

Sedimentation in Tidehäfen

Phase 2

Von HORST NASNER

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit der Wechselwirkung zwischen den Strömungen und der Sedimentation in offenen Tidehäfen. In dem vom BMBF geförderten KFKI-Projekt MTK 0544 wurde dazu ein satellitengestütztes Treibkörpermeßsystem entwickelt und eingesetzt. Dem Feststoffangebot und den Strömungsbedingungen entsprechend ist der Kornaufbau der Hafensedimente und der mineralische Anteil regional verschieden und auch innerhalb der einzelnen Untersuchungsgebiete nicht einheitlich.

Mit den Untersuchungen wird dargelegt, wo die Sedimentationsschwerpunkte in den Tidehäfen liegen. Außerdem wird an Beispielen gezeigt, wie der Unterhaltungsaufwand durch bauliche Maßnahmen oder mit speziellen Methoden eingeschränkt werden kann.

Summary

This study investigates the interactivity between current conditions and sedimentation patterns in open tidal harbours. Within the frame of the KFKI-project MTK 0544, financed by the BMBF, a satellite-based method for current measurements was developed and used. According to the offer of suspended solid matter and current conditions, the grain sizes and the content of minerals in harbour sediments differ not only from region to region, but are also not uniform within single areas of investigation.

This investigation focuses on the centres of sedimentations in tidal harbours. In addition, it demonstrates with examples how maintenance can be reduced by special ways of construction and by special methods.

Inhalt

1. Einleitung und Aufgabenstellung	64
2. Untersuchungsgebiete	64
3. Bearbeitungsansätze	65
3.1 Sedimentationsanalysen	65
3.2 Bodenproben	65
3.3 Strömungsmessungen	66
4. Hafenanlagen in Bremen	67
4.1 Vorbemerkungen	67
4.2 Europahafen mit Wendebecken	69
4.3 Wendebecken Überseehafen und Werfthafen	70
4.4 Neustädter Hafen	76
4.5 Mittelsbürener Hafen	81
4.6 Zusammenfassende Betrachtungen	82
5. Häfen im Brackwasser- und Mündungsgebiet	88
5.1 Vorbemerkungen	88
5.2 Emden	88
5.3 Wilhelmshaven	94
5.4 Bremerhaven	100

5.5 Cuxhaven	106
5.6 Brunsbüttel	108
5.7 Zusammenfassende Betrachtungen	109
6. Schlußbemerkungen	112
7. Schriftenverzeichnis	113

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Mit dem KFKI-Projekt „Sedimentation in Tidehäfen“ waren die Auflandungen offener Häfen im deutschen Nordseeküstenbereich zu untersuchen.

In einer ersten Phase wurden die Sedimentationen auf der Grundlage von Kontrollpeilungen ermittelt. Über die Ergebnisse des vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten KFKI-Projektes MTK 0470 ist ausführlich berichtet worden (NASNER, 1992).

Die in Phase 1 gefundenen Sedimentationen in den Tidehäfen haben gezeigt, daß ganz bestimmte Bereiche von besonders hohen Auflandungen betroffen sind. Es handelt sich dabei um eine Reaktion auf die jeweils herrschenden hydrodynamischen Vorgänge. Zusätzlich ist das Angebot und die Zusammensetzung der sich ablagernden Sedimente von Bedeutung. Es war deshalb vorgesehen, in einer 2. Phase in verschiedenen Tidehäfen Strömungsmessungen und Sedimentationsanalysen vorzunehmen. Außerdem sollten nach den mehr globalen Peilplanauswertungen die Problembereiche der Häfen in engeren Rastern erfaßt werden, um die Maxima der Verlandungen genauer festlegen zu können.

Im einzelnen waren in Phase 2 folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

1. Detaillierte Sedimentationsuntersuchungen mit Peilplananalysen zur Erfassung der Verlandungsschwerpunkte in den Tidehäfen.
2. Strömungsmessungen mit Treibkörpern in verschiedenen Wassertiefen bei unterschiedlichen Randbedingungen in ausgewählten Häfen. Die Treibkörperbahnen sollten möglichst an verschiedenen Stellen gleichzeitig mit einem dafür zu entwickelnden Verfahren aufgenommen werden.
3. Entnahme und Analyse von Bodenproben mit dem Ziel, Erkenntnisse über den Aufbau und die Verteilung der Hafensedimente zu bekommen.

2. Untersuchungsgebiete

In dem Projekt wurden verschiedene Hafengebiete an der Ems, Jade, Weser und Elbe untersucht (Abb. 1). Dazu gehörten die oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen stadtbremischen Hafenanlagen. Im Brackwasser- und Küstengebiet wurden für Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven und Brunsbüttel morphologische Analysen mit Peilplanauswertungen vorgenommen, die in verschiedenen Hafengebieten durch die Entnahme von Bodenproben und Strömungsmessungen ergänzt worden sind.

Die hydrologischen Randbedingungen in den einzelnen Hafengebieten, wie Tidegeschehen, Oberwasser und Salzgehaltsverhältnisse, sind im Bericht zur Phase 1 des Projektes ausführlich beschrieben worden (NASNER, 1992). Deshalb wird im folgenden nur kurz darauf eingegangen.

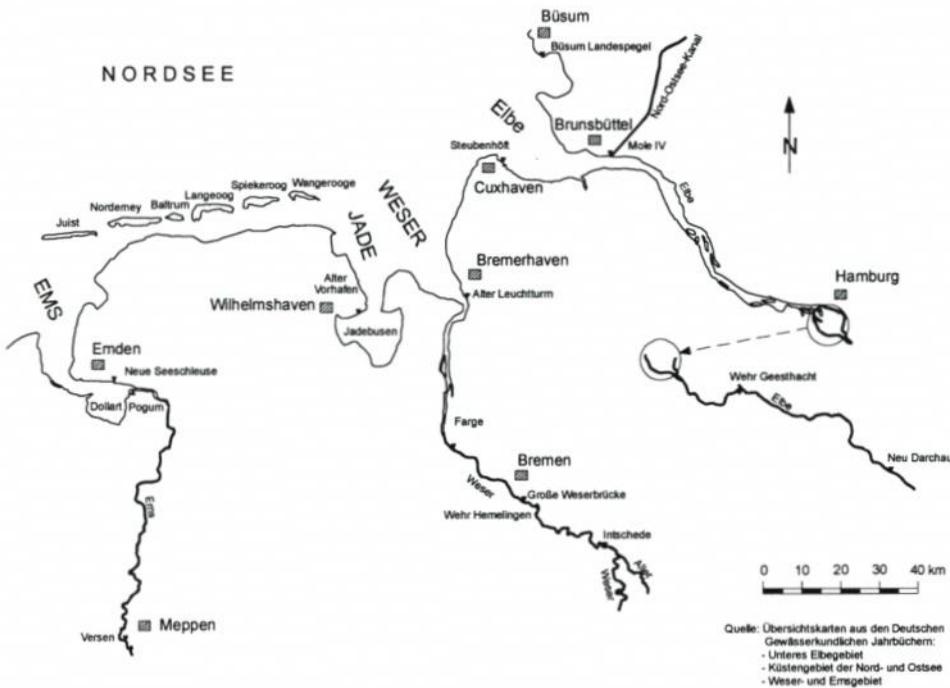


Abb. 1: Lageplan

3. Bearbeitungsansätze

3.1 Sedimentationsanalysen

Mit dem Ziel, die Verlandungsschwerpunkte in den offenen Tidehäfen genauer zu erfassen, wurde die Auswertungsmethode für die langfristig vorliegenden Peilpläne geändert. Statt größerer Teilflächen wurden die einzelnen Peilpunkte aus den Vor- und Nachpeilungen miteinander verglichen. Aus den Tiefendifferenzen waren dazu mittlere Jahreswerte und daraus mit speziellen Rechnerprogrammen Bereiche gleicher Sedimentationsraten zu bilden. Bei den Auswertungen wurden nur die örtlichen Sohlenerhöhungen berücksichtigt. Die daraus ermittelten Tiefendifferenzpläne erfassen sowohl die in das Hafengebiet eingebrachten Feststoffe als auch örtliche Umlagerungen innerhalb des Untersuchungsgebietes, wie sie durch Rückströmungen oder Schraubstrahleinwirkungen bei Schiffsbewegungen oder bei Baggerungen entstehen können. Die im folgenden Bericht zu erörternden morphologischen Verhältnisse in den verschiedenen Tidehäfen sind somit das Ergebnis aus natürlichen (Sedimenteintrag aus dem Strom) und künstlichen Einflüssen (Schiffsbewegungen oder Baggerungen).

3.2 Bodenproben

Die Bodenproben wurden von der Gewässersohle mit einem Van-Veen-Backengreifer entnommen. Nach Trocknung im Ofen bei 85 °C wurden die Kornverteilungen der Proben gemäß DIN 18123 mit Sieb- und Schlämmanalysen ermittelt. Zusätzlich wurden die Glühverluste als Maß des Anteils organischer Substanz bestimmt.

3.3 Strömungsmessungen

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein neues Verfahren für die gleichzeitige Messung von mehreren Treibkörperbahnen in verschiedenen Wassertiefen im Echtzeitverfahren entwickelt. Zur Positionierung wird dazu das weltweit anwendbare, satellitengestützte Ortungsverfahren des DGPS (Differential Global Positioning System) genutzt. Die Arbeitsweise des DGPS wird z. B. von HURN (1989) oder KUMM (1993) erläutert.

Zunächst wurden konventionell ausgerüstete Treibkörper mit nur einem auf dem Vermessungsboot befindlichen Pathfinder (GPS-Empfänger mit Datenlogger) einzeln eingemessen. Die so gewonnenen Daten mußten mit den von der Referenzstation aufgenommenen Referenzdaten in einem aufwendigen Post-Processing in genaue DGPS-Positionen umgerechnet werden. Außerdem waren so noch keine Simultanmessungen möglich.

Bei diesem Online-System sind die Treibkörper selbst schwimmende Meß- und Übertragungsstationen. Die Meßeinrichtung besteht aus drei Hauptgruppen, der Referenzstation, den Treibkörpern (Feldempfängern) und der Basisstation (Abb. 2). Die Feldempfänger und die Referenzstation empfangen gleichzeitig GPS-Signale. Die Referenzstation vergleicht die Satellitendaten mit der vorgegebenen genauen Position. Aus der Differenz werden Korrekturwerte berechnet. Die Korrekturmeldungen werden per Funk zu den Feldempfängern übermittelt und mit den dort vorhandenen GPS-Daten zu hochgenauen DGPS-Positionen gewandelt, bevor sie im Sekundentakt zur Verarbeitung, Darstellung und Speicherung an die Basisstation weitergeleitet werden.

Da zur Übertragung der Daten zur Basisstation nur eine Frequenz zur Verfügung steht, führt das Funkmanagement ein Microcontroller durch. Das Gerät ist so programmiert, daß

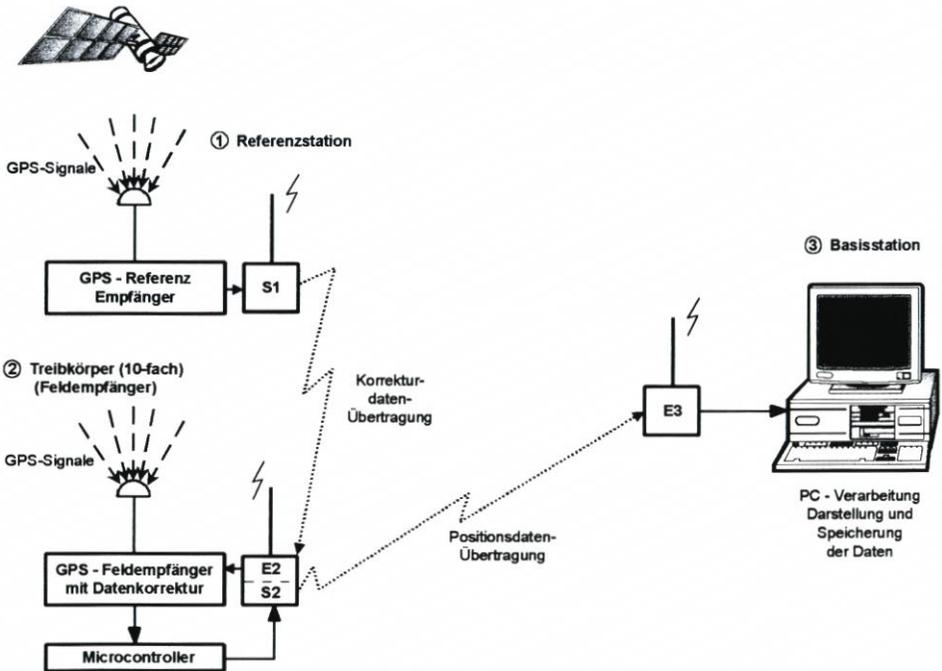


Abb. 2: Prinzipskizze des Treibkörpermeßsystems im Echtzeitverfahren

jeder Treibkörper seine Informationen in einem vorgegebenen Zeittakt aussendet. Die 10 Feldempfänger werden nacheinander so gesteuert, daß die einzelnen Treibkörper die jeweilige Position im Abstand von 20 Sekunden vom Sender (S2) zum Empfänger (E3) des Basisrechners sendet (Abb. 2). Dort werden die Daten verarbeitet und dargestellt. Auf den eingescannten Plänen des Untersuchungsgebietes können gleichzeitig bis zu 10 Treibkörperbahnen am Monitor verfolgt werden. Dabei wird die aktuelle Position der einzelnen Treibkörper alle 20 Sekunden registriert.

Eine wesentliche Neuerung gegenüber früheren Verfahren besteht zum einen darin, daß die Daten im Realtime DGPS aufgenommen und am Monitor angezeigt werden und zum anderen, daß die gespeicherten Daten mit einem dafür selbst entwickelten Programm dargestellt und auf Video übertragbar sind. Die aus der Natur gewonnenen Daten sind somit als bewegte Bilder darstellbar (PIEPER u. TORN, 1996).

4. Hafenanlagen in Bremen

4.1 Vorbemerkungen

Im stadtbremischen Hafengebiet wurden Untersuchungen für den Europahafen, die Wendebecken Europahafen und Überseehafen, den Neustädter-, Werft- und Mittelsbürener Hafen durchgeführt (Abb. 3). In den nahe der Tidegrenze gelegenen Häfen werden die Tiden noch nachhaltig vom Oberwasser beeinflusst.

Abb. 4 zeigt die Ganglinien der Tidewasserstände (Thw, Tnw) und den Tidehub (Thb) in Bremen und das Oberwasser (Qo) der Weser am Pegel Intschede für die Zeit nach dem 9 m-Unterweserausbau ab 1983. Der mittlere Tidehub beträgt $MThb_{1983/95} = 400$ cm. Aus der Auftragung in Abb. 4 wird deutlich, wie das Oberwasser die Wasserstände und den Tidehub beeinflusst. Bei hohen Abflüssen wird besonders das Tideniedrigwasser (Tnw) angehoben und der Tidehub (Thb) liegt deutlich unter dem langjährigen Mittelwert. Bei niedrigem Oberwasser, wie von 1989 bis 1992, ist es umgekehrt. Hydrodynamisch ist dies von Bedeutung, weil bei den größeren Tidehüben die Flutströmungen verstärkt werden.

Im Bereich der stadtbremischen Häfen besteht ein guter Zusammenhang zwischen der

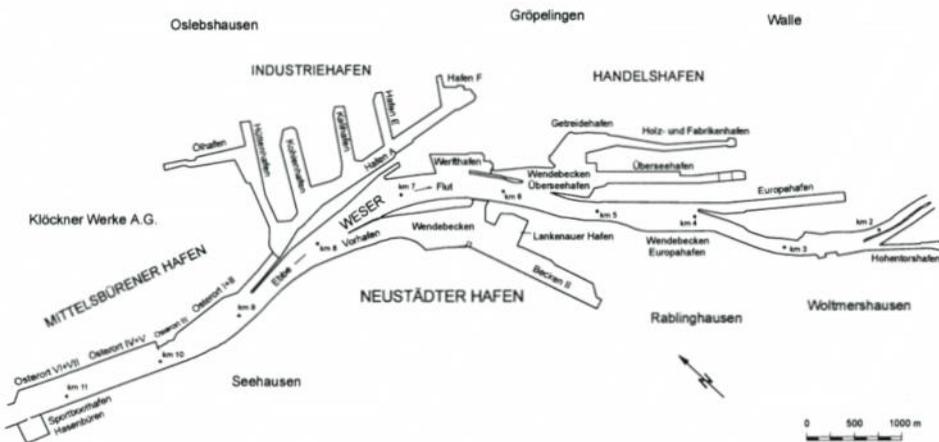


Abb. 3: Hafenanlagen in Bremen

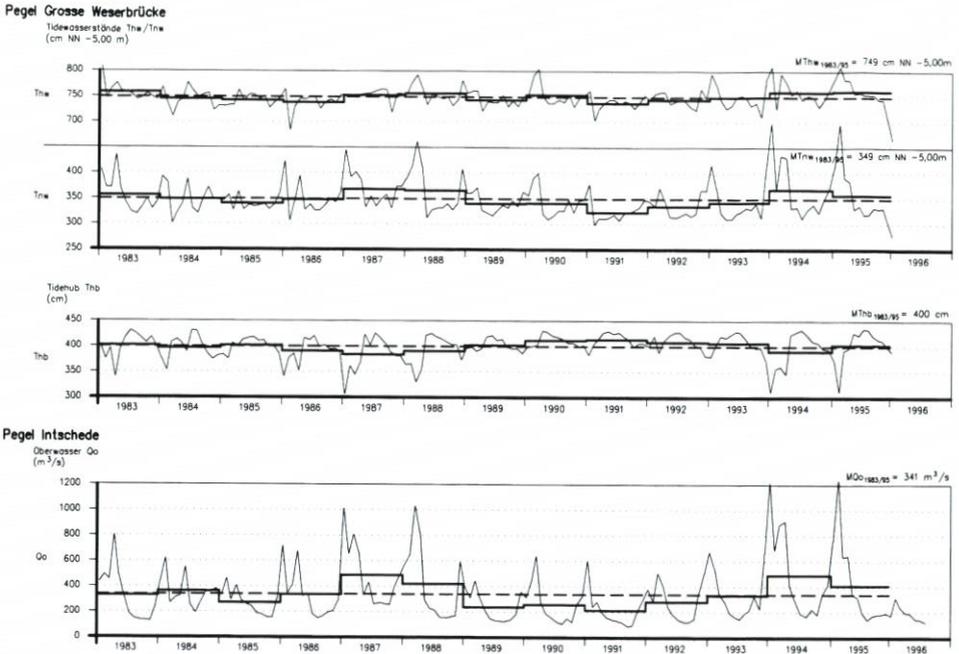


Abb. 4: Monats- und Jahresmittelwerte gewässerkundlicher Einflußgrößen in der Weser bei Bremen

Schwefstofffracht in der Unterweser und dem Oberwasser. Hohe Abflüsse vergrößern den Feststoffgehalt erheblich (Abb. 5). Folglich ist dann auch mit höheren Sedimentationen in den Hafenbecken zu rechnen.

Zu den folgenden Erläuterungen der Sedimentationsanalysen ist anzumerken, daß wegen der extremen Verhältnisse im Wendebcken des Neustädter Hafens vor der Hafenschließung die Sedimentationsraten in 50-cm-Schritten ermittelt wurden. Für die anderen Hafenbereiche beträgt die Staffelung 25 cm. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden für alle Untersuchungsbereiche einheitliche Farbabstufungen gewählt.

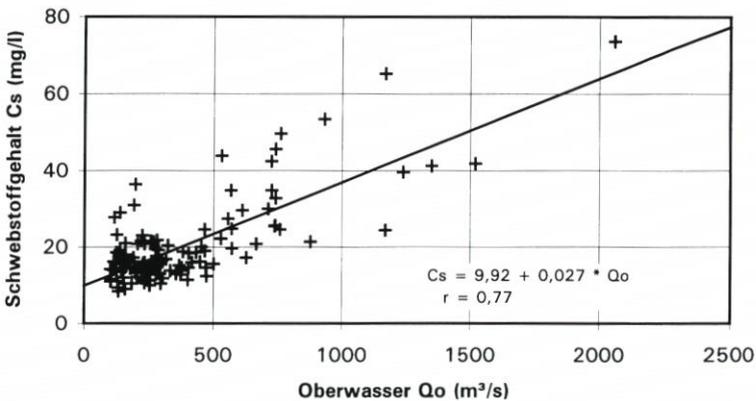


Abb. 5: Schwefstoffgehalt C_s und Oberwasser in der Weser bei Bremen (1987 bis 1990)

4.2 Europahafen mit Wendebecken

Die morphologischen Verhältnisse im äußeren Teil des Europahafens und dem in der Weser gelegenen Wendebecken sind in Abb. 6 wiedergegeben. Für den Europahafen wurden Peilpläne von 1981 bis 1991 und für das Wendebecken von 1970 bis 1991 ausgewertet.

Für den Europahafen bestätigt sich das in der Phase 1 gewonnene Ergebnis, wonach die Sedimentation innerhalb des Europahafens rasch abnimmt. Interessant sind die morphologischen Verhältnisse im mittleren Auswertungsbereich oberhalb der Einfahrt. Die höheren Werte in den Randbereichen sind wohl weniger auf natürliche Ursachen zurückzuführen. Offenbar wird bereits abgesetztes Material durch Schiffsbewegungen resuspendiert und seitlich verlagert. Dieser Vorgang wurde auch an anderer Stelle beobachtet, worauf später noch näher eingegangen wird.

Im Wendebecken Europahafen sind deutlich zwei Verlandungsschwerpunkte zu erkennen (Abb. 6). Ursächlich für die starken Auflandungen im oberen Bereich des Wendebeckens, besonders bei hohem Oberwasser, ist der Sohl sprung bei Weser-km 4,0 von SKN $-4,00$ m auf SKN $-8,60$ m (Übergang zur Seeschiffahrtsstraße) und die Querschnittserweiterung zum Wendebecken. Die Abhängigkeit zwischen dem Oberwasser aus dem Binnenland und der Sedimentation ist mathematisch nachweisbar und wurde an anderer Stelle erläutert (NASNER, 1992).

