

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Erchinger, Heie F.; Coldewey, Hans-Gerd; Probst, Klaus**  
**Empfehlungen für eine wirksame Außentiefräumung als**  
**Ergebnis des Forschungsvorhabens "Tiefenstabilisierung**  
**von Aussentiefs"**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101283>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Erchinger, Heie F.; Coldewey, Hans-Gerd; Probst, Klaus (1988): Empfehlungen für eine wirksame Außentiefräumung als Ergebnis des Forschungsvorhabens "Tiefenstabilisierung von Aussentiefs". In: Die Küste 47. Heide, Holstein: Boyens. S. 245-294.

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Empfehlungen für eine wirksame Außentiefräumung als Ergebnis des Forschungsvorhabens „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“

Von HEIE F. ERCHINGER, HANS-GERD COLDEWEY und KLAUS PROBST

## Zusammenfassung

Nach Abschluß des vom BMFT geförderten KFKI-Forschungsvorhabens werden die Ergebnisse der Untersuchungen in Ergänzung des Zwischenberichtes von 1986 in H. 44 dieser Reihe und die gewonnenen Erkenntnisse für die Unterhaltung von Außentiefs mitgeteilt.

Die Naturmessungen haben interessante Ergebnisse von Schwebstoffgehalten im Wattgebiet in Abhängigkeit von der Windstärke und im Außentief während der Spülströmungen gebracht und die Wirkung des Schiffsverkehrs auf die Materialumlagerung im Außentief erfaßt.

Eingehend wurde die Wirkungsweise von Stromräumbooten für die Außentiefunterhaltung erforscht. Die Sedimente und schllickig-schluffigen Schwebstoffe wurden durch Sieb- und Schlämmanalysen, mit Rasterelektronenmikroskop sowie mit dem Cilas-Laser-Granulometer analysiert und ergaben Einblicke in Sedimentaufbau und -veränderung nach Räumbooteinsatz. Durch Schwebstoffkonzentrationsmessungen wurden die Schwebstoffmobilisierung während Räum- und Beschleunigungsphasen sowie die Sedimentation während Verzögerungsphasen und die Schwebstofftransportmengen in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit ermittelt. Dabei wurden auch Sauerstoffgehalt und Temperatur während der Räumphasen erfaßt.

Unter Auswertung der erforschten Erkenntnisse werden Empfehlungen für die Unterhaltung von Außentiefs und für die Bemessung von Spülanlagen gegeben.

## Summary

*An interim report on the BMFT sponsored KFKI research project "Depth Stabilization of Offshore Channels", was presented in Volume 44 of "Die Küste". The results and conclusions of the project will be presented here.*

*The field measurements have led to interesting information on the effect of wind on suspended sediment transport in intertidal zones during flushing procedures as well as the influence of ship traffic on the distribution of material.*

*The effectiveness of current displacement boats (clearing boats) for offshore channel maintenance was investigated in detail. The sediment, and mud/silt material were analysed using sieves and mud analysis techniques using a raster electron microscope as well as a Cilas-Laser-Granulator. Suspended sediment concentration and velocity measurements allow a determination of the mobilization of suspended material during flushing and acceleration phases of the currents as well as the deposition during the deceleration phases. Water temperature and dissolved oxygen concentrations were also measured.*

*Based on these results, recommendations are made for the maintenance of offshore channels and the dimensioning of flushing techniques.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	246
1.1 Das Forschungsvorhaben . . . . .	246
1.2 Funktion des Außentiefs und Beeinflussung seiner Querschnittsgestaltung . . . . .	247
2. Untersuchungen im Forschungsprojekt . . . . .	250
2.1 Ziele der Untersuchungen . . . . .	250

2.2 Versuchseinrichtungen . . . . .	250
2.3 Versuchsdurchführung . . . . .	251
3. Sediment- und Schwebstoffmessungen ohne Räumbooteinsatz . . . . .	253
3.1 Abhängigkeit von Wind und Seegang . . . . .	253
3.2 Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bei Spülbetrieb und nach Spülunterbrechung . . . . .	255
3.3 Einflüsse des Schiffsverkehrs . . . . .	259
3.4 Schwebstofftransport . . . . .	263
3.5 Optimierung des Spülbetriebs . . . . .	264
4. Räumbooteinsatz für die Außentiefunterhaltung . . . . .	267
4.1 Allgemein . . . . .	267
4.2 Wirkungsweise von Räumgeräten . . . . .	268
4.2.1 Stromräumboot . . . . .	268
4.2.2 Hydraulische Egge und Schlickpflug . . . . .	268
4.3 Versuchsdurchführung mit Räumbooteinsatz . . . . .	270
5. Sediment- und Schwebstoffmessungen während des Räumbooteinsatzes . . . . .	270
5.1 Analyseverfahren der Sediment- und Suspensionsproben . . . . .	270
5.2 Sedimentverteilung im Watt und Außentiefprofil . . . . .	271
5.3 Sedimentverteilung nach Räumbooteinsatz . . . . .	273
5.3.1 1. Versuchsreihe vom Mai/Juni 1986 . . . . .	273
5.3.2 2. Versuchsreihe vom August 1986 . . . . .	274
5.4 Schwebstoffanalyse – mit und ohne Räumbooteinsatz . . . . .	276
5.5 Schwebstofftransport . . . . .	279
5.5.1 Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit . . . . .	279
5.5.2 Schwebstoffkonzentration und -transport während einzelner Räumphasen . . . . .	279
5.6 Vergleich der mobilisierten und transportierten Massen . . . . .	285
5.7 Auswertung der Sauerstoff- und Temperaturmessungen . . . . .	288
6. Bemessung der Spülanlage . . . . .	288
7. Empfehlungen für Außentiefunterhaltung unter Verwertung der Forschungsergebnisse aus den Naturversuchen in Neßmersiel . . . . .	290
7.1 Wirksame Spülströmung . . . . .	290
7.2 Räumbooteinsatz . . . . .	290
7.3 Spüldauer, Gegenstau . . . . .	291
7.4 Spülbeckengestaltung . . . . .	291
7.5 Spülsielbemessung . . . . .	292
7.6 Empfehlungen für die Neßmersieler Spülanlage . . . . .	292
8. Schriftenverzeichnis . . . . .	293

## 1. Einleitung

### 1.1 Das Forschungsvorhaben

In den Jahren 1983 bis 1986 wurden mit Hilfe von Naturmessungen die Möglichkeiten für die Räumung von Außentiefs durch Spülströme und den Einsatz von Stromräumbooten in einem Forschungsvorhaben untersucht.

Erste Ergebnisse wurden in „Die Küste“, Heft 44, vorgestellt. Weitere Ergebnisse zum Schwebstofftransport, die Untersuchungen zum Räumbooteinsatz sowie die gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Beitrag behandelt.

Dieses Forschungsvorhaben des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) wurde durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert. Es bestand aus den drei Teilprojekten

- a) „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“,
- b) „Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)“,

c) „Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe“. Dieser Bericht beinhaltet die Ergebnisse des erstgenannten Teilprojektes in Ergänzung des Zwischenberichtes von 1986 (ERCHINGER, COLDEWEY, PROBST). RENGER u. BEDNARCZIK sowie MÜLLER u. BINEK berichteten zu den Teilprojekten b) und c).

## 1.2 Funktion des Außentiefs und Beeinflussung seiner Querschnittsgestaltung

Außentiefs verbinden Siele und Schöpfwerke im Seedeich mit den tiefen Watt- rinnen und dienen als wattseitige Verlängerung der binnendeichs gelegenen Hauptvorfluter dem Oberflächenabfluß aus dem Binnenland und auch dem Schiffsverkehr zu den häufig am Siel angesiedelten Häfen. Zur Erhaltung ausreichender Querschnittsabmessungen bedarf es in der Regel geeigneter Unterhaltungsmaßnahmen. Außentiefs weisen daher anthropogen erweiterte Watt- rinnenquerschnitte auf.

Nach nahezu alljährlich durchgeführten Außentiefbaggerungen wurde 1977 in Neßmersiel zur Verbesserung der Vorflut- und Fahrwasserhältnisse eine Spülanlage mit Spülsiel und Spülbecken geschaffen (Abb. 1 u. 2). Der seit 1982 vollautomatisch eingerichtete Spülbetrieb hat bewirkt, daß

- die ein- bis zweijährigen Baggerungen des Außentiefs völlig eingestellt werden konnten,
- die Sohlenlage im hafennahen Bereich um etwa 40 cm vertieft werden konnte (Abb. 3) und
- auch der Querschnitt des Außentiefs unter NN - 0,5 m auf das etwa 1,8fache vergrößert wurde (Abb. 4).

Damit hat der Spülbetrieb nicht nur zu erheblichen Einsparungen geführt, sondern auch bewirkt, daß die Entwässerung und die Schifffahrt in diesem kleinen Außentief wesentlich bessere Bedingungen vorfinden.

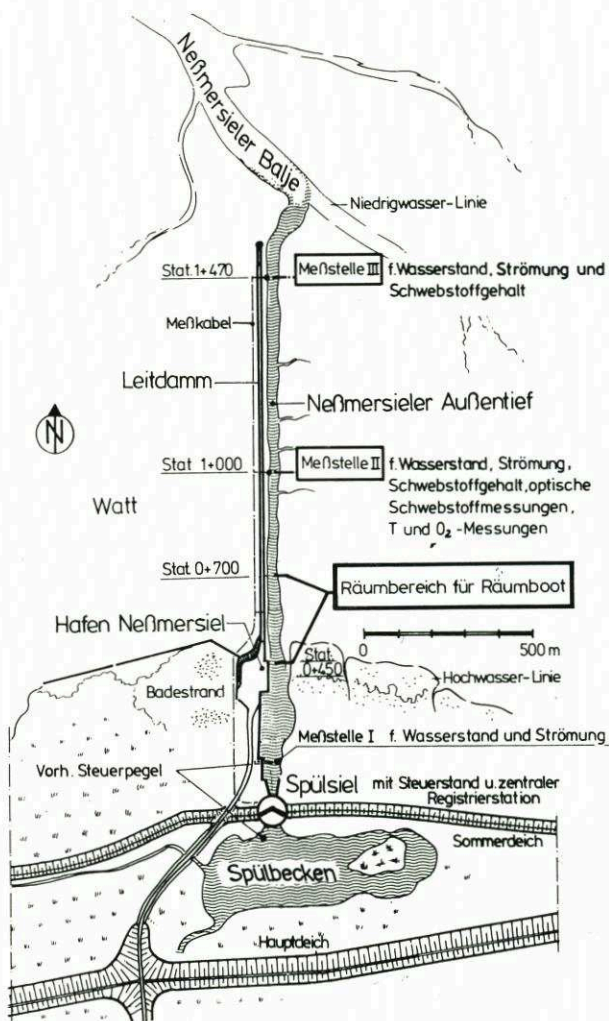


Abb. 1: Das Neßmersieler Außentief mit Spülbecken und Spülsiel sowie Meßstellen und Räumbereich für die Untersuchungen im Forschungsvorhaben

Die Querschnittsfläche von Wattrinnen wird vor allem von den sie regelmäßig durchströmenden Tidewassermengen geprägt. Bei Außentiefs wird die erforderliche Weite und Tiefe erst durch zusätzliche Maßnahmen – in Neßmersiel durch regelmäßigen Spülbetrieb – erreicht. Die dabei erzielte Querschnittsfläche übertrifft den „natürlichen“ Querschnitt vielfach erheblich. Das führt dann dazu, daß die Tideströmungen sich verringern und zwar im reziproken Verhältnis zu der Querschnittsentwicklung.

Wird bei Außentiefs, deren Profil durch Spülung vergrößert worden ist, der Spülbetrieb unterbrochen, so kommt es infolge der verringerten Fließgeschwindigkeiten zu einer schnell-

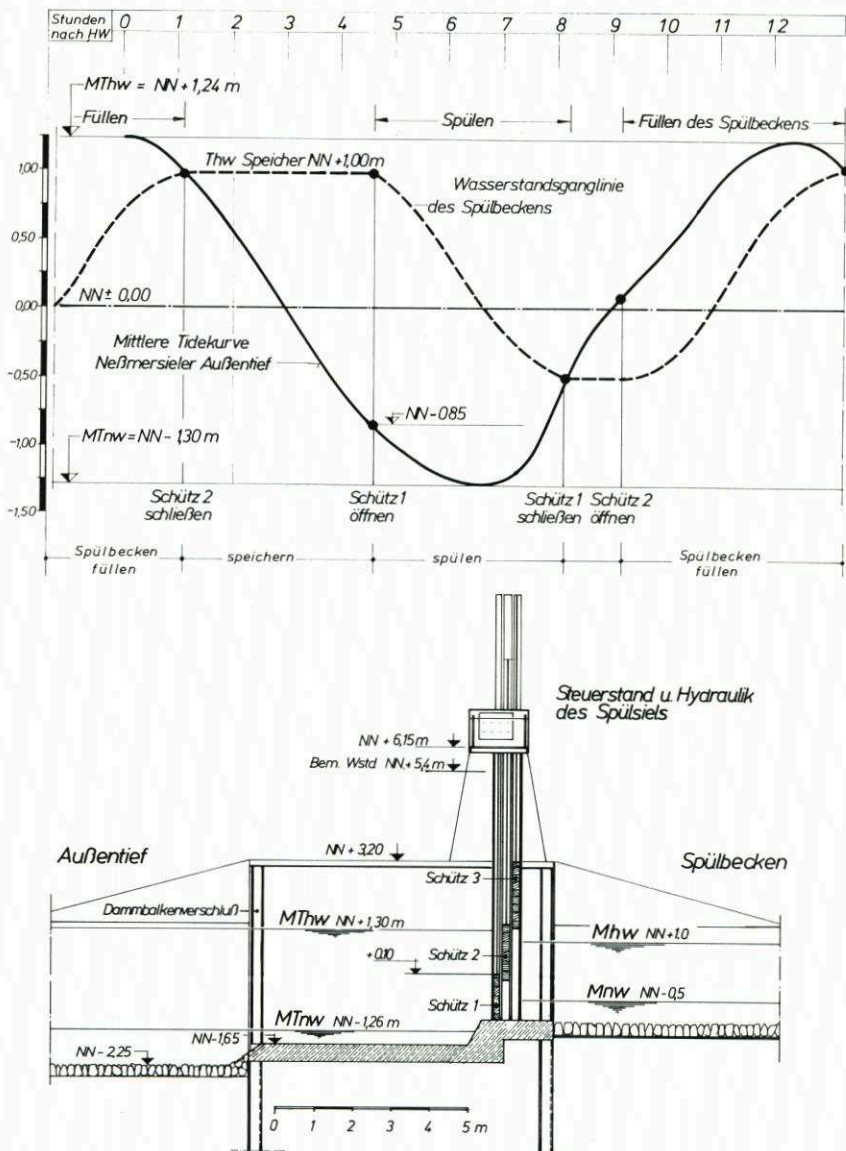


Abb. 2: Wasserstandsganglinie der Tide und des Spülbeckens in Neßmersiel mit Schaltmarken der automatischen Steuerung (oben); Längsschnitt durch das Spülsiel (unten)

len Rückbildung des Außentiefsquerschnitts durch Schwebstoffablagerung, die vor allem in Starkwindzeiten mit beträchtlicher Schwebstoffführung erhebliche Ausmaße annehmen kann.

Das Spülbecken in Neßmersiel unterliegt natürlich einer allmählichen Verschlickung. Die Menge des in das Spülbecken eintreibenden und sich ablagernden Materials wurde von ERCHINGER u. a. (1986) behandelt. Danach wird sich der Verlandungsraum des Spülbeckens in etwa 25 Jahren erfüllt haben. Dann erst wird durch weitere Verlandung das Spülvolumen erheblich eingeschränkt werden, so daß das Spülbecken zur Erhaltung des Speichervolumens und zur Schaffung eines neuen Verlandungsraumes ausgebaggert werden muß.

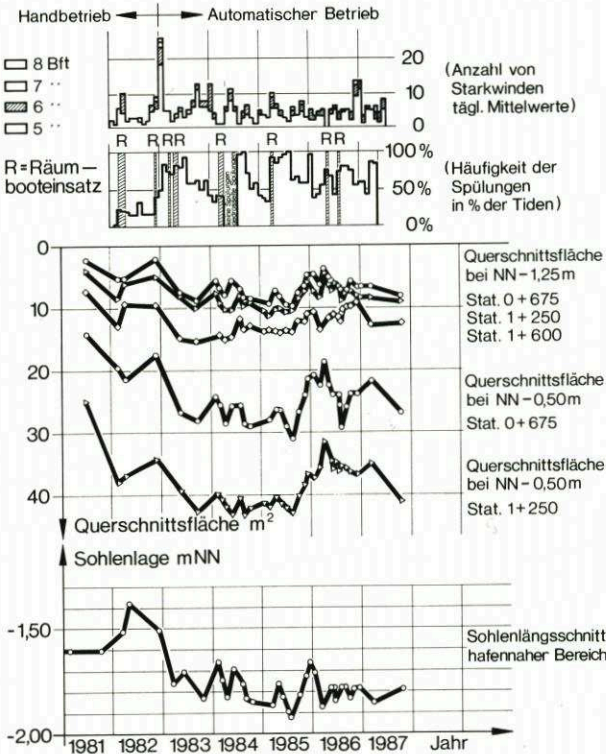


Abb. 3: Entwicklung der Außentief-Querschnittsflächen und der Sohlenlage im hafennahen Außentiefbereich

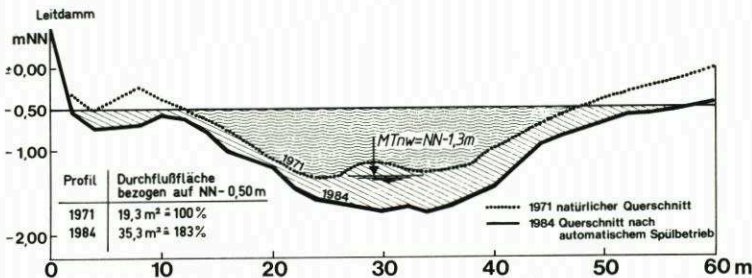


Abb. 4: Querschnittsentwicklung nach automatischem Spülbetrieb

## 2. Untersuchungen im Forschungsprojekt

### 2.1 Ziele der Untersuchungen

In dem vom Bauamt für Küstenschutz (BfK) bearbeiteten Vorhaben „AT-S“ sollten die Möglichkeiten zur Erhaltung oder gar Vergrößerung von Außentiefquerschnitten durch gezielte Spülung untersucht werden. Es sollten Grundlagen für die Bemessung von Spülsiel und Spülbecken und für die Optimierung der Sielsteuerung zur bestmöglichen Tiefenstabilisierung des Außentiefs erarbeitet werden. Dabei war den Fragen des Spülbeginns und der Spüldauer sowie der Auflandungsrate im Spülbecken nachzugehen und zu klären, ob zur Räumung schlickig-schluffiger Sedimente einer intensiven Spülräumung oder einem Gegendau zur Verringerung des beginnenden starken Flutstromes der Vorzug zu geben sei. Auch die Wirkungsweise eines Stromräumbootes und Möglichkeiten zur Optimierung seines Einsatzes sollten in die Untersuchung einbezogen werden.

Durch Naturmessungen sollten die Zusammenhänge zwischen Tideverlauf, Tideströmung, Spülströmung, Schwebstofftransport und Querschnittsentwicklung erfaßt werden. Auch die Einflüsse des Wattseegangs und des Transportvermögens von Tideströmungen waren zu untersuchen.

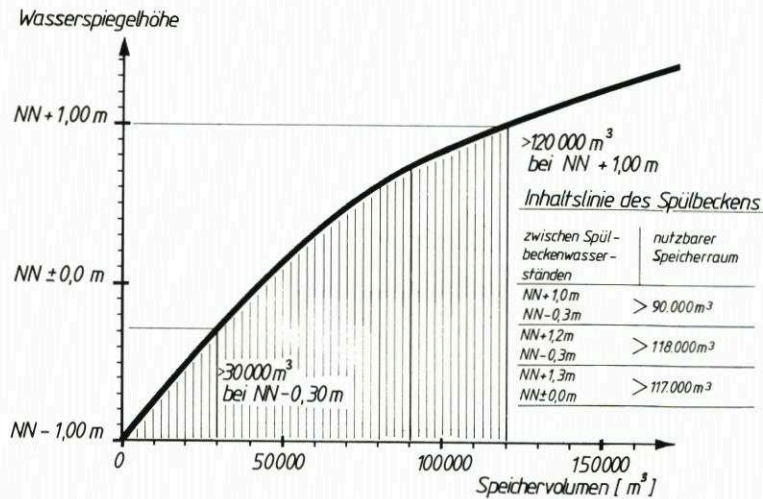


Abb. 5: Speicherinhaltslinie des Spülbeckens

### 2.2 Versuchseinrichtungen

Spülsiel und Spülbecken in Neßmersiel mit ihrer vollautomatischen Steuerung ermöglichen, daß durch das 4,5 m weite Spülsiel in jede Tide 100 000 m<sup>3</sup> Seewasser während der zweiten Fluthälfte einfließen und in den letzten drei Stunden der Ebbe nach Ziehen der untersten Schütztafel mit Geschwindigkeiten von 50 bis 80 cm/s durch das 2 km lange Außentief ausströmen (Abb. 5) (ERCHINGER u. a., 1986). Dabei kann die Räumwirkung noch durch ein Stromräumboot und seine schlicklösende und aufwirbelnde Wirkung der absenkbaaren Schrauben unterstützt werden.

Die Vorbereitungen und Voruntersuchungen einschl. Testen der Meßanlagen wurden

1982 und 1983 vorgenommen. Die Hauptmessungen und -untersuchungen sind in den Jahren 1984, 1985 und 1986 durchgeführt worden.

Im Neßmersieler Außentief sind die in Abb. 1 dargestellten Meßquerschnitte mit Dauermeßstation ausgerüstet worden. Jede Meßstation bestand aus einem Drucksensor für die Wasserstandsmessung und einem Strömungssensor für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten. An den Meßstellen II und III konnten außerdem der Schwebstoffgehalt mit vollautomatischen Sedimentmeßgeräten (Sediwa) (RENGER, 1982 u. 1986) gemessen werden. Zusätzlich konnten wahlweise an der Meßstelle II oder am Spülsiel automatische Schwebstoffmessungen mit einer Trübungssonde durchgeführt werden.

Wegen der großen Bedeutung, die der Schwebstoffmessung bei den Untersuchungen zukam, wird die Funktionsweise des Schwebstoffmeßgerätes „Sediwa“ hier kurz beschrieben.

Das Gesamtgerät ist für den Unterwassereinsatz ausgelegt. Das mit Schwebstoffen angereicherte Seewasser wird von einer Kreiselpumpe in einen Hydrozyklon gepumpt, der das Meßgut separiert und den eingedickten Suspensionstrom in den Meßzylinder einer Unterwasserwaage führt. Hier wird das Gewicht in einer Halbleiter-DMS-Meßzelle kontinuierlich bestimmt. Nach Erreichen einer eingestellten Gewichtsschwelle wird das Meßgerät automatisch gespült.

Das Feinstkorn  $\varnothing \leq 5 \mu\text{m}$  wird von diesem Gerät nicht erfaßt (RENGER, 1982). Alle Schwebstoffgehaltsangaben beinhalten daher nur das Material  $> 5 \mu\text{m}$ . Ein an der Meßstelle II zusätzlich eingebautes optisches Schwebstoffmeßgerät läßt allerdings auch eine Abschätzung des Feinststoffgehaltes zu, wenn die „Sediwa“ kein Material  $> 5 \mu\text{m}$  mehr erfaßt (ERCHINGER u. a., 1986). Mit diesem Gerät wird der Schwebstoffgehalt als Trübe (Attenuation, streng übersetzt: Dämpfung) in % ermittelt.

