Diplomarbeit

"Experimentelle Ermittlung der Filtercharakteristik eines nichtbindigen Bodens und Vergleich mit analytischen Ansätzen"

eingereicht von Dietlind Jacobs geb. am 12.11.1982 in Berlin Mat.-Nr.: 20143

Reg.-Nr.: IUD/2008/4

Erstbetreuer:Prof. Dr.-Ing. K. J. WittZweitbetreuer:M.Sc. M. Salehi Sadaghiani

 Ausgabedatum:
 06.03.2008

 Abgabedatum:
 06.09.2008

Inhaltsverzeichnis

Au	fgaber	nstellung	0
1	Einle	itung	1
2	2 Grundlagen von Strömungs- und Transportvorgängen in poröser Erdstoffen		
	2.1 2.1.1 2.1.2	Materialtransportvorgänge Erosion und Suffosion Materialtransportprobleme in Flussdeichen	3 3 5
	2.2 2.2.1 2.2.2	Bindige Erdstoffe Aufbau und Struktur bindiger Erdstoffe Erosion bindiger Erdstoffe	7 8 10
	2.3 2.3.1 2.3.2	Nichtbindige Erdstoffe Aufbau und Struktur nichtbindiger Erdstoffe Filtrationsprozesse in nichtbindigen Erdstoffen	11 11 14
	2.4	Zusammenfassung zu Materialtransportvorgängen	17
3	Filter Damr	kriterien zur Bemessung von Erdstoffschichten in nbauwerken	19
	3.1	Überblick zur Entwicklung von Filterkriterien	19
	3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4	Filterkriterien auf der Basis von Filtrationsversuchen mit Suspensionen Kriterium von VAUGHAN ET. AL. Kriterium von SHERAD ET. AL. Kriterium von INDRARATNA ET. AL. Zusammenfassung der Filtrationsuntersuchungen	22 22 25 26 28
4	Eiger	ne Filtrationsversuche mit Suspensionen	32
	4.1 4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.2 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.3	Apparatur und Materialien Aufbau der Festwandzelle Eingesetzte Filtermaterialien Eingesetzte Suspensionen Beschreibung der Versuchsdurchführung Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials (Ausgangszustand) Versuchsteil mit Suspensionsaufgabe Versuchsteil mit Gradientenerhöhung Ausbau des Filtermaterials	34 34 37 39 43 43 43 45 48 50

1

5	Ausw	vertung der Untersuchungsergebnisse	52
	5.1	Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials	52
	5.2	Filtercharakteristik bei Suspensionsströmung	54
	5.3	Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung	57
	5.4	Betrachtung der geometrischen Stabilität im System Suspension/Filter	59
	5.5	Zusammenfassung der Auswertung im Vergleich mit analytischen Ansätzen	63
6	Diskı	ission und Bewertung	67
7	Zusa	mmenfassung der Arbeit und Ausblick	69
8	Verze	eichnisse	71
	8.1	Quellenverzeichnis	71
	8.2	Abbildungsverzeichnis	75
	8.3	Tabellenverzeichnis	77
	8.4	Diagrammverzeichnis	78
	8.5	Zeichen und Symbole	79
Anlagen 80			80
	Selbst	ständigkeitserklärung	80
	These	n	81
	Tabell	en	82

1 Einleitung

Dammbauwerke sind das wohl älteste System zum Schutz der Siedlungen und Kulturflächen vor zeitweilig erhöhten Wasserständen von Flüssen (PAESLER, 2003). Obwohl über die Jahrhunderte der bauliche Hochwasserschutz ständig verbessert wurde, haben in den letzten Jahren die Hochwasser z.B. der Flüsse Rhein (2007) und Elbe (2002) gezeigt, dass die Gefahr des Hochwassers immer noch gegenwärtig ist. Eine Schutzmaßnahme gegen das Hochwasser ist die Nutzung der auf der Luftseite des Flussdeiches liegenden Altauen als Überflutungsflächen (natürlicher Retentionsraum) oder Polder. Mit der ökologischen Flutung wird nicht nur die wasserseitige Aue, sondern auch die luftseitige Altaue regelmäßig überflutet. Der Flussdeich wird einem beidseitigen Einstau ausgesetzt.

Der konstruktive Aufbau älterer Flussdeiche ist zumeist nur für den wasserseitigen Belastungsfall ausgelegt. Dabei besteht der Flussdeich aus Erdstoffen verschiedener Kornzusammensetzungen, die nach einer bestimmten Gliederung angeordnet sind. Im Hochwasserfall tritt das Sickerwasser von der Wasserseite in den Flussdeich ein und wird in den Erdstoffschichten kontrolliert abgeleitet. Infolge der unterschiedlichen Materialzusammensetzungen können sich stellenweise variierende Durchströmungsverhältnisse und damit unkontrollierte Sickervorgänge in den Erdstoffschichten einstellen. Wird der Flussdeich beidseitig eingestaut, sind neue Belastungssituationen zu erwarten, die zu veränderten Fließrichtungs- und Gradientenverhältnissen im Flussdeich beitragen können. Die neuen Einflüsse und Wechselwirkungen der Erdstoffschichten mit dem Sickerwasser können für das Erdbauwerk (welchen eigentlich für diesen Belastungsfall konstruktiv nicht ausgelegt wurde) zu schädlichen Materialumlagerungen führen. Die erhöhte Strömungskraft des Wassers führt dazu, dass vereinzelt Erdstoffteilchen aus Erdstoffschichten (Suffosion) oder die gesamte Kornmatrix (Erosion) in Bewegung gesetzt wird. Besonders schwere Folgen können eintreten, wenn der Materialtransport am Grenzbereich zwischen einer bindigen und nichtbindigen Erdstoffschicht stattfindet. Diese Erosionsart wird als Kontakterosion bezeichnet. Der Erosionsvorgang ist in diesem Fall dadurch gekennzeichnet, dass aus der bindigen Erdstoffschicht Teilchen in Form von Aggregaten herausgerissen, diese aber nicht durch die anliegende Schicht zurückgehalten werden.

Das Ziel vieler Untersuchungen war es, herauszufinden, unter welchen Bedingungen eine bindige (Basisschicht) durch eine nichtbindige Erdstoffschicht (Filterschicht) ausreichend geschützt werden kann. Forscher wie z.B. VAUGHAN ET. AL. (1982) fanden heraus, dass sich die Erosionssicherheit einer derartigen Konstellation (bindige Basis/nichtbindiger Filter) nicht durch die allgemein anerkannten Filterkriterien prüfen lässt. Die Gründe hierfür liegen vor allem darin, dass die meisten Filterkriterien an Hand von Experimenten an enggestuften nichtbindigen Böden abgeleitet worden sind. Das Filtrationsverhalten von weitgestuften Böden konnte durch experimentelle Untersuchungen dabei noch nicht ausreichend geklärt werden.

Daher wurden Versuche direkt am Originalmaterial durchgeführt, um neue analytische Ansätze zur Bestimmung der Grenzwertbedingungen einer Filtration abzuleiten. Die Randbedingungen, unter denen die Versuche stattfanden, sind häufig nicht ausreichend bekannt, um die analytischen Ansätze auf jeden weiteren Boden zu übertragen.

Ziel dieser Diplomarbeit war es daher, durch experimentelle Untersuchungen die Filtercharakteristik von einem typischen Dammbaustoff zu untersuchen. Im Speziellen handelt es sich dabei um einen nichtbindigen weitgestuften Erdstoff, welcher in einem Flussdeich verwendet wird.

In einem entwickelten Durchströmungsmodell wurden die Sickerströmung und die Materialtransportvorgänge, die an einer Schichtgrenze eines bindigen zu einem nichtbindigen weitgestuften Erdstoff auftreten können, nachgebildet. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag darauf, herauszustellen, unter welchen Bedingungen die Filtrationsvorgänge zu einer geometrischen Stabilität führen. Ein weiterer Punkt war, herauszufinden, ob der Aggregatrückhalt unter hydrodynamischer Einwirkung stabil bleibt.

Die Vorgehensweise in der Bearbeitung wird im Folgenden beschrieben. In einem ersten Punkt werden die Materialtransportvorgänge Suffosion und Erosion im Rahmen der Strömungs- und Transportvorgänge in porösen Erdstoffen in seinen Grundlagen dargestellt. Anschließend wird der konstruktive Aufbau eines Flussdeiches beschrieben, wobei mögliche kritische Stellen, an denen Materialumlagerungen eintreten können, verdeutlicht werden. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt dabei auf der Kontakterosion, die an der Grenze von einer bindigen zu einer nichtbindigen Erdstoffschicht eintreten kann. Des Weiteren wird der Erosionsvorgang in der bindigen Erdstoffschicht dargestellt und detailliert beschrieben, wie das Fortschreiten der Erosion durch Filtration der Aggregate an einer nichtbindigen Erdstoffschicht verhindert werden kann.

Im Anschluss daran wird in Abschnitt 3 ein Überblick zur Entwicklung von Filterkriterien gegeben und die experimentellen Filtrationsuntersuchungen mit Suspensionen von den drei Autoren VAUGHAN ET. AL. (1982), SHERAD ET. AL. (1984b) und INDRARATNA ET. AL. (1996) beschrieben. Aufbauend auf den Betrachtungen von Abschnitt 3 werden eigene experimentelle Untersuchungen mit Suspensionen an einem weitgestuften nichtbindigen Erdstoff in Abschnitt 4 durchgeführt. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen werden in Abschnitt 5 erläutert und mit den Versuchen aus der Literatur verglichen. Im Abschnitt 6 erfolgt die Diskussion und Bewertung der Versuchergebisse.

Wasser kann in poröse Erdstoffe eindringen und sich in diesen fortbewegen. Der Bewegungsvorgang wird als Strömung bezeichnet. Unter Einfluss der Schwerkraft sickert das Wasser durch den porösen Erdstoff, so dass in diesem Fall von einer Sickerwasserströmung gesprochen wird. Bei sehr starken Strömungen in porösen Erdstoffen können sich Kräfte entwickeln, die den Gefügeaufbau der porösen Erdstoffe beeinträchtigen, indem z.B. Material aus einem Erdstoff herausgelöst und mit dem strömenden Wasser wegtransportiert wird. Die unterschiedlichen Materialtransportvorgänge, die in einem porösen Erdstoff auftreten können, werden in Abschnitt 2.1.1 beschrieben.

Bauwerke, die dem andauernden oder zeitweiligen Rückhalt von Wasser dienen, kommen mit Sickerwasser in Berührung. Bei Flussdeichen mit Hochwasserschutzfunktion kann bei einer neuen, konstruktiv ursprünglich nicht berücksichtigten Nutzungsfunktion wie z.B. des beidseitigen Einstaus eines Flussdeiches, die Gesamtstabilität durch diesen neuen Lastfall beeinträchtigt werden. In Abschnitt 2.1.2 wird das Problem des Materialtransports im Speziellen an der Grenzfläche zweier Erdstoffschichten unterschiedlicher Kornzusammensetzung in Flussdeichen (was dieser Lastsituation entspricht) beschrieben.

Im Flussdeichbau werden bindige und nichtbindige Erdstoffen verwendet. Die unterschiedlichen Eigenschaften und die Anfälligkeit einer bindigen Erdstoffschicht durch die Strömungskraft des Sickerwassers werden in Abschnitt 2.2 beschrieben. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 2.3 die Eigenschaften nichtbindiger Erdstoffe erläutert.

2.1 Materialtransportvorgänge

2.1.1 Erosion und Suffosion

Die Erosion und Suffosion sind nach BUSCH ET. AL (1993) zwei Vorgänge, bei denen Erdstoffteilchen eines Erdkörpers infolge von Sickerwasserströmung oder Oberflächenwasser umgelagert bzw. wegtransportiert werden.

Bei der Suffosion werden die feineren Erdstoffteilchen eines Erdstoffes aus dem Kornverband herausgelöst und in den Räumen zwischen größeren Erdstoffteilchen wegtransportiert. Das Erdstoffgerüst der nicht transportierten Partikel bleibt erhalten. Man unterscheidet bezüglich des örtlichen Auftretens der Suffosion innere, äußere und Kontaktsuffosion (Abb. 2-1).



Abb. 2-1 Arten von Suffosionserscheinungen (BUSCH ET. AL. 1993)

Bei der Erosion werden die gesamten Erdstofffraktionen weggerissen und abtransportiert. Das Erdstoffgerüst wird deformiert. Erosionsvorgänge, die durch die Strömung des Wassers verursacht werden, sind in äussere, innere, Fugen- und Kontakterosion zu unterscheiden. Diese werden in der folgenden Abbildung 2-2 schematisch nach ZIEMS (1969) dargestellt.



Abb. 2-2 Erscheinungsformen der Erosion (BUSCH ET. AL. 1993)

Die äußere Erosion findet an der Oberfläche von z.B. Flußsohlen statt. Infolge der Wasserströmung werden Erdstofffraktionen an der Schichtgrenze abgetragen. Im inneren eines Erdstoffes äußert sich die Erosion durch die Ausbildung von Bahnen oder dem sogenannten Piping. Die Fugenerosion kann sich entlang von Kanten an Bauwerken entwickeln. Bei der Kontakterosion grenzen zwei Erdstoffschichten mit unterschiedlicher Kornzusammensetzung direkt aneinander – sie stehen im Kontakt. Es wird deutlich, dass Fraktionen des feineren Erdstoffes in den gröberen Erdstoff hineintransportiert werden und Röhren im feineren Erdstoff verbleiben, in denen ständig wieder neu erodiertes Material hindurch transportiert werden kann.

Die Betrachtungen zur Erosion und Suffosion zeigen, dass für den Materialtransport zwei Voraussetzungen notwendig sind. Zum einen muss die hydraulische Belastung (Strömungskraft) durch das Sickerwasser so groß sein, dass Partikel aus einer Erdstoffschicht herausgelöst werden können (hydraulische Voraussetzung). Zum anderen muss ein Freiraum vorhanden sein, in dem die Partikel mit dem Sickerwasser hinein bzw.hindurch transportiert werden können (geometrische Voraussetzung) (SAUCKE, 2006). Der Materialentzug infolge Erosion und Suffosion kann Setzungen an darüber liegenden Erdbauwerken oder Erdkörpern hervorrufen.

2.1.2 Materialtransportprobleme in Flussdeichen

Im Hochwasserfall wird der Flussdeich wasserseitig bzw. bei Überströmung auch beidseitig eingestaut. Das Wasser dringt unter Druck in den Flussdeich ein und bewegt sich dort als Sickerwasser fort. Die Erdstoffschichten in einem Flussdeich sind konstruktiv so ausgelegt, dass das Sickerwasser für den Bemessungsfalls geordnet abgeleitet wird, d. h. ohne das dabei unerwünschte Erosions- bzw. Suffosionsvorgänge im Deichkörper ausgelöst werden. In der Abbildung 2-3 ist der konstruktive Aufbau eines solchen Flussdeiches dargestellt.



Abb. 2-3 Materialtransportvorgänge in Flussdeichen (AUS PELZMAIER ET. AL, 2006)

Mögliche kritische Stellen, an denen bei erhöhter hydraulischer Belastung z.B. beidseitiger Einstau unerwünschte Erosion und Suffosion stattfinden können, sind in der Abbildung 2-3 gekennzeichnet.

Hierbei können sich wie dargestellt drei unterschiedliche Materialtransportvorgänge ergeben.

- Typ A: Kontakterosion an Schichtgrenzen
 - o Typ A1 Kontakterosion senkrecht zur Schichtgrenze
 - Typ A2 Kontakterosion parallel zur Schichtgrenze
- Typ B: Suffosion innerhalb eines Erdstoffes
- Typ C: Erosionsgrundbruch

Die Kontakterosion (Typ A) stellt sich an der Grenze zweier unterschiedlicher Erdstoffschichten, die sich im Flussdeich oder im Untergrund befinden, ein. Im Flussdeich kann die Kontakterosion an der Grenze von der Kerndichtungsschicht (bindiger Erdstoff) zum Stützkörper (nichtbindiger Erdstoff) eintreten. Die Sickerwasserströmung verläuft in diesem Fall senkrecht zur Schichtgrenze (Typ A1). Im Untergrund verläuft die Strömung parallel zur Schichtgrenze (Typ A2). Die innere Suffosion (Typ B) kann wie in Abbildung 2-3 im Untergrundmaterial und der Erosionsgrundbruch (Typ C) am luftseitigen Böschungsfuß eintreten.

Durch den konstruktiven Aufbau sollen die eben beschriebenen Materialtransportprobleme verhindert werden. In Abbildung 2-3 ist ersichtlich, dass sich der Deichkörper in die drei Zonen Innendichtung, Stützkörper und Dränkörper aufgliedert. Die drei Schichten bestehen aus Erdstoffen unterschiedlicher Kornzusammensetzung, womit sich unterschiedliche Eigenschaften ergeben. Der Deich ist mit einer wasserseitigen, gering durchlässigen Dichtungsschicht versehen. Diese Schicht ist unmittelbar an den mittig eingebauten, durchlässigen Stützkörper geschüttet und lagenweise verdichtet. In der Dichtungsschicht erfolgt der Potentialabbau und damit das Absenken der Sickerlinie. Auf Grund der geringen Wasserdurchlässigkeit der Dichtungsschicht verzögert sich der Sickerwassereintritt und somit reduziert sich die Gefahr der Materialaustragung (Typ A1).

Der Stützkörper hat die Aufgabe, das Sickerwasser ohne Erosions- und Suffosionswirkung abzuführen (Typ B). Der Fußfilter mit Dränkörper besteht aus einem stärker durchlässigen Erdstoff, wodurch der unplanmäßige Austritt von Sickerwasser und die damit verbundene Erosion des Stützkörpers vermieden werden soll (Typ C) (PATT, 2001; KEIL, 1954).

Werden die Flussauen als Polder bzw. Retentionsräume im Hochwasserfall genutzt, wird der Flussdeich nicht mehr nur einseitig eingestaut, sondern im zweiseitigen Einstaubetrieb gefahren. Sind Flussdeiche für diese Nutzungsanforderung konstruktiv nicht ausgelegt, können sich durch neue Lastfälle unsichere Verhältnisse im Flussdeich (Bauwerk) einstellen. Vor allem im Bereich der Grenzschichten zwischen den einzelnen Zonen des geschütteten Erdbauwerks, sowie an gegebenenfalls vorhandenen Schichtgrenzen im gewachsenen Untergrund können ungünstige Sickerwasservorgänge und damit die Gefahr von Materialumlagerungen hervorgerufen werden (SAUCKE, 2006).

Durch die Hinterströmung der Flussdeiche können Materialtransportvorgänge im Deichkörper und damit lokale Änderungen des Baumaterials bzw. der geotechnischen Materialeigenschaften im Flussdeich und im Untergrund auftreten (PAESLER, 2003). Das Ausspülen von Erdstoffteilchen führt zur Verringerung der Festigkeit in den Erdstoffschichten, so dass die Tragfähigkeit von stützenden Schichten und des Untergrundes nicht mehr erfüllt wird. Beim Versagen der Filterschicht oder Dränagen durch Substanzverlust wird die dichteste Zone des Flussdeiches vor Erosion und Suffosion nicht mehr geschützt, wodurch es zur Zerstörung des gesamten Flussdeiches kommen kann. Die Abbildung 2-4 zeigt die Schäden von Deichen durch Hochwasser. Zu erkennen ist, dass

Erdmaterial aus dem Deichkörper stellenweise vollständig ausgespült und abtransportiert worden ist. Die Stabilität und Tragfähigkeit des Deichkörpers wurde dadurch wesentlich herabgesetzt, wodurch Deichbrüche statt gefunden haben.



Abb. 2-4 Hochwasserschäden an Flussdeichen (DHSV, 2008)

Aus den Betrachtungen ist es notwendig, die kritischen Stellen genauer hinsichtlich des Materialtransports zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Kontakterosion zwischen einer bindigen und einer nichtbindigen Erdstoffschicht im Flussdeich entsprechend des Typs A1.

2.2 Bindige Erdstoffe

In einem Flussdeich werden nach Bemessungsgrundlagen klar definierte Baustoffe mit einer künstlichen Struktur verbaut. Generell wird zwischen den bindigen Erdstoffen wie Ton und Schluff und den nicht bindigen Erdstoffen wie Sand und Kies unterschieden. Die Bezeichnung bindig und nichtbindig ist auf den Aufbau und die Struktur der Erdstoffe zurückzuführen.

Bindige Erdstoffe bestehen aus sehr kleinen Körnern, an deren Oberfläche Kräfte wirksam werden, die einen starken Zusammenhalt der Körner bewirken. Durch die Anziehungskräfte verbinden sich die Körner untereinander.

Nicht bindige Erdstoffe bestehen aus größeren Körnern, bei denen auf Grund fehlender Oberflächenkräfte wenig bis keine Bindungswirkung zwischen den Körnern auftritt. Der Zusammenhalt der Körner untereinander ist nicht gegeben, diese sind nur lose aneinander gelagert.

