# **BayFORREST**

# Bayerischer Forschungsverbund Abfallforschung und Reststoffverwertung

# **Schlußbericht**

zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Projekt Nr. F 58

"Untersuchungen zur Beurteilung der Filterwirksamkeit von Geotextilien bei geringer hydraulischer Belastung"

von

Dipl.-Ing. Maximilian Krug

Projektleiter: Dipl.-Ing. Dirk Heyer

Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik Technische Universität München

Leiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R.Floss

September 1997

# Inhaltsverzeichnis

| 1. Einleitung 1   |
|---|
| 2. Stand der Technik 4  |
| 2.1 Allgemeines 4   |
| 2.2 Stand der Technik in der Kornfilterbemessung  |
| <ul> <li>2.3 Stand der Technik in der Bemessung geotextiler Filter und</li> <li>Zuordnung zum Anwendungsfall Deponiebau</li></ul> |
| 2.3.1 Wechselwirkungen zwischen Boden und Filter  |
| 2.3.2 Bemessung nach DVWK 13  |
| 2.3.3 Versuchstechniken und Versuchsergebnisse  |
| 3. Hydraulisches System im Anwendungsfall Deponiebau  |
| 4. Untersuchungsprogramm  |
| 4.1 Allgemeines   |
| 4.2 Auswahl der Versuchsböden 43  |
| 4.2.1 Allgemeines   |
| 4.2.2 Leichtplastischer Schluff   |
| 4.2.3 Gemischtkörnige Böden 46  |
| 4.3 Auswahl der zu untersuchenden Geotextilien  |
| 4.4 Nachweise der Filterwirksamkeit der Geotextilien mit den<br>Versuchsböden nach DVWK   |

|    | 4.5 Auswerteformeln der Filterversuche                            | 59 |
|----|---|----|
| 5  | Entwicklung und Beschreibung der Versuchstechniken zur            |    |
| 2. | Untersection a der Eilterseidesemlesit von Costerstilien im Labor | 67 |
|    | Untersuchung der Filterwirksamkeit von Geotextillen im Labor      | 03 |
|    | 5.1 Modifizierter LTF-Test  | 63 |
|    | 5.1.1 Versuchszelle   | 63 |
|    | 5.1.2 Vorversuche   | 64 |
|    | 5.1.3 Auswertung und Interpretation der Vorversuche               | 66 |
|    | 5.1.3.1 Gemischtkörniger Boden 1                                  | 66 |
|    | 5.1.3.2 Schluff   | 69 |
|    | 5.1.4 Folgerungen für Reihenuntersuchungen                        | 71 |
|    | 5.2 Modifizierter Pinhole-Test                                    | 73 |
|    | 5.2.1 Allgemeines   | 73 |
|    | 5.2.2 Vorversuchsreihe 1  | 74 |
|    | 5.2.3 Vorversuchsreihe 2  | 78 |
|    | 5.2.4 Folgerungen aus den Vorversuchsreihen                       | 80 |
|    | 5.3 Suspensionstest   | 81 |
|    | 5.3.1 Allgemeines   | 81 |
|    | 5.3.2 Versuchsaufbau  | 81 |
|    | 5.3.3 Feststoffe der Suspensionen                                 | 84 |
|    | 5.3.4 Sand-/Kieskörper  | 85 |
|    | 5.3.5 Feststoffkonzentration der Suspensionen                     | 86 |
|    | 5.4 Modifizierter GR-Test   | 87 |
|    | 5.4.1 Allgemeines   | 87 |
|    | 5.4.2 Modifizierte Durchlässigkeitszelle und Versuchsdurchführung | 89 |
|    | 5.4.3 Vorversuche   | 93 |

| 5.4.3.1 Vorversuch 1:  | . 93        |
|--|-------------|
| 5.4.3.2 Vorversuch 2   | 94          |
| 5.4.3.3 Vorversuch 3   | 95          |
| 5.4.4 Folgerungen für Reihenuntersuchungen   | 98          |
| 5.4.5 Versuche zur Überprüfung der Versuchstechnik mit filterstabilem                        |             |
| Versuchsboden  | 100         |
| 6. Auswertung und Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen                               | 104         |
| 6.1 Modifizierter LTF-Test   | 104         |
| 6.1.1 Versuchsreihen   | 104         |
| 6.1.2 Interpretation Versuchsreihe 1   | 105         |
| 6.1.3 Interpretation Versuchsreihe 2   | 111         |
| 6.1.4 Vergleich Versuchsreihe 1 und 2  | 113         |
| 6.2 Versuche mit dem Suspensionstest   | 114         |
| 6.2.1 Versuchsreihe  | 114         |
| 6.2.2 Auswertung der durchgeführten Versuche   | 115         |
| 6.2.3 Auswertung der Anfangsdurchlässigkeiten ohne   |             |
| Suspensionsbeaufschlagung  | 119         |
| 6.2.4 Beaufschlagung mit fraktioniertem Schluff  | 122         |
| 6.2.4.1 Filtermechanismus  | 122         |
| 6.2.4.2 Zusammenfassung der Versuche mit den Geotextilien des selben Herstellers             | 124         |
| 6.2.4.3 Zusammenfassung und Vergleich der Versuche mit<br>unterschiedlichem Sand-/Kieskörper | 125         |
| 6.2.4.4 Interpretation des unterschiedlichen Filterverhaltens der<br>Geotextilien            | 1 <b>29</b> |
| 6.2.5 Beaufschlagung mit Normensand  | 131         |
| 6.2.5.1 Filtermechanismus  | 131         |
| 6.2.5.2 Permittivität  | 132         |
| 6.2.5.3 Permittivitätsrückgang   | 134         |
| 6.2.6 Beaufschlagung mit Kaolin  | 136         |

| ]   | IV         |
|---|------------|
| 6.2.6.1 Filtermechanismus   | 37         |
| 6.2.6.2 Permittivität 13  | 38         |
| 6.2.6.3 Permittivitätsrückgang14  | 10         |
| 6.2.6.4 Vergleich der Versuche mit Geotextilien des selben Herstellers 14 | <b>1</b> 1 |
| 6.2.7 Zusammenfassung Suspensionsversuche                                 | 12         |
| 6.3 Versuche mit dem modifizierten GR-Test                                | 5          |
| 6.3.1 Allgemeines   | 15         |
| 6.3.2 Versuche mit Testboden A 14   | 5          |
| 6.3.3 Versuche mit Testboden B 15   | ;3         |
| 6.3.4 Versuche mit Schluff 15   | 55         |
| 6.3.5 Zusammenfassung modifizierter GR-Test                               | 3          |
| 7. Zusammenfassung  | 6          |
| 8. Schlußbemerkungen  | 9          |
| 9. Literatur  | 3          |
| Anlagenübersicht  |            |
| Anlage 1  |            |
| Anlage 2  |            |
| Anlage 3  |            |
| Anlage 4  |            |
|   |            |

. Mins

Sec. So

### 1. Einleitung

Die Anwendung geotextiler Filter im Bauwesen ist weit verbreitet. Sie werden nahezu in jedem Bereich des Tiefbaus eingesetzt, als Beispiele kann neben dem Deponiebau der Wasserbau, Tunnelbau, Straßenbau und der allgemeine Erdbau genannt werden.

In allen diesen Anwendungen ist die Funktionsfähigkeit einer kontrollierten Wasserabführung für die langfristige Erhaltung eines Bauwerks von großer Bedeutung. Die einzelnen Bauteile müssen projektspezifisch unter anderem gegen drückendes Grundwasser, Schichtenwasser oder Niederschlagswasser geschützt werden. Konstruktiv wird dabei häufig eine dichtende Schicht vor dem zu schützenden Bauwerksteil angebracht. Die Funktion Dichten ist dabei stets mit der Funktion der kontrollierten Abführung des Wassers kombiniert, wenn eine dauerhafte Funktionsfähigkeit einer Dichtung zu gewährleisten ist. Vor einer Dichtungsschicht müssen Wasserdrücke stets durch eine ausreichend dimensionierte Sickerschicht, in deren Ebene das anströmende Sickerwasser abgeführt werden soll, verhindert werden. Diese Sickerschicht, aufgebaut aus mineralischen Kornmaterialien oder aus Geokunststoffen, zeichnet sich durch eine hohlraumreiche, durchgängige, grobporöse Struktur aus, die dadurch eine ausreichende Wasserableitkapazität gewährleistet. Für die Aufrechterhaltung des Leistungsvermögens dieser Sickerschicht ist im wesentlichen ein funktionsfähiger Filter verantwortlich, der vor der Anströmseite dieser Sickerschicht anzuordnen ist. Dieser Filter nimmt somit eine Schlüsselposition ein. Von seiner dauerhaften Funktionsfähigkeit hängt maßgeblich das Leistungsvermögen des Gesamtsystems ab.

Die Aufgaben eines Filters, einerseits den abzufilternden Boden zurückzuhalten und andererseits das anströmende Wasser möglichst druckverlustfrei durchströmen zu lassen, sind entgegensetzt gerichtet, müssen aber gleichzeitig erfüllt werden. Diese beiden Anforderungen werden in der Regel mit mechanischer Filterwirksamkeit (ausreichendes Bodenrückhaltevermögen) und hydraulischer Filterwirksamkeit (möglichst druckverlustarme Wasserabführung) bezeichnet. Die hydraulische Filterwirksamkeit und die mechanische Filterwirksamkeit sind immer in Kombination zu betrachten, eine Dimensionierung auf der sicheren Seite kann es daher nicht geben. So können beispielsweise die Poren eines Filters nicht so offen gestaltet werden, daß in jedem Fall das Wasser abgeführt wird, da in diesem Fall dann die mechanische Filterwirksamkeit nicht mehr gewährleistet wäre, da als Folge ein umfangreicher Bodendurchgang auftreten würde. Die Lösung ist nur durch einen Optimierungsprozeß unter Berücksichtigung dieser beiden grundsätzlichen Anforderungen herbeizuführen.

Seit ca. 40 Jahren werden diese Filter, früher vorwiegend bestehend aus mineralischen Körnungen, zunehmend aus Geokunststoffe aufgebaut. Die Vorteile in der Anwendung von geotextilen Filtern liegen in wirtschaftlichen und baupraktischen Aspekten. Aufgrund der relativ geringen Dicke und der einfachen flächenhaften Einbaumöglichkeit der Geotextilien auf der Baustelle können Baukosten gespart werden. Vor diesem Hintergrund untersucht dieses FE-Vorhaben die Filterwirksamkeit von Geotextilien im Anwendungsfall Deponiebau, wobei auch hier noch weitere Differenzierungen bezüglich der äußeren Randbedingungen und der hydraulischen Belastungen zu betrachten sind. So ist die Filterschicht zwischen dem Rekultivierungsboden und der Sickerschicht in einem Oberflächenabdichtungssystem grundlegend anderen Beanspruchungen ausgesetzt als die Filterschicht zwischen Deponiematerial und Sickerschicht in einem Basisabdichtungssystem einer Deponie. In der Regel wird im Oberflächenabdichtungssystem das relativ unbelastete Niederschlagswasser abgefiltert, wohingegen beim Sickerwasser aus dem Deponat komplexe chemische Zusammenhänge vorliegen, die beim Abfiltern dieses Sickerwassers berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens wird vornehmlich die Filterwirksamkeit von Geotextilien zwischen Rekultivierungsschicht und Sickerschicht in einem Oberflächenabdichtungssystem betrachtet.

Der Nachweis der beiden Anforderungen an die hydraulische und an die mechanische Filterwirksamkeit wird derzeit in Deutschland nach einem aus dem Wasserbau kommenden Filterkriterium (DVWK, "Merkblatt zur Anwendung von Geotextilien im Wasserbau", 1992) geführt. Untersuchungen an filtertechnisch schwierigen Böden, wie beispielsweise gering kohäsiven Schluffen haben gezeigt, daß dieses Kriterium im Anwendungsfall Deponiebau zu einer zu strengen Dimensionierung des Filtervlieses führen kann, da hier andere hydraulische Randbedingungen als im Wasserbau vorliegen. Es werden damit möglicherweise Produkte ausgeschlossen, obgleich sie für die Anwendung im Deponiebau geeignet und gegebenenfalls kostengünstiger wären. Im Wasserbau sind in der Regel weitaus höhere hydraulische Gradienten vorhanden als in einem Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie. Daraus ergeben sich unterschiedliche Strömungsbedingungen, so z. B. Strömungen in gesättigten Böden (Wasserbau) bzw. in teilgesättigten Böden (Deponiebau), und damit prinzipiell unterschiedliche hydraulische Bedingungen.

Neben den unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen besteht auch im Vergleich zum Dammbau des Wasserbaus ein wesentlicher Unterschied in den abzufilternden Bodenarten. Im Wasserbau, von je her ein klassisches Einsatzgebiet von mineralischen und geotextilen Filtern, ist zumeist mit besonderer Sorgfalt in der Erkundung der abzufilternden Bodenarten vorgegangen worden. Beim Vorliegen filtertechnisch problematischer Böden werden diese ausgetauscht oder die Filter sind ohnehin für künstlich eingebrachte Bodenschichten zu dimensionieren. Dabei können die Körnungen derart ausgewählt werden, daß in filtertechnischer Hinsicht definierte Bedingungen vorliegen.

Bei der Entwicklung von Anforderungen an die einzelnen Schichten der Abdichtungssysteme einer Deponie wurde zunächst das Hauptaugenmerk auf die dichtenden Schichten gerichtet. Anforderungen an die Rekultivierungsschichten der Oberflächenabdichtungssysteme bezüglich des Materials oder des Einbaus existieren nicht, ebensowenig wie mögliche Vorgaben an die Bestimmung bodenphysikalischer Kennwerte dieser Schicht. In der Praxis zeigt sich, daß als Rekultivierungsschicht aus Kostengründen das am Deponiestandort gerade vorhandene Bodenmaterial oder sonstige erdbautechnisch weniger geeignete Bodenmaterialien verwendet werden, ohne daß bodenphysikalische Kennwerte bestimmt werden, die aber für die Bemessung der geotextilen Filter nach DVWK erforderlich wären.

Aufgrund der mangelnden Vorgaben an das Rekultivierungsmaterial war es im Rahmen dieses FE-Vorhabens erforderlich, im besonderen das Filterverhalten von Geotextilien bei filtertechnisch schwierigen Böden, die somit als Rekultivierungsmaterial auch in Frage kommen, zu betrachten. In diesem Zusammenhang ist das im Deponiebau vorkommende System mit den dort vorhandenen hydraulischen Randbedingungen labormaßstäblich zu simulieren. Dafür war es notwendig, dieses System zu idealisieren und labortechnische Versuchseinrichtungen zu entwickeln und zu erproben. Am Ende der Untersuchungen sollten im Idealfall modifizierte Filterkriterien zur Bemessung von geotextilen Filtern für die Anwendung im Deponiebau abgeleitet werden. Sofern dies nicht möglich oder sinnvoll sein würde, wäre ein Standardversuch zur Prüfung der Filterwirksamkeit geotextiler Filter im Deponiebau vorzuschlagen.

### 2. Stand der Technik

#### 2.1 Allgemeines

Als Einstieg in die Problemstellung wird zunächst in diesem Kapitel ein kurzer Abriß über die bereits zum Thema Filtern in der Geotechnik vorhandenen Erkenntnisse gegeben. Ein ausführliches Studium der Literatur über das Filterverhalten von herkömmlichen Komfiltern und geotextilen Filtern in verschiedenen Anwendungsfällen zeigt, daß grundsätzlich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Untersuchung des Filterverhaltens existieren. In einem Fall werden speziell die Eigenschaften des Filters oder des abzufilternden Bodens (Basiserdstoff) untersucht. Beispiele hierfür sind Untersuchungen über die Veränderung der geotextilen Kennwerte durch statische Auflasten oder die Suffosionsanfälligkeit mineralischer Erdstoffe. Im anderen Fall untersuchten eine Vielzahl von Autoren wie beispielsweise Teindl (1980) und Kossendey et al. (1996) das Filterverhalten kombinierter Systeme aus Basiserdstoff und Filter. Je nach Autor sind für die eine oder andere Vorgehensweise theoretische oder versuchstechnische Ansätze vorhanden. Aufgrund der Vielzahl der vorhandenen Versuchsergebnisse, die oft einen unterschiedlichen Anwendungsfall simulieren sollten und aufgrund der meist unterschiedlichen Randbedingungen ist ein Vergleich der bereits vorhandenen Ergebnisse oft schwierig. Dies gilt insbesondere für internationale Veröffentlichungen über geotextile Filter. Schon die Bestimmung der physikalischen Kennwerte der Geotextilien erfolgt in den verschiedenen Ländern mit Hilfe unterschiedlicher Standardversuche. Das Bestreben nach einer Vereinheitlichung der Prüfverfahren europaweit stellt sich als äußerst schwierig heraus, so daß eine Einigung auf einheitliche Prüfverfahren alsbald nicht zu erwarten ist. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang die labortechnische Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite eines Geotextils genannt werden. Die Versuchsdurchführung bei dem das Geotextil die Funktion eines Siebes übernimmt und der Versuchsaufbau ist in den einzelnen Ländern durch unterschiedliche normative Festlegungen definiert. In Deutschland, Frankreich und Italien erfolgt die Bestimmung der wirksamen Öffnungsweite durch Naßsiebung eines definierten Prüfbodens. In Großbritanien dagegen wird die wirksame Öffnungsweite durch Trockensiebung eines Prüfbodens bestimmt, wohingegen in den Vereinigten Staaten die Trockensiebung von Glaskugeln zugrunde gelegt wird.

Vielen Untersuchungen liegen rein geometrische oder rein hydraulische Betrachtungen zugrunde. Dabei wird z. B. untersucht, ob es bestimmten Kornfraktionen aus dem abzufilternden Boden (Basiserdstoff) geometrisch überhaupt möglich ist, den Filter zu passieren und ob aufgrund der Form der Poren und der Dicke des Filters eine Einlagerung verschiedener Kornfraktionen im Filter oder über dem Filter an der Grenzschicht Boden/Filter erfolgen kann. In diesem Zusammenhang können grundsätzlich wiederum zwei unterschiedliche Filtrationsmodelle unterschieden werden.

Beim Modell der Tiefenfiltration wird eine Einlagerung von Feinmaterial in den Filter für eine dauerhafte Funktionsfähigkeit vorausgesetzt. Man geht dabei davon aus, daß sich zunächst feineres Bodenmaterial, das am leichtesten bei einer hydraulischen Belastung mobilisiert werden kann, in die Poren des Filters einlagert und rückschreitend dadurch die nachwandernden gröberen Kornfraktionen stabilisiert werden. Entsprechend der Geometrie der Poren lagern sich im Filter in einem zeitabhängigen Prozeß bestimmte Kornfraktion ab, wodurch die Durchlässigkeit des Filters aber nicht wesentlich zurückgeht. Es entsteht eine stabile Filterschicht mit einem für eine Durchströmung des Wassers ausreichendem Porenvolumen. Dies setzt eine bestimmte Filtrationslänge voraus. Das Prinzip der Tiefenfiltration ist bei der Bemessung und Anwendung von Kornfiltern berücksichtigt.

Das Modell des Oberflächenfilters basiert auf dem Prinzip, daß aufgrund der Geometrie der Poren ein Einwandern von Feinmaterial nicht möglich ist und somit eine Filtrationslänge nicht erforderlich ist. Man geht davon aus, daß sich das Feinmaterial an der Oberfläche des Filters ansammelt und dort eine stabile Kornstruktur im Sinne eines Filters aufbaut. Eine fortschreitende Ansammlung von Feinmaterial kann aber zu einer Bildung einer undurchlässigeren Schicht (Filterkuchen) führen, da dadurch im Gegensatz zum Tiefenfilter mit einer vorhandenen Filtrationslänge kein ausreichendes Porenvolumen für die Durchströmung des Wassers zur Verfügung steht. Auf geotextile Filter bezogen ist der wesentliche Unterschied somit, daß beim Tiefenfilter ein Filter im Geotextil entsteht, wohingegen beim Oberflächenfilter der eigentliche Filter im Boden selbst entsteht, initiiert durch eine siebartige Struktur des Goetextils, die keine Filtrationslänge benötigt. In Abbildung 1 sind die beiden Filtrationsmodelle schematisch dargestellt. Die Bezeichnungen  $t_{F1}$  bzw.  $t_{F2}$  beziehen sich jeweils auf die Filterdicken. Die wirksame Filtrationslänge entspricht aber bei beiden Filtrationsmodellen der Strecke  $t_{F1}$ , da auch beim Oberflächenfilter die Ansammlung an Feinmaterial als Filter wirken kann.



Tiefenfilter

Oberflächenfilter

Abbildung 1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Fitrationsmodelle

## 2.2 Stand der Technik in der Kornfilterbemessung

Die Porengrößenverteilung des Kornfilters wird durch die Parameter

- Korndurchmesser
- Ungleichförmigkeit der Kornverteilung
- Form der Körner
- Lagerungsdichte

beschrieben.

Vor diesem Hintergrund existiert der bekannteste Ansatz zur Kornfilterdimensionierung von Terzaghi (1948):

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \le 4 \qquad \text{und} \qquad \frac{D_{15}}{d_{15}} \ge 4 \tag{1}$$

mit D<sub>15</sub>: Korndurchmesser des Filtermaterials bei 15 % Siebdurchgang d<sub>15 bzw. 85</sub>: Korndurchmesser des abzufilternden Bodens bei 15 bzw. 85 % Siebdurchgang Die beiden Formeln beinhalten die Anforderungen an die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit. Der Anwendungsbereich dieser Formeln ist begrenzt auf nichtbindige und sehr gleichförmige Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl von U < 2.

Ein umfassenderer Ansatz zur Kornfilterbemessung stammt von Ziems (1968). Basierend auf zahlreichen Filterversuchen im Labor ist bei diesem Ansatz eine Dimensionierung eines Kornfilters auch für größere Ungleichförmigkeitszahlen des Bodens und des Filters möglich (bis  $U_{I \text{ bzw. II}} = 20$ ). Aus dem Diagramm 1 können zulässige Abstandsverhältnisse  $A_{50,zul.}$  der Korndurchmesser bei 50 % Massenanteil zwischen dem abzufilternden Boden (Basiserdstoff) und dem Filter entnommen werden.



Diagramm 1: Kornfilterbemessung nach Ziems. Zum Vergleich sind die Filterregeln nach Terzaghi im Diagramm enthalten.

Für die Anwenbarkeit dieses Diagramms sind noch zusätzliche Randbedingungen zu erfüllen. Die Durchströmungsrichtung erfolgt in Richtung der Schwerkraft vom feineren (Basiserdstoff) zum gröberem Material (Filter). Das maximale hydraulische Gefälle i beträgt  $i \le 9$ . Die Korndurchmesser d<sub>I</sub> des Basiserdstoffes liegen im Bereich  $0, 1 \le d_I \le 30$  mm und der Filter d<sub>II</sub> im Korngrößenbereich  $4 \le d_{II} \le 100$  mm. Darüber hinaus müssen die Erdstoffe suffosionssicher sein. Zusätzlich ist im zulässigen Abstandsverhältnis A<sub>50,zul</sub> für kugelähnliche gerundete Kornformen ein Sicherheitsfaktor von  $\eta = 1,5$  eingearbeitet.

Wittmann (1980) schließt mit seinen Untersuchungen an Ziems an und führt zusätzlich den Begriff der Filtrationslänge ein und weist die Notwendigkeit dieser Filtrationslänge nach. Auf der Grundlage des Bemessungsdiagramms von Ziems ist die Dimensionierung eines funktionsfähigen Filters nur mit einer Mindestanforderung an die Filterdicke möglich:

$$t_{\rm F} \ge 25^* d_{\rm 500}$$
 oder  $t_{\rm F} \ge 100^* d_{\rm 100}$  (2)

mit t<sub>F</sub>: Filtrationslänge

d<sub>501</sub>: Korngröße des Filtermaterials bei 50 % Siebdurchgang

d<sub>10||</sub>: Korngröße des Filtermaterials bei 10 % Siebdurchgang

Da in der Praxis im Erdbau ohnehin nur Kornfilterdicken  $\geq 20$  cm einbaubar sind, ist die Filtrationslänge bei Kornfilteranwendungen nicht kritisch.

# 2.3 Stand der Technik in der Bemessung geotextiler Filter und Zuordnung zum Anwendungsfall Deponiebau

In diesem Kapitel werden zunächst die bekannten Formen der Wechselwirkungen zwischen Boden und Geotextilien, die bei einer Durchströmung immer auftreten, aufgeführt und erläutert. Es handelt sich hierbei nicht um eine Aufzählung einzelner möglicher Versagensursachen von geotextilen Filtern, sondern um Beschreibungen von Grenzflächenphänomenen zwischen Boden und Geotextil. Die einzelnen Phänomene lassen sich nicht immer deutlich voneinander abgrenzen und können maßgebend für die Leistungsfähigkeit des Boden/Filtersystems sein. Folgend werden die Bemessungskriterien nach DVWK (1992), die maßgeblich für die Dimensionierung eines geotextilen Filters im Oberflächenabdichtungsystem einer Deponie sind, erläutert. Im Anschluß wird ein Überblick über die bereits vorhandenen Versuchstechniken und deren Ergebnisse dargestellt.

#### 2.3.1 Wechselwirkungen zwischen Boden und Filter

Das Ziel einer Filterbemessung ist die optimale Abstimmung zwischen mechanischer und hydraulischer Filterwirksamkeit. Die Grenzfläche zwischen Boden und Geotextil hat darauf einen entscheidenden Einfluß. Hier bilden sich in Abhängigkeit von der Art des Geotextils, den Eigenschaften des Bodens und den hydraulischen Randbedingungen Phänomene aus, die nachfolgend beschrieben werden. Bis auf das Phänomen Blocking könnten diese auch dem Kapitel 2.2 der Kornfilter zugeordnet werden. Sie sollen aber hier vor dem Hintergrund der geotextilen Filterbemessung erläutert werden.

#### Piping

Der Begriff Piping ist nicht eindeutig definiert. Allgemein wird der Pipingeffekt als das Passieren der Bodenpartikel durch die Poren des Geotextils definiert (eingeschränkte mechanische Filterwirksamkeit). Andererseits gibt es aber auch die Definition der Röhrenbildung im Boden aufgrund des Verlusts von Kornfraktionen, was dem Phänomen der Kontakterosion entsprechen würde und daher nicht die hier betrachtete Themenstellung beträfe. Für weitere Ausführungen wird im Rahmen dieser Arbeit die erste weiter verbreitete Sichtweise übernommen.

#### <u>Clogging</u>

Auch hier stimmen die Definitionen nicht überein. Der Begriff Clogging ist in manchen Veröffentlichungen ein Überbegriff für sämtliche Arten der Durchlässigkeitsverringerung durch Umlagerungen von Bodenpartikeln (z.B. von Christopher et al. 1993).

Üblicherweise ist Clogging jedoch nur die Ein- und Anlagerung von Bodenpartikel in das Porensystem des Filters. Mitunter wird zwar erst bei Filterversagen aufgrund dieser Einlagerungen von Clogging gesprochen, in letzter Zeit gilt es aber immer mehr als unvermeidbarer, handhabbarer und in gewissen Grenzen bezüglich der Tiefenfiltration sogar wünschenswerter Vorgang an der Grenzfläche zwischen Boden und Geotextil. Der Cloggingeffekt kann als Aufbau eines Filtersystems verstanden werden, bei dem aufgrund einer Feinteilcheneinlagerung eine aus Geotextil und Boden kombinierte Schicht (Tiefenfilter) entsteht. Theoretisch kann sich dabei ein funktionsfähiges Gleichgewicht einstellen. Zum jetzigen Stand des Wissens ist allerdings noch nicht klar, unter welchen Randbedingungen dieses Gleichgewicht erreicht werden kann. Quereshi (1990) hat in seinen Untersuchungen zum Clogging bei dicken Geotextilien einen geringeren Durchlässigkeitsrückgang als bei dünneren beschrieben und dies mit dem größeren freien Porenvolumen dicker Geotextilien begründet. Dies entspricht der Betrachtungsweise, daß bei längeren Fließstrecken die Einlagerungen in einen Filter infolge einer Reduzierung der Fließgeschwindigkeit begünstigt wird. In diesem Zusammenhang empfiehlt das Merkblatt DVWK (1992) zur Vermeidung von Clogging, im Sinne eines Filterversagens, eine offene und dicke Struktur des Geotextils.

Der Rückgang der Durchlässigkeit infolge Clogging erfolgt allmählich und führt nicht zur völligen Abdichtung des Filters. Dies haben Siva et al. (1993) vor allem bei vernadelten Vliesen beobachtet. Der Rückgang der Durchlässigkeit ist laut Siva und Bhatia geringer, wenn der Korndurchmesser der Partikel annähernd dem Porendurchmesser des Geotextils entspricht und wenn wie bei Suspensionen die Partikel frei beweglich sind.

Clogging ist auch infolge chemischer und biologischer Vorgänge möglich, die aber im Rahmen dieses FE-Vorhabens nicht behandelt werden. Daß diese Komponenten aber eine Rolle spielen zeigen unter anderem die Untersuchungen von Faure et al. (1993), Kossendey et al. (1996 a) und Rollin (1996).

#### Blocking

Blocking ist das Blockieren der Eintrittsöffnungen eines Geotextils. Es tritt vorrangig bei ebener Filterstruktur auf und ist bei voluminösen Geotextilien nicht zu erwarten. Das Blokkieren des Filters erfolgt bei entsprechenden geometrischen Voraussetzungen sofort und bewirkt eine Verringerung der Durchlässigkeit um mehrere Zehnerpotenzen. Eine völlige Undurchlässigkeit des Filters wird auch hier nicht auftreten. Batereau (1993) führt in diesem Zusammenhang einen sogenannten Infiltrationswiderstand eines Geotextils ein, der einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert entspricht. Dieser Infiltrationswiderstand kann aufgrund von Blocking so groß werden, daß er betragsmäßig dem Strömungswiderstand einer 10 cm mächtigen Schicht dieses Bodenmaterials entspricht.

#### Arching oder Bridging

Beide Bezeichnungen sind für eine Beschreibung des Phänomens, der Bildung einer gewölbeähnlichen Struktur über den Poren des eigentlichen Filterelements, möglich (vgl. Abb. 2) In neuen Ansätzen wird diese Brückenstruktur als erwünschte Erscheinung in die Bemessung einbezogen (Lafleur et al. (1993)). Arching oder Bridging dient je nach Kornaufbau des Bodens als Auslöser und Stützstruktur für einen Sekundärfilter bzw. für einen Filterkuchen (siehe auch nächster Abschnitt "Blinding"). Der Aufbau eines Sekundärfilters ist möglich, wenn der Boden die Fähigkeit zur Selbstfiltration besitzt und suffosionssicher ist. Diese Sekundär- oder Bodenfilterzone wird von Lafleur et al. als fortgesetzte Brückenbildung von (mit wachsendem Abstand vom eigentlichen Filter) immer feineren Bodenpartikeln definiert. In einem bestimmten Abstand von der Filterebene liegt wieder die unveränderte Bodenstruktur vor. Jenseits dieser Schicht erfolgt kein Feinteilverlust mehr. Im Idealfall ist die Durchlässigkeit eines solchen Sekundärfilters nicht kleiner als die des Bodens.

Bei einer Bodenstruktur mit hoher Einzelkornmobilität entsteht auf der Basis des Bridgings jedoch ein schwach durchlässiger Filterkuchen.



Abbildung 2: Darstellung des Phänomens Bridging. Über den Poren des Filters bilden sich "Kornbrücken" aus.

Bridging entsteht nur bei guter Abstimmung des Geotextils auf den Boden und ist nur unter statischer, richtungstreuer hydraulischer Belastung stabil. Bis zur Ausbildung dieser Stützstruktur entstehen geringe Bodenverluste.

#### Filterkuchenbildung bzw. Blinding

Als Filterkuchenbildung wird das Phänomen bezeichnet, daß der Durchlässigkeitsrückgang eines Filtersystems aufgrund einer Schicht stattfindet, die oberstrom der eigentlichen Filterebene liegt. Der Grad der Ausprägung variiert. Einerseits besteht die Gefahr des Blindings, d.h. des Abdichtens des Filters. Der Filterkuchen besteht dann aus einer Ansammlung vorwiegend feiner Bodenteilchen. Voraussetzung hierfür ist anhaltender Antransport feiner Partikel, d.h. es müssen ein suffosionsempfindlicher Boden oder erosionsfördernde Einbaubedingungen wie z.B. ein niedriger Wassergehalt und eine geringe Trockendichte gegeben sein. Andererseits ist mit "Filterkuchen" oft auch der im vorigen Kapitel beschriebene Sekundärfilter gut abgestufter Böden (vgl. Abb. 2) gemeint. Die allgemeine Verwendung des gleichen Begriffs für beide Ausprägungen zeigt von neuem die schlechte Abstimmung der Definitionen in diesem Bereich der Geohydraulik.

Dementsprechend widersprüchlich sind auch die Meinungen über das Zustandekommen eines Filterkuchens. Nach allgemeiner Ansicht entsteht Blinding nur bei Oberflächenfiltration und zu klein gewählter wirksamer Öffnungsweite, was durch die Auswahl von Geotextilien mit dicker und offener Struktur vermeidbar wäre. Es gibt aber auch die Ansicht, daß Blinding bei ungünstigen Bodenverhältnissen durch dicke und offene Vliese nur zeitlich verzögert wird. Das ist insofern plausibel, als ein Tiefenfilter mit vielen Einlagerungen bei einem Boden mit hoher Feinteilmobilität diese dann an der Grenzschicht Boden/Geotextil vergleichsweise wie ein Oberflächenfilter ablagert. Die oben vorausgesetzte flächige Basis für den Filterkuchen würde dann von Bridging-Strukturen erzeugt.

Es ist nachgewiesen, daß die Gefahr des Blindings besonders groß ist, wenn Geotextilien mit Suspensionen beaufschlagt werden. Diese Situation entsteht bei Einbaufehlern, aber auch bei suffosionsempfindlichen Böden oder innerer Erosion. Faure et al. (1993) haben Versuche zum Filterverhalten bei Suspensionsbildung durchgeführt und empfehlen zwar die Verwendung vernadelter Vliese, aber in allererster Linie die bautechnische Vermeidung der Situation, daß eine Suspension entsteht. Typisch für das Filterverhalten ist der teilweise Bodendurchgang, bis der Filterkuchen aufgebaut ist. Die wirksame Öffnungsweite des gewählten Vlieses hat dabei kaum Einfluß auf die hydraulische Filterwirksamkeit. Das Geotextil entscheidet nur über die Dauer der Filterkuchenbildung, die zudem nur von der Konzentration der Suspension und dem aufgebrachten Wasserdruck abhängt. Dann erfolgt grundsätzlich ein starker Rückgang der Durchlässigkeit und unter Umständen ein erheblicher Aufbau eines Wasserdrucks über dem Geotextil.

#### Die Wechselwirkungen im Hinblick auf den Filtermechanismus

Es zeigt sich, daß die oben beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Boden und Geotextil nicht immer im Sinne von Filterversagen zu sehen sind. Eine gewisse Abnahme der Anfangsdurchlässigkeit oder ein anfänglicher Durchtritt von Bodenteilchen ist immer zu erwarten. Entscheidend ist die Erreichung und Aufrechterhaltung eines Gleichgewichtszustandes nach einer Einlaufphase. Arching ist ein gewünschtes Phänomen an der Grenzschicht Boden/Geotextil. Die Begrenzung von Piping ist dem Ziel der mechanischen Filterwirksamkeit zuzuordnen, die Begrenzung von Clogging, Blocking und Blinding dem der hydraulischen Filterwirksamkeit. Partielles Clogging ist nicht vermeidbar, aber auch nicht problematisch. Bhatia et al. (1991) haben nachgewiesen, daß bei Besetzung von bis zu 80% des Porenraumes eines Geotextils durch Bodenpartikel die Systemdurchlässigkeit noch unbeeinträchtigt sein kann. Blocking, Arching und partielles Clogging können allein durch Bodenpartikel aus der Übergangszone Boden/Geotextil hervorgerufen werden. Diese Wechselwirkungen sind nicht nur bei speziellen Böden mit hoher Feinteilmobilität vorhanden, sondern treten stets bei hydraulischer Belastung auf.

Blinding und ausgeprägtes Clogging erfordern länger andauernden Antransport von Feinpartikeln. Deshalb spielen hier verstärkt Körnungsverlauf und Einbauzustand des Bodens eine Rolle. Bei der Beobachtung der Systemdurchlässigkeit ist Blocking daran zu erkennen, daß es plötzlich auftritt. Clogging und Blinding sind eventuell schlecht auseinanderzuhalten, da beide eine langsame Durchlässigkeitsabnahme bewirken. Im Experiment läßt sich aber durch den Ausbau der Probe Klarheit schaffen. Zudem ist Clogging daran zu erkennen, daß das Filtersystem auf eine plötzliche Erhöhung der hydraulischen Belastung mit einer Zunahme der Durchlässigkeit reagiert, da dabei durch einen Spülstoß eingelagerte Bodenpartikel ausgespült werden.

### 2.3.2 Bemessung nach DVWK

Je nach Anwendungsfall gibt es derzeit unterschiedliche Merkblätter für die Bemessung geotextiler Filter. Im wesentlichen sind dies das Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus (FGSV, 1994) und das Merkblatt zur Anwendung von Geotextilien im Wasserbau (DVWK, 1992). Beide Merkblätter beinhalten den Nachweis für die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit. Die Filterregeln beruhen im wesentlichen auf der Auswertung von ausgegrabenen langjährig eingebauten Geotextilien vornehmlich aus dem Anwendungsfall Wasserbau.

Nach Auffassung von Heerten (1993) sollte eine Dimensionierung eines geotextilen Filters aber nicht vom Fachgebiet (Wasserbau oder Straßenbau) abhängen, sondern in erster Linie von anwendungsspezifischen Randbedingungen. So sind die Randbedingungen bei der Dimensionierung eines geotextilen Filters für einen luftseitigen Dammfuß eines Hochwasserdeiches von denen einer Straßenlängsentwässerung nicht grundsätzlich unterschiedlich, weil sie einem anderen Spezialgebiet zuzuordnen sind. Die Bauaufgabe und der Sicherheitsanspruch bestimmen die Anforderungen, die dadurch sehr unterschiedlich sein können. Der Sicherheitsanspruch ist abhängig vom Gefährdungspotential, d.h. der Gefährdung von Menschenleben, hoher oder geringer materieller Schaden, zu definieren. Die in den Merkblättern enthaltenen Filterregeln berücksichtigen dies. Im Anwendungsfall Deponiebau liegen keine fachspezifischen Filterregeln vor. Eine Übertragung von Filterregeln aus anderen Fachgebieten auf ein Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie wurde bisher nicht eingehend überprüft. Den Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" -GDA zu Folge ist für die Dimensionierung der Filterschichten von geotextilen Entwässerungsschichten in Hinblick auf die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit das DVWK- Merkblatt maßgebend.

In diesem Merkblatt werden Bemessungshinweise gegeben, die Analogien zur Wirksamkeit von mineralischen Filtern und deren Bemessung berücksichtigen. Dies betrifft insbesondere die Wirkungsweise mineralischer Filter im Sinne einer Tiefenfiltration, die dem Merkblatt zufolge nur bei mechanisch verfestigten Geotextilien möglich ist. Gewebe und thermisch verfestigte Geotextilien werden aufgrund der fehlenden Filtrationslänge als Siebe mit regelmäßigen oder unregelmäßigen Öffnungen angesehen.

Die Dimensionierung gliedert sich in einen hydraulischen und mechanischen Nachweis der Filterwirksamkeit auf. Für die Dimensionierung der mechanischen Filterwirksamkeit ist die wirksame Öffnungsweite  $O_{90,w}$  des Geotextils der maßgebende Parameter. Das Merkblatt empfiehlt eine strengere Dimensionierung der mechanischen Filterwirksamkeit, wenn keine hinreichend genaue Abschätzung der einwirkenden hydraulischen Kräfte möglich ist. Als Lösung werden die Verwendung der Filterregeln für hydrodynamische Belastungen oder anwendungsorientierte Versuche vorgeschlagen.

Im einzelnen sind Nachweise für die mechanische und die hydraulische Filterwirksamkeit zu führen. Das Merkblatt unterscheidet beim Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit auf der Grundlage der im Erd- und Grundbau gebräuchlichen Normen zur Klassifizierung und Benennung von Böden (DIN 18196; DIN 4022) zwischen drei Körnungsbereichen, für die

eine erforderliche wirksame Öffnungsweite der Geotextilien zu ermitteln ist. Darüber hinaus sind bei der Bemessung und bei der Auswahl eines Geotextils folgende Punkte zu beachten:

- Kornverteilung/Körnungsband des abzufilternden Bodens,
- bei bindigen Böden die Plastizitätszahl und das Ton-/Schluffverhältnis,
- die einwirkenden hydraulischen Belastungen (hydrostatisch/hydrodynamisch, Größe des hydraulischen Gefälles),
- der Lastfall (Lage der Kontaktflächen/Strömungsrichtungen),
- die Art und Konstruktion des Bauwerks, d. h. die dem Geotextil zugewiesene Funktion,
- die sich aus dem Bauwerk ergebende Sicherheitsanforderungen an den Filter,
- die Einbaubeanspruchungen

Der hydrostatische Lastfall zeichnet sich laut Merkblatt durch langsam schwankende Druckgefälle aus, wobei eine Umkehrung der Strömungsrichtung bei diesem Lastfall mit eingeschlossen wird. Dagegen handelt es sich bei hydrodynamischen Filterbelastungen um turbulente Strömungsbedingungen, die durch schnell veränderliche Druckhöhen und Fließrichtungen gekennzeichnet sind.

Liegt ein Körnungsband vor, ist die mechanische Filterwirksamkeit auf den "feinkörnigen Rand" des Körnungsbandes zu bemessen während bei der hydraulischen Filterwirksamkeit der "grobkörnige Rand" maßgebend ist. Unter Berücksichtigung der hydraulischen Filterwirksamkeit soll laut DVWK (1992) die gewählte wirksame Öffnungsweite möglichst der nach dem mechanischen Nachweis zulässigen wirksamen Öffnungsweite entsprechen und gibt als Größenbereich unter der Beachtung der Kolmationssicherheit

$$O_{90,w,geweihlt} = 0.8 \text{ bis } 1.0 * O_{90,w,zulässig}$$
 (3)

an.

Die im Merkblatt angegebenen Anhaltswerte (vgl. Tabelle 1) für die zulässigen hydraulischen Gefälle  $i_{zul}$  unterschiedlicher Bodenarten mit einer Ungleichförmigkeitszahl U > 8 beruhen auf umfangreiche Untersuchungen von Davidenkoff (1970) und stellen Grenzwerte dar, die bei Überschreitung Laboruntersuchungen bezüglich der Suffosionssicherheit zur Folge haben.

| Bodenart        | i zui |
|-----------------|-------|
| dichter Ton     | 0,4   |
| Grobsand, Kies  | 0,25  |
| schluffiger Ton | 0,2   |
| Mittelsand      | 0,15  |
| Feinsand        | 0,12  |

Tabelle 1:Werte des zulässigen hydraulische Gefälles i normal zur Kontaktfläche<br/>(Merkblatt DVWK (1992))

Diese extrem niedrigen Werte für  $i_{zul}$  und die geringen zulässigen Ungleichförmigkeiten der Böden werden praktisch bei jeder Deponiebaumaßnahme überschritten und hätten zahlreiche Laboruntersuchungen zur Folge.

Für den Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit ist die vertikale Durchlässigkeit  $k_v$ des fabrikneuen Geotextils bei einer Belastung von 2,0 kPa der maßgebende Parameter. Diese Geotextildurchlässigkeit  $k_v$  wird, multipliziert mit einem Abminderungsfaktor  $\eta < 1$ , der Bodendurchlässigkeit k unter der folgenden Bedingung gegenübergestellt:

 $\eta^* \mathbf{k}_{\mathbf{v}} \ge \mathbf{k} \tag{4}$ 

Der Abminderungsfaktor  $\eta$  kann in Abhängigkeit von der Dicke des Geotextils aus zwei Bestimmungsdiagrammen entnommen werden. Aus Diagramm 2 (rechts) können die Abminderungsfaktoren  $\eta_G$  für Gewebe und dünne Geotextilien (d < 2,0 mm) in Abhängigkeit des Korndurchmessers des abzufilternden Bodens bei 10 % Siebdurchgang abgelesen werden. Für stark schluffige Sande bis Sande kann zur genaueren Erfassung der hydraulischen Filterwirksamkeit von mechanisch verfestigten Geotextilien mit d  $\geq$  2 mm der Abminderungsfaktor  $\eta_v$  aus Diagramm 2 (links) ermittelt werden.



Diagramm 2: Diagramme zur Bestimmung der Abminderungsfaktoren der Durchlässigkeit von Geotextilien. Links für Vliesstoffe ( $\eta_v$ ) und rechts für Gewebe ( $\eta_G$ ). Entnommen aus DVWK (1992).

Die hydraulische Filterwirksamkeit ist für Sande und Schluffe als gewährleistet anzusehen, wenn die Durchlässigkeit des fabrikneuen Geotextils die Durchlässigkeit des Bodens mindestens 50fach übersteigt. Die Voraussetzung hierfür ist ein mechanisch verfestigter Vliesstoff mit einer Dicke von

$$30^* O_{90,w} \le d \le 50^* O_{90,w}$$
(5)

Eine Übersicht über die Filterregeln des Merkblattes ist in Anlage 1 Blatt 1 zusammenfassend dargestellt. Diese Filterregeln wurden zur Abschätzung der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit der Geotextilien in Kombination mit den Versuchsböden, die im Rahmen dieses FE-Vorhabens labortechnisch untersucht wurden, angewandt.

Einen entscheidenden Einfluß auf die Filterstabilität hat laut Merkblatt die Dicke des Geotextils. Dies wird stets mit Analogiebetrachtungen zu mineralischen Filtern begründet. Bei zunehmender Beanspruchung wird eine größere Gesamtschichtdicke erforderlich. Als Anhaltswert für die zu wählende Dicke d eines Geotextils wird folgende Formel angegeben:

17

Speziell bei hydrodynamischen Beanspruchungen haben sich geotextile Filter mit einer Dikke  $d \ge 6,0$  mm für den Körnungsbereich A und  $d \ge 4,5$  mm für den Körnungsbereich B und C bewährt.

### 2.3.3 Versuchstechniken und Versuchsergebnisse

Zahlreiche Faktoren, die nach Williams (1990) grob in drei Gruppen unterteilt werden können, beeinflussen die hydraulische und mechanische Wirksamkeit eines Filters:

- Bodeneigenschaften
- Geotextileigenschaften
- Strömungsmechanische Randbedingungen

Die Bodeneigenschaften werden bestimmt durch

- Bodenart
- Korngrößenverteilung
- Durchlässigkeit
- Bodenstruktur
- Porenanteil
- Plastizitätszahl
- Sättigungsgrad
- Einbaubedingte oder bodengeschichtlich bedingte Inhomogenitäten.

Bei den Geotextileigenschaften sind zu nennen:

- Verfestigungsart
- Dicke
- Flächenmasse
- Porosität
- Porengrößenverteilung
- Horizontale und vertikale Durchlässigkeit
- Produktionstechnisch bedingt verwendete Avivagen
- Faserrohstoff
- Faserdicke
- Faserart

Strömungsmechanische Randbedingungen sind:

- Hydraulischer Gradient
- Fließgeschwindigkeiten
- Durchflußrichtung
- Art der hydraulischen Belastung (schnell wechselnde Durchflußrichtungen und schnell veränderliche hydraulische Gradienten)
- Vorhandene hydraulische Bedingungen an der Ausströmseite des Filters (Ausströmen unter Atmosphären- oder Wasserdruck)

In zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsarbeiten wurde, seitdem die Vorteile der Verwendung von geotextilen Filtern erkannt worden sind, untersucht, wie und in welchem Maß die obengenannten Faktoren die Wirksamkeit beeinflussen. Das Ziel ist in der Regel, aufgrund von Untersuchungen Aussagen zu bekommen, wie im praktischen Anwendungsfall eine Dimensionierung von geotextilen Filtern im Hinblick auf die langfristige Leistungsfähigkeit zu erzielen ist. Die einzelnen Wege dieses Ziel zu erreichen, lassen sich grob in drei Gruppen aufteilen:

- Theoretische Betrachtungen
- Labortechnische Untersuchungen
- Entwicklung von Bemessungskriterien aufgrund der Auswertung praktischer Anwendungsfälle

Charakteristisch für theoretische Betrachtungsweisen ist oftmals die gezielte und konkrete Bearbeitung von Teilaspekten des Themengebietes Filtern, die gelegentlich zusätzlich durch spezielle Experimente im Labor ergänzt werden. In Vordergrund steht meist nicht das klassische Filtersystem, bei dem ein Boden bei vorgegebener Strömungsrichtung durch ein Geotextil abgefiltert wird, sondern vielmehr Themen wie beispielsweise die Bestimmung der Porengrößenverteilung von Geotextilien oder die computerunterstützte Beschreibung geotextiler Strukturen. Als Beispiele hierfür kann die Arbeit von Huang et al. (1994) genannt werden, in der mit Hilfe der Fraktal Geometrie, die es im Gegensatz zur Euclidischen Geometrie ermöglicht, unregelmäßige und zerstückelte Strukturen zu beschreiben, geotextile Faserstrukturen computerunterstützt modelliert werden. Ebenso erweitert die Veröffentlichung von Calonnier et al. (1990) mit Hilfe von Bildanalysen und Strukturerkennung das Wissen über Faserstrukturen. Im folgenden wird ein Überblick über labortechnische Untersuchungen und die dabei erzielten Ergebnisse gegeben:

Teindl (1980) hat aufgrund von Analogiebetrachtungen zur Kornfilterbemessung nach Cistin/Ziems gezielte Versuche zur Bestimmung des sogenannten Durchgangsfaktors F durchgeführt. Der Aufbau der Versuchstechnik ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.



Abbildung 3: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Durchgangsfaktors F nach Teindl (1980)

Das System aus eingespannten Geotextils und dem darüber locker gelagerten Versuchsboden ist bei einer Durchströmung bei i = 1 bis i = 10 filterstabil, wenn während der gesamten Versuchszeit kein Bodendurchgang vorhanden ist. Der Durchgangsfaktor F wird aus dem Quotienten der wirksamen Öffnungsweite und dem mittleren Korndurchmesser d<sub>50</sub> der kleinsten noch filterfesten Fraktion bestimmt. Der Reziprokwert dieses Durchgangsfaktors F, versehen mit einem Sicherheitsfaktor  $\eta = 1,5$  ergibt das zulässige Verhältnis B<sub>50,zul</sub>. In Abhängigkeit von der Dicke des Geotextils und der Ungleichförmigkeit U<sub>I</sub> des abzufilternden Bodens gibt Teindl die in Diagramm 3 dargestellten Regeln für die mechanische Filterwirksamkeit an. Vergleichsweise wie beim Bemessungsdiagramm nach Cistin/Ziems (vergl. hierzu Diagramm 1), kann auch bei diesem Verfahren ein zulässiges Abstandsverhältnis  $B_{50,zul}$  in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeit des abzufilternden Bodens bestimmt werden. Mit Hilfe dieses Abstandsverhältnisses, definiert als Quotient aus wirksamer Öffnungsweite  $O_{90}$  und  $d_{501}$  (Korndurchmesser bei 50 % Massenanteil des abzufilternden Bodens, kann die erforderliche wirksame Öffnungsweite errechnet werden.



Diagramm 3: Von Teindl (1980) aufgrund von Laboruntersuchungen erstelltes Bemessungsdiagramm geotextiler Filter. In Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit des abzufilternden Bodens U<sub>I</sub> kann ein zulässiges Abstandsverhältnis B<sub>50zul</sub> abgelesen werden. Teindl differenziert zwischen Gewebe und Vliesstoffe.

Für die Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit muß nach Teindl die Durchlässigkeit des Geotextils um mindestens eine Zehnerpotenz höher sein als die Durchlässigkeit des abzufilternden Bodens. Die Ergebnisse zeigen in Abhängigkeit von der Dicke und der Herstellungsart unterschiedliches Verhalten der Geotextilien. Mechanisch verfestigte Vliese weisen demnach die höchsten  $B_{50,zul}$ - Werte auf. Die Ergebnisse der von Teindl (1980) durchgeführten Langzeitversuche stimmen damit überein. Kennzeichnend für die Versuchsdurchführung ist die lockere Lagerung der untersuchten Versuchsböden und die Steigerung der hydraulischen Belastung, um eine Bewegung des Feinmaterials zu bewirken.

Koerner & Ko (1982) entwickelten den Long-Term Flow (Clogging) Test (LTF-Test). Das Ziel war, aufgrund von labortechnischen Untersuchungen das Langzeitverhalten von verschiedenen Boden/Geotextilsystemen beurteilen zu können. Zunächst standen die folgenden Fragen im Mittelpunkt:

- Nach welcher Versuchszeit stellt sich ein stabiles Gleichgewicht im Boden/Geotextilsystem ein?
- Falls ein Systemgleichgewicht für verschiedene Boden/Geotextilsystem existiert, kann dann ein Gleichgewicht für beliebige Kombinationen aus Boden und geotextiler Filter bestimmt werden?

Bei dem für diese Fragestellungen entwickelten Versuchsaufbau wird die Boden/Geotextilprobe bei konstanter hydraulischer Belastung in Richtung der Schwerkraft durchströmt. In einer Versuchsreihe wurden 4 verschiedene Bodenarten (Sand, Schluffe und schluffiger Ton) mit verschiedenen Geweben und Vliesstoffen kombiniert. Die Verläufe der Durchlässigkeiten zeigen deutlich einen bilinearen Verlauf. Zunächst geht die Durchlässigkeit nach Versuchsstart stark zurück (Anfangsphase) und nimmt dann einen konstanten Wert ein (Endphase). Koerner et al. stellten fest, daß das Verhalten in der Anfangsphase hauptsächlich von der Bodenart beeinflußt wird und die Endphase in erster Linie vom Boden/Geotextilsystem abhängig ist. Darüber hinaus zeigte sich eine von der Bodenart abhängige Dauer der Anfangsphase. Die festgestellten Anfangsphasen betragen bei Sanden mindestens 10 Stunden, bei Schluffen ca. 100 Stunden und bei schluffigen Tonen mindestens 200 Stunden. Der Nachteil dieser Versuchstechnik ist die lange Gesamtversuchszeit von 1000 Stunden, was für den kommerziellen Einsatz, wo Ergebnisse in kürzester Zeit vorliegen sollten, oftmals zu lang ist. Darüber hinaus besteht bei zu hohen Umgebungstemperaturen die Gefahr der Algenbildung, die die Versuchsergebnisse beeinträchtigen könnten. Außerdem ist nach Koerner (1990) noch nicht geklärt, unter welchen Randbedingungen der Versuch durchzuführen ist (beispielsweise ob die Verwendung von entionisiertem und/oder entlüfteten Wasser nötig ist). Koerner fügt hinzu, daß exakte Untersuchungen der Filtermechanismen mit diesem Versuchsaufbau nicht möglich sind, erst zusätzliche Versuchstechniken könnten darüber genauen Aufschluß geben. Insgesamt stuft Koerner den Boden als maßgebend für das Durchlässigkeitsverhalten ein. Unabhängig vom verwendeten Geotextil konnten hinsichtlich der hydraulischen Filterwirksamkeit ausreichend hohe Durchlässigkeitsbeiwerte gemessen werden.

