Schriftenreihe Geotechnik
Universität Gh Kassel

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert

Beiträge aus der Umweltgeotechnik

Heft 9

März 2001

Beanspruchung der mineralischen Abdichtung über Kontrollstollen

Hans-Georg Kempfert, Ralph Meyer und Michael Stadel

1 Einführung

Bei bestimmten Deponien besteht oftmals die Forderung nach kontrollier- und reparierbaren Basisabdichtungen, damit während des Deponiebetriebs und nach Stillegung der Deponie im Rahmen der Nachsorge eine wirksame Kontrolle des ausgeführten Abdichtungssystems möglich ist. Die Kontrolle und ggf. notwendige Reparatur von Schwachstellen des Abdichtungssystems kann dabei über begehbare Kontrollstollen unterhalb der Basisabdichtung erfolgen. Der Kontrollstollen als Bestandteil des Basisabdichtungssystems stellt im Verbund mit den übrigen Elementen des Abdichtungssystems einen Bereich höherer Steifigkeit dar. Das führt zwangsläufig zu Lastkonzentrationen im Einflussbereich des Kontrollstollens infolge der Überlagerung der Abfallauflast und die Basisabdichtung ist damit erhöhten Beanspruchungen ausgesetzt.

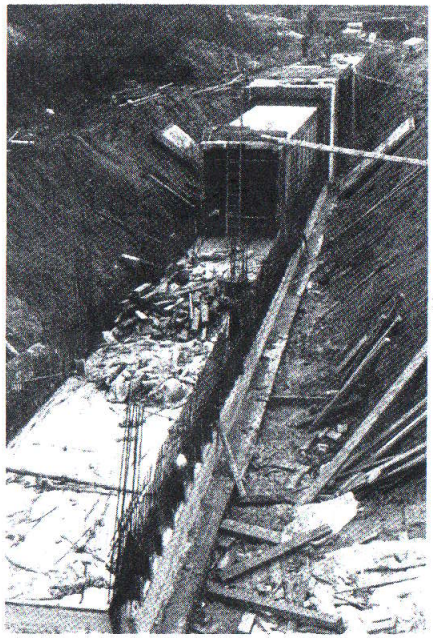
Der vorliegende Beitrag faßt Erkenntnisse aus Diplomarbeiten sowie Ergebnisse aus einem in den 90er Jahren vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhaben zusammen. Die Untersuchungen wurden seinerzeit durch die Ausführung eines Kontrollstollens unter der Deponie Lachengraben (Landkreis Waldshut) angeregt (Bild 2.1).

Weitere Beanspruchungen des Basisabdichtungssystems einer Deponie neben denjenigen bei Kontrollstollen sind Beanspruchungen der Dichtungssysteme z.B. infolge konzentrierter Lasteinwirkungen unter Deponieschächten aus der negativen Mantelreibung an den Wandungen oder bei Steilwanddichtungen in Steinbrüchen, *Hertweck/Amann (1996)*.

2 Berechnungen zur mechanischen Beanspruchung der mineralischen Basisabdichtung im Bereich von Kontrollstollen

Als Grundlage für die in Abschn. 3 und 4 dargestellten Elementversuche an Triaxialproben mit mineralischen Dichtungsmaterialien wurden numerische Berechnungen durchgeführt, die Aufschluß über die Größe der zu erwartenden Beanspruchungen innerhalb von Basisabdichtungen im Einflußbereich von Kontrollstollen geben sollen.

Bild 2.1 zeigt dazu die Ausgangssituation bei rechteckförmigen Stollen



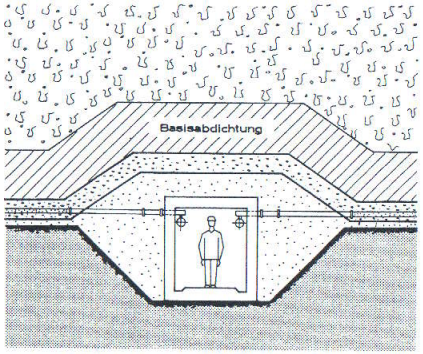


Bild 2.1:
Ausgangssituation bei rechteckförmigen Stollen; Foto Deponie Lachengraben

Die Berechnungen wurden mit dem FEM-Programm *Tunnel* durchgeführt, wobei Bild 2.2 das verwendete Berechnungsmodell zeigt und die wesentlichen Einflüsse des vorliegenden Systems darstellt. Der gewählte Berechnungsausschnitt enthält aus Symmetriegründen nur das halbe Modell. Das Ausgangsmodell bildet den Anfangszustand des Systems bestehend aus Deponieauflager, Kontrollstollen, Basisabdichtung und Feinmüllschicht ab, wie es vor Beginn des Abfalleinbaus vorhanden ist. Die Belastung durch Abfallauflast erfolgt in Schichtmächtigkeiten von je 2 m, was rechentechnisch durch die Aktivierung von zunächst inaktiv gesetzten Elementen realisiert werden konnte. Zwischen der Dichtungsschicht und den angrenzenden Elementen wurden Übergangselemente (Fugenelemente) angeordnet. Als Stoffgesetz wurde der elasto-plastische Stoffansatz nach Mohr-Coulomb gewählt. Tabelle 2.1 enthält die für das Berechnungsmodell gewählten Materialparameter (Boden- und Müllkenngrößen).

Tabelle 2.1: Gewählte Stoffparameter (Boden- und Müllkenngrößen)

Systemelemente	γ [kN/m³]	E [MN/m²]	ν [-]	φ [°]	c [kN/m²]
Deponieauflager	20	30	0,3	27,5	10
Mineralische Dichtung	20	15	0,3	25	10
Abfall	14	2	0,3	30	10
Kontrollstollen (B 35)	25	34000	0,2	-	-
Fugenelemente Beton-Boden	-	-	-	20	5
Fugenelemente Boden-Abfall	-	-	-	20	5

Die Beanspruchung des Dichtungssystems wurde bis zu einer maximalen Einbauhöhe des Abfalls von rd. 40 m verfolgt, was einer vertikalen Auflastspannung von etwa 600 kN/m² entspricht. In Bild 2.2 ist der Bereich gekennzeichnet, in dem sich die größten deviatorischen Beanspruchungen innerhalb der gesamten Basisabdichtung bis zur maximal aufgebrachten Einbauhöhe einstellen. Erwartungsgemäß tritt dieser Bereich an der Rahmenecke des Stollens auf, wo sich konstruktionsbedingt der Steifigkeitssprung zwischen dem relativ steifen Kontrollstollen und dem im Vergleich dazu relativ weichen Deponieauflager befindet.

Im Bereich unmittelbar über dem Kontrollstollen stellt sich eine geringe Lastkonzentration dadurch ein, daß sich das seitliche Deponieauflager neben dem Stollen in stärkerem Maße zusammendrücken läßt als der massive, nahezu inkompressible Querschnitt des Stollens. Dadurch stellen sich in der Dichtungsschicht ungleichmäßige Setzungen, die im Bereich der Rahmenecke des Stollens zu einer gegenüber den danebenliegenden Bereichen erhöhten Beanspruchung innerhalb der Basisabdichtung führen. Größe der Lastkonzentration über dem Stollen bzw. Setzungsdifferenzen zwischen dem Stollen und den angrenzenden Bereichen sind stark abhängig von den Steifigkeitsanteilen der verwendeten Materialien und von der Stollenkonstruktion.

Bild 2.3 zeigt die deviatorischen Beanspruchungen als Spannungspfade im p-q-Diagramm für den in Bild 2.2 gekennzeichneten Bereich (Bodenelement) der Basisabdichtung infolge der zunehmenden Auflast aus dem Einbau des Abfalls bis zur maximalen Einbauhöhe.

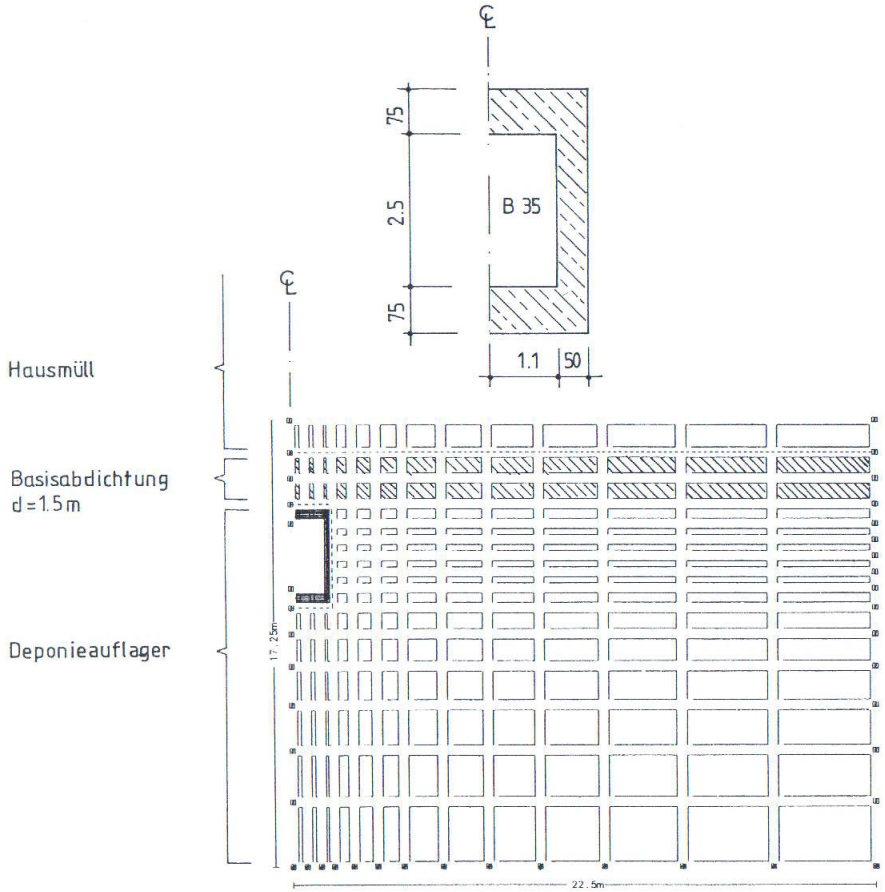
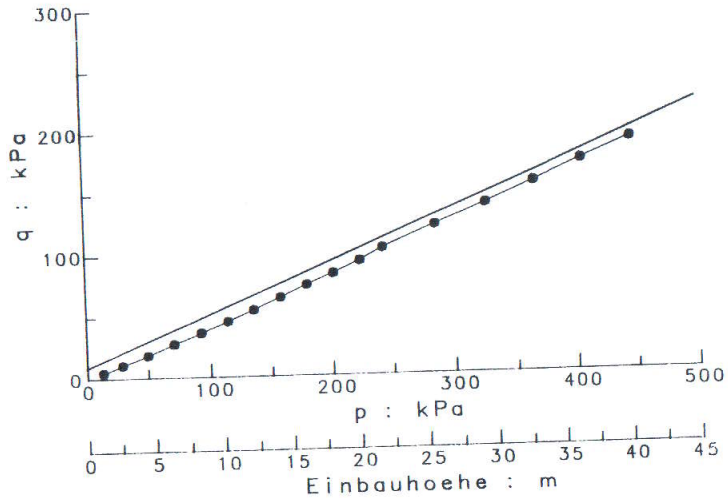


Bild 2.2: Berechnungsmodell für einen rechteckigen Stollen mit Kennzeichnung (Kreis) des Bereichs maximaler Beanspruchungen innerhalb der Basisdichtung

Als Abszissendarstellung wurde in Bild 2.3 weiterhin die der Größe p entsprechende Einbauhöhe des Abfalls aufgetragen, womit die unmittelbare Anbindung an die Entwicklung der deviatorischen Beanspruchungen in Abhängigkeit von der Einbauhöhe des Abfalls gegeben ist. Der Verlauf des Spannungspfades bis zum Erreichen der maximalen Einbauhöhe macht deutlich, daß die Versagensgrenze (Fließbedingung) des Abdichtungsmaterials bei den hier vorliegenden Randbedingungen auch bei großen Auflastspannungen nicht vollständig, sondern ab etwa 25 m Überschüttung zu etwa 95 % erreicht wird. Das führt lokal bereits zu erheblichen plastischen Verformungen im Abdichtungsmaterial.



mit:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Bild 2.3: Durchlaufener Spannungspfad des Bodenelementes bis zur maximal aufgebrachten Einbauhöhe des Mülls für die Randbedingungen nach Bild 2.2

Alternativ zum rechteckförmigen Stollenquerschnitts nach Bild 2.2 wurde auch eine Fertigteillösung aus kreisförmigen Stahlbetonrohren nach *DIN 4035* untersucht, wie es sich auch bei kleineren Querschnitten (unter ca. 2,5 m^2) anbietet. Bild 2.4 zeigt analog zur Situation in Bild 2.2 das Berechnungsmodell. Der Bereich in dem sich die größten deviatorischen Beanspruchungen innerhalb der Dichtungsschicht einstellen, ist wiederum gekennzeichnet und liegt unmittelbar über dem Stollenfirst.

