

Kuratorium für Forschung
im Küstingenieurwesen
Hindenburghufer 247
24106 Kiel

E 14. APR. 1997

A 17. APR. 1997

Sedimentation in Tidehäfen

Phase 2

- Schlußbericht -

MTK 0544

HOCHSCHULE BREMEN
Labor für Wasserbau
Neustadtswall 30
28199 Bremen

N°32333 ht

Kuratorium für Forschung
im Küstingenieurwesen
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

E 14. APR. 1997
A 17. APR. 1997

Sedimentation in Tidehäfen

Phase 2

- Schlußbericht -

MTK 0544

HOCHSCHULE BREMEN
Labor für Wasserbau
Neustadtswall 30
28199 Bremen

№ 32333 LF

INHALT

	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Untersuchungsgebiete	2
3. Bearbeitungsansätze	3
3.1. Sedimentationsanalysen	3
3.2. Bodenproben	3
3.3. Strömungsmessungen	3
4. Hafenanlagen in Bremen	6
4.1. Vorbemerkungen	6
4.2. Europahafen mit Wendebassin	8
4.3. Wendebassin Überseehafen und Werfthafen	13
4.4. Neustädter Hafen	19
4.5. Mittelsbürener Hafen	26
4.6. Zusammenfassende Betrachtungen	29
5. Häfen im Brackwasser- und Mündungsgebiet	35
5.1. Vorbemerkungen	35
5.2. Emden	35
5.3. Wilhelmshaven	44
5.4. Bremerhaven	52
5.5. Cuxhaven	62
5.6. Brunsbüttel	62
5.7. Zusammenfassende Betrachtungen	72
6. Schlußbemerkungen	76
7. Schrifttum	78

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 Problemberiche 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 entwickelndem Verfahren aufgenommen werden.
3. Entnahme und Analyse von Bodenproben mit dem Ziel, Erkenntnisse über den Aufbau und die Verteilung der Hafensedimente zu bekommen.

Das Vorhaben wurde als KFKI-Projekt mit Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie BMBF unter dem Förderkennzeichen MTK 0544 gefördert.

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 stadtremischen 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 nicht näher darauf eingegangen.

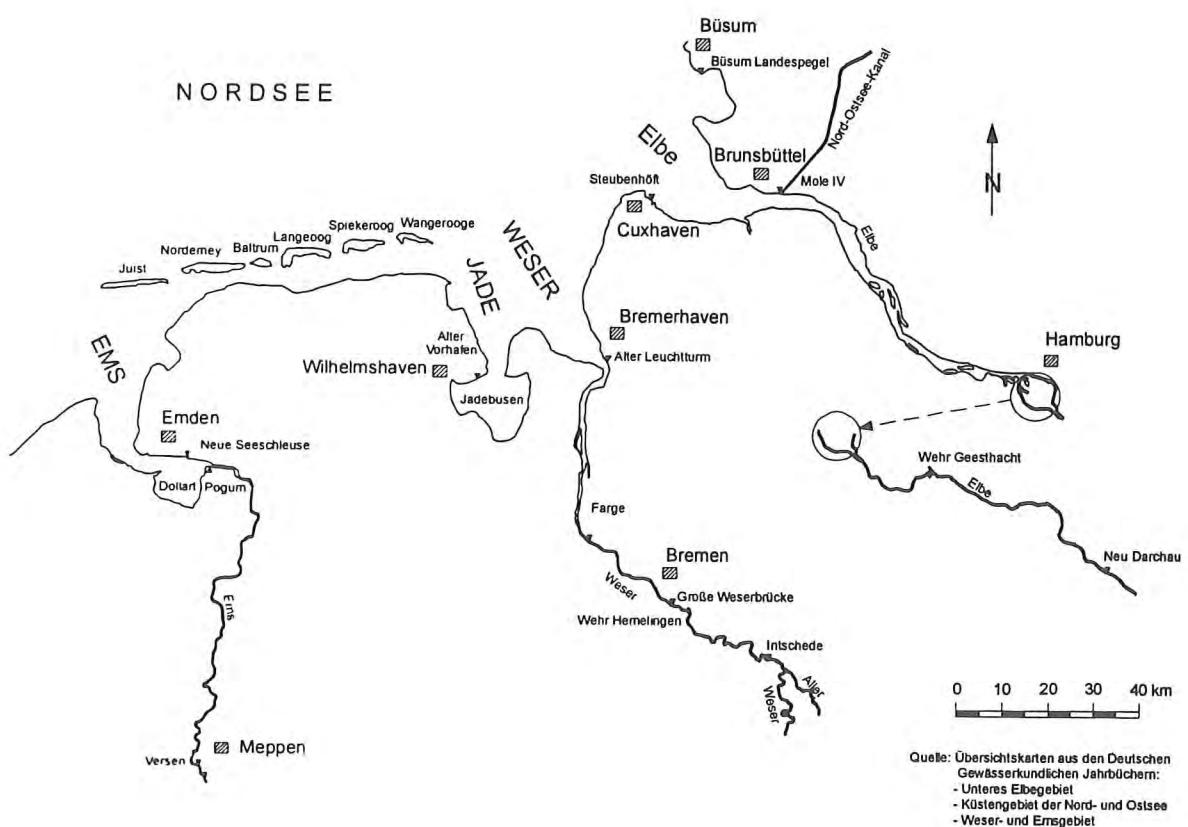


Abb. 1: Lageplan

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 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 (Differential-Global-Positioning-System) gewandelt, bevor sie im Sekundentakt zur Verarbeitung, Darstellung und Speicherung an die Basisstation weitergeleitet werden.

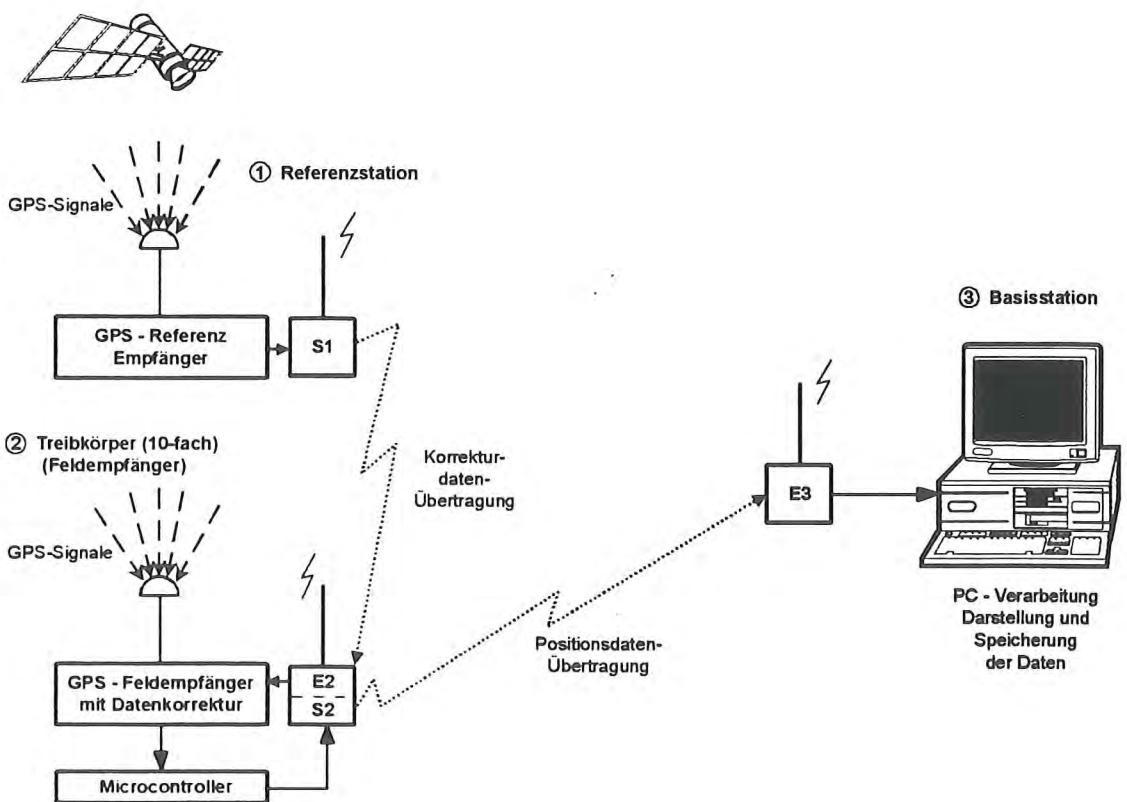


Abb. 2: Prinzipskizze des Treibkörpermeßsystems im Echtzeitverfahren

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 jeder Treibkörper seine Informationen in einem vorgegebenen Zeit-takt 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 und TORN, 1995).

4. Hafenanlagen in Bremen

4.1. Vorbemerkungen

Im stadtremischen Hafengebiet wurden Untersuchungen für den Europahafen, die Wendebeken 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.

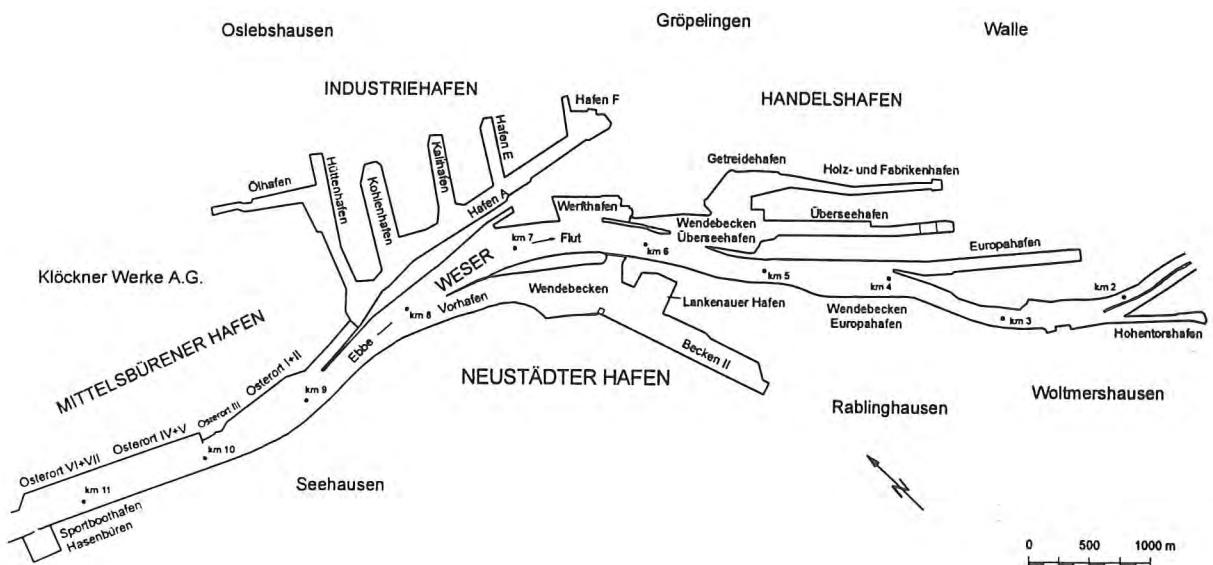
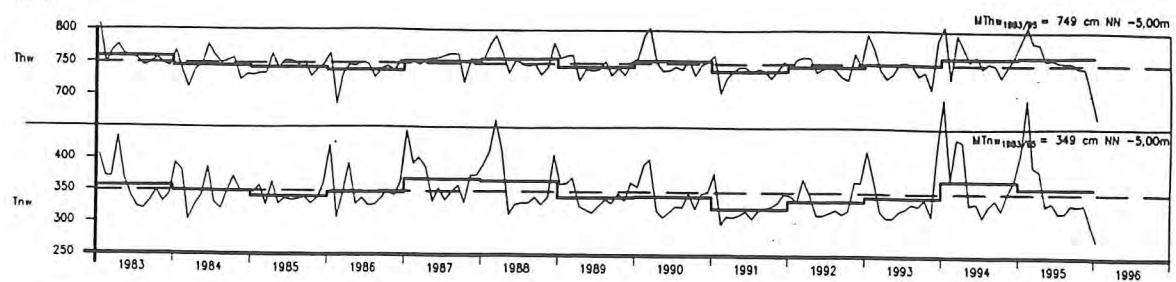


Abb. 3: Hafenanlagen in Bremen

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 $MThb_{1983/95} = 400 \text{ cm}$. 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 langjährigem 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.

Pegel Grosse Weserbrücke

Tidewasserstände Thw/Tnw
(cm NN - 5,00 m)



Pegel Intschede

Oberwasser Qo
(m³/s)

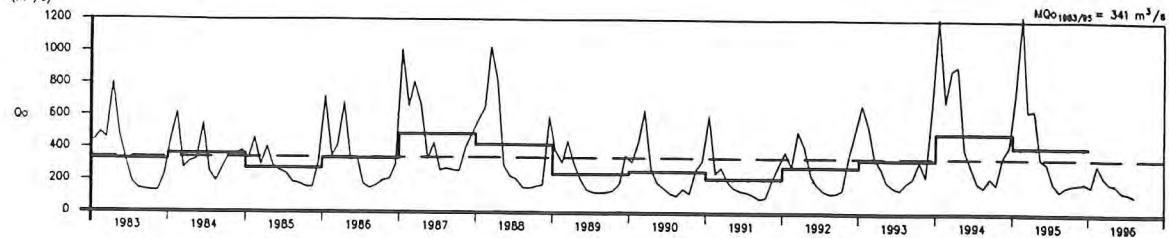


Abb. 4: Monats- und Jahresmittelwerte gewässerkundlicher Einflußgrößen in der Weser bei Bremen

Im Bereich der stadtbrémischen Häfen besteht ein guter Zusammenhang zwischen der Schwebstofffracht 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 Wendebecken des Neustädter Hafens vor der Hafenkanalschließung 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.

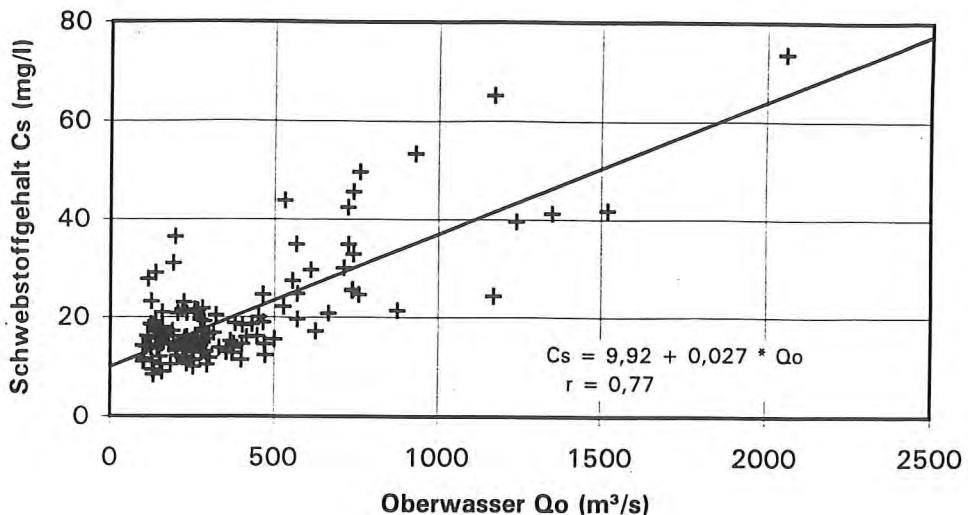


Abb. 5: Schwebstoffgehalt Cs und Oberwasser in der Weser bei Bremen (1987 bis 1990)

4.2. Europahafen mit Wendebeken

Die morphologischen Verhältnisse im äußeren Teil des Europahafens und dem in der Weser gelegenen Wendebeken sind in Abb. 6 wiedergegeben. Für den Europahafen wurden Peilpläne von 1981 bis 1991 und für das Wendebeken 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 von innen nach außen verlagert. Dieser Vorgang wurde auch an anderer Stelle beobachtet, worauf später noch näher eingegangen wird.

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

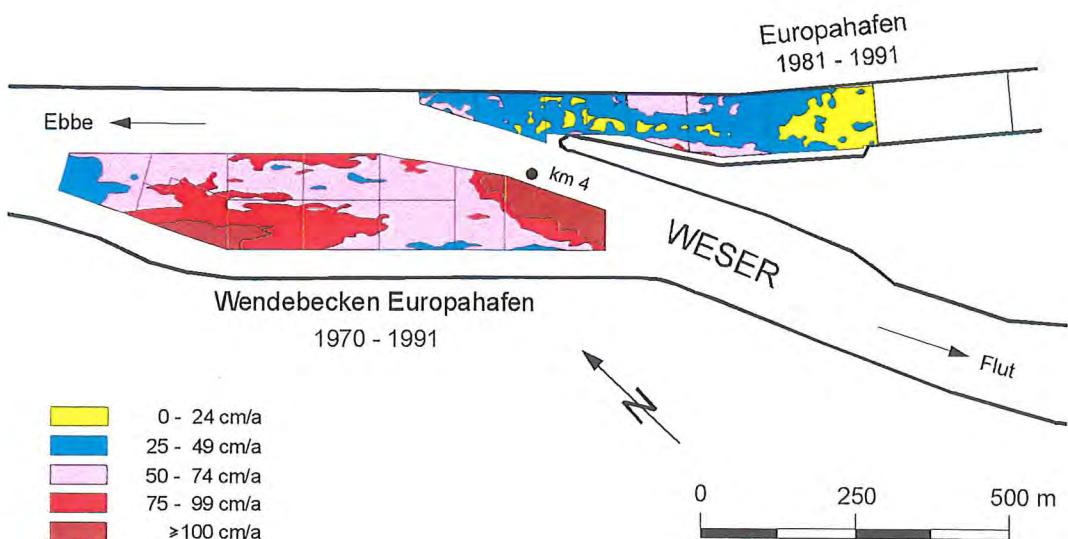


Abb. 6: Morphologie im Europahafen und Wendebecken Europahafen in Bremen

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 inneren 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 22.07.1992 Bodenproben entnommen. Für die Darstellung der Ergebnisse wurden den Entnahmestellen die entsprechenden Teilbereiche der Hafenflächen zugeordnet. Damit können Veränderungen in der Zusammensetzung des Sohlenmaterials innerhalb des Hafengebietes veranschaulicht werden. Im folgenden werden dazu die mittleren Korndurchmesser d_{50} und die Glühverluste dargestellt. Die von jeder Probe entwickelten Kornverteilungen werden später für alle Untersuchungsbereiche in Körndreiecken zur Bodenklassifizierung miteinander verglichen.

Vor der Probenentnahme am 25.10.1989 ist im Bereich des Wendebeckens und im Europahafen gebaggert worden, was die natürlichen Verhältnisse des Sohlenmaterials beeinflußt hat. Dennoch lassen sich aus den Kornanalysen Rückschlüsse auf die Strömungs- und Sedimentationsverhältnisse ziehen (Abb. 7). Im stärker durchströmten Teil des Wendebeckens wurde überwiegend Mittel- und Feinsand angetroffen, im schwächer durchströmten und stärker sedimentierenden Randbereich überwiegend die Schlämmkornfraktionen. Innerhalb des Europahafens wurde ausschließlich Schluff 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 Schlämmkornanteile analysiert wurden, liegen sie bei über 12%, bei den Proben mit stärkeren Sandkornanteilen unter 10%. Das Ergebnis überrascht nicht, da die organischen Bestandteile bekanntlich mehr von den feinkörnigen Mineralien absorbiert werden.

Die letzte Baggerung im Europahafen hatte knapp zwei Jahre vor den Probenentnahmen am 22.07.1992 stattgefunden (Abb. 8). Das Bodenmaterial war daher sehr einheitlich und bestand überwiegend aus Mittelschluffkorn mit Kornfraktionen $d < 0,02$ mm. Entsprechend hoch waren auch die Glühverluste mit bis zu über 17%.

Die Beprobungen des Wendebeckens vom 22.07.1992 haben bestätigt, daß am Strom die Sandkornanteile mit $d > 0,06$ mm und im Randbereich die Schlämmkornanteile überwiegen. Interessant ist hier ein Vergleich mit den morphologischen Verhältnissen im Wendebecken (Abb. 6). Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang 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, 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 Sohlsprungs 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.

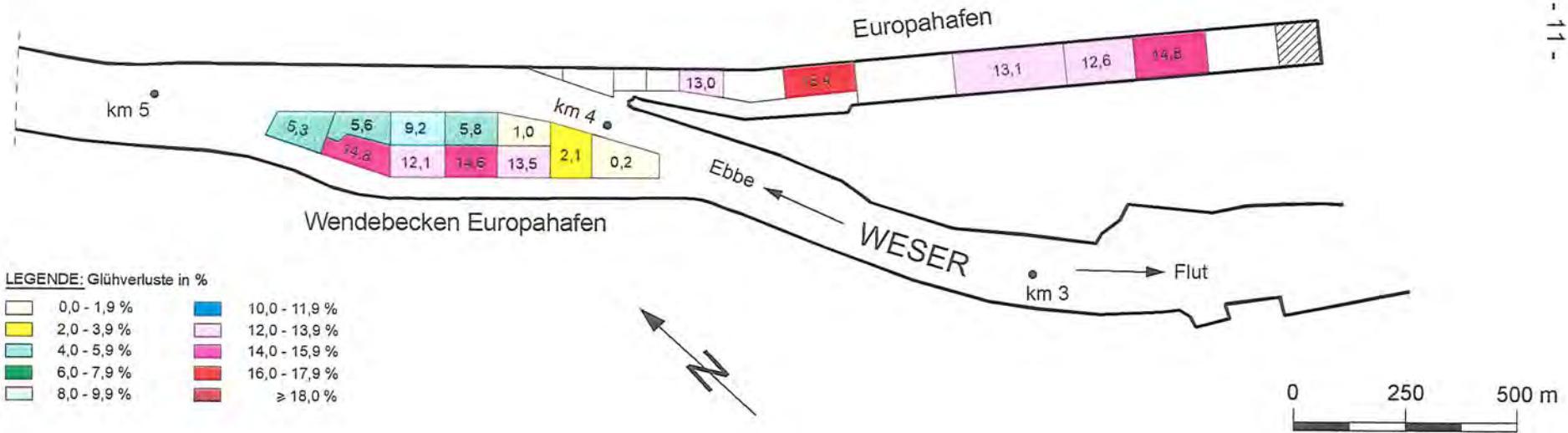
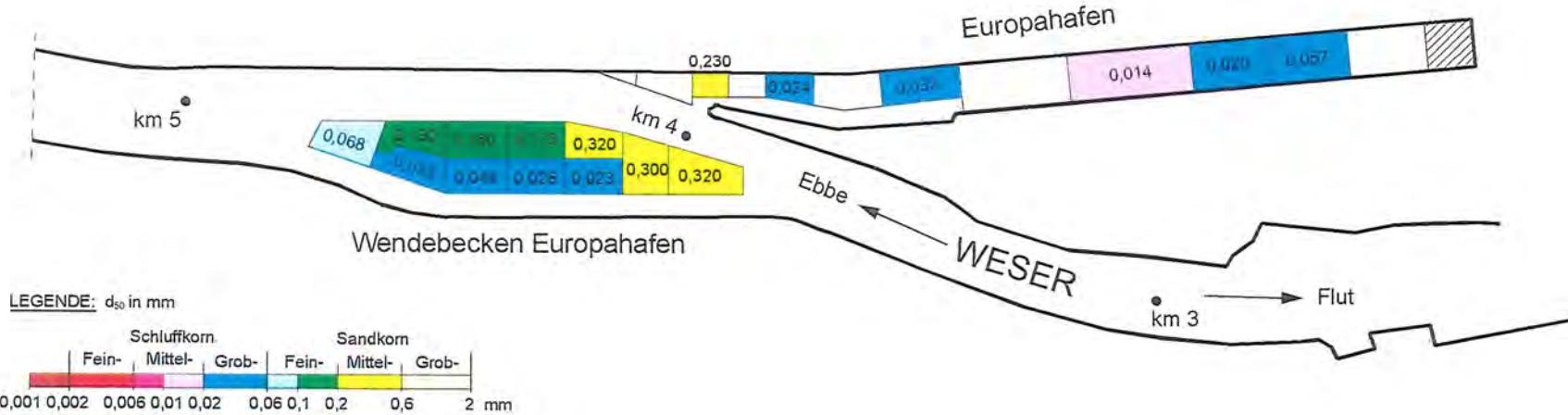


Abb. 7: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Europahafen und Wendebeken des Europahafens in Bremen der Probenentnahme vom 25.10.1989

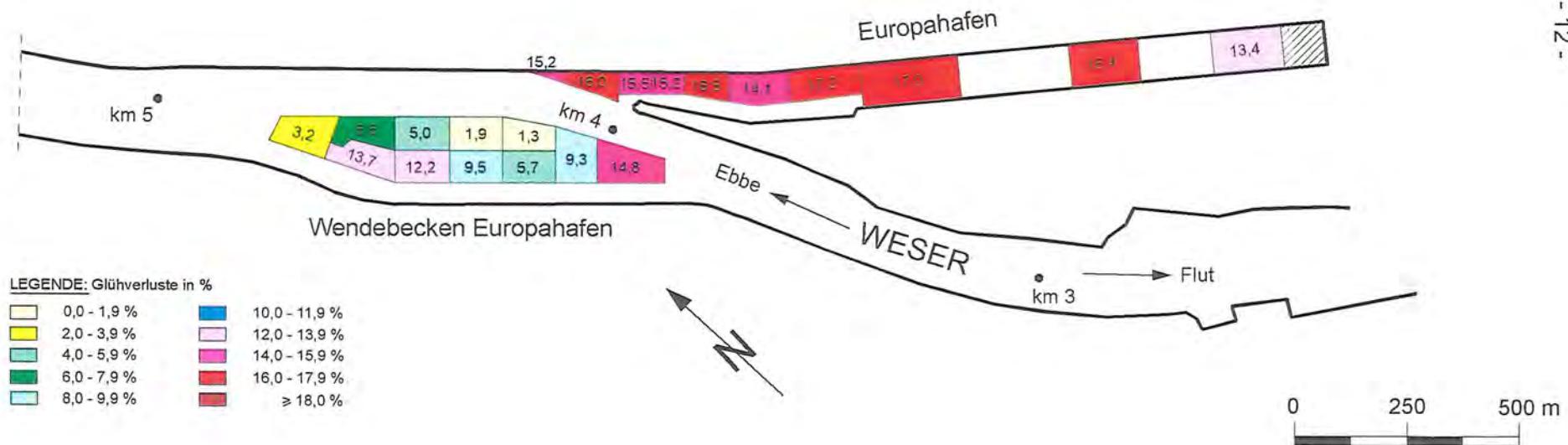
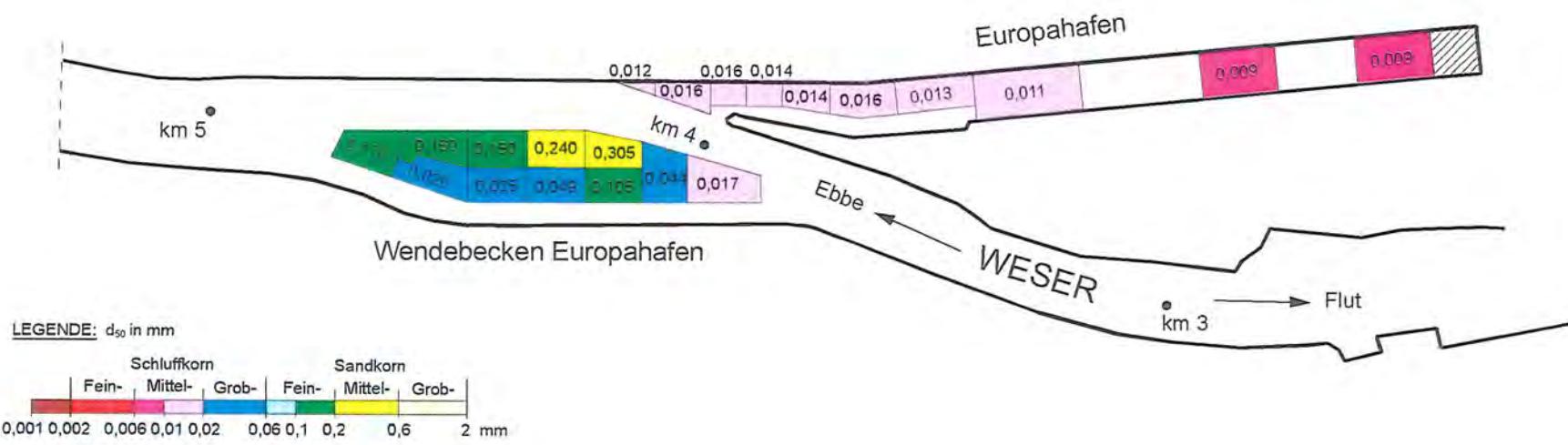


Abb. 8: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Europahafen und Wendebcken des Europahafens in Bremen der Probenentnahme vom 22.07.1992

4.3. Wendebeken Überseehafen und Werfthafen

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

Im Wendebeken Überseehafen sind keine Strömungen gemessen worden. Die Morphologie der Hafensohle lässt erkennen, daß dort örtliche Umlagerungen durch Schiffsbewegungen stattfinden, wodurch verstärkte Ablagerungen im nördlichen und südlichen Untersuchungsbereich verursacht werden (Abb. 9).

