendeten Organobentonits, Wasser kapillar anzusaugen bzw. zu binden, ist wegen der organischen Belegung und der dadurch entstehenden Abstoßungskräfte zwischen Wasser und Partikeln eingeschränkt. Man spricht deshalb auch von erschwerter Benetzbarkeit und Hydrophobie des Organobentonits. Nach dieser verzögerten Anfangsphase tritt wie beim Calcium-Bentonit ein als erhöht eingestuftes Quellvorgang ein, und die Aufnahmewerte übertreffen die von herkömmlichen Tonböden.

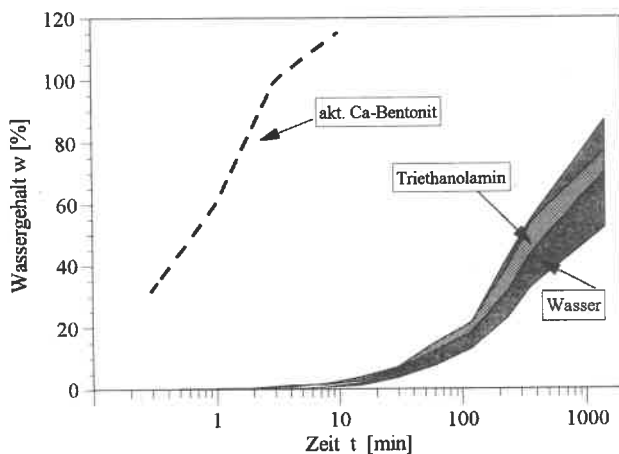


Abb. 6.5: Flüssigkeitsaufnahme von Organobentonit und aktiviertem Calcium-Bentonit (Natrium-Bentonit)

Es wurde festgestellt, daß die empfohlene Versuchsdauer von 24 Stunden für eine ausreichende Beurteilung der Auswirkungen eines Chemikalienkontakts auf den Organobentonit zu kurz ist. Die Annahme des GDA-Arbeitskreises, während dieser Versuchsdauer qualitative Aussagen über die chemische Beständigkeit des Abdichtungsmaterials machen zu können, ist für diese Untersuchungen nicht zutreffend. Wenn die Versuchszeiträume entsprechend verlängert werden würden, müßten besondere Vorsorgemaßnahmen zur Berücksichtigung der Fehlereinflüsse getroffen werden. Versuchsfehler könnten ansonsten auftretende Effekte überdecken.

6.2.2 Wasseraufnahme der Organobentonit-Mischungen

Von allen Boden-Organobentonit-Mischungen wurde nach der in Kap. 4.2.3 beschriebenen Weise das Wasseraufnahmevermögen bestimmt. Die Werte sind in Tab. 6.2 und dessen Verläufe in Abb. 6.6 graphisch als Mittelwertkurven aus mindestens vier Versuchen dargestellt.

Alle drei Bodenarten ohne Organobentonit zeigen nach ca. 1 Minute einen konstanten Wassergehalt. Dieser maximale Wassergehalt, oder auch Wasseraufnahmevermögen w_A genannt, nimmt mit zunehmendem Anteil an quelfähigen Tonmineralien im Boden und

somit mit zunehmender Plastizität erwartungsgemäß zu (DIN 18132, Tab. 2). Zum Zwecke des Vergleichs werden die Wassergehalte aller drei Bodenarten nach 4 Stunden Versuchsdauer als das Wasseraufnahmevermögen w_A definiert (bis zu diesem Zeitpunkt annähernd keine weitere Wasseraufnahme (DIN 18132)). Lößlehm liegt mit einem Wasseraufnahmevermögen von $w_A = 62\%$ im Bereich "niedrig bis mittel", was charakteristisch für leicht bis mittelplastische Tone ist. Mit einem Wert von 72% wird das Wasseraufnahmevermögen von Opalinuston als mittel eingestuft und ist typisch für mittelplastische Tone. Tertiärton zeigt den größten Wert mit 93% und korreliert damit ebenso mit seinen plastischen Eigenschaften (TA). Sowohl bei Opalinuston als auch bei Tertiärton wurde nach einer ersten Beruhigung der Wasseraufnahme eine weitere Zunahme des Wassergehalts festgestellt (Abb. 6.6). Diese Erscheinung wird als Quellverhalten interpretiert und ist nach 24 Stunden noch nicht abgeschlossen. Je größer das Wasseraufnahmevermögen und je länger die Zeit bis zu einem konstanten Verlauf sind, um so aktiver sind die Feinstbestandteile und um so größer ist das Quellvermögen des Bodens.

Organo- bentonit- anteil	Lößlehm		Opalinuston		Tertiärton	
	nach 4 h	nach 24 h	nach 4 h	nach 24 h	nach 4 h	nach 24 h
0 %	62	64	72	79	93	104
3 %	51	53	51	62	67	88
6 %	22	30	26	45	21	47

Tab. 6.2: Wassergehaltswerte der Mischungen nach 4 und 24 Stunden Versuchsdauer in [%]

Eine 3 %-Zugabe von Organobentonit reduziert bei allen Böden die Wasseraufnahme. Bei einer weiteren Erhöhung der Dosierung steigen die Kurven kontinuierlich an und erreichen innerhalb 24 Stunden kein Maximum. Die Aufnahme des Wassers sofort nach Versuchsbeginn wird somit deutlich durch die Hydrophobie des Organobentonits bestimmt (Abb. 6.6). Dabei kann das Porenwasser infolge verringerter Kapillarkräfte nicht mehr so schnell und so hoch in der Bodenprobe aufsteigen. Man kann dies vor allem bei 6 %-Mischungen beobachten, die auch nach 24 Stunden nicht vollständig durchfeuchtet waren. Aufgrund des langsam beginnenden, aber erhöhten Quellvermögens des Organobentonits scheinen sich die Kurven der Ausgangsmaterialien und deren Mischungen einem gemeinsamen Endwert zu nähern. Die zu Versuchsbeginn geringe Wasseraufnahme der Mischungen wird durch das später stattfindende Quellen des Organobentonits kompensiert. Die leicht erhöhende Wirkung des Organobentonits auf die Plastizität der Böden spiegelt sich somit nicht im Wasseraufnahmeverhalten der Mischungen wider.

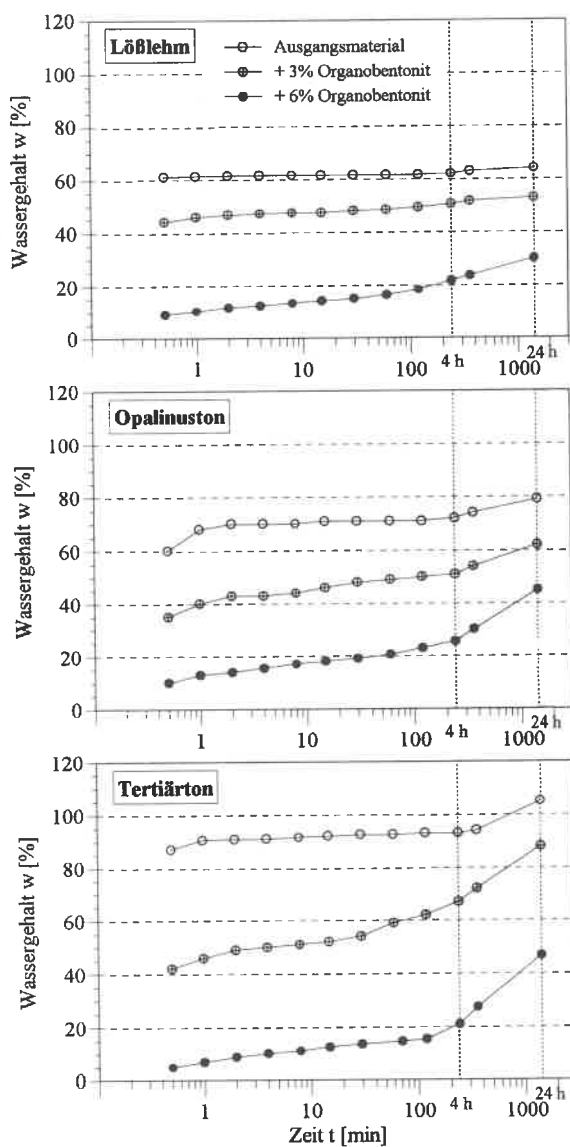


Abb. 6.6: Wasseraufnahme der Mischungen; Mittelwertkurven aus mind. 4 Einzelversuchen

6.2.3 Auswirkungen von Triethanolamin auf Kapillarkräfte und Quellvermögen

Um die Auswirkungen von Deponiesickerwässern bzw. sonstiger Testflüssigkeiten auf das Quellverhalten der Abdichtungsmaterialien beurteilen zu können, wurden Aufnahmeversuche mit der für weitere Untersuchungen ausgewählten Triethanolaminlösung, den drei Böden und deren Organobentonit-Mischungen durchgeführt.

Die Untersuchung der Triethanolamin-Aufnahme der Boden-Organobentonit-Mischungen ergab die in Tab. 6.3 dargestellten bezogenen Werte in Abhängigkeit des Organobentonit-Gehalts in der Mischung. Diese Werte ergeben sich, wenn der "Wassergehalt" während der Triethanolamin-Aufnahme auf den Wassergehalt während der Wasseraufnahme bezogen wird. Unter der Annahme, daß nach 4 Stunden das Ansaugen der Flüssigkeit infolge Kapillarkräfte beendet ist, und danach der reine Quellvorgang beobachtet werden kann, wurden bevorzugt die Werte nach 4 und 24 Stunden Versuchsdauer analysiert.

Organo- bentonit- anteil	Löblehm		Opalinuston		Tertiärton	
	nach 4 h	nach 24 h	nach 4 h	nach 24 h	nach 4 h	nach 24 h
0 %	0,94	0,84	1,06	0,94	1,01	0,93
3 %	0,97	0,83	1,08	0,91	1,00	0,86
6 %	0,98	0,86	1,10	0,89	1,00	0,89

Tab. 6.3: Bezogene Wassergehaltswerte der Organobentonit-Mischungen nach zwei Versuchszeitpunkten

Die Versuche zeigten, daß nach vierstündiger Versuchsdauer bei Löblehm und seinen Mischungen die Werte für Triethanolamin geringer als die mit Wasser sind (Tab. 6.3). Opalinuston und Tertiärton nehmen nach 4 Stunden eine gleiche bis leicht erhöhte Triethanolamin-Menge im Vergleich zur Wassermenge auf. Nach 24 Stunden ist die Triethanolamin-Aufnahme jedoch bei allen Mischungen geringer als die Wasseraufnahme.

Die Triethanolaminlösung beeinflusst nur beim Löblehm und Opalinuston deren Aufnahmevermögen innerhalb der ersten 4 Stunden. Infolge geringer wirkender Kapillarkräfte zwischen Triethanolamin und Löblehmpartikel verringert sich der Aufnahmewert im Vergleich zur Wasseraufnahme. Die andere Kornverteilung und Tonmineralzusammensetzung im Opalinuston verursacht mit Triethanolamin ansteigende Kapillarkräfte und erhöhte Aufnahme nach 4 Stunden. Die Adhäsionskräfte im Tertiärton, aber auch in

seinen Mischungen werden durch die veränderte Porenlösung kaum verändert. Die Wassergehaltswerte der Lößlehm- und Opalinuston-Mischungen steigen mit zunehmendem Organobentonit-Gehalt. Organobentonit im Boden und Triethanolamin in den Poren bewirken eine Erhöhung der Kapillarkräfte.

Der Quellvorgang mit Triethanolamin ist sowohl bei allen unvergüteten Böden als auch bei deren Mischungen mit Organobentonit weniger ausgeprägt als das Quellen mit Wasser. Die Zwischenschichten der Tonmineralien können infolge der veränderten Porenlösung nicht mehr in dieser Weise aufgeweitet werden. Im Gegensatz zum Organobentonit werden die tonigen Böden durch die geringe Konzentration an Triethanolamin in ihrem Quellverhalten beeinflusst.

6.3 Verdichtbarkeit

Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen befaßten sich mit den Auswirkungen einer künstlichen Verdichtung auf die geotechnischen Eigenschaften mineralischer Schüttstoffe (Kap. 2.3). Dabei kam man zu dem Ergebnis, daß durch eine Verdichtung mit eventuellem Wasserzusatz die Zusammendrückbarkeit verbessert, die Kohäsion (Abb. 2.7) erhöht und sogar die Durchlässigkeit vermindert werden kann.

Die nach einer dynamischen Verdichtung erzielbaren Trockendichten variieren mit der Zusammensetzung des mineralischen Dichtungsmaterials und seinen Wassergehalten. Wie in Tab. 6.4 zu erkennen ist, sinkt die Proctordichte vom Lößlehm über den Opalinuston zum Tertiärton, während der optimale Wassergehalt ansteigt. Dies ist zum einen auf den Tonanteil in den Böden und zum anderen auf die Affinität der enthaltenen Tonminerale zum Wasser zurückzuführen. In der Reihenfolge Lößlehm, Opalinuston, Tertiärton nimmt sowohl der Feinstanteil als auch der Gehalt an quellfähigen Tonmineralen zu (Tab. 3.2). Der für die Ausbildung der Doppelschichten notwendige Wassergehalt steigt in der Reihenfolge Kaolinit, Illit und Smektit an. Im Vergleich zu Kaoliniten und Illiten binden Smektite demnach im Verhältnis zu deren Gewicht ein Vielfaches an Wasser. Unter Zugrundelegung der Kornverteilung und der tonmineralogischen Zusammensetzung der untersuchten Ausgangsböden ist eine Erhöhung des optimalen Wassergehalts in der o.g. Reihenfolge gerechtfertigt. Die Proctordichten nehmen infolge der größeren Wassereinlagerung entsprechend ab.

	Lößlehm	Opalinuston	Tertiärton
Optimaler Wassergehalt w_{pr} [%] (Standardabweichung)	16,5 (0,67)	19,0 (0,90)	21,0 (0,74)
Proctordichte ρ_{pr} [g/cm ³] (Standardabweichung)	1,76 (0,02)	1,67 (0,02)	1,65 (0,02)

Tab. 6.4: Proctorwerte der unvergüteten Ausgangsböden (Mittelwerte und Standardabweichung)

In Abb. 6.7 sind die Kurven der Organobentonit-Mischungen zu den jeweiligen Böden gezeichnet. Man erkennt, daß auch bei verdichteten, mit Organobentonit vergüteten Böden das theoretische Verständnis des Proctorversuchs bzw. der Kurvenverläufe, wie es in Kap. 2.3 beschrieben wurde, gilt: Danach wirkt das vorhandene bzw. zugegebene Wasser als "Schmiermittel" zwischen den Boden- und Organobentonit-Partikeln und erleichtert deren relative Bewegung. Bei relativ niedrigem Wassergehalt ($w < w_{pr}$) wirken die Reibungskräfte zwischen den Bodenteilchen der aufgebrachten äußeren Kraft entgegen und verhindern eine dichte Lagerung. Das Gefüge bleibt dabei weitgehend erhalten. Mit zunehmendem Wassergehalt verkleinern sich die Reibungskräfte und der Porenanteil nimmt solange ab, bis die Poren soweit mit Wasser gefüllt sind, daß eine weitere Verkleinerung des Porenraums nicht mehr stattfinden kann ($w = w_{pr}$). Bei diesem optimalen Wassergehalt bewirkt die "Schmierwirkung" eine Einregelung der Bodenpartikel zu einer "dichten Packung", jedoch keine optimale Einregelung der Minerale. Bei hohem Wassergehalt ($w > w_{pr}$) wird ein Teil der Arbeit durch den sich aufbauenden Porenwasserdruck aufgenommen und steht somit nicht zur weiteren Verdichtung des Materials zur Verfügung. Bei weiterem Anstieg des Wassergehalts ($w \gg w_{pr}$) und annähernd konstantem Sättigungsgrad werden mehr Hohlräume mit Wasser gefüllt. Folglich sinkt die Proctordichte, wobei die Tonminerale dabei weitgehend parallel angeordnet, und die Struktur dispers ist. Bei einem Wassergehalt $w \approx w_{opt} + 2\%$ sind bereits die Bodenaggregate zerstört, und eine weitgehende Parallelisierung der Tonteilchen (disperses Gefüge) hat stattgefunden.

Wenn die Proctordichten und die optimalen Wassergehalte der Organobentonit-Mischungen auf die Werte der unvergüteten Böden bezogen und den Organobentonit-Gehalten in der Mischung gegenübergestellt werden, ergeben sich die in Abb. 6.8 dargestellten Verläufe. Man erkennt, wie die Proctorwerte durch eine Organobentonit-Vergütung verändert werden.

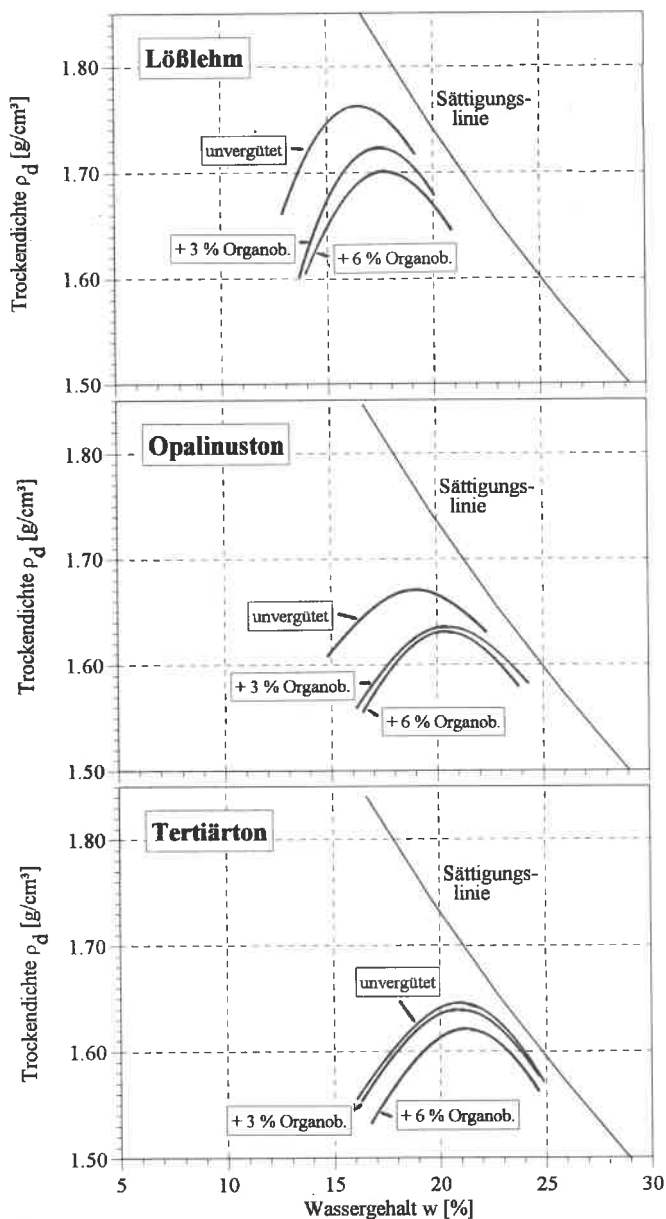


Abb. 6.7: Proctorkurven der Organobentonit-Boden-Mischungen

Eine Zugabe von 6 % Organobentonit hatte eine Reduzierung der Proctordichte um maximal 3 % bei gleichzeitiger Erhöhung des optimalen Wassergehalts um maximal 10 % zur Folge. Ähnlich wie bei den Plastizitätsänderungen infolge Organobentonit-Zugabe ist dies auf die relative Erhöhung des Feinstanteils bzw. der quellfähigen Tonminerale zurückzuführen.

Es kann postuliert werden, daß der zugegebene Organobentonit wegen seinen teilweise hydrophoben Eigenschaften und seiner Zusammensetzung eine Aggregation der Bodenpartikel unterstützt, was eine Erhöhung des optimalen Wassergehaltes und eine Abnahme der Proctordichte bewirkt. Das zugegebene Wasser dringt infolge geringerer Kapillarkräfte nicht sofort in alle Poren vor, was dazu führt, daß der Scherwiderstand zwischen den Partikeln nahezu erhalten bleibt, und die Proctordichte des unvergüteten Bodens nicht erreicht wird. Um die Reibungskräfte in gleichem Maße wie bei unvergütetem Boden zu verkleinern, ist deshalb mehr Wasser notwendig, bis der Porenanteil minimal ist. Es kann entsprechend gefolgert werden, daß Zusatzmittel, die die optimalen Wassergehalte reduzieren und die Proctordichten erhöhen, die Anziehungskräfte zwischen den Bodenpartikeln vermindern und somit dispergierend wirken.

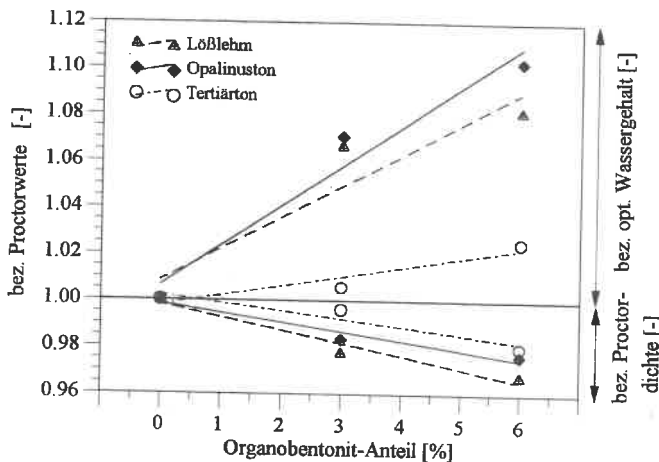


Abb. 6.8: Änderung der Verdichtungswerte infolge Organobentonit-Vergütung

Sowohl bei Opalinus- und Tertiärton als auch bei den jeweiligen Mischungen mit Organobentonit ergab eine deutlich längere Einwirkzeit von Wasser abnehmende Trockendichten. Infolge längerer Kontaktzeit mit Wasser vor der Verdichtung quellen die enthaltenen

Tonminerale. Mehr Wasser wird angelagert, was zu geringeren Trockendichten und höheren optimalen Wassergehalten führt. Der Quellvorgang in den Abdichtungsmischungen dauert länger als 24 Stunden an (Kap. 6.2), so daß dieser zwischen der Wasserzugabe und der Verdichtung auf der Baustelle noch nicht abgeklungen ist. Durch dieses Vorgehen erhält das Abdichtungsmaterial eine "innere Vorspannung", was die bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften indirekt verbessert.

Zur Beurteilung der Verdichtbarkeit eines Bodens können Proctorversuche vorab im Labor durchgeführt werden. Da die Durchführung zeitintensiv sein kann und die Plastizitätsgrenzen oftmals aus Erfahrung bekannt sind, können über Korrelationen zwischen der Fließgrenze und den Proctorwerten die zu erreichenden Dichten im Feld abgeschätzt werden. In Abb. 6.9 ist dieser Zusammenhang nach BJERRUM eingezeichnet und durch die Ergebnisse der Organobentonit-Mischungen ergänzt. Man erkennt, daß sich die Versuchspunkte der Organobentonit-Mischungen innerhalb der Bandbreiten bewegen. Die Korrelation kann somit auch für Mischungen mit Organobentonit angewendet werden, wobei der Anteil der Vergütung keine wesentliche Rolle spielt.

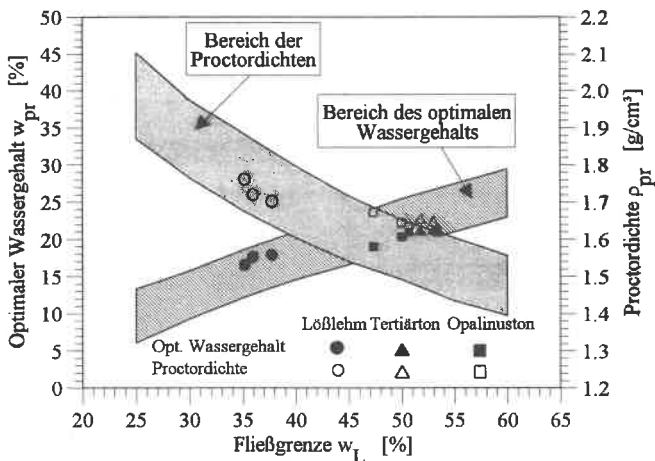


Abb. 6.9: Abhängigkeit der Proctorwerte von der Fließgrenze nach BJERRUM (1952)

6.4 Durchströmungsverhalten

6.4.1 Versuche zur Abschätzung des Durchlässigkeitsverhaltens

Da aussagekräftige Durchlässigkeitsuntersuchungen in der WD-Anlage je nach untersuchter Bodenprobe lange andauern können, wurden zuvor Schlämmanalysen mit Lößlehm und Tertiärton durchgeführt, um mögliche Reaktionen schnell abzuschätzen. Dabei wurden zum einen der Einfluß des in der Schlämmanalyse normalerweise verwendeten Dispergierungsmittels, zum anderen die Auswirkungen einer Zugabe von Organobentonit und die Folgen einer veränderten Porenflüssigkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 6.5 zusammengefaßt.

Feinstanteil von Lößlehm mit Wasser / mit Triethanolamin (1 %) in [%]			
ohne Organobentonit		mit 6 % Organobentonit	
mit Disp. mittel	ohne Disp. mittel	mit Disp. mittel	ohne Disp. mittel
20 / 22	19 / 22	17 / 12	4 / 4
Feinstanteil von Tertiärton mit Wasser / mit Triethanolamin (1 %) in [%]			
ohne Organobentonit		mit 6 % Organobentonit	
mit Disp. mittel	ohne Disp. mittel	mit Disp. mittel	ohne Disp. mittel
42 / 41	19 / 17	39 / 41	5 / 6

Tab. 6.5: Ergebnisse der Schlämmanalysen

Natriumpyrophosphat wird in der Schlämmanalyse nach DIN 18123 zur Aufspaltung der Tonaggregate eingesetzt und ermöglicht eine genauere Bestimmung des Feinstanteils $< 2 \mu\text{m}$. Dabei werden die positiv geladenen Kanten der Tonminerale umgeladen, und es kommt zu einer Abstoßung zwischen den negativen Flächen und den negativen Kanten der Tonpartikel. Im Idealfall werden die Kontakte zwischen den Teilchen aufgelöst, und es kommt zu einer Parallelorientierung der Kristalle. Die Auswirkungen des veränderten Kräftespiels sind besonders beim Tertiärton zu beobachten, der ohne Dispergierungsmittel einen ähnlichen Feinstanteil wie Lößlehm besitzt. Das Dispergierungsmittel erhöht den Wert um das Doppelte; beim Lößlehm wurden kaum Änderungen registriert. Somit ist bei diesen beiden Bodenarten nicht das Kanten-Flächen-Verhältnis der Tonminerale für eine Gefügeänderungen entscheidend, vielmehr bestimmt der tatsächlich vorhandene Tonanteil

im Boden die endgültige Struktur. Die Verwendung eines Dispergierungsmittels für Schlämmanalysen hat deshalb vorwiegend bei mittel bis ausgeprägt plastischen Tonen eine entscheidende Bedeutung.

Bei den Boden-Organobentonit-Mischungen trat trotz Dispergierungsmittel ein Ausflocken auf, das nur optisch und nicht beim Vergleich der Kornverteilungskurven erkennbar war. Daher läßt sich die Korngrößenverteilung als Korrelationsgröße für bodenmechanische Eigenschaften der Mischungen nicht heranziehen, da ähnliche Korngrößenverteilungen sowohl für das Ausgangsmaterial als auch für die koagulierte Organobentonit-Mischung ermittelt wurden.