In Bild 2.5 sind analog zu Bild 2.3 der Spannungspfad für den in Bild 2.4 gekennzeichneten Bereich dargestellt, in dem die größten Beanspruchungen innerhalb der Basisabdichtung auftreten. Danach wird für die hier vorliegenden Randbedingungen bereits bei einer Einbauhöhe des Abfalls von etwa 5 m die Versagensgrenze (Fließgrenze) des Abdichtungsmaterials erreicht, so daß im weiteren Verlauf des Mülleinbaus keine weiteren Scherfestigkeitsreserven mehr mobilisiert werden können und der Spannungspfad entlang der Bruchspannungsgrenze verläuft.

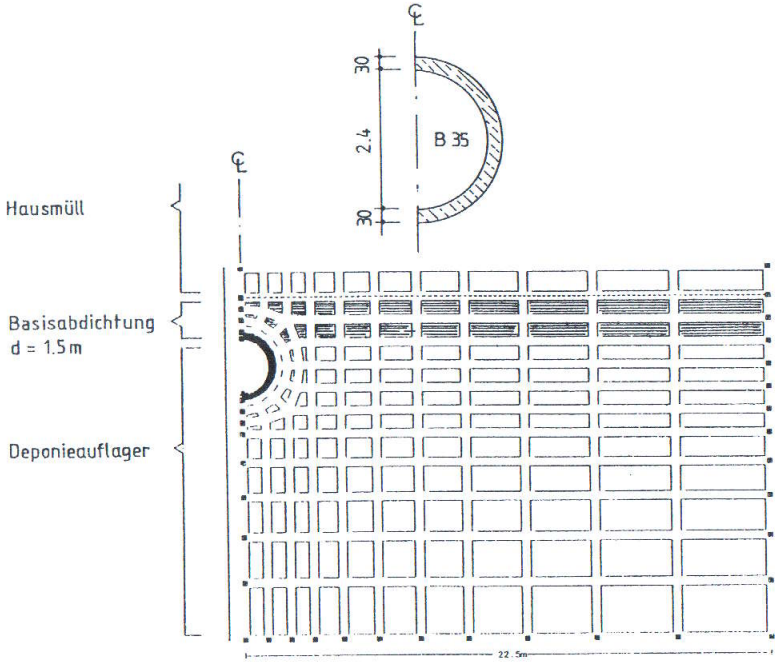


Bild 2.4: Berechnungsmodell für einen runden Stollen mit Kennzeichnung (Kreis) des Bereichs maximaler Beanspruchungen innerhalb der Basisdichtung auftreten

Der Verlauf der beiden in Bild 2.3 und 2.5 dargestellten Spannungspfade für rechteck- und kreisförmige Stollenquerschnitte unterscheidet sich hinsichtlich der Größe des Spannungsdeviators sowie deren Verläufe nur unwesentlich voneinander, wodurch sich zunächst keine eindeutige Abgrenzung vornehmen läßt, welche der beiden betrachteten Querschnittsformen sich in Bezug auf die Beanspruchungen der Basisabdichtung günstiger erweist.

Die sich für den in Bild 2.4 dargestellten kreisförmigen Querschnitt aus den numerischen Berechnungen ergebenden Belastungsverhältnisse (vertikale Auflast) wurden vergleichend nach der Richtlinie für die *Statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen ATV-Arbeitsblatt A 127 (1988)* bzw. *Leonhardt (1979)* mit Konzentrationsfaktoren von $\lambda_R = 1{,}25$ sowie $\lambda_B = 0{,}92$ für weitgehend starre Rohre ermittelt. Bild 2.6 zeigt dazu eine relativ gute

Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der numerischen Berechnungen und den Ausführungen des *Arbeitsblattes A 127 bzw. M 127*. Die Belastungsansätze nach den Ausführungen des *ATV-Arbeitsblattes* können somit als ein erster vereinfachter Ansatz für die statische Bemessung von runden Kontrollstollen unter Deponien verwendet werden.

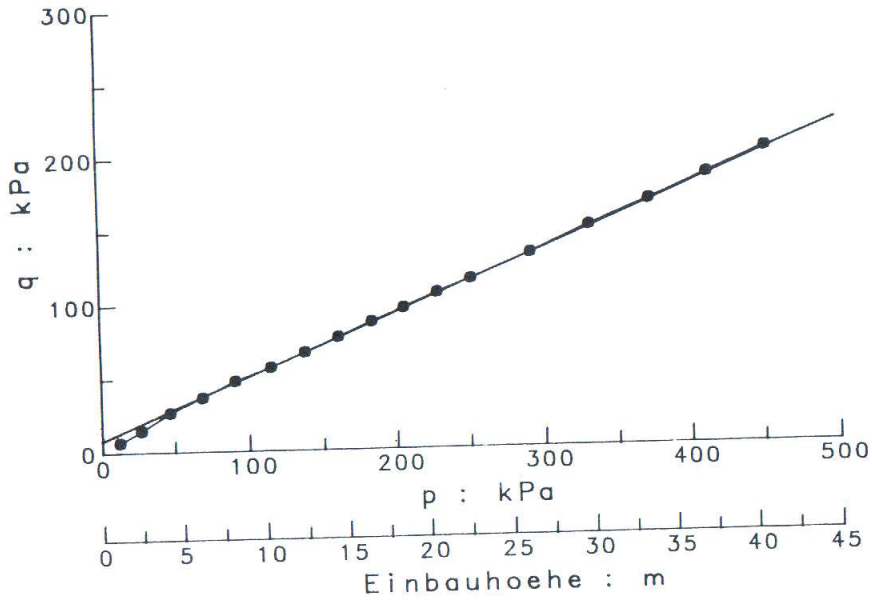


Bild 2.5: Durchlaufener Spannungspfad des Bodenelementes bis zur maximal aufgebrachten Einbauhöhe des Mülls für die Randbedingungen nach Bild 2.4

Die numerischen Berechnungen über mögliche Beanspruchungszustände innerhalb von Basisabdichtungen im Einflußbereich von festen Einbauten lassen erkennen, daß davon auszugehen ist, daß in der unmittelbaren Umgebung von Kontrollstollen durch auftretende deviatorische Beanspruchungen ein Scherversagen der Basisabdichtung durch die Bildung von mehr oder weniger stark ausgebildeten plastischen Bereichen bzw. Scherzonen stattfindet. Wenn auch das mechanische Verhalten von Siedlungsabfällen nach dem derzeitigen Kenntnisstand nur unzureichend beschrieben werden kann und deswegen die Berechnungsergebnisse nur eine Näherung darstellen, so können die in Form von Spannungspfaden in den Bildern 2.3 und 2.5 dargestellten Beanspruchungszustände, die die Basisabdichtung über dem Kontrollstollen im Zuge des Abfalleinbaus durchlaufen, als weitgehend repräsentativ angesehen werden.

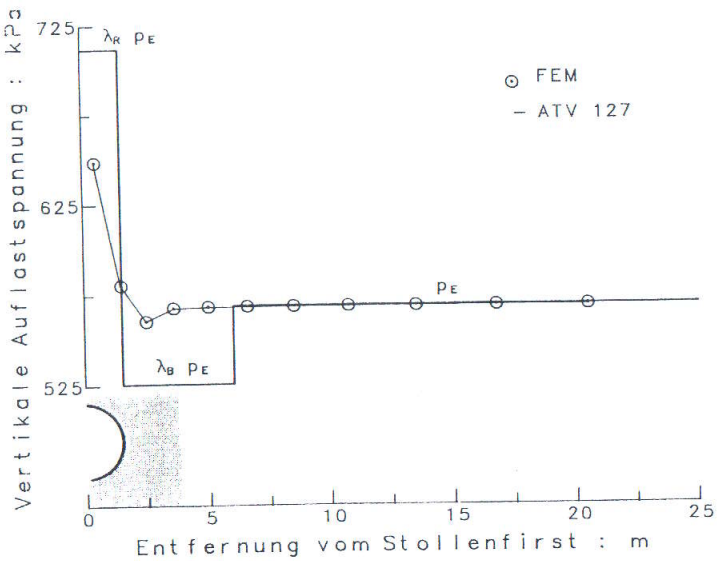


Bild 2.6: Vergleich der vertikalen Belastung über der Stollenfirste nach den Ergebnissen der numerischen Berechnungen (FEM) und dem ATV-Arbeitsblatt A 127

Auf der Grundlage der dargestellten numerischen Berechnungsergebnisse sind in Abschnitt 3.1, Bild 3.5, vereinfachte Beanspruchungszustände in der mineralischen Dichtung aufgeführt, die den Elementversuchen zugrunde gelegt wurden.

3 Versuchskonzeption und Materialien

3.1 Versuchsstand und Geräte

Auf der Grundlage der in Abschn. 2 dargestellten zu erwartenden Beanspruchungszustände innerhalb mineralischer Basisabdichtungen im Bereich von festen Einbauten wurden die aus den numerischen Berechnungen ermittelten Berechnungszustände auf Proben im Triaxialversuchsstand übertragen. Es wurde damit versucht, die Belastungsgeschichte für ein Bodenelement der Basisabdichtung nachzuvollziehen und die Veränderung der Durchlässigkeit versuchstechnisch in Abhängigkeit von der deviatorischen Beanspruchung zu beschreiben.

Zielsetzung der nachfolgend dargestellten Elementversuche war die Beurteilung möglicher Auswirkungen mechanischer Beanspruchungen der Basisabdichtung über dem Kontrollstollen auf das Durchlässigkeitsverhalten der Basisabdichtung.

Um das Durchlässigkeitsverhalten des mineralischen Abdichtungsmaterials unter beliebigen Dehnungs- bzw. Spannungsbeanspruchungen zu untersuchen, wurden sowohl Versuche im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit statischer Belastung der Probekörper bei behinderter Seitendehnung als auch in Triaxialzellen bei unbehinderter Seitendehnung durchgeführt.

Für die Untersuchungen in den Triaxialzellen kamen 3 unterschiedliche Versuchsstände zum Einsatz, die sich hinsichtlich der Probenabmessungen und der Versuchsanordnungen zur Steuerung und Messung der Versuchsparameter unterschieden. Bei allen 3 Versuchsständen war es aber möglich, die Durchlässigkeit für beliebige Dehnungs- bzw. Spannungszustände des Probekörpers zu ermitteln. Bild 3.1 zeigt die schematische Versuchsanordnung für Probedurchmesser d = 36 mm bzw. 50 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 2.

Um den Einfluss des Verformungszustandes auf das Durchlässigkeitsverhalten zu ermitteln, wurden an Probekörpern mit einem Durchmesser von 50 mm sowohl Versuche mit einem Seitenverhältnis von h/d = 2 als auch mit einem Verhältnis von h/d = 1 durchgeführt, wobei der Einfluss der Reibung an den Endflächen der gedrungenen Probekörper durch den Einsatz einer Endflächenschmierung weitestgehend ausgeschaltet und somit im Gegensatz zu schlanken Probekörpern (h/d = 2) ein möglichst homogener Verformungszustand erreicht wurde.

1 - Durchströmungsdruck
2 - entlüftetes Wasser
3 - Probekörper
4 - Zellflüssigkeit (Wasser)
5 - Seitendruck
6 - Belastung
7 - Luftblase
8 - Messbürette
9 - O-Ringe
10 - Filtersteine
11 - Latex-Gummihülle
12 - vom Vorratsbehälter (Wasser)
13 - Kugelhahn

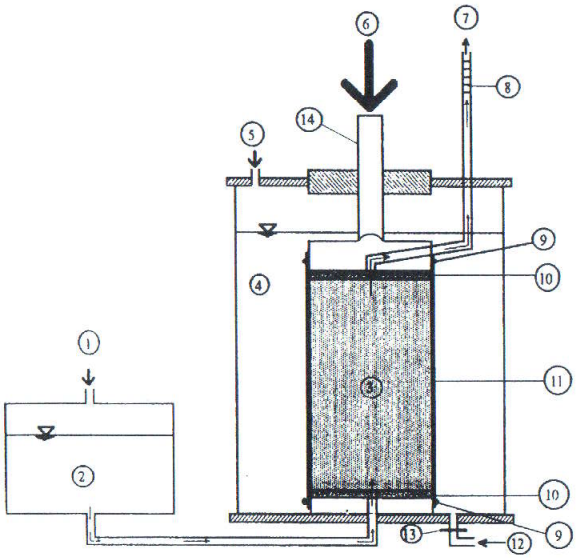


Bild 3.1: Versuchsanordnung für Probendurchmesser d = 36 mm bzw. d = 50 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 2

Bild 3.2 zeigt die schematische Versuchsanordnung für Probedurchmesser 50 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 1.