Im Jahre 1986 wurde die Trübungssonde mit einem Sauerstoff-Temperatur-Sensor ausgerüstet. Diese zusätzlichen Sauerstoff- und Temperaturmessungen an Meßstelle II ermöglichen die Ermittlung einer Sauerstoffzehrung oder Sauerstoffanreicherung während des Spülbetriebs ohne und mit Räumbooteinsatz.

Die mit der sog. OMS-Sonde – Type ME – gemessenen Daten wurden – wie alle anderen Meßwerte – per Kabel übertragen und auf Band gespeichert. Daraus wurde der Sauerstoffgehalt in Prozent ermittelt und unter Berücksichtigung von Temperatur und Salzgehalt in mg/l umgerechnet.

### 2.3 Versuchsdurchführung

Beim Spülbetrieb wird das in dem Spülbecken gestaute Seewasser erst in der letzten Phase der Ebbe ausgelassen, so daß in der dann geringen wasserführenden Querschnittsfläche hohe Ebbstromgeschwindigkeiten erreicht werden. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten nehmen während des i. M. etwa drei Stunden andauernden Spülvorgangs auf der gesamten Außentiefenlänge auf Werte zwischen 0,6 und 1,1 m/s zu. Die erreichbaren Spülstromgeschwindigkeiten hängen ab von der Steuerung des Siels, dem jeweiligen Tideverlauf und dem Tiefenzustand des Außentiefs.

Abb. 6 vermittelt einen Eindruck von den Wasserstands-, Strömungs- und Schwebstoff- bzw. Trübungslinien als Dauermessungen für einen zusammenhängenden Zeitraum von vier Tagen. Sie vermitteln die Eigenart solcher Naturmessungen mit der täglichen Ungleichheit der Tiden, den dadurch unterschiedlichen Spülbeckenwasserständen, Spülströmungen, den Schwebstoffgehalten in einem von frischem Schlick freigespülten Außentief und den darauf wirkenden Windeinfluß.



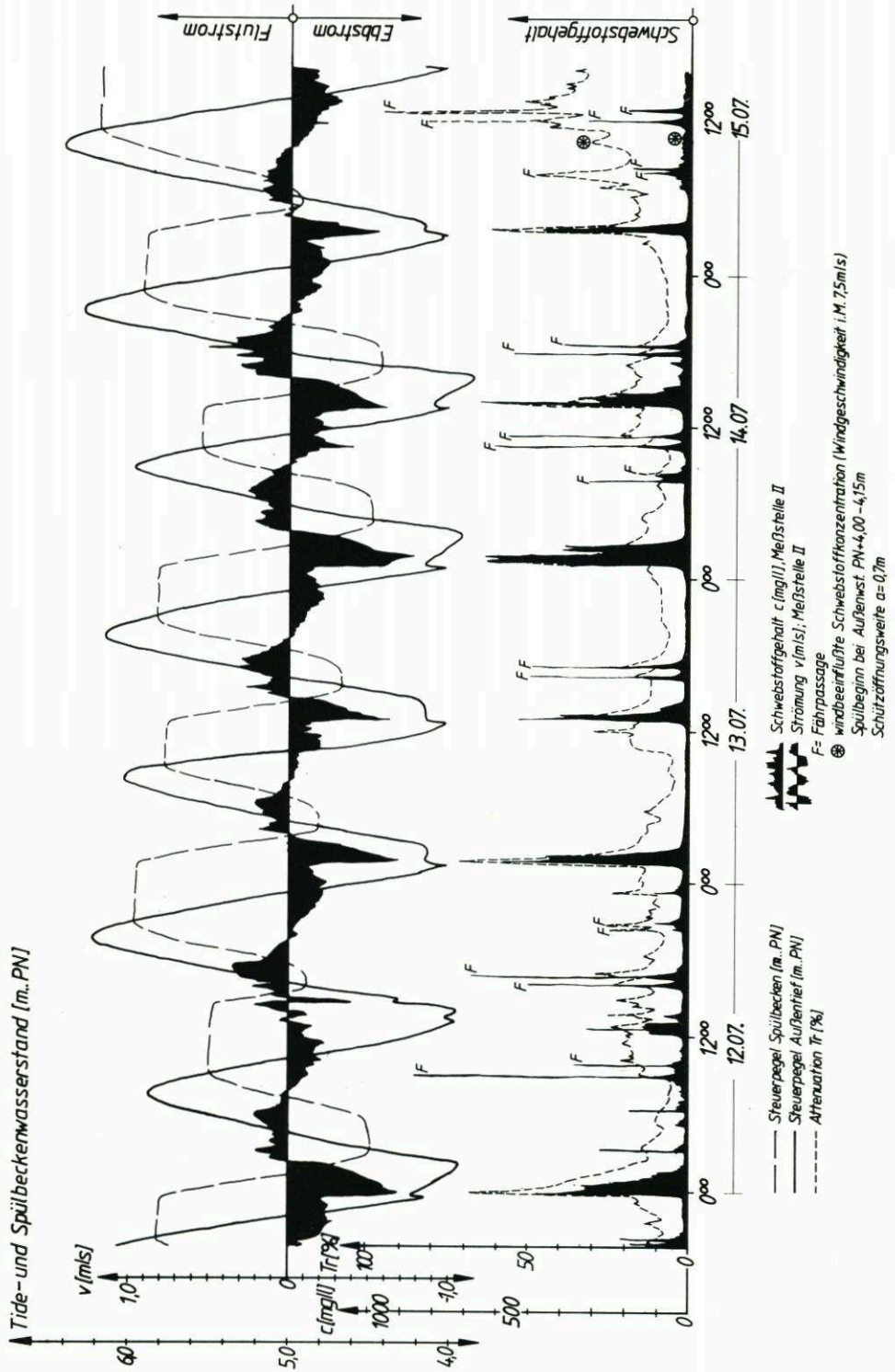


Abb. 6: Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und des Schwebstoffgehalts vom 12. 7. bis 15. 7. 1985

Das Meßprogramm sah zunächst unterschiedliche Einstellungen der Schutzöffnungsweiten und des Spülbeginns in Abhängigkeit vom Außenwasserstand vor (Abb. 7). Diese Versuchseinstellungen wurden gefahren für

- a) ein Außentief, das durch regelmäßiges Spülen von frischem Schlick befreit war, und
  - b) ein Außentief mit frischen Schlickablagerungen aus einer mehrtägigen Spülunterbrechung.
- Anschließend wurde die Wirkung eines zusätzlichen Räumbooteinsatzes untersucht.

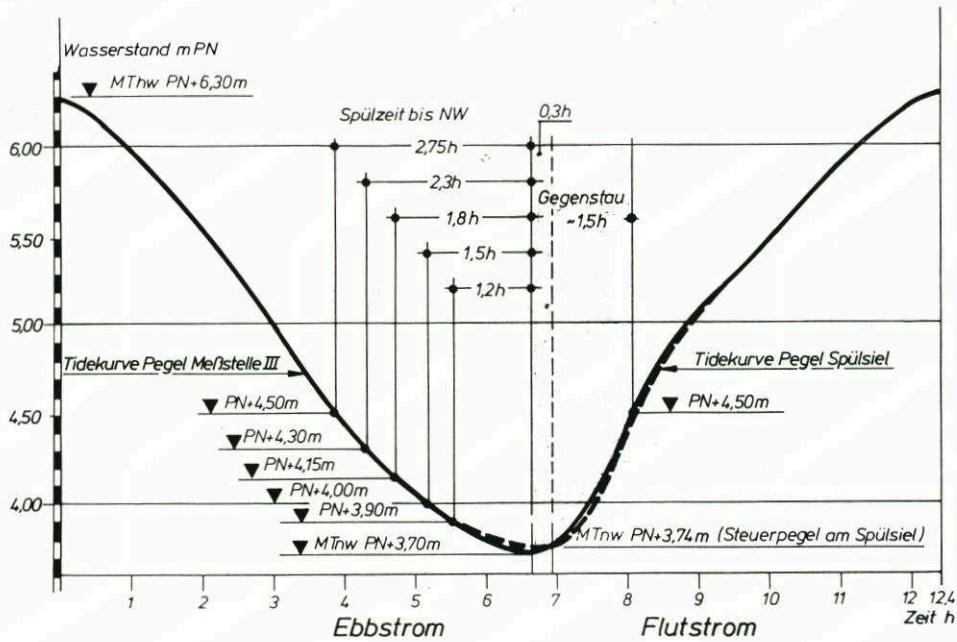


Abb. 7: Mittlere Tidekurven an der Meßstelle III und am Spülsiel (gestrichelt) mit Angabe der vom Wasserstand bei Spülbeginn abhängigen Spülzeiten bis Tnw

### 3. Sediment- und Schwebstoffmessungen ohne Räumbooteinsatz

#### 3.1 Abhängigkeit von Wind und Seegang

Die schlickig-schluffigen Sedimente des Neßmersieler Watts werden bei Wind durch die Grundberührung des Seegangs aufgewirbelt und mit der Strömung weitertransportiert. In den Abb. 8 und 9 sind Ganglinien aus stark windbeeinflussten Meßtiden wiedergegeben. Über den Ganglinien sind die stündlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung angegeben. In den Abbildungen sind die bei Überflutung der Leitdammkrone gemessenen Schwebstoffkonzentrationen auf den Seegangseinfluß zurückzuführen. Wird der Leitdamm überflutet, gelangt das mit Schwebstoffen angereicherte Wasser vom westlich des Leitdamms gelegenen Watt in das Außentief. Etwa küstenparallele südwestliche bis nordwestliche Winde rufen bei gleichen Windgeschwindigkeiten den höchsten Schwebstoffeintrag hervor.

Bei Winden aus dem Westsektor über 8 m/s – entsprechend 5 Bft – konnte nach Überfluten des Leitdamms (Oberkante bei Meßstelle II u. III: NN + 0,7 m) eine deutliche Zunahme der Schwebstoffkonzentration an der Meßstelle II im Außentief festgestellt werden. Gem. Abb. 10 kam es bei einem Wind von gut 11 m/s aus SW und Wasserständen zwischen

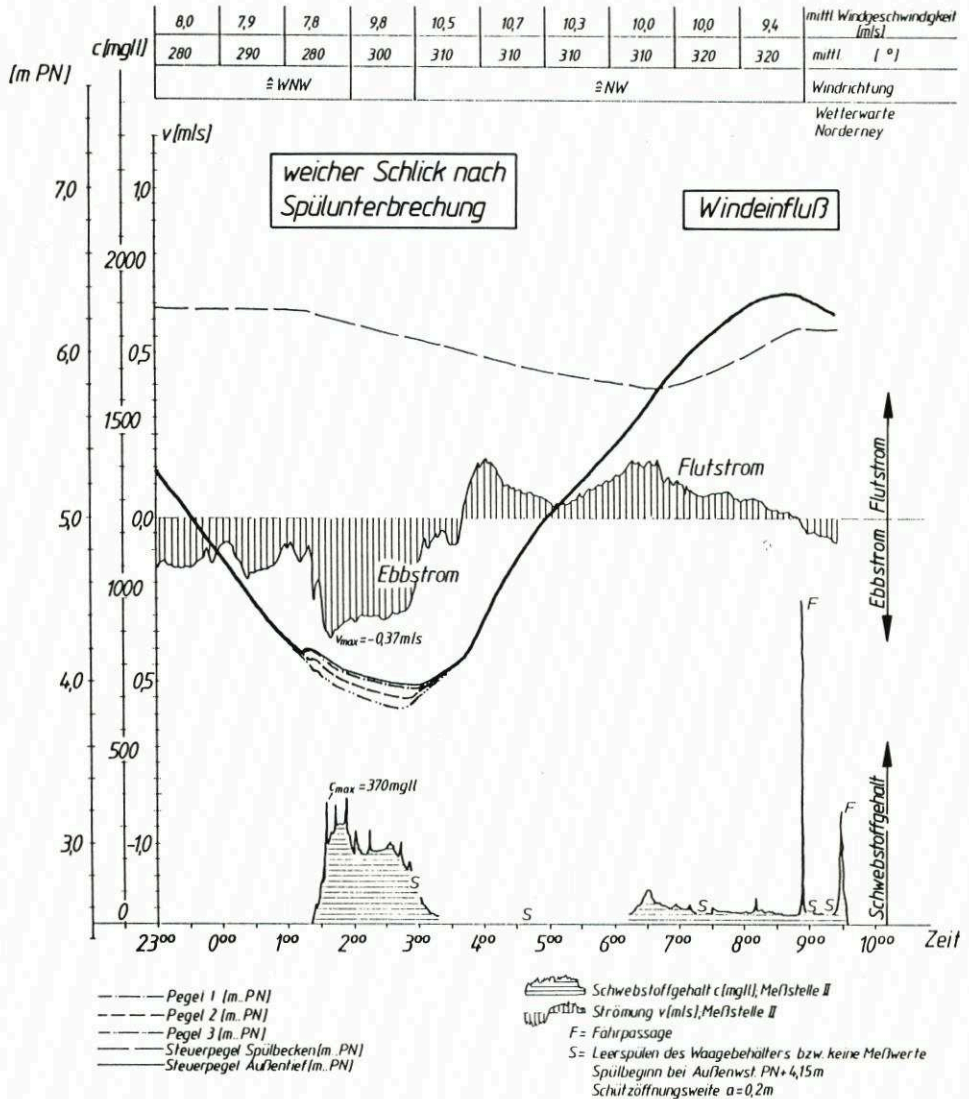


Abb. 8: Ganglinien - Meßstelle II - vom 8./9. 6. 1984

PN + 6,8 m bis 5,8 m trotz einer kaum meßbaren Ebbstromgeschwindigkeit zu einem Schwebstoffgehalt von etwa 200 mg/l. Am 27. 8. 86 trat bei Windstärken über 12 m/s aus SSW sogar ein Schwebstoffgehalt bis zu 570 mg/l auf (Abb. 9).

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt die Seegangenergie und damit auch die Turbulenzintensität zu, so daß immer mehr Schwebstoffe in das Seewasser eingetragen und in Schwebe gehalten werden. Bei einer mittleren Windgeschwindigkeit über 10 m/s überstieg der mittlere Schwebstoffgehalt die Marke 200 mg/l und bei Windstärken über 12 m/s stieg der Schwebstoffgehalt steil an bis auf Werte über 600 mg/l (Abb. 11).

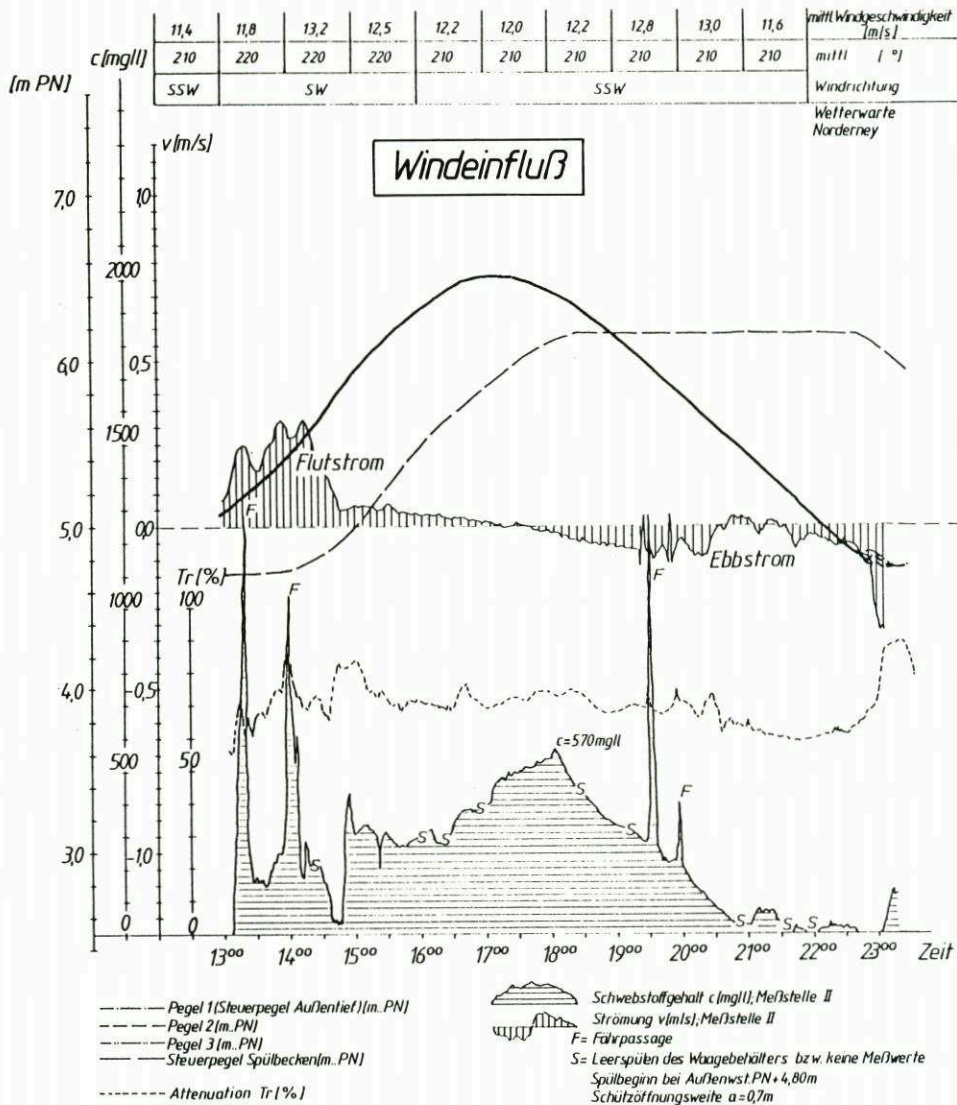


Abb. 9: Ganglinien - Meßstelle II - vom 27. 8. 1986

### 3.2 Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bei Spülbetrieb und nach Spülunterbrechung

Für die Bemessung von Spülströmen für Außentiefräumung ist die sogenannte kritische Fließgeschwindigkeit von Bedeutung, bei der sich Sohlen- und Böschungsmaterial in Bewegung setzt.

Die kritische Geschwindigkeit ist u. a. abhängig vom Korndurchmesser, von der Lagerungsdichte und ggf. von einer vorhandenen Kohäsion bzw. biologischen Verfestigung (FÜHRBÖTER, 1983). Die Untersuchung von Sedimentproben, die an den Meßstellen entnom-

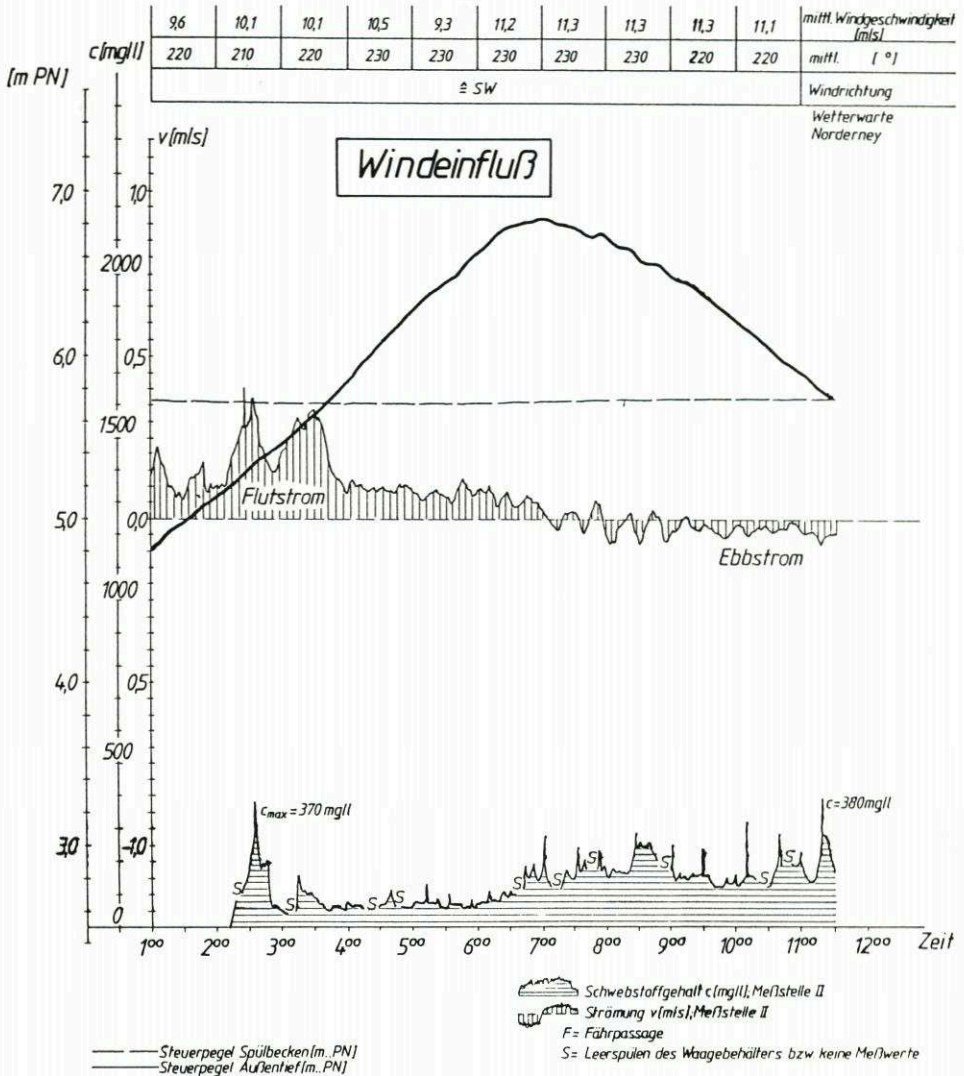


Abb. 10: Ganglinien – Meßstelle II – vom 20. 10. 1984

men wurden, ergaben mittlere Korndurchmesser zwischen 0,06 und 0,11 mm für ein von weichem Schlick freigespültes Außentiefl. Die kritische Geschwindigkeit für ein unverfestigtes steriles Material dieser Korngröße liegt nach Shields um 0,18 m/s (ZANKE, 1982).

Aus den Ganglinien des Schwebstoffgehalts während des durch Spülung verstärkten Ebbstroms wird deutlich, daß bei einem Ansteigen der Strömungsgeschwindigkeit über 0,4 bis 0,5 m/s der Schwebstoffgehalt  $c$  meßbar wird und einen beträchtlichen Umfang annimmt. Er beträgt

- gem. Abb. 12 bei  $v_{max} = 0,6 \text{ m/s}$  400 mg/l
- gem. Abb. 13 bei  $v_{max} = 0,8 \text{ m/s}$  600 mg/l und
- gem. Abb. 14 bei  $v_{max} = 1,23 \text{ m/s}$  570 mg/l.

