



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
KARLSRUHE · HAMBURG · ILMENAU

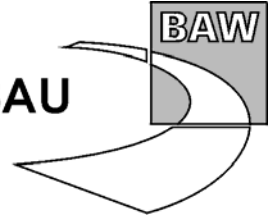
BAW



GUTACHTEN

**Anpassung der Oststrecke
des Nord-Ostsee-Kanals**

**Erosionsverhalten
von gebaggertem Geschiebemergel
aus der NOK-Oststrecke**



**Anpassung der Oststrecke
des Nord-Ostsee-Kanals
Erosionsverhalten von gebaggertem
Geschiebemergel aus der NOK-Oststrecke**

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau
Projektgruppe Anpassung Oststrecke NOK
Schleuseninsel 2, 24159 Kiel

Auftrag vom: 11.07.2008, Az.: -

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39550210106 / A39550110149

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referate: Ästuarsysteme I (K2), Geotechnik Nord (K1)
Bearbeiter: Dr.-Ing. K. Uliczka
Dipl.-Geol. A. Heeling

Hamburg, im April 2009

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, wurde vom WSA Kiel-Holtenau, Projektgruppe Anpassung Oststrecke NOK, beauftragt, das Erosionsverhalten des Baggerguts aus der Anpassung der NOK-Oststrecke im Hinblick auf mögliche Ablagerungsstrategien zu untersuchen.

Die Untersuchungen mit dem gebaggerten Geschiebemergel in der Umlaufrinne der BAW haben gezeigt, dass bis zu einer sohnnahen Strömungsgeschwindigkeit von maximal rund $v = 0,5$ m/s von einer ausreichenden Erosionsstabilität ausgegangen werden kann.

Eine Verwendung des gebaggerten Geschiebemergels als beständig wirkendes Abdeckmaterial z.B. von Sandböden in Tideästuaren kann nur in einem Strömungsregime mit sohnnahen Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 0,5 m/s empfohlen werden.

Aufgrund der geringen Erosionsraten der in der Umlaufrinne eingebauten Geschiebemergelstrecke bei höheren sohnnahen Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa $v \approx 0,7$ m/s kann die mögliche bautechnische Verwendung des Geschiebemergels z.B. als Abdeckmaterial ggf. vertreten werden, wenn durch zusätzliche Feldversuche über mindestens eine Schlechtwetterperiode hinaus das Material unter den örtlichen instationären Strömungs- und Wellenbelastungen mit hochgenauen Sonden vermessen und die Lagestabilität des Geschiebemergels nachgewiesen wird.



Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen	2
3	Untersuchungskonzept.....	2
4	Literaturrecherche	3
5	Versuchseinrichtung	6
5.1	Versuchsmaterial	6
5.2	Umlaufrinne.....	7
5.3	Herstellung der Geschiebemergel-Probekörper	9
6	Geotechnische und wasserbauliche Untersuchungen	10
6.1	Geotechnische Untersuchungen.....	10
6.2	Wasserbauliche Untersuchungen	16
7	Ergebnisse	18
7.1	Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen	18
7.1.1	Klassifikation des Ausgangsmaterials	18
7.1.1.1	Repräsentativität des Versuchsmaterials	18
7.1.1.2	Abschätzung der Erosionsstabilität des Geschiebemergels auf Grundlage von Klassifikationsversuchen	23
7.1.2	Veränderung des Geschiebemergels im Wasser	25
7.1.2.1	Probekörper im Stillwasser.....	25
7.1.2.2	Veränderung der geotechnischen Eigenschaften der Probekörper in der Umlaufrinne	27
7.1.3	Vorher/Nachher-Vergleich	32
7.2	Ergebnisse der wasserbaulichen Untersuchungen.....	35
7.2.1	Veränderung der Geschiebemergeloberfläche in der Umlaufrinne	35
7.2.2	Schichtdickenverlust in Abhängigkeit von der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit	39
8	Bewertung der Ergebnisse	41
8.1	Ablagerung des Baggerguts in der Ostsee	42
8.1.1	Hydrologische Randbedingungen des Verklappungsgebietes.....	42
8.1.2	Bewertung der Lagestabilität im Verklappungsgebiet	43
8.2	Eignung des Baggerguts zur weiteren Verwendung.....	44
8.3	Empfehlungen zum weiteren Vorgehen.....	45
9	Literaturverzeichnis.....	47



Bildverzeichnis

Seite

Bild 1: Untersuchungskonzept zur Materialstabilität von gebaggertem Geschiebemergel aus der NOK-Oststrecke sowie mögliche weitere Untersuchungen	3
Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Mergelklappstelle im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2004	4
Bild 3: Baggerung des Geschiebemergels	6
Bild 4: Anlieferung der Geschiebemergel-Container bei der BAW	6
Bild 5: Blick auf die Untersuchungstrecke in der Umlaufrinne sowie ausgerüsteter Messwagen vor einer der Sichtscheiben	7
Bild 6: Messkonfiguration und Einbauprofil des gebaggerten Geschiebemergels in der Umlaufrinne der BAW-DH (schematisch).....	8
Bild 7: Herstellung der Geschiebemergel-Probekörper	9
Bild 8: Einbau der Probekörper in die Umlaufrinne	10
Bild 9: Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit mit dem Taschenpenetrometer.....	11
Bild 10: Bestimmung der Zerfallsziffer nach ENDELL	12
Bild 11: Bestimmung der Erosionsfestigkeit im Pinhole-Test	12
Bild 12: Entnahme der Container-Proben.....	12
Bild 13: Bergung und Untersuchung der P-Proben	13
Bild 14: Untersuchung der Eindringtiefe des Wassers in die Geschiebemergel-Probekörper im Fluoreszenz-Versuch	14
Bild 15: Probekörper im Fluoreszenz-Versuch	15
Bild 16: T-Proben.....	15
Bild 17: Prinzipskizze der eingebauten Geschiebemergelstrecke mit Lage der analysierten Fläche	17
Bild 18: Körnungsband Geschiebemergel	18
Bild 19: Verteilung der Tongehalte im Geschiebemergel in der NOK-Oststrecke	19
Bild 20: Undränierete Scherfestigkeit Geschiebemergel	19
Bild 21: Wassergehalt Geschiebemergel	20
Bild 22: Plastizitätsdiagramm Geschiebemergel	21
Bild 23: Wasseraufnahmefähigkeit Geschiebemergel.....	21
Bild 24: Kalkgehalt Geschiebemergel.....	22
Bild 25: Ton/Schluff-Verhältnis des Geschiebemergels	23
Bild 26: NOK-Geschiebemergel im Pinhole-Test	24
Bild 27: T-Probe im Stillwasser.....	25
Bild 28: Abnahme der undränierten Scherfestigkeit im Stillwasser nach 100 Tagen	26
Bild 29: Anzahl der Teilstücke nach 100 Tagen und relative Verringerung der undränierten Scherfestigkeit der T-Proben mit und ohne Netz	27
Bild 30: Körnungslinien einer P-Probe vor und nach dem Versuch in der Umlaufrinne	28
Bild 31: Absolute und relative Veränderung der undränierten Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der maximal aufgebrachtten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit.....	28



Bild 32: Absolute und relative Veränderung des Wassergehaltes in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit	29
Bild 33: Absolute und relative Veränderung des Kalkgehaltes in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit	29
Bild 34: Absolute und relative Abnahme des Probenkörper-Gewichtes in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit	30
Bild 35: Zerfall der Probekörper in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit.....	30
Bild 36: Zerfallparameter der Probenkörper in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s	31
Bild 37: Zerfallparameter der Probenkörper in Abhängigkeit von der undrinierten Scherfestigkeit bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s	31
Bild 38: Zerfallparameter der Probenkörper in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s	31
Bild 39: Zerfallparameter der Probenkörper in Abhängigkeit vom Kalkgehalt bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s	32
Bild 40: Vergleich der Körnungsbänder von Rinnenresidual- und Ausgangsmaterial.....	33
Bild 41: Vergleich der Kalkgehalte von Rinnenresidual- und Ausgangsmaterial.....	33
Bild 42: Vergleich der Wassergehalte von Rinnenresidual- und Ausgangsmaterial	34
Bild 43: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Ausgangs- und Rinnenresidualmaterial	33
Bild 44: Mittiges Längsprofil der Geschiebemergelstrecke nach Einbau und dasselbe Profil nach einer Strömungsbelastung bis zu $v = 0,67$ m/s	36
Bild 45: Mittiges Längsprofil der Geschiebemergelstrecke nach Einbau und dasselbe Profil nach einer Strömungsbelastung bis zu $v = 1,35$ m/s	37
Bild 46: Mittiges Längsprofil der Geschiebemergelstrecke nach Einbau und dasselbe Profil nach einer Strömungsbelastung bis zu $v = 1,71$ m/s	38
Bild 47: Mittlerer Schichtdickenverlust als Summe aller Einzelversuche auf der Auswertefläche in [cm/6h].....	39
Bild 48: Differenzen des mittleren Schichtdickenverlusts jedes Einzelversuchs auf der Auswertefläche in [cm/6 h].....	40
Bild 49: Mittlerer Schichtdickenverlust in [cm] in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit und der Belastungsdauer von 6 Stunden	40
Bild 50: Bodennahe Strömungen in der westlichen Ostsee von Januar bis Dezember (stündliche Mittelwerte) zwischen 1982 und 1986 (aus LANGE et al., 1991).....	43
Bild 51: Beispiel für die Ermittlung einer Erosionsrate über ca. 5 Jahre im Bereich des Elbeästuars auf Basis der Rinnenversuche und berechneter Tideströmungen.....	45



Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Versuchsablauf, jeweilige Strömungsbelastung und -dauer	16
Tabelle 2: Unter Strömung erosionsstabilisierend und erosionsdestabilisierend wirkende Parameter für den NOK-Geschiebemergel	32

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1:** Anpassung der Oststrecke des NOK, Erosionsverhalten von gebaggertem Geschiebemergel in der Umlaufrinne der BAW-DH, Messbericht, BAW-Nr. A39550210106, Hamburg, Januar 2009
- Anlage 2:** Ergebnisse der geotechnischen Laborversuche
- 2.1 Ausgangsmaterial aus den Containern (C-Proben)
 - 2.2 Probekörper in der Umlaufrinne (P-Proben)
 - 2.2.1 Tabellarische Zusammenstellung
 - 2.2.2 Körnungslinien
 - 2.3 Rinnenresidualmaterial (R-Proben)
 - 2.4 Fluoreszenzversuche (F-Proben)
 - 2.5 Testkörper im Stillwasser (T-Proben)



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Aufgrund der Zunahme des Schiffsverkehrs und der Veränderung der Flottenstruktur haben sich die Kurven und die Querschnittsbreiten der Oststrecke des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) in zunehmendem Maße zum Engpass für größere Schiffe entwickelt. Die vorgesehene Anpassung des NOKs durch das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Kiel-Holtenau beinhaltet die Aufweitung des Kanalprofils von 44 m auf 70 m Sohlbreite sowie eine Anpassung der Kurvenradien auf 3000 m. Bei den erforderlichen Baggerungen fallen insgesamt 8,5 Millionen Kubikmeter Boden an, bei dem es sich überwiegend im Wesentlichen um Geschiebemergel handelt (WSA KIEL-HOLTENAU, 2009).

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg (BAW-DH), wurde mit Schreiben vom 11.07.2008 vom WSA Kiel-Holtenau, Projektgruppe Anpassung Oststrecke NOK, beauftragt, das Erosionsverhalten des Baggerguts im Hinblick auf mögliche Ablagerungsstrategien zu untersuchen.

Dies beinhaltetete

- die Durchführung von Erosionsversuchen in den Strömungsrinnen der BAW-DH in Hamburg, sowie
- die Beurteilung der Ergebnisse in Hinblick auf die Verbringung des Baggerguts in der Ostsee in Form einer Gutachterlichen Stellungnahme zum Erosionsverhalten unter Berücksichtigung
 - des Baugrundgutachtens für die NOK-Oststrecke des Ingenieurbüros PHW/Hamburg und
 - der Strömungsverhältnisse in der Ostsee,

Begleitet wurden die wasserbaulichen Untersuchungen zum Erosionsverhalten von geotechnischen Versuchsreihen sowie von Klassifikationsversuchen im geotechnischen Labor der BAW-DH.

Die BAW-DH bearbeitete diese Fragestellungen in Kooperation der Referate Geotechnik Nord (K1) und Ästuarsysteme I (K2) unter Federführung von K2.



2 Unterlagen

- [U1] Ausbau der Oststrecke des NOK – Strömungsdaten Kieler Bucht, WSA Kiel-Holtenau per email vom 20.10.2008
- [U2] Ergebnisse der im Rahmen der Baugrunderkundung für die Anpassung der Oststrecke des Nord-Ostsee-Kanals durchgeführten Klassifikationsversuche, Planungsgesellschaft für Hafensflächenrecycling und Wasserbau mbH (PHW), Hamburg, per email vom 26.09.2008

3 Untersuchungskonzept

Von April bis Juni 2008 wurde in der BAW-DH im Rahmen wasserbaulicher und geotechnischer Vorversuche die grundsätzliche Erosionsstabilität des NOK-Geschiebemergels untersucht und die Ergebnisse dem WSA Kiel-Holtenau im Rahmen einer Präsentation im Juli 2008 vorgestellt:

- In der kleinen Strömungsrinne (Länge 30 m, Breite 0,5 m, Tiefe 0,5 m) ist der Geschiebemergel (in Form flächig eingebauter, erbohrter Sonderproben) bis zu Strömungsgeschwindigkeiten von etwa $v = 0,7$ m/s erosionsstabil.
- Eine getrennte Betrachtung von „fetterem“ (Tongehalt ≥ 15 %) und „magerem“ (Tongehalt ≤ 11 %) Geschiebemergel – so wie es in den Vorversuchen noch praktiziert wurde – ist weder erforderlich noch sinnvoll, da der magere Geschiebemergel nur untergeordnet und lokal begrenzt auftritt.

Damit wurden für weitergehende Aussagen Untersuchungen zum Erosionsverhalten des Geschiebemergels hinsichtlich der Kurzzeitstabilität bei hohen, stationären Strömungsgeschwindigkeiten erforderlich (Bild 1), die im September 2008 durchgeführt wurden:

- In der Umlaufrinne der BAW-DH (Länge 80 m, Breite 1,5 m, Tiefe 1,3 m) wurde gebaggertem Geschiebemergel in einer Mächtigkeit von ca. 0,5 m eingebaut, tiefen gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten bis maximal $v \approx 1,7$ m/s ausgesetzt und dabei kontinuierlich der belastungsabhängige Schichtdickenverlust (Erosionsrate) erfasst.
- Diese wasserbaulichen Versuche wurden begleitet von geotechnischen Untersuchungen am Ausgangsmaterial, an täglich aus der Umlaufrinne entnommenen Bodenproben und am Rinnenresidualmaterial.

Die Ergebnisse dieser wasserbaulichen und geotechnischen Versuche werden im vorliegenden Gutachten vorgestellt.

Feldversuche zur Untersuchung der Langzeitstabilität bei instationären Strömungsverhältnissen und Wellenbelastung (Bild 1), die vor dem Hintergrund einer bautechnischen Verwendung des Materials ursprünglich in Betracht gezogen worden waren, sind hinsichtlich der vorgesehenen Verbringung auf Ostsee-Klappstellen nach den aktuellen Ergebnissen nicht erforderlich.

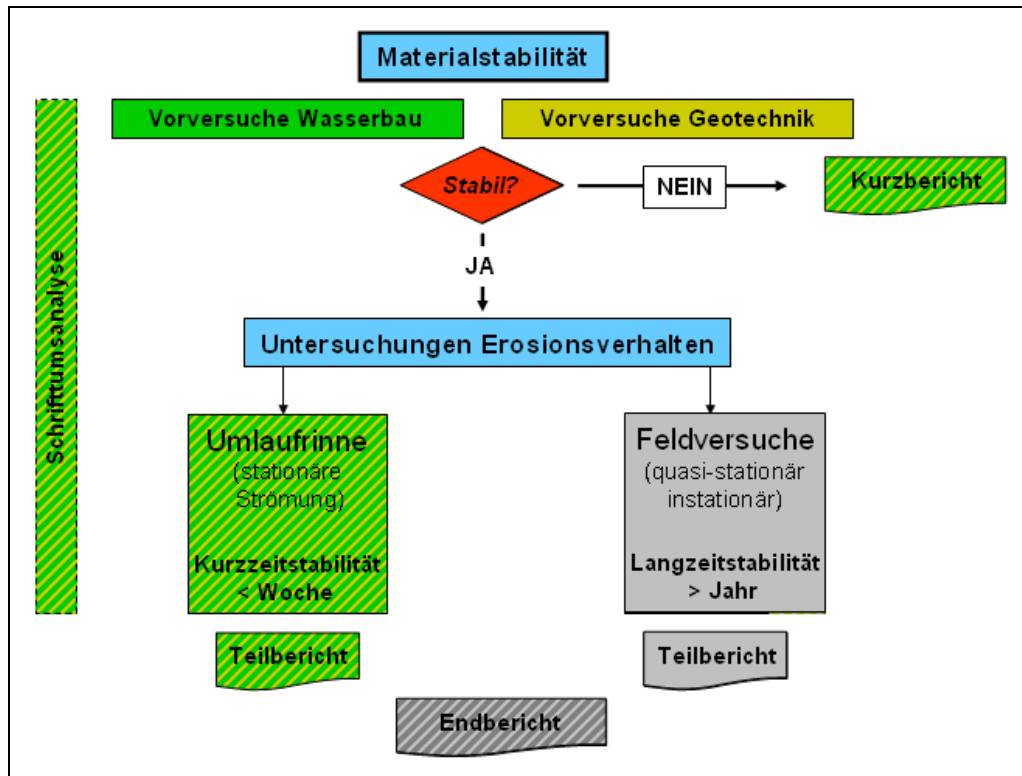


Bild 1: Untersuchungskonzept zur Materialstabilität von gebaggertem Geschiebemergel aus der NOK-Oststrecke sowie mögliche weitere Untersuchungen

4 Literaturrecherche

Das Erosionsverhalten bindiger Sedimente unter Strömungsangriff wurde seit der Mitte des letzten Jahrhunderts vorwiegend in Versuchserinnen unter Verwendung von „gewachsenem“ und/oder homogenem, bzw. homogenisiertem Material untersucht (u.a. RAUDKIVI, 1976, 1982, 1998; WINTERWERP / VAN KESTEREN, 2004; SCHWEIM, 2005). Andere Untersuchungen befassten sich mit dem Erosionsbeginn bzw. der Erosionsrate natürlich anstehender bindiger Böden in Abhängigkeit z.B. vom Porenvolumen und vom Wassergehalt (u.a. GARBRECHT, 1961; ZANKE, 1982; SHUGAR et al., 2007).

Gebrochenes, bindiges Material wie z.B. gebaggertem Geschiebemergel war nicht Gegenstand der zitierten Untersuchungen, so dass die Ergebnisse auf die aktuelle Fragestellung nicht übertragbar sind und Aussagen zur Erosionsstabilität nur tendenziell ableitbar sind.

Im Rahmen des Projektes DYNAS (**D**ynamik **n**atürlicher und **a**nthropogener **S**edimentation) des LEIBNIZ-INSTITUTS FÜR OSTSEEFORSCHUNG WARNEMÜNDE (DYNAS, 2005) wurde das in-situ-Verhalten von in der Ostsee verklapptem Baggergut aus dem Mündungsbereich des Seekanals Warnemünde u.a. hinsichtlich seiner Lagestabilität untersucht.

Das jeweils separat verklappte Material bestand aus ca. 2900 m³ festem Mergel und ca. 2500 m³ Mischboden. Der in vier Einzelchargen in einer Wassertiefe von -18 mNN bis -19 mNN verklappte Mergel setzte sich aus sedimentierten, bis zu einem Meter großen Brocken zusammen.

Das interdisziplinäre Monitoring auf der Klappstelle erfolgte zwischen 2001 und 2004. Beispielhaft sind Sidescan-Sonar-Aufnahmen der Klappstelle westlich von Warnemünde zwischen den Jahren 2000 und 2004 aufgeführt (Bild 2; DYNAS, 2005).

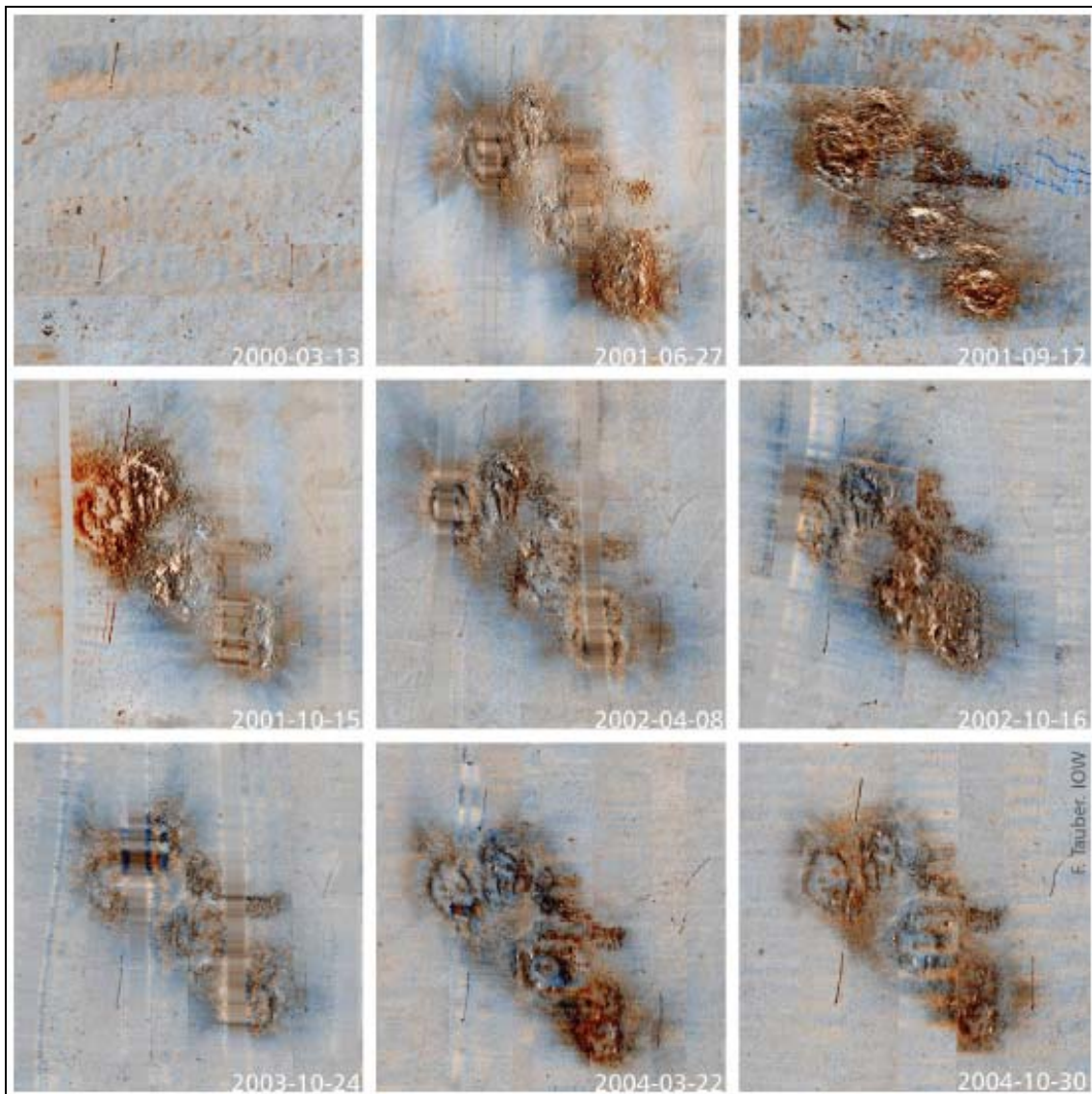


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Mergelklappstelle im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2004 (Sidescan-Sonar-Aufnahmen aus DYNAS, 2005).