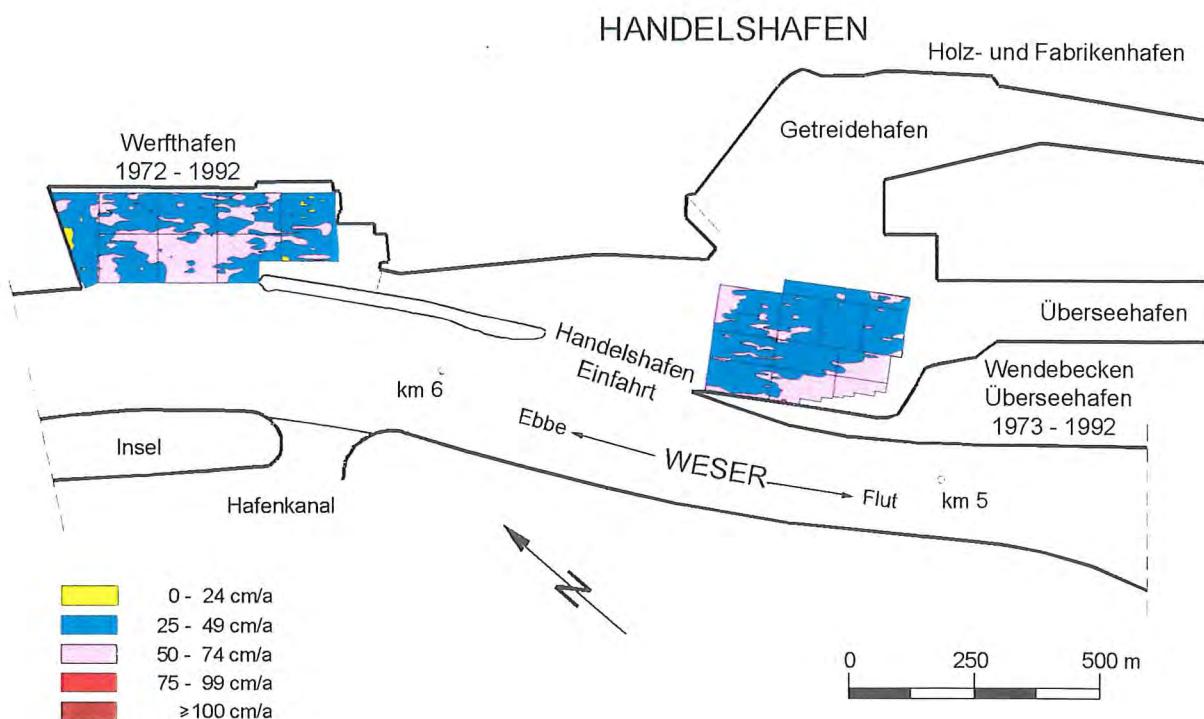


Abb. 9: Morphologie im Werfthafen und Wendebeken Überseehafen in Bremen

Die relativ ungünstigen Sedimentationsverhältnisse im Werfthafen sind trotz der dort vorhandenen geringeren Solltiefe durch die Geometrie mit der verhältnismäßig großen Einfahrtsbreite zur Hafenlänge erklärt. Das aus der Peilplananalyse gewonnene morphologische Sohlenbild vom Werfthafen in Abb. 9 veranschaulicht, daß die stärksten Auflandungen im mittleren Einfahrtsbereich eintreten. Ursächlich dafür sind die Strömungen, die mit dem für dieses Projekt entwickelten Treibkörpermeß-

system in der Natur untersucht worden sind.

Die am 31.08.1994 bei einem Tidefall von 354 cm und geringem Oberwasser ($Q_o = 176 \text{ m}^3/\text{s}$) ausgeführten Messungen zeigen, daß der Werfthafen während der Ebbephase nur sehr schwach durchströmt wird (Abb. 10). Die Strömungsgeschwindigkeiten waren im Hafeninneren $\leq 10 \text{ cm/s}$. Bei dieser Gelegenheit sei noch vermerkt, daß in der Einfahrt zum Neustädter Hafen aufgrund der günstigen Lage zur Weser keine Ebbestromwalzen auftreten.

Demgegenüber wurden vom 24. bis 26.07.1995 bei ähnlich niedrigem Oberwasser und Tidehüben von 404 cm bis 419 cm im Werfthafen sehr ausgeprägte Flutstromwalzen gemessen (Abb. 11 und 12). Am 25.07.1995 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. 9 zeigt für den Werfthafen erwartungsgemäß, daß die höchsten Auflandungen im Walzenzentrum zu finden sind. Die schwachen Strömungen bei Ebbe 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 Einfahrtsbreite bilden sich bei Flutströmung die ausgeprägten Walzen aus, die zum Sedimenteintrag in das Hafenbecken führten. Der Staupunkt liegt bei Flut am östlichen Molenkopf der Einfahrt (Abb. 11 und 12). Es ist denkbar, daß sich die Verhältnisse bei hohem Oberwasser und den sich daraus ergebenden verstärkten Ebbeströmungen umkehren. Dies könnte durch Strömungsuntersuchungen bei entsprechenden Randbedingungen nachgewiesen werden. Günstigere Sedimentationsverhältnisse könnten im Werfthafen durch die Verkleinerung der Einfahrt geschaffen werden.

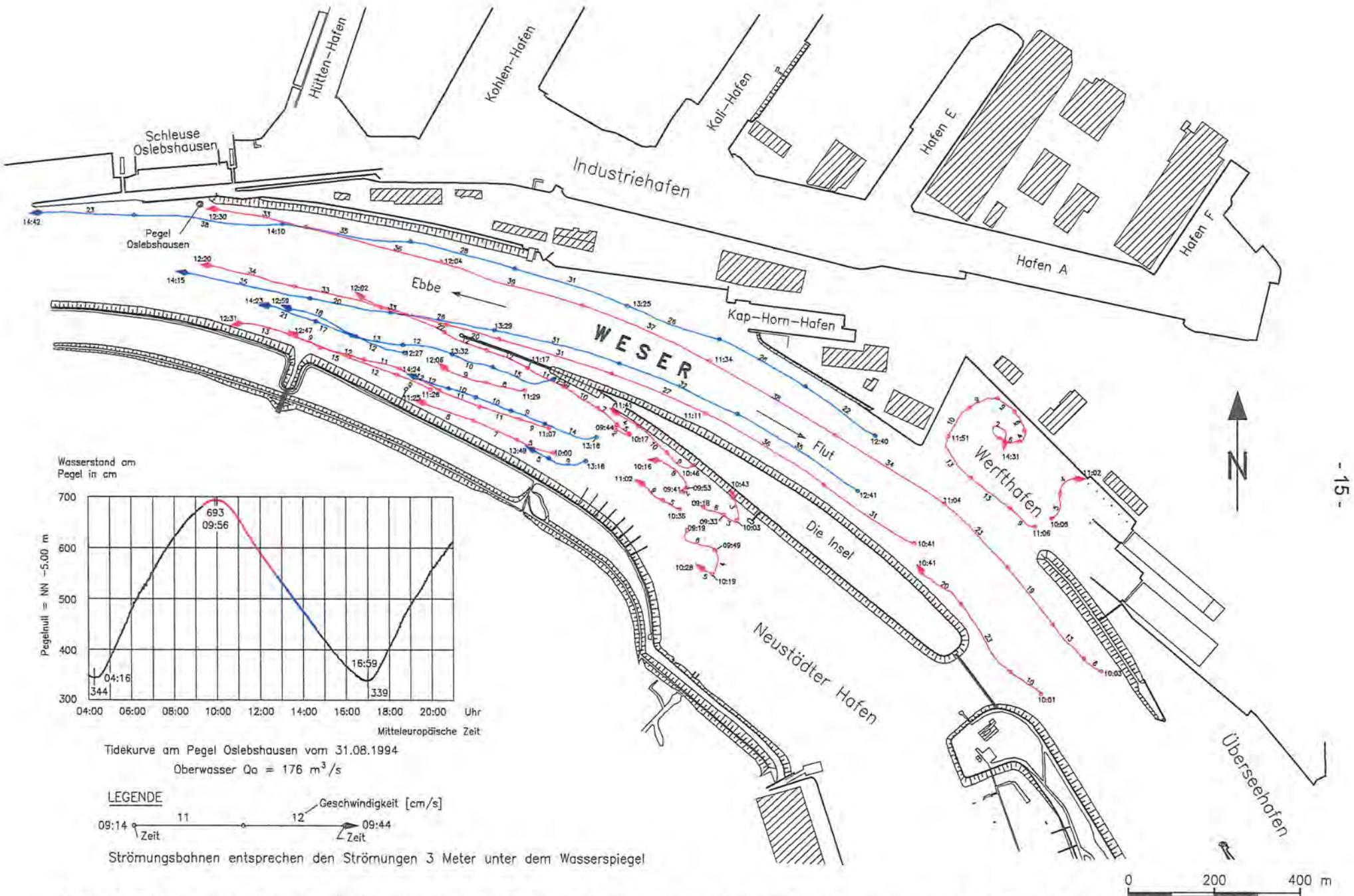


Abb. 10 Treibkörperbahnen in der Weser, im Neustädter Hafen und im Werfthafen in Bremen während der Ebbephase am 31.08.1994

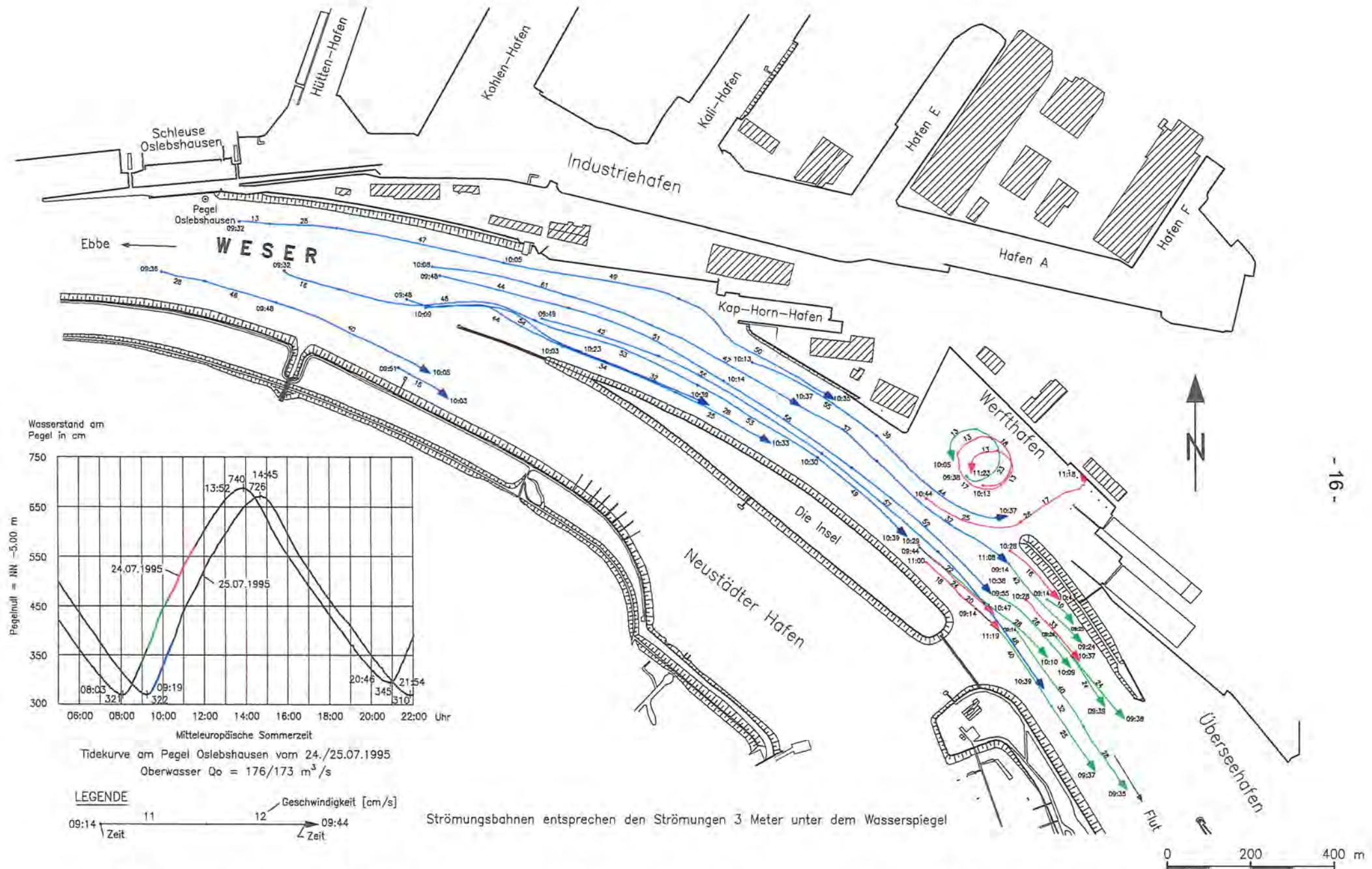
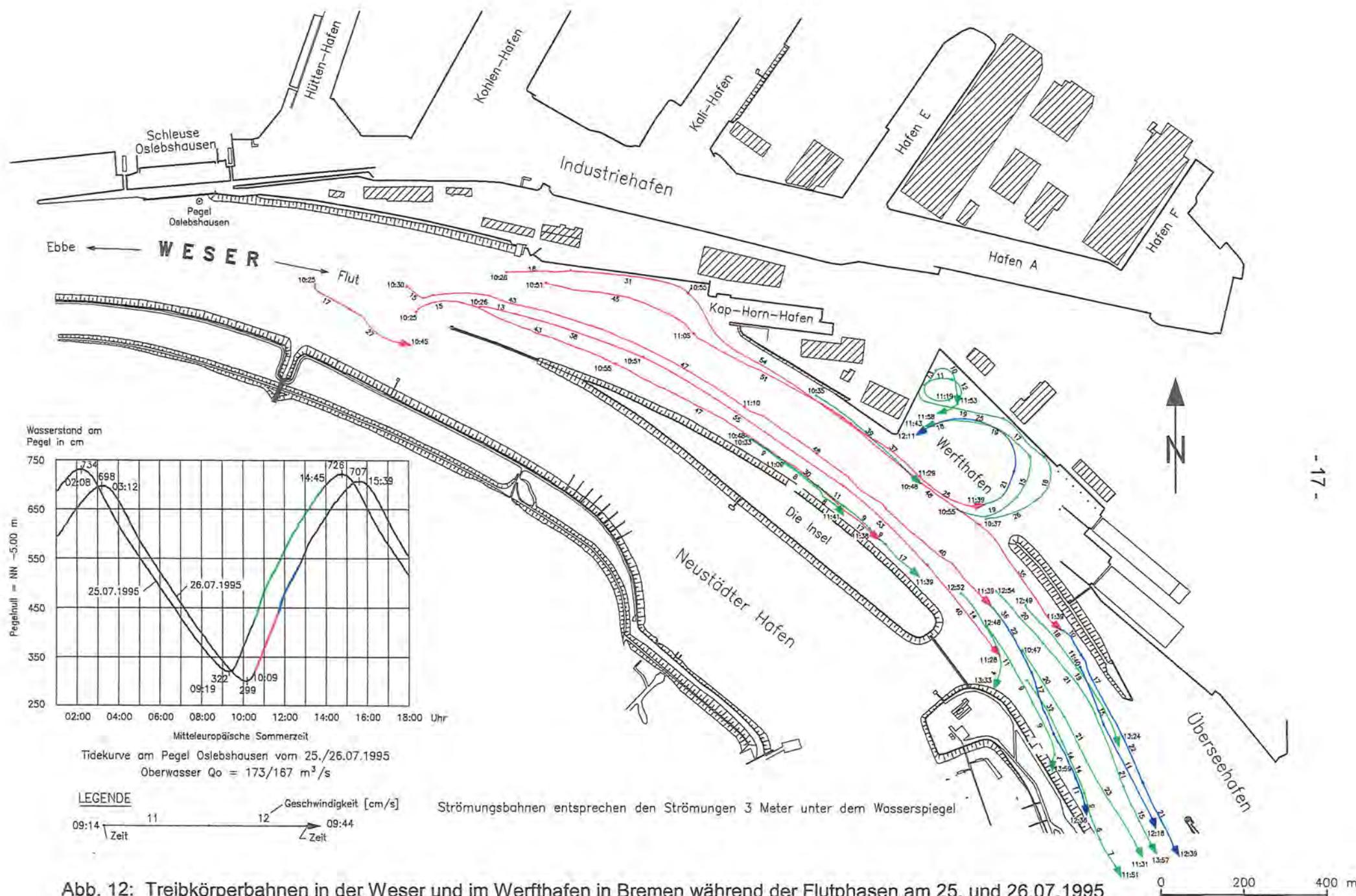


Abb. 11: Treibkörperbahnen in der Weser und im Werfthafen in Bremen während der Flutphasen am 24. und 25.07.1995



Die am 07.07.1993 entnommenen Bodenproben aus dem Werfthafen bestanden überwiegend aus Schluff (Abb. 13). Im Hafeninneren betrug der Anteil an Feinschluff und Ton ($d < 0,006 \text{ mm}$ ($6 \mu\text{m}$)) bis zu 45%. Bedingt durch die Feinkörnigkeit des Sohlenmaterials lag der organische Anteil (Glühverlust) der Proben aus dem Hafen bei über 11%. Die Kornzusammensetzung des in den Werfthafen transportierten Materials und die dort vorliegenden Sedimentationsverhältnisse sind die Reaktion auf die vorhandenen hydrodynamischen Randbedingungen.

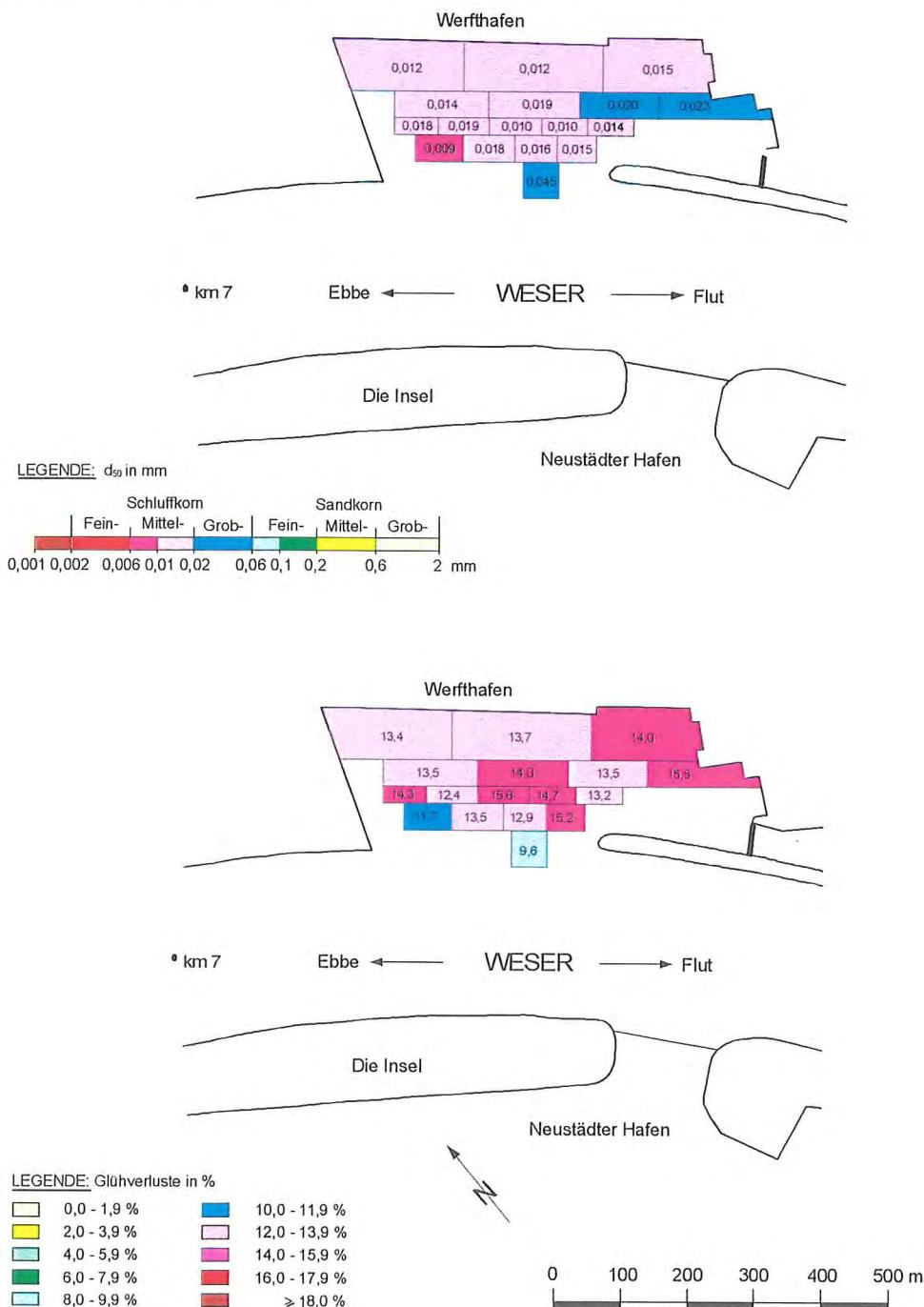


Abb. 13: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Werfthafen der Probenentnahme vom 07.07.1993

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 Hafenkanals 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 Unterhaltungsbaggerungen im Neustädter Hafen zu verringern, ist durch die Baumaßnahme erreicht worden.

Die morphologische Situation im Vorhafen und Wendebassin, wie sie sich bei offenem Hafenkanal aus der Peilplananalyse für den Zeitraum 1967 bis 1991 ergeben hat, ist in Abb. 14 dargestellt. Außerdem sind die Flutströmungsverhältnisse nach Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) dort eingetragen. Es strömten beträchtliche Wassermengen durch den Vorhafen und das Wendebassin zum Hafenkanal. 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 200 cm/a erreicht. Die Ebbeströmungen waren weniger bedeutend für die Sedimentationen im Wendebassin.

Am 28.06.1990 wurden im Neustädter Hafen flächendeckend Bodenproben von der Gewässersohle entnommen. Die in Abb. 15 aufgetragenen mittleren Korndurchmesser zeigen den Zusammenhang mit den Strömungs- und Sedimentationsverhältnissen vor der Hafenkanalschließung.

Im stärker durchströmten äußeren Vorhafen und Hafenkanal wurde überwiegend sandiges Sohlenmaterial vorgefunden. Offenbar reichten die Strömungsgeschwindigkeiten dort aus, um die Schlammkornfraktionen 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. 14) ermittelt. Die Zunahme der größeren Fraktionen im Becken II sind nicht mit natürlichen Strömungsbedingungen zu erklären. Ursächlich für dieses Ergebnis sind die in der Zeit durchgeführten Baumaßnahmen im Hafenbecken.

Auffallend ist auch hier die Übereinstimmung zwischen den Kornfraktionen und nichtmineralischen Anteilen der Proben (Glühverluste in Abb. 15). Die Abhängigkeit der biologischen Bestandteile von der Kornverteilung des Sohlenmaterials ist

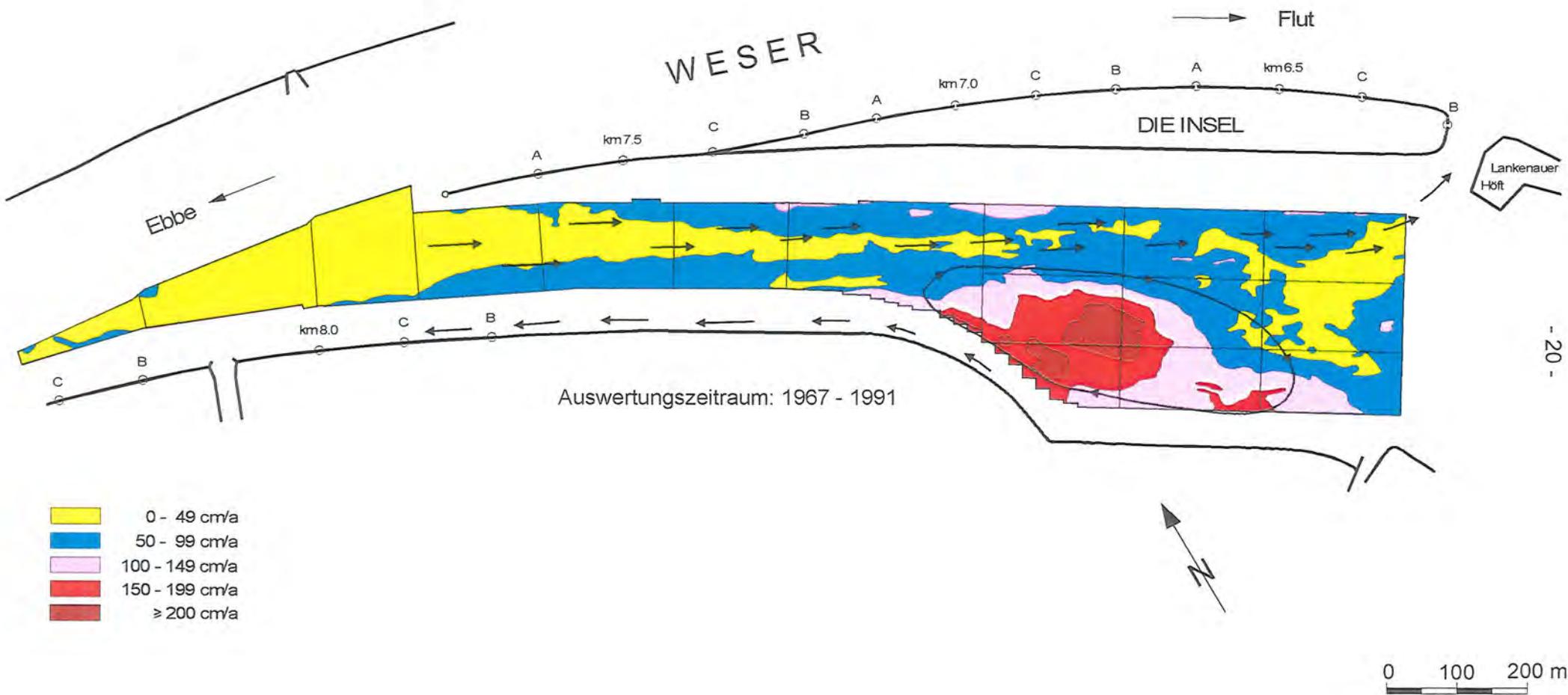


Abb.14: Morphologie im Vorhafen und Wendebassin des Neustädter Hafens und Flutströmungen schematisch nach FRANZIUS-INSTITUT (1989)

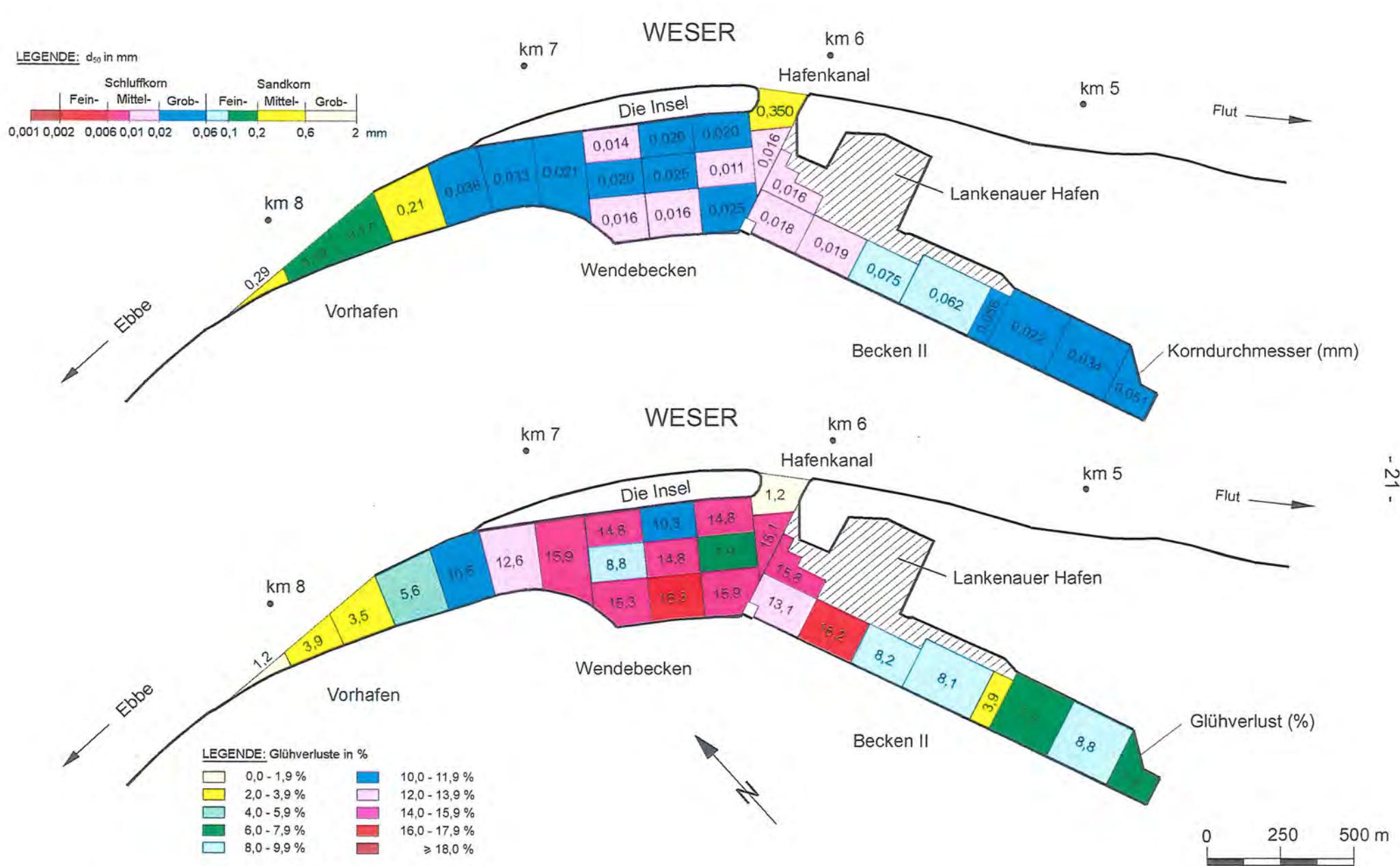


Abb. 15: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Vorhafen und Wendebeken Neustädter Hafen in Bremen der Probenentnahme vom 28.06.1990

mathematisch nachweisbar. In Abb. 16 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.