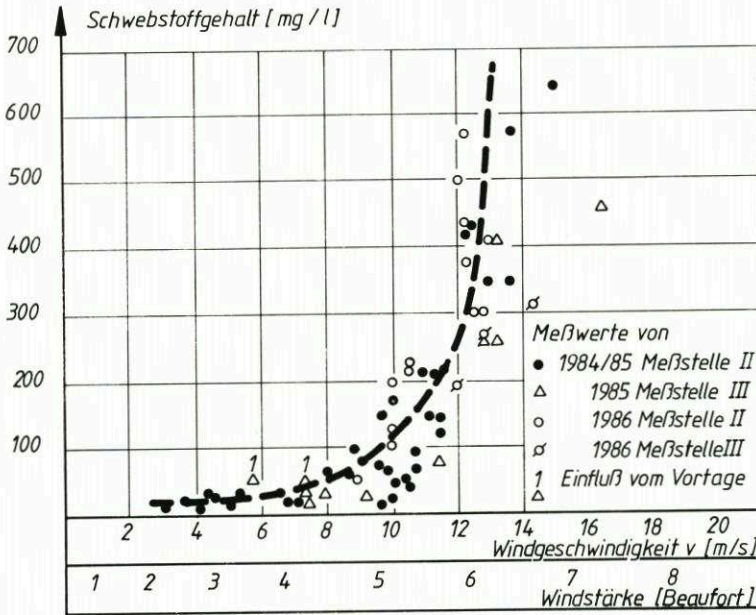


Abb. 11: Vom Wind verursachte Schwebstoffkonzentration bei Leitdammüberflutung mit Tidewasserständen über PN + 5,80 m und bei Windrichtungen von 190° bis 320°

Diese Abbildungen zeigen auch, daß bei Ebbströmung um 0,2 m/s die Attenuation (Trübe) bereits auf 20 bis 25 % steigt.

Diese Messungen sind in dem Außentief ohne nennenswerte frische Schlickablagerungen durchgeführt worden. Der Einfluß der Beschleunigung wird bereits von ERCHINGER u. a. (1986) erläutert.

Das Verhalten von frisch abgelagertem Schlick nach Spülunterbrechung konnte untersucht werden, nachdem der Spülbetrieb für eineinhalb Monate geruht hatte. Es zeigte sich, daß bei gedrosselter Spülung mit nur schmalen Öffnungsspalt des Schützes von nur 0,2 m – gegenüber 0,70 m im Normalfall – bereits bei  $v = 0,25$  m/s der Schwebstoffgehalt ansteigt und

gem. Abb. 8 bei  $v = 0,35$  m/s 370 mg/l erreicht.

Außerdem wurde deutlich, daß es zu sehr starkem Schwebstofftransport kommen kann, wenn ein starker Spülstrom nach längerer Spülunterbrechung während einer Starkwindphase und somit reichem Schlickangebot diesen Schlick aufwirbelt und

gem. Abb. 15 bei  $v_{max} = 1,17$  m/s  $c_{max} 2500$  mg/l

erreicht.

Zahlreiche derartige Meßergebnisse sind in Abb. 16 zusammengestellt. Die Meßwerte des Schwebstoffgehalts sind in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit aus der Transportphase und der Verzögerungsphase des Spülstroms aufgetragen. Mit abnehmender Fließgeschwindigkeit nimmt das Transportvermögen des Spülstroms deutlich ab. Der Bewegungsbeginn von Sedimenten in dem von Schlick freigespülten Neßmersieler Außentief liegt gem. Abb. 17

bei der kritischen Geschwindigkeit zwischen 0,4 und 0,5 m/s.

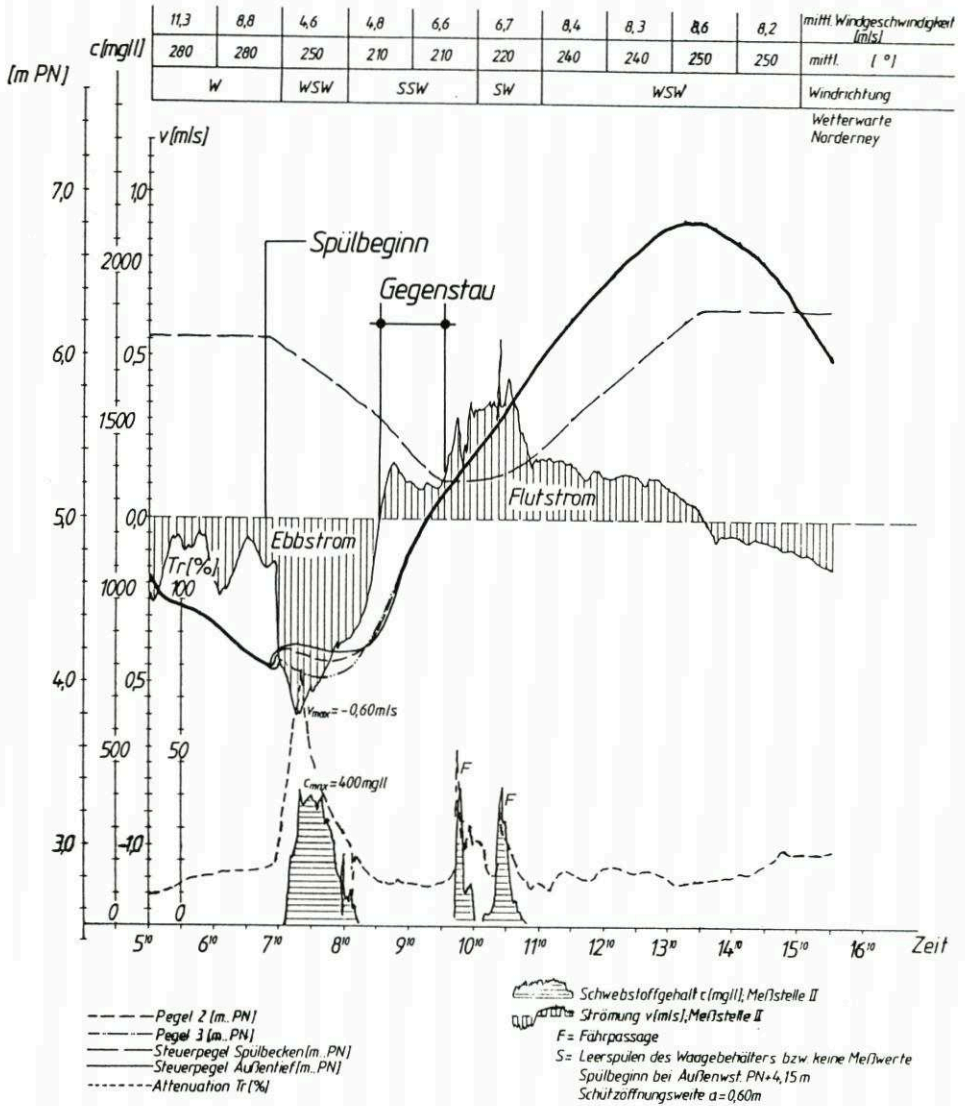


Abb. 12: Ganglinien – Meßstelle II – vom 19. 7. 1985

Das frisch abgelagerte schlickige Material aber wird bereits ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,2 m/s erodiert und bleibt in Schweb.

Für eine wirkungsvolle Räumung des Neßmersieler Außentiefs ist daher eine Spülgeschwindigkeit zu fordern, die 0,5 m/s deutlich überschreitet. Bei weichen schlickigen Ablagerungen reichen dagegen bereits 0,25 m/s für einen Räumeffekt.

Eine Wassertrübe über 10 % wird fast durchgehend gemessen, auch wenn die „Sediwa“ keine absetzbaren Feststoffe mehr erfäßt. Dieses zeigt, daß sich jederzeit Feinstanteile im Wasser befinden, die aus meßtechnischen Gründen von der Sediwa nicht mehr erfäßt werden können. Nur um die Hochwasserzeit – bei Fließgeschwindigkeiten um Null – weist die Wassertrübe teilweise einen Wert unter 10 % auf.

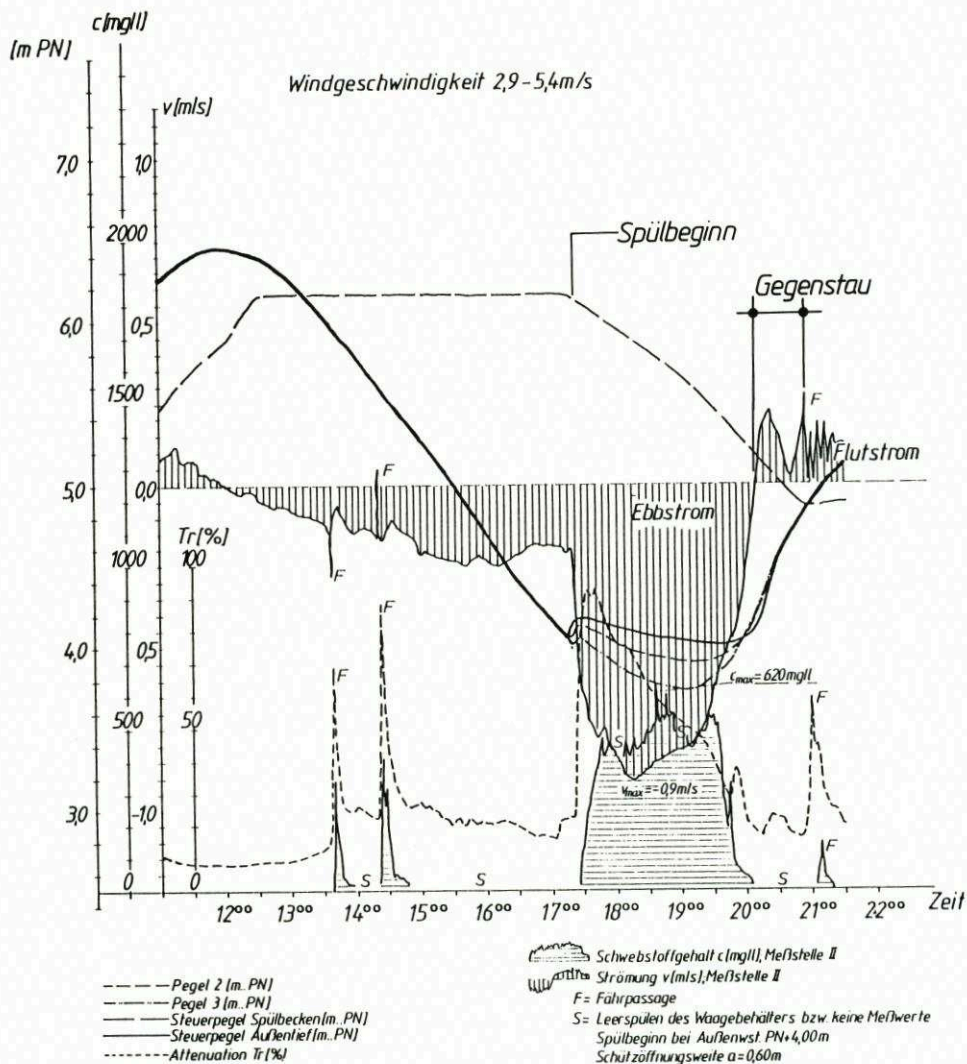


Abb. 13: Ganglinien - Meßstelle II - vom 17. 7. 1985

### 3.3 Einflüsse des Schiffsverkehrs

Nachteilig auf das Außentief wirkt sich das Verhalten von Schiffen in der Wattfahrt aus, bei Flut lange vor Hochwasser und bei beginnender Ebbe möglichst schon kurz nach Hochwasser zu fahren, da ein während der Ebbe festkommendes Schiff nicht vor der nächsten Flut wieder frei kommt.

Einen nicht unwesentlichen Einfluß auf den Schwebstofftransport hat der Schiffsverkehr in Außentiefs (RENGER u. BEDNARCZYK, 1986; Müller u. BINEK, 1986; ERCHINGER u. a., 1986). In fast allen Abbildungen der Schwebstoffgehaltsganglinien sind deutlich die von den Baltrum-Fähren erzeugten Schwebstoffspitzen - gekennzeichnet mit „F“ - zu erkennen.



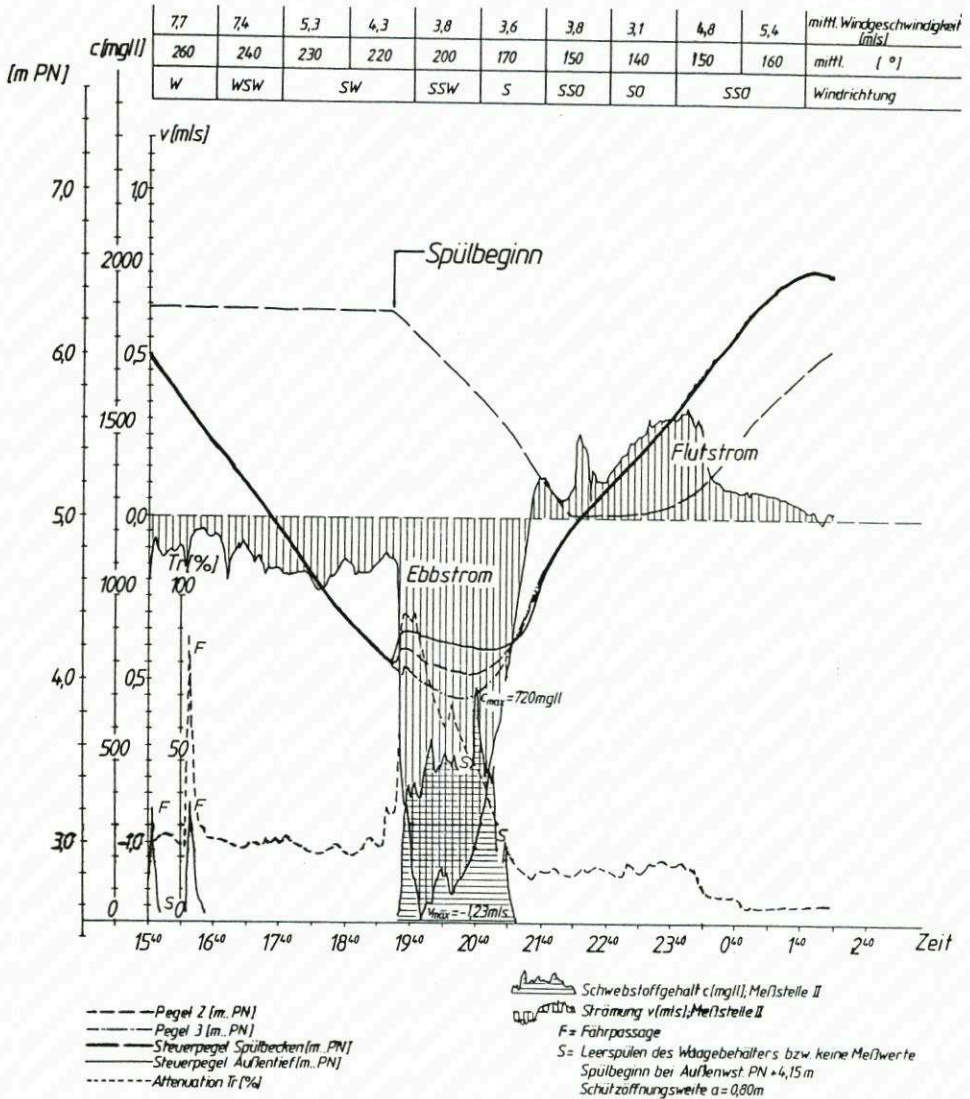


Abb. 14: Ganglinien – Meßstelle II – vom 19./20. 7. 1985

Diese Sedimentumlagerungen infolge Schiffsverkehrs können sich sowohl positiv – im Sinne der Erhaltung einer Außentiefenrinne – als auch negativ auswirken. Abb. 18 soll hier beispielhaft die durch die Fährre bei einem Wasserstand um NN während der Flut verursachte Schwebstoffspitze veranschaulichen.

In Abb. 19 sind 15-Minuten-Mittelwerte des durch die Fährre (Baltrum I) verursachten Schwebstoffgehalts, getrennt nach Einfahrt und Ausfahrt und bezogen auf die Zeitdauer vor bzw. nach Hochwassereintrittszeit, dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, daß die Fährre mit dem Flutstrom möglichst früh in das Außentief hineinfährt, und zwar bis zu 3,8 Stunden vor Hochwasser. Bei Ebbe dagegen verläßt die letzte Fährre bereits bis 2,4, vereinzelt bis 2,9 Stunden nach Hochwasser das Außentief. Der Wasserstand für die ersten bzw. letzten

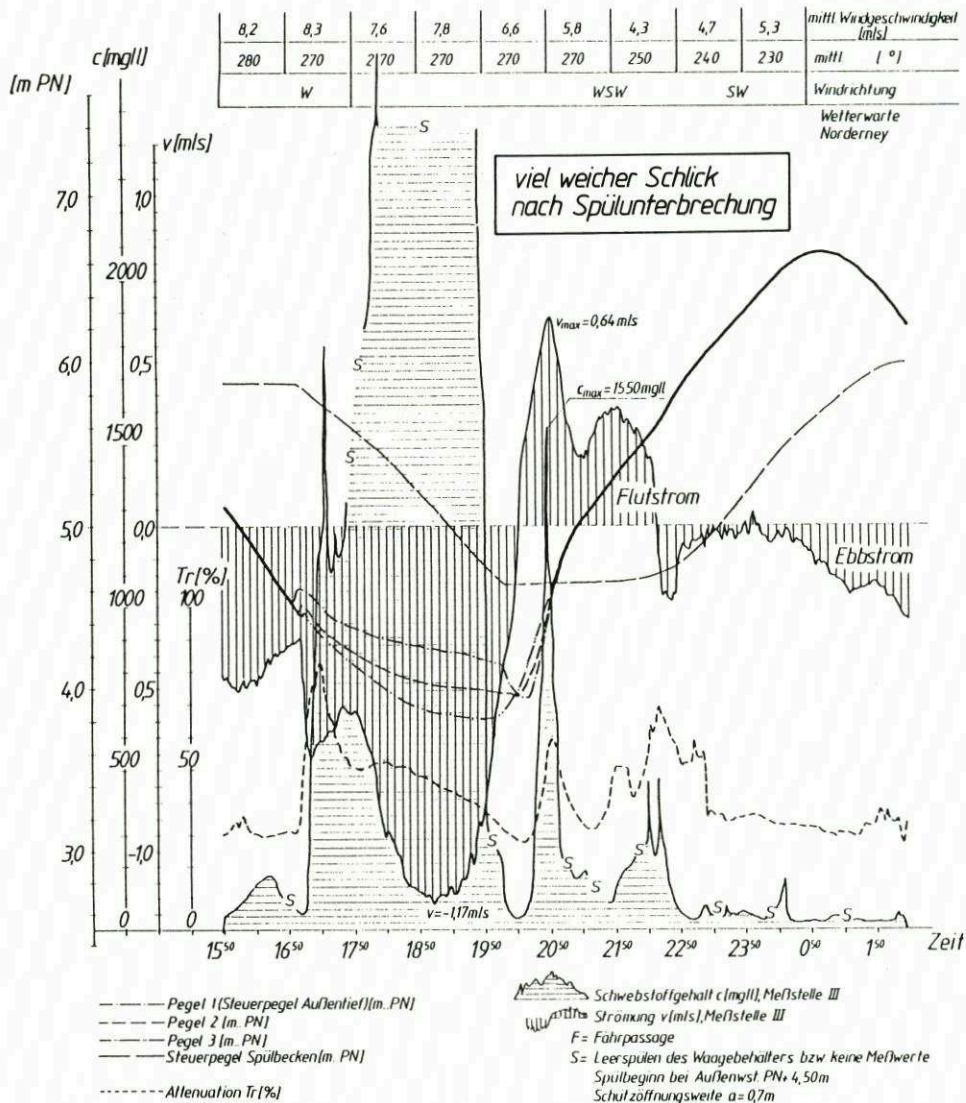


Abb. 15: Ganglinien - Meßstelle III - vom 24./25. 5. 1986

Schiffspassagen liegt daher bei Flut etwa 0,4 m niedriger als bei Ebbe. Entsprechend hoch liegt bei Flutstrom die mittlere Schwebstoffkonzentration bei Einfahrt der Fähre mit 400 mg/l; die stets später liegende Ausfahrt bringt immerhin noch 180 mg/l. Während des Ebbstroms wurden dagegen bei Einfahrt im Mittel 220 mg/l und bei Ausfahrt der Fähre nur 100 mg/l Schwebstoffe gemessen. Folglich wird das Material in wesentlich größerer Menge bei Flutstrom einwärts als bei Ebbstrom auswärts transportiert.