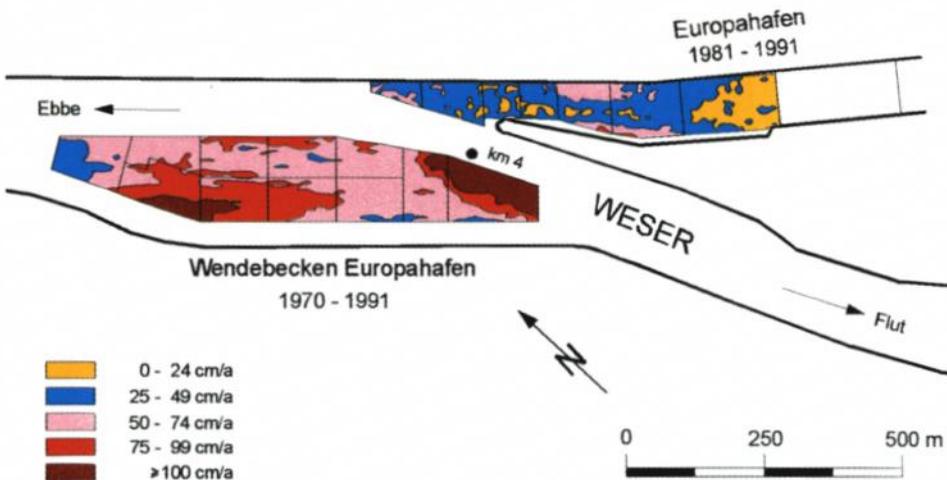


Abb. 6: Sedimentationsraten im Europahafen und Wendebecken Europahafen in Bremen

Der zweite Verlandungsschwerpunkt liegt am unteren äußeren Ende des Wendebeckens. Nach Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) treten dort in der Querschnittserweiterung, besonders während der Flutphase, Walzenströmungen auf, in deren innerem Teil sich verstärkt die mitgeführten Feststoffe ablagern. Insgesamt gesehen führen die geometrischen Randbedingungen (vergrößerter Querschnitt und wechselnde Sohlentiefen) zu den sehr ungünstigen morphologischen Verhältnissen im Wendebecken.

Im Europahafen und Wendebecken wurden am 25. 10. 1989 und am 22. 7. 1992 Bodenproben entnommen. Vor der Probenentnahme im Oktober 1989 ist im Bereich des Wendebeckens und im Europahafen baggert worden. Die nach einer längeren Ruhephase

durchgeführten Kornanalysen vom Juli 1992 geben deshalb einen besseren Einblick in die natürlichen Verhältnisse und lassen Rückschlüsse auf die Strömungs- und Sedimentationsbedingungen zu. Für die Darstellung der Ergebnisse wurden die mittleren Korndurchmesser d_{50} und die Glühverluste den Entnahmestellen zugeordnet (Abb. 7). Damit können Veränderungen in der Zusammensetzung des Sohlenmaterials innerhalb des Hafengebietes veranschaulicht werden. Die von jeder Probe entwickelten Kornverteilungen werden später zusammenfassend für alle stadtbremischen Untersuchungsgebiete in Körnungsdreiecken zur Bodenklassifizierung miteinander verglichen.

Innerhalb des Europahafens wurde ausschließlich Schluffkorn mit $d_{50} < 0,02$ mm und Glühverlusten bis über 17 % angetroffen. Die mittleren Korndurchmesser nehmen in der Tendenz von außen nach innen ab.

Die Glühverluste stehen in engem Zusammenhang mit den ermittelten Kornfraktionen (Abb. 7). Überall dort, wo überwiegend Schlämmerkornanteile analysiert wurden, liegen sie über 12 %, bei den Proben mit stärkeren Sandkornanteilen deutlich darunter. Das Ergebnis überrascht nicht, da die organischen Bestandteile bekanntlich mehr von den feinkörnigen Mineralien absorbiert werden.

Den Strömungsbedingungen im Bereich des Wendebeckens entsprechend überwiegen am Strom die Sandkornanteile mit $d > 0,06$ mm und im Randbereich die Schlämmerkornanteile. Interessant ist hier ein Vergleich mit den morphologischen Verhältnissen im Wendebecken (Abb. 6). Es besteht eine eindeutige Zuordnung zwischen Korndurchmessern, Glühverlusten und den Sedimentationen im Wendebecken Europahafen. Höhere Ablagerungen feineren Materials finden im Bereich der schwächeren Strömungen am Rande des Wendebeckens statt. Dabei unterliegt der obere Abschnitt des Wendebeckens besonderen Bedingungen. Vor der Beprobung im Juli 1992 führte die Weser über einen längeren Zeitraum wenig Oberwasser (Abb. 4), was in Bremen höhere Tiden mit verstärkten Flutströmungen zur Folge hat. In diesem Fall kann sich feineres Material im Übergangsbereich der Weser zur Binnenschiffahrtsstraße bei km 4,0 ablagern. Die hohen Sedimentationen treten dort bei starkem Oberwasser und entsprechend hohen Ebbestromgeschwindigkeiten aufgrund des Sohlensprungs zum seeschiffstiefen Wasser auf. Der Erweiterungsbereich bei km 4,0 hat dann die Wirkung einer Sandfalle, in der sich das von oben mitgeführte Geschiebe ablagert.

4.3 Wendebecken Überseehafen und Werfthafen

Ein großer Teil der in den Handelshafen gelangenden Feststoffe sedimentiert im Wendebecken Überseehafen (NASNER, 1992). Dieser Hafengebiet sowie der vergleichbar stark verlandende Werfthafen wurden einer detaillierten Sedimentationsanalyse unterzogen.

Die Morphologie der Hafensohle im Wendebecken Überseehafen läßt erkennen, daß örtliche Umlagerungen durch Schiffsbewegungen stattfinden, wodurch verstärkte Auflagerungen im nördlichen und südlichen Untersuchungsgebiet verursacht werden (Abb. 8).

Die relativ ungünstigen Sedimentationsverhältnisse im Werfthafen sind trotz der dort vorhandenen geringeren Soltiefe durch die Geometrie mit der verhältnismäßig großen Einfahrtbreite zur Hafentlänge erklärt. Das aus der Peilplananalyse gewonnene morphologische Sohlenbild vom Werfthafen in Abb. 8 veranschaulicht, daß die stärksten Ablagerungen im mittleren Einfahrtbereich eintreten. Ursächlich dafür sind die Strömungen, die mit dem für dieses Projekt entwickelten Treibkörpermeßsystem in der Natur untersucht worden sind.

Die am 31. 8. 1994 bei einem Tidefall von 354 cm ausgeführten Messungen zeigen, daß der Werfthafen bei geringem Oberwasser ($Q_0 = 176 \text{ m}^3/\text{s}$) während der Ebphase nur sehr

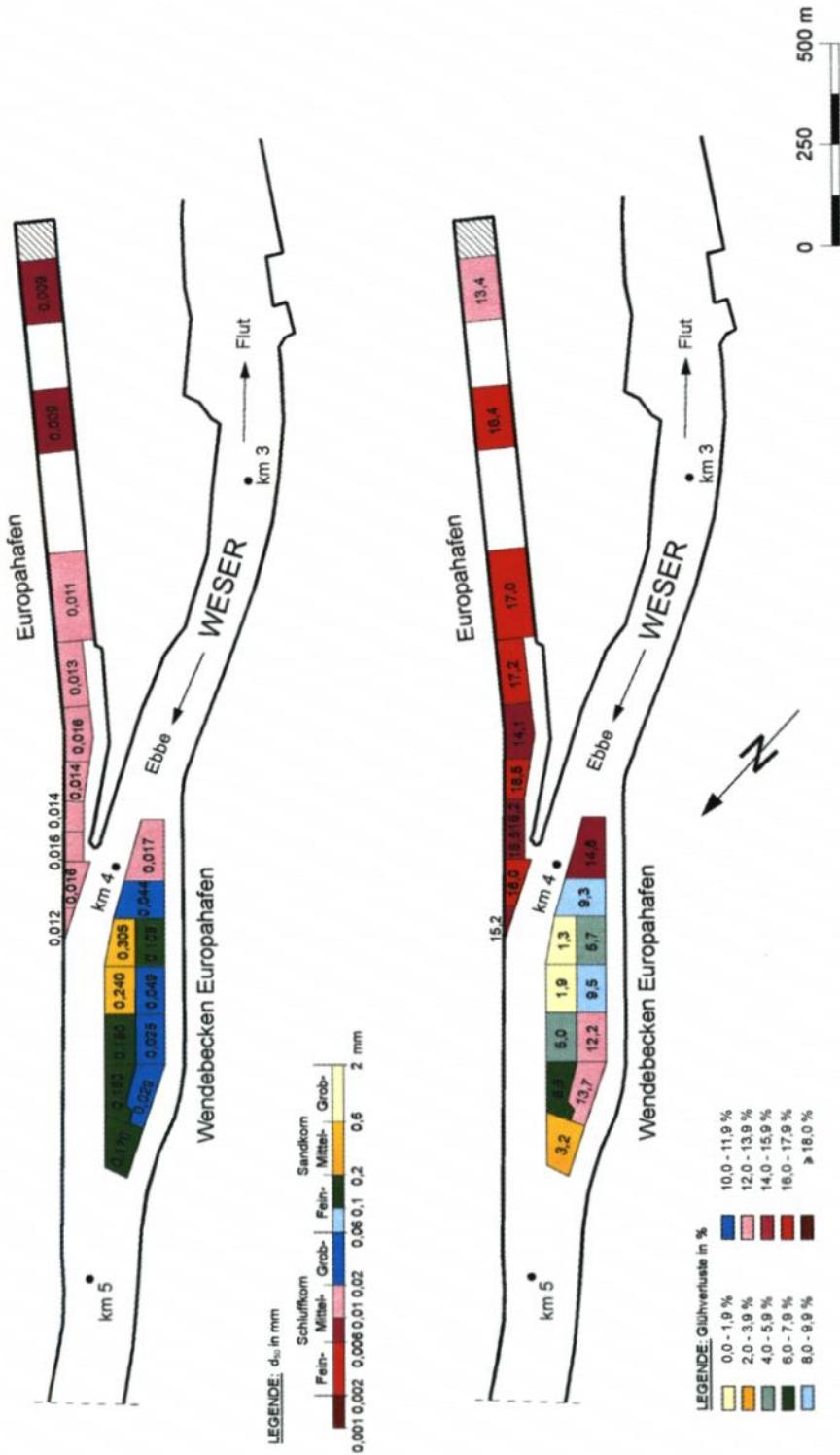


Abb. 7: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Europahafen und Wendebecken des Europahafens in Bremen der Probenentnahme vom 22. 7. 1992

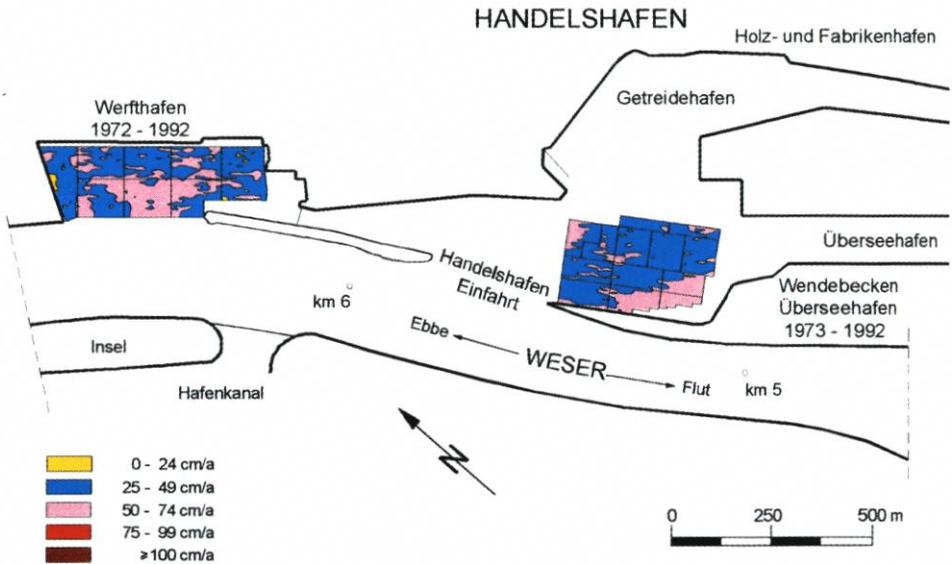


Abb. 8: Sedimentationsraten im Werfthafen und Wendebcken Überseehafen in Bremen

schwach durchströmt wird (Abb. 9). Die Strömungsgeschwindigkeiten waren im Hafenerinneren $v \leq 10$ cm/s. Bei dieser Gelegenheit sei vermerkt, daß in der Einfahrt zum Neustädter Hafen aufgrund der günstigen Lage zur Weser keine Ebbestromwalzen auftreten.

Demgegenüber wurden vom 24. bis 26. 7. 1995 bei ähnlich niedrigem Oberwasser und Tidehüben von 404 cm bis 419 cm im Werfthafen sehr ausgeprägte Flutstromwalzen gemessen (Abb. 10 und 11). Am 25. 7. 1995 wurde im nordöstlichen Teil des Hafens eine Sekundärwalze registriert. Im übrigen bilden sich in der Vorhafeneinfahrt zum Neustädter Hafen auch bei Flut keine Walzenströmungen aus.

Ein Vergleich mit Abb. 8 zeigt für den Werfthafen erwartungsgemäß, daß die höchsten Auflandungen im Walzenzentrum zu finden sind. Die oberwasserbedingten schwachen Ebbeströmungen und die intensiven Walzenströmungen während der Flutphase bei geringem Abfluß aus dem Binnenland lassen den Schluß zu, daß die Sedimente vornehmlich bei Flut in den Werfthafen eingetragen werden und sich dort absetzen. Bedingt durch die große Einfahrtbreite bilden sich bei Flutströmung die ausgeprägten Walzen, die zum Sedimenteintrag in das Hafenbecken führen. Der Staupunkt liegt bei Flut am östlichen Molenkopf der Einfahrt (Abb. 10 und 11). Anders sind die Verhältnisse bei hohem Oberwasser. Die dann dominierenden Ebbeströmungen verstärken die Ebbestromwalzen bei insgesamt höherem Feststoffangebot (Abb. 5). Für alle stadtbremischen Hafengebiete ist deshalb bei hohen Abflüssen in das Tidegebiet mit höheren Auflandungen zu rechnen.

Die am 7. 7. 1993 entnommenen Bodenproben aus dem Werfthafen bestanden wie beim Europahafen überwiegend aus Schluff. Im Hafenerinneren betrug der Anteil an Feinschluff und Ton ($d < 0,006$ mm [$6 \mu\text{m}$]) bis zu 45 %. Bedingt durch die Feinkörnigkeit des Sohlenmaterials lag der organische Anteil (Glühverlust) über 11 %. Die Kornzusammensetzung des in den Werfthafen transportierten Materials und die vorliegenden Sedimentationsverhältnisse sind auch dort die Reaktion auf die vorhandenen hydrodynamischen Randbedingungen.

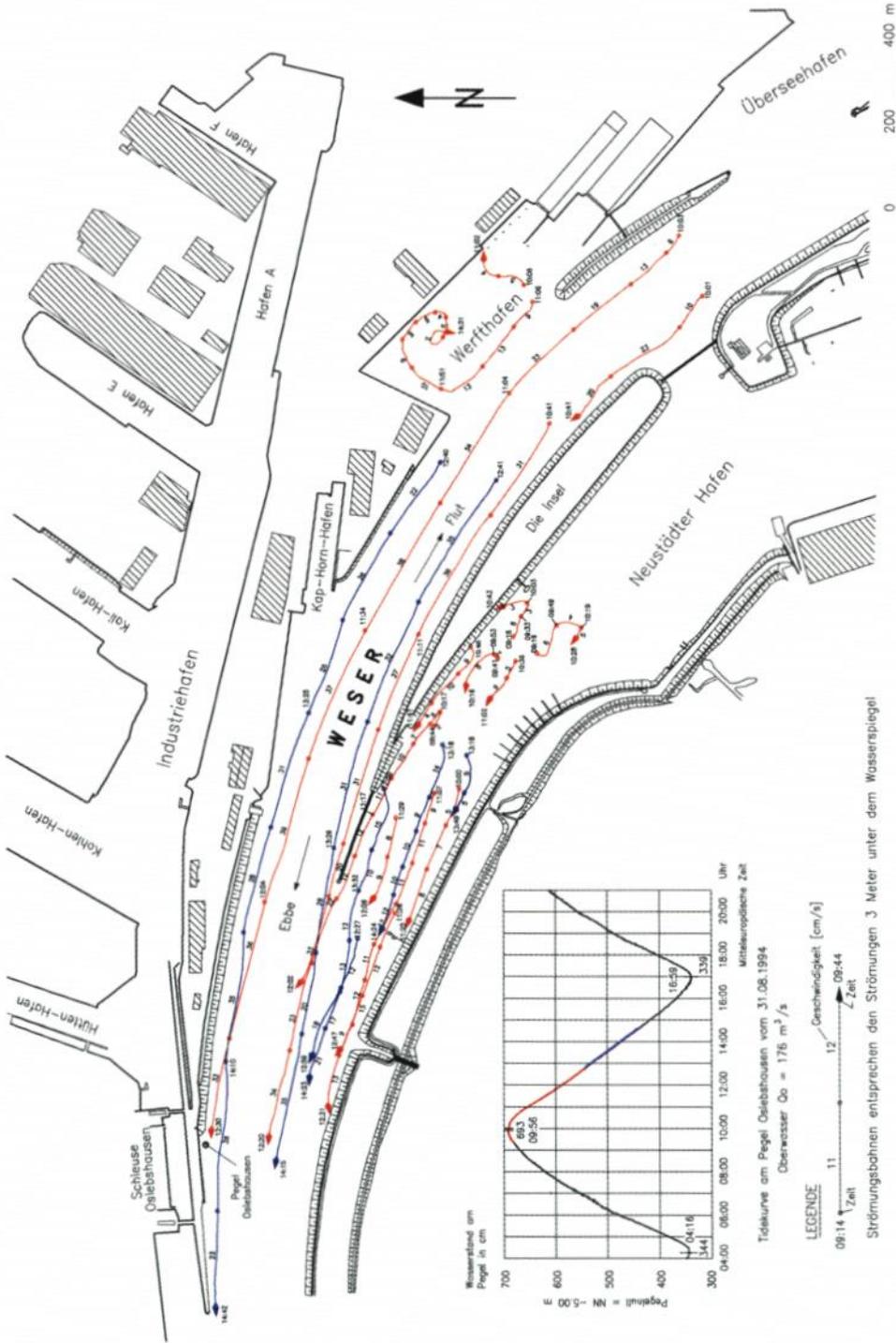


Abb. 9: Treibkörperbahnen in der Weser, im Neustädter Hafen und im Werfthafen in Bremen während der Ebbephase am 31. 8. 1994

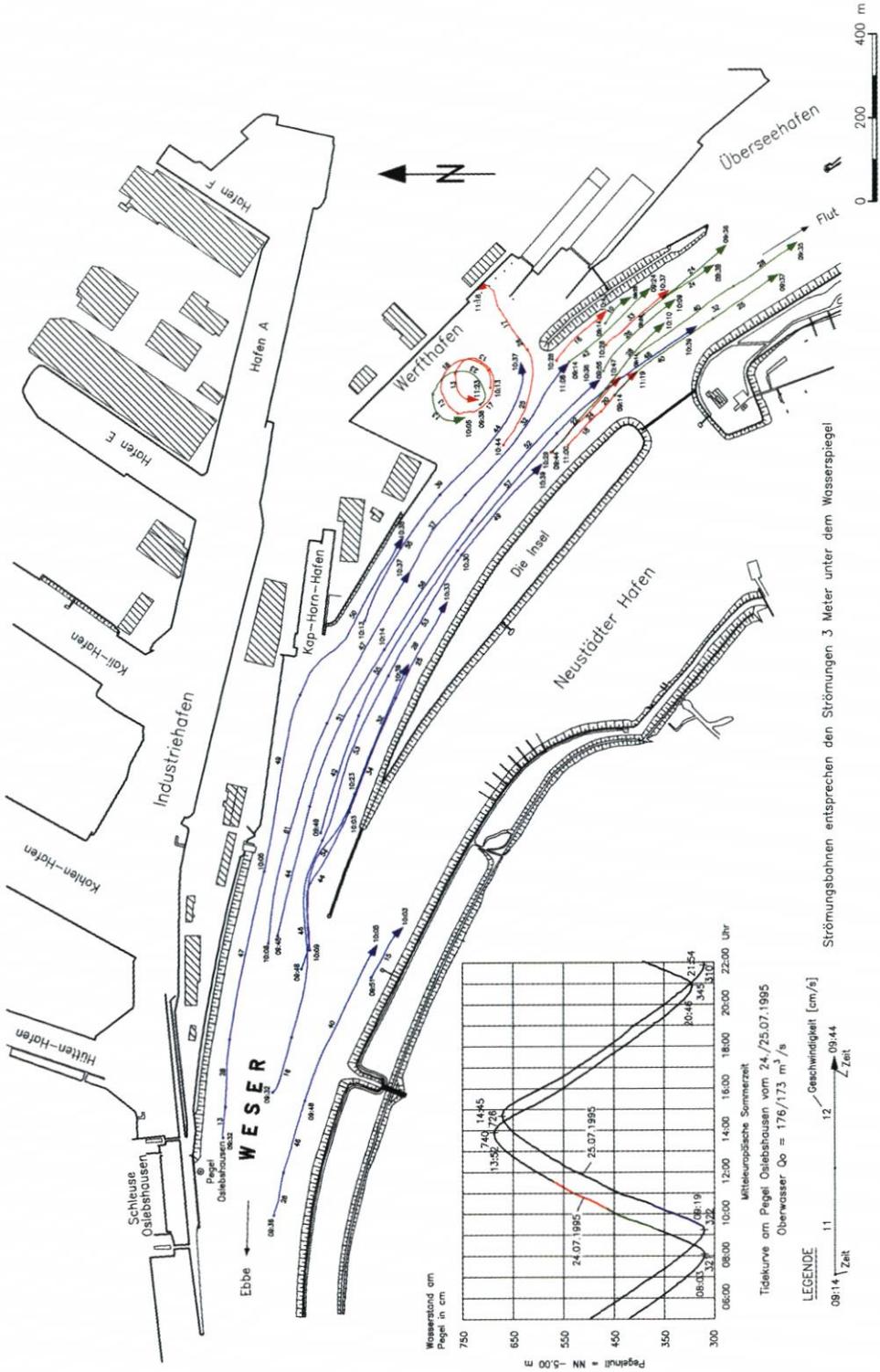


Abb. 10: Treibkörperbahnen in der Weser und im Werfthafen in Bremen während der Flutphasen am 24. und 25. 7. 1995

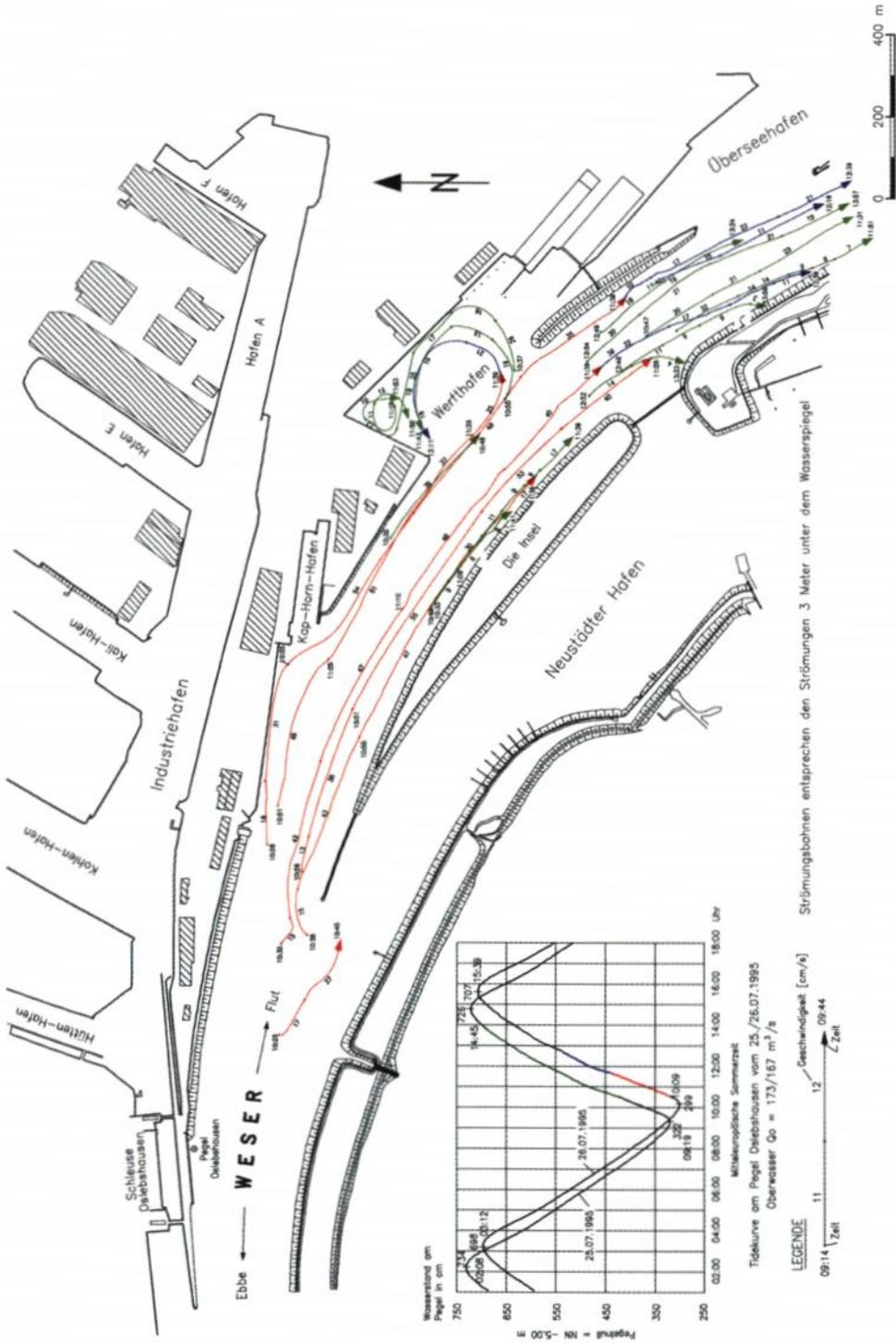


Abb. 11: Treibkörperbahnen in der Weser und im Werthhafen in Bremen während der Flurphasen am 25. und 26.7. 1995

4.4 Neustädter Hafen

Von besonderem Interesse sind die Strömungs- und Sedimentationsverhältnisse in dem am linken Weserufer gelegenen Neustädter Hafen (Abb. 3). Nach der Schließung des Hafenkanales zu Beginn des Jahres 1992 haben sich die hydrologischen und morphologischen Bedingungen grundlegend geändert (NASNER u. PIEPER, 1992; NASNER, PIEPER u. TORN, 1996b). Das Ziel, die Unterhaltungsabgräbungen im Neustädter Hafen zu verringern, ist durch die Baumaßnahme erreicht worden.