Einen gegenüber Koerners Aufbau modifizierten Versuchsaufbau verwendet Qureshi (1990) bei Langzeitfilterversuchen. In einer Versuchsreihe variiert er 6 unterschiedliche mechanisch verfestigte Geotextilien mit unterschiedlichen Böden mit Ausfallkörnung. Die Geotextilien unterscheiden sich in erster Linie durch ihre Dicke und Flächenmasse. Bei drei der 6 Geotextilien erfolgte herstellungsbedingt eine Wärmebehandlung, wodurch diese eine glattere Oberfläche aufweisen. Der Versuch wird nach Erreichen eines konstanten Durchlässigkeitsbeiwertes des Gesamtsystems abgebrochen, das bei dieser Versuchsreihe nach ca. 150 Versuchsstunden gegeben ist. Als Ergebnis hält Quershi fest, daß sich bezüglich der verschiedenen Dicken und Flächenmassen der getesteten Geotextilien keine wesentlichen Unterschiede der Durchlässigkeiten der Gesamtsysteme ergeben.

Ein fast ähnliches Durchlässigkeitsverhalten konnte Kossendey (1996 b) aufgrund von Langzeitversuchen feststellen. In großen Versuchszellen wird das Boden/Geotextilsystem bei konstantem hydraulischen Gefälle durchströmt. Im Gegensatz zu Qureshi wird bei diesen Versuchsreihen kein entlüftetes Wasser verwendet. Die ausgewählten Versuchsböden sind nach den entsprechenden Kriterien des Merkblattes FGSV (1994) als filtertechnisch schwierig einzustufen. Es handelt sich hierbei um einen Schluff mit einer Ungleichförmigkeitszahl von U = 12,6 und zwei weitere Böden mit geringerer Ungleichförmigkeit (Boden A: Feinsand, stark schluffig mit U = 6,3 ; Boden B: Fein- und Mittelsand mit U = 3,3). Die untersuchten Geotextilien decken die für Filterzwecke üblicherweise eingesetzten Produkttypen ab. Die Versuchszeiten mit Boden A und B betragen mindestens 320 Tage, beim Schluff wurde die Versuchszeit auf 550 Tage erhöht. Die Versuchsergebnisse zeigen -unabhängig vom untersuchten Geotextil- mit zunehmender Versuchsdauer gleiches Durchlässigkeitsverhalten. Typisch für den Verlauf der Durchlässigkeiten des Gesamtsystems ist, daß diese zunächst ansteigt. Bei Böden A und B stellt sich bei Versuchsende eine höhere Durchlässigkeit als bei Versuchsstart ein, wohingegen beim Schluff eine Abnahme der Durchlässigkeit von einer Zehnerpotenz gemessen wurde.

Zusammenfassend kann zunächst aus den oben dargestellten Veröffentlichungen festgestellt werden, daß sich aufgrund der Untersuchungen der Boden/Geotextilsystem mit dem LTF -Test keine deutlichen Unterschiede im Filterverhalten der verschiedenen Geotextilien ergeben. Problematisch ist der Vergleich der Versuchsergebnisse der verschiedenen Autoren, da die Versuchsrandbedingungen die Ergebnisse zu beeinflussen. Unklar ist weiterhin der Einfluß des entlüftetem Wassers bei derartigen Versuchstechniken. Übereinstimmend mit der Aussage von Koerner zeigen diese Versuchsergebnisse jedoch, daß zur Untersuchung der genauen Filtermechanismen an der Grenzschicht Boden/Geotextil zusätzliche Versuchstechniken notwendig sind. Als Beispiel hierfür wird der Gradient Ratio Test (GR-Test) genannt, dessen Versuchstechnik und die damit bereits erzielten Ergebnisse im folgenden kurz zusammengefaßt werden.

Bei dem bereits in den USA nach ASTM D 5101-90 genormten und ursprünglich von Calhoun (1972) entwickelten GR-Test wird die Boden/Geotextilprobe bei konstanter hydraulischer Belastung in Richtung der Schwerkraft durchströmt. Ein wesentliches Merkmal dieser Versuchstechnik ist die Messung der Wasserdruckverteilung, die mit Hilfe von an der Zellenwand angebrachten Piezometern über die Höhe der Bodenprobe bei einer Durchströmung erfolgt. Aus den Wasserdruckmessungen können unter Berücksichtigung der entsprechenden Fließstrecken die hydraulische Gradienten in der Bodenprobe und im Geotextil berechnet werden. Der GR-Wert ist definiert als Quotient der hydraulischen Gradienten im Geotextil und im Boden:

$$GR = i_{Geotextil} / i_{Boden}$$
<sup>(7)</sup>

Ein wesentlicher Vorteil dieser Versuchstechnik ist, daß zusätzlich zu den üblichen Meßparametern wie der Bodendurchgang und die Wasserdurchflußmenge eine Messung des Wasserdruckes über dem Geotextil erfolgt und dadurch die Anforderung an die hydraulische Filterwirksamkeit, das Wasser möglichst ohne Druckaufbau abzuführen, meßtechnisch erfaßt wird. Um keine aufgrund der Komprimierbarkeit der Luft verfälschten Wasserdrücke zu messen, muß bei der Versuchsdurchführung der maximal mögliche Sättigungsgrad der Boden- und Geotextilprobe erreicht sein. Daher ist die Verwendung von entlüfteten Wasser unerläßlich, was auch in der genormten Versuchsdurchführung festgehalten ist. Nimmt der Wasserdruck über dem Geotextil zu, ist dies ein Zeichen der Abnahme der Durchlässigkeit des Geotextils und/oder der Grenzschicht zum Boden. Schon Teindl (1980) führte mit einem ähnlichen Versuchsaufbau GR-Langzeitversuche durch und definierte in diesem Zusammenhang ein Verstopfungsverhältnis (VV). Dabei wird im Gegensatz zum GR der Quotient aus dem Gradienten im Geotextil und dem Gradienten des gesamten Geotextil/Bodensystem gebildet. Bei Versuchen mit einem Geotextil in Kombination mit verschiedenen suffosionsgefährdeten Fraktionsgemischen konnte Teindl eine Zunahme des VV-Wertes auf 10 feststellen, wenn Feinteilfraktionen das Geotextil nicht passieren können und im entgegengesetzten Fall ein VV-Wert von ca. 0,1, wenn die Feinteile das Geotextil durchwandern können.

Von Haliburton (1982) wurden Reihenuntersuchungen mit dem GR-Test durchgeführt. Das Untersuchungsprogramm umfaßte die Kombination aus 2 Vliesstoffen und 4 Gewebe mit verschiedenen suffosionsgefährdeten Böden. Die Versuchsböden unterscheiden sich jeweils durch den Massenprozentanteil an Feinmaterial, wonach auch die Höhe des hydraulischen Gradienten festgelegt wurde. Um auch bei hohen Feinteilgehalten der Versuchsböden ausreichend hohe Fließgeschwindigkeiten für eine Mobilisierung der Feinteile zu erreichen, wurden hierbei entsprechend höhere Gradienten angelegt. Als Ergebnis konnte Haliburton eine vom Geotextil abhängige Zunahme der GR-Werte bei zunehmenden Feinteilgehalten der Versuchsböden feststellen. Monofilamentgewebe mit den größten Öffnungsweiten zeigten die geringsten GR-Werte, wohingegen das thermisch verfestigte Geotextil und ein Bändchengewebe schon bei sehr geringen Feinteilgehalten sehr hohe GR-Werte ereichten. Das mechanisch verfestigte Geotextil und ein Monofilamentgewebe weisen bis zu einem Feinteilgehalt von ca. 20 % GR-Werte unter drei auf, die dann aber bei zunehmenden Feinteilgehalt stark zunehmen. Aufgrund dieser Versuchsergebnisse wird das von U.S. Army Corps of engineers festgelegte Kriterium GR < 3 bestätigt, das bei der Dimensionierung eines Filters bei kritischen Anwendungsfällen eingehalten werden sollte. Vor dem Hintergrund, daß dieser zulässige Grenzwert aufgrund der Ergebnisse von nur wenigen Versuchen festgelegt wurde, weist Williams (1990) darauf, daß beim GR-Test nur Böden untersucht werden können, deren Durchlässigkeit größer als 1\*10<sup>-6</sup> m/s ist. Darüber hinaus besteht die Gefahr, daß aufgrund von Randumläufigkeiten die GR-Werte nicht immer reproduzierbar sind und möglicherweise zu hohe Durchlässigkeitsbeiwerte gemessen werden können.

Y. C. Shi et al. (1994) modifizierten den genormten Versuchsaufbau indem zusätzliche Piezometer installiert wurden. Um die Oberfläche der Bodenprobe vor Zerstörung durch das einströmende Wasser zu schützen wurde beim Einlauf eine wasserstrahlverteilende Düse angebracht. Als Ergebnis seiner Untersuchungen, bei dem hauptsächlich Sande als Versuchsböden verwendet wurden, gibt Shi drei mögliche Bereiche an in denen die in der Regel bilinearen Wasserdruckverteilungen liegen. Diese drei Bereiche sind in Abbildung 4 dargestellt und klassifizieren die Filterwirksamkeit des Systems. Shi führt einen modifizierten GR<sub>mod</sub>-Wert ein, der mit dem GR-Wert nach ASTM korreliert. Die Anforderungen nach Shi an ein filterstabiles System lauten GR<sub>mod</sub> < 7,4 im Gegensatz zu GR < 3 nach ASTM.



Abbildung 4: Darstellung dreier möglicher Bereiche in denen nach Shi (1994) die Wasserdruckverteilung über die Probenhöhe liegen kann. Darin enthalten ist der Zusammenhang der Werte zwischen GR<sub>med</sub> und GR<sub>ASTM</sub>.

Charakteristisch für die bisher vorgestellten Versuchstechniken ist, daß die Bodenprobe mit bestimmter Verdichtung in die Durchlässigkeitszelle eingebaut wird. Bei dem folgend beschriebenen Versuchstyp liegt bei der Bodenprobe kein Korn-zu-Korn-Kontakt vor. Die zu untersuchende Bodenprobe liegt in Form einer Suspension vor. Zur Untersuchung der Auswirkungen dieser Suspensionen auf das Filterverhalten ist unter anderem der Fine Fraction Filtration Test (F<sup>3</sup>-Test) von Sansone et al. (1992) entwickelt worden. Zunächst erkannte Hoover (1982), daß Suspensionsbeaufschlagungen auf Geotextilien maßgebende Lastfälle für die Filterwirksamkeit sein können und entwickelte hierzu einen Versuchsaufbau, bei dem das Geotextil vertikal positioniert durchströmt wird. Ebenfalls mit vertikal ausgerichteten Geotextilien baute Legge (1990) diese Versuchstechnik noch aus und führt einen "interface flow capacity"-Wert ein. Dieser Wert gibt an ob über dem Geotextil ein Gleichgewichtszustand erreicht ist oder ob ausgeprägtes "Clogging" vorliegt.

Sansone (1992) erkannte die Problematik, daß bei vertikal ausgerichteten Geotextilien keine gleichmäßige Beaufschlagung der Suspension erfolgt und dadurch im oberen Bereich der Geotextilprobe zu hohe Durchlässigkeiten vorliegen. Beim F<sup>3</sup>-Test (Fine Fraction Filtration Test) wird daher das Geotextil vertikal durchströmt und mehrmals bei einem konstanten hydraulischen Gefälle mit feinen Bodenfraktionen beaufschlagt. Der Zeitpunkt einer neuen Beaufschlagung richtet sich danach, ob sich bereits ein Gleichgewichtszustand nach der vorherigen Beaufschlagung eingestellt hat. Die Feinteilkonzentration der Suspension wird aufgrund von Vorversuchen gewählt. Die Auswertung erfolgt über die Ermittlung der Permittivität, da bei diesem Versuchsaufbau die strömungswirksame Fließstrecke des Systems nicht bekannt ist. Der Versuch wird abgebrochen, wenn eine weitere Suspensionszugabe keine Veränderung in der Permittivität bewirkt. In einem Versuchsprogramm untersuchte Sansone drei verschiedene Feinteilfraktionen und 5 verschiedene Geotextilien. Suspensionen deren Feinteile (Flugasche) kleiner sind als die Öffnungsweiten der untersuchten Geotextilien durchwandern dies. Der gegenteilige Effekt konnte bei Suspensionen beobachtet werden, deren Feinteildurchmesser (Mittelsand) größer sind als die wirksamen Öffnungsweiten. In diesem Fall baute sich ein filterstabile Schicht über dem Geotextil auf. Bei einer weiteren untersuchten Feinteilfraktion stellte er ausgeprägtes "Clogging" fest, das die Grenze der Meßgenauigkeit der Durchlässigkeitszellen überschritt. Zusammenfassend weist Sansone auf die Minderung der Leistungsfähigkeit der Filterwirksamkeit aufgrund von Suspensionen hin und schlägt in erster Linie vor, bei praktischen Anwendungen die Bildung von Suspensionen durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Das "Clogging" des Filters kann durch die Auswahl eines Filters deren Poren relativ groß sind, vermieden werden, was aber auf Kosten der mechanischen Filterwirksamkeit geht. Welche der beiden Anforderungen -hydraulisch oder mechanisch- für die langfristige Beständigkeit eines Bauwerks wichtiger sind, muß für den spezifischen Anwendungsfall entschieden werden.

Um ebenso die Auswirkungen von Suspensionsbeaufschlagungen zu untersuchen, führen Siva & Bhatia (1993) den sogenannten Rapid Retention Test (RRT) ein. Zunächst aber wurden von Siva & Bhatia LTF-Tests durchgeführt, deren Ergebnisse -ähnlich den Ergebnissen

der oben beschriebenen LTF-Versuche anderer Autoren- zeigten, daß die Durchlässigkeit des Boden/Geotextilsystems maßgeblich vom Versuchsboden abhängt. In Vorversuchen werden die Auswirkungen verschiedener Einbaubedingungen hinsichtlich des Wassergehaltes der Bodenprobe beim LTF-Test untersucht. Der größte Rückgang der Durchlässigkeit und der größte Bodendurchgang konnte festgestellt werden, wenn die Bodenprobe trocken eingebaut wird und diese vor der Durchströmung nicht gesättigt wird. Ursache für das Ergebnis ist die höhere Feinteilmobilität bei geringeren Wassergehalten. Das verwendete Wasser wurde vorher entlüftet. Für die Reihenuntersuchungen mit dem LTF-Test wurde die Probe vor dem Einbau gesättigt, um eine bessere Homogenität der Bodenprobe zu gewährleisten. Um nochmals zu überprüfen, ob das Filterverhalten maßgeblich von der Bodenprobe beeinflußt wird, wurde beim LTF-Test vor Versuchsende ein bevorzugter Wasserweg in die Bodenprobe eingestanzt. Die Durchlässigkeit des Gesamtsystems stieg dadurch zunächst an, ging aber danach wieder in ein stabiles System mit konstanter Durchlässigkeit über. Bezüglich der mechanischen Filterwirksamkeit konnte bei keinem System eine Überschreitung des von Lafleur et al. (1990) vorgeschlagenen Grenzwertes festgestellt werden. Im Gegensatz dazu verhält es sich bei den von Siva & Bhatia durchgeführten RRT-Versuchen, die Bodendurchgänge von mehr als 50 % der beaufschlagten Feinteile zur Folge hatten. Für die Auswertung des RRT-Versuchs wird der Quotient (DC) aus dem Durchflußvermögen des fabrikneuen Geotextils und dem Geotextil nach Suspensionsbeaufschlagung gebildet:

$$DC = Q_{fabrikneu} / Q_{"glogged"}$$
(8)

Dieser DC-Wert gibt den Grad des "Cloggings" und somit auch die Abnahme der hydraulischen Leistungsfähigkeit an. Eine stellenweise Einlagerung von Feinmaterial und damit verbunden der Rückgang der Durchlässigkeit ist nach Siva & Bhatia insbesondere bei Suspensionen möglich. Im Vergleich zu dünnen thermisch verfestigten Geotextilien erfolgt bei mechanisch verfestigten Geotextilien eine ausgeprägtere Einlagerung von Feinmaterial. Bei der Versuchsdurchführung wird zunächst eine Suspension mit dem gewünschten Feinteilgehalt hergestellt, die dann dem gesättigten und bereits in der Versuchseinrichtung eingespannten Geotextil bei einer konstanten hydraulischen Belastung zugegeben. Im Versuchsbehälter befindet sich ein Rührlöffel, der ein zu schnelles Absinken der Feinteilchen verhindert. Das Untersuchungsprogramm umfaßt die Variation aus 11 Vliesstoffen (4 verschiedene Hersteller) und 6 verschiedene Versuchsböden. Bezüglich der mechanischen Filterwirksamkeit zeigte sich bei allen 4 Geotextiltypen ähnliches Bodenrückhaltevermögen. Im Gegensatz

dazu ergaben sich Unterschiede in den DC-Werten. Diese Unterschiede sind nach Siva & Bhatia im wesentlichen auf die unterschiedliche Struktur und Herstellungsart der einzelnen Geotextilien zurückzuführen. Die größten DC-Werte stellten sich bei Spinnfaservliesstoffen (stapelfaser Vliesstoff) ein, wenn die wirksame Öffnungsweite des Geotextils 3 bis 4 mal größer ist als der Durchmesser D<sub>85</sub> bei 85 % Massenanteil des Bodens. Bei mechanisch verfestigten Filamentvliesstoffen (endlosfaser Vliesstoff), die aufgrund der langen Fasern einen größeren Porenraum aufweisen, liegen die größten DC-Werte bei geringeren Verhältniswerten zwischen wirksamer Öffnungsweite und dem Durchmesser D<sub>85</sub>. Im selben Bereich der  $O_{90,v}/D_{85}$ -Werte lagen die höchsten DC-Werte bei den thermisch verfestigten Vliesstoffen. Die Geotextilstruktur läßt aber in diesem Fall aufgrund der geringen Dicke der thermisch verfestigten Geotextilien keine Einlagerung von Feinmaterial zu, wodurch das hierbei auftretende Filterphänomen dem Blocking zuzuordnen ist. Als Ergebnis dieser Versuchsreihe halten Siva & Bhatia fest, daß bezüglich des Bodenrückhaltevermögens unter den kritischen Bedingungen (Suspensionsbeaufschlagung) das Verhältnis  $O_{90}$ , möglichst klein gewählt werden soll. Darüber hinaus ist stets mit einem Rückgang der Durchlässigkeit des Geotextils zu rechnen. Dies beeinflußt aber die Durchlässigkeit des Gesamtsystems nicht, da die Durchlässigkeit des Geotextils in der Regel um zwei Zehnerpotenzen größer ist als die Durchlässigkeit feinkörniger Böden. Anhand der völlig unterschiedlichen Bodendurchgangsmengen beim LTF-Test und beim RRT-Versuch verdeutlichen Siva & Bhatia die Auswirkungen der Einbaubedingungen und weisen vor diesem Hintergrund darauf hin, daß im Experiment entsprechend dem praktischen Anwendungsfall auch die Versuchsrandbedingungen zu wählen sind.

Weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen von Suspensionsbeaufschlagungen auf das Filterverhalten von Geotextilien führte Faure et al. (1993) durch. Mit dem für diesen Zweck entwickelten Versuchsaufbau ist es mit Hilfe von Piezometern möglich die entstehenden Wasserdrücke über dem Geotextil zu messen. Zunächst untersucht Faure mit gleichförmigen Kornfraktionen mit den Korndurchmessern d das Phänomen "Piping". Er stellte fest, daß bei Versuchsbeginn zunächst stets Piping auftritt, bis sich Brückenstrukturen aus Bodenmaterial über den Poren des Geotextils ausbilden. Der Zeitpunkt, ab dem dies erfolgt, ist vom Verhältnis Öffnungsweite Filter zu Korngrösse d abhängig. Von den getesteten Geotextilien zeigen die Vliesstoffe ein besseres Bodenrückhaltevermögen als Gewebe. Ferner sind Vliesstoffe in der Lage schon bei geringeren Konzentrationen der Feststoffteile diese zurückzuhalten, wohingegen Gewebe für das gleiche Rückhaltevermögen höhere Konzentrationen benötigen. In einer weiteren Versuchsreihe untersuchte Faure das "Clogging"-Verhalten der geotextilen Filter. Die Versuchssuspension bestand aus einem tonigen Schluff, der im Gegensatz zu den oben beschriebenen Versuchsböden mit einzelnen gleichförmigen Kornfraktionen eine größere Ungleichförmigkeitszahl aufweist. Als Kriterium für das Phänomen "Clogging" legt Faure den Aufbau eines Wasserdruckes von einem Meter Wassersäule über dem Geotextil fest, den er mit Hilfe von Piezometern mißt. Zusätzlich stoppt er die Zeit bis dies erreicht wird. Als Ergebnis stellt Faure bei den untersuchten Geotextilien fest, daß "Clogging" bei Bändchengewebe und bei thermisch verfestigten Geotextilien schneller auftritt als bei mechanisch verfestigten Vliesstoffen. Nach Faure ist bereits das erste Zurückhalten von Feinmaterial verantwortlich für die Abnahme der Durchlässigkeit. Infolge weiterer Zugaben kommt es zu einer Ansammlung von Feinmaterial über dem Geotextil, die einen Druckaufbau über dem Geotextil bewirken. Der Aufbau eines gering durchlässigeren Filterkuchens kann nur durch einen gleichmäßigen Abtransport von Feinteilchen verzögert werden.

Den oben beschriebenen Versuchstechniken zur Untersuchung des Filterverhaltens bei Suspensionsbeaufschlagungen liegt bei der Versuchsdurchführung ein konstanter hydraulischer Gradient mit gleicher Fließrichtung zugrunde. In bestimmten Anwendungsfällen in der Praxis wie z.B. im Straßenbau können jedoch hydrodynamische Belastungen auftreten, die gerade hinsichtlich der mechanischen Filterwirksamkeit maßgeblich sein können. Narejo & Koerner (1992) entwickelten einen Dynamik Filtration (DF) Test, mit dem die Durchlässigkeit des Boden/Geotextilsystems nach zunehmenden hydrodynamischen Belastungen bestimmt werden kann. Ergebnisse dieser relativ jungen Versuchstechnik zeigten, daß unter diesen hydraulischen Bedingungen Flugasche mit Partikelgrößen kleiner als die wirksamen Öffnungsweiten der Geotextilien diese passieren. Bei Verwendung eines gut abgestuften Sandes geht die Durchlässigkeit auf einen konstanten Wert zurück. Dagegen wird die Durchlässigkeit des Gesamtsystems nahezu null, wenn die feinen Fraktionen eines Ton-Schluff-Gemisches verwendet werden.

Nach den oben beschriebenen zahlreichen labortechnischen Untersuchungen von Boden/Geotextilsystemen werden im folgenden die Untersuchungen von Heerten (1981) an langjährig eingebauten Geotextilien zusammengefaßt. Auf deren Grundlage wurden Filterregeln erarbeitet, die bei der Filterdimensionierung im praktischen Anwendungsfall maßgebend sind und im wesentlichen dem Bemessungsvorgehen des Merkblattes DVWK (1992)

entsprechen. Grundlage für die Ausarbeitung der Filterregeln sind 5 Entnahmestellen aus verschiedenen Deckwerkskonstruktionen des Küstenbaus, in denen das Geotextil für Filterzwecke eingebaut wurde. Aus diesen Entnahmestellen wurden 16 verschiedene Geotextilprodukte entnommen. Aufgrund der verschiedenen Filtrationsmodelle denen Gewebe und Vliesstoffe bzw. Verbundstoffe mit einer Filtrationslänge zuzuordnen sind, erfolgte eine getrennte Auswertung bezüglich der hydraulischen Filterwirksamkeit dieser Geotextilien. Die Überprüfung der mechanischen Filterwirksamkeit erfolgt sowohl für Gewebe als auch für Vliesstoffe über die Bestimmung der wirksamen Öffnungsweiten D<sub>w</sub> (D<sub>w</sub> entspricht heute O<sub>90,w</sub>) und einem Vergleich der wirksamen Öffnungsweiten mit den Bodenparametern (hier d<sub>10</sub>: Korndurchmesser bei 50 % Massenanteil) des abzufilternden Bodens. Anhand der Ausgrabungsergebnisse, die eine mechanische Filterwirksamkeit belegen, erweitert Heerten den von Ragutzki angegebenen Bereich für die Wahl der wirksamen Öffnungsweite von  $D_{w} \leq$  $1,3d_{50}$  auf  $D_w \le 2,7d_{50}$ . Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, daß auch bei Systemen mit  $D_w$ < 0,5d<sub>50</sub>, wie von Ragutzki (1969) als Grenzwert für die Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit angegeben, die Filterfunktion erfüllt ist. Unter Berücksichtigung der Bodenparameter und Filterbelastung schlägt Heerten für die mechanische Filterwirksamkeit folgende Filterregeln vor:

- abzufilternder Boden mit  $d_{50} \ge 0,06$  mm:

 $\mathbf{D}_{w} < 10d_{50}$  und  $\mathbf{D}_{w} \leq d_{90}$  bei stationären Fließzuständen und Böden mit U  $\geq 5$ 

 $D_{\rm w} \! < \! 2,5 d_{\rm 50}$  und  $D_{\rm w} \! \le d_{\rm 90}$  bei stationären Fließzuständen und Böden mit U < 5

 $D_w < 1,0d_{50}$  bei turbulenten und richtungswechselnden Strömungsbedingungen - abzufilternder mit  $d_{50} < 0,06$  mm: Für diesen Bereich liegen wenig Auswertedaten vor, empfohlen wird daher

 $D_w \leq 0,1 \text{ mm}$ 

Bei der Überprüfung der hydraulischen Filterwirksamkeit bestimmt Heerten die Durchlässigkeit der ausgebauten Geotextilien und der abzufilternden Böden. Ist der Quotient aus  $k_{Geotextil}/k_{Boden}$  größer als eins, so ist die hydraulische Filterwirksamkeit erfüllt. Im Gegensatz zu den 9 ausgegrabenen mechanisch verfestigten Geotextilien, die alle diese Bedingung einhielten, erfüllten 5 der 8 ausgegrabenen Gewebe diese Bedingung nicht. Da in der Praxis bei der Bemessung eines geotextilen Filters nur die Durchlässigkeit des fabrikneuen Geotextils vorliegt, stellt Heerten mit Hilfe von Abminderungsfaktoren eine Beziehung zwischen dem fabrikneuen Geotextil und der zu erwartenden geringeren Durchlässigkeit nach langjährigem
Einbau auf. Der Abminderungsfaktor  $\eta$  ist nach Heerten als Quotient aus  $k_{Geotextil,neu}/k_{Geotextil,ausgegraben}$  definiert. Für Gewebe ist dieser Abminderungsfaktor vom Korndurchmesser d<sub>10</sub> bei 10 % Massenanteil des abzufilternden Bodens abhängig, da bei Geweben ein Filterversagen relativ spontan durch das Verlegen der Öffnungen auftreten kann. Im Gegensatz dazu sind die Abminderungsfaktoren für Vlies- und Verbundstoffe, bei denen ein Rückgang der Durchlässigkeit auf zeitlich abhängige Einlagerungen im Porenraum des Filters zurückzuführen ist, abhängig von Geotextilparametern wie D<sub>w</sub>, k<sub>Geotextil</sub>, Dicke und Porenraum 4 ist der Zusammenhang der Geotextilparameter und der Abminderungsfaktoren  $\eta$  aufgrund der Untersuchungen graphisch dargestellt.



Diagramm 4: Abminderungsfaktor  $\eta_v$  für den Durchlässigkeitsbeiwert eines Vlies- oder Verbundstoffes in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert des fabrikmäßigen Geotextils  $k_f$  und der Porosität P. Ergebnisse der Untersuchungen der Geotextilien der Entnahmestelle am Seedeich Speicherkoog Dithmarschen.

Da bei der Entnahmestelle nur Fein- und Mittelsande vorlagen, können diese Abminderungsfaktoren nur auf entsprechende abzufilternde Bodenarten angewandt werden. Aufgrund der Untersuchungen von Heerten ist es möglich, Abminderungsfaktoren für die zu erwartende Abnahme der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Geotextils zu bestimmen, um den in Kapital 2.3.2 angegebenen Nachweis für die hydraulische Filterwirksamkeit nach (4) zu führen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Merkblatt DVWK (1992) eingearbeitet. Die Anwendbarkeit auf bindige Böden ist erst auf der Grundlage weiterer Untersuchungen zu prüfen.

Im folgenden wird zusammenfassend auf die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der oben genannten Einflußparameter auf das Filterverhalten eingegangen. Theoretische Betrachtungsweisen alleine können die umfassende Problematik des Themas Filtern nicht abdecken, sondern sind derzeit vielmehr als notwendige Ergänzungen zum Kenntnisstand, beispielsweise über die Porenstruktur und deren computerunterstützte Modellierbarkeit, zu betrachten. Sehr viel konkreter lassen sich für die Praxis verwertbare Erkenntnisse aus labortechnischen Untersuchungen erzielen, die im Idealfall eine Aussage über das Langzeitverhalten des Boden/Geotextilsystems ermöglichen. Diese Erkenntnisse können nur durch die Untersuchungen an langjährig eingebauten Geotextilien bestätigt werden, was im Anwendungsbereich Wasserbau für spezielle Randbedingungen hinsichtlich der Bodenart und den hydraulischen Gegebenheiten durch die Untersuchungen von Heerten (1981) erfolgte. Trotz des Umfangs der labortechnischen Untersuchungen ist zum derzeitigen Kenntnisstand keine eindeutige Aussage über den Einfluß verschiedener Bodenparameter und Geotextilparameter auf das Filterverhalten möglich. In der Fachwelt liegen oftmals kontroverse Ansichten vor. Als Beispiel hierfür kann die Frage aufgeführt werden, ob für die langfristige Wirksamkeit eines geotextilen Filters eine Filtrationslänge notwendig ist. In diesem Zusammenhang ist ungeklärt, ob mit Hilfe von Vliesstoffen Tiefenfiltration, die eine Filtrationslänge benötigt, überhaupt möglich ist und wie gegebenenfalls dann die Porenstruktur aussehen muß. Nach Heerten (1993) werden bei einem idealen Tiefenfilter die Poren von der Anströmseite her bis zur Filterausströmseite geringer. In Anlehnung an einen abgestuften Kornfilter beschreibt Eichenauer (1993) ein anderes Modell eines Tiefenfilters, bei dem die Porendurchmesser des Filters zur Ausströmseite hin größer werden. Hinzu kommen unterschiedliche Auffassungen von Filtrationslängen. Eichenauer (1993) berichtet von relativ "dünnen" Geotextilien mit einer Dicke von 2 bis 3,3 mm. Geotextilien dieser Dicke sind nach DVWK (1992) schon als Filter mit dreidimensionaler Struktur einzustufen.

Übereinstimmend geht aus der Fachliteratur hervor, daß es sich bei der wirksamen Öffnungsweite eines Geotextils um einen maßgebenden Parameter für die mechanische Filterwirksamkeit handelt. Die Zusammenstellung bereits verschiedener existierender mechanischer Filterkriterien in Tabelle 2 verdeutlicht dies. Bei allen Autoren liegt das gleiche Nachweisschema zugrunde:  $O_X/D_Y \leq Z$ . Das bedeutet, daß eine bestimmte Porengröße des Geotextils  $O_X$  um mindestens einen bestimmten Betrag Z kleiner sein muß, als ein bestimmter Korndurchmesser  $D_Y$  eines abzufilternden Bodens. Auf die Problematik, eine maßgebende Porengröße des Geotextils anzugeben, wird in Kapitel 4.3 eingegangen.

| Autor   | Kriterium   | Bemerkung   |  |  |
|---|---|---|--|--|
| Calhoun (1972)  | $O_{95}/D_{85} \le 1$<br>$O_{95} \le 0,2 \text{ mm}$                                      | Gewebe, Boden mit weniger als 50 % kleiner 0,2 mm<br>Gewebe, cohäsive Böden   |  |  |
| Zitscher (1975)   | $\begin{array}{l} O_{50}/D_{50} \leq 1,7-2,7 \\ O_{50}/D_{50} \leq 25-37 \end{array}$     | Gewebe, Böden mit U $\leq$ 2, D <sub>50</sub> =0,1 bis 0,2 mm Vliesstoffe, cohäsive Böden   |  |  |
| Ogink (1975)  | $O_{90}/D_{90} \le 1$<br>$O_{90}/D_{90} \le 1,8$  | Gewebe<br>Vliesstoffe   |  |  |
| Sweetland (1977)  | $O_{15}/D_{85} \le 1$<br>$O_{15}/D_{15} \le 1$  | Vliesstoffe, Böden mit $U = 1,5$<br>Vliesstoffe, Böden mit $U = 4$  |  |  |
| Rankilor (1981)   | $O_{50}/D_{85} \le 1$<br>$O_{15}/D_{15} \le 1$  | Vliesstoffe, Böden mit $0.02 \le D_{85} \le 0.25$ mm<br>Vliesstoffe, Böden mit $D_{85} > 0.25$ mm   |  |  |
| Schober und Teindl<br>(1979)                                    | $O_{90}/D_{50} \le 2.5 - 4,5$<br>$O_{90}/D_{50} \le 4,5 - 7,5$                            | <ul> <li>Gewebe/dünne Vliesstoffe, Boden abhängig von U</li> <li>dicke Vliesstoffe, Boden abhängig von U, Schluff</li> <li>Sandböden</li> </ul> |  |  |
| Millar, Ho und<br>Turnbull (1980)                               | $O_{50}/D_{85} \le 1$   | Gewebe und Vliesstoffe  |  |  |
| Giroud (1982)   | $O_{95}/D_{50} \le (9-18)/U$  | Boden abhängig von U und Dichte   |  |  |
| Carroll (1983)  | $O_{95}/D_{85} \le 2 - 3$   | Gewebe und Vliesstoffe  |  |  |
| Christopher und Holtz<br>(1985)                                 | $O_{95}/D_{85} \le 1 - 2$<br>$O_{95}/D_{15} \le 1$<br>$O_{50}/D_{85} \le 0,5$             | abhängig von Bodenart und U<br>hydraulische Belastung, Feinteilmobilität  |  |  |
| franz. Kommitee für<br>Geotextilien und Geo-<br>membrane (1986) | O <sub>f</sub> /D <sub>85</sub> ≤ 0,38 - 1,25   | abhängig von Bodenart, Verdichtung, hydraulische &<br>Anwendungsbedingungen   |  |  |
| Fischer, Christopher<br>und<br>Holtz (1990)                     | $O_{50}/D_{85} \le 0.8$<br>$O_{50}/D_{15} \le 1.8 - 7.0$<br>$O_{50}/D_{50} \le 0.8 - 2.0$ | basiert auf Porengrößenverteilung des Geotextils, abhän-<br>gig von U   |  |  |

Tabelle 2:Zusammenstellung der mechanischen Filterkriterien verschiedener Autoren<br/>(nach Fischer et al. 1990). Die Versuche für diese Kriterien werden nicht<br/>dargestellt. Die Bedeutung der Kennwerte ist im Text enthalten

Den Einfluß verschiedener Geotextilparameter über einen Vergleich der durchgeführten Versuche verschiedener Autoren zu klären, scheitert weitgehend an den jeweils unterschiedlich vorhandenen Versuchsrandbedingungen. Dadurch werden Auswirkungen von ohnehin schwierig nachweisbaren Einflußfaktoren überdeckt. Als Beispiel hierfür kann die Verwendung von entlüfteten Wasser bei der Versuchsdurchführung aufgeführt werden, da dadurch Unterschiede im Durchlässigkeitsverhalten des Boden/Geotextilsystems auftreten können, was aber ursächlich nicht einer Eigenschaft eines Geotextils zugeordnet werden kann. Ebenso verhält es sich bei den unterschiedlich langen Versuchszeiten speziell beim LTF-Test, die zwischen 200 Stunden und mehreren hundert Tagen variieren können. Nach Koerner (1982) ist die Anfangsphase eines Versuchs in der noch keine Aussagen zur Langzeitwirksamkeit möglich sind, erst nach ca. 200 h vorüber, wohingegen Qureshi (1990) seine Versuche schon nach dieser Zeit beendet. Zu kurze Versuchszeiten können zu einer Fehlinterpretation der Wirksamkeit eines Filters führen, da gerade im Hinblick auf eine Tiefenfiltration Teilchenumlagerungen auch noch nach mehreren hundert Versuchsstunden zu erwarten sind, die dann Veränderungen in der Durchlässigkeit des Gesamtsystems bewirken können. Aussagen zu den Auswirkungen verschiedener Faserrohstoffe oder den unterschiedlich verwendeten Avivagen auf die Filterwirksamkeit sind in der Literatur nicht vorhanden, obwohl dies einen entscheidenden Einfluß auf die auftretenden Phänomene an der Grenzfläche zwischen Boden und Geotextil haben können. Ursache hierfür sind das hydrophobe oder hydrophile Verhalten (siehe hierzu auch Kapitel 4.3) der verschiedenen Kunststoffe in Kontakt zu Wasser.

Bei mineralischen Filtern mit relativ großen Korndurchmessern mußte das nicht berücksichtigt werden, da in diesem Fall ein "neutraler" Kontaktwinkel des Wassers zum Boden vorliegt. Wie aber aus der Bodenmechanik bekannt ist, wird der Einfluß aus adhäsiv gebundenem Wasser bei kleinen Korngrößen hinsichtlich ihrer Mobilität größer und muß daher gerade bei abzufilternden Suspensionen durch einen geotextilen Filter, der ebenfalls in bezug auf die Wasseranlagerungsfähigkeit kunststoffspezifische Eigenschaften aufweist, berücksichtigt werden. Bezüglich des Einflusses der Verfestigungsart auf die Filterwirksamkeit liegt in der Fachwelt keine eindeutige Stellungnahme vor. Ein wesentlicher Unterschied zwischen thermisch und mechanisch verfestigten Vliesstoffen ist die Dicke und damit wiederum verbunden die Frage, ob sich eine Tiefenfiltration bei dicken Vliesstoffen überhaupt einstellen kann.

Ein weiterer Punkt, der die Vergleichbarkeit der Versuche erschwert ist, daß oftmals der Einfluß aus den Bodeneinbaudingungen wie Wassergehalt oder Trockendichte nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu liegen häufig im praktischen Anwendungsfall in verschiedenen Fachgebieten klare Vorgaben bezüglich des Einbaus der abzufilternden Bodenschicht vor. In der Literatur wird in der Regel eine Kornverteilung des abzufilternden Bodens angegeben, Angaben jedoch, mit welchem Wassergehalt oder mit welchem Verdichtungsgrad der Versuchsboden eingebaut wurde, bleiben aus. Diesbezügliche Reihenuntersuchungen von Fillibeck (1993) oder Siva & Bhatia (1993) belegen, daß die Einbaubedingungen einen entscheidenden Einfluß auf die Filterwirksamkeit des Boden/Geotextilsystem haben. Eine weitgehend einheitliche Meinung liegt in der Fachwelt über die Gefährdung der Filterwirksamkeit durch Suspensionen oder durch Böden mit Ausfallkörnung vor, da hierbei eine hohe Feinteilmobilität vorhanden ist. Da derartige Belastungsfälle im praktischen Anwendungsfall nicht immer ausgeschlossen werden können, ist es notwendig, diesen möglicherweise maßgebenden Belastungsfall im Laborversuch zu simulieren. In bezug auf die strömungsmechanischen Randbedingungen findet in der Literatur in der Regel keine ausführliche Auseinandersetzung statt. Eine differenzierte Analyse der verschiedenen praktischen Anwendungsfälle hinsichtlich der hydraulischen Gradienten, des Sättigungsgrades des Bodens und der Druckverhältnisse an der Ausströmseite des Filters erfolgt im allgemeinen nicht.

Aus der oben aufgeführten Zusammenfassung kann geschlossen werden, daß, obwohl umfangreiche Forschungsarbeit betrieben worden ist, in Fachkreisen keine einheitliche Meinung über den Einfluß verschiedener Parameter auf das Filterverhalten vorliegt. Ursache hierfür ist unter anderem die große Anzahl an verschiedenen Versuchstechniken einzelner Autoren, deren Ergebnisse untereinander nicht vergleichbar sind. Die Versuchsrandbedingungen sind, falls sie überhaupt hinreichend angegeben werden, zu unterschiedlich. Die angegebene Aufzählung bekannter Versuchstechniken können keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben. Es könnten noch eine Vielzahl unterschiedlicher Versuchstechniken angefügt werden. Die zitierten sind jedoch repräsentativ und charakterisieren beispielhaft die verschiedenen Vorgehenweisen. Unklar ist bei vielen Versuchstechniken die Anwendungsgrenze und der Hintergrund, für welchen Anwendungsfall in der Praxis diese entwickelt bzw. durchgeführt wurden. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens werden Versuchstechniken entwickelt, die teilweise auf die oben beschriebenen aufbauen. Im Vordergrund steht dabei jedoch das Ziel, den Randbedingungen, die im Anwendungsfall Deponiebau vorliegen, möglichst nahe zu kommen.

# 3. Hydraulisches System im Anwendungsfall Deponiebau

Im Rahmen dieses FE-Vorhabens ist das im Deponiebau vorkommende System in Laborversuchen zu simulieren. Die bei einem Oberflächenabdichtungssystem vorhandenen hydraulischen Randbedingungen sind weitgehend unbekannt und die abzufilternden Rekultivierungsmaterialien variieren aufgrund der verschiedenen Standorte der Deponieen sehr stark. Die Ursachen dafür sind zum einen, daß bodenphysikalische Kennwerte wie beispielsweise die Durchlässigkeit des Rekultivierungsmaterials praktisch nicht bestimmt werden und zum anderen keine definierten Anforderungen an die Eigenschaften des Einbaumaterials selbst oder an den Einbau bezüglich der Verdichtung bestehen. Für das zu simulierende System sind daher keine engbegrenzten Einbaubedingungen oder Einbaumaterialien vorgegeben. Ziel ist daher den maßgebenden bzw. den ungünstigsten Lastfall und die im Anwendungsfall Deponiebau entsprechenden strömungsmechanischen Randbedingungen im Labor zu simulieren. Folgend werden dahingehend die Einbaubedingungen und die hydraulischen Randbedingungen beschrieben. Auf die Beschreibung der bodenphysikalischen Kennwerte der ausgewählten Bodenarten wird im Kapitel 4.2 eingegangen.

Im Labor durchgeführte Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit eines Rekultivierungsboden, der mit zwei unterschiedlichen Verdichtungsgraden eingebaut wurde, zeigen die Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Verdichtungsgrad. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, liegt bei geringer Verdichtung eine 2500fach höhere Durchlässigkeit vor.

| Verdichtungsverfahren bei<br>gleichem Wassergehalt       | k, Boden im Proctortopf nach DIN 18130<br>[m/s] |
|--|---|
| Verdichtung mit Proctorenergie                           | 1,1 - 2,1*10 <sup>-6</sup>                      |
| geringe Verdichtung; lockerer Ein-<br>bau der Bodenprobe | 3,8 - 4,0*10 <sup>-3</sup>                      |

 Tabelle 3:
 Durchlässigkeitsbestimmung von Rekultivierungsmaterial bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden

Betrachtet man in diesem Zusammenhang Abbildung 5, die den Einbau eines Rekultivierungsmaterials zeigt, wird deutlich, daß zunächst großflächige Bereiche mit geringer Verdichtung vorhanden sind, die dem oben beschriebenen Versuch, bei dem die Bodenprobe per Hand verdichtet wurde, entsprechen würden. Stellen, bei denen große Bodenaggregate die Grenzschicht zwischen Boden und Geotextil bilden, sind zunächst, aufgrund der geringen Durchlässigkeit dieser Bodenaggregate nicht strömungswirksam. Aufgrund dieser mechanischen Filterwirksamkeit verursacht die Anreicherung von Feinmaterial im durchströmenden Wasser die Bildung eines Wasseraufstaus über dem Filter. Dadurch werden die kohäsiven Bindungskräfte der Bodenaggregate geringer und die Durchmesser dieser Bodenaggregate verkleinern sich. Als Folge tritt im Laufe der Zeit eine Homogenisierung der Rekultivierungsschicht ein. Ein über dem Filter anstehender Wasserstand wird, falls der Filter funktionsfähig ist, über diesen abgebaut bis ein Gleichgewicht zwischen den kapillaren Bindungskräften des Wassers an das Bodenmaterial und der Schwerkraft erreicht ist. Die Rekultivierungsschicht kann dann als teilgesättigtes System betrachtet werden, was vorher aber die Entwicklung eines funktionsfähigen Filters voraussetzt.

Aus den oben aufgeführten Überlegungen ist zu schließen, daß die erste Durchströmung des eingebauten Rekultivierungsmaterials maßgebend ist. Die weitere Entwicklung im Boden/Geotextilsystem hängt wesentlich von den Eigenschaften des Geotextils ab. Abhängig vom Geotextil bildet sich eine stabile Partikelstruktur aus oder, wie Erfahrungen aus der Praxis bestätigen es, können falsch dimensionierte geotextile Filter bereits bei der ersten Durchströmung hydraulisch Versagen. Die Ursache hierfür muß aber nicht allein auf eine unzureichende Filterbemessung zurückgeführt werden, sondern in diesem Zusammenhang kann auch der Wassereintrittswiderstand in das Geotextil von großer Bedeutung sein. Dieser wird im wesentlichen von dem Faserrohstoff des Geotextils und der herstellungsbedingt notwendigen Avivage beeinflußt. Geotextilfasern bestehend aus dem Kunststoff Polyethylen (PE) lassen sich beispielsweise schlechter aufgrund des unterschiedlichen Kontaktwinkels mit Wasser benetzen als Fasern aus Polyester (PES). Diese Wirkungsweise kann noch durch die produktionstechnisch notwendige Verwendung von Avivagen beeinflußt werden, die je nach Hersteller aus öligen oder laugenartigen Lösungen bestehen. Der Einfluß dieser Avivage ist gerade bei Strömungsbeginn groß und läßt im allgemeinen nach einer bestimmten Zeit nach. Wie groß und vor allen Dingen wie lange dieser Einfluß anhält, ist weitgehend unbekannt und kann auch von den Herstellern nicht eindeutig angegeben werden.

Für den Einbau der Bodenprobe bedeutet dies, daß bei einer Simulation des für die Filterwirksamkeit des Geotextils maßgebenden Lastfalls diese mit geringer Verdichtung und auf der trockenen Seite der Proctorkurve eingebaut werden muß, da dies auch in der Regel beim Einbau einer Rekultivierungsschicht in der Praxis zutrifft. Die Untersuchungen von Fillibeck (1993) bestätigen dies. Er konnte feststellen, daß beim Einbau der Bodenprobe unter den oben beschriebenen Bedingungen, filtertechnisch problematische Randbedingungen heterogenen Gegebenheiten wäre der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit des Geotextils nach (4) u.U. problematisch, da die Durchlässigkeit des Geotextils im Vergleich zum Boden unter Anfangseinbaubedingungen zu gering sein kann. Die Durchlässigkeit des Rekultivierungsmaterials nimmt aber in einem zeitabhängigen Prozeß ab. Ursache hierfür ist das Zuschlämmen der in der Rekultivierungsschicht enthaltenen Makroporen mit Feinmaterial. In diesen Makroporen liegen bei entsprechenden Niederschlagsereignissen erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten vor, womit auch eine Erhöhung der Schleppkraft des versikkernden Wassers verbunden ist.



Abbildung 5: Darstellung des Einbaus einer Rekultivierungsschicht. Der Einbau erfolgt durch Vorkopfschüttung. Zu erkennen sind große Bodenaggregate, die auf dem Filtervließ (weiße Fläche) zu liegen kommen.

Als Folge treten Erosionserscheinungen entlang der Ränder der Bodenaggregate ein. Es entstehen geringe hydraulische Gradienten in der Rekultivierungsschicht, die ausreichen einen weiteren Feinteiltransport zu bewirken. Die in der Tabelle 1 angegebenen kritischen hydraulischen Gradienten für verschiedene Bodenarten verdeutlichen, daß bereits bei geringen hydraulischen Gradienten mit einem Feinteiltransport zu rechnen ist. Abhängig von der beim Laborversuch vorliegen, da dabei eine ausgeprägte Feinteilmobilisierung bei einer hydraulischer Belastung vorliegt. Des weiteren entspricht die Laborsimulation dem praktischen Anwendungsfall, wenn die Bodenprobe ausgehend vom trockenen Einbauzustand durch eine Beaufschlagung der hydraulischen Belastung in den gesättigten Zustand übergeht und die weitere Durchströmung in diesem Zustand erfolgt. Wie oben beschrieben, entsteht bei diesem Sättigungszustand im praktischen Anwendungsfall erst das Gleichgewicht zwischen der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit, weshalb dieser Vorgang als entscheidende Entwicklungsphase zu betrachten ist. Erst dann kann die Rekultivierungsschicht in ein teilgesättigtes System übergehen. Je nach Stärke der Niederschlagsereignisse kann eine Wechsel zwischen gesättigten und teilgesättigten Zustand erfolgen. Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungssystemen von Hämmerle (1997) bestätigen dies. Die Funktionsfähigkeit eines Filters im teilgesättigten Zustand muß aber noch in einem weiteren Schritt im Rahmen eines fortführenden FE-Vorhabens überprüft werden.

Neben der Frage, unter welchen Bedingungen die Bodenprobe in die Versuchszelle einzubauen ist und welcher Sättigungszustand der Bodenprobe bei der Versuchsdurchführung maßgeblich ist, um die deponiebauspezifischen Randbedingungen zu simulieren, muß die Frage der entsprechenden Versuchstechnik geklärt sein. Die Strömungsrichtung in den entwickelten Versuchszellen erfolgt daher entsprechend dem Anwendungsfall in Richtung der Schwerkraft.

Unter der Voraussetzung, daß aufgrund einer ordnungsgemäßen Dimensionierung der Sikkerschicht die Wasserabführung in der Ebene dieser Sickerschicht im freien Gefälle erfolgt, tritt auch das Sickerwasser unter dem Geotextil frei aus. Dies wird mit Hilfe eines sogenannten offenen Systems simuliert, bei dem der Wasseraustritt unter atmosphären Druck erfolgt. Da in diesem Fall kein genau definierter Unterwasserstand vorhanden ist und damit die hydraulische Druckhöhe dh nicht bestimmbar ist, ist die übliche Definition des hydraulischen Gefälle nach Darcy nicht möglich. Deswegen wird hierfür das hydraulische Gefälle i' eingeführt, bei dem die Wasserdruckhöhe dh', die dem Höhenunterschied zwischen Unterkante Geotextil und dem Oberwasserspiegel entspricht, in (18) [siehe hierzu S. 60] eingesetzt. Des weiteren ist bei der Versuchsdurchführung in einem offenen System die Einstellung eines hydraulischen Gradienten von i < 1 nicht möglich, da dann sowohl der obere Wasserstand als auch die wirksame Fließstrecke dl des durchströmenden Wassers nicht definierbar sind bzw. stets i = 1 wäre. Beim geschlossenen System sind dagegen die für die Berechnung eines Durchlässigkeitsbeiwertes des Gesamtsystems notwendigen Parameter im Versuch exakt bekannt. Ähnlich dem genormten Versuch zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Böden können Ober- und Unterwasserstand genau eingestellt werden. Die Fließstrecke des durchströmenden Wassers entspricht der gesamten Höhe des Prüfkörpers. Eine Einstellung eines hydraulischen Gradienten von i < 1 ist in diesem Fall möglich. In Abbildung 6 sind die Unterschiede zwischen dem offenen und geschlossenen System schematisch dargestellt. Ferner geht aus dieser Abbildung die unterschiedliche Definition der beiden Systeme bezüglich des hydraulischen Gradienten hervor.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß filtertechnisch problematische Randbedingungen vorliegen, wenn die Bodenprobe mit geringem Verdichtungsgrad und auf der trokkenen Seite der Proctorkurve eingebaut werden. Bei beiden Versuchseinrichtungen wird zunächst im Rahmen dieses FE-Vorhabens der gesättigte Zustand der Bodenproben zugrunde gelegt, da hierbei die maßgebende anfängliche Entstehungsphase eines Gleichgewichts zwischen Filter und Rekultivierungsschicht untersucht werden kann. Versuche mit der offenen Versuchseinrichtung simulieren das im Deponiebau vorkommende hydraulische System am ehesten, da dabei das durchströmende Wasser frei unter dem Geotextil austritt. Dagegen können die zu untersuchenden grundlegenden Phänomene an der Grenzschicht Boden/Geotextil am genauesten mit der geschlossenen Versuchseinrichtung untersucht werden, da hier exakt definierte hydraulische Randbedingungen (definiertes hydraulisches Gefälle i und maximal mögliche Sättigung der Probe) vorliegen. Zusätzliche für das geschlossene System entwickelte Meßeinrichtungen (Piezometer) zur Erfassung der Wasserdruckverteilung über die Höhe der Bodenprobe unterstützen die Untersuchungen an der Grenzschicht Boden/Geotextil.



Abbildung 6: Schematische Darstellung der Unterschiede der geschlossenen (rechts) und offenen (links) Versuchseinrichtung. Dargestellt sind die Einstellmöglichkeiten der hydraulischen Belastungen i bzw. i' für die einzelnen Versuchstypen.

## 4. Untersuchungsprogramm

#### 4.1 Allgemeines

Entsprechend den einführenden Aussagen wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf filtertechnisch schwierige Böden gelegt. Es handelt sich dabei in der Regel um leichtplastische Schluffe und Tone oder um gemischtkörnige Böden mit Ausfallkörnungen. Die Auswahl der zu untersuchenden Geotextilien soll eine möglichst große Produktpalette der für Filterzwecke üblicherweise eingesetzten Geotextilien abdecken. Da ein wesentlicher Punkt dieses FE-Vorhabens die labortechnische Untersuchung der Filterwirksamkeit von Geotextilien in Kontakt mit dem abzufilternden Boden ist, wird für eine Abschätzung der zu erwartenden Filterwirksamkeit das Merkblatt DVWK (1992), das derzeit für die Bemessung der geotextilen Filter im Deponiebau maßgeblich ist, verwendet.