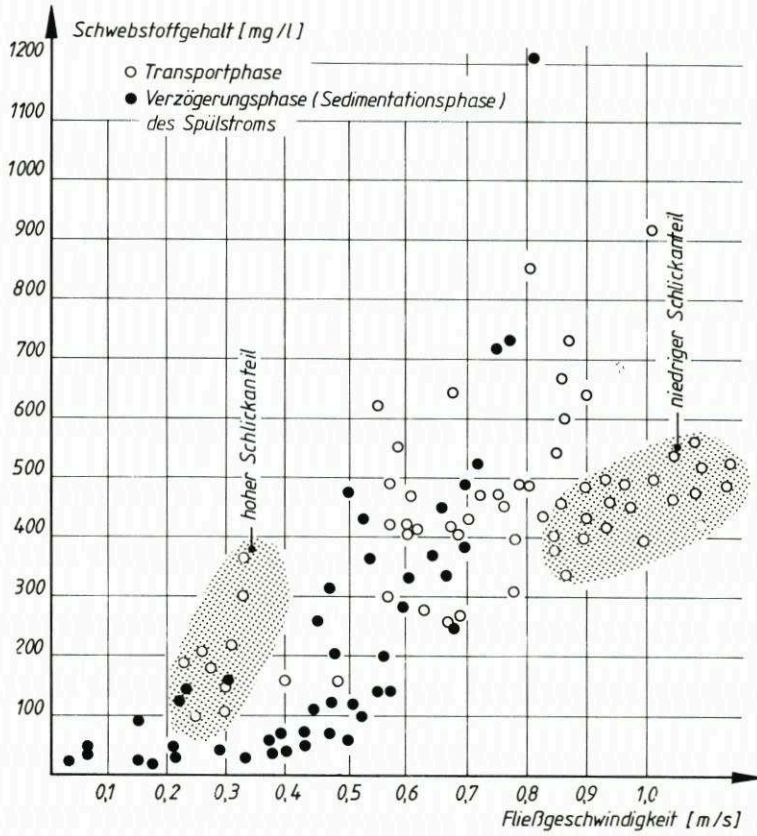


Abb. 16: Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bei Spülströmen

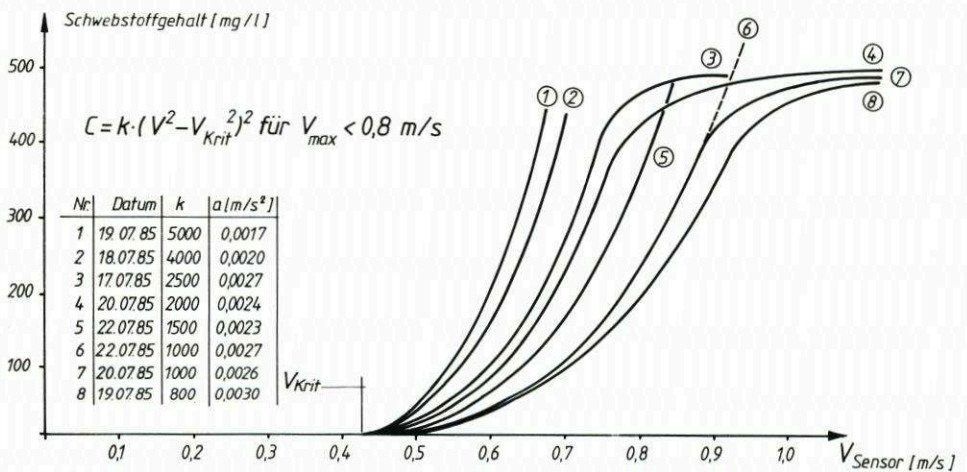


Abb. 17: Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit und Beschleunigung des Spülstroms – Meßstelle II –

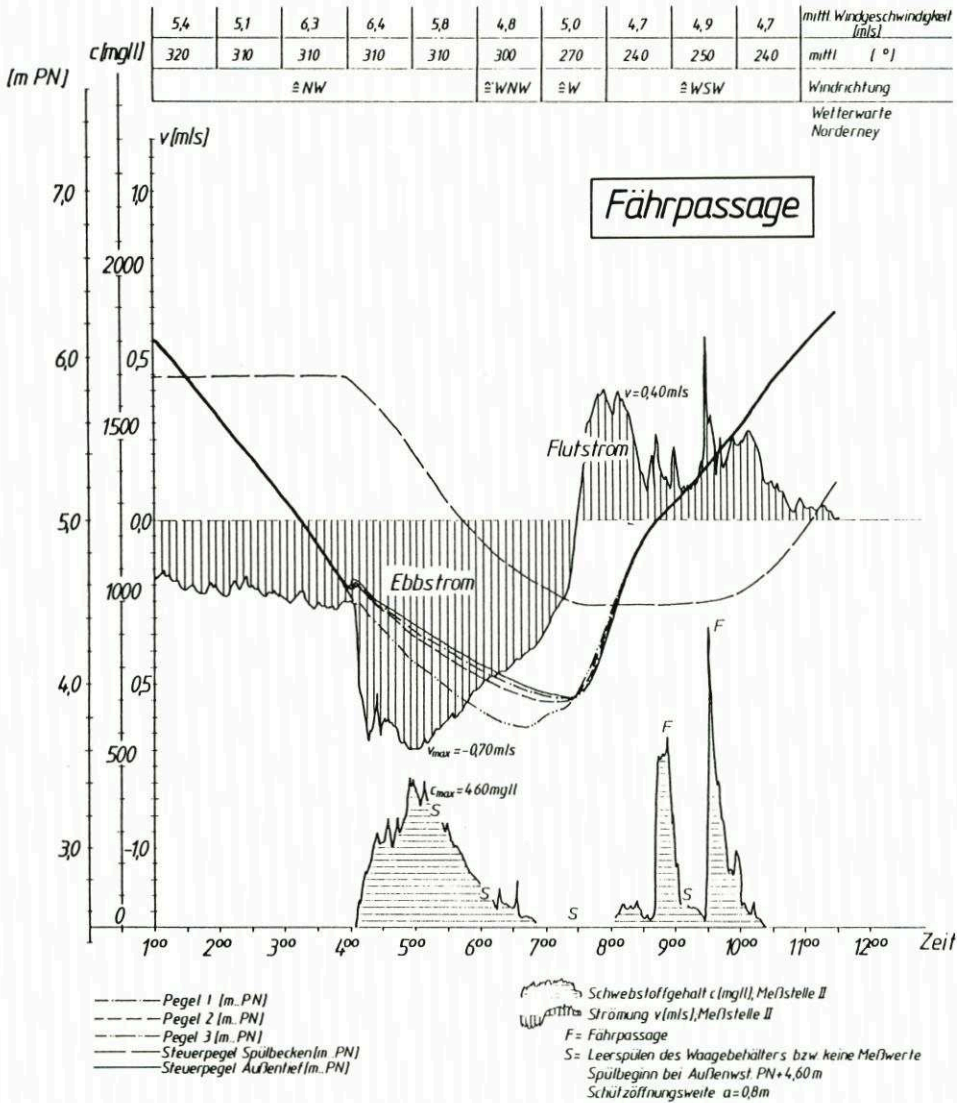


Abb. 18: Ganglinien – Meßstelle II – vom 28. 7. 1984

### 3.4 Schwebstofftransport

Als maßgebender Einfluß auf die Bett- und Querschnittsbildung des Außentiefs ist vor allem die Kenntnis des richtungsbezogenen Transports der Schwebstofffracht anzusehen.

In Tab. 1 sind die Häufigkeiten der ereignisbezogenen Schwebstofffrachten durch den Außentiefquerschnitt an Meßstelle II für 20 Tage mit 38 Tiden im Juli 1985 zusammengestellt. Als Klassenbreite der transportierten Feststoffmassen wird einheitlich 5 t gewählt.

Die Schwebstofffrachten werden vereinfacht berechnet als Produkt aus den Punktmessungen für Schwebstoffgehalt und Strömung multipliziert mit der Außentief-Durchflußfläche.

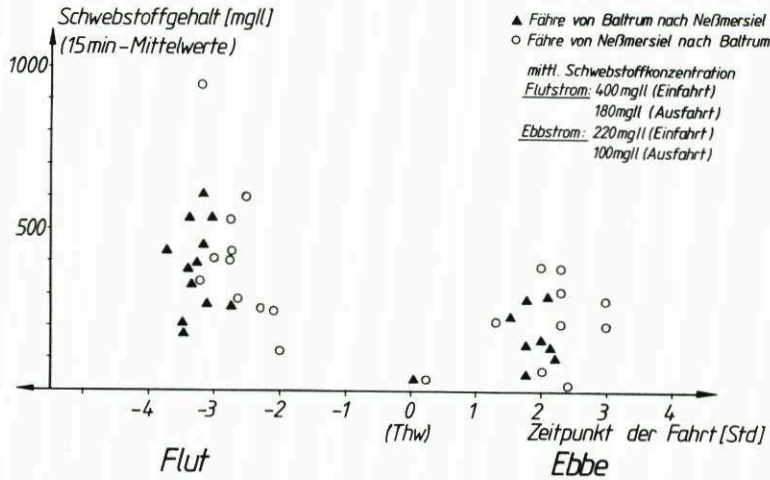


Abb. 19: Schwebstoffgehalt, hervorgerufen durch die Vorbeifahrt der Fähre „Baltrum I“, aufgetragen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Fahrt

Die transportierten Frachten werden für unbeeinflusste Flut- und Ebbströme je Tide, für die einzelnen Fährpassagen, unterschieden nach Flut- oder Ebbstrom sowie für den Ebbstrom mit Spülstrom, ermittelt. Weitere Einflußfaktoren, wie Seegang, waren während des gewählten Zeitraums unbedeutend. Aus Tab. 1 ist zu ersehen, daß die Häufigkeit bestimmter Schwebstofffrachten stark schwankt. Dieses beruht hauptsächlich auf den unterschiedlichen Tideverlauf und den dadurch bedingten unterschiedlichen Spülströmen. Insgesamt erreicht die Ebbstromfracht den etwa 3fachen Umfang der Flutstromfracht. An ihr ist der Ebbstrom mit Spülstrom zu 72 % beteiligt. An der Flutstromfracht überwiegt der Einfluß der Schiffspassagen mit 62 %.

Bei Schiffspassagen wird das Material aufgewirbelt und in einer Schwebstoffwolke eine kurze Strecke transportiert. Der gemessene Feststoffgehalt fällt meist nach 15 Minuten wieder ab, so daß mit einer Fließgeschwindigkeit um i. M. 0,2 m/s ein maximaler Transportweg von 180 m erreicht wird.

Der unbeeinflusste Flut- und Ebbstrom haben mit 150 t bzw. 110 t nur einen geringen Anteil an dem Gesamttransport. Die Gesamtbilanz der 38 Tiden umfaßt eine überschießende Ebbstromfracht von 775 t, d. s. i. M. rd. 20 t/Tide.

### 3.5 Optimierung des Spülbetriebs

Zur Optimierung des Spülbetriebs in Neßmersiel wurden Meßreihen durchgeführt, in denen die Spülwassermenge sowie der Spülbeginn in Abhängigkeit vom Außenwasserstand verändert wurden (Abb. 7).

Wie bereits berichtet, ist für Neßmersiel ein langer effektiver Räumetrieb dem Gegenstaubetrieb, der nur in wenigen Fällen mit hohen Flutstromspitzen eine nennenswerte Wirkung hat, vorzuziehen (ERCHINGER u. a., 1986).

Für eine effektive Räumung des Außentiefs muß der Spülstrom über einen möglichst langen Zeitraum die kritische Geschwindigkeit (Abschn. 3.2) wesentlich überschreiten. Voraussetzung hierfür sind eine ausreichend bemessene Spülwassermenge und ein ausreichend

Tabelle 1: Ermittlung der die Meßstelle II passierenden Schwebstofffrachten in 38 Tiden vom 9. 7. bis 28. 7. 1985

Häufigkeit der Schwebstofffracht für die einzelnen Klassenabschnitte	Schwebstofffracht in t für die Klassenabschnitte . . . bis . . . t												Summierte Schwebstofffracht				
	0-4,9	5-9,9	10-14,9	15-19,9	20-24,9	25-29,9	30-24,9	35-39,9	40-44,9	45-49,9	50-54,9	55-59,9	60-64,9	65-69,9	70-74,9	75-79,9	(t)
Flutstrom	33	3	0	1	0	1										150	37,8
Fähre bei Flutstrom	4	10	7	3	1											247	62,2
Σ Flutstrom																397	100
Ebbstrom (unbeeinflußt)	35	3														110	9,4
Fähre bei Ebbstrom	11	10	1	4	0	0	1									220	18,9
Ebbstrom mit Spülstrom*	0	5	6	3	3	5	0	2	1	2	1	0	0	0	1	840	71,7
Σ Ebbstrom																1172	100
Überschuß der Ebbstromfracht 775 t																	

\* 6 der 38 Tiden ohne Spülung

starkes Fließgefälle. Bei Tiden mit erhöhtem  $T_{nw}$  bzw. erniedrigtem  $T_{hw}$  und demzufolge geringem Füllungsgrad des Spülbeckens führen das geringe Fließgefälle und die verkürzte Spüldauer zu geringer Räumwirkung. Damit das mitgeführte Material sich nicht noch im Außentief abgelagert, ist eine möglichst lange Räumphase zur Erzielung ausreichend langer Transportwege anzustreben.

Bei relativ frühem Spülbeginn mit einem Außenwasserstand  $\geq PN + 4,6$  m sind die Randflächen des Außentiefs noch überflutet, so daß die ausgelassenen Wassermengen nicht nur durch die eigentliche Rinne, sondern auch über die Seitenräume und somit durch einen großen benetzten Querschnitt mit relativ geringer Geschwindigkeit abfließen. Das Wasserspiegelgefälle und somit das Stromarbeitsvermögen erreichen daher keine optimalen Werte. Durch einen späteren Spülbeginn bei einem um 20 cm niedrigeren Wasserstand von  $PN + 4,4$  m wurde im allgemeinen ein wesentlich günstigerer Räumeffekt erzielt.

Ausgehend von mittleren Tideverhältnissen und mittlerem Füllungsgrad des Spülbeckens wurde anhand zahlreicher Meßergebnisse der optimale Spülbeginn

a) nach dem erreichbaren Transportweg der Schwebstofffracht auf Abb. 20 und

b) nach dem erzielbaren maximalen Schwebstofftransport auf Abb. 21

optimiert. Es ergibt sich, daß ein Spülbeginn

von 2,5 Stunden vor der Eintrittszeit des Tideniedrigwassers bzw. bei einem Tidewasserstand von  $PN + 4,4$  m

anzustreben ist. Bei einer Erhöhung der Spülwassermenge (s. 7.6) kann ein etwas früherer Spülbeginn ratsam sein, damit die mobilisierende Strömung rechtzeitig vor der Kenterung auf Flutstrom abfällt.

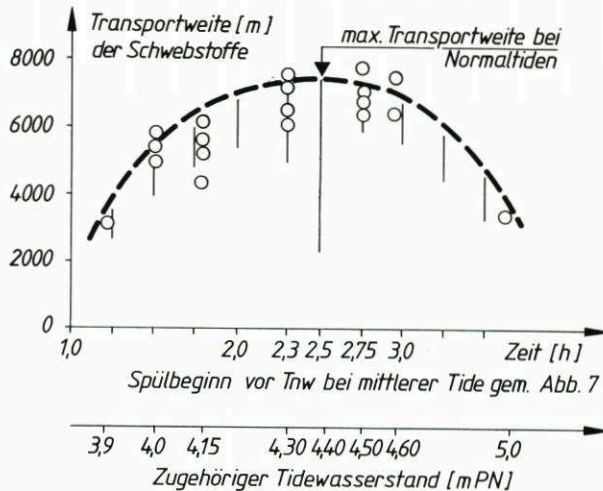


Abb. 20: Optimierung der Transportweite der Schwebstoffe in Abhängigkeit vom Spülbeginn

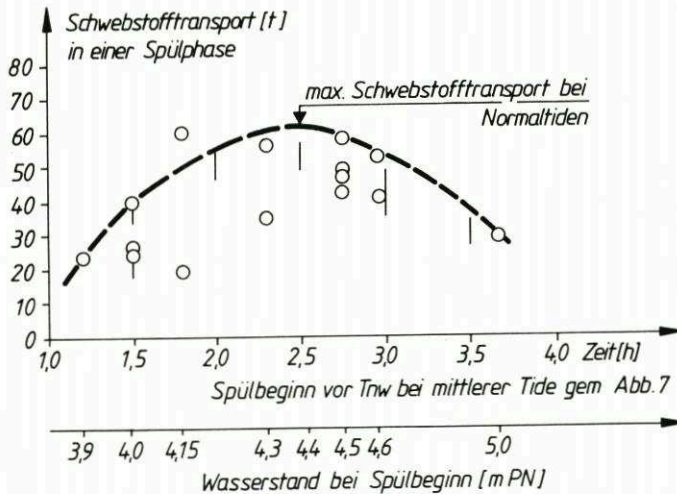


Abb. 21: Optimierung des Schwebstofftransports in einer Spülphase in Abhängigkeit vom Spülbeginn

#### 4. Räumbooteinsatz für die Außentiefunterhaltung

##### 4.1 Allgemein

Für die Räumung von Ablagerungen in Außentiefs werden seit etwa vier Jahrzehnten Stromräumboote eingesetzt (Abb. 22). Die vom Räumboot aufgewirbelten – hauptsächlich schllickigen – Sedimente werden mit der Ebbströmung aus dem Außentief transportiert. Da häufig die natürliche geringe Ebbströmung im Außentief für einen ausreichend weiten Schwebstofftransport nicht ausreicht, sollte sie während des Räumbooteinsatzes durch Sielzug, Schöpfwerksbetrieb oder Spülung verstärkt werden. Dem strömenden Wasser kommt dabei die Funktion des Transportes der aufgerührten Schwebstoffe zu. Der besondere Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß

- nur sehr wenig Energie aufgewendet werden muß,
- keine ökologisch wertvollen Salzwiesen oder Wattflächen als Spülfelder zur Baggergutablagerung beansprucht werden,
- keine aufwendigen Einrichtungen wie Spüleleitungen zu schaffen sind.

1986 wurden Naturmessungen der Außentiefspülung mit Räumbooteinsatz durchgeführt, um die Wirkungsweise eines Stromräumbootes näher zu untersuchen und die Möglichkeiten zur Optimierung seines Einsatzes zu erforschen. Außerdem sollte in dem erweiterten Forschungsvorhaben das Transportverhalten der Tideströmung und die Belastbarkeit mit Schwebstoffen untersucht werden. Auch einer möglichen Veränderung des Sauerstoffgehalts des Seewassers in Form einer denkbaren Sauerstoffzehrung als Folge des Schlickeintrags sollte nachgegangen werden.

Für die Räummethode der Aufrührbaggerung sind außer dem Stromräumboot noch die hydraulischen Eggen bzw. Schlickpflüge im Einsatz. Die Wirkungsweise und technische Daten dieser Räumgeräte werden im Folgenden kurz beschrieben.



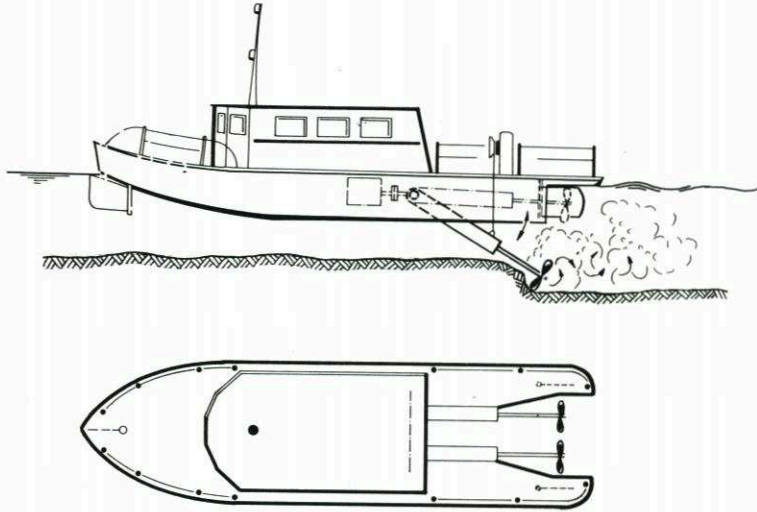


Abb. 22: Stromräumboot in Seitenansicht und Draufsicht

## 4.2 Wirkungsweise von Räumgeräten

### 4.2.1 Stromräumboot

Stromräumboote werden seit etwa 1950 zur Erhaltung der Vorflut und Schiffbarkeit von Außentiefs an der Küste eingesetzt. Sie sind mit zwei absenkbaaren Schrauben versehen. Die gegenläufig arbeitenden Doppelschrauben werden während des Räumvorganges bis auf die erhöhte Sohle abgesenkt und wirbeln das abgelagerte Material vor allem durch den Schraubenstrahl, aber auch durch die mechanische Propellerwirkung auf. Durch die starke Turbulenz des Schraubenwassers wird das Material im Wasser verteilt. Die dem Schluff zuzuordnenden Schwebstoffe verbleiben über längere Zeit in Suspension. Durch eine seewärtig gerichtete Strömung im Außentief werden diese Schwebstoffe dann seewärts verfrachtet und schließlich aus dem Außentief herausgetragen.

Die Arbeitstiefe ist durch die Länge des Schraubenauslegers begrenzt. Die Propellerschaufeln sind austauschbar, da sie im häufigen Sohlenkontakt einem großen Verschleiß unterliegen. Entwickelt wurden die Stromräumboote ursprünglich von der Firma Köster in Heide. Die in ihrer Arbeitstiefe begrenzten Stromräumboote eignen sich besonders für Außentiefs mit ihrer ohnehin geringen Tiefe.

Die technischen Daten der beiden z. Z. vom Bauamt für Küstenschutz in 12 Außentiefs an der Ostfriesischen Küste eingesetzten Stromräumboote sind in Tab. 2 zusammengestellt. Ein weiteres Stromräumboot wird zur Außentiefunterhaltung an der Jade verwendet.

### 4.2.2 Hydraulische Egge und Schlickpflug

Das als hydraulische Egge oder Schlickpflug bezeichnete Räumgerät (Abb. 23) wurde zu Beginn der 60er Jahre von der Firma Fokko Becker, Wilhelmshaven, entwickelt und in den folgenden Jahren unter wissenschaftlicher Beratung von Prof. HENSEN, TU Hannover, ständig

Tabelle 2. An der ostfriesischen Küste eingesetzte Stromräumboote und deren technische Daten

	Stromräumboot „Utlandshörn“	Stromräumboot „Hooge Hörn“
Länge (m)	12,00	15,90
Breite (m)	3,30	4,16
Tiefgang (m)	0,70	0,70
max. Räumtiefe (m. u. Wsp.)	1,50	2,50
Antriebsleistung (PS)	80	2 × 120
Regelarbeitsdrehzahl der Propeller (U/min.)	300	300

verbessert. In den Jahren 1969 bis 1970 wurde die hydraulische Egge erstmals für die Herstellung einer Schifffahrtsrinne beim Bau des neuen Tiefwasserhafens von Cayenne in franz. Guayana angewendet (HOFER, 1975). Im Tidegebiet der deutschen Nordseeküste wird die hydraulische Egge z. Z. u. a. in Hooksiel, Wilhelmshaven, Esensham/Unterweser (Kühlwassereinlauf Kernkraftwerk), Bremerhaven und am Anleger Bützfleth/Elbe eingesetzt.

Bei der hydraulischen Egge sind in einem schlittenähnlichen Stahlrahmen mit seitlichen Kufen zwei etwa senkrecht zueinanderstehende Einlaßbleche angeordnet. Das untere Blech hat die Funktion einer Pflugschar, die je nach Art und Lagerungsdichte des anstehenden Bodens unterschiedlich geformt wird und mit Aufreißzähnen versehen werden kann. Es führt das gelockerte Material und das durchströmende Wasser durch die Eintrittsöffnung in die dahinterliegende Wirbelkammer. Werden mit einem Schlickpflug sehr weiche Schlickablagerungen abgetragen, so gelangen die dispergierten Bodenpartikel allein durch die Formgebung der Wirbelkammer in die Strömung. In die Wirbelkammer kann aber auch zusätzlich von der Rückwand Druckluft und/oder Druckwasser gepumpt werden, das dem von vorn eindringenden Boden-Wasser-Gemisch entgegenströmt. Dadurch entstehen sehr starke aufwärts gerichtete Turbulenzen, die das Abtragmaterial fein verteilen und in höhere Stromlagen verwirbeln. Die auf Kufen gleitende Egge wird von einem Schlepper über den abzutragenden Boden gezogen. Pro Breitenmeter Egge sind etwa 100 PS, entsprechend 75 KW Zugkraft erforderlich.

Neben der mechanisch wirkenden Egge wird inzwischen auch eine „hydrodynamische“ Egge eingesetzt, die ausschließlich durch Wasserdüsen das Sediment löst und in Suspension bringt.

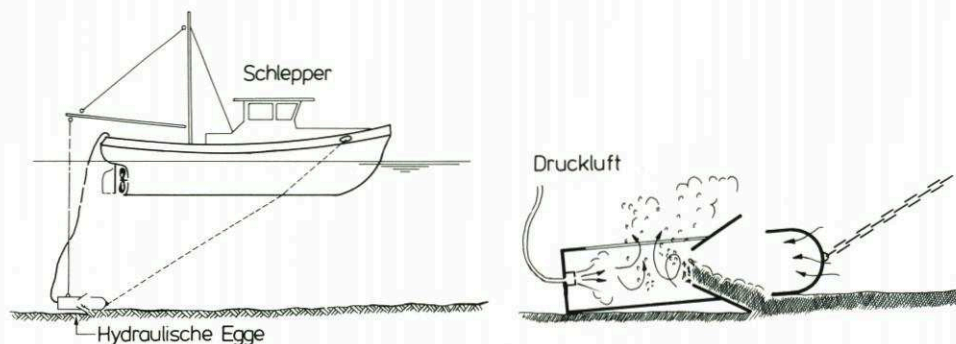


Abb. 23: Hydraulische Egge

Hydraulische Eggen sind vielseitiger und besonders bei größeren Wassertiefen einsetzbar. Sie können sowohl sehr kohäsives als auch schlickig/feinsandiges Material räumen. Der Transport des aufgewirbelten Materials wird auch hier von der Strömung besorgt. Im Bau und Betrieb sind sie aufwendiger als Räumboote.