Alle Versuche wurden mit konstantem hydraulischen Gefälle gefahren. Die Durchströmung der Probekörper erfolgte von unten nach oben.

Einer der eingesetzten Triaxialversuchsstände wurde für die Durchführung von kraftgesteuerten Versuchen mit einer neu entwickelten Mikropumpe und einem Differenzdruckaufnehmer ausgestattet und entsprach damit einer Versuchsanordnung, die erstmals ausführlich von *Olsen et al. (1985)* vorgestellt und zur Durchführung von Durchlässigkeitsversuchen mit kleinen hydraulischen Gradienten eingesetzt wurde. Dem Probekörper wird hierbei ein konstanter Durchfluss Q aufgezwungen bei gleichzeitiger Messung der sich zwischen den beiden Enden der Probe einstellenden Druckdifferenz Δh. Gegenüber den konventionellen Durchlässigkeitsmessungen mit fallender bzw. konstanter Druckhöhe bietet dieses Verfahren im wesentlichen zwei Vorteile:

a) Eine direkte Messung der den Probekörper durchströmten Wassermenge ist auf Grund des bekannten, konstanten Durchflusses Q nicht erforderlich, und damit werden die mit der Wassermengenermittlung verbundenen, hinreichend bekannten Fehler, wie sie insbesondere bei kleinen Gradienten und kurzen Versuchszeiten auftreten können, vermieden.

b) Die Durchlässigkeitsversuche können bei wassergesättigten Proben weitaus schneller durchgeführt werden als mit den konventionellen Verfahren, was sich gerade bei der Ermittlung des Durchlässigkeitsverhaltens in Abhängigkeit von Spannungszuständen als äußerst vorteilhaft und zeitsparend erweist.

1 - Durchströmungsdruck
2 - entlüftetes Wasser
3 - Probekörper
4 - Zellflüssigkeit (Wasser)
5 - Seitendruck
6 - Belastung
7 - Luftblase
8 - Messbürette
9 - O-Ringe
10 - Filtersteine
11 - Latex-Gummihülle
12 - vom Vorratsbehälter (Wasser)
13 - Kugelhahn
14 - Kappe aus Plexiglas
15 - Schmiermittel
16 - Gummilappen (Latex)
17 - Filterpapier

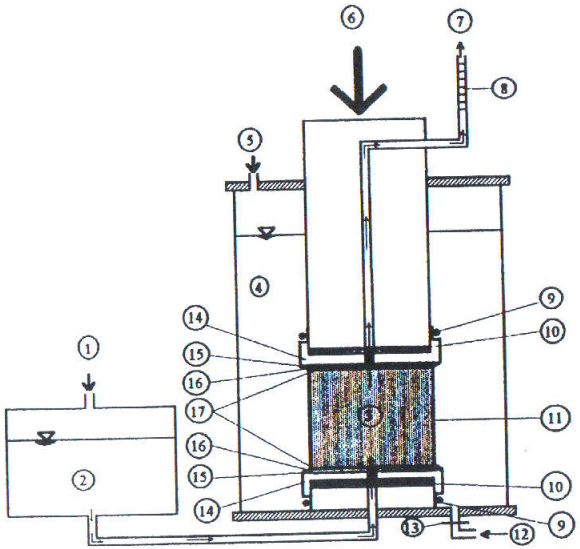
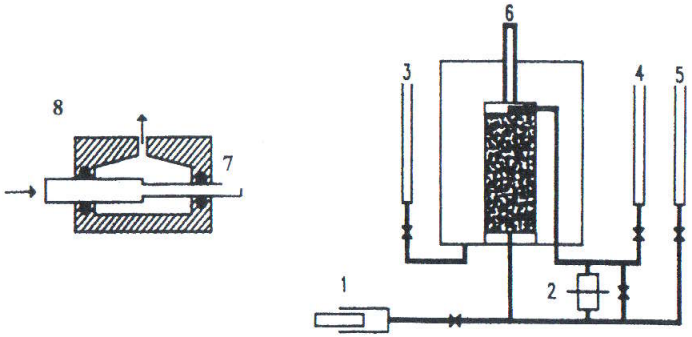


Bild 3.2: Triaxialzelle für Probendurchmesser d=50 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 1

Bild 3.3 zeigt den schematischen Aufbau der für die Durchführung der kraftgesteuerten Durchlässigkeitsversuche verwendeten Versuchsanordnung.

Die Mikropumpe besteht aus einer durch abgedichtete Gleitlagerbuchsen geführten Kolbenstange mit unterschiedlichem Durchmesser, die durch das Einfahren in eine mit entlüftetem Wasser gefüllte Kammer einen konstanten Volumenstrom erzeugt. Angetrieben wurde die Kolbenstange von einem stufenlos regelbaren Antrieb, dessen Geschwindigkeit in einem Be-

reich von 10 bis 10^{-5} mm/min einstellbar war und somit bei insgesamt 50 mm Kolbenhub ein maximales Fördervolumen von 0,324 cm^3 hatte. Hieraus ergaben sich Durchflussraten im Bereich von $1{,}08 \cdot 10^{-3}$ bis $1{,}08 \cdot 10^{-9}$ cm^3/s. Für die notwendige Messung des Differenzdrucks an den Endflächen des Probekörpers wurde ein Differenzdruckaufnehmer mit einer Auflösung von 0,1 kN/m^2 (= 1 cm Wassersäule) eingesetzt. Die Steuerung des Zellendrucks σ_3, des Porenwasserdrucks u sowie der axialen Spannung σ_1 erfolgte über die Steuereinheit des Triaxialversuchsstandes.



1 – Mikropumpe
2 – Differenzdruckaufnehmer
3 – Steuerung Seitendruck
4 – Steuerung Porenwasserdruck
5 – Steuerung Porenwasserdruck
6 – Belastung
7 – Kolbenstange
8 – Wassergefülltes Gehäuse

Bild 3.3: Versuchsanordnung für kraftgesteuerte Triaxialversuche mit Probendurchmesser d = 50 mm und Mikropumpe

Für den Einsatz einer Mikropumpe ist es notwendig, dass alle Komponenten der Versuchseinrichtung, insbesondere das Leitungssystem und die Lagerbuchsen der Kolbenstange, druckfest sind, da sich kleinste Undichtigkeiten nachhaltig auf die Durchlässigkeitsbestimmung auswirken.

Um die für die Anwendung der Mikropumpe exakte Durchflussmenge zu ermitteln, wurde bei einem Kalibrierversuch mit Hilfe einer geeichten Glaskapillare und eines induktiven Wegaufnehmers sowohl die geförderte Wassermenge als auch der Kolbenhub gemessen. Bei dem damit möglichen Soll-Ist-Vergleich stellte sich heraus, dass das tatsächlich geförderte Volumen mit ausreichender Genauigkeit mit dem Soll-Volumen übereinstimmt, wobei sich das Soll-Volumen zu

$$V_{soll}\,[mm^3] = 6{,}479535 \cdot \text{Kolbenhub}\,[mm]$$

errechnete.

Bild 3.4 zeigt den Vergleich zwischen der linearen Beziehung des Soll-Volumens in Abhängigkeit vom Kolbenhub und dem tatsächlich geförderten Volumen.

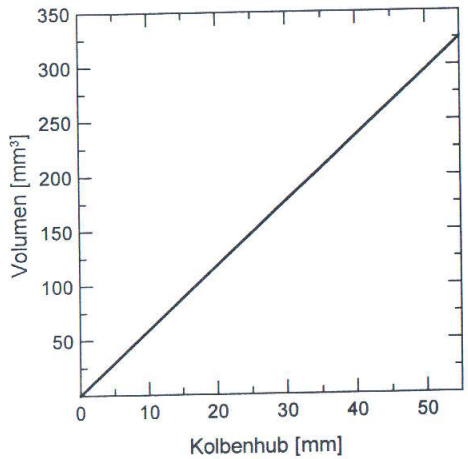


Bild 3.4:
Kalibrierung des Fördervolumens

Mit dieser Versuchsanordnung wurden kraftgesteuerte Durchlässigkeitsversuche bei veränderlichem Seitendruck σ_3 durchgeführt. Sie dienten der Ermittlung des Durchlässigkeitsverhalten unter Berücksichtigung der Belastungsgeschichte aus der allmählichen Zunahme der Auflast und somit der schrittweisen Zunahme der Beanspruchungen bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit des Dichtungsmaterials. Bild 3.5a zeigt hierzu qualitativ die Spannungszustände, wie sie sich aus der beschriebenen Belastungsgeschichte ergeben.

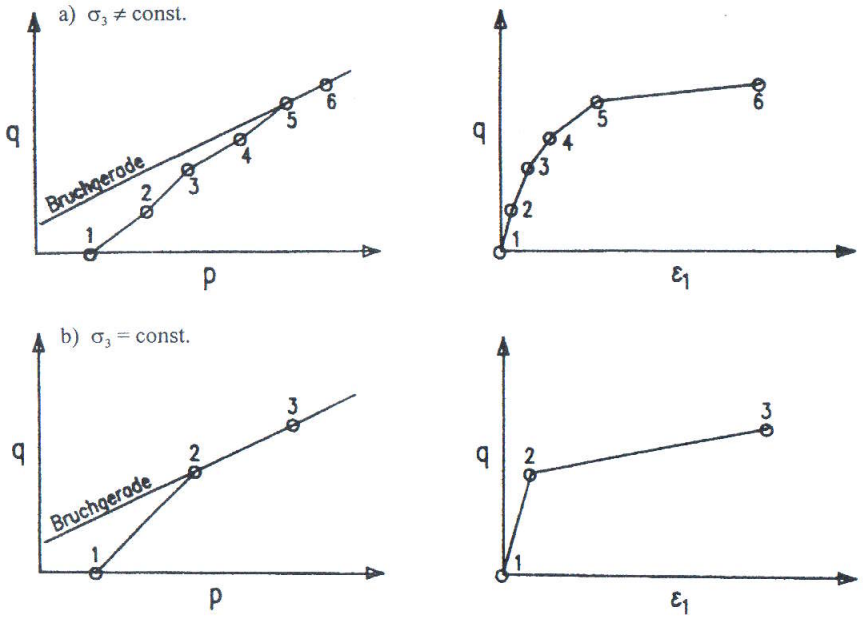


Bild 3.5: a) Spannungspfad der Probekörper mit $\sigma_3 \neq$ const.,
b) σ_3 = const.

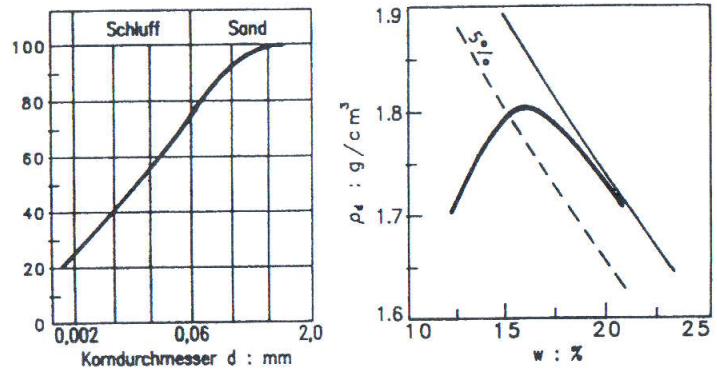
Weiterhin wurden durch die axiale Probenstauchung ε_1 geregelte weggesteuerte Versuche bei konstantem Seitendruck σ_3 gefahren. Bild 3.5b zeigt hierzu qualitativ die Spannungszustände. Diese geben die Beanspruchungsverhältnisse eines Abdichtungselementes wieder, das ausgehend von einer bestimmten Müllauflast (näherungsweise als isotroper Ausgangsspannungszustand mit $\sigma_1 = \sigma_3$) einer kontinuierlichen Beanspruchung bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit ausgesetzt ist (1-2) und darüber hinaus ausgeprägtes plastisches Fließen stattfindet (2-3).

