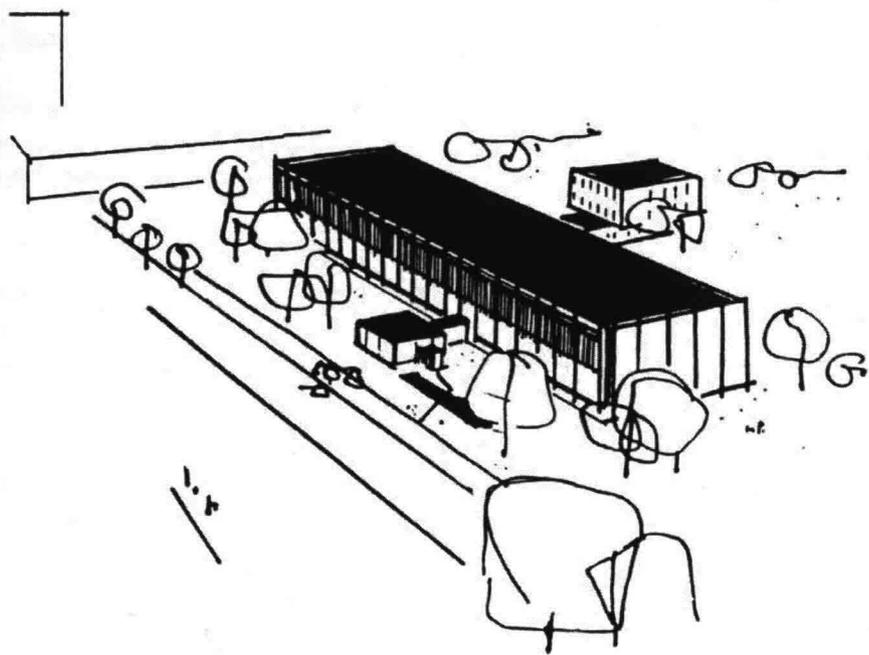


MITTEILUNG NR. 138



**IWAWI**

INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN



# **Die Entmischung bei der Schüttung von Wellenbrecherkernen mit Hinterkippern**

Vorgelegt von  
Diplom-Ingenieurin  
**Pascale Rouault**

Von der Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Träger  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stückrath  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolff  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Kohlhase (Univ. Rostock)

Tag der wissenschaftliche Aussprache: 21.07.2003

Berlin 2004  
D83

**INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT**

**Die Entmischung bei der Schüttung von Wellenbrecherkernen  
mit Hinterkippern**

**Pascale Rouault**

**Mitteilung Nr. 138  
Technische Universität Berlin**

**ISSN 0409-1744  
Berlin 2003  
D83**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Gang der Untersuchung.....	2
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Aufbau eines Wellenbrechers.....	5
2.2	Anforderungen an das Kernmaterial.....	7
2.3	Entmischung während des Aufbaus des Kerns.....	9
2.4	Schäden an Wellenbrechern, die auf den Kern des Wellenbrechers zurückzuführen sind.....	11
2.4.1	Der Wellenbrecher von Arzew el Djedid.....	12
2.4.2	Der Wellenbrecher von Mohammedia.....	12
2.4.3	Der Hafen von Sines.....	13
2.4.4	Schäden an großen Wellenbrechern.....	13
2.5	Zusammenfassung des Kenntnisstandes.....	14
<b>3</b>	<b>Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung</b> .....	<b>15</b>
3.1	Vorversuche.....	15
3.1.1	Aufbau der Versuchseinrichtung.....	15
3.1.2	Versuchsmaterial.....	16
3.1.3	Versuchsreihe, Versuchsdurchführung.....	17
3.1.4	Versuchsauswertung.....	18
3.1.5	Versuchsergebnisse der Vorversuche.....	19
3.2	Versuchseinrichtung und Auswertungsverfahren für die Versuche.....	21
3.2.1	Versuchseinrichtung.....	22

3.2.2	Versuchsmaterial als Modell für das Kernmaterial.....	24
3.2.3	Vorbereitung des Schüttmaterials.....	25
3.2.4	Fehlerquellen bei der Erstellung einer Körnungslinie.....	26
3.2.5	Versuchsdurchführung.....	27
3.2.6	Versuchsauswertung und Darstellung.....	28
3.2.6.1	Versuchsauswertung.....	28
3.2.6.2	Darstellung der Versuchsergebnisse.....	29
3.3	Versuchsreihe im kleinen Maßstab 1:15.....	30
3.4	Durchführung der Versuche in größeren Maßstäben.....	34
3.4.1	Versuchsstand und Versuchsdurchführung.....	34
3.4.2	Versuche in den größeren Maßstäbe 2:15 und 4:15.....	35
<b>4</b>	<b>Versuchsergebnisse.....</b>	<b>38</b>
4.1	Der Referenzversuch: Darstellung und Ergebnisse.....	39
4.1.1	Körnungslinie.....	40
4.1.2	Masse der Kornfraktionen.....	42
4.1.3	Charakteristische Werte.....	43
4.1.4	Fehlerbetrachtung der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung.....	44
4.1.4.1	Mögliche Fehlerquellen.....	44
4.1.4.2	Bestimmung der optimalen Materialmasse für den Referenzversuch.....	47
4.1.5	Statistische Auswertung.....	50
4.1.6	Visuelle Auswertung.....	54
4.2	Böschungsausbildung bei verschiedenen Versuchsbedingungen.....	57
4.2.1	Die Gesamttiefe $t_G$ .....	59
4.2.2	Die Falltiefe in Luft $t_L$ .....	63
4.2.3	Der Feinkomanteil des Schüttgutes.....	66
4.2.4	Der Ungleichförmigkeitsgrad des Schüttgutes.....	68
4.2.5	Der Maßstab.....	71
4.3	Übertragung der Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab.....	75
4.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	77
<b>5</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Unterwasserschüttung bei Böschungen.....</b>	<b>78</b>
5.1	Physikalische Beobachtungen.....	78
5.2	Versuchsbeschreibung.....	79
5.2.1	Versuchsmaterial.....	80
5.2.2	Versuchsdurchführung.....	82
5.2.3	Versuchsauswertung.....	83

5.2.4	Durchgeführte Versuche.....	84
5.3	Versuchsergebnisse.....	85
5.3.1	Bewegungsarten.....	85
5.3.2	Landeverhalten.....	88
5.3.3	Steingeschwindigkeit.....	89
5.3.4	Fehlerbetrachtung.....	91
5.3.5	Einfluss der Steinmasse und des Steinvolumens.....	96
5.3.6	Einfluss der Wassertiefe.....	97
5.3.7	Einfluss der Abwurfart.....	99
5.3.8	Die Oberflächenbeschaffenheit der Böschung (Rampe).....	102
5.4	Beschreibung des mechanischen Vorganges.....	104
5.4.1	Theoretische Beschreibung des stationären Schüttvorganges.....	104
5.4.2	Berechnung der Kräfte.....	107
5.4.3	Übertragung der stationären Geschwindigkeiten in den Naturmaßstab.....	108
5.5	Schlussfolgerung aus Kapitel 5.....	113
<b>6</b>	<b>Folgen der Kernentmischung für die Filterbemessung und für die Kernstabilität.....</b>	<b>116</b>
6.1	Zur Einführung.....	116
6.2	Einfluss der Entmischung auf die Filterbemessung.....	117
6.2.1	Notwendigkeit der Anordnung von Filtern.....	117
6.2.1.1	Filter zwischen dem Kern und dem Meeresboden.....	117
6.2.1.2	Filter zwischen dem Kern und der Deckschicht.....	119
6.2.2	Bemessung der Filter am Beispiel eines an der Küste von Sylt zu bauenden Mole.....	120
6.2.2.1	Bemessung des Mineralkornfilters zwischen dem Kern und dem Meeresboden.....	122
6.2.2.2	Bemessung des Filters zwischen dem Kern und der Deckschicht.....	129
6.3	Einfluss der Entmischung auf die Molenstabilität.....	130
6.3.1	Definition der Molenstabilität.....	130
6.3.2	Versuchsbeschreibung.....	135
6.3.3	Versuchsergebnisse.....	136
6.4	Zusammenfassung von Kapitel 6.....	140
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>142</b>
7.1	Experimentelle Untersuchungen.....	142
7.2	Anwendung der Ergebnisse und Ausblick.....	144

**Literatur**.....147

**Inhaltsverzeichnis der Anhänge**.....A - 1

Anhang 1: Untersuchung des Einflusses von Versuchsparameter  
anhand der Körnungslinien und der charakteristischen Werten.....A - 2

Anhang 2: Versuchsreihe I, Darstellung, Auswertung, Berechnung  
der Widerstandbeiwerte der Steine.....A - 10

Anhang 3: Filterbemessung.....A - 17

Anhang 4: Versuchsergebnisse zum Vergleich der Stabilität unter  
Wellenbelastung von homogenen mit entmischten Kernen.....A - 29

## Kurzfassung

Der geschüttete Wellenbrecher wird seit Jahrhunderten mit zumeist einfachen Einbaumethoden für den Schutz von Häfen und Küsten gebaut. Der Querschnitt des Wellenbrechers resultiert aus jahrelangen Erfahrungen, die allerdings nicht durch wissenschaftliche Erkenntnisse abgesichert sind. In der Natur sind immer wieder erhebliche durch Stürme verursachte Schäden an den Bauwerken festzustellen, die hohe Kosten verursachen.

Der Schwerpunkt des Dissertationsvorhabens liegt auf dem Aufbau eines mit Hilfe von Hinterkippern geschütteten Molenkerns. Bei dieser in der Praxis überwiegend eingesetzten Einbaumethode wird zwar eine Entmischung des Kernmaterials erwartet, allerdings ist die genaue Verteilung des Materials im Kern unbekannt.

Zur Erforschung der Entmischung sind in der Versuchshalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt wurden. Der Kernaufbau wird anhand von experimentellen Modellversuchen in drei verschiedenen Maßstäben analysiert. Das gebrochene Kernmaterial wird mit einer Kippeinrichtung, die den Hinterkipper modelliert, in das ruhende Wasser eines Versuchsbeckens geschüttet.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Molenkern im Vergleich zum ursprünglichen Schüttgut erheblich entmischt ist. Die Entmischung ist kontinuierlich über die Höhe des Molenkerns verteilt. Dabei wird der Kern von oben nach unten immer größer. Am Meeresboden ist das Kernmaterial am größten. Versuche, die Entmischung durch Veränderungen der Einbauparameter (z.B. Fallhöhe etc.) zu verringern, zeigen keine Verbesserung des Kernaufbaus. Als Zwischenergebnis ist festzustellen, dass eine Entmischung bei der untersuchten Einbaumethode stets auftritt.

Zur theoretischen Erklärung der Entmischung wird der Fallvorgang von Einzelsteinen verschiedener Größe anhand eines Kräfte Modells beschrieben. Geschwindigkeitsmessungen auf der Böschung von Einzelsteinen und Steinen innerhalb von Schwärmen zeigen eine hohe Übereinstimmung des theoretischen Modells mit den realen Vorgängen bei der Unterwasserschüttung. Die theoretische Erklärung der Entmischung trägt wesentlich zum besseren Verständnis der Vorgänge bei.

Die bisherigen Erkenntnisse über die Entmischung des Molenkerns lassen sich unmittelbar auf die Bemessung der beiden Filter Kern/Meeresboden und Kern/Deckschicht sowie auf die Überprüfung der hydraulischen Stabilität des Gesamtbauwerkes anwenden.

Die praktische Bedeutung der Forschungsergebnisse besteht darin, dass bisher beim Entwurf bzw. der Planung von Wellenbrechern stets von homogenen Kernen ausgegangen wird. Diese Annahme führt zu einer eingeschränkten Nutzung der Kerneigenschaften, in der eine der Hauptursachen für auftretende Schäden zu sehen ist. Die praktische Umsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit besteht in dem Nachweis der Entmischung und einem besseren Verständnis der Vorgänge, die zum einen die Planungsgrundlage von Wellenbrecherkernen verbessern und zum anderen einen Beitrag zur Ermittlung von neuen Bemessungskriterien liefern sollen.

## **Abstract**

Rubble mound breakwaters are built since centuries to protect harbours and coastlines. Very basic construction methods were commonly used. The designed structure is mostly a result of long-term non-scientific experience. Storm events are repeatedly leading to failure of these structures resulting in costly rehabilitation measures.

The focus of this thesis is on the land-based buildup of the core of a rubble mound breakwater by dumping truck. Using this common method, rock size separation (segregation) is expected but the resulting distribution within the structure is unknown.

Experimental research on rock separation has been conducted in the hydraulic laboratory of the Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft of Technische Universität Berlin. The resulting core structure of broken rock dumped in a still water basin has been studied on three model scales.

The resulting core structure is substantially graded by size. The segregation prevails over the complete core structure from coarse material at the base to fine material in the upper sections. Measures to diminish this segregation by variation of the dumping process parameters (e.g. dumping depth) showed no improvement on the structure's composition. As a preliminary result it can be stated, that the segregation is inevitable and now well known.

A force model is used for the theoretical approach of single rocks of different sizes. The calculated velocities of single rocks on an underwater slope displayed a high degree of accuracy. This theoretical approach contributes to a better understanding of the physical process.

The presented conclusions are applied to define a breakwater's filter layers: core/base and core/armour as well as to check out the structure's overall hydraulic stability.

It is shown, that the common general assumption of a homogenous grain size distribution in the core is unjustified and results in reduced usability and possible damages. The presented results prove the relevance of rock size segregation and contribute to the better understanding of the physical process. Based on these results, the design of breakwaters can be improved.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Geschüttete Wellenbrecher werden seit Jahrhunderten gebaut. Für den Einbau des Kerns stehen vielfältige Einbauverfahren zur Verfügung. In der Praxis hat sich bei der Landbauweise der Einsatz von Hinterkippern und bei der wasserseitigen Schüttung der Einsatz von Schuten bewährt. Die Wahl des Bauverfahrens beeinflusst direkt die Struktur des geschütteten Wellenbrechers und insbesondere die seines Kerns. Am Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau der TU Berlin beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe mit unterschiedlichen Bauverfahren von Steinschüttungen. Ziel der Forschung ist es, den Aufbau und die Struktur von Bauwerken aus Steinschüttungen zu beschreiben. Insbesondere laufen Untersuchungen über das Unterwasser-Fallverhalten von Steinschwärmen im freien Fall, auf einer Böschung, durch Fallröhre oder von Einzelkörpern. Diese Arbeit konzentriert sich ausschließlich auf den Einbau von Molenkernen mit Hinterkippern. Obwohl die Schüttung eines Wellenbrechers mit Hinterkippern ein weit verbreitetes Bauverfahren darstellt, ist der daraus folgende Kernaufbau bisher unbekannt. Bruun (1985) vermutet zwar, dass sich das Kernmaterial bei der Schüttung entmischt und somit zu einer heterogenen Struktur des Kerns führt. Allerdings wird das Phänomen der Entmischung in der Literatur nicht weiter behandelt, so dass auch keine Handlungsempfehlungen für die Planung einer Mole aufgrund einer heterogenen Kernstruktur gegeben werden. Der Entwurf einer Mole basiert immer auf der Annahme eines homogenen Kerns. Auch bei Untersuchungen zur Beschreibung der Strömungsprozesse innerhalb eines Wellenbrechers, wie beispielsweise bei Muttray (2000), wird der Kern als homogen angesehen.

Es zwingend notwendig, die Struktur der Wellenbrecher und deren Auswirkungen auf die dauerhafte Stabilität vertiefend zu untersuchen, da in der Natur nach starken Stürmen regelmäßig große Schäden an den Wellenbrechern entstehen. Aus einem verbesserten Erkenntnisstand können dann Schäden prognostiziert und Empfehlungen zu deren Vermeidung abgeleitet werden. Zu diesem Zweck wird die Natur mit Hilfe von experimentellen Modellen nachgebildet, wobei das gesamte Verfahren in Bezug auf die Charakteristika des Modells exakt simuliert werden muss.

Aus dem besseren Verständnis der inneren Vorgänge beim Bau der geschütteten Mole und der daraus resultierenden Struktur des Kerns können die bestehende Lücke in der Literatur

verkleinert werden und die Grundlagen für einen technisch und wirtschaftlich effizienteren Entwurf gelegt werden.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine umfassende Untersuchung der Unterwasserschüttung mit Hinterkippern beim Bau von Molenkernen und der daraus folgenden Entmischung des Kerns. Dabei werden insbesondere die Einflüsse der verfahrensbedingten Parameter, wie z.B. die Schüttiefe untersucht. Die Folgen der Entmischung auf das Gesamtbauwerk werden dargestellt und diskutiert. Als Forschungsansatz werden sowohl experimentelle als auch theoretische Methoden angewendet. Die Ziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Darstellung und Erläuterung der Prozesse bei der Unterwasserschüttung unter Berücksichtigung der verfahrensbedingten Parameter (Bauparameter).
- Schaffung von Grundlagen und Anreizen zur Entwicklung neuer Bemessungskriterien für den Entwurf von Filtern zwischen Kern und Deckschicht und zwischen Kern und Meeresboden.
- Darlegung von Grundlagen für die experimentelle Nachbildung und für die Entwicklung theoretischer und numerischer Modelle zur Beschreibung der hydraulischen Prozesse innerhalb eines mit Hinterkippern geschütteten Wellenbrechers.

Die Ergebnisse der Teilziele sollen ein Beitrag zur Entwicklung neuer Entwurfs- und Bemessungskriterien für geschüttete Wellenbrecher leisten, die mit Hinterkippern errichtet werden.

## 1.3 Gang der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit ist in 7 Kapitel unterteilt.

Zuerst wird der aktuelle Wissenstand über den Bau und den Aufbau eines Wellenbrechers aufgrund einer intensiven Literaturrecherche zusammengefasst. Der Schwerpunkt liegt bei dem Kernaufbau.

Da die theoretischen Grundlagen über die Schüttung des Kernmaterials sich auf Hinweise auf eine mögliche Entmischung beschränken, wird in diesem Kapitel die allgemeine Literatur zum Kernaufbau herangezogen. Es werden die Kriterien zur Wahl des Kernmaterials herangezogen, wie z. B. die Steingröße, Steinform, Gesteinscharakteristika, die Literaturhinweise über eine mögliche Entmischung bei der Schüttung von Molenkernen und eine Erläuterung

der Schadensfälle, welche möglicherweise auf den unplanmäßigen Kernaufbau zurückzuführen sind.

Dann werden die experimentellen Untersuchungen zur Beschreibung der Unterwasser-schüttung vorgestellt: die Vorversuche zur Entwicklung und Festlegung der Versuchsparameter, der Modellaufbau, das Vorgehen bei den Modellversuchen, die untersuchten Bauparameter (die Wassertiefe, die Länge der Fallstrecke in der Luft, die Schüttguteigenschaften wie der Feinkornanteil oder die Ungleichförmigkeitszahl), der Maßstab der Modellversuche (eine Modellfamilie mit drei Maßstäben wurde gebildet) und die Art der Auswertung zur Beschreibung des Kernaufbaus.

Anschließend werden die ermittelten Versuchsergebnisse dargestellt, erläutert und zusammengefasst. Die Kernstruktur wird quantitativ ermittelt, indem jeder Kernaufbau anhand von 6 Körnungslinien und ihrer charakteristischen Werte beschrieben wird. Der Einfluss der untersuchten Bauparameter wird über den Vergleich der Ergebnisse von Versuchen mit unterschiedlichen Bedingungen überprüft. Abschließend wird die Übertragbarkeit des Modells auf die Natur erörtert.

Der Vorgang der Schüttung mit Hinterkippen wird theoretisch beschrieben. Mit Hilfe der Betrachtung der Kräfte, die auf den Einzelstein wirken, wird eine Entmischung nachgewiesen. Zur Kontrolle der theoretischen Beschreibung werden experimentelle Untersuchungen herangezogen. Dabei werden Steine unterschiedlicher Größe während ihres Schüttvorganges entlang einer schon vorhandenen Böschung beobachtet.

Es werden Bemessungsempfehlungen zur Filterbemessung des Kerns unter Berücksichtigung der festgestellten Entmischung gegeben. Die Beachtung der Kernentmischung ist bei der Bemessung des Filters zwischen dem Meeresboden und dem Kern, aber auch für den Filter zwischen dem Kern und der Molendeckschicht notwendig. Bei falscher Wahl besteht einerseits die Gefahr des Auftretens einer Erosion im Fußbereich der Mole und andererseits des Versagens der Filterschicht. Weiterhin werden experimentelle Untersuchungen zur Beschreibung des Einflusses der Kernentmischung auf die Stabilität des Wellenbrechers in der Bauphase untersucht und dargestellt. Es handelt sich um Untersuchungen über die Umformung noch ungeschützter Molenkerne unter Wellenbelastung. Dabei werden gut durchmischt aufgebaute Kerne mit entmischten Kernen verglichen. Die Versuche dienen dazu, die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Entmischung bei der Beschreibung der hydraulischen Prozesse im Kern zu klären und zu verdeutlichen.

Im Anschluss werden die experimentellen Ergebnisse zusammengefasst, Hinweise zur Berücksichtigung der Kernentmischung bei der Planung und dem Entwurf von Wellenbrechern werden vorgeschlagen, und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten wird unterbreitet.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Aufbau eines Wellenbrechers

Der Aufbau eines Wellenbrechers besteht generell aus drei Schichten: dem Kern, dem Filter und der Deckschicht (vgl. Abb. 2.1.a und 2.1.b). Die Größe der Steine nimmt von außen nach innen ab.

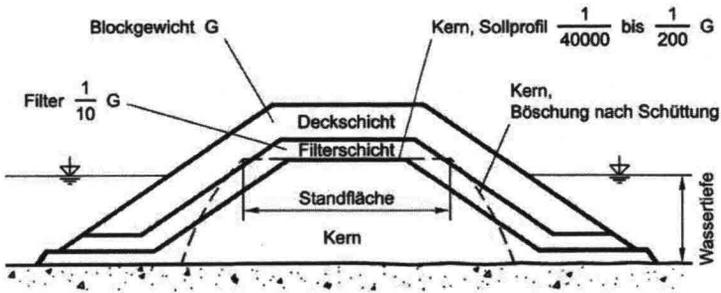


Abb. 2.1.a: Aufbau von Wellenbrechern

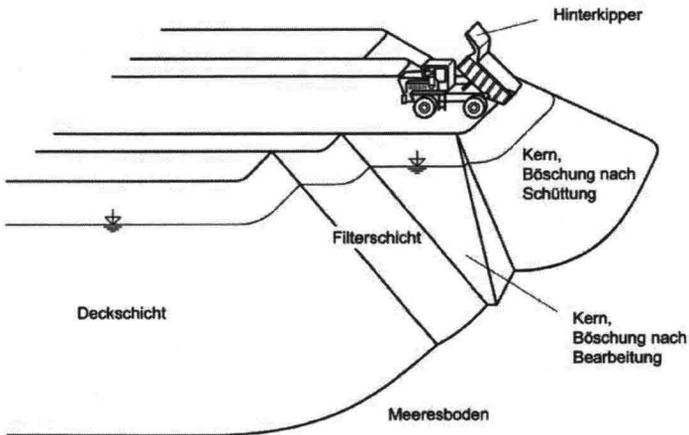


Abb. 2.1.b: Schematische Darstellung des Abkippvorganges

Der Kern von Wellenbrechern wird aus Natursteinen aufgebaut. Diese gewinnt man stets aus Steinbrüchen. Das verwendete Kernmaterial ist ein gebrochenes, kantiges Material. Das Kernmaterial eines schalenartig aufgebauten Wellenbrechers wird mit Schuten verklappt (Seebauweise) oder mit Hinterkippern von Land aus geschüttet (Abb. 2.1) (Landbauweise). Die Schutenverklappung kann nur für denjenigen Teil des Kernes vorgenommen werden, der tiefer liegt als der Tiefgang der beladenen Schute. Die Schüttung erfolgt praktisch meistens bis ca. 3 m unter dem Wasserspiegel. Der Rest des Kernes wird mit anderen Baugeräten aufgebaut. Der Schüttvorgang mit Hinterkippern hat dagegen den Vorteil, dass er für jede Wassertiefe und jede Höhenlage der Kernoberkante geeignet ist. Der Kern muss jedoch eine bestimmte Höhe über den Wasserspiegel haben, damit der Bauvorgang wegen eines zu niedrigen Freibords bei Wellengang nicht abgebrochen werden muss. Nach dem Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000) muss der Freibord mindestens 1,5 m betragen. Der Bau des Kernes mit Hinterkippern bedingt auch eine Mindestbreite des Kernes, damit der Verkehr mit Hinterkippern ermöglicht wird. Die Fahrzeuge müssen Begegnungs- und Wendemöglichkeiten haben. Das Kernmaterial wird in einem Steinbruch gewonnen, auf die Baustelle transportiert und dann in das Wasser geschüttet. Dieses Bauverfahren ist oft wesentlich günstiger als der Bau mit Schuten. Die Seebauweise kann, laut dem Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000, S. 6-25) bis zu 300 % teuer werden als die Landbauweise. Der größte Nachteil der Landbauweise besteht dagegen darin, dass die Liniennaubauweise nur am jeweiligen Ende der auf dem Kern befindlichen Baustrasse Fortschritt erzielt. Bei dem Bau mit Schuten kann dagegen an mehreren Stellen gleichzeitig gearbeitet werden.

In der internationalen Forschung wurde der Einbau des Kernmaterials bisher weit weniger erforscht als die Eigenschaften der Deckschicht und der Filterschicht, wie Hedges (1984) berichtet. Demzufolge gibt es auch nur wenige Veröffentlichungen in diesem Forschungsfeld. Beispielsweise werden im Shore Protection Manual (2001) nur das Kernmaterial und der Kernaufbau beschrieben, dagegen sind alle Aussagen über die Stabilität des Wellenbrechers auf die Deckschicht und den Filter beschränkt. Die Bedeutung des Kernes zeigt sich an den wichtigen Aufgaben, die er im Bauwerk übernimmt. Der Kern bildet:

- das Fundament und den Füllkörper des Bauwerkes und die Aufstandsfläche für den Bau der Deckschichten,
- eine Sperre für die Übertragung der Wellenenergie und
- 50 bis 80 % des Volumens des Wellenbrechers.

Beispielsweise entsprachen beim Bau des Wellenbrechers von Zeebrugge die Kosten für die Herstellung des Kerns ungefähr 50% der Kosten des Gesamtbauwerks (vgl. Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000)).

## 2.2 Anforderungen an das Kernmaterial

Es gibt keine Normen über das Schüttgut, welches für den Kern verwendet wird, sondern nur Empfehlungen. Bei der Suche nach geeignetem Kernmaterial müssen vom Planer folgende vier Fragen beantwortet werden:

### **Welche Steinformen gibt es in den Steinbrüchen der Umgebung?**

Beim Einsatz von langen oder flachen Steinen besteht die Gefahr, dass sich große Hohlräume beim Einbau bilden können, die insbesondere unter der Einwirkung von Wellen zu erheblichen Setzungen führen, und dass die Einzelsteine zerbrechen. Daher empfehlen Fookes und Poole (1981), für den Kern nur Steine zu benutzen, bei denen das Verhältnis der maximalen Länge zur minimalen Länge nicht größer als 2,5 beträgt. Nach dem Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000) sollten nicht mehr als 5% der Steine ein Achsenverhältnis von 3:1 überschreiten. Die in der Literatur bekannten strengste Anforderung definieren Barlow und Briggs (1984) mit einem maximalen zulässigen Achsenverhältnis von 2:1. Diese Anforderung wird deswegen als maßgebend für diese Arbeit gewählt.

Für die Beurteilung der Eignung der Form von Steinen zur Modellierung des Kernmaterials werden in dieser Arbeit die Achsenlängen nach der Definition von Zingg definiert. Ihre Verhältnisse werden in einer Klassifikation nach Zingg (vgl. Kapitel 3.3.2) eingetragen. Zingg (1935) hatte das Ziel, die Form von Geröll unabhängig von seiner Größe zu klassifizieren: An Geröllen mit der Idealgestalt von dreiachsigen, gestreckten oder abgeplatteten Ellipsoiden sind drei senkrecht aufeinander stehende Achsen vorhanden. Die große Achse  $l$  (für long) entspricht dem größten Durchmesser, die kleine  $s$  (für short) dem kleinsten Durchmesser eines Gerölls. Dazwischen liegt ein mittlerer Durchmesser  $i$  (für intermediate). Das Achsenverhältnis  $i/l$  zeigt, ob ein Geröll plattig oder stängelig ist. Das Achsenverhältnis  $s/i$  zeigt, ob ein Geröll stängelig oder flachstängelig ist. Wenn bei einer repräsentativen Probe von Steinen eines gegebenen Kernmaterials das Verhältnis  $l/s$  von 2:1 nicht überschritten wird, hat das Schüttgut eine geeignete Form für den Bau eines Wellenbrecherkerns.

### **Hat das Schüttgut die für den Kern erforderlichen Eigenschaften?**

Nach Barlow und Briggs (1984):

- müssen die Steine frei von Rissen und Materialdefekten sein,
- dürfen die Steine beim Einbau nicht brechen; sie müssen in einem Praxistest einen Sturz aus 1,5 m Höhe auf eine Stahlplatte unbeschadet überstehen,
- sollte ihre Trockendichte über  $2,65 \text{ t/m}^3$  liegen (diese sehr strenge Eigenschaft kann in der Praxis nicht immer eingehalten werden),
- muss die Wasserabsorption unter 2% des Trockengewichts liegen und
- wird eine hohe Abriebfestigkeit und Frostsicherheit des Schüttgutes gefordert, da die maritime Umwelt sehr aggressiv ist. Das Material ist physikalischen, chemischen oder biologischen Angriffen ausgesetzt, so dass die hohe Festigkeit eine der wichtigsten Eigenschaften ist. Die Ansprüche an das Steinbruchmaterial sind bei Kernen jedoch nicht so hoch wie bei Außenschalen, denn der Kern ist immer von der Außenschale (dem Filter und der Deckschicht) geschützt.

### **Welche Dichte und Standfestigkeit erreicht das Bauwerk?**

Ein Wellenbrecherkern muss eine Mindestlagerungsdichte haben, um seine Aufgabe zu erfüllen. Bei der Planung von Wellenbrechern wird durch Modellversuche die optimale Kerndichte hinsichtlich Dämpfungsvermögen und Standsicherheit bestimmt.

Es gibt beim Bau von Unterwasserschüttungen nahezu keine Verdichtungsmöglichkeiten. Die Dichte des Kerns kann daher nur mit einer Veränderung der Größe der verwendeten Steine oder der Kornzusammensetzung beeinflusst werden. Bruun und Johannesson (1976) weisen darauf hin, dass mit abnehmender Porosität die Dichte wächst. Hedar (1960) und Hudson (1979) haben allerdings bei ihren Untersuchungen festgestellt, dass eine größere Wasserdurchlässigkeit (große Porosität) die Stabilität des Kernes erhöht. Völlig undurchlässige Wellenbrechern oder Wellenbrecher sind dagegen in ihrer Stabilität gefährdet, weil eine undurchlässige Wand den Wellendruck vergrößert, statt ihn zu absorbieren. Es sind sowohl zu durchlässige als auch vollständig undurchlässige Wellenbrecherbauwerke in ihrer Standsicherheit gefährdet.

Für eine hohe Stabilität des ganzen Bauwerkes wird nach Bruun und Johannesson (1976) ein dicht gelagerter aber gut wasserdurchlässiger Gefügebau empfohlen. Allerdings ist nicht bekannt, wie sich das Material nach dem Abkippen in seinem Abrollvorgang verhält und sich lagert. Die erzielte Dichte des Kernes bleibt inhomogen und dem Zufall überlassen.

### **Sollte es eine untere Grenze für die Steingröße des Kernes geben?**

Zu dieser Fragestellung existiert in der Literatur keine einheitliche Auffassung. Damit der Kern genug Hohlräume hat, empfiehlt Hedges (1984), eine Untergrenze für die Steingrößen vorzuschreiben, ohne dass er selbst eine konkrete Vorgabe empfiehlt. Nach Jensen (1984) gibt es keine definierte Vorschrift für die minimale Steingröße. Nach Fookes and Poole (1981) sollte das kleinste erlaubte Kermaterial eine Masse von mindestens 2 kg haben. Nach Barlow und Briggs (1984) besteht die Gefahr, dass Steine unter 1 kg leicht ausgewaschen werden können. Das Shore Protection Manual (2001) fordert, dass die Masse des feinsten Kernes 1/30 der Masse des größten Kernes nicht unterschreiten darf. Umgerechnet auf den Durchmesser des Kernes entspricht dies einem Verhältnis von 1:3. Diese Begrenzung wird im praktischen Bau fast nie eingehalten. Bruun (1985) fordert, dass der Anteil mit  $D < 6$  mm auf 5% des Kernmaterials beschränkt bleiben sollte. Zusammenfassend: es gibt keine einheitlichen Regelungen über einen Minstdurchmesser für das Kernmaterial.

Es lässt sich nicht vermeiden, dass der Kern während der Bauphase noch nicht von der Deckschicht geschützt wird und daher während der Bauzeit direkt von den Wellen belastet wird. Eine absolute Wellenruhe während des Schüttvorganges herrscht nie, so dass die feinen Bestandteile ausgewaschen werden können.

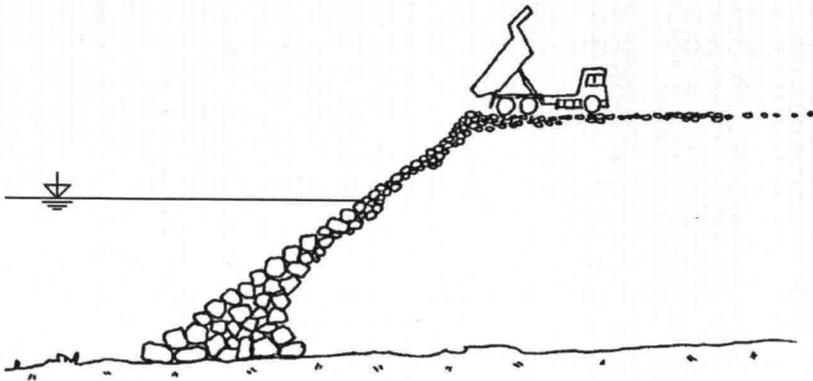
In der Praxis wird ein so genanntes „tout venant“ oder „quarry run“ als Kernmaterial verwendet. Es handelt sich um ein Schüttgut, das durch die Sprengung im Steinbruch entsteht und nicht nachträglich bearbeitet wird. Dabei hängt der kleinste Steindurchmesser von der Art der Sprengung und dem Gestein ab. Der Anteil des feinen Materials kann in einzelnen Steinbrüchen, z. B. bei Tiefengesteinen wie Granit, gering gehalten werden. Bei Sedimentgesteinen, wie Kalkstein, ist er jedoch sehr hoch. Deswegen müsste bei diesem Material der feine Anteil des „quarry run“ ausgesiebt werden, was in der Praxis nur selten geschieht. Hookway und Brinson (1986) berichten, dass bei dem Wellenbrecher von Ras Lanuf in Libyen das feine Material unter 2 kg ausgesiebt worden ist. Der zusätzliche Arbeitsschritt des Aussiebens des Feinkorns führt bei der Herstellung des Kernmaterials zu erheblichen zusätzlichen Kosten.

## **2.3 Entmischung während des Aufbaus des Kernes**

Wie Bruun (1985) vermutet und Pilarczyk und Zeidler (1996) bestätigen, muss sich das Kernmaterial beim Abrollen auf der Böschung entmischen. Die großen Steine rollen schneller als die kleinen (vgl. Abb. 2.2). Das Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering weist in

dem letzten Report von 2000 auch auf die Entmischung hin, ohne allerdings quantitative Angaben zu machen.

Die Entmischung des Kerns wurde bisher vermutet und beobachtet. Sie wurde bisher nicht wissenschaftlich untersucht. Durch die Nichtberücksichtigung der Entmischung des Kerns bei Entwurf und Ausführung besteht bei der Landbauweise die Gefahr, dass die Stabilität des Gesamtbauwerkes gefährdet und die Filterbedingungen zwischen dem Kern und dem Meeresboden nicht eingehalten werden.



**Abb. 2.2: Entmischung des Kernmaterials beim Abrollen,  
nach Bruun (1985, S. 560)**

Eine Entmischung erfolgt bei jedem Abkippvorgang. Es besteht die Gefahr, dass sich das geschüttete Material auf seinem Weg durch das Wasser soweit entmischt, dass die Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit der Bauwerke gefährdet werden:

- Beim Abkippen, lagert sich das grobe Material an der Sohle ab und das feine nur oben. Dieser Aufbau begünstigt das Eindringen des Meeresbodens in die groben Poren des Kernfußes (Suffosion). Die Filterregel wird zwischen dem Meeresboden und dem Kern oder zwischen einer Filterschicht und dem Kern nicht mehr eingehalten. Bei der Bemessung von Filtern bei geschütteten Wellenbrechern ist daher die Entmischung zu berücksichtigen.
- Eine Entmischung des Kernmaterials führt dazu, dass die genaue Kornzusammensetzung des Wellenbrecherkerns unbekannt ist. Die Dichte des Materials ist innerhalb des Kerns nicht homogen und auch nicht ermittelbar, obwohl die Dichte des Kerns eine wesentliche Rolle für die Stabilität des gesamten Bauwerks spielt. Die schon erwähnten Versuche zur Bestimmung der Lagerungsdichte bei der Wellenbrecherplanung müssten alle maßge-

benden Parameter berücksichtigen. Das Kernmaterial ist im stärksten Bereich der Wellenbelastung feiner als das durchschnittliche abgekippte Schüttmaterial. Die Gefahr, dass Material an dieser Stelle ausgespült wird, ist deswegen größer. Die Stabilität des ganzen Bauwerks kann aufgrund der Entmischung gefährdet sein, wenn die Entmischung bei der Planung eines Wellenbrechers nicht berücksichtigt wird.

- Eine Entmischung kann zu größeren Setzungen des Bauwerkes führen, die von der Planung nicht berücksichtigt werden. Zur Kompensation müsste das Bauwerk überhöht ausgeführt werden.

Zusammenfassend: Es lassen sich anhand der Literatur weder für einen idealen Ungleichförmigkeitsgrad der Sieblinie noch für die ideale mittlere Korngröße eines Wellenbrecherkerns eindeutige Regeln finden. Selbst wenn diese Größen gegeben wären, ergäbe sich durch die Entmischung beim Abrollvorgang eine weitere Unklarheit bei der Beurteilung der Sicherheit der Kerne.

Wie bereits erläutert, wurde das Phänomen „Entmischung“ in der Vergangenheit nur vermutet und beobachtet. Eine wissenschaftliche Untersuchung ist jedoch bisher nicht durchgeführt worden, obwohl die Literatur darauf hinweist, dass es in diesem Bereich einen Mangel an Kenntnis gibt (vgl. Kapitel 2.4).

## **2.4 Schäden an Wellenbrechern, die auf den Kern des Wellenbrechers zurückzuführen sind**

Die Ursache von großen Schäden an Wellenbrechern ist nach der aktuellen Literatur häufig auf eine falsche Bestimmung der Bemessungswelle oder auf das Versagen der Deckschicht zurückzuführen. Die Schäden können viele verschiedene Ursachen haben, sie können z. B. durch einen falschen Filtereinbau oder durch die Bauweise bedingt sein, z. B. wenn Dolosse beim Einbau brechen. Das Versagen von Bauwerken bei einem Sturm kann allerdings auch auf die Entmischung des Kerns zurückzuführen sein.

Die folgenden exemplarisch ausgewählten Beispiele zeigen, dass der Kern im Bauwerk bei dem Beschädigungsverlauf nicht vernachlässigt werden darf. Ein zu hoher Feinkornanteil im oberen Teil des Kerns und die daraus resultierende zu geringe Wasserdurchlässigkeit werden in diesen Beispielen als eine Ursache für die aufgetretenen Schäden genannt. Der Feinkornanteil im oberen Teil des Kerns muss nicht auf eine falsche Wahl des Kernmaterials zurückzuführen sein. Eine Entmischung des Kernmaterials während des Baus kann zu einem

größeren Feinkornanteil im oberen Teil des Kernes führen, im Vergleich zu einem homogen gebauten Kern.

#### 2.4.1 Der Wellenbrecher von Arzew el Djedid

Der Wellenbrecher von Arzew el Djedid in Algerien wurde nach Bruun (1985) beim Sturm im Dezember 1980 aufgrund eines zu großen Anteils an feinen Bestandteilen im Kern beschädigt (vgl. Abb. 2.3). Der obere Teil des Wellenbrechers, welcher unter Wellenangriff stand, hatte sich gesetzt. Die feinen Anteile des Kernes sind zunächst in die Filterschicht und dann in die Deckschicht hinein gewaschen worden. Dadurch erfolgten Setzungen, welche die Stabilität des ganzen Bauwerkes gefährdet haben. Diese Erklärung zeigt, dass die Ursache der Beschädigung in der Zusammensetzung des Kernmaterials lag.



Abb. 2.3: Schäden am Wellenbrecher von Arzew el Djedid,  
aus Bruun (1985, S. 674)

#### 2.4.2 Der Wellenbrecher von Mohammedia

Der Hafen von Mohammedia befindet sich in Marokko. Der Bau des Hauptwellenbrechers wurde von Franco et al. (1996), beschrieben. Ihr Kern besteht aus Steinen mit einer Masse zwischen 0 und 2 Tonnen. Es wurde beobachtet, dass der obere Meter des Kernes sehr viel feines Material aufwies. Eine Begründung dafür wäre nach Franco et al. die Entmischung des Materials beim Bau des Kernes. Zwei Monate nach dem Bau wurden schon unterschiedli-

che Setzungen festgestellt. Der obere Meter des Kerns wurde aus diesen Gründen entfernt und wieder neu gebaut. Franco et al. (1996) weisen darauf hin, dass die Stabilitätsprobleme, die aufgrund eines zu hohen Anteils an feinem Material im Wellenbrecherkernen entstehen, besser berücksichtigt werden müssen.

### **2.4.3 Der Hafen von Sines**

Ein Sturm hat im Jahre 1978 im Hafen von Sines, Portugal, zu erheblichen Schäden geführt. Viele wissenschaftliche Einrichtungen haben sich später mit der Suche nach der Ursache dieser Schäden näher beschäftigt. Der Hafen von Sines hat einen der größten Wellenbrecher der Welt. Der ASCE Engineering Research Council (1982) berichtete, dass die Durchlässigkeit des Kernes erheblich geringer gewesen sei als die, welche im Modell untersucht worden ist und laut Vertrag hätte eingebaut werden müssen. Dieses hätte dazu geführt, dass sich im Kern ein größerer Druck als geplant aufbauen konnte. Dieser Druck hätte zur Abhebung der Deckschicht geführt. ASCE (1982) schreibt, dass es ist möglich, dass die geringere Durchlässigkeit durch eine Entmischung des Materials während der Bauphase verursacht worden ist.

Harlow (1980) bestätigt, dass Aufnahmen von dem Wellenbrecher Sines nach dem Sturm von 1978 zeigen, dass feines Material aus dem Kern heraus gewaschen worden ist. Die Wellenbelastung führt im Kern zu dem Aufbau eines hohen Druckes, welcher auf die Deckschicht wirkt. Der Kern wird zu undurchlässig und ist als Unterlage ungeeignet.

### **2.4.4 Schäden an großen Wellenbrechern**

Harlow (1980) berichtet, dass Wellenbrecher mit großem Querschnitt anders bemessen werden sollten als kleinere. Diese Anforderung ergibt sich durch die Tatsache, dass bei großen Wellenbrechern das Verhältnis zwischen dem Volumen des Kerns und der Deckschicht viel größer ist, als bei kleineren.

Die Ursache der Schäden bei großen Wellenbrechern, kann nach Harlow (1980) nicht nur auf die Form der Deckschicht zurückzuführen sein. Er nennt das Beispiel vom Wellenbrecher von Kahului auf Hawaii. Dieser Wellenbrecher hatte ursprünglich eine Deckschicht aus Steinblöcken. Nach erheblichen Schäden wurden die Blöcke durch Tetrapoden ersetzt, später durch Tribars und ein weiteres Mal durch Dolosse. Durch den Einbau der neuen Deckschichten wurde das Problem der Instabilität dieses Wellenbrechers nicht gelöst.

Harlow hält allerdings eine Analyse des Porendrucks (Stärke, Ausbreitungsrichtung) für notwendig, um die Kräfte, die zur Bewegungen führen, zu definieren. Der Feinkornanteil müsste nach Harlow (1980) begrenzt werden.

## 2.5 Zusammenfassung des Kenntnisstandes

Die Literaturhinweise über die Kernentmischung beziehen sich nur auf die Beschreibung von Schäden, die auf eine Kernentmischung beim Kernaufbau zurückzuführen sind. In diesen Fällen ist allerdings der genaue Kernaufbau unbekannt. Weder eine Erklärung über die Ursache der Entmischung noch der Schüttvorgang noch eine Beschreibung des entstehenden Wellenbrecherkernes werden von der Literatur aus diesem Bereich geliefert.

Nur für Böschungen in der Luft, insbesondere beim Straßenbau durch Berglandschaften, ist der Fall von Steinen oder Steinblöcken entlang von Böschungen, mit dem Ziel, die Straßen vor diesen Steinen zu schützen, untersucht und beschrieben worden, Bozzolo (1987). Bei dem Fallvorgang wird der Luftwiderstand als unwesentlich betrachtet und bei der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Außerdem wird nur der Fall von Einzelsteinen oder Einzelblöcken untersucht. Eine Übertragung dieser Erkenntnisse auf den Unterwasseraufbau eines Wellenbrecherkerns ist leider nicht möglich, da die Viskosität des Wassers eine Übertragung einschränkt. Der Unterwassereinbau eines Kerns unterscheidet sich daher von Böschungsschüttungen an der Luft und muss vollständig neu betrachtet werden.

### **3 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung**

Im Mittelpunkt der folgenden Untersuchungen steht die Bauweise des Wellenbrecherkerns. Es zeigt sich, dass allein die Bauweise (in diesem Falle durch den Transport und das Abkippen des Materials mit Hinterkippen) die gesamte Struktur des Kerns bestimmt. Da Naturmessungen einen großen Aufwand erfordern, wurde geprüft, ob Modellversuche herangezogen werden können, um alle Besonderheiten des Bauvorganges zu erkennen.

In diesem Kapitel werden die Versuchsstände beschrieben. Es wird erklärt, wie Maßstäbe, Massen, Körnungslinien, Falltiefen aufeinander abgestimmt wurden. Die im vorliegenden Kapitel beschriebenen Versuchseinrichtung und -durchführung dienen zur Untersuchung der Entmischung des Schüttgutes von Wellenbrecherkernen, die allein mit Hinterkippen hergestellt wurden. Zu diesem Zweck wurde die Natur anhand von physikalischen Modellen im kleineren Maßstab nachgebildet. Das Kernmaterial wurde mit Hilfe einer Kippeinrichtung nach und nach ins Wasser geschüttet. Die im Versuch benutzte Kippeinrichtung entspricht der Ladefläche eines Hinterkippers im entsprechenden Maßstab.

#### **3.1 Vorversuche**

Zur Bestimmung oder Bestätigung der Versuchsparameter des Modells war die Durchführung von Vorversuchen notwendig. Bei den Vorversuchen sind u.a. folgende Parameter zu ermitteln und zu überprüfen:

- der Maßstab des Modells,
- die Anforderungen an den Versuchstand,
- die Mess- und Auswertungsmethoden.

##### **3.1.1 Aufbau der Versuchseinrichtung**

Die Vorversuche erfolgten in dem geometrischen Maßstab 1:15.

Die Unterwasserschüttungen wurden in einem 80 cm tiefen, rechteckigen Becken, welches bis zu der Höhe von 65 cm mit Wasser gefüllt war, durchgeführt. Die Abmessungen des  $4 \times 6 \text{ m}^2$  großen Beckens lassen keine versuchsbeeinträchtigenden Randeinflüsse vermuten. Die gewählte Modellwassertiefe von 0,65 m entspricht einer Wassertiefe von 9,75 m in der Natur ( $15 \cdot 0,65 \text{ m} = 9,75 \text{ m}$ ).

Die Ladefläche des Hinterkippers ist ebenfalls im Maßstab 1:15 nachgebildet. Sie besteht aus einer aus Holz gebauten Kippeinrichtung mit den Maßen  $20 \times 13 \times 33 \text{ cm}^3$  (Breite x Höhe x Länge). In der Natur hätte dieser Hinterkipper die Maße:  $300 \times 195 \times 495 \text{ cm}^3$  (Breite x Höhe x Länge). Die Modellladung hat eine Masse von ca. 11 kg, dies entspricht einer Ladung eines Hinterkippers von ca. 34 t. Im Folgenden wird die mathematische Herleitung des Maßstabes erklärt.

$$M_M = \rho_M \cdot V_M$$

$$M_N = \rho_N \cdot V_N$$

Index <sub>M</sub>	Modell
Index <sub>N</sub>	Natur
M	Steinmasse [kg]
V	Steinvolumen [m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Steindichte [kg/m <sup>3</sup> ]

$\rho$  ist in der Natur genauso groß wie im Modell, das heißt  $\rho_N = \rho_M = \rho$ .

$L_N = 15 \cdot L_M$  Die Länge ist in der Natur 15-mal größer als im Modell (Modellmaßstab 1:15)

$$V_N = 15^3 \cdot V_M$$

$$M_N = 15^3 \cdot M_M$$

$$M_N = 15^3 \cdot 11 \text{ kg} = 3375 \text{ kg} = \text{ca. } 34 \text{ t}$$

Das Schüttmaterial wurde von einer Vorrichtung aus stets aus gleicher Höhe und an gleicher Stelle abgekippt, so dass alle Vorversuche unter den gleichen Abkipppbedingungen wiederholt wurden.

### 3.1.2 Versuchsmaterial

In der Natur wird das Material des Wellenbrecherkernes aus einem Steinbruch durch Sprengung gewonnen. Dieses Schüttgut ist ein gebrochenes, kantiges Material. Für das Modell wurde ein Splitt mit ähnlichen Eigenschaften gewählt. Der Splitt ist handelsüblich, als Baumaterial in den Korngrößen 5 - 8 mm, 8 - 16 mm und 16 - 32 mm zu erhalten. Der gewählte Splitt hat eine raue Oberfläche und eine Dichte (laut Prüfbericht) von  $2710 \text{ kg/m}^3$ . Nach Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000), ist für den Bau von Wellenbrecherkernen eine Dichte von mindestens  $2600 \text{ kg/m}^3$  erforderlich. Das gewählte Schüttgut erfüllt

diese Anforderungen. Ein Splitt dieser Korngröße und dieses Gewichts kann mit der Hand und mit Schaufel und Schubkarre bewegt werden. Dieses vereinfacht die Versuchsdurchführung im Vergleich zu Versuchen, die nur mit Maschineneinsatz (Radlader, Kran, usw.) durchgeführt werden könnten.

Die Größe des handelsüblichen Splitts ergab den Modellmaßstab:

Nach dem British Standard BS 1377 aus Fookes and Poole (1981) können für den Bau eines Wellenbrecherkernes Steine der Größen 75 mm bis 480 mm verwendet werden. Die Größe dieser Steine ist 15-mal größer als die des gewählten Splittes ( $5 \text{ mm} \cdot 15 = 75 \text{ mm}$ ;  $32 \text{ mm} \cdot 15 = 480 \text{ mm}$ ). Damit wurde der Maßstab 1:15 für die Vorversuche festgelegt. Der British Standard BS 1377 bestätigt damit den Maßstab 1:15 für die Vorversuche.

Alle Splittkörner wurden entsprechend ihrer Korngröße eingefärbt. Die gewählte Farbe ist wasserfest. Sie hat eine hohe Abriebfestigkeit und Haftkraft. Die Veränderung der Eigenschaften der Steinoberfläche durch die Farbe war zu vernachlässigen, da die Farbe keinen Film bildet.

Zwei Splittgemische M I und M II zu jeweils 275 kg wurden erstellt. Die Farbe der Einzelkörnungen und die Kornzusammensetzungen der Splittgemische sind in der Tabelle 3.1 erläutert.

Größe der Einzelkörnung	Farbe der Einzelkörnung	Massenanteil in % der Einzelkörnung in dem Splittgemisch	
		Kornmischung M I	Kornmischung M II
5 - 8 mm	ungefärbt	0	20
8 - 16 mm	grün	50	40
16 - 32 mm	rot	50	40

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Kornfraktionen M I und M II

### 3.1.3 Versuchsreihe, Versuchsdurchführung

Für die Beobachtung der Böschungsbildung wurden insgesamt 9 Vorversuche durchgeführt, jeweils zwei Versuche mit jeder einzelnen Korngröße sowie mit der Kornmischung M I. Mit dem Korngemisch M II erfolgte ein weiterer Versuch. Bei all diesen Versuchen wurden die Versuchsbedingungen beibehalten.

Der technische Ablauf der Vorversuche wird im Folgenden beschrieben:

- Das Becken wurde mit Wasser gefüllt.
- Das Kernmaterial wurde von der Kippeinrichtung in Chargen in das Becken geschüttet. Insgesamt wurden 25 Ladungen abgekippt.
- Das Becken wurde langsam entleert, so dass es zu keiner nachträglichen Bewegung des Molenkernmaterials durch abfließendes Wasser kam.
- Die beim Schüttvorgang entstandene Böschung wurde vermessen.

### 3.1.4 Versuchsauswertung

Von jeder abgekippten Böschung wurden mit Hilfe eines Zollstockes, einer Wasserwaage sowie eines 2-schenkligen verstellbaren Winkelmessers, folgende Größen der entstandenen Böschungen gemessen und ermittelt (vgl. Abb. 3.1):

- die Höhe  $H$ ,
- die Länge  $L$ ,
- die Breite  $B$ ,
- der linke, rechte Winkel und Frontwinkel  $\alpha_L$ ,  $\alpha_R$ ,  $\alpha_M$ , (vgl. Abb. 3.1).

Per Augenschein wurde die Ablesegenauigkeit  $\pm 1$  cm für die Längen und  $\pm 1^\circ$  für die Winkel geschätzt.

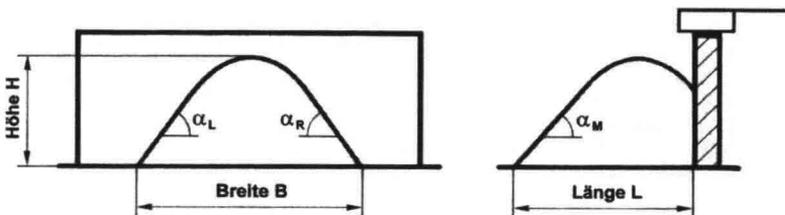


Abb. 3.1: Gemessene Größen nach der Ausbildung einer Böschung

Während der Durchführung der Vorversuche wurde der Böschungsaufbau beobachtet, um eine vermutete Entmischung zu erkennen. Diese Beobachtung erfolgte zuerst unter der besonderen Betrachtung des Abkippvorganges des Schüttmaterials. Die entstandenen Böschungen wurden, nachdem das Wasser aus dem Becken abgelassen wurde, mit einer Schaufel in horizontalen Schichten abgetragen. Die horizontalen Schichten wurden fotografiert. Diese Art der Auswertung der Entmischung war ausschließlich qualitativ.

Die Fotos wurden untereinander verglichen. Diese Auswertungsart wurde nur für die Vorversuche angewendet, damit das Phänomen der Entmischung sichtbar gemacht werden konnte. Für die weiteren Versuche wurden andere Auswertungsmöglichkeiten mit dem Zweck einer quantitativen Auswertung der Entmischung entwickelt.

### 3.1.5 Versuchsergebnisse der Vorversuche

Die Versuchsergebnisse der Vorversuche sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Die Böschungswinkel  $\alpha_R$  und  $\alpha_L$  sind in dem Wert  $\alpha_S$  gemittelt (vgl. Abb. 3.1, der Index S steht für Seite).

Korngröße 5 - 8 mm	Höhe H in cm	Breite B in cm	Länge L in cm	$\alpha_L$ in °	$\alpha_R$ in °	$\alpha_M$ in °
Versuch 1	45,0	135,5	95,0	37,0	38,0	35,0
Versuch 2	45,5	133	95,0	37,5	37,0	35,0
Mittelwert	45,25	134,25	95,0	$\alpha_S = 36,2$		35,0
Korngröße 8 - 16 mm						
Versuch 3	44,5	128,0	92,5	34,0	40,0	38,0
Versuch 4	46	131,0	92,5	38,0	38,0	37,0
Mittelwert	45,25	129,5	92,5	$\alpha_S = 37,5$		37,5
Korngröße 16 -32 mm						
Versuch 5	47,0	127,5	92,0	45,0	40,0	41,0
Versuch 6	48,0	125,0	90,0	43,5	45,0	43,0
Mittelwert	47,5	126,75	91,0	$\alpha_S = 43,4$		42,0
Kornmischung M I						
Versuch 7	46,0	129,0	89,0	39,5	40,0	41,0
Versuch 8	45,0	129,0	89,0	41,0	39,5	
Mittelwert	45,5	129,0	89,0	$\alpha_S = 40,0$		41,0
Kornmischung M II						
Versuch 10	47,0	125,0	89,0	41,0		39,0

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Vorversuche

Eine Zusammenfassung der Mittelwerte findet sich in Tabelle 3.3.