### 4.3 Versuchsdurchführung mit Räumbooteinsatz

In den Monaten Mai/Juni und August 1986 sind zwei Versuchsreihen mit Räumbooteinsatz im Neßmersieler Außentief durchgeführt worden. Das Räumboot war während der Meßreihen in einem festgelegten Räumbereich zwischen Stat. 0 + 450 und 0 + 700 am westlichen Ufer des Außentiefs (s. Abb. 1) im Einsatz. Die seewärts transportierten, suspendierten Feststoffe wurden an den Meßstellen II und III durch die „Sediwa“ erfaßt. Die Meßstellen lagen i. M. 400 m (II) bzw. 1000 m (III) vom Räumbereich entfernt. Zusätzlich wurden an den Meßstellen wieder der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit sowie außerdem an Meßstelle II die Attenuation, der Sauerstoffgehalt und die Temperatur des Seewassers gemessen.

In der ersten Versuchsreihe vom 26. 5. bis 9. 6. 1986 ist mit großer Schützöffnung von 80 cm bei relativ niedrigen Tidewasserständen mit dem Spülen begonnen worden. Dadurch konnten hohe Fließgeschwindigkeiten bis 1,3 m/s im Außentief und somit sehr hohe Feststofftransportkonzentrationen erreicht werden. Das Spülziel wurde in Handbetrieb gesteuert, um durch zeitweises Ziehen der unteren Schütztafel einen hohen Füllungsgrad des Spülbeckens sicherzustellen. Die Handsteuerung brachte es allerdings mit sich, daß nur in 60 % der Tiden während der Tagzeit der Arbeitstage gespült werden konnte.

Die zweite Versuchsreihe vom 14. 8. bis 21. 8. 1986 sollte Aufschluß darüber geben, welche Schwebstoffgehalte noch bei geringen Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,3 bis 0,5 m/s transportiert werden können. Das Spülwasser wurde bereits ab halber Tide abgelassen. In der nachfolgenden Nachttide wurde ohne Räumbooteinsatz gespült, um Sohlablagerungen zu verhindern bzw. zu räumen.

Der Tideverlauf ergab in der ersten Versuchsphase Wasserstände, die etwa 5 cm unter den langjährigen Mittelwerten lagen.

Während der zweiten Versuchsreihe haben die Pegel nur leicht erhöhte Tidewasserstände registriert. Während beider Versuchsreihen wurden nur geringe Windgeschwindigkeiten um i. M. 3 Bft gemessen.

## 5. Sediment- und Schwebstoffmessungen während des Räumbooteinsatzes

### 5.1 Analyseverfahren der Sediment- und Suspensionsproben

Zwischen dem hydraulischen Feststofftransport im Außentief und der Zusammensetzung des verfügbaren Sediments bestehen enge Wechselbeziehungen. Daher wurden sowohl die Bodensedimente als auch die Schwebstoffe mehrfach an den vorgegebenen Punkten entnommen und im Labor analysiert. Um auch evtl. Umlagerungen im Außentief zu erfassen, sind jeweils vor und nach einer Räumversuchsreihe definierte Bodenproben mit einem schließbaren Stechzylinder  $\varnothing$  40 mm 10 cm tief entnommen worden.

Die Schwebstoffdauermessungen der „Sediwa“ erfassen kontinuierlich das Gesamtge-

wicht der abtrennbaren Kornfraktionen  $\geq 5 \mu\text{m}$ . Die Einzeluntersuchungen der Suspensionsproben sollten Aufschluß über die Verteilung der suspendierten Feststoffe infolge Räumboot-einsatzes und über die Frage der biogenen Verkittung der Feinststoffe geben.

Die *S e d i m e n t p r o b e n* wurden sowohl nach der herkömmlichen Methode der Sieb- und Schlämmanalyse als auch mit dem Cilas-Laser-Granulometer vom Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Kiel (Prof. KÖSTER) analysiert.

Die Schlämmanalyse bestimmt Äquivalentdurchmesser aufgrund der Sinkgeschwindigkeit der Sedimente. Zusammenballungen von Feinstsedimenten, die hauptsächlich auf Tonmineralien, Schalenbruchstücken etc. bestehen, dürften vermutlich optisch größere Abmessungen aufweisen, als ihre aufgrund der Sinkgeschwindigkeit errechneten Äquivalentdurchmesser.

Die mit dem Granulometer bearbeiteten Proben ergeben ein wesentlich feineres Korngrößenspektrum als die Ergebnisse der Sieb- und Schlämmanalyse. Vor allem im Bereich des Fein- und Mittelschluffs ( $2 < \varnothing < 20 \mu\text{m}$ ) erfaßt diese Methode höhere Anteile.

Die Bestimmung der organischen Bestandteile (Corg-Gehalt) erfolgte mit dem Leco-Carbol-Analyser – CS 244 vom Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Kiel. Dabei wurde die bei niedrigen Temperaturen (ca.  $40^\circ\text{C}$ ) getrocknete und gemahlene Probe im Induktionsofen des Leco-Analysers bei  $2000^\circ\text{C}$  im Sauerstoffstrom verbrannt und der Kohlenstoff zu  $\text{CO}_2$  oxidiert. Die thermische Leitfähigkeit des entstehenden Gasgemisches dient als Maß für den  $\text{CO}_2$ -Gehalt, über den der Corg-Gehalt bestimmt wird.

Die *S u s p e n s i o n s p r o b e n* wurden nach folgenden Verfahren untersucht:

- Cilas-Granulometer-Methode vom Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Kiel. Während verschiedener Tidephasen wurden Suspensionsproben im Außentief entnommen und mit dem Laserverfahren untersucht. Die Proben wurden mit Wasserstoffperoxyd behandelt, um das Algenwachstum zu behindern und organische Bestandteile zu zerstören (BfK, 1987).
- Elektronisch-optische Untersuchung durch die Fachhochschule Flensburg (Prof. MÜLLER VON DER HAEGEN). Das mikroskopisch vergrößerte Bild einer kleinen Wasserprobe wird durch einen Computer auf Partikelanzahl und Kornverteilung ausgewertet. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, daß nur eine sehr kleine Teilprobe (Tropfengröße) analysiert werden kann, die kaum eine repräsentative Entnahme zuläßt. Eine Unterscheidung zwischen organischen und anorganischen Bestandteilen ist nicht möglich. Mit Wasserstoffperoxyd behandelte Proben wurden mit jeweils unbehandelten Proben verglichen.
- Rasterelektronenmikroskopische (REM) Untersuchungen durch das Geologisch-Paläontologische Institut der Universität Kiel. Die REM-Aufnahmen ermöglichen wegen ihrer hochauflösenden Vergrößerung einen Einblick in die Zusammensetzung und den Aufbau der suspendierten Stoffe, den RICKLEFS (1988) in diesem Heft wiedergibt.

## 5.2 Sedimentverteilung im Watt und Außentiefprofil

Im August 1986 wurden in zwei Querprofilen in Stat. 0 + 675 und Stat. 1 + 470 Proben entnommen. Sie sollten einen Gesamtüberblick über die auf dem Watt westlich und östlich des Leitdammes sowie im Außentief anstehenden Sedimente vermitteln. Die Probenmittelwerte sind in Abb. 24 zusammengestellt.

Der Korndurchmesser des Wattsediments nimmt von Norden nach Süden etwas ab. Der Anteil des Schlämmskörns  $\leq 60 \mu\text{m}$  steigt vom äußeren Profil mit 5 % auf 10–15 % in Stat. 0 + 675, so daß hier der Übergang vom Sandwatt zum Mischwatt anzusiedeln ist.

Auf der niedriger gelegenen Berme zwischen Außentief und Leitdamm lagert sich in dessen Seegangsschatten zunächst feineres Material ab mit einem Feinkornanteil bis zu 50 % (Stat. 0 + 675). Etwa 100 m östlich des Leitdamms ist der Einfluß von Außentief und Leitdamm abgeklungen, so daß kein merklicher Unterschied zur Kornzusammensetzung westlich des Leitdamms mehr festzustellen ist.

Der eigentliche Außentiefquerschnitt einschl. seiner Böschungsbereiche weist in Sohlenmitte an Meßstelle III fast ausschließlich Feinsand (98 %) auf. Landwärts nimmt der Feinsandanteil auf 90 bis 80 % ab. Hierbei dürfte es sich um das beim Spülen sortierte und an der Sohle bewegte gröbere Korn handeln, das im äußeren Bereich durch Sandeintrieb bei gewissen Flutströmungen (ERCHINGER u. a., 1986) noch angereichert wird.

Der Feinkornanteil < 60 µm liegt im Bereich der Außentiefböschungen wesentlich höher und beträgt an Meßstelle III an der Westseite 21 % und an der Ostseite 30 %. Diese Klassierung dürfte auf die bei Leitdammüberflutung quer zur Rinne verlaufende Strömungskomponente zurückzuführen sein.

Die Suspensionsproben werden dadurch zeitweise sowohl beim Spülen als auch beim Fährverkehr zur Ostseite der Rinne abgelenkt und führen hier zu Ablagerung des länger in Schwebelag befindlichen feineren Materials. Der Gehalt an organischer Substanz ist unmittelbar östlich des Leitdamms am höchsten. Er beträgt

bei Stat. 0 + 675	Corg = 1,57 %,
bei Stat. 1 + 440	Corg = 0,9 % und
100 m weiter östlich bei Stat. 0 + 675	Corg = 1,1 %.

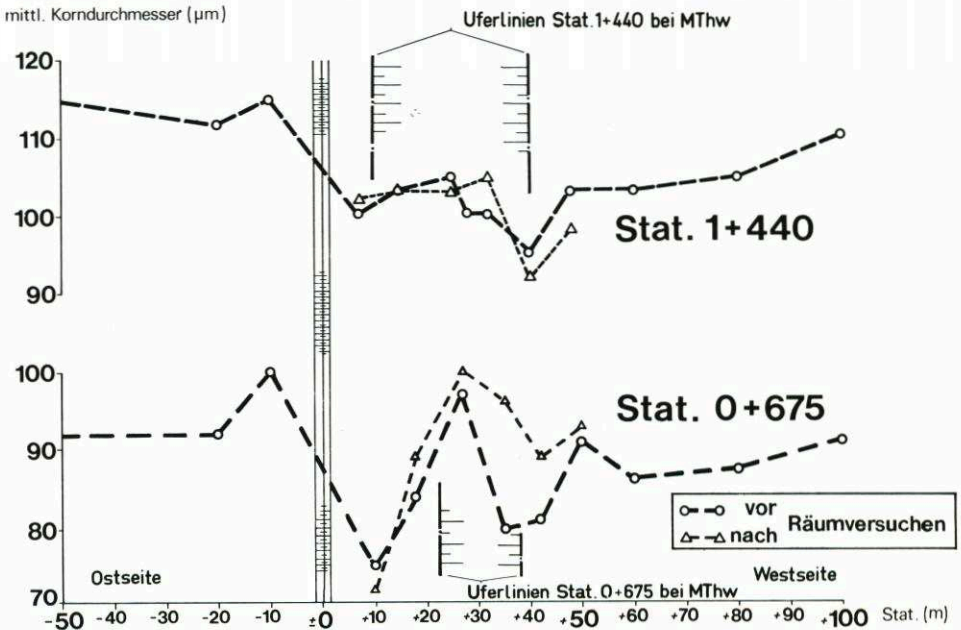


Abb. 24: Medianwerte aus den Sieb- und Schlämmanalysen der Schlickproben in ihrer Verteilung quer zum Außentief (entnommen im August 1986)

## 5.3 Sedimentverteilung nach Räumbooteinsatz

## 5.3.1 1. Versuchsreihe vom Mai/Juni 1986

Im Räumereich (Stat. 0 + 450 bis 0 + 700) wurden an drei Stationen (Stat. 0 + 475, 535 und 565) vor Beginn der Räumversuche Sedimentproben entnommen zur Analyse des abzuräumenden Materials. Die Sieb- und Schlämmanalysen ergaben einen mittleren Korndurchmesser von 75–80  $\mu\text{m}$  und damit wesentlich mehr Feinanteile als im Außentiefbett an den Meßstellen II und III.

An Meßstelle II und III sind vor und nach den Räumversuchen im Mai 1986 je drei Sedimentproben entnommen worden. Ein erster Vergleich der aus den Sieb- und Schlämmanalysen ermittelten Medianwerte ergibt keine signifikanten Veränderungen der vor und nach den Räumen entnommenen Sedimente (Tab. 3). Die Auftragung der Körnungskurven macht jedoch deutlich, daß sich ein Körnungsband im Feinsandbereich doch meßbar zum feineren verschoben hat (Abb. 25). Dieses dürfte die Folge der wechselnden Erosions- und Sedimentationsvorgänge sein, bei denen sich das geräumte und bis hier transportierte feinere Material mit den anstehenden Außentiefsedimenten vermischt.

Die Verschiebung wird besonders deutlich an den Körnungskurven der etwa 1000 m vom Räumereich entfernt liegenden Meßstelle III. Die Korngrößen der Feinsandanteile nehmen sowohl im Böschungsbereich als auch an der Sohle mit ihrem eng begrenzten Kornspektrum um ca. 20  $\mu\text{m}$  ab.

Im Gegensatz dazu nehmen die Schlämmerkornanteile (DIN 4022),  $\varnothing < 0,06 \text{ mm}$ , in den Randbereichen des Querschnitts ab. Dies ist vermutlich auf eine Klassierung des geräumten Materials zurückzuführen. Während das sehr feine Schlämmerkorn mit der turbulenten Räumströmung seewärts transportiert wird, sedimentieren die feinsandigen Teilchen wegen ihrer größeren Sinkgeschwindigkeit im Randbereich des Querschnitts, wodurch der vor den Räumversuchen gemessene Schlämmerkornanteil abnimmt.

An der nur 200–500 m vom Räumereich entfernt liegenden Meßstelle II ergibt sich kein einheitliches Bild. Vor Beginn der Räumarbeiten wurde an der mittleren und westlichen Entnahmestelle ein relativ geringer Feinanteil  $\leq 60 \mu\text{m}$  von 10–12 % gemessen. Dieser Anteil

Tabelle 3. Mittlere Korndurchmesser des Sediments in Meßstelle II und III vor und nach der Räumung aus Sieb- und Schlämmanalysen

Meßstelle II (Stat. 1000)	NN – 1,30 m westl. Außentieftrand $\mu\text{m}$	AT-Sohle Mitte $\mu\text{m}$	NN – 1,30 m östl. Außentieftrand $\mu\text{m}$
Vor Räumversuchen	96	100	88
Nach Räumversuchen	100	98	80
<b>Meßstelle III</b> (Stat. 1470)			
Vor Räumversuchen	98	105	90
Nach Räumversuchen Sieb- und Schlämmanalyse	99	105	95

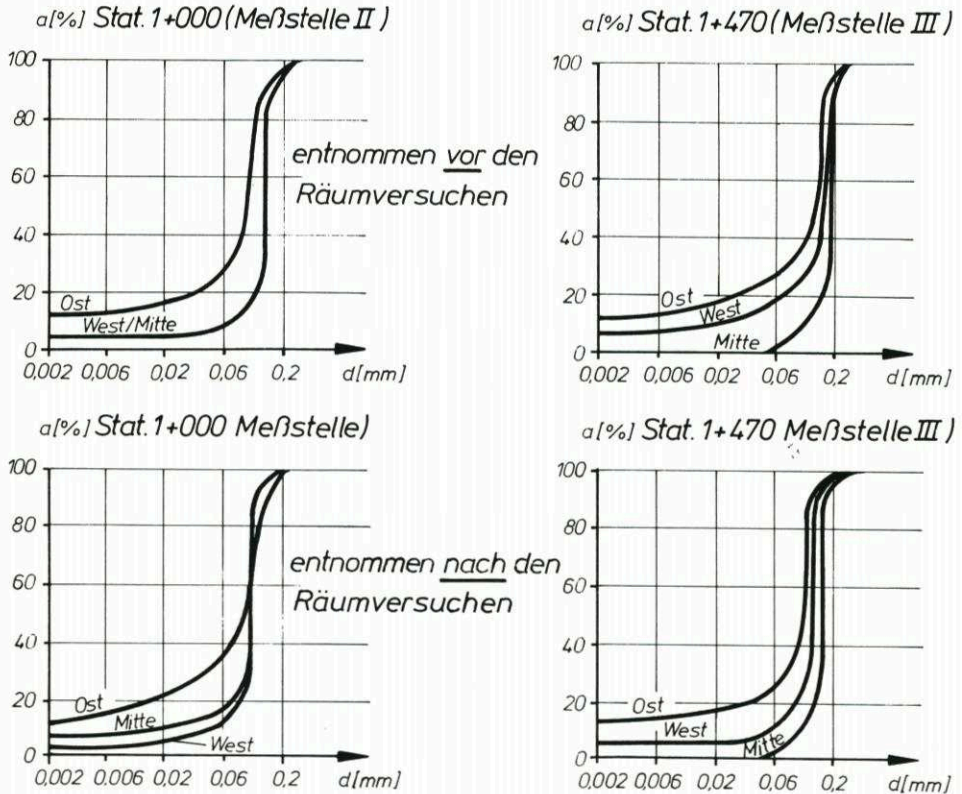


Abb. 25: Körnungskurven von Außentiefbodensedimenten vom Mai/Juni 1986

hat sich vor allem infolge Zunahme des Mittel- und Grobschluffkorns auf 18 % in Sohlmitte erhöht. Der westliche Entnahmepunkt zeigt hingegen ausschließlich Veränderungen im Feinsandspektrum, das sich – wie an Meßstelle III – nach links verschiebt. An der Ostseite nimmt sowohl der Schlammkornanteil als auch der Anteil grobkörniger Feinsande zu. Dies mag ein Zufallsergebnis sein. Die Zunahmen des Feinsandspektrums deuten jedoch darauf hin, daß in der Nähe des Räumbereiches zumindest zeitweise ein Überangebot an geräumtem Sediment vorherrschte, das nicht suspendiert wurde. Dieses Material hat sich daher ohne Klassierung abgesetzt und ist erst später mit den nachfolgenden Spülströmungen erodiert worden.

Bezüglich der organischen Bestandteile bleibt festzuhalten, daß deren Gehalt während der Räumversuche an fast allen Entnahmestellen abnimmt.

Die vor und nach den Räumversuchen nivellierten Außentiefprofile seewärts des Räumbereiches zeigen weder Auf- noch Ablandung. Daraus kann geschlossen werden, daß ein Gleichgewichtsprofil besteht, und Sedimentations- und Erosionsphasen ständig wechseln und sich ausgleichen.

### 5.3.2 2. Versuchsreihe vom August 1986

Die Räumbooteinsätze wurden hierbei bereits ab halber Ebttide (Wasserstand ~ NN) und mit geringer Spülstromgeschwindigkeit durchgeführt. Die landseitigen Entnahmestellen

der Sedimentproben wurden von Meßstelle II bis an den seewärtigen Rand des Räumbereiches verlegt (Stat. 0 + 675). Die Probenentnahmen bestätigten weitgehend die Ergebnisse vom Frühjahr des Jahres (Tab. 3 und Abb. 25). Der mittlere Korndurchmesser des Feinsand-Kornbandes verringerte sich infolge der Räumaktion (Abb. 26). In Stat. 0 + 675 nimmt der zuvor hohe Schlammkornanteil in den sohnahen Probenentnahmestellen deutlich ab, während eine Probe vom oberen westlichen Außentiefrand 10 m östlich des Leitdammes eine Zunahme feiner Kornfraktionen verzeichnet. Aufgrund dieser Probe wird das in Abb. 26 dargestellte Körnungsband der Schlammfraktionen  $\leq 60 \mu\text{m}$  der Stat. 0 + 675 nach der Räumaktion wesentlich breiter. An den anderen Entnahmestellen nehmen die Feinanteile ab.

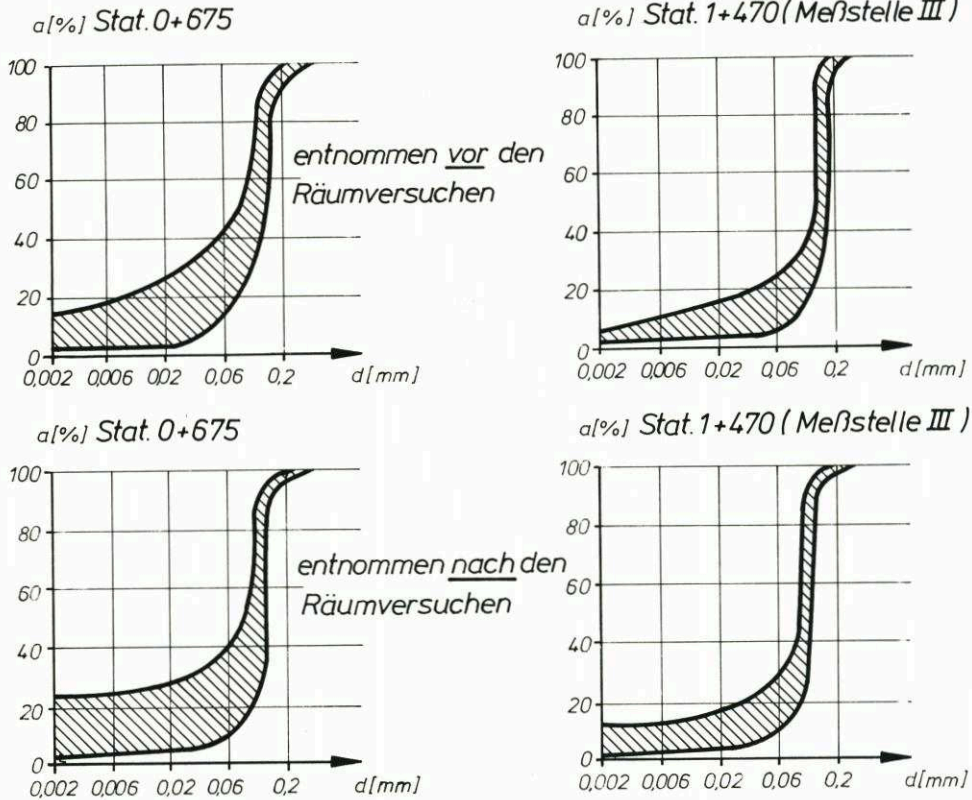


Abb. 26: Körnungskurven von Außentiefbodensedimenten vom Aug. 1986

Die sedimentologischen Untersuchungsergebnisse sind ein Indiz für eine Klassierung des geräumten Materials, die aufgrund der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten bei der geringeren Fließgeschwindigkeit bereits im Aktionsbereich des Räumbootes einsetzt. Sedimente mit hoher Sinkgeschwindigkeit (Feinsand) werden ausschließlich durch die turbulente Spülströmung transportiert. Ihre Konzentration nimmt zur Außentiefsohle stark zu. Infolgedessen ist die Suspension als heterogen zu bezeichnen. Zum Teil dürfte das grobe Material wie „Geschiebe“ auf der Sohle transportiert werden. Nimmt die Turbulenz ab, sedimentieren die Feinsande und werden erst mit der nächsten Spülströmung wieder erodiert und seewärts transportiert.

Sedimente mit sehr geringer Sinkgeschwindigkeit werden infolge der durch Räumboot-



und Spülströmung erzeugten Turbulenz über den gesamten Wasserquerschnitt verteilt. Sie bilden mit dem Seewasser eine quasi homogene Suspension und nehmen an der turbulenten Austauschbewegung des Wassers teil. Sie gelangen auch in den Randbereich des wasserbedeckten Querschnitts, wo sie ggf. infolge der gegen Null abnehmenden Strömung sedimentieren, wie 10 m östlich des Leitdammes festzustellen war.

#### 5.4 Schwebstoffanalyse – mit und ohne Räumbooteinsatz

Als Ergebnisse der Cilas-Messungen und der optisch-elektronischen Untersuchungen konnte die Kornverteilung von Suspensionsproben ermittelt werden.