Im Hinblick auf die Problematik der erforderlichen Filtrationslänge bei geotextilen Filtern wurden im Rahmen des FE-Vorhabens von jedem Hersteller jeweils ein relativ dünnes und ein relativ dickes Geotextil in das Untersuchungsprogramm einbezogen.

## 4.2 Auswahl der Versuchsböden

#### 4.2.1 Allgemeines

Bezüglich der Filterwirksamkeit können Böden prinzipiell in filtertechnisch problematische und filtertechnisch nicht problematische Böden eingeteilt werden. Bei filtertechnisch unproblematischen Böden sind die Korngrößen der einzelnen Kornfraktionen so aufeinander abgestimmt, daß eine stabile Kornstruktur vorliegt. Einerseits kann diese Kornstruktur erreicht werden, indem der Boden aus nahezu gleichen Korngrößen aufgebaut ist. Dem einzelnen Korn ist es hierbei nicht möglich aufgrund einer hydraulischen Belastung durch das Kornhaufwerk zu wandern. In diesem Zusammenhang ist eine Partikelbewegung nur in Form von Erosion möglich, wenn die hydraulische Belastung so groß ist, daß das gesamte Korngerüst umgelagert wird. Es handelt sich dabei um engestufte Sande oder Kiese mit geringer Ungleichförmigkeit.

Andererseits liegt bei gut abgestuften Kornverteilungen mit größeren Ungleichförmigkeiten eine stabile Kornstruktur vor. Die einzelnen Kornfraktionen bilden ein Porensystem, bei dem die Poren kleiner sind als die im Boden vorhandenen Kornfraktionen. In beiden Fällen erfolgen nur geringe Umlagerungen im Boden und ermöglichen, unabhängig vom Filtrationsmodell, bis zu einer bestimmten Größe der hydraulischen Belastung ein filterstabiles System. Bei sehr kleinen Korngrößen, wie dies bei Tonen der Fall ist, liegen ausgeprägte kohäsive Bindungskräfte zwischen den einzelnen Mineralien vor, die dadurch bei hydraulischer Belastung kaum zur Umlagerung neigen. Ist bei diesen Bodenarten überhaupt ein Filter vorgesekönnen die Poren des Filters relativ groß gewählt werden ("offene hen. Filterdimensionierung").

Da bei filtertechnisch unproblematischen Böden von einer Gewährleistung der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit ausgegangen werden kann, ohne daß dies in labortechnischen Untersuchungen nachgwiesen werden muß, werden im Rahmen dieses FE-Vorhabens vorwiegend filtertechnisch problematische Böden untersucht. Dies sind zum einen Böden mit einem erheblichen Anteil im Schluff- und Feinsandbereich und geringen kohäsiven Eigenschaften. Bei entsprechender hydraulischer Belastung neigen diese Böden zur Einzelkornmobilität. Damit ist die Gefahr der Bodenausspülung und der Zusetzung des Filters verbunden.

Zum anderen sind suffosionsempfindliche Böden filtertechnisch problematisch. Ein Merkmal dieser Böden ist das Vorhandensein einer Ausfallkörnung. Da bestimmte Kornfraktionen dieser Böden fehlen, kann kein stabiler Zustand in den Poren zwischen dem Grobkorngerüst entstehen. Die Porengrößen des Grobkorngerüsts sind so groß, daß bei ausreichender hydraulischer Belastung kleinere Kornfraktionen durch die Porenengestellen des Korngerüsts gespült werden können. Dieses Phänomen (wenn also kleine Kornfraktionen bei ausreichender hydraulischer Belastung durch das Grobkorngerüst gespült werden, ohne daß dieses verändert wird) wird als Suffosion bezeichnet.

#### 4.2.2 Leichtplastischer Schluff

Die Körnungslinie nach DIN 18123 des leicht plastischen Schluff ist in Anlage 2 Blatt 1 dargestellt. Ebenso sind die Konsistenzgrenzen gemäß DIN 18122, Teil 1 in dieser Anlage aufgeführt. Die Anlage 2 Blatt 2 enthält die Ergebnisse des Proctorversuchs nach DIN 18127. Die Korndichte  $\rho_s$  wurde zu 2,68 g/cm<sup>3</sup> bestimmt. Dieses natürlich relativ homogene Material wird seit längerer Zeit bei verschiedenen bodenphysikalischen Untersuchungen des Institutes als typischer Schluff verwendet.

Die Durchlässigkeit dieses Schluffs wurde nach DIN 18130 bei konstanten hydraulischem Gefälle bestimmt. Da bei mehreren Filterversuchen die relativ geringe Trockendichte von  $\rho_d$ = 1,57 g/cm<sup>3</sup> und der Wassergehalt w = 6 % verwendet wurde, sind diese Einbaubedingungen auch bei der Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes zugrunde gelegt worden. Bei der Durchführung des Versuchs zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes konnte festgestellt werden, daß bei jeder Erhöhung des Gradienten die Durchlässigkeit zunächst anstieg. Im Zuge der weiteren Durchströmung wurde dann wieder eine Abnahme der Durchlässigkeit beobachtet. Aufgrund der vergleichsweise geringen Saugspannung und der geringen Einbaudichte des Schluffes kann am Anfang des Versuchs keine Sättigungsphase der Probe festgestellt werden. Die ein- und ausströmenden Wassermengen stimmen von Versuchsbeginn an größenordnungsmäßig überein. Dieses Verhalten im Durchlässigkeitsversuch zeigt bereits, wie instabil dieser Boden bei einer hydraulischen Belastung ist, da nur die Mobilisierung von Feinteilchen für die Schwankungen der Durchlässigkeiten verantwortlich sein kann. Diese Erscheinungen zeigen, daß der Schluff für Untersuchungen der Filterwirksamkeit von Geotextilien in Kombination mit filtertechnisch schwierigen Böden geeignet ist. Der für eine Durchlässigkeitsbestimmung relativ große Schwankungsbereich lag zwischen k  $= 5*10^{-9}$  und k  $= 1*10^{-7}$  m/s.

Da bei weiteren Versuchen der Schluff mit einem Wassergehalt von w = 8 % und einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,73$  g/cm<sup>3</sup> eingebaut worden ist, wurde auch unter diesen Einbaubedingungen die Durchlässigkeit des Boden bestimmt. Unter diesen Randbedingungen hat auch Fillibeck (1993) die Durchlässigkeit des Schluffes in zwei Versuchen bestimmt. Wie in allen Durchlässigkeitsversuchen wurde auch bei diesen das hydraulische Gefälle schrittweise erhöht, um einen Spülstoß zu bewirken. Auch bei diesen Versuchen zeigte sich unmittelbar nach einer Erhöhung der hydraulischen Belastung eine "Durchlässigkeitsspitze", die dann wieder in eine geringere Durchlässigkeit überging.

Insgesamt ergibt sich, betrachtet man alle Versuche, eine Durchlässigkeitsbandbreite von k =  $6*10^{-11}$  bis k =  $3*10^{-7}$  m/s. Ein besonderes Merkmal bei der versuchstechnischen Bestimmung der Durchlässigkeit, ist die Tatsache, daß bei den Versuchen praktisch keine Sättigungsphase der Probe aufgetreten ist und die Durchströmung unmittelbar nach Aufbringen der hydraulischen Belastung erfolgt.

Für den Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit nach DVWK (1992) ergibt sich für diesen Schluff eine zulässige wirksame Öffnungsweite von  $O_{90,w,zul} \leq 0,053$  mm. Wie oben beschrieben, ist der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit aufgrund der großen Bandbreite der versuchstechnisch bestimmten Durchlässigkeiten des Schluffes problematisch. Für den hydraulischen Nachweis nach (5) wird daher von einem bemessungstechnisch ungünstigen Wert der Durchlässigkeitsbandreite ausgegangen, was in diesem Fall der Wert mit der größten Durchlässigkeit von  $1,0*10^{-7}$  m/s ist. Die Bedingung nach (5) ist erfüllt, wenn ein mechanisch verfestigtes Geotextil um 50fach durchlässiger ist als der Schluff. Die Durchlässigkeit der fabrikneuen Geotextilien sollte folglich mindestens  $5*10^{-6}$  m/s betragen, was von allen untersuchten Geotextilien (vgl. Tabelle 5) eingehalten wird. An diesen Nachweis ist eine Dickenanforderung d gebunden:

$$30^* O_{90,w} \le d \le 50^* O_{90,w} \tag{9}$$

Die weiteren hydraulischen Nachweise nach DVWK (1992) für Gewebe oder dünne Vliesstoffe bzw. für mechanisch verfestigte Vliesstoffe sind im Kapitel 4.4 enthalten.

#### 4.2.3 Gemischtkörnige Böden

Neben dem Schluff wurden im Untersuchungsprogramm gemischtkörnige Böden mit großer Ungleichförmigkeit verwendet. Die Kornverteilungen nach DIN 18123 sind in Anlage 2 Blatt 3 und 4 dargestellt. Diese Böden sind ebenfalls als filtertechnisch schwierig einzustufen, da sie Ausfallkörnungen aufweisen. Es liegt ein Grobkorngerüst vor, das mit verhältnismäßig kleinen Kornfraktionen gefüllt ist. Ausgeprägte Kornumlagerungen erfolgen schon bei geringen hydraulischen Gradienten. Feinteilfraktionen, die in den Poren des Grobkorngerüsts enthalten sind, ist ein Durchwandern der Porenengstellen aufgrund geometrischer Beziehungen möglich. Dieses Phänomen wird als Suffosion bezeichnet. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens wurden im wesentlichen drei unterschiedliche Böden mit Ausfallkörnung untersucht. Dem Boden mit der Bezeichnung "gemischtkörniger Boden 1" wird dabei besondere Aufmerksamkeit gewidmet, da er durchaus im Körnungsband von üblichen Rekultivierungsböden auftreten kann.

Die Korndichte dieses gemischtkörnigen Bodens 1 wurde mit dem Tauchwägegefäß nach Haas zu  $\rho_s$ =2,703 g/cm<sup>3</sup> bestimmt. Nach Vorversuchen wurde dieser Boden künstlich aus einem Kies (79 Gew.- %) und dem Schluff (21% Gew.- %) zusammengesetzt. Dem Kies wurde vorher der Kornanteil d > 16 mm entzogen, um zu gewährleisten, daß der Durchmesser der Versuchszelle fünf mal größer als das Größtkorn ist. In Vorversuchen hat sich gezeigt, daß der Gewichtsanteil des Feinkorns das Filter- und Durchlässigkeitsverhalten entscheidend beeinflußt. Bei Veränderung der Gewichtsanteile des Schluffs ergibt sich die Situation, daß bei hohem Schluffanteil die Kieskörner in die Feinkornmatrix aus Schluff eingebettet sind und dadurch im wesentlichen der Schluff für die hydraulischen Eigenschaften des gemischtkörnigen Bodens 1 verantwortlich ist. Ist der Schluffanteil geringer, wird das Korngerüst durch die Kieskörner gebildet, wobei sich der Schluff in die Poren dieses Korngerüsts einlagert. Dieser Boden ist gegenüber dem Boden mit einem höherem Schluffanteil als filtertechnisch schwieriger einzustufen, zumal eine erhöhte Gefahr der Entmischung besteht.

Die Durchlässigkeit  $k_{10}$  des gemischtkörnigen Boden 1 wurde nach DIN 18130 bei konstantem Druckgefälle im Proctortopf bestimmt und betrug 5,0\*10<sup>-6</sup> m/s. Beim Einstampfen des Bodens mit Proctorenergie bei einem Wassergehalt von w = 2,0 % wurde eine maximale Dichte von  $\rho$ =2,124 g/cm<sup>3</sup> erreicht. Bei der Durchführung des Versuchs hat sich gezeigt, daß bereits bei einem i = 0,33 massiver Bodendurchgang feststellbar ist und bei weiterer Steigerung des hydraulischen Gefälles eine Durchlässigkeitsbestimmung des Bodens nicht mehr möglich ist. Die Bodenstruktur hatte sich aufgrund der Ausspülungen so stark verändert, daß bei weiteren Messungen die höhere Durchlässigkeit des ausgespülten Grobkorngerüsts gemessen worden war. Dies verdeutlicht die ausgesprochene Neigung des Bodens zu hoher Einzelkornbewegung.

Eine Abschätzung des kritischen hydraulischen Gefälles i<sub>S,krit</sub> nach Busch/Luckner (1993) für suffosionsgefährdete Erdstoffe mit unstetiger Kornverteilung und einer gegen die

Schwerkraft gerichteten Durchströmung ergibt den Wert  $i_{S,krit} = 0,22$ . Dies bestätigt größenordnungsmäßig den Wert i = 0,33, ab dem bei der Bestimmung der Durchlässigkeit massive Feinteilchenausspülungen festgestellt worden waren. Für weitere Untersuchungen und Berechnungen wird der oben aufgeführte Wert für die Durchlässigkeit von  $k_{10}=5,0*10^{-6}$  m/s verwendet.

Für eine maximal zulässige wirksame Öffnungsweite ergäbe sich beim Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit nach DVWK (1992) ein  $O_{90,w,zul} \leq 2,0$  mm. Die Ursache für den sehr hohen und damit unrealistischen Wert ist die große Ungleichförmigkeit in der Kornverteilung von U = 410. Da bei dieser wirksamen Öffnungsweite mit umfangreichen Bodendurchgang durch den Filter zu rechnen wäre und als Folge davon ausgeprägte Erosionserscheinungen auftreten würden, empfiehlt es sich in diesem Fall die Kornverteilung im Bereich der Ausfallkörnung in einen grobkörnigen und einen feinkörnigen Teil zu trennen. Die Dimensionierung der mechanischen Filterwirksamkeit ist dann für den feinkörnigeren Teil durchzuführen. Da es sich bei der Füllung des Grobkorngerüsts um den Schluff handelt, ergeben sich für die wirksamen Öffnungsweiten die selben Anforderungen wie beim Schluff (vgl. Kapitel 4.2.2) von O<sub>90,wzal</sub>  $\leq 0,053$  mm.

Das Merkblatt DVWK (1992) erwähnt in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der Trennung der Körnungslinien in einen feinkörnigen und grobkörnigen Teil nicht, sondern schreibt für diese Böden Prüfungen der Suffosionsicherheit im Labor vor. Massive Suffosionserscheinungen beim Versuch zur Bestimmung der Durchlässigkeit bei kleinen hydraulischen Gefällen verdeutlichen die Notwendigkeit labormäßiger Untersuchungen, um die Filterwirksamkeit von unterschiedlichen Geotextilien und unter Umständen anderer Konstruktionen beurteilen zu können. Die Bemessung der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit nach den Filterregeln dieses Merkblattes können in diesen Fällen nur zur Voreinschätzung dienen.

Die Kornverteilungen zweier weiterer Versuchsböden, der Testböden A und B, mit Ausfallkörnungen sind in Anlage 2 Blatt 3 und 4 dargestellt. Im Vergleich zu dem oben beschriebenen gemischtkörnigen Boden 1 ist die Ausfallkörnung bei diesen Testböden extremer ausgebildet. Die Durchlässigkeit des Testbodens A wurde im Proctortopf bei kleinem hydraulischen Gefälle (i = 0,1) bestimmt und betrug k =  $5,8*10^{-6}$  m/s. Für Testbodenboden B konnte keine Bestimmung der Durchlässigkeit erfolgen, da im Versuch bereits beim ersten Kontakt des Bodens mit Wasser ein massives Austreten des Feinmaterials aus dem Grobkorngerüst zu beobachten war und deshalb lediglich die Durchlässigkeit des Grobkorngerüsts gemessen werden kann. Die Auswahl dieser Testböden erfolgte nicht im Hinblick auf die Repräsentativität für die Baupraxis, sondern vielmehr um die unterschiedliche Wirkungsweise der verschiedenen Geotextilien in den entwickelten Versuchseinrichtung (hier modifizierter GR-Test) zu prüfen. Hintergrund für die labormäßige Zusammenstellung der Fraktionen für die Testböden A und B sind die in Busch/Luckner (1993) zusammengestellten Kriterien für das Auftreten von Suffosion. Die von Busch/Luckner zusammengefaßten Betrachtungsweisen zur Suffosion werden folgend kurz zusammengefaßt:

Im allgemeinen werden drei Erscheinungsformen der Suffosion unterschieden: innere Suffosion, äußere Suffosion und Kontaktsuffosion. Der Nachweis der Suffosionssicherheit setzt sich im allgemeinen aus zwei Kriterien zusammen. Zum einen ist zunächst das geometrische Suffosionskriterium nachzuweisen. Damit wird überprüft, ob aufgrund der Porengeometrie des Erdstoffes Suffosion überhaupt möglich ist. Wenn dies zutrifft ist in einem weiteren Schritt das hydraulische Suffosionskriterium zu überprüfen. Dies beinhaltet den Nachweis, ob die vorhandene hydraulische Transportkraft ausreicht, Suffosion zu bewirken. Die folgenden Nachweise sind nur für nichtbindige Böden mit  $d_{10} > 0,002$  mm gültig.

Der Nachweis für die geometrische Suffosionssicherheit  $\eta_{s,G}$  wird nach Ziems (1968) mit Hilfe folgender Bedingung geführt:

| η <sub><i>S</i>,<i>G</i> =</sub> | $=\frac{d_{\min}}{F_{S}\cdot d_{K}}\geq 1,5$         |              |                               | (10)  |
|----------------------------------|--|--------------|-------------------------------|---|
| mit                              | $d_{\min} = d_{0\%}$                                 | Korn<br>Korn | durchm<br>durchm              | esser bei 0% Massenanteil (minimaler<br>esser)  |
|                                  | $d_K = 0,455 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}$ | maßg         | gebende                       | r Korndurchmesser bei einer Suffosion   |
|                                  |  | mit          | U:<br>e:<br>d <sub>17</sub> : | Ungleichförmigkeit<br>Porenzahl<br>Korngröße bei 17 % Massenanteil                    |
|                                  | $F_S = \frac{d}{d_{km}}$                             | Durc         | hgangsf                       | aktor (11)  |
|                                  |  | mit          | d:<br>d <sub>km</sub> :       | Durchmesser des passierenden<br>Erdstoffteilchens<br>relatives Minimum des Porenkanal |

durchmessers; bestimmbar nach Ziems (1969) oder Patrasev Dieser Durchgangsfaktor  $F_s$  berücksichtigt die Tatsache, daß ein Teilchen, um eine Porenengstelle passieren zu können, um einen bestimmten Faktor kleiner sein muß als diese Porenengstelle. Dieser Durchgangsfaktor ist abhängig von mehreren Faktoren wie z.B. dem Brückenbildungsfaktor, der Größe der transportierten Teilchen, Adhäsion zwischen den transportierten Teilchen, der Dicke der gebundenen Wasserhüllen und der Abweichung der transportierten Teilchen von der Kugelgestalt.

Für die Berechnung des größten suffosionsgefährdete Korns  $d_s$  kann nach Ziems der Durchgangsfaktor  $F_s = 0,6$  gewählt werden. Daraus ergibt sich das größte Suffosionsgefährdete Korn zu:

$$d_{S} = F_{S} \cdot d_{K} = 0,27 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}$$
(12)

Es läßt sich zeigen, daß der Nachweis (10) in Kombination mit (12) erfüllt werden kann, wenn der Boden eine der nachfolgende Bedingungen erfüllt:

- U ≈ 1

- Kornverteilungen die im halblogarithmischen Maßstab als Gerade approximierbar sind und

U < 10 unabhängig vom Betrag der Lagerungsdichte

oder

U

$$> 10 \text{ mit } I_{\rm D} < 0.6$$

mit  $I_D = \frac{(e_{\max}-e_n)}{(e_{\max}-e_{\min})}$  Lagerungsdichte mit  $e_n$ : vorgegebene Lagerung  $e_{\max}$ : dichteste Lagerung  $e_{\min}$ : lockerste Lagerung

- für stetige Korngrößenverteilungen mit U < 8 (unabhängig von der Lagerungsdichte)

- für ungleichförmige Erdstoffe mit einer Kornverteilung, die der Form einer Fuller -Kurve mit der Gleichung y = 100 %  $(d_i/d_{max})^{\alpha}$  entspricht mit 0,4 <  $\alpha$  < 0,5. (entspricht der angestrebten Kornverteilungslinie der Zuschlagsstoffe bei der Betonherstellung)

Lubockov (1965) schließt aufgrund seiner Untersuchungen auf Suffosionssicherheit bei Erdstoffen, mit  $I_D = 0,3$  bis 0,6 und stetig gekrümmten Korngrößenverteilungen, wenn diese vollständig im gekennzeichneten Bereich des Diagramms 5 liegen. Hierbei wird die bezogene Kornverteilungslinie eingetragen, die nach der Formel  $d_i/d_{max}$  gebildet wird. Dabei ist  $d_{max}$ das Größtkorn und  $d_i$  die mittlere Korngröße einer bestimmten Kornfraktion.



and the second s

Diagramm 5: Grenzkornverteilungslinien für suffosionssichere nichtbindige Erdstoffe nach Lubockov (1965)

Liegen unstetige Kornverteilungskurven mit Ausfallkörnungen, starken Krümmungen oder Knicken vor, kann der Nachweis der Suffosionssicherheit graphisch geführt werden. Hierfür wird die bezogene Kornverteilungslinie des Bodens in das Diagramm 5 eingetragen. Daraus ergibt sich grafisch bestimmt der Durchmesser d<sub>s</sub> des größten suffosionsgefährdeten Korns und der zugehörige Massenprozentsatz. Führt man dies für den Testboden A durch, ergibt sich für d<sub>s</sub> = 0,208 mm und ein zugehöriger Massenprozentsatz an Feinmaterial das aus dem Grobkorngerüst ausgetragen werden kann von 25 %. Eine diesbezügliche Auswertung für die Testböden B und dem gemischtkörnigen Boden 1 ist nicht möglich, da hierbei die Anwendungsgrenzen des Diagramms 5 überschritten werden.

Zusammenfassend sind die bodenphysikalischen Kennwerte der im Rahmen dieses FE-Vorhabens untersuchten gemischtkörnigen Böden in Tabelle 4 dargestellt. Die beiden Testböden A und B unterscheiden sich im wesentlichen durch die gewählte Breite Ausfallkörnungen. Die Korngrößen der Fraktionen, die das Grobkorngerüst bilden, wurden unterschiedlich groß gewählt. Die grobkornfüllende feine Kornfraktion besteht bei beiden Testböden aus dem Schluff und weist einen Massenanteil von 25 % auf.

|                               | Testboden A    |                   | Testb          | oden B                 | Gemischtkörniger<br>Boden 1   |                                     |
|-------------------------------|----------------|-------------------|----------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| U                             | 85,7           |                   | 28             | 285,7                  |                               | 10                                  |
| Fehlkornbereich<br>[mm]       | 0,06 < d < 0,4 |                   | 0,06 < d < 1,0 |                        | 0,1 < d < 0,25                |                                     |
| k <sub>Proctotopf</sub> [m/s] | 5,8*           | *10 <sup>-6</sup> | n. b.          |                        | 5,5 <b>*</b> 10 <sup>-6</sup> |                                     |
| $\rho_{s} [g/cm^{3}]$         | 2,676          |                   | <b>n</b> . b.  |                        | 2,703                         |                                     |
| w [%]                         | 2              | %                 | 2 %            |                        | 2 %                           |                                     |
|                               | Skelettfüllung | Grobkomgerüst     | Skelettfüllung | Grobkomgerüst          | Skelettfüllung                | Grobkomgerüst                       |
| Bodenart                      | Schluff        | Grobsand          | Schluff        | Fein-bis<br>Mittelkies | Schluff                       | Grobsand,<br>Fein-bis<br>Mittelkies |
| U                             | 14,6           | 2,1               | 14,6           | 2,4                    | 14,6                          | 6,7                                 |
| Massenanteil<br>[%]           | 25             | 75                | 25             | 75                     | 20                            | 80                                  |
| $A_{50} = d_{50}/D_{50}$      | 46,7           |                   | 140            |                        | 266,7                         |                                     |

Tabelle 4:Übersicht der Kennwerte der Testböden A und B und dem gemischtkörnigen Boden 1

Die in der Tabelle angegebenen Abstände  $A_{50}$  der Korndurchmesser d bzw. D bei 50% Massenanteil der Kornverteilungen der Skelettfüllung bzw. des Grobkorngerüsts sind zu groß, als daß eine Filterwirksamkeit zwischen diesen Kornverteilungen auftreten könnte. Dies wurde mit dem Diagramm 1 nach Ziems überprüft. Die Abstände liegen außerhalb des zulässigen Bereichs. Für keinen der drei oben beschriebenen Böden kann die geometrische Suffosionsicherheit nach (10) nachgewiesen werden.

#### 4.3 Auswahl der zu untersuchenden Geotextilien

Geokunststoffe sind allgemein als synthetische Flächengebilde definiert, die grob in eine wasserdurchlässige und eine wasserundurchlässige Gruppe eingeteilt werden können. Als Beispiele können für die wasserdurchlässige Gruppe die Geotextilien und Geogitter genannt werden und für die wasserundurchlässige Gruppe die Kunststoffdichtungsbahnen. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens werden vornehmlich die Geotextilien berücksichtigt. Diese können eingesetzt werden zum Filtern, Dränen, Trennen von Bodenschichten, Bewehren, Verpacken und Schützen. Es können von einem Geotextil zugleich mehrere Funktionen erfüllt werden. Dieses FE-Vorhaben behandelt speziell die Filterwirksamkeit der Geotextilien. Für den Anwendungsfall Filtern werden derzeit im wesentlichen in der Praxis drei

unterschiedliche Geotextiltypen verwendet. Es handelt sich dabei um die folgend beschriebenen Vliesstoffe, Gewebe und Verbundstoffe.

Beim Vliesstoff handelt es sich um ein mehr oder weniger flexibles Flächengebilde, das aus flächenhaft aufeinander abgelegten ungeordneten Spinnfasern (Stapelfasern mit 3 - 5 cm Länge) oder endlosen Fasern (Filamenten) besteht. Die Verfestigung der einzelnen Fasern kann mechanisch durch Vernadelung oder thermisch durch Verschmelzung erfolgen. Bei mechanisch verfestigten Geotextilien liegen flexible und verschiebbare Faserkreuzungspunkte vor. Thermisch verfestigte Geotextilien zeichnen sich durch vergleichsweise starre Faserkreuzungspunkte aus. Aus Abbildung 7 ist zu erkennen, daß beim mechanisch verfestigten eine ausgeprägterer Porenstruktur vorliegt als beim thermisch verfestigten Geotextil. Beim thermisch verfestigten Geotextil liegt eine vergleichsweise dichte und glatte Oberflächenstruktur vor. Im Deponiebau sind Vliesstoffe die am häufigsten für Filterzwecke eingesetzten Geotextilien.



Abbildung 7: Unterschiedliche Oberflächenstruktur bei mechanisch (links) und thermisch (rechts) verfestigten Geotextilien. Beim thermisch verfestigtem Geotextil sind verschmolzenen Faserkreuzungspunkte zu erkennen. Beide Geotextilien haben die gleiche wirksame Öffnungsweite.

Gewebe werden aus zwei sich kreuzenden Fäden zweier Fadensysteme (Kette und Schuß) hergestellt. Die Fäden, auch Garne genannt, unterscheiden sich in der Art, wie z.B. Spinnfasergarne, Multifilamentgarne und Folienbändchen. Die Anzahl der Fäden pro Längeneinheit kann variiren. Es existieren unterschiedliche Verfahren der Verwebung, wie z.B. Leinwandbindung, Panamabindung und Köperbindung

Verbundstoffe sind mehrschichtige (mindestens zwei Schichten), flächenhaft oder punktuell miteinander verbundene Geotextilien. Die einzelnen Komponenten zeichnen sich in der Regel durch eine unterschiedliche Struktur aus und können aus Geweben oder Vliesstoffen bestehen. Im Deponiebau werden Verbundstoffe häufig in Form von Geodränmatten eingesetzt. Bei den zumeist dreischichtigen Verbundstoffen übernimmt eine Schicht die Filteraufgabe, die mittlere ist für den Wasserabtransport in der Ebene (Sickerschicht) verantwortlich während die dritte Schicht eine trennende und schützende Funktion übernimmt.

Die vielfältigen Geotextiltypen mit ihren unterschiedlichen Rohstoffen und Herstellungsverfahren werden durch verschiedene physikalische Kennwerte beschrieben. Die genormten Verfahren und die Bedeutung der Kennwerte, die im Hinblick auf die hydraulischen Eigenschaften und damit für die Filterwirksamkeit von Bedeutung sind, werden im folgenden kurz zusammengefaßt.

Der für den Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit entscheidende Parameter ist die wirksame Öffnungsweite  $O_{99,w}$  in [mm] des Geotextils. Bei der experimentellen Bestimmung übernimmt das Geotextil die Funktion des Siebes für einen Einheitsprüfboden. Die Siebung erfolgt unter Wasserzufuhr. Nach einem definierten Siebvorgang wird der Bodendurchgang ausgewertet. Mit  $O_{90,w}$  wird der Korndurchmesser X in mm bei 90 % Massenanteil der Korngrößenverteilung bezeichnet und bedeutet, daß 90 % der Poren des Geotextils kleiner sind als der Korndurchmesser X des Bodendurchgangs. Genormt ist der Versuch in E DIN EN ISO 12956 (momentan Entwurf und als Ersatz vorgesehen für E DIN 60 500 Teil 6).

Für den Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit ist die vertikale Durchlässigkeit k, in [m/s] ein maßgebender Parameter. Mit dem in E DIN 60 500 Teil 4 genormten Prüfverfahren wird die Durchlässigkeit senkrecht zur Ebene des Geotextils bestimmt. Die Prüfung wird in der Regel an mehrlagigen Proben bei einem konstanten hydraulischen Höhenunterschied durchgeführt. Je nach Versuchsaufbau kann die Versuchsdurchführung normalspannungs- und/oder dickenabhängig erfolgen. In der Regel werden die Laststufen 2, 20 und 200 kPa verwendet, sofern keine anderen anwendungsbezogenen Laststufen untersucht werden sollen. Für die Prüfung soll entlüftetes Wasser verwendet werden. Die Dicke d in [mm] eines einlagigen Geotextils wird nach DIN EN 964, Teil 1/ ISO 9863 bestimmt. Unter einer Prüfstempelfläche von 25 cm<sup>2</sup> wird die Dicke eines Geotextil unter einem Prüfdruck von 2, 20 und 200 kPa ermittelt. Wie bei der Bestimmung der Flächenmasse  $m_{GT}$  in [g/m<sup>2</sup>] müssen mindestens 10 Meßproben untersucht werden. Die Probe muß bei der Bestimmung der Flächenmasse nach DIN EN 965 / ISO 9864 mindestens 100 cm<sup>2</sup> groß sein.

Der Faserrohstoff kann auf das Durchströmungsverhalten einen wesentlichen Einfluß haben. Die in der Mehrzahl verwendeten Faserrohstoffe sind neben anderen Polyester (PES) und Polypropylen (PP). Die Rohdichten der beiden Kunststoffe sind 1,38 g/cm<sup>3</sup> für PES und 0,90 g/cm<sup>3</sup> für PP. Das unterschiedliche Durchströmungsverhalten der beiden Kunststoffe ist durch die unterschiedlichen Randwinkel mit Wasser bei den Polymeren PP ( $\vartheta = 107^{\circ}$ ) und PES ( $\vartheta = 76^{\circ}$ ) begründet. Setzt man diese Winkel in die Formel für die Berechnung der kapillaren Steighöhen (Kuchling, 1988)

$$h = \frac{2 \bullet \delta \bullet \cos 9}{\rho \bullet g \bullet r} \tag{13}$$

mit:

h = kapillarer Aufstieg [m]  $\delta$  = Oberflächenspannung von Wasser für 20°C = 0,072 N/m  $\vartheta$  = Randwinkel [°]  $\rho$  = Dichte des Wassers für 20°C = 9,98\*10<sup>2</sup> kg/m<sup>3</sup> g = Fallbeschleunigung [9,81 m/s<sup>2</sup>] r = Radius der Kapillare [m]

ein, so erhält man für PP einen negativen und für PES einen positiven Wert. Das bedeutet zum Bewässern des Geotextils aus PP muß eine Wassersäule aufgebracht werden oder anders formuliert, aufgrund der hydrophoben Eigenschaften des Geotextils aus PP schwimmt dieses und kann mehrere cm unter Wasser gehalten werden, ohne daß es vollständig von Wasser durchdrungen ist. Das Geotextil aus PES, mit hydrophilen Eigenschaften, verhält sich genau entgegengesetzt. Die unterschiedliche Wasserbenetzungsfähigkeit von Geotextilien aufgrund des unterschiedlichen Rohstoffes wird durch die herstellungsbedingte Verwendung von Avivagen beeinflußt, die ihrerseits wiederum hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften aufweisen können.

Zur überschlägigen Berechnung des Porenanteils  $n_{GT}$  von Geotextilien kann die Formel wie sie üblicherweise für die Berechnung des Porenanteils von Böden nach DIN 53855, Teil 1 verwendet wird, herangezogen werden:

$$n_{GT} = 1 - \frac{\rho_{GT}}{\rho_F} = 1 - \frac{\left(\frac{m_{GT}}{d}\right)}{\rho_F} \times 10^{-6}$$
(14)

mit:

| n <sub>or</sub> | = Porenanteil des Geotextils [-]                     |
|-----------------|--|
| ρ               | = Rohdichte des Faserrohstoffes [g/cm <sup>3</sup> ] |
| ρστ             | = Dichte des Geotextils [g/cm <sup>3</sup> ]         |
| m <sub>er</sub> | = Flächenmasse des Geotextils [g/m <sup>2</sup> ]    |
| d               | = Dicke des Geotextils [m]                           |

Die Auswahl der im Rahmen dieses FE-Vorhabens untersuchten Geotextilien erfolgte unter dem Gesichtspunkt eine möglichst große Produktpalette der für Filterzwecke insbesondere im Deponiebau eingesetzten Geotextilien zu untersuchen. Bezüglich der geotextilen Filterschicht zwischen Rekultivierungsschicht und Sickerschicht bestehen keine besonderen Anforderungen an den Faserrohstoffe, da aufgrund von Umwelteinflüßen keine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit dieser Filterschicht bekannt ist. Aus Kostengründen werden daher in der Regel in diesem Anwendungsfall Geotextilien aus PP eingesetzt, weshalb auch keine Produkte aus PE in die Versuchsreihen aufgenommen wurden. PES wurde aufgrund der vorgenannten hydrophoben Eigenschaften in das Versuchsprogramm aufgenommen.

Da eine große Beeinflussung der Versuchsergebnisse bei den Versuchsreihen unter anderem durch die Herstellungsart, den Faserrohstoff und Avivagen zu erwarten ist, wurden bei der Auswahl der Geotextilien in der Regel zwei Produkte einer Produktfamilie eines Herstellers berücksichtigt. Vom selben Hersteller wurden zwei Geotextilien ausgewählt, die sich zwar in ihrer Dicke, wirksamen Öffnungsweite, vertikalen Durchlässigkeit und Flächenmasse unterscheiden, nicht aber im Herstellungsverfahren, dem Faserrohstoff und der Avivage. Damit wird das Ziel verfolgt, zu überprüfen, ob und inwieweit die unterschiedlichen Kennwerte der Geotextilien einen Hinweis auf das unterschiedliche Filterverhalten im Versuch geben können.

Die Kennwerte der in den einzelnen Versuchsreihen verwendeten Geotextilien sind zusammenfassend in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt. Um nicht auf die möglicherweise streuenden Prüfergebnisse der einzelnen Geotextilhersteller bei der Bestimmung der Kennwerte angewiesen zu sein, wurden diese im Labor nach entsprechender Norm eigens bestimmt. Sie sind nachfolgend angegeben.

| Geotextil              | <b>G</b> 1                | G 2                       | G 3                       | <b>G</b> 4               | G 5                       | <b>G</b> 6                | <b>G</b> 7                | <b>G</b> 8                |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Faserrohstoff          | PP                        | PP                        | PP                        | PP                       | PP                        | PP                        | PES                       | PES                       |
| Fasertyp               | Endlosf.                  | Endlosf.                  | Endlosf.                  | Endlosf.                 | Stapelf.                  | Stapelf.                  | Stapelf.                  | Stapelf.                  |
| Verfestigung           | mechan.                   | mechan.                   | therm.                    | therm.                   | mechan.                   | mechan.                   | mechan.                   | mechan.                   |
| Dicke [mm]             | 1,01                      | 3,45                      | 0,32                      | 0,99                     | 3,27                      | 3,29                      | 1,29                      | 2,91                      |
| Flächenmasse<br>[g/m²] | 105,81                    | 426,59                    | 67,91                     | 361,35                   | 207,74                    | 340,87                    | 138,34                    | 363,27                    |
| k, bei 2kN/m²<br>[m/s] | 3,05*<br>10 <sup>-3</sup> | 2,09*<br>10 <sup>-3</sup> | 2,79*<br>10 <sup>-3</sup> | 2,9*<br>10 <sup>-4</sup> | 7,68*<br>10 <sup>-3</sup> | 1,69*<br>10 <sup>-3</sup> | 1,59*<br>10 <sup>-3</sup> | 1,37*<br>10 <sup>-3</sup> |
| O <sub>90,w</sub> [mm] | 0,16                      | 0,08                      | 0,29                      | 0,07                     | 0,15                      | 0,07                      | 0,14                      | 0,07                      |
| Porenanteil<br>[-]     | 0,89                      | 0,86                      | 0,77                      | 0,6                      | 0,93                      | 0,89                      | 0,92                      | 0,91                      |

Tabelle 5:Übersicht über die physikalischen Kennwerte der in den einzelnen Versuchs-<br/>reihen des Kapitel 6 verwendeten Geotextilien

# 4.4 Nachweise der Filterwirksamkeit der Geotextilien mit den Versuchsböden nach DVWK

In diesem Kapitel sind die Nachweise der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit nach DVWK (1992) der Geotextilien mit den verschiedenen im Forschungsvorhaben verwendeten Versuchsböden aufgeführt. Bei diesen "Nachweisen" handelt es sich um Abschätzungen für das zu erwartende Filterverhalten, da laut Merkblatt für die untersuchten Versuchsböden ohnehin zusätzlich labortechnische Untersuchungen vorgeschrieben sind. Es handelt sich somit um eine orientierende und vergleichende Vorstudie.

|            | mechan. Filterwirksamkeit                               |                                  |       | hydraul. Filterwirksamkeit   |       |  |         |         |  |
|------------|---|----------------------------------|-------|--|-------|--|---------|---------|--|
|            | O <sub>90,w,gew</sub> =(0,                              | 8 bis 1,0) O <sub>90,w,zai</sub> |       | $\eta^* k_v / k_{Boden} \ge 1$   |       |  |         |         |  |
|            | mit O <sub>90,w</sub>                                   | <sub>بعن</sub> = 0,053 mm        |       |  |       |  |         |         |  |
|            | gemischtkörniger Boden 1,<br>Testboden A und B, Schluff |                                  |       | gem. Boden 1<br>$k_{Boden} = 5*10^{-6} \text{ m/s}$ Testboden A<br>$k_{Boden} = 6*10^{-6} \text{ m/s}$ |       | Schluff<br>$k_{Boden} = 1*10^{-7} \text{ m/s}$ |         |         |  |
| <b>G</b> 1 | 3,01  | Diskrepanz                       | 0,40  | Diskrepanz   | 0,2   | Diskrepanz                                     | nicht r | nöglich |  |
| G 2        | 1,51  | Diskrepanz                       | 37,62 | i.O.   | 31,6  | i.O.   | 2745    | i.O.    |  |
| G 3        | 5,47  | Diskrepanz                       | 0,39  | Diskrepanz   | 0,23  | Diskrepanz                                     | nicht n | nöglich |  |
| G 4        | 1,32  | Diskrepanz                       | 0,58  | Diskrepanz   | 0,34  | Diskrepanz                                     | nicht r | nöglich |  |
| G 5        | 2,83  | Diskrepanz                       | 24,58 | i.O.   | 20,48 | i.O.   | 1229    | i.O.    |  |
| G 6        | 1,32  | Diskrepanz                       | 37,18 | i.O.   | 31    | i.O.   | 1859    | i.O.    |  |
| G 7        | 2,64  | Diskrepanz                       | 0,45  | Diskrepanz   | 0,21  | Diskrepanz                                     | nicht n | nöglich |  |
| G 8        | 1,32  | Diskrepanz                       | 41,1  | i.O.   | 34,6  | i.O.   | 2055    | i.O.    |  |

Tabelle 6:Nachweise der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit der<br/>Geotextilien mit dem gemischtkörnigen Boden 1, Testboden A und<br/>Testboden B und Schluff ("Diskrepanz": Der Nachweis ist nicht erfüllt).

Die mechanische Filterwirksamkeit kann für keines der Geotextilien nachgewiesen werden. Die wirksamen Öffnungsweiten O<sub>90.w</sub> der Geotextilien, die eine breite Palette der marktüblichen Filtervliese abdecken, sind zu groß. Bei den Versuchen ist deshalb Bodendurchgang zu erwarten. Die hydraulische Filterwirksamkeit kann nur für die Geotextilien G2, G5, G6 und G8 nachgewiesen werden. Es handelt sich hierbei um Produkte mit einer Dicke von größer als 2 mm. Die entsprechenden Abminderungsfaktoren  $\eta_v$  können dem Diagramm 2 (siehe Seite 17 linkes Diagramm) entnommen werden. Vor diesem Hintergrund wird die Dickenanforderung an geotextile Filter sehr gut deutlich. Die Nachweise der hydraulischen Filterwirksamkeit der Geotextilien G1, G3, G4 und G7 können nicht erbracht werden, da deren Dicken geringer als 2 mm sind und dadurch die Abminderungsfaktoren  $\eta_{G}$  dem dafür entsprechendem Diagramm 2 (siehe Seite 17 rechtes Diagramm) zu entnehmen sind. Diese Abminderungsfaktoren  $\eta_{G}$  sind kleiner als die Abminderungsfaktoren für Geotextilien mit Dikken größer als 2 mm. Der Testboden B läßt sich hinsichtlicher der hydraulischen Filterwirksamkeit nicht mit diesem Schema bewerten, da in diesem Fall keine Bestimmung der Durchlässigkeit des Testbodens B möglich war (vergl. hierzu Kap. 4.2.3). Für die Geotextilien G1, G3, G4 und G7 ist in Kombination mit dem Schluff der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit aufgrund der Anwendungsrenzen bezüglich des Durchmessers d<sub>10</sub> des entsprechenden Diagramms nicht möglich. Beim Schluff beträgt der Korndurchmesser bei 10% Massenanteil 0,002 mm, wohingegen im Diagramm ein Nachweis erst ab einem Korndurchmesser von 0,01 mm durchführbar ist.

Im Rahmen dieses FE-Vorhabens wurden darüber hinaus Suspensionsversuche mit drei Feststoffarten und Feststoffgehalten durchgeführt. Die Kornverteilungen der verwendeten Feinteilfraktionen sind in Anlage 3 Blatt 3 und 4 enthalten. In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse der "Nachweiskriterien" für die mechanische Filterwirksamkeit der einzelnen Geotextilien in Kombination mit den jeweiligen Suspensionen zusammengestellt. Für die Suspension mit Kaolin als Feststoffteilchen ist ein Nachweis nicht möglich, da für diese Korngrößen keine Filterregel dieses Merkblattes greift. Eine Vorabschätzung der hydraulischen Filterwirksamkeit nach (4) ist bei Suspensionversuchen nicht möglich, da der Durchlässigkeitsbeiwert einer Suspension nicht bestimmbar ist. Im Vordergrund steht bei Suspensionsuntersuchungen zunächst nur das Rückhaltervermögen des geotextilen Filters.

|            |                                   | Nachw             | eis: O <sub>90,w</sub>                | , <sub>gewählt</sub> = 0,8 bis | 1,0 O <sub>90,w,zul</sub> |
|------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
|            | Normen<br>O <sub>90.w.zul</sub> = | sand<br>= 0,17 mm | fraktionic<br>O <sub>90.w.zul</sub> = | erter Schluff<br>0,045 mm      | Kaolin                    |
| <b>G</b> 1 | 0,9                               | i.O.              | 3,6                                   | Diskrepanz                     | Nachweis nach DVWK        |
| <b>G 2</b> | 0,5                               | Diskrepanz        | 1,8                                   | Diskrepanz                     | nicht möglich             |
| <b>G</b> 3 | 1,7                               | Diskrepanz        | 6,4                                   | Diskrepanz                     |                           |
| <b>G</b> 4 | 0,4                               | Diskrepanz        | 1,6                                   | Diskrepanz                     |                           |
| <b>G</b> 5 | 0,9                               | i.O.              | 3,3                                   | Diskrepanz                     |                           |
| <b>G</b> 6 | 0,4                               | Diskrepanz        | 1,6                                   | Diskrepanz                     |                           |
| <b>G</b> 7 | 0,8                               | i.O.              | 3,1                                   | Diskrepanz                     |                           |
| <b>G 8</b> | 0,4                               | Diskrepanz        | 1,6                                   | Diskrepanz                     |                           |

Tabelle 7:Abschätzung der mechanischen Filterwirksamkeit für die verwendeten<br/>Geotextilien bei Suspensionsversuchen ("Diskrepanz": Der Nachweis ist<br/>nicht erfüllt).

#### 4.5 Auswerteformeln der Filterversuche

Für die Auswertung und damit für die Beurteilung der verschiedenen Filterversuche stehen im wesentlichen drei unabhängige Meßparameter zu Verfügung. Es handelt sich hierbei um die Wasserdruckmessung in der Probe durch Piezometer sowie die Bestimmung der Bodenund Wasserdurchgangsmengen pro Zeiteinheit. Die Kenntnis der Verteilung des Wasserdrucks über die Probenhöhe ist nur beim modifizierten Gradient Ratio Test (GR-Test) möglich. Die gravimetrische Bestimmung des durch den geotextilen Filter gespülten Die für die Beurteilung der Durchlässigkeitsentwicklung entscheidenden Meßparameter sind die Wasserdurchflußmengen Q. Dabei wird dem System die Grundgleichung der laminaren Wasserströmung im Boden nach dem Gesetz von Darcy zugrunde gelegt:

$$k = \frac{v}{i}$$
 Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy [m/s] (15)

mit

| $i = \frac{dh}{dl}$ | hydraulisches Gefälle [-]                                 | (16) |
|---------------------|---|------|
| dh                  | Druckhöhendifferenz                                       |      |
| dl                  | Fließstrecke als direkter Abstand                         |      |
| v [m/s]             | Filtergeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeit bezogen auf d | 1)   |

Die Fließgeschwindigkeit ist definiert mit:

| $v = \frac{Q}{A}$ |        | [m/s]   | (17) |
|-------------------|--------|---|------|
| mit               | A<br>Q | durchströmte Querschnittsfläche [m²]<br>gemessener Durchfluß pro Zeiteinheit [m³/s] |      |

#### Aus (15) und (17) folgt:

$$k = \frac{Q}{A^{*i}} \tag{18}$$

Der Einfluß der Temperatur wird entsprechend DIN 18130 berücksichtigt. Ausgehend von einer wassergesättigten Boden/Geotextilprobe wird die unterschiedliche Viskosität des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur in den Durchlässigkeitsbeiwert mit einbezogen. Als Bezugstemperatur wird 10° C gewählt. Der Beiwert  $\alpha_t$  für die Rückrechnung auf 10° C lautet:

$$\alpha_t = \frac{\eta_{10}}{\eta_t} = \frac{1,359}{(1,0+0,03337\cdot T+0,00022\cdot T^2)}$$
(19)

| mit | $\eta_{10}$ | Viskosität des Wassers bei 10° C [Ns/m <sup>2</sup> ]         |
|-----|-------------|---|
|     | $\eta_t$    | Viskosität des Wassers bei Meßtemperatur [Ns/m <sup>2</sup> ] |
|     | T           | Wassertemperatur [°C]   |

Die Gesamtformel für den temperaturberücksichtigten Durchlässigkeitsbeiwert ergibt sich zu:

$$k_{10} = \frac{Q \cdot dl}{A \cdot dh} \cdot \frac{1,359}{(1,0+0,0337 \cdot T+0,00022 \cdot T^2)}$$
 [m/s] (20)

Dieser Wert kann mit Hilfe einer massenmäßigen Bestimmung der Durchflußmenge Q pro Zeiteinheit und der Bestimmung der Temperatur des durchströmenden Wassers nach jeder Messung angegeben werden. Es handelt sich dabei um einen bodenphysikalischen Kennwert, der an bestimmte Voraussetzungen geknüpft ist. Die Bodenprobe muß bei der versuchstechnischen Bestimmung wassergesättigt sein, es müssen laminare Strömungsbedingungen vorliegen und die Bodenprobe muß möglichst homogen sein. Die für den Durchlässigkeitsbeiwert zugrundegelegte Darcy-Gleichung bezieht sich nur auf eine eindimensionale Strömung bei welcher der Gradient während der Meßdauer der Durchflußmenge konstant bleibt (stationäre Strömung).

Die Angabe eines hydraulischen Gradienten setzt die genaue Kenntnis der Ober- und Unterwasserstände voraus, was bei der offenen Versuchseinrichtung nicht gegeben ist, da aufgrund des fehlenden genau definierten Unterwasserspiegels die Wasserdruckhöhe dh für (16) nicht exakt angegeben werden kann. Um diesen wesentlichen Unterschied zwischen der offenen und geschlossenen Versuchseinrichtung zu kennzeichnen, wird bei der offenen Versuchseinrichtung die Wasserdruckhöhe mit dh' bezeichnet. Sie gibt die Höhendifferenz zwischen Unterkante Geotextil und dem konstanten Oberwasserspiegel in der Versuchszelle an. Konsequenterweise wird auch das hydraulische Gefälle mit

$$i' = \frac{dh'}{dl} \tag{21}$$

für die offene Versuchseinrichtung definiert und in (18) eingesetzt.

Im Rahmen dieses FE-Vorhabens soll mit der oben aufgeführten gesonderten Kennzeichnung des hydraulischen Gefälles bei der offenen Versuchseinreichtung darauf hingewiesen werden, daß hierbei ein grundlegend anderes strömungsmechanisches Verhalten vorliegt. Dies wird plausibel, wenn man die unterschiedlichen Druckverhältnisse (offene Versuchseinrichtung: atmosphären Druck; geschlossene Versuchseinrichtung: Wasserdruck entsprechend der Höhe des Auslaufs) an der Ausströmseite des Filters betrachtet. Welche Bodenund Geotextilparameter vor diesem Hintergrund maßgeblich sind und wie die Auswirkungen quantifizierbar in einem Durchlässigkeitsbeiwert k verarbeitet werden können, ist zunächst nicht Gegenstand dieses FE-Vorhabens. Ferner ist die Umrechnung der Durchflußmenge in einen dickenunabhängigen Kennwert, der sogenannten Permittivität  $\psi$  [1/s], möglich. Die Bestimmung der Permittivität des Gesamtsystems erfolgt insbesondere dann, wenn die Dicken der strömungswirksamen Schichten, die senkrecht zur Ebene durchflossen werden, unbekannt sind bzw. nicht exakt voneinander trennbar sind. Die Permittivität ist definiert mit:

$$\Psi = \frac{k_{10}}{d} = \frac{Q}{A \cdot dh} \cdot \frac{1,359}{(1,0+0,0337 \cdot T+0,00022 \cdot T^2)}$$
[1/s] (22)

Die Auswertung der Versuche mit dem modifizierten Pinhole-Test und dem Suspensionstest erfolgte mit Hilfe dieser Formel, da hierbei die Dicken der strömungswirksamen Schichten aufgrund des Versuchstyps nicht bestimmbar sind.

# 5. Entwicklung und Beschreibung der Versuchstechniken zur Untersuchung der Filterwirksamkeit von Geotextilien im Labor

# 5.1 Modifizierter LTF-Test

# 5.1.1 Versuchszelle

Der modifizierte Long Term Flow-Test (LTF-Test) ist eine offene Versuchseinrichtung, mit dem dafür charakteristischen freien Wasseraustritt unter dem Geotextil. Die Versuchszelle ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt.



Abbildung 8:Schematische Darstellung der Versuchszelle für den modifizierten LongTerm Flow-Test (LTF-Test); siehe auch Abbildungen Anlage 3 Blatt 1

Sie besteht aus zwei Plexiglaszylindern (Innendurchmesser 12,1 cm), die über Gewindestangen wasserdicht mit einer Grundplatte verbunden werden können. In der kreisförmigen Aussparung in der Grundplatte befindet sich ein Stützkreuz auf das ein Maschendrahtgitter (Öffnungsweite 1,5 mm) aufgelegt wird. Grundsätzlich können zwei verschiedene Arten des Einbaus der zu untersuchenden Bodenprobe unterschieden werden. Einerseits kann bei ausreichender Standfestigkeit der zu untersuchenden Bodenprobe diese vorab in den Plexiglaszylinder eingebaut werden. Wenn andererseits nicht ausreichend standfeste Böden untersucht werden, erfolgt die Verdichtung dieser Versuchsböden auf dem Geotextil, nachdem dieses bereits in die Versuchseinrichtung eingebaut worden ist. Beide Vorgehensweisen simulieren den vom Boden abhängigen Einbauvorgang im praktischen Anwendungsfall, bei dem kohäsionsloses Bodenmaterial auf dem Geotextil verteilt und dann verdichtet wird, wohingegen bei bindigen Bodenarten bereits bestehende größere Bodenaggregate auf dem Geotextil zu liegen kommen.

Bei diesem Versuchsaufbau ist die Messung der Wasserdurchflußmenge Q und des Bodendurchgangs möglich. Zu jeder Durchflußmessung wird die vorhandene Wassertemperatur dokumentiert, um bei der Auswertung die Abhängigkeit der Viskosität des Wassers von der Temperaturen berücksichtigen zu können. Die Durchströmungsrichtung erfolgt von oben nach unten. Der Bodendurchgang wird mit einem Filterpapier aufgefangen. Um die durchgespülten Bodenmengen richtig zu erfassen, erfolgt die Gewichtsbestimmung des fabrikneuen und des benützten Filterpapiers im ofentrockenen Zustand. Bei einer Höhe der Bodenprobe von 5 cm ist bei diesen Versuchszellen entsprechend der maximal einstellbaren Druckhöhen von 80 cm ein maximales hydraulisches Gefälle von i'=16 möglich.