Aus den Ergebnissen der Vorversuche können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Die Böschungswinkel vergrößern sich mit zunehmender Korngröße, d.h. die Böschung wird steiler.
- Bei den Korngemischen M I und M II beträgt der Böschungswinkel  $40^\circ \pm 1^\circ$ . Die genaue Kornzusammensetzung innerhalb einer Kornfraktion hat keinen messbaren Einfluss auf den Böschungswinkel.

Korngröße [mm]	Anzahl der Versuche	Höhe H [cm]	Breite B [cm]	Länge L [cm]	$\alpha_s$ [°]	$\alpha_M$ [°]
5 - 8	2	45,2	134,2	95,0	36,2	35,0
8 - 16	2	45,2	129,5	92,5	37,5	37,5
16 - 32	2	47,5	126,7	91,0	43,4	42,0
Mischung M I	2	45,5	129,0	89,0	40,0	41,0
Mischung M II	1	47,0	125,0	89,0	41,0	39,0

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Vorversuche, Mittelwerte

In Abb. 3.2 ist exemplarisch ein horizontaler Schnitt durch eine Böschung der Mischung M I dargestellt.

Die Kornzusammensetzung der Böschung ist nicht homogen. Es entsteht eine Entmischung innerhalb der Böschung. Am Böschungsfuß in der unteren Schicht sowie an der Oberfläche der Böschung lagern sich die größeren Steine der Mischung ab (helle Steine). Der innere Teil der Böschung besteht dagegen aus feinerem Material (dunklere Steine). Abb. 3.2 zeigt, dass eine quantitative Auswertung der Versuche erforderlich ist.



Abb. 3.2: Horizontaler Schnitt bei 10 cm Höhe durch eine Böschung der Mischung M I

Folgende Erfahrungen wurden aus der praktischen Durchführung der Vorversuche gewonnen:

- Der Versuchsaufwand ist durch die große Menge an Material sehr hoch. Diese muss bei jedem Versuch bewegt werden. Jede Möglichkeit zur Verringerung dieses Aufwandes und damit der Materialmenge muss ausgenutzt werden.
- Der Versuchsmaßstab führt zu versuchstechnisch gut handhabbaren und somit vernünftigen Steingrößen. Er wurde für die weiteren Versuche beibehalten. Bei der Durchführung der Versuche mit einem feineren Material wäre die Versuchsdurchführung zwar weiter vereinfacht gewesen, aber es würde die Gefahr entstehen, dass das Schüttmaterial die Eigenschaften von Sedimenten annehmen würde. Sedimente verhalten sich anders als Steine. Auf der anderen Seite würden größere Maßstäbe zu komplizierteren und aufwändigeren Versuchen führen. Die zu bewegenden Massen wären viel größer. Dadurch würde sich die Durchführungsdauer der Versuche erheblich verlängern.
- Die Kippeinrichtung entspricht einem guten und handlichen Modell eines Lkws. Sie wurde ebenfalls für die weiteren Versuche verwendet (vgl. Abb. 3.5).
- Die Farbe wurde weder bei Schütt- noch bei Siebvorgängen abgestoßen. Die Farbe stellt eine große Hilfe bei der qualitativen Auswertung der Entmischung des Schüttmaterials dar. Das Schüttmaterial wurde für die weiteren Versuche ebenfalls gefärbt.
- Eine quantitative Auswertung ist zur Beschreibung der Entmischung notwendig.

## **3.2 Versuchseinrichtung und Auswertungsverfahren für die Versuche**

Mit den aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen konnten weitere Versuche geplant werden.

Folgende Fragen sollen durch die Untersuchungen beantwortet werden:

- Entmischt sich das Schüttmaterial während seines Fallweges im Wasser?
- Wovon hängt diese Entmischung ab und von welchen Randbedingungen kann sie beeinflusst werden?

Aus den Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen gesucht, die die Entmischung vermindern oder verhindern sollen.

Die Versuche erfolgten in drei verschiedenen Maßstäben. Diese bilden eine Modellfamilie. Sie dient zur Kontrolle der erhaltenen Ergebnisse und Phänomene und zur Übertragung der Versuchsergebnisse auf den Naturmaßstab. Zu der Modellfamilie gehören die Versuche im einfachen Maßstab 1:15, im zweifachen Maßstab 2:15 und im vierfachen Maßstab 4:15.

### 3.2.1 Versuchseinrichtung

Eine Übersicht über das Versuchsbecken und der komplette Versuchsstand sind in Abb. 3.3 und 3.4 dargestellt.



Abb. 3.3: Übersicht über das Versuchsbecken

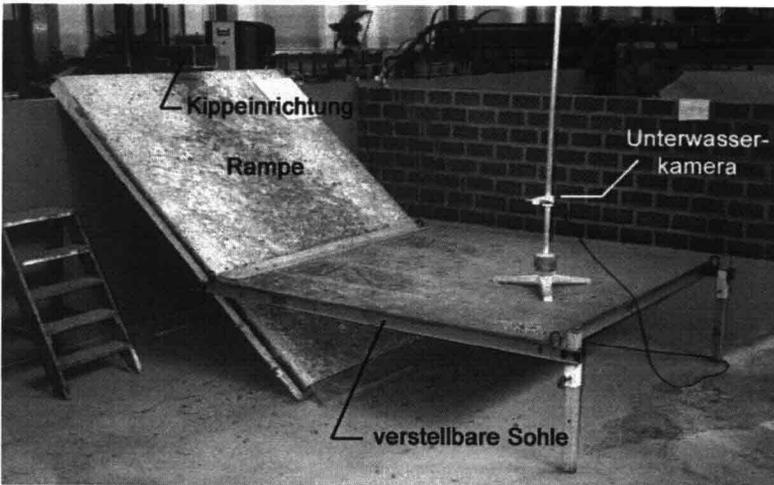
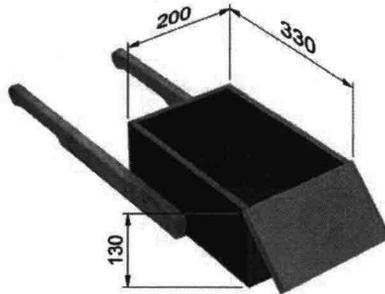


Abb. 3.4: Versuchsstand

Der Versuchsstand wurde im Maßstab 1:15 errichtet. Er wurde in einem 1,50 m tiefen Becken durchgeführt. Das Becken wurde ursprünglich nicht für diesen Versuchszweck gebaut. Es war bereits in der Versuchshalle am Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau der TU Berlin vorhanden. Das Becken kann bis zu einer Wassertiefe von 1,30 m gefüllt werden. In diesem Modell konnte daher der Aufbau von Wellenbrecherkernen bis zu einer Wassertiefe von 22,5 m ( $1,30 \text{ m} \cdot 15 = 22,5 \text{ m}$ ) modelliert werden.

Das Becken ist 9 m lang und 7 m breit. Die Versuche konnten in dem Becken erfolgen, ohne dass ihre Ergebnisse von einem eventuellen Randeinfluss verfälscht wurden.

Die maßstabsgerechte Kippeinrichtung (vgl. Abb. 3.5), die für die Vorversuche als Modell für die Ladefläche eines Hinterkippers gebaut wurde, wurde für die weiterführenden Versuche übernommen.



**Abb. 3.5: Kippeinrichtung als Modell für die Ladefläche eines Hinterkippers (Maße in mm)**

Eine Rampe mit einem Winkel von  $40^\circ$  wurde in das Becken eingebaut. Der eingestellte Winkel von  $40^\circ$  entspricht dem gemessenen mittleren natürlichen Winkel, der sich bei den Vorversuchen für die unter Wasser gebauten Böschungen durchschnittlich eingestellt hatte (vgl. Kapitel 3.1.5). Diese Messungen erfolgten mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 1^\circ$ .

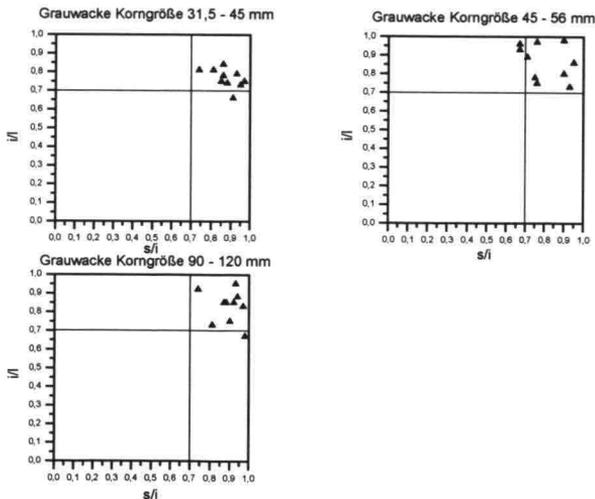
Die Rampe ist eine Art „Vorböschung“. Sie hat die Aufgabe, Versuchsmaterial sowie den Aufwand bei der Versuchsdurchführung einzusparen. Die Rampe besteht aus einem Stahlrahmen mit einer Waschbetonoberfläche. Der Waschbeton wurde auf eine Betonplatte gegossen. Die Rampe hat damit eine raue Oberfläche. Die Grobkörnung des Waschbetons besteht aus dem Versuchsplitt der Körnung 2 - 45 mm. Sie entspricht der Körnung des Schüttmaterials im Maßstab 1:15.

Ein Ziel dieser Untersuchungen war es festzustellen, wann sich das Schüttmaterial während der Schüttbewegung entmischt und ob diese Entmischung von der Wassertiefe bzw. von der Gesamtfalltiefe abhängt. Zu diesem Zweck war die Falltiefe im Becken variierbar. Die Installation der festen Abkipfstelle musste beibehalten werden; daher wurde eine horizontale Sohle an der Rampe montiert. Diese Sohle konnte vertikal verstellbar (vgl. Abb. 3.4) und an der Rampe befestigt werden, so dass der Fußpunkt zwischen Rampe und Sohle variierbar war.

### 3.2.2 Versuchsmaterial als Modell für das Kernmaterial

Als Versuchsmaterial wurde eine Grauwacke der Körnung 2 - 45 mm gewählt. Es handelt sich, wie bei den Vorversuchen, um ein gebrochenes, kantiges Material. Dieses Material erfüllt die im Folgenden beschriebenen, notwendigen Anforderungen an die Form und die Dichte eines für den Bau von Wellenbrecherkerne geeigneten Schüttmaterials (vgl. Kapitel 2.2).

Die Form wurde anhand der Achsenverhältnisse nach Zingg (1935)  $i/l$  (Länge der mittleren Achse / Länge der längsten Achse) und  $s/i$  (Länge der kürzesten Achse / Länge der mittleren Achse), mit Hilfe einer repräsentativen Probeentnahme von Steinen kontrolliert. Die Probe besteht aus 100 Steinen. Die daraus ausgerechneten Achsenverhältnisse wurden in einem Diagramm nach Zingg eingetragen, vgl. Abb. 3.6.



**Abb. 3.6: Diagramm nach Zingg für eine repräsentative Probeentnahme des Versuchsmaterials, Beispiel für Steine aus drei Kornfraktionen**

Aus dieser Probeentnahme hatten alle Steine das erforderliche Achsenverhältnis nach Barlow und Briggs (1984) von 2:1 nicht überschritten, so dass deren Anforderungen erfüllt sind.

Die verwendete Grauwacke hat eine Dichte von  $2760 \text{ kg/m}^3$ , so dass die Mindestdichte des Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000) von  $2600 \text{ kg/m}^3$  ebenfalls erfüllt ist.

Damit ist gewährleistet, dass die gewählte Grauwacke die in der Literatur bekannten Anforderungen an das Schüttmaterial von Wellenbrecherkernen erfüllt. Sie ist somit für die Versuchszwecke geeignet.

### 3.2.3 Vorbereitung des Schüttmaterials

Das Schüttmaterial wurde anhand seiner Körnungslinie charakterisiert. Die Körnungslinie wurde aus den einzelnen Kornfraktionen zusammengestellt.

Die Erstellung der Körnungslinie erfolgte in folgenden Arbeitsschritten:

- Waschen des Versuchsmaterials, damit die für die Färbung der Steine gewählte Farbe an ihrer Oberfläche haftet.
- Separieren des Ausgangsmaterials in Kornfraktionen durch Sieben. Das Sieben erfolgte mit einer Siebmaschine. Sie besitzt einen Siebsatz und einen Rütteltisch (vgl. Abb. 3.7).

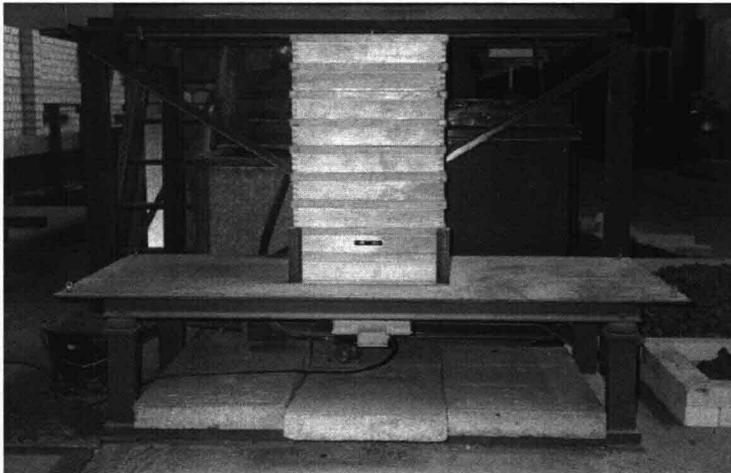


Abb. 3.7: Siebmaschine zur Trennung der einzelnen Kornfraktionen

Die Kornfraktionen sind nach DIN 10204 definiert. Für ein Versuchsmaterial mit den Größen zwischen 2 und 45 mm ergeben sich folgende Fraktionen:

<b>Kornfraktion in mm</b>	2 - 8	8 - 11,2	11,2 - 16	16 - 22,4	22,4 - 31,5	31,5 - 45
<b>Farbton</b>	ungefärbt	gelb	rot	grün	blau	violett

**Tabelle 3.4: Kornfraktionen nach DIN 10204 und gewählte Farbtöne für das Schüttgut zwischen 2 und 45 mm**

- Einfärben der Kornfraktionen: Dieser Vorgang fand in einem Betonmischer statt. Die Qualität der verwendeten Farbe war die gleiche wie die bei den Vorversuchen. Die Farbgebung ist in der Tabelle 3.4 zusammengefasst.
- Zusammenstellung der gewünschten Körnungslinie: Die notwendigen Fraktionen wurden abgewogen und zum Schüttgut oder -material vermischt. Die Vermischung erfolgte mit einer Handschaufel. Die gewählten Körnungslinien werden in Kapitel 3.3 bei der Beschreibung der Versuchsreihen dargestellt.

### **3.2.4 Fehlerquellen bei der Erstellung einer Körnungslinie**

Bei der Erstellung der Körnungslinie oder beim Sieben oder Abwiegen der Kornfraktionen sind verschiedene Fehlerquellen möglich. Es besteht die Gefahr, dass nicht alle Steine bei der richtigen Kornfraktion ausgesiebt wurden. Beim Abwiegen sind die Ablesegenauigkeit und Messgenauigkeit der Waage zu betrachten.

Der Vergleich eines probeweise nachgesiebten Schüttgutes von 6 kg (hier Ist-Körnungslinie genannt) mit einer aus den Ergebnisprotokollen aus Einzelwerten zurückgerechneten Körnungslinie und der Soll-Körnungslinie zeigt (vgl. Abb. 3.8), dass die Abweichung zwischen der Soll- und der zusammengestellten Ist-Körnungslinie maximal 5% beträgt. Der maximale Fehler tritt bei der untersuchten Körnungslinie bei einem Korndurchmesser von 8 mm auf. Der Fehler von 5% wird als größtmögliche Ungenauigkeit, die bei der Erstellung einer Körnungslinie auftreten kann, angenommen.

Daraus folgt, dass ein Unterschied zwischen zwei Ergebnissen von 5% auf den Fehler bei der Auswertung oder bei der Erstellung der Körnungslinie zurückgeführt werden kann. Diese Ungenauigkeit verringert sich allerdings bei größeren Korngrößen.

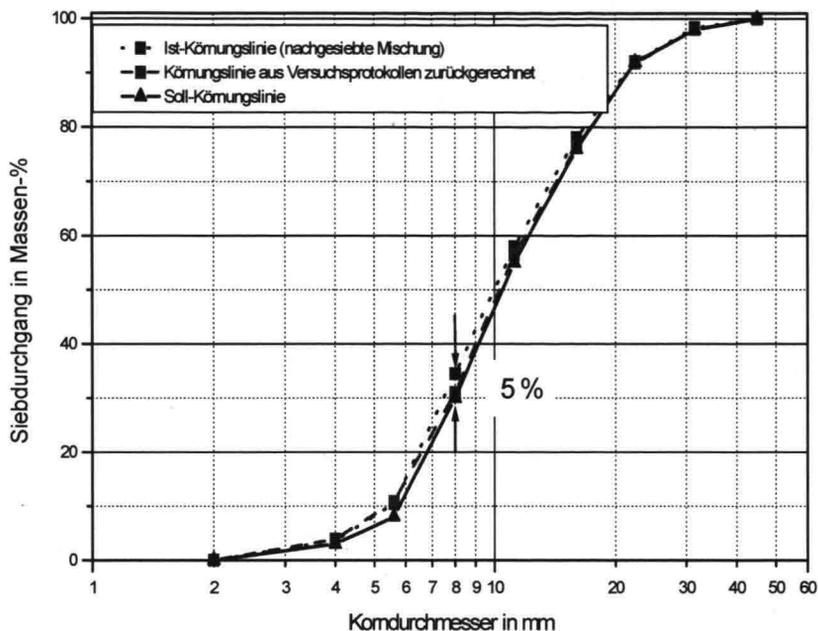


Abb. 3.8: Ist-, Sollkörnungslinie und aus Versuchsprotokollen zurückgerechnete Körnungslinie.

### 3.2.5 Versuchsdurchführung

Die Landbauweise eines Molenkernes wurde folgendermaßen im Modellversuch durchgeführt:

- Das Becken wurde bis zu der gewünschten Tiefe mit Wasser gefüllt.
- Die Unterwasserböschung als Modell für einen Molenkern wurde mit Hilfe der Kipp-einrichtung als Modell für den Lkw geschüttet. Der Schüttvorgang wurde beispielsweise für einen 200 kg schweren Kern, in Chargen von 10 kg 20 Mal wiederholt.
- Zur Untersuchung der Zusammensetzung der Böschung wurde das Wasser aus dem Becken durch einen Bodenauslass und mit Unterwasserpumpen langsam entleert.
- Nach Entleerung des Beckens wurden die einzelnen Schichten der Böschung abgetragen und dann untersucht.

## 3.2.6 Versuchsauswertung und Darstellung

### 3.2.6.1 Versuchsauswertung

Die Auswertung erfolgte in folgenden Prozessschritten:

- Der Abkippvorgang und die Böschungsbildung wurden gefilmt. Dafür wurde zuerst eine analoge Unterwasserkamera installiert. Die Bildqualität zeigte sich allerdings als nicht ausreichend. Auf Grund dessen wurde eine Digitalkamera mit einem wasserdichten Gehäuse verwendet. Sie ermöglichte eine bessere Auflösung der Aufnahmen sowie eine quantitative Auswertung der Schüttvorgänge.
- Die entstehende Böschung wurde nach dem Ablassen des Wassers aus dem Becken in sechs volumengleiche Schichten eingeteilt, vgl. Abb. 3.9.

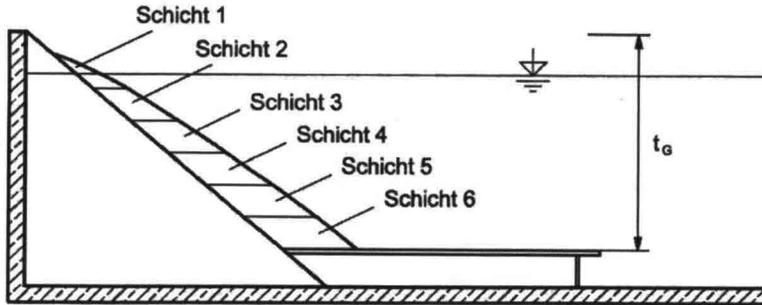


Abb. 3.9: Einteilung der Böschung in 6 volumengleiche Schichten

Volumengleichheit der Schichten bedeutet, dass aufgrund der Böschungsform die Höhe der abzunehmenden Schichten nach unten hin abnimmt. Diese Höhen wurden theoretisch ausgerechnet. Die Geometrie der Böschung wurde näherungsweise durch einen schrägen Kegelstumpf beschrieben. Zur Auswertung wurden die Schichten von oben nach unten per Hand mit einer Schaufel abgenommen. Als Volumenkontrolle diente dabei das Füllmaß eines Behälters, welcher das genormte Volumen einer Schicht beinhalten sollte. Diese Vorgehensweise hat sich für die praktische Handhabung der Auswertung bewährt.

- Der Schichteninhalt wurde mit der Siebmaschine in Kornfraktionen separiert.
- Die abgetrennten Kornfraktionen wurden anschließend gewogen. In diesen Arbeitsschritten wurden die Kornzusammensetzungen der 6 Schichten ermittelt.

Mit diesem Verfahren sind die Kornzusammensetzungen der verschiedenen Böschungen eindeutig charakterisiert.

### 3.2.6.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Nach der Auswertung der Versuche erfolgt die Darstellung der Ergebnisse. Dafür werden der Böschungsaufbau und die Gewichtung der Kornfraktionen anhand von Körnungslinien dargestellt. Zusätzlich erfolgt die Darstellung der Kornfraktionen anhand von Balkendiagrammen. Die charakteristischen Werte werden in Form von Tabellen ermittelt.

#### Körnungslinie

Jeder Böschungsaufbau wurde anhand der Körnungslinien seiner sechs Schichten quantitativ beschrieben. Die 6 Körnungslinien werden in Form eines Diagramms zusammen mit der Körnungslinie des Schüttgutes dargestellt, dadurch ergibt sich eine Vergleichbarkeit der beiden Körnungslinien. Die Entmischung ist anhand dieser Darstellung direkt ablesbar.

#### Masse der Kornfraktionen

Bei der Darstellung der Körnungslinien werden die Massen der Fraktionen als Anteil der Gesamtmasse beschrieben und zu einem Summenparameter zusammengefasst. Änderungen in Fraktionen, deren Anteil an der Gesamtmasse verhältnismäßig gering ist, sind in der Darstellung als Körnungslinie kaum sichtbar. Daher wurden neben den Körnungslinien als Ergebnisauswertung Säulendiagramme benutzt, durch welche die Anteile der Fraktionen an der Materialzusammensetzung deutlicher darstellbar sind.

#### Charakteristische Werte

Aus jeder Körnungslinie wurden charakteristische Werte ausgerechnet. Sie werden in Tabellen ermittelt. Diese Kennwerte werden häufig in der Bodenmechanik verwendet, um die Eigenschaften bzw. die Kornzusammensetzung eines Bodens zu beschreiben. Es sind:

- U Ungleichförmigkeitsgrad;  $U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

$D_x$  ist der Steindurchmesser, der X Massenprozenten der Gesamtmenge einer Körnungslinie entspricht.

- $D_{50}$  mittlerer Korndurchmesser
- C Krümmungszahl;  $C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$

Des Weiteren wurde der Feinkornanteil F dokumentiert. Er entspricht für die Versuche im Maßstab 1:15 den Korngrößen kleiner als 8 mm. In der Natur entspricht dieser Anteil der Steine einer Korngröße kleiner als 120 mm ( $8 \text{ mm} \cdot 15 = 120 \text{ mm}$ ).

### 3.3 Versuchsreihe im kleinen Maßstab 1:15

Im diesem Kapitel werden die Versuchsreihen beschrieben, die im kleinen Maßstab 1:15 durchgeführt wurden. Im Verlauf der Arbeit erfolgten die meisten Versuche in diesem Maßstab, da er eine praktische effiziente Durchführung ermöglichte.

In weiteren Versuchen wurden Maßstäbe der Modellfamilie untersucht, die Maßstäbe 2:15 und 4:15.

Versuchsnummer	Schüttgut				Gesamt- tiefe $t_G$ [m]	Tiefe im Wasser $t_w$ [m]
	Körnungs- linie Maß- stab 1:15	U [-]	Fein- kornan- teil F [%]	Masse M [kg]		
Referenzversuche 5, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	G1	2,1	30	200	0,90	0,70
6	G1	2,1	30	200	0,90	0,70
1, 2, 3, 4	G1	2,1	30	200	1,50	1,30
7	G1	2,1	30	200	0,90	0,85
9	G1	2,1	30	200	0,90	0,80
10	G1	2,1	30	200	0,90	0,50
8	G1	2,1	30	100	0,90	0,70
40	G1	2,1	30	100	0,70	0,50
41	G1	2,1	30	100	0,50	0,30
42	G1	2,1	30	100	0,40	0,20
23, 24, 25, 28	G1	2,1	30	300	0,90	0,70
26, 30, 32	G1	2,1	30	300	1,50	1,30
27	G1	2,1	30	300	1,10	0,90
29	G1	2,1	30	300	1,30	1,10
31	G1	2,1	30	300	1,50	1,50
43	G2	2,1	5	200	0,90	0,70
34, 35	G3	1,6	30	200	0,90	0,70
33	G3	1,6	30	200	1,50	1,30
36, 37, 38, 46	G4	4,1	30	200	0,90	0,70
39	G4	4,1	30	200	1,50	1,30
47	G4	4,1	30	200	0,90	0,70

Tabelle 3.5: Versuchsreihe mit den Körnungslinien G1 bis G4 im  
Maßstab 1:15

Insgesamt wurden 45 Versuche im Maßstab 1:15 durchgeführt. Sie wurden nach dem Zeitpunkt ihrer Durchführung chronologisch nummeriert. Die Versuche wurden nachträglich nach der Art der Versuche neu sortiert, vgl. Tabelle 3.5: zuerst nach der verwendeten Körnungslinie und der Schüttgutmenge und danach nach der Art der Randbedingungen (z. B. gewählte Gesamttiefe oder verwendete Materialmasse).

Der Versuch 5 wurde 13-mal mit dem gleichen Material und den gleichen Randbedingungen (Versuche 5, 11 bis 22) durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu überprüfen.

Im weiteren Verlauf werden die unterschiedlichen Versuchsreihen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf die Kernentmischung erläutert.

### **Schüttgüter**

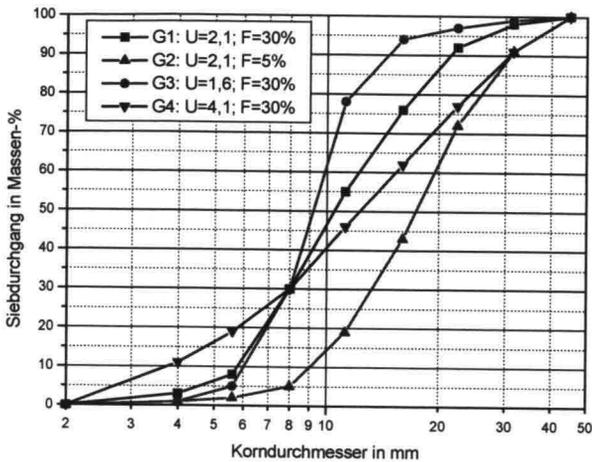
Vier Schüttgüter mit unterschiedlichen Kornzusammensetzungen wurden untersucht. Sie werden G1 bis G4 genannt. Ziel war es zu überprüfen, ob die Kornzusammensetzung einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat.

Die Schüttgüter G1, G3 und G4 haben den gleichen Feinkomanteil von 30%. Sie unterscheiden sich in ihren Ungleichförmigkeitsgraden  $U$ .

- G1:  $U = 2,1$
- G3:  $U = 1,6$
- G4:  $U = 4,1$

Ihre Kornzusammensetzungen sind in Abb. 3.10 dargestellt.

Der Versuch Nr. 43 wurde mit einem weiteren Schüttgut G2 (vgl. auch Abb. 3.10) durchgeführt. Dieses Schüttgut hat den gleichen Ungleichförmigkeitsgrad wie das Schüttgut G1, nämlich  $U=2,1$ . Allerdings beträgt der Feinkomanteil nur 5%. Grund für die Wahl des geringen Feinkomanteils ist die Empfehlung des Shore Protection Manual (2001), diese feinen Bestandteile aus der Körnungslinie zu entfernen bzw. so gering wie möglich zu halten. Es ist zu vermuten, dass die Entmischung durch den geringeren Feinkomanteil vermindert werden kann.



**Abb. 3.10: Körnungslinie der Schüttgüter G1, G2, G3, und G4  
(Maßstab1:15)**

### Schüttmasse

Die Versuche wurden bei identischen Randbedingungen aber unterschiedlichen Schüttmassen durchgeführt. Beim Schüttgut G1 erfolgten Versuche mit 100 kg (Versuch Nr. 8), mit 200 kg (Versuche Nr. 5, 11 bis 22) und mit 300 kg (Versuche Nr. 23, 24, 25, 28). Dieser Unterschied hat ausschließlich eine versuchstechnische Bedeutung. Gesucht wurde eine optimale Schüttmasse. Auf der einen Seite führt die Verwendung von zu großen Materialmassen zu unnötig hohen Werten bei Aufwand und Kosten, auf der anderen Seite können zu geringe Massen zu verfälschten Versuchsergebnissen (z. B. durch den Einfluss der rauen Rampe) führen. Die Böschungsmaterialien mussten bei jedem Versuch vollständig gesiebt werden. Der Siebvorgang und das Abwägen der abgetrennten Kornfraktionen dauerten für eine 100 kg Böschung insgesamt 1,5 Stunden und für eine 200 kg Böschung ca. 3 Stunden. Die folgende Aussage zur Verwendung der Materialmasse wurde getroffen:

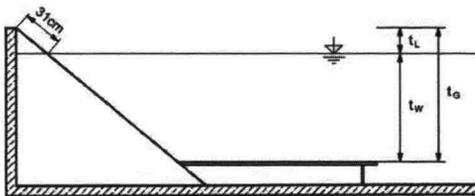
Wenn die Ergebnisse der Versuche mit 100 kg Schüttgut sich von denen der Versuche mit 200 kg unterscheiden, ist die Materialmasse von 100 kg nicht ausreichend.

Wenn sie sich allerdings nicht unterscheiden, dann ist die Materialmasse von 100 kg ausreichend und es ist nicht notwendig, größere Materialmengen für die weiteren Versuche zu verwenden.

Das gleiche gilt für den Vergleich zwischen der Verwendung von 200 kg und 300 kg Schüttgut.

### Die Gesamttiefe $t_G$

Zur Klärung, in wie weit die Entmischung von der Gesamttiefe abhängig ist, wurden Versuche mit unterschiedlichen Tiefen zwischen  $t_G = 0,40$  m und  $t_G = 1,50$  m durchgeführt. Es handelt sich dabei um die Gesamttiefe (vertikale Tiefe) und nicht um die Länge des Weges auf der Rampe. Die Gesamttiefe von 1,50 m entspricht einer Länge von 2,33 m auf der Rampe. Die Einteilung der Tiefen ist in Abb. 3.11 dargestellt.



$t_L$ : Lotrechte Anteil des Fallweges in Luft  
 $t_w$ : Tiefe im Wasser  
 $t_G$ : Gesamttiefe

Abb. 3.11: Einteilung der Tiefen im Versuchsstand

Der Wert  $t_w$  betrug bei allen Versuchen 20 cm weniger als die Gesamttiefe  $t_G$  (d. h. auch 31 cm weniger auf der Rampe), da der Anfang des Schüttvorganges in der Luft erfolgte.

Die Versuche, die zu dieser Untersuchung ausgewertet werden, sind in der Tabelle 3.6 zusammengefasst.

Gesamttiefe $t_G$	0,40 m	0,50 m	0,70 m	0,90 m	1,10 m	1,30 m	1,50 m
G1, 100 kg	42	41	40	8			
G1, 200 kg				5, 11-22			1, 2, 3, 4
G1, 300 kg				23, 24, 25, 28	27	29	26, 30, 32
G3, 200 kg				34, 35			33
G4, 200 kg				36, 37, 38, 46, 47			39

Tabelle 3.6: Falltiefen bei den Versuchen im Maßstab 1:15

### Der lotrechte Anteil des Fallweges in Luft $t_L$

Der lotrechte Anteil des Fallweges des Schüttmaterials durch die Luft  $t_L$  wird durch die Planung der Mole festgelegt. In der Natur muss die Befahrbarkeit des Kernes durch die Hinterkipper gewährleistet sein. Weiterhin muss eine Überflutung der Abkipfstelle verhindert werden, da es sonst zu Wegspülungen von Kernmaterial kommen kann. Der Kern wird mit einer festen Höhe über dem mittleren Wasserspiegel gebaut. Diese Höhe ist durch die Terminplanung und der Anzahl der Arbeitstage bedingt. Zwischen der Gefahr des Wegspülens von Kernmaterial und der Wirtschaftlichkeit des Baus eines Wellenbrechers ist im Einzelfall abzuwägen.

Die Schwankungen des Fallweges durch die Luft während des Wellenbrecherbaus können auch bei fester Kernoberkante nicht vermieden werden. Sie sind auf Wasserspiegelschwankungen wie z.B. den Tideeinfluss zurückzuführen. Bei den beschriebenen Tiefen handelt es sich um vertikal gemessene Strecken.

Bei einer konstanten Gesamttiefe von  $t_G = 0,90$  m wurden vier verschiedene lotrechte Anteile des Fallweges durch die Luft  $t_L$  zwischen 5 cm und 40 cm eingestellt. Ziel war es, einen möglichen Einfluss dieses Parameters auf die Entmischung des Schüttmaterials zu bestimmen. Die Versuche zu dieser Untersuchung sind in der Tabelle 3.7 zusammengefasst. Sie wurden mit 200 kg des Schüttgutes G1 durchgeführt.

<b>Lotrechter Anteil des Weges in Luft <math>t_L</math> in cm</b>	5	10	20	40
<b>Versuchsnummer</b>	7	9	5, 11-22	10

**Tabelle 3.7: Zusammenfassung der Versuche zur Beschreibung des Luftweges im Maßstab 1:15**

### 3.4 Durchführung der Versuche in größeren Maßstäben

Eine Unbekannte bei der Planung bzw. Durchführung von Modellversuchen besteht immer in der Frage, inwieweit die Natur im Modell richtig nachgebildet wird. Dabei sind insbesondere folgende Fragestellungen von Interesse:

- Treten die Phänomene, die im Modell betrachtet werden, auch in der Natur auf?
- Inwieweit kann der Maßstab des Modells auf die in der Natur stattfindenden Phänomene übertragen werden?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde eine Modellfamilie gebildet. Sie besteht aus mindestens drei geometrisch identischen Modellen, mit unterschiedlichen Maßstäben. Wenn eine Übertragung der Ergebnisse innerhalb der Maßstäbe möglich ist, so kann die Annahme getroffen werden, dass die Ergebnisse auch auf einen vierten Maßstab außerhalb des Bereiches der untersuchten Modelle übertragbar sind. Auf diese Art und Weise können Beziehungen zwischen den Maßstäben durch eine mathematische Funktion dargestellt werden.

#### 3.4.1 Versuchsstand und Versuchsdurchführung

Zur Bildung der Modellfamilie wurden Versuche in den Maßstäben 2:15 und 4:15 durchgeführt. Als Schüttgut wurde ebenfalls die Grauwacke wie im Standardversuch im Maßstab 1:15 verwendet. Die Größe der Steine wurde an die Maßstäbe angepasst. Ein Material der

Größe 4 - 90 mm wurde für den Maßstab 2:15 gewählt und der Größe 8 - 180 mm für den Maßstab 4:15.

Die Versuche wurden in demselben Becken wie die Versuche des Maßstabes 1:15 durchgeführt. Wenn die Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Gesamttiefe auf die Entmischung zeigen, dass die Gesamftiefe keinen Einfluss auf die Entmischung hat, kann der Standardversuchsaufbau mit einer maximalen Gesamttiefe von 1,50 m beibehalten werden. In Kapitel 4.3.1 erfolgt der notwendige Nachweis.

Das Schüttmaterial wurde mit einer Kippeinrichtung, die im Vergleich zu der für den Maßstab 1:15 verwendeten Standardkippe die doppelten Abmessungen hat, abgekippt. Sie hat die Abmessungen  $40 \times 26 \times 66 \text{ cm}^3$  (Breite x Höhe x Länge). Eine Ladung enthielt ca. 80 kg Steine.

Damit eine ausreichende Anzahl von Ladungen für jeden Versuch nacheinander geschüttet werden konnte, wurde die Schüttmasse für diese Versuche vergrößert. Für die Versuche im Maßstab 2:15 betrug die Schüttmasse 400 kg, für diejenigen im Maßstab 4:15 betrug sie 500 kg.

### 3.4.2 Versuche in den größeren Maßstäben 2:15 und 4:15

Für den mittleren Maßstab 2:15 wurde nur eine Körnungslinie G1 untersucht. Sie ist in Abb. 3.12 dargestellt. (vgl. Abb. 3.10, Maßstab 1:15)

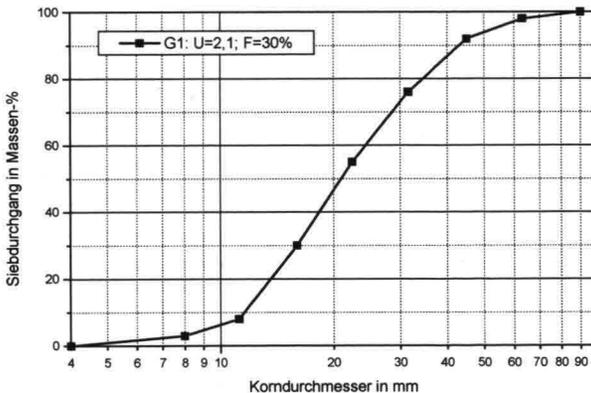


Abb. 3.12: Körnungslinie des Schüttgutes G1 (Maßstab 2:15)

Zu ihrer Erstellung wurden die Korngrößen der Körnungslinie G1 im Maßstab 1:15 verdoppelt, wobei die entsprechenden Massenanteile beibehalten wurden.

Die Tabelle 3.8 fasst die Versuche im Maßstab 2:15 zusammen. Sie erfolgten bei zwei unterschiedlichen Gesamttiefen.

Versuchsnummer	Schüttgut				Gesamttiefe $t_G$ [m]	Tiefe im Wasser $t_w$ [m]
	Körnungslinie Maßstab 2:15	U [-]	Feinkornanteil F [%]	Masse M [kg]		
44, 45, 49	G1	2,1	30	400	1,30	1,10
48	G1	2,1	30	400	0,90	0,70

Tabelle 3.8: Versuchsreihe im Maßstab 2:15

In dem groben Maßstab 4:15 wurden zwei unterschiedliche Körnungslinien G1 und G4 erstellt. Sie sind in Abb. 3.13 dargestellt.

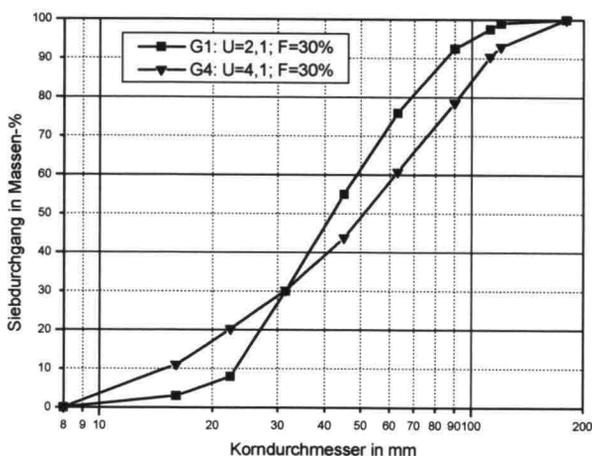


Abb. 3.13: Körnungslinien der Schüttgüter G1 und G4 (Maßstab 4:15)

Die Tabelle 3.9 fasst die Versuche im Maßstab 4:15 zusammen. Es wurden zwei Kornzusammensetzungen erstellt, so dass ihr Einfluss auf die Versuchsergebnisse auch in diesem Maßstab untersucht werden kann.

Versuchsnummer	Schüttgut				Gesamttiefe $t_G$ [m]	Tiefe im Wasser $t_w$ [m]
	Körnungs- linie Maßstab 4:15	U [-]	Feinkorn- anteil F [%]	Masse M [kg]		
50, 51	G1	2,1	30	500	1,50	1,30
52, 53, 54	G4	4,1	30	500	1,50	1,30

Tabelle 3.9: Versuchsreihe im Maßstab 4:15

Ob Versuche in unterschiedlichen Maßstäben auch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, wird durch den Vergleich der in Tabelle 3.10 aufgeführten Versuche geklärt. Der Vergleich erfolgt mit Versuchen gleicher Randbedingungen, bei denen nur der Maßstab variiert.

Körnungslinie	Gesamttiefe in m	Maßstab fein 1:15	Maßstab mittel 2:15	Maßstab grob 4:15
G1	0,90	5, 11-22	48	
G1	1,30	29	44, 45, 49	
G1	1,50	1, 2, 3, 4		50, 51
G4	1,50	39		52, 53, 54

Tabelle 3.10: Zusammenfassung der Versuche zur Bestimmung des Einflusses des Maßstabes auf die Entmischung

Die drei Versuchsmaßstäbe bilden eine Modellfamilie. Die Bildung einer Modellfamilie ist zur Übertragung der Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab notwendig. Dadurch kann der Aufbau des entsprechenden Prototyps in dem Naturmaßstab bestimmt werden.

Zusammenfassend wurden in diesem Kapitel die Versuchsbedingungen zur Untersuchung des Wellenbrecherkernaufbaus in der Landbauweise beschrieben. Die dazu gehörigen Ergebnisse, insbesondere die Beschreibung der entmischten Kerne, werden in Kapitel 4 dargestellt.

## 4 Versuchsergebnisse

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der in Kapitel 3 beschriebenen Versuche zur Untersuchung der Entmischung beim Bau von Wellenbrecherkernen mit Hinterkippern dargestellt. Zuerst erfolgt die Auswertung der Versuche im kleinen Maßstab 1:15.

Die Versuchsreihe 5, 11 bis 22 gilt als Referenzversuchsreihe. Ihre mittleren Versuchsergebnisse werden deswegen als erstes betrachtet. Der möglicherweise auftretende Fehler beim Versuchsablauf und bei der Auswertung wird anhand dieser Versuchsergebnisse bewertet. Eine statistische Auswertung dieser Versuchsergebnisse erfolgt anhand der Bestimmung der Mittelwerte und der möglichen Streuungen.

Danach werden die Versuche zur Bestimmung der optimalen Materialmasse beschrieben und ausgewertet.

Im Anschluss werden die möglichen Einflüsse der verschiedenen Randparameter untersucht.

Dafür werden die Ergebnisse der Versuche, die mit anderen Randparametern als die Referenzversuchsreihe durchgeführt wurden, mit denen der Referenzversuchsreihe verglichen. Durch diesen Vergleich werden die Einflüsse der folgenden Parameter ermittelt:

- die Gesamttiefe  $t_g$ ,
- die Variation der lotrechten Anteils des Fallwegs in der Luft  $t_L$  bei einer gleich bleibenden Gesamttiefe,
- der Ungleichförmigkeitsgrad des Schüttgutes,
- der Feinkomanteil des Schüttgutes.

Die genannten Parameter können beim Bau von Wellenbrecherkernen variieren. Der Einfluss von Wellen und Strömung kann bei dieser Untersuchung allerdings nicht berücksichtigt werden.

Anschließend werden die Ergebnisse der Versuche in den größeren Maßstäben 2:15 und 4:15 dargestellt, und es wird eine Übertragung der Ergebnisse der Modellfamilie in den Naturmaßstab erfolgen.

## 4.1 Der Referenzversuch: Darstellung und Ergebnisse

Mit dem Begriff Referenzversuch wird ein Versuch beschrieben, der mit 200 kg des Schüttgutes G1, bei einer Gesamttiefe von 0,90 m und einer Wassertiefe von 0,70 m erfolgt. Es handelt sich um die Versuche 5, 11 bis 22. Ihre Ergebnisse gelten als Referenzergebnis. Sie werden in diesem Kapitel in unterschiedlicher Art und Weise dargestellt.

In Abb. 4.1 ist ein typisches Beispiel für eine Böschungsausbildung dargestellt. Aus technischen Gründen wurde das Foto nach der Entleerung des Beckens aufgenommen. Die Böschung wurde durch die Entleerung nicht verändert.



Abb. 4.1: Beispiel für die geschüttete Böschung im Modell nach der Entleerung des Versuchsbeckens, Versuch 44.

Anhand dieser Darstellung kann die Entmischung des Kernmaterials qualitativ beschrieben werden. Das grobe Material befindet sich ausschließlich im unteren Bereich der Böschung. Im oberen Bereich haben sich hauptsächlich kleinere Kornfraktionen abgelagert. Zwischen dem unteren und dem oberen Bereich ist eine kontinuierliche Verteilung vom groben zum feinen Material zu beobachten. Die groben Kornfraktionen befinden sich aber eher auf der Böschungsoberfläche als im Böschungskörper, so dass diese Darstellung nicht repräsentativ für die Zusammensetzung der Gesamtböschung ist. Die Entmischung der Böschung, die damit schon festzustellen ist, ist noch stärker als sie hier erscheint.

### 4.1.1 Körnungslinie

Die Darstellung von Körnungslinien ist in vielen Bereichen des Ingenieurwesens eine weit verbreitete Darstellungsform. Sie eignet sich sehr gut zur Auswertung der Entmischung.

Die mittleren Körnungslinien der 6 übereinander liegenden Schichten der Versuchsreihe 5, 11 bis 22 gelten als Referenzsieblinien. Sie sind in Abb. 4.2 zusammen mit der Körnungslinie des verwendeten Schüttgutes dargestellt.

Die mittleren Körnungslinien der einzelnen Schichten, die sich aus den 13 Versuchen ergeben, wurden aus der Mittelung der Körnungslinien gewonnen. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird noch in Kapitel 4.1.5 diskutiert.

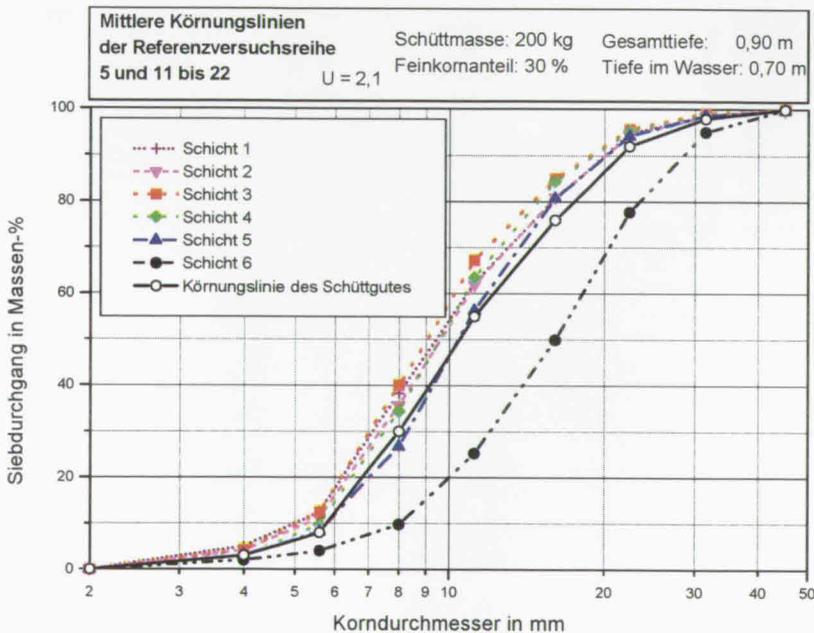


Abb. 4.2: Körnungslinien der 6 Schichten der Referenzböschung, Mittelwerte aus der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22 und Körnungslinie des abgekippten Schüttgutes.

Die nach der Schüttung entstandene Böschung lässt sich folgendermaßen beschreiben:

Die Körnungslinie der unteren Schicht (Schicht 6) liegt in der Darstellung deutlich unterhalb der Körnungslinie des Schüttgutes, d. h. die Schicht 6 ist gröber als das Schüttmaterial. Dies wird anhand des Vergleichs des mittleren Korndurchmessers der Schicht 6 und dem Schüttgut deutlich. Die Schicht 6 hat einen mittleren Durchmesser von  $D_{50\text{Schicht6}} = 16,0 \text{ mm}$  wäh-

rend der mittlere Durchmesser des Schüttmaterials  $D_{50\text{Schüttgut}} = 10,4$  mm beträgt, damit wird die Schicht 6 als „52% gröber als das Schüttgut“ beschrieben.

Die Körnungslinie der Schicht 5 liegt in etwa im gleichen Bereich wie die des Schüttgutes. Ihre mittleren Korndurchmesser  $D_{50\text{Schicht5}} = 10,5$  mm und  $D_{50\text{Schüttgut}} = 10,4$  mm sind vergleichbar, sie ist feiner als die 6. Böschungsschicht.

Weiterhin ist die Schicht 4 feiner als die Schicht 5. Ihr mittlerer Durchmesser beträgt  $D_{50\text{Schicht4}} = 9,6$  mm.

Schicht 3 ist bei 10 von den 13 ausgewerteten Referenzböschungen feiner als die Schicht 4. Ihr mittlerer Korndurchmesser beträgt  $D_{50\text{Schicht3}} = 9,0$  mm.

Der Abstand der Körnungslinien zwischen der Schicht 5 und der Schicht 4 sowie zwischen der Schicht 4 und Schicht 3 ist allerdings wesentlich kleiner als der zwischen Schicht 5 und Schicht 6.

Die mittleren Korndurchmesser der vier unteren Böschungsschichten sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Referenzversuche 5, 11 bis 22	Schicht 6	Schicht 5	Schicht 4	Schicht 3	Schüttgut
$D_{50}$ in mm	16,0	10,5	9,6	9,0	10,4

**Tabelle 4.1: Mittlere Durchmesser der Schichten 6, 5, 4 und 3 der Referenzversuchsreihe. Mittelwerte aus den Versuchsergebnissen der Versuche 5, 11 bis 22, Maßstab 1:15.**

Die Körnungslinien der Schichten 1 und 2 gemittelt über die 13 Versuche liegen oberhalb der Körnungslinie des Schüttmaterials, sie sind feiner als das Schüttmaterial. Diese Schichten sind aber bei den Einzelversuchen, teils gröber und teils feiner als die 4 unteren Schichten. Ein eindeutiges Verhalten ist nicht erkennbar, so dass ihre Körnungslinien im Einzelnen nicht repräsentativ sind. Es lässt sich bei den beiden oberen Böschungsschichten keine einheitliche Aussage über ihre Zusammensetzung treffen. Sie sind wahrscheinlich zu dünn, so dass ihr Aufbau von der eingebauten Rampe beeinflusst wird. Um die Schichten 1 und 2 bei der Auswertung weiterhin berücksichtigen zu können, müssten alle Versuche entweder häufiger wiederholt werden oder mit einer größeren Schüttmasse durchgeführt werden. Dadurch hätte die Anzahl der untersuchten Parameter extrem reduziert werden müssen. Es wurde daher entschieden, die Schichten weiter nicht zu betrachten.

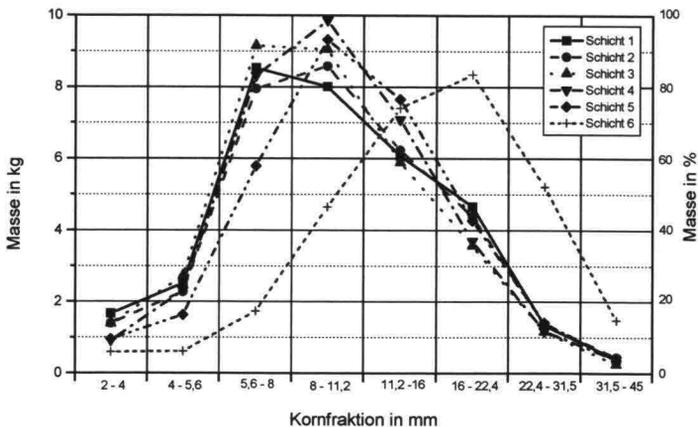
Im weiteren Verlauf werden daher nur die Körnungslinien der unteren Schichten 3 bis 6 untersucht.

Aus der Auswertung der Körnungslinien können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die unter Wasser geschüttete Referenzböschung ist nicht homogen.
- Während des Baus findet eine Entmischung statt.
- Das oben gelagerte Material ist feiner als das Schüttgut, d. h., dass die Böschung an ihrem Fuß gröber sein wird als das Schüttgut.
- Die Entmischung erfolgt kontinuierlich, d. h., dass die Kornzusammensetzung der Böschung von oben nach unten immer gröber wird.
- Insbesondere unterscheidet sich die untere Schicht in ihrer Kornzusammensetzung von der restlichen Böschung. Der Abstand ihrer Körnungslinie zur Schüttgutssieblinie ist am größten. Sie besteht aus erheblich gröberem Material.

### 4.1.2 Masse der Kornfraktionen

Die Siebergebnisse können auch als Histogramm darstellen werden, ohne Aufsummierung. Wird die Masse jeder Kornfraktion allein durch einen Punkt dargestellt, ergibt sich das Bild nach Abb. 4.3.



**Abb. 4.3: Masse der einzelnen Kornfraktionen der 6 Schichten der Referenzböschung**

Abb. 4.3 lässt erkennen, dass beginnend bei Schicht 3 der Schwerpunkt des Korngemisches immer gröber wird, und sie zeigt zugleich die geringe Aussagekraft bei der Schicht 1 und 2.

Die untere Schicht (Schicht 6) lässt sich in dieser Darstellung besser von den anderen Schichten unterscheiden. Sie besteht aus einem überproportional stark vertretenden Anteil von grobem Material. Bei dieser Schicht hat die Kornfraktion 16 - 22,4 mm den stärksten Anteil mit ca. 8 kg. Der Anteil der Kornfraktion 22,4 - 31,5 mm beträgt ca. 5 kg, wobei das Schüttgut insgesamt nur ca. 12 kg dieser Fraktion enthält. Die feinen Kornfraktionen (2 bis 8 mm) erreichen dagegen den Böschungsfuß nur sehr selten. Bei allen anderen Schichten sowie bei dem Schüttgut ist aber die Kornfraktion zwischen 8 - 11,2 mm am stärksten repräsentiert. Die Kornfraktionen 22 - 31,5 mm und 31,5 - 45 mm sind dagegen in der unteren Schicht ebenfalls am stärksten vertreten.

Die Schichten 3, 4 und 5 unterscheiden sich nur im geringeren Maße voneinander. Die am stärksten repräsentierte Kornfraktion ist die zwischen 8 - 11,2 mm, analog zum Schüttgut. Der Verlauf ihrer Kornzusammensetzungen unterscheidet sich von der des Schüttgutes kaum.

### 4.1.3 Charakteristische Werte

Die charakteristischen Werte werden für die Körnungslinien der vier unteren Schichten der Referenzböschung bestimmt. Es handelt sich um:

- den Ungleichförmigkeitsgrad U,
- die Krümmungszahl C,
- den mittleren Durchmesser einer Schicht  $D_{50}$ ,
- den Feinkornanteil F in % (in diesem Maßstab Anteile von Steinen kleiner als 8 mm).

Zur Charakterisierung der Körnungslinien werden die wesentlichen Eigenschaften der 4 unteren Schichten bestimmt (vgl. Tabelle 4.2).

	Schüttgut	3. Schicht	4. Schicht	5. Schicht	6. Schicht
F [%]	30,0	40	34	26	10,0
$D_{50}$ [mm]	10,4	9,0	9,6	10,4	16,0
C [-]	0,9	0,95	0,9	1,0	1,0
U [-]	2,1	2,0	1,9	2,0	2,2

Tabelle 4.2: Vergleich der Charakteristischen Werte der Schichten 3, 4, 5 und 6 der Referenzböschung und des Schüttgutes. Die Mittelwerte stammen aus den Ergebnissen der Referenzversuche 5, 11 bis 22.

Aus dem Vergleich der mittleren Durchmesser  $D_{50}$  ist deutlich zu erkennen, dass die Böschung von oben nach unten betrachtet immer größer wird. Die Entwicklung dieses Wertes zeigt eine gute qualitative Darstellung der Entmischung, wobei er kein Ersatz für die Körnungslinie sein soll.

In dem Feinkornanteil spiegelt sich ebenfalls die Entmischung wieder. Im oberen Teil der Böschung ist er sehr groß. In der 3. Schicht beträgt er 40% im Vergleich zu 30% beim Schüttgut. Im unteren Teil der Böschung, d. h. in Schichten 5 und 6 wird der Feinkornanteil immer geringer. In der untersten Schicht beträgt er nur 10% der Kornzusammensetzung der Körnungslinie. Die Kornfraktion 2 - 8 mm ist am Böschungsfuß 3-mal weniger repräsentiert als im Schüttgut.