Die Cilas-Schwebstoffuntersuchungen ergeben relativ große Medianwerte zwischen 70–96  $\mu\text{m}$ , der aus dem Spülstrom ohne Räumbooteinsatz an den Meßstellen II und III entnommenen Proben. Dieses Ergebnis zeigt, daß bei regelmäßigem Spülbetrieb hauptsächlich die an der Außentiefsohle vorherrschenden Feinsandfraktionen transportiert werden. Die Medianwerte der während des natürlichen Ebbstroms – also bei geringeren Fließgeschwindigkeiten bis 0,3 m/s – entnommenen Proben liegen um eine 10er Potenz niedriger zwischen 6,7 bis 9,4  $\mu\text{m}$ .

Die während des Räumbooteinsatzes am 26./27. 5. 86 entnommenen Proben bringen ein ähnliches Ergebnis für den Medianwert zwischen 8,5 und 9,3  $\mu\text{m}$ . Dieses Ergebnis überrascht insofern, als beim Spülen ohne Räumbooteinsatz wesentlich höhere Medianwerte gemessen wurden. Offensichtlich wurden hauptsächlich die in quasi-homogener Suspension befindlichen Schwebstoffe erfaßt – s. Abschn. 5.3.2. Außerdem wurden die Suspensionsproben wegen Algenbildung mit Wasserstoffperoxyd behandelt, wodurch zahlreiche biogene Bindungen zerstört werden und somit ein geringerer Medianwert gemessen wird.

Dies zeigen auch die mikroskopischen Untersuchungen der Fachhochschule Flensburg, in denen die Teilchen-Größen elektronisch ausgezählt werden. Bei einer unbehandelten Probe liegt die Mehrzahl der aus dem Räumstrom entnommenen Schwebstoffe im Größenbereich 20–50  $\mu\text{m}$ , also in der Kornfraktion des Grobschluffs. Die Kornverteilung dieser unbehandelten Suspensionsproben ist in Abb. 27 aufgetragen. Nach Angaben des Probenbearbeiters konnten allerdings eine große Anzahl von Teilchen  $\geq 100 \mu\text{m}$  nicht in die Analyse einbezogen werden.

Durch Behandlung der Proben mit Wasserstoffperoxyd verschiebt sich die Körnungslinie vom Grobschluffbereich (20–60  $\mu\text{m}$ ) in die Fraktion des Fein- und Mittelschluffs. Diese Verschiebung ist ein Hinweis auf die tatsächlich vorhandenen zahlreichen, aus feineren Teilchen zusammengesetzten Partikel (Agglomerate), die nach den REM-Untersuchungen aus Tonmineralien und untergeordnet aus den Mineralien Quarz, Glimmer und Feldspat bestehen (KÖSTER u. RICKLEFS, 1987). Die Teilchen werden infolge elektrochemischer Flockung und mikrobiologischer Aktivität zusammengehalten. Auch zahlreiche organische Stoffe, z. B. Schalen, Gehäusereste von Kieselalgen und Einzellern, befinden sich in Suspension.

Eine beim Spülen ohne Räumbooteinsatz in Meßstelle III entnommene Probe enthält große Anteile aus der Korngrößenfraktion des Mittelschluffs (6–20  $\mu\text{m}$ ; Abb. 27). Dieses Ergebnis widerspricht scheinbar der oben erläuterten Cilas-Untersuchung. Es ist jedoch zu bedenken, daß während der Teilprobenentnahme häufig die Teilchen mit großer Sinkgeschwindigkeit (z. B. Feinsand) nicht mehr erfaßt werden, so daß deren Anteil in der untersuchten Tropfenprobe unterrepräsentiert ist.

Trotz der Problematik der Schwebstoffentnahme und -analyse läßt sich auch aus den Schwebstoffuntersuchungen der Schluß ziehen, daß das geräumte Material mit der in Abb. 27

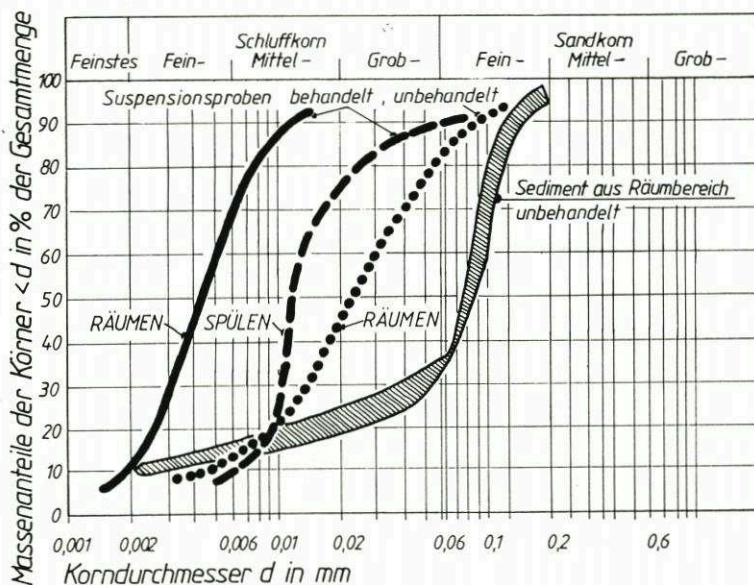


Abb. 27: Kornverteilung der Suspensionsproben während der Spül- und Räumbootphasen sowie des Sediments aus dem Räumbereich mit und ohne Wasserstoffperoxydbehandlung

dargestellten Kornverteilung nach dessen Eintrag in die vorbeiziehende Strömung klassiert wird. Wird diese Kornverteilung mit der aus dem Räumstrom entnommenen Verteilung der suspendierten Stoffe verglichen, so ist folgendes festzustellen:

- Die Feinsandfraktion ( $\geq 60 \mu\text{m}$ ) wird in der in mittlerer Wassertiefe entnommenen Schwebstoffprobe in wesentlich geringeren Anteilen erfaßt. Daraus ist zu schließen, daß die Feinsandfraktion in heterogener Suspension, d. h. mit zur Sohle stark zunehmender Konzentration, transportiert wird.
- Die feinsten Teilchen einschl. der Feinschluff-Fraktion ( $\leq 6 \mu\text{m}$ ) werden wegen ihrer sehr geringen Sinkgeschwindigkeit über den gesamten Wasserquerschnitt bis in den Übergang zum Watt verteilt und in quasi homogener Suspension transportiert. Diese Schwebstofffraktionen werden daher in etwa gleichen Anteilen wie in der geräumten Sedimentprobe gemessen.
- Die Anteile aus den Fraktionen des Grobschluffs ( $20\text{--}60 \mu\text{m}$ ) und vor allem die des Mittelschluffs ( $6\text{--}20 \mu\text{m}$ ) überwiegen in der Schwebstoffprobe. Sie nehmen gegenüber den Anteilen aus der Schlämmanalyse der Sedimentproben erheblich zu. Diese Fraktionen werden konzentriert in dem Hauptspülstrom transportiert. Sie verteilen sich nicht über den Gesamtquerschnitt bis in die Seitenräume und verhalten sich auch nicht wie die Feinsandfraktion mit sohnaher Konzentration und Neigung zum Absetzen. Der Förderzustand dieser Mittel- bis Grobschlufffraktionen wäre demzufolge einem Übergangsbereich zwischen homogener und heterogener Suspension zuzuordnen.

Die Schwebstoffanalysen zeigen, daß der starke Räumeffekt der Räumbootpropeller zu einer guten Auflösung des zu räumenden Sediments führt. Zusammenballungen von Feinsedimenten, die überwiegend als Agglomerate der Korngröße des Mittel- bis Grobschluffs zuzuordnen sind, werden jedoch nicht zerkleinert (KÖSTER, RICKLEFS, 1987). In der Strömung werden die Sedimente klassiert. Sie bilden homogene bis heterogene Feststoff-Wasser-Gemische (NEWITT et al., 1955).

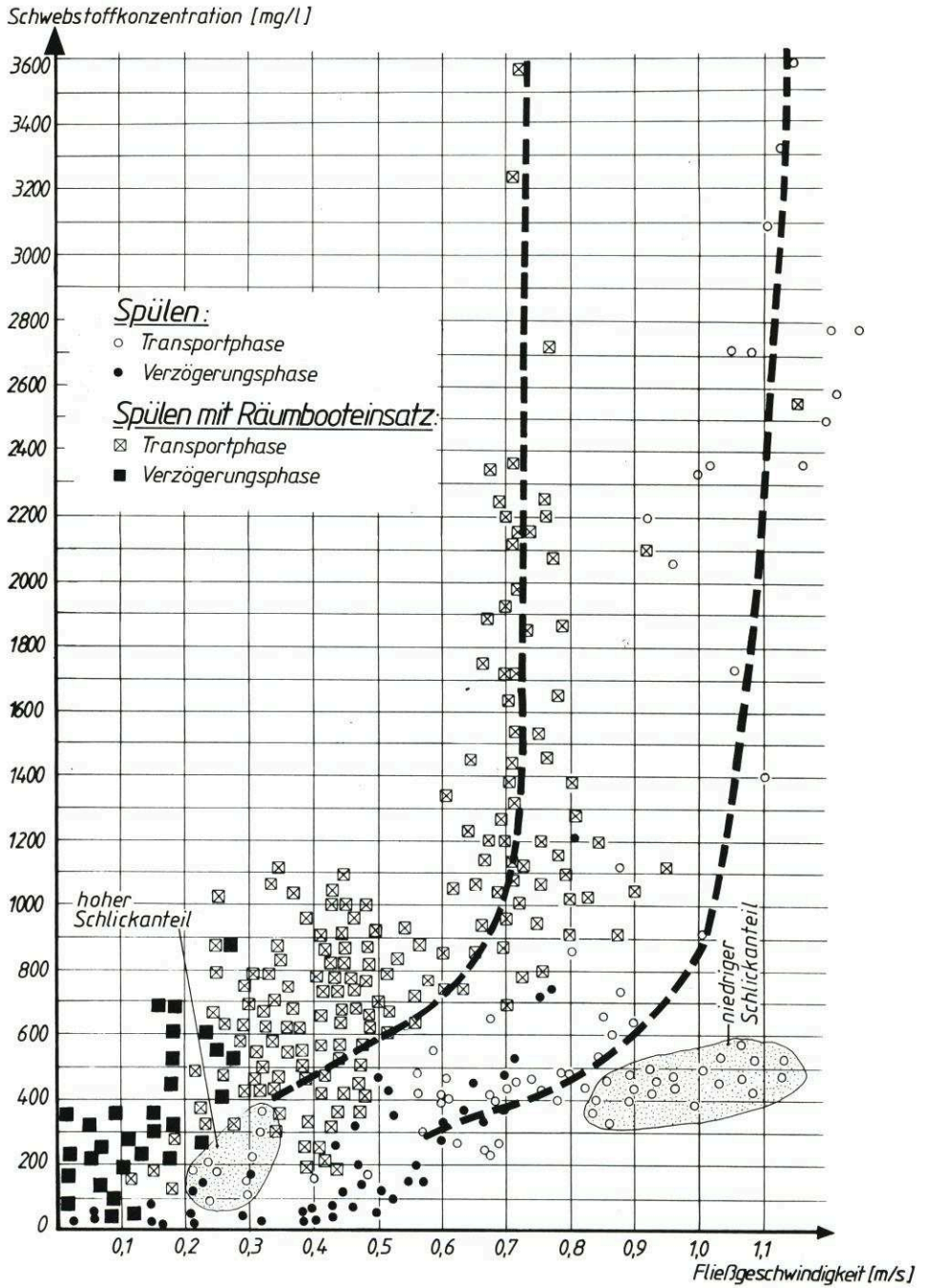


Abb. 28: Daten der Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit mit und ohne Räumbooteinsatz

## 5.5 Schwebstofftransport

### 5.5.1 Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit

Die Ergebnisse der Dauermessungen mit der „Sediwa“ in den Meßstellen II und III zeigen, daß durch den Räumbooteinsatz ein Mehrfaches an Schwebstoffen mobilisiert wird. Abb. 28 verdeutlicht den Unterschied zwischen den Schwebstoffgehalten bei normalem Spülbetrieb und beim Spülen mit Räumbooteinsatz. Die gewonnenen Meßwerte sind als Minutenmittelwerte ermittelt worden, von denen jeweils zehn zu einem Punkt zusammengefaßt worden sind (Abb. 28).

Bei der Betrachtung der Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit ist grundsätzlich zwischen einer Transportphase und einer Verzögerungsphase zu unterscheiden. Gegen Ende der Spülphase nehmen die Fließgeschwindigkeiten stark ab. Die Schwebstoffe verbleiben während dieser Verzögerungsphase noch eine Weile in Suspension und sedimentieren erst allmählich. Die im Verhältnis zur Fließgeschwindigkeit häufig sehr hohen Werte der Schwebstoffkonzentration während dieser Sedimentationsphase sind daher besonders gekennzeichnet.

Auffällig ist, daß die Schwebstoffkonzentration bei Geschwindigkeiten unter 0,6 m/s etwa 1100 mg/l nicht überschreitet, während bei Fließgeschwindigkeiten über 0,6 m/s die Schwebstoffkonzentration offenbar infolge der großen Turbulenz steil zunimmt bis über 3000 mg/l. Hervorzuheben ist, daß bei höheren Schwebstoffkonzentrationen ohne Räumbooteinsatz eine etwa 50 % höhere Fließgeschwindigkeit für die gleiche Konzentration erforderlich ist. Da der Transportvorgang sich nicht unterscheidet, ist der stärkere Strom für die Mobilisierung des Materials erforderlich, die im andern Fall das Räumboot übernimmt.

### 5.5.2 Schwebstoffkonzentration und -transport während einzelner Räumphasen

Die Ganglinien der Schwebstoffkonzentration während des Spülers mit Räumbooteinsatz sind auf Abb. 29 für die Meßstelle II und auf Abb. 30 für Meßstelle III wiedergegeben. Mit Spülbeginn wurde der Räumbooteinsatz in dem in Abb. 1 dargestellten Räumbereich gestartet. Bei einer maximalen Spülgeschwindigkeit von 0,93 m/s blieb an Meßstelle II die Schwebstoffkonzentration bis auf einen Spitzenwert von 1480 mg/l unter 1000 mg/l. Diese während des Räumbooteinsatzes relativ geringe Konzentration ist vermutlich damit zu erklären, daß der schwebstoffreiche Hauptspülstrom von der wegen des Schiffsbetriebes seitlich im Außentief angeordneten Meßstelle II nicht voll erfaßt wurde. Anders bei Meßstelle III (Abb. 30), wo bei einer Spülstromgeschwindigkeit von 0,80 m/s eine maximale Schwebstoffkonzentration von 2370 mg/l gemessen wurde. Bei dieser hohen Konzentration war der Waagebehälter der „Sediwa“ jeweils in sehr kurzer Zeit gefüllt und mußte wieder leerspült werden. Durch diese häufigen Spülvorgänge – in den Ganglinien mit „S“ gekennzeichnet – ergaben sich für einige Minuten Lücken in der Datenerfassung. Das macht die Grenzen dieses Meßverfahrens deutlich.

Die an Meßstelle III während des Räumbooteinsatzes gemessene Schwebstoffkonzentration ist in Abb. 31 über die Fließgeschwindigkeit aufgetragen. Durch eine fortlaufende Eintragung der Minutenmeßwerte ist eine zeitbezogene Zuordnung möglich und der Verlauf der Schwebstoffkonzentration über die gesamte Räumzeit Minute für Minute nachvollziehbar.

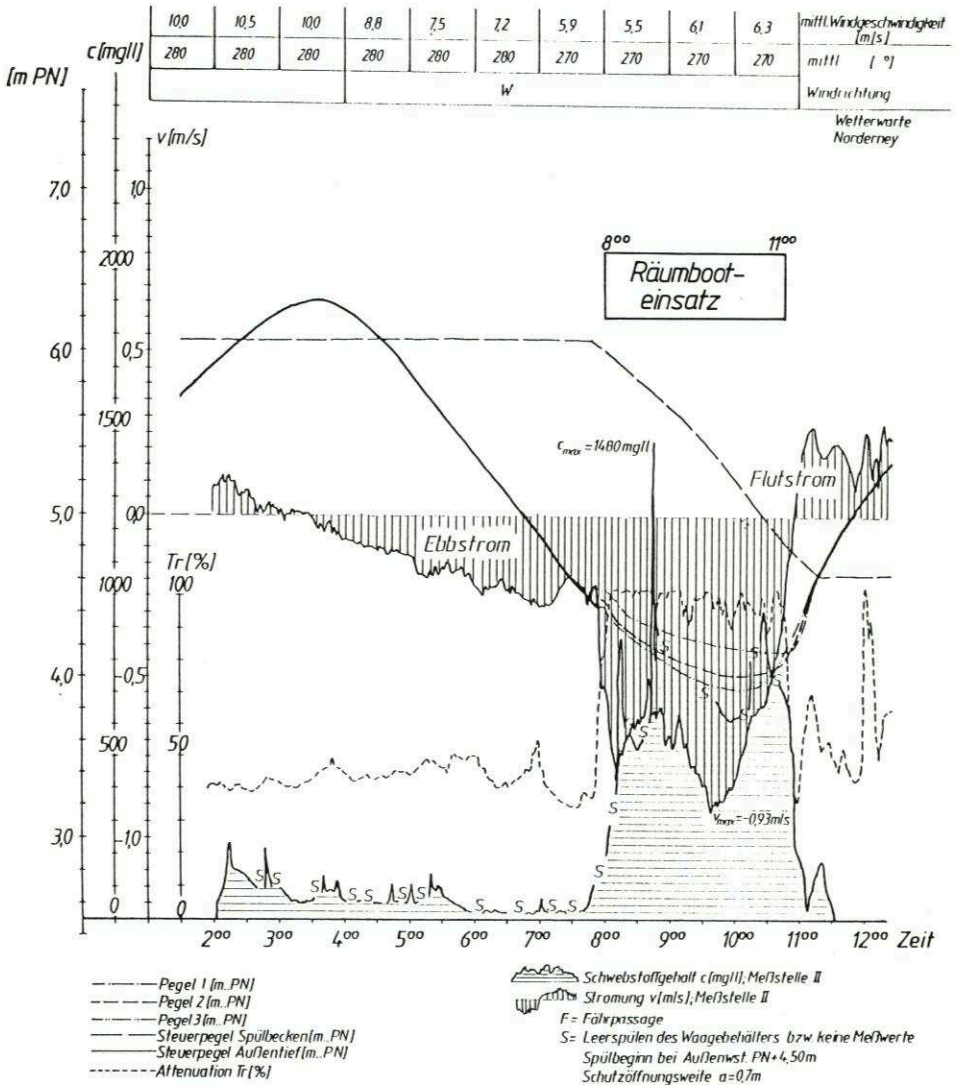


Abb. 29: Ganglinien - Meßstelle II - vom 28. 5. 1986

Nach Öffnen des Spülsiels um 7.56 Uhr läuft der Spülschwall durch das Außentief. Nach 5 Minuten erreicht der kleiner als 1 cm hohe Schwallkopf Meßstelle II, nach weiteren 3 Minuten gegen 8.04 die Meßstelle III. Mit Durchlaufen des Schwallkopfes nimmt die Fließgeschwindigkeit sofort zu. Infolge Zunahme des Stromarbeitsvermögens erhöht sich auch die Schwebstoffkonzentration und steigt bis 8.25 Uhr weiter bis auf 800 mg/l. Die durch das Räumboot aufgewirbelten Sedimente erreichen erst gegen 8.30 Uhr die Meßstelle III. Sie werden vom Wasserkörper transportiert. Der Spülschwall hingegen läuft der Strömung mit Wellengeschwindigkeit ( $c = v + \sqrt{g \times h}$  [m/s] mit  $h$  = mittl. Wassertiefe über Sohle) voraus.

Zur Ermittlung der die Meßstelle passierenden Schwebstofffracht wird die in einem Punkt gemessene Schwebstoffkonzentration als für den gesamten Querschnitt repräsentativ

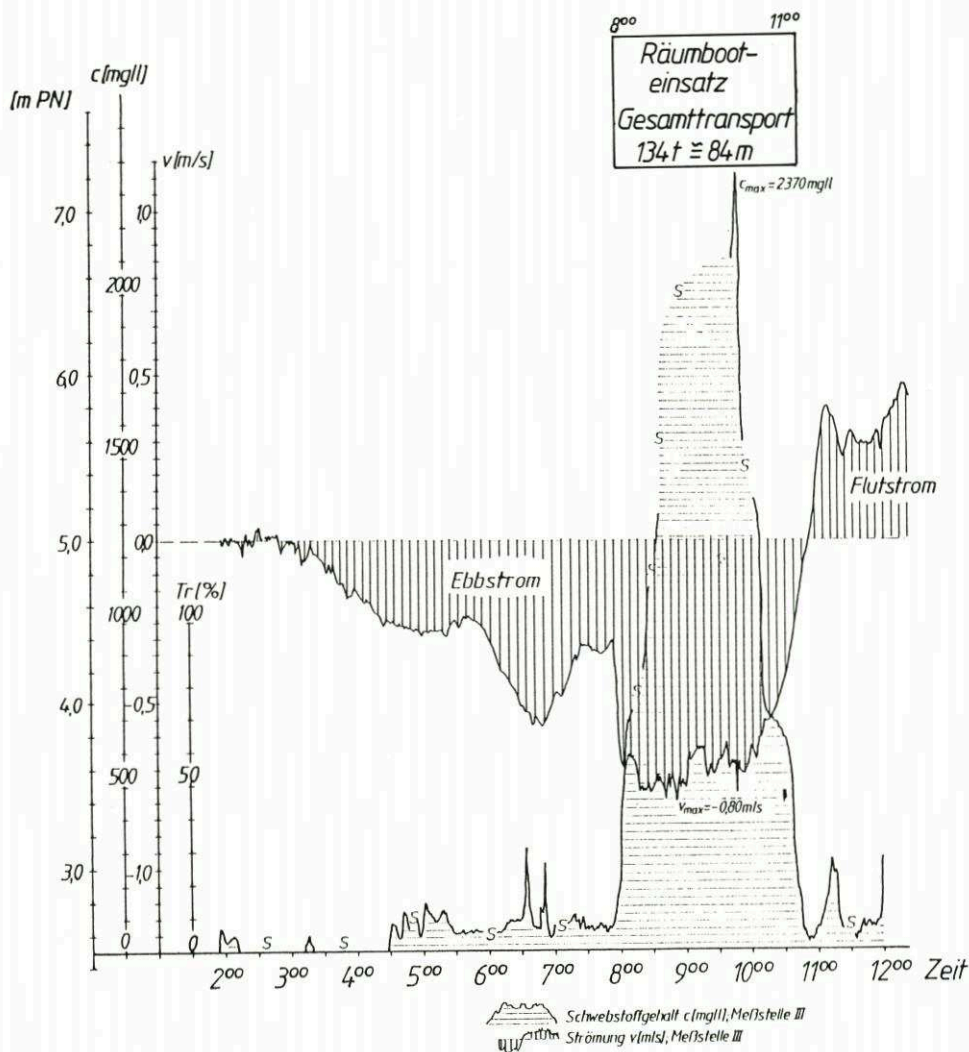


Abb. 30: Ganglinien – Meßstelle III – vom 28. 5. 1986 (Wasserstände s. Abb. 29)

angenommen. Bis zum Eintreffen des vom Räumboot mobilisierten Materials sind infolge der starken Spülströmung 14 t erodiertes Material aus dem oberhalb liegenden Tiefabschnitt an Meßstelle III erfaßt worden. Bei leicht schwankenden Schwebstoffkonzentrationen zwischen 1100 und 1400 mg/l haben nach 45 Minuten ca. 82 t Schwebstoff den Meßquerschnitt passiert. Ab 10.21 Uhr beginnt die Hauptverzögerungsphase; die Geschwindigkeit und allmählich auch die Schwebstoffkonzentration nehmen bis zum Räumende um 10.53 Uhr ab. In der etwa 3stündigen Räumzeit sind 134 t Schlick an Meßstelle III erfaßt worden, das sind rd. 84 m<sup>3</sup>.