#### 5.1.2 Vorversuche

Anhand von Vorversuchen wurde die Eignung der Versuchstechnik überprüft. Da Einbaubedingungen und Versuchsablauf bei dieser Versuchstechnik variabel sind, sollten hiermit maßgebende Versuchsrandbedingungen herausgearbeitet werden, unter denen dann weitere Reihenversuche durchgeführt werden können. Weiterhin sollte erprobt werden, ob stark schwankende hydraulische Belastungen einen Einfluß auf die Durchlässigkeitsentwicklung des Boden/Geotextilsystems haben. Zielsetzung war zunächst eine Extrembelastung zu simulieren, wie sie aufgrund mehrerer Niederschlagsereignisse auftreten kann. Ferner sollte damit überprüft werden, ob sich aufgrund einer schlagartigen Veränderung der Größe der hydraulischen Belastung und den damit möglicherweise verbundenen Spülstoß ein Zeitraffereffekt in der Versuchsdurchführung erzielen läßt. Aufgrund der relativ schnellen Erhöhung der hydraulischen Belastung erhöht sich auch die Schleppkraft des durchströmenden Wassers und kann dadurch bereits im Korngerüst oder in der Grenzschicht zwischen Geotextil und Boden stabilisierte Feinteilchen bewegen.

In einem Versuchsprogramm wurden jeweils zwei gleiche Bodenproben unter identischen Randbedingungen bezüglich des Wassergehaltes und der Verdichtung in die Versuchszelle eingebaut. Ein Versuch dient als Vergleichsversuch und wurde bei einem gleichbleibenden hydraulischen Gradienten von i' = 16 durchströmt. Die hydraulische Belastung in der anderen Zelle mit einer möglichst identisch eingebauten Bodenprobe wurde dagegen in Intervallen verändert, beziehungsweise die Durchströmung so lange unterbrochen, bis auf der Probenoberfläche kein Wasserstand mehr feststellbar war. Die Erhöhung bzw. Verringerung des hydraulischen Gradienten erfolgte bei Versuchsanfang in kleineren Schritten (i'=0, 1,2, 2, 4, 8, 16), die dann gegen Versuchsende vergrößert wurden (i'=0, 8, 16).

Als Versuchsböden wurden der Schluff (vgl. Kap. 4.2.2) und der gemischtkörnige Boden 1 (vgl. Kap. 4.2.3) verwendet. Die Einbaubedingungen dieser Versuchsböden sind in Tabelle 8 enthalten. Das Wasser wird vor der Durchströmung nach dem in der DIN 18130 vorgeschlagenen Verfahren teilentlüftet und ist nicht entkalkt.

|                             | gemischtkörr      | niger Boden 1            | Sch                  | uff                   |  |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|--|
|                             | Zelle 1           | Zelle 2                  | Zelle 3              | Zelle 4               |  |
| w [%]                       |                   | 2                        | 6                    |                       |  |
| $\rho_d [g/cm^3]$           | 1,                | 73                       | 1,57                 |                       |  |
| $\rho_{s} [g/cm^{3}]$       | 2                 | ,7                       | 2,6                  | 8                     |  |
| k <sub>10</sub> [m/s]       | 5,0*              | <b>'10</b> <sup>-6</sup> | 5*10 <sup>-9</sup> - | 1*10 <sup>-7</sup>    |  |
| hydraulisches<br>Gefälle i' | konstant<br>i'=16 | variabel<br>i'=0,, 16    | konstant<br>i'=16    | variabel<br>i'=0,, 16 |  |

Tabelle 8: Versuchsprogramm der Vorversuch in der offenen Versuchseinrichtung

Der Schluff hat unter diesen Einbaubedingungen (auf der trockenen Seite der Proctorkurve) eine größere Durchlässigkeit, als bei höheren Wassergehalten, da er hierbei eine ausgeprägte Krümelstruktur aufweist. Beide Tatsachen bedingen sich gegenseitig und begünstigen eine Feinteilchenmobilisierung. Der Schluff wurde im Plexiglaszylinder verdichtet, der dann auf das Geotextil gesetzt wurde. Im Gegensatz dazu wurde der gemischtkörnige Boden in die Versuchszelle eingefüllt, nachdem das Geotextil bereits eingelegt war. In alle vier Zellen wurde das gleiche Geotextil eingebaut. Es handelt sich um ein mechanisch verfestigten Vliesstoff aus Polypropylen, mit folgenden Kennwerten:

d = 2,11 mm (Dicke mit einer Belastung von 2 kN/m<sup>2</sup>) m = 221,6 g/m<sup>2</sup>  $O_{90,w} = 0,14$  mm (Naßsiebung nach Verfahren Franzius Institut) k<sub>v</sub>=5\*10<sup>-3</sup> m/s ( bei 2 kN/m<sup>2</sup> Belastung)

Für beide Böden kann die mechanische Filterwirksamkeit aufgrund der zu großen wirksamen Öffnungsweite nach DVWK nicht nachgewiesen werden (vgl. hierzu Kapitel 4.4). Der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit nach DVWK kann für beide Böden erbracht werden.

## 5.1.3 Auswertung und Interpretation der Vorversuche

#### 5.1.3.1 Gemischtkörniger Boden 1

Die Wassersäule für die hydraulische Belastung von i' = 16 wurde innerhalb von 2,5 Stunden aufgebracht, dabei konnte sofort starker Bodendurchgang festgestellt werden. Der Durchlässigkeitsverlauf der Zelle 1 in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (siehe Diagramm 6) zeigt ein typisches Durchlässigkeitsverhalten. Zu Versuchsbeginn nimmt die Durchlässigkeit zu, nach Erreichen eines Maximums bei  $k_{10}=2*10^{-5}$  m/s fällt sie wieder stark ab. Nach ca. 50 Stunden wird die Abnahme der Durchlässigkeit geringer. Ebenso ist ein Bodendurchgang nach ca. 50 Stunden nicht mehr beobachtbar. Die Durchlässigkeit des Boden/Geotextilsystems nimmt um eine Zehnerpotenz ab (max  $k_{10}=2*10^{-5}$  m/s , min  $k_{10}=3*10^{-6}$ m/s ), wobei das Maximum nach ca. 20 h erreicht ist und das Minimum den Endwert des Versuchs nach ca. 910 h darstellt. Der zeitliche Zusammenhang zwischen dem Nachlassen des Bodendurchgangs und der immer geringer werdenden Abnahme der Durchlässigkeit weist darauf hin, daß nach ca. 50 h eine Bodenstruktur entstanden ist, die sich filtertechnisch im Gleichgewicht befindet. Die Feinteilchen haben sich mit der Zeit aufgrund der Durchströmung so angeordnet, daß sie sich gegeneinander abstützen (arching) und somit weitere Bodenteilchen am Passieren hindern. Die Durchlässigkeit des Gesamtsystems richtet sich nach den verbleibenden strömungswirksamen Porenkanälen, nachdem sich schrittweise eine neue Bodenstruktur aufgebaut hat.



Diagramm 6: Durchlässigkeitsverlauf der Zelle 1 und 2. Zusätzlich sind die von Fillibeck (1993) erzielten Ergebnisse im Diagramm enthalten

Vergleicht man den Verlauf der Durchlässigkeitsbeiwerte mit denen von Fillibeck (1993) erzielten Verläufen, dann ist zwischen diesen beiden ein Zusammenhang zu erkennen. Unter den ähnlichen labortechnischen Randbedingungen nahm die Durchlässigkeit desselben Bodens bei Fillibeck (1993) um einen Faktor von ca. 2,1 ab (max  $k_{10}=7,5*10^{-6}$  m/s , min  $k_{10}=3,5*10^{-6}$  m/s). Ein Vergleich der Extremwerte läßt erkennen, daß die Durchlässigkeiten am Ende etwa den selben Wert aufweisen, während der Maximalwert bei Fillibeck (1993) um ca. 2,6-fach geringer ist und sich erst nach ca. 100 h einstellt. Geht man davon aus, daß bei hoher Verdichtung, Vorhandensein einer Auflast und bei einer geringeren hydraulischen Belastung der Maximalwert der Durchlässigkeit vergleichsweise niedriger liegt, so erscheinen die gemessenen Werte plausibel.

Macht man die Einlagerung von Feinteilchen in den Filter (Clogging) für die Abnahme der Durchlässigkeit verantwortlich, so kann man feststellen, daß mit den hier gewählten Randbedingungen ein Gleichgewichtszustand zwischen mechanischer und hydraulischer Filterwirksamkeit erreicht worden ist. Der Boden und das Geotextil bilden in Kombination eine
filterstabile Schicht, obwohl für eine Feinteilchenbewegung förderlichere Randbedingungen (keine Auflast, geringe Verdichtung, höhere hydraulische Belastung) gewählt wurden.

Beim Verlauf der Durchlässigkeit in Zelle 2 in Abhängigkeit von der Zeit (siehe Diagramm 6) kann tendenziell ein ähnlicher Verlauf wie bei Zelle 1 festgestellt werden. Obwohl in Zelle 2 die hydraulische Belastung nach einer Einlaufphase schlagartig verändert wurde und die Durchströmung für kurze Zeitabschnitte unterbrochen wurde, stimmt der Verlauf größenordnungsmäßig mit dem Verlauf in Zelle 1 bei konstanter hydraulischer Belastung überein. Während des Versuchs kann beobachtet werden, daß jeweils unmittelbar nach einer Erhöhung der hydraulischen Belastung Bodendurchgang beobachtbar war, der nach relativ kurzer Zeit dann aussetzte. Aufgrund der Erhöhung der Druckhöhe tritt ein Spülstoß auf, der die bereits in der Bodenprobe und im Geotextil aufgebaute Filterschicht kurzfristig zerstört, was mit einer Ausspülung von Feinteilchen verbunden ist. Diese Filterschicht kann sich aber durch nachwandernde Feinteilchen, die sich knapp über oder im Geotextil gegeneinander abstützen sehr schnell wieder aufbauen, so daß keine weiteren Teilchen mehr ausgespült werden können. Eine Ausspülung von Feinteilchen kann nach ca. 500 Stunden Versuchsdauer selbst bei einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten in großen Schrittweiten nicht mehr beobachtet werden. Daraus kann geschlossen werden, daß nach mehreren vorangegangenen Spülstößen eine stabile Filterschicht aufgebaut wurde, die weiteren zyklischen Veränderungen der hydraulischen Belastung genügend großen Widerstand entgegensetzen konnte.

Der Effekt, daß nach einer Durchströmungsunterbrechung die Durchlässigkeit bei der Wiederaufbringung einer Wassersäule auf die Bodenprobe signifikant größer wird, konnte nicht festgestellt werden. Es ist nicht auszuschließen, daß dies nach längeren Zeiträumen der Durchströmungsunterbrechung als maximal 90 Stunden wieder auftreten könnte. In dem genannten Zeitraum ist bei weitem keine vollständige Austrocknung der Bodenprobe feststellbar, sondern es liegt vielmehr nach erneuter Beaufschlagung der hydraulischen Belastung wieder ein weitgehend gesättigtes System vor. Die Untersuchungen der Auswirkungen auf das Filterverhalten, wenn infolge von Trockenrissen bevorzugte Wasserwege entstehen, waren zunächst nicht Gegenstand dieser Betrachtung. Dies sollte in späteren Versuchen mit dem Pinhole-Test, der für derartige Untersuchungen konzipiert wurde, simuliert und untersucht werden (siehe Kap. 5.2). Nachfolgend wird die Wirkung des geotextilen Filters beschrieben. Um ein größeres Spektrum an Geotextilien zu erhalten, werden in die Betrachtungen die erzielten Teilergebnisse von Fillibeck (1993) miteinbezogen.

|                     | Dicke d<br>[mm] | Material                     | Verfestigungsart | Flächengewicht<br>[g/m <sup>2</sup> ] | O <sub>90,w</sub><br>[mm] |
|---------------------|-----------------|------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|
|                     | 1,15            | Polyester                    | mechanisch       | 104,42                                | 0,07                      |
| Fillibeck<br>(1993) | 0,67            | Polyester<br>mit<br>Polyamid | thermisch        | 129,94                                | 0,16                      |
| Verfasser           | 2,11            | PP                           | mechanisch       | 211,62                                | 0,14                      |

 Tabelle 9:
 Übersicht über die Kennwerte der Geotextilien

In Tabelle 9 sind die in der offenen Versuchseinrichtung in Kombination mit dem gemischtkörnigen Boden untersuchten Geotextilien enthalten. Bei gleichen hydraulischen Systemen liegen unterschiedliche Versuchsrandbedingungen vor, die jeweils aber eine Feinteilchenmobilisierung ermöglichen. Die vom Verfasser gewählten Randbedingungen (i' = 16; keine Auflast;  $\rho_d = 1,73$  g/cm<sup>3</sup>) begünstigen eine Feinteilchenbewegung im Vergleich zu den von Fillibeck (1993) (i' = 4; 20 kN/m<sup>2</sup> Auflast;  $\rho_d = 1,96$  g/cm<sup>3</sup>) gewählten Randbedingungen in stärkerem Maß. Bemerkenswert aber ist, daß die Systemdurchlässigkeiten aller vier Versuche nach einer Versuchszeit von ca. 320 h größenordnungsmäßig übereinstimmen (siehe Diagramm 6). Das bedeutet, daß die drei verwendeten Geotextilien gleichermaßen in der Lage sind, im Boden selbst bzw. an der Grenzschicht Boden/Geotextil den Aufbau einer stabilen Filterschicht zu bewirken. Daraus folgt, daß mit dem modifizierten LTF-Test eine grundsätzliche Aussage in bezug auf den gemischtkörnigen Boden 1 über die mechanische und hydraulische Filterwirksamkeit möglich ist.

#### 5.1.3.2 Schluff

Der zunächst bei Versuchsbeginn starke Bodendurchgang war nach ca. 200 Versuchsstunden nicht mehr feststellbar. Beim Verlauf des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k_{10}$  in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (siehe Diagramm 7) ist zu erkennen, daß bei der Versuchszelle mit konstantem hydraulischen Gefälle von i' = 16 nach ca. 200 h die Durchlässigkeit angestiegen ist und sich nach etwa weiteren 200 h einem konstantem Wert von ca. 1,5\*10<sup>-6</sup> m/s genähert hat. Das zunächst nicht vollständig gesättigte System weist aufgrund der in den Porenkanälen vorhandenen Luftblasen eine geringere Durchlässigkeit auf. Dieser Zustand kann zunächst aufrecht gehalten werden. Die fortlaufende aber immer schwächer werdende Ausspülung von Feinteilchen deutet aber auf einen Übergang von einem labilen in einen stabilen Zustand hin. Letzterer, wenn die in den Poren frei bewegliche Luft nicht mehr vorhanden ist und die Feinteilchen eine stabile Struktur im oder über dem Geotextil aufgebaut haben. Einen trendmäßig ähnlichen Verlauf, d.h. zu Versuchsbeginn eine geringere Durchlässigkeit als bei Versuchsende, konnte auch Fillibeck (1993) bei seinen Untersuchungen mit dem Schluff in der offenen Versuchseinrichtung feststellen.



Diagramm 7: Durchlässigkeitsverlauf der Zelle 3 und 4; zusätzlich sind die von Fillibeck (1993) erzielten Ergebnisse im Diagramm enthalten.

Bei den ersten beiden Wiederbeaufschlagungen der hydraulischen Belastung, nachdem programmgemäß die Durchströmung unterbrochen worden ist, konnte noch Bodendurchgang festgestellt werden, der bei weiteren Beaufschlagungen aber ausblieb. Dies weist darauf hin, daß der durch die rasche Befüllung aufgebrachte Spülstoß die Bodenmatrix länger in einen instabilen Zustand versetzt, wenngleich die Durchlässigkeitsentwicklung nicht signifikant von der der Zelle 3 mit konstanter hydraulischer Belastung abweicht.

## 5.1.4 Folgerungen für Reihenuntersuchungen

Mit dem modifizierten LTF-Test kann bedingt durch die Versuchsrandbedingungen nur eine grundsätzliche Aussage über die Gewährleistung der Filterwirksamkeit getroffen werden. Für genauere Untersuchungen, wie z.B. die Veränderung der hydraulischen Strömungsbedingungen im Boden aufgrund einer Feinteilchenbewegung, ist diese Versuchseinrichtung nicht geeignet. Ein wesentlicher Einfluß von Durchströmungsunterbrechungen auf die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit konnte nicht festgestellt werden. Ein größerer Einfluß dürfte zu erwarten sein, wenn die Durchströmungsunterbrechung verlängert wird und damit eine stärkere Austrocknung der Bodenprobe verbunden ist. Unter diesen Bedingungen sind Schrumpfrisse in der Bodenprobe zu erwarten, entlang derer bei Beaufschlagung mit einer hydraulischen Belastung Erosionserscheinungen auffreten können. Die Untersuchungen der Auswirkungen solcher Erosionserscheinungen ist aber die Zielsetzung des im Rahmen dieses FE-Vorhabens entwickelten modifizierten Pinhole-Test (siehe Kap. 5.2).

Die untersuchten Geotextilen führen in Kombination mit beiden Versuchsböden das System in ein stabiles Gleichgewicht zwischen mechanischer und hydraulischer Filterwirksamkeit über, obwohl die hydraulischen Randbedingungen (Durchströmungsunterbrechung mit darauf folgenden Spülstoß) und die Einbauparameter der Testböden (geringe Verdichtung, Wassergehalt auf der trockenen Seite der Proctorkurve und keine Auflast) so gewählt wurden, daß sie eine Extrembelastung für die Filterwirksamkeit darstellen. Ferner wurde ein Geotextil verwendet, das die Anforderungen an die wirksame Öffnungsweite nach DVWK (1992) nicht erfüllt. Dies betrifft vor allem den Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit in Kombination mit dem Schluff. Der Nachweis in Kombination mit dem gemischtkörnigen Boden 1 ist ohnehin nur durch labormäßige Untersuchungen möglich, da aufgrund der großen Ungleichförmigkeitszahl dieses Bodens ein unrealistischer Wert für die wirksame Öffnungsweite in der Bemessung nach DVWK (1992) ermittelt wird (siehe auch Kap. 4.2.3).

Bemerkenswert beim Durchlässigkeitsverhalten dieser beiden Testböden in der offenen Versuchseinrichtung ist, daß beim Schluff die Anfangsdurchlässigkeit geringer ist als die Durchlässigkeit am Ende des Versuchs. Beim gemischtkörnigen Boden 1 verhält es sich umgekehrt. Die sich aus den Vorversuchen ergebenden Erkenntnisse für die Auswahl der versuchstechnischen Randbedingungen und Versuchsdurchführungen der Reihenuntersuchungen soll im folgenden kurz zusammengefaßt werden:

Die Durchlässigkeitsverläufe bei den Versuchen mit veränderlichen hydraulischen Belastungen zeigen keinen wesentlichen Unterschied zum Verlauf mit konstanten hydraulischen Belastungen bei i' = 16. Ein Zeitraffereffekt konnte durch die beaufschlagten Spülstöße nicht erreicht werden, so daß bei folgenden Versuchsreihen stets eine konstante hydraulische Belastung von i' = 16 beibehalten wird. Zur Überbrückung der unkontrollierbaren Einlaufphase eines Versuchs wird zunächst für 24 Stunden ein Anfangsgradient von i' = 4 eingestellt, der dann auf i' = 16 erhöht wird. Die Reihenuntersuchungen werden nur mit gemischtkörnigen Boden 1 durchgeführt, da zum einen die Vorversuche eine eindeutigere Tendenz zur Verringerung der Durchlässigkeit aufgezeigt haben und zum anderen der gemischtkörnige Boden 1 in der Praxis als Rekultivierungsmaterial in der Form häufiger vorkommen kann. Darüber hinaus wird das Durchlässigkeitsverhalten des Schluffs mit Hilfe des modifizierten GR-Test genauer untersucht.

Bei der Versuchsdurchführung muß die Probenoberfläche durch ein wasserverteilendes Geotextil beim Befüllungsvorgang geschützt werden, um eine unkontrollierbare Störung der Probe zu verhindern.

Der Probekörper wird bei der Durchströmung nicht belastet, um eine Feinteilchenmobilität zu begünstigen. Die Bodenprobe wird mit einem Wassergehalt von w = 2 % auf dem in der Durchlässigkeitszelle bereits eingelegten Geotextil, das vor Versuchsbeginn nicht entlüftet oder bewässert wird, verdichtet. Die gewählte Trockendichte von  $\rho_d = 1,73$  g/cm<sup>3</sup> ist mit geringer Verdichtungsarbeit händisch erreichbar und begünstigt ebenfalls die Feinteilchenmobilität.

Der durch den geotextilen Filter durchgespülte Bodendurchgang wird in Abhängigkeit von der Versuchsdauer in Filterpapieren aufgefangen und gravimetrisch bestimmt.

Die Vorversuche haben gezeigt, daß Versuchszeiten von mindestens 1000 h notwendig sein können, um überhaupt einen stabilen Durchlässigkeitsbeiwert des Systems zu erhalten. Bei weiteren Versuchen wurde diese als Mindestversuchszeit festgelegt, die gegebenenfalls verlängert wird. Der Einfluß von unterschiedlich stark entlüftetem Wasser auf das Filterverhalten wird in einer weiterführenden Versuchsreihe untersucht. Das Untersuchungsprogramm und die Ergebnisse, die unter den oben aufgeführten Versuchsrandbedingungen bei unterschiedlichen Geotextilien erreicht wurden, sind in Kapitel 6.1 dargestellt.

## 5.2 Modifizierter Pinhole-Test

## 5.2.1 Allgemeines

Mit der Entwicklung des modifizierten Pinhole-Tests war die Zielsetzung verbunden die Auswirkungen von Erosionserscheinungen an bevorzugten Wasserwegen auf die Filterwirksamkeit von Geotextilien im Labor zu untersuchen. Der Idee eines möglichen Aufbaus liegt der Pinhole-Test (ASTM, D 4647-87) zugrunde, mit dem Erosionserscheinungen speziell von Tonen untersucht werden. Die Bodenprobe wird dabei in eine genormte Versuchszelle bei den zu untersuchenden Einbaubedingungen eingebaut. Der bevorzugte Wasserweg wird mit Hilfe einer 1 mm dicken Nadel in der Mitte der Probe eingebracht. Dieser röhrenförmige bevorzugte Wasserweg wird auf der Anströmseite der Bodenprobe noch auf vorgegebene Abmessungen aufgeweitet. Die Durchlässigkeitszelle entspricht der des geschlossenen Systems (vgl. Kapitel 3), bei dem ein hydraulisches Gefälle aufgebracht wird. Die Durchströmung der Bodenprobe erfolgt in horizontaler Richtung. In der Versuchsauswertung wird die Aufweitung des bevorzugten Wasserweges und die Trübung des ausströmenden Wassers dokumentiert.

In den folgenden Vorversuchsreihen sollte zunächst die Durchführbarkeit eines an die in situ Randbedingungen -vertikale Durchströmungsrichtung, freier Wasseraustritt unter dem Geotextil- angepaßten Versuchsaufbaus überprüft werden. Ein wesentlicher Unterschied besteht darüber hinaus in den zu untersuchenden Böden. Im Anwendungsfall Deponiebau wird die Rekultivierungsschicht in der Regel nicht aus Tonen aufgebaut, sondern in den meisten Fällen handelt es sich um feinkörnige oder gemischtkörnige Böden. Der in Abbildung 9 dargestellte Versuchsaufbau beruht auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den Vorversuchen.



Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des modifizierten Pinhole-Tests; kennzeichnend für diese Versuchstechnik ist der mit Stützmaterial gefüllte konisch geformte bevorzugte Wasserweg in der Bodenprobe

# 5.2.2 Vorversuchsreihe 1

Als Prüfboden wurde der unter 4.2.2 beschriebene Schluff verwendet, der auf der trockenen Seite der Proctorkurve bei einem Wassergehalt von w = 8% und einer Trockendichte  $\rho_d$  = 1,73 g/cm<sup>3</sup> in die Versuchszelle eingebaut wurde. Bei diesem Wassergehalt liegen im Vergleich zu geringeren Wassergehalten keine großen kohäsiv gebundene Bodenaggregate vor, die sonst aufgrund ihrer größeren Festigkeit das Einbringen eines eindeutig geformten bevorzugten Wasserweges erschweren. Ferner ist vor der Beaufschlagung der hydraulischen Belastung eine ausreichende Standfestigkeit des bevorzugten Wasserweges gegeben. Das Einbauverfahren und ebenso die Abmessungen der Bodenprobe entsprechen dem des modifizierten LTF-Tests (vgl. Kap. 5.1.2). Eine Übersicht über die Kennwerte der in den Vorversuchen verwendeten Geotextilien ist in Tabelle 10 enthalten. Wie aus der Übersicht zu erkennen ist, wurde bei der Auswahl beachtet möglichst unterschiedliche Geotextilien zu verwenden.

| Vlies     | Verfestigung | Flächenmasse<br>[g/m <sup>2</sup> ] | Dicke<br>[mm] | O <sub>90,w</sub><br>[mm] | vgl. m. DVWK            |
|-----------|--------------|-------------------------------------|---------------|---------------------------|-------------------------|
| M schwarz | mechanisch   | 527,6                               | 13,51         | 0,42                      | 8 zul O <sub>90,w</sub> |
| M grün    | mechanisch   | 673                                 | 8,2           | 0,12                      | 2 zul O <sub>90,w</sub> |
| T3        | thermisch    | 129,9                               | 0,67          | 0,16                      | 3 zul O <sub>90,w</sub> |

 Tabelle 10:
 Kennwerte der Geotextilien, die beim modifizierten Pinhole-Test verwendet wurden.

In einer ersten Versuchsreihe wurde entsprechend dem Pinhole-Test ein röhrenförmig bevorzugter Wasserweg (Durchmesser d = 6,0 mm) in die Bodenprobe eingestanzt. Eine mit einem entsprechendem Loch versehene PVC-Platte diente als Zentrierhilfe, um eine Anordnung der ausgestanzten Röhre in der Mitte der Bodenprobe zu gewährleisten. Die verwendeten Geotextilien wurden ohne vorherige Entlüftung, um auch in diesem Punkt dem in der Praxis vorkommenden System zu entsprechen, mit der Bodenprobe in die Versuchszelle eingebaut und mit einer Wassersäule von dh = 10 cm, gemessen ab Unterkante Geotextil, beaufschlagt. Vor dem Aufbringen der hydraulischen Belastung wurde, um eine Störung der Probenoberfläche zu vermeiden ein Schutzvlies auf diese gelegt. Bei den Versuchen wurde die Durchflußmenge und der Bodendurchgang (qualitativ) beurteilt.

Die Auswertung der Versuche durch eine Bestimmung des  $k_{10}$ -Wertes nach (20) erscheint bei diesem Versuchsaufbau nicht sinnvoll. Bei Vorhandensein eines bevorzugten Wasserweges kann nicht von einer homogenen Bodenprobe ausgegangen werden, so daß der Ansatz eines  $k_{10}$ -Werts als eine Bodenkenngröße einer möglichst homogenen Bodenprobe nicht möglich ist. Darüber hinaus ist die bei der Durchströmung anzusetzende hydraulisch wirksame Fläche nicht definiert. Beim Versuchsstart muß davon ausgegangen werden, daß zunächst nur die Grundfläche des bevorzugten Wasserweges strömungswirksam ist und erst dann im weiteren Versuchsablauf, wenn aufgrund von Erosionserscheinungen der bevorzugte Wasserweg undurchlässiger wird, die gesamte Zylinderfläche angesetzt werden kann. Das bedeutet, zunächst ist unbekannt, ab welchem Zeitpunkt des Versuchs die Durchlässigkeit des bevorzugten Wasserweges der Durchlässigkeit des anstehenden Schluffs entspricht. Diese Tatsache wird aber bei der Auswertung der ersten Vorversuche nicht berücksichtigt, da zunächst einmal die Durchführbarkeit des Versuchs selbst im Mittelpunkt stand und dafür die Verwendung der Permittivität nach (22) des Gesamtsystems als ausreichende Auswerteeinheit betrachtet werden kann. Bei den Vorversuchen wurde teilentlüftetes Leitungswasser verwendet. Die Versuchsdurchführung erfolgte ohne statische Belastung der Bodenprobe.

Bei Verwendung des Geotextils M schwarz sind äußerst starke Erosionserscheinungen aufgetreten. Begleitet von massivem Bodendurchgang, der fortschreitend bei der Durchströmung anhielt, mußte der Versuch nach ca. 3 Minuten abgebrochen werden. Eine Bestimmung der Permittivität des Systems ist nicht möglich, da kein konstanter oberer Wasserspiegel aufgebaut werden konnte. Die Bodenprobe zeigte nach Versuchsabbruch einen aufgeweiteten Krater mit Erosionsrillen. Im Gegensatz dazu konnte bei den Geotextilien M grün und T eine Wassersäule aufgebracht werden. Bei Versuchsende nach ca. 18 h war aber nur noch eine leichte Mulde des röhrenförmigen Wasserweges festzustellen. Die Permittivitätsentwicklung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer ist im Diagramm 8 graphisch dargestellt.

Ferner ist in diesem Diagramm ein Ergänzungsversuch mit Geotextil M schwarz dargestellt. Bei diesem Versuch wurde kein bevorzugter Wasserweg in die Bodenprobe gestanzt, um zu überprüfen, inwieweit dies für die massiven Erosionserscheinungen verantwortlich ist oder ob das Geotextil selbst maßgebend dafür ist. Bei diesem Versuch war der Aufbau einer Wassersäule möglich, ohne daß ein spontanes Filterversagen aufgetreten ist.



Diagramm 8: Permittivitätsverlauf in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Wie aus dem Diagramm 8 ersichtlich, ist die Permittivität des Geotextils M schwarz über den gesamten Beobachtungszeitraum leicht angestiegen. Ferner konnte nur ein langsames Abklingen des Bodendurchganges beobachtet werden. Im Gegensatz dazu wurde bei den Versuchen mit den Geotextilien M grün und T Bodendurchgang nur in den ersten 15 Minuten festgestellt. Die Durchlässigkeit bei diesen Versuchen näherte sich einem konstanten Wert.

Als Ergebnis der ersten Versuchsreihe kann folgendes festgehalten werden:

Die Ausbildung des bevorzugten Wasserweges in Form einer Röhre hat sich nur als bedingt sinnvolle Methode zur Simulation der inneren Erosion beim Schluff erwiesen. Nur bei Verwendung des äußerst großporigem auch unter herkömmlichen Versuchsbedingungen mechanisch nicht filterwirksamen Geotextils M schwarz stellt sich innere Erosion in Verbindung mit Piping ein. Dieses Vlies kommt deshalb für weitere Untersuchungen nicht mehr in Frage, zumal dieser Geotextiltyp ohnehin in der Praxis nicht für Filterzwecke eingesetzt wird. Die beiden anderen Geotextilien zeigen sich ähnlich wie unter üblichen Versuchsbedingungen filterwirksam, obwohl auch deren wirksamen Öffnungsweiten über den nach DVWK (1992) ermittelten zulässigen Werten liegen (vgl. Tabelle 9). Der Grund für die begrenzte Eignung einer Röhre liegt in ihrer mangelhaften Standfestigkeit bei Beaufschlagung einer Wassersäule. Hat sich ein Wasserstand und damit verbunden ein Auftrieb eingestellt, fällt das Loch in sich zusammen und nach Versuchsabbruch ist nur noch eine kleine Mulde in der Probenoberfläche zu erkennen. Das Einstürzen der Röhre hat sich in Vorversuchen als von der Bodenverdichtung und von der Wasserdurchlässigkeit des Geotextils abhängig herausgestellt. Das Verhalten der trockenen Geotextilien gegenüber Wasser wurde daraufhin in einem einfachen, rein qualitativen Blindversuch untersucht. Die Geotextilien wurden ohne Boden in die Versuchseinrichtung eingebaut und mit einer plötzlichen Wasserzufuhr beaufschlagt. Bei Geotextil M schwarz wurde das Wasser ohne großen Eintrittswiderstand abgeführt, beim Geotextil M grün durchströmte die Wassermenge gerade noch ohne Aufstau und das Geotextil T zeigte einen so großen Widerstand, daß zu anfangs ein Aufstau erfolgte, der dann in Abhängigkeit von der Zeit über die sich sättigenden Zonen, sichtbar durch die dunklere Verfärbung des Geotextils, abgebaut werden konnte.

Als Folgerung ergibt sich daraus, daß bei Geotextilien mit zu geringer Durchlässigkeit und dadurch verbunden die verzögerte Wasserableitung, die zu einem Wasserstau führt, die Bodenteilchen unter Auftrieb geraten und dadurch ein Stabilitätsverlust der Röhre entsteht. Infolge des Zusammenfallens können dann auch keine Erosuionserscheinungen auftreten.

#### 5.2.3 Vorversuchsreihe 2

Aufgrund der oben ausgeführten Erkenntnisse mußte der Versuchsaufbau modifiziert werden. Insbesondere das schnelle Zusammenfallen des röhrenförmigen Wasserweges mußte bei weiteren Versuchen verhindert werden. Eine Alternative ist die Veränderung der Form des vorgebenen Wasserweges. Statt wie oben beschrieben wurde nicht eine röhrenförmige Öffnung vorgegeben, sondern eine kegelförmige. Mit diesem konisch geformten Wasserweg wurden zwei Versuche durchgeführt. Bei einem Versuch wurde eine kleinere kegelförmige Öffnung in die Bodenprobe eingebracht, während bei dem anderen Versuch die größere ebenfalls konisch geformte Öffnung zusätzlich noch mit einem geeigneten Stützmaterial, das die Offnung unter hydraulischen Belastung stabilisieren sollte, verfüllt worden ist. Dieses Stützmaterial sollte unter Berücksichtigung der Kornfilterbemessung geeignet ausgewählt werden. Die Anforderung war eine Körnung auszuwählen, die die erodierten Feinteile des Schluffs mit Sicherheit nicht zurückhält. Mit Bemessungsverfahren für Kornfilter nach Cistin und Ziems nach BAW (1989) und dem Verfahren nach Vniig (in Batereau 1993) wäre für eine gleichförmige Filterschicht der größte zulässige Korndurchmesser 0,1 mm. Mit der in den Versuchen gewählten Kiesfraktion 4 mm < d < 8 mm liegt somit ein Stützmaterial vor, bei dem das Kleinstkorn aufgrund von geometrischen Beziehungen 40fach zu groß ist, um mechanisch filterwirksam zu sein. Das Stützmaterial wurde nach dem Einfüllen mit der Oberkante der Probe abgeglichen und händisch leicht verdichtet. Aufgrund der Korngröße des Stützmaterials wurde die konisch geformte Öffnung bei diesem Versuch größer ausgeführt und hat einen Durchmesser auf der Probenoberseite von 7 cm und auf der Unterseite von ca. 3,5 cm. Beim Vergleichsversuch ohne Stützmaterial war der obere Durchmesser 5 cm und der untere ca. 1 cm. Für die Herstellung der kegelförmigen Öffnungen wurde zunächst eine Röhre vorgestanzt, die dann mit einem geeigneten spitzen Messer auf die gewünschten Abmessungen und Form ausgeschabt wurde. Bei der Herstellung des Probekörpers erwies sich das Bodenmaterial ( $\rho_d = 1,73 \text{ g/cm}^3$ , w = 8%) als ausreichend standsicher. Für beide Versuche wurde das Geotextil T verwendet, da dieses den größten Wassereintrittswiderstand aufwies und dadurch als geeignetes Versuchsmaterial für die Überprüfung der Stabilität des bevorzugten Wasserweges angesehen werden kann. Auch bei diesen Versuchen wurde das Geotextil vorher nicht entlüftet.

Folgende Beobachtungen konnten bei der Versuchsdurchführung gemacht werden:

Wie beim Versuch mit dem röhrenförmigen Wasserweg lag auch beim Versuch mit der ungestützten Kegelöffnung nach Versuchsende nur noch eine Mulde auf der Probenoberfläche vor. Im Vergleich dazu blieb der gestützte Kegel stabil. Es war nach Versuchsende eine dünne Feinteilschicht auf dem Geotextil zu erkennen. Der darüber liegende Bereich der Kegelöffnung war frei von Feinteilchen. Die Entwicklung der Permittivität in Abhängigkeit von der Versuchsdauer ist in Diagramm 9 graphisch dargestellt.

Darin ist zu erkennen, daß bei der ungestützten Kegelöffnung ähnlich wie bei Vorversuchsreihe 1 mit einer röhrenförmigen Öffnung die Durchlässigkeit zunächst ansteigt und nach ca. 2 h einen konstanten Wert annimmt. Eine Vervierfachung der hydraulischen Belastung (h=80 cm) bewirkt eine geringfügige Veringerung der Permittivität. Das Stützmaterial im zweiten Versuch dagegen bewirkt ein verändertes Durchlässigkeitsverhalten. Die Anfangspermittivität liegt zunächst höher und wird in Abhängigkeit von der Versuchsdauer geringer. Nach ca. 20 h lag noch keine konstante Permittivität. Bei beiden Versuchen wurde bei Versuchsstart erhöhter Bodendurchgang festgestellt, der nach ca. 30 Minuten auf ein minimales Maß zurückging.



Diagramm 9: Vergleich der Permittivitätsverläufe der Bodenproben mit bzw. ohne Stützkörper

## 5.2.4 Folgerungen aus den Vorversuchsreihen

Die Aufrechterhaltung des bevorzugten Wasserweges mit Hilfe von Stützmaterial ist möglich und notwendig, um das schnelle Zusammenfallen der Öffnung zu verhindern. Dafür ist die gewählte Kiesfraktion 4 mm < d < 8 mm geeignet. Der gewählte Öffnungsdurchmesser auf der Unterseite der Bodenprobe ist zu groß. Nach Versuchsbeendigung konnte festgestellt werden, daß die erodierten Feinteilchen nicht gleichmäßig das Geotextil bedeckten. Dies kann gerade bei durchlässigeren Geotextilien zu Fehlinterpretationen im Filterverhalten führen, da dadurch eine zu hohe Permittivität vorgetäuscht wird. Ferner muß auch der Durchmesser der oberen Öffnung reduziert werden, falls in weiteren Versuchen der Einfluß aus statischer Belastung untersucht werden soll und hierfür eine genügend große Aufllastfläche auf der verbleibenden Probenoberfläche vorliegen muß. Der anhaltende Abfall der Permittivität nach 20 Versuchsstunden zeigt, daß sich noch kein konstanter Wert eingestellt hat, was eine Verlängerung der Versuchszeit bis zur Permittivitätskonstanz erfordert. Die Einbaubedingungen der Bodenprobe erwiesen sich als geeignet, Erosionsvorgänge an der Oberfläche des Schluffs zu bewirken. Bei einer Durchströmung der Bodenprobe erodieren ausreichend Feinteile aus der Wandung des bevorzugten Wasserweges. Aufgrund der Erkenntnisse aus den oben beschriebenen Voruntersuchungen stellt der in Abbildung 9 dargestellte Versuchsaufbau eine geeignete Versuchstechnik dar, die Auswirkungen von Erosionsvorgängen in bevorzugten Wasserwegen auf die Filterwirksamkeit labortechnisch zu simulieren. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens wird dieses Versuchskonzept nicht durch weiterführende Versuchsreihen überprüft, da zunächst hinsichtlich der Belastung der Filterwirksamkeit durch erodierte Feinteilchen und damit verbunden die Beurteilung des Einflußes der verschiedenen geotextilen Kennwerte aus den folgenden Suspensionsuntersuchungen eine aufschlußreichere Aussage zu erwarten ist.

#### 5.3 Suspensionstest

### 5.3.1 Allgemeines

In der Praxis sind Suspensionsbeaufschlagungen meistens die Folge von vorangegangenen Erosionserscheinungen im Boden. In bevorzugten Wasserwegigkeiten, wie beispielsweise Trockenrissen, liegen erhöhte Fließgeschwindigkeiten vor. Als Folge davon treten Erosionserscheinungen an der Grenzfläche auf und es entstehen wässerige Suspensionen. Die Beaufschlagung von Suspensionen auf geotextile Filter stellt einen grundlegend anderen Lastfall dar. Es liegt kein Korngefüge mit Korn-zu-Korn-Kontakt vor, sondern die einzelnen Feststoffteilchen sind frei im Wasser beweglich. Die vergleichsweise hohe Anzahl an frei beweglichen Feinteilchen kann eine extreme und maßgebliche Belastung für die Filterwirksamkeit darstellen. In einem für diesen Lastfall entwickelten Laborversuch sollen die Auswirkungen der Beaufschlagung von Suspensionen simuliert werden. Eine Suspension in diesem Zusammenhang liegt vor, wenn die oben aufgeführten Eigenschaften der Feststoffteilchen relativ groß sind und diese sich dadurch nicht dauerhaft im schwebezustand befinden.

## 5.3.2 Versuchsaufbau

Anhand von Vorversuchen mit Suspensionen in der geschlossenen Versuchseinrichtung und in der genormten Versuchseinrichtung zur Bestimmung der vertikalen Durchlässigkeit von Geotextilien nach DIN EN 12040 wurde der im Abbildung 10 dargestellte Versuchsaufbau entwickelt.



Abbildung 10: Schematische Darstellung der entwickelten Versuchszelle zur Untersuchung der Filterwirksamkeit von Geotextilien bei Beaufschlagung von Suspensionen. (siehe auch Abbildungen in Anlage 3 Blatt 2)

Entsprechend der Versuchszelle des LTC-Tests erfolgt die Durchströmung in einem Plexiglaszylinder mit einem Durchmesser von 12,1 cm in Richtung der Schwerkraft. Am unteren Ende wird auf ein Stützkreuz und ein Drahtgitter das zu untersuchende Geotextil gelegt. Ein Überlauf auf einer Höhe von 40 cm über dem Geotextil gewährleistet einen konstanten Oberwasserstand. Das hydraulische System entspricht dem einer offenen Versuchseinrichtung (vgl. Kapitel 3). Zur Feinteilaufbereitung wird eine Zusatzeinrichtung benötigt. In einem zylindrischen Behälter mit einem Fassungsvermögen von 6 1 werden die Feinteilchen durch ein Rührgerät gleichmäßig im Wasser durchmischt. Die Durchlässigkeitszelle wird über eine Bodenöffnung mit der aufbereiteten Suspension beschickt.

Vor dem Einbau wird das Geotextil entlüftet. Ein 9 cm dicker Sand/Kieskörper, dessen Funktion in Kapitel 5.3.4 erläutert ist, wird, nachdem das Geotextil in der Versuchseinrichtung fixiert worden ist, in zwei gleich dicken Schichten mit gleicher Verdichtung eingebaut. Dieser Sand/Kieskörper muß vor dem Einbau gewaschen werden, um möglicherweise vorhandene Feinteilchen zu entfernen. Auf die ebene Oberfläche des Sand/Kieskörpers wird vor dem Befüllen der Zelle mit Wasser zum Schutz vor Kornumlagerungen im Sand/Kieskörpers ein wasserverteilendes Geotextil gelegt, das nach Erreichen des konstanten Wasserstandes bei 40 cm über dem Geotextil entfernt wird.

Der Behälter zur Feinteilaufbereitung wird wie die Durchlässigkeitszelle mit teilweise entlüfteten Wasser (Entlüftungsvorgang nach Vorschlag aus DIN 18130) befüllt. Das Ende des Rührlöffels wird möglichst nahe am Behälterboden positioniert um das Absetzen von Feinteilchen der Suspension zu verhindern. Nach einer Einlaufzeit von 30 Minuten, in der mehrmals die Durchlässigkeit des Sand/Kieskörpers in Kombination mit dem zu untersuchenden Geotextil gemessen wird, wird die Versuchszelle mit der aufbereiteten Suspension beaufschlagt. Dieser Vorgang wird drei mal wiederholt, wobei bei jeder Feinteilaufbereitung jeweils 100 g Trockenmasse aufbereitet werden. Während der Beschickung der Durchlässigkeitszelle mit der aufbereiteten Suspension muß der Wasserstand in der Durchlässigkeitszelle reguliert werden, um zu gewährleisten, daß dieser konstant bleibt und aufgrund der erhöhten Zugabe von Wasser keine Feinteile durch den Überlauf ausgespült werden. Nach jeder Suspensionszugabe wird 30 Minuten lang die Entwicklung der Permittivität dokumentiert, bevor die nächste Zugabe erfolgt.

Für die Auswertung der Versuche werden folgende Meßdaten erfaßt:

- Wasserdurchflußmenge Q [g/s]
- Wassertemperatur T [°C]
- Bodendurchgang [g]
- Wasserstandshöhe dh in der Zelle [cm]

- Feinteilmasse m<sub>FT(SKK+FTS)</sub> [g] im und auf dem Sand/Kieskörper nach Versuchsende
- Masse m<sub>FT(vor)</sub> [g] des Geotextils vor Versuchsbeginn im trockenen Zustand
- Masse m<sub>FT(nuch)</sub> [g] des Geotextils nach Versuchsende im trockenen Zustand
- Dicke d<sub>FIS</sub> [cm] der Feinteilschicht auf dem Sand-/Kieskörper nach Versuchsende

# 5.3.3 Feststoffe der Suspensionen

In einer Versuchsreihe wurden drei verschiedene Suspensionen untersucht. Es wurden Suspensionen aus dem Schluff, einem Normensand und Kaolin hergestellt. Die Auswahl erfolgte im wesentlichen aufgrund folgender Unterscheidungsmerkmale:

- Korngrößenverteilung
- filtertechnische Eigenschaften
- Kornform
- Kornrauhigkeit

Aus dem Schluff wurde durch Siebung die Fraktion größer als 0,063 mm entfernt. Damit liegt der Kornanteil im Schluffbereich bei 90 % und zu 10 % im Feinstkornbereich (zur Unterscheidung zum sonst verwendeten Schluff wird der Begriff "fraktionierter Schluff" eingeführt). Er weist dadurch eine gleichförmigere Korngrößenverteilung auf (vgl. hierzu Anlage 3 Blatt 3). Der Mineralaufbau besteht zu 90 % aus Quarz. Im Mikroskop erscheint die Kornform der Schluffpartikel als kugelig bis gedrungen und die Kornform als gerundet. Aufgrund der geringen kohäsiven Eigenschaften neigen die Schluffpartikel zu hoher Einzelkornmobilität, womit ein filtertechnisch schwieriger Boden gegeben ist (s. auch Kapitel 4.2). Die Dimensionierung der größten zulässigen wirksamen Öffnungsweite für den Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit nach DVWK (1992) ergibt ein O<sub>90,wzul</sub>  $\leq$  0,045 mm.

Die Kornverteilung des Normensandes (DIN 488-3) ist in Anlage 3 Blatt 3 dargestellt. Es handelt sich nach DIN 4022 um einen eng gestuften Feinsand, der schwach grobschluffig und schwach mittelsandig ist. Er zeichnet sich durch eine schwache Kohäsion aus. Die Kriterien für einen Boden mit hoher Einzelkornmobilität nach DVWK (1992) treffen zu, da Kornfraktionen mit  $d \leq 0,06$  mm vorliegen. Für den Nachweis der mechanischen

Filterwirksamkeit ist  $O_{90,w,zul} \leq 0,17$  mm zu fordern. Der Normensand ist ein künstlich zusammengestelltes Mineralstoffgemisch, bei dem die Körner gebrochen werden. Die Kornform ist gedrungen und die Kornoberfläche kantig bis scharfkantig.

In Anlage 3 Blatt 4 ist die Korngrößenverteilung des Kaolins dargestellt. Es handelt sich nach DIN 4022 um einen Ton, der schluffig und leicht feinsandig ist. Nach DVWK (1992) liegt die Körnungslinie in einem Bereich, in dem die wirksame Kohäsion eine vergleichsweise offene Filterdimensionierung ermöglicht. Dies kann aber bei Suspensionsuntersuchungen nicht zugrunde gelegt werden. Die in Wasser aufbereiteten Tonminerale sind bezüglich der Korngröße zu klein, als daß die Filterregeln des DVWK (1992) anwendbar sind. Die Anlagerungsfähigeit von Bodenpartikeln, die an ihren Kanten unterschiedliche Ladungen aufweisen, an eine geotextile Faser kann mit dem nichtquellfähigen Kaolin untersucht werden. Das Kaolin ist ein in der Natur vorkommendes Tonmineral, dessen Kornrauhigkeit gerundet ist. Die Kornform des Kaolin ist nach Smoltczyk (1980) plattig mit einem Längen : Breiten : Dicken-Verhältnis von 10:10:1.

| Unterscheidungsmerkmale                             | fraktionierter Schluff | Kaolin              | Normensand      |
|---|------------------------|---------------------|-----------------|
| Korngrößenbereich [mm]                              | ≤ 0,063                | ≤ 0,063             | 0,045 ≤ X ≤ 0,3 |
| Kornform  | kugelig                | plattig             | gedrungen       |
| Kornrauhigkeit                                      | gerundet               | gerundet            | kantig          |
| Korndichte $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]            | 2,68                   | 2,64                | 2,65            |
| Mineralaufbau                                       | Quarz/ Feldspat        | Kaolin              | Quarz           |
| max O <sub>90,w,zal.</sub> [mm]<br>nach DVWK (1992) | 0,045                  | nicht<br>bestimmbar | 0,17            |

Tabelle 11: Übersicht über die Kennwerte der verwendeten Feinteile

#### 5.3.4 Sand-/Kieskörper

Wie aus Abbildung 10 (s. S. 82) zu erkennen, ist auf dem Geotextil ein Sand-/Kieskörper aufgebracht worden. Die Notwendigkeit dieses Widerstandskörpers hat sich in Vorversuchen gezeigt, da zum einen bei stark wasserdurchlässigen Geotextilien dadurch überhaupt erst ein oberer Wasserstand für die Messung der Einlaufdurchlässigkeit erreicht werden kann, der für die Ermittlung der Rückgänge der Permittivitäten infolge der Zugabe der Suspension erforderlich ist. Zum anderen hat sich gezeigt, daß nur durch einen ausreichenden Wasseraufstau und sowie bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten eine gleichmäßige Verteilung der Feinteilchen erfolgen kann.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Wahl der Korngrößenverteilung eines geeigneten Sand/Kieskörpers ist, daß keine Filterwirkung zwischen Sand/Kieskörper und Feststoffteilchen der Suspensionen auftreten darf. Der Sand/Kieskörper muß einen weitgehend ungehinderten Durchtritt der Feinteilchen ermöglichen. Die experimentelle Bestimmung eines diesbezüglich geeigneten Materials erfolgte im Rahmen einer Versuchsreihe. Es wurden dafür 3 verschiedene Sand/Kieskörper untersucht, deren Korngrößenverteilungen in Anlage 3 Blatt 4 dargestellt sind. Wie aus diesen Kornverteilungen ersichtlich, handelt es sich um eine Sandfraktion mit den Korngrößen 1 mm < d < 2 mm (1/2 Sandfraktion) und zwei Kiesfraktionen mit 2 mm < d < 4 mm (2/4 Kiesfraktion) bzw. 4 mm < d < 8 mm (4/8 Kiesfraktion).

Überprüft man zusätzlich für den kritischen Fall (Kombination: Normensand - 1/2 Sandfraktion) überschlägig die mechanische Filterwirksamkeit mit (1) nach Terzaghi ergibt sich mit  $D_{15}/d_{85} = 7,3 \ge 4$  ein zu hoher Wert, als daß ein Abfiltern der Feinteilchen zu erwarten wäre. Die bodenphysikalischen Eigenschaften der verwendeten Sand/Kieskörper sind in Tabelle 12 zusammenfassend dargestellt.

|  | 1/2 Sandfraktion | 2/4 Kiesfraktion | 4/8 Kiesfraktion           |
|--|------------------|------------------|----------------------------|
| Korngrößenfraktionen [mm]                          | 1 < d < 2        | 2 < d < 4        | 4 < d < 8                  |
| Bezeichnung<br>DIN 4022                            | Grobsand         | Feinkies         | Feinkies und<br>Mittelkies |
| Durchlässigkeit k [m/s]<br>DIN 18130 (Proctortopf) | 5,6*10-3         | 3,2*10-2         | 1,0*10-1                   |
| Porenanteil n [-]                                  | 0,46             | 0,43             | 0,42                       |
| Rohdichte $\rho_{s}$ [g/cm <sup>3</sup> ]          | 2,749            | 2,737            | 2,739                      |
| Trockendichte $\rho_d [g/cm^3]$                    | 1,48             | 1,57             | 1,58                       |

Tabelle 12:Übersicht der bodenphysikalischen Kennwerte der verwendeten<br/>Sand/Kieskörper (siehe hierzu auch Anlage 3 Blatt 4)

#### 5.3.5 Feststoffkonzentration der Suspensionen

Der in der Versuchsreihe gewählte Feststoffgehalt hat 10 g/l betragen. Die Feststoffkonzentration bezieht sich auf eine Feinteilzugabe von 100 g, die während des gesamten Versuchs dreimal in festen Zeitabschnitten wiederholt wird. Ein wesentliches Kriterium für die Wahl der Feststoffkonzentration war, daß im Sand/Kieskörper genügend Porenvolumen für die Feinteilchen vorhanden sein muß. Falls ein Geotextil die gesamte Masse der Feinteilchen zurückhält, können diese im Sand/Kieskörper eingelagert werden, und es entsteht keine separate Schicht auf dem Sand/Kieskörper. Der Porenraum des Kieskörpers 4/8 (im Vergleich zu 1/2 Sand- bzw. 2/4 Kieskörper liegt hierbei das geringste Porenvolumen vor) beträgt bei der im Versuch vorliegenden Verdichtung und Höhe ca. 460 cm<sup>3</sup>. Bei einer Rohdichte des Kaolins von  $\rho_s$ = 2,64 g/cm<sup>3</sup> nehmen 300 g ein Volumen von 113,64 cm<sup>3</sup> (Volumen ohne Poren) ein. Durch einen Volumenvergleich zwischen Feinteilvolumen und Porenvolumen läßt sich zeigen, daß im Kieskörper für eine vollständige Einlagerung der Feinteile ausreichend Volumen vorhanden ist. Um ein Einwandern zu ermöglichen müssen darüber hinaus die Porenengestellen dieses Sand-/Kieskörpers ausreichend groß sein.

## 5.4 Modifizierter GR-Test

#### 5.4.1 Allgemeines

Der im Rahmen dieses FE-Vorhabens entwickelte und in Abbildung 11 schematisch dargestellte modifizierte Gradient-Ratio-Test beruht auf dem Prinzip des bereits in den USA genormten Gradient-Ratio-Test nach ASTM D 5101-90 (1990). Mit Hilfe der Messung der hydraulischen Gradienten im Boden und am geotextilen Filter wird ein Verhältniswert berechnet, mit dessen Hilfe eine Aussage über die Filterwirksamkeit des Geotextils getroffen werden kann.