Durch den eingemischten Organobentonit wird der Feinstanteil beider Böden geringer bestimmt. Am deutlichsten ist dies bei den Schlämmanalysen ohne Dispergierungsmittel zu erkennen. Dies steht im Widerspruch zu der Tatsache, daß Organobentonit selbst einen hohen Feinstkornanteil besitzt und somit diesen bei jeder Bodenart theoretisch erhöhen müßte. Infolgedessen bewirkt der Organobentonit ein Zusammenhaften der Bodenpartikel, das selbst durch das verwendete Dispergierungsmittel nicht vollständig verhindert werden kann. Scheinbar größere Partikelabmessungen werden nunmehr ermittelt. Die Mischungen zeigen ein Kartenhausgefüge, das mit zunehmendem Organobentonit-Gehalt ausgeprägter wird.

Das Aufschlämmen der Proben mit der Triethanolaminlösung zeigte weder beim Lößlehm noch beim Tertiärton deutliche Veränderungen im Feinstkornanteil. Auch bei den Mischungen mit Organobentonit wird keine Auswirkung auf die Aggregation der Teilchen festgestellt. Unabhängig von der Tonmineralzusammensetzung bewirkt der basische pH-Wert der Lösung keine merkliche Umladung der Tonmineralkanten; die Bildung einer dispersen Struktur wurde somit nicht unterstützt. Es kann davon ausgegangen werden, daß höhere Lösungskonzentrationen sowohl Änderungen in den elektrischen Eigenschaften der Tonminerale und als auch im Gefüge hervorrufen.

Da die Bodenproben während der Durchströmungsversuche in der WD-Anlage mit unbehandeltem Leitungswasser bzw. Triethanolaminlösung beaufschlagt wurden, können auch nur Schlämmanalysen ohne Dispergierungsmittel Aufschluß über mögliche Gefügeänderungen in der Bodenprobe im Zusammenhang mit der Durchströmung geben.

Folgende Thesen können nun für die Durchströmungseigenschaften formuliert werden:

- ☐ Böden, deren Feinstanteil mit Dispergierungsmittel deutlich höher als ohne bestimmt wurde, zeigen geringere Durchlässigkeitsbeiwerte als Böden, bei denen keine Auswirkung des Dispergierungsmittels beobachtet wird.

- Die Zugabe von Organobentonit unterstützt eine Aggregation der Teilchen. Eine Kartenhausstruktur mit großen, durchflußwirksamen Poren entsteht, die eine Erhöhung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Organobentonit-Zugabe zur Folge hat.
- Mögliche Wechselwirkungen zwischen Chemikalie und Boden sind während der Schlämmanalysen deutlicher erkennbar als bei Durchströmungsversuchen, weil die benetzbaren Oberflächen in einer Suspension größer sind. Da das Aufschlämmen der Böden mit Triethanolaminlösung keine Aggregation zeigt, kann davon ausgegangen werden, daß eine Durchströmung der Proben mit dieser Chemikalienlösung kaum eine Veränderung der Durchlässigkeit bewirkt.
- Ob der Organobentonit oder der Boden durch eine Chemikalie quillt, kann allein durch Schlämmanalysen nicht eindeutig festgestellt werden. Zur Beurteilung dieses Phänomens müßten zusätzlich Wasseraufnahmeversuche oder Quellversuche (HUDER/AMBERG, KAISER/HENKE) durchgeführt werden. Durch einen Quellvorgang innerhalb der verdichteten Bodenproben kann die Durchlässigkeit ebenfalls reduziert werden.

6.4.2 Zusammenhang zwischen Gefüge und Durchlässigkeit

Das bodenmechanische Verhalten eines künstlich verdichteten Tons wird durch sein Gefüge zum Zeitpunkt der Verdichtung maßgebend charakterisiert, unabhängig wohin sich die Verdichtungspunkte infolge Sättigung und Abschervorgang im Proctordiagramm hinbewegen. RILLING (1994) spricht deshalb von einem "Gedächtnis des Bodens". Er ermittelte für denselben Lößlehm Linien gleicher effektiver Kohäsion mit Hilfe von CD-Versuchen an laborverdichteten Proben.

Unter Berücksichtigung strukturspezifischer Überlegungen und den Erkenntnissen u.a. von RILLING kann das Modell von LAMBE (Abb. 2.6) erweitert werden, indem Linien gleichen Gefüges oder gleichen Dispergierungsgrades in das Proctordiagramm eingetragen werden. Abb. 6.10 läßt erkennen, daß Bodenproben mit unterschiedlichen Kombinationen aus Wassergehalt und Trockendichte dieselbe Struktur bzw. ähnliche Porengeometrien aufweisen und sich deshalb hydraulisch und mechanisch ähnlich verhalten können. So läßt sich das Gefüge eines verdichteten Bodens durch weitere Verdichtung in ein geordnetes Gefüge mit höherem Dispergierungsgrad überführen. Je größer der Verdichtungsaufwand ist, desto stärker sind die Partikel ausgerichtet, und desto größer ist der Dispergierungsgrad des Bodens. Ein Boden, dessen Wassergehalt bei gleichbleibender Dichte erhöht wird, oder der mit unverändertem Wassergehalt weiter verdichtet wird, kann nach beiden Vorgängen dieselbe Struktur bzw. dieselben geotechnischen Eigenschaften besitzen.

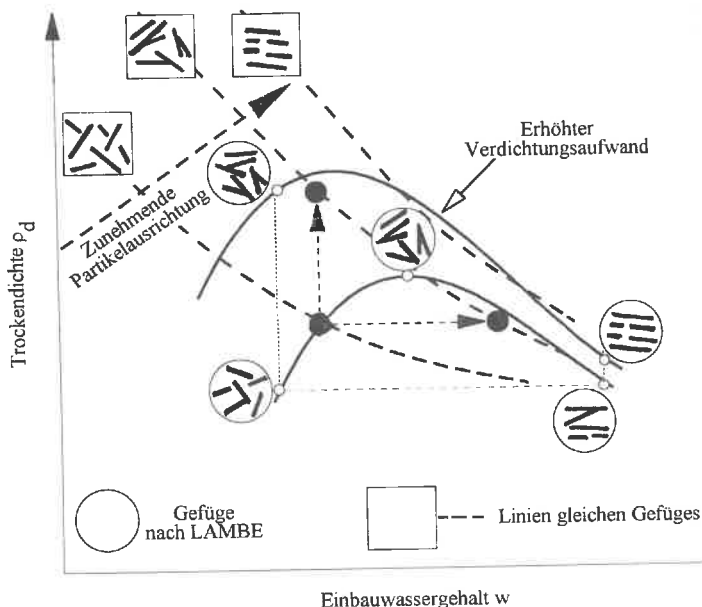
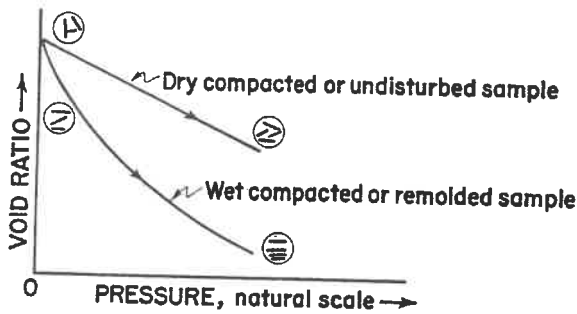


Abb. 6.10: Linien gleichen Gefüges

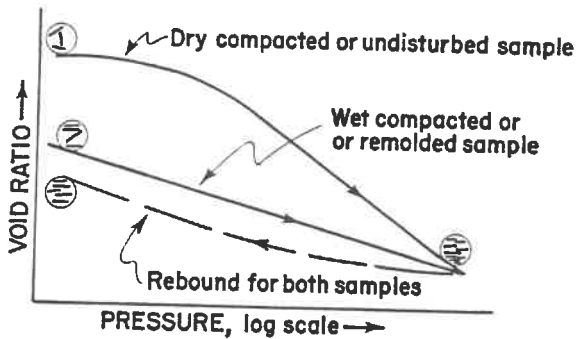
Diese Interpretation des Modells von LAMBE kann Grundlage für viele, die Bodenmechanik und Hydraulik betreffenden, strukturabhängigen Zusammenhänge sein. So wird bei einem Vergleich der Kurven gleicher effektiver Kohäsion von RILLING (Abb. 2.7) und der Linien gleichen Gefüges deutlich, daß deren Verläufe ähnlich sind. Der gefundene Zusammenhang zwischen Verdichtung und Kohäsion nach RILLING ist somit nach einer Berücksichtigung des jeweiligen Gefüges erst logisch nachvollziehbar: Je disperser die Struktur des künstlich verdichteten Bodens ist, desto größer ist seine effektive Kohäsion.

Diese Überlegungen können nun konsequenterweise auf alle strukturabhängigen Größen der Geotechnik ausgedehnt werden. LAMBE (1958 a) beschrieb die theoretischen Auswirkungen eines eindimensionalen Verdichtungsdrucks auf die Struktur eines natürlichen und gestörten, verdichteten Tones mit unterschiedlichen Konsolidationsdrücken. Danach ist das Setzungsverhalten eines Tones ebenfalls strukturabhängig (Abb. 6.11). Nach

Auffassung der Autorin müßten deshalb in Anlehnung an das Vorgehen von RILLING Linien gleicher Steifemoduln in das Proctordiagramm eingetragen werden können.



a. LOW PRESSURE CONSOLIDATION



b. HIGH PRESSURE CONSOLIDATION

Abb. 6.11: Auswirkung einer eindimensionalen Verdichtung auf die Struktur (LAMBE, 1958 a)

Neben den mechanischen müssen auch die hydraulischen Merkmale eines verdichteten Tons mit dieser Theorie beschreibbar sein, da dessen Durchlässigkeit direkt von der vorhandenen Porengeometrie und somit von dem Gefüge abhängig ist. In Anlehnung an das Vorgehen von RILLING zur Bestimmung der Linien gleicher Scherfestigkeit wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte für Lößlehm ohne Organobentonit in ein Diagramm eingetragen, in welchem der Zusammenhang zwischen Trockendichte und Sättigungsgrad über

eine Hyperbelschar $\rho_d(S_r)$ mit dem Wassergehalt w als Scharparameter aufgezeigt wird (Anhang 12, Abb. A9). Werden die k -Werte aller (mit Wasser und mit Triethanolamin) durchströmten Proben in dieses ρ_d - S_r -Diagramm eingezeichnet, so lassen sich Geraden gleicher Durchlässigkeit eintragen (Der Einfluß von Triethanolamin auf die Durchlässigkeit wird auf S. 125 erläutert.). Überträgt man die Schnittpunkte der Wassergehaltslinien mit den Linien gleicher Durchlässigkeit in das Proctordiagramm, erhält man die in Abb. 6.12 dargestellten Verläufe. Die dargestellten Durchlässigkeitskurven gelten nur für den untersuchten Lößlehm und nur für einen bestimmten Spannungszustand in der Probe während der Durchströmung (hier: mittlere Spannung in der Probe: $\sigma_m = 130 \text{ kPa}$). Die Verläufe sind für den Opalinuston und den Tertiärton ähnlich, wobei deren Durchlässigkeitsbeiwerte aufgrund ihrer größeren Plastizität entsprechend kleiner sind. Für geringere mittlere Spannungen in den Proben nehmen die k -Werte zu. Wie nach der beschriebenen Theorie zu erwarten ist, entsprechen die Durchlässigkeitslinien qualitativ den Linien gleichen Gefüges und ähneln denen gleicher effektiver Kohäsion.

Auf der trockenen Seite der Proctorkurve sind die Bodenpartikel zu großen Aggregaten mit durchflußwirksamen Großporen und wenig Wasser verbunden. Bei gleicher Trockendichte und einem Wassergehalt auf der nassen Seite sind hingegen Festmasse und wassergefüllte Poren gleichmäßig verteilt. Die Porendurchmesser sind klein, und somit ist der Boden gering durchlässig. Tritt ein Quellen der Tonminerale auf, so werden die sehr kleinen, durchflußwirksamen Poren infolge der aufgeweiteten Doppelschichten vergrößert. Wird eine Volumenzunahme infolge Quellen durch eine äußere effektive Spannung behindert, so entsteht ein Quelldruck, der die größeren, durchflußwirksamen Poren zwischen den Tonaggregaten verkleinert, was zu einer geringeren Durchlässigkeit führt.

Bei Einbauwassergehalten, die geringer als der optimale sind, führt eine Vergrößerung der Verdichtungsenergie zu einer beträchtlichen Verkleinerung der Durchlässigkeit. Liegt der Einbauwassergehalt hingegen im Bereich des optimalen Wassergehalts, so wird durch eine größere Verdichtung eine geringere Abnahme des k -Werts erreicht. Eine geringe Durchlässigkeit hat ein verdichteter Boden, wenn sein Einbauwassergehalt etwa 1,5 % bis 3,5 % über dem optimalen Wassergehalt liegt und unter der Voraussetzung, daß er ausreichend verdichtet wurde. Die entsprechenden Trockendichten können geringer als die Proctordichte sein. Der optimale Bereich der Einbauwassergehalte und der Durchlässigkeit liegt bei ca. 97 % der Proctordichte auf der nassen Seite der Proctorkurve.

Dieser Tatsache wird auch in den Einbauanforderungen der TA ABFALL an die mineralische Basisabdichtung Rechnung getragen. An den punktierten Kurven in Abb. 6.12 ist ablesbar, daß bereits ein um 4 % veränderter Wassergehalt oder eine Trockendichtediffe-

renz von $0,1 \text{ g/cm}^3$ die Durchlässigkeit des Bodens um eine Zehnerpotenz ändert. Die besondere Vorsicht und die geforderte Sorgfalt bei der Herstellung von mineralischen Abdichtungsschichten haben somit ihre Rechtfertigung.

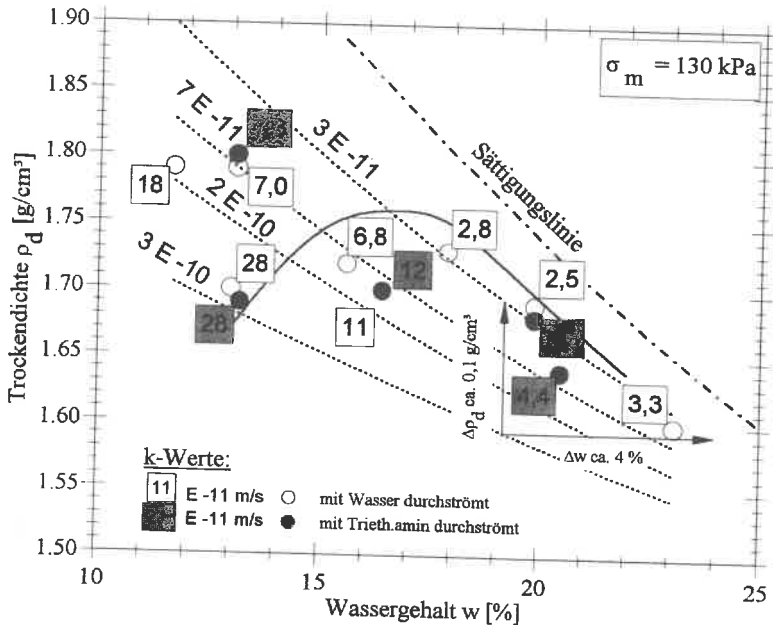


Abb. 6.12: Linien gleicher Durchlässigkeit für den unvergüteten Lößlehm

Geringer wirkende mittlere Spannungen in den Proben bzw. in der Abdichtungsschicht während einer Durchströmung bewirken flachere Kurvenverläufe und höhere Durchlässigkeitswerte. Das Bodengefüge verändert sich aufgrund der kleineren effektiven Spannungen nicht in dem Maße. Wie sich dabei Änderungen des Wassergehalts und der Trockendichte auf die Durchlässigkeit des Bodens auswirken, kann zu diesem Zeitpunkt nicht definitiv bestimmt werden. Weiterer Forschungsbedarf bestände darin zu klären, welcher Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Trockendichte, effektiver Spannung während der Durchströmung und Durchlässigkeit des Bodens besteht.

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, ist die Änderung der Bodenstruktur neben der Bodenart, der Verdichtungsart und -energie, der Wassermenge auch von eventuell enthaltenen Zusatzstoffen wie Organobentonit oder anderen Porenflüssigkeiten abhängig. Dieser Einfluß wird in dem folgenden Kapitel ausführlich besprochen.

6.4.3 Das Durchströmungsverhalten mit Organobentonit vergüteter Böden

Um das Durchlässigkeitsverhalten der mit Organobentonit vergüteten Böden zu verstehen, wurden Durchströmungsversuche mit Leitungswasser und Triethanolaminlösung (Tab. 3.3) durchgeführt. Das austretende Porenwasser wurde auf elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert untersucht. Eine eventuell auftretende Gleichgewichtsphase kann damit registriert werden, und mögliche Ionenanlagerungen bzw. Ionenausspülungen können qualitativ erfaßt werden. Die Versuchsdurchführung und die Randbedingungen wurden in Kap. 4.2.5 ausführlich dargestellt.

Spannung in der Probe während der Durchströmung

Für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts wird in den GDA-Empfehlungen das Triaxialgerät mit konstanter Druckhöhe empfohlen, wobei ein hydraulischer Gradient von $i = 30$ eingehalten werden soll. Wenn in der Prüfpraxis aus Zeitgründen schnell ein k -Wert für das mineralische Abdichtungsmaterial ermittelt werden soll, wird vor allem bei tonigem Material vorzugsweise der hydraulische Gradient erhöht. In Triaxialzellen bedeutet eine Erhöhung des Gradienten bei gleichbleibendem Sättigungsdruck eine Zunahme der Spannung in der Probe ($\sigma_m = \sigma_3 - \frac{1}{2} (p_2 + p_1)$). Dies führt zu Änderungen in der Porengeometrie der Probe, und zu geringe, nicht aussagekräftige Durchlässigkeiten werden bestimmt. So bewirkte eine Steigerung des hydraulischen Gradienten um 250 eine Zunahme der mittleren Spannung um 100 kPa. Die Folgen zeigt Abb. 6.14, wonach die Durchlässigkeit aller Opalinuston-Mischungen nach einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten deutlich abfiel.

Während der Eignungs- bzw. Qualitätsprüfungen sollte aus diesem Grund nur in Ausnahmefällen von dem vorgegebenen Gradient abgewichen werden. Muß dennoch mit erhöhtem Gradient durchströmt werden, ist auf die durchlässigkeitsreduzierende Wirkung der erhöhten Spannung in den Proben zu achten und entsprechend zu bewerten. Am Beispiel des Lößlehms wurde der Zusammenhang zwischen mittlerer Spannung in der Probe ($\sigma_m = \sigma_3 - \frac{1}{2} (p_2 + p_1)$) und Durchlässigkeit aufgezeigt (Abb. 6.13), wobei k_0 der Durchlässigkeitsbeiwert zu Beginn des Versuchs bei einem bestimmten hydraulischen Gradienten (hier: $i = 30$) und k_i der Durchlässigkeitsbeiwert nach einer Erhöhung des hydraulischen Gefälles bzw. Spannung in der Probe ist.

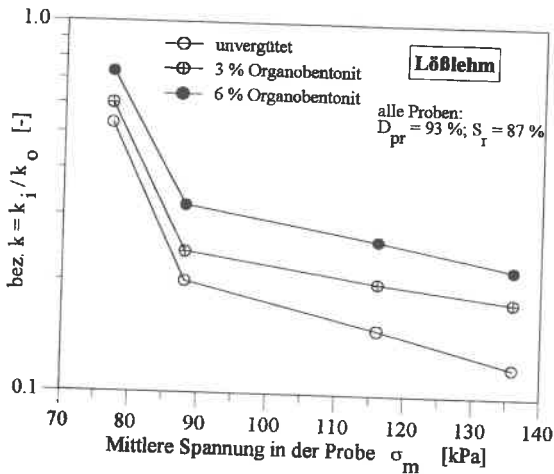


Abb. 6.13: Auswirkung unterschiedlicher hydraulischer Gradienten auf die Durchlässigkeit von Lösslehm

Beispielhaft für den zeitlichen Verlauf der Durchströmungsuntersuchungen und repräsentativ für sämtliche Durchlässigkeitsauswertungen sind in Abb. 6.14 sechs Durchströmungsversuche von Opalinuston-Proben ohne, mit 3 % und mit 6 % Organobentonit bei einer mittleren Spannung σ_m von 130 kPa dargestellt. Die Hälfte wurde mit der Triethanolaminlösung durchströmt, nachdem das Porenvolumen einmal mit Wasser ausgetauscht war. In den Diagrammen ist der Verlauf der Durchlässigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit des entnommenen Eluats über die Versuchsdauer aufgetragen.

Das Ende der Durchströmung wird einerseits durch einen konstanten Kurvenverlauf, andererseits durch die Porenaustauschrate (PAR) angezeigt. Die Porenaustauschrate gibt an, wie häufig das Porenvolumen durch die Prüflösung ersetzt wurde. Die Einbaudaten aller Proben lagen auf der nassen Seite der jeweiligen Proctorkurve und sind durch Verdichtungs- und Sättigungsgrad eindeutig definiert.

Während der Anfangsphase wurden bei allen Versuchen Differenzen zwischen der ein- und ausströmenden Wassermenge festgestellt. Dies führte zu anfänglich höheren, nicht repräsentativen Durchlässigkeitsbeiwerten, die nach abgeschlossener Sättigung, Konsolidation und Quellung der Proben einem kleineren Endwert zustreben. Diese Abnahme wurde bei allen Bodenarten festgestellt und war um so größer, je geringer der Verdichtungsgrad der Proben und je größer die wirksame mittlere Spannung in den Proben während des Versuchs waren.

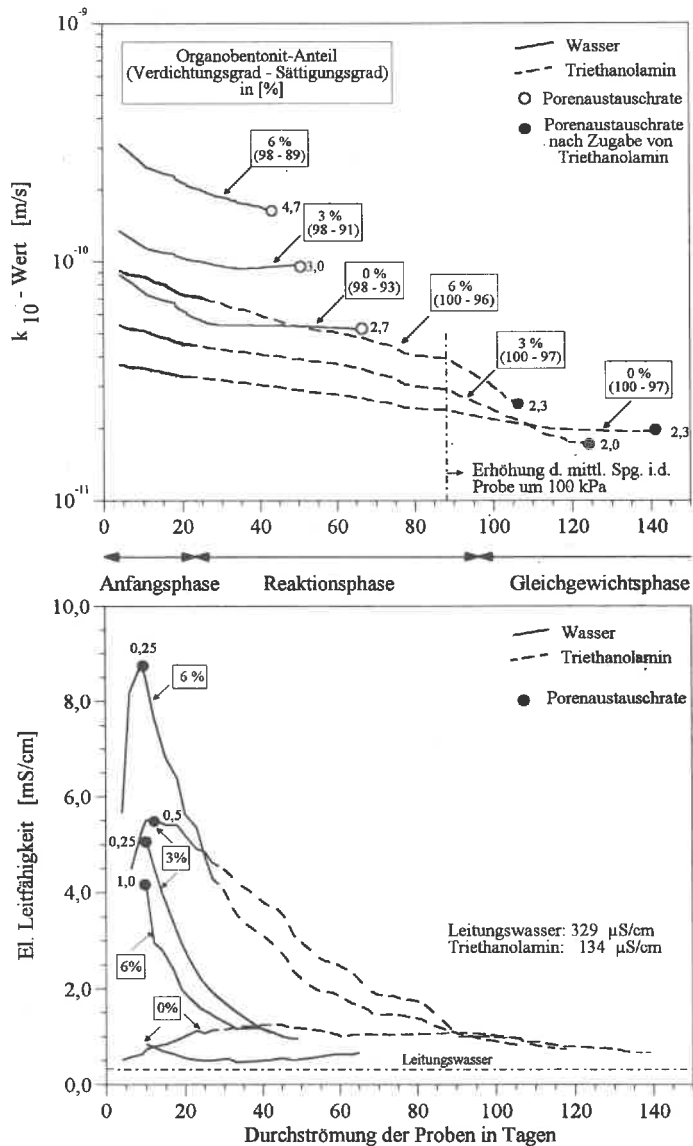


Abb. 6.14: Auswertung der Durchströmungsversuche mit Opalinuston und seinen Mischungen

Organobentonit und "Wasser"-Durchlässigkeit

Entsprechend den Vermutungen aus den Schlämmanalysen (Kap. 6.4.1) wächst die Durchlässigkeit der Opalinuston-Proben mit steigendem Organobentonit-Gehalt deutlich an (Abb. 6.14). Eine 3 %-Zugabe führt im Vergleich zum Ausgangsmaterial zu einer Erhöhung um 85 %. 6 % Organobentonit erhöht den k -Wert um mehr als das Doppelte. Aufgrund des teilweise hydrophoben Charakters des Organobentonits müssen die Porengeometrie und das Porenvolumen in den Proben in großem Maße beeinflusst werden. Das Gefüge verändert sich in Abhängigkeit der Organobentonit-Menge und bildet eine Kartenhausstruktur aus. Durchströmungsuntersuchungen im Kompressionsdurchlässigkeitsgerät von STOCKMEYER (1993) zeigten ebenfalls, daß eine Zugabe von Organobentonit zu einem schluffigen Sand die Bildung einer "geflockten" Struktur bewirken kann.

Aufgrund der zahlreich durchgeführten Durchlässigkeitsversuche mit Lößlehm konnte untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen Einbauzustand der Proben vor der Durchströmung und Organobentonit besteht. Dazu wurden die k -Werte der 3 %- und 6%-Mischungen in das Sättigungsgrad-Trockendichte-Diagramm eingetragen, wobei nur die Werte bei einer mittleren Spannung σ_m von 130 kPa verwendet wurden (Abb. 6.15). Man kann erkennen, daß auch bei den Organobentonit-Mischungen mit zunehmendem Sättigungsgrad und zunehmender Dichte die Durchlässigkeiten abnehmen. Bildet man das Produkt aus Verdichtungsgrad D_{pr} und Sättigungsgrad S_r der Probe vor einer Durchströmung ($S_r \cdot D_{pr}$), und bezieht die Durchlässigkeit der Mischung auf die des Ausgangsmaterials ohne Organobentonit bei entsprechendem Einbauzustand der Probe (bez. k -Wert), so läßt sich der in Abb. 6.16 dargestellte lineare Zusammenhang für mit Wasser bzw. Triethanolamin durchströmte Proben finden. Der Kurvenverlauf der mit Wasser durchströmten Organobentonit-Mischungen ist für den gesamten Verdichtungsbereich nahezu konstant. Die Durchlässigkeiten der Organobentonit-Mischungen verändern sich in gleichem Maß wie beim unvergüteten Boden in Abhängigkeit des Einbauzustands. Die Durchlässigkeitsänderungen infolge Strukturumwandlungen sind bei den Organobentonit-Mischungen ebenfalls zu beobachten. Erwartungsgemäß ist die Durchlässigkeit der vergüteten Mischungen aufgrund der hydrophoben Eigenschaften des Organobentonits größer als die des unvergüteten Bodens und nimmt mit zunehmendem Organobentonitgehalt zu: Bei 3% Organobentonit um 30 %, bei 6 % um 60 %.