Der Vergleich hochauflösender Fächerecholotmessungen vom August 2001 und vom Oktober 2003 ergab für die Mergelklappstelle Differenzen um $\pm 0,2$ m, wobei 95 % der Veränderungen bei $\pm 0,05$ m lagen. Nach rund zwei Jahren hatten sich die exponierten Strukturen um etwa 0,1 m abgeflacht, und die tiefer liegenden Bereiche der Klappstelle waren leicht erhöht. Unter Ausschluss biologischer Faktoren und von Extremwetterereignissen ist bei einem exponentiellen Erosionsverlauf von einer vollständigen Auflösung der sichtbaren Strukturen der Mergelklappstelle nach etwa 250 Jahren auszugehen (STOCKMANN, 2005).

Hinsichtlich des sohnnahen Sedimenttransports stellte DIESING (2003) im Rahmen einer Arbeit zur Regeneration von Materialentnahmestellen in der südwestlichen Ostsee fest, dass ab einer Grenztiefe („closure depth“ oder „aktive Tiefe“) seewärts des unteren Vorstrands nur noch seegangsbedingte Umlagerungen auftreten, die an Starkwind- oder Sturmereignisse geknüpft sind, und die somit episodischen Charakter haben.

Verschiedene Ansätze zur Berechnung dieser Grenztiefe wurden von BOHLING (2003) auf die hydrodynamischen und sedimentologischen Bedingungen in der Mecklenburger Bucht angewandt: Für das dort anstehende Sohlmaterial ist davon auszugehen, dass bei Wassertiefen > 20 m (hier: kohäsive Schlicke) und mittleren Strömungs- und Wellensituationen kein nennenswertes Risiko (< 1 %) bzgl. strömungs- und seegangsbedingter Erosion besteht. Selbst bei maximalen Wellen- und Strömungsgeschwindigkeiten (Sturmereignissen) wird in Gebieten mit einer Wassertiefe über 23 m der kritische Erosionsschwellenwert nicht überschritten (Erosionsrisiko < 10 %). Aussagen zum Erosionsverhalten des verklappten Geschiebemergels konnten jedoch aufgrund zu geringer Datenbasis von BOHLING (2003) nicht gemacht werden. Dazu ist auf die Ergebnisse der oben angeführten Vermessungsdaten von STOCKMANN (2005) zurückzugreifen.

Da das in der Mecklenburger Bucht verklappte Material erheblich fester ist und zudem mittels Eimerkettenbagger gewonnen wurde, sind die DYNAS-Untersuchungsergebnisse nicht auf den Geschiebemergel aus der NOK-Oststrecke übertragbar. Aus diesem Grunde waren eigenständige Untersuchungen zum Erosionsverhalten des NOK-Geschiebemergels erforderlich.

5 Versuchseinrichtung

5.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial zum Einbau in der Umlaufrinne wurden am 20. August 2008 an der Nordseite des NOKs – unmittelbar östlich der Fähre Landwehr etwa bei NOK-km 86,9 (s.a. Bild 19) – drei Container mit Geschiebemergel aus der Uferböschung entnommen (Bild 3) und am folgenden Tag bei der BAW-DH angeliefert (Bild 4). Der Ausbau des Geschiebemergels erfolgte mittels eines Mobilbaggers mit einer ca. 0,8 m³ Schaufel.



Bild 3: Baggerung des Geschiebemergels



Bild 4: Anlieferung der Geschiebemergel-Container bei der BAW

5.2 Umlaufrinne

In der Versuchshalle I der BAW-DH steht für die vorgesehenen Untersuchungen eine Umlaufrinne mit einem Gesamtvolumen von ca. 360 m³ zur Verfügung. Die Umlauflänge beträgt ca. 200 m, wovon eine Untersuchungsstrecke auf ca. 80 m als gerades Rechteckgerinne mit einem Querschnitt von 1,5 m x 1,3 m ausgebildet ist (Bild 5, links). Mit Hilfe eines Bugstrahlruders kann im unverbauten Querschnitt eine Strömung mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1,5 m/s erzeugt werden. Für die videometrische Dokumentation und die Versuchsbeobachtung sind zwei Sichtscheiben von je 6 m Länge eingelassen.



Bild 5: Blick auf die Untersuchungstrecke in der Umlaufrinne (links) sowie ausgerüsteter Messwagen vor einer der Sichtscheiben

Als Geräteträgersystem zur Versuchsbeobachtung steht in der Umlaufrinne ein Messwagen zur Verfügung, der mit Messbrücken und -adaptern ausgestattet ist, so dass unterschiedliche Sensoreinheiten flexibel eingebaut und exakt positioniert werden können (Bild 5, rechts, und Bild 6). Zur Erfassung des Erosionsverhaltens des Geschiebemergels wurden folgende Messgerätesysteme eingesetzt:

- Akustisches Pegelmesssystem zur Erfassung von Wasserspiegelauslenkungen.
- Ultraschall-Sensor zum Aufmessen der Unterwasser-Sohlstruktur.
- Acoustic-Doppler-Velocitymeter (ADV) zur Erfassung punktueller Geschwindigkeiten.
- Ultraschallsonde DOP1000 zur Erfassung des vertikalen, sohnnahen eindimensionalen Strömungsprofils.
- PC-gestütztes Antriebs- und Positionierungssystem zur Durchführung von stationären und instationären Messungen.
- Videokamera, Webcam etc. zur Dokumentation der Versuche.

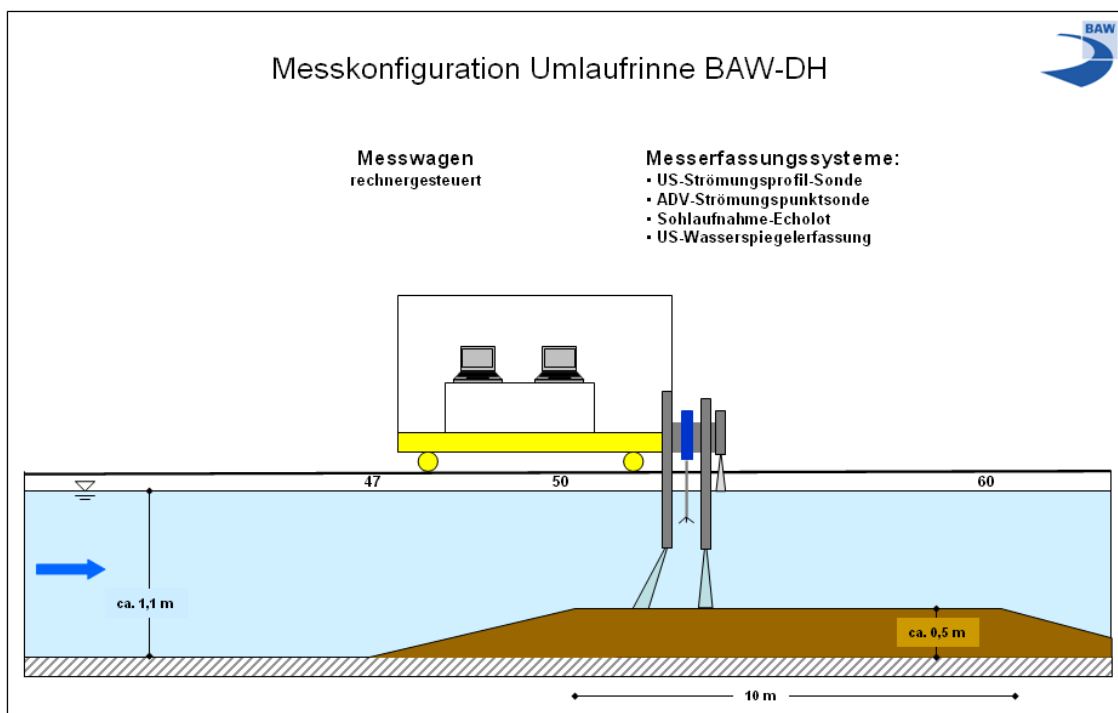


Bild 6: Messkonfiguration und Einbauprofil des gebaggerten Geschiebemergels in der Umlaufrinne der BAW-DH (schematisch)

Die Dimensionierung der Umlaufrinne erlaubt die Durchführung großmaßstäblicher Untersuchungen, so dass auf einer etwa 0,1 m starken Sandsohle (f_{S,ms^*} , $d_{10} = 0,091$ mm; $d_{60} = 0,202$ mm, $C_U = 2,23$) in der Untersuchungsstrecke zwischen den Rinnenpositionen 50 m und 60 m eine etwa 0,5 m mächtige Geschiebemergelstrecke eingebaut wurde (Bild 6). Die Übergänge von der Geschiebemergelstrecke zur Sandsohle wurden jeweils mit einer Neigung von 1:6, ebenfalls mit Geschiebemergel, ausgeführt.

Eine detaillierte Beschreibung der Umlaufrinne, der verwendeten Messgeräte und der eingesetzten Analyseverfahren sowie Einzelheiten zum Einbau des Geschiebemergels sind dem Messbericht (Anlage 1) zu entnehmen.

5.3 Herstellung der Geschiebemergel-Probekörper

Die wasserbaulichen Untersuchungen in der Umlaufrinne sollten durch eine kontinuierliche Beprobung des eingebauten Geschiebemergels begleitet werden, um so Aussagen über die Veränderung der geotechnischen Eigenschaften des Geschiebemergels in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit treffen zu können. Um die Ergebnisse der wasserbaulichen Versuche nicht durch die Entnahme des Probematerials zu verfälschen und um eine höhere Vergleichbarkeit der geotechnischen Untersuchungsergebnisse sicher zu stellen, wurden aus geeigneten Geschiebemergelbrocken (Bild 7, oben links) mittels einer Schablone insgesamt 30 Kugeln mit einem Durchmesser von 15 cm hergestellt (Bild 7, oben rechts) und - mit einer Probennummer beschriftet - in stabile Netze verpackt (Bild 7, unten).

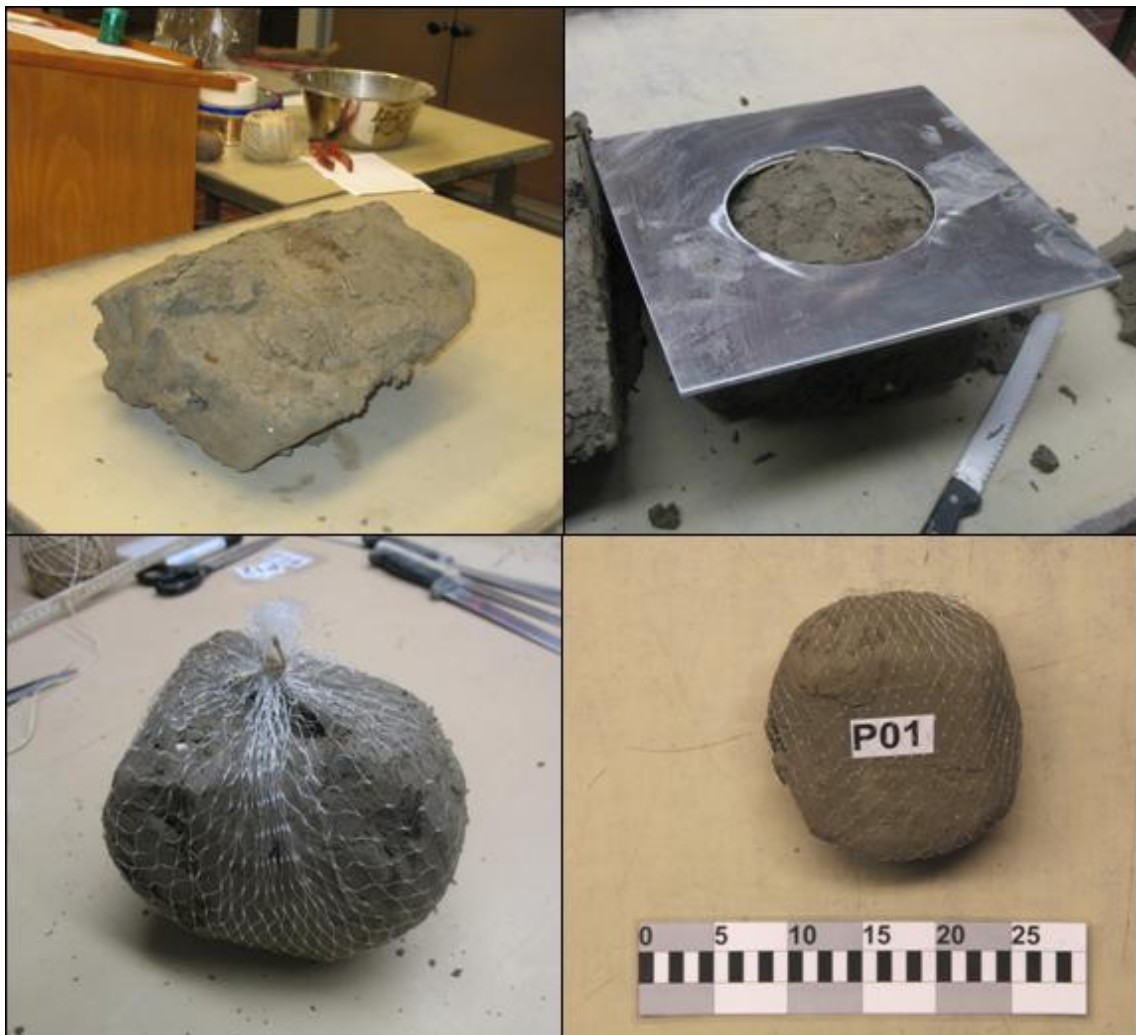


Bild 7: Herstellung der Geschiebemergel-Probekörper

Diese Versuchskörper wurden, durch Erdanker gesichert, seitlich in die Geschiebemergelfläche der Umlaufrinne eingebaut. Eine an den Probekörpern befestigte Schnur ermöglichte später deren gezielte Bergung (Bild 8).



Bild 8: Einbau der Probekörper in die Umlaufrinne

6 Geotechnische und wasserbauliche Untersuchungen

6.1 Geotechnische Untersuchungen

Zur Beurteilung der geotechnischen Eigenschaften des NOK-Geschiebemergels wurden verschiedene Probentypen entnommen und untersucht:

- Das Ausgangsmaterial wurde mittels von insgesamt zehn Proben aus den angelieferten Containern (**C-Proben**) untersucht.
- Zum Einbau in die Umlaufrinne und zur Beurteilung der Veränderung der geotechnischen Eigenschaften im Verlaufe des Rinnenversuches wurden 30 Probekörper (**P-Proben**) hergestellt (s. Kap. 5.3).
- Nach dem Umlaufrinnenversuch wurden zehn Proben aus dem Residualmaterial (**R-Proben**) entnommen.
- Zur Untersuchung der Eindringtiefe des Wassers in den Geschiebemergel, d.h. zur Bestimmung der Mächtigkeit der Aufweichungszone, wurden an zehn sog. **F-Proben** Fluoreszenzversuche durchgeführt.
- Der Zerfallsprozess des Geschiebemergels im Stillwasser sowie die Fragestellung, ob das bei den P-Proben verwendete Probennetz die Erosionsstabilität beeinflusst, wurde an insgesamt 20 Testkörpern (**T-Proben**) – je zehn mit und ohne Netz – untersucht.

Nachfolgend werden die an den einzelnen Probentypen durchgeführten geotechnischen Untersuchungen beschrieben:

Folgende geotechnische Klassifikationsversuche wurden am **Ausgangsmaterial** – dem in drei Containern angelieferten, gebaggertem Geschiebemergel – an insgesamt zehn Bodenproben („**C-Probren**“) durchgeführt:

- | | |
|---|-------------------------------|
| • Korngrößenverteilung | nach DIN 18123 |
| • natürlicher Wassergehalt w | nach DIN 18121 |
| • Fließgrenze w_l und Ausrollgrenze w_p | nach DIN 18122 bzw. BS 1377-2 |
| • Schrumpfgrenze w_s | nach DIN 18122 |
| • Wasseraufnahmevermögen w_a | nach DIN 18132 |
| • Kalkgehalt V_{Ca} | nach DIN 18129 |
| • Glühverlust V_{gl} | nach DIN 18128 |
| • Korndichte ρ_s | nach DIN 18124 |

Zusätzlich zu diesen genormten Laborversuchen wurden folgende Parameter bestimmt; die Versuche sind detailliert im BAW-Merkblatt „Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen (RPW, 2006) beschrieben:

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| • undränierete Scherfestigkeit c_u | mit dem Taschenpenetrometer |
| • Zerfallsziffer $Z(8)$ | nach ENDELL |
| • Erosionsfestigkeit | Pinhole-Test |

Das Taschenpenetrometer eignet sich als Schnelltest zur Bestimmung der undräniereten Scherfestigkeit c_u : das Penetrometer wird in den Boden eingedrückt, und über einen Schleppring wird die erforderliche Kraft an einer Messskala abgelesen (Bild 9).



Bild 9: Bestimmung der undräniereten Scherfestigkeit mit dem Taschenpenetrometer

Zur Bestimmung der Zerfallsziffer $Z(8)$ wird nach ENDELL ein Drahtkorb mit einer Bodenprobe in einen mit NOK- und/oder Elbwasser gefüllten Messzylinder gehängt und das Auftriebsgewicht zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen. Die Zerfallsziffer $Z(8)$ gibt die relative Abnahme des Auftriebsgewichtes nach acht Stunden wieder (Bild 10).



Bild 10: Bestimmung der Zerfallsziffer nach ENDELL

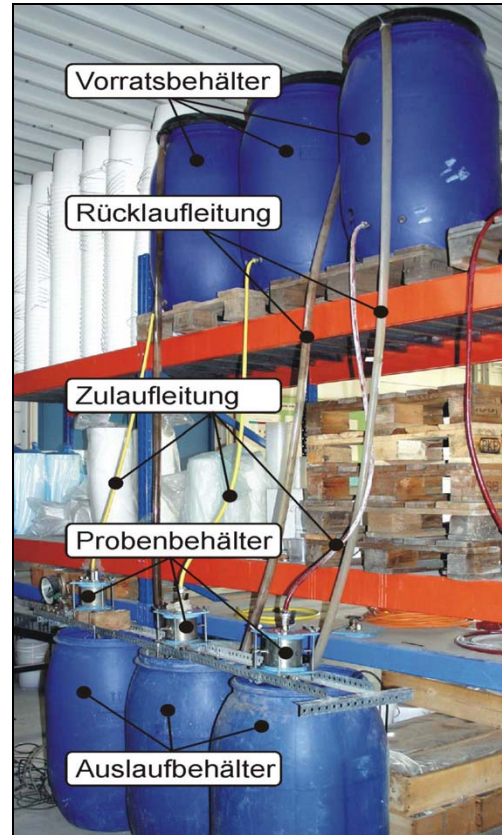


Bild 11: Bestimmung der Erosionsfestigkeit im Pinhole-Test

Im Pinehole-Test (Bild 11) strömt Wasser durch einen definiert in der Bodenprobe hergestellten Durchflusskanal. Nach einer vorgegebenen Zeit wird die Querschnittsveränderung des Durchflusskanals bewertet.

Mittels der Versuche an den C-Proben sollte beurteilt werden,

- ob das Versuchsmaterial für die gesamte NOK-Oststrecke repräsentativ ist (d.h. ob die Versuchsergebnisse mit denen des Ing.-Büros PHW [U2] übereinstimmen) und
- welches Verhalten des Geschiebemergels bzgl. der Erosionsstabilität – auch hinsichtlich alternativer Verbringungskonzepte – grundsätzlich zu erwarten ist.



Bild 12: Entnahme der Container-Proben

Untersucht wurden jeweils große Geschiebemergelbrocken (Bild 12), aus denen gleichzeitig Probekörper für Untersuchungen im Stillwasser (s.u.) hergestellt wurden. Die Ergebnisse der Klassifikationsversuche an den C-Proben sind Anlage 2.1 zu entnehmen.

Um die Veränderung der geotechnischen Eigenschaften unter Strömungsbelastung beurteilen zu können, wurde täglich mindestens ein **Probekörper** aus der Umlaufrinne entnommen („**P-Proben**“, s. Bild 13, oben): jeweils im täglichen Wechsel aus dem stromaufwärtigen, dem mittleren und dem stromabwärtigen Bereich der Geschiebemergelstrecke. Jeder Probekörper wurde vor dem Einbau und nach dem Ausbau gewogen. Zusätzlich wurde vor dem Einbau in der Umlaufrinne das bei der Herstellung der Geschiebemergelkugeln anfallende Restmaterial und nach der Bergung der Probekörper selbst bzgl. Korngrößenverteilung, Kalkgehalt, undrännierter Scherfestigkeit (sowohl in der Aufweichungszone als auch im Probenkern, s. Bild 13, unten) sowie natürlichem Wassergehalt (nur Aufweichungszone) untersucht.

Anlage 2.2 listet die Versuchsergebnisse der P-Proben auf.