Im Zuge der Entwicklung des modifizierten GR-Test standen zunächst 2 Fragestellungen im Mittelpunkt:

- 1. Mit welcher Methode ist eine Wasserdruckmessung unter den vorgegebenen Einbaubedingungen der Bodenproben überhaupt möglich?
- Wenn eine hinreichend genaue Druckmessung möglich ist, können dadurch die unterschiedlichen Filtrationsprozesse (Tiefenfiltration, Oberflächenfiltration) meßtechnisch erkannt werden? Dadurch wäre auch eine Antwort bezüglich der Dickenanforderungen an einen geotextilen Filter zu erwarten.



 Abbildung 11: Schematische Darstelllung des modifizierten Gradient Ratio-Test. Eine entsprechende Einrichtung zur Wasserdruckmessung ist auch auf gegen überliegender Seite für Kontrollzwecke installiert (siehe auch Anlage 3 Blatt 5 und 6)

Zur schrittweisen Beantwortung dieser Fragen wurde eine Versuchszelle entwickelt, die aufgrund von Erkenntnissen aus Vorversuchen mehrmals erweitert und optimiert wurde. Im Vergleich zu den oben beschriebenen Versuchstechniken (modifizierter LTF-Test, Suspensionstest) liegt beim modifizierten GR-Test ein zusätzlicher unabhängiger Meßparameter vor, der Aufschluß über die hydraulischen Druckverhältnisse in der Bodenprobe gibt. Dies ist von großer Bedeutung für das grundlegende Verständnis der Filtrationsprozesse an der Grenzschicht Boden/Geotextil. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können Erklärungshilfen für die bei anderen Versuchen vorkommenden Filterverhaltensweisen liefern. Die Nutzung der genormten Versuchstechnik war nicht möglich, da mit dieser die filtertechnisch schwierigen Böden, für die laut DVWK labortechnische Untersuchungen notwendig sind, nicht untersucht werden können. Ferner sollte die Versuchszelle so konzipiert werden, daß eine statische Belastung, entsprechend den im Deponiebau vorhandenen Bodenauflasten durch die Rekultivierungsschicht, aufgebracht werden kann.

#### 5.4.2 Modifizierte Durchlässigkeitszelle und Versuchsdurchführung

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Versuchsaufbauten handelt es sich beim GR-TestVersuchsaufbau um eine geschlossene Versuchseinrichtung, bei der sich über und unter dem Boden/Geotextilsystem eine geschlossene Wassersäule anschließt. Die Durchströmungsrichtung ist von oben nach unten gerichtet. Der Austritt des durchströmenden Wassers unter dem Geotextil erfolgt bei einer Druckhöhe entsprechend dem eingestellten Unterwasserstand. Die Versuchszelle besteht aus zwei Plexiglaszylinder, zwischen denen das zu untersuchende Geotextil eingelegt wird. Es muß dabei beachtet werden, daß vorher der untere Versuchszylinder vollständig mit Wasser gefüllt ist, um zu verhindern, daß unter dem aufgesetzten Geotextil ein Luftpolster entsteht. Das Geotextil muß vorher gut entlüftet werden. Die Bodenprobe wird, je nach Standfestigkeit entweder vorher in den oberen Versuchszylinder mit der gewünschten Verdichtung eingebaut und dann auf den unteren Zylinder aufgesetzt oder, wenn keine ausreichende Standfestigkeit der Bodenprobe vorliegt, erst nachdem der obere Zylinder aufgesetzt wurde, in diesen eingebaut. Da die zu untersuchenden Böden Saugspannungen aufweisen können, muß beim Aufsetzen der Bodenprobe am unteren Zylinder ein Ausgleichsbehälter angeschlossen sein, um einen ausreichenden Wassernachschub zu ermöglichen. Durch schrittweise Erhöhung des Unterwassers erfolgt eine Sättigung des Boden/Geotextilsystems von unten, wodurch die in der Probe vorhandene Luft bei einem durchgängigen Porensystem noch oben verdrängt wird. Nach einer maximal möglichen Sättigung der Probe, wird die obere Wassersäule aufgebracht. Über ein oberes Überlaufgefäß kann ein konstanter Oberwasserstand auf einer gewünschten Höhe eingestellt werden.

Da bei den Versuchen vorwiegend gering verdichtete Böden untersucht wurden, ist die Gefahr der Randumläufigkeiten sehr groß. Ferner sollten mit dieser Methode Böden mit einer Ausfallkörnung untersucht werden, die beim Einbau zur Entmischung neigen, was gerade am Zellenrand besonders ausgeprägt sein kann. Vorversuche haben gezeigt, daß aufgrund der Randumläufigkeiten eine Wasserdruckmessungen über unmittelbar an der Zellenwand angeschlossene Piezometer zu Verfälschungen führen. Ferner sollte eine Druckmessung möglichst nah an der Grenzschicht Boden-Geotextil erfolgen, ohne diese jedoch zu beeinflussen, um die dort zu erwartenden Phänomene wie z.B. Blocking, Arching oder Clogging meßtechnisch über Piezometer erfassen zu können. Die oft übliche Messung des Wasserdrucks am Zellenrand ist hierfür nicht geeignet. Die oben aufgeführte Problematik wurde dadurch gelöst, indem die Drücke mit Hilfe von Injektionsnadeln gemessen wurden. Diese Injektionsnadeln mit einem Außendurchmesser von 0,9 mm und einem Innendurchmesser 0,6 mm wurden spiralförmig über paßgenaue Bohrungen über die Höhe des Zylinders angeordnet.



Abbildung 12: Darstellung der verfeinerten Meßtechnik des modifizierten GR-Tests. Zusätzliche Injektionsnadeln wurden jeweils auf gegenüberliegender Seite installiert

Wird die gesamte Länge der Injektionsnadel in die Bodenprobe eingeführt (vgl. hierzu Abb. 12), kann der Wasserdruck maximal im Abstand von 3,3 cm vom Innenrand der Zelle gemessen werden. Die Bohrungen wurden so angeordnet, daß ein minimaler Abstand über dem Geotextil vorhanden ist. Bei den drei fertiggestellten Versuchszellen liegt dieser Abstand zwischen 3,0 und 6,0 mm. Die weiteren Meßhöhen wurden in 1,0 cm Abständen angeordnet. Um ein Zusetzen der Nadeln beim Einführen in die Bodenprobe zu verhindern, hat es sich bewährt, vor dem Einführen der Injektionsnadel in diese einen Draht mit entsprechendem Außendurchmesser einzuschieben. Mit diesem Draht versehen, kann die Nadel in den Bodenprüfkörper eingeführt werden. Um eine Zerstörung der Bodenstruktur vor der Nadel durch eine Sogwirkung beim Ziehen des Drahtes zu verhindern, muß dieser langsam gezogen werden. Danach erfolgt der Anschluß der Schläuche für die Druckmessung.

Die Auswertung der Wasserdruckverteilung über die Höhe der Bodenprobe erfolgt nach dem in Abbildung 13 dargestellten Prinzip. Die Wasserdruckhöhe unter dem Geotextil, die der Druckhöhe des Auslaufs entspricht, wird als Nullhöhe festgelegt. Bei den Auswertungen der Wasserdruckverteilungen sind die Differenzdrücke zu dieser Nullhöhe dargestellt. Dic strömungswirksame Druckdifferenz des gesamten Boden/Geotextilsystems ist der Höhenunterschied zwischen der Druckhöhe im Piezometer 6 und der Nullhöhe, die der Höhe des Auslaufs entspricht (UW).



Abbildung 13: Prinzip der Wasserdruckhöhen, die bei Auswertung der Versuche verwendet wurden

Der Vorteil der Messung der Druckverteilung über die Probenhöhe ist, daß aufgrund der Veränderung des Druckverlaufs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer Rückschlüsse auf die hydraulische Filterwirksamkeit gezogen werden können. Ist beim Piezometer unmittelbar über dem Geotextil ein Aufbau des Wasserdrucks erkennbar, ist dies ein Hinweis, daß aufgrund von Feinteilchenbewegungen die Poren im oder auf dem geotextilen Filter nicht mehr ausreichend durchströmt werden können. In diesem Zusammenhang wird ein neuer GR-Wert eingeführt, der diesen Sachverhalt quantifiziert und folgendermaßen definiert ist:

$$mod \ GR = \frac{i_{Geotextil}}{i_{Boden}} = \frac{(h_{Piezometer1} - h_{Unterwasser}) \cdot d_{Boden}}{(h_{Piezometer5} - h_{Piezomiter1}) \cdot d_{Geo}}$$
[-] (23)

| mit | i <sub>Geotextil</sub> :              | hydraulischer Gradient im Geotextil mit anliegender Grenzschicht |
|-----|---------------------------------------|--|
|     | i <sub>Boden</sub> :                  | hydraulischer Gradient im Boden                                  |
|     | $\mathbf{h}_{\text{Piezometer1}}$ :   | Wasserdruckhöhe 1. Piezometer über Geotextil                     |
|     | $\mathbf{h}_{\mathrm{Unterwasser}}$ : | Wasserdruckhöhe unter Geotextil                                  |
|     | $\mathbf{h}_{\text{Piezometer5}}$ :   | Wasserdruckhöhe 5. Piezometer über Geotextil                     |
|     | $\mathbf{d}_{\mathrm{Boden}}$ :       | Strömungsweg zwischen Piezometer 1 und Unterkante Geotextil      |
|     | $\mathbf{d}_{\text{Geo}}$ :           | Strömungsweg zwischen Piezometer 5 und 1                         |

Die Definitionen der hydraulischen Gradienten  $i_{Geotextil}$  und  $i_{Boden}$  gehen aus Abbildung 14 hervor.



Abbildung 14: Wasserdrücke, deren Beträge in die Berechnung des mod GR-Wertes eingehen

#### 5.4.3 Vorversuche

Im Rahmen der Vorversuche wurde die Durchführbarkeit der Versuchstechnik überprüft. Ein weiterführendes Ziel war zu untersuchen, ob die unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen zwischen der geschlossenen und der offenen Versuchstechnik mit der erweiterten Meßtechnik erfaßt werden können. Dazu wurde während des Versuchs das geschlossene in ein offenes System überführt. In allen drei Vorversuchen wurde ein mechanisch verfestigtes Geotextil aus Polypropylen mit den folgenden Kennwerten eingesetzt:

d = 2,11 mm (Dicke mit einer Belastung von 2 kN/m<sup>2</sup>)

 $m = 221,6 \text{ g/m}^2$ 

 $O_{90,w} = 0,14 \text{ mm}$  (Naßsiebung nach Verfahren Franzius Institut) k\_=5\*10<sup>-3</sup> m/s ( bei 2 kN/m<sup>2</sup> Belastung)

5.4.3.1 Vorversuch 1:

Der Schluff (vgl. Kap. 4.2.2) wurde mit einem Wassergehalt von 6 % und einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,57$  g/cm<sup>3</sup> in die Versuchszelle eingebaut. Die Versuchsdurchführung entspricht dem oben beschriebenen Verfahren. Eine schrittweise Sättigungsphase der Probe von unten wurde nicht berücksichtigt, d. h. nachdem das Aufsetzen der Probe auf das Geotextil ohne Luftkissen unter dem Geotextl erfolgt war, wurde auf den Schluff eine Wassersäule aufgebracht. Das hydraulische Gefälle i wurde anfangs variiert und dann konstant auf 2,8 eingestellt. Das System wurde nach 115 h durch Ablassen des Wassers im unteren Versuchszylinder in ein offenes System überführt.

Es konnte festgestellt werden, daß eine Druckmessung möglich ist. Die Ergebnisse sind in Anlage 3 Blatt 7 graphisch dargestellt. Auf der Abszisse ist der gemessene Wasserdruck in Abhängigkeit von der jeweiligen Höhe (Ordinate) des Meßpunktes in der Bodenprobe aufgetragen. In diesem Diagramm ist ebenfalls der theoretisch anzunehmende Verlauf für den Druckabbau über die Höhe der Bodenprobe eingetragen. Bei geschlossenem System kam der gemessene Druckabbau dem theoretisch anzunehmenden Verlauf am nächsten, wobei in der obersten Schicht der Bodenprobe der meiste Druck abgebaut wurde. Im unteren Bereich (3 mm über dem Geotextil) verblieb noch ein Druck von ca. 3,2 cm Wassersäule. Nach dem das System in eine offene Versuchseinrichtung überführt wurde, ging der Druck im gesamten unteren Bereich zurück und der Gesamtdruck der hydraulischen Belastung wurde in den oberen 7 mm der Bodenprobe abgebaut. Gleichzeitig ging der Verlauf der Durchlässigkeit (siehe Anlage 3 Blatt 7) mit zunehmender Versuchszeit zurück.

Der Druckverlust der Piezometer, begleitet von einem Rückgang der Durchlässigkeit, spricht für einen Übergang in ein teilgesättigtes Bodensystem. Diese Teilsättigung erfolgt entsprechend den Piezometermessungen von unten nach oben. Der Druckabbau im oberen Bereich ist möglicherweise auf eine unzureichende Durchlässigkeit der Lochplatten zurückzuführen.

#### 5.4.3.2 Vorversuch 2

Mit einem im Labor zusammengestellten enggestuften Testboden, der eine große Durchlässigkeit und eine einheitlich runde Kornform aufweist, wurde die Funktionsfähigkeit der Versuchszelle überprüft. Da bei diesem Boden die einbaubedingten Inhomogenitäten geringer sind als beim Schluff, liegen definiertere Strömungsbedingungen in der gesamten Bodenprobe vor. Aufgrund dieser Überlegungen wurde ein Normensand (DIN 1164/58 [EN 169]) in die Versuchszelle eingebaut. Beim Durchströmen konnte in allen Piezometer ein konstanter Wert zwischen Ober- und Unterwasser abgelesen werden. Das deutete auf eine zu große Durchlässigkeit des Normensandes hin. Der Abbau des Wasserdruckes erfolgte nicht durch die Bodenprobe, sondern als Strömungswiderstand in der Anlage. Vor diesem Hintergrund wurde dem Normensand mehrmals kleinere Kornfraktionen zugefügt, bis letztlich eine Kornverteilung (siehe Anlage 3 Blatt 8) gefunden werden konnte, bei der ein Druckabbau in der Zelle meßbar war. Dieser Versuchsboden wurde mit einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,74$ g/cm<sup>3</sup> eingebaut. Das hydraulische Gefälle wurde konstant bei i = 1,2 eingestellt. Ferner wurden wiederum die Auswirkungen einer Überführung des geschlossenen Systems in ein offenes System auf die Piezometerstände untersucht.

Die Durchlässigkeit (Anlage 3 Blatt 8) ging mit der Versuchsdauer stark zurück (Faktor 53). Die Überführung des Systems in eine offene Versuchseinrichtung verändert den Verlauf der Durchlässigkeit minimal. Zunächst steigt sie nach dem Öffnen leicht an, wird dann aber wieder um den Faktor 2 geringer. Deutlicher dagegen zeigte sich die Überführung in ein offenes System bei der Messung der Wasserdrücke über die Probenhöhe (Anlage 3 Blatt 9). Im geschlossenen Zustand gingen die Wasserdrücke entsprechend dem Rückgang der Systemdurchlässigkeit zurück. Wie im Vorversuch 1 erfolgte der Druckabbau in der oberen

Schicht der Bodenprobe. Unmittelbar nach dem Öffnen des Systems fiel der Wasserdruck in der Bodenprobe vollständig ab, das auf die Ausbildung eines Drei-Phasen-Systems hindeutete. Bei weiterer Durchströmung war aber kein ausgeprägter Abfall der Durchlässigkeit feststellbar. Die gemessenen Wasserdruckverteilungen weisen darauf hin, daß zu Versuchsbeginn ein Abbau des Wasserdruckes noch über die gesamte Probenhöhe erfolgt. Nach einer Einlaufphase liegt aber dann ein durchgängiger Porenraum vor, bei dem unabhängig von der Probenhöhe überall der gleiche Wasserdruck vorliegt. Feinere Kornfraktionen blockieren bis zu einem bestimmten Grad die Poren des Geotextils und sind für den Rückgang der Durchlässigkeit, der relativ schnell erfolgte und dann einen konstanten Wert eingenommen hat, verantwortlich. Da bei diesem Boden die Korngrößen größer sind als beim Schluff aus Vorversuch 1 und somit die Meniskenkräfte des Wassers im Boden geringer sind, stellt sich beim Öffnen des Systems schneller ein Drei-Phasen-System ein. Der relativ schnelle Druckverlust beim Öffnen des Systems verdeutlichte dies. Die Durchlässigkeitsentwicklung verhält sich entgegengesetzt, da bei geringen kapillaren Kräften des Bodens der Einfluß aus Teilsättigung hinsichtlich der Durchlässigkeitsabnahme geringer ist. Bemerkenswert war wie bei Vorversuch 1 der deutliche Wasserdruckabbau im oberen Bereich der Bodenprobe.

#### 5.4.3.3 Vorversuch 3

In einem weiteren Versuch sollte der gemischtkörnige Boden 1 (vgl. Kap. 4.2.3) untersucht werden. Problematisch kann das Einführen der Injektionsnadeln in die Bodenprobe sein, da bei diesem Boden Kornfraktionen in der Größe von Kies vorhanden sind. Ist dieses Verfahren möglich, ist zu überprüfen, ob aufgrund einer Veränderung der Wasserdruckverhältnisse bei zunehmender Versuchsdauer und Steigerung der hydraulischen Belastung auf eine Bewegung der Feinteilchen geschlossen werden kann.

Der gemischtkörnige Boden 1 wurde mit einer Trockendichte von  $\rho_d = 2,11$  g/cm<sup>3</sup> in die Versuchseinrichtung eingebaut. Um eine möglichst gute Sättigung der Probe zu gewährleisten, wurde mit der Durchströmung erst nach 24 Stunden begonnen. Das hydraulische Gefälle wurde beginnend bei i = 2,6 jeweils nach ca. 50 bis 100 h um ca. i = 1 erhöht. Das Maximum betrug i = 16,9.

Die Versuchszelle wurde vor dem Versuch folgendermaßen verändert:

a) Die obere und untere Lochplatte wird durch ein ausreichend verformungsstabiles VA-Gitter ersetzt, da in den oben beschriebenen Versuchen der größte Druckabbau in der oberen Schicht zwischen Piezometer 6 und 5 erfolgte und nicht auszuschließen ist, daß hierfür zu gering durchlässige Lochplatten verantwortlich sind.

b) Bei der Druckmessung oberhalb der Bodenprobe zeigt sich, daß die gemessene Wasserdruckhöhe nicht immer mit der Höhe des eingestellten Oberwassers übereinstimmt. Verantwortlich hierfür sind Potentialverluste im Wasserzulauf und im oberen Bereich der Versuchszelle. Um derartige Verfälschungen in der Druckmessung des Unterwassers zu vermeiden, wurde unmittelbar unterhalb der Bodenprobe eine weitere Injektionsnadel eingeführt. Durch diese Erweiterung kann der exakte Druckabbau über des Boden/Geotextilsystem erfaßt werden.

Zunächst konnte festgestellt werden, daß eine Wasserdruckmessung mit dem oben beschriebenen Verfahren möglich ist. Der Verlauf der Durchlässigkeit ist in Diagramm 10 graphisch dargestellt.



Diagramm 10: Durchlässigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Versuchsdauer; zu erkennen sind die "Durchflußspitzen" nach einer Erhöhung der hydraulischen Belastung

Aus dem Verlauf sind eindeutig die jeweiligen Erhöhungen der hydraulischen Belastung in Form von "Durchflußspitzen" erkenntlich. Diese Spitzen werden im Zuge der weiteren Durchströmung immer wieder abgebaut. Die Durchlässigkeit fällt, nachdem die Spitze abgebaut ist, mindestens auf den Wert der Durchlässigkeit der hydraulischen Belastung davor ab oder wird geringer. Insgesamt wird die Durchlässigkeit geringer, wenngleich die hydraulische Belastung erhöht wird. Dies kann nur mit Hilfe der Mobilisierung der Feinteilchen dieses suffosionsempfindlichen Bodens erklärt werden. Nach jeder Erhöhung tritt zunächst ein Spüleffekt auf, der eine kurzzeitige Erhöhung der Durchlässigkeit bewirkt. Durch diesen Spüleffekt werden Feinstpartikel in Bewegung gebracht, die sich nach einer kurzen Fließstrecke in Engstellen im Grobkorngerüst ablagern. Die Durchlässigkeit wird dadurch aufgrund der Ansammlung und Verdichtung der Feinteilchen geringer. Diese sich so ausbildende Struktur kann nur teilweise durch eine weitere Erhöhung der hydraulischen Belastung zerstört werden. Nachwandernde Teilchen verstärken dann im weiteren Strömungsverlauf die Verlegung der Engstellen der Poren. Im Verlauf der Durchströmung wird dies deutlich, indem die Spitzen nach einer Erhöhung immer weniger ausgeprägt werden. Wie aus Diagramm 11 ersichtlich, nimmt die Wasserdruckverteilung in der Probe unmittelbar nach einer Erhöhung der hydraulischen Belastung relativ schnell einen stabilen Verlauf an.



Diagramm 11: Messung der Wasserdruckverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten bei gleicher hydraulischer Belastung

Untersucht man die Druckverteilungen der unterschiedlichen hydraulischen Belastungen, konnte folgendes beobachtet werden. Zunächst findet bei i = 2,6 ein weitgehend kontinuierlicher Druckabbau über die Höhe der Bodenprobe statt. Dies weist auf eine relativ gute Homogenität dieser Bodenprobe am Anfang der Durchströmung hin und bedeutet, daß die Feinteilchen gleichmäßig im Grobkornskelett verteilt sind und der Filter funktioniert. Im oberen Bereich kann aber schon bei geringer hydraulischer Belastung der Abtransport der Feinteilchen in Strömungsrichtung festgestellt werden, was durch konstante Wasserdrücke dort verdeutlicht wird. Bei weiterer Erhöhung der hydraulischen Belastung vergrößert sich dieser Bereich gleichen Druckes, bis zuletzt ab einer Höhe von 2,3 cm über dem Geotextil gleiche Druckverhältnisse vorliegen. Das bedeutet in diesem Bereich wird kein Wasserdruck mehr abgebaut, da dort die Feinteilchen aus den Poren des Grobkornskeletts bereits abtransportiert wurden. Ähnlich verhält es sich im untersten Bereich der Bodenprobe. Mit zunehmender hydraulischer Belastung kann auch hier kein Druck mehr abgebaut werden, da die Feinteilchen dort durch den geotextilen Filter ausgespült wurden (siehe Diagramm 12). Zuletzt wird nur noch in einer Schicht zwischen 1,3 und 2,3 cm über dem Filter, in die von oben her genügend viele Feinpartikel eingelagert worden sind, der gesamte Wasserdruck abgebaut. Ein ausgeprägter Druckabbau in der oberen Schicht der Bodenprobe konnte bei diesem Versuch nicht mehr festgestellt werden.



Diagramm 12: Veränderung der Wasserdruckverteilung durch die Zunahme der hydraulischen Belastung

#### 5.4.4 Folgerungen für Reihenuntersuchungen

Die entwickelte Versuchstechnik eignet sich für eine Vielzahl von verschiedenen Bodenarten zur Überprüfung der Filterwirksamkeit dieser Böden in Kombination mit einem Geotextil. Das unterschiedliche Filterverhalten verschiedener Geotextilien insbesondere hinsichtlich der verschiedenen Verfestigungsarten der Geotextilien muß noch in den folgenden Vergleichsversuchen untersucht werden. Die Vorversuche haben gezeigt, daß stark durchlässige Böden nicht mit dieser Versuchszelle untersucht werden können. Ein Mindestanteil im Fein- und Mittelsandbereich muß vorhanden sein, um einen Druckabbau in der Bodenprobe feststellen zu können. Besonders geeignet sind Böden, die einen Schluffanteil aufweisen. Erfolgt der Druckabbau durch den Strömungswiderstand der Anlage selbst, wird dies durch konstante Wasserdrücke aller Piezometer sichtbar. Die verfeinerte Meßtechnik ermöglicht somit die Grenze der Versuchszelle hinsichtlich der Bestimmung der Durchlässigkeit von Boden/Geotextilsystemen zu erkennen.

Eine maximal mögliche Sättigung der Bodenprobe ist eine wesentliche Voraussetzung für ein unverfälschte Wasserdruckmessung mit Piezometer. Ursachen für die Verfälschung der Wasserdrücke ist die Kompressibilität der Luft. Ausreichende Sättigung wird am besten durch hinreichend lange Sättigungsphasen der Bodenprobe von unten her erreicht, ehe mit einer Durchströmung begonnen wird. Liegt eine durchgängige Porenstruktur in der Probe vor, wird die in den Poren enthaltene Luft nach oben hin verdrängt. Sichtbare Luftblasen in den Schlauchanschlüssen der Piezometer müssen entfernt werden. Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung von entlüfteten Wasser unumgänglich. Aus diesem Grunde wird in weiterführenden Versuchen auf die Untersuchung, inwieweit ein höherer Sauerstoffgehalt im Wasser die Versuchsergebnisse beeinflussen könnte, verzichtet. Das bei diesen Versuchen mit Hilfe einer speziell konstruierten automatischen Wasserentlüftungsanlage (siehe hierzu Anlage 4 Blatt 1) verwendete Wasser mit einem Sauerstoffgehalt von 2,3 mg  $O_2/I$  soll auch für die weiteren Versuche verwendet werden. Darüber hinaus muß ebenfalls das Geotextil vor Versuchsbeginn ausreichend entlüftet werden.

Der Einfluß auf die Wasserdruckverteilung durch nicht ausreichend durchlässige Lochplatten ist nicht auszuschließen. Für folgende Versuche werden diese durch formstabile VA-Gitter mit ausreichend großer Öffnungsweite ersetzt.

Der Versuchsablauf mit schrittweiser Erhöhung der hydraulischen Belastung hat sich als geeignet herausgestellt, Feinteilchen im Boden verstärkt zu mobilisieren. Der Frage, ob aufgrund einer zeitabhängigen Veränderung der Wasserdruckverteilung auf eine Feinteilwanderung geschlossen werden kann, wird in folgenden Versuchen verstärkt nachgegangen.

Zur Überprüfung der Wasserdruckmessung wird für die weiteren Versuche die gleiche Piezometermeßtechnik auf der gegenüberliegenden Seite der Versuchszelle auf selber Höhe angebracht. Bei folgenden Auswertungen werden, wenn sich auf beiden Seiten größenordnungsmäßig die selben Werte ergeben, nur die Messung einer Seite angegeben. Ferner wurde, da sich herausstellte, daß beim Auslauf des Unterwassers Druckverluste entstehen können noch zwei Piezometer nach dem selben Prinzip wie die Wasserdruckmessung in der Bodenprobe unmittelbar unter dem Geotextil auf gegenüberliegenden Seiten angeordnet. Auf diese Weise kann der Wasserdruck unmittelbar vor der Anströmseite der Bodenprobe und unmittelbar nach dem Geotextil dokumentiert werden. Möglicherweise vorhandene Druckverluste durch die Zu- und Abströmung des Wassers durch Schläuche gehen dadurch nicht in die Auswertung ein. Bei der Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k_{10}$  nach (20) wird nur der tatsächlich vor und nach der Probe vorhandene und gemessene Wasserdruck angesetzt.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Strömungsbedingungen bei Öffnung des geschlossenen Systems können mit dieser Meßtechnik nicht ausreichend erfaßt werden. Es ist zwar ein Verlust des Wasserdrucks erkennbar, dies kann aber mit Hilfe der Piezometer nicht ausgewertet werden. Die Erfassung der dann entstehenden Kapillarwirkung oder Saugspannung des Bodens ist nur mit Hilfe von Tensiometern möglich. Dies wurde aber im Rahmen dieses FE-Vorhabens nicht weiterführend untersucht. Dafür ist noch zusätzliche gezielte Forschungsarbeit notwendig, die speziell die Auswirkungen der Teilsättigung auf das Strömungsverhalten untersucht.

# 5.4.5 Versuche zur Überprüfung der Versuchstechnik mit filterstabilem Versuchsboden

Die Zielsetzung dieser Versuchsreihe ist die Überprüfung der Versuchstechnik mit einem filterstabilen Boden. Bei Verwendung dieses Versuchsbodens sollten die Piezometermessungen kein Filterversagen andeuten. Ein filterstabiles System zeichnet sich durch einen nahezu linearen Wasserdruckabbau über die gesamte Höhe der Bodenprobe aus. Als Versuchsboden wurde ein Sand-Schluff-Gemisch im Labor hergestellt, dessen Kornverteilung im Diagramm 13 dargestellt ist. Die Durchlässigkeit des Bodens wurde zu k =  $2,5*10^{-7}$  m/s bestimmt. Es wurden dabei unterschiedliche hydraulische Gradienten angelegt, die keine Schwankungen in der Durchlässigkeit bewirkten.



Diagramm 13: Kornverteilung des Versuchsbodens (Sand-Schluff-Gemisch) zur Überprüfung der Versuchstechnik

Bei der Dimensionierung eines für diesen Boden geeigneten Geotextils nach DVWK (1992) ergibt sich ein  $O_{90,w,zul} \leq 0,156$  mm. Zusätzlich sind für diesen Boden, der dem Körnungsbereich C zuzuordnen ist, laut Merkblatt Suffosionsuntersuchungen notwendig. Die gewählten Geotextilien, G6 (mechanisch verfestigt) und G4 (thermisch verfestigt), weisen ein  $O_{90,wgewählt} = 0,07$  mm auf. Die Anforderung nach (3) zur Berücksichtigung der hydraulischen Filterwirksamkeit wird von den Geotextilien nicht eingehalten. Das bedeutet, es könnte ein geringer Wasserdruck über den Geotextilien aufgebaut werden. Die Kennwerte der Geotextilien können Tabelle 5 in Kapitel 4.3 entnommen werden. Die Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens erfolgte unter den selben Einbaubedingungen wie beim modifizierten GR-Test. Die Einbaudichte  $\rho_d$  betrug 1,80 g/cm<sup>3</sup>, der Einbauwassergehalt lag bei 2,0 %.

|     | mechan. Filterwirksamkeit                                |                               | hydraul. Filterwirksamkeit     |                       |  |
|-----|--|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
|     | O <sub>90,w,gew</sub> =0,8 bis 1,0 O <sub>90,w,zul</sub> |                               | $\eta * k_v / k_{Boden} \ge 1$ |                       |  |
|     | O <sub>90,w</sub>  | $_{y,zul} = 0,156 \text{ mm}$ | $k_{Boden} = 2,5$              | *10 <sup>-7</sup> m/s |  |
| G 4 | 0,44   | Diskrepanz                    | 11,6                           | i.O.                  |  |
| G 6 | 0,44   | Diskrepanz                    | 74,36                          | i.O.                  |  |

Tabelle 13:Nachweise der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit der<br/>Geotextilien nach DVWK (1992) ("Diskrepanz": Der Nachweis ist nicht<br/>erfüllt).

Die Ergebnisse der beiden Versuche sind in Anlage 3 Blatt 10 und 11 dargestellt. Die Durchlässigkeit des Geotextils G6 war im Schnitt etwas größer als beim Geotextil G4. Bei beiden Versuchen ging die Durchlässigkeit trendmäßig leicht zurück, nachdem eine hydraulische Belastung von i = 4 angelegt wurde. Offensichtlich setzt bei dieser hydraulischen Belastung im Boden eine Feinteilchenbewegung ein. Vor dem Hintergrund zweier unterschiedlicher Filtrationsmodelle und der Zuordnung des Geotextils G4 als Oberflächenfilter und G6 als Tiefenfilter muß aufgrund der Feinteilwanderung eine Veränderung der Wasserduckverteilung meßbar sein. Die diesbezügliche Untersuchung der gemessenen Wasserdruckverteilungen bestätigen das. Aus dem Diagramm 14 ist bei Geotextil G4 bei einem hydraulischen Gefälle von i = 4 deutlich ein Aufbau eines Wasserdrucks über dem Geotextil zu erkennen. Das bestätigt die Gültigkeit dieser Filtrationsmodelle bei derartigen Geotextilien, die mit Hilfe dieser Meßtechnik dokumentiert werden kann. Der meßbare Aufbau des Wasserdrukkes bei Geotextil G4 geht einher mit einer geringen Abnahme der Durchlässigkeit. Der Aufbau einer undurchlässigeren Schicht (Filterkuchen) über dem Geotextil findet statt, was aber in diesem Fall noch kein Beleg für ein filtertechnisches Versagen ist. Diese Schicht ist im Sinne des Oberflächenfiltrationsmodells notwendig für ein insgesamt filterstabiles System, der Oberflächenfilter initiiert gewissermaßen diese Schicht, die innerhalb bestimmter Grenzen der hydraulischen Wirksamkeit tolerierbar ist.

Ahnlich verhält es sich bis zu diesem Versuchsstadium, in dem sich die unterschiedlichen Filtrationsmodelle erst herausbilden, auch beim Tiefenfiltrationsmodell beim Geotextil G6. Bei diesem Versuch liegt eine fast identische Durchlässigkeitsentwicklung vor, denn auch hier geht die Durchlässigkeit, nachdem die hydraulische Belastung auf i = 4 erhöht worden ist, zurück. Diese ebenso geringe Abnahme ist in diesem Fall mit dem Einwandern der Feinteile in den Filter zu erklären, was aber nicht mit einem meßbaren Aufbau eines Wasserdrukkes vor dem Geotextil verbunden ist. Im Diagramm 14 ist die Ausbildung der unterschiedlichen Wasserdruckverteilungen der beiden Geotextilien zu erkennen.

In beiden Fällen liegt bei den untersuchten hydraulischen Gradienten eine ausreichende hydraulische Filterwirksamkeit vor, wenn man dies mit dem Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens, die im Größenordnungsbereich der Systeme mit Filter liegen, vergleicht.



Diagramm 14: Unterschiedliche Wasserdruckverteilungen bei thermisch (G4) und mechanisch (G6) verfestigten Geotextilien. Zu erkennen ist der Aufbau eines geringen Wasserdruck beim thermisch verfestigten Geotextil

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit dieser verfeinerten Meßtechnik die unterschiedlichen Filtrationsmodelle belegt werden können und speziell bei diesem filterstabilen Boden keine Abnahme der Filterwirksamkeit der untersuchten Geotextilien in Kombination mit diesem Boden zu verzeichnen ist. Der modifizierte GR-Wert, berechnet nach (23), liegt beim Geotextil G4 bei 6 und beim Geotextil G6 bei 2. In Kapitel 6.3 wird die Filterwirksamkeit von Geotextilien in Kombination mit filtertechnisch schwierigen mit dieser Versuchstechnik untersucht, hierbei sind höhere modifizierte GR-Werte zu erwarten.
# 6. Auswertung und Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen

### 6.1 Modifizierter LTF-Test

# 6.1.1 Versuchsreihen

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach dem im Kapitel 5.1 beschriebenen Verfahren. Der gemischtkörnige Boden 1 wurde mit einem Wassergehalt w = 2 % und einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,73$  g/cm<sup>3</sup> in die Versuchszelle eingebaut und bei einer konstanten hydraulischen Belastung von i' = 16 durchströmt. Die Versuchsdurchführung erfolgte ohne statische Belastung. Die Versuchsreihen umfaßten die Geotextilien G1 bis G8, deren physikalischen Kennwerte in Kapitel 4.3 zusammengefaßt sind.

Die in Kapitel 2.3.3 enthaltene Literaturrecherche hat gezeigt, daß hinsichtlich des Einflusses verschiedener Versuchsrandbedingungen auf die Versuchsergebnisse in der Fachwelt keine einheitliche Meinung vorliegt. Im Zusammenhang mit dem LTF-Test betrifft dies speziell den Sauerstoffgehalt des durchströmenden Wassers. In den zwei folgenden Versuchsreihen wird unter anderem auf diese Problematik eingegangen. Hierfür wurde die Versuchsreihe 1 in einem klimatisierten Labor mit konstanter Raum- und Wassertemperatur bei  $20\pm2$ °C durchgeführt. Das durchströmende Wasser wurde vorher entkalkt und mit Hilfe einer speziell konstruierten automatischen Entlüftungsanlage entlüftet. Die Entlüftung erfolgt indem das Wasser im Vakkuum versprüht wird. Der Sauerstoffgehalt des Wassers wird dadurch von üblichen 12 auf 2,3 mg O<sub>2</sub>/l reduziert (siehe hierzu Anlage 4 Blatt 1). Bei Versuchsreihe 2 lagen keine definierten Randbedingungen vor. Die Wassertemperatur lag zwischen 15 und 25 °C. Das Leitungswasser wurde gering, mit Hilfe einer Durchströmung durch ein Sandbecken nach DIN 18130, entlüftet. Der gemessene Sauerstoffgehalt des Wassers lag bei ca. 8,4 mg O<sub>2</sub>/l.

Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 14 zusammengefaßt. Die Nachweise der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit für die Geotextilien G1 bis G8 mit dem gemischtkörnigen Boden 1 ist in Kapitel 4.4 enthalten.

|           | Versuchsbezeichnung  |   |  |  |  |
|-----------|--|---|--|--|--|
| Geotextil | Versuchsreihe 1<br>Wasser entkalkt und entlüftet<br>Sauerstoffgehalt: 2,3 mg O <sub>2</sub> /l | Versuchsreihe 2<br>Leitungswasser gering entlüftet<br>Sauerstoffgehalt 8,4 mg O <sub>2</sub> /l |  |  |  |
| G 1       | Z 10   | Z 1   |  |  |  |
| G 2       | Z 11   | Z 2   |  |  |  |
| G 3       | Z 12   | Z 3   |  |  |  |
| G4        | Z 9  | Z 4   |  |  |  |
| G 5       | Z 5  | Z 7   |  |  |  |
| G 6       | Z 6  | Z 8   |  |  |  |
| G 7       | Z 14   | Z 13  |  |  |  |
| G 8       | Z 15   | Z 16  |  |  |  |

Tabelle 14: Übersicht über Versuchsprogramm mit dem modifizierten LTF-Test

Die Ergebnisse der Versuchsreihen 1 bzw. 2 sind in Anlage 4 Blatt 2 bis 7 bzw. Blatt 8 bis 13 graphisch dargestellt. Die Auswertung umfaßt die Entwicklung der Systemdurchlässigkeit, berechnet nach (20), und die Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

# 6.1.2 Interpretation Versuchsreihe 1

Bei allen Versuchen ist der größte Bodendurchgang bei Versuchsanfang gemessen worden. Der Bodendurchgang zur Zeit t = 0 h ist die Menge, die beim Befüllen der Versuchszelle durch den geotextilen Filter gespült worden ist. Die Diagramme auf Blatt 2 bis 7 (Anlage 4) zeigen einen Zusammenhang zwischen Bodendurchgangsmenge und der Systemdurchlässigkeit. Steigt die Bodendurchgangsmenge an, nimmt tendenziell die Durchlässigkeit zu oder bleibt konstant. Ist kein Bodendurchgang meßbar, nimmt die Durchlässigkeit ab. Dies wird auf eine Umlagerung der Feinteilchen an der Grenzschicht Boden/Geotextil oder im Geotextil selbst zurückgeführt. Aufgrund der hydraulischen Belastung kommt es zu einer Ansammlung von Feinteilchen im oder auf der Oberfläche des Geotextils. Strömungswirksame Poren des Filters werden dadurch verschlossen und es entsteht ein zunehmender Wasserdruck über dem Geotextil. Dieser wird so groß, daß, nach Erreichen eines kritischen Betrages, Kornstrukturen, die den Durchlässigkeitsrückgang bewirkten, zusammenfallen. Als Folge davon nimmt die Durchlässigkeit begleitet von Bodendurchgang zu. In Diagramm 15 ist dies beispielhaft für das Geotextil G3 dargestellt.



Diagramm 15: Darstellung des Durchlässigkeitsverlaufs und der Summenlinie des Bodendurchgangs für das Geotextil G3. Nimmt die Durchlässigkeit zu, steigt ebenso der Bodendurchgang; ab ca. 250 h ist nur mehr geringer Bodendurchgang vorhanden

Wie aus Anlage 4 Blatt 7 ersichtlich, ist nach 400 Stunden bei den Versuchen nur mehr geringer Bodendurchgang vorhanden (Ausnahme: Geotextilien G1 und G2). Aus den Schwankungen der Durchlässigkeiten aber ist zu erkennen, daß auch nach längeren Versuchszeiten noch Kornumlagerungen stattfinden müssen. Diese sind aber im Vergleich zu Versuchsbeginn schwächer ausgebildet. Das heißt, für relativ große Veränderungen der Durchlässigkeit sind nur mehr kleinere Kornfraktionen, die aber noch länger mobilisierbar sind, verantwortlich.

Vor diesem Hintergrund ist aber kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der wirksamen Öffnungsweite  $O_{90,w}$  und der Bodendurchgangsmenge erkennbar. Es bestehen keine ausschließlich geometrischen Zusammenhänge zwischen einer kennzeichnenden Porengröße, wie dies der Wert  $O_{90,w}$  darstellt, und dem Bodenpartikel, das die Pore gerade noch passieren kann. Geotextilien mit vergleichbaren wirksamen Öffnungsweiten, wie dies beim Geotextil G1, G5 und G7 der Fall ist, bewirken unterschiedliche Bodendurchgangsmengen. Alle drei Geotextilien weisen in etwa eine gleiche wirksame Öffnungsweite von 0,15 mm auf, unterscheiden sich aber wesentlich in der Bodendurchgangsmenge. In diesem Zusammenhang müssen die Kennwerte des Geotextils genauer betrachtet werden. Der bezeichnende Unterschied liegt im verwendeten Faserrohstoff des Geotextils. Das Geotextil G7 aus PES (hydrophile Oberflächeneigenschaften) mit einer größeren wirksamen Öffnungsweite weist einen größenordnungsmäßen gleichen Bodendurchgang auf, wie Geotextilien mit kleineren wirksamen Öffnungsweiten aus PP (hydrophobe Oberflächeneigenschaften). Diese Zusammenhänge sind im Diagramm 16 dargestellt. Es ist daraus erkennbar, daß keine eindeutige Korrelation zwischen der Bodendurchgangsmenge und der wirksamen Öffnungsweite  $O_{90,w}$  besteht.

Die Bodendurchgangsmengen bei einem  $O_{90,w}$  um 0,07 mm der Geotextilien G2, G4, G6 und G8 liegen im gleichen Größenordnungsbereich. Bei diesen Geotextilien ist die Anforderung laut DVWK (1992) an die zulässige wirksame Öffnungsweite noch am besten erfüllt. Die Porengrößen sind verhältnismäßig klein beziehungsweise ist die Porengrößenabstimmung zu den Schluffpartikel derart, daß porengeometrische Voraussetzungen für ein besseres Bodenrückhaltevermögen herangezogen werden können. Einflüsse wie z.B. aus Faserrohstoff oder Avivagen auf den Faseroberflächen, wie dies bei großen Porenöffnungsweiten der Fall war, sind in diesem Zusammenhang geringer. Das bedeutet, daß bei Poren eines Filters, die relativ groß im Vergleich zum Bodenpartikel sind, das die Pore passieren will, auch der Einfluß der Faseroberfläche größer ist.



Diagramm 16: Darstellung der Abhängigkeit der wirksamen Öffnungsweite von den in Versuchsreihe 1 gemessenen Bodendurchgangsmengen.

Die Systemdurchlässigkeiten bei den Versuchen mit den Geotextilien G3, G8, G7, G4 und G6 lagen bei Versuchsende unter der Durchlässigkeit des Bodens ohne Geotextil. Bei den Geotextilien G5 und G2 lag die Enddurchlässigkeit des Gesamtsystems im Bereich der Bodendurchlässigkeit. Die Systemdurchlässigkeit mit dem Geotextil G1 zeichnete sich durch eine im Vergleich zur Durchlässigkeit des Bodens etwas höheren Durchlässigkeit bei Versuchsende aus. Zur detaillierteren Beschreibung des Durchlässigkeitsverhaltens der einzelnen Versuche werden die in Tabelle 15 berechneten Faktoren A, B bzw. C eingeführt. Diese Verhältniswerte beschreiben eindeutig die Lage des Durchlässigkeitsverlaufs des Gesamtsystems zur Bodendurchlässigkeit (Faktor A,B), beziehungsweise die tendenzielle Entwicklung der Durchlässigkeit des Gesamtsystems (Faktor C).

|            | $A = k_{Boden} / k_{Anfang}$ | $\mathbf{B} = \mathbf{k}_{\text{Boden}} / \mathbf{k}_{\text{Ende} (1200 \text{ h})}$ | $C = k_{Anfang} / k_{Ende (1200 h)}$ |
|------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| <b>G</b> 1 | 0,7                          | 0,5  | 0,7                                  |
| G 2        | 1,3                          | 1,15   | 0,9                                  |
| G 3        | 0,7                          | 2,5  | 3,5                                  |
| G 4        | 1,07                         | 15,6   | 14,5                                 |
| G 5        | 0,15                         | 1  | 6,5                                  |
| <b>G</b> 6 | 0,2                          | 23,7   | 14,3                                 |
| G 7        | 0,65                         | 14,5   | 22,25                                |
| G 8        | 0,23                         | 7,4  | 31,67                                |

Tabelle 15:Verhältniswerte zur Bestimmung der Lage des Durchlässigkeitsverlaufs.<br/>  $k_{Ende(1200 h)}$  bezieht sich auf die Durchlässigkeit des Gesamtsystems nach<br/>
1200 Versuchsstunden.  $k_{Amfang}$  ist die Durchlässigkeit bei der ersten<br/>
Messung des Gesamtsystems.

Der Faktor A bezieht sich auf den Anfang des Versuchs und ist der Quotient aus der Durchlässigkeit des Bodens ohne Geotextil geteilt durch den ersten Wert der Durchlässigkeitsmessung des Gesamtsystems bei i' = 16. Für A > 1, ist die Durchlässigkeit des Gesamtsystems bei der ersten Messung kleiner als die Durchlässigkeit des Bodens. Das bedeutet, daß bei Versuchsstart Feinteilchenbewegungen stattfinden, die eine Systemdurchlässigkeit kleiner als die Bodendurchlässigkeit bewirken. Dies konnte nur bei den Geotextilien G2 und G4 festgestellt werden. Für A < 1 ist die Anfangsdurchlässigkeit des Gesamtsystems noch höher als die Durchlässigkeit des Bodens. Dies traf für den Rest der Geotextilien zu, muß jedoch nicht eine hinreichende hydraulische Filterwirksamkeit für die gesamte Versuchsdauer bedeuten. Der Faktor B ist definiert als Quotient aus der Durchlässigkeit des Bodens ohne Geotextil und der Durchlässigkeit des Gesamtsystems am Ende des Versuchs nach 1200 Stunden. Entscheidend ist die Entwicklung von Faktor A zu B. Für die Geotextilien G3, G5, G6, G7 und G8 bedeutet dies, daß das anfänglich durchlässigere Gesamtsystem (A < 1) bei Versuchsende in ein undurchlässigeres System als der Boden (B  $\geq$  1) überging. Das ist ein Hinweis für eine eingeschränkte hydraulische Filterwirksamkeit. Anders verhält es sich bei den Geotextilien G1 und G2. Bei diesen Geotextilien nahm die Durchlässigkeit bis zum Versuchsende hin leicht zu, wobei die Durchlässigkeit von G1 schon am Anfang größer (A<1) und bei Geotextil G2 kleiner (A>1) war als der Boden ohne Geotextil. Die Faktoren C geben, unabhängig von der Durchlässigkeit des Bodens ohne Geotextil , die Tendenz an, ob die Systemdurchlässigkeit steigt (C < 1) oder abnimmt (C > 1). In diesem Zusammenhang ist nur für das Geotextil G2 eine konstante Durchlässigkeit gemessen wurde, sind die Durchlässigkeiten bei den restlichen Geotextilien stark zurückgegangen.

Eine ausschließliche Rückführung dieses Durchlässigkeitsverhaltens auf die einzelnen physikalischen Kennwerte wie z.B. Dicke, vertikale Durchlässigkeit und wirksame Öffnungsweite ist nicht möglich. Zusätzliche Einflußparameter wie die Herstellungsart oder der Faserrohstoff, die beim Einsatz in der Praxis ebenso vorhanden sind, sind offensichtlich für die Ergebnisse unter diesen Versuchsbedingungen, verantwortlich. Vor diesem Hintergrund ist die kombinierte Betrachtung der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit eines Geotextils von entscheidender Bedeutung. Dazu werden im Diagramm 17 diese beiden Anforderungen in Abhängigkeit von einander aufgetragen.

Entsprechend den Vorgaben des DVWK (1992), wonach für derartige Böden Untersuchungen zur Suffosionssicherheit vorgeschrieben werden und dem Grundverständnis über die Filterwirksamkeit, wonach die Gewährleistung einer langfristigen Funktionsfähigkeit eines Filters nur durch eine Optimierungslösung herbeizuführen ist, soll beispielhaft ein Geotextil aus dieser Versuchsreihe ausgewählt werden, das unter diesen Versuchsrandbedingungen für eine konkrete Deponiebaumaßnahme am geeignetsten wäre. Aus dem Diagramm 17 werden die beiden Extreme der Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit bei gleichzeitigem Versagen der mechanischen Filterwirksamkeit und umgekehrt deutlich. Das bedeutet für die Geotextilien G4, G6, G7 und G8 ist die mechanische Filterwirksamkeit gewährleistet, da der Bodendurchgang gering ist, gleichzeitig sind die Rückgänge der Durchlässigkeit des Gesamtsystems aber groß. Für die Geotextilien G1, G3 und G5 trifft das Gegenteil zu. In diesem Fall ist die mechanische Filterwirksamkeit nicht gewährleistet, die hydraulische jedoch schon. Das optimalste Ergebnis wird für das Geotextil G2 erreicht, für dessen Einsatz man sich bei der Baumaßnahme einer Deponie aufgrund der labortechnischen Untersuchungen entscheiden müßte. Das Ergebnis ist zusätzlich noch durch den Faktor B zu überprüfen, da dieser eine Aussage über die Durchlässigkeit dieses Geotextils im Vergleich zum gemischtkörnigen Boden 1 macht. In diesem Fall ist B = 1,15 und bedeutet, daß die Durchlässigkeit am Ende des Versuch nach 1200 Stunden in etwa der Durchlässig-keit des Bodens ohne Geotextil entspricht.



Diagramm 17: Gegenseitiger Einfluß der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit bei Versuchsreihe 1

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Untersuchungen mit der Dimensionierung nach DVWK (1992), enthalten im Kapitel 4.4, soll Erkenntnis darüber bringen, ob die Untersuchungen für das Auswahlkriterium eines geeigneten Geotextils überhaupt notwendig wären. Hinsichtlich des mechanischen Nachweises erfüllten die Geotextilien G2, G4, G6 und G8 am ehesten die Anforderungen an die wirksame Öffnungsweite. Bezüglich der hydraulischen Filterwirksamkeit ergibt die Dimensionierung eine ausreichende vertikale Durchlässigkeit dieser Geotextilien. Vergleicht man hierzu Diagramm 17, hat sich aber gerade bei diesen Geotextilien, mit Ausnahme von Geotextil G2, ein hydraulisches Filterversagen eingestellt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Durchführung von Versuchen. Die Ursachen des hydraulischen Versagens der Geotextilien G4, G6 und G8 sind unter anderem die Herstellungsart, der Faserrohstoff oder auch die verwendete Avivage auf den Geotextilfasern. Für die Geotextilien G1, G3 und G5 waren die Ergebnisse aufgrund der Bemessung zu erwarten. Die wirksamen Öffnungsweiten der Geotextilien sind für die Gewährleistung der mechanischen Filterwirksamkeit zu groß und hätten aufgrund dieser Dimensionierung im Rahmen eines für einen praktischen Anwendungsfall aufgestellten Versuchsprogrammes nicht labortechnisch untersucht werden müssen. Überraschend ist in diesem Zusammenhang das Abschneiden des Geotextils G7, das obwohl mechanisches Filterversagen erwartet worden wäre, hydraulisch versagt, was aber offensichtlich mit dem Faserrohstoff zusammenhängt.

### 6.1.3 Interpretation Versuchsreihe 2

Charakteristisch für die Verläufe der Durchlässigkeiten der einzelnen Versuche ist, daß diese überwiegend geringere Schwankungen aufweisen. Die Faktoren A, B und C zur Charakterisierung des Durchlässigkeitsverhaltens sind in Tabelle 16 dargestellt.

|            | $\mathbf{A} = \mathbf{k}_{\mathrm{Boden}} / \mathbf{k}_{\mathrm{Anfang}}$ | $\mathbf{B} = \mathbf{k}_{\text{Boden}} / \mathbf{k}_{\text{Ende}(1000 \text{ h})}$ | $\mathbf{C} = \mathbf{k}_{\text{Anfang}} / \mathbf{k}_{\text{Ende (1000 h)}}$ |
|------------|---|---|---|
| <b>G</b> 1 | 0,7   | 2,73  | 4   |
| G 2        | 0,8   | 2,73  | 3,5   |
| G 3        | 0,5   | 1,8   | 3,3   |
| G 4        | 0,8   | 3,2   | 4,11  |
| G 5        | 0,2   | 0,4   | 1,7   |
| <b>G</b> 6 | 0,5   | 9,9   | 21,8  |
| G 7        | 0,4   | 7,8   | 18,6  |
| G 8        | 0,5   | 1,8   | 3,3   |

Tabelle 16:Verhältniswerte zur Bestimmung der Lage des Durchlässigkeitsverlaufs.<br/>  $k_{Ende(1000 h)}$  bezieht sich auf die Durchlässigkeit des Gesamtsystems nach<br/>
1000 Versuchsstunden.  $k_{Anfang}$  ist die Durchlässigkeit bei der ersten<br/>
Messung des Gesamtsystems.

Die Durchlässigkeit aller Versuche ist bei Versuchsanfang größer als die Durchlässigkeit des Bodens ohne Geotextil (A < 1). Bei Versuchsende nach 1000 Stunden liegt die Durchlässigkeit der Gesamtsysteme bei allen Versuchen (Ausnahme G5) unter der Durchlässigkeit des Bodens ohne Geotextil (C > 1). Trendmäßig nimmt die Durchlässigkeit bei allen Geotextilien ab. Bei den Geotextilien G2, G4, G6 und G8 mit wirksamen Öffnungsweiten bei 0,07 mm ist der geringste Bodendurchgang aufgetreten. Die Bodendurchgangsmengen liegen im gleichen Größenordnungsbereich zwischen 0,7 und 2,5 g. Eine größere Streuung ergibt sich bei den Geotextilien mit größeren wirksamen Öffnungsweiten. Bei Geotextil G5 tritt mit 18 g der größte Bodendurchgang auf. Beim Versuch mit Geotextil G7 mit ähnlicher wirksamer Öffnungsweite ist nur 2,2 g Bodendurchgang vorhanden. Das Geotextil G3 mit der größten wirksamen Öffnungsweite verursacht einen Bodendurchgang von 10 g. Die Abhängigkeit des Bodendurchgang nach 1000 Versuchsstunden von der wirksamen Öffnungsweite ist in Diagramm 18 dargestellt. Die kombinierte Betrachtung der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit zeigt Diagramm 19.