Die Eigenschaften der bindigen und nichtbindigen Erdstoffe sind vom mineral-chemischen Aufbau abhängig. Im Folgenden der Aufbau und die Struktur von bindigen Erdstoffen beschrieben, sowie auf die Vorgänge eingegangen, die im Zusammenhang mit Kontakterosion auftreten. Im anschließenden Abschnitt 2.3 wird der Aufbau und die Struktur von nichtbindigen Erdstoffe und darauf aufbauend die Wirkungsweise eines Filtersystems, mit der sich die Kontakterosion verhindern lässt, erklärt.

2.2.1 Aufbau und Struktur bindiger Erdstoffe

Die in Flussdeichen eingebauten Dichtungsschichten haben die Aufgabe, das Sickerwasser bei möglichst kleinen hydraulischen Gradienten druckverlustfrei ab- und weiterzuleiten. Die Dichtungsschichten besitzen eine geringe Wasserdurchlässigkeit, die durch den strukturellen Aufbau bedingt ist. Im Folgenden wird ein Überblick zum elementaren Aufbau von Tonen und Schluffen sowie zu den darauf beruhenden Eigenschaften gegeben.

Tone und Schluffe sind chemische Verbindungen aus Silikaten mit fester Kristallform. Der Grundbaustein der Silikate ist der Silizium-Sauerstoff-Tetraeder, in dem ein Siliziumatom von vier Sauerstoffatomen umgeben wird. Ein weiteres schichtbildendes Bauelement ist der Oktaeder, bei dem ein zentrales Aluminiumion von sechs Sauerstoffionen umlagert wird. Die Bauelemente verknüpfen sich untereinander, so dass verschiedene Strukturen, z.B. Bänder, Ringe und Schichten entstehen. Durch die Abfolge mehrerer Schichtpakete werden plättchenförmige Tonpartikel gebildet (Abb. 2-5), deren weiterer Verbund zur Ausbildung von Tonmineralen führt. Die Tonplättchen sind so klein, dass sie mit dem bloßen Auge nicht mehr zu erkennen sind. Aufnahmen, wie in Abbildung 2-5, sind nur noch mit Mikroskopen hoher Auflösung, z.B. einem Rasterelektronenmikroskop, möglich (JASMUND ET.AL., 1993; RÖSLER; 1991).



Abb. 2-5 Plättchenförmige Struktur von Tonmineralen (Kaolinit) (SMOLTCYK, 1990)

Schluffe bestehen zum größten Teil aus Feldspäten (Gerüststruktur) sowie aus Glimmer (Schichtstruktur) (Abb. 2-6).



Abb. 2-6 Gerüstsilikat (BOKU, 2008)

An der Oberfläche der Tonplättchen werden auf Grund von unausgeglichenen Ladungen Oberflächenkräfte wirksam, die dazu führen, dass sich die Tonplättchen zu Tonaggregaten zusammenballen. Dies wird als Kohäsion bezeichnet. Die zumeist negative Oberflächenladung hat nicht nur einen Einfluss auf die Tonpartikel untereinander, sondern auch auf das Sickerwasser, welches sich zwischen den Tonaggregaten in sehr kleinen Freiräumen bewegt.

In Abbildung 2-7 werden die unterschiedlichen Formen, die das Sickerwasser bei Eintritt in einen bindigen Erdstoff annehmen kann, dargestellt.



Abb. 2-7 Zustandsformen des Porenwassers im bindigen Erdstoff (PRINZ, 1991; ENGEL, 2000)

Das Diagramm auf der rechten Seite in der Abbildung 2-7 zeigt, je näher sich die Wassermoleküle an der Tonoberfläche befinden, desto höher ist die Anziehungskraft. Sickerwasser, welches sich direkt an der Tonaggregatoberfläche anlagert, liegt gebunden als festes Adsorptionswasser vor. Mit größer werdendem Abstand wird das Wasser zähflüssiger und als Adhäsionswasser bezeichnet. Das sich anschließende mobile Sickerwasser ist flüssig und kann sich frei zwischen den Tonaggregaten bewegen. Die Schicht, die sich zwischen der Tonoberfläche und dem freien Wasser befindet, wird als elektrochemische Doppelschicht bezeichnet (VITTINGHOFF, 2003).

2.2.2 Erosion bindiger Erdstoffe

Die Kohäsion bzw. Zugfestigkeit ist eine Kraft, die das Korngerüst bindiger Erdstoffe zusammenhält. Die Strömungskraft des Sickerwassers als treibende Kraft wirkt den haltenden Kräften (Kohäsion) entgegen. Haltende und treibende Kräfte sind im Normalfall gleich groß, so dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Wird die hydraulische Belastung durch eine zunehmende Strömungskraft des Sickerwasser auf das Korngerüst so groß, dass die haltenden Kräfte aufgehoben werden, ist der Gleichgewichtszustand in Richtung der treibenden Kräfte verschoben. Die haltenden Kräfte werden überwunden und Ton- und Schluffpartikel können aus dem Korngefüge herausgelöst werden. Ton und Schluff zerfallen dabei nicht in die sie bildenden Körner, sondern in zusammenhängende Partikel (Aggregate), die mit dem freien Sickerwasser abtransportiert werden. Die Abbildung 2-8b zeigt ein Aggregat, das sich aus einzelnen Teilchen zusammensetzt. Mittig ist das Aggregat stark verdichtet und am äußersten Rand ragen Teilchen hinaus.

Das System aus Sickerwasser und Aggregat ist ein wässrig-disperses System, in welchem Ton- und Schluffaggregate im Sickerwasser partikulär als dispergierte Phase vorliegen (MÜLLER, 1991; BUSCH ET. AL ,1993). In der Abbildung 2-8a wird ein solches System dargestellt.





. Abb. 2-8 a) Tonaggregate in wässriger Lösung (Mattiat, 1963); b) Zusammensetzung eines Aggregates (Gmachowski, 1999)

In dem wässig-dispersen System wirken auf die erodierten Aggregate Anziehungs- und Abstoßungskräfte. Die Anziehungskräfte, wie van-der Waalsche Oberflächenkräfte, bewirken die Aggregation (Flockung) der Partikel untereinander. Durch Abstoßungskräfte, welche ausschließlich elektrischen Ursprungs sind, werden die Partikel auseinander getrieben (HANACK ET. AL., 1968).

Aus den Betrachtungen wird deutlich, dass in Folge größerer treibender Kräfte als haltender Kräfte vereinzelt Aggregate durch das Sickerwasser aus einer bindigen Erdstoffschicht herausgerissen werden können. Dabei entstehende kleine Risse sind ungeschützte Angriffsflächen für das strömende Sickerwasser, so dass weitere Aggregate ausgespült werden können. Vergrößern sich die Strömungsbereiche zunehmend, können sich neue Strömungszustände entwickeln, die den Erosionsvorgang weiter fördern. Durch den zunehmenden Substanzverlust, wird die bindige Erdstoffschicht deformiert und weicht vom Zustand des ursprünglichen Bemessungsfalls ab. Die Funktionsfähigkeit der bindigen Erdstoffschicht im Flussdeich ist damit nicht mehr ausreichend sicher gestellt.

2.3 Nichtbindige Erdstoffe

Nichtbindige Erdstoffe werden in Flussdeichen in Schichten für Stütz- und Filterkonstruktionen eingesetzt. Im Gegensatz zu den bindigen Erdstoffen weisen sie Eigenschaften im Porensystem auf, die es ermöglichen, die Kontakterosion zu verhindern. Im Folgenden wird der Aufbau und die Struktur und darauf aufbauend die Filtrationsprozesse beschrieben.

2.3.1 Aufbau und Struktur nichtbindiger Erdstoffe

Die Stabilität nichtbindiger Erdstoffe wie Sande und Kiese wird durch ein in sich abgestütztes Korngerüst, in welchem sich die Erdstoffteilchen gegenseitig über kleine Kontaktflächen berühren, erzeugt. Während des Sedimentationsvorganges folgen die Feststoffteilchen der Schwerkraft und setzen sich lose aneinandergelagert ab. Zwischen den Teilchen wirken keine Anziehungs- oder Abstoßungskräfte und damit besteht keine Verbindung der einzelnen Körner untereinander, wovon die Bezeichnung nichtbindig abgeleitet wird (REUTER ET. AL., 1992).



Abb. 2-9 Struktur nichtbindiger Lockergesteine

Die Abbildung 2-9 zeigt den Sedimentationsvorgang und das Korngefüge, welches aus Körnern unregelmäßiger Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit aufgebaut ist. Zwischen den Körnern bildet sich ein räumliches Netzwerk, das sogenannte Porensystem, heraus. Dieses besteht aus Poren (Hohlräume) und den sie begrenzenden Porenengstellen. Die Poren, welche von mehreren (mindestens drei, häufig vier) sich berührenden Körnern umschlossen werden, sind entsprechend der Kornform und -größe unregelmäßig geformt. Die Porenengstellen, als Verbindungskanäle zwischen den Poren, verengen und erweitern sich bzw. sind durch Windungen und Verzweigungen gekennzeichnet (GELBERT, 1971; SCHULER, 1994, WITT, 1986). Im Prozess der Sickerwasserbewegung werden die zusammenhängenden Wasserwege durch die Aneinanderreihung von Poren zu Porenkanälen gebildet.

Die Porenstruktur wird im Wesentlichen von den feinkörnigen Fraktionen im Erdstoff bestimmt (SCHULER, 1995). Wie hoch der Anteil des feinen Materials an der Gesamtmasse ist, kann aus der Korngrößenverteilung abgelesen werden. Im Kornverteilungsdiagramm wird an definierten Korngrößen (Stützstellen) der durch Siebanalyse gewonnene Massenanteil einer Korngrößenklasse aufgetragen, so dass sich eine Summenkurve ergibt. Der Korngrößenbereich, der sich zwischen zwei definierten Korngrößen ergibt, wird als Fraktion bezeichnet. Ein Fraktilwert ist der Durchmesser, der bei x % Siebdurchgang im Kornverteilungsdiagramm abgelesen wird (SCHULER, 1994) (Diag. 2-1).



Diag. 2-1 Korngrößenverteilung mit Kennzeichnung von Fraktion und Fraktilwert

Im Diagramm 2-1 ist die Kornverteilung eines weitgestuften nichtbindigen Erdstoffes dargestellt. An Hand des Verlaufes der Summenkurve ist zu erkennen, dass der Erdstoff sowohl aus feinen als auch gröberen Körnern zusammengesetzt ist. Bei einem gleichförmigen Erdstoff würde die Kornverteilung sehr schmal und steil verlaufen, was darauf hindeutet, dass sich der Erdstoff im Wesentlichen aus Körnern einer Korngröße zusammensetzt. Die Ungleichförmigkeitszahl U ist ein abgeleiteter Kennwert aus der graphischen Darstellung der Kornverteilungslinie und zugleich ein Maß für die Steigung der Kornverteilungslinie. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis des Durchmessers d_{60} (Durchmesser bei 60 % Siebdurchgang der Kornverteilungslinie) zu d_{10} (Durchmesser bei 10 % Siebdurchgang der Kornverteilungslinie) (Gl. 2-1). U charakterisiert die Unterschiede der Kornverteilung eng- und weitgestufter Böden.

GI. 2-1
$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

13

Aus Abbildung 2-10 wird deutlich, dass, je unterschiedlicher die Korngröße von Erdstoffteilchen ist, die Porenstruktur komplexer (differenzierter) wird.



Abb. 2-10 Komplexität der Porenstruktur bei unterschiedlicher Ungleichförmigkeit von Erdstoffteilchen (BUSCH ET. AL., 1993)

Im Porenraum können sich flüssige und gasförmige Phasen fortbewegen. Die Durchlässigkeit eines nichtbindigen Erdstoffes steht in Abhängigkeit von der Porenstruktur und dem Porengehalt, der sogenannten Porosität. Je höher die Porosität des nichtbindigen Erdstoffes ist, desto weniger Wasser kann durch den Erdstoff strömen. Dieser Zusammenhang wird mit dem Durchlässigkeitskoeffizient $k_{10°C}$, als Kennwert für die Durchlässigkeit eines porösen Mediums ausgedrückt. BUSCH ET. AL (1993) definieren den Durchlässigkeitskoeffizient als Volumenstrom in m³/s, welcher durch eine Fläche A von 1 m² des porösen Mediums strömt, wenn das Standrohrspiegelgefälle (dimensionslos) senkrecht zu dieser Fläche A gleich 1 ist und die Temperatur des porösen Mediums und des Volumenstroms 10°C beträgt. Ist die Strömung im por ösen Medium laminar, kann der Durchlässigkeitskoeffizient über das Gesetz von DARCY errechnet werden (GELBERT, 1971).

2.3.2 Filtrationsprozesse in nichtbindigen Erdstoffen

Neben der flüssigen und gasförmigen Phase, können sich auch feinste Partikel durch den Porenraum eines nichtbindigen Erdstoffes bewegen. Durch die gezielte Kornzusammensetzung einer nichtbindigen Erdstoffschicht ist es möglich, dass nicht alle Körner in den Porenraum eindringen bzw. diesen passieren. Dieser Effekt wird in Flussdeichen genutzt, um die Erosion der bindigen Erdstoffschicht zu verhindern. Dabei wird diese Schicht, aus der Aggregate herausgelöst werden können, mit einer nichtbindigen Schicht kombiniert. Die nichtbindige Erdstoffschicht trägt dazu bei, dass die Aggregate aus dem Sickerwasserstrom abgetrennt und damit am Weitertransport gehindert werden. Dieser Vorgang wird als Filtration und die nichtbindige Erdstoffschicht daraus ableitend als Filterschicht bezeichnet. Die zu schützende bindige Erdstoffschicht wird als Basisschicht bezeichnet.

Beim Filtrationsprozess gelangt das Sickerwasser mit den Aggregaten an die Filteroberfläche. Ob ein Aggregat an der Filteroberfläche abgefiltert wird, ist vom Durchmesser des Porenkanals (Öffnungsweite der Poren an der Oberfläche) abhängig. An

Hand der folgenden Abbildung 2-11 wird der Filtrationsprozess an der Oberfläche eines Filtermaterials beschrieben. Die Aggregate, die in einer Suspension vertikal zur Filteroberfläche transportiert werden, sind in Form einer Kugel dargestellt. Die Öffnung der Porenkanäle ist als Kreis zu erkennen.



Abb. 2-11 Filtrationsprozess an der Filteroberfläche (STAROV, 1999)

Sind die Aggregate größer als die Porenöffnung, werden sie an der Oberfläche abgefiltert. Dies führt zur Verstopfung der Filteroberfläche und zur Ausbildung einer Deckschicht, dem sogenannten Filterkuchen. Der Filterkuchen besteht aus einem Gerüst von Aggregaten, die eine sekundäre Filtration von Aggregaten bewirken. Der Filtrationsprozess wird als Oberflächen- oder Kuchenfiltration bezeichnet.

Ist die Aggregatabmessung kleiner als die Porenöffnungsweite, passieren die Aggregate die Filteroberfläche und werden in den Porenkanälen ins Filterinnere transportiert. Die Aggregate bewegen sich soweit in den Filter hinein, bis sie an einer Engstelle des Porenkanals zurückgehalten werden und dadurch nachfolgende Aggregate am Transport hindert. Der Filtrationsprozess wird als Tiefenfiltration bezeichnet.

Ist die Konzentration von Aggregaten im engsten Querschnitt einer Pore so hoch, so ist es möglich, dass sich die Aggregate gegenseitig am Weitertransport hindern und dadurch Poren blockiert werden. Dieser Vorgang wird auch als Brückenbildung bezeichnet.

Da die geometrische Form der Porenkanäle in der Regel unbekannt ist, werden diese durch kreiszylindrische Röhren ersetzt. Dies ist in der folgenden Abbildung 2-12 dargestellt.



Abb. 2-12 Geometrische Form der Porenkanäle

Um die genaue geometrische Abmessung von Porenkanälen zu bestimmen, wurden von SHERAD ET. AL. (1984a) Versuche durchgeführt, in denen Wachs in das Porensystem eingepresst wurde. Mit den Abdrücken wurden nach Ausbau Rückschlüsse auf das Porensystem gezogen. Die Versuche wurden mit Sanden und Kiesen durchgeführt, deren Feinanteil nicht unter einem Sieb der Maschenweite 0,075 mm lag. Bis zu einer Ungleichförmigkeitszahl 10 wichen die Ergebnisse gleichförmiger und weitgestufter Filter voneinander ab. SHERAD ET. AL. (1984a) fanden heraus, wenig dass der Porenkanaldurchmesser von der Menge des Feinanteils im Filtermaterial abhängig ist und durch den Durchmesser d_{15F} (Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang) repräsentiert wird. Sie kamen zum Ergebnis, dass das Sickerwasser nach einer Strecke von 5^*d_{15F} bereits alle möglichen maximalen und minimalen Porenkanaldurchmesser durchquert. Der Porenkanaldurchmesser wurde durch die folgende Gleichung 2-2 ermittelt:

Gl. 2-2 $d_k = 0, 1 \cdot d_{15F}$ bis $0, 6 \cdot d_{15F}$

In Hinblick auf die Filtrationswirkung kamen sie zum Ergebnis, dass Aggregate mit der Abmessung $0,10^*d_{15F}$ ausgewaschen und Aggregate Partikel mit der Abmessung $0,12^*d_{15F}$ nahe der Filteroberfläche zurückgehalten werden.

Zwei weitere Möglichkeiten zur Berechnung des Porenkanaldurchmessers wurden von PECENKIN und ZIEMS (1969) gegeben. In der von PECENKIN aufgestellten Berechnungsgleichung 2-3 steht der minimale Porenkanaldurchmesser in Abhängigkeit vom wirksamen Korndurchmesser d_W und der Porenzahl *e*. ZIEMS (1969) ermittelte den Porenkanaldurchmesser durch hydraulische Äquivalenz. Der Porenkanaldurchmesser wird nach Gleichung 2-4 berechnet und steht in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeitszahl *U*,

dem Durchmesser bei 17 % Siebdurchgang der Kornverteilungslinie d_{17} sowie der Porenzahl e.

GI. 2-3 $d_{k,min} = 0,44 \, ed_{w}$

GI. 2-4 $d_k = 0.455 \sqrt[6]{U} e d_{17}$

Die Betrachtungen zum Porensystem von nichtbindigen Erdstoffen, im Speziellen zur Porenkanalgeometrie, werden im Abschnitt 5.2 nochmals aufgegriffen.

2.4 Zusammenfassung zu Materialtransportvorgängen

Materialtransportvorgänge können überall dort auftreten, wo Erdstoffschichten der Sickerwasserströmung ausgesetzt sind. Die Erosion, die an der Grenze zweier Erdstoffschichten unterschiedlicher Kornzusammensetzung vorkommt, wird als Kontakterosion bezeichnet. Bei einer bindigen Erdstoffschicht (Ton oder Schluff) äußert sie sich durch das Herausreißen von Aggregaten an der Schichtgrenze. Eine Erweiterung der Strömungsbereiche in der bindigen Schicht kann zur Rissbildung führen, was der Auslöser von z.B. Setzungen im Erdbauwerk sein kann.

Durch die Kombination der bindigen Erdstoffschicht mit einer gezielt zusammengesetzten nichtbindigen Erdstoffschicht kann die Kontakterosion durch Filtration verhindert werden. In solch einem Zweischichtsystem wird die bindige Schicht als Basisschicht und die nichtbindige Schicht als Filterschicht bezeichnet. Wenn die Aggregatabmessung größer ist als die Öffnungsweite der Poren, findet der Filtrationsprozess an der Oberfläche unter Ausbildung eines Kuchenfilters statt. Werden die Aggregate nicht an der Filteroberfläche zurückgehalten, müssen sie im Filterinneren durch Tiefenfiltration in den Porenengstellen abgefangen werden.

Das Verhindern der Kontakterosion ist an die Filtration gekoppelt. In Abbildung 2-13 wird schematisch der Zusammenhang zwischen der Erosion und Filtration in seiner Strömungsfolge im Erdbauwerk dargestellt.



Abb. 2-13 Abfolge charakteristischer Vorgänge bei Durchströmung eines Erdbauwerks

Die Stabilität eines Basis/Filter-System ist dann gewährleistet, wenn die Zusammensetzung der Filterschicht so gewählt ist, dass die Aggregate der Basisschicht zurückgehalten werden. Die Funktionsfähigkeit eines Filtersystems wird durch die Anwendung von Filterkriterien gesichert, welche im folgenden Abschnitt 3 näher beschrieben werden.

3 Filterkriterien zur Bemessung von Erdstoffschichten in Dammbauwerken

In einem Erdbauwerk wird durch den konstruktiven Aufbau sichergestellt, dass keine Kontakterosion an der Grenze zwischen einer bindigen zu einer nichtbindigen Erdstoffschicht eintritt. An Hand von Bemessungskriterien für die strukturelle Kornzusammensetzung der verschiedenen Schichten des Dammbauwerkes wird beurteilt, ob die als Filter wirkende Schicht in der Lage ist, die Partikel einer Basis in gewünschter Weise vollständig oder teilweise zu filtern. Die Bewertung der Funktionsfähigkeit erfolgt mit geometrischen und hydraulischen Filterkriterien.