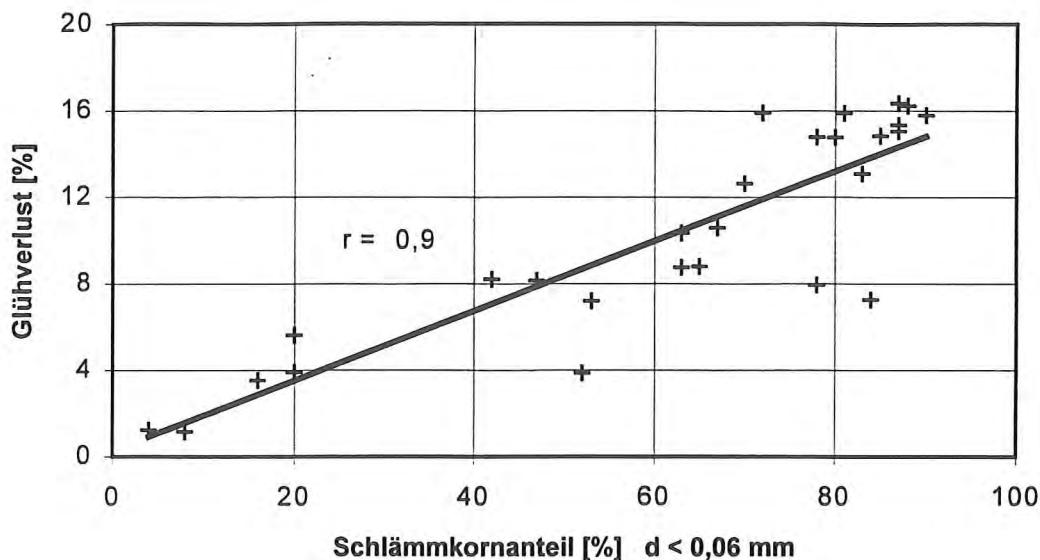


Abb. 16: Glühverlust und Schlämmkornanteil der Proben vom 28.06.1990 im Neustädter Hafen in Bremen

Mit der abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit innerhalb eines Hafenbeckens sedimentieren zunehmend feinere Feststoffpartikel. Mit wachsender Feinkörnigkeit vergrößern sich nicht nur die Glühverluste, sondern ebenso der Aluminium- und Schwermetallgehalt. Dieser Zusammenhang wurde für das Hafenbecken 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 Hafenkanalschließung (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 Aluminiumanteil war dort -den größeren Kornfraktionen entsprechend- am niedrigsten. Innerhalb des Vorhafens steigen die Werte deutlich zum Wendebassin hin an, wo im allgemeinen die höchsten Werte vorgefunden wurden. Es besteht offenbar ein enger Zusammenhang zwischen dem nichtminerali-

schen Anteil und der Schadstoffbelastung der Sedimente. Dies ist wiederum von entscheidender Bedeutung für die Behandlung und Verbringung des aus den Häfen zu baggernde Bodenmaterials.

Nach der Hafenkanalschließung haben sich die Sedimentationsverhältnisse im Neustädter Hafen grundlegend geändert, wie ein Vergleich der Abb. 14 mit Abb. 17 zeigt. Die in Abb. 17 zusätzlich eingetragenen Flutstromgeschwindigkeiten und -richtungen wurden in Zusammenarbeit mit dem HAFENAMT BREMEN am 04.05.1993 mit DGPS Treibkörpermessungen festgestellt. Im Wendebassin wurden keine Walzenströmungen, die vor der Schließung die hohen Auflandungen verursachten, mehr gemessen. Die größten Flutstromgeschwindigkeiten betrugen im Vorhafen bei einem Tidehub von 434 cm und dem niedrigen Oberwasser ($Q_o = 209 \text{ m}^3/\text{s}$) 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 Einfahrtsbereich keine Strömungswalzen auftreten, sedimentieren unter diesen Voraussetzungen die mit der Flut transportierten größeren Feststoffe (Sandkornfraktionen) innerhalb des Vorhafens. Der erweiterte Querschnitt des Wendebassins wird nur noch äußerst schwach durchströmt. Die Geschwindigkeiten lagen im allgemeinen unter 10 cm/s, bei denen sich auch die feineren Bestandteile ablagern können.

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 Hafenkanalschließung in Abb. 17 verdeutlicht wird. Die Sedimentation hat im Wendebassin deutlich abgenommen. Dem steht eine Zunahme der Ablagerungen im Vorhafen gegenüber (Abb. 14 und 17).

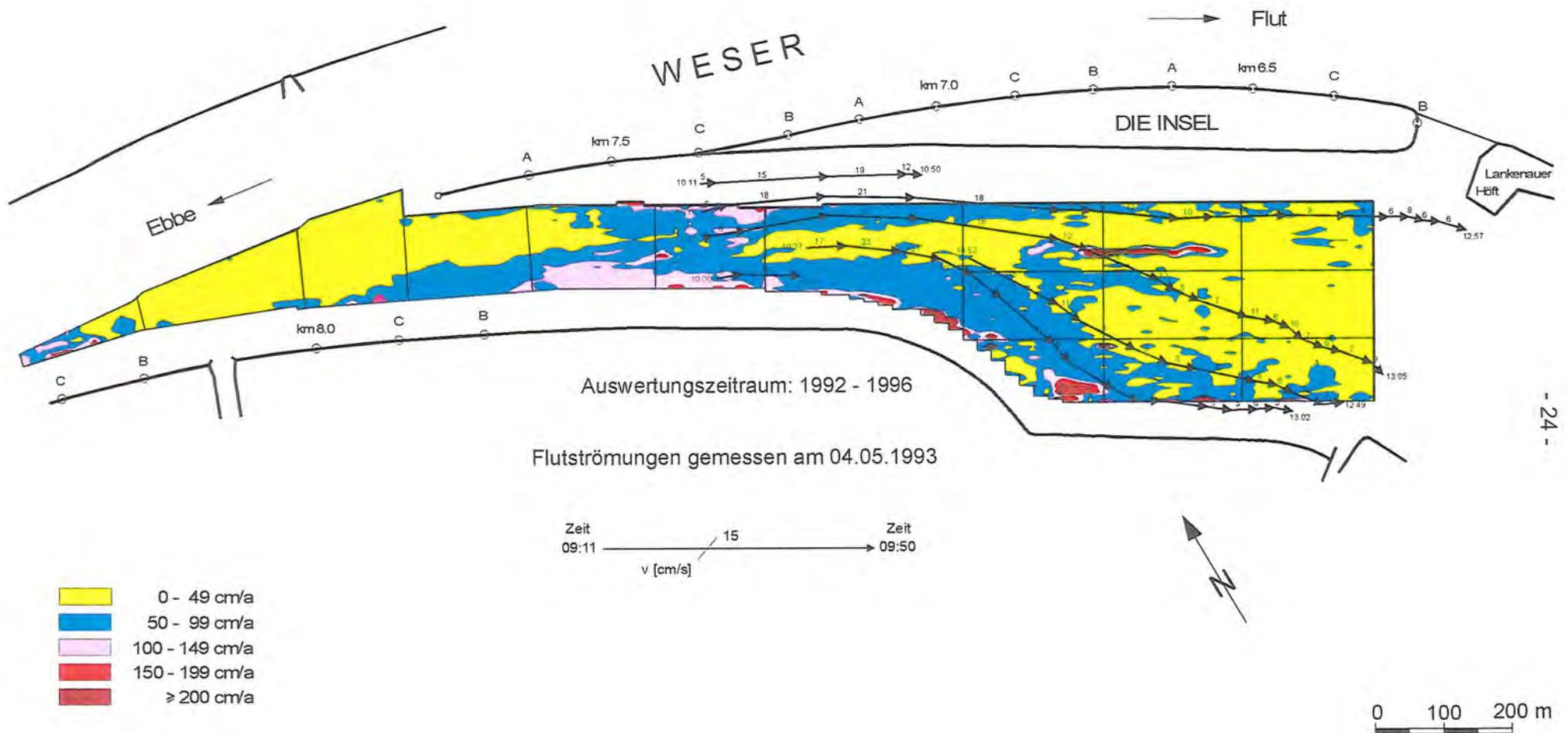


Abb. 17: Morphologie im Vorhafen und Wendebassin des Neustädter Hafens und Flutströmungen gemessen vom Labor für Wasserbau, HOCHSCHULE BREMEN

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

	Sedimentationsrate qs [cm/a]		Diff. Δq_s [cm/a]	Sedimentationsvolumen Qs [1000m³/a]		Diff. ΔQ_s [1000m³/a]
	1967/91 vor	1992/96 nach		1967/91 vor	1992/96 nach	
	Hafenkanalschließung					
Vorhafen	30	42	+12	35	49	+14
Wendebeken	69	38	-31	160	89	-71
Becken II	23	7	-16	62	19	-43
Neustädter Hafen (insg.)	41	25	-16	257	157	-100

Tafel 1: Sedimentationsraten und -mengen im Neustädter Hafen vor und nach der Hafenkanalschließung

Im nicht mehr durchströmten Neustädter Hafen hat die Sedimentationsrate im Vorhafen um $\Delta q_s = 12$ cm/a zugenommen und sich im Wendebeken deutlich um $\Delta q_s = 31$ cm/a verringert. Im heute bestehenden Zustand finden die Sedimentationen im wesentlichen im Vorhafen und Wendebeken 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 $q_s = 22$ cm/a (CHRISTIANSEN und KAMPS, 1985).

Gegenüber dem langjährigen Mittelwert von $Q_s = 257.000$ m³/a hat sich das jährliche Sedimentationsvolumen im Neustädter Hafen durch die Hafenkanalschließung auf $Q_s = 157.000$ m³/a um 100.000 m³/a oder 40% verringert. Für die erforderlichen Unterhaltungsarbeiten ist dies eine erhebliche Entlastung, da entsprechend weniger Massen gebaggert und untergebracht werden müssen.

Die Hafenkanalschließung 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 $Q_o \approx 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ und Maximalwerten von $Q_o > 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 verursacht haben.

4.5. Mittelsbürener Hafen

Die am erweiterten rechten Weserufer gelegenen Mittelsbürener Hafenanlagen Osterort I und II sowie Osterort IV und V sind aufgrund der Geometrie und ihrer gegenüber der Fahrinne 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 Fahrinnensohle der Unterweser. Die Ausbautiefe des Mittelsbürener Hafens Osterort IV und V beträgt -11,50 m SKN. Naturgemäß sind die Auflandungen in den Uferbereichen 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. 18).

Die Abhängigkeiten zwischen Sedimentation, Strömung und Sohlenmaterial konnten durch die Entnahme und Analyse von Bodenproben für die Mittelsbürener Häfen bestätigt werden (Abb. 19). Das Sohlenmaterial besteht überwiegend aus Mittel- und Feinsand. Abb. 19 verdeutlicht, wie die Körnung des Sohlenmaterials quer zum Strom mit der verminderten Schleppkraft der Strömungen vom Fahrwasser zu den vertieften Stromanlegern hin kleiner wird. Im Uferbereich von Osterort IV und V waren die Schlämmkornanteile $d < 0,06 \text{ mm}$ mit 20 bis 30% am höchsten, was auch durch die im allgemeinen höheren Glühverluste gegenüber Osterort I und II in Abb. 19 gezeigt wird. Die Bodenuntersuchungen bestätigen die mit den Sedimentationsanalysen gewonnenen Ergebnisse, wonach im erweiterten und vertieften Querschnittsbereich am

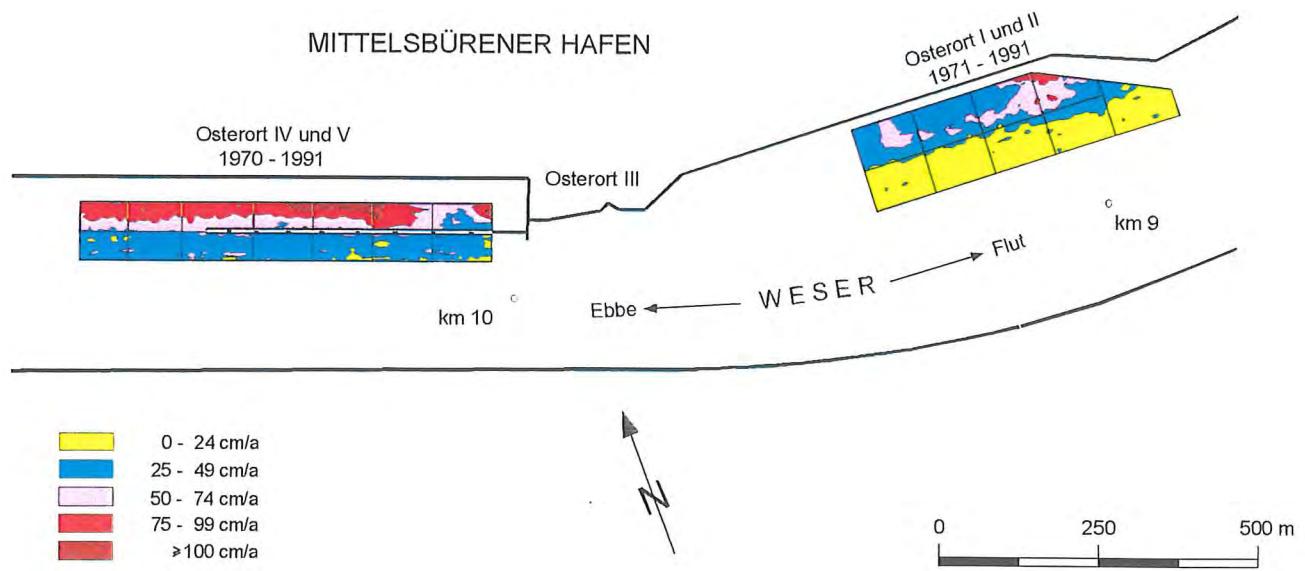


Abb. 18: Morphologie in den Mittelsbürener Häfen Osterort I und II und Osterort IV und V in Bremen

rechten Ufer die starken Verlandungen eintreten. Die Sedimentationen nehmen mit der Ausbautiefe der Liegewannen bei feinkörnigerem sich absetzendem Sohlenmaterial zu. Im Gegensatz zu den Hafenbecken sedimentieren in den Osterorter Häfen geringere Feinschluff- und Tonanteile ($d < 0,006$ mm), da diese offenbar durch die alternierenden Tideströmungen eher resuspendiert werden.

MITTELSBÜRENER HAFEN

Osterort IV und V

Osterort III

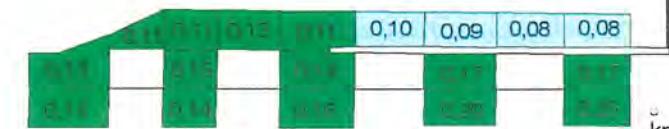
Osterort I und II

Vorhafen
Schleuse Oslebhausen

km 11

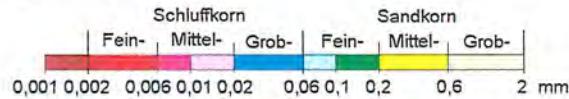
km 10

° km 9



Ebbe ← W E S E R → Flut

LEGENDE: d_{50} in mm



Osterort IV und V

Osterort III

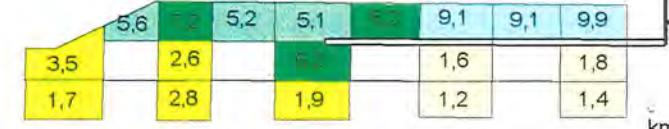
Osterort I und II

Vorhafen
Schleuse Oslebhausen

km 11

km 10

° km 9



Ebbe ← W E S E R → Flut

LEGENDE: Glühverluste in %

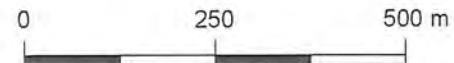
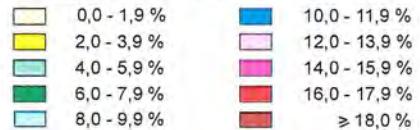


Abb. 19: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Mittelsbürener Hafen in Bremen der Probenentnahme vom 25.10.1989

4.6. Zusammenfassende Betrachtungen

Mit den detaillierten Peilplananalysen (Einzelpunktauswertung) sollten die Sedimentationsschwerpunkte und die Verteilungen der Auflandungen in den 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 erfaßt. 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.

Einen Überblick der Sedimentationsverhältnisse in den untersuchten stadtremischen Hafengebieten gibt Abb. 20. Die Sedimentationsraten sind einheitlich in 50 cm Abständen dargestellt.

Die durch die Hafenkanalschließung völlig veränderte Situation im Neustädter Hafen wird mit Abb. 20 deutlich. Vor der Baumaßnahme war das Wendebecken der Bereich mit den höchsten Sedimentationen aller stadtremischer Hafenbecken. Heute beschränkt sich das Gebiet mit überdurchschnittlichen Verlandungen vor allem auf das im Strom gelegene Wendebecken 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 Wendebecken Europahafen die Funktion einer Sandfalle für das von oben eintreibende Geschiebe.

Abschließend sollen die aus verschiedenen stadtremischen 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 $d < 0,02 \text{ mm}$ ($20 \mu\text{m}$) als Schlick bezeichnet werden (Abb. 21).

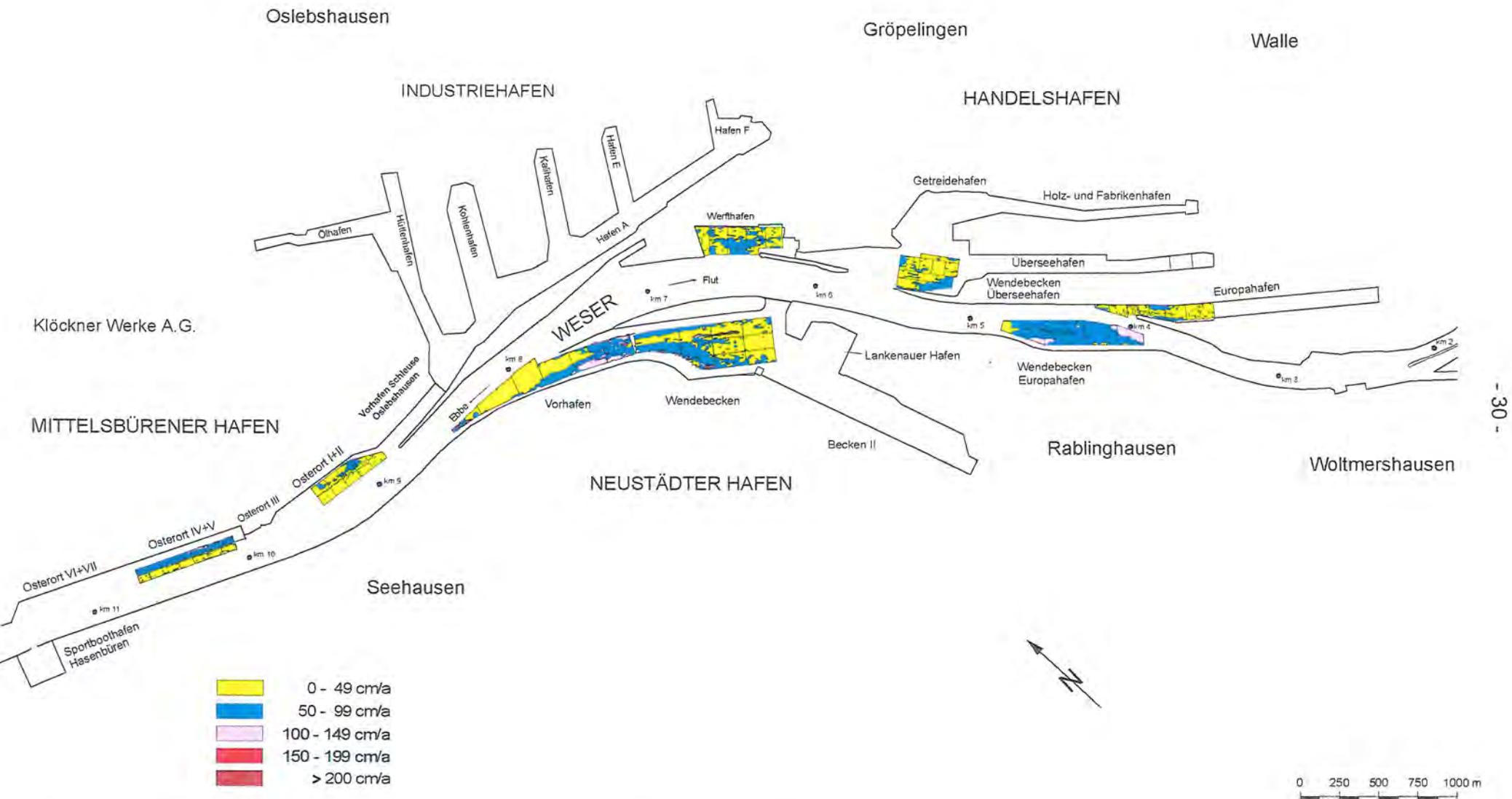


Abb. 20: Morphologische Verhältnisse in den stadtremischen Hafengebieten

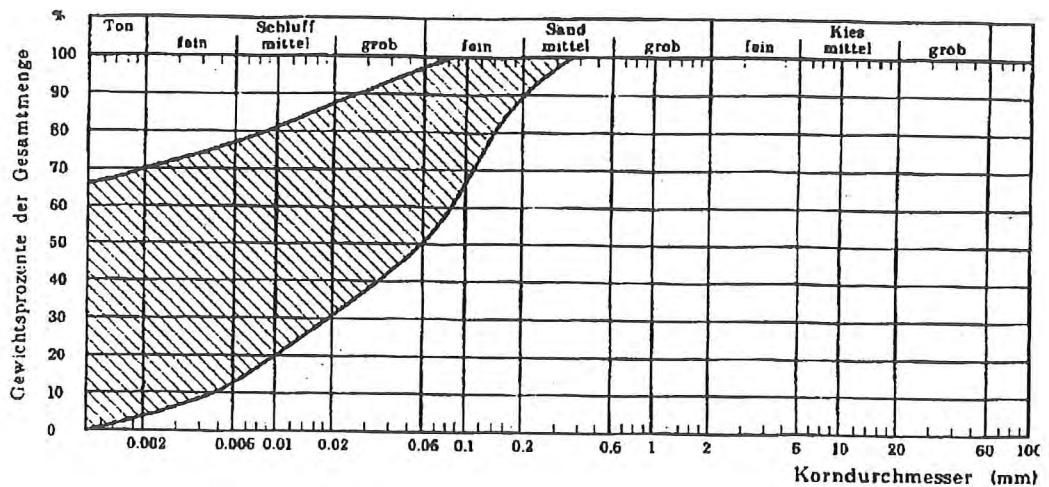


Abb. 21: Schlickkornkurvenbereich nach RECHLIN, 1996

Ein anderer Versuch „Bidderschlick“ 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 ($d > 0,06 \text{ mm}$), der Grob- und Mittelschluffanteile ($d = 0,06 \text{ mm}$ bis $0,006 \text{ mm}$) und den Korngrößen $d < 0,006 \text{ mm}$ (Ton- und Feinschluff) unterschieden (Abb. 22).

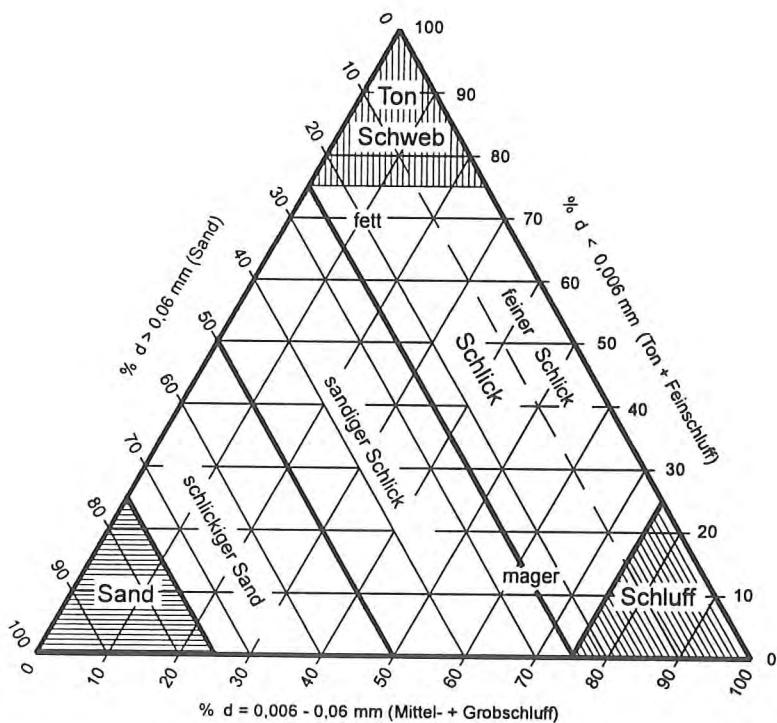


Abb. 22: Versuch einer Definition von Bidderschlick (PLATE, 1992)

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 stadtremischen Hafenbereiche übertragen ergibt sich daraus folgendes (Abb. 23). 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 $d < 0,006 \text{ mm}$ ($6 \mu\text{m}$) zwischen 20 und 40% und die Sandkornfraktionen $d > 0,06 \text{ mm}$ unter 20%. Im Juli 1992 waren die Verhältnisse im Europahafen ähnlich wie im Werfthafen. Der Probenentnahme vom Oktober 1989 aus dem Europahafen war eine Baggerung vorausgegangen, was die größeren Kornfraktionen zu diesem Zeitpunkt erklärt.

Vor der Hafenkanalschließung bestand das Sohlenmaterial im äußeren Vorhafen und im Hafenkanal überwiegend aus sandigem Material (Abb. 23, Mitte links). Die größten Feinstanteile wurden für das Wendebassin im Bereich der Flutwalze und im Becken II ermittelt. Die stärkeren Sandkornanteile bei 4 Proben im Becken II sind auf die im Jahre 1990 durchgeföhrten Baumaßnahmen zurückzuführen. Insgesamt geben die im Bodendreieck dargestellten Kornverteilungen einen guten Einblick in die unterschiedliche, strömungsbedingte Zusammensetzung des Bodenmaterials.