Diagramm 18: Darstellung der Abhängigkeit der wirksamen Öffnungsweite von den in Versuchsreihe 2 gemessenen Bodendurchgangsmengen.

Die Geotextilien G3 und G5 sind vorwiegend hydraulisch wirksam, wohingegen die Geotextilien G7 und G8 hauptsächlich mechanisch filterwirksam sind. Die Geotextilien G1, G2, G4 und G8 gewährleisten am ehesten die Kombination der Anforderungen an einen Filter.



Diagramm 19: Gegenseitiger Einfluß der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit bei Versuchsreihe 2.

# 6.1.4 Vergleich Versuchsreihe 1 und 2

Am auffälligsten sind die unterschiedlich stark ausgeprägten Schwankungen der Durchlässigkeitsverläufe zwischen der Versuchsreihe 1 und 2. Bei Versuchsreihe 1 sind in der Regel größere Bodenmengen durchgespült worden als bei Versuchsreihe 2. Bei Geotextilien mit größerer wirksamer Öffnungsweite und höherem Porenanteil ist die Durchlässigkeit des Gesamtsystems bei Versuchsreihe 1 größer als bei Versuchsreihe 2. Die Ursache für diese unterschiedlich gemessenen Durchlässigkeitsverläufe bei Versuchsreihe 1 und 2 liegen im Feinteilchentransport. Dieser ist abhängig von der Schleppkraft des durchströmenden Wassers. Vor diesem Hintergrund kann gut entlüftetes Wassers bezüglich der Schleppkraft für Feinteilchen eine idealere Flüssigkeit darstellen, da dabei beim Strömungsvorgang durch ein Porengefüge keine Luftblasen entstehen. Diese Luftblasen können hinsichtlich der Feinteilmobilität stabilisierend wirken. Eine Luftblase in einer Porenengstelle verhindert aufgrund der Oberflächenspannung und der Kompressibilität der Luft einen Feinteiltransport in dieser Pore. Ist dagegen die Luftblase nicht vorhanden, kann ein voller Kraftangriff des Wassers auf der gesamten Anströmseite des Feinteilchens erfolgen und dadurch einen Feinteiltransport bewirken. Ein idealer Kraftangriff auf ein mobilisierbares Feinteilchen kann zwei unterschiedliche Effekte bewirken. Zum einen kann das System durchlässiger werden, wenn die Feinteilchen ausgespült werden, zum anderen kann die Durchlässigkeit abnehmen, wenn sich vermehrt Feinteilchen in dichterer Lagerung in der Grenzschicht Boden/Geotextil oder im Geotextil einlagern, weil ein Passieren aufgrund der Porenstruktur nicht möglich ist. Bei Verwendung von Wasser mit geringen Sauerstoffgehalten sind die Schwankungen der Durchlässigkeit auf das Zusammenfallen der Kornstrukturen im oder über dem Geotextil aufgrund einer höheren Schleppkraft des Wassers zurückzuführen.

# 6.2 Versuche mit dem Suspensionstest

# 6.2.1 Versuchsreihe

Die Versuchsdurchführung erfolgt nach dem in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Verfahren. In dieser Versuchsreihe wurden, wie bei der zuvor beschriebenen Versuchsreihe, die Geotextilien G1 bis G8 untersucht. Die physikalischen Kennwerte dieser Geotextilien sind im Kapitel 4.3 enthalten. Die Kombination aus drei unterschiedlichen Sand/Kieskörpern, drei Suspensionen und den 8 Geotextilien ergibt eine Anzahl von insgesamt 72 Einzelversuchen. Zur Identifizierung der verwendeten Parameter bei den einzelnen Versuchen ist das Versuchsprogramm in Tabelle 17 zusammengefaßt.

| Feinteile       | Feinteile fraktionierter<br>Schluff |      | No          | Normensand |      | Kaolin |      |      |      |
|-----------------|-------------------------------------|------|-------------|------------|------|--------|------|------|------|
| Sand/Kieskörper | 1/2                                 | 2/4  | 4/8         | 1/2        | 2/4  | 4/8    | 1/2  | 2/4  | 4/8  |
| <b>G</b> 1      | V 56                                | V 53 | V 55        | V 50       | V 49 | V 47   | V 79 | V 77 | V 75 |
| G 2             | V 52                                | V 98 | V 54        | V 51       | V 48 | V 46   | V 74 | V 78 | V 76 |
| G 3             | V 24                                | V 21 | V 19        | V 26       | V 97 | V 18   | V 63 | V 64 | V 61 |
| <b>G</b> 4      | V 25                                | V 23 | V 40        | V 29       | V 27 | V 20   | V 62 | V 67 | V 60 |
| G 5             | V 37                                | V 34 | V 41        | V 43       | V 39 | V 30   | V 73 | V 70 | V 68 |
| <b>G</b> 6      | V 35                                | V 33 | V 32        | V 42       | V 38 | V 36   | V 72 | V 71 | V 69 |
| <b>G</b> 7      | V 93                                | V 96 | V 13        | V 9        | V 12 | V 14   | V 85 | V 87 | V 84 |
| G 8             | V 6                                 | V 7  | <b>V</b> 11 | V 15       | V 16 | V 17   | V 83 | V 86 | V 81 |



Die Nachweise der mechanischen Filterwirksamkeit der einzelnen Geotextilien ist in Kapitel 4.4 enthalten. Der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit ist bei Suspensionversuchen nicht möglich, da kein Durchlässigkeitsbeiwert der abzufilternden Schicht bestimmbar ist.

# 6.2.2 Auswertung der durchgeführten Versuche

Die Auswertung der Versuche erfolgt mit Hilfe der Bestimmung der Permittivität des Gesamtsystems nach Formel (22). In Diagramm 20 ist eine typischer Verlauf der Permittivität bei Suspensionsbeaufschlagung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt.



Diagramm 20: Entwicklung der Permittivität des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Zu erkennen ist der Rückgang der Permittivität nach Zugabe von Feinteilen

Während der Anfangsphase (ohne Zugabe von Feinteilen) ist die Permittivität konstant. Unmittelbar nach Beaufschlagung mit Feinteilchen, im Diagramm 20 durch Pfeile gekennzeichnet, sinkt die Systempermittivität. Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt der Rückgang ab, bis die Permittivitätskurve nach einer weiteren Feinteilzugabe wieder steiler abfällt. Die Steigung der Permittivitätskurve ist von den auftretenden Phänomenen an der Grenzschicht Boden/Geotextil abhängig. Ein Kurvenabschnitt mit der Steigung Null, der bei den Versuchen in der Regel nur während der Anfangsphase auftritt, bedeutet, daß aufgrund der fehlenden Feinteilchen keine Grenzflächenphänomene auftreten. Eine stark fallende Permittivitätskurve weist auf ausgeprägte Umlagerungs- oder Einlagerungsvorgänge hin. Steigt nach einem starken Rückgang die Systemdurchlässigkeit wieder an, werden Feinteile aus der Grenzschicht ausgespült, was ein Hinweis für Piping ist. Um die Auswirkung der Zugaben auf die Systemdurchlässigkeit auswerten zu können, ist die Permittivität kurz vor den Zugaben und bei Versuchsende relevant. Diese Werte werden in dieser Versuchsreihe folgendermaßen bezeichnet:

> $\Psi_{10}(0)$ ....Permittivität während der Anfangsphase [ 1 / s ]  $\Psi_{10}(1)$ ....Permittivität kurz vor der 2. Zugabe [ 1 / s ]  $\Psi_{10}(2)$ ....Permittivität kurz vor der 3. Zugabe [ 1 / s ]  $\Psi_{10}(3)$ ....Permittivität bei Versuchsende [ 1 / s ]

Mit diesen gemessenen Permittivitäten werden die folgenden Rückgänge definiert:

R1 =  $\Psi_{10}(0)/\Psi_{10}(1)$ R1....Permittivitätsrückgang durch die erste Zugabe [-]

R2 =  $\Psi_{10}(1)/\Psi_{10}(2)$ R2....Permittivitätsrückgang durch die zweite Zugabe [-]

R3 =  $\Psi_{10}(2)/\Psi_{10}(3)$ R2....Permittivitätsrückgang durch die dritte Zugabe [-]

Rges =  $\Psi_{10}(0)/\Psi_{10}(3)$ Rges....Permittivitätsrückgang durch alle drei Zugaben [-]

Zunächst werden nachfolgend zusätzliche für die Auswertung notwendige Definitionen und Begriffe eingeführt:

### Feinteilrückstand im System

Der Feinteilrückstand im System teilt sich auf in eine zurückgehaltene Feinteilmasse in der Geotextilprobe und einer Masse, die sich im oder auf dem Sand-/Kieskörper abgelagert hat.

Durch die im und auf dem Sand-/Kieskörper zurückgehaltene Feinteilmasse ist es möglich, eine Aussage über die mechanische Filterwirksamkeit des Boden-Geotextil-Systems zu treffen. Ist die zurückgehaltene im Vergleich zu der zugegebenen Feinteilmasse gering, ist keine ausreichende Bodenretention vorhanden und es liegt Piping vor. Ferner ist es interessant, ob sich Abhängigkeiten zwischen den zurückgehaltenen Feinteilen und  $\Psi_{10}(3)$  ergeben. Blinding liegt vor, je geringer der  $\Psi_{10}(3)$ -Wert ist und damit einhergehend je mehr Feinteile zurückgehalten werden. Dabei wird die Sekundärfilterschicht über dem Geotextil um so undurchlässiger, je mehr Feinteile eingelagert werden. Liegt der Wert  $\Psi_{10}(3)$  größenordnungsmäßig im gleichen Bereich und unterscheiden sich dennoch die zurückgehaltenen Feinteilmassen der Versuche, ist die Grenzschicht zwischen Boden und Geotextil für die Systemdurchlässigkeit ausschlaggebend. Ferner kann damit geklärt werden, ob der Gesamtrückgang der Permittivität von der Masse der zurückgehaltenen Feinteilen abhängt.

Durch den Feinteilrückstand im Geotextil dagegen werden Hinweise auf die Wechselwirkung zwischen Boden und Geotextil erwartet. Ein hoher Feinteilrückstand im Geotextil beweist, daß viele Partikel in die Geotextilstruktur eindringen. Dies deutet auf Clogging oder Blinding hin. Einerseits können geringe Feinteilrückstände darauf hinweisen, daß die Bodenpartikel auf der Geotextiloberfläche und den Porenöffnungen zum Liegen kommen. Dabei ist es den Feinteilen nicht möglich in die Geotextilstruktur einzudringen, da das Verhältnis der Porenweiten und der Durchmesser der Bodenpartikel zu ungünstig ist. Diese Wechselwirkung zwischen Geotextil und Boden wird "Blocking" genannt. Andererseits können geringe Feinteilrückstände im Geotextil das Phänomen "Piping" bedeuten. Die Porendurchmesser sind im Vergleich zum Durchmesser der Bodenpartikel größer und die Feinteile können sich dadurch nicht in die Geotextilporen einlagern. Die Masse der im Geotextil zurückgehaltenen Feinteilchen werden folgendermaßen berechnet:

$$\mathbf{m}_{\rm FT} = \mathbf{m}_{\rm GT(nach)} - \mathbf{m}_{\rm GT(vor)} \tag{24}$$

 $m_{GI(vor)}$ ......Masse des Geotextils im trockenen Zustand vor Versuchsbeginn [g]  $m_{GI(nach)}$ .....Masse des Geotextils im trockenen Zustand nach Versuchsende [g]  $m_{TT}$ .....Feinteilmasse im Geotextil im trockenen Zustand [g]

### Zuschlämmgrad

Der Zuschlämmgrad des Geotextils ist das Verhältnis des durch Einlagerungen zugeschlämmten zum vorhandenen Porenvolumen der Geotextils. Bhatia (1993) weist darauf hin, daß partikuläres Zuschlämmen von Geotextilien bis zu 80 % keinen Einfluß auf die

Systemdurchlässigkeit haben kann. Folglich ist bei geringeren Werten Clogging auszuschließen. Sehr geringe Zuschlämmgrade ist ein Kennzeichen für Blocking und Piping.

$$Z = m_{FT} / (V_{P} * \rho_{s}) = m_{FT} / (A_{GT} * d_{GT} * n_{GT} * \rho_{s})$$
(25)

Ζ Zuschlämmgrad des Geotextils [ % ] V<sub>P</sub> Porenvolumen der Geotextilprobe [ cm<sup>3</sup>] Rohdichte der Feinteile[g/cm<sup>3</sup>]  $\rho_{\rm s}$ Fläche der Geotextilprobe [ cm<sup>2</sup>] Agr d<sub>or</sub> Dicke der Geotextilprobe [ cm ] Porenanteil der Geotextilprobe [-] n<sub>GT</sub>

A

n

Mittlere Einlagerungsdichte der Feinteile im und auf dem Sand-/Kieskörper pd(SKK+FTS)

Die mittlere Einlagerungsdichte  $\rho_{d(SKK+FTS)}$  kann Aufschluß über die Einlagerung der Feinteile im Sand-/Kieskörper geben. Je geringer die Dichte der eingelagerten Feinteilchen ist, desto größer ist die Durchlässigkeit der Feinteilschicht im Sand-/Kieskörper. Dadurch können Rückschlüsse auf die Systemdurchlässigkeit gezogen werden. Die mittlere Einlagerungsdichte der Feinteile im und auf dem Sand-/Kieskörper pd (SKK+FTS) wird folgendermaßen definiert. Die Bedeutung der einzelnen Bezeichnungen ist in Abbildung 15 schematisch dargestellt

$$\rho_{d(SKK+FTS)} = m_{FT(SKK+FTS)} / (V_{FT(SKK)} + V_{FT(FTS)})$$

$$= m_{FT(SKK+FTS)} / (d_{SKK} * A * n + d_{FTS} * A)$$
(26)

mittlere Trockendichte der Feinteile im und auf dem Sand-/Kieskörper [g/cm<sup>3</sup>]  $\rho_{d(SKK+FTS)}$ Trockenmasse der im und auf dem Sand-/Kieskörper zurückgehaltenen Feinteile [g]  $m_{\rm FT(SKK+FTS)}$ V<sub>FT(SKK)</sub> Volumen des im Sand-/Kieskörper zugeschlämmten Bereichs [ cm<sup>3</sup>] V<sub>FT (FTS)</sub> Volumen der Feinteilschicht auf dem Sand-/Kieskörper [ cm<sup>3</sup>]  $\mathbf{d}_{\mathbf{s}\mathbf{k}\mathbf{k}}$ Dicke des im Sand-/Kieskörper zugeschlämmten Bereichs [ cm ]  $d_{FTS}$ Dicke der Feinteilschicht auf dem Sand-/Kieskörper [ cm ] durchströmte Zylinderfläche [ cm<sup>2</sup>] Porenanteil des Sand-/Kieskörpers [-]



Abbildung 15: Schematische Darstellung der Feinteilschicht (FTS) und des Sand-/ Kieskörpers (SKK)

# 6.2.3 Auswertung der Anfangsdurchlässigkeiten ohne

# Suspensionsbeaufschlagung

Die Auswertung der Durchlässigkeiten vor der ersten Zugabe der Suspension ermöglicht die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse mit dieser Versuchstechnik. Da bei jeder Suspensionsart erneut die Bestimmung der Anfangsdurchlässigkeit des Gesamtsystems mit dem gleichen Geotextil erfolgt, stehen drei unabhängige Anfangsdurchlässigkeiten zur Verfügung, deren Werte größenordnungsmäßig übereinstimmen müssen. Die Versuchsergebnisse zeigen nur geringe Abweichungen bei den gleichen Geotextiltypen mit gleichem Sand/Kieskörper. Das bedeutet, daß im Rahmen dieser Versuchsreihe eine gute Konstanz im Einbau des Sand-/Kieskörpers gewährleistet ist und dadurch für die Beaufschlagung der unterschiedlichen Suspensionen nahezu gleiche Strömungsbedingungen vorliegen. Dies ist wichtig im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Auswirkungen unterschiedlicher Suspensionsarten auf die Filterwirksamkeit der zu untersuchenden Geotextilien.

Ferner ist eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen Durchlässigkeiten mit berechenbaren Durchlässigkeiten möglich. Die Berechnung eines Gesamtdurchlässigkeitsbeiwertes eines geschichteten Systems, bei homogenem Aufbau der einzelnen Schichten, wie in diesem Fall das Geotextil und der Sand-/Kieskörper erfolgt mit folgender Formel:

$$\mathbf{k}_{10(\text{rech})}(0) = \mathbf{d}_{\text{GT}} + \mathbf{d}_{\text{W}} / (\mathbf{d}_{\text{GT}} / \mathbf{k}_{\text{v}} + \mathbf{d}_{\text{W}} / \mathbf{k})$$
(27)

[m/s]

k10(rech)(0)Einlaufdurchlässigkeit berechnet [m/s]kDurchlässigkeit des Sand-/Kieskörpers aus Tabelle 12 in Kap. 5.3.4dwDicke des Widerstandskörpers Gesamtschicht [m]

# d\_GTDicke Geotextil [m]k\_vvertikale Durchlässigkeit des Geotextils [m/s]

In Diagramm 21 ist ein Vergleich der berechneten und der gemessenen Einlaufdurchlässigkeiten dargestellt. Aus dem Diagramm geht folgender systematischer Zusammenhang hervor. Die gemessenen Durchlässigkeiten sind größer als die berechneten. Die Abweichung der gemessenen Durchlässigkeiten von den berechneten nimmt mit zunehmend gröberer Körnung des Sand/Kieskörpers zu. Bei zunehmend gröberer Körnung des Sand/Kieskörpers liegen aufgrund höherer Strömungsgeschwindigkeiten zunehmend turbulentere Strömungsbedingungen vor, die bei einer Berechnung des Gesamtdurchlässigkeitsbeiwertes berücksichtigt werden müßten. Die bei der Kiesfraktion 4/8 gemessenen Abweichungen liegen aber noch in einem akzeptablen Bereich, der eine Auswertung der Permittivitäten unter Zugabe von Suspensionen im laminaren Strömungsbereich erlaubt.



Diagramm 21: Mittlere gemessene Anfangsdurchlässigkeiten in Abhängigkeit von den berechneten Durchlässigkeiten der Gesamtsysteme

Ein weiterer Grund für die Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Werten können eingelagerte Luftbläschen im Korngerüst sein, die vermehrt beim Kieskörper 4/8 zu beobachten waren. Auffallend in diesem Diagramm sind die hervorgehobenen Werte des Geotextils G4, die bei jeder Sand-/Kiesfraktion größere Abweichungen aufzeigten. Weiterhin kann ein systematischer Zusammenhang zwischen dem Geotextil und dem Sand-/Kieskörpers hinsichtlich der Anfangsdurchlässigkeit gezeigt werden. Dies wird deutlich wenn die gemittelten Anfangsdurchlässigkeiten  $k_{10M}(0)$  der Versuche mit gleichem Sand-/Kieskörper und gleichen Geotextil in Abhängigkeit vom Verhältniswert aus  $k_{10(Boden)}$  und  $k_{10(Geotextil)}$  graphisch dargestellt wird. Der Verhältniswert V wird mit

$$\mathbf{V} = \mathbf{k}_{10(\text{Boden})} / \mathbf{k}_{10(\text{Geotextil})} \qquad [-]$$
(28)

definiert.

Die Trendlinien in Diagramm 22 verbinden Punkte gleicher Geotextilien mit unterschiedlichen Sand-/Kieskörpern. Die lineare Steigung der Trendlinien sagt aus, daß die Anfangsdurchlässigkeit um so größer ist, je größer der Wert V ist.



 Diagramm 22: Abhängigkeit der gemittelten Anfangsdurchlässigkeit k<sub>10M</sub>(0) vom
 V-Wert. Mit Zunahme des V-Wertes nimmt auch die Anfangsdurchlässigkeit zu. Die Trendlinie des duchlässigsten Geotextils G5 liegt über den Trendlinien der anderen durchlässigeren Geotextilien.

Anschaulicher ist die gleichbedeutende zu erwartende Aussage, daß bei Verwendung des gleichen Geotextils mit zunehmend durchlässigeren Sand-/Kieskörper die Einlaufdurchlässigkeit linear zunimmt. Interessant ist die Reihenfolge der Trendlinien, die der Reihenfolge der Durchlässigkeiten der Geotextilien entspricht. Das bedeutet, die Trendlinie des durchlässigsten Geotextils G5 liegt am weitesten oben und weist die größten Einlaufdurchlässigkeiten auf.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Auswertung der Anfangsdurchlässigkeiten gezeigt hat, daß für jede Suspensionsart bei Versuchsstart gleiche Randbedingungen vorliegen und daß unterschiedliche Geotextilien in Kombination mit verschiedenen Sand-/Kieskörpern einen systematischen Zusammenhang ergeben. Dies stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Eignung dieser Versuchstechnik und der daraus ableitbaren Ergebnisse dar.

# 6.2.4 Beaufschlagung mit fraktioniertem Schluff

Die Permittivitätsverläufe in Abhängigkeit von der Versuchsdauer der 24 Versuche mit dem fraktionierten Schluff sind in Anlage 4 Blatt 14 und 15 graphisch dargestellt. Aufgrund der Permittivität des Gesamtsystems bei Versuchsende erfolgt eine Einteilung der Versuche in eine durchlässige Gruppe "D" und in eine gering durchlässige Gruppe "G". Der Gruppe D gehören die Versuche mit den Geotextilien G1, G2, G3, G5 und G6 und der Gruppe G die Versuche mit den Geotextilien G4, G7 und G8 an. Das Diagramm in Anlage 4 Blatt 15 verdeutlicht die Einteilung besonders gut, die Gruppe D ist im Durchschnitt 500fach durchlässige siger als Gruppe G. Im folgenden wird eine differenzierte Auswertung der Versuche mit dem fraktionierten Schluff vorgenommen.

### 6.2.4.1 Filtermechanismus

Im Diagramm 23 ist die Permittivität  $\Psi_{10}(3)$  aller 24 mit fraktioniertem Schluff beaufschlagten Versuche in Abhängigkeit von der Masse der zurückgehaltenen Feinteile dargestellt. Der schraffierte Bereich zeigt deutlich, daß das System um so undurchlässiger wird, je mehr Feinteile im Sand/Kieskörper zurückgehalten werden. Demnach bewirkt eine dickere Sekundärfilterschicht eine geringere Permittivität  $\Psi_{10}(3)$ . Dies gilt als Hinweis, daß bei den Versuchen mit fraktioniertem Schluff, bei denen sich die feinen Bodenteilchen oberstrom der eigentlichen Filterebene absetzen, Blinding entsteht. Dabei stellt sich eine Systempermittivität ein, die von den über dem Geotextil liegenden Feinteilchen abhängt. Im Diagramm 23 stellt der zweite schraffierte Bereich die Abhängigkeit des Permittivitätsrückgang Rges von den im Sand-/Kieskörper zurückgehaltenen Feinteile dar. Rges ist bei Versuchen, bei denen sich viele Feinteile oberstrom des Geotextils absetzen, groß. Die Ansammlung von Feinmaterial bewirkt zwar den Rückgang Permittivität des Gesamtsystems, die Ursache für die Ansammlung der Feinteile ist aber das Geotextil.

Bei fast allen der 24 Versuche ist der R1-Wert größer als der R2- und R3-Wert. Dies ist dadurch zu erklären, daß sich bereits durch die erste Feinteilzugabe eine Filterschicht auf der Geotextiloberfläche bildet, die die nachfolgenden Feinteile größtenteils zurückhält. Auch Faure et al. (1993) hat bei seinen Untersuchungen festgestellt, daß zu Beginn der Beaufschlagung von Suspensionen die Bodenteilchen solange ausgespült werden, bis sich eine gewölbeähnliche Struktur oberhalb des Geotextils bildet. Der Bodendurchgang nimmt dadurch schlagartig ab. Durch die erste Einlagerung der Feinteile nimmt die Permittivität des Systems verhältnismäßig stark ab. Dies wird durch den steilen Abfall der Permittivitätskurven im Anschluß an die Feinteilzugabe (vor allem bei den Versuchen der Gruppe G) bestätigt.

Beispielsweise werden bei Versuch V23 51 g der ersten Zugabe durchgespült. Bis 8 Minuten nach der ersten Beaufschlagung ist Bodendurchgang zu erkennen. Im Anschluß an die zweite bzw. dritte Zugabe wandern nur 0,25 g bzw. 0,16 g durch den Filter. Obwohl der Bodendurchgang bei den Versuchen mit den Geotextilien der Gruppe G bei der zweiten und dritten Zugabe geringer ist als bei der ersten Zugabe, sind die Werte von R2 und R3 deutlich kleiner als von R1. Infolge der zweiten und dritten Zugabe entsteht eine geringere Permittivitätsänderung, da im Vergleich zur ersten Zugabe weniger Feinteile in die Grenzschicht Boden/Geotextil eindringen können. Dies bedeutet, daß tieferliegende Schichten eines Sekundärfilters undurchlässiger sind und einen höheren Verdichtungsgrad aufweisen. Die tieferliegenden Schichten werden einerseits bei relativ hoher Systemdurchlässigkeit eingelagert. Dabei ist die Schleppkraft des Wassers größer und es ist nicht auszuschließen, daß die Einlagerungen besser verdichtet werden. Andererseits wandert durch Bodenumlagerung sehr feines Material in die Grenzschicht ein und die Durchlässigkeit kann sich entsprechend erhöhen. Daß diese Schicht verhältnismäßig nah an der Geotextilprobe liegt, wird durch folgende Überlegung bestätigt:

Bei den Versuchen mit den Geotextilien G8 und G4 sind die Poren des Sand-/Kieskörpers in unterschiedlicher Höhe mit Feinteilchen gefüllt. Obwohl die mittlere Dichte der im Sand-/Kieskörper eingelagerten Feinteile bei den Versuchen mit dem Geotextil G4 zwischen 1,0 und 1,2 g/cm<sup>3</sup> und bei den Versuchen mit dem Geotextil G8 nur zwischen 0.3 und 0,8 g/cm<sup>3</sup> beträgt, ist die Permittivität  $\Psi_{10}(3)$  der Versuche mit dem entsprechenden Sand-/Kieskörper etwa gleich groß. Es ist nicht auszuschließen, daß die Grenzschichten über dem Geotextil bei beiden Systemen einen höheren und zugleich ähnlichen Verdichtungsgrad aufweisen. Dies bedeutet, daß die Systemdurchlässigkeit von der Grenzschicht Boden/Geotextil abhängt. Clogging kann als möglicher Filtermechanismus ausgeschlossen werden. Bhatia et al. (1991) haben festgestellt, daß bei Besetzung von bis zu 80% des Geotextilporenraums mit Bodenpartikel die Systemdurchlässigkeit noch unbeeinflußt sein kann. Die Auswertung der Geotextileinlagerungen ergaben, daß bei den Versuchen mit dem fraktionierte Schluff maximal 40% des Geotextilporenvolumens mit Bodenpartikel besetzt waren.



Diagramm 23:  $R_{ges}$  und  $\Psi_{10}(3)$ -Wert in Abhängigkeit von den im Sand-/Kieskörper zurückgehaltenen Feinteilen

6.2.4.2 Zusammenfassung der Versuche mit den Geotextilien des selben Herstellers

Die Geotextilien G1 und G2, G3 und G4, G5 und G6 sowie G7 und G8 sind jeweils vom gleichen Hersteller. Die Geotextilien mit ungerader Kennziffer sind durch eine vergleichsweise geringe Dicke, große wirksame Öffnungsweite, geringe Flächenmasse, höheren Porenanteil und große vertikale Durchlässigkeit gekennzeichnet. Die Versuche der Geotextilien eines Herstellers werden unter der Voraussetzung des gleichen Sand-/Kieskörpers verglichen. Folgende Tendenz ist dabei feststellbar. Beim Versuch mit dem Geotextil mit gerader Kennziffer ist

- · die Permittivität vom Versuchsbeginn bis zum Versuchsabbruch geringer
- der Rges-Wert größer
- der Feinteilrückstand im Sand-/Kieskörper größer
- · der Feinteilrückstand im Geotextil größer

als beim Versuch mit dem Geotextil mit ungerader Kennziffer des selben Herstellers. Durch diese Gegenüberstellung wird der Einfluß des Sand-/Kieskörpers und der Herstellungsbedingungen der Geotextilien eliminiert. Bei beiden Versuchen wird die gleiche Sand-/Kiesfraktion verwendet, wodurch die Feinteilchen die Geotextiloberfläche mit der gleichen Konzentration erreichen. Dadurch ist gewährleistet, daß die unterschiedlichen Ergebnisse auf die Geotextilparameter wie wirksame Öffnungsweite, vertikale Durchlässigkeit, Dicke und Porenanteil zurückgeführt werden können.

Durch die größere wirksame Öffnungsweite und größere vertikale Durchlässigkeit des Geotextils mit ungerader Kennziffer wird die Bildung eines Sekundärfilters verzögert und die Feinteile werden in erhöhtem Maß durch das Geotextil gespült. Die Feinteilschicht auf der Oberfläche des Geotextils hat eine geringere Dicke und ist dadurch durchlässiger. Daher ist die Permittivität während des gesamten Versuchs höher, der Rges-Wert kleiner und der Feinteilrückstand im Sand-/Kieskörper geringer als bei dem Versuch mit dem Geotextil mit gerader Kennziffer. Ferner ist der Feinteilrückstand im Geotextil mit höherem Porenanteil größer. Dies spricht für eine Systematik bei Beaufschlagung mit fraktionierten Schluff und die Relevanz der Geotextilparameter für das Durchlässigkeitsverhalten.

# 6.2.4.3 Zusammenfassung und Vergleich der Versuche mit unterschiedlichem Sand-/Kieskörper

Im folgenden werden die Ergebnisse der Versuche verglichen, bei denen das gleiche Geotextil aber unterschiedliche Sand-/Kieskörper verwendet wurden. Die verschiedenen Sand-/Kieskörper unterscheiden sich in der Größe der Porendurchmesser und damit in der Durchlässigkeit. Vor dem Hintergrund, daß die 1/2 Sandfraktion die geringsten Porendurchmesser und die geringste Durchlässigkeit im Vergleich zu den anderen Kieskörpern aufweist, lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Eine Suffosion der Feinteile durch den 4/8 Kieskörper ist mit dem geringsten Widerstand möglich. Dadurch erreichen die Feinteile einerseits am schnellsten und andererseits in der höchsten Konzentration die Oberfläche der Geotextilprobe. Die hohe Fließgeschwindigkeit bei der Durchströmung der 4/8 Kiesfraktion geht mit einer vergleichsweise großen Schleppkraft des Wassers einher. Im Korngerüst können sich nur geringe Mengen der Feinteile einlagern, da bei der 4/8 Kiesfraktion größere Porenengestellen und höhere Strömungsgeschwindigkeiten vorliegen und dadurch eine Feinteilmobilisierung begünstigt wird. Beim 1/2 Sandkörper verhält es sich umgekehrt.

Bei den Versuchen mit den Geotextilien der Gruppe G sind zusammenfassend folgende Tendenzen bei gröber werdenden Sand-/Kieskörper festzustellen:

- Die  $\Psi_{10}(3)$ -Werte sinken.
- · Die Rges-Werte steigen.
- · Die Feinteilrückstände im Sand-/Kieskörper steigen.

Die folgenden Tabellen 18 bis 20 untermauern diese Tendenzen. Die Werte der Versuchsergebnisse  $\Psi_{10}(3)$ , Rges und Feinteilrückstände sind in Abhängigkeit vom Sand-/Kieskörper dargestellt.

|            | <b></b>               | Ψ <sub>10</sub> (3)-Wert sink<br>⇒ | t<br>⇒         |
|------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| Gruppe G   | 1/2 Sandkörper        | 2/4 Kieskörper                     | 4/8 Kieskörper |
| G4         | 1,78*10-4             | 5,66*10-5                          | 4,56*10-5      |
| G8         | 1,62*10-2             | <b>6,92</b> *10 <sup>-5</sup>      | 6,86*10-5      |
| <b>G</b> 7 | 6,39*10 <sup>-3</sup> | 1,14*10 <sup>-3</sup>              | 8,19*10-5      |

Tabelle 18:  $\Psi_{10}(3)$ -Wert der Versuche der Geotextilien der Gruppe G in Abhängigkeit des Sand-/Kieskörpers

|            | Rges-Wert steigt<br>⇒ ⇒ ⇒ |                |                |  |  |  |
|------------|---------------------------|----------------|----------------|--|--|--|
| Gruppe G   | 1/2 Sandkörper            | 2/4 Kieskörper | 4/8 Kieskörper |  |  |  |
| G4         | 76,88                     | 694,89         | 892,54         |  |  |  |
| G8         | 182,19                    | 1.000          | 1.717,99       |  |  |  |
| <b>G</b> 7 | 7,56                      | 83,42          | 1.538,25       |  |  |  |

 Tabelle 19:
 Rges-Wert der Versuche mit den Geotextilien der Gruppe G in Abhängigkeit des Sand-/Kieskörpers

|            | Fei<br>⇒       | inteilrückstand steigt⇒⇒2/4 Kieskörper4/8 Kieskörper246253194200 |                |
|------------|----------------|--|----------------|
| Gruppe G   | 1/2 Sandkörper | 2/4 Kieskörper   | 4/8 Kieskörper |
| G4         | 197            | 246  | 253            |
| G8         | 151            | 194  | 200            |
| <b>G</b> 7 | 19,93          | 69,3   | 157            |

Tabelle 20:Feinteilrückstände im Sand-/Kieskörperbei den Versuchen mit den Geo-<br/>textilien der Gruppe G in Abhängigkeit des Sand-/Kieskörpers

Bei Versuchen mit Verwendung des 4/8 Kieskörpers erreichen die Feinteile zum einen sehr schnell und zum anderen in sehr hoher Konzentration die Oberfläche der Geotextilprobe. Ein Filterkuchen kann dadurch in kürzerer Zeit entstehen und ein Abtransport von Feinteilchen durch den Filter erfolgt langsamer als der Feinteilzustrom. Je mehr Feinteile in der Schicht eingelagert werden, um so geringer wird die Systemdurchlässigkeit und somit auch der  $\Psi_{10}(3)$ -Wert. Der Rges-Wert steigt aufgrund einer dickeren Sekundärfilterschicht.

Bei den Versuchen mit den Geotextilien der Gruppe D sind folgende Tendenzen bei gröber werdenden Sand-/Kieskörper festzustellen:

- Die  $\Psi_{10}(3)$ -Werte steigen
- · Die Rges-Werte sinken
- · Die Feinteilrückstände im Sand-/Kieskörper sinken

Die folgenden Tabellen dokumentieren diese Tendenzen. Die Werte der Versuchsergebnisse  $\Psi_{10}(3)$ , Rges und Feinteilrückstände sind in Abhängigkeit vom Sand-/Kieskörper dargestellt.

|          | )                     | Ψ <sub>10</sub> (3)-Wert steig<br>⇒ | t<br>⇒         |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Gruppe D | 1/2 Sandkörper        | 2/4 Kieskörper                      | 4/8 Kieskörper |
| G6       | 2,6*10 <sup>-3</sup>  | 3,5*10 <sup>-3</sup>                | 3,54*10-2      |
| G5       | 2,04*10-2             | 5,64*10-2                           | 1,01*10-1      |
| G3       | 2,07*10-2             | 7,41*10-2                           | -              |
| G2       | 9,68*10 <sup>-3</sup> | 3,95*10-2                           | 5,83*10-2      |
| G1       | 2,32*10-2             | 6,32*10 <sup>-2</sup>               | 1,3*10-1       |

Tabelle 21: $\Psi_{10}(3)$ -Wert der Versuche der Geotextilien der Gruppe D in Abhängig-<br/>keit des Sand-/Kieskörpers

|          | <b>a</b>       | Rges-Wert sinkt<br>⇒ | ⇒              |
|----------|----------------|----------------------|----------------|
| Gruppe D | 1/2 Sandkörper | 2/4 Kieskörper       | 4/8 Kieskörper |
| G6       | 16,97          | -                    | 4,01           |
| G5       | 2,12           | 1,72                 | 1,17           |
| G3       | 2              | 1,65                 | 6,83           |
| G2       | 4,25           | 2,18                 | 1,89           |
| G1       | 2,19           | 1,63                 | 1,18           |

 Tabelle 22:
 Rges-Wert der Versuche mit den Geotextilien der Gruppe D in Abhängigkeit des Sand-/Kieskörpers

|            | Feinteilrückstand sinkt<br>⇒ ⇒ ⇒ |                |                |  |
|------------|----------------------------------|----------------|----------------|--|
| Gruppe D   | 1/2 Sandkörper                   | 2/4 Kieskörper | 4/8 Kieskörper |  |
| G6         | 29                               | 14             | 2              |  |
| G5         | 9                                | 2              | 1,75           |  |
| G3         | 9                                | 4              | 8              |  |
| G2         | 19,04                            | 3,13           | 1,26           |  |
| <b>G</b> 1 | 7,09                             | 2,71           | 0,44           |  |

Tabelle 23:Feinteilrückstände im Sand-/Kieskörper bei den Versuchen mit den Geo-<br/>textilien der Gruppe D in Abhängigkeit des Sand-/Kieskörpers

Der Erklärungsansatz, daß bei gröberem Kieskörper eine ausgeprägtere Feinteilchenwanderung aufgrund der erhöhten Schleppspannung des Wassers vorliegt, trifft auch hier zu. In der Gruppe D allerdings werden die Feinteilchen selbst noch durch den Filter gespült. Diese Tendenz ist klar zu erkennen, wenngleich sie nicht nur von dem Wert der wirksamen Öffnungsweite allein abhängt, sondern vielmehr auch von der gesamten Struktur des Geotextils. Der Versuch mit G3 macht dies deutlich, da gerade bei diesem Versuch der oben aufgezeigte Trend am ausgeprägtesten vorhanden sein müßte. Die Verfestigungsart kann für dieses atypische Verhalten verantwortlich sein. Durch die größere Durchlässigkeit des 4/8 Kieskörpers erhöht sich die Schleppkraft des durchströmenden Wassers und mehr Feinteile werden, sowohl aus der Schicht auf dem Geotextil, als auch durch den Sand-/Kieskörper gespült. Deshalb ist der Feinteilrückstand im 4/8 Kieskörper geringer. Dadurch ist der  $\Psi_{10}(3)$ -Wert des Systems höher und somit auch der Rges-Wert kleiner.

### 6.2.4.4 Interpretation des unterschiedlichen Filterverhaltens der Geotextilien

Im folgenden werden die Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit den Ergebnissen von bereits veröffentlichten Versuchen anderer Autoren verglichen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, daß das unterschiedliche Filterverhalten der Geotextilien nicht allein durch die wirksame Öffnungsweite bestimmt wird, da die Geotextilien, bei denen sich im Versuch Piping, also ein Durchspülen der Feinteilchen, einstellt, teilweise kleinere  $O_{90,w}$ -Werte aufweisen als die Geotextilien, bei denen sich Blinding, also ein Ablagern der Feinteilchen auf dem Geotextil, einstellt. Die Geotextilien G7, G8 und G4 sind mechanisch filterwirksam, obwohl laut DVWK die größte zulässige  $O_{90,w} = 0,043$  mm betragen würde.

Das Unterscheidungsmerkmal für das unterschiedliche Filterverhalten basiert bei Lafleur et al. (1996) auf dem sogenannten  $R_R$ -Wert ( $R_R = O_{90,w}/d_I$  ist ein sogenannter "retention ratio";  $d_I$  ist ein bestimmter Korndurchmesser bei X % Massenanteil und abhängig von der Form der Kornverteilung des abzufilternden Bodens: z.B.  $d_{50}$  bei linearer Kornverteilung). Nach Lafleur et al. entsteht Piping bei  $R_R$ -Werten größer als 1, Bridging bei  $R_R$ -Werten von ca. 1 und Blinding bei Werten kleiner als 1. Das  $R_R$ -Verhältnis des Geotextils G7 mit dem fraktionierten Schluff ( $d_I = d_{50} = 0,025$  mm) liegt bei etwa 5. Bei Verwendung dieses Geotextils in der Versuchsreihe stellt sich Blinding ein, obwohl sich gemäß dem  $R_R$ -Wert Piping einstellen müßte. Bei Lafleur et al. wurden ebenfalls derartige Phänomene beobachtet. Es sind Geotextilien mit  $O_{90,w}$ -Werten zwischen 0,084 mm und 0,109 mm und ein feinkörniger Boden mit  $d_{50} = 0,015$  mm untersucht worden. Obwohl das  $R_R$ -Verhältnis ebenfalls größer als 5 ist, konnte der feinkörnige Boden zurückgehalten werden.

Bei Siva & Bhatia (1993) wird der Verhältniswert aus wirksamer Öffnungsweite und des  $D_{85}$ -Wert des abzufilternden Bodens als Filterkriterium eingeführt. Die meisten Feinteile

wurden bei Werten zwischen 2 und 4 durch das Geotextil gespült. In der Versuchsreihe ergeben sich für alle untersuchten Geotextilien Verhältniswerte zwischen 1,75 und 3,75 (für Geotextil G3: 7,25). Doch nur bei den Geotextilien der Gruppe D stellt sich Piping ein, wodurch die Ergebnisse von Siva nicht bestätigt werden können. Die Aussage von Siva dagegen, daß mechanisch verfestigte Geotextilien aus Spinnfasern eine dichtere und mit weniger Hohlräumen behaftete Struktur aufweisen, als Geotextilien aus Filamenten und damit eine größere Retentionsfähigkeit verbunden ist, konnte durch die Versuche mit den Geotextilien G7 und G8 bestätigt werden. Diese Geotextilien wurden aus Spinnfasern hergestellt und hielten mehr Feinteile zurück. Bei den Geotextilien G1 und G2, bestehend aus Filamenten, gingen mehr Feinteilchen hindurch.

Faure (1993) zeigte, daß unterschiedliche  $O_{90,w}$ -Werte von gleich hergestellten Vliesen keinen großen Einfluß auf das Filterverhalten bewirken. Dies zeigt sich in der Versuchsreihe bei den Geotextilien des Herstellers der Geotextilien G3/G4 bis G7/G8.

Die vertikale Durchlässigkeit der Geotextilien der Gruppe D ist höher als die der Gruppe G. Die Erklärung, daß die vertikale Durchlässigkeit der Geotextilien der alleinige Grund für das unterschiedliche Filterverhalten ist, erscheint nicht schlüssig, da beispielsweise der  $k_{z}$ -Wert von G8 nur minimal kleiner ist als der von G 6. Lafleur (1996) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß andere Parameter wie Porengrößenverteilung, Oberflächeneigenschaften, Art und Oberflächeneigenschaften der Fasern und der Herstellungsprozeß der Geotextilien das Filterverhalten wesentlich beeinflussen können. Die Ursache, daß sich bei G4 Blinding einstellt, ist in der Verfestigungsart zu sehen. Das Geotextil G4 ist thermisch und das Geotextil G2 mechanisch verfestigt. Weitere Parameter wie Öffnungsweite, Faserrohstoff und Fasertyp sind gleich oder vergleichbar. Beim mechanisch verfestigten Geotextil G2 wird die Bildung des Filterkuchens verhindert. Bei Faure (1993) sind unterschiedlich verfestigte Geotextilien mit vergleichbarem O<sub>90,w</sub>-Wert (0,1 mm - 0,13 mm) bei Beaufschlagung mit Suspension untersucht worden. Es zeigte sich auch bei seinen Untersuchungen, daß thermisch verfestigten Geotextilien schneller zuschlämmten und mechanisch verfestigte hydraulisch länger wirksam waren. Die Fasern der Geotextilien G7 und G8 sind als einzige der untersuchten Geotextilien aus Polyester. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß dieser Faserrohstoff das Zuschlämmen der Geotextilporen begünstigt. Die Geotextilien G2 und G8 weisen gleiche Werte bei den Parametern Öffnungsweite, Porenanteil, Fasertyp und Verfestigungsart auf. Die Unterschiede beschränken sich auf den verwendeten Faserrohstoff. Der physikalische Hintergrund in diesem Zusammenhang ist die unterschiedliche Benetzbarkeit der Kunststoffe mit Wasser. Die Fähigkeit der im Wasser enthaltenen Bodenpartikel sich an besser benetzbare Kunststoffasern anzulagern bzw. sich in die Poren aus diesem Kunststoff ist ausgeprägter.

### 6.2.5 Beaufschlagung mit Normensand

Die Verläufe der Permittivitäten in Abängigkeit von der Versuchsdauer sind in Anlage 4 Blatt 16,17 graphisch dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Versuche interpretiert.

### 6.2.5.1 Filtermechanismus

Das  $R_R$  (=  $O_{90,w}/d_1$ ) -Verhältnis liegt für die Kombination des Normensandes mit den Geotextilien G6, G4, G8 und G2 bei 0,7 und mit G5, G7 und G1 unter 1,5. Die maximale Partikelgröße des Normensands von 0,3 mm ist deutlich größer als die wirksamen Öffnungsweiten der untersuchten Geotextilien (Ausnahme Geotextil G3). Aufgrund dieser geometrischen Voraussetzungen können die Öffnungen der Poren der Geotextilien durch die Bodenpartikel des Normensandes blockiert und an der Geotextiloberfläche zurückgehalten werden. Vor diesem Hintergrund liegen die Voraussetzungen für das Phänomen Blocking vor. Dies zeigen unter anderem die im Sand-/Kieskörper zurückgehalten Feinteilmassen von durchschnittlich (abgesehen von den Versuchen mit dem Geotextil G3) 86% der zugegebenen Gesamtmasse der Feinteilchen. Ein Hinweis auf das Vorhandensein des Blockings gibt auch der geringe Zuschlämmgrad, der bei den untersuchten mechanisch verfestigten Geotextilien meist unter 10% und bei den thermisch verfestigten Geotextilien unter 1,63% liegt.

Die thermisch verfestigten Geotextilien lagern aufgrund der unterschiedlichen Verfestigungsart, der geringeren Dicke und des geringeren Porenanteils weniger Feinteile ein, als die mechanisch verfestigten Geotextilien. Im Vergleich ist die Masse der Feinteileinlagerungen im Geotextil eines Herstellers mit gerader Kennziffer größer als die mit ungerader Kennziffer. Dies liegt am größeren Porenvolumen dieser Geotextilien, bei denen dadurch größere Mengen an Normensand eingelagert werden können. Das  $R_{R}$ -Verhältnis von Normensand und dem Geotextil G3 liegt bei 2,6, wobei der Durchmesser des Größtkorns annähernd so groß ist wie die wirksame Öffnungsweite des Geotextils G3. Aufgrund dieser geometrischen Voraussetzungen, läßt sich der geringere durchschnittliche Bodenrückhalt von 74% der zugegebenen Feinteile bei den Versuchen mit G3 erklären. Die mechanische Filterwirksamkeit des als filtertechnisch schwierigen Boden eingestuften Normensands ist auch bei Geotextil G3 mit dem O<sub>90,w</sub> -Wert von 0,29 mm gewährleistet, obwohl die maximal zulässige wirksame Öffnungsweite nach DVWK (1992) O<sub>90,wal</sub> = 0,17 mm beträgt.

### 6.2.5.2 Permittivität

Die Permittivität  $\Psi_{10}(3)$  bei gleichen Geotextilien nimmt mit feiner werdendem Sand-/Kieskörper zu. Diese Tendenz ist festzustellen, obwohl sich einerseits die Massen der zurückgehaltenen Feinteile nur geringfügig unterscheiden und andererseits bei Versuchsabbruch auf dem 1/2 Sandkörper eine dickere Feinteilschicht (1,0 cm - 2,5 cm), als auf dem 2/4 Kieskörper (0,5 cm - 1,5 cm) vorgefunden wurde. Auf den 4/8 Kieskörpern bilden sich keine Feinteilschichten aus, was die Annahme widerlegt, daß die Feinteilschicht auf dem Sand-/Kieskörper für die Systemdurchlässigkeit verantwortlich ist. Gerade die Systeme mit dünnerer oder fehlender Feinteilschicht weisen geringere  $\Psi_{10}(3)$ - Werte auf. Dies ist ein weiterer Grund dafür, daß die Grenzschicht Boden/Geotextil für die Systemdurchlässigkeit maßgeblich ist und damit das Geotextil in dieser Versuchsreihe systematisch die Permittivität des Gesamtsystems beeinflußt. Die Feinteilschichten, die nur über der 1/2 Sandfraktion und der 2/4 Kiesfraktion sichtbar waren, sind im Vergleich zu den Filtrationsprozessen an der Grenzschicht Boden Geotextil nicht maßgebend.

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Permittivität und der mittleren Dichte  $\rho_{d(SKK+FTS)}$ nach (26) der im Porenraum und auf der Oberfläche des Sand-/Kieskörpers eingelagerten Feinteile. Die Dichte der eingelagerten Feinteile ist um so geringer, je feinkörniger der Sand-/Kieskörper ist. Bei den Versuchen mit dem 4/8 Kieskörper liegt der durchschnittliche  $\rho_{d(SKK+FTS)}$ -Wert bei 0,74, beim 2/4 Kieskörper bei 0,49 und beim 1/2 Sandkörper bei 0,39 g/cm<sup>3</sup>. Die Ursache für kleinere mittlere Dichten der eingelagerten Feinteile liegt unter anderem in der geringeren Anfangsdurchlässigkeit der Versuche mit dem 1/2 Sandkörper, da aufgrund der geringeren Fließgeschwindigkeit geringere Strömungskräfte auf die Feinteilchen ausgeübt werden. Durch die Reaktionen des Kraftangriffs des durchströmenden Wassers auf die Bodenpartikel, werden je nach Größe der vorhandenen Fließgeschwindigkeit die Feinteilchen mehr oder weniger dicht gelagert. Dadurch ist die über dem Geotextil liegende Feinteilschicht bei den Versuchen mit dem 1/2 Sandkörper geringer verdichtet und entsprechend durchlässiger als bei den Versuchen mit den gröberen Kieskörpern. Die unterschiedlichen Einlagerungsdichten begründen die Abhängigkeit des Permittivitätsverlaufes vom verwendeten Sand-/Kieskörper.

Darüber hinaus gelangen bei Verwendung eines grobkörnigen Kieskörpers durch die größeren Porendurchmesser die Feinteile in höherer Konzentration auf das Geotextil als bei feinerer Körnung. Dadurch entsteht eine undurchlässigere Schicht auf der Geotextiloberfläche. In Abbildung 16 ist das Geotextil G8 des Versuchs V17 wiedergegeben. Dabei wurde als Widerstandskörper die 4/8 Kiesfraktion verwendet. Die einzelnen Kieskörner sind durch die Ablagerungsstruktur des Normensand auf der Geotextiloberfläche erkenntlich.



Abbildung 16: Geotextil G8 nach Beaufschlagung mit Normensand. Deutlich ist die Ablagerungsstruktur des 4/8 Kieskörper zu erkennen.

Im Diagramm 24 sind die Permittivitätsverläufe der Versuche mit den mechanisch verfestigten Geotextilien in Abhängigkeit von der Versuchsdauer und vom verwendeten Sand-/Kieskörpers dargestellt. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, daß die Permittivitätsverläufe geringere Streuungen bei gleichen Sand-/Kieskörpern aufweisen als dies bei schluffbeaufschlagten Versuchen der Fall war. Dies zeigt, daß die verschiedenen mechanisch verfestigten Geotextilien gegenüber dem Normensand relativ gleiches Filterverhalten aufweisen, da der Einfluß der Geotextilien im Gegensatz zu den verwendeten Sand-/Kieskörpern in den Hintergrund tritt. Um unterschiedliches Filterverhalten bei den Tests mit Normensand feststellen zu können, müßten Geotextilien mit bedeutend größeren wirksamen Öffnungsweiten und Widerstandskörper mit möglichst groben Körnungen verwendet werden.

Dagegen liegen die Permittivitätsverläufe der Versuche mit den thermisch verfestigten Geotextilien meist nicht im Bereich der Versuche mit den mechanisch verfestigten Geotextilien. Die Unterschiede bezüglich der Permittivität sind nicht sehr groß und am ehesten noch bei Verwendung des 4/8 Kieskörpers zu erkennen. Die Permittivitäten bei Verwendung des Geotextils G3 sind größer und bei Geotextil G4 geringer als die Permittivitäten der Versuche mit mechanisch verfestigten Geotextilien.



Diagramm 24: Permittivitätsverläufe der Versuche mit mechanisch verfestigten Geotextilien bei Beaufschlagung von Normensand

### 6.2.5.3 Permittivitätsrückgang

Der Permittivitätsrückgang Rges ist bei den Versuchen mit feinerer Körnung des Sand-/Kieskörpers bei Verwendung des gleichen Geotextils kleiner als der Rges bei gröberer Körnung des Sand-/Kieskörpers. Diese Abhängigkeit ist im Diagramm 25, in dem der  $k_{y}$ -Wert der untersuchten Geotextilien in Abhängigkeit vom Rges-Wert aufgetragen ist, zu erkennen,

Das Verhältnis des  $O_{90,w}$ -Wertes der Geotextilien und des  $D_{85}$ -Wertes, der beim Normensand 0,15 mm beträgt, ist mit Ausnahme von Geotextil G3 kleiner gleich 1. Daraus wäre zu folgern, daß wenige Feinteile durchgespült oder eingelagert werden, da die Poren des Geotextils relativ klein sind.



Diagramm 25: Der Rges-Werte in Abhängigkeit vom k<sub>v</sub>-Wert des Geotextils. Je gröber die Körnung des Sand-/Kieskörpers, umso größer ist der Rges-Wert.