3.2 Versuchsmaterialien

Das Versuchsprogramm wurde an insgesamt 4 unterschiedlichen natürlichen Böden aus dem süddeutschen Raum durchgeführt, für die nachstehend die Ergebnisse aus der geotechnischen Eignungsprüfung zusammengestellt sind.

Die 4 untersuchten Abdichtungsmaterialien werden im weiteren als Kurzschreibweise mit den Buchstaben A, B, C und D bezeichnet. Eine Zuordnung der gewählten Bezeichnungen zu den Dichtungsmaterialien ergibt sich aus den nachstehenden Tabellen und Bildern.

Material A



Material B

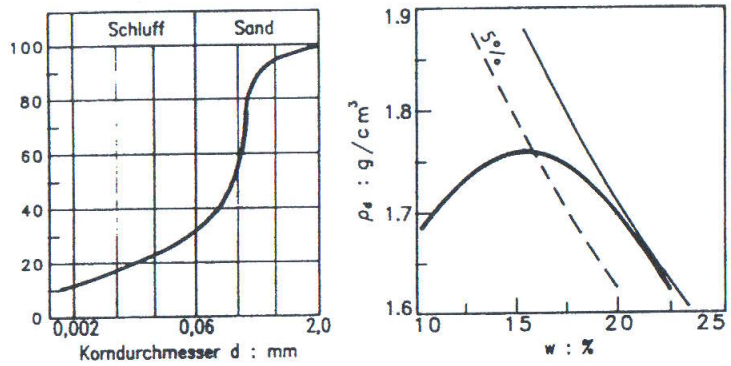
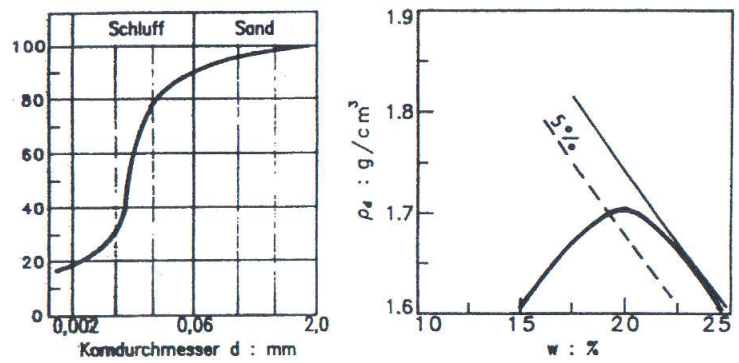


Bild 3.6: Körnungslinien und Einbaukriterien der Versuchsmaterialien A und B

Material C



Material D

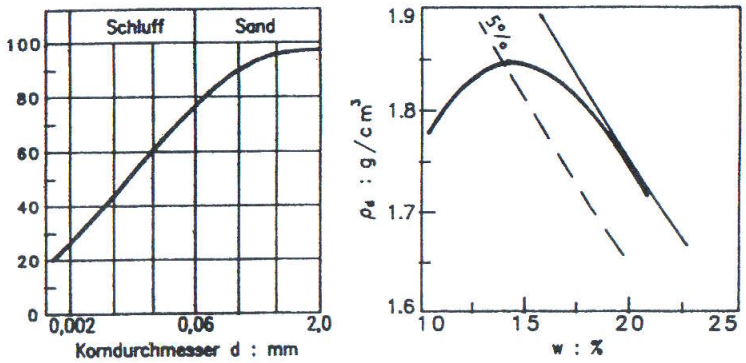


Bild 3.7: Körnungslinien und Einbaukriterien der Versuchsmaterialien C und D

3.3 Herstellung der Proben

Für die Durchführung der Serienuntersuchung wurde eine einheitliche Probenherstellungsmethode mit statischer Verdichtung vorgenommen. Dies war notwendig, da sich bekanntermaßen bei gleicher Trockendichte statisch verdichtete Böden durchlässiger als im Proctorversuch rammend verdichtete Böden verhalten, *Mitchell et al. (1965)* und somit die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse miteinander nicht direkt gegeben gewesen wäre.

Tabelle 3.1: Kenngrößen der Versuchsmaterialien A - D aus Eignungsprüfungen

Kennwert			Versuchsboden A	B	C	D
Wassergehalt	w	[%]	21,0	17,0	18,1	18,3
Fließgrenze	w_L	[%]	37,6	47,9	47,2	39,1
Ausrollgrenze	w_P	[%]	21,1	17,2	26,8	21,6
Plastizitätszahl	I_P	[%]	16,5	30,7	20,4	17,5
Konsistenzzahl	I_C	[1]	1,0	1,0	1,42	1,19
Korndichte	ρ_s	[g/cm³]	2,68	2,61	2,70	2,65
Dichte	ρ	[g/cm³]	1,95	1,93	2,05	1,95
Proctordichte	ρ_{Pr}	[g/cm³]	1,81	1,76	1,70	1,88
Opt. Wassergehalt	w_{opt}	[%]	16,1	15,0	20,5	113,8
Glühverlust	V_{gl}	[%]	4,1	3,0	3,2	2,3
Kalkgehalt	V_{Ca}	[%]	0,45	0,7	3,4	1,5
Wasseraufnahme	w_A	[%]	57,0	136,0	58,0	55,0
einax. Druckfestigkeit	q_u	[kN/m²]	340,0	240,0	300,0	100,0
Reibungswinkel	φ	[°]	25,0	29,8	26,0	28,0
Kohäsion	c	[kN/m²]	10,0	5,4	15,0	10,0
Quelldruck	$\sigma_{qÄ}$	[kN/m²]	14,0	54,0	50,0	45,0
Steifemodul	E_s	[MN/m²]	16,0	12,0	13,0	10,0

Hierzu wurde ein Probenformgerät entwickelt, in dem auf eine bestimmte Aggregatgröße aufbereitetes Versuchsmaterial durch den langsamen Vorschub beidseitig angeordneter Kolben in einem Zylinder auf die gewünschte Einbaudichte und Probenausgangsabmessungen von h/d = 1 und 2 für Probendurchmesser d = 36 und 50 mm gepresst wurde. Über in den Kolben angeordneten Filterplatten konnte sich der beim Verdichten entstehende Porenwasserüberdruck abbauen. Das Probenformgerät bietet den Vorteil, dass die Probekörper in einer über die Probenhöhe weitgehend homogenen und reproduzierbaren Dichte hergestellt werden können, was als Ausgangszustand für die Beurteilung der durchgeführten Serienversuche wichtig war.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Kompressionsversuche

Die Versuche im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät wurden mit einer Anordnung für veränderliches hydraulisches Gefälle und einem Probendurchmesser von d = 71,4 mm sowie einer Anfangshöhe von h_0 = 20 mm durchgeführt.

Im Kompressionsversuch lässt sich die von Null monoton zunehmende Belastungsgeschichte einer Basisabdichtung durch die Belastung aus dem Abfallkörper auf die Durchlässigkeit ermitteln. Mit der Versuchsrandbedingung, dass die seitlichen Dehnungen Null sind ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$), entsprechen die Spannungszustände dem Normalfall der Belastung für die unendlich ausgedehnte Basisabdichtung.

Es wurden Versuche mit den Versuchsböden A, C und D bei einer Belastung von bis zu p = 400 kN/m² durchgeführt. Die Verdichtungsgrade der Proben beim Einbau lagen bei D_{pr} = 0,88 für Versuchsboden A, D_{pr} = 0,871 für Versuchsboden C und D_{pr} = 0,813 für Versuchsboden D. Die Verdichtungsgrade der Proben beim Ausbau lagen bei D_{pr} = 0,98 für Versuchsboden A, D_{pr} = 1,085 für Versuchsboden C und D_{pr} = 0,994 für Versuchsboden D. In Bild 4.1 bis 4.3 ist jeweils der ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit von der Belastung p sowie der Probenstauchung ε_1 dargestellt.

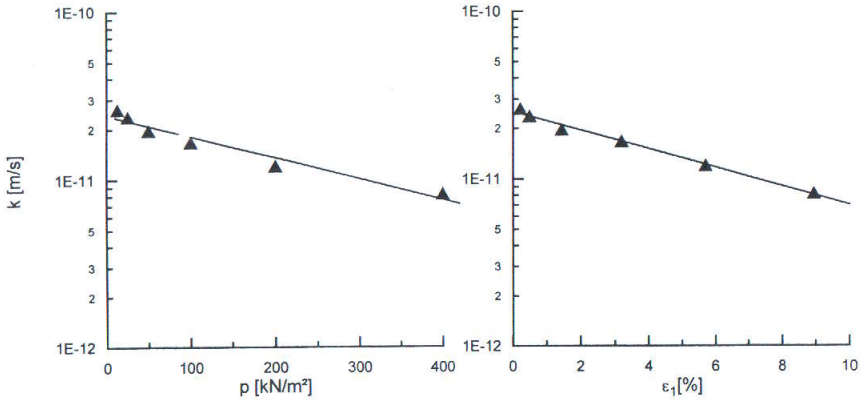


Bild 4.1: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts von der Belastung bzw. der Zusammendrückung für Versuchsboden A

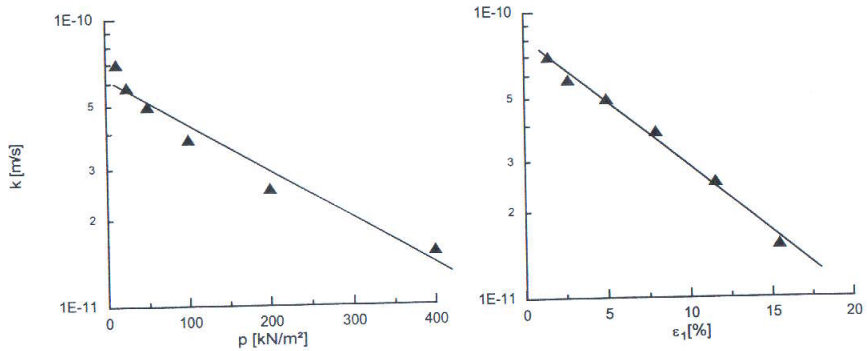


Bild 4.2: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts von der Belastung bzw. der Zusammendrückung für Versuchsboden C

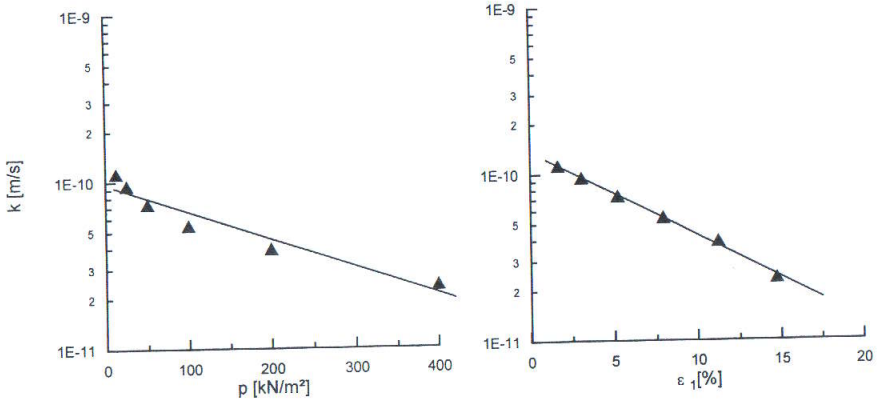


Bild 4.3: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts von der Belastung bzw. der Zusammendrückung für Versuchsboden D

Durch die Darstellung von k und p sowie von k und ε_1 im halb logarithmischen Maßstab läßt sich die Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Belastung bzw. der Zusammendrückung der Probe mit ausreichender Genauigkeit als linearer Zusammenhang angeben. Durch die Zusammendrückung der Proben findet die Umlagerung der Bodenteilchen zu einer dichteren Struktur statt, womit die Durchlässigkeit des Bodens bekanntermaßen mit zunehmender Belastung geringer wird.