Wenn ein mineralisches Abdichtungsmaterial entsprechend den Vorgaben der TA SIEDLUNGSABFALL eingebaut wird (Anhang 6, Abb. A5), zeigt es innerhalb des zugelassenen Bereichs bei einem Verdichtungsgrad von 95 % und bei dem optimalen Wassergehalt die größte Durchlässigkeit. (Dies entspricht einem Wert von ca. 0,7 für das Produkt aus Verdichtungs- und Sättigungsgrad, welcher für alle geeigneten mineralischen Abdich-

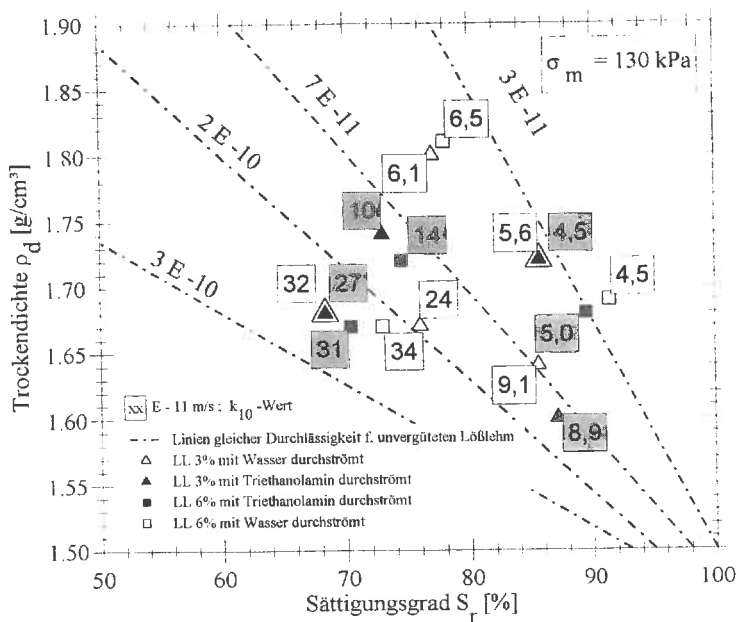


Abb. 6.15: k-Werte der Lößlehm-Mischungen

tungsmaterialien angesetzt werden kann.) Diese für das Ausgangsmaterial maßgebende größte Durchlässigkeit ist Grundlage für eine Beurteilung des mit Organobentonit vergüteten Materials. Dem Diagramm in Abb. 6.16 kann für $D_{pr} \cdot S_r = 0,7$ der bezogene k-Wert (bez. k) für die entsprechende Organobentonit-Zugabe entnommen werden, mit dessen Hilfe die größte wahrscheinlich auftretende Durchlässigkeit dieser Mischung bestimmt werden kann. Diese sollte nach den Vorgaben der TA SIEDLUNGSABFALL den Wert von $5 \cdot 10^{-10}$ m/s nicht überschreiten.

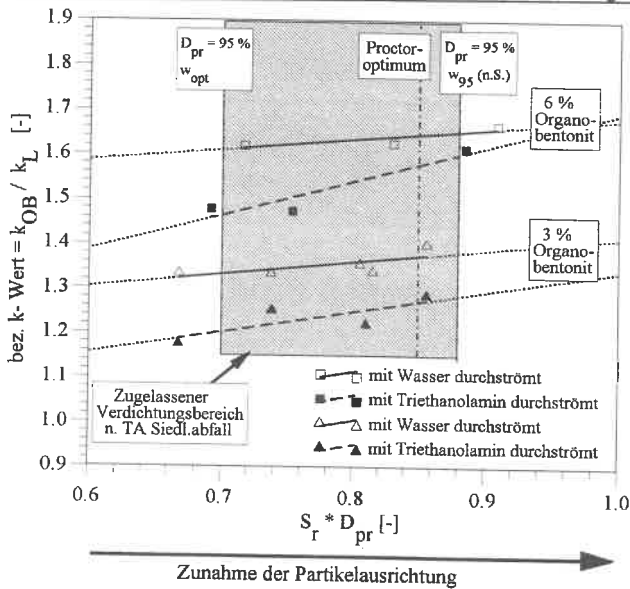


Abb. 6.16: Zusammenhang zwischen Einbauparameter und Durchlässigkeit für Lößlehm und seine Mischungen

Tonböden und Triethanolamin

Wie bereits in Kap. 2 beschrieben, können Änderungen der Durchlässigkeit infolge modifizierter Porenlösung durch die Kenntnis der die Doppelschicht beeinflussenden Parameter verstanden werden. So bedingt eine Abnahme der abstoßenden Kräfte und eine Zunahme der Anziehungskräfte eine Verkleinerung des Doppelschichtabstands. Dies führt eher zu einer Kartenhausstruktur im Ton und damit zusammenhängend zu einer höheren Durchlässigkeit. Da die verwendete Triethanolaminlösung gering konzentriert ist, sich ihre Dielektrizitätskonstante kaum von derjenigen des Prüfwassers unterscheidet und ihr Elektrolytgehalt ebenfalls im Bereich des Gehalts des Prüfwassers liegt, kann davon ausgegangen werden, daß diese Parameter nicht für auftretende Durchlässigkeitsänderungen verantwortlich sind.

Eine von ANDERSON et al. (1985) und D'APPOLONIA (1980) festgestellte, dramatische Änderung der Durchlässigkeit wurde auf die geringen bzw. sehr hohen pH-Werte der Lösungen zurückgeführt. Niedrige oder hohe pH-Werte (kleiner pH 5 und größer pH 8 nach KELLER (1964)) bewirken Veränderungen in der Kristallstruktur (erhöhte Löslichkeit von Aluminium und amorphem Silikat) und keine Änderungen in der Kräftebilanz zwi-

schen den Partikeln. Ob der pH-Wert der Triethanolaminlösung mit 9,3 eine Umladung der Tonmineralkanten oder eine Kristallauflösung zur Folge hat, kann nicht festgestellt werden. Die auftretenden Durchlässigkeitsänderungen infolge veränderter Porenlösung (Triethanolamin) sind jedoch eindeutig auf die chemischen Wechselwirkungen zwischen Porenlösung und Boden zurückzuführen.

Bei den Versuchen mit Triethanolamin wurde darauf geachtet, daß das Porenvolumen mindestens zweimal durch die Prüflösung ersetzt wurde. Während dieser Reaktionszeit konnten bei den unvergüteten Ausgangsmaterialien keine bemerkenswerten Änderungen im Durchlässigkeitsverlauf festgestellt werden (Abb. 6.14). Die Eigenschaften der enthaltenen Tonminerale und die Struktur der Böden wurden keineswegs beeinflusst. Auch dies entspricht den Erwartungen aus den Schlämmanalysen, wonach selbst beim Aufschlämmen von Tertiärton mit einem höheren Tonmineralanteil als Opalinuston mit Triethanolamin keine Veränderungen auftraten.

Zur Konstruktion der Linien gleicher Durchlässigkeit in Abb. 6.12 wurden die k -Werte der sowohl mit Wasser als auch mit Triethanolamin durchströmten Proben verwendet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte des Lößlehms (ohne Organobentonit) sind nachweislich vom Durchströmungsmedium unbeeinflusst. Alle Verdichtungspunkte genügen der Theorie der Linien gleichen Gefüges. So ist beim Lößlehm kein Einfluß der Triethanolaminlösung auf die Bodenstruktur zu bemerken. Das infolge Verdichtung entstandene Gefüge wurde folglich weder beim Opalinuston, noch beim Lößlehm durch die niedrig konzentrierte Triethanolaminlösung verändert.

Wissenschaftliche Untersuchungen, wie sie in Kap. 2.4 beschrieben wurden, zeigen ähnliche Ergebnisse: Durchströmungen mit hochkonzentrierten Prüflösungen verändern die diffusen Doppelschichten der Tonminerale; Niedrig konzentrierte Porenlösungen haben nur geringe bis gar keine Auswirkungen auf die Durchlässigkeit, da Änderungen in dem Kräftegleichgewicht zwischen den Doppelschichten für eine grundlegende Strukturänderungen nicht ausreichend sind.

Organobentonit und Triethanolamin

Nach den beschriebenen Untersuchungen kann zusammenfassend geschlossen werden, daß eine Zugabe von Organobentonit zu Tonböden deren "Wasser"-Durchlässigkeit erhöht und, daß die niedrig konzentrierte Triethanolaminlösung keine Durchlässigkeitsänderung bei den unvergüteten Böden hervorruft. Das Verhalten der mit Organobentonit vergüteten Böden gegenüber der organischen Testlösung wird im folgenden diskutiert.

Wenn Wasser durch eine "aktive" Testlösung ersetzt wird, beginnt die eigentliche Reaktionsphase. Falls der Verlauf des k -Werts, des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit keine signifikanten Änderungen über längere Zeit zeigen, gilt diese Phase als beendet, und die Gleichgewichtsphase beginnt. Dies war bei den Opalinuston-Mischungen mit Organobentonit nach ca. dem zweifachen Porenvolumenaustausch mit Triethanolamin der Fall (Abb. 6.14). Erst der zu diesem Zeitpunkt meßbare, konstante k -Wert repräsentiert das Durchlässigkeitsmaß der Dichtungsmischung gegenüber Triethanolamin. Ein Vergleich der Durchlässigkeitsverläufe zeigt, daß ein Wechsel der Porenflüssigkeit bei den Organobentonit-Mischungen zu Veränderungen im k -Wert-Verlauf führt. Die Durchlässigkeit beginnt sich erst nach einem vollständigen Austausch des Porenwassers durch die Testlösung zu verringern. Vor der Erhöhung der effektiven Spannung in den Proben zeigte die 3 %-Mischung eine 36 %ige Abnahme, die 6 %-Mischung eine 47 %ige Abnahme. Bei einer Porenaustauschrate von ca. 2 haben beide Mischungen ihr absolutes Minimum erreicht. Der k -Wert der 3 %-Mischung unmittelbar vor Spannungsänderung entspricht annähernd dem des Ausgangsbodens ohne Organobentonit.

Da die unvergüteten Tonböden nach Kontakt mit Triethanolamin keine nennenswerten Veränderungen erfahren, kann der Schluß gezogen werden, daß vorwiegend der Organobentonit mit der Triethanolaminlösung reagiert, und dies zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit führt.

Wie bereits auf S. 123 festgestellt, besitzen die Organobentonit-Mischungen eine höhere Wasser-Durchlässigkeit als der unvergütete Boden. In Abb. 6.16 wird deutlich, daß die mit Triethanolamin durchströmten Lößlehm-Organobentonit-Mischungen im zugelassenen Bereich der TA SIEDLUNGSABFALL einen geringeren Durchlässigkeitsanstieg zeigen als die mit Wasser durchströmten (Abnahme zwischen 3 und 12 %). Die Durchlässigkeitswerte der Mischungen sind aber dennoch größer als die des unvergüteten Bodens. Die größte Abnahme wurde dabei bei kleinen Werten für das Produkt aus Verdichtungsgrad und Sättigungsgrad festgestellt. Das bedeutet, je ungeordneter die Partikel im Haufwerk angeordnet, je stärker Kartenhausstrukturen ausgebildet und je größer die durchströmbareren Poren bzw. die reaktiven Oberflächen sind, desto deutlicher sind die Auswirkungen einer Organobentonit-Triethanolamin-Reaktion zu erkennen. Der für die Anlagerung von Triethanolamin-Moleküle an den Organobentonit benötigte Raum steht vor allem bei vorhandenen Kartenhausstrukturen zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Schlämmanalysen in Tab. 6.5 zeigen bei den 0 %- und den 6 %-Mischungen annähernd keinen Unterschied, unabhängig davon, ob mit Wasser oder mit Triethanolamin gearbeitet wurde. Die Triethanolaminlösung hatte weder eine Aggregation noch eine Dispergierung der Tonteilchen zur Folge. Diese Erscheinung steht scheinbar im Widerspruch zu den Ergebnissen der Durchlässigkeitsuntersuchungen. Da aber die

Durchführung von Schlämmanalysen ausschließlich Auskunft über Partikelgrößen und damit zusammenhängend Bodenstrukturen geben kann, kann davon ausgegangen werden, daß die Wechselwirkung zwischen Organobentonit und Triethanolamin die Bodenstruktur nicht verändert und dies kein abweichendes Durchlässigkeitsverhalten verursachen kann.

Aus den Interpretationen der Durchlässigkeitsversuche und der Schlämmanalysen wird gefolgert, daß Quellvorgänge zwischen Organobentonit und Triethanolamin die durchflußwirksamen Poren verkleinern und für die abnehmende Durchlässigkeit verantwortlich sind. Diese können durch spezielle Quellversuche (HUDER/AMBERG, ENSLIN/NEFF, etc.) quantifiziert und mit der Durchlässigkeit in Verbindung gebracht werden.

Nach einer Zugabe von Organobentonit wird der k -Wert mit Wasser als Porenlösung vergrößert. Diese Erhöhung wird durch eine Durchströmung mit organischer Testlösung (oder auch natürlichem Deponiesickerwasser) aufgrund des Quellverhaltens des Organobentonits teilweise kompensiert. Gleichzeitig wird das Sorptionsvermögen des Bodens durch das Zusatzmittel erheblich verbessert.

Elektrische Leitfähigkeit der Eluate

Wie in Abb. 6.14 zu erkennen ist, zeigen die Mischungen mit Organobentonit zu Beginn der Wasser-Durchströmung deutlich höhere Leitfähigkeitswerte als das Ausgangsmaterial ohne Organobentonit. Je mehr Organobentonit in der Mischung enthalten ist, desto größer ist das Maximum der elektrischen Leitfähigkeit. Es wird darauf zurückgeführt, daß Organobentonit Ionenaustauschreaktionen im Boden hervorruft, die nach ca. 3 bis 4 Porenvolumenaustauschraten beendet sind. Die Durchlässigkeit wird dadurch nicht negativ beeinflusst.

Ebenso wie die Durchlässigkeit wird die elektrische Leitfähigkeit des Eluats unwesentlich durch die Triethanolaminlösung beeinflusst. Von einem Ionenaustausch im Zusammenhang mit Triethanolamin kann nicht gesprochen werden. Der Wechsel der Prüflüssigkeit bei den Organobentonit-Mischungen hat ebenfalls keinerlei Einfluß auf den Verlauf der Leitfähigkeit. Die abnehmende Durchlässigkeit bei der Kombination Organobentonit und Triethanolamin wurde in der Leitfähigkeit der Eluate nicht bemerkt.

Die Verläufe der Leitfähigkeit streben asymptotisch einem Leitfähigkeitswert zu, der höher als der von Leitungswasser und von Triethanolamin ist. Diese erhöhte Ionenausspülung aus den Proben kann u.a. auf Kationenaustauschreaktionen des Organobentonits zurückgeführt werden, die nach einer Durchströmungsdauer von ca. 2 Porenaustauschraten beendet sind. Auch wenn der Boden kein Organobentonit enthält, werden leicht

erhöhte Leitfähigkeitswerte registriert. Dieser Prozeß beruht vermutlich auf einer mit der Durchströmung zusammenhängenden Bodenauslaugung. Das Ende der Auslaugung kann festgestellt werden, wenn einströmendes Porenwasser gleiche Leitfähigkeit wie ausströmendes besitzt.

Die Durchlässigkeit wird durch den stattfindenden Ionenaustausch nicht beeinflusst. Auch bei längerer Durchströmungsdauer ist damit nicht zu rechnen. Ein Schadstoffdurchtritt wurde bei allen Versuchen trotz mehrmaligem Porenvolumenaustausch mit der Prüflösung nicht registriert. Die Triethanolaminlösung wurde zumindest während dieser Versuchsdauer durch den Boden bzw. den Organobentonit adsorbiert. Zur quantitativen Ermittlung der Adsorptionsfähigkeit des Bodens bzw. des Organobentonits bezüglich Triethanolamin sind u.a. Batchversuche (Ton im dispergierten Zustand und Schadstoff werden geschüttelt und dabei das Eluat untersucht) und analytische Untersuchungen der Eluate erforderlich, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden.

Unter der Voraussetzung, daß Ausspülungen von Ionen aus den Doppelschichten der Tone mit Adsorptionen "fremder" Ionen einhergehen, müssen diese Ionen durch die Porenflüssigkeit eingetragen werden. Im Kristallverband werden sie in Abhängigkeit der Ladungsstärke mehr oder weniger fest angelagert. Handelt es sich dabei um umweltbelastende Schadstoffe, wie sie in Deponiesickerwasser enthalten sind, verhält sich das mineralische Dichtungsmaterial wie ein "Schwamm", der eine bestimmte Menge an komplexen Verbindungen aufnehmen und fixieren kann. Die Zugabe von Organobentonit erhöht dessen Speicherkapazität bei gleichzeitig zunehmender Wasser-Durchlässigkeit. Eine wesentliche Reinigung des durchfließenden Porenwassers findet statt.

Nutzbarmachung der Ergebnisse für die Deponieplanung

Für die Planung und den Entwurf einer mit Organobentonit vergüteten, mineralischen Basisabdichtung ist es notwendig, schnell abschätzen zu können, inwieweit die geplante Organobentonit-Zugabe die Durchlässigkeit erhöht und ob der geforderte k -Wert eingehalten wird. Aus den Erkenntnissen der vorherigen Kapiteln kann beispielhaft für den Lößlehm, der im süddeutschen Raum bevorzugt als Abdichtungsmaterial eingesetzt wird, eine Möglichkeit vorgestellt werden, mit deren Hilfe für jeden Verdichtungspunkt und Organobentonit-Anteil der entsprechende Durchlässigkeitsbeiwert ermittelt werden kann (Abb. 6.17). Für die Übertragung dieses Schaubilds auf andere Tonböden müssen die Linien gleicher Durchlässigkeit (Diagramm III) und die Linien entsprechender Organobentonit-Anteile (Diagramm II) versuchstechnisch ermittelt werden. Dabei genügen aufgrund der bekannten Kurvenverläufe wenige Durchlässigkeitsversuche, die auf die Randbedingungen der geplanten Deponie abzustimmen sind.

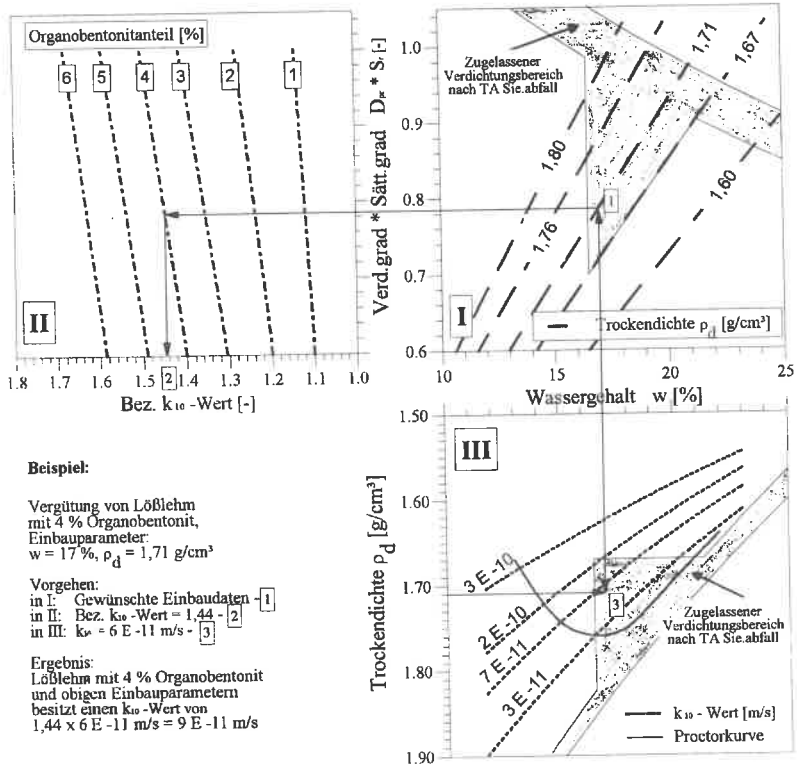


Abb. 6.17: Graphische Ermittlung der Durchlässigkeit eines mit Organobentonit vergüteten Lößlehms

6.5 Scherfestigkeit

Neben der Oberflächenladung und den austauschbaren Ionen der Tonminerale beeinflussen die Ionen im Porenwasser die zwischen den Tonteilchen wirkenden Kräfte. Diese reagieren empfindlich gegenüber Änderungen der die Doppelschicht beeinflussenden Parameter und verändern nachhaltig das Gefüge des feinkörnigen Bodens (Kap. 2). Zusammen mit der Durchlässigkeit ist die Scherfestigkeit eines verdichteten Tonbodens eine strukturabhängige Größe, die sich entsprechend der wechselnden Kräftesituation zwischen den Tonmineralen ändert. Während nach Angaben von MÜLLER-VONMOOS et al. (1985) die Zusammendrückbarkeit von Tonen weitgehend von deren Einbaudichte und deren Plasti-

zität abhängt, wird ihr Scherverhalten vor allem von der Korngröße und Kornform, den Gegenionen und der innerkristallinen Quellung bestimmt.

6.5.1 Die Entwicklung des effektiven Reibungswinkels

Nach RILLING ist der effektive Reibungswinkel des Lößlehms unabhängig von den Einbaubedingungen und somit von der jeweilig vorhandenen Struktur des Bodens. Ob der Reibungswinkel von Lößlehm durch eine Organobentonit-Vergütung oder durch eine Durchströmung mit Wasser bzw. Triethanolamin beeinflusst wird, wurde bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht und ist Gegenstand dieses Kapitels.

EFF. REIBUNGSWINKEL ρ' [°]		Anzahl d. Versuche	Mittel- wert	Standard- abweichg.	Variations- koeffizient	Min. Wert	Max. Wert
Lößlehm ohne Organo- bentonit	nicht durchströmt	2	21,5	0,92	0,04	20,8	22,1
	mit Wasser durchströmt	5	23,0	1,19	0,05	21,8	24,6
	mit Trieth.amin durchströmt	5	22,7	1,69	0,07	20,7	25,0
Lößlehm mit 3 % Organo- bentonit	nicht durchströmt	4	21,7	0,91	0,04	20,6	22,8
	mit Wasser durchströmt	5	21,3	1,06	0,05	20,5	23,1
	mit Trieth.amin durchströmt	4	23,7	1,60	0,07	21,9	25,6
Lößlehm mit 6 % Organo- bentonit	nicht durchströmt	5	21,6	1,03	0,05	19,9	22,4
	mit Wasser durchströmt	3	20,3	1,27	0,06	19,3	21,7
	mit Trieth.amin durchströmt	3	24,1	1,31	0,05	22,7	25,3

Tab. 6.6: Effektive Reibungswinkel des Lößlehms und seiner Mischungen

In Tab. 6.6 sind die effektiven Reibungswinkel ρ' der im Triaxialgerät abgescherten Lößlehm-Proben statistisch nach der jeweiligen Durchströmungsgeschichte ausgewertet. Die errechneten Streuungen der Reibungswinkel sind erwartungsgemäß für alle Mischungen gering. Der Reibungswinkel des unvergüteten, mit Wasser durchströmten Lößlehms

entspricht mit $23,0^\circ$ exakt dem Wert von RILLING. Da die Lößlehm-Proben von RILLING vor dem Abschervvorgang nicht durchströmt, sondern nur gesättigt waren, kann davon ausgegangen werden, daß eine lang andauernde Wasser-Durchströmung den Reibungswinkel ebenfalls nicht beeinflusst. Diese Erkenntnis ist ein Nachweis dafür, daß die Ergebnisse von RILLING auf die Betrachtungen mit Organobentonit ohne Einschränkung übertragen werden dürfen. Für nicht durchströmte, aber gesättigte Proben kann aufgrund der geringen Anzahl der Versuche (2) keine endgültige Aussage getroffen werden. Es wird davon ausgegangen, daß keine entscheidenden Abweichungen auftreten und im Durchschnitt mit einem Reibungswinkel von 23° gerechnet werden darf.

In Abb. 6.18 ist sowohl die Entwicklung des Reibungswinkels als auch die Plastizitätsentwicklung über die Organobentonit-Vergütung graphisch aufgetragen. Man kann erkennen, daß der Reibungswinkel der mit Wasser durchströmten Proben mit zunehmender Organobentonit-Dosierung um 12 % abnimmt. Da deren Plastizität mit zunehmendem Organobentonit-Anteil steigt, paßt die Entwicklung des Reibungswinkels zu der Feststellung von LAMBE, wonach die effektiven Reibungswinkel mit zunehmender Fließgrenze bzw. Plastizitätszahl abnehmen (Abb. 2.6).

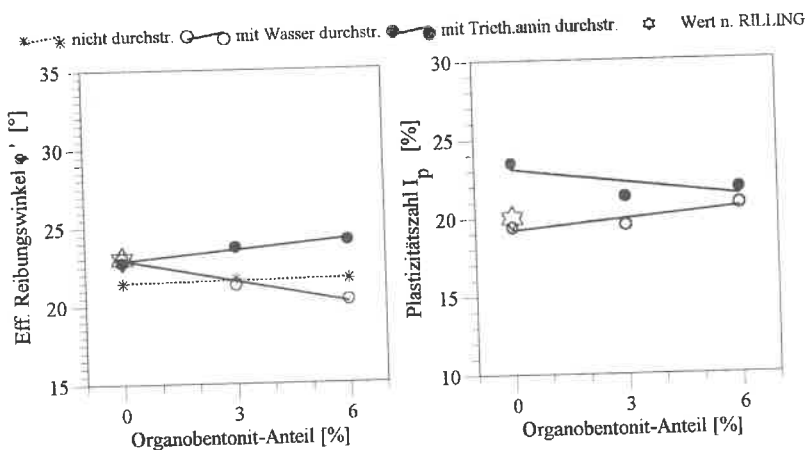


Abb. 6.18: Entwicklung des Reibungswinkels und der Plastizität in Abhängigkeit des Organobentonit-Anteils im Lößlehm

Lößlehm-Proben nach einem Triethanolamin-Kontakt zeigen mit steigender Organobentonit-Vergütung eine schwache Zunahme des Reibungswinkels um 6 % und eine Abnahme der Plastizität. Dieser Zusammenhang paßt ebenfalls zu den Erkenntnissen von LAM-

BE, die bisher auf Proben mit Wasser beschränkt waren. Die Beziehung zwischen Plastizität und Reibungswinkel eines Bodens kann somit nach den vorliegenden Untersuchungen auf die organische Flüssigkeit Triethanolamin uneingeschränkt übertragen werden. Unter Zuhilfenahme der plastischen Eigenschaften der Organobentonit-Mischungen kann die Tendenz der Scherwinkeländerung prognostiziert werden. Inwieweit dieser Zusammenhang auf weitere chemische Verbindungen oder natürliche Gemische ausgedehnt werden kann, wäre in einer weiteren Forschungsarbeit durch Scherversuche im Triaxialgerät mit anschließenden Plastizitätsuntersuchungen nachzuweisen.

6.5.2 Einfluß einer Wasser-Durchströmung auf die effektive Kohäsion

Die Fragestellung, ob eine Durchströmung von feinkörnigem Boden negative Auswirkungen auf den durch die Kohäsion bewirkten Anteil der Festigkeit hat, ist für die Deponietechnik und darüber hinaus auch für den Dammbau interessant. Dabei sind eventuell auftretende Festigkeitsänderungen infolge Suffusionserscheinungen nicht Gegenstand der folgenden Betrachtungen. Es ist vielmehr von Bedeutung, inwieweit das strömende Medium Wasser Strukturänderungen im Tonanteil ohne Massenverlust bewirken kann. Auswaschungen von Feinteilen während der Durchlässigkeitsversuche wurden einerseits visuell über durchsichtige Rohrleitungen am Auslauf kontrolliert, andererseits über Messungen der elektrischen Leitfähigkeit des ausströmenden Eluats. Der Verlauf des Durchlässigkeitsbeiwerts über die Zeit gibt ebenfalls einen Anhalt über einen Materialtransport aus der Probe.

Im Anhang 10 sind die Versuchsergebnisse der Triax-Versuche für Lößlehm und seine Organobentonit-Mischungen in Tab. A6 zusammengestellt. Zusätzlich sind im S_r - p_d -Diagramm sowohl die effektiven Kohäsionen c' der nicht durchströmten, mit Wasser und mit Triethanolamin durchströmten Proben als auch die Linien gleicher effektiver Kohäsion für Laborversuche nach RILLING eingetragen (Anhang 12, Abb. A9). Da es sich bei dem verwendeten Lößlehm um dasselbe Material vom gleichen Standort wie für die Untersuchungen von RILLING handelt, können die RILLINGschen-Linien als Bezugswerte für nicht durchströmte und unvergütete Lößlehm-Proben herangezogen werden. Zwei selbst durchgeführte Scherversuche an nicht durchströmten Proben mit denselben Versuchsrandbedingungen wie RILLING bestätigen die Anwendbarkeit dieser Linien für die weiteren Versuche (Anhang 12, Abb. A9).