Der Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  und die Krümmungszahl  $C$  der Böschung liegen etwa in dem gleichen Bereich wie die des Schüttguts. Die Entmischung ist daher nicht mit diesen Werten beschreibbar. Die geschüttete Böschung behält die gleichen charakteristischen Werten  $U$  und  $C$  wie das ursprüngliche Schüttgut bei.

#### **4.1.4 Fehlerbetrachtung der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung**

##### **4.1.4.1 Mögliche Fehlerquellen**

Bei der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung könnten verschiedene Fehler auftreten.

Die möglichen Fehlerquellen liegen:

- **Bei der Versuchsvorbereitung, genauer bei der Zusammensetzung des Schüttmaterials.** Das Material wurde abgetrennt und die einzelnen Fraktionen einer Körnungslinie wurden gewogen, zusammengestellt und gemischt. In Kapitel 3 wurde der maximale Fehler bei der Erstellung einer Körnungslinie mit 5 % bewertet.
- **Bei der schichtweise Abtragung der Böschung.** Jede abgetragene Schicht sollte aus einem Sechstel des gesamten Böschungsvolumens bestehen. Das abzutragende Volumen wurde mit Hilfe eines Eimers gemessen. Dieses Messverfahren beinhaltet einige Ungenauigkeiten bezüglich des gewünschten Soll-Volumens. Anhand der Versuchprotokolle wurde die Gesamtmasse jeder Schicht ausgerechnet und mit der Soll-Masse des Eimerinhalts verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass dieser Fehlerquelle zu vernachlässigen ist.

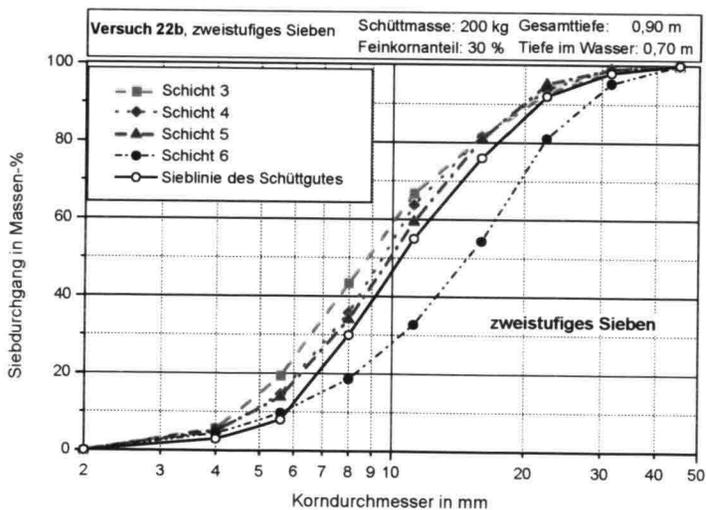
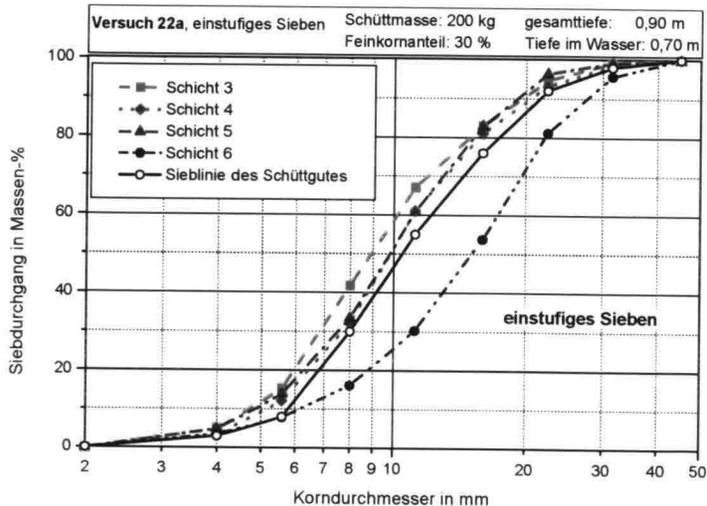
- **Bei dem Siebvorgang.** Ein Siebvorgang dauerte 10 Minuten lang. Es wurde angenommen, dass nach dieser Zeit alle Steine, die durch einen Siebsatz fallen könnten, ausgesiebt waren. Zur Kontrolle dieser Annahme wurde das verwendete Schüttgut nach Kornfraktionen eingefärbt. Durch eine visuelle Kontrolle per Augenschein konnte die Beendigung des Siebvorganges nach 10 Minuten Siebung festgestellt werden.
- **Bei der Wägung.** Dieser Fehler ist auf die Messgenauigkeit der Waage zurückzuführen. Der Fehler beträgt bis zu  $\pm 20$  g. Für den Referenzversuch beträgt dieser Fehler 0,2% bezogen auf die Gesamtmasse von 10 kg und jedoch schon 10% bezogen auf 0,2 kg. Die Messgenauigkeit hängt also von der Gesamtmasse einer Korngröße ab. Für kleine Massen wurde eine weitere Waage verwendet, so dass der Fehler bei der Wägung geringer wurde.

Die einzige genauere messbare Fehlerquelle besteht bei der Wägung. Alle anderen Quellen können nur annähernd bestimmt werden, ohne jedoch genau definierbar zu sein.

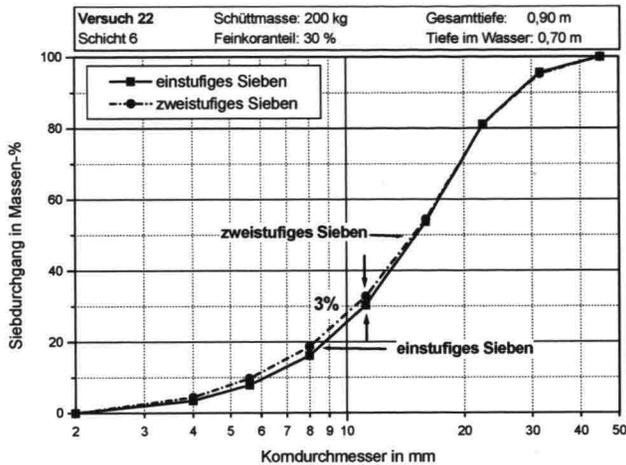
Mit dem Ziel, den gesamt möglichen Fehler abzuschätzen, wird in diesem Kapitel ein Versuch mit zwei verschiedenen Methoden ausgewertet.

Die Auswertung durch einstufiges Sieben wird mit einer Auswertung durch zweistufiges Sieben verglichen. Die grundsätzliche Annahme, die für die Auswertung der Versuche durch einfaches und zweifaches Sieben getroffen wird, besteht darin, dass das Ergebnis eines Siebvorganges umso genauer ausfällt, je geringer die Menge des zu siebenden Materials ist. Um diese Annahme zu überprüfen, wurde die Auswertung des Versuchs Nr. 22 hinsichtlich der Siebvorgänge variiert. Dieser Versuch gehört auch zu den Referenzversuchen.

Zunächst wurde das Material wie üblich gesiebt, d. h. das gesamte Volumen einer Schicht wurde in die Siebe gegeben, getrennt und abgewogen. Dieser Vorgang wird als „einstufiges Sieben“ bezeichnet. Das Ergebnis dieses Vorganges wird als Versuch 22a bezeichnet. Das Böschungsmaterial des Versuchs 22 wurde dann ein zweites Mal gesiebt. Zunächst wurde etwa die Hälfte der Schichten gesiebt und anschließend, der Rest. Dieser Vorgang wird als „zweistufiges Sieben“ bezeichnet und 22b genannt. Bei diesem Vorgang wurde also pro Siebvorgang weniger Material (ungefähr die Hälfte) ausgewertet als bei dem „einstufiges Sieben“. Abb. 4.5 zeigt die Ergebnisse des einstufigen und zweistufigen Siebens am Beispiel der Schicht 6. Bei den Schichten 1 bis 5 sehen die Abweichungen der Körnungslinien zwischen einstufigem und zweistufigem Sieben ähnlich aus (vgl. Abb. 4.4).



**Abb. 4.4.:** Vergleich eines „einstufiges Sieben“ mit einem „zweistufiges Sieben“ beim dem Versuch Nr. 22.



**Abb. 4.5: Vergleich eines „einstufiges Sieben“ mit einem „zweistufiges Sieben“ der Körnungslinie der 6. Schicht, Referenzversuch Nr. 22.**

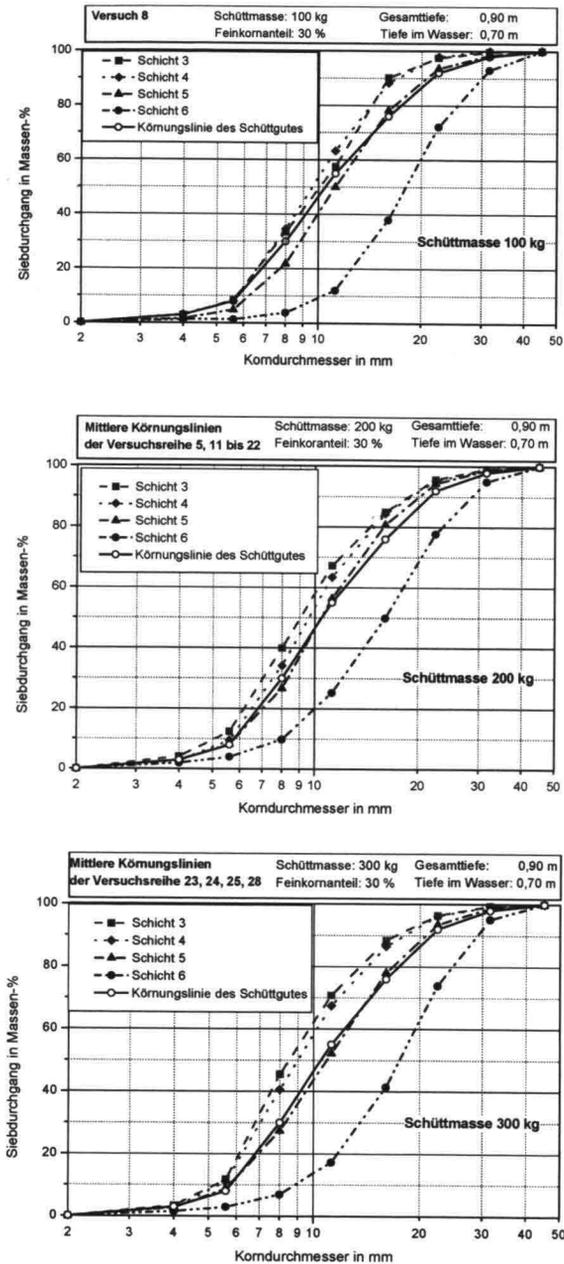
Die aus dem zweistufigen Siebvorgang gewonnene Körnungslinie zeigt einen erhöhten Feinkoranteil im Vergleich zum einstufigen Siebvorgang. Diese Körnungslinie nähert sich in den Fraktionen zwischen 10 und 20 mm der Körnungslinie des einstufigen Siebens an, d. h. es findet eine Umverteilung von den mittleren in die feineren Fraktionen statt.

Die Erklärung für die Umverteilung der Fraktionen ist leicht nachvollziehbar. Bei dem einstufigen Siebvorgang steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die größere Materialmasse den Feinkoranteilen den Siebdurchgang versperrt, so dass sich die Feinkoranteile in einem größeren Sieb ablagern. Die Unterschiede der einzelnen Fraktionen in der Schicht 6 liegen zwischen dem einstufigen und dem zweistufigen Sieben unterhalb von 3%. Der maximal beobachtete Fehler wurde bei der Schicht 3 ermittelt. Er beträgt maximal 5%. Dieser Fehler schließt aber auch den Fehler der Messgenauigkeit der Waage mit ein. Daher ist er nicht ausschließlich auf die Art des Siebens zurückzuführen.

#### **4.1.4.2 Bestimmung der optimalen Materialmasse für den Referenzversuch**

Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, war die Verwendung einer optimalen Materialmasse bei der Versuchsdurchführung zu definieren. Gesucht wurde die Materialmasse, ab der die Versuchsergebnisse sich nicht mehr ändern.

Der Versuch Nr. 8 wurde mit 100 kg vom Schüttgut G1, die Versuche Nr. 5, 11 bis 22 mit 200 kg Schüttgut und die Versuche 23 bis 25, 28 mit 300 kg durchgeführt. Diese Versuche erfolgten mit den gleichen Versuchsparametern und im Maßstab 1:15. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.6 dargestellt.



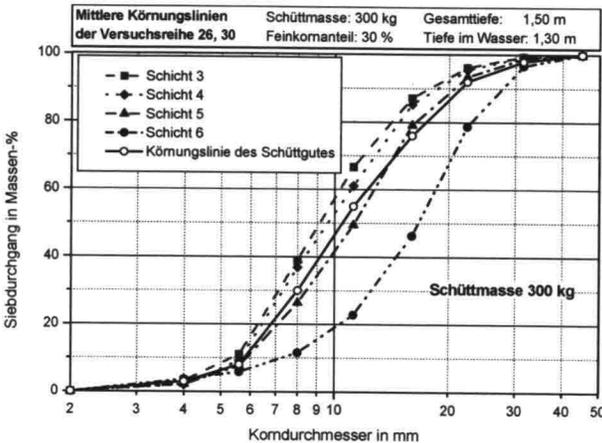
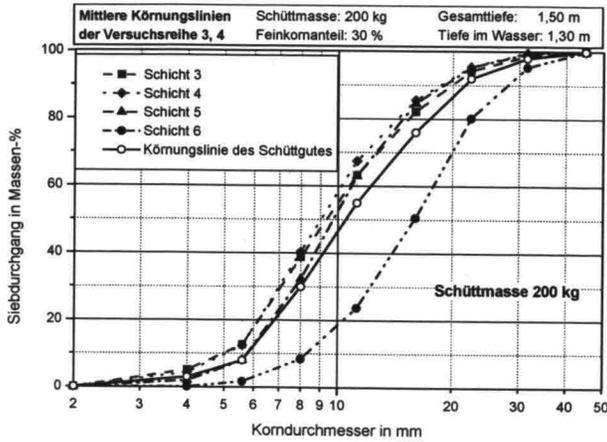
**Abb. 4.6: Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Schüttmasse: Schüttmassen 100 kg, 200kg, 300 kg und Gesamttiefe 0,90 m.**

Im Versuch Nr. 8 mit 100 kg Schüttgut tritt die Entmischung viel deutlicher auf, als bei den Versuchen mit 200 kg und 300 kg. Der mittlere Durchmesser der Schicht 6 beträgt  $D_{50} = 18,2$  mm, anstatt 16 mm bei dem Referenzversuch mit 200 kg. Außerdem liegt die Körnungslinie der Schicht 3 für den Versuch 8 unterhalb von der der Schicht 4. Dieses Phänomen findet bei den anderen Versuchsergebnissen nicht statt. Die Zusammensetzung der Böschung aus 100 kg Schüttgut wird wahrscheinlich in einem zu großen Maß von der eingebauten Rampe beeinflusst.

Zwischen den Ergebnissen der Versuche mit 200 kg Schüttmasse (Versuche 5, 11 bis 22) und denen mit 300 kg (Versuche 23 bis 25, 28) sind keine wesentlich charakteristischen Unterschiede zu beobachten.

Als Schlussfolgerung ist festzustellen, dass erst die Materialmasse von 200 kg für diese Versuche ausreichend ist und aus ökonomischen Gründen für die weiteren Versuche gewählt wurde.

Ob das Ergebnis auch bei einer größeren Gesamttiefe (1,50 m) übertragbar ist, wird mit dem Vergleich der Versuchsergebnisse der Versuche Nr. 1 bis 4 mit 200 kg und der Versuche Nr. 26 bis 30 und 32 mit 300 kg Schüttgut nachgewiesen (vgl. Abb. 4.7).

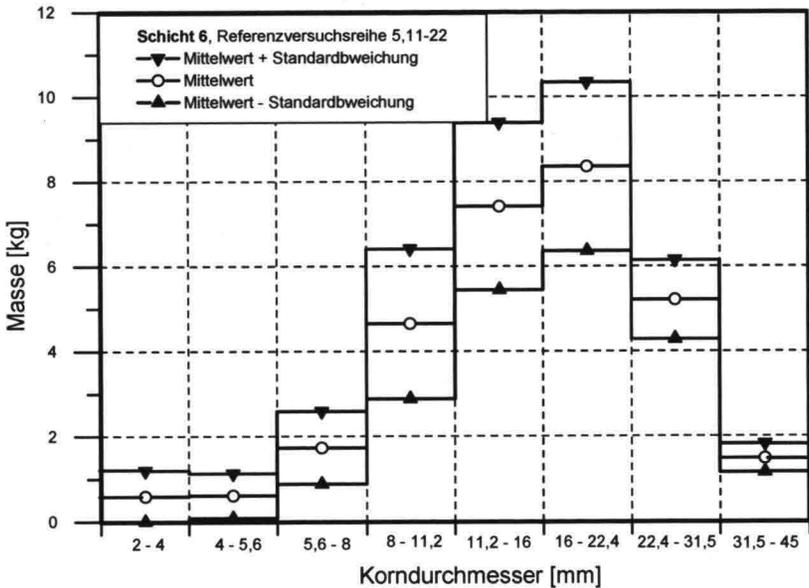


**Abb. 4.7: Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Schüttmasse:  
Schüttmassen 200kg, 300 kg und Gesamtiefe 1,50 m.**

### 4.1.5 Statistische Auswertung

Das Ziel der statistischen Auswertung ist es, einerseits die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei gleichen Versuchen zu überprüfen, andererseits Anhaltswerte für eine Parametervariation zu bekommen und zusätzlich festzustellen, ob eine Veränderung der Versuchsergebnisse von einem oder mehreren geänderten Parametern abhängt oder auf eine statistische Streuung zurückzuführen ist. Zu diesem Zweck müssen die Streuung der Ergebnisse bei zwei identischen Versuchen definiert werden.

Mit Hilfe des Referenzversuchs soll die Frage der Reproduzierbarkeit beantwortet werden. Eine übersichtliche Darstellung der Streuung kann anhand von Wahrscheinlichkeitsbereichen gewonnen werden. Ausgehend vom Mittelwert werden die obere bzw. die untere Grenze der Bereiche durch Addition bzw. Subtraktion der Standardabweichung berechnet. In Abb. 4.8 ist die mittlere Körnungslinie für Schicht 6 der Referenzversuchsreihe zusammen mit den ermittelten Standardabweichungen in Form eines Balkendiagramms dargestellt, so dass die Mittelwerte der Kornfraktionen der Schicht 6 und die zugehörigen Standardabweichungen direkt ablesbar sind.



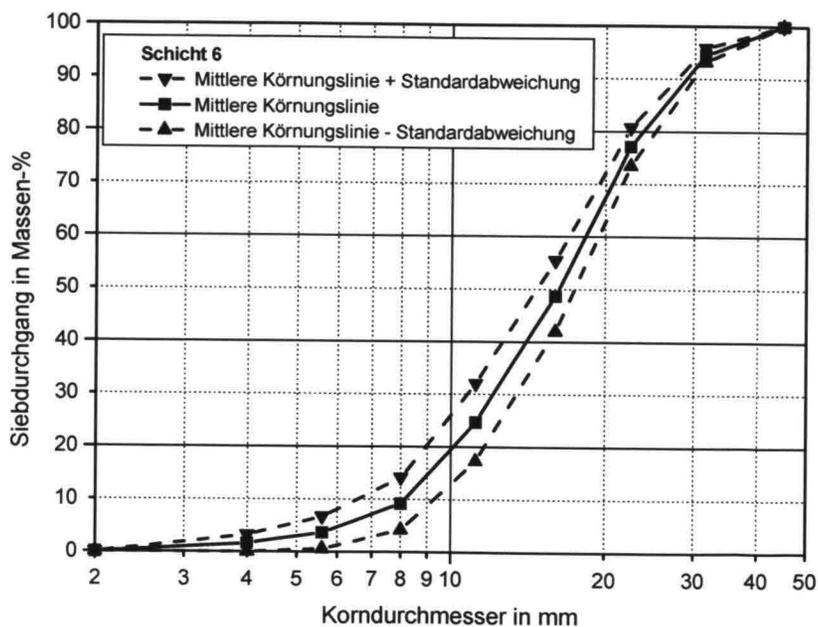
**Abb. 4.8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Kornfraktionen der Schicht 6 der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22.**

Die zugehörigen Werte, d.h. die Mittelwerte und die Standardabweichungen für Schicht 6, sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die entsprechende Körnungslinie ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Kornfraktion [mm]	0-2	2-4	4-5,6	5,6-8	8 - 11,2	11,2- 16	16- 22,4	22,4- 31,5	31,5- 45
Mittlere Masse + Standardabweichung [kg]	0	3,2	6,7	14,1	32	55,4	80,7	95,8	100
Mittlere Masse [kg]	0	1,6	3,65	9,15	24,65	48,65	77,05	94,5	100
Mittlere Masse – Standardabweichung [kg]	0	0	0,6	4,2	17,3	41,9	73,4	93,2	100

**Tabelle 4.3: Mittelwerte für die Summen der Massen der Kornfraktionen innerhalb der Schicht 6 und die zugehörigen Standardabweichungen.**

**Ergebnis der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22.**



**Abb. 4.9: Mittlere Körnungslinie und mögliche Standardabweichung der Schicht 6. Versuchsergebnisse aus der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22.**

Die charakteristischen Werte und ihre Standardabweichungen sind ebenfalls am Beispiel der Schicht 6 der Referenzversuchsreihe in der Tabelle 4.4 dargestellt.

Versuchsreihe 5, 11 bis 22	Mittelwert	Prozentuale Standard- abweichung	Standard- abweichung	Mittelwert - Standard- abweichung	Mittelwert + Standard- abweichung
U [-]	2,2	12%	0,3	1,9	2,5
C [-]	1,0	6,7%	0,1	0,9	1,1
D <sub>50</sub>	16,0 mm	10,4%	1,7 mm	14,3 mm	17,7 mm

**Tabelle 4.4: Charakteristische Werte, Mittelwerte und Standardabweichungen aus der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22.**

Der Feinkornanteil wurde in dieser Tabelle nicht mehr dargestellt, weil er nicht reproduzierbar ist. Die Feinkornanteile weichen zwischen den Versuchen extrem voneinander ab, da die Standardabweichung ca. 50 % des Mittelwertes entspricht. Für die weitere Überprüfung des Einflusses von verschiedenen Versuchsparametern werden die Feinkornanteile nicht weiter berücksichtigt.

Alle anderen charakteristischen Werte gelten dagegen als reproduzierbar, da die Standardabweichungen bei den Mittelwerten gering sind.

Wie bereits erläutert, kann der mögliche Fehler bei einer Versuchsauswertung bis 5% betragen und muss daher bei der Auswertung berücksichtigt werden. Bei den Versuchsergebnissen kann allerdings nicht zwischen einem Fehler bei der Auswertung und einer Streuung aufgrund der Reproduzierbarkeit der Versuche unterschieden werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Unterschiede der Ergebnisse, die innerhalb des ermittelten Streuungsbereichs liegen, nicht auf die Einflüsse wie Messfehler oder Veränderung eines Parameters zurückzuführen sind.

Wenn die charakteristischen Werte von Ergebnissen innerhalb des Streuungsbereichs liegen, ist der Einfluss der Versuchsparametern auf die Böschungsausbildung als unbedeutend anzusehen. Dagegen wenn sie weit außerhalb des Streuungsbereichs liegen, so deutet dies auf einen Einfluss des geänderten Versuchsparameters auf die Böschungsausbildung hin.

### 4.1.6 Visuelle Auswertung

Die visuelle Auswertung wird mit Hilfe von zwei verschiedenen Verfahren ausgeführt.

Bei dem einen Verfahren geht es darum, den Schüttvorgang qualitativ zu beobachten. Zu diesem Zweck wurden alle Versuche während der Durchführung gefilmt. Die Filme wurden dann anschließend nachträglich visuell ausgewertet. Der Verlauf des Schüttvorganges im Wasser wird im Folgenden qualitativ beschrieben:

Beim Verlassen des Hinterkippers nimmt die Schüttung eine Zungenform an. Der äußere Rand der Zunge besteht aus groben Steinen, die Steine werden immer feiner in Richtung des Zungenzentrums. Die groben Steine treffen als erstes auf die Rampe und rollen dann die Rampe entlang. Das Schüttmaterial hat sich zu diesem Zeitpunkt schon deutlich entmischt. Bei der nächsten Schüttung, treffen ebenfalls zuerst die groben Steine auf die Rampe oder die Steine der vorherigen Schüttung. Die oben gelagerten Steine rollen mit der nächsten Schüttung mit. Die feineren Steine rollen nun eine kürzere Wegstrecke als die größere. Die Entmischung wird dadurch verstärkt. An der Oberfläche der Böschung lagern sich daher bevorzugt die groben Steine ab, weil sie am weitesten rollen können.

Aus den Beobachtungen ist zu erkennen, dass die Entmischung zwei Ursachen hat:

- Der Schüttvorgang mit dem Hinterkipper.
- Die Umlagerung der schon liegenden Steine durch die Energie der Steine der nächsten Schüttungen.

Die Begründung der beobachtenden Entmischung erfolgt in Kapitel 5.

Bei dem zweiten visuellen Verfahren soll die Kornzusammensetzung der Böschung graphisch sichtbar gemacht werden. Die erfolgreiche Anwendung der graphischen Auswertung könnte das Verfahren der Siebung und Bestimmung von Körnungslinien bestätigen bzw. sogar ersetzen. Die Vorteilhaftigkeit des herkömmlichen Verfahrens liegt allerdings in der leichteren Versuchsdurchführung und der gleichzeitigen hohen Sicherheit bzw. Genauigkeit des Verfahrens.

Die Versuchsauswertung wird im Folgenden beschrieben.

Nach der Abtragung einer Böschungsschicht, wurde die Böschungsoberfläche der verbleibenden Schüttung fotografiert (vgl. Abb. 4.10).

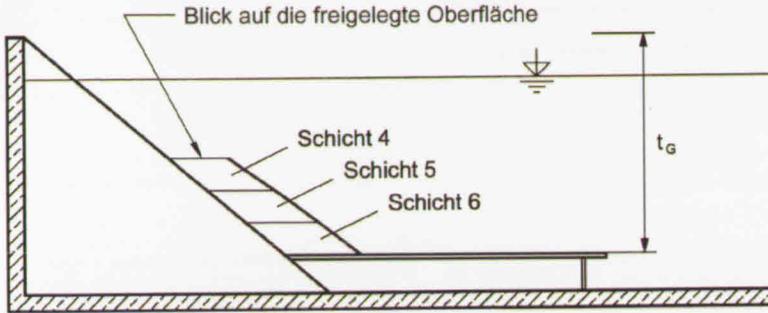


Abb. 4.10: Blick auf die Schichtoberfläche

Abb. 4.11 gibt die Fotos der Schichtoberflächen der Schichten 4 bis 6 des Versuchs 47 wieder.

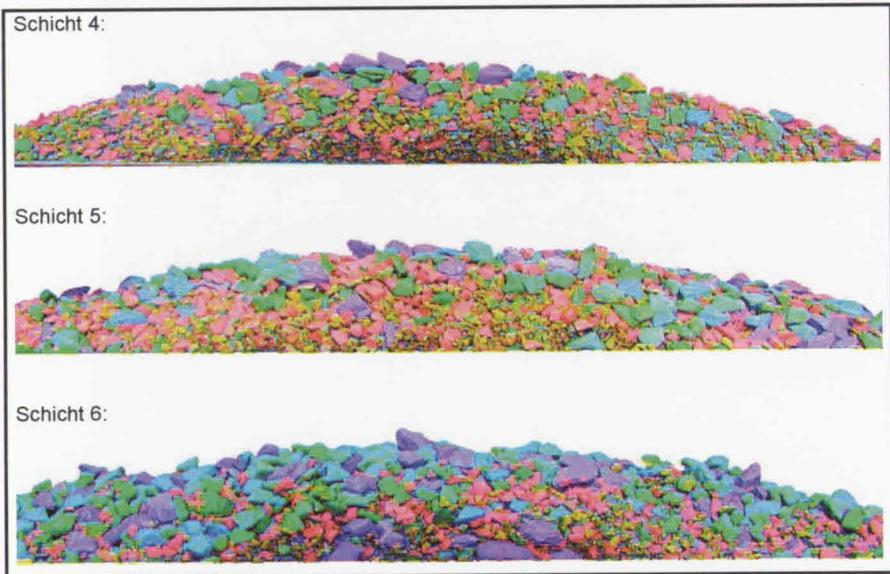


Abb. 4.11: Blick auf die freigelegten Oberflächen der Schichten 4, 5 und 6 nach der Abtragung der darüber liegenden Schicht, Versuch 47.

Die Fotos wurden graphisch bearbeitet. Ziel dieser Auswertungsform ist es, die Anteile der verschiedenen Körnungen sichtbar zu machen. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass alle Körnungen bzw. alle Farben auseinander gehalten und markiert werden können. Die Fotos zeigten allerdings, dass die Auflösung für diese Art der Analyse ungenügend war.

Daher wurden die Anteile kleiner als 22,4 mm schwarz und die über 22,4 mm weiß markiert. Abb. 4.12 zeigt die Darstellung der drei unteren Schichten der Böschung 47 nach der schwarz/weiß Markierung. Die Größen der Flächen in schwarz und weiß konnten dann mit einem Bildverarbeitungsprogramm berechnet werden.

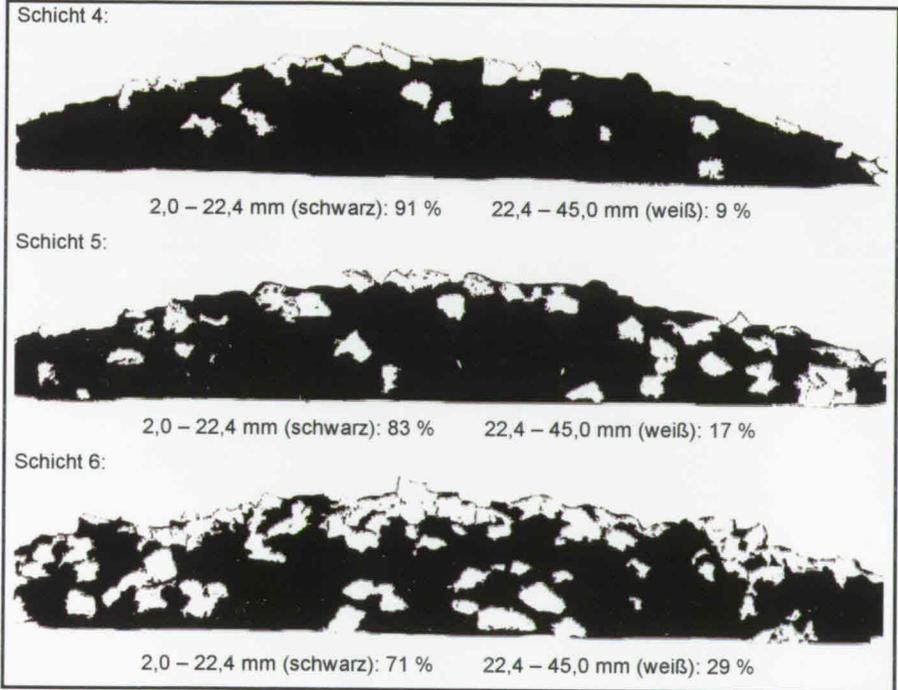
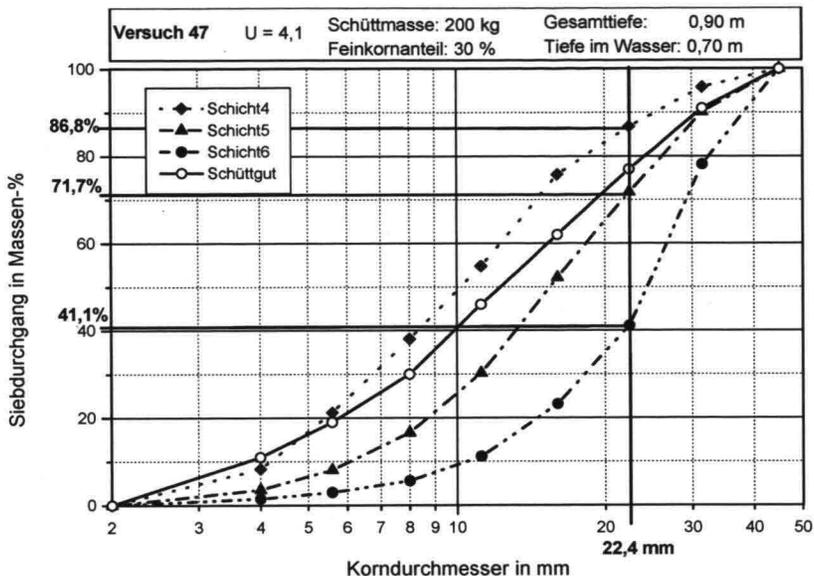


Abb. 4.12: Fotos der Oberfläche der Schichten 4,5 und 6 nach Bildverarbeitung, Versuch 47.

Dieses Verfahren liefert ähnliche Daten wie die Auswertung durch Siebung und die Herstellung der Körnungslinien der Böschungsschichten. Die erhaltenen Körnungslinien der Böschung beim Versuch Nr. 47 sind in Abb. 4.13 dargestellt.



**Abb. 4.13: Kornzusammensetzung der Böschung bei dem Versuch Nr. 47.**

Das graphische Verfahren bestätigt die vorhandenen Ergebnisse nicht vollständig. Es liefert weniger Informationen über die Verteilung der Körnung als das Verfahren der Siebung. Bei den Körnungslinien wird das gesamte Schichtvolumen ausgewertet, bei dem graphischen Verfahren wird dagegen nur die Kornverteilung der Schichtoberfläche bestimmt. Der Zeitaufwand ist für die beiden Verfahren vergleichbar. Da das graphische Verfahren zu keiner Vereinfachung führt, wird es nicht verwendet.

## 4.2 Böschungsausbildung bei verschiedenen Versuchsbedingungen

In diesem Kapitel wird anhand der Versuchsergebnisse untersucht, inwiefern eine Änderung eines Anfangs- oder Randparameters die Zusammensetzung der Böschung bzw. des Wellenbrecherkernes beeinflusst. Zu diesem Zweck werden die Versuchsergebnisse in Form von Körnungslinien und Tabellen über die charakteristischen Werte verglichen.

Die charakteristischen Werte und die Körnungslinien werden teilweise in diesem Kapitel ermittelt, alle weiteren Werte sind in Anhang 1 zu finden.

Als Hypothese wird angenommen, dass die Entmischung im gleichen prozentualen Verhältnis auftritt, wie bei der Referenzversuchsreihe.

Beispiel: Es wird erwartet, dass die Schicht 6 einer Böschung 52,4% gröber wird als das Schüttgut:  $D_{50 \text{ Schicht 6}} = D_{50 \text{ Schüttgut}} + 52,4\% \cdot D_{50 \text{ Schüttgut}}$

Alle anderen charakteristischen Werte werden sich auch im gleichen prozentualen Verhältnis wie bei der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22 ändern. Dies ist in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

	U [-]	C [-]	D <sub>50</sub> [mm]
<b>Schicht 6</b>	$U_{\text{Schüttgut}} + 4,8\% \cdot U_{\text{Schüttgut}}$	$C_{\text{Schüttgut}} + 33,3\% \cdot C_{\text{Schüttgut}}$	$D_{50\text{Schüttgut}}$ + $52,4\% \cdot D_{50\text{Schüttgut}}$
<b>Schicht 5</b>	$U_{\text{Schüttgut}} + 4,8\% \cdot U_{\text{Schüttgut}}$	$C_{\text{Schüttgut}} - 11,1\% \cdot C_{\text{Schüttgut}}$	$D_{50\text{Schüttgut}}$ - $0,9\% \cdot D_{50\text{Schüttgut}}$
<b>Schicht 4</b>	$U_{\text{Schüttgut}} - 9,5\% \cdot U_{\text{Schüttgut}}$	$C_{\text{Schüttgut}}$	$D_{50\text{Schüttgut}}$ - $8,6\% \cdot D_{50\text{Schüttgut}}$
<b>Schicht 3</b>	$U_{\text{Schüttgut}} - 4,8\% \cdot U_{\text{Schüttgut}}$	$C_{\text{Schüttgut}}$	$D_{50\text{Schüttgut}}$ - $14,3\% \cdot D_{50\text{Schüttgut}}$

**Tabelle 4.5: prozentuale Veränderung der charakteristischen Werte der Referenzböschung in Abhängigkeit der charakteristischen Werte des Schüttgutes.**

Auch die bei der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22 festgestellte Streuung der Versuchsergebnisse wird bei den weiteren Versuchsreihen erwartet. Das heißt, dass die gemessenen Standardabweichungen der charakteristischen Werte bei der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22 bei den anderen Versuchsreihen im gleichen prozentualen Verhältnis zu erwarten sind.

Beim Ungleichförmigkeitsgrad U beträgt die festgestellte gemessene Standardabweichung 12%, bei der Krümmungszahl C beträgt sie 6,7% und bei D<sub>50</sub> erreicht sie 10,4%.

Beispiel: Bei dem mittleren Durchmesser D<sub>50</sub> der Referenzversuchsreihe wurde eine Standardabweichung von 12% festgestellt. Zu erwarten ist, dass das D<sub>50 Schicht 6</sub> einer Versuchsreihe sich im folgenden Bereich befindet zwischen:

$$D_{50 \text{ Schicht 6 min erwartet}} = D_{50 \text{ Schicht 6}} - 12\% D_{50 \text{ Schicht 6}}$$

$$D_{50 \text{ Schicht 6 max erwartet}} = D_{50 \text{ Schicht 6}} + 12\% D_{50 \text{ Schicht 6}}$$

Befindet sich ein gemessener Wert in dem Bereich zwischen dem minimal erwarteten und dem maximal erwarteten Wert, deutet dieses auf eine Entmischung im gleichen Maß wie bei der Referenzversuchsreihe hin. Dieser Bereich wird auch „möglicher Streubereich“ genannt. Bei der betrachtenden Versuchsreihe haben die Versuchsparameter zu dem gleichen Ergebnis geführt wie die der Referenzversuchsreihe, diese Versuchsparameter haben keinen Einfluss auf die Entmischung.

Befindet sich ein gemessener Wert außerhalb dieses Bereiches, deutet dieses auf eine stärkere Entmischung in als bei der Referenzversuchsreihe hin. Bei der betrachtenden Versuchsreihe haben die Versuchsparameter dann zu einem anderen Ergebnis geführt als bei der Referenzversuchsreihe, daraus folgt dass, diese Versuchsparameter einen Einfluss auf die Entmischung haben.

Beispiel:

$$D_{50 \text{ Schicht 6 min erwartet}} < D_{50 \text{ Schicht 6 gemessen}} < D_{50 \text{ Schicht 6 max erwartet}}$$

die Versuchsparameter haben keinen Einfluss auf die Entmischung!

$$D_{50 \text{ Schicht 6 gemessen}} > D_{50 \text{ Schicht 6 max erwartet}},$$

$$\text{oder } D_{50 \text{ Schicht 6 gemessen}} < D_{50 \text{ Schicht 6 min erwartet}},$$

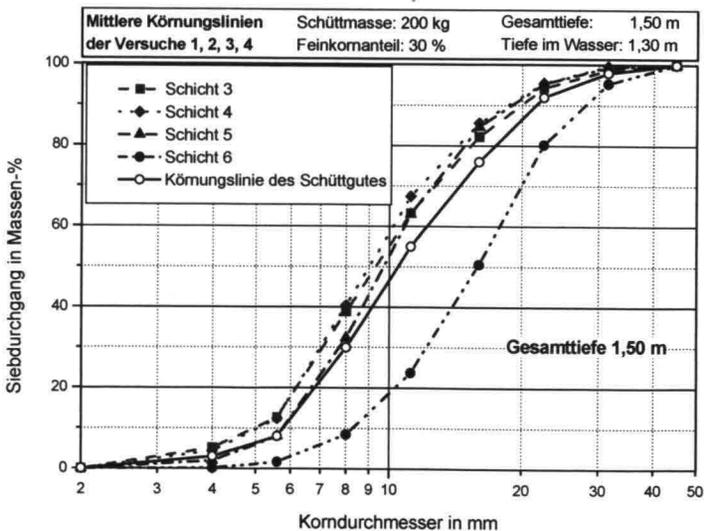
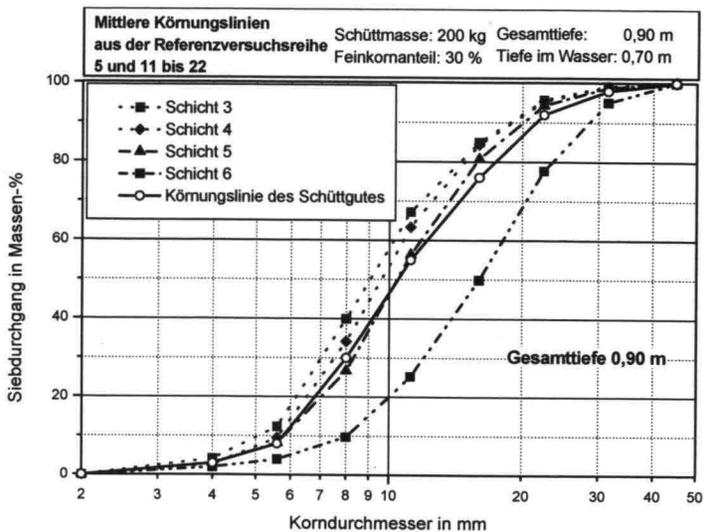
die Versuchsparameter haben einen Einfluss auf die Entmischung!

#### 4.2.1 Die Gesamttiefe $t_G$

Der Einfluss der Gesamttiefe  $t_G$  auf die Böschungsbildung wird mit Hilfe der in Kapitel 3.4.2 (Beschreibung der Versuche) beschriebenen Versuchsreihen untersucht.

Die Versuche Nr. 8, 40, 41 und 42 werden zur weiteren Bearbeitung nicht berücksichtigt, da die Versuche mit einer Materialmasse von 100 kg zu nicht repräsentativen Versuchsergebnisse führen, wie bereits erläutert.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse zwischen der Referenzversuchsreihe mit einer Gesamttiefe von 0,90 m und der Versuchsreihe 1 - 4 mit einer Gesamttiefe von 1,50 m ergibt sich Abb. 4.14 und die folgende Tabelle. Die Versuche erfolgten mit dem Schüttgut G1 im Maßstab 1:15 und eine Materialmasse von 200 kg.



**Abb. 4.14: Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Gesamttiefe:**  
Gesamttiefen  $t_G = 0,90$  m und  $t_G = 1,50$  m.

Versuchsnummer	Gesamt-tiefe [m]	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
5,11 bis 22	0,9	1,9	2,2	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	16,0	17,7
1 - 4	1,5	1,9	1,9	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	15,9	17,7
<b>Schicht 5:</b>										
5,11 bis 22	0,9	1,7	2,0	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	10,4	11,5
1 - 4	1,5	1,7	1,9	2,3	0,9	0,95	1,1	9,3	9,8	11,5
<b>Schicht 4:</b>										
5,11 bis 22	0,9	1,6	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,6	10,6
1 - 4	1,5	1,6	2,15	2,2	0,8	0,95	1,0	8,6	9,0	10,6
<b>Schicht 3:</b>										
5,11 bis 22	0,9	1,7	2,0	2,3	0,85	0,95	1,05	8,1	9,0	9,9
1 - 4	1,5	1,7	2,16	2,3	0,85	0,95	1,05	8,1	9,35	9,9

**Tabelle 4.6: Charakteristische Werte zur Untersuchung des Einflusses der Gesamttiefe auf die Böschungsbildung. Vergleich der Ergebnisse mit dem Schüttgut G1, Schüttmasse 200 kg, Maßstab 1:15**

Die charakteristischen Werte befinden sich alle im „möglichen Streuungsbereich“ der Referenzversuchsreihe. Folglich werden sie nicht von der Wassertiefe beeinflusst. Bei den dazugehörigen Körnungslinien ist ebenfalls kein messbarer Einfluss der Wassertiefe auf die Böschungsbildung festzustellen. Die mit 1,50 m Wassertiefe entstehende Böschung ist analog zu der Referenzversuchsreihe entmischt.

Alle weiteren Tabellen zur Untersuchung des Einflusses der Wassertiefe auf die Böschungsbildung sind dem Anhang 1 zu entnehmen. Sie werden innerhalb dieses vorliegenden Kapitels nicht näher erläutert, weil sie zu den gleichen Erkenntnissen führen wie die vorherigen.

Aus dem detaillierten Vergleich der Versuchsergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Gesamttiefe auf die Entmischung ergibt sich:

Die Werte U, C und D<sub>50</sub> sowie die Körnungslinien liegen im „möglichen Streuungsbereich“. Das heißt, die Werte bleiben unverändert, trotz einer Verlängerung des Fallweges auf der Böschung. Die Entmischung findet schon bei einer Tiefe von 0,90 m statt. Sie erfolgt bei den anderen Falltiefen im gleichen Maß. Vereinzelt wurden andere Phänomene beobachtet. Beispielsweise wurde bei einer Schicht einer Böschung der Ungleichförmigkeitsgrad größer als

erwartet. Das Auftreten dieser Phänomene ist als Ausnahme zu bewerten und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt. Die Erscheinungen werden als nicht repräsentativ betrachtet. Es war erwartet worden, dass sich die Böschung bei einer größeren Gesamttiefe stärker entmischt als bei einer geringeren. Die verstärkte Entmischung wurde aber entgegen der Erwartung weder beobachtet noch gemessen.

Bei den Versuchen mit geringeren Falltiefen hat die Entmischung bereits ab einer Gesamtfalltiefe von  $t_G = 0,40$  m (entspricht 6 m in der Natur, Versuch Nr. 42) stattgefunden. Das Ergebnis ist in Abb. 4.15 einzusehen. Zur besseren Erklärung des Phänomens der Entmischung wäre es notwendig, eine Grenztiefe zu bestimmen, ab welcher die Entmischung festzustellen ist. Diese Grenztiefe konnte anhand der durchgeführten Versuche nicht festgestellt werden. Im Versuch 42 wurde die geringste Tiefe im Wasser  $t_W = 0,20$  m untersucht. Dabei ist die Länge der Strecke in der Luft genauso lang wie im Wasser.

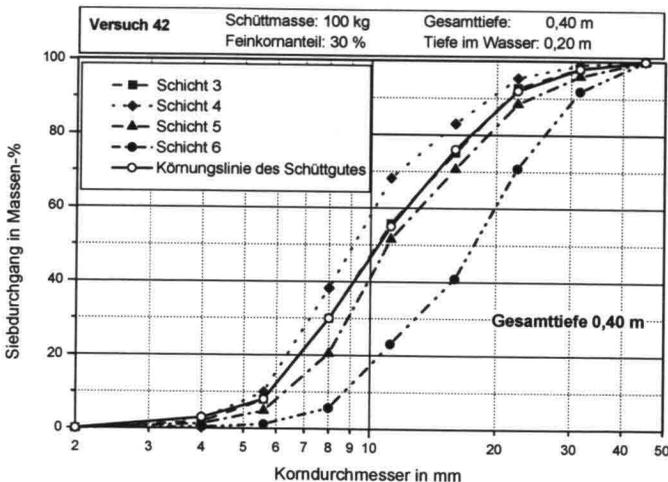


Abb. 4.15: Körnungslinien des Versuchs 42

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Gesamttiefe weder einen Einfluss auf das Auftreten noch auf die Stärke der Entmischung hat.

Versuchstechnisch kann aus diesen Ergebnissen gefolgert werden, dass die Versuche mit den größeren Maßstäben 2:15 und 4:15 in dem vorhandenen Becken auch durchgeführt werden können. Wenn die Falltiefe einen Einfluss auf die Wellenbrecherkernausbildung und insbesondere auf seine Entmischung gehabt hätte, hätten diese Versuche mit größeren Maßstäben in einem tieferen Becken durchgeführt werden müssen. Für die weiteren Versuche mit größeren Maßstäben wurde kein neuer Versuchsstand benötigt.

Abschließend ist Folgendes festzuhalten:

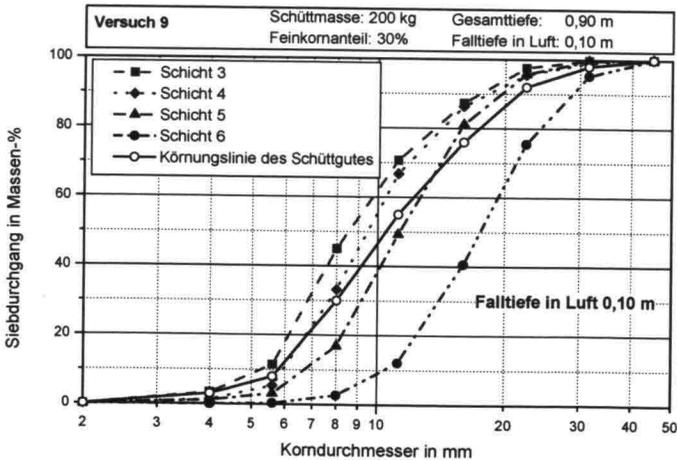
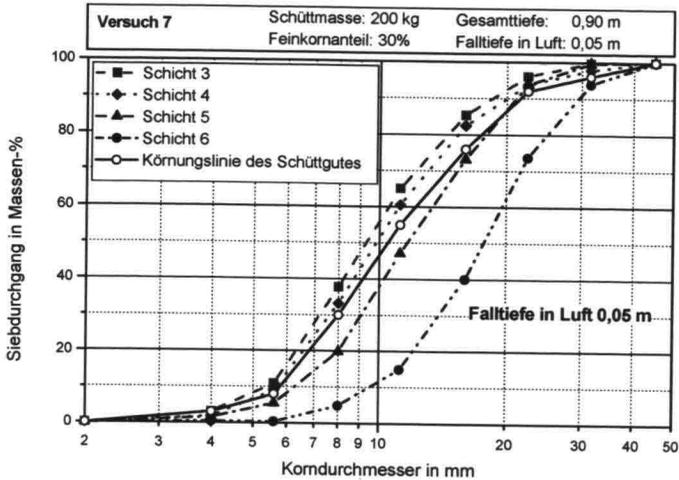
- Das Phänomen der Entmischung bei der Errichtung eines Wellenbrecherkerns durch Hinterkipper tritt in jedem Fall auf.
- Die Entmischung ist unabhängig von der Gesamttiefe in der der Kern gebaut wird, sie erfolgt im gleichen Maß wie bei der Referenzversuchsreihe.

#### 4.2.2 Die Falltiefe in Luft $t_L$

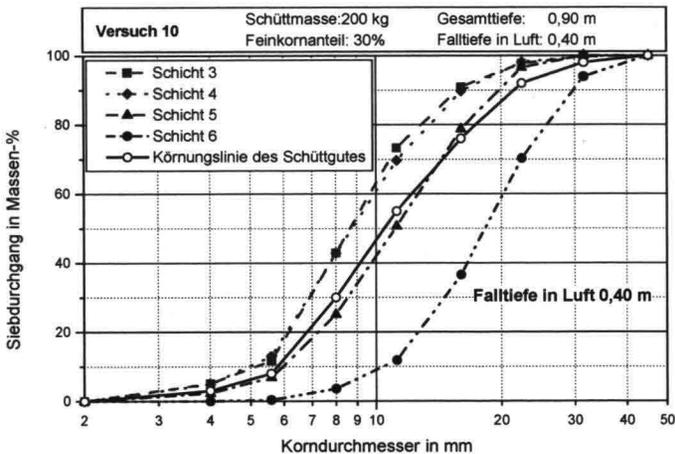
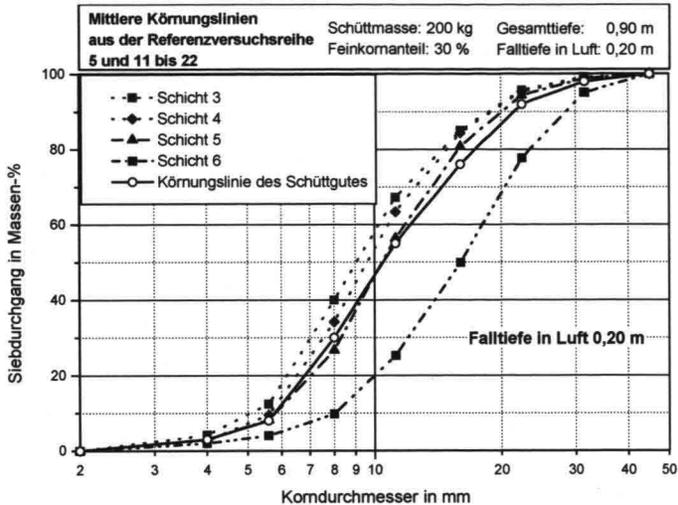
In Kapitel 3.3 (Versuchsreihe im kleinen Maßstab 1:15) wurden bereits die Versuche beschrieben, die zur Untersuchung eines möglichen Einflusses der Tiefe der Luftstrecke  $t_L$  dienen. Diese Versuche wurden alle bei einer Gesamttiefe  $t_G$  von 0,90 m durchgeführt. Die Ergebnisse bzw. die charakteristischen Werte der Versuchsböschungen sind in der Tabelle 4.7 dargestellt.

Versuch Nummer	$t_L$ in [m]	$U_{\min}$ erwartet [-]	$U$ gemessen [-]	$U_{\max}$ erwartet [-]	$C_{\min}$ erwartet [-]	$C$ - gemessen [-]	$C_{\max}$ erwartet [-]	$D_{50\min}$ erwartet [mm]	$D_{50}$ gemessen [mm]	$D_{50\max}$ erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
7	0,05	1,9	2,1	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	17,8	17,7
9	0,1	1,9	1,9	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	17,6	17,7
5, 11 bis 22	0,2	1,9	2,2	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	16,0	17,7
10	0,4	1,9	1,95	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	18,4	17,7
<b>Schicht 5:</b>										
7	0,05	1,7	2,1	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	11,7	11,5
9	0,1	1,7	1,9	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	11,3	11,5
5, 11 bis 22	0,2	1,7	2,0	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	10,4	11,5
10	0,4	1,7	2,1	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	11,2	11,5
<b>Schicht 4:</b>										
7	0,05	1,6	2,0	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,9	10,6
9	0,1	1,6	1,8	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,5	10,6
5, 11 bis 22	0,2	1,6	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,6	10,6
10	0,4	1,6	2,0	2,2	0,8	1,0	1,0	8,6	8,8	10,6
<b>Schicht 3:</b>										
7	0,05	1,7	2,0	2,3	0,85	0,9	1,05	8,1	9,3	9,9
9	0,1	1,7	1,85	2,3	0,85	0,9	1,05	8,1	8,5	9,9
5, 11 bis 22	0,2	1,7	2,0	2,3	0,85	0,95	1,05	8,1	9,0	9,9
10	0,4	1,7	1,9	2,3	0,85	1,0	1,05	8,1	8,7	9,9

**Tabelle 4.7: Charakteristische Werte zur Untersuchung des Einflusses der Falltiefe in Luft auf die Böschungsbildung. Vergleich der Ergebnisse der Versuchsreihe mit dem Schüttgut G1, Schüttmasse 200 kg.**



Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Falltiefe in Luft: Fall-  
 tiefen  $t_L = 0,05$  m und  $t_L = 0,10$  m. (Teil von Abb. 4.17)



**Abb. 4.17: Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Falltiefe in Luft: Falltiefen  $t_L = 0,05$  m,  $t_L = 0,10$  m,  $t_L = 0,20$  m und  $t_L = 0,40$  m.**

Die charakteristischen Werte und die Körnungslinien zeigen keine Anhaltspunkte für einen möglichen Einfluss der Länge des Fallweges in der Luft auf die Entmischung der Böschung. Bei dem Versuch Nr. 7 ist festzustellen, dass die Schichten 5 und 6 ein wenig gröber sind als bei dem Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22. Bei dem Versuch Nr. 10 ( $t_L = 0,4$  m) ist auch die Schicht 6 gröber als erwartet.

Allerdings zeigt sich kein Zusammenhang zwischen der Länge des Fallweges in der Luft und der Stärke der Entmischung der Schichten innerhalb der Böschungen. Dieses Ergebnis ist besonders wichtig, da in der Natur der Abstand der trockenen Abkipfstelle zum Wasser hauptsächlich durch die Wellen- und die Wasserstandverhältnisse an dem zu bauenden Wellenbrecher bestimmt ist. Wenn dieser Parameter einen Einfluss auf die Entmischung hätte, hätte zusätzlich ein optimaler Abstand für die Bestimmung der Abkippstellhöhe berücksichtigt werden müssen. Wenn eine geringere Luftstrecke zu weniger Entmischung geführt hätte, hätte dieses beispielsweise zu einer Eingrenzung der Ausführungszeiten beim Bau abhängig von den Gezeiten führen können. Auf der anderen Seite hätte die zunehmende Falltiefe durch die Luft zu einer Verminderung des Phänomens der Entmischung geführt, wäre die Errichtung einer höheren Abkipfstelle sinnvoll gewesen, was allerdings zu höheren Kosten für den Bauvorgang geführt hätte.