Die morphologische Situation im Vorhafen und Wendebassin, wie sie sich bei offenem Hafenkanales aus der Peilplananalyse für den Zeitraum 1967 bis 1991 ergeben hat, ist in Abb. 12 dargestellt. Außerdem sind die Flutströmungsverhältnisse nach Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) dort eingetragen. Es strömten beträchtliche Wassermengen durch den Vorhafen und das Wendebassin zum Hafenkanales. Im südwestlichen Teil des Wendebassins bildete sich eine stabile Flutstromwalze aus, durch die die hohen Sedimentationsraten verursacht wurden. Im Walzeninneren wurden Auflandungen von mehr als $q_s = 200 \text{ cm/a}$ erreicht. Die Ebbeströmungen waren weniger bedeutend für die Sedimentationen im Wendebassin.

Am 28. 6. 1990 wurden im Neustädter Hafen flächendeckend Bodenproben von der Gewässersohle entnommen. Die in Abb. 13 aufgetragenen mittleren Korndurchmesser zeigen den Zusammenhang mit den Strömungs- und Sedimentationsverhältnissen vor der Hafenkanaleschließung.

Im stärker durchströmten äußeren Vorhafen und Hafenkanales wurde überwiegend sandiges Sohlenmaterial vorgefunden. Offenbar reichten die Strömungsgeschwindigkeiten dort aus, um die Schlämmerkornfraktionen im wesentlichen in Suspension zu halten. Im inneren Vorhafen und im gesamten Wendebassin bestanden die Proben überwiegend aus Schluff. Die größten Schluffanteile wurden mit rd. 90 % der Gesamtprobe im Zentrum der Strömungswalze (vgl. Abb. 12) ermittelt. Die Zunahme der gröberen Fraktionen im Bassin II sind nicht mit natürlichen Strömungsbedingungen zu erklären. Ursächlich für dieses Ergebnis sind in der Zeit durchgeführten Baumaßnahmen im Hafenbassin.

Auffallend ist wie in allen anderen Untersuchungsbereichen auch hier die Übereinstimmung zwischen den Kornfraktionen und nichtmineralischen Anteilen der Proben (Glühverluste in Abb. 13). Die Abhängigkeit der biologischen Bestandteile von der Kornverteilung des Sohlenmaterials ist mathematisch nachweisbar. In Abb. 14 sind die Glühverluste aller 27 Proben abhängig von den Kornfraktionen $d < 0,06 \text{ mm}$ (Schluff- und Tonanteile) aufgetragen. Der berechnete Korrelationskoeffizient von $r = 0,9$ unterstreicht den sehr guten Zusammenhang. Die Koppelung der Glühverluste an die Gewichtsprozentage der Feinanteile ist allgemein gültig und wurde auch an anderer Stelle nachgewiesen (RECHLIN, 1996).

Mit der abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit innerhalb eines Hafenbassins sedimentieren zunehmend feinere Feststoffpartikel. Damit vergrößern sich nicht nur die Glühverluste, sondern ebenso der Aluminium- und Schwermetallgehalt. Dieser Zusammenhang wurde für das Hafenbassin des Überseehafens von KASTEN (1993) mit der Analyse von Sedimentproben nachgewiesen.

Zu ähnlichen Ergebnissen führten Bodenuntersuchungen aus dem Neustädter Hafen von 1994, etwa zwei Jahre nach der Hafenkanaleschließung (STROTMANN, 1995; KEFFEL, 1995). Für die veränderten hydrologischen und morphologischen Randbedingungen stimmten die strömungsbedingten Sedimentationen mit den daraus resultierenden Korngrößenverteilungen und Schadstoffbelastungen überein. Im Bereich der Hafeneinfahrt wurden die geringsten Gehalte an Blei, Cadmium, Chrom und Nickel angetroffen. Auch der Alumi-

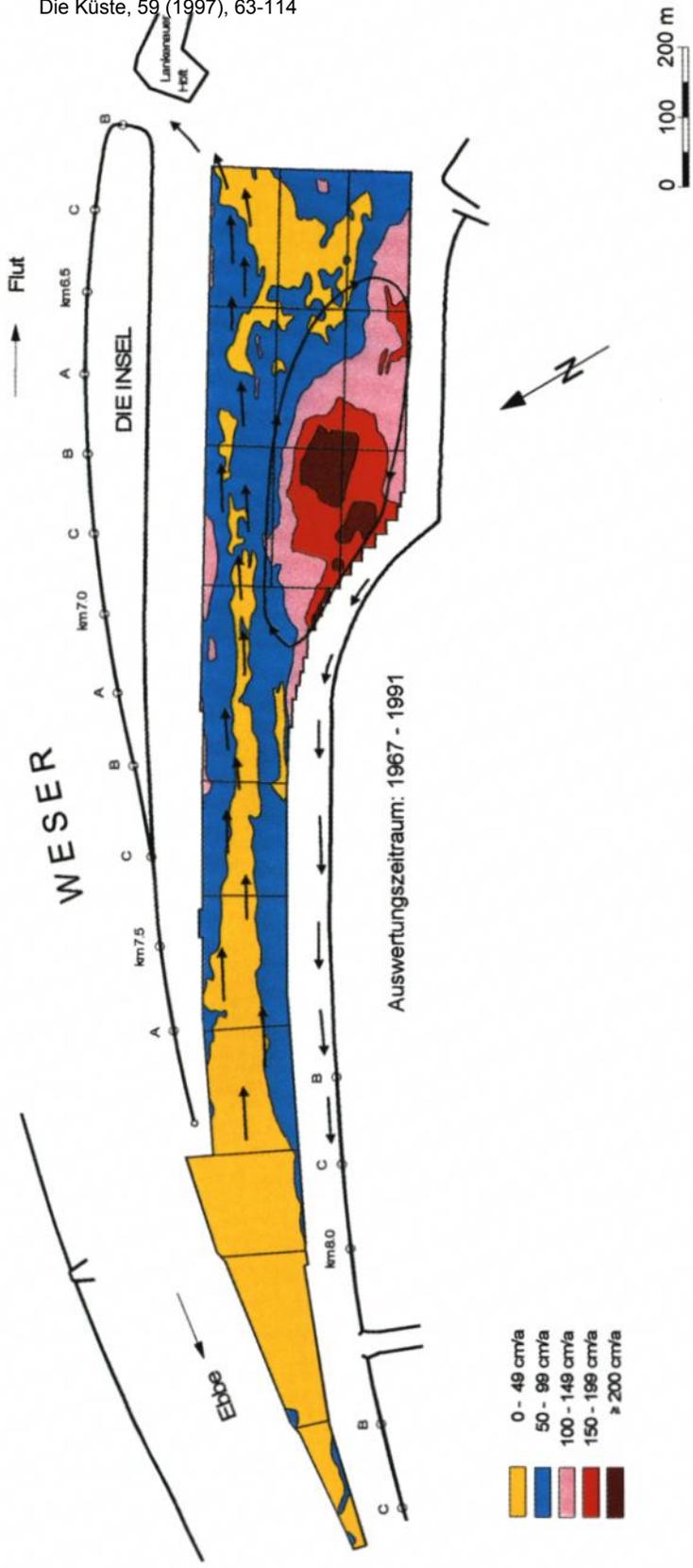


Abb. 12: Sedimentationsraten im Vorhafen und Wendebecken des Neustädter Hafens und Flutströmungen schematisch nach FRANZIUS-INSTITUT (1989)

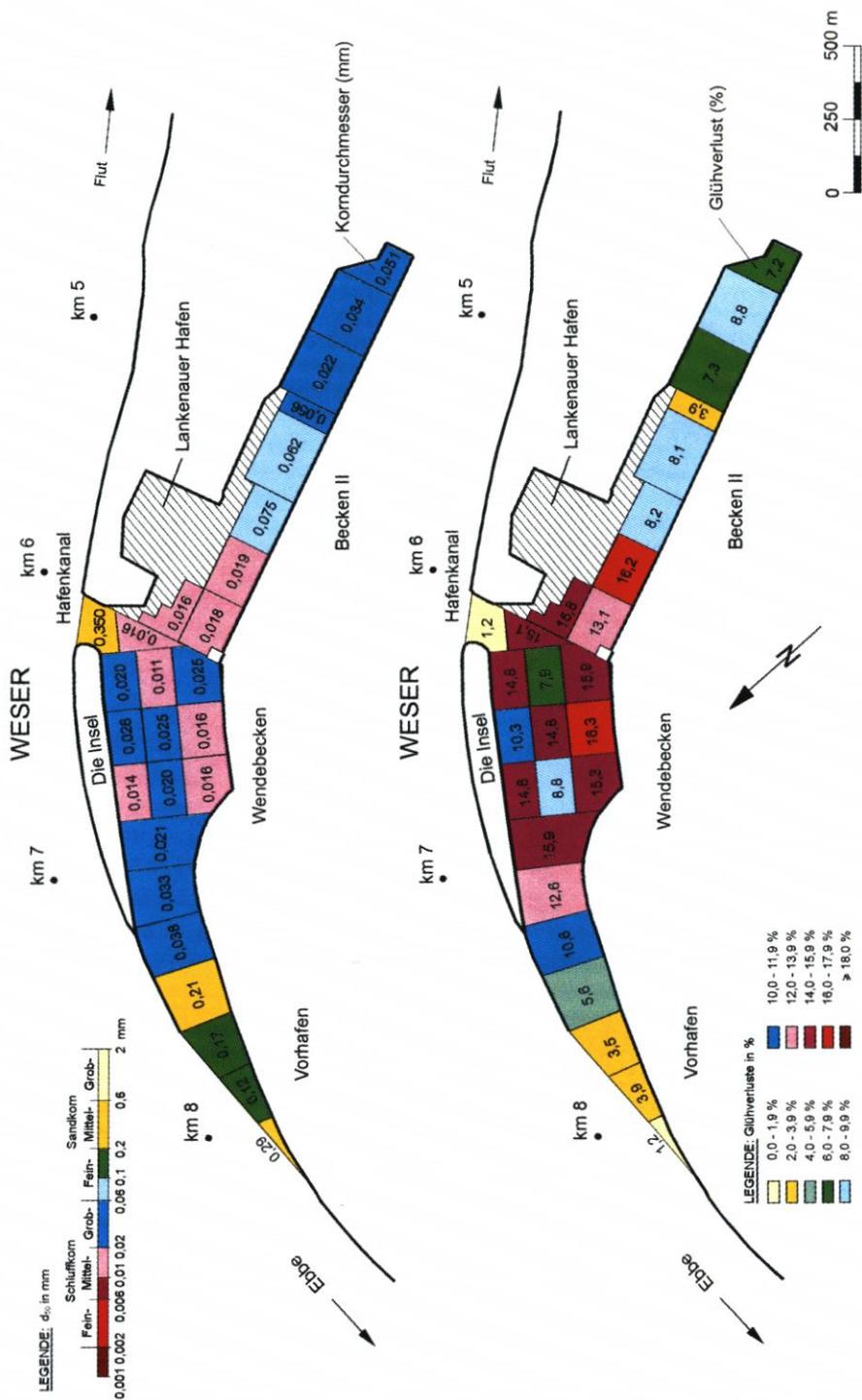


Abb. 13: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Vorhafen und Wendebecken Neustädter Hafen in Bremen der Probenentnahme vom 28. 6. 1990

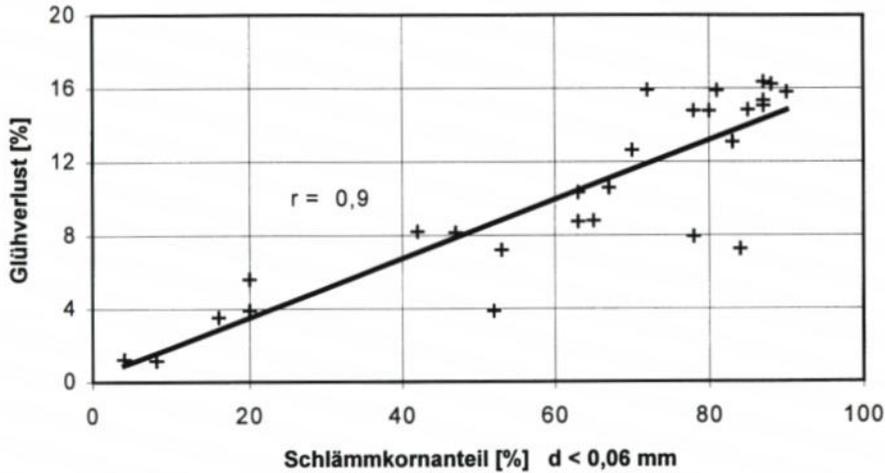


Abb. 14: Glühverlust und Schlammkornanteil der Proben vom 28.6.1990 im Neustädter Hafen in Bremen

niumenteil war dort – den größeren Kornfraktionen entsprechend – am niedrigsten. Innerhalb des Vorhafens steigen die Werte deutlich zum Wendebecken hin an, wo im allgemeinen die höchsten Werte vorgefunden wurden. Es besteht offenbar ein enger Zusammenhang zwischen dem nichtmineralischen Anteil und der Schadstoffbelastung der Sedimente. Dies ist wiederum von entscheidender Bedeutung für die Behandlung und Verbringung des aus den Häfen zu baggernden Bodenmaterials.

Nach der Hafenskanalschließung haben sich die Sedimentationsverhältnisse im Neustädter Hafen grundlegend geändert, wie ein Vergleich der Abb. 12 mit Abb. 15 zeigt.

Die in Abb. 15 zusätzlich eingetragenen Flutstromgeschwindigkeiten und -richtungen wurden in Zusammenarbeit mit dem HAFENAMT BREMEN am 4.5.1993 mit DGPS Treibkörpermessungen festgestellt. Im Wendebecken wurden keine Walzenströmungen, die vor der Schließung die hohen Auflandungen verursachten, mehr gemessen. Die größten Flutstromgeschwindigkeiten betragen im Vorhafen bei einem Tidehub von 434 cm und niedrigem Oberwasser ($Q_0 = 209 \text{ m}^3/\text{s}$) lediglich $v_f \approx 20 \text{ cm/s}$. Die Geschwindigkeiten lagen bei den unter ähnlichen hydrologischen Randbedingungen durchgeführten hydraulischen Modellversuchen auch im äußeren Vorhafen in der gleichen Größenordnung (FRANZIUS-INSTITUT, 1989). Da im Einfahrtbereich keine Strömungswalzen auftreten, sedimentieren unter diesen Voraussetzungen die mit der Flut transportierten gröberen Feststoffe (Sandkornfraktionen) innerhalb des Vorhafens. Der erweiterte Querschnitt des Wendebeckens wird nur noch äußerst schwach durchströmt. Die Geschwindigkeiten lagen im allgemeinen unter $v_f = 10 \text{ cm/s}$, bei denen sich auch die feineren Bestandteile ablagern.

Aus dem vorstehend beschriebenen wird klar, daß sich das mit der Flut in den Neustädter Hafen gelangende Material vornehmlich im Vorhafen ablagert, wie es auch durch die Peilplananalysen nach der Hafenskanalschließung in Abb. 15 verdeutlicht wird. Die Sedimentation hat im Wendebecken deutlich abgenommen. Dem steht eine Zunahme der Ablagerungen im Vorhafen gegenüber (Abb. 12 und 15).

Insgesamt haben die Auflandungen im Neustädter Hafen durch die Baumaßnahme nach 1992 erheblich abgenommen. Eine dazu durchgeführte Peilplananalyse hat dies bestätigt (Tab. 1).

Tab. 1: Sedimentationsraten und -mengen im Neustädter Hafen vor und nach der Hafenskanalschließung

	Sedimentationsrate q_s [cm/a]		Diff. Δq_s [cm/a]	Sedimentsvolumen Q_s [1000 m ³ /a]		Diff. ΔQ_s [1000 m ³ /a]
	1967/91 vor	1992/96 nach		1967/91 vor	1992/96 nach	
	Hafenskanalschließung			Hafenskanalschließung		
Vorhafen	30	42	+12	35	49	+14
Wendebecken	69	38	-31	160	89	-71
Becken II	23	7	-16	62	19	-43
Neustädter Hafen (insg.)	41	25	-16	257	157	-100

Im nicht mehr durchströmten Neustädter Hafen hat die Sedimentationsrate im Vorhafen um $\Delta q_s = 12$ cm/a zugenommen und sich im Wendebecken deutlich um $\Delta q_s = 31$ cm/a verringert. Im heute bestehenden Zustand finden die Sedimentationen im wesentlichen im Vorhafen und Wendebecken statt. Aufgrund des sehr schwachen Füllstromes sind im Becken II nur noch sehr geringe Auflandungen zu verzeichnen.

Mit $q_s = 25$ cm/a liegt die Sedimentationsrate im Neustädter Hafen in der mittleren Größenordnung für einen oberhalb der Brackwasserzone gelegenen Tidehafen (NASNER, 1992). So beträgt die mittlere Verlandung für verschiedene Hamburger Hafengebiete $q_s = 36$ cm/a (CHRISTIANSEN u. HAAR, 1996).

Gegenüber dem langjährigen Mittelwert von $Q_s = 257\,000$ m³/a hat sich das jährliche Sedimentationsvolumen im Neustädter Hafen durch die Hafenskanalschließung auf $Q_s = 157\,000$ m³/a um $100\,000$ m³/a oder rd. 40 % verringert. Für die erforderlichen Unterhaltungsarbeiten ist dies eine erhebliche Entlastung, da entsprechend weniger Massen gebaggert und untergebracht werden müssen.

Die Hafenskanalschließung hat somit zu einer erheblichen Entlastung geführt, obwohl in den vergangenen Jahren relativ ungünstige hydrologische Randbedingungen vorlagen. Die gewässerkundlichen Einflußgrößen in Abb. 4 weisen im Winter 1993/94 und 1994/95 sehr hohe Abflüsse mit Monatsmitteln von $Q_0 \approx 1200$ m³/s und Maximalwerten von $Q_0 > 2000$ m³/s aus. Abb. 5 belegt, daß bei derartigen Verhältnissen das Feststoffangebot und damit die Sedimentationsraten verhältnismäßig hoch sind. Es kann deshalb erwartet werden, daß sich die Sedimentationen im Neustädter Hafen bei anhaltend geringeren Abflüssen aus dem Binnenland noch weiter verringern werden. Im übrigen war nicht nachzuweisen, daß die günstigeren Verhältnisse im Neustädter Hafen stärkere Sedimentationen in benachbarten Hafenbecken oder in der Tideweser verursacht haben.

4.5 Mittelsbürener Hafen

Die am erweiterten rechten Weserufer gelegenen Mittelsbürener Hafenanlagen Osterort I und II sowie Osterort IV und V (Abb. 3) sind aufgrund der Geometrie und ihrer gegenüber der Fahrrinne größeren Ausbautiefen stärkeren Versandungen ausgesetzt. Die Solltiefe von Osterort I und II liegt mit -10,50 m SKN um einen Meter tiefer als die mit -9,50 m SKN festgelegte Fahrrinnensohle der Unterweser. Die Ausbautiefe des Mittelsbürener Hafens Osterort IV und V beträgt -11,50 m SKN. Naturgemäß sind die Auflandungen in den Ufer-

bereichen der Liegewannen besonders hoch. Dort, wo der Querschnitt am rechten Ufer am stärksten vergrößert ist, sind die Strömungen am schwächsten und die Transportkapazität am geringsten. Folgerichtig treten die stärkeren Sedimentationen in der Liegewanne von Osterort IV und V ein (Abb. 16).