4.2 Triaxialversuche bei konstantem Seitendruck

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes für die Triaxialversuche bei konstantem Seitendruck erfolgte unter Berücksichtigung der Gestaltänderung des Probenkörpes während der Belastung. Für den Versuchsboden A wurde das Scherversagen infolge Bildung diskreter Scherfugen untersucht. Hierzu wurden 3 Versuchsproben mit einem Seitenverhältnis von h/d = 2 (Probendurchmesser d = 50 mm) bei nahezu vollständiger Wassersättigung ($S_r \approx 0{,}98$) und einer Einbaudichte von $D_{pr} = 0{,}96$ hergestellt. Die Proben wurden in einer Vorlaufphase bei Seitendrücken von σ_3 = 100, 200 und 400 kN/m² mit einem konstanten hydraulischen Gefälle von i = 62 solange durchströmt (15 Tage), bis in etwa gleichbleibende Durchlässigkeiten gemessen werden konnten (stationärer Strömungszustand). Das Hauptspannungsverhältnis σ_3/σ_1 während der Versuche lag etwa bei 0,8. Im Anschluss an die Vorlaufphase wurden die Proben ausgebaut und unter einem Winkel von 30° in Bezug zur Strömungsrichtung vollständig durchtrennt, bevor die Probenhälften durch leichtes Andrücken zusammengefügt und unter den gleichen Spannungsrandbedingungen wieder in den Versuchsstand eingebaut wurden. In Bild 4.4 ist die zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeitsbeiwerte für drei unterschiedliche Seitendrücke unmittelbar im Anschluss an das Scherversagen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die eingebrachte Scherfuge die Durchlässigkeit der Proben um etwa eine Zehnerpotenz zunahm, jedoch innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden wieder auf die ursprüngliche Durchlässigkeit abnahm.

Anhand der Versuchsergebnisse ist erkennbar, dass innerhalb des Dichtungsmaterials eingetretene diskrete Scherfugen durch den Seitendruck überdrückt wurden. Die Durchlässigkeit war bei ausreichend großen Seitendrücken sogar unbeeinflusst von möglichen diskreten Scherfugen. Bild 4.5 zeigt beispielhaft einen Probekörper mit dem Verlauf der diskreten Scherfugen nach dem Ausbau.

Die in Bild 4.4 dargestellten Versuchsergebnisse stellen eine idealisierte Form des Scherversagens dar, die für Basisabdichtungen nicht repräsentativ ist, da das simulierte Materialversagen unabhängig von den wirklichen Spannungsverhältnissen und innerhalb der Grenzfläche der diskreten Scherfuge stattfindet und die innere Struktur des Versuchsbodens im übrigen Teil der Probe davon weitgehend unbeeinflusst bleibt. Tatsächlich wird mit zunehmender Beanspruchung der Abdichtung bis zum Erreichen des Grenzzustandes jedoch ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes plastisches Fließen und damit eine deutliche Strukturveränderung innerhalb des Versuchsbodens stattfinden. Es wurden daher weitere Versuche bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit des Versuchsbodens und darüber hinaus bis zum Eintritt plastischen Fließens, entsprechend dem in Bild 3.5b dargestellten Spannungspfad, durchgeführt.

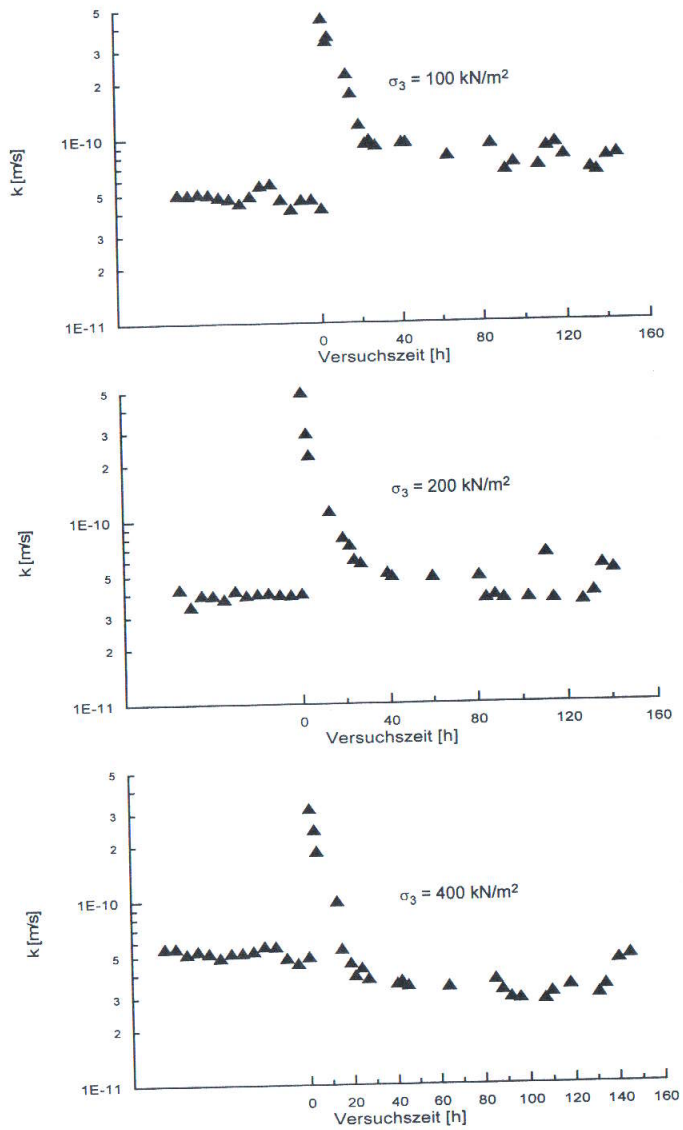


Bild 4.4: Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwerts nach dem Scherversagen(Zeitpunkt 0)

Für Versuchsboden A wurden hierzu 3 Versuchsproben mit einem Seitenverhältnis von h/d = 2 (Probendurchmesser d = 50 mm) bei nahezu vollständiger Wassersättigung ($S_r \approx 0{,}98$) und einer Einbaudichte von D_{pr} = 0,944 hergestellt. Die Proben sind in einer zweiwöchigen Vorlaufphase bei Seitendrücken von σ_3 = 100, 200 und 400 kN/m² und einem konstanten hydraulischen Gefälle von i = 62 solange durchströmt worden, bis in etwa gleichbleibende Durchlässigkeiten gemessen werden konnten (stationärer Strömungszustand).

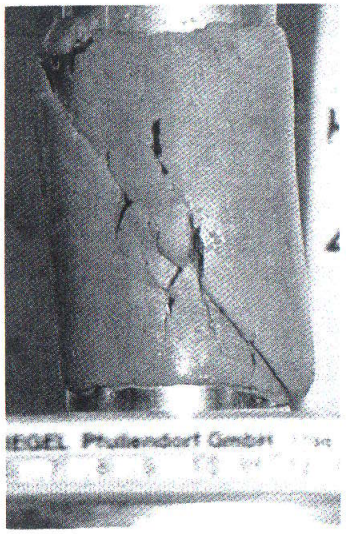


Bild 4.5:
Probekörper mit diskreten Scherfugen nach Ausbau

Im Anschluss an die Vorlaufphase wurden die Proben bei jeweils unverändertem Seitendruck durch Steigerung der axialen Spannung σ_1 kontinuierlich bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit des Versuchsbodens und darüber hinaus bis zu einer axialen Probenstauchung von ε_1 = 20 % belastet.

Die Ermittlung der Durchlässigkeit erfolgte jeweils für die durchfahrenen Spannungszustände nach abgeschlossener Konsolidation. Die gesamte Versuchszeit betrug 700 Stunden.

Es zeigte sich, dass für alle Proben, unabhängig von der Größe des Seitendrucks, die Durchlässigkeit trotz zunehmender Beanspruchung kontinuierlich abnahm. Mit zunehmendem Seitendruck machte sich die Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwertes in Abhängigkeit von der axialen Probenstauchung stärker bemerkbar. Eine nachhaltige Beeinträchtigung des Durchlässigkeitsverhaltens des Bodens infolge der aufgebrachten Beanspruchung ließ sich nicht erkennen.

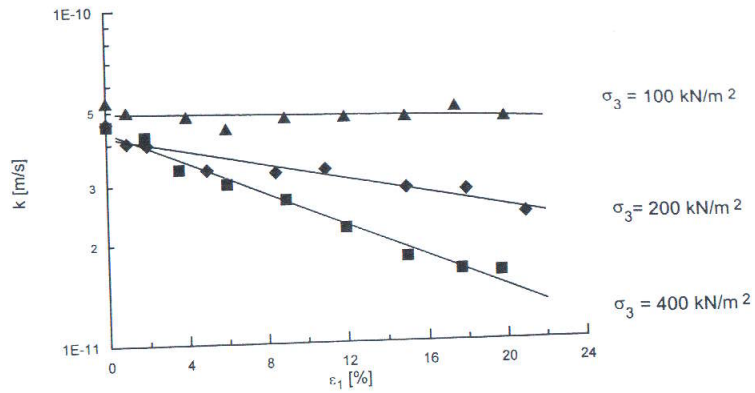


Bild 4.6: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Probenstauchung für Versuchsboden A, h/d = 2, d = 50 mm

Neben der Versuchsreihe mit Probendurchmesser d = 50 mm wurden für Versuchsboden A weiterhin 3 Versuchsproben mit Probendurchmesser d = 36 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 2 bei wiederum nahezu vollständiger Wassersättigung ($S_r \approx 0{,}98$) und einer Einbaudichte von D_{pr} = 0,95 hergestellt, um den Einfluss unterschiedlicher Probendurchmesser zu untersuchen. Die Proben wurden in einer einwöchigen Vorlaufphase bei Seitendrücken von σ_3 = 100, 200 und 400 kN/m² mit einem konstanten hydraulischen Gefälle von i = 61 durchströmt. Die Proben wurden wiederum bei unverändertem Seitendruck σ_3 durch Steigerung der axialen Spannung σ_1 kontinuierlich bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit des Bodens und darüber hinaus bis zu einer axialen Probenstauchung von ε_1 = 24 % belastet. Die gesamte Versuchszeit betrug 500 Stunden.

Die unter der Belastung ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte sind in Bild 4.7 in Abhängigkeit von der Probenstauchung aufgetragen und zeigen ähnlich wie in Bild 4.6 mit zunehmender Probenstauchung je nach Größe des Seitendruckes eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Abnahme. Auffallend in Bild 4.7 ist, dass trotz gleicher Einbaudichten die Probe bei einem Seitendruck von σ_3 = 200 kN/m² eine geringere Durchlässigkeit aufweist als die bei einem Seitendruck von σ_3 = 400 kN/m². Dies ist vermutlich auf die, trotz größter Sorgfalt, infolge der Verdichtung geschaffene unterschiedliche innere Struktur der Proben zurückzuführen, die sich um so stärker bemerkbar macht, je kleiner der Probendurchmesser ist. Serienversuche von *Carpenter/Stephenson (1986)* mit Probendurchmessern von 36, 71 und 102 mm haben gezeigt, dass die Ergebnisse aus Durchlässigkeitsversuchen mit kleinen Probendurchmessern deutlich stärker streuen als die mit großen Probendurchmessern.

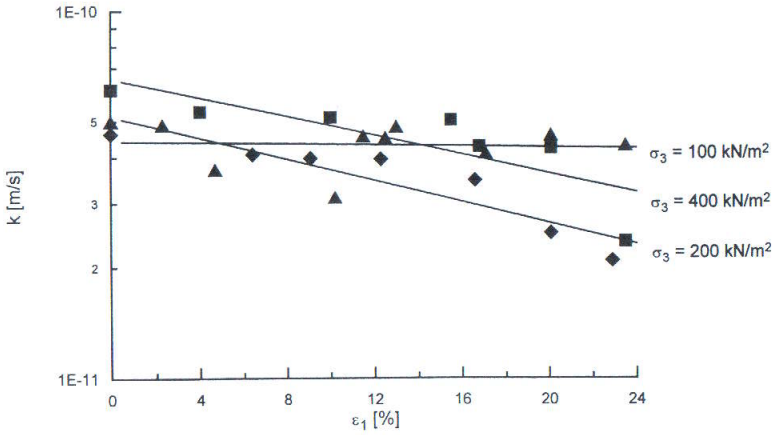


Bild 4.7: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Probenstauchung für Versuchsboden A, h/d = 2, d = 36 mm

Insgesamt gesehen stimmt jedoch der in Bild 4.7 dargestellte Verlauf der Durchlässigkeitsbeiwerte tendenziell mit dem Verlauf in Bild 4.6 überein. Die für die beiden Versuchsreihen gemessenen Durchlässigkeiten liegen nahezu in der gleichen Größenordnung, weshalb sich eine eindeutige Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Probendurchmesser für die vorliegenden Versuche nicht erkennen lässt. Was sich jedoch in beiden Versuchsreihen eindeutig zeigt, ist, dass der Durchlässigkeitsbeiwert mit zunehmender Beanspruchung und zunehmendem Seitendruck geringer wird. Die Durchlässigkeit der Proben nimmt mit größer werdendem Seitendruck stärker ab und erreicht jeweils bei der größten Beanspruchung, bei der das Scherversagen des Bodens vorausgesetzt werden kann, ihren Kleinstwert.