Im Anschluss an die wasserbaulichen Versuchsserien, d.h. nach Ablassen des Wassers in der Umlaufrinne, wurden aus der Geschiebemergelschicht an zehn gleichmäßig über die Fläche verteilten Punkten jeweils drei bis vier Bodenproben in Tiefenabständen von 0,1 m entnommen. An diesem **Rinnenresidualmaterial** („**R-Proben**“) wurden für einen Vorher/Nachher-Vergleich diejenigen geotechnischen Eigenschaften untersucht, bei denen eine Veränderung gegenüber dem Ausgangsmaterial infolge Strömungsbelastung bzw. Aufweichung zu erwarten war (Korngrößenverteilung, natürlicher Wassergehalt sowie – nur bei den unmittelbar an der Oberfläche genommenen Proben – der Kalkgehalt). Auf eine Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit bzw. der Konsistenz wurde verzichtet, da es sich bei dem Rinnenresidualmaterial nicht um einen Boden einheitlicher Konsistenz handelt, sondern um ein inhomogenes Gemisch aus kompakten Brocken und aufgeweichtem Material.

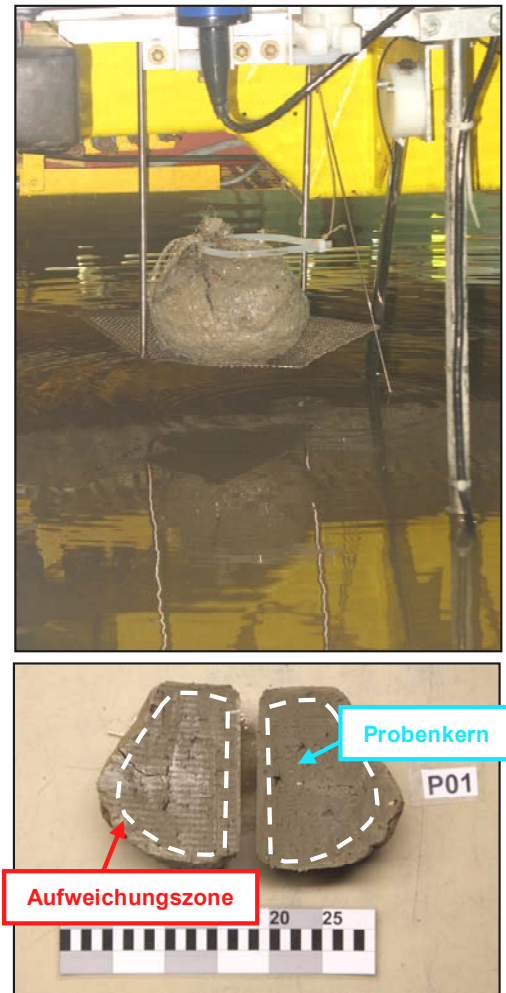


Bild 13: Bergung und Untersuchung der Probekörper

Die Ergebnisse der geotechnischen Versuche an den R-Proben sind in Anlage 2.3 zusammengestellt.

Parallel zu den Versuchen in der Umlaufrinne wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, bei denen Bodenproben in Wassereimern – also im „Stillwasser“ – gelagert wurden:

Zehn Geschiebemergelkugeln („**F-Proben**“, Probedurchmesser: 15 cm, Bild 14, links) wurden in eine Uraninlösung gelegt. Täglich wurde eine Probe geborgen. Uranin ist ein gelb-oranger Farbstoff, der in der Hydrologie als Tracer verwendet wird und der unter UV-Licht grün fluoresziert. Bereits eine Uranin-Konzentration von 0,1mg/l führt zu einer sichtbaren Färbung von Wasser. Um die Eindringtiefe des Wassers in die Geschiebemergelproben sichtbar zu machen (Bild 14, rechts), war jedoch – wie Vorversuche ergaben – eine deutlich höhere Konzentration von 3g/l erforderlich.

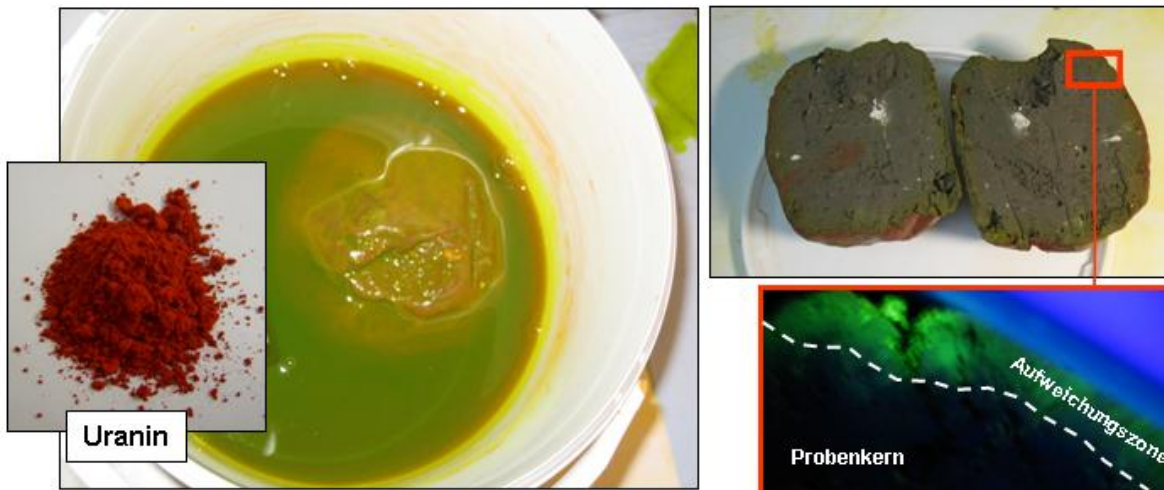


Bild 14: Untersuchung der Eindringtiefe des Wassers in die Geschiebemergel-Probenkörper im Fluoreszenz-Versuch

Ziel dieser **Fluoreszenz-Versuche** war es, die Mächtigkeit der Aufweichungszone und deren zeitliche Entwicklung quantitativ zu bestimmen. Vor dem Versuch und nach dem Bergen wurden der Wassergehalt und die undrainede Scherfestigkeit – nach dem Versuch getrennt für Probenkern und Aufweichungszone – bestimmt. Die Ergebnisse der Fluoreszenz-Versuche sind Anlage 2.4 zu entnehmen.

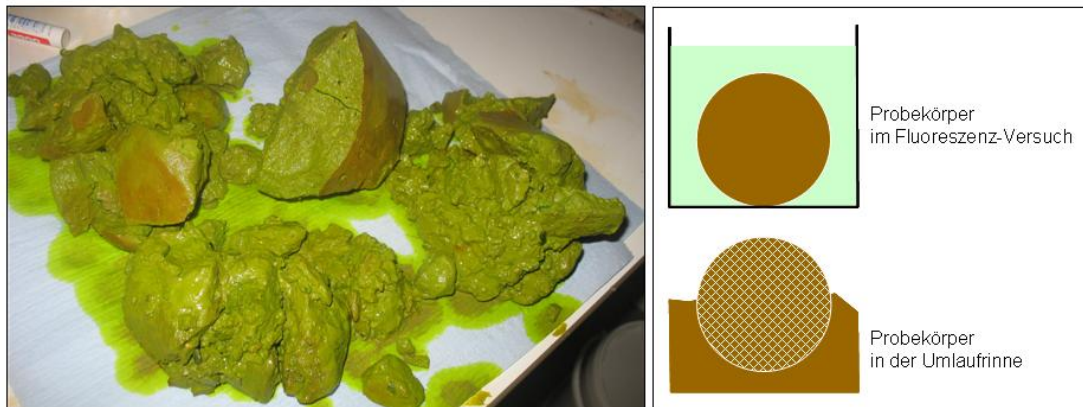


Bild 15: Probekörper im Fluoreszenz-Versuch

Die Fluoreszenz-Versuche waren ursprünglich auf eine Dauer von insgesamt zwei Wochen angesetzt. Bereits am zweiten Tag waren jedoch die meisten Kugeln zerfallen (Bild 15, links), so dass die letzte intakte Kugel bereits nach vier Tagen geborgen wurde. Gleichzeitig zeigten die inzwischen aus der Umlaufrinne geborgenen Probekörper jedoch kaum Zerfallserscheinungen. Um zu klären, ob die Ursache dieses unterschiedlichen Verhaltens in der stabilisierenden Einbettung der runden Probekörper in die Geschiebemergelschicht der Umlaufrinne liegt, die im Fluoreszenzversuch fehlt, (Bild 15 rechts) oder ob das Netz der Umlaufrinnen-Probekörper einen – unbeabsichtigten – stabilisierenden, und damit die Versuchsergebnisse verfälschenden Einfluss hat, wurde eine zusätzliche Versuchsreihe durchgeführt.

Dazu wurden würfelförmige Testkörper („**T-Proben**“) mit einer Kantenlänge von ca. 7 cm insgesamt 100 Tage in Wasserbehälter gelegt: zehn Paare gleichen Materials (d.h. aus der gleichen C-Probe, s.o.), jeweils eine Probe mit und eine ohne Netz. Im Ergebnis wurde die Aussagekraft der geotechnischen Umlaufrinnen-Versuche bestätigt: das Netz hat keinen stabilisierenden Einfluss.

Gleichzeitig wurde untersucht, wie der Zerfallsprozess des Geschiebemergels im **Stillwasser** voranschreitet: in der ersten Woche wurde der Probenzustand (*intakt / zerbrochen in x Teile / zerfallen*) täglich, danach wöchentlich dokumentiert.

Die Ergebnisse der Versuche an den T-Proben sind der Anlage 2.5 zu entnehmen.



Bild 16: T-Proben



Zusätzlich wurde je eine Probe aus dem Ausgangsmaterial sowie aus dem Rinnenresidualmaterial unter dem **Rasterelektronenmikroskop** untersucht, um so eine mögliche Veränderung der mikroskopischen Struktur des Geschiebemergels vor und nach dem Versuch in der Umlaufrinne zu erkennen. Die Fotos wurden von Hrn. C. FEHSE (2009) im Rahmen seiner Diplomarbeit unter den Teilaspekt „Vergleichende Sedimentuntersuchungen“ erstellt und uns zur Verfügung gestellt.

6.2 Wasserbauliche Untersuchungen

Die Strömungsbelastung der Geschiebemergelstrecke erfolgte in der Zeit vom 03. bis zum 25. September 2008 in Stufen von $\Delta v \approx 0,2$ m/s jeweils über eine Dauer von etwa 6 Stunden (Tabelle 1 nach Anlage 1]). Die Einstellung der nominellen Strömungsgeschwindigkeit in der Umlaufrinne erfolgte mit Bezug zur ADV-Strömungssonde etwa am Ende der Einbaustrecke. Die Referenzgeschwindigkeit zur Bewertung der Erosionsstabilität des eingebauten Materials wurde mittels Nachbereitung des sohnahen Strömungsprofils als tiefengemittelter Strömungswert über der Einbaustrecke ($h \approx 0,6$ m) etwa bei Rinnenmeter 57 berechnet (Anlage 1, Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsablauf, jeweilige Strömungsbelastung und -dauer nach Anlage 1

	Nomineller Strömungswert [cm/s]	Tiefengemittelter Strömungswert [cm/s]	Belastungs-dauer [h]
V1	35	29	6
V2	52	45	6
V3	70	67	6
V4	90	keine Messung	6
	90	keine Messung	1
V5	110	96	6
V6	130	111	6
V7	150	135	6
V8	170	143	6
V9	190	164	6
V10	210	171	6
V11	210	keine Messung	6
V12	210	162	6

Zur Erfassung der Wasserspiegelauslenkung und des Strömungslängsprofils während der laufenden Versuche wurde ein Linienprofil etwa mittig der Umlaufrinne zwischen den Rinnenmetern 45 m bis 63 m abgefahren. Zeitgleich wurde eine Sohlaufnahme auf diesem Längsprofil durchgeführt, so dass auch Veränderungen der Sandsohle stromauf der Geschiebemergelstrecke erfasst wurden.

Die Messung der vertikalen sohnnahen Strömungsprofile fand stationär jeweils über einen Zeitraum von ein bis zwei Minuten an sieben Messpositionen zwischen den Rinnenmetern 45 m und 63 m statt.

Die Aufnahme der flächenhaften Sohlstruktur erfolgte nach jeder Versuchsserie zwischen den Rinnenmetern 45 m und 63 m mit Längsprofilen im seitlichen Abstand von 0,12 m bei einem vertikalen Abstand des Schallkopfs über dem Einbaumaterial von etwa 0,2 m bis 0,3 m.

Aufgrund von geotechnischen Sonderversuchen im Nahbereich der Sichtfenster wurde für die Betrachtung der Erosionsstabilität eine Fläche von etwa 10 m x 0,6 m hinsichtlich eines mittleren, strömungsbedingten Schichtdickenverlustes ausgewertet (Genauigkeit $\pm 0,3$ mm; Anlage 1). Die analysierte Fläche ist als Draufsicht dem Bild 17 zu entnehmen.

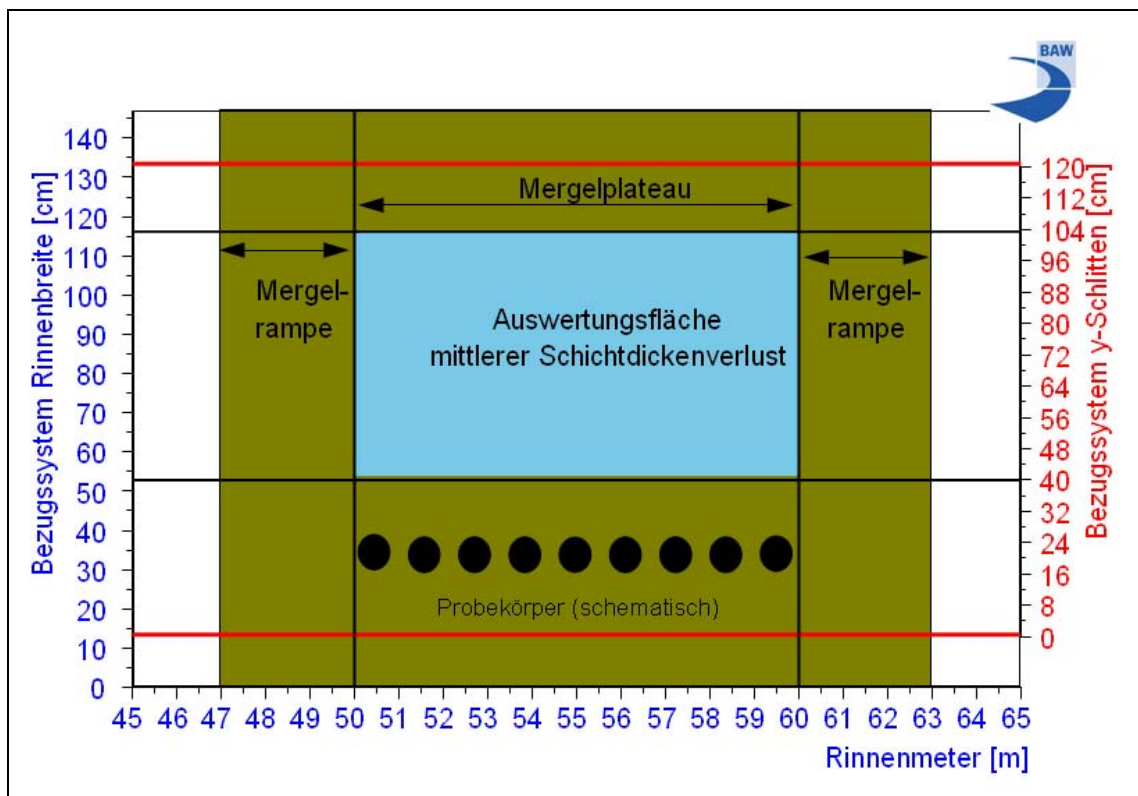


Bild 17: Prinzipskizze der eingebauten Geschiebemergelstrecke (Draufsicht) mit Lage der analysierten Fläche nach Anlage 1

Weitere Einzelheiten zur Messkonfiguration und den Analyseverfahren sind dem Messbericht (Anlage 1) zu entnehmen.

7 Ergebnisse

7.1 Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen

7.1.1 Klassifikation des Ausgangsmaterials

7.1.1.1 Repräsentativität des Versuchsmaterials

Zunächst war zu klären, ob der in der Umlaufrinne eingebaute Geschiebemergel repräsentativ für den bei der Anpassung des NOKs zu baggernden Geschiebemergel ist, d.h. ob dessen geotechnischen Eigenschaften innerhalb der Schwankungsbreite des Geschiebemergels der gesamten Oststrecke liegen und ob evt. Abweichungen eher zu einer Über- (unsichere Seite) oder zu einer Unterschätzung (sichere Seite) der Erosionsstabilität führen. Dazu wurden die Ergebnisse der im geotechnischen Labor der BAW-DH durchgeführten Klassifikationsversuche mit denen des Ing.-Büros PHW [U2] für den Geschiebemergel der gesamten NOK-Oststrecke verglichen.

Kornanalytisch handelt es sich beim NOK-Geschiebemergel um ein toniges, örtlich schwach kiesiges Ton/Schluff-Gemisch. Bild 18 zeigt, dass die **Körnungsbänder** der BAW-Kornanalysen mit denen aus der gesamten Oststrecke grundsätzlich übereinstimmen. Die BAW-Proben liegen bzgl. des Tongehaltes im oberen Bereich des Oststrecken-Körnungsbandes. Eine Analyse der Verteilung der Tongehalte im Geschiebemergel über die gesamte Oststrecke (Bild 19) zeigt aber, dass der magere Geschiebemergel (Tongehalt $\leq 11\%$) nur untergeordnet auftritt, d.h., dass der in der Umlaufrinne untersuchte Geschiebemergel die typische Ausprägung darstellt.

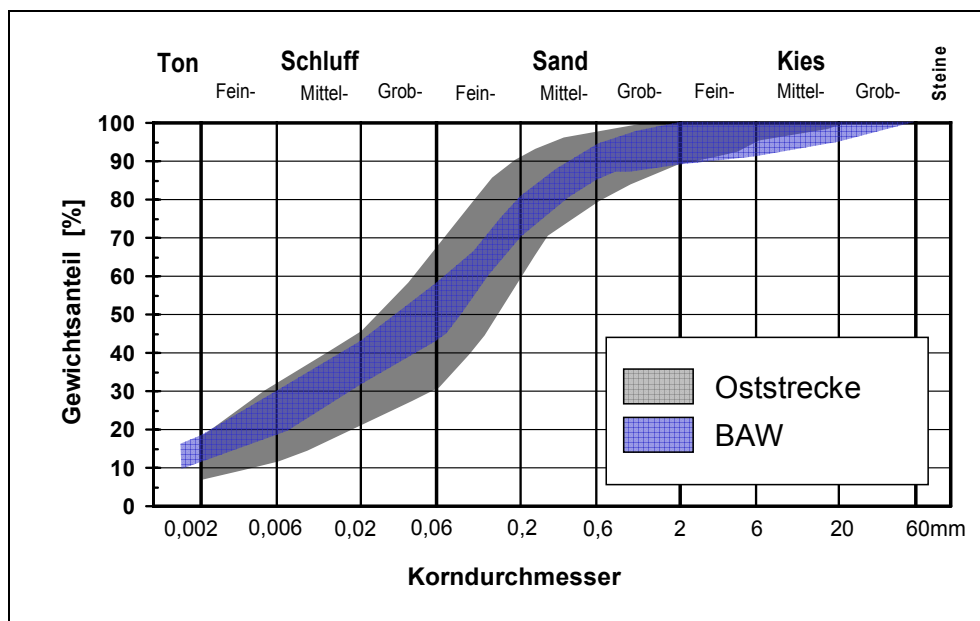


Bild 18: Körnungsband Geschiebemergel
(Anzahl Einzelversuche BAW/Oststrecke: 40/104)

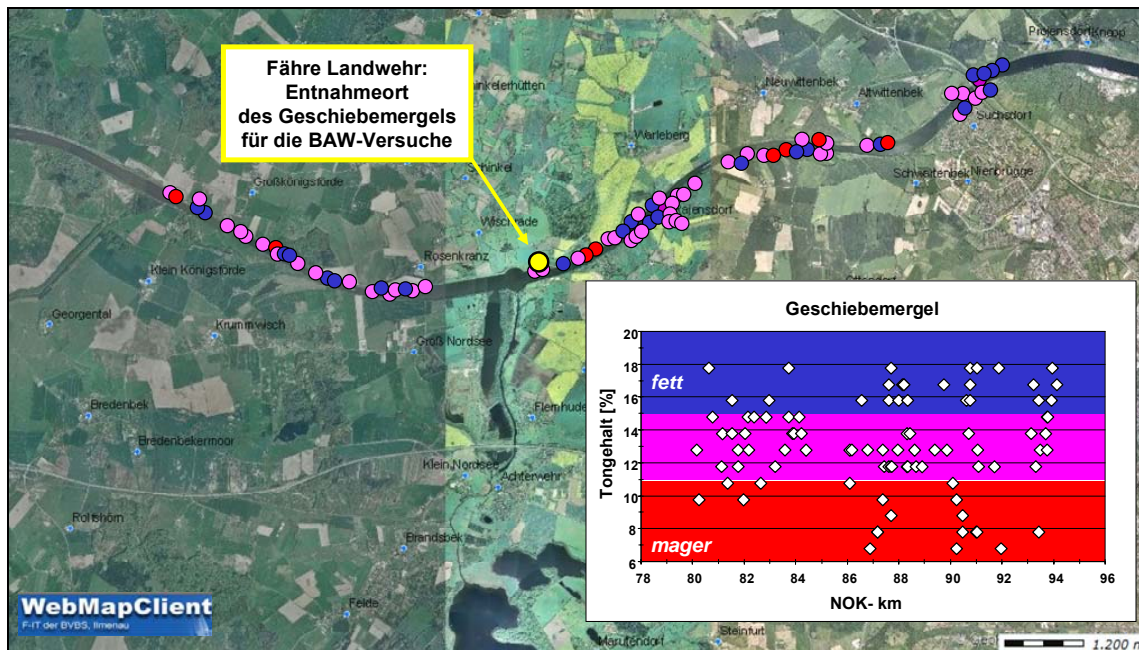


Bild 19: Verteilung der Tongehalte im Geschiebemergel in der NOK-Oststrecke

Mit **undrännierten Scherfestigkeiten** c_u zwischen 19 kN/m² und 464 kN/m² (im Mittel $c_u = 89$ kN/m²) hat der in die Umlaufrinne eingebaute Geschiebemergel eine *breiige* bis *halbfeste*, überwiegend eine *weiche* bis *steife Konsistenz*. Damit ist er von geringerer Festigkeit als das Material der gesamten Oststrecke mit undrännierten Scherfestigkeiten c_u zwischen 13 kN/m² und >900 kN/m² (im Mittel $c_u = 154$ kN/m²) und einer *breiigen* bis *festen*, überwiegend einer *steifen* Konsistenz (s. Bild 20).