Die effektive Kohäsion c' der untersuchten Proben bezogen auf die effektive Kohäsion nach RILLING c'_{Ri} (Lößlehm nicht durchströmte) ergibt einen Quotienten (bez. c'), der Aufschluß darüber gibt, inwieweit sich eine Wasser-Durchströmung auf die Kohäsion auswirkt. Eine Auftragung der Werte über das Produkt aus Sättigungs- und Verdich-

tungsgrad der Proben vor Einbau in das Durchlässigkeits- bzw. Triaxgerät zeigt die Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Einbaudaten bzw. der eingprägten Struktur.

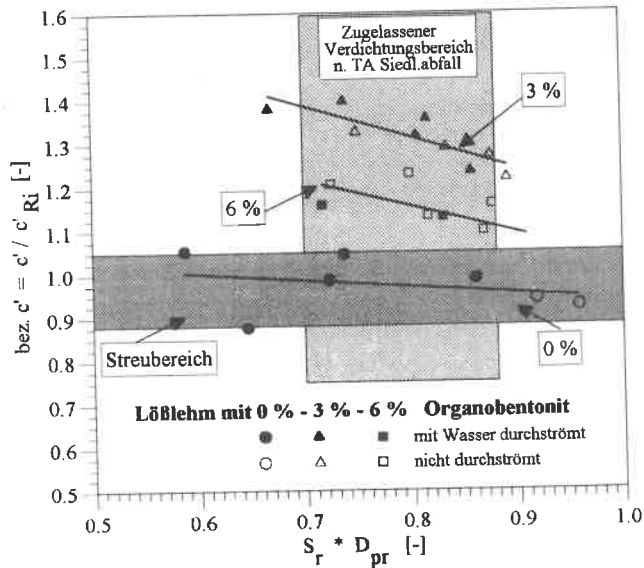


Abb. 6.19: Scherfestigkeit der durchströmten und nicht durchströmten Lösslehm-Organobentonit-Mischungen

Die Werte der unvergüteten, durchströmten und nicht durchströmten Lösslehm-Proben lassen sich durch eine annähernd horizontale Regressionsgerade beschreiben und liegen im Bereich zwischen 0,88 und 1,05 für bez. c' (Abb. 6.19). Das bedeutet, daß die Festigkeit, insbesondere die effektive Kohäsion der mit Wasser durchströmten Proben für jeden Einbauzustand den RILLINGSchen Werten entspricht. Die Streuungen sind versuchstechnisch bedingt. Eine Wasser-Durchströmung mit hydraulischen Gradienten, die größer als die natürlich auftretenden waren, aber eine laminare Strömung in den Poren bewirkten, hat somit auch nach mehrmaligen Porenaustausch keine nachhaltige Beeinflussung der Festigkeit und damit zusammenhängend keine Gefügeänderung zur Folge. Es können somit die Ergebnisse von RILLING bestätigt und um eine Erkenntnis erweitert werden, wonach allein die Einbauparameter entscheidend für strukturabhängige Scherkräfte verantwortlich sind und eine Wasser-Durchströmung keinen nachhaltigen Einfluß auf die Struktur hat. Überträgt man diese Laborergebnisse auf die Zustände in der Praxis, so kann angenommen werden, daß verschiedene Durchströmungssituationen, denen ein Boden während seiner

bautechnischen Nutzung ausgesetzt ist, weder eine Erhöhung noch eine Reduzierung der effektiven Kohäsion bewirken können.

Die Ergebnisse der mit Organobentonit vergüteten Bodenproben zeigen ebenfalls, daß eine Durchströmung mit Wasser (vor dem Abscheren) ähnliche Festigkeitswerte ergibt wie keine Durchströmung (Abb. 6.19). Entsprechend den Überlegungen zur Durchlässigkeit in Kap. 6.4, können die Werte der bezogenen Kohäsion (bez. c') für die Organobentonit-Mischungen mit einer Geraden verbunden werden. Die Geraden verlaufen in dem für den Erdbau bzw. die Deponietechnik relevanten Bereich oberhalb der bezogenen Kohäsion von bez. $c' = 1,0$, und die Geradensteigungen nehmen mit zunehmendem Produkt aus Sättigungs- und Verdichtungsgrad ab. Das bedeutet, daß die untersuchten Organobentonit-Mischungen (mit Wasser oder nicht durchströmt) für alle möglichen Einbaustände größere effektive Kohäsionen besitzen als der unvergütete Lößlehm. Wie bereits bei den Durchlässigkeitsuntersuchungen erwähnt, wird eine Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit infolge Organobentonit-Zugabe auf die Bildung von Kartenhausstrukturen zurückgeführt. Diese aufgrund der hydrophoben Benetzungseigenschaften des Organobentonits entstandenen Strukturen bewirken höhere maximale Scherfestigkeiten als Strukturen mit einer besseren Ausrichtung der Partikel (MÜLLER-VONMOOS et al., 1985).

Überraschenderweise bewirkt eine weitere Zugabe von Organobentonit von 3 auf 6 % keinen weiteren Anstieg der Festigkeit, sondern eine erhebliche Abnahme der effektiven Kohäsion. Der Festigkeitserhöhung infolge Kartenhausstruktur müssen festigkeitsmindernde Phänomene gegenüberstehen. Abb. 6.20 zeigt schematisch die Vorstellung, wonach die Zugabe von 3 % Organobentonit die Poren in der Probe vollständig mit Feinteilen füllt und dennoch die Korn-zu-Korn-Kontakte bestehen bleiben. Es existiert dabei gerade noch ein korngestütztes Gefüge mit einer Scherfestigkeit, die verglichen mit der von unvergüteten Lößlehm größer ist. Äußere Kräfte werden einerseits als Druckkräfte zwischen den Körnern, andererseits als strukturabhängige Scherkräfte im Tonanteil weitergeleitet.

Bei 6 % Organobentonit "schwimmen" die Körner frei in einer Matrix aus Feinteilen, die ebenfalls eine stabile Kartenhausstruktur mit einer gewissen Eigenfestigkeit besitzt. Die maximale Scherfestigkeit ist verglichen mit der 3 %-Mischung jedoch geringer, da das Abscheren ausschließlich innerhalb des Feinstanteils stattfindet. Ein Vergleich der 6 %-Mischung mit dem unvergüteten Boden zeigt, daß die Bindungskräfte zwischen den Teilchen der 6 %-Mischung infolge der besonderen Eigenschaften des Organobentonits größer sind. Die hoch dosierte Mischung hat eine höhere Festigkeit als der unvergütete Lößlehm.

Die pauschale Annahme, daß sich die Festigkeit mit zunehmender Organobentonit-Vergütung im Abdichtungsmaterial und dem dadurch entstandenen Quellvermögen verschlechtert, ist nach den oben genannten Erkenntnissen somit nur bedingt haltbar.

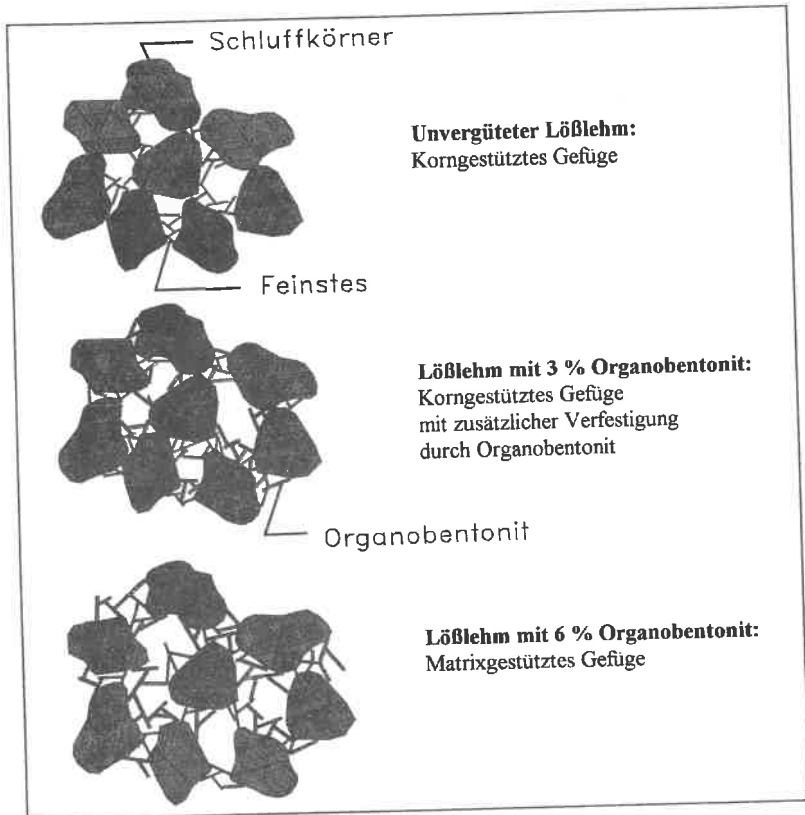


Abb. 6.20: Schematische Darstellung des Gefüges eines vergüteten Bodens

6.5.3 Wie wirkt sich Triethanolamin auf die effektive Kohäsion aus?

Je nach Zusammensetzung und chemischen Eigenschaften der im Boden vorhandenen Porenflüssigkeit kann ein zugegebener Organobentonit eher eine Kartenhausstruktur oder eine disperse Struktur ausbilden. Die Scherfestigkeiten des vergüteten mineralischen Abdichtungsmaterials können dementsprechend unterschiedlich sein (Kap. 2.5).

STOCKMEYER (1993) untersuchte erstmals die Festigkeit von schluffigem Sand im Ring-scherapparat, der mit Organobentoniten und herkömmlichen Bentoniten vergütet war. Zwei Versuche mit vergüteten Proben (10 % eines vollorganophilen Bentonits) im Triaxialgerät zeigten, daß sich die Festigkeit nach einer Durchströmung mit Wasser und mit Ethanol trotz erhöhtem Quellvermögen nicht verschlechtert.

Um die Änderungen der effektiven Kohäsion durch die organische Porenlösung sichtbar zu machen, wurde das in Abb. 6.19 dargestellte Diagramm durch die Ergebnisse der Triethanolamin-Durchströmung ergänzt (Abb. 6.21). Der unvergütete Lößlehm reagiert am empfindlichsten auf eine Durchströmung mit Triethanolamin. Die effektive Kohäsion wurde im zugelassenen Verdichtungsbereich der TA SIEDLUNGSABFALL zwischen 10 und 80 % über dem Wert mit Wasser ermittelt.

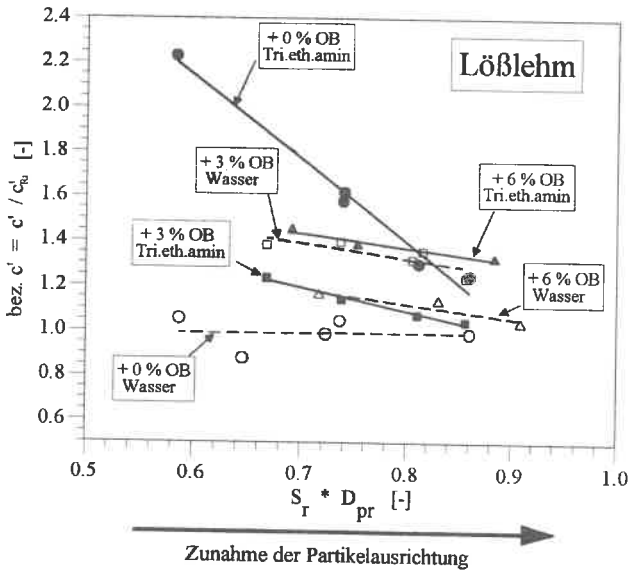


Abb. 6.21: Effektive Kohäsion in Abhängigkeit der Einbaudaten

Ein zunehmendes Produkt aus Sättigungs- und Verdichtungsgrad ist gleichbedeutend mit einer zunehmenden Partikelausrichtung im Gefüge bei gleichzeitiger Annäherung der Teilchen infolge erhöhter Anziehungskräfte zwischen den Partikeln. Dies bewirkt eine Erhöhung der strukturabhängigen Scherkräfte und deshalb eine Zunahme der effektiven Kohäsion im Boden. Eine Durchströmung mit Triethanolamin bei dem unvergüteten Lößlehm verursacht eine weitaus größere Kohäsion als diejenige der mit Wasser bzw. nicht

durchströmten Proben. Diese Differenz zwischen "Wasser-Kohäsion" und "Triethanolamin-Kohäsion" nimmt mit steigendem Produkt aus Sättigungs- und Verdichtungsgrad ab. Im Bereich der großporigen Kartenhausstruktur mit ungeordneter Partikelausrichtung (trockene Seite der Proctorkurve) hat die organische Testlösung den größten Einfluß. Dort vergrößert sie das anziehende Kräftepotential zwischen den Partikeln um das Mehrfache, und die effektive Kohäsion nimmt zu. Bodenproben mit hohem Grad an Partikel-ausrichtung und -annäherung (disperse Struktur, nasse Seite der Proctorkurve) werden kaum durch die Triethanolaminlösung in ihrem Kräftegleichgewicht gestört. Die Anziehungskräfte bleiben in ihrer Größe erhalten, und es zeigt sich kaum eine Änderung in der effektiven Kohäsion. Diese Auswirkung der veränderten Porenlösung findet sich auch bei der 6 %-Mischung, ist jedoch deutlich schwächer ausgebildet. Das Verhalten der 3 %-Mischung widerspricht scheinbar den Erkenntnissen. Welcher chemische Parameter nun entscheidend zu einer Änderung der Kräftebilanz bzw. der Scherfestigkeit beiträgt, kann hier wie bei der Durchlässigkeit nicht endgültig bestimmt werden.

Die TA SIEDLUNGSABFALL gibt den Einbauzustand des mineralischen Abdichtungsmaterials auf der nassen Seite der Proctorkurve vor. Die Richtigkeit und Notwendigkeit dieser Forderung wird durch die erhaltenen Ergebnisse bestätigt. Die Empfindlichkeit toniger Böden gegenüber einwirkenden chemischen Stoffen ist in diesem Verdichtungsbereich am kleinsten.

Für einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Porenlösungen in den Organobentonitmischungen, und um das besondere Verhalten der 3 %-Mischung zu verstehen, ist es zweckmäßig, die effektive Kohäsion der Triethanolamin-Proben c'_T auf die der Wasser-Proben c'_w zu beziehen und über das Produkt aus Sättigungs- und Verdichtungsgrad aufzutragen. Dazu wurden die Geradengleichungen der Mischungen (Abb. 6.21) ermittelt und nach dem Quotienten c'_T / c'_w aufgelöst (Abb. 6.22).

Auch in dieser Darstellung erkennt man, daß die Auswirkungen der organischen Testlösung auf die effektive Kohäsion der Organobentonit-Mischungen im Vergleich zum Ausgangsmaterial deutlich geringer sind. Der Wechsel der Porenflüssigkeit bewirkte bei der 6 %-Mischung unabhängig von der jeweilig vorhandenen Struktur eine um ca. 20 % erhöhte Kohäsion. Durch eine Durchströmung mit Triethanolamin werden die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen bei allen eingepprägten Strukturen gleichmäßig erhöht. Das durch die erhöhte Zugabe von Organobentonit entstandene matrixgestützte Gefüge wird durch die Triethanolaminlösung zusätzlich verfestigt und erreicht dadurch das Festigkeitsniveau der mit Wasser durchströmten 3 %-Mischung (Abb. 6.20).

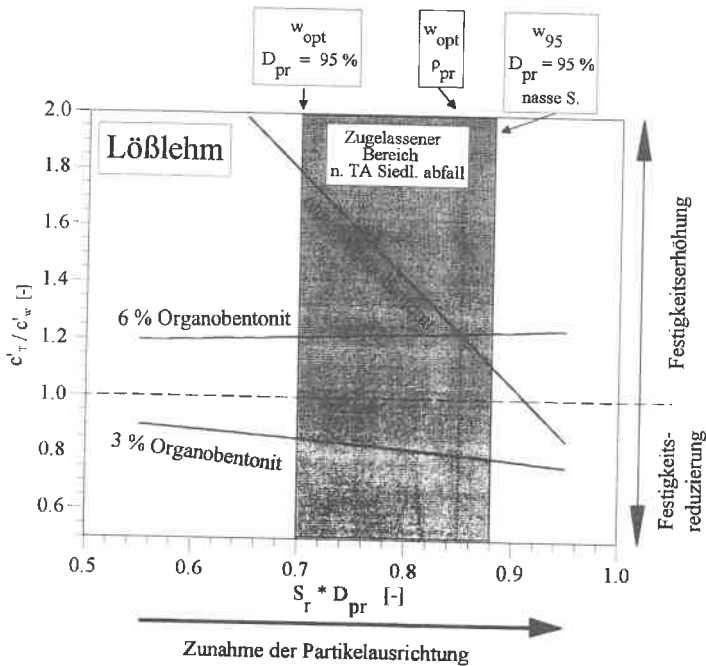


Abb. 6.22: Auswirkungen von Triethanolamin auf die Kohäsion der Organobentonit-Mischungen

Wie in Kap. 6.5.2 ausführlich beschrieben, hatte eine Wasser-Durchströmung bei der 3 %-Mischung im Vergleich zum unvergüteten Lösslehm und der 6 %-Mischung deutlich höhere Kohäsionswerte zur Folge. Ursache hierfür war ein korngestütztes Gefüge mit nahezu vollständiger Füllung der Poren mit Organobentonit. Im Gegensatz zur 0 %- und 6 %-Mischung bewirkte der Austausch des Porenwassers durch die Triethanolaminlösung im Vergleich zur "Wasser-Kohäsion" um 10 bis 20 % geringere Kohäsionswerte (Abb. 6.22). Die organische Porenflüssigkeit setzt offensichtlich die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen herab bzw. erhöht die abstoßenden Kräfte während der Durchströmung. Vermutlich sind Quellvorgänge im Organobentonit mit Triethanolamin verantwortlich dafür, daß der enge Verbund der Teilchen gelockert wird. Das Quellen bzw. die organophilen Benetzungseigenschaften des Bentonits stehen somit der die Bindungskräfte erhöhenden Wirkung des Triethanolamins gegenüber. Der Porenraum wird durch die Quellvorgänge aufgeweitet, so daß die Spannungsübertragung von Korn-zu-Korn von einer Scherspannung im Tonanteil abgelöst wird.

7 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse im Hinblick auf einen Praxiseinsatz

Die besonderen sorptiven Eigenschaften von Organobentoniten werden schon seit langem in verschiedenen Anwendungsgebieten ausgenutzt. Für den Bereich der Deponietechnik wurde die Sorptionsfähigkeit der mit Organobentonit vergüteten, "sorptionsschwachen" Böden u.a. von STOCKMEYER (1993) untersucht. Daran anknüpfend war der Gegenstand dieser Dissertation, wie sich eine Organobentonit-Vergütung auf die geotechnischen Eigenschaften mineralischer Abdichtungsmischungen auswirkt. Dazu wurden einerseits die Herstellung einer Organobentonit-Mischung im Zwangsmischer unter Baustellenbedingungen untersucht, andererseits mögliche Zustände einer vergüteten Dichtungsschicht während eines Deponiebetriebs im Labor simuliert. Um abschließend eine Eignung in geotechnischer Hinsicht aussprechen zu können, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Labor- und Feldversuche gegenübergestellt und im Hinblick auf Praxistauglichkeit überprüft.

7.1 Einmischen von Organobentonit

Das Mixed-in-plant-Verfahren ist aufgrund der Witterungsunabhängigkeit, der erzielbaren Qualität des Abdichtungsmaterials und des flexiblen Einsatzes für das Einmischen von Organobentonit dem Mixed-in-place-Verfahren vorzuziehen. Das Mischgut kann mit diesem Verfahren vor dem Einbau kontrolliert, optimiert und evtl. zwischengelagert werden.

Da der Organobentonit neben der Kunststoffdichtungsbahn eine meist gering zu dosierende, wertvolle Komponente im Abdichtungssystem darstellt und eine ungewollte Mehrdosierung wegen Geräteungenauigkeiten unerwartete Folgen haben kann, wird die gezielte Zugabe von Organobentonit von Hand empfohlen. Es handelt sich dabei um

maximal 40 kg Organobentonit je Charge. Daran anschließend kann das notwendige Wasser in die Mischtrommel eingesprüht werden.

Entspricht die Kornverteilung des zu vergütenden Bodens annähernd derjenigen von Lößlehm, so genügt für Dosierungen bis maximal 2 % und für Mischungen mit einem Wassergehalt zwischen w_{pr} und $w_{95}(n.S.)$ eine Mischdauer von 60 Sekunden. Eine längere Mischdauer würde die Mischungsqualität nicht erheblich verbessern, vielmehr wäre der Durchsatz und damit die Leistung der Mischanlage erheblich herabgesetzt. Höher dosierte und feuchtere Mischungen benötigen für ein zufriedenstellendes Ergebnis annähernd 2 Minuten Mischzeit. Bei einem enggestuften Boden ohne Ausfallkörnungen und mit einem Feinstanteil größer als 20 % ist aufgrund der fehlenden Knetwirkung der größeren Körner mit deutlich höheren Mischzeiten zu rechnen. Vor der eigentlichen Mischungsherstellung sollten aus Testmischungen mit paralleler Homogenitätsprüfung des Mischguts die optimale Mischzeit ermittelt werden. Die Mischungen können bei entsprechender Abdekung einige Zeit zwischengelagert werden.

Optimale Qualität der Mischungen bedeutet optimale Verteilung von Wasser und Organobentonit im tonigen Dichtungsmaterial. Gleichmäßig verteilter Organobentonit garantiert eine sehr gute Schadstoffadsorption und einheitliche geotechnische Eigenschaften der entstandenen Mischung. Vor Beginn des eigentlichen Mischprozesses müssen die Mischdauer in Abhängigkeit der damit erzielbaren Mischungsqualität festgelegt werden. Zur Homogenitätskontrolle sollten verschieden lang gemischte Testchargen ausreichend beprobt und vor Ort untersucht werden. Es genügt, Wassergehalt und Glühverlust der Proben zu bestimmen und statistisch auszuwerten, um dann frühestens nach 24 Stunden mit dem Einmischen von Organobentonit beginnen zu können.

7.2 Geotechnische Eigenschaften vergüteter Böden in Verbindung mit organischen Lösungen

Die **Plastizität** toniger Abdichtungsmaterialien mit Wasser als Porenflüssigkeit wird durch eine Organobentonit-Vergütung nicht verkleinert. Die für die Deponietechnik relevanten Dosierungen führen eher zu leicht erhöhten Plastizitätszahlen. Je geringer der Feinstanteil eines Bodens ist, um so deutlicher ist eine Veränderung erkennbar. Die Forderung der TA ABFALL nach Flexibilität der Dichtungsschicht ist bei vergüteten Böden mit Organobentonit deshalb eingehalten.

Die **Wasseraufnahme** toniger Böden wächst mit zunehmendem Feinstanteil und steigendem Gehalt an quellfähigen Tonmineralen. Sie wird durch eine Organobentonit-Zugabe deutlich verlangsamt und erreicht nach über 24 Stunden denselben Endwert wie un-

vergütete Böden. Die für das Ansaugen von Wasser bestimmenden Vorgänge werden durch den teilweise hydrophoben Charakter und das Quellverhalten des Organobentonits bestimmt.

Die **Proctorkurven** der drei Tonböden und ihrer Mischungen mit Organobentonit verlaufen ähnlich. Mit steigendem Feinstanteil im Boden und mit zunehmender Organobentonit-Vergütung sinken die Proctordichten, und die optimalen Wassergehalte nehmen zu. Ursache hierfür ist die Aggregation der Bodenteilchen infolge zugegebenem Organobentonit. Da der Quellvorgang länger als 24 Stunden andauert (s. Wasseraufnahmeversuche), wird für die Herstellung einer Basisabdichtung empfohlen, die Dichtungsmischung mit Organobentonit innerhalb eines Tages herzustellen und anschließend zu verdichten. Eine dadurch verursachte "innere Vorspannung" der Dichtungsschicht wirkt sich positiv auf die bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften aus.

Das **Durchlässigkeitsverhalten** verdichteter Tonböden ist vom Gefüge zum Zeitpunkt der Verdichtung abhängig, das durch den Wassergehalt, die Dichte und das eingemischte Vergütungsmittel bestimmt wird. Die Zugabe von Organobentonit unterstützt eine Aggregation der Bodenpartikel, so daß eine Kartenhausstruktur mit relativ großen, durchflußwirksamen Poren entsteht. Die Durchlässigkeit der Mischungen mit Wasser als Durchströmungsmedium steigt deshalb mit zunehmender Organobentonit-Vergütung an.

Bei der Planung einer Deponie, insbesondere der Basisabdichtung, sind Schadstofftransportberechnungen mit allen den Transportvorgang beeinflussenden Parametern durchzuführen. Es ist für den Einzelfall abzuwägen, ob auf den geforderten Grenzwert der Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-10}$ m/s zugunsten eines erhöhten Schadstoffadsorptionspotentials des Abdichtungsmaterials verzichtet werden darf. So schließt sich die Autorin den Forderungen von STOCKMEYER an, wonach zusätzlich zum Durchlässigkeitsbeiwert der Diffusionsbeiwert und alle bisher bekannten Transportparameter in der TA ABFALL festgelegt werden sollten. Maßgebend dafür sollte eine gerade noch akzeptable Schadstofffracht pro Zeit und Fläche durch die Deponiebasis sein.

Die Entwicklung der effektiven **Reibungswinkel** toniger Böden kann mit der Plastizität derselben korreliert und auf Organobentonit-Mischungen ausgedehnt werden: Mit zunehmender Plastizität sinkt der effektive Reibungswinkel. Eine Durchströmung mit Wasser hat weder eine Veränderung der Reibungswinkel noch eine Veränderung der effektiven Kohäsion zur Folge. Dies gilt sowohl für unvergütete Böden als auch für deren Mischungen mit Organobentonit.

Die Größe der effektiven Kohäsion ist von der Art des vorhandenen Gefüges abhängig. Eine Zugabe von 3 % Organobentonit füllt die Poren des korngestützten Gefüges voll-

ständig, und eine deutlich höhere Kohäsion als beim unvergüteten Boden wird registriert. 6 % Organobentonit bewirkt, daß die Körnerkontakte annähernd aufgehoben werden und diese in einer Matrix aus Feinstem und Organobentonit "schwimmen". Die Kohäsionswerte liegen zwischen dem unvergütetem Material und der 3 %-Mischung.

Auswirkungen organischer Lösungen auf Tonböden und deren Mischungen

Die Empfindlichkeit mineralischer Dichtungsmaterialien gegenüber durchsickernden Schadstoffen wird mit zunehmendem Feinstanteil, mit steigendem Gehalt an aktiven Tonmineralen, mit steigender spezifischer Oberfläche und wachsender Oberflächenladung der Tonminerale größer. So nehmen die Änderungen der plastischen Eigenschaften, der Festigkeit und der Durchlässigkeit in der Reihenfolge Lößlehm, Opalinuston und Tertiärton zu.

So werden Böden, die unempfindlicher gegenüber Schadstoffkontakt sind, als Abdichtungsmaterialien bevorzugt eingesetzt, vorausgesetzt, sie genügen den Forderung der TA ABFALL. Besitzen diese jedoch keine ausreichenden Rückhalteigenschaften gegenüber Schadstoffen im Deponiesickerwasser, können sie mit Organobentonit verbessert werden. Die notwendige Menge muß mit Laborversuchen in Abhängigkeit der Sorptionskapazität des Dichtungsmaterials festgelegt werden.