Mit geometrischen Filterkriterien wird die Stabilität des Basis/Filter-Systems geprüft, ob sich die ungewünschte Bewegung feiner Erdstoffteile (Aggregate) durch die Porenstruktur des groben Erdstoffes rein geometrisch ausschließen lässt.

Ist die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion nicht gegeben, wird in Ergänzung zu den geometrischen Kennwerten mit einem hydraulischen Kriterium nachgewiesen, dass die hydraulische Belastung ausgedrückt als hydraulischer Gradient nur so groß ist, dass der Transport der Basispartikel durch das Filterinnere (hydraulisch) ausgeschlossen wird.

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich die geometrischen Filterkriterien behandelt. In Abschnitt 3.1 wird ein kurzer Überblick zur Entwicklung der Filterkriterien für körnige Erdstoffe gegeben und herausgestellt, warum diese Kriterien nur bedingt für die Kombination einer bindigen mit einer weitgestuften nichtbindigen Erdstoffschicht anwendbar sind. Ergänzend werden in Abschnitt 3.2 drei unterschiedliche Filtrationsuntersuchungen aus der Literatur, in denen Versuche mit Suspensionen durchgeführt wurden, beschrieben. Aus der unterschiedlichen Vorgehensweise in der Versuchsdurchführung resultieren unterschiedliche analytische Ansätze für die Ermittlung der Erosionssicherheit.

3.1 Überblick zur Entwicklung von Filterkriterien

Filterkriterien wurden zuerst an theoretischen Korngerüstmodellen von grobkörnigen, gleichförmigen Erdstoffen bestimmt. In diesen Modellen wurde der Erdstoff mit Kugeln gleicher Form und Größe beschrieben. In der Abbildung 3-1 wird die Modellvorstellung verdeutlicht. Die Kugeln (Erdstoffteilchen) lagern sich so aneinander, dass sich in Abhängigkeit von der Kugelgröße *D* und der Lagerungsdichte (ausgedrückt durch die Porosität ϕ) der Kugeln ein eingeschlossener kugelförmiger Hohlraum ergibt. Unter Berücksichtigung der voran stehend ausgeführten Filterkriterien, kennzeichnet dieser Hohlraum bezüglich seiner Größe die charakteristische minimale Öffnungsweite, durch die der Transport feiner Partikeln der Basisschicht nicht auftreten darf.



Abb. 3-1 Mathematische Bestimmung der Porenweite am Kugelmodell (WITTMANN, 1980)

Die Größe des minimalen Porendurchmessers $d_{p,min}$ wird durch die Anordnung der Kugeln untereinander beeinflusst. In einer regulären 6er-Packung in der jede Kugel von 6 benachbarten Kugeln berührt wird, ergibt sich der minimale Porendurchmesser $d_{p,min}$ nach Gleichung 3-1. Wird jede Kugel von 12 benachbarten Kugeln berührt, verringert sich der minimale Porendurchmesser $d_{p,min}$. Gleichung 3-2 zeigt die Berechnung einer regulären kubischen bzw. hexagonalen 12er-Packung.

Gl. 3-1	$d_{k,min} = 0,414 D (\phi \approx 0,45)$	reguläre 6er-Packung
---------	---	----------------------

GL 3-2	$d_{\rm barrie} = 0.155 \text{D} (\phi \approx 0.35)$	kubischen hzw. hexagonalen 12er-Packung
GI. J-Z	$u_{k,min} = 0, 155 D (\psi \approx 0.55)$	Rubischen bzw. nekagonalen izei-Fackung

mit:

♦ = Porosität

D = Kugeldurchmesser

d_{p, min} = minimaler Porendurchmesser

Da die natürliche Erdstoffstruktur differenzierter (strukturierter) als die regelmäßigen Modellkugelpackungen aufgebaut ist, wurden die anfänglichen Betrachtungen zur Packungsstruktur gleichförmiger Kugelmodelle (homodispere Kugelpackungen) auf ungleichförmige (heterodisperse) Systeme erweitert.

Die Ableitung der Porenweite einer Mehrkugelpackung, durch die sich Basispartikel hindurchbewegen können, ist nicht trivial. Erst im Jahr 1965 wurde durch SILVIERA eine erste mathematische Formulierung zu diesem Problem erstellt, indem er aus der Kornverteilungslinie eine Porenengstellenverteilung errechnete. Er ging dabei von drei bis fünf Körnern, die einen Porendurchmesser bilden, aus. Der eingeschlossene Porendurchmesser stand dabei in Abhängigkeit von Größenverhältnissen der bildenden Körner und von der Häufigkeit des Auftretens einer Korngröße. Die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Korngröße wurde von SILVIERA durch den Massenanteil dieser Korngröße, welchen er aus der Korngrößenverteilung entnahm, ersetzt. Durch den Vergleich des Durchmessers der Basispartikel und den der Porenengstellen des Filters konnte der die Filterfestigkeit ableiten (SCHULER, 1994).

Neben diesen theoretischen und mathematischen Beschreibungen des Porenraumes wurden Laborversuche mit eng- und weitgestuften Erdstoffen durchgeführt (z.B. SHERAD ET. AL., 1984a; KENNEY ET. AL ,1985)

An Hand der experimentellen Versuche wurde herausgefunden, dass sich aus dem Verhältnis der repräsentativen Fraktildurchmesser von Filter und Basis ein Grenzwert (kritisches Verhältnis) für den Filtrationsprozess ergibt. Für enggestufte Erdstoffe wird der Grenzwert oftmals aus den Fraktildurchmesser d_{50F} und d_{50B} berechnet. Bei weitgestuften Erdstoffen wurde der Grenzwert über das Verhältnis mit den Kornfraktilen d_{15F} und d_{85B} berechnet, denn dabei wird die wesentlich größere Streubreite mit berücksichtigt (SCHULER, 1994). Eine Sammlung zu den Filterkriterien, die sich auf den Fraktildurchmesser stützen, sind in SCHULER ET. AL. (1993) und BATEREAU (1993) zu finden. In der Tabelle 3-1 werden die Filterkriterien, welche die geometrische Sicherheit einer Kombination aus einem Basis- und einem weitgestuftem Filtererdstoff geben, dargestellt.

In weiteren von CISTIN/ZIEMS durchgeführten Versuchen wurde die Ungleichförmigkeit der Basis- und Filtererdstoffe in der Betrachtung der Grenzzustände der geometrischen Filterstabilät berücksichtigt. Aus dem Verhältnis der Ungleichförmigkeitszahlen der betrachteten Erdstoffe wurde ein zulässiger Abstand berechnet (A_{50zul}), den die Kornverteilungslinien gerade einnehmen dürfen, damit die geometrische Sicherheit (geometrisches Filterkriterium) gegeben ist. Weiterführende Betrachtungen zum zulässigen Abstandsverhältnis sind in BUSCH ET. AL (1993) zu finden.

Die in der Tabelle 3-1 aufgeführten Filterkriterien sind aus den Versuchen verschiedener Autoren ermittelt worden.

Autor (Jahr)	Kriterium	Nebenbedingung
SHERAD ET. AL.	$d_{15F}/d_{85B} = 9$	
(1984)		
KENNEY ET. AL	$d_{5F} / d_{50B} \le 4$	
(1985)	$d_{15F} / d_{50B} \le 5$	
WITT (1986)	Feinkörniger Filter	d < 0,5 mm
	$d_{10F} / d_{95B} < 1,2$	3 < U < 6
	$d_{5F} / d_{95B} < 1,2$	U > 6
CISTIN (1964)	$A_{50 \text{ vorh.}} = d_{50 \text{ F}} / d_{50 \text{ B}}$	
	$A_{50 \text{ vorh.}} \leq A_{50 \text{ zul.}}$	

Tab. 3-1	Zusammenstellung von Ansätzen für die Grenzzustände geometrischer Filterstabilität aus
	Laborversuchen

Die in der Tabelle 3-1 aufgeführten Filterkriterien sind aus Versuchen ermittelt worden. Die dabei verwendeten Randbedingungen, wie z.B. Versuchsaufbau und Bewertung der Versuchsergebnisse, sind teilweise nicht vollständig bekannt. Die Anwendung für die Ermittlung der geometrischen Filterstabilität ist daher nur begrenzt möglich. Weiterhin wurden die Versuche mit nichtbindigen Erdstoffen durchgeführt, so dass für Systeme mit herausgelösten Aggregaten bei bindigen Erdstoffschichten diese sich nicht angemessen übertragen lassen. Deshalb werden im folgenden Abschnitt 3.2 weitere bekannte Untersuchungen aus der Literatur dargestellt, bei denen zur Ableitung der Filterkriterien Ton-und Schluffsuspensionen verwendet und bei denen für die Ableitung der Kriterien Versuche mit Ton die geometrische Sicherheit abgeschätzt werden kann.

3.2 Filterkriterien auf der Basis von Filtrationsversuchen mit Suspensionen

Filtrationsuntersuchungen mit Suspensionen sind von den drei Forschern VAUGHAN ET. AL. (1982), SHERAD ET. AL. (1984b), INDRARATNA ET. AL. (1996) bekannt.

In der Darstellung wird jeweils die Problemstellung vor Versuchsbeginn und die Schlussfolgerungen, die sie daraus für die Versuchsdurchführung zogen, behandelt. Danach werden kurz die Versuchsmaterialien beschrieben. Anschließend folgen die Beobachtungen und Bedingungen bei denen sich ein erfolgreicher bzw. nicht erfolgreicher Versuch einstellte. Die wichtigsten Ergebnisse werden zusammengefasst und in einer Tabelle dargestellt.

3.2.1 Kriterium von VAUGHAN ET. AL.

Im Zusammenhang mit dem Versagen des Balderhead Damms (Nordengland) 1967 wurden von VAUGHAN ET. AL. (1982) nach den Ursachen geforscht. Sie fanden heraus, dass sich Risse in der Kerndichtungsschicht bildeten, aus denen feines Tonmaterial abgetragen und in Form von koagulierten Tonpartikeln in Richtung des Filters wegtransportiert worden ist. Die Stabilität der Ton/Filter-Grenzfläche wurde im Vorfeld durch Versuche an intaktem Ton geprüft, bei dem die Rissbildung unberücksichtigt blieb. VAUGHAN ET. AL. (1982) stellten fest, dass die Übertragung von Filterregeln, welche auf den Vergleich der Korngrößenverteilung von nicht kohäsiven Basis- und Filtermaterialien basieren, auf den weitgestuften Ton des Dammkerns nicht möglich war. Auf Grund des falschen Ansatzes zur Filterbemessung wurden die erodierten Tonpartikel nicht im Filter zurückgehalten, sondern traten aus diesem aus.

Aus diesen Beobachtungen haben VAUGHAN ET. AL. (1982) ein neues Filterkriterium für einen bindigen Ton und nichtbindigen Filter entwickelt. Ausgehend von der Überlegung, dass die kleinsten Partikel bei der Erosion Tonflocken sind, führten sie Versuche mit Suspensionen und unterschiedlichen Filtermaterialien (eng- und weitgestuft bzw. natürlich und gewaschen) durch. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Effektivität eines Filters durch dessen

Wasserdurchlässigkeit besser beschrieben wird, als durch den Vergleich der Kornfraktile von Basis und Filter.

Die Versuche wurden in einem 45 cm langen Zylinder, der einen Durchmesser von 5 cm hatte, durchgeführt. Ein Teil des vorgesättigten Filtermaterials wurde über einem gröberen Material 7,5 cm hoch unter Verdichtung eingebaut. Um die Verhältnisse in einem Damm nachzubilden wurde das Filtermaterial mit aufbereitetem Wasser (Flusswasser) durchströmt. Bei der Durchströmung stellte sich ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wasser und Sand ein. Unter diesen Versuchsbedingungen wurde die Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials ermittelt. Anschließend wurde der aggregierte Ton (Suspension) auf das Filtermaterial aufgebracht. Bei der Durchströmung wurde der Durchfluss vom ausgetretenen Wasser gemessen und das Wasser rezirkuliert.

Ein Versuch galt als erfolgreich, wenn die Wasserdurchlässigkeit sich anfänglich sehr schnell und fortlaufend weiter verringerte und sich eine Tonschicht auf der Filteroberfläche bildete. Der Versuch war nicht erfolgreich, wenn trübes Wasser aus dem Filter austrat und die Wasserdurchlässigkeit nur geringfügig kleiner wurde. Der Durchfluss nahm eine konstante Größe an. Neben effektiven und nicht effektiven Filtern konnte die Verstopfung beobachtet werden. Bei diesem Vorgang waren zunächst Partikel in das Filterinnere eingedrungen und anschließend durch Verstopfung zugesetzt. Die Wasserdurchlässigkeit verringerte sich nur langsam.

Die Filter der Dämme Cow Green und Empingham (England) wurden mit den Versuchen nach VAUGHAN ET. AL. (1982) bemessen. Die Versuche zeigten, dass der Feinkornanteil einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials und damit auch auf den Rückhalt von aggregierten Tonpartikeln hat (Diag. 3-1).



Diag. 3-1 Ergebnisse der Untersuchungen am Empingham Damm (VAUGHAN ET. AL., 1982)

Das Diagramm 3-1 zeigt, dass mit zunehmendem Feinanteil im Filtermaterial die Wasserdurchlässigkeit des Filters geringer wurde. Wurde kein Schluff zum Filtermaterial dazugeben, lag die Wasserdurchlässigkeit bei 4*10⁻³ m/s und die Tonpartikel passierten das

Filtermaterial. Lag der Schluffanteil bei 2,5 % im Filtermaterial, verringerte sich die Wasserdurchlässigkeit auf 8*10⁻³ m/s und die Tonpartikel wurden nach fünf Stunden zurückgehalten. Bei einem Schluffanteil von 5-15 % wurde die Wasserdurchlässigkeit bis auf 5*10⁻⁵ m/s verkleinert und die Tonpartikel wurden sofort zurückgehalten.

Weitere Versuche wurden mit Suspensionen aus dispergiertem Londoner Ton und mit Suspensionen aus Quarzpartikeln durchgeführt. Für die Suspension mit Quarzpartikel wurden 30 g Quarz mit einem Liter Wasser, das zuvor hinsichtlich der chemischen Bedingungen getestet worden ist, gemischt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Diagramm 3-2 dargestellt.



Diag. 3-2 Größe der zurück gehaltenen oder passierten Partikel in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des Filters (VAUGHAN ET. AL., 1982)

Im Diagramm 3-2 sind die Suspensionen durch den Durchmesser d_{85} des Aggregats repräsentiert. An Hand der Versuchergebnisse läßt sich eine Regressionsgerade mit der Gleichung 3-3 erstellen, durch die der Einhaltung des Filterkriteriums (effektiv) vom nichteffektiven Filter abgegrenzt ist.

GI. 3-3
$$k = 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot \delta^{1,52}$$

mit:

k = Wasserdurchlässigkeit [m/s]

 δ = mittlerer Aggregatdurchmesser [µm]

Das wesentliche Ergebnis der Untersuchungen ist mit Gleichung 3-2, dass von der Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials auf die Partikelgröße geschlossen werden kann, die gerade noch im Filterinneren zurück gehalten wird.

3.2.2 Kriterium von SHERAD ET. AL.

Das Hauptziel dieser Untersuchungen war, das Filtrationsverhalten von Filtern zu erklären, die Tone und Schluffe eines undurchlässigen Dammbereichs, schützen sollen. Nach SHERAD ET. AL. (1984b) besteht die Aufgabe eines kritischern stromabwärts gerichteten Filter darin, die Bruchstelle eines zentralen Dammkernes zu kontrollieren und abdichten. Außerdem muss der Filter bei erzeugten hydraulischen Gradienten von 1000 stabil bleiben. Zwei unterschiedliche Versuche wurden entwickelt, um die Vorgänge in einem kritischen Filter nachzubilden – der Spalt- und der Schlämmungstest.

Die Versuche wurden in einem 34 cm hohen vertikalen Plastikzylinder mit 10 cm Durchmesser durchgeführt. Das Filtermaterial wurde in drei Lagen 10 cm hoch unter Vermeidung von Entmischung eingebaut, anschließend gesättigt und auf einem Vibrationstisch verdichtet. Die Suspension wurde in einem 2 Liter Becher unter Wasserzugabe, bis zum 2,5 fachen der Fließgrenze, hergestellt und in den Zylinder bis zu einer Höher 5 - 7,5 cm eingetragen. Über der Suspension befand sich eine 16,8 cm Wasserschicht. Zur Vermeidung von Verwirbelungen an der Suspensionsoberfläche befand sich zwischen der Suspension und dem Wasser ein Filterpapier. Die untere und obere Platte wurde befestigt und der Wassereinlauf wurde abrupt unter einem Druck von 4 kg/cm² (3,92 bar) geöffnet.

Es wurden 36 Suspensionen aus fast kohäsionslosen Schluffen bis hin zu hoch plastischen Tonen sowie hoch dispersiven Tonen aus Natrium hergestellt. Das Filtermaterial bestand aus abgerundeten bis rundem alluvialem Sand und Sand-Kiesgemischen. Jede Suspension wurde mit Filtern verschiedener Grobkörnigkeit getestet.

Bei erfolgreichen Versuchen verschob sich die Suspensionsoberfläche plötzlich für einige Millimeter in das Filterinnere und beharrte in dieser Tiefe. Am Filterboden trat eine geringe Menge an trübem Filtrat aus (4-10 ml in 2 min). Der Durchfluss ging auf null zurück und es stellte sich ein Gleichgewicht im Zuge der Verdichtung der Oberfläche ein. Bei nicht erfolgreichen Versuchen wurde das Material der Suspensionen innerhalb 2-3 Sekunden vollständig ausgespült, und es blieb eine saubere Filteroberfläche zurück.

Für jedes Filtermaterial wurde vor Versuchsbeginn der Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang (d_{15F}) bestimmt. Die Ton- und Schluffsuspensionen wurden dann solange mit unterschiedlichen Filtermaterialien kombiniert, bis sich ein erfolgreicher Versuch von einem nicht erfolgreichen Versuch abgrenzte. Durch diese Vorgehensweise wurde für jede Ton- und Schluffsuspension eine Filtergrenze, die in Abhängigkeit des d_{15F} vom Filtermaterial lag, ermittelt. Die folgende Tabelle 3-2 stellt die Vorgehensweise dar, mit der die Filtergrenze ermittelt wurde.

Ton		
d _{15F} [mm]	Testergebnis	
0,7	erfolgreich	
1,0	erfolgreich	
1,1	erfolgreich	
d _{15F} = 1,15 mm	Filtergrenze	
1,2	nicht erfolgreich	
2,0	nicht erfolgreich	

 Tab. 3-2
 Beispiel f
 ür die Ermittlung der Filtergrenze nach SHERAD ET. AL. (1984b)

Die untersuchten Tone und Schluffe ließen sich in Gruppen zusammenfassen und Filtergrenzen d_{15F} zuordnen (Tab. 3-3).

Tab. 3-3	Filtergrenzen d _{15E} für die verwendeten	Tone und Schluffe nach SHERAD ET. AL. (1984b)
	J i i i j j i i i i i i i i i i		/

Material für Suspension	d _{85B} [mm]	d _{15F} [mm]
Ton (ohne Feinsandanteil)	0,03-0,08	0,5
Ton (mit Feinsandanteil)	0,1-0,5	2,4 - 6,0
Ton (hochdispersiv mit Natrium)	0,01	0,4
Schluff	0,04-0,09	0,67 - 0,82

Die Tabelle 3-3 zeigt, je größer der Durchmesser der Suspensionsmaterialien war, desto größer wurde auch die ermittelte Filtergrenze d_{15F} . Vor allem hatte der Anteil an Feinsand einen erheblichen Einfluss auf die Filtergrenze d_{15F} des Filtermaterials. Diese war mit 2,4 - 6,0 mm am höchsten. Ein hochdispersiver Ton war das feinste Material, das getestet worden ist. Die Filtergrenze d_{15F} mit 0,4 mm war die kleinste aller ermittelten Filtergrenzen.

3.2.3 Kriterium von INDRARATNA ET. AL.

INDRARATNA ET. AL. (1996) sind davon ausgegangen, dass entlang von Bruchstellen in einer undurchlässigen Kerndichtungsschicht feine Partikel erodiert werden können. Die Schlussfolgerung war, dass ein Filter den Rückhalt von aggregierten Tonpartikeln, anstelle von kleinsten dispergierten Tonpartikeln, gewährleisten sollte. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde in den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) die Effektivität eines Filters bezüglich der Erosion eines verwitterten Erdstoffes, der in Form einer Suspension vorlag, getestet.

Die Filtrationsversuche wurden mit gleichförmigen und weitgestuften Filtermaterialien, welche auf einem 0,075 mm Sieb gewaschen worden sind, durchgeführt. Die Tonschlämmung wurde aus 25 g Feinmaterial, welches kleiner als 0,075 mm war, und unter Zusatz von 3,5 me/l CaCl₂ mit einem Liter Wasser hergestellt.