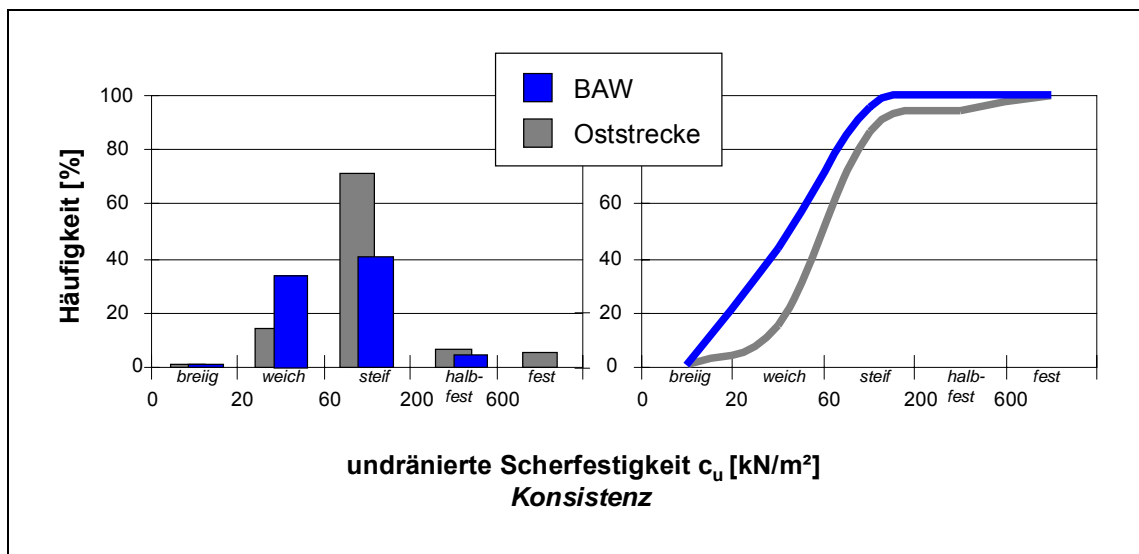


Bild 20: Undrännierte Scherfestigkeit Geschiebemergel (links: Häufigkeit; rechts: Häufigkeit kumuliert; Anzahl Einzelversuche BAW/Oststrecke: 80/746)

Die geringere Festigkeit des BAW-Geschiebemergels erklärt sich darin, dass das Material für die Umlaufrinnen-Versuche unmittelbar ab der Geländeoberkante gebaggert wurde, während die c_u -Werte für die gesamte Oststrecke auch aus größeren Tiefen stammen. Da davon auszugehen ist, dass eine höhere Festigkeit eher erosionsstabilisierend wirkt, führen die Abweichungen in der Konsistenz beim Rinnenversuch zu Ergebnissen, die auf der sicheren Seite liegen.

Im Bereich der gesamten NOK-Oststrecke wurden im Geschiebemergel **Wassergehalte** w zwischen 7,3 % und 25,5 % (im Mittel: $w = 12,4$ %) bestimmt. Die Wassergehalte im Geschiebemergel der BAW schwanken zwischen 9,6 % und 14,0 % (im Mittel: $w = 12,1$ %). Bei nur geringfügig abweichenden mittleren Wassergehalten und gut übereinstimmender Summenkurven (s. Bild 21, rechts) ist der in der Umlaufrinne eingebaute Geschiebemergel bzgl. seines Wassergehaltes repräsentativ für die gesamte Oststrecke.

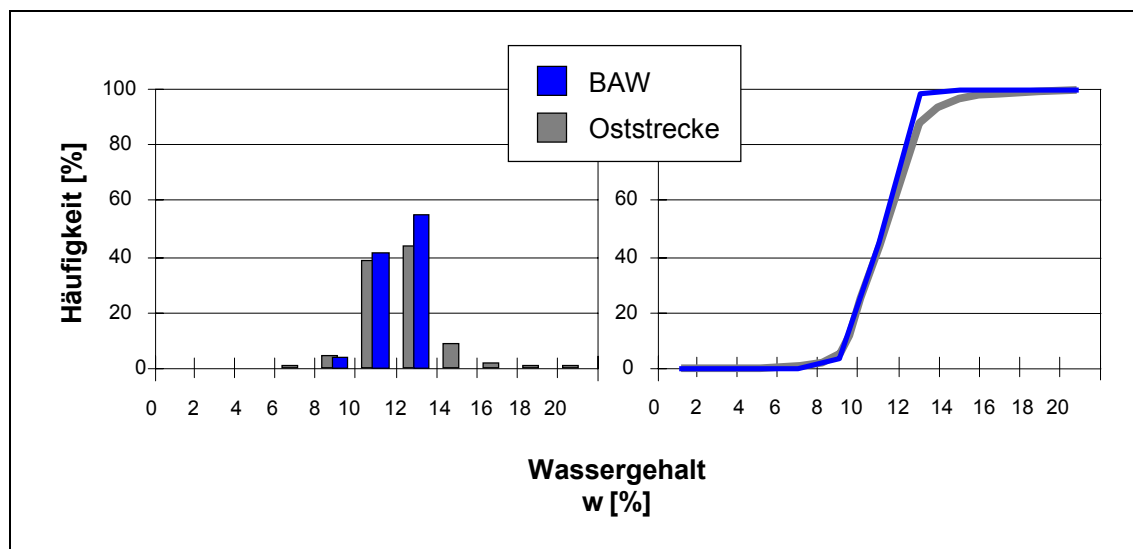


Bild 21: Wassergehalt Geschiebemergel (links: Häufigkeit; rechts: Häufigkeit kumuliert; Anzahl Einzelversuche BAW/Oststrecke: 80/762)

Für den BAW-Geschiebemergel wurden Wassergehalte an der Fließgrenze w_l zwischen 19,7 % und 20,8 % (im Mittel: $w_l = 20,4$ %) bestimmt, wonach der Boden *leicht plastisch* ist. Bei Wassergehalten an der Ausrollgrenze w_p zwischen 9,6 % und 11,3 % (im Mittel: $w_p = 10,5$ %) und Plastizitätszahlen I_p zwischen 8,9 % und 11,2 % (im Mittel $I_p = 9,9$ %) ist der BAW-Geschiebemergel im **Plastizitätsdiagramm** als *leicht plastischer Ton* anzusprechen (s. Bild 22). Darüber hinaus wurden Wassergehalte an der Schrumpfgrenze zwischen 13,4 % und 16,9 % (im Mittel: $w_s = 15,2$ %) bestimmt.

Aufgrund der deutlich höheren Anzahl von Einzelversuchen zeigen die Wassergehalte an Fließ- und Ausrollgrenze im Geschiebemergel der gesamten Oststrecke eine deutlich größere Schwankungsbreite: Mit Wassergehalten an der Fließgrenze w_l zwischen 14,6 % und 23,1 % (im Mittel: $w_l = 17,6$ %) ist aber auch der Oststrecken-Geschiebemergel ausnahmslos

als *leicht plastisch* einzustufen. Bei Wassergehalten an der Ausrollgrenze w_p zwischen 8,4 % und 14,2 % (im Mittel: 10,3 %) und Plastizitätszahlen I_p zwischen 2,9 % und 11,8 % (im Mittel: $I_p = 7,3$ %) liegt damit überwiegend ein *leicht plastischer Ton* vor; darüber hinaus treten aber auch *Sand/Ton-* bzw. *Sand/Schluff-Gemische* auf (Bild 22).

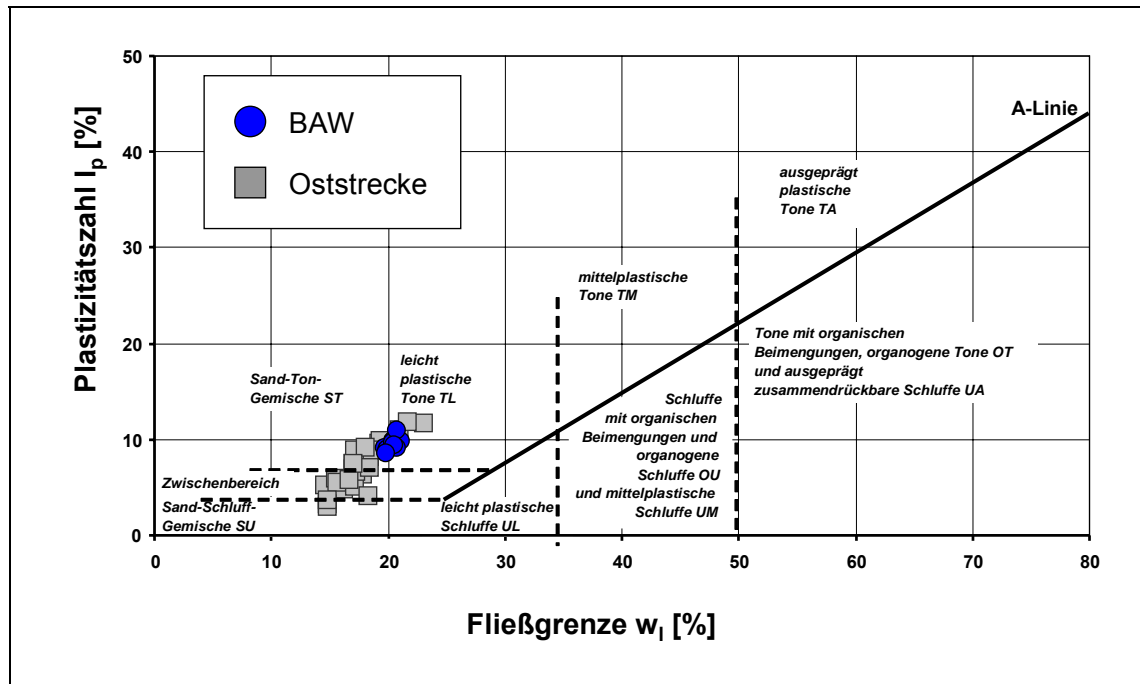


Bild 22: Plastizitätsdiagramm Geschiebemergel (Anzahl Einzelversuche BAW/Oststrecke: 10/41)

Der von der BAW untersuchte Geschiebemergel liegt damit innerhalb der Schwankungsbreite des Oststrecken-Geschiebemergels. Da bei leicht plastischen Tönen jedoch von einer vergleichbaren oder größeren Erosionsempfindlichkeit ausgegangen wird als bei Sand/Schluff- und Sand/Ton-Gemischen (s. Abschn. 7.1.1.2), werden die Ergebnisse zur Erosionsstabilität im Rinnenversuch nach den plastischen Eigenschaften des BAW-Geschiebemergels auf der sicheren Seite liegen.

Das **Wasseraufnahmevermögen** w_a schwankt im Geschiebemergel der BAW zwischen 37,0 % und 39,9 % (im Mittel: $w_a = 37,9$ %), was einem *sehr geringen* Wasseraufnahmevermögen entspricht. Im Geschiebemergel der gesamten Oststrecke ist das Wasseraufnahmever-

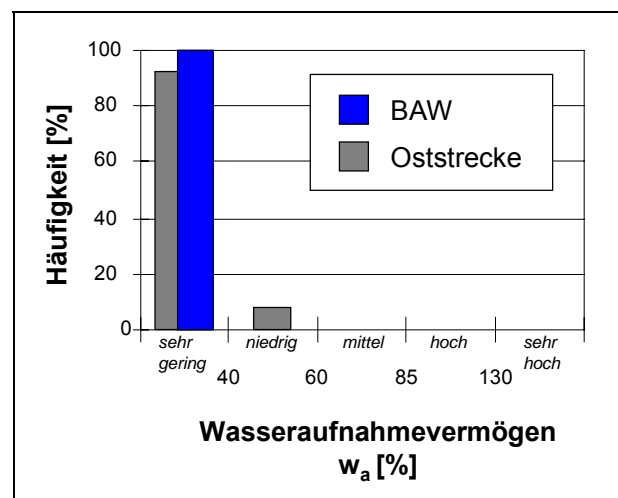


Bild 23: Wasseraufnahmefähigkeit Geschiebemergel (Anzahl Einzelversuche BAW/Oststrecke: 10/38)

mögen bei w_a -Werten zwischen 31,3 % und 54,5 % (im Mittel: $w_a = 37,0$ %) überwiegend ebenfalls *sehr gering*, untergeordnet auch *niedrig* (Bild 23). Bei nahezu identischen Mittelwerten stimmen die BAW-Ergebnisse damit gut mit denen der Oststrecke überein.

Für den BAW-Geschiebemergel wurden **Kalkgehalte** V_{Ca} zwischen 15,0 % und 20,0 % (im Mittel: $V_{Ca} = 17,7$ %) bestimmt. Im Bereich der gesamten Oststrecke schwanken die Kalkgehalte im Geschiebemergel zwischen 11,5 % und 28,9 % (im Mittel: $V_{Ca} = 18,8$ %). Bild 24 zeigt, dass die Kalkgehalte des in der Umlaufrinne eingebauten Geschiebemergels zwar innerhalb der Schwankungsbreite der Oststrecken-Werte liegen, dass insgesamt jedoch beim BAW-Material eher geringere Kalkgehalte auftreten.

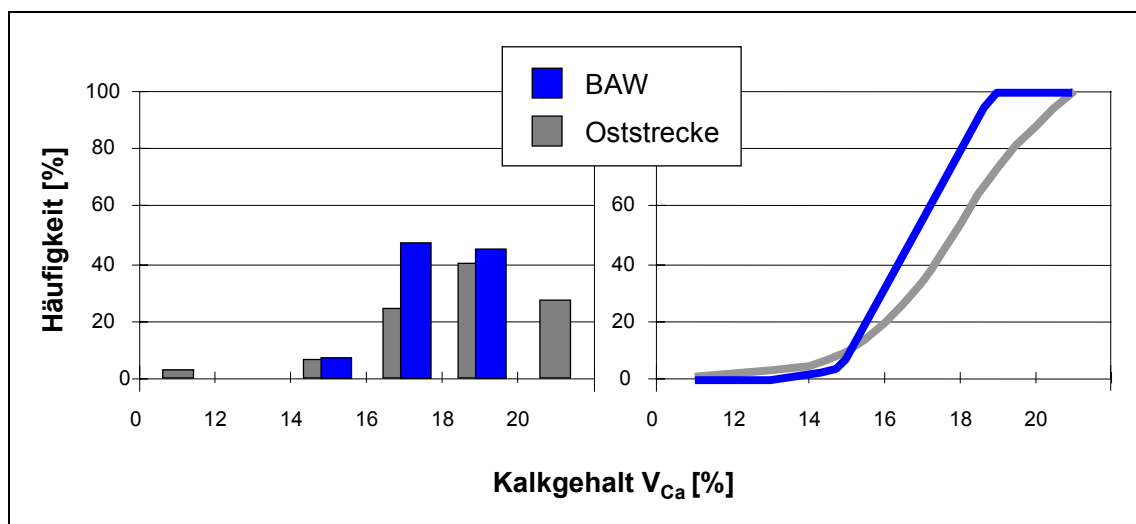


Bild 24: Kalkgehalt Geschiebemergel (Anzahl Einzelversuche BAW/Oststrecke: 40/36)

Allgemein führt Kalk in einem Lockersediment zu einer Verfestigung. Geringere Kalkgehalte im Geschiebemergel werden damit eher zu einer niedrigeren Erosionsstabilität führen, so dass davon auszugehen ist, dass die Ergebnisse der Rinnenversuche aufgrund des Kalkgehaltes auf der sicheren Seite liegen.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem Vergleich der Klassifikationsversuche des BAW-Geschiebemergels mit denen des Geschiebemergels aus der gesamten Oststrecke, dass das Versuchsmaterial repräsentativ für den beim Ausbau des NOKs anfallenden Boden ist, und dass der in der Umlaufrinne eingebaute Geschiebemergel innerhalb der Schwankungsbreite des gesamten Geschiebemergels eher die erosionsempfindlichere Ausprägung darstellt. Die Ergebnisse der Versuche in der Umlaufrinne werden damit zu Aussagen führen, die bzgl. der Erosionsstabilität eher auf der sicheren Seite liegen.

7.1.1.2 Abschätzung der Erosionsstabilität des Geschiebemergels auf Grundlage von Klassifikationsversuchen

Die Auswertung von Klassifikationsversuchen lässt eine Abschätzung der Erosionsstabilität des Geschiebemergels unter Strömungsbelastung aber auch hinsichtlich möglicher alternativer Verbringungskonzepte zu:

Nach DIN 18196 ist der NOK-Geschiebemergel als leicht plastischer Ton bzw. Sand/Ton- oder Sand/Schluff-Gemisch (s.a. Bild 22) in die Bodenklassen TL, ST, SU bzw. SU* einzuordnen. Nach Tabelle 5 der DIN 18196 ist bei Böden der Klassen

- SU und ST eine *mittlere* bzw.
- SU* und TL eine *große Witterungs- und Erosionsempfindlichkeit*

zu erwarten.

Grundsätzlich ist bekannt, dass die Erodierbarkeit eines bindigen Bodens u.a. von seinem Ton/Schluff-Verhältnis abhängt: Ein höherer Tonanteil wirkt aufgrund kohäsiver Kräfte stabilisierend, während ein hoher Schluffgehalt aufgrund des geringen Gewichtes der Einzelkörner zu einer höheren Erosionsempfindlichkeit führt. Im Fachgebiet Bodenkunde wird deshalb die **Erodierbarkeit eines Bodens durch überströmendes Wasser an Land** in Abhängigkeit vom Ton/Schluff-Verhältnis beurteilt (AG BODEN, 1994). Bild 25 stellt das Ton/Schluff-Diagramm für den NOK-Geschiebemergel dar: Danach ist von einer *mittleren bis sehr hohen* Erodierbarkeit auszugehen.

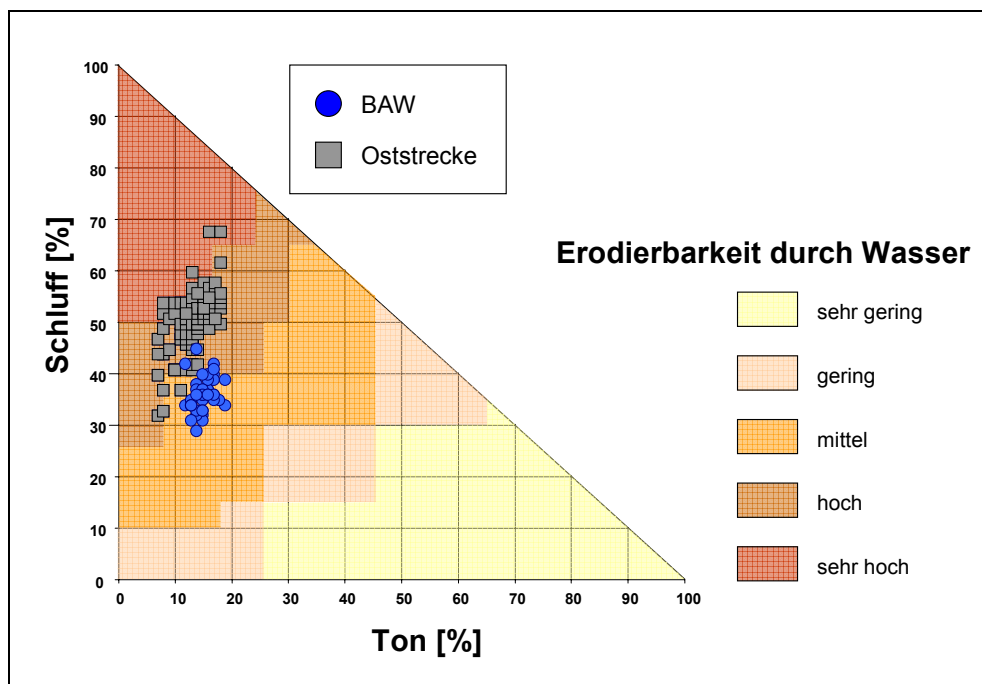


Bild 25: Ton/Schluff-Verhältnis des Geschiebemergels (Anzahl Einzelversuche: BAW/ Oststrecke: 40/104)

Im BAW-Merkblatt RPW wird die **Erosionsanfälligkeit eines Dichtungstoffes** aus Naturton anhand

- der Zerfallsziffer $Z(8)$ nach ENDELL, die die Beständigkeit eines Probekörpers bei Wasserlagerung nach 8 Stunden beschreibt, und
- der im Pinhole-Test ermittelten Erosionsfestigkeit

beurteilt. Nach dem RPW ist davon auszugehen, dass oberhalb einer Zerfallsziffer von $Z(8) = 0,05$ die Erosionsanfälligkeit eines Dichtungsmaterials zunimmt. Für den Geschiebemergel wurden deutlich geringere $Z(8)$ -Werte bis maximal 0,02 bestimmt.

Die Versuchsauswertung im Pinhole-

Test erfolgt qualitativ: Die Probe wird entlang ihrer Längsachse aufgeschnitten. Von einer für Dichtungsmaterialien ausreichenden Erosionsfestigkeit ist auszugehen, wenn sich der Lochdurchmesser nach der Durchströmung an keiner Stelle um mehr als 100 % vergrößert hat. Bild 26 zeigt, dass der NOK-Geschiebemergel auch diese Bedingung erfüllt.



Bild 26: NOK-Geschiebemergel im Pinhole-Test

Der **Erosionsbeginn** in der Natur anstehender, bindiger Böden wurde von GARBRECHT (1961) empirisch für tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten in einer Tiefe von $t = 1$ m in Abhängigkeit vom Porenvolumen n bestimmt. An zwei Geschiebemergelproben aus der NOK-Oststrecke wurden Porenvolumina von 25,3 % und 27,5 % bestimmt, woraus nach GARBRECHT auf eine zulässige Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,9 m/s geschlossen werden kann.

