

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Erchinger, Heie F.; Coldewey, Hans-Gerd; Probst, Klaus**  
**Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im**  
**Forschungsvorhaben "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/20.500.11970/101246>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Erchinger, Heie F.; Coldewey, Hans-Gerd; Probst, Klaus (1986): Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben "Tiefenstabilisierung von Außentiefs". In: Die Küste 44. Heide, Holstein: Boyens. S. 17-63.

**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.



# Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“

Heie F. ERCHINGER, Hans-Gerd COLDEWEY und Klaus PROBST

## Zusammenfassung

Behandelt wird das verbreitete Problem der Unterhaltung von Außentiefs. Im Abschnitt A wird zunächst der Begriff „Außentief“ als der im Deichvorland und Watt liegende Abschnitt eines Sieltiefs, also eines Hauptvorfluters in der Marsch, beschrieben. Am Beispiel des Neßmersieler Außentiefs wird die Außentiefräumung mit einer tidegesteuerten Spülanlage erläutert. Durch dieses 1977 gebaute und 1982 auf vollautomatische Steuerung umgestellte Spülsiel konnte die Außentiefunterhaltung wesentlich billiger und wirksamer gestaltet werden. Darüber hinaus kommt dem Spülbecken als Vogelnest- und -brutgebiet besondere Bedeutung für den Seevogelschutz zu.

Für die Durchführung der vom BMFT geförderten Forschungsvorhaben des KFKI an Außentiefs mit den beiden Projekten „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ und „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“ einschl. der besonderen Untersuchung von Schiffeinflüssen bot sich das Neßmersieler Außentief mit seiner Spülanlage als günstiges Naturmodell an. Im Abschnitt B sind nach der einleitenden Beschreibung dieser Forschungsprojekte die Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ und die erzielten Ergebnisse der Wasserstands-, Strömungs- und Schwebstoffmessungen als erster Zwischenbericht zusammengefaßt worden.

Aus zahlreichen Abfluß- und Schwebstoffmessungen kann die kritische Geschwindigkeit des Erosionsbeginns sowohl für frisch abgelagerten Schlick als auch für die festgelagerte Außentiefsohle ermittelt werden. Die Möglichkeiten der Optimierung der Räumwirkung zur wirkungsvollen Schlickräumung werden verglichen mit der Effektivität des Gegenstaus zur Verhinderung von Sedimenteintrag durch hohe Flutstromgeschwindigkeiten. Auch die Seegangs- und die Schiffseinflüsse auf den Sedimentgehalt können nachgewiesen werden. Des weiteren werden die enge Abhängigkeit der Entwicklung des Außentiefquerschnittes von der Intensität des Spülens und auch der Verlandungstrend des Spülbeckens nachgewiesen. Der 1986 untersuchte Räumbooteinsatz kann in diesem Zwischenbericht noch nicht behandelt werden.

## Summary

*The Dredging of Offshore Channels by Flushing: Results of the Research Project „Depth Stabilization of Offshore Channels“. The frequently occurring problem involving the maintenance of offshore channels is treated in this paper. The term „offshore channel“ is defined as a junction channel located in dike vorlands and inter-tidal zone, or in other words, the section of a main channel in marsh regions from the tidal gates to the sea. The dredging of offshore channels using a tidally driven flushing technique is demonstrated using the Neßmersiel offshore channel as an example. The offshore channel maintenance has been made significantly more efficient and cheaper due to this flushing system which was constructed in 1977 and fully automated in 1982. The flushing basin has also been found to be an effective rest and nesting place for sea birds and as such is environmentally important.*

*The Neßmersiel outer channel and its associated flushing system was chosen for prototype studies in the context of the two BMFT sponsored KfKI research projects „Depth Stabilization of Outer Channels and „Natural Cross Sections of Outer Channels“. These studies also included investigations of navigation related effects.*

*Following a general introduction, the field procedures in the first mentioned research project are discussed and the results of the water level, current, and suspended sediment transport measurements summarized. The critical erosion velocities for both newly deposited mud as well as for the compacted outer channel bed could be determined from the numerous discharge and*

*suspended sediment measurements. A comparison was made between the possibilities of optimizing techniques for mud flushing and the effectiveness of preventing sediment inflow through high flood tide currents generated by artificial backwaters. It was found that both the wave action and shipping play important roles in the overall sediment balance. The strong dependence between the flushing intensity, deposition in the flushing basin and the development of the outer channel profile could also be shown. The ongoing investigations of navigation induced dredging cannot be treated in this progress report.*

## I n h a l t

|       |                                                                                                                                       |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A     | Außentiefs und deren Unterhaltung . . . . .                                                                                           | 19 |
| 1.    | Einleitung und Problemstellung . . . . .                                                                                              | 19 |
| 2.    | Außentiefräumung mit tidegesteuerter Spülanlage . . . . .                                                                             | 20 |
| 2.1   | Bemessung und Einrichtung einer Spülanlage für das Neßmersieler Außentief . . . . .                                                   | 20 |
| 2.2   | Betrieb und Steuerung des Spülsiels . . . . .                                                                                         | 24 |
| 2.3   | Unterstützender Räumbooteinsatz . . . . .                                                                                             | 25 |
| 2.4   | Erzielte Räumwirkung durch den Spülbetrieb . . . . .                                                                                  | 27 |
| 2.5   | Eisräumung durch Spülung . . . . .                                                                                                    | 27 |
| 2.6   | Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet . . . . .                                                                                   | 28 |
| B     | Das Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs – (AT-S)“ mit Natur-<br>untersuchungen am Neßmersieler Außentief . . . . . | 30 |
| 1.    | Vorbemerkung zu den Forschungsprojekten über Außentiefs . . . . .                                                                     | 30 |
| 1.1   | Veranlassung . . . . .                                                                                                                | 30 |
| 1.2   | Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“ . . . . .                                                              | 30 |
| 1.3   | Forschungsprojekt „Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)“ . . . . .                                                           | 31 |
| 1.4   | Der Einfluß des Schiffsverkehrs . . . . .                                                                                             | 31 |
| 1.5   | Durchführung der Forschungsprojekte über Außentiefs . . . . .                                                                         | 31 |
| 2.    | Morphologische und hydrologische Gegebenheiten am Neßmersieler Außentief . . . . .                                                    | 32 |
| 2.1   | Das Außentief und seine Seitenräume . . . . .                                                                                         | 32 |
| 2.2   | Speicherinhalt des Spülbeckens . . . . .                                                                                              | 35 |
| 2.3   | Haupttidewasserstände in Neßmersiel . . . . .                                                                                         | 35 |
| 3.    | Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung“ . . . . .                                                 | 36 |
| 3.1   | Einrichtung der Meßstellen . . . . .                                                                                                  | 36 |
| 3.2   | Zentrale Datenerfassung . . . . .                                                                                                     | 37 |
| 3.3   | Hydrometrische Untersuchungen . . . . .                                                                                               | 38 |
| 3.3.1 | Wasserstände . . . . .                                                                                                                | 38 |
| 3.3.2 | Strömungen . . . . .                                                                                                                  | 39 |
| 3.4   | Schwebstoffmessung . . . . .                                                                                                          | 40 |
| 3.4.1 | Einsatz der Sedimentwaage (Sediwa) . . . . .                                                                                          | 40 |
| 3.4.2 | Vergleichende optische Schwebstoffmessungen . . . . .                                                                                 | 41 |
| 4.    | Einflußfaktoren auf den Schwebstoffgehalt . . . . .                                                                                   | 43 |
| 4.1   | Schwebstoffgehalt bei unbeeinflussten Tideströmungen . . . . .                                                                        | 43 |
| 4.1.1 | Unbeeinflusste Tideströmungen . . . . .                                                                                               | 43 |
| 4.1.2 | Schwebstoffeintrag durch Tideströmung . . . . .                                                                                       | 44 |
| 4.1.3 | Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Schubspannung . . . . .                                                                     | 44 |
| 4.2   | Wirkung der Spülströmung . . . . .                                                                                                    | 44 |
| 4.2.1 | Spülbeeinflusste Strömungen . . . . .                                                                                                 | 44 |
| 4.2.2 | Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .                                                          | 46 |
| 4.2.3 | Optimierung der Räumwirkung . . . . .                                                                                                 | 48 |
| 4.2.4 | Wirkung des Gegenstaus . . . . .                                                                                                      | 50 |
| 4.3   | Windabhängige Seegangseinflüsse . . . . .                                                                                             | 51 |
| 4.4   | Schiffseinflüsse . . . . .                                                                                                            | 52 |
| 5.    | Veränderungen der Außentiefquerschnitte . . . . .                                                                                     | 52 |
| 5.1   | Vermessungen . . . . .                                                                                                                | 52 |
| 5.2   | Veränderungen von Außentiefsohle und -querschnitten . . . . .                                                                         | 54 |
| 5.3   | Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung . . . . .                                             | 57 |
| 6.    | Sedimentation im Spülbecken . . . . .                                                                                                 | 58 |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 6.1 Schwebstoffmessung im Spülsiel . . . . .            | 58 |
| 6.2 Schlickpegelmessungen . . . . .                     | 60 |
| 6.3 Ergebnisse aus Nivellements und Peilungen . . . . . | 61 |
| 7. Ausblick . . . . .                                   | 62 |
| 8. Schriftenverzeichnis . . . . .                       | 62 |

## A Außentiefs und deren Unterhaltung

### 1. Einleitung und Problemstellung

Als Außentief wird der im Deichvorland und Watt liegende Abschnitt eines Sieltiefs bezeichnet. Das Außentief beginnt am Siel im Hauptdeich und endet an der Einmündung in den naturgegebenen Vorfluter (Priel, Balje) im Watt bzw. nach DIN 4049 an einem größeren Wattstrom. Es bildet damit die Fortsetzung eines Sieltiefs als Hauptvorfluter in der Marsch, der die Binnenabflüsse durch ein Deichsiel in das Meer leitet. Daher dient ein Außentief in erster Linie der Binnenentwässerung.

Während das Bett der Wattrinnen und -ströme durch die Flut- und Ebbeströmung geformt wird, reicht die natürliche Bettbildung im Außentief nicht aus, um in dieser Rinne die notwendige Tiefe und Breite für die Entwässerung des Binnenlandes und ggf. für die Schifffahrt zu erhalten. Das Außentief ist daher in der Regel ein künstlich zu erhaltendes Gewässer zwischen dem Siel und dem naturgegebenen Wattstrom. Die meisten Außentiefs unterliegen einer ständigen Auflandung. Die Ablagerungen aus Schlick, Sand und Muschelschalen müssen regelmäßig beseitigt werden. Des öfteren werden Leitdämme angeordnet, die das Außentief seitlich begrenzen, die Strömung im Tief zusammenhalten und leiten sowie das Eintreiben von Sand und Schlick vermindern (LÜDERS u. LUCK, 1976).

Für die Räumung der Ablagerungen bieten sich in Abhängigkeit von den Binnen- und Tidewasserständen, der Länge und dem Querschnitt des Außentiefs, dem Sediment und der Auflandungsrate folgende Möglichkeiten (nach Aufwand geordnet):

- ein regelmäßiger Sielzug mit einer für das Lösen und Transportieren der Ablagerungen ausreichenden Strömungsgeschwindigkeit, ggf. unterstützt durch regelmäßigen Schiffsverkehr,
- eine schwache Strömung aus Sielzug oder Spülung mit Lösen des Materials durch ein Stromräumboot (früher Mudderflug bzw. Mudderprahm),
- eine für das Lösen und Transportieren der Ablagerungen ausreichende Spülströmung aus Spülbecken mit Spülsiel, zeitweise mit Räumbootunterstützung,
- regelmäßige Baggerung des Außentiefs mit Cutterbagger; eine Baggerung führt geräte- und verfahrensbedingt häufig zu Übertiefen und somit zu besonders großer Materialbewegung, deren Ablagerung auf dem Deichvorland oder Watt unerwünschte ökologische Eingriffe verursacht.

Zur Unterhaltung eines Außentiefs ist in Niedersachsen in der Regel der zuständige Gewässer-Unterhaltungsverband oder das Land verpflichtet (Niedersächsisches Wassergesetz, § 105). Die Unterhaltung dient zur Erhaltung eines ordnungsgemäßen Zustandes für den Wasserabfluß und, wenn das Außentief schiffbar ist, auch zur Erhaltung der Schiffbarkeit.

Das Außentief unterliegt ständigen Veränderungen und Auflandungen durch die gestaltenden Kräfte von Tideströmung und Brandung und durch die mitgeführte Sedimentfracht. Die Möglichkeiten der Erleichterung und Vereinfachung der Außentiefunterhaltung durch Spülanlagen und Räumbootinsatz werden in diesem Abschnitt behandelt.

## 2. Außentiefräumung mit tidegesteuerter Spülanlage

### 2.1 Bemessung und Einrichtung einer Spülanlage für das Neßmersieler Außentief

Das Neßmersieler Außentief verbindet seit je den alten Sielort Neßmersiel samt Siel und Hafen mit den tieferen Baljen im Watt. Es hat auch stets dem Schiffsverkehr zur vorgelagerten Insel Baltrum gedient. Die ständig weitergehende Verlandung und Verschlickung dieses Außentiefs führte dazu, daß der Schiffsverkehr nach Baltrum seit der Mitte dieses Jahrhun-

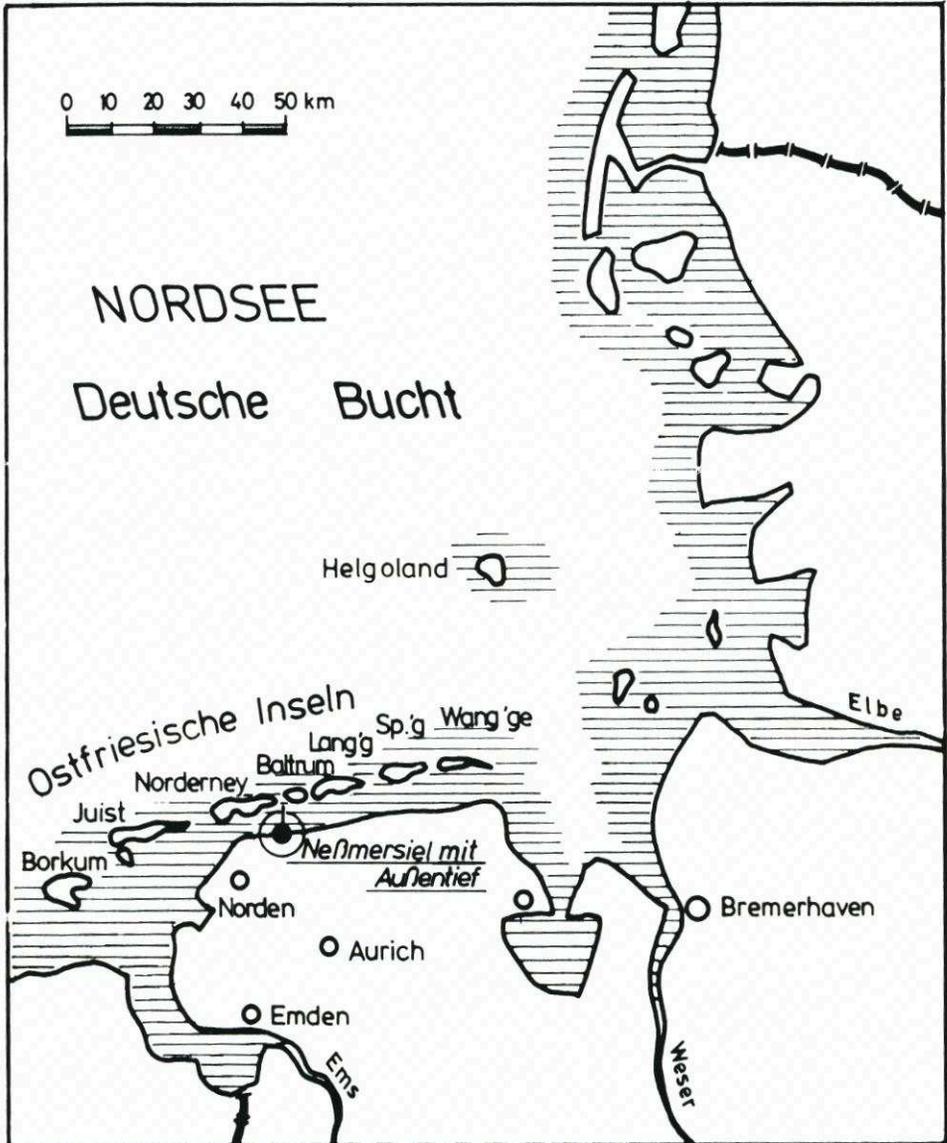


Abb. 2.1. Übersichtsskizze

derts nur noch mit einem kleinen Motorschiff aufrechterhalten werden konnte. Für den Haupt-Gästeverkehr wurde der Fährverkehr mit der etwa zwei Stunden beanspruchenden Fahrt nach dem 15 km westlich gelegenen Norddeich eingerichtet. Um von dieser zeitraubenden, nur um Tidehochwasser möglichen Fahrt freizukommen, wurde 1970/71 rd. 1500 m vor dem alten Hafen an der Deichvorlandkante ein neuer Hafen gebaut, von dem Baltrum nach 20minütiger Fahrt zu erreichen ist. Die Räumung des verbliebenen, an der Westseite mit einem Leitdamm ausgestatteten, 1,5 km langen Außentiefs bereitete trotzdem noch Probleme. Zur Verbesserung der Wasserverhältnisse wurde daher 1977 der Bau eines Spülsiels mit Spülbecken in Angriff genommen.

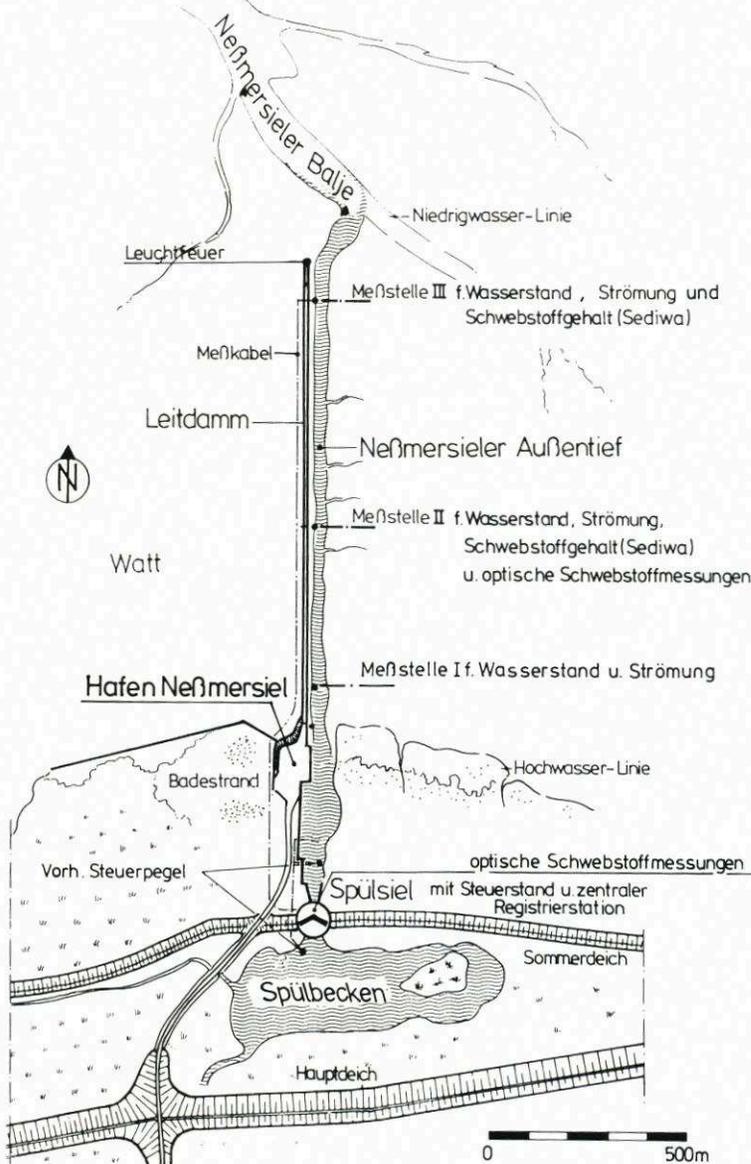


Abb. 2.2. Neßmersieler Außentief mit Spülbecken und Spülsiel

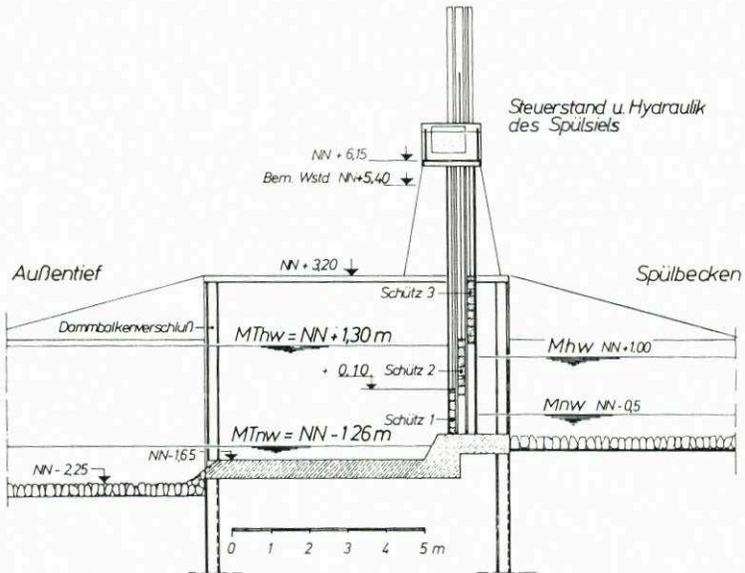
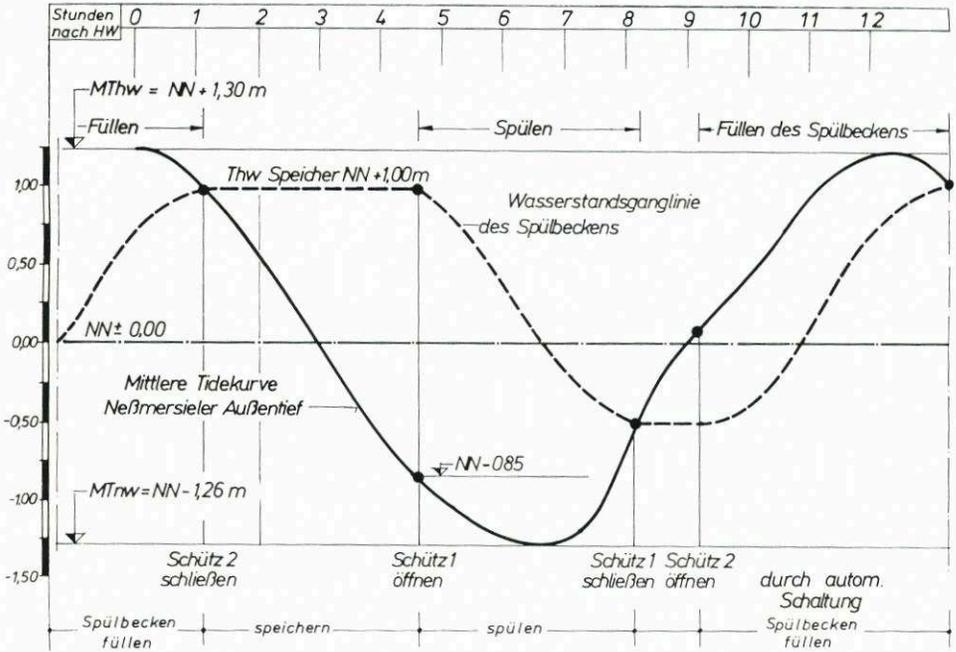