In den stärker durchströmten Untersuchungsbereichen, dem Wendebassin Europahafen und den Mittelsbürener Hafenanlagen, wurde gemäß Definition in Abb. 22 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 Schlick, wie er sich in den Hafenbecken ablagert. Die Feinstanteile mit $d < 0,006 \text{ mm}$ waren mit unter 20% Gewichtsanteil der Proben vergleichsweise gering.

Bei der Beschreibung der einzelnen Untersuchungsbereiche im stadtremischen 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

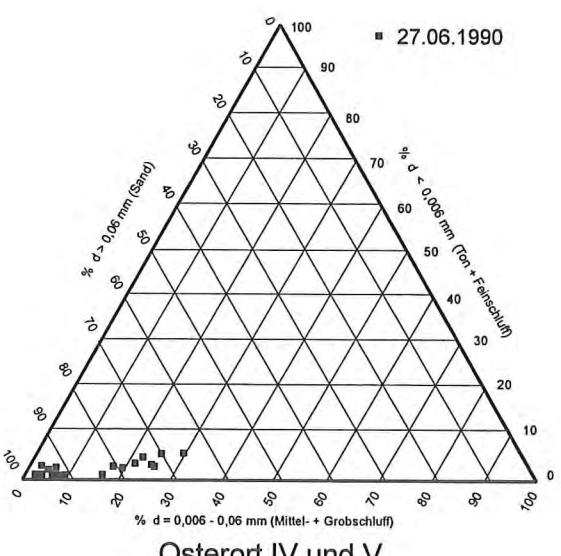
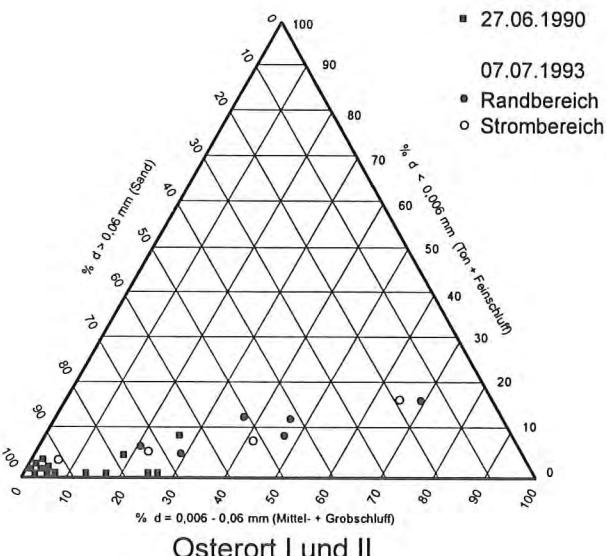
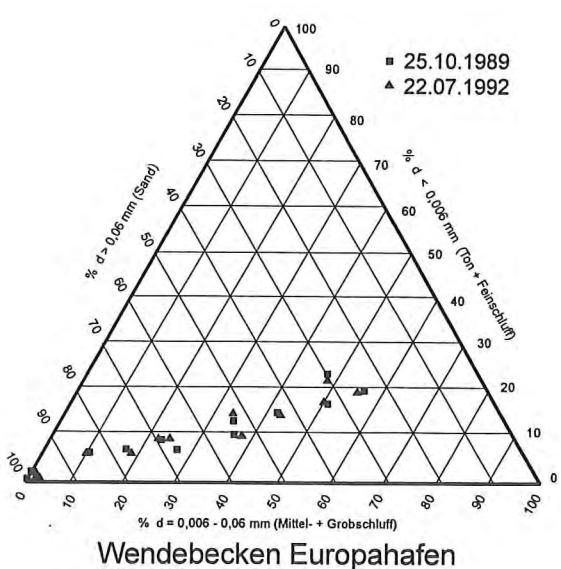
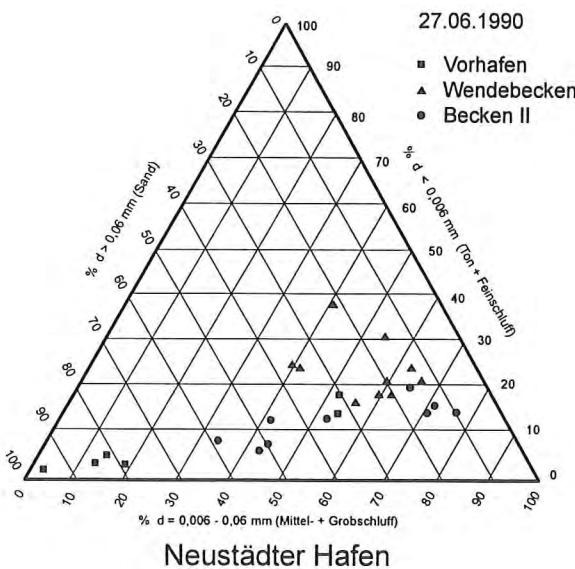
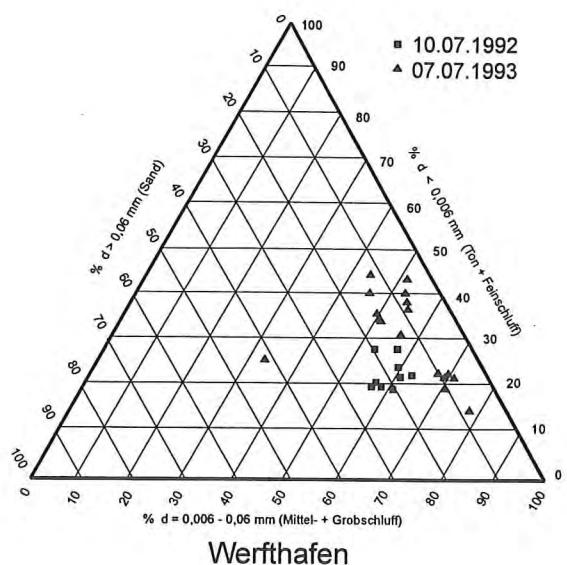
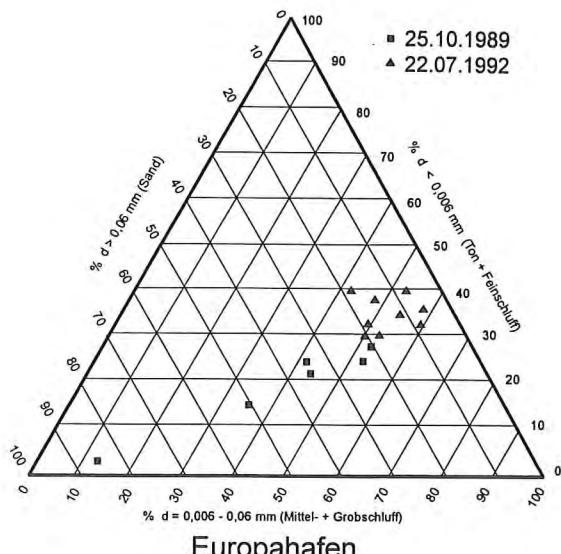


Abb. 23: Kornverteilung der stadtremischen Häfen im Bodendreieck

auf die Behandlung und Unterbringung des Baggergutes gezogen werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist das Material aus den Osterorter Häfen und dem Wendebekken 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 Dichtestromungen von besonderer Bedeutung. Durch den Dichteefekt 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 Salzwasserbedingungen 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. 24 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 Dichteefekt überlagern. Dazu wurden im September 1994 mit DGPS im Echtzeitverfahren erstmals Messungen im Brackwasserbereich in Zusammenarbeit mit dem NIEDERSÄCHSISCHEN HAFEN-AMT EMDEN bei mittleren Tide- und Oberwasserverhältnissen durchgeführt (PIEPER und TORN, 1995).

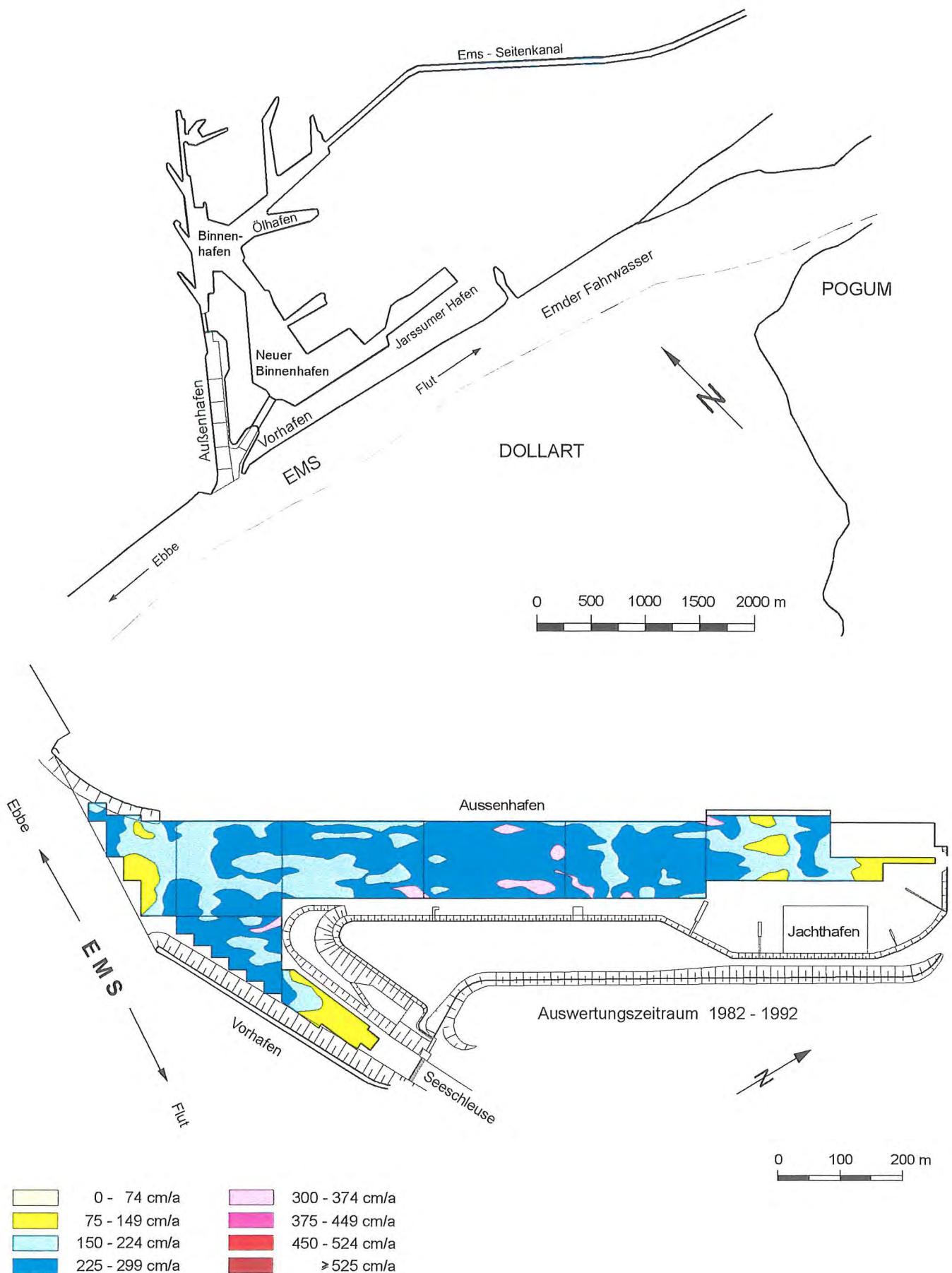


Abb. 24: Hafenanlagen von Emden und Morphologie im Vor- und Außenhafen

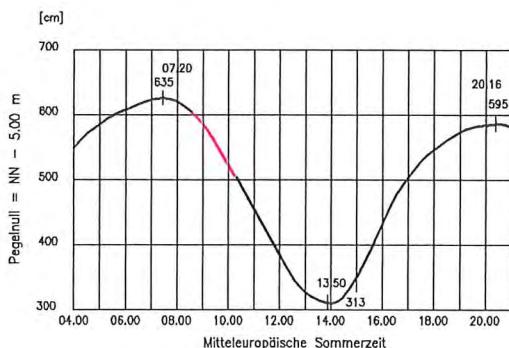
Der mittlere Tidehub beträgt in Emden $MThb_{1971/80} = 310 \text{ cm}$ und das Oberwasser $MQo_{1941/80} = 77 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Strömungen wurden in 1,5 m und in 6,0 m Wassertiefe gemessen (Abb. 25 bis 27).

Am 14.09.1994 betrug der Tidefall 322 cm bei einem Oberwasser von $Qo = 57 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 25). Während der ersten Ebephase bildeten sich im Einfahrtsbereich Walzenströmungen aus. Am rechten Walzenrand strömt das Wasser aus dem Vorhafen in die Ems (Abb. 25 oben). Im zweiten Abschnitt zeigt sich die Überlagerung der verschiedenen Strömungsvorgänge. Deutlich ist die Walzenbildung im äußeren Hafenbereich und das Ausströmen an der Vorhafenmole -Überlagerung von Strömungs- und Tideeffekt- zu erkennen. Zusätzlich hatten sich Dichtestömungen 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 Ebephase und noch während der ersten Flutphase mit starker Strömungsintensität zu beobachten. Das zeigen die Naturbeobachtungen vom 21.09.1994 bei einem Tidefall von 343 cm und $Qo = 101 \text{ m}^3/\text{s}$ zeigen (Abb. 26 oben). Während des anschließenden Flutastes ($Thb = 374 \text{ cm}$) kehren sich die Verhältnisse um. Im äußeren Hafenbereich traten ausgeprägte Flutwalzen auf, und das Wasser strömte an der Oberfläche mit bis über 38 cm/s bei Flut (!) aus dem Hafen heraus. Der Füllvorgang wird durch das sohlennahe Einströmen des schweren Salzwassers aus der Ems in den Hafen (zu erkennen am rechten Walzenrand, blaue Linien in Abb. 26 unten) bewirkt.

Die bei vergleichbaren hydrologischen Randbedingungen ebenfalls bei Flut durchgeführten Messungen am 20.09.1994 bestätigen das vorstehend Gesagte (Abb. 27). 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 Dichteefektes aus dem Hafen heraus.

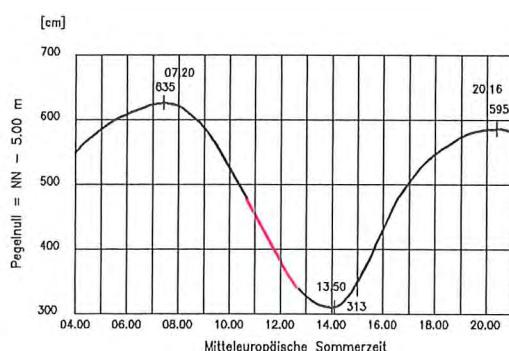
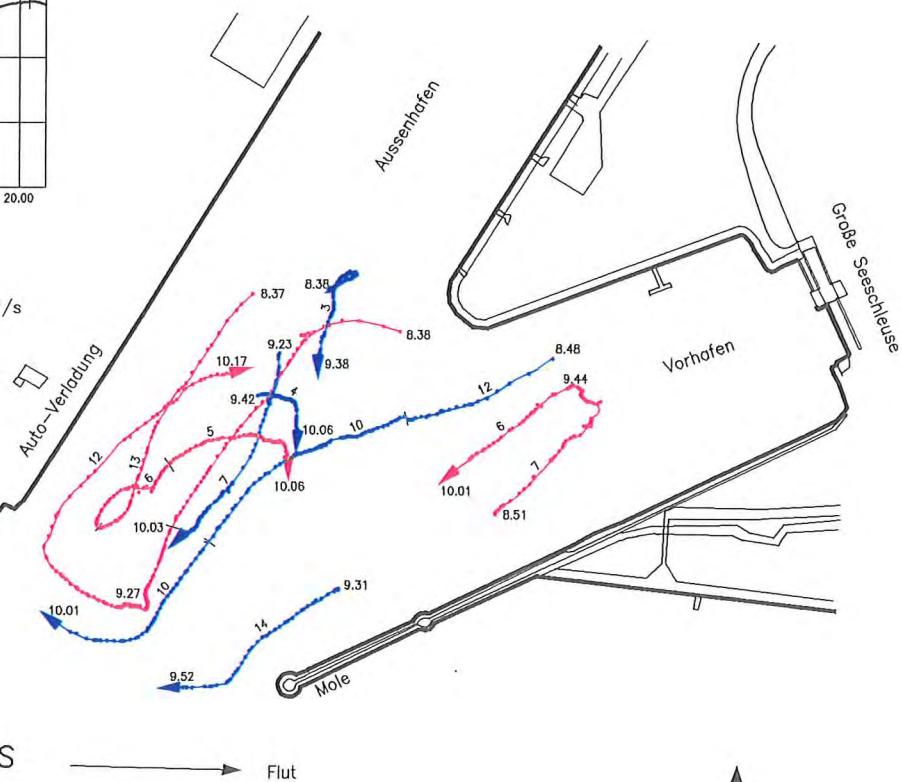
Die Strömungsmessungen haben nachgewiesen, wie sich der tideabhängige Wasseraustausch im Hafenbecken durch die Dichtestömungen vervielfacht. Zwangsläufig kommt es dadurch zu den hohen Sedimentationen in Brackwasserhäfen. Im Einfahrtsbereich bilden sich horizontale Strömungswalzen und im Hafeninneren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



Tidekurve aufgenommen am 14.09.1994
am Pegel Große Seeschleuse
Oberwasser am Pegel Versen $Q_o = 57,1 \text{ m}^3/\text{s}$

LEGENDE

- Strömungsbahnen in 1,5 m Wassertiefe
- Strömungsbahnen in 6,0 m Wassertiefe



Tidekurve aufgenommen am 14.09.1994
am Pegel Große Seeschleuse
Oberwasser am Pegel Versen $Q_o = 57,1 \text{ m}^3/\text{s}$

LEGENDE

- Strömungsbahnen in 1,5 m Wassertiefe
- Strömungsbahnen in 6,0 m Wassertiefe

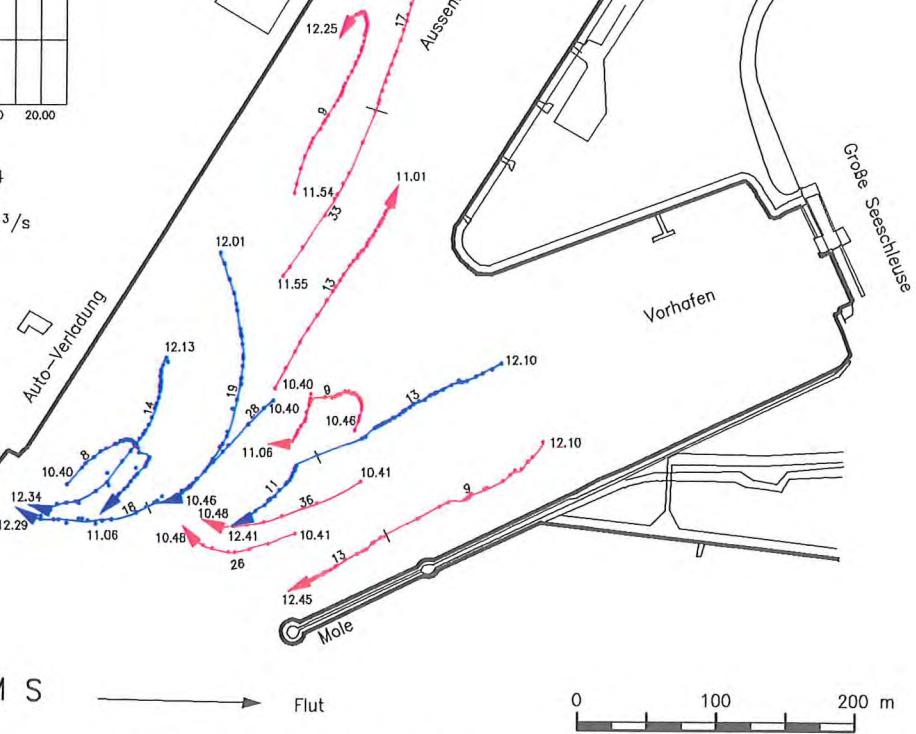
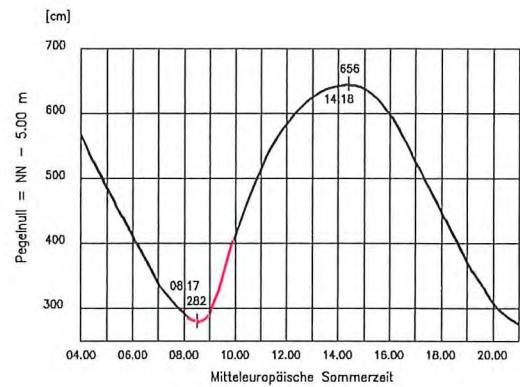
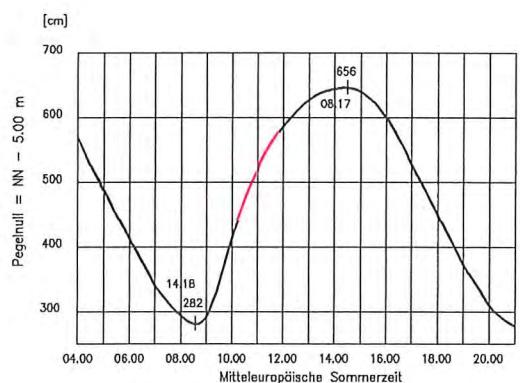
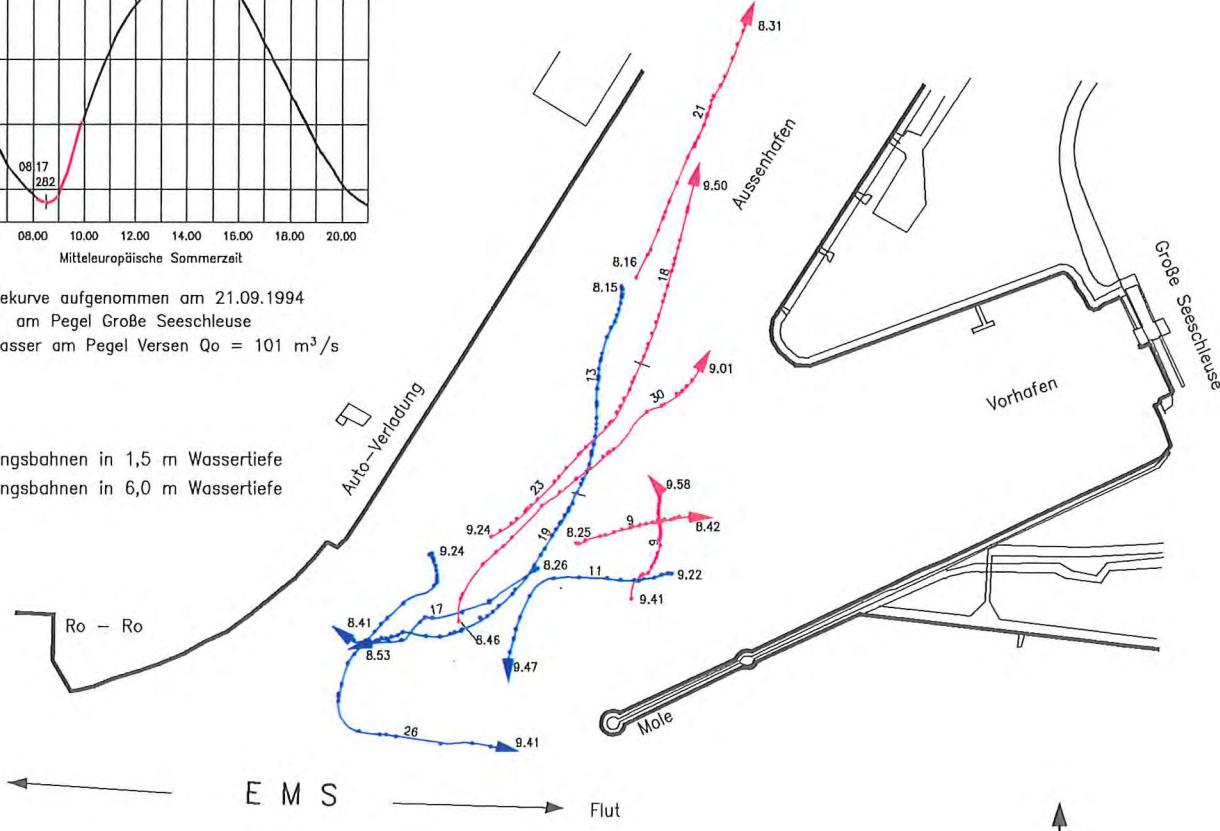


Abb. 25: Treibkörperbahnen im Emder Vor- und Außenhafen während der Ebbephase am 14.09.1994



LEGENDE

- Strömungsbahnen in 1,5 m Wassertiefe
- Strömungsbahnen in 6,0 m Wassertiefe



LEGENDE

- Strömungsbahnen in 1,5 m Wassertiefe
- Strömungsbahnen in 6,0 m Wassertiefe

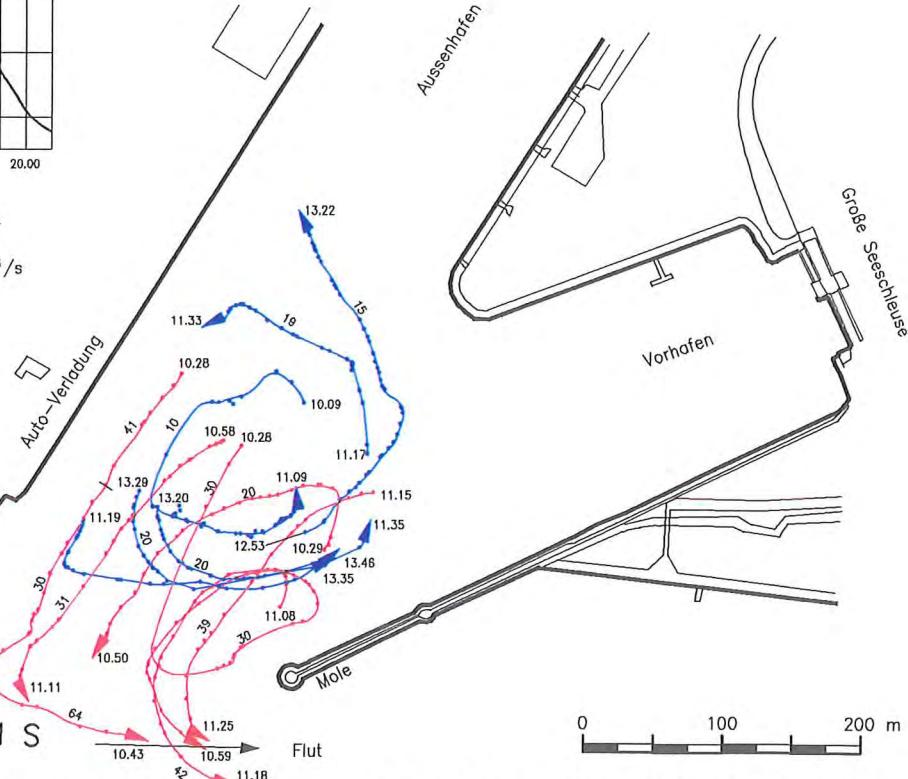


Abb. 26: Treibkörperbahnen im Emder Vor- und Außenhafen während der Flutphase am 21.09.1994

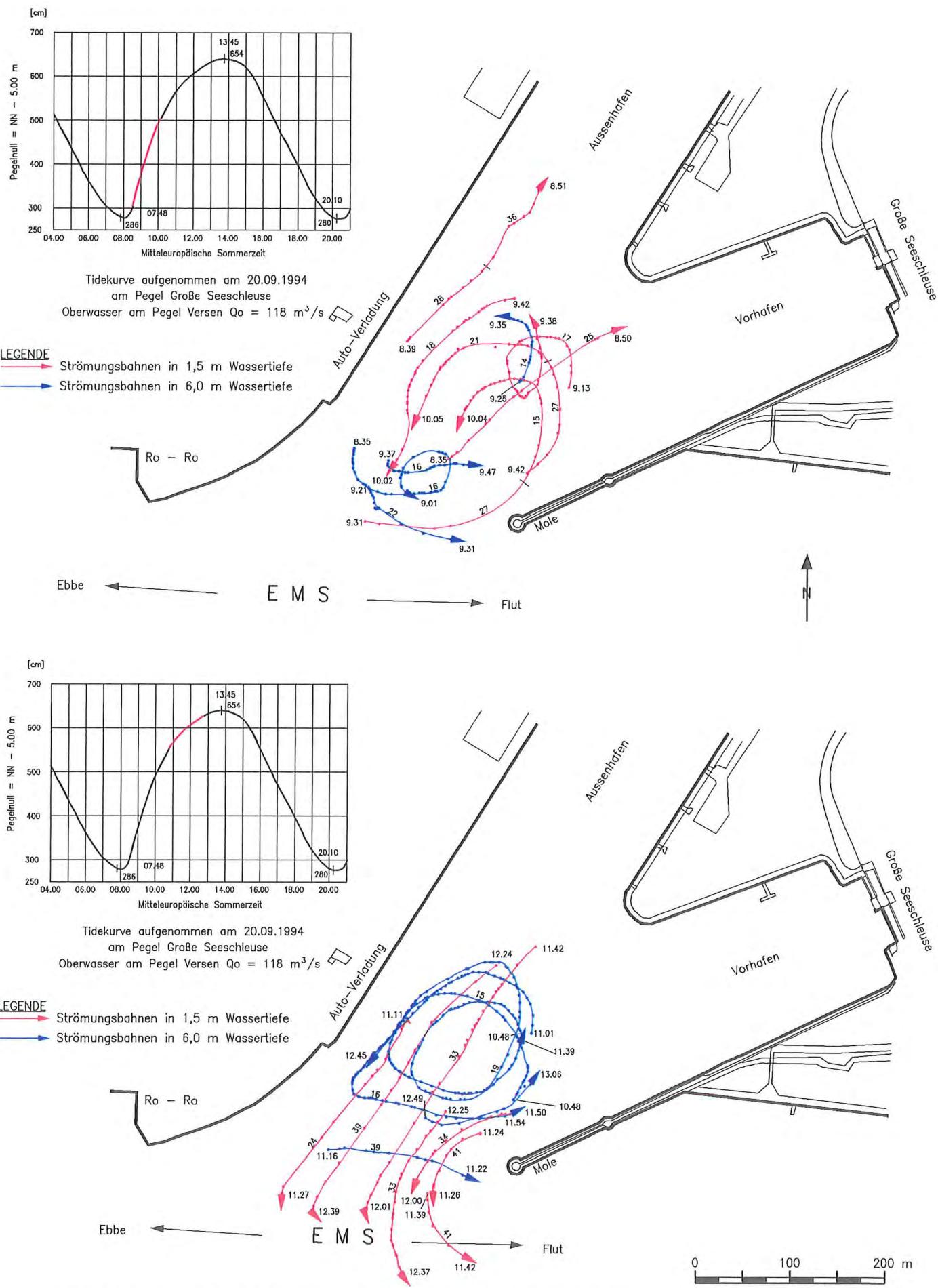


Abb. 27: Treibkörperbahnen im Emder Vor- und Außenhafen während der Flutphase am 20.09.1994

Die in der Natur gemessenen Strömungsverhältnisse im Emder Hafen sind in Abb. 28 schematisch dargestellt.