Um eine über die Probenhöhe möglichst homogene Veränderung der Struktur des Bodens zu erhalten, wurden neben den Proben mit einem Seitenverhältnis von h/d = 2 auch Probekörper mit einem Seitenverhältnis von h/d = 1 untersucht. Um die bei einem Seitenverhältnis von h/d = 1 notwendige Schmierung der Endflächen (reibungsfreie Randbedingung) zu erreichen, kann die Durchströmung der Probe nur über die in die beiden Endkappen eingelassenen Filtersteine erfolgen. Die Filtersteine weisen jedoch eine weitaus kleinere Querschnittsfläche auf als der Probekörper. Der damit gegebenenfalls verbundene Fehler bei der Versuchsdurchführung, läßt sich rechnerisch nicht weiter berücksichtigen und wurde bewusst in Kauf genommen, da im vorliegenden Fall die Absolutbeträge der Durchlässigkeitsbeiwerte nur eine untergeordnete Rolle spielen. In erster Linie ist die Änderung der Durchlässigkeit der Probe bis zum Scherversagen von Bedeutung, so dass hier nur relative Durchlässigkeitsunterschiede

betrachtet werden, die von dem in allen Versuchen näherungsweise gleich großen Fehler unbeeinflusst bleiben.

Bild 4.8 zeigt die Ergebnisse aus 3 Versuchsproben mit einem Seitenverhältnis von h/d = 1 und einem Probendurchmesser von d = 50 mm für Versuchsboden A bei nahezu vollständiger Wassersättigung ($S_r \approx 0{,}98$) und einer Einbaudichte von $D_{pr} = 0{,}956$ der Proctordichte.

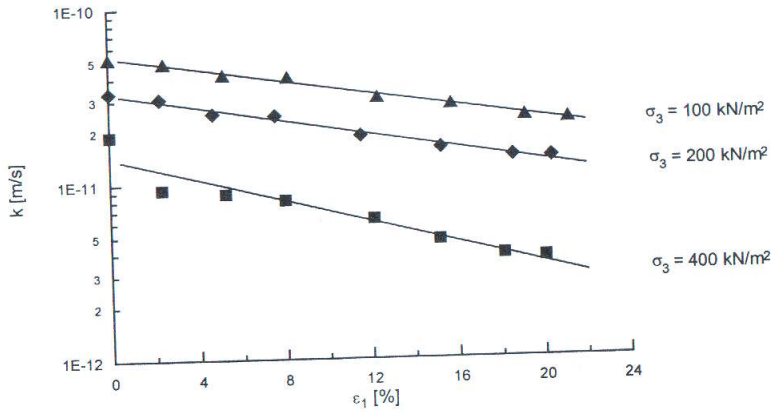


Bild 4.8: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Probenstauchung für Versuchsboden A, h/d = 1, d = 50 mm

Die Proben wurden analog zu den vorhergehenden Versuchsreihen in einer zweiwöchigen Vorlaufphase bei effektiven Seitendrücken von σ_3 = 100, 200 sowie 400 kN/m² und einem konstanten hydraulischen Gefälle von i = 60 bis zum Erreichen eines stationären Zustandes durchströmt. Das dargestellte Durchlässigkeitsverhalten des Bodens während der Belastung bis zu axialen Probenstauchung von ε_1 = 21 % ist durch eine etwas ausgeprägtere Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwertes gekennzeichnet als nach Bild 4.7. Dies lässt sich vermutlich dadurch erklären, dass die innere Struktur des Versuchsbodens als Folge des nahezu homogenen Verformungszustandes über die gesamte Probenhöhe verändert wird und nicht wie im Fall des Seitenverhältnisses von h/d = 2 vorwiegend nur im mittleren Drittel der Probenhöhe. Hinsichtlich der absolut gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte zeigt Bild 4.8 gegenüber Bild 4.7 nur geringe Unterschiede, obwohl die Ein- und Ausströmfläche in den beiden Endkappen im Vergleich zur Querschnittsfläche des Probekörpers weitaus geringer sind. Dass der mit der Versuchsanordnung verbundene Fehler bei der Versuchsauswertung im Rahmen der sonstigen Messungenauigkeiten bzw. Fehlerquellen liegt und damit für die vorliegenden Versuche ver-

nachlässigt werden kann, ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Probekörper nach der Vorlaufphase fast vollständig wassergesättigt und die Fließgeschwindigkeit innerhalb der Probe äußerst gering war. So konnte sich als Fließfläche innerhalb der Probe über nahezu der gesamten Strömungslänge die volle Probenquerschnittsfläche einstellen, was unter anderem auch durch das auf die Endflächen verteilte Filterpapier gefördert wurde.

Neben den bisherigen Versuchen bei unterschiedlichen Versuchsrandbedingungen wurden analog zu den in Bild 4.7 dargestellten Versuchsergebnissen Versuche mit Versuchsboden B zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Böden durchgeführt. Hierzu wurden für Versuchsboden B 3 Versuchsproben mit einem Seitenverhältnis von h/d =2 und einem Probedurchmesser von d = 36 mm bei nahezu vollständiger Wassersättigung ($S_r \approx 0{,}98$) und einer Einbaudichte von $D_{pr} = 0{,}973$ hergestellt. Die Proben wurden in einer 10-tägigen Vorlaufphase bei Seitendrücken von σ_3 = 100, 200 sowie 400 kN/m² und einem konstanten hydraulischen Gefälle von i = 31 durchströmt. Gegenüber den Versuchen mit Versuchsboden A wurde ein geringerer hydraulischer Gradient gewählt, um Strukturstörungen innerhalb der Proben zu vermeiden, da es sich bei Versuchsboden B nach Bild 3.1 im Siebkornbereich um ein enggestuftes Material handelt.

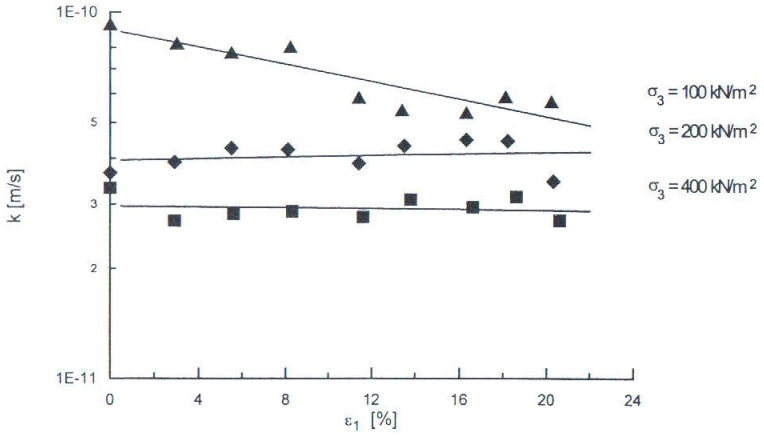


Bild 4.9: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Probenstauchung für Versuchsboden B, h/d = 2, d = 36 mm

Auch für Versuchsboden B tritt bei Steigerung der axialen Spannung σ_1 bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit des Bodens und darüber hinaus bis zu einer axialen Probenstauchung von $\varepsilon_1 = 21$ % keine nachhaltige Beeinträchtigung der Durchlässigkeit des Bodens ein. Mit zunehmendem Seitendruck ist, wie für Versuchsboden A, eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwertes zu verzeichnen, wobei eine nur geringe Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der axialen Probenstauchung erkennbar ist.

4.3 Versuche mit veränderlichem Seitendruck und Mikropumpe

Mit der in Bild 3.3 dargestellten Versuchsanordnung mit der Mikropumpe wurden kraftgesteuerte Versuche bei veränderlichem Seitendruck durchgeführt. Hierdurch konnten die Proben Beanspruchungszuständen ausgesetzt werden, die ausgehend von dem bei der erdbautechnischen Verdichtung des Erdstoffs geschaffenen Anfangsspannungszustandes (näherungsweise als isotroper Spannungszustand) aus der kontinuierlich zunehmenden Auflast aus dem Abfall und somit der schrittweisen Zunahme der Beanspruchungen in der Abdichtung bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit des Erdstoffes, wie es qualitativ in Bild 3.5a dargestellt ist, berücksichtigt werden.

Die Sättigung der Proben erfolgte durch Aufbringen eines Sättigungsdruckes innerhalb des geschlossenen Porenwasserdrucksystems der Versuchsanordnung nach Bild 3.3. Der Verlauf, der durch den konstanten Durchfluss Q der Probe aufgezwungenen oder auch *induzierten* Druckdifferenz Δh über die Versuchsdauer, hängt deutlich von der Größe des gewählten Sättigungsdruckes bzw. dem verbleibenden Anteil an ungelöster Porenluft innerhalb des Porenwassersystems ab. *Olsen et al. (1988)* haben gezeigt, dass die sog. Steifigkeit des Porenwasserdrucksystems S, die als Verhältnis zwischen der Zunahme an Flüssigkeitsvolumen innerhalb des Porenwassersystems (dV) bezogen auf die Änderung der Druckdifferenz (dh) definiert ist,

$$S = \frac{dV\left(cm^3\right)}{dh\left(cmH_2O\right)} \tag{4.1}$$

mit zunehmendem Sättigungsdruck kleiner wird und asymptotisch einen konstanten Wert erreicht. Bild 4.10 zeigt den Einfluss des Sättigungsdruckes auf den Verlauf der Steifigkeit des Porenwasserdrucksystems, der als Grundlage für den gewählten Sättigungsdruck diente.

Aus Bild 4.10 lässt sich erkennen, dass sich mit Sättigungsdrücken von etwa 500 kN/m² die Steifigkeit des Porenwasserdrucksystems kaum verändert und daher das Verhältnis dV/dh als konstant betrachtet werden kann. Die durchgeführten Versuche wurden alle mit einem Sättigungsdruck von 500 kN/m² durchgeführt, womit entsprechend Bild 4.10 eindeutige Versuchsrandbedingungen vorlagen.

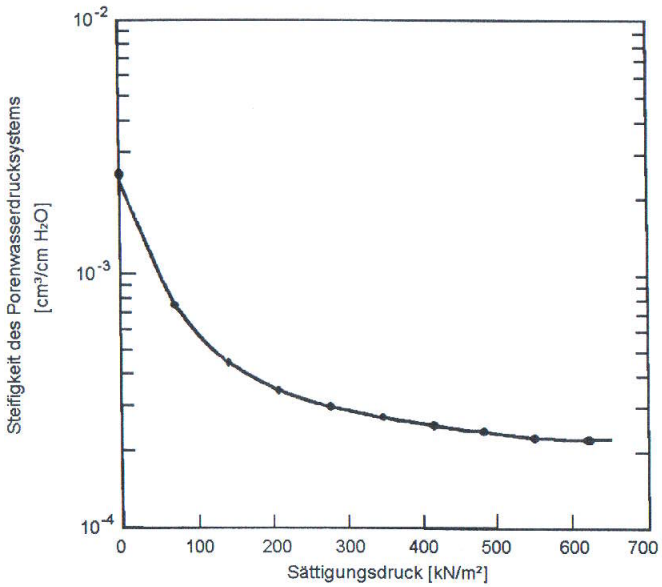


Bild 4.10: Veränderung der Steifigkeit des Porenwasserdrucksystems mit zunehmendem Sättigungsdruck, nach *Olsen et al., (1988)*

Den aufgebrachten Sättigungsdruck konstant zu halten bereitete anfänglich gewisse Schwierigkeiten, da durch anschlussbedingte Undichtigkeiten innerhalb des Systems der Druck um etwa 100 kN/m² abfiel. Nach nochmaliger Montage aller Anschlussteile an das Porenwasserdrucksystem konnte ein konstanter Druck innerhalb des Systems aufrechterhalten werden. Die Dichtigkeit wurde mit einem Systemdruck von 1000 kN/m² geprüft und der aufgezeichnete Druckabfall betrug über einen Zeitraum von 24 Stunden weniger als 2 kN/m², womit eine für die Versuche ausreichende Dichtigkeit des Porenwasserdrucksystems erreicht war.