Abb. 32 derselben Versuchsreihe im Mai 1986 zeigt die Abhängigkeit zwischen Schwebstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit an Meßstelle III während eines Räumbooteinsatzes bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten bis 1,3 m/s. Allein durch den Spülstrom wird hier eine Konzentration bis 1600 mg/l erreicht. Danach erhöht sich die Konzentration innerhalb einer Minute auf ca. 3200 mg/l, als das durch das Räumboot mit beträchtlicher

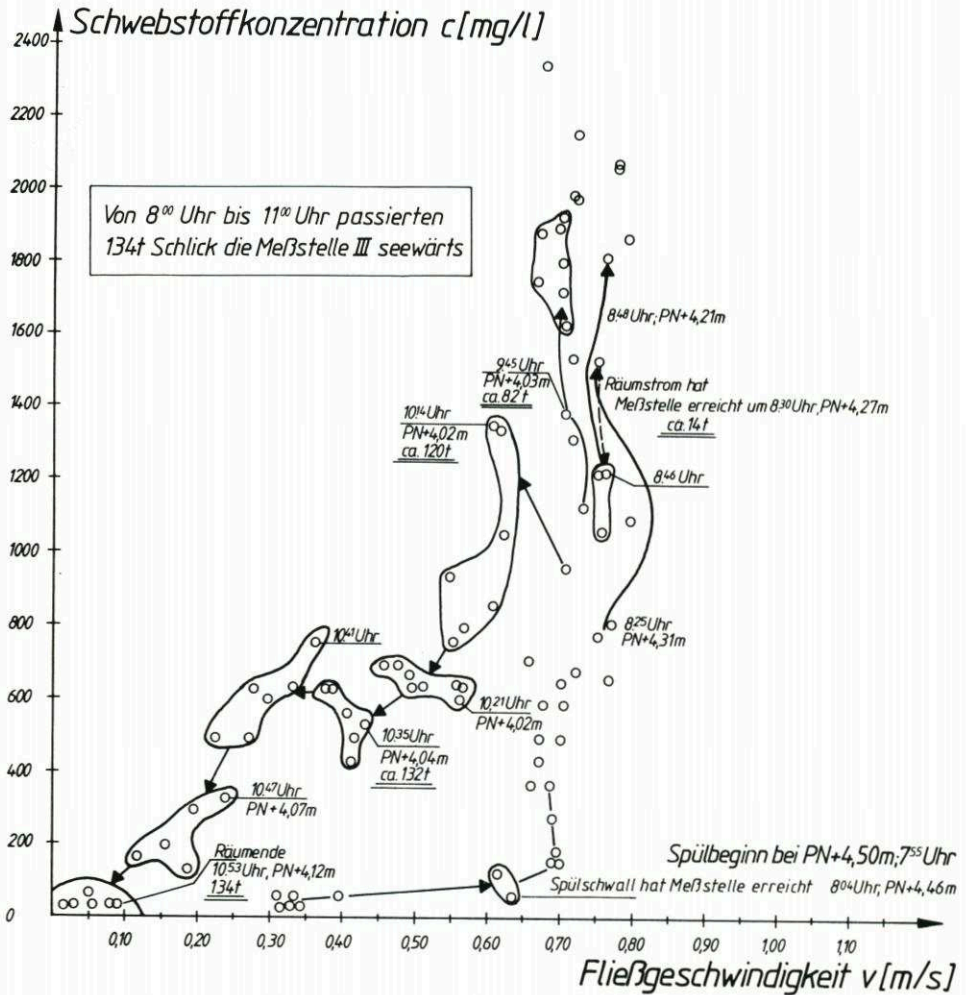


Abb. 31: Schwebstoffkonzentration und Schwebstofftransport in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit während des Spülens mit Räumbooteinsatz am 28. 5. 1986 (Meßstelle III)

Schwebstofffracht angereicherte Wasser die Meßstelle erreicht. Die Konzentration steigt weiter an bis zu einem gemessenen Maximalwert von ca. 8800 mg/l. Danach wird das Räumen mit dem Räumboot beendet, die Schwebstoffkonzentration nimmt innerhalb von 74 Minuten kontinuierlich von 6000 auf 2000 mg/l ab, obwohl die Spülstromgeschwindigkeit noch weit über 1 m/s liegt. Damit wird deutlich, daß die Transportkonzentration von der Mobilisierung der Schwebstoffe abhängt. Danach nehmen die Fließgeschwindigkeit und damit die Schwebstoffkonzentration – wegen Ausfall der „Sediwa“ nicht mehr erfaßt – kontinuierlich auf Null bzw. eine geringe Grundkonzentration ab. Während dieses 3,5stündigen Räumbooteinsatzes am 26. 5. 1986 wurden 300 t Schlick durch Meßquerschnitt III transportiert.

Um den Schwebstofftransport auch bei relativ geringen Fließgeschwindigkeiten ( $v < 0,6$  m/s) zu untersuchen, ist in der zweiten Versuchsreihe vom August 1986 bei einem hohen Außenwasserstand um NN und einer Schützöffnungsweite unter 0,8 m mit Räumbootunterstützung gespült worden (Abb. 33). Zu Beginn erhöht der Spülstrom die natürliche Ebb-

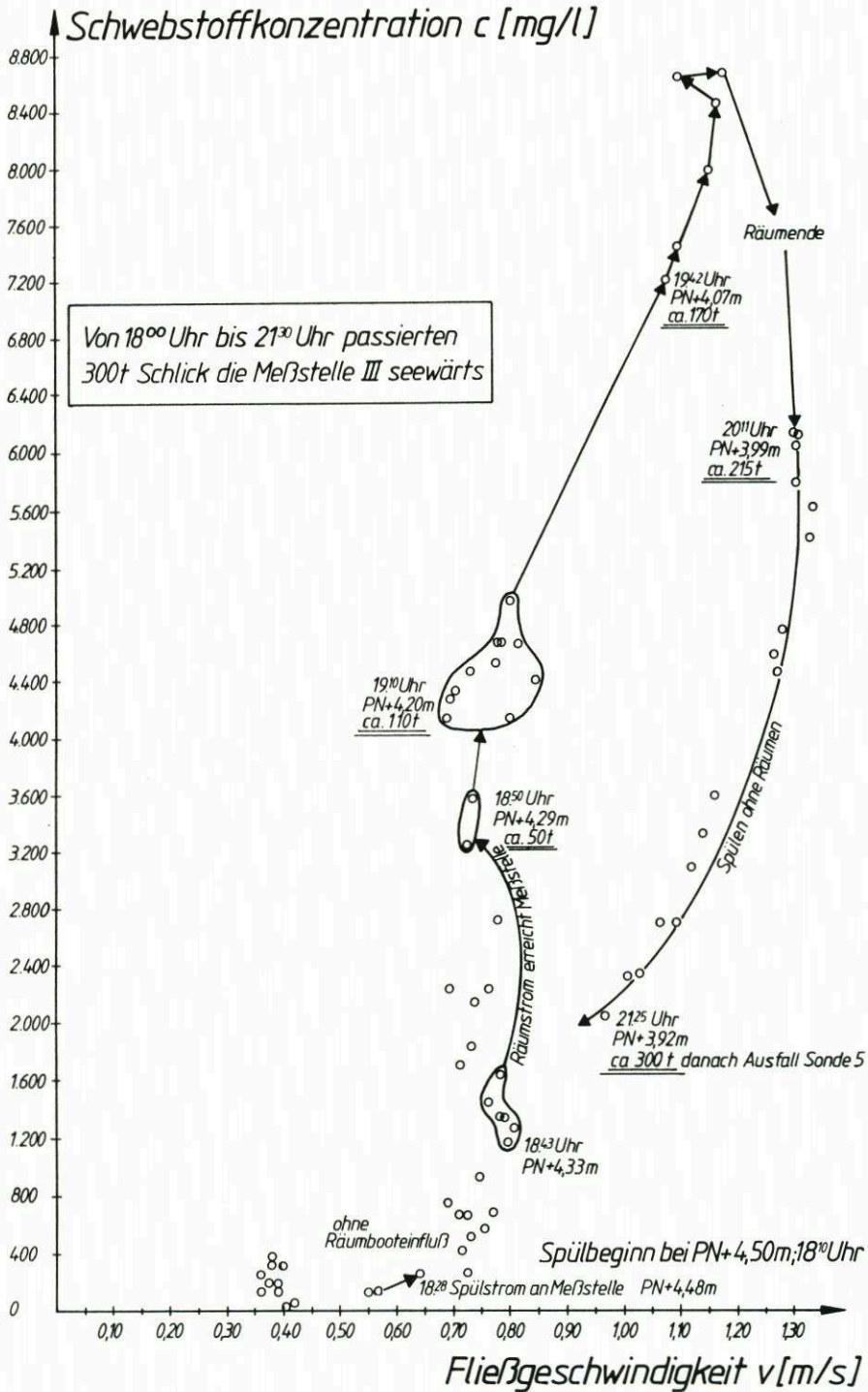


Abb. 32: Beziehung zwischen Strömung und Schwebstoff während des Räumbooteinsatzes am 26. 5. 1986 (Meßstelle III)



stromgeschwindigkeit von 0,4 auf max. 0,6 m/s. Damit steigt auch der Schwebstoffgehalt auf zunächst ca. 700 mg/l an, um dann wieder mit abnehmender Strömung auf ca. 400 mg/l abzufallen.

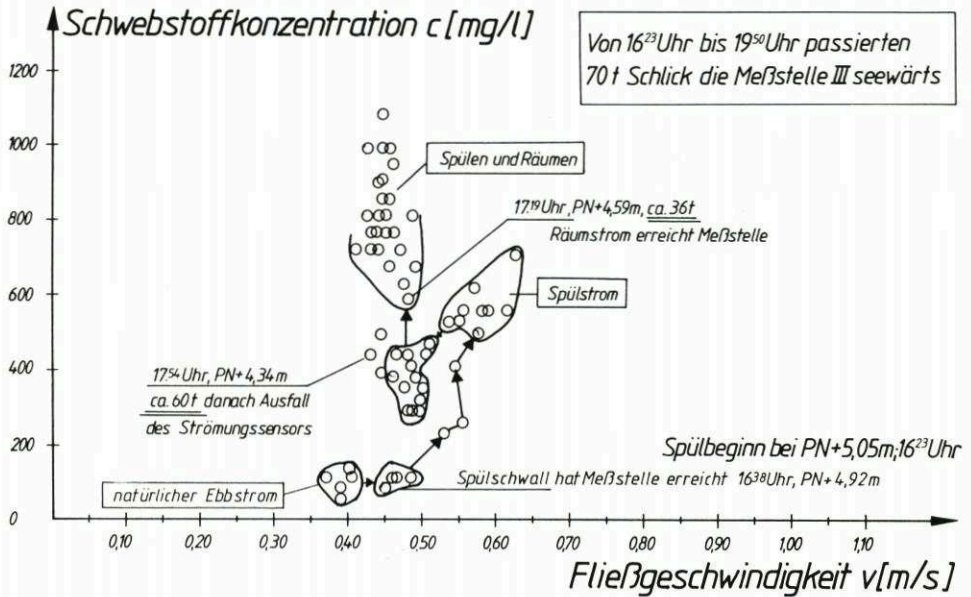


Abb. 33: Beziehung zwischen Strömung und Schwebstoff während des Räumbooteinsatzes am 28. 8. 1986 (Meßstelle III)

Erst als der durch das Räumboot angereicherte Spülstrom die Meßstelle erreicht, steigt die Konzentration bis auf einen Maximalwert von etwa 1100 mg/l bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa 0,45 m/s an. Der Räumbooteinsatz wird um 17.43 Uhr beendet. Infolge des anhaltenden Spülstroms wird 50 Minuten danach an Meßstelle III eine erhöhte Schwebstoffkonzentration um 600 mg/l gemessen. Legt man den reinen Stromweg zugrunde, so dauert die Transportzeit der zuletzt durch das Räumboot eingetragenen Teilchen von der Räum- bis zur Meßstelle 30 bis 40 Minuten. Wegen der Auflockerung des Räumbereiches wird wahrscheinlich danach noch verstärkt Material durch die Strömung mobilisiert. Die letzten Meßwerte fehlen hier wegen des Ausfalls des Strömungssensors, der vermutlich kurzzeitig mit Seetank bedeckt war. Während der gesamten Räum- und Spülphase werden 70 t Schlick seewärts transportiert, das ist wesentlich weniger als im Beispiel der ersten Meßreihe im Mai 1986.

Auf Abb. 34 sind die Ganglinien für Wasserstand, Fließgeschwindigkeit und Schwebstoffgehalt sowie die Summenlinie und die zeitliche Änderung des Schwebstoffgehaltes über der Zeitabzisse entwickelt. Die starke Zunahme des Schwebstoffgehaltes um 140 mg/l je Min. zu Beginn der Räumung und Spülung – zeitversetzt für den Fließweg des Wasserkörpers von der Mobilisierung des Materials bis zur Erfassung an Meßstelle III – macht die stark mobilisierende und transportierende Wirkung der stark beschleunigten Strömung deutlich. Gegen Ende der Räumphase ist der Geschwindigkeitsabfall erheblich, auch ist die Abnahme des Schwebstoffgehaltes mit 61 mg/l je Min. noch beträchtlich. Bei einem Schwebstoffgehalt von etwa 1000 mg/l um Tideniedrigwasser besteht die Gefahr, daß mit der ersten einlaufenden Flut selbst bei schwachem Flutstrom ein erheblicher Schwebstofftransport in das Außentief stattfindet. Ein rechtzeitiges Beenden des Räumbooteinsatzes vor Tnw ist folglich geboten.

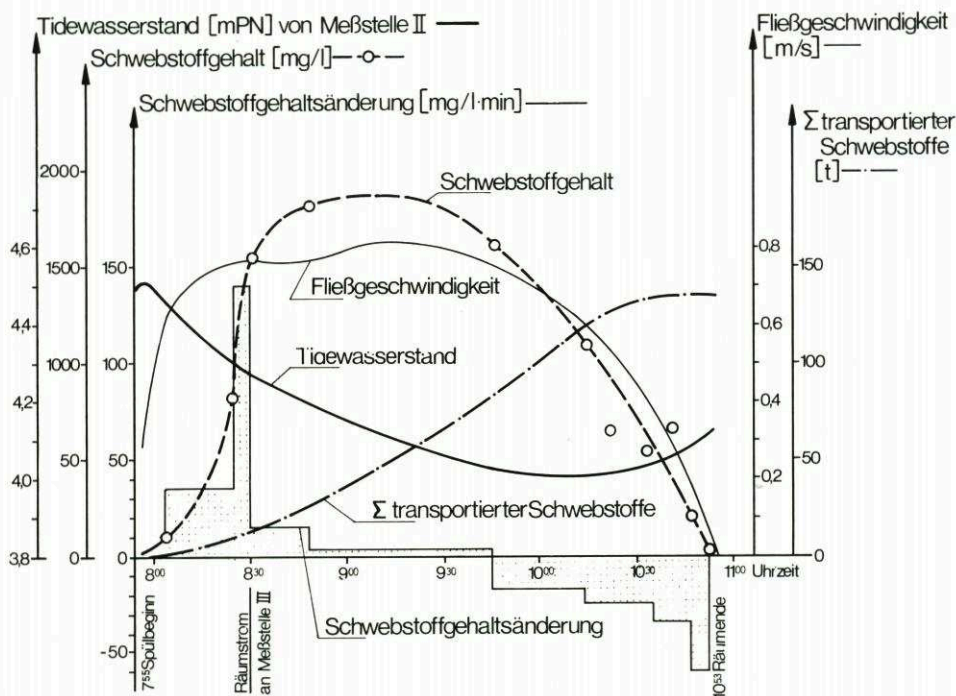


Abb. 34: Zeitabhängige Entwicklung der Fließgeschwindigkeit und des Schwebstofftransports während des Spülens mit Räumbooteinsatz am 28. 5. 1986 (Meßstelle III) (Kurven geglättet)

## 5.6 Vergleich der mobilisierten und transportierten Massen

Das während der beiden Räumversuchsreihen im Räumbereich mobilisierte Schlickvolumen ist mit Hilfe von Handpeilungen für drei verschiedene Höhenstufen ermittelt und in Tab. 4 zusammen mit etwaigen Massenverschiebungen durch Erosion oder Ablagerung auf der bezeichneten Außentiefstrecke wiedergegeben worden.

Da im August mit dem Räumen schon bei Wasserständen um NN und somit ca. 50 cm höher als im Mai begonnen wurde, konnte das Räumboot mehr in dem höher liegenden Randbereich arbeiten. Demzufolge sind im August die obere und vor allem die mittlere Räumerschicht stärker erfaßt worden, während im Mai die untere Schicht am stärksten geräumt wurde.

Bezieht man das durch das Räumboot gelöste Gesamtvolumen jeder Versuchsreihe auf die jeweilige Gesamträumzeit, so ergibt sich im Mai bzw. August jeweils

eine Räumleistung von 49 bis 54 m<sup>3</sup> pro Stunde.

Im August erbrachte das Lösen des Schlicks im oberen weichen Randbereich trotz niedrigerer Spülstromgeschwindigkeiten eine um 10 % höhere Leistung. Die Schwebstoffgehalte waren zwar geringer, aber der Wasserquerschnitt um so größer. Zu bedenken ist ferner, daß sich das geräumte Sediment bei geringeren Geschwindigkeiten teilweise zwischen dem Räumereich und der Meßstelle wieder abgesetzt hat und erst nach und nach während der nächsten Spülungen durch die Strömung aufgenommen und weitertransportiert worden ist. Vor und nach beiden Räumbootversuchsreihen sind daher die über die Außentiefenlänge verteilten 18

Profile gepeilt worden. Aus den Differenzen der jeweiligen Peilungen errechnen sich die Schlickmassen, die in dem entsprechenden Zeitraum in dem Außentief erodiert bzw. abgelagert wurden. In Tab. 4 sind diese Massen – wieder bezogen auf drei Höhenstufen – mit enthalten.

Die durch Meßstelle II (Station 1000) seawärts transportierte Gesamt-Schwebstofffracht war im Mai und August etwa gleichgroß, durch Stat. 1470 (Meßstelle III) wurden im August gut 400 t mehr Schlick seawärts transportiert als im Mai (Tab. 4).

Obwohl im August mit kleineren Spülgeschwindigkeiten geräumt wurde, ergaben sich auch über das übrige Außentief etwa gleichhohe Erosionsraten, zwischen Meßstelle II und III sogar höhere als im Mai. Das dürfte sowohl in Zwischenablagerungen und -mobilisierungen als auch in zusätzlicher Ausräumung begründet sein.

Bei einem Vergleich der aus den Peilungen ermittelten Massen mit den von der „Sediwa“ gemessenen Schwebstoffmassen ergeben sich für die Mai-Messungen an Meßstelle III als „Sediwa“-Messung ca. 2500 t und aus den Peilungen 2300 t eine recht gute Übereinstimmung. Lücken und Mängel in der „Sediwa“-Erfassung lassen für die anderen Meßreihen einen solchen Vergleich nicht zu.

Hinsichtlich der von der „Sediwa“ 0,4 m über Sohle erfaßten Schwebstofffrachten und den in gleicher Position gemessenen Fließgeschwindigkeiten ist diese Einpunktmessung nicht mit hohem Genauigkeitsanspruch als repräsentativer Mittelwert für den ganzen Querschnitt anzusehen. Die Vorversuche hatten jedoch für die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit eine ausreichende Genauigkeit der Einpunktmessung ergeben (ERCHINGER u. a., 1986). Da das Außentiefprofil sich aber im Laufe einer Meßkampagne insbesondere durch das vom Sicherheitsbedürfnis der Baltrum-Fähre ausgelöste Ausweichen etwas verlagert hat, verändert sich auch die Lage des Meßpunktes im Profil. Trotzdem haben die Messungen sehr brauchbare Werte ergeben, wie die Gegenüberstellung der gelösten und der „Sediwa“ gemessenen Frachten an Meßstelle III zeigt.

Tabelle 4. Gelöster und transportierter Schlick zuzüglich etwaiger Massenverschiebungen in der Außenstrecke infolge Erosion bzw. Ablagerung der 1. Räumversuchsreihe (12. bis 30. 5. 1986) und der 2. Versuchsreihe (11. bis 22. 8. 1986)

1. Versuchsreihe im Mai				
Räumschicht	Höhe h bez. auf NN (m)		Massen Stat. 400–1000 (t)	Massen Stat. 400–1470 (t)
obere	h >	–0,50	246	470
mittlere	–1,25 < h <	–0,50	328	570
untere	h <	–1,25	1261	1261
Summe:			1835	2300
davon aus: Räumbereich			1640	1640
davon aus: übrigen Außentief			195	660
2. Versuchsreihe im August				
obere	h >	–0,50	379	749
mittlere	–1,25 < h <	–0,50	1033	1513
untere	h <	–1,25	420	477
Summe:			1832	2739
davon aus: Räumbereich			1550	1550
davon aus: übrigen Außentief			282	1189

Tabelle 5. Sauerstoffgehalt und Temperaturverlauf beim Räumbootinsatz vom 26. bis 29. 5. 1986

Räumphase Tag, Uhrzeit	Meßzeitpunkt, bezogen auf Räumphase	Sauerstoffgehalt	Wassertemperatur [°C]
26. 5. 1986 18.00-20.00 Uhr	vorher	117 % $\triangleq$ 9,2 mg/l	18
	während am Ende	90 % $\triangleq$ 7,3 mg/l	16 (Temp. d. Spülwassers)
	nach Räumphase	85 % $\triangleq$ 6,9 mg/l 100 % $\triangleq$ 8,2 mg/l	16 geringfügig abnehmend (Nachtabkühlung)
27. 5. 1986 6.48-8.25 Uhr	während	70 % $\rightarrow$ 65 % $\rightarrow$ 80 %	Kurzzeitig ansteigend von 13,5 auf 15°, dann gleichbleibend
	nach Räumphase	Anstieg auf	13
28. 5. 1986 8.02-10.48 Uhr	vorher	90 % $\triangleq$ 7,8 mg/l	ansteigend auf 15
	nach Räumbeginn	70 % $\triangleq$ 5,8 mg/l fallend	konstant 15
	während	85 % $\triangleq$ 7,1 mg/l	15, 1/2 Std. nach Kenterung
	nach Räumende	kurzzeitig abfallend auf 1,5 Std. ansteigend auf 30 Min. Abnahme um max. den ursprünglichen Wert	abfallend auf 13 von 14,5 auf 16 steigend
29. 5. 1986 8.20-10.08 Uhr	nach Räumbeginn	100 % $\triangleq$ 8,3 mg/l	
		14 % , danach Anstieg auf (80 %)	

### 5.7 Auswertung der Sauerstoff- und Temperaturmessungen

Die Sauerstoffmessungen an Meßstelle II während der Räumversuche zeigten, daß durch die hohe Schwebstoffanreicherung des Wassers nicht generell eine Sauerstoffzehrung stattfindet, sondern durch die Turbulenz des Spülstroms zeitweise auch eine Sauerstoffanreicherung (27. 5. 1986) bewirkt wird. Für die Räumbooteinsätze vom 26. 5. bis 29. 5. 1986 enthält Tab. 5 den Verlauf des Sauerstoffgehalts.