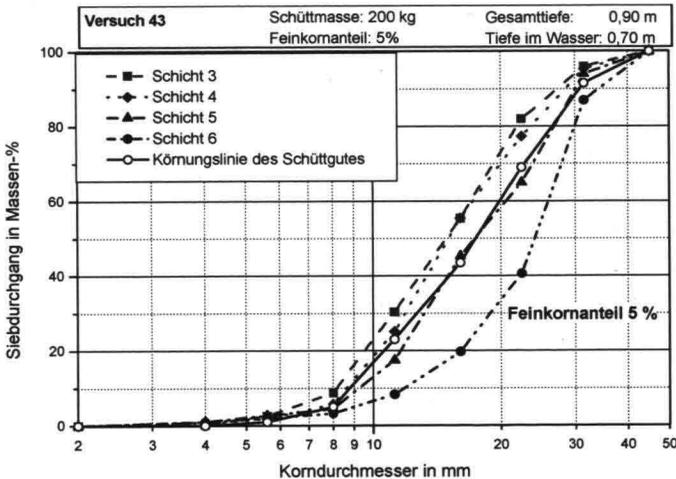
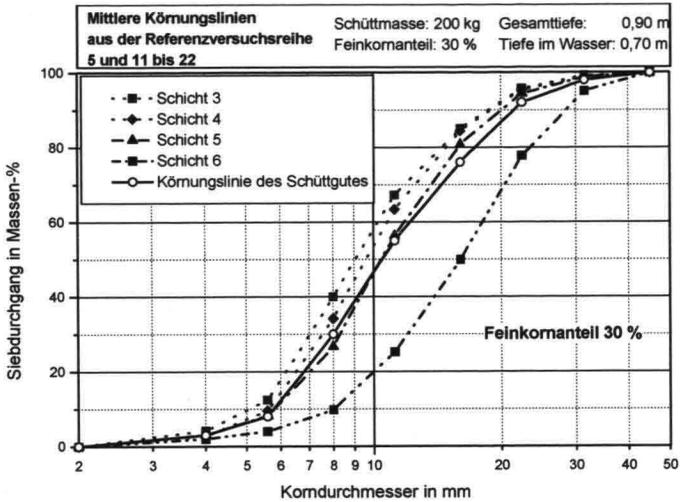
Festzuhalten ist, dass die Böschungsbildung unabhängig ist von der Länge der Luftstrecke.

#### 4.2.3 Der Feinkornanteil des Schüttgutes

Die Untersuchung des Einflusses des Feinkornanteils auf die Entmischung erfolgt durch den Vergleich der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22 mit dem Feinkornanteil  $F = 30\%$  und dem Versuch Nr. 43 mit einem Feinkornanteil von  $F = 5\%$ .

Versuch Nummer	Feinkornanteil F [%]	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
5, 11 bis 22	30	1,9	2,2	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	16,0	17,7
43	5	1,8	2,2	2,3	0,9	1,2	1,1	23,8	24,0	29,3
<b>Schicht 5:</b>										
5, 11 bis 22	30	1,7	2,0	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	10,4	11,5
43	5	1,6	2,2	2,1	0,9	0,9	1,1	15,4	17,4	19,0
<b>Schicht 4:</b>										
5, 11 bis 22	30	1,6	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,6	10,6
43	5	1,5	2,0	2,0	0,8	0,95	0,95	15,2	15,0	17,6
<b>Schicht 3:</b>										
5, 11 bis 22	30	1,7	2,0	2,3	0,85	0,95	1,05	8,1	9,0	9,9
43	5	1,6	2,1	2,1	0,85	0,9	1,05	13,4	14,8	16,5

**Tabelle 4.8: Charakteristische Werte zur Untersuchung des Einflusses des Feinkornanteils auf die Böschungsbildung. Vergleich der Ergebnisse der Versuchsreihe mit dem Schüttgut G1 und G2.**



**Abb. 4.17: Versuche zur Untersuchung des Einflusses des Feinkornanteils: Feinkornanteile  $F = 30\%$  und  $F = 5\%$ .**

Allein die Körnungslinie der Schicht 4 im Versuch Nr. 43 befindet sich außerhalb des „möglichen Streubereichs“. Das Phänomen der Entmischung innerhalb eines Schüttgutes ist bei den geringeren Feinkornanteilen genauso deutlich zu erkennen wie bei den größeren

Feinkornanteilen. Bei den beiden untersuchten Schüttgütern befinden sich die Körnungslinien der Böschung innerhalb des „möglichen Streuungsbereichs“.

Um die vermutete Entmischung zu reduzieren empfiehlt Bruun (1985), den Feinkornanteil abzusenken und eine Kornzusammensetzung mit einem Feinkornanteil geringer als 5 % zu wählen.

Aus der Reduzierung des Feinkornanteils eines Schüttgutes folgt, dass das Schüttmaterial gröber wird, und sich dann eine gröbere Böschung bildet. Allerdings verhindert die Reduzierung des Feinkornanteils nicht die Entmischung. Die Entmischung erfolgt unabhängig von dem Feinkornanteil des Schüttmaterials. Die Absiebung der feinen Körner würde zudem zu einem Kostenmehraufwand führen.

#### **4.2.4 Der Ungleichförmigkeitsgrad des Schüttgutes**

Der Ungleichförmigkeitsgrad eines Schüttgutes ist durch die Form seiner Körnungslinie definiert. Eine „flache Körnungslinie“ bedeutet einen großen Ungleichförmigkeitsgrad und eine „steile Körnungslinie“ einen kleinen. Dieser Parameter ist für die Stabilität des Bauwerkes wichtig. Bei einer steilen Körnungslinie des Kerns sind größere Schäden bei der Deckschicht zu erwarten als bei einer flachen schreiben Barends and Hölscher (1988). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind Versuche durchgeführt worden, um die möglichen Unterschiede in dem Böschungsaufbau durch eine Veränderung in der Körnungslinie zu erkennen. Allerdings ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein Schüttgut mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von beispielsweise  $U = 1,6$  für den Bau eines Wellenbrechers verwendet wird. Dieser Wert wäre viel zu gering für ein natürliches durch Sprengung gewonnenes Material.

Um gleichzeitig auftretende Einflüsse auf die Böschungsbildung zu vermeiden, werden nur die Ergebnisse von Versuchen mit der gleichen Falltiefe verglichen. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, damit nur eindeutige Schlussfolgerungen aus den unterschiedlichen Einflüssen getroffen werden. Die vorherigen Kapitel hatten bereits gezeigt, dass die Falltiefe keinen Einfluss auf die Böschungsbildung hat.

Zuerst werden die Versuche mit einer Gesamttiefe von 0,90 m miteinander verglichen, das heißt der Referenzversuch (Schüttgut G1) mit den Versuchen Nr. 34, 35 (Schüttgut G3) und die Versuche Nr. 36-38, 46 (Schüttgut G4).

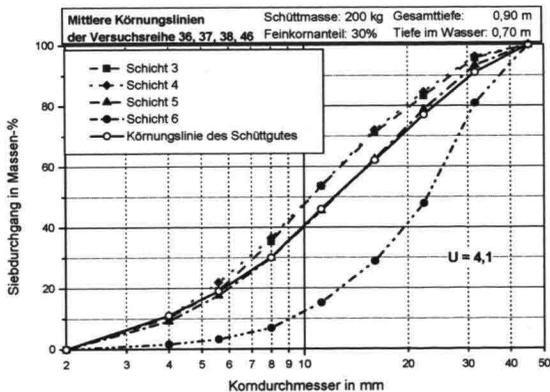
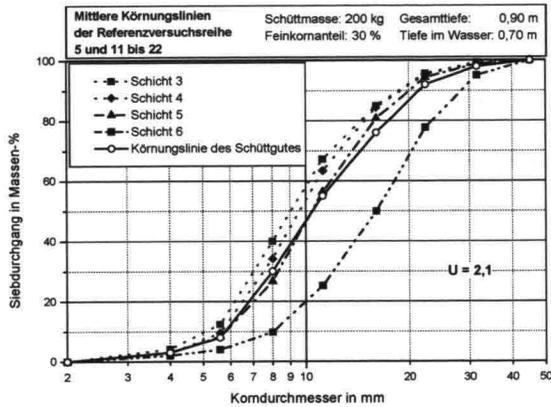
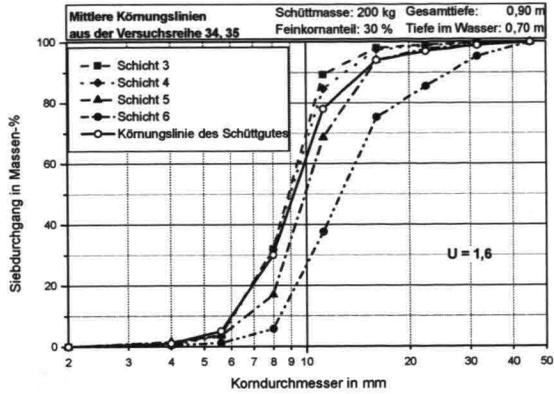


Abb. 4.18: Versuche zur Untersuchung des Einflusses des Ungleichförmigkeitsgrades: Ungleichförmigkeitsgraden  $U = 1,6$ ,  $U = 2,1$  und  $U = 4,1$ .

Versuch Nummer	U <sub>Schüttgut</sub> [-]	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U <sub>gemessen</sub> [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C <sub>gemessen</sub> [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
34, 35 (G3)	1,6	1,5	1,7	1,9	1,1	0,9	1,3	12,5	12,6	15,5
5, 11-22 (G1)	2,1	1,9	2,2	2,5	0,9	1,0	1,1	14,3	16,0	17,7
36-38, 46 (G4)	4,1	3,8	2,8	4,8	1,1	1,16	1,3	16,9	22,9	20,9
<b>Schicht 5:</b>										
34, 35 (G3)	1,6	1,3	1,6	1,7	0,8	1,1	1,0	8,1	9,9	10,0
5, 11-22 (G1)	2,1	1,8	2,0	2,2	0,8	1,0	1,0	9,3	10,4	11,5
36-38, 46 (G4)	4,1	3,4	3,7	4,4	0,8	1,1	1,0	11,0	12,3	13,6
<b>Schicht 4:</b>										
34, 35 (G3)	1,6	1,3	1,6	1,6	0,8	1,05	1,0	7,5	8,95	9,3
5, 11-22 (G1)	2,1	1,7	1,9	2,1	0,8	0,9	1,0	8,6	9,6	10,6
36-38, 46 (G4)	4,1	3,3	3,3	4,2	0,8	0,96	1,0	10,1	10,4	12,5
<b>Schicht 3:</b>										
34, 35 (G3)	1,6	1,3	1,6	1,7	0,8	1,06	1,0	7,1	8,9	8,7
5, 11-22 (G1)	2,1	1,8	2,0	2,2	0,8	0,95	1,0	8,1	9,0	9,9
36-38, 46 (G4)	4,1	3,4	3,25	4,4	0,8	1,0	1,0	9,5	10,5	11,7

**Tabelle 4.9: Versuche zur Untersuchung des Einflusses des Ungleichförmigkeitsgrades.**

Bei dem Schüttgut G4 mit  $U = 4,1$  befindet sich die Körnungslinie der Schicht 6 außerhalb des „möglichen Streubereichs“. Die Schicht 6 ist gröber als erwartet. Dieses gilt auch für die Schicht 3 der Böschung G3 ( $U = 1,6$ ), allerdings in einem viel geringeren Maß. Bei allen anderen Schichten ist die Entmischung der Schüttgüter mit dem Referenzversuch mit G1 ( $U = 2,1$ ) vergleichbar.

Die Ergebnisse der Versuche, die mit anderen Falltiefen durchgeführt wurden oder einen größeren Maßstab haben, sind Anhang 1 zu entnehmen.

Die Untersuchung des möglichen Einflusses der Kornzusammensetzung der Schüttgüter auf die Böschungsbildung lässt keine Tendenz erkennen. Die bei den Einzelversuchen eintretenden Phänomene (grau markiert) wiederholen sich nicht. Die festgestellten Abweichungen werden daher als zufällige Ausnahmen beurteilt.

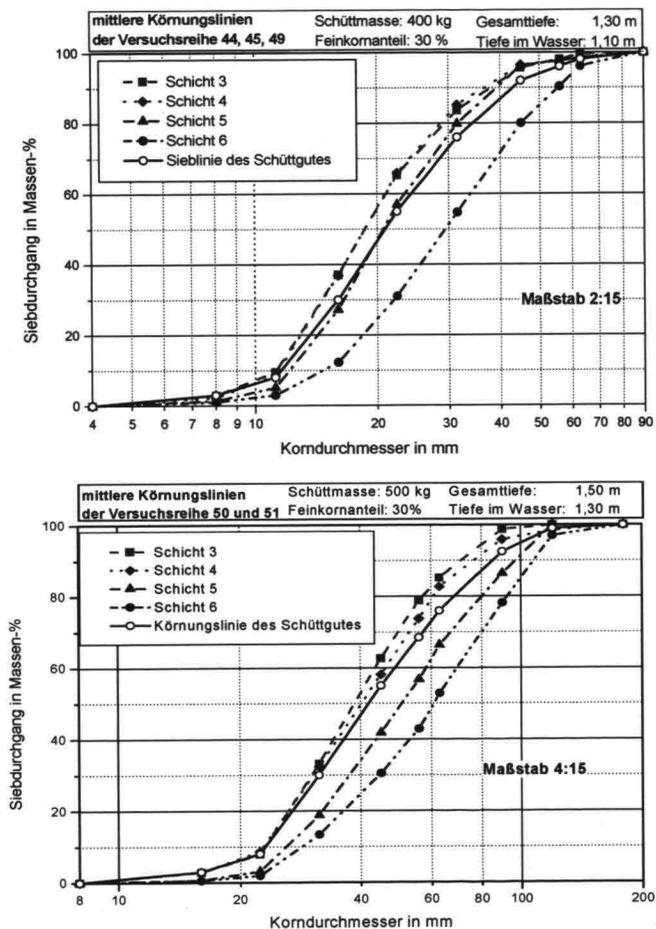
Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Ungleichförmigkeitsgrad der Kornzusammensetzung keinen messbaren oder sichtbaren Einfluss auf die Böschungsentmischung hat.

## 4.2.5 Der Maßstab

Der Einfluss des Maßstabes könnte eine wesentliche Rolle für diese Untersuchungen spielen. Die Frage, wie sich die Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab übertragen lassen, soll mit der folgenden Untersuchung beantwortet werden.

In diesem Zusammenhang werden die Versuchsergebnisse von Schüttgütern gleicher Zusammensetzung aber verschiedener Größe untersucht.

Zuerst werden die Versuchsergebnisse mit dem Schüttgut G1 in den Maßstäben 1:15, 2:15 und 4:5 untereinander verglichen (vgl. Abb. 4.17 und Abb. 4.19 und Tabelle 4.10).



**Abb. 4.19: Versuche zur Untersuchung des Einflusses des Maßstabes: Maßstäbe 2:15 und 4:15 und Schüttgut G1.**

Die Versuche sind untereinander vergleichbar, obwohl sie bei der gleichen Falltiefe durchgeführt werden. Eigentlich handelt es sich maßstabsmäßig um unterschiedliche Falltiefen. In Kapitel 4.2.1 wurde aber bereits nachgewiesen, dass die Falltiefe keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat.

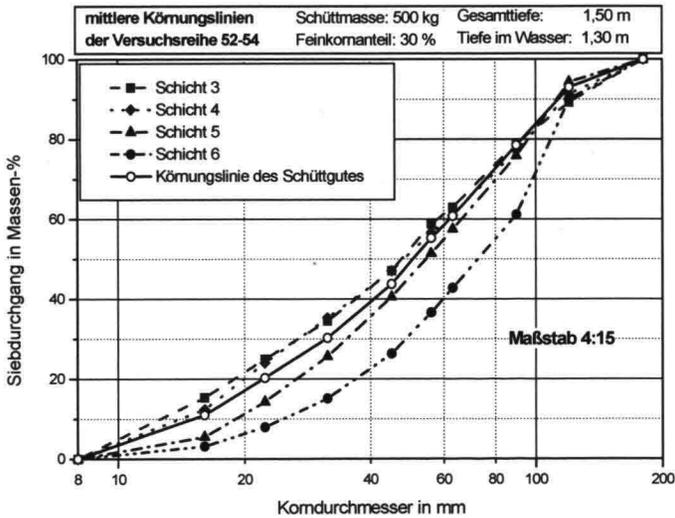
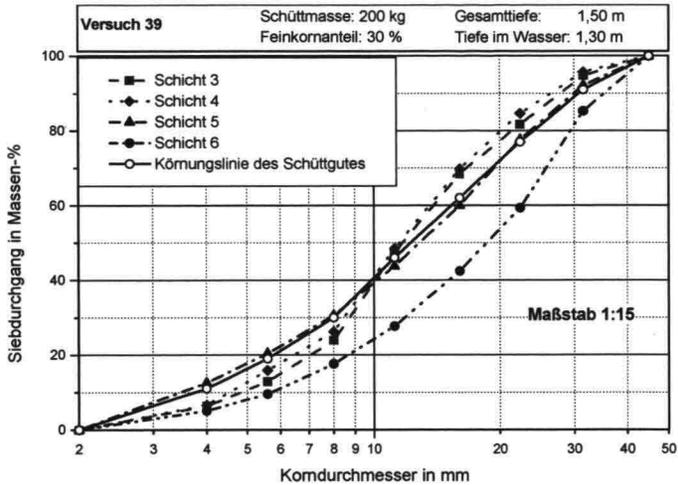
Versuch Nummer	Maßstab	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
5, 11 bis 22	1:15	1,9	2,2	2,5	0,9	1,0	1,1		16,0	
44, 45, 49	2:15	1,9	2,3	2,5	0,9	1,0	1,1	28,5	29,4	35,2
50, 51	4:15	1,9	2,45	2,5	0,9	1,0	1,1	68,3	60,9	84,1
<b>Schicht 5:</b>										
5, 11 bis 22	1:15	0,7	2,0	2,3	0,9	1,0	1,1		10,4	
44, 45, 49	2:15	0,7	1,9	2,3	0,9	1,0	1,1	18,6	20,7	22,9
50, 51	4:15	0,7	2,2	2,3	0,9	0,9	1,1	44,4	50,7	54,7
<b>Schicht 4:</b>										
5, 11 bis 22	1:15	1,6	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0		9,6	
44, 45, 49	2:15	1,6	1,8	2,2	0,8	0,9	1,0	17,1	18,6	21,1
50, 51	4:15	1,6	2,0	2,2	0,8	0,9	1,0	40,9	40,2	50,4
<b>Schicht 3:</b>										
5, 11 bis 22	1:15	1,7	2,0	2,3	0,85	0,95	1,05		9,0	
44, 45, 49	2:15	1,7	1,9	2,3	0,85	0,9	1,05	15,6	18,65	20,1
50, 51	4:15	1,7	1,9	2,3	0,85	0,9	1,05	38,4	38,6	47,3

**Tabelle 4.10: Charakteristische Werte zur Untersuchung des Einflusses des Maßstabes auf die Böschungsausbildung. Vergleich der Ergebnisse der Versuchsreihe mit dem Schüttgut G1.**

Die Schichten 4 und 6 sind im großen Maßstab 4:15 feiner als erwartet. Sie befinden sich außerhalb des „möglichen Streubereichs“. In dem Maßstab 2:15 ist dagegen keine Abweichung der Ergebnisse festzustellen.

Anhand der charakteristischen Werte für die Versuche mit dem Schüttgut G1 scheint der große Maßstab 4:15 die Versuchsergebnisse so zu beeinflussen, dass die Schicht 6 feiner ist als erwartet. Die entstandene Böschung ist sehr stark entmisch. Allerdings sind bei den Körnungslinien keine Unterschiede zwischen den Entmischungen der Versuchsreihe zu beobachten.

Die Ergebnisse der Versuche mit dem Schüttgut G4 zur Untersuchung des Maßstabseinflusses auf die Böschungsausbildung werden in der Tabelle 4.11 dargestellt.



**Abb. 4.20: Versuche zur Untersuchung des Einflusses des Maßstabes: Maßstäbe 1:15 und 4:15 und dem Schüttgut G4.**

Versuch Nummer	Maßstab	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U <sub>mittel</sub> gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C <sub>mittel</sub> gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [-]	D <sub>50mittel</sub> gemessen [-]	D <sub>50max</sub> erwartet [-]
<b>Schicht 6:</b>										
39	1:15	3,8	2,8	4,8	1,1	1,2	1,3	16,9	22,9	20,9
52-54	4:15	3,8	3,6	4,8	1,1	1,1	1,3	69,9	72,5	86,1
<b>Schicht 5:</b>										
39	1:15	3,4	3,7	4,4	0,8	1,1	1,0	11,0	12,3	13,6
52-54	4:15	3,4	3,5	4,4	0,8	1,0	1,0	45,4	54,5	56
<b>Schicht 4:</b>										
39	1:15	3,3	3,3	4,2	0,8	1,0	1,0	11,1	10,4	12,5
52-54	4:15	3,4	4,4	4,4	0,8	0,8	1,0	41,9	48,2	51,7
<b>Schicht 3:</b>										
39	1:15	3,4	3,3	4,4	0,8	1,0	1,0	9,5	10,5	11,7
52-54	4:15	3,4	4,6	4,4	0,8	1,0	1,0	39,3	47,5	48,5

**Tabelle 4.11: Charakteristische Werte, Einflüsse des Maßstabes auf die Böschungsausbildung. Vergleich der Versuchsreihe mit dem Schüttgut G4**

In diesem Fall ist nur die Schicht 4 der Böschung (Versuch 39) im Maßstab 1:15 feiner als erwartet. Ihre Körnungslinie befindet sich außerhalb der erwartenden Körnungslinie  $\pm$  Standardabweichung. Das bei dem Schüttgut G1 beobachtete Phänomen (Schichten 4 und 6 feiner als erwartet) hat sich mit dem Schüttgut G4 nicht wiederholt.

Bei den beiden Körnungslinien G1 und G4 sind einzelne Unterschiede zwischen dem Aufbau der Böschungen erkennbar. Allerdings verteilen sich diese Unterschiede nicht über die gesamte Körnungslinie. Des Weiteren treten Unterschiede in beiden Körnungslinien nicht auf. Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Maßstab keinen wesentlichen Einfluss auf den Böschungsaufbau hat. Aus dieser Erkenntnis ist abzuleiten, dass sich die in den Versuchen festgestellte Entmischung auf eine Böschung in situ übertragen lässt.

### 4.3 Übertragung der Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab

Die Analyse der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass die prozentuale Entmischung der Kornzusammensetzung im Vergleich zu der des Schüttgutes in den drei untersuchten Maßstäben gleich bleibt. Eine Interpolation der Ergebnisse innerhalb des untersuchten Maßstabsbereiches ist daher möglich. Die Extrapolation der Ergebnisse in einen noch größeren Maßstab ist möglich, wenn der Naturmaßstab zu keiner Veränderung des physikalischen Bereiches, in dem sich das Schüttgut beim Abrollen entlang der Böschung befindet, führt. In diesem Fall muss sich die Fallbewegung der abgekippten Steine in dem gleichen Reynoldsbereich befinden wie die Versuche. Zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse und somit des physikalischen Bereichs ist die Reynolds-Zahl maßgebend (vgl. Abb. 4.21).

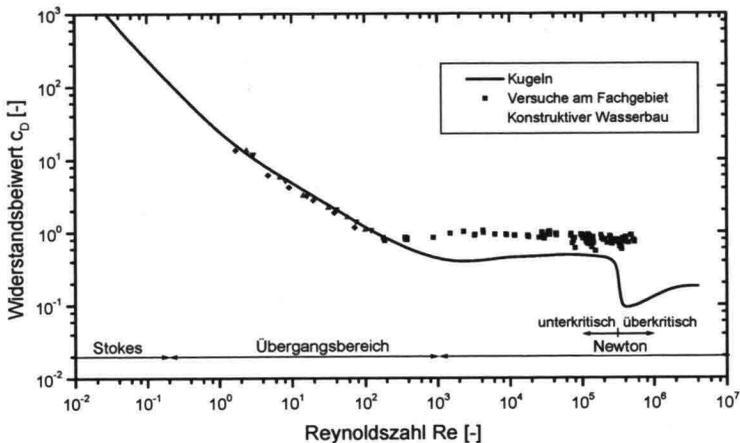


Abb. 4.21: Widerstandsbeiwert von Würfeln in Abhängigkeit der Reynoldszahl; Ergebnisse von am Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau der TU Berlin durchgeführten Versuchen, Vergleich mit bekannten Werten für Kugeln.

Die Geschwindigkeiten von Steinen beim Abrollen auf der Böschung werden in Kapitel 5 gemessen. Ein Stein der Größe  $D_{50} = 31,5$  bis  $45$  mm bewegt sich mit der mittleren Endgeschwindigkeit von  $0,38$  m/s und einer Reynoldszahl von  $Re = 1,3 \cdot 10^4$  (Bei einer Temperatur von  $15^\circ$  beträgt die Viskosität des Wassers  $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s).

Die Reynoldszahl ist größer als  $Re > 3 \cdot 10^3$ , die Steinbewegung befindet sich daher im Newtonschen Bereich.

Ein Stein der Größe  $D_{50} = 240 \text{ mm}$  (240 mm entspricht dem  $D_{50}$  des Schüttgutes im Naturmaßstab) würde sich auf der Böschung mit einer mittleren Endgeschwindigkeit von ca. 1 m/s fortbewegen (vgl. Kapitel 5) und einer Reynolds-Zahl von  $Re = 2 \cdot 10^5$ . Die Strömungsverhältnisse um die Steine würden sich bei einer Schüttung in dem Naturmaßstab auch im Newtonschen Bereich befinden.

Zusammenfassend ist eine Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Natur möglich. Die Entmischung in der Natur erfolgt, wie bei den in diesem Kapitel vorgestellten Versuchen, in den gleichen prozentualen Verhältnissen wie die gemessene Entmischung der Referenzversuchsreihe.

Zur Veranschaulichung wird in Abb. 4.22 die Übertragung der Kornzusammensetzung des Schüttgutes G1 vom Maßstab 1:15 auf den Naturmaßstab dargestellt.

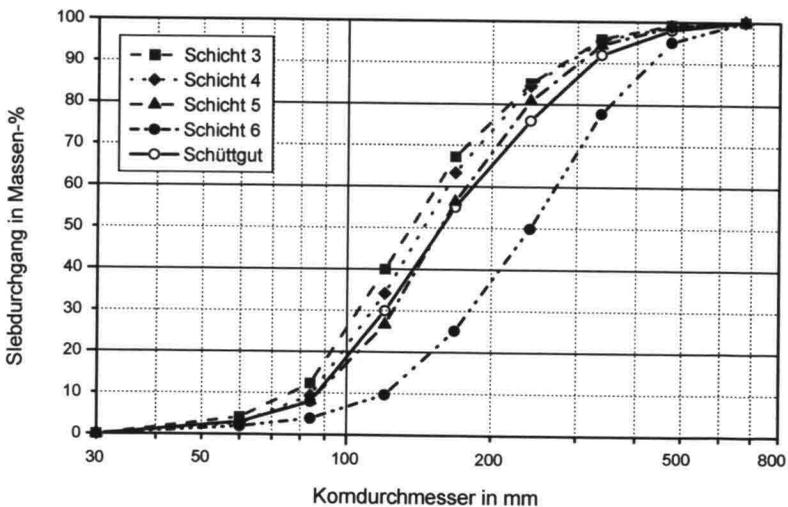


Abb. 4.22: Kornzusammensetzung eines in der Natur gebauten Wellenbrecherkernes

## 4.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Während des Baus eines Wellenbrecherkerns vom Land aus mit Hinterkippern findet eine Entmischung des Schüttgutes statt. Das feine Material lagert sich in den oberen Schichten der Böschung ab. Die Böschung wird mit zunehmender Wassertiefe gröber. Der mittlere Korndurchmesser am Fuß des Wellenbrecherkerns ist ca. 50 % gröber als der des abgekipperten Schüttgutes. Die statistische Auswertung zur Bestimmung der Kornzusammensetzung einer Böschung liefert eine Vorhersage für einen typischen Böschungsaufbau eines Wellenbrecherkerns.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die folgenden Parameter die Entmischung **nicht beeinflussen**:

- die Wassertiefe,
- der lotrechte Anteil des Fallweges durch die Luft,
- der Feinkornanteil des geschütteten Kernmaterials,
- der Ungleichförmigkeitsgrad des Schüttgutes.

Folglich kann man durch die geeignete Kornzusammensetzung des Schüttgutes die Entmischung des Schüttmaterials in keiner Weise verringern. Das Abkippen mit Hinterkippern ins Wasser führt stets zu einer nicht homogenen Böschungsbildung.

Das ursprüngliche Ziel der Arbeit war es, die Konsequenzen der Anwendung des Bauverfahrens mit Hinterkippern zu untersuchen, und aus der Interpretation der Ergebnisse die Bauweise zu verbessern. Eine Verbesserung des Bauverfahrens wäre möglich gewesen, wenn durch den Einfluss von Randparametern beim Abkippen oder durch die Verwendung einer optimal zusammengesetzten Körnungslinie für das Schüttgut eine Vermeidung oder zumindest Reduzierung der Entmischung erfolgreich gewesen wäre. Die Versuchsergebnisse haben aber gezeigt, dass sich die Entmischung hauptsächlich durch das Bauverfahren ergibt. Es ist bei dem untersuchten Bauverfahren jedoch leider nicht möglich, die Entmischung zu beeinflussen.

Die festgestellte Entmischung muss wegen ihrer starken Bedeutung auf die Qualität des Kerns beim Bau von Wellenbrechern berücksichtigt werden. Die Entmischung kann einen Einfluss auf die Stabilität des ganzen Bauwerkes und auf die Wirksamkeit der Filterschichten haben. Die Richtlinien über die Zusammensetzung der Wellenbrecherkerne sind stets für gut durchmischte Kerne bestimmt. Eine Entmischung wird dabei niemals berücksichtigt.

## **5 Physikalische Grundlagen der Unterwasserschüttung bei Böschungen**

Beim Schütten eines Wellenbrecherkernes in Landbauweise wurde in den vorherigen Kapiteln eine durch Änderungen von Versuchsparametern nicht vermeidbare Entmischung des abgekippten Schüttgutes festgestellt. Das Phänomen der Entmischung soll daher physikalisch untersucht werden, mit dem Ziel, diese Entmischung zu reduzieren.

In diesem Kapitel wird die Mechanik von Einzelsteinen beim Abrollen auf einer Unterwasserböschung untersucht. Die Eingrenzung dieser Betrachtung auf Einzelsteine begründet sich in der Durchführung von Versuchen mit Steinschwärmen. Diese Versuche haben gezeigt, dass sich ein einzelner Stein beim Abrollen auf einer Böschung ähnlich verhält wie ein Stein innerhalb eines Steinschwarms. Es wurde zwar beobachtet, dass ein Einzelstein innerhalb eines Schwarms schneller ist als wenn er sich isoliert fortbewegt. Der kleinere Stein wurde aber auch innerhalb des Schwarms stets im gleichen Verhältnis langsamer als ein großer. Daraus folgt, dass das Verhalten von Einzelsteinen auf das von Steinschwärmen übertragen werden kann.

Zunächst (Kapitel 5.2 und 5.3) werden mit Hilfe von Versuchsdurchführungen das Verhalten von Einzelsteinen beschrieben und die Einflüsse von verschiedenen Parametern erklärt. Das mechanische Verhalten von geschütteten Einzelsteinen wird möglichst exakt beschrieben. Die Steine werden hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und Bewegungsarten untersucht. In Kapitel 5.4 werden die wesentlichen Gleichungen aufgeführt, die zur mathematischen Beschreibung der Unterwasserschüttung bei Böschungen verwendet werden.

Eine Übertragung dieser Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab wird aus der Betrachtung des mechanischen Vorganges abgeleitet.

### **5.1 Physikalische Beobachtungen**

Im Gebiet des Wellenbrecherbaus befasst sich die Literatur selten mit dem Aufbau des Kernes und beschränkt sich auf Hinweise über eine mögliche Entmischung des Schüttmaterials (vgl. Kapitel 2). Im Baubereich setzt sich keine andere Disziplin mit Unterwasserschüttungen ausführlich auseinander. Die Bewegungsvorgänge von Steinen in der Luft sind dagegen in mehreren Untersuchungen beschrieben, wie z. B. die von Bozzolo (1987) bei einem Stein Schlag. Die dabei beobachtenden Bewegungsvorgänge auf einer geneigten, rauen Oberfläche wie Gleiten, Rollen, Springen und dem Stoß zwischen Stein und Boden können auf das Medium Wasser übertragen werden.

## 5.2 Versuchsbeschreibung

Die Unterwasserbewegung von Einzelsteinen wurde während des Herabrollens einer Böschung untersucht. Die Einzelsteine wurden mit der Kippeinrichtung auf eine Böschung fallen gelassen und dabei beobachtet. Der Versuchsstand (Abb. 5.1) ist derjenige, der zur Betrachtung der Entmischung in Kapitel 3 auch verwendet wurde.

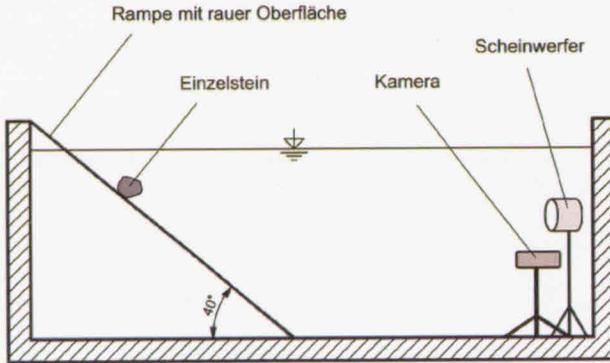


Abb. 5.1: Prinzipskizze des Versuchsstandes

Auf der Rampe wurden zur Auswertung horizontale Markierungslinien in einem Abstand von 10 cm aufgetragen, von 0 cm am Fuß bis zu 200 cm oben (vgl. Abb. 5.2).



Abb. 5.2: Foto der verwendeten Rampe

Zur Versuchsaufnahme wurde eine digitale Videokamera in einem wasserdichten Gehäuse verwendet. Die Auswertung erfolgte nachträglich mit einem digitalen Videorecorder.

### 5.2.1 Versuchsmaterial

Neun Steine (Grauwacke) aus drei verschiedenen Korngrößen wurden für diese Untersuchungen gewählt. Es handelt sich um Steine aus den in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungen, welche die Anforderungen zum Wellenbrecherkernbau erfüllen. Die gewählten Steine sind in Abb. 5.3 mit ihrer Positionierung in der Klassifikation nach Zingg in Abb. 5.4 beschrieben.

Die Steine sind nach Kornfraktionen eingefärbt.

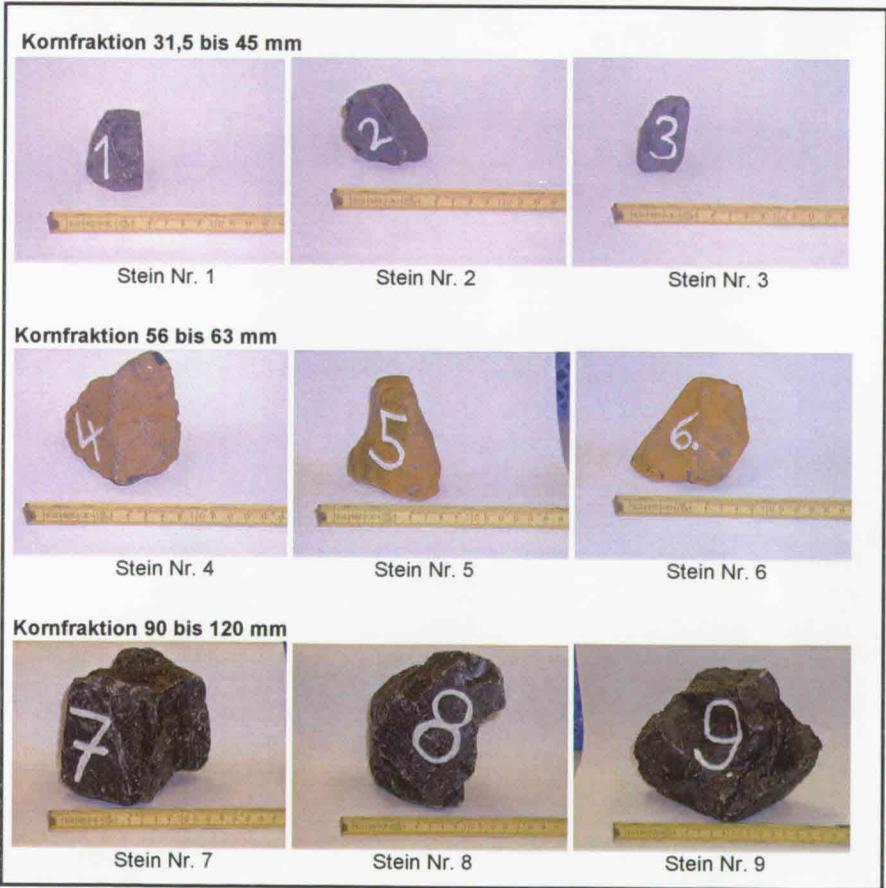


Abb. 5.3 : Neun gewählte Steine als Versuchsmaterial

Eine Zusammenfassung der Hauptcharakteristika dieser Steine ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Kornfraktion [mm]	Stein Nr.	long l [mm]	intermediate i [mm]	short s [mm]	l/s [-]	s/i [-]	i/l [-]	Masse [g]
31,5 - 45	1	48	43	37	1,30	0,86	0,90	101
	2	53	35	32	1,66	0,91	0,66	102
	3	54	42	30	1,80	0,71	0,78	102
56 - 63	4	70	57	42	1,67	0,74	0,81	328
	5	81	69	48	1,69	0,70	0,85	335
	6	60	59	40	1,50	0,68	0,98	346
90 - 120	7	118	108	80	1,48	0,74	0,92	2035
	8	133	89	87	1,53	0,98	0,67	2034
	9	157	137	99	1,59	0,72	0,87	2100

Tabelle. 5.1: Charakteristika der neun ausgewählten Steine

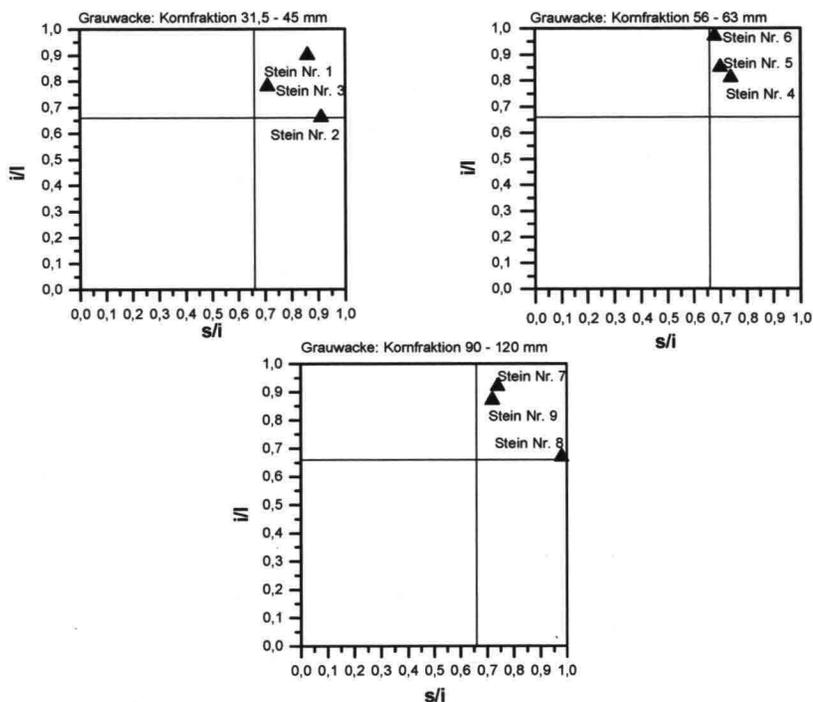


Abb. 5.4: Anordnung der neun Steine in einer Klassifikation nach Zingg

## 5.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsreihen erfolgten jeweils im Wasser und als Vergleich in der Luft, damit auch die Erkenntnisse aus der Literatur für die Bewegung in der Luft berücksichtigt werden können.

Die Steine wurden mit der Kippeinrichtung ins Wasser gekippt, um die Landbauweise im Modell nachzubilden. Zusätzlich wurden auch andere Abwurfarten untersucht, um den Einfluss der Abwurfart zu bestimmen.

Die Abwurfarten sind Abb. 5.5 zu entnehmen. Sie werden wie folgt beschrieben:

- Abwurfart 1: Die Steine wurden per Hand mit ihrer maximalen Schattenfläche orthogonal zur Bewegungsrichtung mittig auf eine feste Markierungslinie gesetzt und von dort aus fallen gelassen.
- Abwurfart 2: Die Steine wurden per Hand von der Rampenoberkante fallen gelassen.
- Abwurfart 3: Die Steine wurden mit einem vertikalen Abstand von 60 cm zur Rampenoberkante fallen gelassen.
- Abwurfart 4: Die Steine wurden mit der Kippeinrichtung auf die Rampe fallen gelassen.

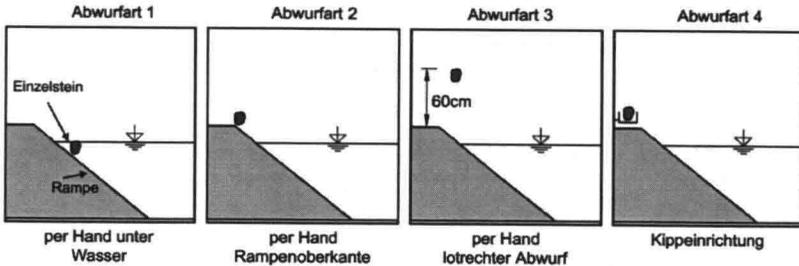


Abb. 5.5: Darstellung der untersuchten Abwurfarten

Eine Übersicht über den Inhalt der Versuchsreihen zeigt Abb. 5.6.



Abb. 5.6: Beschreibung des Inhalts der Versuchsreihen

### 5.2.3 Versuchsauswertung

Bei der Auswertung werden beobachtet:

- das Fallverhalten der Steine
- die Geschwindigkeit der Steine
- das endgültige Lage der Steine

Die Bestimmung des Fallverhaltens und der Geschwindigkeiten erfolgte anhand der während der Versuche aufgezeichneten Videoaufnahmen.

Die Auswertung des Landeverhaltens erfolgte sofort nach der Durchführung einer Versuchsreihe in dem die Landestelle aller Steine notiert wurde.

Die Geschwindigkeit eines Steines wird über die Zeit, in der ein Stein ein Wegintervall von 10 cm durchquert, berechnet. Die Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit eines Wegintervalls beschreibt die Gleichung (5.1):

$$v_i = \frac{W}{\Delta t} \quad (5.1)$$

- $v_i$  mittlere Geschwindigkeit auf der Rampe zwischen den Markierungslinien i-1 und i [m/s]
- $W$  zurückgelegter Weg auf der Rampe [m]; hier Weg = 0,10 m
- $\Delta t$  Zeit, die für den Weg auf der Rampe zwischen den Markierungslinien i-1 und i benötigt wird [s]

## 5.2.4 Durchgeführte Versuche

Die Versuche, die zur Beschreibung des Schüttvorganges durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Versuchsreihe Nr.	Fall	Oberflächenbeschaffenheit der Rampe	Abwurfart	Medium	Steine	Anzahl der Versuche
I	lotrecht	ohne Rampe	Hand	Wasser/Luft	1 bis 9	3
II	auf der Rampe	rau	Hand, unter der Wasseroberfläche	Wasser	1 bis 9	3
III	auf der Rampe	rau	Hand, von der Rampenoberkante	Wasser/Luft	1 bis 9	3
IV	auf der Rampe	rau	Hand, lotrechter Abwurf	Wasser/Luft	1 bis 9	3
V	auf der Rampe	rau	Kippeinrichtung	Wasser/Luft	1 bis 9	3
VI	auf der Rampe	glatt	Hand, unter der Wasseroberfläche	Wasser	3, 5, 9	3
VII	auf der Rampe	glatt	Kippeinrichtung	Wasser/Luft	3, 5, 9	3

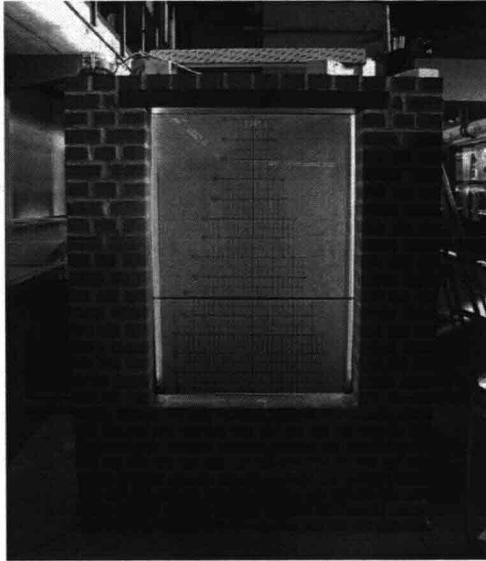
Tabelle 5.2: Beschreibung der durchgeführten Versuche

Die Versuchsreihe V bildet das Einbringen von einem Wellenbrecherkern in der Landbauweise im Wasser nach. Sie gilt als Referenzversuch. Alle anderen Versuche wurden durchgeführt, mit dem Zweck, die Mechanik des Fallverhaltens dieser Versuchsreihe zu verdeutlichen und die Einflüsse verschiedene Parameter zu klären.

Der Einfluss der folgenden Versuchsparameter wird betrachtet:

- Oberflächenbeschaffenheit der Böschung (zu diesem Zweck wurde bei der Versuchsreihen VI und VII eine Platte aus Schalholz auf die Rampe gelegt),
- Abwurfart,
- Medium: Wasser oder Luft,
- Steinmasse.

Die Versuchsreihe I gilt zur Bestimmung der Widerstandbeiwerte  $c_w$  der Steine. Es handelt sich um Versuche, die im kleinen Falltank am FG Konstruktiver Wasserbau der TU Berlin durchgeführt wurden. Der Falltank ist in Abb. 5.7 dargestellt.



**Abb. 5.7: Falltank zur Durchführung der Versuchsreihe I**

Die Steine wurden von Hand fallen gelassen. Sie bewegten sich lotrecht durch das Wasser zum Behälterboden über einen Weg von 130 cm. In Anhang 2 sind die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe I mit der Berechnung der Widerstandbeiwerte  $c_w$  dargestellt.

Alle Versuche wurden dreimal durchgeführt.

## **5.3 Versuchsergebnisse**

Die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe V (Referenzversuchsreihe: Abwurf mit der Kipp-einrichtung auf der rauhen Rampe) werden in diesem Kapitel ausführlich erläutert. Alle anderen Ergebnisse werden zum Vergleich herangezogen.

### **5.3.1 Bewegungsarten**

Zwei Bewegungsarten waren bei den Versuchen im stationären Zustand unter Wasser zu beobachten:

- das Gleiten,
- das Rollen.

Das Springen wurde unter Wasser bei diesen Versuchen nie beobachtet.

Der Zeitpunkt, ab dem sich der stationäre Fall einstellt, wurde über die Steingeschwindigkeit bestimmt (Kapitel 5.3.3). Die beobachteten Bewegungsarten sind Tabelle 5.3 zu entnehmen. „Rol“ steht für rollen, „Gl“ für gleiten. Die dazu gehörige Nummer entspricht der Anzahl der 10-cm Abstandsmarkierungen auf der Rampe, bei denen diese Bewegung aufgetreten ist. Die Bewegungsarten sind zusammen mit den Geschwindigkeiten dargestellt.

Versuchsreihe V (Kippeinrichtung) im Wasser					
Stein Nr. (Masse)	Abwurf	v [m/s]	v <sub>Stein</sub> [m/s]	v <sub>Kornfraktion</sub> [m/s]	Fallverhalten
1 (101 g)	1	0,36	0,36	0,38	Gleiten
	2	0,36			Rollen
	3	0,36			
2 (102 g)	1	0,38	0,38		
	2	0,33			
	3	0,42			
3 (102 g)	1	0,40	0,40		
	2	0,43			
	3	0,38			
4 (328 g)	1	0,47	0,42	0,40	Gleiten
	2	0,38			
	3	0,40			
5 (335 g)	1	0,32	0,39		Gleiten
	2	0,39			Rol 2, Gl 6
	3	0,45			Rol 3, Gl 5
6 (346 g)	1	0,38	0,41		Rollen
	2	0,43			Rol 4, Gl 4
	3	0,42			
7 (2035 g)	1	0,77	0,67	0,69	Rollen
	2	0,54			Gleiten
	3	0,69			
8 (2034 g)	1	0,87	0,74		Rollen
	2	0,65			
	3	0,71			
9 (2100 g)	1	0,67	0,66		Rol 5, Gl 3
	2	0,65			Rollen
	3	0,67			Gleiten

**Tabelle 5.3: Bewegungsarten und Geschwindigkeiten der Steine bei der Unterwasserschüttung, Versuchsreihe V**

Ermittelt werden:

- $v$ : Die stationäre Geschwindigkeit eines Steins bei einem Abwurf. Dieser Wert wird wie folgt aus den gemessenen Zeiten für die 80 cm Endstrecke (stationärer Bereich) des Steines auf der Rampe errechnet::

$$v = \frac{1,8\text{ m} - 1,0\text{ m}}{t_{1,8\text{ m}} - t_{1,0\text{ m}}} \text{ [m/s]} \quad (5.2)$$

- $v_{\text{Stein}}$ : Die mittlere Endgeschwindigkeit eines Steins, gemittelt über die Abwürfe mit diesem Stein,
- $v_{\text{Kornfraktion}}$ : Die Endgeschwindigkeit einer Kornfraktion, gemittelt über die Abwürfe mit dieser Kornfraktion.

Festzustellen ist:

- Kleine Steine (Steine 1, 2, 3) rollen ausschließlich.
- Bei den größeren Steinen ist kein einheitliches Verhalten zu beobachten. Sie gleiten oder rollen je nach Kornfraktion, nach Stein und sogar nach Abwurfart, so dass keine Verbindungen zwischen der Steingröße und dem Fallverhalten oder der Steinform und dem Fallverhalten erkannt werden kann.
- Die Oberflächenbeschaffenheit der Rampe spielt eine maßgebende Rolle für die Einstellung der Bewegungsart. Bei der Versuchsreihe VII (Schüttung mit Kippeinrichtung auf einer glatten Rampe) gleiten alle Steine. Ein kleiner Stein, der auf eine Unebenheit trifft, wird in seiner Bewegung stärker beeinflusst als ein großer Stein. Dies ist in Abb. 5.8 dargestellt.

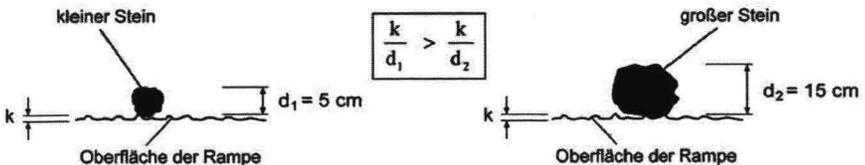
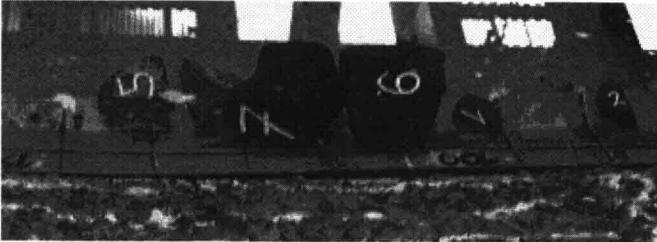


Abb. 5.8: Verhältnis der Abmessungen der Steine zur Rauigkeit der Rampe

### 5.3.2 Landeverhalten

Die Steine der Versuchsreihe V im Wasser blieben unabhängig von ihrer Korngröße alle am Rampenfuß liegen. Diese Beobachtung konnte auch bei allen anderen auf der Rampe durchgeführten Versuchsreihen festgestellt werden. Abb. 5.9 zeigt das Landeverhalten der Steine einer Versuchsreihe im Wasser. Die Kornfraktion, die Variation der Abwurfarten und die Änderung der Rauhgigkeit durch die glatte Oberfläche haben demnach auf das Landeverhalten von Steinen unterschiedlicher Größe im Wasser keinen Einfluss.

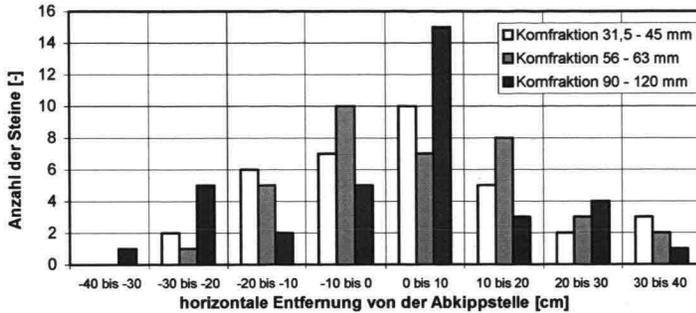


**Abb. 5.9: Unterwasseraufnahme vom Landeverhalten von Einzelsteinen unterschiedlicher Kornfraktionen im Wasser. Alle Steine befinden sich am Rampenfuß.**

Die Landung kann daher als Begründung für die Entmischung ausgeschlossen werden. Die Entmischung der Steine ist ausschließlich durch den Schüttvorgang bedingt. Dies ist bei Schüttungen an der Luft anders!

Im Modell landeten die Steine auf einer glatten Betonsohle anstatt auf Sand wie es in der Natur meistens der Fall ist und alle blieben trotz glatter Oberfläche an der Stelle liegen wo sie gelandet sind, dies ist in der Natur auch zu erwarten. Falls die Steine ihre Laufbahn nicht direkt am Rampenfuß abgebrochen gehabt hätten, sondern wenn sie sich weiter fortbewegt hätten, hätte dieser Versuchsparameter geändert werden müssen, damit die Phänomene in der Natur richtig nachgebildet wurden.

Auch eine Betrachtung der horizontalen Verteilung der Steine quer zur Bewegungsrichtung am Rampenfuß gemessen ermöglicht im Wasser keine Unterscheidung der Kornfraktionen. Die meisten Steine einer Kornfraktion landeten maximal 10 cm im horizontalen Abstand entfernt von der Abwurfsstelle (vgl. Abb. 5.10). Die größte festgestellte horizontale Entfernung von der Abwurfsstelle beträgt 40 cm.

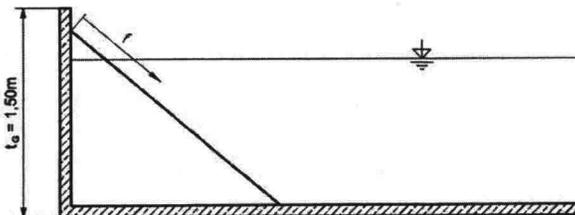


**Abb. 5.10 : horizontale Verteilung der Steine nach der Landung am Rampenfuß (gemessen quer zur Bewegungsrichtung)**

### 5.3.3 Steingeschwindigkeit

Die Steine der Versuchsreihe V kamen mit einer Anfangsgeschwindigkeit im Wasser an. Diese ist auf die Beschleunigungsstrecke in der Luft zurückzuführen. In der Natur entspricht diese Strecke dem Abstand vom Hinterkipper bis zu der Wasseroberfläche (im Modell die Strecke von der Kippeinrichtung bis zur Wasseroberfläche ( $t_0$ )). Die Geschwindigkeiten wurden bei dieser Untersuchung im Wasser gemessen.

Alle Steine wurden durch den Widerstand des Wassers gebremst, bis sie eine stationäre Geschwindigkeit (im Text auch Endgeschwindigkeit genannt) erreichten, die sie bis zu ihrer Landung beibehielten. Die Geschwindigkeitsverläufe über die Fallstrecke  $f$  (vgl. Skizze) der Versuchsreihe V sind in Abb. 5.12 dargestellt.



**Abb. 5.11: Definition der Fallstrecke zur Messung von Geschwindigkeiten**

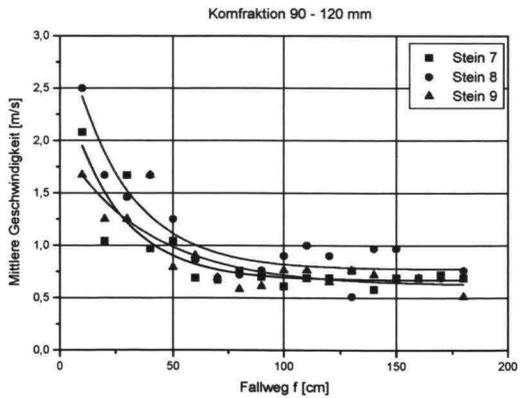
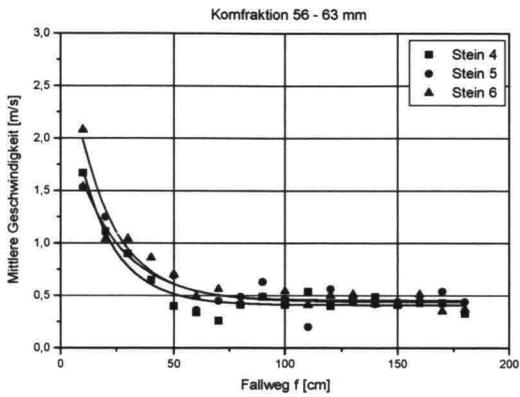
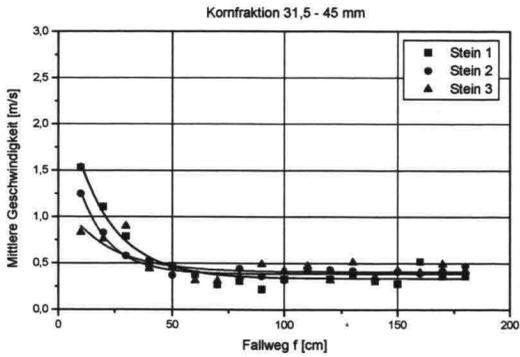


Abb. 5.12: Geschwindigkeitsverläufe der Steine bei Versuchsreihe V  
(Kippeinrichtung, raue Rampe)

Die stationäre Geschwindigkeit im Wasser stellte sich im Wasser für alle Steine spätestens nach einer Strecke von etwa 1 m auf der Rampe ein.