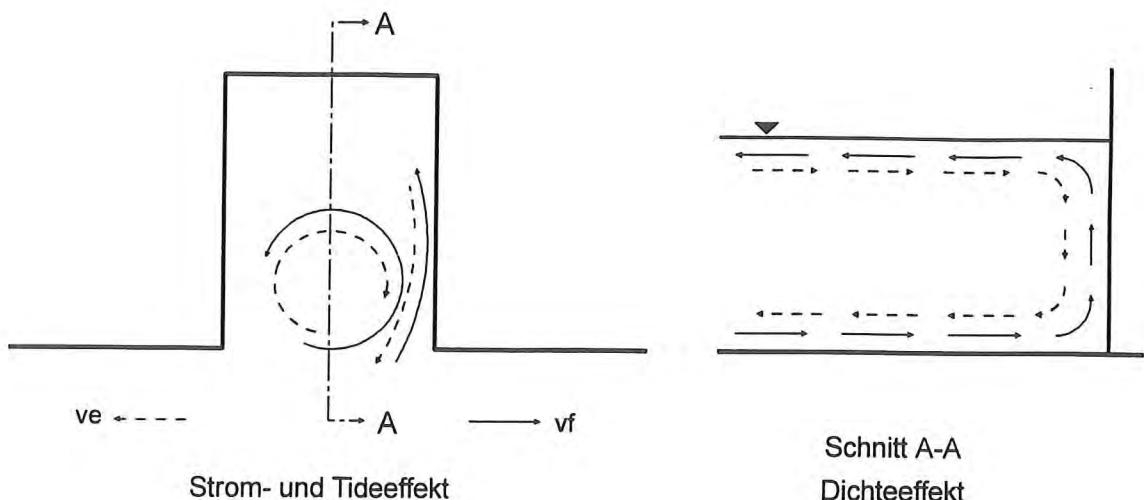


Abb. 28: Tide-, Strom- und Dichteefekt bei Flut- und Ebbeströmungen (schematisch)

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. 24).

Die besonderen Bedingungen im Brackwassergebiet führen dazu, daß der Übergang zur festen Sohle im Emder Außenhafen fließend ist, weil sich im sohnahen Bereich hochkonzentrierte Feststoffsuspensionen mit geringer Dichte (verflüssigter Schlick 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 $1,17 \text{ g/cm}^3$ gemessen. Dieses sind Werte, die unter dem kritischen Maß für die Manövriertfähigkeit von Schiffen liegen (RECHLIN, 1996).

Für die Unterhaltungsarbeiten und die Schiffahrt ist die feste Gewässersohle maßgebend. Nur die Tieferlegung des festen Horizontes hat eine größere Kielfreiheit bzw. nutzbare 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 Emder Tidehäfen rd. $2,2 \text{ Mio m}^3$ 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 Emder Vor- und Außenhafen wurde verfestigtes Sohlenmaterial gewonnen und im Labor für Wasserbau der HOCHSCHULE BREMEN analysiert. Die Ergebnisse der Beprobungen vom April 1993 und September 1994 sind in den Abbildungen 29 und 30 dargestellt.

Das Sohlenmaterial ist sehr einheitlich und besteht überwiegend aus Mittelschluff. Dementsprechend hoch ist auch das Verhältnis von organischen zu mineralischen Feststoffanteilen. Es bestätigt sich, daß die Glühverluste an die Gewichtsprozente der Feinanteile gekoppelt sind (RECHLIN, 1996). Die organischen Anteile lagen im April 1993 im Mittel etwas niedriger als im September 1994 (Abb. 29 und 30 unten). 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 und SCHIRMER, 1991).

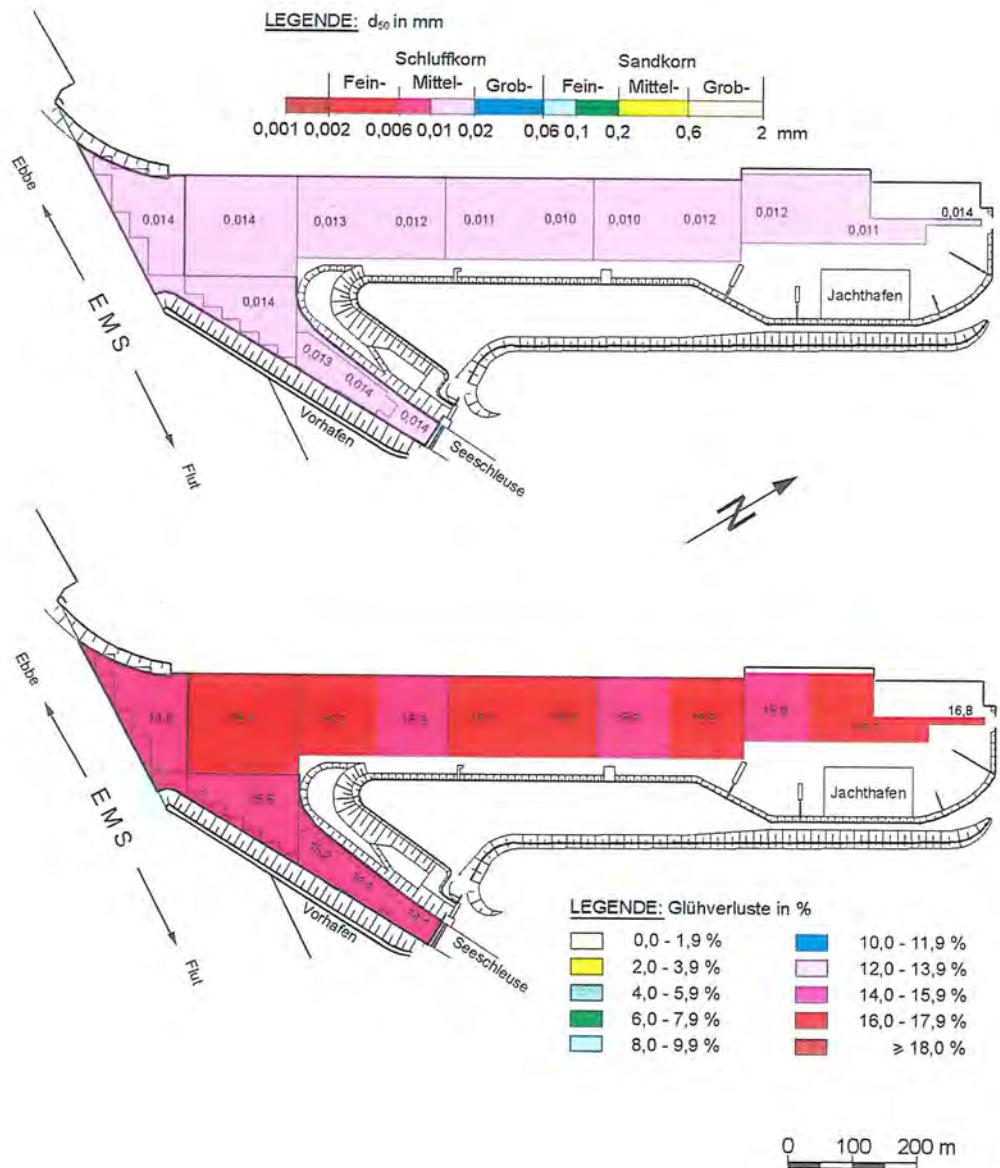


Abb. 29: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Vor- und Außenhafen in Emden der Probenentnahme vom 01.04.1993

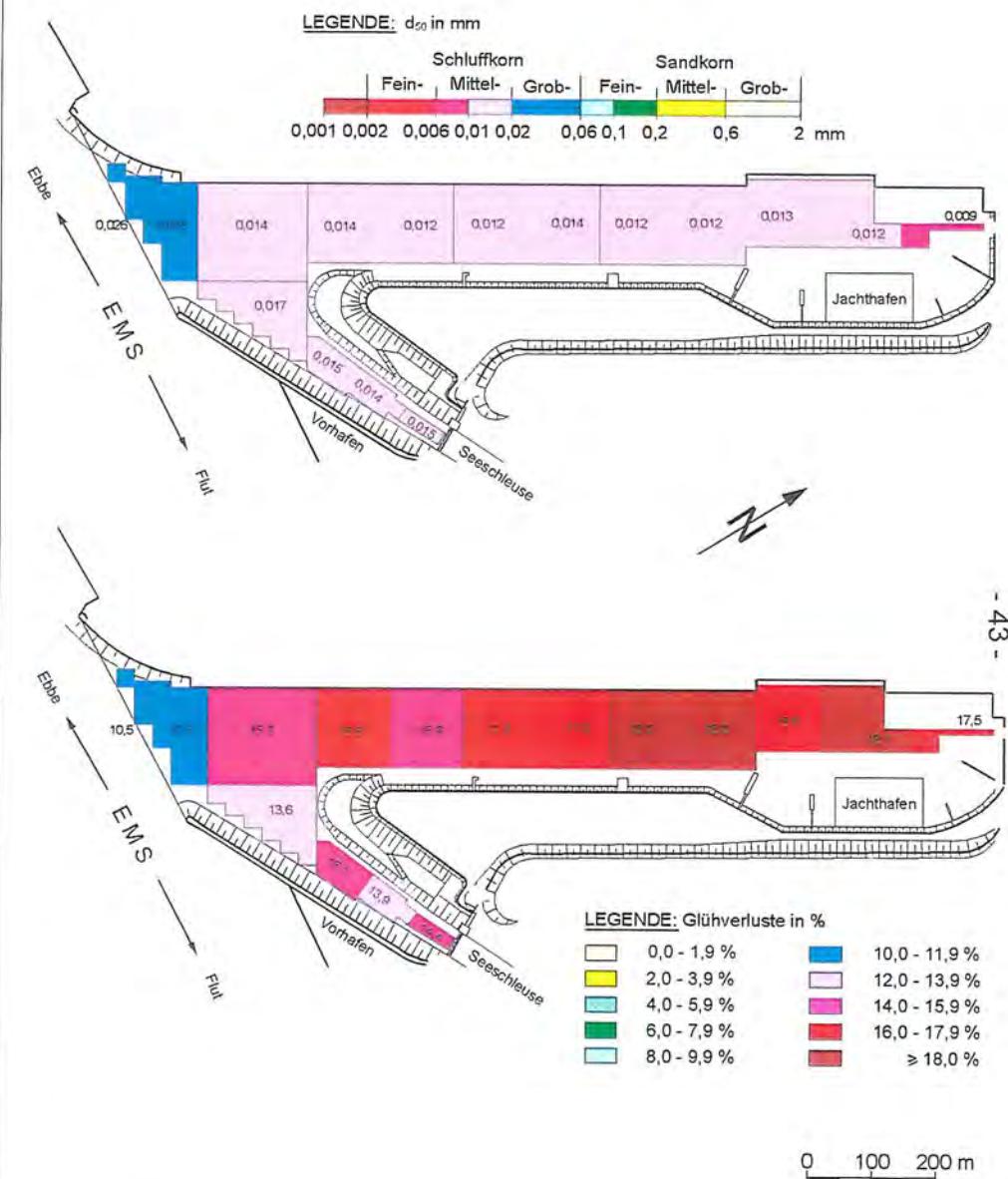


Abb. 30: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Vor- und Außenhafen in Emden der Probenentnahme vom 12.09.1994

5.3. Wilhelmshaven

Die morphologischen Bedingungen im neuen Vorhafen von Wilhelmshaven sind in Abb. 31 für den Auswertungszeitraum 1974/90 dargestellt. Bei insgesamt recht hohen Auflandungen sind die Bedingungen im Einfahrtsbereich -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 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. 32). Unabhängig von der gewählten Baggermethode bleiben dabei die Verlandungsschwerpunkte unverändert. Offenbar haben Unterhaltungsmaßnahmen, die sich mehr im Fluid Mud-Bereich abspielen (Abb. 32 unten), nicht den gewünschten Erfolg. Es ist vielmehr denkbar, daß sich im Feststoffmaterial vorhandene Bakterien sich 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 14.06.1995 hohe Einströmgeschwindigkeiten an der Ostmole in drei (rote Linien) und sechs (blaue Linien) Meter Wassertiefe auf (Abb. 33). Aus Dauerstrommessungen des WSA Wilhelmshaven geht hervor, daß die Strömungsintensität mit der Wassertiefe zunimmt, was auf die große Wassertiefe außerhalb des Vorhafens geführt wird (FRELS, 1995). Am 14.06.1995

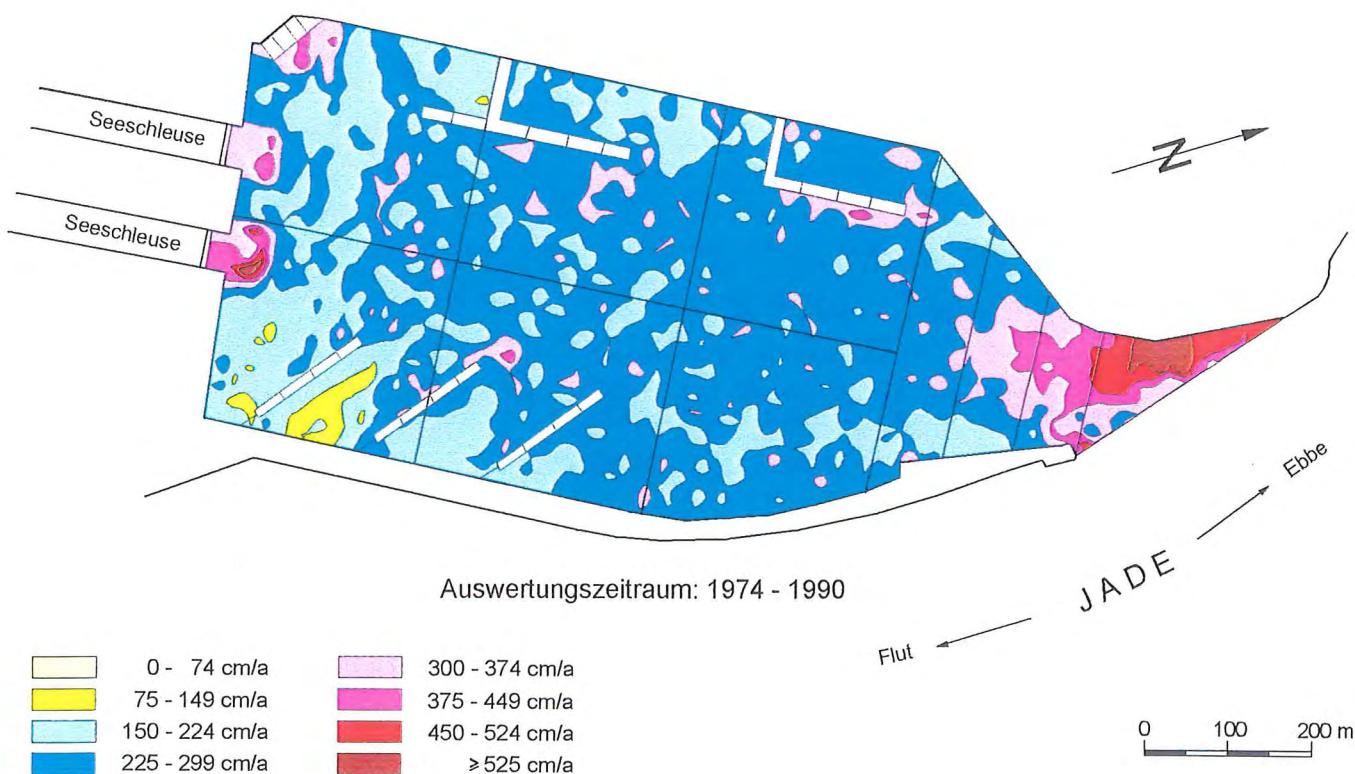
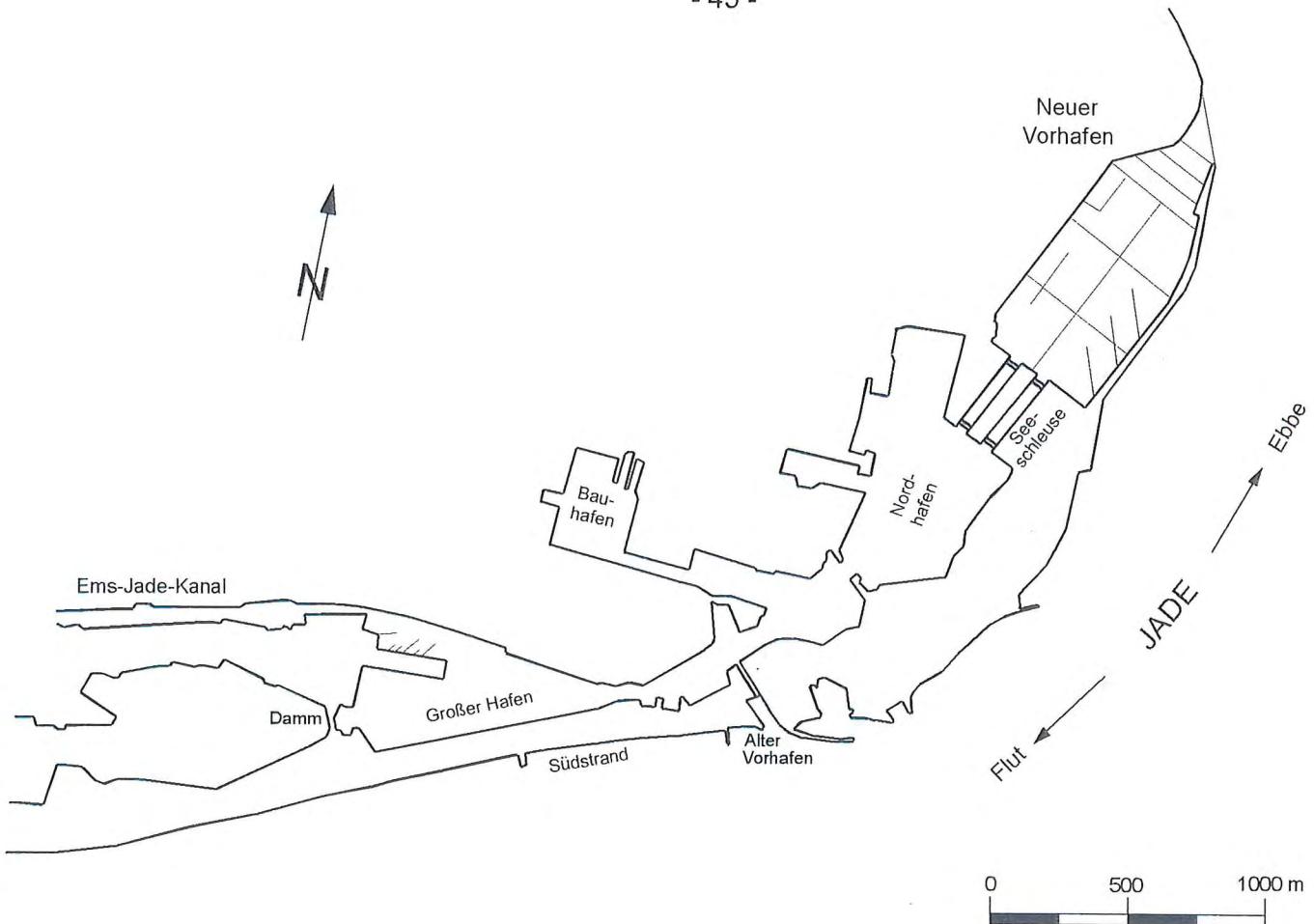


Abb 31: Hafenanlagen und Morphologie im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven

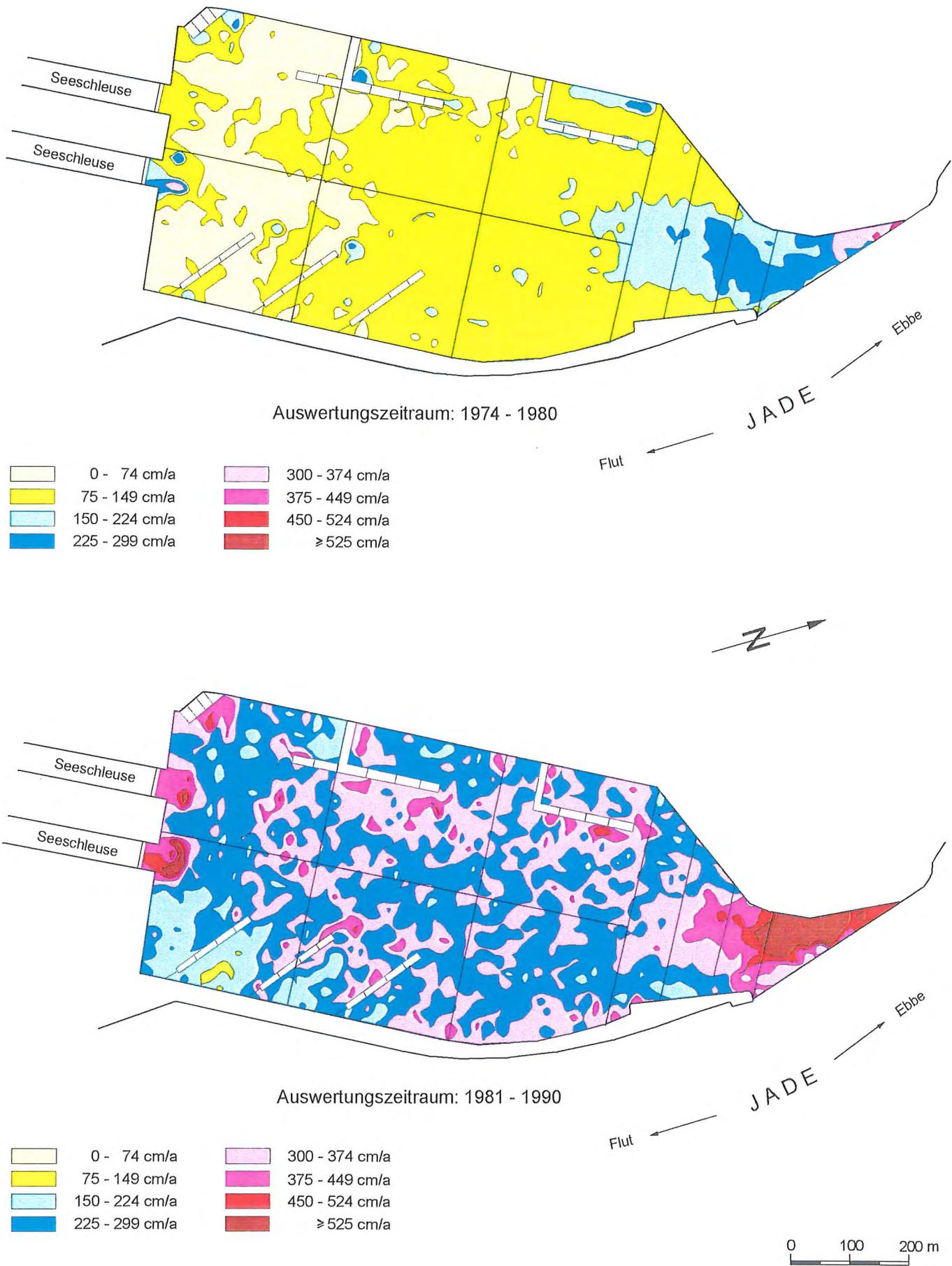


Abb 32: Morphologie im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven

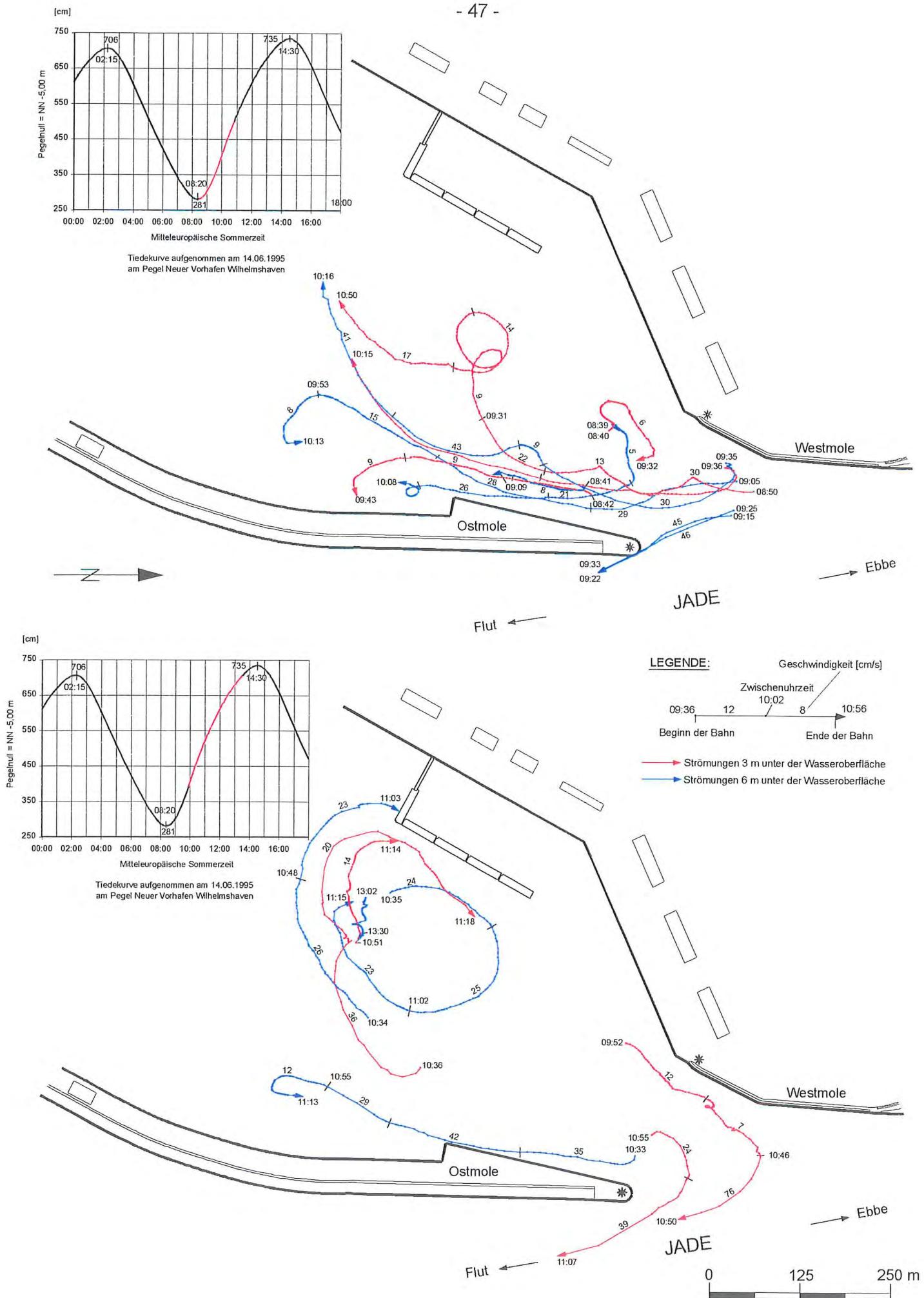


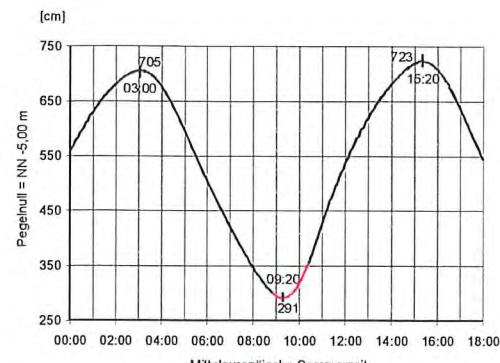
Abb. 33: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven während der Flutphase am 14.06.1995

erreichten die Geschwindigkeiten auch noch im äußeren Walzenbereich mit bis über $v = 30 \text{ cm/s}$ 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. 33 unten 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.