Die Versuche wurden in einer Apparatur durchgeführt, die aus zwei transparenten Zylindern bestand. Im oberen Teil des Zylinders befand sich die Suspension und im unteren Teil das Filtermaterial. Ein Wasserdruck von 2 m wurde von oben auf den Zylinder aufgebracht, wodurch hydraulische Gradienten von 8 – 10 erzeugt werden konnten. Das Filtrat strömte durch einen Hahn, der am unteren Zylinder befestigt war, aus. Die Trübheit und der Durchfluss wurden in bestimmten Zeitabständen gemessen.

Ein Versuch galt als erfolgreich, wenn die Filteroberfläche stabil blieb und der Trübungsgrad kleiner als 25 NTU (<u>Nephelometric - T</u>urbidity – <u>U</u>nit) ausfiel. Der Durchfluss nahm nach einer gewissen Zeit einen konstanten Wert an. Dagegen war ein Versuch nicht erfolgreich, wenn keine stabile Oberfläche zu erkennen war und der Trübungsgrad größer als 100 war. Durch Verstopfung zugesetzte Filter zeichneten sich durch einen fortlaufend abnehmenden Durchfluss aus, ohne dass dieser einen konstanten Wert erreichte.

Aus den Versuchen ging hervor, dass die Effektivität eines Filters stark vom Filtrationsprozess im Filterinneren und von der Ausbildung einer stabilen Basis-Filteroberfläche beeinflusst wurde. Nach INDRARATNA ET. AL. (1996) war es nicht möglich, alle erodierten Partikel zurückzuhalten. Sie führten daher den Trübungsgrad als Maß für die Effektivität eines Filters ein. In diesem Zusammenhang erwies sich ein Trübungsgrad kleiner 25 NTU als ein angemessener Indikator für einen effektiven Filter.

An Hand der Versuchergebnisse konnte von INDRARATNA ET. AL. (1996) drei wesentliche Aussagen zur Effektivität eines Filters getroffen werden. Feinkörnige Sandfilter erwiesen sich als effektiv, solange nicht Verstopfung bei einer Ungleichförmigkeit von 4 eintrat. Bei mittelkörnigen Sandfiltern konnte eine Effektivität bei höheren Ungleichförmigkeitswerten ohne Verstopfung festgestellt werden. Gleichförmige grobkörnige Sandfilter waren generell auf Grund ihrer höheren Porosität nicht effektiv, außer wenn ein gewisser Anteil an Fein-oder Mittelsand dem Filtermaterial zugemischt wurde.

Die Ergebnisse der Versuche von INDRARATNA ET. AL. (1996) wurden in das von VAUGHAN ET. AL. (1982) erstellte Diagramm übertragen. Die Regressionsgerade für die Effektivität des Filters für einen lateritisch verwitterten Ton wird im Folgenden dargestellt (Diag. 3-3).



Diag. 3-3 Vergleich der Regressionsgerade aus den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) und VAUGHAN ET. AL. (1982)

Aus dem Diagramm 3-3 ist zu erkennen, dass in den Versuchen von VAUGHAN ET. AL. (1982) im Gegensatz zu INDRARATNA ET. AL. (1996) mit feinkörnigeren Suspensionen gearbeitet worden ist. Dementsprechend müssen Filter mit einer geringeren Wasserdurchlässigkeit für den effektiven Rückhalt von Suspensionspartikeln ausgewählt werden.

3.2.4 Zusammenfassung der Filtrationsuntersuchungen

Im Vergleich der Filtrationsuntersuchungen zeigten sich Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Versucheinrichtung und –durchführung.

Die Versuche wurden alle in einem vertikal stehenden Zylinder durchgeführt, wobei jedoch festgestellt wurde, dass die Höhe und der Durchmesser des Zylinders in den Versuchen variierten. Das Filtermaterial befand sich in allen Versuchen im unteren Teil des Zylinders, wobei Unterschiede im Einbauzustand festgestellt wurden. Im Versuch von Vaughan wurde das Filtermaterial vorgesättigt und im Versuch von SHERAD ET. AL. (1984b) trocken eingebaut und anschließend gesättigt. Im Versuch von INDRARATNA ET. AL. (1996) wurde keine Angabe zum Einbauzustand gemacht.

Als Basismaterial wurde in allen Versuchen eine Suspension aus Ton oder Schluff verwendet. Diese wurde von oben auf das Filtermaterial aufgegeben. Die Ermittlung der Korngrößenverteilung der Suspension erfolgte mit einem Aräometer ohne den Zusatz von einem Dispergierungsmittel. Hinsichtlich der Herstellungsmethoden der Suspension wurde bei SHERAD ET. AL. (1984b) Wasser zum Ton bis zum 2,5 Fachen der Fließgrenze hinzugefügt. Bei INDRARATNA ET. AL. (1996) wurden 25 g mit 1 Liter Wasser gemischt. In den Versuchen von VAUGHAN ET. AL. (1982) wurden keine Angaben zur Ausgangsmasse der

Suspension gemacht. Die Durchführung der Filtrationsversuche fand bei unterschiedlichen Druckverhältnissen statt. In den Versuchen von SHERAD ET. AL. (1984b) betrug der Druck 3,92 bar (4 kg/cm²) und in den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) nur 0,196 bar (Druckhöhe 2 m). In den Versuchen von VAUGHAN ET. AL. (1982) wurden keine Angaben zur Druckhöhe gegeben.

Mit der systematische Durchführung von Versuchen entwickelten VAUGHAN ET. AL. (1982) und SHERAD ET. AL. (1984b) aus den Versuchsergebnissen ein Filterkriterium. Diese beruhten auf unterschiedlichen analytischen Ansätzen. VAUGHAN ET. AL. (1982) fanden heraus, dass die die Filterwirkung in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials steht. Durch die Ermittlung einer Regressionsgerade legten sie eine Grenze zwischen einem effektiven und nicht effektiven Filter fest. In den Versuchen von SHERAD ET. AL. (1984b) steht die Filterwirkung dagegen in Abhängigkeit vom Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang der Kornverteilungslinie (d_{15F}). Dieser Durchmesser stellt die sogenannte kritische Filtergrenze (engl. "filter boundary") zwischen einem erfolgreichen und nicht erfolgreichen Filtrationsversuch dar.

In den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) wurde kein Filterkriterium entwickelt, sondern lediglich der Trübungsgrad als ein angemessener Indikator für einen erfolgreichen bzw. nicht erfolgreichen Versuch verwendet.

Die Versuchsbedingungen und –ergebnisse werden in der folgenden Tabelle 3-4 zusammenfassend dargestellt.

	Vaughan et. al. (1982)	Sherad et. al. (1884b)	Indraratna et. al. (1996)
Basismaterial	Tonsuspension hergestellt mit Flusswasser	Ton- und Schluffsuspensionen	Tonsuspension (0,005-0,075 mm)
	(0,002-0,2 mm)		25 g/l und 3,5 me/l CaCl2
Filtermaterial	a) natürlicher gleichförmiger und weitgestufter	Sand, Sandkiesgemische mit verschiedener	gleichförmig und weitgestufter
	Sand	Grobheit	Sand
	b) gewaschener Sand 0,075 mm Sieb	(d _{15F} von 0,3-9,5 mm)	
Versuchein-	- Plastikröhre H = 45 cm; D = 5 cm.	- Plastikzylinder H = 34 cm; D = 10 cm	- Zwei transparenten Zylinder
richtung	 Filtermaterial (vorgesättigt) H = 7,5 cm 	- Filtermaterial (trocken) H = 10 cm	- Obere Teil mit Suspension
und –durch-	- Chemisches Gleichgewicht zwischen Wasser	- Suspension H = 5-7,5 cm	- Unteren Teil mit Filtermaterial
führung	und Sand	- Raum über Suspension H = 16,5 cm	- Druckhöhe 2 m (0,196 bar)
	- Messung von Wasserdurchlässigkeit von	- Sättigung und Verdichtung von Filtermaterial	- Hydraulische Gradienten 8 – 10
	Filtermaterial	- Wassergehalt der Suspension entsprach	- Filtratauslass am unteren
	- Einbringung von Suspension mit geflocktem Ton	dem 2,5 fachen der Fließgrenze	Zylinder
	- Durchflusskontrolle	- Füllung Raum über der Suspension mit	- Messung von Trübheit und
	- Rezirkulierung von Filtrataustritt	Wasser	Durchfluss in bestimmten
		- Öffnung von Wassereinlauf unter einem	Zeitabständen
		Druck von 4 kg/cm ² (3,92 bar)	

Tab. 3-4 Vergleich der drei Filtrationsuntersuchungen von VAUGHAN ET. AL. (1982), SHERAD ET. AL. (1984b) und INDRARATNA ET. AL. (1996)

	Vaughan et. al. (1982)	Sherad et. al. (1884b)	Indraratna et. al. (1996)
Beobachtung	Erfolgreich:	Erfolgreich:	Erfolgreich:
	- Anfänglich sehr schnelle und fortlaufend weiter	- Verschiebung von der	- Stabile Filteroberfläche -
	verringerte Wasserdurchlässigkeit	Suspensionsoberfläche für einige Millimeter	Trübungsgrad kleiner als 25
	- Bildung einer Tonschicht auf Filteroberfläche	ins Filterinnere	NTU
		- Geringe Menge an trübem Filtrat (4-10 ml in	- Durchfluss nach einer gewisser
	Nicht erfolgreich:	2 min)	Zeit konstanten
	- Austritt von unreinem Wasser aus Filter	- konstanter Durchfluss im Zuge der	
	- Wasserdurchlässigkeit nur geringfügig kleiner	Verdichtung	Nicht erfolgreich:
	- Der Durchfluss nahm eine konstante Größe an.		- Keine stabile Oberfläche
		Nicht erfolgreich:	- Trübungsgrad größer als 100
	Clogging (Verstopfung):	- Vollständige Ausspülung von Suspension	
	- Zunächst Partikeleindringung ins Filterinnere	nach 2-3 Sekunden	Clogging (Verstopfung):
	- Anschließend Zusetzung durch Verstopfung	- Saubere Filteroberfläche konstanten Wert	- Fortlaufend abnehmender
	- Langsame Verringerung der		Durchfluss ohne
	Wasserdurchlässigkeit		
Filterkriterium	$k = 6.7 * 10^{-6} \cdot \delta^{1.52}$	- d _{15F} als zul. Filtrationsgrenze ("filter	- Trübungsgrad
Bemessungs-	,	boundary")	
gleichung			

4 Eigene Filtrationsversuche mit Suspensionen

Mit den eigenen experimentellen Untersuchungen wurden die Strömungs- und Materialtransportvorgänge, die entlang einer Schichtgrenze in einem Flussdeich beim Eintreten einer Kontakterosion vorherrschen können, nachgebildet.

In einem Flussdeich sind die bindige Ton- bzw. Schluffschicht und die nichtbindige Filterschicht (Abb. 4-1) hauptsächlich an der Kontakterosion beteiligt. Diese an der Kontakterosion beteiligten Schichten wurden in ein Durchströmungsmodell übertragen. In dem Modell wurde das nichtbindige weitgestufte Filtermaterial in einem zylindrischen Körper, der sogenannten Festwandzelle, eingefüllt, welches eine Sand-Kiesschicht (typischer Dammbaustoff) in einem Flussdeich repräsentierte.

Auf das Filtermaterial wurde eine Suspension, die unter realen Bedingungen aus einer bindigen Schicht austritt, direkt aufgegeben. Da die Größe von heraus gelösten Aggregaten einer bindigen Erdstoffschicht nicht bekannt ist, wurden die Versuche mit einer Suspension bekannter Korngrößenverteilung durchgeführt.

In vier Versuchsreihen wurden zwei unterschiedliche Filtermaterialien (Sand mit unterschiedlichen Feinanteilen) mit jeweils einer Suspension (Ton bzw. Schluffsuspension) kombiniert.

Mit der Ermittlung der initialen Wasserdurchlässigkeit der Filtermaterialien sollte der Ausgangzustand untersucht werden, um diesen mit der Wasserdurchlässigkeit nach der Suspensionsaufgabe vergleichen zu können. Schlussfolgernd galt es, die Filtercharakteristik in Bezug auf Systemstabilität aus Suspension und Filter zu beurteilen.

Das Ziel der Versuche war, Aussagen darüber treffen zu können, ob die gewählte Kombination aus Filtermaterial und Suspension ein geometrisch stabiles System in Abhängigkeit von unterschiedlichen Strömungsgradienten ergibt. Dazu wurden über die Änderung der Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials, nach Aufgabe von der Suspension, Rückschlüsse auf die Menge der zurückgehaltenen Suspensionspartikel im Filtermaterial bzw. an der Filteroberfläche gezogen. Durch die stufenweise Erhöhung des hydraulischen Gradienten wird analysiert, wie stark die Suspensionspartikel im Filtermaterial zurückgehalten wurden.



Abb. 4-1 Deichkörper im Gefahrenströmungszustand (PELZMAIER ET. AL, 2006)
4.1 Apparatur und Materialien

Die Versuchseinrichtung zu den experimentellen Versuchen wird in der folgenden Abbildung 4-2 schematisch dargestellt. Im Abschnitt 4.1.1 wird der fertige Versuchsaufbau beschrieben.



Abb. 4-2 Prinzipskizze zur Versuchseinrichtung

4.1.1 Aufbau der Festwandzelle

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine stehende Festwandzelle, welche sich aus folgenden drei Bestandteilen

- Kopfplatte mit Pneumatikzylinder
- Zylinder
- Fußplatte

zusammensetzte, verwendet (Abb. 4-3)



Abb. 4-3 Aufbau der Festwandzelle

Der Filterkörper wurde in Richtung der Schwerkraft durchströmt. Um den Filtratstrom regulieren und fassen zu können, wurden an drei Auslässen in der Fußplatte Kugelhähne montiert. In der mittigen Vertiefung der Fußplatte wurden drei Dränkörper eingepasst und eine 2,5 cm hohe Filterplatte, auf der das Filtermaterial aufgeschichtet wurde, aufgelagert (Abb. 4-4). Zwischen der Fuß- und Kopfplatte wurde der 50 cm hohe Plexiglaszylinder eingesetzt. In diesem wurde das Filtermaterial 30 cm hoch eingebaut und der Raum darüber (20 cm) mit beruhigten entlüfteten Wasser, welches aus einem Hochbehälter entnommen worden ist, gefüllt. Der Durchmesser des Zylinders beträgt 19 cm. Auf den Zylinder wurde die Kopfplatte fest aufgesetzt und verschraubt. In der Kopfplatte wurden vier Auslässe eingebracht, an denen Kugelhähne zur Regulierung der Wasserzufuhr befestigt wurden. Mit dem an der Kopfplatte befestigten Pneumatikzylinder wurde mittels eines Druckstempels (Filterplatte h = 2,5 cm) eine Auflast von 10 kN/m² auf das Filtermaterial aufgebracht. Durch den zusätzlichen Anschluss für Druckluft wurden Gradienten größer als 9 erzeugt (Abb. 4-5).



Abb. 4-4 Aufbau der Fußplatte



Abb. 4-5 Aufbau der Kopfplatte

4.1.2 Eingesetzte Filtermaterialien

Die Filtrationsuntersuchungen wurden an zwei weitgestuften Filtermaterialien durchgeführt. Die Kornverteilungslinien sind dem Diagramm 4-1 zu entnehmen. Beim Filtermaterial 1 handelt es sich um einen feinkiesig, schwach mittelkiesigen Sand mit 70,1 % Sand- und 29,9 % Kiesanteil. Filtermaterial 2 ist ein schwach feinkiesiger, schwach mittelkiesiger Sand mit 77,7 % Sand- und 22,3 % Kiesanteil.

Der Versuch 1 und der Versuch 2 wurden mit Filtermaterial 1 und der Versuch 3 und Versuch 4 mit Filtermaterial 2 durchgeführt.



Diag. 4-1 Korngrößenverteilung der untersuchten Filtermaterialien

Die Korngrößen der Filtermaterialen liegen zwischen 0,125 mm und 31,5 mm. Wie das Diagramm 4-1 zeigt, ist Filtermaterial 2 feinkörniger als Filtermaterial 1. Dies ist damit zu begründen, dass Filtermaterial 2 einen höheren Massenanteil im Bereich unter 50 % Siebdurchgang hat.

Zur Gewährleistung der inneren Suffosionssicherheit bei Durchströmung des Filterkörpers, wurde entsprechend des Merkblatts "Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK)" eine Überprüfung auf Filterstabilität durchgeführt. Für beide Kornverteilungslinien war das vorhandene Abstandsverhältnis kleiner als das zulässige Abstandsverhältnis, welches aus dem Diagramm von CISTIN und ZIEMS ausgelesen wurde. Daher konnte von der inneren Suffosionssicherheit ausgegangen werden.

Anschließend wurden Kennwerte der beiden Filtermaterialien ermittelt. Die Porenzahl und Porosität wurden nach den Gleichungen 4-1 und 4-2 berechnet. Die Korndichte von Filtermaterial 1 (F1) wurde nach DIN 18124 mit einem Kapillarpyknometer mit 2,642 g/cm³ bestimmt. Für Filtermaterial 2 (F2) wurde die Korndichte aus praktikablen Gründen in Anlehnung an RÜTZ ET. AL. (2007) mit 2,65 g/cm³ angenommen.

GI. 4-1
$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

GI. 4-2
$$\phi = \frac{e}{1+e}$$

In der folgenden Tabelle 4-1 sind die Kennwerte für Filtermaterial 1 und 2 zusammengestellt.

Tab. 4-1	Kennwerte des	Filtermaterials	eigener	experimenteller	Untersuchungen
----------	---------------	-----------------	---------	-----------------	----------------

	ρ _d [g/cm³]	e [-]	φ[-]	U [-]	C _c [-]
F 1	2,642	0,44	0,31	6,0	1,1
F 2	2,65	0,28	0,22	5,2	0,6

Der Filterboden wurde aus acht Kornfraktionen gemäß der Kornverteilungslinie zu einer homogenen Masse vermischt (Abb. 4-6).



Abb. 4-6 Kornfraktionen zur Herstellung des Filtermaterials

In den ersten drei Versuchen wurde das Filtermaterial im trockenen und im vierten Versuch im angefeuchteten Zustand in den Plexiglaszylinder 30 cm hoch eingebaut.

4.1.3 Eingesetzte Suspensionen

Als Ausgangsmaterial für die Suspensionen wurde Ton (braune Färbung) und Schluff (beige graue Färbung) verwendet. Die Korngrößenverteilungen der Suspensionen wurden mit einem Aräometer für den abschlämmbaren Anteil (d < 0,125 mm) bestimmt. Hierzu wurde der feste Ton und Schluff aufgeweicht und durch ein Sieb der Maschenweite 0,125 mm hindurch gerieben. Vom getrockneten Siebdurchgang wurde 40 g in einem Standzylinder aufgegeben und mit Leitungswasser zur 1 Liter Markierung aufgefüllt. Die Suspension wurde mehrere Stunde mit einer Rührvorrichtung homogenisiert. Die folgende Abbildung 4-7 stellt die Vorgehensweise zur Ermittlung der Korngrößenverteilung dar. Das Diagramm 4-2 zeigt die ermittelten Korngrößenverteilungen.



Abb. 4-7 a) Standzylinder mit Ton- und Schluffsuspension b) Rührvorrichtung c) Aräometer und Temperaturmessgerät



Diag. 4-2 Korngrößenverteilung der Ton- und Schluffsuspension

Die Messungen ergaben für die Tonsuspension (S1) Korngrößen von 1,4 μ m bis 125 μ m und für die Schluffsuspension (S2) Korngrößen von 1,5 μ m bis 125 μ m. Kleinere Aggregate als 1,4 μ m bzw. 1,5 μ m konnten mit dem verwendeten Aräometer nicht erfasst.

Aus dem Diagramm 4-2 ist ersichtlich, dass die Tonsuspension (S1) im Vergleich zur Schluffsuspension (S2) einen wesentlich höheren Anteil an Aggregaten im Bereich feinster Aggregatgrößen besitzt. 31 % der Aggregate in der Tonsuspension (S1) haben eine Größe kleiner als 1,4 μ m. In der Schluffsuspension sind es dagegen nur 8,5 %, was nur knapp 1/3 der Aggregate der Tonsuspension entspricht. Bei einem Durchgang von 50 % haben die

Tonaggregate eine Größe von 4,5 μ m, die Schluffaggregate sind mit 22 μ m nahezu um das Fünffache größer. Ab einem Massenanteil von 80 % an der Gesamtmasse gleichen sich die Korngrößen in der Ton- und Schluffsuspension einander an. Die Tonaggregate haben bei 80 % Massenanteil eine Korngröße von 28 μ m und die der Schluffaggregate von 39 μ m, so dass nur noch eine Differenz von 11 μ m besteht.