### 5.3.4 Fehlerbetrachtung

Bei der Fehlerbetrachtung wird der größtmögliche Fehler für die Geschwindigkeit bei der Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung bestimmt. Bei klassischen statistischen Verfahren werden die möglichen beeinflussenden Parameter dem größtmöglichen Fehler gegenüber gestellt. Wenn sich die ermittelte Endgeschwindigkeit eines Steins nicht mehr in einem von dem größtmöglichen Fehler bestimmten Geschwindigkeitsintervall befindet, kann daraus gefolgert werden, dass die vorliegende Abweichung nicht allein aus der Ungenauigkeit des Auswertungsverfahrens oder der statistischen Streuung der Ergebnisse resultiert. Die Abweichung hängt dann möglicherweise von einem oder mehreren Versuchsparametern ab. Bei den vorliegenden Versuchsreihen ist eine Bestimmung des größtmöglichen Fehlers möglich. Nur die geringe Anzahl der durchgeführten Versuche schränkt die Aussagekraft ein. Bei der Versuchsdurchführung gibt es Parameter, die nicht genau eingestellt werden können oder zufällig variieren:

- die Länge der Strecke auf der Rampe bei starker seitlicher Abweichung,
- die Positionierung des Steins am Versuchsanfang.

Bei der Versuchsauswertung gibt es Parameter, die Ungenauigkeiten der Ablesung verursachen:

- Luftblasenbildung: Bei den Versuchsreihen III bis V im Wasser traten die Steine mit einer Anfangsgeschwindigkeit ins Wasser ein, so dass auch Luft mit ins Wasser hineingetragen wurde. Die Lage der Steine auf den ersten 30 cm im Wasser ist daher im Videobild nicht eindeutig erkennbar.
- Betrag der Geschwindigkeit: In der Luft bewegten sich die Steine so schnell, dass die Videokamera es nicht ermöglicht, für jede Markierungslinie eine Geschwindigkeit zu bestimmen.

Andere beeinflussende Parameter können dagegen genau erfasst werden:

- Das zeitliche Auflösungsvermögen der verwendeten Videokamera gegenüber der Auswertungsverfahren: Die Geschwindigkeiten werden gemessen zu dem Zeitpunkt, in dem die Steine eine Markierungslinie mit ihrem Mittelpunkt überqueren. Die Videokamera hat ein Auflösungsvermögen von 25 Bildern pro Sekunde. Abb. 5.13 zeigt, welcher maximale Fehler über die Fallstrecke durch die Ablesung auftreten kann.

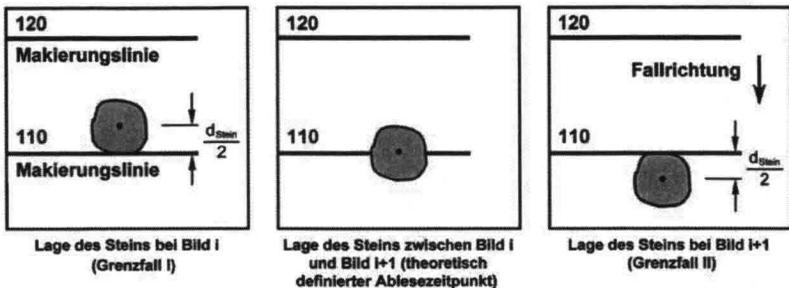


Abb. 5.13: Maximal möglicher Fehler der Fallstrecke beim Ablesen des Zeitpunkts, zu dem ein Stein eine Markierungslinie überquert.

Der maximale Fehler beim Ablesen des Überquerungszeitpunktes eines Steins an einer Markierungslinie beträgt über die Fallstrecke  $\Delta W = d_{\text{Stein}} / 2$ ; ( $d_{\text{Stein}}$  ist auch der längste Achse nach Zingg und entspricht damit dem maximalen möglichen Fehler).

Die Endgeschwindigkeit wird über die folgende Gleichung ausgerechnet:

$$v = \frac{W}{t} \quad [\text{m/s}] \quad (5.3)$$

- t Zeit, die ein Stein einer Kornfraktion im Mittel für den Weg von 0,80 m (stationärer Bereich) auf der Rampe benötigt; [s]
- W zurückgelegter Weg auf der Rampe; [m]; hier: 0,80 m
- v Geschwindigkeit des Steins; [m/s]

Die Grenzwerte des Fehlerbereiches lassen sich durch die folgenden zwei Gleichungen berechnen:

$$v_{\min} = v - \frac{d_{\text{Stein}}}{2t} \quad (5.4)$$

$$v_{\max} = v + \frac{d_{\text{Stein}}}{2t} \quad (5.5)$$

- $v_{\min}$  kleinste Geschwindigkeit, die sich aus dem maximal möglichen Ablesefehler bei der Auswertung der Geschwindigkeiten ergibt (nach Abb. 5.9 ergibt Grenzfall a für  $t_{100}$  und Grenzfall b für  $t_{180}$ ); [m/s]
- $v_{\max}$  größte Geschwindigkeit, die sich aus dem maximal möglichen Ablesefehler bei der Auswertung der Geschwindigkeiten ergibt (nach Abb. 5.9 ergibt Grenzfall a für  $t_{100}$  und Grenzfall b für  $t_{180}$ ); [m/s]
- $d_{\text{Stein}}$  Steindurchmesser des Steins; gewählt: längste Abmessung l nach Zingg [m]

$$\text{Fehler}_{\max} = \frac{d_{\text{Stein}}}{t_{180\text{cm}} - t_{100\text{cm}}} \quad [\text{m/s}] \quad (5.6)$$

Tabelle 5.4 fasst die maximal möglichen Fehler zusammen.

Stein Nr.	$d_{\text{Stein}}$ [cm]	t [s] bei Markierung 100 cm	t [s] bei Markierung 180 cm	Fehler [m/s]	v [m/s]	$v_{\text{min}}$ [m/s]	$v_{\text{max}}$ [m/s]
1	4,8	2,36	4,6	0,02	0,36	0,34	0,38
		2,36	4,6	0,02	0,36	0,34	0,38
2	5,3	2,4	4,48	0,025	0,38	0,355	0,405
		2,64	5,08	0,02	0,33	0,031	0,035
		2,28	4,2	0,03	0,42	0,39	0,45
3	5,4	2,2	4,2	0,03	0,4	0,037	0,43
		2,4	4,28	0,03	0,425	0,395	0,455
		2,12	4,24	0,025	0,38	0,355	0,405
4	7	2,24	3,96	0,04	0,465	0,425	0,505
		1,84	3,96	0,03	0,38	0,35	0,41
		2,56	4,56	0,035	0,4	0,365	0,435
5	8,1	1,84	4,32	0,03	0,32	0,29	0,35
		2,12	4,16	0,04	0,39	0,35	0,43
		1,4	3,16	0,05	0,45	0,4	0,5
6	6	1,6	3,68	0,02	0,38	0,36	0,4
		1,84	3,68	0,03	0,43	0,4	0,46
		1,48	3,4	0,03	0,42	0,39	0,45
7	11,8	0,96	2,0	0,11	0,77	0,66	0,88
		1,28	2,76	0,08	0,54	0,46	0,62
		1,68	2,84	0,1	0,69	0,59	0,79
8	13,3	0,8	1,72	0,14	0,87	0,73	1,01
		1,08	2,32	0,11	0,645	0,535	0,755
		1,2	2,32	0,12	0,71	0,59	0,83
9	15,7	1,04	2,24	0,13	0,67	0,54	0,80
		1,36	2,6	0,13	0,645	0,515	0,775
		1,2	2,4	0,13	0,67	0,54	0,80

**Tabelle 5.4: Maximal möglicher Fehler der Endgeschwindigkeit v bei der Bildauswertung, Versuchsreihe V im Wasser**

Der maximale Fehler der Endgeschwindigkeit ist bei den größten Steinen zu errechnen und beträgt für Stein 7 bis zu 0,14 m/s für eine gemessene Geschwindigkeit von 0,87 m/s. Demzufolge beträgt der maximal mögliche Fehler der auftreten könnte 16%.

Stein Nr.	$v_{\text{Stein}}$ [m/s]	Fehler [m/s]	$v_{\text{Stein min}}$ [m/s]	$v_{\text{Stein max}}$ [m/s]
1	0,36	0,04	0,32	0,40
2	0,38	0,075	0,305	0,455
3	0,4	0,085	0,295	0,465
4	0,415	0,105	0,31	0,52
5	0,39	0,12	0,27	0,51
6	0,41	0,08	0,33	0,49
7	0,67	0,29	0,38	0,96
8	0,74	0,37	0,37	1,11
9	0,66	0,39	0,27	1,05

**Tabelle 5.5: Mittelwerte der Endgeschwindigkeit eines Steins  $v_{\text{Stein}}$  und ihrer Fehlerbereiche, Versuchsreihe V im Wasser**

### **Statistische Streuung der Geschwindigkeiten, Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse**

Die gemessene Endgeschwindigkeit eines gegebenen Steins ist bei der Wiederholung des Versuchs nicht konstant. Die hier angegebene Endgeschwindigkeit für einen Stein, mit einer vorgegebenen Masse sowie Form kann unter der Berücksichtigung einer möglichen Abweichung bestimmt werden. Die maximale gemessene Abweichung der Endgeschwindigkeiten beträgt 19 % von der mittleren Geschwindigkeit. Sie wurde für den zweiten Abwurf des Steins 7 festgestellt (vgl. Tabelle 5.6: prozentualen Abweichungen der Endgeschwindigkeiten im Vergleich zu der mittleren Endgeschwindigkeit eines Steins). Die geringe Anzahl der Abwürfe erlaubt aber keine weitere statistische Auswertung über die Streuung der Ergebnisse. Alle weiteren Ergebnisse befinden sich innerhalb des Fehlerbereichs.

<b>Versuchsreihe V (Kippeinrichtung) im Wasser</b>				
<b>Stein Nr. (Masse)</b>	<b>Abwurf</b>	<b>v [m/s]</b>	<b>v<sub>Stein</sub> [m/s]</b>	<b>Abweichung von v<sub>Stein</sub> [%]</b>
1 (101 g)	1		0,36	
	2	0,36		0
	3	0,36		0
2 (102 g)	1	0,38	0,38	0
	2	0,33		13
	3	0,42		10,5
3 (102 g)	1	0,40	0,40	0
	2	0,43		7,5
	3	0,38		5
4 (328 g)	1	0,47	0,42	12
	2	0,38		9,5
	3	0,40		5
5 (335 g)	1	0,32	0,39	18
	2	0,39		0
	3	0,45		15
6 (346 g)	1	0,38	0,41	7,3
	2	0,43		5
	3	0,42		2
7 (2035 g)	1	0,77	0,67	15
	2	0,54		19
	3	0,69		3
8 (2034 g)	1	0,87	0,74	18
	2	0,65		12
	3	0,71		4
9 (2100 g)	1	0,67	0,66	1,5
	2	0,65		1,5
	3	0,67		1,5

**Tabelle 5.6: Prozentuale Abweichung der Endgeschwindigkeiten im Vergleich zu der mittleren Endgeschwindigkeit eines Steins**

### 5.3.5 Einfluss der Steinmasse und des Steinvolumens

Die Parameter „Steinmasse“ und „Steinvolumen“ können zusammen betrachtet werden, weil diese Größen im direkten Verhältnis zueinander stehen. Die Steinmasse wird als vergleichender Parameter weiter berücksichtigt.

Der Einfluss der Steinmasse auf die Endgeschwindigkeit auf der Rampe wird wie folgt ausgedrückt. Je schwerer die Steine sind, desto höher sind ihre Endgeschwindigkeiten. Die Form und die Art der linearen Regression zwischen Steinmasse und Endgeschwindigkeit werden im Folgenden dargestellt.

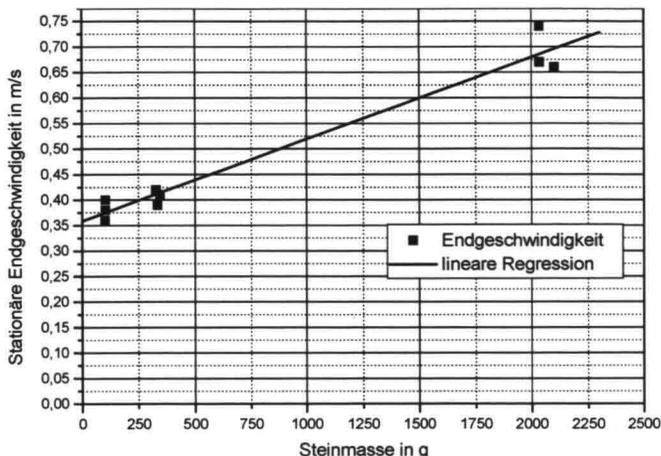


Abb. 5.14: Stationäre Geschwindigkeit von Steinen in Abhängigkeit ihrer Masse

Die Endgeschwindigkeit entwickelt sich linear mit der Steinmasse. Die lineare Regressionsanalyse zwischen Endgeschwindigkeit und Steinmasse wurde ausgerechnet.

Die Gleichung kann in der folgenden Form beschrieben werden:

$$v = 0,36 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot M \quad \text{in m/s} \quad (5.7)$$

$v$  stationäre Geschwindigkeit in m/s

$M$  Steinmasse in g

Die lineare Regression ist physikalisch nur für den Bereich der beobachteten Steingrößen bzw. Steinmassen und im Bereich von größeren Massen bzw. Größen begründbar. Kleinere

Steine verhalten sich dagegen wie Sedimente. Sie sind allerdings für den Wellenbrecherkernbau nicht geeignet und sind daher von den Untersuchungen ausgeschlossen.

### 5.3.6 Einfluss der Wassertiefe

Die stationäre Geschwindigkeit  $v$  ist von allen beobachtenden Steinen nach einem Meter Fallstrecke im Wasser erreicht worden. Es ist kein messbarer Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Einstellung der stationären Geschwindigkeit und der Steinmasse festzustellen.

Steine unterschiedlicher Massen können auch während ihrer instationären Fallgeschwindigkeit nach dem Betrag der Masse sortiert werden. Im instationären Bereich gilt ebenfalls die Aussage: Je größer die Masse der Steine ist, desto größer ist die Geschwindigkeit (vgl. Abb. 5.15 am Beispiel der Geschwindigkeitsverläufe der Steine 3, 6 und 9).

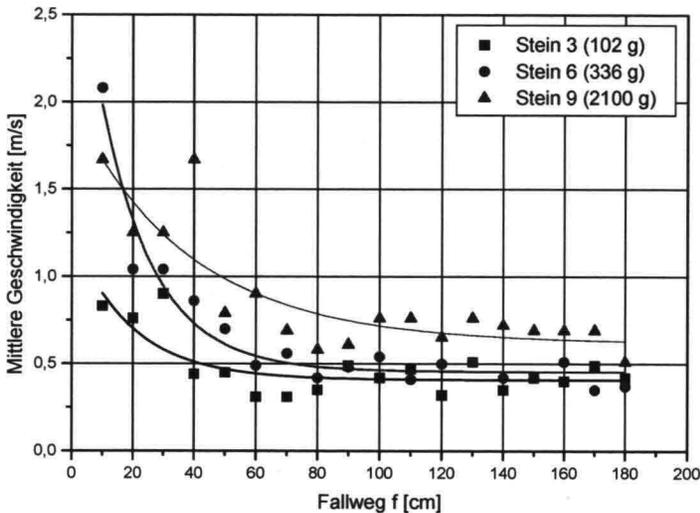


Abb. 5.15: Geschwindigkeitsverläufe der Steine Nr. 3, 6 und 9

Eine Sortierung der Steine nach ihrer Masse erfolgt schon am Anfang der Strecke unter Wasser im instationären Geschwindigkeitsbereich. Dies lässt vermuten, dass eine Entmischung der Steine schon bei geringen Falltiefen zu erwarten ist.

Die Aussage aus Kapitel 4.2.1 „die Falltiefe hat keinen Einfluss auf die Entmischung“ wird dadurch bestätigt und begründet. Das Schüttmaterial eines Wellenbrecherkerns entmischt sich während des Schüttvorgangs fast unabhängig davon, wie tief das Wasser ist.

Die Strecke außerhalb des Wassers muss aber auch betrachtet werden, um diese Aussage zu bestätigen.

In der Luftstrecke breiten sich die Steine aus: Entweder fallen sie lotrecht in Richtung der Böschung und treffen die Böschung an der Wasseroberfläche oder unter Wasser, oder sie bewegen sich schon in der Luft an der Böschung entlang. Damit alle Möglichkeiten berücksichtigt werden, wurden die Steine im lotrechten Fall (Versuchsreihe I) in der Luft und auch auf der Böschung (Versuchsreihe V) in der Luft betrachtet.

In der Luft ist auf dem kurzen Weg sogar auf der Rampe kein Unterschied der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Steinmasse festzustellen (vgl. Anhang 3: Geschwindigkeitsverlauf der Steine der Versuchsreihe I und V in der Luft).

Stein Nr.	v nach 30 cm Fallstrecke [m/s] Versuchsreihe I lotrechter Fall	Mittelwert für v einer Kornfraktion [m/s]	v nach 30 cm Fallstrecke [m/s] Versuchsreihe V Schüttung mit Kippeinrichtung auf der Rampe	Mittelwert für v einer Kornfraktion [m/s]
1	1,5	1,44	1,75	2,14
2	1,435		2,17	
3	1,39		2,5	
4	1,47	1,44	2,08	2,11
5	1,47		2,29	
6	1,375		1,96	
7	1,29	1,48	2,09	2
8	1,54		2,09	
9	1,6		1,83	

**Tabelle 5.7: Steingeschwindigkeiten nach 30 cm Fallstrecke in der Luft**

Die Betrachtung der Steine nach 30 cm Fallstrecke auf der Rampe zeigt, dass sich die Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Steingröße noch nicht unterscheiden. Die Entmischung ist im Modellversuch ausschließlich auf die Strecke im Wasser zurückzuführen.

Die Ausbreitung der Steine einer Schüttung kann wie folgt beschrieben werden:

Alle Steine erreichen das Wasser in einem Schwarm. Sie haben unabhängig von ihrer Masse die gleiche Geschwindigkeit. Nach dem Auftreffen im Wasser entmischen sie sich in Abhängigkeit von ihrer Masse. Große Steine bewegen sich auf der gesamten weiteren Strecke schneller als leichtere, das heißt nicht nur im stationären, sondern auch im instationären Bereich. Dieses Verhalten behalten sie entlang der weiteren Strecke bei, bis sie den Böschungsfuß oder ihre Landestelle erreichen. Die Entmischung ist maßgebend für die Lage-

nung der Steine. Größere Steine befinden sich deswegen früher im unteren Böschungsbereich als kleinere.

### 5.3.7 Einfluss der Abwurfart

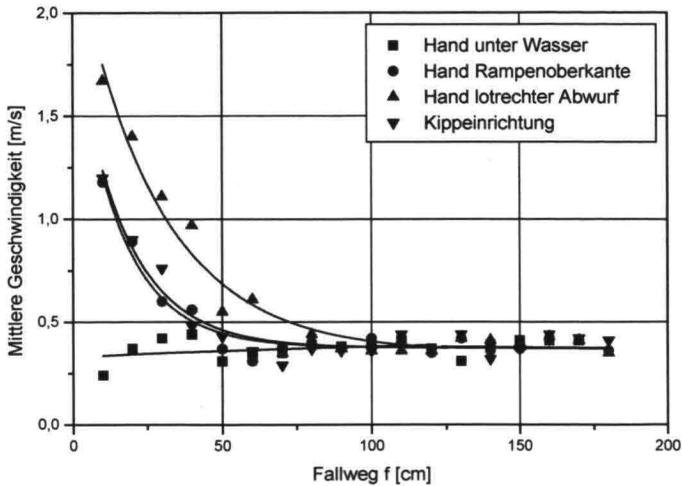
Die vier untersuchten Abwurfarten (vgl. Tabelle 5.2) werden in diesem Kapitel untersucht. Tabelle 5.8 zeigt die Endgeschwindigkeit der Steine.

Stein-Nr.	$v_{\text{Stein min}}$ [m/s]	Versuchsreihe V Kippeinrichtung $v_{\text{Stein}}$ [m/s] im Wasser	$v_{\text{Stein max}}$ [m/s]	Versuchsreihe II Hand unter Wasser $v_{\text{Stein}}$ [m/s] im Wasser	Versuchsreihe III Hand Rampen- oberkante $v_{\text{Stein}}$ [m/s] im Wasser	Versuchsreihe IV Hand lotrechter Abwurf $v_{\text{Stein}}$ [m/s] im Wasser
1	0,32	0,36	0,40	0,32	0,34	0,34
2	0,305	0,38	0,455	0,38	0,38	0,35
3	0,295	0,40	0,465	0,41	0,37	0,41
4	0,31	0,42	0,52	0,44	0,40	0,43
5	0,27	0,39	0,51	0,43	0,40	0,40
6	0,33	0,41	0,49	0,52	0,46	0,43
7	0,38	0,67	0,96	0,63	0,66	0,58
8	0,37	0,74	1,11	0,74	0,66	0,76
9	0,27	0,66	1,05	0,76	0,72	0,64

**Tabelle 5.8: Vergleich der Endgeschwindigkeiten der Steine auf der Rampe im Wasser in Abhängigkeit ihrer Abwurfart**

Die Abwurfart hat keinen messbaren Einfluss auf die Endgeschwindigkeiten der geschütteten Steine. Es ist auch kein Unterschied im Fallverhalten bei verschiedenen durchgeführten Versuchen mit unterschiedlichen Abkipparten festzustellen.

Abb. 5.16 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe  $v_{\text{Kornfraktion}}$  bei Steinen der Kornfraktion 31,5 - 45 mm in Abhängigkeit ihrer Abwurfart.



**Abb. 5.16: Geschwindigkeit der Kornfraktion 31,5 – 45 mm in Abhängigkeit der Abwurfart.**

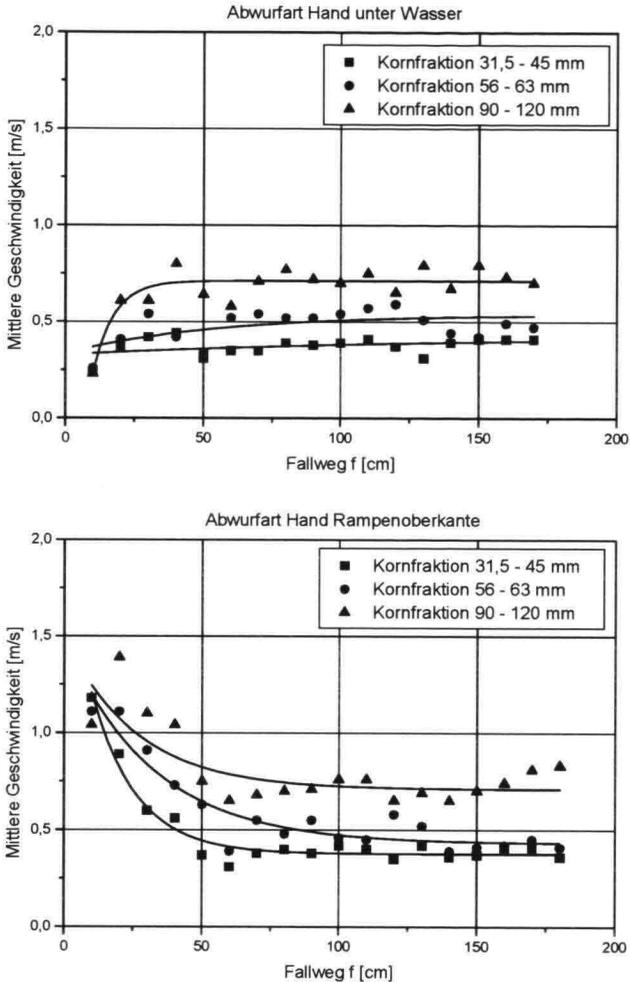
Allerdings sind die Geschwindigkeitsverläufe im instationären Bereich unterschiedlich. Sie hängen von der Abwurfart ab.

Steine, die unter Wasser geschüttet werden, haben im Allgemeinen keine Anfangsgeschwindigkeit.

Steine, die dagegen mit der Kippeinrichtung oder von Hand über der Wasseroberfläche geschüttet werden, haben stets eine Anfangsgeschwindigkeit.

Innerhalb des stationären Verlaufs in tieferen Bereichen ist kein Unterschied zwischen den Versuchsreihen festzustellen. Das heißt, die Abwurfart hat weder einen Einfluss auf das Fallverhalten noch auf die Endgeschwindigkeit der Steine.

Daraus folgt, dass bei einer gegebenen Abwurfart ein Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten nur aufgrund unterschiedlicher Kornmassen, wie in Kapitel 5.3.5 (Einfluss der Steinmasse) beschrieben, festzustellen ist. Dies bestätigt die Abb. 5.17 für alle anderen Abwurfarten.



**Abb. 5.17: Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe der Kornfraktionen bei einer gegebenen Abwurfart**

Aus dem Ergebnis folgt:

- Die gewählte einfache Kippeinrichtung als Modell für den Hinterkipper wird wiederholt als geeignet bestätigt. Andere Abwurfarten hätten zu demselben Ergebnis bei der Entmischung geführt. Weder die Zeit, in der das Material geschüttet wird, noch die Geometrie der Kippeinrichtung beeinflussen die Entmischung.

- Die Abwurfart beeinflusst den Kernaufbau nicht. Dies hat den Vorteil, dass unabhängig von der Zeit, der Höhe der abgekippten Ladung und damit unabhängig vom Bauablauf oder von den Bauausführenden, durch ein gegebenes Kernmaterial immer derselbe jetzt bekannte Kernaufbau erzielt wird. Es hat aber auch den Nachteil, dass die Entmischung durch die Abwurfart nicht verhindert oder zumindest reduziert werden kann.

### 5.3.8 Die Oberflächenbeschaffenheit der Böschung (Rampe)

Die Oberflächenbeschaffenheit der Böschung spielt ebenfalls eine Rolle im Entmischungsvorgang. Die Entmischung, die bisher bei den untersuchten Versuchsergebnissen über den Massenunterschied erklärt wurden ist, kann durch die gegebene Böschungsoberfläche verstärkt werden.

Wie bereits in Kap. 5.2.4 angesprochen, hängt das Fallverhalten von Steinen auch von der Oberflächenbeschaffenheit der Rampe ab.

Im Folgenden wird der Einfluss der Oberfläche auf die Steine näher untersucht.

Zwei Versuchsreihen, die Versuchsreihen VI und VII, wurden im Wasser auf einer glatten Oberfläche durchgeführt. Die Versuche wurden allerdings mit jeweils nur 3, anstatt 9 Steinen durchgeführt. Die Endgeschwindigkeiten  $v_{\text{Stein}}$  sind in Tabelle 5.9 ermittelt.

Mittelwerte der Endgeschwindigkeiten $v_{\text{Stein}}$ in m/s aus drei Abwürfen für jeden Stein				
Stein Nr.	Abwurfart: Kippeinrichtung im Wasser		Abwurfart: Hand unter Wasser	
	Versuchsreihe V	Versuchsreihe VII	Versuchsreihe II	Versuchsreihe VI
	raue Oberfläche	glatte Oberfläche	raue Oberfläche	glatte Oberfläche
3	0,41	0,59	0,41	0,53
5	0,39	0,77	0,43	0,69
9	0,66	1,07	0,76	0,89

Tabelle 5.9: Vergleich der Endgeschwindigkeiten zwischen Steinen auf der rauhen und der glatten Rampe

Festzustellen ist, dass die Steine, die sich auf einer glatten Rampe bewegen, immer schneller sind als die auf der rauhen Oberfläche. Der Reibungskoeffizient  $\mu$  zwischen den Steinen und der Rampe kann aufgrund der Messdaten ermittelt werden. Die Ermittlung erfolgt laut Gleichung (5.16) im Kapitel 5.4.2.

Für die untersuchten Steine sind die ausgerechneten resultierenden Reibungskoeffizienten zwischen den Steinen und der rauhen Rampe in Tabelle 5.10 dargestellt.

Stein Nr.	$\mu$ [-] zwischen Stein und rauher Oberfläche	$\mu$ [-] zwischen Stein und glatter Oberfläche
3	0,33	0,14
5	0,39	0,03
9	0,30	0,02

**Tabelle 5.10: Reibungskoeffizienten  $\mu$  zwischen einem Stein und der rauhen Rampe**

Die Berechnungen zeigen:

- Die Reibungskoeffizienten der Steine auf der glatten Rampe sind alle wesentlich kleiner als die auf der rauhen Rampe.
- Der Reibungskoeffizient wird beim Gleiten mit zunehmender Steingröße kleiner. Dies wird mit dem Vergleich der Steine 5 und 9 auf der rauhen Rampe und mit dem Vergleich der drei untersuchten Steine auf der glatten Rampe nachgewiesen. Nur Steine, die dieselbe Bewegungsform aufweisen, können in dieser Hinsicht untereinander verglichen werden.
- Der Reibungskoeffizient hängt von der Bewegungsform ab. Der Stein 3 rollt schneller die Rampe entlang als der Stein 5. Sein Reibungskoeffizient ist gegen die Erwartung kleiner als der des Steins 5, obwohl er kleiner ist. Diese Steine unterscheiden sich allerdings in ihrer Bewegungsform. Der Stein 5 gleitet die Rampe entlang.

Zusammenfassend verstärkt sich bei dem Schüttvorgang die Entmischung bei großer Oberflächenrauigkeit der Böschung. Die Steine werden dadurch von dem direkten Weg zum Böschungsfuß abgelenkt. Die Oberflächenbeschaffenheit der Böschung führt zu einer größeren Reibung, die auf die kleineren Steine stärker wirkt. Die kleineren Steine werden eher von ihrer linearen Laufbahn durch den Einfluss der Steine der Rampenoberfläche abgelenkt als die größeren. Die Länge der Laufbahn kleinerer Steine wird dadurch etwas länger als die der größeren Steine. Kleine Steine werden eher von Der ermittelte Reibungskoeffizient beinhaltet beide Einflüsse. Diese Einflüsse können in der Auswertungsform nicht auseinander gehalten und daher nicht ermittelt werden.

## 5.4 Beschreibung des mechanischen Vorganges

Die in Kapitel 4 beschriebene visuelle Beobachtung des Bewegungsverhaltens von Einzelsteinen dient dazu, den mechanischen Vorgang zu beschreiben. In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine theoretische Betrachtung der Kräfte, welche auf einen gleitenden Stein wirken. Anhand der Versuchsergebnisse werden die auf die Steine wirkenden Kräfte im stationären Bereich berechnet. Die Übertragung der Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab und die allgemeine Entmischung werden anschließend erklärt.

### 5.4.1 Theoretische Beschreibung des stationären Schüttvorganges

Der Schüttvorgang wird zweidimensional behandelt und dargestellt. Die Laufbahn eines Steins ist die kürzeste zwischen dem Abwurfpunkt und dem Böschungsfuß.

Abb. 5.18 stellt die Kräfte dar, die auf einen Körper wirken, der sich auf einer schiefen und rauen Ebene zweidimensional durch ein beliebiges Medium im stationären Zustand herab bewegt. Die Lage des Steins auf der Böschung wird mit Hilfe von zwei voneinander unabhängigen Koordinatenachsen  $x$  und  $y$  beschrieben. Es wirken die folgenden Kräfte auf den Einzelstein:

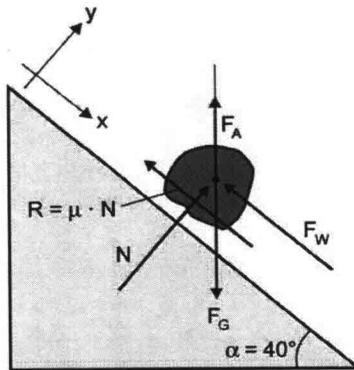


Abb. 5.18: Kräfte an einem Stein auf der Böschung im Wasser  
(stationärer Zustand)

- Die Gewichtskraft  $F_G$  in [N]:

$$F_G = m_K \cdot g = V_K \cdot \rho_K \cdot g \quad (5.8)$$

$m_K$	Masse des Körpers [kg]
$V_K$	Volumen des Körpers [m <sup>3</sup> ]
$\rho_K$	Dichte des Körpers [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

- Die Widerstandskraft  $F_W$  in [N]:

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot A_{St} \cdot v^2 \quad (5.9)$$

$c_W$	Widerstandsbeiwert [-]
$\rho_W$	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Geschwindigkeit des Steins [m/s]
$A_{St}$	Schattenfläche des Körpers [m <sup>2</sup> ]

- Die Normalkraft  $N$  in [N]: In der Kontaktfläche zwischen dem Stein und der Gleitebene wirkt als Reaktionskraft eine Normalkraft  $N$ , die senkrecht zur Gleitebene steht.
- Die Reibungskraft  $R$  in [N]: Es gilt das Coulombsche Reibungsgesetz.

$$R = \mu \cdot N \quad (5.10)$$

$\mu$	Reibungskoeffizient [-]
$N$	senkrecht zur Gleitebene wirkende Normalkraft [N]

Der Betrag des Reibungskoeffizienten  $\mu$  hängt vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit der Berührungsflächen und von der Bewegungsart ab.

- Die Auftriebskraft  $F_A$  in [N]:

$$F_A = V_K \cdot \rho_W \cdot g \quad (5.11)$$

$V_K$	Volumen des Körpers; entspricht dem Volumen des vom Stein verdrängten Wassers [m <sup>3</sup> ]
$\rho_W$	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

Im stationären Zustand gilt die Gleichung:

$$F_G + F_A + R + N + F_W = 0 \quad (5.12)$$

Das Kräftegleichgewicht in Bewegungsrichtung (x-Richtung) lautet:

$$F_G \cdot \sin \alpha - F_A \cdot \sin \alpha - R = F_W \quad (5.13)$$

Durch Umformen von Gleichung (5.13) und Ersetzen von R und N durch

$$R = \mu \cdot N = \mu \cdot m_K \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (5.14)$$

gilt für die Endgeschwindigkeit  $v$  eines Steins auf der Böschung im Wasser:

$$v = \left( \frac{F_G \cdot \sin \alpha - F_A \cdot \sin \alpha - R}{\frac{F_W}{v^2}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = \left( \frac{m_K \cdot g \cdot \sin \alpha - \frac{m_K \cdot \rho_W \cdot g \cdot \sin \alpha}{\rho_K} - \mu \cdot m_K \cdot g \cdot \cos \alpha}{\frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = \left( \frac{m_K \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \left( 1 - \frac{\rho_W}{\rho_K} - \frac{\mu}{\tan \alpha} \right)}{\frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.15)$$

Die Parameter dieser Gleichung können in zwei Kategorien getrennt werden.

- während der Untersuchung konstant bleibende Parameter:
  - Dichte des Versuchsmaterials  $\rho_K = 2760 \text{ kg/m}^3$ ,
  - Neigung der Rampe  $\alpha = 40^\circ$ ,
  - Dichte des Wassers  $\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,
  - Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .
- Vom Versuchskörper abhängige Parameter (in fett und kursiv):
  - Masse des Versuchskörpers  $m_K$ ,
  - Widerstandsbeiwert  $c_W$ ,
  - Schattenfläche  $A_{St}$ ,
  - Reibungskoeffizient  $\mu$ .

## 5.4.2 Berechnung der Kräfte

Um die auf den Einzelstein wirkenden Kräfte zu berechnen, müssen die oben genannten Parameter ermittelt werden. Unbekannte Parameter sind:

- der Widerstandsbeiwert  $c_W$ ,
- die Schattenfläche  $A_{St}$ ,
- der Reibungskoeffizient  $\mu$ .

Durch die Versuchsreihe im lotrechten Fall können alle Werte des Produkts  $c_W \cdot A_{St}$  der untersuchten Steine gemessen werden. Sie sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst. Der  $c_W$ -Wert und die Schattenfläche können jedoch nicht einzeln bemessen werden. Die Schattenfläche könnte beispielsweise über die Achsenverhältnisse der untersuchten Körper definiert werden, wobei die damit errechneten Schattenflächen zu ungenau wären. Dadurch wäre der  $c_W$ -Wert fehlerhaft bestimmt.

Stein Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$c_W \cdot A_{st} [cm^2]$	19,3	19,0	19,5	40,2	47,4	42,4	150,7	152,9	168,2

Tabelle 5.11:  $c_W \cdot A_{st}$  für die untersuchten Steine

Aus den Versuchsergebnissen für die Geschwindigkeit auf der Rampe (vgl. Anhang 3) können danach die Reibungsbeiwerte (vgl. Tabelle 5.12) mit dem Einsetzen von Gleichung (5.15) in Gleichung (5.16) ausgerechnet werden. Dabei wird angenommen, dass sich die größte Schattenfläche entgegen der Anströmrichtung einstellt. Daher können die oben genannten Werte für  $c_W \cdot A_{St}$  übernommen werden.

$$\mu = \tan \alpha \cdot \left( 1 - \frac{\rho_W}{\rho_K} - \frac{1}{2} \frac{c_W \cdot A_{St} \cdot \rho_W \cdot v^2}{m_K \cdot g \cdot \sin \alpha} \right) \quad (5.16)$$

- $A_{St}$  Schattenfläche [m<sup>2</sup>]  
 $c_W$  Widerstandsbeiwert [-]  
 $\rho_W$  Dichte des Wassers = 1000 kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_K$  Dichte des Körpers [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m_K$  Masse des Versuchskörpers [kg]  
 $\mu$  Reibungskoeffizient [-]  
 $\alpha$  Neigung der Rampe [°]

Stein Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu$ [-]	0,37	0,36	0,33	0,39	0,39	0,40	0,31	0,26	0,30

**Tabelle 5.12: Reibungskoeffizient  $\mu$  zwischen Versuchskörper und rauer Rampe**

Die Ergebnisse bestätigen, dass:

- die gemessenen Geschwindigkeiten mit einer ausreichenden Genauigkeit gemessen wurden,
- die Darstellung der physikalischen Grundlagen für den Schüttvorgang richtig ist.

In Tabelle 5.13 sind die Kräfte dargestellt, die in der Bewegungsrichtung wirken.

Stein Nr.	$F_G \cdot \sin \alpha$ [N]	$F_A \cdot \sin \alpha$ [N]	R [N]	$F_W$ [N]
1	0,64	0,23	0,28	0,12
2	0,64	0,23	0,27	0,14
3	0,64	0,23	0,25	0,16
4	2,07	0,75	0,97	0,35
5	2,11	0,77	0,99	0,36
6	2,18	0,79	1,03	0,36
7	12,83	4,65	4,80	3,38
8	12,82	4,65	3,99	4,19
9	13,24	4,80	4,78	3,66

**Tabelle 5.13: Kräfte, die in Bewegungsrichtung (Richtung x) auf die Steine wirken**

Die Tabelle zeigt, dass nur die Gewichtskraft  $F_G$  eine wesentliche Rolle für die Bewegung spielt.

### 5.4.3 Übertragung der stationären Geschwindigkeiten in den Naturmaßstab

Anhand der auf die Steine wirkenden Kräfte wird eine mögliche Übertragung der Versuchsergebnisse in den Naturmaßstab überprüft.

Die sich einstellende stationäre Geschwindigkeit kann in Abhängigkeit der folgenden Parameter errechnet werden:

$$v = \left( \frac{m_K \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\rho_W}{\rho_K} - \frac{\mu}{\tan \alpha}\right)}{\frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.15)$$

- $A_{St}$**  Schattenfläche [m<sup>2</sup>]  
 **$c_W$**  Widerstandsbeiwert [-]  
 **$\rho_W$**  Dichte des Wassers = 1000 kg/m<sup>3</sup>  
 **$\rho_K$**  Dichte des Körpers [kg/m<sup>3</sup>]  
 **$m_K$**  Masse des Versuchskörpers [kg]  
 **$\mu$**  Reibungskoeffizient [-]  
 **$\alpha$**  Neigung der Rampe [°]

In Gleichung (5.15) sind die Parameter, die innerhalb einer Kippladung für den Bau eines Wellenbrecherkernes variieren, kursiv markiert. Der Wert  $\mu$  variiert für eine gegebene Kippladung in einem sehr geringen Maß. Dies ist physikalisch bedingt und wurde bereits in Tabelle 5.12 berechnet. Der Reibungskoeffizient  $\mu$  kann konstant mit einem mittleren Wert von  $\mu = 0,34$  angenommen werden. Das heißt, dass nur das Verhältnis

$$\frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}}$$

innerhalb einer Kippladung variabel ist.

$$v = \left( \frac{g \cdot \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\rho_W}{\rho_K} - \frac{\mu}{\tan \alpha}\right)}{\frac{1}{2} \cdot \rho_W} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = \left( \frac{9,81 \cdot \sin 40^\circ \cdot \left(1 - \frac{1000}{2760} - \frac{0,35}{\tan 40^\circ}\right)}{\frac{1}{2} \cdot 1000} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = 0,053 \cdot \left( \frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.17)$$

Das Verhältnis  $\frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}}$  kann auch in der folgenden Form dargestellt werden:

$$\frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}} = \frac{\rho_K \cdot V_K}{c_W \cdot A_{St}}$$

Dabei kann vereinfacht für die verwendeten Steine das Körpervolumen in Abhängigkeit der zu messenden Schattenfläche und der kürzesten Achse  $s$  erläutert werden:

$$V_K = \chi \cdot A_{St} \cdot s \quad [m^3]$$

- $V_K$  Körpervolumen [ $m^3$ ]  
 $\chi$  resultierende Formkoeffizient [-]  
 $A_{St}$  Schattenfläche [ $m^2$ ]  
 $s$  kürzeste Achse nach Zingg [m]

Der Formkoeffizient wird für jeden Stein ausgerechnet und in Abhängigkeit des mittleren ausgerechneten Formkoeffizienten wird die Geschwindigkeit für jeden Stein nach der folgenden Formel berechnet:

$$v = 0,053 \cdot \left( \frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,053 \cdot (\rho_K \cdot \chi)^{\frac{1}{2}} \cdot (s)^{\frac{1}{2}} = 0,053 \cdot (2760 \cdot 0,61)^{\frac{1}{2}} \cdot (s)^{\frac{1}{2}} = 2,17 \cdot (s)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = 2,17 \cdot (s)^{\frac{1}{2}} \quad [m/s] \quad (5.18)$$

Diese Formel gilt nach Vereinfachungen nur für die verwendete Grauwacke in dem Korngrößenbereich und mit dieser Kornform.

Die Formkoeffizienten und daraus resultierenden Geschwindigkeiten sind in der Tabelle 5.14 dargestellt.

Stein Nr.	Schattenfläche $A_{st}$ [cm <sup>2</sup> ]	s [cm]	$V_K$ [cm <sup>3</sup> ]	Formkoeffizient $\chi$ [-]	v [m/s] berechnet
1	20,64	3,7	36,59	0,48	0,42
2	18,55	3,2	36,96	0,62	0,39
3	22,68	3	36,96	0,54	0,38
4	39,9	4,2	118,84	0,71	0,44
5	55,89	4,8	121,38	0,45	0,48
6	35,4	4	125,36	0,89	0,43
7	127,44	8	737,32	0,72	0,61
8	118,37	8,7	736,96	0,72	0,64
9	215,09	9,9	760,87	0,36	0,68

Arithmet. Mittel: 0,61

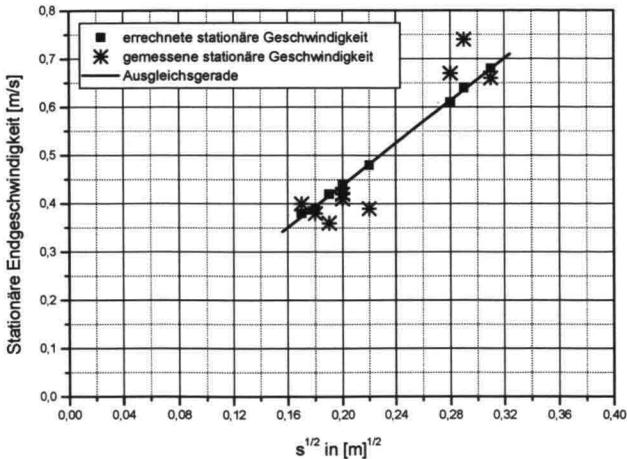
**Tabelle 5.14: Berechnung der Formkoeffizienten und der stationären Endgeschwindigkeit**

Die gemessenen und die mit der Formel (5.18) errechneten Endgeschwindigkeiten werden in Tabelle 5.15 miteinander verglichen.

Stein Nr.	$v_{\text{Stein}}$ gemessen [m/s]	$v_{\text{Stein}}$ berechnet [m/s]
1	0,36	0,42
2	0,38	0,39
3	0,40	0,38
4	0,42	0,44
5	0,39	0,48
6	0,41	0,43
7	0,67	0,61
8	0,74	0,64
9	0,66	0,68

**Tabelle 5.15: Vergleich der gemessenen Endgeschwindigkeiten mit denen aus dem Formkoeffizient und den kürzesten Achsen nach Zingg errechneten stationären Geschwindigkeiten**

Dieser Vergleich ist in der Abb. 5.19 graphisch dargestellt. Die Endgeschwindigkeiten werden in Abhängigkeit der Wurzel der kürzesten Achse s nach Zingg aufgetragen. In dieser Abbildung sind die gemessenen wie auch die errechneten Endgeschwindigkeiten dargestellt.



**Abb. 5.19: Vergleich der gemessenen mit den errechneten Werten für die stationäre Geschwindigkeit auf der Rampe**

Diese Darstellung zeigt, dass die Annäherung der gemessenen Geschwindigkeiten für die verwendete Grauwacke mit der Formel  $v = 2,17 \cdot (s)^{\frac{1}{2}}$  berechtigt ist.

Die Übertragung der Geschwindigkeitswerte der untersuchten Steine in den Naturmaßstab kann nach dieser Formel erfolgen, mit der Voraussetzung, dass die Übertragung physikalisch berechtigt ist. Die Übertragung in den Naturmaßstab ist physikalisch berechtigt, wenn sich die Steine in der Natur in dem gleichen Reynolds-Bereich bewegen wie die Steine im Modell. Dieses wurde bereits in Kapitel 4 erklärt.

In einem gegebenen Maßstab 1 kann die Geschwindigkeit wie folgt errechnet werden:

$$v_1 = 2,17 \cdot (s_1)^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}]$$

In einem gegebenen Maßstab 2:

$$v_2 = 2,17 \cdot (s_2)^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}]$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{2,17 \cdot (s_2)^{\frac{1}{2}}}{2,17 \cdot (s_1)^{\frac{1}{2}}} = \left( \frac{s_2}{s_1} \right)^{\frac{1}{2}} = (\text{Maßstab})^{\frac{1}{2}} \quad (5.19)$$

Die vorangegangene theoretische Herleitung (5.19) bestätigt die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse der Modelle auf die Natur anhand der Froudeschen Modellgesetze. Der

Nachweis basiert auf der Annahme des Einflusses der Schwerkraft auf den Böschungsaufbau.

Die Untersuchungen mit Steinen der Größe 2 - 45 mm erfolgten im Maßstab 1:15. In der Naturmaßstab würden Steine, welche 15-mal größer sind, das heißt der Korngröße 30 - 675 mm, verwendet. Die zu erwartenden stationären Geschwindigkeiten des Schüttmaterials bei dem Abkippvorgang entlang des Wellenbrecherkerns unter Wasser werden nach Gleichung (5.19) errechnet.

Ein Stein (Grauwacke) der Korngröße 30 mm bewegt sich mit einer stationären Geschwindigkeit von:

$$v = 2,17 \cdot s^{\frac{1}{2}} = 2,17 \cdot 0,03^{\frac{1}{2}} = 0,37 \text{ m/s}$$

Ein Stein (Grauwacke) der Korngröße 675 mm bewegt sich mit einer stationären Geschwindigkeit von:

$$v = 2,17 \cdot s^{\frac{1}{2}} = 2,17 \cdot 0,675^{\frac{1}{2}} = 1,78 \text{ m/s}$$

## 5.5 Schlussfolgerung aus Kapitel 5

Die in diesem Kapitel vorgestellten Versuchsergebnisse und die theoretische Darstellung des Schüttvorganges bestätigen, dass die Entmischung ausschließlich durch den Steingrößenunterschied (durch den Schwerkrafteinfluss) innerhalb eines Schüttgutes bedingt ist. Sie kann mit einem einfachen Hinterkipper als Abkipppgerät weder reduziert noch verhindert werden. Die untersuchte Bauart hat zwangsläufig die Entmischung des abgekippten Schüttgutes zur Folge. Es gibt aus diesem Grund keine ideale Körnungslinie, die die Entmischung positiv beeinflussen würde. Dies erklärt, warum in Kapitel 4 die Suche nach einem Aufbauparameter bzw. einem eigenen Parameter für das Schüttgut, die zu einer Veränderung der Böschungsausbildung geführt hätten, erfolglos war.

Die physikalische Beschreibung des Schüttvorganges wurde theoretisch auf den stationären Bereich reduziert. In diesem Bereich gilt die Gleichung für die Steingeschwindigkeit:

$$v = \left( \frac{m_K \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\rho_W}{\rho_K} - \frac{\mu}{\tan \alpha}\right)}{\frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

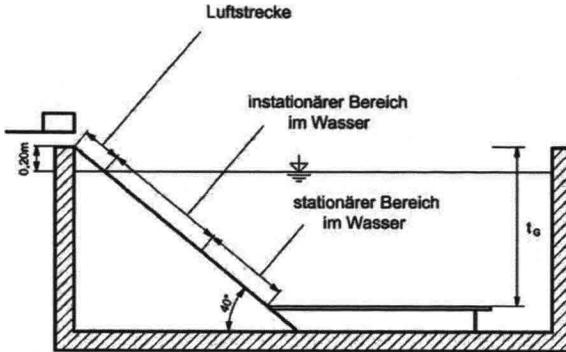
- $\rho_W$  Dichte des Wassers = 1000kg/m<sup>3</sup>
- $A_{St}$  Schattenfläche [m<sup>2</sup>]
- $c_W$  Widerstandsbeiwert [-]
- $\rho_K$  Dichte des Körpers [kg/m<sup>3</sup>]
- $m_K$  Masse des Versuchskörpers [kg]
- $\mu$  Reibungskoeffizient [-]
- $\alpha$  Neigung der Rampe [°]

Diese Gleichung kann für die verwendete Grauwacke durch die angenäherte Gleichung ersetzt werden:

$$v = 0,053 \cdot \left( \frac{m_K}{c_W \cdot A_{St}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ [m/s]}$$

Der Fallvorgang von Steinen innerhalb eines Schwarms erfolgt ca. 50% schneller als der Fallvorgang von Einzelsteinen. Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen großen und kleinen Steinen werden durch das Schwarmverhalten nicht geändert. Große Steine sind im Schwarm auch schneller als die kleineren.

Durch die Beobachtung des gesamten Schüttvorganges anhand der Modellversuche, konnten allerdings alle Bereiche des Schüttvorganges beobachtet und beschrieben werden, d.h. sowohl im stationären als auch im instationären Bereich (vgl. Abb. 5.20).



**Abb. 5.20: Begriffe zur Erklärung des physikalischen Vorgangs bei der Unterwasserschüttung von Steinen für den Bau von Wellenbrecherkernen**

Die Modellversuche haben gezeigt:

- Die Entmischung der Steine in Abhängigkeit von ihrer Größe findet ausschließlich im Wasser statt.
- In der Luft weisen alle untersuchten Steine noch die gleiche Geschwindigkeit auf.
- Die Entmischung beginnt bereits im instationären Bereich des Schüttvorganges unter Wasser.
- Im stationären Bereich setzt sich die Entmischung dann fort.
- Die entstehende Böschung besitzt keine homogene Struktur, welche die Voraussetzung für die Entstehung eines langfristig stabilen Bauwerks wäre.

## **6 Folgen der Kernentmischung für die Filterbemessung und für die Kernstabilität**

### **6.1 Zur Einführung**

Die in der bisherigen Arbeit festgestellte Entmischung beim Einbau des Molenkerns wirft die folgende Fragestellung auf:

Welche Folgeerscheinungen entstehen durch die Entmischung für das gesamte Bauwerk?

In diesem Kapitel werden zuerst die Folgen für den Filter betrachtet. Die Filter trennen zu einem den Kern von der Deckschicht und bisweilen auch den Kern von dem Meeresboden. Der Meeresboden ist der Baugrund und bleibt unbehandelt. Die Filter sollen die Suffosion innerhalb des Wellenbrechers sowie eine Eindringung der Mole in den Meeresboden verhindern.

In der Praxis wird beim Bau von Wellenbrechern nur zwischen dem Kern und der Deckschicht ein Filter eingebaut. Zwischen dem Meeresboden und dem Kern wird dagegen der notwendige Filter häufig aus Kostengründen nicht eingebracht. Dieser fehlende Filter ist eine Ursache von Schäden an Wellenbrechern.

Die in Kapitel 4 nachgewiesene Entmischung des Kernmaterials beim Bau von geschütteten Wellenbrecherkernen hat ebenfalls einen zu berücksichtigenden Einfluss auf die Filterbemessung. Der Grund liegt darin, dass der Kern, entgegen der Annahme der Bemessung, eine entmischte Struktur hat.

In diesem Kapitel wird zunächst der Stand der Literatur über den Einbau von Filtern dargestellt. Dabei werden die Bemessungsgrundlagen für Wellenbrecherkernfilter auf ihre Anwendbarkeit untersucht.

Anschließend wird anhand eines fiktiven Beispiels eines Molenbaus die Bemessung der Filter für einen Molenbau durchgeführt. Es handelt sich in dem Beispiel um eine Mole, die an der Westküste von Sylt gebaut werden könnte. Das dafür gewählte Kernmaterial ist das Material G1 übertragen auf den Naturmaßstab. Die Filterregeln sowie die Verfahren zur Bemessung eines Mineralkornfilters werden anhand dieses Beispiels erläutert. Die Filterbemessung erfolgt jeweils für einen homogenen Kern und für einen entmischten Kern.

Abschließend zeigt ein Vergleich dieser zwei Bemessungen die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Kerntmischung auf die Wahl der Filter.

Die Entmischung des Molenkerns hat nicht nur einen Einfluss auf die Filterbemessung zur Folge, sondern auch auf die Bauwerksstabilität.

An der Stelle des Wellenaufschlags ist das Kernmaterial feiner als das durchschnittliche geschüttete Schüttgut. Daraus folgt, dass der geschüttete Kern vor der Sicherung mit der darüber liegende Filterschicht, der Deckschicht und seiner Profilierung leichter ausgespült und beschädigt werden kann als ein homogener Kern. Die Gefahr einer Erosion ist an dieser Stelle besonders groß.

Alle Bemessungsverfahren zur Bestimmung eines Molenquerschnittes setzen voraus, dass der Kern eine homogene Zusammensetzung hat. Unbekannt ist allerdings das Verhalten einer Mole mit einem entmischten Kern in Bezug auf die Stabilität.

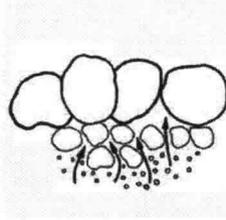
In diesem Kapitel wird der Begriff der „Stabilität eines Wellenbrechers“ anhand einer Zusammenfassung der bekannten Literatur aus dem Bereich des Wellenbrecherbaus definiert. Anschließend werden exemplarisch Versuche vorgestellt, die zur Untersuchung des Einflusses der Entmischung einer Mole in Bezug auf seine Stabilität dienen. Bei diesen Versuchen werden homogene und entmischte Molenkerne unter Wellenbelastung beobachtet und miteinander verglichen. Anhand der Versuchsergebnisse wird gezeigt, inwiefern die hydraulische Stabilität von entmischten geringer ist als die von homogenen Kernen. Des Weiteren werden Lösungswege aufgezeigt, wie die Entmischung für die Planung eines Wellenbrechers berücksichtigt werden könnte.

## **6.2 Einfluss der Entmischung auf die Filterbemessung**

### **6.2.1 Notwendigkeit der Anordnung von Filtern**

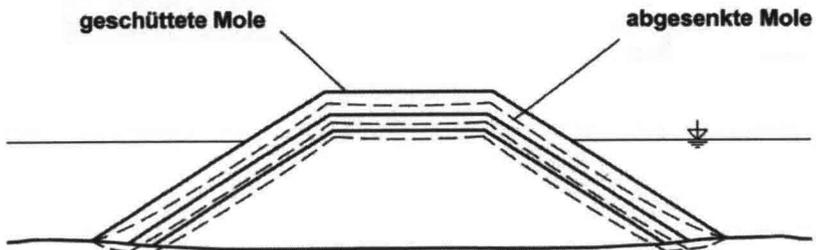
#### **6.2.1.1 Filter zwischen dem Kern und dem Meeresboden**

Unter starker Wellenbelastung und dem Einfluss von Strömungen kann ein Wellenbrecher, der direkt auf den Meeresboden gebaut wird, in den Meeresboden einsinken. Dabei dringt der Meeresboden in die Wellenbrecherstruktur ein. Dieses ist in Abb. 6.1 dargestellt.



**Abb. 6.1: Darstellung des Eindringens des Meeresbodens in den Wellenbrecherkörper (Suffosion)**

In den dadurch entstandenen Freiraum auf dem Meeresboden sackt das Kernmaterial nach. Die Suffosion führt zu einer wesentlichen und nicht vermeidbaren Absenkung der Molenkrone (Abb. 6.2).



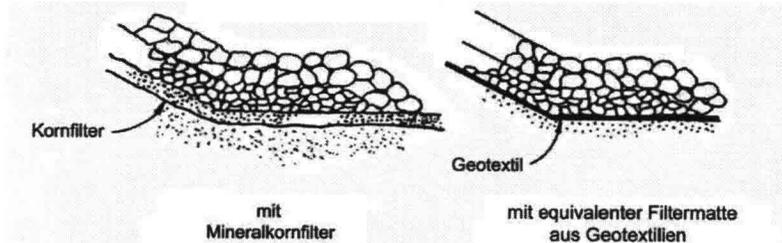
**Abb. 6.2: Absenkung des Molenkopfes durch Eindringen des Meeresbodens in den Molenkern**

Wenn nun das Eindringen des Meeresbodens räumlich unregelmäßig erfolgt und der Molenkern an seinem Fuß erodiert, kann die Standsicherheit der Bauwerksgründung gefährdet sein. Die Mole müsste in diesen Fall vorsorglich überhöht gebaut werden. Durch diese Vorsichtsmaßnahme wird das Eindringen von Material und damit die Eintiefung des Kerns ausgeglichen. Das Eindringen des Meeresbodens kann aber durch den Einbau einer Filterschicht verhindert werden. Ein zweiter Teil der vorhandenen Setzungen, nämlich die Setzungen innerhalb des Meeresbodens und innerhalb der Mole, werden dadurch allerdings nicht verhindert.

Bei einem kohäsionslosen Boden, insbesondere bei einem sandigen Boden, wird von dem Shore Protection Manual (2001) empfohlen, eine Filterschicht anzuordnen. Sie muss, wenn sie aus Kommaterial besteht, entsprechend der Filterregel von Terzaghi dimensioniert

werden. Diese berücksichtigt folgende zwei Wirksamkeiten für den Filter: einerseits die mechanische Filterfestigkeit, die verhindert, dass Körner der feineren Schicht in die Poren einer größeren Schicht eindringen; andererseits die hydraulische Wirksamkeit, welche die Größe der zulässigen Poren bestimmt, damit sich das Wasser innerhalb des Bauwerkes fortbewegen kann, ohne dass sich große Drücke aufbauen können. Die Filterschichtdicke hängt von der Wassertiefe, in welcher das Material eingebaut wird, und von der Größe der Deckschichtsteine ab, nach MAK (1993) (Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen). Sie muss allerdings mindestens 0,3 m stark sein, um sicherzustellen, dass im Fall eines unregelmäßigen Bodens die Filterschicht den Meeresboden vollständig abdeckt.

Anstatt eines Mineralkornfilters kann auch eine Filtermatte aus Geotextilien oder eine Kombination von Kornfilter und Geotextil eingebracht werden. Diese Möglichkeiten werden in diesem Kapitel allerdings nicht betrachtet.



**Abb. 6.3: Möglichkeiten zum Filtereinbau, aus Shore Protection Manual (2001)**

In der Praxis wird die Notwendigkeit eines Filters zwischen dem Meeresboden und dem Kern leider nicht immer erkannt, obwohl der Filter eine wesentliche Rolle für die gesamte Funktion des Bauwerkes hat. Der Kern wird meistens direkt auf den Meeresboden aufgesetzt.

### 6.2.1.2 Filter zwischen dem Kern und der Deckschicht

Bei der Bemessung einer Mole wird zuerst die Masse  $W$  der Deckschichtblöcke in Abhängigkeit der zu erwartenden Wellenbelastung bestimmt. Das Shore Protection Manual (2001) empfiehlt in Abhängigkeit von der Masse der Deckschicht einen Querschnitt für die Mole, der die Stabilitätskriterien berücksichtigt (vgl. Abb. 6.4). Der Molenquerschnitt besteht aus einer Deckschicht, einem Filter und einem Kern. Es bestehen die Forderungen, dass die Filterkriterien zwischen dem Kern und dem Filter sowie zwischen dem Filter und der Deckschicht erfüllt werden.

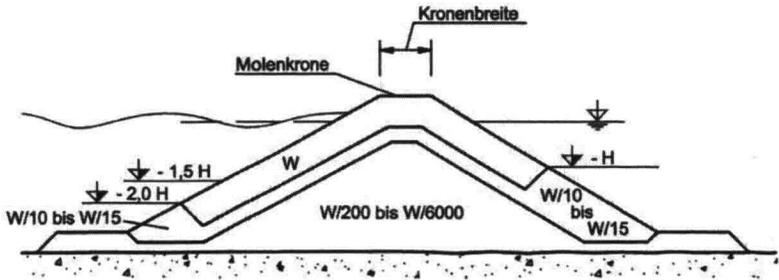


Abb. 6.4: Empfohlener Querschnitt für ein Mole, nach Shore Protection Manual (2001).

## 6.2.2 Bemessung der Filter am Beispiel eines an der Küste von Sylt zu bauender Mole

In diesem Beispiel erfolgt die fiktive Planung eines Molenkerns an der Westküste Sylts. Geschüttet wird ein Kern der Kornzusammensetzung G1. Die Zusammensetzung des Meeresbodens ist an der Stelle der Errichtung bekannt. Dette et al. (1987), haben sie (vgl. Abb. 6.5) ermittelt.

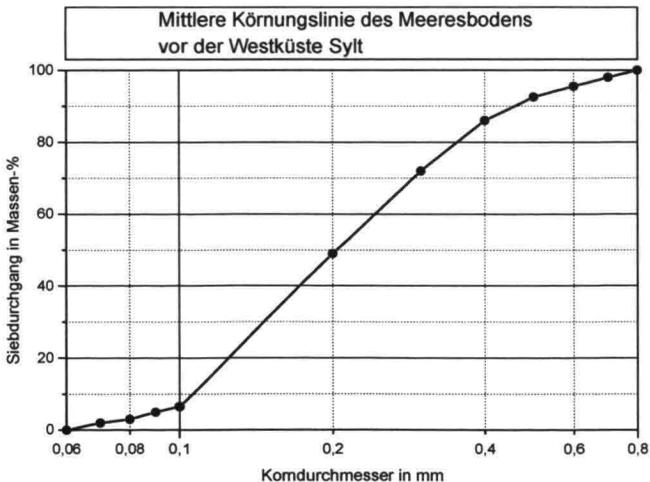
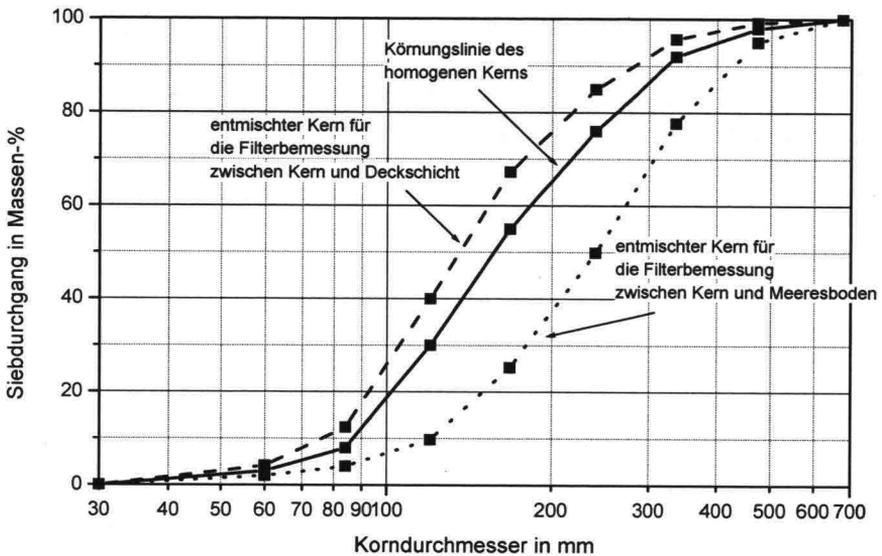


Abb. 6.5: Körnungslinie des Meeresbodens vor der Westküste von Sylt nach Dette et al. (1987)

Die Filter zwischen dem Kern und dem Meeresboden sowie zwischen dem Kern und der Deckschicht werden wie folgt ermittelt.

Die Bemessung eines Filters erfolgt für einen homogenen Kern und als Vergleich für einen durch den geschütteten Einbau entmischten Kern. Für den homogenen Kern wird die Kornzusammensetzung des Schüttgutes G1 berücksichtigt. Für den Filter zwischen dem Meeresboden und dem Kern wird die Körnungslinie der unteren Schicht (Schicht 6) der Böschung der Referenzversuchsreihe 5, 11 bis 22 (in Kapitel 4 definiert) im Naturmaßstab berücksichtigt. Für die Bemessung des Filters zwischen dem Kern und der Deckschicht wird für den entmischten Kern die Schicht 3 der entmischten Böschung gewählt (vgl. Abb. 6.6). Die Bemessung erfolgt für einen Prototyp.



**Abb. 6.6: Kornzusammensetzung des idealen homogenen Kerns (Körnungslinie des Schüttgutes) und der Schichten 6 und 3 des entmischten Kerns nach dem Einbau mit Hinterkippern im Naturmaßstab.**

### 6.2.2.1 Bemessung des Mineralkornfilters zwischen dem Kern und dem Meeresboden

Die Bemessung eines Mineralkornfilters erfolgt in vielen verschiedenen Gebieten des Bauingenieurwesens. Gewöhnlich wird die Filterregel von Terzaghi angewandt.

Außer der Regel von Terzaghi wurden seither auch andere Filterregeln entwickelt, die den Filter zusätzlich an die Gebrauchsart des Bodens oder Bauwerkes anpassen sollen.

In der vorliegenden Arbeit werden die Filter unterschiedlich nach zwei Filterregeln bemessen und zwar nach

- der Filterregel von Terzaghi und
- der Filterregel von Cistin/Ziems.

#### Bemessung des Filters nach der Regel von Terzaghi

Die Filterregel von Terzaghi ist beispielsweise in dem Merkblatt MAK (1993) in der folgenden Form definiert:

$$\frac{D_{15f}}{D_{85b}} < 4 < \frac{D_{15f}}{D_{15b}} \quad (6.1)$$

$D_i$  Korndurchmesser in mm des Erdstoffes bei  $i$  % des Siebdurchganges

$F, b$  Index für den Filter und  $b$  für den feineren Basiserdstoff

Aus dieser Regel können zwei Gleichungen abgeleitet werden:

1. 
$$\frac{D_{15f}}{D_{85b}} < 4 \quad (6.2)$$

(Gl. 6.2) berücksichtigt die mechanische Filterfestigkeit.

Aus dieser Gleichung ergibt sich die obere Grenze für die Bestimmung der Kornverteilung eines Filters, d. h. die Körnungslinie des zu wählenden Filters muss unterhalb dieser Körnungslinie liegen (vgl. Abb. 6.7).

2. 
$$\frac{D_{15f}}{D_{15b}} > 4 \quad (6.3)$$

(Gl. 6.3) berücksichtigt die hydraulische Filterwirksamkeit.

Aus dieser Gleichung ergibt sich die untere Grenze für die Bestimmung der Kornverteilung eines Filters, d. h. die Körnungslinie des zu wählenden Filters muss oberhalb dieser Körnungslinie liegen (vgl. Abb. 6.7).

Diese mit der Filterregel von Terzaghi definierten Kornverteilungen grenzen den Körnungslinienbereich, in dem sich die Kornverteilung der Filter befinden muss, ein.

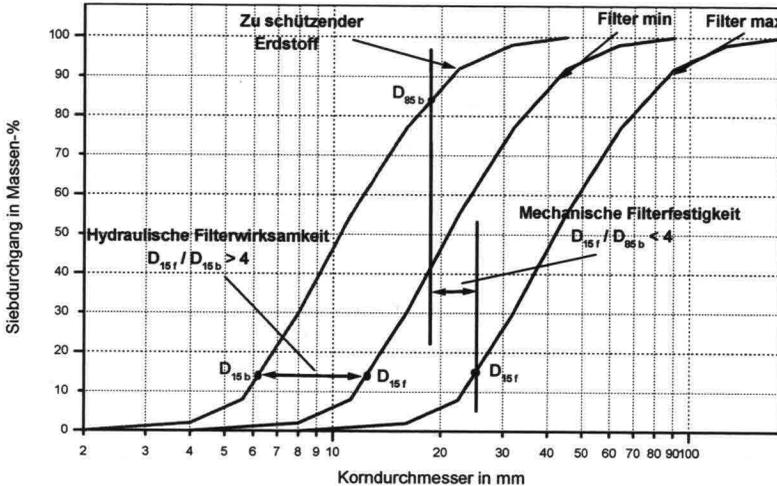


Abb. 6.7: Darstellung der Filterregel von Terzaghi

Eine detaillierte Bemessung erläutert in Anhang 4 das Prinzip der Filterbemessung von Terzaghi. Um die Bemessungen von Filtern zu erleichtern, wurde ein Programm mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms erarbeitet. Es berechnet in Abhängigkeit der zwei zu filternden Böden den nach Terzaghi bemessenen Filter bzw. Stufenfilter und stellt ihn anhand einer Grafik dar.

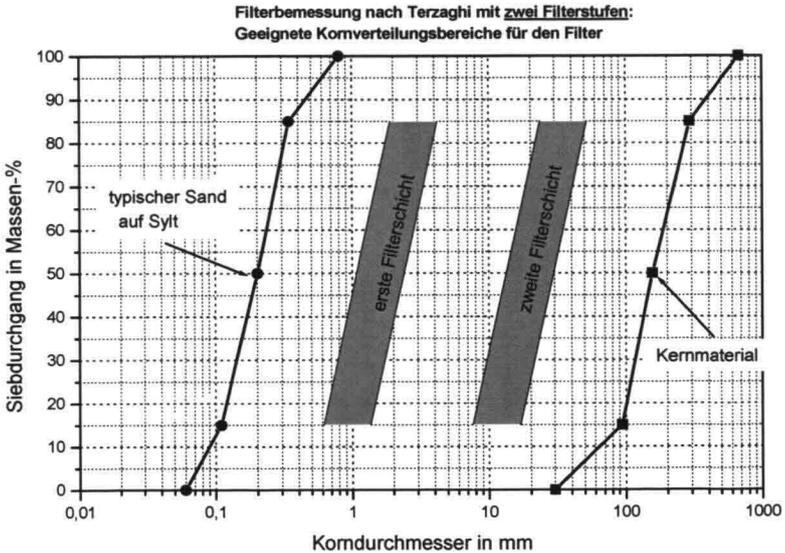
Die Bemessung erfolgt wie folgt: Zunächst wird der Filter in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens bestimmt. Es ergibt sich ein Körnungslinienbereich für den Filter. Anschließend wird der Filter in Abhängigkeit der Kornverteilung des Wellenbrecherkerns berechnet. Damit ergeben sich einen neuen Körnungslinienbereich für die mögliche Kornverteilung des Filters.

Die erhaltenen Bandbreiten für die Kornverteilung des Filters in Abhängigkeit des Meeresbodens sowie in Abhängigkeit des Kerns werden miteinander verglichen. Aus den Überschneidungen dieser Bandbreiten ergibt sich den endgültigen eingeschränkten Bereich für die Kornverteilungen der Filter. Im Folgenden wird sie als „geeigneter Kornverteilungsbereich für die Wahl der Filter“ bezeichnet.

Eine Besonderheit besteht für einen Stufenfilter, der aus mehreren Filterschichten besteht. Die definierten Körnungslinienbereiche sind Bereiche aus denen der Filter gewählt werden kann, d. h. innerhalb dieser Bereiche können Kornverteilungen gewählt werden, die gegenseitig und von dem zu trennenden Erdstoffen filterfest sind. Außerhalb dieser Bereiche ist dies aber ausgeschlossen. Alle definierten Körnungslinien eines gegebenen Bereichs sind aber nicht filterfest gegenüber allen Körnungslinien des weiteren definierten Bereichs. Aus diesem Grund wird in der Praxis zuerst eine Körnungslinie für die erste Filterschicht gewählt. Die Körnungslinie der weiteren Filterschicht wird dann in Abhängigkeit von der gewählten Körnungslinie für die erste Filterschicht bestimmt.

**Bestimmung des Filters in Abhängigkeit der Kornverteilungen des Meeresbodens und des homogenen Kerns**

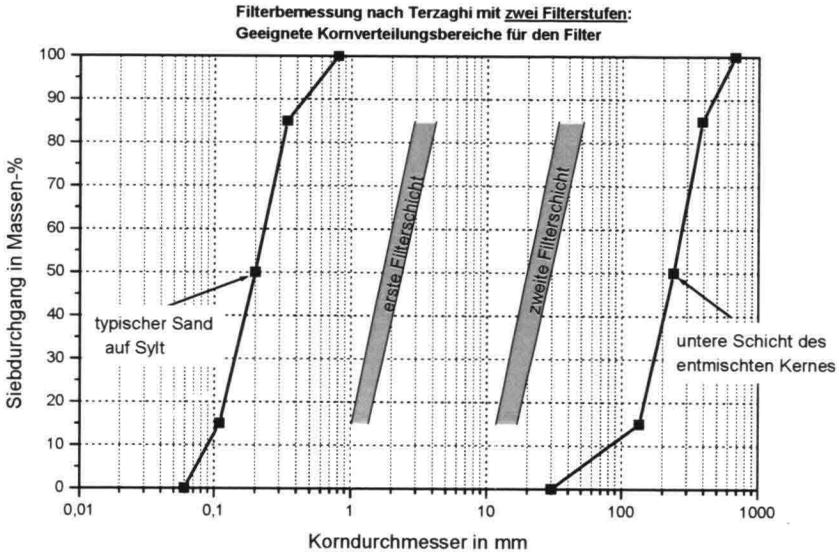
Die geeigneten Kornverteilungsbereiche für den Filter für den Fall eines homogenen Kerns ist der Abb. 6.8 zu entnehmen.



**Abb. 6.8: Stufenfilter zwischen dem Meeresboden und dem homogenen Wellenbrecherkern. Definition nach der Regel von Terzaghi in Abhängigkeit der Kornverteilungen des Meeresbodens und des Kernschüttgutes**

**Bestimmung des Filters in Abhängigkeit der Kornverteilungen des Meeresbodens und des entmischten Kerns:**

Die Entmischung des Kerns wird berücksichtigt, weil sich der Meeresboden in direktem Kontakt mit der unteren Schicht des Kerns befindet. Aufgrund der auftretenden Entmischung ist diese Kontaktschicht gröber als das geschüttete Kernmaterial. Sie wird durch die Kornzusammensetzung der Schicht 6 berücksichtigt. Der daraus folgende bemessene Filter ist in Abb. 6.9 dargestellt.



**Abb. 6.9: Stufenfilter zwischen dem Meeresboden und dem entmischten Molenkern. Definition nach der Regel von Terzaghi in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens und des entmischten Molenkerns**

Die geeigneten Kornverteilungsbereiche für die Wahl der Stufenfilter erweisen sich in diesem Fall als sehr klein.

Wenn der Filter in Abhängigkeit des Schüttgutes bestimmt wird, besteht die Gefahr, dass er nicht filterfest gegenüber dem darauf liegenden Kernmaterial ist. Als Folge einer Nichtbeachtung der Entmischung des Kerns während des Einbaus kann eine Suffosion im Fußbereich auftreten.

**Die Filterregel von Cistin/Ziems**

Im folgenden Kapitel wird die Filterregel von Cistin/Ziems vorgestellt. Sie ist eine Weiterentwicklung der Filterregel nach Terzaghi, wobei nicht nur die zu trennenden Böden

berücksichtigt werden, sondern auch die Belastung auf die Bauwerke. Die Anwendbarkeit der Regel von Cistin/Ziems ist einfacher und schneller als die Regel von Terzaghi. Die Erläuterung der Filterregel nach Cistin/Ziems ist in MAK (1993) (Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen) von der Bundesanstalt für Wasserbau sehr detailliert dargestellt. In diesem Kapitel wird allerdings nur der für die vorliegende Anwendung relevante Teil der Regel vorgestellt.

Die Filterregel von Cistin/Ziems ist ausschließlich für nicht bindige Böden anwendbar. Der Gültigkeitsbereich der Filterregel von Cistin/Ziems liegt im Bereich der folgenden Korngrößen:

$$\begin{aligned} 0,1 \text{ mm} < D_b < 30 \text{ mm} & \quad (D_b \text{ steht für Durchmesser des Basiserdstoffs) und} \\ 4 \text{ mm} < D_f < 100 \text{ mm} & \quad (D_f \text{ steht für Durchmesser des Filters).} \end{aligned}$$

Das zulässige Abstandsverhältnis  $A_{50}$ , maßgebend für die mechanische Filterfestigkeit, zwischen dem Filter  $f$  und dem zu schützenden Boden  $b$  wird in Abhängigkeit von der jeweiligen Ungleichförmigkeitszahl aufgetragen.

$$A_{50} = \frac{D_{50f}}{D_{50b}} = \text{Funktion}(U_b, U_f)$$

$U_b$ , Ungleichförmigkeitszahl des Basiserdstoffs

$U_f$ , Ungleichförmigkeitszahl des Filters

Die Funktion wurde experimentell bestimmt und ist in Abb. 6.10 wiedergegeben. Der Wert für  $A_{50}$  ist dieser Abbildung zu entnehmen. Laut MAK (1993) muss das zulässige Abstandsverhältnis  $A_{50}$  möglichst maximal ausgenutzt werden.

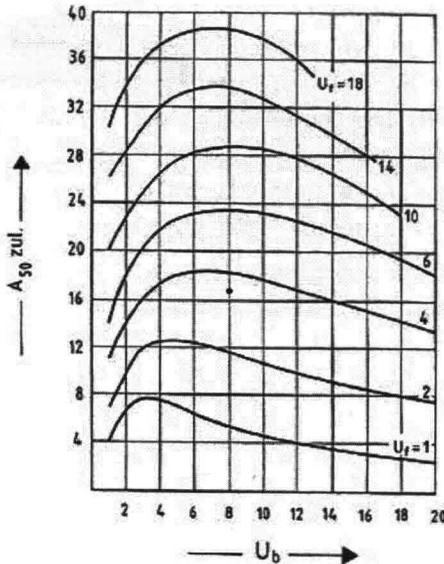


Abb. 6.10: Funktion F für die Filterbemessung nach Cistin/Ziems, nach dem MAK (1993), S. 19

Der Filter besitzt unter dynamisch hydraulischer Belastung eine ausreichende hydraulische Filterwirksamkeit, solange das zulässige Abstandsverhältnis  $A_{50}$  maximal ausgenutzt wird.

Bei Vorliegen eines Kornverteilungsbereichs müssen für den Filter zusätzlich die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

1. Bedingung:  $D_{50f} > D_{50b}$
2. Bedingung:  $D_{10f} > 2 \cdot D_{10b}$

Die erforderliche Mindestdicke  $d$  eines Filters beim Unterwassereinbau lautet:

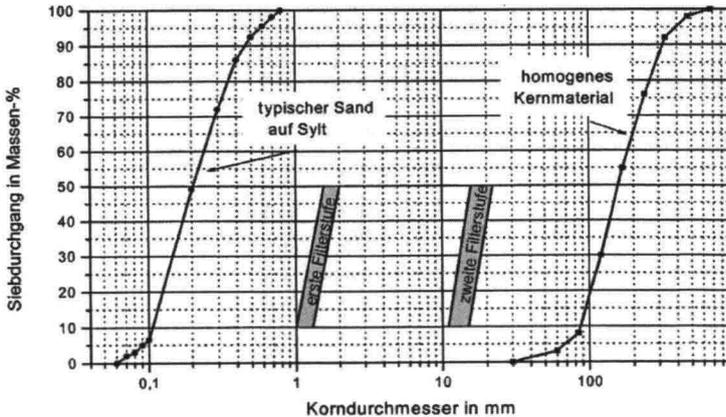
- |     |                              |                     |                |
|-----|------------------------------|---------------------|----------------|
| Für | $D_{50f} \leq 30 \text{ mm}$ | $d = 20 \text{ cm}$ | je Filterstufe |
| Für | $D_{50f} > 30 \text{ mm}$    | $d = 30 \text{ cm}$ | je Filterstufe |

### Bemessung des Filters nach Cistin/Ziems

Die Filterbemessung nach Cistin/Ziems wird wieder für die Beispielsmole auf Sylt verwendet. Wie bei Terzaghi muss der Filter einerseits in Abhängigkeit des Meeresbodens, andererseits in Abhängigkeit von dem Molenkern bestimmt werden. Die Erläuterung dieser Berechnung erfolgt in Anhang 3.

**Bestimmung des Filters nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens und des homogenen Kerns:**

Der Filter nach Cistin/Ziems, der in Abhängigkeit des Meeresbodens und des Schüttmaterials des Kerns die Anforderungen der Bemessung erfüllt, ist in Abb. 6.11 dargestellt.



**Abb. 6.11: Stufenfilter zwischen dem Meeresboden und dem Molenkern. Filterbemessung nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens und des Kernmaterials.**

**Berücksichtigung der Kernentmischung für die Filterbemessung nach Cistin/Ziems**

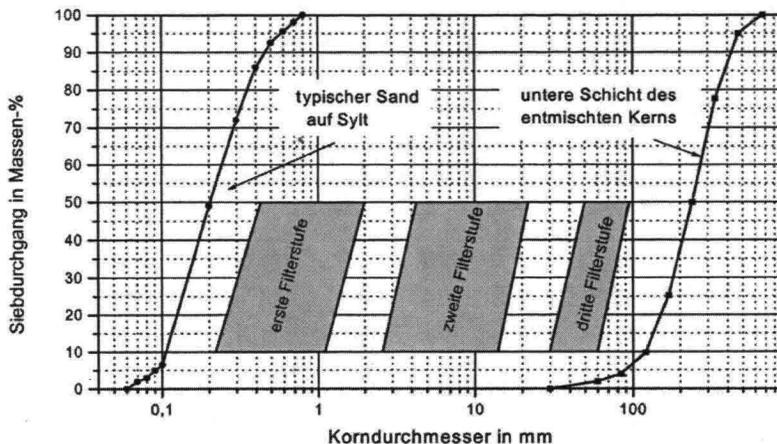
Für den Fall, in dem die Entmischung beim Bau des Wellenbrecherkerns berücksichtigt wird, wird für den im direkten Kontakt zu dem Meeresboden stehenden Kern die Körnungslinie der Schicht 6 der entmischten Böschung gewählt.

$$D_{50 \text{ Schicht 6}} = 240 \text{ mm}; \quad D_{50 \text{ 12}} = 22 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow A = \frac{240}{22} = 10,3 < 10 \text{ ? NEIN!} \Rightarrow \text{Die mechanische Filterfestigkeit ist nicht erfüllt!}$$

Aufgrund der Entmischung des Kerns ist die mechanische Filterfestigkeit nicht mehr gewährleistet. Es besteht die Gefahr einer Suffosion im Fußbereich der Mole. Um dieses zu verhindern, müsste eine dritte Filterstufe eingebaut werden.

Die Berechnung des dritten Stufenfilters zwischen dem Meeresboden und dem entmischten Kern, erfolgt auch in Anhang 3. Das Ergebnis dieser Berechnung unter Berücksichtigung der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit ist in Abb. 6.12 dargestellt.



**Abb. 6.12: Stufenfilter zwischen dem Meeresboden und dem entmischten Kern. Filterbemessung nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens und des entmischten Kerns.**

Als Schlussfolgerung kann in diesem Fall auch festgestellt werden, dass eine Nichtberücksichtigung der Kernentmischung bei der Planung einer Mole zu dem Einbau eines unwirksamen Filters zwischen dem Meeresboden und dem Kern führt. Folglich kann es trotz korrekter Beachtung der Filterregeln zu Schäden am Bauwerk durch Suffosion kommen.

### 6.2.2.2 Bemessung des Filters zwischen dem Kern und der Deckschicht

In den bisherigen Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Kern keine homogene Zusammensetzung hat. Er wird von oben nach unten immer größer. Das heißt, dass der Filter zwischen dem Kern und der Deckschicht an der Kornzusammensetzung des Kerns angepasst werden müsste, genauso wie der Filter zwischen dem Molenkern und dem Meeresboden. Eine solche Forderung würde allerdings zu erheblichen Mehrkosten führen und gleichzeitig zu einem komplizierteren Aufbau. Im Folgenden wird ein vereinfachtes Verfahren zur Berücksichtigung der Entmischung beim Filteraufbau vorgeschlagen.

Der Kern bzw. das ganze Bauwerk wird in dem Bereich des Wellenaufschlages besonders stark beansprucht. An dieser Stelle, im oberen Bereich des Kerns, ist die Kornzusammensetzung feiner als die des geschütteten Schüttgutes. Die Kornzusammensetzung in diesem Bereich entspricht der der Schicht 3 des Kerns (vgl. Kapitel 4), d. h. der Kern ist 14% feiner als das ursprüngliche Schüttgut. Eine Bemessung des Filters in Abhängigkeit vom homogenen Schüttgut kann die hydraulische Wirksamkeit des Filters nicht ausreichend

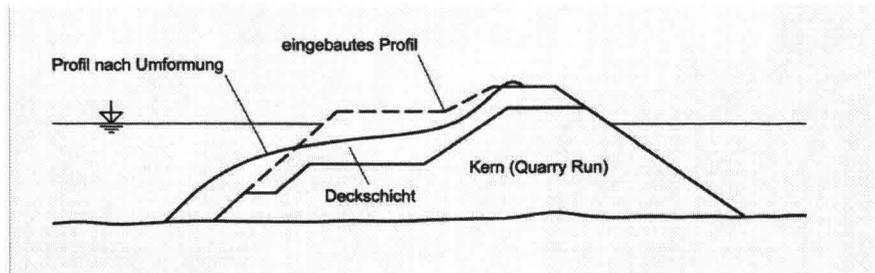
gewährleisten. Daher müsste die Filterbemessung an die dritte Schicht angepasst werden. Daraus folgt, dass die Entmischung des Kerns auch für diesen Fall berücksichtigt werden muss. Eine erneute Filterbemessung erfolgt im Weiteren nicht, weil das Prinzip der Bemessung anhand des ausführlichen Beispiels bereits beschrieben wurde. Zur Bemessung des Filters zwischen dem Kern und der Deckschicht wird das gleiche Verfahren angewandt. Allerdings wird anstatt der Körnungslinie des Schüttgutes die der Schicht 3 berücksichtigt.

## 6.3 Einfluss der Entmischung auf die Molenstabilität

### 6.3.1 Definition der Molenstabilität

Der Begriff Stabilität ist sehr allgemein und wird vielfältig verwendet. Die Literatur im Bereich des Wellenbrecherbaus befasst sich einerseits mit der Stabilität von klassisch geschütteten Wellenbrechern („Rubble Mound Breakwaters“) und andererseits mit den so genannten „Berm Breakwaters“ (vgl. Abb. 6.13).

Der „Rubble Mound Breakwater“ besteht aus drei Schichten: dem Kern, dem Filter und der Deckschicht. Der „Berm Breakwater“ ist ein Wellenbrecher, der durch Steinschüttungen ins Wasser gebaut wird, er nimmt den natürlichen Winkel, der sich bei der Schüttung einstellt, ein. Die natürliche Umformung durch die Wellenbelastung ist gewünscht und ist Teil der Planung und des Baus. Dadurch soll ein stabiles Bauwerk entstehen. Er muss, im Gegensatz zu einem klassisch geschütteten Wellenbrecher „Rubble Mound Breakwater“, nicht nachträglich profiliert werden. Bei dem geschütteten Wellenbrecher ist der natürliche Böschungswinkel, der sich bei der Kernschüttung einstellt, tatsächlich steiler als der des geplanten Kerns. Die Effektivität eines „Berm Breakwater“ ist daher für eine vorgegebene Blockgröße und für eine vorgegebene Materialmenge am höchsten.



**Abb. 6.13: Umformung eines Wellenbrechers der Art „Berm Breakwater“, nach Shore Protection Manual (2001), S. VI-2-14**

Die Aussagen des Shore Protection Manual (2001) über die Stabilität werden wie folgt zusammengefasst:

Die hydraulische Stabilität kann als ein Widerstand gegen die Wellenbelastung dargestellt werden. Der Nachteil bei dem Bau eines geschütteten Wellenbrechers wie bei allen ins Wasser geschütteten Schüttgütern ist, dass das Schüttgut nicht künstlich verdichtet werden kann, die geschüttete Einbaudichte kann nachträglich nicht verbessert werden. Nur die natürliche Wellenbelastung ist in der Lage, den Kern eines Wellenbrechers nachträglich zu verdichten. Er ändert seine Form, bis sich sein Profil im Gleichgewichtszustand befindet und die erreichte Form beibehält. Dieses Phänomen kann als eine Art Anpassung des Bauwerkes an die Wellenbelastung beschrieben werden. Während und nach dem Bau eines Wellenbrecherkernes kommt es zu Setzungen bzw. Umformungen, die zu der Entstehung eines stabileren Bauwerks beitragen, Shore Protection Manual (2001), S. VI-4-14.

### **Welche Parameter beeinflussen die hydraulische Stabilität?**

Die Masse der einzelnen Steine beeinflusst die Stabilität: je größer die Masse ist, desto größer ist das zugehörige Gewichtskraft und daher auch der Widerstand gegen die Wellenbelastung. Die Gewichtskraft ist die einzige Kraft, die stabilisierend auf den Kern wirkt, Shore Protection Manual (2001), S. VI-5-48. Wenn das Gewichtskraft insbesondere im Bereich des Wellenaufschlages kleiner ist als ursprünglich geplant (das ist der Fall bei einem entmischten Kern), entsteht die Gefahr, dass der Kern an dieser Stelle beschädigt wird.

Die Einbaudichte, die Größe der Poren im Kern, befinden sich im direkten Zusammenhang mit der hydraulischen Stabilität (nach Burcharth und Thompson (1983)). Die Porenvolumen wirken wie ein Reservoir, das die Kraft auf die Blöcke der Deckschicht reduziert (nach Shore Protection Manual, Seite V-5-5). Die Geschwindigkeit der anlaufenden Welle wird dadurch abgebremst, da ein Anteil des anlaufenden Wassers in den Poren gespeichert wird. Bei zunehmender Porosität, das heißt beispielsweise durch die Beschränkung des Feinkomanteils, entstehen größere Poren im Kern und damit ein stabilerer Kern.

Alle physikalischen Gesetzmäßigkeiten erklären damit einen groben Kern im Bereich des Wellenaufschlages für stabiler als einen feinen.

Das Shore Protection Manual (2001, S. VI-5-55) fasst die Parameter (Seegangparameter und eigene Parameter des Wellenbrechers), die einen Einfluss auf die hydraulische Stabilität haben, zusammen. Diese sind:

- Seegangparameter: Charakteristische Wellenhöhe, charakteristische Wellenlänge, charakteristische Wellensteilheit, Wellenasymmetrie, Art des Wellenspektrums, Wellengruppen, Wassertiefe, Auftreffwinkel der Wellen, Wellenanzahl, Dichte des Wassers.
- Parameter des Wellenbrechers: Seeseitiges Profil und Konstruktion, Böschungswinkel, Freibord, Korndichte der verwendeten Steine, Körnungslinie der verwendeten Steine,

Masse und Form der Einzelsteine, Lagerungsdichte, Lagerung, Ausführung und Dicke des Kerns, Porosität und Durchlässigkeit von Unterlage, Filterschicht und Kern.

Die genannten Parameter werden bei der folgenden Untersuchung nicht weiter betrachtet. Diese Untersuchung bleibt sehr exemplarisch, sie dient dazu, das Verhalten eines homogenen von dem eines entmischten Wellenbrecherkerns unter einer bestimmten Wellenbelastung zu vergleichen.

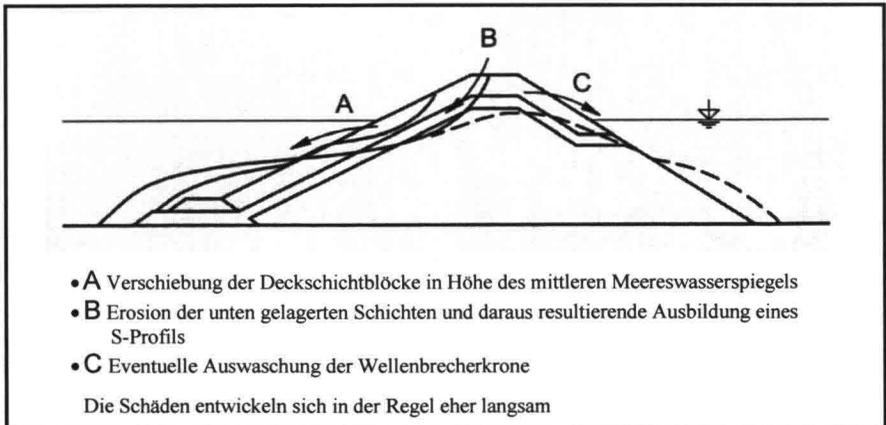
#### Wie äußert sich eine hydraulische Instabilität bei einem Wellenbrecherkern?

Die hydraulische Instabilität führt zu einer Bewegung der Deckschichtblöcke eines geschütteten Wellenbrechers, die durch die Wellenbelastung auf einen Wellenbrecher entsteht, nach Shore Protection Manual (2001, S. V-5-48).

Die hydraulische Instabilität kann sich in drei verschiedenen Arten äußern, vgl. auch Abb. 6.14:

- Verschiebung der Deckschichtblöcke in Höhe des Meeresspiegels,
- Erosion der unten gelagerten Schichten und daraus resultierende Ausbildung eines S-Profiles,
- Eventuelle Auswaschung der Wellenbrecherkrone.

Genauso führt die hydraulische Instabilität zur Bewegungen von Steinen an der Kernoberfläche solange der Kern ungeschützt ist.



**Abb. 6.14: Instabilität der Deckschicht eines Wellenbrechers**  
(nach Shore Protection Manual (2001, Bild VI-2-26))

Eine besondere Art der Umformung stellen die Setzungen, die innerhalb des Kerns auftreten können, dar. Sie sind auf die instabile Lagerung, die aus der Schüttung des Kerns resultieren, direkt zurückzuführen. Zum Ausgleich von aufgetretenen Setzungen müsste das Gesamtbauwerk erhöht werden, um seine Aufgabe weiterhin vollständig erfüllen zu können. Wenn diese Maßnahme nicht durchgeführt wird, besteht die Gefahr, dass es überspült wird. Wenn einzelne Steine bzw. Blöcke eines Wellenbrechers beschädigt werden, handelt es sich um eine andere Art von Instabilität, die hier nicht näher behandelt wird.

### **Wie wird die hydraulische Stabilität festgestellt und gemessen?**

Für eine gegebene Wellenbelastung gilt: je größer die Umformung des Kerns ist, desto instabiler war das ursprünglich gebaute Bauwerk. Das Shore Protection Manual (2001) weist darauf hin, dass deterministische Berechnungsverfahren für die Bestimmung des Stabilitätszustandes eines Wellenbrechers nicht möglich sind. Die Stabilität ist nur anhand von aus den Ergebnissen von Modellversuchen abgeleiteten Formeln definierbar.

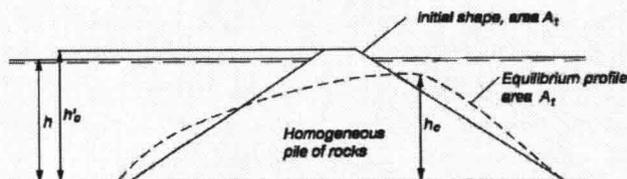
Schäden an einem Wellenbrecher werden auf verschiedene Methoden gemessen. Oft wird die genaue Anzahl der bewegten Deckschichtblöcke erfasst. Andere Messmethoden sind:

- Iribaren (1938) misst die erodierte Fläche  $A_e$  vom Querschnitt in Höhe des Meeresspiegels.
- Hudson (1958) misst den Prozentsatz des erodierten Volumens eines Wellenbrechers in Verhältnis zu ihrem ursprünglichen Gesamtvolumen.
- Broderick (1983) definiert einen dimensionslosen Parameter  $S = A_e/D^2_{n50}$ .
- Van der Meer (1990) schlägt eine Formel vor (vgl. Abb. 6.15), welche die Höhe eines Wellenbrechers im Gleichgewichtszustand in Abhängigkeit vom ursprünglichen Profil und der Wellenbelastung vorhersagt.

Irregular, head-on waves

van der Meer (1990)

Trunk cross section of reef breakwater



The equilibrium height of the structure

$$h_c = \sqrt{\frac{A_t}{\exp(a N_s^*)}} \quad \text{with a maximum of } h'_c \quad (\text{VI-5-73})$$

where  $A_t$  area of initial cross section of structure

$h$  water depth at toe of structure

$h'_c$  initial height of structure

$$N_s^* = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} s_p^{-1/3}$$

$$a = -0.028 + 0.045 \frac{A_t}{(h'_c)^2} + 0.034 \frac{h'_c}{h} - 6 \times 10^{-9} \frac{A_t^2}{D_{n50}^2}$$

Data source: Ahrens (1987), van der Meer (1990)

Powell and Allsop (1985) analyzed data by Ahrens, Viggooson, and Zirkle (1982) and Ahrens (1984) and proposed the stability formula

$$\frac{N_{od}}{N_a} = a \exp[b H_s / (\Delta D_{n50})] \quad \text{or} \quad \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \frac{1}{b} \ln \left( \frac{1}{a} \frac{N_{od}}{N_a} \right) \quad (\text{VI-5-74})$$

where values of the empirical coefficients  $a$  and  $b$  are given in the table as functions of freeboard  $R_c$  and water depth  $h$ .  $N_{od}$  and  $N_a$  are the number of displaced rocks and the total number of rocks in the mound, respectively.

Values of coefficients  $a$  and  $b$  in Eq (VI-5-74).

$R_c/h$	$a \cdot 10^4$	$b$
0.0	15	0.31
0.2	17	0.33
0.4	4.8	0.53

Valid for  $0.0012 < H_s/L_p < 0.036$

Abb. 6.15: Vorhersage des Gleichgewichtszustandes eines Wellenbrechers unter Wellenbelastung nach van der Meer (1990)

Es gibt kein Standardverfahren zur Messung der Stabilität von Wellenbrechern. Für die folgende Untersuchung wird die Stabilität mit mehreren Verfahren ausgewertet:

- Über die Höhe des Wellenbrecherkerns nach Wellenbelastung. Die erreichte Höhe wird mit der von van der Meer errechnete Höhe verglichen.
- Über die bewegte Querschnittsfläche (entspricht den Verfahren von Iribaren und Hudson).

### 6.3.2 Versuchsbeschreibung

Es wurde vermutet, dass die Entmischung einen Einfluss auf die Stabilität eines Wellenbrechers hat. Um dieses zu kontrollieren, wurden exemplarisch Versuche in einer Wellenrinne durchgeführt, in dem der Einfluss einer gegebenen Wellenbelastung auf die Stabilität von unterschiedlich aufgebauten Molenkernen untersucht wurde. Zweck der durchgeführten Versuche ist es, die Stabilität eines gut durchmischten Kerns (auch homogen genannt) mit der eines durch den geschütteten Einbau entmischten Molenkerns zu vergleichen. Der homogene Kern wurde mit einer Handschaufel aufgebaut, der entmischte Kern wurde mit der schon verwendeten Kippeinrichtung ins Wasser geschüttet. Beide Kerne hatten das gleiche Ausgangsmaterial, die gleiche Gesamtmaterialmasse und das gleiche Profil, nämlich das Profil der natürlichen Böschung, das sich bei der Kernschüttung einstellt. Es wurde allein das Profil einer natürlichen Böschung betrachtet.

Das verwendete Kernmaterial war die schon verwendete Grauwacke in der Größe 2-16 mm (mit  $U = 2,1$ ).

Bei diesen Modellversuchen war das Gleichgewichtsprofil an eine konstante Wasserspiegellage und eine gleich bleibende Wellenbelastung gebunden. Es ist damit die ideale Beschreibung eines Gleichgewichtszustandes, der in der Natur nur näherungsweise ausgebildet werden kann, da Änderungen der Wellenbelastung und des Wasserspiegels stets neue Umformungen des Böschungsprofils hervorrufen. Ziel war es, nur wenige Einflussfaktoren miteinander zu verknüpfen.

Die Wellenbelastung erfolgte mit der folgenden Welle:

Wellenhöhe = 6 cm

Wellenlänge = 92 cm

Die Wellenbelastung erfolgte bis zu dem Zeitpunkt bis keine sichtbaren und messbaren Umformungen mehr festzustellen waren.

Es wurden 6 Versuche mit gut durchmischten Kernen und 6 Versuche mit entmischten Kernen durchgeführt.

Die Messung der Umformungen der Molenkerne erfolgte nach der Versuchsdurchführung in dem das Gleichgewichtsprofil der Kerne grafisch festgehalten wurde. Die Bewegungsformen der einzelnen Steine wurden dabei nicht untersucht. Durch die Umformungen der verschiedenen Kerne können Aussagen über die hydraulische Stabilität der gebauten Kerne getroffen werden.

### 6.3.3 Versuchsergebnisse

Bei der Umformung stellt sich die aus der Literatur für einen „Berm Breakwater“ bekannte S-Profil ein.

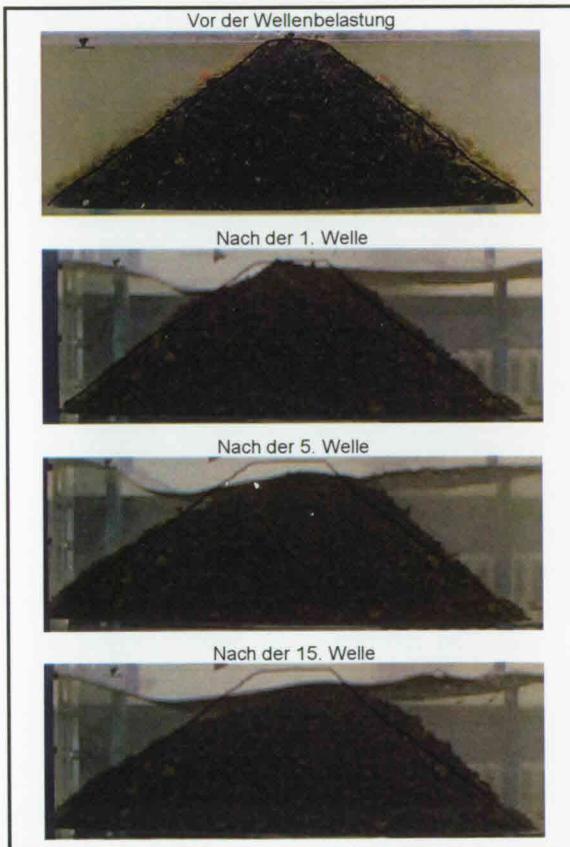


Abb. 6.16: Entmischter Molenkern unter Wellenbelastung, Darstellung seines Umformungsverlaufs

Das von den Wellen erodierte und angegriffene Material wird im Wechselspiel zwischen Abrasion und Akkumulation umgelagert (vgl. Abb. 6.16).

Dies führt zur folgenden Erscheinungen:

- Verflachungen der Ausgangsneigung im Wirkungsbereich der Wellen,
- Erosion des hauptsächlich über dem Wasserspiegel liegenden Böschungsbereichs,
- Ablagerung des gelösten Böschungsmaterials überwiegend an Leeseite.

Diese Beobachtungen treffen für alle Molenkerne zu. Die Umformung begann schon nach der ersten Welle, der Gleichgewichtszustand wurde nach 15 Wellen erreicht.

Der Umformungsverlauf ist in Abb. 6.16 dargestellt.

Die hydraulische Instabilität ist durch die folgenden Umformungen zu beobachten:

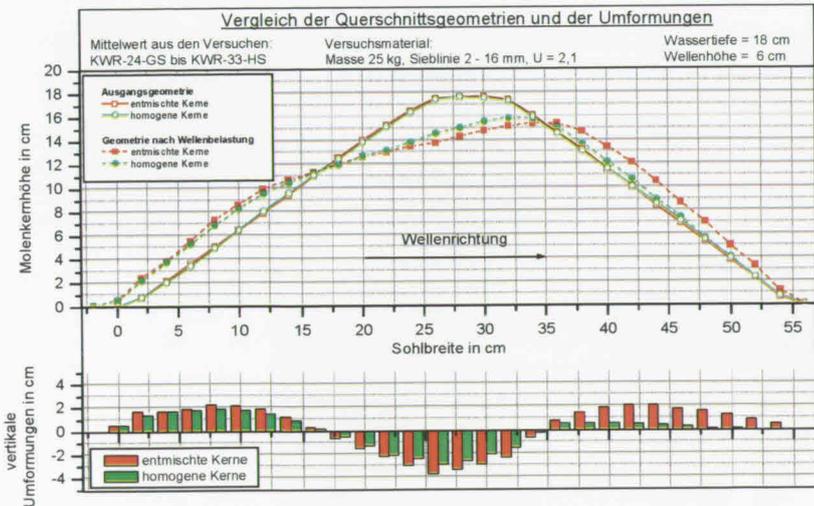
- Das Rutschen eines ganzen Bereichs der Böschungsoberfläche.
- Die Abtragung einzelner Steine aus der Böschungsoberfläche.
- Das Wippen einzelner Steine, wobei dieses Phänomen weiterhin nach Entstehung des Gleichgewichtsprofils beobachtet wurde, das Profil wurde aber dadurch nicht geändert.

Durch die gewählte Auswertungsart ist es nicht möglich, die verschiedenen Beiträge zur hydraulischen Instabilität zu unterscheiden.

Die Molenkernegeometrien vor und nach der Wellenbelastung sind in Abb. 6.17 für beide Kernarten, homogen und entmischt, (gemittelt über die Anzahl der Versuche) dargestellt. Alle einzelnen Ergebnisse sind in Anhang 4 dargestellt.

Die Umformung der Kerne wird durch die Feststellung des Gleichgewichtsprofils gemessen.

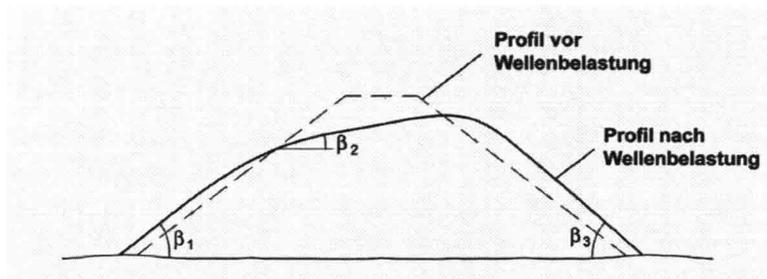
Die Genauigkeit dieser Messung beträgt  $\pm 2$  mm.



**Abb. 6.18: Querschnittsgeometrien der homogenen und entmischten Molenkerne vor und nach einer Wellenbelastung**

Die Umformung der Molenkernkrone wird anhand der Unterschiede der Höhen zwischen der Ausgangsgeometrie und dem höchsten Punkt des Molenkernquerschnitts nach Wellenbelastung bestimmt. Die Differenz beträgt im Durchschnitt für einen homogenen Kern 1,65 cm und für einen entmischten Kern 2,15 cm bei einer ursprünglichen Gesamthöhe von 17,5 cm. Dies bedeutet, dass der entmischte Molenkern vor der Wellenbelastung hydraulisch instabiler ist.

Weiterhin werden die Böschungswinkel gemessen. Bei dem entmischten Kern ist die Böschung nach der Wellenbelastung (vgl. Abb. 6.18 und Tabelle 6.1) steiler als bei dem homogenen Kern. Dies gilt für alle gemessenen Böschungswinkel. Die Böschungswinkelunterschiede sind auf die kleineren Korndurchmesser im Wellenangriffsbereich zurückzuführen.



**Abb. 6.18: Gemessene Böschungswinkel bei Molenkernen nach der Wellenbelastung**

	Homogener Kern		Entmischter Kern
Böschungswinkel $\beta_1$ in [°]	38	<	40
Böschungswinkel $\beta_2$ in [°]	18	>	12
Böschungswinkel $\beta_3$ in [°]	38	<	46

**Tabelle 6.1: Böschungsneigungen der Böschungen nach der Wellenbelastung, Vergleich des homogenen mit dem entmischten Molenkern**

Die Umformung wird auch über die umgeformten Querschnittsflächen gemessen. In Tabelle 6.2 wird die Abrasionsfläche angegeben. Die entsprechende Akkumulationsfläche ist aus Kontinuitätsgründen genauso groß.

	Homogener Kern		Entmischter Kern
Bewegte Fläche durch die Wellenbelastung in $\text{cm}^2$	30,4		47,8

**Tabelle 6.2: Bewegte Flächen durch die Wellenbelastung, Vergleich eines homogenen mit einem entmischten Kern**

Die bewegte Querschnittsfläche eines entmischten Kerns ist ca. 30 % größer als die eines gut durchmischten Kerns. Es zeigt sich wieder, dass der entmischte Kern wesentlich instabiler ist als der homogene. Seine hydraulische Stabilität ist daher direkt nach seinem Einbau geringer.

Diese Untersuchungen zeigen, dass schon in der Planungsphase die Bauweise und die eventuelle daraus resultierende Entmischung unbedingt mitbetrachtet werden müssen. Die Querschnitte eines Wellenbrechers und die zu verwendeten Steingrößen können nicht mehr nur in Abhängigkeit der Wellenverhältnisse definiert werden, sie müssen die Entmischung des Kernmaterials bei der Schüttung in der Landbauweise mitberücksichtigen. Bei der Landbauweise mit Hinterkippern wird der Kern entmischt sein, er ist damit automatisch instabiler, als wenn er durch Schuten eingebaut wäre.

## 6.4 Zusammenfassung von Kapitel 6

Die Untersuchung der Folgen, die aus der Entmischung einer Mole resultieren, können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Bemessung von Filtern erfolgt üblicherweise nach der Filterregel von Terzaghi. Die Regel von Cistin/Ziems ist eine Weiterentwicklung der Regel von Terzaghi. Sie berücksichtigt die Art der Belastung auf das Bauwerk und ist zusätzlich einfacher anzuwenden als die Filterregel von Terzaghi. Ein Vergleich der Regel von Terzaghi mit der von Cistin/Ziems zeigte, dass die Regel von Cistin/Ziems für die Wellenbrecherfilter besser geeignet ist.

Das Bemessungsbeispiel eines Filters hat gezeigt:

- Generell ist der Einbau eines Filters zwischen dem Meeresboden und dem Kern notwendig.
- Eine Nichtbeachtung der Entmischung des Kerns kann zu einer Erosion im Fußbereich und/oder im Wellenaufschlagsbereich führen.
- Eine Entmischung des Kerns muss daher bei der Bemessung zwingend berücksichtigt werden:

Für den Filter zwischen dem Meeresboden und dem Kern ist die Körnungslinie des unteren Bereichs des Kerns (Schicht 6 der Versuchsergebnisse) maßgebend. In diesem Bereich ist der mittlere Durchmesser des Kerns größer als das ursprüngliche Kernmaterial.

Für den Filter zwischen der Deckschicht und dem Kern wird die Körnungslinie des oberen Bereichs (Schicht 3 der Versuchsergebnisse) berücksichtigt. In diesem Bereich ist der mittlere Durchmesser des Kerns ca. 14% feiner als das geschüttete Schüttgut.

Die weiteren Untersuchungen zum Vergleich der hydraulischen Stabilität eines nicht entmischten mit einem entmischten Kerns zeigen, dass ein entmischter Kern wesentlich

instabiler ist als ein nicht entmischter Kern, da eine gegebene Wellenbelastung ihn deutlich stärker verformt als einen gut durchmischten Kern. Dies ist allein auf die mittlere Korngröße des Kernmaterials im Bereich des Wellenangriffs zurückzuführen.

Bei der Planung eines Wellenbrechers muss daher der Einfluss der Wahl der Kernbauweise auf die hydraulische Stabilität des entstehenden Bauwerkes für ein bestimmtes Kernmaterial berücksichtigt werden. Dadurch könnte das Eintreten von Schäden verhindert werden und somit die ökonomische Effizienz verbessert werden. Soerensen und Jensen (1985) erwähnen schon die Notwendigkeit der Prüfung durch gute Modelle. Die Kosten der Modelle sind im Vergleich zu denen des Wellenbrecherbaus sehr gering und führen zu sehr großen Verbesserungen bei den geplanten Bauwerken. Eine gute Planung könnte viele Schäden verhindern und damit Kosten reduzieren. Wenn Modellversuche oder die Verwendung von numerischen Modellen zur Planung herangezogen werden, müssen diese sehr sorgfältig die natürlichen Gegebenheiten und die Bauweise nachbilden. Der Einfluss der Porosität der Kerne auf die Stabilität des Bauwerkes wurde in der Literatur häufig anhand von Modellversuchen untersucht, wie z. B. von Simm und Hedges (1988) oder die numerischen Modellen wie HADEER von Hölscher and Barends (1990). Allerdings wurde dabei die Entmischung des Kerns nicht berücksichtigt. Die Planung des Kerneinbaus durch die Landbauweise kann aber nur unter Berücksichtigung der Entmischung erfolgen. Bei nicht Berücksichtigung der Entmischung wird das Bauwerk mit einer falschen Bemessungsgrundlage bemessen. Bauwerksschäden sind die Folgen.

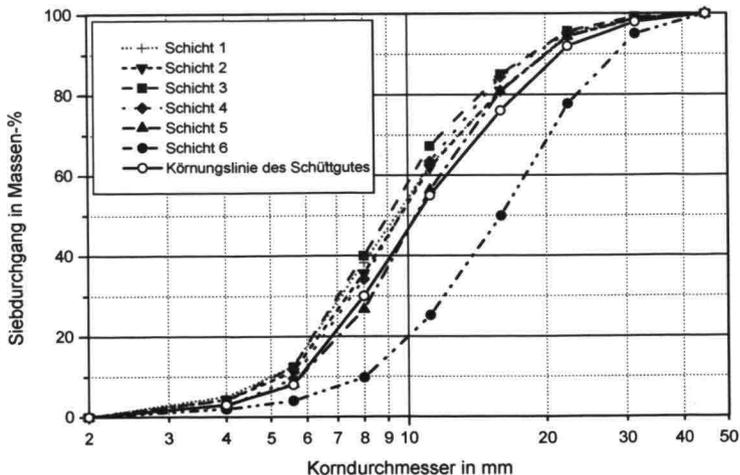
Die in diesem Kapitel erläuterten Folgeerscheinungen, die durch die Kernentmischung bedingt sind, zeigen, wie wichtig die Berücksichtigung der Kernentmischung schon bei der Molenplanung ist. Es wäre notwendig, diese Untersuchungen weiterzuführen und zu vervollständigen, insbesondere die über die hydraulische Stabilität.

## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Experimentelle Untersuchungen

Die vorliegende Arbeit entstand auf der Grundlage von Modellversuchen, die im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts Stu 133/ 8-1 durchgeführt wurden. Ziel der Arbeit war es, die in der Praxis zwar vermutete und in der Literatur angedeutete Entmischung von Molenkernen wissenschaftlich zu untersuchen und aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen für das Einbauverfahren und für die Planung zu geben.

Zu diesem Zweck ist der Aufbau von Wellenbrecherkernen, die in der Landbauweise mit Hilfe von Hinterkippern erstellt werden, qualitativ und quantitativ erfasst worden. Die experimentellen Untersuchungen erfolgten in den drei verschiedenen Maßstäben 1:15, 2:15 und 4:15, die eine Modellfamilie bilden. Die Entmischung wurde anhand eines Vergleiches der Kornzusammensetzungen eines im Labor geschütteten Molenkerns und der des ursprünglichen Schüttgutes ermittelt. Die Versuchsergebnisse bestätigten die Anfangshypothese, dass sich der Molenkern beim Einbau entmischt. Die folgende Abbildung beschreibt den quantitativen Aufbau des Molenkerns. Die dargestellte Entmischung ist charakteristisch für alle Versuche.



**Körnungslinien der 6 Schichten eines im Labor geschütteten Molenkerns (Maßstab 2:15) und Körnungslinie des Schüttgutes**

Am stärksten ist die untere Schicht (Schicht 6), die im direkten Kontakt mit dem Meeresboden steht, entmischt. Der Vergleich der Kornzusammensetzungen der Schicht 6 und dem ursprünglichen Schüttgut zeigt, dass diese Schicht durchschnittlich 52 % gröber als das Schüttgut ist. Die Entmischung verläuft über alle 6 Schichten kontinuierlich, wobei sie in der vorliegenden Arbeit durch diskrete Auswertungsverfahren nachgewiesen wurden ist. Aus der verstärkten Verteilung von gröberem Material in den unteren Schichten folgt, dass sich in den oberen Schichten verstärkt die feineren Kornfraktionen ablagern.

Nachdem die Entmischung nachgewiesen und dokumentiert worden ist, wurde im Weiteren der Einfluss der Bau- und Schüttgutparameter auf den Kernaufbau untersucht. Dabei handelt es sich im Einzelnen um

- die Wassertiefe,
- die Länge des Fallweges durch die Luft,
- den Feinkornanteil des geschütteten Kernmaterials und
- den Ungleichförmigkeitsgrad des Schüttgutes.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die spätere Struktur des Kernaufbaus kaum durch Änderung der untersuchten Parameter zu verbessern ist. Die Entmischung ist einzig und allein auf das Verfahren des Schüttens mit Hinterkippen und somit auf die Bewegung des Schüttgutes auf der Böschung zurückzuführen.

Als nächster Untersuchungsgegenstand wurde die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf größere Maßstäbe überprüft. Die Versuche haben gezeigt, dass die Ergebnisse in der Modellfamilie der Maßstäbe 1:15, 2:15 und 4:15 physikalisch verknüpft sind. Aus den Ergebnissen ist damit abzuleiten, dass eine Entmischung des Schüttmaterials in der Natur in gleicher Art und Weise auftreten wird.

Zur Bestätigung der experimentellen Ergebnisse ist die festgestellte Entmischung anhand einer theoretischen Betrachtung der wirkenden Kräfte im stationären Bereich erklärt und bestätigt worden. Zu diesem Zweck wurde der Schüttvorgang zunächst bei einem Einzelstein analysiert. Die Geschwindigkeit beim Herabgleiten von unterschiedlichen Einzelsteinen eines Schüttgutes hängt fast ausschließlich von deren Größe ab. Aus der theoretischen Betrachtung und einer ergänzenden Beobachtung des Verhaltens der Einzelsteine lassen sich folgende Kernaussagen zusammenfassen:

- Die Entmischung der Steine findet ausschließlich im Wasser statt.
- In der Luft weisen alle untersuchten Steine noch die gleiche Geschwindigkeit auf.
- Die Entmischung beginnt unter Wasser bereits im instationären Anfangsbereich.
- Im stationären Bereich, weiter unten, setzt sich die Entmischung fort.

Die für diese Untersuchung verwendeten Einzelsteine sind ergänzend auch innerhalb von Steinschwärmen beobachtet wurden. Dabei bestätigte sich, dass die Beschreibung des Schüttvorganges von Einzelsteinen im stationären Bereich einen guten Ansatz zur Erklärung der Entmischung darstellt.

Nachdem der heterogene Böschungsaufbau in der bisherigen Arbeit experimentell nachgewiesen und theoretisch bestätigt wurde, werden im Weiteren dessen wesentliche Folgen auf die Stabilität des Gesamtbauwerks zusammengefasst und Handlungsempfehlungen für zukünftige Entwürfe gegeben.

- Werden die Filter zwischen dem Kern und dem Meeresboden sowie zwischen dem Kern und der Deckschicht wie bisher üblich nach dem Schüttgut bemessen, d.h. unter der Annahme eines homogenen Kernaufbaus, kann es zu einer Suffosion kommen. Als Folge sind erhebliche Schäden am Bauwerk durch auftretende Setzungen und eine eingeschränkte Funktionalität der Mole zu erwarten. Um dieses zu verhindern, müssen die beiden Filter nach dem heterogenen Aufbau des Kerns bemessen werden. Maßgebend ist nicht mehr die Kornzusammensetzung des Schüttguts, sondern die des entmischten Kerns.
- Die innere Struktur eines heterogenen Kerns ist hydraulisch instabiler als bei einem gut durchmischten Kern. Bei einem entmischten Kern kommt es im Vergleich zum homogenen Kern zu einem geringeren Druckabbau bei der Wellenenergie, dieses führt zu größeren Setzungen. Werden diese Setzungen nicht bei der Bemessung berücksichtigt, z.B. durch einen Sicherheitszuschlag bei der Molenhöhe, ist die Funktionalität des Gesamtbauwerks ebenfalls gefährdet.

## **7.2 Anwendung der Ergebnisse und Ausblick**

Die vorliegende Arbeit bietet eine neue Grundlage für den Bau von Molenkernen in Forschung und Praxis. Im Folgenden wird erörtert, inwiefern die nachgewiesene Entmischung von Molenkernen und deren Folgen Ausgangspunkt für weitere Forschungsfelder und -ansätze sein können und welche Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung bestehen.

### **In der Forschung**

Die immer wieder auftretenden starken Schäden an Wellenbrechern zeigen, dass das Verhalten des Bauwerkes noch nicht ausreichend geklärt ist. Vertiefende Untersuchungen sollten die Grundlage für die Verbesserung des Aufbaus schaffen. Aus dem bestehenden Forschungsstand leitet sich ein weiterer Bedarf an Grundlagenarbeiten zu diesem Thema ab. Dazu zählen auch die Strömungsprozesse innerhalb des Kerns, die bisher noch nicht vollständig erforscht sind. Diese Untersuchungen können die Natur aber nur hinreichend nachbilden, wenn der heterogene Kernaufbau dabei berücksichtigt wird. Diese Annahme gilt für alle theoretischen, experimentellen und numerischen Untersuchungen in gleicher Art und Weise.

### **Zur praktischen Anwendung**

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Entmischung eines geschütteten Wellenbrechers bei der Landbauweise schon in der Planungsphase, d.h. im Entwurf, berücksichtigt werden muss. Dieses gilt insbesondere für die optimale Gestaltung des Bauwerkes sowie für die in dieser Arbeit intensiv behandelte Bemessung der wirksamen Filter zwischen Kern und Deckschicht und zwischen Kern und Meeresboden. In der praktischen Umsetzung folgt aus den Ergebnissen der Arbeit, dass die beschriebenen Filter nicht wie bisher in Abhängigkeit der Kornzusammensetzung des gewählten Schüttgutes bemessen werden dürfen, sondern in Abhängigkeit der nachgewiesenen heterogenen Kornzusammensetzung des Kerns. Die zur Bemessung des Filters zwischen dem Kern und dem Meeresboden maßgebende Kornzusammensetzung ist durchschnittlich 52% gröber als das Schüttgut, für den Filter zwischen dem Kern und der Deckschicht gilt dagegen eine um 13% feinere Kornzusammensetzung.

Da der Kern zugleich Fundament als auch Füllkörper des Bauwerkes ist, wurde in dieser Arbeit ein Nachweis erbracht, dass der Kernaufbau die Stabilität des Kerns beeinflusst. Die Auswertungsmethode bestand aus einem einfachen Vergleich der Verformung eines homogenen Kerns mit der eines entmischten Kerns unter Wellenangriff. Die Verformung des entmischten Kerns verläuft stärker als die des homogenen Kerns. Daraus folgt, dass der heterogene Kern instabiler ist.

Zusammenfassend leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag, um dauerhaft standhafte und sichere Bauwerke zu planen und zu bauen. Auf den Grundlagen dieser Arbeit sollten auch zukünftige Untersuchungen dieses Ziel verfolgen. Aus Sicht der Verfasserin besteht ein noch großer Bedarf, die bestehenden Wissenslücken in diesem Gebiet zu schließen.

Abschließend wäre es wünschenswert, wenn die vorliegenden Ergebnisse zur Verbesserung der Qualität von Wellenbrechern in den Empfehlungen zum Bau von Wellenbrecherkernen mit Hinterkippen ihre Berücksichtigung finden würden.

## Literatur

ASCE Engineering Research Council (1982): Behind the Sines, Portugal Breakwater Failure. Civ. Engin. -ASCE 52, No. 4, pp. 64-67

Barlow, P.G.R. and Briggs, M.G. (1984): Rubble Breakwaters Specification. Breakwaters, Design and Construction, Thomas Telford Ltd, London, pp. 151-157

Bautabellen für Ingenieure (1998): mit Berechnungshinweise und Beispielen. Hrsg. Von Klaus-Jürgen Schneider. 13. Aufl. Düsseldorf, Werner

Bozzolo, D. (1987): Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag. Dissertation ETH Nr. 8490, Zürich

Broderick, L. L. (1983): Riprap Stability A Progress Report. Proceedings of Coastal Structures 83, American Society of Civil Engineers, Vol. 3, pp. 1691-1701

Bruun, P. (1985): Design and Construction of Mound for breakwaters and Coastal Protection. Development in Geotechnical Engineering, Vol. 37, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 549-561

Bruun, P. und Johannesson, P. (1976): Parameters Affecting Stability of Rubble Mounds. J. Waterways, Harbors & Coastal Engineering Div., May 1976, pp. 141-164

Burcharth, H. F., and Thompson, A. C. (1983): Stability of Armour Units in Oscillatory Flow. Proceedings of Coastal Structures 83, American Society of Civil Engineers, pp. 71-82

Detle, H.-H. et al. (1987): Schutz sandiger Küsten durch Sandvorspülungen am Beispiel der Insel Sylt. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Bd. 42, 1987, S. 262

DIN 18196 (1970): Erdbau. Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen

DIN 4023 (1955): Baugrund- und Wasserbohrungen. Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse

DVWK-Schriften, H. 76 (1986): Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erd- und Wasserbau. Empfehlung des Arbeitskreises 14 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. und des Dt. Verb. für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Parey, Hamburg, Berlin

DVWK-Mitteilungsheft Nr. 4 (1978): Wasserbauliches Versuchswesen. Arbeitsausschuss „Wasserbauliches Versuchs- und Messwesen“(DVWK/KWK), zusammengestellt von H. Kobus

EAU (1996): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen. Hrsg. vom Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. – 9. Aufl., Ernst, Berlin

Fookes, P.G. and Poole, A.B. (1981): Some Preliminary Considerations on the Selection and the Durability of Rock and Concrete Materials for Breakwaters and Coastal Protection Works. Quarterly. J. Engin. Geol. London., Vol. 14., pp. 97-128

Franco, L., Gentilomo, M., Noli, A., Passacantando, G. (1996): Constructional Aspects of some Large Rubble Mound Breakwaters in Northern Africa. Advances in Coastal Structures and Breakwaters, J. E. Clifford (ed.), London, pp. 158-177

Harlow, E.H. (1980): Large Rubble-Mound Breakwater Failures. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, ASCE, New-York, Technical notes, No. WW2, Mai 1980, pp. 275-278

Hedar, P.A. (1960): Stability of Rock-Fill Breakwaters. Akademiförlaget-Gumperts, Goteborg.

Hedges, T.S. (1984): The Core and Underlayers of a Rubble-Mound Structure. Breakwaters, Design and Construction, Thomas Telford Ltd, London, pp. 89-106

Hölscher, P. And Barends, F. B. J. (1990): Finite Difference Scheme for Wave Transmission in a Rubble Mound Breakwater. International Journal for Numerical Methods in Engineering, John Wiley & Sons, Ltd., vol. 30, pp. 1129-1145

Hookway, D.W., Brinson, A.G. (1986): Construction of Rubble Mound Breakwaters at Ras Lanuf, Lybia. Developments in Breakwaters. Thomas Telford Ltd, London, pp. 175-189

Hudson, R. Y. (1958): Design of Quarry-Stone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters; Hydraulic Laboratory Investigation, Research Report No. 2-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS

Hudson, R.Y. (1979): Coastal Hydraulic Models. Special Report No. 5 for U.S. Army Coastal Engin. Res. Center, U.S. Govt. Printing Office, Washington, pp. 202-283

Iribaren, R. (1938): Una Formula Para el Calculo de los Diques de Escollera. Technical Report HE 116-295, Fluid Mechanics Laboratory, University of California, Bekerley, CA (translated by D. Heinrich, 1948)

Jensen, O.J. (1984): Monograph on Rubble-Mound Breakwaters. Danish Hydraulik Institute, November 1984

Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering (2000): A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield

MAG (1993): Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

MAK (1989): Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

Muttray, M. (2000): Wellenbewegung an und in einem geschütteten Wellenbrecher. Laborexperimente im Großmaßstab und theoretische Untersuchung. Dissertation, Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig. Mitteilungen Heft 148/2001, Braunschweig

Pilarczyk, K.W. and Zeidler, R.B. (1996): Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control. A.A. Balkema, Rotterdam

RPG (1984): Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien Filtern im Verkehrswasserbau. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

Shore Protection Manual (2001): Coastal Engineering Research Center. U.S. Government Printing Office, Washingon, Draft

Simm, J. D. And Hedges, T. S. (1988): Pore Pressure Response and Stability of Rubble Mound Breakwaters. Design of Breakwaters, Thomas Telford Ltd, London, pp. 59-69

Soerensen, T. and Jensen, O. J. (1985): Experience gained from Breakwater Failures. Developments in Breakwaters. Proceedings of the Conference on Breakwaters 85, organised by the Institution of Civil Engineers and held in London on 2-4 October 1985, Thomas Telford, London, pp.103-118

Taibi, B. (1984): La tempête de décembre au port d'Arzew El-Djedid et la réparation du brise-lames. Travaux Nr. 580, p. 62-66

Tucker, Th. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie 1. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

Van der Meer, J. W. (1990): Low-crested and Reef Breakwaters. Report H198/Q638, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands

Wagner, H. W. (1996): Böschungumbildung durch Wellen. Wellen - Wirkungen am Ufer-Befestigungen - Wasserbaukolloquium '96 - Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen (1996), Heft 9, S. 155-161

Zingg, T. (1935): Beitrag zur Schotteranalyse. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, Bd. 15, Druck und Verlag AG Gebr. Leemann & Co., Zürich, S. 39-141

## Inhaltsverzeichnis der Anhänge

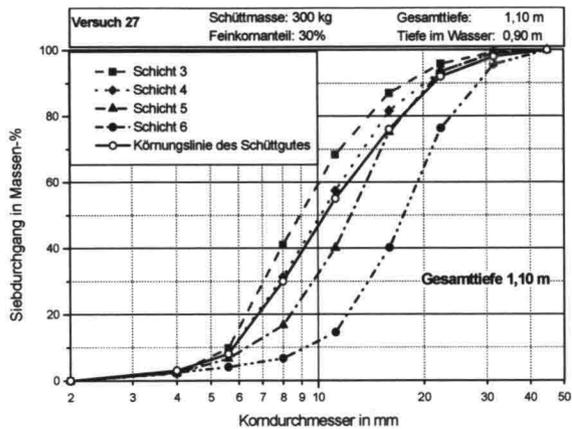
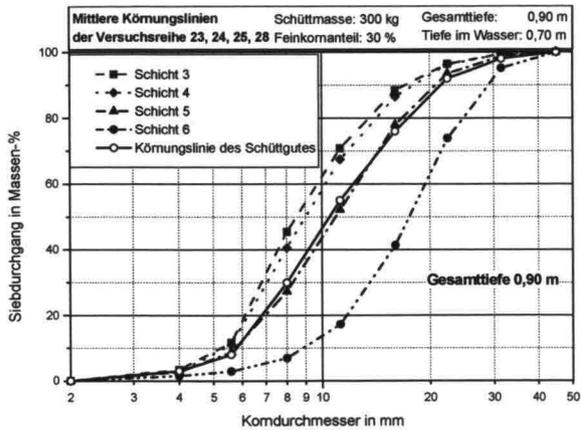
<b>Anhang 1:</b>	Untersuchung des Einflusses von Versuchsparametern anhand der Sieblinien und der charakteristischen Werte	A - 1
<b>Anhang 2:</b>	Versuchsreihe I, Darstellung, Auswertung, Berechnung der Widerstandbeiwerte der Steine	A - 10
<b>Anhang 3:</b>	Filterbemessung	A - 17
<b>Anhang 4:</b>	Versuchsergebnisse zum Vergleich der Stabilität von homogenen mit entmischten Kernen unter Wellenbelastung	A - 29

# Anhang 1: Untersuchung des Einflusses von Versuchsparametern anhand der Körnungslinien und der charakteristischen Werte

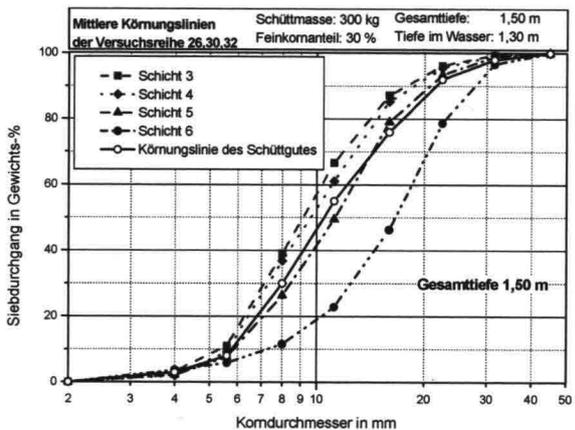
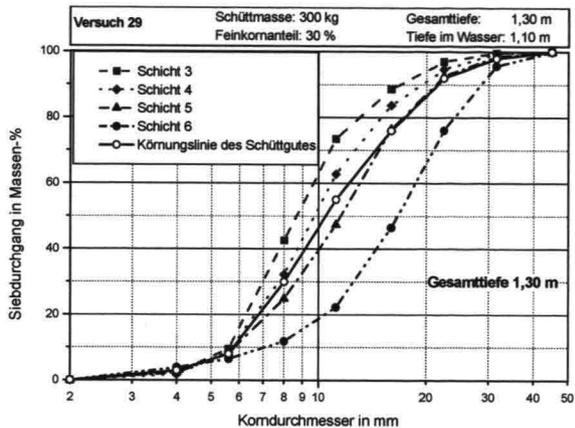
## Einfluss der Wassertiefe (Seiten A - 1 bis A - 6)

Vergleich der Versuche mit dem Schüttgut G1 (300 kg Schüttmasse pro Versuch im Maßstab 1:15). Die Wassertiefe wird variiert und beträgt 0,90 m (Versuchsreihe 23-25, 28), 1,10 m (Versuch 27), 1,30 m (Versuch 29) und 1,50 m (Versuchsreihe 26, 30, 32).

Versuch Nummer	Gesamt-tiefe in m	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
23-25,28	0,9	1,9	2,2	2,5	0,9	1,1	1,1	14,3	17,5	17,7
27	1,1	1,9	2,1	2,5	0,9	1,1	1,1	14,3	17,5	17,7
29	1,3	1,9	2,6	2,5	0,9	1,2	1,1	14,3	16,7	17,7
26,30,32	1,5	1,9	2,5	2,5	0,9	1,2	1,1	14,3	16,6	17,7
<b>Schicht 5:</b>										
23-25,28	0,9	1,7	2,2	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	10,9	11,5
27	1,1	1,7	2,2	2,3	0,9	1,1	1,1	9,3	12,4	11,5
29	1,3	1,7	2,25	2,3	0,9	0,9	1,1	9,3	11,6	11,5
26,30,32	1,5	1,7	2,2	2,3	0,9	1,0	1,1	9,3	11,25	11,5
<b>Schicht 4:</b>										
23-25,28	0,9	1,6	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,0	10,6
27	1,1	1,6	2,0	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	10,2	10,6
29	1,3	1,6	1,9	2,2	0,8	1,0	1,0	8,6	9,7	10,6
26,30,32	1,5	1,6	1,95	2,2	0,8	0,9	1,0	8,6	9,6	10,6
<b>Schicht 3:</b>										
23-25, 28	0,9	1,7	1,9	2,3	0,85	0,9	1,05	8,1	8,5	9,9
27	1,1	1,7	1,8	2,3	0,85	0,9	1,05	8,1	8,9	9,9
29	1,3	1,7	1,7	2,3	0,85	0,9	1,05	8,1	8,7	9,9
26, 30, 32	1,5	1,7	1,9	2,3	0,85	0,9	1,05	8,1	9,1	9,9

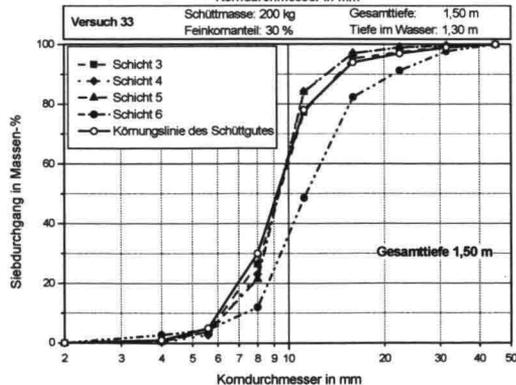
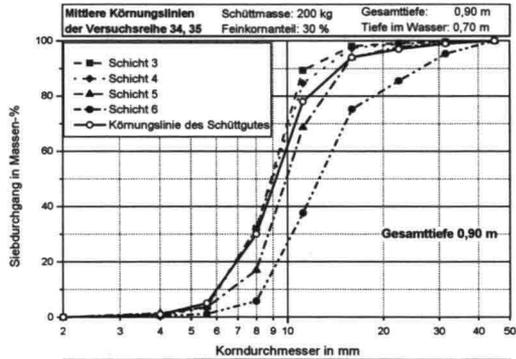


Fortsetzung der Abbildung auf Seite A - 3



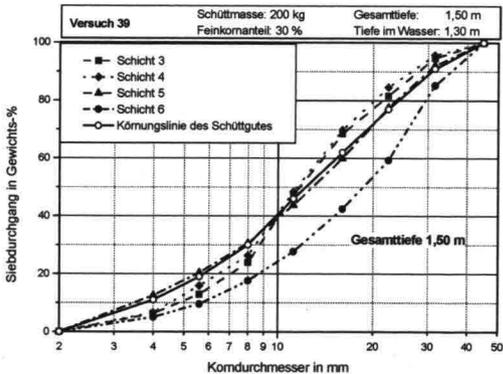
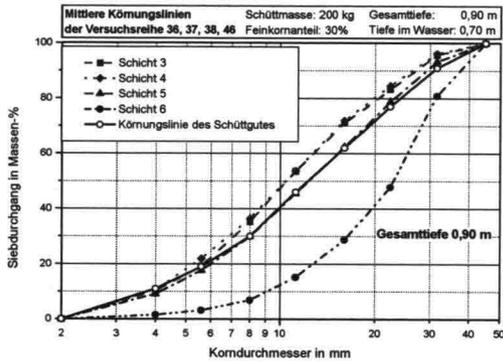
Vergleich der Versuche mit dem Schüttgut G3 im Maßstab 1:15. Die Wassertiefe beträgt 0,90 m (Versuche 34, 35) und 1,50 m (Versuch 33).

Versuch Nummer	Gesamt-tiefe in m	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
34, 35	0,9	1,5	1,7	1,9	1,1	0,9	1,0	12,5	12,6	15,5
33	1,5	1,5	1,7	1,9	1,1	1,0	1,0	12,5	11,4	15,5
<b>Schicht 5:</b>										
34, 35	0,9	1,3	1,6	1,7	0,8	1,1	1,0	8,1	9,9	10,0
33	1,5	1,3	1,55	1,7	0,8	1,1	1,0	8,1	9,3	10,0
<b>Schicht 4:</b>										
34, 35	0,9	1,3	1,6	1,6	0,8	1,05	1,0	7,5	9,0	9,3
33	1,5	1,3	1,5	1,6	0,8	1,1	1,0	7,5	9,3	9,3
<b>Schicht 3:</b>										
34, 35	0,9	1,3	1,6	1,7	0,8	1,1	1,0	7,1	8,9	8,7
33	1,5	1,3	1,6	1,7	0,8	1,1	1,0	7,1	9,4	8,7



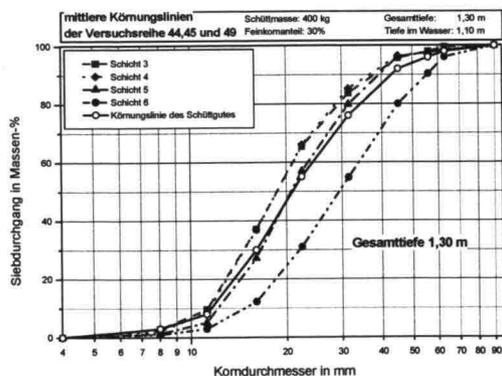
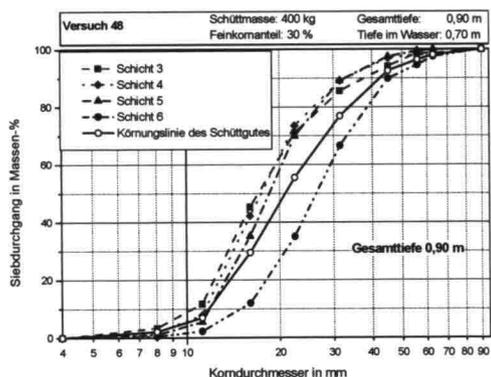
Vergleich der Versuche wird mit dem Schüttgut G4 im Maßstab 1:15. Die Wassertiefe beträgt 0,90 m (Versuche 36-38, 46) und 1,50 m (Versuch 39).

Versuch Nummer	Gesamt-tiefe in m	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6</b>										
36-38, 46	0,9	3,8	2,8	4,8	1,1	1,2	1,3	16,9	22,9	20,9
39	1,5	3,8	3,95	4,8	1,1	1,1	1,3	16,9	18,6	20,9
<b>Schicht 5</b>										
36-38, 46	0,9	3,4	3,7	4,4	0,8	1,1	1,0	11,0	12,3	13,6
39	1,5	3,4	4,6	4,4	0,8	1,1	1,0	11,0	12,9	13,6
<b>Schicht 4</b>										
36-38, 46	0,9	3,3	3,3	4,2	0,8	1,0	1,0	11,1	10,4	12,5
39	1,5	3,3	3,0	4,2	0,8	1,2	1,0	11,1	11,5	12,5
<b>Schicht 3</b>										
36-38, 46	0,9	3,4	3,2	4,4	0,8	1,0	1,0	9,5	10,5	11,7
39	1,5	3,4	2,9	4,4	0,8	1,1	1,0	9,5	11,7	11,7



Beim Schüttgut G1 ist der Einfluss der gesamt Falltiefe zu untersuchen. Es werden zwei Versuchsarten bei 0,90 m (Versuch 48) und 1,30 m Gesamttiefe (Versuche 44, 45, 49) durchgeführt (Maßstab 2:15).

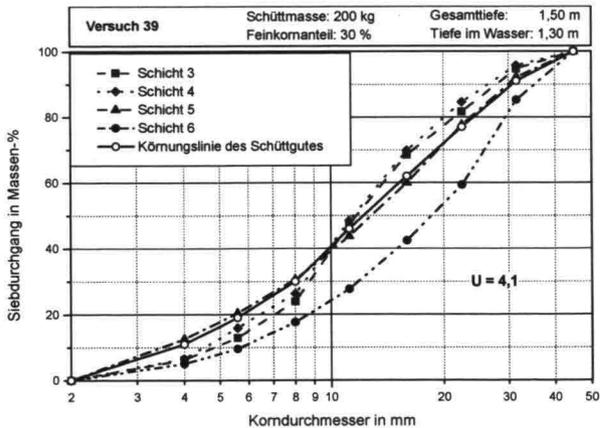
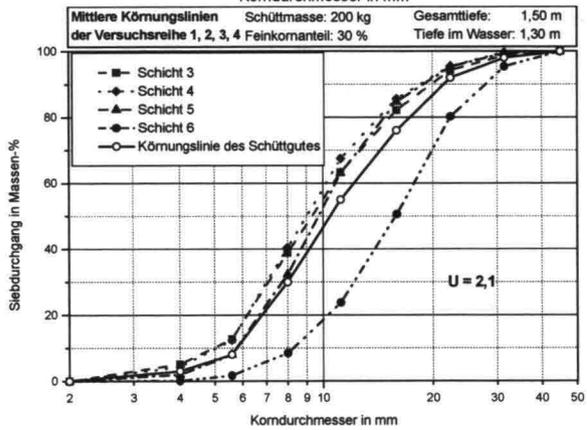
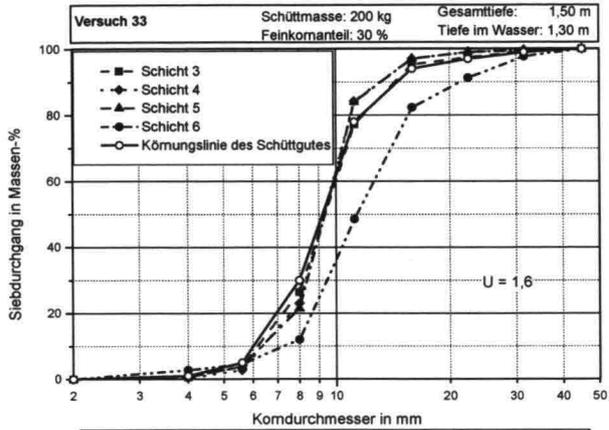
Versuch Nummer	Gesamttiefe in m	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
48	0,9	1,9	2,3	2,5	0,9	1,0	1,1	28,5	29,4	35,2
44, 45, 49	1,3	1,9	2,0	2,5	0,9	1,0	1,1	28,5	26,3	35,2
<b>Schicht 5:</b>										
48	0,9	1,7	1,9	2,3	0,9	1,0	1,1	18,6	20,7	22,9
44, 45, 49	1,3	1,7	1,7	2,3	0,9	0,9	1,1	18,6	18,45	22,9
<b>Schicht 4:</b>										
48	0,9	1,6	1,8	2,2	0,8	0,9	1,0	17,1	18,6	21,1
44, 45, 49	1,3	1,6	1,7	2,2	0,8	0,9	1,0	17,1	17,4	21,1
<b>Schicht 3:</b>										
48	0,9	1,7	1,9	2,3	0,85	0,9	1,05	15,6	18,65	20,1
44, 45, 49	1,3	1,7	1,85	2,3	0,85	0,9	1,05	15,6	17,0	20,1



## **Einfluss des Ungleichförmigkeitsgrad (Seiten A - 7 bis A - 9)**

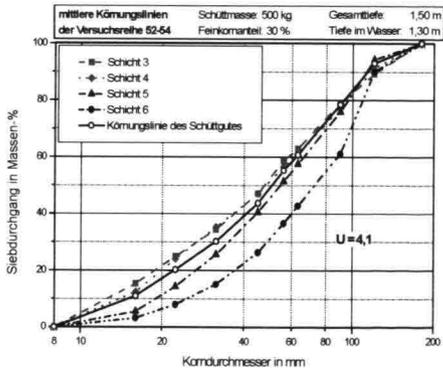
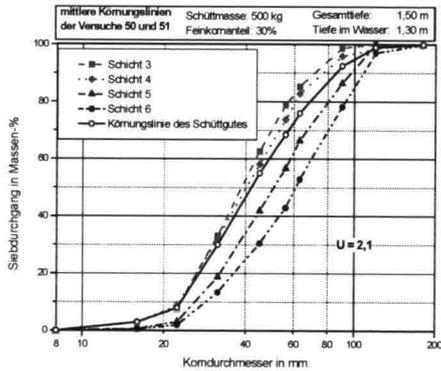
Vergleich von Versuche mit unterschiedlichen Ungleichförmigkeitsgraden und mit einer größeren Gesamttiefe von  $t_g = 1,50$  m.

<b>Versuch Nummer</b>	<b>U<sub>Schüttgut</sub></b> [-]	<b>U<sub>min</sub> erwartet</b> [-]	<b>U<sub>mittel</sub> gemessen</b> [-]	<b>U<sub>max</sub> erwartet</b> [-]	<b>C<sub>min</sub> erwartet</b> [-]	<b>C<sub>mittel</sub> gemessen</b> [-]	<b>C<sub>max</sub> erwartet</b> [-]	<b>D<sub>50min</sub> erwartet</b> [mm]	<b>D<sub>50</sub> mittel gemessen</b> [mm]	<b>D<sub>50max</sub> erwartet</b> [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
33 (G3)	1,6	1,5	1,7	1,9	1,1	1,0	1,3	12,5	11,4	15,5
1-4 (G1)	2,1	1,9	2,5	2,5	0,9	1,2	1,1	14,3	16,6	17,7
39 (G4)	4,1	3,8	3,95	4,8	1,1	1,1	1,3	16,9	18,6	20,9
<b>Schicht 5:</b>										
33 (G3)	1,6	1,3	1,55	1,7	0,8	1,1	1,0	8,1	9,3	10,0
1-4 (G1)	2,1	1,8	2,2	2,2	0,8	1,0	1,0	9,3	11,25	11,5
39 (G4)	4,1	3,4	4,6	4,4	0,8	1,1	1,0	11,0	12,9	13,6
<b>Schicht 4:</b>										
33 (G3)	1,6	1,3	1,5	1,6	0,8	1,1	1,0	7,5	8,3	9,3
1-4 (G1)	2,1	1,7	1,95	2,1	0,8	0,9	1,0	8,6	9,6	10,6
39 (G4)	4,1	3,3	3,0	4,2	0,8	1,2	1,0	10,1	11,5	12,5
<b>Schicht 3:</b>										
33 (G3)	1,6	1,8	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0	8,1	9,1	9,9
1-4 (G1)	2,1	1,3	1,6	1,7	0,8	1,1	1,0	7,1	9,4	8,7
39 (G4)	4,1	3,4	2,9	4,4	0,8	1,1	1,0	9,5	11,7	11,7



Einfluss des Ungleichförmigkeitsgrades anhand von Versuchen (Maßstab 4:15).

Versuch Nummer	U Schüttgut [-]	U <sub>min</sub> erwartet [-]	U gemessen [-]	U <sub>max</sub> erwartet [-]	C <sub>min</sub> erwartet [-]	C gemessen [-]	C <sub>max</sub> erwartet [-]	D <sub>50min</sub> erwartet [mm]	D <sub>50</sub> gemessen [mm]	D <sub>50max</sub> erwartet [mm]
<b>Schicht 6:</b>										
50, 51 (G1)	2,1	1,9	2,45	2,5	0,9	1,0	1,1	68,3	60,9	84,1
52-54 (G4)	4,1	3,8	3,6	4,8	1,1	1,1	1,3	69,9	72,5	86,1
<b>Schicht 5:</b>										
50, 51 (G1)	2,1	1,8	2,2	2,2	0,8	0,9	1,0	44,4	50,7	54,7
52-54 (G4)	4,1	3,4	3,5	4,4	0,8	1,0	1,0	45,4	54,5	56
<b>Schicht 4:</b>										
50, 51 (G1)	2,1	1,7	2,0	2,1	0,8	0,9	1,0	40,9	40,2	50,4
52-54 (G4)	4,1	3,3	4,4	4,2	0,8	0,8	1,0	41,9	48,2	51,7
<b>Schicht 3:</b>										
50, 51 (G1)	2,1	1,8	1,9	2,2	0,8	0,9	1,0	38,4	38,6	47,3
52-54 (G4)	4,1	3,4	4,6	4,4	0,8	1,0	1,0	39,3	47,5	48,5



## **Anhang 2: Versuchsreihe I, Darstellung, Auswertung, Berechnung der Widerstandbeiwerte der Steine**

(Seiten A - 10 bis A - 16)

Die Versuchsergebnisse sind aus der folgenden Tabelle zu entnehmen.



**VERBODSRISSE (Lorenz-Fall)**

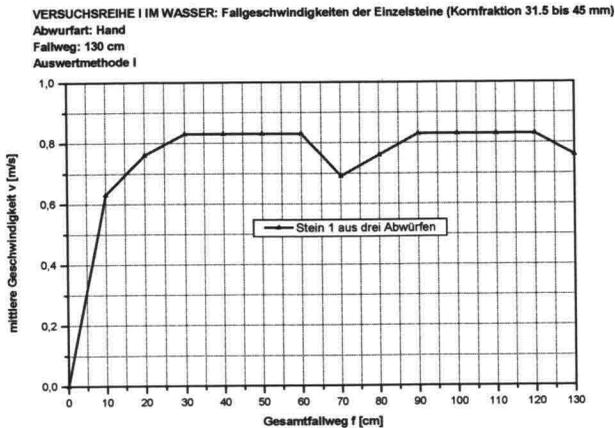
Abwurfart: Hand  
 Fallweg: 100 cm  
 Medium: Wasser

Stein 4 56 - 63 mm																					
10	01	02	21	0,120	0,120	0,83	0,83	10	08	43	07	0,120	0,120	0,83	10	15	56	15	0,160	0,160	0,63
20	01	03	00	0,160	0,260	0,83	0,83	20	08	43	10	0,120	0,240	0,83	20	15	58	18	0,120	0,260	0,83
30	01	03	00	0,120	0,400	0,83	0,83	30	08	43	12	0,060	0,320	1,25	30	15	59	21	0,200	0,400	0,83
40	01	03	06	0,120	0,520	0,83	0,83	40	08	43	15	0,120	0,440	0,83	40	15	59	23	0,060	0,480	1,25
50	01	03	06	0,120	0,640	0,83	0,83	50	08	43	18	0,120	0,560	0,83	50	15	59	02	0,160	0,640	0,83
60	01	03	12	0,120	0,760	0,83	0,83	60	08	43	22	0,160	0,720	0,83	60	15	59	04	0,060	0,720	1,25
70	01	03	14	0,060	0,840	1,25	1,25	70	08	43	24	0,060	0,800	1,25	70	15	59	07	0,120	0,840	0,83
80	01	03	17	0,120	0,960	0,83	0,83	80	08	44	02	0,120	0,920	0,83	80	15	59	10	0,120	0,960	0,83
90	01	03	19	0,060	1,040	1,25	1,25	90	08	44	05	0,120	1,040	0,83	90	15	59	13	0,120	1,060	0,83
100	01	03	21	0,060	1,120	1,25	1,25	100	08	44	07	0,060	1,120	1,25	100	15	59	15	0,060	1,160	1,25
110	01	03	24	0,120	1,240	0,83	0,83	110	08	44	10	0,120	1,240	0,83	110	15	59	17	0,060	1,240	0,83
120	01	04	02	0,120	1,360	0,83	0,83	120	08	44	12	0,060	1,320	1,25	120	15	59	20	0,120	1,360	0,83
130	01	04	04	0,060	1,440	1,25	1,25	130	08	44	15	0,120	1,440	0,83	130	15	59	22	0,060	1,440	1,25
140								140							140						1,02
0	01	08	19					0	08	50	18				0	18	03	22			0,83
10	01	08	00	0,120	0,240	0,83	0,83	10	08	50	23	0,200	0,200	0,50	10	17	04	01	0,160	0,160	0,83
20	01	08	00	0,120	0,240	0,83	0,83	20	08	51	01	0,120	0,320	0,83	20	17	04	05	0,160	0,320	0,83
30	01	08	03	0,120	0,360	0,83	0,83	30	08	51	04	0,120	0,440	0,83	30	17	04	08	0,120	0,440	0,83
40	01	08	05	0,060	0,440	1,25	1,25	40	08	51	06	0,160	0,600	0,83	40	17	04	11	0,120	0,560	0,83
50	01	08	07	0,060	0,520	0,83	0,83	50	08	51	09	0,060	0,680	1,25	50	17	04	14	0,120	0,680	0,83
60	01	08	09	0,060	0,600	1,25	1,25	60	08	51	13	0,120	0,800	0,83	60	17	04	16	0,060	0,760	1,25
70	01	08	11	0,060	0,680	1,25	1,25	70	08	51	16	0,120	0,920	0,83	70	17	04	18	0,060	0,840	1,25
80	01	08	14	0,120	0,800	0,83	0,83	80	08	51	18	0,060	1,000	1,25	80	17	04	21	0,120	0,860	0,83
90	01	08	16	0,060	0,880	1,25	1,25	90	08	51	21	0,120	1,120	0,83	90	17	04	24	0,120	1,060	0,83
100	01	08	19	0,120	1,000	0,83	0,83	100	08	51	24	0,120	1,240	0,83	100	18	05	01	0,060	1,160	1,25
110	01	08	22	0,120	1,120	0,83	0,83	110	08	52	02	0,120	1,360	0,83	110	18	05	03	0,060	1,240	1,25
120	01	08	24	0,060	1,200	1,25	1,25	120	08	52	04	0,060	1,440	1,25	120	18	05	07	0,160	1,400	0,83
130	01	10	02	0,120	1,320	0,83	0,83	130	08	52	07	0,120	1,560	0,83	130	18	05	09	0,060	1,480	1,25
140								140							140						1,02
0	01	15	14					0	08	56	04				0						
10	01	15	18	0,160	0,160	0,63	0,63	10	08	56	08	0,160	0,160	0,63	10						
20	01	15	21	0,120	0,260	0,83	0,83	20	08	56	11	0,120	0,260	0,83	20						
30	01	16	00	0,160	0,440	0,83	0,83	30	08	56	14	0,120	0,400	0,83	30						
40	01	16	03	0,120	0,560	0,83	0,83	40	08	56	17	0,120	0,520	0,83	40						
50	01	16	05	0,060	0,640	1,25	1,25	50	08	56	19	0,060	0,600	1,25	50						
60	01	16	08	0,120	0,760	0,83	0,83	60	08	56	21	0,060	0,680	1,25	60						
70	01	16	11	0,120	0,860	0,83	0,83	70	08	56	23	0,060	0,760	1,25	70						
80	01	16	13	0,060	0,960	1,25	1,25	80	08	57	03	0,120	0,840	0,83	80						
90	01	16	16	0,120	1,060	0,83	0,83	90	08	57	05	0,060	0,960	1,25	90						
100	01	16	19	0,120	1,200	0,83	0,83	100	08	57	08	0,060	1,040	1,25	100						
110	01	16	22	0,120	1,320	0,83	0,83	110	08	57	09	0,060	1,120	1,25	110						
120	01	17	02	0,120	1,440	0,83	0,83	120	08	57	09	0,060	1,200	1,25	120						
130	01	17	02	0,060	1,520	1,25	1,25	130	08	57	11	0,060	1,280	1,25	130						
140								140							140						

Stein frei unter das Netz,  
 wird nicht ausgewertet.



Typischer Geschwindigkeitsverlauf am Beispiel des Steins 1 (mittlerer Verlauf über 3 Abwürfe):



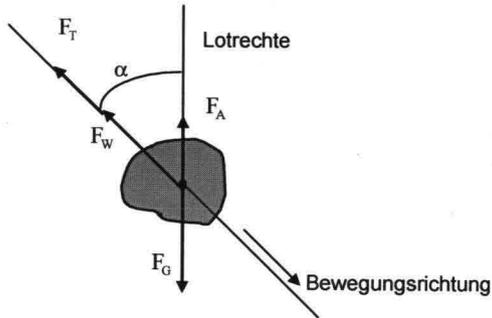
mittlere Geschwindigkeit des Steins 1 der Versuchsreihe I (Lotrechter Fall) im Wasser

Ermittlung der stationären Endgeschwindigkeit über die letzten 50 cm der Fallstrecke:

Versuchsreihe I (Lotrechter Fall) im Wasser				
Stein Nr.	Abwurf	$v$ [m/s]	$v_{\text{Stein}}$ [m/s]	$v_{\text{Kornfrakt.}}$ [m/s]
1	1	0,83	0,81	0,81
	2	0,83		
	3	0,78		
2	1	0,78	0,82	
	2	0,78		
	3	0,89		
3	1	0,78	0,81	
	2	0,83		
	3	0,83		
4	1	1,04	1,01	0,99
	2	0,96		
	3	1,04		
5	1	0,96	0,94	
	2	0,89		
	3	0,96		
6	1	0,89	1,01	
	2	1,14		
	3			
7	1	1,39	1,30	1,28
	2	1,25		
	3	1,25		
8	1	1,25	1,29	
	2	1,25		
	3	1,38		
9	1	1,25	1,25	
	2	1,25		
	3	1,25		

Stationäre Endgeschwindigkeiten der Versuchsreihe I (lotrechter Fall) im Wasser

Berechnung der Widerstandsbeiwerte:



$F_G$  Gewichtskraft [N]

$$F_G = m_K \cdot g = V_K \cdot \rho_K \cdot g$$

$m_K$  Masse des Körpers [kg]

$V_K$  Volumen des Körpers [m<sup>3</sup>]

$\rho_K$  Dichte des Körpers [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$F_T$  Trägheitskraft [N]

$$F_T = m_K \cdot a$$

$m_K$  Masse des Körpers [kg]

$a$  Beschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$F_W$  Widerstandskraft [N]

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot v^2 \cdot A_{St}$$

$c_W$  Widerstandsbeiwert [-]

$\rho_W$  Dichte des Wassers,

$v$  Geschwindigkeit des Steins [m/s]

$A_{St}$  Schattenfläche des Körpers [m<sup>2</sup>]

$F_A$  Auftriebskraft [N]

$$F_A = V_K \cdot \rho_W \cdot g$$

$V_K$  Volumen des Körpers; entspricht dem Volumen des vom Stein verdrängten Wassers [m<sup>3</sup>]

$\rho_W$  Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

Für den Ansatz des Kräftegleichgewichts in lotrechter Richtung im stationären Zustand folgt:

$$F_G - F_W + F_A = 0$$

Für die stationäre Endgeschwindigkeit eines frei fallenden Steins im Wasser unter einem Winkel  $\alpha$  der Fallbahn zur Lotrechten von  $0^\circ$  gilt dann:

$$v = \left( \frac{2 \cdot g \cdot V_K \cdot (\rho_K - \rho_W)}{c_W \cdot A_{St} \cdot \rho_W} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}]$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  wird für einen im Wasser frei fallenden Stein berechnet.

$$c_W = \frac{2 \cdot g \cdot V_K \cdot (\rho_K - \rho_W)}{v_E^2 \cdot A_{St} \cdot \rho_W} \quad [-]$$

$V_K$  Volumen des Versuchskörpers [ $\text{m}^3$ ]

$g$  Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

$\rho_K$  Dichte des Körpers [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_W$  Dichte des Wassers [ $\text{kg/m}^3$ ]

hier:  $\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1,0 \text{ g/cm}^3$

$v_E$  Endgeschwindigkeit des Körpers [ $\text{m/s}$ ]

$A_{St}$  Schattenfläche des Körpers [ $\text{m}^2$ ]

Bestimmung des Wertes  $c_W$ ,  $A_{St}$ :

Bestimmung des Wertes $c_W$ , $A_{St}$						
Kornfraktion [mm]	Stein Nr.	$m_K$ [g]	$V_K$ [cm <sup>3</sup> ]	$v_E$ [cm/s]	$v_E^2$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$c_W \cdot A_{St}$ [cm <sup>2</sup> ]
31,5 - 45	1	101	36,59	81	6561	19,26
	2	102	36,96	82	6724	18,98
	3	102	36,96	81	6561	19,45
56 - 63	4	328	118,84	101	10201	40,23
	5	335	121,38	94	8836	47,44
	6	346	125,36	101	10201	42,44
90 - 120	7	2035	737,32	130	16900	150,65
	8	2034	736,96	129	16641	152,92
	9	2100	760,87	125	15625	168,15

## Anhang 3: Filterbemessung

(Seiten A - 17 bis A - 28)

### Bemessung des Filters nach Terzaghi

**Bestimmung des Filters nach Terzaghi in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens:**

$$D_{15 \text{ Sand}} = 0,11 \text{ mm}$$

$$D_{85 \text{ Sand}} = 0,34 \text{ mm}$$

Bestimmung der ersten Filterschicht F1:

$$\text{(Gl. 1)} \Rightarrow D_{15 F1} < 4 \cdot D_{85 \text{ Sand}} = 4 \cdot 0,34 = 1,36 \text{ mm}$$

$$\text{(Gl. 2)} \Rightarrow D_{15 F1} > 4 \cdot D_{15 \text{ Sand}} = 4 \cdot 0,11 = 0,44 \text{ mm}$$

Aus der mechanischen Filterfestigkeit (Gl. 1) ergibt sich die obere Grenze  $F1_{\max}$  der Kornverteilung der ersten Filterschicht, aus der hydraulischen Filterwirksamkeit (Gl. 2) ergibt sich die untere Grenze  $F1_{\min}$ .

Der erhaltene Kornverteilungsbereich für die erste Filterschicht liegt zwischen den folgenden Korngrößen:

$$1. \text{ Filter min: } D_{15 F1_{\min}} = 0,44 \text{ mm} \quad D_{85 F1_{\min}} = 1,36 \text{ mm}$$

$$1. \text{ Filter max: } D_{15 F1_{\max}} = 1,36 \text{ mm} \quad D_{85 F1_{\max}} = 4,24 \text{ mm}$$

Bestimmung der zweiten Filterschicht F2:

Zuerst wird in Abhängigkeit der unteren Grenze der ersten Filterschicht  $F1_{\min}$  die zweite Filterschicht definiert:

Die untere Grenze für die zweite Filterschicht  $F2_{\min}$  wird anhand von (Gl. 2) (hydraulische Filterwirksamkeit) bestimmt:

$$\text{(Gl. 2)} \Rightarrow D_{15 F2_{\min}} > 4 \cdot D_{15 F1_{\min}} = 4 \cdot 0,44 = 1,76 \text{ mm}$$

Die obere Grenze für die zweite Filterschicht  $F2_{\max}$  wird mit Hilfe von (Gl. 1) (mechanische Filterfestigkeit) berechnet:

$$\text{(Gl. 1)} \Rightarrow D_{15 F2_{\max}} < 4 \cdot D_{85 F1_{\min}} = 4 \cdot 1,36 = 5,44 \text{ mm}$$

Die erhaltene Bandbreite für die zweite Filterschicht in Abhängigkeit von F1min hat die Kornverteilung:

2. Filter min:  $D_{15\ F2min} = 1,76\text{ mm}$        $D_{85\ F2min} = 5,44\text{ mm}$   
 2. Filter max:  $D_{15\ F2max} = 5,44\text{ mm}$        $D_{85\ F2max} = 18\text{ mm}$

In Abhängigkeit von F1max wird die zweite Filterschicht definiert:

Die untere Grenze für den Kornverteilungsbereich der zweiten Filterschicht F2min wird anhand von (Gl. 2) (hydraulische Filterwirksamkeit) berechnet:

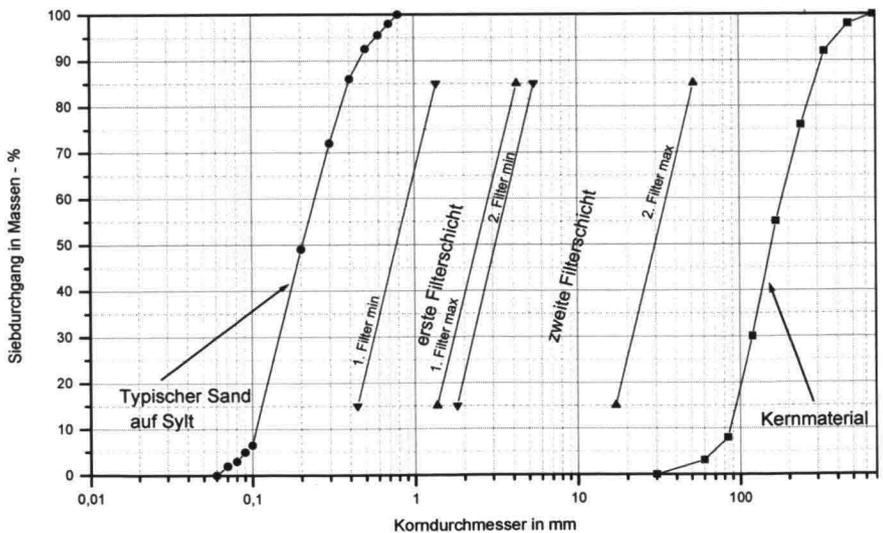
$$(Gl. 2) \Rightarrow D_{15\ F2min} > 4 \cdot D_{15\ F1max} = 4 \cdot 1,36 = 5,44\text{ mm}$$

Die obere Grenze des Kornverteilungsbereichs der zweiten Filterschicht F2max wird mit (Gl. 1) (mechanische Filterfestigkeit) berechnet:

$$(Gl. 1) \Rightarrow D_{15\ F2max} < 4 \cdot D_{85\ F1max} = 4 \cdot 4,24 = 16,96\text{ mm}$$

Die Kornverteilungen der zweiten Filterschicht in Abhängigkeit von F1min liegen im folgenden Bereich:

2. Filter min:  $D_{15\ F2min} = 5,44\text{ mm}$        $D_{85\ F2min} = 18\text{ mm}$   
 2. Filter max:  $D_{15\ F2max} = 16,96\text{ mm}$        $D_{85\ F2max} = 52\text{ mm}$



Kornverteilungen des Filters (zweistufig), in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens, Bestimmung nach der Regel von Terzaghi

## Bestimmung des Filters nach Terzaghi in Abhängigkeit der Kornverteilung des homogenen Wellenbrecherkernes der Kornzusammensetzung G1:

Zweite Filterschicht: Als „zweite Filterschicht“ wird die obere Filterschicht bezeichnet.

$$(Gl. 1) \Rightarrow D_{85 F2min} > \frac{D_{15 \text{ Schüttgut}}}{4} = \frac{94,1}{4} = 23,5 \text{ mm}$$

$$(Gl. 2) \Rightarrow D_{15 F2max} < \frac{D_{15 \text{ Schüttgut}}}{4} = \frac{94,1}{4} = 23,5 \text{ mm}$$

Aus (Gl. 1) (mechanische Filterfestigkeit) ergibt sich die untere Grenze der Kornverteilung der oberen Filterschicht, aus (Gl. 2) (hydraulische Filterwirksamkeit) ergibt sich die obere Grenze.

Der erhaltene Kornverteilungsbereich für die zweite oder obere Filterschicht hat die Kornverteilung:

$$2. \text{ Filter min: } D_{15 F2min} = 7,6 \text{ mm} \quad D_{85 F2min} = 23,5 \text{ mm}$$

$$2. \text{ Filter max: } D_{15 F2max} = 23,5 \text{ mm} \quad D_{85 F2max} = 73 \text{ mm}$$

Erste Filterschicht: Als „erste Filterschicht“ wird die untere Filterschicht bezeichnet, die einen direkten Kontakt zum Meeresboden hat.

Zuerst wird in Abhängigkeit von F2min die erste Filterschicht definiert:

$$(Gl. 1) \Rightarrow D_{85 F1min} > \frac{D_{15 F2min}}{4} = \frac{7,6}{4} = 1,9 \text{ mm}$$

$$(Gl. 2) \Rightarrow D_{15 F1max} < \frac{D_{15 F2min}}{4} = \frac{7,6}{4} = 1,9 \text{ mm}$$

Der erhaltene Kornverteilungsbereich für die erste Filterschicht in Abhängigkeit von F2min befindet sich zwischen:

$$1. \text{ Filter min: } D_{15 F1min} = 0,5 \text{ mm} \quad D_{85 F1min} = 1,9 \text{ mm}$$

$$1. \text{ Filter max: } D_{15 F1max} = 1,9 \text{ mm} \quad D_{85 F1max} = 5,9 \text{ mm}$$

Die erste Filterschicht wird in Abhängigkeit von F2max definiert:

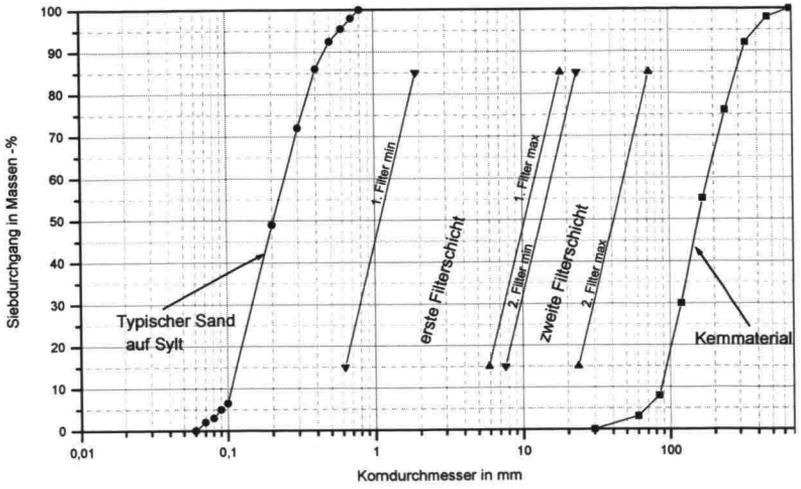
$$(Gl. 1) \Rightarrow D_{85 F1min} > \frac{D_{15 F2max}}{4} = \frac{23,5}{4} = 5,9 \text{ mm}$$

$$(Gl. 2) \Rightarrow D_{15 F1max} < \frac{D_{15 F2max}}{4} = \frac{23,5}{4} = 5,9 \text{ mm}$$

Der erhaltene Bereich für die erste Filterschicht in Abhängigkeit von F2max hat die Kornverteilung:

$$1. \text{ Filter min: } D_{15 F1min} = 1,9 \text{ mm} \quad D_{85 F1min} = 5,9 \text{ mm}$$

$$1. \text{ Filter max: } D_{15 F1max} = 5,9 \text{ mm} \quad D_{85 F1max} = 18,2 \text{ mm}$$



Kornverteilungen des Filters nach Terzaghi in Abhängigkeit der Kornverteilung des Wellenbrecherkernschüttgutes.

## Bemessung des Filters nach Cistin Ziems

### Bemessung der ersten Filterschicht f1 nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit der Kornverteilung des Meeresbodens

Mechanische Filterfestigkeit:

$$U_b = U_{\text{Sand}} = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,25}{0,1} = 2,5$$

$U_f = U_{f1} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenigen des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 f1}}{D_{50 \text{ Sand}}} = 11$$

$$D_{50 f1} = 11 \cdot D_{50 \text{ Sand}} = 11 \cdot 0,2 = 2,2 \text{ mm}$$

### Bemessung der zweiten Filterschicht f2 nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des Meeresbodens

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_b = U_{f1} = 2,1$$

$U_f = U_{f2} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenigen des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 f2}}{D_{50 f1}} = 10$$

$$D_{50 f2} = 10 \cdot D_{50 f1} = 10 \cdot 2,2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

### Bemessung der zweiten Filterschicht f2 (oder obere Filterschicht) nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des homogenen Wellenbrecherkernes

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_f = U_{\text{Schüttgut}} = 2,1$$

$U_f = U_{f2} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenigen des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 \text{ Schüttgut}}}{D_{50 \text{ f } 2}} = 10$$

$$D_{50 \text{ f } 2} = \frac{D_{50 \text{ Schüttgut}}}{10} = \frac{240}{10} = 24$$

### **Bemessung der ersten Filterschicht f1 (oder untere Filterschicht) nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des Wellenbrecherkernes**

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_f = U_{f2} = 2,1$$

$U_f = U_{f1} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenigen des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 \text{ f } 2}}{D_{50 \text{ f } 1}} = 10$$

$$D_{50 \text{ f } 1} = \frac{D_{50 \text{ f } 2}}{10} = \frac{24}{10} = 2,4$$

Die hydraulische Filterwirksamkeit muss noch zwischen den verschiedenen Materialien gewährleistet werden. Zu diesem Zweck wird der ungünstigste Fall zur Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit angenommen. Der ungünstigste Fall eintritt, wenn der Abstand zwischen den Körnungslinien der zu trennenden Böden Minimum ist. Wenn die Anforderungen zur Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit für den ungünstigsten Fall die Wahl des Filters bestätigen, ist es zu erwarten, dass aller anderen Körnungslinien, die zur Wahl des Filters zur Verfügung stehen gültig sind. Wenn die Anforderungen zur Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit die Wahl des Filters nicht bestätigen, muss der Filter in Hinsicht auf der hydraulischen Filterwirksamkeit erneuert bestimmt werden.

Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen dem Meeresboden und der Filterschicht f1

1. Bedingung	$D_{50 \text{ f } 1 \text{ min}} > D_{50 \text{ b}}$	
1,57 mm > 0,2 mm ?		JA! ⇒ erfüllt!

2. Bedingung	$D_{10 \text{ f } 1 \text{ min}} > 2 D_{10 \text{ b}}$	
1 mm > 2 · 0,11 mm = 0,22 mm ?		JA! ⇒ erfüllt!

Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen der ersten Filterschicht f1 und der zweiten Filterschicht f2

1. Bedingung  $D_{50 f2 \min} > D_{50 f1 \max}$   
15,7 mm > 2 mm ? JA!  $\Rightarrow$  erfüllt!

2. Bedingung  $D_{10 f2 \min} > 2 D_{10 f1 \max}$   
11 mm > 2 · 1,3 mm = 2,6 mm ? JA!  $\Rightarrow$  erfüllt!

Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen der zweiten Filterschicht f2 und dem Kern

1. Bedingung  $D_{50 K} > D_{50 f2 \max}$   
154,7 mm > 22 mm ? JA!  $\Rightarrow$  erfüllt!

2. Bedingung  $D_{10 K} > 2 D_{10 f2 \max}$   
88,2 mm > 2 · 15 mm = 30 mm ? JA!  $\Rightarrow$  erfüllt!

**Bemessung des Filters zwischen dem Meeresboden und dem Kern nach Cistin/Ziems im Fall eines entmischten Kernes**

**Erste Filterschicht f1 nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des Meeresbodens**

Mechanische Filterfestigkeit:

$$U_b = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,25}{0,1} = 2,5$$

$U_{f1} = 2,1$  (gewählt damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenige des Kernes verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 f1}}{D_{50 b}} = 11$$

$$D_{50 f1} = 11 \cdot D_{50 b} = 11 \cdot 0,2 = 2,2 \text{ mm}$$

**Zweite Filterschicht f2 nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des Meeresbodens**

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_b = U_{f1} = 2,1$$

$U_{f2} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenige des Kernes verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 \text{ f2}}}{D_{50 \text{ f1}}} = 10$$

$$D_{50 \text{ f2}} = 10 \cdot D_{50 \text{ f1}} = 10 \cdot 2,2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

### **Dritte Filterschicht f3 nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des Meeresbodens**

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_b = U_{f2} = 2,1$$

$U_{f3} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenige des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 \text{ f3}}}{D_{50 \text{ f2}}} = 10$$

$$D_{50 \text{ f3}} = 10 \cdot D_{50 \text{ f2}} = 10 \cdot 22 \text{ mm} = 220 \text{ mm}$$

### **Dritte Filterschicht f3 (oder obere Filterschicht) nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des entmischten Wellenbrecherkernes**

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_f = U_K = 2,1$$

$U_{f3} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenige des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 \text{ K}}}{D_{50 \text{ f3}}} = 10$$

$$D_{50 \text{ f3}} = \frac{D_{50 \text{ Kern}}}{10} = \frac{240}{10} = 24$$

### **Zweite Filterschicht f2 (oder obere Filterschicht) nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des entmischten Wellenbrecherkernes**

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_f = U_{f3} = 2,1$$

$U_{f2} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenige des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 \text{ f3}}}{D_{50 \text{ f2}}} = 10$$

$$D_{50 f2} = \frac{D_{50 f3}}{10} = \frac{24}{10} = 2,4$$

### Erste Filterschicht f1 (oder untere Filterschicht) nach Cistin/Ziems in Abhängigkeit des Wellenbrecherkernes

Mechanische Wirksamkeit:

$$U_f = U_{f2} = 2,1$$

$U_{f1} = 2,1$  (gewählt, damit die Kornverteilung des Filters parallel zu derjenige des Kerns verläuft)

Der Wert  $A_{50}$  wird aus dem Diagramm von Cistin/Ziems abgelesen:

$$A_{50 \text{ zul}} = \frac{D_{50 f2}}{D_{50 f1}} = 10$$

$$D_{50 f1} = \frac{D_{50 f2}}{10} = \frac{2,4}{10} = 0,24$$

Die hydraulische Filterwirksamkeit muss zwischen den verschiedenen Materialien gewährleistet werden. Zu diesem Zweck wird jeweils der ungünstigste Fall betrachtet. Wenn sie für diesen Fall gewährleistet wird, wird sie es für alle anderen Fälle auch. Wenn nicht, dann muss der Filter in dieser Hinsicht neu bestimmt werden.

### Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen dem Meeresboden und der Filterschicht f1

1. Bedingung  $D_{50 f1 \text{ min}} > D_{50 b}$

1,57 mm > 0,2 mm? JA!  $\Rightarrow$  Erfüllt!

2. Bedingung  $D_{10 f1 \text{ min}} > 2 D_{10 b}$

0,13 mm >  $2 \cdot 0,11 \text{ mm} = 0,22 \text{ mm}$ ? NEIN!  $\Rightarrow$  Nicht erfüllt!

Die hydraulische Filterwirksamkeit erfordert, dass  $D_{10 f1 \text{ min}} > 2 D_{10 b}$ , das heißt:

$$D_{10 f1 \text{ min}} > 0,22$$

### Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen der ersten Filterschicht f1 und der zweiten Filterschicht f2

1. Bedingung  $D_{50 f2 \text{ min}} > D_{50 f1 \text{ max}}$

15,7 mm > 2 mm? JA!  $\Rightarrow$  Erfüllt!

2. Bedingung  $D_{10 f2 \text{ min}} > 2 D_{10 f1 \text{ max}}$

1,6 mm >  $2 \cdot 1,3 \text{ mm} = 2,6 \text{ mm}$ ? NEIN!  $\Rightarrow$  Nicht erfüllt!

Die hydraulische Filterwirksamkeit erfordert, dass  $D_{10 f2 \text{ min}} > 2 D_{10 f1 \text{ max}}$ , das heißt:

$$D_{10 f2 \text{ min}} > 2,6$$

**Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen der zweiten Filterschicht f2 und der dritten Filterschicht f3**

1. Bedingung  $D_{50 f3 \min} > D_{50 f2 \max}$

24 mm > 22 mm? JA!  $\Rightarrow$  Erfüllt!

2. Bedingung  $D_{10 f3 \min} > 2 D_{10 f2 \max}$

16 mm > 2 · 15 mm = 30 mm? NEIN!  $\Rightarrow$  Nicht erfüllt!

Die hydraulische Filterwirksamkeit erfordert, dass  $D_{10 f3 \min} > 2 D_{10 f2 \max}$ , das heißt:

$$D_{10 f3 \min} > 30$$

**Kontrolle der hydraulischen Filterwirksamkeit zwischen der dritten Filterschicht f3 und dem entmischten Kern**

1. Bedingung  $D_{50 K} > D_{50 f2 \max}$

240 mm > 22 mm? JA!  $\Rightarrow$  Erfüllt!

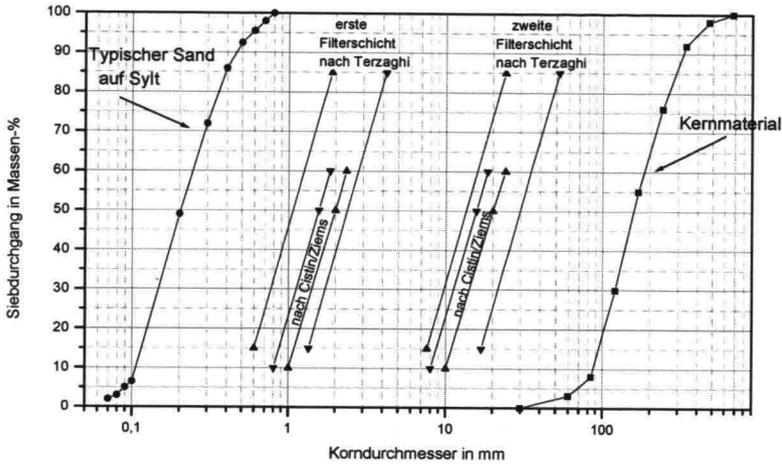
2. Bedingung  $D_{10 K} > 2 D_{10 f3 \max}$

120 mm > 2 · 125 mm = 250 mm? NEIN!  $\Rightarrow$  Nicht erfüllt!

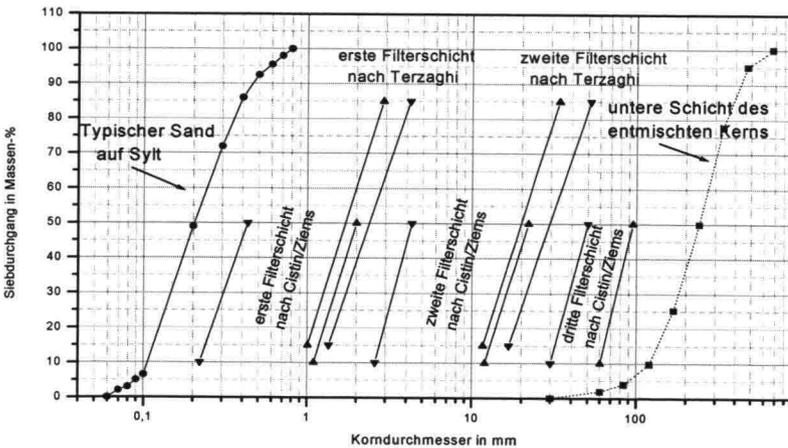
Die hydraulische Filterwirksamkeit erfordert, dass  $D_{10 K} > 2 D_{10 f3 \max}$ , das heißt:

$$D_{10 f3 \max} < \frac{D_{10 K}}{2} = \frac{120}{2} = 60$$

## Vergleich der Filterbemessungen nach Terzaghi und nach Cistin/Ziems



Vergleich der Filterbemessungen von Terzaghi und von Cistin/Ziems am Beispiel eines Filters zwischen dem Meeresboden von Sylt und einem Wellenbrecherkern der Kornzusammensetzung G1



Vergleich der Filterbemessungen von Terzaghi und von Cistin/Ziems am Beispiel eines Filters zwischen dem Meeresboden von Sylt und einem entmischten Wellenbrecherkern (die Kornzusammensetzung der unteren Schicht des Wellenbrecherkerns wird dafür berücksichtigt)

Die Ergebnisse, die sich aus den zwei gewählten Filterregeln von Terzaghi und von Cistin/Ziems ergeben, widersprechen sich grundsätzlich nicht.

Beide Filterregeln berücksichtigen die Kornzusammensetzungen beide Erdstoffe, die durch den Filter getrennt werden.

Die Kornzusammensetzung eines Filters von Cistin/Ziems befindet sich möglicherweise innerhalb des Körnungslinienbereichs von Terzaghi. Daraus folgt, dass die Bemessung des Filters nach Cistin/Ziems, Körnungslinienbereiche für die Wahl des Filters ausschließt, die bei einer Bemessung nach Terzaghi zulässig wären. Festzustellen ist auch (Abb. 6.16), dass der Einbau einer weiteren Schicht für einen Stufenfilter nach Cistin/Ziems bereits früher als nach Terzaghi notwendig ist. Die Anforderungen des Bemessungsverfahrens für den Filter von Cistin/Ziems sind daher strenger als bei dem Verfahren von Terzaghi.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Filterbemessungen besteht in der Art der Berücksichtigung der mechanischen Filterfestigkeit. Bei Terzaghi ist die mechanische Filterfestigkeit unabhängig von der Belastung auf das Bauwerk. Bei Cistin/Ziems wurde für den Wellenbrecher eine dynamische Belastung berücksichtigt. Dieser grundsätzliche Unterschied begründet die festgestellten Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden vorgestellten Verfahren.

Ein wesentlicher Unterschied besteht auch in der Berücksichtigung der hydraulischen Filterwirksamkeit. Die hydraulische Filterwirksamkeit wird bei den beiden Bemessungsverfahren unterschiedlich gehandhabt. Terzaghis Anforderung für die hydraulische Filterwirksamkeit ist wesentlich strenger als die von Cistin/Ziems.

Sie lautet nach Cistin/Ziems:  $D_{10f} > 2 \cdot D_{10b}$

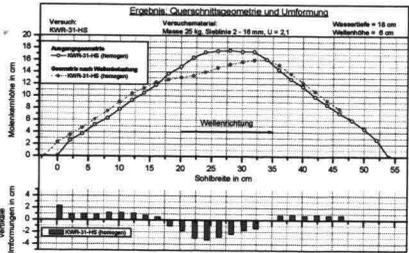
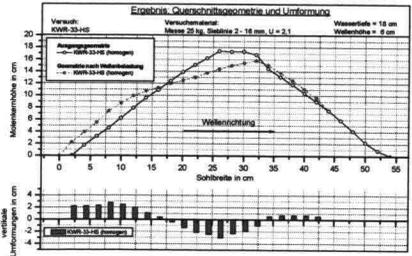
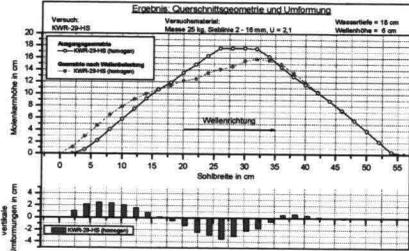
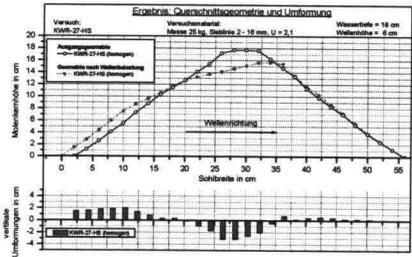
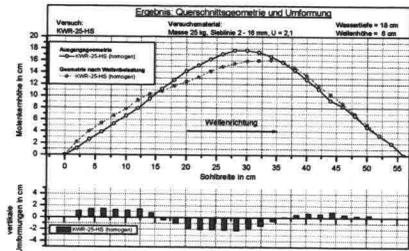
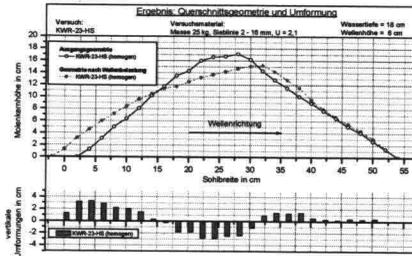
Und nach Terzaghi:  $D_{15f} > 4 \cdot D_{15b}$

Die Bemessung eines Filters von Cistin/Ziems für die Bemessung von Filtern im Wellenbrecherbau ist besser geeignet als die von Terzaghi, weil sie an die Belastung des Bauwerks angepasst wird. Dadurch dass sie engere Körnungslinienbereiche für die Wahl des Filters als Terzaghi fordert, befindet sich eine Bemessung mit dem Verfahren von Cistin/Ziems auf der sicheren Seite. Dieses Verfahren hat zusätzlich den Vorteil, dass es einfacher anzuwenden ist.

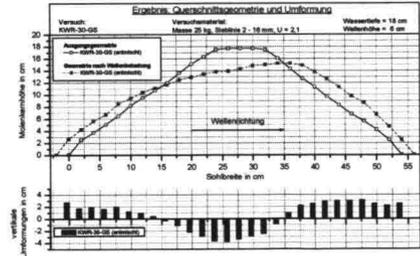
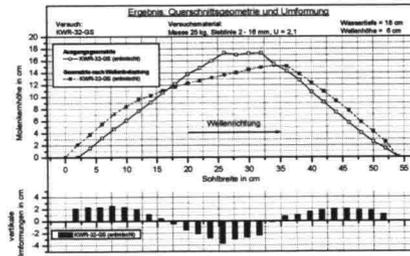
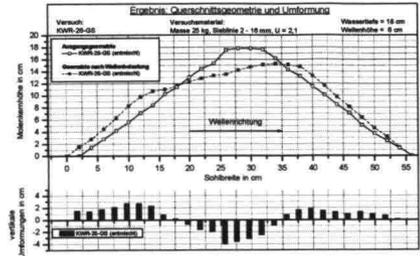
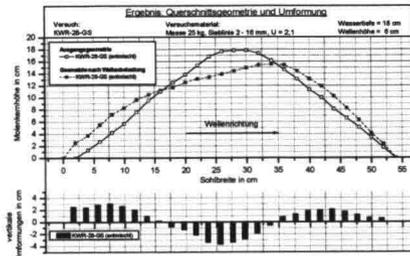
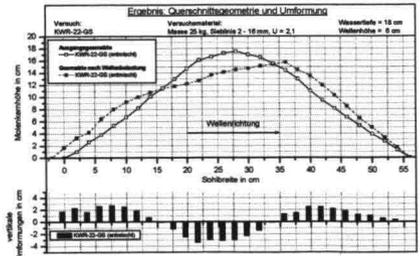
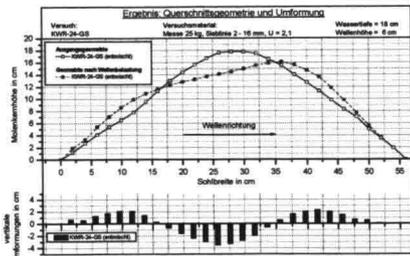
# Anhang 4: Versuchsergebnisse zum Vergleich der Stabilität unter Wellenbelastung von homogenen mit entmischten Kernen

(2 Seiten)

## Umformung von homogenen Wellenbrecherkernen unter Wellenbelastung



# Umformung von entmischten Wellenbrecherkernen unter Wellenbelastung



**MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN**

Nr./Jahrgang

- 1-36 1913-43 Eine Zusammenstellung  
vergriffen befindet sich in Mitteilung Nr. 50
- 37 1950 Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
vergriffen **Die Entwicklung des Lehrstuhles für  
Wasserwirtschaft und des Instituts für  
Wasserbau (Wasserbaulaboratorium)  
der Technischen Universität Berlin-  
Charlottenburg**
- Dipl.-Ing. S. Eicke  
**Gestaltung eines Kühlwassereinlaufes  
unter Berücksichtigung von Schweb-  
stoffzurückhaltung**
- Dipl.-Ing. S. Eicke  
**Bemerkungen zu einigen Gebieten der  
Versuchs- und Meßtechnik hydrodynamischer  
und wasserbaulicher Modell-  
versuche**
- Dipl.-Ing. H. Schaumann  
**Stand der Berechnung von Streich-  
wehren**
- 38 1951 Dipl.-Ing. J. Ohde  
Zur Statik der Staudämme mit Beton-  
kern
- Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Über die Herstellung von Beton für  
Gewichtstaumauern**
- Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Modellversuche an Staumauern zur  
Überprüfung des statischen Verhaltens**
- Dipl.-Ing. J. Pickert  
**Die Anwendung der statischen Modell-  
gesetze für Untersuchungen an Sperr-  
mauermodellen**
- Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Herunterbringen von Senkbrunnen mit  
Hilfe von Druckluftdüsen**
- 39 1952 Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Turbineneinläufe ohne Einlaufspirale  
für Pfeilerkraftwerke**
- Dipl.-Ing. S. Eicke  
**Modelluntersuchungen an Turbinen-  
einläufen ohne Spirale für Pfeiler-  
kraftwerke**
- 40 1953 Dipl.-Ing. H. Preß  
**Bau von Stauanlagen ohne  
Unterbrechung des Schiffahrtsbetriebes**
- Dipl.-Ing. A. B. Schulz  
**Das Entfernen von Geschiebeansamm-  
lungen bei Grundwehren mit Fisch-  
bauchstauklappen**

Nr./Jahrgang

- 41 1954 Dipl.-Ing. M. Schmidt  
vergriffen **Zur Frage des Abflusses über Streich-  
wehre**
- 42 1954 Dipl.-Ing. A. B. Schulz  
vergriffen **Die strömungstechnische Gestaltung der  
Wehre und Flußkraftwerke**
- 43 1955 Dipl.-Ing. H.U. Smoitczyk  
**Beitrag zur Ermittlung der Feinge-  
schiebe-Mengenganglinie**
- 44 1955 Dr.-Ing. E. Leopold  
**Abflußvorgang und Frachtraumverluste  
auf den natürlichen Binnenwasser-  
straßen**
- 45 1956 Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Einige neuere Untersuchungen unter  
Verwendung neu entwickelter  
Meßgeräte aus dem Institut für  
Wasserbau an der Technischen  
Universität Berlin**
- Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt  
**Überlegungen zum Entwurf eines Tos-  
beckens**
- Dipl.-Ing. H. J. Hoffmann  
**Vergleichende Untersuchungen über das  
Leistungsvermögen eines Absturzbau-  
werkes herkömmlicher Bauart und eines  
Kesselabsturzes in vier Varianten**
- Dipl.-Ing. R. Schröder  
**Neue Wege der Flügelmeßtechnik**
- Dr.-Ing. M. Schmidt  
**Einige Besonderheiten bei den  
Modellversuchen für die Isar-Staustufen  
Gumming und Dingolfing**
- Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt, K. Ernst  
**Darstellung des Regelvorganges eines  
Turbinen-Leitapparates durch eine  
elektronische Steuerungsanlage**
- Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt, K. Ernst  
**Beitrag zur Ermittlung der Potential-  
linien nach einem elektronischen  
Analogie-Verfahren**
- 46 1956 Dipl.-Ing. A. Gsaenger  
**Speicherwirtschaft und Hochwasser-  
vorhersage**
- 47 1956 Dipl.-Ing. F. Bassler  
vergriffen **Gesichtspunkte bei der Wahl einer  
Talsperren-Bauart**

**MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN**

Nr./Jahrgang

- 48 1957 Dipl.-Ing. R. Schröder  
vergriffen **Untersuchungen über diskontinuierliche Abfluvorgänge in Freispiegelrinnen**
- 49 1959 Dipl.-Ing. H. Bretschneider  
vergriffen **Beitrag zur Beobachtung und Messung von Wasserströmungen im wasserbaulichen Versuchswesen mit Tellur**
- Dipl.-Ing. F. J. Mock  
**Eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der photographischen Methode der Strömungsrichtungs- und Geschwindigkeitsbestimmung**
- Dr.-Ing. M. Schmidt  
**Die Berechnung von Streichwehren beim Auftreten eines Fließwechsels**
- Dr.-Ing. R. Schröder  
**Gegenüberstellung zweier Drehzahlübertragungssysteme für induktive Meßflügelsonden**
- Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt  
**Ausbildung einer Schleuseneinfahrt am konvexen Flußufer**
- 50 1959 Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin**
- Prof. Dr.-Ing. N. Engez  
**Untersuchungen über den Einfluß des Sinkstoffgehalts auf den Fließwiderstand in Rohrleitungen**
- Dipl.-Ing. H. Bretschneider  
**Die Kühlwasserversorgung von Wärmekraftwerken, insbesondere des Kraftwerkes Moabit in Berlin**
- Dipl.-Ing. F. Helmert  
**Bestimmungen der Wasserspiegellage in einem gegliederten Profil bei kontinuierlich abnehmender Wassermenge**
- Dr.-Ing. F. Mock  
**Der Anspringvorgang bei Hebern**
- Dr.-Ing. R. Schröder  
**Über die hydraulische Sicherheit von Tosbecken**
- Dr.-Ing. A. B. Schulz  
**Überfalleitungen und Luftabscheider in den Wassertürmen der Berliner Wasserwerke**

Nr./Jahrgang

- 51 1959 Dipl.-Ing. G. Mundt  
**Die Untersuchungen des Einflusses der Geschiebe- und Schwebstoffführung auf die Sohlen- und Wasserspiegellage in Staueen, abgeleitet aus Messungen und Beobachtungen an der Innstufe Ering**
- 52 1960 Dipl.-Ing. F. J. Mock  
**Strömungsvorgänge und Energieverluste in Verzweigungen von Rechteckgerinnen**
- 53 1961 Dipl.-Ing. H. Bretschneider  
**Abfluvorgänge bei Wehren mit breiter Krone**
- 54 1961 Prof. Dr. sc. Techn. C. Jaeger  
**Der heutige Stand der Felsmechanik und ihre Beziehung zum Bau von Wasserkraftwerken**
- Prof. Dr.-Ing. N. Engez  
**Verlandungserscheinungen in Talsperrenecken und die Wirkung der Grundablässe**
- Sonderheft T. P. Padmarajaiah, B. E.  
**Strömungswiderstand in gekrümmten Rohrleitungen**
- 55 1961 Dr.-Ing. H. Bretschneider  
vergriffen **Modelluntersuchungen für die Hochwasserentlastungsanlage des Mariental-Dammes in Südwestafrika**
- Dipl.-Ing. F. Helmert  
**Die Rauigkeit poröser Betonrohre**
- Dipl.-Ing. L. Macha  
**Gleichzeitige automatische Wasserspiegelmessung an mehreren Meßstellen**
- Dr.-Ing. F. J. Mock  
**Nomographische Lösungen der Gleichung von Bernoulli und der Extremalwerte für offene Gerinne mit regelmäßigem Querschnitt**
- Dipl.-Ing. W. Richter  
**Die Isar-Stautufen Gummering und Dingolfing**
- Dr.-Ing. M. Schmidt  
**Hochwassererwägungen beim Entwurf des Mariental-Dammes in Südwestafrika**
- Dr.-Ing. R. Schröder  
**Fotoelektrische Meßverfahren im wasserbaulichen Versuchswesen**
- Prof. Dr.-Ing. H. Preß  
**Zusammenstellung seiner wichtigsten Veröffentlichungen**

**MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN**

Nr./Jahrgang

Nr./Jahrgang

- 56 1962 Dr.-Ing. H. Bretschneider  
**Die Grundlagenforschung im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**
- Dr.-Ing. F.-J. Mock  
**Modellbehandlung von Druckstoßproblemen mit Hilfe von Kunststoffrohren**
- Dipl.-Ing. S. Eicke  
**Der Abfluß in teilgefüllten Rohrleitungen**
- 57 1962 Dipl.-Ing. H. Tessendorf  
vergriffen **Untersuchungen zum Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen**
- 58 1963 Dipl.-Ing. F. Helmert  
vergriffen **Einlaufprobleme bei Fallschächten**
- 59 1963 Dr.-Ing. R. Schröder  
**Die turbulente Strömung im freien Wechselsprung**
- 60 1963 Dr.-Ing. H. Bretschneider  
**Die Modelluntersuchungen für die Hochwasserentlastungsanlage des Pineios-Dammes in Griechenland**
- Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder  
**Schiffbugförmige Trennpfeiler für Flußkraftwerke**
- Dipl.-Ing. G. Fuchs  
**Die wirksamste Abstufung von künstlichen Kiesschüttungen in den Filterstrecken bei Bohrbrunnen**
- Dr.-Ing. H. Bretschneider  
**Der Schleppwagen im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Berlin**
- Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder  
**Bemerkenswerte Ausführung eines Wehrmodells**
- 61 1963 Dipl.-Ing. L. Macha  
vergriffen **Untersuchungen über die Wirksamkeit von Tosbecken**
- 62 1965 Dipl.-Ing. L. Macha  
**Die Energieumwandlung in räumlichen Tosbecken (Fortsetzung zu Mitteilung Nr. 61)**
- Dr.-Ing. H. Bretschneider  
**Die neue Steueranlage zum Betrieb von Wellenmaschinen im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin**
- Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder,  
Dipl.-Ing. D. Krause  
**Automatische Geschwindigkeitsmessungen mit Staugeräten**
- Dipl.-Ing. W. Gaede  
**Modelluntersuchungen zur Umgestaltung der Spreemündung**
- Dr.-Ing. H. Bretschneider,  
Dipl.-Ing. D. Krause  
**Die Modellversuche für die Hochwasserentlastungsanlage der Innerste-Talsperre im Harz**
- 63 1966 Dr.-Ing. H. Bretschneider,  
Ing. G. Retzlaff  
**Messungen von kleinen Geschwindigkeiten im wasserbaulichen Versuchswesen**
- Dr.-Ing. H. Bretschneider,  
Dipl.-Ing. J. Schweitzner  
**Kraftschlußbauwerke in Kühlsystemen von Dampfkraftwerken**
- Dipl.-Ing. G. Fuchs  
**Analytische und graphische Verfahren zur Untersuchung der Wellenbewegungen in offenen Seehäfen**
- Dipl.-Ing. W. D. Geiseler  
**Untersuchungen der Abhängigkeit zwischen Korndurchmesser und Strömungsgeschwindigkeit im Untergrund hinsichtlich des Wanderungsbeginns**
- Dipl.-Ing. S. Nanack  
**Stauraumverlandung**
- Dipl.-Ing. H. Hartmann  
**Maßnahmen zur Stabilisierung des Schußstrahles in einer im oberen Teil stark gekrümmten Schußrinne**
- Dipl.-Ing. H. Kaldenhoff  
**Abflußmessungen am Modell der Lechstaustufe 2 Prem**
- Dipl.-Ing. D. Krause  
**Vorbemessung von Tosbecken mit konzentrierter Beaufschlagung**
- Dipl.-Ing. F.-J. Mock  
**Afghanistan, Land alter Bewässerungskultur**
- Dipl.-Ing. H. Neubert  
**Bau und Betrieb von Horizontalfilterrohrbrunnen**
- Dipl.-Ing. H. Raisner  
**Zur Frage der Rauigkeitsdarstellung bei extrem rauhen Gerinnen**
- Dipl.-Ing. F. W. Renz  
**Dimensionierung eines Nachlaufbehälters zur Druckstoßsicherung einer langen Rohrleitung mit Zwischenhochpunkten**

- Dr.-Ing. M. Schmidt  
**Die Granetalsperre als Ergänzung der Okertalsperre**
- Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder  
**Indirekte Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung bei Rohrströmungen einfacher nichtnewtonscher Flüssigkeiten**
- Dr.-Ing. H. Stefan, Dipl.-Ing. P. Franke,  
Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder  
**Abbildung von Druckstoßerscheinungen in Metallrohren mit nichtkreisförmigen Querschnitten**
- Dr.-Ing. H. Stefan, Dipl.-Ing. J. Meyer  
**Untersuchungen ebener Sickerströmungen in heterogenem Untergrund mit Hilfe der elektrischen Analogie**
- Dipl.-Ing. L. Macha  
**Untersuchungen bei Paraná-Santa Fé**
- 64 1967 Dipl.-Ing. H. J. Hoffmann  
vergriffen **Über die Wechselwirkungen einer senkrechten Tauchwand mit periodischen Schwerewellen**
- 65 1967 Dipl.-Ing. W.-D. Geiseler  
vergriffen **Über die Strömungsvorgänge bei Vertikalfilterrohrbrunnen mit einfachen Kiesschüttungen unter besonderer Berücksichtigung der Leistungssteigerung durch Entsandten**
- 66 1967 Dr.-Ing. H. Bretschneider  
vergriffen **Maßstabseinflüsse bei Kavitation**
- 67 168 Dipl.-Ing. S. Hanack, Dr.-Ing. H. Stefan  
**Strömungen von Tonsuspensionen mit einem hohen Feststoffgehalt**
- 68 1968 Dipl.-Ing. G. Fuchs  
**Die Änderung der Wellenelemente durch positive Unterwasserstufen**
- 69 1969 Dipl.-Ing. H. Hartmann  
vergriffen **Das Stabgitter in instationärer Strömungsbewegung**
- 70 1969 Dipl.-Ing. D. Krause  
**Geschwindigkeitsverteilung und Fließverluste der turbulenten Strömungen in Rohren und Gerinnen**
- 71 1969 Prof. Dr.-Ing. H. Bretschneider  
**Programmiertes Praktikum für das Wasserbauliche Versuchswesen. Ein Beispiel zur Rationalisierung des Unterrichts an Hochschulen**
- Dipl.-Ing. S. Emsmann, Dipl.-Ing. J. Meyer  
**Beitrag zur experimentellen Bestimmung der Energiehöhenverluste an Rohrabzweigungen**
- Dipl.-Ing. P. Franke, Dipl.-Ing. M. Malik  
**Voraussetzung für den Einsatz leistungsfähiger Turbinen und Pumpen**
- Dr.-Ing. G. Fuchs  
**Das Bewässerungssystem des landwirtschaftlichen Siedlungsgebietes Hardap in Südwesafrika**
- Dipl.-Ing. H. Hartmann  
**Studium der Sandwanderung unter Welleneinwirkung am Seehafenmodell Rethymnon**
- Dr.-Ing. H. Hoffmann, Dipl.-Ing. K. Riemer  
**Der neue Hamburger Elbtunnel**
- Dipl.-Ing. H. Kaldenhoff,  
O. Hoffmann, M. Sc.  
**Einfache Bestimmung der exakten Wasseroberfläche bei stationärem Brunnenuzufluß aus einem ungespannten Grundwasserleiter durch eine Modifizierung der Dupuitschen Brunnengleichungen**
- Dipl.-Ing. H.-J. Koch, O. Hoffmann, M. Sc.  
**Spiegellinienberechnung eines beschleunigten Abflusses nach dem Runge-Kutta-Verfahren**
- Dipl.-Ing. G. Mundt  
**Beziehungen zwischen der Stauweite und dem Wendepunkt der Abflußkurven im Staubereich**
- Dipl.-Ing. S. Savidis  
**Die Wellenkraft auf einen eingetauchten horizontalen Kreiszyylinder**
- Dr.-Ing. G. Stapelfeldt  
**Ansatz zur näherungsweise Berechnung des Spannungszustandes im Haufwerk unter Berücksichtigung des inneren Verschiebungszustandes**
- Dr.-Ing. H. Tessendorff  
**Möglichkeiten und Grenzen der Berechnung großflächiger vermaschter Wasserrohrnetze auf elektronischen Datenverarbeitungsanlagen**
- 72 1970 Dipl.-Ing. B. Popov  
**Über die Ausbildung der Kavitation in einer diskontinuierlichen Strömung**
- 73 1971 Dipl.-Ing. H. Kaldenhoff  
**Näherungslösungen bei der instationären Brunnenuströmung**
- 74 1971 Dipl.-Ing. J. Meyer  
**Wandschubspannungs- und Geschwindigkeitsverteilung im glatten Dreieckgerinne (Öffnungswinkel 90°)**

**MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN**

Nr./Jahrgang

- 75 1971 Dipl.-Ing. U. Drewes  
vergriffen **Ebene instationäre Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche in Wechselwirkung mit einem Oberflächengewässer**
- 76 1972 Dipl.-Ing. M. Malik  
**Die hydromechanischen Parameter und ihr Einfluß auf die charakteristischen Größen des Wechselsprunges**
- 77 1972 Dipl.-Ing. H.-J. Koch  
vergriffen **Die Umströmung der quadratischen Schwelle im Rechteckgerinne bei überkritischem Fließzustand**
- 78 1972 **Tätigkeitsbericht 1971/1972**
- 79 1973 Dr.-Ing. S. Emsmann  
**Experimentelle Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung in einer oszillierenden turbulenten Rohrströmung**
- 80 1974 Dr.-Ing. U. Drewes  
**Die Berechnung räumlicher instationärer Grundwasserströmungen mit Hilfe eines Differenzenverfahrens**  
  
Dr.-Ing. S. A. Savidis  
**Kraftangriff und Dämpfung periodischer Schwerewellen beim Durchgang durch ein aus horizontalen Stäben bestehenden Gitter**
- 81 1974 Dr.-Ing. S. Emsmann, Dipl.-Ing. J. Köngeter  
**Geschwindigkeits-Eichanlage für Thermistorsonden**  
  
Dr.-Ing. S. Emsmann,  
cand. ing. A. Lehmann  
**Über die Entwicklung eines Thermistor-CT-Anemometers zur Messung instationärer Wassergeschwindigkeiten**  
  
O. Hoffmann, M. Sc.  
**Programmsystem für die Druckstoßberechnung nach dem Stoßgeradenverfahren**  
  
Ing. (grad.) P. Ch. Lang  
**Einige Geräteentwicklungen des Elektroniklabors**  
  
Dipl.-Ing. D. Morgenstern  
**Hydraulische Stabilität von Wasserkraftanlagen mit Wasserschloß im Ober- und Unterwasserstollen**  
  
Prof. Dr.-Ing. C. Schreck  
**Beitrag zum Problem des Wasserschlages**
- 82 1974 **Tätigkeitsbericht 1973/1974**

Nr./Jahrgang

- 83 1975 Dr.-Ing. D. Morgenstern  
**Dimensionierung von Differentialwasserschlossern mit optimaler Schwingungsdämpfung**
- 84 1975 Dr.-Ing. O. Hoffmann  
**Beitrag zur Druckstoßberechnung bei Pumpenausfall**
- 85 1976 Dr.-Ing. F. Waßelewsky  
**Strukturermittlung und Parameterschätzung hydrologischer Speichermodelle durch Approximation des Frequenzgangs**
- 86 1976 **Tätigkeitsbericht 1975/1976**
- 87 1976 Dipl.-Ing. S. Gökcesu  
**Beitrag zum Aufaufvorgang des natürlichen Seegangs im Flachwassergebiet auf glatten Böschungen**
- 88 1977 Dipl.-Ing. R. Krüger  
**Strömungserscheinungen an einer Blende in oszillierender Rohrströmung**
- 89 1978 Dipl.-Ing. H. Berger  
**Druckstoßverhalten an Blenden bei Berücksichtigung der Anlaufströmung**
- 90 1978 **Tätigkeitsbericht 1977/1978**
- 91 1979 Dipl.-Ing. M. Heintl  
**Die Stabilität der Schwingung in Differentialwasserschlossern bei idealer Regelung auf konstante Leistung**
- 92 1980 Dipl.-Ing. W. Behrendt  
**Die dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung in der Laufradebene einer spezifisch schnellläufigen Pumpe, deren Anströmung durch Einbauten vor dem Beschleunigungskrümmern gestört wird**
- 93 1980 Dipl.-Ing. P. Bade  
**Erzeugung kurzer seegangähnlicher Wellenzüge in Wasser begrenzter Tiefe durch Überlagerung dispergierender permanenter Wellenpakete**
- 94 1980 Dipl.-Ing. J. Weiß  
**Beitrag zur Ermittlung des Gasgehaltes und der Blasenauftiegschwindigkeit in einer Blensäule eines Wasser-Luft-Gemisches in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom und von der Höhe**

Nr./Jahrgang

Nr./Jahrgang

- |     |      |   |     |      |   |
|-----|------|---|-----|------|---|
| 95  | 1980 | Dipl.-Ing. J. Köngeter<br><b>Rohrreibungsverluste einer oszillierenden turbulenten Strömung in einem Kreisrohr konstanten Querschnitts</b>  |     |      | Dipl.-Ing. C. Rack<br><b>Unsicherheiten bei der Abflußmessung mit Ultraschall und mit Meßflügeln in offenen Gerinnen</b>  |
| 96  | 1980 | Dipl.-Ing. E. Papamastorakis<br><b>Reflexion, Transmission und Kräfte von Oberflächenwellen an aufgelösten Konstruktionen</b>   |     |      | Dipl.-Ing. G. Schulz<br><b>Programmsystem GRUWA Ein Finite-Element-Modell zur Berechnung ebener Grundwasserströmungen</b>   |
| 97  | 1980 | Dipl. Phys. H.-H. Schneider<br><b>Turbulentes Entrainment über eine Dichtezwischenschicht mit einem Freistrah als Turbulenzquelle</b>   | 101 | 1983 | <b>Tätigkeitsbericht 1981/1982</b>  |
| 98  | 1981 | <b>Tätigkeitsbericht 1979/1980</b>  | 102 | 1983 | Dipl.-Ing. H. Arit<br><b>Experimentelle Untersuchungen über das instationäre, turbulente Reibungsverhalten bei aufgeprägten Druckimpulsen in einer Rohrleitung mit Kreisquerschnitt</b>       |
| 99  | 1981 | Dipl.-Ing. H. Geipert<br><b>Schwall und Sunk als Übergangsbereich zwischen Teil- und Vollfüllung in Rohrleitungen mit rechteckigem Querschnitt</b>  | 103 | 1984 | Dipl.-Ing. F. Busch<br><b>Schwingungsstabilität des Verschlusses und Abflußvermögen eines Abschlagsbauwerkes der Kanalisation</b>   |
| 100 | 1982 | Prof. Dipl.-Ing. P. Franke<br><b>Vorwort</b><br><br>Prof. Dr.-Ing. H. Blind<br><b>Kontrollmaßnahmen in Stauanlagen -ein Beitrag zur Sicherheit-</b><br><br>Dr.-Ing. H. Hartmann<br><b>Der Marinenhafen Lumut in West-Malaysia unter besonderer Beachtung der Gründungsprobleme beim Bau der Pieranlagen</b><br><br>Dr.-Ing. D. Krause<br><b>Dimensionierungsfragen bei Kühlwassersystemen</b><br><br>Prof. Dr.-Ing. R. C. M. Schröder<br><b>Versickerung aus Talsperren -Messungen und Simulation-</b><br><br>Prof. Dr.-Ing. H. Bretschneider<br><b>Luftgesteuerte Heber zur Hochwasserentlastung bei Stauanlagen</b><br><br>Dipl.-Ing. F. Busch<br><b>Die Länge des Wechselsprunges in einem parallelwandigen Rechteckgerinne mit horizontaler Sohle und glatter Wand</b><br><br>Dipl.-Ing. J. Dignatz,<br>Prof. Dr.-Ing. H. Kaldenhoff<br><b>Tendenzen in der modernen Seegangsforschung</b><br><br>Dr.-Ing. J. Meyer,<br>Dr.-Ing. H.-J. Koch<br><b>Modelluntersuchung für den Grund- und Betriebsauslaß Randenigala, Sri Lanka</b> | 104 | 1984 | Dipl.-Ing. J. Dignatz,<br>Prof. Dr.-Ing. H. Kaldenhoff,<br>Dipl.-Ing. G. Schulze<br><b>Einsatz von Tracern zur Bestimmung der Ausbreitungsvorgänge von Nährsalzen in stehenden Gewässern</b>  |
|     |      |   | 105 | 1985 | <b>Tätigkeitsbericht 1977/1978</b>  |
|     |      |   | 106 | 1985 | Dipl.-Ing. O. Müller<br><b>Eine Strategie zur Schließfunktionsermittlung für Armaturen in Fernwasserleitungen</b>   |
|     |      |   | 107 | 1987 | Dipl.-Ing. A. Schulz<br><b>Zur Näherungsberechnung des Abflusses in naturnah gestalteten Fließgewässern</b>   |
|     |      |   | 108 | 1987 | <b>Tätigkeitsbericht 1985/1986</b>  |
|     |      |   | 109 | 1987 | Dipl.-Ing. M. Zapp<br><b>Auswirkungen von Grundwasserentnahmen aus tieferen Schichten eines mehrstöckigen Aquifersystems, untersucht am Beispiel des Grundwassersystems im Norden Berlins</b> |
|     |      |   | 110 | 1987 | Dipl.-Ing. P. Brinkmann,<br>Dr.-Ing. M. Heiml,<br>Dipl.-Ing. R. Holländer<br><b>Grundwasserströmung im Nubischen Aquifersystem, Nordost-Afrika</b>  |
|     |      |   | 111 | 1988 | Dr.-Ing. G. Schulz-Terfloth<br><b>Untersuchungen zur Wechselbeziehung zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser</b>   |

Nr./Jahrgang

Nr./Jahrgang

- 112 1988 Dipl.-Ing. K.-U. Graw  
vergriffen **Der Einsatz laseroptischer Verfahren zur Untersuchung von Geschwindigkeitsfeldern im wasserbaulichen Versuchswesen**
- 113 1989 **Tätigkeitsbericht 1987/1988**
- 114 1989 Dr.-Ing. C. Rack  
vergriffen **Entscheidungsgrundlagen zur Wahl des Entwässerungskonzepts bei besiedelten Flächen unter besonderer Berücksichtigung des Gewässerschutzes und alternativer Methoden**
- 115 1989 Dr.-Ing. R. Holländer  
**Zum Dispersionseinfluß bei Altersbestimmungen des Grundwassers im Nubischen Aquifersystem**
- 116 1990 Prof. Dr.-Ing. H. Bretschneider  
**Lufteintrag durch Nischen mit und ohne Rampe in Grundablüssen**
- 117 1991 Dipl.-Math. E. Holzbecher  
**Numerische Modellierung von Dichteströmungen im porösen Medium**
- 118 1991 **Tätigkeitsbericht 1989/1990**
- 119 1991 Dipl.-Ing. Klaus Möller  
**Das Absenken einer thermisch bedingten Dichtezwischenschicht in einem nicht-prismatischen Wasserspeicher**
- 120 1991 **Modellierung von Strömung und Transport im Grundwasser**  
Prof. Dr.-Ing. G. Holtorff  
**Vorwort**  
Dipl.-Ing. M. Thiele  
**Stationäre Konzentrationsverteilungen bei der Überströmung der festen Wand im porösen Medium**  
Dr. rer. nat. V. Koß  
**Geochemische Modelle**  
Dr. rer. nat. H. Scholz  
**Mathematische und numerische quasi dreidimensionale Simulation des Mengen- und Stofftransports**  
Dr.-Ing. M. Heint  
**Ein Strömungsmodell für den Nubischen Aquifer**  
Dr. rer. nat. G. Nützmann  
**Simulation von Strömung und Stofftransport in ungesättigt/gesättigten Bodenprofilen**
- Dr.-Ing. Dipl.-Math. E. Holzbecher  
**Zur Modellierung von Dichteströmungen in porösen Medien**  
Dipl.-Ing. H. Moser  
**Modellierung der Salzwasserexperimente des INTRAVAL-Workshops Testcase 13**  
Dr.-Ing. G. Schulz-Terfloth  
**Der Einsatz von Grundwassermodellen bei der Standortuntersuchung von Deponien am Beispiel der geplanten Deponie Weeze-Wemb**  
Dr. rer. nat. M. Schafmeister-Spierling  
**Geostatistische Simulationstechniken**  
Dipl.-Geogr. R. Baumann  
**Meerwasserinvasion im Delta arider und semiarider Gebiete am Beispiel des Nildeltas**  
Dipl.-Ing. R. Mansouri  
**Das Nildelta und die Modellierung des Salztransports im ungesättigten Bodenbereich**
- 121 1991 Dipl.-Ing. P. J. Brinkmann  
**Niederschlagsverhältnisse und Grundwasserneubildung in Darfur (Sudan)**
- 122 1993 Dipl.-Ing. M. Thiele  
**Vermischung von Süß- und Salzwasser in horizontalen Scherschichtströmungen im porösen Medium**
- 123 1994 Dipl.-Ing. A. Schmidt  
**Schätzung des Schwebstofftransports in kleinen Einzugsgebieten auf der Grundlage von Abflußmessungen**
- 124 1994 Dipl.-Ing. J. Skripalle  
**Zwangsbelüftung von Hochgeschwindigkeitsströmungen an zurückspringenden Stufen im Wasserbau**
- 125 1994 Dipl.-Ing. R. Mansouri  
**Simulation des Wasser- und Salztransports an grundwassernahen Standorten am Beispiel des Einzugsgebietes "El-Scheikh" (Nord-Nildelta)**
- 126 1994 **Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen**  
Prof. Dr.-Ing. G. Holtorff  
**Vorwort**  
Dipl.-Ing. K. Hildebrand  
**Modellierung zur simulationsgestützten Steuerung des Bodenwassergehalts**

- Dr.-Ing. Dipl.-Math. E. Holzbecher  
**Simultane Modellierung von Transport- und Abbauprozessen**
- Dr. rer. nat. V. Koß  
**Zur geochemischen Modellierung der Bleiadsorption**
- Dr. rer. nat. H. Langmach  
**Zur numerischen Simulation des reaktiven Schadstofftransports im porösen Medium**
- Dr. rer. nat. G. Nützmann  
**Zur Bestimmung der hydraulischen Funktionen eines homogenen Sandes durch indirekte Parameteridentifikation**
- Dr.-Ing. M. Thiele  
**Vertikalprofile für den Gleichgewichts-transport von Schwebstoffgemischen in offenen Kanälen**
- 127 1995 Dipl.-Ing. F. Schumacher  
**Zur Durchflußberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer**
- 128 1995 Dr.-Ing. H. Moser  
**Einfluß der Salzkonzentration auf die hydrodynamische Dispersion im porösen Medium**
- 129 1995 Dipl.-Geogr. R. Baumann  
**Untersuchungen zum anthropogenen Einfluß auf die Salzwasserintrusion am Beispiel des Nildeltas**
- 130 1995 D. Arlt, M.Sc.  
**A Hydrogeological Study of the Nile Delta Aquifer with Emphasis on Salt-water Intrusion in the Northern Area**
- 131 1995 **Probleme des Wasser- und Stoffhaushalts und der Nutzung ehemaliger Rieselfelder Berlins und Umgebung**  
Felduntersuchungen-Laborexperimente-Modellierung
- Dipl.-Hydr. S. Görzitz  
**Zum oberirdischen Abfluß der Rieselfelder südlich Berlins**
- Dipl.-Geol. M. Asbrand  
**Hydrogeologische Situation der Rieselfelder südlich Berlins**
- Dipl.-Geol. H. Handke  
**Beeinflussung des Wasser- und Stoffhaushaltes ehemaliger Rieselfeldflächen durch Infiltration mit weitgehend gereinigtem Abwasser**
- Dr. rer. nat. B. Marschner,  
Dipl.-Ing. L. Schlenther  
**Die Böden der Rieselfelder in Berlin-Buch: Bodentypen, Bodeneigenschaften und Schadstoffbelastung**
- Dipl.-Ing. S. Pudenz  
**Ein Kompartimentmodell zur Simulation des vertikalen P-Transports auf einem ehemaligen Rieselfeldstandort**
- 132 1996 Dipl.-Ing. I. Mendes Pereira  
**Wirbelablösungen, die Oberflächenwellen beim Passieren einer Stufe erzeugen**
- 133 1996 Prof. Dr.-Ing. T. Stückrath,  
Dr.-Ing. M. Heint  
**Dämpfung der Tidebewegung in einem Polder**
- 134 1996 Prof. Dr.-Ing. T. Stückrath,  
Dipl.-Ing. G. Völker,  
Dipl.-Ing. J. Meng  
**Untersuchungen zum Fallverhalten würfelförmiger Einzelkörper in Wasser**
- Dr. T. Özбек  
**Zur Durchflußberechnung von geometrisch gegliederten Gerinnen**
- 135 2000 Dipl.-Hydrologe H. Messal  
**Rückkopplungen und Rückwirkungen in der hydrologischen Modellierung am Beispiel von kontinuierlichen Niederschlag-Abfluß-Simulationen und Hochwasservorhersagen**
- 136 2000 Dipl.-Ing. S. Knoll  
**Das Abflußverhalten von extensiven Dachbegrünungen**
- 137 2003 Prof. Dr.-Ing. T. Stückrath,  
Dipl.-Ing. G. Völker  
Dipl.-Ing. J. Meng  
**Die Gestalt von natürlichen Steinen und ihr Fallverhalten in Wasser**
- 138 2003 Dipl.-Ing. P. Rouault  
**Die Entmischung bei der Schüttung von Wellenbrecherkernen mit Hinterkippen**