Mit allen untersuchten organischen Chemikalien als Porenflüssigkeit wird der unvergütete Lößlehm und auch der Opalinuston **plastischer** als mit Wasser. Eine Zugabe von Organobentonit hatte keine einheitlichen Auswirkungen auf die Chemikalien-Plastizität. Nur bei Lößlehm nahm die Chemikalien-Plastizität mit zunehmendem Organobentonit-Gehalt ab und wurde teilweise geringer als die Wasser-Plastizität. Dieser Zusammenhang ist zufällig und ist nicht auf andere Bodenarten übertragbar, denn die chemischen Reaktionen in den Mischungen können sowohl im Tonmineralbestand des Bodens als auch im eingemischten Organobentonit stattfinden. Die Verformbarkeit der Organobentonit-Mischung und die Bereitschaft zur Ribildung wird im Hinblick auf Gebrauchstauglichkeit nicht negativ beeinflußt.

Bei einem Kontakt mit natürlichem Deponiesickerwasser wurden alle unvergüteten Böden plastischer. Eine Vergütung mit Organobentonit (6 %) hatte nur bei Tertiärton niedrigere Werte als die Wasser-Plastizität zur Folge. Ansonsten bleibt die erhöhte Plastizität der Mischungen erhalten.

Der festgestellte Zusammenhang zwischen pH-Wert der Porenlösungen und Plastizität der Mischungen wird ebenfalls als Zufall bewertet und ist durch die verwendeten organischen

Lösungen bestimmt. Diese scheinbare Abhängigkeit darf nicht für Plastizitätsvorhersagen mit anderen chemischen Substanzen verwendet werden. Die Interpretationen der Plastizitätsentwicklungen infolge veränderter Porenflüssigkeiten sind komplex, da sowohl die chemischen Eigenschaften der Porenflüssigkeit als auch die tonmineralogische Zusammensetzung der Böden variieren. Aussagen über mögliche Änderungen bestimmter geotechnischer Eigenschaften bei Sickerwasserkontakt dürfen deshalb nicht pauschal und allgemeingültig formuliert werden. Erst nach Schlämmanalysen oder Plastizitätsversuchen mit dem Abdichtungsmaterial und der realen Porenlösung können vorsichtige Prognosen für mögliche Auswirkungen auf die hydraulischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften gemacht werden. Es ist deshalb nicht korrekt, Analogieschlüsse von dem Tonmineralbestand oder der Kationenaustauschkapazität des Bodens auf sein bodenmechanisches Verhalten zu ziehen oder Versuchsergebnisse ähnlicher Tone mit ähnlichen Chemikalien heranzuziehen.

Triethanolamin hat aufgrund seiner geringen Konzentration unbedeutende Auswirkungen auf das Quellverhalten unvergüteter Böden und auch der Mischungen mit Organobentonit. Die möglicherweise erkennbaren Tendenzen sind für die untersuchten Bodenarten nicht einheitlich, und auch eine Zugabe von 6 % Organobentonit genügt nicht, um das Flüssigkeitsaufnahmeverhalten zu beeinflussen.

Bei einer **Durchströmung** mit einer von Wasser abweichenden Porenlösung können unter bestimmten Bedingungen nachträglich Strukturänderungen auftreten. Für eine vorzeitige Abschätzung möglicher Reaktionen zwischen modifizierter Porenlösung und Abdichtungsmaterial wird die Durchführung von Schlämmanalysen ohne Dispergierungsmittel mit der entsprechenden Porenlösung empfohlen. Wird dabei nichts Außergewöhnliches registriert, kann davon ausgegangen werden, daß Durchströmungsversuche keine neuen Ergebnisse liefern. Mögliche Reaktionen während der Schlämmanalyse bedingen aber nicht notwendigerweise Änderungen in der Durchlässigkeit.

Der Austausch von Wasser durch Triethanolamin bewirkte bei keinem der untersuchten, unvergüteten Böden eine Änderung der Durchlässigkeitbeiwerte. Dieses Ergebnis ist um so überraschender, wenn man die veränderte Sedimentation und die deutliche Plastizitätserhöhung aller unvergüteten Böden bei Triethanolamin-Kontakt gegenüberstellt. Möglicherweise wird durch diese beiden Versuche der "worst case" eines mineralischen Abdichtungsmaterials während des Deponiebetriebs simuliert. Zur Abschätzung der Langzeitbeständigkeit mineralischer Abdichtungsmaterialien gegenüber veränderter Porenlösung können diese Versuche in zeitlich vernünftigem Rahmen Aufschluß geben.

Die Erhöhung der Durchlässigkeit durch eine Organobentonit-Zugabe wird teilweise durch das Quellen desselben mit der Triethanolaminlösung kompensiert. So erreicht z.B.

eine 3 %-Mischung nach zweimaligem Porenaustausch mit Triethanolamin wieder die Durchlässigkeit des unvergüteten Opalinustons. Dies wäre ein für die Deponiepraxis erfreuliches Ergebnis, wenn es auf alle erdenklichen Chemikaliengemische übertragen werden dürfte. Obwohl sich das natürliche Sickerwasser bei den Plastizitätsversuchen ähnlich wie das Triethanolamin verhält, sind Durchlässigkeitsversuche mit dem Sickerwasser zur Absicherung der Ergebnisse mit Triethanolamin ratsam.

Der effektive **Reibungswinkel** des unvergüteten Lößlehms wird durch die organische Porenflüssigkeit nicht verändert. Werden die mit Triethanolamin durchströmten Mischungen abgesichert, kann eine geringfügige Erhöhung des Reibungswinkels mit zunehmendem Organobentonit-Gehalt festgestellt werden.

Die effektive **Kohäsion** des unvergüteten Lößlehms vergrößert sich deutlich infolge Triethanolamin-Kontakt im gesamten Verdichtungsbereich. Die Kohäsion der Organobentonit-Mischungen reagiert deutlich unempfindlicher gegenüber der veränderten Porenlösung. Die Auswirkungen des Triethanolamins auf das korn- bzw. matrixgestützte Gefüge der Mischungen waren unterschiedlich, so daß nicht von einer generellen Erhöhung bzw. Reduzierung der Kohäsion gesprochen werden kann.

Im Rahmen dieser Dissertation konnte gezeigt werden, daß eine Zugabe von semiorganophilem Bentonit zu verschiedenen in der Deponiepraxis verwendeten Abdichtungsmaterialien keine wesentlichen negativen Einflüsse auf die bodenphysikalischen, -mechanischen und die hydraulischen Eigenschaften hat. Auch nach Kontakt mit organischen Testflüssigkeiten und natürlichem Deponiesickerwasser konnten keine die Gebrauchsfähigkeit der Deponie einschränkende Auswirkungen festgestellt werden. Für eine Verbesserung der Adsorptionseigenschaften mineralischer Abdichtungsmaterialien genügen erfahrungsgemäß geringe Dosierungen an Organobentonit. Der Einsatz von semiorganophilem Bentonit in der Deponiepraxis kann darüber hinaus aus geotechnischer Sicht empfohlen werden, da sich die relevanten geotechnischen Eigenschaften der Abdichtungsmaterialien nicht verändern und teilweise sogar verbessern.

7.3 Anpassung der Richtlinien an die Forschungsergebnisse

Der mineralischen Basisabdichtung einer Deponie wird die Aufgabe zugewiesen, den Untergrund vor schädlichen Angriffen zu schützen. Gemäß den Richtlinien und Empfehlungen sollte der Schadstofftransport durch die künstliche Barriere deshalb auf ein Minimum reduziert werden. Dies erfolgt bisher allein durch die Vorgabe eines Durchlässigkeitsbeiwerts und der Versuchsrandbedingungen. Da dies aber nur den Transport über Konvektion berücksichtigt, ist diese Festlegung nur unzureichend. Es wäre vielmehr

angemessener, eine maximal akzeptable Gesamtschadstofffracht durch die Dichtung zu definieren. Der Deponieplaner kann unter Berücksichtigung der speziellen Bodeneigenschaften die Anteile der einzelnen Transportvorgänge, wie Konvektion, Diffusion, Sorption und Schadstoffabbau, aufsummieren und dem Grenzwert gegenüberstellen. So kann z.B. ein nach TA SIEDLUNGSABFALL für Abdichtungszwecke geeignetes mineralisches Abdichtungsmaterial zwar den vorgegebenen Durchlässigkeitsbeiwert einhalten, aber schlechte Adsorptions- bzw. Diffusionseigenschaften aufweisen, so daß der Schadstoffaustrag aus der Deponie dennoch nicht umweltverträglich ist.

Ein Ergänzungsbedarf der Richtlinien und Anleitungen besteht bei der Festlegung des Begriffs "homogene Dichtungsmasse". Visuelle Überprüfungen und stichprobenartig durchgeführte Durchlässigkeitsuntersuchungen sind für vergütete Böden nicht ausreichend. Für Organobentonit-Mischungen kann zur einfachen und schnellen Untersuchung der optimalen Verteilung von Wasser und Organobentonit die Bestimmung des Wassergehalts und die Ermittlung des Glühverlusts inklusive statistischer Auswertung verwendet werden. Für andere, spezielle Zusatzmittel sind geeignete und einfache Methoden zur Homogenitätsprüfung vorzuschlagen.

7.4 Ausblick

Gegenstand vorliegender Arbeit war es, Mischungen mit Organobentonit als mineralisches Deponieabdichtungsmaterial im Hinblick auf geotechnische Eignung zu untersuchen. Schematische Untersuchungen, wie sich eine evtl. auftretende Austrocknung auf die Eigenschaften auswirkt, wurden nicht durchgeführt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht auf dem Gebiet der gleichzeitig wirkenden Beanspruchungen auf Basisabdichtungen. So interessiert die Frage, wie sich die Durchlässigkeit und Festigkeit einer vergüteten Dichtungsschicht bei Schadstoffkontakt, nach Austrocknung, bei Untergrundsetzungen und verändertem Spannungszustand verändern.

Auch die Idee einer Bodeninjektion mit Organobentonit-Suspensionen zur nachträglichen Sanierung von schadhafte Deponiebasisabdichtungen sollte wissenschaftlich untersucht werden.

Literatur

- ACAR, Y.B. / HAMIDON, A. / FIELD, S.D. / SCOTT, L. (1985): *The Effect of Organic Fluids on Hydraulic Conductivity of Compacted Kaolinite*. - Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, S. 171-187.
- ANDERSON, D.C. / BROWN, K.W. / THOMAS, J.C. (1985): *Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids*. - Waste Management and Research, Vol. 3, No. 4, S. 339-349.
- AZZAM, R. (1993): *Stofftransportprozesse in natürlichen Dichtungsstoffen unter Berücksichtigung der Verdichtbarkeit sowie des Einflusses strukturverändernder Chemikalien auf die Materialeigenschaften*. - Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Heft 49, RWTH Aachen, 199 S..
- BJERRUM, L. (1952): *Künstliche Verdichtung der Böden*. - Mitteilung 22, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau in Straße und Verkehr, Heft 2, Nr. 38, Zürich.
- BOWDERS, J. J. (1985): *The influence of various concentrations of organic liquids on the hydraulic conductivity of compacted clays*. - Dissertation Geotechnical Engineering GT85-2, University of Texas, Austin.
- BOWDERS, J.J. / DANIEL, D.E. / BRODERICK, G.P. / LILJESTRAND, H.M. (1986): *Methods for Testing the Compatibility of Clay Liners with Landfill Leachate*. - Hazardous and Industrial Solid Waste Testing: 4th Symposium, ASTM STP 886, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- BOWDERS, J.J. / DANIEL, D.E. (1987): *Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals*. - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 12, S. 1432-1449.
- BRACKE, R. / HAGEMANN, H.W. / ECHLE, W. / PUETTMANN, W. (1991): *Geotechnische Veränderungen in der Tonbasisabdichtung der Deponie Geldern-Pont nach 8 jährigem Deponiebetrieb*. - Müll und Abfall 23, Nr. 7, S. 409-420, Berlin.
- BRANDL, H. (1989): *Der Einfluß von Deponie-Sickerwässer auf bindige Böden bzw. mineralische Dichtschichten*. - Geotechnik 12, Nr. 4, S. 190-201.

- BRUNELLE, T.M. / DELL, L.R. / MEYER, C.J. (1987): *Effect of permeameter and leachate on a clay liner*. - Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 13, University of Michigan.
- CZURDA, K. (1992): *Tonmineralogische Aspekte bei Deponiedichtungen*. - Tonmineralogie für die geotechnische Praxis, Landesgewerbeanstalt, Bayern.
- DANIEL, D.E. / LILJESTRAND, H.M. (1984): *Effects of Landfill Leachate on Natural Liner Systems*. - Geotechnical Engineering Report, GR83-6, 86 S..
- DANIEL, D.E. / LILJESTRAND, H.M. / BRODERICK, G.P. / BOWDERS, J.J. (1988): *Interaction of Earthen Liner Materials with Industrial Waste Leachate*. - Hazardous Waste & Hazardous Materials, Vol. 5, No.2, Mary Ann Liebert, Inc. Publishers, New York.
- D'APPOLONIA, D.J. (1980): *Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs*. - Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT4, S. 399-418.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V. / HRSRG. (1993): *Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten"*- GDA. - 2. Aufl., 190 S., Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- DÜLLMANN, H. / ECHLE, W. / CEVRIM, M. (1989): *Geotechnische und mineralogische Veränderungen in einer Tondichtung nach mehrjährigem Sickerwasserkontakt*. - Bericht der 7. Nationalen Tagung der Ingenieurgeologie, S. 107-114, Bensheim.
- ECHLE, W. / CEVRIM, H. / DÜLLMANN, H. (1988): *Tonmineralogische, chemische und bodenphysikalische Veränderungen in einer Ton-Versuchsfläche an der Basis der Deponie Geldern-Pont*. - Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie, Band 4, S. 99-121, Karlsruhe.
- EHRIG, H.-J. (1988): *Inhaltsstoffe von Deponiesickerwässern*. - 3. ZAF-Seminar "Behandlung von Sickerwässern aus Hausmülldeponien", TU Braunschweig.
- EVANS, J.C. / FANG, H.-Y. / KUGELMAN, I.J. (1985): *Organic Fluid Effects on the Permeability of Soil-Bentonite Slurry Walls*. - Proceedings of the National Conference of Hazardous Waste and Environmental Emergencies, Cincinnati, S. 267-271.
- FALKE, M. (1995): *Geowissenschaftliche Untersuchungen zur Eignung von tonigen Sedimenten und Sedimentgesteinen als Deponieuntergrund im Braunschweiger Raum*. - Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 64, Hannover.
- FOREMAN, D. / DANIEL, D.E. (1986): *Permeation of compacted clay with organic chemicals*. - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No 7, S. 669-681.

- GOODALL, D.C. / QUIGLEY, R.M. (1977): *Pollutant Migration from two Sanitary Landfill sites near Sarnia, Ontario*. - Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, S. 223-235.
- GORANTONAKI, A. (1992): *Mineralogisches und chemisches Verhalten von Tonen bei Kontakt mit natürlichen Deponie-Sickerwässern in statischen und dynamischen Reaktionssystemen*. - Dissertation, RWTH Aachen.
- GRAY, D.H. / WEBER, W. (1984): *Diffusional Transport of Hazardous Waste Leachate across Clay Barriers*. - 7th Annual Madison Waste Conference.
- GRIM, R.E. (1968): *Applied Clay Mineralogy*. - 596 S., McGraw-Hill, New York.
- HAM, R.K. / ANDERSON, M.A. / STEGMANN, R. / STANFORTH, R. (1980): *Die Entwicklung eines Auslaugtests für Industrieabfälle*. - MÜLL und ABFALL, 7/80.
- HASENPATT, R. (1988): *Bodenmechanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemischer Verbindungen (Batch- und Diffusionsversuche)*. - Mitteilung 134, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich.
- HEAD, K.H. (1986): *Effektive stress testing-principles, theory and applications*. - Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 3, Pentech Press, London.
- HOLZLÖHNER, U./AUGUST, H./MEGGYES, T./BRÜNE, M. (Hrsg.) (1994): *Forschungsbericht 201, Deponieabdichtungssysteme; Statusbericht*. - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin.
- KELLER, W.D. (1964): *Soil Clay Mineralogy*. - Rich, C.I., Kunze, G.W. (eds.), University of North Carolina, Chapel Hill, S. 3-76.
- KENNEY, T.C. (1959): *Discussion*. - Proc. ASCE, Vol. 85, No. SM3, S. 67-79.
- KEZDI, A. (1964): *Bodenmechanik*. - Band 1, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- KNÜPFER, J. (1990): *Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen*. - Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 32.
- LAMBE, T.W. (1958 a): *The engineering behavior of compacted clay*. - Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 84, No. SM2.
- LAMBE, T.W. (1958 b): *The structure of compacted clay*. - Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 84, No. SM2.
- LAMBE, T.W. (1960): *A mechanistic picture of shear strength in clay*. - Conference in Shear Strength Soils, Colorado, S. 503-532.

- LAMBE, T.W. / WHITMAN, R.V. (1969): *Soil Mechanics*. - Massachusetts Institute of Technology, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- MADSEN, F.T. / MÜLLER-VONMOOS, M. (1988): *Das Quellverhalten der Tone*. - Mitteilung 133, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich.
- MADSEN, F.T. / MITCHELL, J.K. (1989): *Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity and their Determination*. - Mitteilung 135, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich.
- MICHAELS, A.S. / LIN, C.S. (1954): *Permeability of Kaolinite*. - Industrial Engineering Chemistry, Vol. 46, S. 1239-1246.
- MITCHELL, J.K. (1993): *Fundamentals of Soil Behavior*. - 2. Auflage, John Wiley & Sons, New York.
- MÜLLER-VONMOOS, M. / HONOLD, P. / KAHR, G. (1985): *Das Scherverhalten reiner Tone*. - Mitteilung 128, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich.
- MOORE, C.A. / MITCHELL, J.K. (1974): *Electromagnetic Forces and Soil Strength*. - Géotechnique 24, No. 4, S. 627-640.
- N.N. (1993): *Abfallwirtschaft in NRW*. - Richtlinien "Mineralische Abdichtungen", LfWuA, Düsseldorf.
- OLSON, R.E. / MESRI, G. (1970): *Mechanisms controlling compressibility of clays*. - Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 96, SM6, S. 1863-1878.
- PREGEL, O. (1994): *Deponietechnik*. - Handbuch der Geotechnik, Band 19/2, 435 S., Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur, Wien.
- REUTER, E. (1988): *Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren*. - Mitteilung 26, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Braunschweig.
- RILLING, B. (1994): *Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit bindiger Schüttstoffe am Beispiel von Lößlehm*. - Mitteilung 40, Institut für Geotechnik, Stuttgart.
- SCHNEIDER, L. (1992): *Der Einfluß von Prüflüssigkeiten (organische Säuren und CKW) auf Deponiebasisabdichtungen (Kalkhaltige mineralische Basisabdichtung, Kombinationsdichtung)*. - Dissertation, RWTH Aachen.
- SCHNEIDER, W. / GÖTTNER, J.J. (1991): *Schadstofftransport in mineralischen Deponieabdichtungen und natürlichen Tonschichten*. - Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 58, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, S. 3-132.

- SCHRÖDER, H.-P. (1993): *Bodenphysikalische Untersuchungen zum Einfluß von Depo-niesickerwässern auf die Dichtstoffeigenschaften von Deponietonen bei stati-schen und dynamischen Reaktionssystemen*. - Mitteilung 52, Lehrstuhl für Inge-nieurgeologie und Hydrogeologie, Aachen.
- SCHUSTER, P. (1986): *Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von Silt-Sand-Fractionen, die mit quellfähigem Ton vergütet werden*. - Band 131, 223 S., Institut für Geotechnik, ETH Zürich.
- SEED, H.B. / CHAN, C.K. (1959): *Structure and Strength Characteristics of compacted Clays*. - Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings ASCE, Vol. 85, No. SM5, S. 87-128.
- SIMONS, H. / HÄNSEL, W. / REUTER, E. (1984): *Physical and Chemical Behavior of clay-based Barriers under Percolation with Test Liquid*. - Proceedings of Interna-tional Symposium on Clay Barriers for Isolation of Toxic Chemical Wastes, Stockholm, S. 118-127.
- SKEMPTON, A.W. (1953): *The Colloidal "Activity" of Clays*. - Proc. 3 International Conference S.M.F.E., Zürich, Vol. 1, S. 57-61.
- SMOLTczyk, U. (1962): *Neue Erkenntnisse der Tonmechanik*. - Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (Hrsg.), Vortrag Baugrundtagung in Essen.
- SMOLTczyk, U. (1990): *Grundbau-Taschenbuch*. - Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 4. Auflage.
- SONDEREGGER, U. (1985): *Das Scherverhalten von Kaolinit, Illit und Montmorillonit*. - Band 129, 137 S., Institut für Geotechnik, ETH Zürich.
- SRIDHARAN, A. / VENKATAPPA RAO, G. (1973): *Mechanisms controlling volume chan-ge of saturated clays and the role of the effective stress concept*. - Géotechnique 23, No. 3, S. 359-382.
- STOCKMEYER, M. (1993): *Organophile Bentonite als Komponente in Deponiebarriere-Systemen* - Band 202, 90 S., Institut für Geotechnik, ETH Zürich.
- SÜD-CHEMIE AG: Diverse Firmenprospekte, München.
- TA ABFALL, TEIL 1 (1991): *Gesamtfassung der zweiten allgemeinen Verwaltungsvor-schrift zum Abfallgesetz*. - Bundesanzeiger, Verlagsges. mbH, Köln.
- TA SIEDLUNGSABFALL (1993): *Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfall-gesetz*. - Bundesanzeiger, Verlagsges. mbH, Köln.
- TERZAGHI, K. (1925): *Erdbaumechanik*. - Franz Deutike, Leipzig - Wien.

- WIEDEMANN, H.U. (1995): *Organo-Tone in der Abfalltechnik. Literaturbericht.* - Hrsg.: Umweltbundesamt, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- WIENBERG, R. (1990): *Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. - Teil 1: Unspezifische Interaktionen. Teil 2: Spezifische Interaktionen.* - Abfallwirtschaftsjournal 2 (4), (6), S. 222-230, S. 306-314.
- YANG, N. / BARBOUR, S.L. (1992): *The impact of soil structure and confining stress on the hydraulic conductivity of clays in brine environments.* - Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, S. 730-739.
- ZEIGER, F.G. (1993): *Beständigkeit von tonigen Deponieabdichtungen im Kontakt mit Deponiesickerwasser und organischen Prüfflüssigkeiten.* - Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie, Band 24, 152 S., Karlsruhe.

Anhang

Seite

1	Röntgenaufnahmen der verwendeten Böden	154
2	Geochemische Zusammensetzung und Röntgendiffraktogramm des eingesetzten Organobentonits	157
3	Berechnung der Dielektrizitätskonstanten	158
4	Zusammensetzung des Hausmüllsickerwassers	159
5	V Versuchsergebnisse der Fließ-, Ausrollgrenzen	160
6	Einbauanforderung an eine mineralische Basisabdichtung	164
7	Mittelwert- und Grenzkurven der Proctorversuche	165
8	Proctorwerte der untersuchten Böden und deren Mischungen	168
9	Randbedingungen und Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche	169
10	Randbedingungen und Auswertung der Triaxialversuche	178
11	Gleichungen für die Verteilung von Organobentonit	185
12	Auftragung der effektiven Kohäsionen des Lößlehms und seiner Mischungen in das Sättigungsgrad-Trockendichte-Diagramm	186

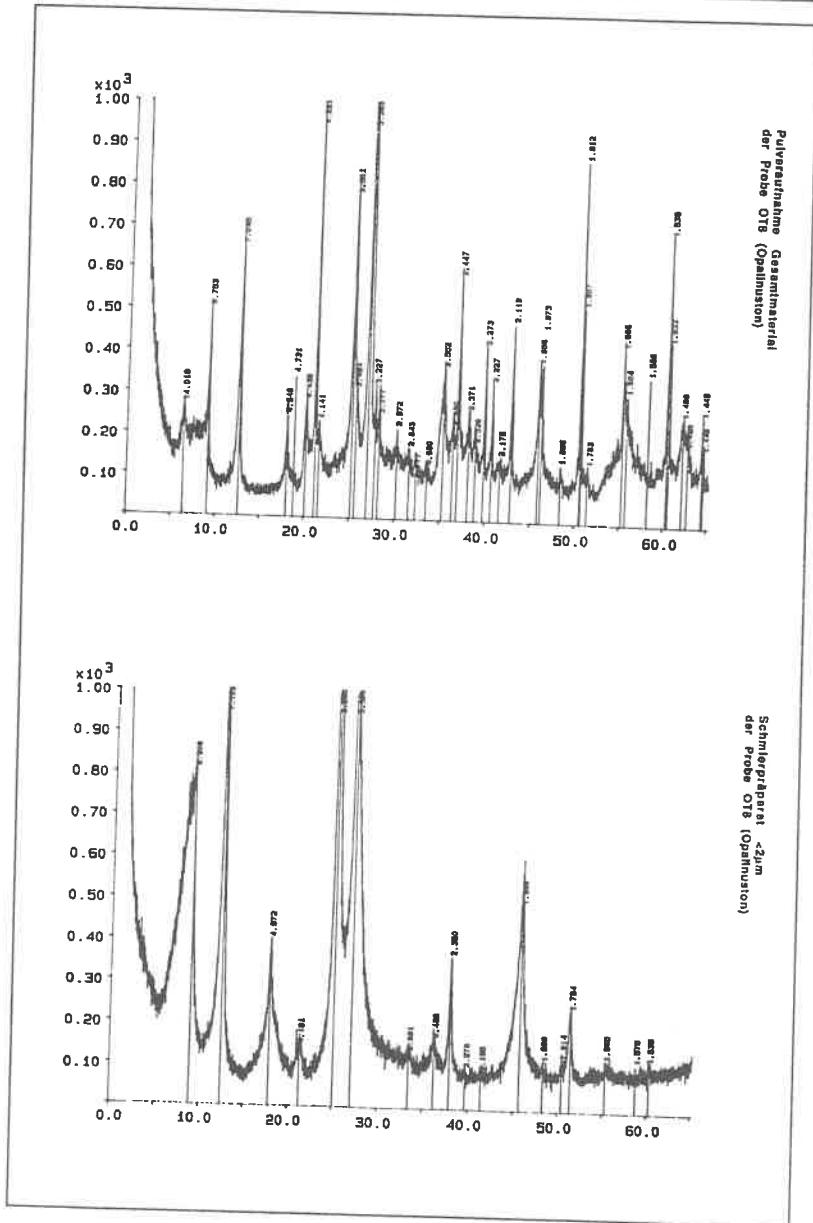


Abb. A2: Röntgenaufnahmen von Opalinuston,
oben: Gesamtmaterial - unten: Fraktion < 2 µm