Abb. 2.3 Oben : Wasserstandsganglinie der Tide und des Spülbeckens in Neßmersiel mit Schaltmarken der automatischen Steuerung  
Unten : Längsschnitt durch das Spülisiel

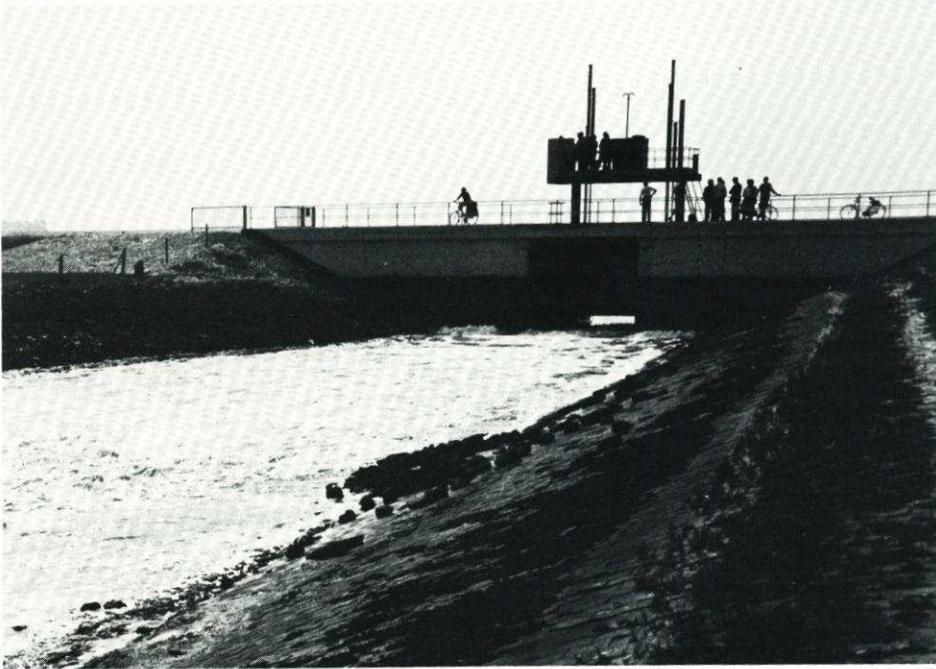


Abb. 2.4. Spülsiel mit Zentralstation (oben links) und Hydraulikanlage (oben mitte)

Die Anlage von Spülbecken ist an der Wattenküste nicht neu. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts haben eine Reihe von Küstenhäfen – u. a. Norddeich und Norderney – Spülbecken erhalten, die der Verschlickung des Hafens entgegenwirken sollten. Diese Spülbecken dienten jedoch lediglich als hinter dem Hafen angeordnete Retentionsbecken ohne jegliche Stauanlage. Die Tideströmung in Hafen und Hafenzufahrt wurde dadurch während der gesamten Tide lediglich geringfügig erhöht, bis das Spülbecken nahezu völlig aufgeschlickt und damit wirkungslos war. Für Den Helder, Niederlande, konnte durch den Ende des 18. Jahrhunderts gebauten Fangedamm ein Spülstrom erzeugt werden, der zur Erhaltung des Fahrwassers ausreichte (RODLOFF, 1970). Vereinzelt wurden auch kleine Spülbecken mit Stauanlagen eingerichtet, um damit den Sielzug für den Einsatz eines Mudderpfluges oder Mudderprahms zur Schlickräumung zu unterstützen. Für das Greetsieler Außentief wurde 1957 ein Spülsiel in den Hauener Hooge Sommerdeich eingebaut, dessen Spülbecken die Vorfluter im Sommerpolder bilden. Die Abmessungen von Spülbecken und -siel reichen zur Räumbootunterstützung, nicht aber zum völligen Freihalten des Außentiefs (Nds. Wasserwirtschaftsverwaltung, 1958, WASSER UND BODEN). Auch in Neßmersiel gab es eine Stauanlage hinter dem alten Hafen, durch die das zur Tidehochwasserzeit gestaute Wasser um Tideniedrigwasser zur Räumung ausgelassen wurde.

Da für die Dimensionierung der aus Spülbecken und -siel bestehenden Spülanlage keine Bemessungsregeln, ja nicht einmal Erfahrungswerte vorlagen, mußte die neue Anlage in Neßmersiel auf der Grundlage allgemeinen Wissens über Sedimentation und Erosion entwickelt werden. Aufgrund der möglichen, von FÜHRBÖTER und MANZENRIEDER (1983) für die Wattoberfläche nachgewiesenen biologischen Stabilisierung und einer denkbaren Kohäsion mußte für die Sedimente im Außentief, deren Kornfraktionen vom schlickigen Schluff bis zum schluffigen Feinsand reichen, mit einer höheren Erosions-Grenzgeschwindigkeit gerechnet

werden als für vergleichbare sterile Kornfraktionen. Die Anlage wurde daher ausgelegt auf eine zwei- bis dreifache Grenzgeschwindigkeit – bezogen auf das sterile Korn – und sollte daher in der Lage sein, etwa zwei Stunden lang um Tideniedrigwasser eine Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 0,5 m/s im 1,5 km langen Außentief aufrechtzuerhalten (ERCHINGER, 1984).

Ziel der im weiteren beschriebenen Forschungsvorhaben ist, die Dimensionierung solcher Anlagen und die Besonderheiten ihres Betriebes zu verfeinern und weiter zu erforschen.

## 2.2 Betrieb und Steuerung des Spülsiels

Im Zuge von Deichbaumaßnahmen konnte ein etwa 13 ha großes Spülbecken angelegt werden (Abb. 2.2). Zum Außentief wird es durch das 4,5 m weite Spülsiel abgeschlossen. Drei Bongossi-Schütztafeln oberhalb der auf NN -1,0 m liegenden Sielschwelle werden mit je zwei Nirosta-Hubstangen ölhdraulisch betrieben (Abb. 2.3, 2.4). Das Spülbecken faßt rd. 100 000 m<sup>3</sup> Seewasser. Der Füllvorgang des Spülbeckens beginnt etwa bei Tidehalbwasser, wenn der ansteigende Tidewasserstand die Oberkante der untersten Schütztafel mit NN +0,1 m übersteigt. Dadurch wird erreicht, daß der in der ersten Fluthälfte stärker mit Sedimenten beladene Flutstrom nicht in das Spülbecken einfließt und auch nicht durch den noch kleinflächigen benetzten Außentiefquerschnitt mit hoher Geschwindigkeit einströmt (ERCHINGER, 1982). Damit wird sowohl der Verlandung des Spülbeckens als auch einem starken Schlickeintrieb ins Außentief während der ersten Fluthälfte entgegengewirkt.

Um eine günstige Räumwirkung zu erzielen, strömt das gestaute Wasser in den letzten zwei Stunden der Ebbe nach Ziehen der untersten Schütztafel durch das Außentief mit Strömungsgeschwindigkeiten von 50 bis 80 cm/s. Dabei kann die Räumwirkung noch durch

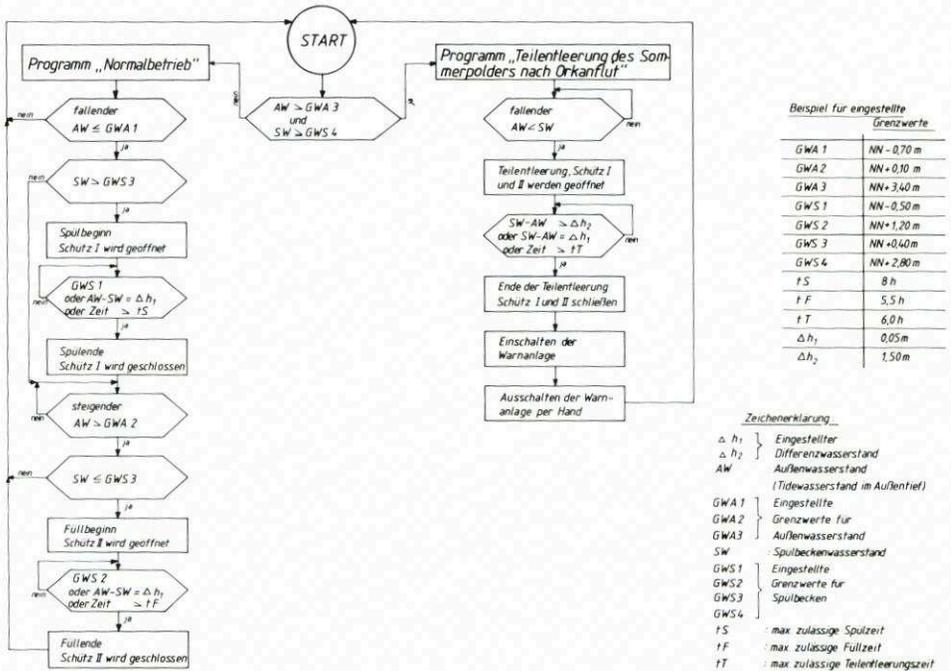


Abb. 2.5. Ablaufdiagramm für die automatische Spülsielsteuerung durch Mikroprozessor



Abb. 2.6. Stromräumboot

ein Stromräumboot und seine schlicklösende und aufwirbelnde Wirkung der absenkbaaren Schrauben unterstützt werden. Ob zur Tiefenstabilisierung des Außentiefs die größere Räumwirkung durch den auf den letzten Ebbstrom gesetzten Räumstrom oder das Prinzip des Gegenstaus durch ein späteres, bis in die beginnende Flutphase reichendes Auslassen des Wassers günstiger sein würde, müssen die Praxis und die Erforschung erst ergeben.

Nach dem anfänglichen Handbetrieb, der die Bedienung lediglich während der Tagestiden an den fünf Arbeitstagen der Woche zuließ, wurde 1982 die vollautomatische Steuerung eingerichtet (Abb. 2.3). Mit Hilfe eines Mikroprozessors werden die Schütztafeln über die Wasserstände im Spülbecken bzw. im Außentief vollautomatisch gesteuert. Die in den beiden Tiden eines Tages notwendigen acht Schützbewegungen können somit ohne menschliches Zutun ausgelöst werden. Bei ungewöhnlich verlaufenden Tiden sorgt die Automatik für die Unterbrechung der üblichen Schützbewegungen (Abb. 2.5).

### 2.3 Unterstützender Räumbooteinsatz

Das Köster'sche Stromräumboot, ein flaches Boot mit zwei absenkbaaren Schrauben, wird seit Jahrzehnten in vielen Außentiefs Norddeutschlands für die Unterhaltung und Schlickräumung eingesetzt (Abb. 2.6). Die überdimensionalen Schiffsschrauben und der starke Antriebsmotor ermöglichen es, vor allem durch den Schraubenstrahl, aber auch durch die mechanische Propellereinwirkung Schlick und Schluff an der Außentiefsohle zu lösen und aufzuwirbeln. Der starke Rühreffekt führt dabei insbesondere bei den Schlickteilchen zu einer weitgehenden Auflösung und somit zu besonders feinem Sediment, das sich als Schwebstoff nur langsam wieder absetzt. Durch eine seewärts gerichtete Strömung im Außentief werden diese Schwebstoffe dann aus dem Außentief herausgetragen.

Dem strömenden Wasser kommt folglich die Funktion des Sedimenttransportes zu. Das

kann durch Szielug während der Niedrigwasserzeit, durch Betrieb der Schöpfwerke zur Unterstützung der Räumwirkung oder durch Spülanlagen erreicht werden. Für die Bemessungen von Spülanlagen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die lediglich den vom Räumboot aufgewirbelten Schlick heraustransportieren sollen, und jenen, die durch stärkere Strömung auch ohne Räumbooteinsatz die Sedimente lösen können und auch in der Lage sind, die sich schneller absetzenden schluffigen Feinsande noch mit seewärts zu transportieren. Die Spülanlage in Neßmersiel gehört der zweiten Gruppe an, aber auch dabei ist ein unterstützender Räumbooteinsatz denkbar und – vor allem für den „Frühjahrsputz“ – zweckmäßig.

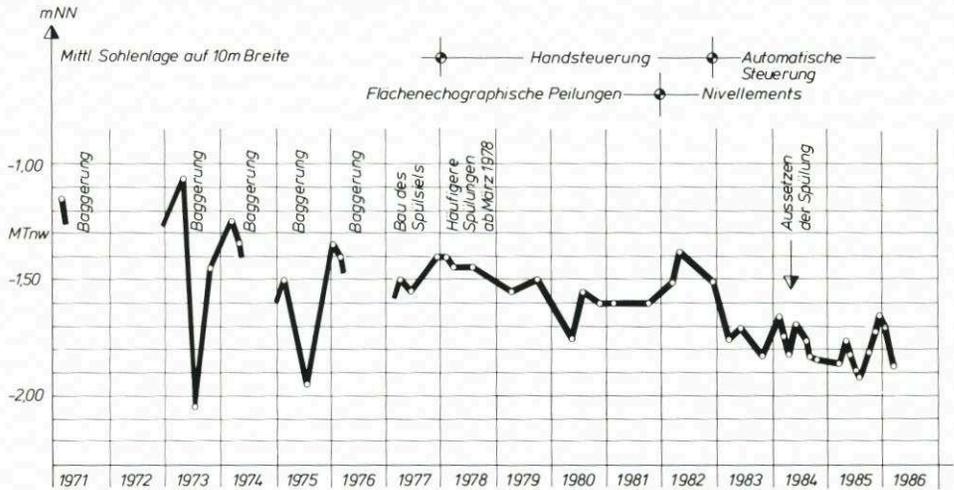


Abb. 2.7. Entwicklung der Sohlenlage des Neßmersieler Außentiefs – hafennaher Bereich (Stat. 0450 bis 0800)

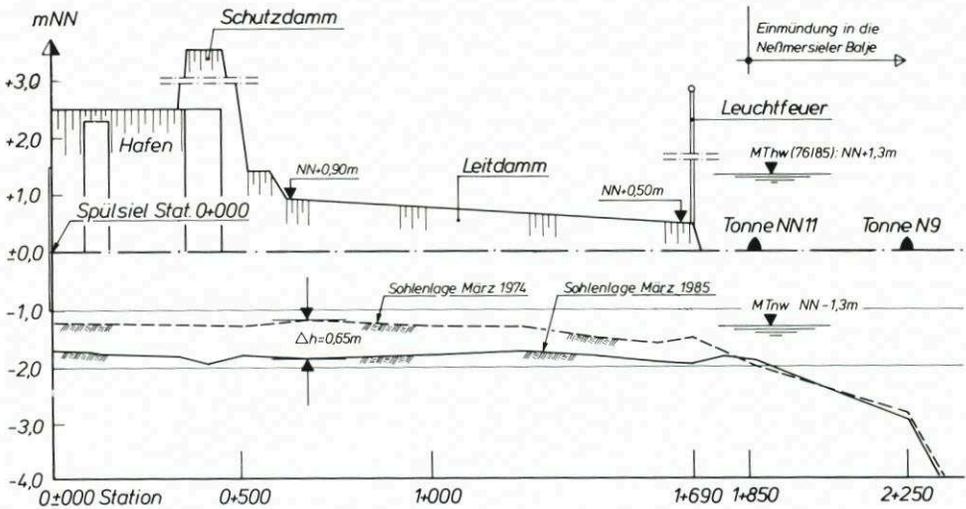


Abb. 2.8. Längsschnitt durch das Neßmersieler Außentief mit Sohlenvertiefung von 1974 bis 1985 durch den automatischen Spülbetrieb

## 2.4 Erzielte Räumwirkung durch den Spülbetrieb

Bis zum Bau des Spülsiels im Jahre 1977 mußte das Neßmersieler Außentief im Abstand von ein bis zwei Jahren auf ganzer Länge von einem Cutterbagger wieder auf ausreichende Tiefe gebracht werden. Das verursachte erhebliche Kosten. Seit der Einrichtung des Spülsiels im Jahre 1977 ist eine Baggerung nicht mehr durchgeführt worden. Die Sohle konnte im gesamten Außentief durch den Spülbetrieb deutlich vertieft werden. Gemäß Abb. 2.7 konnte die Sohle im hafennahen Bereich von NN  $-1,40$  m Anfang 1978 während der Spülperiode mit Handsteuerung bis 1981 auf NN  $-1,60$  m gebracht werden. Nach Einbau der automatischen Steuerung wurde dann nach 1982 sogar eine weitere Vertiefung auf Sohlagen um NN  $-1,80$  m erreicht. Ein Aussetzen der Spülung, die gelegentlich für Unterhaltungsarbeiten – beispielsweise am Tosbecken – unterbrochen werden muß, wirkt sich jeweils umgehend auf eine Erhöhung der Sohle aus.

Der Spülbetrieb hat folglich 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 und
- auch der Querschnitt des Außentiefs unter NN  $-0,50$  m auf das etwa 1,8fache vergrößert wurde (Abb. 2.8, 2.9).

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.

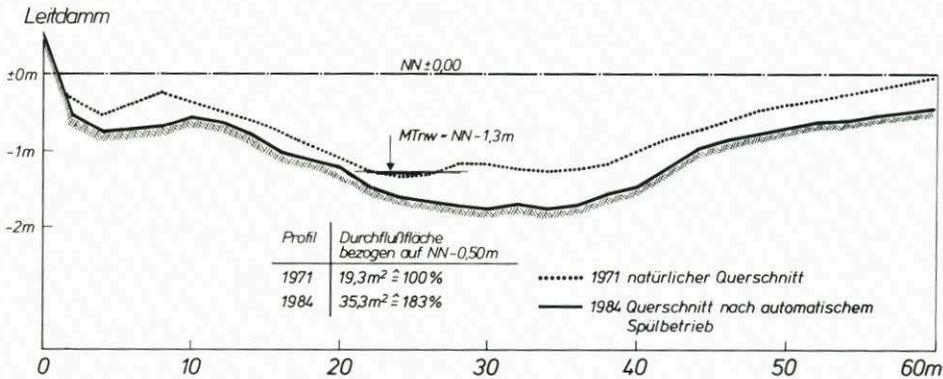


Abb. 2.9. Querschnittsentwicklung nach automatischem Spülbetrieb

## 2.5 Eisräumung durch Spülung

Als besonders nützlich hat sich die Spülanlage auch während winterlicher Vereisungen des Watts erwiesen. In unterschiedlich starkem Maße wird der Fährverkehr zu den einzelnen ostfriesischen Inseln bei winterlicher Vereisung im Watt beeinträchtigt oder für längerer Zeit unterbrochen. Der Fährverkehr von Baltrum nach Neßmersiel ist seit Aufnahme des Spülbetriebes in mehreren Wintern mit starker Vereisung des Watts bis auf kurze Ausnahmen nie zum Erliegen gekommen. Während der täglichen Fahrt der Fähre wird das Eis im Außentief gebrochen. Durch den Spülstrom werden die Schollen dann seewärts getrieben, so daß sie nicht zu erneuten Vereisungen der Rinne beitragen können (Abb. 2.10 u. 2.11). Für die Insel



Abb. 2.10. Eisräumung während der Spülung im Hafenbereich – Lattenpegel für Spülsiel-Steuerpegel, Sensor unter der Wasseroberfläche –

Baltrum bedeutet dieses einen wesentlichen Fortschritt in der winterlichen Inselversorgung gegenüber der früher starken Eisabhängigkeit bei der Fährverbindung von Norddeich über das Norderneyer Watt nach Baltrum.