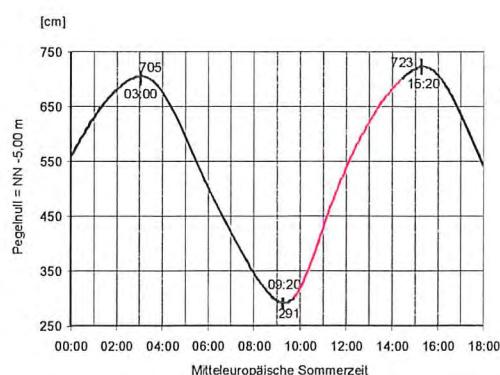
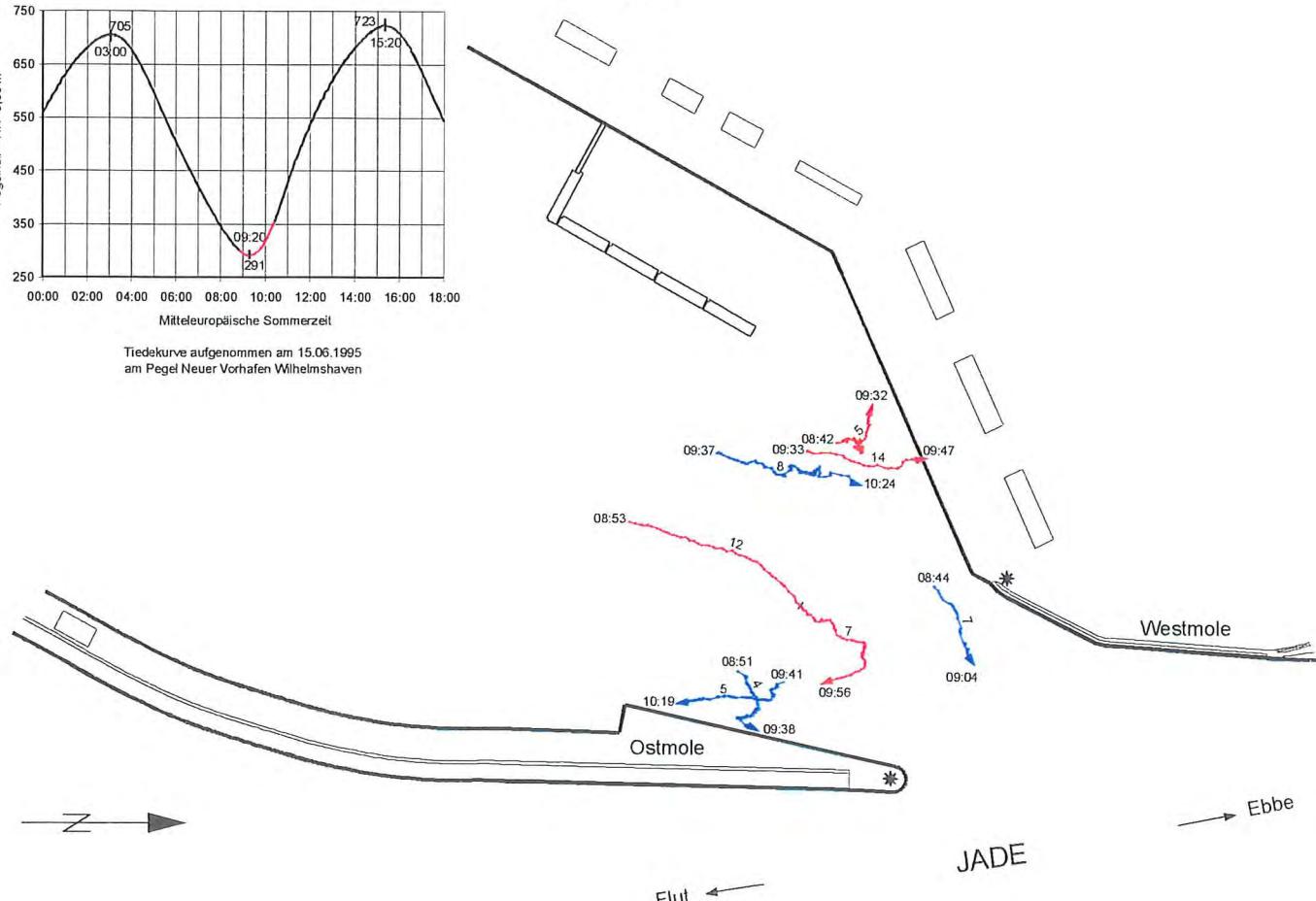
Am 15.06.1995 lag der Tidehub mit 432 cm ebenfalls über dem langjährigen Mittelwert von $MThb_{1971/80} = 375 \text{ cm}$. An diesem Tage wurde noch die letzte Ebbephase erfaßt (Abb. 34 oben). Grundsätzlich wurden die Flutströmungsverhältnisse vom Vortag bestätigt (Abb. 34 unten). Es hatte sich wieder 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 15.06.1995 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 21.06.1995 wurden die Strömungen bei einer Nipptide während der Ebbephase 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. 35 oben). Die Strömungsgeschwindigkeiten sind im Vorhafen bedeutend geringer als bei Flut. Nach Dauerstrommessungen des WSA WILHELMSHAVEN ändert sich das auch nicht bei höheren Tiden. Zusätzlich sind die Geschwindigkeiten in größeren Tiefen noch deutlich schwächer. Vor der Westmole wurden während der Ebbephase schwache Gegenströmungen registriert, woraus zu schließen ist, daß sich dort Ebbestromwalzen ausbilden (FRELS, 1995).

Während der zweiten Ebbephase kam es am 21.06.1995 zu auffrischendem Wind aus NW mit Geschwindigkeiten von 5 bis 7 m/s. Den schwachen Ebbeströmungen im Vorhafen überlagerte sich die Winddrift (Abb. 35 unten). Erst nach Tideniedrigwasser setzte sich der beginnende Flutstrom in den Vorhafen gegen den Windeinfluß durch.



Tidekurve aufgenommen am 15.06.1995
am Pegel Neuer Vorhafen Wilhelmshaven



Tidekurve aufgenommen am 15.06.1995
am Pegel Neuer Vorhafen Wilhelmshaven

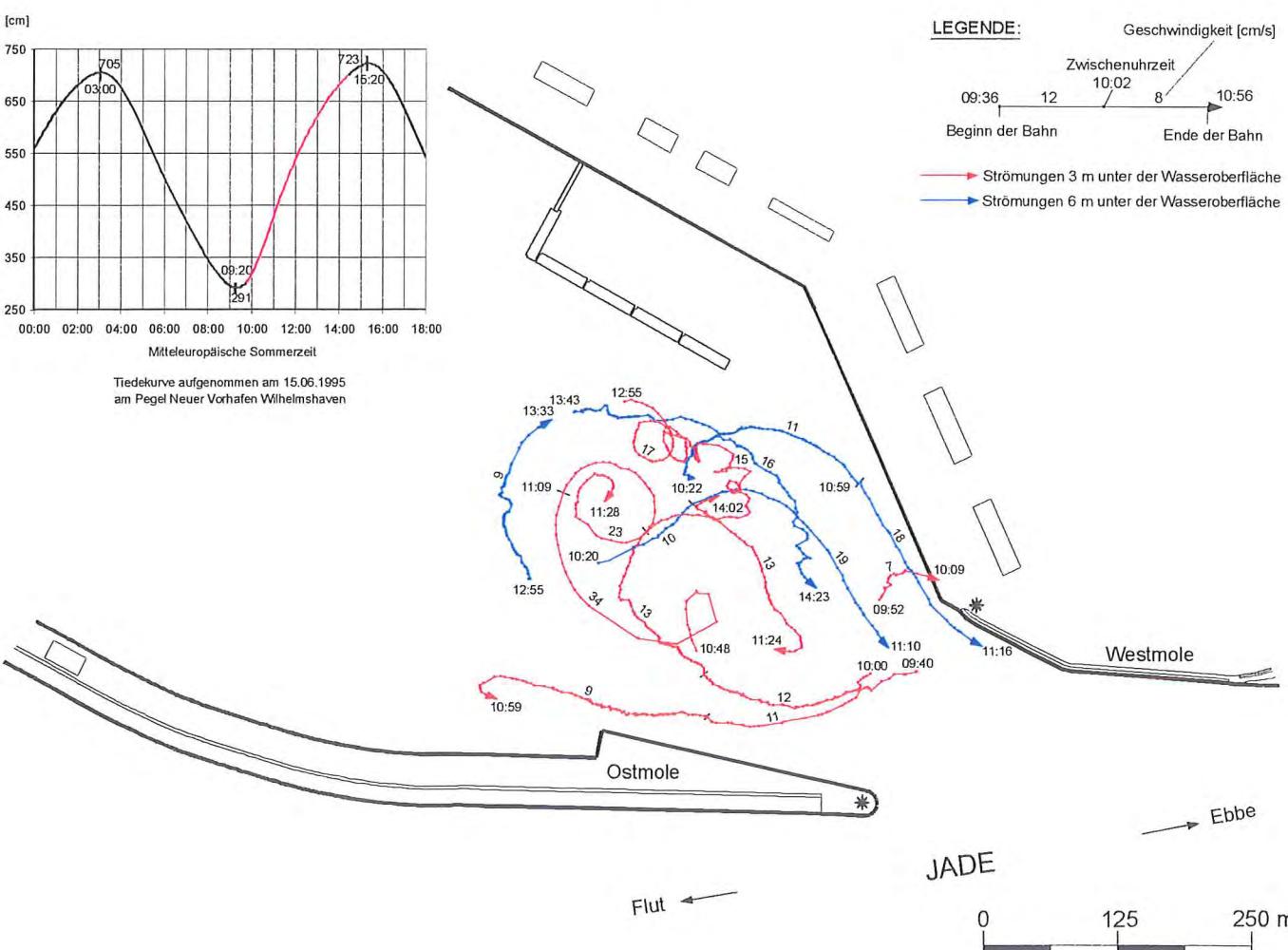


Abb. 34: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven während der Flutphase am 15.06.1995

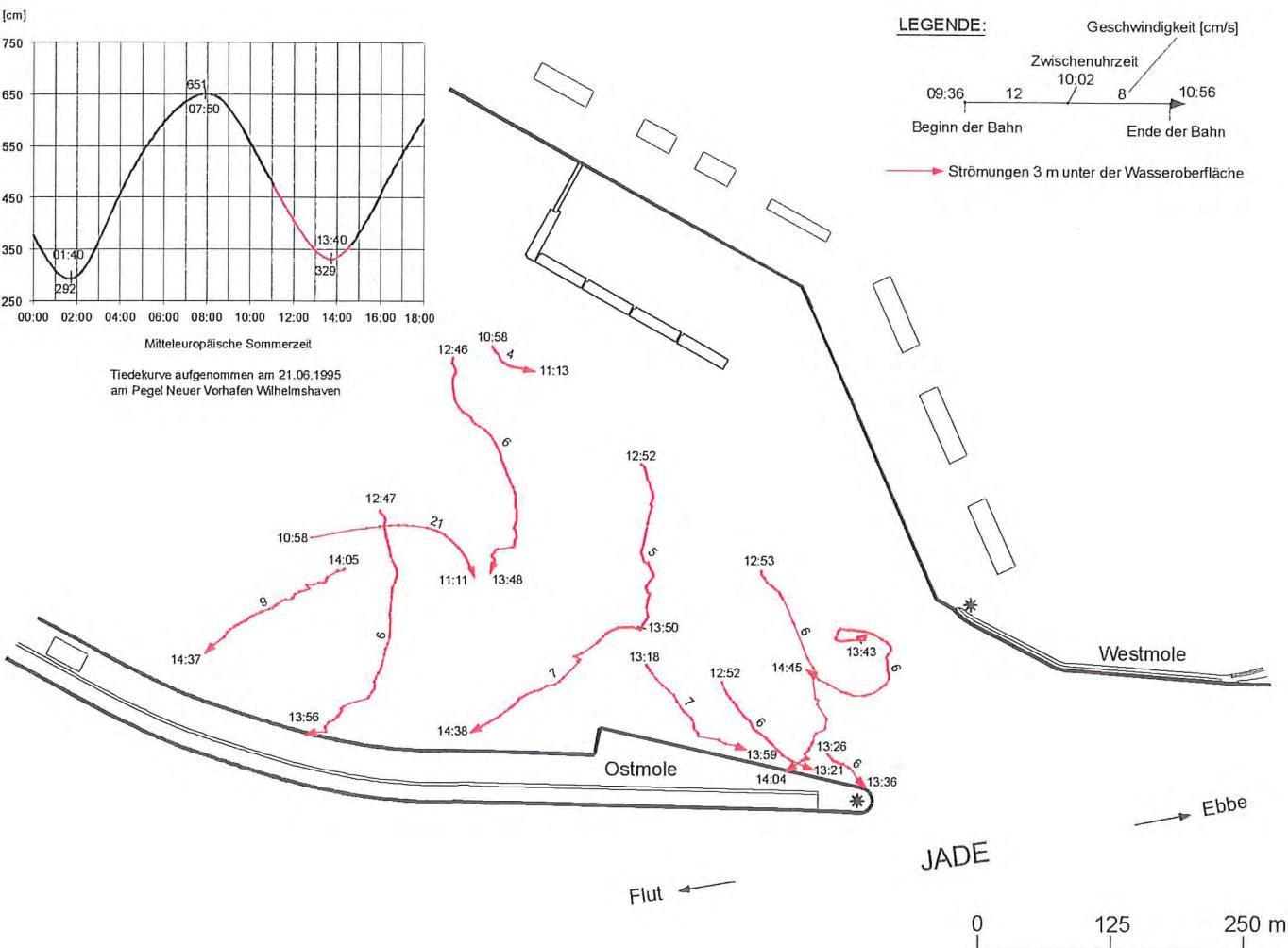
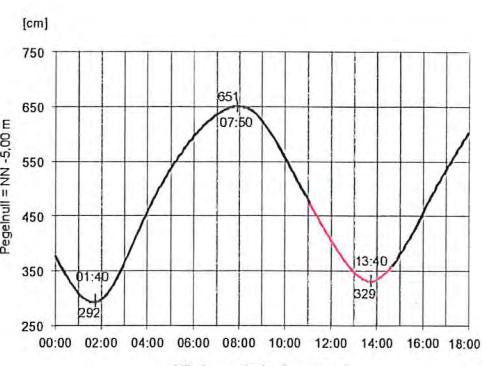
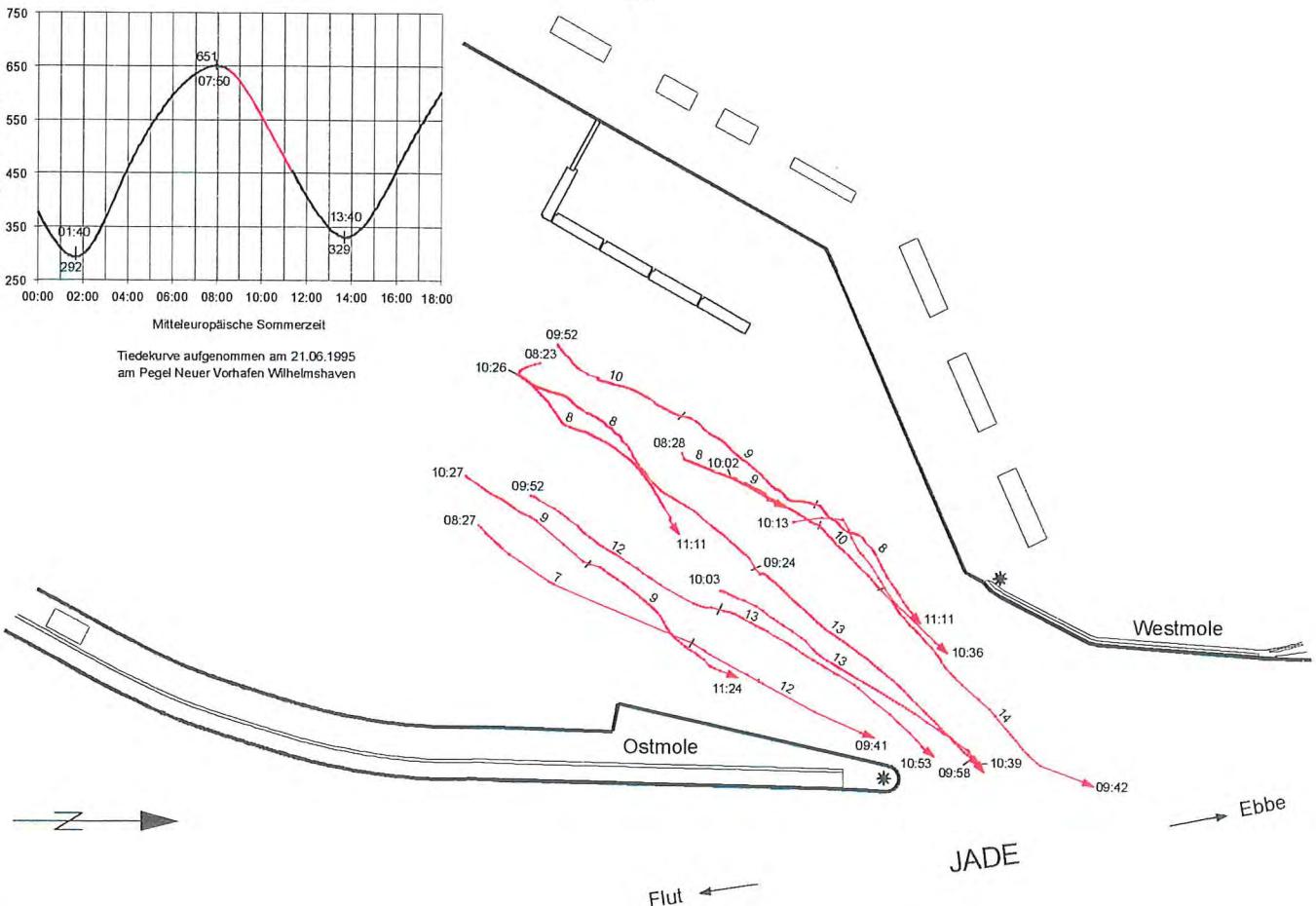
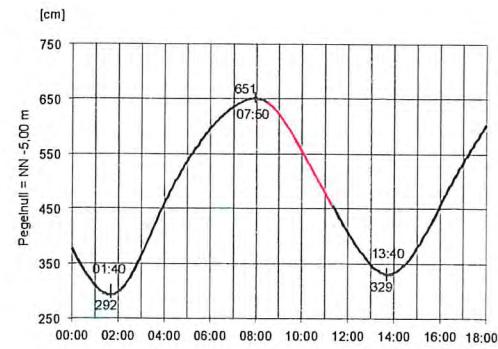


Abb. 35: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven während der Ebbephase am 21.06.1995

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. 31 und 32). 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 (Abb. 36). Die Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials ist mit der aus dem Emder 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, sofern man bei diesen Größenordnungen überhaupt noch von Unterschieden in den Körnungen ausgehen mag.

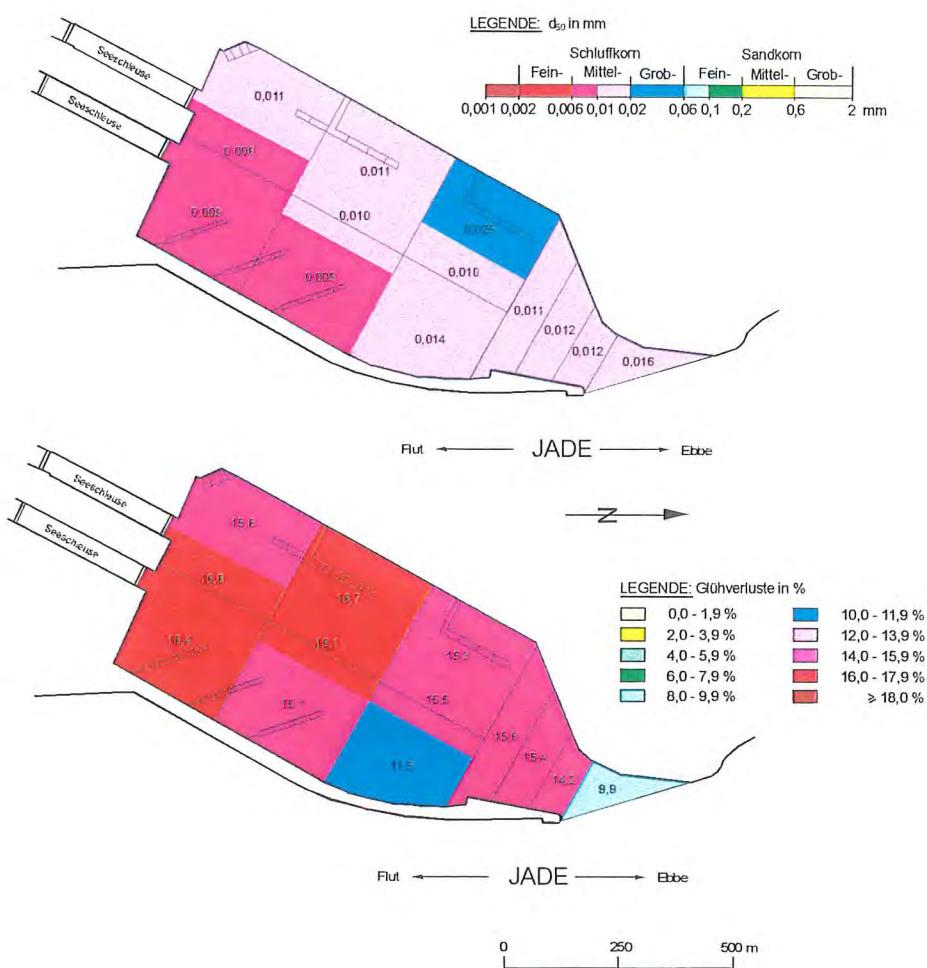


Abb. 36: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven der Probenentnahme vom 17.10.1995

5.4. Bremerhaven

Von den Hafenanlagen in Bremerhaven wurden die Vorhäfen zur Kaiser- und Nordschleuse sedimentologisch untersucht (Abb. 37). Die Peilplanauswertungen haben ergeben, daß die Auflandungen im Vorhafen zur Kaiserschleuse trotz der geringeren Einfahrtsbreite höher sind als vor der Nordschleuse (Abb. 37 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 $qs = 157 \text{ cm/a}$ (NASNER, 1992). Hinter dem Binnenhaupt der Kaiserschleuse sedimentiert dagegen lediglich $qs = 33 \text{ cm/a}$.

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 Schlickeggé 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 08.06.1990) und anschließend (am 19.06.1990) 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. 38). 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.