Im Versuch 1 wurde die Tonsuspension (S1) verwendet. Der Versuch 2, 3 und 4 wurde mit der Schluffsuspension (S2) durchgeführt.

Für die Ton- und Schluffsuspension der Versuche 1, 2 und 4 wurde eine Trockenmasse m_d von 330 g in einen Zylinder aufgegeben und mit Leitungswasser bis zur 1 Liter Markierung aufgefüllt. Mit einer Rührvorrichtung wurde die Suspension eine halbe Stunde lang gemischt. Im Versuch 3 wurde die Trockenmasse m_d um 1/3 auf 220 g reduziert. In der folgenden Abbildung 4-8 wird die Vorgehensweise bei der Herstellung der Suspensionen gezeigt.



Abb. 4-8 a) Einfüllen der errechneten Massen im Standzylinder b) Auffüllen mit Leitungswasser bis zur 1 Liter Markierung c) Rührvorrichtung zur Homogenisierung

Die verschiedenen Dichten der Suspensionen wurden nach Gleichung 4-3 berechnet.

GI. 4-3
$$\rho_{Susp} = \frac{(m_{Susp} + m_{Zyl}) - (m_{Zyl})}{V_{Susp}} = \frac{m_{Susp}}{V_{Susp}}$$

mit:

 $\begin{array}{ll} \rho_{Susp} & \mbox{Dichte der Suspension} \\ m_{Susp} & \mbox{Masse der Suspension} \\ V_{Susp} & \mbox{Volumen der Suspension} \end{array}$

In den Versuchen 1, 2 und 4 beträgt die Dichte der Suspension 1,2 g/cm³. Dadurch, dass im Versuch 3 eine geringe Trockenmasse verwendet worden ist, ergibt sich eine Dichte von 1,15 g/cm³.

Tabelle 4-2 gibt einen gibt einen Überblick zu den Ausgangsparametern in den einzelnen Versuchen.

Versuch	Filtermaterial				Suspension		
Nr.	Тур	Einbau	Dicke [cm]	ρ _{Einbau} [g/cm³]	Тур	m _d [g]	Ρsuspension [g/cm³]
1	F 1	trocken	30	1,83	S 1	330	1,2
2	F 1	trocken	30	1,83	S 2	330	1,2
3	F 2	trocken	30	1,83	S 2	220	1,15
4	F 2	feucht	30	1,83	S 2	330	1,2

Tab. 4-2 Überblick zu den Ausgangsparametern der vier eigenen Filtrationsversuche

4.2 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Der gesamte Versuch gliederte sich in vier Versuchsteile. Zur Gewinnung vergleichbarer Versuchsergebnisse, wurde in jedem Versuch auf gleiche Versuchsbedingungen und –abläufe in den einzelnen Versuchteilen geachtet. Die vier Versuchsteile werden in der folgenden Tabelle 4-3 dargestellt.

	Versuchsteil	Versuchsablauf
Nr.1	Bezeichnung	
1	Initiale Wasserdurch-	Messung der Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials
	lässigkeit Filtermaterial	bei i = 2,4; 3,4 und 4,5
2	Suspensionsaufgabe	 Suspensionsaufgabe bei i = 3,0
		Messung der Wasserdurchlässigkeit bei i = 3,0
		 Filtratfassung
3	Gradientenerhöhung	 Erhöhung des hydraulischen Gradienten von 3 auf 33
		 Filtratfassung
		 Dichtebestimmung des Filtrats
4	Ausbau des	 Absaugen der Suspension
	Filtermaterials	 Ausbau des Filterkuchens
		 Aufsättigung des Filtermaterials von unten nach oben
		 Schichtenweiser Ausbau des Filtermaterials und
		Korngrößenbestimmung

Tab. 4-3Übersicht zur Versuchsdurchführung einer Filterversion

4.2.1 Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials (Ausgangszustand)

Vor Suspensionsaufgabe erfolgte die Messung der Wasserdurchlässigkeit (k-Wert) in Abhängigkeit von der Erhöhung des hydraulischen Gradienten Filtermaterials. Die geplanten Versuchsbedingungen lagen im Gradientenbereich von 2,4 bis 4,5. Die ermittelten initialen Wasserdurchlässigkeiten stellen den Ausgangzustand des Filtermaterials dar.

Im Folgenden werden die Schritte, die vor Messung der initialen Wasserdurchlässigkeit durchgeführt wurden, beschrieben.

Zuerst wurde der 30 cm hohe Filterkörper mit einer Auflast von 10 kN/m² beansprucht. Anschließend wurde das trockene bzw. angefeuchtete Filtermaterial von unten nach oben langsam aufgesättigt bis der Raum über dem Filterkörper vollständig mit Wasser gefüllt war. Dadurch wurden unerwünschte Störeffekte im Filtermaterial (Materialumlagerung) vermieden werden und Luftblasen konnten aus dem Filtermaterial infolge des Druckgefälles nach oben aufsteigen und entweichen. Der Schlauch zur Wasserzufuhr wurde anschließend von der Fußplatte zur Kopfplatte umgesteckt, so dass die Strömung in Richtung der Schwerkraft erfolgte (Abb. 4-9). Nachdem der Filterkörper einige Minuten durchströmt wurde, erfolgte die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit bei einem hydraulischen Gradienten von 2,4. Anschließend wurde der Gradienten auf 2.6 erhöht und bei diesen Durchströmungsbedingungen die Durchlässigkeit bestimmt. Die Wasserdurchlässigkeit wurde anschließend bei den Gradienten 3,4 und 4,5 ermittelt. In Tabelle 4-4 sind die Arbeitsschritte und Gleichungen zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit dargestellt. In Abbildung 4-9 wird der Versuchsaufbau zur Ermittlung des k-Wertes gezeigt.

Tab. 4-4	Arbeitschritte zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials vor
	Suspensionsaufgabe

Ar	beitsschritte zur Bestimmung k-Wert	Gleichungen
1	- Festlegung des hydraulischen Gradienten	. Δh
	- Ablesung der Setzung an Meßuhr und Berechnung der Filterlänge (I)	1 =
	- Berechnung und Einstellung des Höhenunterschieds (Δ h)	-
	- Filtratfassung in einer bestimmten Zeit (3-4 Messungen)	$V_{\rm W}$ m _w
_	- Wägung des Filtrats und Mittelwertbildung (m _w)	$Q = \frac{m}{t} = \frac{m}{0m \cdot t}$
2	- Temperaturmessung und Interpolation der Dichte von Wasser ($ ho_W$)	
3	- Berechnung des durchflossenen Querschnitts (A = 0,03 cm ²)	Q
	- Annahme laminarer Strömungsverhältnisse im Filtermaterial	$V = \frac{1}{A}$
4	- Berechnung des k-Werts nach DARCY	$1_{r} - V$
		κ



Abb. 4-9 Versuchaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

4.2.2 Versuchsteil mit Suspensionsaufgabe

In jedem Versuch wurde die Suspension über einen Trichter bei einem hydraulischen Gradienten von 3 aufgegeben. Über einen Schlauch gelangte die Suspension zur Zelle und vermischte sich mit dem klaren Wasser über dem wassergesättigten Filtermaterial. Bei Suspensionsaufgabe wurde der mittlere Kugelhahn der Fußplatte geöffnet, so dass das Filtrat frei ausströmte (Abb. 4-10).



Abb. 4-10 a) Aufgabetrichter für Suspension
b) Aufgabe der Suspension
c) Einlauf in die Zelle - Vermischung mit Wasser über dem Filtermaterial

Während der Suspensionsströmung bei einem hydraulischen Gradienten von 3 wurden zwei wesentliche Veränderungen in der Festwandzelle beobachtet.

Beobachtung 1 - Einfärbung des Porenwassers:

In den ersten drei Versuchen wurde beobachtet, dass sich die Suspension mit dem Porenwasser vermischt und das Porenwasser die Farbe der Suspension erhielt. Im Versuch 4 wurde dies nicht beobachtet.

Im Versuch 1 wurde eine braune Färbung des Porenwassers sichtbar. Im Versuch 2 war die Einfärbung milchig trüb und Versuch 3 milchig grau, somit dunkler als im Versuch 2 (Abb. 4-11). Die Einfärbung stagnierte in einer bestimmten Tiefe des Filterköpers. Die Eindringtiefe wurde mit einem Zollstock von der Filteroberfläche vertikal nach unten gemessen. Beim Versuch 1 drangen die Suspensionspartikel bis in eine Tiefe von 18,3 cm am tiefsten in den Filterkörper ein. Im Versuch 2 wurde eine Eindringtiefe von 10,5 cm ermittelt. Die Eindringtiefe betrug im Versuch 3 bis zu 3,5 cm.

In einem Zeitraum von etwa 15 Minuten wurden Suspensionsaggregate, vor allem im Bereich lokaler Inhomogenitäten, im Porenraum des Filtermaterials abgelagert. Dies führte zur allmählichen Verdichtung (Kolmation) des oberen Schichtbereichs im Filtermaterial. Im Versuch 3 war diese Erscheinung am stärksten ausgeprägt (Abb. 4-12).

Beobachtung 2 - Filterkuchenbildung:

In allen vier Versuchen wurde beobachtet, dass Suspensionsaggregate das Porensystem an der Oberfläche des Filtermaterials zusetzten. Die Verdichtung durch Suspensionsaggregate war im Versuch 1 am deutlichsten zu erkennen. Über der verstopften Filteroberfläche bildete sich allmählich schichtweise ein Filterkuchen aus. Die untersten Schichten des Filterkuchens erschienen als dicht und undurchlässig und die sich oben abgelagerten Filterkuchensschichten als lockerer und durchlässiger (Abb. 4-12). Nach einem Tag war eine maximale Filterkuchendicke erreicht.

Die Ermittlung der Filterkuchendicke erfolgte mit einem Zollstock. Aus den Messungen ging hervor, dass die Filterkuchendicken in Versuch 1 und in Versuch 4 mit ungefähr 5,5 cm am größten waren. In den Versuchen 2 und 3 wurde dagegen nur eine Filterkuchenhöhe von 1,5 cm gemessen (Abb.4-13).



Abb. 4-11 Suspension im Porensystem des Filtermaterials (Versuch 3)



Versuch 4



Abb. 4-12 Beobachtungen während Suspensionsströmung



Abb. 4-13 Filterkuchenbildung während Suspensionsströmung

Mit der Zunahme der Filterkuchenhöhe verringerte sich der aus dem Filterkörper austretende Filtratstrom. Eine Stunde nach Suspensionsaufgabe wurde die Wasserdurchlässigkeit bei einem hydraulischen Gradienten von 3 gemessen, wobei bereits an Hand des Filtratsstromes zu erkennen war, dass sich die Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung im Vergleich zur initialen Wasserdurchlässigkeit verringerte.

4.2.3 Versuchsteil mit Gradientenerhöhung

Der hydraulische Gradient wurde nach einem Tag durch das Anlegen von Druckluft in drei Stufen von 10 über 16,5 auf 33 erhöht. Mit steigendem Gradienten war zu erkennen, dass die die Filterkuchen sukzessive zerstört wurden (Abb. 4-14).

Im Versuch 4 wurde nur die oberste Schicht des Kuchenfilters deformiert. Dagegen wurde der Filterkuchen in Versuch 3 fast vollständig abgetragen.

Zu erkennen war, dass der Filtratstrom mit höher werdenden Gradienten zunahm. Nach jeder Gradientenerhöhung wurde ein Teil vom Filtrat in ein Reagenzglas aufgefangen und die Filtrattrübung mit einander verglichen (Abb. 4-13).



Abb. 4-14 Vergleich von Filtrattrübung

An Hand der Filtrattrübung war zu erkennen, dass bei jeder Erhöhung des Gradienten mehr Suspensionsaggregate ausgetragen wurden. Beim hydraulischen Gradienten 3 war bei Versuch 4 im Gegensatz zu Versuch 1 und Versuch 2 keine Trübung zu erkennen. Ab einem hydraulischen Gradienten von 4 wurde eine leichte Trübung des Filtrats sichtbar. Die Verdunklung der Filtrattrübung bei zunehmenden Gradienten erfolgte in den Versuchen 1 und 4 stufenweise. Im Versuch 2 war kein wesentlicher Unterschied bei der Filtrattrübung ab einem Gradienten von 10,0 sichtbar. Insgesamt sind die Trübungen der Versuche 1 und 2 dunkler als in Versuch 4 und glichen sich nahezu der Ausgangsfarbe der Suspensionen vor Aufgabe an.

Die Gradientenerhöhung wurde soweit durchgeführt bis turbulente Effekte im Kuchenfilter zu erkennen waren. Diese äußerten sich durch Verwirbelungen in den oberen Kuchenschichten und durch die Ausbildung bevorzugter Strömungsbahnen im unteren Schichtbereich des Filterkuchens. Der Filterkuchen wurde allmählich zerstört (Abb. 4-14). Dies war das Abbruchkriterium.



Abb. 4-15 Filterkuchenzerstörung bei der Gradientenerhöhung

4.2.4 Ausbau des Filtermaterials

In einem letzten Schritt wurde das System entlastet und der zerstörte Filterkuchen ausgebaut. Der Filterkörper wurde anschließend von unten nach oben aufgesättigt.

Bei der Aufsättigung war zu beobachten, dass das über dem Filterkörper austretende Wasser eine Trübung erhielt (Abb. 4-16). Im Versuch 1 war diese am trübsten, wogegen im Versuch 4 nur eine schwache Trübung zu erkennen war. Die Intensität der Trübung von Versuch 2 und 3 befand sich zwischen denen von Versuch 1 und 4.

Das über dem Filterkörper stehende Wasser wurde abgeleitet und das Filtermaterial schichtweise ausgebaut. Von drei Schichten (jeweils 5 cm), die aus dem Filtermaterial oben, in der Mitte, und unten entnommen wurden, erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilung Das Filtermaterial wurde dazu über einem 0,125 mm Sieb gewaschenen. Die Versuchsdurchführung war damit abgeschlossen.



Abb. 4-16 a) Absaugen der Flüssigkeit über zerstörten Filterkuchen b,c) Filterkuchenausbau d) Wiederaufsättigung mit Trübung

In Tabelle 4-5 werden die wesentlichen Beobachtungen der Versuchsdurchführung zusammengefasst, so dass ein Vergleich der einzelnen Versuche untereinander möglich ist.

Unterschiede in den Versuchsbedingung	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Suspension	Ton	Schluff	Schluff	Schluff
Filtermaterial	S 70,1 %	S 70,1 %	S 77,7 %	S 77,7 %
	G 29,9 %	G 29,9 %	G 22,3 %	G 22,3 %
Einbau Filtermaterial	trocken	trocken	trocken	angefeuchtet
Beobachtung				
Strömungszustand zu Versuchsbeginn	fließender Filtratstrom	fließender Filtratstrom	fließender Filtratstrom	fließender Filtratstrom
Einfärbung Porenwasser	braun	milchig trüb	milchig grau	keine Färbung
Eindringtiefe der Suspensionsaggregate [cm]	18,3	10,5	3,5	1,0
Filterkuchenhöhe [cm]	5,5	1,5	1,5	5,5
Strömungszustand nach Suspensionsaufgabe	sehr gering tropfend	gering tropfend	gering tropfend	gering tropfend
Filterkuchenstabilität bei Gradientenerhöhung	stabil	wenig stabil	nicht stabil	stabil
Filtratfarbe bei i = 3	leicht trüb	trüb	leicht trüb	nicht trüb
Filtratfarbe von i = 10 bis i = 33	von trüb zu dunkel	von trüb zu sehr trüb	von leicht trüb zu sehr trüb	von leicht trüb zu trüb
Filtrattrübung bei Wiederaufsättigung nach Filterkuchenausbau	trüb	geringe Trübung	geringe Trübung	sehr geringe Trübung

Tab. 4-5	Zusammenfassung der Versuchsbedingungen und Beobachtungen der vier eigenen
	Filtrationsversuche

5 Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Dieser Abschnitt beinhaltet die Versuchsteile aus Abschnitt 4. Es wird erklärt, welche Veränderungen im Filtermaterial und auf der Filteroberfläche während der Suspensionsströmung beobachtet wurden. Dabei sollen insbesondere die Strömungen- und Verlagerungsprozesse untersucht und ausgewertet werden.

5.1 Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials

In diesem Abschnitt werden die Strömungsversuche vor der Suspensionsaufgabe betrachtet. Die berechneten initialen Wasserdurchlässigkeiten sind Bezugswerte mit denen die ermittelten Wasserdurchlässigkeiten bei Suspensionsströmung sowie Gradientenerhöhung verglichen werden. Die initialen Wasserdurchlässigkeiten wurden im Gradientenbereich von 2,4 bis 4,5 ermittelt, womit dieser Bereich die geplanten Versuchsbedingungen für die Folgeversuche abgedeckt.

Im Diagramm 5-1 sind die Durchlässigkeitswerte in Abhängigkeit von der Gradientenerhöhung für die Versuchsreihen 1-4 für die verschiedenen Proben dargestellt. Die Verteilung der ermittelten Stützwerte der Abhängigkeitsfunktionen zeigen drei Bereiche zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit.

Die Wasserdurchlässigkeit von den Versuchen 1 und 2 liegen am höchsten mit Werten von 3 bis $4*10^{-4}$ m/s. Versuch 3 liegt in einem mittleren Bereich von $1,4*10^{-4}$ bis $1,6*10^{-4}$ m/s und Versuch 4 mit $0,8*10^{-4}$ bis $0,9*10^{-4}$ m/s ist am niedrigsten.



Diag. 5-1 Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials in Abhängigkeit von der Gradientenerhöhung

Aus dem Diagramm 5-1 wird deutlich, dass die k-Werte in Abhängigkeit von steigenden Gradienten ebenfalls überwiegend leicht steigen.

Die geringere Wasserdurchlässigkeit in den Versuchen 3 und 4 ist auf den höheren Gehalt feinerer Sandfraktionen im Filtermaterial zurückzuführen. In den Versuchen 1 und 2 beträgt der Sandanteil im Filtermaterial 1 gleich 70,1 %. Dem gegenüber liegt dieser im Filtermaterial 2 (Versuche 3 und 4) um 7,6 % höher und beträgt 77,7 % (siehe Diag. 4-1).

Durch den höheren Anteil feinerer Kornbestandteile im Filtermaterial 2 ist die Porosität mit 0,22 gegenüber Filtermaterial 1 mit 0,31 geringer. Unter diesen Bedingungen waren engere Porenkanäle im Filtermaterial 2 und damit eine kleinere durchströmte Querschnittsfläche (Fläche des Zylinders von 0,03 m²) vorhanden. In Folge geringerer Querschnittsfläche traten auch entsprechend geringere Durchlässigkeitswerte auf.

Im Versuch 3 und 4 wurde das Filtermaterial 2 verwendet. Der Unterschied in der Durchlässigkeit vom Filtermaterial 2 im Versuch 4 gegenüber dem Versuch 3 ist auf die Einbauweise des Filtermaterials zurückzuführen. Höhere Durchlässigkeiten bestanden, als das Filtermaterial im Versuch 3 trocken eingebaut wurde. Diese Verhältnisse treten auf, weil beim trockenen Einbau die Gefahr der Entmischung besteht. Im angefeuchteten Zustand wurde dies durch Adhäsionskräfte vermieden bzw. verhindert (Abb. 5-1).





Der Anstieg der Wasserdurchlässigkeit mit Anstieg des Gradienten, ist darin begründet, dass bei der Aufsättigung (Abschnitt 4.2.1) des trockenen bzw. angefeuchteten Filtermaterials von unten nach oben die Luft nur teilweise aus dem Porensystem des Filtermaterials heraus transportiert wurde. Erst bei der Durchströmung mit größeren Gradienten von oben nach unten, wird die Luft in Folge erhöhter Strömungskräfte aus dem Porenraum verdrängt und nach unten ausgetragen. Damit werden die Strömungsquerschnitte erweitert und die Wasserdurchlässigkeit im Porensystem erhöht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die initialen Wasserdurchlässigkeiten aller Versuchsreihen im Bereich "durchlässig" (10⁻⁶ bis 10⁻⁴ m/s) liegen und sich im Bereich der nach DIN 18130 Teil 1 ermittelten Erfahrungswert für Sand befinden. Die Anforderungen an die Beschaffenheit des Sandes (höherer Sandanteil im Filtermaterial und angefeuchteter Einbau) bezüglich der geringen Wasserdurchlässigkeit wurde mit dem Ergebnis der Versuchsreihe 4 erfüllt.

Die ermittelten Wasserdurchlässigkeit sind Ausgangswerte aus der Durchströmung des Filtermaterials und dienen im Folgenden als Vergleichswert für die Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung und Gradientenerhöhung.