Nach Siva & Bhatia (1993) bewirken derartige Verhältnisse relativ geringe Durchlässigkeitsabnahmen der Geotextilien. Die Durchlässigkeit der in der Versuchsreihe verwendeten Geotextilien konnten im zugeschlämmten Zustand nicht bestimmt werden. Allerdings weisen relativ niedrige Feinteilmassen in den Geotextilien bei Beaufschlagung von Normensand darauf hin, daß nur geringe Durchlässigkeitsabnahmen auftraten. Dagegen werden die Permittivitätsrückgänge durch das Verschließen der Geotextilporen durch die Feinteile verursacht. Batereau (1993) stellte fest, daß bei Blocking Durchlässigkeitsverringerungen bis zu auftreten maximale zwei Zehnerpotenzen können. Der Faktor für den

Permittivitätsrückgang beträgt 189. Der Rges-Wert bei Versuchen mit dem Geotextil G4 ist relativ gering. Im Diagramm 25 ist der Rges-Wert der Versuche V20, V27 und V29 gekennzeichnet. Es ist deutlich zu sehen, daß diese Werte im Vergleich zu den übrigen Rges-Werten der Versuche mit dem entsprechenden Sand-/Kieskörper niedriger sind. Dies liegt an den verhältnismäßig niedrigen Einlaufpermittivitäten, die bei Versuchen mit G4 auftreten.

Obwohl bei den Versuchen mit dem Geotextil G3 verhältnismäßig wenige Feinteile zurückgehalten werden, unterscheiden sich die Permittivitätsrückgänge Rges nicht signifikant von den übrigen Versuchen. Es ist daher nicht auszuschließen, daß über dem Geotextil G3 der Aufbau einer Feinteilschicht initiiert wurde, die maßgebend für die Systempermittivität ist. Die Masse der zurückgehaltenen Feinteile im Sand-/Kieskörper und damit die Dicke der eingelagerten Feinteilschicht hat offensichtlich einen geringen Einfluß auf den Permittivitätsrückgang. Die Rges-Werte der übrigen Versuche sind abhängig vom Sand-/Kieskörper und liegen in den im Diagramm 25 gekennzeichneten Bereichen.

Mit Ausnahme von V26 ergeben sich bei allen Versuchen größere R1 als R2 und R3 Werte. Dies ist dadurch zu erklären, daß mit der ersten Beaufschlagung die Öffnungen der Geotextilporen durch die Feinteile blockiert werden und die Durchlässigkeit an der Grenzschicht Boden/Geotextil schlagartig sinkt. Die gröberen Feinteile lagern sich infolge des höheren Gewichts zuerst ab und bilden eine Brückenstruktur, die die feinen Bodenpartikel zurückhält. Die beiden folgenden Feinteilzugaben lagern sich wiederum auf dieser erstentstandenen Schicht ab, wodurch aber nur geringe Durchlässigkeitsänderungen entstehen. Mit Zunahme der Versuchszeit bewirkt die Schleppkraft des Wassers eine Verdichtung der eingelagerten Feinteile, was die Ursache für eine Abnahme der Permittivität bei anhaltender Versuchsdauer ist.

# 6.2.6 Beaufschlagung mit Kaolin

Die Permittivitätsverläufe der Versuche mit der Beaufschlagung mit Kaolin sind in Abhängigkeit von der Versuchsdauer in Anlage 4 Blatt 18,19 graphisch dargestellt. Im folgenden werden die Versuchsergebnisse interpretiert.

### 6.2.6.1 Filtermechanismus

Aufgrund der geringen Korngrößen des Kaolins liegen geometrische Voraussetzungen vor, die ein Passieren (Piping) der Partikel durch den Filter ermöglichen müßten. Das hauptsächlich aufgetretene Filterphänomen bei diesen Versuchen ist aber Blinding. Dies entsteht durch die extreme Neigung der Kaolinpartikel sich an die Fasern der Geotextilien anzulagern. Wie beispielhaft der Dünnschliff des Versuchs V68 zeigt (siehe Abbildung 17), entsteht bei einem Geotextil mit relativ großer wirksamer Öffnungsweite und einem großen Porenvolumen eine undurchlässige Schicht auf der Anströmseite des Geotextils. Diese Schicht entsteht schrittweise und beginnt mit Anlagerungen der Kaolinpartikel an die Fasern des Geotextils. Wie aus Abbildung 17 des Versuchs V69 zu erkennen ist, bilden sich diese Anlagerungen meniskenartig in den Porenräumen aus. Durch diese Ausbildungen in den Poren im Anströmbereich des Geotextils nimmt der strömungswirksame Porenraum ab, wodurch sich nachströmende Kaolinpartikel auf der Oberfläche des Geotextils anlagern.



Abbildung 17: Mikroaufnahmen der Dünnschliffe des Geotextils G5 (V68) und des Geotextils G6 (V69) nach Beaufschlagung mit Kaolin. Zu erkennen sind die meniskenartigen Anlagerungen des Kaolins an die Fasern des Geotextilien

# 6.2.6.2 Permittivität

Im Diagramm 26 sind die Permittivitätsverläufe der mit Kaolin durchgeführten Versuche zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß die Permittivitäten der Versuche mit zunehmend gröberen Körnungen der Sand-/Kieskörper geringer werden. Ein Grund dafür ist die größere Feinteildichte und Dicke des Filterkuchens bei den Versuchen mit dem grobkörnigerem Sand-/Kieskörper. Bei den Versuchen mit dem 1/2 Sandkörper werden im Durchschnitt 140 g, mit dem 2/4 Kieskörper 168 g und mit dem 4/8 Kieskörper 186 g zurückgehalten. Diese Tendenz ergibt sich aufgrund der größeren Porenweiten bei grobkörnigeren Sand-/Kieskörpern, da dadurch eine höhere Feinteilkonzentration auf die Geotextiloberfläche auftrifft. Dies bewirkt, daß sich der Filterkuchen schneller ausbildet und die nachfolgenden Feinteile in geringerer Menge durchgespült werden. Es entsteht ein dickerer und dichterer Filterkuchen auf der Geotextiloberfläche, der dadurch eine geringere Permittivität aufweist. Zudem bewirkt die größere Fließgeschwindigkeit bei den Versuchen mit dem gröberen Sand-/Kieskörper, höhere mittlere Einlagerungsdichten, die entsprechend undurchlässiger sind. Beispielsweise ist der Durchschnittswert der mittleren Einlagerungsdichte  $\rho_{d (SKK+FTS)}$  nach (26) bei den Versuchen mit den 1/2 Sandkörper mit 0,2 g/cm<sup>3</sup> niedriger als bei den Versuchen mit dem 4/8 Kieskörper, bei denen eine mittlere Einlagerungsdichte von 0,32 g/cm<sup>3</sup> vorliegt.

Darüber hinaus ist aus dem Diagramm 26 ersichtlich, daß die Permittivitätsverläufe, zusammengefaßt in Abhängigkeit vom verwendeten Sand-/Kieskörper, mit zunehmender Versuchsdauer weniger streuen und bei feinerer Körnung des Sand-/Kieskörpers eine größere Streuung aufweisen als bei gröberer Körnung. Dagegen liegen die Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem thermisch verfestigten Geotextil G3 nicht im Bereich der mechanisch verfestigten Geotextilien, da nur verhältnismäßig wenige Feinteile zurückgehalten werden. Aufgrund der großen wirksamen Öffnungsweite von 0,29 mm werden bei den Versuchen V63 nur 76,8 g und bei V64 nur 23,1 g von jeweils 300 g zugegebenem Kaolin zurückgehalten. Dadurch ergeben sich relativ hohe Systempermittivitäten.


Diagramm 26: Permittivitätsverläufe der Versuche mit den mechanisch verfestigten Geotextilien und den 1/2, 2/4 und 4/8 Sand-/Kieskörpern in Abhängigkeit von der Versuchsdauer bei Beaufschlagung mit Kaolin

#### 6.2.6.3 Permittivitätsrückgang

Die Rges-Werte der Versuche mit der gröberen Körnung des Sand-/Kieskörpers sind bei gleichem Geotextil größer. Im Diagramm 27 sind die Rges-Werte in Abhängigkeit vom  $k_v$ -Wert des Geotextils dargestellt, wobei die schraffierten Bereiche die Rges-Werte der Versuche mit dem entsprechenden Sand-/Kieskörper zusammenfassen.

Außerdem sind im Diagramm 27 die Rges-Werte der Versuche, bei denen thermisch verfestigte Geotextilien verwendet werden, mit der Versuchsnummer gekennzeichnet. Dabei wird deutlich, daß diese Punkte meist außerhalb der schraffierten Bereiche liegen, wie beispielsweise die Rges-Werte von V64 und V67. Dagegen weist der Versuch V61 einen Gesamtpermittivitätsrückgang auf, der im Bereich der Versuche mit den mechanisch verfestigten Geotextilien liegt. Obwohl die Permittivitäten bei Versuchsende mit dem Geotextil G4 (V60, V62, V67) im Bereich der Versuche mit den mechanisch verfestigten Geotextilien liegen, sind die Rges-Werte, wie im Diagramm 27 ersichtlich, verhältnismäßig niedrig. Da die Anfangsdurchlässigkeit, wie unter 6.2.3 erläutert worden ist, bei den Versuchen mit dem Geotextil G4 verhältnismäßig niedrig ist, ergibt sich daraus auch ein relativ kleiner Rges-Wert.



Diagramm 27: Rges in Abhängigkeit vom k<sub>v</sub>-Wert der Geotextilien und vom verwendeten Sand-/Kieskörper; ausgefüllte Signaturen sind mechanisch verfestigte Geotextilien; nicht ausgefüllte Signaturen kennzeichnen thermisch verfes tigte Geotextilien

6.2.6.4 Vergleich der Versuche mit Geotextilien des selben Herstellers

Die Versuche mit den Geotextilien eines Herstellers werden bei gleichen Sand-/Kieskörper verglichen. Folgende Tendenz ist dabei feststellbar. Bei den Versuchen des Geotextils mit gerader Kennziffer, gekennzeichnet durch eine vergleichsweise größere Dicke, kleinere wirksame Öffnungsweite, größere Flächenmasse, geringerer Porenanteil und geringere vertikale Durchlässigkeit, ist

· der Feinteilrückstand im Sand-/Kieskörper größer

• der Feinteilrückstand im Geotextil größer

- · die Feinteilschicht auf dem Sand-/Kieskörper dicker
- als bei den Versuchen des Geotextils mit ungerader Kennziffer des selben Herstellers.

# 6.2.7 Zusammenfassung Suspensionsversuche

Zunächst konnte mit Hilfe der Auswertung der Anfangsdurchlässigkeiten, also der Durchlässigkeiten bei denen zunächst nur der Sand-/Kieskörper und das Geotextil durchströmt wurden, gezeigt werden, daß für jedes System, bevor die Zugabe der Suspension erfolgte, gleiche Versuchsrandbedingungen vorlagen. Das bedeutet, daß die jeweiligen Sand-/Kieskörper mit nahezu gleicher Trockendichte in die Versuchszelle eingebaut wurden und dadurch die Versuche mit gleichen Sand-/Kieskörpern aber unterschiedlichen Geotextilien oder Suspensionsarten untereinander vergleichbar sind. Die folgenden zu erwartenden Zusammenhänge konnten bei der Auswertung der Anfangsdurchlässigkeiten festgestellt werden:

Systeme mit Geotextilien hoher Durchlässigkeit weisen auch eine hohe Anfangsdurchlässigkeit auf. Bei gleichen Geotextilien nimmt die Anfangsdurchlässigkeit mit zunehmend gröberen Körnungen der Sand-/Kieskörper zu.

Weiterhin kann zusammenfassend festgestellt werden, daß nach Zugabe der Suspensionen die auftretenden Phänomene an der Grenzschicht Boden/Geotextil maßgebend für die Systempermittivitäten sind. Diese Phänomene bilden sich in erster Linie nach der ersten Zugabe der Suspensionen aus. In der Regel konnte nach der ersten Zugabe der größte Rückgang der Systempermittivität gemessen werden. Die weitere Zugabe von Suspensionen bewirkte in den meisten Fällen nur mehr einen geringeren Rückgang. Das bedeutet, daß die ersten Feinteilchen, die auf den geotextilen Filter treffen, maßgebend für die weitere Wirksamkeit des Filters sind.

In bezug auf die Körnungen der Sand-/Kieskörper konnte festgestellt werden, daß die Systempermittivitäten bei gröberen Körnungen stärker zurückgehen als bei feineren Körnungen. Die Ursache hierfür ist zum einen, daß die Feinteilchen in einer höheren Konzentration das Geotextil erreichen, da die Poren der gröberen Körnungen der Sand-/Kieskörper größer sind. Zum anderen liegt bei gröberen Körnungen eine höhere Durchflußgeschwindigkeit bei Versuchsstart vor, wodurch eine dichtere Lagerung der Feinteilchen an der Grenzschicht entsteht.

Hinsichtlich der verschiedenen Suspensionen konnte folgendes festgestellt werden:

Bei Suspensionen, bestehend aus Normensand, waren die geringsten Streuungen der Permittivitäten bei den einzelnen Sand/-Kieskörpern mit verschiedenen Geotextilien gemessen worden. Bei gleichen Sand-/Kieskörpern, aber unterschiedlichen Geotextilien wurden größenordnungsmäßig gleiche Beträge der Permittivitäten gemessen. Ferner sind, im Vergleich zu anderen Suspensionsarten, die geringsten Gesamtrückgänge der Permittivitäten festgestellt worden. Das vornehmlich aufgetretene Filterphänomen ist bei dieser Suspensionsart Blocking. Die Feinteilchen des Normensandes sind so groß, daß sie die Poren des Filters nicht passieren können. Ferner ist die Oberfläche dieser Teilchen relativ rauh, so daß bereits bei relativ großen Engstellen, welche Schluffpartikel mit verhältnismäßig glatter Oberfläche noch passieren könnten, die Teilchen sich gegenseitig verkeilen. Die Feinteilchen lagern sich dadurch vergleichsweise locker ab und bewirken keinen ausgeprägten Rückgang der Systempermittivität.

Bei Systemen, die mit Kaolinsuspensionen beaufschlagt wurden, wurde zunächst erwartet, daß aufgrund der geringen Korngrößen des Kaolins der größte Teil der Feinteilchen durch das Geotextil gespült wird und dadurch die Systempermittivität nicht wesentlich zurückgeht. Entgegen dieser Annahme konnte bei den Versuchen festgestellt werden, daß hierbei die größten Rückgänge der Gesamtpermittivitäten zu messen waren. Die Ursache hierfür ist die Anlagerungsfähigkeit der Kaolinpartikel an die Oberfläche der geotextilen Fasern. Offensichtlich ziehen geotextile Fasern aufgrund ihrer Ladungen an den Oberflächen die Kaolinpartikel an, die ihrerseits wieder unterschiedliche Ladungen auf den Oberflächen aufweisen. In einem fortschreitenden Prozeß erfolgt eine verstärkte Anlagerung von Kaolinpartikel im oberen Bereich des Geotextils, wodurch eine undurchlässigere Schicht entsteht. Das auftretende Phänomen kann als Blinding beschrieben werden, da sich letztendlich die undurchlässigere Schicht im oberen Bereich des Geotextils und dann auf dem Geotextil ausbildet. Die Ergebnisse zeigen, daß geometrische Betrachtungsweisen, wonach zur Gewährleistung der mechanischen Filterwirksamkeit eine bestimmte wirksame Öffnungsweite des Filters zu wählen ist, bei Kaolinpartikeln oder Partikeln mit ähnlichen Korngrößen nicht angewandt werden können. In diesem Fall empfiehlt es sich verhältnismäßig große wirksame

Öffnungsweiten zu wählen, denn die größte Permittivität bei Versuchsende konnte beim Geotextil G3 mit der größten wirksamen Öffnungsweite ( $O_{90,w}$ = 0,29 mm) gemessen werden.

Bei Beaufschlagung der Systeme mit Schluff konnten die deutlichsten Unterschiede in der Wirksamkeit verschiedener Geotextilien gemessen werden. Hier bildet sich, je nach Herstellungsart des Geotextils, Oberflächenfiltration bei thermisch verfestigten oder Tiefenfiltration bei mechanisch verfestigten Geotextilien aus. Bei mechanisch verfestigten Geotextilien konnten zudem bezüglich der Wirksamkeit Unterschiede zwischen verschiedenen Faserrohstoffen gemessen werden. Hinsichtlich der Permittivität konnte festgestellt werden, daß bei Versuchsende das System mit einem thermisch verfestigten Geotextil um einen Faktor 800 undurchlässiger ist, als das System bestehend aus einem mechanisch verfestigten Geotextil aus PP mit gleicher wirksamer Offnungsweite. Allerdings konnten auch bei mechanisch verfestigten Geotextilien aus PES mit gleicher Öffnungsweite oder aber auch mit größeren wirksamen Öffnungsweiten Rückgänge der Permittivitäten gemessen werden, die thermisch verfestigten Geotextilien entsprachen. Das bedeutet, bei Schluff ist neben den üblichen Geotextilparametern wie wirksame Öffnungsweite und vertikale Durchlässigkeit in bezug auf die Filterwirksamkeit auch die Herstellungsart und der Faserrohstoff zu beachten. In diesem Zusammenhang ist nicht auszuschließen, daß aus diesem Grund diverse in der Literatur auffindbare Ergebnismitteilungen mit denen in dieser Versuchsreihe nicht immer übereinstimmen.

Aufgrund der Versuchsergebnisse ist anzumerken, daß hinsichtlich des Optimierungsprozesses zwischen der hydraulischen und mechanischen Wirksamkeit eines Filters, dieser bei Suspensionsuntersuchungen anders zu bewerten ist als bei abzufilternden Böden, bei denen ein Korn-zu-Korn Kontakt vorliegt. Das bedeutet, aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit des Wassers muß auch eine größere Bodendurchgangsmenge akzeptiert werden, wenn die langfristige hydraulische Wirksamkeit des Systems im Vordergrund steht. Eine hohe Durchlässigkeit des Gesamtsystems kann nur aufrecht erhalten werden, wenn vergleichsweise viel Boden bei Durchströmungsbeginn durch den Filter gespült wird. In diesem Zusammenhang ist die erste Durchströmung mit Feinteilen von großer Bedeutung, denn bereits hier baut sich bereits die Feinteilstruktur im oder auf dem Geotextil auf, die maßgebend für das weitere Durchlässigkeitsverhalten ist. Zusammenfassend machen die Ergebnisse deutlich, daß die Phänomene wie Blocking, Piping, Clogging oder Blinding erfaßt werden können. Diese Phänomene treten in Abhängigkeit von den verwendeten Suspensionen, die sich bezügliche der Korngrößen, Kornform und Kornoberfläche unterscheiden, auf. Die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit lassen sich nicht ausschließlich auf geometrische und hydraulische Voraussetzungen der Geotextilien zurückführen. Vielmehr wird das Filterverhalten wesentlich vom Faserrohstoff und der Verfestigungsart beeinflußt. Die Feststoffkonzentration und die Fließgeschwindigkeit der Suspension, die durch die Verwendung von unterschiedlichen Sand-/Kieskörpern variiert wurde, beeinflußt das Filterverhalten.

### 6.3 Versuche mit dem modifizierten GR-Test

### 6.3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Versuche mit dem modifizierten GR-Test dargestellt und interpretiert. Im Vordergrund bei der Auswahl der Versuchsrandbedingungen stand die Überprüfung der entwickelten Versuchstechnik hinsichtlich der meßtechnischen Erfassung des unterschiedlichen Filterverhaltens verschiedener Geotextilien. Wie sich in den oben dargestellten Suspensionsversuchen mit dem Schluff gezeigt hat, sind die größten Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Verfestigungsart der Geotextilien zu erwarten. Demzufolge wurden vornehmlich Geotextilien unterschiedlicher Verfestigungsart bei gleichen Bodeneinbaubedingungen in den einzelnen Versuchen untersucht. Die Versuchsdurchführung entspricht dem in Kapitel 5.4 beschriebenen Verfahren. Die Auswertung der Wasserdurchflußmengen erfolgt nach Formel (20). Das Auswertungsprinzip der Wasserdruckmessungen der Piezometer geht aus Kapitel 5.4.2 hervor. Stimmen die Messungen der Wasserdrücke auf beiden Seiten der Versuchszelle größenordnungsmäßig überein, wird nur die Messung einer Seite angegeben.

## 6.3.2 Versuche mit Testboden A

Der Versuchsboden A zeichnet sich durch eine ausgeprägte Fehlkörnung aus. Die einzelnen bodenphysikalischen Kennwerte sind in Kapitel 4.2.3 beschrieben. Dieser Boden stellt

hinsichtlich der Filterwirkung von Geotextilien eine extreme Belastung dar. In zwei unter möglichst identischen äußeren Versuchsrandbedingungen ablaufenden Versuchen wurden die Auswirkungen des durch eine hohe Feinteilmobilität gekennzeichneten Bodens auf das Filterverhalten der Geotextilien G4 und G6 untersucht. Der Boden wird mit einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,79$  g/cm<sup>3</sup> in die Versuchszelle eingebaut, der Wassergehalt betrug 2 %. Die Überprüfung der Filterwirksamkeit der Geotextilien ist in Kapitel 4.4 enthalten. Die Durchlässigkeitsverläufe der Versuche sind in Diagramm 28 dargestellt, die Wasserdruckverteilung sind in Anlage 4 Blatt 20 enthalten.

Im Diagramm 28 sind eindeutig die "Durchlässigkeitsspitzen" nach einer Erhöhung der hydraulischen Belastung erkennbar. Es handelt sich hierbei um kurzzeitige Spüleffekte, die im Anschluß in der Regel eine geringere Durchlässigkeit des Systems nach sich ziehen. Diese Tendenz ist aus dem Durchlässigkeitsverlauf ersichtlich. Mit Zunahme der hydraulischen Belastung geht bei beiden Geotextilien die Systemdurchlässigkeit zurück. Das Geotextil G6 bleibt über die gesamte Versuchsdauer durchlässiger als das Geotextil G4. Die Durchlässigkeit von G6 geht um einen Faktor 15 zurück, bei G4 um einen Faktor 22. Die Durchlässigkeit des Testbodens A wird von G4 bereits nach ca. 500 Versuchsstunden erreicht. Bei Geotextil G6 ist dies erst nach 2000 Versuchsstunden der Fall. Bei 500 Versuchsstunden liegt bei beiden Versuchen ein Gradient i = 3 an. Vergleicht man zu diesem Zeitpunkt die Wasserdruckverteilung (siehe hierzu Anlage 4 Blatt 20) über die Probenhöhe bei beiden Versuchen, so ist erkennbar, daß bei G4 schon ein erheblicher Wasserdruck über dem Geotextil aufgebaut wurde. Das bedeutet, bei G4 wird schon im unteren Bereich der Bodenprobe ein Großteil des Wasserdruckes abgebaut. Dort vorhandene hohe Gradienten verursachen hohe Strömungsgeschwindigkeiten, die dadurch aufgrund der erhöhten Schleppspannung des strömenden Wassers wieder sukzessive weitere Bodenpartikel in immer dichter werdender Lagerung in der Grenzschicht Boden/Geotextil einlagern. Dieser Prozeß setzt bei derartigen Böden schon bei geringen hydraulischen Gradienten ein. Beim Geotextil G6 dagegen erfolgt der überwiegende Teil des Druckabbaus über die gesamte Höhe der Bodenprobe. Dem Tiefenfiltrationsmodell folgend lagern sich beim Geotextil G6 die Feinteile im Geotextil ein, die dann in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung teilweise wieder ausgespült werden können. Die Durchlässigkeit nimmt dann schlagartig wieder zu, was bei der Versuchsdurchführung aufgrund der oftmals notwendigen Nachregulierung des konstanten Oberwasser bemerkbar war. Die Durchlässigkeitsentwicklung weist darüberhinaus große Schwankungen auf.



Diagramm 28: Durchlässigkeitsverlauf der Versuche mit Geotextil G4 und G6 in Abhän gigkeit von der Versuchsdauer; enthalten ist die hydraulische Belastung und die Durchlässigkeit des Testbodens A

Auffallend bei der Auswertung der Wasserdruckverteilungen ist deren zeitabhängige Veränderung bei konstantem hydraulischen Systemgradienten. Eine Veränderung des Wasserdruckes im Piezometer 1 geht einher mit der Veränderung der Durchflußmenge Q. Die Veränderung des Druckwertes bzw. des Durchflußwertes Q wird durch die Bildung des Quotienten aus der aktuellen Messung und der Messung davor ausgedrückt. Ist der Quotient

größer eins, bedeutet dies, daß der Wasserdruck im Piezometer 1 bzw. die Wasserdurchflußmenge Q zunimmt. Ein für das Filterverhalten systematischer Zusammenhang besteht dann, wenn einer der beiden Werte größer eins und zugleich der andere Wert kleiner 1 ist. Dies hängt damit zusammen, daß sich ein Rückgang der Durchflußmenge Q durch eine Zunahme des Wasserdruckes über dem Geotextil ausdrückt (Piezometer 1). Ursache hierfür sind ausgeprägte Bewegungen der Feinteilchen an der Grenzschicht Boden/Geotextil, an der sich Kornstrukturen aufbauen, die dann im Zuge des Anstiegs des örtlichen Wasserdruckes immer wieder zusammenbrechen. Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt dieses Phänomen ab. Das bedeutet, es entsteht in Abhängigkeit vom Boden und vom Geotextil ein stabiles Gleichgewicht an der Grenzschicht Boden/Geotextil. Im Diagramm 29 ist der oben beschriebene Zusammenhang dargestellt. Darüber hinaus ist aus diesen Diagrammen das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Geotextilien -obwohl beide Geotextilien gleiche wirksame Öffnungsweiten aufweisen- ersichtlich. Beim Geotextil G6 (mechanisch verfestigt) dauern die Kornumlagerungen länger an als beim Geotextil G4 (thermisch verfestigt) und die Amplituden der Veränderungen sind größer. Das bedeutet, im Vergleich zum thermisch verfestigten wird beim mechanisch verfestigten der wirksame Filter erst nach längerer Versuchzeit aufgebaut. Die Einlagerung der Feinteilchen in das hohlraumreichere mechanisch verfestigte Geotextil im Sinne eines Tiefenfilters erfolgt schrittweise.

Die Druckverteilungen am Ende des Versuchs zeigen bei beiden Geotextilien einen erheblichen Wasserdruck auf dem Geotextil, was als hydraulisches Filterversagen zu interpretieren ist. Beim Ausbau der Proben konnten im Gegensatz zum Geotextil G4 Bodeneinlagerungen auf der Ausströmseite des Geotextils G6 festgestellt werden. Dies steht im Einklang mit dem unterschiedlichen Filtrationsverhaltens der beiden Geotextilien, wonach für einen Tiefenfilter im Geotextil G6 Feinmaterial enthalten sein muß. Die mod GR-Werte bei Versuchsende liegen bei beiden Geotextilien bei Versuchsende zwischen 60 und 100.





Diagramm 29: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Durchflußmenge Q und dem Wasserdruck im Piezometer 1. Systematisch für das Filterverhalten ist, daß einer der Werte größer und gleichzeitig der andere Wert kleiner eins ist.

In einem weiterführenden Langzeitversuch mit dem Testboden A wurde überprüft, ob durch die Wahl eines Geotextils mit relativ großer wirksamer Öffnungsweite ("offene Filterdimensionierung") derartig hohe Wasserdrücke über den Geotextilien vermieden werden können und sich bezüglich der mechanischen Filterwirksamkeit stabile Verhältnisse einstellen. Es wurde dafür das Geotextil G3 mit einer wirksamen Öffnungsweite von  $O_{90,w} = 0,29$  mm verwendet. Die mechanischen und hydraulischen Nachweise der Filterwirksamkeit sind in Tabelle 6 im Kapitel 4.4 enthalten. Die geotextilen Kennwerte stehen im Kapitel 4.3.

Beim Nachweis des geometrischen Suffosionskriterium nach Busch/Luckner (1993) hat das größte suffosionsgefährdete Korn einen Durchmesser von  $d_s = 0,208$  mm (vgl. hierzu Kapitel 4.2.3). Ein Vergleich mit  $O_{90,wgew} = 0,29$  mm macht deutlich, daß bei diesem Versuch mit ausgeprägten Bodendurchgang zu rechnen wäre. Die Berechnung eines kritischen hydraulischen Gradienten, ab dem eine Feinteilchenbewegung einsetzt, ergibt  $i_{s,krit} = 0,08$ . Dieser niedrige Wert wurde beim Versuchseinbau bestätigt, bei dem sofort eine Trübung im unteren Versuchszylinder festgestellt werden konnte.

Der Durchlässigkeitsverlauf bzw. die Wasserdruckverteilung ist in Diagramm 30 bzw. 31 enthalten. Die Kornverteilung des Bodendurchgangs dieses Versuchs ist in Anlage 4 Blatt 21 graphisch dargestellt.



Diagramm 30: Durchlässigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Versuchsdauer



Diagramm 31: Wasserdruckverteilungen über die Probenhöhe bei unterschiedlichen hydraulischen Gradienten

Aus den Diagrammen 30 und 31 sind sowohl beim Durchlässigkeitsverlauf als auch bei den Druckmessungen große Schwankungen in den Kurvenverläufen erkennbar. Die Durchlässigkeit geht schrittweise um eine Faktor 5 zurück, steigt aber wieder im Zuge der schrittweisen Erhöhung des hydraulischen Gradienten nach ca. 3000 Versuchsstunden fast bis zum Anfangswert. Dies und die Druckmessung mit den Piezometern weisen auf eine ausgeprägte Feinteilchenbewegung im Grobkorngerüst hin. Die Druckverteilung über die Höhe der Probe zeigt, daß sich wie erwartet kein Wasserdruck über dem Geotextil aufgebaut hat. Die berechneten mod GR-Werte sind somit praktisch null. Die Trockenmasse des Bodendurchgangs konnte aufgrund der relativ großen Menge im Gegensatz zu anderen Versuchem mit dieser Versuchtechnik in diesem Fall bestimmt werden und betrug 18,6 g. Das Ergebnis der Sedimentation dieser Bodenprobe ist in Anlage 4 Blatt 21 dargestellt. Die Kornverteilung zeigt, daß die Verteilung der Korngrößen des Durchgangs der Verteilung der Korngerüstfüllung, dem Schluff, entspricht.

Eine überschlägige Berechnung unter Zugrundelegung der Ausspülmasse, bis zu welcher Höhe über dem Geotextil die Feinteilchen aus dem Grobkorngerüst ausgespült worden sind, ergibt einen Wert von 4,5 mm. Um dies zu überprüfen und um einen optischen Eindruck der Grenzschichtsituation zu erhalten, wurde ein Dünnschliff einer ungestörten Probe erstellt.



Abbildung 18: Mikroaufnahmen der Grenzschichtsituatuin nach einer Durchströmung. Es ist über dem Geotextil ein feinteilfreies Grobkorngerüst bis zu einer Höhe von ca. 4 mm zu erkennen.

Die überschlägige Berechnung konnte damit bestätigt werden. Feinteilfreie Poren auch in höher liegenden Schichten bestätigen die gemessenen Wasserdrücke in den jeweiligen Schichten.

Diese Kombination aus suffosionsgefährdetem Boden und offener Filterstruktur stellt ein Extrembeispiel dar, für das auch diese Versuchstechnik überprüft werden muß. Aufgrund einer verbesserten Meßtechnik zeigt dieser Versuch die Wichtigkeit einer kombinierten Betrachtung der Anforderungen an einen Filter. Meßtechnisch unterstützt und damit dokumentierbar ist dieser Versuch ein Beispiel, daß in diesem Fall die hydraulische Filterwirksamkeit auf Kosten der mechanischen Filterwirksamkeit geht. Für spezielle Anforderungen in der Praxis könnte dies aber ein optimaler Zustand sein, insbesondere dann, wenn auf der Ausströmseite eines derartigen Filters ein genügend großer Porenraum zur Verfügung steht.

### 6.3.3 Versuche mit Testboden B

Mit dem Testboden B wird die Anwendbarkeit der Versuchszelle um einen weiteren noch extremeren Boden bezüglich der Feinteilmobilität überprüft. Die bodenphysikalischen Kennwerte dieses Bodens sind im Kapitel 4.2.3 zusammengefaßt. Die Bestimmung der Durchlässigkeit war aufgrund der stark ausgeprägten suffosiven Eigenschaften nicht möglich, da dieser Boden bei Beaufschlagung einer hydraulischen Belastung sofort seine Durchlässigkeitseigenschaften verändert. In Kombination mit diesem Boden wurden die Geotextilien G2 und G4 verwendet. Die Kennwerte dieser Geotextilien sind in Kapitel 4.3 zusammengefaßt. Die Nachweise der mechanischen Filterwirksamkeit nach DVWK (1992) sind in Kapitel 4.4 enthalten. Der Testboden B wurde mit Trockendichte von  $\rho_d = 1,82$  g/cm<sup>3</sup> und einem Wassergehalt von w = 2% in die Versuchszelle eingebaut.

Die gemessenen Druckverteilungen der Versuche sind in Anlage 4 Blatt 23 dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, daß von Versuchsbeginn an im oberen Bereich der Bodenprobe eine Ausspülung der Feinteilfraktionen stattfindet. Es entsteht dort ein durchgängiges Porengefüge in dem aufgrund der großen Poren kein Wasserdruck abgebaut werden kann. Im unteren Bereich der Bodenprobe liegt eine vom Geotextil abhängige Druckverteilung vor. Beim Geotextil G2 wird der gesamte Wasserdruck zwischen 0,3 und 1,3 cm über dem Geotextil abgebaut, beim Geotextil G4 dagegen steht der gesamte Wasserdruck direkt auf dem Geotextil bis zu einer Höhe von 0,8 cm an. Dies entspricht den unterschiedlichen

Filtrationsmodellen, die den beiden Geotextilien zugeordnet werden können. Das Geotextil G2 verhält sich entsprechend dem Modell der Tiefenfiltration und das Geotextil G4 entsprechend dem Modell der Oberflächenfiltration. Wie bei den vorherigen Versuchen wurde auch bei diesen Versuchen die hydraulische Belastung schrittweise erhöht, um die Schleppspannung zu erhöhen und somit eine zeitraffende Wirkung in der Feinteilchenbewegung zu bewirken. Daraus ergeben sich, wie im Diagramm der Anlage 4 Blatt 22 ersichtlich, "Durchlässigkeitsspitzen", die sich mit der wieder abbauen. Nachdem das System mit der höchsten hydraulischen Belastung von i  $\approx 12$  durchströmt worden ist, wurde bei i = 1 beginnend die hydraulische Belastung noch einmal in größeren Schritten erhöht. In diesem Versuchsstadium ist zu erkennen, daß zunächst bei i = 1 ein relativ konstanter Wert der Durchlässigkeit des Gesamtsystems erreicht wird und im Zuge einer weiteren Erhöhung keine ausgeprägten Durchlässigkeitsspitzen mehr erreicht werden, wie dies selbst bei einer vergleichweisen sanften erstmaligen Erhöhung der Fall war. Ab i = 12 bzw. i = 10 ist aber wieder ein Trend zur Abnahme der Durchlässigkeit erkennbar. Das bedeutet, daß bei Versuchsanfang eine Feinteilchenbewegung schon bei kleinen hydraulischen Belastungen feststellbar ist, bei einer erneuten Erhöhung der hydraulischen Belastung muß diese höher angesetzt werden, um wieder den Effekt einer Abnahme der Durchlässigkeit aufgrund von Feinteilchenbewegung zu erhalten. Bei beiden Geotextilien lag eine ähnliche Durchlässigkeitsentwicklung vor. Der durchschnittliche Rückgang der Durchlässigkeit des Gesamtsystems, wenn diese bei i = 1bei Versuchsbeginn und bei i = 1 gegen Versuchsende miteinander vergleichen werden, beträgt ca. 4,5 bei G2 und ca. 6,3 bei G4.

Das charakteristische des Testbodens B ist der ausgeprägte Fehlkörnungsbereich. Nach einer Trennung der Gesamtkörnungslinie in auf 100 % gerechnete Kornverteilungen für das Grobkorngerüst (1 mm < d < 8 mm) und für die Grobkorngerüstfüllung liegt eine vergleichbare Situation wie bei entsprechenden Suspensionsversuchen (vgl. Kapitel 6.4) vor. Verglichen werden sollen in diesem Zusammenhang die Suspensionsversuche V52 (Geotextil G2) und V25 (Geotextil G4), bei denen der Sandkörper 1/2 verwendet wurde. Es werden deshalb die Versuche mit dem Widerstandskörper 1/2 gewählt, da diese Korngrößen auch im Grobkorngerüst des Testbodens B enthalten sind und diese Kornfraktion strömungstechnisch und bezüglich der geometrischen Voraussetzung für die Wanderungsfähig von Feinteilfraktionen maßgebend ist, selbst wenn sie, wie beim GR-Test nur zu 10 % im Grobkorngerüst vorhanden ist. Mit Hilfe der Erkenntnisse über die unterschiedlichen Wasserdruckverteilungen bei den Versuchen mit den Geotextilien G2 und G4 aus dem modifizierten GR-

Test kann das Ergebnis aus den Suspensionsversuchen V52 und V25 belegt werden. Der hohe Rückgang von  $R_{ges} = 76,9$  der Permittivität bei V25 liegt demnach an der Oberflächenfiltration, bei dem sich zu viele Feinteilchen auf der Oberfläche des Geotextils anlagern und eine undurchlässigere Schicht entstehen lassen.

Zusammenfassend zeigt sich auch unter diesen Versuchsrandbedingungen aufgrund der unterschiedlichen Wasserdruckverteilung bei den Versuchen das unterschiedliche Filtrationsverhalten. Es liegt hier ein Boden mit stark ausgeprägter Ausfallkörnung vor, bei dem sich bezüglich des Druckabbaus über die Probenhöhe ein Extremfall einstellt. Im oberen Bereich kann kein Wasserdruck abgebaut werden und im unteren Bereich dagegen stellt sich eine vom Filtrationsverhalten abhängige Druckverteilung ein. Vor diesem Hintergrund sind nur die Messungen direkt über dem Geotextil interessant, da sich im oberen Bereich keine Unterschiede in der Druckverteilung ergeben. Die Ergebnisse zeigen, wie dünn die filtertechnisch maßgebende Grenzschicht (hier etwa 0,8 cm) zwischen Boden und Geotextil in diesem Fall sein kann.

### 6.3.4 Versuche mit Schluff

Die bodenphysikalischen Kennwerte des Schluff sind in Kapitel 4.2.2 beschreiben. Der Versuchsboden wurde mit einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,73$  g/cm<sup>3</sup> und einem Wassergehalt von w = 8% in die Durchlässigkeitszelle eingebaut. In zwei Versuchen wurden die Geotextilien G4 und G6 untersucht. Die Bemesssung der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit nach DVWK (1992) ist in Kapitel 4.4 enthalten.

Der Verlauf der Durchlässigkeit und die entsprechenden Gradienten des Versuchs mit Geotextil G6 ist in Diagramm 32 dargestellt.

Bei Versuchsstart mit einem Gradienten von i = 0,6 nimmt die Systemdurchlässigkeit bis ca. 500 Versuchsstunden zu. Im weiteren Versuchsablauf nimmt die Durchlässigkeit bei schrittweiser Erhöhungen des Gradienten auf i = 2 ab und erreicht die Durchlässigkeit bei Versuchsstart. Die weiteren Erhöhungen der Gradienten auf i=4, 8 und 14 bewirken kurze Durchlässigkeitsspitzen, die nach ca. 30 Stunden wieder abgebaut waren. Die Durchlässigkeit war dann geringer als unmittelbar nach der Erhöhung der Gradienten. Am Ende des Versuchs wurde erneut ein Gradient von i = 1 eingestellt, bei dem sich eine um einen Faktor 7 geringere Durchlässigkeit einstellte als bei entsprechenden hydraulischen Gradienten bei Versuchsbeginn. Die gemessenen Wasserdrücke dieses Versuchs sind in Anlage 4 Blatt 24 dargestellt.



Diagramm 32: Verlauf der Durchlässigkeit des Gesamtsystems und der angelegten hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit von der Versuchsdauer, hier bei Geotextil G6

Die Ergebnisse zeigen Unterschiede zwischen den Messungen auf der linken und rechten Seite. Bis zu einem i = 2 ergeben sich größenordnungsmäßig auf beiden Seiten gleiche Druckverteilungen. Bei einem i = 4 zeigt die Messung auf der linken Seite der Probe zunächst ein Druckabbau im oberen Bereich der Probe an, während auf der rechten Seite noch ein nahezu linearer Druckabbau gemessen wurde. Die größten Unterschiede ergeben sich bei der Erhöhung der hydraulischen Belastung auf i = 8. Dabei stellt sich innerhalb von 5 Versuchsstunden im Vergleich zum vorherigen Gradienten und im Vergleich zur gegenüberliegenden Seite eine grundlegend andere Druckverteilung ein. Auf der rechten Seite verändert sich innerhalb von 5 Versuchsstunden die Form der Wasserduckverteilung. Unmittelbar nach Erhöhung der hydraulischen Belastung erfolgt noch ein relativ gleichmäßiger Druckabbau über die Höhe der Bodenprobe. Bei weiterer Durchströmung allerdings nimmt der Wasserdruck im Piezometer 1 über dem Geotextil deutlich zu, bis schließlich der gesamte Abbau des Wasserdruckes in der Bodenschicht über dem Geotextil erfolgt. Die Messungen links

dagegen zeigen einen plötzlichen Anstieg des Druckes über die gesamte Höhe der Bodenprobe. Das Piezometer 1 über dem Geotextil dokumentiert aber dort noch einen Druckabbau. In diesem Fall erfolgt der Druckabbau nicht im Geotextil sondern im darüberliegenden Boden. Das Geotextil ist in diesem Bereich noch ausreichend durchlässig, so daß sich unmittelbar darüber kein Wasserdruck aufbaut. Diese auf beiden Seiten gemessenen Druckverteilungen stellen sich entsprechend auch bei der Erhöhung des hydraulischen Gradienten auf i = 14 ein. Die im Diagramm (siehe hierzu Anlage 4 Blatt 24) ab einem hydraulischen Gradienten von i = 8 erkennbaren Einbrüche der Wasserdrücke auf beiden Seiten, können auf Verstopfungen der jeweiligen Piezometer zurückgeführt werden. Diese wurden aber nicht behoben, um Störungen in der Probe zu vermeiden. Die permanente Überprüfung der restlichen Piezometer ergab eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit. Zur Klärung dieser Druckverteilung wurde von der Probe ein Dünnschliff angefertigt, da ein derartig ausgeprägtes Phänomen der Veränderung des Wasserdruckaufbaus ab einem bestimmten Gradienten bei anderen Versuchen noch nicht festgestellt werden konnte. Als Ursache sind ausgeprägte Kornumlagerungen wahrscheinlich, was auch mit dem Ausfall der zwei Piezometer im Einklang steht. In Abbildung 19 ist der Dünnschliff dieser Probe dargestellt.

In der Probe ist deutlich die Ausbildung eines bevorzugten Wasserweges zu erkennen. Vor diesem Hintergrund ist es offensichtlich, daß ein Piezometer dessen Meßpunkt in diesem ausgeprägten bevorzugten Wasserweg liegt keinen Abbau des Wasserdruckes anzeigt. Der in der Abbildung gekennzeichnete Meßpunkt des Piezometers muß vielmehr den Wasserdruck des Oberwassers anzeigen. Die Ursache für die Ausbildung dieser bevorzugten Wasserwegigkeiten ist auf partielle Feinteilverluste der Bodenprobe durch den Filter zurückzuführen. Diese Feinteilverluste treten offensichtlich erst ab einer ausreichend hohen hydraulischen Belastung ein. Da bei geringen hydraulischen Gradienten noch ein nahezu linearer Druckabbau meßbar war, muß ab einem hydraulischen Gefällen von i = 4 dieser Feinteilverlust eingetreten sein. In diesem Zusammenhang zeigt der Durchlässigkeitsverlauf bei einer Erhöhung auf diese hydraulischen Gradienten (i > 4) eine größere Durchlässigkeit auf. Dies ist auf Kornumlagerung an der Grenzschicht Boden/Geotextil zurückzuführen. In einem zeitabhängigen Prozeß bildet sich dort aber wieder eine stabile Bodenstruktur aus, bei der keine Bodenteilchen ausgespült werden. Im Zuge des Nachwanderns weitere Bodenpartikel wird diese Feinteilschicht über dem Geotextil wieder undurchlässiger.



Abbildung 19: Mikroaufnahmen des Dünnschliffes der Schluffprobe . Es ist ein ausgeprägter bevorzugter Wasserweg über nahezu der gesamten Probenhöhe zu erkennen.



Der Verlauf der Durchlässigkeit und die entsprechenden Gradienten beim Versuch mit dem Geotextil G4 ist Diagramm 33 dargestellt.

Diagramm 33: Verlauf der Durchlässigkeit des Gesamtsystems und der angelegten hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit von der Versuchsdauer, hier mit dem Geotextil G4

In den ersten 500 Versuchsstunden mit den hydraulischen Gradienten von i = 0,6 und i = 1 stellt sich eine nahezu konstante Systemdurchlässigkeit ca.  $3*10^{-7}$  m/s ein. Nach einer Erhöhung des Gradienten auf i = 2 schwankt die Durchlässigkeit zwischen 1,5 und  $3*10^{-7}$  m/s. Bei weiteren Erhöhungen des Gradienten auf i = 4, 6 und 8 nimmt die Durchlässigkeit immer mehr ab, bis nach 1300 Versuchsstunden ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_{10} = 1*10^{-7}$  m/s vorliegt. Auffallend bei diesem Versuch ist die Abnahme der Systemdurchlässigkeit ab einem hydraulischen Gradienten von i = 4, wie dies auch bei Geotextil G6 schon festgestellt werden konnte. Ein wesentlicher Unterschied zu dem Vergleichsversuch mit Geotextil G6 ist, daß beim Durchlässigkeitsverlauf des Geotextils G4 keine Durchlässigkeitsspitzen unmittelbar nach einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten auffreten. Dies kann auf die unterschiedliche Struktur der beiden Geotextilien zurückgeführt werden, die sich aufgrund der unterschiedlichen Verfestigungsart ergibt. Der Spüleffekt, der bei einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten auftritt, bewirkt beim Geotextil G6 bei dem sich im Geotextil ein Filter aufgebaut hat, einen Abtransport der Feinteilchen. Damit verbunden ist eine kurzeitige

Erhöhung der Durchlässigkeit bis sich im Geotextil wieder genügend Feinteilchen für einen Tiefenfilter eingelagert haben. Dies ist beim Geotextil G4 nicht möglich, da sich hierbei ein Oberflächenfilter aufgebaut hat, bei dem ein Abtransport der Feinteilchen bzw. eine Einlagerung der Feinteilchen in das Geotextil bei einer Erhöhung der hydraulischen Belastung nicht möglich ist. Die nachfolgenden Bodenpartikel bewirken den Aufbau eines Filterkuchens.

Die Unterschiede im Filterverhalten zwischen dem Geotextil G4 und G6 werden bei diesen Versuchen durch die Durchlässigkeitsspitzen aufgezeigt, die nach einer Erhöhung der hydraulischen Belastung nur beim Geotextil G6 vorhanden sind. Bei beiden Versuchen liegt eine stärker ausgeprägte Abnahme der Durchlässigkeit ab einem hydraulischen Gradienten von i = 4 vor. Dies ist auf die Eigenschaft des Bodens mit den vorliegenden Einbaubedingungen zurückzuführen, unter denen ab diesem hydraulischen Gradienten eine ausgeprägte Feinteilbewegung einsetzt, die unabhängig vom Filtrationsmodell (Tiefen- oder Oberflächenfilter) der jeweiligen Geotextilien eine Abnahme der Durchlässigkeit bewirkt. Die gemessenen Druckverteilungen bei Geotextil G4 sind in Diagramm 34 dargestellt.

Es kann beim Vergleich der Messungen der linken und rechten Seite keine Übereinstimmung der Wasserdrücke festgestellt werden. Ab einer hydraulischen Belastung von i = 2weisen die Wasserdrücke der Piezometer 1 und 2 der Messung auf der linken Seite deutlich geringere Werte auf. Dies deutet auf eine verminderte Funktionsfähigkeit dieser Piezometer hin, die auf eine erhöhte Feinteilumlagerung ab diesen Gradienten zurückzuführen ist. In Diagramm 35 sind die Wasserdrücke der Piezometer 1 der linken und rechten Seite sowie die Durchlässigkeitsentwicklung des Gesamtsystems dargestellt.

Aus Diagramm 35 wird der Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit  $k_{10}$  und den Piezometern 1 beider Seiten deutlich. Bei einer Zunahme des Wasserdruckes unmittelbar über dem Geotextil nimmt die Durchlässigkeit und somit die hydraulische Filterwirksamkeit ab. Trendmäßig trifft dies für beide Druckmessungen zu, wenngleich die Beträge der Wasserdrücke auf beiden Seiten unterschiedlich sind. Vor diesem Hintergrund ist es möglich, daß sich ein unterschiedlich wirksamer Filter vor den Injektionsnadeln aufbaut. Bei 1200 Versuchsstunden wurde dieser Filter durch leichtes Klopfen am Piezometer zerstört, woraufhin sich die Wasserdruckwerte zwischen beiden Seiten wieder angeglichen haben.



Diagramm 34: Unterschiedliche Wasserdruckverteilungen auf gegenüberliegenden Seiten der Bodenprobe



Diagramm 35: Wasserdrücke der Piezometer 1, die auf gegenüberliegenden Seiten der Bodenprobe gemessen wurden. Ferner ist die Durchlässigkeitsentwicklung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Zusammenfassend kann aufgrund dieser beiden Versuche festgestellt werden, daß die Grenze der Anwendbarkeit zur Messung der Wasserdrücke über Injektionsnadeln bei diesen Bodenarten unter den Einbaubedingungen nahezu erreicht ist. Die ausgeprägten Bodenumlagerungen ab einem hydraulischen Gefälle von i = 4 kann zur Verlegung der Nadeln mit Bodenpartikeln führen, die die Druckmessungen verfälschen oder nicht mehr ermöglichen. Problematisch sind ebenso die Wasserdruckmessungen bei hydraulischen Belastungen kleiner 1. Hierbei liegen so geringe Strömungsgeschwindigkeiten vor und die Beträge der Druckunterschiede auf verschiedenen Probenhöhen sind so gering, daß mögliche Meßfehler der einzelnen Piezometer einen systematischen Zusammenhang überdecken. Darüberhinaus ist, wie die Abbildung 19 zeigt, die mögliche Ausbildung von bevorzugten Wasserwegen bei diesen Böden zu beachten. Die Messungen der Wasserdrücke an zwei Stellen auf gleicher Höhe im Boden haben sich in diesem Fall als zielführend erwiesen, um die Ausbildung eines derartigen Phänomens erkennen zu können.

## 6.3.5 Zusammenfassung modifizierter GR-Test

Same.

Die Funktionstüchtigkeit der Versuchszelle konnte durch die oben beschriebenen Versuche eingehend überprüft werden. Bei der Entwicklung des modifizierten GR-Test wurde das Ziel verfolgt, eine Versuchstechnik zu entwickeln, mit der grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten von geotextilen Filtern gewonnen werden können. Im Mittelpunkt stand dabei die meßtechnische Erfassung der unterschiedliche Wirkungsweise eines Tiefenfilters und eines Oberflächenfilters. Ein Tiefenfilter zeichnet sich im Gegensatz zu einem Oberflächenfilter durch eine hohlraumreichere Porenstruktur aus. Diese Porenstruktur ermöglicht ein Einwandern von Feinmaterial. Dadurch entwickelt sich eine wirksame Filterstruktur bestehend aus geotextilen Fasern und eingelagertem Feinmaterial des abzufilternden Bodens. Beim Oberflächenfilter wird durch die dichtere Faserstruktur des Geotextils der Aufbau einer wirksamen Filterstruktur, bestehend aus Feinmaterial, über dem Geotextil initiiert. Ein Einlagern von Feinteilen in den Oberflächenfilter ist in der Regel nicht möglich. Die Zuordnung eines Geotextils zum jeweiligen Filtrationsmodell aufgrund der wirksamen Öffnungsweite ist nicht möglich, da diese Wirkungsweise durch das Verfahren (Naßsiebung eines Prüfbodens durch das Geotextil mittels Vibration) zur Bestimmung der wirksamen Öffnungsweite geprägt wird. Maßgebender für die Zuordnung sind die Geotextilparameter Dicke, Herstellungsart und Porengehalt. Beiden Filtrationsmodellen obliegen die gleichen Anforderungen hinsichtlich der hydraulischen und mechanischen Filterwirksamkeit. Insbesondere die hydraulische Filterwirksamkeit, also die druckverlustarme Ableitung der hydraulischen Belastung, konnte mit herkömmlichen Versuchstechniken, bei denen dieses Kriterium nur über die Messung der Wasserdurchflußmenge erfaßt werden kann, nicht überprüft werden.

Aus diesem Grund wurden Durchlässigkeitszellen mit einer verfeinerten Meßtechnik zur Erfassung der Wasserdruckverteilung über die Probenhöhe ausgestattet. Dadurch war es möglich Wasserdrücke und die Veränderung dieser Wasserdrücke in Abhängigkeit von der Versuchsdauer möglichst nahe an der Grenzschicht Boden/Geotextil erfassen zu können. Ferner wurden Meßfehler aufgrund von Randumläufigkeiten eliminiert, indem die Wasserdrücke im inneren der Bodenprobe mit Hilfe von Injektionsnadeln abgegriffen wurden. Mit Hilfe dieser Versuchstechnik konnte somit die hydraulische Wirksamkeit nicht nur über die Wasserdurchflußmenge sondern ergänzend noch über die Wasserdruckmessung in der Probe überprüft werden. Zusätzlich wurde ein sogenannter mod GR-Wert (Quotienten aus dem hydraulischen Gradienten im Geotextil und dem hydraulischen Gradienten im Boden) eingeführt, der aussagt, wie groß der Wasserdruck über dem Geotextil im Verhältnis zum Wasserdruck in der Bodenprobe ist.

In Vorversuchen mit einem filterstabilen Versuchsboden, konnte gezeigt werden, daß hierbei ein nahezu linearer Abbau des Wasserdruckes über die Höhe der Bodenprobe erfolgt. Beim Geotextil das dem Oberflächenfiltrationsmodell zuzuordnen ist, konnte ab einer hydraulischen Belastung von i = 4 ein leichter Aufbau des Wasserdruckes gemessen werden. Entsprechend lag hierbei auch der mod GR-Wert mit 6 etwas höher als beim Geotextil, das aufgrund der Verfestigungsart und dem Porengehalt als Tiefenfilter einzustufen ist, bei dem der mod GR-Wert bei 4 lag. Beide Geotextilien zeigten ein ähnliches Durchlässigkeitsverhalten und waren unabhängig vom Filtrationsmodell hydraulisch wirksam. Als Ergebnis dieser Versuche wird festgestellt, daß wenn ein filterstabiler Boden vorliegt die Filterwirksamkeit gewährleistet ist und dies auch durch die Messung der Wasserdruckverteilung bestätigt werden kann.

