

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG
IM KÜSTENINGENIEURWESEN
POSTFACH 44 67 - TEL. (04 31) 365 - 1
2300 KIEL 1

25. Mai 1988

10/3
5/5

Schlußbericht über das
KFKI - Forschungsprojekt

AT-S

„Tiefenstabilisierung von Außentiefs“

mit Naturuntersuchungen am
Neßmersieler Außentief

Aufgestellt:

Bauamt für Küstenschutz Norden

Norden, im Jahr 1987

№ 28445 Lit - 1

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG
IM KÜSTENINGENIEURWESEN
POSTFACH 44 67 - TEL. (04 31) 365 - 1
2300 KIEL 1

No 28445

Land Niedersachsen
Wasserwirtschaftsverwaltung
Bauamt für Küstenschutz Norden

DAS FORSCHUNGSPROJEKT

"TIEFENSTABILISIERUNG VON AUSSENTIEFS - (AT-S)"

MIT NATURUNTERSUCHUNGEN AM NESSMERSIELER AUSSENTIEF

Schlußbericht

Forschungsvorhaben des Kuratoriums für Forschung im
Küsteningenieurwesen gefördert vom Bundesminister
für Forschung und Technologie (MF 0292 9) von 1982
bis 1987.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Die Forschungsvorhaben über Außentiefs
 - 2.1 Außentiefs und deren Unterhaltung - Begriffe und Problematik -
 - 2.2 Forschungsprojekt "Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)"
 - 2.3 Weitere Untersuchungen
 - 2.3.1 Forschungsprojekt "Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)"
 - 2.3.2 Der Einfluß des Schiffsverkehrs
 - 2.4 Durchführung der Forschungsprojekte über Außentiefs
3. Außentiefräumung mit tide-gesteuerter Spülanlage
 - 3.1 Einrichtung einer Spülanlage für das Neßmersieler Außentief
 - 3.2 Betrieb und Steuerung des Spülwerks
 - 3.3 Morphologische Gegebenheiten im Bereich des Neßmersieler Außentiefs
 - 3.4 Hydrologische Verhältnisse
 - 3.5 Speicherinhalt des Spülbeckens
 - 3.6 Hydraulische Nachweise für Spülwerk und Spülbecken
 - 3.6.1 Ziele des Entwurfes
 - 3.6.2 Hydraulischer Nachweis für den Spülbetrieb
 - 3.6.3 Füllen des Spülbeckens
4. Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt "Tiefenstabilisierung von Außentiefs"
 - 4.1 Einrichtung der Meßstellen
 - 4.2 Zentrale Datenerfassung
 - 4.3 Hydrometrische Untersuchungen
 - 4.3.1 Wasserstände
 - 4.3.2 Strömungen
 - 4.4 Schwebstoffmessungen
 - 4.4.1 Einsatz der Sedimentwaage (Sediwa)
 - 4.4.2 Vergleichende optische Schwebstoffmessungen
 - 4.5 Sauerstoff- und Temperaturmessungen
 - 4.6 Zeitlicher Ablauf
5. Meßergebnisse ohne Räumbooteinsatz
 - 5.1 Strömungen
 - 5.1.1 Unbeeinflusste Tideströmungen
 - 5.1.2 Strömungen bei Spülbetrieb

- 5.2 Schwebstoffgehalt
 - 5.2.1 Schwebstoffgehalt bei unbeeinflusster Tideströmung
 - 5.2.2 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bei Spülbetrieb
 - 5.2.3 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Schubspannung
 - 5.2.4 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von Seegangseinflüssen
 - 5.2.5 Schwebstoffgehalt durch Schiffseinflüsse
 - 5.2.6 Schwebstoffgehalt - Häufigkeiten
 - 5.2.6.1 Attenuation (Wassertrübe)
 - 5.2.6.2 Schwebstoffgehalt - Häufigkeiten gemessen mit "Sediwa" in 1984 und 1985
 - 5.2.6.3 Schwebstoffgehalt-Häufigkeiten in Abhängigkeit von maßgebenden Einflußfaktoren
- 5.3 Spülbeginn in Abhängigkeit vom Außenwasserstand
 - 5.3.1 Wirkung des Gegenstaus
 - 5.3.2 Optimierung der Räumwirkung
- 6. Meßergebnisse mit Räumbooteinsatz
 - 6.1 Allgemeines zum Räumbooteinsatz
 - 6.2 Kurzbeschreibung und Wirkungsweise von Räumgeräten
 - 6.2.1 Stromräumboote
 - 6.2.2 Schlickpfüge und hydraulische Eggen
 - 6.3 Durchführung der Räumversuche
 - 6.3.1 Räumbereich und Lage der Meßstellen
 - 6.3.2 Zwei Versuchsreihen mit Räumbooteinsatz
 - 6.4 Analyse der Bodensedimente und der Schwebstoffe
 - 6.4.1 Probenentnahmen und Untersuchungsverfahren
 - 6.4.1.1 Probenentnahmen
 - 6.4.1.2 Untersuchungsverfahren für Bodensedimente
 - 6.4.1.3 Untersuchungsverfahren für Schwebstoffpartikel
 - 6.4.2 Sedimentanalyse im Watt- und Außentiefprofil
 - 6.4.3 Veränderung der Sedimentverteilung infolge Räumbooteinsatz
 - 6.4.3.1 Bödenmaterial des Räumbereichs
 - 6.4.3.2 Räumbooteinsatz vom Mai/Juni 1986
 - 6.4.3.3 Räumbooteinsatz vom August 1986
 - 6.4.4 Ergebnisse der Schwebstoffanalyse
 - 6.5 Auswertung der Schwebstoffdauermessungen
 - 6.6 Massenbilanzen der Räumarbeiten
 - 6.7 Auswertung der Sauerstoff- und Temperaturmessungen

7. Ausräumung der Außentiefquerschnitte infolge des Spülbetriebs
 - 7.1 Vermessungen
 - 7.2 Veränderung von Außentiefsohle und -querschnitt
 - 7.3 Ursachen der Querschnittsabnahme ab September 1985
8. Sedimentation im Spülbecken
 - 8.1 Schwebstoffmessung am Spülsiel
 - 8.2 Schlickpegelmessungen
 - 8.3 Ergebnis aus Nivellements und Peilungen
9. Empfehlungen für Außentiefunterhaltung unter Verwertung der Forschungsergebnisse aus den Naturversuchen in Neßmersiel
 - 9.1 Wirksame Spülströmung
 - 9.1.1 Regelbetrieb
 - 9.1.2 Frische Schlickablagerungen
 - 9.1.3 Räumbooteinsatz als Sondereinsatz
 - 9.1.4 Regelmäßiger Räumbooteinsatz
 - 9.1.5 Spüldauer
 - 9.1.6 Spülbetrieb oder Gegenstau
 - 9.2 Spülbeckengestaltung
 - 9.3 Spülsielbemessung
10. Auswertung der Forschungsergebnisse zur Verbesserung vorhandener und Bemessung neuer Spülanlagen
 - 10.1 Mögliche Verbesserungen für die Spülanlage in Neßmersiel
 - 10.1.1 Erhöhung der Füllwassermenge durch niedrige Einlaufschwelle
 - 10.1.2 Frühes Spülende ermöglicht erhöhten Spülbeckenwasserstand
 - 10.1.3 Vergrößerung der Spülwassermenge durch Vertiefung der Spülbeckenrandzone
 - 10.2 Beispiel für eine Bemessung einer Spülanlage
 - 10.2.1 Allgemeines
 - 10.2.2 Rechenbeispiel für den Nachweis der erforderlichen Fließgeschwindigkeit im angestrebten Außentiefquerschnitt
 - 10.2.3 Dimensionierung des Spülsiels (Beispiel)
11. Pressearbeit, Vorträge und Veröffentlichungen
 - 11.1 Presse
 - 11.2 Vorträge
 - 11.3 Bisherige Veröffentlichungen
12. Schriftenverzeichnis
13. Anhang: Bericht über die Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Schwebstoffen aus dem Neßmersieler Außentief

DAS FORSCHUNGSPROJEKT "TIEFENSTABILISIERUNG VON AUßENTIEFS (AT-S)"
mit Naturuntersuchungen am Neßmersieler Außentief

1. Einleitung

Die etwa 80 Außentiefs an der deutschen Nordseeküste und sonstige Hafenzufahrten und kleinere Ausmündungen 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. In dieser Arbeit wird über das Forschungsprojekt "Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)" mit Naturuntersuchungen am Neßmersieler Außentief berichtet.

...

2. Die Forschungsvorhaben über Außentiefs

2.1 Außentiefs und deren Unterhaltung - Begriffe und Problematik -

Als Außentief wird der im Deichvorland und Watt liegende Abschnitt eines Sieltiefs bezeichnet. Das Außentief beginnt am Siegel 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 Sieltiefes als Hauptvorfluter in der Marsch, der die Binnenabflüsse durch ein Deichsiegel 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 Siegel 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). Sie stellen einen Teil der Außentiefanlage dar.

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 an (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 Mudderpflug 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 Über-tiefen 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 Unterhaltung und Tiefenstabilisierung von Außentiefs durch Spülanlagen und Räumbooteinsatz werden in dieser Untersuchung behandelt.

2.2 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 Spülsiel und Spülbecken und für die Optimierung der Sielsteuerung zur bestmöglichen Tiefenstabilisierung des Außentiefs erarbeitet werden. Es wird dabei der Frage nachgegangen, ob zur Räumung 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.

2.3 Weitere Untersuchungen

2.3.1 Forschungsprojekt "Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)"

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 überwiegendem 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.

2.3.2 Der Einfluß des Schiffsverkehrs

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

Die VDB-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.

2.4 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

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. Landesamtes für Wasserwirtschaft, Norderney

LBD Roelf Carsjens, Nds. Hafenamt Emden (bis 1984)

BD Gerd Frerichs, Nds. Hafenamt Norden (ab 1985)

Die Naturversuche wurden überwiegend am "Naturmodell" Neßmersieler Außentief bei Neßmersiel, Landkreis Aurich, 15 km östlich der Stadt Norden/Ostfriesland durchgeführt (Abb. 3.1). 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.

3. Außentiefräumung mit tidegesteuerter Spülanlage

3.1 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 Jahrhunderts 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. 1 500 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, rd. 2 km langen Außentiefs bereitete trotzdem noch Probleme. Zur Verbesserung der Wasserhältnisse wurde daher 1977 der Bau eines Spülseils mit Spülbecken in Angriff genommen.

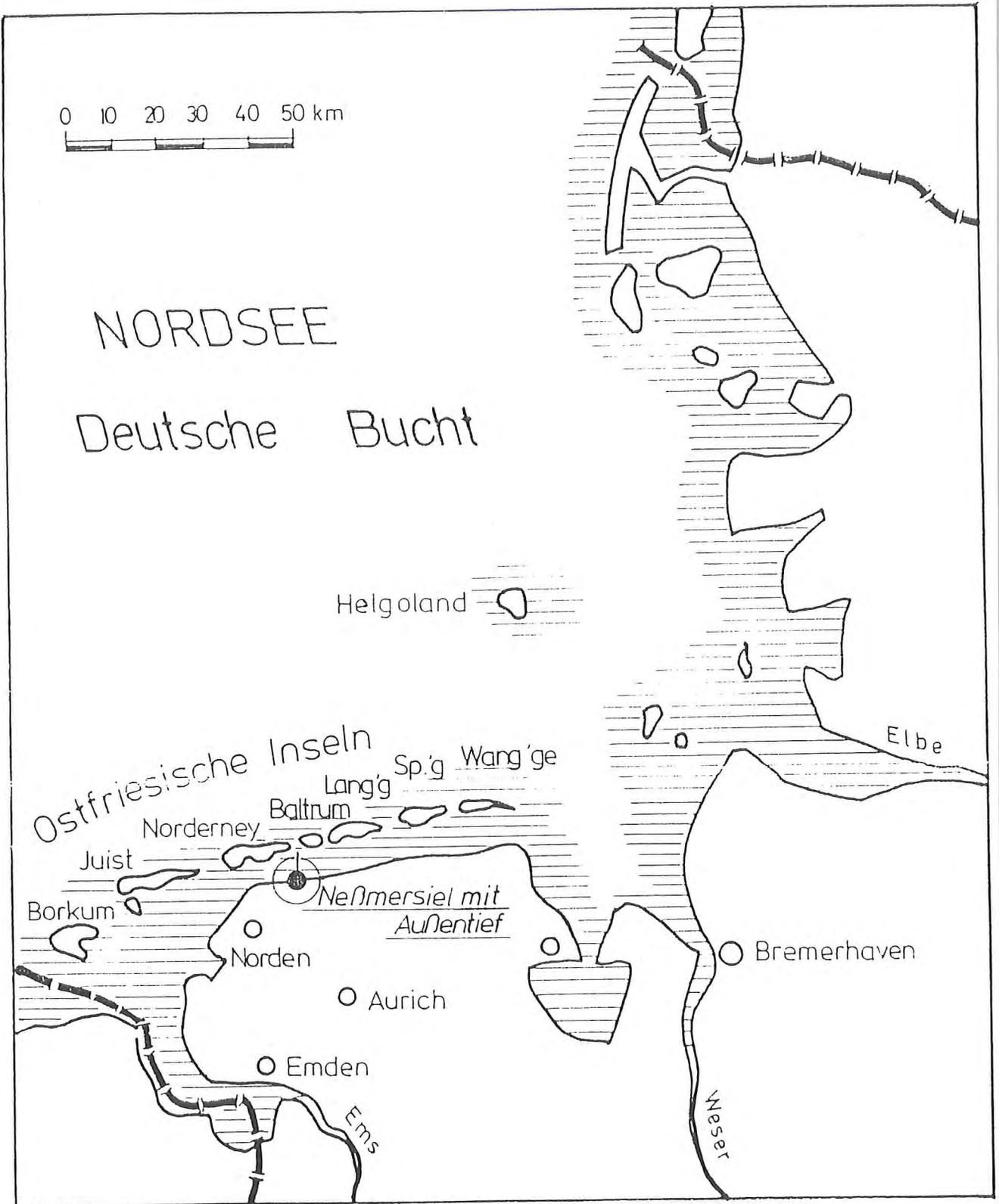


Abb. 3.1 Übersichtsskizze

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 Greet-sieler 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 abgelassen 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 des Forschungsprojekts ist, die Dimensionierung solcher Anlagen, die Besonderheiten des Spülbetriebes sowie die Wirkung von Stromräumbooten weiter zu erforschen.

3.2 Betrieb und Steuerung des Spülsiels

Im Zuge von Deichbaumaßnahmen konnte ein etwa 13 ha großes Spülbecken angelegt werden (Abb. 3.2). 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 ölhydraulisch betrieben (Abb. 3.3, 3.4). Das Spülbecken faßt rd. 100 000 m³ 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 ein Stromräumboot und seine schlicklösende und aufwirbelnde Wirkung der absenkbaren 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.

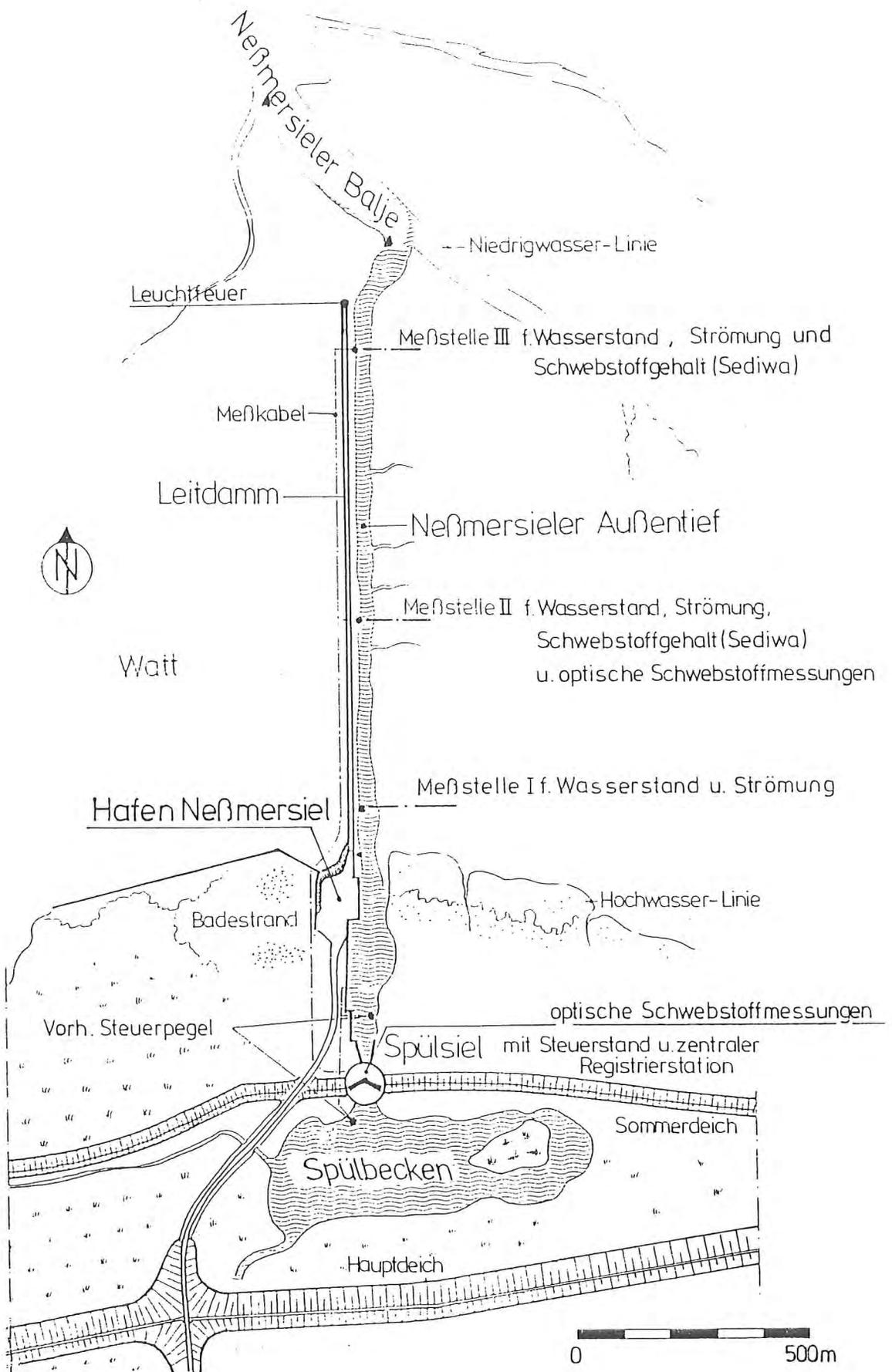


Abb. 3.2 Neßmersieler Außentief mit Spülbecken und Spülsiel

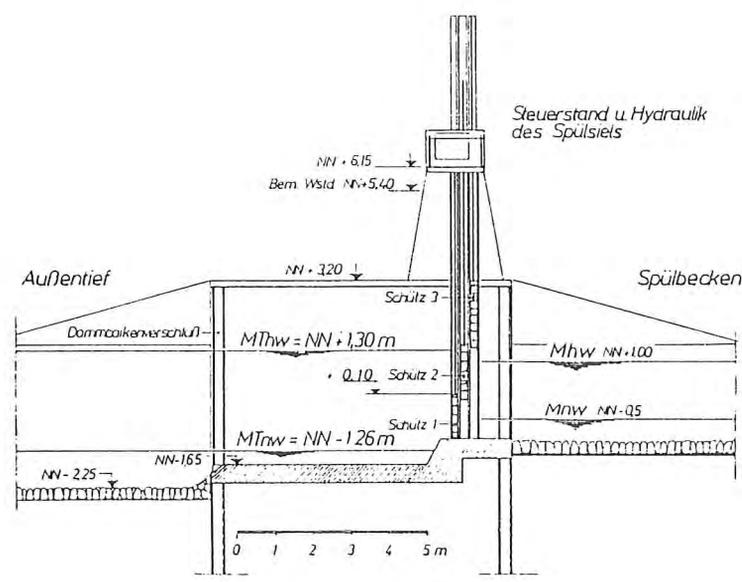
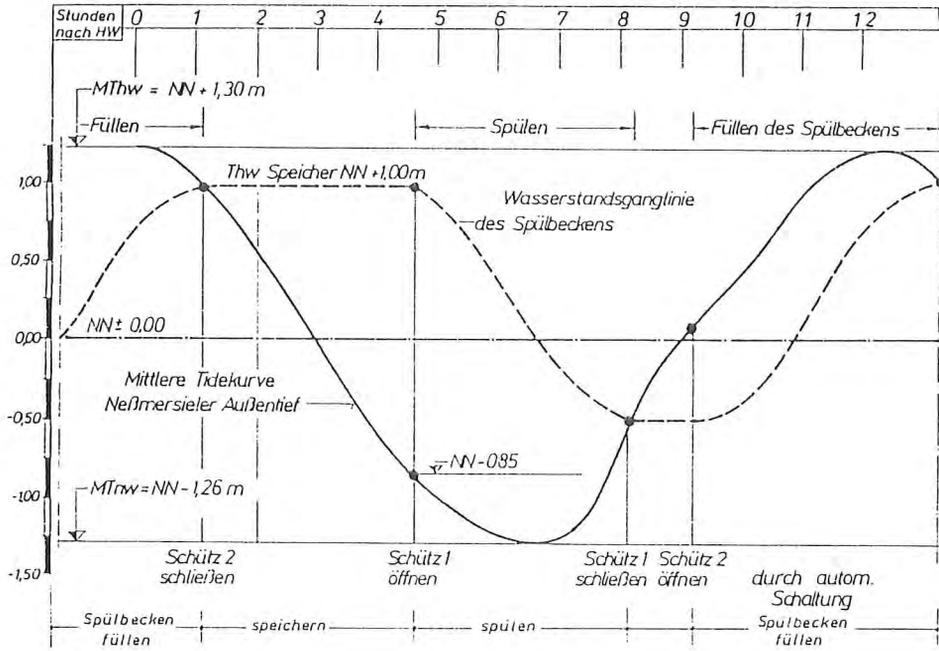


Abb. 3.3 Wasserstandsganglinie der Tide und des Spülbeckens in Neßmersiel mit Schaltmarken der automatischen Steuerung (oben)
Längsschnitt durch das Spülwerk (unten)

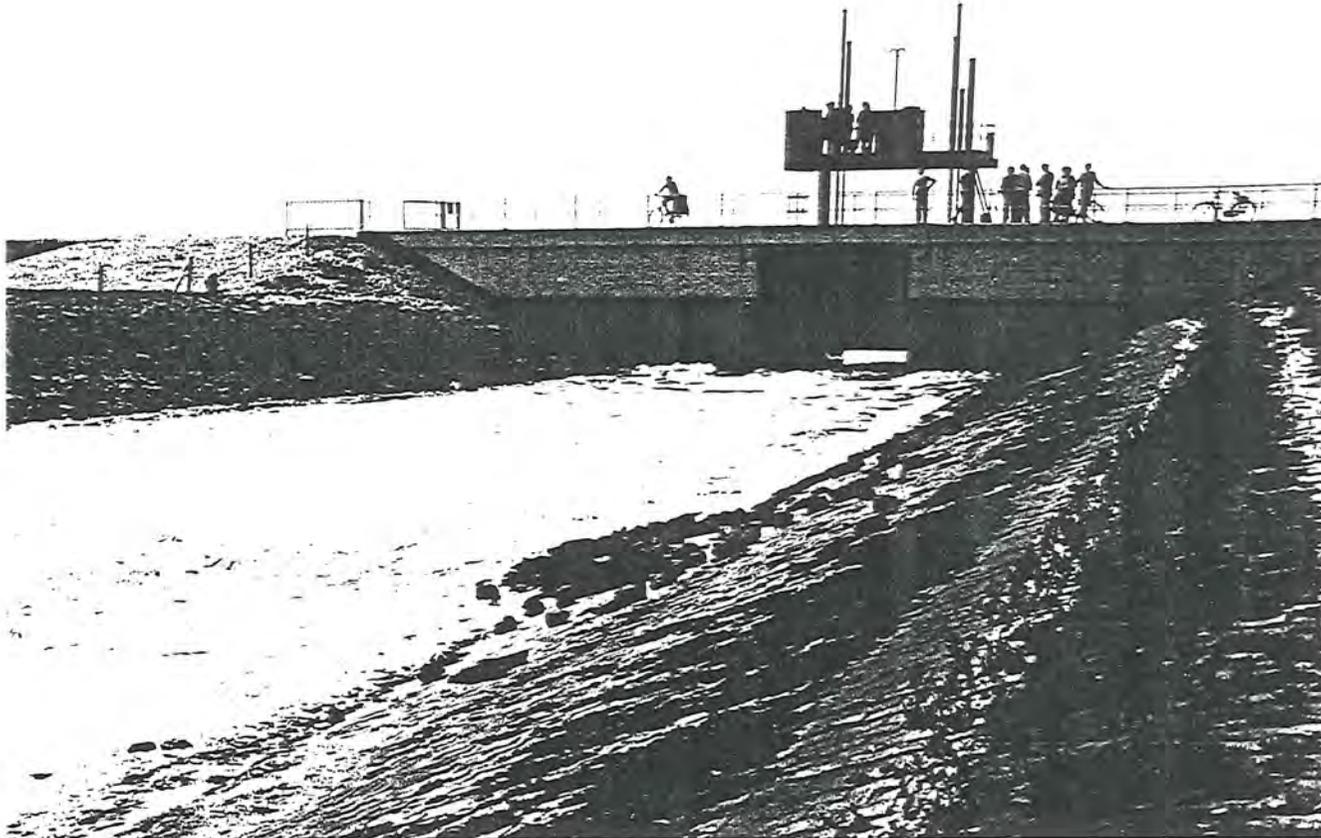
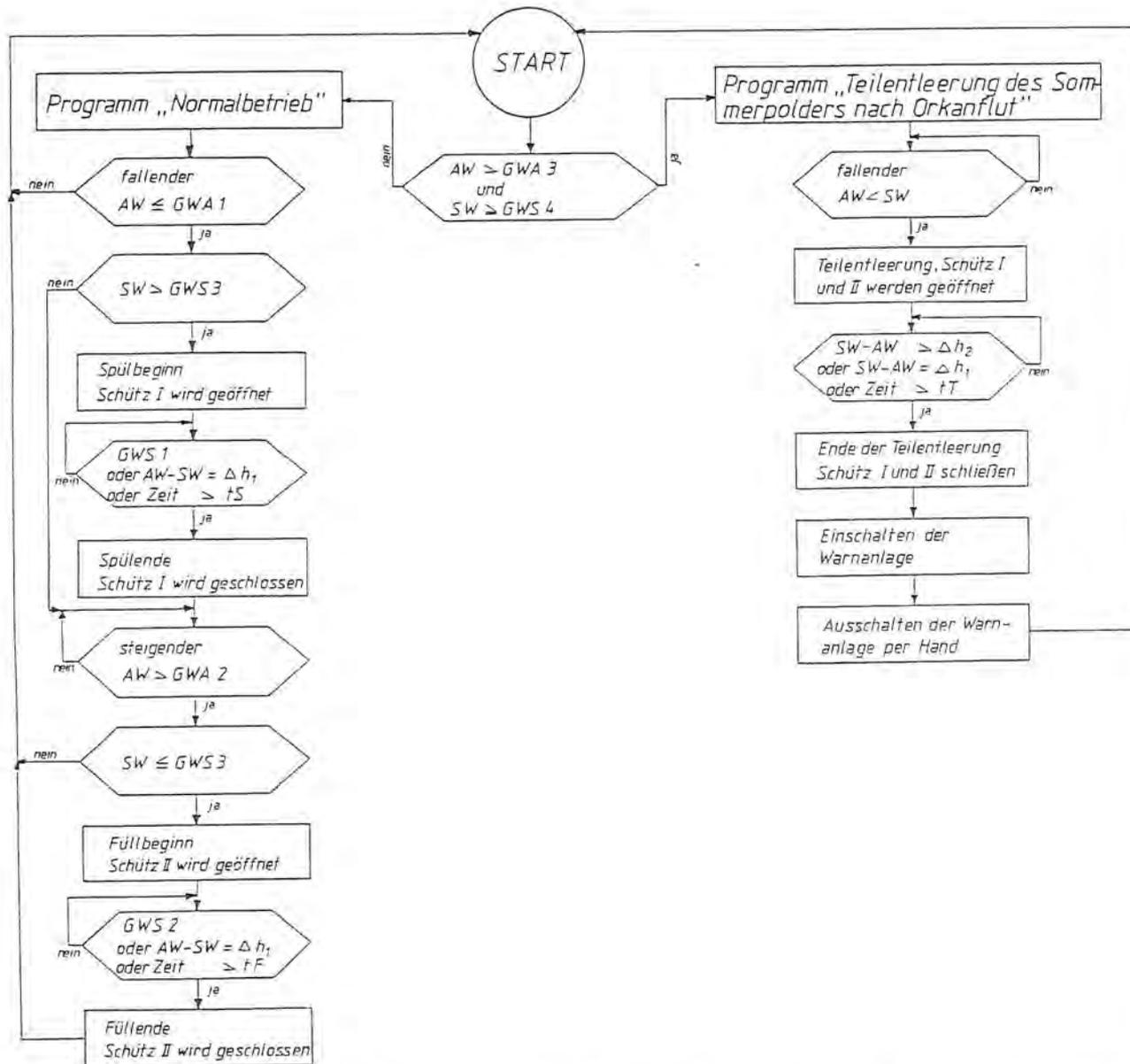


Abb. 3.4 Spülsiel mit Zentralstation (oben links) und Hydraulikanlage (oben Mitte)



Beispiel für eingestellte Grenzwerte

	Grenzwerte
GWA 1	NN - 0,70 m
GWA 2	NN + 0,10 m
GWA 3	NN + 3,40 m
GWS 1	NN - 0,50 m
GWS 2	NN + 1,20 m
GWS 3	NN - 0,40 m
GWS 4	NN - 2,80 m
tS	8 h
tF	5,5 h
tT	6,0 h
Δh1	0,05 m
Δh2	1,50 m

- Zeichenerklärung
- Δh1 } Eingestellter
 - Δh2 } Differenzwasserstand
 - AW } Außenwasserstand
(Tidewasserstand im Außentief)
 - GWA 1 } Eingestellter
 - GWA 2 } Grenzwerte für
 - GWA 3 } Außenwasserstand
 - SW } Spülbeckenwasserstand
 - GWS 1 } Eingestellter
 - GWS 2 } Grenzwerte für
 - GWS 3 } Spülbecken
 - GWS 4 }
 - tS } max zulässige Spülzeit
 - tF } max zulässige Füllzeit
 - tT } max zulässige Teilentleerungszeit

Abb. 3.5 Ablaufdiagramm für die automatische Spülsielsteuerung durch Mikroprozessor

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. 3.3). 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. 3.5).

3.3 Morphologische Gegebenheiten im Bereich des Neßmersieler Außentiefs

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

Auf weiteren 1 200 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 Betonrüttelteilen. 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 Bälje zwingt.

An der Ostseite des Außentiefs fällt das grüne Deichvorland zum unbegrüntem Watt ab. Im Schutze der Hafenanlagen sind die See- gangskräfte 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 Prielen 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.

3.4 Hydrologische Verhältnisse

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. Für die wenigen vorliegenden unbeeinflussten 21 Wertepaare aus dem Jahre 1985 ergibt sich durch Vergleichsrechnung ein MTnw von NN - 1,26 m am Steuerpegel des Spülsiels. Weiter seewärts fällt das MTnw bis Meßstelle III auf NN - 1,30 m. Das MTnw ist in starkem Maße von den morphologischen Verhältnissen der vorgelagerten Balje und des Außentiefs abhängig. (siehe hierzu Abschn. 7.3).

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.

3.5 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 m³ 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 m 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. 8.1). 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, beträgt das Speichervolumen oberhalb der Drempele-Oberkante von NN - 1,0 m $120\ 000\ m^3$ (s. Speicherinhaltslinie, Abb. 3.6). 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 $30\ 000\ m^3$ beträgt die mittlere Spülwassermenge etwa $90\ 000\ m^3$.

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 beispielsweise bei Ostwindlagen erwiesen, daß bei einem Speicherpeil von NN + 0,6 m - das sind 40 cm unter dem MHW-Peil - das Spülbecken nur noch $40\ 000\ m^3$ Spülwasser faßt.

Wasserspiegelhöhe

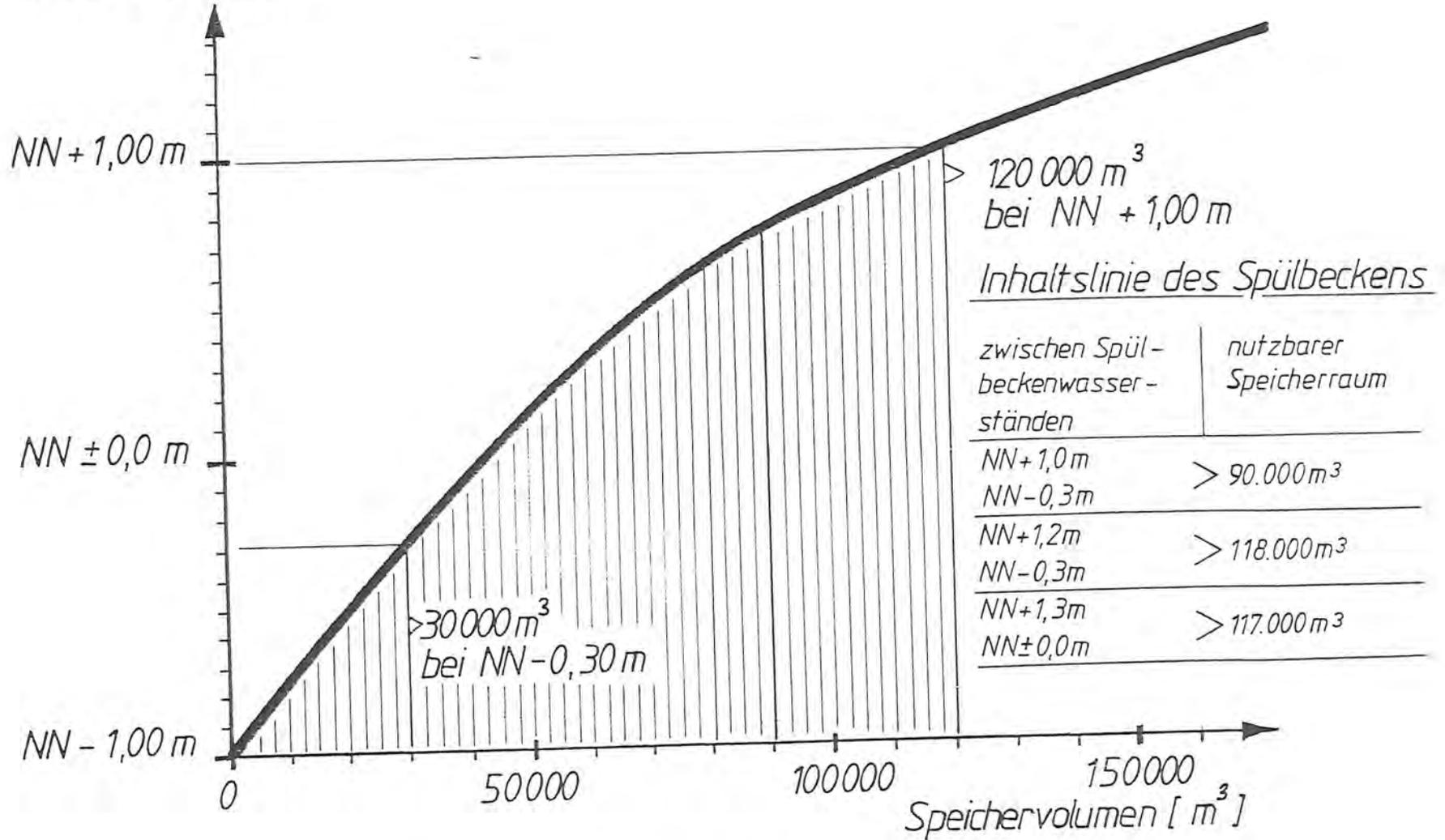


Abb. 3.6 Speichereinhaltslinie des Spülbeckens

3.6 Hydraulische Nachweise für Spülsiel und Spülbecken

3.6.1 Ziele des Entwurfes

Im Entwurf des Spülsiels ist ein Spülvolumen von 55 000 m³ Wasser je Tide vorgesehen. Die Sohle des Siels liegt auf NN - 1,0 m, die Sielbreite beträgt 4,50 m. Durch Ziehen des unteren Schützes bis auf eine Öffnungshöhe von max. 1 m wird das Spülbecken entleert. Durch Ziehen des mittleren Schützes wird das Spülbecken durch Überlauf über das untere Schütz wieder gefüllt (siehe Abschn. 3.2).

Für die Bemessung von Spülsiel und Spülbecken wurde die Bedingung gestellt, daß der Spülstrom im Außentief von i. M. 0,5 m/s über eine Zeitspanne von 1,5 bis 2,0 Std. gehalten wird. Nach dieser Bedingung ist das Bauwerk bemessen worden. Der Durchfluß während des Spülens wurde nach der Formel $Q = \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0}$ für den Ausfluß unter einem Schütz berechnet.

Durch größere Bodenentnahmen für den Deichbau ergab sich ein größeres Spülbecken mit einem verfügbaren Speichereinhalte von 80 000 bis 100 000 m³.

Entsprechend konnten auch die Spülstromgeschwindigkeiten und die Spüldauer erhöht werden. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, daß bei der größeren einzulassenden Wassermenge das erreichbare Stauziel etwas niedriger liegt.

3.6.2 Hydraulischer Nachweis für den Spülbetrieb

Mit Hilfe der Speichereinhaltslinie (Abb. 3.6) und der Änderung des Spülbeckenwasserstandes während des Spülens ist der Durchfluß durch das Spülsiel für verschiedene Schützöffnungsweiten (Abb. 3.7) halbgrafisch ermittelt worden und in Abb. 3.8 dargestellt. In den Tabellen 3.1 und 3.2 ist das dazugehörige Spülvolumen, abhängig vom Spülbeginn und der Schützöffnung, zusammengestellt. Hierbei ist von einer mittleren Tide (Abb. 3.9)

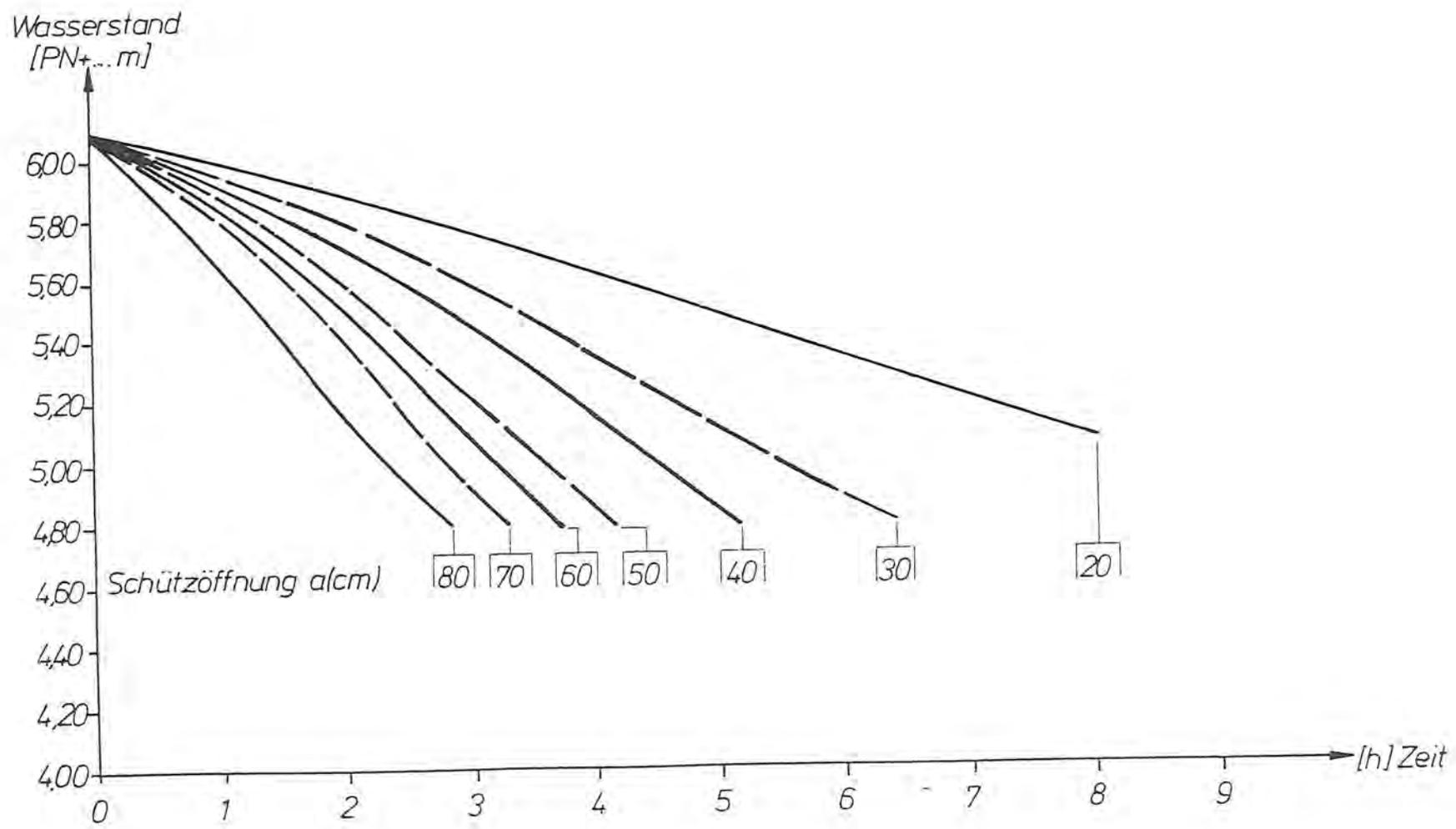


Abb. 3.7 Abflußdauer aus dem Spülbecken Neßmersiel bezogen auf Anfangswasserstand von PN + 6,10 m

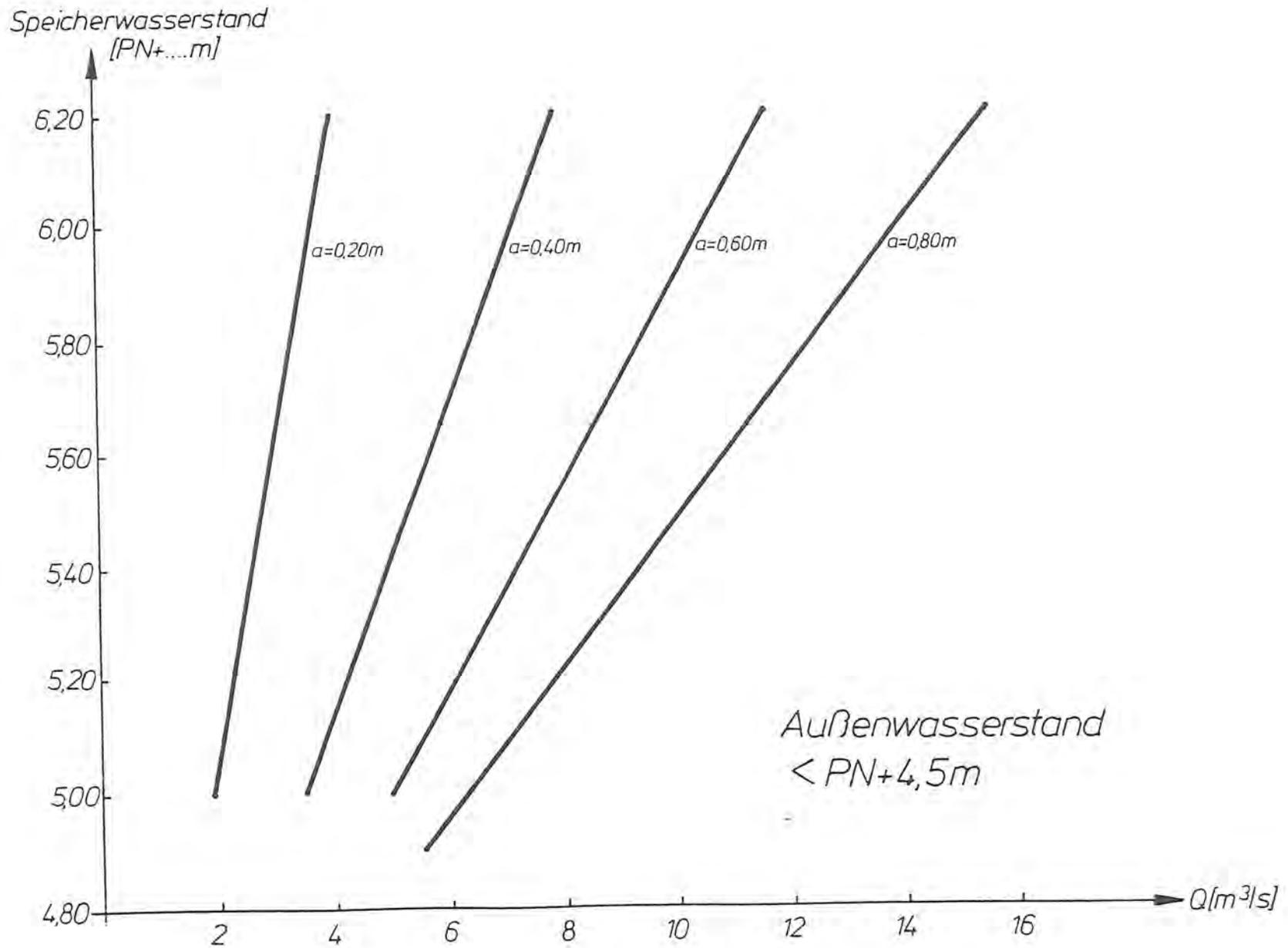


Abb. 3.8

Abflußkurven des Spülsiels in Abhängigkeit vom Speicherwasserstand und von der Schützöffnung a

Außenwasserstand bei Spülbeginn PN:	4,50	4,30	4,15	4,00	3,90
Spülzeit bis MTnw in Stunden:	2,75	2,3	1,8	1,5	1,2
<u>a = 80 cm</u> (Schützöffnung) mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	9,1 90 000	10,8 89 400	11,2 72 500	11,7 63 200	12,1 52 300
<u>a = 70 cm</u> mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	8,2 81 200	8,8 72 800	9,0 58 300	9,6 51 600	10,0 43 200
<u>a = 60 cm</u> mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s): Volumen:	7,5 74 300	7,7 63 800	8,1 52 500	8,7 47 000	8,9 38 400
<u>a = 50 cm</u> mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s) Volumen (m ³)	6,9 68 300	7,1 58 800	7,3 47 300	7,4 40 000	7,5 32 400
<u>a = 40 cm</u> mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s): Volumen (m ³)	5,6 55 400	5,7 47 200	5,9 38 200	6,2 33 500	6,5 28 100
<u>a = 30 cm</u> mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	5,1 50 500	5,2 43 100	5,3 34 300	5,3 28 600	5,3 22 900
<u>a = 20 cm</u> mittlerer Siel durchfluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	3,7 36 600	3,8 31 500	3,9 25 300	3,9 21 100	3,9 16 800

Tab. 3.1 Siel durchfluß bei Spülbetrieb bis MTnw für unterschiedliche Außenwasserstände bei Spülbeginn und verschiedenen Schützöffnungen

Außenwasserstand bei Spülbeginn m PN:	4,50	4,30	4,15	4,00	3,90
Spülzeit bis Wasserstandsausgleich bzw. unterer Grenzwasserstand im Spülbecken Std.	3,2	3,2	3,2	3,0	3,7
<u>a = 80 cm</u> (Schützöffnung) mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³)	8,7 100 200	8,7 100 200	8,7 100 200	9,0 97 200	9,2 89 400
<u>a = 70 cm</u> mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	7,6 87 600	7,6 87 600	7,6 87 600	8,0 86 400	8,3 80 700
<u>a = 60 cm</u> mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³)	6,8 78 300	6,8 78 300	6,8 78 300	7,2 77 800	7,5 72 900
<u>a = 50 cm</u> mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	6,5 74 900	6,5 74 900	6,5 74 900	6,7 72 400	6,9 67 100
<u>a = 40 cm</u> mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	5,4 62 200	5,4 62 200	5,4 62 200	5,5 59 400	5,6 54 900
<u>a = 30 cm</u> mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	4,9 56 400	4,9 56 400	4,9 56 400	5,0 54 000	5,1 49 600
<u>a = 20 cm</u> mittlerer Siel­durch­fluß (m ³ /s): Volumen (m ³):	3,6 41 500	3,6 41 500	3,6 41 500	3,7 40 000	3,8 36 900

Tab. 3.2 Siel­durch­flüsse bei Spül­betrieb mit "Gegen­stau" bei un­ter­schied­li­chen Außen­wasser­ständen bei Spül­be­ginn und ver­schie­de­nen Schütz­öff­nun­gen

und von einem mittleren Spülbeckenwasserstand bei Spülbeginn von PN + 6,00 m ausgegangen worden.

Bei normalem Spülbetrieb wird das Spülen bei T_{nw} beendet (Tab. 3.1). Soll nach dem Gegenstauprinzip zur Verringerung des beginnenden Flutstroms nach T_{nw} weitergespült werden, bis etwa ein Ausgleich zwischen Spülbeckenwasserstand und Außenwasserstand erreicht ist, so können die in Tab. 3.1 angegebenen Spülzeiten noch bis zu 2,5 Stunden verlängert werden (Tab. 3.2). Der mittlere Sieldurchfluß während der gesamten Spüldauer verkleinert sich beim Gegenstaubetrieb. Wird bei T_{nw} das Schütz geschlossen, beträgt die maximale Spülwassermenge 90 000 m³, im anderen Fall etwas über 100 000 m³ für eine Schützöffnung von 80 cm und einen Spülbeginn bei einem Außenwasserstand von PN + 4,50 m. Die je nach Steuerung verschiedenen Spülzeiten sind anhand der mittleren Tidekurve in Abb. 3.9 dargestellt.

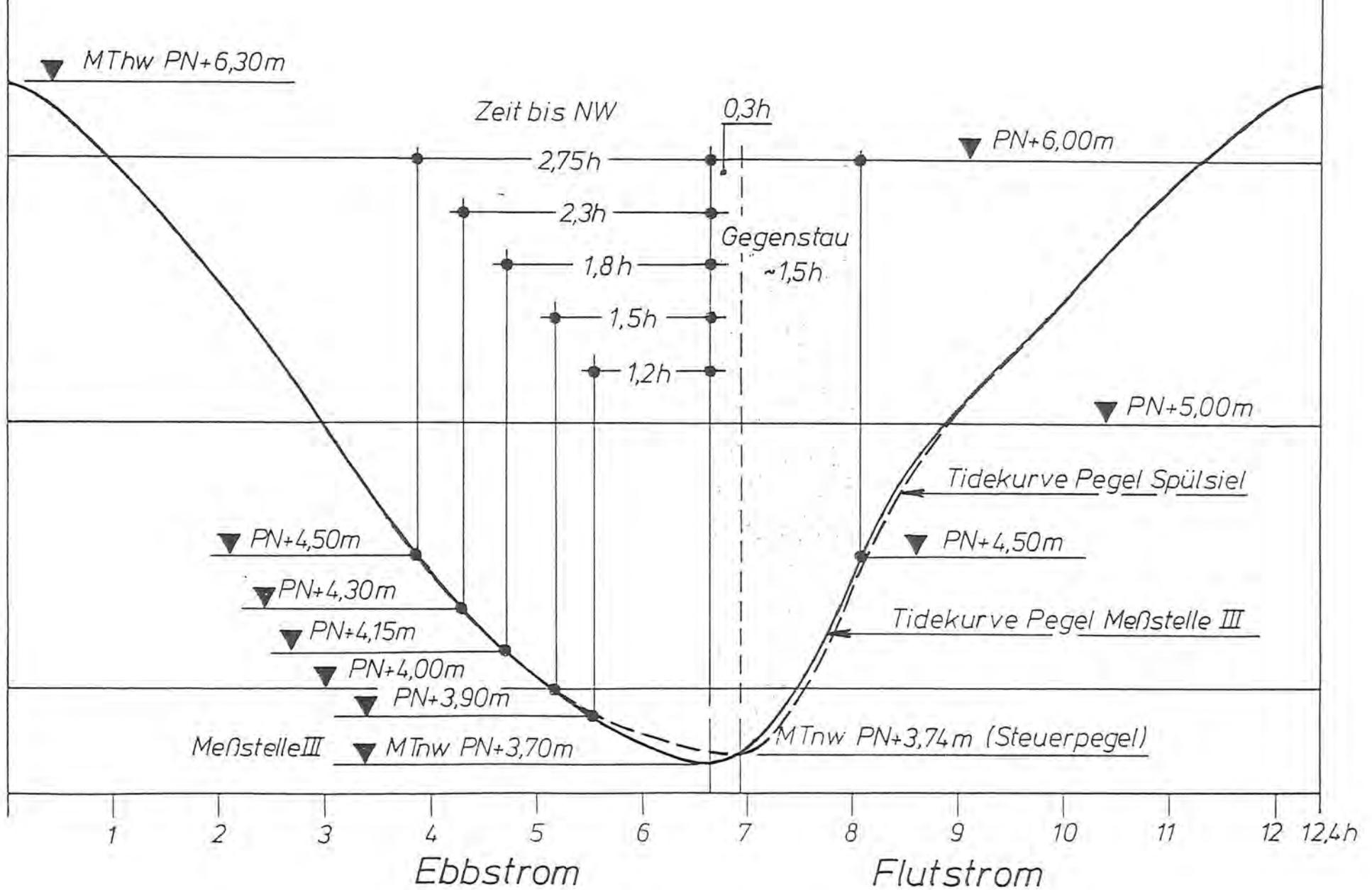


Abb. 3.9 Mittlere Tidekurven an der Meßstelle III (Leuchtfeuer) und am Spülsiel mit Angabe der Spülzeiten bezogen auf Wasserstand bei Spülbeginn und auf Tnw

3.6.3 Füllen des Spülbeckens

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erläutert, beginnt der Füllvorgang etwa bei Fluthalbwasser, wenn der ansteigende Tidewasserstand die Oberkante der untersten Schütztafel mit NN + 0,1 m übersteigt.

Die in das Spülbecken einströmenden Wassermengen können mit Hilfe der im Sielentwurf angewandten Poleni-Formel

$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\ddot{u}}^{3/2}$$

berechnet werden, wobei als Beiwert $\mu = 0,6$ für das vorhandene Siel einzusetzen ist. Einzelheiten der Berechnung werden im Abschn. 10.1.1 erläutert.

Die vorliegenden Messungen zeigen, daß das Spülbecken bei einem mittleren Niedrigwasserstand von NN - 0,5 m in mittleren Tiden (MThw = NN + 1,30 m) bis MHW = NN + 1,0 m entsprechend PN + 6,0 m gefüllt wird.

4. Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt "Tiefenstabilisierung"

4.1 Einrichtung der Meßstellen

Im Neßmersieler Außentief sind an drei ausgewiesenen Meßquerschnitten Dauermeßstationen eingerichtet. Die Meßstelle I liegt in Hafennähe, ca. 600 m seewärts des Spülziels. Meßstelle II liegt im mittleren Abschnitt des Außentiefs, ca. 1 000 m vom Siel entfernt. Die III. Meßstelle wurde am äußeren Ende des Außentiefs vor der Einmündung in die Neßmersieler Balje angeordnet (Abb. 3.2).

...

Jede Meßstation besteht aus einem Drucksensor für die Wasserstandsmessung und einem Strömungssensor für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in Längs- und Querrichtung zur Außentiefachse (Abb. 4.1). An der II. und III. Meßstelle werden außerdem der Schwebstoffgehalt mit vollautomatischen Sedimentmeßgeräten (Sediwa, Abb. 4.2) gemessen. Zusätzlich können wahlweise an der II. Meßstelle oder am Spülsiel automatische Schwebstoffmessungen mit einer Trübungssonde durchgeführt werden. Im Jahr 1986 wird die Trübungssonde mit einem Sauerstoff-Temperatur-Sensor aufgerüstet.

Mit Hilfe der an den drei Meßstellen ermittelten Wasserstandsmeßwerte 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.

4.2 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 übertragene 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

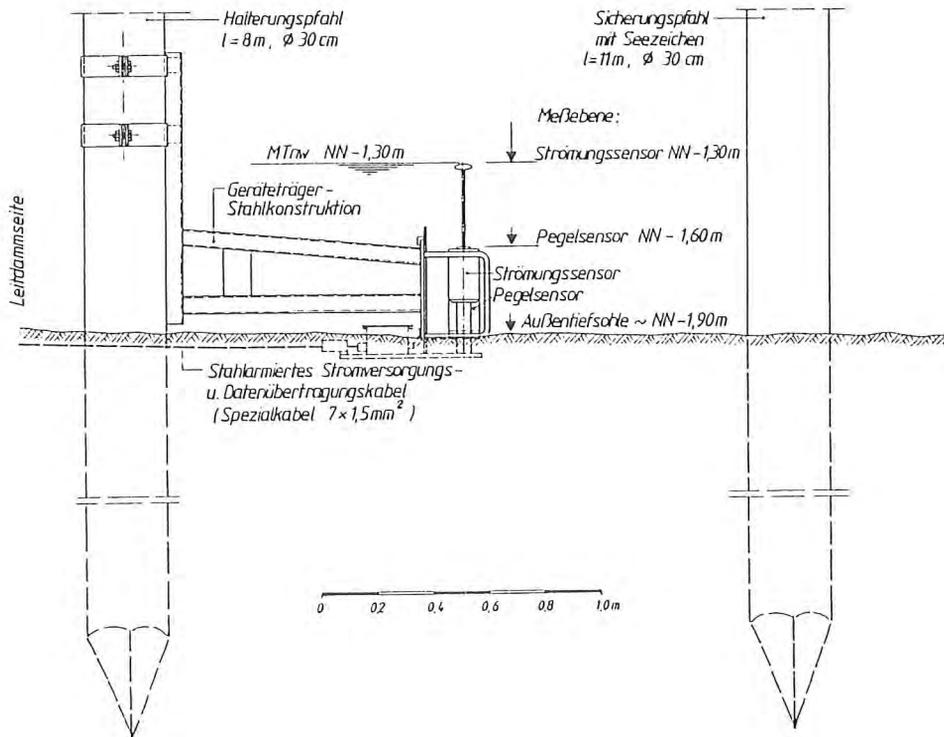


Abb. 4.1 Pegel- und Strömungsmessstelle

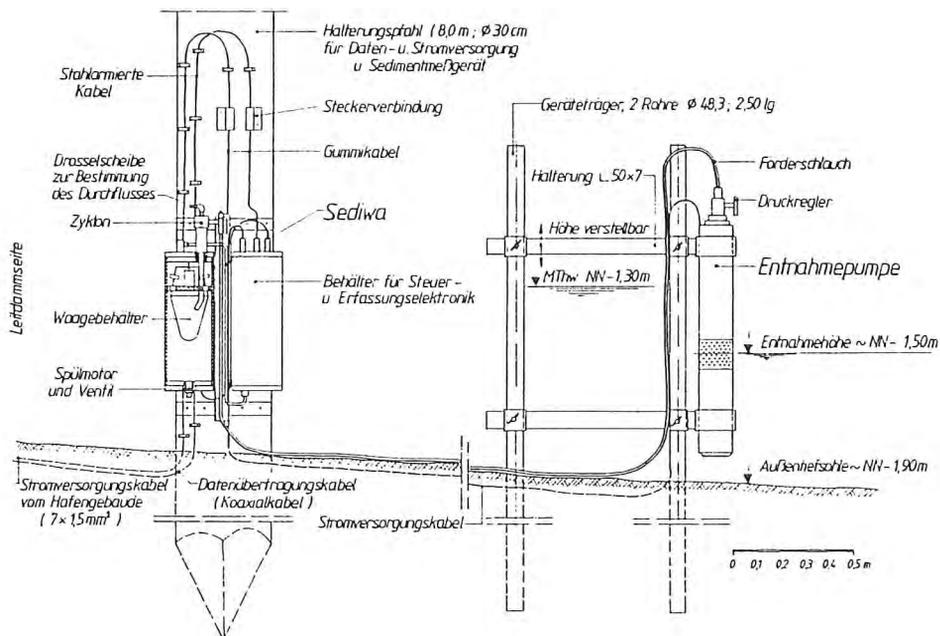


Abb. 4.2 Dauerentnahmestelle für Schwebstoffmessungen mit "Sediwa"

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 eingepprägten Ausgangsstrom $0 \dots 20 \text{ mA} = 945 \dots 1\,055 \text{ mbar}$ 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.

4.3 Hydrometrische Untersuchungen

4.3.1 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 Einrichtung 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 eingepprägten Strom (0 ... 20 mA) umgesetzt wird.

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. 4.3 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.

4.3.2 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.

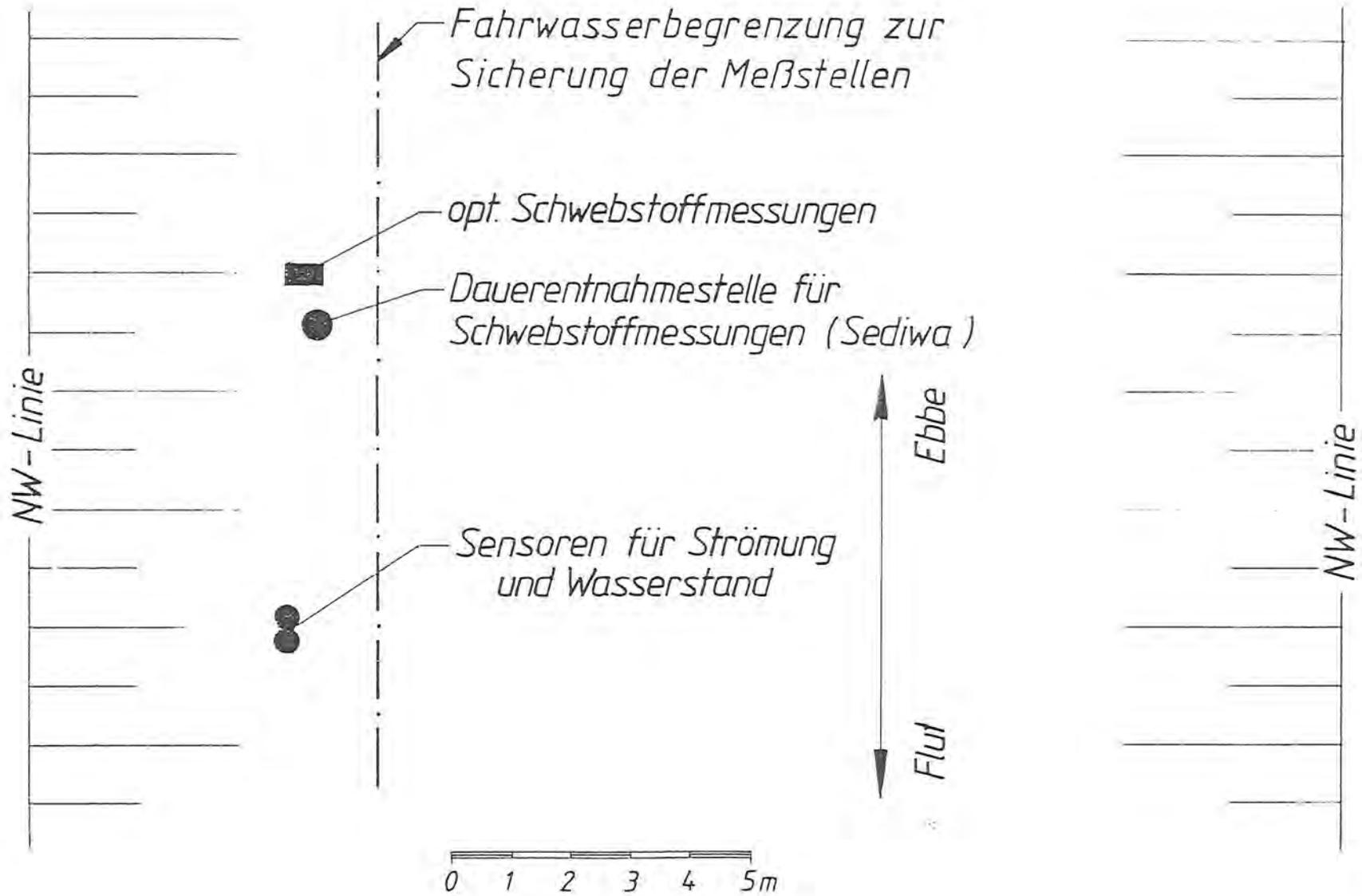


Abb. 4.3 Anordnung der Meßgeräte an Meßstelle II

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. 4.4).

Von der Meßbühne eines schwenkbaren Meßauslegers wurden die Strömungsmessungen in drei Meßlötrecten über die gesamte Außentiefbreite 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.

4.4 Schwebstoffmessung

4.4.1 Einsatz der Sedimentwaage (Sediwa)

Für eine kontinuierliche Dauermessung der instationären Sedimentbewegungen im Außentief wurde die neue vollautomatische Sedimentwaage (Sediwa) eingesetzt. Meßgerät und Meßverfahren sind im Beitrag von RENGGER und BEDNARCZYK in Die Küste, H. 44 und dem dort angegebenen Schrifttum eingehend beschrieben. Die gewählte Anordnung einer Dauermeßstation ist in Abb. 4.2 dargestellt.

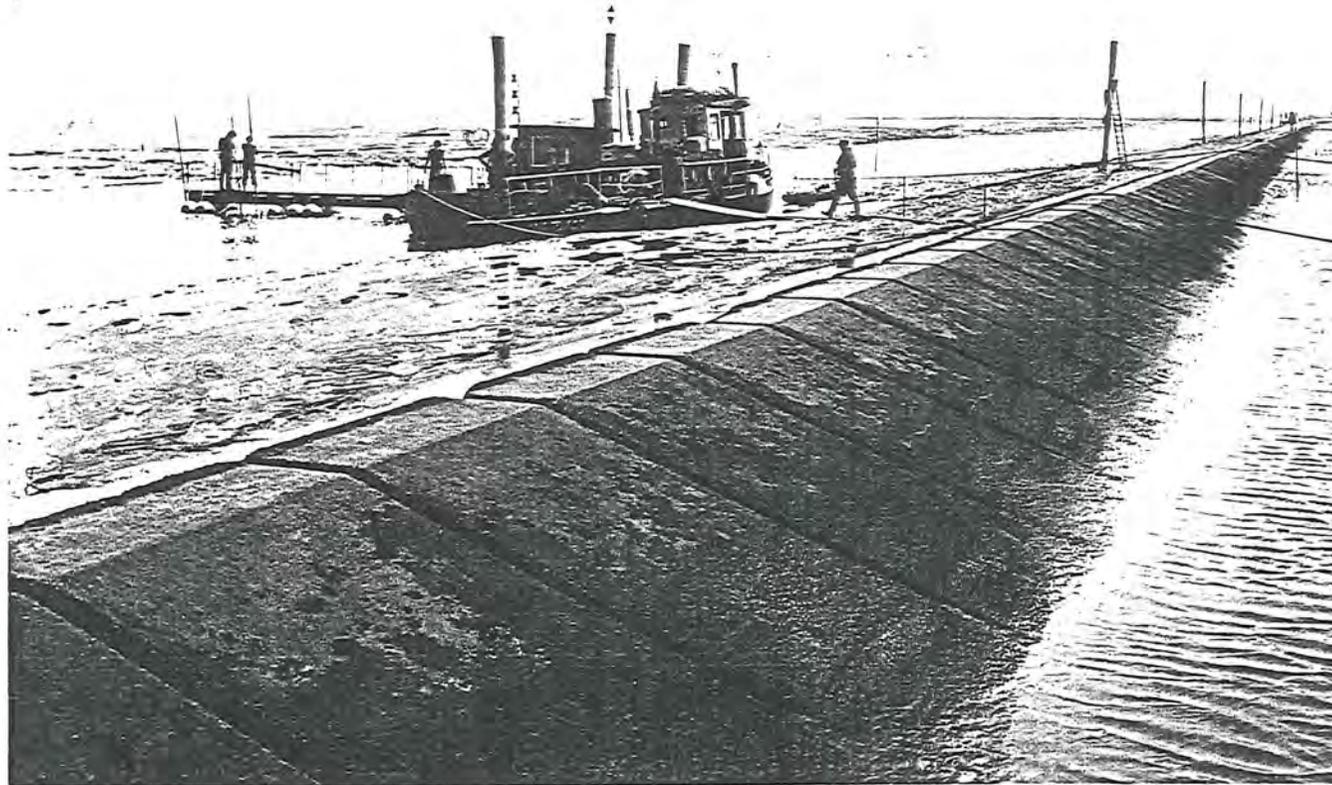


Abb. 4.4 Strömungs- und Schwebstoffmessungen vom Meßausleger über den Außentiefquerschnitt

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 $\varnothing \leq 5 \mu\text{m}$ wird von diesem Gerät nicht erfaßt (Renger, 1982). Da der Feinstkornanteil bei geringen Schwebstoffgehalten $\leq 50 \text{ mg/l}$ unter natürlichen Bedingungen relativ hoch ist, sollte das Gerät nicht für die Erfassung geringer Konzentrationen verwendet werden. Resttrübenuntersuchungen hat das Paläontologische Institut und Museum der Universität Kiel (Ricklefs 1985) im Auftrage des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten durchgeführt.

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

4.4.2 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. 4.5). Das Meßsignal wird im Unterwasserteil in eine Frequenz gewandelt und damit der Betrieb mit Einleiterkabel ermöglicht.

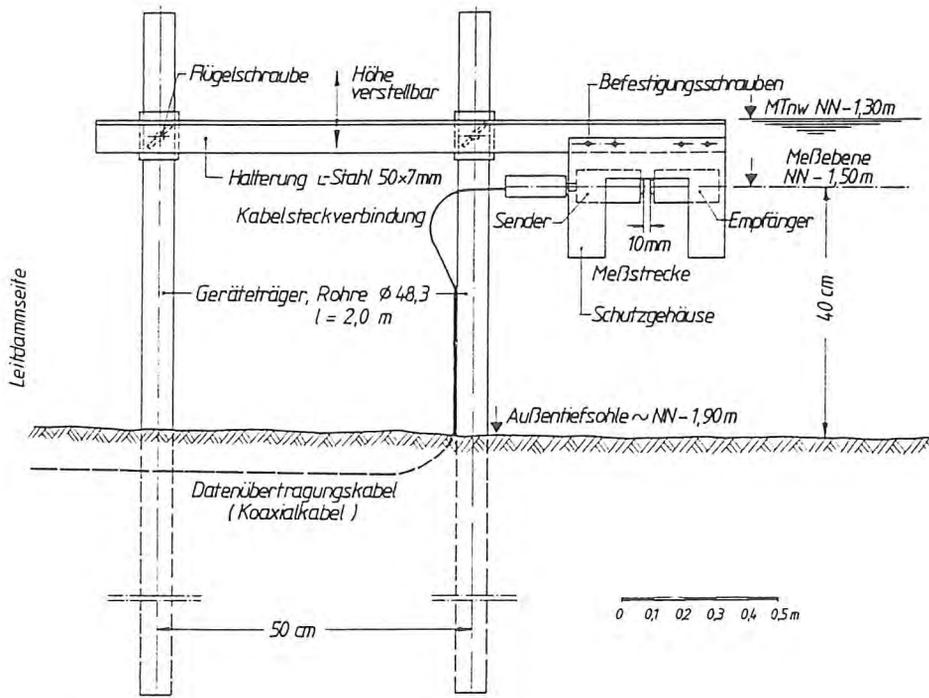


Abb. 4.5 Optisches Schwebstoffmeßgerät (Extinktionsmeßgerät) mit Halterungsvorrichtung im Außentief (Meßstelle II)

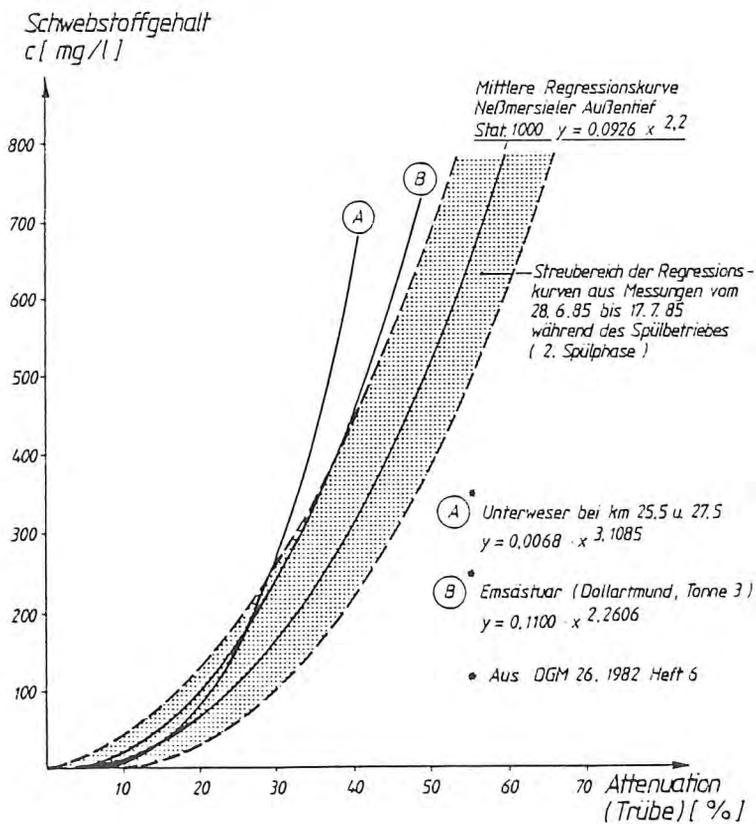


Abb. 4.6 Abhängigkeit zwischen Attenuation aus optischen Messungen und Schwebstoffgehalt aus Messungen mit der Sedimentwaage (Sediwa)

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 1 024 bis 2 048 Hz. Die volle Frequenz von 2 048 Hz wird im klaren Wasser wiedergegeben und in sehr trübem Wasser nur noch 1 024 Hz.

Der empfangene Strahlungsfluß F_t wird gemessen und durch den eingestrahnten Strahlungsfluß F_0 geteilt. Dieser Wert wird Transmission T genannt.

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

$$T = F_t / F_0 \quad (1)$$

$$c = (- \ln T) / L \quad \text{m}^{-1} \quad (2)$$

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. 4.6 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. 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).

4.5 Sauerstoff- und Temperaturmessungen

Zur Messung einer Sauerstoffzehrung oder Sauerstoffanreicherung während des Spülbetriebs oder während des Spülbetriebs mit Räumbooteinsatz sind im Jahre 1986 zusätzlich Sauerstoff- und Temperaturmessungen an Meßstelle II durchgeführt worden.

Die mit der sog. OMS-Sonde gemessenen Daten werden per Kabel übertragen und auf Band gespeichert. Nach entsprechender Umrechnung wird der Sauerstoffgehalt in Prozent angegeben. Der Meßbereich liegt zwischen 30 und 130 % Sättigung. Mit dem gemessenen %-Wert, einer Konstanten und einem von Temperatur und Salzgehalt abhängigen Sättigungswert (aus Tabelle) läßt sich der Sauerstoffgehalt in mg/l angeben.

Die Ergebnisse aus diesen Messungen werden im Abschn. 6.7 erläutert.

4.6 Zeitlicher Ablauf

Im Jahre 1983 wurden die Strömungs- und Drucksensoren an den Meßstellen für Strömung und Wasserstand erstmalig eingebaut und Vergleichsmessungen der Fließgeschwindigkeit mit Meßflügeln über den gesamten Querschnitt durchgeführt.

An zwei Meßstellen fanden gemeinsame Zwischen- bzw. Hauptversuche mit dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein und der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau statt, die im Rahmen des Projekts "Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)" Sondermessungen vornahmen.

Die Abb. 4.7 enthält eine Gesamtübersicht der Einzelmessungen- und -untersuchungen.

Abb. 4.8 gibt eine Übersicht über die Einsatzzeiten der Dauermeßgeräte. Zur Vermeidung von Schäden durch Eisgang mußten die Geräte in den Wintermonaten abgebaut werden.

Im Jahr 1984 wurden erstmals Schwebstoffdauermessungen mit der "Sediwa" durchgeführt, so daß der Frage der kritischen Geschwindigkeit des Erosionsbeginns nachgegangen werden konnte. Außerdem wurde untersucht, wie sich das längere (ca. 2 Monate dauernde) Aussetzen des Spülbetriebs auf das Außentief auswirkt.

Im Jahre 1985 wurde die Spülsielsteuerung variiert und die Auswirkung der Steuerungsvarianten erfaßt. Erstmals konnten mit inzwischen zwei "Sediwas" an 2 Meßstationen parallele Schwebstoffdauermessungen vorgenommen werden. Außerdem wurden vergleichsweise erstmals Schwebstoffmessungen mit einem Trübungsmeßgerät durchgeführt.

Im darauffolgenden Jahr 1986 wurden die Messungen im Zusammenhang mit Räumbooteinsätzen durchgeführt, um das Schwebstofftransportvermögen der Tideströmung zu erfassen und den Räumbooteinsatz zu untersuchen. Damit waren die Naturmessungen abgeschlossen.

Parallel zu den hydrologischen Messungen wurde in kurzen Zeitabständen die Topographie des Untersuchungsgebietes aufgenommen sowie die erforderlichen sedimentologischen Untersuchungen durchgeführt (Abb. 4.7 und 4.8).

Zeit	1983												1984												1985												1986												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Spülbecken																																																	
Wasserstand Steuerpegel																																																	
Außenriff Stat. 90 Spüßsiedl. / Hafen																																																	
Wasserstand																																																	
Strömung																																																	
Schwebstoff (Hafen)																																																	
Trübe (Spüßsiedl.)																																																	
Außenriff Stat. 590 Meßstelle I																																																	
Wasserstand																																																	
Strömung																																																	
Außenriff Stat. 1000 Meßstelle II																																																	
Wasserstand																																																	
Strömung																																																	
Schwebstoff																																																	
Trübe																																																	
Temperatur																																																	
Sauerstoff																																																	
Außenriff Stat. 1470 Meßstelle III																																																	
Wasserstand																																																	
Strömung																																																	
Schwebstoff																																																	

Abb. 4.8 Meßzeitenübersicht der Dauermeßgeräte

5. Meßergebnisse ohne Räumbooteinsatz

5.1 Strömungen

5.1.1 Unbeeinflusste Tidenströmungen

Unter unbeeinflussten Tidenströmungen soll in diesem Zusammenhang der natürliche Flut- bzw. Ebbstrom ohne Einfluß durch Schiffsverkehr, Auslassen aus dem Spülbecken oder durch Starkwinde verstanden werden. Die Strömungen werden daher bei mittlerem Tideverlauf im Neßmersieler Außentief untersucht.

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 (Abb. 5.8).

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 (Abb. 5.7, 5.8).

Für ein besonders niedriges T_{nw} von NN - 1,50 m an Meßstelle III zeigt das Beispiel eines Anlogschriebs (Abb. 5.7) 45 Minuten nach T_{nw} an Meßstelle II eine Flutstromspitze von 1,0 m/s. Außer den Wasserständen und Strömungen enthält die Abb. 5.7 die Ganglinie des Schwebstoffgehalts und der Durchflußmenge durch das Spülziel. Zu der 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 T_{nw} 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 Leuchtfeuer aufläuft und daraufhin 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 in dem Neßmersieler Außentief überwiegt. Z. B. wurde die transportwirksame Fließgeschwindigkeit $> 0,4$ m/s an Meßstelle III in einer Meßwoche ohne Spülbetrieb Ende Mai 1984 durch den Flutstrom in 3,04 % - d. s. i. M. 23 Minuten einer Tide - und durch den Ebbstrom nur in 0,06 % der Meßwerte, d. h. bei Flut 50 mal häufiger bzw. länger überschritten.

Die mit der Flut in das Außentief transportierten Sedimente führten zu einer raschen Auflandung der zuvor durch Spülbetrieb vertieften Querschnitte. Der Bereich der Meßstelle II verschlickte infolge Aussetzen des Spülbetriebs zunehmend, so daß die Messungen vorübergehend eingestellt werden mußten und erst nach einer Räumaktion und längerem Spülbetrieb wieder aufgenommen werden konnten.

Wegen der Querschnittsenge an Meßstelle I konnten mit Rücksicht auf den Schiffsverkehr keine Strömungsmessungen im dortigen Außentiefquerschnitt durchgeführt werden.