Neben Prüfung der Druckbeständigkeit des Systems wurde weiterhin die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse für die verwendete Versuchsanordnung untersucht. Hierzu wurden an einer Probe insgesamt 3 Versuche bei unterschiedlichen Durchflussraten ausgeführt. Bild 4.11 zeigt den Verlauf der zwischen den Enden des Probekörpers mit einem Durchmesser von 36 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 2 für *Material C* induzierten Druckdifferenz Δh_t für die unterschiedlichen Durchflussraten Q. Die Größe der Durchlässigkeitsbeiwerte ist ausgehend von dem Fließgesetz von DARCY durch folgende Beziehung gegeben *(Olsen et al., 1988)*

$$k_t = \frac{Q \cdot h_0 \cdot (1-\varepsilon_1)}{\Delta h_t \cdot \left(\frac{A_0 \cdot h_0}{h_0 \cdot (1-\varepsilon_1)} \right)} \tag{4.2}$$

Es bedeuten:

k_t = Durchlässigkeitsbeiwert zum Zeitpunkt t
Q = aufgebrachte Durchflußrate
h_0 = Probenausgangshöhe
ε_1 = axiale Probenstauchung
Δh_t = induzierte Druckdifferenz zum Zeitpunkt t bezogen auf die durchstömte Länge
A_0 = Ausgangsquerschnittsfläche der Probe

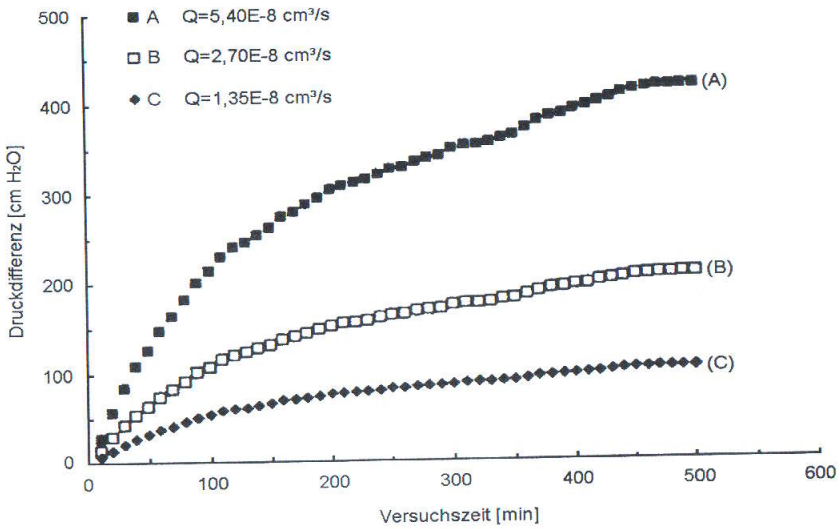


Bild 4.11: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse für die verwendete Versuchsanordnung für Material C

Es ist zu beachten, dass k_t mit steigender Druckdifferenz Δh_t kleiner wird. Wie die Charakteristik von Δh_t in Bild 4.11 zeigt, strebt die induzierte Druckdifferenz unabhängig von Q asymptotisch einem konstanten Wert zu, der einen stationären Strömungszustand kennzeichnet. Die Versuchsdauer richtete sich deshalb nach dem Zeitpunkt, ab dem sich die induzierte

Druckdifferenz nicht mehr verändert. Dies hängt von der Durchlässigkeit des Erdstoffes sowie von der aufgebrachten Durchflussrate Q ab. Im vorliegenden Fall ergaben sich Versuchszeiten von bis zu 500 Minuten (ca. 8,5 h). Unabhängig von den aufgebrachten Durchflussraten Q wurde für Versuchsmaterial C im Versuch A ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 8{,}97\ 10^{-11}$ m/s, für Versuch B von $k = 8{,}88 \cdot 10^{-11}$ m/s und für Versuch C von $k = 8{,}72 \cdot 10^{-11}$ m/s bestimmt. Die Größen der Durchlässigkeitsbeiwerte zeigen, dass damit die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gegeben ist. Weiterhin zeigen sich deutlich kürzere Versuchszeiten gegenüber den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Versuchen mit konventioneller Versuchstechnik. Trotz der schnellen Versuchsdurchführung hatten sich relativ geringe hydraulische Gradienten in einer Größe von i = 58 für Versuch A, i = 29 für Versuch B sowie i = 15 für Versuch C eingestellt.

Tabelle 4.1: Induzierte Druckdifferenz, Material C, d=36 mm, h/d=2 (Versuchsergebnisse aus Bild 4.12)

Spannungszustand	Durchflussrate Q in [cm³/s]	Induzierte Druckdifferenz max Δh_t in [bar]	Durchlässigkeitsbeiwert k in [m/s]
a)	$5{,}40 \cdot 10^{-6}$	0,420	$8{,}97 \cdot 10^{-11}$
b)	$3{,}24 \cdot 10^{-6}$	0,447	$4{,}71 \cdot 10^{-11}$
c)	$3{,}24 \cdot 10^{-6}$	0,536	$3{,}88 \cdot 10^{-11}$
d)	$3{,}24 \cdot 10^{-6}$	0,638	$3{,}24 \cdot 10^{-11}$
e)	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	0,604	$1{,}69 \cdot 10^{-11}$
f)	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	0,611	$1{,}50 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 4.2: Induzierte Druckdifferenz, Material D, d=36 mm, h/d=2 (Versuchsergebnisse aus Bild 4.13)

Spannungszustand	Durchflussrate Q in [cm³/s]	Induzierte Druckdifferenz max Δh_t in [bar]	Durchlässigkeitsbeiwert k in [m/s]
a)	$5{,}40 \cdot 10^{-6}$	0,658	$5{,}76 \cdot 10^{-11}$
b)	$3{,}24 \cdot 10^{-6}$	0,893	$2{,}22 \cdot 10^{-11}$
c)	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	0,529	$1{,}86 \cdot 10^{-11}$
d)	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	0,609	$1{,}60 \cdot 10^{-11}$
e)	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	0,577	$1{,}59 \cdot 10^{-11}$

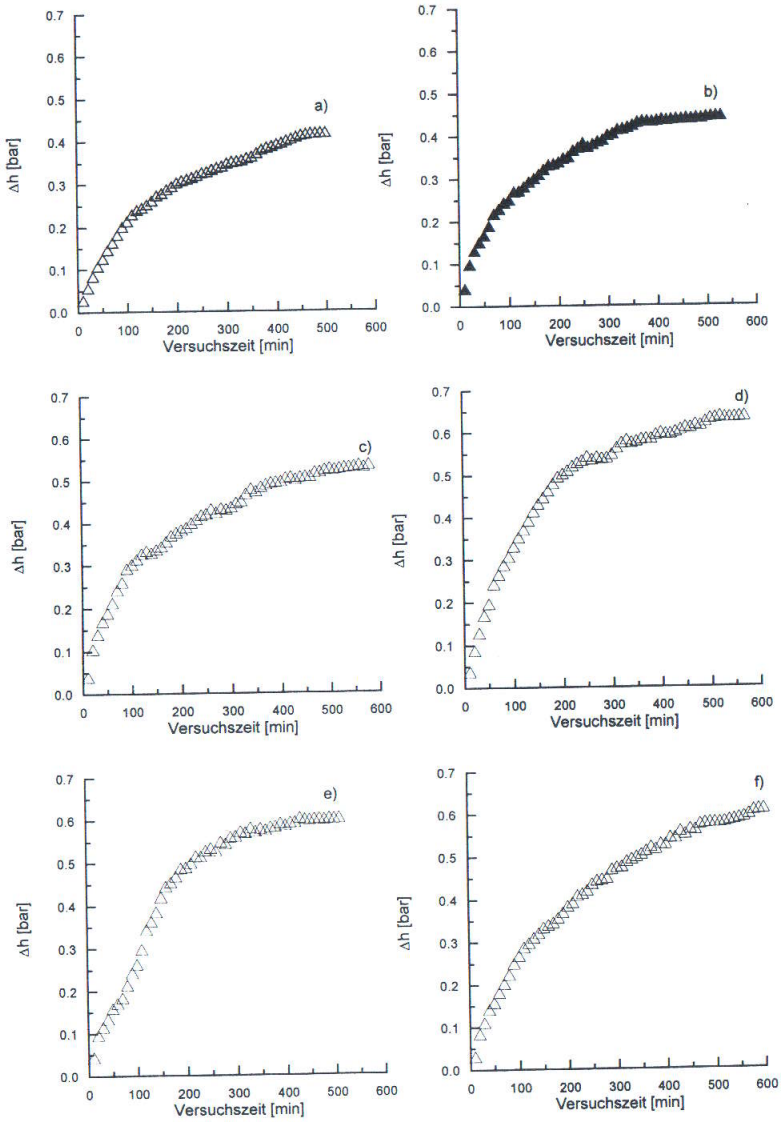


Bild 4.12: Verlauf der induzierten Druckdifferenz der Probe für Material C mit Probendurchmesser 36 mm und h/d = 2 für Spannungszustände nach Bild 4.14

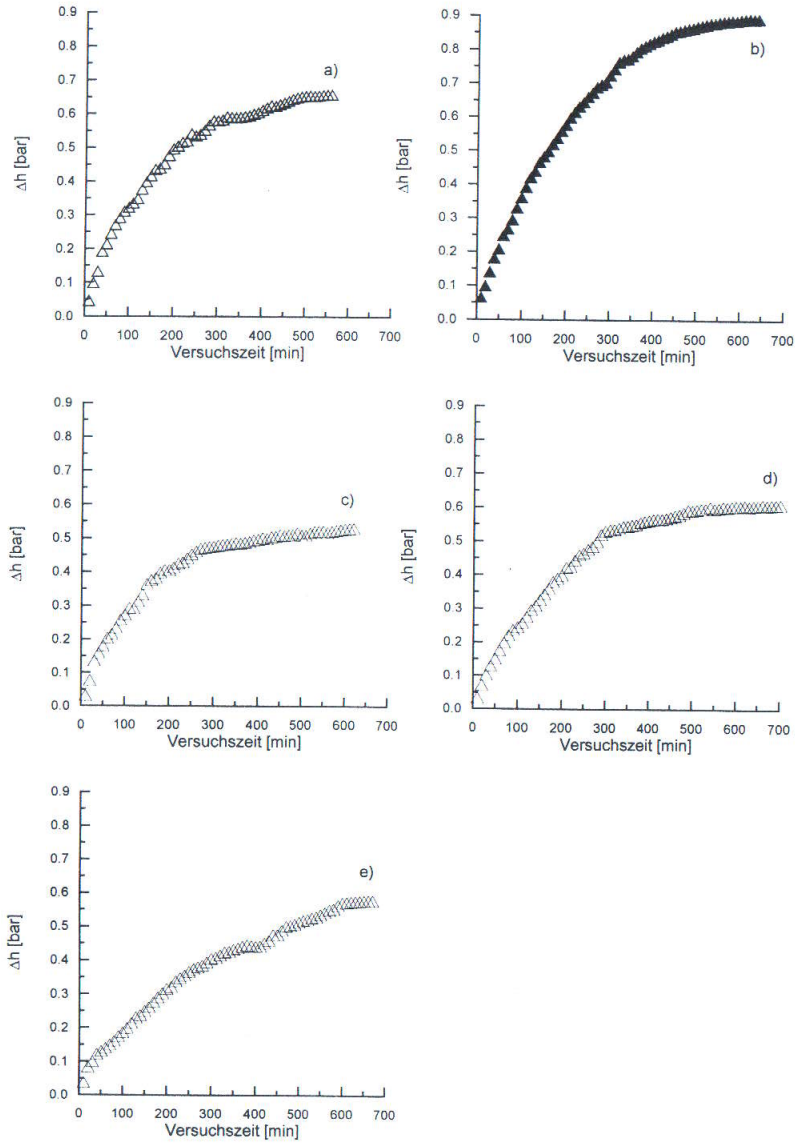


Bild 4.13: Verlauf der induzierten Druckdifferenz der Probe für Material D mit Probendurchmesser 36 mm und h/d = 2 für Spannungszustände nach Bild 4.15

Die durchgeführten Durchlässigkeitsversuche unter Scherbeanspruchung sind in den Bildern 4.12 und 4.13 enthalten und zeigen den Verlauf der zwischen den Enden der Proben mit einem Durchmesser von 36 mm und einem Seitenverhältnis von h/d = 2 für Material C und Material D induzierten Druckdifferenz Δh_t bei unterschiedlichen Durchflussraten Q für die jeweils durchlaufenen Spannungs- bzw. Beanspruchungszustände.