5.2 Filtercharakteristik bei Suspensionsströmung

Rückschlusse auf die Rückhaltemechanismen von Suspensionsaggregaten im Filtermaterial und an der Filteroberfläche geben die Einfärbung des Porenwassers durch die Aggregate und Bildung des Filterkuchens. Diese Beobachtungen, die in Abschnitt 4.2.2 bei Suspensionsströmung eintraten, werden in diesem Abschnitt erklärt. Zur Beschreibung der Veränderung in der Porenstruktur, fließen die in Abschnitt 2.3.2 erklärten Filtrationsprozesse und die Betrachtungen zur Porenstruktur mit ein.

Um die im Zusammenhang mit der Ablagerung von Aggregaten an der Filteroberfläche und im Filterinneren stattfindenden Vorgänge zu erklären, wird die Größe der Suspensionsaggregate mit dem minimalen Porenkanaldurchmesser des Filtermaterials verglichen. Die Größe der Suspensionsaggregate und die Massenanteile werden aus der Korngrößenverteilung (Diag. 4-2) entnommen. Die minimalen Durchmesser der Porenkanäle der Filtermaterialien 1 und 2 werden aus den Gleichungen 2-2, 2-3 und 2-4 des Abschnitts 2.3.2 berechnet. Die ermittelten Durchmesser sind in der folgenden Tabelle 5-1 nach den Ansätzen verschiedener Autoren aufgeführt.

	PECENKIN	ZIEMS (1969)	SHERAD ET.AL. (1984A)	
	d _{k,min} [mm]	d _k [mm]	d _{k,min} [mm]	
F 1	0,089	0,09	0,03 - 0,19	
F 2	0,036	0,036	0,02 - 0,114	

Tab. 5-1 Ermittelte minimale Durchmesser eines Porenkanals im Filtermaterial

Tabelle5-1verdeutlicht,dassdieberechnetenWertedesminimalenPorenkanaldurchmessers aus diesenAnsätzen nahe bei einander liegen.

Für die weiteren Betrachtungen wird daraus der hydraulisch äquivalente Porenkanaldurchmesser nach ZIEMS verwendet. Danach beträgt dieser 0,09 mm für das Filtermaterial 1 und 0,036 mm für das Filtermaterial 2.

In der Darstellung der Korngrößenverteilung ist die charakteristische Korngröße der Aggregate, die diesen minimalen Porenkanal äquivalent sind, markiert.



Diag. 5-2 Korngrößenverteilung der Suspensionen mit Kennzeichnung der Korngröße der minimalen Durchmesser des Porenkanals der Filtermaterialien 1 und 2

Aus Diagramm 5-2 lässt sich damit der Massenanteil von Suspensionsaggregaten, die kleiner sind als der Porenkanaldurchmesser und damit ins Filtermaterial gelangen können, ablesen.

Im Versuch 1 beträgt der Massenanteil an Tonaggregate, die kleiner sind als der Porenkanaldurchmesser ca. 97 %. Im Versuch 2 sind es ca. 95 % der Schluffaggregate aus der Suspension und in den Versuchen 3 und 4 jeweils 75 %.

Durch die Einfärbung des Porenwassers in den Versuchen 1, 2 und 3 wurde deutlich, dass Suspensionsaggregate mit einem kleineren Korndurchmesser, als ihn der Porenkanaldurchmesser hat, in das Filtermaterial transportiert wurden. Der Transportprozess erfolgte solange, bis der minimale Porenkanaldurchmesser durch Aggregate größerer Abmessung blockiert wurde bzw. sich Aggregate gegenseitig am Weitertransport durch eine hohe Konzentration behinderten (Verstopfungseffekt durch Brückenbildung). Aufgrund der Blockierung der Porenkanäle wurden weiter ankommende Aggregate zurückgehalten, so dass sich der Porenraum allmählich bis zur Filteroberfläche mit Aggregaten auffüllte. Auf der verstopften Filteroberfläche lagerten sich Aggregate unter Bildung des beobachteten Filterkuchens ab. Erst nachdem sich der schichtweise Filterkuchen gebildet hatte, nahm die Verfärbung des Porenwassers ab.

Die schnelle Verengung bzw. Verstopfung der Porenkanäle im Versuch 4 ist darin begründet, dass gegenüber den anderen Versuchen ein erheblich höherer Anteil an größeren Aggregaten vorhanden war (25 %), die in ihrer Größe den minimalen Poren-Auf kanaldurchmesser überschritten. Grund der höheren Konzentration von Suspensionsaggregaten im Versuch 4 als im Versuch 3 war eine stärkere gegenseitige Anziehung der Aggregate in der Suspension von Versuch 4 anzunehmen (siehe Abschnitt 2.2.). Aus diesem Grund konnten sich schneller Aggregatverbände, mit einer größeren Abmessung als der minimale Porenkanal, bilden und die Porenkanäle zusetzten. Durch die schnellere Verstopfung des Porensystems, kam es zu einer ebenfalls schnellen Ablagerung der Aggregate auf der Filteroberfläche. Diese Schicht hielt weiter ankommende Aggregate zurück, so dass sich ein Filterkuchen ausbildete. Durch die dichte Struktur des Filterkuchens erfolgte eine weitere Filtration von Aggregaten. Bei der Konstellation aus Suspension und Filtermaterial im Versuch 4 wurde der Transport von Aggregaten in tiefe Schichten des Filtermaterials unterbunden und damit die Basis (Suspension) geschützt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Rückhalt von Aggregaten eine Wirkung aus Porengröße und der Größe des minimalen Porenkanals ist. Der Filtrationsprozess wurde in den vier Versuchen durch die Gefügeverengung in der Filteroberfläche eingeleitet. Darauf aufbauend bildete sich aus der Suspension selber eine Dichtungsschicht in Form eines Filterkuchens auf. Der Filterkuchen wird auf der Filteroberfläche als ein stabiles Gerüst aus Suspensionsaggregaten gelagert.

Nur durch ausreichend großen Anteil an Suspensionsaggregaten, die eine sofortige Verstopfung der Filteroberfläche bewirken, wurde der Aggregattransport in tiefere Schichten des Filtermaterials verhindert.

In den Versuchen 1-3 zeigte das ausgetretene Filtrat eine Eintrübung. Im Versuch 4 hingegen war diese Eintrübung im Filtrat nicht mehr vorhanden. Das ist auf den massiven Filterkuchen als Sperrschicht zurückzuführen. Im Ergebnis heißt das, dass der Versuch 4 die beste Filterwirkung nachgewiesen hat.

5.3 Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung

Aus Abschnitt 5.2 wurde deutlich, dass der Transport und die Ablagerung von Aggregaten zur Veränderung des Porensystems führten. In diesem Zusammenhang wird im Folgenden der Einfluss dieser Vorgänge auf die Wasserdurchlässigkeit bei der Suspensionsströmung erklärt.

Um den Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit darzustellen, wurden die Werte der initialen Wasserdurchlässigkeit mit denen der ermittelten Wasserdurchlässigkeiten bei Suspensionsströmung gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung ist in der folgenden Tabelle 5-2 aufgeführt.

	Durchlässigkeitsbereiche				
Versuch	Ausgangswasserdurchlässigkeit (initiale) des Filtermaterials	Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung			
1	3,0 10 ⁻⁴	7,6 10 ⁻¹⁰			
1	durchlässig	sehr schwach durchlässig			
2	3,8 10 ⁻⁴	4,7 10 ⁻⁷			
2	durchlässig	schwach durchlässig			
2	1,6 10 ⁻⁴	7,6 10 ⁻⁶			
3	durchlässig	schwach durchlässig			
4	0,88 10-4	4,5 10 ⁻⁶			
	durchlässig	schwach durchlässig			

 Tab. 5-2
 Änderung der Wasserdurchlässigkeiten nach Suspensionsaufgabe

Es zeigt sich, dass die initialen Wasserdurchlässigkeiten der Filtermaterialien der vier Versuche im Bereich "durchlässig" einzuordnen sind (Tab. 5-2). Nach der Suspensionsaufgabe verringerte sich die Wasserdurchlässigkeit in allen Versuchen deutlich (in Größenordnung mehrerer Zehnerpotenzen).

Die wesentlich geringern Wasserdurchlässigkeiten bei der Suspensionsströmung sind auf Filtrationsprozesse, die zur Querschnittsverengung der Porenkanäle und damit zu Strömungswiderständen führten, zurückzuführen. Zu den Vorgängen zählten:

- Anlagerungsmechanismus im Filterinneren (Effekte der Tiefenfiltration)
- Verstopfung des oberflächennahen Porensystems (Tiefenfiltration)
- Filterkuchenbildung über der Verstopfungszone (Oberflächen- oder Kuchenfiltration)

Durch die Filtrationsprozesse bildete sich in allen Versuchen ein System aus drei Schichten aus. Diese bauten sich wie folgt von unten nach oben auf:

- 1. Sand-Kiesgemisch
- 2. Verstopfte Schicht im Filtermaterial
- 3. Filterkuchen.

Die Dichte des Filterkuchens ist bestimmend für Wasserdurchlässigkeit des Schichtsystems. Die Zusammensetzung und der Aufbau der Schichten hatten einen Einfluss auf die Menge der Wasserdurchlässigkeit. Dies wird im Folgenden erklärt.

Aus der Tabelle 5-2 ist zu erkennen, dass der k-Wert von Versuch 1 als einziger im "sehr schwach durchlässigen" Größenbereich liegt. Dies ist darauf zurück zuführen, dass in Versuch 1 eine Tonsuspension und in den anderen drei Versuchen eine Schluffsuspension verwendet wurde. Die Aggregate der Tonsuspension hatten einen höheren Anteil an Aggregaten die im feinsten Korngrößenbereich lagen. Es ist daher davon auszugehen, dass sich durch die kleinere Korngröße der Tonaggregate feinere Strömungskanälen in der verstopften Schicht und im Filterkuchen gegenüber der Schluffschicht ausbildeten. Damit sind die Schichten bei der Konstellation von Tonsuspension und Filtermaterial undurchlässiger als in der Konstellation Schluffsuspension und Filtermaterial.

Der Vergleich der Versuche mit Schluffsuspension zeigte, dass der Versuch 2 die besten Werte bezüglich der Wasserundurchlässigkeit auswies. Ausgehend von der Prognose und der Filterwirkung (kompakteste Konsistenz des beobachteten Filterkuchens Abschnitt 5.2) hätte der Versuch 4 die geringste Wasserdurchlässigkeit ausweisen müssen.

Im Vergleich der Wasserdurchlässigkeit von Suspensionsströmung und initialen Wasserdurchlässigkeit zeigte sich, dass die Wasserdurchlässigkeit bei der Suspensionsströmung wesentlich geringer wurde. Dies wurde hauptsächlich auf die hohe die Dichtungswirkung des Filterkuchens zurückgeführt.

An Hand der Wasserdurchlässigkeit kann lediglich darauf geschlossen werden, dass ein Aggregatrückhalt stattfand. Es kann damit keine Aussage zur zurückgehaltenen Menge an Aggregaten getroffen werden.

Ausgehend von den Versuchen 1-4 unter Betrachtung der Ausgangswasserdurchlässigkeit (initiale) des Filtermaterials und der Wasserdurchlässigkeit nach Suspensionsaufgabe wurde ermittelt, dass bei Versuch 1 bei der Aufgabe der Tonsuspension die Wasserdurchlässig am geringsten ist. Jedoch wurde dabei noch nicht die Stabilität des Schichtsystems betrachtet. Ein entscheidender Aspekt zur Beeinflussung der Ergebnisse (Wasserdurchlässigkeit und Stabilität des Schichtsystems) ist der Einflussfaktor Druck. Die Filtercharakteristik und die Wasserdurchlässigkeit in den Versuchen von Abschnitt 5.2 und 5.3 wurden mit dem Gradienten von 3 ermittelt. Aus diesem Grunde kann an dieser Stelle noch keine endgültige Aussage zum in der Praxis anwendungsfähigsten Versuch getroffen werden, da man das Verhalten des Schichtsystems insbesondere der Verstopfungsschicht bei erhöhten Druck noch ermitteln ist.

5.4 Betrachtung der geometrischen Stabilität im System Suspension/Filter

In Abschnitt 5.2 wurde herausgestellt, dass Aggregate aus der Suspension das Filtermaterial verstopften und sich daraufhin auf der Oberfläche eine Dichtungsschicht in Form eines Filterkuchens bildete. Dieser Strömungsvorgang erfolgte bei einem hydraulischen Gradienten von 3. Mit der stufenweisen Erhöhung des hydraulischen Gradienten von 3 auf 33 wurde getestet, ob das System aus Suspension und Filtermaterial bei steigender hydraulischer Belastung stabil bleibt.

Mit den ermittelten Wasserdurchlässigkeiten bei jedem Gradienten sollten Rückschlüsse zu einem möglichen Materialaustrag gezogen werden.

Die Beobachtungen zu den Versuchen wurden in Abschnitt 4.2.3 erläutert.

In den Versuchen 1-3 kam es zur Ausspülung der Aggregate aus dem Porensystem und Filterkuchen. Die Ursache der verstärkten Ausspülung in den Versuchen 1-3 beruht auf die geometrische Instabilität der Aggregate. Das wiederum verursacht veränderte Strömungsverhältnisse innerhalb des Filterkuchens und des Filtermaterials, was zum Materialaustrag führte. Speziell zum Versuch 3 wird in der folgenden Abbildung 5-3 ein Überblick zum Materialaustrag in Folge der Gradientenerhöhung von 3 auf 33 verdeutlicht.

Der Versuch 4 wies diesbezüglich deutlich geringere Merkmale aus. Durch die Konsistenz der Aggregate bei Versuch 4 wurde eine geometrische Stabilität erreicht, die letztlich die Gesamtstabilität des Schichtsystems begründet und die Ursache für den geringeren Materialaustrag war.



Abb. 5-2 Auswirkung der Gradientenerhöhung im Filtermaterial

Bei einem hydraulischen Gradienten von 3 verstopfte sich das Porensystem und es bildete sich ein Filterkuchen auf der Filteroberfläche aus. Zwischen den haltenden Kräften und den treibenden Kräften bestand ein Gleichgewicht.

Bei der Erhöhung des hydraulischen Gradienten von 3 auf 4 wurde das Gleichgewicht in Richtung der treibenden Kräfte verschoben. Bei Gradient 4 ist zu erkennen, dass der Filterkuchen zerstört und die Aggregate tiefer in den Filter transportiert wurden. Weiterhin wurde festgestellt, dass das Filtrat an Trübung zunahm, was auf eine Erhöhung der Aggregatkonzentration zurück zuführen ist.

Im Versuch 4 zeigte sich, dass bei der schrittweisen Erhöhung des hydraulischen Gradienten bis 16,5 der Filterkuchen unversehrt blieb. Bei der Versuchsdurchführung mit einem hydraulischen Gradienten von 33 wurden die oberen Schichtbereiche des Filterkuchens zerstört. Das Filtrat wurde zunehmend trüber. Das nur die oberen Schichten des Filterkuchens zerstört wurden und die unteren Schichten visuell intakt waren, ist darauf zu schließen, dass die Aggregate durch das Filtermaterial geometrisch stabil zurückgehalten wurden und damit die Filterfestigkeit gegeben ist.

Die Wasserdurchlässigkeit wurde bei jeder Gradientenänderung ermittelt. Im Diagramm 5-3 sind die Wasserdurchlässigkeiten in Abhängigkeit von der Erhöhung des hydraulischen Gradienten dargestellt.

Im Diagramm 5-3 sind die Verhaltenseigenschaften zum Wassertransport bei der Erhöhung der Gradienten aus den einzelnen Versuchen dargestellt.



Diag. 5-3 Änderung der Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Erhöhung des hydraulischen Gradienten

Im Versuch 4 ist die Wasserdurchlässigkeit unter Beachtung der Gradientenerhöhung von 3 auf 10 minimal angestiegen. Bei der weiteren Erhöhung der Gradienten bis 33 blieb die Wasserdurchlässigkeit annähernd konstant.

In den Versuchen 1-3 ist speziell im Gradientenbereich von 3 bis 10 ein deutlicher Abfall der Wasserundurchlässigkeit sichtbar. Im weiteren Verlauf von 10 bis 33 ist ebenfalls eine Konstanz zu verzeichnen. In diesen Versuchen wurde durch das Filtermaterial 1 kein ausreichender Schutz vor Materialaustrag gegeben.

Die Instabilität wird an Hand der folgenden Kornverteilung aus Versuch 1 untermauert. Im Diagramm 5-4 ist die Kornverteilung (rosa) vom Filtermaterial 1 vor Versuchsbeginn (Einbauzustand) dargestellt. Des Weiteren sind die Kornverteilungskurven der nach Wideraufsättigung ausgebauten drei Filterschichten dargestellt (siehe Abschnitt 4.2.4). Aus dem Diagramm 5-4 geht die Überlagerung der Kornverteilungskurven hervor, so dass sich daher kein wesentlich höherer Feinanteil zu verzeichnen war. Dies deutet auf die Ausspülung vom Feinmaterial (Aggregate) bei der Gradientenerhöhung hin.



Diag. 5-4 Korngrößenverteilung der drei ausgebauten Schichten im Versuch 1 (blau-oben; rotmitte; grün-unten; rosa-Ausgangskornverteilung)

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Aggregate in den Versuchen 1, 2 und 3 in den verstopften Bereichen des Filtermaterials nicht stabil zurück gehalten worden sind. Daraus wird abgeleitet, dass die Kombination der Suspension mit dem Filtermaterial in den Versuchen 1, 2 und 3 bei Gradientenerhöhung geometrisch nicht stabil ist. Die Folge aus der eingetretenen Inhomogenisierung war letztlich der Filterzusammenbruch.

Im Versuch 4 wurde der geometrisch stabile Zustand des Filterkuchens durch die Erhöhung des Gradienten im Schichtenaufbau kaum beeinträchtigt. Lediglich die oberste Schicht des Filterkuchens wurde beschädigt. Unter den Versuchbedingungen war die geometrische Sicherheit aus der Kombination Filtermaterial 2 und Suspension 2 gegeben.

In Auswertung der Versuchsreihen und der dargelegten Ausführungen erfüllen die Ergebnisse aus Versuch 4 die Anforderungen der Aufgabenstellung.

5.5 Zusammenfassung der Auswertung im Vergleich mit analytischen Ansätzen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zusammenfassend dargestellt und mit den bisher bekannten analytischen Ansätzen aus Abschnitt 3.2 verglichen.

Im Punkt 3.2 wurden Filterkriterien auf der Basis von Filtrationsversuchen mit Suspensionen erläutert. Die einzelnen Ansätze bezogen sich auf den Trübungsgrad des Filtrats (INDRARATNA ET. AL.), der Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials (VAUGHAN ET. AL.) und des Korngrößendurchmessers des Filtermaterials d_{15F} (SHERAD ET. AL.). Im Ergebnis wurde festgestellt, das eine Stabilität beim Trübungsgrad < 25 NTU erreicht wird. Die Wasserdurchlässigkeit wird mit der Formel $k = 6,7 * 10^{-6} \cdot \delta^{1,52}$ berechnet. Die Korngröße d_{15F} wird entsprechend der Korngrößenverteilung der Suspension angepasst.

In den eigenen Versuchen wurde die Stabilität des Systems aus Suspension und Filtermaterial an Hand der Gradientenerhöhung (3 bis 33) bewertet.

Die Methodik zur Versuchsdurchführung bestand in der Ermittlung der Filtercharakteristik bei Suspensionsströmung (Tab. 5-1) und Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung Mit dieser Methodik (Vergleich Aggregatkorngröße mit minimalem (Tab. 5-2). Porenkanaldurchmesser) wurde herausgearbeitet, dass die Filtercharakteristik des Filtermaterials bei Suspensionsströmung mit dem Versuch 4 (Kombination von Schluffsuspension und Filtermaterial 2) die beste Filterwirkung auswies. Bei der Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung wurde im Versuch 1 (Kombination Filtermaterial 1 und Tonsuspension) die höchste Wasserundurchlässigkeit festgestellt. Weiterhin wurden drei Versuche mit Schluffsuspensionen durchgeführt. Das Ergebnis wies den Versuch 2 (Kombination Filtermaterial 1 und Tonsuspension) mit den besten bezüglich der Wasserdurchlässigkeit aus. Wie unter Abschnitt 5.3 ausgeführt hätte der Versuch 4 die geringste Wasserdurchlässigkeit ausweisen müssen, da hier der beobachtete Filterkuchen den kompaktesten Schichtaufbau hatte. Im Rahmen der Versuche zeigte sich, dass die Verstopfungsschicht zwar wasserundurchlässiger ist, sich aber bei erhöhtem Druck äußerst instabil gestaltet. In den Versuchen kam es bei Erhöhung der Gradienten zum Bruch des Filterkuchens. Schlussfolgernd bedeutet das, dass diese Schichtsysteme unter Druckbelastungen nicht praktisch einsatzfähig sind.

Bei der Betrachtung der geometrischen Stabilität im System Suspension/Filter wurde im Versuch 4 der geometrisch stabilste Zustand festgestellt, da nur geringe Beeinträchtigung der obersten Schicht des Filterkuchenaufbaus erfolgte. Die geometrische Sicherheit war unter den Versuchsbedingungen aus der Kombination Filtermaterial 2 und Suspension 2 gegeben. In diesem Versuch wurde bei der Gradientenerhöhung der geringste Materialaustrag nachgewiesen.