ZANKE (1982) verwendet – basierend auf der Untersuchung von GARBRECHT – den Wassergehalt w zur Berechnung der kritischen Erosionsgeschwindigkeit: im untersuchten NOK-Geschiebemergel schwankt der Wassergehalt zwischen 9,6 % und 14,0 % (im Mittel: $w = 12,1$ %; s. Kap. 7.1.1.1) ist mit einem Erosionsbeginn bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen ca. 0,8 m/s und 1,0 m/s (im Mittel bei ca. $v = 0,9$ m/s) zu rechnen.

Diese Prognose kann jedoch auf gebaggerten Geschiebemergel nicht unmittelbar übertragen werden, da durch die Baggerung die Struktur des Geschiebemergels gestört wird, wodurch bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten mit einem Einsetzen von Erosion zu rechnen ist. Die BAW-Versuche in der Umlaufrinne bestätigen dies (s. Kap. 8).

7.1.2 Veränderung des Geschiebemergels im Wasser

7.1.2.1 Probenkörper im Stillwasser

Im Fluoreszenzversuch (Versuchsdauer: 4 Tage) wurde festgestellt, dass im Stillwasser die **Eindringtiefe des Wassers** in einen Geschiebemergel-Probenkörper nach einem Tag überwiegend 1 cm bis 2 cm beträgt und dann stagniert. Eine kontinuierlich fortschreitende Eindringung und damit durchgehende Aufweichung des Probekörpers erfolgte nicht.

Ein ähnliches Verhalten zeigten die T-Proben (Versuchsdauer: 100 Tage): bereits nach einem Tag im Wasser war ein Teil der Probenkörper zerbrochen oder zerfallen. Dieser **Zerfallsprozess** schritt aber sichtbar nicht weiter fort, wie auch Bild 27 beispielhaft zeigt.



Bild 27: T-Probe im Stillwasser (links: nach einem Tag; rechts: nach 100 Tagen)

Die Anzahl der Bruchstücke nach 100 Tagen wurde jeweils als Maß für die Intensität des Zerfalls dokumentiert.

Darüber hinaus wurde für alle Proben die undrainede Scherfestigkeit c_u vorher und nachher (dann getrennt für außen und innen) bestimmt. Im Ausgangsmaterial schwankte die undrainede Scherfestigkeit c_u zwischen 29 kN/m² und 145 kN/m² (im Mittel: $c_u = 73$ kN/m²), was einer *weichen* bis überwiegend *steifen* Konsistenz entspricht. Nach 100 Tagen zeigte sich je Probe jedoch kein Unterschied im c_u -Wert zwischen innen und außen, so dass hier – anders als beim Fluoreszenzversuch nach vier Tagen – keine Trennung in Aufweichungszone und Probenkern erkennbar war. Die c_u -Werte lagen zwischen < 2 kN/m² und 87 kN/m² (im Mittel: $c_u = 42$ kN/m²) bei überwiegend *weicher*, untergeordnet *breiiger* und *steifer* Konsistenz (Bild 28, links). Die relative Abnahme der undrainede Scherfestigkeit je Probenkörper schwankte sehr stark zwischen 0 % (d.h. keine Veränderung) und 100 % (d.h. vollständiger Zerfall der Probe), und lag im Mittel bei einer Verringerung des c_u -Wertes um ca. 40 % (s. Bild 28, rechts).

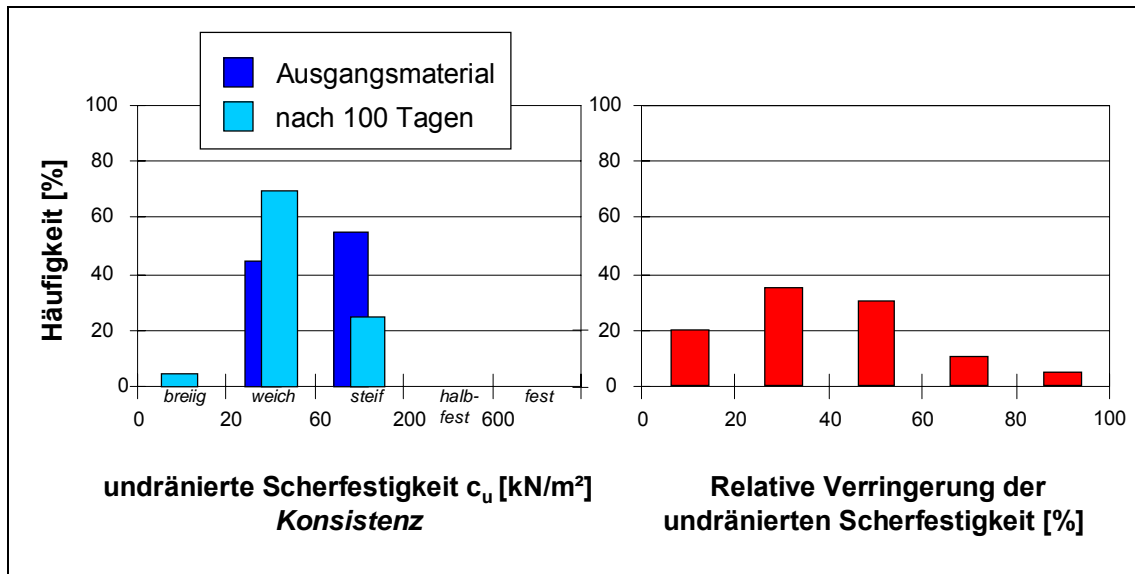


Bild 28: Abnahme der undrännerten Scherfestigkeit im Stillwasser nach 100 Tagen (20 Einzelversuche)

Eine Abhängigkeit der Stabilität der T-Proben im Stillwasser (d.h. der Anzahl der Teilstücke nach 100 Tagen bzw. der relativen Verringerung der undrännerten Scherfestigkeit) von anderen geotechnischen Parametern (z.B. Kornverteilung, Wassergehalt, Kalkgehalt, undrännerte Scherfestigkeit des Ausgangsmaterials) konnte nicht festgestellt werden. Auch Grenzwerte der einzelnen geotechnischen Parameter, ober- bzw. unterhalb derer sich die Probekörper im Stillwasser eher stabil bzw. instabil verhielten, konnten – anders als für die P-Proben in der Umlaufrinne (s. Kap. 7.1.2.2, Tabelle 2) - nicht angegeben werden.

Hauptziel dieser Versuchsreihe war es aber, einen eventuell vorhandenen Einfluss des Probenetzes (s. Kap. 5.3) auf die Stabilität der Probekörper in der Umlaufrinne - und damit auf die Aussagekraft der geotechnischen Begleitversuche – zu beurteilen. Bild 29 vergleicht für die T-Proben mit (rot) und ohne Netz (grün) jeweils die Teilstücke-Anzahl (oben) und die relative Verringerung der undrännerten Scherfestigkeit (unten): Insgesamt waren die Proben ohne Netz stabiler (wahrscheinlich wegen der unebeneren Aufstandfläche der Netzproben im Wassereimer), so dass die in der Umlaufrinne mit Netz eingebauten P-Proben eher zu einer Unter- als zu einer Überschätzung der Erosionsstabilität führen und die Aussagen damit auf der sicheren Seite liegen.

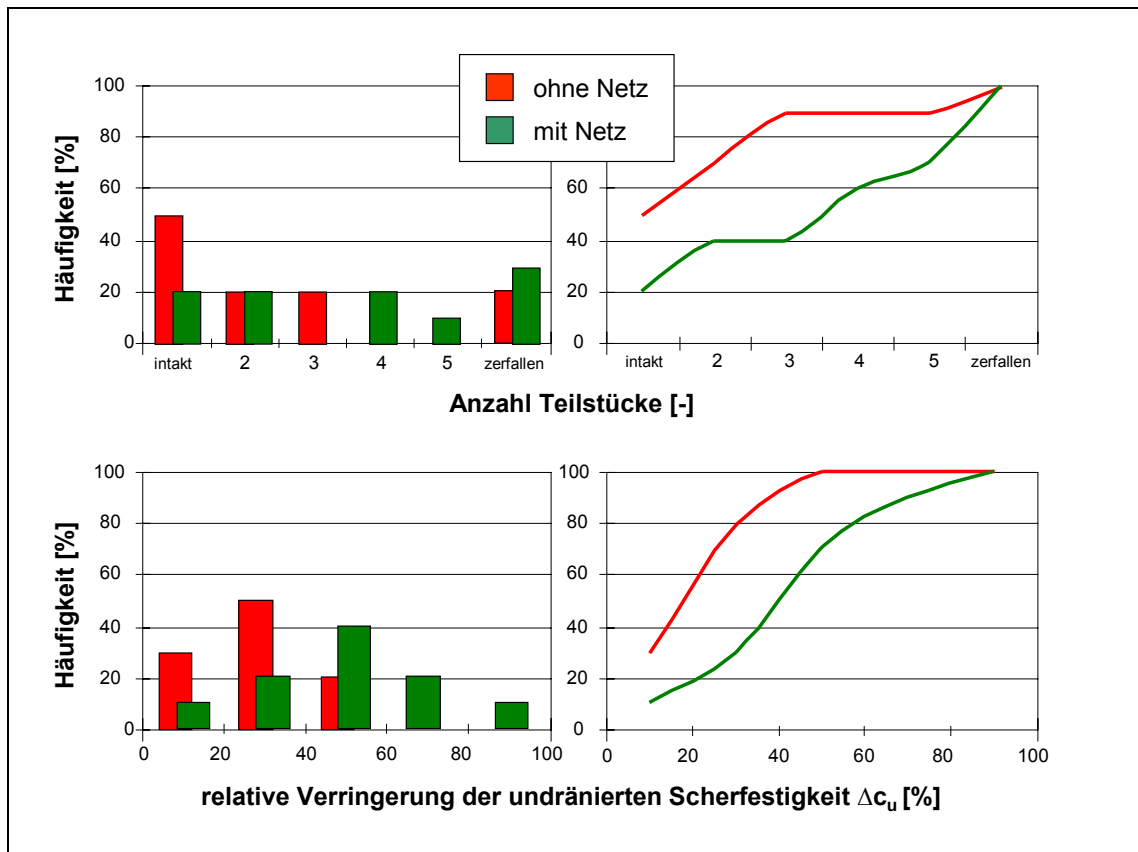


Bild 29: Anzahl der Teilstücke nach 100 Tagen und relative Verringerung der undränierten Scherfestigkeit der T-Proben mit und ohne Netz (je 10 Einzelversuche)

7.1.2.2 Veränderung der geotechnischen Eigenschaften der Probenkörper in der Umlaufrinne

Zur Bestimmung der zeitlichen bzw. strömungsabhängigen Veränderung der geotechnischen Eigenschaften des NOK-Geschiebemergels wurden 30 Probekörper seitlich in die Geschiebemergelstrecke der Umlaufrinne eingebaut. Durch die tägliche Entnahme eines Probekörpers konnte nun die Entwicklung von Kornverteilung, undränierter Scherfestigkeit, Wasser- und Kalkgehalt in Abhängigkeit von der Verweildauer in der Umlaufrinne bzw. von der maximal aufgetragenen, tiefengemittelten Strömung, getrennt nach Aufweichungszone und Probekern, untersucht werden; basierend auf den Ergebnissen der Fluoreszenzversuche (s. Kap. 7.1.2.1) wurde davon ausgegangen, dass die Dicke einer potenziell vorhandenen Aufweichungszone mindestens 1 cm beträgt.

Bild 30 zeigt beispielhaft für den Probekörper P05, der nach 20 Tagen zerbrochen aus der Umlaufrinne geborgen wurde und dort einer tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit bis zu 1,64 m/s ausgesetzt worden war, dass allgemein die **Körnungslinien** vor und nach dem Versuch nahezu identisch sind, dass es also auch bei längerer Verweildauer in der Rinne

und höherer Strömungsgeschwindigkeit nicht zu einer selektiven Ausschwemmung einzelner Kornfraktionen gekommen ist.

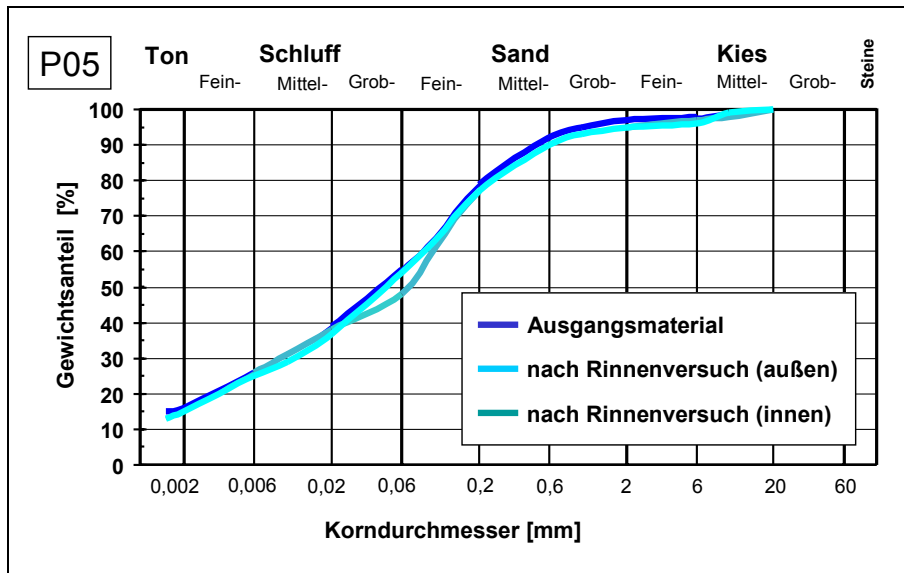


Bild 30: Körnungslinien einer P-Probe vor und nach dem Versuch in der Umlaufrinne

In Bild 31 wird die **Veränderung der undrännierten Scherfestigkeit c_u** in der Aufweichungszone der P-Proben in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit in der Umlaufrinne dargestellt. Das Auftreten auch positiver Δc_u -Werte, d.h. einer Verfestigung anstelle der zu erwartenden Aufweichung, ist Ausdruck der relativ großen Schwankungsbreite der undrännierten Scherfestigkeit im Ausgangsmaterial.

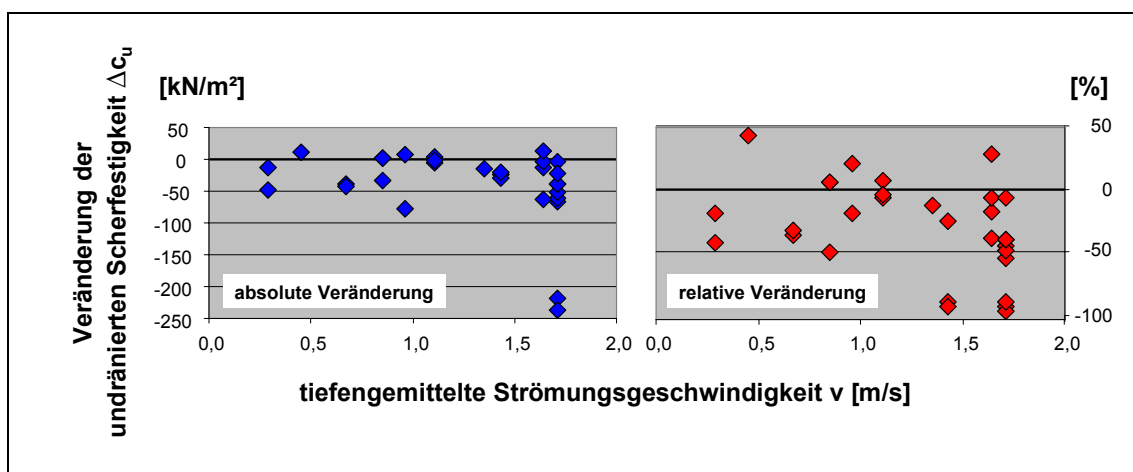


Bild 31: Absolute und relative Veränderung der undrännierten Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der maximal aufgetragenen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

Insgesamt zeigt sich, dass bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von $v \approx 1,4$ m/s keine Abhängigkeit der Veränderung der undrännierten Scherfestigkeit der Probekörper von der Strömungsgeschwindigkeit besteht (und ebenfalls keine Abhängigkeit von der Verweildauer in der Umlaufrinne); lediglich im Falle des vollständige Zerfalls eines Probekörpers etwa ab Strömungsgeschwindigkeiten um 1,4 m/s zeigt sich in einem deutlichen Sprung in den Δc_u -Werten. Die gleichen Phänomene treten für den **Wassergehalt** (Bild 32) und den **Kalkgehalt** (Bild 33) auf.

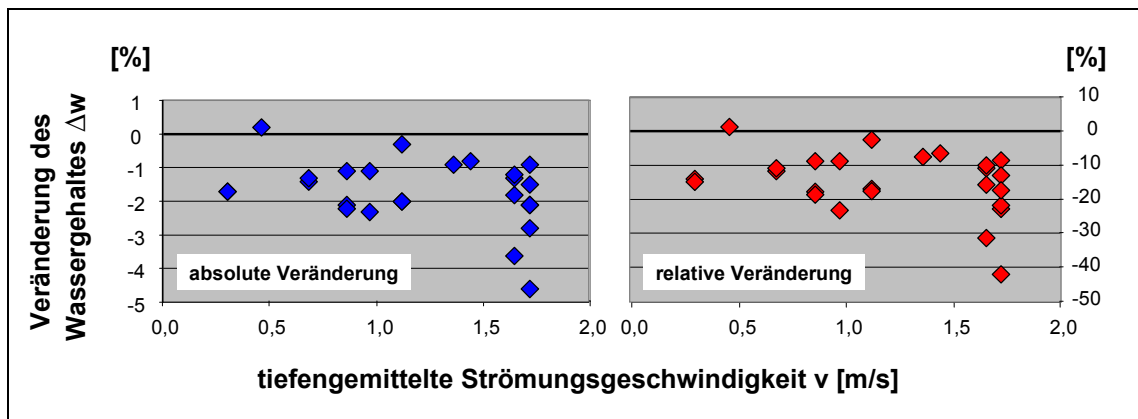


Bild 32: Absolute und relative Veränderung des Wassergehaltes in Abhängigkeit von der maximal aufgebrauchten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

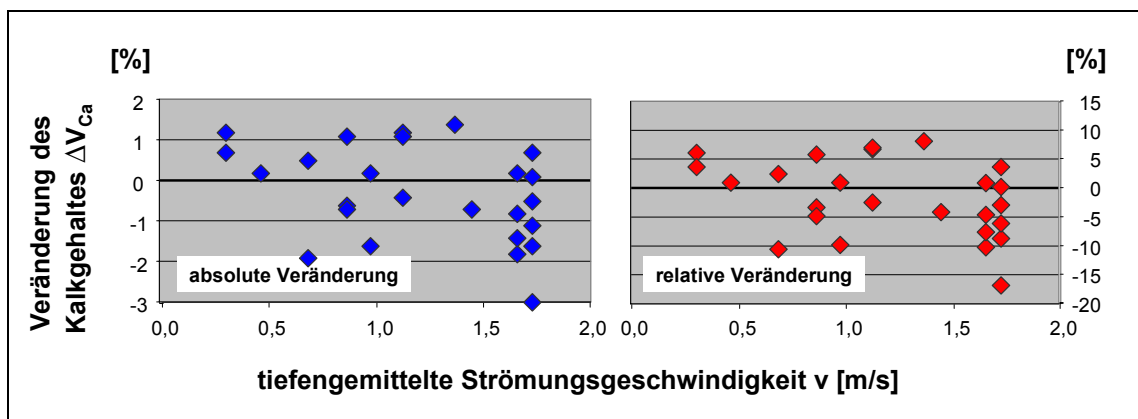


Bild 33: Absolute und relative Veränderung des Kalkgehaltes in Abhängigkeit von der maximal aufgebrauchten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

Zusammenfassend folgt daraus, dass bis zum vollständigen Zerfall bei Strömungsgeschwindigkeiten um $v = 1,4$ m/s an den Probekörpern in der Umlaufrinne keine kontinuierliche Veränderung der geotechnischen Eigenschaften – Kornverteilung, undrännierte Scherfestigkeit, Wassergehalt, Kalkgehalt – in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit zu beobachten war. Tatsächlich wird das äußere, aufgeweichte Material von der Strömung jeweils abgeführt, so dass als Maß für die Erosionsstabilität nicht die Veränderung geotechnischer Para-

meter herangezogen werden kann, sondern ausschließlich das Fortschreiten des **Zerfallsprozesses**, der sich in Form

- einer Abnahme des Bodengewichtes des Probenkörpers (d.h. das Gewicht des Probenkörpers vermindert um das Gewicht des Wassers) und
- in einem Zerbrechen der Probekörper in eine zunehmende Anzahl von Teilstücken äußert.

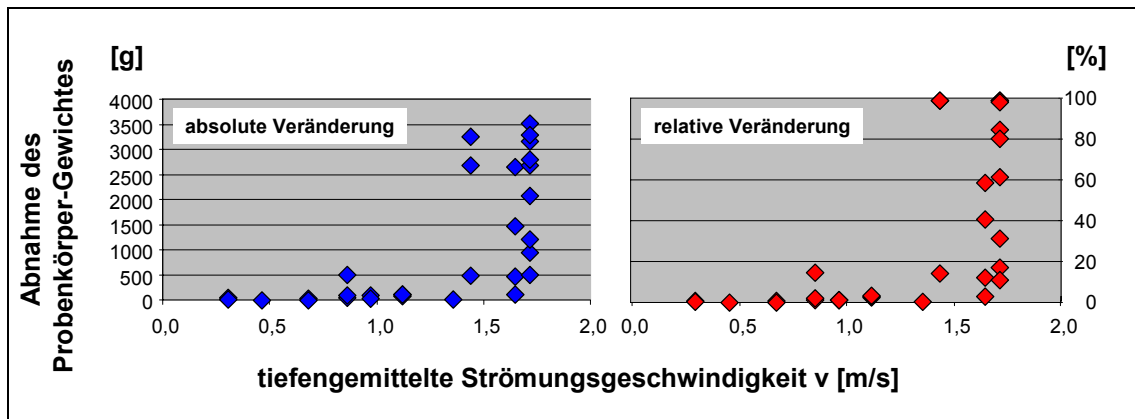


Bild 34: Absolute und relative Abnahme des Probenkörper-Gewichtes in Abhängigkeit von der maximal aufgebrauchten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

Bild 34 und Bild 35 zeigen, dass erste Zerfallerscheinungen an den Probenkörpern ab einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. $v = 0,8$ m/s auftreten. Oberhalb von ca. $v = 1,4$ m/s zerfallen die Probenkörper dann schnell.