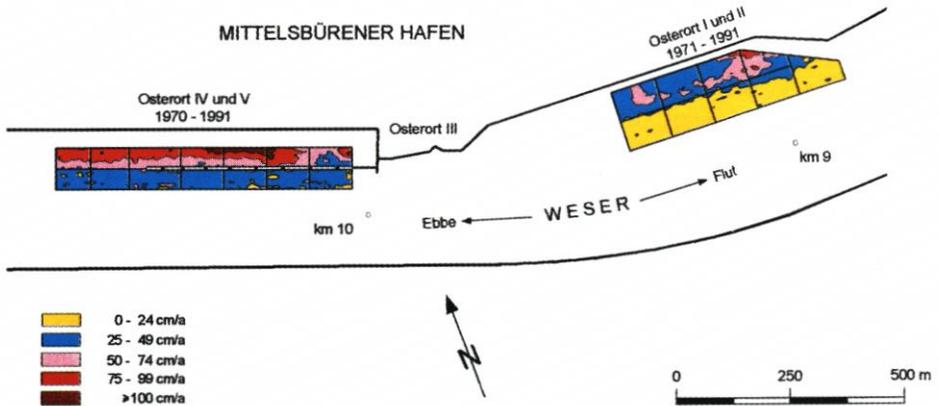


Abb. 16: Sedimentationsraten in den Mittelsbürener Häfen Osterort I und II und Osterort IV und V in Bremen

Die Abhängigkeiten zwischen Sedimentation, Strömung und Sohlenmaterial wurden durch die Entnahme und Analyse von Bodenproben für die Mittelsbürener Häfen bestätigt (Abb. 17). Das Sohlenmaterial besteht überwiegend aus Mittel- und Feinsand. Die Körnung wird quer zum Strom mit der verminderten Schleppkraft der Strömungen vom Fahrwasser zu den vertieften Stromanlegern hin kleiner. Im Uferbereich von Osterort IV und V waren die Schlämmerkornanteile $d < 0,06$ mm mit 20 bis 30 % am höchsten, was auch die im allgemeinen höheren Glühverluste gegenüber Osterort I und II in Abb. 17 zeigen. Die Bodenuntersuchungen bestätigen die mit den Sedimentationsanalysen gewonnenen Ergebnisse, wonach im erweiterten und vertieften Querschnittsbereich am rechten Ufer die starken Verlandungen eintreten. Die Sedimentationen nehmen mit der Ausbautiefe der Liegewannen bei feinkörnigerem sich absetzendem Sohlenmaterial zu. Im Gegensatz zu den Hafengebieten sedimentieren in den Osterorter Häfen geringere Feinschluff- und Tonanteile ($d < 0,006$ mm), da diese offenbar durch die alternierenden Tideströmungen eher resuspendiert werden.

4.6 Zusammenfassende Betrachtungen

Mit den detaillierten Peilplananalysen (Einzelpunktauswertung) sollten die Sedimentationsschwerpunkte und die Verteilungen der Auflandungen in den zu untersuchenden Hafengebieten genauer ermittelt werden. Die daraus entwickelten Bereiche gleicher Sedimentationsraten geben die Überlagerung verschiedener Einflüsse wieder. Zum einen wird mit dieser Methode der natürliche Feststoffeintrieb in die Untersuchungsgebiete ermittelt. Zum anderen werden aber auch örtliche Veränderungen durch den Schiffsbetrieb (Sedimentumlagerungen durch Rückströmungs- und Schraubstrahleinflüsse) oder durch Baggerungen mit erfaßt. Die morphologischen Darstellungen geben die aus natürlichen und künstlichen Einwirkungen überlagerten Verhältnisse wieder.

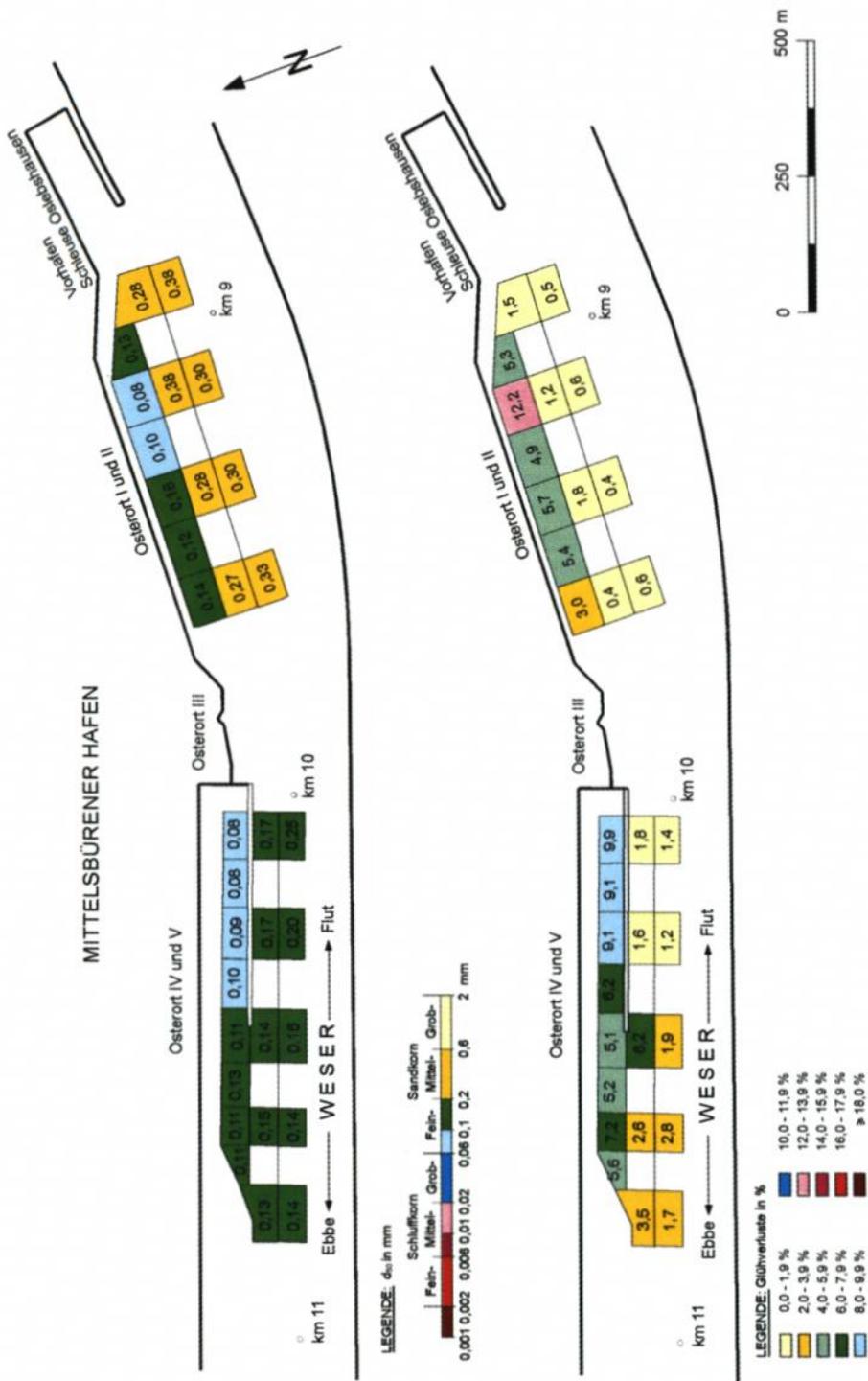


Abb. 17: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Mittelsbürener Hafen in Bremen der Probenentnahme vom 25. 10. 1989

Einen Überblick der Sedimentationsverhältnisse in den untersuchten stadtbremischen Hafengebieten gibt Abb. 18. Die Sedimentationsraten sind einheitlich in 25 cm Abständen dargestellt.

Die durch die Hafenanalschließung völlig veränderte Situation im Neustädter Hafen wird mit Abb. 18 deutlich. Die stärksten Auflandungen treten heute im inneren Vorhafen und nicht mehr im Wendebassin ein. Vor der Baumaßnahme war das Wendebassin des Neustädter Hafens der Bereich mit den höchsten Sedimentationen aller stadtbremischer Hafengebiete. Heute beschränkt sich das Gebiet mit überdurchschnittlichen Verlandungen vor allem auf das im Strom gelegene Wendebassin des Europahafens. Wegen der Geometrie des Flußquerschnittes und aufgrund der Tiefenverhältnisse ergeben sich dort die hohen Auflandungen. Vor allem bei starken Abflüssen aus dem Binnenland hat das Wendebassin Europahafens die Funktion einer Sandfalle für das von oben eintreibende Geschiebe.

Abschließend sollen die aus verschiedenen stadtbremischen Hafengebieten analysierten Bodenproben miteinander verglichen werden. Dabei taucht die Frage auf, für welche Kornzusammensetzungen der Begriff „Schlick“ verwendet werden sollte.

Nach einer von RECHLIN (1996) vorgenommenen Definition kann das Sohlenmaterial bis zu einer Obergrenze von maximal 50 Gewichts-% Feinsandanteil und mindestens 30 % mit $d < 0,02$ mm (20 μ m) als Schlick bezeichnet werden (Abb. 19).

Ein anderer Versuch „Baggerschlick“ zu definieren wurde anlässlich einer KFKI-Projektgruppensitzung von PLATE (1992) anhand des Körnungsdreiecks zur Bodenklassifizierung vorgetragen. In dem Dreieck wird zwischen den Gewichtsprozenten der Sandkornanteile ($d > 0,06$ mm), der Grob- und Mittelschluffanteile ($d = 0,06$ mm bis 0,006 mm) und den Korngrößen $d < 0,006$ mm (Ton- und Feinschluff) unterschieden (Abb. 20).

Mit zunehmenden Feinkornanteilen wird das Baggergut in schlickigen Sand, sandigen Schlick, Schlick und feinen Schlick unterteilt. Abhängig vom Tongehalt wird magerer und fetter Schlick definiert.

Auf die untersuchten stadtbremischen Hafengebiete übertragen ergibt sich daraus folgendes (Abb. 21). Das feinste (schlickigste) Sohlenmaterial wurde in den Becken des Europa- und Werfthafens angetroffen. Die beiden Beprobungen vom Juli 1992 und 1993 weisen für den Werfthafen kaum Unterschiede in der Kornzusammensetzung auf. Überwiegend lagen die Feinanteile mit $d < 0,006$ mm (6 μ m) zwischen 20 und 40 % und die Sandkornfraktionen $d > 0,06$ mm unter 20 %. Im Juli 1992 waren die Verhältnisse im Europahafen ähnlich wie im Werfthafen. Der Probenentnahme vom Oktober 1989 aus dem Europahafen war die Baggerung vorausgegangen, was die größeren Kornfraktionen zu diesem Zeitpunkt erklärt.

Vor der Hafenanalschließung bestand das Sohlenmaterial im äußeren Vorhafen und im Hafenanal überwiegend aus sandigem Material (Abb. 21, Mitte links). Die größten Feinanteile wurden für das Wendebassin im Bereich der Flutwalze und im Becken II ermittelt. Die stärkeren Sandkornanteile bei vier Proben im Becken II sind auf die im Jahre 1990 durchgeführten Baumaßnahmen zurückzuführen. Insgesamt geben die im Bodendreieck dargestellten Kornverteilungen einen guten Einblick in die unterschiedliche, strömungsbedingte Zusammensetzung des Bodenmaterials innerhalb des Neustädter Hafens.

In den stärker durchströmten Untersuchungsbereichen, dem Wendebassin Europahafens und den Mittelsbürener Hafenanlagen, wurde gemäß Definition in Abb. 20 überwiegend Sand und schlickiger Sand vorgefunden. Bei den Proben aus Osterort I und II und Osterort IV und V vom Juni 1990 kann wegen der größeren Körnung angenommen werden, daß Baggerungen vorausgegangen waren. So wurde aus Osterort I und II im Juli 1993 deutlich erkennbar feineres Material entnommen. Dennoch handelte es sich dabei nicht um feinen

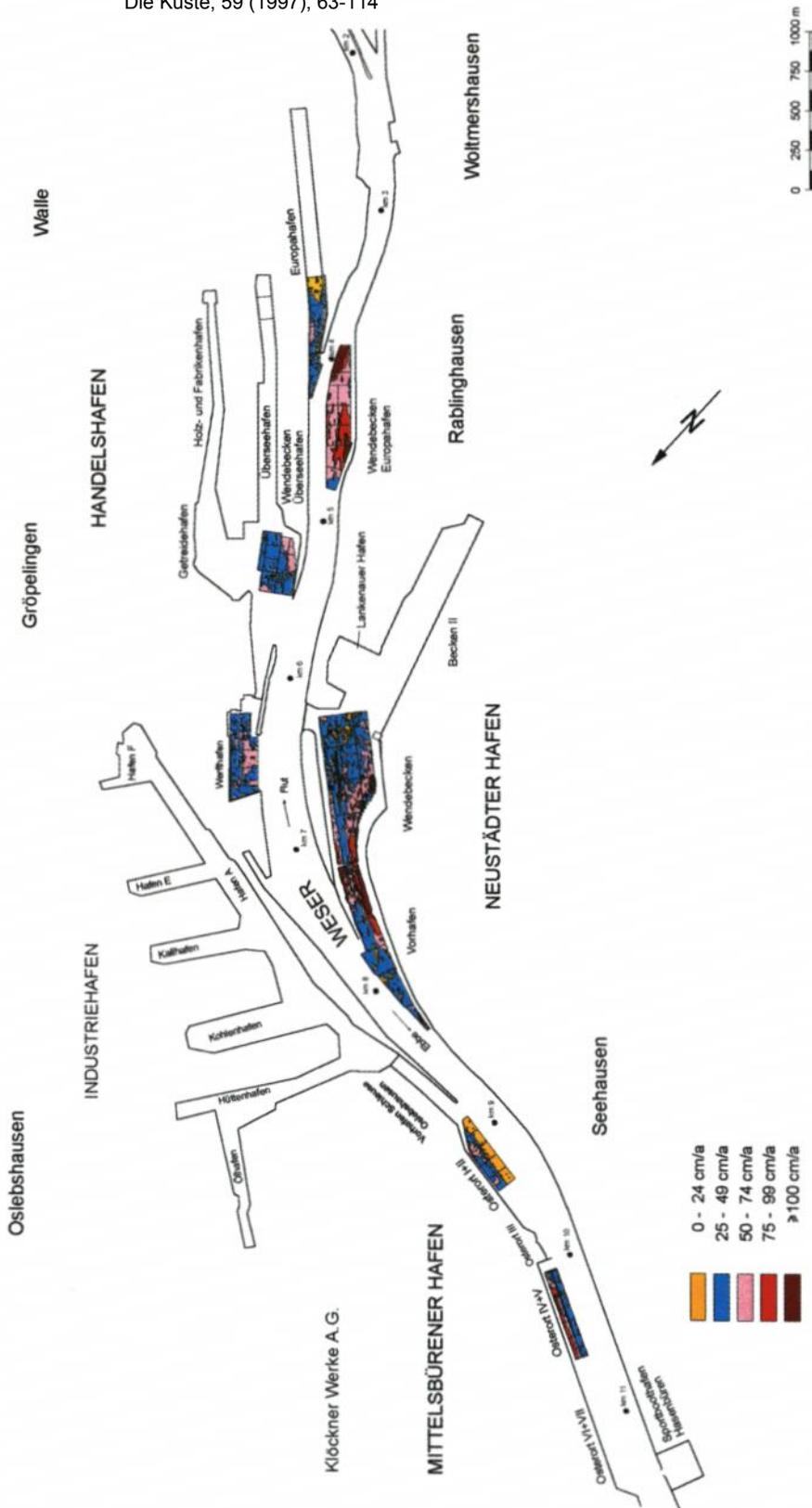


Abb. 18: Morphologische Verhältnisse in den stadtbremischen Hafengebieten

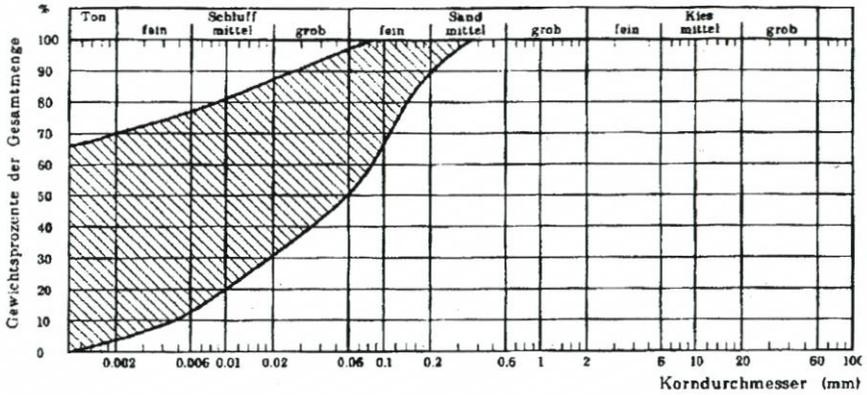


Abb. 19: Schlickkornkurvenbereich nach RECHLIN, 1996

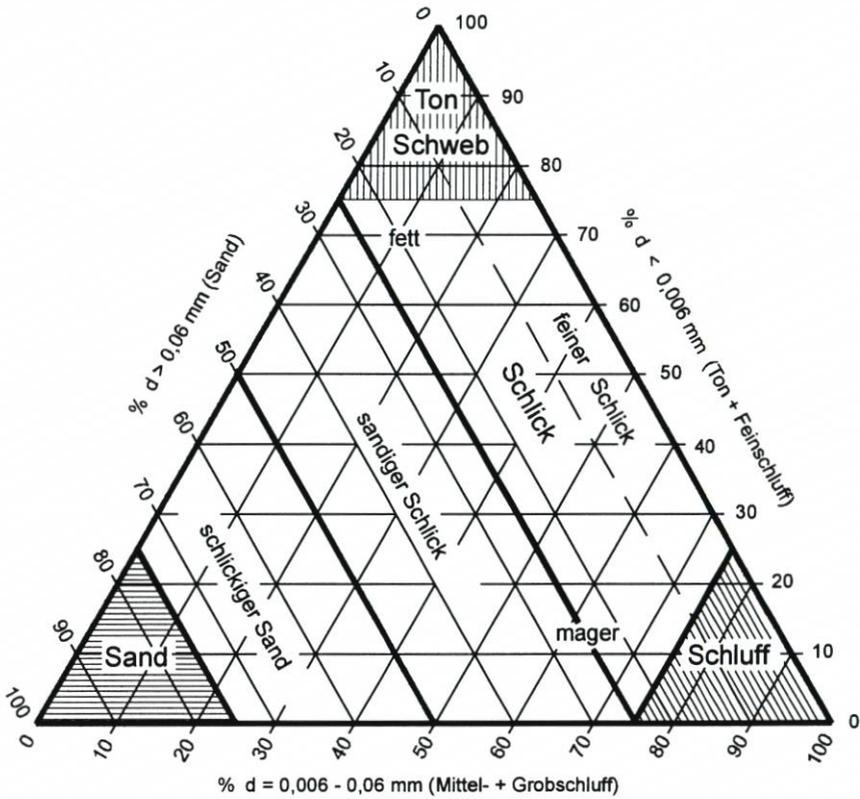


Abb. 20: Versuch einer Definition von Baggerschlick (PLATE, 1992)

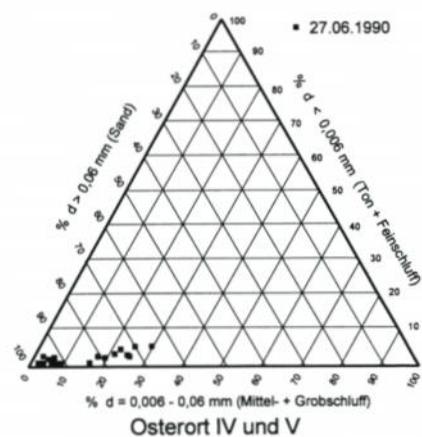
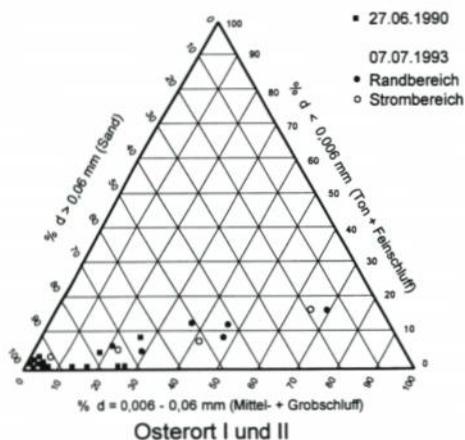
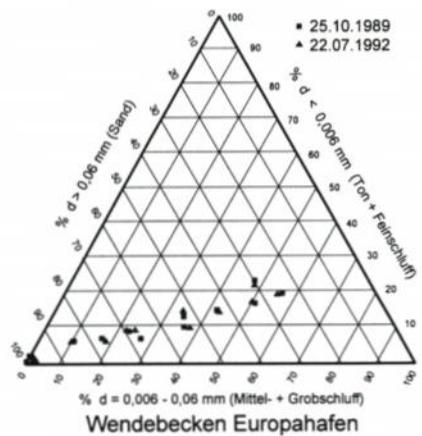
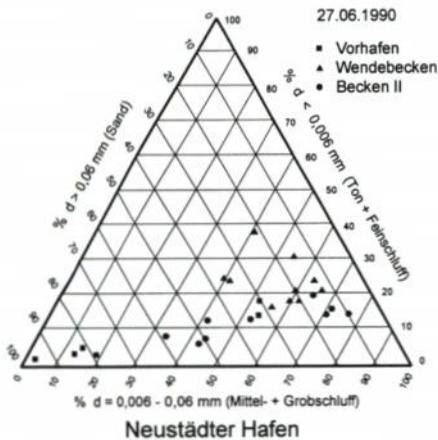
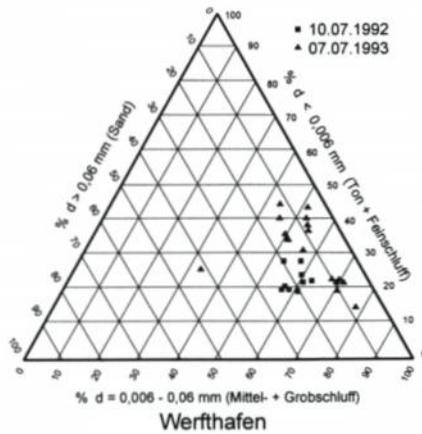
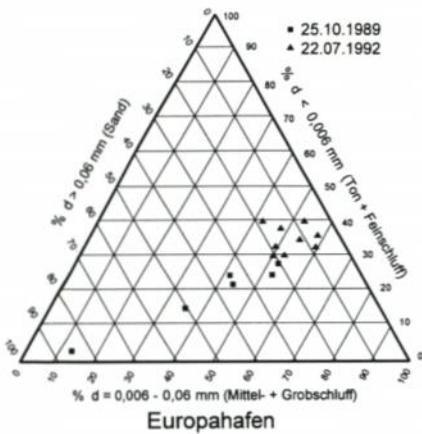


Abb. 21: Kornverteilung der stadtbremischen Häfen im Bodendreieck

Schlick, wie er sich in den Hafenbecken abgelagert. Die Feinstanteile mit $d < 0,006$ mm waren mit unter 20 % Gewichtsanteil der Proben vergleichsweise gering.