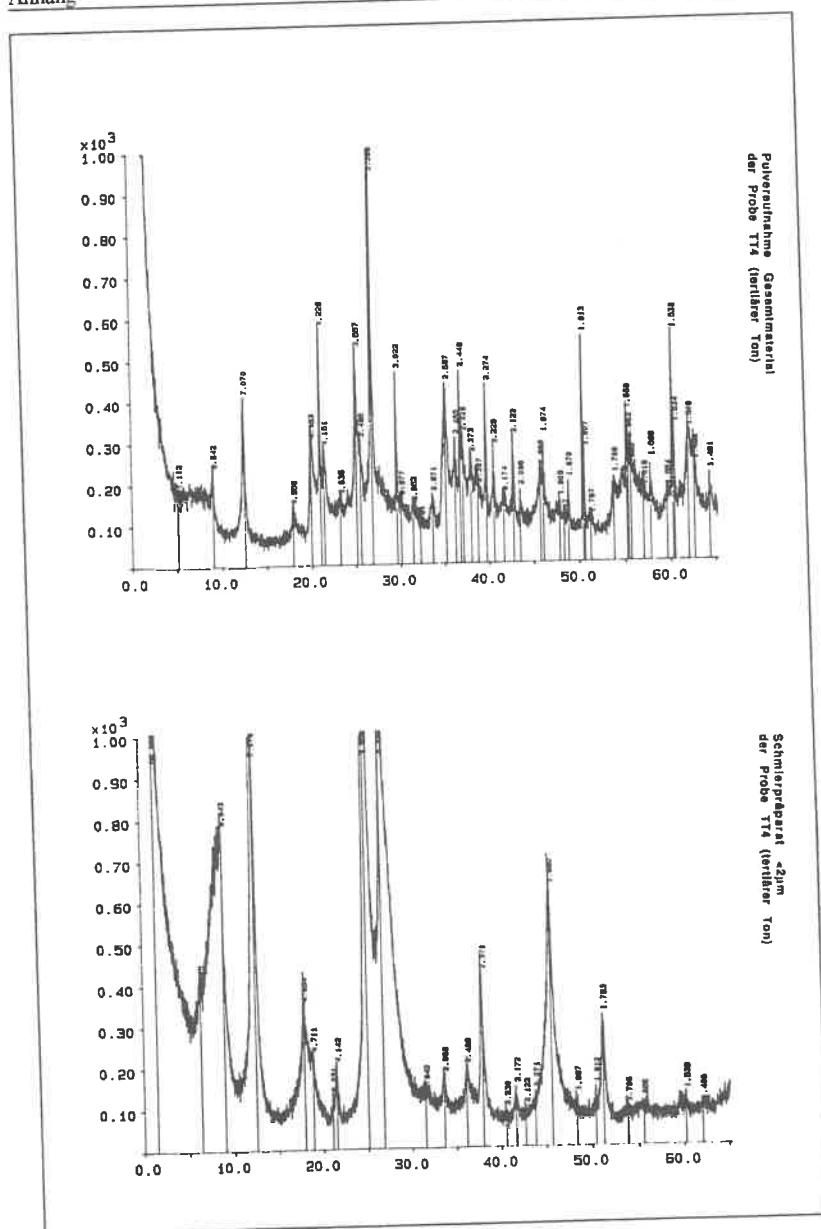


Abb. A3: Röntgenaufnahmen von Tertiärton,
oben: Gesamtmaterial - unten: Fraktion < 2 μm

Anhang 2 GEOCHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG UND RÖNTGENDIFFRAKTOGRAMM
DES EINGESETZTEN ORGANO-BENTONITS

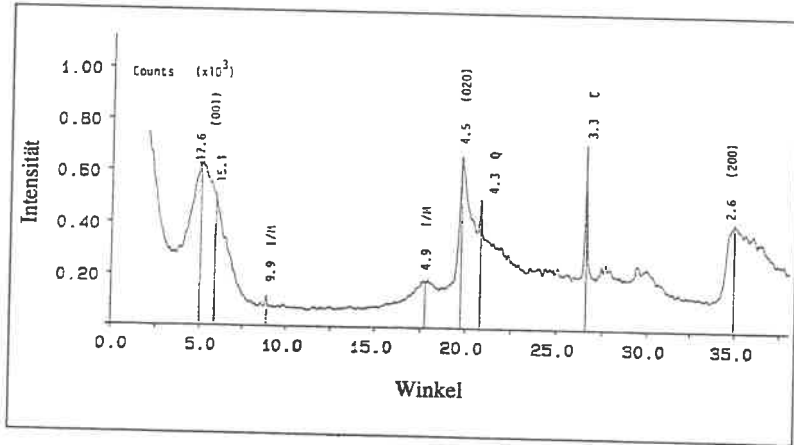


Abb. A4: Röntgendiffraktogramm von TIXOSORB (STOCKMEYER, 1993)

	BENTONIT	ORGANO-BENTONITE		
	MONTIGEL F	TIXOSORB	TIXOGEL VP	TIXOGEL VZ
SiO ₂	58,35	68,83	66,50	66,47
TiO ₂	0,00	0,33	0,30	0,28
Al ₂ O ₃	18,52	19,10	21,83	21,97
Fe ₂ O ₃	5,51	2,29 (tot.)	4,84 (tot.)	5,04 (tot.)
FeO	0,17	-	-	-
MnO	0,02	0,10	0,00	0,00
MgO	3,12	5,66	2,88	2,81
CaO	1,87	3,26	1,05	1,01
Na ₂ O	0,07	0,39	0,60	0,63
K ₂ O	0,73	0,43	0,25	0,25
P ₂ O ₅	-	0,06	1,75	1,54
Glühverlust	-	26,59	39,47	35,43

Tab. A1: Hauptverbindungen [Gew. %] (STOCKMEYER, 1993)

Anhang 3: BERECHNUNG DER DIELEKTRIZITÄTSKONSTANTEN EINER MISCHUNG

Das Gesetz nach CLAUSIUS-MOSOTTI ist in SEDGWICK (*The Covalent Link in Chemistry*. - Cornell University Press, Ithaca, New York, 1933) ausführlich erläutert und wird im folgenden verkürzt wiedergegeben:

$$P = \frac{D-1}{D+2} \cdot \frac{M}{d} \quad [\text{Gl. 1}]$$

wobei

P	die molekulare Polarisierung [l/mol],
M	das Molekulargewicht [g/mol],
d	die Dichte [g/cm ³],
D	die Dielektrizitätskonstante einer Flüssigkeit [-]

bedeutet.

Die molekulare Polarisierung einer Mischung aus zwei Flüssigkeiten ($P_1, P_2, M_1, M_2, d_1, d_2$ und f_1 bzw. f_2 als Molfraktionen) kann nach dem Gesetz von CLAUSIUS-MOSOTTI folgendermaßen berechnet werden ($f_1 + f_2 = 1$):

$$P_{1,2} = \frac{D-1}{D+2} \cdot \frac{f_1 M_1 + f_2 M_2}{d} = f_1 P_1 + f_2 P_2 \quad [\text{Gl. 2}]$$

Um nun die Dielektrizitätskonstante der Mischung $D_{1,2}$ zu erhalten, wird Gl. 1 nach D aufgelöst und entsprechend die Werte für die Mischung eingesetzt ($P_{1,2}, M_{1,2}$ und $d_{1,2}$):

$$D_{1,2} = \frac{2P_{1,2} d_{1,2} + M_{1,2}}{M_{1,2} - P_{1,2} d_{1,2}} \quad [\text{Gl. 3}]$$

Anhang 4: ZUSAMMENSETZUNG DES HAUSMÜLLSICKERWASSERS

Parameter	Einheit	Menge
pH-Wert	-	8,0
CSB	mg/l O ₂	7 760
BSB ₅	mg/l O ₂	2 142
DOC	mg/l	3 024
el. Leitfähigkeit	mS/cm	24,4
Chlorid	g/l	2,4
Sulfat	mg/l	25
Sulfid	mg/l	0,63
Ammonium	mg/l	1 493
Nitrit	mg/l	0,25
Nitrat	mg/l	0,1
Blei	mg/l	0,1
Calcium	mg/l	76
Cadmium	mg/l	0,01
Chrom	mg/l	0,3
Eisen	mg/l	1,7
Kupfer	mg/l	0,1
Magnesium	mg/l	26
Mangan	mg/l	0,45
Natrium	g/l	1,9
Nickel	mg/l	0,1
Phenol	mg/l	15
Zink	mg/l	0,1

Tab. A2: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Hausmüllsickerwassers

Anhang 5: VERSUCHSERGEBNISSE DER FLIEß-, AUSROLLGRENZEN

	Wasser		wp		lp		wl		wp		lp		wl		wp		lp	
	Anzahl	Mittelwert	s [-]	v=s/x [%]	Minimum	Maximum	Anzahl	Mittelwert	s [-]	v=s/x [%]	Minimum	Maximum	Anzahl	Mittelwert	s [-]	v=s/x [%]	Minimum	Maximum
Lößlehm ohne Organobentonit	8	34,2	14,1	20,1	35,8	14,4	21,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1
		34,2	14,1	20,1	35,8	14,4	21,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1
		34,2	14,1	20,1	35,8	14,4	21,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1
		34,2	14,1	20,1	35,8	14,4	21,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1
		34,2	14,1	20,1	35,8	14,4	21,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1
		34,2	14,1	20,1	35,8	14,4	21,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1	23,4	37,5	14,1
Lößlehm mit 3% Organobentonit	6	35,3	16,0	19,5	34,0	15,7	18,3	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3
		35,3	16,0	19,5	34,0	15,7	18,3	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3
		35,3	16,0	19,5	34,0	15,7	18,3	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3
		35,3	16,0	19,5	34,0	15,7	18,3	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3
		35,3	16,0	19,5	34,0	15,7	18,3	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3
		35,3	16,0	19,5	34,0	15,7	18,3	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3	20,2	35,5	15,3
Lößlehm mit 6% Organobentonit	5	35,9	15,9	20,0	37,7	17,1	20,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8
		35,9	15,9	20,0	37,7	17,1	20,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8
		35,9	15,9	20,0	37,7	17,1	20,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8
		35,9	15,9	20,0	37,7	17,1	20,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8
		35,9	15,9	20,0	37,7	17,1	20,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8
		35,9	15,9	20,0	37,7	17,1	20,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8	22,6	39,6	18,8

Tab. A3: Fließ-, Ausrollgrenzen

	wl	wp	Ip	wl	wp	Ip	wl	wp	Ip	wl	wp	Ip	wl	wp	Ip	Proportion-Estigmure 10%	wp	Ip
Opalinuston ohne Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 6% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 6% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 6% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 6% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 6% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 6% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2	4,1	5,3	3,5	9,1	0,8	7,6	6,7	4,9	2,9	9,9	2,3	1,8
	Minimum	44,3	17,8	24,3	45,5	18,8	26,2	55,1	22,0	31,6	51,6	20,7	27,9	47,2	20,8	25,1	49,2	20,6
	Maximum	49,3	20,3	27,2	45,5	18,9	26,6	61,1	23,2	37,9	51,6	23,7	27,9	52,4	23,7	31,7	51,5	21,3
Opalinuston mit 3% Organobentonit	Anzahl	6		7	47,9	18,8	29,1											
	Mittelwert	47,3	19,4	27,9	47,1	19,4	27,7	57,7	22,9	34,8	52,0	21,8	30,2	50,2	21,3	28,9	50,3	21,0
	s [I]	1,9	0,9	2,4	1,1	0,6	1,1	3,1	0,8	3,2	0,4	1,7	2,0	2,4	0,6	2,9	1,2	0,4
	v=s/x [%]	4,0	4,6	8,7	2,3	3,2												

Tab. A3, Fortsetzung

	Wasser			synthetisches SW			Triethanolamin 1%			natürlicher SW			Phenol 1%			Proton-Essigsäure 100%		
	wt	wp	Ip	wt	wp	Ip	wt	wp	Ip	wt	wp	Ip	wt	wp	Ip	wt	wp	Ip
Tertiärton ohne Organobentonit	50,5	19,8	30,7	55,4	22,4	31,0	65,2	20,3	44,9	53,0	22,6	30,4	53,2	23,5	29,7	41,6	19,5	22,1
	54,5	19,7	34,8	43,8	23,3	20,5	60,2	21,1	39,1	56,0	21,3	34,7	54,2	23,9	30,3	49,5	19,8	29,5
	57,2	20,3	36,9	44,0	18,3	25,7	67,7	21,2	46,5	54,7	23,1	31,6	53,4	22,9	30,5	49,3	21,6	27,7
	48,6	23,4	25,2	47,8	19,5	28,3	66,5	21,6	41,9	57,8	21,5	36,3	54,7	22,5	32,2	48,3	20,7	27,6
	47,2	23,1	24,1	44,1	19,2	24,9										48,2	20,4	27,8
	54,7	21,2	33,5	45,8	20,8	25,0										48,1	19,9	28,2
	54,7	22,1	32,6															
	49,7	20,8	28,9															
	47,3	21,3	26,0															
	48,3	20,7	27,6															
Tertiärton mit 3% Organobentonit	48,9	20,0	28,9															
	53,7	20,2	33,5															
	53,7	21,9	33,8															
	54,6	21,1	35,5															
	51,9	20,9	31,0															
	51,9	20,9	31,0															
	51,9	20,9	31,0															
	51,9	20,9	31,0															
	51,9	20,9	31,0															
	51,9	20,9	31,0															
Anzahl	15			6			4			4			4			6		
Mittelwert	51,8	21,1	30,7	46,5	20,6	25,9	64,9	21,1	43,9	55,4	22,1	33,3	53,9	23,2	30,7	47,5	20,3	27,2
s [-]	3,4	1,1	3,8	3,7	2,0	3,5	5,3	0,5	3,3	2,0	0,9	2,7	0,7	0,6	1,1	2,9	0,8	2,6
v=σx [%]	6,5	5,3	12,4	8,0	9,5	13,7	5,1	2,6	7,4	3,7	3,9	8,2	1,3	2,7	3,5	6,2	3,8	9,5
Minimum	47,2	19,7	24,1	43,8	18,3	20,5	60,2	20,3	39,1	53,0	21,3	30,4	53,2	22,5	29,7	41,6	19,5	22,1
Maximum	57,2	23,4	36,9	53,4	23,3	31,0	67,7	21,6	46,5	57,8	21,3	36,3	54,7	23,9	32,2	49,3	21,6	29,5
	51,0	21,0	30,0	45,2	23,2	20,0	54,1	23,1	31,0	53,2	23,1	30,1	55,0	26,6	28,4	50,6	22,3	28,3
	56,5	22,0	34,5	46,6	19,0	27,6	76,9	22,9	54,0	62,0	22,1	39,9	58,2	23,5	32,7	54,7	23,3	31,4
	59,7	22,4	37,5	45,1	20,6	24,5	49,7	21,8	27,9	60,6	23,4	37,2	58,6	26,1	32,5	52,8	23,4	29,4
	52,5	21,0	31,5	54,2	21,1	33,1	52,8	20,2	32,6	58,1	23,3	34,8	55,0	28,6	33,9			
	54,3	21,7	32,6	46,5	18,5	28,0	54,3	22,0	32,3									
	54,5	21,8	32,7															
	47,8	21,0	26,8															
	51,8	20,7	31,1															
	51,2	21,4	29,8															
	52,8	23,4	29,4															
	48,4	20,4	28,0															
	55,7	22,1	33,6															
Anzahl	12			5			5			4			5			3		
Mittelwert	53,0	21,6	31,4	47,1	20,5	26,6	57,6	22,0	35,6	58,5	23,0	35,5	55,1	26,3	28,7	52,7	23,0	29,7
s [-]	3,4	0,8	2,9	4,2	1,9	4,8	11,0	1,2	10,5	3,9	0,6	4,2	3,4	0,6	3,9	2,1	0,6	1,6
v=σx [%]	6,4	3,9	9,3	8,9	9,1	18,1	19,1	5,2	29,5	6,6	2,6	11,7	6,3	2,1	13,5	3,9	2,6	5,3
Minimum	47,8	20,4	26,8	43,2	18,5	20,0	49,7	20,2	27,9	53,2	22,1	30,1	50,5	25,5	23,9	50,6	22,3	28,3
Maximum	59,7	23,4	37,3	54,2	23,2	35,1	76,9	23,1	54,0	62,0	23,4	39,9	58,6	26,9	32,7	54,7	23,4	31,4

Tab. A3, Fortsetzung

Tertiärlon mit 6% Organobentonit	Wasser		synthetisches SW		Triechnadamin 1%		natürliches SW		Phenol 1%		Propion-Essigsäure 10%	
	wl	wp	wl	wp	wl	wp	wl	wp	wl	wp	wl	wp
	50,2	22,4	47,7	23,0	57,9	23,8	50,6	24,5	44,0	24,4	42,7	20,6
	46,6	22,6	44,4	20,3	48,8	22,8	53,2	23,4	55,5	24,5	50,5	20,9
	47,0	21,6	44,7	20,3	55,7	19,5	48,7	23,3	55,4	25,9	47,5	19,0
	48,0	21,0	46,6	18,9	47,2	22,1	51,2	24,4	52,2	24,3		
	49,5	21,3			57,1	22,1	53,9	22,5	53,3	24,4		
	60,9	22,3			56,7	21,3			52,2	25,8		
	61,3	22,3							48,2	23,5		
	56,1	20,2										
	56,2	22,0										
	56,2	22,9										
	55,5	22,9										
Anzahl	11		4		6		5		7		5	
Mittelwert	53,4	21,9	45,9	20,7	53,9	22,3	51,5	23,6	51,5	24,7	46,9	20,2
s [-]	5,4	0,8	5,3	1,6	4,7	2,1	4,9	0,8	4,1	0,9	3,8	1,0
y=σ/x [%]	10,0	3,6	16,7	3,4	8,6	9,3	15,6	4,0	8,0	3,5	8,4	5,1
Minimum	46,6	20,2	44,4	18,9	47,2	19,5	48,7	22,5	44,0	23,5	42,7	19,0
Maximum	61,3	22,9	47,7	23,0	57,9	25,8	53,9	24,5	55,5	25,9	50,5	20,9
												29,6

Tab. A3, Fortsetzung

Anhang 6: EINBAUANFORDERUNG AN EINE MINERALISCHE
DEPONIEBASISABDICHTUNG

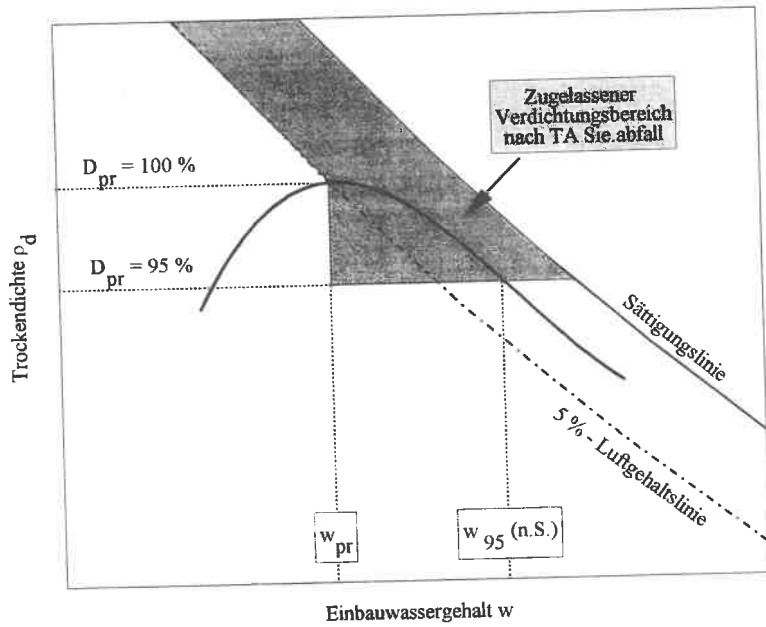


Abb. A5: Geforderter Verdichtungsbereich der TA ABFALL für mineralische Basisabdichtungen

Anhang 7:

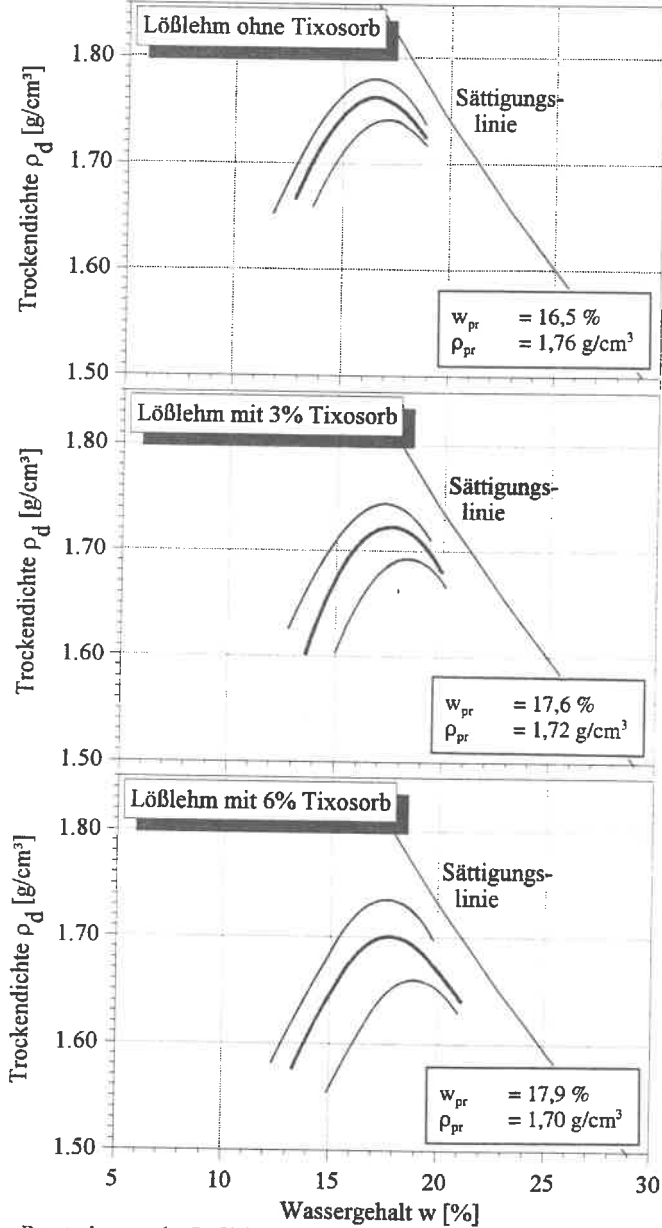


Abb. A6: Proctorkurven des Lößlehms und seinen Mischungen,
Mittel-, Maximal- und Minimalwerte

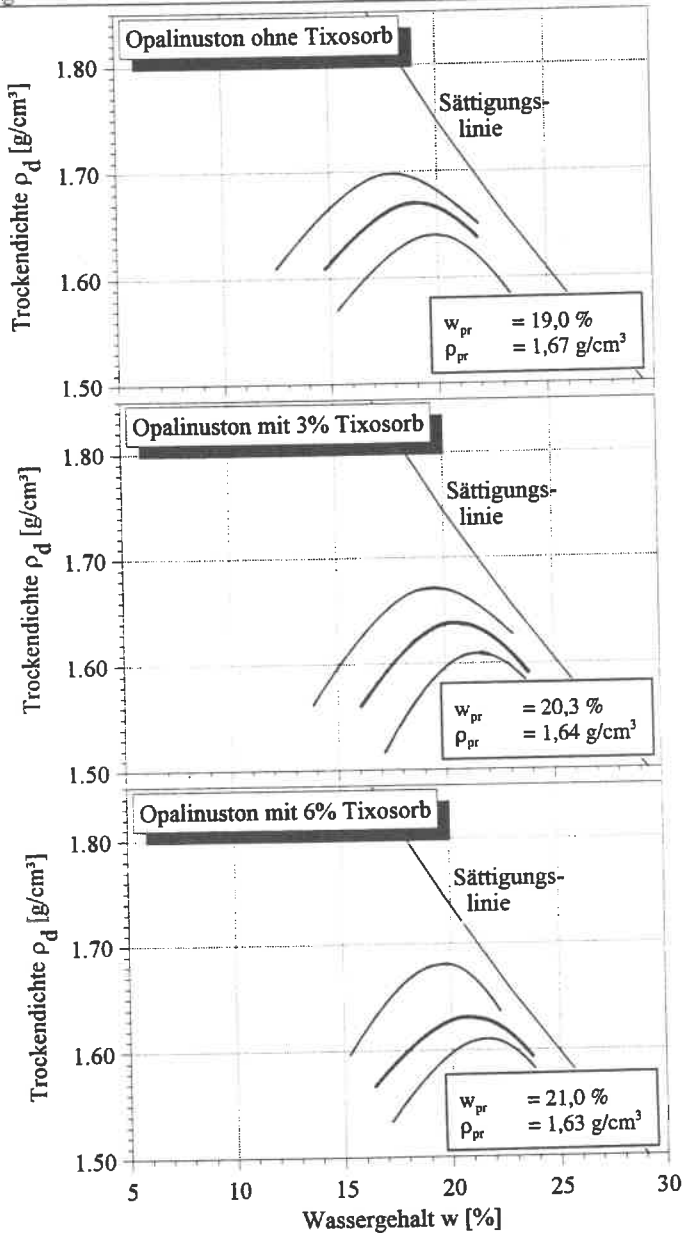


Abb. A7: Proctorkurven des Opalinustons und seinen Mischungen; Mittel-, Maximal- und Minimalwerte

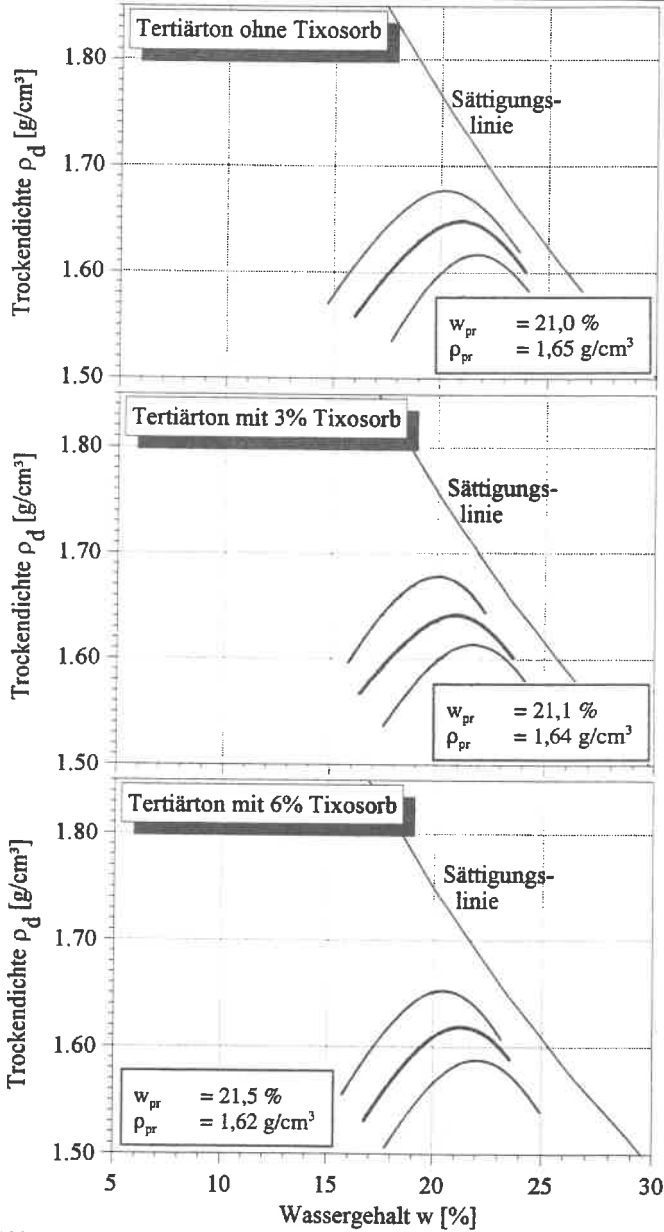


Abb. A8: Proctorkurven des Tertiärtons und seinen Mischungen; Mittel-, Maximal- und Minimalwerte

Anhang 8: PROCTORWERTE DER UNTERSUCHTEN BÖDEN UND DEREN MISCHUNGEN

	Organo- bentonit [%]	w_{pr} (Stand.abw.) [%]	ρ_{pr} (Stand.abw.) [g/cm ³]	w_{95} (nasse S.) [%]	95% ρ_{pr} [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]
Lößlehm	0	16,5 (0,67)	1,76 (0,02)	20,5	1,67	2,67
	3	17,6 (0,60)	1,72 (0,02)	21,8	1,63	2,66
	6	17,9 (0,75)	1,70 (0,03)	22,0	1,62	2,65
Opalinuston	0	19,0 (0,90)	1,67 (0,02)	23,5	1,59	2,69
	3	20,3 (0,96)	1,64 (0,02)	24,5	1,56	2,68
	6	21,0 (1,02)	1,63 (0,03)	25,0	1,55	2,66
Tertiärton	0	21,0 (0,74)	1,65 (0,02)	25,0	1,57	2,73
	3	21,1 (0,81)	1,64 (0,03)	25,0	1,56	2,71
	6	21,5 (0,91)	1,62 (0,03)	25,0	1,54	2,69

Tab. A4: Proctorwerte inkl. Korndichte der Böden und deren Mischungen

Anhang 9: RANDBEDINGUNGEN UND ERGEBNISSE DER DURCHLÄSSIGKEITSVERSUCHE

Durchströmung von LÖBLEHM ohne ORGANOBENTONIT mit WASSER												
Bezeichnung	Verdichtungsgrad D_p	Abmessungen d/h [cm] Sättigungsgrad S_r [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)			Durchströmungsversuch				Eluat		
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_s [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.sp. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	e.l. Leitföh. [mS/cm] Max (PAR)	Endwert Tendenz	
LL1 LL0-1a	98 nasse S.	9,60/8,00 88	17,9 (-)	1,73 (-)	150 200	136 156	19.11.94 84 1,4	2,8E-11 2,6E-11	const. 7,3	const. 7,3	-	0,9 const.
LL4 LL0-1 LL0D1C12	95 nasse S.	9,55/8,05 90	19,9 (17,8)	1,68 (1,77)	200	130	19.5.95 88 3,0	2,5E-11	schwach abnehm. 7,4	const. 7,4	-	0,9 const.
LL5 LL0-7	97 Opt.	9,59/8,00 77	16,4 (-)	1,70 (-)	200	130	8.7.95 41 3,0	1,1E-10	const. 7,4	const. 7,4	-	0,8 const.
LL5 LL0-4 LL0D1C13	102 trock. S.	9,59/7,94 71	13,1 (18,2)	1,79 (1,79)	200	130	8.7.95 48 2,8	7,0E-11	const. 7,5	const. 7,5	-	0,8 const.
LL7 LL0-8 LL0D1C16	97 trock. S.	9,58/7,95 61	13,0 (19,4)	1,70 (1,75)	200 150	130 100	14.7.95 70 5,5	2,8E-10 2,8E-10	const. 7,5	const. 7,5	-	0,6 const.
LL8 LL0-10 LL0D1C18	98 trock. S. Opt.	9,57/7,85 75	15,6 (21,2)	1,72 (1,71)	200	130	31.10.95 131 4,7	6,8E-11	const. 7,4	const. 7,4	-	0,6 const.
LL8 LL0-11	91 nasse S.	9,57/7,95 92	23,1 (-)	1,60 (-)	200	130	31.10.95 141 2,4	3,3E-11	const. 7,4	const. 7,4	-	0,8 const.
LL8 LL0-12 LL0D1C17	102 trock. S.	9,57/7,80 64	11,7 (21,5)	1,79 (1,71)	200	130	31.10.95 121 9,2	1,8E-10	const. 7,5	const. 7,5	-	0,6 const.