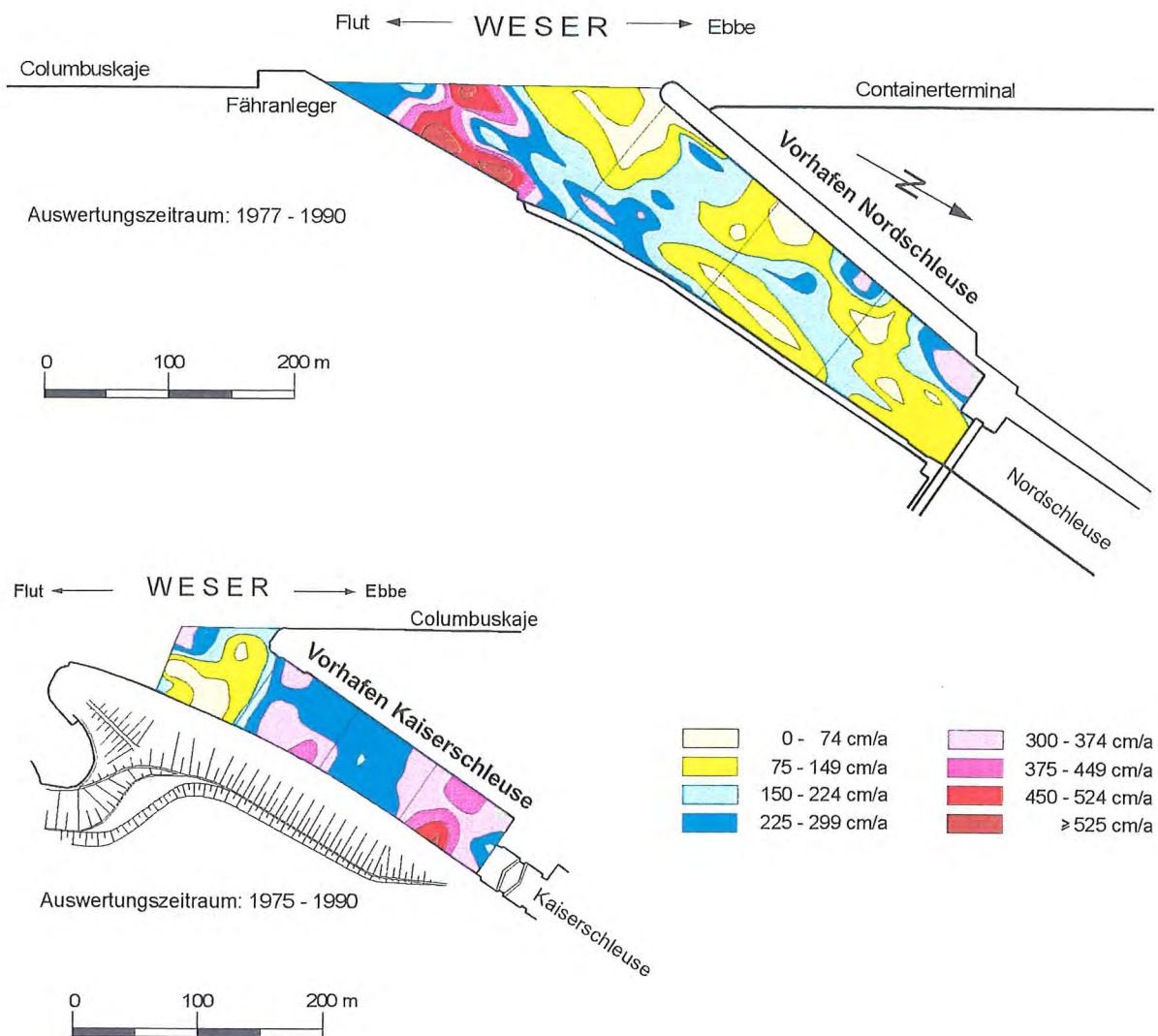
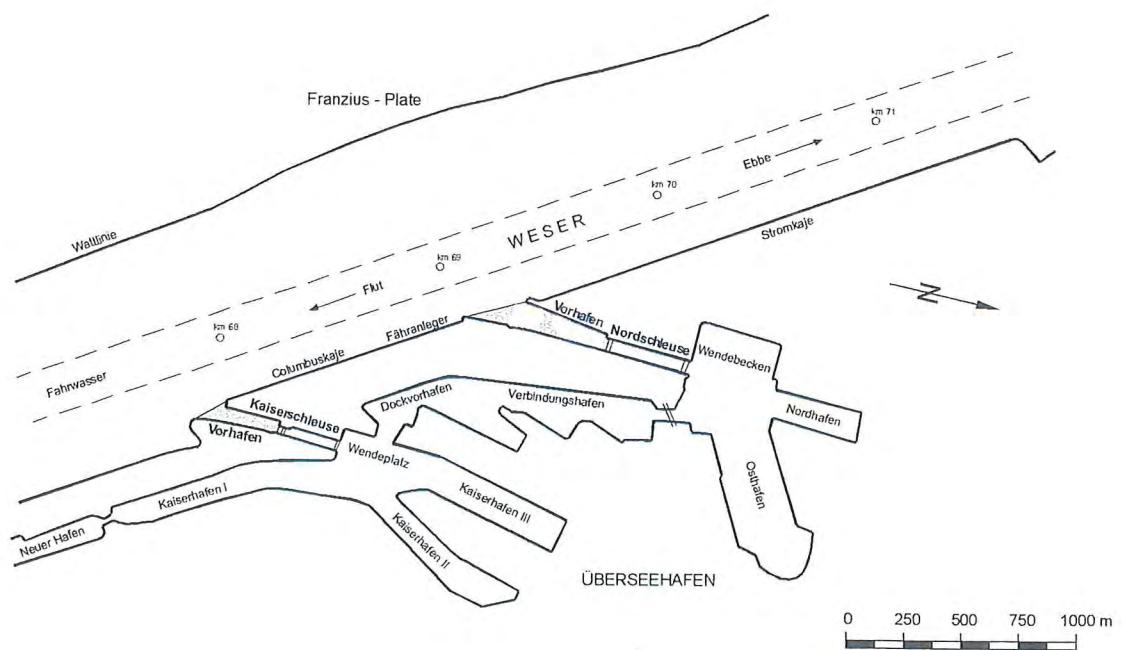


Abb 37: Hafenanlagen in Bremerhaven und Morphologie in den Vorhäfen zur Nord- und Kaiserschleuse

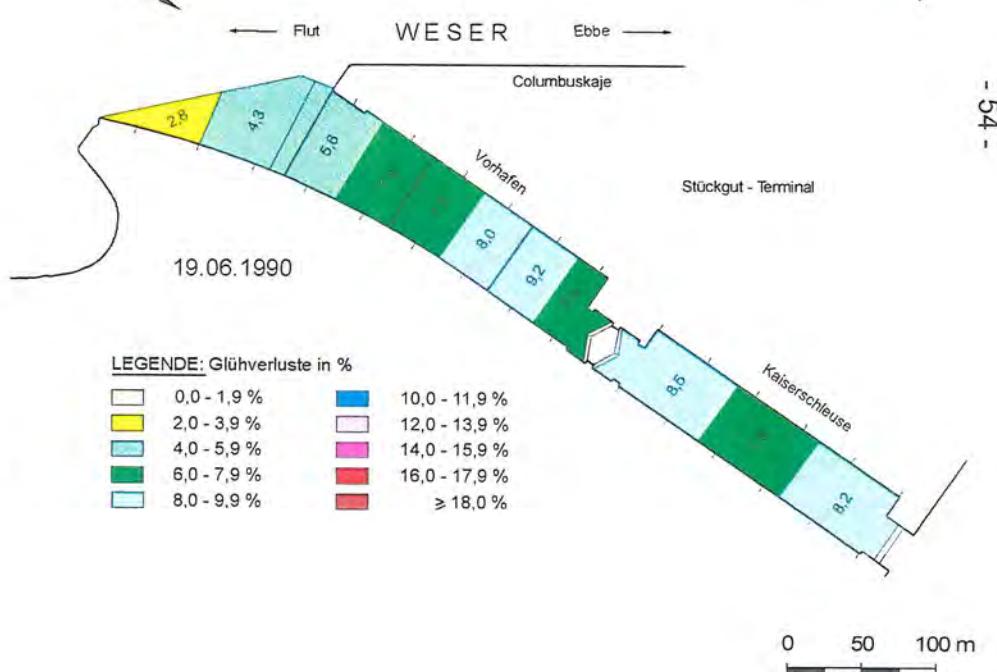
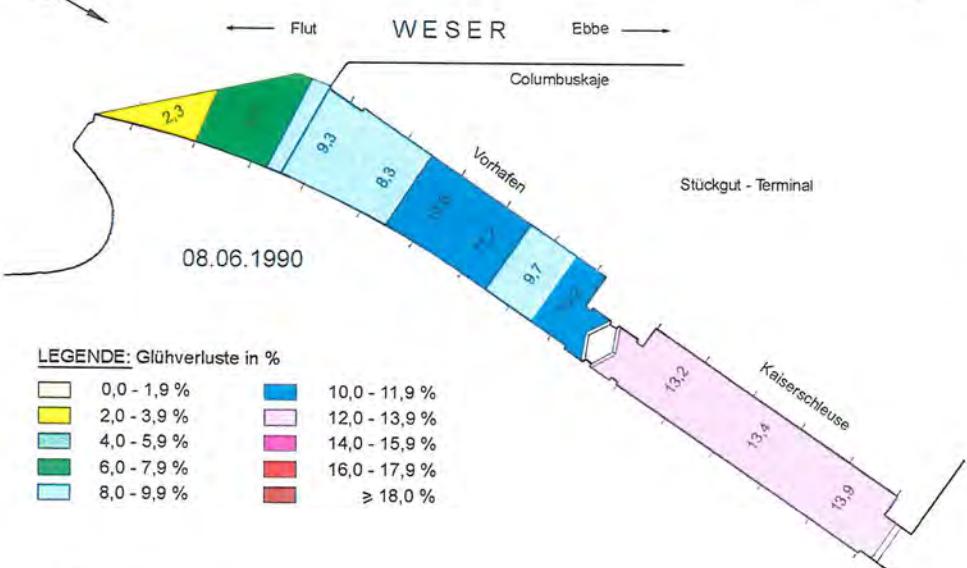
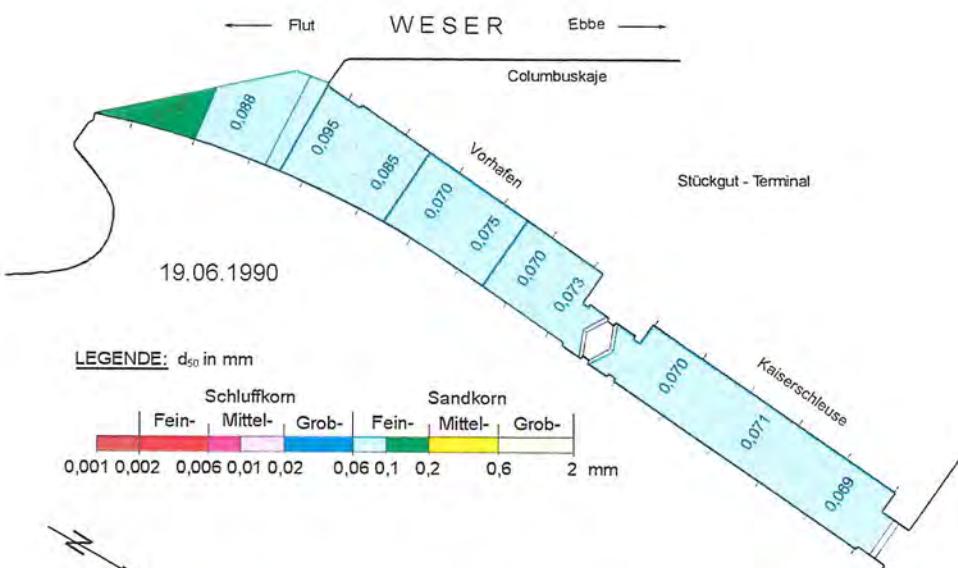
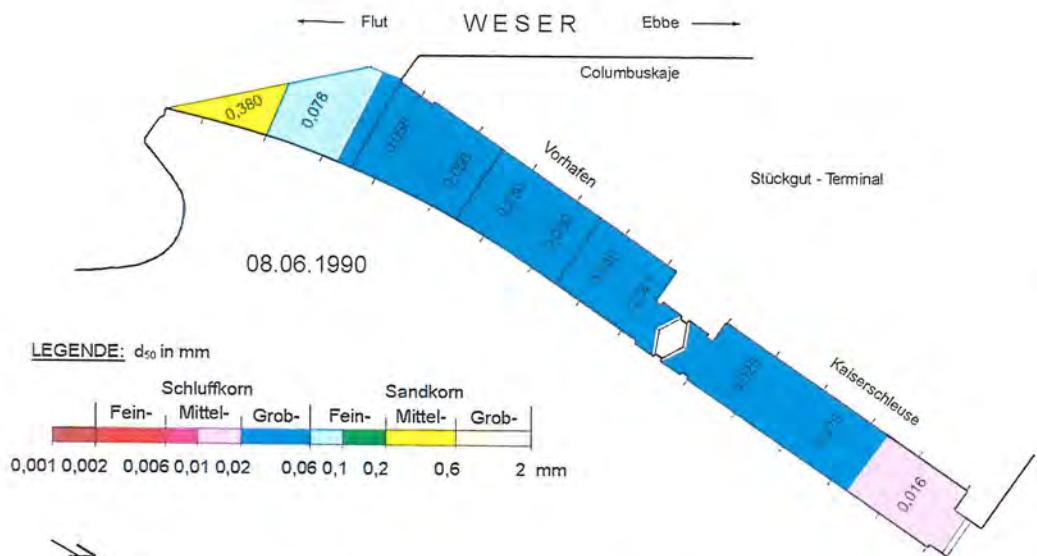


Abb. 38: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Vorhaven zur Kaiserschleuse in Bremerhaven der Probenentnahmen vom 08.06.1990 und 19.06.1990

Sowohl in der Schleusenkammer als auch im Vorhafen wurde am 19.06.1990 größeres, überwiegend feinsandiges Sohlenmaterial angetroffen (Abb. 38). Lediglich im äußersten Vorhafenbereich war die Körnung feiner als vor der Probebaggerung. 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 (Abb. 39 und 40). Die absoluten Werte sind jeweils von den vorher stattgefundenen Unterhaltungsmaßnahmen abhängig. Dabei spielten die Konsistenz des Fluid Muds und der Einfluß der mechanischen Ege eine Rolle. Im Juni 1992 (Abb. 39) 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 (Abb. 40), wurde offenbar ein spezifisch schweres Fluid Mud angetroffen in dem der Bodengreifer bei geringen Entnahmetiefen steckengeblieben ist.

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

Die Auswirkungen der Injektionsbaggerung in der Schleusenkammer und im Vorhafen zur Kaiserschleuse können mit vom HBA BREMERHAVEN durchgeführten Längspeilungen nachvollzogen werden (Abb. 41 und 42). Vor der Baggerung lag das obere Echo in der Schleusenkammer etwas unter SKN -5 m. Die Proben wurden aus ca. SKN -6 m Tiefe entnommen (Abb. 41 oben). Bereits vier Tage nach der Maßnahme wurde die obere Grenze der Fluid Mud-Schicht wieder bei SKN -8 m registriert (Abb. 41 Mitte). Die Entnahmetiefe der Bodenproben 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. 41 unten). Der untere Horizont lag unverändert bei SKN -10 m. Der rasche Eintrieb von Fluid Mud mit geringer Dichte ist nicht ungewöhnlich und auch nicht auf die Injektionsmaßnahme zurückzuführen. Für den Schiffsbetrieb 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 maßgebende Dichte. Dies ist an der sehr viel größeren Eindringtiefe des Bodengreifers zu erkennen. Auch mit dem Handlot wurden am 09.07.1990 noch Tiefen bis zu SKN -9,50 m erreicht.

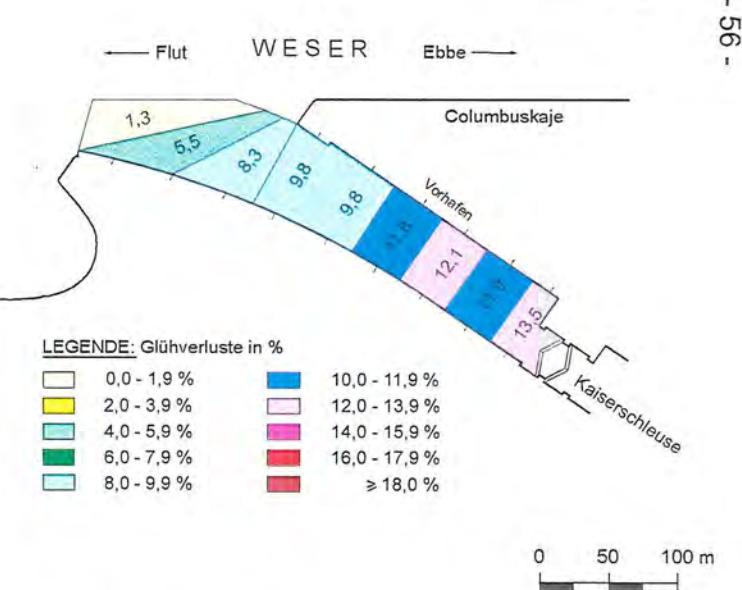
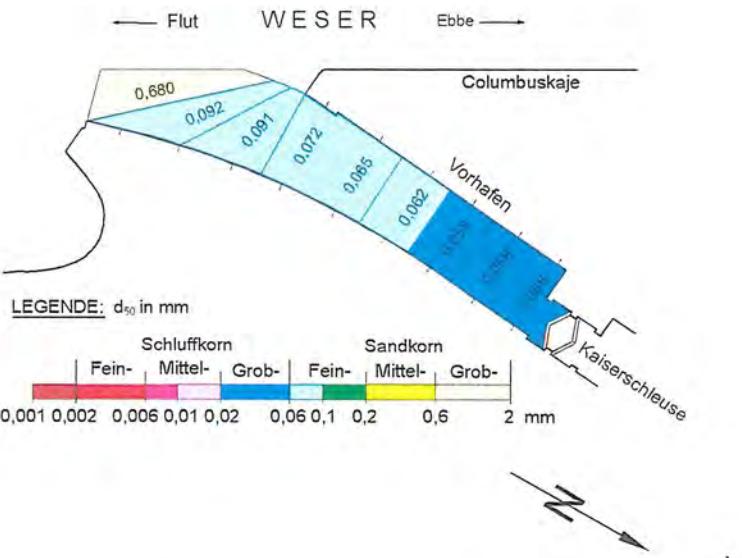
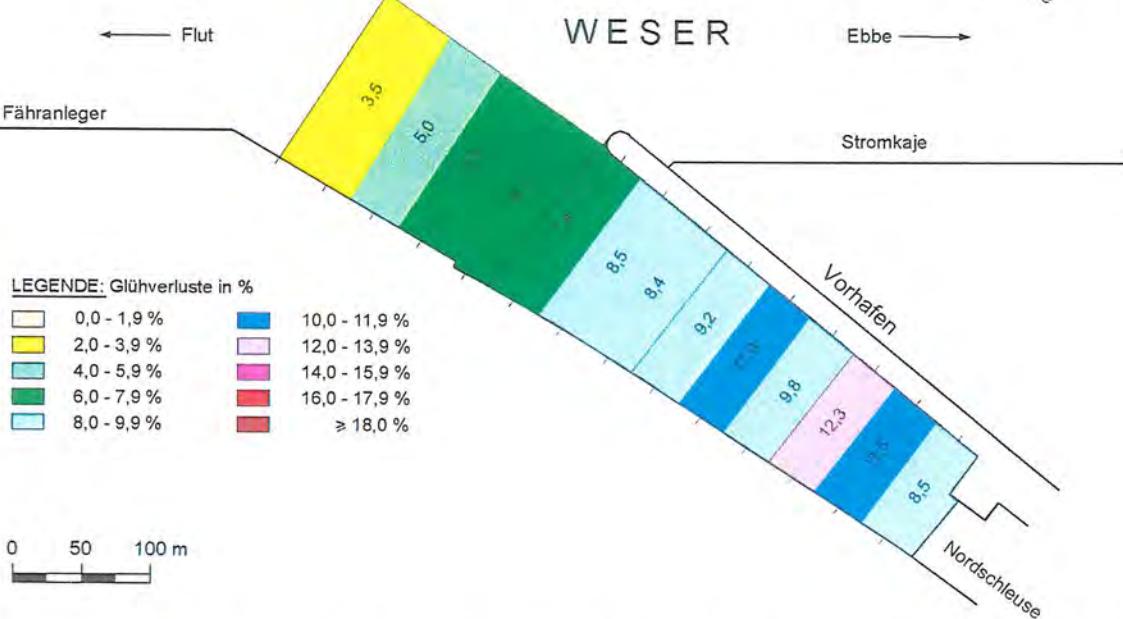
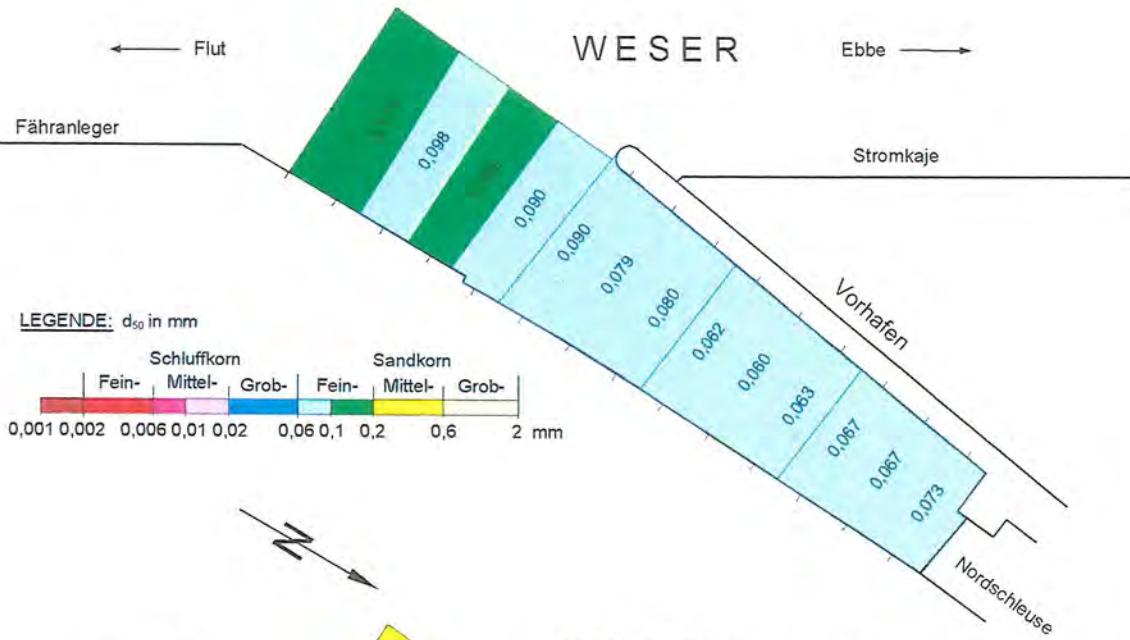


Abb. 39: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste in den Vorhäfen zur Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven der Probenentnahme vom 11.06.1992

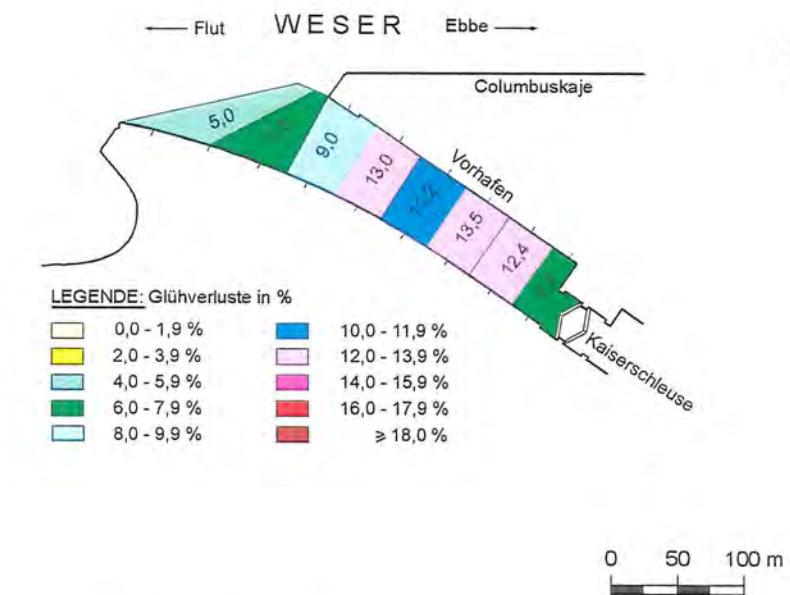
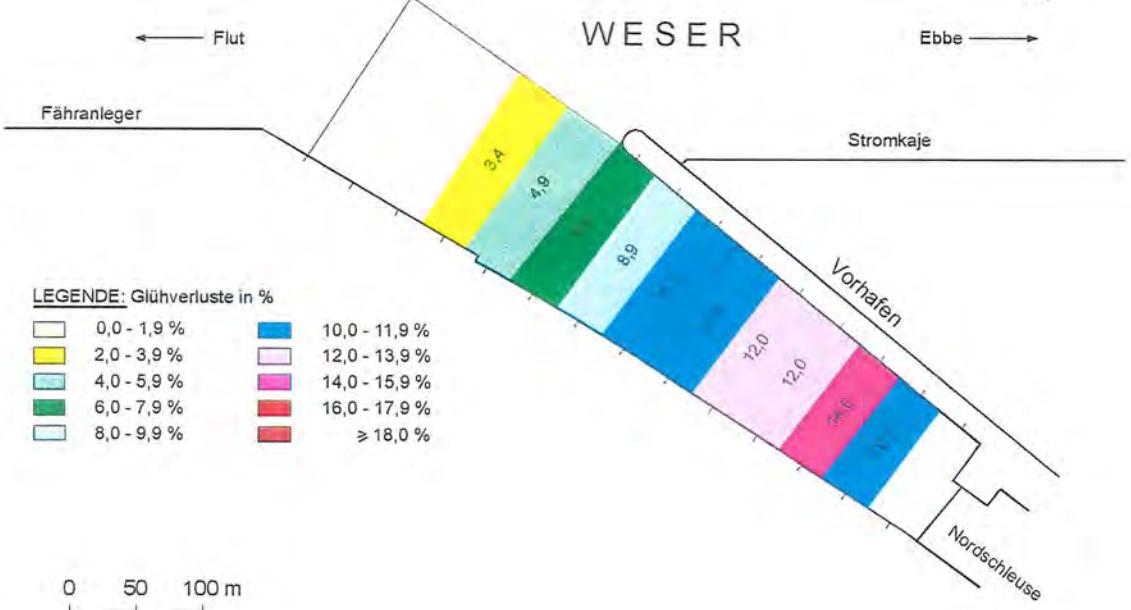
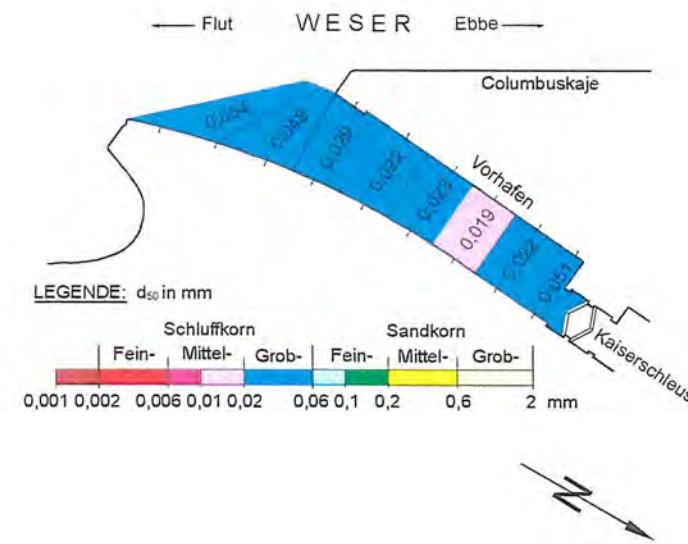
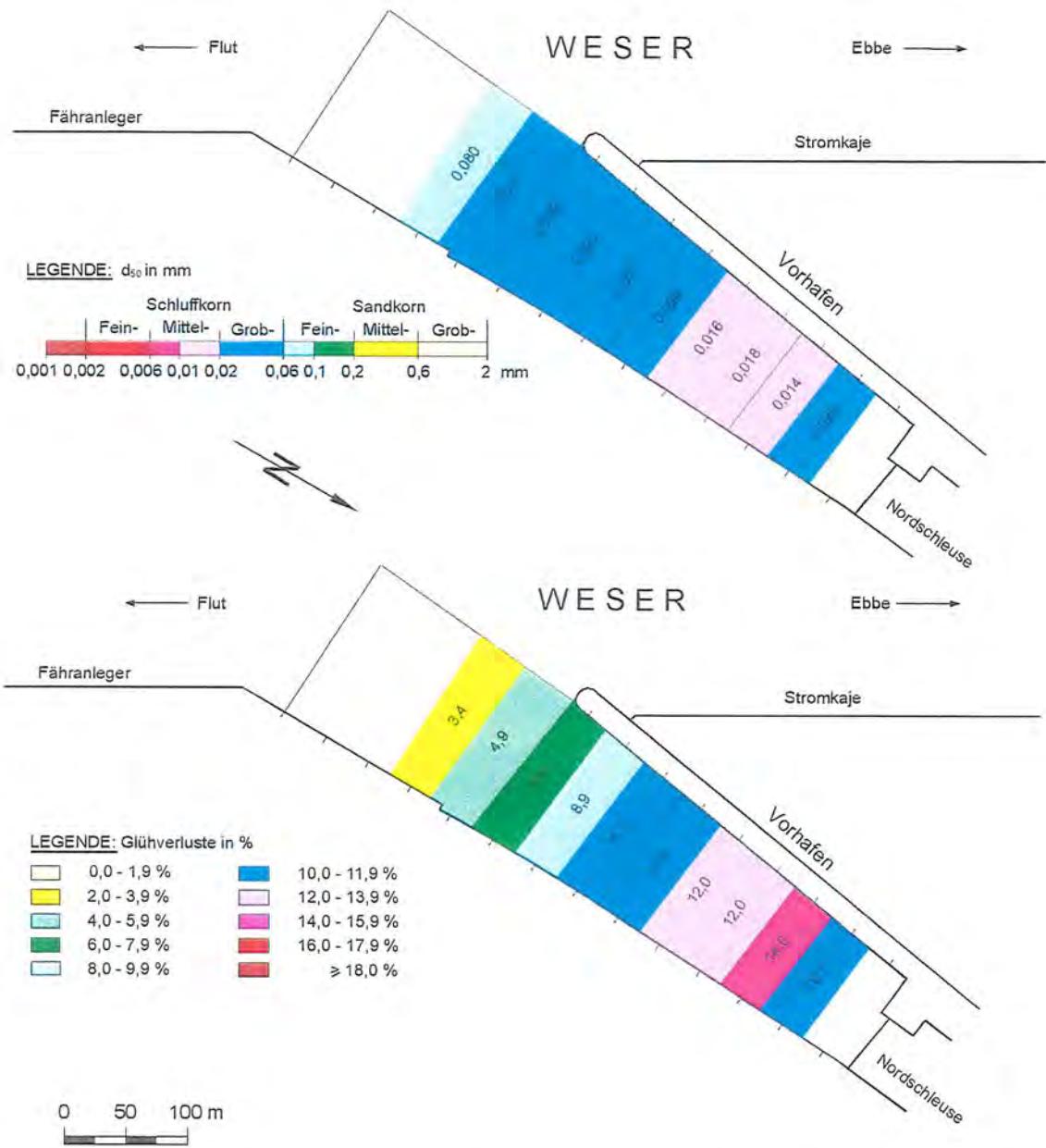


Abb. 40: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste in den Vorhäfen zur Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven der Probenentnahme vom 27.04.1994