Bei der Beschreibung der einzelnen Untersuchungsbereiche im stadtbremischen Hafengebiet wurde gezeigt, daß die Glühverluste und auch die Belastung der Sedimente mit Schwermetallen in engem Zusammenhang mit dem Anteil an Feinschluff und Ton stehen. Deshalb können aus diesen Erkenntnissen wertvolle Rückschlüsse auf die Behandlung und Unterbringung des Baggergutes gezogen werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist das Material aus den Osterorter Häfen und dem Wendebecken Europahafen problemloser einzustufen als die feineren Feststoffe innerhalb des Neustädter Hafens, des Europa- und Werfthafens.

Die Untersuchungen für die verschiedenen Hafengebiete in Bremen haben die Wechselwirkungen zwischen Verlandungsgeschehen, der Zusammensetzung des sedimentierenden Materials und den zugehörigen Strömungsbedingungen aufgezeigt. Einen besonderen Stellenwert haben dabei die durch die Hafenkanalschließung grundlegend veränderten Verhältnisse im Neustädter Hafen.

5. Häfen im Brackwasser- und Mündungsgebiet

5.1 Vorbemerkungen

In den vom Salzwasser der Nordsee beeinflussten Tidehäfen im norddeutschen Küstengebiet sind für die Auflandungen neben dem Strömungs- und Tideeffekt die Dichteströmungen von besonderer Bedeutung. Durch den Dichteeffekt kommt es im Tiderhythmus zu einem vielfachen Wasseraustausch in den offenen Hafenbecken. Die in Meterbereichen liegenden jährlichen Sedimentationen sind um Größenordnungen höher als in den oberhalb des Brackwassereinflusses gelegenen Häfen von Bremen und Hamburg. In den brackischen Hafenbereichen wird die Sedimentation vom komplexen Zusammenwirken hydrodynamischer, physikalischer und biologischer Faktoren bestimmt.

Die stärksten Auflandungen wurden für die im oberen Brackwasserbereich, der oligo- bis mesohalinen Zone, gelegenen Häfen in Emden, Brunsbüttel und Bremerhaven ermittelt. In Cuxhaven und Wilhelmshaven sind die Sedimentationen deutlich niedriger. Cuxhaven kann eher dem unteren polyhalinen Brackwasserbereich und Wilhelmshaven mehr den Salz- wasserbedingungen der Nordsee zugeordnet werden (NASNER, 1992).

In der folgenden Ergebniszusammenstellung sind die aus der Einzelpunktauswertung ermittelten Sedimentationsraten auf Jahreswerte umgerechnet und zum Vergleich für alle Häfen einheitlich in 75-cm-Abstufungen dargestellt worden.

5.2 Emden

Für den Außen- und Vorhafen von Emden wurden Peilpläne von 1982 bis 1992 ausgewertet. Die daraus ermittelten morphologischen Verhältnisse sind in Abb. 22 dargestellt. Die stärksten Auflandungen sind im mittleren Bereich des Außenhafens zu finden. Dies erklärt sich aus den Strömungsverhältnissen im Vorhafenbereich, bei denen sich die Einflüsse aus Strömungs-, Tide- und Dichteeffekt überlagern. Dazu wurden im September 1994 mit dem DGPS im Echtzeitverfahren erstmals Messungen im Brackwasserbereich in Zusammenarbeit mit dem NIEDERSÄCHSISCHEN HAFENAMT EMDEN bei mittleren Tide- und Oberwasserverhältnissen durchgeführt (PIEPER u. TORN, 1996).

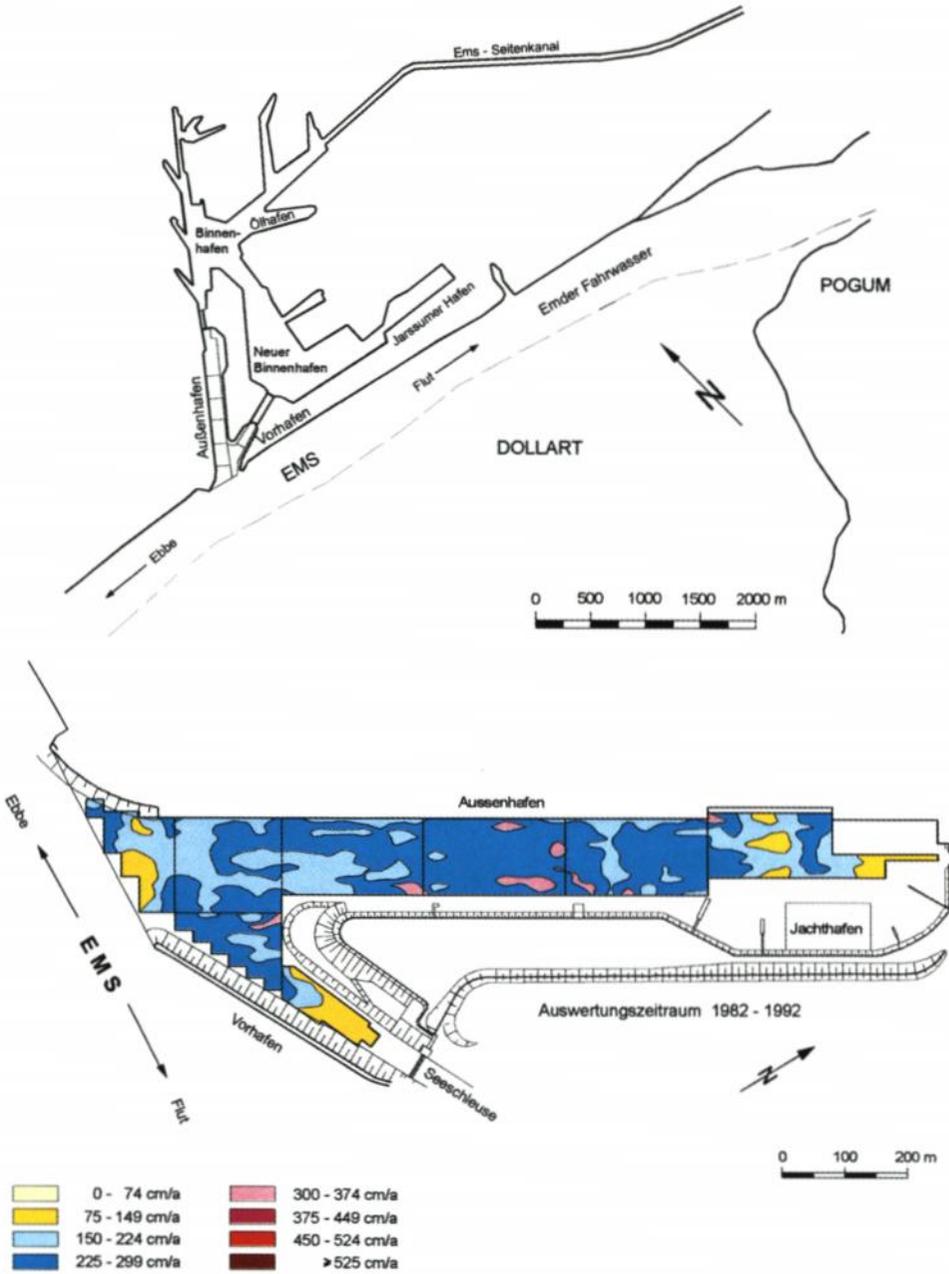


Abb. 22: Hafenanlagen von Emden und Morphologie im Vor- und Außenhafen

Der mittlere Tidehub beträgt in Emden $MThb_{1971/80} = 310$ cm und das Oberwasser $MQO_{1941/80} = 77$ m³/s. Die Strömungen wurden in 1,5 m und in 6,0 m Wassertiefe gemessen (Abb. 23 bis 25).

Am 14. 9. 1994 betrug der Tidefall 322 cm bei einem Oberwasser von $Q_0 = 57$ m³/s (Abb. 23). Während der ersten Ebbephase bildeten sich im Einfahrtsbereich Walzenströmungen aus. Am rechten Walzenrand strömt das Wasser aus dem Vorhafen in die Ems (Abb. 23 oben). Im zweiten Abschnitt zeigt sich die Überlagerung der verschiedenen Strömungsvorgänge. Deutlich sind die Walzenbildung im äußeren Hafengebiete und das Ausströmen an der Vorhafenmole – Überlagerung von Strömungs- und Tideeffekt – zu erkennen. Zusätzlich hatten sich Dichteströmungen ausgebildet. Das leichtere Wasser strömt mit bis zu mehr als 30 cm/s oben (rote Linien) bei Ebbe (!) in den Außenhafen hinein und das schwerere Wasser in 6,0 m Tiefe (blaue Linien) aus dem Hafen heraus.

Dieser Vorgang ist bis zum Ende der Ebbephase und noch während der ersten Flutphase mit starker Strömungsintensität zu beobachten. Das zeigen die Naturbeobachtungen vom 21. 9. 1994 bei einem Tidefall von 343 cm und $Q_0 = 101$ m³/s (Abb. 24 oben). Während des anschließenden Flutastes ($Thb = 374$ cm) kehren sich die Verhältnisse um. Im äußeren Hafengebiete traten ausgeprägte Flutwalzen auf, und das Wasser strömte an der Oberfläche mit bis über 40 cm/s bei Flut (!) aus dem Hafen heraus. Der Füllvorgang wird durch das sohlennahe Einstromen des schweren Salzwassers aus der Ems in den Hafen (zu erkennen am rechten Walzenrand, blaue Linien in Abb. 24 unten) bewirkt.

Die bei vergleichbaren hydrologischen Randbedingungen ebenfalls bei Flut durchgeführten Messungen am 20. 9. 1994 bestätigen das vorstehend Gesagte (Abb. 25). Zu Beginn strömt das Wasser noch kräftig an der Oberfläche in den Hafen. Anschließend bilden sich im Einfahrtsbereich Walzenströmungen aus, die zum Ende der Flutphase nur noch in größerer Wassertiefe auftreten. Oben strömt dann das Wasser aufgrund des Dichteeffektes aus dem Hafen heraus.

Mit den Strömungsmessungen wurde nachgewiesen, wie sich der tideabhängige Wasseraustausch im Hafenbecken durch die Dichteströmungen vervielfacht. Zwangsläufig kommt es dadurch zu den hohen Sedimentationen in Brackwasserhäfen. Im Einfahrtsbereich bilden sich horizontale Strömungswalzen und im Hafenninneren vertikale Dichtewalzen mit horizontaler Achse und unterschiedlichem Drehsinn während der Flut- und Ebbephase aus.

Die in der Natur gemessenen Strömungsverhältnisse im Emdener Hafen sind in Abb. 26 schematisch dargestellt.

Aufgrund des Wasseraustausches und der geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Walzen wird sehr feines Material in großen Mengen in den Hafen transportiert. Die Peilplananalysen haben folgerichtig die höchste Sedimentation innerhalb der Dichtestromwalze im mittleren Außenhafen ergeben (vgl. Abb. 22).

Die besonderen Bedingungen im Brackwassergebiet führen dazu, daß der Übergang zur festen Sohle im Emdener Außenhafen fließend ist, weil sich im sohlennahen Bereich hochkonzentrierte Feststoffsuspensionen mit geringer Dichte (verflüssigter Schlack bzw. Fluid Mud) bilden. Mit gesonderten Untersuchungen wurde festgestellt, daß die Fluid Mud-Schicht im Außenhafen von Emden 2 bis 4 m mächtig werden kann. Überwiegend aus dem Oberlauf der Ems stammendes Fluid Mud-Material sedimentiert nur sehr langsam durch Konsolidierung und mikrobiellen Abbau organischer Substanzen (GREISER et. al., 1992). Die Dichte des Fluid Muds wurde mit $\rho = 1,10$ bis $1,17$ g/cm³ gemessen. Das sind Werte, die unter dem kritischen Maß für die Manövrierfähigkeit von Schiffen liegen (RECHLIN, 1996).

Für die Unterhaltungsarbeiten und die Schifffahrt ist die feste Gewässersohle maßgebend. Nur die Tieferlegung des festen Horizontes hat eine größere Kieflfreiheit bzw. nutz-

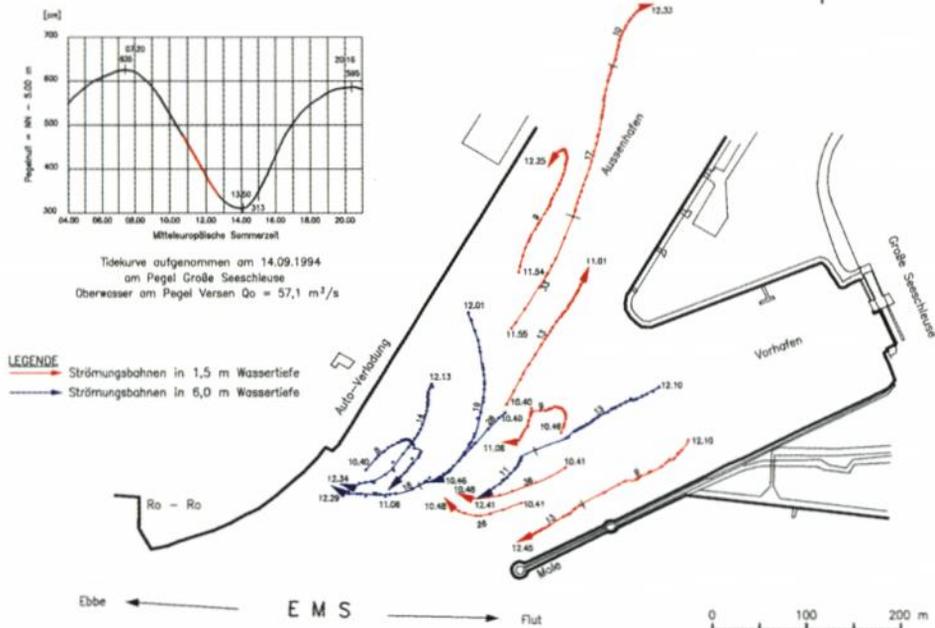
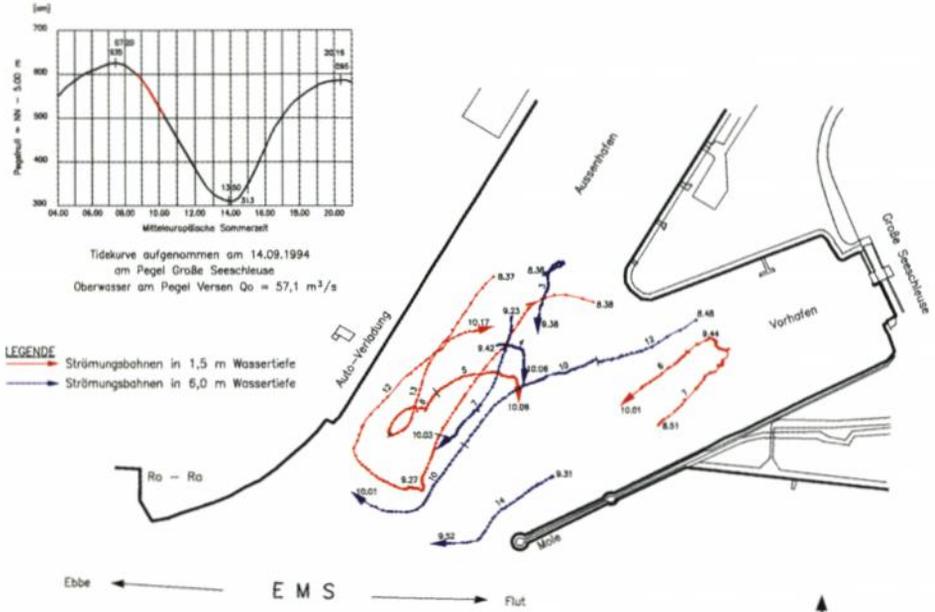


Abb. 23: Treibkörperbahnen im Emdrer Vor- und Außenhafen während der Ebbephase am 14. 9. 1994

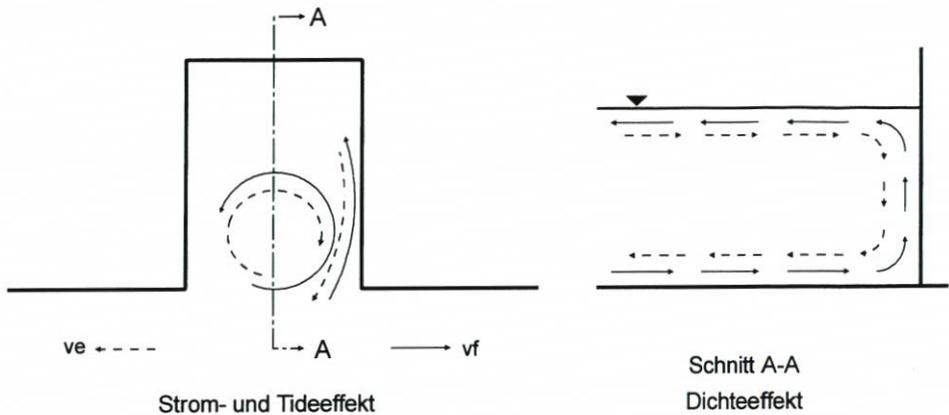


Abb. 26: Tide-, Strom- und Dichteeffekt bei Flut- und Ebbeströmungen (schematisch)

bare nautische Tiefe zur Folge. Wenn konventionell gebaggert wird, ist es deshalb sinnvoll, durch tiefe Schnitte möglichst festes (konsolidiertes) Material zu fördern. Bei dem Versuch, eine bestimmte Solltiefe zu halten, wird mehr verflüssigtes Sohlenmaterial gebaggert. Höhere Baggermengen und längere Einsatzzeiten sind die Folge. Bis 1990 wurden in den Emdener Tidehäfen rd. 2,2 Mio. m³ gebaggert und außerhalb untergebracht. Mit einer speziellen Methode wird heute mit dem Hopperbagger das festere Material an der Sohle resuspendiert und damit die erforderliche nautische Tiefe gehalten (WURPTS, 1996). Das Material verbleibt in situ und muß nicht mehr wie früher aufgespült werden.

Mit den durch den Van-Veen-Greifer entnommenen Bodenproben aus dem Emdener Vor- und Außenhafen im April 1993 und September 1994 wurde verfestigtes Sohlenmaterial gewonnen und im Labor für Wasserbau der HOCHSCHULE BREMEN analysiert.

Das Sohlenmaterial ist sehr einheitlich und besteht überwiegend aus Mittelschluff. Dementsprechend hoch ist auch das Verhältnis von organischen zu mineralischen Feststoffanteilen. Es wurden bis zu rd. 18 % Glühverluste im Labor ermittelt. Die organischen Anteile waren im April 1993 im Mittel etwas niedriger als im September 1994. Aus den geringen Unterschieden können jedoch keine Rückschlüsse auf jahreszeitliche Schwankungen gezogen werden. Nach GREISER (1988) ändert sich die Gesamtmenge organischer Substanz am Schwebstoff mit der Jahreszeit nur wenig. Ihre Zusammensetzung ist jedoch qualitativen Veränderungen im Jahresverlauf unterworfen. In dem biologisch aktiveren Schwebstoff ist der organische Anteil allerdings höher als im Sohlenmaterial. So wurden im Schwebstoff der Ems über 20 % Glühverlust (GREISER et. al., 1992) und für die Weser bis rd. 32 % Glühverlust festgestellt (SCHUCHARDT u. SCHIRMER, 1991).

5.3 Wilhelmshaven

Die morphologischen Bedingungen im neuen Vorhafen von Wilhelmshaven sind in Abb. 27 für den Auswertungszeitraum 1974/90 dargestellt. Bei insgesamt recht hohen Auflandungen sind die Bedingungen im Einfahrtbereich – abgesehen von den Schleuseneinfahrten – am ungünstigsten. In der Hafeneinfahrt handelt es sich um eine Reaktion auf die Strömungsbedingungen. Vor den Außenhäuptern der Seeschleusen kommt es aufgrund von

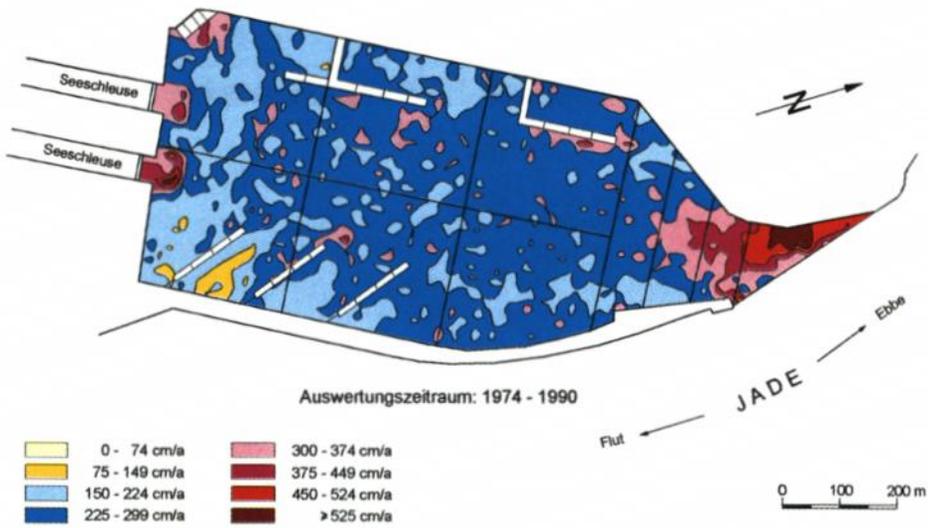
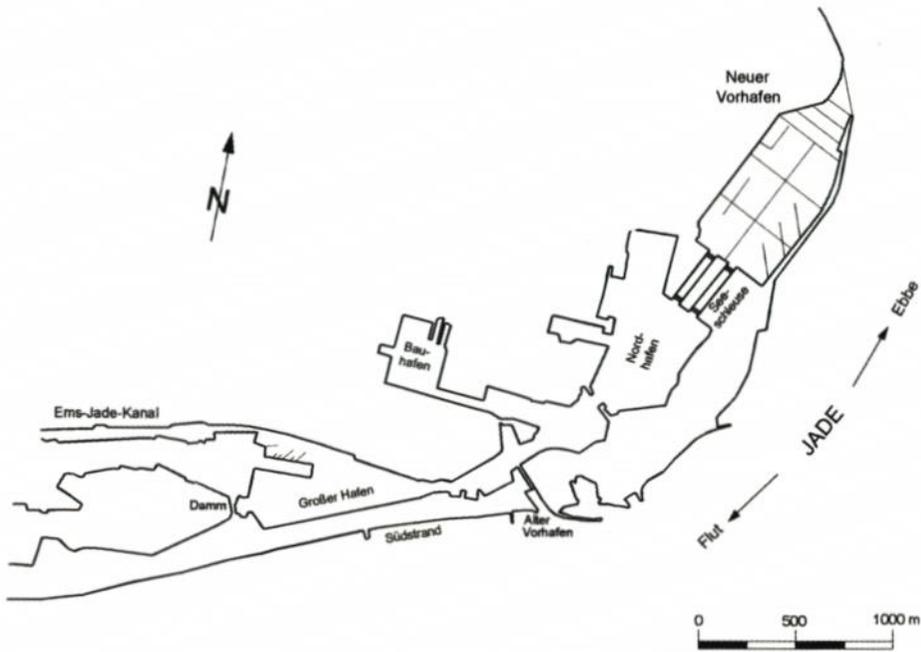


Abb. 27: Hafenanlagen und Sedimentationsraten im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven

Sielungen zu den höheren Sedimentationen. Aus dem Ems-Jade-Kanal anfallendes Wasser wird über die Schleusen der Jade zugeführt.