Tab. A5: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche

Durchströmung von LÖBLEHM ohne ORGANOBEINTONIT mit TRIETHANOLAMIN (1%)										
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_w [%]	Abmes- sungen d/h [cm] Sättigungs- grad S_s [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)		Durchströmungsversuch				Eluat	
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_s [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.spg. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	el. Leitföh. [mS/cm] Max. (PAR) Endwert Tendenz
LL2 LLO-1b LLOD1CT1	93 masse S.	9,61/8,10 87	20,5 (16,6)	1,64 (1,81)	30 50 100 150	77 88 116 136	16,2/95 159 2,5	2,0E-10 7,7E-11 5,7E-11 4,4E-11	schwach zunehm. 7,6 Min=6,8	- 0,6 const.
LL4 LLO-3 LLOD1CT2	95 masse S.	9,61/8,00 90	19,9 (19,0)	1,68 (1,76)	200	130	19,5/95 107 1,9	2,6E-11	const. 7,6	0,8 const.
LL6 LLO-5 LLOD1CT4	102 trock. S.	9,59/7,93 72	13,1 (16,7)	1,80 (1,82)	200	130	29,6/95 78 5,0	7,3E-11	const. 7,4	- 0,5 const.
LL6 LLO-6 LLOD1CT3	97 trock. S.	9,59/8,00 77	16,4 (18,4)	1,70 (1,79)	200	130	29,6/95 63 6,0	1,2E-10	schwach zunehm. 9,1	- 0,3 const.
LL7 LLO-9 LLOD1CT5	96 trock. S.	9,58/7,72 61	13,2 (17,4)	1,69 (1,78)	200 150	130 100	14,7/95 98 5,5	2,8E-10	schwach zunehm. 8,9	- 0,4 const.

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von LÖBLEHM + 3 % ORGANOBENTONIT mit WASSER													
Verdichtungsgrad			Abmessungen		Einbaudaten Durchl.		Durchströmungsversuch					Eluat	
Versuchs- serie	WD-Probe Triax-Probe	D _{pr} [%]	Sättigungs- grad S _r [%]	d/h [cm]	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ _d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff Kons.spg. σ _c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k ₁₀ -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	el. Leitföh. [mS/cm]	
												Max. (PAR)	Endwert Tendenz
LL1 LL3-1 LL3D1C01		95	9,60/8,00 86		20,0 (20,8)	1,64 (1,69)	150 200	136 156	19,11,94 84 1,6	9,1E-11 8,5E-11	const. 7,1	5,1 (0,5)	2,5 schwach abnehm.
LL9 LL3-4 LL3D1CW3		100	9,60/7,88 86		17,6 (18,6)	1,72 (1,76)	150	136	16,3,95 95 1,8	5,6E-11	const. 7,3	5,6 (0,3)	2,0 abnehm.
LL10 LL3-2 LL3D1CW2		98	9,60/8,00 68		15,0 (19,9)	1,68 (1,70)	150	136	11,3,96 59 1,2	3,2E-10	-	-	-
LL11 LL3-5 LL3D1CW4		105	9,59/7,95 77		13,8 (17,8)	1,80 (1,80)	200	130	5,7,95 57 1,1	6,1E-11	const. 7,3	5,4 (0,5)	2,4 abnehm.
LL11 LL3-6 LL3D1CW5		97	9,60/7,92 76		16,9 (19,4)	1,67 (1,73)	200	130	5,7,95 57 1,3	2,4E-10	const. 7,2	4,9 (0,4)	2,2 abnehm.

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von LÖBLEHM + 3 % ORGANOBEONTONIT mit TRIETHANOLAMIN (1 %)										
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_r [%]	Abmes- sungen d/h [cm] Sättigungs- grad S_s [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)		Durchströmungsversuch					
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.sp.g. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	Eluat el. Leitföh. [mS/cm] Max. Endwert (PAR) Tendenz
LL2 LL3-2 LL3D1CT1	93 nassee S.	9,61/8,00 87	21,7 (18,9)	1,60 (1,74)	30 50 100 150	77 88 116 136	16,2 94 163 2,3	2,3E-10 1,8E-10 1,0E-10 8,9E-11	schwach zunehm. 7,6	1,6 (0,5)* const.
LL9 LL3-3 LL3D1CT2	100 Opt.	9,60/7,93 86	17,6 (18,5)	1,72 (1,77)	150	136	16,3 96 95 1,8	4,5E-11	schwach zunehm. 7,5	3,0 (**) const.
LL10 LL3-1 LL3D1CT3	98 trock. S.	9,60/7,98 68	15,0 (18,4)	1,68 (1,75)	150	136	11,3 96 122 4,0	2,7E-10	schwach zunehm. 8,9	kein Max. const.
LL3 LL3-7 LL3D1CT4	101 trock. S.	9,59/7,95 73	14,5 (18,8)	1,74 (1,76)	200	130	15,10 95 96 4,1	1,0E-10	schwach zunehm. 8,8	kein Max. const.

* nach Triethanolaminzugabe
** relatives Maximum

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von LÖBLEHM + 6 % ORGANO BentonIT mit WASSER											
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_{pr} [%]	Abmes- sungen d/h [cm] Sättigungs- grad S_r [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)		Durchströmungsversuch					Eluat	
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons spg. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	el. Leitföh. [mS/cm] Max. (PAR)	Endwert Tendenz
LL1 LL6-1 LL6D1C01	99 nasse S.	9,57/7,85 91	19,6 (21,0)	1,69 (1,69)	150 200	136 156	19.11.94 77 1,9	4,5E-11 2,9E-11	const. 7,2	6,9 (0,25)	2,3 abnehm.
LL3 LL6D1C02	106 trock. S.	9,60/7,96 78	13,7 (17,3)	1,81 (1,81)	200	130	15.10.95 43 2,5	6,5E-11	const. 7,3	7,2 (0,3)	2,1 schwach abnehm.
LL3 LL6D1C03	98 trock. S.	9,59/7,98 73	16,2 (19,0)	1,67 (1,72)	200	130	15.10.95 35 2,3	3,4E-10	const. 7,2	6,8 (0,4)	2,4 schwach abnehm.

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von LÖBLEHM + 6 % ORGANOEBENTONIT mit TRIETHANOLAMIN (1 %)												
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe		Verdich- tungs- grad D_{pr} [%]	Abmes- sungen d/h [cm] Sättigungs- grad S_s [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)			Durchströmungsversuch				Eluat	
				Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.sp.g. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	el. Leitföh. [mS/cm] Max. (PAR)	Endwert Tendenz
LL2 LL6-2 LL6D1CT1	99 masse S.	9,60/8,00 89	19,5 (18,6)	1,68 (1,71)	30 50 100 150	77 88 116 136	16,2/94 138 3,6	2,2E-11 9,0E-11 9,0E-11 6,5E-11	schwach zunehm. 7,2	1,5 (0,75)* 0,7 abnehm.		
LL9 LL6-2 LL6D1CT2	101 trock. S.	9,60/7,78 74	15,2 (19,7)	1,72 (1,71)	150	136	16,4/96 57 2,5	1,4E-10	schwach zunehm. 7,5	3,0 (**) 0,7 const.		
LL10 LL6-1 LL6D1CT3	98 trock. S.	9,60/7,98 70	15,6 (19,9)	1,67 (1,70)	150	136	22,3/96 97 3,8	3,1E-10	zunehm. 8,7	1,1 (**) 0,5 const.		

* nach Triethanolaminzugabe

** relatives Maximum

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von OPALINUSTON ohne ORGANOBENTONIT mit WASSER												
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_{pr} [%]	Abmes- sungen dh [cm] Sättigungs- grad S_i [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)			Durchströmungsversuch					Eluat	
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.sp.g. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]	el. Leitföh. [mS/cm]		
										Max. (PAR)	Endwert Tendenz	
OT3 OT3-0 OT0D1C01	98 nahe S.	9,57/8,00 93	22,3 (26,0)	1,64 (1,58)	200	130	10,3,95 65 2,7	5,0E-11	const. 7,0	kein Max. (-)	0,6 const.	

Durchströmung von OPALINUSTON ohne ORGANOBENTONIT mit TRIETHANOLAMIN (1 %)											
Bezeichnung:		Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)			Durchströmungsversuch					Eluat	
Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_{pr}	Abmes- sungen dh [cm]	Wasser- gehalt w	Trocken- dichte ρ_d	hydraul. Gradient i	eff. Kons.sp.g. σ_c	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert	Verlauf pH-Wert	el. Leitföh. [mS/cm]	
	[%]	S_r [%]	[%]	[g/cm ³]	[-]	[kPa]		[m/s]	[-]	Max. (PAR)	
	100	9,59/7,90 97	22,0 (21,7)	1,67 (1,70)	150 400	136 236	6,8,94 121 2,3	3,0E-11 2,1E-11	const. 7,4	kein Max. (-)	
	OT1 OT1-0 OT0DICT1	nasse S.								0,7 const.	

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von OPALINUSTON + 3 % ORGANOBENTONIT mit WASSER									
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_r [%]	Abmes- sungen d/h [cm] Sättigungs- grad S_r [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)				Durchströmungsversuch		
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.sp.g. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]
OT3	98	9,57/7,95	22,7	1,61	200	130	10,3-95	9,6 bis	const.
OT3-3	masse S.	91	(25,2)	(1,60)			49	1,0E-11	7,0
OT3D1C01							3,0		
									Endwert Tendenz
									Max. (PAR)
									5,3 (**)
									1,0 const.

Durchströmung von OPALINUSTON + 3 % ORGANOBENTONIT mit TRIETHANOLAMIN (1 %)									
Bezeichnung: Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe	Verdich- tungs- grad D_r [%]	Abmes- sungen d/h [cm] Sättigungs- grad S_r [%]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)				Durchströmungsversuch		
			Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	hydraul. Gradient i [-]	eff. Kons.sp.g. σ_c [kPa]	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [-]
OT1	100	9,58/7,92	23,1	1,61	150	136	6,8-94	3,6E-11	schwach
OT1-3	masse S.	97	(22,6)	(1,67)	400	236	126	1,7E-11	zunehm.
OT3D1T1							2,0	7,6	
									Endwert Tendenz
									Max. (PAR)
									5,5 (**)
									0,8 const.

Tab. A5, Fortsetzung

Durchströmung von OPALINUSTON + 6 % ORGANO Bentonit mit WASSER									
Bezeichnung:	Verdichtungsgrad D_{pr}	Abmessen Sättigungsgrad d/h [cm]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)			Durchströmungsversuch			
			Wasser- gehalt w	Trocken- dichte ρ_s	hydraul. Gradient i	eff. Kons.spg. α_c	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [$-$]
Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe									el. Leitföh. [mS/cm]
									Max. (PAR)
									Endwert Tendenz
OT3	98	9,57/8,00	22,3	1,60	200	130	10,3,95	1,7E-11	const.
OT3-6	masse S.	89	(25,2)	(1,59)			42		7,1
OT6D1C01							4,7		4,2 (**)
									const.

Durchströmung von OPALINUSTON + 6 % ORGANO Bentonit mit TRIETHANOLAMIN (1 %)									
Bezeichnung:	Verdichtungsgrad D_{pr}	Abmessen Sättigungsgrad d/h [cm]	Einbaudaten Durchl. (Einbaudaten Triax)			Durchströmungsversuch			
			Wasser- gehalt w	Trocken- dichte ρ_s	hydraul. Gradient i	eff. Kons.spg. α_c	Beginn Dauer: Tage PAR	k_{10} -Wert [m/s]	Verlauf pH-Wert [$-$]
Versuchs- serie WD-Probe Triax-Probe									el. Leitföh. [mS/cm]
									Max. (PAR)
									Endwert Tendenz
OT1	100	9,58/7,95	22,7	1,61	150	136	68,94	4,8E-11	schwach zunehm.
OT1-6	masse S.	96	(22,7)	(1,66)	400	236	106	2,5E-11	7,4
OT6D1C11							2,3		8,8 (**)
									schwach abnehm.

Tab. A5, Fortsetzung

Anhang 10: RANDBEDINGUNGEN UND AUSWERTUNG DER TRIAXIALVERSUCHE

Scherfestigkeit von LÖBLEHM ohne ORGANOBEINTONIT												
Durchströmungsgeschichte	Einbaudaten (WD-Anlage)				Einbaudaten (Triax)					Aushauwasser-gehalt w [%]	eff. Seiten-druck σ'_3 [kPa]	Scherparameter ϕ' [°] c' [kPa]
	Probenbezeichnung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_{st} [%] S_t [%]	i [-] mittl. Spg. σ_a [kPa] Dauer	Abmessungen dh [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser-gehalt w [%]	Trocken-dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdichtungs-grad [%]	Poren-zahl e [-]	Sättigungs-grad S_r [%]			
keine Durchströmung	LL0 DOC01	/	/	9,6/12,0 3,60/8,05 3,60/8,05 3,60/8,05	16,2 16,2 16,2	1,82 1,82 1,82	103 Opt.	0,47 0,47 0,47	93 93 93	18,3 18,7 17,5	200 100 400	22,1° 67,4
	LL0 DOC02	/	/	9,6/12 3,60/8,05 3,60/8,05 3,60/8,05	17,1 17,1 16,9	1,78 1,78 1,78	101 nasse S.	0,50 0,50 0,50	91 91 90	18,0 17,1 18,8	200 400 100	20,8° 59,2
	LL0 DIC12	19,9 1,68 95 90	200 130 3 Monate	9,53/7,87 3,61/7,90 3,60/7,85 3,61/7,86	17,8 17,7 18,0	1,77 1,78 1,77	101 nasse S.	0,51 0,50 0,51	93 95 95	19,7 18,7 17,4	100 200 400	21,8° 39,5
Durchströmung mit Wasser	LL0 DIC13	13,1 1,79 102 71	200 130 1,5 Monate	9,66/7,95 3,59/7,96 3,59/7,91 3,60/7,92	18,0 18,5 18,0	1,81 1,78 1,79	102 nasse S.	0,48 0,50 0,49	101 99 98	16,0 18,2 17,3	400 100 200	23,3° 47,3
	LL0 DIC16	13,0 1,70 97 61	155 100 2 Monate	9,47/7,71 3,60/7,73 3,60/7,77 3,60/7,69	19,2 19,5 19,4	1,75 1,76 1,74	99 nasse S.	0,52 0,52 0,53	98 101 98	18,8 18,0 17,1	100 200 400	24,6° 29,5
	LL0 DIC17	11,7 1,79 102 64	205 130 5 Monate	9,67/7,94 3,58/7,95 3,57/7,87 3,60/7,88	21,1 21,7 21,6	1,72 1,72 1,69	97 nasse S.	0,55 0,56 0,58	102 104 100	20,6 10,1 19,0	100 200 400	23,6° 36,8

Tab. A6: Ergebnisse der Triaxialversuche

SCHERFESTIGKEIT von LÖBLEHM ohne ORGANOBENTONIT												
Einbaudaten (WD-Anlage)			Einbaudaten (Triax)								eff. Seiten- druck σ'_s [kPa]	Scher- parameter ϕ' [°] c' [kPa]
Durch- strömungs- geschichte	Proben- bezeich- nung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_{10} [%] S_r [%]	i [-] mittl. Spg. α_m [kPa] Dauer	Abmessungen d/h [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdich- tungs- grad [%]	Poren- zahl e [-]	Sättigungs- grad S_r [%]	Ausbau- wasser- gehalt w [%]		
Durch- strömung mit Wasser	LL0	15,6	204	9,59/7,75	21,2	1,71	97	0,56	101	19,1	21,9°	
	D1C18	1,72 98 76	130 4 Monate	3,60/7,81 3,60/7,76 3,60/7,77	21,3 21,2	1,71 1,70	nasse S.	0,56 0,57	101 100	18,3 20,5	39,7	
	LL0 D1C11	20,5 1,64 93 87	150 136 3 Monate	9,6/8,0 3,60/7,85 3,60/7,85 3,60/7,85	16,8 16,2 16,8	1,80 1,83 1,81	103 Opt.	0,48 0,46 0,48	93 94 94	19,7 17,9 16,6	21,8° 33,8	
Durch- strömung mit Trieth. amin		19,9 1,68 95 90	200 130 3,5 Monate	9,55/7,84 3,60/7,81 3,60/7,83 3,60/7,80	19,0 18,9 19,0	1,75 1,77 1,76	100 nasse S.	0,52 0,51 0,51	98 99 99	20,0 19,0 18,0	20,7° 48,5	
	LL0 D1C13	16,4 1,70 97 77	200 130 2 Monate	9,55/7,87 3,60/7,84 3,60/7,87 3,58/7,80	18,3 18,4 18,5	1,79 1,79 1,79	102 nasse S.	0,49 0,50 0,49	99 99 101	18,4 17,1 19,0	22,4° 56,7	
	LL0 D1C14	13,1 1,80 102 72	200 130 2,5 Monate	9,62/7,95 3,60/7,91 3,60/7,90 3,58/7,99	16,8 16,9 16,4	1,82 1,82 1,83	104 Opt.	0,47 0,46 0,46	96 97 96	17,4 19,0 17,9	25,0° 75,8	
	LL0 D1C15	13,2 1,69 96 60	159 109 3 Monate	9,64/7,58 3,61/3,60 3,60/7,58 3,59/7,57	17,5 17,3 17,4	1,76 1,78 1,79	101 nasse S.	0,51 0,50 0,50	91 93 94	17,6 16,2 18,1	23,8° 58,0	

Tab. A6, Fortsetzung

SCHERFESTIGKEIT von LÖBLEHM mit 3 % ORGANOBENTONIT												
Durchströmungs-geschichte	Einbaudaten (WD-Anlage)				Einbaudaten (Triax)					eff. Seiten-druck σ'_s [kPa]	Scher-parameter ϕ' [°] c' [kPa]	
	Proben-bezeich-nung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_r [%] S_r [%]	i [-] mitl. Spg. σ_a [kPa] Dauer	Abmessungen d/h [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser-gehalt w [%]	Trocken-dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdichtungs-grad [%]	Poren-zahl e	Sättigungs-grad S_r [%]			Aushau-wasser-gehalt w [%]
keine Durchströmung	LL3 DOC01	/	/	10,0/12,0 3,60/8,07 3,60/8,06 3,60/8,04	18,8 18,8 18,8	1,70 1,71 1,70	99 nasse S.	0,53 0,52 0,53	89 90 89	18,2 19,3 20,0	400 200 100	22,8° 55,9
	LL3 DOC02	/	/	10,0/12,0 3,60/8,07 3,60/8,08 3,60/8,07	20,0 20,0 20,1	1,65 1,64 1,65	96 nasse S.	0,57 0,58 0,57	87 86 87	17,4 20,0 19,0	400 100 200	21,0° 36,1
	LL3 DOC03	/	/	9,6/11,99 3,58/8,05 3,55/8,05 3,60/8,05	17,7 18,2 17,7	1,72 1,73 1,73	101 Opt.	0,55 0,54 0,54	86 90 88	19,9 19,5 18,1	100 200 400	20,6 60,9
Durchströmung mit Wasser	LL3 DOC04	/	/	9,6/12,02 3,59/8,05 3,59/8,04 3,59/8,04	15,5 15,4 15,2	1,72 1,71 1,72	100 trock. S.	0,55 0,56 0,55	75 73 74	18,7 17,9 19,1	200 400 100	21,5° 49,0
	LL3 D1C01	20,0 1,64 95 86	200 156 3 Monate	9,59/7,78 3,62/7,78 3,61/7,76 3,61/7,78	20,6 20,8 20,9	1,69 1,70 1,69	98 nasse S.	0,57 0,56 0,57	95 98 97	17,8 20,1 19,3	400 100 200	21,0° 33,9
	LL3 D1C02	15,0 1,68 98 68	150 136 2 Monate	9,60/7,91 3,57/7,97 3,60/7,81 3,59/7,92	19,6 20,4 19,7	1,72 1,67 1,72	99 nasse S.	0,54 0,59 0,55	96 92 96	19,3 18,7 17,3	100 200 400	23,1° 35,9

Tab. A6, Fortsetzung

SCHERFESTIGKEIT von LÖBLEHM mit 3 % ORGANOBENTONIT											
Einbaudaten (WD-Anlage)			Einbaudaten (Triax)							Scher- parameter φ' [°] c' [kPa]	
Durch- strömungs- geschichte	Proben- bezeich- nung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_{50} [%] S_u [%]	i [-] mittl. Spg. σ_m [kPa] Dauer	Abmessungen d/h [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdich- tungs- grad [%]	Poren- zahl e [-]	Sättigungs- grad S_r [%]		Ausbau- wasser- gehalt w [%]
Durch- strömung mit Wasser	LL3 D1CW3	17,6 1,72 100 85	150 136 3 Monate	9,62/7,81 3,54/7,82 3,58/7,82 3,58/7,78	18,5 18,6 18,6	1,76 1,77 1,76	103 nassee S.	0,51 0,51 0,51	96 98 96	18,5 18,5 20,5	200 400 100
	LL3 D1CW4	13,8 1,80 105 77	200 130 2 Monate	9,58/7,95 3,59/7,95 3,58/7,94 3,59/7,95	17,9 17,8 17,7	1,80 1,80 1,81	105 nassee S.	0,48 0,48 0,47	100 99 100	19,7 17,8 20,2	200 400 100
	LL3 D1CW5	16,9 1,67 97 76	200 130 2 Monate	9,59/7,93 3,60/7,92 3,59/7,92 3,58/7,93	19,4 19,4 19,5	1,73 1,73 1,74	99 nassee S.	0,56 0,56 0,57	96 96 98	19,9 19,2 18,0	100 200 400
	LL3 D1CT1	21,7 1,60 93 87	150 136 5,5 Monate	9,60/8,00 3,60/7,75 3,60/7,75 3,60/7,80	19,0 18,9 18,8	1,74 1,73 1,76	101 nassee S.	0,53 0,54 0,51	96 94 98	19,6 18,0 18,0	100 200 400
Durch- strömung mit Trieth. amin	LL3 D1CT2	17,6 1,72 100 86	214 171 3 Monate	9,54/7,82 3,60/7,82 3,57/7,80 3,57/7,84	18,6 18,3 18,7	1,77 1,77 1,76	103 nassee S.	0,50 0,50 0,51	99 97 97	19,1 18,3 17,2	100 200 400
	LL3 D1CT3	15,0 1,68 98 68	212 171 4 Monate	9,60/7,80 3,59/7,81 3,59/7,80 3,60/7,81	18,4 18,3 18,4	1,76 1,76 1,72	102 nassee S.	0,51 0,51 0,55	95 95 89	17,6 16,0 15,5	100 200 400
											20,6° 53,1
											21,2° 69,8
											20,5° 39,1
											23,0° 16,1
											21,9° 46,9
											25,6° 34,6

Tab. A6, Fortsetzung

SCHERFESTIGKEIT von LÖBLEHM mit 3 % ORGANOBENTONIT											
Einbaudaten (WD-Anlage)				Einbaudaten (Triax)				Sättigungs- grad S_r [%]	Ausbau- wasser- gehalt w [%]	eff. Seiten- druck σ'_v [kPa]	Scher- parameter ϕ' [°] c' [kPa]
Durch- strömungs- geschichte	Proben- bezeich- nung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_{50} [%] S_r [%]	i [-] mittl. Spg. σ'_m [kPa] Dauer	Abmessungen d/h [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdich- tungs- grad [%]	Poren- zahl e [-]			
Durch- strömung mit Trieth. amin	LL3 D1CT4	14,5	200	9,60/7,96	18,9	1,75	102	0,52	17,9	200	24,3°
		1,74	130	3,60/7,96	18,6	1,76	102	0,51	19,5	100	45,6
		101	3 Monate	3,59/7,95	18,8	1,76	102	0,51	17,3	400	