Die weiteren Versuche mit filtertechnisch schwierigen Böden, wie Böden, die zu hoher Feinteilmobilität neigen, zeigten zusammenfassend folgende Ergebnisse:

Durch Böden, die eine ausgesprochene Neigung zur Feinteilmobilität aufweisen, konnte ausgeprägt die unterschiedliche Wirkungsweise eines Tiefen- bzw. Oberflächenfilters durch die Messung der Wasserdrücke über die Probenhöhe erkannt werden. Die Messungen zeigten, daß bei mechanisch verfestigten Geotextilien (Tiefenfilter) größere Feinteilumlagerungen an der Grenzschicht Boden/Geotextil stattfinden als bei thermisch verfestigten Vliesstoffen. Die länger anhaltenden und die stärker schwankenden Druckveränderungen bei mechanisch verfestigten Geotextilien deuten darauf hin, daß schrittweise eine Einlagerung in das Geotextil stattfindet. Laut Heerten (1981) ist dies ein typisches Verhalten eines Tiefenfilters, bei dem sich erst nach längerer Zeit ein Gleichgewichtszustand einstellt. Beim Oberflächenfilter erfolgt dies in relativ kurzer Zeit, da schon aufgrund der ersten Anlagerungen von Feinteilen auf der Oberfläche des Filters die strömungswirksamen Poren verstopft werden können und dadurch ein Aufbau des Wasserdruckes entstehen kann.

Die Messungen der Wasserdrücke über dem Geotextil und der Wasserdurchflußmengen ließen einen für das Filterverhalten systematischen Zusammenhang erkennen. Es konnte festgestellt werden, daß bei Zunahme des Wasserdruckes über dem Geotextil die Durchflußmenge abnimmt. Die Ursache hierfür ist der Aufbau eines Gleichgewichtszustandes an der Grenzschicht Boden/Geotextil oder im Geotextil. Bodenpartikel nehmen gerade beim Tiefenfilter nicht sofort nach Strömungsbeginn ihre endgültige Position ein, da aufgrund von örtlich ansteigenden hydraulischen Gradienten im System es immer wieder zu Einlagerungen oder Umlagerungen von Feinmaterial kommt.

Bei Verwendung eines Geotextils mit einer wirksamen Öffnungsweite, die größer ist als die Durchmesser der grobkorngerüstfüllende Fraktion zeigte sich, daß kein Wasserdruck über dem Geotextil aufgebaut wird. Es kam in der Schicht über dem Geotextil zu Feinteilausspülungen, wodurch dann der Abbau des Wasserdruckes im oberen Bereich der Bodenprobe erfolgte. In projektspezifischen Anwendungsfällen, bei denen die Sickerschicht einen ausreichenden Porenraum aufweist, um die durchgespülten Feinteile einzulagern, wird dies zur Auswahl eines Geotextils führen, bei dem aufgrund der Ausspülungen die Systemdurchlässigkeit nur geringfügig abnimmt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß mit dieser Versuchstechnik die Filtrationsmodelle, Oberflächenfilter und Tiefenfilter, nachvollzogen werden können. Der modifizierte GR-Test zeigt seine Funktionstüchtigkeit bei filterstabilen und filtertechnisch schwierigen Böden. Insbesondere bei filtertechnisch schwierigen Böden, bei denen laut DVWK (1992) die Filterwirksamkeit eines Geotextils labormäßig nachzuweisen ist, eignet sich dieser Versuchsaufbau zur Überprüfung der hydraulischen Filterwirksamkeit.

### 7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses FE-Vorhabens sind Versuchstechniken entwickelt und erprobt worden, mit denen die Filterwirksamkeit von Geotextilien im Anwendungsfall Deponiebau und in diesem Zusammenhang speziell die Filterwirksamkeit von Geotextilien zwischen Rekultivierungsschicht und Sickerschicht, untersucht werden kann.

Die bisherige Dimensionierung erfolgte nach Filterregeln, die auf der Auswertung von Aufgrabungen langjährig eingebauter Geotextilien in wasserbaulichen Anwendungen beruhen. Hierbei liegen im Gegensatz zum Deponiebau jedoch meist größere hydraulische Belastungen und teilweise auch hydrodynamische Belastungen vor. Darüber hinaus werden im Deponiebau als Rekultivierungsmaterialien eine Vielzahl an verschiedenen und meist auch heterogenen Bodenarten verwendet, die ohne Anforderungen an die Einbaubedingungen eingebaut werden.

Unter Berücksichtigung dieser hydraulischen und bodeneinbautechnischen Randbedingungen bei geotextilen Filtern zwischen Rekultivierungs- und Sickerschicht, wurden labortechnische Prüfverfahren entwickelt, die eine Beurteilung der Wirksamkeit dieser geotextilen Filter zuläßt. Die Auswertung der diesbezüglichen Literatur zeigte, daß eine Vielzahl an Versuchstechniken existieren, diese aber in der Regel die im Deponiebau vorkommenden Randbedingungen nicht befriedigend berücksichtigen, so daß nicht auf bereits bewährte oder genormte Versuchstechniken zurückgegriffen werden konnte. Ferner sind oftmals die Versuchsrandbedingungen nur unzureichend genau angegeben, so daß bereits durchgeführte Versuche nicht zur Beurteilung der Filterwirksamkeit übernommen werden können.

Im wesentlichen wurden vier labortechnische Prüfverfahren entwickelt, die unterschiedliche Zielsetzungen verfolgten. Zum einen handelt es sich um Prüfverfahren, die das in der Praxis vorkommende System möglichst genau simulieren. Zum anderen wurde ein Prüfverfahren entwickelt, mit dem das unterschiedliche Filterverhalten von verschiedenen Geotextilien grundlagenorientiert untersucht werden kann.

Die praxisorientierten Versuchstechniken, zu denen der modifizierte LTF-Test, der modifizierte Pinhole-Test und der Suspensionstest zu rechnen sind, simulieren im Deponiebau vorkommende Gegebenheiten labormaßstäblich. Der LTF-Test stellt eine Grenzschichtsituation nach, die beim Einbau des Rekultivierungsmaterials durch Vorkopfschüttung aufttreten. Hierbei wurden 8 Geotextilien mit einem filtertechnisch schwierigen Versuchsboden kombiniert. Ein weiterer Versuchsparameter war der Sauerstoffgehalt des durchströmenden Wassers. Es konnten Unterschiede beim Durchlässigkeitsverhalten des Boden-Geotextilsystems bei verschiedenen Sauerstoffgehalten des durchströmenden Wassers festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigten, daß bei Verwendung von stark entlüftetem Wasser größere Mengen an Feinteilchen mobilisiert werden können und dadurch hinsichtlich der Untersuchungen der Filterwirksamkeit maßgeblichere Randbedingungen vorliegen.

Der modifizierte Pinhole-Test untersucht die Auswirkungen von Erosionsvorgängen in der Bodenprobe auf das Filterverhalten von Geotextilien bei bevorzugten Wasserwegen, die unter anderem aufgrund von Bodeninhomogenitäten beim Einbau oder durch Wurzelbildung entstehen können. Bei der Entwicklung einer geeigneten Versuchstechnik, mit der eine Simulation von bevorzugten Wasserwegen auch bei gering kohäsiven feinkörnigen Böden möglich ist, zeigte sich, daß der bevorzugte Wasserweg in Durchströmungsrichtung konisch geformt sein muß und darüber hinaus mit einem geeigneten Stützmaterial zu verfüllen ist, um die Standfestigkeit des bevorzugten Wasserweges zu gewährleisten und dadurch die Auswirkungen von Oberflächenerosion entlang des Wasserweges auf das Filterverhalten des Geotextils untersuchen zu können.

Kommt es im praktischen Anwendungsfall zu Erosionserscheinungen ist dies in der Regel mit der Bildung von Suspensionen verbunden. Diese Suspensionen stellen in Bezug auf die Filterwirksamkeit einen kritischen Lastfall dar, da hierbei eine ausgeprägte Feinteilmobilität vorliegt. Um die Auswirkungen von Suspensionen auf das Filterverhalten von Geotextilien zu untersuchen, wurde ein Suspensionstest entwickelt. Die umfangreichen Versuche mit verschiedenen Suspensionen zeigten, daß geometrische Betrachtungsweisen allein nicht ausreichen, um das Bodenrückhaltevermögen (mechanische Filterwirksamkeit) des Filters vorhersagen zu können. Geotextile Filter mit gleicher wirksamer Öffnungsweite aber unterschiedlichem Faserrohstoff und unterschiedlichem Herstellungsverfahren zeigten grundlegende Unterschiede bei den durchgespülten Bodenmengen und dadurch auch unterschiedliche hydraulische Filterwirksamkeit.

Mit Hilfe des grundlagenorientierten Versuchsaufbaus des modifizierten GR-Tests, dessen Hauptmerkmal eine erweiterte und verfeinerte Meßtechnik zur Erfassung der grenzschichtnahen Wasserdrücke ist, konnten grundlegende Erkenntnisse über das Filterverhalten erarbeitet werden. Der Vorteil dieser Meßtechnik ist, daß neben der Veränderung der Durchlässigkeit des Gesamtsystems und der Bodendurchgangsmenge, mit der Messung der Wasserdruckverteilung zusätzlich ein Parameter zur Beurteilung der hydraulischen Filterwirksamkeit vorliegt. Die Funktionstüchtigkeit dieser Meßtechnik wurde zunächst an Kombinationen aus geotextilen Filters und filterstabilem Versuchsboden überprüft. Bei diesen Systemen erfolgte ein linearer Abbau des Wasserdruckes über die gesamte Bodenprobe. Bei Kombinationen bestehend aus geotextilen Filter und filtertechnisch schwierigen Böden konnte ein vom Herstellungsverfahren des Filters abhängige Wasserdruckverteilung gemessen werden. Im Gegensatz zu mechanisch verfestigten zeigte sich bei thermisch verfestigten Geotextilien ein Aufbau eines Wasserdruckes an der Grenzschicht Boden/Geotextil, wodurch eine eingeschränkte hydraulische Filterwirksamkeit nachgewiesen ist. Die Veränderung der Wasserdruckverteilung ermöglicht eine Zuordnung des geotextilen Filters zum Filtrationsmodell eines Tiefen- oder Oberflächenfilters.

Aufgrund der umfassenden Überprüfung der im Rahmen dieses FE-Vorhabens entwickelten Versuchstechniken ist eine Beurteilung der Filterwirksamkeit eines Geotextils in Kombination mit einem vorgegebenen Rekultivierungsboden möglich. Besonders geeignet ist hierfür der modifizierte GR-Test, da mit diesem am eindeutigsten die hydraulische Filterwirksamkeit, die in Bezug auf die Standfestigkeit und die langfristige Funktionsfähigkeit der Dichtung des Oberflächenabdichtungssystems maßgebend ist, überprüft werden kann.

### 8. Schlußbemerkungen

Bei Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien sind im wesentlichen die folgenden vier Schichten zu nennen, deren Funktionsweisen aufeinander abzustimmen sind:

- Rekultivierungschicht,
- Filterschicht,
- Sickerschicht,
- Abdichtungsschicht.

Dieses Abdichtungssystem hat die Aufgabe, langfristig den Eintrag von Niederschlagswasser in den Deponiekörper und dessen Auslaugung zu minimieren. Hierzu ist zum einen eine ausreichende Filter- und Dränwirksamkeit des Systems sicherzustellen. Zum anderen kommt dabei aber auch eine besondere Bedeutung dem Wasserhaushalt im Abdichtungssystem und damit in den einzelnen Schichten zu. Dieser wird neben den vorgegebenen Standortbedingungen (Klima, Oberflächengestaltung, geographische Orientierung, Bewuchs u.a.) im besonderen von der Art und Mächtigkeit der Rekultivierungs-, Filter- und Sickerschichten bestimmt, durch die eine mögliche Austrocknungsgefahr der mineralischen Abdichtungsschichten beeinflußt wird. So ist in diesem Zusammenhang beispielsweise die Anforderung an den Durchlässigkeitsbeiwert von Sickerschichten mit k >1x 10<sup>-3</sup> m/s a priori in Frage zu stellen, da damit enggestufte, gleichkörnige Kies- oder Sandschichten zum Einsatz kommen, die im Hinblick auf den genannten Wasserhaushalt und die Austrocknungsgefährdung der mineralischen Abdichtung als sehr ungünstig einzustufen sind.

Ein weiterer Aspekt, der für die Auswahl der Materialien eines Oberflächenabdichtungssystems eine wesentliche Bedeutung hat, ist die dauerhafte Gewährleistung der Standsicherheit. In die diesbezüglichen Nachweis gehen die Scherparameter der Materialien an sich und in deren Grenzflächen zueinander ein. Hierbei wird davon ausgegangen, daß diese Parameter dauerhaft erhalten bleiben. Dies setzt jedoch voraus, daß im Zuge der hydraulischen Beanspruchung des Systems z.B. keine Kolmation oder Filterkuchenbildung im Bereich der Grenzfläche zwischen der Rekultivierungs- und der Filterschicht auftritt, wodurch eine Gleitschicht entstehen kann und was außerdem zum Aufbau eines Wasserdrucks führen würde. Durch beide Phänomene, die sich durchaus gegenseitig verstärken können, wird die Standsicherheit des Systems vermindert oder gar gefährdet. Im Rahmen der Bearbeitung der Forschungsarbeit mußte jedoch zunächst entsprechend der derzeitigen praktischen Handhabung von Materialien für die Rekultivierungs- und Sickerschichten ausgegangen werden, wie sie durch die Anforderungen der Verwaltungsvorschriften TA Abfall und TA Siedlungsabfall vorgegeben sind. Für die Sickerschichten sind dabei Materialien zu betrachten, die infolge der geforderten Gleichkörnigkeit einen hohen Porenanteil aufweisen. Da in den genannten Verwaltungsvorschriften für die Materialien der Rekultivierungsschichten mit Ausnahme einer Mindestmächtigkeit keine konkreten Anforderungen aufgeführt werden, hat dies für den konkreten Anwendungsfall zur Folge, daß hierfür eine weite Palette von zumeist auch heterogenen Böden zum Einsatz kommt, die im Regelfall eine zwischen der Rekultivierungs- und der Sickerschicht einzubringende Filterschicht bedingen. Für die Untersuchungen in der Forschungsarbeit wurden daher prinzipiell filtertechnisch schwierige, d.h. erosions- und suffosionsempfindliche Materialien eingesetzt, um die maßgeblichen Beanspruchungsfälle in der Praxis abdecken zu können.

ALT ?

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß die <u>mechanische</u> Filterwirksamkeit, d.h. ein eingeschränkter, nur geringfügiger Durchtritt von Feinteilchen durch den Filter stets gegeben war, wenn die wirksame Öffnungsweite  $O_{90,w}$  kleiner als der dreifache Korndurchmesser des untersuchten Bodens bei einem Siebdurchgang von 90 Masse% war ( $O_{90,w} < 3d_{90}$ ). Im Hinblick auf den Einsatz von gemischtkörnigen, suffosionsempfindlichen Böden ist anzumerken, daß für solche Böden die Körnungslinie entsprechend dem Nachweis gegen Suffosion in zwei Bereiche, d.h. einen feinkörnigen und einen grobkörnigen Anteil aufzugliedern ist, wobei die mechanische Filterwirksamkeit des Geotextils und das genannte Kriterium auf den so idealisierten feinkörnigen "Teilboden" zu beziehen ist. Aus den umfänglichen Untersuchungen läßt sich also ableiten, daß die Vorgaben des bisher herangezogenen DVWK-Merkblatts mit  $O_{90,w} < d_{90}$  für die Anwendung bei Deponieoberflächenabdichtungssystemen aufgrund der hier gegebenen geringeren hydraulischen Gradienten abgemindert werden können.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde kein systematischer Zusammenhang zwischen mechanischer Filterwirksamkeit und der Dicke oder der Flächenmasse der Geotextilien festgestellt. Für die Planung ergeben sich jedoch diesbezüglich Mindestanforderungen, die dem baupraktischen Einsatz, d.h. der Art der Rekultivierungsschichtmaterialien und der Beanspruchung durch deren Einbau, gerecht werden. Die einzusetzenden Vliesstoffe müssen in dieser Hinsicht eine Robustheit aufweisen, um den Einbaubeanspruchungen widerstehen zu können, da im Falle der Beschädigung die Filterwirksamkeit nicht mehr gegeben ist. Für die zu erwartenden Beanspruchungen beim Bau von Deponieoberflächenabdichtungen kann eine Auswahl in Anlehnung an das Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (Ausgabe 1994) erfolgen, wobei für den Regelfall Geotextilien mit einer Robustheitsklasse von mindestens GRK 3 einzusetzen sind.

Im Hinblick auf die <u>hydraulische</u> Filterwirksamkeit haben die Forschungsarbeiten gezeigt, daß bei den hier untersuchten filtertechnisch kritischen Böden die Einführung eines Faktors  $\eta$ , um den der Durchlässigkeitsbeiwert des Geotextils größer sein muß als der des Rekultivierungsmaterials (z.B. Faktor 50 oder 100), nicht zielführend ist. Sobald sich eine Feinteilchenmobilität in solchen Böden einstellt, lagern sich diese Partikel nicht nur im geotextilen Filter, sondern vorwiegend ausgehend von der Grenzfläche zwischen dem Filter und dem Testboden und dann rückschreitend in den Boden selbst ab. Dieses Phänomen ist mit der Einführung des vorgenannten Faktors nicht auszuschließen. Die Prüfung, ob solche Phänomene bei einem vorgesehenen geotextilen Filter zusammen mit einem bestimmten Rekultivierungsmaterial auftreten können, kann mit dem im Zuge der Forschungsarbeit entwickelten modifizierten GR-Test (s. Kap. 5.4 und 6.3) erfolgen. Soweit dabei festgestellt wird, daß der Druckabbau nicht über die gesamte Dicke der Boden-Geotextil-Probe linear, sondern bevorzugt im Grenzbereich zwischen geotextilen Filter und Rekultivierungsmaterial erfolgt, ist das vorgesehene Geotextil für den Einsatz als Filter für das vorgegebene Rekultivierungsmaterial als ungeeignet einzustufen.

Das Phänomen, daß eine relativ zum Rekultivierungsmaterial geringer durchlässige, zumeist recht dünne Schicht entsteht, schränkt nicht nur die Filter- und Dränwirksamkeit des Entwässerungssytems ein. Es kann sich vielmehr, wie schon erwähnt, durch die damit einhergehende Bildung einer Gleitschicht und dem Aufbau eines Wasserdrucks auch standsicherheitsgefährdend für die Rekultivierungsschicht auswirken, so daß der Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit für die Funktionstüchtigkeit und Sicherheit des Deponieabdichtungssystems eine größere Bedeutung zukommt als die mechanische Filterwirksamkeit.

Insgesamt zeigten die umfänglichen Untersuchungen, bei denen neben unterschiedlichen Geotextiltypen, -dicken und -flächenmassen die Einbaubedingungen der Testböden und auch die hydraulischen Abflußbedingungen variiert wurden, daß die mechanische Filterwirksamkeit mit Vliesstoffen, wie sie üblicherweise eingesetzt werden, in allen Fällen selbst mit den hier eingesetzten filtertechnisch kritischen Böden nicht zuletzt aufgrund der vergleichsweise zu wasserbaulichen Anwendungen geringen hydraulischen Beanspruchungen erfüllt wird. Es ist daher naheliegend, die Untersuchungen in der Richtung zu vertiefen und fortzusetzen, einen Verzicht auf Filterschichten zu ermöglichen, indem die Art und Einbaubedingungen der Rekultivierungs- und Sickerschichten aufeinander abgestimmt werden. Dies bedeutet zum einen, daß für Sickerschichten Materialien zu verwenden wären, die eine nicht zu hohe Durchlässigkeit und damit einen zu großen Porenanteil aufweisen. Zum anderen ist es ebenfalls erforderlich, daß die Auswahl und der Einbau des Rekultivierungsmaterials unter definierten Bedingungen erfolgt. In diesem Zusammenhang wird auch zu prüfen sein, inwieweit Dränmatten aus Geokunststoffen alternativ zu mineralischen Sickerschichten zum Einsatz kommen können.

Im weiteren wird bei der Untersuchung und Beurteilung der Filter- und Dränwirksamkeit von Deponieoberflächenabdichtungssystemen die Frage des Wasserhaushalts in solchen Konstruktionen im Hinblick auf die Austrocknungsgefährdung der mineralischen Abdichtungsschichten eine herausragende Bedeutung zukommen. Die Behandlung dieser Frage wie auch die zuvor genannten geplanten weiteren Untersuchungen können aber nicht mehr allein mittels vergleichsweise kleinmaßstäblichen Laborversuchen erfolgen. Hierzu werden Versuchsfelder erforderlich, deren Beobachtungen mit klein- und großmaßstäblichen Laborversuchen in Verbindung zu bringen sein werden und zudem einer numerischen Modellierung zugänglich sein sollten. Dies werden schwerpunktmäßig die Aufgaben sein, die im Rahmen der Fortsetzung dieser Forschungsarbeit anstehen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing

Ordinarius

München, 8.10.1997

# 9. Literatur

#### ASTM D 4647-87 (1987)

Standard test method for Identification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia

### ASTM D 5101-90 (1990)

Standard test method for measring the soil-geotextile system clogging potential by the gradient ratio. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia

### Batereau, Ch.

"Beitrag zur hydraulischen Wechselwirkung zwischen Boden und Geotextil" aus : R. Floss (Hrsg.) Dritte Informations- und Vortragsveranstaltung über "Kunststoffe in der Geotechnik" München, März 1993, Sonderheft der DGEG, S. 22

### Bhatia, S.K. / Mylnarek, J. / Rollin, A.L. / Lafleur, J.

"Effect of pore strukture of nonwoven geotextileson their clogging behaviour" Geosynthetics '91, Conference Proceedings, S. 629, 1991

Busch, K. / Luckner L. / Tiemer K. "Geohydraulik", Band 3 Gebrüder Bornträger \* Berlin \* Stuttgart, 1993

### Calhoun, C.C.

"Development of design criteria and acceptance specifications for plastic filter cloths"

United States Army Engeneer Waterways Experimental Station, Technical report, Vicksburg 1972

Christopher, B.R., Holtz, R.D., Fischer, G.R.

"Research needs in geotextile filter design"Filters in Geotechnical and Hydraulic EngeneeringA.A. Balkema, Rotterdam 1993, S. 19

Colonnier, M. / Sotton, M. / Laget B.

"A contribution to modelisation of porometry of fibrous structures"

4. Geotextilkonferenz, Den Haag 1990, S. 263-267

## Davidenkoff, R.

"Unterläufigkeit von Stauwerken" Werner-Verlag Düsseldorf 1970

### **DIN 4022**

Baugrund und Wasser: Benennung und Beschreibung von Boden und Fels Beuth Verlag GmbH Berlin September 1987

### DIN 18196

Erd- und Grundbau: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke Beuth Verlag GmbH Berlin Oktober 1988

#### **DIN ISO 12958**

"Bestimmung der Wasserdurchlaßfähigkeit innerhalb der Ebene", 1996

DVWK Merkblätter, "Anwendung von Geotextilien im Wasserbau" 221/1992 Verlag Paul Parey

### Eichenauer, T.

"Dickenanforderungen an Geotextilien im Filterbereich"

aus : R. Floss (Hrsg.)

Dritte Informations- und Vortragsveranstaltung über "Kunststoffe in der Geotechnik"

München, März 1993, Sonderheft der DGEG, S. 9

Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA

2. Auflage Ernst & Sohn, 1993 Faure, Y. H. / Elamir, A. / Farkough, B. / Gendrin, P.
"Geotextil filter behaviour with critical filtration conditions"
Filters in Geotechnical and Hydraulic Engeneering
A.A. Balkema, Rotterdam 1993, S. 209

FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 1994

Fillibeck, J. / Heyer, D. / Berkhout, H.C.

"Beitrag zur Filterwirksamkeit von Geotextilien unter geringer hydraulischer Belastung", aus : R. Floss (Hrsg.) Dritte Informations- und Vortragsveranstaltung über "Kunststoffe in der Geotechnik" München, März 1993, Sonderheft der DGEG, S. 16

Fischer, G. R. / Christopher, B. R. / Holtz, R. D.

"Filter criteria based on pore size distribution"

4. Geotextilkonferenz, Den Haag 1990, S. 289

Haliburton, T.A. & Wood, P. D.

"Evaluation of the U.S. Army Corps of Engineer Gradient Ratio Test for Geotextile Performance" Second Internat. Conference on Geotextiles, Las Vegas 1982 Conference Proceedings, S. 97

#### Hämmerle, E

"Ergebnisse der Aufgrabungen mineralischer Oberflächenabdichtungen" 13. Nürnberger Deponieseminar, Heft 76,1997

### Heerten, G.

"Geotextilien im Wasserbau -Prüfung, Anwendung, Bewährung" Mitteilung des Franzius Institutes der Universität Hannover, Heft 52, Hannover 1981
Heerten, G.

"Dimensioning the Filtration Properties of Geotextiles Considering Long-Term Conditions" Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, U.S.A.

Seite 115-120, 1982

#### Heerten, G.

"Stand der Untersuchung und Bemessung des Filterverhaltens von Geokunststoff-Boden-Systemen", aus : R. Floss (Hrsg.) Dritte Informations- und Vortragsveranstaltung über "Kunststoffe in der Geotechnik" München, März 1993, Sonderheft der DGEG, S. 3

Hoover, T.P.

"Laboratory testing of geotextile fabric filters" Second Internat. Conference on Geotextiles, Las Vegas 1982 Conference Proceedings, S. 839

Huang, Y. -F. / Wang, H. -Q. / Huang, D. -Q.

"Fractal geometry and fractal structure of non-wovwn neddle geotextiles" Fith International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore 1994, S. 711-714

Koerner, R. M., Ko, F. K.

"Laboratory studies on long term drainage capability of geotextiles" second Internat. Conference on Geotextils, Las Vegas 1982, Conference Proceedings S. 91

Koerner, R. M.

"Designing with Geosynthetics" Second Edition Prentice Hall, 1990 Kossendey, Th. / Gartung / E., Schmidt, St.

"Microbiological Influences on the Long-Term Performance of Geotextile Filters"

Geofilters '96, Conference Proceedings, S. 115, 1996 a

Kossendey, Th. / Gartung, E. / Lawson, C.R.

"Long-Term Performance Tests for Verification of Current Geotextile Filter Criteria" Geofilters '96, Conference Proceedings, S. 275, 1996 b

Lafleur, J. / Mlynarek, J. / Rollin, A.L.

"Clogging of geotextiles under pumping loads"

4. Geotextilkonferenz, Den Haag 1990, S. 189

Lafleur, J. / Eichenauer T. / Werner, G.

"Geotextile filter retention criteria for well graded cohensionsless soils" Geofilters '96, Conference Proceedings, S. 429, 1996

Legge, K.R.

" A new approach to geotextile selection"

4. Geotextilkonferenz, Den Haag 1990, S. 269-272

#### Lubockov, E.A.

"A graphical and analytical method for the determination of the suffosive of non-cohesive soils"

(in Russian). Izv. VNIIG, Leningrad, 78, 1965

Narejo, D. B. & Koerner, R. M.

"A dynamic Filtration Test for Geotextiles Filters" Geotextiles and Geomembranes 11, 1992

Qureshi, S. / Kogler, R.M. / Bhatia, S.K.

"Long term Filtration behaviour of nonwoven geotextiles"

4. Geotextilkonferenz, Den Haag 1990, S. 279

#### Ragutzki, G.

"Einige Versuchsergebnisse über Filtereigenschaften von Kunstsoffgeweben und deren Verwendung im Lahnungsbau"

Jahresbericht der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Band XXI, Norderney, 1969

#### Ramke, H.-G.

"Oberflächenentwässerung von Deponien - Ansätze zur hydraulischen Berechnung" 11. Nürnberger Deponieseminar, Heft 74,1995

#### Rollin, A. L.

"Bacterial Clogging of Geotextiles" Geofilters '96, Conference Proceedings, S. 125, 1996

#### Sansone, L.J. & Koerner, R.M.

"Fine Fraction Filtration test to assess geotextile filter performance" Geotextil and Geomembranes 11, 1992

#### Shi, Y. C. / Fannin, R. J. / Vaid, Y. P.

"Interpretation of Gradient Ratio Test Results" Fith International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore 1994, S. 673-676

#### Siva, U. & Bathia, S.K.

"Filtration performance of geotextiles with fine-graded soils" Geosysthetics '93, Vancouver, B. C., Canada Conference Proceedings, S. 483, 1993

#### Teindl, H.

"Filterkriterien von Geotextilien"

Forschungsbericht Bundesminister für Bauten und Technik, Heft 153, Wien 1980 Terzaghi, K. & Peck, R.

Soil mechanics in engeneering practice John Wiley & Sons Inc. New York, 1948

#### Williams, N.D. & Lüttich, S.M.

"Laboratory measurement of geotextile filtration characteristics"

4. Geotextilkonferenz, Den Haag 1990, S. 273-278

#### Wittmann, L.

"Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien" Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 86, 1980

### Witt, K. J.

"Filtrationsverhalten und Bemessung von Erdstoff-Filtern" Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 104, 1986

#### Wunsch, R.

"Bestimmung der Abflußhöhe in offenliegenden Dränschichten über Deponiedichtungen" Bautechnik 73, Heft 5 Ernst & Sohn, 1996

#### Ziems, J.

"Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe" Dissertation, TU Dresden, 1968

# Anlagenübersicht

# Anlage 1:

| Blatt 1          | Übersicht Bemessungskriterien nach DVWK (1992)                                       |
|------------------|--|
| Anlage 2:        |  |
| Blatt 1          | Kornverteilung, Plastizitätszahl, Fließ- und Ausrollgrenze leichtplastischer Schluff |
| Blatt 2          | Proctorversuch leichtplastischer Schluff   |
| Blatt 3          | Kornverteilung gemischtkörniger Boden 1  |
|                  | Kornverteilung Testboden A   |
| Blatt 4          | Kornverteilung Testboden B   |
| <u>Anlage 3:</u> |  |
| Blatt 1          | Abbildungen modifizierter LTF-Test   |
| Blatt 2          | Abbildungen Suspensionstest  |
| Blatt 3          | Kornverteilung fraktionierter Schluff  |
|                  | Kornverteilung Normensand  |
| Blatt 4          | Kornverteilung Kaolin  |
|                  | Kornverteilung der Sand-/ Kieskörper   |
| Blatt 5          | Abbildung Ansicht modifizierter GR-Test  |
| Blatt 6          | Abbildungen Detailaufnahmen modifizierter GR-Test                                    |
| Blatt 7          | Vorversuch 1; Durchlässigkeitsverlauf  |
|                  | Vorversuch 1; Wasserdruckverteilung  |

.

| Blatt 8          | Vorversuch 2; Kornverteilung des Versuchsbodens  |  |  |  |  |  |  |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                  | Vorversuch 2; Durchlässigkeitsverlauf  |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 9          | Vorversuch 2; Wasserdruckverteilung  |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 10         | Filterstabiler Versuchsboden; Durchlässigkeitsverlauf mit Geotextil G4<br>Filterstabiler Versuchsboden; Wasserdruckverteilung mit Geotextil G4 |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 11         | Filterstabiler Versuchsboden; Durchlässigkeitsverlauf mit Geotextil G6<br>Filterstabiler Versuchsboden; Wasserdruckverteilung mit Geotextil G6 |  |  |  |  |  |  |
| <u>Anlage 4:</u> |  |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 1          | Abbildungen Wasserentlüftungsanlagen   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 2          | Versuchsreihe 1; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie<br>Bodendurchgang mit Geotextil G1 und G2   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 3          | Versuchsreihe 1; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie<br>Bodendurchgang mit Geotextil G3 und G4   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 4          | Versuchsreihe 1; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie<br>Bodendurchgang mit Geotextil G5 und G6   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 5          | Versuchsreihe 1; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie<br>Bodendurchgang mit Geotextil G7 und G8   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 6          | Versuchsreihe 1; Durchlässigkeitsverlauf mit Geotextil G1 bis G8   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 7          | Versuchsreihe 1; Summenlinie Bodendurchgang mit Geotextil G1 bis G8  |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 8          | Versuchsreihe 2; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie<br>Bodendurchgang mit Geotextil G1 und G2   |  |  |  |  |  |  |
| Blatt 9          | Versuchsreihe 2; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie<br>Bodendurchgang mit Geotextil G3 und G4   |  |  |  |  |  |  |

•

•

| Blatt 10 | Versuchsreihe 2; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie            |
|----------|---|
|          | Bodendurchgang mit Geotextil G5 und G6                              |
| Blatt 11 | Versuchsreihe 2; Durchlässigkeitsverlauf und Summenlinie            |
|          | Bodendurchgang mit Geotextil G7 und G8                              |
| Blatt 12 | Versuchsreihe 2; Durchlässigkeitsverlauf mit Geotextil G1 bis G8    |
| Blatt 13 | Versuchsreihe 2; Summenlinie Bodendurchgang mit Geotextil G1 bis G8 |
| Blatt 14 | Suspensionsversuch; fraktionierter Schluff mit 1/2 Sandkörper       |
|          | Suspensionsversuch; fraktionierter Schluff mit 2/4 Kieskörper       |
| Blatt 15 | Suspensionsversuch; fraktionierter Schluff mit 4/8 Kieskörper       |
| Blatt 16 | Suspensionsversuch; Normensand mit 1/2 Sandkörper                   |
|          | Suspensionsversuch; Normensand mit 2/4 Kieskörper                   |
| Blatt 17 | Suspensionsversuch; Normensand mit 4/8 Kieskörper                   |
| Blatt 18 | Suspensionsversuch; Kaolin mit 1/2 Sandkörper                       |
|          | Suspensionsversuch; Kaolin mit 2/4 Kieskörper                       |
| Blatt 19 | Suspensionsversuch; Kaolin mit 4/8 Kieskörper                       |
| Blatt 20 | Modifizierter GR-Test; Wasserdruckverteilung bei Testboden A mit    |
|          | Geotextil G4 und G6   |
| Blatt 21 | Modifizierter GR-Test; Bodendurchgang durch Geotextil G3 mit        |
|          | Testboden A   |
| Blatt 22 | Modifizierter GR-Test; Durchlässigkeitsverlauf bei Testboden B mit  |
|          | Geotextil G2 und G4   |
| Blatt 23 | Modifizierter GR-Test; Wasserdruckverteilung bei Testboden B mit    |
|          | Geotextil G2 und G4   |
| Blatt 24 | Modifizierter GR-Test; Wasserdruckverteilung bei leichtplastischen  |
|          | Schluff mit Geotextil G6  |

.

| Körnungs-<br>bereich   | Geltungsbereich im<br>Kornverteilungsdiagramm  | Kriterien für einen<br>Boden mit hoher<br>Einzelkornmobilität  | Bemessung<br>Mechanische Filter-<br>festigkeit  | Bemessung<br>Hydraulische<br>Filter-<br>wirksamkeit | hyd<br>Me   |
|--|--|--|---|---|---|
| A<br>d₄0 ≤ 0,06 mm   | Schwarzsch A.:         Roden mit einem Schlännkommentel - 40% ( 4 <sub>40</sub> s 0.05 mm )           March         Sindermitorin           March         Sindermitorin <t< td=""><td>1. Kornfraktion &lt; 0,06 mm<br/><math>U = d_{60}/d_{10} &lt; 15</math><br/>2. 0,02 mm &lt; d &lt; 0,1 mm &gt; 50 %<br/>3. <math>I_P &lt; 0,15 = 15</math> %<br/>oder ersatzweise<br/>Tonanteil/Schluffanteil &lt; 0,5</td><td><ul> <li>a) hydrostatische Belastung<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; 10 · d<sub>50</sub><br/>- für Böden mit hoher Einzel-<br/>kornmobilität zusätzlich<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; d<sub>90</sub><br/>- für Böden mit langfristig<br/>stabiler Kohäsion zulässig<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; 2 · d<sub>90</sub></li> <li>b) hydrodynamische<br/>Belastung<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; d<sub>90</sub> und<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; 0,3 mm</li> </ul></td><td></td><td>traulische und mechanische Filterwirk<br/>rkblatt.</td></t<>   | 1. Kornfraktion < 0,06 mm<br>$U = d_{60}/d_{10} < 15$<br>2. 0,02 mm < d < 0,1 mm > 50 %<br>3. $I_P < 0,15 = 15$ %<br>oder ersatzweise<br>Tonanteil/Schluffanteil < 0,5 | <ul> <li>a) hydrostatische Belastung<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; 10 · d<sub>50</sub><br/>- für Böden mit hoher Einzel-<br/>kornmobilität zusätzlich<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; d<sub>90</sub><br/>- für Böden mit langfristig<br/>stabiler Kohäsion zulässig<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; 2 · d<sub>90</sub></li> <li>b) hydrodynamische<br/>Belastung<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; d<sub>90</sub> und<br/>O<sub>90,w</sub> &lt; 0,3 mm</li> </ul> |   | traulische und mechanische Filterwirk<br>rkblatt. |
| B<br>d <sub>15</sub> ≥ 0,06 mm   | Kimungsbersch B.         Böden mit einem Schlämmisomarkei 4 5% ( d ss s 0.06 mm.)           Schlämmisom         Schlämmisom  | 1. Kornfraktion < 0,06 mm und<br>$U = d_{60}/d_{10} < 15$<br>2. 0,02 mm < d < 0,1 mm > 50 %  | a) hydrostatische Belastung<br>$O_{90,w} < 5 \cdot d_{10} \sqrt{U}$ und<br>$O_{90,w} < 2 \cdot d_{90}$<br>- für Böden mit hoher Einzel-<br>kornmobilität zusätzlich<br>$O_{90,w} < d_{90}$<br>b) hydrodynamische Belastung<br>$O_{90,w} < 1,5 \cdot d_{10} \sqrt{U}$ und<br>$O_{90,w} < d_{50}$   | η·k <sub>V</sub> ≥k                                 | samkeit von Geotextilien. Ei                      |
| C<br>$d_{15} \le 0,06 \text{ mm}$<br>und<br>$d_{40} > 0,06 \text{ mm}$ | Körungsbereich C.:         Gemischlichnige Böden mit einem Schlichmitischonstell zwischen 15 und 40%.           10:05:000m und 40:000m und 40:0000 und 40:000m und 40:0000 und 40:000000000 und 40:00000 und 40:000 und 40:0000 und 40:00000 und 40:0000 | 1. Kornfraktion < 0,06 mm und  | Bemessung wie bei Boden des<br>Körnungsbereiches B , jedoch<br>zusätzliche Untersuchungen<br>zur Suffossionsbeständigkeit<br>des Bodens.<br>Bei Suffossionsgefahr:<br>siehe DVWK (1989)   |   | ntnommen aus dem                                  |

Ser Star

Blatt 1

e.

•





Kornverteilung des leichtplastischen Schluff

Blatt 1

Ergebnis des Proctor-Versuchs mit dem leichtplastischen Schluff

# Proctor-Versuch nach DIN 18127

| Projekt Nr.: 10 385 Bauve                  | orhaben: Untersuchungen zum Filterverhalten<br>von Geotextilien |
|--|---|
| Probe Nr.                                  | 1   |
| Bodenart                                   | - Schluff   |
| Entnahmestelle - tiefe                     |   |
| Versuchszylinder d <sub>1</sub> mm         |   |
| Verdichtungsarbeit MNm/m <sup>3</sup>      | 0,6   |
| Korndichte <sub>9s</sub> t/m <sup>3</sup>  | 2,68  |
| w <sub>Pr</sub> Когп < ттф %               | 12,80   |
| γ <sub>Pr</sub> Korn≺ mmφt/m³              | 1,802   |
| w <sub>Pr</sub> Gesamtkorn %               |   |
| <sub>9Pr</sub> Gesamtkorn t/m <sup>3</sup> | -   |
| β <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> )         | ст.   |
| 1.88                                       |   |
| 1,86                                       |   |
| 1,84                                       |   |
| 1,82                                       |   |
| 1,80                                       |   |
| 1,78                                       |   |
| 1,76                                       |   |
| 1,74                                       |   |
| 1,72                                       |   |
| 1,70                                       |   |
| 1,68                                       |   |
| 1,66                                       |   |
| 1,64                                       |   |
| 1,62                                       |   |
| 1,60 0 2 4 6 8                             | 10 12 14 16 18 20 22 24 26 w (%)                                |



#### Kornverteilung des gemischtkörnigen Boden 1

Kornverteilung Testboden A





#### Kornverteilung Testboden B



#### Abbildungen modifizierter LTF-Test



#### Bild oben:

Detail Bodenprobe (braun) und Oberflächenschutz (schwarz). Der Oberflächenschutz besteht aus einem Wirrgelege aus Kunststoffasern und weist eine große Durchlässigkeit auf. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten bleibt die Oberfläche der Bodenprobe ungestört.

#### Bild unten:

Ansicht modifizierter LTF-Test. Das Geotextil ist in der Aussparung der PVC-Platte (grau) eingelegt. Das Wasser tritt frei unter dem Geotextil aus. Die durchgespülten Feinteile werden in einem Filterpapier (weiß) aufgefangen. Entlang der Zellenwand sind Suffosionserscheinungen beim gemischtkörnigen Boden 1 zu erkennen.

#### Abbildungen Suspensionstest





#### Bild oben:

Detail 2/4 Kieskörper nach Beaufschlagung mit Normensand. Zu erkennen sind die durch den Kieskörper gewanderten Feinteile des Normensandes.

#### Bild unten:

Ansicht Suspensionstest. Das Geotextil ist in der Aussparung der PVC-Platte (grau) eingelegt. Darüber ist der Sand-/Kieskörper aufgebaut. Kurz vor der Aufnahme erfolgte eine Beaufschlagung mit fraktioniertem Schluff als Suspension (erkennbar durch die Trübung des Wassers). Zur genaueren Erfassung der Wasserdurchflussmengen ist unter der PVC-Platte ein Trichter angebracht.



Kornverteilung des fraktionierten Schluffes, der für Suspensionsversuche verwendet wurde.

Kornverteilung des Normensandes, der für Suspensionsversuche verwendet wurde.

| [       | Körnungslinien nach DIN 18123 Anlage Blatt zu / |   |                     |                             |                                   |                                   |              |                              |                                     |                   |   |  |
|---------|---|---|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---|--|
|         |   | millieres grobes<br>Schlämmkorn<br>feinsles Schluff<br>Fein-Hiltel- Grob- |                     |                             | fe                                | feines millieres grob<br>Siebkorn |              | es                           | Sleine<br>D-Ungleichförmigkeitszahl |                   |   |  |
|         |   |   |                     |                             | Sand<br>Fein- Hittel- Grob- Fein- |                                   | Fein-        | Kies Sleine<br>Hittel- Grob- |                                     |                   |   |  |
| tmenge  | 90  |   |                     |                             |                                   |                                   |              |                              |                                     |                   |   | C-Krümmungszah]= (d <sub>30</sub> ) <sup>2</sup><br>(d <sub>50</sub> : d <sub>10</sub> |
| . Gesan | 80  |   |                     |                             |                                   | -  + +/-                          | ┥╍╍┾╍┝┥╍┟    |                              | ┉┝╼┥╍┥┝                             | ···               |   | Bauvorhaben:   |
| A der   | 70  | • •   |                     |                             |                                   | -                                 | +            |                              |                                     | ₩                 |   |  |
| d to    | 60  |   |                     |                             |                                   | ╶┼┼┼╢╌╂╌                          | ┼╌┟╌┟┽┠      |                              | ┼╾┼╌┼┼                              |                   | ┼╌╁┼╁╫╢                                       |  |
| Lan.    | 50  |   |                     | -+                          |                                   |                                   | ┥╾┼╍┟┾┫      | -14                          | ╌┼╾┼╾┤┝                             |                   |   |  |
| ter Kö  | 40  |   |                     |                             |                                   | ╺┼╎┥┈╢╌╍╍                         | ╵╎╾╾┼╼╶╎╾┟╍╎ |                              | ╺┼─┤╌┼╍┞┦╴                          | +                 | •   |  |
| ľ       | 30  |   |                     |                             |                                   | • + + <b> </b>                    | ┼╾┼┼┼┧       | +                            | ┼┼┼╢                                | ╂╂┞───╁──         | ╺┼╼╁╍╁╍╁┼┤╢                                   | Į  |
| Intell  | 50  |   |                     |                             | +                                 | - - - //                          | ┥──┤╾┝╸┝╸┤   |                              | ╺┼╌┤╍┤╼║┤                           | <b> -</b> -       | •       |  |
| 135en2  | 10  |   |                     |                             |                                   | ∦                                 | ┼╍┼╸┟┼┦      |                              | ┼┼┼╫                                |                   | ╺┼╾┾┼┼┼┼                                      |  |
| 1º      | 0.0   | 001 0.0   | x05 0               |                             | 0.02                              | 0.05                              | 0.2 0.6      | 53 2.0                       | 6.3                                 |                   | <u>1-1-1-11</u><br>ປ (ຄ.ຫ.) <sup>53</sup> 300 | NÜNCHEN, den   |
| Prob    | e Hr  | stell   | Entna<br>ejtiefe (# | ih <del>ae-</del><br>Ij ort | Bodengi<br>DIN 18                 | ruppe 8<br>196 0                  | N 4022       | Geologische<br>Bezeichnung   | e u c                               | Kornkenn-<br>zah] | Arbeitsweise                                  | ]  |
| F-00    | 812   |   |                     |                             |                                   |                                   |              |                              | 1.57 1.0                            | 3 00100           | Siebung trocken                               |  |



Kornverteilung des Kaolins, das für Suspensionsversuche verwendet wurde.

Kornverteilungen der verschiedenen Sand-/Kieskörper, die sich bei den Suspensionsversuchen auf dem Geotextil befinden. Die Benennung der Sand-/Kieskörper erfolgt entsprechend der kleinsten und größten Korngröße: 1/2 Sandkörper beinhaltet Korngrößen mit  $1 \le d \le 2$  mm.



#### Ansicht modifizierter GR-Test



Bei dieser Versuchseinrichtung liegt ein sogenanntes geschlossenes System vor, bei dem sich dafür charaktersistisch auf der Ausströmseite des Boden-/Filtersystems eine Wassersäule anschließt. In der mitte der Plexiglaszylinder befindet sich die Bodenprobe (braun; Höhe 31 bis 36 cm auf dem Meterstab). Darunter ist das zu untersuchende Geotextil zwischen dem oberen und unteren Plexiglaszylinder eingeklemmt. Auf gegenüberliegenden Seiten der Bodenprobe sind jeweils auf gleicher Höhe die Injektionsnadeln in die Bodenprobe zur Wasserdruckmessung eingeführt. Die Durchströmung erfolgt von oben nach unten. Um exakt die Wasserdrücke auf der Ein- und Ausströmseite des Boden-/Filtersystems messen zu können, sind zusätzlich über der Bodenprobe und unter dem Geotextil Injektionsnadeln angeordnet. Die Wasserdrücke werden auf dem Piezometerbrett (rosa) abgelesen (siehe auch Detailaufnahmen in Anlage 3 Blatt 6).



Detailaufnahme der Injektionsnadeln, die zur Messung des Wasserdruckes (Piezometer) in die Bodenprobe eingeführt wurden.

Detailaufnahme des Piezometerbrettes, wo die Wasserdrücke der jeweiligen Piezometer abgelesen werden.





Verlauf der Durchlässigkeit des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer bei Vorversuch 1.



Darstellung der gemessenen Wasserdruckverteilung bei Vorversuch 1. Die hydraulische Belastung beträgt i = 2,8.



Kornverteilung des im Vorversuch 2 verwendeten Versuchsbodens.



Verlauf der Durchlässigkeit des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer bei Vorversuch 2

Darstellung der gemessenen Wasserdrücke über die Höhe der Bodenprobe. Nach "Öffnung" des Systems fallen die Wasserdrücke ab und es ist keine Druckmessung mehr möglich. Dies ist ein Zeichen dafür, daß das System in ein Drei-Phasensystem übergegangen ist.







## Diagramm oben:

Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (Geotextil G4). Ebenfalls sind in diesem Diagramm die jeweiligen hydraulischen Gradienten eingetragen.

### Diagramm links:

Die gemessenen Wasserdrücke auf verschiedenen Höhen in der Bodenprobe (hier Geotextil G4).







# Diagramm oben:

Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (Geotextil G6). Ebenfalls sind in diesem Diagramm die jeweiligen hydraulischen Gradienten eingetragen.

#### Diagramm links:

Die gemessenen Wasserdrücke auf verschiedenen Höhen in der Bodenprobe (hier Geotextil G6).



# Abbildung links:

Wasserentluftüngsanlage nach einem in DIN 18130 enthaltenem Vorschlag. Bei einer Durchströmung des Sandes im Becken wird dem Wasser der Sauerstoff und Stickstoff entzogen. Der Sauerstoffgehalt vor der Durchströmung beträgt ca. 12 mg  $O_2/l$  nach der Durchströmung des Sandes ca. 8,3 mg  $O_2/l$ .

#### Abbildung rechts:

Am Prüfamt entwickelte automatische Wasserentlüftungsanlage. Sie gewährleistet eine permanente Vorhaltung an entlüftetem Wasser. Die Entlüftung des Wassers erfolgt durch das Versprühen des Wassers in einem mit Vakumm gefüllten Plexiglaszylinder, der an der Labordecke montiert ist, um eine ausreichende Wasserdruckhöhe für die Filteruntersuchungen zu erhalten. Der Sauerstoffgehalt des Wassers wird bei diesem Verfahren von 12 mg  $O_2/l$  auf ca. 2,3 mg  $O_2/l$  reduziert.





Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G1)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G2).



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G3)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G4).



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G5)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G6).



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G7)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G8). Zusammenstellung der in Versuchsreihe 1 mit dem LTF-Test gemessenen Durchlässigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Zusätzlich ist die Durchlässigkeit des gemischtkörnigen Boden 1 im Diagramm eingetragen.





Summenlinie Bodendurchgang [g]

Zusammenstellung der Summenlinienen der Bodendurchgangsmengen bei Versuchsreihe 1 mit dem LTF-Test.

Versuchsreihe 2 mit dem LTF-Test



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G1)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G2).



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G3)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G4).
Versuchsreihe 2 mit dem LTF-Test



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G5)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G6). Versuchsreihe 2 mit dem LTF-Test



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G7)



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems und Summenlinie des Bodendurchgangs in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G8). Zusammenstellung der in Versuchsreihe 2 mit dem LTF-Test gemessenen Durchlässigkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Zusätzlich ist die Durchlässigkeit des gemischtkörnigen Boden 1 im Diagramm eingetragen.





S. Born V



Summenlinie Bodendurchgang [g]

Zusammenstellung der Summenlinienen der Bodendurchgangsmengen bei Versuchsreihe 1 mit dem LTF-Test.

Martin Port



Ergebnisse der Suspensionsversuche mit fraktioniertem Schluff

Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 1/2 Sandkörper und dem fraktionierten Schluff als Suspension.



Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 2/4 Kieskörper und dem fraktionierten Schluff als Suspension.



Ergebnisse der Suspensionsversuche fraktioniertem Schluff

Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 4/8 Kieskörper und dem fraktionierten Schluff als Suspension,



Ergebnisse der Suspensionsversuche mit Normensand

Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 1/2 Sandkörper und dem Normensand als Suspension.



Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 2/4 Kieskörper und dem Normensand als Suspension.



Ergebnisse der Suspensionsversuche mit Normensand

Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 4/8 Kieskörper und dem Normensand als Suspension,



Ergebnisse der Suspensionsversuche mit Kaolin

Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 1/2 Sandkörper und dem Kaolin als Suspension,



Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 2/4 Kieskörper und dem Kaolin als Suspension,



Ergebnisse der Suspensionsversuche mit Kaolin

Permittivitätsverläufe der Versuche mit dem 4/8 Kieskörper und dem Kaolin als Suspension.

Som in

AL.



Darstellung der gemessenen Wasserdrücke über dem Geotextil bei verschiedenen hydraulischen Gradienten: linkes Diagramm i = 3; rechtes Diagramm i = 12. Beim Geotextil G4 hat sich bereits bei einem hydraulischen Gradienten i = 3 über dem Geotextil ein Wasserdruck aufgebaut.

4.9**2**17

Sec.



ALC: ST

Kornverteilung des Bodendurchgangs beim modifizierten GR-Test. Bei diesem Versuch wurde das Geotextil G3 mit dem Testboden A kombiniert. Die wirksame Öffnungsweite  $O_{90,w}$  des Geotextils G3 ist um einen Faktor 6 größer als die nach DVWK erforderliche. Die Korngrößenverteilung stimmt gut mit der Korngrößenverteilung des leichtplastischen Schluff überein, der als Feinteilfüllung des Grobkorngerüsts verwendet wurde. Das bedeutet, daß alle Kornfraktionen des grenzflächennahen Bereich aus dem Grobkorngerüst durch das Geotextil gespült worden sind.



Ergebnisse des modifzierten GR-Testes mit dem Testboden B

Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G2). In diesem Diagramm sind die hydraulischen Gradienten des Versuchsprogramms enthalten.



Durchlässigkeitsverlauf des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (hier Geotextil G4). In diesem Diagramm sind die hydraulischen Gradienten des Versuchsprogramms enthalten.



Ergebnisse des modifzierten GR-Testes mit dem Testboden B

Darstellung der gemessenen Wasserdruckverteilung über die Probenhöhe: linkes Diagramm Geotextil G2; rechtes Diagramm G4. Aufgrund der ausgeprägten Ausfallkörnung des Testbodens B kommt es sofort nach Versuchsstart zu einer Ausspülung des Feinmaterials aus dem Grobkorngerüst. Dies ist in beiden Diagrammen daran zu erkennen, daß kein Druckabbau im oberen Bereich der Bodenprobe mehr erfolgt. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Versuchen ist, daß bei Geotextil G2 (linkes Diagramm) der Wasserdruck über der Grenzfläche Boden/Geotextil auf einer Höhe von 0,3 und 1,3 cm abgebaut wird, während bei Geotextil G4 der gesamte Wasserdruck auf dem Geotextil ansteht. Dies geht einher mit den Wirkungsweisen der zwei unterschiedlichen Filtrationsmodelle. Das Geotextil G2 wirkt demnach nach als Tiefenfilter und das Geotextil G4 als Oberflächenfilter.



## Ergebnisse des modifizierten GR-Test mit dem leichtplastischen Schluff

Unterschiedliche Verteilung der Wasserdrücke; gemessen auf gegenüberliegenden Seiten der Durchlässigkeitszelle. Ausgeprägte Veränderungen in den Wasserdruckverteilungen treten bei einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten auf i = 8 auf. Es ist nicht auszuschließen, daß es ab dieser hydraulischen Belastung verstärkt zu einer Feinteilmobilisierung kommt.