Bild 34 und Bild 35 zeigen aber auch, dass einige Probenkörper selbst bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten nur wenig zerfallen bzw. intakt bleiben. Um zu untersuchen, welche geotechnischen Parameter stabilisierend bzw. destabilisierend wirken, wird im Folgenden der Zerfall (Anzahl Teilstücke und relative Gewichtsabnahme) nur derjenigen Probenkörper, die – zur besseren Vergleichbarkeit – tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s ausgesetzt waren, in Abhängigkeit von der Kornverteilung (Tonanteil bzw. Ton/Schluff-Verhältnis), vom Wassergehalt, von der undrännierten Scherfestigkeit und vom Kalkgehalt des Ausgangsmaterials dargestellt (Bild 36 bis Bild 39).

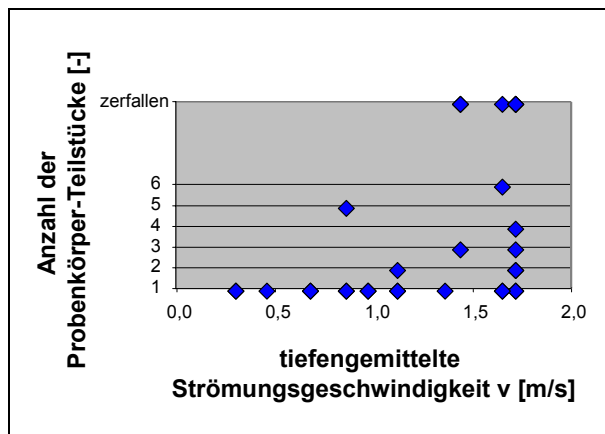


Bild 35: Zerfall der Probekörper in Abhängigkeit von der maximal aufgebrauchten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

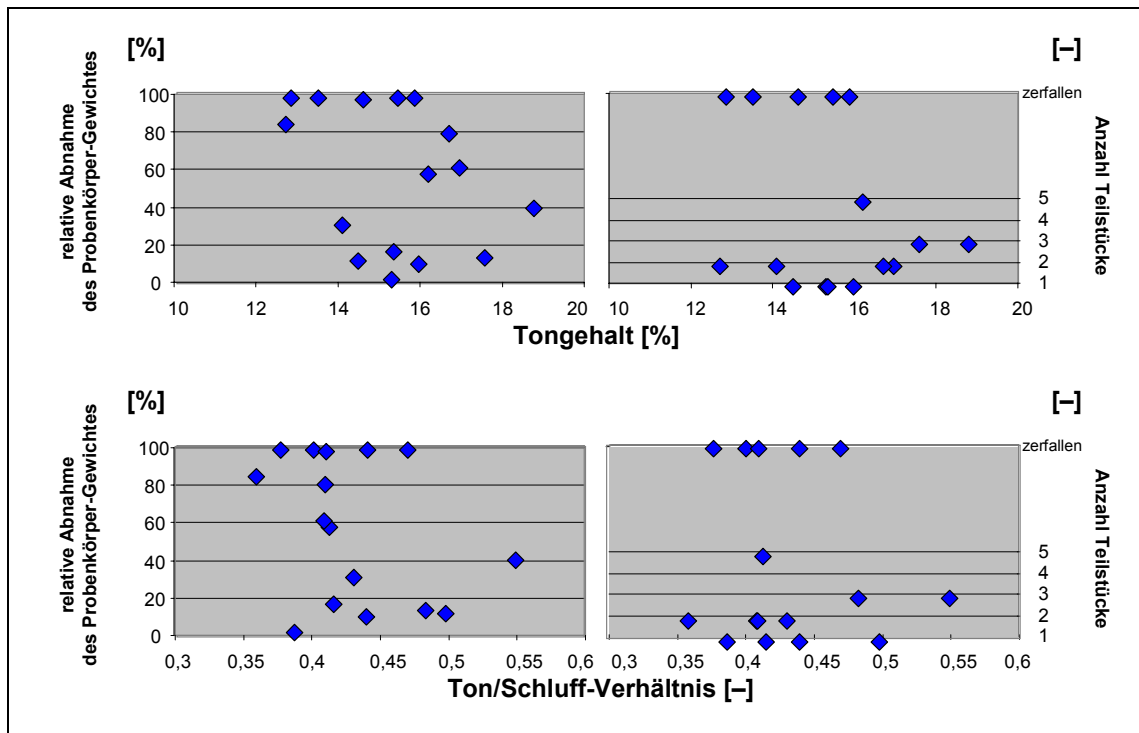


Bild 36: Zerfallsparameter der Probenkörper in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s

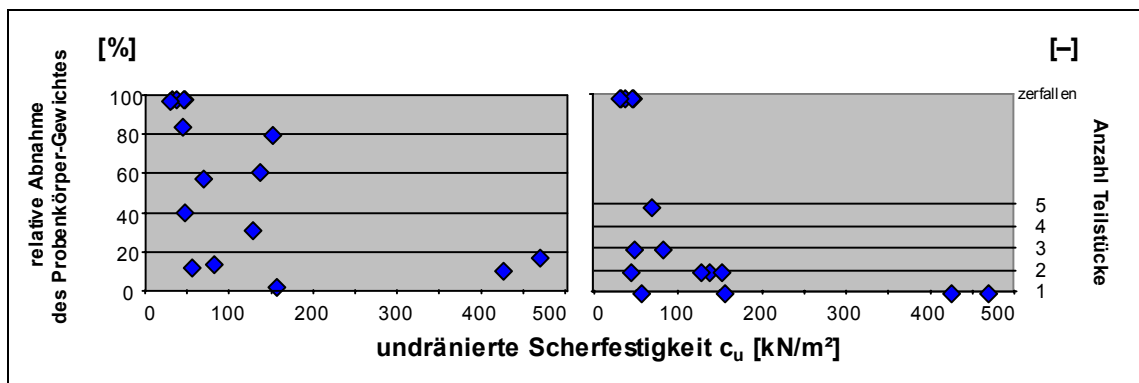


Bild 37: Zerfallsparameter der Probenkörper in Abhängigkeit von der undrainede Scherfestigkeit bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s

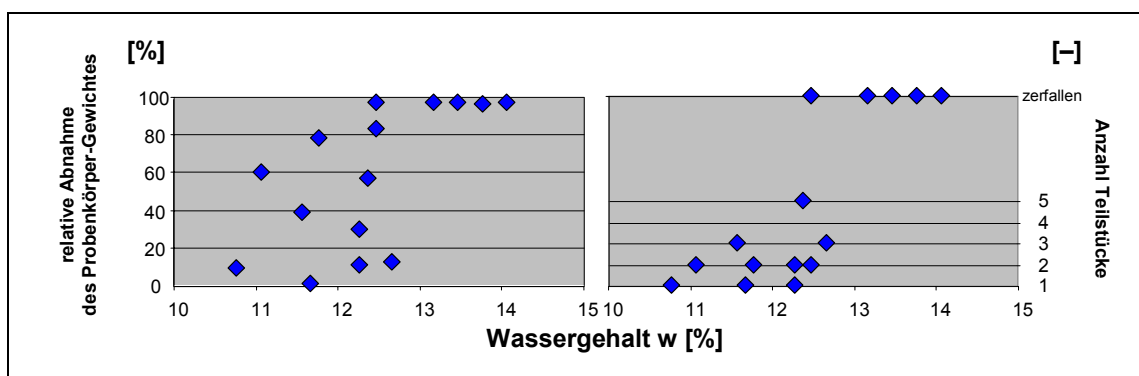


Bild 38: Zerfallsparameter der Probenkörper in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s

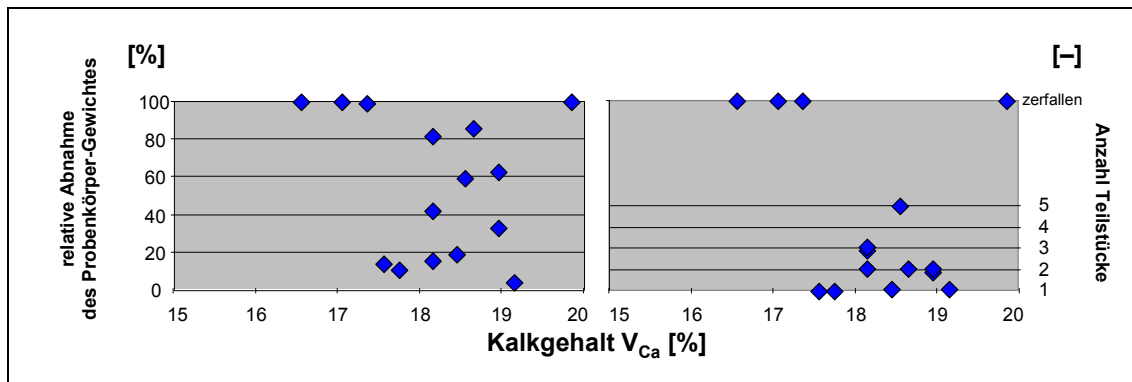


Bild 39: Zerfallsparameter der Probenkörper in Abhängigkeit vom Kalkgehalt bei tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten von $v > 1,4$ m/s

Insgesamt lässt sich beim untersuchten NOK-Geschiebemergel keine Korrelation zwischen der Erosionsstabilität (d.h. des Verlustes an Bodengewicht bzw. der Anzahl von Teilstücken) und einzelnen geotechnischen Parametern erkennen. Auch SCHWEIM (2005) kommt aufgrund einer Literaturrecherche zu dem Ergebnis, dass sich der Erosionswiderstands eines Sediments quantitativ nicht aus den geotechnischen Standardparametern herleiten lässt, dass es aber durchaus „funktionelle Zusammenhänge“ gibt. Für den NOK-Geschiebemergel zeigte sich im Rahmen der aktuellen Bearbeitung, dass das Über- und Unterschreiten der in Tabelle 2 aufgelisteten Grenzwerte im Ausgangsmaterial unter Strömung erosionsstabilisierend bzw. –destabilisierend wirkt.

Tabelle 2: Unter Strömung erosionsstabilisierend und erosionsdestabilisierend wirkende Parameter für den NOK-Geschiebemergel

Parameter	erosionsstabilisierend	erosionsdestabilisierend
Tongehalt	> 17 %	< 14 %
Ton/Schluff-Verhältnis	> 0,5	< 0,4
Undrainede Scherfestigkeit	> 150 kN/m ²	< 50 kN/m ²
Wassergehalt	< 12 %	> 13 %
Kalkgehalt	–	< 17,5 %

7.1.3 Vorher/Nachher-Vergleich

Nach Beendigung der wasserbaulichen Versuche und dem Ablassen des Wassers in der Umlaufrinne, wurden aus der Geschiebemergelstrecke an zehn Punkten mittig Bodenproben entnommen und die Kornverteilung bestimmt. Zusätzlich wurden in Tiefenabständen von 0,1 m Wasser- und Kalkgehalt ermittelt. Die vollständigen Ergebnisse sind Anlage 2.3 zu entnehmen.

Für einen Vorher/Nachher-Vergleich werden die Versuchsergebnisse aus den oberen 0,1 m denen des Ausgangsmaterials bzw. der gesamten Oststrecke gegenübergestellt.

Bild 40 zeigt, dass bzgl. der **Kornzusammensetzung** nahezu keine Veränderung des untersuchten Geschiebemergels eingetreten ist; die Körnungsbänder von Residual- und Ausgangsmaterial stimmen praktisch überein.

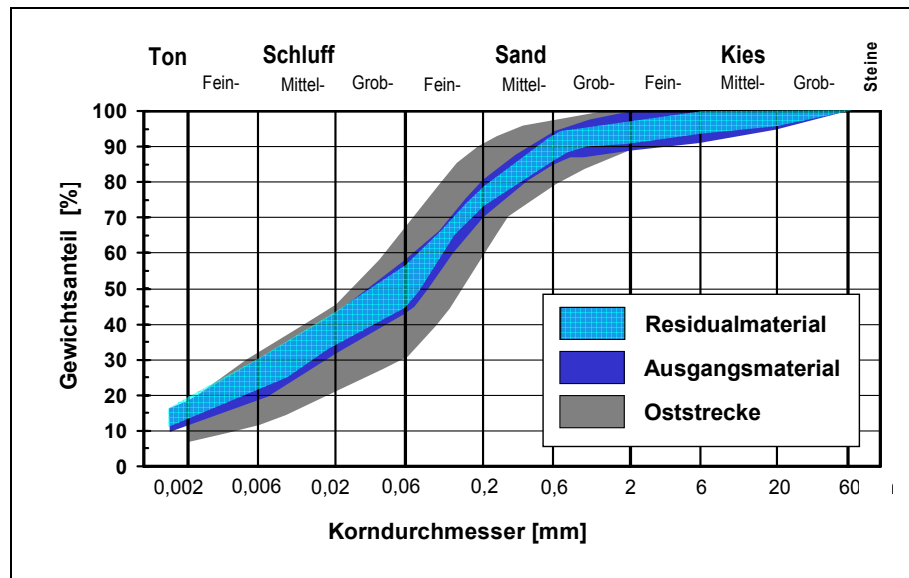


Bild 40: Vergleich der Körnungsbänder von Rinnenresidual- und Ausgangsmaterial (Anzahl Einzelversuche: 10/40)

Als Folge der großen Schwankungsbreite des **Kalkgehalts** im NOK-Geschiebemergel lässt der Vergleich der Kalkgehalte vor und nach dem Versuch in der Umlaufrinne keine eindeutige Tendenz erkennen: nach dem Versuch treten sowohl höhere als auch niedrigere Kalkgehalte als im Ausgangsmaterial auf (Bild 41).

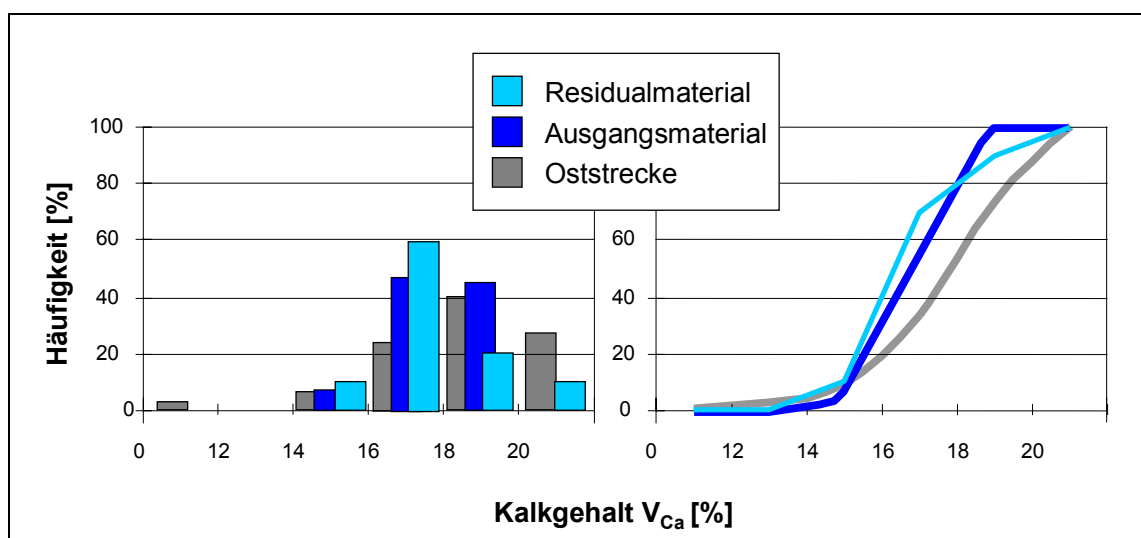


Bild 41: Vergleich der Kalkgehalte von Rinnenresidual- und Ausgangsmaterial (Anzahl Einzelversuche: 10/40)

Beim **Wassergehalt** ist die nach dem Rinnenversuch zu erwartende Aufweichung zu beobachten. Bei gleichbleibender Verteilungsform sind die Wassergehalte einheitlich von im Mittel 12,1 % im Ausgangsmaterial auf im Mittel 16,0 % beim Rinnenresidualmaterial angestiegen (Bild 42).

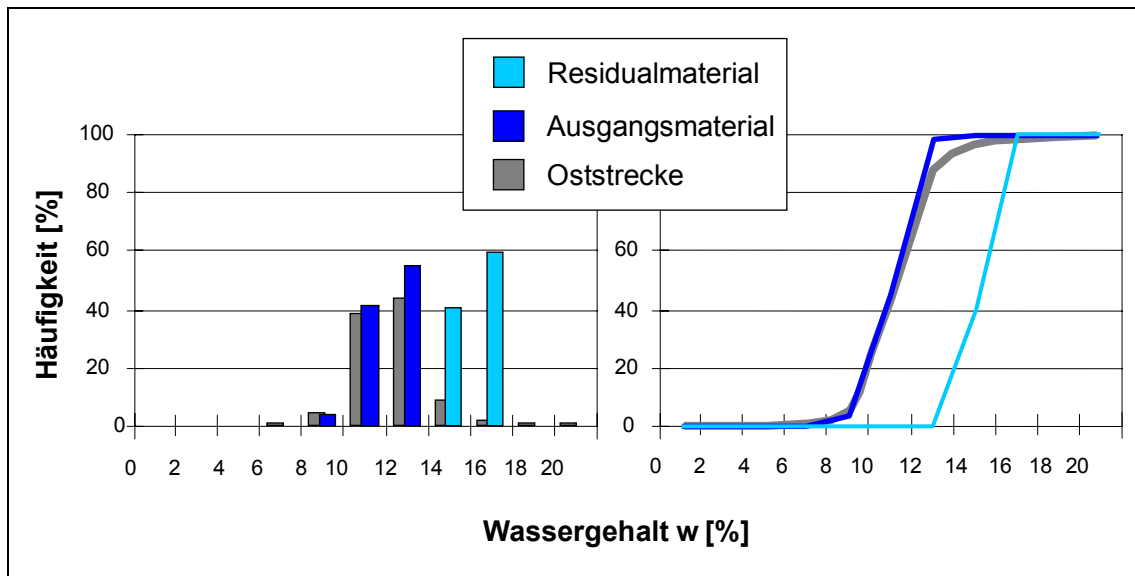


Bild 42: Vergleich der Wassergehalte von Rinnenresidual- und Ausgangsmaterial (Anzahl Einzelversuche: 10/40)

Je eine Geschiebemergelprobe aus dem Ausgangs- und dem Rinnenresidualmaterial wurde mit dem **Rasterelektronenmikroskop** untersucht (Bild 43), um so einen Hinweis auf die Veränderung der Feinstruktur des Geschiebemergels während des Strömungsversuches zu erhalten. Bei nur einer untersuchten Probe kann nur ein erster Eindruck vermittelt werden; für belastbare Aussagen wäre eine Vielzahl von Untersuchungen erforderlich.

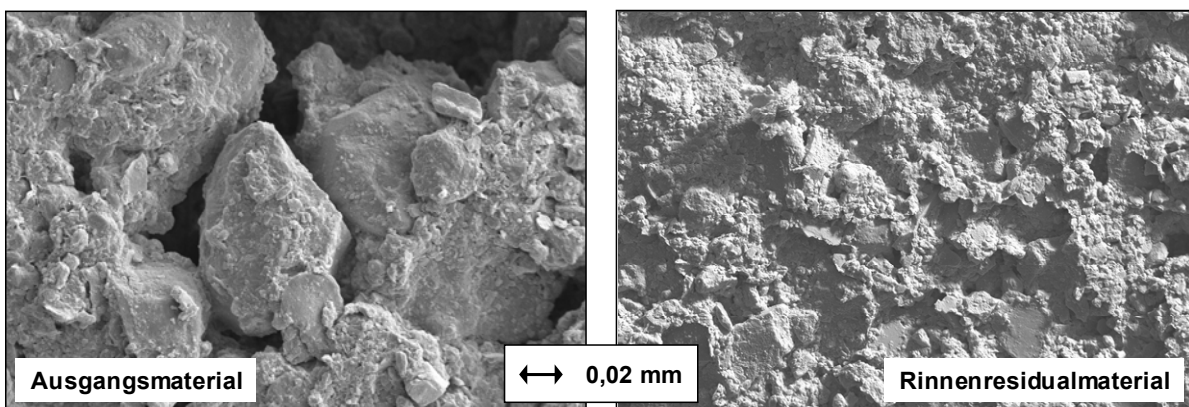


Bild 43: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Ausgangs- und Rinnenresidualmaterial



Die Fotos zeigen, dass der Geschiebemergel vor dem Rinnenversuch (Bild 43, links) ein deutlich größeres Porenvolumen aufweist, als nach dem Versuch (rechts) und dass die Poren nun durch Feinstmaterial gefüllt sind. Nach GARBRECHT (1961; s. Kap. 7.1.1.2) führt aber ein kleineres Porenvolumen zu einer Verschiebung des Erosionsbeginns hin zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten; ein kleineres Porenvolumen wirkt also erosionsstabilisierend.

Möglicherweise könnte dieser Effekt – sollte er sich denn bewahrheiten und nicht nur unter Strömung, sondern auch im Stillwasser auftreten – erklären, warum die Proben im Stillwasser nur während des ersten Tages zerfielen und der Zerfallsprozess dann zum Stillstand kam (vgl. Kap. 7.1.2.1).

7.2 Ergebnisse der wasserbaulichen Untersuchungen

7.2.1 Veränderung der Geschiebemergeloberfläche in der Umlaufrinne

Als jeweiliges Zwischenergebnis, dementsprechend ein Zwischenschritt hin zur Berechnung des mittleren Schichtdickenverlusts, wurden im Folgenden ausgewählte Profilauswertungen dargestellt und hinsichtlich der geschwindigkeitsabhängigen Oberflächenveränderungen eines mittigen Profils bewertet. Eine Zusammenstellung aller Zwischenschritte und Profilaufnahmen ist dem Messbericht zu entnehmen (Anlage 1).

Die Darstellungen der ausgewählten Profilauswertungen (Bild 44 bis Bild 46) zeigen zur Orientierung jeweils die Linienecholotaufzeichnungen der Geschiebemergelstrecke (Ausgangszustand, oben rechts), das ausgewählte Linienprofil an der Position $y = 56$ cm (oben links) sowie einen vergrößerten Abschnitt dieses Linienprofils zwischen den Rinnenmetern 50 m bis 60 m (Geschiebemergelplateau).