## 2.6 Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet

Das 13 ha große Spülbecken ist nach einem Landschaftspflegeplan als Vogelrast- und -brutgebiet angelegt. Dieser See mit tiefem und flachem, schlickigem Bereich und einer von außerhalb nicht zugänglichen Insel ist längst von gefährdeten Vogelarten wie Säbelschnäbler, Uferschnepfe, Flußseeschwalbe und Rotschenkel entdeckt worden und hat sich als Rast- und Brutgebiet positiv entwickelt. Die Wasserfläche unterliegt ja den – wenn auch gedämpften – Gezeiten und ist somit dem Ökosystem des Watts angepaßt. Durch die zeitliche Verschiebung des Trockenfallens zum Watt hat das Spülbecken für die Vögel seine besondere Bedeutung. Auch konnte durch Anordnung einer Bodenschwelle für den Flachwasserbereich eine für Watvögel günstige Wassertiefe geschaffen werden. Das umliegende Grünland unterliegt weiterhin einer für den Seevogelschutz vorteilhaften extensiven Beweidung mit Jungrindern. Die Anwendung von Herbiziden oder gar Pestiziden, von Kunstdünger und Gülle sowie eine Grasmahd sind absolut ausgeschlossen.

Zur Erhaltung von Arten der Salzwiesen-Pflanzengesellschaft wird der Sommerpolder im Winter sechsmal geflutet, zweimal als völliger Einstau für alle Flächen über zwei bis drei Tage und viermal als Grabeneinstau. Da die Häufigkeit von Sturmfluten in der Regel dafür nicht ausreicht, wird im übrigen bei erhöhten Tiden durch das Spülsiel geflutet.

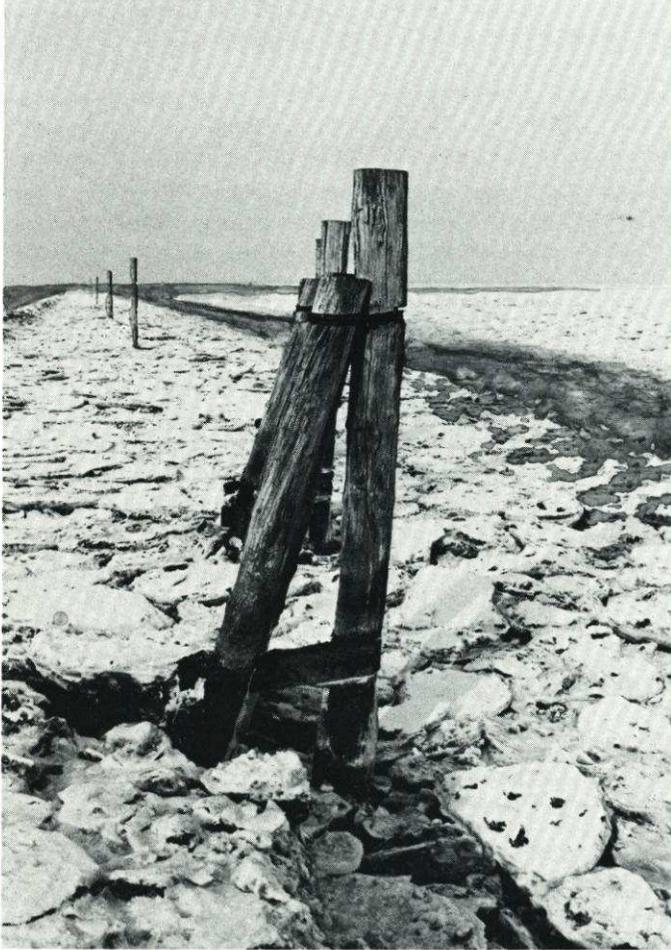


Abb. 2.11. Eisräumung durch Spülung im Außentief, vom Hafen seewärts

Diese Nutzungen bestätigen die geglückte Verquickung der wasserwirtschaftlichen Aufgaben der Spülanlage mit den Interessen des Naturschutzes.

Die Schlickablagerungen im Spülbecken sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens mit untersucht werden. Sollte das Spülbecken in zwei bis drei Jahrzehnten bis zur Spülsiel-Sohlschwelle angefüllt sein, muß es von einem Cutterbagger geräumt werden. Die Baggerung im Spülbecken hat den Vorteil, daß sie

- nur in großen Zeitabständen notwendig wird,
- ohne gegenseitige Behinderung mit dem Schiffsverkehr bei langfristiger Einplanung durchgeführt werden kann
- und jeder gebaggerte  $m^3$  als Auffangraum für erneute Verschlickung auch Nutzen bringt.

## B Das Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs AT-S“ mit Naturuntersuchungen am Neßmersieler Außentief

### 1. Vorbemerkung zu den Forschungsprojekten über Außentiefs

#### 1.1 Veranlassung

Die etwa 80 Außentiefs an der deutschen Nordseeküste und sonstige Hafenzufahrten unterliegen einer mehr oder weniger starken Verschlickung und genügen daher häufig nicht den Anforderungen, die für die Binnenentwässerung und den Schiffsverkehr an sie gestellt werden. Die Räumung der Außentiefs ist ein besonderes Problem. Der Sielzug, unterstützt durch den Schiffsverkehr, reicht zur Freihaltung des Außentiefs vielfach nicht aus. Mit Hilfe eines Stromräumbootes kann in vielen Fällen eine genügende Tiefe erhalten werden. Die sonst regelmäßig notwendigen Baggerungen mit Cutterbaggern führen verfahrens- und gerätebedingt in der Regel zu nicht erforderlichen Übertiefen. Sie erfordern daher häufig eine zu große Bodenbewegung und sind somit besonders energieaufwendig und kostspielig. Außerdem verursacht die Wiederablagerung des Baggerguts auf Salzwiesen oder Wattflächen unerwünschte ökologische Eingriffe.

Die Zusammenhänge für die natürliche Entwicklung der Außentiefquerschnitte, für die Schaffung und Erhaltung ausreichender Tiefe und Querschnitte unter gezielter Ausnutzung der Spülung und des Räumbooteinsatzes werden in dem in drei Arbeiten behandelten Forschungsvorhaben des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) mit Förderung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) systematisch untersucht und erforscht. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Wirkung des Schiffsverkehrs gelegt.

#### 1.2 Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“

Das vom Bauamt für Küstenschutz (BfK) als Antragsteller durchgeführte Vorhaben „AT-S“ soll die Wirksamkeit einer Vergrößerung von Außentiefquerschnitten durch gezielte Spülung untersuchen. Es sollen Grundlagen für die Bemessung von Spülziel und Spülbecken und für die Optimierung der Sielsteuerung zur bestmöglichen Tiefenstabilisierung des Außentiefs erarbeitet werden. Es wird dabei der Frage nachgegangen, ob zur Räumung schllickig-schluffiger Sedimente einer intensiven Spülräumung oder einem Gegenstau zur Verringerung des beginnenden starken Flutstromes der Vorzug zu geben ist.

Durch Naturmessungen werden die Zusammenhänge zwischen Tideverlauf, Tideströmung, Spülströmung, Schwebstofftransport und Querschnittsentwicklung erfaßt. Aber auch andere Einflußgrößen wie Seegang auf dem Watt, Spülbeginn und Spüldauer werden dabei untersucht. Die Auflandungsrate des Spülbeckens durch das regelmäßige Füllen mit schwebstoffbeladenem Seewasser ist ebenfalls von Interesse. Außerdem ergeben die Messungen wissenschaftliche Grundlagen für die Beurteilung des Transportvermögens von Tideströmungen. Erwartet werden somit umfangreiche Erkenntnisse für die praktische Lösung von Ingenieuraufgaben. Auch die Wirkungsweise eines Stromräumbootes und Möglichkeiten zur Optimierung seines Einsatzes werden in die Untersuchung einbezogen. Im übrigen ist der Einfluß des Schiffsverkehrs besonderen Untersuchungen vorbehalten (s. 1.3 und 1.4).

### 1.3 Forschungsprojekt „Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)“<sup>\*\*</sup>)

Das vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (LW) als Antragsteller durchgeführte Vorhaben „AT-N“ soll die natürlichen Zusammenhänge zwischen den maßgebenden Einflußgrößen von Außentiefssystemen an der deutschen Nordseeküste mit überwiegender Sielbetrieb untersuchen. Die Ergebnisse sollen Beiträge für Bewertungs- und Bemessungsgrundlagen, für die Auswirkung künstlicher und natürlicher Veränderungen sowie maßgebende Einflüsse auf hydrologische und morphologische Zustandsgrößen liefern.

Anhand von Ähnlichkeitsuntersuchungen werden die Beziehungen zwischen Kenngrößen für den Binnenabfluß, den Sielbetrieb, die Tideverhältnisse und die Außentiefmorphologie überwiegend auf der Grundlage von vorhandenem Archivmaterial analysiert. Der Einfluß der Schifffahrt auf die Schwebstoffführung in Außentiefs soll durch Naturversuche exemplarisch bewertet werden. Die dazu erforderlichen Untersuchungsverfahren – insbesondere für die kontinuierliche automatische Messung von Sedimentkonzentrationen – wurden schrittweise unter Einbeziehung der zwischenzeitlichen Erkenntnisse entwickelt und optimiert.

### 1.4 Der Einfluß des Schiffsverkehrs<sup>\*\*</sup>)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens hat die Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD) Naturmessungen im Neßmersieler Außentief durchgeführt, die den Einfluß der Schifffahrt auf die Wasserstände und die bodennahen Strömungen deutlich machen.

Die VBD-Untersuchungen sollen helfen, die komplexen Zusammenhänge zwischen Fahrwasserquerschnitt, Schiffstiefgang, Fahrgeschwindigkeit, Fahrtrichtung, Rückstromgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkung, die für den Transport von Sohlenmaterial mitbestimmend sind, bei unterschiedlichen Tideverhältnissen zu klären.

### 1.5 Durchführung der Forschungsprojekte über Außentiefs

#### Mitglieder der Projektgruppen:

Ausführende Stelle des Projektes „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“:

Bauamt für Küstenschutz, Jahnstr. 1, 2980 Norden 1,  
 LBD Heie F. Erchinger (Projektleitung)  
 Dipl.-Ing. Hans-Gerd Coldewey  
 Dipl.-Ing. Klaus Probst  
 Bautechn. Johann Krey

<sup>\*</sup>) siehe Beitrag RENGER und BEDNARCZYK in diesem Heft

<sup>\*\*</sup>) siehe Beitrag MÜLLER und BINEK in diesem Heft

Ausführende Stelle des Projektes „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“:

Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein, Saarbrückenstr. 38, 2300 Kiel,  
Dr.-Ing. Eberhard Renger (Projektleitung und Geschäftsführung für das Gesamtprojekt)  
Dipl.-Ing. Klaus Bednarczyk  
Dipl.-Ing. Ulla von See  
Verm.Techn. Uwe Gutsche

Untersuchung der Einflüsse durch Schiffsverkehr:

Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Klödenerstr. 77, 4100 Duisburg 1,  
Dr.-Ing. Ernst Müller  
Ing. Helmut Binek

#### Weitere Mitglieder der Projektgruppe:

Dr.-Ing. Hans-Joachim Stephan, Forschungsstelle Küste des Nds.  
Landesamts für Wasserwirtschaft, Norderney  
LBD Roelf Carsjens, Nds. Hafenamts Emden (bis 1984)  
BD Gerd Frerichs, Nds. Hafenamts Norden (ab 1985)

Die Naturversuche wurden überwiegend am „Naturmodell“ Neßmersieler Außentief bei Neßmersiel, Landkreis Aurich, 15 km östlich der Stadt Norden/Ostfriesland durchgeführt. 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.

## 2. Morphologische und hydrologische Gegebenheiten am Neßmersieler Außentief

### 2.1 Das Außentief und seine Seitenräume

Das rd. 2 km lange Außentief beginnt am Spülsiel und endet an der Neßmersieler Balje. Auf den ersten 500 m ist es seitlich vom Deichvorland eingefasst. An der Westseite ist dieses erhöht und zu Hafenanlagen ausgebaut. Die Böschungen sind an dieser Seite befestigt. Die Hafenkajungen sind mit Spundwänden eingefasst.

Auf weiteren 1200 m ist an der Westseite des Außentiefs ein Leitdamm errichtet, dessen Krone von NN + 0,9 m auf NN + 0,5 m am Leuchtfeuer abfällt. Der Leitdamm besteht aus Betonfertigteilen. An der Ostseite ist der Fuß durch Steinschüttung gesichert, während an der Westseite des Leitdamms kleine, niedrige Abweiser die Eintiefung einer Rinne am Leitdammfuß verhindern. Die von 40 auf 80 cm unter MThw abfallende Leitdammkrone hat sich auch in winterlichen Ostwindlagen bewährt, da sie selbst bei etwas erniedrigten Tidewasserständen das treibende Eis nicht staut und damit die Vereisung der Rinne nicht fördert. Am Leitdammkopf führt der Stromversatz zur Ablagerung einer Plate, die zu einer östlichen Ausbuchtung des Außentiefs vor Einmündung in die Neßmersieler Balje zwingt.

An der Ostseite des Außentiefs fällt das grüne Deichvorland zum unbegrünten Watt ab. Im Schutze der Hafenanlagen sind die Seegangskräfte derart gedämpft, daß sich die Kante des

Vorlandes (ostfriesisch: des Hellers) hält, ohne daß sie durch eine Lahnung geschützt zu werden braucht. Weiter seewärts steigt die ostseitige Böschung des Außentiefs mit nach oben flacher werdender Böschungsneigung asymptotisch an bis zur Wattoberfläche, deren Höhe von NN + 0,75 m an der Hellerkante auf NN -0,50 m am Prielrand in Höhe des Leitdammkopfes abfällt. Mehrere, sich besonders nach Eiswintern verlagernde und stärker einschneidende Priele münden von dieser östlichen Wattfläche ins Außentief. Da eine zeitweilig starke Ausräumung von Priele zu erheblichen Eintreibungen in das Außentief führt, werden solche Priele ggf. zur Verhinderung weiterer rückschreitender Erosion abgedämmt. Mit einer in die Wattoberfläche einbindenden kurzen Holzspundwand mit V-förmig angelegter Oberkante liegt die Prieleinmündung dann nach Lage und Höhe fest.

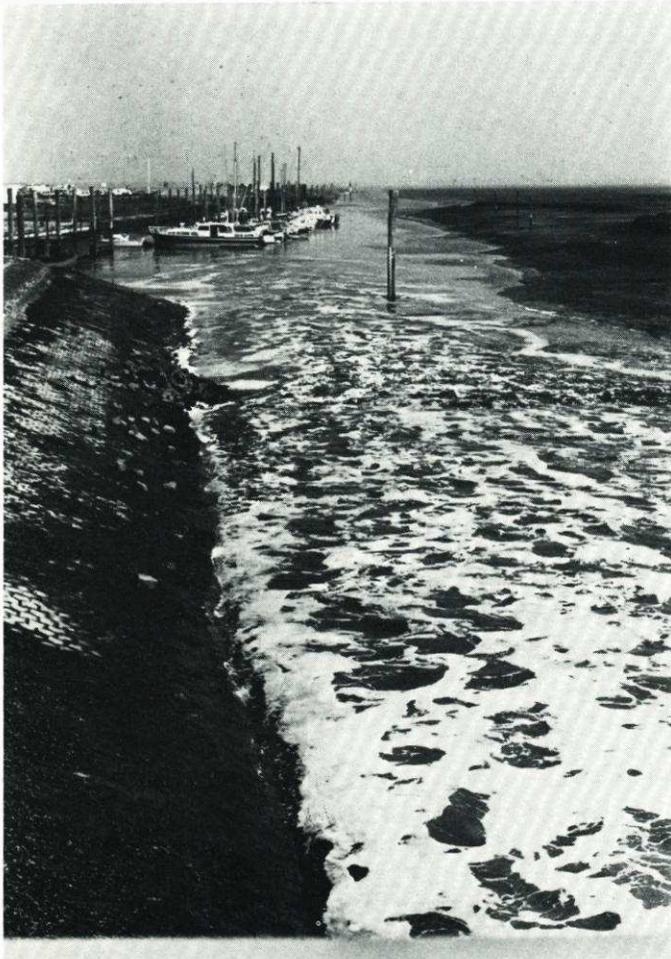


Abb. 2.12. Blick vom Spülsiel auf Hafen und Außentief während des Spülens kurz vor Tnw

Bezogen auf die topographische Wattwasserscheide ergeben sich die in Tab. 1 aufgeführten Einzugsgebiete und Tidevolumina (Grundlage: Küstenkarte 1975) wie folgt:

Tabelle 1. Einzugsgebiete und Tidevolumina für das Neßmersieler Außentief

| Außentief-Station (m) | Einzugsgebiet (ha) | Tidevolumen ( $10^6 \text{ m}^3$ ) |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------|
| 600                   | 19                 | 0,14                               |
| 1 000                 | 33                 | 0,34                               |
| 1 250                 | 45                 | 0,51                               |
| 1 600                 | 55                 | 0,67                               |

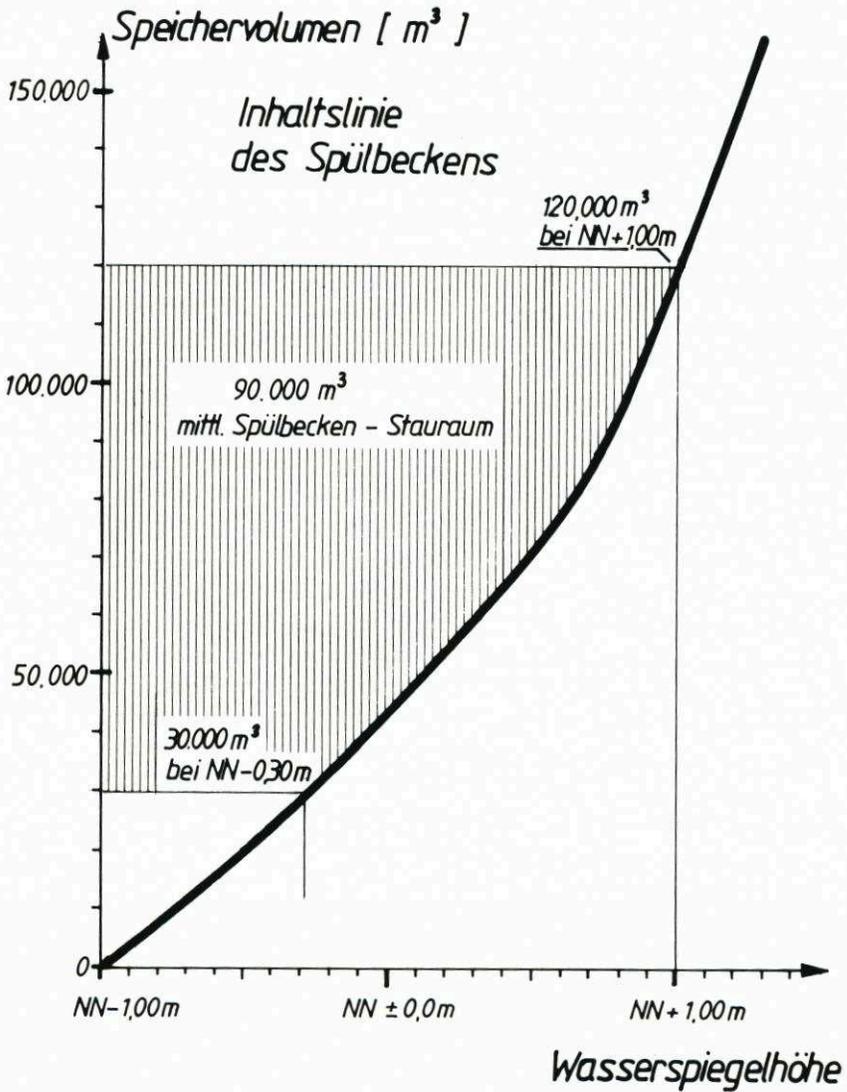


Abb. 2.13. Speicherinhaltslinie des Spülbeckens

## 2.2 Speicherinhalt des Spülbeckens

Das insgesamt 13,9 ha große Spülbecken wurde in den Jahren 1979/80 nach einem Landschaftspflegeplan als Vogelrast- und -brutgebiet angelegt. Etwa 290 000 m<sup>3</sup> Klei- und Sandboden wurden im Zuge von Deichbaumaßnahmen entnommen. In seinem tiefen Bereich liegt die Sohle auf NN -5 bis -6 m.

In Höhe der Spülsiel-Sohlschwelle von NN -1,0 hat das Spülbecken eine Fläche von 3,7 ha. Die an diese ständig mit Wasser bedeckte Fläche anschließende Uferzone ist bis zur Höhe NN + 0,5 m 2,4 ha groß. Zwischen den Höhen NN + 0,5 bis 0,8 m ist eine nahezu ebene Zone mit etwa 5 ha Größe angelegt, die im östlichen Bereich eine Insel umschließt (Abb. 6.1). Das umliegende Grünland und die vorgenannte Insel liegen auf NN + 1,6 bis 1,8 m.

Wenn das Spülbecken in mittleren Tiden bis zum Peil von NN + 1,0 m (MHW-Peil) gefüllt wird, trägt das Speichervolumen oberhalb der Drempele-Oberkante von NN -1,0 m 120 000 m<sup>3</sup> (s. Speicherinhaltslinie, Abb. 2.12). Dieses Gesamtvolumen steht jedoch als Spülwassermenge nicht voll zur Verfügung, da die Restwassermengen wegen geringer Abflusshöhe am Siel in der Regel nicht abfließen können. Außerdem nimmt der Abfluß stark ab, wenn der Spülbeckenwasserstand unter NN -0,3 m abfällt, so daß die vorher durch die Räumströmung aufgenommenen Außentiefsedimente wieder zu Boden sinken. Abzüglich dieses „nicht räumwirksamen“ Restvolumens von 30 000 m<sup>3</sup> beträgt die mittlere Spülwassermenge etwa 90 000 m<sup>3</sup>.

Die Form des Spülbeckens mit der hochliegenden Ebene zwischen NN + 0,5 bis 0,8 m hat den Nachteil, daß nach niedrig auflaufenden Tiden nur eine geringe Spülwassermenge zur Räumung des Außentiefs zur Verfügung steht. Als Nachteil hat sich im vergangenen Winter erwiesen, daß beispielsweise bei einem Speicherpeil von NN + 0,6 m – das sind 40 cm unter dem MHW-Peil – das Spülbecken nur noch 40 000 m<sup>3</sup> Spülwasser faßt. Zur Vergrößerung des Fassungsvermögens sollte daher die hochgelegene, ebene Randzone des Spülbeckens um 0,4 bis 0,5 m vertieft werden, wodurch nach niedrig auflaufenden Tiden etwa 50 % mehr Spülwassermenge verfügbar wäre. Nachteile für den Naturschutz ergeben sich dadurch nicht, da diese Fläche nach jeder Spülung wie bisher trockenfällt bzw. hinter einer leicht höheren Schwelle als Flachwasserzone für die Watvögel einen interessanten Rast- und Nahrungsbiotop darstellt.

## 2.3 Haupttidewasserstände in Neßmersiel

Das Mitteltidehochwasser für den Pegel Neßmersiel (Steuerpegel des Spülsiels) wurde durch Vergleichsrechnung mit dem gewässerkundlichen Pegel Bengersiel überprüft. Die Regressionsrechnung für ca. 380 Wertepaare aus den Monaten November 1984 bis Oktober 1985 ergibt, daß das Thw Neßmersiel i. M. um 7,5 cm niedriger als in Bengersiel aufläuft. Für die maßgebende Jahresreihe 1976/85 wurde am Pegel Bengersiel das MThw = NN + 1,37 m nach Wasserstandslisten des WWA Aurich berechnet. Für Neßmersiel gilt dann MThw = NN + 1,30 m. Dieser Wert konnte durch Vergleichsrechnungen mit den Wasserständen am gewässerkundlichen Pegel Borkum bestätigt werden.

Das Tnw in Neßmersiel wird durch den Spülbetrieb beeinflusst. Es ist vorgesehen, daß das unbeeinflusste MTnw aus einer größeren Anzahl von Meßwerten aus dem Jahre 1986 berechnet werden soll. Für die wenigen vorliegenden unbeeinflussten 21 Wertepaare ergibt sich durch Vergleichsrechnung vorläufig eine MTnw von NN -1,26 m am Steuerpegel des Spülsiels. Weiter seewärts fällt das MTnw bis Meßstelle III auf NN - 1,30 m. Der Ebbeast der

Tidekurve im Neßmersieler Außentief (Meßstelle III) zeigt einen flachen Verlauf mit einer Ebbedauer von i. M. 6 Stunden 36 Minuten, während der Flutast steil ansteigt und seine Dauer i. M. 5 Stunden 49 Minuten beträgt. Dieser typische Verlauf wird um so ausgeprägter, je näher der Meßpunkt am Siel liegt. Die Ebbedauer erhöht sich am Siel um ca. 20 Minuten. Die Flutdauer wird dementsprechend kürzer.

### 3. Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung“

#### 3.1 Einrichtung der Meßstellen

Im Neßmersieler Außentief sind an drei ausgewiesenen Meßquerschnitten Dauermeßstationen eingerichtet. Die Meßstelle I liegt in Hafennähe, ca. 600 m seawärts des Spülsiels. Meßstelle II liegt im mittleren Abschnitt des Außentiefs, ca. 1000 m vom Siel entfernt. Die III. Meßstelle wurde am äußeren Ende des Außentiefs vor der Einmündung in die Neßmersieler Balje angeordnet (Abb. 2.2).

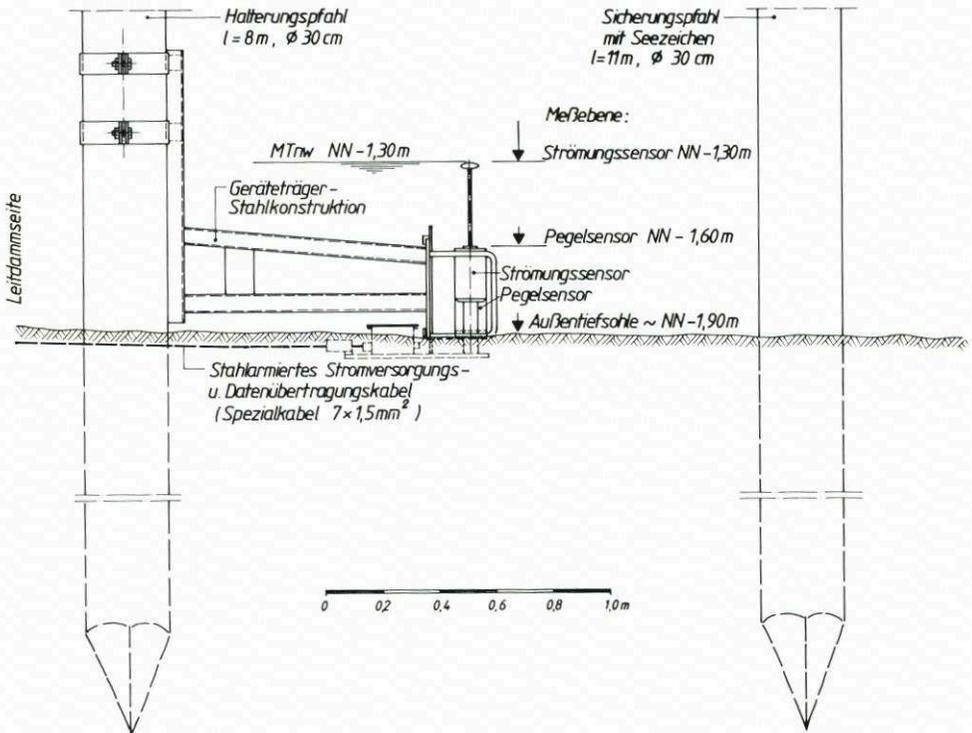


Abb. 3.1. Pegel- und Strömungsmessstelle

Jede Meßstation besteht aus einem Drucksensor für die Wasserstandsmessung und einem Strömungssensor für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in Längs- und Querrichtung zur Außentiefachse (Abb. 3.1). An der II. und III. Meßstelle werden außerdem der Schwebstoffgehalt mit vollautomatischen Sedimentmeßgeräten (Sediwa, Abb. 3.2) gemessen.

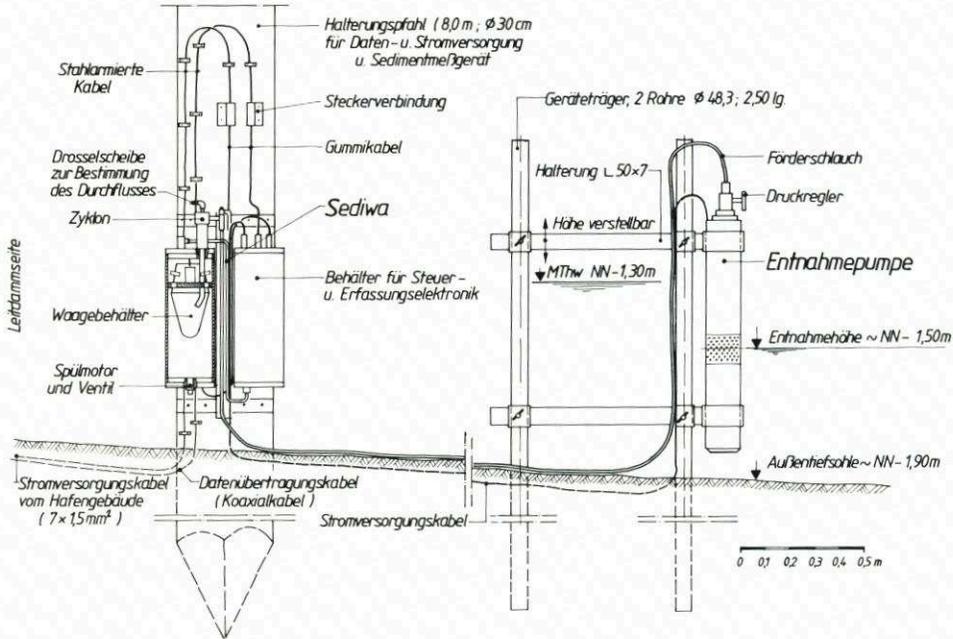


Abb. 3.2. Dauerentnahmestelle für Schwebstoffmessungen mit „Sediwa“

Zusätzlich können wahlweise an der II. Meßstelle oder am Spülsiel automatische Schwebstoffmessungen durchgeführt werden.

Mit Hilfe der an den drei Meßstellen ermittelten Wasserstands-Meßwerte wird das Fließgefälle im Außentief erfaßt. Die simultanen Dauermessungen ermöglichen es, die Zusammenhänge zwischen Tideverlauf, Strömungsgeschwindigkeiten einschl. Beschleunigungs- und Verzögerungseffekten und dem jeweiligen Schwebstoffgehalt zu untersuchen.

Alle Meßdaten werden über Seekabel zur Zentralstation am Steuerstand des Spülsiels übertragen.

### 3.2 Zentrale Datenerfassung

Die zentrale Datenstation besteht aus einer Digitalanzeige für die drei Pegel, einem Datalogger zur Speicherung der Meßwerte, einem Mehrfach-Schreiber sowie einem Barometergeber zum Ausgleich des Luftdrucks bei den Wasserstandsmessungen und einer Mittelwertelektronik.

Die zur Zentralstation am Steuerstand des Spülsiels übertragenen Meßwerte werden auf Magnetband gespeichert und außerdem von dem Mehrfach-Schreiber auf Registrierpapier aufgezeichnet.

Da die Druckdosen zur Messung des Wasserstandes bei einem bestimmten Luftdruck kalibriert worden sind, wird eine Korrektur – bezogen auf den jeweilig herrschenden Luftdruck – vorgenommen (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982): Zur Luftdruckmessung ist ein Aneroid-Barometer Typ Lambrecht mit Induktivmeßumformer in die Zentralstation eingebaut. Das Gerät enthält einen sechsteiligen Dosensatz als Luftdruck-Meßelement. Die druckabhängige Längenänderung des Dosensatzes wird über Hebel und Kette vergrößert und in Drehbewegungen der Zeigerachse umgeformt. Unter dem Zeiger des Meßgerätes kann der

aktuelle Luftdruck örtlich abgelesen werden. Zur elektronischen Verarbeitung der Luftdruckwerte ist das Gerät mit einem Induktiv-Meßumformer versehen, der den Verschiebungsweg des auf den Barometerdosen angeordneten Spulenkerns in einen eingetretenen Ausgangsstrom  $0 \dots 20 \text{ mA} = 945 \dots 1055 \text{ mbar}$  wandelt.

Als Seewasserdichte ist ein Mittelwert von  $1,024 \text{ g/cm}^3$  im Meßwertwandler fest eingestellt.

Da die Meßdaten nur in bestimmten Zeitabschnitten auf Magnetband abgespeichert werden können, wurde eine spezielle Mittelwertelektronik entwickelt, die die anfallenden Meßwerte für vorgegebene Zeiträume mittelt. Eine Abspeicherung von Zufallswerten ist insbesondere für die Strömungsgeschwindigkeiten wenig sinnvoll. Als Zeittakt für die Abspeicherung der Meßwerte wurden zunächst 5 Minuten gewählt. Für die Auswertung der Sedimentmessungen zeigte sich dann die Verkürzung auf eine Minute als zweckmäßig.

An die Mittelwertelektronik sind 13 Meßkanäle angeschlossen. Von diesen Kanälen sind sechs für die Signale der Strömungssensoren (je Sensor Quer- und Längsströmung), drei für die Signale der Drucksensoren und zwei für die Signale der Sedimentmeßgeräte belegt. Die letzten beiden Kanäle sind für die beiden Steuerpegel des Spülsiels (Pegel-Spülbecken und Pegel-Außentief) eingerichtet.

Die Mittelwertbildung ist technisch wie folgt gelöst (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982): Die momentanen Meßwerte werden ständig durch einen Spannungs/Frequenzwandler in Impulse umgesetzt, deren Frequenz proportional zum Meßwert ist. Während der Mittelung werden die Impulse von einem Zähler summiert. Aus dem Zählerstand, dividiert durch die Mittelungszeit, wird der Mittelwert gebildet. Der Mittelwert wird in einem Ausgaberegister gespeichert und steht als Ausgangssignal an, bis er nach Ablauf der nächsten Mittelungszeit durch den neuen Mittelwert ersetzt wird.

Die Mittelungszeit wird für alle Kanäle gemeinsam in einem Umschalter eingestellt. Möglich sind eine, zehn, dreißig, sechzig und 300 Sekunden. In der Schalterstellung „0“ werden die Momentanwerte ohne Mittelwert direkt angegeben. Diese Meßkanäle sind an den Datalogger angeschlossen.

Der Datalogger kann weitere zehn Kanäle aufnehmen. Sie sind belegt für das Datum, die Uhrzeit, die Schützstellungen des Spülsiels und die Kontrollwerte aus den Sedimentmessungen, wie Pumpenleistung und Zellendruck, sowie Signale aus den optischen Schwebstoffmessungen.

Die Meßdaten werden auf sogenannten Drei-M-Kassetten aufgezeichnet, die eine Speicherkapazität von rund 4 Mio Byte entsprechend 250 000 Meßwerten besitzen.

Für das Einlesen der umfangreichen Daten in den amtseigenen Rechner – Typ Commodore 8096 – wurde ein Leseprogramm entwickelt. Mit Hilfe dieses Computerprogramms können sämtliche Daten geordnet auf dem Bildschirm des Rechners abgerufen und in tabellarischer Form ausgedruckt werden. Außerdem werden die Wasserstands-, Strömungs- und Schwebstoffganglinien mit Hilfe eines Plotters gezeichnet und statistisch ausgewertet.

### 3.3 Hydrometrische Untersuchungen

#### 3.3.1 Wasserstände

Da die Außentiefquerschnitte im Verhältnis zur Breite des von und nach Baltrum verkehrenden Fährschiffes sehr eng sind und außerdem mit Verlagerungen des Außentiefs zu rechnen war, wurde auf die Errichtung von festen Schwimmerpegeln verzichtet. Statt dessen

wurden platzsparende, leicht zu montierende Drucksonden für die Wasserstandsmessungen verwendet. Die Drucksonden – Typ SETRA 204 – (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982) sind in robuste PVC-Gehäuse eingebaut. Der Wassereinlaß erfolgt durch einen bewuchsgeschützten Ringspalt. Der Druck wird über eine Membran und über Silikonöl auf den Meßwertgeber (Druckdose) übertragen. Die Druckdose besteht aus einem geschlossenen Edelstahlblock und einer zentralbefestigten, isolierten, plattenförmigen Elektrode, die zusammen eine veränderliche Kapazität bilden. Mit steigendem Druck wird die Kapazität kleiner. Diese Kapazitätsänderung wird elektronisch in ein lineares Gleichspannungssignal umgewandelt, das in einen eingprägten Strom (0 . . . 20 mA) umgesetzt wird.

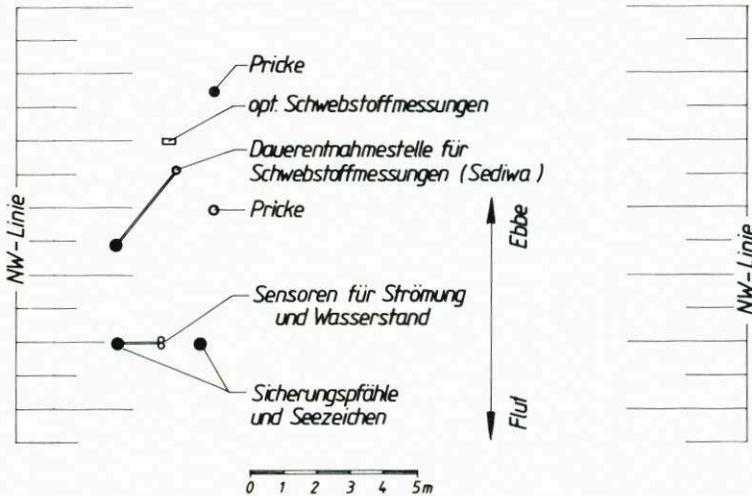


Abb. 3.3. Anordnung der Meßgeräte an Meßstelle II

Die Sensoren werden über Seekabel mit Strom versorgt, ebenso werden die Meßdaten über das gleiche Seekabel zur beschriebenen Zentralstation am Spülsiel übertragen. Die Anordnung der Meßeinrichtung ist aus Abb. 3.3 zu ersehen.

Da die Sensoren aus Gründen der Betriebssicherheit in Meßwertgebern für Absolutdruck ausgerüstet sind, müssen ihre Ausgangssignale für den jeweiligen Luftdruck korrigiert werden, damit eine Pegelmessung möglich wird. Bei Absolutdruckgebern über diese Korrektur würde eine Luftdruckänderung von z. B. 10 mbar eine Wasserstandsänderung von ca. 10 cm vortäuschen.

Die Drucksonden werden durch Vergleichsablesung des an der jeweiligen Meßstelle angebrachten Lattenpegels kalibriert.

### 3.3.2 Strömungen

Die Strömungssensoren arbeiten nach dem magnetohydrodynamischen Prinzip (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982). Die Strömung induziert in einem elektromagnetischen Feld zwischen zwei Elektroden eine proportionale Spannung. Durch Anordnung von zwei in ihrer Achse senkrecht aufeinander stehenden Elektrodenpaaren werden die x- und y-Komponenten der durch die Elektrodenanordnung gegebenen Ebene gemessen. Der Meßbereich beträgt  $-5$  bis  $+5$  m/s und die Meßwerthäufigkeit 40 Werte je Sekunde.

Mit den Strömungssensoren wird die Fließgeschwindigkeit an einem festliegenden Punkt im Querschnitt gemessen. Um die Beziehung zur mittleren Geschwindigkeit über die Querschnittsbreite und -tiefe zu erhalten, sind zusätzlich Strömungsmessungen mit dem Ott'schen Meßflügel durchgeführt worden (Abb. 3.4). Von der Meßbühne eines schwenkbaren Meßauslegers wurden die Strömungsmessungen in drei Meßlotrechten über die gesamte Außentief-



Abb. 3.4. Strömungs- und Schwebstoffmessungen vom Meßausleger über den Außentiefquerschnitt

breite von jeweils drei Tiefenstufen mit einem Zeitabstand von 10 Minuten, bzw. während der Spülphase von 5 Minuten, jeweils eine Tide lang durchgeführt. Die berechneten mittleren Querschnittsgeschwindigkeiten wurden zu der am Sensorkopf erfaßten Strömungsgeschwindigkeit in Beziehung gesetzt. Der Sensorwert konnte als repräsentativer Wert mit ausreichender Genauigkeit gewertet werden.

### 3.4 Schwebstoffmessung

#### 3.4.1 Einsatz der Sedimentwaage (Sediwa)

Für eine kontinuierliche Dauermessung der instationären Sedimentbewegungen im Außentief wurde die neue vollautomatische Sedimentwaage (Sediwa) eingesetzt. Meßgeräte und Meßverfahren sind im Beitrag von RENGER und BEDNARCZYK in diesem Heft und dem dort angegebenen Schrifttum eingehend beschrieben. Die gewählte Anordnung einer Dauermeßstation ist in Abb. 3.2 dargestellt.

Das Gesamtgerät ist für den Unterwassereinsatz ausgelegt. Das Seewasser einschl. dessen Schwebstoffe werden durch eine Kreiselpumpe zu einem Hydrozyklon befördert, der das

Meßgut separiert und den eingedickten Suspensionsstrom in das Meßgerät der Unterwasserwaage führt. Das Gewicht wird in einer Halbleiter-DMS-Meßzelle kontinuierlich bestimmt. Nach Erreichen einer eingestellten Gewichtsschwelle wird das Meßgefäß automatisch gespült. Die Pumpe wird per Kabel mit Strom versorgt; ebenso werden die Meßdaten per Kabeltelemetrie zur Zentralstation übertragen. Die Zentralstation enthält die Elektronik der Kabeltelemetrie, einen Mikroprozessor und die Steuereinrichtung für die Meßabläufe (Meerestechnik-Elektronik, 1983). Die Meß- und Kontrolldaten werden auf Registrierpapier aufgezeichnet und auf Magnetband des beschriebenen Dataloggers gespeichert.

Die an den Meßstellen II und III durchgeführten Dauermessungen lieferten wertvolle Meßergebnisse. Die Praxis des Meßeinsatzes unter Seebedingungen hat jedoch auch gezeigt, daß das Meßgerät Sediwa einen hohen Unterhaltungsaufwand erfordert und insbesondere die Pumpen einem hohen Verschleiß unterliegen. Das Feinstkorn  $\varnothing < 5 \mu$  wird von diesem Gerät nicht erfasst (RENGER, 1982).

Um während der Hauptmessungen durchgehende Meßreihen zu erhalten, wurde an Meßstelle II zusätzlich ein optisches Schwebstoffmeßgerät eingesetzt.

### 3.4.2 Vergleichende optische Schwebstoffmessungen

Das Attenuationsmeßgerät (Trübungsmeßgerät) zeichnet sich aus durch eine mechanisch robuste und kompakte Konstruktion. Es arbeitet mit Gleichlicht und gegenüberliegenden Fenstern. Die Meßstrecke zwischen den Fenstern beträgt 10 mm (Abb. 3.5). Das Meßsignal wird im Unterwasserteil in eine Frequenz gewandelt und damit der Betrieb mit Einleiterkabel

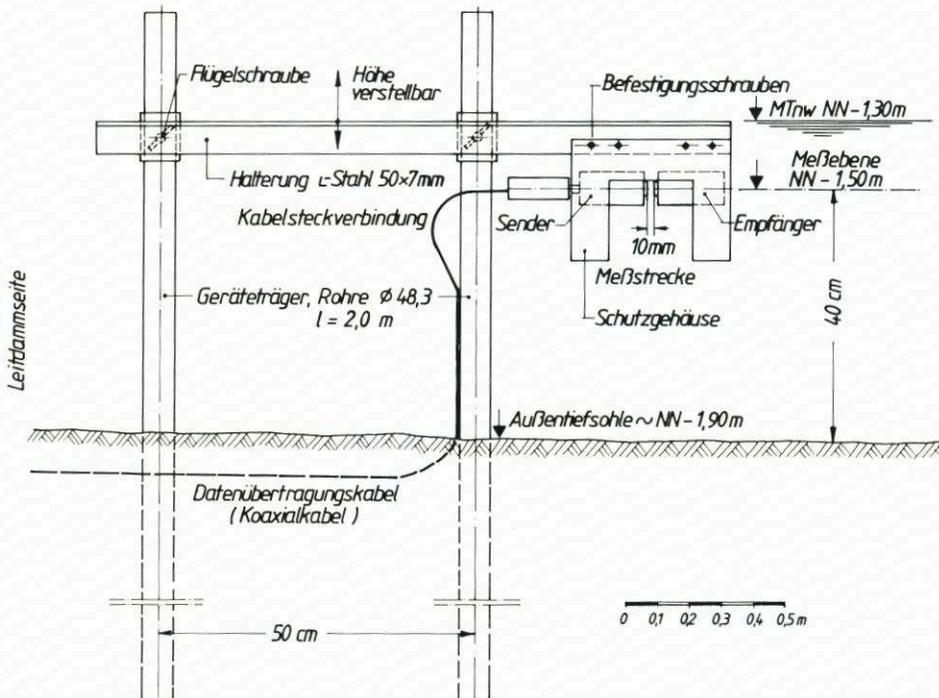


Abb. 3.5. Optisches Schwebstoffmeßgerät (Extinktionsmeßgerät) mit Halteungsvorrichtung im Außentief (Meßstelle II)

ermöglicht. Die in das Wasser eingeleiteten Lichtstrahlen, die entlang der Meßstrecke auf absorbierende oder streuende Partikel treffen, erreichen nicht den Empfänger. Diese Lichtschwächung wird gemessen und als elektronisches Signal wiedergegeben. Das Gerät arbeitet im Bereich von 1024 bis 2048 Hz. Die volle Frequenz von 2048 Hz wird im klaren Wasser wiedergegeben, in sehr trübem Wasser nur noch 1024 Hz.

Der empfangene Strahlungsfluß  $F_t$  wird gemessen und durch den eingestrahnten Strahlungsfluß  $F_o$  geteilt. Dieser Wert wird Transmission  $T$  genannt.

Der negative natürliche Logarithmus der Transmission ergibt, bezogen auf die Strecke  $L$ , den Attenuationskoeffizienten  $c$ .

$$T = F_t/F_o \tag{1}$$

$$c = (- \ln T)/L [m^{-1}] \tag{2}$$

Der Meßfehler des Attenuationskoeffizienten durch Vorwärtsstreuung wird auf 5 % geschätzt (OHM, 1974).

Vergleichbare optische Schwebstoffmessungen während des Spülbetriebs an Meßstelle II mit den Meßwerten der Sedimentwaage (Sediwa) ergeben die in Abb. 3.6 dargestellte mittlere Regressionskurve zwischen Attenuation in Prozent und dem Schwebstoffgehalt in mg/l. Für die Korrelationsrechnung wurden nur Meßwerte nach Erreichen der maximalen Geschwindigkeit berücksichtigt, um Beschleunigungseinflüsse nach Beginn der Spülung auszuschließen.

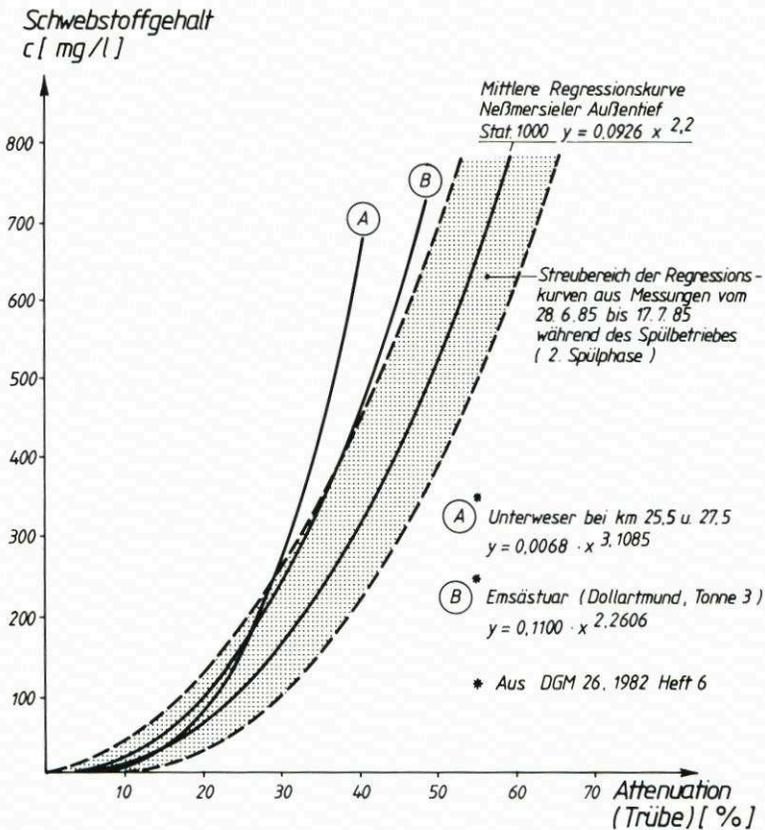


Abb. 3.6. Abhängigkeit zwischen Attenuation aus optischen Messungen und Schwebstoffgehalt aus Messungen mit der Sedimentwaage (Sediwa)

Für verschiedene Spülereignisse ergeben sich unterschiedliche Funktionen, vermutlich bedingt durch unterschiedliche Kornverteilungen. Die für die einzelne Funktion errechneten Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,8 und 0,93. Zum Vergleich sind hierzu Regressionskurven für die Unterweser und Ems (Dollart) aufgetragen (REINEMANN u. a., 1982).

Optische Schwebstoffmessungen haben den Nachteil, daß der Bezug zu Schwebstoffgewichten nur für gleiche Schwebstoffkorngrößen oder -verteilungen gültig ist. Ein hoher biologischer Anteil der Schwebstoffzusammensetzung, z. B. nach starkem Algenwachstum, erhöht die Trübe auch in dem Fall gleichbleibender Schwebstoffkonzentrationen. Vergleichsmessungen sind daher nur für einen begrenzten Zeitraum maßgebend. Diese Bedingung konnte in Neßmersiel weitgehend erfüllt werden. Im Unterschied zur Sediwa werden auch die Feinteile  $< 5 \mu$  mit erfaßt.

#### 4. Einflußfaktoren auf den Schwebstoffgehalt

##### 4.1 Schwebstoffgehalt bei unbeeinflussten Tideströmungen

###### 4.1.1 Unbeeinflusste Tideströmungen

Unter unbeeinflussten Tideströmungen soll in diesem Zusammenhang der natürliche Flut- bzw. Ebbstrom ohne Einfluß durch Wind, Schiffsverkehr oder Auslassen von Speicherwasser verstanden werden. Hierzu ist der mittlere Tideverlauf im Neßmersieler Außentief untersucht worden.

Die Strömungsmessungen haben ergeben, daß der Ebbstrom nach Kenterung nur langsam zunimmt und im mittleren Bereich des Außentiefs Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,3 m/s erreicht. Zum Leitdammende hin erhöht sich das Maximum der Ebbstromgeschwindigkeit auf 0,4 bis 0,6 m/s.

Der natürliche Flutstrom dagegen ist an Meßstelle III nur geringfügig höher als an Meßstelle II. Infolge des steilen Wasserstandsanstiegs werden in Einzelfällen hohe Flutstromspitzen bis zu einem Meter pro Sekunde gemessen.

Für ein Tnw von NN  $-1,50$  m an Meßstelle III zeigt der Analogschrieb (Abb. 4.4) 45 Minuten nach Tnw an Meßstelle II eine Flutstromspitze von 1,0 m/s. Außer den Wasserständen und Strömungen enthält Abb. 4.4 die Ganglinien des Schwebstoffgehalts und der Durchflußmenge durch das Spülsiel. Zur Zeit des Flutstrommaximums beträgt in diesem Beispiel das Fließgefälle vom Leitdammende (Meßstelle III) bis zum Hafen (Meßstelle I) rd. 25 cm entsprechend 25‰. Bei diesem relativ niedrigen Tnw läuft der erste Flutstrom ähnlich einer Bore durch das Außentief und füllt zunächst das Hafenbecken. Die in das Außentief fließende Wassermenge nimmt mit steigendem Wasserstand zu, bis schließlich das mit hoher Fließgeschwindigkeit einfließende Wasser im Hafenbecken kurzzeitig höher als am Leuchfeuer aufläuft und darauf die Fließgeschwindigkeit an Meßstelle II bis auf 0,1 m/s abfällt. Dieser Schwingungsvorgang ist an Meßstelle II ausgeprägter als an Meßstelle III und wiederholt sich noch einmal in gedämpfter Form bei einem Wasserstand um NN, bis schließlich die seitlich angrenzenden Wattflächen überflutet werden und sich ein Flutstrom von 0,3 bis 0,4 m/s einstellt.

Diese Messungen belegen, daß der Flutstrom im Neßmersieler Außentief deutlich überwiegt. Messungen aus dem Jahre 1979, vor Beginn der Außentiefspülungen (BLANKENSTEIN u. a., 1984), ergeben ebenfalls, daß der Bereich des Neßmersieler Außentiefs „flutstromorientiert“ ist.

#### 4.1.2 Schwebstoffeintrag durch Tideströmung

Während der oben beschriebenen Phase des Flutstroms kurz nach  $T_{nw}$  ist das Wasser mit sehr viel Schwebstoffen angereichert. Im Beispiel Abb. 4.4 beträgt die maximale Schwebstoffkonzentration 700 mg/l an Meßstelle II. Diese Schwebstoffe setzen sich nach Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Außentief bzw. Hafenbecken ab.

Die bisher ausgewerteten Schwebstoff-Parallelmessungen an Meßstelle II und III zeigen, daß der Schwebstoffgehalt während der Flutstromspitzen an beiden Meßstellen etwa gleich hoch ist. In einem Einzelfall wurden allerdings auch wesentlich höhere Schwebstoffkonzentrationen an der Meßstelle III gemessen.

Die natürliche Ebbstromgeschwindigkeit reicht an der äußeren Meßstelle III zeitweilig aus, um Sedimente in Suspension zu versetzen. Für die Meßstelle II kann diese Aussage nach den Messungen mit der automatischen Sedimentwaage (Sediwa) nicht bestätigt werden.

Die Dauermessungen zeigen, daß durch die natürlichen, unbeeinflussten Tideströmungen mehr Schwebstoff in das Außentief hinein- als heraustransportiert wird.

#### 4.1.3 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Schubspannung

Im Zusammenhang dieser Untersuchungen ist auch die infolge der Räumströmung wirkende, tangential an der Sohle des Außentiefs angreifende Schub- oder Schleppspannung  $\tau_0$  ermittelt worden. Die Schubspannung ist linear abhängig vom Wasserspiegelgefälle und hydraulischen Radius (ZANKE, 1982).

$$\tau_0 = \rho \times g \times R \times I \quad [\text{N/m}^2] \quad (3)$$

|     |                             |                   |
|-----|-----------------------------|-------------------|
| Mit | $\rho$ = Dichte des Wassers | $[\text{kg/m}^3]$ |
|     | $g$ = Erdbeschleunigung     | $[\text{m/s}^2]$  |
|     | $R$ = Hydraulischer Radius  | $[\text{m}]$      |
|     | $I$ = Spiegelgefälle        | $[-]$             |

Für die Untersuchung der Schubspannung an Meßstelle II ist das mittlere Wasserspiegelgefälle zwischen Meßstelle I und III ermittelt und der hydraulische Radius vereinfacht mit der mittleren Wassertiefe über der Außentiefsohle gleichgesetzt worden. Entsprechend der o. g. Grenzwerte für die kritische Geschwindigkeit können Grenzs Schubspannungen angegeben werden. Nach ersten Untersuchungen ist für eine wirksame Räumung von Außentiefs des Typs Neßmersiel zu fordern, daß die Grenzs Schubspannung von  $\tau_c = 1,6 \text{ N/m}^2$  wesentlich überschritten wird. Dieser Frage der kritischen Schubspannung oder Grenzs Schleppspannung soll in weiteren Messungen und Untersuchungen noch vertiefend nachgegangen werden.

### 4.2 Wirkung der Spülströmung

#### 4.2.1 Spülbeeinflusste Strömungen

Die Auswertung der durch die Spülungen beeinflussten Strömungsmeßwerte ergibt, daß der Ebbstrom gegenüber dem Flutstrom deutlich überwiegt. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten nehmen während des i. M. etwa drei Stunden andauernden Spülvorgangs auf Werte zwischen 0,6 und 1,1 m/s auf der gesamten Außentiefenlänge zu. Während des Meßzeitraums vom Juli bis Oktober 1985 wurden z. B. 80 % aller Tiden durch Spülungen beeinflusst.

Tabelle 2. Strömungsparameter 24. 6. bis 13. 10. 1985

| Zeitraum           | Häufigkeit der Spülungen bez. auf die Anzahl der Tiden (%) | $V_i$ (m/s) |            |            | $V_e$ (m/s) |            |            | $\int V_i dt : \int V_e dt$ |            |           | Überschreitungshäufigkeit $V_e > 0,4$ m/s (%) |           | Überschreitungshäufigkeit $V_i > 0,4$ m/s (%) |  |
|--------------------|------------------------------------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-----------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|--|
|                    |                                                            | Meßst. II   | Meßst. III | Meßst. III | Meßst. II   | Meßst. III | Meßst. III | Meßst. II                   | Meßst. III | Meßst. II | Meßst. III                                    | Meßst. II | Meßst. III                                    |  |
| 24. 06.-21. 07. 85 | 96                                                         | 0,16        | 0,18       | 0,30       | 0,28        | 0,28       | 1:2,6      | 1:3,7                       | 0,7        | 1,4       | 14,3                                          | 18,4      |                                               |  |
| 22. 07.-18. 08. 85 | 85                                                         | 0,15        | 0,19       | 0,28       | 0,27        | 0,27       | 1:2,0      | 1:3,5                       | 0,9        | 2,0       | 13,1                                          | 17,1      |                                               |  |
| 19. 08.-15. 09. 85 | 84                                                         | 0,13        | 0,18       | 0,23       | 0,24        | 0,24       | 1:2,5      | 1:3,0                       | 0,4        | 1,9       | 9,6                                           | 13,0      |                                               |  |
| 16. 09.-13. 10. 85 | 55                                                         | 0,12        | 0,20       | 0,12       | 0,23        | 0,23       | 1:1,4      | 1:2,6                       | 1,0        | 2,3       | 1,1                                           | 13,0      |                                               |  |
| Mittelwert         | 80                                                         | 0,14        | 0,19       | 0,23       | 0,25        | 0,25       | 1:2,2      | 1:3,2                       | 0,7        | 1,9       | 9,5                                           | 15,4      |                                               |  |

Die Ebbstromgeschwindigkeit von 0,5 m/s wurde dabei i. M. 1,5 Stunden lang überschritten. Die jeweilige Dauer und Größe der künstlich erhöhten Ebbströmung ist sehr stark abhängig von dem nicht zu beeinflussenden natürlichen Tideverlauf an der Einmündung des Neßmersieler Außentiefs zur Neßmersieler Balje und der jeweils gewählten Steuerung des Spülsiels (Abschn. 4.2.4).

Wie unter Abschn. 4.1 beschrieben, überwiegt in unbeeinflussten Tiden der Flutstrom. Nach Messungen aus dem Jahre 1979 (BLANKENSTEIN u. a., 1984) beläuft sich der Verhältniswert der Stromintegrale (Flutstromintegral zu Ebbstromintegral) auf 1:0,8 im mittleren Bereich des Außentiefs. Infolge der Spülwasserzugabe kehrt sich der Verhältniswert der Stromintegrale um und wird für den Meßzeitraum 1985 zu 1:2,2 im mittleren Bereich des Außentiefs (Meßstelle II) und 1:3,2 an Meßstelle III (Tab. 2).

#### 4.2.2 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit

Wenn die Geschwindigkeit eines Stromes über einem aus Einzelkörnern gebildeten ebenen Bett langsam gesteigert wird, setzen sich bei der sogenannten kritischen Geschwindigkeit die ersten Körner in Bewegung. Für die Bemessung von Spülströmen für Außentieferräumung ist dieser Wert von Bedeutung.

Die kritische Geschwindigkeit ist u. a. abhängig von Korndurchmesser, von der Lagerungsdichte und ggf. von einer vorhandenen Kohäsion bzw. biologischen Verfestigung (FÜHRBÖTER, 1983). Die Untersuchung von Sedimentproben, die an den Meßstellen entnommen wurden, ergab mittlere Korndurchmesser zwischen 0,06 und 0,11 mm für ein von feinem Schlick freigespültes Außentief.

Schwebstoffgehalt [ mg/l ]

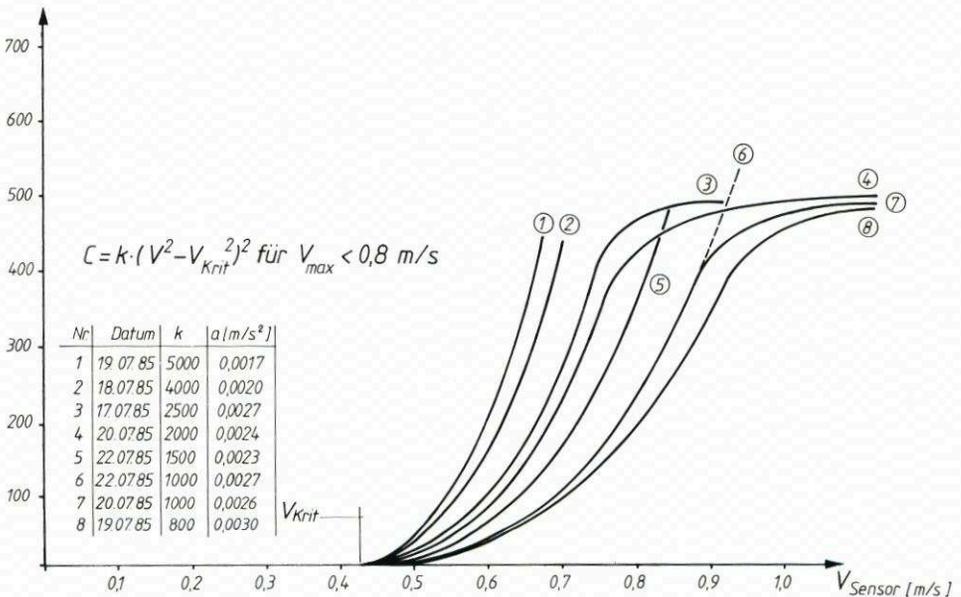


Abb. 4.1. Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit und Beschleunigung des Spülstromes

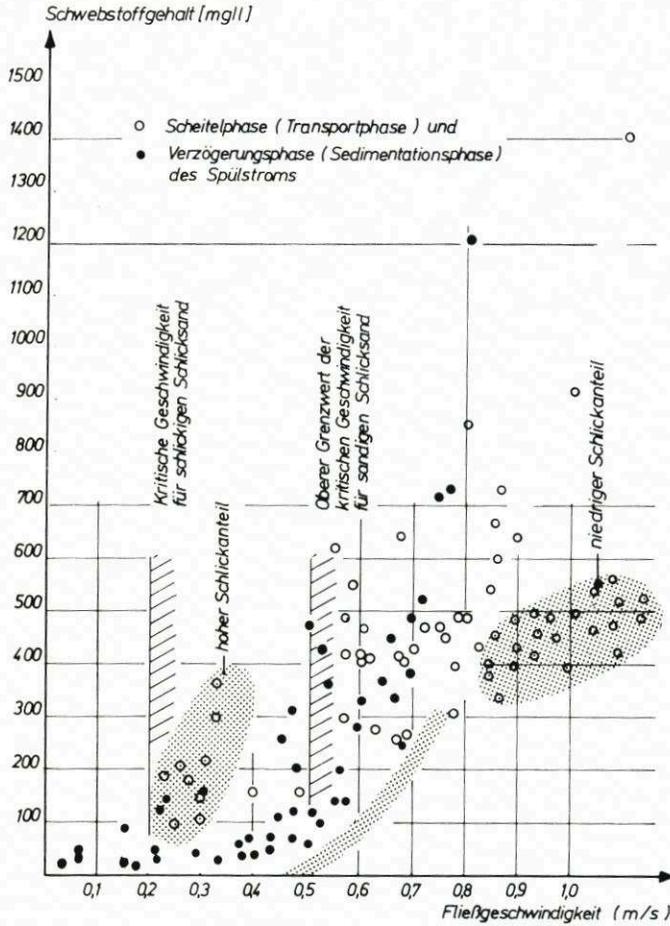


Abb. 4.2. Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit

Die kritische Geschwindigkeit für ein unverfestigtes steriles Material dieser Korngröße liegt nach SHIELDS um 0,18 m/s (ZANKE, 1982). Nach den vorliegenden Meßergebnissen liegt der Bewegungsbeginn von Sedimenten in dem vom Schlick freigespülten Neßmersieler Außentief zwischen 0,4 und 0,5 m/s (Abb. 4.1 und 4.2). Daher ist für die Räumung des Neßmersieler Außentiefs eine Mindestspülgeschwindigkeit zu fordern, die 0,5 m/s deutlich überschreitet. Für diesen Bereich wurde der Zusammenhang zwischen Schwebstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit untersucht. Aus theoretischen Ansätzen ist folgende Beziehung bekannt:

$$c = k \times (v^2 - v_{\text{krit}}^2)^2 \text{ (mg/l)} \quad (4)$$

- $c$  = Schwebstoffgrammkonzentration (mg/l)  
 $v$  = Fließgeschwindigkeit (m/s)  
 $v_{\text{krit}}$  = kritische Geschwindigkeit (m/s)  
 $k$  = Konstante

Diese untersuchte Beziehung gilt nur für Geschwindigkeiten < 0,8 m/s, da in den Meßreihen nach Überschreitung dieser Geschwindigkeit keine weitere Schwebstoffzunahme

zu verzeichnen war. Der Faktor  $k$  ist abhängig von der Beschleunigung des Spülstroms und liegt für die Meßwerte vom Juli 1985 zwischen 800 und 5000 (Abb.4.1). Je größer die Geschwindigkeitszunahme bei Spülbeginn ist, desto kleiner wird  $k$ , d. h., daß die Schwebstoffkonzentration langsamer zunimmt.

Die in Abb. 4.1 dargestellten Zusammenhänge gelten nur für ein Außentief ohne frische Schlickablagerungen, wie es im Juli 1985 vorlag.

Im Jahre 1984 wurde der Spülbetrieb für eineinhalb Monate ausgesetzt und anschließend das Verhalten des frisch abgelagerten Schlicks untersucht. Die Messungen des Schwebstoffgehalts an Meßstelle II zeigten, daß das frisch abgelagerte schlickige Material bereits ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,2 m/s erodiert und in Schwebeliege bleibt. In Abb. 4.2 sind Meßwerte des Schwebstoffgehaltes in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit aus der Scheitelphase und der Verzögerungsphase des Spülstroms aufgetragen. Mit abnehmender Fließgeschwindigkeit nimmt das Transportvermögen des Spülstroms deutlich ab. Abb.4.2 enthält ebenfalls die Meßwerte für den Außentiefzustand ohne frische Schlickablagerungen.

### 4.2.3 Optimierung der Räumwirkung

Zur Optimierung des Spülbetriebes in Neßmersiel wurden in den Hauptmessungen die Spülwassermenge sowie der Spülbeginn in Abhängigkeit zum Außenwasserstand variiert. Die Untersuchungen zur Optimierung der Räumwirkung sind noch nicht abgeschlossen. Einige grundsätzliche Erkenntnisse und Erfahrungen sollen hier anhand von Beispielen erläutert werden:

Für eine effektive Räumung des Außentiefs muß die Ebbstromgeschwindigkeit durch Auslassen von Spülwasser über einen möglichst langen Zeitraum die kritische Geschwindigkeit überschreiten. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichend bemessene Spülwassermenge und ein niedriger Wasserstand im Außentief. Um eine möglichst lange Räumphase und

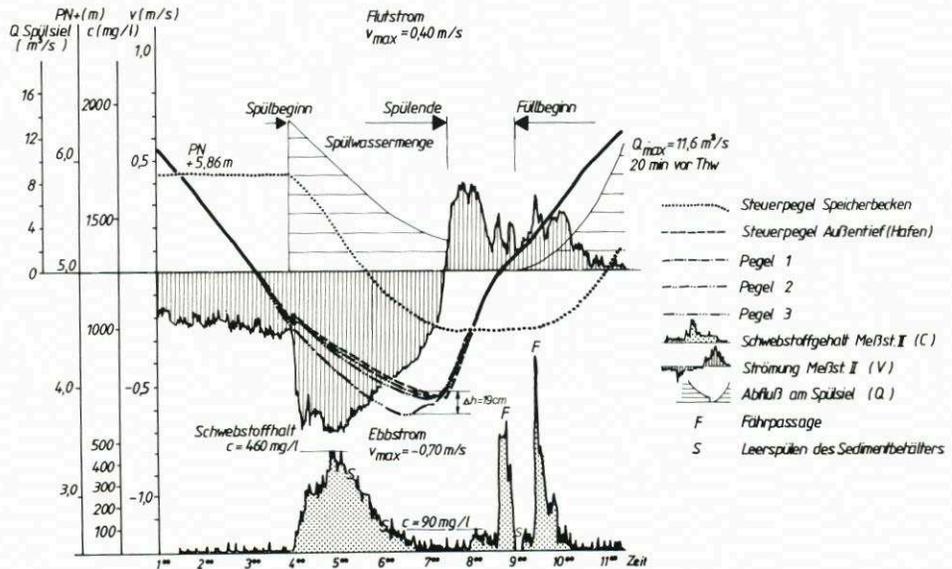


Abb. 4.3. Auszug aus den Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und Schwebstoffgehalte am 28. 7. 1984

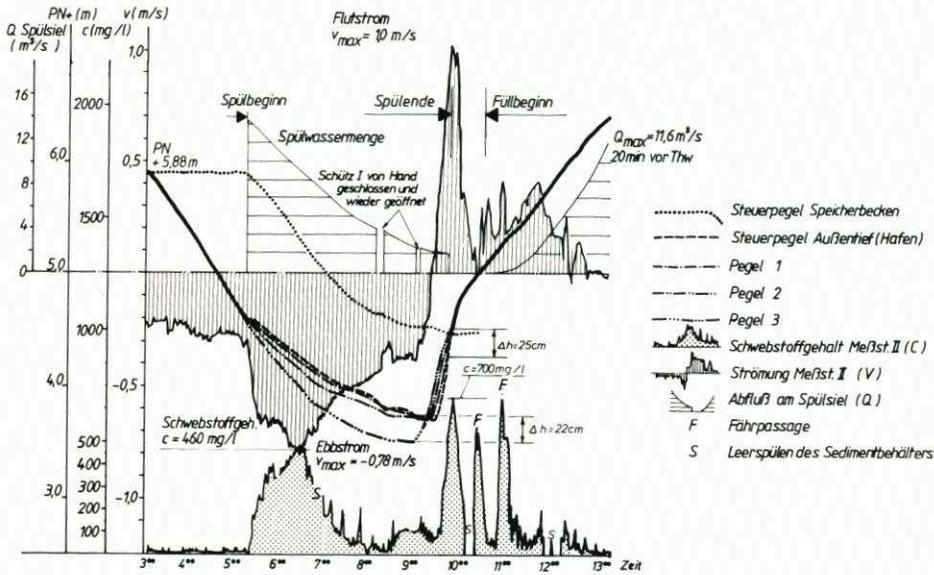


Abb. 4.4. Auszug aus den Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und Schwebstoffgehalte am 30. 7. 1984

ausreichend lange Transportwege (Stromwege) zu erreichen, muß möglichst früh vor dem Niedrigwasser mit dem Spülen begonnen werden, damit sich das erforderliche Fließgefälle über einen längeren Zeitraum einstellen kann und das mitgeführte Material nicht mehr im Außentief ausfällt.

Diese Zusammenhänge sollen anhand der Ganglinien auf Abb. 4.3 und 4.4 erläutert werden: Bei einem Spülbeckenwasserstand von etwa PN + 5,9 m und einem Außenwasserstand von PN + 4,6 m wird mit dem Spülen im Falle a) (Abb. 4.3) ca. 2,5 Stunden bzw. im Falle b) (Abb. 4.4) bereits 3,7 Stunden vor Niedrigwasser aufgrund der erniedrigten Tidekurve besonders früh begonnen. Während der ersten zwei Spülstunden mit hohem Sieldurchfluß wird die kritische Geschwindigkeit von 0,5 m/s wesentlich überschritten. Im Fall a) wird eine maximale Geschwindigkeit von 0,7 m/s und im Fall b) von 0,78 m/s erreicht. Im Fall b) wird eine höhere Geschwindigkeitsspitze erreicht, da das Niedrigwasser um 20 cm unter dem normalen Tnw abfällt und sich somit ein größeres Fließgefälle einstellen kann. Das Geschwindigkeitsmaximum wird bei einem Gefälle im Fall a) von 0,19 ‰ und b) von 0,22 ‰ zwischen den Meßstellen I und III erreicht. In beiden Fällen wurde an Meßstelle II ein maximaler Schwebstoffgehalt von 460 mg/l gemessen. Die Dauer der hohen Schwebstoffkonzentration beträgt etwa 2,5 Stunden. Darüber hinaus wird durch die längere Spülphase in b) noch über eine Stunde lang eine nur wenig erhöhte Schwebstoffkonzentration bis zu 100 mg/l (Abb. 4.4) gemessen. Mit dem Spülstrom werden im Falle a) 42 t und im Falle b) 53 t seewärts verfrachtet.

Aufgrund vorliegender Messungen bringt es keinen Vorteil, bei einem höheren Außenwasserstand als PN + 4,6 m mit dem Spülen zu beginnen. Zu dieser Zeit 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 kleiner Geschwindigkeit abfließen. Das Wasserspiegelgefälle und das Stromarbeitsvermögen erreichen daher keine optimalen Werte. Außerdem herrscht am Siel bei einem höheren Außenwasserstand ein geringeres Gefälle und somit ein geringerer Durchfluß.

Es hat sich gezeigt, daß durch einen Spülbeginn bei einem Wasserstand von  $PN + 4,3$  m, also um 30 cm niedriger als in den oben beschriebenen Beispielen, eine lange Räumphase mit wesentlich mehr als 0,5 m/s Fließgeschwindigkeit und damit eine maximale Ausräumung erreicht wird. Es wurden dabei erreicht (Meßzeitraum 1985):

Fließgeschwindigkeit 0,5 m/s über i. M. 1,8 Std.

max. Geschwindigkeit i. M. 0,85 m/s

max. Schwebstoffgehalt i. M. 580 mg/l

Schwebstofftransport während des Spülens i. M. 70 t

#### 4.2.4 Wirkung des Gegenstaus

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, treten besonders in Springtiden mit einem  $T_{nw}$  unter  $NN - 1,4$  m kurze, hohe Flutstromgeschwindigkeiten ca. eine Stunde nach  $T_{nw}$  auf. Infolgedessen werden über etwa eine halbe Stunde hohe Schwebstoffkonzentrationen in das einströmende Tidewasser eingetragen (Abb. 4.4).

Die Flutstromspitzen können gedämpft und damit der Sedimenteintrag verringert werden, wenn zu diesem Zeitpunkt noch genügend Wasser im Spülbecken für einen Gegenstau zur Verfügung steht. Dieses ist bei der vorgegebenen Spülbeckengröße dann der Fall, wenn

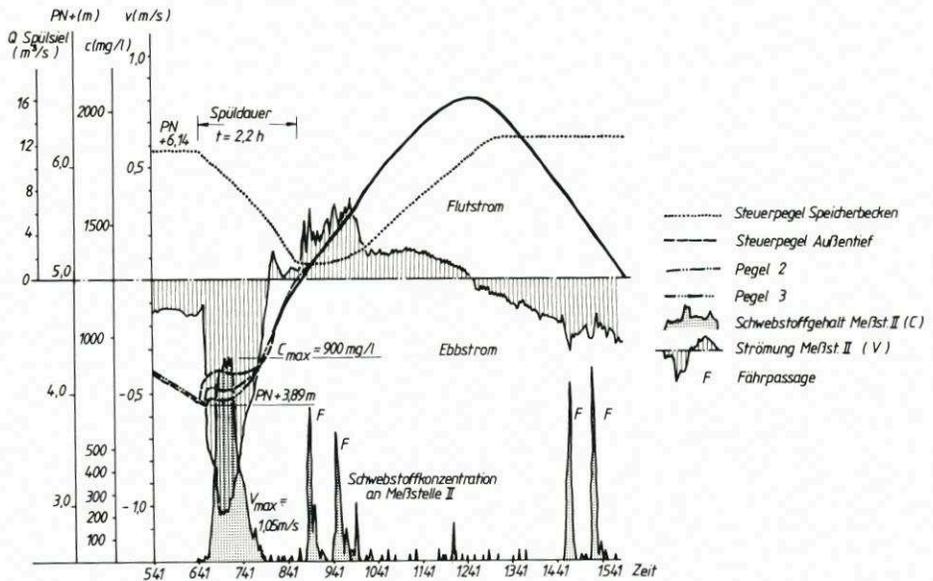


Abb. 4.5. Auszug aus den Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und Schwebstoffgehalte am 1. 8. 1985

zuvor entweder mit geringer Spülwassermenge gedrosselt (kleine Schützöffnung) gespült oder erst später mit dem Spülen begonnen wird. In beiden Fällen ist die Räumwirkung nicht sehr groß.

Für den Gegenstaubetrieb ist ein entsprechend später Spülbeginn (z. B. Außenwasserstand  $PN + 3,9$  m) in Abb. 4.5 dargestellt. Kurzzeitig wird eine hohe Spülgeschwindigkeit von  $V_{max} = 1,05$  m/s erreicht. Die kritische Geschwindigkeit von 0,4 . . . 0,5 m/s wird aber nur

eine Stunde lang überschritten. Dementsprechend wird kurzfristig ein Schwebstoffmaximum von 900 mg/l gemessen. Diese hohe Schwebstoffkonzentration wird in diesem Beispiel nur erreicht, weil genügend frisch abgelagerter Schlick im Außentief vorhanden ist. Immerhin werden etwa 25 Tonnen Schwebstoffe durch den Querschnitt an Meßstelle II seewärts transportiert. Durch den späten Spülbeginn kann während des Flutastes bis zu einem Außenwasserstand von etwa  $NN \pm 0$  mit einer Spüldauer von 2,2 Stunden gespült und die erste Flutstromspitze auf etwa 0,1 m/s Fließgeschwindigkeit gedämpft werden.

Der Gegenstau verhindert, daß die in etwa 10% der gemessenen und durch Spülung beeinflussten Tiden auftretenden hohen Flutstromspitzen ( $v \geq 0,5$  m/s) Schwebstoffe in das Außentief und den Hafbereich transportieren. Dafür muß auf einen effektiven Teil der Räumphase verzichtet werden. Ein Vergleich des Gegenstaubetriebs mit den beschriebenen Beispielen für den ausschließlichen Räumbetrieb ergibt folgende Schwebstofftransporte durch den Querschnitt an Meßstelle II. Die Schwebstofftransporte infolge Schiffsverkehr werden dabei nicht mit einbezogen.

Mit dem Spülstrom werden in Beispiel a) (Abb. 4.3) 42 t und in Beispiel b) (Abb. 4.4) 53 t seewärts transportiert. Der erste einsetzende Flutstrom trägt im Fall a) nur etwa eine Tonne und im Fall b) mit der außergewöhnlich hohen Flutstromspitze 21 Tonnen in den hafennahen Bereich des Außentiefs ein. Stellt man die in den Beispielen a) und b) ermittelten Massen dem bei großem Frischschlickangebot ermittelten Transport von 25 Tonnen aus dem Beispiel des Gegenstaubetriebes gegenüber, so läßt sich der Schluß ziehen, daß für die Gegebenheiten in Neßmersiel ein langer, effektiver Räumbetrieb dem Gegenstaubetrieb, der nur in wenigen Fällen mit hohen Flutstromspitzen eine nennenswerte Wirkung hat, vorzuziehen ist.

Der Schwebstoffeintrag in das Außentief und in den Hafen infolge Strömung, Schiffsverkehr und Seegang ist nicht durch den Spülbetrieb einflußbar. Die in diesen Fällen abgelagerten Sedimente müssen durch den Räumbetrieb wieder entfernt werden.

### 4.3 Windabhängige Seegangseinflüsse

Die die Wattoberfläche bildenden schlickig-schluffigen Sedimente werden bei Wind durch die Grundberührung des Seegangs auf dem Watt in stärkerem Maße aufgewirbelt und mit der Tiderströmung weitertransportiert.

Bei südwestlichen bis nordwestlichen Winden über 8 m/s – entsprechend 5 Bft – konnte nach Überfluten des Leitdammes (Oberkante der Krone i. M.  $NN + 0,6$  m) eine deutliche Zunahme der Schwebstoffkonzentration an der Meßstelle II im Außentief festgestellt werden. In Abb. 4.6 sind gemittelte Meßwerte des Schwebstoffgehaltes und die mittlere Windgeschwindigkeit – gemessen an der etwa 14 km entfernt liegenden Wetterwarte Norderney – aufgetragen. Die Mittelungszeiträume liegen zwischen einer und drei Stunden. Während dieser Zeit waren jeweils die Windgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration weitgehend gleichbleibend. Der Zusammenhang zwischen der aus dem Windfeld berechneten Wellenhöhe und der Schwebstoffkonzentration konnte bestätigt werden. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt die Seegangsenergie und damit auch die Turbulenzintensität zu, so daß immer mehr Schwebstoffe in das Seewasser eingetragen werden und in Schwebelassen bleiben. Bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 15 m/s aus West-Süd-West mit etwa 0,5 m signifikanter Wellenhöhe wurde ein mittlerer Schwebstoffgehalt von 640 mg/l etwa 40 cm über der Außentiefsohle gemessen (Abb. 4.6).

Angesichts dieser Meßergebnisse ist es verständlich, daß Außentiefs häufig nach sturmflutreichen Wintern verhältnismäßig stark aufgelandet sind.

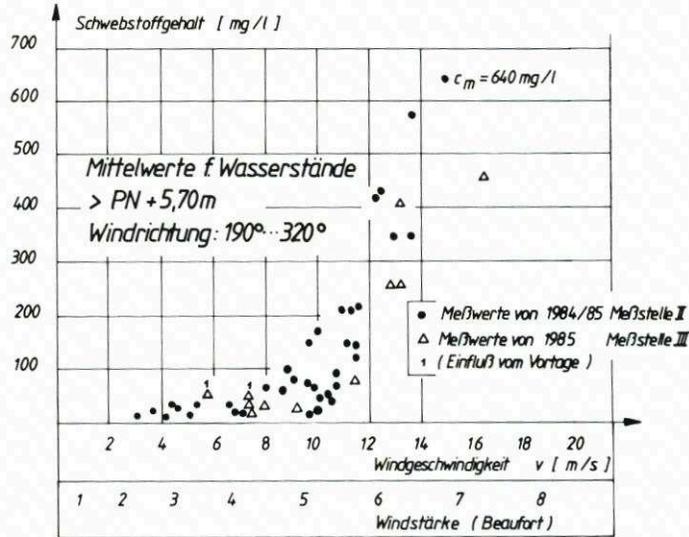


Abb. 4.6. Abhängigkeit zwischen Schwebstoffgehalt und Windgeschwindigkeit an Meßstelle II und III

#### 4.4 Schiffseinflüsse

Einen nicht unwesentlichen Einfluß auf den Schwebstofftransport hat der Schiffsverkehr in den Außentiefs. Dieser Spezialfall wird ausführlich von RENGER und BEDNARCZYK in diesem Heft behandelt. In den Abbildungen 4.3, 4.4 u. 4.5 sind deutlich die von den Ein- und Ausfahrten der nach Baltrum verkehrenden Fähre erzeugten Schwebstoffspitzen – gekennzeichnet mit „F“ – zu erkennen. Diese Sedimentumlagerungen infolge von Schiffsverkehr können sich sowohl positiv – im Sinne der Erhaltung einer Außentiefgrube – als auch sehr negativ auswirken. Negativ wirken sie sich vorwiegend im hafennahen Bereich aus, da sich hier insbesondere die bei Flutstrom mitgebrachten Schwebstoffe wegen der geringen natürlichen Tideströmung absetzen und nicht wieder heraus transportiert werden. Z. B. war nach dem eineinhalb Monate andauernden Aussetzen des Spülbetriebs im Hafengebiet eine derartige hohe Verlandung zu verzeichnen, daß diese Ablagerungen nicht mehr durch natürlichen Sedimenttransport zu erklären waren. Verursacher war hier – und das belegen die Messungen eindeutig – die für das Außentief an sich zu große Fähre, die den Tidestrom – wenn auch nur kurzfristig – mit Schwebstoffen sehr stark anreichert.

Nachteilig wirkt es sich dabei auch aus, daß die Fähre während der Flut so früh wie möglich bei gerade ausreichendem Wasserstand einfährt und damit hinsichtlich der Sedimentumlagerung besonders wirksam ist, während bei der Fahrt nach Tidehochwasser die Abfahrtszeit stets sicherer bei höherem Wasserstand kalkuliert wird, da ein während der Ebbe festkommendes Schiff nicht vor der nächsten Flut wieder frei kommt.

### 5. Veränderungen der Außentiefquerschnitte

#### 5.1 Vermessungen

Das Neßmersieler Außentief wird – wie auch die anderen Außentiefs im Amtsbereich des Bauamtes für Küstenschutz – seit 1973 regelmäßig durch Peilungen mit dem Flächenechogra-

phen des Meßschiffes „Memmert“ überwacht. Der Echograph registriert die Tiefe des Gewässerbettes in zehn Sohlen-Längsschnitten mit einem jeweiligen seitlichen Abstand von 2m, so daß das Gewässer in einer Peilfahrt auf insgesamt 20m Breite kontinuierlich erfaßt wird. Die 100-KHZ-Echolote sind am Schiffsrumpf sowie an zwei seitlichen, je 8 m langen Auslegern befestigt. Mit Hilfe der Flächenpeilungen werden Vorflut u. Schiffbarkeit der Außentiefs beurteilt sowie ggf. Baggerungen überwacht.

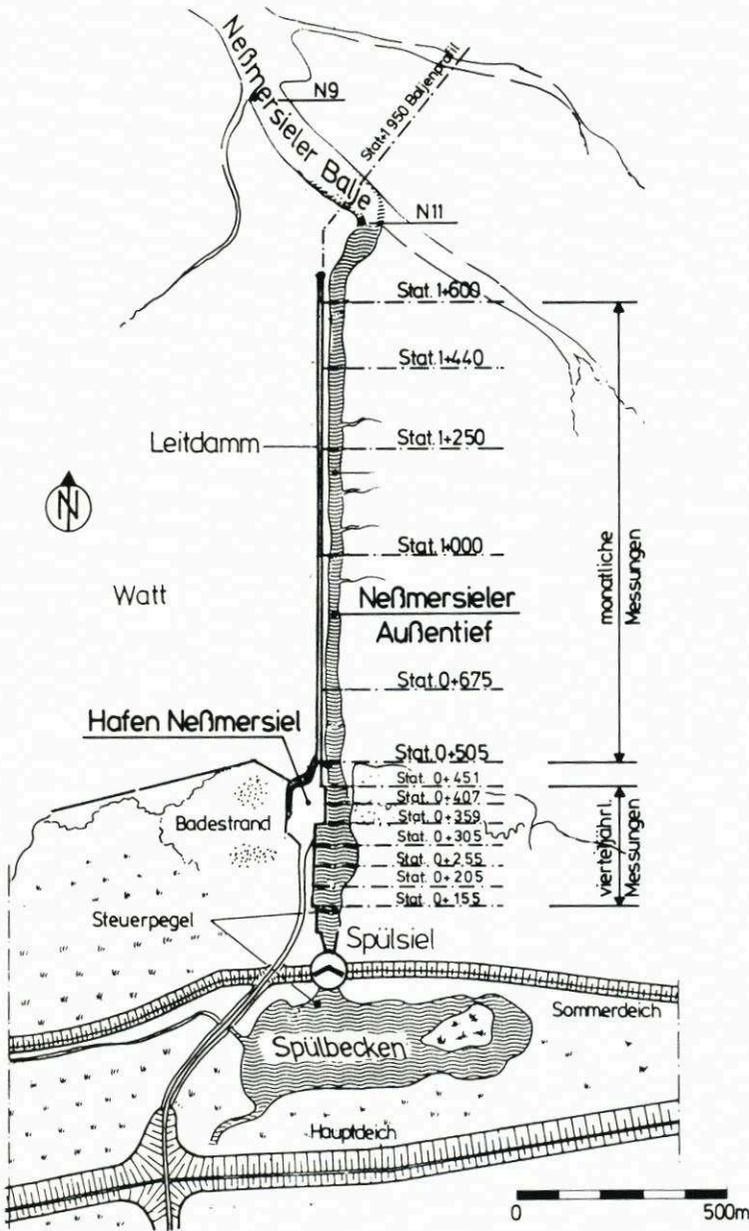
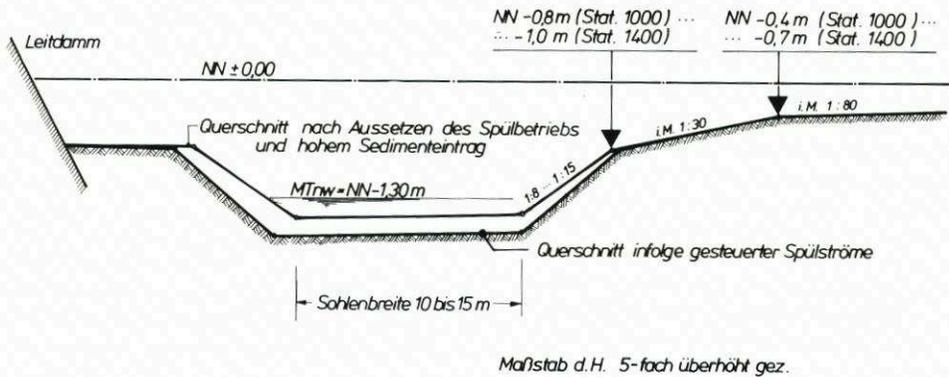


Abb. 5.1. Übersicht der regelmäßig vermessenen Außentiefprofile

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Neßmersieler Außentief zusätzlich in festgelegten Profilen nach Möglichkeit monatlich nivelliert (Abb. 5.1), um kurzfristige Veränderungen der Querschnitte mit Übergangsbereich zum Watt untersuchen zu können. In den Profilen wird alle 2 m ein Punkt gemessen. Im übrigen liefern die Nivellements genauere Werte (s. 6.3), während die Echolottiefen nur auf etwa  $\pm 1$  dm genau zu erfassen sind. Wegen des Meßzeitaufwands und der Tideabhängigkeit müssen die Nivellements auf die sechs ausgewählten Profile von Stat. 0 + 505 bis 1 + 600 beschränkt werden. Die übrigen Profile werden zwei bis dreimal pro Jahr aufgenommen.

## 5.2 Veränderungen von Außentiefsohle und -querschnitten

Die Auswirkung der gesteuerten Spülströme auf die Querschnittsform des Außentiefs ist in Abb. 5.2 schematisch dargestellt. Die Querschnittsform läßt sich durch ein Trapez angleichen. Auf der Westseite des Querschnitts liegt der Leitdamm, und nach Osten, in der Abbildung rechts, schließt sich das Watt des Einzugsgebietes an.



Maßstab d.H. 5-fach überhöht gez.

Abb. 5.2. Formparameter des Neßmersieler Außentiefs

Zunächst soll auf die Veränderung der Parameter entlang der Außentiefachse hingewiesen werden: Die Breite der Sohle nimmt mit der Entfernung zum Siel zu. Die seitlich anschließende Neigung des Trapezquerschnitts beträgt etwa 1:8 bis 1:15. Sie wird nach außen zunehmend flacher. Der anschließende Übergangsbereich zum Watt ist 1:30 bzw. 1:80 im Anschluß an das Watt geneigt. Die Böschungsknickpunkte liegen mit zunehmender Entfernung zum Siel – angepaßt an die Wattlage – niedriger. Die Außentiefquerschnitte werden offensichtlich – neben anderen Einflußfaktoren – durch die Füll- und Entleerungsvorgänge ihrer Wateinzugsgebiete beeinflusst. Sie werden mit zunehmender Entfernung vom Siel größer (Abb. 5.4, Tab. 1 in Abschn. B 2.1). Die gesteuerten Spülströme wirken sich so aus, daß sie die Sohle vertiefen und verbreitern und den unteren Bereich der Böschung steiler werden lassen. Nach Aussetzen des Spülbetriebs und dem Sedimentieren von Schwebstoffen wird der Querschnitt insgesamt wieder flacher. Diese Veränderungen der Formparameter sind besonders ausgeprägt im hafennahen Bereich, da hier die Auswirkung der gesteuerten Spülströme im Vergleich zu den natürlichen Einflußparametern größer ist.

Die langfristige Veränderung des Außentiefs läßt sich anhand der Sohlenlage darstellen, die aus den Flächenpeilungen bzw. den vorhandenen Nivellements ausgewertet worden sind. Die Höhenlage der Sohle wird aus den fünf niedrigsten Meßpunkten der Querschnitte auf 10

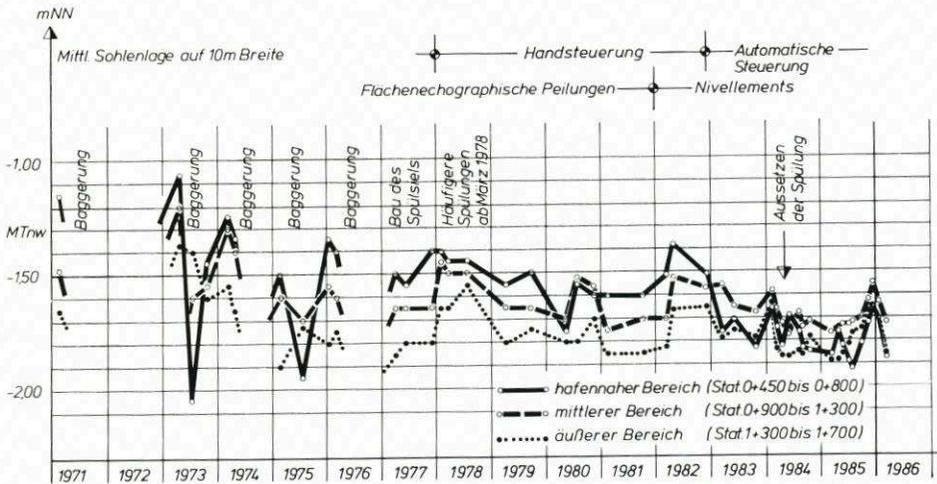


Abb. 5.3. Langfristige Entwicklung der Außentiefensole

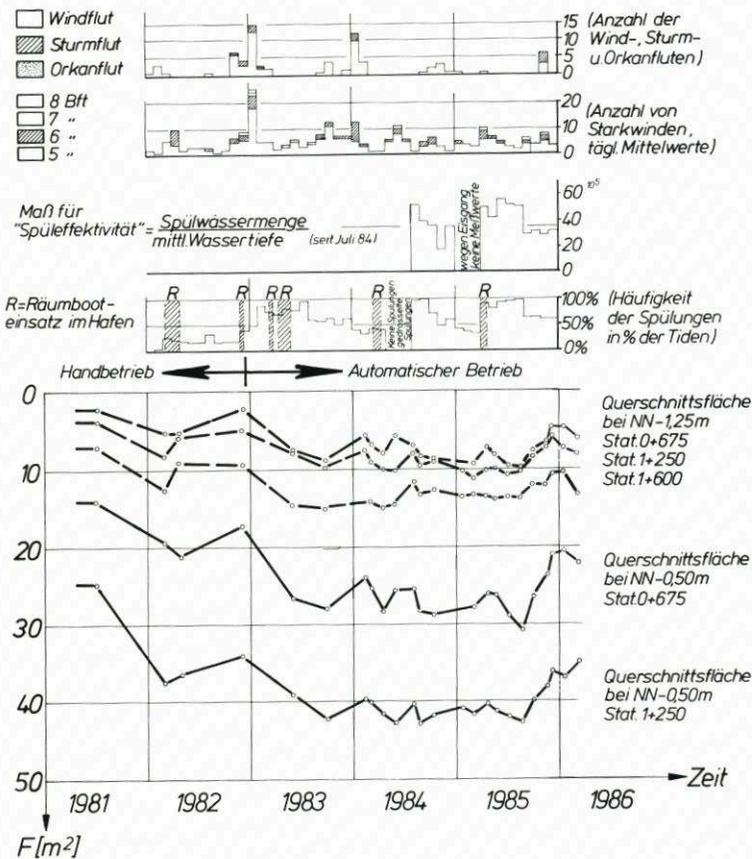


Abb. 5.4. Entwicklung der Außentiefenquerschnittsflächen

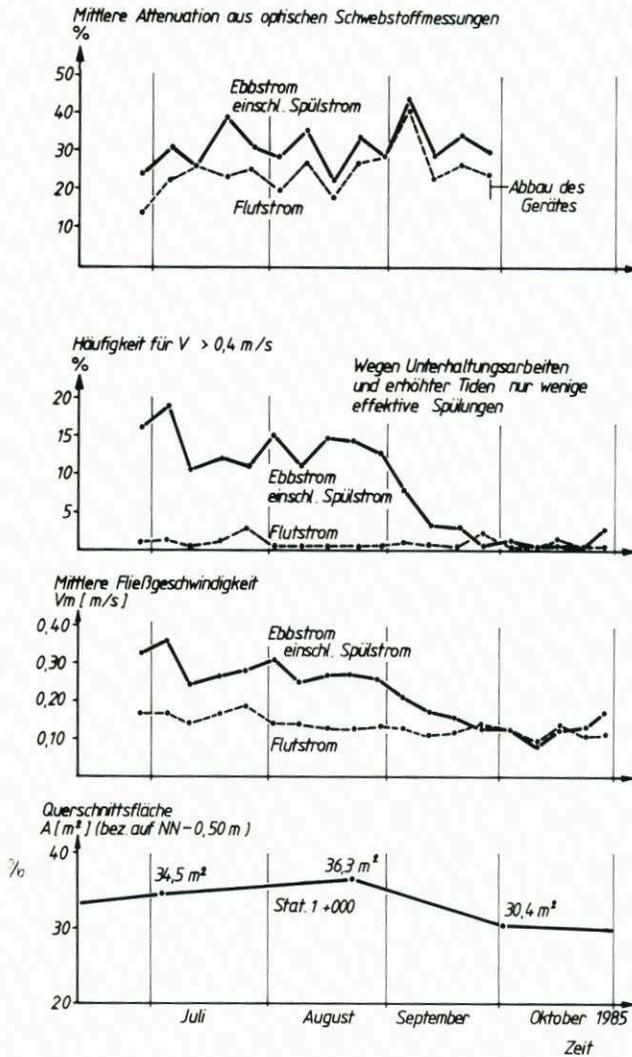


Abb. 5.5. Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung

m Gesamtbreite bestimmt. In Abb. 5.3 sind die mittleren Sohlenlagen für die Querschnitte im hafennahen (Stat. 0 + 450 bis 0 + 800), mittleren (Stat. 0 + 900 bis 1 + 300) und äußeren Bereich (Stat. 1 + 300 bis 1 + 700) des Neßmersieler Außentiefs jeweils zusammengefaßt und deren Entwicklung seit 1971 ablesbar.

Nach Einbau der automatischen Steuerung ist der hafennahe Außentiefbereich mit seinen engeren Durchflußquerschnitten stärker an der Sohle ausgeräumt worden. Im einzelnen ist die aus den Nivellements berechnete Entwicklung der Außentiefquerschnitte seit 1981 auf Abb. 5.4 dargestellt.

Die auf die gewählten Bezugshorizonte NN - 1,25 m (entsprechend etwa dem MTnw) und NN - 0,5 m bezogenen Querschnittsflächen zeigen tendenziell eine ähnliche Veränderung wie die Sohlentiefe. Seitdem die Spülströme aus dem Siel automatisch gesteuert werden, haben die Durchflußquerschnitte auf gesamter Außentiefänge - also auch im äußeren Bereich

– zugenommen. Während die zu- und abfließenden Tidevolumina mit der Entfernung zum Siel zunehmen und sich entsprechend querschnittsvergrößernd auswirken, hat die durch die Geometrie des Siels und des Spülbeckens vorgegebene Spülwassermenge eine für alle Querschnitte in etwa gleiche Querschnittsvergrößerung zur Folge.

Im Jahre 1985 hat die Ausräumung der Querschnitte durch gesteuerte Spülströme offensichtlich ihren Scheitelpunkt erreicht. Zu erkennen ist auch, daß künstlich vertiefte Querschnitte empfindlich auf hohen Sedimenteintrag reagieren. Abb. 5.4 zeigt, daß die Querschnitte nach einer größeren Anzahl von Starkwinden ab Windstärke 6 kurzfristig abnehmen. Dies gilt vor allem für den hafennahen (z. B. Stat. 0 + 675) und den mittleren Bereich (z. B. 1 + 250) des Außentiefs. Wenn darüber hinaus die Spüleffektivität infolge erhöhter Tideniedrigwasserstände gering ist und nur eine geringere Sedimentausräumung bewirkt oder der Spülbetrieb aus anderen Gründen unterbrochen wird, hält die Querschnitts-abnahme längere Zeit an, wie insbesondere ab Ende August 1985 festzustellen ist.

Der äußere Abschnitt des Außentiefs (z. B. in Stat. 1 + 600) reagiert nicht so empfindlich auf höheren Schwebstoffeintrag bei Starkwindlagen, da offensichtlich die Sedimente infolge höherer natürlicher Tideniedrigwasserstände nicht zur Ablagerung kommen. Die Entwicklung zeigt allerdings Mitte des Jahres 1984 und ab Oktober 1985 eine Querschnittsabnahme, die auf die Unterbrechungen des Spülbetriebs zurückzuführen ist und in folgendem Abschnitt 5.3 näher erläutert wird. Nach regelmäßigem Spülbetrieb sind die eingetriebenen Sedimente bis Anfang März 1986 zumindest an der Sohle wieder ausgeräumt worden.

### 5.3 Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung

In Abb. 5.5 ist ein Auszug der Querschnittsentwicklung an Meßstelle II (Stat. 1 + 000) vom Juni bis Oktober 1986 dargestellt. Zeitgleich dazu sind aufgetragen die wöchentlichen Mittelwerte der Flut- und Ebb- einschl. Spülstromgeschwindigkeit sowie die Überschreitungshäufigkeit für die Grenzgeschwindigkeit 0,4 m/s und die mittlere Attenuation aus optischen Schwebstoffmessungen. In den Monaten Juni bis August 85 mit Querschnittszunahme wird die Grenzgeschwindigkeit von 0,4 m/s während des Spülens 10 bis 15 % des gesamten Meßzeitraums, d. h. in 1,3 bis 1,9 Std. einer Tide, überschritten. Die mittlere steuerungsbeeinflusste Ebbströmung überschreitet 0,25 m/s. Im September nimmt die Häufigkeit der Spülgeschwindigkeiten  $\geq 0,4$  m/s bis auf nahezu 0 ab. Die Auftragung der Strömungswerte zeigt, daß in den Monaten September bis Oktober wegen erforderlicher Unterhaltungsarbeiten am Tosbecken und wegen erhöhter Tideniedrigwasser nur wenige effektive Spülungen durchgeführt werden konnten. Außerdem weisen die optischen Schwebstoffmessungen Anfang November hohe Schwebstoffgehalte im Seewasser infolge von Seegangseinfluß nach. Die Schwebstoffe sedimentieren in dem künstlich vertieften Außentief und werden infolge geringer Spülstromgeschwindigkeit nicht wieder erodiert. Infolgedessen nimmt die Querschnittsfläche innerhalb NN – 0,5 m an der Meßstelle II von 36,3 m<sup>2</sup> auf 30,4 m<sup>2</sup> Anfang Oktober ab.

Mit diesen Dauermessungen konnte nachgewiesen werden, daß der durch Spülung vergrößerte Querschnitt nur offengehalten werden kann durch jeweils mindestens 1,5 bis 2,0 Std. dauernde Spülströme mit hoher Fließgeschwindigkeit von wesentlich mehr als 0,4 m/s.

## 6. Sedimentation im Spülbecken

### 6.1 Schwebstoffmessung im Spülsiel

Für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Spülsiel und -becken zur Außentieferräumung ist die Kenntnis des Schlickfalls im Spülbecken eine wichtige Grundlage.

Tideoffene Bodenentnahmestellen im Watt sind häufig bereits nach drei bis sieben Jahren völlig verlandet. Z. B. war die im Jahr 1979 im östlichen Neßmer Watt gebaggerte Sandentnahmestelle für den Hauptdeichbau im Jahre 1985 – also sechs Jahre später – bis auf ein kleines Restvolumen zum ursprünglichen Wattniveau wieder verfüllt.

Da das Spülbecken durch einen Sommerdeich vom Watt getrennt ist und nur während der schwebstoffärmsten Tidephase (Abschn. A 2.2) gefüllt wird, ist dessen Verlandungszeit erheblich länger. Die Messungen im Außentief haben bestätigt, daß die dem Spülbecken zufließenden Wassermengen keinen wesentlichen Einfluß auf die Fließgeschwindigkeit oder den Schwebstoffgehalt im Außentief (Abb. 6.2) haben.

Um den Schwebstoffgehalt im Spülsiel mit den gemessenen Werten im Außentief vergleichen zu können, wurden im Oktober bis Dezember 1985 am Einlauf des Spülsiels optische Schwebstoffmessungen durchgeführt.

Außerdem wurden aus dem Spülbecken während des Füllens Wasserproben entnommen, die darauf hinweisen, daß bei Normal-Wetterlagen tatsächlich nur Wasser mit geringem Schwebstoffgehalt (Meßwerte  $\leq 10$  mg/l) in das Spülbecken gelangt (ARLT, 1986).

Die optischen Dauermessungen am Spülsiel zeigen, daß die Attenuation (Trübe) häufig kurz vor der Tidehochwasserzeit zunimmt.

Die Fließgeschwindigkeit im Hafenbecken und in dem Bereich zwischen Hafen und Siel ist relativ gering und überschreitet auch beim Füllen nicht den Wert von i. M. 0,15 m/s, so daß eine wesentliche Schwebstoffanreicherung infolge von Füllbetrieb nicht anzunehmen ist. Die

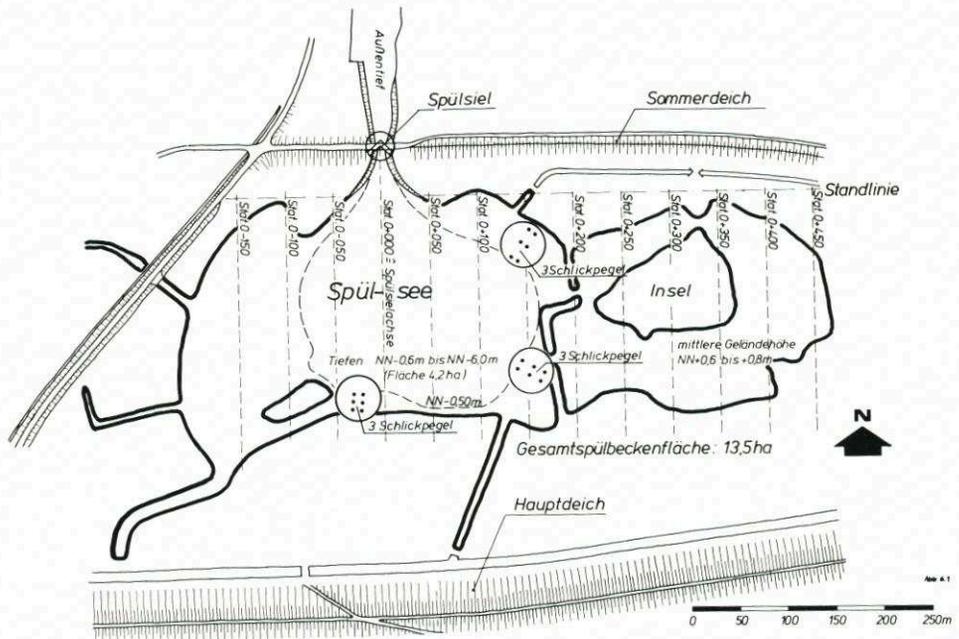


Abb. 6.1. Übersicht des Spülbeckens mit Lage der Schlickpegel und Meßprofile

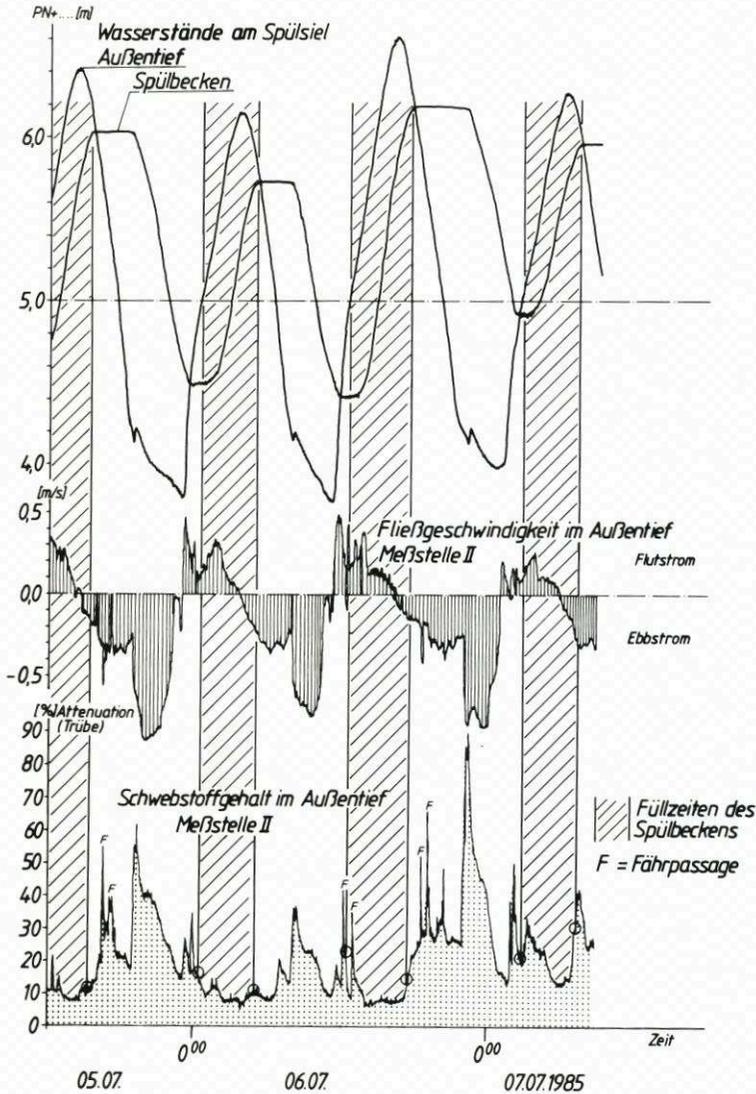


Abb. 6.2. Dauermessungen der Wasserstände, Fließgeschwindigkeit und Schwebstoffgehalte

leicht erhöhten Schwebstoffgehalte am Siel sind häufig nach Anlege- und Wendemanövern der Fähre im Hafenbecken festzustellen. Offensichtlich bleiben die aufgewirbelten feinen Kornfraktionen noch sehr lange in Schwebelage und werden in Richtung Siel transportiert.

Die Untersuchung von Sedimentproben an der Sohle des Außentiefs hat ergeben (ARLT, 1986), daß der Feinsandanteil im Wendekreisbereich der Fähre relativ hoch ist und in Richtung Siel abnimmt. Auch diese Untersuchung deutet darauf hin, daß sich der Feinsandanteil aus den aufgewirbelten Sedimenten der Fährschiffmanöver sehr schnell wieder absetzt, während die feineren Kornfraktionen von der relativ geringen Strömung weitertransportiert werden.

Im übrigen sind die am Spülsiel gemessenen Schwebstoffgehalte abhängig von den

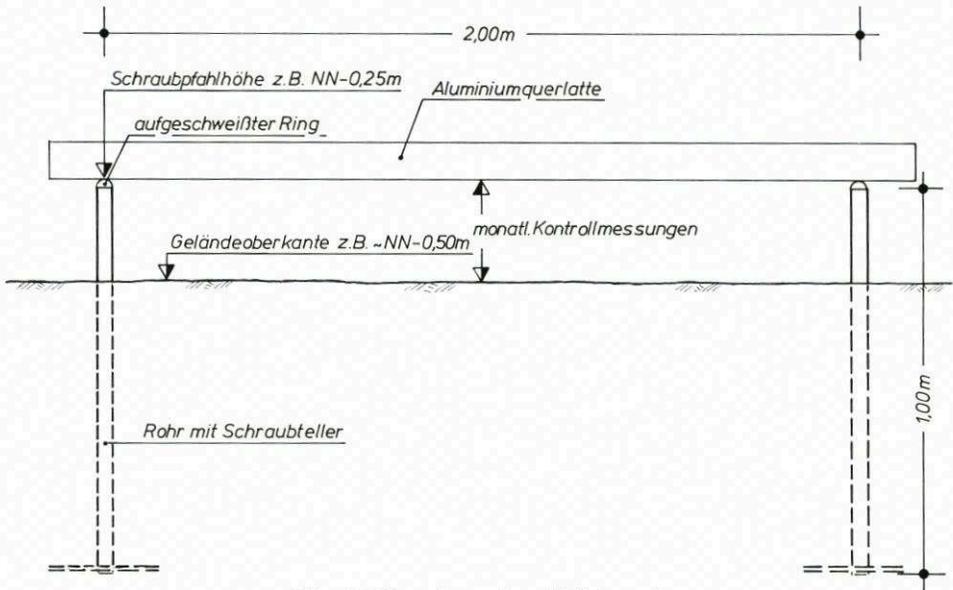


Abb. 6.3. Darstellung eines Schlickpegels

Witterungsbedingungen (s. auch Abschn. 4.3) und weisen stark unterschiedliche Werte auf, so daß sich die Spülbeckenverlandung aufgrund von nur drei Monate andauernden Schwebstoffmessungen nicht ermitteln läßt, zumal die Mengenabschätzungen aus optischen Meßwerten mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Zusammenhänge sollen jedoch noch weiter untersucht werden.

## 6.2 Schlickpegelmessungen

Zur Überwachung der Spülbeckenverlandung werden regelmäßig Schlickpegelablesungen sowie Nivellements und Peilungen in festgelegten Profilen durchgeführt. Im folgenden soll zunächst über die Schlickpegel berichtet werden, die an drei trockenfallenden Bereichen des Spülbeckens jeweils in drei verschiedenen Höhenlagen aufgestellt worden sind (Abb. 6.1).

Die Schlickpegel bestehen aus zwei in den Boden eingedrehten Schraubpfählen mit einem horizontalen Teller von ca. 30 cm Durchmesser, die 2 m auseinander stehen (Abb. 6.3). Auf der Oberkante der gleich hoch aufragenden Pfähle wird beim Messen des Geländeniveaus eine Aluminiumlatte gelegt. Der Abstand zwischen der Unterseite dieser Latte und der Geländehöhe wird im monatlichen Zeitabstand mit Millimeter-Genauigkeit gemessen. Zwei Pegel werden seit 1981 und die übrigen seit 1984 beobachtet.

Aus den Einzelmessungen ergeben sich aufgrund unterschiedlicher örtlicher Einflüsse z.T. wechselnde Auf- und Abträge. An den drei südwestlichen Schlickpegeln (Abb. 6.1) wurden bisher überwiegend Abträge gemessen, woraus zu schließen ist, daß in dem künstlich angelegten Becken noch Umlagerungen stattfinden und höher gelegene Teilflächen infolge Seegang und Füllströmung erodieren und Material in tiefer gelegene Zonen abgeben. An den übrigen sechs Schlickpegeln wurde ein mittlerer Auftrag von etwa 6 mm/Jahr gemessen. Unterschiede zwischen den in den Höhenlagen  $NN + 0,5$  m,  $NN \pm 0$  u.  $NN - 0,5$  m angelegten Pegeln lassen sich noch nicht nachweisen. Der Meßzeitraum ist noch zu kurz, um gesicherte Aussagen machen zu können. Die Einzelergebnisse der Schlickpegelmessungen werden im Schlußbericht erläutert.

## 6.3 Ergebnisse aus Nivellements und Peilungen

Die Spülbeckenfläche wird in parallelen Profilen mit jeweils 50 m Abstand nivelliert und in der nicht trockenfallenden Fläche gepeilt (Abb. 6.1). Die Profile sind vor Ort durch Festpunkte markiert. In den Profilen wird in der Regel alle 5 m ein Punkt gemessen. Die Nivellier- bzw. Peillatte ist mit einem Teller von  $\varnothing 30$  cm als Aufsetzfläche versehen, damit sie nicht in den weichen Schlick einsinken kann.

Auf den höher gelegenen Flächen des Ostteils des Spülbeckens (NN + 0,6 m) wurden bisher keine Geländeänderungen gemessen, die das Maß der Meßgenauigkeit von  $\pm 1$  cm überschreiten. Wesentliche Geländeänderungen sind nur auf den tiefer gelegenen Flächen des Spülbeckens festzustellen. Offensichtlich sammeln sich hier die in den See eingetragenen feinen Schwebstoffe. Die Untersuchung der entnommenen Spülbecken-Sedimentproben ergibt sehr geringe Medianwerte der Korngrößen von 0,007 mm an den tiefsten Stellen des Sees bis 0,076 mm in den Randbereichen (ARLT, 1986). Die für die Korngrößenbestimmung angewendete „CILAS-Laser-Granulometer-Methode“ erfordert eine Vorbehandlung des Probenmaterials, wodurch organische Bestandteile zerstört werden und chemische und biologische Bindungen verlorengehen.

Zur Ermittlung eines Verlandungstrends werden die gemessenen Querschnittsflächen aus den vier Profilen des tieferen, nicht trockenfallenden Seebereichs zu einem Mittelwert zusammengefaßt und Regressionsgeraden für die Querschnittsentwicklung, bezogen auf die Bezugshorizonte NN + 1,0 m und NN - 0,6 m, berechnet. Die gemessenen mittleren Querschnittsflächen mit den berechneten Regressionsgeraden sind auf Abb. 6.4 dargestellt. Der Hauptverlandungsraum des Spülbeckens liegt unterhalb des Bezugshorizonts von etwa NN - 0,6 m. Erst nach Überschreiten dieses Verlandungshorizonts wird das vorhandene Spülvolumen wesentlich eingeschränkt. Aufgrund des bisher festzustellenden Verlandungstrends wird diese Grenze in etwa 25 Jahren nach dem Bezugsjahr 1982 erreicht (Abb. 6.4).

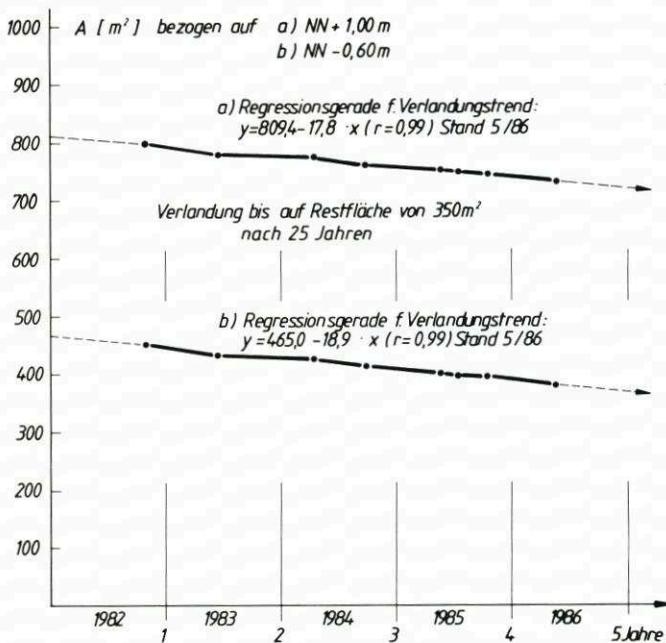


Abb. 6.4. Verlandungstrend des Spülbeckens

Bezogen auf eine Breite des verlandenden tieferen Spülbeckenbereiches von etwa 150 m, beträgt das mittlere jährliche Verlandungsvolumen  $2650 \text{ m}^3$ . Mit der mittleren jährlichen in das Spülbecken eingelassenen Wassermenge von rd.  $36 \text{ Mio. m}^3$  ergibt sich für die abgesetzten Feststoffe eine Raumkonzentration von etwa  $0,0000736 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

Nimmt man weiterhin an, daß das Raumgewicht des durch die Handpeilung aufgemessenen, stark wasserhaltigen Schlicks etwa mit  $1,5 \text{ t/m}^3$  angesetzt werden kann, so beträgt die mittlere Feststoffkonzentration der in das Spülbecken eingelassenen Wassermengen  $110 \text{ mg/l}$ .

Aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes von drei Jahren und der getroffenen Annahmen über den Verlandungsbereich stellt die angegebene Feststoffkonzentration nur eine grobe Schätzung dar. Sie ist im übrigen stark abhängig von den Witterungsbedingungen und unterliegt nicht unerheblichen jahreszeitlichen Schwankungen. Einen wesentlichen Einfluß auf die Spülbeckenverlandung haben sicher auch die aus Naturschutzgründen im Winter durchzuführenden Polderflutungen. Der Schlickfall im Spülbecken wird weiterhin durch Peilungen genau verfolgt.

## 7. Ausblick

Das Ergebnis der bisherigen Untersuchungen zeigt, daß Außentiefquerschnitte durch gesteuerte Spülströme vertieft und verbreitert werden können.

Für die Dimensionierung des Spülbeckens und Spülsiels sowie für die optimale Steuerung der Anlagen sollen als Ergebnis der bisherigen Untersuchungen und der z. Z. noch laufenden Messungen Empfehlungen erarbeitet werden, die mit dem Schlußbericht vorgelegt werden. Darüber hinaus wird der Einsatz und die Wirksamkeit eines Stromräumbootes bei abgestuft gesteuerten Spülströmen untersucht.

Überbreite Querschnitte, die aus Gründen des Schiffsverkehrs z. B. in Häfen benötigt werden, sind durch zusätzlichen Räumbooteinsatz vom Schlick zu räumen. In Neßmersiel z. B. ist einmal pro Jahr ein etwa 14tägiger Räumbooteinsatz im Hafenbereich ausreichend, wenn in der übrigen Zeit durch Spülung der Verschlickung entgegengewirkt wird. Außentiefs ohne Spülanlage werden bevorzugt durch Räumbooteinsatz unterhalten.

Ziel dieser weiteren, z. Z. laufenden Untersuchungen soll sein, die Auswirkung von Räumfahrzeugen auf den Schwebstofftransport in Außentiefs und das Transportverhalten des Tidestroms zu untersuchen. Insbesondere soll der Sättigungsschwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Transportgeschwindigkeit ermittelt werden. Diese Grundlagen über den äußerst komplexen Problemkreis des hydraulischen Feststofftransports im Tidegebiet können ausschließlich Naturmessungen liefern, so wie sie im Neßmersieler Außentief durchgeführt werden.

## 8. Schriftenverzeichnis

- ARLT, S.: Die Auswirkung des Spülbetriebs und der Einfluß des Fährverkehrs auf das Sedimentationsgeschehen im Neßmersieler Außentief. Geol.-Pal. Institut der Universität Kiel, unveröffentlichter Zwischenbericht einer Diplomarbeit, März 1986.
- BAUAMT FÜR KÜSTENSCHUTZ NORDEN: Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“. Jahresberichte 1983, 1984, 1985.
- BLANKENSTEIN, H., BRANDT, G. u. NIEMEYER, H. D.: Strommessungen im Bereich des Neßmer 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 Franz.-Inst., Univ. Hannover, H. 60, 1985.
- DVWK: Regeln zur Wasserwirtschaft – Schwebstoffmessungen. Gelbdruck, 1984.
- 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 – Spülbekken als Vogelrast- und -brutgebiet. Wasser und Boden, H. 8, 1984.
- FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. Wasser und Boden, H. 3, 1983.
- 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-Inst., TU Braunschweig, H. 77, 1983.
- MEERESTECHNIK-ELEKTRONIK GmbH: Steuergerät Sedimentmessungen, 1983 – unveröffentlicht.
- MÜLLER, E. u. BINEK, H.: Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- Nds. WASSERWIRTSCHAFTSVERWALTUNG: Jahresbericht. Wasser und Boden, H. 7/8, 1958.
- NORDDEUTSCHE SEEKABELWERKE AG: „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ – Meßkette Neßmersiel – 1982 – unveröffentlicht.
- OHM, K.: Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten. Die Küste, H. 42, 1985.
- RAUDKIVI, A. J.: Grundlagen des Sedimenttransportes. Springer-Verlag, 1982.
- REINEMANN, L., SCHEMMER, H. u. TIPPNER, M.: Trübungsmessungen zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts. DGM 26, H. 6, 1982.
- RENGER, E.: Zweidimensionale Stabilitätsanalysen von Tidebecken und Watteinzugsgebieten größerer Ausdehnung. Die Küste, H. 34, 1979.
- RENGER, E.: Dauermessungen des suspendierten Feststoffgehalts im Tidegebiet mit Hilfe von Durchlaufzentrifugen. Intermaritec 82, Bericht 418.
- RENGER, E. u. BEDNARCZYK, K.: Schifffahrtserzeugte Schwebstofftransporte im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- 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.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. des Franzius-Instituts, TU Hannover, H. 34, 1970.
- SIEFFERT, W. u. LASSEN, H.: Windstauentwicklung im Küstengebiet der Deutschen Bucht. Wasser und Boden, H. 1, 1986.
- ZANKE, K.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, 1982.