Die Beeinflussung der morphodynamischen Vorgänge durch unterschiedliche Baggermethoden, kann am Beispiel des Vorhafens von Wilhelmshaven veranschaulicht werden. Bis einschließlich 1980 wurden mit Eimerkettenbaggern und relativ wenig Einsätzen Übertiefen geschaffen und festere Masse gebaggert. Danach wurde versucht, mit dem Hopperbagger die Solltiefe zu halten (NASNER, 1992). Dabei waren die Geräte länger im Einsatz und es wurde mehr und flüssigere Masse (Fluid Mud) gefördert. Ein Vergleich der beiden Zeiträume zeigt für 1974/80 deutlich, wie der Unterhaltungsaufwand durch Reservebaggerungen erheblich eingeschränkt werden kann (Abb. 28). Unabhängig von der gewählten Baggermethode bleiben dabei die Verlandungsschwerpunkte unverändert. Offenbar haben Unterhaltungsmaßnahmen, die sich mehr im Fluid Mud-Bereich abspielen (Abb. 28 unten), nicht den gewünschten Erfolg. Es ist vielmehr denkbar, daß sich im Feststoffmaterial vorhandene Bakterien aufgrund günstigerer Nährstoff- und Wachstumsbedingungen stärker vermehren können und damit mehr Biomasse produziert wird.

Der Salzgehalt liegt nach Untersuchungen des WSA WILHELMSHAVEN bei $s = 29\%$ mit nur geringen Schwankungen. Aus diesem Grunde führen lediglich der Tide- und Strömungseffekt zu den Verlandungen des Vorhafens von Wilhelmshaven. Durch die sich bei Flut ausbildenden Strömungswalzen kommt es zu einem um etwa 30 % erhöhten Wasseraustausch im Vorhafen (FRELS, 1995).

Im Juni 1996 wurden mit Unterstützung des WSA WILHELMSHAVEN vom Labor für Wasserbau der HOCHSCHULE BREMEN die Strömungen im Vorhafen gemessen. Bei einem Springtidehub von 454 cm traten am 14. 6. 1995 hohe Einströmgeschwindigkeiten an der Ostmole in drei (rote Linien) und sechs (blaue Linien) Meter Wassertiefe auf (Abb. 29 oben). Aus Dauerstrommessungen des WSA Wilhelmshaven geht hervor, daß die Strömungsintensität mit der Wassertiefe zunimmt, was auf die große Wassertiefe außerhalb des Vorhafens zurückgeführt wird (FRELS, 1995). Am 14. 6. 1995 erreichten die Geschwindigkeiten auch noch im äußeren Walzenbereich mit bis über $v_f = 30$ cm/s beträchtliche Größenordnungen, bei denen erhebliche Feststoffmengen in den Vorhafen transportiert und dort abgesetzt werden. Die Rückströmungen finden im westlichen Teil des Vorhafens statt. Aus Abb. 29 oben ist erkennbar, wie die Wasserteilchen aus dem Vorhafen treiben und von der Flutströmung in der Jade erfaßt und beschleunigt werden. Die geringen Strömungsintensitäten im Bereich der Westmole verursachen dort die hohen Sedimentationen.

Am 15. 6. 1995 lag der Tidehub mit 432 cm ebenfalls über dem langjährigen Mittelwert von $MThb_{1971/80} = 375$ cm. Grundsätzlich wurden die Flutströmungsverhältnisse vom Vortag bestätigt (Abb. 29 unten). Es hatte sich wieder eine rechtsdrehende Flutstromwalze ausgebildet mit Einströmungen an der Ostmole. Die Messungen machen aber auch die sich täglich ändernden dynamischen Vorgänge deutlich. So hatten sich die Walzenströmungen am zweiten Tag mit geringerer Stärke und weiter vorn im Vorhafen ausgebildet, und auch das Walzenzentrum lag an einer anderen Stelle. Dies hat mit den vielfältigen periodischen Einflüssen im Tidegebiet zu tun. So war der Tidehub am 15. 6. 1995 etwas geringer als am Vortag und es herrschte Wind aus WSW mit abnehmender Tendenz von 8 m/s auf 5 m/s während der Messungen.

Am 21. 6. 1995 wurden die Strömungen bei einer Nipptide während der Ebbphase in 3 m Tiefe gemessen. Der Tidefall lag mit 322 cm rd. 0,5 m unter dem langjährigen Mittelwert. Innerhalb des Vorhafens wurden keine Walzenströmungen festgestellt. Die Treibkörperbahnen verschwenken im Einfahrtsbereich nach Osten (Abb. 30).

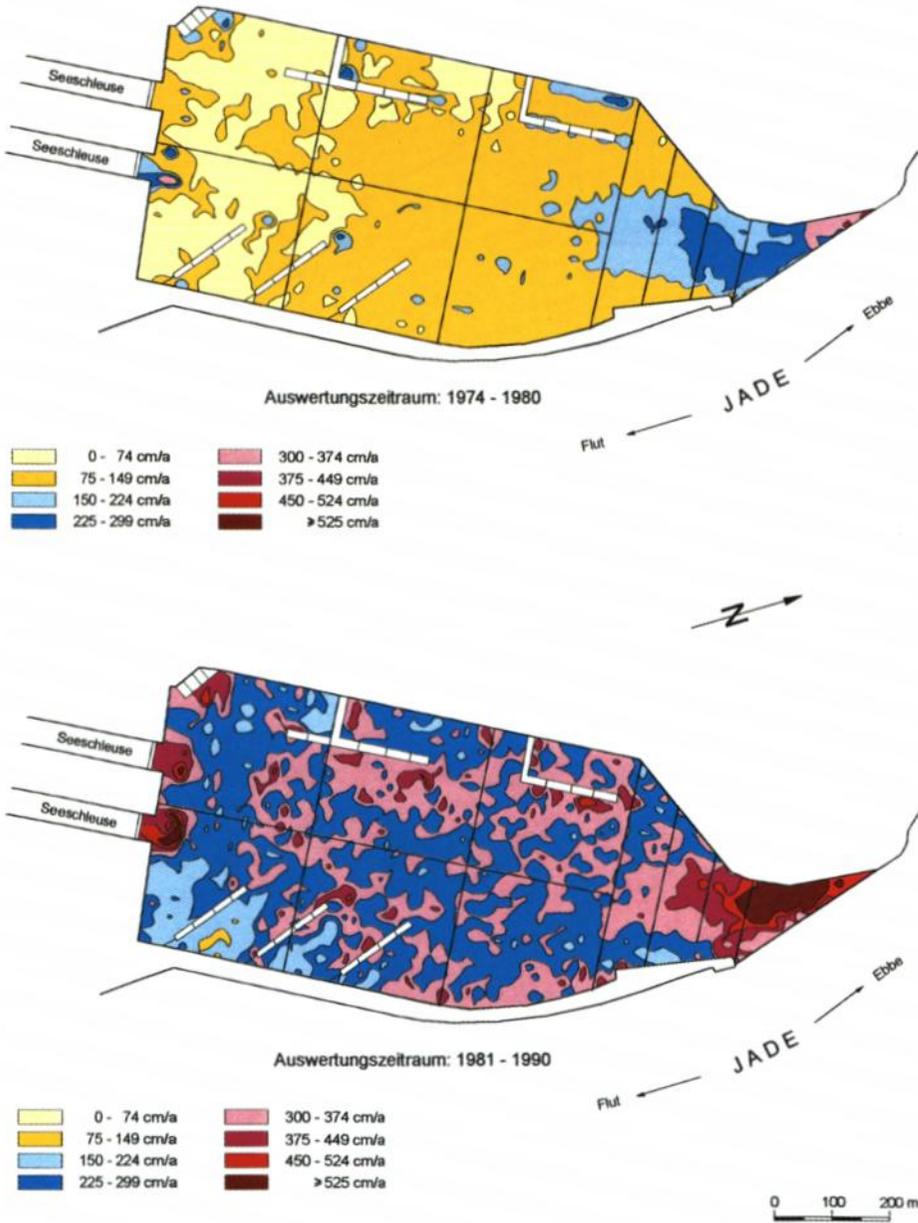


Abb. 28: Sedimentationsraten im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven

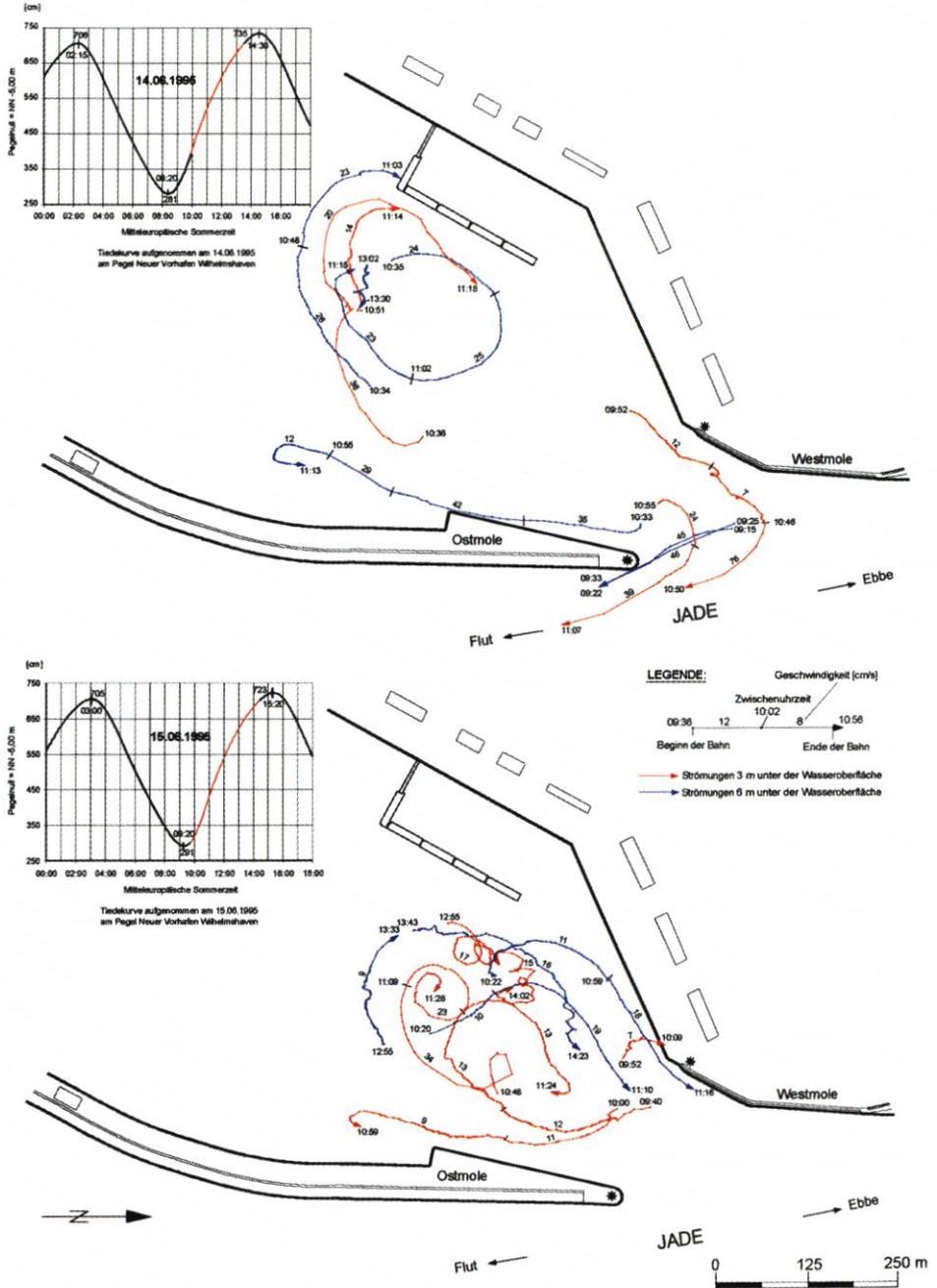


Abb. 29: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven während der Flutphase am 14. und 15. 6. 1995

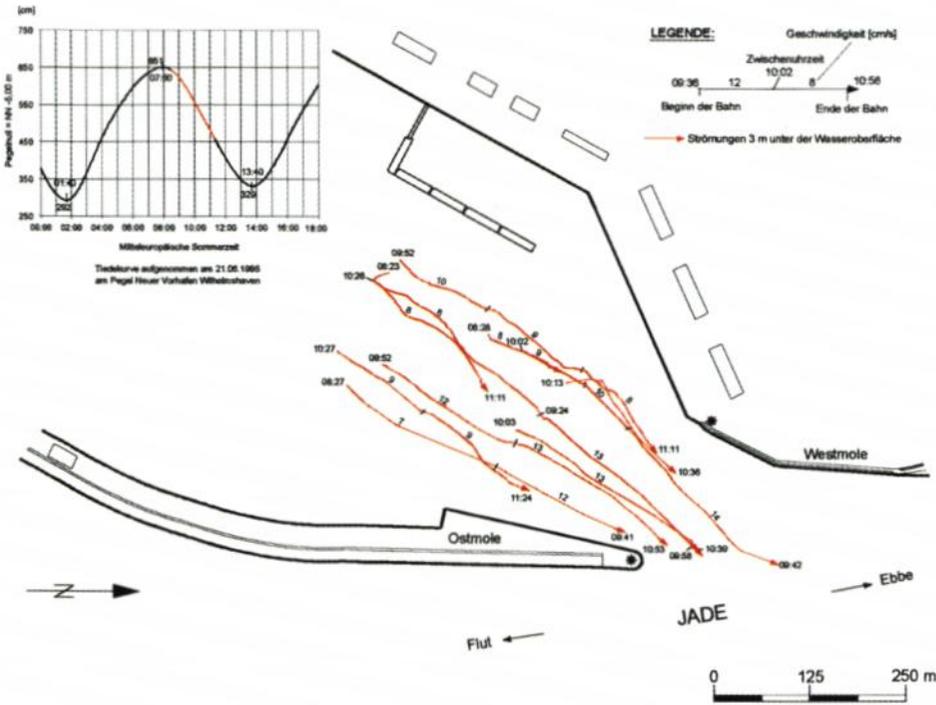


Abb. 30: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven während der Ebbsphase am 21. 6. 1995

Die Ausströmungsgeschwindigkeiten waren im Vorhafen mit $v_e < 15$ cm/s bedeutend geringer als der Füllstrom bei Flut. Nach Dauerstrommessungen des WSA WILHELMSHAVEN ändert sich das auch nicht bei höheren Tiden. Außerdem sind die Geschwindigkeiten in größeren Tiefen noch deutlich schwächer. Vor der Westmole wurden bei den Messungen während der Ebbsphase schwache Gegenströmungen registriert, woraus zu schließen ist, daß sich dort Ebbsstromwalzen ausbilden (FRELS, 1995).

Aus den Ergebnissen der Strömungsmessungen kann geschlossen werden, daß die Sedimente marinen Ursprungs aus der Jade durch die Flutströmungen in den Vorhafen von Wilhelmshaven eingetragen werden und die morphologischen Verhältnisse prägen (Abb. 27 und 28). Die starken Sedimentationen vor der Westmole werden durch die Strömungsbedingungen sowohl bei Flut als auch bei Ebbe verursacht.

Die am 17. 10. 1995 entnommenen Bodenproben ergaben innerhalb des Vorhafens sehr einheitliches, überwiegend aus Schluffkorn bestehendes Sohlenmaterial. Die Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials ist mit der aus dem Emdener Vorhafen vergleichbar. Auch die Glühverluste liegen in der gleichen Größenordnung wie in Emden. Für die nichtmineralischen Anteile scheint der Salzgehalt des Wassers nicht so entscheidend zu sein. Den vorstehend beschriebenen hydrodynamischen Vorgängen entsprechend setzt sich im inneren Vorhafen das feinste Material ab.

5.4 Bremerhaven

Von den Hafenanlagen in Bremerhaven wurden die Vorhäfen zur Kaiser- und Nordschleuse sedimentologisch untersucht (Abb. 31). Die Peilplanauswertungen haben ergeben, daß die Auflandungen im Vorhafen zur Kaiserschleuse trotz der geringeren Einfahrtsbreite höher sind als vor der Nordschleuse (Abb. 31 unten), was auf betriebliche Ursachen zurückzuführen ist.

In der Nordschleuse finden mehr Schiffsbewegungen statt als in der Kaiserschleuse, so daß es dort verstärkt zur Resuspendierung der Sedimente kommt. Außerdem werden Wasserverluste durch Schleusungen bei höheren Wasserständen in der Weser mit Sielungen über die Nordschleuse ausgeglichen. Dadurch tritt im Vorhafen ein gewisser Spüleffekt ein, durch den zusätzlich mit den Sielwassermengen Feststoffe in das Wendebassin des Überseehafens gelangen. Dementsprechend hoch ist die mittlere jährliche Sedimentationsrate im Wendebassin mit $q_s = 157 \text{ cm/a}$ (NASNER, 1992). Hinter dem Binnenhaupt der Kaiserschleuse sedimentiert dagegen lediglich $q_s = 33 \text{ cm/a}$.

In den dem mesohalinen Brackwasserbereich zuzuordnenden Vorhäfen von Bremerhaven lagert sich über der festen Sohle Fluid Mud ab. Die Sedimentationen sind dort in den Sommermonaten nachweislich höher als in der kalten Jahreszeit (NASNER, 1992). Seit Herbst 1994 wird die Unterhaltung der Vorhäfen ausschließlich mit „Wasserinjektionen“ betrieben. Davor wurde mit dem Eimerkettenbagger und der mechanischen Schlickege gearbeitet.

Die Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials in den Vorhäfen wurde mehrfach untersucht. Als vom 11. bis 14. Juni 1990 in der Kaiserschleuse selbst und im Vorhafen ein Versuch mit dem Wasserinjektionsverfahren durchgeführt wurde, sind vorher (am 8. 6. 1990) und anschließend (am 19. 6. 1990) Greiferproben genommen worden. Im folgenden sollen neben den Ergebnissen der Bodenanalyse auch Längspeilungen des HANSESTADT BREMISCHEN AMTES hinsichtlich des Verhaltens von Fluid Mud erläutert werden.

Vor den Wasserinjektionen bestanden die mit dem Van-Veen-Greifer gezogenen Proben aus dem Vorhafen überwiegend aus Grobschluff (Abb. 32). Erwartungsgemäß wurde in der Schleuse selbst feineres Material angetroffen und auch die höheren Glühverluste ermittelt. Nach dem Injektionsversuch hatte sich die Entnahmetiefe der Proben in der Schleusenkammer um etwa 3,5 m und im Vorhafen um rd. 2 m vergrößert.

Sowohl in der Schleusenkammer als auch im Vorhafen wurde am 19. 6. 1990 gröberes, überwiegend feinsandiges Sohlenmaterial angetroffen (Abb. 32). Lediglich im äußersten Vorhafenbereich war die Körnung feiner als vor der Probegrabung. Das liegt daran, daß sich das durch Injektionen aktivierte Sohlenmaterial zum Teil bereits im Bereich des westlichen Molenkopfes wieder abgesetzt hatte.

Zwei weitere Probenentnahmen aus den Vorhäfen der Kaiser- und Nordschleuse im Juni 1992 und im April 1994 haben bestätigt, daß die Korngrößen des Sohlenmaterials innerhalb der Vorhäfen geringer werden. Die absoluten Werte sind jeweils von den vorher stattgefundenen Unterhaltungsmaßnahmen abhängig. Dabei spielten die Konsistenz des Fluid Muds und der Einfluß der mechanischen Egge eine Rolle. Im Juni 1992 wurde aus den Vorhäfen überwiegend Feinsand entnommen, was auf eine Fluid Mud-Schicht geringer Dichte schließen läßt. Im April 1994, als die Kornfraktionen vornehmlich aus Mittel- und Grobschluff bestanden, wurde offenbar ein spezifisch schweres Fluid Mud angetroffen in dem der Bodengreifer bei geringen Entnahmetiefen steckengeblieben ist.

Im folgenden wird auf das Verhalten des Fluid Mud anhand einiger Echogramme eingegangen.