Die quantitative Erfassung der Daten aus den Versuchen beziehen sich auf die Volumenströme – erfasst durch die Wasserdurchlässig (Tab. 5-2) sowie die eingesetzten Gradienten von 3 bis 33 zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit (Diag. 5-1).

Im Vergleich mit den analytischen Ansätzen ist festzustellen, dass das Filtermaterial 2 mit der geringen Wasserdurchlässigkeit die beste Filterwirkung erzielte. Dieser Ansatz konnte auch den Ausführungen von Vaughan et. al. (1982) festgestellt werden.

In der folgenden Tabelle 5-3 wurden die Ergebnisse der initialen Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials der eigenen experimentellen Untersuchungen mit denen von VAUGHAN ET. AL. (1982) verglichen. Es zeigt sich, dass die initialen Wasserdurchlässigkeiten der eigenen Versuche kleiner sind als die nach der Gleichung 3-3 ermittelten Wasserdurchlässigkeiten nach VAUGHAN ET. AL. (1982). Demnach hätten sich auch in den Versuche 1-3 die geometrische Stabilität bei Gradientenerhöhung ergeben müssen.

Die Ursache einer nicht vorhandenen geometrischen Stabilität ist in den Ausgangsbedingungen zur Versuchsdurchführung zu begründen. VAUGHAN ET. AL. (1982) führten ihre Versuche mit aufbereitetem Wasser (Flusswasser) durch. In den eigenen Versuchen wurde dagegen normales (chemisch unbeeinflusstes) Wasser bei der Suspensionsströmung verwendet. Das Flusswasser verursachte die Reaktion zu größeren Aggregaten, die zur geometrischen Stabilität führten. In den eigenen Versuchen war die Aggregatgröße in der Suspension geringer, so dass diese in das das Filtermaterial eindringten. Daher bildete sich in den ersten drei eigenen Versuchsreihen kein sofortiger Filterkuchen auf der Filteroberfläche wie in den erfolgreichen Versuchen von VAUGHAN ET. AL. (1982).

Versuch	Eig	jene Untersuchungen	VAUGHAN ET. AL. (1982)	
Nr.	d _{85B} [mm]	k-Wert Filtermaterial (initial) [m/s]	k- Wert Filtermaterial [m/s]	
1	0,039	3,0 10 ⁻⁴	1,1 10 ⁻³	
2	0,047	3,8 10 ⁻⁴	1,4 10 ⁻³	
3	0,047	1,6 10 ⁻⁴	1,4 10 ⁻³	
4	0,047	0,88 10 ⁻⁴	1,4 10 ⁻³	

 Tab. 5-3
 Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit denen von VAUGHAN ET. AL. (1982)

Der Vergleich mit den Versuchen von SHERAD ET. AL. (1984b) erfolgte mit der Tabelle 5-4. In der Tabelle 5-4 sind die Suspensionsmaterialien der eigenen Versuche eingetragen. In Anlehnung dazu ist der Durchmesser der Suspensionsaggregate bei einem Siebdurchgang von 85 % und der Korndurchmesser für das Filtermaterial bei 15 % Siebdurchgang der Kornverteilungskurve eingetragen. Daneben ist die zulässige Filtrationsgrenze ausgedrückt durch d_{15F} nach SHERAD ET. AL. (1984b) aufgeführt. Im Vergleich der Korngrößen d_{15F} zeigt sich, dass die Korngrößen der eigenen Versuche kleiner sind als die nach SHERAD ET. AL. (1984b). Dementsprechend hätten alle Versuche die geometrische Stabilität aufweisen müssen.

Eine mögliche Ursache dafür, dass keine geometrische Stabilität in den drei eigenen Versuchen 1-3 gegeben war, liegt in der Einbauweise des Filtermaterials. In den eigenen Versuchen sowie in den Versuchen von SHERAD ET. AL. (1984b) wurde das Filtermaterial trocken in den Zylinder eingebaut. Trotz des vorsichtigen Einbaus kam es in den eigenen Versuchen zur Entmischung von groben und feinen Körnern im Filtermaterial. Zudem erfolgte in den eigenen Versuchen keine Verdichtung des Filtermaterials auf einem Vibrationstisch. Auf Grund von einer höheren Anzahl von Bereichen mit größeren Porenräumen und einer höheren Lagerungsdichte, konnten mehr Aggregate in das Filtermaterial eindringen.

Versuch	Eigene	e Untersuchunge	SHERAD ET. A	L. (1984b)	
Nr.	Material für Suspension	d _{85B} [mm]	d _{15F} [mm]	d _{85B} [mm]	d _{15F} [mm]
1	Ton (ohne Feinsandanteil)	0,039	0,32	0,03 - 0,08	0,5
2	Schluff	0,047	0,32	0,04 - 0,09	0,67 - 0,82
3	Schluff	0,047	0,19	0,04 - 0,09	0,67 - 0,82
4	Schluff	0,047	0,19	0,04 - 0,09	0,67 - 0,82

Tab 5_1	Vergleich der eingenen Versuchsergehnisse mit denen von SHERAD ET AL	108/h)
Tab. 5-4	Vergieren der eingenen versuchsergebnisse mit denen von Sherad er. AL. (19040)

Materialtransport und damit zur Beurteilung der Stabilität vom System aus Suspension/Filter eignete. Im Versuch 4 wurde bei der Suspensionsströmung und Gradientenerhöhung der Verstopfungsbereich und Filterkuchen am wenigsten beschädigt. Dies war mit einem geringeren Materialaustrag verbunden, was durch die im Vergleich zu den anderen Versuchen 1-3 geringere Filtrattrübung ersichtlich wurde. In den Versuchen 1-3 erhielt das Filtrat annähernd die Farbe der Suspension vor Aufgabe auf das Filtermaterial.

In den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) wurde festgestellt, dass mit einer steigenden Ungleichförmigkeit mittelkörniger Sandfilter die Verstopfung aus bleibt. In den eigenen Versuchen wies dagegen das Filtermaterial 1, welches eine höhere Ungleichförmigkeitszahl (U = 6) als das Filtermaterial 2 (U = 5,2) hatte, einen ausgeprägteren Verstopfungsbereich aus. Eine mögliche Ursache für diese Beobachtung liegt in der Herstellung der Suspension. In den Filtrationsversuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) wurde die Suspension unter Zusatz von 3,5 me/l CaCl₂ zum Wasser hergestellt. Durch die Zugabe eines Salzes (vor allem mehrwertiger Kationen) wurde die Neigung zur Aggregation verstärkt, so dass darauf zu schließen ist, dass die Aggregate einen größeren Durchmesser als in den eigenen Versuchen hatten. In den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. sind die Aggregate auf Grund der verstärkten Aggregation nicht in das Filtermaterial eingedrungen, sondern wurden direkt an der Filteroberfläche unter Bildung eines Filterkuchens zurückgehalten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Vergleichbarkeit mit den Filterkriterien der drei Filtrationsuntersuchungen der Autoren VAUGHAN ET. AL, SHERAD ET. AL. und INDRA-RATNA ET. AL. nur bedingt möglich ist. Die Ursachen der abweichenden Versuchsergebnisse liegen vor allem in den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen zur Versuchsdurchführung, wie die Herstellung der Suspension (Zugabe von Salzen zum Wasser) sowie dem Einbauzustand vom Filtermaterial in den Zylinder. Die Betrachtungen zeigen, dass für die Vergleichbarkeit analytischer Ansätze untereinander die Recherche zu den Ausgangsbedingungen der Versuche unabdingbar ist, da diese das Versuchsergebnis und damit die Bewertung zur Stabilität eines Systems aus Suspension und Filter wesentlich beeinflussen.

6 Diskussion und Bewertung

Ausgehend von den dargestellten Ergebnissen im Abschnitt 5.5 hatte der Versuch 4 mit der Kombination von Schluffsuspension und Filtermaterial 2 die beste Filterwirkung, jedoch im Vergleich zu den anderen drei Versuchen bestand eine höhere Wasserdurchlässigkeit. Unter dem Gesichtspunkt der Wasserundurchlässigkeit lieferte der Versuch 2 mit Schluffsuspension und Filtermaterial 1 die besten Werte. Obwohl der Versuch 4 mit seinem kompakten Schichtaufbau die besseren Bedingungen für eine geringere Wasserdurchlässigkeit hatte. Mögliche Ursachen für dieses Verhalten im Versuch 2 könnte die ausgeprägte Verstopfungsschicht sein, die eine höhere Blockade im Hinblick auf die Wasserdurchlässigkeit bildet als der große Filterkuchen im Versuch 4. Es wird davon ausgegangen, dass die Filterkuchen eine größere Porosität besitzen als die Verstopfungsschichten. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Plausibilität des vorliegenden Ergebnisses begründet.

Unter dem Anschein, dass bessere Versuchswerte unter Einbeziehung einer großen Verstopfungsschicht erreicht wurden, ist aber zu beachten, dass die Verstopfungsschicht unter Einfluss von Druck (Gradientenerhöhung) massive Zersetzungserscheinungen aufwies, die letztlich keine Langzeitwirkung für die praktische Anwendung bieten. Dem gegenüber bietet der Filterkuchen unter der Maßgabe der praktischen Anwendung (hohe Stabilität, Wasserundurchlässigkeit und Langlebigkeit des Schichtsystems) eine solide Grundlage.

Die in der Aufgabenstellung geforderte quantitative Erfassung der Daten aus den Versuchen beziehen sich auf die Volumenströme – erfasst durch die Wasserdurchlässig bzw. Rückhaltung (Tab. 5-2) sowie die eingesetzten Gradienten von 3 bis 33 zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit (Diag. 5-1).

Eine separate quantitative Erfassung der Rückhaltemengen wurde nicht gesondert durch Massebestimmung vorgenommen, sondern über die Volumenströme ermittelt. Ausgehend von den Versuchsergebnissen der Wasserdurchlässigkeit unter verschiedenen Gradienten wurde die logische Schlussfolgerung zum Aggregateintrag bzw. -austrag gezogen. Bei einer niedrigen Wasserdurchlässigkeit besteht eine hohe Rückhaltemenge. Bei einer hohen Wasserdurchlässigkeit ist dem zufolge ein niedriges Volumen der Rückhaltemengen vorhanden.

Im Gegensatz zu den bereits vorhanden Filtrationsversuche mit Suspension wurde in den eigenen Versuchen eine stufenweise Druckerhöhung zur Betrachtung der geometrischen Stabilität und Wasserdurchlässigkeit vorgenommen. Damit konnte die Verhaltensweise des Schichtsystems unter diesen Bedingungen detaillierter betrachtet und bewertet werden. Das entscheidende Kriterium für den positiven Verlauf der Versuche war die Bestätigung der Stabilität des Filterkuchens unter verschiedenen Gradienten. Was sich mit Versuch 4 erwiesen hat. In Auswertung der Ergebnisse aus den Filtrationsversuchen mit Suspensionen im Abschnitt 3.2 und den Ergebnissen der eigenen Versuche sind fundamentale Grundlagen vorhanden um detaillierte Entscheidungen für die Praxis zu treffen bzw. zielgerichtet die Forschung auf diesem Sektor fortzusetzen.

7 Zusammenfassung der Arbeit und Ausblick

Flussdeiche als Schutzbauwerke gegen Hochwasser sind längeren Standzeiten des Hochwassers (mehrere Tage bis Wochen) ausgesetzt und entsprechend bemessen. Durch neue Hochwasserschutzmaßnahmen, wie die ökologische Flutung von Altauen, werden Flussdeiche einem beidseitigen Wassereinstau ausgesetzt. Daraus resultieren neue Belastungssituationen innerhalb vom Flussdeich. Die neu eintretenden Wechselwirkungen von Erdstoffschichten mit der Sickerströmung können an der Grenzschicht von einer bindigen zu einer nichtbindigen Erdstoffschicht zum Materialtransport führen. Dieser unerwünschte Vorgang wird als Kontakterosion bezeichnet und kann Auslöser von Bodendeformationen, wie z.B. die Setzungen an Bauwerken sein. Der Austrag von Feinmaterial aus der Dichtungsschicht (Basisschicht) kann mit Erdstofffiltern (Filterschicht) bestimmter Kornzusammensetzung verhindert werden. Bei diesem Vorgang wird das feine Material bei Durchströmung der Filterschicht an der Oberfläche bzw. im Inneren einer Filterschicht abgetrennt bzw. am Transportvorgang zurückgehalten.

Die Ermittlung der Funktionsfähigkeit solcher Basis/Filter-Systeme erfolgt mit geometrischen und hydraulischen Filterkriterien. Unter Anwendung der geometrischen Filterkriterien wird nachgewiesen, dass die ungewünschte Bewegung feiner Erdstoffteile (Aggregate) durch die Porenstruktur des gröberen Erdstoffes rein geometrisch ausgeschlossen wird. Ist die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion nicht gegeben, wird in Ergänzung zu den geometrischen Kennwerten mit einem hydraulischen Kriterium geprüft, ob die hydraulische Belastung – ausgedrückt durch den hydraulischen Gradienten ausreichend groß ist, um den Transport der Basispartikel durch das Filterinnere (hydraulisch) zu bewirken.

In der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich die geometrischen Filterkriterien behandelt. In einer Literaturrecherche zeigte sich, dass die Ermittlung von Kriterien auf unterschiedlichen Herangehensweisen basiert. Die Aufstellung von Kriterien auf Grundlage von Laborversuchen stellt eine vorteilhafte Methode hinsichtlich der Anschaulichkeit am simulierten Objekt dar, denn die Durchführung kann direkt am kontakterosionsgefährdeten Originalmaterial erfolgen. Als problematisch erwies sich jedoch die angemessene Übertragbarkeit der an körnigen meist enggestuften Erdstoffen ermittelten Filterkriterien auf das System mit herausgelösten Aggregaten einer bindigen Erdstoffschicht und weitgestuften Erdstoff. Auf Grund dessen wurden weitere Untersuchungen der Autoren VAUGHAN ET. AL. (1982), SHERAD ET. AL. (1984b) sowie INDRARATNA ET. AL. (1996) herangezogen, in denen die Filterationsversuche mit Suspensionen aus Ton und Schluff und unterschiedlichen Filtererdstoffen durchgeführt wurden. Die Suspension repräsentierte das wässrige System herausgelöster Aggregate aus einer Dichtungsschicht im Sickerwasserstrom.

Die Forschungsarbeiten wurden hinsichtlich der Versuchsdurchführung und –ergebnisse analysiert und es wurden die Ansätze zur der geometrische Stabilität herausgearbeitet. Diese bezogen sich bei VAUGHAN ET. AL. auf die Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials, bei SHERAD ET. AL. auf den Korngrößendurchmesser des Filtermaterials d_{15F} sowie bei INDRARATNA ET. AL. auf den Trübungsgrad des Filtrats.
Die Auswertung der oben genannten drei Versuche von VAUGHAN ET. AL., SHERAD ET. AL. auf und INDRARATNA ET. AL. war die Grundlage für die eigenen Filtrationsuntersuchungen. Mit Suspensionen wurde die Filtercharakteristik von einem typischen Dammbaustoff untersucht. In einer zylindrischen Versucheinrichtung, der sogenannten Festwandzelle, wurden vier Versuchsreihen gefahren. In jedem Versuch wurde eine Suspension von oben direkt auf das aufgegeben. unter Abschnitt Filtermaterial Wie 4.2 beschrieben. wurde die Verhaltenscharakteristik der Aggregate bei Suspensionsströmung und anschließend unter verschieden Gradientenbedingungen beprobt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse bezog sich auf die initiale Wasserdurchlässigkeit, auf die Filtercharakteristik sowie die Wasserdurchlässigkeit bei Suspensionsströmung und die Betrachtung der geometrischen Stabilität des Systems aus Suspension und Filter, was im Abschnitt 5 im Detail dargelegt wurde.

In Auswertung der durchgeführten Versuche und Diskussion der Ergebnisse weist die Verhaltenscharakteristik im Versuch 4 (Schluffsuspension und Filtermaterial 2) unter permanenter Druckerhöhung und Ermittlung der Wasserundurchlässigkeit die höchste Stabilität im Schichtsystem aus.

Die vorliegenden Ergebnisse aus den Filtrationsversuchen mit Suspensionen im Abschnitt 3.2 und die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Eigenversuchen sind eine solide fundamentierte Voraussetzung, um spezielle Entscheidungen für den praktischen Einsatz zu treffen. Weiterhin ist mit den ermittelten Daten die Fortsetzung einer wissenschaftlichen Arbeit auf diesem Gebiet zielgerichtet möglich.

8 Verzeichnisse

8.1 Quellenverzeichnis

Batereau (1993)	Batereau, Ch.; Comparison of existing granular filter criteria Filters; Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heilbaum & Schuler; 1993
BOKU (2008)	Bodenkunde online; URL: http://www2.hu-berlin.de /agrar/bod- en/EinfBoku/pcboku10.agrar.huberlin.de/cocoon/boku/0_deckbl att7935.html; Zugriff: 2.06.08
BRAUNS ET. AL. (2000)	Brauns, J.; Schuler, U.; Die effektive Porenöffnung körniger Erdstoffe - ein Kriterium für die Injizierbarkeit von Suspensionen; Geotechnik 23, Nr. 4; 2000
BUSCH ET. AL (1993)	Busch, K. F., Luckner, L., Tiemer, K.; Geohydraulik; Lehrbuch der Hydrogeologie Band 3; 1993
CISTIN (1964)	Cistin, J.; Konstrukce a stavba filtru sypanych hrazi; Brno, Forschungsbereich IX-5-5/3 VVUH Brno; 1964
DHSV (2008)	Deich- und Hauptsiedelverband Dithmarschen, URL: http://www.dhsv-dithmarschen.de/sturmflut.html; Zugriff: 28.07.08
Engel (2000)	Engel, J.; Bodenmechanische Modelle bei teilgesättigten Böden; 2. Workshop – Teilgesättigter Böden; Tom Schanz (Hrsg.), Schriftenreihe Geotechnik der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 04, S. 1-23; 2000
Förster (1996)	Förster, W.; Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine; 1996
Gelbert (1971)	Gelbert, K.; Filtergesetze plastischer Injektionsmassen bei der Durchströmung von Lockergesteinen, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe; Heft 49; 1971
Gmachowski (1999)	Gmachowski, L.; Hydrodynamic size in modelling of filtration and separation of aggregated systems; in Filtration and Separation of fine paricle suspension; International Sympodium 1999

Hanack et. al. (1968)	Hanack, S., Stefan, H.; Strömungen von Tonsuspensionen mit einem hohen Feststoffgehalt; Ein Beitrag zum Studium von Dichteströmen in Speicherbecken; 1968
Indraratna et. al. (1996)	Indraratna, B.; Vafai, F.; Haque, M.A.; Design of granular filters based on experimental and analytical studies; Geofilters; 1996
JASMUND ET.AL. (1993)	Jasmund, K.; Lagaly, G.; Tonminerale und Tone; Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt; 1993
Keil (1954)	Keil, K.; Der Dammbau, Stau- und Verkehrsdämme; zweite Auflage; 1954
Kenney et. al (1985)	Kenney, T. C.; Chalam, R.; Chiu, E.; Ofoegbu, G. I.; Omange, G.N.; Ume, A.; Controlling constriction size of granular filsters; Can. Geotechnical Journal; 1985
Kezdi (1969)	Kezdi, A.; Handbuch der Bodenmechanik I.; 1969
MATTIAT (1963)	Mattiat, B.; Methodische Verbesserung bei routinemäßigen Schlämmanalysen von Ton- und Bodenproben; Beiträge zur Mineralogie und Petrographie 10, 216-224; 1963
Müller (1991)	Müller, B.; Beitrag zur Untersuchung der Erosionssicherheit bindiger Mischböden bei vertikaler Durchströmung; Dissertation im Fachbereich Bauingenieurwesen der Gesamthochschule Kassel; 1991
PAESLER (2003)	Paesler, C.; Bau, Ausrüstung und Betrieb eines Labordeiches im Naturmaßstab;
РАТТ (2001)	Patt, H.; Hochwasser – Handbuch; 2001
Pelzmaier et. Al (2006)	Pelzmaier, S., Haselsteiner, R.; Systemansatz zur Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformationen, Fachtagung Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern in Wallgau; 2006
Prinz (1991)	Prinz, H.; Abriß der Ingenieurgeologie. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage; 1991
Rösler (1991)	Rösler, J.; Lehrbuch der Mineralogie; 5., unveränderte Auflage; 1991