Für die vorliegenden Versuche ergaben sich Versuchszeiten zwischen 500 und 700 Minuten (ca. 8,5 h und 12,5 h). Auch hierbei zeigen sich die deutlich kürzeren Versuchszeiten gegenüber den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Versuchen mit konventioneller Versuchstechnik. Trotz der schnellen Versuchsdurchführung hatten sich relativ geringe hydraulische Gradienten in einer Größe zwischen i = 58 und i = 124 eingestellt. Die der Versuchsauswertung zugrunde gelegten Druckdifferenzen Δh_t sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 ebenso wie die Größe der ermittelten Durchlässigkeiten ausgewiesen.

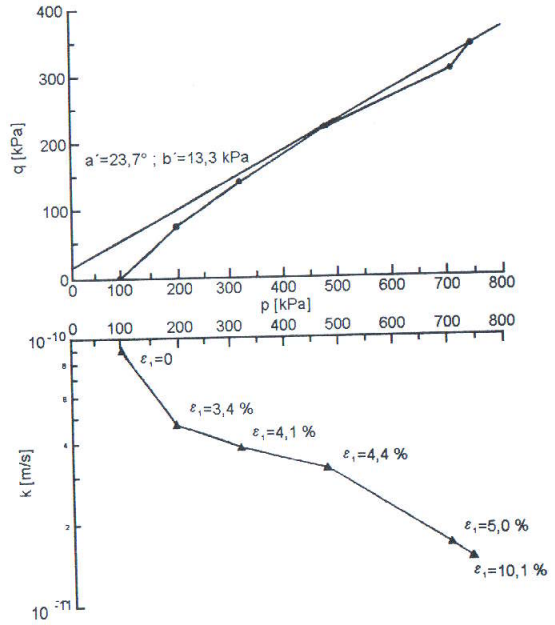


Bild 4.14: Durchlässigkeitsverhalten während der Beanspruchungszustände a) bis f) nach Bild 4.12 für Material C mit Probendurchmesser 36 mm und h/d = 2

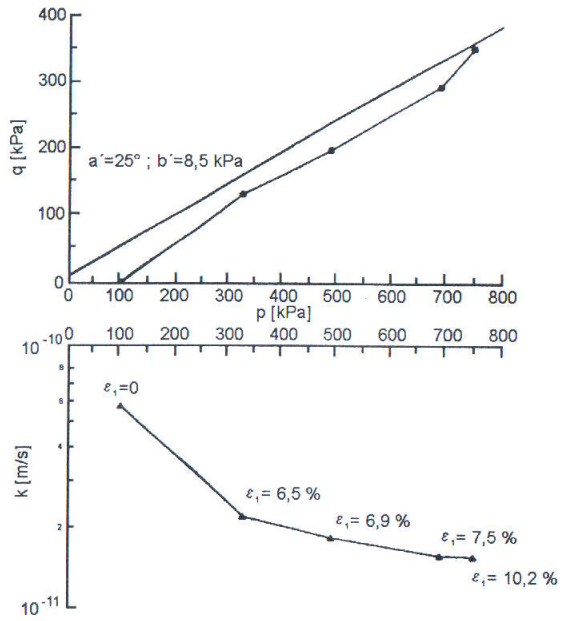


Bild 4.15: Durchlässigkeitsverhalten während der Beanspruchungszustände a) bis e) nach Bild 4.12 für Material D mit Probendurchmesser 36 mm und h/d = 2

Die Bilder 4.14 und 4.15 zeigen den Zusammenhang zwischen den Beanspruchungszuständen für die im Einbauzustand auf D_{pr} = 0,964 (Material C) und D_{pr} = 0,957 (Material D) verdichteten Proben und der Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwertes.

Aus der Darstellung zeigt sich, dass die Durchlässigkeit der Proben mit zunehmender Beanspruchung stetig kleiner wird. Selbst bei Beanspruchungen über die Grenztragfähigkeit des Materials hinaus, bis zum Erreichen ausgeprägten Scherversagens begleitet durch große Verformungen, lässt sich, wie bereits bei den Versuchen nach Abschnitt 4.2, keine nachhaltige Beeinträchtigung des Durchlässigkeitsverhaltens der Proben erkennen. Es tritt vielmehr eine stetige Verminderung des Durchlässigkeitsbeiwertes mit zunehmenden Verformungen und damit eine Erhöhung der Dichtwirkung ein.

Es zeigt sich somit unabhängig davon, ob die Beanspruchungszustände bei konstantem oder veränderlichem Seitendruck herbeigeführt werden, dass für die untersuchten Dichtungsmaterialien eine mit zunehmender Beanspruchung und der daraus resultierenden Verformungen verbundene Verdichtung bzw. Verfestigung des Erdstoffes eintritt. Diese Art der beanspruchungsbedingten Verdichtung, der eine Basisabdichtung unterliegt, kann als *Selbstdichtungseffekt* bezeichnet werden.

Dieser *Selbstdichtungseffekt* zeichnet sich dadurch aus, dass die Dichtungsschicht an der Basis einer Deponie unabhängig von den eintretenden Beanspruchungszuständen ihr Durchlässigkeitsverhalten mit zunehmender Auflast günstig verändert. Die Gefahr einer nachhaltigen Beeinträchtigung der Dichtwirkung lässt sich anhand der durchgeführten Versuche nicht erkennen.

5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Aus der Forderung einer verlässlichen Kontrolle der Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit von Dichtungssystemen werden zunehmend kontrollier- und reparierfähige Basisabdichtungen ausgeführt. In der Deponiepraxis können hierfür begehbare Kontrollstollen unterhalb des Abdichtungssystems angeordnet werden, von denen mögliche Leckagen über ein Kontrollsystem kontrolliert und repariert werden können. Der hierzu notwendige Kontrollstollen selbst stellt im Verbund mit seiner Umgebung, d.h. mit der Basisabdichtung bzw. dem Deponieauflager und dem Deponiekörper ein vergleichsweise steifes Element dar, was zwangsläufig zu Lastkonzentrationen und daraus resultierend zu Beanspruchungen innerhalb der Basisabdichtung führt, die das Durchlässigkeitsverhalten der mineralischen Abdichtung beeinflussen. Die mit der Beanspruchung verbundene Auswirkung auf die Dichtigkeit von mineralischen Basisabdichtungen wurde durch ein Versuchsprogramm untersucht und die Wechselwirkung zwischen Beanspruchung und Dichtwirkung beschrieben. Hierzu wurden die für die Basisabdichtung aus dem Einfluß von festen Einbauten zu erwartenden Beanspruchungen abgeschätzt und mit Hilfe der triaxialen Versuchstechnik unmittelbar auf unterschiedliche, für mineralische Abdichtungen repräsentative Erdstoffe übertragen, wobei gleichzeitig das Durchlässigkeitsverhalten beobachtet wurde.

Unabhängig davon, ob die Beanspruchungszustände bei konstantem oder veränderlichem Seitendruck herbeigeführt wurden zeigte sich, daß für die untersuchten Dichtungsmaterialien eine mit zunehmender Beanspruchung und der daraus resultierenden Verformungen verbundene Verdichtung bzw. Verfestigung des Erdstoffs eintritt. Diese Art der beanspruchungsbedingten Verdichtung, der eine Basisabichtung unterliegt, kann als Selbstdichtungseffekt bezeichnet werden. Der Selbstdichtungseffekt ist dadurch gekennzeichnet, daß die Dichtungsschicht an

der Basis einer Deponie unabhängig von den untersuchten Beanspruchungszuständen ihr Durchlässigkeitsverhalten mit zunehmender Auflast günstig verändert. Die Gefahr der nachhaltigen Beeinträchtigung der Dichtwirkung läßt sich anhand der durchgeführten Versuche nicht erkennen. Aus den dargestellten Versuchsergebnissen lassen sich folgende, vorläufige Schlußfolgerungen ziehen:

- Die Versuchsergebnisse in Bild 4.4 zeigen, daß sich das Scherversagen des untersuchten Dichtungsmaterials infolge Bildung diskreter Scherfugen nur unmittelbar nach Eintritt des Versagens auf die Durchlässigkeit auswirkt. Bei ausreichend großem Seitendruck erreicht das Dichtungsmaterial bereits wenige Stunden nach der Bildung der diskreten Scherfugen, wieder sein ursprüngliches Durchlässigkeitsverhalten. Die Durchlässigkeit des Dichtungsmaterials zeigt sich weitgehend unbeeinflußt von diskreten Scherfugen.
- Die Versuchsergebnisse nach Bild 4.6 bis 4.8 zeigen, daß unabhängig vom untersuchten Dichtungsmaterial beanspruchungsbedingte Strukturveränderungen innerhalb des Erdstoffs, wie sie bei plötzlichem Erreichen der Grenztragfähigkeit der Abdichtung eintreten können, auch bei ausgeprägtem plastischen Fließen keine nachhaltigen Veränderungen der Dichtwirkung erkennen lassen. Während der Beanspruchung der Abdichtung bis zum Eintritt der Grenztragfähigkeit des Materials und darüber hinaus nimmt die Durchlässigkeit stetig ab, unabhängig vom Ausgangsspannungszustand.
- Die Versuchsergebnisse nach Bild 4.14 und 4.15 zeigen, daß die kontinuierliche Zunahme der deviatorischen Beanspruchung bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit der Abdichtung und die daraus resultierenden Strukturveränderungen innerhalb des Erdstoffs ebenfalls keine nachhaltige Veränderung der Dichtungswirkung erkennen lassen. Mit zunehmender deviatorischer Beanspruchung der Abdichtung verringert sich die Durchlässigkeit deutlich über die im Ausgangszustand vorhandenen Größen hinaus.

Es sei darauf hingewiesen, daß die dargestellten günstigen Versuchsergebnisse über das Durchlässigkeitsverhalten von Dichtungsmaterialien unter mechanischer Beanspruchung zunächst nur für die untersuchten feinkörnigen Böden aufgezeigt werden können.

Unabhängig von der hier behandelten Fragestellung zum Abdichtungsverhalten von Basisabdichtungen über Kontrollstollen sind ähnliche Ergebnisse für allgemein beanspruchte Deponieabdichtungen z.B. von *Schick (1996)* mitgeteilt worden.

Der wesentliche Einflussparameter zum Selbstdichtungseffekt bei scherbeanspruchten Basisabdichtungen scheint damit das hohe Spannungsniveau infolge der Abfallüberschüttung und damit ein Überdrücken der beanspruchten mineralischen Abdichtungsschicht zu sein.

6 Literatur

ATV - Arbeitsblatt A 127 (1988): Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen. Regelwerk Abwasser-Abfall DK 628.22(083), 2. Auflage 1988

Boynton, S.S. / Daniel D.E. (1985): Hydraulic conductivity tests on compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 465-478

Carpenter, G.W. / Stephenson, R.W. (1986): Permeability Testing in the Triaxial Cell. Geotechnical Testing Journal. GTJODJ, Vol. 9, No. 1, pp. 3-9

DIN 4035 (1990): Stahlbetonrohre, Stahlbetondruckrohre und zugehörige Formstücke - Maße; Technische Lieferbedingungen

Edelmann, L. (1995): Grenzen der Verformbarkeit mineralischer Barrieren, Untersuchungen im Darmstädter Deponieverformungssimulator. In Vorträge 2. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Mitteilungen d. Inst. F. Geotechnik, TH Darmstadt, S. 39-46

Hertweck, M. / Amann, P. (1996): Tragverhalten von Steilwandbarrieren im Deponiebau. Bauingenieur 71, S. 369-377

Horn, A. / Schick, P. / Wunsch, R. (1995): Verformbarkeit, Rißsicherheit und Dichtigkeit von mineralischen Deponiedichtungen, Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München, Heft 10

Leonhardt, G. (1979): Die Erdlast bei überschütteten Durchlässen, Bautechnik 56, Heft 11, S. 361-368

Olsen, H.W. (1966): Darcy's Law in saturated kaolinite. Wat. Resour. Res. 2, No. 6, 287-295

Olsen, H.W. (1969): Simultaneous fluxes of liquid and change through saturated kaolinite. Proc. Soil Sci. Soc. AM. 33, No. 3, 338-344

Olsen, H.W. (1972): Liquid movement through kaolinite under hydraulic, electric and osmotic gradients. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. 56, 2022-2028

Olsen, H.W. / Nichols, R.W. / Rice, T.L. (1985): Low gradient permeability measurements in a triaxial system. Geotechnique 35, No. 2, 145-157

Olsen, H.W. / Morin, R.H. / Nichols, R.W. (1988): Flow Pump Applications in Triaxial Testing. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp. 68-81

Schick, P. (1996): Zur Zeit- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der Rißsicherheit mineralischer Deponiedichtungen. Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München, Heft 12