5.1.2 Strömungen bei Spülbetrieb

Beim Spülbetrieb wird das in dem Becken gestaute Seewasser erst in der letzten Phase der Ebbe ausgelassen, so daß in dem kleinflächig benetzten Außentiefquerschnitt hohe Ebbstromgeschwindigkeiten erreicht werden. 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 Außentiefhöhe zu. Die erreichbaren Spülstromgeschwindigkeiten hängen ab von der Steuerung des Siels und den vorgegebenen natürlichen hydrologischen Bedingungen, vor allem dem Tideverlauf und dem topographischen Zustand des Außentiefs, der sich wiederum in Reaktion auf den Spülbetrieb einstellt (Abschn. 7).

Zunächst sollen die Wasserstands-, Strömungs- und Schwebstoff- bzw. Trübungsganglinien für einen zusammenhängenden Zeitraum von 4 Tagen einen Gesamteindruck über die Dauermessungen geben. Sie vermitteln die Eigenart solcher Naturmessungen mit der täglichen Ungleichheit der Tiden, den dadurch unterschiedlichen Spülbeckenwasserständen und Spülströmungen, den Schwebstoffgehalten in einem freigespülten Außentief sowie dem daran ablesbaren Windeinfluß (Abb. 5.1 a).

Während der Hauptnaturuntersuchungen in den Jahren 1984 und 1985 wurde die Steuerung des Spülbetriebs variiert - wie bereits erläutert. Dies geschah durch unterschiedliche Einstellung der Schützöffnungsweiten und des Spülbegins in Abhängigkeit zum Außenwasserstand (Abb. 5.1 u. 5.2).

Das Aussetzen des Spülbetriebs und die gedrosselten Spülungen vom 16.4. bis 10.7.84 führten zu einer Verlandung des Außentiefs (s. Abb. 7.4). Die Meßstellen gelangten in eine Randlage zum Querschnitt, so daß gegenüber dem Meßzeitraum 1985 geringfügig geringere mittlere Fließgeschwindigkeiten registriert wurden.

Der Verhältniswert der Stromintegrale - das ist das Integral über $v dt$ - wird dadurch nicht beeinflusst. Er beträgt für die Meßstelle II für die Meßzeiträume 1984 und 1985 $1 : 2,2$ (Tab. 5.1) und $1 : 3,2$ an Meßstelle III. Im Meßzeitraum 1984 wurden 86 %, 1985 80 % aller Tiden durch Spülung beeinflusst. (An Meßstelle III für 1984 nicht ermittelt) Durch die Spülwasserzugabe wird der Verhältniswert der Stromintegrale, der sich lt. Messungen aus dem Jahre 1979 (BLANKENSTEIN u. a., 1984) in unbeeinflussten Tiden auf $1 : 0,8$ im mittleren Bereich des Außentiefs (etwa Meßstelle II) beläuft, völlig umgekehrt. Für Meßstelle III ergibt sich der höhere Verhältniswert $1 : 3,2$. Dies läßt sich dadurch begründen, daß aufgrund einer Walzenbildung am Leitdammende in der Endphase des Spülens bei Einsetzen des ersten Flutstroms und häufig sehr frühzeitig vor Kenterung des Flutstroms um Thw eine verlängerte Ebbstromdauer quasi vorgetäuscht wird. Infolge dieser Strömungen schließt sich der Außentiefquerschnitt ohne westliche Uferzone unmittelbar an den Leitdamm an. In diesem Abschnitt fehlt daher das bei NW sonst zu beobachtende trockenfallende westliche Außentiefufer.

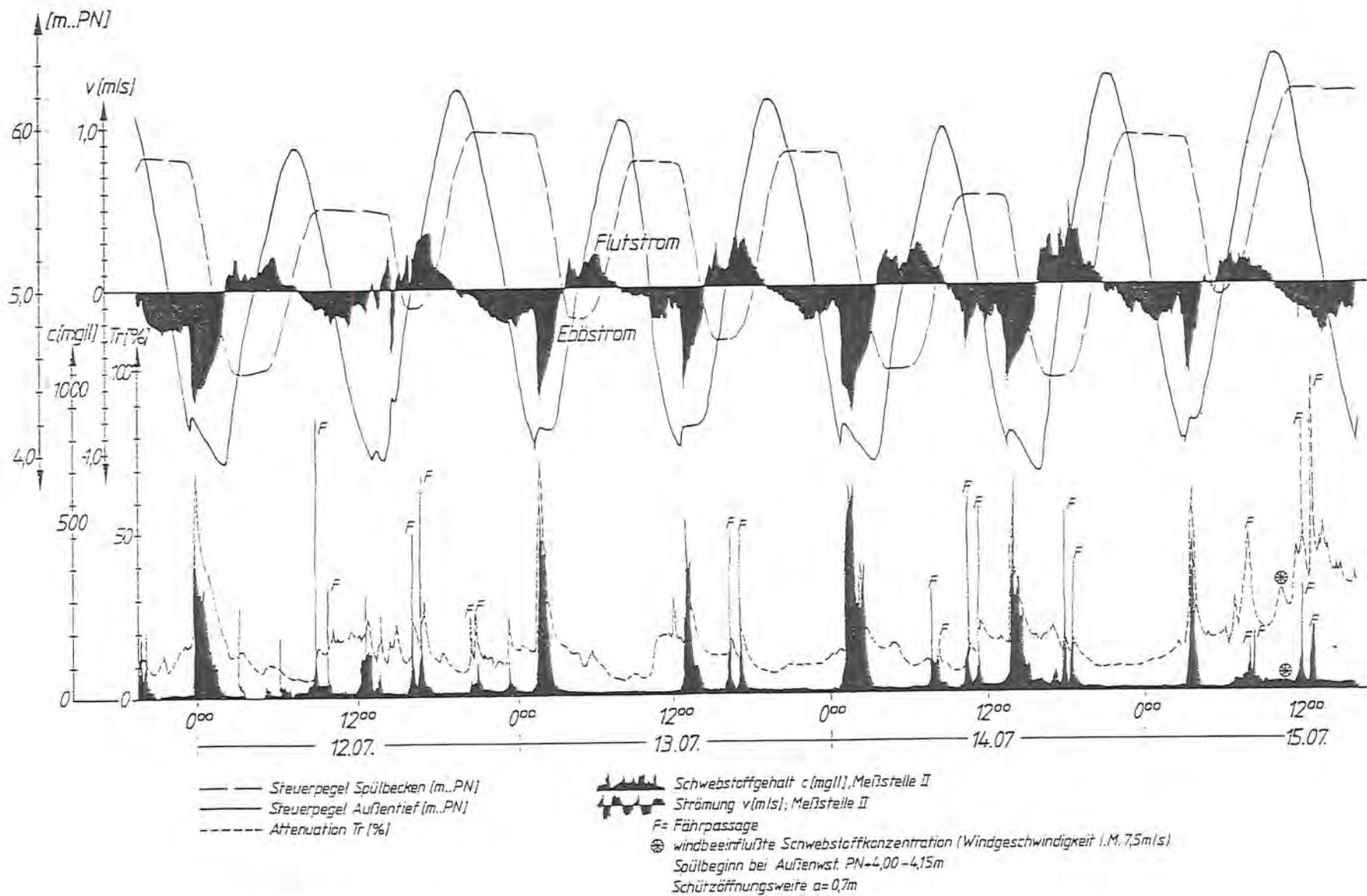


Abb. 5.1a Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und des Schwebstoffgehalts vom 12.07. - 15.07.1985

Spülbeginn bei einem
Außenwasserstand von [PN+...m]

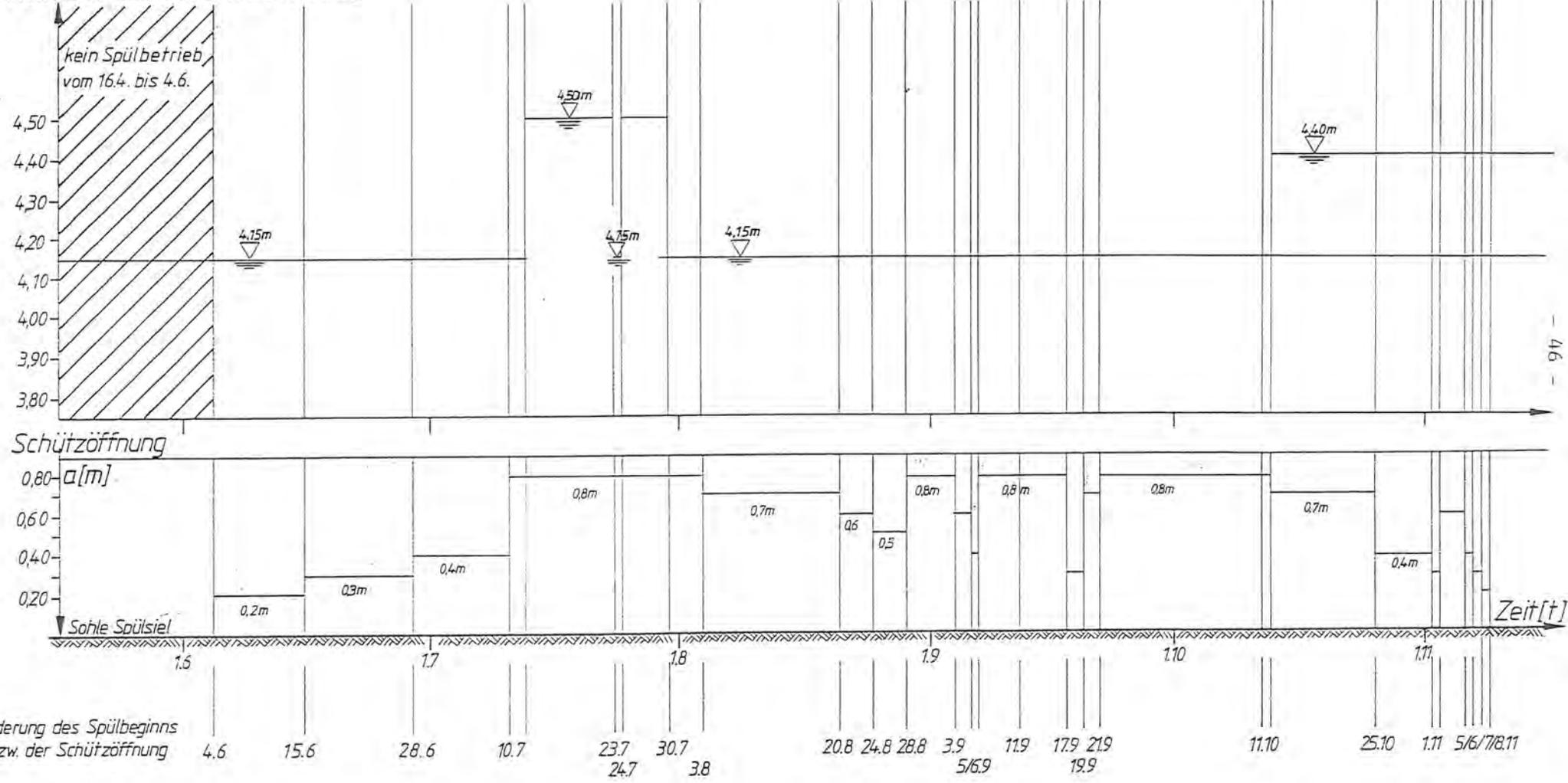


Abb. 5.1: Steuerung des Spülsiels während der Dauermessungen 1984

Spülbeginn bei einem
Außenwasserstand von [PN+...m]

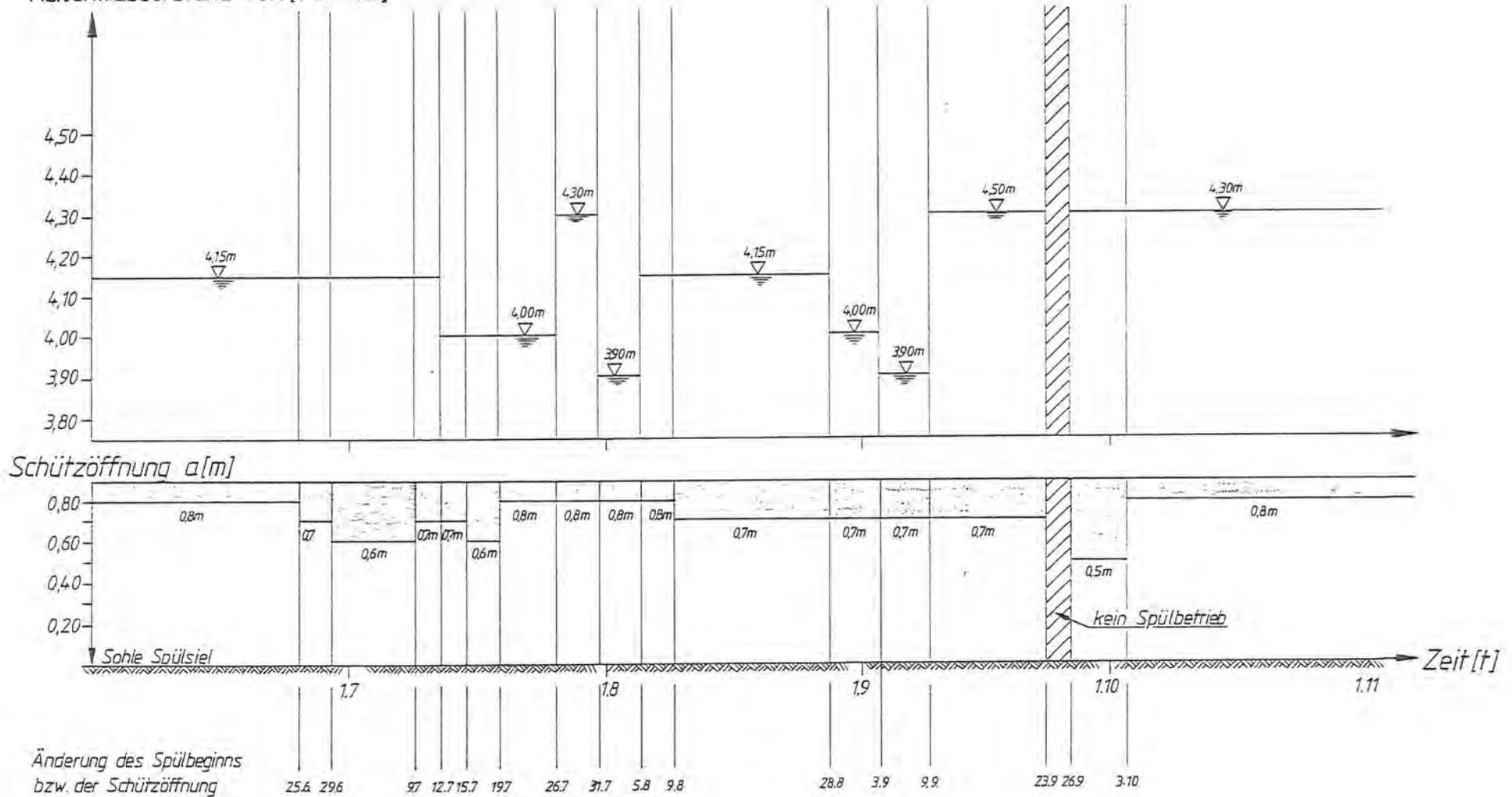


Abb. 5.2: Steuerung des Spülseils während der Dauermessungen 1985

Messzeitraum	HS (%)	Messort (b. Spülbeginn (m PN))	a (m)	MHW m PN	MHW m PN	MHW (mPN)	MHW (mPN)	HW < 4 m PN (%)	mittlere Fließgeschwindigk.				berechnete Leckvolumen $\frac{V}{t}$				$\int v dt = \int v dt$		Bemerkungen
									Mdet. II		Mdet. III		Mdet. II		Mdet. III		Mdet. II	Mdet. III	
									v_{fm}	v_{zm}	v_{fm}	v_{zm}	Flut	Lecke	Flut	Lecke			
24.06. - 30.06.	92	4,15	0,8/0,7	6,31	3,97	6,55 6,05	4,08 3,95	13	0,165	0,328	0,18	0,28	0,7	16,1	0,7	18,6	1 : 2,7	1 : 3,9	
01.07. - 07.07.	100	4,15	0,6	6,42	3,98	6,65 6,12	4,08 3,98	14	0,165	0,358	0,20	0,31	1,1	19,0	2,4	23,2	1 : 4,0	1 : 4,0	erhöhter Seegang
08.07. - 14.07.	100	4,15/4,00	0,6/0,7	6,17	3,69	6,65 5,92	4,10 3,72	8	0,140	0,236	0,18	0,26	0,2	10,4	0,8	15,8	1 : 1,4	1 : 3,0	
15.07. - 21.07.	93	4,00	0,6/0,8	6,44	3,98	6,80 6,13	4,10 3,56	6	0,119	0,255	0,17	0,27	0,2	11,8	1,8	15,1	1 : 2,3	1 : 4,0	
22.07. - 28.07.	69	4,00/4,30	0,8	6,32	3,78	6,66 5,94	4,06 3,50	11	0,187	0,276	0,22	0,28	3,0	11,3	3,2	17,0	1 : 1,9	1 : 3,1	
29.07. - 04.08.	100	4,30/3,90	0,8	6,56	3,97	6,83 6,30	4,24 3,86	12	0,143	0,310	0,17	0,30	0,2	15,2	1,2	17,1	1 : 3,4	1 : 4,3	
05.08. - 11.08.	77	4,15	0,8/0,7	6,35	4,16	6,95 5,94	4,87 3,70	3	0,143	0,252	0,18	0,27	0,1	11,0	2,1	16,2	1 : 2,3	1 : 3,3	
12.08. - 18.08.	93	4,15	0,7	6,24	3,97	6,59 6,03	4,30 3,93	10	0,125	0,269	0,19	0,25	0,2	14,8	1,7	19,2	1 : 3,7	1 : 3,4	
19.08. - 25.08.	100	4,15	0,7	6,24	3,97	6,82 6,00	4,25 3,70	10	0,134	0,272	0,19	0,26	0,1	14,3	1,3	15,8	1 : 3,0	1 : 3,7	
26.08. - 01.09.	93	4,15/4,00	0,7	6,30	4,01	6,66 5,94	4,30 3,95	9	0,135	0,260	0,19	0,24	0,3	12,7	1,8	13,5	1 : 2,9	1 : 3,1	
02.09. - 08.09.	30	4,00/3,90	0,7	6,55	4,40	7,18 6,12	5,21 3,78	4	0,128	0,214	0,16	0,23	1,0	7,9	2,8	10,2	1 : 2,1	1 : 2,8	erhöhter Seegang
09.09. - 15.09.	92	4,30	0,7	6,22	4,07	7,04 5,86	4,36 3,66	5	0,110	0,165	0,19	0,22	0,6	3,1	1,5	12,4	1 : 2,0	1 : 2,3	wegen Internal-Pumpenarbeiten und erhöhter Form ab Getriebe
16.09. - 22.09.	63	4,30	0,7	6,57	4,01	6,88 6,22	4,28 3,84	6	0,124	0,162	0,20	0,25	0,3	3,1	1,4	16,1	1 : 2,0	1 : 3,0	bis einschl. Oktober nur wenig effektive Spülungen
23.09. - 30.09.	43	4,30	0,5	7,19	4,53	6,52 5,85	4,32 3,86	11	0,139	0,150	0,19	0,24	2,4	0,02	1,2	11,6	1 : 1,1	1 : 2,9	A fo. Spülunterbrechung
01.10. - 06.10.	64	4,30	0,8	6,38	3,94	6,39 6,01	4,24 3,66	5	0,130	0,130	0,24	0,25	0,3	1,2	4,0	15,5	1 : 1,4	1 : 2,4	
09.10. - 13.10.	56	4,30	0,8	6,33	4,45	7,00 6,02	5,14 3,84	3	0,090	0,083	0,17	0,18	0,2	0,2	2,7	8,7	1 : 0,9	1 : 2,0	
14.10. - 20.10.	79	4,30	0,8	6,47	3,91	6,68 6,14	4,06 3,64	9	0,140	0,134	0,21	0,31	1,6	0,5	3,4	24,4	1 : 1,2	1 : 3,2	
21.10. - 27.10.	54	4,30	0,8	5,90	3,79	6,39 5,42	4,03 3,61	12	0,101	0,132	0,15	0,29	0,3	0,2	1,0	20,3	1 : 1,6	1 : 3,3	Ostwindlage
28.10. - 30.10.	100	4,30	0,8	6,37	3,93	6,30 6,22	4,10 3,80	4	0,111	0,165	0,26	0,36	--	2,7	4,5	36,7	1 : 2,5	1 : 3,8	Werte von Mdet. III nicht repräsentativ, da zweimal Nullwerte
Gesamtmittel: 24.06. - 30.10.09	80	--	-	6,39	4,02	7,18 5,42	5,21 3,48	8	0,14	0,22	0,18	0,27	0,8	10,5	2,1	17,2	1 : 2,2	1 : 3,2	
Gesamtmittel 23.05.-4.11.04	86	--	-	6,34	3,99	-	-	-	0,11	0,15	0,14	0,17	0,41	4,64	-	--	1 : 2,2	--	

* beeinflusst durch Spülbetrieb

HS = Häufigkeiten der Spülungen bez. auf die Anzahl aller Lufen
a = Spülöffnungsweite (m)
HW = Häufigkeit der Wasserstände < 4,00 m PN bez. auf die Anzahl aller Messwerte (%)

Tab. 5.1: Wöchentliche Wasserstands- und Strömungsparameter

Daß der durch Spülung verstärkte Ebbstrom gegenüber dem Flutstrom deutlich überwiegt, ergibt sich auch aus den berechneten Mittelwerten des gesamten Meßzeitraumes aus dem Jahre 1985. Die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit liegt mit 0,22 m/s (Meßstelle II) und 0,27 m/s (Meßstelle III) wesentlich über der mittleren Flutstromgeschwindigkeit mit nur 0,14 m/s bzw. 0,19 m/s (Tab. 5.1).

Zunächst erscheinen die Werte relativ gering. Hierbei muß aber berücksichtigt werden, daß in die Mittelwertbildung sämtliche Meßwerte eingehen, also auch die kleinen Fließgeschwindigkeiten vor und nach Hochwasser. Die am häufigsten auftretende Ebbstromgeschwindigkeit liegt mit einem Anteil von 18,3 % der Gesamtmeßwerte an Meßstelle II zwischen 0,10 m/s und 0,20 m/s und mit einem Anteil von 16,5 % an Meßstelle III zwischen 0,20 m/s und 0,30 m/s. Die am häufigsten auftretende Flutstromgeschwindigkeit liegt mit einem Anteil von 17,8 % aller Meßwerte an Meßstelle II und 9,9 % an Meßstelle III zwischen 0 und 0,10 m/s.

Der Einfluß des Spülbetriebs auf die Geschwindigkeitsverteilung wird in Abb. 5.3 im Ebbstrombereich bei Wasserständen kleiner NN durch die bis zu 1,2 m/s reichende Verteilungskurve verdeutlicht. An Meßstelle III - Abb. 5.4 - ist der durch Spülen künstlich erhöhte Ebbstrom nicht so sehr ausgeprägt, die höhere mittlere Ebbstromgeschwindigkeit ergibt sich hier überwiegend durch den höheren natürlichen Ebbstrom.

Der Einfluß des Spülbetriebs kommt deutlicher zum Ausdruck, wenn kürzere Meßzeiträume mit häufigen bzw. mit wenigen Spülungen miteinander verglichen werden.

Als Einzelbeispiele bieten sich die Daten der Wochen vom 01.07. bis 07.07.1985 und vom 23.09. bis 30.09.1985 an. In der Juliwoche wurde an jeder Tide gespült. Dieses ist in Abb. 5.5 mit der hohen Häufigkeit der Ebbstromgeschwindigkeit größer 0,5 m/s (bei Wasserständen kleiner 5 m) zu erkennen. Die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit liegt mit 0,36 m/s dementsprechend hoch, die mittlere Flutstromgeschwindigkeit beträgt 0,16 m/s.

Als Gegenbeispiel ist in Abb. 5.6 die letzte Septemberwoche aufgeführt. Wegen Unterhaltungsarbeiten am Tosbecken ist hier nur an 43 % aller Tiden gespült worden. Auch lag die Ebbstromgeschwindigkeit nie über 0,5 m/s. Die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit beträgt hier nur 0,13 m/s. In der Häufigkeitsverteilung des Flutstroms treten Fließgeschwindigkeiten bis zu 1,25 m/s bei niedrigen Wasserständen auf. Hier sind nach Tnw einige kurzzeitig anhaltende Flutstromspitzen erfaßt worden. Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit von 0,14 m/s wird aber hierdurch kaum beeinflusst.

Für die Tiefenstabilisierung des Außentiefs sind die transportwirksamen Fließgeschwindigkeiten $> 0,4$ m/s entscheidend (Abschn. 5.2.2). In dem Gesamtmeß-Zeitraum 1985 sind bei Ebbstrom an Meßstelle II 10,5 % und an Meßstelle III sogar 17,2 % aller Meßwerte größer als 0,4 m/s, bei Flutstrom nur 0,8 % bzw. 2,1 % (Tab. 5.1). Aus diesen Daten wird besonders deutlich, daß der durch Spülung verstärkte Ebbstrom überwiegt und ein hohes Stromarbeitsvermögen aufweist. Dieses Ergebnis ist für die Spülanlagenbemessung wichtig. Zu berücksichtigen sind dabei auch die anderen Einflußfaktoren auf den Schwebstoffumsatz, wie z. B. der Seegang und der Schiffsverkehr, die zu einer Resedimentation bzw. ggf. Verflachung des Außentiefquerschnitts beitragen können.

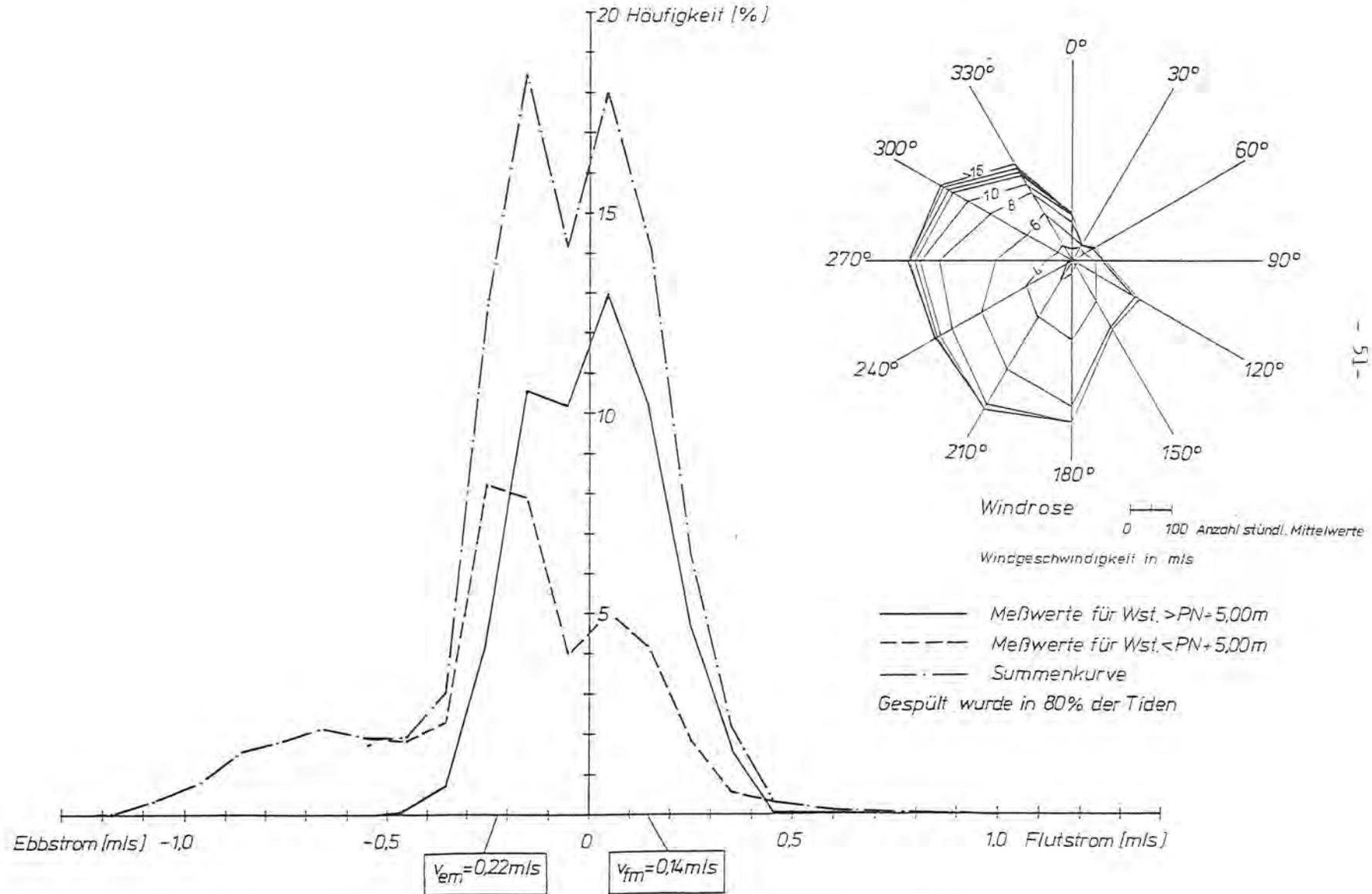


Abb. 5.3: Häufigkeitsverteilung der Fließgeschwindigkeit an Meßstelle II vom 24.06. bis 30.10.1985

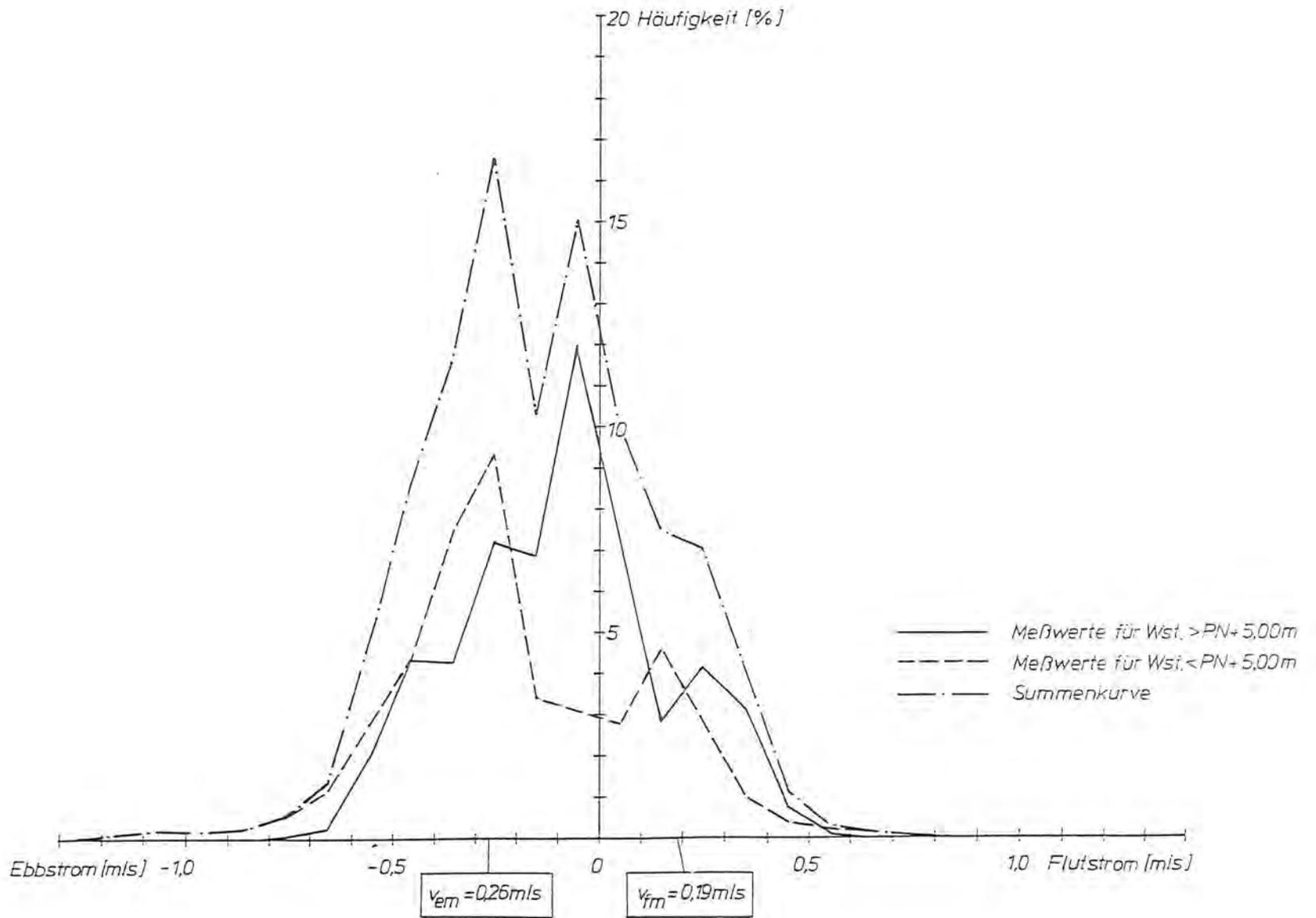


Abb. 5.4: Häufigkeitsverteilung der Fließgeschwindigkeit an Meßstelle III vom 24.06. bis 30.10.1985

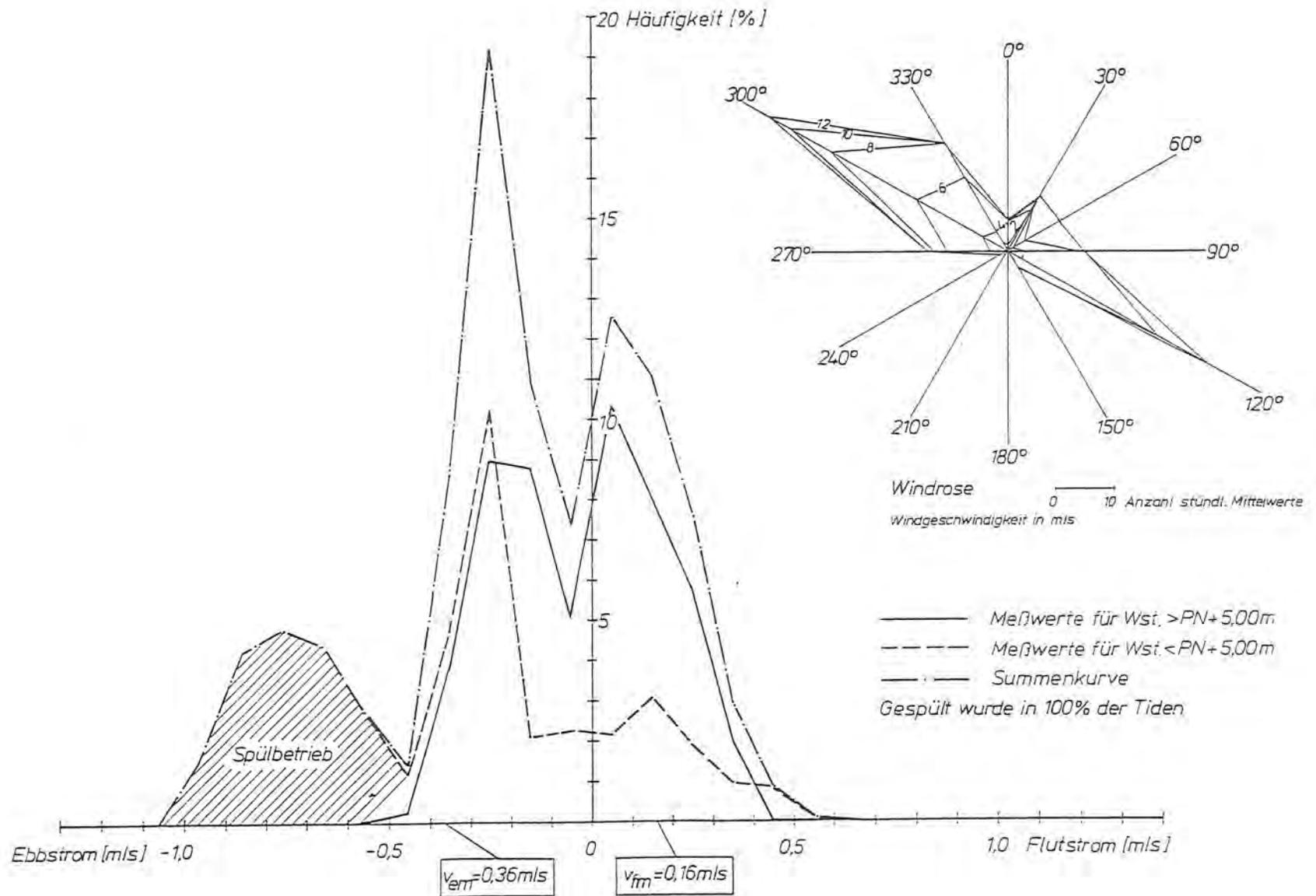


Abb. 5.5: Häufigkeitsverteilung der Fließgeschwindigkeit an Meßstelle II vom 01.07. bis 07.07.1985

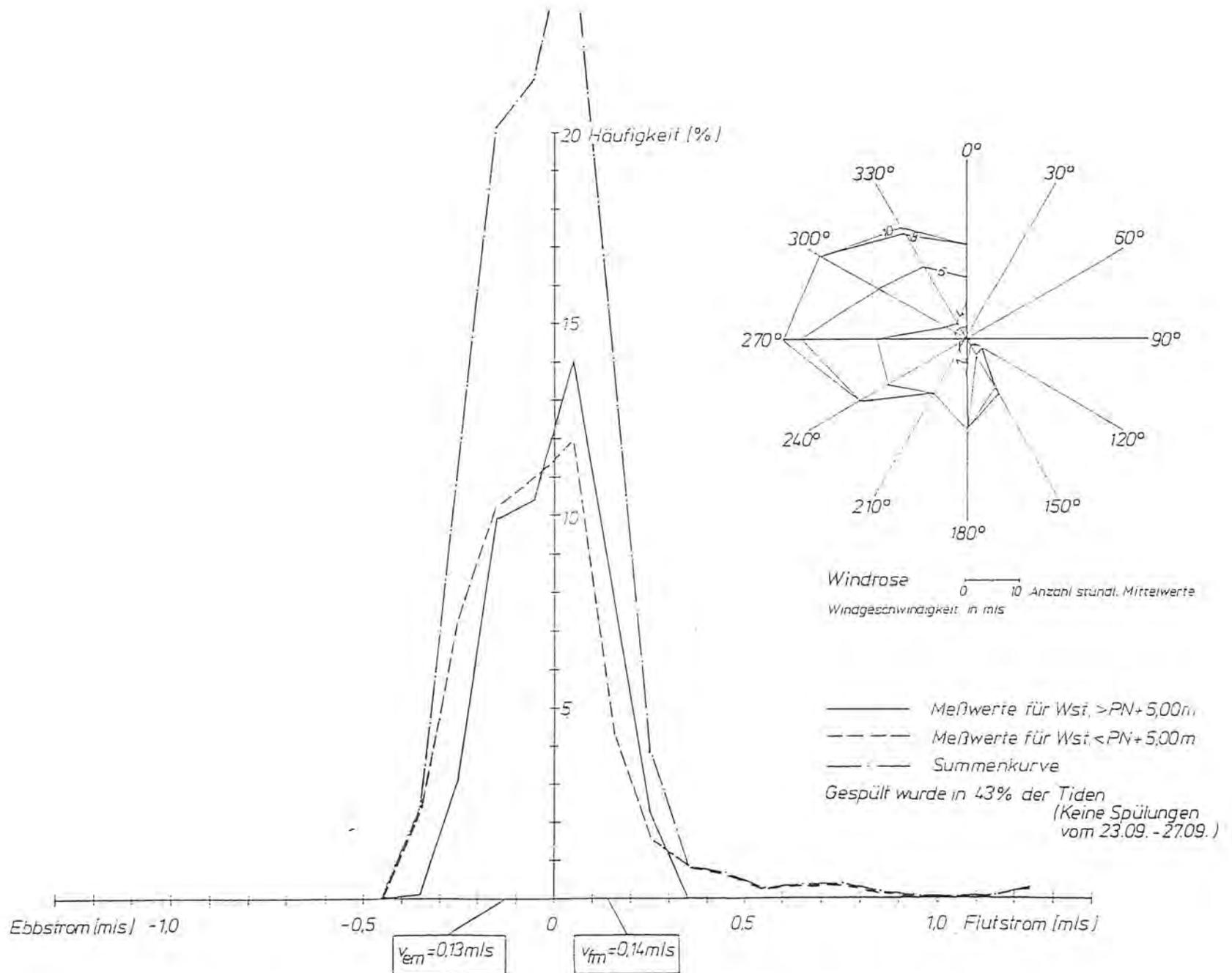


Abb. 5.6: Häufigkeitsverteilung der Fließgeschwindigkeit an Meßstelle II vom 23.09. bis 30.09.1985

5.2 Schwebstoffgehalt

5.2.1 Schwebstoffgehalt bei unbeeinflusster Tidesströmung

Während der in Abschn. 5.1.1 beschriebenen Phase des Flutstroms kurz nach T_{w} ist das Wasser mit sehr vielen Schwebstoffen angereichert. Diese Schwebstoffe setzen sich nach Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Außentief bzw. Hafenbecken ab.

Beispiele aus den Naturmessungen für den Schwebstoffeintrag durch den Flutstrom zeigen Abb. 5.7 bis 5.12.

Grundsätzlich werden mit hohen Flutstromspitzen ($v > 1,0$ m/s) relativ hohe Schwebstoffgehalte in das Außentief transportiert (Abb. 5.7 und 5.8 mit 700 bzw. 1090 mg/l).

Aber auch schon bei geringeren Fließgeschwindigkeiten können hohe Schwebstoffgehalte auftreten, wenn leicht erodierbares Material wie z. B. frisch abgelagerter Schlack von der Strömung erfaßt wird. (Abb. 5.9 mit $v_{\max} = 0,62$ m/s mit $c_{\max} = 800$ mg/l an Meßstelle II).

In den Abbildungen 5.11 bis 5.14 ist vor

Einsetzen des Flutstroms mit zusätzlichem Räumbooteinsatz gespült worden. Hier wurde sogar bei einer kleinen Flutstrom-

... 0,25 m/s eine Schwebstoffspitze von

0,58 m/s eine

III (Abb. 5.12)

e Flutstromge-

stoff während

. Dagegen beträgt

II bei 0,41 m/s

4).

er Meßerspieler

fs eingetragen,

it hinaus trans-

...

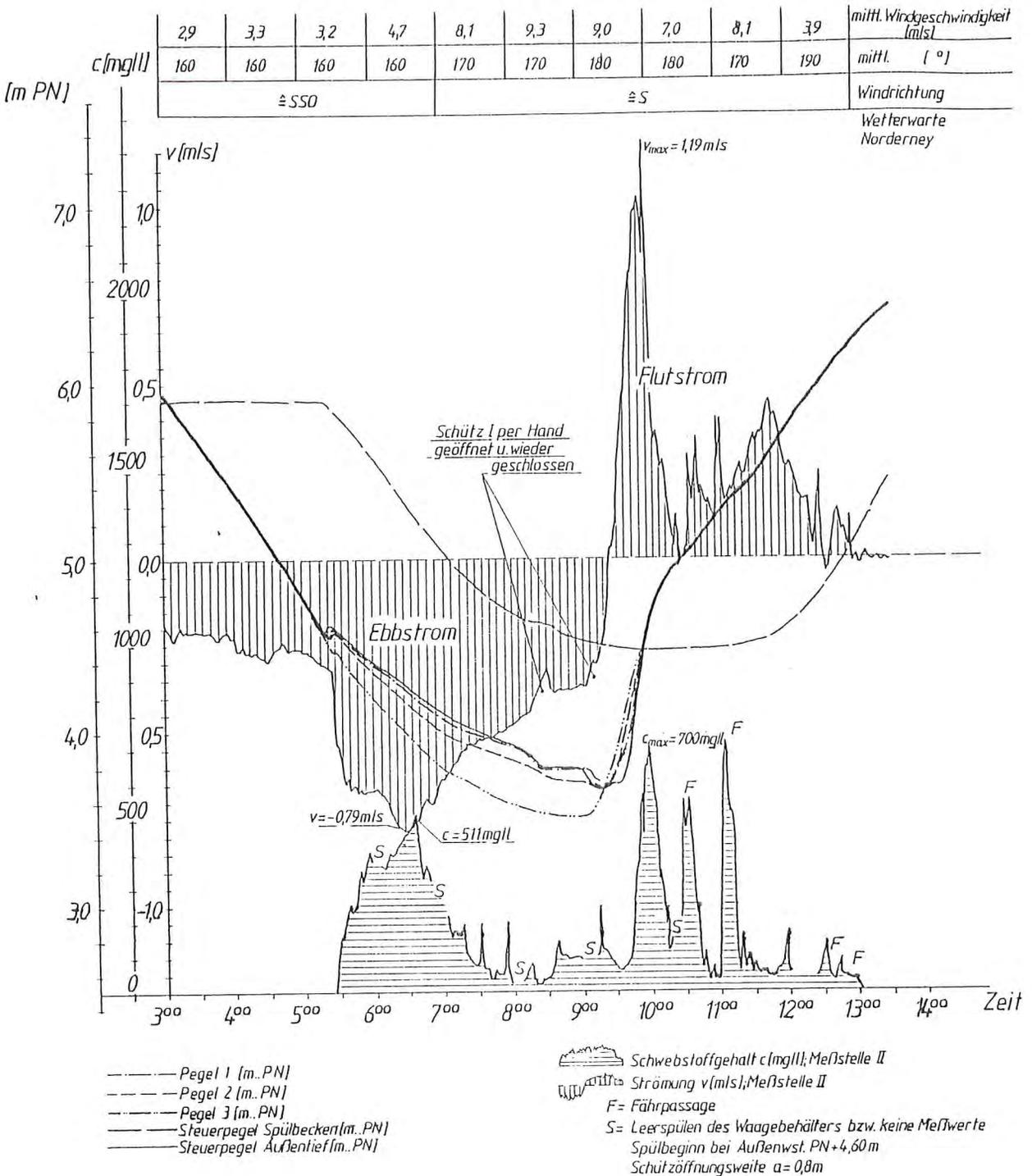


Abb. 5.7 Ganglinien - Meßstelle II - vom 30.07.1984

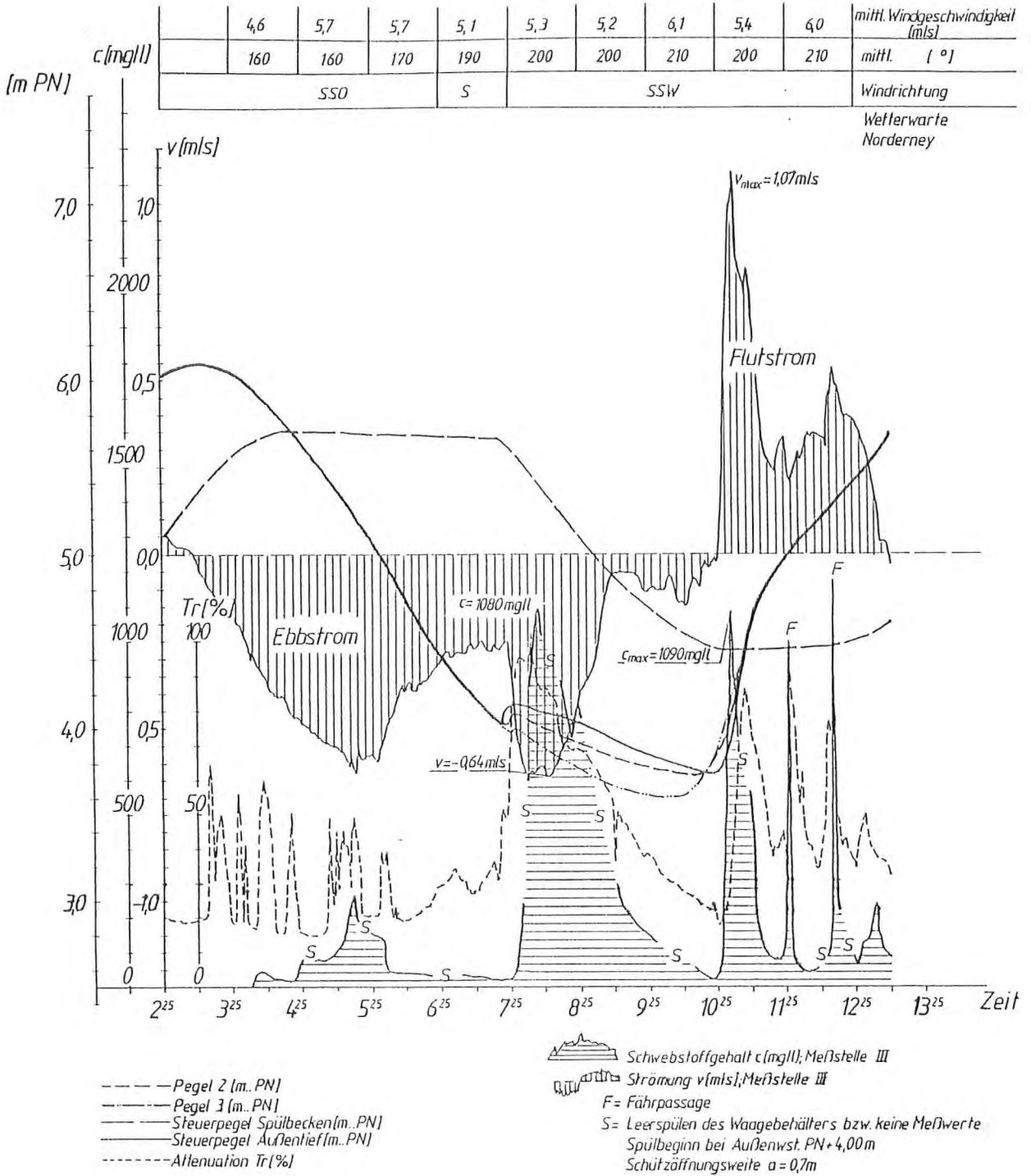


Abb. 5.8 Ganglinien - Meßstelle III - vom 03.09.1985

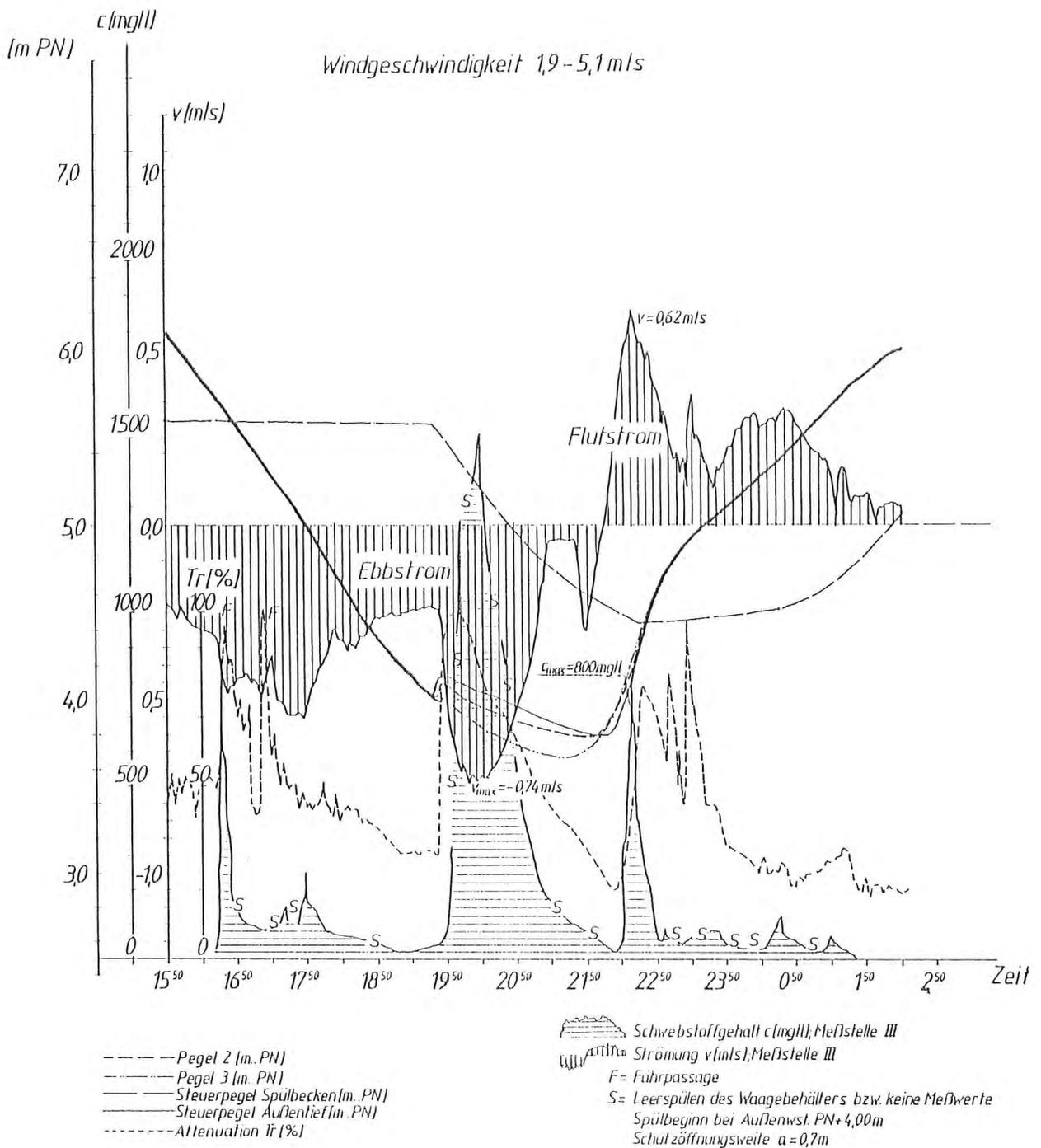
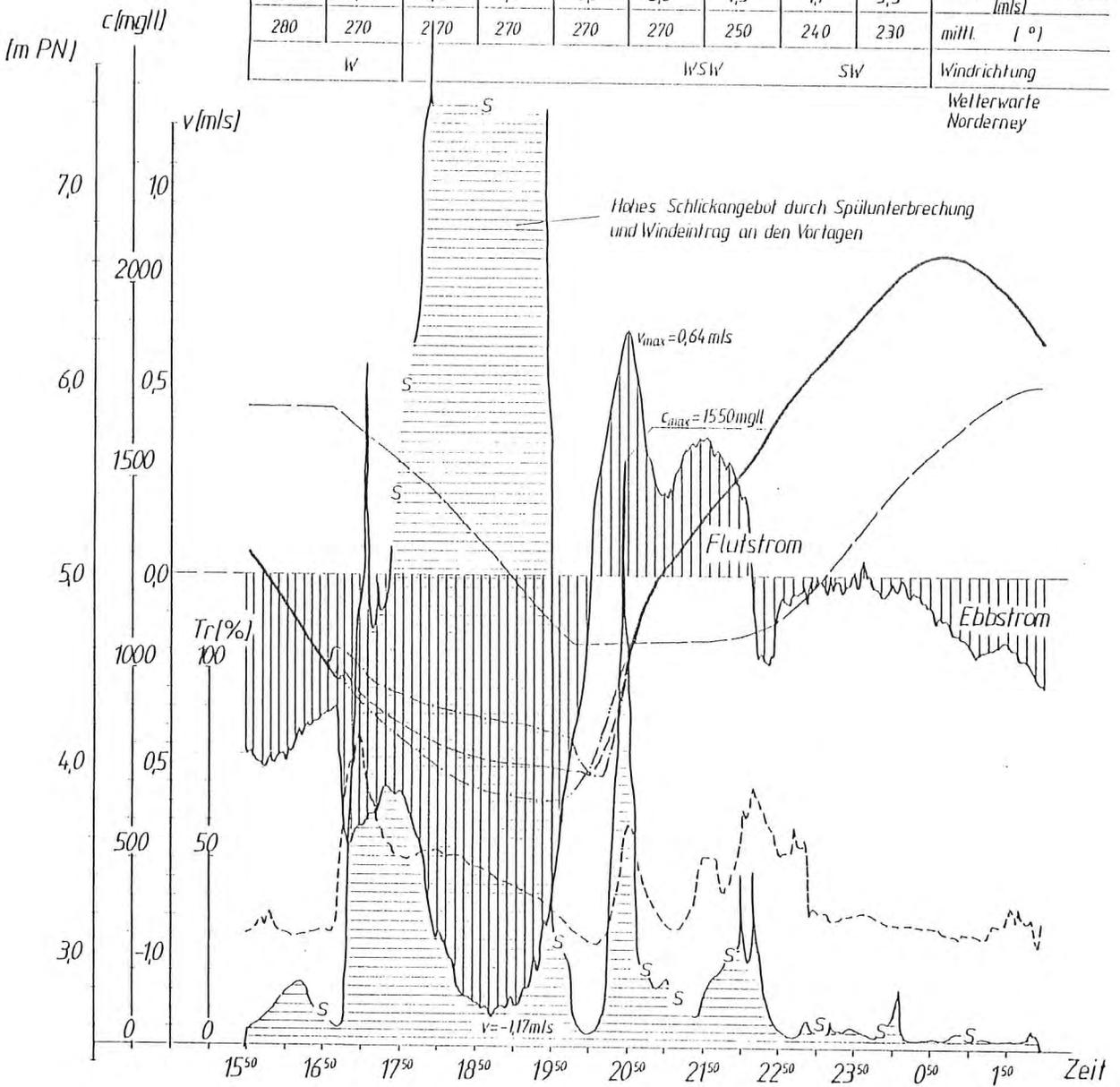


Abb. 5.9 Ganglinien - Meßstelle III - vom 02./03.09.1985

8,2	8,3	7,6	7,8	6,6	5,8	4,3	4,7	5,3	mittl. Windgeschwindigkeit (m/s)
280	270	2170	270	270	270	250	240	230	mittl. (°)
W		W'SW				SW			Windrichtung
Wetterwarte Norderney									



- Pegel 1 (Steuerpegel Außentief) (m. PN)
- Pegel 2 (m. PN)
- Pegel 3 (m. PN)
- Steuerpegel Spülbecken (m. PN)
- Attenuation Tr (%)

- Schwebstoffgehalt c (mg/l), Meßstelle III
- mittl. Strömung v (m/s), Meßstelle III
- F = Fährpassage
- S = Leerspülen des Waagebehälters bzw. keine Meßwerte
- Spülbeginn bei Außenwst. PN+ 4,50m
- Schulzöffnungsweite $a = 0,7m$

Abb. 5.10 Ganglinien - Meßstelle III - vom 24./25.05.1986

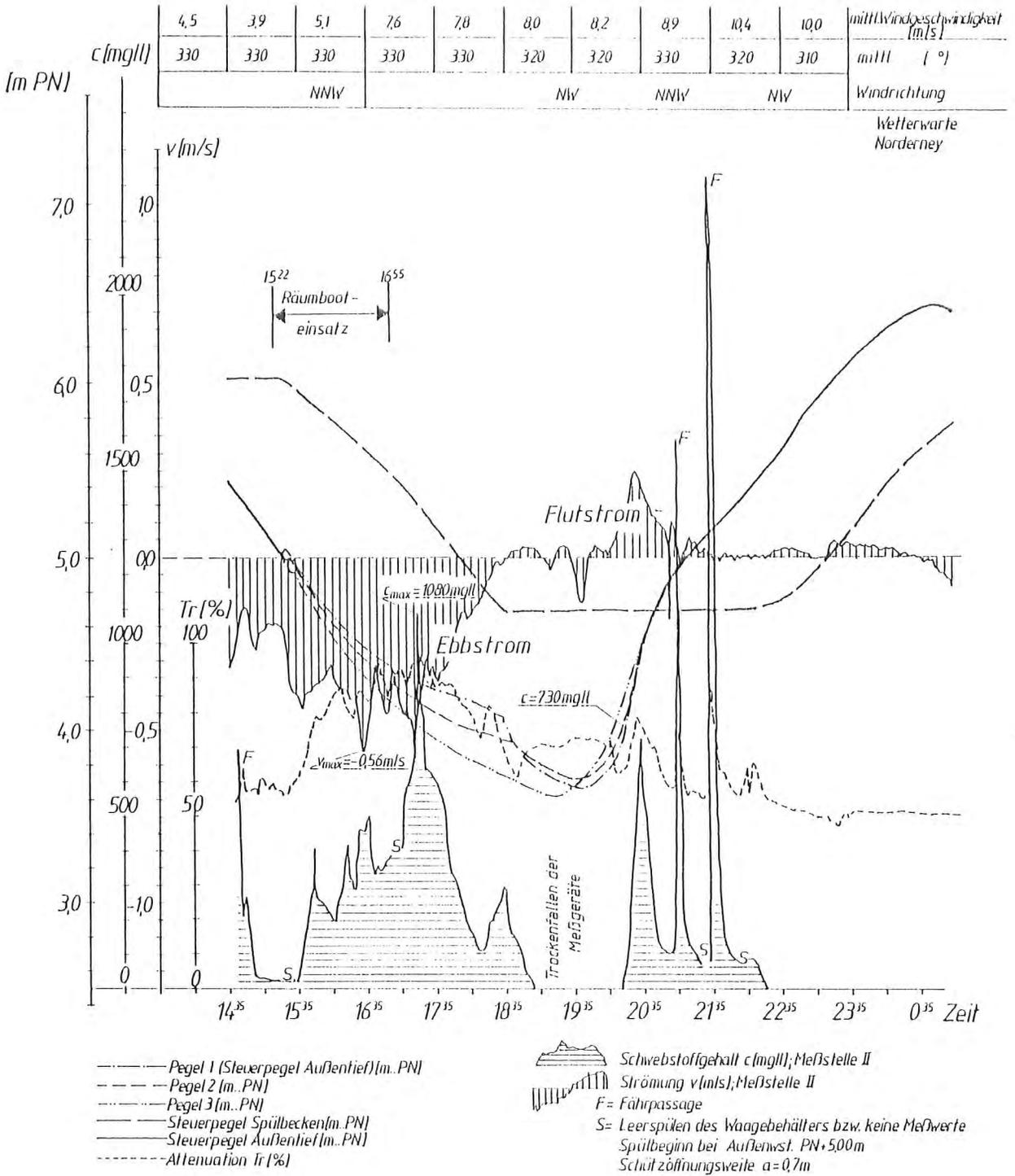


Abb. 5.11 Ganglinien - Meßstelle II - vom 19./20.08.1986

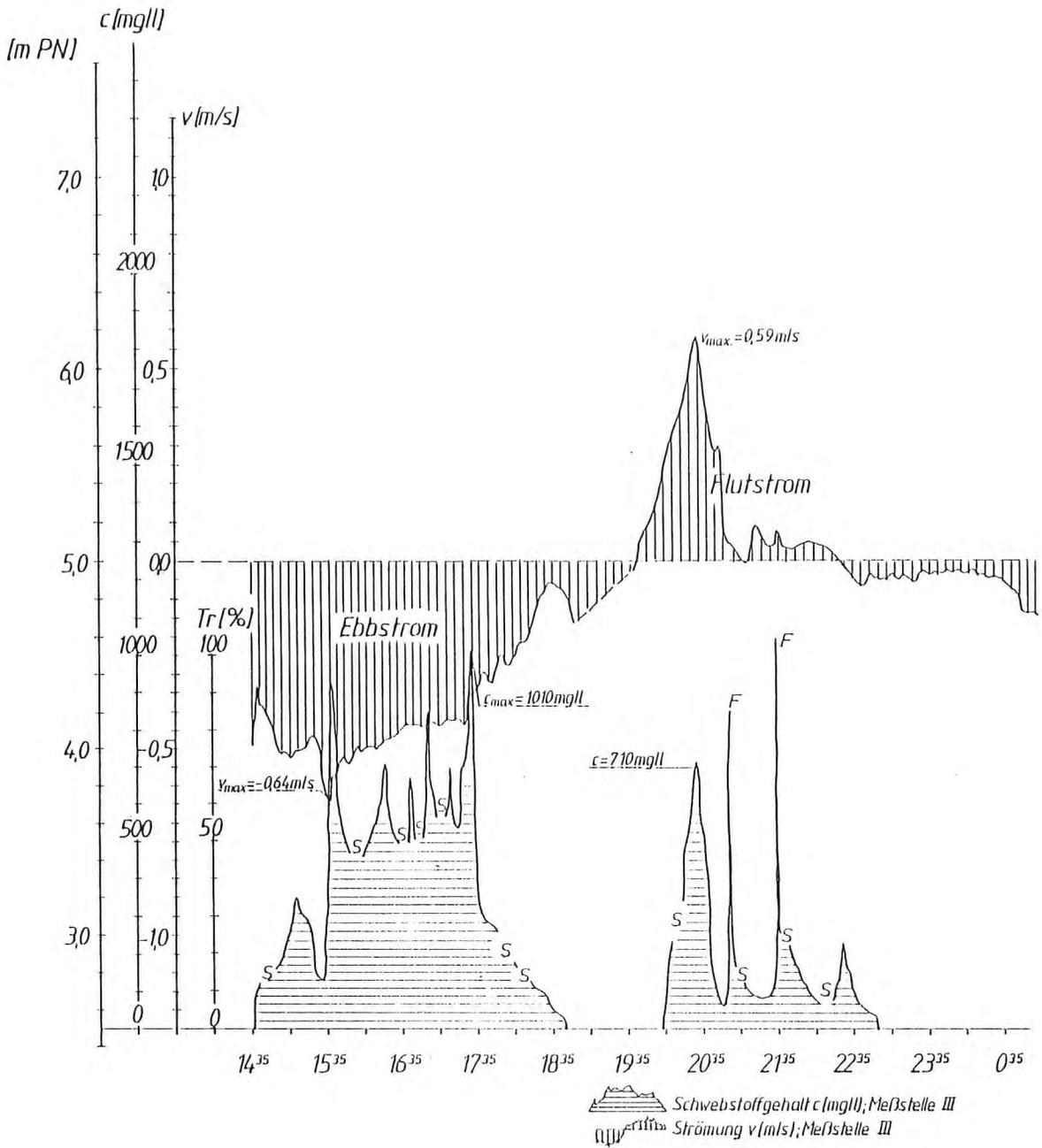


Abb. 5.12 Ganglinien - Meßstelle III - vom 19./20.08.1986

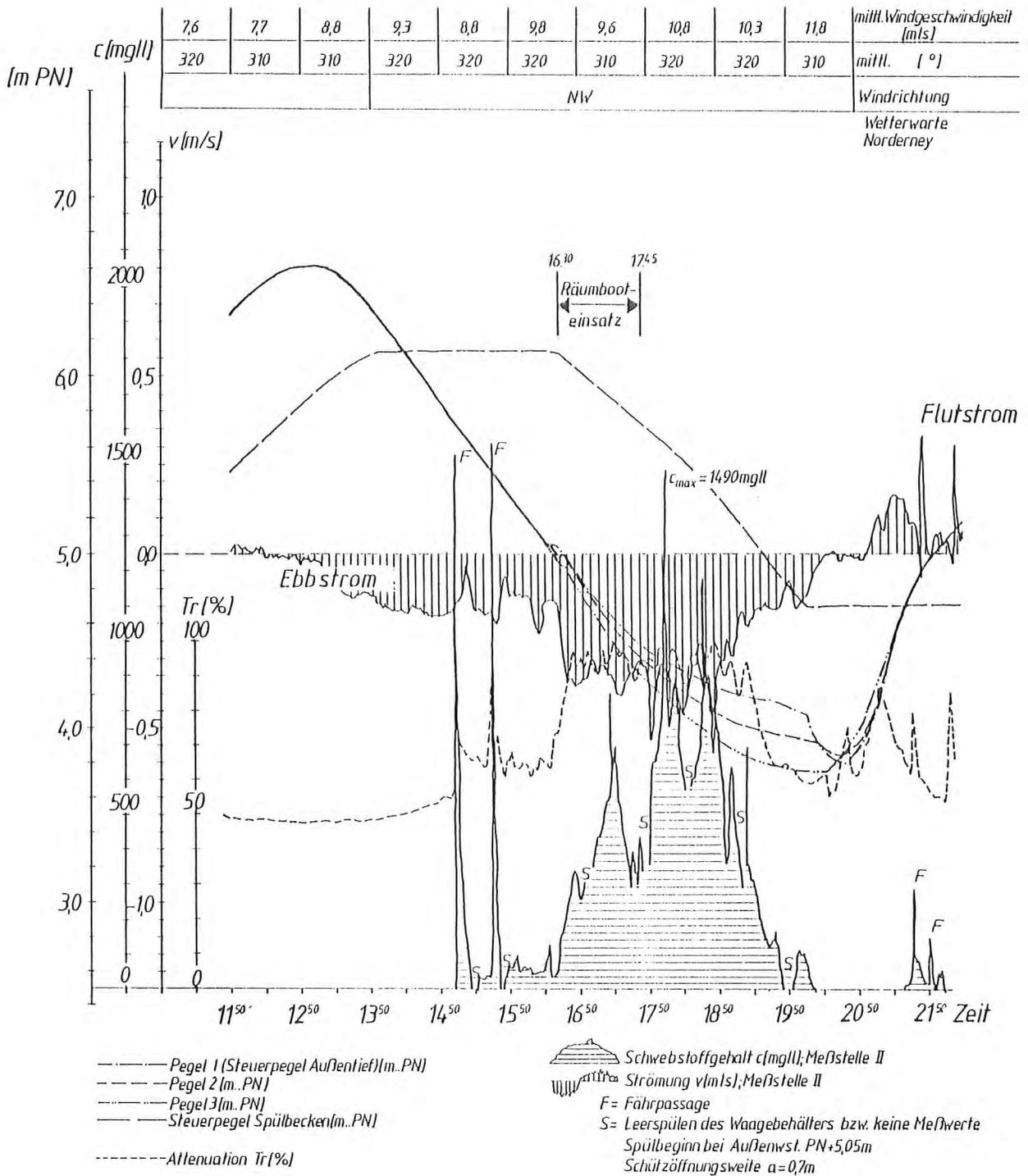


Abb. 5.13 Ganglinien - Meßstelle II - vom 20.08.1986

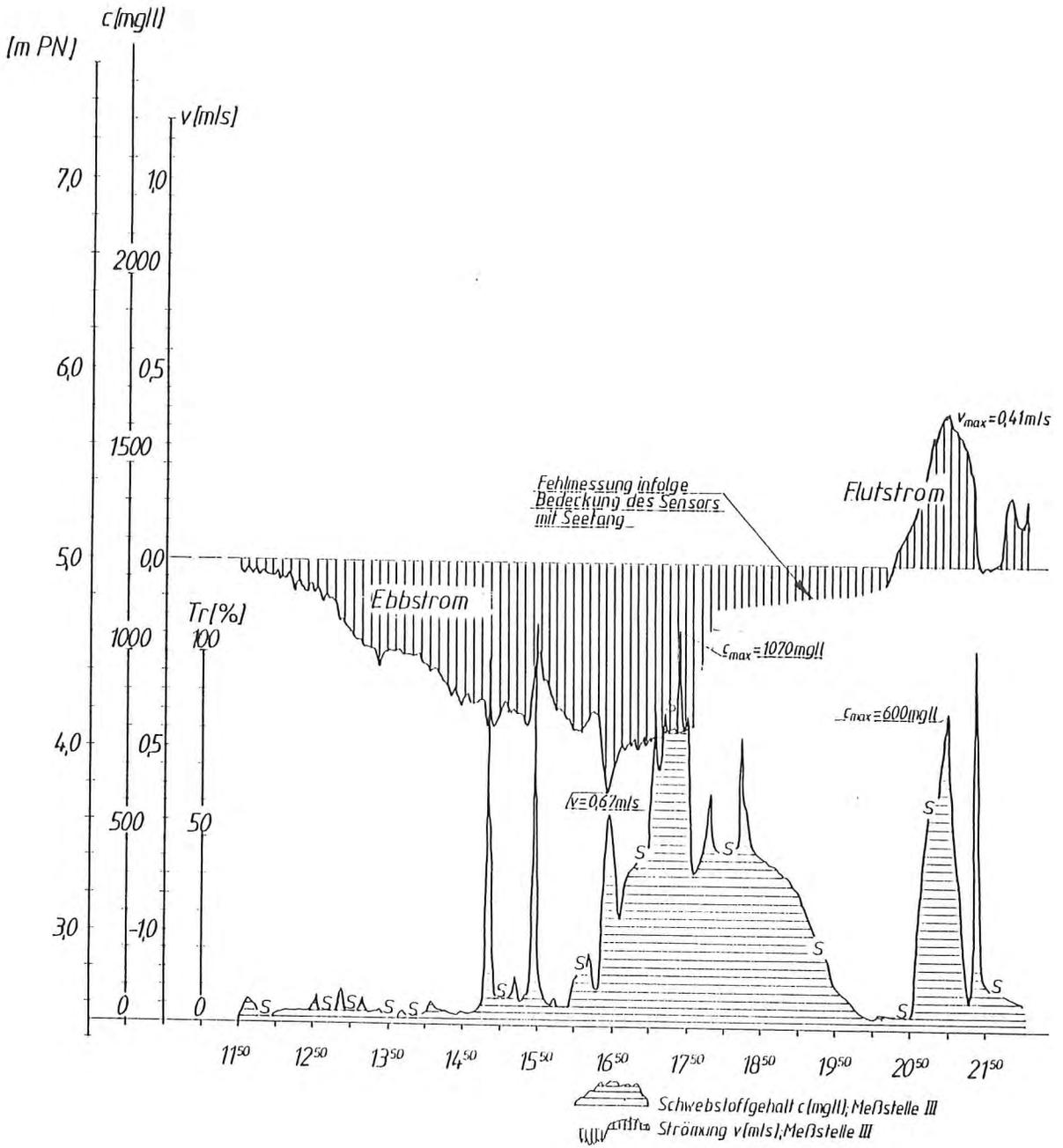


Abb. 5.14 Ganglinien - Meßstelle III - vom 20.08.1986

In Abb. 5.18 wird ein Schwebstoffspitzenwert während des Flutstroms von 1550 mg/l bei einer maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,64 m/s erreicht. Hier ist nach vorheriger Spülunterbrechung für einige Tage und Schwebstoffeintrag infolge starken Seegangs an den Vortagen ein hohes Schlickangebot im Außentief vorhanden. Diese Schwebstoffkonzentrationen während des Flutstroms wurden bei einem vom frischen Schlick freigespülten Außentief bei Flutstromgeschwindigkeiten unter 1 m/s nicht gemessen.

Die Schwebstoffspitzen während des ersten Flutstroms kommen dadurch zustande, daß das ausgeräumte, in der Neßmersieler Balje zum Teil abgesetzte Material teilweise vom Flutstrom wieder aufgenommen und in das Außentief transportiert wird. Diese Menge ist aber wesentlich geringer, als die vorher durch Räumen seewärts transportierte Schwebstoffmenge, zumal der größere Teil des schwebstoffbeladenen Flutwassers am Außentief vorbei die Neßmersieler Balje weiter aufwärts flutet.

Nicht nur durch den natürlichen Flutstrom wird Sediment in Bewegung gebracht, sondern auch die natürliche Ebbstromgeschwindigkeit reicht an der äußeren Meßstelle III zeitweilig aus, um Sediment in Suspension zu versetzen, nach den Messungen mit der automatischen Sedimentwaage (Sediwa) jedoch nicht an der Meßstelle II.

Abb. 5.8 und 5.9 zeigen einen deutlichen Anstieg der Schwebstoffkonzentrationen an Meßstelle III während des Ebbstroms. Bei einer Ebbstromgeschwindigkeit von ca. 0,6 m/s wird in Abb. 5.8 eine Schwebstoffspitze von 250 mg/l und bei einer Geschwindigkeit von 0,55 m/s in Abb. 5.9 ebenfalls eine Schwebstoffspitze von 250 mg/l erreicht. Die hohe Spitze vor 16.50 Uhr wird in dieser Abbildung durch die Fähre verursacht. Auch die Abb. 5.14 (Meßstelle III) zeigt im Gegensatz zu 5.13 (Meßstelle II) während des natürlichen Ebbstroms eine erhöhte Konzentration. Dasselbe gilt für Abb. 5.10, hier liegt nur die Schwebstoffganglinie von Meßstelle III vor.

Abschließend kann hierzu festgestellt werden, daß die Dauer-
messungen von Meßstelle II zeigen, daß durch die natürlichen
unbeeinflussten Tideströmungen eine größere Schwebstofffracht
in das Außentief hinein- als heraustransportiert wird.
An Meßstelle III, deren Außentiefquerschnitt durch ein
größeres natürliches Wattenzugsgebiet geprägt wird, weist
auch der Ebbstrom ein hohes Stromarbeitsvermögen auf.
Darüber hinaus ist zu vermerken, daß die Menge der suspen-
dierten Feststoffe erheblich von der morphologischen Vorge-
schichte insbesondere der vorhergehenden Tiden abhängt.

5.2.2 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bei Spülbetrieb

Wenn die Geschwindigkeit eines Stromes über einem aus Einzel-
körnern gebildeten ebenen Bett langsam gesteigert wird,
setzen sich bei der sogenannten kritischen Geschwindigkeit
die ersten Körner in Bewegung. Für die Bemessung von Spül-
strömen für Außentiefräumung ist dieser Wert von Bedeutung.

Die kritische Geschwindigkeit ist u. a. abhängig von Korn-
durchmesser, von der Lagerungsdichte und ggf. von einer vor-
handenen Kohäsion bzw. biologischen Verfestigung (FÜHRBÖTER,
1983). Die Untersuchung von Sedimentproben, die an den Meß-
stellen entnommen wurden, ergaben mittlere Korndurchmesser
zwischen 0,06 und 0,11 mm für ein von feinem Schlick frei-
gespültes Außentief.

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 frei
gespülten Neßmersieler Außentief zwischen 0,4 und 0,5 m/s.
(Abb. 5.15 u. 5.16). Daher ist für die Räumung des Neßmer-
sieler Außentiefs eine Mindestspülgeschwindigkeit zu fordern,
die 0,5 m/s deutlich überschreitet. Für den Bereich der Spül-
geschwindigkeiten, die 0,5 m/s überschreiten, wurde der Zu-
sammenhang zwischen Schwebstoffgehalt und Strömungsge-
schwindigkeit untersucht. Aus mathematisch theoretischen
Ansätzen ist folgende Beziehung bekannt:

Schwebstoffgehalt [mg/l]

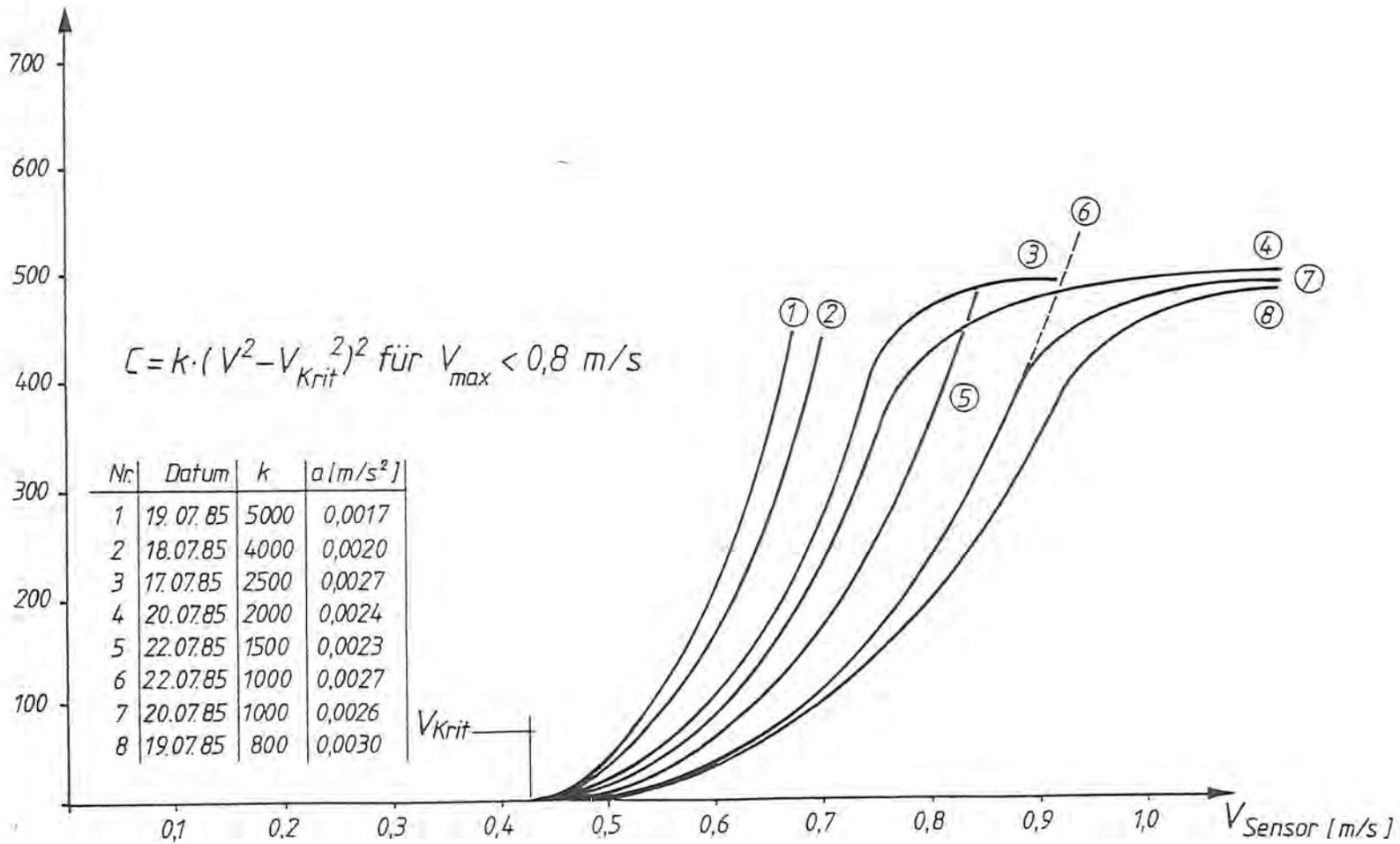


Abb. 5.15 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit und Beschleunigung des Spülstroms

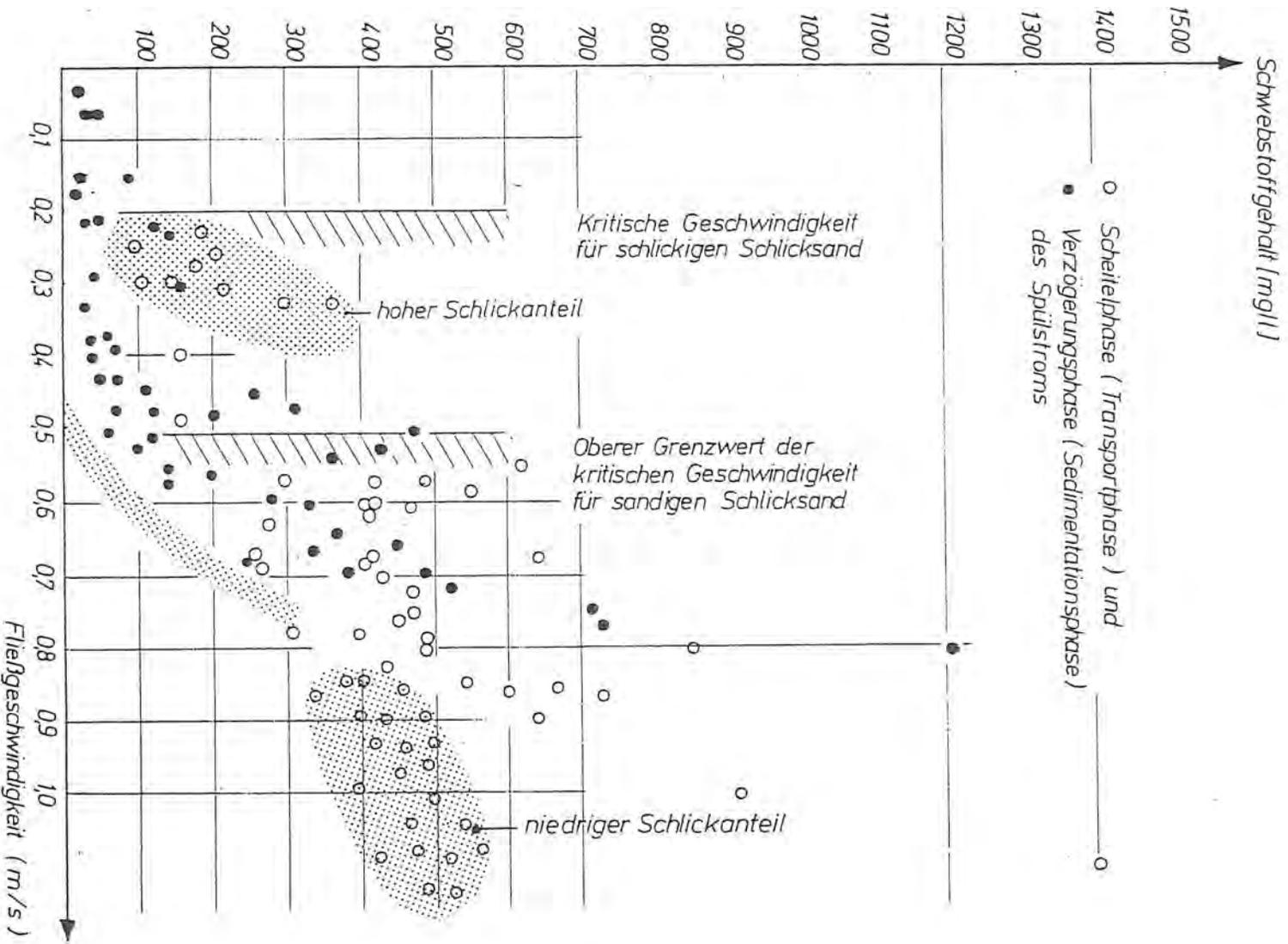


Abb. 5.16 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bei Spülströmen

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

c = Schwebstoffkonzentration (mg/l)

v = Fließgeschwindigkeit (m/s)

v_{krit} = kritische Geschwindigkeit (m/s)

k = Konstante ($\text{mg/l} / \text{m}^4 / \text{s}^4$)

Diese untersuchte Beziehung gilt nur für Geschwindigkeiten kleiner als 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 5 000 (Abb. 5.15). Je größer die Geschwindigkeitszunahme bei Spülbeginn ist, desto kleiner wird k , d. h. daß die Schwebstoffkonzentration langsamer zunimmt.

Die in Abb. 5.15 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 Schwebelagung bleibt. In Abb. 5.16 sind Meßwerte des Schwebstoffgehalts in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit aus der Scheitelphase und der Verzögerungsphase des Spülstroms aufgetragen. Mit abnehmender Fließgeschwindigkeit nimmt das Transportvermögen des Spülstroms deutlich ab. Die Abb. 5.16 enthält ebenfalls die Meßwerte für den Außentiefzustand ohne frische Schlickablagerungen.

Die in der Abb. 5.15 dargestellten Zusammenhänge für ein von frischem Schlick freigespültes Außentief sind aus Naturmeßdaten vom Juli 1985 gewonnen, von denen ausgewählte Ganglinien in den Abbildungen 5.17 bis 5.24 dargestellt sind:

Über die Zeitachse sind wiederum jeweils aufgetragen die Schwebstoffkonzentration, die Attenuation (Trübe) und die Fließgeschwindigkeit, gemessen an Meßstelle II. Außerdem sind die Tidekurven von drei Außentiefpegeln und vom Spülbeckenpegel dargestellt. Besonders hervorzuheben sind hier die hohen Spülgeschwindigkeiten und relativ niedrigen Schwebstoffkonzentrationen (Abb. 5.19 und 5.20), die auch bei Fließgeschwindigkeiten größer 0,8 m/s nicht weiter zunehmen. Zusätzliches Material wird dann ausschließlich proportional der zunehmenden Fließgeschwindigkeit bzw. der transportierten Wassermenge aufgenommen. Daß in diesen beiden Beispielen Fließgeschwindigkeiten von 1,1 bzw. 1,2 m/s trotz des etwas erhöhten Niedrigwassers erreicht werden, ist auf den hohen Spülbeckenwasserstand von PN + 6,20 m bzw. 6,30 m bei Spülbeginn zurückzuführen.

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

Die Eintrittshäufigkeit der gemessenen Schwebstoffgehalt-Daten wird in Abschnitt 5.2.6 erläutert.

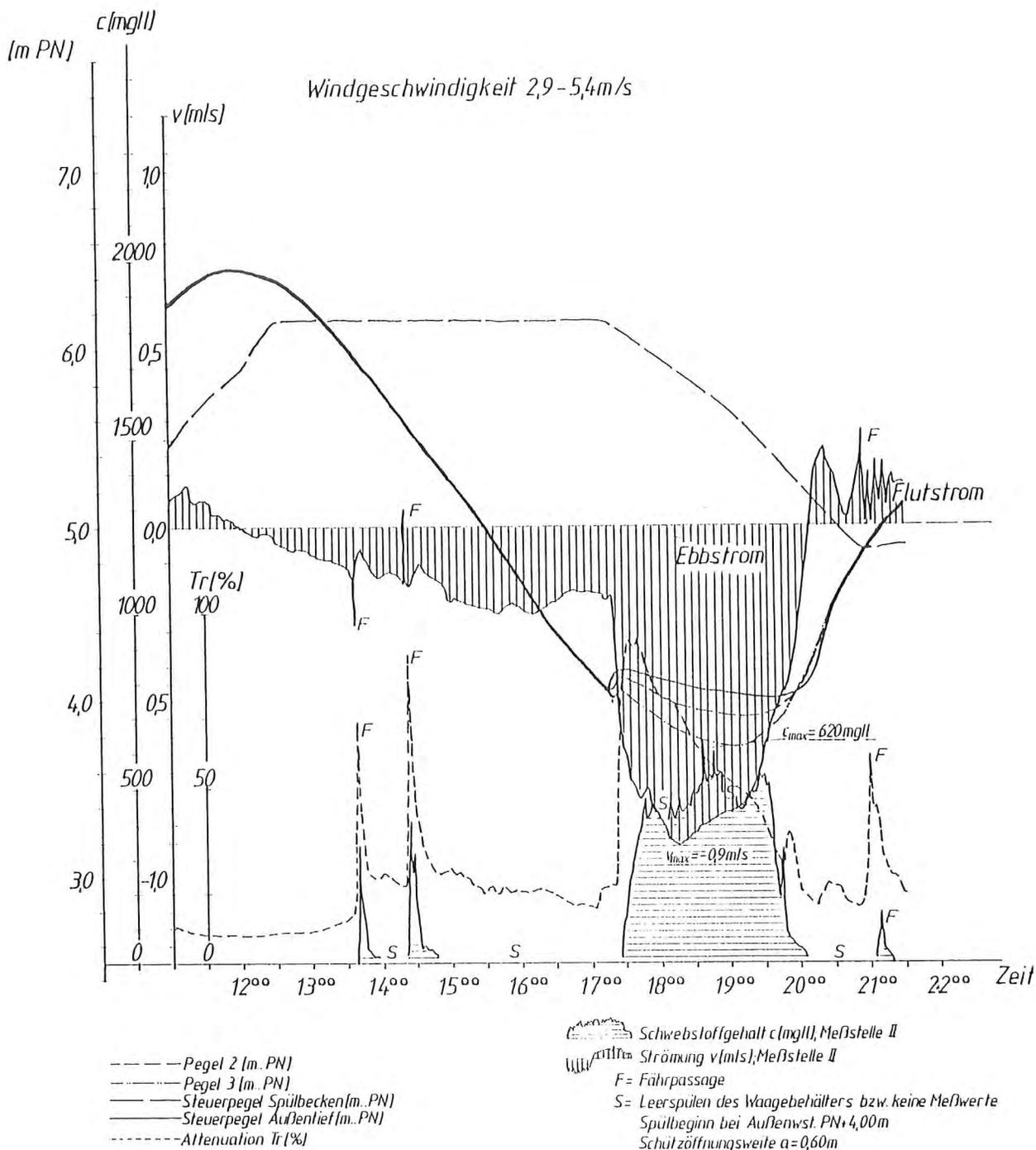


Abb. 5.17 Ganglinien - Meßstelle II - vom 17.07.1985

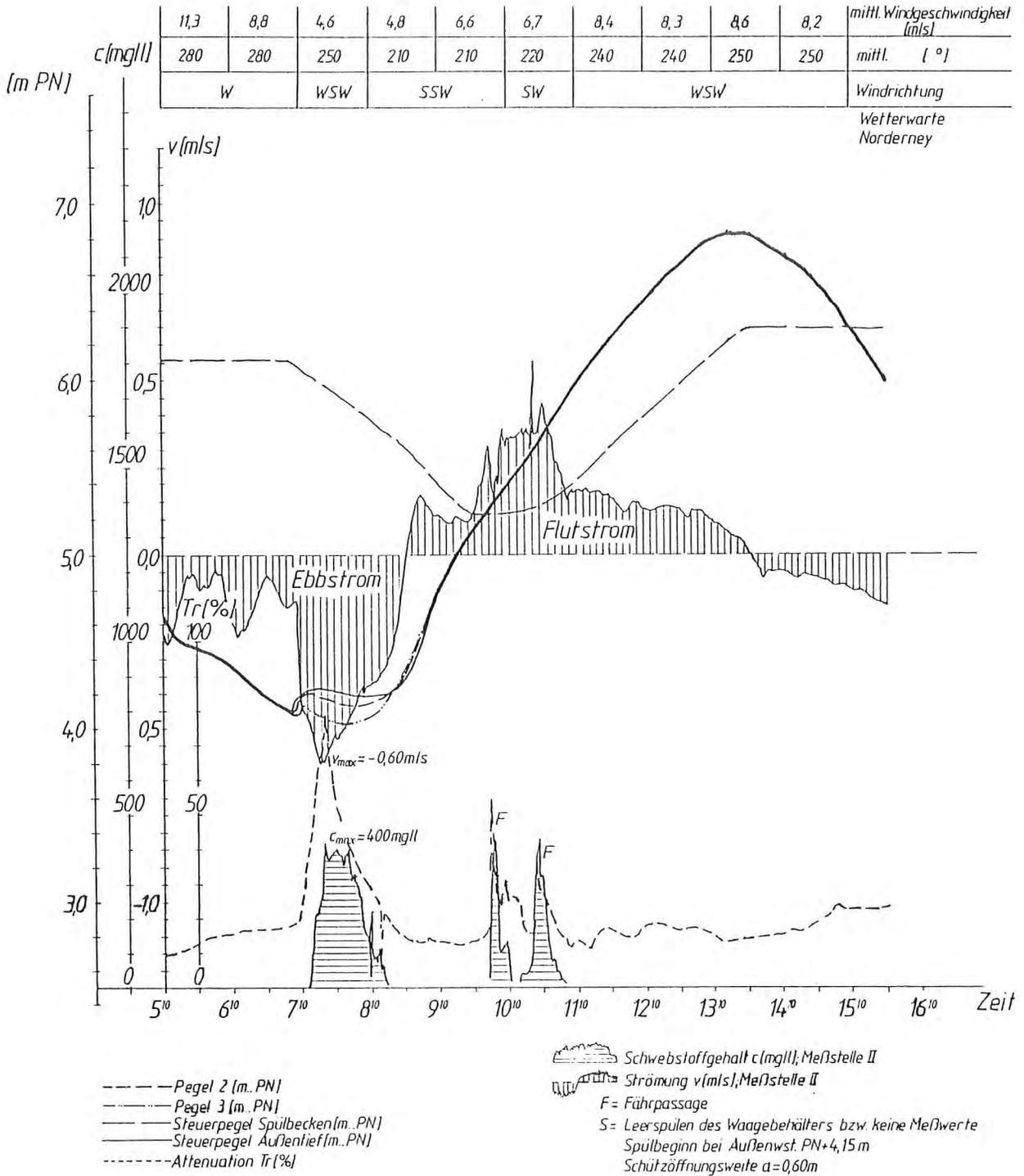


Abb. 5.18 Ganglinien - Meßstelle II - vom 19.07.1985

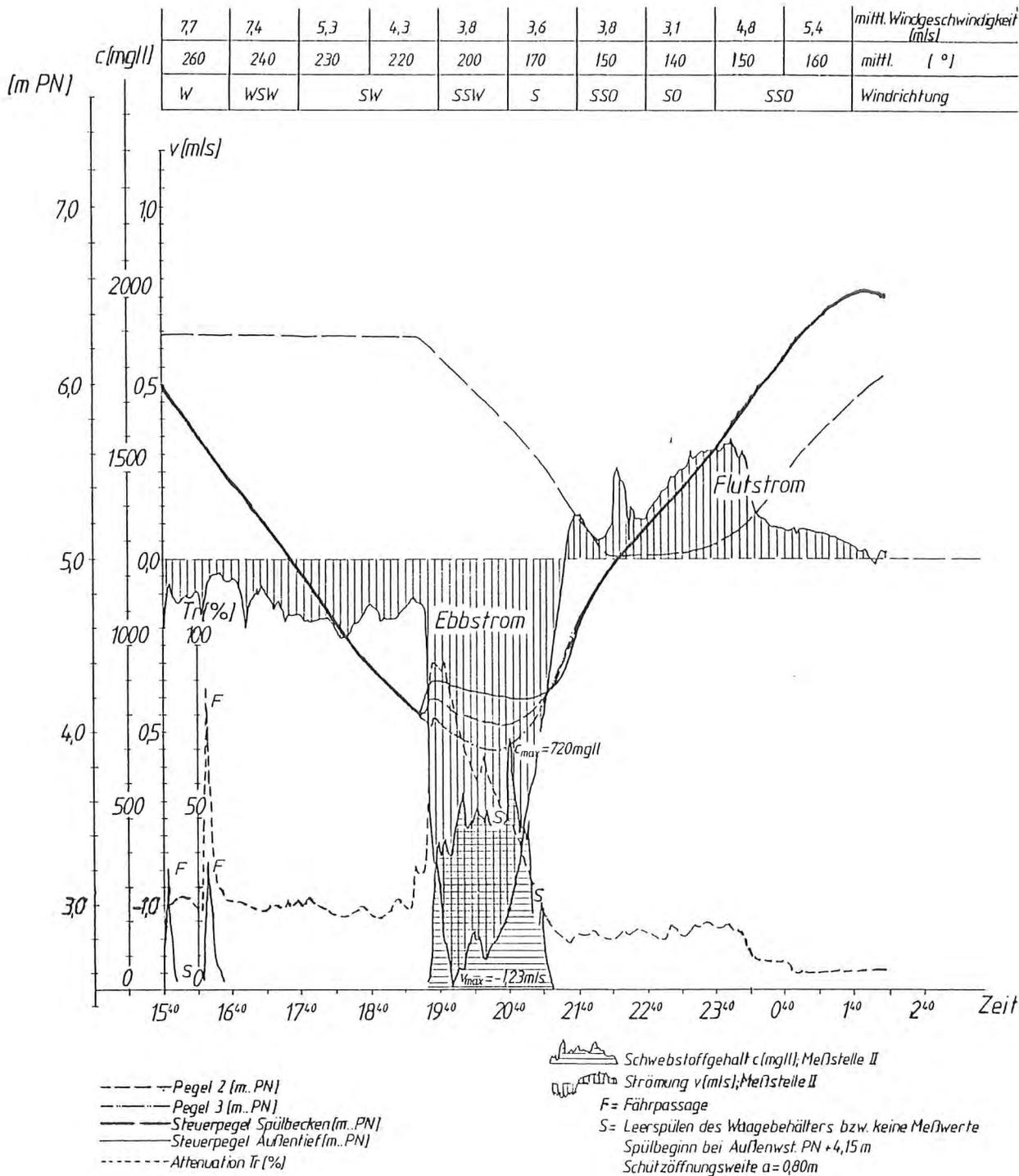


Abb. 5.19 Ganglinien - Meßstelle II - vom 19./20.07.1985

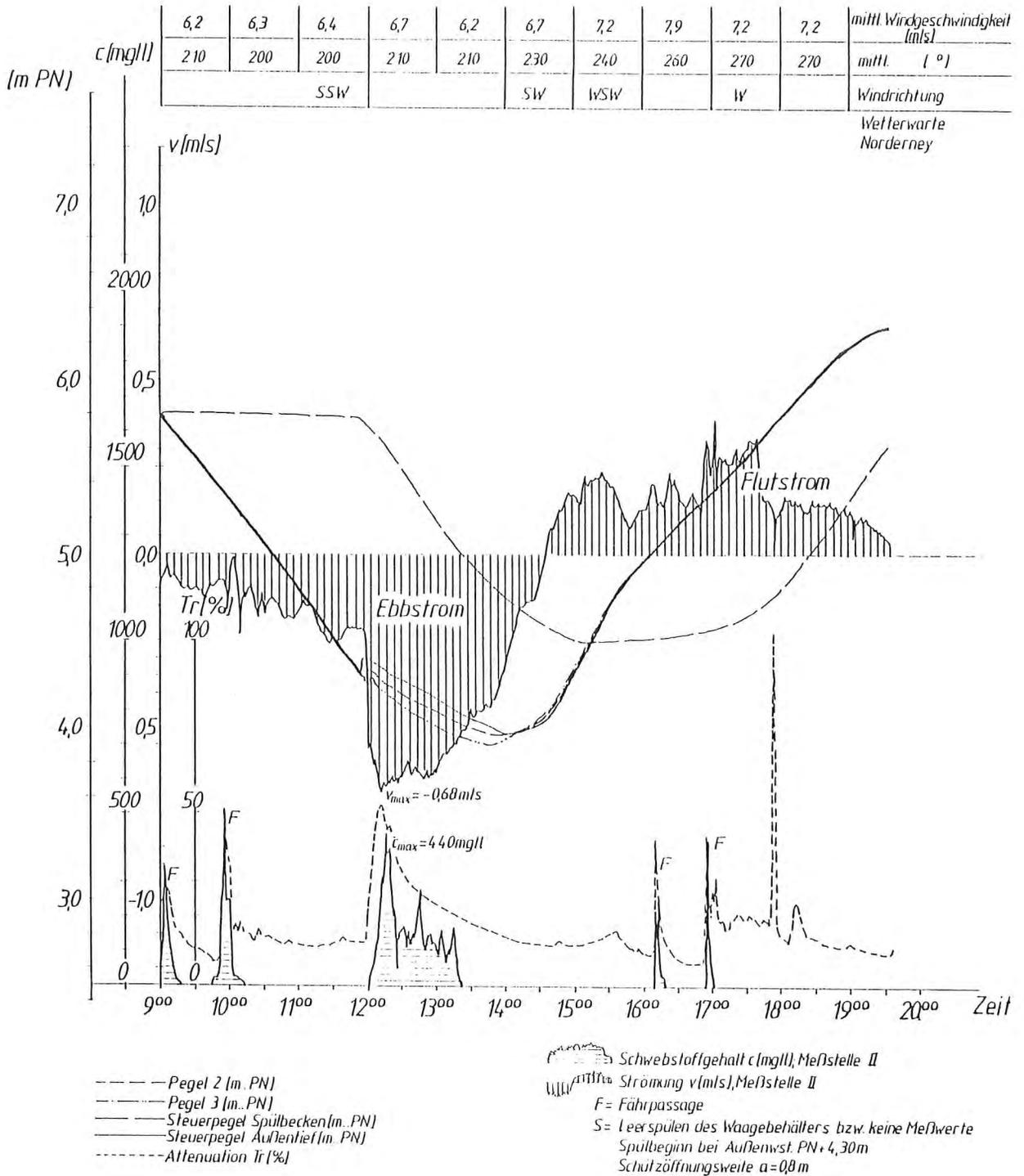


Abb. 5.22 Ganglinien - Meßstelle II - vom 27.07.1985

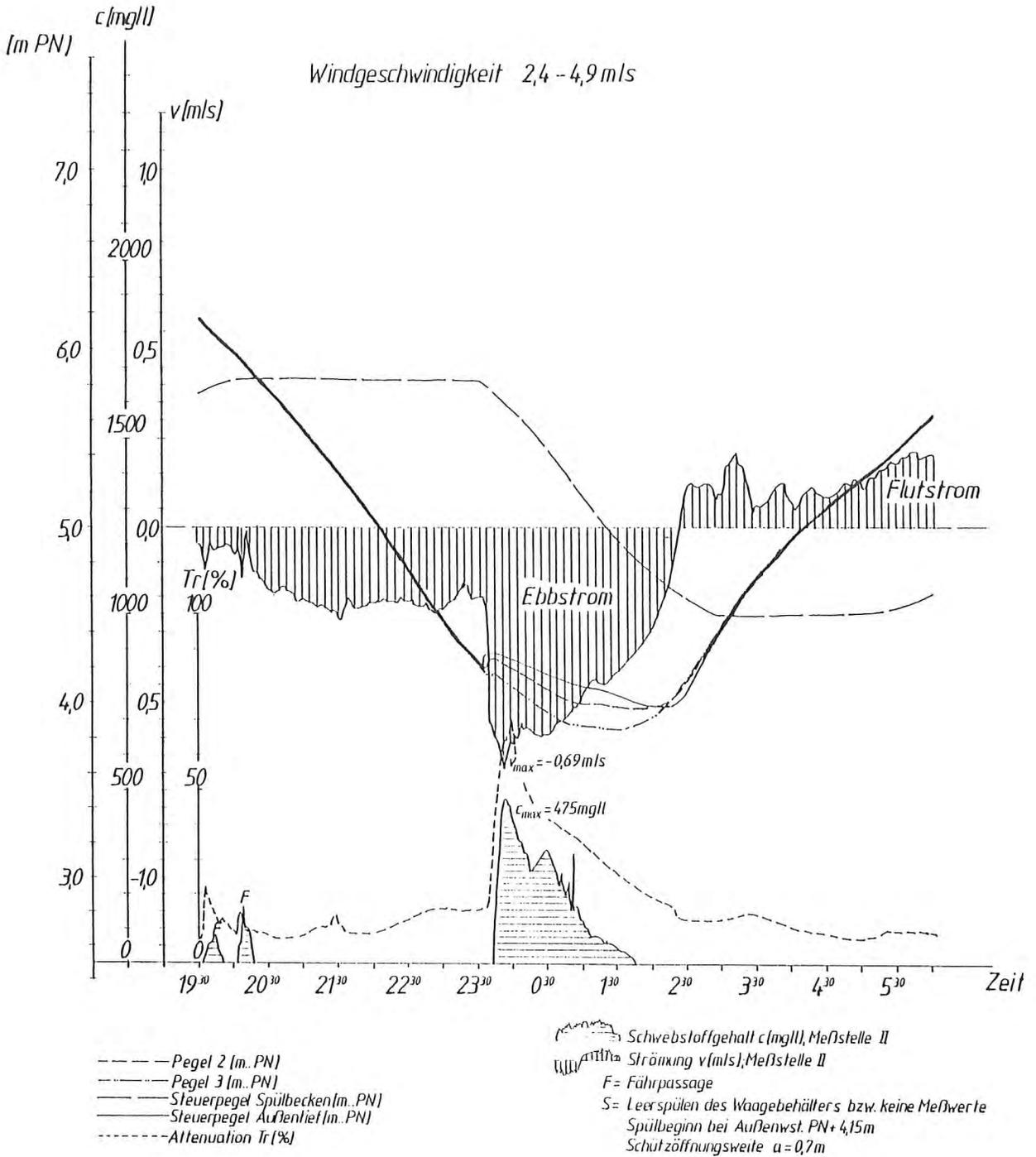


Abb. 5.23 Ganglinien- Meßstelle II - vom 11./12.09.1985

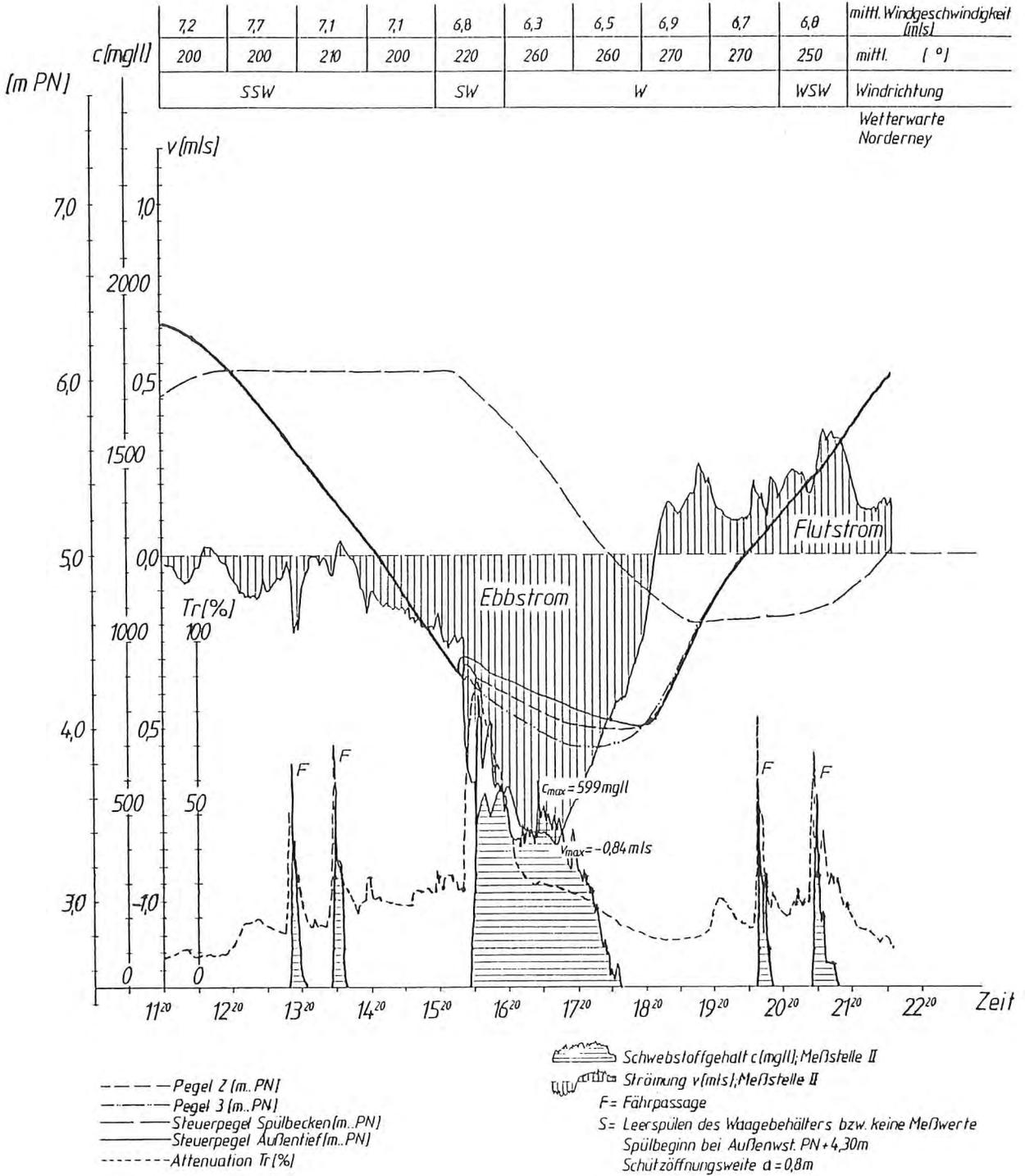


Abb. 5.24 Ganglinien - Meßstelle II - vom 30.07.1985

5.2.3 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Schubspannung

Die Reibungskräfte (tangentialer Schubkraft), die an der Grenzfläche zwischen dem strömenden Wasser und der Sedimentoberfläche wirksam werden, stellen eine maßgebliche und geeignete Größe für die Charakterisierung von Erosions- und Transportvorgängen an der Außentiefsohle dar.

Als angreifende Kräfte wirken dabei Schub- und Druckspannungen aus dünnen Unterschichten mit laminarer und/oder turbulenter Strömung auf die einzelnen Kornoberflächen ein; die Widerstandskräfte ergeben sich aus der Größe, Dichte und Form der einzelnen Körner in Verbindung mit der Kornverteilungskurve und der Lagerungsdichte (FÜHRBÖTER et al). Auf natürlichen Watten werden die mechanischen Vorgänge von Erosion und Sedimentation durch biologische Einflüsse entscheidend mitbestimmt. Nach MANZENRIEDER (1983) beträgt die mittlere Festigkeitszunahme durch biologische Einflüsse im Sommer i. M. 300 %. Die maximale Erhöhung der Wattstabilität durch die biologischen Komponenten wurde gemessen mit 770 %. Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen (s. Anhang) zeigen vielfältige organische Verkittungen.

Für die Darstellung der Sohlschubspannung (τ_0) ist hier eine stetige gleichförmige Strömung angenommen, die während einer bzw. fünf Minuten, je nach Meßwertaufnahmezyklus, anhält. Es gilt folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}\tau_0 &= \rho \cdot g \cdot t \cdot I && (\text{N/m}^2) \\ \rho &= \text{Dichte des Wassers} && (\text{kg/m}^3) \\ g &= \text{Erdbeschleunigung} && (\text{m/s}^2) \\ t &= \text{Wassertiefe} && (\text{m}) \\ I &= \text{Spiegelgefälle} && (-)\end{aligned}$$

Zur Ermittlung der an der Sohle des Neßmersieler Außentiefs während des Spülvorgangs wirkenden Schubspannung wird das Mittel aus dem Wasserspiegelgefälle zwischen Meßstelle I und

II und zwischen Meßstelle II und III als mittleres Gefälle an Meßstelle II für jeden Meßwert neu angesetzt. Die Wassertiefe wird jeweils aus den Wasserstandsmessungen ermittelt. Somit kann für jeden Meßwert die dazugehörige Schubspannung berechnet werden.

Die im Jahre 1984 durchgeführten Messungen ergeben folgende Zusammenhänge:

Die während des Spülens - ca. 1,5 Std. nach Spülbeginn - auftretenden maximalen Schubspannungen an Meßstelle II liegen für die Spülvariante mit 80 cm Schützöffnungsweite, Spülbeginn bei einem Außenwasserstand von PN + 4,5 m und einem Spülbeckenwasserstand von PN + 6,0 m zwischen $1,9 \text{ N/m}^2$ und $2,2 \text{ N/m}^2$. Je niedriger das Tnw abfällt, desto höher wird die Schubspannung, da mit Abnahme des Wasserstandes am Außentiefende das Fließgefälle zunimmt. Dann wird über 1,5 Stunden eine Schubspannung zwischen $1,75 \text{ N/m}^2$ und $2,06 \text{ N/m}^2$ und ein Fließgefälle zwischen 0,23 % und 0,37 % überschritten. Die dazugehörige Fließgeschwindigkeit überschreitet 1,5 Stunden 0,61 m/s bis 0,73 m/s und die mittlere Schwebstoffkonzentration liegt während dieser Zeit über 320 mg/l bis über 500 mg/l. Die Maximalwerte sind geringfügig höher. Die Außentiefensole war während dieser Zeit weitgehend vom Schlick freigespült.

Im Vergleich dazu tritt bei einer Schützöffnungsweite von 20 cm und einem Spülbeginn ab PN + 4,15 m die maximale Schubspannung von $0,75 \text{ N/m}^2$ bis $1,05 \text{ N/m}^2$ ca. $1 \frac{3}{4}$ Std. nach Spülbeginn auf und kann über einen Zeitraum von ca. einer Stunde aufrechterhalten werden. Das Fließgefälle 0,14 % bis 0,26 % kann während dieser Zeit überschritten werden, ebenso die Fließgeschwindigkeit von 0,32 m/s. Der Schwebstoffgehalt von 150 mg/l bis 350 mg/l wird eine Stunde lang überschritten. Die maximalen Konzentrationen liegen noch um ca. 50 mg/l höher. Diese Messungen sind nach einer mehrwöchigen Unterbrechung des Spülbetriebes durchgeführt worden, so daß ein hohes Angebot an feinem Schlick zur Verfügung stand.

Als Ganglinienbeispiel ist der Verlauf der Schubspannung und des Fließgefälles, sowie des Schwebstoffgehaltes und der Strömungsgeschwindigkeit mit den Pegelkurven des Außentiefs und des Spülbeckens für eine Spülphase vom 30.07.1984 in Abb. 5.25 dargestellt (Schützöffnung 80 cm, Spülbeginn bei ca. PN + 4,60 m (Außenwasserstand):

Kurze Zeit nach Spülbeginn (im Beispiel gegen 17.00 Uhr) steigt die Fließgeschwindigkeit auf ein Maximum von 0,73 m/s an und fällt ca. 2,5 Stunden vor T_{nw} wieder ab. Die Schwebstoffkonzentration erreicht 2,5 Stunden vor T_{nw} ein Maximum von 550 mg/l und fällt dann auf fast 0 bei T_{nw} wieder ab. Zur selben Zeit wird auch die maximale Schubspannung mit $2,1 \text{ N/m}^2$ erreicht. Die Darstellung der Schubspannung endet hier um 22.00 Uhr, da die Werte mit beginnenden Flutstrom wegen instationärer Vorgänge zu sehr streuen. Das maximale Fließgefälle stellt sich mit ca. 0,4 % erst 1,5 Stunden vor T_{nw} ein.

Mit Hilfe der durchgeführten Schwebstoffkonzentrationsmessungen können Grenzs Schubspannungen angegeben werden, nach deren Überschreiten eine deutliche Schwebstoffkonzentration im Wasser meßbar ist. Die Messungen zeigen, daß eine Mindestschubspannung von $\tau = 1,6 \text{ N/m}^2$ für die Räumung eines Außentiefs des Typs "Neßmersiel" zu fordern ist. Für ein mit feinem Schlick angereichertes Außentief (z. B. nach mehrwöchigem Aussetzen des Spülbetriebs) ergibt sich eine Grenzs Schubspannung für den Erosionsbeginn von $\tau = 0,65 \text{ N/m}^2$ aus den Meßwerten.

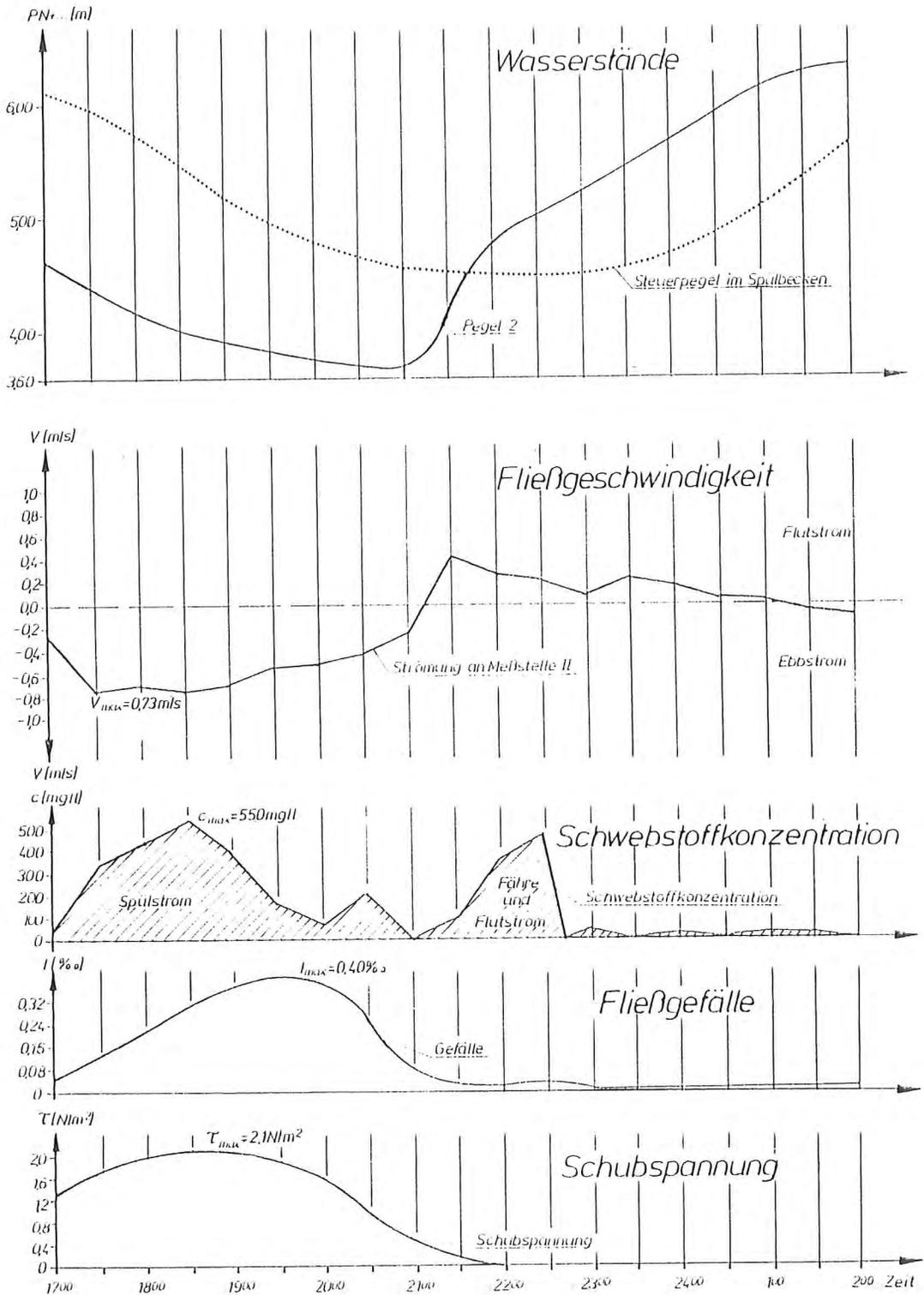


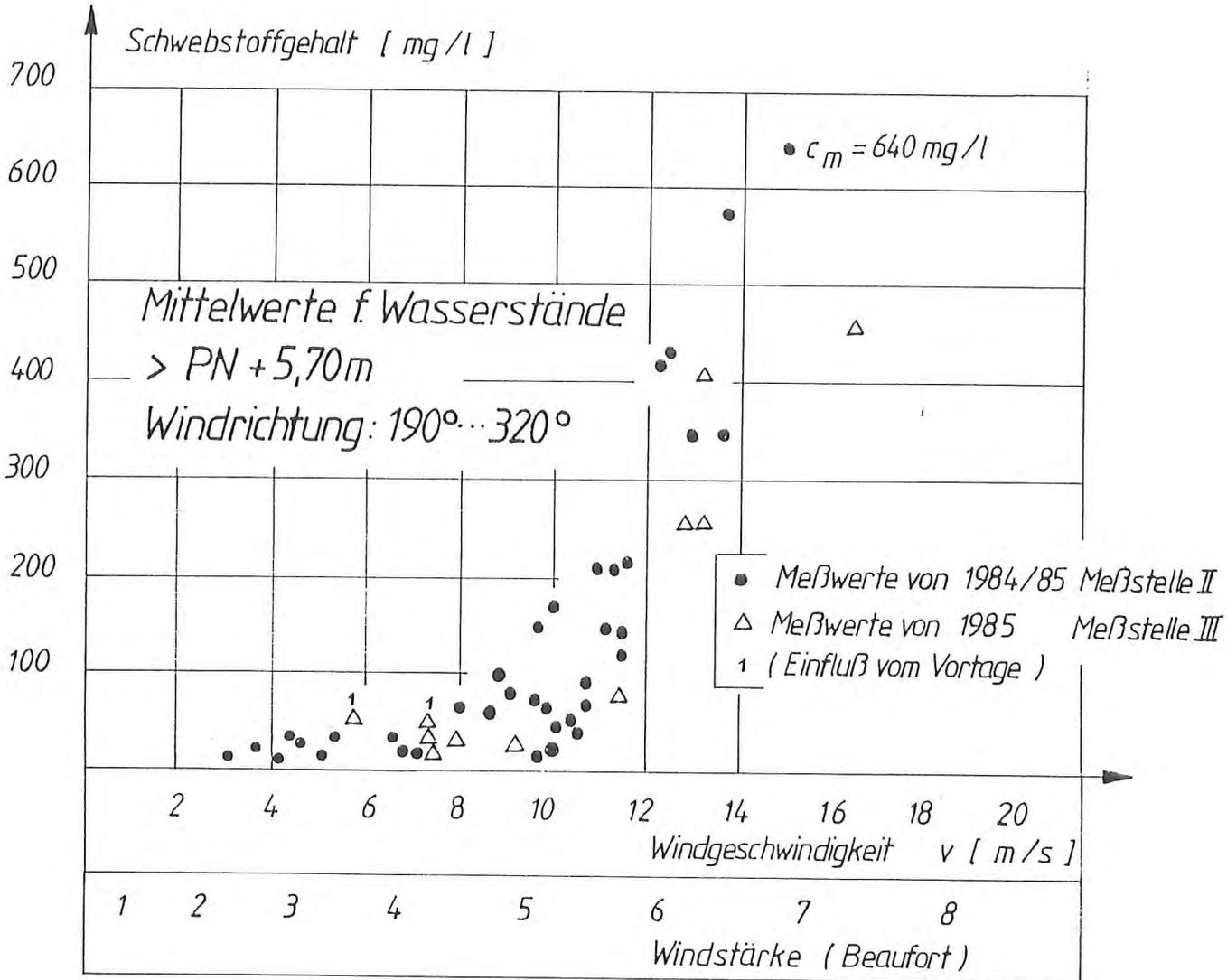
Abb. 5.25: Wasserstand, Strömung, Schwebstoffkonzentration, mittleres Fließgefälle und Schubspannung an Meßstelle II

5.2.4 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von Seegangseinflüssen

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 Tideströmung weitertransportiert.

Bei südwestlichen bis nordwestlichen Winden über 8 m/s - entsprechend 5 Bft - konnte nach Überfluten des Leitdammes (Oberkante i. M. NN + 0,6 m) eine deutliche Zunahme der Schwebstoffkonzentration an der Meßstelle II im Außentief festgestellt werden. In Abb. 5.26 sind gemittelte Meßwerte des Schwebstoffgehaltes über 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. Ein Zusammenhang zwischen der aus dem Windfeld nach dem Verfahren von Bretschneider (SHORE PROTECTION MANUAL, 1973) berechneten Wellenhöhe und der Schwebstoffkonzentration konnte bestätigt werden. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt die Seegangenergie und damit auch die Turbulenzintensität zu, so daß immer mehr Schwebstoffe in das Seewasser eingetragen werden und in Schwebelagung 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. 5.26).

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



In den Abb. 5.27 bis 5.34 sind Ganglinien aus windbeeinfluteten Naturmeßdaten dargestellt. Über die Zeitachse aufgetragen ist jeweils die Schwebstoffkonzentration und die Fließgeschwindigkeit von Meßstelle II oder III. Außerdem sind die Tidekurven von 3 Pegeln übereinandergezeichnet und die Pegelkurve des Spülbeckens dargestellt. Ab 1985 ist die Wassertrübe an Meßstelle II gemessen und in Prozent ebenfalls über die Zeitachse dargestellt worden.

Über den Ganglinien sind die stündlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung gemessen an der Wetterwarte Norderney dargestellt. In allen Abbildungen sind die bei Wasserständen über PN + 5,60 m (Leitdamm-Krone) vorhandenen Schwebstoffkonzentrationen auf den Seegangseinfluß zurückzuführen. Wird der Leitdamm überflutet, gelangt das mit Schwebstoffen angereicherte Wasser vom westlich des Leitdammes gelegenen Watt in das Außentief. Bei gleichen Windgeschwindigkeiten ruft eine etwa küstenparallele Windrichtung den höchsten Schwebstoffeintrag hervor.

Offensichtlich werden dann größere mit Schwebstoffen angereicherte Wassermengen küstenparallel verfrachtet ("Küstenstrom"), als wenn die Windrichtung küstennormal verläuft. In Abb. 5.27 (08. und 09.06.1984) ist z. B. ab ca. 6.00 Uhr eine gemessene Windgeschwindigkeit von 10 m/s aus Nordwest mit einer Schwebstoffkonzentration bis ca. 100 mg/l dargestellt. Dagegen wurde bei Westwind und derselben Windgeschwindigkeit am 28.05.1986 kurz vor Thw eine maximale Konzentration von ca. 200 mg/l gemessen (Abb. 5.33) und am 23.10.1984 (Abb. 5.29) bei WSW-Wind mit 10 m/s zwischen 8.00 Uhr und 9.00 Uhr sogar über 250 mg/l. Bei Zunahme der Windgeschwindigkeit und einer Windrichtung zwischen West und Südwest nimmt dann die Schwebstoffkonzentration entsprechend zu (Abb. 5.28 bis 5.30, 5.32 und 5.34).

In den Abb. 5.30 bis 5.33 ist eine Attenuation (Trübe) im Mittel von ca. 50 % und in Abb. 5.34 sogar 70 % bedingt durch Windeinfluß gemessen worden. Ohne irgendwelche Einflüsse würde die Attenuation bei Thw auf ca. 10 % absinken. Infolge Spülbetrieb bzw. Fährpassage werden Trübewerte bis zu 100 % erreicht.

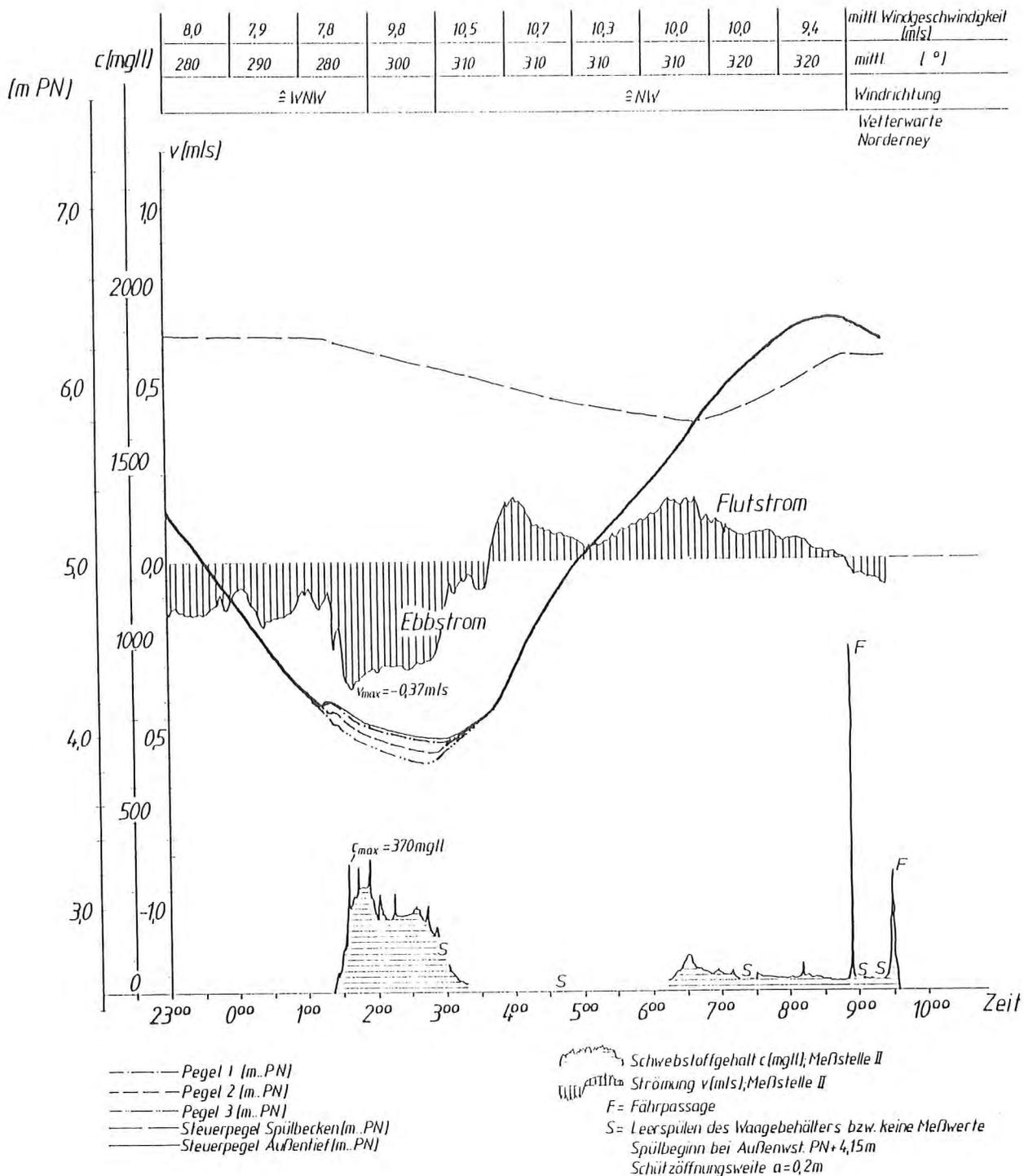


Abb. 5.27: Ganglinien - Meßstelle II - vom 08./09.06.1984

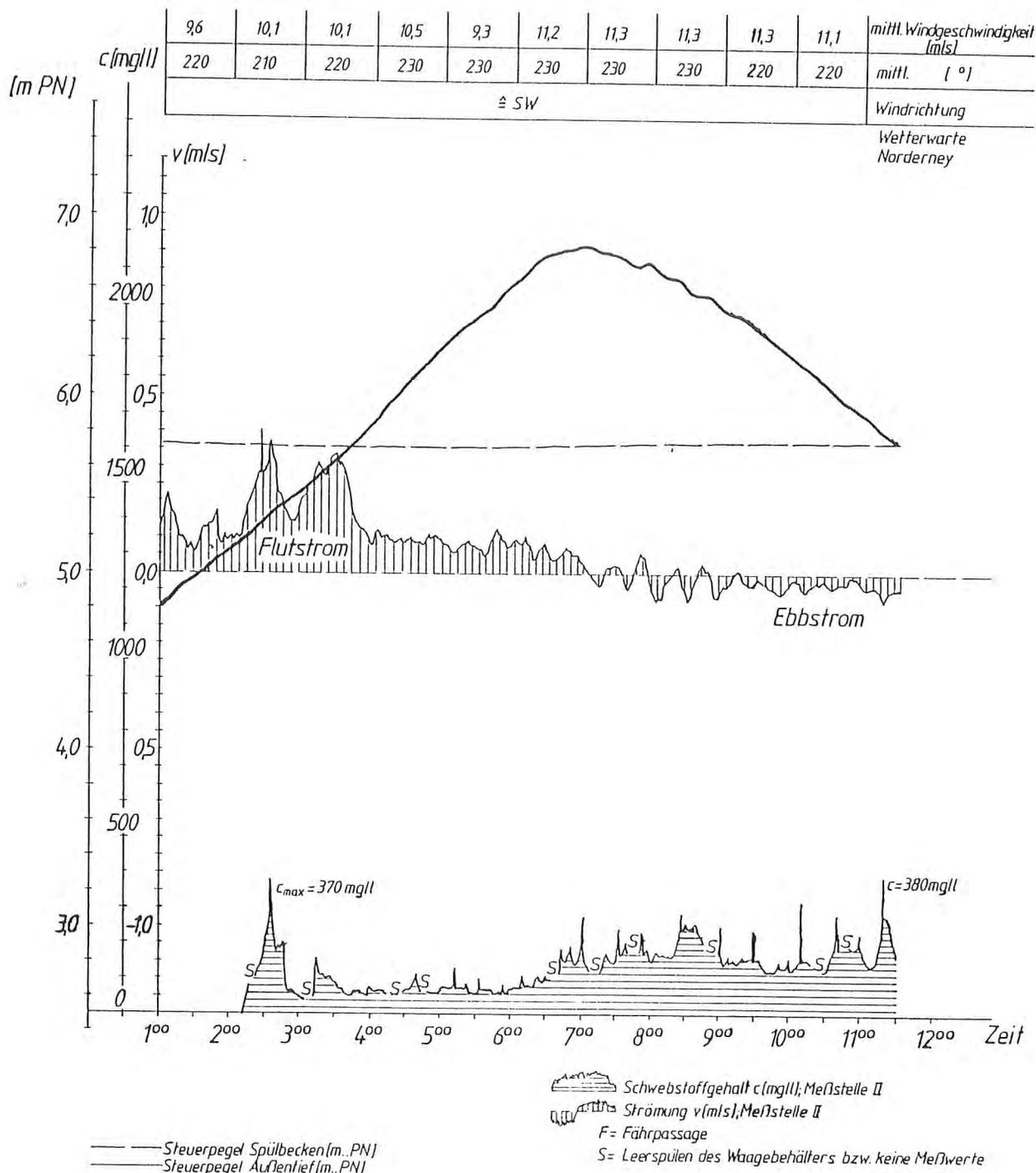


Abb. 5.28: Ganmlinien - Meßstelle II - vom 20.10.1984

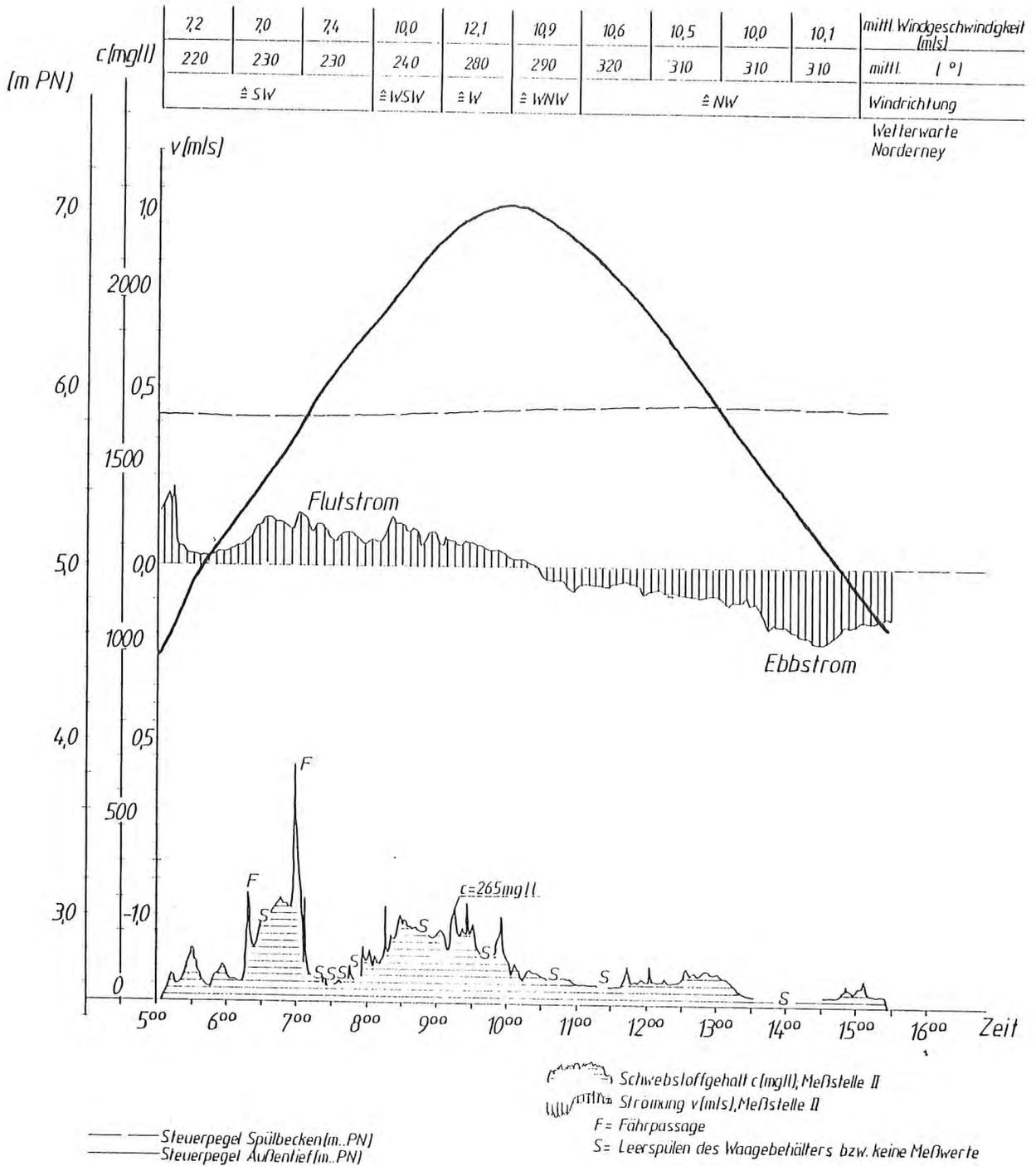


Abb. 5.29: Ganglinien - Meßstelle II - vom 23.10.1984

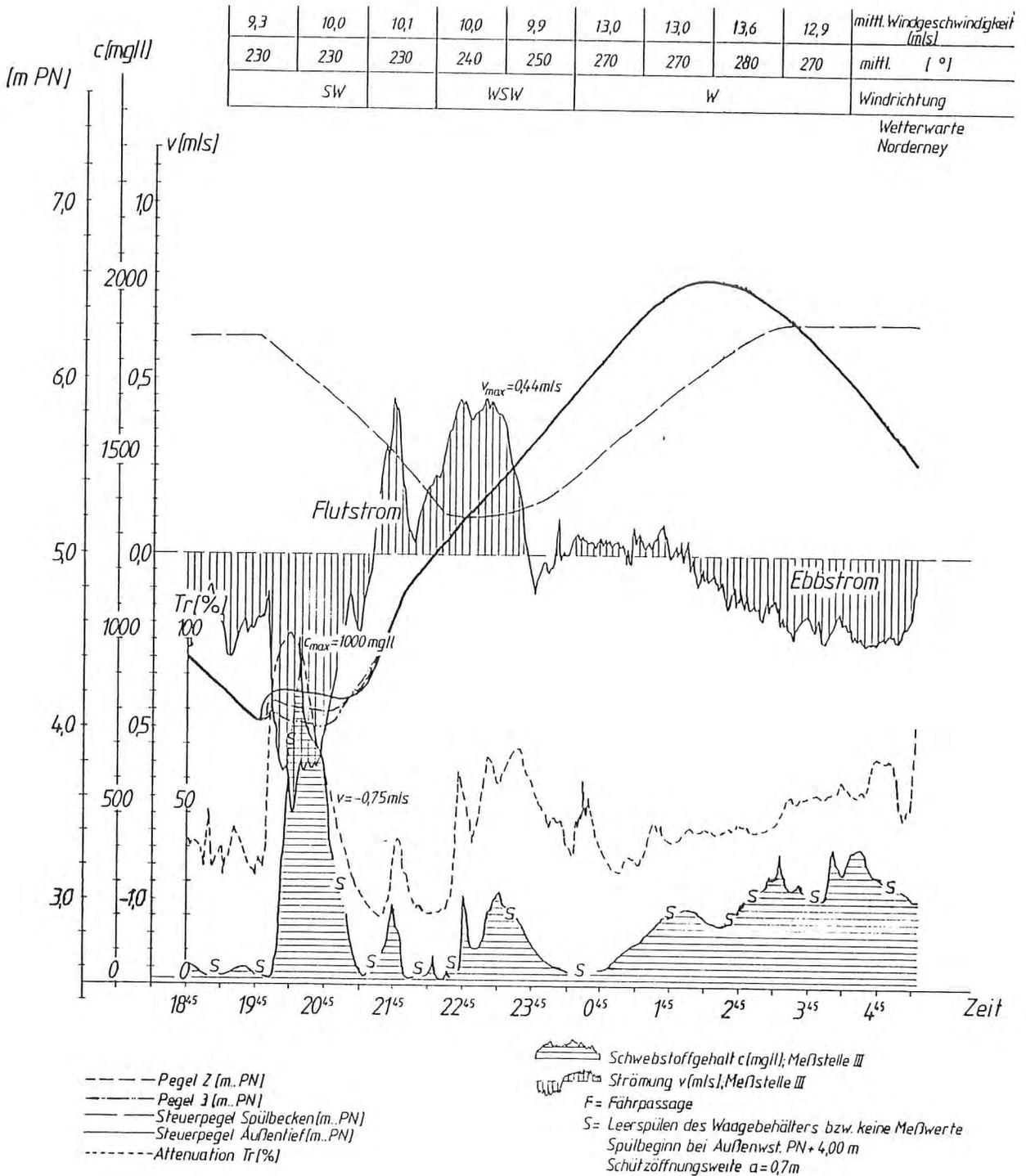


Abb. 5.30: Ganglinien - Meßstelle III - vom 01./02.09.1985

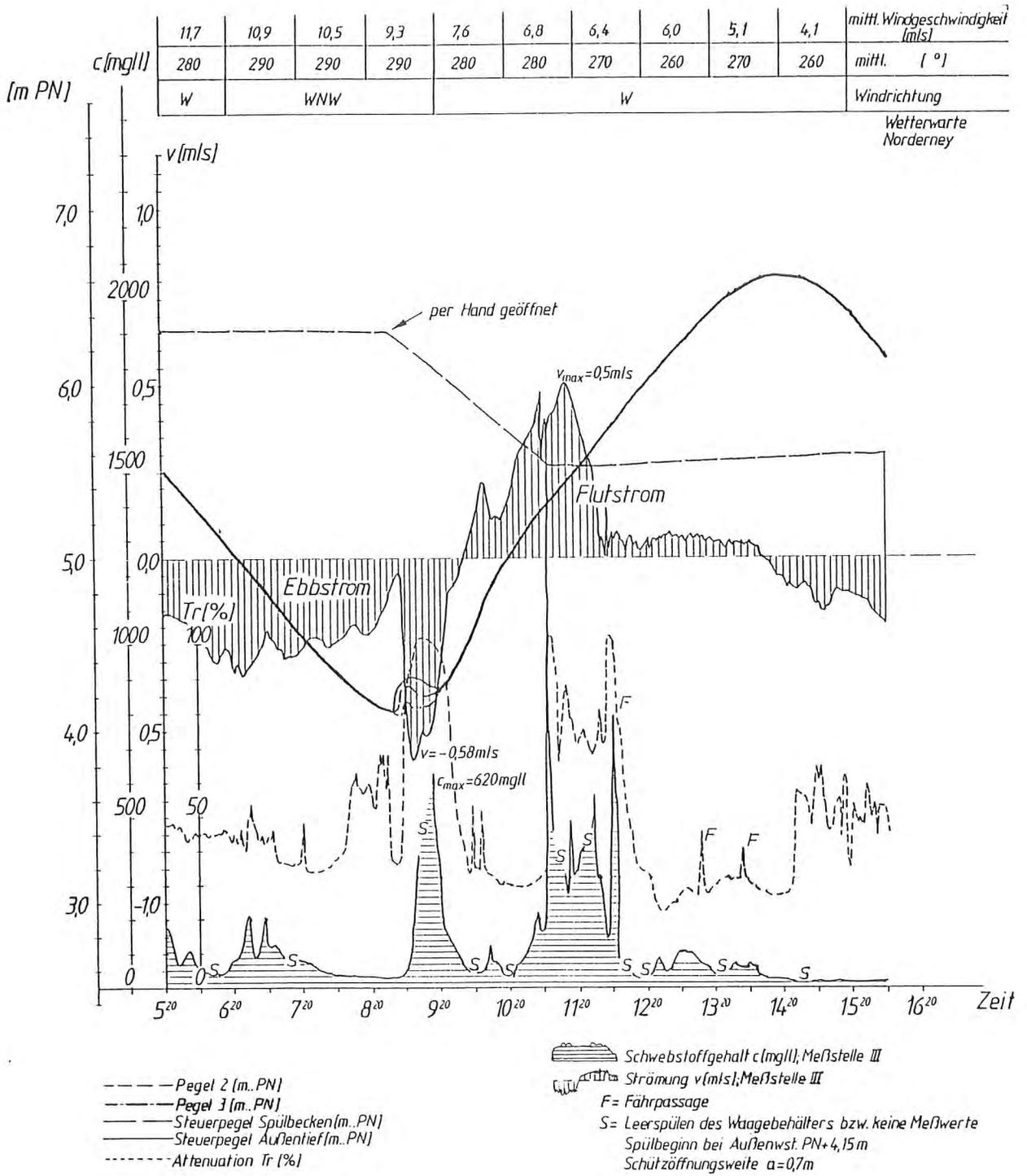


Abb. 5.31: Ganglinien - Meßstelle III - vom 02.09.1985

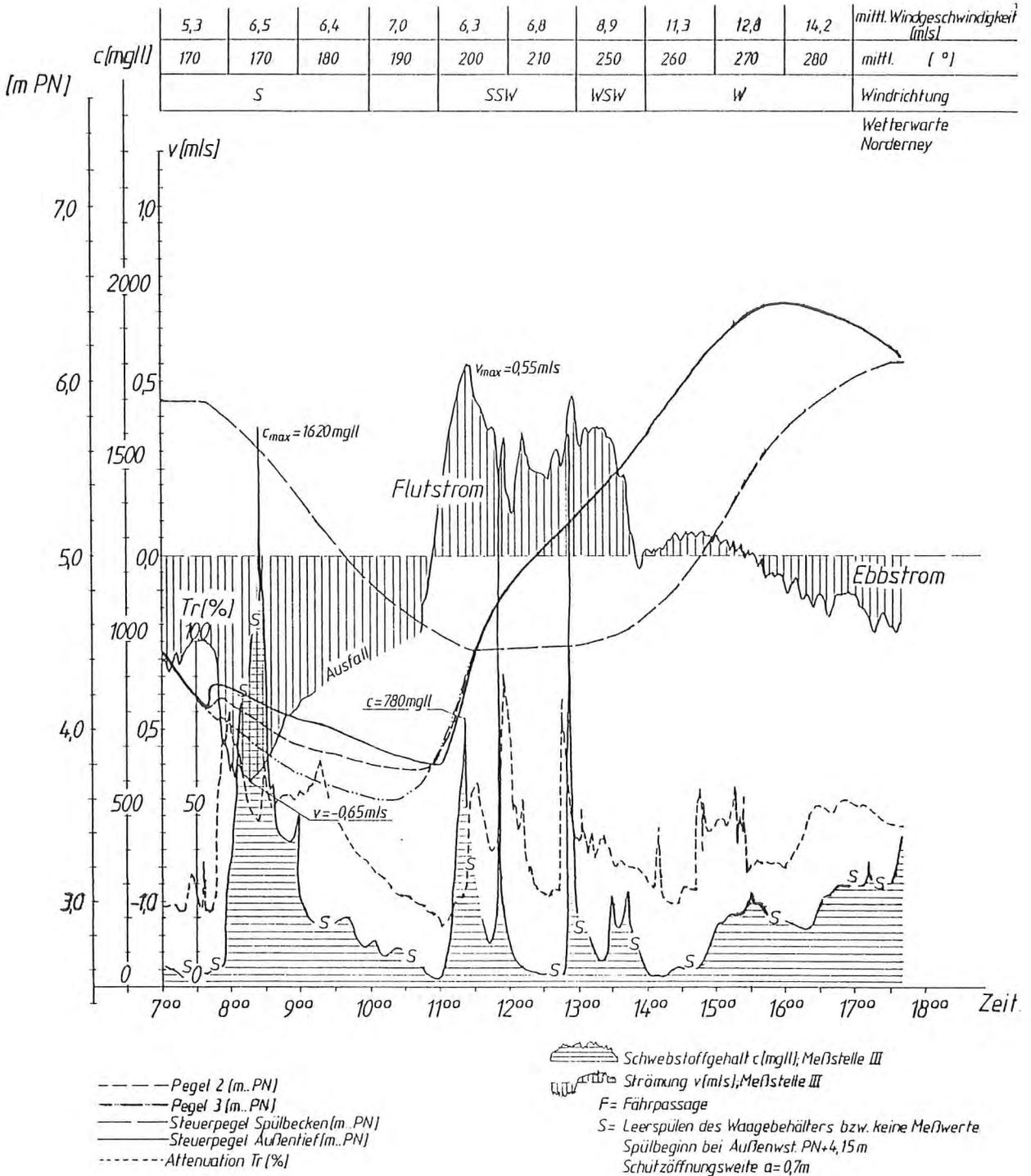


Abb. 5.32: Ganglinien - Meßstelle III - vom 05.09.1985

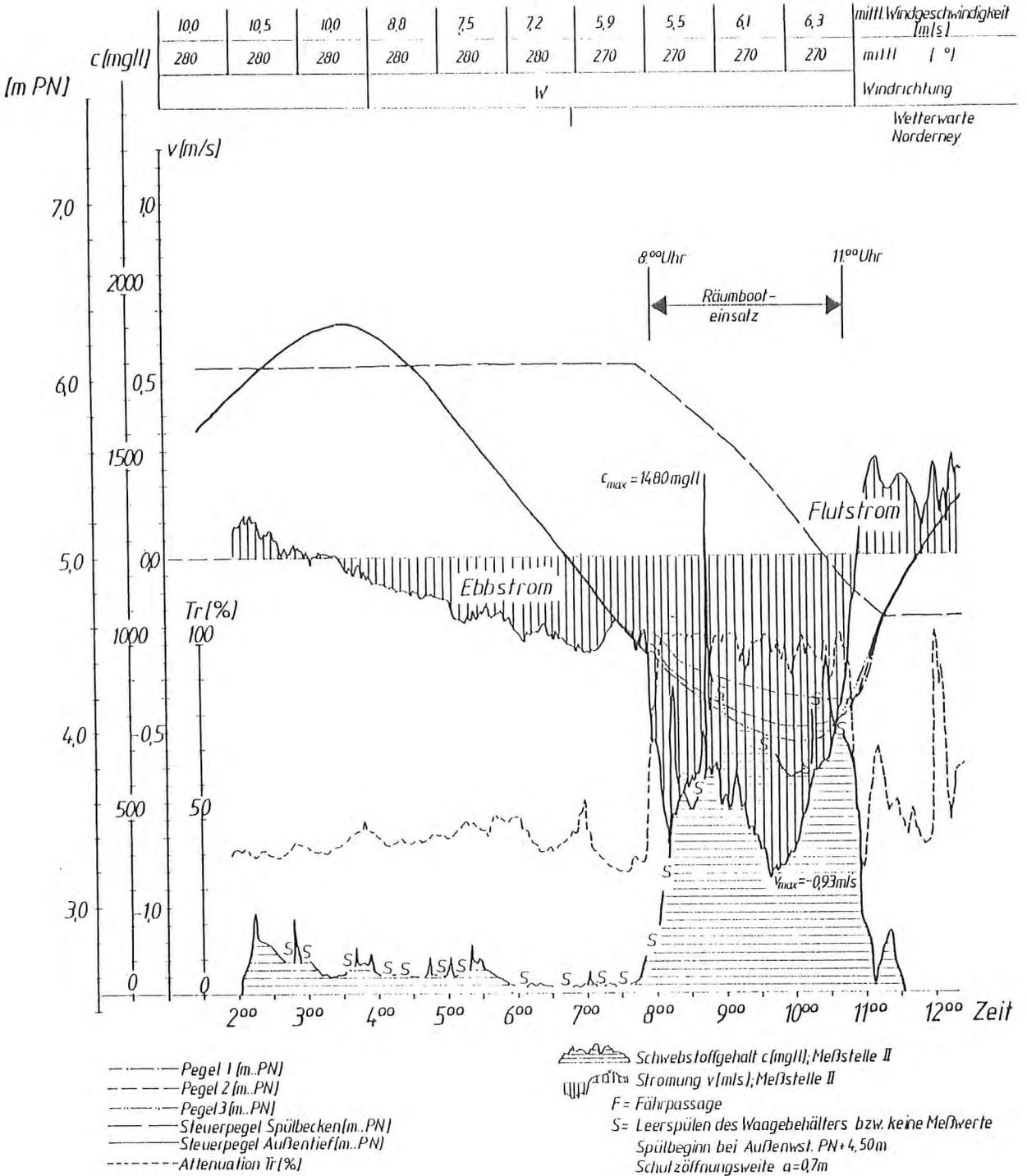


Abb. 5.33: Ganglinien - Meßstelle II - vom 28.05.1986

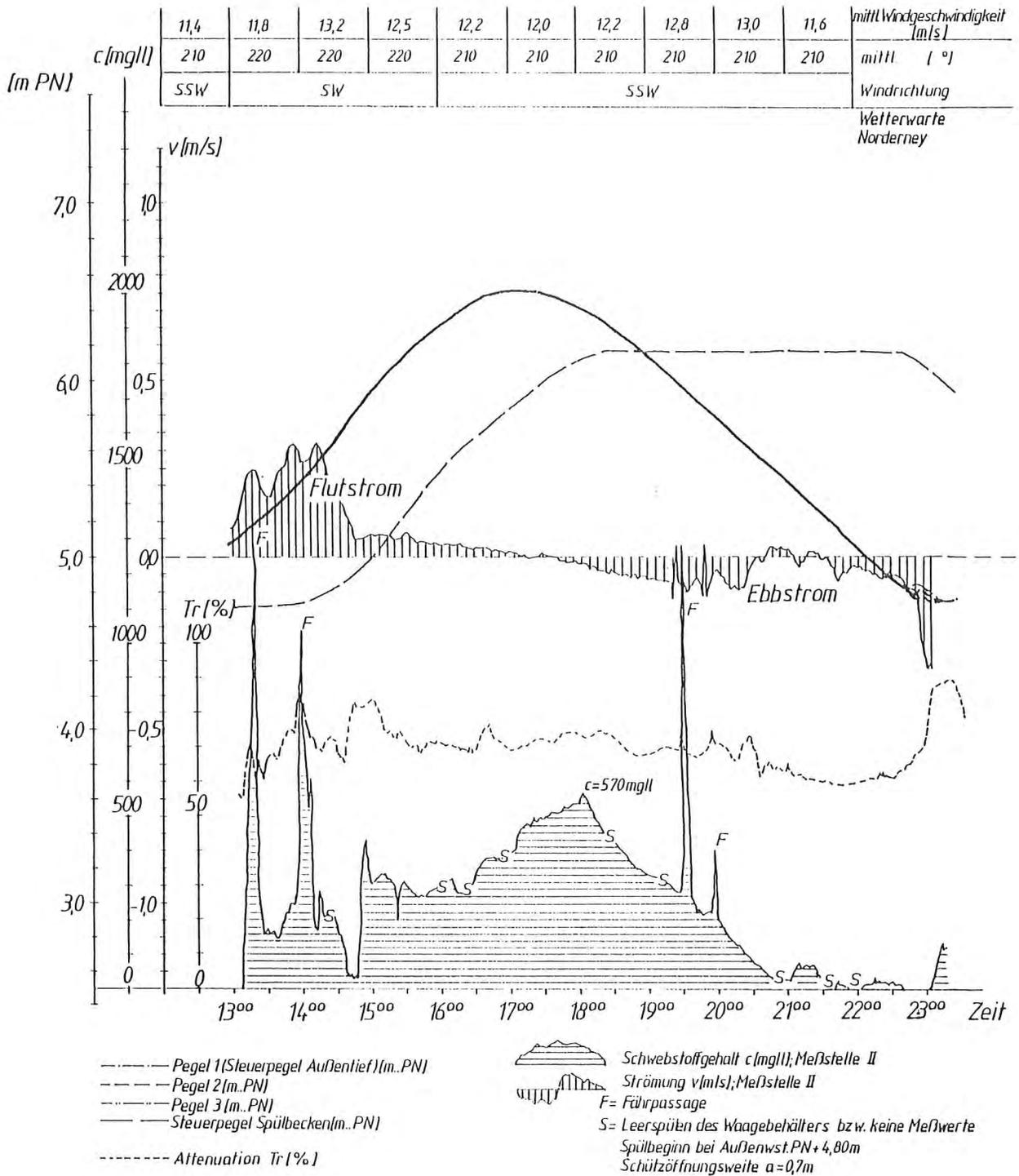


Abb. 5.34: Ganglinien - Meßstelle II - vom 27.08.1986

Das Thw liegt bei fast allen hier dargestellten Messungen über dem MThw von PN + 6,30 m, ausgenommen am 28.05.1986 (Abb. 5.33), hier wird das MThw genau erreicht. Wegen erhöhter Niedrigwasserstände (windbedingt) wurde am 20.10. und 23.10.1984 (Abb. 5.28 und 5.29) nicht gespült und am 01.09.1985 und 02.09.1985 (Abb. 5.30 und 5.31) ohne große Wirkung gespült, da hier wegen der großen Durchflußquerschnitte nur kurzzeitig relativ hohe Spülstromgeschwindigkeiten erreicht werden konnten. Ein Sonderfall, was den Spülbetrieb betrifft, stellt die Ganglinie vom 08./09.06.1984 (Abb. 5.27) dar:

Hier ist mit einer kleinen Schützöffnungsweite von nur 20 cm gespült worden - bei den anderen hier dargestellten Beispielen betrug die Schützöffnung 70 cm -, so daß eine maximale Spülgeschwindigkeit von nur 0,37 m/s erreicht und nach hohem Spülbeckenfüllungsgrad bis 4 Stunden nach Niedrigwasser wirkungslos Speicherwasser ausgelassen wurde (hierzu siehe Abschn. 5.3).

Diese Abbildungen sind ein Auszug aus den vielen Naturmessungen, die hier als Beispiel die Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Schwebstoffkonzentration wiedergeben.

5.2.5 Schwebstoffgehalt durch Schiffseinflüsse

Einen nicht unwesentlichen Einfluß auf den Schwebstofftransport hat der Schiffsverkehr in den Außentiefs. Dieser Spezialfall wurde ausführlich von RENGGER und BEDNARCZYK (1986) behandelt. In fast allen Abbildungen der Ganglinien sind deutlich die von den Ein- und Ausfahrten der nach Balttrum verkehrenden Fähre erzeugten Schwebstoffspitzen - gekennzeichnet mit "F" - zu erkennen. Abb. 5.35 soll hier beispielhaft die durch die Fähre bei auflaufendem Wasser und einem Wasserstand um NN verursachten Schwebstoffspitzen veranschaulichen. Diese Sedimentumlagerungen infolge Schiffsverkehr können sich sowohl positiv - im Sinne der Erhaltung

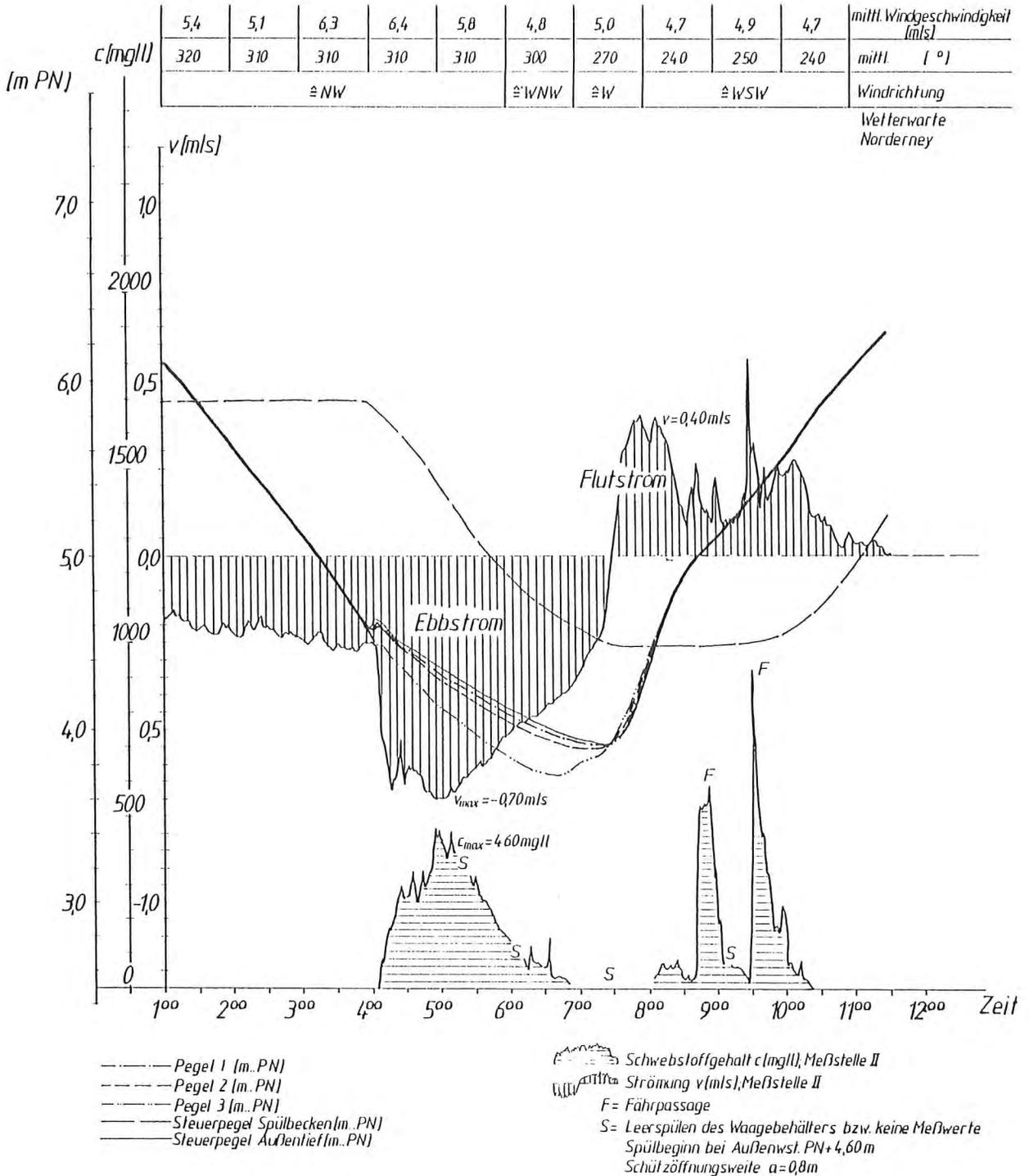


Abb. 5.35: Ganglinien - Meßstelle II - vom 28.07.1984

einer Außentief Rinne - 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 Tidenströmung absetzen und nicht wieder heraustransportiert werden. Z. B. war nach eineinhalb Monate andauerndem Aussetzen des Spülbetriebs im Hafengebiete eine derartig 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 kurzzeitig - 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 (siehe Beispiel) und damit hinsichtlich der Sedimentumlagerung besonders wirksam ist, während bei der letzten 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.

Dieses verdeutlicht die Auftragung in Abb. 5.36:

Der durch die Fähre (Baltrum I) verursachte Schwebstoffgehalt ist getrennt nach Einfahrt und Ausfahrt in das Außentief sowie getrennt für Flutstrom und Ebbstrom dargestellt. Die eingezeichneten Meßwerte sind mittlere Konzentrationen über einen Zeitraum von 15 Minuten.

Deutlich ist zu erkennen, daß die Fähre mit dem Flutstrom möglichst früh in das Außentief hineinfährt, frühestens $3 \frac{3}{4}$ Stunden vor Hochwasser. Bei Ebbstrom dagegen verläßt sie spätestens 3 Stunden nach Hochwasser das Außentief. Entsprechend hoch liegt die mittlere Schwebstoffkonzentration durch die Einfahrt der Fähre bei Flutstrom mit 400 mg/l. Die Ausfahrt der Fähre bei Flutstrom bringt immerhin noch 180 mg/l. Diese Schwebstoffe werden mit dem Flutstrom in Richtung Hafen transportiert. Dagegen wurden im Mittel wäh-

Schwebstoffgehalt mgll
 hervorgerufen durch Fährpassage
 (bezogen auf 15min. -Mittelwerte)

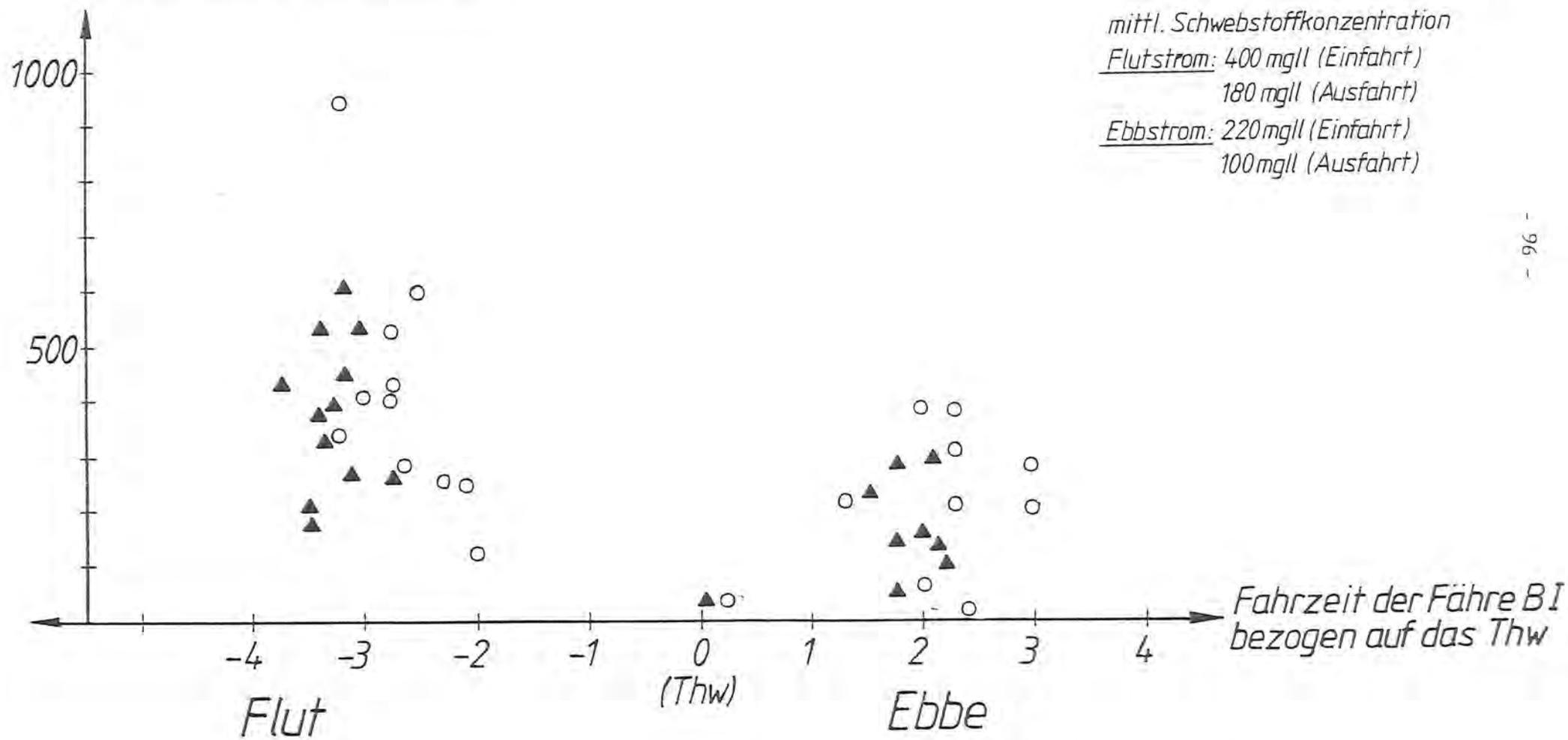


Abb. 5.36: Schwebstoffgehalt durch Fährschiffpassage in Abhängigkeit von der Fahrzeit

rend des Ebbstroms bei Einfahrt nur 220 mg/l und bei Ausfahrt der Fähre nur 100 mg/l Schwebstoffe gemessen, welche seewärts transportiert werden.

5.2.6 Schwebstoffgehalt-Häufigkeiten

5.2.6.1 Attenuation (Wassertrübe)

Während des Untersuchungszeitraums 1985 wurde die Attenuation an Meßstelle II kontinuierlich gemessen. Die Daten eignen sich daher gut für eine Häufigkeitsbetrachtung.

Eine deutliche Zunahme der Wassertrübe ist grundsätzlich während des Spülbetriebs, der Fährpassagen und durch Wind einfluß aus Nordwest bis Südwest nach Überfluten des Leitdammes zu verzeichnen. In der Häufigkeitsuntersuchung ist die durch Wind hervorgerufene Wassertrübe in der Verteilungskurve für Wasserstände größer NN bei Ebb- und Flutstrom etwa in gleichen Teilen enthalten. Die durch die Fähre hervorgerufene Wassertrübe geht hauptsächlich in die Häufigkeitskurve für Wasserstände größer NN im Flutstrombereich ein, da die Fähre überwiegend bei auflaufendem Wasser und einem Wasserstand wenig über NN in das Außentief hineinfährt und besonders bei diesem niedrigen Wasserstand viel Schlick aufwirbelt. Die durch den Spülbetrieb hervorgerufene Wassertrübe geht in die Häufigkeitskurve für einen Wasserstand unter NN im Ebbstrombereich ein.

Aus dieser Zusammensetzung der Verteilungskurven ergibt sich für den gesamten Untersuchungszeitraum 1985 eine mittlere Wassertrübe bei Ebbstrom von 31,6 % und bei Flutstrom von 24,9 % (Abb. 5.37). Die am häufigsten auftretenden Trübungswerte liegen zwischen 10 und 20 % sowohl für Ebbstrom als auch für Flutstrom, für Wasserstände kleiner NN durch den Spülbetrieb bei Ebbstrom aber zwischen 20 und 30 %. Eine Trübe von 40 % ist bei den Flutstromwerten bei 6,5 % und den Ebbstromwerten bei 15,1 % aller Meßdaten überschritten worden. Dieses zeigt die deutliche Dominanz des Spülstroms.

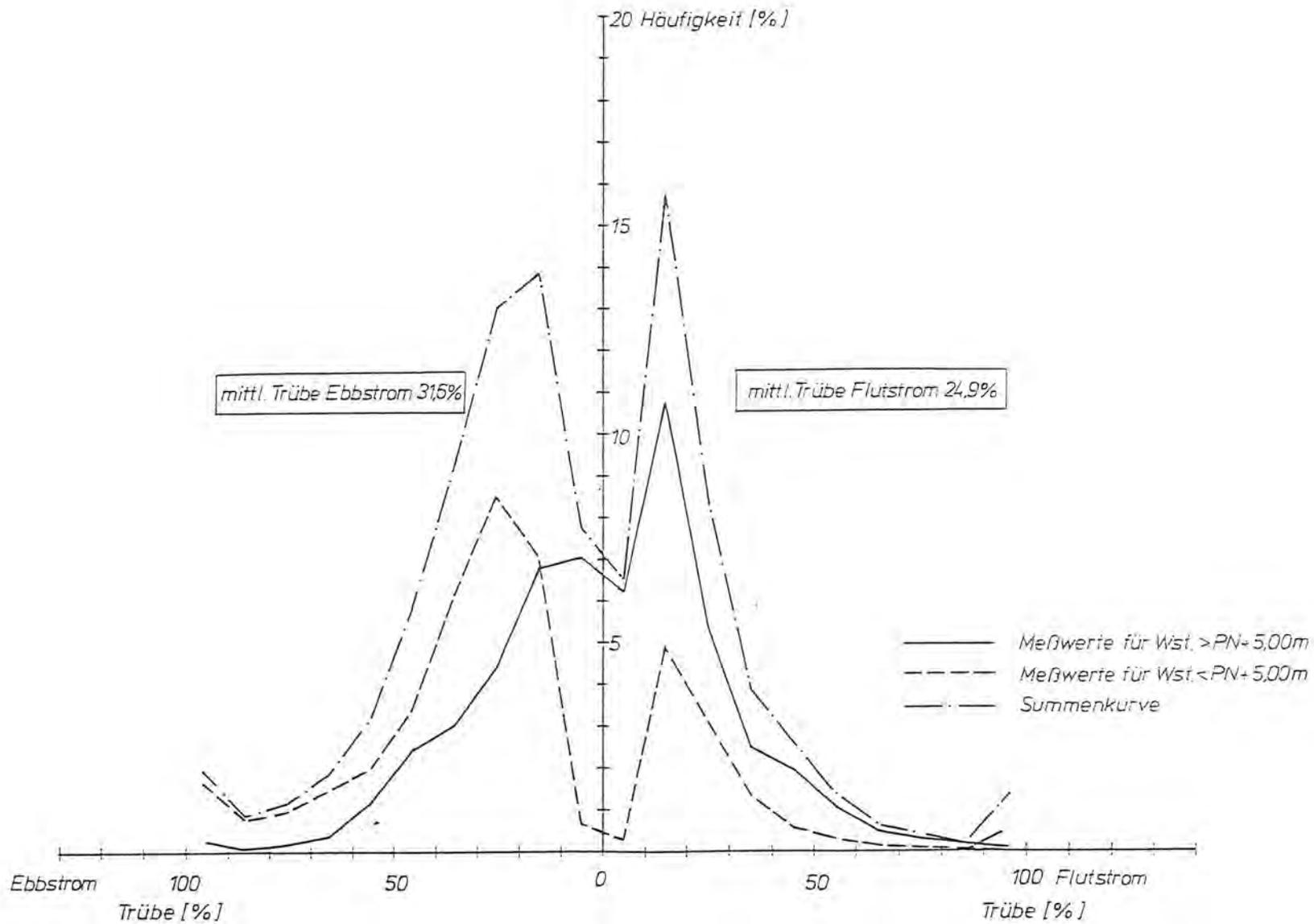


Abb. 5.37: Häufigkeitsverteilung der Attenuation (Wassertrübe) an Meßstelle II vom 24.06. bis zum 30.10.1985

Die relativ große Häufigkeit zwischen 90 und 100 % Trübe kommt dadurch zustande, daß sich zeitweise schwimmende Algenreste in den Meßspalt absetzen, so daß eine totale Trübe vorgetäuscht wurde.

Bei den Wochenmittelwerten ergaben sich für die Woche 02.09. bis 08.09.1985 die höchsten Trübungswerte mit 41 % bei Flutstrom und 44,7 % bei Ebbstrom (siehe Abb. 5.38). Wegen Unterhaltungsarbeiten und erhöhter Tiden konnte hier nur an 50 % der Tiden gespült werden. Die hohen Trübungswerte wurden durch die in dieser Woche vorherrschenden hohen Windgeschwindigkeiten von teilweise über 16 m/s verursacht (genauere Zusammenhänge siehe 5.24). Alle Wochenmittelwerte können der Tabelle 5.2 entnommen werden.

5.2.6.2 Schwebstoffgehalt-Häufigkeiten - gemessen mit "Sediwa" in den Jahren 1985 und 1984

Vom 01.07. bis zum 04.08.1985 und vom 16.09. bis 30.09.1985 sind mit kleineren Unterbrechungen durch Geräteausfälle Schwebstoffdauermessungen mit der "Sediwa" an Meßstelle II und vom 19.08. bis zum 08.09.1985 an Meßstelle III durchgeführt und durch eine Häufigkeitsuntersuchung ausgewertet worden.

Für den Untersuchungszeitraum ergab sich ein mittlerer Schwebstoffgehalt bei Flutstrom von 60 mg/l und bei Ebbstrom von 92 mg/l an Meßstelle II und von 75 mg/l bei Flutstrom und 87 mg/l bei Ebbstrom an Meßstelle III. Das Verhältnis des Schwebstoffintegrals Flutstrom zum Schwebstoffintegral Ebbstrom beträgt:

$$\int c_f dt : \int c_e dt = 1 : 3,4 \text{ für Meßstelle II und}$$

$$\int c_f dt : \int c_e dt = 1 : 2,6 \text{ für Meßstelle III.}$$

Diese Ergebnisse zeigen, daß die Ebbstrom-Schwebstoffgehalte infolge des Spülbetriebs deutlich überwiegen.

Meßzeitraum	mittl. Schwebstoffgehalt (Sediwa)				$\int c_f dt : \int c_e dt$		mittlere Wassertrübe an Meßstelle II		$\int Tr_f dt : \int Tr_e dt$	Häufigkeit $Tr_f > 40\%$ (%)	Häufigkeit $Tr_e > 40\%$ (%)	Bemerkungen	
	Meßstelle II		Meßstelle III		Meßst. II	Meßst. III	Tr_f (%)	Tr_e (%)					
	c_f	c_e	c_f	c_e									
24.06. - 30.06.	---	---	---	---	---	---	14,8	23,8	1 : 2,2	0,8	0,6	Die für die Schwebstoffmeßwerte der Meßstelle II zugrunde gelegte Strömungsrichtung wurde an Meßstelle III erfaßt (aus programmtechnischen Gründen)! erhöhter Seegang 1.7. - 7.7.	
01.07. - 07.07.	132	174	---	---	1 : 3,0	---	22,3	31,4	1 : 2,6	3,3	13,4		
08.07. - 14.07.	37	75	---	---	1 : 5,2	---	26,2	26,1	1 : 1,4	6,9	11,4		
15.07. - 21.07.	47	83	---	---	1 : 4,3	---	23,3	39,2	1 : 2,6	4,2	14,5		
22.07. - 28.07.	61	68	---	---	1 : 2,9	---	25,2	30,9	1 : 1,5	7,7	14,1		
29.07. - 04.08.	43	113	---	---	1 : 2,9	---	19,5	28,6	1 : 2,3	2,9	11,9		
05.08. - 11.08.	---	---	---	---	---	---	27,7	26,0	1 : 1,7	8,2	18,5		
12.08. - 18.08.	---	---	---	---	---	---	17,8	23,1	1 : 2,2	1,5	9,2		
19.08. - 25.08.	---	---	64	65	---	1 : 2,6	27,1	34,0	1 : 1,9	6,6	16,1		
26.08. - 01.09.	---	---	60	58	---	1 : 2,4	29,1	29,1	1 : 1,5	11,0	16,0		
02.09. - 08.09.	---	---	100	138	---	1 : 2,7	41,0	44,7	1 : 1,4	21,7	32,2		wegen Unterhaltungsarbeiten und erhöhter Tiden nur wenig effektive Spülungen
09.09. - 15.09.	---	---	---	---	---	---	23,5	29,2	1 : 1,7	5,1	15,2		
16.09. - 22.09.	51	40	---	---	1 : 1,8	---	26,5	35,4	1 : 2,1	6,6	19,4		
23.09. - 30.09.	---	---	---	---	---	---	24,6	30,3	1 : 1,4	3,9	12,5		
Gesamtmittel:	60	92	75	87	1 : 3,4	1 : 2,6	24,9	30,8	1 : 1,3	6,5	15,1		

Tab. 5.2 Wochenmittelwerte der Schwebstoffgehalte 1985

Erläuterungen: c = Schwebstoffkonzentration (mg/l)
 $(c_f$ bzw. c_e : " während des Flutstroms bzw. Ebbsstroms

Tr = Wassertrübe (%)

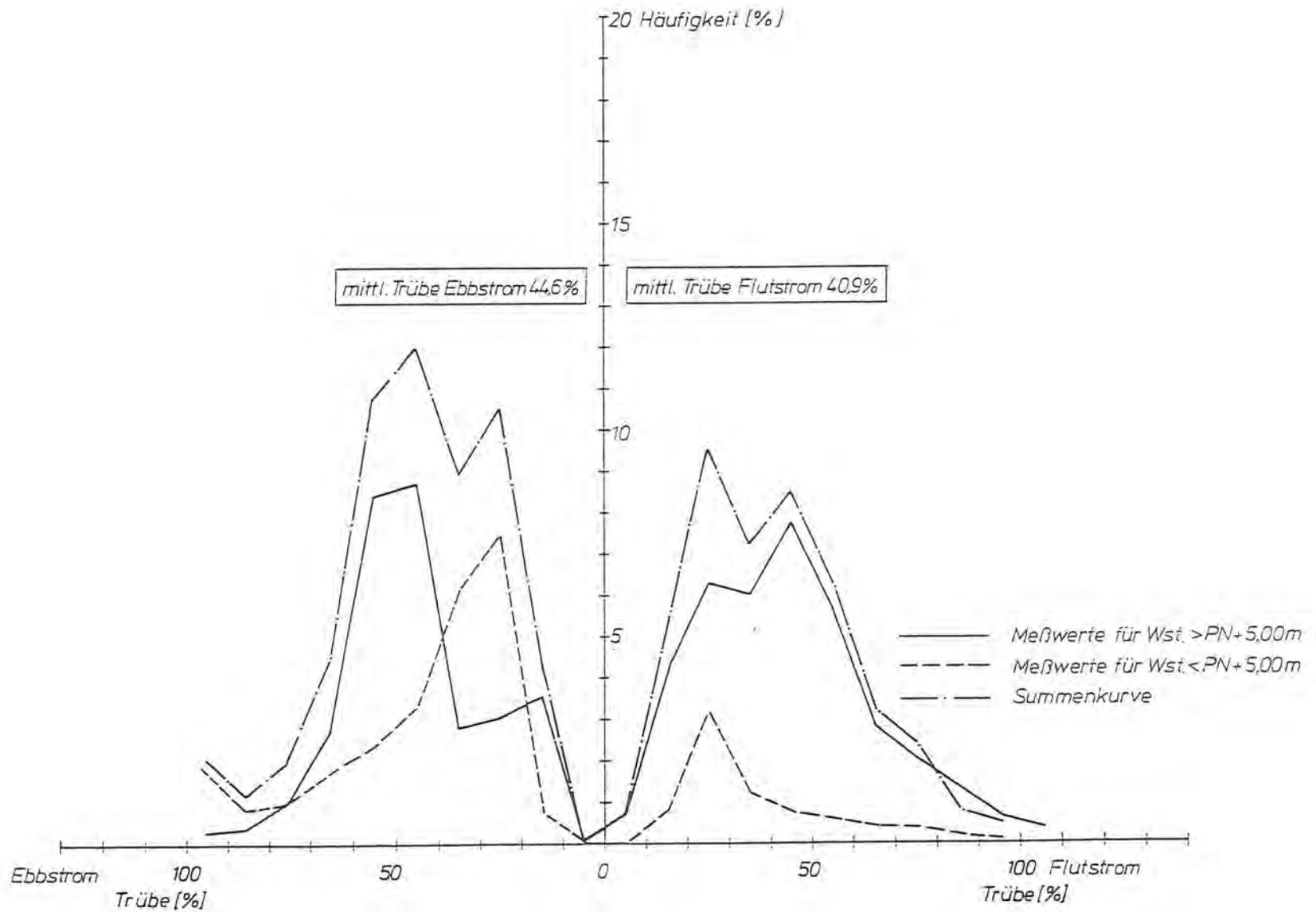


Abb. 5.38: Häufigkeitsverteilung der Attenuation (Wassertrübe) an Meßstelle II vom 02.09. bis 08.09.1985

Die höchsten gemessenen mittleren Konzentrationen traten - bedingt durch Seegang - in der Woche vom 01.07. bis 07.07.1985 und vom 02.09. bis 08.09.1985 mit 132 mg/l bei Flutstrom und 174 mg/l bei Ebbstrom bzw. 100 mg/l und 138 mg/l auf.

Die einzelnen Mittelwerte sind in Tabelle 5.2 zusammengefaßt.

In Tabelle 5.3 sind außerdem die 1984 durchgeführten Schwebstoffmessungen in Form von Wochenmittelwerten zusammengefaßt. In den Oktoberwochen gehen windbeeinflusste Schwebstoffmessungen ein, dadurch werden in der Woche vom 15.10. bis 21.10.1984 maximale Konzentrationsmittelwerte von 84,4 mg/l während des Flutstroms bzw. 122,0 mg/l während des Ebbstroms erreicht. Während des Flutstroms wird eine Konzentration von 100 mg/l bei 15,7 % und während des Ebbstroms bei 14,7 % sämtlicher Meßwerte überschritten. Dieser für das spülbeeinflusste Außentief untypische niedrigere Ebbstromwert ist ausschließlich auf die höhere Schwebstoffkonzentration durch vom Wind erzeugten Seegang - auch während des Flutstroms - zurückzuführen. Dieses umgekehrte Verhältnis der Konzentration zwischen Ebbstrom und Flutstrom ist in der darauffolgenden Woche mit 14 % Überschreitungshäufigkeit bei Flutstrom und nur 2,3 % bei Ebbstrom noch deutlicher. Über den Einfluß des Windes und dem dadurch bedingten Seegang auf dem Watt wird in Abschn. 5.2.4 ausführlicher berichtet.

Für sämtliche 1984 durchgeführten Schwebstoffmessungen ergibt sich ein Konzentrationsmittelwert von 50,8 mg/l bei Flutstrom und 55,4 mg/l bei Ebbstrom.

Meßzeitraum	mittlerer Schwebstoffgehalt Meßstelle II		$\int c_f dt : \int c_e dt$	Überschreitungs- häufigkeit $c > 100$ mg/l (%)		Bemerkungen
	\bar{c}_f	\bar{c}_e		Flutstrom	Ebbstrom	
06.06. - 10.06.	39	45	1 : 1,6	2,95	6,40	
09.07. - 15.07.	38,8	40,3	1 : 1,6	3,71	4,80	
23.07. - 29.07.	71,6	107,0	1 : 3,2	5,48	19,86	
30.07. - 05.08.	44,6	42,5	1 : 2,0	3,26	6,65	
08.10. - 14.10.	31,6	33,4	1 : 1,4	2,55	5,61	
15.10. - 21.10.	84,4	122,0	1 : 0,5	15,70	14,70	windbeeinflußt
22.10. - 28.10.	77,2	36,7	1 : 0,4	14,00	2,33	"
29.10. - 04.11.	19,5	16,5	1 : 0,9	1,28	1,56	"
Mittelwerte:	50,8	55,4	1 : 1,45	6,1	7,8	

Erläuterungen: c_m mittlere Schwebstoffkonzentration (mg/l)

\bar{c}_f : c_m bei Flutstrom (mg/l)

\bar{c}_e : c_m bei Ebbstrom (mg/l)

Tab. 5.3 Wochenmittelwerte der Schwebstoffgehalte 1984

5.2.6.3 Schwebstofftransport-Häufigkeiten in Abhängigkeit maßgebender Einflußfaktoren

Für die Beurteilung der Frage nach den maßgebenden Einflüssen auf die Bettbildung des Außentiefs ist vor allem die Kenntnis der ereignisbezogenen Schwebstoffumsätze von Interesse.

In Tab. 5.4 sind die Häufigkeiten der ereignisbezogenen Schwebstofftransporte durch den Außentiefquerschnitt an Meßstelle II für die Zeit vom 09.07. bis 28.07.1985 zusammengefaßt. Als Klassenbreite der transportierten Feststoffmassen wird einheitlich 5 t gewählt.

Die Schwebstofftransporte werden vereinfacht aus den gemessenen Schwebstoffgehalten und Strömungen bezogen auf die Außentiefdurchflußfläche berechnet. Die Transporte des Meßzeitraums werden für unbeeinflusste Flut- und Ebbströme jeder Tide, die einzelnen Fahrpassagen unterschieden nach Tidephase (Flut- oder Ebbstrom) und den Spülstrom ermittelt. Weitere Einflußfaktoren, wie z. B. Seegang, waren während des gewählten Zeitraums nicht maßgebend.

Aus der Tab. 5.4 ist zunächst zu ersehen, daß die einzelnen Ereignisse einer starken Streuung unterliegen, die hauptsächlich durch den unterschiedlichen Tideverlauf verursacht werden. Dies gilt vor allem für den Spülstrom. Wie bereits im Abschn. 5.1.2 festgestellt, wird bestätigt, daß der Spülstrom überwiegt und entscheidend zur Querschnittsbildung des Außentiefs beiträgt. Sein Anteil an dem ermittelten Gesamtschwebstoffumsatz längs des Außentiefs beträgt 53 %.

Aber auch die Fahrten der großen Baltrumfähre tragen zu erheblicher Sedimentumlagerung bei. Deren Anteil ergibt sich zu rd. 30 % des Gesamttransports. Wie im Abschn. 5.2.5 erläutert, überwiegt der Sedimenteintrag während des Flutstroms (16 %) gegenüber den Umlagerungen beim Ebbstrom (14 %).

Schwebstoffumsatz (t) für die Einzelabschnitte

	0 - 5,9	5 - 9,9	10 - 14,9	15 - 19,9	20 - 24,9	25 - 29,9	30 - 24,9	35 - 39,9	40 - 44,9	45 - 49,9	50 - 54,9	55 - 59,9	60 - 64,9	65 - 69,9	70 - 74,9	75 - 79,9	
Flutstrom	33	3	0	1	0	1											$\Sigma = 150 \text{ t} = 9,6 \%$
Fähre bei Flutstrom	4	10	7	3	1												$\Sigma = 247 \text{ t} = 15,7 \%$
Ebbstrom	35	3															$\Sigma = 110 \text{ t} = 7,0 \%$
Fähre bei Ebbstrom	11	10	1	4	0	0	0	1									$\Sigma = 222 \text{ t} = 14,1 \%$
Spülstrom *	0	6	5	3	3	5	0	2	3	1	2	1	0	0	0	1	$\Sigma\Sigma = 840 \text{ t} = 53,5 \%$

* 6 von 38 Tiden
ohne Spülung

= 1 569 t = 100 %

Tab. 5.4 Schwebstoffumsatz-Häufigkeiten an Meßstelle II vom 09.07. bis 28.07.1985

Im Gegensatz zum Spülstrom werden diese Massen nicht kontinuierlich über eine längere Strecke transportiert. Sie werden aufgewirbelt und in einer Schwebstoffwolke eine kurze Strecke transportiert, da die mittlere Fließgeschwindigkeit (siehe 5.2.6.1) 0,3 m/s nicht überschreitet.

Die suspendierten Feststoffe sedimentieren wieder nach Durchgang des Schiffes.

Die Sandanteile werden durch die schiffserzeugten Turbulenzen kurz aufgewirbelt und setzen sich nach wenigen Metern wieder ab, während Feststoffe mit geringerer Sinkgeschwindigkeit längere Zeit in Schwebelagung bleiben.

Die gemessene Feststoffanreicherung des Wassers dauert meist nicht länger als 15 Minuten, so daß mit einer Fließgeschwindigkeit um i. M. 0,2 m/s ein maximaler Transportweg von 180 m erreicht wird.

Aufgrund der nicht unerheblichen Sedimentumlagerung trägt der Schiffsverkehr zu einer gewissen Bettbildung bei. Die Tiefe der Querschnittsbildung ist jedoch stark begrenzt, da der schiffsbedingte Sedimenteintrag in das Außentiefregime überwiegt (siehe Abschn. 5.2.4) und die Umlagerungs- und Sortierungsvorgänge die Außentiefsohle zunehmend mit Feinsanden anreichert. Eine Vertiefung wird dann nur durch den starken Spülstrom ermöglicht, der die umgelagerten und aufgelockerten Feinsande seewärts transportiert.

Der natürliche Flut- und Ebbstrom haben mit rd. 10 % und 7 % nur einen geringen Anteil an den Gesamttransporten längs des Außentiefs.

Leider liegen keine ausreichende Daten von Parallelmessungen an der Meßstelle III vor. Aus den vorliegenden später gemessenen Werten läßt sich jedoch der Schluß ziehen, daß die Feststofftransportanteile der natürlichen Flut- und Ebbströme und damit auch der schiffserzeugten Sedimentumlagerungen zunehmen.

Der Spülstrom überwiegt noch mit 30 bis 40 % an den Gesamt-
feststofftransporten.

5.3 Spülbeginn in Abhängigkeit vom Außenwasserstand

5.3.1 Wirkung des Gegenstaus

Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 erläutert, treten besonders in Springtiden mit einem T_{nw} unter NN - 1,4 m kurze hohe Flutstromgeschwindigkeiten ca. eine Stunde nach T_{nw} auf. Infolge dessen werden über etwa eine halbe Stunde hohe Schwebstoffkonzentrationen in dem einströmenden Tidewasser registriert (Abschn. 5.2.1).

Die Flutstromspitzen können gedämpft und damit der Schwebstoffgehalt 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 zuvor entweder mit geringer Spülwassermenge gedrosselt (kleine Schützöffnung) (Abb. 5.40 und 5.41) gespült oder erst später mit dem Spülen begonnen wird (Abb. 5.39). Bei gedrosselter Spülwasserzugabe wird die Ebbströmung nur geringfügig erhöht, so daß die geforderte Mindestgeschwindigkeit kaum überschritten und nur wenig Material erodiert wird.

Für den Gegenstaubetrieb soll ein entsprechend später Spülbeginn (z. B. Außenwasserstand PN + 3,9 m) anhand der Abb. 5.39 erläutert werden. Kurzzeitig wird eine hohe Spülgeschwindigkeit von $v_{max} = 1,04$ 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 gut 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.

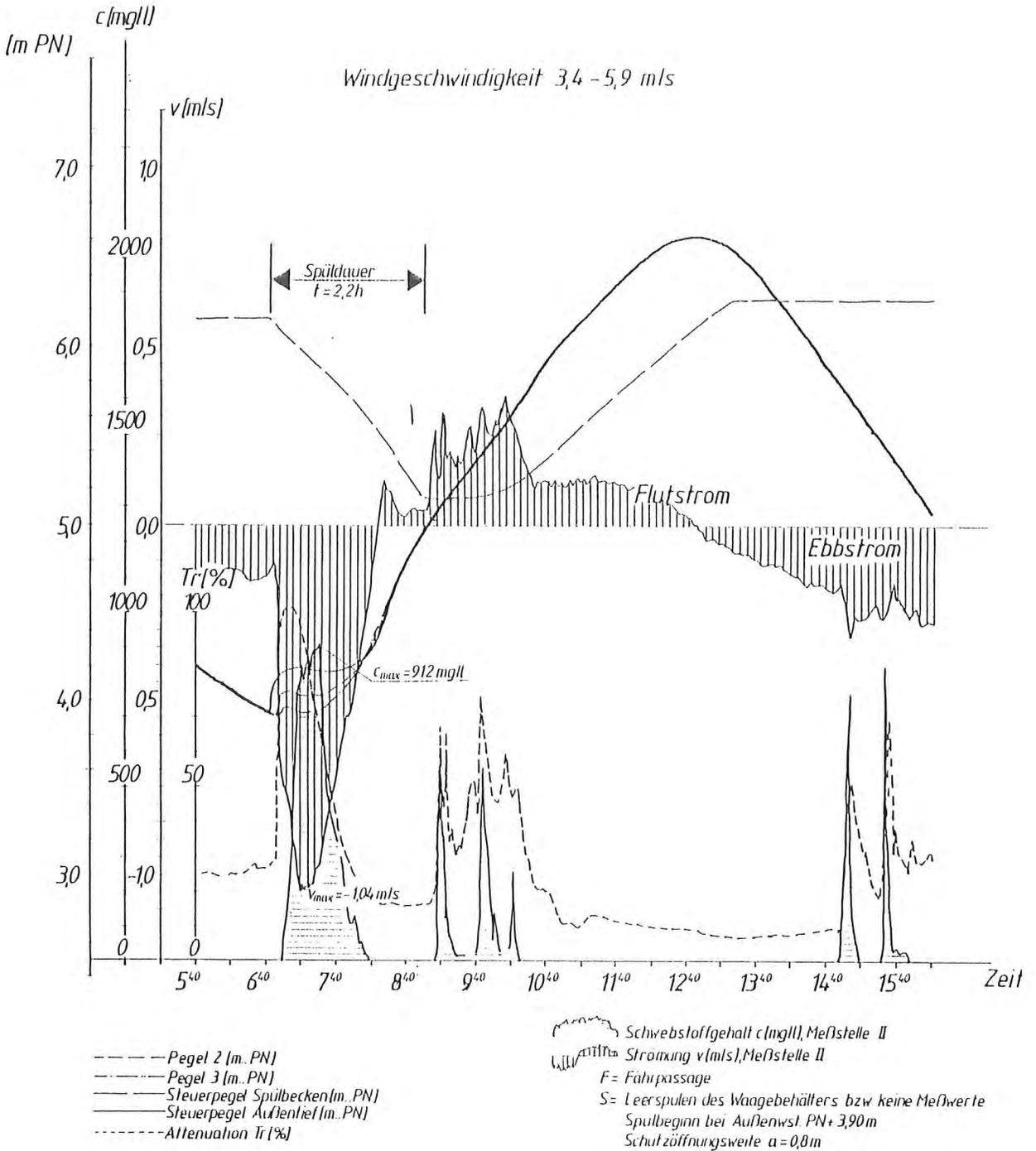


Abb. 5.39: Ganglinien - Meßstelle II - vom 01.08.1985

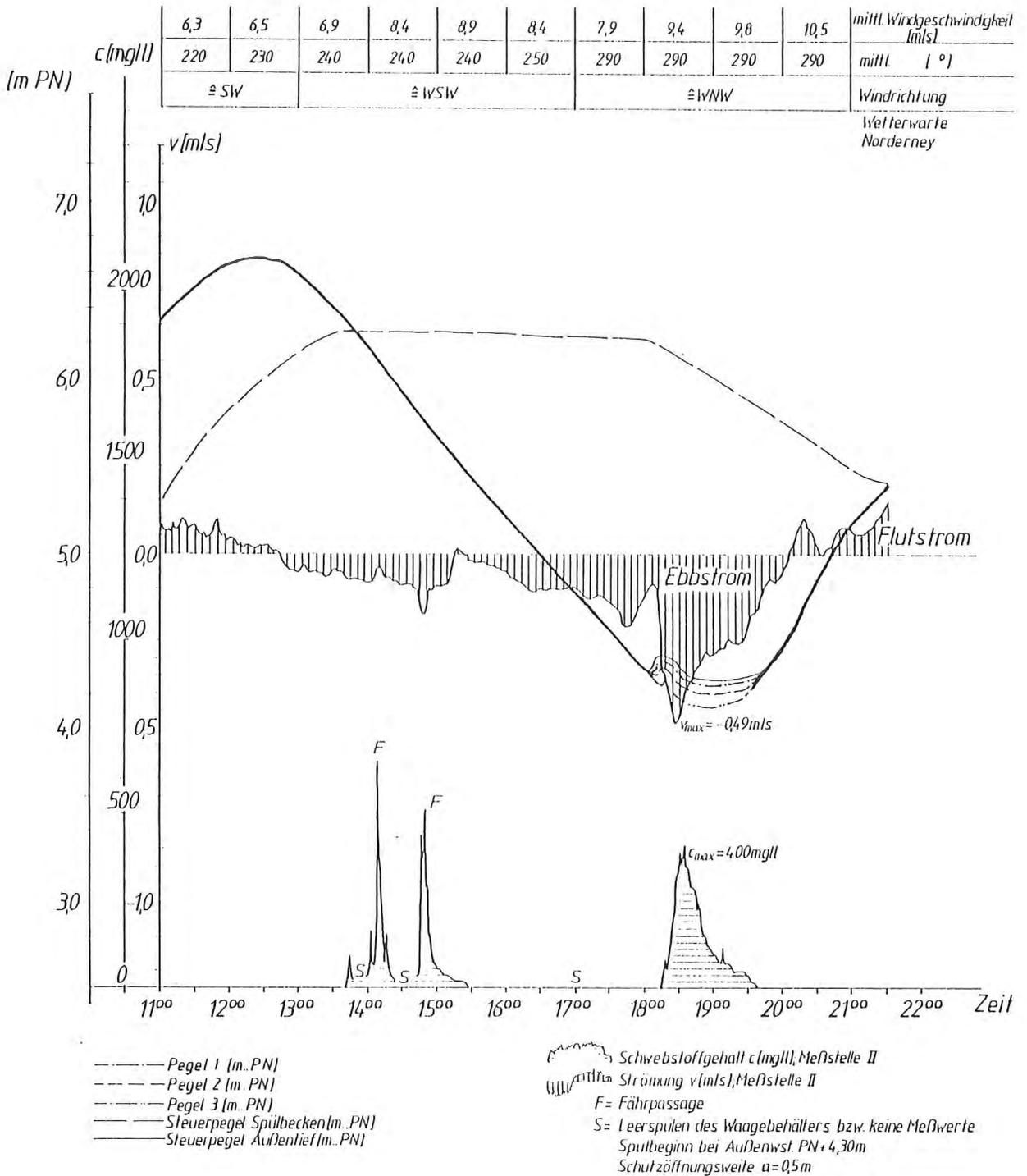


Abb. 5.40: Ganglinien - Meßstelle II - vom 11.10.1984

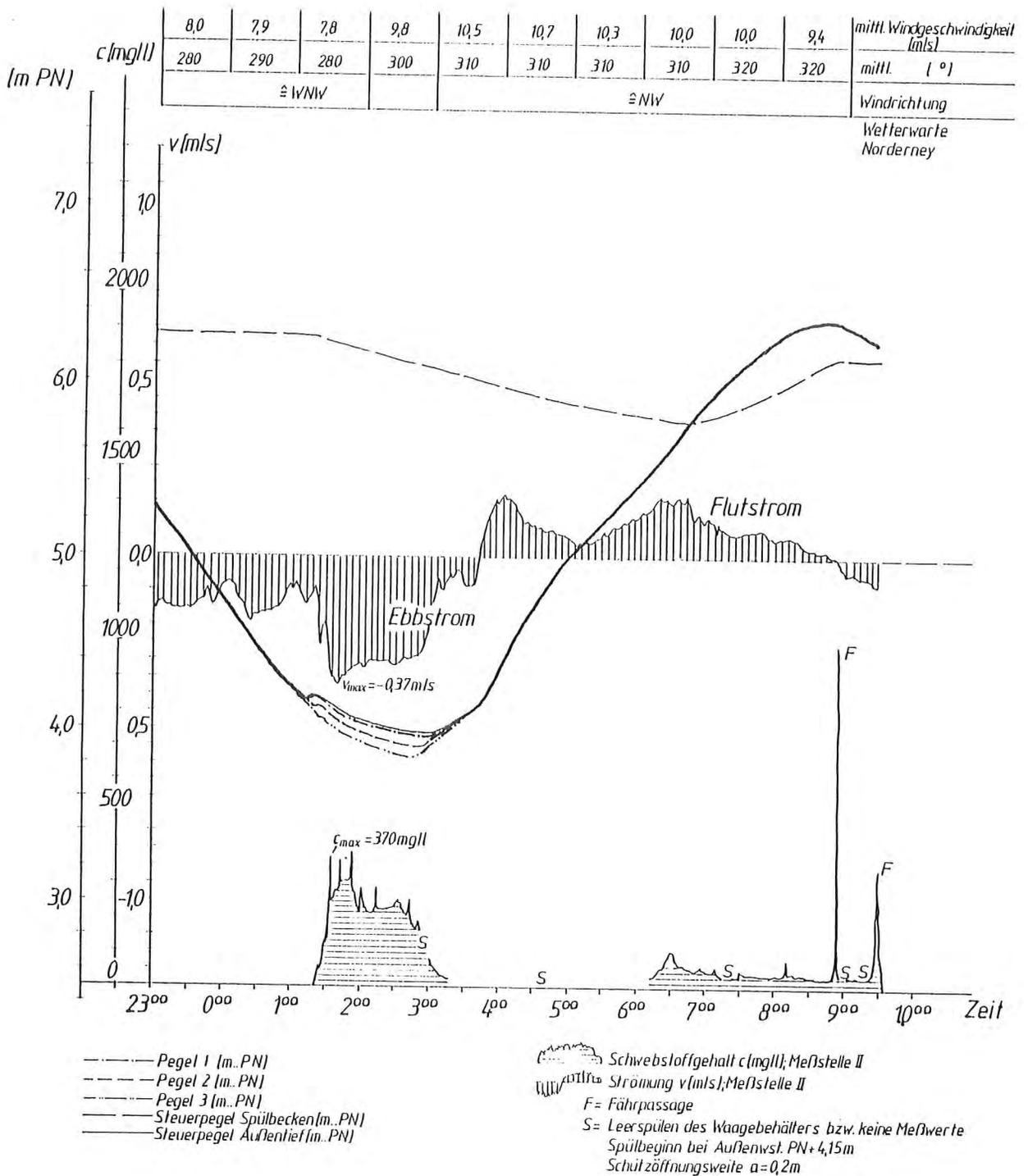


Abb. 5.41: Ganglinien - Meßstelle II - vom 08./09.06.1984

Eine andere Möglichkeit des sog. Gegenstaubetriebes zeigen Abb. 5.40 und 5.41. Um während des Flutstroms noch genügend Spülwasser zur Verfügung zu haben, wird hier nicht erst sehr spät mit dem Spülen begonnen, sondern schon bei einem Außenwasserstand von PN + 4,30 m bzw. PN + 4,15 m, dafür aber mit verringerter Schützöffnungsweite von 0,5 bzw. 0,2 m. Im ersten Fall mit 50 cm Schützöffnungsweite wird eine maximale Spülstromgeschwindigkeit von fast 0,5 m/s als Spitzenwert erreicht, der dann schnell innerhalb von 1,5 Stunden auf Null abfällt. Eine erhöhte Schwebstoffkonzentration wird über 1,5 Stunden gemessen mit einem Maximum von 400 mg/l. An den Ganglinien ist schon zu erkennen, daß die Spüleffektivität trotz hohem Spülbeckenwasserstand bei Spülbeginn gering ist. Das liegt hier einmal an der kleinen Schützöffnung von 0,5 m, die nur eine geringe Spülwasserzugabe zuläßt (siehe Abschn. 3:6), zum anderen - was die Dauer der Spülwirkung betrifft - an einem erhöhten Tnw von PN + 4,10 m am äußeren Außentiefende.

In dem zweiten Beispiel - Abb. 5.41 - ist durch die noch kleinere Schützöffnung von 20 cm die Spülstromgeschwindigkeit und der Schwebstoffgehalt noch geringer. Dafür ist hier aber, im Gegensatz zum vorherigen Beispiel, wegen des niedrigeren Tnw eine länger anhaltende Spülstromgeschwindigkeit und eine länger anhaltende erhöhte Schwebstoffkonzentration gemessen worden, obwohl hier bei einem Außenwasserstand von PN + 4,15 m etwas später mit dem Spülen begonnen wurde als im Beispiel vorher mit PN + 4,30 m.

Daß in diesen beiden Beispielen trotz der Spülströmung, die weitgehend unter der geforderten Spülstromgeschwindigkeit liegen (s. Abschn. 5.2.2), noch so relativ hohe Schwebstoffkonzentrationen von 400 bzw. 370 mg/l erreicht werden, liegt hier an dem hohen Angebot von feinem Schlick, welcher infolge erhöhter Windgeschwindigkeiten, z. B. zwischen 6,3 und 8,9 m/s aus WSW am 11.10.1984 (Abb. 5.40) bzw. zwischen 9,4 und 10,3 m/s aus NW am 09.06.1984 (Abb. 5.41) und damit verbundenem Seegang bei Wasserständen über PN + 5,60 m in das Außentief hineingetragen wurde (s. Abschn. 5.2.4).

Zusammenfassend kann aber festgestellt werden, daß bei einer kleineren Schützöffnung die Spülwirkung nicht sehr groß ist und zu T_{nw} noch viel Speicherwasser zur Verfügung steht, welches dann nach T_{nw} bis etwa Wasserstandsgleichstand wirkungslos ausläuft.

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 Hafengebiete transportieren. Dafür muß auf einen effektiven Teil der Räumphase verzichtet werden. Ein Vergleich des Gegenstaubetriebes mit den beschriebenen Beispielen für den ausschließlichen Räumetrieb ergibt folgende Schwebstofftransporte durch den Querschnitt an Meßstelle II. Die Schwebstoffumlagerungen infolge Schiffsverkehr werden dabei nicht mit einbezogen:

Mit dem Spülstrom werden in Beispiel a) (Abb. 5.42) 42 t und in Beispiel b) (Abb. 5.43) 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 den bei großem Frischschlickangebot ermittelten Transport von 25 Tonnen aus dem Beispiel des Gegenstaubetriebes gegenüber, läßt sich der Schluß ziehen, daß für die Gegebenheiten in Neßmersiel ein langer effektiver Räumetrieb 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 Seegangseinflüssen kann zwar nicht durch den reinen Spülbetrieb herabgesetzt werden, die in diesen Fällen abgelagerten Sedimente können aber durch den Räumetrieb wirksam herausgespült werden.

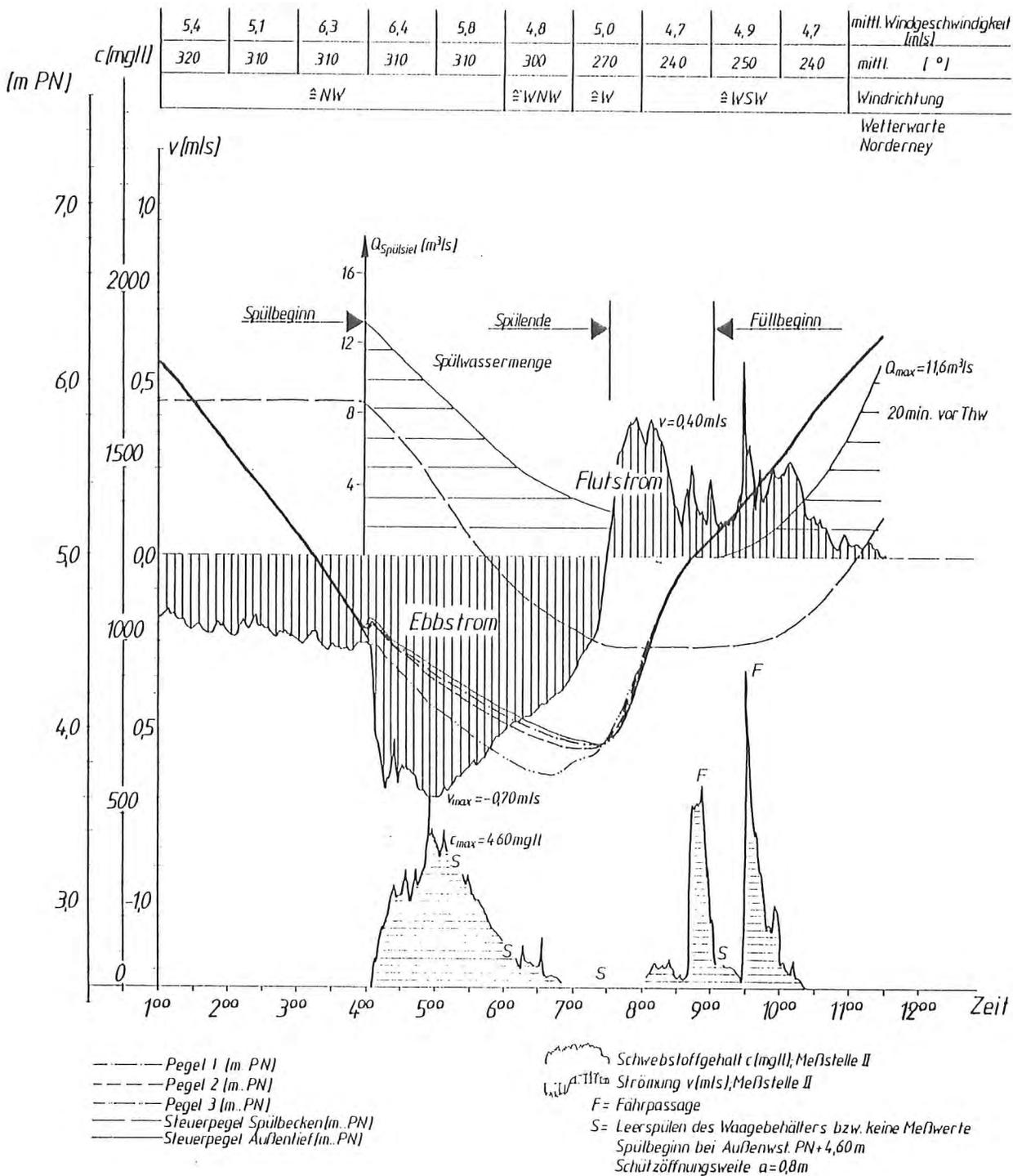


Abb. 5.4²: Ganglinien - Meßstelle II - vom 28.07.1984

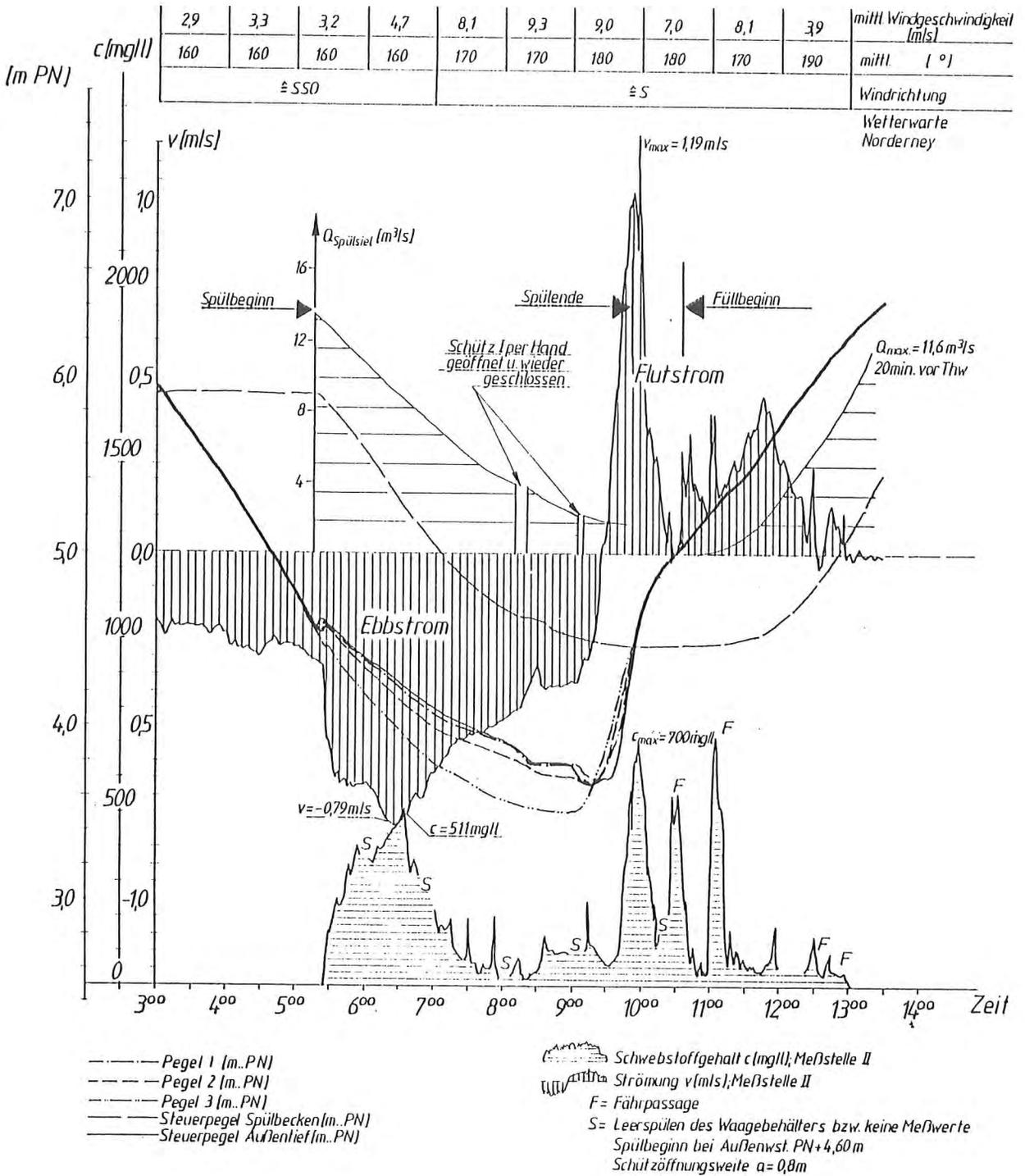


Abb. 5.43: Ganglinien-- Meßstelle II - vom 30.07.1984

5.3.2 Optimierung der Räumwirkung

Zur Optimierung des Spülbetriebes in Neßmersiel wurden in den Hauptmessungen die Spülwassermenge sowie der Spülbeginn in Abhängigkeit zum Außenwasserstand variiert.

Für eine effektive Räumung des Außentiefs muß die Ebbstromgeschwindigkeit durch Auslassen von Spülwasser über einen möglichst langen Zeitraum die kritische Geschwindigkeit (Abschnitt 5.2.2) wesentlich überschreiten. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichend bemessene Spülwassermenge und ein niedriger Wasserstand im Außentief. Um eine möglichst lange Räumphase und ausreichend lange Transportwege 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. 5.42 und 5.43 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. 5.42) ca. 2,5 Std. bzw. im Falle b) (Abb. 5.43) bereits 3,7 Std. vor Niedrigwasser aufgrund der erniedrigten Tidekurve besonders früh begonnen. Während der ersten zwei Spülstunden mit hohem Siel durchfluß 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) 0,78 m/s erreicht. Im Fall b) wird eine höhere Geschwindigkeitsspitze erreicht, da das Niedrigwasser um 20 cm unter dem normalen T_{nw} 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. 5.43) 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.

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
erreichbarer Schwebstofftransport während des Spülens: 70 t	

Wie schon erwähnt, ist für eine effektive Räumung des Außentiefs Voraussetzung, daß das NW möglichst bis T_{nw} oder tiefer abfällt. Ist dieses nicht der Fall, bleibt die Spülstromgeschwindigkeit wegen des größeren Querschnitts zu klein und wegen des schnell wieder ansteigenden Wasserstandes die Spüldauer zu kurz, auch wenn rechtzeitig, wie in den oben beschriebenen Beispielen, mit dem Spülen begonnen wird. Die Abbildungen 5.44 und 5.45 zeigen Beispiele, in denen das NW über dem M_{Tnw} liegt. In Abb. 5.45 wird z. B. bei einem Wasserstand von PN + 4,15 m mit dem Spülen begonnen. An Meßstelle III fällt das NW nur bis auf PN + 4,05 m ab und im Hafenbereich fällt der Wasserstand während des Spülens kaum unter den Wert bei Spülbeginn ab. Dazu kommt ein niedriger Spülbeckenwasserstand zu Spülbeginn von PN + 5,80 m, der 20 cm tiefer als der mittlere Spülbeckenwasserstand liegt. Ein geringes Fließgefälle kann sich nur über etwa 1,5 Stunden einstellen, danach geht die Geschwindigkeit wegen des auflaufenden Flutstroms auf Null und das noch 1,5 Stunden nach NW auslaufende Spülwasser

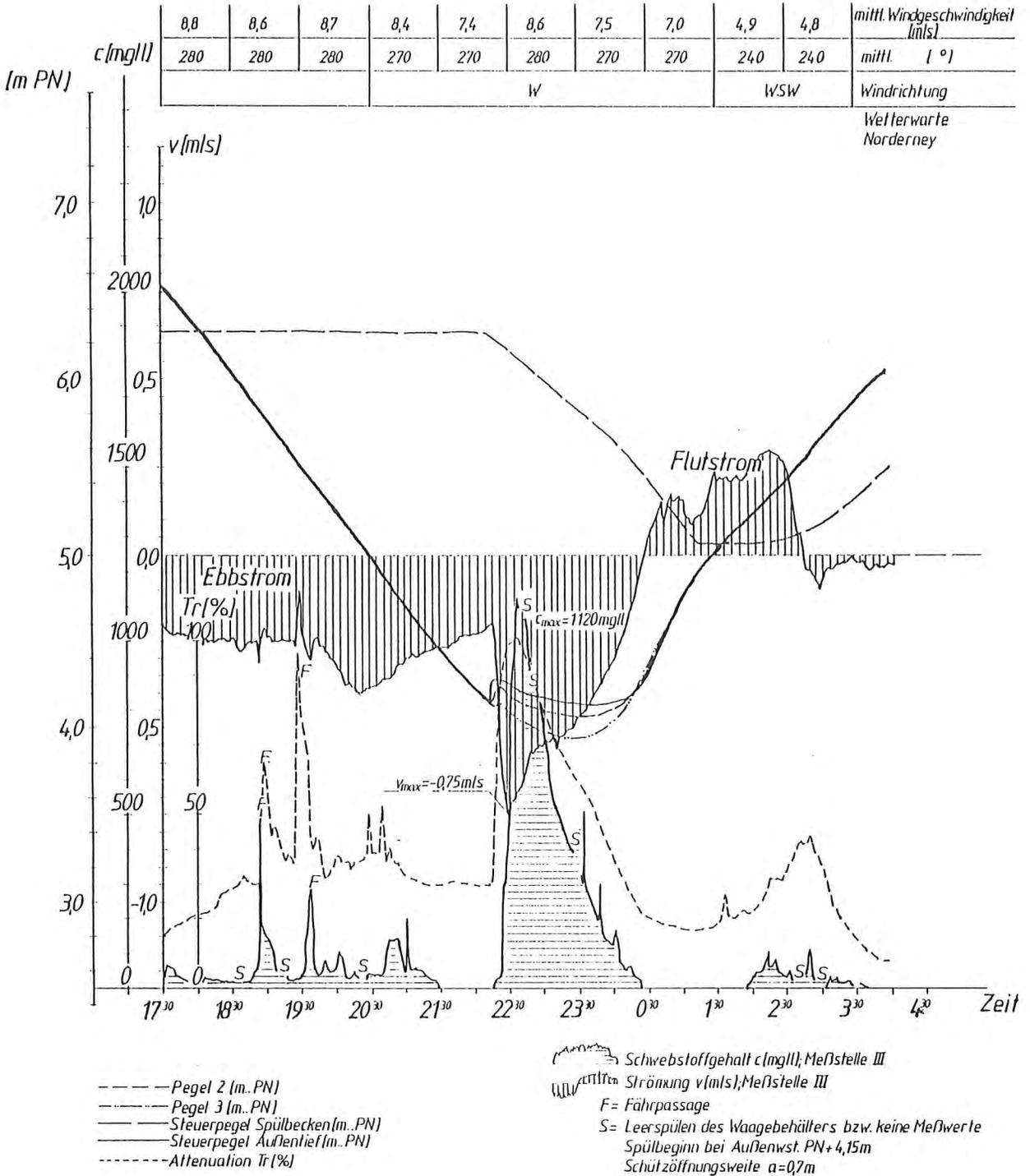


Abb. 5.44: Ganglinien - Meßstelle III - vom 22./23.08.1985

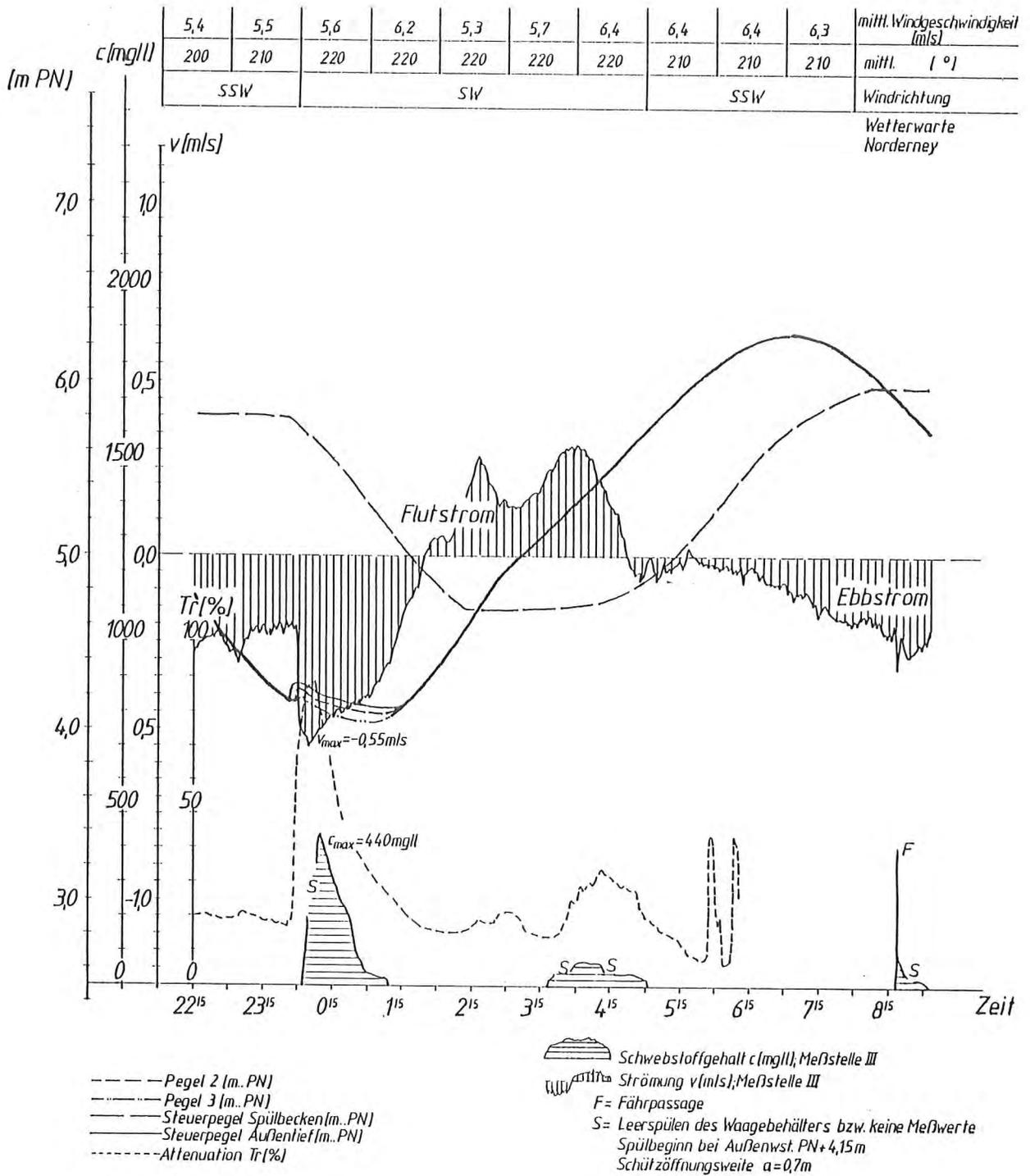


Abb. 5.45: Ganglinien - Meßstelle II - vom 24./25.08.1985

bleibt ohne Wirkung. Eine erhöhte Schwebstoffkonzentration wird etwa über 1 Stunde gemessen, der Spitzenwert liegt bei 440 mg/l und die maximale Spülstromgeschwindigkeit bei 0,55 m/s. Die gesamte Spülwirkung ist also in diesem Beispiel gering.

In Abb. 5.44 ist die Spülwirkung etwas größer. Hier fällt das T_{nw} am Außentiefende etwa 10 cm tiefer ab als in Abb. 5.45, liegt aber immer noch über dem MThw. Der Spülbeckenwasserstand liegt mit $PN + 6,30$ m 30 cm über dem mittleren Wasserstand. Die hier kurzzeitig erreichte maximale Schwebstoffkonzentration von 1 120 mg/l ist im wesentlichen auf das erhöhte Schlickangebot infolge Windeinfluß zurückzuführen. Bei einem vom Schlick freigespülten Außentief werden diese hohen Konzentrationen durch maximale Geschwindigkeit von 0,75 m/s nicht erreicht.

Daraus ist wiederum zu schließen, daß Schwebstofftransporte maßgeblich von der hydrologischen und morphologischen Vorgeschichte abhängen.

Die beiden Beispiele mit erhöhtem T_{nw} lassen sich wegen der unterschiedlichen Voraussetzungen kaum vergleichen. Ein hohes T_{nw} im Außentief setzt in jedem Fall die Spülwirkung (Dauer und Intensität) herab.

Für eine effektive Räumung bzw. Tiefenstabilisierung eines angestrebten Außentiefquerschnittes müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

- Das Stromarbeitsvermögen des Ebbstroms muß so verstärkt werden, daß die Ebbstromgeschwindigkeit durch Zugabe von Spülwasser über einen möglichst langen Zeitraum von rd. 2 Stunden die Erosionsgrenzgeschwindigkeit überschreitet (siehe Abschn. 5.2.2 und 7.3).
- Das Ebbstromintegral $\int v_e dt$ muß das Flutstromintegral $\int v_f dt$ wesentlich überschreiten (bei einem optimalen Spülbetrieb in Neßmersiel wurden vom 24.06. bis 01.09.1985 $\int v_e dt$: $\int v_f dt = 2,8$ für Meßstelle II bis 3,6 für Meßstelle III erreicht).

- Während der Räumphase sollte ein ausreichend langer Transportweg erreicht werden, damit das mitgeführte Material möglichst weit in den natürlichen Wattstrom abtransportiert wird. Trägt man den maximalen ideellen Transportweg in Abhängigkeit vom Spülbeginn vor T_{nw} auf (Abb. 5.46), wird deutlich, daß die längsten Transportwege für einen Spülbeginn von 2 bis 3 Stunden vor T_{nw} erreicht werden können. Die eingezeichnete Kurve soll den Bereich des maximalen ideellen Transportweges andeuten, der in mittleren Tiden erreichbar ist. In Springtiden können noch längere Transportwege erreicht werden.

- Letztendlich ist für Neßmersiel aus den berechneten Schwebstofftransporten zu folgern, daß das Spülen etwa 2 bis 2,5 Stunden vor T_{nw} beginnen sollte (Abb. 5.47). Die eingezeichnete Kurve gibt den Bereich des erreichbaren Schwebstofftransports an. Die stark streuenden Transportdaten sind auf die unterschiedlichen hydrologischen und morphologischen Randbedingungen zurückzuführen - wie bereits erläutert. Die Daten gelten für die Gegebenheiten des vorhandenen Spülseils mit seinem Spülbecken. Werden die Anlagen verändert (s. Abschn. 10.1), verschiebt sich die Kurve des erreichbaren Schwebstofftransports.

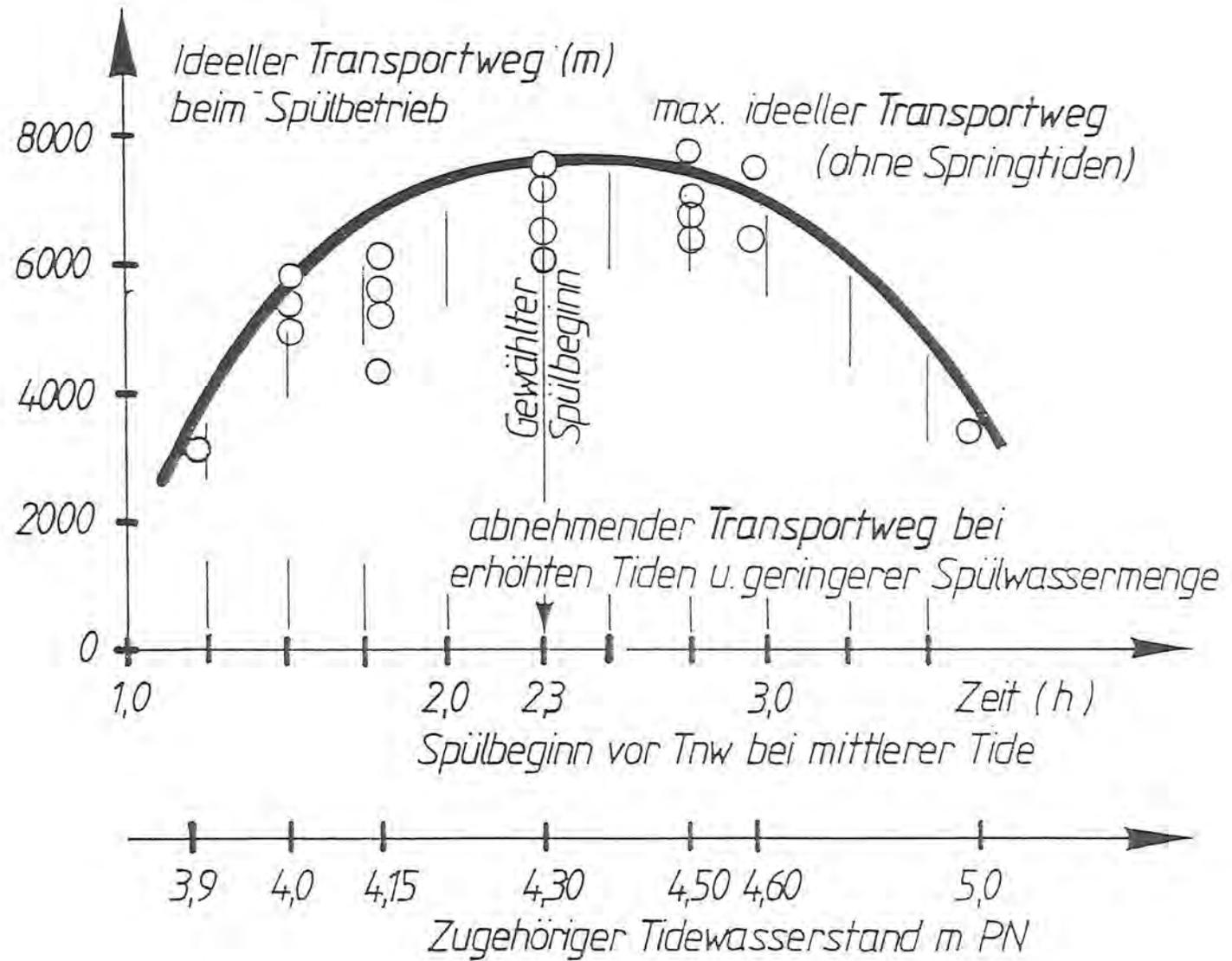


Abb. 5.46: Ideeller Transportweg in Abhängigkeit vom Spülbeginn

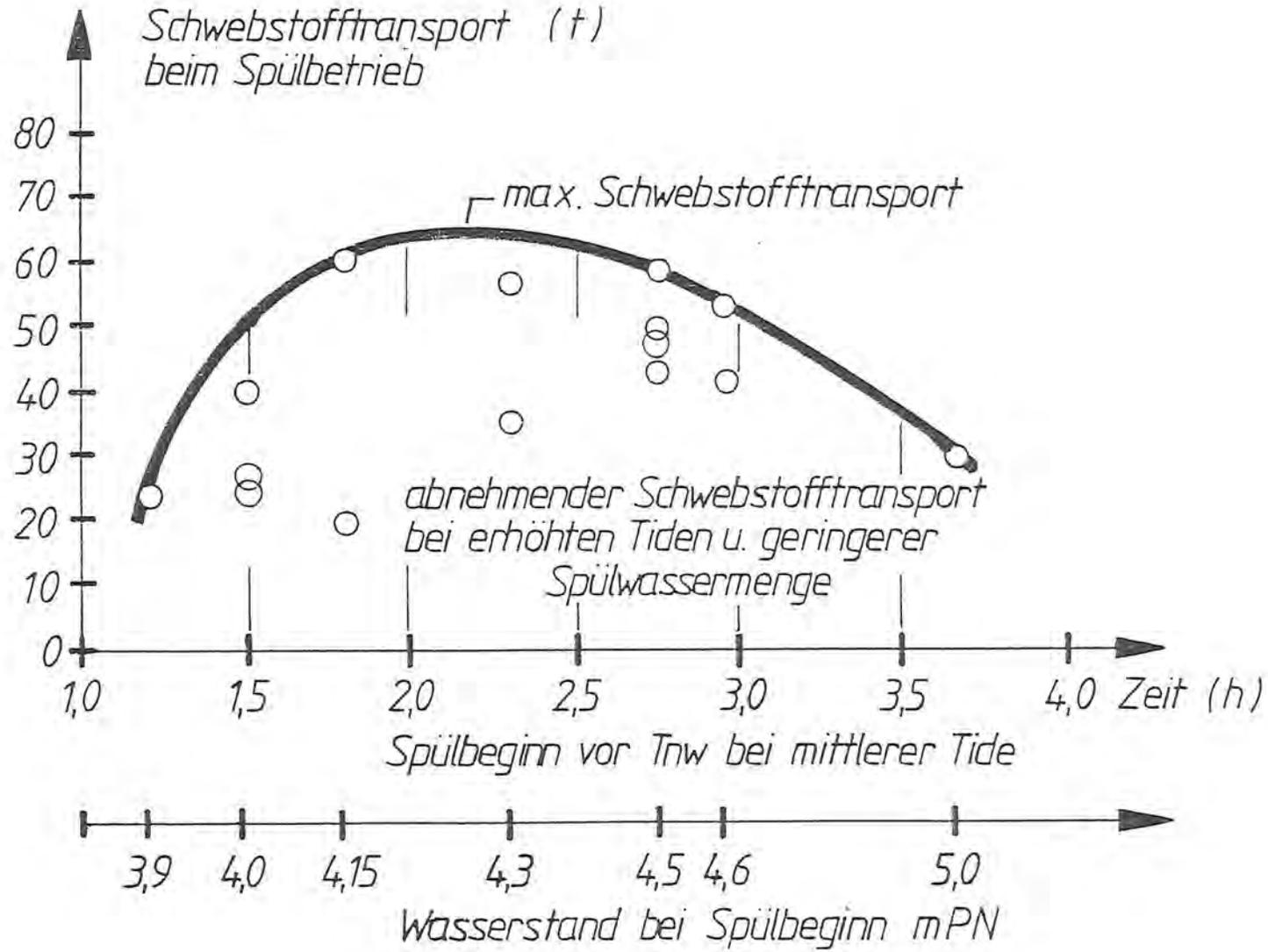


Abb. 5.47: Schwebstofftransport in Abhängigkeit vom Spülbeginn

6. Meßergebnisse mit Räumbooteinsatz

6.1 Allgemeines zum Räumbooteinsatz

Für die Räumung von Ablagerungen in Außentiefs werden seit Anfang der 50er Jahre Stromräumboote eingesetzt (Abb. 6.1). Die vom Räumboot aufgewirbelten - hauptsächlich schlickigen - Sedimente werden mit der Ebbströmung aus dem Außentief transportiert. Da häufig die natürliche geringe Ebbströmung im Außentief für einen ausreichend weiten Schwebstofftransport nicht ausreicht, sollte sie während des Räumbooteinsatzes durch Sielzug, Schöpfwerksbetrieb oder Spülung verstärkt werden. Dem strömenden Wasser kommt dabei die Funktion des Transportes der aufgerührten Schwebstoffe zu. Der besondere Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß

- nur sehr wenig Energie aufgewendet werden muß und
- keine ökologisch wertvollen Salzwiesen oder Wattflächen als Spülfelder zur Baggergutablagerung beansprucht werden.

1986 wurden Naturmessungen der Außentiefspülung mit Räumbooteinsatz durchgeführt, um die Wirkungsweise eines Stromräumbootes näher zu untersuchen und die Möglichkeiten zur Optimierung seines Einsatzes zu erforschen. Außerdem sollte in dem erweiterten Forschungsvorhaben das Transportverhalten der Tideströmung und die Belastbarkeit mit Schwebstoffen untersucht und der Frage des Sättigungsschwebstoffgehalts sowie einer möglichen Veränderung des Sauerstoffgehalts des Seewassers (Sauerstoffzehrung infolge Schlickeintrag) nachgegangen werden.

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

6.2 Kurzbeschreibung und Wirkungsweise von Räumgeräten

6.2.1 Stromräumboote

Stromräumboote werden seit Anfang der 50er Jahre zur Erhaltung der Vorflut und Schiffbarkeit von Außentiefs an der Küste eingesetzt (Abb. 6.1). Sie sind mit zwei absenkbaren Schrauben versehen. Die gegenläufig arbeitenden Doppelschrauben werden während des Räumvorganges bis auf die erhöhte Sohle abgesenkt und wirbeln das abgelagerte Material vor allem durch den Schraubenstrahl, aber auch die mechanische Propellerwirkung auf. Durch die starke Turbulenz des Schraubenwassers wird das Material im Wasser verteilt. Die dem Schlick und feinen Schluff zuzuordnenden Schwebstoffe verbleiben über längere Zeit in Suspension. Durch eine seewärtig gerichtete Strömung im Außentief werden diese Schwebstoffe dann seewärts verfrachtet und schließlich aus dem Außentief herausgetragen.

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

Die beiden z. Z. vom Bauamt für Küstenschutz in den Außentiefs an der ostfriesischen Küste eingesetzten Stromräumboote haben folgende technische Daten:

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

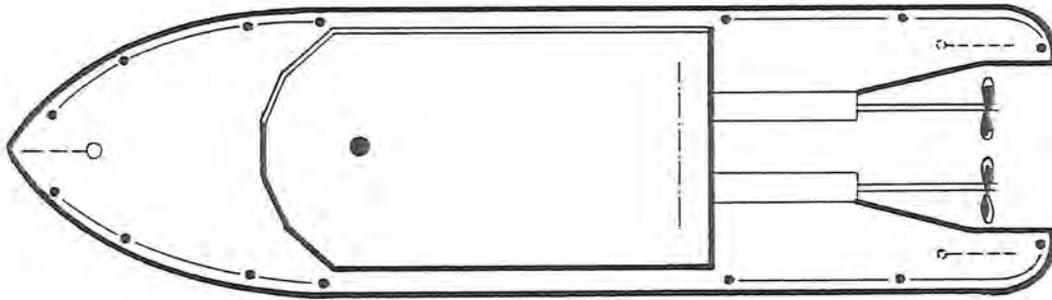
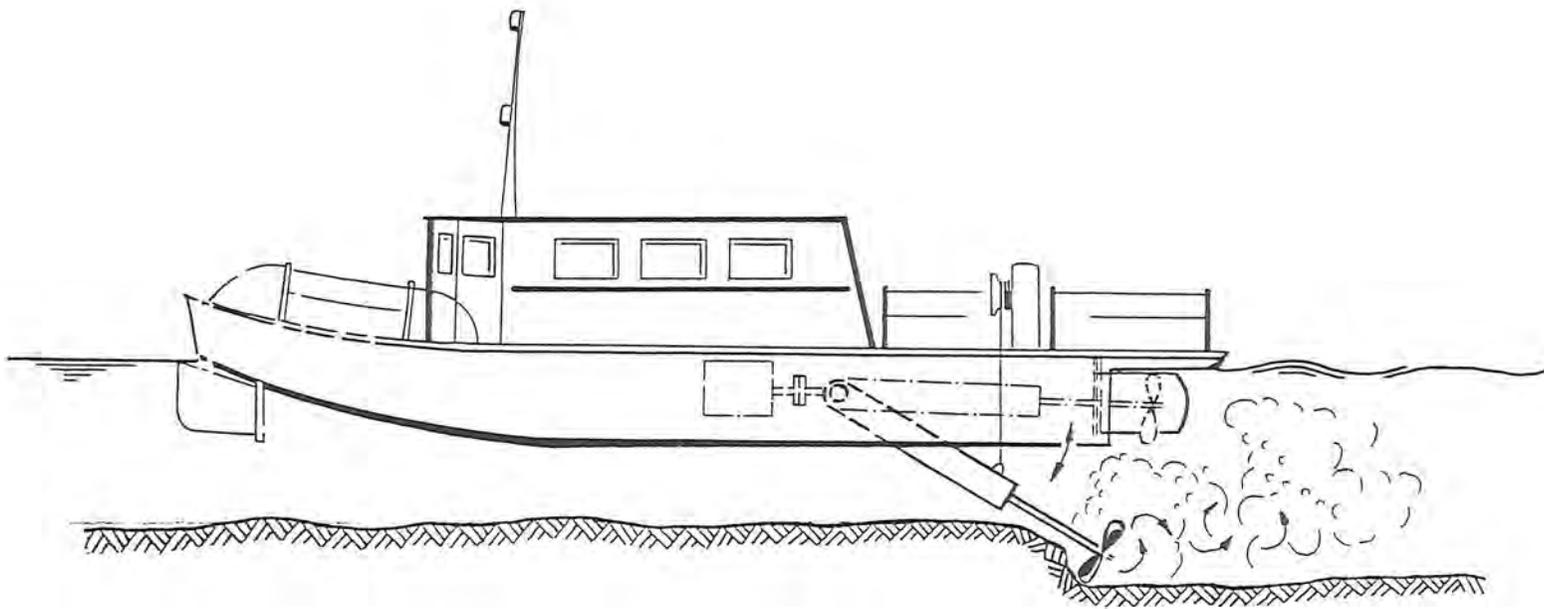


Abb. 6.1 Stromräumboot

6.2.2 Schlickpflüge und hydraulische Eggen

Das als Schlickpflug oder hydraulische Egge bezeichnete Räumgerät (Abb. 6.2) wurde zu Beginn der 60er Jahre von der Firma Fokko Becker, Wilhelmshaven, entwickelt und in den folgenden Jahren unter wissenschaftlicher Beratung von Prof. Hensen, dem damaligen Direktor des Franzius-Instituts der TU Hannover, ständig verbessert. In den Jahren 1969 bis 1970 wurde die hydraulische Egge erstmals für die Herstellung einer Schiffahrtsrinne beim Bau des neuen Tiefwasserhafens von Cayenne in franz. Guayana angewendet (HOVER, 1975). Im Tidegebiet der deutschen Nordseeküste wird die hydraulische Egge z. Z. u. a. in Hooksiel, Wilhelmshaven, Esensham/Unterweser (Kühlwassereinlauf Kernkraftwerk), Bremerhaven und am Anleger Bützfleth/Elbe eingesetzt.

Das Gerät hat folgende Form und Wirkungsweise:

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

Hydraulische Eggen sind vielseitiger und besonders bei größeren Wassertiefen einsetzbar. Sie können sowohl sehr kohäsives als auch feinsandiges Material räumen.

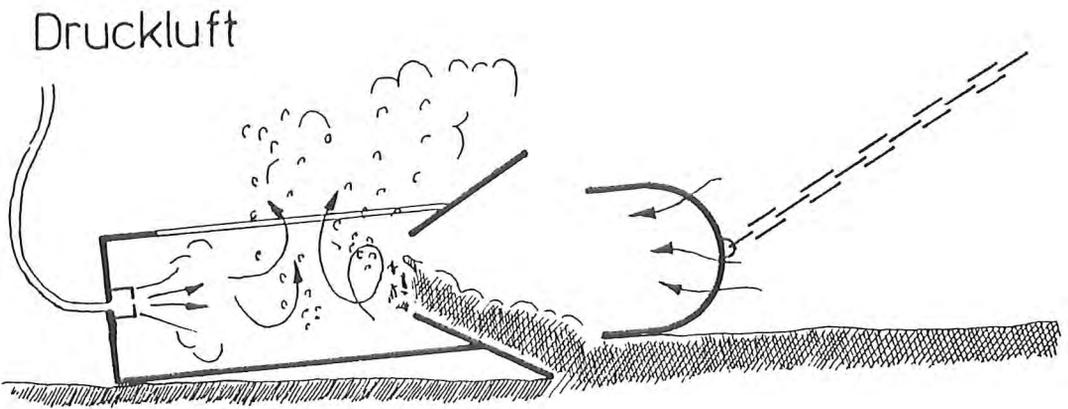
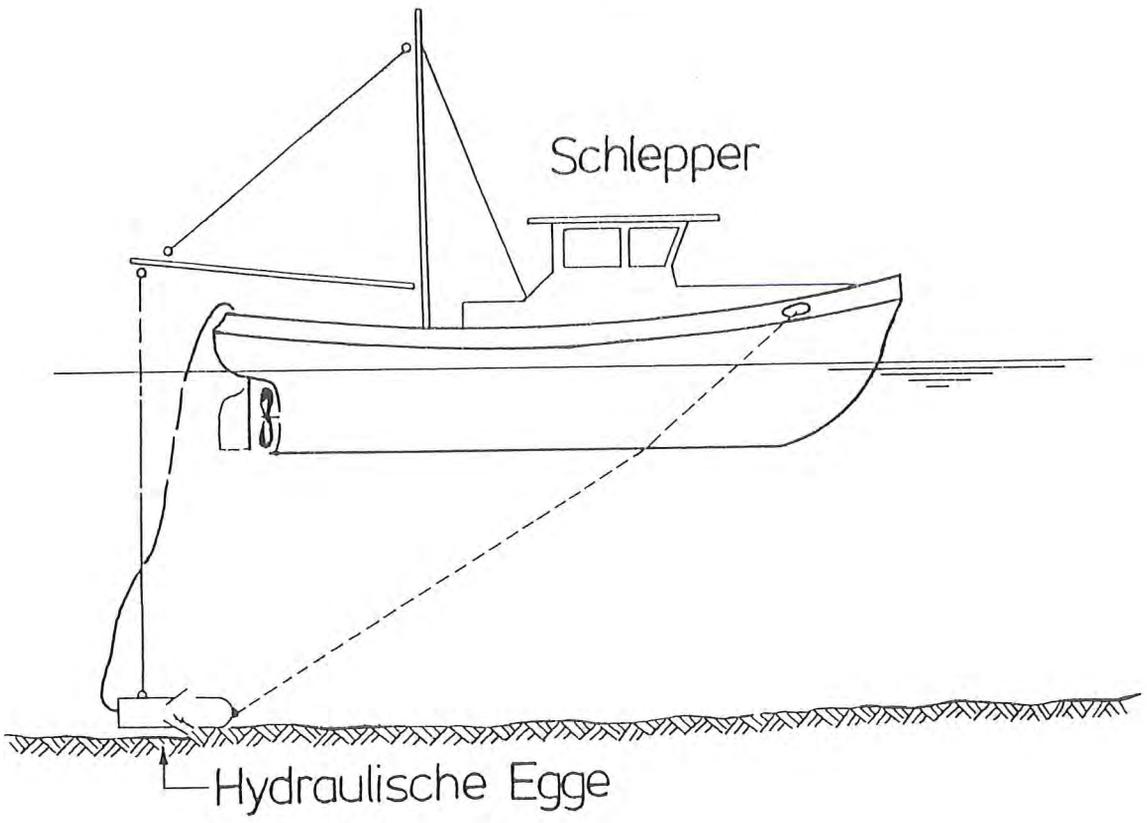


Abb. 6.2 Hydraulische Egge

6.3 Durchführung der Räumversuche

6.3.1 Räumbereich und Lage der Meßstellen

Im Jahre 1986 sind zwei Versuchsreihen mit Räumbooteinsatz im Neßmersieler Außentief durchgeführt worden. Das Räumboot war während der Meßreihen in einem festgelegten Räumbereich zwischen Stat. 0 + 450 und 0 + 700 am westlichen Ufer des Außentiefs (s. Übersichtsskizze Abb. 6.3) im Einsatz. Die seewärts transportierten, suspendierten Feststoffe wurden an den Meßstellen II und III durch die "Sediwa" erfaßt. Die Meßstellen liegen i. M. 400 m (II) bzw. 1 000 m (III) vom Räumbereich entfernt. Zusätzlich wurden an den Meßstellen wieder der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit sowie außerdem an Meßstelle II die Attenuation, der Sauerstoffgehalt und die Temperatur des Seewassers gemessen. Eine Übersicht über das Naturmeßprogramm 1986 enthält die Abb. 6.4.

Die Veränderung der Außentiefquerschnitte einschl. des angrenzenden Watts wurde durch systematische Vermessung sehr genau kontrolliert. Zur Ermittlung der durch das Räumboot in Bewegung gesetzten Massen ist der zwischen Hafen und Stat. 700 gelegene Räumbereich (Abb. 6.1) jeweils vor und nach den beiden Versuchsreihen nivelliert worden.

Zu diesen Versuchen gehörten auch gezielte bodenmechanische Untersuchungen, die im Abschnitt 6.4 erläutert werden.

6.3.2 Zwei Versuchsreihen mit Räumbooteinsatz

In der ersten Versuchsreihe vom 26.05. bis zum 09.06.1986 ist mit großer Schützöffnung von 80 cm bei relativ niedrigen Tidewasserständen mit dem Spülen begonnen worden, um möglichst hohe Fließgeschwindigkeiten (bis 1,3 m/s) im Außentief und somit sehr hohe Feststofftransportkonzentrationen zu erreichen. Das Spülziel wurde in Handbetrieb gesteuert, um durch zeitweises Ziehen der unteren Schütztafel sicherzustellen, daß das Spülbecken jeweils hoch gefüllt wurde, denn nur mit einem vollen Spülbecken lassen sich die für diese Meßreihe gewünschten hohen Spülgeschwindigkeiten erreichen. Die Handsteuerung brachte es aller-

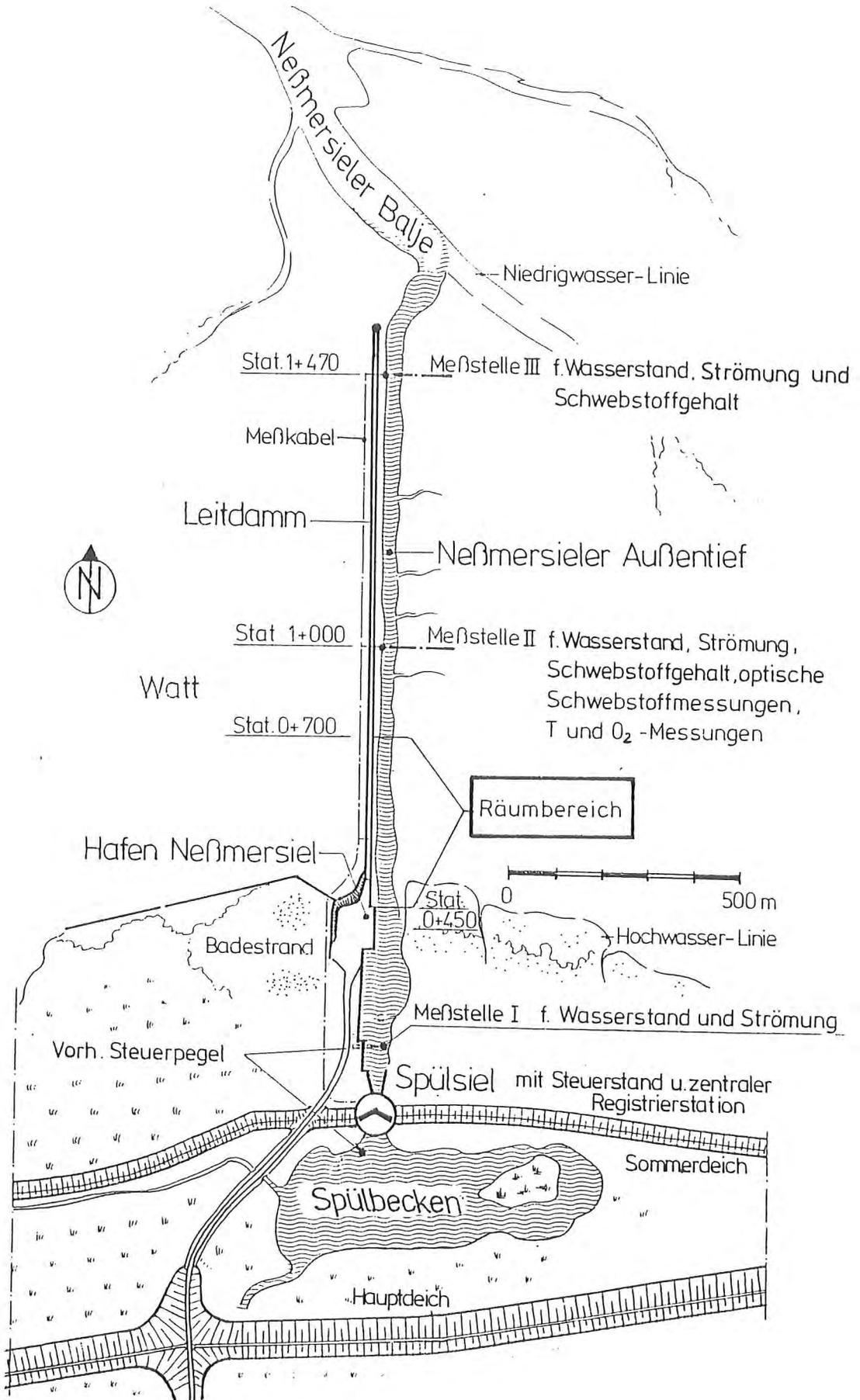


Abb. 6.3 Übersichtsskizze

Meßprogramm 1986April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November.....	
Wasserstands- und Strömungsmessungen an Meßstelle I, II, III	Einrichten der Meßstellen	[Hatched bar]							
Sedimentmessungen mit „Sediwa“ an Meßstelle I und III		Meßstelle II	[Hatched bar]			[Hatched bar]			
		Meßstelle III	[Hatched bar]			[Hatched bar]			
Optische Sedimentmessungen, Temperatur- u. O ₂ -Messungen Meßstelle II			[Hatched bar]						
Raumkoordinatz			26.05 31.5 09.05			R	12.08 bis 21.08		
Peilungen Außentief und ggf. Hafen	[Hatched bar]	[Hatched bar]	[Hatched bar]		[Hatched bar]	[Hatched bar]	[Hatched bar]	[Hatched bar]	
Speicherseepegelungen		[Hatched bar]	[Hatched bar]			[Hatched bar]			
Entnahme von Schlickproben im Außentief (s. Lageplan)			W	[Hatched bar]		[Hatched bar]	[Hatched bar]		

W= Wasserproben für die Schwebstoffuntersuchung

R= Meßstellenräumung

H= Hafenpeilung

Z= Außentief mit Zwischenprofilen

zusätzl. rasterelektronenmikroskopische Schwebstoffuntersuchungen durch Geol.-Pal. Institut Kiel

Regelmäßige Kontrollen:

Monatlich Schlickpegel im Speichersee ablesen

Monatlich Pegelkontrollen durchführen

Wöchentliche Durchflußkontrolle bei Sonde 4

Abb. 6.4 Meßprogramm 1986

dings mit sich, daß nur in 60 % der Tiden gespült werden konnte.

Das MThw lag in dieser Woche mit NN + 1,25 m 5 cm unter dem langjährigen MThw von NN + 1,30 m und das MTnw mit NN - 1,31 m am Siel ebenfalls 5 cm unter dem langjährigen MTnw von NN - 1,26 m.

Die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit trat mit 0,36 m/s an Meßstelle III und 0,31 m/s an Meßstelle II infolge der Spülungen bei erniedrigten Tidewasserständen entsprechend höher als im gesamten Meßzeitraum des Jahres 1985 mit $v_{em} = 0,27$ m/s (III) bzw. 0,22 m/s (II). Die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten entsprechen mit 0,22 m/s an Meßstelle III und 0,14 m/s an Meßstelle II etwa den Gesamtmittelwerten vom Vorjahr.

Die zweite Versuchsreihe vom 14.08. bis 21.08.1986 sollte Aufschluß darüber geben, welche Schwebstoffgehalte noch bei kleinen Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,3 bis 0,5 m/s transportiert werden können. Das Spülwasser wurde beim Räumbooteinsatz bereits ab halber Tide ausgelassen. In der nachfolgenden Nachtide wurde ohne Räumbooteinsatz gespült, um an der Außentiefsohle abgelagertes Sediment zu räumen.

Die Pegel haben nur leicht erhöhte Tidewasserstände registriert. Das MThw lag in dieser Woche mit NN + 1,34 m 4 cm und das MTnw mit NN - 1,15 m 11 cm über den Mittelwerten.

Während beider Versuchsreihen wurden nur geringe Windgeschwindigkeiten um i. M. 3 Bft gemessen.

6.4 Analyse der Bodensedimente und der Schwebstoffe

6.4.1 Probenentnahmen und Untersuchungsverfahren

6.4.1.1 Probenentnahmen

Da der hydraulische Feststofftransport im Außentief von der Zusammensetzung des verfügbaren Sediments abhängt, wurden sowohl die Bodensedimente als auch die Schwebstoffe mehrfach an vorgegebenen Punkten entnommen und im Labor analysiert.

Außerdem sollten evtl. Veränderungen der Außentiefbodensedimente infolge Ablagerungen aus dem geräumten Material erfaßt werden. Jeweils vor und nach den beiden Räumversuchsreihen im Mai/Juni und im August 1986 wurden definierte Bodenproben mit einem schließbaren Stechzylinder \varnothing 40 mm 10 cm tief entnommen.

Die Schwebstoffdauermessungen der "Sediwa" erfassen kontinuierlich das Gesamtgewicht der abtrennbaren Kornfraktionen $\geq 5 \mu\text{m}$. Die Einzeluntersuchungen der Suspensionsproben sollten Aufschluß über die Verteilung der suspendierten Feststoffe infolge Räumbooteinsatz und über die Frage der biogenen Verkitung der Feinststoffe geben.

6.4.1.2 Untersuchungsverfahren für Bodensedimente

Die Sedimentproben wurden sowohl nach der herkömmlichen Methode der Sieb- und Schlämmanalyse als auch mit dem Cilas-Laser-Granulometer vom Geologisch -Paläontologischen Institut der Universität Kiel analysiert.

Das Cilas-Granulometer nutzt das Prinzip der Lichtbeugung. Ein Lichtstrahl wird durch eine Küvette geleitet, in der sich die zu untersuchende Probe als Suspension befindet. Partikel rufen in diesem Lichtstrahl Beugungserscheinungen hervor. Der aus der Küvette austretende Lichtstrahl wird durch ein optisches System auf dem Detektor abgebildet, und das ungebeugte Licht wird ausgeblendet. Gemessen wird die Verteilung der Lichtenergie des gebeugten Lichts in der Brennebene des optischen Systems mit einer Präzisions-Multizellen-Detektoreinrichtung. Die Durchmesser der entstehenden Beugungsringe sind umgekehrt proportional der Korngröße (nach Pabisch-Vertrieb wissenschaftlicher Instrumente - Information).

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

Es liegt die Vermutung nahe, daß die Unterschiede verfahrensbedingt sind. Auch unbehandelte Analysen ergaben ähnliche Differenzen. Dieser Vergleich mit der Sieb- und Schlämmanalyse bedarf jedoch einer genaueren Untersuchung, die im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt werden kann. Nach KÖSTER (brieflich Nov. 1986) ist anzunehmen, daß Entwicklung und/oder Eichung des Laser-Verfahrens noch nicht ausgereift sind.

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

Die Bestimmung der organischen Bestandteile (Corg-Gehalt) erfolgte mit dem Leco-Carbol-Analyser - CS 244 vom Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Kiel. Dabei wurde die bei niedrigen Temperaturen (ca. 40 ° C) getrocknete und gemahlene Probe im Induktionsofen des Leco-Analysers bei 2 000° C im Sauerstoffstrom verbrannt und der Kohlenstoff zu CO₂ oxidiert. Die thermische Leitfähigkeit des entstehenden Gasgemisches dient als Maß für den CO₂-Gehalt, über den der Corg-Gehalt bestimmt wird.

6.4.1.3 Untersuchungsverfahren für Schwebstoffpartikel

Die Suspensionsproben wurden nach folgenden Verfahren untersucht:

- a) Cilas-Granolometer-Methode vom Geologisch-Paläonthologischen Institut der Universität Kiel - wie bereits erläutert.

Im Rahmen einer Diplomarbeit des genannten Instituts wurden bereits im Jahre 1985 während verschiedener Tidephasen Suspensionsproben im Außentief entnommen und mit dem Laserverfahren untersucht. Die Proben wurden mit Wasserstoffperoxid behandelt, um das Algenwachstum zu behindern und organische Bestandteile zu zerstören (ARLT, 1986).

- b) Elektronisch-optische Untersuchung durch die Fachhochschule Flensburg (Prof. Müller von der Haegen)

Das mikroskopisch vergrößerte Bild einer kleinen Wasserprobe wird durch einen Computer auf Partikelanzahl und Kornverteilung ausgewertet. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, daß nur eine sehr kleine Teilprobe (Tropfengröße) analysiert werden kann, die kaum eine repräsentative Entnahme zuläßt. Eine Unterscheidung zwischen organischen und anorganischen Bestandteilen ist nicht möglich. Mit Wasserstoffperoxid behandelte Proben wurden mit jeweils unbehandelten Proben verglichen.

- c) Rasterelektronenmikroskopische (REM) Untersuchungen durch das Geologisch-paläonthologische Institut der Universität Kiel

Die REM-Aufnahmen ermöglichen wegen ihrer hochauflösenden Vergrößerung einen Einblick in die Zusammensetzung und den Aufbau der suspensierten Stoffe. Einzelheiten zur Durchführung dieser Untersuchungen sind dem anliegenden Bericht zu entnehmen.

6.4.2 Sedimentanalyse im Watt- und Außentiefprofil

Im August 1986 wurden in zwei Querprofilen in Stat. 0 + 675 und Stat. 1 + 440 , d. s. rd. 300 bzw. rd. 1000 m seewärts der Vorlandkante, Proben entnommen. Sie sollten einen Gesamtüberblick über die auf dem Watt westlich des Leitdammes, im Außentief und auf dem Watt bis 100 m östlich des Leitdammes anstehenden Sedimente vermitteln.

In Stat. 1 + 440 befindet sich westlich des Leitdammes reines Sandwatt. Offensichtlich läßt der hier vorherrschende Seegang aus der Neßmer-sieler Balje noch keine Mischwattbildung zu. Landwärts von Stat. 1 + 440 nimmt der Anteil des Schlämmkorns $\leq 60 \mu\text{m}$ von 5 % auf 10 - 15 % in Stat. 0 + 675 zu, wo mithin der Übergang zum Mischwatt beginnt.

Im Seegangsschatten des Leitdammes hat das Sediment, das wegen der Nähe des Außentiefs auf wesentlich niedrigerem Niveau liegt, einen Feinkornanteil von max. 50 % (Stat. 0 + 675), der dann mit weiterer Entfernung vom Leitdamm wieder abnimmt. Etwa ab hundert Meter östlich des Leitdammes unterscheidet sich das Wattsediment nicht wesentlich von dem Material westlich des Leitdammes. Dies wird deutlich aus den Medianwerten der Sedimentproben (Abb. 6.5).

Der Bereich des eigentlichen Außentiefquerschnittes mit Uferzonen und Sohle stellt einen Unstetigkeitsbereich mit unterschiedlichen Kornspektren dar. Im äußeren Bereich, z. B. an Meßstelle III, besteht die Sohle (Außentiefmitte) fast ausschließlich aus Feinsand (98 %). In Richtung Hafen nimmt der Schlämmkornanteil der Außentiefsohle geringfügig auf 10 - 20 % zu. Die Sohlsedimente unterliegen der starken erosiven Wirkung des Spülstroms.

Die Proben aus den Uferzonen des Außentiefs weisen wesentlich höhere Feinanteile $\leq 60 \mu\text{m}$ auf, z. B. an Meßstelle III: Westseite 21 %, Ostseite 30 %.

Die höheren Feinanteile am Ostufer sind vermutlich im wesentlichen auf den Fährverkehr zurückzuführen. Von den durch Rückströmung und Schraubenstrahl aufgewirbelten Sedimenten bleiben die Feinstanteile länger in Schwebelage. Mit auflaufendem Wasser werden die Suspensionsfahnen in das östlich des Außentiefs gelegene Einzugsgebiet transportiert. Wegen abnehmender Transportgeschwindigkeit beginnt der Absetzvorgang der Feinanteile am östlichen Ufer des Außentiefs.

Bei auflaufendem Wasser wird also das Ostufer stärker mit Feinstsedimenten beaufschlagt. Beim Ebbstrom ergeben sich hinsichtlich des Absetzverhaltens aufgewirbelter Feinstsedimente keine wesentlichen Unterschiede für beide Ufer, da die Hauptströmung nahezu achsparallel seewärts gerichtet ist.

Der Gehalt organischer Bestandteile ist unmittelbar östlich des Leitdammes am höchsten (Stat. 0 + 675: Corg = 1,57 Gew.-%)

und nimmt zum Watt hin ab (1,1 % 100 Meter östlich des Leitdammes). An der äußeren Station 1 + 440 wurden geringere Werte (um 0,9 %) gemessen.

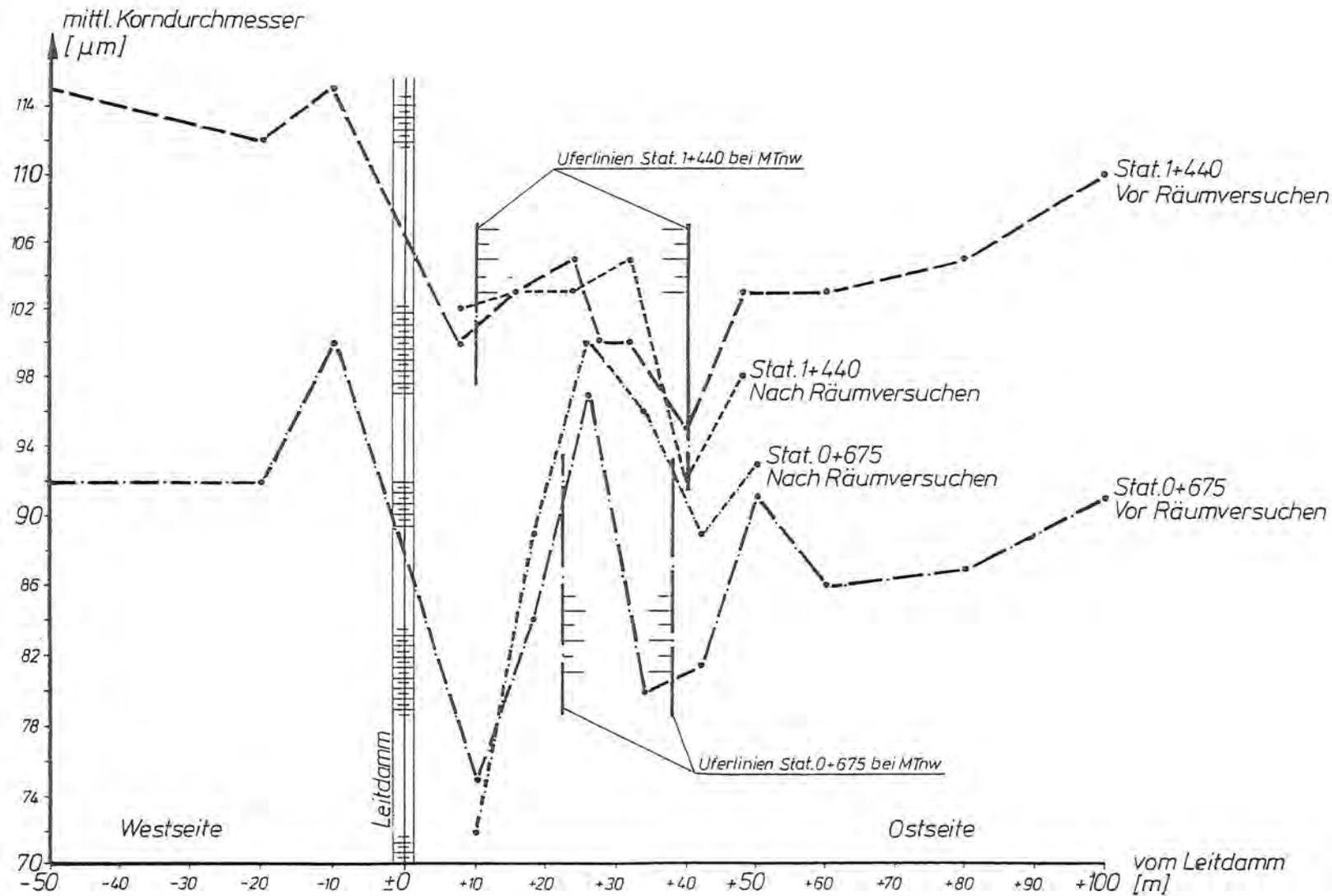


Abb. 6.5 Medianwerte aus den Sieb- und Schlämmanalysen der Schlickproben in ihrer Verteilung quer zum Außentief (entnommen im August 1986)

6.4.3 Veränderung der Sedimente-Verteilung infolge Räumbooteinsatz

6.4.3.1 Bodenmaterial des Räumbereiches

Wie bereits erwähnt, war das Räumboot in einem festgelegten Bereich von Stat. 0 + 450 bis 0 + 700 am westlichen Ufer des Außentiefs im Einsatz. An 3 Stationen (Stat. 0 + 475, 535 und 565) wurden vor Beginn der Räumversuche Sedimentproben entnommen, die einen Überblick über das abgeräumende Material geben. Die Sieb- und Schlämmanalysen ergeben einen mittleren Korndurchmesser von 75 - 80 μm . Der mittlere Korndurchmesser ist in seiner Verteilung quer zum Außentief in Abb. 6.5 dargestellt. Das geräumte Material enthält wesentlich mehr Feinanteile als die an den Meßstellen II und III einschl. der Uferzonen entnommenen Außentiefsedimente. Die aus den Cilas-Messungen berechneten wesentlich geringeren Medianwerte von 13 - 33 μm weisen vermutlich auf zahlreiche vorhandene Zusammenballungen hin, die in der Cilas-Probenbehandlung zerstört und in der Analyse nicht erfaßt werden.

6.4.3.2 Räumbooteinsatz vom Mai/Juni 1986

Vor und nach den Räumversuchsreihen im Mai 1986 sind je drei Sedimentproben an Meßstelle II und III entnommen worden (Tab. 6.1). Ein erster Vergleich der aus den Sieb- und Schlämmanalysen ermittelten Medianwerte ergibt keine signifikanten Veränderungen der vor und nach dem Räumen entnommenen Sedimente. Die Cilas-Messungen sind in der folgenden Zusammenstellung mit aufgeführt. Wegen der erwähnten Problematik dieses Analyseverfahrens sollen deren Resultate nicht weiter interpretiert werden.

Meßstelle II =====	NN - 1,30 m westl. Außentiefwand	AT-Sohle Mitte	NN - 1,30 m östl. Außentiefwand
(Stat. 1 000)			
<u>Vor Räumversuchen</u>			
Sieb- u. Schlamm- analyse	96	100	88
Cilas-Messung	85	86	68
<u>Nach Räumversuchen</u>			
Sieb- u. Schlamm- analyse	100	98	80
Cilas-Messung	83	80	40

Meßstelle III =====	NN - 1,30 m westl. Außentiefwand	AT-Sohle Mitte	NN - 1,30 m östl. Außentiefwand
(Stat. 1 470)			
<u>Vor Räumversuchen</u>			
Sieb- u. Schlamm- analyse	98	105	90
Cilas-Messung	79	130	9,8
<u>Nach Räumversuchen</u>			
Sieb- u. Schlamm- analyse	99	105	95
Cilas-Messung	31	96	70

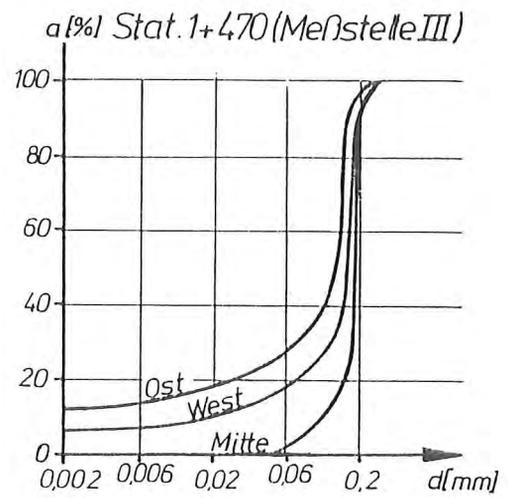
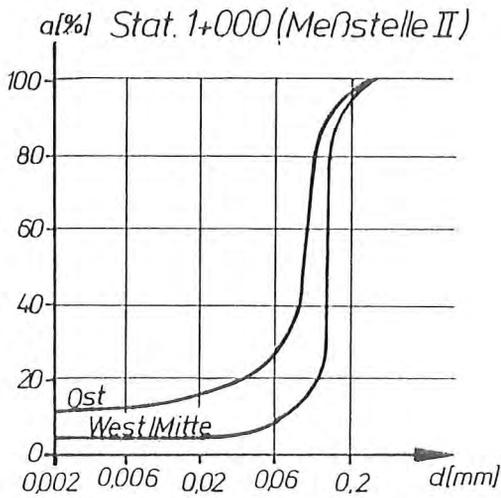
Aufgrund der Sieblinien (Abb. 6.6) wird deutlich, daß sich das Körnungsband im Feinsandbereich doch meßbar zum feineren verschiebt. Dies ist vermutlich eine Folge der wechselnden Sedimentations- und Erosionsvorgänge des geräumten und bis hier transportierten feineren Materials und seiner Vermischung mit den anstehenden Außentiefsedimenten.

Die Verschiebung ist besonders deutlich erkennbar für die Sieblinien der Meßstelle III, die etwa 1000 m vom Räumereich entfernt liegt. Die Korngrößen der Feinsandanteile nehmen um ca. 0,02 mm ab. Dies gilt sowohl für den Querschnittsrand als auch für die Sohle, an der ein eng begrenztes Kornspektrum vorherrscht.

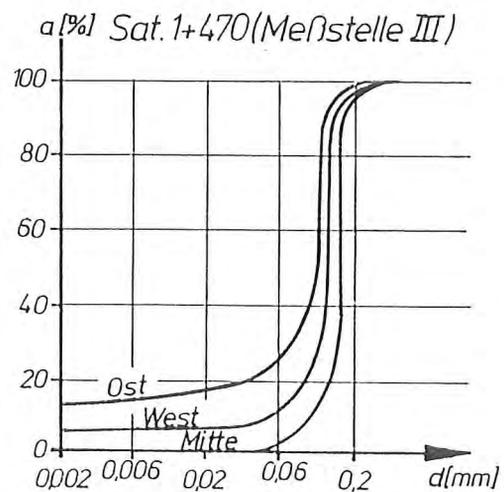
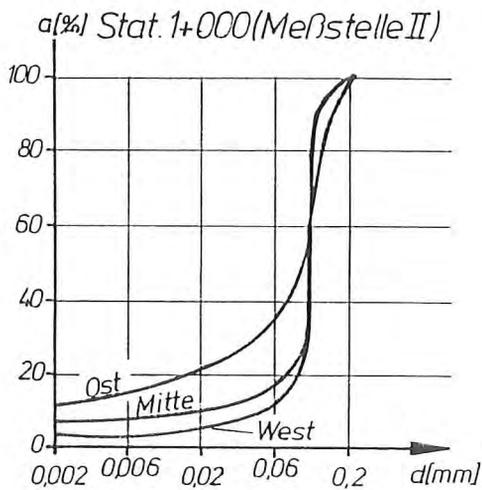
Im Gegensatz dazu nehmen die Schlämmkornanteile (DIN 4022) $\varnothing < 0,06$ mm an den Randbereichen des Querschnitts ab. Dies ist vermutlich auf eine Klassierung des geräumten Materials zurückzuführen. Während das sehr feine Schlämmkorn mit der turbulenten Räumströmung seewärts transportiert wird,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

Die Meßstelle II, die nur 200 - 500 m vom Räumereich entfernt liegt, gibt kein einheitliches Bild. Vor Beginn der Räumarbeiten wurde an der mittleren und westlichen Entnahmestelle ein relativ geringer Feinanteil $\leq 60 \mu\text{m}$ von 10 - 12 % gemessen. Dieser Anteil hat sich vor allen infolge Zunahme des Mittel- und Grobschluffkorns sogar auf 18 % in Sohlmitte erhöht. Der westliche Entnahmepunkt zeigt hingegen ausschließlich Veränderungen im Feinsandspektrum, das sich - wie bereits für Meßstelle III beschrieben - nach links verschiebt. Bezüglich der organischen Bestandteile bleibt festzuhalten, daß deren Gehalt während der Räumversuche an fast allen Entnahmestellen abnimmt.

An der Ostseite nimmt sowohl der Schlämmkornanteil als auch der Anteil grobkörniger Feinsande zu. Dies mag ein Zufallsergebnis sein. Die Zunahmen des Feinsandspektrums deuten jedoch darauf hin, daß in der Nähe des Räumereiches zumindest zeitweise ein Überangebot an geräumtem Sediment vorherrschte, das nicht suspendiert wurde.



*Körnungskurven der vor den Räumversuchen entnommenen Schlickproben
(aus Sieb- und Schlämmanalysen)*



*Körnungskurven der nach den Räumversuchen entnommenen Schlickproben
(aus Sieb- und Schlämmanalysen)*

Abb. 6.6 Körnungskurven von Außentiefbodensedimenten vom Mai/Juni 1986

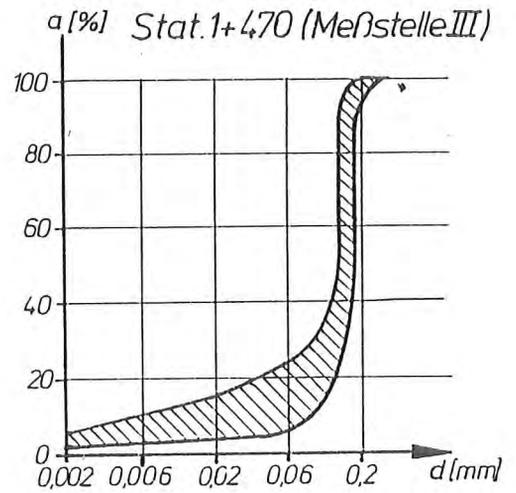
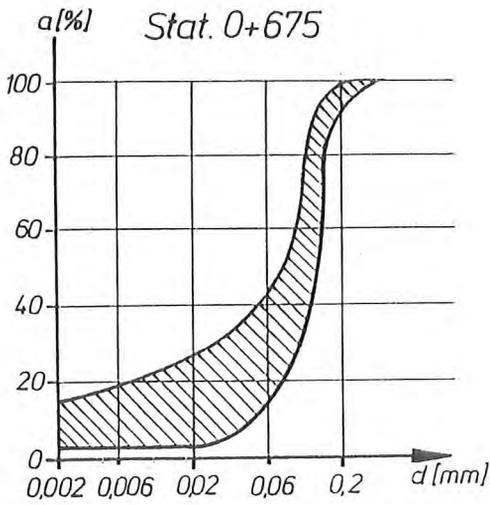
Dieses Material hat sich daher ohne Klassierung abgesetzt und ist erst später mit den nachfolgenden Spülströmungen erodiert worden.

Die vor und nach den Räumversuchen nivellierten Profilpunkte seewärts des Räumbereiches zeigen keine Auflandung, woraus zu schließen ist, daß Sedimentations- und Erosionsphasen ständig wechseln und ein Gleichgewichtsquerschnitt erhalten bleibt.

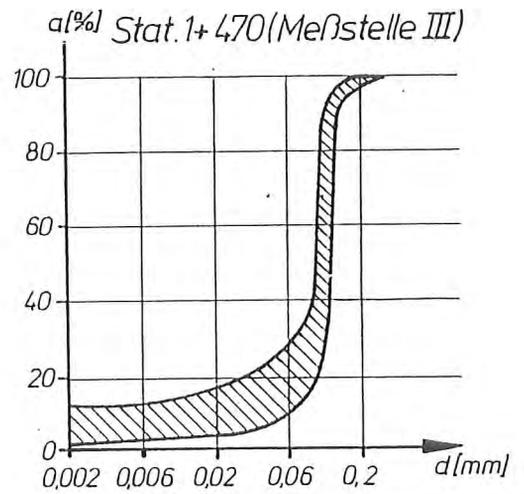
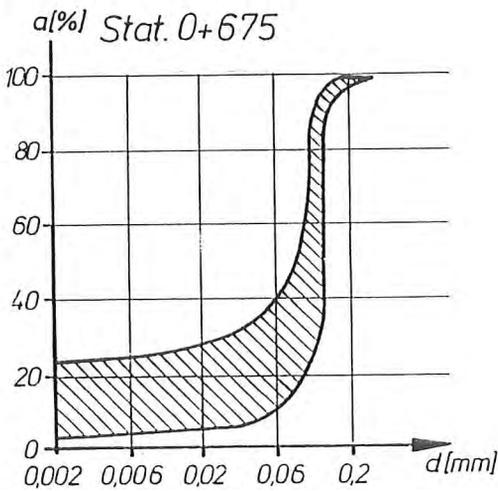
6.4.3.3 Räumbooteinsatz vom August 1986

Im Gegensatz zur Meßreihe vom Frühjahr wurden die Räumbooteinsätze nicht nur auf niedrige Wasserstände beschränkt, sondern bereits ab halber Ebttide (ungefähr NN) durchgeführt. Die landseitigen Entnahmestellen der Sedimentproben wurden von Meßstelle II bis an den seewärtigen Rand des Räumbereiches verlegt (Stat. 0 + 675). Die Probenentnahmen bestätigen weitgehend die Ergebnisse vom Frühjahr des Jahres (Tab.6.1 u. Abb. 6.6). Der mittlere Korndurchmesser des Feinsand-Kornbandes verringert sich infolge der Räumaktion (Abb. 6.7). In Stat. 0 + 675 nimmt der zuvor hohe Schlämmkornanteil in den sohnahen Probeentnahmestellen deutlich ab, während eine Probe vom oberen westlichen Außentiefrand 10 m östlich des Leitdammes eine Zunahme feiner Kornfraktionen verzeichnet. Aufgrund dieser Probe wird das in Abb. 6.7 dargestellte Körnungsband der Schlämmfraktionen $\leq 60 \mu\text{m}$ der Stat. 0 + 675 nach der Räumaktion wesentlich breiter. An den anderen Entnahmestellen nehmen die Feinanteile ab.

Die sedimentologischen Untersuchungsergebnisse sind ein Indiz für eine Klassierung des geräumten Materials, die aufgrund der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten bereits im Aktionsbereich des Räumbootes einsetzt. Sedimente mit hoher



*Körnungskurven der vor den Räumversuchen entnommenen Schlickproben
(aus Sieb- und Schlämmanalysen)*



*Körnungskurven der nach den Räumversuchen entnommenen Schlickproben
(aus Sieb- und Schlämmanalysen)*

Abb. 6.7 Körnungskurven von Außentiefbodensedimenten vom August 1986

Sinkgeschwindigkeit (Feinsand) werden ausschließlich durch die turbulente Spülströmung transportiert. Ihre Konzentration nimmt zur Außentiefsohle stark zu. Infolgedessen ist die Suspension als heterogen zu bezeichnen. Zum Teil dürfte das grobe Material wie "Geschiebe" in Sohlnähe transportiert werden. Nimmt die Turbulenz ab, sedimentieren die Feinsande und werden erst mit der nächsten Spülströmung wieder erodiert und seewärts transportiert.

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

6.4.4 Ergebnisse der Schwebstoffanalyse

Im folgenden werden die Ergebnisse der Cilas-Messungen und der optisch-elektronischen Untersuchungen erörtert. Dabei wird besonders auf die Kornverteilung von Suspensionsproben eingegangen. Der Bericht des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Universität Kiel über die "Rasterelektrodenmikroskopischen Untersuchung von Schwebstoffen aus dem Neßmersieler Außentief" ist als Anhang diesem Schlußbericht beigefügt.

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

Die während des Räumbooteinsatzes am 26./27.5.86 entnommenen Proben bringen ein ähnliches Ergebnis für den Medianwert zwischen 8,5 und 9,3 μm . Dieses Ergebnis überrascht insofern, als beim Spülen ohne Räumbooteinsatz wesentlich höhere Medianwerte gemessen wurden. Offensichtlich wurden hauptsächlich die in quasi-homogener Suspension befindlichen Schwebstoffe - wie in Abschnitt 6.4.3.3 erläutert - erfaßt. Außerdem wurden die Suspensionsproben wegen Algenbildung mit Wasserstoffperoxid behandelt, wodurch zahlreiche biogene Bindungen zerstört werden und somit ein geringerer Medianwert gemessen wird.

Dies zeigen auch die mikroskopischen Untersuchungen der Fachhochschule Flensburg, in denen die Teilchen-Größen elektronisch ausgezählt werden.

Bei einer unbehandelten Probe liegt die Mehrzahl der aus dem Räumstrom entnommenen Schwebstoffe im Größenbereich 20 - 50 μm , also in der Kornfraktion des Grobschluffes. Die Kornverteilung der unbehandelten Suspensionsproben ist in Abb. 6.8 aufgetragen. Zu berücksichtigen ist nach Angaben des Probenbearbeiters, daß eine große Anzahl von Teilchen-Größen \geq 100 μm nicht in die Analyse einbezogen werden konnten.

Durch Behandlung der Proben mit Wasserstoffperoxid verschiebt sich die Körnungslinie vom Grobschluffbereich (20 - 60 μm) in die Fraktion des Fein- bis Mittelschluffs. Diese Verschiebung ist ein Hinweis auf die tatsächlich vorhandenen zahlreichen aus feineren Teilchen zusammengesetzten Partikel (Agglomerate, die nach den REM-Untersuchungen aus Tonmineralen und untergeordnet aus den Mineralen Quarz, Glimmer und Feldspat bestehen). Die Teilchen werden infolge elektrochemischer Flockung und mikrobiologischer Aktivität zusammengehalten. Auch zahlreiche organische Stoffe, z. B. Schalen, Gehäusereste von Kieselalgen und Einzellern, befinden sich in Suspension.

Eine beim Spülen ohne Räumbooteinsatz in Meßstelle III entnommene Probe enthält große Anteile aus der Korngrößenfraktion des Mittelschluffs (6 - 20 μm ; Abb. 6.8.). Dieses Ergebnis widerspricht scheinbar der oben erläuterten Cilas-Untersuchung. Es ist jedoch zu bedenken, daß während der Teilproben-

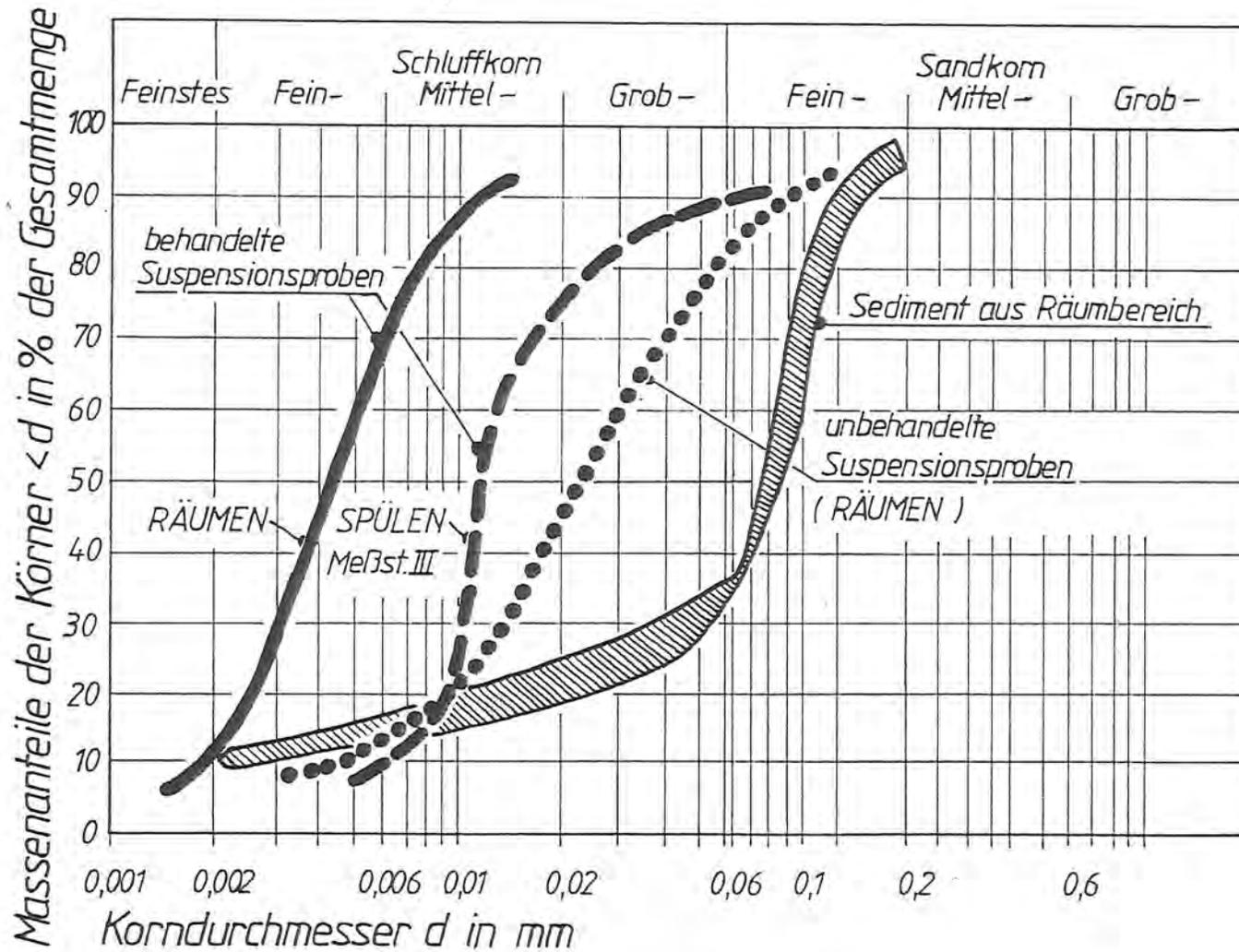


Abb. 6.8 Kornverteilung von Suspensionsproben

entnahme häufig die Teilchen mit großer Sinkgeschwindigkeit (z. B. Feinsand) nicht mit erfaßt werden, so daß deren Anteil in der untersuchten Tropfenprobe unterrepräsentiert ist.

Trotz der Problematik der Schwebstoffentnahme und -analyse läßt sich auch aus den Schwebstoffuntersuchungen der Schluß ziehen, daß das geräumte Material mit der in Abb. 6. 8 dargestellten Kornverteilung nach dessen Eintrag in die vorbeiziehende Strömung klassiert wird (s. Abs. 6.4.3.3). Wird diese Kornverteilung mit der aus dem Räumstrom entnommenen Verteilung der suspendierten Stoffe verglichen, so ist folgendes festzustellen:

1. Die Feinsandfraktion ($\geq 60 \mu\text{m}$) wird in der in mittlerer Wassertiefe entnommenen Schwebstoffprobe in wesentlich geringeren Anteilen erfaßt. Aufgrund der durchgeführten Kontrollnivelements ist nicht davon auszugehen, daß sich die Feinsande an der Außentiefsohle abgesetzt haben. Daraus ist zu schließen, daß die Feinsandfraktion in heterogener Suspension, d. h. mit zur Sohle stark zunehmender Konzentration transportiert wird.
2. Die feinsten Teilchen einschl. der Feinschluff-Fraktion ($\leq 6 \mu\text{m}$) werden wegen ihrer sehr geringen Sinkgeschwindigkeit über den gesamten Wasserquerschnitt bis in den Übergang zum Watt verteilt und in quasi homogener Suspension transportiert. Diese Schwebstofffraktionen werden daher in etwa gleichen Anteilen wie in der geräumten Sedimentprobe gemessen.
3. Die Anteile aus den Fraktionen des Grobschluffs ($20 - 60 \mu\text{m}$) und vor allem die des Mittelschluffs ($6 - 20 \mu\text{m}$) überwiegen in der Schwebstoffprobe. Sie nehmen gegenüber den Anteilen aus der Schlämmanalyse der Sedimentproben erheblich zu. Diese Fraktionen werden konzentriert in dem Hauptspülstrom transportiert. Sie verteilen sich nicht über den Gesamtquerschnitt bis in die Seitenräume und verhalten sich auch nicht wie die Feinsandfraktion, deren Konzentration zur Außentiefsohle stark zunimmt, und die zum Absetzen neigt.

Der Förderzustand dieser Mittel- bis Grobschlufffraktionen wäre demzufolge einem Übergangsbereich zwischen homogener und heterogener Suspension zuzuordnen.

Die Schwebstoffanalysen zeigen, daß der starke Rühreffekt der Räumbootpropeller zu einer guten Auflösung des zu räumen- den Sediments führt. Zusammenballungen von Feinstsedimenten, die überwiegend als Agglomerate der Größe des Mittel- bis Grobschluffs zuzuordnen sind, werden jedoch nicht zerkleinert. In der Strömung werden die Sedimente klassiert. Sie bilden homogene bis heterogene Feststoff-Wasser-Gemische. Die Zusammensetzung der Feststoffe wird in dem Bericht über die "Rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen ..." er- örtert.

6.5 Auswertung der Schwebstoffdauermessungen

Die Ergebnisse der Dauermessungen mit der Sediwa in den Meß- stellen II und III zeigen, daß die Schwebstoffgehalte durch den Räumbooteinsatz um ein Mehrfaches gegenüber dem normalen Spülbetrieb erhöht werden können. Abb. 6.9 verdeutlicht den Unterschied zwischen den Schwebstoffgehalten bei normalem Spülbetrieb und beim Spülen mit Räumbooteinsatz. Die ge- wonnenen Meßwerte sind als Minutenmittelwerte ermittelt. Zehn dieser Einzelmeßwerte sind auf der Abb. 6.9 zu einem Punkt zusammengefaßt worden.

Es hat sich gezeigt, daß bei der Betrachtung der Schwebstoff- konzentration in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit grundsätzlich zwischen einer Haupträumphase - als Scheitel- phase bezeichnet - und einer Verzögerungsphase zu unter- scheiden ist. Während der Schlußphase eines Spülzeitraumes nehmen die Fließgeschwindigkeiten verständlicherweise ab. Die bereits in Suspension befindlichen Schwebstoffe verbleiben dann auch bei relativ geringen Strömungen noch eine Weile in Schwebelage. Das erklärt die im Verhältnis zur Fließgeschwindig- keit häufig hohe Schwebstofffracht während dieser Verzögerungs- phase. Die Meßwerte sind daher besonders gekennzeichnet.

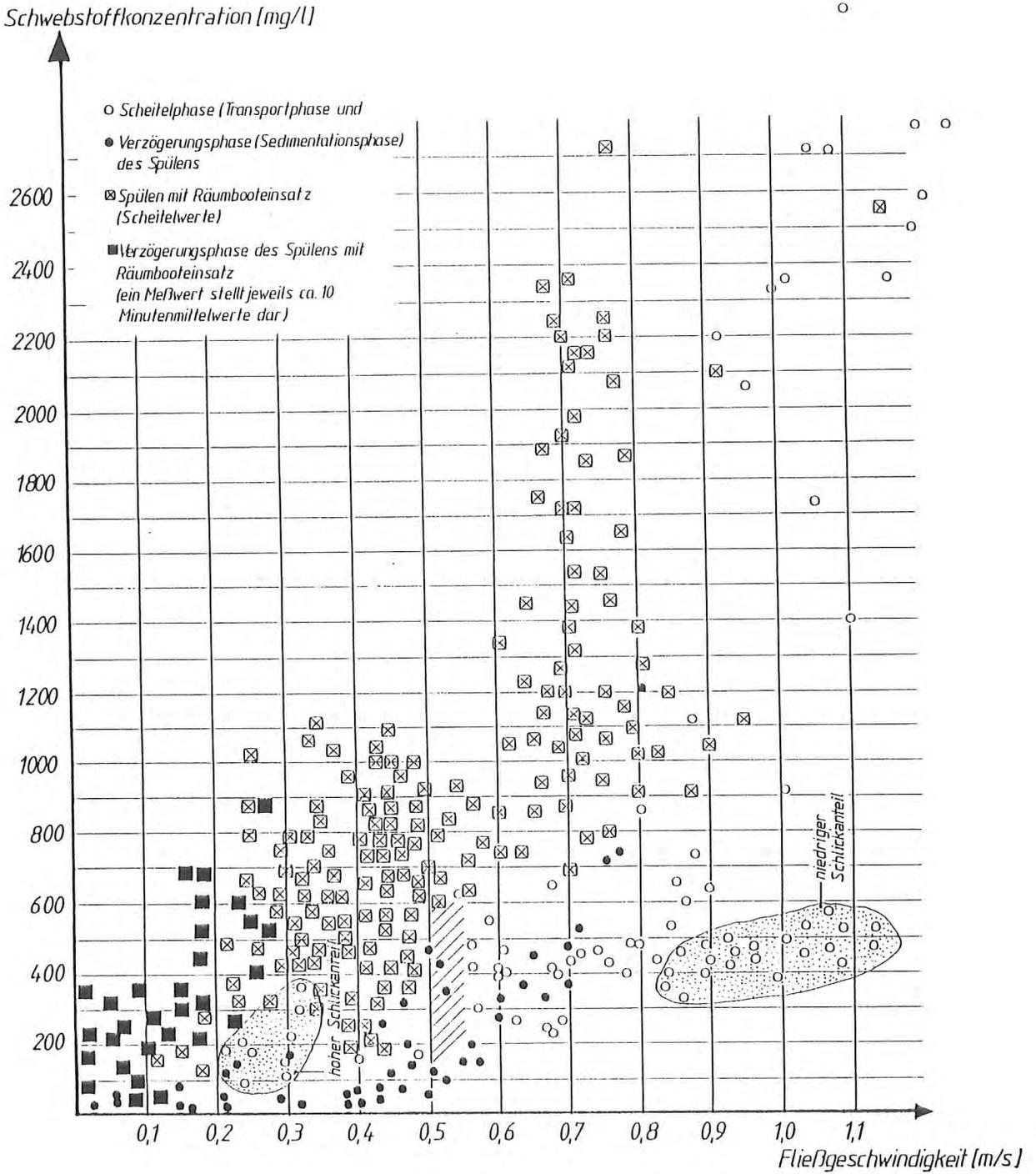


Abb. 6.9 Daten der Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

Durch den Räumbooteinsatz wird wesentlich mehr Material in Suspension gebracht. Die Transportkonzentration ist jedoch für Fließgeschwindigkeiten kleiner als 0,6 m/s offenbar nach oben begrenzt. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,25 und 0,6 m/s werden Transportkonzentrationen von 1 000 bis 1 500 mg/l nicht überschritten.

Ein Mehrfaches dieser Konzentration wurde bei Fließgeschwindigkeiten über 0,6 m/s gemessen. Dann wird offenbar infolge der hohen Turbulenz ein Transportzustand erreicht, in dem hohe Feststoffkonzentrationen ohne Ablagerungen transportiert werden. Wird die Grenzgeschwindigkeit von 0,6 m/s unterschritten, beginnt ein Teil der suspendierten Feststoffe sich abzusetzen. Nur eine begrenzte Feststoffkonzentration bleibt vorläufig noch in Suspension. Auf Abb. 6.10 ist die größere Schwebstofffracht bei Räumbooteinsatz und insbesondere deren steile Zunahme bei Fließgeschwindigkeiten über 0,65 m/s deutlich erkennbar.

Ein Beispiel aus den Meßdaten während des Spülens mit Räumbooteinsatz zeigen Abb. 6.11 für Meßstelle II und 6.12 für Meßstelle III. Mit Spülbeginn wurde der Räumbooteinsatz in dem in Abb. 6.1 dargestellten Räumbereich gestartet. Bei einer maximalen Spülstromgeschwindigkeit von 0,93 m/s bleibt an Meßstelle II die Schwebstoffkonzentration bis auf einen Spitzenwert von 1 480 mg/l unter 1 000 mg/l. Diese während des Räumbooteinsatzes relativ geringe Konzentration ist vermutlich damit zu erklären, daß der mit vielen Schwebstoffen angereicherte Hauptspülstrom an der seitlich angeordneten Meßstelle II vorbeizieht und von der Sediwa nicht voll erfaßt wird. Anders sieht es an Meßstelle III (Abb. 6.12) aus. Hier wird bei einer Spülstromgeschwindigkeit von 0,80 m/s eine maximale Schwebstoffkonzentration von 2 370 mg/l gemessen. Bei dieser relativ hohen Konzentration ist der Waagebehälter der "Sediwa" in sehr kurzen Abständen gefüllt und muß wieder leergespült werden. Durch diese häufigen Spülvorgänge - in Abbildungen mit "S" gekennzeichnet - ergeben sich für einige Minuten Lücken in der Datenerfassung.

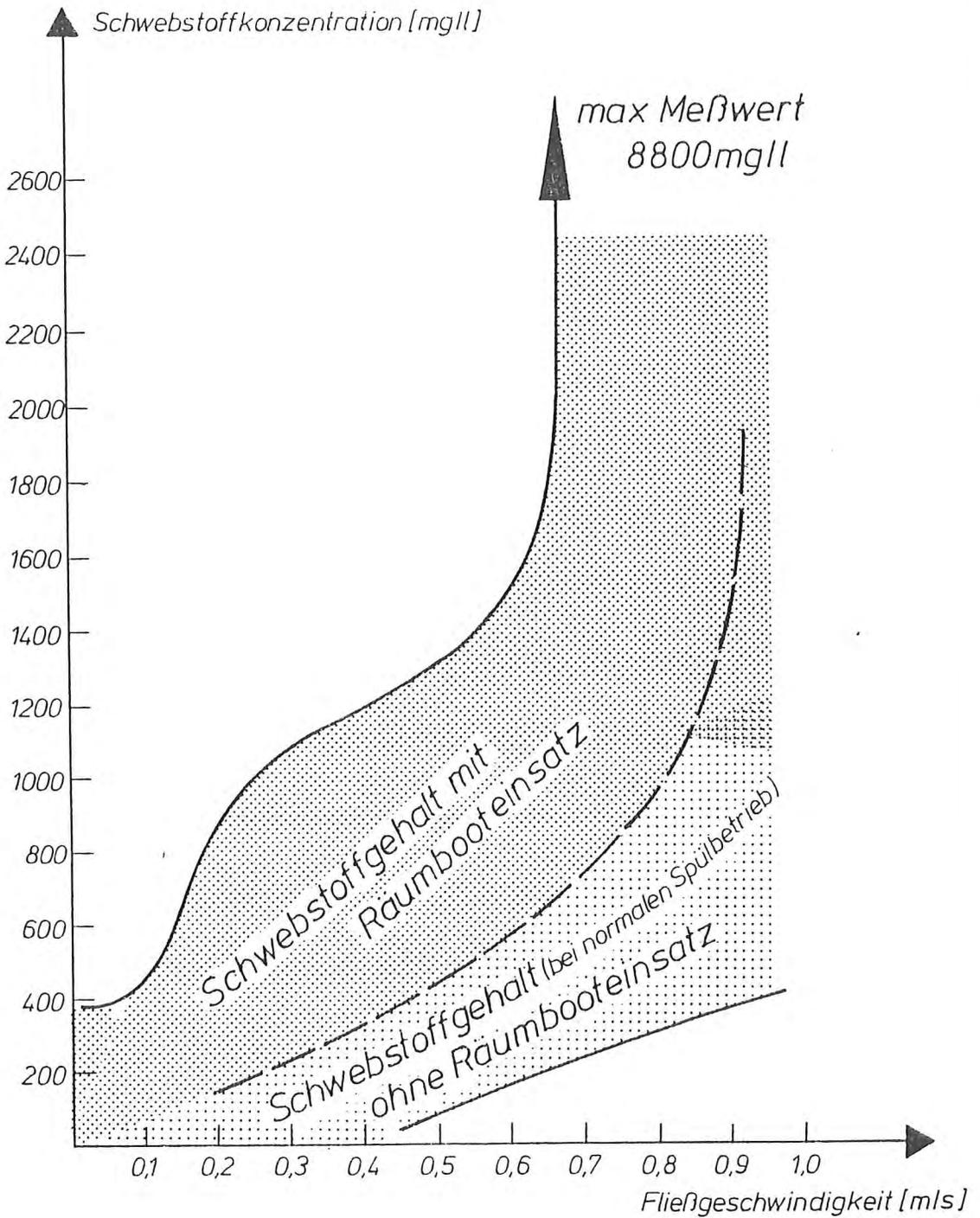


Abb. 6.10 Schwebstoffgehalt im Neßmersieler Außentief beim Spülen mit und ohne Raumbooteinsatz

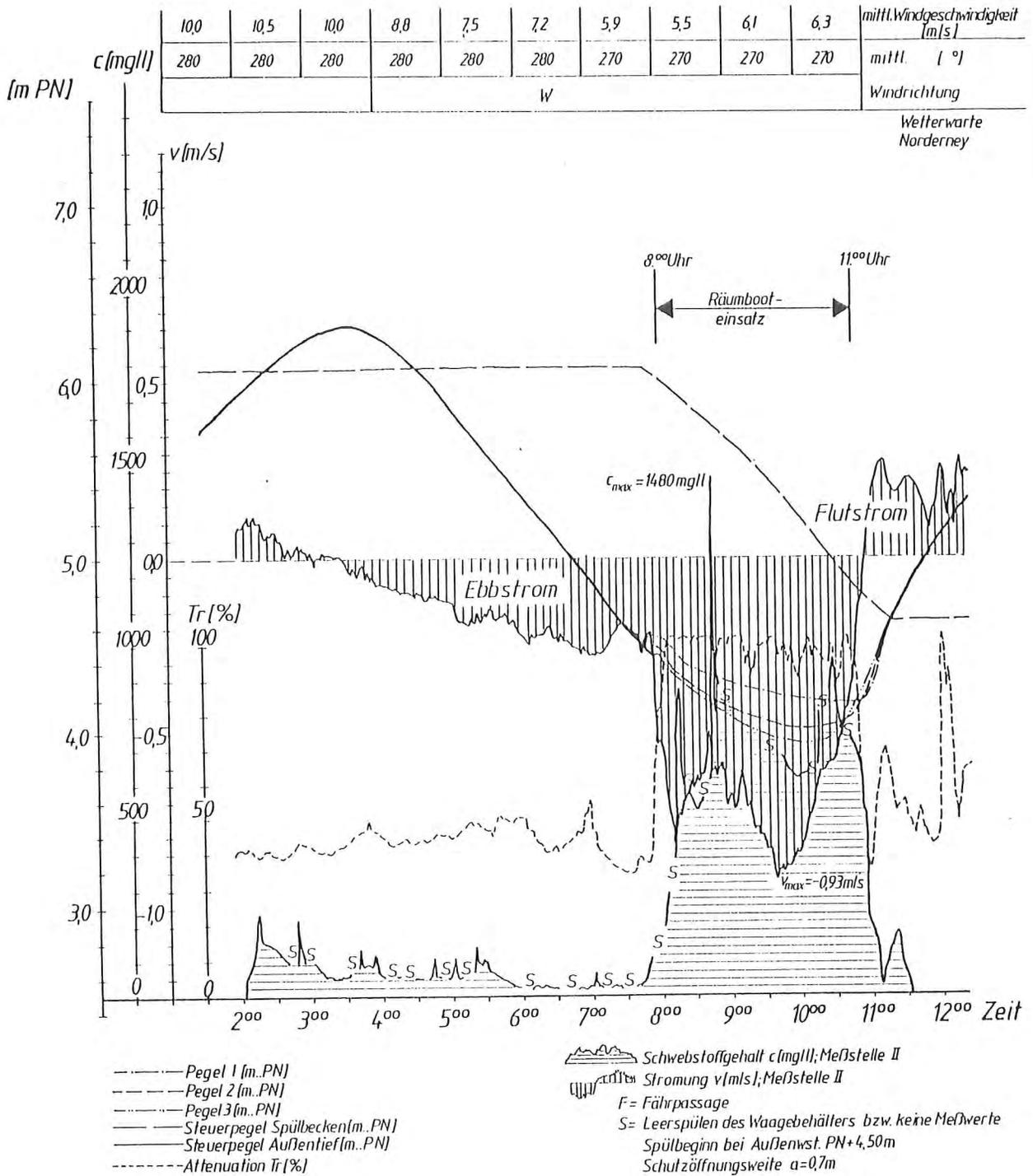


Abb. 6.11 Ganglinien - Meßstelle II-vom 28.05.1986

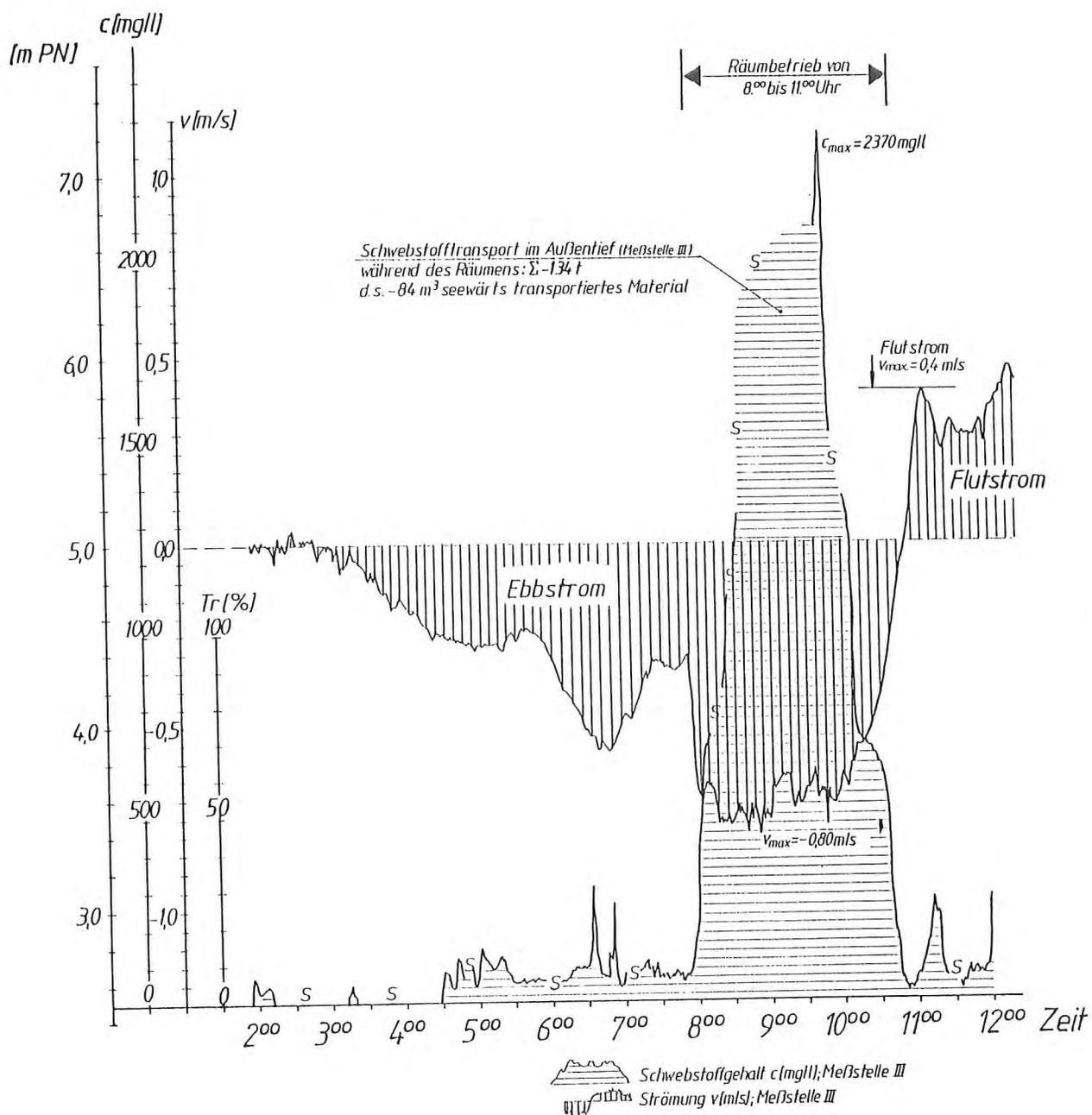


Abb. 6.12 Ganglinien - Meßstelle III-vom 28.05.1986

Das macht die Grenzen dieses Verfahrens der Schwebstoffmessung bei hohen Konzentrationen deutlich.

Die an Meßstelle III während des Räumbooteinsatzes gemessene Schwebstoffkonzentration ist in Abb. 6.13 über die Fließgeschwindigkeit aufgetragen. Hier ist vor Spülbeginn bei natürlichem Ebbstrom mit der Auftragung der Minutenwerte begonnen worden. Durch eine fortlaufende Nummerierung der Minutenwerte ist eine zeitbezogene Zuordnung möglich und der Verlauf der Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit ist über die gesamte Räumzeit - mit Ausnahme der meßtechnisch bedingten Ausfallzeiten - Minute für Minute nachvollziehbar.

Nach Öffnen des Spülsiels läuft der Spülschwall durch das Außentief. Nach 5 Minuten erreicht der kleiner als 1 cm hohe Schwallkopf Meßstelle II, nach weiteren 3 Minuten gegen 8.04 die Meßstelle III.

(Anzumerken ist hier, daß die Messungen die Formel für die Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schwallkopfes $c = v + \sqrt{g \times h}$ mit h = mittlere Wassertiefe über der Sohle bestätigt haben.)

Mit Durchlaufen des Schwallkopfes nimmt die Fließgeschwindigkeit sofort zu. Infolge Zunahme des Stromarbeitsvermögens erhöht sich auch die Schwebstoffkonzentration und steigt bis 8.25 Uhr (Abb. 6.13) infolge zunehmender Suspendierung der Sedimente weiter bis auf ca. 800 mg/l. Die durch das Räumboot aufgewirbelten Sedimente erreichen erst gegen 8.30 Uhr die Meßstelle III. Sie werden mit dem Weg der Strömung (dem Stromweg) transportiert. Der Spülschwall hingegen läuft der Strömung mit Wellengeschwindigkeit - in Neßmer-siel etwa um die 5- bis 6fache Strömung - voraus. Daher brauchen die künstlich eingetragenen Schwebstoffe die 5- bis 6fache Zeit, bis sie die Meßstelle nach Durchgang des Spülschwalls erreichen können.

...

Bis zum Eintreffen der maschinell geräumten Sedimente sind infolge der starken Spülströmung 14 t erodiertes Material durch den Querschnitt an Meßstelle III transportiert worden, die aus dem unmittelbar oberhalb liegenden Tiefabschnitt stammen.

Diese Meßwerte zeigen, daß Räumbooteinsätze möglichst bei ausreichender Transportströmung ($v \geq 0,3$ m/s) durchgeführt werden sollten. Andernfalls wird nur eine gering bemessene Umlagerung der Sedimente erreicht.

Zur Ermittlung der die Meßstelle passierenden Schwebstoffmenge wird vereinfacht angenommen, daß die an der Meßstelle gemessene Konzentration in gleichem Maße für den gesamten Querschnitt gilt.

Da das Räumboot die Sedimente nicht gleichmäßig einträgt, ergeben sich Schwankungen der Schwebstoffkonzentration zwischen ca. 1 100 und 1400 mg/l. 45 Minuten, nachdem der Räumstrom die Meßstelle erreicht hat, sind ca. 82 t Schwebstoff durch den Querschnitt transportiert worden. Ab 10.14 Uhr beginnt die Verzögerungsphase, d.h. die Geschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration nehmen bis auf einen Grundwert zu Räumende um 10.53 Uhr ab. Von 10.41 Uhr bis 10.53 Uhr ergibt sich z. B. eine Konzentrationsabnahme von 727 mg/l, das entspricht einer Abnahme von 61 mg/l in der Minute. Die Schwebstoffe resedimentieren wegen zu geringer Transportströmung. In der gesamten Räumzeit von 8.00 Uhr bis 11.00 Uhr haben 134 t Schlick die Meßstelle III passiert.

Abb. 6.14 derselben Versuchsreihe im Mai 86 zeigt die Abhängigkeit zwischen Schwebstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit während eines Räumbooteinsatzes bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten bis 1,3 m/s an Meßstelle II. Allein durch den Spülstrom wird hier eine Konzentration bis 1 600 mg/l erreicht. Danach erhöht sich die Konzentration innerhalb einer Minute auf ca. 3 200 mg/l, als das durch das Räumboot mit vielen Schwebstoffen angereicherte Wasser die

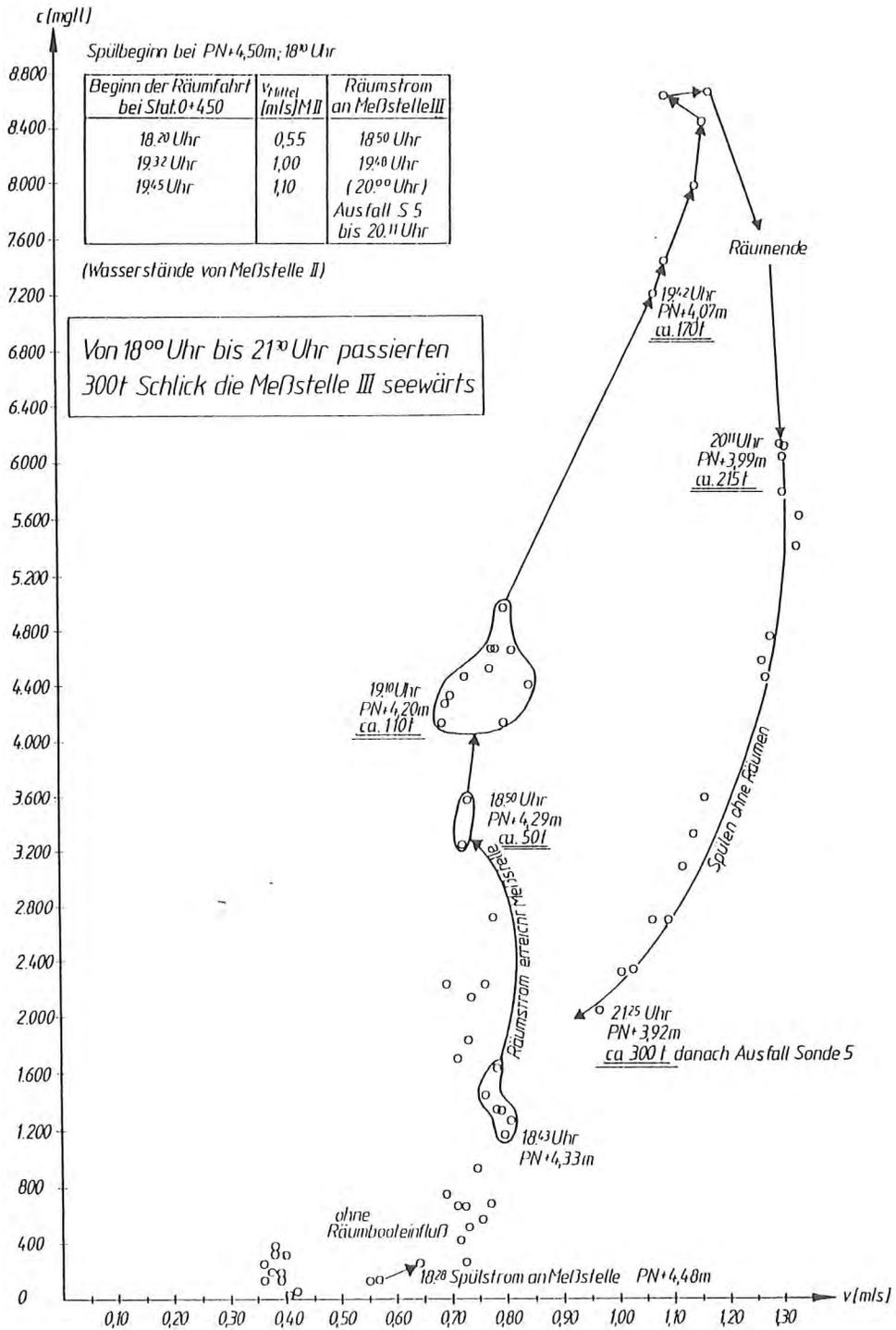


Abb. 6.14 Beziehung zwischen Strömung und Schwebstoff während des Räumbooteinsatzes am 26.05.1986 (Meßwerte von Meßstelle III)

Meßstelle erreicht. Die Konzentration steigt weiter an bis zu einem gemessenen Maximalwert von ca. 8 800 mg/l. Danach wird das Räumen mit dem Räumboot beendet, die Schwebstoffkonzentration nimmt innerhalb von 74 Min. kontinuierlich von 6000 auf 2000 mg/l ab, obwohl die Spülstromgeschwindigkeit noch weit über 1 m/s liegt. Damit wird deutlich, daß die Transportkonzentration von der Verfügbarkeit der Schwebstoffe abhängt. Danach nehmen die Fließgeschwindigkeit und damit vermutlich auch die Schwebstoffkonzentration, die wegen Ausfall der "Sediwa" nicht mehr erfaßt werden konnten, kontinuierlich auf Null bzw. eine geringe Grundkonzentration ab.

Während dieses Räumbooteinsatzes am 26.05.1986 wurden von 18.00 Uhr bis 21.30 Uhr 300 t Schlick durch Meßquerschnitt III transportiert. Die mittlere Schwebstoffkonzentration lag infolge des Räumbooteinsatzes in dieser Woche mit 112 mg/l bei Ebbstrom und 103 mg/l bei Flutstrom höher als die Mittelwerte von 1985. Hier betrug die mittlere Schwebstoffkonzentration aus 3 Meßwochen an Meßstelle III 75 mg/l bei Flut- bzw. 87 mg/l bei Ebbstrom und an Meßstelle II 60 bzw. 92 mg/l.

Ein Beispiel aus der 2. Versuchsreihe vom August 1986 zeigt Abb. 6.15. Um die Belastbarkeit der Strömung auch bei relativ kleinen Fließgeschwindigkeiten ($v < 0,6$ m/s) zu untersuchen, ist in der 2. Versuchsreihe bei einem hohen Außenwasserstand um NN, bei dem die Seitenbereiche des Außentiefs noch überflutet waren, und mit einer Schützöffnungsweite kleiner 0,8 m mit dem Spülen begonnen worden. Wegen der günstigeren Lage der Meßstelle im Außentief zu dieser Zeit, sind wiederum die Meßwerte von Meßstelle III für eine Spülphase mit Räumbootunterstützung dargestellt. Die natürliche Ebbstromgeschwindigkeit wird durch den Spülstrom von 0,4 auf max. 0,6 m/s erhöht. Damit steigt auch der Schwebstoffgehalt auf zunächst ca. 700 mg/l an, um dann wieder mit abnehmender Strömung auf ca. 400 mg/l abzufallen.

...

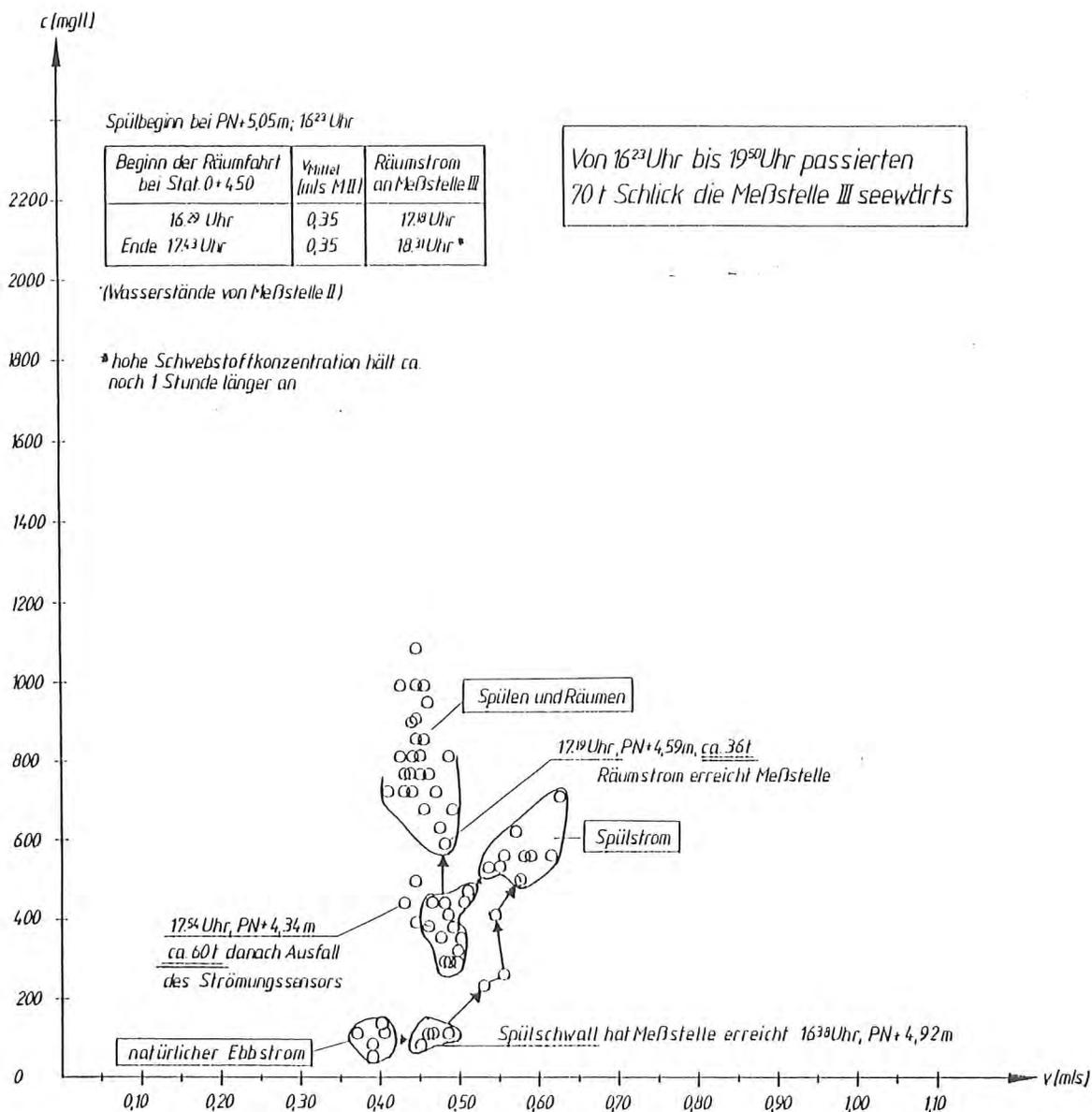


Abb. 6.15 Beziehung zwischen Strömung und Schwebstoff während des Räumbooteinsatzes am 28.08.1986 (Meßwerte von Meßstelle III)

Erst als der durch das Räumboot angereicherte Spülstrom die Meßstelle erreicht, steigt die Konzentration bis auf einen Maximalwert von etwa 1100 mg/l bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa 0,45 m/s an. Der Räumbooteinsatz wird in diesem Beispiel um 17.43 Uhr beendet. Infolge des anhaltenden Spülstroms wird 50 Minuten danach an Meßstelle III eine erhöhte Schwebstoffkonzentration um 600 mg/l gemessen. Legt man den reinen Stromweg zugrunde, so dauert die Strömungszeit der zuletzt durch das Räumboot eingetragenen Teilchen von der Räum- bis zur Meßstelle 30 bis 40 Minuten. Wegen der Auflockerung des Räumbereiches wird wahrscheinlich danach noch Material durch die starke Strömung erodiert. Die letzten Meßwerte fehlen hier wegen Ausfall des Strömungssensors, der vermutlich kurzzeitig mit Seetank bedeckt war. Während der gesamten Räum- und Spülphase werden 70 t Schlick seewärts transportiert, das ist wesentlich weniger als im Beispiel der ersten Meßreihe im Mai 86.

6.6

Massenbilanz

Das während der beiden Räumversuchsreihen im Räumbereich aufgenommene Volumen an Schlick ist mit Hilfe von Handpeilungen für drei verschiedene Höhenstufen ermittelt worden und im Folgenden zusammengestellt:

Höhe h bez. auf NN (m)	Massen Stat. 400 ⁻ - 1000 (t)	Massen Stat. 400 - 1470 (t)
h < - 1,25	1 261	1 261
- 1,25 < h < - 0,50	328	570
h > - 0,50	246	470
Summe:	<u><u>1 835</u></u>	<u><u>2 300</u></u>

Tab. 6.2: Gelöster und transportierter Schlick der 1. Räumversuchsreihe zwischen dem 12.05.1986 und 30.05.1986.

Höhe bez. auf NN (m)	Massen Stat. 400 - 1000 (t)	Massen Stat. 400 - 1470 (t)
$h < - 1,25$	420	477
$- 1,25 < h < - 0,50$	1 033	1 513
$h > - 0,50$	379	749
Summe:	<u>1 832</u>	<u>2 739</u>

Tab. 6.3: Gelöster und transportierter Schlick der 2. Räumversuchsreihe zwischen dem 11.08.86 und 22.08.86.

In der ersten Räumversuchsreihe vom Mai 86 ist in der unteren Höhenstufe, unter NN - 1,25 m, mit 694 m³ wesentlich mehr geräumt worden als in der zweiten Räumversuchsreihe mit 398 m³. Das liegt daran, daß im August mit dem Räumen schon bei Wasserständen um NN begonnen wurde, ca. 50 cm höher als bei der ersten Räumversuchsreihe, so daß das Räumboot mehr in dem höher liegenden Randbereich arbeiten konnte. In der nächst höheren Höhenstufe zwischen NN - 0,50 m und NN - 1,25 m sind dadurch im August 491 m³ und im Mai nur 222 m³ abgeräumt worden. Bezieht man das durch das Räumboot bewegte Gesamtvolumen jeder Versuchsreihe auf die jeweilige Gesamträumzeit, ergibt sich eine Räumleistung im Mai von 49 m³ pro Stunde und im August von 54 m³ pro Stunde. Die Räumleistungen waren also trotz unterschiedlicher Spülstromgeschwindigkeiten fast gleich, im August sogar ein wenig höher, da in dem oberen weichen Randbereich der Schlick wesentlich leichter durch das Räumboot aufgewirbelt werden kann, als im unteren sohlnahen Bereich mit höherer Lagerungsdichte. Daß dennoch in der zweiten Räumversuchsreihe geringere Schwebstoffgehalte gemessen wurden, ist damit zu begründen, daß die Sedimente bei höheren Wasserständen auf ein größeres Wasservolumen verteilt wurden. Außerdem setzt sich das geräumte Sediment bei geringeren Geschwindigkeiten teilweise zwischen dem Räumbereich und der Meßstelle wieder ab und wird nach und nach während der nächsten Spülungen durch die Strömung aufgenommen und weitertransportiert. Um einen genügend weiten Sedimenttransport sicherzustellen, ist eine möglichst hohe Fließgeschwindigkeit erforderlich.

Vor und nach beiden Räumbootversuchsreihen sind die über die Außentiefenlänge verteilten 18 Profile gepeilt worden. Aus den Differenzen der jeweiligen Peilungen errechnen sich die Schlickmassen, die in dem entsprechenden Zeitraum im gesamten Außentief erodiert wurden. In der Tab. 6.2 sind die Massen, wieder bezogen auf drei verschiedene Höhenstufen, die zwischen Station 400 (Hafen) und 1000 (Meßstelle II) bzw. zwischen Station 400 und 1470 (Meßstelle III) durch den Spülstrom und das Räumboot erodiert wurden, zusammengefaßt.

Die Summen der Schlickmassen, die durch die Meßstellen seewärts transportiert worden sind, sind für Station 1000 (Meßstelle II) etwa gleichgroß, durch Station 1470 (Meßstelle III) wurden im August gut 400 t mehr Schlick seewärts transportiert (Tab. 6.3).

Obwohl im August mit kleineren Spülgeschwindigkeiten geräumt wurde, ergeben sich auch über die gesamte Außentiefenlänge etwa gleichhohe Erosionsraten, zwischen Meßstelle II und III sogar höhere als im Mai. Das liegt daran, daß sich das durch das Räumboot abgeräumte Material, welches sich bei kleinen Spülstromgeschwindigkeiten noch im Außentief - teilweise bevor es durch die "Sediwa" an den Meßstellen als Suspension gemessen wird - wieder absetzt, zum Teil durch den nächsten Spülstrom wieder aufgenommen und weitertransportiert wird.

Die aus den Differenzen der Peilungen ermittelten Schlickmassen stammen aber nicht ausschließlich aus dem Räumbereich (siehe Volumenberechnung Räumbereich), es ist in dieser Zeit durch den Spülstrom zusätzlich Schlick aus dem gesamten Außentief ausgeräumt worden, und zwar im Mai ca. 200 t bis Station 1000 (Meßstelle II) und 660 t bis Station 1470 (Meßstelle III) und im August ca. 280 t bis Station 1000 und 1190 t bis Station 1470. Offenbar war im August das zusätzliche Schlickangebot im Außentief höher als im Mai. Nur so ist zu erklären, daß die Erosion zu der Zeit trotz kleiner Spülstromgeschwindigkeiten im vom Räumboot unbeeinflussten Außentiefbereich so ausgeprägt ist.

Diese aus den Peilungen ermittelten Massen werden den mit der Sediwa gemessenen Schwebstoffmassen gegenübergestellt. Es wird davon ausgegangen, daß die an den Meßstellen an einem Punkt gemessenen Schwebstoffkonzentrationen gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sind.

Für die Messungen im Mai ergab sich durch Geräteausfall bzw. ungünstige Lage der "Sediwa" im Querschnitt an Meßstelle II eine hohe Differenz, hier wurden durch die "Sediwa" an Stat. 1000 umgerechnet nur ca. 640 t erfaßt (aus Peilungen 1 835 t, siehe Tabelle). Dagegen ergab sich bei Station 1 470 (Meßstelle III) mit ca. 2 500 t, ermittelt durch die "Sediwa", und 2 300 t aus den Peilungen eine recht gute Übereinstimmung. Für die 2. Meßreihe im August kann diese Gegenüberstellung wegen häufigerer Geräteausfälle nicht durchgeführt werden.

6.7 Auswertung der Sauerstoff- und Temperaturmessungen

Die Sauerstoffmessungen an Meßstelle II während der Räumversuche zeigten, daß durch die hohe Schwebstoffanreicherung des Wassers nicht generell eine Sauerstoffzehrung stattfindet, sondern durch die Turbulenz des Spülstroms zeitweise auch eine Sauerstoffanreicherung (27.05.86) zu verzeichnen war. Für die Räumbooteinsätze vom 26.05. bis 29.05.86 ist der Verlauf des Sauerstoffgehalts im Folgenden kurz beschrieben:

1.) 26.05.1986

Vor dem Räumbooteinsatz: (ca. 18.00 Uhr)

konst. Sauerstoffgehalt von 117 % entspr. 9.2 mg/l
bei einer Wassertemperatur von 18 ° C

Während des Räumens:

Sauerstoffgehalt fällt in 40 Min. auf 90 % entspr. 7.3 mg/l
bei einer Wassertemperatur von 16 ° C (Temp. des Spülwassers)

...

Bei Räumende:

Minimum des Sauerstoffgehalts bei 85 % entspr. 6.9 mg/l

Nach Räumende:

Anstieg des Sauerstoffgehalts in 45 Min. auf 100 % entspr. 8.2 mg/l.

2.) 27.05.86

Keine Sauerstoffzehrung durch Räumboot, sondern ein leichter Anstieg des Sauerstoffgehalts von 7 % gemessen.

3.) 28.05.86

Vor dem Räumbooteinsatz: (ca. 8.00 Uhr)

Anst. Sauerstoffgehalt von 90 % entspr. 7.8 mg/l
bei einer Wassertemperatur von 13 ° C

Während des Räumens:

Sauerstoffgehalt fällt in 20 Min. auf 70 % entspr. 5.8 mg/l
bei einer Wassertemperatur von 15 ° C (Temperatur des Spülwassers)
Sauerstoffgehalt steigt dann langsam auf 85 % entspr. 7.1 mg/l an.

Nach Räumende:

Anstieg des Sauerstoffgehalts auf ca. 100 % entspr. 8.3 mg/l.

4.) 29.05.86

Kurzzeitig für eine halbe Stunde nach Räumbeginn Abfall des Sauerstoffgehalts um ca. 14 %, danach wieder Anstieg auf den Wert vor dem Räumbooteinsatz.

...

Ebenso wurde beim Spülen ohne Räumbooteinsatz teils eine Sauerstoffzehrung, teils eine Sauerstoffanreicherung gemessen. Häufig fiel der Sauerstoffgehalt sofort nach Spülbeginn für ca. eine halbe Stunde ab, danach stieg er zum Teil über den Ausgangswert vor Spülbeginn wieder an. Dieses ist damit zu erklären, daß zu Beginn des Spülens sehr feine Schwebstoffe, die sich auf der Sohle abgesetzt haben, vom Wasser aufgenommen werden. Diese feinen zum großen Teil auch aus organischen Bestandteilen bestehenden Partikel können eine Sauerstoffabnahme im Wasser bewirken.

Der mittlere Sauerstoffgehalt aus 82 Meßtagen vom Mai bis August 1986 ist für die Zeit vor Spülbeginn, während Tnw und während Thw sowie der mittlere minimale und maximale Sauerstoffgehalt während des Spülens und während des Flutstroms in folgender Tabelle zusammengestellt:

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

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

Diese Auswertung zeigt, daß sich große Unterschiede beim mittleren Sauerstoffgehalt für die einzelnen Tidephasen nicht ergeben. Von einer belastenden Sauerstoffzehrung kann folglich nicht die Rede sein.

7. Ausräumung der Außentiefquerschnitte infolge des Spülbetriebs

7.1 Vermessungen

Das Neßmersieler Außentief wird - wie auch die anderen Außentiefs in Ostfriesland - seit 1973 regelmäßig mit dem Flächenechographen des Meßschiffes "Memmert" gepeilt. Der Echograph registriert die Tiefe des Gewässerbettes mit zehn Sohlen-Längsschnitten mit einem jeweiligen seitlichen Abstand von 2 m, so daß das Gewässer in einer Peilfahrt auf insgesamt 20 m 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 und Schiffbarkeit der Außentiefs beurteilt sowie ggf. Baggerungen überwacht.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Neßmersieler Außentief zusätzlich in festgelegten Profilen nach Möglichkeit monatlich nivelliert (Abb. 7.1), um kurzfristige Veränderungen der Querschnitte mit Übergangsbereich zum Watt untersuchen zu können. Der Meßpunktabstand in den Profilen beträgt 2 m. Die Nivellements ergeben eine auf cm genaue Höhenlage, da zum Vermeiden unterschiedlich starken Einsackens der Nivelierlatte diese am Fuß eine kreisrunde Scheibe von 30 cm Durchmesser aufweist. Die mit dem Flächenechographen ermittelten Tiefen sind dagegen nur auf etwa ± 1 dm genau zu erfassen. Wegen des Meßzeitaufwands und der Tideabhängigkeit müssen die Nivellements auf die 6 ausgewählten Profile von Stat. 0 + 505 bis 1 + 600 (s. Abb. 7.1) beschränkt werden. Die übrigen Profile werden zwei bis dreimal pro Jahr aufgenommen.

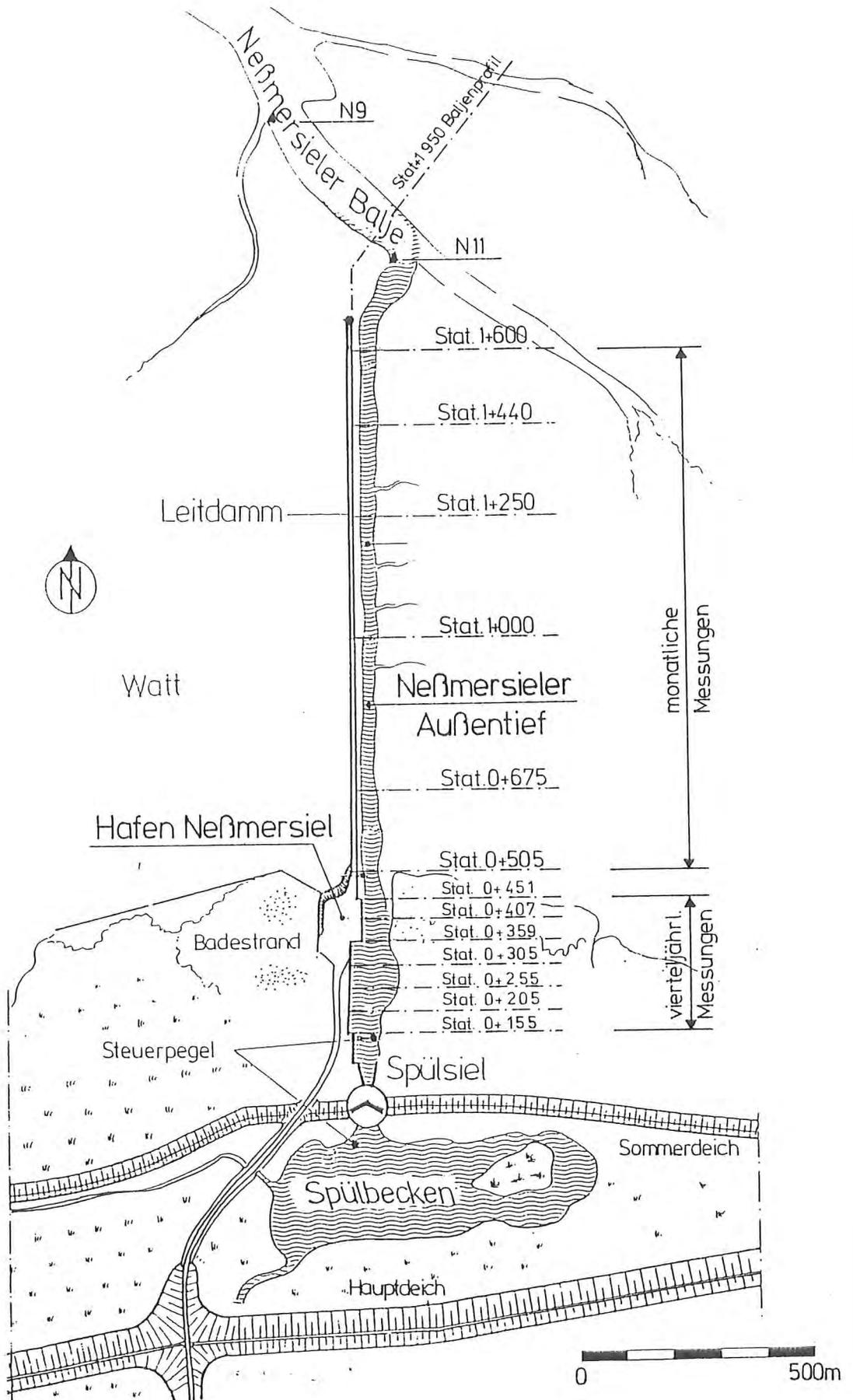


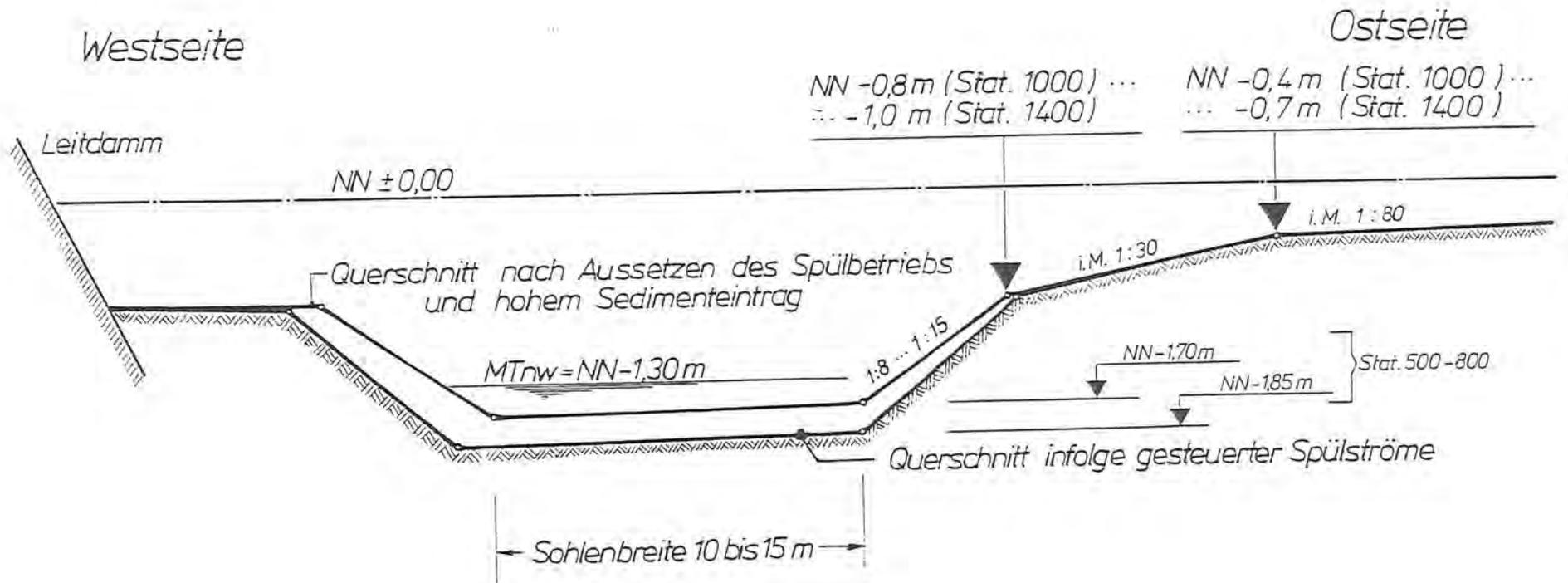
Abb. 7.1 Übersicht der regelmäßig vermessenen Außentiefprofile.

7.2 Veränderung von Außentiefsohle und -querschnitten

Die Auswirkung der gesteuerten Spülströme auf die Querschnittsform des Außentiefs ist in Abb. 7.2 schematisch dargestellt. Die Querschnittsform läßt sich durch ein Trapez angleichen. Auf der Westseite des Querschnitts liegt der Leitdamm, die ostseitige Böschung geht in das Watt über.

Zur Veränderung der Querschnittsparameter über die Außentieflänge ist folgendes festzustellen:

- 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 mit zunehmender Entfernung vom Siel größer (Abb. 7.7, Tab. 1 in Abschn. 3.3), sie werden offensichtlich - neben anderen Einflußfaktoren - durch die Füll- und Entleerungsvorgänge ihrer Watteinzugsgebiete beeinflußt.
- Die gesteuerten Spülströme wirken sich so aus, daß sie die Sohle vertiefen und verbreitern und dadurch der untere Bereich der Böschung steiler wird. Nach Aussetzen des Spülbetriebs wird der Querschnitt durch neue Ablagerungen wieder flacher. Dieser Einfluß von Spülbetrieb bzw. "Spülruhe" ist besonders ausgeprägt im hafennahen Bereich, da hier die Wirkung der Spülströmung im Vergleich zur natürlichen Tideströmung größer ist.



Maßstab d.H. 5-fach überhöht gez.

Abb. 7.2 Formparameter des Neßmersieler Außentiefs

In hafennahen Profilen sind auch die größten Höhenänderungen festgelegter Profilmesspunkte festzustellen (z. B. Stat. 0 + 675, Abb. 7.3). Die in Abb. 7.3 dargestellte maximale Umsatzhöhe ergibt sich aus den jeweils höchsten und niedrigsten Werten der gemessenen Höhen aus dem Meßzeitraum Sept. 83 - Sept. 86. Wegen der Querschnittsverlagerungen erreichen die Umsatzhöhen im Bereich der Ufer jeweils ein Maximum, wobei das leitdammseitige westliche Ufer den absoluten Höchstwert erreicht.

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 m Gesamtbreite bestimmt. In Abb. 7.4 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.

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. 7.4 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.

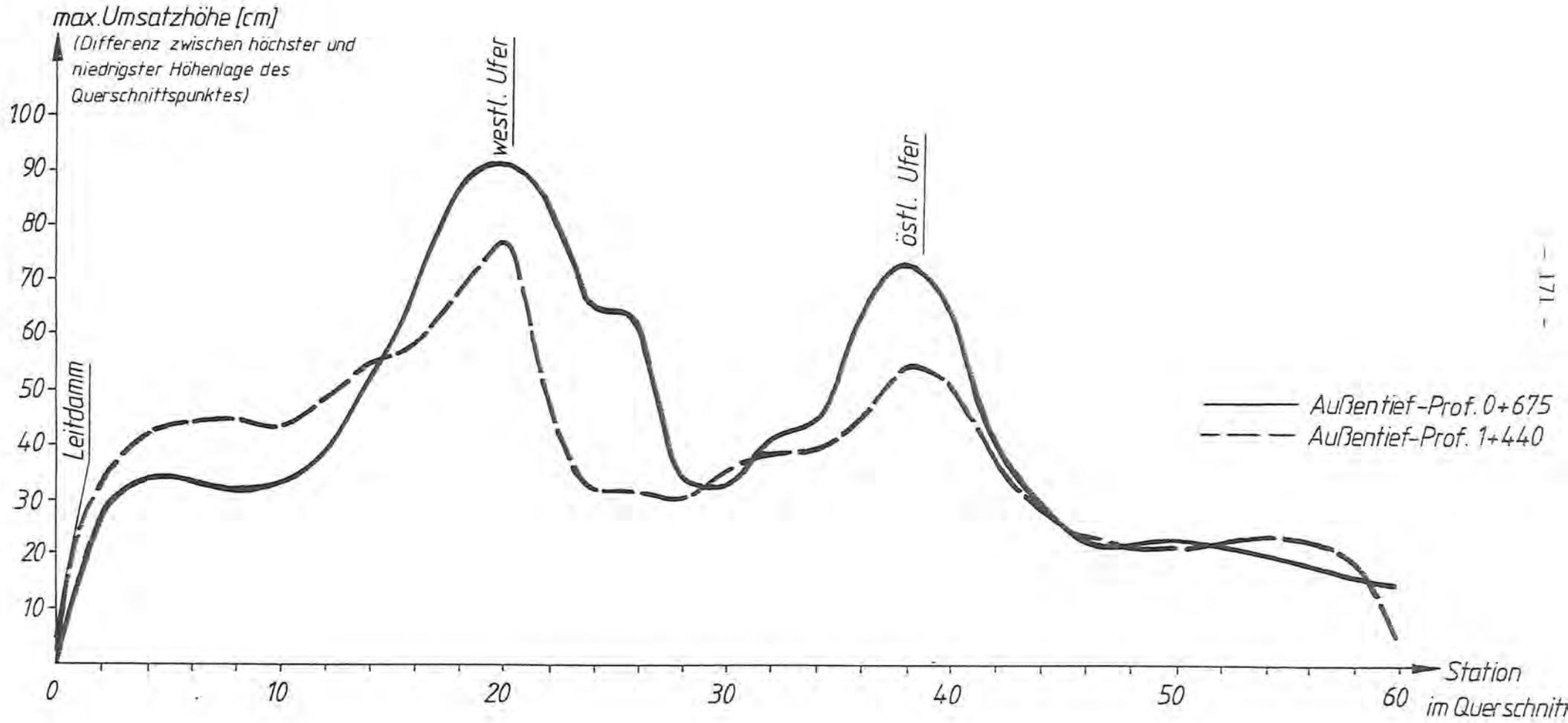


Abb. 7.3 Max. Umsatzhöhe in Außentiefquerschnitten im Meßzeitraum vom Sept. 1983 bis Sept. 1986

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 (Abb. 7.5) und
- auch der Querschnitt des Außentiefs unter NN - 0,5 m auf das etwa 1,8fache vergrößert wurde (Abb. 7.6)

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.

Die auf die gewählten Bezugshorizonte NN - 1,25 m (entsprechend etwa dem MTnw) und NN - 0,5 m bezogenen Querschnittsflächen (Abb. 7.7) zeigen tendenziell eine ähnliche Veränderung wie die Sohlentiefe. Seitdem die Spülströme aus dem Siel automatisch gesteuert werden, haben die Durchflußquerschnitte auf gesamter Außentief-länge - 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 Scheitelwert erreicht. Zu erkennen ist auch, daß künstlich vertiefte Querschnitte empfindlich auf hohen Sedimenteintrag reagieren. Die Abb. 7.7 zeigt, daß die Querschnitte nach einer ausgeprägten Starkwindperiode ab Windstärke 6 (lt. Wetterwarte Norderney des Deutschen Wetterdienstes) 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 Tideniedrigwasserstän-

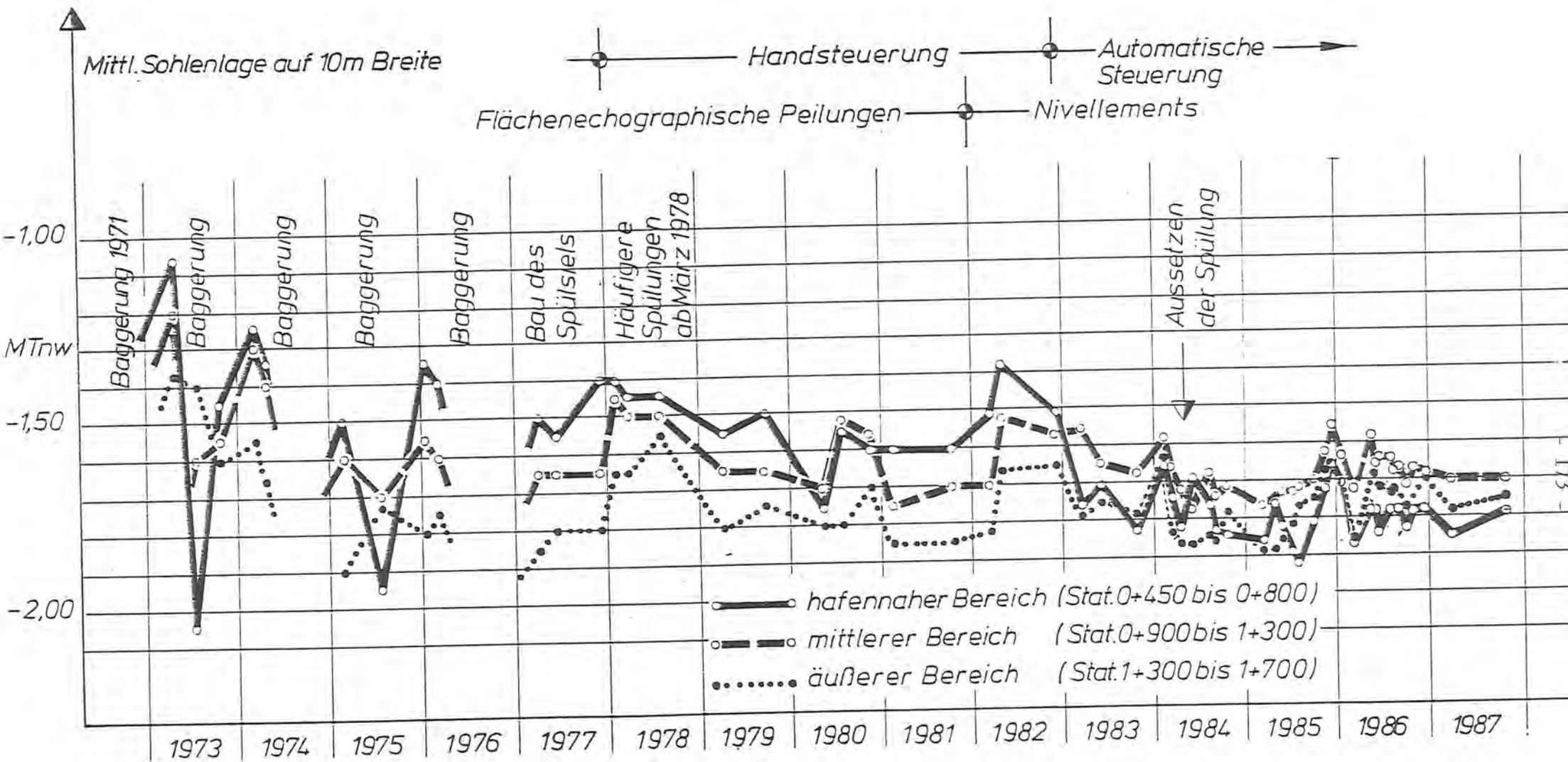


Abb. 7.4 Langfristige Entwicklung der Außentiefsohle

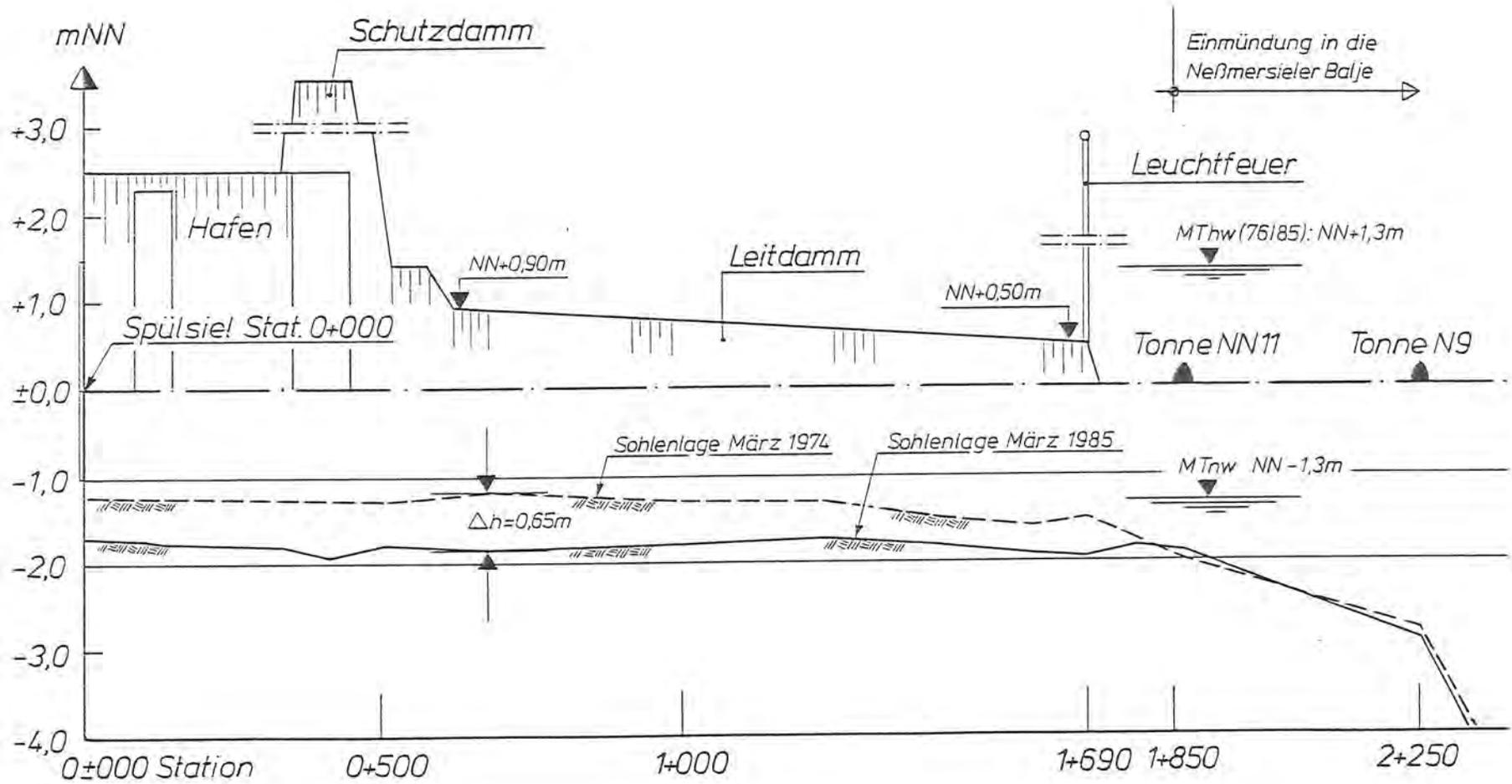


Abb. 7.5 Längsschnitt durch das Neßmersieler Außentief mit Sohlenvertiefung von 1974 - 1985 durch den automatischen Spülbetrieb

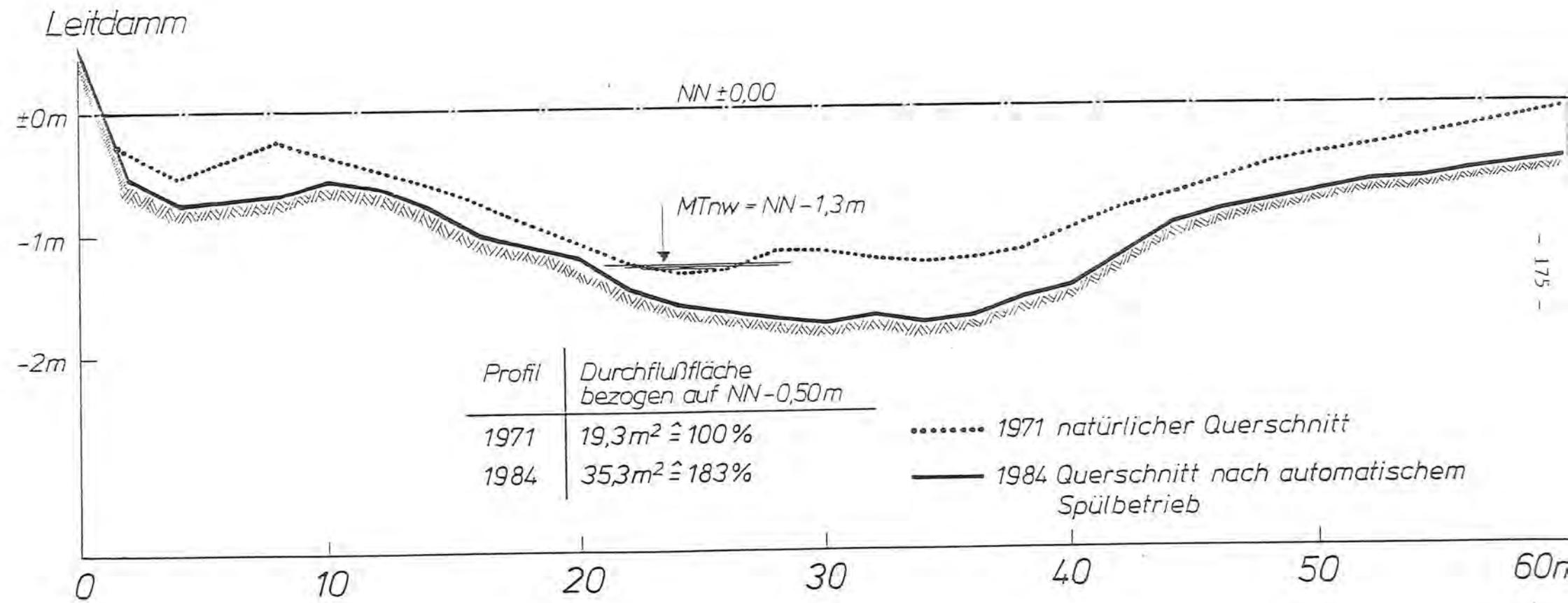


Abb. 7.6 Querschnittsentwicklung nach automatischen Spülbetrieb

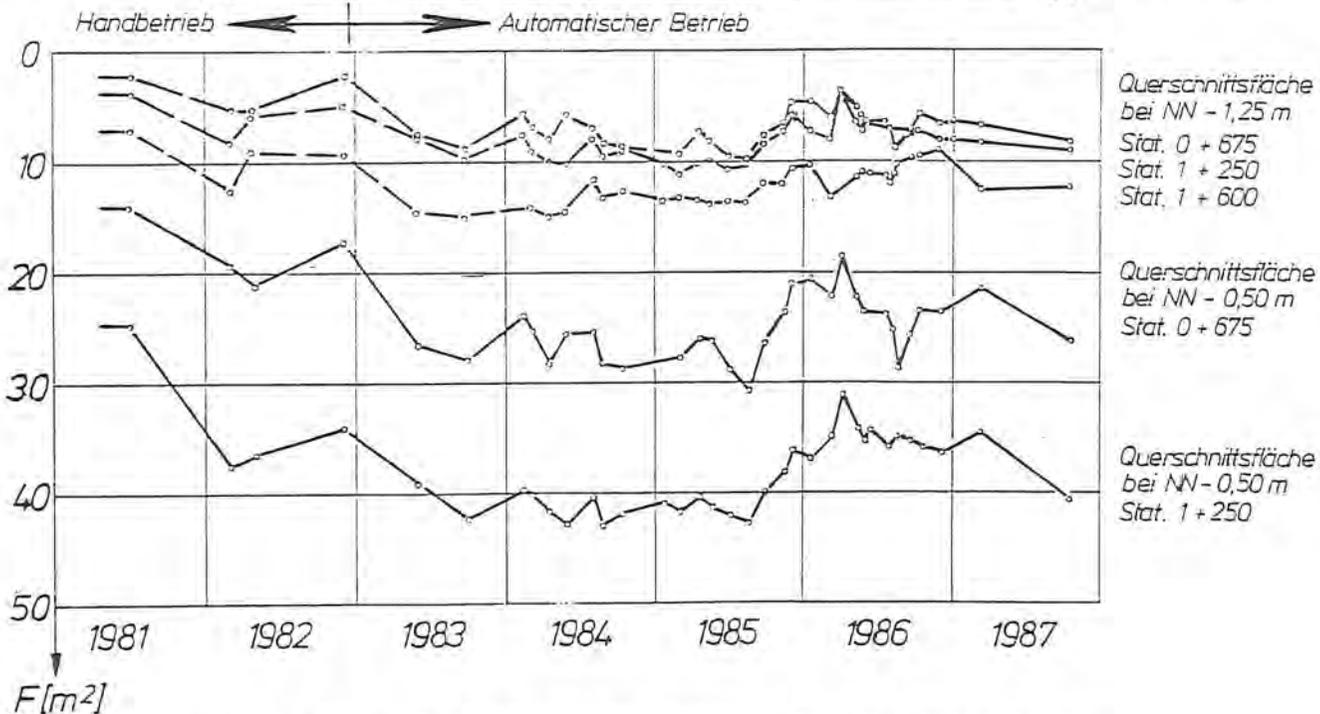
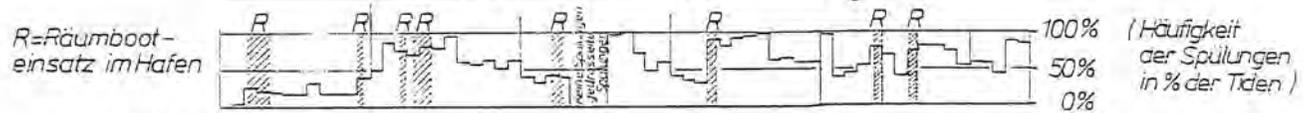
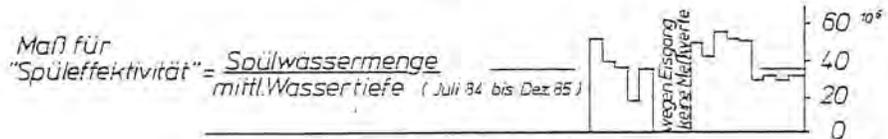
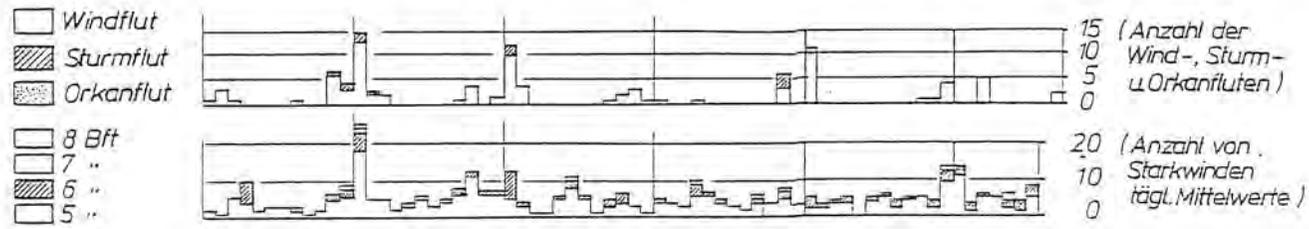


Abb. 7.7 Entwicklung der Außentiefquerschnittsflächen

de gering ist und nur eine geringere Sedimentausräumung bewirkt oder der Spülbetrieb aus anderen Gründen unterbrochen wird, hält die Auflandungstendenz 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 in Starkwindlagen, da offensichtlich die Sedimente infolge höherer natürlicher Tideströmungen nicht zur Ablagerung kommen. Die Entwicklung zeigt allerdings Mitte des Jahres 1984 und ab Oktober 1985 eine Querschnittsabnahme, die auf die Unterbrechungen des Spülbetriebs und erhöhte T_{nw} zurückzuführen sind und in folgendem Abschnitt 7.3 näher erläutert wird. Nach regelmäßigem Spülbetrieb sind die eingetriebenen Sedimente bis März 1986 zumindest an der Sohle wieder ausgeräumt worden.

7.3 Ursachen der Querschnittsabnahme ab September 1985

Es liegt zunächst nahe, die Querschnittsabnahmen ab Sept. 85 auf den eingeschränkten Spülbetrieb infolge der Unterhaltungsarbeiten an der Spülanlage und auf den erhöhten Schwebstoffgehalt des Tidewassers Anfang September zurückzuführen (Abb. 7.7). Die Querschnittsfläche innerhalb NN - 0,5 m nimmt an der Meßstelle II von 36,3 auf 30,4 m² Anfang Oktober ab. Die sich ablagernden Sedimente werden nämlich infolge geringer Spülstromgeschwindigkeit nicht wieder erodiert und aus dem Außentief transportiert.

Sowohl an Meßstelle II (Abb. 7.8) als auch an Meßstelle III (Abb. 7.9) nimmt die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit vom Juli bis Oktober nahezu kontinuierlich ab. Dies gilt auch für die Häufigkeit der Ebbstromgeschwindigkeit $> 0,4$ m/s, die die Dauer des räumwirksamen Spülstroms wiedergibt. Der Flutstrom zeigt hingegen keinen wesentlichen Abnahmetrend.

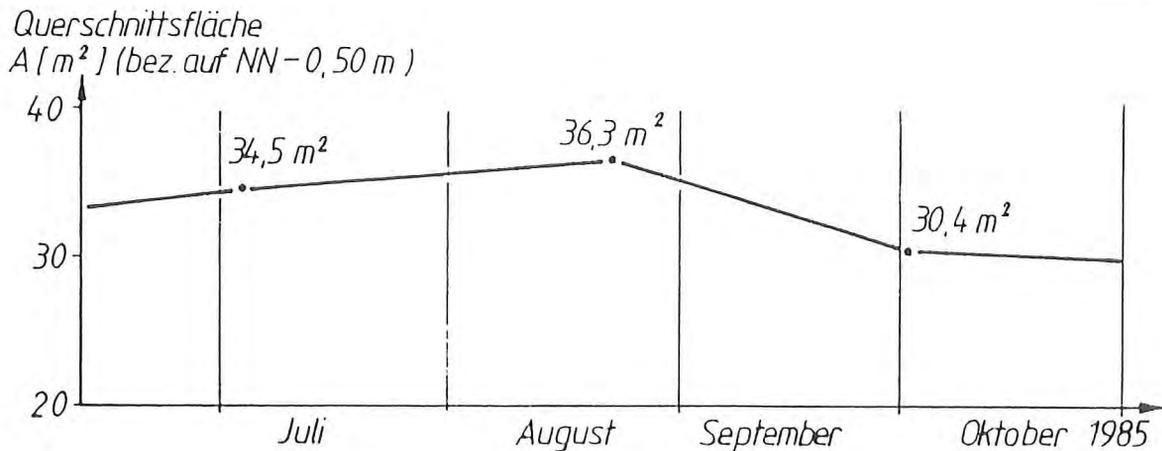
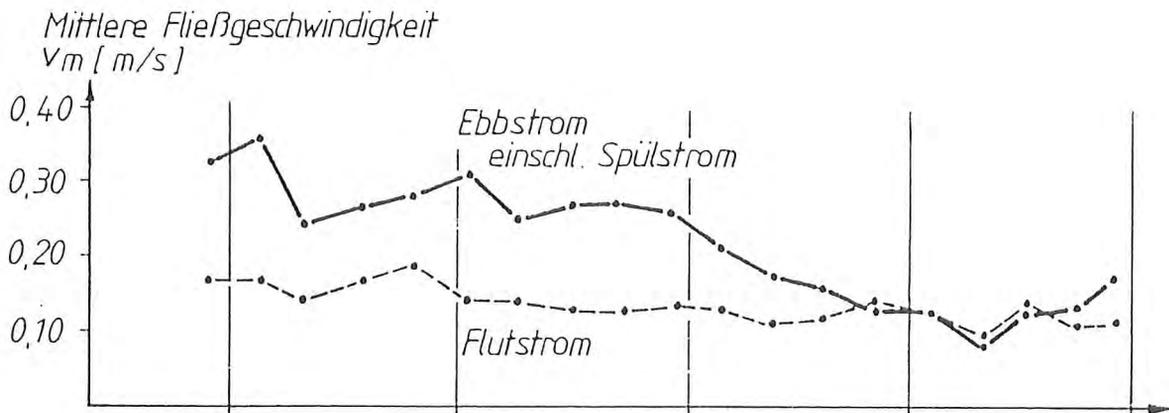
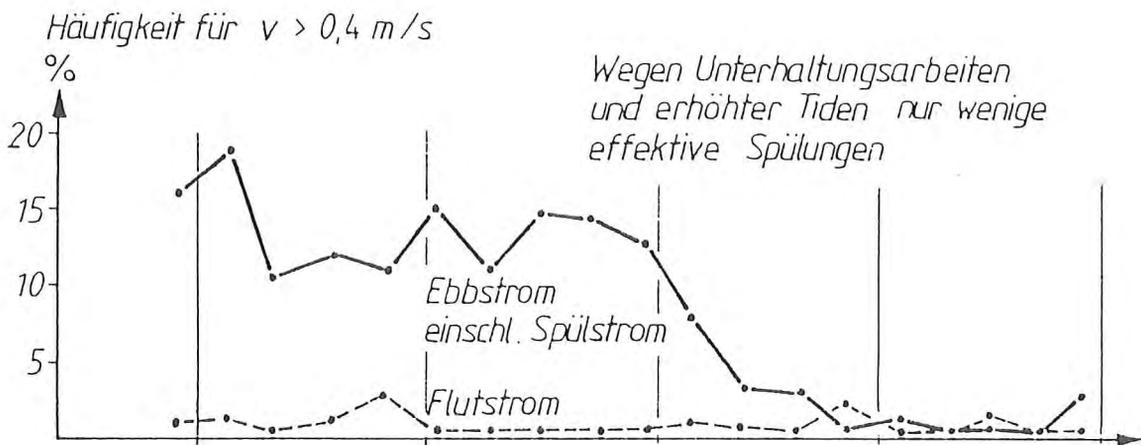
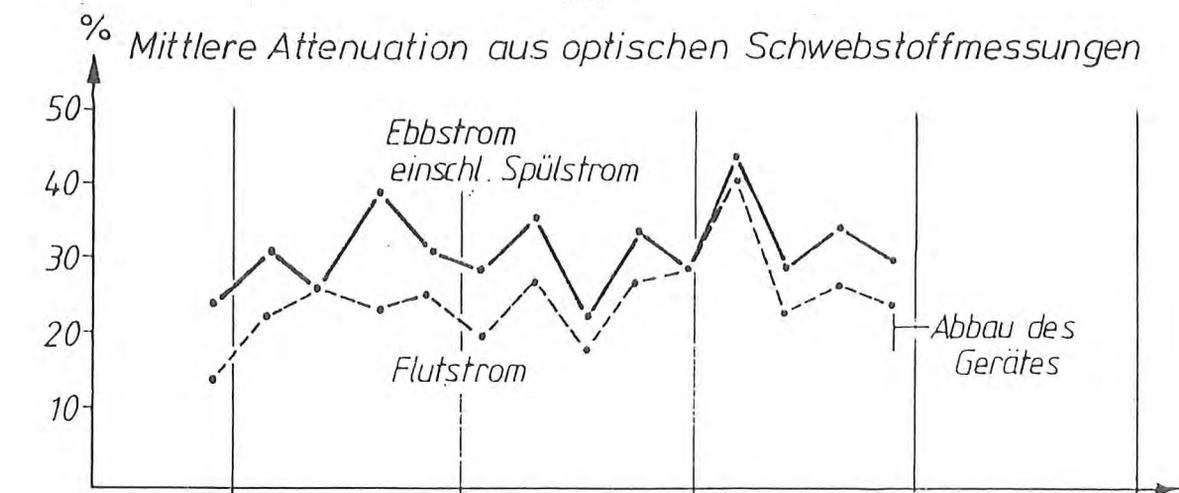


Abb. 7.8 Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung an Meßstelle II.

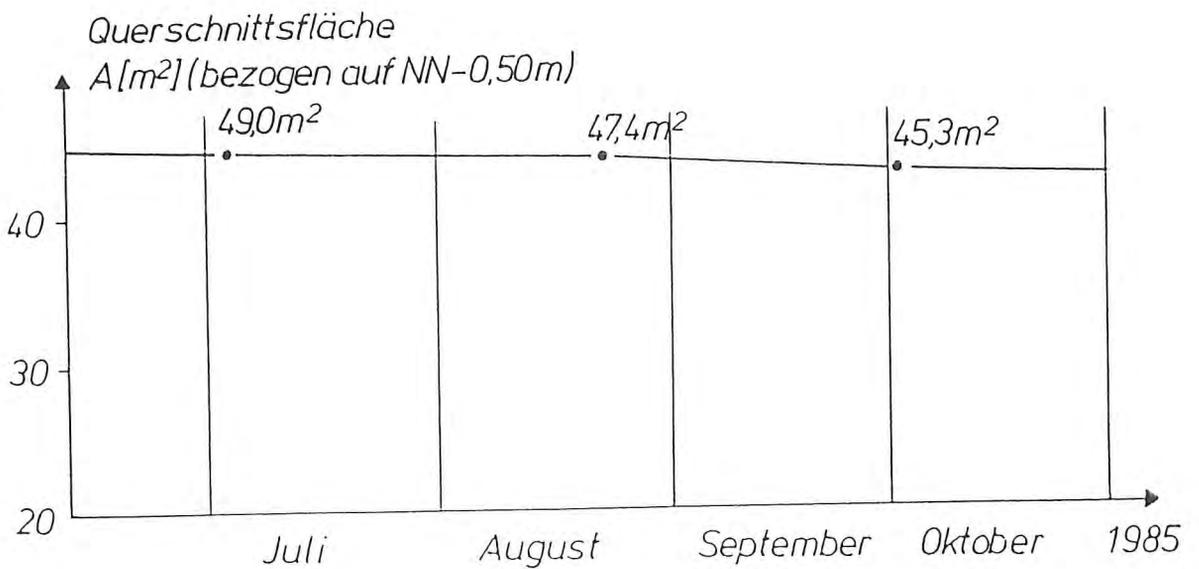
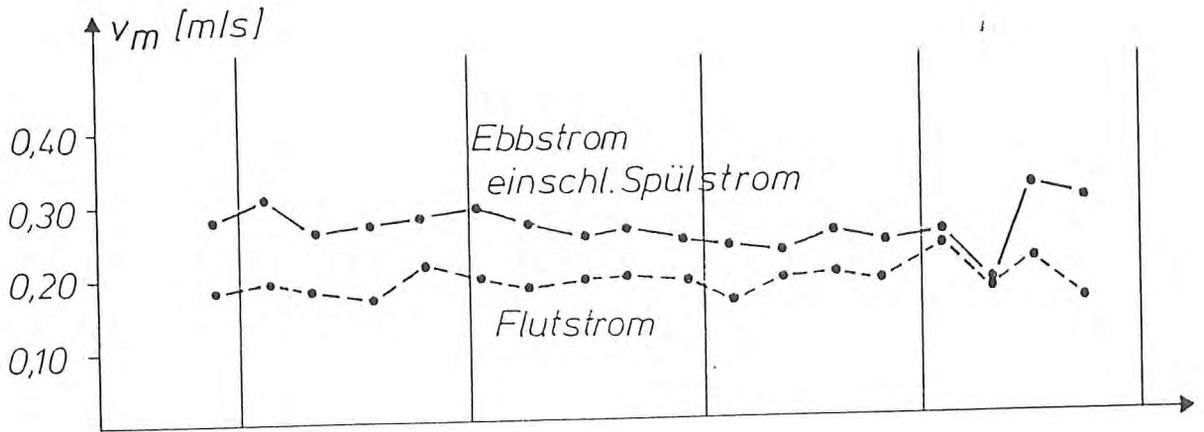
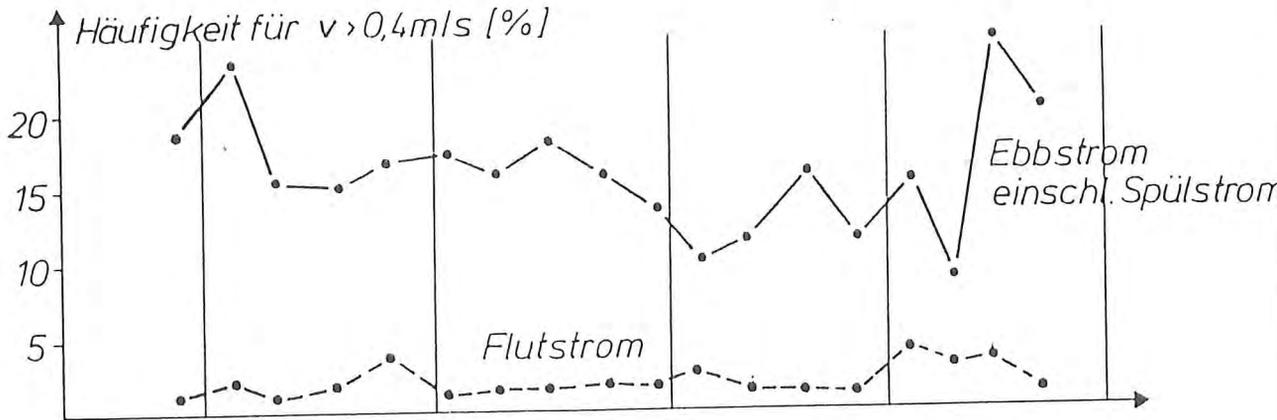


Abb. 7.9 Mittlere Fließgeschwindigkeit, Überschreitungshäufigkeit ($v > 0,4 \text{ m/s}$) und Querschnittsentwicklung an Meßstelle III

Die anhaltende Abnahme des Ebbstroms läßt vermuten, daß sich die hydrologischen Randbedingungen, die die Neßmersieler Balje als Vorfluter des Neßmersieler Außentiefs vorgibt, verändert haben.

Die Regressionsrechnungen der unbeeinflußten Tnw im Neßmersieler Außentief mit dem gewässerkundlichen Pegel Norderney oder dem Betriebspegel Baltrum bestätigen tatsächlich, daß die Außentief-Tnw in den Monaten Sept./Okt. 1985 wesentlich höher auflaufen als im Vorjahr (Abb. 7.10).

Setzt man in die Regressionsgleichung der vom Spülstrom unbeeinflußten Tnw-Werte von September 1984 für Norderney ein M_{Tnw} von PN + 3,74 m ein, so ergibt sich für Neßmersiel ein Tnw von PN + 3,73 m.

(M_{Thw} Norderney PN + 6,18 m ergibt für Neßmersiel PN + 6,33 m)

Für die vom Spülen unbeeinflußten Tnw-Werte von September 1985 ergibt sich mit dem Tnw = 3,74 m von Norderney ein Tnw = 3,85 m für Neßmersiel. Das sind + 12 cm Differenz gegenüber den Werten von 1984.

(M_{Thw} Norderney PN + 6,18 m ergibt für Neßmersiel PN + 6,32 m für die Werte von Sept. 85)

Die Abnahme der Ebbstromgeschwindigkeit, die auch die Spülströmung enthält, ist also auf eine Abflachung der Tidekurve im Tnw-Bereich zurückzuführen. Infolge der erhöhten Tnw verringert sich also die Spülströmung und deren Räumwirkung, so daß die Außentiefquerschnitte wieder flacher werden.

Der Zustand des Außentiefs wird ganz wesentlich von den morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten der vorgelagerten tiefen Wattrinne geprägt und gesteuert. Dementsprechend muß die Bemessung einer Spülanlage auf die aktuellen Tidedaten abgestimmt sein.

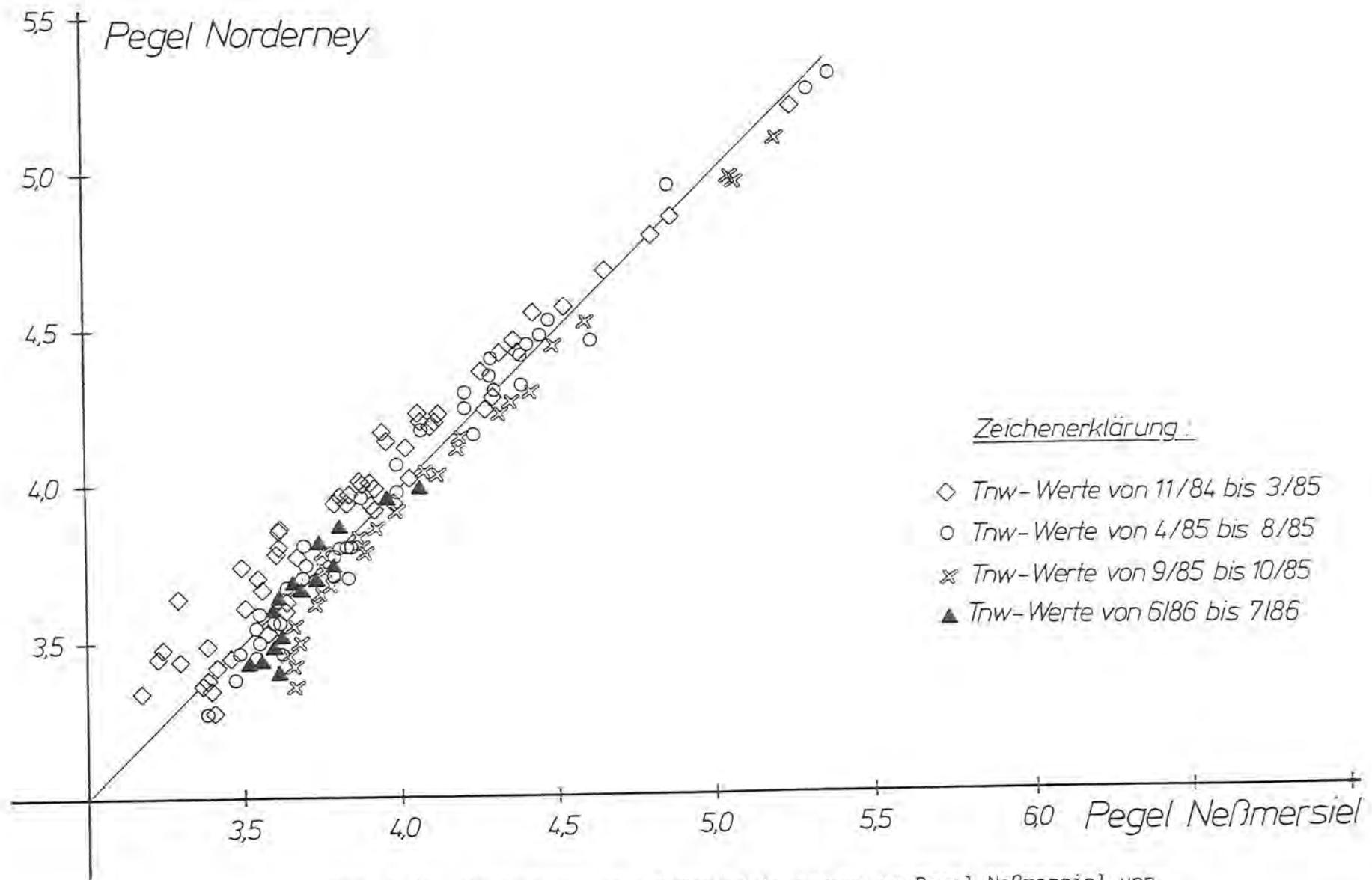


Abb. 7.10 Veränderung des Tideniedrigwassers am Pegel Neßmersiel von Nov. 1984 bis Juli 1986

Die erhöhten Tnw sind vermutlich zunächst auf die Verlandung der 8 ha großen Sandentnahmestelle im Einzugsgebiet der Neßmersieler Balje zurückzuführen, mit der eine entsprechende Abnahme des ein- und ausschwingenden Tidevolumens verbunden ist. Die veränderten Tideströmungen in der Neßmersieler Balje haben die morphologischen und auch hydrologischen Gegebenheiten verändert.

Die hydrologische Situation für das Neßmersieler Außentief hat sich zunächst Anfang des Jahres 1986 geringfügig verbessert. Das Tnw fiel z. B. im Juni/Juli 86 wieder tiefer ab als im Sept./Okt. 85 (Abb. 7.10). Die Sohlenlage des hafennahen Bereiches z. B. hat sich von etwa NN - 1,60 m zum Jahreswechsel 1985/86 auf NN - 1,70 m im Laufe des Jahres 1986 stabilisiert (Abb. 7.4). Im Jahre 1987 haben sich vor allem die auf den Horizont NN - 0,5 m bezogenen Querschnittsflächen vergrößert (Abb. 7.7). Möglicherweise deutet sich damit wieder eine günstigere Entwicklung an.

Mit diesen Dauermessungen konnte im übrigen nachgewiesen werden, daß der durch Spülung vergrößerte Querschnitt nur offengehalten werden kann durch jeweils mindestens 1,9 Std. dauernde Spülströme mit hoher Fließgeschwindigkeit von wesentlich mehr als 0,4 m/s. Vor allem gegen Ende des Jahres 1985 wurde diese Bedingung wegen der erwähnten ungünstigen hydrologischen Entwicklung für die vorhandenen Außentiefquerschnitte nicht erfüllt.

8. Sedimentation im Spülbecken

8.1 Schwebstoffmessung am Spülziel

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

Tideoffene Bodenentnahmestellen im Watt sind häufig bereits nach 3 bis 7 Jahren völlig verlandet. Z. B. war

die im Jahr 1979 im östlichen Neßmer Watt gebaggerte Sandentnahmestelle für den Hauptdeichbau im Jahre 1985 - also 6 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. 3.2) 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. 8.2) 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 = 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 Füllbetrieb nicht anzunehmen ist. Die 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 Schwebe und werden in Richtung Siel transportiert.

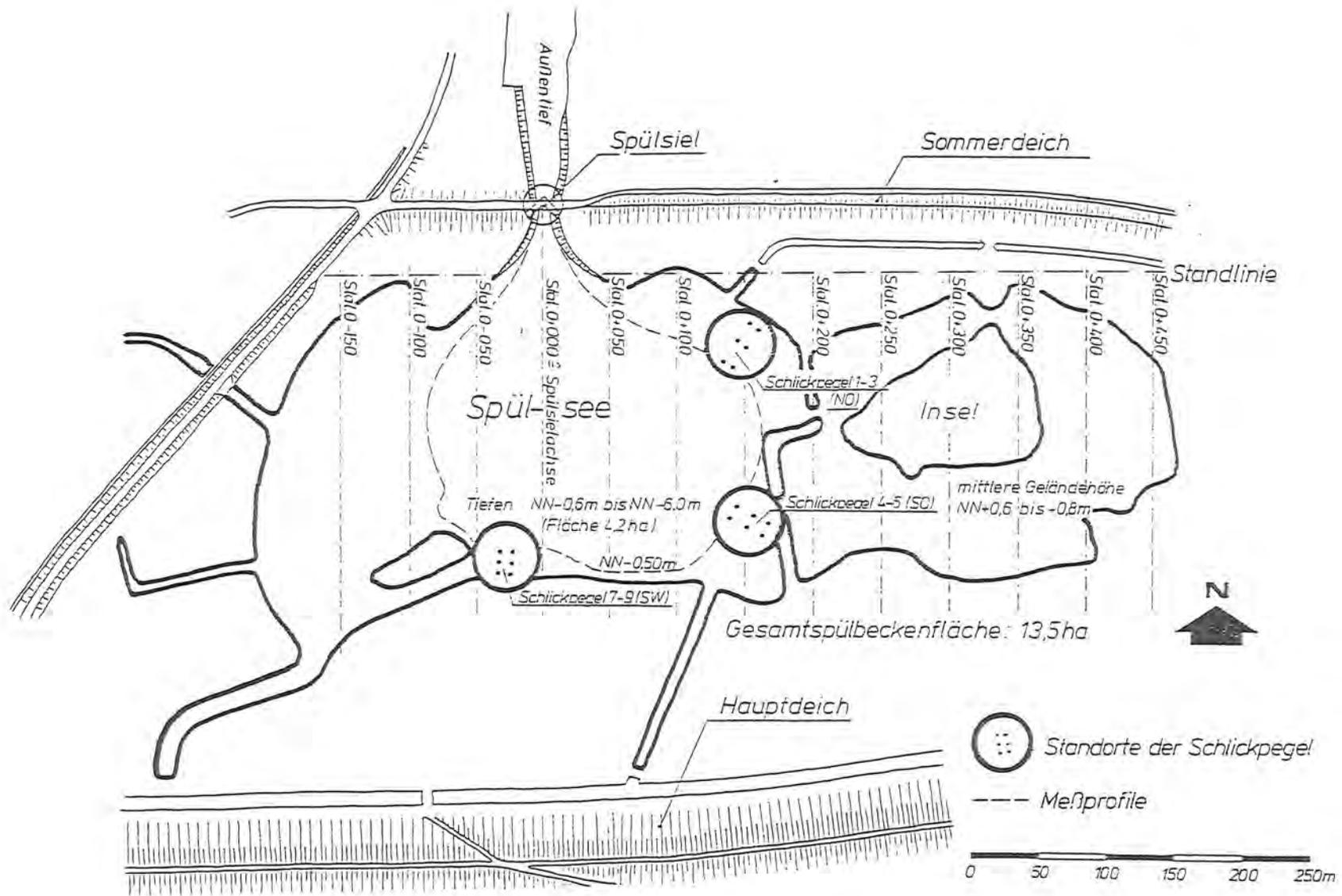


Abb. 8.1 Übersicht des Spülbeckens mit Lage der Schlickpegel und Meßprofile

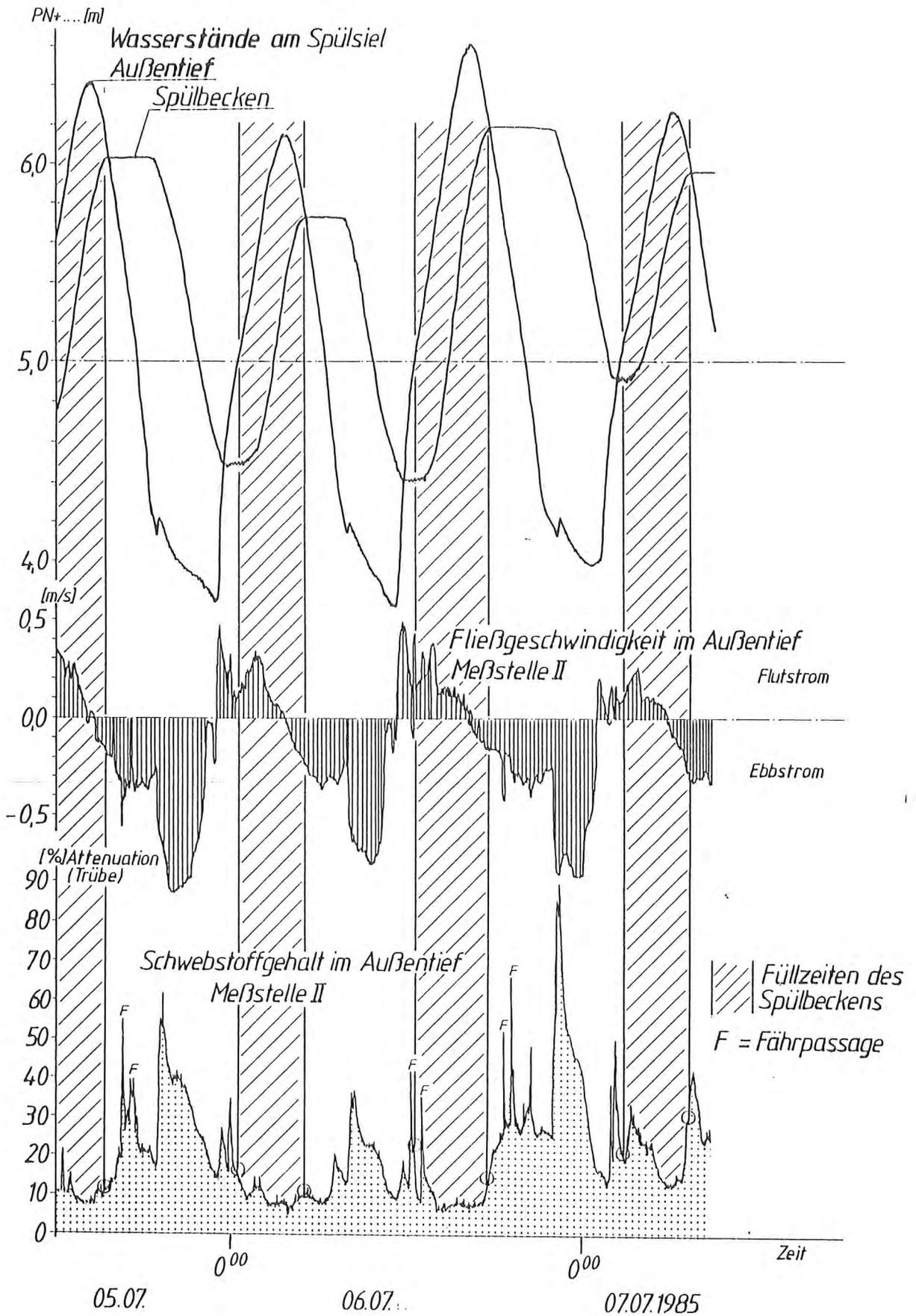


Abb. 8.2 Dauermessungen der Wasserstände, Fließgeschwindigkeit und des Schwebstoffgehaltes

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 weiter transportiert werden.

Im übrigen sind die am Spülsiel gemessenen Schwebstoffgehalte abhängig von den Witterungsbedingungen (s. auch Abschn. 5.24) und weisen stark unterschiedliche Werte auf, so daß sich die Spülbeckenverlandung aufgrund von nur 3 Monate andauernden Schwebstoffmessungen nicht abschätzen läßt, zumal die Mengenermittlungen aus optischen Meßwerten mit Unsicherheiten behaftet sind. Der Verlandungsfortschritt ist folglich aus den bisher meßbaren Werten der Auflandung zu extrapolieren.

8.2 Schlickpegelmessungen

Zur Überwachung der Spülbeckenverlandung werden regelmäßig

- Schlickpegelablesungen
- Nivellements und
- Peilungen in festlegten Profilen durchgeführt.

Die S c h l i c k p e g e l sind an drei trockenfallenden Bereichen des Spülbeckens jeweils in drei verschiedenen Höhenlagen aufgestellt worden (Abb. 8.1).

Sie bestehen aus zwei im Abstand von 2 m in den Boden eingedrehten Schraubpfählen mit einem horizontalen Schraubteller von ca. 30 cm Durchmesser (Abb. 8.3). Auf die Oberkante der gleich hoch aufragenden Pfähle wird beim Messen des Geländeniveaus eine Aluminiumlatte gelegt. Der Abstand zwischen der Unterkante dieser Latte und der Geländehöhe wird im monatli-

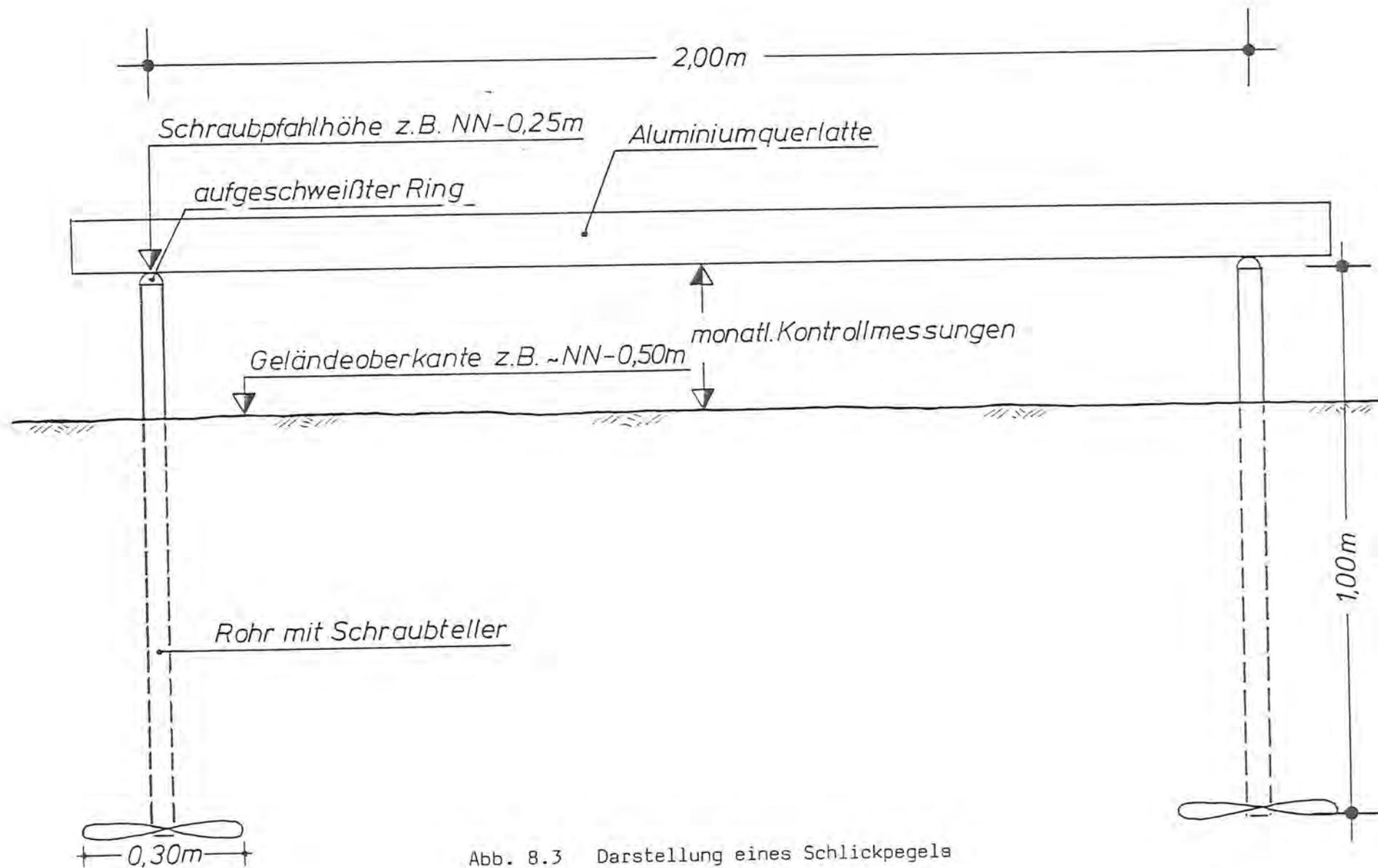


Abb. 8.3 Darstellung eines Schlickpegels

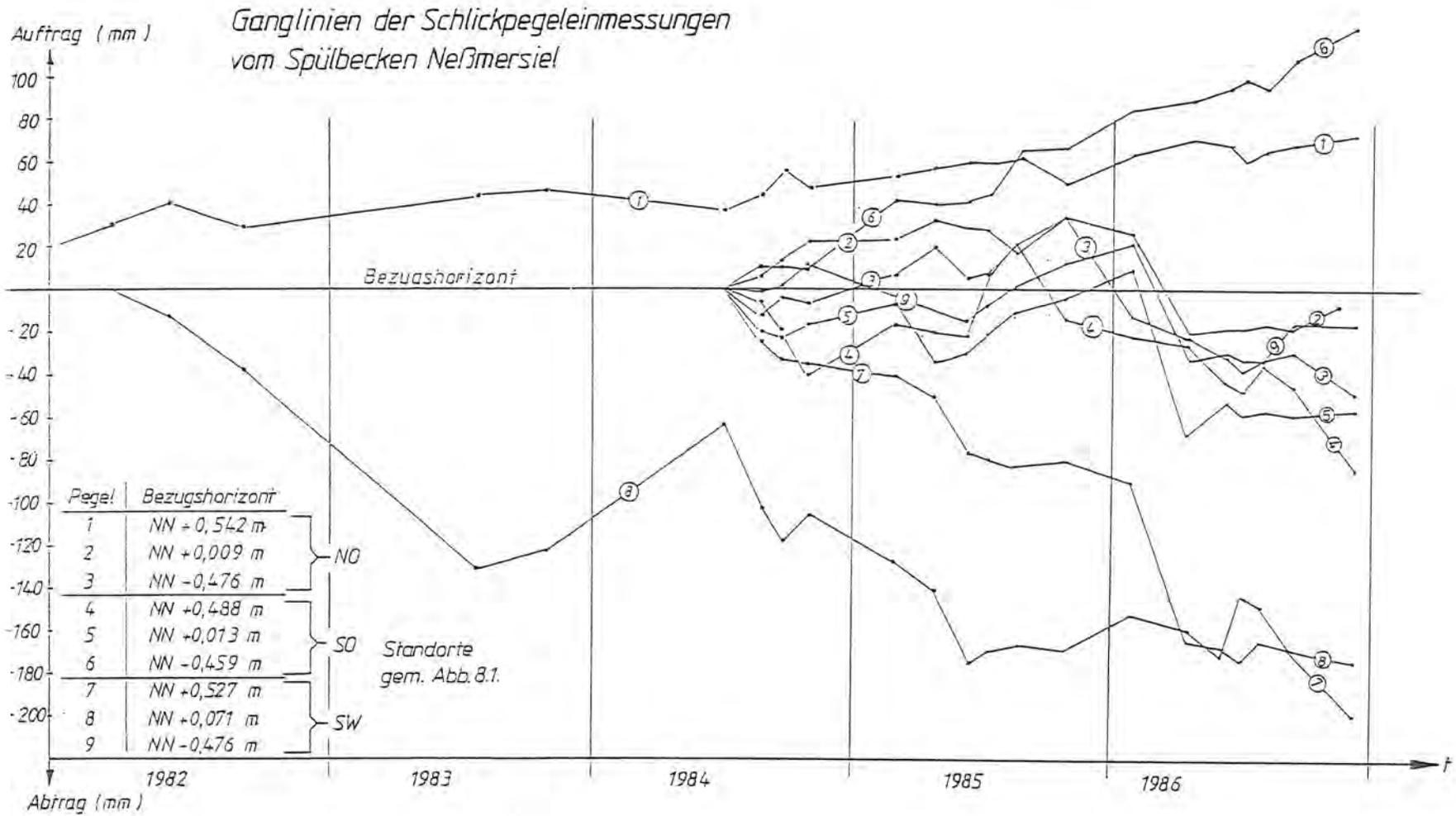


Abb. 8.4 Ganglinien der Schlickpegel­einmessungen im Spül­becken Neßmersiel

chen 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 (Abb. 8.4). Aus den Meßpunkten mit überwiegendem Abtrag ist zu schließen, 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. Unterschiede zwischen den in den Höhenlagen NN + 0,5 m, NN \pm 0 u. NN - 0,5 m angelegten Pegeln lassen sich nicht nachweisen. Die Schlickpegelmessungen ermöglichen sehr genaue Punktuntersuchungen. Einen besseren Gesamtüberblick bieten jedoch die Profilpeilungen.

8.3 Ergebnis aus Nivellements und Peilungen

Die Spülbeckenfläche wird in parallelen Profilen mit jeweils 50 m Abstand nivelliert und in der nicht trockenfallenden Fläche gepeilt (Abb. 8.1). 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. Der Aufsetzdruck der Meßlatte wird durch den Teller auf 1/50-tel abgemindert. Auf den höher gelegenen Flächen des Ostteils des Spülbeckens (um 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. Einerseits setzen sich hier infolge der jeweils wesentlich höheren Wasserbedeckung deutlich mehr Schwebstoffe ab, andererseits lagern sich hier auch noch die in höheren Zonen aufgewirbelten Sedimente ab.

Die Untersuchung der entnommenen Spülbeckensedimentproben ergibt sehr geringe Medianwerte der Korngrößen von 0,007 mm an den tiefsten Stellen des Sees und 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 (s. 6.4.1.3).

Zur Ermittlung des Verlandungsfortschritts werden die gemessenen Querschnittsflächen aus den vier Profilen des tieferen, nicht trockenfallenden Seebereiches 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 Regressionsgeraden sind auf Abb. 8.5 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 der bisher festzustellenden Verlandung wird diese Grenze in etwa

25 Jahren

nach dem Bezugsjahr 1982 erreicht (Abb. 8.5).

Bezogen auf eine Breite des verlandenden tieferen Spülbeckenbereiches von etwa 150 m beträgt das mittlere jährliche Verlandungsvolumen $2\,650\text{ m}^3$. Mit der mittleren jährlichen in das Spülbecken eingelassenen Wassermenge von rd. 36 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 $1,5\text{ t}/\text{m}^3$ angesetzt werden kann, beträgt die mittlere Feststoffkonzentration der in das Spülbecken eingelassenen Wassermengen

110 mg/l.

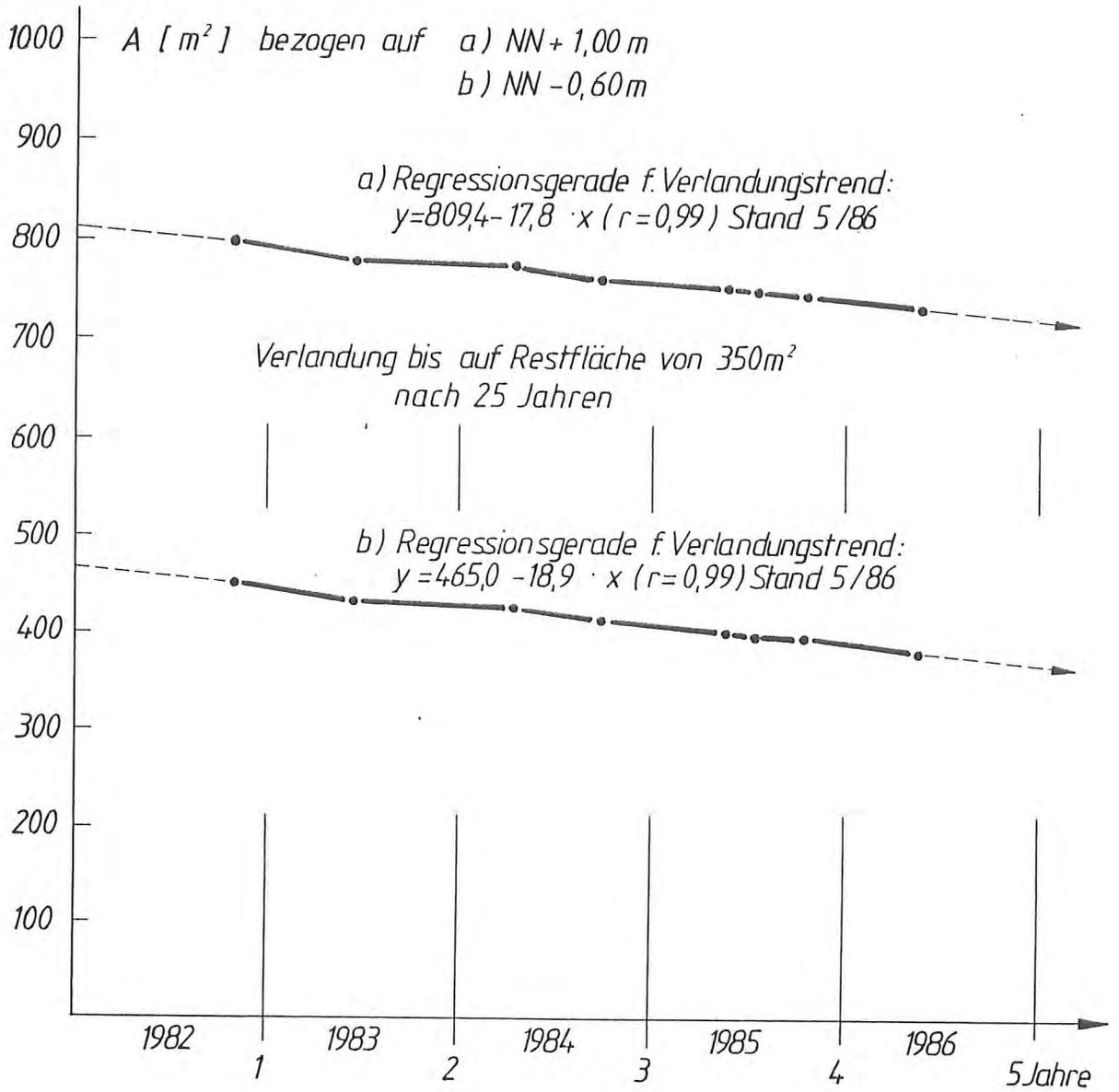


Abb. 8.5 Verlandungstrend des Spülbeckens

Aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes von 3 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.

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

9.1 Wirksame Spülströmung

9.1.1 Regelbetrieb

Die Untersuchungen haben ergeben, daß bei den Bodenverhältnissen im Neßmersieler Außentief (Körnungskurve s. Abb. 6.6 u. 6.7) nennenswerte Erosion des abgelagerten Bodenmaterials einsetzt bei einer

Fließgeschwindigkeit von $v_{krit} = 0,43$ m/s (Abb. 5.9)

Die Geschwindigkeit von

$v = 0,5$ m/s erzielt eine Schwebstofffracht von etwa 50 bis 200 mg/l.

Die Schwebstofffracht kann gesteigert werden

bei $v = 0,6$ m/s auf 200 bis 600 mg/l

$v = 0,8$ m/s auf 300 bis 900 mg/l

(s. Abschn. 5.2.2).

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

9.1.2 FrISCHE Schlickablagerungen

FrISCHE, weiche und ungefestigte Schlickablagerungen werden bereits von wesentlich geringeren Strömungen aufgenommen.

In Neßmersiel konnten hierfür als kritische Geschwindigkeit

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

ermittelt werden.

Der Schwebstoffgehalt kann bereits bei $v = 0,3$ m/s Werte von etwa 100 bis 300 mg/l erreichen.

9.1.3 Räumbooteinsatz als Sondereinsatz

Beim Räumbooteinsatz wird unterschieden zwischen Sondereinsatz und regelmäßigem Einsatz. Der Sondereinsatz beschreibt Fälle, wo die regelmäßige Räumung durch Spülströmung aus besonderer Spülanlage wie in Neßmersiel oder durch Sielzug bzw. Schöpfwerksbetrieb einschl. des Abflusses aus dem Wattgebiet in etwa ausreicht. Für den "Frühjahrsputz" nach längerer Räumpause und dgl. wird dann in Sondereinsätzen das Räumboot zur Wiederherstellung des normalen Außentiefprofils eingesetzt. Die im Normalfall ausreichende Spülströmung ermöglicht auch beim Räumbooteinsatz häufig hohe Fließgeschwindigkeiten wie im Falle Neßmersiel (Abschn. 6).

Bereits bei Fließgeschwindigkeiten von

$v = 0,2$ bis $0,3$ m/s tritt ein Räumeffekt ein. Wirksamer sind Geschwindigkeiten

$0,4$ bis $0,6$ m/s mit Schwebstofffrachten von 600 bis $1\ 400$ mg/l
und $> 0,6$ m/s mit Schwebstofffrachten von 700 bis $9\ 000$ mg/l.

Am 26.5.86 passierten z. B. bei derartigem Räumbooteinsatz mit Fließgeschwindigkeiten bis etwa $v = 1,1$ m/s 300 t Material in $3,5$ Std. seewärts die Meßstelle III (Abb. 6.14).

Der Räumbooteinsatz sollte dabei stets 1 Std. und bei längerem Außentief und geringeren Spülströmungen noch früher vor der Stromkenterung auf Flutstrom beendet werden, damit das aufgewirbelte Material von der beginnenden Flut nicht wieder sielwärts verfrachtet wird, sondern sich - möglichst weit außerhalb des Außentiefs - zunächst absetzen kann.

9.1.4 Regelmäßiger Räumbooteinsatz

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

Räumbooteinsatz ist immer dann hilfreich, wenn mindestens Fließgeschwindigkeiten von 0,2 bis 0,3 m/s im Außentief auftreten. Zu bedenken ist, daß die Schwebstofffracht bei $v = 0,25$ m/s nur 900 m in einer Stunde zurücklegt. Bei langen Außentiefs sollte abschnittsweise geräumt werden, wobei man z. B. mit 1 bis 2 km langen Abschnitten von außen beginnt und "Platz schafft", sich sielwärts vorarbeitet und am Schluß dann wieder seewärts den Weitertransport abschnittsweise mit dem Räumboot besorgt. Dabei ist ein rechtzeitiges Beenden des Einsatzes mind. 1 Std. vor Tnw wichtig, damit die Schlickaufwirbelung nicht als "Fütterung" des Flutstroms fehlschlägt.

Auch das in Abhängigkeit von der Tide möglichst frühe Einlaufen der Fischkutter und ggf. Fahrgastschiffe während der Flut wirkt sich durch den damit einhergehenden landseitigen Transport negativ aus. In dieser Wirkung liegt auch der Grund für das abschnittsweise von außen beginnende Räumen. Damit wird vermieden, daß die Ablagerungen in dem ungeräumten engen Querschnitt des seewärts anschließenden Abschnitts wieder voll von den Schiffen landwärts transportiert werden. Zur Erhöhung der Räumströmung empfiehlt es sich ggf., eine Spülanlage nach dem Muster "Neßmersiel" anzulegen. Schon bei erzielbaren Strömungen von $v \geq 0,3$ m/s ist die Anlage von Nutzen.

9.1.5 Spüldauer

Nach den Erfahrungen von dem 1,5 km langen Neßmersieler Außentief sollte die Spüldauer möglichst 2 Stunden oder mehr betragen. Diese Dauer gewährleistet, daß die Schwebstofffracht zum großen Teil bis außerhalb des Außentiefs transportiert wird. Ein Abfall der Fließgeschwindigkeit vor Einsetzen des Flutstroms verringert den Schwebstoffgehalt und damit den Materialtransport landwärts bei einsetzendem Flutstrom. Bei längeren Außentiefs und geringen Spülströmungen ist eine längere Spüldauer anzustreben.

9.1.6 Spülbetrieb oder Gegenstau

Die Untersuchungen in Neßmersiel haben eindeutig ergeben, daß bei den dortigen Bodenverhältnissen und Schlickablagerungen ein Spülbetrieb in den letzten 2 bis 3 Stunden vor Tnw wesentlich wirksamer ist als ein Gegenstaubetrieb, bei dem der Spülstrom später einsetzt und den einsetzenden Flutstrom zunächst noch wirksam bremst. Ein rechtzeitiges Beenden des Spülens ist bereits unter 9.1.5 gefordert und begründet worden.

9.2 Spülbeckengestaltung

Der erforderliche Inhalt ergibt sich aus der zu erzielenden Räumstromgeschwindigkeit nach Abzug des Anteils aus den Abflüssen vom Wattgebiet (v), dem zu räumenden Außentiefquerschnitt (A) und der Spüldauer (t). Zu diesem für die Spülung verfügbaren Volumen ist der im Becken verbleibende Inhalt zum Gesamtvolumen zu addieren. Die Erfahrungen mit Neßmersiel lehren uns:

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

- Ein großes Tiefbecken hat den Vorteil, daß es das trotzdem eintreibende und sich ablagernde Material für lange Zeit aufnehmen kann (in Neßmersiel lt. Abschn. 8 für voraussichtlich 25 Jahre). Sollte es dann ausgebaggert werden müssen, so sind die Kosten im Vergleich zu ständigen Baggerkosten für das Außentief verschwindend gering aus folgenden Gründen: Nur ausnutzbarer Ablagerungsraum und keine gerätemäßig bedingte Übertiefe wird gebaggert; das Baggern wird nicht im schmalen Profil mit ständigen Störungen durch Schiffspassagen durchgeführt; die günstigste Ausführungszeit kann dem Unternehmen überlassen werden; Baggerbetrieb und Spülleitungsbau sind wesentlich einfacher.
- Der flache Spülbeckenteil kann vorzüglich als Vogelrast- und -nahrungsgebiet, mit Insel sogar als Brutgebiet, gestaltet werden, da die Tideerscheinung in etwa antizyklisch zum Watt abläuft und das Wattengebiet daher günstig ergänzt.

9.3 Spülsielbemessung

Das Spülsiel ist so zu bemessen, daß die gewünschte wirksame Spülströmung erzeugt und auch die angestrebte möglichst hohe Füllung des Spülbeckens erreicht werden kann. Bewährt hat sich ein Doppelschütz.

Die untere Schütztafel dient dem Ausströmen für's Spülen. Eine Schützöffnung von 0,8 m, und bei größerer Auffüllhöhe von 0,70 m, hat sich in Neßmersiel im Hinblick auf Räumströmung und Räumdauer als Optimum erwiesen.

Die obere Schütztafel wird für den Füllvorgang während der zweiten Fluthälfte gezogen, da dann der Schwebstoffgehalt relativ gering ist. Die untere Schütztafel wird dabei überströmt. Ihre Oberkante ist daher sowohl für die Höhe der Ausströmöffnung als auch für die Größe der Einströmöffnung wichtig. Ein rechtzeitiger Füllbeginn sichert einen ausreichend hohen Füllungsgrad des Spülbeckens. Für Neßmersiel

hat sich herausgestellt, daß eine Oberkante des unteren Schützes von etwa PN + 4,80 m angestrebt werden sollte. In einem unter 10. ausgeführten Rechenbeispiel werden die Einzelheiten der Spülsielbemessung angegeben.

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

10. Auswertung der Forschungsergebnisse zur Verbesserung vorhandener und Bemessung neuer Spülanlagen

10.1 Mögliche Verbesserungen für die Spülanlage in Neßmersiel

Die Wirksamkeit der Spülanlage Neßmersiel kann ohne große bauliche Eingriffe noch verbessert werden durch

- einen höheren Spülbeckenwasserstand bei Spülbeginn,
- eine frühere Beendigung des Spülvorganges, um eine größere Restspeichermenge zu halten und dadurch die erforderliche Füllwassermenge zu verringern. Das wiederum ermöglicht einen höheren Füllwasserstand.
- eine größere Füllwassermenge.

10.1.1 Erhöhung der Füllwassermenge durch niedrigere Einlaufschwelle

Ein höheres Füllen des Speichers ergibt eine größere Speichermenge und gleichzeitig - besonders während der ersten Spülphase - ein größeres Druckgefälle und damit größeren Durchfluß durch das Spülsiel. Es ist daher ein Spülbeckenwasserstand von PN + 6,20 m bei Spülbeginn anzustreben. Ohne große bauliche Änderungen läßt sich dieses erreichen, wenn die Überfallkante des unteren Schützes tiefer gelegt wird. Eine Höhe des unteren Schützes von 80 cm mit Überfallkante auf NN - 20 cm wäre für den Spülbetrieb ausreichend. Eine größere Schützöffnungsweite als 80 cm ist für Neßmersiel nicht zu empfehlen, da dann bei dem vorhandenen Spülvolumen die Spülzeit zu kurz werden würde und andererseits unerwünscht hohe Fließgeschwindigkeiten eintreten. Diese niedrige Einlaufschwelle ermöglicht einen stärkeren Füll-Durchfluß und somit einen höheren Spülbeckenwasserstand.

Füllwassermenge bei einer Überfallhöhe von NN - 0,20 m:

$$Q = c \cdot 2/3 \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_u^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q = c \cdot 2/3 \cdot 0,6 \cdot 4,50 \cdot 4,43 \cdot h_u^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q = c \cdot 7,97 \cdot h_u^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Darin ist h_u die Überfallhöhe und μ der Beiwert.

Für die Berechnung von h_u und von c (Beiwert für den unvollkommenen Überfall) ist vereinfacht der Spülbeckenwasserstandsanstieg aus Pegelmessungen für eine Überfallhöhe von $NN + 10$ cm angesetzt worden. Aus der hieraus berechneten Volumenzunahme ist dann mit Hilfe der Speicherinhaltslinie wiederum der Anstieg des Spülbeckenwasserstandes ermittelt worden. Aus diesen aktuellen Spülbeckenwasserständen könnte dann wieder h_u und c berechnet werden und damit die Volumenzunahme korrigiert werden. Diese Iteration kann solange durchgeführt werden, bis sich die Spülbeckenwasserstände nicht mehr ändern. Auf diese Näherungsrechnung ist hier allerdings verzichtet worden, da die Ausgangswerte, wie z. B. Speicherinhaltslinie und c -Beiwert in Abhängigkeit von der Schützoberkante, schon relativ ungenau sind. Somit ist der in Tab. 10.1 mit Hilfe der beiwertbehafteten Wehrformel ermittelte Spülbeckenwasserstand als hinreichend genau anzusehen.

Bei einem Spülbeckenwasserstand von $PN + 4,80$ m ergibt sich nach der Speicherinhaltslinie ein Volumen von $33\,500\text{ m}^3$. Addiert man hierzu die in der Tabelle ermittelten Einzelvolumina, die für die einzelnen Zeitabschnitte bis zu einem Außenwasserstand von $PN + 6,20$ m nach Hochwasser in das Spülbecken hineingelassen werden, errechnet sich ein Gesamtvolumen von $152\,500\text{ m}^3$, entsprechend einem Spülbeckenwasserstand von $PN + 6,24$ m.

Wasserstand Außentief (PN +m)	Wasserstand Spülbecken (PN +m)	h _ü (m)	z/h _ü	c	Q = $c \cdot 7,97 \cdot h_{\text{ü}}^{3/2}$ (m ³ /s)	Zeit (s)	ΔV (m ³)	Wasserstand Spülbecken aus Speicherinhaltslinie (PN +m)
5,10								
5,20		0,35	0	1,0	1,65	770	1271	
5,30		0,45	0	1,0	2,41	900	2169	
5,40	4,80	0,55	0	1,0	3,25	900	2925	4,80
5,50	4,90	0,65	0,08	1,0	4,18	780	3260	4,88
5,60	5,00	0,75	0,20	1,0	5,18	720	3427	4,94
5,70	5,10	0,85	0,29	1,0	6,25	650	3653	5,01
5,80	5,20	0,95	0,37	0,99	7,31	680	4264	5,09
5,90	5,35	1,05	0,45	0,99	9,13	720	6576	5,21
6,00	5,50	1,15	0,54	0,98	9,63	720	6935	5,33
6,10	5,65	1,25	0,62	0,95	10,58	1080	11428	5,53
6,20	5,84	1,35	0,70	0,93	11,63	1620	18835	5,77
6,30	5,95	1,45	0,76	0,90	12,52	2520	31561	6,02
6,20	6,00	1,45	0,83	0,83	11,55	2520	29106	6,24

h_ü = Überfallhöhe

z = Stauhöhe Spülbeckenwst. üb. OK Schütz

c = Abminderungsbeiwert für unvollkommenen Überfall

ΔV = Füllvolumen des Berechnungsabschnitts

Tab. 10.1 Berechnungstabelle für den Füllvorgang

10.1.2 Frühes Spülende ermöglicht erhöhten Spülbeckenwasserstand

Um das Spülbeckenvolumen besser nutzen zu können, empfiehlt es sich, das Spülen zu beenden, wenn der Spülbeckenwasserstand etwa bis auf NN abgefallen ist.

Nach Abb. 3.8 liegt der Durchfluß bei einem Spülbeckenwasserstand unter NN auch bei einer großen Schützöffnung von 80 cm unter $6 \text{ m}^3/\text{s}$, die Spülzeit beträgt nach Abb. 3.7 bei einer Schützöffnung von 80 cm gut 2 Stunden und bei einer Schützöffnung von 70 cm ca. 3 Stunden. Diese Spülzeiten gelten für einen Spülbeckenwasserstand von PN + 6,10 m bei Spülbeginn, verlängern sich also noch für ein randvoll gefülltes Spülbecken.

Der Vorteil dieses frühen Spülendes ist, daß das Spülbecken beim nächsten Füllvorgang auf PN + 6,30 m gefüllt werden kann, wenn das MThw im Außentief nicht unterschritten wird. Somit stehen für den nächsten Spülbetrieb zwischen den Spülbeckenwasserständen PN + 6,30 m und PN + 5,00 m theoretisch ca. $117\,000 \text{ m}^3$ Spülwasser zur Verfügung. Die Schützöffnungsweite kann in diesem Fall auf etwa 70 cm verringert werden, da das höhere Druckgefälle bei gleicher Öffnungsweite zu einem höheren Durchfluß führt. Andererseits zeigten die Naturmessungen, daß das Spülwasser, welches nach Erreichen des Spülbeckenwasserstandes NN herausläuft, nur noch geringe Auswirkung auf den Räumvorgang im Außentief hat.

Die Grenzwerte des unter Abb. 3.5 angegebenen Ablaufdiagramms für die automatische Spülsielsteuerung durch Mikroprozessor sind nach diesen Erkenntnissen einzustellen.

10.1.3 Vergrößerung der Spülwassermenge durch Vertiefung der Spülbeckenrandzone

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 Win-

ter 1985/86 erwiesen, als beispielsweise bei einem Speicherpeil von NN + 0,6 m - das sind 40 cm unter dem MHW-Peil - das Spülbecken nur noch 40 000 m³ Spülwasser faßte. 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.

10.2 Beispiel für eine Bemessung einer Spülanlage

10.2.1 Allgemeines

Bevor eine Entwurfsbemessung durchgeführt werden kann, sind die hydrologischen und morphologischen Parameter sowie die Bemessungsparameter zu bestimmen.

Folgende wichtigsten Parameter werden benötigt:

- Hydrologie und Morphologie des Wateinzugsgebietes des Außentiefs
 - Tidewasserstände)
 - Wateinzugsgebietsgröße) Tidevolumen
 - Wathöhenrelief)

- Außentiefparameter (Soll- und Bemessungsparameter)
 - Länge bis zum tiefen Wattstrom (etwa bis zur Tiefenlinie NN - 3,0 m)
 - Querschnittsflächen (Abschätzung aufgrund morphologischer Zusammenhänge)
 - Sohlhöhe
 - Fließgeschwindigkeit (natürliche)
 - Sedimentbewegungen

- Steuerungsparameter des Spülsiels

- Spül- und Füllbeginn)
- Spülwassermenge) Steuerungsautomatik
- Füllwassermenge)
- Spül- und Füllzeiten)

- Abmessungen des Spülsiels und Speicherbeckens

a) Spülsiel:

- Breite und Höhe des Aus- bzw. Einlaßschützes
- Sohlhöhe des Siels
- Höhenlage der Schützoberkante (Füllbetrieb)

b) Speichersee:

- Bewirtschaftungshöhe) Seefläche und Höhenstufen
- Speichervolumen) des Sees

Im Rahmen der eigentlichen Entwurfsbemessung ist z. B. wie folgt vorzugehen:

Der für die Schifffahrt oder Entwässerung erforderliche Querschnitt eines Außentiefs oder einer Hafenzufahrt sind vorzugeben. Dabei sind morphologische Zusammenhänge zu berücksichtigen.

Aus den Untersuchungen im Neßmersieler Außentief geht hervor, daß für die Räumung des Außentiefs eine Mindestspülgeschwindigkeit zu fordern ist, die 0,5 m/s wesentlich überschreitet. Die Überschreitungsdauer sollte mindestens ca. 2 Stunden betragen.

Die kritische Geschwindigkeit von 0,4 bis 0,5 m/s ist u. a. abhängig vom Korndurchmesser, von der Lagerungsdichte und ggf. von einer vorhandenen Kohäsion bzw. biologischen Verfestigung (Führböter, 1983). Die Untersuchung von Sedimentproben aus dem Neßmersieler Außentief ergab z. B. mittlere Korndurchmesser zwischen 0,06 und 0,11 mm. In anderen Bereichen mit abweichender Sedimentbeschaffung kann entsprechend die kritische Geschwindigkeit höher oder tiefer liegen, daher kann hier keine allgemeingültige kritische Geschwindigkeit angegeben werden. Sie muß in jedem Einzelfall gesondert bestimmt

werden.

Bei diesem Bemessungsvorschlag wird davon ausgegangen, daß eine Fließgeschwindigkeit von 0,6 m/s 2 Stunden lang nicht unterschritten werden darf. Aus der geforderten Querschnittsfläche und der Geschwindigkeit ergibt sich der Durchfluß (m^3/s), der im Bemessungsansatz wegen der Fließverluste (Rauigkeit etc.) etwas höher angesetzt werden sollte. Diese Wassermenge muß aus dem Spülbecken und dem natürlichen Wateinzugsgebiet zur Verfügung gestellt werden. In dieser überschlägigen Bemessung wird der Zufluß aus dem natürlichen Wateinzugsgebiet vernachlässigt. Wird nur mit der Wassermenge aus dem Spülbecken gerechnet, steht das Volumen aus dem Einzugsgebiet noch als gewisse Reserve zur Verfügung. In einem hydrodynamisch-numerischen Modell sollten diese Randbedingungen aus dem Einzugsgebiet berücksichtigt werden. Für den Bemessungsansatz werden weitere Parameter benötigt:

Für einen einfachen Geschwindigkeitsnachweis in einem angestrebten Außentiefquerschnitt wird hier die Manning-Strickler-Formel angewandt. Dafür ist der Rauigkeitsbeiwert k abzuschätzen.

- Der Rauigkeitsbeiwert k nach Manning-Strickler liegt während des Spülbetriebs im Neßmersieler Außentief zwischen $k = 40$ und $k = 50$ für ein vom Schlick freigespültes Außentief. Dieses entspricht einer festen, regelmäßigen Sohle aus Sand mit etwas Ton (Definition nach Wendehorst).

Für die Berechnung empfiehlt sich,

- ein langes Außentief in Einzelabschnitten von etwa 500 m Länge zu unterteilen,
- den Wasserstand am seeseitigen Außentiefende (1. Berechnungsabschnitt) bei Spülbeginn nach der mittl. Tidekurve (z. B. 2,7 Stunden vor T_{NW}) anzusetzen (Abb. 3.9).

Dem vorgegebenem Außenwasserstand wird eine geschätzte Höhendifferenz (z. B. 10 cm) addiert, um den Wasserstand am anderen Ende des 1. Berechnungsabschnitts und damit das Gefälle zu erhalten. Der mittlere Wasserstand dieses Berechnungsabschnitts ergibt sich dann aus dem bekannten Wasserstand plus halber

Höhendifferenz, aus dem sich dann die Querschnittsparameter berechnen lassen.

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

$$I = \frac{Q^2/A^2}{k^2 \times R^{4/3}}$$

$$R = A/U \text{ (m)}$$

$$\Delta h = I \cdot dL \text{ (m)}$$

$$p_l = p + \Delta h/2 \text{ (m PN)}$$

mit:	I	Gefälle
	Q	Abfluß (m ³ /s)
	A	Querschnittsfläche (m ²)
	k	Rauhigkeit (m ^{1/3} /s)
	R	Hydraulischer Radius (m)
	Δh	Höhendifferenz des Wasserspiegels im Berechnungsabschnitt (m)
	dL	Länge des Berechnungsabschnitts (m)
	p	Wasserstand am seeseitigen Ende des Berechnungsabschnitts (m PN)
	p _l	Mittlerer Wasserstand im Berechnungsabschnitt (m PN)

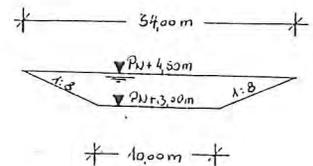
Aus dem mittleren Wasserstand p_l ergeben sich die neuen Querschnittsparameter A und U. Damit wird erneut iteriert, bis sich Δh kaum noch ändert. Mit den dann endgültigen Parametern I, A und U errechnet sich die Fließgeschwindigkeit $v = k \cdot I^{1/2} \cdot (A/U)^{2/3}$ (m/s) in diesem Berechnungsabschnitt.

Dementsprechend wird beim nächsten Berechnungsabschnitt vorgegangen, wobei der Wasserstand am seeseitigen Ende dieses Berechnungsabschnitts dem Wasserstand am landseitigen Ende des vorherigen Berechnungsabschnitts entspricht. Es empfiehlt sich, den Rechenvorgang zu programmieren und mit einem PC abzuwickeln.

Mit dieser Iterationsrechnung wird unter den getroffenen Annahmen überschlägig nachgewiesen, daß im gesamten Außentief die geforderte Fließgeschwindigkeit eingehalten werden kann. Nach dem hierzu erforderlichen Durchfluß Q (m^3/s) ist das Spülziel und Spülbecken zu dimensionieren.

10.2.2 Rechenbeispiel für den Nachweis der erforderlichen Fließgeschwindigkeit im angestrebten Außentiefquerschnitt

angenommener vereinfachter Querschnitt:



$$A = 10 \cdot 1,5 + 12 \cdot 1,5 = 33 \text{ m}^2$$

$$U = 10 + 2 \sqrt{1,5^2 + 12^2} = 34 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{U} = \frac{33}{34} = 0,97 \text{ m}$$

geforderte Fließgeschwindigkeit:

$v = 0,6 \text{ m/s}$ über 2 Stunden (s. o.)

Rauhigkeitswert nach Manning:

$k = 50$ (s.o.)

Länge der Berechnungsabschnitte: $dL = 500 \text{ m}$

Wasserstand am seeseitigen Außentiefende

(Anfang des 1. Berechnungsabschnitts): $PN + 4,50 \text{ m}$

Wasserstandsdifferenz im 1. Berechnungsabschnitt (geschätzt):

$\Delta h = 0,10 \text{ m}$

$$p_l = p + \frac{\Delta h}{2} = 4,50 + \frac{0,10}{2} = 4,55 \text{ m}$$

(mittlerer Wasserstand im Berechnungsabschnitt).

$$A = 10 \left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right) + 8 \left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = 34,72 \text{ m}^2$$

$$U = 10 + 2 \sqrt{\left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right)^2 + \left(8 \cdot \left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right)\right)^2} = 35,0 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{U} = \frac{34,72}{35,0} = 0,99 \text{ m}$$

$$Q = v \cdot A = 0,6 \cdot 34,72 = 20,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

Da im Außentief Fließverluste auftreten, wird hier ein Q von $22 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen.

$$I = \frac{Q^2/A^2}{k^2 \cdot R^{4/3}} = \frac{22^2/34,72^2}{50^2 \cdot 0,994^{4/3}} = \frac{0,40}{2467} = 0,00016$$

$$\Delta h = I \cdot dL = 0,00016 \cdot 500 = 0,08 \text{ m}$$

$$p_l = p + \frac{\Delta h}{2} = 4,50 + \frac{0,08}{2} = 4,54 \text{ m}$$

$$U = 10 + 2 \sqrt{\left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right)^2 + \left(8 \cdot \left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right)\right)^2} = \underline{34,8 \text{ m}}$$

$$A = 10 \left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right) + 8 \left(1,5 + \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = \underline{34,37 \text{ m}^2}$$

$$R = \frac{A}{U} = \frac{34,37}{34,8} = \underline{0,99 \text{ m}}$$

$$I = \frac{22^2/34,37^2}{50^2 \cdot 0,99^{4/3}} = \frac{0,41}{2467} = \underline{0,00017}$$

$$\Delta h = I \cdot dL = 0,00017 \cdot 500 = 0,08 \text{ m}$$

Δh ändert sich nicht mehr - Iteration des 1. Berechnungsabschnitts beendet.

$$v = k \cdot I^{1/2} \cdot R^{2/3} = 50 \cdot 0,00017^{1/2} \cdot 0,99^{2/3} = \underline{0,65 \text{ m/s}}$$

Die oben geforderte Geschwindigkeit von 0,60 m/s kann in diesem Berechnungsabschnitt eingehalten werden.

2. Berechnungsabschnitt

$$p = 4,50 \text{ m} + 0,08 \text{ m} = \underline{4,58 \text{ m}}$$

(Wasserstand am seeseitigen Ende dieses Berechnungsabschnitts muß dem Wasserstand des hier anschließenden 1. Berechnungsabschnitts entsprechen).

$$\Delta h_{\text{geschätzt}} = 0,10 \text{ m}$$

$$V_{\text{min}} = 0,60 \text{ m/s}$$

Rechenablauf wie im 1. Berechnungsabschnitt usw.

Fortsetzung der Berechnung für weitere Zeitabschnitte

10.2.3 Dimensionierung des Spülziels (Beispiel):

Bedingungen und Parameter:

$Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ sollen mindestens 1,5 Stunden zur Verfügung stehen.

Die gesamte Spülzeit soll mindestens 2,5 Stunden betragen.

MH_w Speicher : PN + 6,20 m

MN_w Speicher : PN + 4,80 m

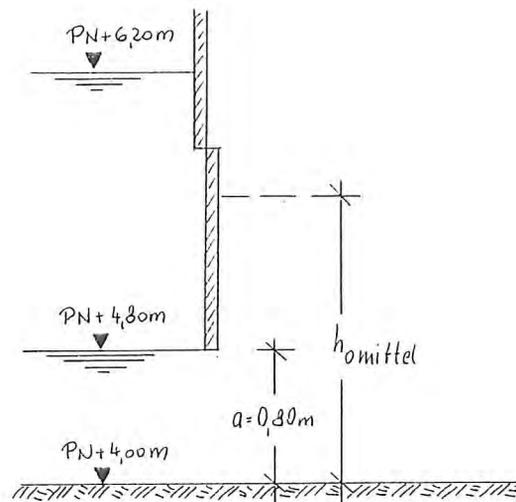
...

Rechnung:

$$h_{o\text{mittel}} = (6,20 + 4,80) \cdot 0,5 - 4,0 = 1,50 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{\epsilon}{\sqrt{1 + \epsilon \cdot a/h_0}} \quad \text{mit } \epsilon = 0,62 \text{ bei senkrechten, scharfkantigen Schützen}$$

$$\mu = 0,54$$



Der Abflußbeiwert μ ist in erster Linie eine Funktion der Schützart, der Sohlenform und des Verhältnisses der OW-Tiefe zur Schützöffnung. Es ist für einfache und typische Formen des Schützes und der Sohle experimentell bestimmt worden und seine Werte können Handbüchern entnommen werden.

$$Q = \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_0} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q/b = 0,54 \cdot 0,8 \cdot 4,43 \cdot 1,22 = 2,34 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$b = \frac{22 \text{ m}^3/\text{s}}{2,34 \text{ m}^2/\text{s}} = \underline{9,40 \text{ m}}$$

$$V = 2,5 \cdot 3\,600 \cdot 2,34 \cdot 9,4 = \underline{197\,964 \text{ m}^3}$$

Bei einem Speichervolumen von ca. 200 000 m³ kann theoretisch 2,5 Stunden mit einem Durchfluß von 22 m³/s gespült werden. In der Praxis ist der Durchfluß zu Spülbeginn höher, um dann laut Vorgabe in diesem Beispiel nach 1,5 Stunden 22 m³/s zu erreichen. Danach nimmt der Durchfluß bis Spülende weiter ab. Bei der weiteren Bemessung wird daher vorerst von einem mittleren Durchfluß von 22 m³/s ausgegangen.

Von der Speicherinhaltslinie und damit der Oberwasserhöhe ist es abhängig, ob der Mindestdurchfluß von 22 m³/s für die hier vorgegebene Dauer von 1,5 Stunden eingehalten werden kann. Für diesen Nachweis ist im folgenden ein h₀ in Abhängigkeit zur Spülzeit angenommen worden.

Zeit nach Spül- beginn (min.)	h ₀ (m)	μ	Q (m ³ /s) = 33,3 · √h ₀ · μ	V (m ³) Speicher
0	2,20	0,56	27,7	200 000
15	2,06	0,56	26,8	175 475
30	1,92	0,55	25,4	151 985
45	1,78	0,55	24,4	129 575
60	1,64	0,54	23,0	108 245
75	1,50	0,54	22,0	87 995
90	1,36	0,53	20,6	68 825
105	1,22	0,52	19,1	50 960
120	1,08	0,51	17,6	34 445
135	0,94	0,50	16,1	19 280
150	0,80	0,49	14,6	5 465

Ein Mindestdurchfluß von 22 m³/s kann hier 1 1/4 Stunden aufrechterhalten werden. Durch Änderung der Speicherinhaltslinie - Vergrößerung der Oberfläche, damit langsamerer Wasserspiegelabfall und höherer Oberwasserspiegel h₀ - kann die Spülzeit mit einem entsprechend hohen Durchfluß verlängert werden.

10.2.4 Nachweis des Füllvolumens:

$$M_{Thw} = PN + 6,30 \text{ m}$$

200 000 m³ Spülwasser sollen in 4 Stunden eingelassen werden:

Art des Einlaßbauwerks: Überfall über ein Schütz

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_u^{3/2} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad \text{(vollkommener Überfall)}$$

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot c \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_u^{3/2} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad \text{(unvollkommener Überfall)}$$

μ für ein scharfkantiges Schütz: 0,6

Schützoberkante auf NN - 0,20 m.

$b = 9,40 \text{ m}$ (festgelegt bei der Berechnung des Durchflusses während des Spülbetriebs)

Außenwasserspiegelanstieg (Höhe, Zeit) durch mittlere Pegelkurve gegeben. Hier im Beispiel ist die mittlere Pegelkurve von Neßmersiel zugrundegelegt worden.

Das mittlere Schütz wird geöffnet bei einem Wasserstand von NN, zu diesem Zeitpunkt beträgt die Überfallhöhe 20 cm.

Der Spülbeckenwasserstand soll in diesem Beispiel bei einem Außenwasserstand von PN + 5,90 m die Schützoberkante erreichen, d. h. ab hier liegt ein unvollkommener Überfall vor, was in der Berechnung erst ab einem Spülbeckenwasserstand von 5,25 m berücksichtigt wird, da unterhalb dieses Wasserstandes der Durchfluß noch etwa dem eines vollkommenen Überfalls entspricht.

Außenwas- serstand (PN + ... m)	hü (m)	$Q = 16,66 \cdot hü^{3/2}$ (m ³ /s)	Zeit (s)	V (m ³)
5,00	0,25	2,08	540	1 123
5,10	0,35	3,45	770	2 657
5,20	0,45	5,03	900	4 527
5,30	0,55	6,80	900	6 120
5,40	0,65	8,72	780	6 802
5,50	0,75	10,81	720	7 783
5,60	0,85	13,04	650	8 476
5,70	0,95	15,41	680	10 479
5,80	1,05	17,90	720	12 888
5,90	1,15	20,55	720	14 796

Unvollkommener Überfall:

Außenwas- serstand (PN + ... m)	Spülbecken- wasserstand * * (PN + ... m)	hü (m)	z/hü	c *	Q (m ³ /s)	Zeit (s)	V (m ³)
6,00	5,10	1,25	0,32	0,88	20,50	1 080	22 140
6,10	5,30	1,35	0,52	0,78	20,38	1 620	33 016
6,20	5,70	1,45	0,76	0,61	17,74	2 520	44 705
6,30	6,10	1,45	0,93	0,41	11,93	2 520	30 064
6,20	6,20	1,45	0,93	0,41	11,93	2 520	30 064
							205 576

* c aus Diagramm Wendehorst 19. Auflage

** Wasserstand aus Speicherinhaltslinie, hier annähernd Speicherinhaltslinie vom Spülbecken Neßmersiel herangezogen.

Anhand dieses Beispiels ist nachgewiesen, daß über ein 9,4 m langes Schütz mit der Oberkante auf NN - 0,20 m innerhalb von gut 4 Stunden mindestens 200 000 m³ Wasser in das Spülbecken eingelassen werden können.

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

11. Pressearbeit, Vorträge und Veröffentlichungen

11.1 Presse

Durch Pressemitteilungen wurde die örtliche Presse mehrfach über das KFKI-Forschungsvorhaben informiert.

An folgenden Tagen hat die Presse über das Vorhaben berichtet:

- 30.06.1982 ausführlicher Bericht
- 11.01.1983
- 10.06.1983
- 19.09.1983
- 14.02.1984
- 18.02.1984 ausführlicher Bericht
- 16.07.1987 Vortragskurzfassung s. Abschnitt 11.2.3

11.2 Vorträge

11.2.1 Vortragsveranstaltung der HTG "Küstenforschung und Küsten-
ingenieurwesen" am 08.11.1984 in Hamburg:

"Auswirkung von gesteuerten Spültrömen", von Dipl.-Ing.
H.-G. Coldewey

11.2.2 Workshop "Außentiefs" des KFKI am 08.09.1986 in Bremen:

"Probleme der Außentiefunterhaltung - Räumung durch voll-
automatisches Spülsiel und durch Räumbooteinsatz -" von
Ltd. Baudirektor H. F. Erchinger

"Im Forschungsprojekt "Tiefenstabilisierung von Außentiefs"
in Neßmersiel ermittelte Einflußfaktoren auf den Schweb-
stoffgehalt", von Dipl.-Ing. K. Probst

"Einfluß gesteuerter Spülströme auf die Querschnitte des
Neßmersieler Außentiefs", von Dipl.-Ing. H.-G. Coldewey

11.2.3 Tagung der Arbeitsgemeinschaft Nordwestdeutscher Geologen
in Norderney vom 09. bis 12.06.1987

"Außentieferräumung durch vollautomatisches Spülsiel in Neß-
mersiel ", von Dipl.-Ing. H.-G. Coldewey

- 11.2.4 Studientage des Kring von Zeewerende Ingenieurs am 28./29.09.1987 im Raum Norden
"Ergebnisse des KFKI-Forschungsvorhabens "Stabilisierung von Außentiefs", durchgeführt am Neßmersieler Außentief", von Dipl.-Ing. H.-G. Coldewey
- 11.2.5 Zahlreiche Besichtigungen durch Vertreter des Bundeslandwirtschaftsministeriums des Nds. Landwirtschaftsministeriums der Bezirksregierungen Weser-Ems und Lüneburg des Soil Conservation Service der USA des Niederl. Rijkswaterstaats des Niederländischen Kring van Zeewerende Ingenieurs der Wasserwirtschaftsämters Niedersachsens von Wasser- und Bodenverbänden von Schulklassen und Studentengruppen.

11.3 Bisherige Veröffentlichungen

11.3.1 ERCHINGER, H. F.: Außentiefräumung durch vollautomatisches Spülsiel im Neßmersiel-Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet. Wasser u. Boden, H. 8, 1984

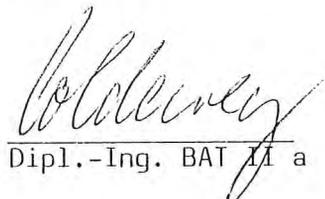
11.3.2 ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G., Probst, K.: Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben "Tiefenstabilisierung von Außentiefs". Die Küste, H. 44, 1986.

Die Schlußveröffentlichung ist für "Die Küste" H. 47 eingeplant.

Aufgestellt:
Norden, den 01.12.1987
Bauamt für Küstenschutz
Der Leiter

Sachgebietsleiter


Ltd. Baudirektor


Dipl.-Ing. BAT II a

gez. K. Probst
Dipl.-Ing. BAT II a

12. 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, 1986.

BLANKENSTEIN, H., BRANDT, G., NIEMEYER, H.D.: Strommessungen im Bereich des Neßmer Außentiefs. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft - Forschungsstelle Küste - Jahresbericht 1984.

COLDEWEY, H.G.: Sielzugberechnung unter Berücksichtigung von Ausentiefverlusten. Wasser und Boden, Heft 10, 1979.

DIEKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wattenzugsgebieten der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 60, 1985.

DVWK: Regeln zur Wasserwirtschaft, 1984 - Schwebstoffmessungen. Gelbdruck.

ERCHINGER, H.F.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Abschn. Küsteningenieurwesen, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 6. Aufl., 1982.

ERCHINGER, H.F.: Außentiefräumung durch vollautomatisches Spülsiel in Neßmersiel - Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet. Wasser und Boden, Heft 8, 1984.

ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H. G., PROBST, K.: Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben "Tiefenstabilisierung von Außentiefs". Die Küste, H. 44, 1986.

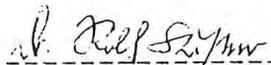
- FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. Wasser und Boden, Heft 3, 1983.
- HOFER, H.: Die hydraulische Egge. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen-112. Jahrgang - 1975 Nr. 9 u. 11.
- LÜDERS, K., LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon, Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim, 1976.
- MANZENRIEDER, H.: Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts, Heft 77, 1983.
- MEERESTECHNIK-ELEKTRONIK GmbH: Steuergerät Sedimentmessungen, 1983 - unveröffentlicht.
- MÜLLER, E., BINEK, H.: Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief. Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD). Die Küste, Heft 44, 1986.
- Nds. WASSERWIRTSCHAFTSVERWALTUNG: Jahresbericht. Wasser und Boden, Heft 7/8, 1958.
- NORDDEUTSCHE SEEKABELWERKE AG: "Tiefenstabilisierung von Außentiefs" - Meßkette Neßmersiel - 1982 - unveröffentlicht.
- OHM, K.: Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten. Die Küste, Heft 42, 1985.
- RAUDKIVI, A. J.: Grundlagen des Sedimenttransportes. Springer-Verlag 1982.
- REINEMANN, L., SCHEMMER, H., TIPPNER, M.: Trübungsmessungen zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 26, Heft 6, 1982.
- RENGER, E.: Zweidimensionale Stabilitätsanalysen von Tidebecken und Watteinzugsgebieten größerer Ausdehnung. Die Küste, Heft 34, 1980.

- RENGER, E.: Dauermessungen des suspendierten Feststoffgehalts im Tidegebiet mit Hilfe von Durchlaufzentrifugen, Intermari-
tec 82, Bericht 418.
- RENGER, E., BEDNARCZYK, K.: Schifffahrtserzeugte Schwebstofftransporte und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben "Natürliche Querschnitte von Außentiefs". Die Küste, Heft 44, 1986.
- RHODE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 - 1981. Die Küste, Heft 37, 1982.
- RHODE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1981 - 1983. Die Küste, Heft 40, 1984.
- RHODE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1983 - 1986. Die Küste, Heft 44, 1986.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitteilungen des Franzius-Instituts, TU Hannover, Heft 34, 1970.
- SIEFERT, W., LASSEN, H.: Windstauentwicklung im Küstengebiet der Deutschen Bucht. Wasser und Boden, Heft 1, 1986.
- WENDEHORST/MUTH: Bautechnische Zahlentafeln . B. G. Teubener Stuttgart; 1979.
- ZANKE, K.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, 1982.

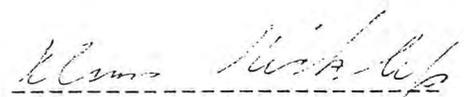
Anhang zum Schlußbericht über
das KFKI-Forschungsprojekt
"Tiefenstabilisierung von Außentiefs"
mit Naturuntersuchungen am
Neßmersieler Außentief

Bericht über die
Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von
Schwebstoffen aus dem Neßmersieler-Außentief.

Geologisch-Paläontologisches Institut
der Universität Kiel



Prof. Dr. R. Köster



Dipl. Geol. K. Ricklefs

Kiel, im Mai 1987

Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden, vom Bauamt für Küstenschutz und Domänen, Norden, in Auftrag gegebenen, Arbeit ist die qualitative Untersuchung der während verschiedener Strömungszustände im Neßmersieler Außentief suspendierten Sedimente. Zu diesem Zweck wurden von Bord des Räumbootes "UTLANUNGSHÖRN" aus gezielt Suspensionsproben während der nachfolgend aufgeführten Strömungssituationen entnommen:

1. natürlicher Ebbstrom
2. Spülstrom
3. natürlicher Flutstrom
4. Spülstrom mit Räumbooteinsatz
5. Flutstrom nach Räumbooteinsatz

Nach entsprechender Präparation sind im Geologischen Institut der Universität Kiel an diesem Probenmaterial mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopen (REM) bzw. mit lichtmikroskopischen Verfahren Untersuchungen der präsedimentären Zusammensetzung der schlickbildenden Materialien durchgeführt worden.

Allgemeines

Für die Präparation werden die Schwebstoffe mit Hilfe von Polykarbonatfiltern (Porengröße $0.2 \mu\text{m}$) aus der Suspension abfiltriert. Diese Filter sind teilweise auf den Fotos als perforierter Untergrund zu erkennen. Die weitere Präparation ist ausführlich bei RICKLEFS 1984 beschrieben.

Die Oberflächenkräfte zwischen der Filteroberfläche und größeren Mineralkörnern sind relativ gering, was dazu führen kann, daß einige dieser meist über $30 \mu\text{m}$ großen Mineralkörner bei der Präparation vom Filtern herunter geschwemmt werden. Hierdurch ist das feinstkörnige Material auf den Filtern zwangsläufig etwas überrepräsentiert. Aus diesem Grunde sollte bei weitergehenden Analysen darauf verzichtet werden, die mit dem Rasterelektronenmikroskop gemachten Aufnahmen für verbindliche Aussagen über die Korngrößenzusammensetzung des Materials heranzuziehen.

Für die Auswertung der Präparate sind zwei Angaben auf den Fotos besonders wichtig. Es ist dies erstens der kleine weiße Strich am linken unteren Bildrand. Seine Streckenlänge entspricht auf dem Foto der unter dem Strich angegebenen Länge in μm . Die zweite wichtige Angabe ist die dreistellige Zahl am unteren Bildrand. Hierbei handelt es sich um die laufende Bildnummer, auf die bei der Diskussion einzelner Fotos verwiesen werden wird. Alle Fotos ohne diese dreistellige Nummer sind, beginnend bei 1, fortlaufend nummeriert. Der zugehörige Größenmaßstab wird jeweils durch Begleittext angegeben.

ERGEBNISSE und DISKUSSION

Die Zusammensetzung und Beschaffenheit der Schwebstoffe im Neßmersieler Außentief

Die im Neßmersieler Außentief suspendierten Sedimente setzen sich aus Komponenten zweier großer Materialgruppen zusammen. Die erste Gruppe umfaßt die mineralischen Stoffe. Ihre Zusammensetzung variiert mit der Korngröße. Die Partikel, deren Durchmesser größer als etwa 5 μm ist, bestehen hauptsächlich aus Quarz, Glimmer und Feldspat. Die feinkörnigere Komponente setzt sich zum überwiegenden Teil aus verschiedenen Tonmineralen und untergeordnet aus Mineralen der erstgenannten Gruppe zusammen.

Neben mineralischen Stoffen befinden sich zahlreiche organogene Stoffe in Suspension. Dieses Material ist größtenteils detritisch - setzt sich also aus Bruchstücken abgestorbener Organismen zusammen. In diesem Zusammenhang sind besonders, die auf allen Fotos so zahlreich zu erkennenden Reste von Diatomeenschalen zu erwähnen. Diatomeen sind Kieselalgen, die je nach Art am Boden angeheftet leben (braune, etwas "glitschige" Überzüge auf manchen Wattflächen) oder aber die planktische Lebensweise bevorzugen. Die Schalen bestehen aus Opal, der amorphen Form des Quarzes. Diatomeenschalenbruchstücke sind leicht an ihren auffälligen Formen zu erkennen, die häufig Gittern oder Siebböden ähneln. Daneben kommen aber auch kalkige Gehäuse von Foraminiferen und Coccolithospheriden (Einzeller) vor. Generell sind im Neßmersieler Außentief sehr viel mehr derartiger Schalenreste im Sediment enthalten, als dies z.B. in den Mündungsbereichen von Weser oder Eider der Fall ist.

Im Vergleich zu den auffälligen Resten gehäusetragender Kleinstlebewesen sind andere organogene Materialien viel schwieriger zu entdecken. Neben einigen wenigen Algen mit Weichkörpern sind dies vor allem bakterielle Formen. Diese finden sich oft als faden- oder gespinstartige Gebilde auf Schwebstoffen. Da schleimige Fäden aber auch von einigen Diatomeenarten produziert werden, ist es sehr schwierig diese Formen zweifelsfrei zuzuordnen (zahlreiche Gespräche mit Biologen verschiedenster Spezialgebiete haben in diesem Fall die Bestimmungsfrage auch nicht klären können). Für sedimentologische Fragestellungen ist allerdings die Tatsache viel wichtiger, daß durch mikrobiologische Aktivität abgelagertes Sediment verfestigt und bei Schwebstoffen eine Zusammenballung erfolgen kann, wodurch unter Umständen die Erosionsstabilität bzw. die Sinkgeschwindigkeit erhöht wird.

Größere Organismen, wie Muscheln und Würmer, tragen durch die Bildung von Kotpillen ebenfalls erheblich zur Sedimentbindung bei. Kotpillen sind auf den Fotos an ihrer scharf begrenzten runden oder ovalen Form zu erkennen. Das

innere Gefüge ist sehr dicht, da die unverdaulichen mineralischen und organischen Reste durch die Darmtätigkeit stark kompaktiert worden sind. Die äußeren Teilchen verlaufen fast alle parallel zur Oberfläche, so daß kein Partikelchen "irgendwie herauspiekt". Frische Kotpillen sind meist noch von einer Schleimschicht überzogen.

Neben den Zusammenballungen von Einzelteilchen deren Entstehung auf die Tätigkeit von Lebewesen zurückzuführen ist, kommen aber auch andere Agglomerationsformen vor. Diese meist als Tonflocken bezeichneten Gebilde entstehen durch die Wechselwirkung von Teilchen mit unterschiedlich geladenen Oberflächen. Dieses Phänomen wird unter dem Begriff elektrochemische Flockung zusammengefaßt (Einzelheiten finden sich bei RICKLEFS 1984). Tonflocken zeichnen sich durch eine lockere Struktur aus, die nicht allein einzelne Mineralkörner einschließt, sondern auch kleinere Zusammenballungen unterschiedlichster Genese zu größeren Einheiten vereinigt. Ganz generell kann man davon ausgehen, daß feinkörnige ($>10 \mu\text{m}$) Materialien unter den brackischen oder marinen Bedingungen in den Wattgebieten so gut wie nie als einzelne Körner in Bewegung sind, sondern meist als Zusammenballungen solcher.

Beschreibung der einzelnen Strömungsphasen

A: Natürlicher Ebbstrom

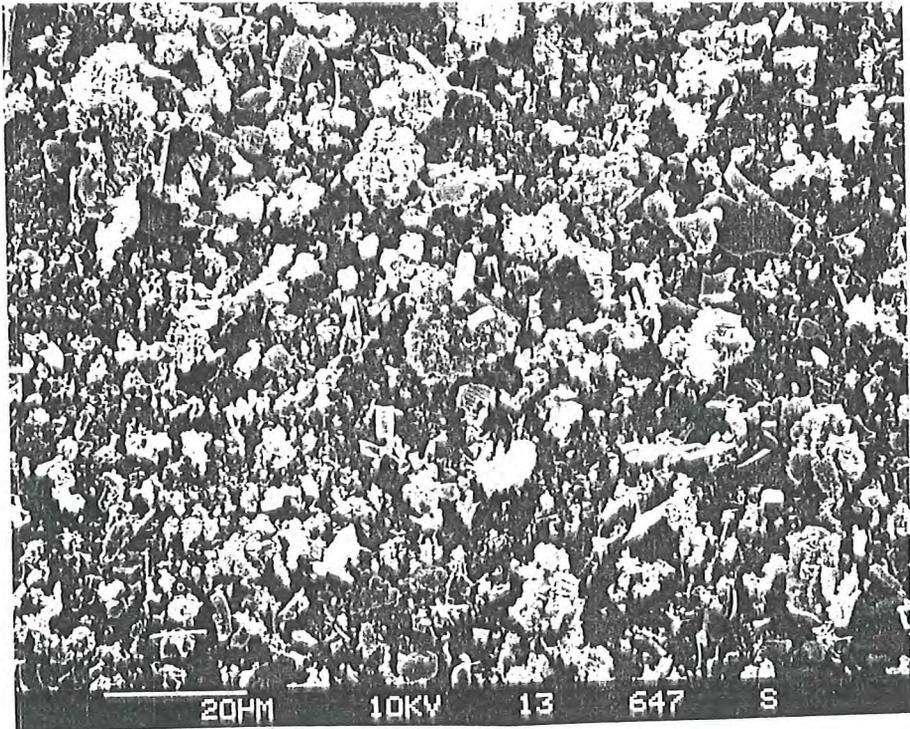
Probenentnahme: 26.11.86 / 11⁰⁰ Uhr
Station : 1. Pfahl bei 1000 m
Tiefe : 1 m unter Wasseroberfläche
Konzentration : 270 mg/l

Die Schwebstoffe setzen sich aus allen weiter oben beschriebenen Materialien zusammen. Hauptsächlich finden sich lockere Agglomerate, die um $10 \mu\text{m}$ groß sind. Einige wenige erreichen Ausdehnungen entlang einer ihrer Achsen bis annähernd $50 \mu\text{m}$. Eingestreut sind solitäre Schichtsilikate im Korngrößenbereich des Feinschluffes. Gelegentlich weisen Glimmerplättchen aber auch Längen von über $20 \mu\text{m}$ auf. Bedingt durch die Form, dürfte ihre effektive Sinkgeschwindigkeit aber mit der kleinerer kompakter Körper zu vergleichen sein. Bei den größeren Zusammenballungen handelt es sich meist um Kotpillen unterschiedlichen Zerfallgrades. In den Kotpillen sind zahlreiche Trümmer von Diatomeenschalen zu entdecken.

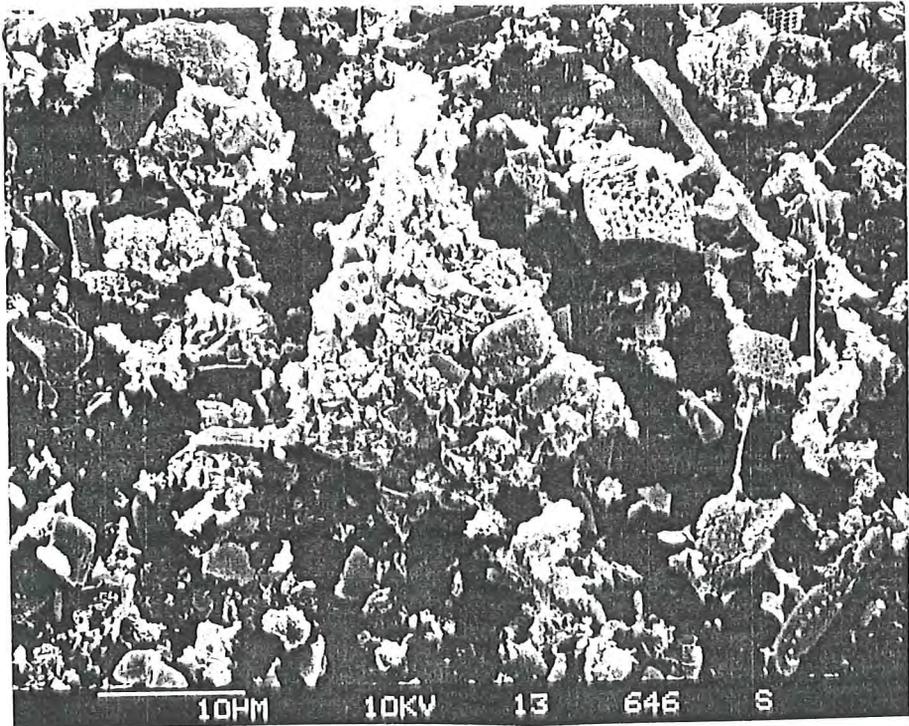
Insgesamt weist die Materialzusammensetzung keine Besonderheiten auf. Der hohe Anteil an recht kleinen und locker aufgebauten Agglomeraten weist auf eine ruhige Bewegung des Wassers hin, was hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeit und Wellenbewegung zum Zeitpunkt der Probenentnahme auch mit den Geländebeobachtungen im Außentief übereinstimmt.

-4-

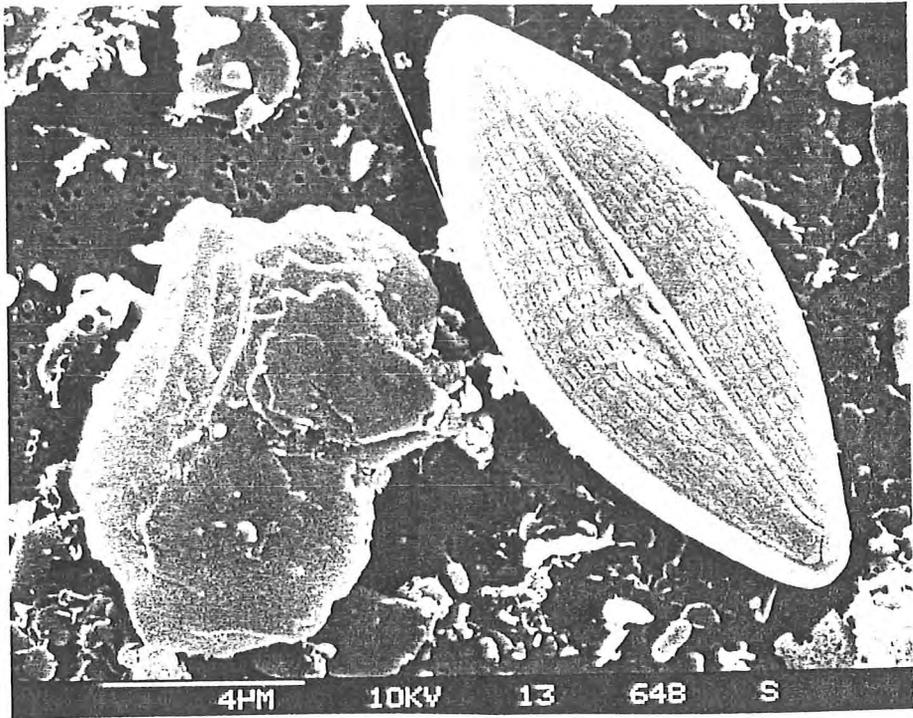
natürlicher
Ebbstrom



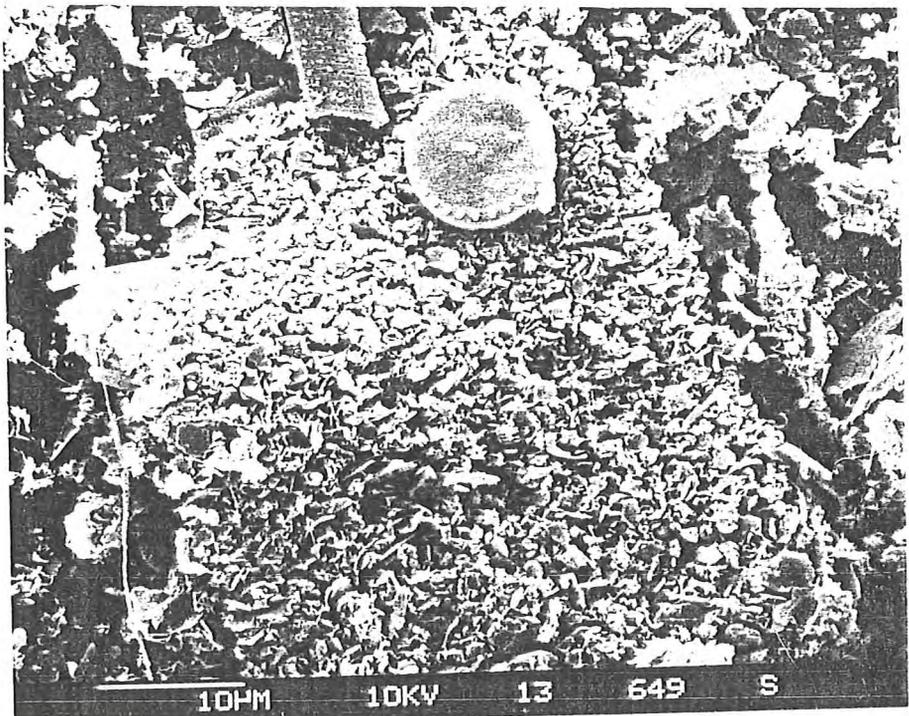
647: Überblick bei 1000-facher Vergrößerung. Zu erkennen sind zahlreiche Kotpillen und kleinere flockige Zusammenballungen. Eingestreut sind einzelne Schichtsilikate und zahlreiche Bruchstücke von Organismen.



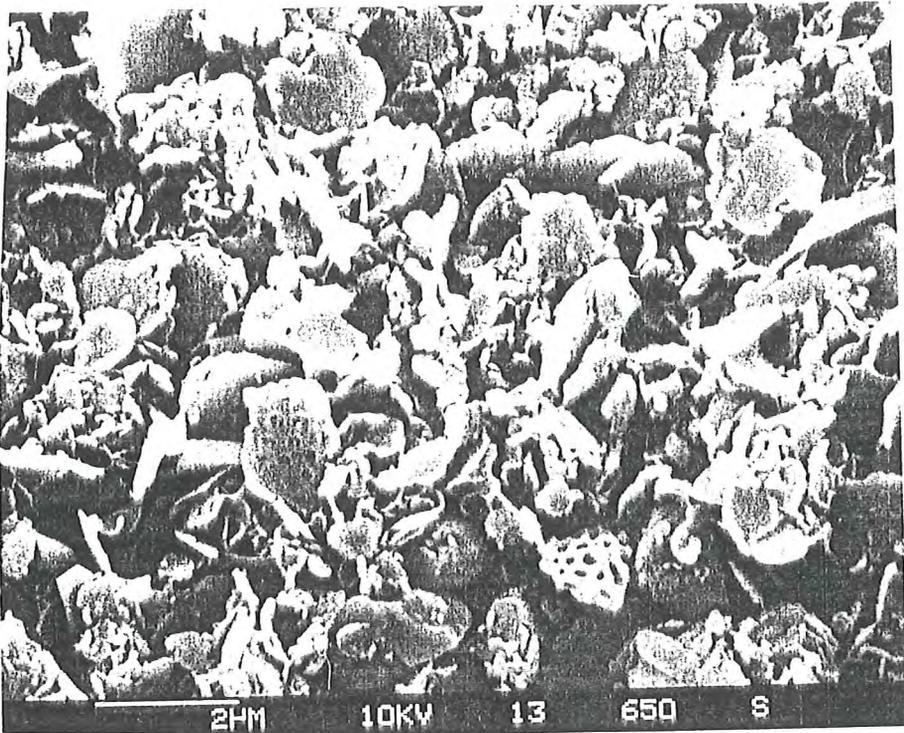
646: Zerfallene Kotpille und durch Fäden miteinander verklebte Schwebstoffe (Vergr. 2000x).



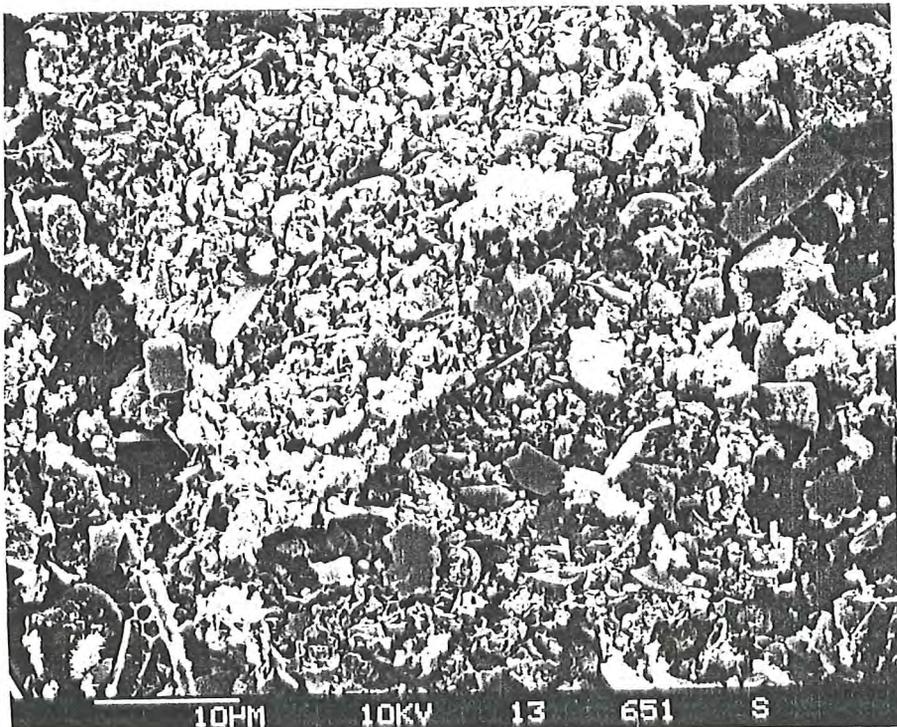
648: Vergleich Mineralkorn (Schichtsilikat) und planktonische Diatomee (Vergr. 7000x).



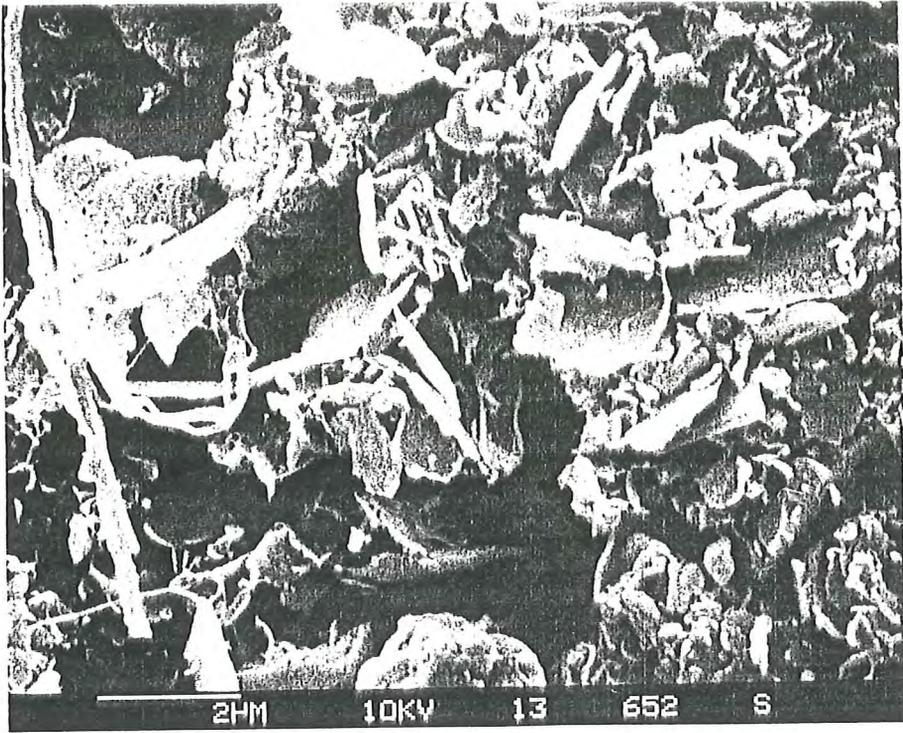
649: Das Bild zeigt das interessanteste Stück des gesamten Präparates. Das innere Gefüge deutet darauf hin, daß es sich hierbei wahrscheinlich um einen "Brocken" bereits abgelagerten Sedimentes handelt der erneut erodiert worden ist. Die Diatomee am oberen Bildrand ist bei der Präparation auf dem Partikel "gestrandet" (Vergr. 2000x).



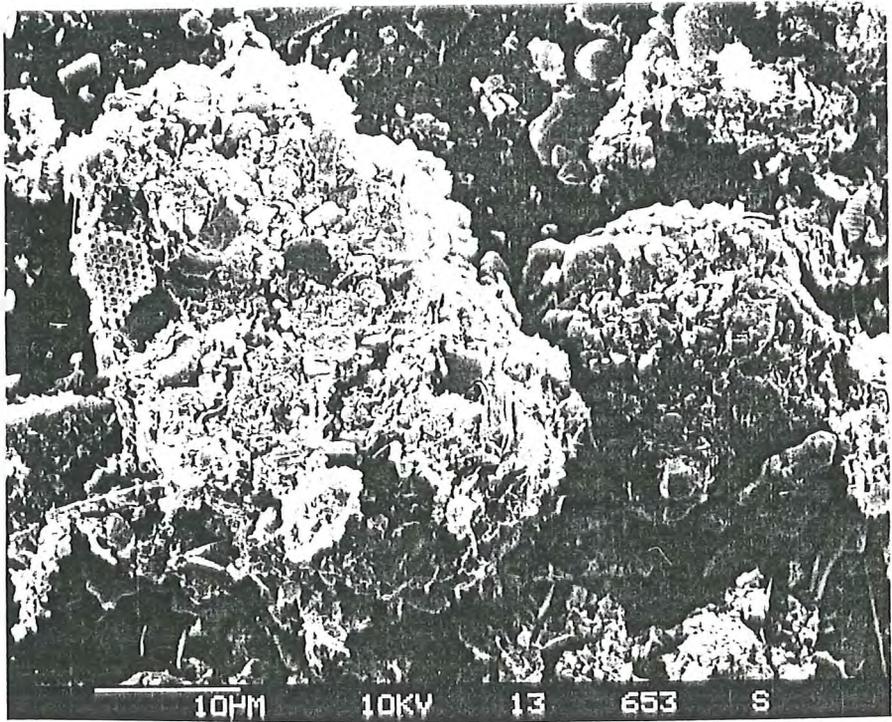
650: Detailaufnahme: Zu erkennen ist das für Tonminerale unter den herrschenden Salinitätsbedingungen typische Kartenhausgefüge (Vergr. 10000x).



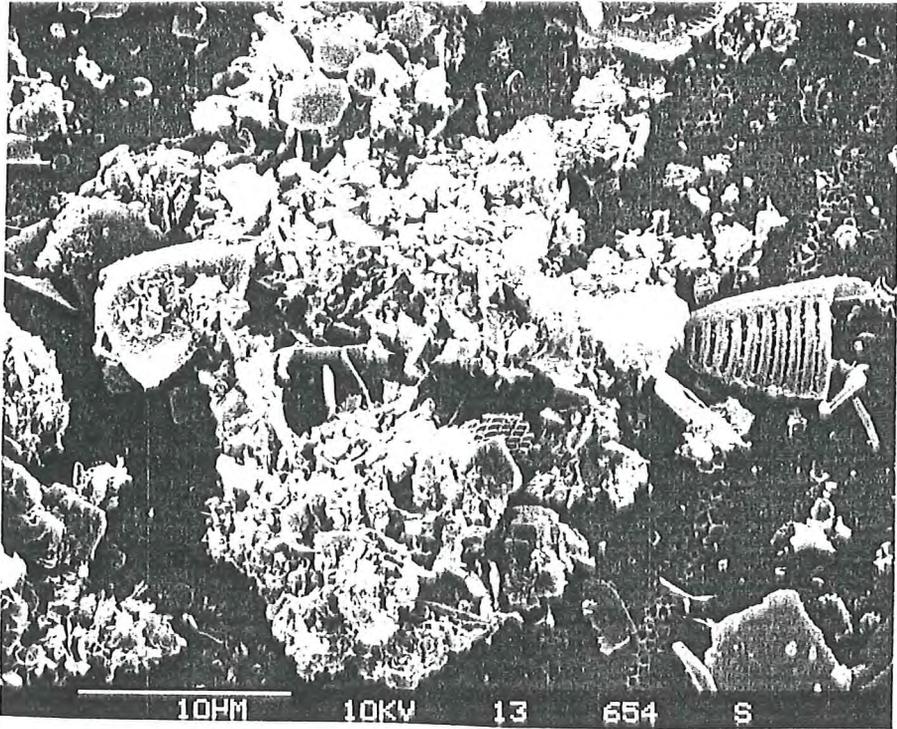
651: Andeutung einer Mikroschichtung am unteren Ende des "Sedimentbrockens" (Vergr. 2000x).



652: Lockeres Mikrogefüge einer Schwebstoffflocke - teilweise Bindung durch Fäden usw. (Vergr. 10000x).



653: Ovale und runde Kotpille (Vergr. 2000x).



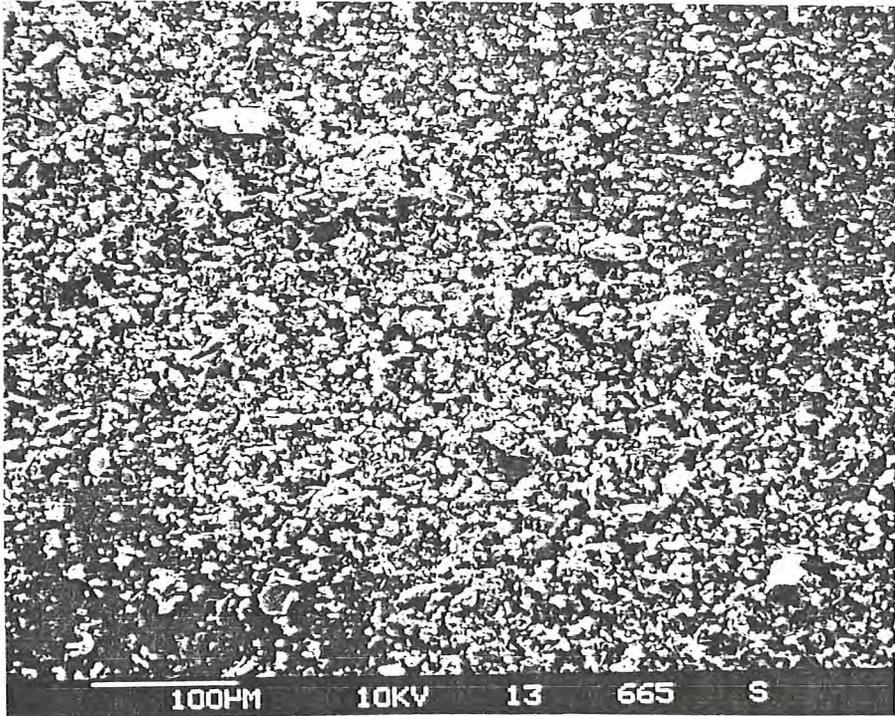
654: Agglomerat verschiedenster Materialien verbunden durch elektrochemische Kräfte und mikrobielle Aktivität

B: Spülstrom

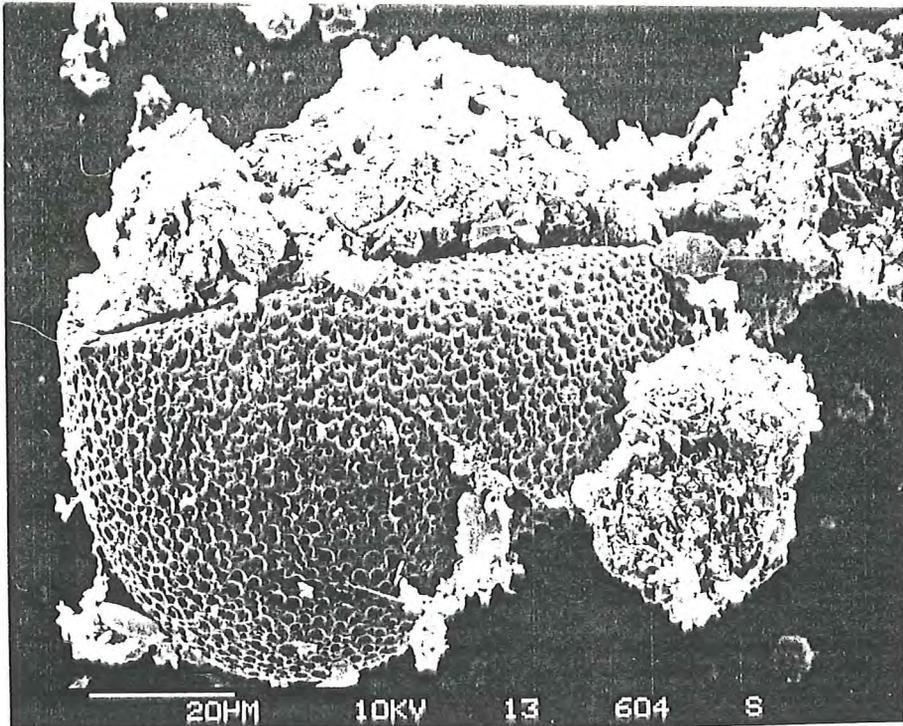
Probenentnahme: 26.11.86 / 11²³ Uhr
 Station : 1. Pfahl bei 1000 m
 Tiefe : 1 m unter Wasseroberfläche
 Konzentration : 1010 mg/l

Trotz der im Vergleich zum natürlichen Ebbstrom viel höheren Strömungsgeschwindigkeit beim Spülstrom, nimmt die Größe der in Suspension befindlichen Teilchen nicht merklich zu. Einige Kotpillen fallen aber mit 50 µm deutlich größer aus. Die prinzipielle Materialzusammensetzung gleicht also im wesentlichen der des natürlichen Ebbstroms. Die Menge der Agglomerate weist jedoch einen kompakteren Aufbau auf. Man kann vermuten, daß diese Teilchen eine höhere Sinkgeschwindigkeit haben und unter Umständen schon einmal etwas länger abgelagert gewesen sind. Für die Annahme, daß es sich hierbei um erodierte Sedimente handelt, spricht die Tatsache, daß zahlreiche stark verschmutzte Diatomeen gefunden werden konnten. Da Diatomeen aber gewöhnlich auf der Sedimentoberfläche oder im freien Wasser leben, kann man davon ausgehen, daß diese Gehäuse bereits längere Zeit im Sediment begraben gewesen sein müssen. Weitere Hinweise auf Resuspension von Materialien konnten nicht gefunden werden.

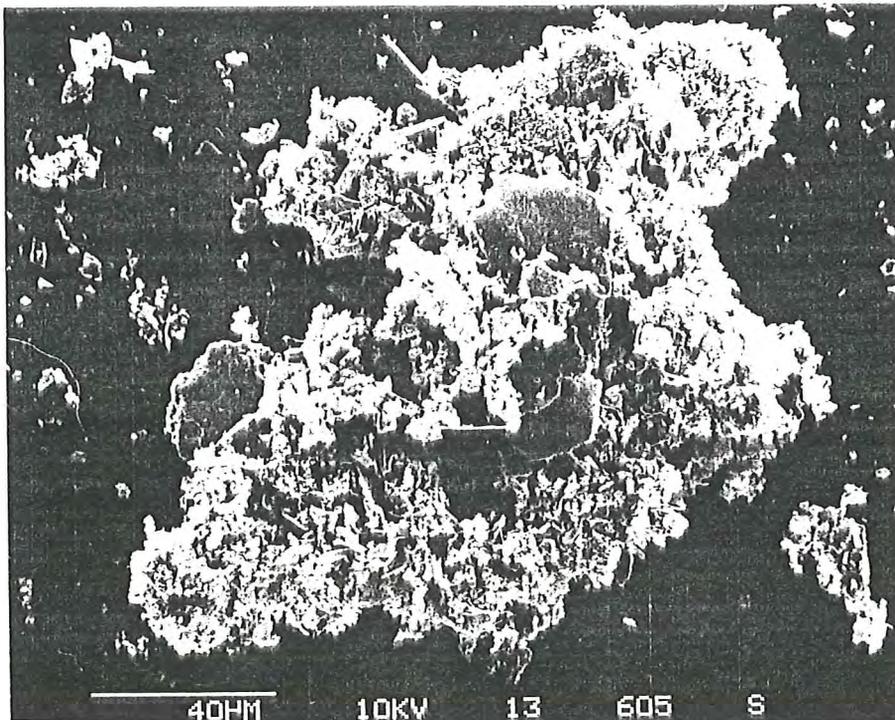
Spülstrom



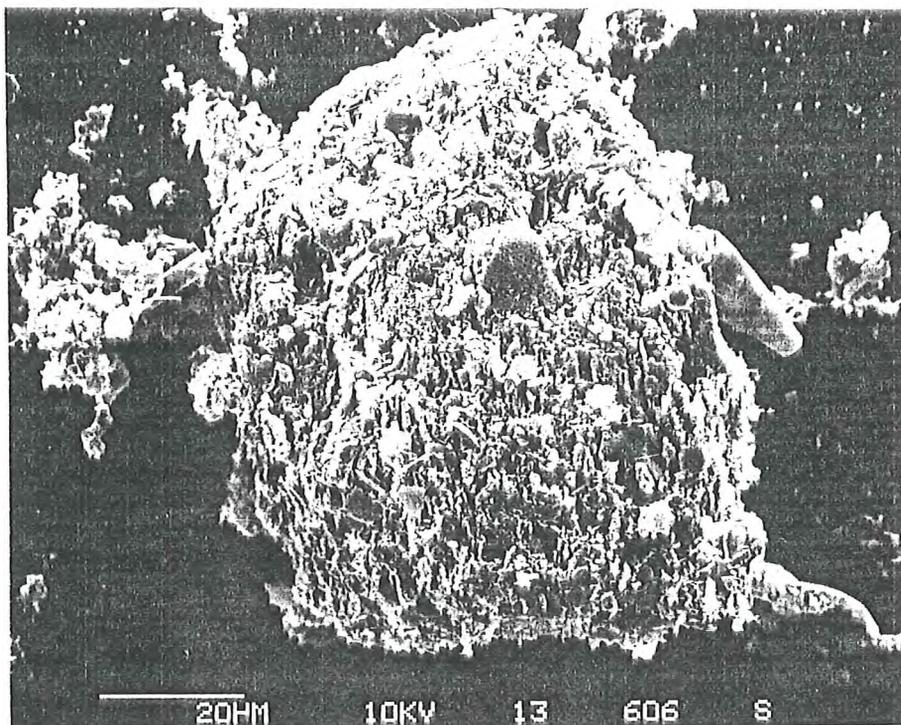
665: Überblick über die Schwebstoffzusammensetzung bei 100-facher Vergrößerung. Erkennbar sind zahlreiche kompakte Teilchen deren Durchmesser etwa 10 - 20 µm beträgt sowie einige größere Agglomerate und Kotpillen mit Durchmessern um 50 µm.



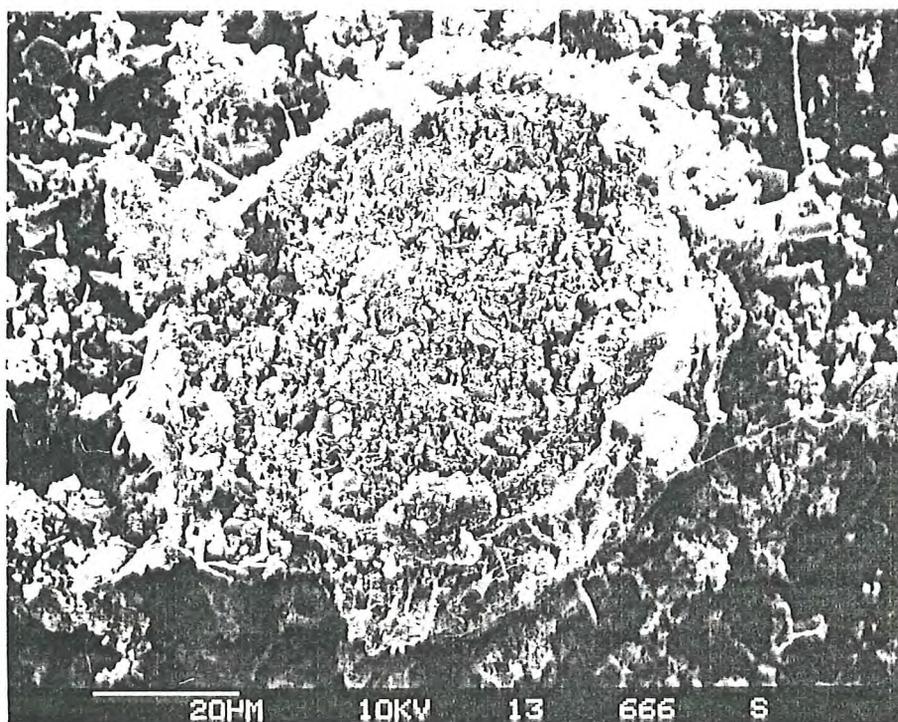
604: Gehäusebruchstück mit dicht angelagertem Sediment - wahrscheinlich bereits längere Zeit abgelagert gewesen (Vergr. 1000x).



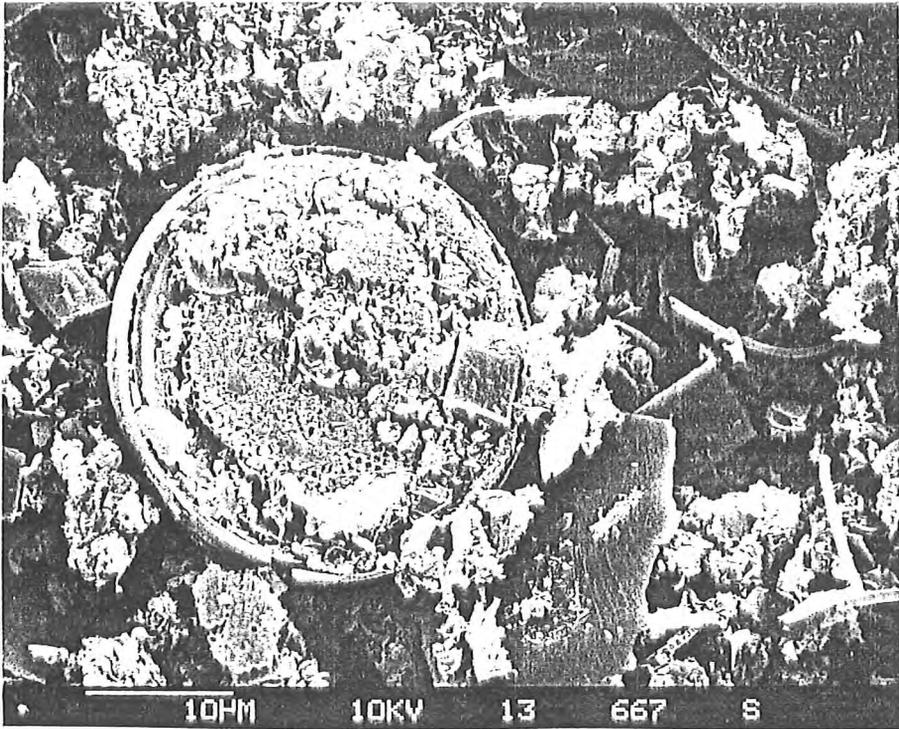
605: Komplex aufgebaute Schwebstoffflocke mit angelagerten Schluffkörnern (Vergr. 600x).



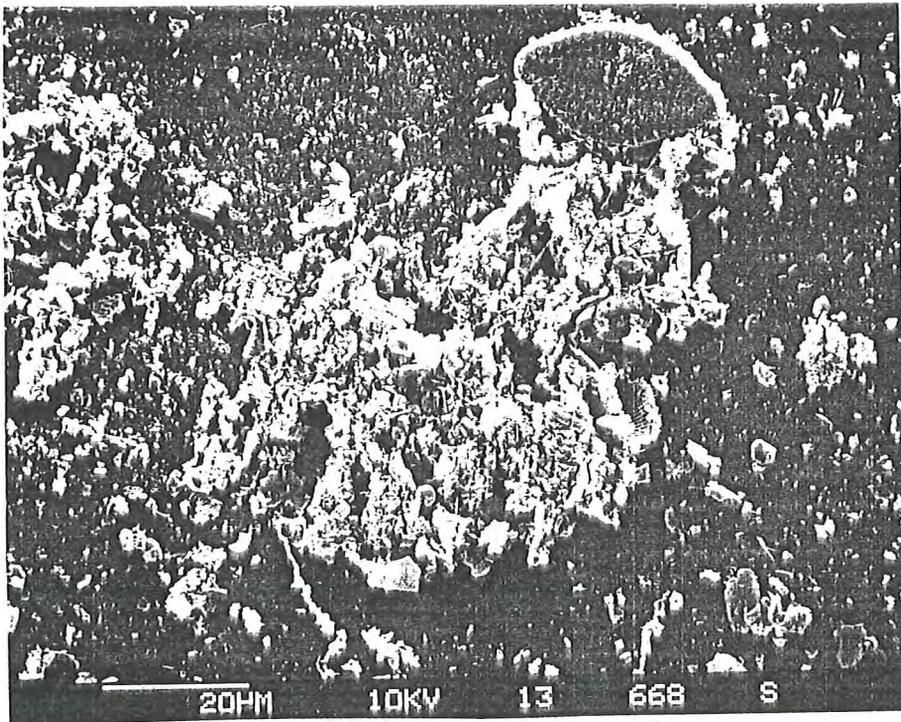
606: Kompakte Kotpille (Vergr. 1000x).



666: Extrem dicht mit Sediment belegte Diatomee (Vergr. 1000x).



667: In Sediment eingebettete Diatomee (Vergr. 2000x).



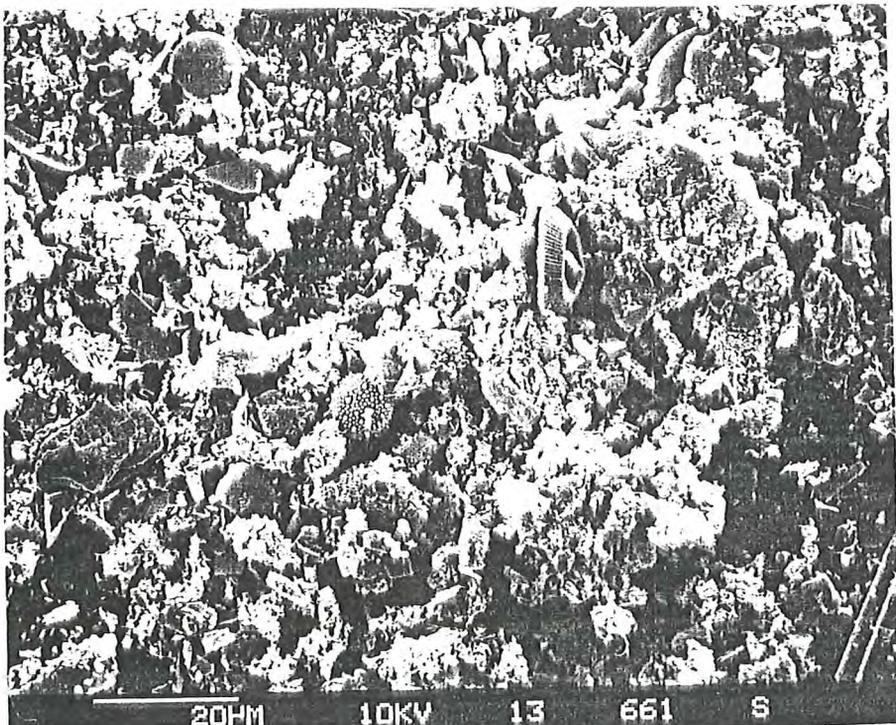
668: Agglomerat mit angelagerter Diatomee (Vergr. 1000x).

C: Flutstrom

Probenentnahme: 26.11.86 / 14⁰⁰ Uhr
Station : 1. Pfahl bei 1000 m
Tiefe : 1 m unter Wasseroberfläche
Pegel : 4.95 m
Konzentration : 265 mg/l

Während der gesamten Flutphase traten im Außentief nur sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten auf. Wie schon beim natürlichen Ebbstrom sind auch in diesem Fall die Zusammenballungen mit lockerer Struktur am häufigsten vertreten. Isolierte Mineralkörner im Feinschluffbereich und komplett erhaltene Gehäuse verschiedener Kleinstlebewesen kommen in großer Zahl vor. Ganz generell überraschte das Präparat den Bearbeiter mit immer neuen Arten und Formen. Neben verschiedenen Diatomeenarten, Foraminiferen und Coccolithen ließen sich die unterschiedlichsten "weichen" organischen Formen beobachten. Zahlreiche Agglomerate waren von fadenförmigen oder gespinstartigen Strukturen durchzogen. Spezielle Untersuchungen mit der EDAX-Anlage (RICKLEFS 1984) haben ergeben, daß in einigen Flocken keine für Minerale und Hartschalen typischen Elemente, wie Si, Al, Ca oder K, zu finden sind. Diese Schwebstoffe scheinen also ausschließlich aus organischer Substanz zu bestehen. Verglichen mit den Ebbstromproben ist die Zahl der Kotpillen geringer. Die maximale Größe der Agglomerate fällt mit 40 µm ebenfalls kleiner aus.

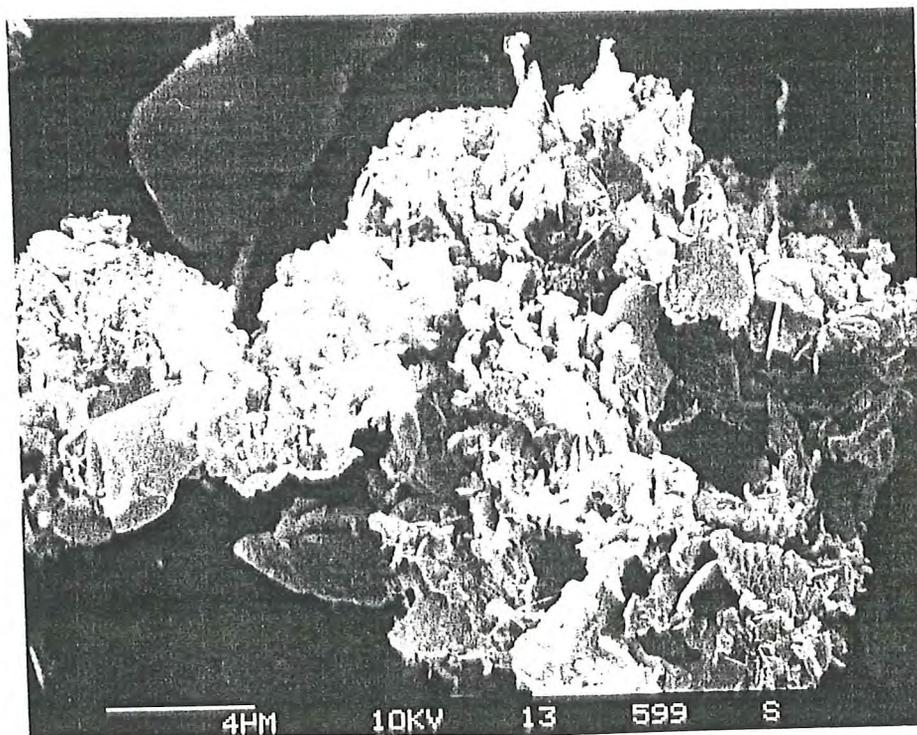
Flutstrom



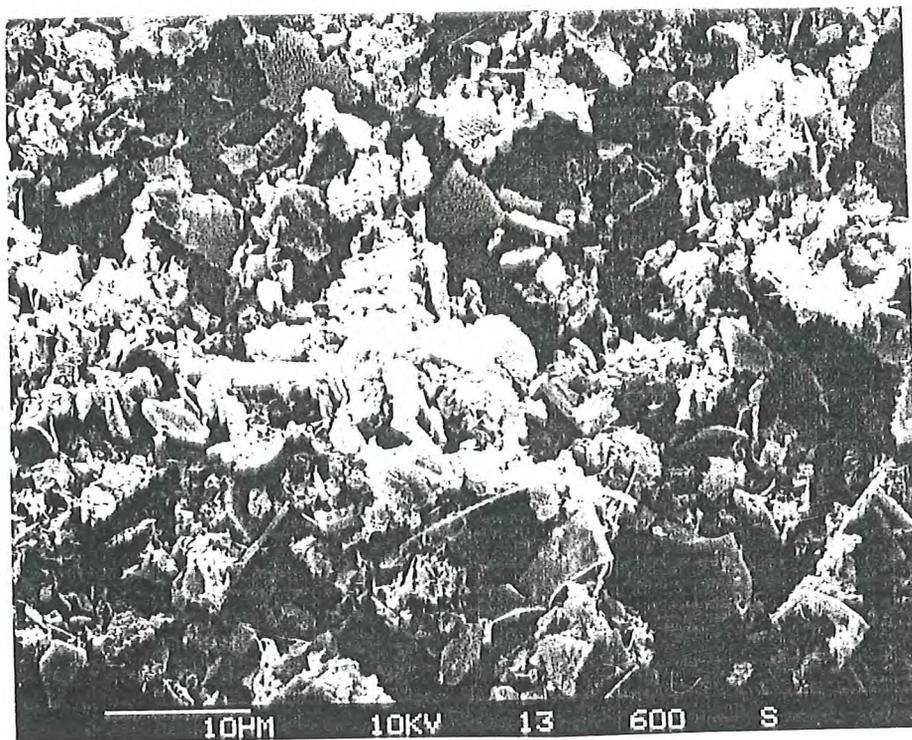
661: Dieser Überblick zeigt dicht gelagerten Bereich der Filteroberfläche. Zu erkennen sind zahlreiche Schluffkörnchen und verschiedene organische Formen (Vergr. 1000x).



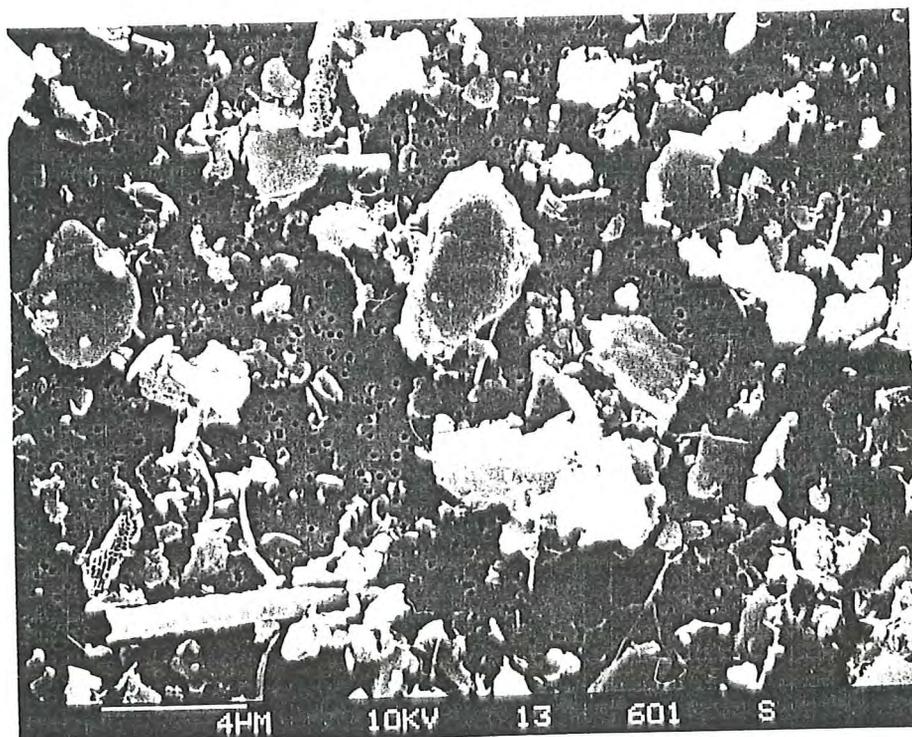
598: Detailaufnahme einer Schwebstoffflocke (Vergr. 2000x).



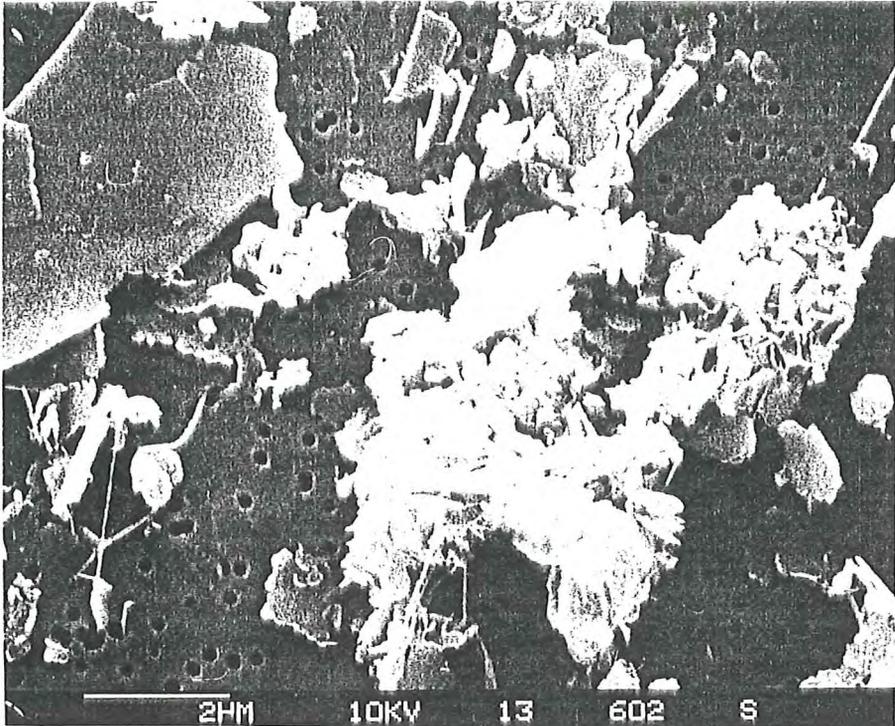
599: Agglomerat mit Ringstruktur und hohem organischen Anteil (Vergr. 5000x).



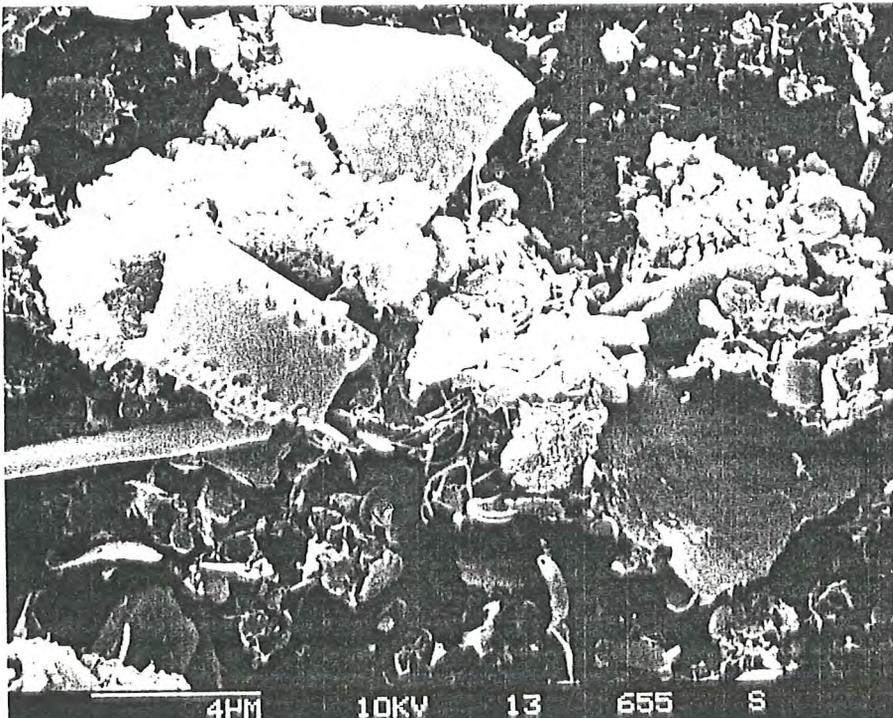
600: Lockere Agglomerate mit hohem Detritusanteil (Vergr. 2000x).



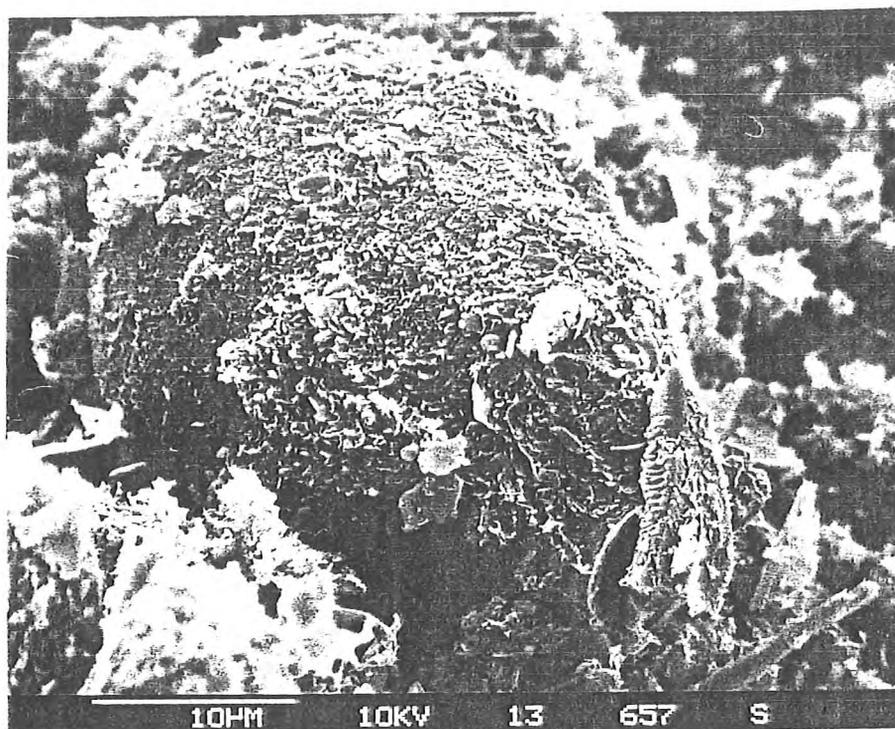
601: Sammlung verschiedener Schichtsilikate (Vergr. 5000x).



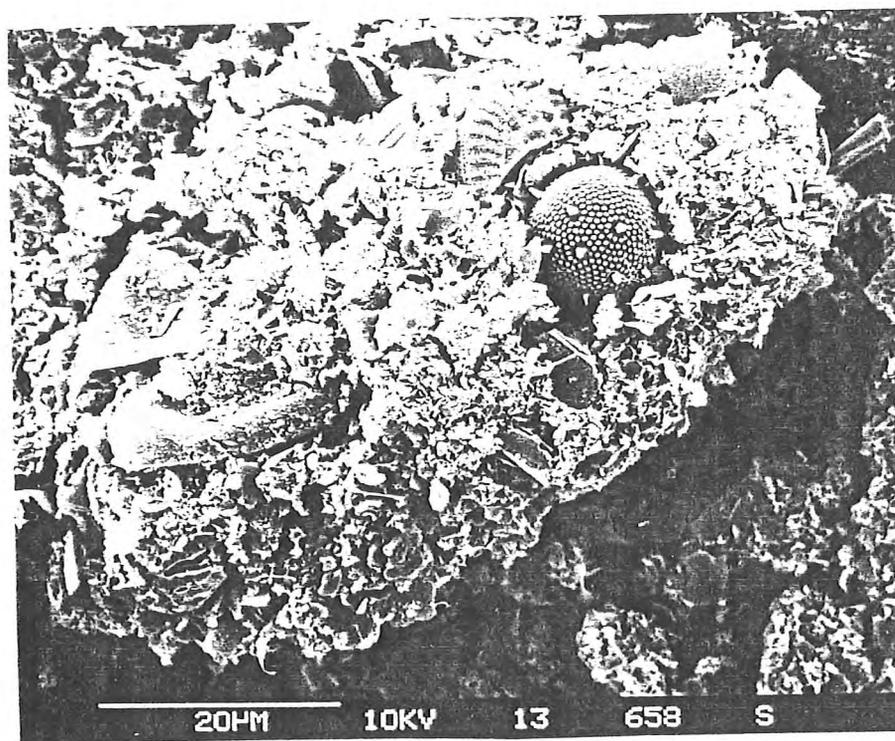
602: Flocke aus organischen Materialien mit angelagerter kleiner Kotpille (Vergr. 10000x).



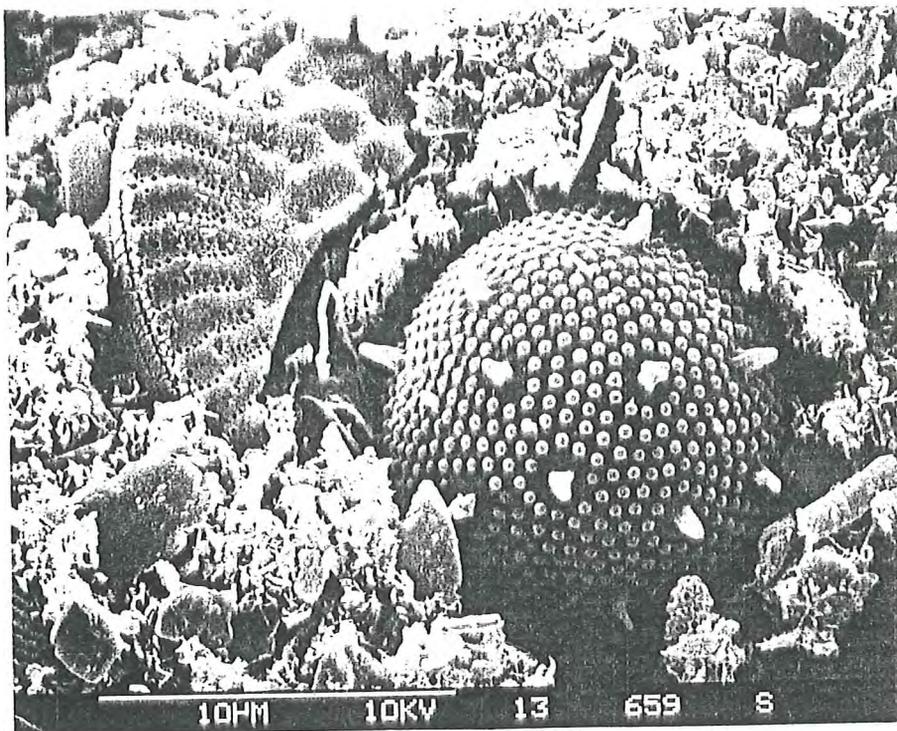
655: Durch gespinstartiges Gebilde stabilisiertes Agglomerat (Vergr. 5000x)



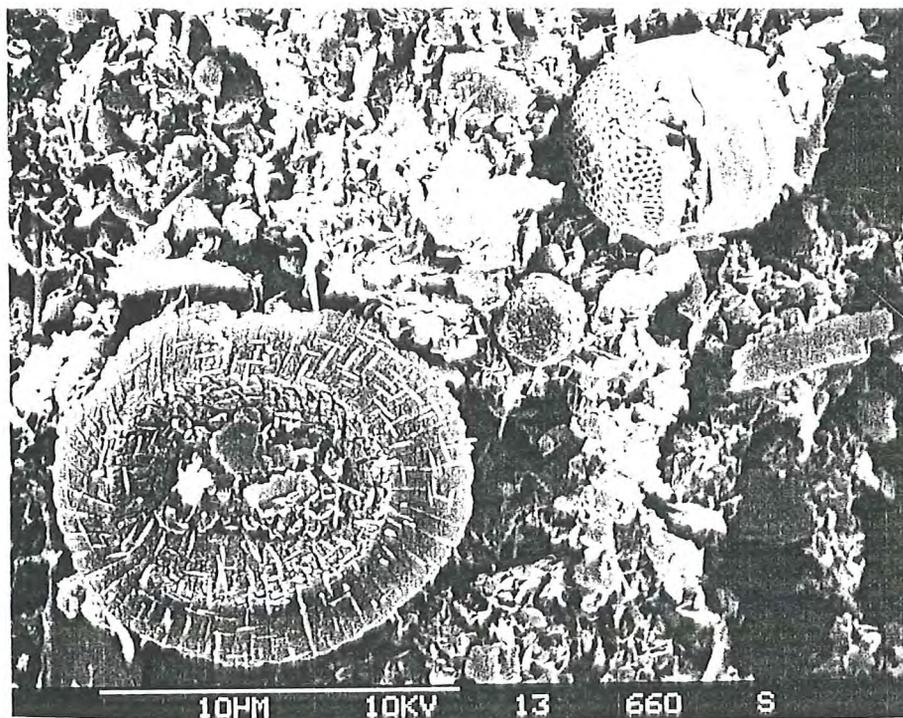
657: Gehäuse unbekannter Genese (Vergr. 2400x).



658: Kotpille mit Diatomeenresten und Spore oder Polle (Vergr. 1600x).



659: Detail von 658 (Vergr. 4800x).



660: Diatomee und Coccolith. Die Nadeln auf dem tellerförmigen Coccolithen sind Mineralneubildungen. Dieses Teilchen ist wahrscheinlich längere Zeit zusiedimentiert gewesen.

D. Spülstrom mit Räumbooteinsatz

Probenentnahme: 27.11.86 / 13⁰⁰ Uhr
Station : 1. Pfahl bei 1000 m
Tiefe : bodennah
Pegel : 4.20 m
Konzentration : 2800 mg/l

Wegen der extrem hohen Feststoffkonzentration gestaltete sich die Präparation dieser Probe außerordentlich schwierig. Da für ein brauchbares Präparat eine monopartikuläre Schicht auf den Filter notwendig ist, mußte die Ausgangssuspension sehr stark verdünnt werden. Bei dieser starken Verdünnung erfolgte aber anscheinend eine Selektion besonders der gröberen Anteile. Dies führte dazu, daß, obwohl die Ausgangssuspension augenscheinlich zahlreiche grobe Komponenten enthielt, sich das Erscheinungsbild des REM-Präparates kaum von denen der anderen Strömungszustände unterschied. Nur auf einem einigermaßen brauchbaren REM-Präparat waren vereinzelt Kotballen von bis zu 300 µ Länge zu entdecken. In Größe und Beschaffenheit glichen aber alle anderen Schwebstoffe denen der bereits bekannten Präparate. Auffälligstes Merkmal der Proben nach dem Räumbooteinsatz war der hohe Anteil an einzelnen gröberen Mineralkörnern.

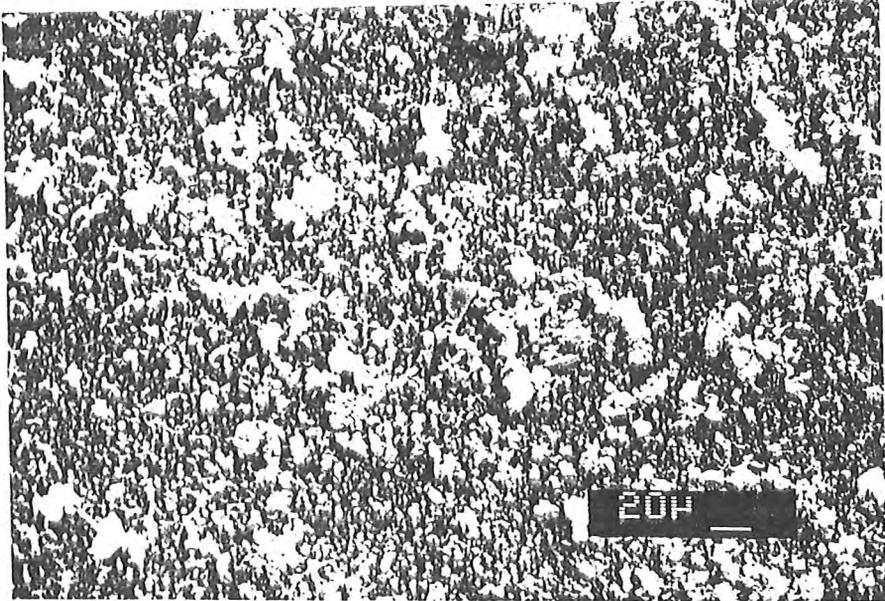
Wegen der konzentrationsbedingten Schwierigkeiten bei der REM-Untersuchung sind eine Reihe von Proben zusätzlich mit dem Lichtmikroskop bearbeitet worden. Bei diesem Verfahren bleiben die Teilchen stets unter Wasserbedeckung, da die Ausgangssuspension direkt auf den Objektträger gegeben wird. Trotz der vergleichsweise geringen Vergrößerungen ist bei diesem lichtoptischen Verfahren der Tiefenschärfenbereich schon so stark eingeschränkt, daß nur noch Teilbereiche des Präparates deutlich abgebildet werden können. Andererseits finden sich aber auf den Abbildungen nun in großer Zahl die vermuteten gröberen Anteile. Hierbei handelt es sich um Sand- und Schluffkörner und um aus feineren Teilchen zusammengesetzte Partikel. Die Frage, ob es sich hierbei um erodierten Schlack oder aber um Kotballen handelt, kann wegen der geringen Auflösung des Lichtmikroskopes nicht geklärt werden. Bemerkenswert sind weiterhin die zahlreichen großen Pflanzenreste, die in den anderen Präparaten nicht zu finden sind.

Insgesamt läßt also nicht nur die extrem hohe Ausgangskonzentration den Einsatz des Räumbootes erkennen, sondern auch die Materialbeschaffenheit und die Materialzusammensetzung weisen mit ungewöhnlich großen Anteilen an Schluff und Feinsand sowie zahlreichen großen, kompakten Agglomeraten auf die starke erosive Wirkung beim Räumen hin.

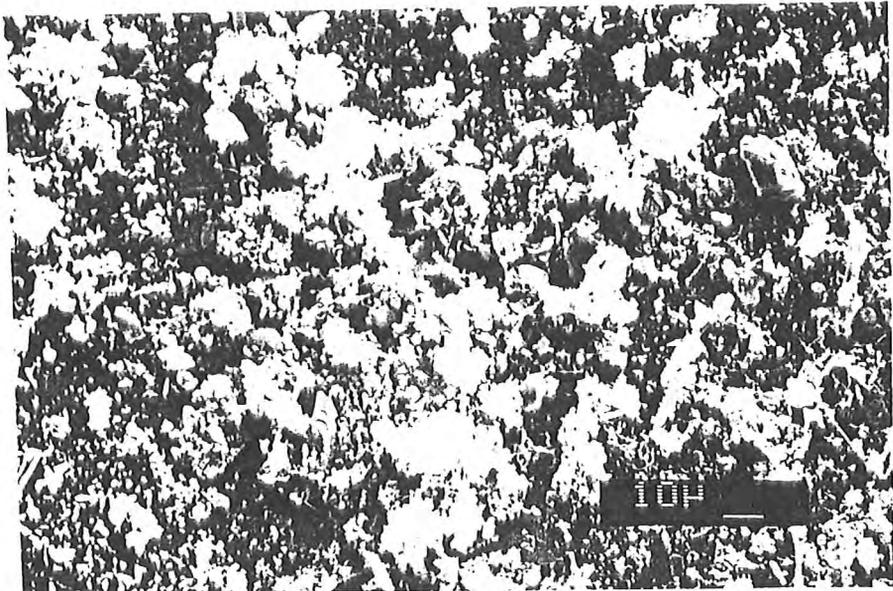
-60-
Spülstrom

mit

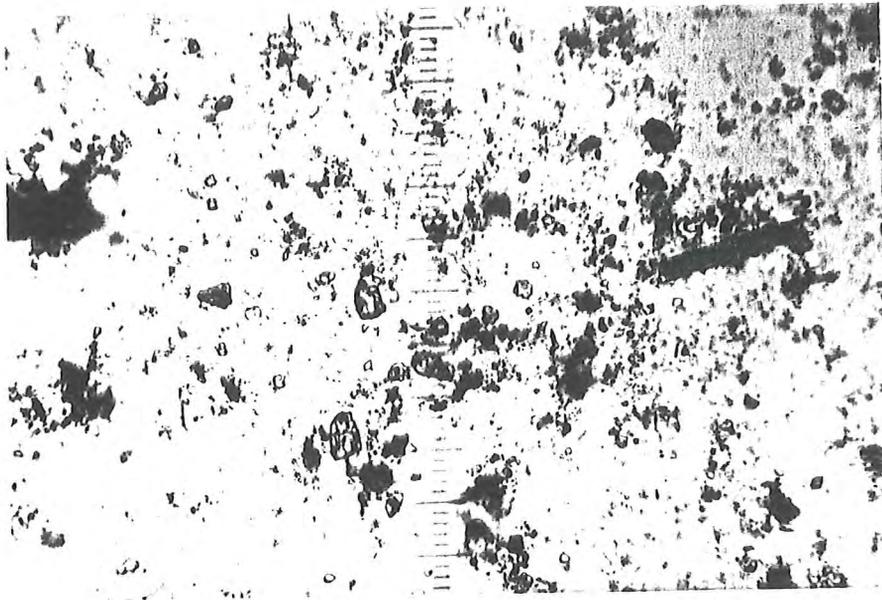
Räumbooteinsatz



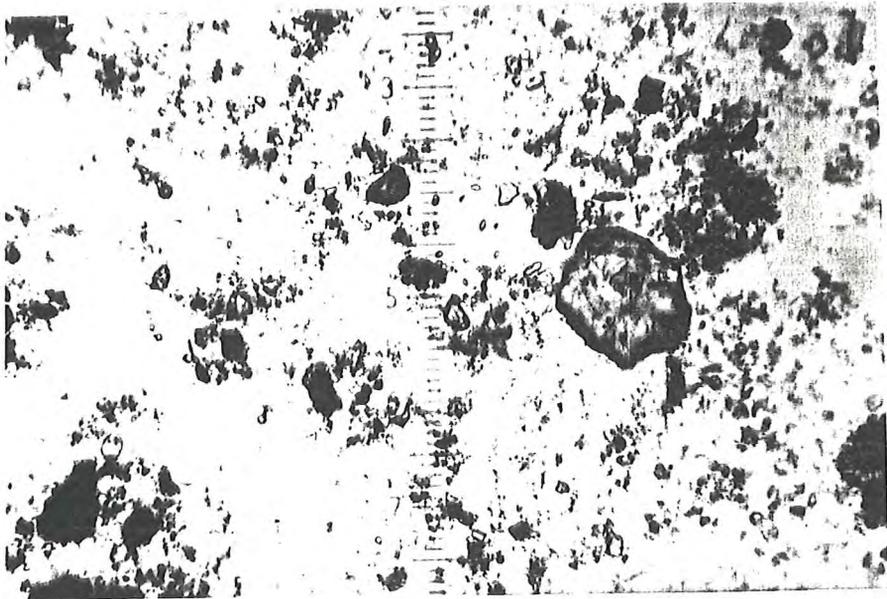
1: Überblick mit 500-facher Vergrößerung



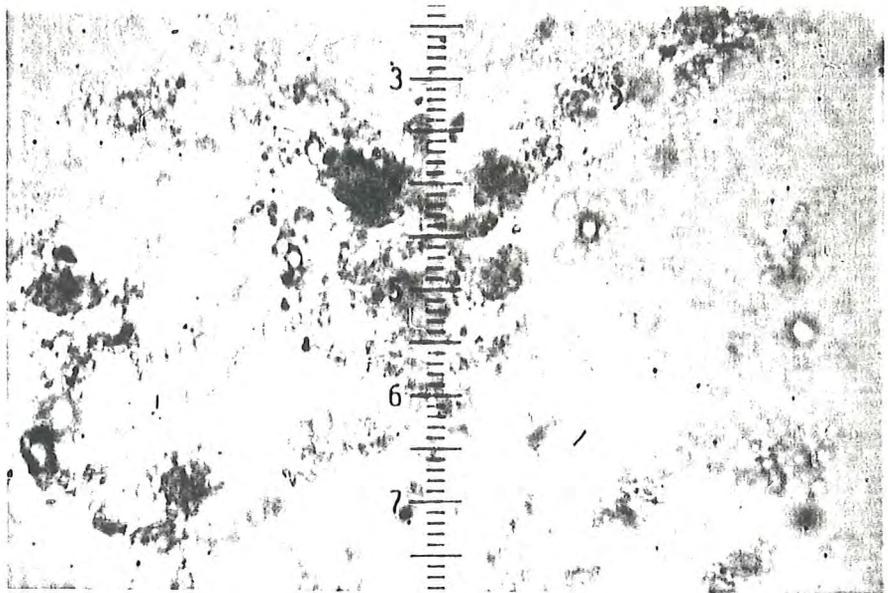
2: Agglomerat unbekannter Genese mit hohem Schluffanteil
(Vergr. 1000x)



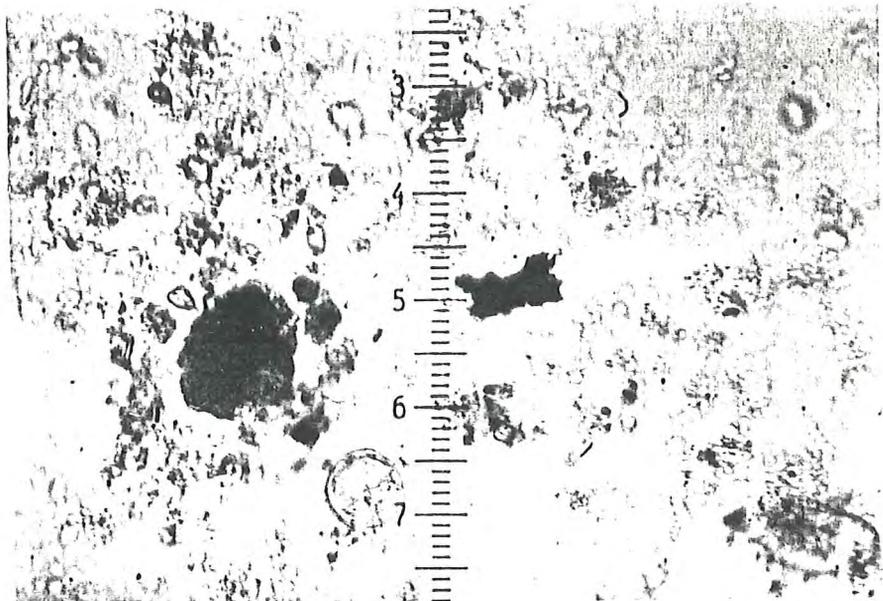
3: Eine lichtmikroskopische Aufnahme mit 125-facher Vergrößerung. In der Ausgangssuspension sind zahlreiche Feinsand- und Siltkörner sowie große Agglomerate zu erkennen (10 Teilstriche entspr. etwa 125 μm).

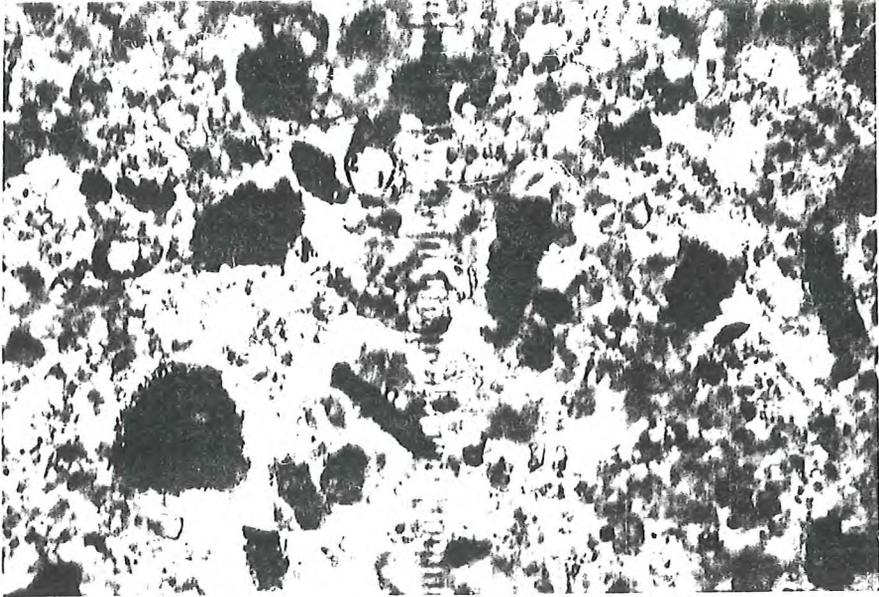


4: Ausgangssuspension bei 312-facher Vergrößerung (10 Teilstriche entspr. etwa 50 μm).

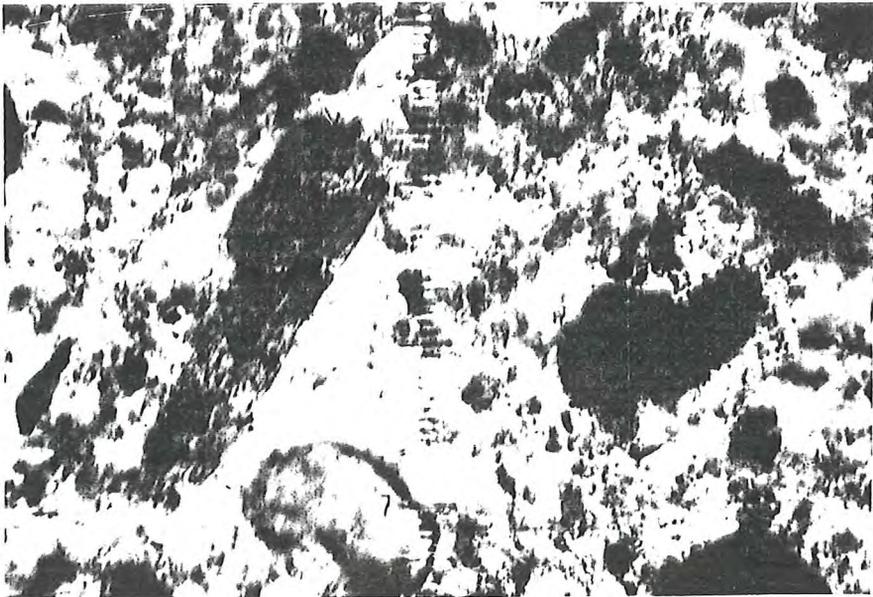


5+6: Detailaufnahmen von Zusammenballungen (Vergr. 312x).





7: Bodensatz des Ausgangsmaterials. Angereichert sind alle Teilchen mit recht hoher Sinkgeschwindigkeit (Vergr. 312x).



8: Bodensatz mit Feinsandkorn, großen Agglomeraten und groben Pflanzenresten (Vergr. 312x).

E: Flutstrom nach Räumbooteinsatz

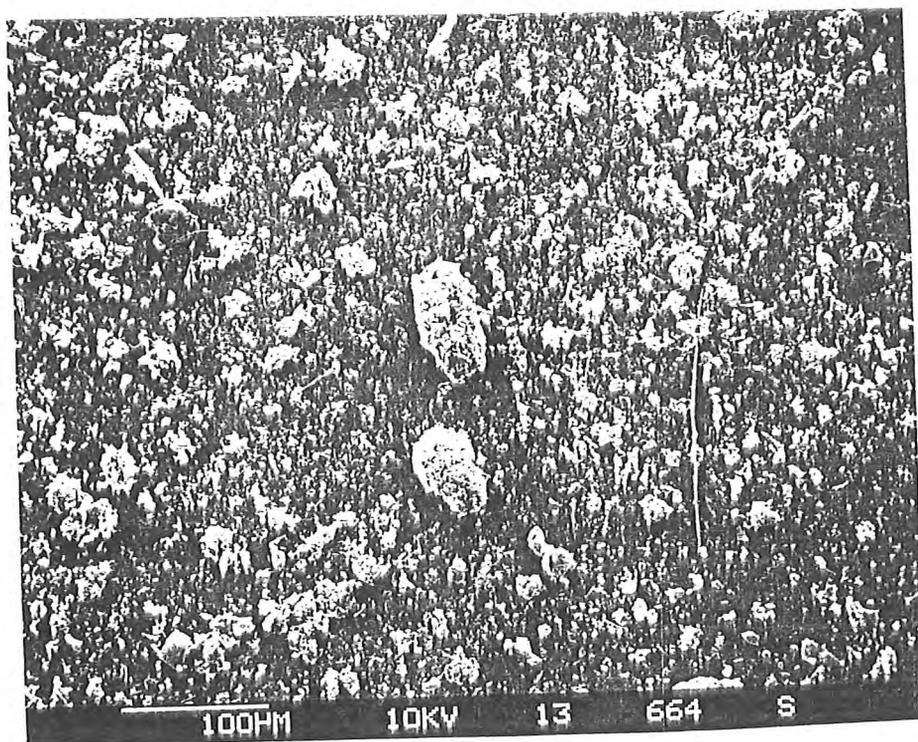
Probenentnahme: 27.11.86 / 15⁴⁵ Uhr
Station : 1. Pfahl bei 1000 m
Tiefe : 1 m unter Wasseroberfläche
Pegel : 4.70
Konzentration : 420 mg/l

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse weisen diese Probe als die von der Materialzusammensetzung her undifferenzierteste aus.

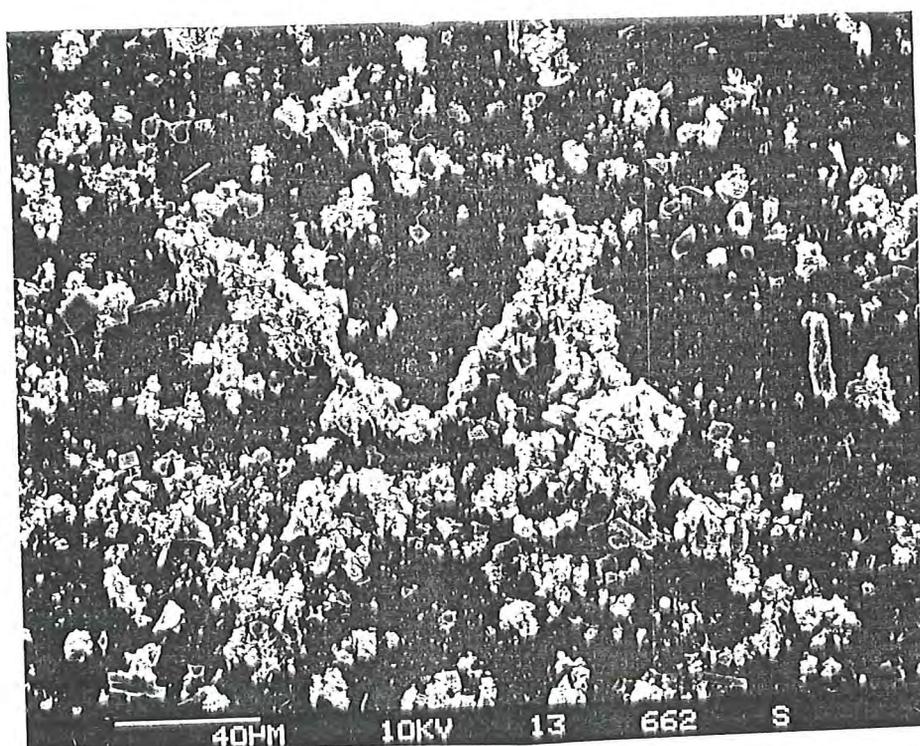
Auffällig ist allenfalls die relative Armut an organogenen Komponenten. Kotpillen sind gleichfalls seltener zu finden. Die Schwebstoffflocken sind meist recht kompakt. Gelegentlich sind mehrere kleine Flocken zu einem größeren Agglomerat vereinigt. Zum Entnahmezeitpunkt war, wie während der gesamten Flutphase, die Strömungsgeschwindigkeit recht gering. Anscheinend ist aus diesem Grunde nur relativ feines Material in Bewegung gewesen. Es deutet jedenfalls nichts darauf hin, daß z.B. besonders große Teilchen, die vom Räumbooteinsatz her stammen könnten, während der beprobten Flutphase wieder das Sieltief hinauftransportiert worden sind. Die durchschnittliche Größe beträgt meist weniger als 20 µm. Einige Kotpillen und Agglomerate können aber auch Längen von etwa 80 µm erreichen. Im großen und ganzen ist das Material mehr mit dem des Spülstromes, als mit dem der Flut des vorangegangenen Tages zu vergleichen. Dies mag ein Indiz dafür sein, daß nach einem Räumbooteinsatz ein Teil der gelösten Sedimente wieder in das Außentief zurückgelangen. Eindeutige Beweise für diese Vermutung konnten aber nicht gefunden werden.

-25-

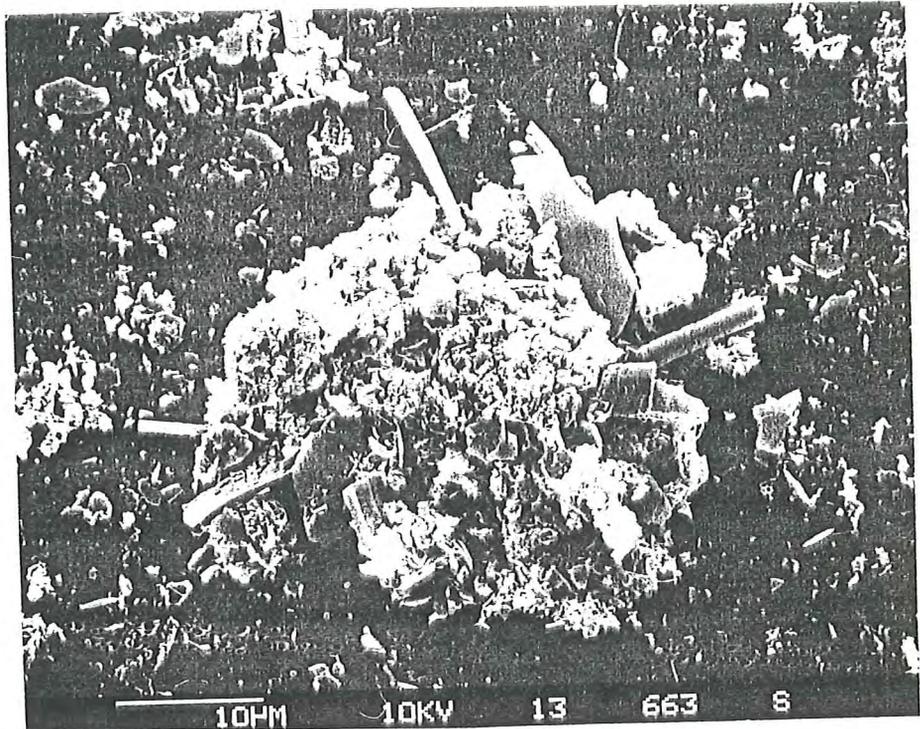
Flutstrom
nach
Räumbooteinsatz



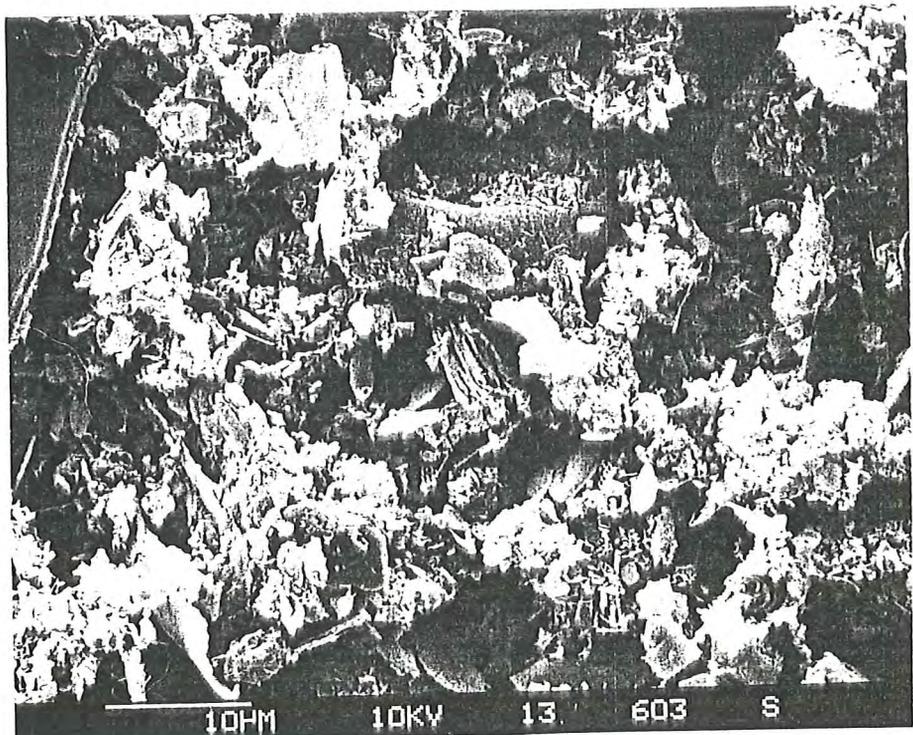
662: Ein komplex aus vielen kleineren Flocken aufgebautes Agglomerat (Vergr. 500x).



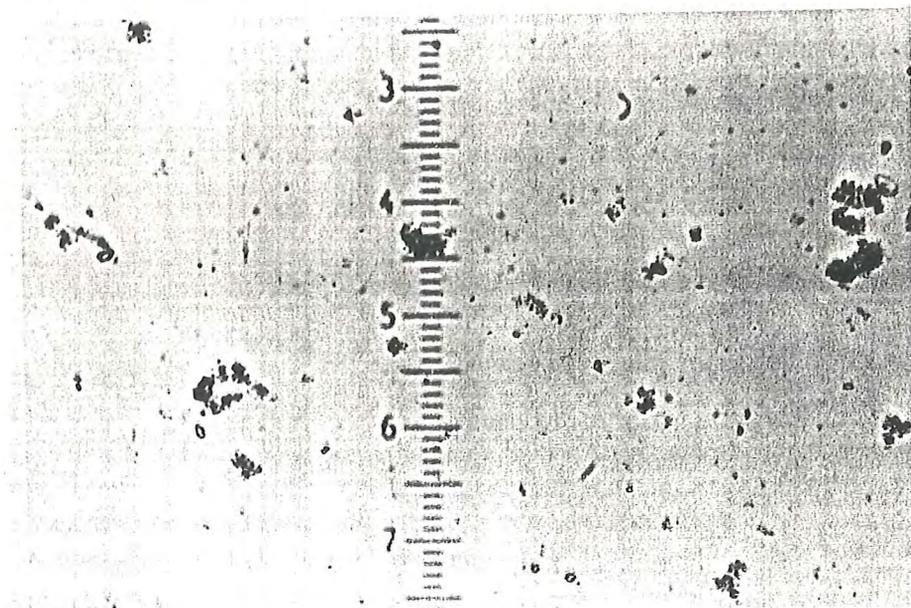
664: Übersicht mit 200-facher Vergrößerung. Zu erkennen sind zwei frische Kotpillen und zahlreiche Agglomerate verschiedenster Größe.



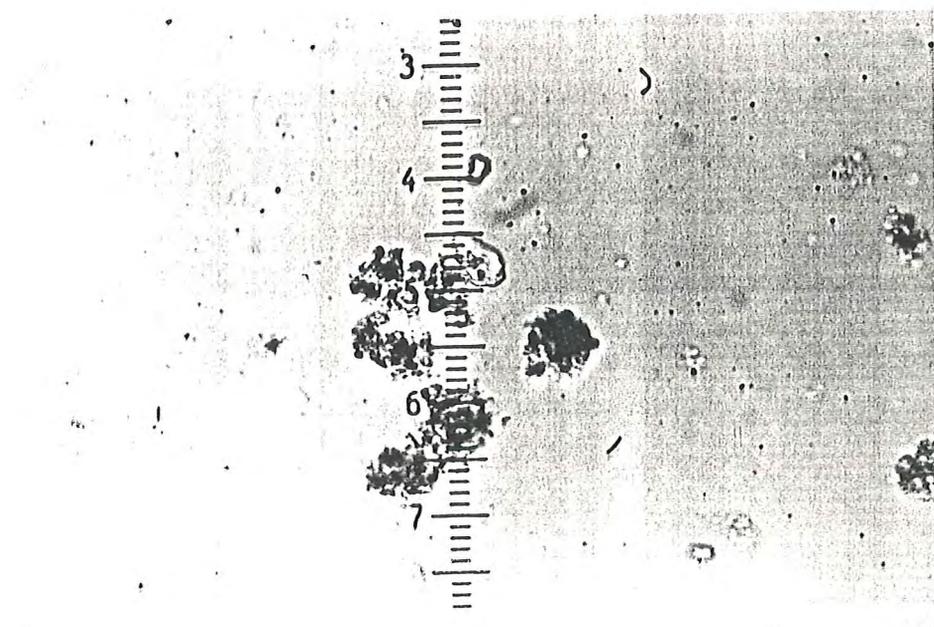
663: Im Zerfall befindliche Kotpille (Vergr. 2000x).



603: Stark verschutzter und bereits angelöster Schalenrest innerhalb eines Agglomerates (Vergr. 2000x). Resuspendiertes Material?



9: Lichtmikroskopische Aufnahme der Ausgangssuspension bei 125-facher Vergrößerung (10 Teilstriche entspr. etwa 125 μm).



10: Detailaufnahme einer größeren Flocke (Vergr. 312x, 10 Teilstriche entspr. 50 μm).

Schlußbetrachtung

Faßt man die Einzelergebnisse der Untersuchung zusammen, so kann man sagen, daß trotz der zahlreichen Schwierigkeiten bei der Präparation mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes ein Einblick in die Zusammensetzung und den Aufbau der im Neßmersieler-Außentief suspendierten Stoffe gewonnen werden konnte.

Es hat sich dabei gezeigt, daß die Materialbeschaffenheit während der verschiedenen Strömungszustände meist recht ähnlich ist und nur durch wenige Eigenarten, wie z.B. ein erhöhter Gehalt an organischen Komponenten, voneinander zu unterscheiden ist. Allein die Materialzusammensetzung während des Spülstroms mit Räumbooteinsatz fällt mit einem hohen Anteil an gröberklastischen Materialien deutlich andersartig aus.

Literaturhinweis

RICKLEFS, K.: Geologisch-Sedimentologische Untersuchungen an feinkörnigen Sedimenten aus dem Weser-Ästuar. Diplomarbeit Univ. Kiel (unveröff.), 1984.