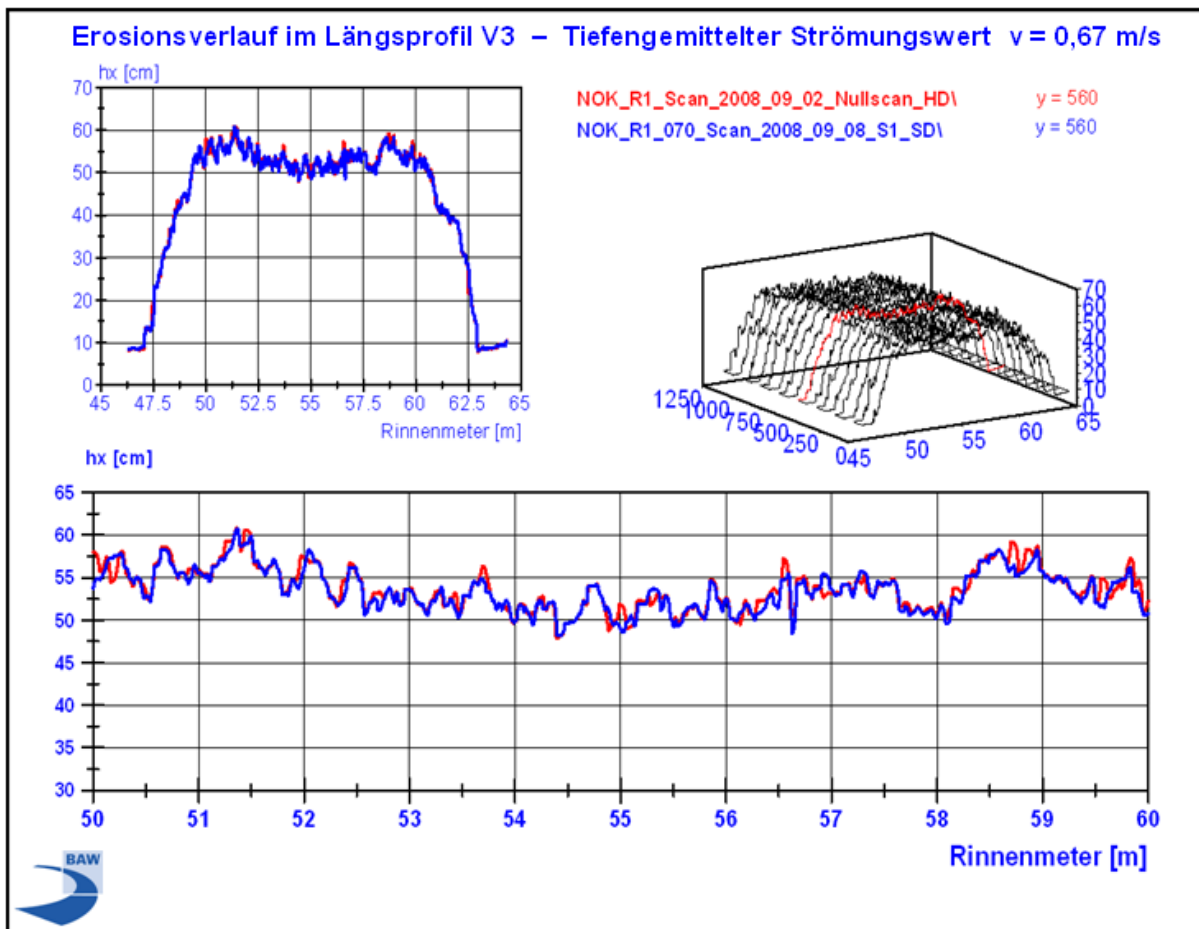


Bild 44: Mittiges Längsprofil der Geschiebemergelstrecke nach Einbau (rot) und dasselbe Profil nach einer Strömungsbelastung bis zu $v = 0,67 \text{ m/s}$ (blau)

Bis zu Strömungsgeschwindigkeiten von etwa $v = 0,7 \text{ m/s}$ sind in dem Vergleichsprofil nach einer Belastungszeit von etwa 6 Stunden nur geringe Veränderungen an der Oberfläche des Geschiebemergels festzustellen (Bild 44). Vereinzelt wurden exponiert liegende Spitzen gekappt, eine allgemein einsetzende flächenhafte Erosion des Geschiebemergels ist nicht festzustellen. Dieses Resultat stimmt mit den Ergebnissen der Vorversuche an aufbereiteten Sonderproben des NOK-Geschiebemergels überein.

Eine Steigerung der Strömungsbelastung führte zu weiteren Oberflächenveränderungen, so dass der eingebaute Geschiebemergel auf Basis einer Versuchszeit von ca. 6 Stunden ab Strömungsgeschwindigkeiten von über $v = 0,7 \text{ m/s}$ nicht mehr als erosionsstabil zu bewerten war.

Deutliche Oberflächenveränderungen sind beim Vergleich der Profilauswertung nach einer Strömungsbelastung des Geschiebemergelkörpers bis etwa $v = 1,35 \text{ m/s}$ festzustellen (Bild 45). Bei dieser Belastung hatte eine annähernd flächenhafte Erosion des Geschiebemergels eingesetzt, die zu einer Glättung des Profils, allerdings noch ohne deutliche Verfüllung von „Tälern“, und vor allem im Bereich der hinteren Einbaustrecke zu einer Niveauabnahme bis zu etwa 5 cm führte. Die Wassersäule war bei einer derart hohen Strömungsgeschwindigkeit bis zur Oberfläche mit Tonpartikeln und in Suspension sohnah transportiertem Feinsand angereichert.

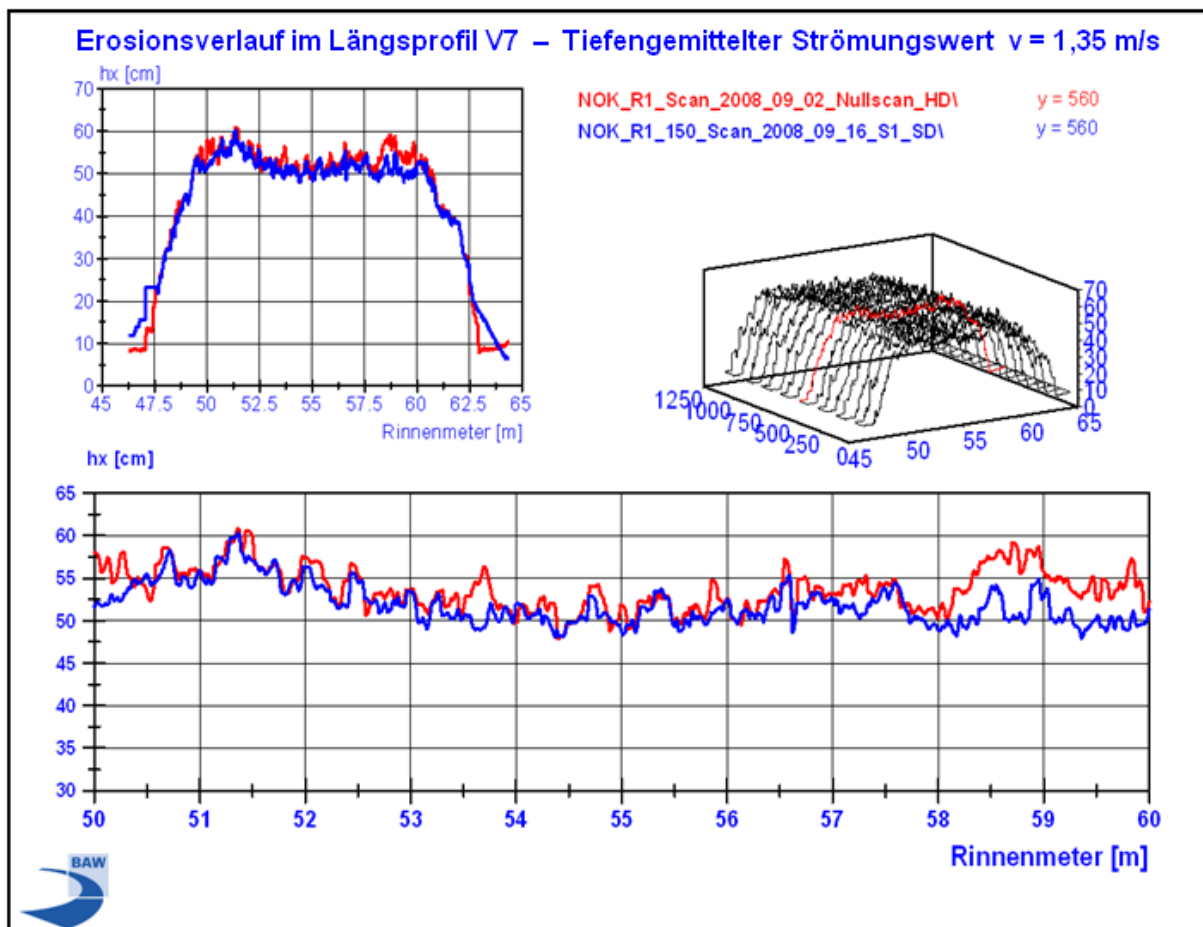


Bild 45: Mittiges Längsprofil der Geschiebemergelstrecke nach Einbau (rot) und dasselbe Profil nach einer Strömungsbelastung bis zu $v = 1,35 \text{ m/s}$ (blau)

Als Extrembeispiel für das weitergehende Erosionsverhalten des eingebauten Geschiebemergels des NOK wurden vergleichende Auftragungen wiederum des annähernd mittigen Profils ($y = 56 \text{ cm}$, vgl. Bild 17) nach Einbau der Versuchsstrecke und nach der Belastung durch eine tiefengemittelten Strömung bis zu $v = 1,7 \text{ m/s}$ zusammengestellt (Bild 46).

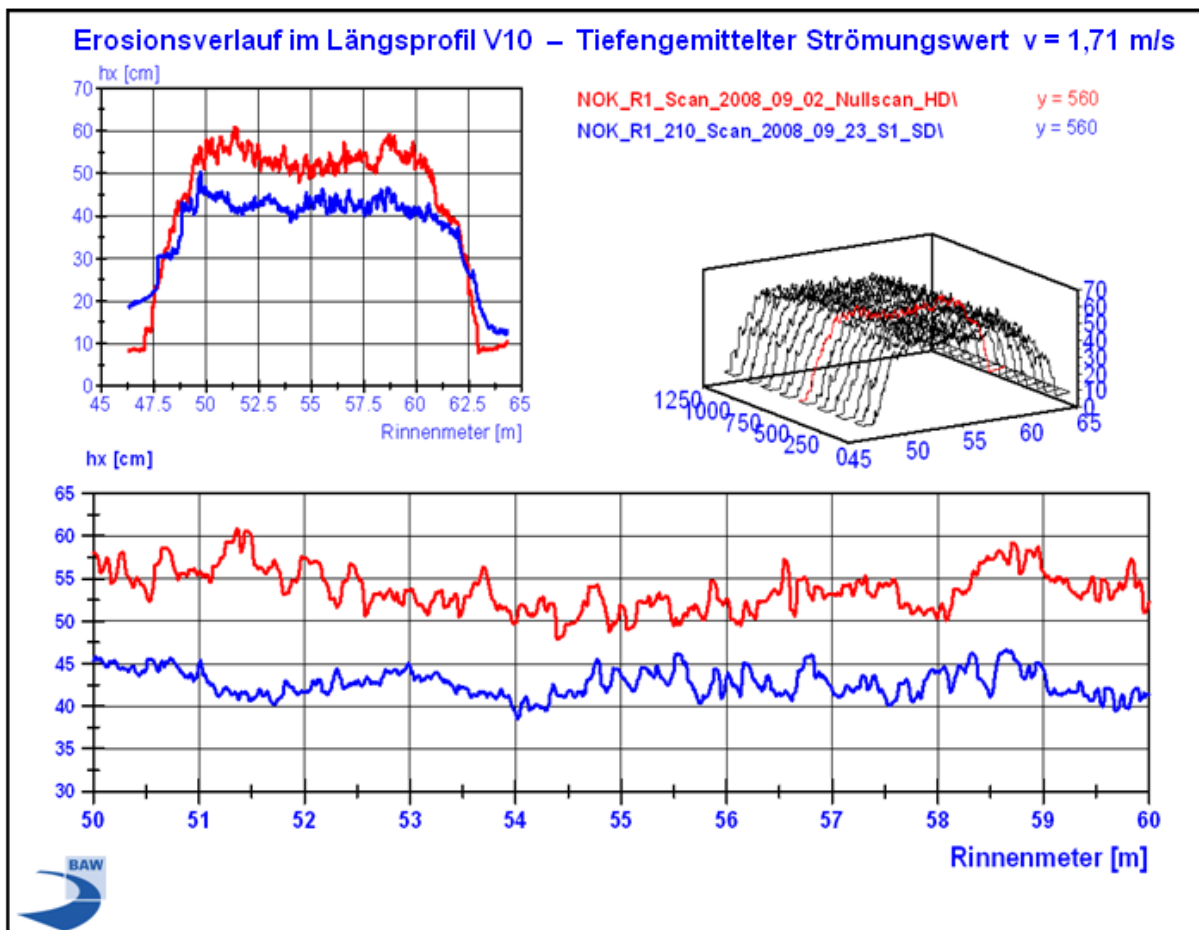


Bild 46: Mittiges Längsprofil der Geschiebemergelstrecke nach Einbau (rot) und dasselbe Profil nach einer Strömungsbelastung bis zu $v = 1,71 \text{ m/s}$ (blau)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die hohen Strömungsgeschwindigkeiten über der Geschiebemergelstrecke in diesem Profil ab etwa $v = 0,7 \text{ m/s}$ in der Summe zu einer vertikalen Sohlabnahme bis zu maximal etwa 15 cm führten. Dabei war besonders deutlich zwischen den Rinnenmetern 50 m und etwa 54 m in Form einer Glättung des Oberflächenprofils festzustellen, wozu allerdings zusätzlich auch der strömungsbedingte Sedimenttransport der Sandsohle in Form eines durchwandernden Transportkörpers (Unterwasserdüne) beigetragen hatte.

Weitere Versuchsserien mit annähernd gleich hoher Strömungsgeschwindigkeit, nochmals über einen Zeitraum von etwa 12 Stunden (V 11 und V 12, vgl. Tabelle 1: Versuchsablauf, jeweilige Strömungsbelastung und -dauer nach Anlage 1), führten in dem analysierten Profil in der Summe zu maximalen vertikalen Abnahmen bis zu 0,2 m.

Anhand der analysierten Profiländerungen ist festzuhalten, dass mit der Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit mit einem überproportionalen Anstieg der Erosionsrate des gebaggerten NOK-Geschiebemergels zu rechnen ist.

7.2.2 Schichtdickenverlust in Abhängigkeit von der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

Die Analyse der geschwindigkeitsabhängigen Profiländerungen deutete auf einen überproportionalen Anstieg der Erosionsrate des gebaggerten NOK-Geschiebemergels hin, so dass weitergehende Auswertungen auf eine klare Formulierung der funktionellen Abhängigkeit ausgerichtet waren. Dazu wurde nach dem in Anlage 1 beschriebenen Verfahren der mittlere Schichtdickenverlust der ausgewählten Geschiebemergelfläche (ca. 6 m²) für jede einzelne Geschwindigkeitsstufe ermittelt.

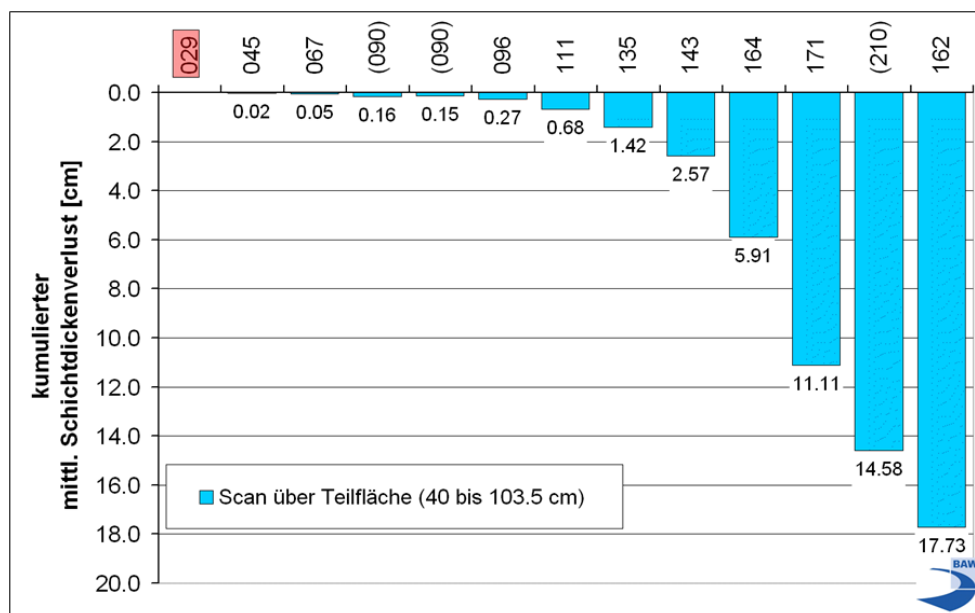


Bild 47: Mittlerer Schichtdickenverlust als Summe aller Einzelversuche auf der Auswertefläche in [cm/6h] (nach Anlage 1)

Die geschwindigkeitsabhängigen Schichtdickenverluste sind zum einen als Summe aller Einzelversuche in Bild 47 und als jeweilige Differenz des mittleren Schichtdickenverlusts jedes Einzelversuchs in Bild 48 aufgetragen. Bezugsmessung ist jeweils der Versuch V1 ($v = 0,29$ m/s, rote Markierung). Anhand der Daten beider Grafiken wurde deutlich, dass sich der überproportionale Anstieg der Erosionsrate bis zu der höchsten, tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1,71$ m/s mit einer Exponentialfunktion beschreiben lässt.

Auch die beiden letzten Versuchsserien mit ihren aufgrund der erosionsbedingten Querschnittsaufweitung etwas geringeren, tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten können mit der ermittelten Funktion beschrieben werden (vgl. Bild 48 und Bild 49). Die Messwerte der 10 Versuchsserien mit berechenbarer tiefengemittelter Strömungsgeschwindigkeit sowie die daraus entwickelte Funktion des strömungsabhängigen mittleren Schichtdickenverlustes sind in Bild 49 dargestellt.

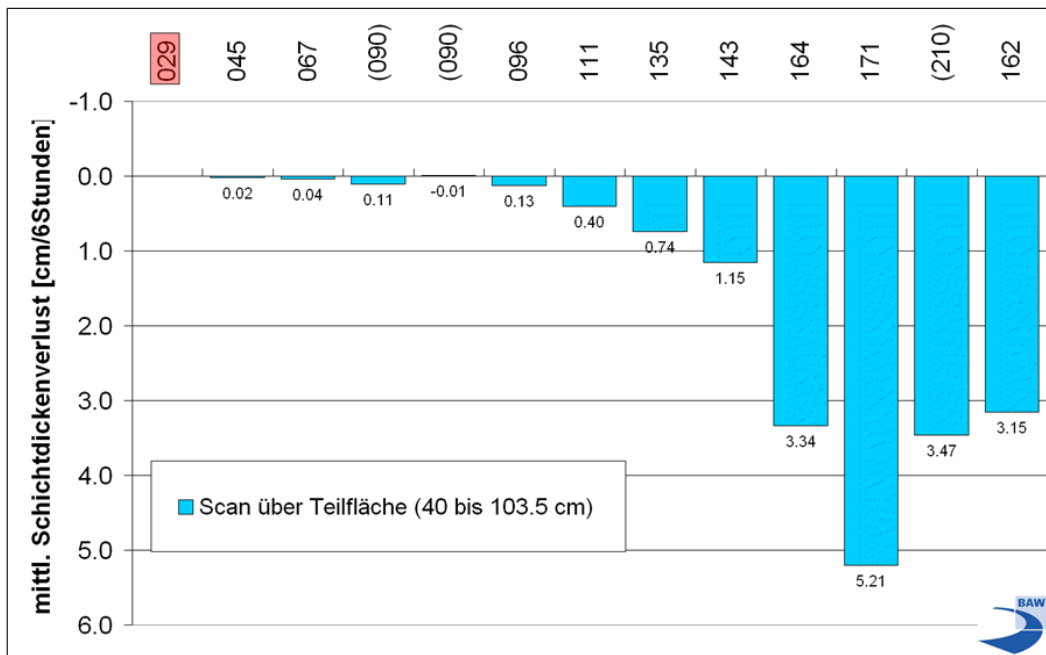


Bild 48: Differenzen des mittleren Schichtdickenverlusts jedes Einzelversuchs auf der Auswertefläche in [cm/6 h] (nach Anlage 1)

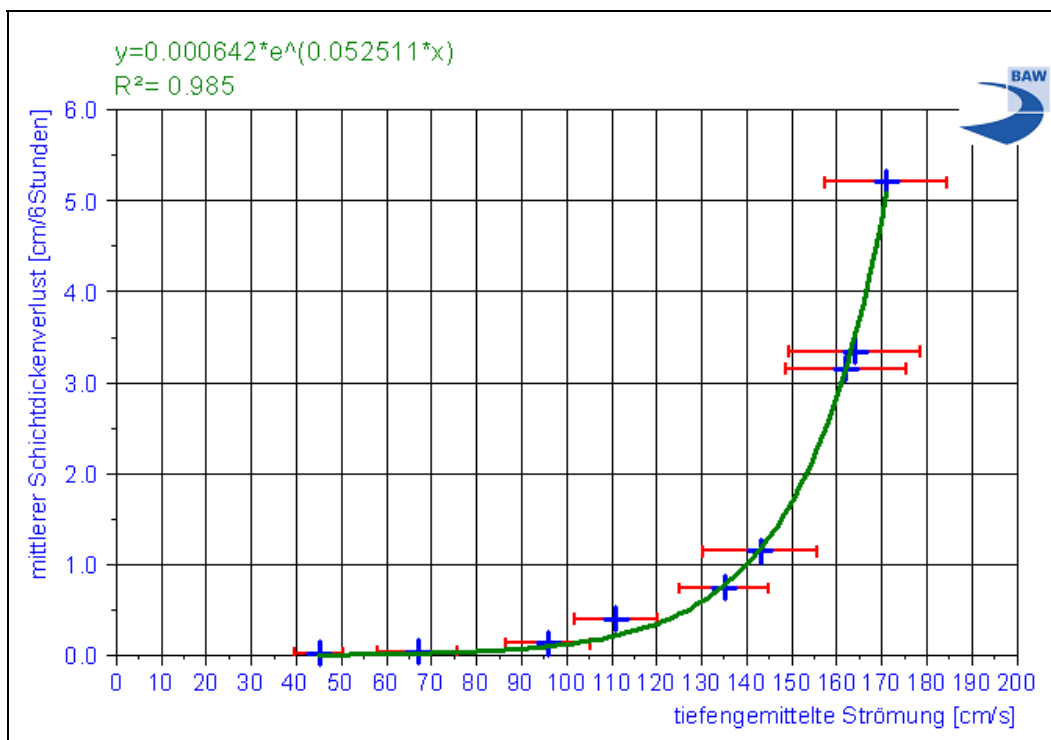


Bild 49: Mittlerer Schichtdickenverlust in [cm] in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit und der Belastungsdauer von 6 Stunden (mit Standardabweichung)

Neben der optischen Kongruenz verdeutlicht der Regressionskoeffizient mit einem Wert von $R^2 = 0,985$ die hohe Übereinstimmung der ermittelten Exponentialfunktion

$$y = 0,000642 \cdot e^{0,0525 \cdot x}$$

mit den Messwerten (x = tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit; y = mittlerer Schichtdickenverlust; Bild 49).