Beim Spülen mit und auch ohne Räumbooteinsatz wurde teils eine Sauerstoffzehrung, teils eine Sauerstoffanreicherung gemessen. Häufig fiel der Sauerstoffgehalt sofort nach Spülbeginn für ca. eine halbe Stunde ab, danach stieg er zum Teil über den Ausgangswert vor Spülbeginn wieder an. Zu Beginn des Spülers sind offenbar sehr feine Stoffe mit hohem Anteil organischen Materials von der Sohle aufgewirbelt worden. Die in Tab. 6 zusammengestellten Sauerstoffgehalte machen deutlich, daß von einer belastenden Sauerstoffzehrung nicht die Rede sein kann.

### 6. Bemessung der Spülanlage

Bevor eine Entwurfsbemessung durchgeführt werden kann, sind folgende Einflußgrößen zu bestimmen:

- Tidevolumen des Wateinzugsgebietes des Außentiefs
- Länge des Außentiefs bis zum tiefen Wattstrom (etwa bis zur Tiefenlinie NN - 3,0 m)
- Querschnitt des Außentiefs
- Fließgeschwindigkeit, Ebbstromgeschwindigkeit im Außentief
- Sedimentbewegungen und Korngrößen
- Steuerungsparameter des Spülsiels: Spülbeckenfläche, Füllwassermenge, Spülwassermenge, Spül- und Füllbeginn, Spül- und Füllzeiten
- Abmessungen des Spülsiels und Speicherbeckens wie lichte Weite des Spülsiels, Höhe des Aus- und Einlaßschützes, Sollhöhe des Siels

Bei dieser Bemessung wird davon ausgegangen, daß bei Normaltiden für intensiven Spülbetrieb eine Fließgeschwindigkeit - aus Watt- und Spülbeckenzufluß - von 0,6 m/s 2 Stunden lang überschritten werden soll. Bei kleinen Wateinzugsgebieten kann für die überschlägige Bemessung der Zufluß aus dem natürlichen Wateinzugsgebiet vernachlässigt werden.

Für einen einfachen Geschwindigkeitsnachweis in einem angestrebten Außentiefquerschnitt wird hier die Manning-Strickler-Formel angewandt. Der dabei einzusetzende Rauigkeitswert  $k$  ergab sich während des Spülbetriebs im Neßmersieler Außentief zwischen  $k=40$  und  $k=50$  für ein vom Schlick freigespültes Außentief. Dieses entspricht einer festen, regelmäßigen Sohle aus Sand mit etwas Ton.

Für die Berechnung empfiehlt sich,

- ein langes Außentief in Einzelabschnitten von etwa 500 m Länge zu unterteilen,
- den Wasserstand am seeseitigen Außentiefende (1. Berechnungsabschnitt) bei Spülbeginn nach der mittl. Tidekurve (z. B. 2,7 Stunden vor  $T_{nw}$ ) anzusetzen (Abb. 7).

Durch folgende Iterationsrechnung errechnet sich über die Formel von Manning-Strickler ( $v = Q/A = k \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$ ) das genaue Gefälle im 1. Berechnungsabschnitt und damit die Fließgeschwindigkeit:

Tabelle 6. Mittlerer Sauerstoffgehalt aus 82 Meßtagen vom Mai bis August 1986

Zeit	Mittl. Sauerstoffgehalt in mg/l*
vor Spülbeginn	7,1
während des Spülens	7,0 (Minimum) 8,3 (Maximum)
während Tnw	7,7
während des Flutstroms	6,8 (Minimum) 8,1 (Maximum)
während Thw	7,5

\*) Bei der Berechnung des Sauerstoffgehalts ist ein Salzgehalt von 31 ‰ angesetzt worden.

$I = \frac{Q^2/A^2}{k^2 \times R^{4/3}}$	Darin sind:
$R = A/U \text{ (m)}$	I Gefälle
$\Delta h = I \cdot dL \text{ (m)}$	Q Abfluß (m <sup>3</sup> /s) = Spülsieldurchfluß
$pl = p + \Delta h/2 \text{ (m PN)}$	A Querschnittsfläche (m <sup>2</sup> )
	k Rauigkeit (m <sup>1/3</sup> /s)
	R Hydraulischer Radius (m)
	$\Delta h$ Höhendifferenz des Wasserspiegels im Berechnungsabschnitt (m)
	dL Länge des Berechnungsabschnitts (m)
	p Wasserstand am seeseitigen Ende des Berechnungsabschnitts (m PN)
	pl Mittlerer Wasserstand im Berechnungsabschnitt (m PN)

Aus dem mittleren Wasserstand pl ergeben sich die neuen Querschnittsparameter A und U. Damit wird erneut iteriert, bis sich  $\Delta h$  kaum noch ändert. Mit den dann endgültigen Parametern I, A und U errechnet sich die Fließgeschwindigkeit

$$v = k \cdot I^{1/2} \cdot (A/U)^{2/3} \text{ (m/s)}$$

in diesem Berechnungsabschnitt.

Mit dieser Iterationsrechnung wird unter den getroffenen Annahmen überschlägig nachgewiesen, daß im gesamten Außentief die geforderte Fließgeschwindigkeit eingehalten werden kann. Bei einem angenommenen Querschnitt von rd. 36 m<sup>2</sup> benetzter Fläche für den 1. Berechnungsabschnitt mit einem Wasserstand am seeseitigen Außentiefende von PN + 4,5 m ist zur Erzielung der angestrebten Geschwindigkeit von  $v = 0,6 \text{ m/s}$  ein  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$  erforderlich.

Nach dem hierzu erforderlichen Durchfluß  $Q \text{ (m}^3/\text{s)}$  ist das Spülsiel und Spülbecken zu dimensionieren. Bei einem Speichervolumen von ca. 200 000 m<sup>3</sup> kann theoretisch 2,5 Stunden mit einem Durchfluß von 22 m<sup>3</sup>/s gespült werden. Tatsächlich ist der Durchfluß zu Spülbeginn höher. Er fällt nach 75 Minuten auf 22,0 m<sup>3</sup>/s, nach 90 Minuten auf 20,6 m<sup>3</sup>/s. Bei einem Speicherpeil von PN + 6,20 m und einem Absenkepeil von PN + 4,80 m hat die Berechnung eine Schützbreite von 9,4 m für die anderen Konstruktionsmerkmale und Tideverhältnisse wie in Neßmersiel ergeben (BfK, 1987). Dort ist auch der Nachweis erbracht, daß die Füllwassermenge durch das Spülsiel bei einem MThw = PN + 6,30 m in 4 Stunden eingelassen werden kann. Während beim Spülen das untere Schütz 0,70 bis 0,80 m gezogen wird, erfolgt die Füllung durch Überlauf ab etwa halber Tide über die Oberkante der nächsten Schütztafel mit PN + 4,8 m.

Zu bedenken ist, daß die Vernachlässigung des natürlichen Ebbstromes und das Ansetzen der erf. Spülströmung von 0,6 m/s zu diesen Abmessungen der Spülanlage geführt haben. Auch mit wesentlich kleineren Anlagen und Ausgangswerten lassen sich in der Regel bereits erhebliche Erfolge erzielen.

## 7. Empfehlungen für Außentiefunterhaltung unter Verwertung der Forschungsergebnisse aus den Naturversuchen in Neßmersiel

### 7.1 Wirksame Spülströmung

Die Untersuchungen haben ergeben, daß bei den Bodenverhältnissen im Neßmersieler Außentief mit mittl. Korndurchmesser (Sohle) von 0,06 bis 0,11 mm (Körnungskurve s. Abb. 25, 26) nennenswerte Erosion des abgelagerten Bodenmaterials einsetzt bei einer Fließgeschwindigkeit von  $v_{krit} = 0,43$  m/s

Die Geschwindigkeit von

$v = 0,5$ m/s erzielt eine Schwebstofffracht	von 50 bis 200 mg/l
$v = 0,6$ m/s erzielt eine Schwebstofffracht	von 200 bis 600 mg/l
$v = 0,8$ m/s erzielt eine Schwebstofffracht	von 300 bis 900 mg/l

Die Fließgeschwindigkeit setzt sich aus der Spülsielausströmung und dem natürlichen Tidewasserabfluß von den seitlichen Wattflächen zusammen.

Frische, weiche und ungefestigte Schlickablagerungen werden bereits von wesentlich geringerer Strömung aufgenommen. In Neßmersiel konnten hierfür als kritische Geschwindigkeit

$$v_{krit} \text{ (weicher Schlick) } = 0,2 \text{ m/s}$$

ermittelt werden. Dabei erzielt eine Geschwindigkeit von  $v = 0,3$  m/s einen Schwebstoffgehalt von 100 bis 300 mg/l.

Steht kein spezielles Spülsiel zur Verfügung, so ist auf einen effektiven Einsatz des Ebbstromes bei Sielzug und ggf. des Schöpfwerksstromes – bei niedrigen Tidewasserständen – zur Unterstützung des Stromräumbootes zu achten.

### 7.2 Räumbooteinsatz

In Außentiefs ohne ausreichende Räumkraft der Ebbströmung werden vielfach Stromräumboote zur Außentiefunterhaltung eingesetzt. Durch Räumbooteinsatz wird der Schwebstoffgehalt erheblich erhöht, so daß auch schon bei Fließgeschwindigkeiten von

$$v = 0,2 \text{ bis } 0,3 \text{ m/s}$$

ein Räumeffekt eintritt. Wirksamer sind Geschwindigkeiten von

0,4 bis	0,6 m/s mit Schwebstoffkonzentrationen von 600 bis 1400 mg/l
und	> 0,6 m/s mit Schwebstoffkonzentrationen von 700 bis 9000 mg/l.

Am 26. 5. 1986 passierten z. B. bei derartigem Räumbooteinsatz mit Fließgeschwindigkeiten bis etwa  $v = 1,1$  m/s 300 t Material in 3,5 Std. seewärts die Meßstelle III (Abb. 32).

Der Räumbooteinsatz sollte dabei stets 1 Std. und bei längerem Außentief und geringeren Spülströmungen noch früher vor der Stromkenterung auf Flutstrom beendet werden, damit

das aufgewirbelte Material von der beginnenden Flut nicht wieder sielwärts verfrachtet wird, sondern sich – möglichst weit außerhalb des Außentiefs – zunächst absetzen kann.

In etlichen Außentiefs mit sehr ungünstigen Verhältnissen – z. B. in der Leybucht ohne Sielzug – treten kaum Strömungen auf, die eine nennenswerte Räumwirkung auslösen. Mit Hilfe von regelmäßigen Räumbooteinsätzen wird dabei vielfach versucht, den Verlandungsfortschritt einzudämmen.

Räumbooteinsatz ist bei ausreichend feinen, schlickigen Ablagerungen immer dann hilfreich, wenn mindestens Fließgeschwindigkeiten von 0,2 bis 0,3 m/s im Außentief durch Sielzug, Schöpfwerksbetrieb oder Spülung erzeugt werden. Zu bedenken ist, daß die Schwebstofffracht bei  $v = 0,25$  m/s nur 900 m in einer Stunde zurücklegt. Bei langen Außentiefs sollte abschnittsweise geräumt werden. Dabei ist ein rechtzeitiges Beenden des Einsatzes vor Tnw wichtig, damit die Schlickaufwirbelung nicht als „Fütterung“ des Flutstroms fehlschlägt.

Auch das in Abhängigkeit von der Tide möglichst frühe Einlaufen der Fischkutter und ggf. Fahrgastschiffe während der Flut wirkt sich durch den damit einhergehenden landseits gerichteten Transport negativ aus.

Zur Erhöhung der Räumströmung empfiehlt es sich ggf., eine Spülanlage nach dem Muster „Neßmersiel“ anzulegen.

### 7.3 Spüldauer, Gegenstau

Nach den Erfahrungen von dem 1,5 km langen Neßmersieler Außentief sollte die Spüldauer je nach Außentiefslänge 2 bis 3 Stunden betragen, damit die Schwebstofffracht zum großen Teil bis außerhalb des Außentiefs transportiert wird. Ein Abfall der Fließgeschwindigkeit vor Einsetzen des Flutstroms verringert den Schwebstoffgehalt und damit den Materialtransport landwärts bei einsetzendem Flutstrom.

Bei Neßmersieler Verhältnissen und Schlickablagerungen ist ein Spülbetrieb wesentlich wirksamer als ein Gegenstaubetrieb, bei dem der Spülstrom später einsetzt und den einsetzenden Flutstrom noch wirksam bremst.

### 7.4 Spülbeckengestaltung

Das erforderliche Volumen oberhalb des Absenkpeils ergibt sich aus der zu erzielenden Räumstromgeschwindigkeit nach Abzug des Anteils aus den Abflüssen vom Wattgebiet, dem zu räumenden Außentiefquerschnitt und der Spüldauer. Die Erfahrungen mit Neßmersiel lehren:

- Das Spülbecken sollte jeweils möglichst hoch aufgefüllt werden, damit Druckgefälle und Ausfluß lange möglichst groß sind; ein Auffüllen bis etwa 10 cm unter dem jeweiligen Thw ist anzustreben.
- Weist das Spülbecken eine tiefe und eine flache Teilfläche auf, so sollte der flache Beckenteil bei normaler Füllung noch Wassertiefen von 0,8 bis 1,0 m erreichen, damit bei niedrigen Wasserständen, z. B. bei Nipptide oder Ostwind, die verfügbare Spülwassermenge nicht zu sehr abfällt.
- Die Füllung des Spülbeckens sollte nur in der zweiten Fluthälfte vorgenommen werden, da der Gehalt an mitgeführten Schwebstoffen dann geringer ist. Auch empfiehlt es sich, das Wasser über ein Überfallschütz oder -wehr einzulassen, damit das bodennahe Material nicht mit eintreibt.



- Ein tiefes Becken hat den Vorteil, daß es das trotzdem eintreibende und sich ablagernde Material für lange Zeit aufnehmen kann (in Neßmersiel für voraussichtlich 25 Jahre). Sollte es dann ausgebaggert werden müssen, so sind die Kosten im Vergleich zu ständigen Baggerkosten für das Außentief verschwindend gering aus folgenden Gründen: Nur ausnutzbarer Ablagerungsraum und keine gerätetmäßig bedingte Übertiefe wie bei Außentiefbaggerungen wird gebaggert; das Baggern wird nicht im schmalen Profil mit ständigen Strömungen durch Schiffspassagen durchgeführt; die günstigste Ausführungszeit kann dem Unternehmen überlassen werden; Baggerbetrieb und Spülleitungsbau sind wesentlich einfacher.
- Der flache Spülbeckenteil kann vorzüglich als Vogelrast- und Nahrungsgebiet, mit Insel sogar als Brutgebiet, gestaltet werden, da die Tideerscheinung in etwa antizyklisch zum Watt abläuft und das Wattengebiet daher günstig ergänzt.

### 7.5 Spülsielbemessung

Das Spülsiel ist so zu bemessen, daß die gewünschte wirksame Spülströmung erzeugt und auch die angestrebte möglichst hohe Füllung des Spülbeckens erreicht werden kann. Bewährt hat sich dabei ein Doppelschütz. Die untere Schütztafel wird gezogen für's Spülen. Eine Schützöffnung von 0,8 m, und bei größerer Auffüllhöhe von 0,70 m, hat sich in Neßmersiel im Hinblick auf Räumströmung und Räumdauer als Optimum erwiesen.

Beim Füllen des Spülbeckens wird die untere Schütztafel überströmt. Ihre Oberkante wird so gelegt, daß das Füllen während der zweiten Fluthälfte geschieht, da dann der Schwebstoffgehalt relativ gering ist. In einem unter 6. ausgeführten Beispiel werden die Einzelheiten der Spülsielbemessung angegeben.

Wenn der Speicherwasserstand während des Spülens soweit gesunken ist, daß infolge gering gewordenen Druckgefälles der Ausstrom nicht mehr räumwirksam ist, sollte das untere Schütz wieder geschlossen werden. Je höher der Speicherwasserstand am Spülende bleibt, desto höher läßt sich der Speicher dann wieder auffüllen.

### 7.6 Empfehlungen für die Neßmersieler Spülanlage

Gemäß Abschn. 7.4 und 7.5 läßt sich die Wirksamkeit der Spülanlage Neßmersiel ohne große bauliche Eingriffe noch verbessern durch eine größere Füllwassermenge mit einem höheren Spülbeckenwasserstand bei Spülbeginn und einer früheren Beendigung des Spülvorganges, um eine größere Restspeichermenge zu halten.

Eine größere Füllwassermenge kann ohne große bauliche Eingriffe durch eine niedrigere Einlaufschwelle erreicht werden. Da nach den Untersuchungen eine Schützöffnung von 80 cm zur Erzielung ausreichender Strömungsgeschwindigkeiten ausreicht, kann die Überfallkante des unteren Schützes auf PN + 4,80 m gesenkt werden. Diese niedrige Einlaufschwelle ermöglicht einen stärkeren Fülldurchfluß und somit auch einen höheren Spülbeckenwasserstand.

Da gegen Ende der Spülphase das ausströmende Spülwasser wegen der geringen Strömungsgeschwindigkeiten nur noch einen geringen Räumeffekt erzielt, empfiehlt es sich, das Spülen früher zu beenden. Legt man hierfür einen Absenkpeil im Spülbecken von PN + 4,80 m fest, läßt sich gemäß Berechnung des BfK (1987) bei normaler Tide mit einem auf PN + 6,30 m ansteigenden Thw ein Spülbeckenwasserstand von PN + 6,24 m erreichen. Das

Speichervolumen beträgt dann 152 000 m<sup>3</sup>, von denen bis zum Absenkpeil von PN + 4,80 m 125 000 m<sup>3</sup> nutzbar sind. Die Schützöffnungsweite kann wegen der größeren Druckhöhe auf etwa 70 cm verringert werden.

Eine weitere Verbesserung ist für Zeiten mit niedrig auflaufenden Tiden anzustreben. Die Form des Spülbeckens mit der hochliegenden Teilfläche zwischen NN + 0,5 bis 0,8 m hat den Nachteil, daß nach niedrig auflaufenden Tiden nur eine geringe Spülwassermenge zur Räumung des Außentiefs in diesem Teil zur Verfügung steht. Wird beispielsweise bei Ostwindlagen nur ein Speicherpeil von NN + 0,6 m erreicht, so kann das Spülbecken nur 40 000 m<sup>3</sup> Spülwasser abgeben. Zur Vergrößerung des Fassungsvermögens sollte daher die hochgelegene Randzone des Spülbeckens um 0,4 bis 0,5 m vertieft werden, wodurch in niedrig auflaufenden Tiden etwa 50 % mehr Spülwassermenge verfügbar wäre. Für Normaltiden könnte die Spülwassermenge dadurch auch um weitere 20 000 m<sup>3</sup> vergrößert werden. Nachteile für den Naturschutz ergäben sich nicht, da diese Fläche nach jeder Spülung wie bisher weitgehend trockenfallen würde und weiterhin hinter einer flachen Bodenschwelle eine Flachwasserzone für die Watvögel als interessanter Rast- und Nahrungsbiotop erhalten bliebe.

#### 8. Schriftenverzeichnis

- BAUAMT FÜR KÜSTENSCHUTZ NORDEN: Schlußbericht über das KFKI-Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs mit Naturuntersuchungen am Neßmersieler Außentief“. Norden, (unveröff.) 1987.
- BLANKENSTEIN, H., BRANDT, G. u. NIEMEYER, H. D.: Strommessungen im Bereich des Neßmersieler Außentiefs. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft – Forschungsstelle Küste –, Jahresbericht 1984.
- COLDEWEY, H. G.: Sielzugberechnung unter Berücksichtigung von Außentiefverlusten. Wasser und Boden, H. 10, 1979.
- DIEKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Watteinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitt. des Franzius-Instituts, H. 60, Hannover, 1985.
- DVWK: Regeln zur Wasserwirtschaft, 1984 – Schwebstoffmessungen. Gelbdruck.
- ERCHINGER, H. F.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Abschn. Küsteningenieurwesen. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 6. Aufl., 1982.
- ERCHINGER, H. F.: Außentiefräumung durch vollautomatisches Spülsiel in Neßmersiel – Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet. Wasser und Boden, H. 8, 1984.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H. G. u. PROBST, K.: Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“. Die Küste, H. 44, 1986.
- FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. Wasser und Boden, H. 3, 1983.
- HOFER, H.: Die hydraulische Egge. HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen – 112. Jahrgang – Nr. 9 u. 11, 1975.
- KÖSTER, R. u. RICKLEFS, K.: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Schwebstoffen aus dem Neßmersieler Außentief, 1987 enthalten in: BfK-Schlußbericht über das KFKI-Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs . . .“ Norden 1987 (s. o.)
- LÜDERS, K. u. LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon, Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim, 1976.
- MANZENRIEDER, H.: Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs. Mitt. des Leichtweiß-Instituts, H. 77, Braunschweig, 1983.
- MEERESTECHNIK-ELEKTROTECHNIK GmbH: Steuergerät Sedimentmessungen. (unveröff.) 1983.
- MÜLLER, E. u. BINEK, H.: Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief. Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD). Die Küste, H. 44, 1986.
- Nds. WASSERWIRTSCHAFTSVERWALTUNG: Jahresbericht. Wasser und Boden, H. 7/8, 1958.
- NEWITT, D. M., RICHARDSON, J. F., ABBOTT, M. u. TURTLE, R. B.: Hydraulic Conveying of Solids in Horizontal Pipes, Part 2. Proc. Symp. Interaction between Fluids and Particles. Inst. Chem. Engrs., 1955.

- NORDDEUTSCHE SEEKABELWERKE AG.: „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ – Meßkette Neßmersiel – (unveröff.) 1982.
- OHM, K.: Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten. Die Küste, H. 42, 1985.
- RAUDKIVI, A. J.: Loose Boundary Hydraulics. Pergamon Press, Oxford a. O., 1976.
- RAUDKIVI, A. J.: Grundlagen des Sedimenttransportes. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- REINEMANN, L., SCHEMMER, H. u. TIPPNER, M.: Trübungsmessungen zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts. Deutsche Gewässerkundl. Mitt. 26, H. 6, 1982.
- RENGER, E.: Zweidimensionale Stabilitätsanalysen von Tidebecken und Wateinzugsgebieten größerer Ausdehnung. Die Küste, H. 34, 1980.
- RENGER, E.: Dauermessungen des suspendierten Feststoffgehalts im Tidegebiet mit Hilfe von Durchlaufzentrifugen. Bericht 418, Intermaritec 82.
- RENGER, E. u. BEDNARCZYK, K.: Schiffahrtserzeugte Schwebstofftransporte und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“. Die Küste, H. 44, 1986.
- RICKLEFS, K.: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an schlickbildenden Schwebstoffen aus dem Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 47, 1988.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. des Franzius-Instituts, H. 34, Hannover, 1970.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979–1981. Die Küste, H. 37, 1982.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1981–1983. Die Küste, H. 40, 1984.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1983–1986. Die Küste, H. 44, 1986.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Windstauentwicklung im Küstengebiet der Deutschen Bucht. Wasser und Boden, H. 1, 1986.
- ZANKE, K.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.