Saucke (2006)	Saucke, U.; Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe; Geotechnik 29, Nr. 1; 2006
Schaumberg (1970)	Schaumberg, G.; Experimentelle Untersuchung der Stabilität konzentrierter Tonsuspensionen gegen Elektrolyte mit Hilfe der Elektrophorese; Dissertation an der Technischen Universität Clausthal; 1970
Schuler et. al. (1993)	Schuler, U.; Brauns, J.; Behaviour of coarse and well-graded filters; Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heilbaum & Schuler; 1993
Schuler (1994)	Schuler, U.; Bemessung von Erdstoff-Filtern unter besonderer Berücksichtigung der Parameterstreuung; Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 143; 1997
Schuler (1995)	Schuler, U.; Sicherheit geotechnischer Filtersysteme, Wasserwirtschaft 85, 7/8; 1995
Sherad et. al. (1984a)	Sherad, J. L.; Dunnigan L. P.; Talbot J. R.; Basic properties of sand and gravel filters; Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No. 6; 1984
Sherad et. al. (1984b)	Sherad, J. L.; Dunnigan L. P.; Talbot J. R; Filters for silts and clays; Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No. 6; 1984
Silveira (1965)	Silveira, A.; An analysis of the problem of washing through in protective filters; Proc. 6 th Inernational Conference on SMFE, Montreal; 1965
Starov (1999)	Starov, V.; Sieve mechanism of microfiltration seperation; in Filtration and Separation of fine paricle suspension; International Sympodium; 1999
SUCHFORT (2004)	Suchfort, A.; Literaturrecherche zu Deichsanierungsarbeiten; Diplomarbeit an der Technische Universität München, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft; PDF, 2004
Reuter et. al. (1992)	Reuter, F., Klengel J., Pasek, J.; Ingenieurgeologie, 3., stark überarbeitete und erweiterte Auflage; 1992
Rütz et. al. (2007)	Rütz, D.; Witt, K. J.; Semar, O.; Wolff, T.; Wudtke, RB.; Wissensspeicher Geotechnik, Bauhaus-Universität Weimar, Studienunterlagen Geotechnik, 16. Auflage; 2007

Sartor (2006)	Sartor, M.; Untersuchungen zum Einfluss elektrokinetischer Repulsationseffekte auf die Tiefenfiltration mit partikulären Schüttbetten; Dissertation; 2006								
Schuler (1995)	Schuler, U., How to deal with the problem of Suffosion, Beitrag zur Tagung Research and Development in the Field of Dams; Crans- Montana Switzerland; 1995								
Striegler (1998)	Striegler, W.; Dammbau in Theorie und Praxis; völlig neu bearbeitete 2. Auflage mit Beiträgen von DrIng. Klaus Girod und DrIng. Horst Rahn; 1998								
VAUGHAN ET. AL. (1982)	Vaughan, P. R.; Soares, F.; Design of filters for clay cores of dams, Journal og Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 108, S.17-31; 1982								
VITTINGHOFF (2003)	Vittinghoff, T.; Analyse des Langzeitverhaltens einer Spundwandkonstruktion in einem überkonsolidierten Ton; Dissertation an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig; 2003								
WAGNER (2006)	Wagner, J. L., Suffosionsstabilität von weitgestuften rolligen Böden – Ansätze und deren Grenzen der Anwendbarkeit, 2006								
WITTMANN (1980)	Filtrations- und Transportphänomene in Porösen Medien, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 86; 1980								
ZIEMS (1969)	Ziems, Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe; Dissertation an der TU Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen; 1969								

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Arten von Suffosionserscheinungen (BUSCH ET. AL. 1993)	4
Abb. 2-2	Erscheinungsformen der Erosion (BUSCH ET. AL. 1993)	4
Abb. 2-3	Materialtransportvorgänge in Flussdeichen (AUS PELZMAIER ET. AL,	
	2006)	5
Abb. 2-4	Hochwasserschäden an Flussdeichen (DHSV, 2008)	7
Abb. 2-5	Plättchenförmige Struktur von Tonmineralen (Kaolinit)	
	(Smoltcyk, 1990)	8
Abb. 2-6	Gerüstsilikat (BOKU, 2008)	9
Abb. 2-7	Zustandsformen des Porenwassers im bindigen Erdstoff	
	(PRINZ, 1991; ENGEL, 2000)	9
Abb. 2-8	a) Tonaggregate in wässriger Lösung (Mattiat, 1963);	
	b) Zusammensetzung eines Aggregates (Gmachowski, 1999)	10
Abb. 2-9	Struktur nichtbindiger Lockergesteine	12
Abb. 2-10	Komplexität der Porenstruktur bei unterschiedlicher Ungleichförmigkeit	
	von Erdstoffteilchen (BUSCH ET. AL., 1993)	14
Abb. 2-11	Filtrationsprozess an der Filteroberfläche (STAROV, 1999)	15
Abb. 2-12	Geometrische Form der Porenkanäle	16
Abb. 2-13	Abfolge charakteristischer Vorgänge bei Durchströmung eines	
	Erdbauwerks	18
Abb. 3-1	Mathematische Bestimmung der Porenweite am Kugelmodell	
	(WITTMANN, 1980)	20
Abb. 4-1	Deichkörper im Gefahrenströmungszustand (PELZMAIER ET. AL, 2006)	33
Abb. 4-2	Prinzipskizze zur Versuchseinrichtung	34
Abb. 4-3	Aufbau der Festwandzelle	35
Abb. 4-4	Aufbau der Fußplatte	36
Abb. 4-5	Aufbau der Kopfplatte	37
Abb. 4-6	Kornfraktionen zur Herstellung des Filtermaterials	39
Abb. 4-7	a) Standzylinder mit Ton- und Schluffsuspension	
	b) Rührvorrichtung	
	c) Aräometer und Temperaturmessgerät	40
Abb. 4-8	a) Abwiegen der errechneten Feuchtmasse im Standzylinder	
	b) Auffüllen mit Leitungswasser bis zur 1 Liter Markierung	
	c) Rührvorrichtung zur Homogenisierung	41
Abb. 8-1	Versuchaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	
Abb. 4-10	a) Aufgabetrichter für Suspension	
	b) Aufgabe der Suspension	
	c) Einlauf in die Zelle - Vermischung mit Wasser über dem	
	Filtermaterial	45
Abb. 4-11	Suspension im Porensystem des Filtermaterials (Versuch 3)	46
Abb. 4-12	Beobachtungen während Suspensionsströmung	47

Abb. 4-13	Filterkuchenbildung während Suspensionsströmung	48
Abb. 4-14	Vergleich von Filtrattrübung	49
Abb. 4-15	Filterkuchenzerstörung bei der Gradientenerhöhung	50
Abb. 4-16	a) Absaugen der Flüssigkeit über zerstörten Filterkuchen	
	b,c) Filterkuchenausbau	
	d) Wiederaufsättigung mit Trübung	51
Abb. 5-1	Versuch 3: Entmischungszonen im trockenen Einbauzustand	
	Versuch 4: homogener Aufbau bei angefeuchteten Einbauzustand	53
Abb. 5-2	Auswirkung der Gradientenerhöhung im Filtermaterial	60

8.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Zusammenstellung von Ansätzen für die Grenzzustände geometrischer	
	Filterstabilität aus Laborversuchen	21
Tab. 3-2	Beispiel für die Ermittlung der Filtergrenze nach SHERAD ET. AL. (1984b)	26
Tab. 3-3	Filtergrenzen d _{15F} für die verwendeten Tone und Schluffe nach SHERAD	
	ET. AL. (1984b)	26
Tab. 3-4	Vergleich der drei Filtrationsuntersuchungen von VAUGHAN ET. AL.	
	(1982), Sherad et. al. (1984b) und Indraratna et. al. (1996)	30
Tab. 4-1	Kennwerte des Filtermaterials eigener experimenteller Untersuchungen	39
Tab. 4-2	Überblick zu den Ausgangsparametern der vier eigenen	
	Filtrationsversuche	42
Tab. 4-3	Übersicht zur Versuchsdurchführung einer Filterversion	43
Tab. 4-4	Arbeitschritte zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des	
	Filtermaterials vor Suspensionsaufgabe	44
Tab. 4-5	Zusammenfassung der Versuchsbedingungen und Beobachtungen der	
	vier eigenen Filtrationsversuche	51
Tab. 5-1	Ermittelte minimale Durchmesser eines Porenkanals im Filtermaterial	55
Tab. 5-2	Änderung der Wasserdurchlässigkeiten nach Suspensionsaufgabe	57
Tab. 5-3	Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit denen von	
	VAUGHAN ET. AL. (1982)	65
Tab. 5-4	Vergleich der eingenen Versuchsergebnisse mit denen von	
	SHERAD ET. AL. (1984b)	65

8.4 Diagrammverzeichnis

Korngrößenverteilung mit Kennzeichnung von Fraktion und Fraktilwert	13
Ergebnisse der Untersuchungen am Empingham Damm (VAUGHAN ET.	
AL., 1982)	23
Größe der zurück gehaltenen oder passierten Partikel in Abhängigkeit	
von der Wasserdurchlässigkeit des Filters (VAUGHAN ET. AL., 1982)	24
Vergleich der Regressionsgerade aus den Versuchen von INDRARATNA	
ET. AL. (1996) und VAUGHAN ET. AL. (1982)	28
Korngrößenverteilung der Ton- und Schluffsuspension	40
Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials in Abhängigkeit von	
der Gradientenerhöhung	52
Korngrößenverteilung der Suspensionen mit Kennzeichnung der	
Korngröße der minimalen Durchmesser des Porenkanals der	
Filtermaterialien 1 und 2	55
Änderung der Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Erhöhung	
des hydraulischen Gradienten	61
Korngrößenverteilung der drei ausgebauten Schichten im Versuch 1	
(blau-oben; rot-mitte; grün-unten; rosa-Ausgangskornverteilung)	62
	Korngrößenverteilung mit Kennzeichnung von Fraktion und Fraktilwert Ergebnisse der Untersuchungen am Empingham Damm (VAUGHAN ET. AL., 1982) Größe der zurück gehaltenen oder passierten Partikel in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des Filters (VAUGHAN ET. AL., 1982) Vergleich der Regressionsgerade aus den Versuchen von INDRARATNA ET. AL. (1996) und VAUGHAN ET. AL. (1982) Korngrößenverteilung der Ton- und Schluffsuspension Initiale Wasserdurchlässigkeit des Filtermaterials in Abhängigkeit von der Gradientenerhöhung Korngröße der minimalen Durchmesser des Porenkanals der Filtermaterialien 1 und 2 Änderung der Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Erhöhung des hydraulischen Gradienten Korngrößenverteilung der drei ausgebauten Schichten im Versuch 1 (blau-oben; rot-mitte; grün-unten; rosa-Ausgangskornverteilung)

8.5 Zeichen und Symbole

A _{50zul}	zulässiges Abstandsverhältnis
Cc	Krümmungszahl
D	Kugeldurchmesser
$\mathbf{d}_{k,\ min}$	minimaler Porenkanaldurchmesser
$\mathbf{d}_{k,F1}$	minimaler Porenkanaldurchmesser des Filtermaterials 1 (nach ZIEMS)
$\mathbf{d}_{k,F2}$	minimaler Porenkanaldurchmesser des Filtermaterials 2 (nach ZIEMS)
dw	wirksamen Korndurchmesser
dx	Korndurchmesser bei x % der Kornverteilungskurve
d_{xB}	Korndurchmesser der Basis (Suspension) x % der Kornverteilungskurve
d_{xF}	Korndurchmesser des Filters bei x % der Kornverteilungslinie
е	Porenzahl
F1	Filtermaterial 1
F2	Filtermaterial 2
i	hydraulischer Gradient [-
k-Wert	Wasserdurchlässigkeit [m/s]
m _d	Trockenmasse
${\sf m}_{\sf Susp}$	Masse der Suspension
m _{Zyl}	Masse des Zylinders
U	Ungleichförmigkeitszahl [-]
V_{Susp}	Volumen der Suspension
S1	Suspension 1 (Tonsuspension)
S2	Suspension 2 (Schluffsuspension)
Q	Durchfluss

δ	mittlerer Aggregatdurchmesser	[µm]
---	-------------------------------	------

ф	Porosität
ρ _d	Trockendichte
ρs	Korndichte
$ ho_{Susp}$	Dichte der Suspension

Selbstständigkeitserklärung

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegeben Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Weimar, den 08.09.2008

Dietlind Jacobs

Thesen

- 1. Die experimentelle Untersuchung des Zusammenspiels von Filtermaterialien und Suspensionen ist eine wichtige Grundlage zur Entwicklung von Filterkriterien.
- Die Filtrationsuntersuchungen mit Suspensionen der drei Forschern VAUGHAN ET. AL. (1982), SHERAD ET. AL. (1984b), INDRARATNA ET. AL. (1996) dienten als Ausgangslage für die eigenen Untersuchungen und um eine Vergleichbarkeit der Kriterien sicher zu stellen.
- 3. Die im Labor aufgebaute Versuchseinrichtung mit Festwandzelle, ist als idealisiertes Modell zu betrachten, um die sich in der Praxis veränderten Einflüsse zu stabilisieren.
- 4. Die im Versuch verwendeten Körnungslinien der Filtermaterialien sind als idealistisch zu betrachten, da in der Praxis am Deich die Körnungslinien des Filters variieren.
- 5. Die im Versuch verwendeten der Ton- und Schluffsuspensionen sind ebenfalls als idealistisch anzusehen, da in der Praxis am Deich die Körnungslinien der Dichtungsschichten des Deiches variieren.
- Die Gradientenerhöhung der Versuchsdurchführung spiegelt nicht die über verschiedene Zeiträume stattfindenden Veränderungen der Gradienten im Hochwasserfall wieder (z.B. schnelles Steigen bei Bergflüssen und über Tage beim Elbhochwasser)
- 7. Es sind weitere Untersuchungen durchzuführen, um Kriterien zu konkretisieren, die die Bildung des Filterkuchens und damit die Stabilität positiv beeinfluss.
- 8. Es sind weitere Untersuchungen um die Zusammenhänge von Filtermaterial, Suspension und Gradientenerhöhung beim Durchbruch des Filterkuchens zu analysieren.
- 9. Zur Untermauerung der Ergebnisse dieser Arbeit, müssen noch weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden.
- 10. Die Erkenntnisse dieser und weitere Untersuchungen müssen bei der Planung von Flussdeichen bzw. deren Erneuerung einfließen

Tabellen

Berechnungstabellen für Wasserdurchlässigkeit alle Versuche

					Dichte						
	i [-]	m [g]	t (s)	(℃) T	(g/cm³)	Vw (m³)	Q (m³/s)	A (m²)	v (m/s)	k (m/s)	
	2,4	733,333	30	21,3	0,99795	7,35E-04	2,45E-05	0,03	8,16E-04	3,23E-04	
initiale	2,6	771,667	30	21,3	0,99795	7,73E-04	2,58E-05	0,03	8,59E-04	3,19E-04	
Wasserdurchlässigkeit	3,4	1016,333	30	21,3	0,99795	1,02E-03	3,39E-05	0,03	1,13E-03	3,11E-04	
Filtermaterial	4,5	1346,000	30	21,3	0,99795	1,35E-03	4,50E-05	0,03	1,50E-03	3,08E-04	
	3,0	0,055217	555	21,6	0,99769	5,53E-08	9,97E-11	0,03	3,32E-09	1,11E-09	
	3,0	0,02936	553	21,6	0,99769	2,94E-08	5,30E-11	0,03	1,77E-09	5,88E-10	
Suspensionsströming	3,0	0,032365	610	21,6	0,99769	3,24E-08	5,32E-11	0,03	1,77E-09	5,90E-10	7,62E-10
Gradientenerhöhung	10	80,57	160	22	0,9978	8,07E-05	5,05E-07	0,03	1,68E-05	5,60E-06	
	10	72,729	160	22	0,9978	7,29E-05	4,56E-07	0,03	1,52E-05	1,53E-06	
	10	104,064	180	22	0,9978	1,04E-04	5,79E-07	0,03	1,93E-05	1,95E-06	3,03E-06
	16,5	96,653	60	22	0,9978	9,69E-05	1,61E-06	0,03	5,38E-05	5,44E-06	
	16,5	134,885	60	22	0,9978	1,35E-04	2,25E-06	0,03	7,51E-05	4,55E-06	
	16,5	117,628	60	22	0,9978	1,18E-04	1,96E-06	0,03	6,55E-05	3,97E-06	4,65E-06

					Dichte						
	i [-]	m [g]	t (s)	(℃) T	(g/cm³)	Vw (m³)	Q (m³/s)	A (m²)	v (m/s)	k (m/s)	
	2,4	1337,000	60	20,32	0,998166	1,34E-03	2,23E-05	0,03	7,44E-04	3,06E-04	
initiale	2,6	1552,700	60	20,32	0,998166	1,56E-03	2,59E-05	0,03	8,64E-04	3,32E-04	
Wasserdurchlässigkeit	3,4	2185,290	60	20,32	0,998166	2,19E-03	3,65E-05	0,03	1,22E-03	3,58E-04	
Filtermaterial	4,5	3146,273	60	20,34	0,998166	3,15E-03	5,25E-05	0,03	1,75E-03	3,85E-04	
Suspensionsströming	3,0	16,560	420	19,7	0,99829	1,66E-05	3,95E-08	0,03	1,32E-06	4,72E-07	
	10,0	62,9	1,2	18,3	0,998566	6,30E-05	5,25E-05	0,03	1,75E-03	1,78E-04	
	10,0	61,380	1,2	18,3	0,998566	6,15E-05	5,12E-05	0,03	1,71E-03	1,74E-04	
0,3 bar	10,0	55,030	0,6	18,3	0,998566	5,51E-05	9,18E-05	0,03	3,06E-03	3,12E-04	2,22E-04
	16,5	234,670	2,1	18,7	0,99852	2,35E-04	1,12E-04	0,03	3,73E-03	3,80E-04	
	16,5	254,840	2,8	18,7	0,99852	2,55E-04	9,11E-05	0,03	3,04E-03	1,84E-04	
0,5 bar	16,5	211,060	1,8	18,7	0,99852	2,11E-04	1,17E-04	0,03	3,91E-03	2,38E-04	2,67E-04
	33,0	176,650	1,4	18,7	0,99852	1,7691E-04	1,26E-04	0,03	4,21E-03	2,56E-04	
	33,0	155,460	1,2	18,7	0,99852	1,56E-04	1,30E-04	0,03	4,32E-03	1,31E-04	
	33,0	241,320	1,6	18,7	0,99852	2,42E-04	1,51E-04	0,03	5,03E-03	1,52E-04	
1,0 bar	33,0	197,950	1,1	18,7	0,99852	1,98E-04	1,80E-04	0,03	6,01E-03	1,82E-04	1,80E-04

					Dichte					
	i [-]	m [g]	t (s)	(℃) T	(g/cm³)	Vw (m³)	Q (m³/s)	A (m²)	v (m/s)	k (m/s)
initiale										
Wasserdurchlässigkeit										
Filtermaterial	2,4	626,067	60	20,31	0,998168	6,27E-04	1,05E-05	0,03	3,48E-04	1,45E-04
	2,6	674,133	60	20,04	0,998222	6,75E-04	1,13E-05	0,03	3,75E-04	1,46E-04
	3,4	960,400	60	19,35	0,99836	9,62E-04	1,60E-05	0,03	5,34E-04	1,57E-04
	4,5	1335,400	60	19,47	0,998336	1,34E-03	2,23E-05	0,03	7,43E-04	1,65E-04
Suspensionsströming	3	10,365	15	22	0,998416	1,04E-05	6,92E-07	0,03	2,31E-05	7,69E-06
0,3 bar	10,0	678,305	30	21,2	0,998416	6,79E-04	2,26E-05	0,03	7,55E-04	7,54E-05
0,5 bar	16,5	696,35	20	21,4	0,998416	6,97E-04	3,49E-05	0,03	1,16E-03	6,96E-05
1,0 bar	33,0	823,9	15	21,4	0,998416	8,25E-04	5,50E-05	0,03	1,83E-03	5,48E-05

					Dichte					
	i [-]	m [g]	t [s]	T [℃]	[g/cm³]	Vw [m³]	Q [m³/s]	A [m²]	v [m/s]	k [m/s]
	2,4	686,067	120	21,1	0,998168	6,87E-04	5,73E-06	0,03	1,91E-04	7,94E-05
initiale	2,6	570,667	90	21,1	0,998222	5,72E-04	6,35E-06	0,03	2,12E-04	8,20E-05
Wasserdurchlässigkeit	3,4	500,433	60	21,8	0,99836	5,01E-04	8,35E-06	0,03	2,78E-04	8,16E-05
Filtermaterial	4,5	362,767	30	21,8	0,998336	3,63E-04	1,21E-05	0,03	4,04E-04	8,85E-05
Suspensionsströming	3	73,007	180	21,1	0,998416	7,31E-05	4,06E-07	0,03	1,35E-05	4,51E-06
0,3 bar	10,0	468,667	60	21,8	0,998416	4,69E-04	7,82E-06	0,03	2,61E-04	2,58E-05
0,5 bar	16,5	543,467	60	21,8	0,998416	5,44E-04	9,07E-06	0,03	3,02E-04	1,80E-05
1,0 bar	33,0	570,100	60	21,8	0,998416	5,71E-04	9,52E-06	0,03	3,17E-04	9,36E-06