Die in der Grafik für jeden Geschwindigkeitspunkt zusätzlich als roter Querbalken eingetragene Standardabweichung der tiefengemittelten Strömung ist als Maß für die gemessene, tiefenabhängige Turbulenz zu verstehen, die wie zu erwarten mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit größer wurde und Maximalwerte von etwa $\sigma \approx \pm 0,15$ m/s erreichte.

Aufgrund der durch das Bagerverfahren zerstörten Struktur des natürlich abgelagerten Geschiebemergels begann der wirksame Erosionsprozess bei einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit von etwa $v \approx 0,7$ m/s. Bei dieser Strömungsgeschwindigkeit von $v \approx 0,7$ m/s waren für den gebaggerten NOK-Geschiebemergel mittlere Schichtdickenverluste von rund 0,07 mm/h (nach Bild 48: 0,04 cm/6h) festzustellen. Bei einer tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit von $v \approx 0,45$ m/s sind mittlere Schichtdickenverluste von annähernd 0,03 mm/h (nach Bild 48: 0,02 cm/6h) berechnet worden. Somit ist auf Basis der Strömungsuntersuchungen in der Umlaufrinne von einer ausreichenden Erosionsstabilität des gebaggerten NOK-Geschiebemergels bis zu einer sohnahen Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s auszugehen, da u.a. die lokale vertikale Messgenauigkeit bei ca. 0,3 mm lag (Anlage 1).

8 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen in der Umlaufrinne zum Erosionsverhalten des gebaggerten und damit in seiner natürlichen Struktur gestörten NOK-Geschiebemergels unter Strömungsbelastung haben gezeigt, dass der Erosionsbeginn des in Brocken eingebauten Geschiebemergels sich von den in der Natur ermittelten Grenzwerten deutlich unterscheidet (u.a. GARBRECHT, 1961; s. Kap. 4 und 7.1.1.2). Auf Basis der Strömungsuntersuchungen in der Umlaufrinne ist festzuhalten, dass eine ausreichende Erosionsstabilität des flächenhaft eingebauten gebaggerten NOK-Geschiebemergels bis zu einer sohnahen Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s vorhanden ist.

Auf der sicheren Seite liegend ist deshalb bzgl. der Erosionsstabilität des gebaggerten NOK-Geschiebemergels eine maximale sohnahen Strömungsgeschwindigkeit von **$v = 0,5$ m/s** anzusetzen.

Die geotechnischen Untersuchungen zeigten erste Zerfallserscheinungen der Probenkörper in der Umlaufrinne ab einer tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,8$ m/s.



Aufgrund der geringen Erosionsraten der in der Umlaufrinne eingebauten Geschiebemergelstrecke bei höheren sohnahen Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa $v \approx 0,7$ m/s kann die mögliche bautechnische Verwendung des Geschiebemergels z.B. als Abdeckmaterial ggf. vertreten werden, wenn durch zusätzliche Feldversuche über mindestens eine Schlechtwetterperiode hinaus das Material unter den örtlichen instationären Strömungs- und Wellenbelastungen mit hochgenauen Sonden vermessen und die Lagestabilität des Geschiebemergels nachgewiesen wird.

8.1 Ablagerung des Baggerguts in der Ostsee

8.1.1 Hydrologische Randbedingungen des Verklappungsgebietes

Die Ablagerung des gebaggerten Geschiebemergels aus der Ausbaustrecke des NOK ist in einem Abschnitt der Kieler Bucht (ca. $10^{\circ}15'$ Ost / $54^{\circ}35'$ Nord) bei einer Wassertiefe von etwa 20 m bis 21 m unter dem mittleren Wasserstand vorgesehen (detaillierte Angaben siehe [U1]).

Für diesen Abschnitt der westlichen Ostsee lagen zum einen Strömungsmessungen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH; LANGE et al., 1991; [U1]) vor, zum anderen standen Seegangssimulationen auf Basis von Klimadaten aus KOLAX und HUPFER (1999) zur Verfügung.

Die Strömungsdaten in der Kieler Bucht (ca. $10^{\circ}14'$ Ost, $54^{\circ}37'$ Nord; Bild 50, blaue Markierung) wurden direkt im vorgesehenen Klappstellengebiet für den NOK-Geschiebemergel erfasst und stammen aus einem Zeitraum von 1982 bis 1986, wobei sohnah Messdaten von rund 16 Monaten für die Analyse verwendet wurden (LANGE et al., 1991). Die Grafik in Bild 50 zeigt Strömungsrosen mit Richtungsangaben vom Messpunkt in Strömungsrichtung als prozentuale stündliche Vektormittel (über 45°) von Januar bis Dezember aus den im Messzeitraum verarbeiteten Daten. Die hier dargestellten bodennahen Strömungen wurden ca. 4 m über der Sohle gemessen und erreichten gemäß der vektoriellen Strömungsverteilung Werte von etwa $0,25$ m/s $< v < 0,38$ m/s in 0,6 %/a (ca. 53 h/a; Bild 50, blaue Markierung, Vektor NW) Die gemessenen Maximalwerte traten mit $0,40$ m/s $< v < 0,45$ m/s in 0,1 % des Jahres auf (ca. 9 h/a; LANGE et al., 1991, dort Tabelle Seite 32). Die vorherrschenden, nach West bzw. Südwest zeigenden Strömungsrichtungen erreichen in 20 % bis 25 % des Jahres Strömungswerte im Bereich bis zu $v < 0,13$ m/s und in rund 5 %/a bis 10 %/a Werte bis $v = 0,25$ m/s (Bild 50, blaue Markierung; LANGE et al., 1991).

Im Vergleich zu den Strömungsmessungen in der Mecklenburger Bucht (Bild 50, grüne Markierung), in deren Nahbereich die Untersuchungen zum verklappten Geschiebemergel im Rahmen des Projekts DYNAS (DYNAS, 2005; s. Kap. 4) vorgenommen wurden, sind im

Bereich der vorgesehenen Klappstelle in der Kieler Bucht deutlich geringere Strömungsbelastungen zu erwarten.

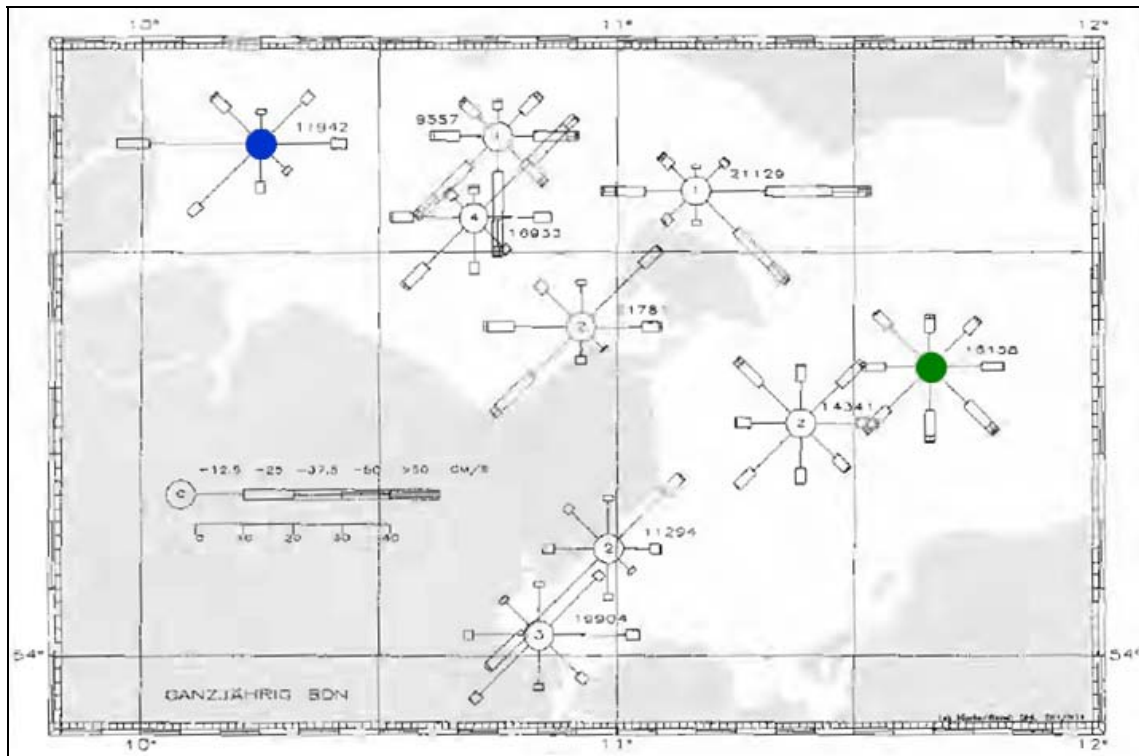


Bild 50: Bodennahe Strömungen in der westlichen Ostsee (ca. 4 m ü. Sohle) von Januar bis Dezember (stündliche Mittelwerte) zwischen 1982 und 1986 (aus LANGE et al., 1991)

Die Analyse der von KOLAX und HUPFER (1999) vorgenommenen Simulationsergebnisse zur Seegangsenergie für den Bereich der Kieler Bucht im Seegebiet vor Eckernförde (ca. 10°6' Ost, 54°36' Nord) ergab für das vorgesehene Klappstellengebiet eine mittlere jährliche Seegangsenergie von rund 1 MWh/a, was im Vergleich mit der gesamten deutschen Oststeeküste im unteren Drittel der berechneten Belastungen lag. Im Vergleich zum Seegebiet vor Kühlungsborn (Untersuchungsgebiet DYNAS; ca. 2 MWh/a nach KOLAX und HUPFER, 1999) ist in der Kieler Bucht mit einer um etwa 50 % geringeren Seegangsbelastung zu rechnen.

8.1.2 Bewertung der Lagestabilität im Verklappungsgebiet

Ausgehend von den beschriebenen hydrologischen Randbedingungen im Bereich des vorgesehenen Verklappungsgebiets mit zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten bis zu maximal rund $v_{MAX} = 0,45$ m/s ist der gebaggerte Geschiebemergel auf Basis der Untersuchungsergebnisse der BAW als annähernd lagestabil zu bewerten.



Bei einem mittleren Schichtdickenverlust von annähernd 0,03 mm/h bei $v = 0,45$ m/s nach den Ergebnissen der BAW-Erosionsversuche ist aufgrund einer vergleichbaren Strömungsbelastung auf der vorgesehenen Klappstelle in einer Zeit von ca. 9 h/a (LANGE et al., 1991) von einem mittleren jährlichen Schichtdickenverlust von etwa 0,3 mm auszugehen. Selbst mit heutiger, hochgenauer Wasserschallfeldmesstechnik ist dieser mittlere jährliche Schichtdickenverlust nicht zu messen (Genauigkeit des Mittelstrahls ca. $\pm 0,6$ mm bei einer Wassertiefe von ca. 18,5 m; STOCKMANN, 2005).

Werden des weiteren die Ergebnisse der Untersuchungen von BOHLING (2003; Ostsee, kohäsive Schlicke, Wassertiefe > 20 m, mittlere Strömungs- und Wellensituationen: Erosionsrisiko < 1 %), DIESING (2003) und STOCKMANN (2005; vgl. Kapitel 4) zur Bewertung der Lagestabilität herangezogen und hinsichtlich der deutlich geringeren Belastung in der Kieler Bucht gegenüber der in der Mecklenburger Bucht beurteilt, ist für den gebaggerten Geschiebemergel in dem für die Verklappung vorgesehenen Gebiet mit einer hohen Lagestabilität zu rechnen.

8.2 Eignung des Baggerguts zur weiteren Verwendung

Aufgrund der Erosionsstabilität des gebaggerten Geschiebemergels bis zu Strömungsgeschwindigkeiten von $v \approx 0,5$ m/s kann das Material z.B. unter Wasser zur Abdeckung von Böden, die schon bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten erodieren, wie z.B. ton- und schlufffreie, fein- und gleichkörnige Sande, genutzt werden. Allerdings sollten hierzu interdisziplinäre Feldversuche unter instationären Strömungs- und Wellenbelastungen durchgeführt werden, um die Erosionsstabilität auch in den vorgesehenen Gebieten unter den dortigen lokalen Belastungen zu überprüfen.

Für eine Verwendung des Geschiebemergels im Elbeästuar seewärts von Brunsbüttel können auf Grundlage von berechneten Tideströmungen aus hydrodynamisch-numerischen Ästuarmodellen die Erosionsrate und die Verweildauer des verklappten Materials abgeschätzt werden. Als Beispiel wurde aus den Strömungsberechnungen der BAW für einen Zeitraum von rund 5 Jahren (2002 bis 2007) im Bereich des Neufelder Sands eine Position mit Maximalwerten bis zu $v \approx 1,0$ m/s ausgewählt, der Strömungsverlauf in 20-Minutenmittel geteilt und jeweils mit der auf 20 Minuten normierten Erosionsrate (mittlerer Schichtdickenverlust aus den BAW-Versuchen in der Umlaufrinne) multipliziert (Bild 51).

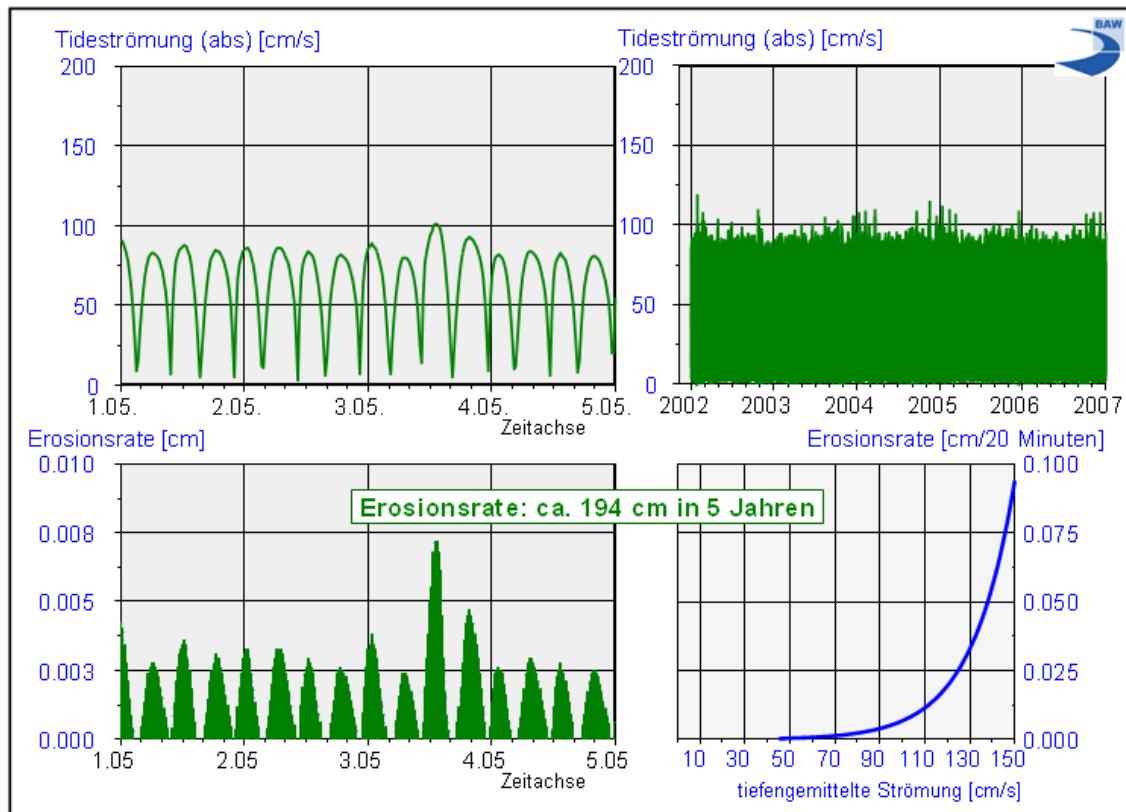


Bild 51: Beispiel für die Ermittlung einer Erosionsrate über ca. 5 Jahre im Bereich des Elbeästuars auf Basis der Rinnenversuche und berechneter Tideströmungen

Auf der rechten Seite oben in Bild 51 sind die lokalen Strömungswerte über den 5-Jahreszeitraum dargestellt, die Grafik rechts unten zeigt die auf 20 Minuten normierte Erosionsrate gemäß der Untersuchungen in der Umlaufrinne der BAW. Auf der linken Seite ist auszugsweise ein 4-Tageszeitraum der Tideströmung (Bild 51, oben links) und die entsprechende geschwindigkeitsabhängige Erosionsrate (Bild 51, unten links) dargestellt.

Auf Basis der gewählten Randbedingungen ist an dieser Position nach 5 Jahren mit einem mittleren Schichtdickenverlust des gebaggerten NOK-Geschiebemergels von rund 1,9 m zu rechnen, so dass der Geschiebemergel bei derartigen Strömungsbelastungen nicht dauerhaft als Abdeckmaterial verwendet werden sollte.

8.3 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Die Untersuchungen in der Umlaufrinne der BAW-DH zum Erosionsverhalten von gebaggertem Geschiebemergel aus der Oststrecke des NOK haben gezeigt, dass bis zu einer sohl-nahen Strömungsgeschwindigkeit von rund $v = 0,5 \text{ m/s}$ von einer ausreichenden Erosionsstabilität ausgegangen werden kann.



Eine Verwendung des gebaggerten Geschiebemergels als ständig wirkendes Abdeckmaterial z.B. von Sandböden in Tideästuaren kann nur bei sohlennahen Strömungsbelastungen bis maximal $v_{MAX} \approx 0,5$ m/s empfohlen werden. Die BAW empfiehlt, für eine bautechnische Verwendung des Materials im Tideregime diese im Laborgerinne erzielten Ergebnisse durch zusätzliche Feldversuche abzusichern, indem über mindestens eine Schlechtwetterperiode hinaus das Material unter den örtlichen instationären Strömungs- und Wellenbelastungen mit hochgenauen Sonden vermessen und die Lagestabilität des Geschiebemergels bewertet wird.

Für Rückfragen stehen wir zur Verfügung.

Hamburg, im April 2009

Im Auftrag	für Ästuarsysteme I (K2):	für Geotechnik Nord (K1):
<i>gez. Rahlf</i>	<i>gez. Uliczka</i>	<i>gez. Heeling</i>
BDir Dipl.-Ing. H. Rahlf	Dr.-Ing. K. Uliczka	Dipl.-Geol. A. Heeling



9 Literaturverzeichnis

- AG Boden Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Hannover 1994
- BAW Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW), Karlsruhe 2006
- Bohling, B. Untersuchungen zur Mobilität natürlicher und anthropogener Sedimente in der Mecklenburger Bucht
Dissertation Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Greifswald 2003
http://www.io-warnemuende.de/projects/dynas/dynas2/db/data/pub/bohling_2003.pdf
- Garbrecht, G. Erfahrungswerte über die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Flüssen und Kanälen
Wasser und Boden, Heft 5, 1961
- Diesing, M. Die Regeneration von Materialentnahmestellen in der südwestlichen Ostsee unter besonderer Berücksichtigung der rezenten Sedimentdynamik
Dissertation Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Kiel 2003
- DYNAS Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation - Sedimentationsprozesse in der Mecklenburger Bucht, Phase II, Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Fachbereich Biologie der Universität Rostock. Forschungsvorhaben des BMBF 03F0280A, Abschlussbericht, Rostock 2005
http://www.io-warnemuende.de/projects/dynas/dynas2/db/data/pub/dynas_II_abschlussbericht_2seitig.pdf
- Fehse, C. Untersuchungen über den Nachweis einer elsterzeitlichen Rinne im Bereich des Medemgrundes, Elbmündung. Unveröffentl. Diplomarbeit (2009: in Bearbeitung), Geologisch-Paläontologisches Institut der Freien Universität Hamburg
- Kolax, M.
Hupfer, P. Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation und die Veränderlichkeit des Seegangs vor der deutschen Ostseeküste
Die Küste, Heft 61, Heide 1999



- Lange, W.
Mittelstaedt, E.
Klein, H. Strömungsdaten aus der Westlichen Ostsee, Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Erg.-H. B, Nr.24, ISSN OOTO-4172, BSH, Hamburg 1991
- Raudkivi, A.J. Loose Boundary Hydraulics, 2nd Edition, Pergamon Press, Frankfurt-am-Main 1976
- Raudkivi, A.J. Grundlagen des Sedimenttransports, Springer-Verlag, Heidelberg 1982
- Raudkivi, A.J. Loose Boundary Hydraulics
A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands 1998
- Schweim, C. Modellierung und Prognose der Erosion feiner Sedimente.
Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, FB Bauingenieurwesen, 2005
- Shugar, D.
Kostaschuk, R.
Ashmore, P.
Desloges, J.
Burge, L. In situ jet-testing of the erosional resistance of cohesive streambeds
Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.34, NRC Research Press, Canada 2007
- Stockmann, K. Quantifizierung morphologischer Veränderungen verklappter Sedimente vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns
Diplomarbeit, Universität Leipzig, FB Geophysik, GKSS, Geesthacht 2005
http://www.io-warnemuende.de/projects/dynas/dynas2/db/data/pub/stockmann_2005.pdf
- WSA Kiel-Holtenau http://www.wsa-kiel.wsv.de/ausbau_oststrecke_nok/
Stand 04/2009
- Winterwerp, J.C.
Van Kesteren, W.G.M. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment
in: Developments in Sedimentology 56, Editor: T. van Loon, Elsevier, 2004
- Zanke, U. Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer-Verlag, Heidelberg 1982