Die Auswirkungen der Injektionsbaggerung in der Schleusenkammer und im Vorhafen

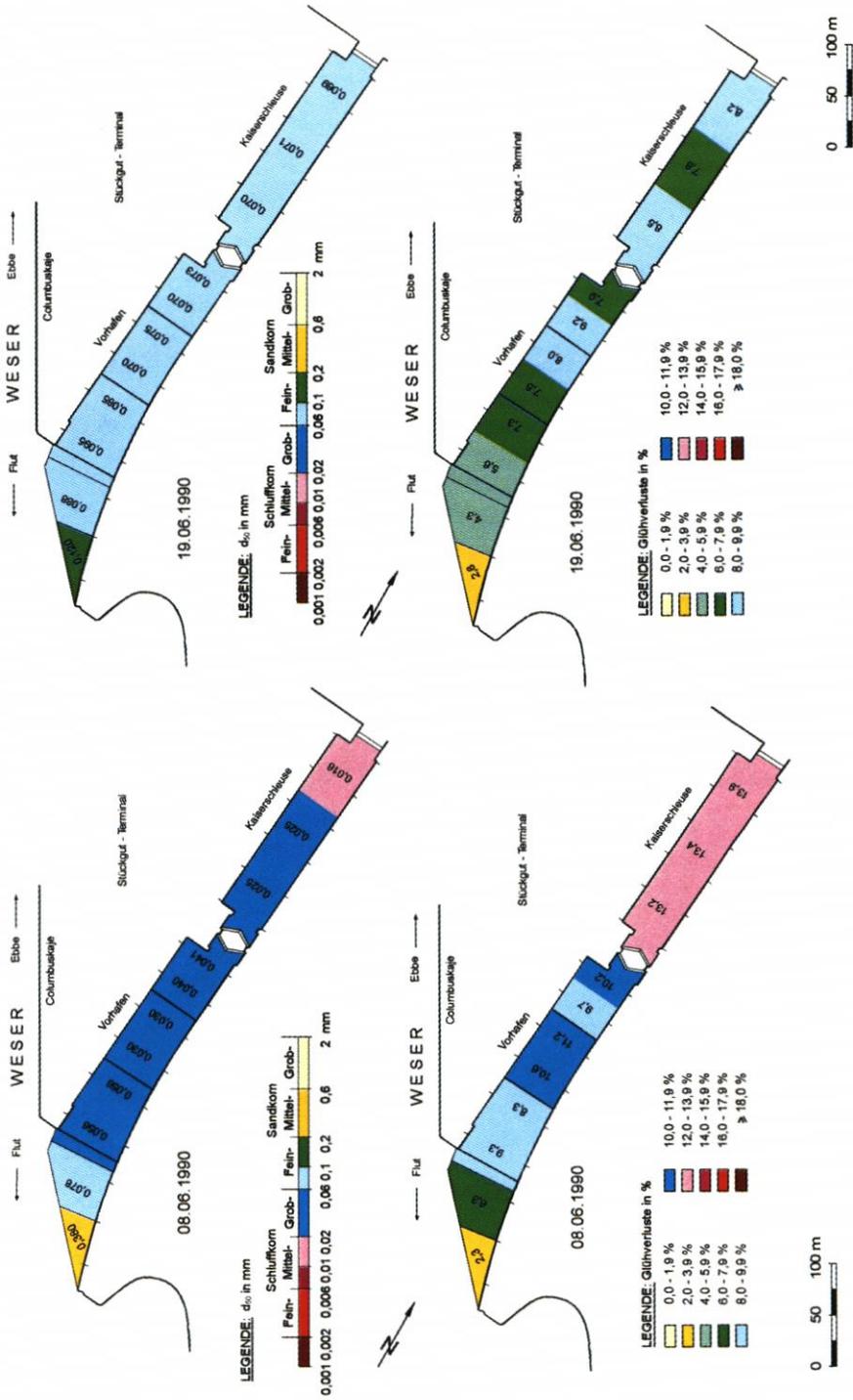


Abb. 32: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste in der Schleusenkammer und dem Vorhafen der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Probenentnahme vom 8. 6. 1990 und 19. 6. 1990

zur Kaiserschleuse können mit vom HBA BREMERHAVEN durchgeführten Längspeilungen nachvollzogen werden (Abb. 33 und 34). Vor der Baggerung lag das obere Echo in der Schleusen-
kammer etwas unter SKN -5 m. Die Proben wurden aus ca. SKN -6 m Tiefe entnommen (Abb. 33 oben). Bereits vier Tage nach der Maßnahme wurde die obere Grenze der Fluid
Mud-Schicht wieder bei SKN -8 m registriert (Abb. 33 Mitte). Die Entnahmetiefe der Bo-
denproben betrug etwa SKN $-9,50$ m. Der untere „feste“ Horizont wurde bei SKN -10 m
festgestellt. Innerhalb von nur 3 Wochen wurde der obere Horizont des Echos um etwa
einen Meter auf SKN -7 m angehoben (Abb. 33 unten). Der untere Horizont lag unverän-
dert bei SKN -10 m. Der rasche Eintrieb von Fluid Mud mit geringer Dichte ist nicht unge-
wöhnlich und auch nicht auf die Injektionsmaßnahme zurückzuführen. Für den Schiffsbe-
trieb ist maßgebend, daß die Fluid Mud-Schicht ausgedünnt und der feste Horizont vertieft
wurde. Das neu eingetriebene Fluid Mud hat eine bedeutend geringere, nautisch nicht maßge-
bende Dichte. Dies ist an der sehr viel größeren Eindringtiefe des Bodengreifers zu erken-
nen. Auch mit dem Handlot wurden am 9. 7. 1990 noch Tiefen bis zu SKN $> -9,50$ m er-
reicht.

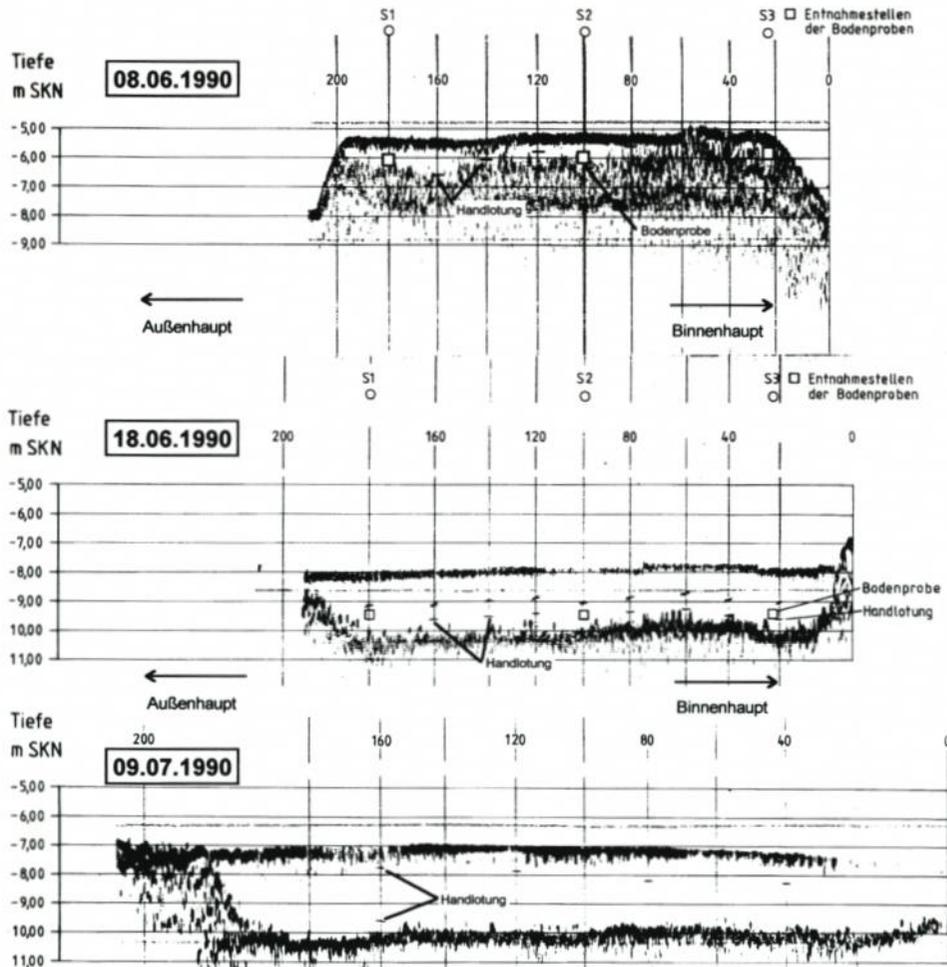


Abb. 33: Längspeilungen in der Schleusen-
kammer der Kaiserschleuse in Bremerhaven

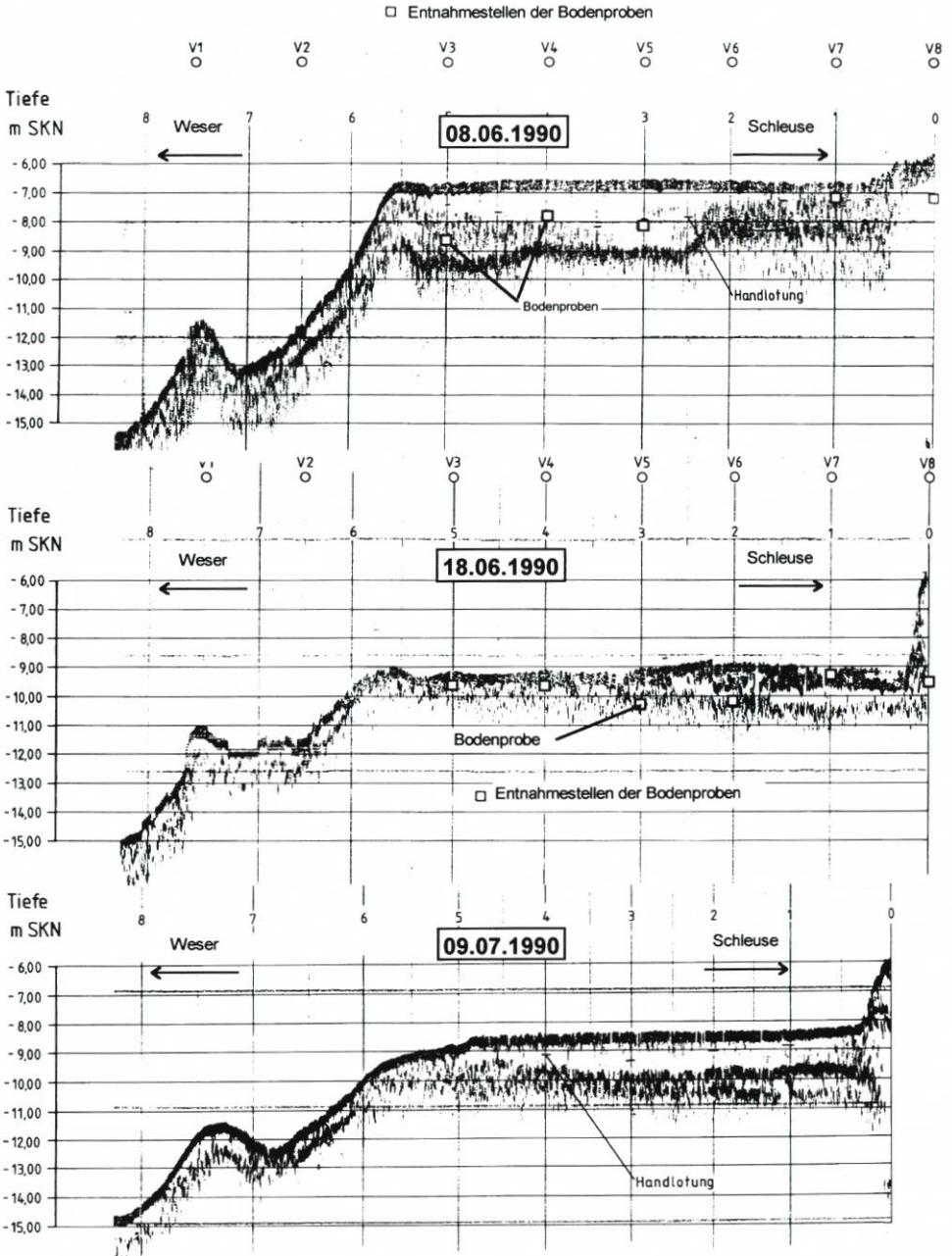


Abb. 34: Längsprofilen im Vorhafen der Kaiserschleuse in Bremerhaven

Aus dem Vorhafen der Kaiserschleuse wurde durch die Wasserinjektionen ebenfalls Sohlenmaterial resuspendiert und transportiert (Abb. 34). Ein Vergleich der Eindringtiefen des Bodengreifers am 8. und 18. 6. 1990 mag dies verdeutlichen. Die begrenzten, kornabhängigen Transportwege nach Wasserinjektionen sind daran erkennbar, daß sich aktivierte Fest-

stoffe bereits in dem Kolk vor der Einfahrt wieder abgesetzt hatten. Aufgrund der herrschenden Strömungsbedingungen hatte sich die Sohle dort bis zum 9. 7. 1990 bereits wieder vertieft. Auch im Vorhafen war schon kurzfristig eine neue Fluid Mud-Schicht entstanden.

Ähnliche Verhältnisse wurden nach einer Baggerung mit dem Eimerkettenbagger im Vorhafen der Nordschleuse beobachtet. Dort wurde noch nach Monaten der feste Horizont als zweites Echo aufgezeigt. Darüber befand sich die mehrere Meter starke Fluid Mud-Schicht mit dem Übergang vom flüssigen Schlick zu stark schwebstoffhaltigem Wasser. Dies ist mit Längspeilungen des HBA BREMERHAVEN vom 3. 11. 1986 bis zum 2. 7. 1987 zu belegen (Abb. 35).

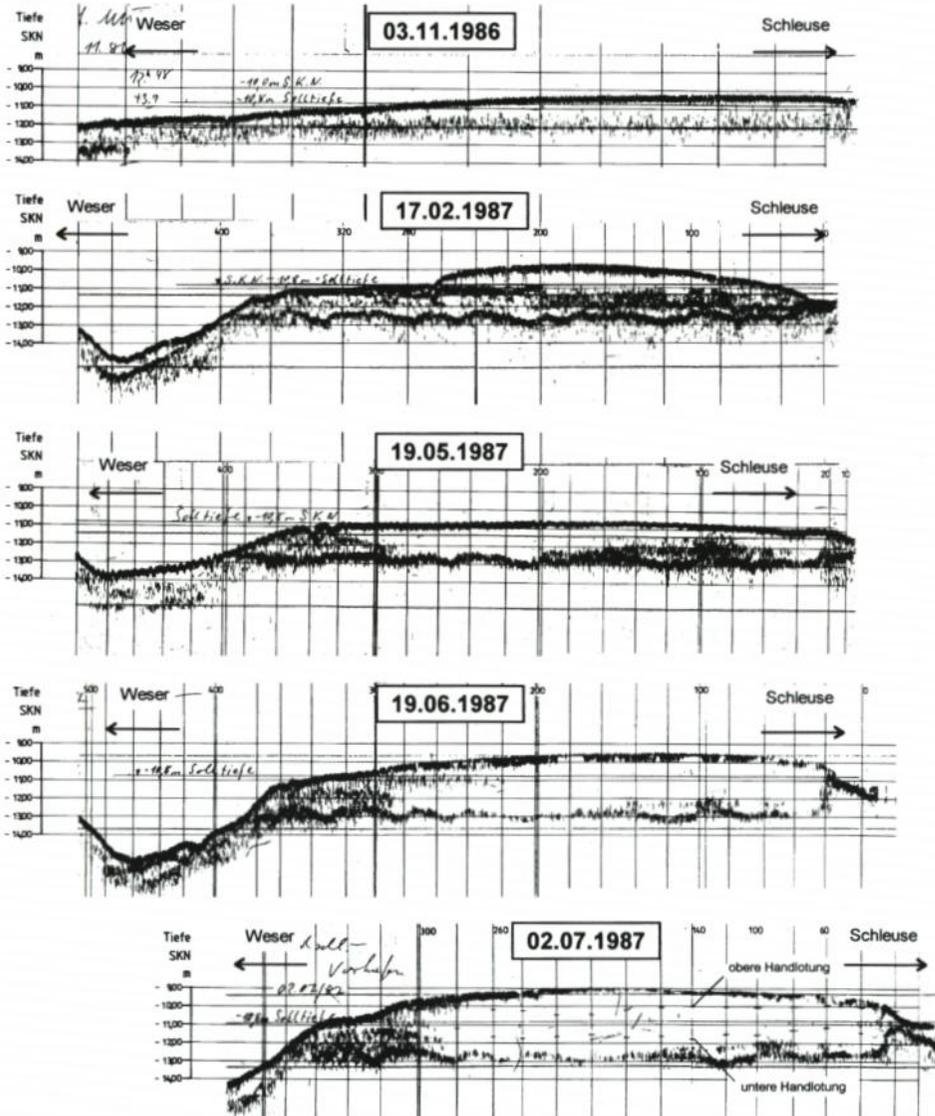


Abb. 35: Längspeilungen im Vorhafen der Nordschleuse in Bremerhaven

In der zweiten November- und ersten Dezemberhälfte 1986 wurde die Vorhafensohle mit dem Bagger vertieft. Seit Mitte Januar 1987 konnte wegen Eisgangs nicht geeeggt werden. Bei der Peilung vom 17. 2. 1987 ist der Baggerhorizont als unterstes Echo zwischen SKN -12 m bis SKN -13 m zu erkennen. Darüber zeichnet sich eine ausgeprägte Fluid Mud-Linse mit Tiefen bis zu weniger als SKN -10 m ab. Die weitere Entwicklung bis zum Juli 1987 zeigt, daß das Doppelecho eine unverändert feste Sohllage zwischen SKN -12 m bis SKN -13 m anzeigt (Abb. 35).

Nach dem Eiswinter konnte der obere Horizont mit dem Einsatz der mechanischen Egge auf knapp SKN -11 m abgesenkt werden. Die Erhöhung des oberen Wertes bis auf SKN -9 m Anfang Juli 1987 ist auf die steigenden Wassertemperaturen und zunehmenden Biomassenproduktionen in den Frühjahrsmonaten zurückzuführen. Aufgrund der günstigen Nährstoff- und Wachstumsbedingungen können sich die im Feststoffmaterial vorhandenen Bakterien stark vermehren (GREISER et. al., 1992).

Die am 2. 7. 1987 durchgeführten Handlotungen zeigen, daß die obere Fluid Mud-Schicht vor allem aus Wasser besteht (Abb. 35 unten). Obwohl die Handlotungen nur subjektiv beurteilt werden können zeigt sich, daß ein erster Widerstand erst etwa 1 m unter dem oberen Echo festgestellt wurde (obere Handlotung). Die größten Eindringtiefen (untere Handlotung) betragen bis zu 1,8 m mehr.

Seit Herbst 1994 wird in Bremerhaven der Überschuß an Fluid Mud-Eintrieb in die Vorhäfen durch Wasserinjektionen ausgeglichen. Durch die Arbeiten mit dem Wasserinjektionsgerät kommt es zu einem Rückfluß des Fluid Muds aus der Hafeneinfahrt, so daß sich zusätzliche Baggereinsätze erübrigen. Mit dieser Lösung ist für Bremerhaven ein optimales Konzept für die Unterhaltungsarbeiten gefunden worden.

5.5 Cuxhaven

Für den mehr dem unteren Brackwasserbereich zuzuordnenden Vorhafen und Alten Hafen von Cuxhaven wurden die Peilungen des NIEDERSÄCHSISCHEN HAFENAMTES CUXHAVEN von 1985 bis 1989 nach dem Einzelpunktverfahren ausgewertet und Bereiche gleicher Sedimentationsraten ermittelt (Abb. 36). Die Unterhaltungsarbeiten werden dort seit 1985 durch Resuspension des Sohlenmaterials mit Wasserinjektionen durchgeführt. Die stärkste Sedimentation findet im äußeren Vorhafen statt, der auf SKN -8,5 m ausgebaut ist. Es kann davon ausgegangen werden, daß dies durch die bei Flut auftretenden Walzenströmungen verursacht wird. Zum inneren Vorhafen hin nehmen die Auflandungen ab. Am geringsten ist die Sedimentation im Alten Hafen in dem die Sollsohle lediglich auf SKN -4,5 m festgelegt ist. Die günstigeren Verhältnisse sind auf die größere Entfernung zur Hafeneinfahrt und die geringere Ausbautiefe zurückzuführen. Sicher bedingt auch die Lage im äußeren Brackwasserbereich der Elbe, daß die Auflandungen geringer als in den Untersuchungsgebieten von Emden, Bremerhaven oder Brunsbüttel sind.

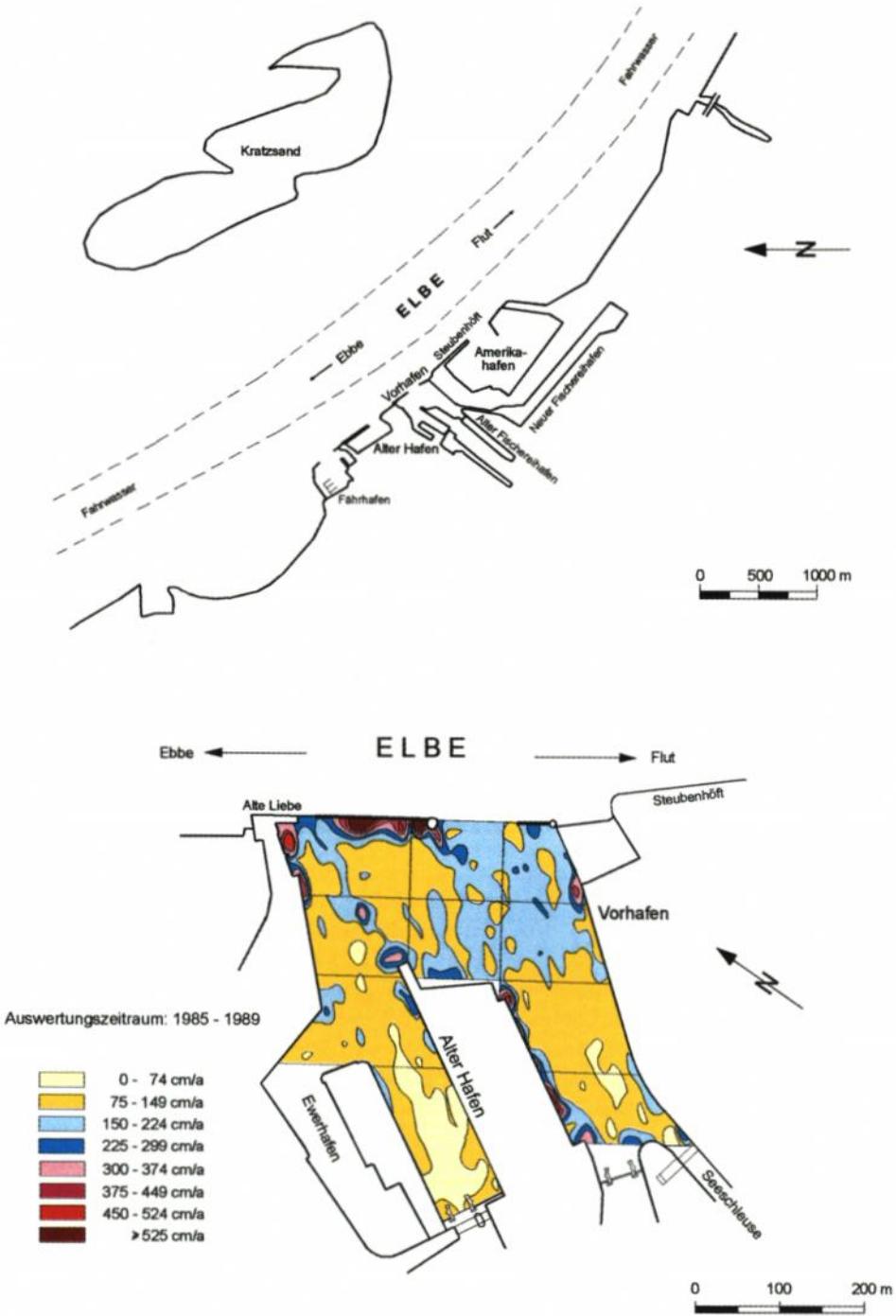


Abb. 36: Hafenanlagen von Cuxhaven und Morphologie im Vorhafen und Alten Hafen

5.6 Brunsbüttel

Aufgrund ihrer Lage im oberen Brackwasserbereich der Elbe sind die Schleusenvorhöfen zum Nord-Ostsee-Kanal besonders hohen Auflandungen unterworfen (Abb. 37). Am Beispiel des Neuen Vorhafens ist deutlich zu erkennen, wie die Morphologie der Sohle durch betriebliche Vorgänge beeinflusst wird. So zeigt sich, daß bei dem starken Schiffsverkehr im Neuen Vorhafen durch Rückströmungs- und Schraubstrahleffekte Feststoffe resuspendiert und in den Randbereichen wieder abgesetzt werden. Dagegen bietet der Alte Vorhafen ein ganz anderes Bild. Die hohen Auflandungen in Brunsbüttel verursachen wie in Emden die brackwasserbedingten Austauschvorgänge zwischen den Vorhöfen und der Elbe. Wie in den Brackwasserhäfen von Emden und Bremerhaven liegen die mittleren jährlichen Sedimentationsraten auch in Brunsbüttel im Bereich von mehreren Metern. Nachweisbar setzt sich wie an der Ems und Weser im Sommer mehr Material ab als im Winter (NASNER, 1992). Besonders hohe Auflandungen finden in den Vorhöfen des Nord-Ostsee-Kanals bei geringer Oberwasserführung der Elbe statt. Offenbar sind dann die brackwasserbedingten Dichteströmungen besonders ausgeprägt.