Tab. A6, Fortsetzung

SCHERFESTIGKEIT von LÖBLEHM mit 6 % ORGANOBENTONIT												
Einbaudaten (WD-Anlage)			Einbaudaten (Triax)									
Durchströmungs-geschichte	Proben-bezeich-nung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_r [%] S_t [%]	i [-] mittl. Spg. σ_m [kPa] Dauer	Abmessungen d/h [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdich- ungs- grad [%]	Poren- zahl e [-]	Sättigungs- grad S_s [%]	Ausbau- wasser- gehalt w [%]	eff. Seiten- druck σ'_v [kPa]	Scher- parameter φ [°] c' [kPa]
keine Durchströmung	LL6 DOC01	/	/	10,0/12,0 3,60/8,06 3,60/8,06 3,60/8,06	18,4 18,2 18,5	1,67 1,67 1,67	99 Opt.	0,58 0,58 0,58	83 82 85	20,8 19,0 20,1	100 400 200	22,1° 35,1
	LL6 DOC02	/	/	10,0/12,0 3,60/8,04 3,61/8,05 3,60/8,05	17,9 17,9 18,0	1,71 1,72 1,71	101 Opt.	0,55 0,54 0,55	86 88 87	20,0 18,7 18,7	100 200 400	22,4° 49,4
	LL6 DOC03			10,0/12,0 3,61/8,07 3,61/8,08 3,60/8,09	20,2 20,2 20,1	1,66 1,66 1,67	98 nasse S.	0,60 0,60 0,59	90 90 91	21,0 19,7 18,5	100 200 400	19,9° 37,1
	LL6 DOC04			9,61/12,01 3,58/8,05 3,59/8,04 3,58/8,04	15,4 15,3 15,3	1,71 1,68 1,70	100 trock. S.	0,55 0,58 0,56	74 70 72	18,3 20,4 19,4	400 100 200	21,5° 38,6
	LL6 DOC05			9,60/11,99 3,57/8,05 3,59/8,04 3,58/8,06	15,4 15,5 15,3	1,73 1,73 1,76	102 trock. S.	0,53 0,53 0,51	77 77 80	20,2 19,2 18,0	100 200 400	22,3° 54,1
	LL6 DIC01 (LL1)	19,6 1,69 99 91	200 156 3 Monate	9,58/7,76 3,61/7,67 3,60/7,74 3,61/7,71	21,0 21,0 21,0	1,69 1,69 1,69	99 nasse S.	0,57 0,57 0,57	98 98 98	20,9 19,7 18,4	100 200 400	21,7° 43,4

Tab. A6, Fortsetzung

SCHERFESTIGKEIT von LÖBLEHM mit 6 % ORGANOBEINTONIT												
Durchströmungsgeschichte	Einbaudaten (WD-Anlage)			Einbaudaten (Triax)					Ausbauwasser-gehalt w [%]	eff. Seiten-druck σ'_3 [kPa]	Schерparameter φ' [°] c' [kPa]	
	Proben-bezeichnung	w [%] ρ_d [g/cm ³] D_r [%] S_r [%]	i [-] mittl. Spg. σ_m [kPa] Dauer	Abmessungen d/h [cm] Zylinder Triaxproben	Wasser-gehalt w [%]	Trocken-dichte ρ_d [g/cm ³]	Verdich-tungs-grad [%]	Poren-zahl e [-]				Sättigungs-grad S_r [%]
Durchströmung mit Wasser	LL6	13,7	200	9,57/7,76	17,0	1,82	106	0,46	99	400	19,3°	
	D1C02	1,81 106 1,78	130 1,5 Monate	3,67/7,78 3,67/7,79 3,67/7,76	17,1 17,2	1,80 1,80	nasse A.	0,47 0,47	96 97	200 100	64,4	
	LL6	16,2	200	9,58/7,78	20,1	1,67	98	0,59	90	200	19,8°	
	D1C03	1,67 98 73	130 1 Monat	3,67/7,78 3,67/7,77 3,67/7,77	20,0 20,0	1,68 1,67	nasse S.	0,58 0,59	92 90	400 100	31,3	
Durchströmung mit Trieth. amin	LL6	19,5	150	9,60/8,00	18,4	1,72	100	0,54	90	200	22,7°	
	D1CT1	1,68 99 89	136 4 Monate	3,60/8,06 3,60/8,00 3,60/7,90	18,7 18,8	1,69 1,71	nasse S.	0,57 0,55	87 91	400 100	51,6	
	LL6	15,2	150	9,56/7,74	19,7	1,70	100	0,56	93	400	24,3°	
	D1CT2	1,72 101 74	136 2 Monate	3,60/7,74 3,60/7,74 3,60/7,72	19,7 19,7	1,69 1,73	nasse S.	0,57 5,53	92 99	100 200	51,1	
	LL6	15,6	150	9,62/7,94	20,0	1,69	100	0,57	93	100	25,3°	
	D1CT3	1,67 98 71	136 3 Monate	3,59/7,94 3,59/7,94	19,7	1,70	nasse S.	0,56	93	400	37,7	

Tab. A6, Fortsetzung

Anhang 11: GLEICHUNGEN FÜR DIE VERTEILUNG VON ORGANOBENTONIT

Ausgehend von den folgenden Grundgleichungen werden Formeln für den theoretisch zu erwartenden Soll-Wert des Glühverlusts einer Organobentonit-Mischung (Soll V_{gl}^M) und dem tatsächlich vorhandenen Gehalt an Organobentonit in einer Mischung (Ist OB) hergeleitet.

$$V_{gl}^{OB} = \frac{m_{org}^{OB}}{m_d^{OB}} \quad [1], \quad V_{gl}^B = \frac{m_{org}^B}{m_d^B} \quad [2] \quad \text{bzw.} \quad m_d^{OB} = \text{Soll OB} \cdot m_d^B \quad [3]$$

Der Glühverlust einer Mischung ergibt sich aus:

$$V_{gl}^M = \frac{m_{org}^M}{m_d^M} = \frac{m_{org}^{OB} + m_{org}^B}{m_d^{OB} + m_d^B}$$

$$\text{mit [1] und [2]:} \quad = \frac{V_{gl}^{OB} m_d^{OB} + V_{gl}^B m_d^B}{m_d^{OB} + m_d^B}$$

$$\text{mit [3]:} \quad = \frac{V_{gl}^{OB} \text{Soll OB } m_d^B + V_{gl}^B m_d^B}{\text{Soll OB } m_d^B + m_d^B}$$

$$\Rightarrow \text{Soll } V_{gl}^M = \frac{V_{gl}^{OB} \text{Soll OB} + V_{gl}^B}{\text{Soll OB} + 1} \quad \text{Gl.I}$$

Ersetzt man in Gl. I "Soll" durch "Ist", so kann man aus dem tatsächlich gemessenen Glühverlust-Wert der Mischung den tatsächlich vorhandenen Organobentonit-Anteil in der Mischung ermitteln.

$$\text{Ist OB} = \frac{\frac{V_{gl}^B}{\text{Ist } V_{gl}^M} - 1}{1 - \frac{V_{gl}^{OB}}{\text{Ist } V_{gl}^M}}$$

ANHANG 12: AUFTRAGUNG DER EFFEKTIVEN KOHÄSIONEN DES LÖBLEHMS UND SEINER MISCHUNGEN IN DAS SÄTTIGUNGSGRAD-TOCKENDICHTE-DIAGRAMM

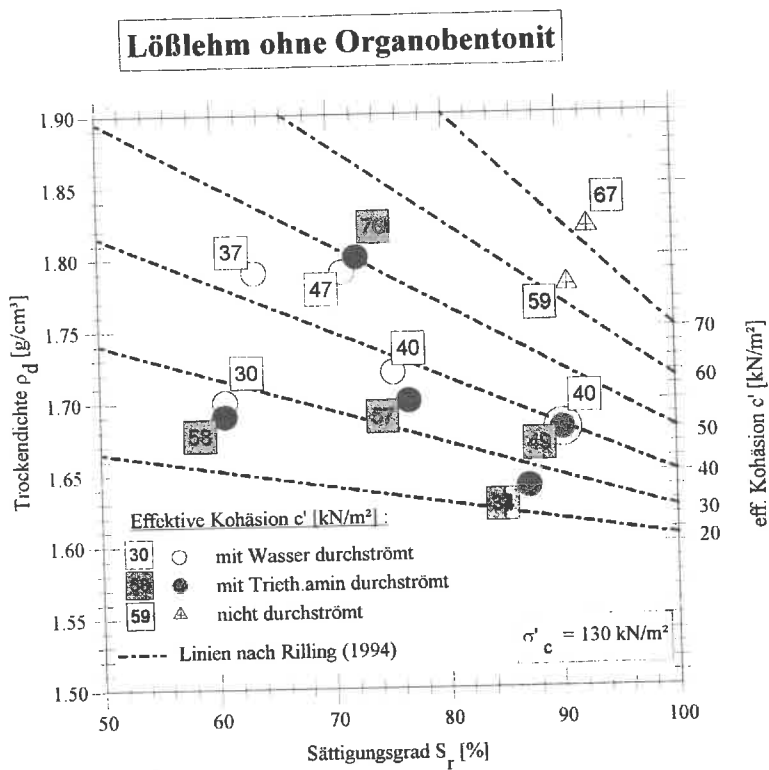


Abb. A9: Effektive Kohäsionen des unvergüteten Löblehms

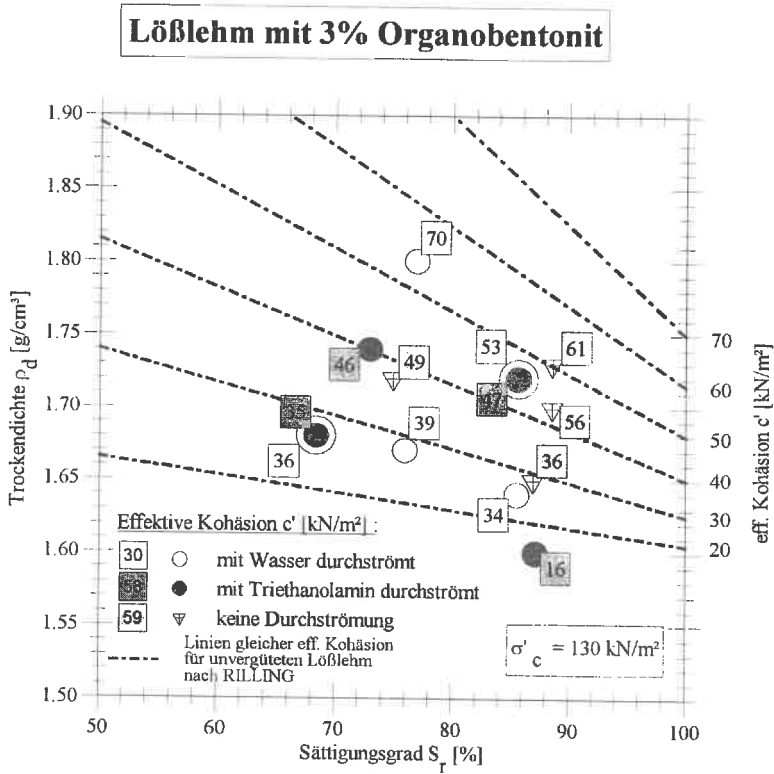


Abb. A10: Effektive Kohäsionen des Lößlehms mit 3 % Organobentonit

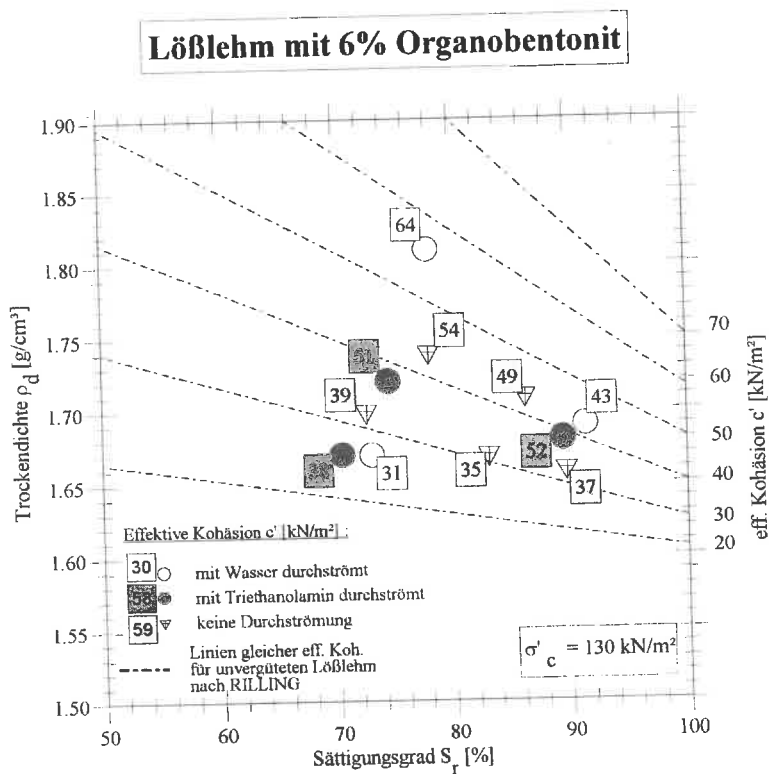
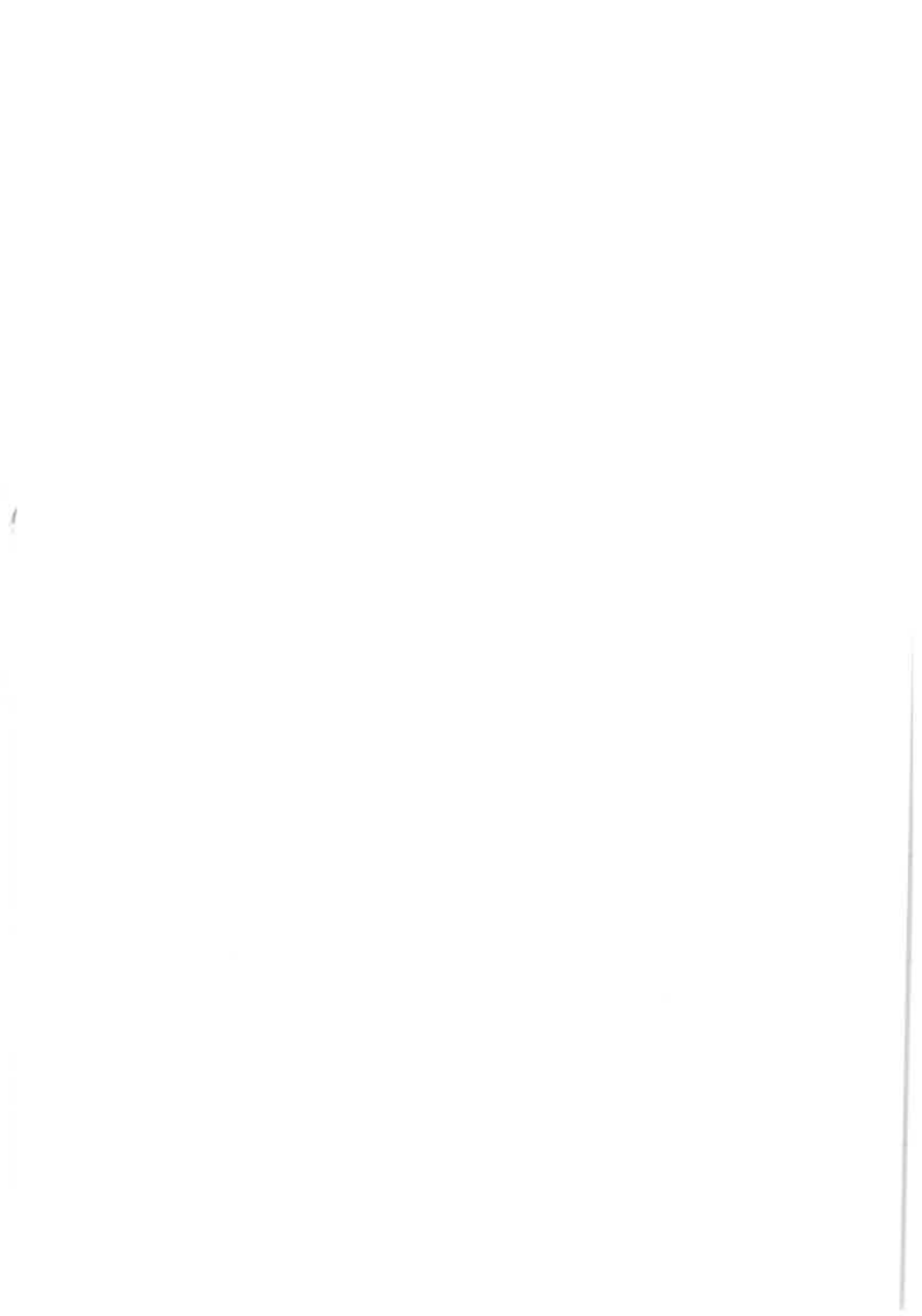


Abb. A11: Effektive Kohäsionen des Lößlehms mit 6 % Organobentonit



Mitteilungen des Instituts für Geotechnik
Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. U. Smoltczyk

Nr. 1	Thamm, B.R.	(1974)	Anfangssetzungen und Anfangsporenwasserüberdrücke eines normalverdichteten wassergesättigten Tones	DM 10,--
Nr. 2	Gußmann, P.	(1975)	Einheitliche Berechnung von Grundbruch und Böschungsbruch	DM 5,--
Nr. 3	Feeser, V.	(1975)	Die Bedeutung des Kalziumkarbonats für die bodenphysikalischen Eigenschaften von Löß	DM 10,--
Nr. 4	Du Thinh, K.	(1976)	Standsicherheit von Böschungen: Programm-Dokumentation	vergriffen
Nr. 5	Smoltczyk, U./ Pertschi, O./ Hilmer, K.	(1976)	Messungen an Schleusen in der UdSSR. Schleusennorm der UdSSR (SN 303-65)	vergriffen
Nr. 6	Hilmer, K.	(1976)	Erddruck auf Schleusenkammerwände.	DM 18,--
Nr. 7	Laumans, Q.	(1977)	Verhalten einer ebenen, in Sand eingespannten Wand bei nichtlinearen Stoffeigenschaften des Bodens	DM 18,--
Nr. 8	Lächler, W.	(1977)	Beitrag zum Problem der Teilflächenpressung bei Beton am Beispiel der Pfahlkopfanschlüsse	DM 15,--
Nr. 9	Spotka, H.	(1977)	Einfluß der Bodenverdichtung mittels Oberflächen-Rüttelgeräten auf den Erddruck einer Stützwand bei Sand	DM 15,--

Nr. 10	Schad, H.	(1979)	Nichtlineare Stoffgleichungen für Böden und ihre Verwendung bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben DM 20,--
Nr. 11	Ulrich, G.	(1980)	Verschiebungs- und kraftgesteuerte Plattendruckversuche auf konsolidierenden Böden
	Gußmann, P.	(1980)	Zum Modellgesetz der Konsolidation DM 20,--
Nr. 12	Salden, D.	(1980)	Der Einfluß der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten DM 25,--
Nr. 13	Seeger, H.	(1980)	Beitrag zur Ermittlung des horizontalen Bettungsmoduls von Böden durch Seitendruckversuche im Bohrloch DM 25,--
Nr. 14	Schmidt, H.H.	(1981)	Beitrag zur Ermittlung des Erddrucks auf Stützwände bei nachgiebigem Baugrund DM 25,--
Nr. 15	Smoltczyk, U./ Schweikert, O.	(1981)	Vorstudie über bauliche Alternativen für Durchgangsstraßen in Siedlungen DM 12,--
Nr. 16	Malcharek, K./ Smoltczyk, U.	(1981)	Vergleich nationaler Richtlinien für die Berechnung von Fundamenten DM 15,--
Nr. 17	Gruhle, H.-D.	(1981)	Das Verhalten des Baugrundes unter Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als räumliches Problem des Erdwiderstandes DM 30,--
Nr. 18	Kobler, W.	(1982)	Untersuchungen über Böschungs- und Grundbruch bei begrenzten Lastflächen DM 25,--

Nr. 19	Lutz, W.	(1983)	Tragfähigkeit des geschlitzten Baugrunds neben Linienlasten DM 25,--
Nr. 20	Smoltczyk, U.	(1983)	Studienunterlagen "Bodenmechanik und Grundbau"; Überarbeitete Ausgabe 1993 DM 40,--
Nr. 21	Schweikert, O.	(1984)	Der Einfluß des Böschungswinkels β auf die Berechnung des aktiven Erddrucks DM 20,--
Nr. 22	Vogt, N.	(1984)	Erdwiderstandsermittlung bei monotonen und wiederholten Wandbewegungen in Sand vergriffen
Nr. 23	Buchmaier, R.	(1985)	Zur Berechnung von Konsolidationsproblemen bei nichtlinearem Stoffverhalten DM 25,--
Nr. 24	Schad, H. Smoltczyk, U./ Schad, H./ Zoller, P.	(1985)	Möglichkeiten der Böschungssicherung bei kleinen Baugruben Sonderkonstruktionen der Böschungssicherung DM 35,--
Nr. 25	Gußmann, P.	(1985)	Die Methode der Kinematischen Elemente DM 20,--
Nr. 26	Steinmann, B.	(1985)	Zum Verhalten bindiger Böden bei monotoner einaxialer Beanspruchung DM 25,--
Nr. 27	Lee, S.D.	(1987)	Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlitzten im Sand neben Einzelfundamenten DM 25,--
Nr. 28	Kolb, H.	(1988)	Ermittlung der Sohlreibung von Gründungskörpern unter horizontalem kinematischen Zwang DM 25,--

Nr. 29	Ochmann, H.	(1988)	Ebene Grenzzustände von Erdböschungen im stochastischen Sicherheitskonzept DM 25,--
Nr. 30	Breinlinger, F.	(1989)	Bodenmechanische Stoffgleichungen bei großen Deformationen sowie Be- und Entlastungsvorgängen DM 30,--
Nr. 31	Smoltczyk, U./ Breinlinger, F./ Schad, H./ Wittlinger, M.	(1989)	Beitrag zur Bemessung von Tunneln in offener Bauweise DM 25,--
Nr. 32	Gußmann, P./ Schanz, T./ Smoltczyk, U./ Willand, E.	(1990)	Beiträge zur Anwendung der KEM (Erddruck, Grundbruch, Standsicherheit von Böschungen) DM 30,--
Nr. 33	Gruhle, H.-D.	(1990)	Der räumliche Erdwiderstand vor überwiegend horizontal belasteten Ankerplatten DM 30,--
Nr. 34	Henne, J.	(1995)	Zur Bewehrung von verformten Bodenschichten durch Einsatz zugfester Geokunststoffe DM 30,--
Nr. 35	Wittlinger, M.	(1994)	Ebene Verformungsuntersuchungen zur Weckung des Erdwiderstandes bindiger Böden DM 30,--
Nr. 36	Schad, H.	(1992)	Zeit- und geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten in der Geotechnik - Experimentelle Erfassung und numerische Analyse DM 30,--
Nr. 37	Belz, I.	(1992)	Zur Ermittlung dynamischer Bodenkennwerte in situ aus der Systemantwort des Erregers DM 30,--
Nr. 38	Ma, J.	(1994)	Untersuchungen zur Standsicherheit der durch Stützscheiben stabilisierten Böschungen DM 30,--

- | | | | | |
|--------|---------------|--------|---|----------|
| Nr. 39 | Smoltczyk, U. | (1994) | Sonderheft: 25 Jahre Lehre und Forschung in der Geotechnik | DM 30,-- |
| Nr. 40 | Rilling, B. | (1994) | Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit bindiger Schüttstoffe am Beispiel von Lößlehm | DM 35,-- |

Mitteilungen des Instituts für Geotechnik
Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. P.A. Vermeer

- | | | | | |
|------------|---------------------|--------|--|----------|
| Nr. 41 (1) | Vermeer, P.A. | (1996) | Deponiebau und Geotechnik | DM 35,-- |
| Nr. 42 | Vermeer, P.A. | (1997) | Baugruben in Locker- und Festgestein | DM 35,-- |
| Nr. 43 | Brinkmann, C. | (1998) | Untersuchungen zum Verhalten von Dichtungsübergängen im Staudamm-bau | DM 35,-- |
| Nr. 44 | Fiechter-Scharr, I. | (1998) | Beeinflussung von Erdbaustoffen durch Beimischen eines organophilen Bonto-nits | DM 35,-- |

Weitere Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und seiner Mitarbeiter

- | | | | |
|------|---|--------|---|
| [1] | Vermeer, P.A. | (1995) | Materialmodelle in der Geotechnik und ihre Anwendung.
Finite Elemente in der Bautechnik - Beiträge der Tagung FEM '95, Stuttgart. |
| [2] | Vogt, C./
Salden, D. | (1995) | Schraubanker zum Rückverhängen von Spundwänden.
Bautechnik 72, Heft 12, S. 800-802. |
| [3] | Schanz, T. | (1995) | Zur geotechnischen Bewertung von Beton-Recycling-Material.
Bautechnik 72, Heft 12, S. 810-816. |
| [4] | Schanz, T./
Gussmann, P. | (1995) | Bearing capacity of strip footing on layered subsoil.
Proc. Intern. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, NUMOG V, Davos, Balkema, Rotterdam. |
| [5] | Smolczyk, U./
Gussmann, P./
Schanz, T./
Salden, D. | (1995) | Zuverlässigkeitsuntersuchungen des Grundbruchs auf geschichteten Böden.
Forschungsbericht Sm 3/46-1, DFG. |
| [6] | Vermeer, P.A./
Schanz, T. | (1996) | Angles of friction and dilatancy of sand.
Géotechnique 46, No. 1, pp. 145-151. |
| [7] | Vermeer, P.A./
Schanz, T. | (1995) | Zum Steifemodul von Sanden.
Mitteilungen des Instituts für Geotechnik, Heft 3, TU Dresden, pp. 123-142. |
| [8] | Stolle, D.F.A./
Bonnier, P.G./
Vermeer, P.A. | (1997) | A soft soil model and experiences with two integration schemes.
Proc. Intern. Conf. on Numerical Methodes in Geomechanics, Montreal, Balkema, Rotterdam. |
| [9] | Schanz, T./
Bonnier, P.G. | (1997) | Verification of a soil model with predicted behavior of a sheet pile wall.
9th IACMAG Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, pp. 953-959. |
| [10] | Schanz, T./
Desrues, J./
Vermeer, P.A. | (1997) | Comparison of sand data on different plane strain devices.
IS-Nagoya'97 International Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, Pergamon, pp. 289-294. |

- [11] Schanz, T. (1997) Die Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialsteifigkeiten bei geotechnischen Berechnungen. Numerik in der Geotechnik, Workshop des AK 1.7 der DGGT, IGS, pp. 107-120.
- [12] Vermeer, P.A./ Stolle, D.F.A./ Bonnier, P.G. (1997) From the classical theory of secondary compression to modern creep analysis. Proc. 9th International Conference IACMAG, Wuhan - China.
- [13] Schanz, T./ Gussmann, P./ Smolczyk, U. (1997) Study of bearing capacity of strip footing on layered subsoil with the kinematical element method. Proc. XIVth Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Hamburg, Vol. 1, pp. 727-730.
- [14] Vermeer, P.A./ Salden, D. (1997) Die Geotechnik des Dammbaus. Wechselwirkungen, Jahrbuch 1996. Aus Lehre und Forschung der Universität Stuttgart.
- [15] Vermeer, P.A./ Schanz, T. (1997) Die Steifigkeit des Bodens und ihr Einfluß auf die Fußsainspannung einer Stützwand. OHDE-Kolloquium'97, Mitteilungen des Instituts für Geotechnik, Heft 4, TU Dresden, pp. 247-264.
- [16] Schanz, T. (1997) The leaning tower of St. Moritz. PLAXIS bulletin 4, pp. 4-7.
- [17] Meier, C.P./ Schanz, T. (1998) Verformungsabschätzungen für Gründungen mittels Rüttelstopfverdichtung. 5. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, TU Darmstadt, pp. 59-79.
- [18] Neher, H./ Schanz, T./ Köhler, L. (1998) Das Torsionsoedometer: ein neuartiges geotechnisches Versuchsgerät. Messen in der Geotechnik'98, TU Braunschweig, pp. 259-272.
- [19] Schanz, T. (1998) A constitutive model for cemented sands. 4th International Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Balkema, Rotterdam.
- [20] Schanz, T./ Vermeer, P.A. (1998) On the stiffness of sands. Géotechnique 48, pp. 383-387.
- [21] Vermeer, P.A./ Bayreuther, C. (1998) Tiefe Baugruben in weichen Böden. 1. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen.