

# PHYSIKALISCHE MODELLUNTERSUCHUNGEN ZUR BEURTEILUNG DER LAGESTABILITÄT VON WEITGESTUFTEM STEINMATERIAL

von

Alexander Schendel<sup>1</sup>  
Nils Goseberg<sup>2</sup>  
Torsten Schlurmann<sup>3</sup>

## ABSTRACT

In order to investigate the erosion potential and bed stability of a homogeneously well-graded quarry stone material with a grain size distribution of 1-200 mm, large-scale hydraulic model experiments are carried out by the Franzius-Institute. The material is installed in the circulation flume of the Franzius-Institute and is loaded by successively increasing current velocities up to 0.9 m/s. In order to quantify the erosion and transport processes an ADV probe, a sand trap and an optoelectronic laser distance meter are used as measurement devices. An assessment of the bed stability as well as the performance of the material results from a comparison of the calculated bed shear stresses with the critical bed shear stresses by Shields (1936) and Egiazaroff (1965).

## 1. EINLEITUNG

Die Kolkbildung an Offshore-Tragstrukturen kann die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Anlagen gefährden. Daher sind die Bemühungen groß einen sicheren und effizienten Kolkschutz zu entwickeln. Um den zeitlichen und finanziellen Aufwand beim Einbau derzeitiger Kolkschutzsysteme zu minimieren, plant die Firma Mibau Baustoffhandel GmbH weitgestuftes Bruchsteinmaterial, Korngrößenbereich 1-200 mm, als Kolkschutz einzusetzen. Zur Untersuchung der Erosions- und Lagestabilität dieses Materials unter Strömungs- sowie Wellenbelastung wird vom Franzius-Institut ein aus drei Phasen bestehendes Untersuchungsprogramm mit jeweils großmaßstäblichen physikalischen Modellversuchen durchgeführt. Während im Rahmen der ersten beiden Phasen

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [schendel@fi.uni-hannover.de](mailto:schendel@fi.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Dr.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [goseberg@fi.uni-hannover.de](mailto:goseberg@fi.uni-hannover.de)

<sup>3</sup> Prof. Dr.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [schlurmann@fi.uni-hannover.de](mailto:schlurmann@fi.uni-hannover.de)

Untersuchungen in der Umlaufrinne Marienwerder zur Stabilität unter Strömungsbelastung durchgeführt werden, erfolgen in der anschließenden dritten Phase Modellversuche im Großen Wellenkanal zur Beurteilung der Materialstabilität unter Wellenbelastung. Dabei sollen in der ersten Untersuchungsphase qualitative Erkenntnisse zur Lagestabilität des Materials gewonnen sowie das charakteristische Verhalten der Mischsohle unter Strömungsbelastung beschrieben werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten Phase hat die zweite Phase die Zielsetzung eine quantitative Bestimmung der Lagestabilität des weitgestuften Materials sowie eine Bewertung der Leistungsfähigkeit des Materials unter stationären Strömungsverhältnissen vorzunehmen. In den Modellversuchen der dritten Untersuchungsphase wird das Material hinsichtlich seiner Stabilität unter Wellenbelastung als auch hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit als Kolkenschutz für maritime Strukturen untersucht. Im Folgenden sollen jedoch die Ergebnisse der zweiten Untersuchungsphase im Vordergrund stehen.

## **2. HYDRAULISCHE MODELLVERSUCHE**

### **2.1 Versuchsaufbau**

Die hydraulischen Modellversuche der zweiten Untersuchungsphase werden im Maßstab 1:1 in der Umlaufrinne des Franzius-Instituts in Marienwerder durchgeführt. Die Umlaufrinne erlaubt die Untersuchung von Strömungs- und Sedimenttransportprozessen im hydraulischen Modell. Die Anlage wird über vier Rohrpumpen mit einer Gesamtfördermenge von 0.5 m<sup>3</sup>/s angetrieben. Bei einer Gesamtlänge von 60 m und einer Breite von 1 m kann eine maximale Fließtiefe von 0.8 m ermöglicht werden. Auf der den Pumpen gegenüberliegenden Seite der Umlaufrinne befindet sich eine 18 m lange gerade Strecke mit einem 0.6 m tiefen und 2.7 m langen Tieftteil.

Das zu untersuchende Material ist homogen weitgestuftes Bruchsteinmaterial aus Granodiorit mit einem Korngrößenbereich von 1-200 mm. Es wird ebenerdig und in loser Schüttung in den Tieftteil eingebaut. Die Schichtdicke beträgt 200 mm, was dem Größtkorndurchmesser  $d_{\max}$  von 200 mm entspricht.

Zur Quantifizierung der Erosions- und Transportprozesse kommt neben einer ADV-Sonde sowie eines Sandfanges ein optoelektronischer Laser-Distanz-Sensor als Messtechnik zum Einsatz. Das Ziel der Laserdistanzmessung ist eine Erfassung der Änderungen der Materialoberfläche infolge der induzierten Strömungsbelastung. Der verwendete optoelektronische Laser-Distanz-Sensor funktioniert nach dem Messprinzip der Lasertriangulation und verfügt nach Herstellerangaben über eine absolute Auflösung von 0.015 mm bis 0.67 mm, bei einer Linearitätsabweichung von  $\pm 0.05$  mm bis  $\pm 2.0$  mm in Abhängigkeit vom Abstand zum gescannten Objekt. Im Verlauf der Modelluntersuchungen konnte, bei vorhandenen Randbedingungen, eine realistische vertikale Genauigkeit im Bereich von 1.0 mm bis 2.0 mm erreicht werden.

Zur Ermittlung des erodierten Geschiebematerials wird unterstrom des im Tieftteil der Rinne eingebauten Materials ein Sandfang installiert. Bedingt durch seine konstruktive Ausführung als eine Art „Fallgrube“ kann das sich in Suspension befindliche Feinstmaterial nicht erfasst werden.

Für die Geschwindigkeitsmessungen über dem eingebauten Material wird eine ADV-Sonde des Typs Vectrino<sup>+</sup> der Firma NORTEK verwendet. Neben der Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Strömungsbeeinflussung durch die raue

Materialoberfläche dienen die Geschwindigkeiten als Grundlage für die Bestimmung der Sohlschubspannungen. Mit den ermittelten Sohlschubspannungen können wiederum Aussagen zur Lagestabilität des untersuchten Materials getroffen werden.

Zur automatischen und reproduzierbaren Positionierung des Laser-Distanz-Sensors sowie der Vectrino<sup>+</sup> Geschwindigkeitssonde wird ein 3-Achsen-Verfahrenssystem über den Tiefteil installiert.

Die Abbildung 1 stellt den Versuchsaufbau im Längsschnitt dar.

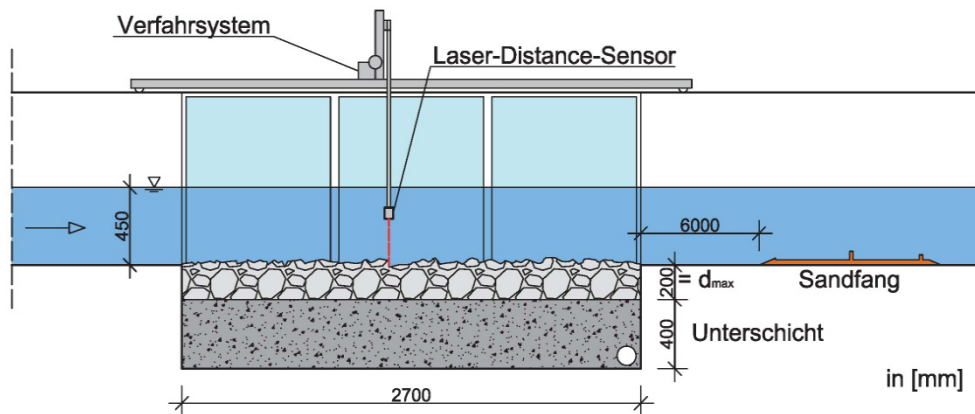


Abbildung 1: Versuchsaufbau im Längsschnitt

## 2.2 Versuchsdurchführung

Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse baut sich das Versuchsprogramm aus drei Versuchsreihen mit jeweils sukzessiv steigenden Belastungsstufen durch Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten auf. Die untersuchten Belastungsstufen können der Tabelle 1 entnommen werden. Die angegebene mittlere Fließgeschwindigkeit  $u_m$  bezeichnet die über Wassertiefe und Kanalbreite gemittelte Strömungsgeschwindigkeit der im Vorfeld der Versuche durchgeführten Nullmessung ohne Materialeinbau. Die Belastungsdauer beträgt für jede Belastungsstufe mindestens zwei Stunden, sodass kumulativ für jede Einbaulage eine Gesamtbelastungsdauer von 14 Stunden erzielt wurde.

Belastungsstufe	#	1	2	3	4	5	6	7
Fließgeschwindigkeit $u_m$	[m/s]	0.10	0.18	0.24	0.38	0.56	0.72	0.90
Wasserstand	[cm]	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45

Tabelle 1: Übersicht durchgeführter Belastungsstufen je Versuchsreihe

Für jede der drei Versuchsreihen wird eine andere Materialprobe des selben weitgestuften Materials verwendet (vergl. Tabelle 2). Die Materialproben unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der Sieblinie und bestätigen somit die Notwendigkeit mehrerer Versuchsreihe zur Erfassung der Materialkennwertunsicherheit im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Versuchsreihe	Materialkennwerte [mm]		
	D10	D50	D90
1	0.6	30	120
2	0.2	25	110
3	1.0	72	130

Tabelle 2: Materialkennwerte der Ausgangsmaterialien

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden je nach Versuchsreihe an verschiedenen Positionen über dem eingebauten Material gemessen. An jeder Position wird ein Geschwindigkeitsprofil über die Wassertiefe aus insgesamt acht Einzelmessungen ermittelt. Die Messzeit pro Messung beträgt 30 s, bei einer Samplingrate von 200 Hz.

Die Lasermessung der Sohltopografie erfolgt im Anschluss an die Belastung im trockenen Zustand. Das Messfeld wird in einem Raster aufgenommen, wobei der Abstand der Messpunkte quer zur Strömungsrichtung 5 mm und in Strömungsrichtung 0.5 mm beträgt. Für die Auswertung der Ergebnisse werden die Messpunkte auf ein 1 x 1 mm feines Gitter interpoliert.

Der Sandfang wird nach jeder Belastungsstufe entleert und die Sieblinie des aufgefangenen Materials erstellt.

### 3. VERSUCHSERGEBNISSE

#### 3.1 Qualitative Eindrücke zur Lagestabilität

Während der Versuchsdurchführung konnte mit zunehmender Belastung eine vermehrte Erosion der Feinstanteile und damit einhergehend eine Vergrößerung der Sohloberfläche beobachtet werden. Zudem konnten neben der globalen Ausprägung einer Abpflasterungsschicht auch lokale Abschattungs- und Expositionseffekte festgestellt werden. Es konnten Bereiche, insbesondere im Strömungsschatten größerer Steine, identifiziert werden in denen sich Feinstmaterial ansammelte und größere Steine beobachtet werden, die infolge ihrer exponierten Lage umgelagert wurden.

Diese Beobachtungen weisen auf die beginnende Ausbildung einer für Mischsohlen unter Strömungsbelastung charakteristischen Deckschicht hin, die beeinflussend auf die Lagestabilität der Sohle wirkt und daher bei der Versuchsauswertung berücksichtigt werden muss.

Insgesamt konnte über die Versuchszeit hinweg optisch keine Zerstörung oder Aufreißen der Sohldecke beobachtet werden. Offensichtlich zeichnen sich die eigestellten Belastungen (bis  $u_{\max} = 0.90$  m/s) und die jeweilige Belastungseinwirkungsdauer (bis zu 14 h) als nicht hinreichend kritische Einwirkungen aus, um den Zustand der maximalen Bettstabilität und die Belastungsgrenze des Materials zu erreichen und folglich ein Versagen der Sohle herbeizuführen. Die tatsächliche Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Sohle ist definitiv größer als unter den zuvor angeführten Laborrandbedingungen ermittelt werden kann.

#### 3.2 Quantitative Ergebnisse und Auswertung

Durch die Lasermessung konnte eine sehr detaillierte Abbildung der Sohltopografie erzielt werden. Anhand dieser Laserdaten konnte die Entwicklung spezifischer Erosions- und Akkumulationsbereiche mit zunehmender Strömungsbelastung verfolgt sowie die

Volumenmengen des umgelagerten Materials bestimmt werden. Davon ausgehend ergab sich ein mittlerer kumulierter Gesamtabtrag für alle Versuchsreihen von 2.7 mm bezogen auf die abgetastete Oberfläche.

Mittels des eingebauten Sandfanges konnten sowohl die erodierten Transportmengen abgeschätzt als auch die Korngrößenverteilung des transportierten Materials ermittelt werden. Für alle Versuchsreihen konnte eine kontinuierliche Zunahme des erodierten Korngrößendurchmessers mit steigender Belastung festgestellt werden. Demzufolge werden mit steigender Strömungsgeschwindigkeit größere Kornfraktionen aus der Mischsohle erodiert. Insgesamt wurde mit dem Sandfang eine mittlere Gesamtmasse von 655 g /m<sup>2</sup> aufgefangen.

Weiterhin wurden ausgehend von den lokalen Geschwindigkeitsmessungen die maßgeblichen Sohlschubspannungen bestimmt. Der Schubspannungsberechnung lag die Annahme einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung im sohnahen Bereich zu Grunde. Die zur Berechnung der Schubspannung notwendige lokale Rauheitshöhe wurde aus der Steigung des gemessenen Geschwindigkeitsprofils bestimmt.

Zur Bewertung der Schubspannungen im Hinblick auf die Lagestabilität des Materials werden die ermittelten Schubspannungen den D<sub>50</sub> Korngrößen des Sandfangmaterials gegenübergestellt und mit dem gängigen Bemessungsansatz nach Shields (1936) sowie dem Ansatz nach Egiazaroff (1965) verglichen.

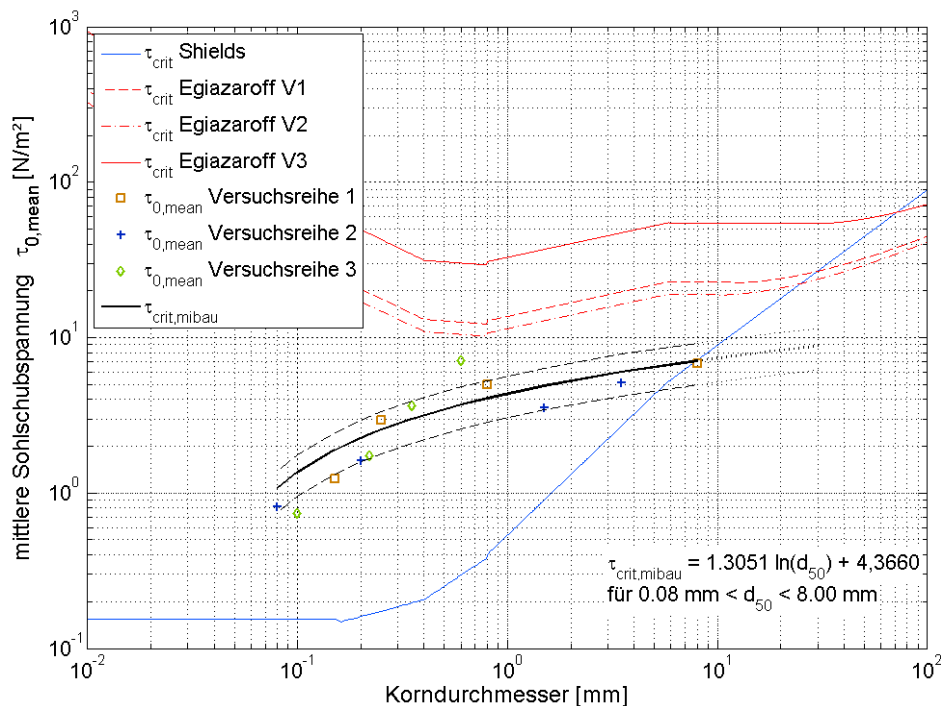


Abbildung 2: Vergleich kritische Schubspannungen für Sandfang D<sub>50</sub>

Den Ergebnissen in Abbildung 2 ist zu entnehmen, dass die ermittelten Schubspannungen für die jeweiligen Korngrößen ( $d = 0.08$  bis  $3.50$  mm) deutlich über der kritischen Schubspannung nach Shields liegen. Demnach müssen für bestimmte Kornfraktionen des untersuchten Materials höhere Schubspannungen aufgebracht werden, um sie zu bewegen. Damit ist die Lagestabilität für diesen spezifischen Bereich der Kornfraktionen ( $d = 0.08$  bis  $3.50$  mm) innerhalb der Mischsohle offenkundig und anhand der Laboruntersuchungen nachweislich größer als durch den Shields-Ansatz angenommen.

Die Erhöhung der kritischen Sohlschubspannungen gegenüber dem Shields-Ansatz kann quantitativ mit folgendem Zusammenhang beschrieben werden:

$$\tau_{crit,mibau} = \zeta * \tau_{crit,Shields} \quad (1)$$

Aus den Messdaten lassen sich für den Erhöhungsfaktor  $\zeta$  in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des  $D_{50}$ -Korns die Funktionen:

$$\zeta = \begin{cases} 42.4319 d_{50}^{0.8659} & \text{für } d_{50} < 0.6 \text{ mm} \\ 9.5448 d_{50}^{-1.2095} & \text{für } d_{50} > 0.6 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

ableiten. Im Mittel kann für den betrachteten Korngrößenbereich ( $d = 0.08 \text{ mm}$  bis  $8.00 \text{ mm}$ ) eine Erhöhung der kritischen Sohlschubspannung um einen Erhöhungsfaktor von  $\zeta = 9.76$  gegenüber den kritischen Schubspannungen nach Shields festgehalten werden.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

In der Umlaufrinne des Franzius-Instituts wurden hydraulische Modellversuche durchgeführt mit dem Ziel eine Bewertung der Lagestabilität eines weitgestuften Steingemisches unter Strömungsbelastung vorzunehmen.

Die Ergebnisse der Modellversuche bescheinigen dem Material eine gegenüber dem Shields-Ansatz erhöhte Stabilität einzelner Kornfraktionen ( $0.08 \text{ mm}$  bis  $3.5 \text{ mm}$ ) bei stationärer Strömungsbelastung. Im Mittel kann für den betrachteten Korngrößenbereich eine Erhöhung der kritischen Sohlschubspannung um einen Erhöhungsfaktor von  $\zeta = 9.76$  gegenüber den kritischen Schubspannungen nach Shields festgehalten werden.

Diese Aussagen zur Lagestabilität gelten nur für die erwähnten spezifischen Kornfraktionen innerhalb des sehr weitgestuften Mischmaterials. Insbesondere für die gröberen Kornfraktionen müssen diese Ergebnisse durch weiterführende Untersuchungen oder Feldstudien mit weitaus höheren Belastungen ( $u_m \gg 0.9 \text{ m/s}$ ) ergänzt und bestätigt werden.

Mit den folgenden Modellversuchen der dritten Untersuchungsphase im Großen Wellenkanal soll das Material hinsichtlich seiner Lagestabilität unter Wellenbelastung als auch hinsichtlich seiner Eignung als Kolkschutz für maritime Strukturen untersucht werden.

#### 5. SCHRIFTTUM

DITTRICH, A.: Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fliessgewässer. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe. Habilitationsschrift, Heft 198, 1998

EGIAZAROFF, I. V.: Calculation of nonuniform sediment concentration. Journal of the Hydraulics Division. Proc. ASCE, No, HY4, 1965

SHIELDS: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Berlin: Eigenverlag der Preuß. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936