Im Oktober 1993 wurden erstmals mit Unterstützung des WSA BRUNSBÜTTEL im Neuen Vorhafen die Strömungen mit DGPS in verschiedenen Tiefen gemessen. Zu der Zeit waren die selbstregistrierenden Treibkörper noch nicht entwickelt. Die Position der konventionell ausgerüsteten Kreuztafelschwimmer mußte jeweils mit einem im Vermessungsboot installierten Empfänger bestimmt werden. Die Strömungen wurden bei mittleren Tideverhältnissen ($MThb_{1971/80} = 281 \text{ cm}$) und geringem Oberwasser ($Q_0 \approx 365 \text{ m}^3/\text{s}$) in drei verschiedenen Wassertiefen gemessen. Die Ergebnisse wurden ausführlich im Schlußbericht des KFKI-Projektes dargestellt (NASNER, 1996).

Mit den in der Natur durchgeführten Strömungsmessungen im Neuen Vorhafen konnten ähnlich wie in Emden die Überlagerungen von Tide-, Strömungs- und Dichteeffekt erfaßt werden. Die Ergebnisse des Naturversuches entsprechen ebenfalls der schematischen Darstellung in Abb. 26.

Am 4.10.1993 wurden in den Vorhafenbereichen von Brunsbüttel Bodenproben entnommen. Außerhalb der Streichlinien der Bühnenköpfe bestand das Sohlenmaterial überwiegend aus Feinsand. Innerhalb der Vorhöfen lagern sich zunehmend feinere Feststoffe ab, und es bildet sich Fluid Mud, das mehrere Meter stark werden kann. In den inneren Vorhafenbereichen waren auffallend hohe Feinschluff- und Tonanteile in den Proben.

Die Änderungen der Zusammensetzung der Sedimente aufgrund der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse von außen nach innen wird hier besonders deutlich, obwohl es sich lediglich um einzelne Stichproben handelt. Wie in den anderen Untersuchungsgebieten zeigt sich auch hier der gute Zusammenhang zwischen Korngrößen und Glühverlusten. Die Kornverteilungen werden im folgenden Abschnitt im Vergleich mit dem Sohlenmaterial aus anderen Untersuchungsbereichen beschrieben.

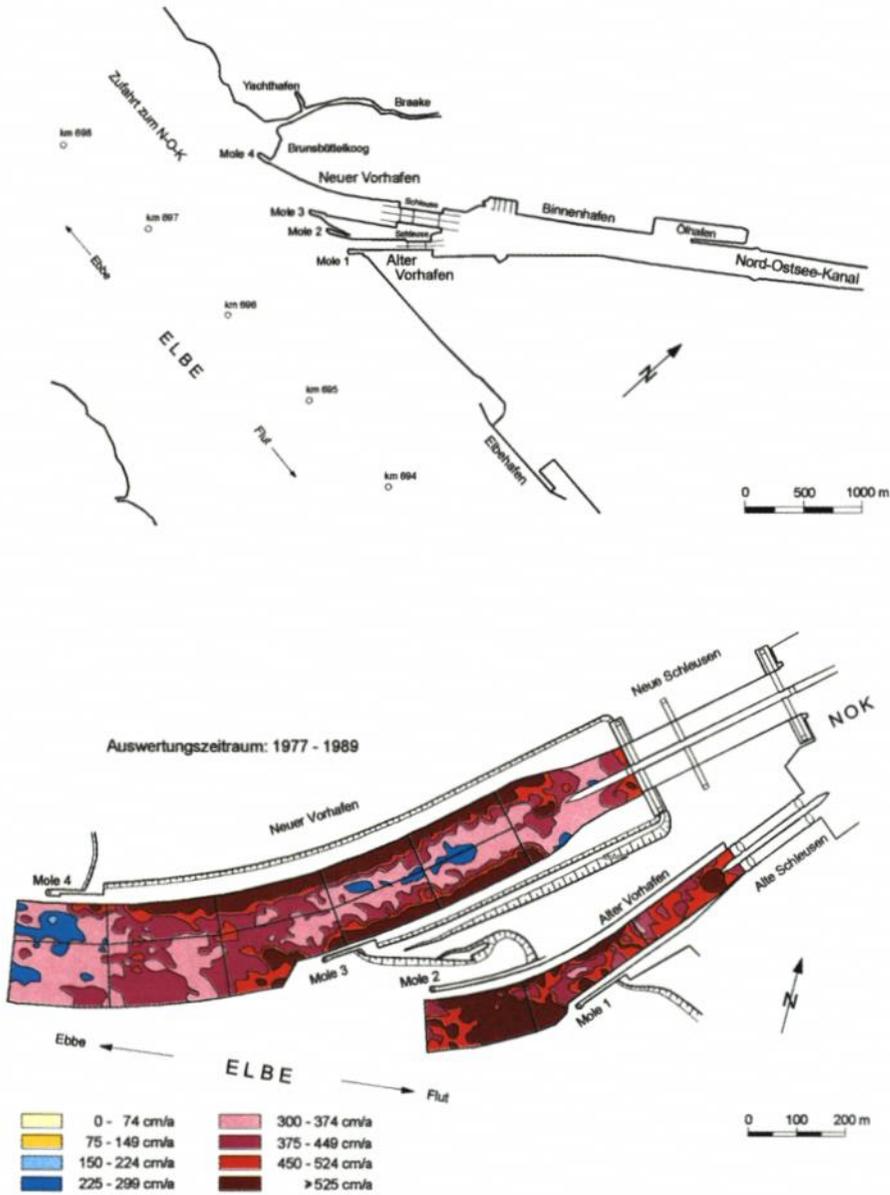


Abb. 37: Hafenanlagen von Brunsbüttel und Sedimentationsraten im Neuen und Alten Vorhafen

5.7 Zusammenfassende Betrachtungen

Von den im Brackwasser- und Mündungsgebiet untersuchten Hafengebieten wurden für Wilhelmshaven und Cuxhaven vergleichsweise geringe Sedimentationen ermittelt. Das liegt daran, daß Cuxhaven mehr dem unteren Brackwasserbereich und Wilhelmshaven den Salzwasserbedingungen der Nordsee zuzuordnen ist.

Aufgrund ihrer Lage im Brackwasserbereich von Ems, Weser und Elbe sind die Auflandungen in den Hafengebieten von Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel besonders hoch. Ursächlich dafür sind die aus den Salzgehaltsunterschieden resultierenden Dichteströmungen, so wie sie in den Vorhäfen von Emden und Brunsbüttel gemessen wurden. Der tidebedingte Wasseraustausch wird durch den Dichteeffekt vervielfacht. Die hydrodynamischen Vorgänge und biologischen Prozesse führen zu den ungünstigen Sedimentationsverhältnissen. Aus der Summe aller Einflüsse bilden sich in den Vorhäfen über der festen Sohle Fluid Mud-Schichten geringer Dichte aus, deren oberer Bereich vornehmlich aus Wasser besteht.

Mit konventionellen Methoden kann der Unterhaltungsaufwand mit Übertiefen aus Vorratsbaggerungen eingeschränkt werden. Dies wurde bereits an anderer Stelle für die Vorhäfen in Emden, Wilhelmshaven und Bremerhaven belegt (NASNER, 1992). Der positive Einfluß von Reservetiefen wurde vorstehend am Beispiel des Vorhafens von Wilhelmshaven dokumentiert (Abb. 28). Als bis 1980 mit wenig Baggereinsätzen und tiefen Schnitten mehr festes Material gefördert wurde, konnte sich neu eintreibendes Material problemloser ablagern und verfestigen. Baggerungen, die sich mehr im Bereich des verflüssigten Schlicks abspielen, bringen nicht den gewünschten Erfolg.

Alternativ werden in den Schleusenvorhäfen von Bremerhaven und in Cuxhaven seit einigen Jahren erfolgreich Unterhaltungsmaßnahmen mit Wasserinjektionen betrieben. Damit kann der Überschuß an Feststoffeintrieb durch künstlich erzeugte Dichteströmungen ausgeglichen werden, wodurch sich zusätzliche Baggereinsätze erübrigen. Diese Methode ist dann erfolgreich anzuwenden, wenn die Gefälleverhältnisse zwischen Vorhafen und Fluß gewährleisten, daß das aktivierte Sohlenmaterial aus dem Vorhafen fließen kann. Die Funktionsfähigkeit ist nicht gegeben, wenn die Hafensohle tiefer liegt als die Flußsohle oder eine Barre den Ausfluß von Fluid Mud verhindert.

Eine andere Möglichkeit, die Sedimentationen in einem Hafenbecken zu vermindern, wird seit 1990 im Hamburger Hafen untersucht (CHRISTIANSEN u. KIRBY, 1991). Dabei wird das Ziel verfolgt, mit einer Strömungsumlenkwand die Wasseraustauschvorgänge zwischen Strom und Hafen so zu beeinflussen, daß weniger Feststoffe im Hafenbecken sedimentieren. Nach neueren Ergebnissen konnte damit die Sedimentation um etwa 46 % verringert werden (CHRISTIANSEN, 1996).

Die aus den verschiedenen Hafengebieten analysierten Bodenproben sind zum Vergleich in Körnungsdreiecke zur Bodenklassifizierung eingetragen worden (Abb. 38). Die Beprobungen für Emden und Wilhelmshaven haben ergeben, daß es sich dort nach der Definition in Abb. 20 überwiegend um mageren, im wesentlichen aus Mittel- bis Grobschluffanteilen bestehenden Schlick handelt (Abb. 38 oben).

Für die Kammer und den Vorhafen der Kaiserschleuse in Bremerhaven zeigt sich der Erfolg des Versuches mit Wasserinjektionen vom Juni 1990 (Abb. 38 Mitte links). Nach der Maßnahme am 19. 6. 1990 waren die Körnungen in der Schleusenkammer und davor deutlich gröber. Der feinste Schlick setzte sich in Bremerhaven vornehmlich im Überseehafen ab. Die Tonmineralanteile der Sedimente betragen dort bis über 38 % (PATZOLD, 1996). Vergleichbare Verhältnisse sind ebenfalls im Schleusenbereich von Brunsbüttel vorhanden.

Alle Probenentnahmen von Bremerhaven lassen erkennen, daß die Körnungen innerhalb der Vorhäfen zur Kaiser- und Nordschleuse feiner werden. Die Unterschiede zwischen 1992 und 1994 sind von den Unterhaltungsarbeiten vor den Entnahmen abhängig. Die Proben von 1994 mit feineren Körnungen sind offenbar nach einer längeren Ruhepause gegriffen worden.

Für die Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal zeigt sich der Übergang vom Sand zum Schlick innerhalb der Schleusenzufahrten besonders deutlich. Vor den Außenhäuptern be-

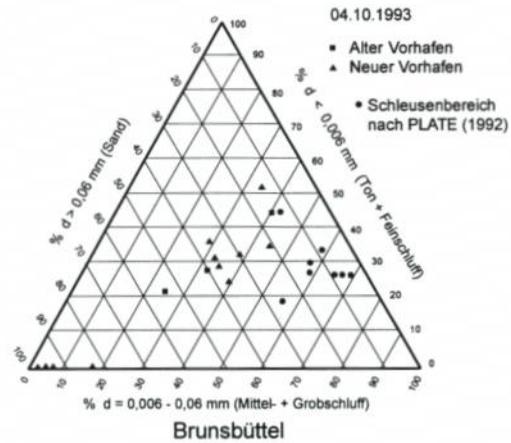
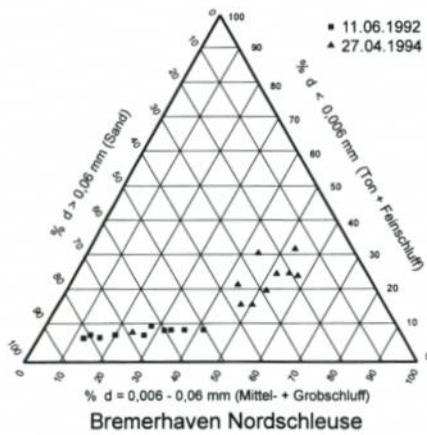
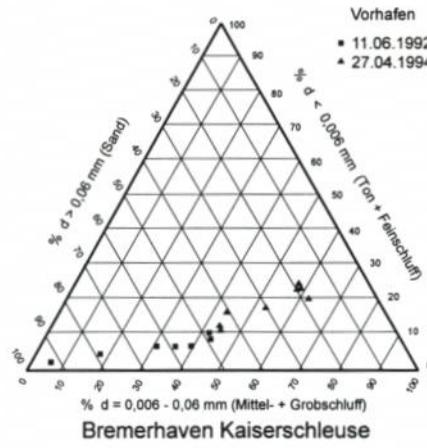


Abb. 38: Kornverteilung der Brackwasserhäfen im Bodendreieck

findet sich im Gegensatz zu Emden und Wilhelmshaven „fetterer“ Schlick mit relativ hohen Feinkornanteilen. Im Körnungsdreieck (Abb. 38 unten rechts) wurden zusätzlich Auswertungen von PLATE (1992) mit eingetragen, wodurch bestätigt wird, daß sich der feine, mit hohen Tonanteilen versehene Schlick im Schleusenbereich ablagert.

Der hier vorgenommene Vergleich der Kornverteilungen von Sedimenten der Hafensohle aus den verschiedenen Untersuchungsgebieten hat übereinstimmend gezeigt, daß die Körnungen den hydraulischen Randbedingungen entsprechend von außen nach innen feiner werden. Nach Unterhaltungsmaßnahmen sind die absoluten Werte größer. Beachtenswert sind örtliche Unterschiede in den Zusammensetzungen der Kornfraktionen. So setzen sich die Hafensedimente in Emden und Wilhelmshaven vornehmlich aus Schluffkornanteilen zusammen. Im Schleusenbereich der Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal sind ebenso wie in Bremerhaven höhere Tonmineralanteile vorhanden. Über die Auswirkungen dieser Unterschiede auf die Zusammensetzung und Zähigkeit der über der festen Sohle anstehenden Fluid Mud-Schichten können hier keine Aussagen getroffen werden.

6. Schlußbemerkungen

Die Sedimentation offener Tidehäfen ist von den hydrodynamischen Randbedingungen, der Lage des Hafens zum Strom, seiner Geometrie und Ausbautiefe abhängig. Dabei herrschen in den Häfen oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee ganz andere Verhältnisse als im Brackwassergebiet. Dort führen die veränderlichen Salzgehalte und daraus resultierende Dichteströmungen zu einem vielfachen Wasseraustausch und um Größenordnungen höher liegende Sedimentationen. Aufgrund der besonderen physikalischen und biologischen Vorgänge lagert sich verflüssigter Schlick (Fluid Mud) geringer spezifischer Wichte mit bis zu mehreren Metern Mächtigkeit ab.

Mit den vorliegenden Untersuchungen waren die Verlandungsschwerpunkte in Tidehäfen durch gezielte Peilplananalysen zu bestimmen. Einblicke in die Wechselwirkungen zwischen Sedimentation, der Zusammensetzung des sedimentierenden Materials und den Strömungsverhältnissen wurden mit Treibkörpermessungen und der Analyse von Sedimentproben erhalten.

Im Rahmen des BMBF-Projektes MTK 0544 wurde dazu für Strömungsmessungen ein mit dem satellitengestützten Ortungsverfahren (DGPS) online arbeitendes Treibkörpermeßsystem aufgebaut und zur Anwendungsreife gebracht. Für den innovativen Gehalt dieser Entwicklung wurden zwei Mitarbeiter des Labors für Wasserbau der HOCHSCHULE BREMEN mit dem ERICH LACKNER-Förderpreis ausgezeichnet (PIEPER u. TORN, 1995). Anlässlich des 11th International Harbour Congresses in Antwerpen wurde das im Real-Time DGPS arbeitende System der internationalen Fachwelt vorgestellt (NASNER, PIEPER u. TORN, 1996a). Im Sommer 1996 wurde es erstmals im außereuropäischen Ausland erfolgreich eingesetzt.

Aufgrund geänderter ökologischer Randbedingungen bereitet die Unterbringung von Baggergut zunehmend Probleme. Unter diesem Gesichtspunkt hat die Schließung des Hafkanals zum Neustädter Hafen einen besonderen Stellenwert. Durch die Baumaßnahme ist die Sedimentation und damit der Unterhaltungsaufwand ganz erheblich zurückgegangen. Andere stadtbremische Hafengebiete und das Fahrwasser der Weser sind dadurch nicht ungünstig beeinflusst worden. Über die Ergebnisse wurde in einem Beitrag zum 11th International Harbour Congress in Antwerpen im Juni 1996 berichtet (NASNER, PIEPER u. TORN, 1996b).

In den Brackwasserhäfen ist die Fluid Mud-Schicht von besonderer Bedeutung. Mit konventionellen Methoden sind Unterhaltungsmaßnahmen immer dann erfolgreich, wenn

durch tiefe Baggerschnitte stärker konsolidiertes Material gefördert wird. Der Unterhaltungsaufwand kann durch Resuspensionsmaßnahmen optimiert werden. Dies kann wie in Emden durch Remobilisierung des festen Materials an der Sohle mit dem Hopperbagger geschehen. In Bremerhaven und Cuxhaven wird der Überschuss an Feststoffeintrieb durch Wasserinjektionen behandelt. Dadurch kommt es zu einem Rückfluß des verflüssigten Schlicks aus der Hafeneinfahrt, wodurch sich zusätzliche Baggereinsätze erübrigen und das Problem der Baggergutunterbringung nicht mehr gegeben ist.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse konnten nur durch die jederzeit gute Zusammenarbeit mit den für die Häfen zuständigen Ämtern erreicht werden. Deshalb sei an dieser Stelle den beteiligten Behörden für ihre Kooperationsbereitschaft, dem BMBF für die Unterstützung und unbürokratische Abwicklung des Vorhabens sowie den KFKI-Projektgruppenmitgliedern – besonders dem Obmann Herrn Dipl.-Ing. Bliesener – für die konstruktive Mitarbeit gedankt. Den Mitarbeitern des Labors für Wasserbau, den Herren Dipl.-Ing. Pieper und Dipl.-Ing. Torn, gebührt besondere Anerkennung für die Einsatzbereitschaft bei den Arbeiten in der Natur, der Entwicklung des Treibkörpermeßsystems und der Aufbereitung und Analyse der Datenfülle bis zur Darstellung der in den Abbildungen dieses Berichtes dokumentierten Ergebnisse.

7. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H. u. KIRBY, R.: Fluid mud intrusion and evaluation of a passive device to reduce mud deposition. Proceedings CEDA-PIANC Conference Amsterdam, 1991.
- CHRISTIANSEN, H.: The mainfactors causing harbour siltation and measures for its reduction. Report of the second Workshop on Dredging and Surveying 1996, Leer, Germany.
- CHRISTIANSEN, H. u. HAAR, S.: Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken – Auswertungen der Peilungen 1977 bis 1995 – Gewässerkundliche Studie Nr. 15, Strom- und Hafenaufbau Hamburg, Referat Gewässerkunde, 1996.
- FRANZIUS-INSTITUT: Modellversuche für den Europahafen. Versuchsbericht 1989, – unveröffentlicht –.
- FRANZIUS-INSTITUT: Hydraulische Modellversuche zur Reduzierung des Schlickfalls im Neustädter Hafen in Bremen, 1989, – unveröffentlicht–.
- FRELS, G.: Eine Sammlung gewässerkundlicher Daten aus der Jadebucht und angrenzenden Bereichen. Wasser- und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven, 1995.
- GREISER, N.: Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihrer biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg. Hamburger Küstenforschung, H. 45, 1988.
- GREISER, N., GRESIKOWSKI, S. u. HARMS, H.: Feststofftransport und Verschlickung im Emdener Hafen. Universität Hamburg, Institut für allgemeine Botanik – Abteilung Mikrobiologie, Mai 1992, – unveröffentlicht –.
- HURN, J.: GPS A Guide to the next Utility. Trimble Navigation, USA, 1989.
- KASTEN, S.: Die Verteilung von Schwermetallen in den Sedimenten eines stadtbremischen Hafenbeckens. Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen, Nr. 34, 1993.
- KEFFEL, S.: Die Verteilung von Aluminium im Neustädter Hafen. Methoden-Vergleich zur Normierung von Schwermetallgehalten. Diplomarbeit, Universität Bremen, Fachbereich Geowissenschaften, 1995, – unveröffentlicht –.
- KUMM, W.: GPS Global Positioning System. Klasing, Bielefeld, 1993.
- NASNER, H. u. PIEPER, R.: Improvement of maintenancework in a tidal harbour. Proceedings 10th International Harbour Congress Antwerpen, 1992.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen. Die Küste, H. 53, 1992.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen, Phase 2. Schlußbericht MTK 0544, 1996, – unveröffentlicht –.

- NASNER, H., PIEPER, R. u. TORN, P.: Lagrangian Flow Velocities measured with DGPS Drifter Buoys. Proceedings 11th International Harbour Congress Antwerpen, 1996a.
- NASNER, H., PIEPER, R. u. TORN, P.: Influences of the Closure of one Entrance to the Neustadt Harbour in Bremen. Proceedings 11th International Harbour Congress Antwerpen, 1996b.
- PATZOLD, V.: Baggergutkonzept der Hafengruppe Bremerhaven. Physikalische und mineralogische Untersuchungen an rezenten Hafensedimenten der Vorhäfen, 1996, – unveröffentlicht –.
- PIEPER, R. u. TORN, P.: Treibkörpermessungen im Realtime DGPS. Erich Lackner-Förderpreis 1995. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Bd. 50, 1996.
- PLATE, U.: Versuch einer Definition von Baggerschlick. Kurzvortrag anlässlich der KFKI-Projektgruppensitzung „Sedimentation in Tidehäfen“, 1992, – unveröffentlicht –.
- RECHLIN, D.: Bestimmung der nautischen Tiefe in Hauptschlickgebieten. Hansa, 133. Jg. Nr. 7, 1996.
- SCHUCHARDT, B. u. SCHIRMER, M.: Zur Sedimentationsdynamik in den tideoffenen Bremer Seehäfen. Die Küste, H. 52, 1991.
- STROTSMANN, B.: Verteilung der Schwermetallgehalte im Hafenschlick des Neustädter Hafens (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn). Diplomarbeit, Universität Bremen, Fachbereich Geowissenschaften, 1995, – unveröffentlicht –.
- WURPTS, R.: Determination of the Nautical Depth in the Harbour of Emden. Report of the second Workshop on Dredging and Surveying 1996, Leer, Germany.