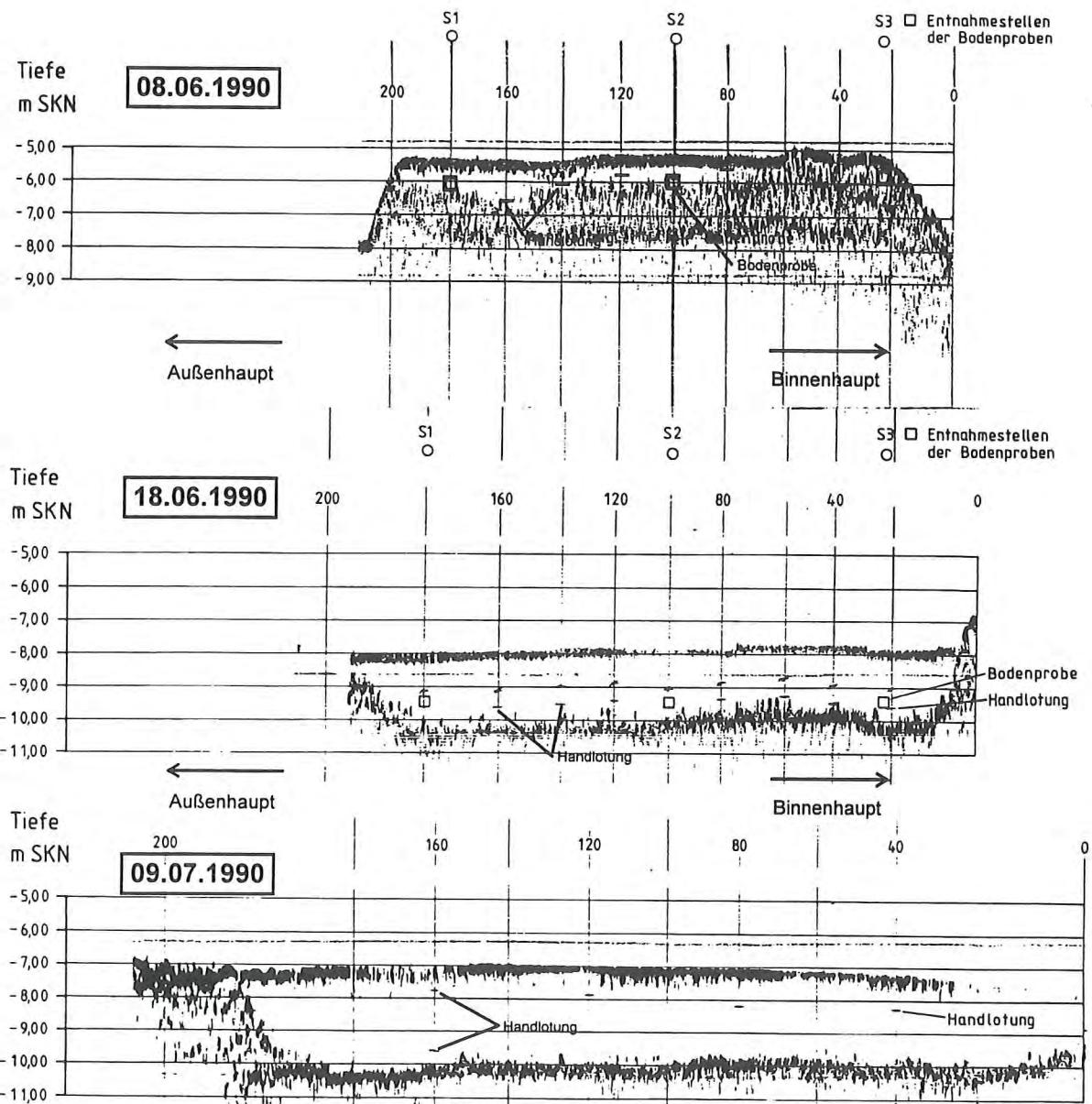


Abb. 41: Längspeilungen in der Schleusenkammer der Kaiserschleuse in Bremerhaven

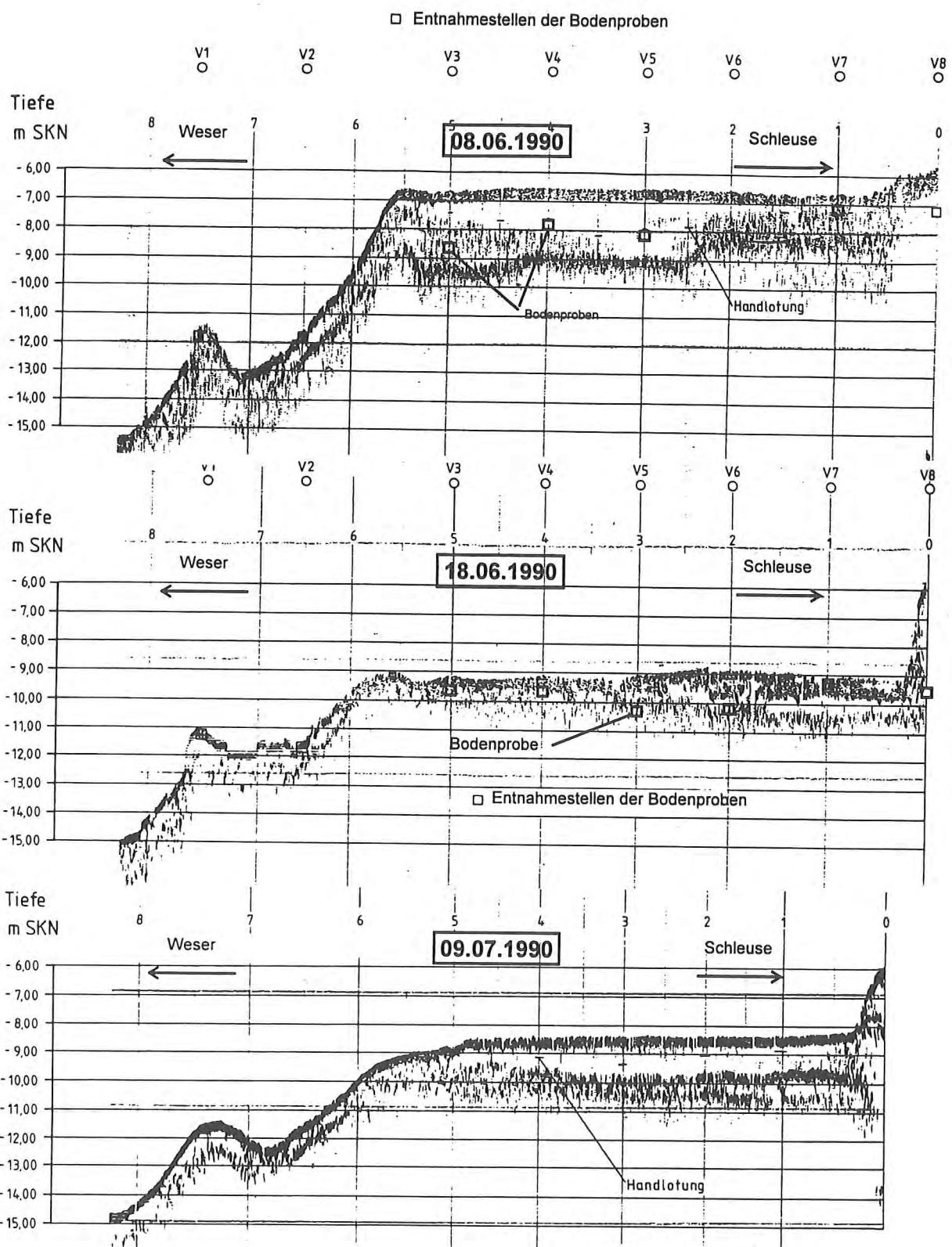


Abb. 42: Längspeilungen im Vorhafen der Kaiserschleuse in Bremerhaven

Aus dem Vorhafen der Kaiserschleuse wurde durch die Wasserinjektionen ebenfalls Sohlenmaterial resuspendiert und transportiert (Abb. 42). Ein Vergleich der Eindringtiefen des Bodengreifers am 08. und 18.06.1990 mag dies verdeutlichen. Die begrenzten, kornabhängigen Transportwege nach Wasserinjektionen sind daran erkennbar, daß sich aktivierte Feststoffe bereits in dem Kolk vor der Einfahrt wieder abgesetzt hatten. Aufgrund der herrschenden Strömungsbedingungen hatte sich die Sohle dort bis zum 09.07.1990 wieder vertieft. Auch im Vorhafen war schon wieder eine neue Fluid Mud-Schicht entstanden.

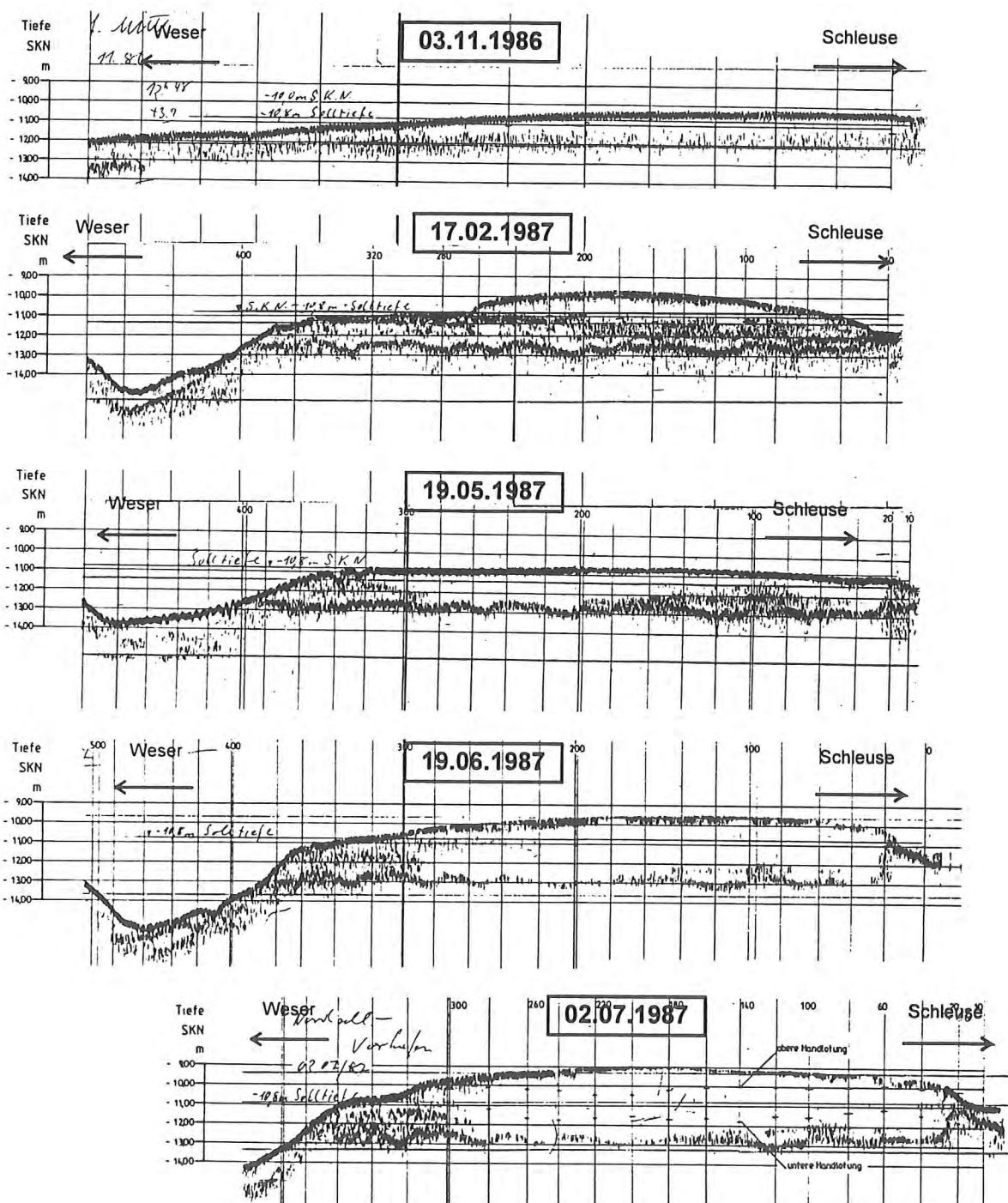


Abb. 43: Längspeilungen im Vorhafen der Nordschleuse in Bremerhaven

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 flüssigem Schlick zu stark schwebstoffhaltigem Wasser. Dies ist mit Längspeilungen des HBA BREMERHAVEN vom 03.11.1986 bis zum 02.07.1987 zu belegen (Abb. 43).

In der zweiten November- und ersten Dezemberhälfte 1986 wurde die Vorhafensohle mit dem Bagger vertieft. Seit Mitte Januar 1987 konnte wegen Eisgangs nicht geeggt werden. Bei der Peilung vom 17.02.1987 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. 43).

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 02.07.1987 durchgeföhrten Handlotungen zeigen, daß die obere Fluid Mud-Schicht vor allem aus Wasser besteht (Abb. 43 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) betrugen 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 HAFEN-AMTES CUXHAVEN von 1985 bis 1989 nach dem Einzelpunktverfahren ausgewertet und Bereiche gleicher Sedimentationsraten ermittelt (Abb. 44). 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 bei Flut auftretende Walzenströmungen verursacht wird. Zum inneren Vorhafen nehmen die Auflandungen ab. Am geringsten ist die Sedimentation im Alten Hafen in dem die Sollsohle lediglich auf SKN -4,5 m festgelegt ist. Sicher ist es auch auf die Lage im äußeren Brackwasserbereich der Elbe zurückzuführen, daß die Auflandungen geringer als in den Untersuchungsgebieten von Emden, Bremerhaven oder Brunsbüttel sind.

5.6. Brunsbüttel

Aufgrund ihrer Lage im oberen Brackwasserbereich der Elbe sind die Schleusenvorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal besonders hohen Auflandungen unterworfen (Abb. 45). 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 Vorhafen und Elbe.

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 installiertem Empfänger bestimmt werden. Die Strömungen wurden bei mittleren Tideverhältnissen $MThb_{1971/80} = 281$ cm vom 5. bis 7.10.1993 gemessen. Das Oberwasser am Pegel Neu Darchau lag mit $Qo = 364$ bis $366 \text{ m}^3/\text{s}$ unter dem langjährigen Mittelwert ($MQo_{1926/85} = 717 \text{ m}^3/\text{s}$). Mit den Messungen in der

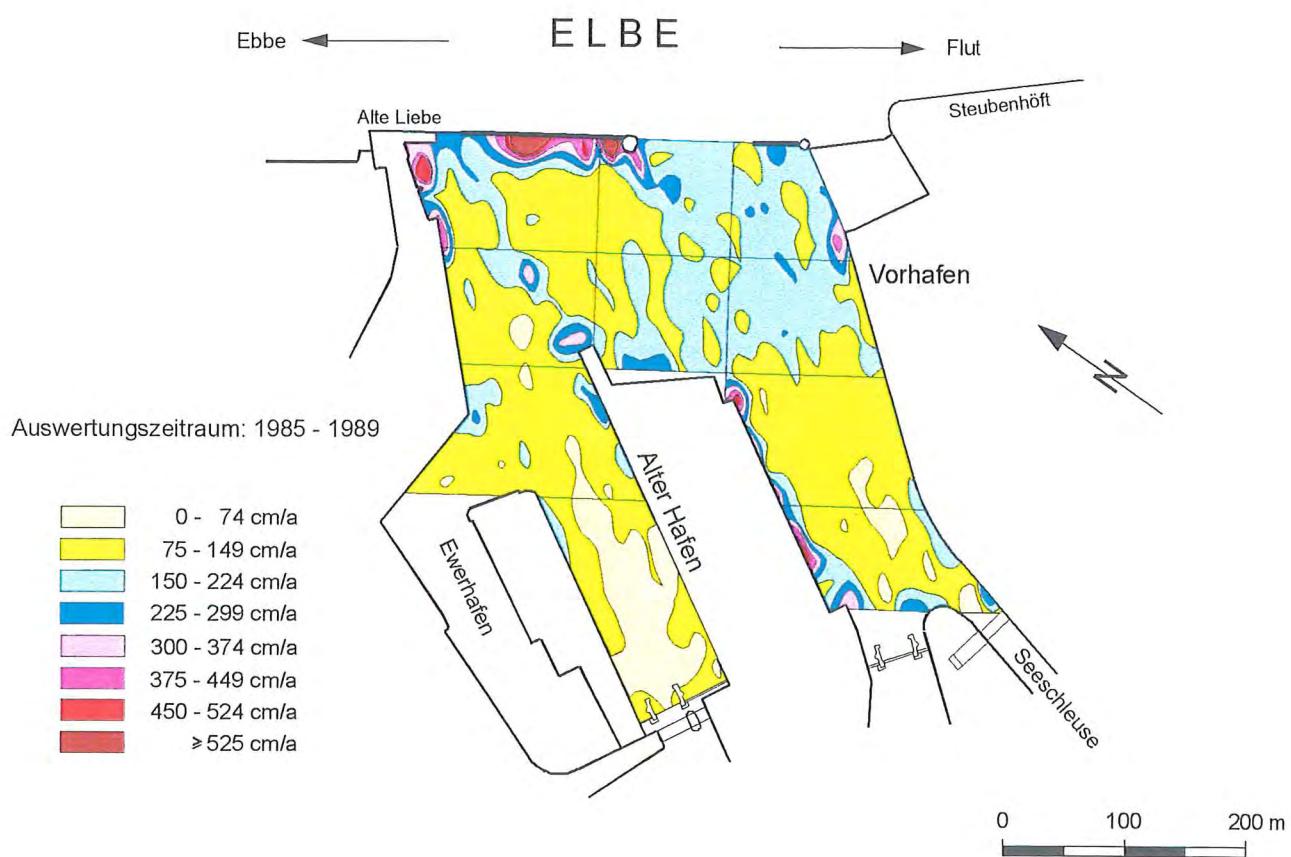
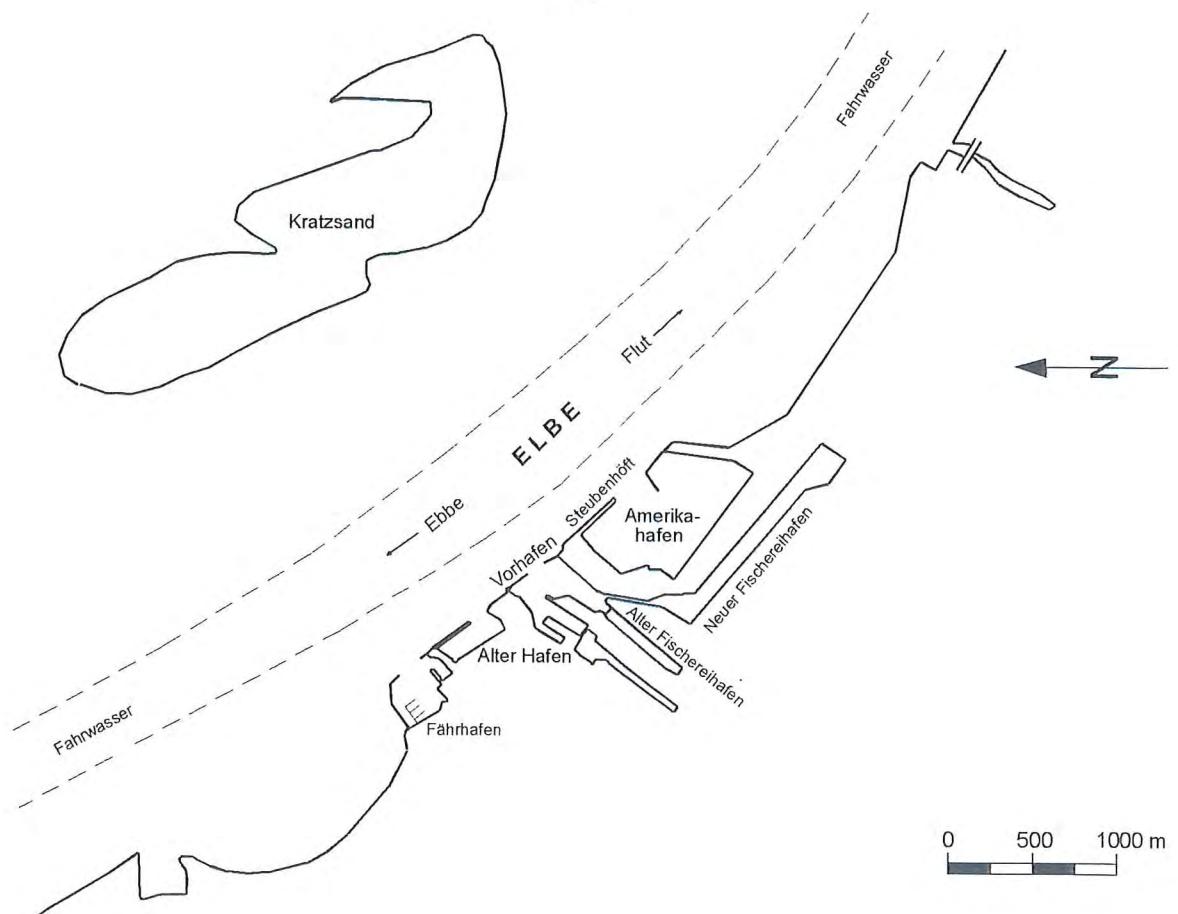


Abb. 44: Hafenanlagen von Cuxhaven und Morphologie im Vorhafen und Alten Hafen

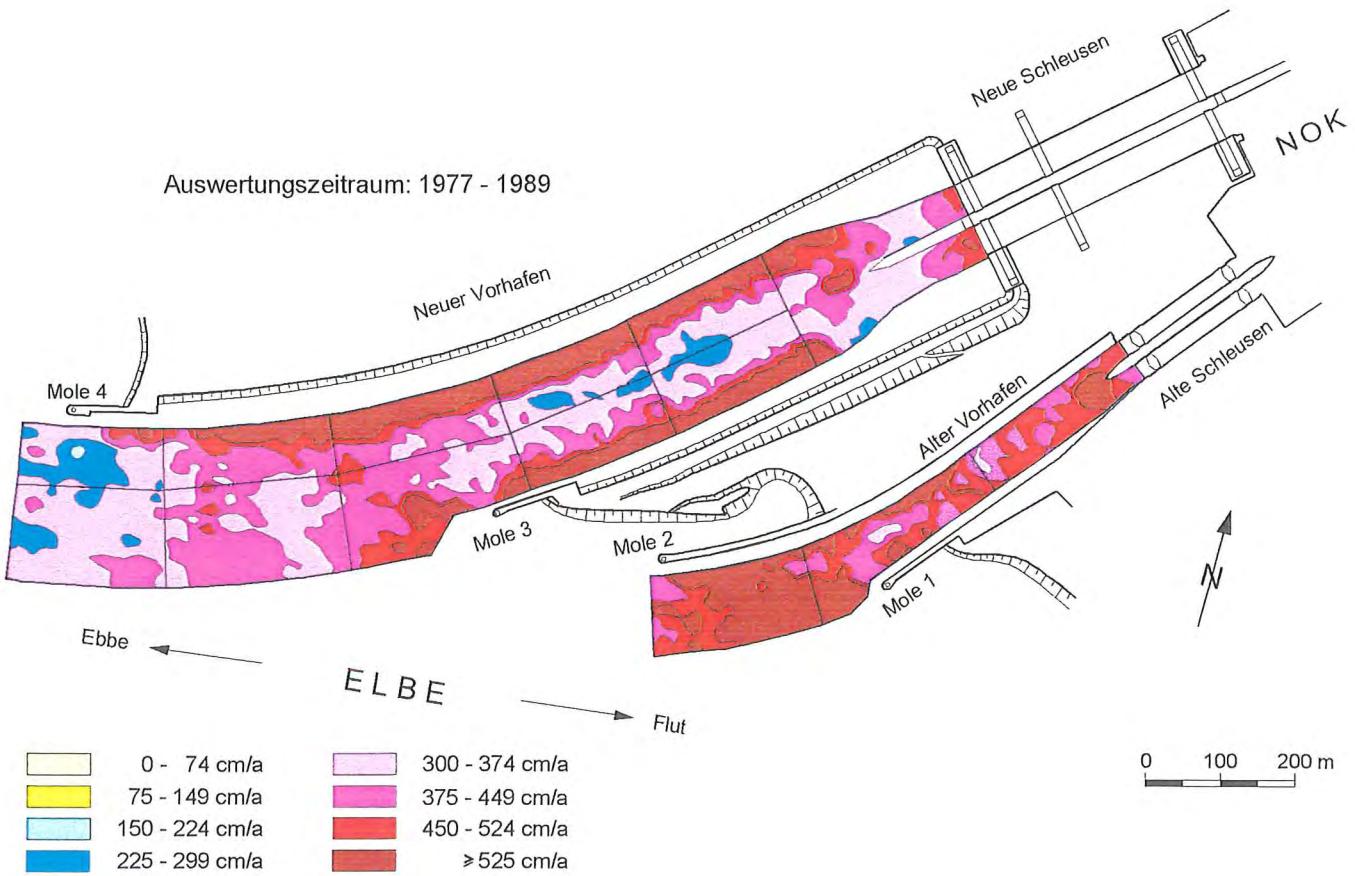
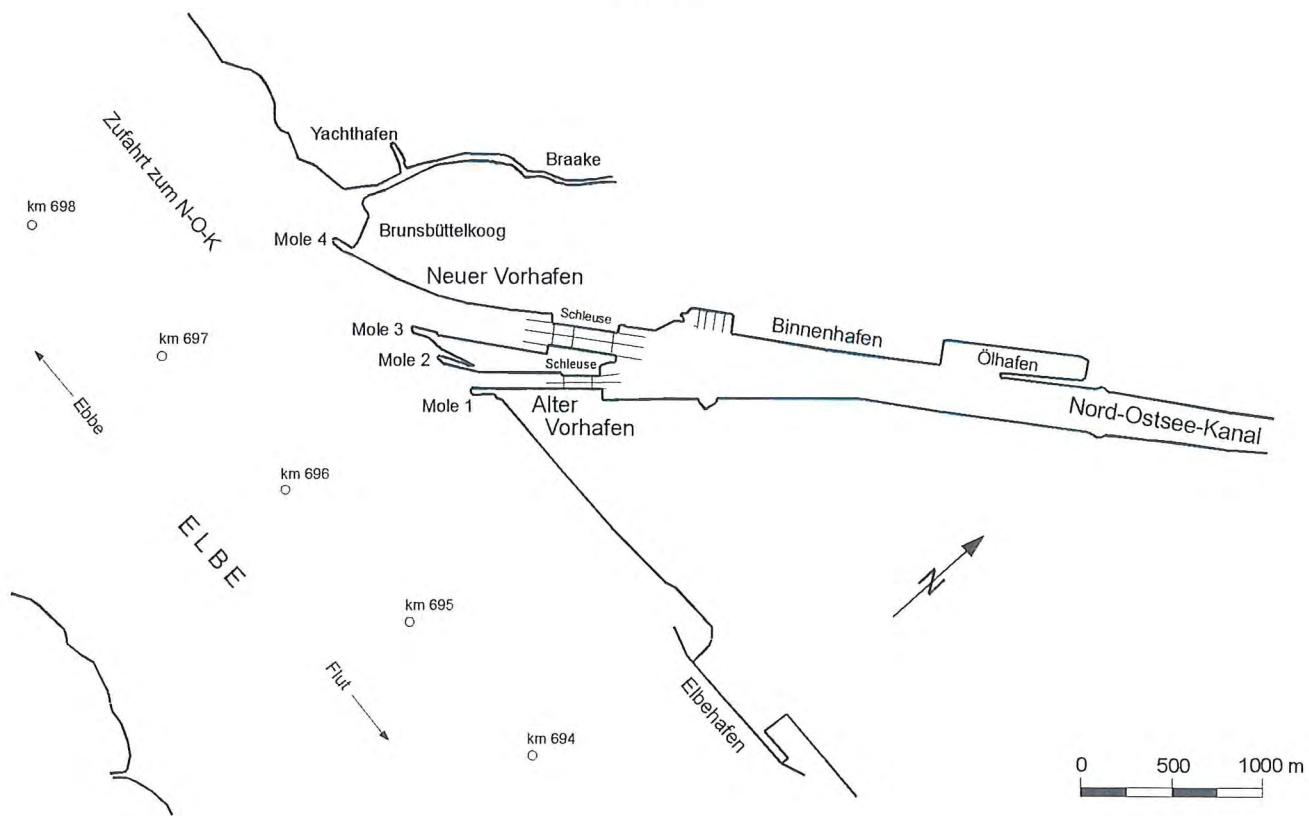


Abb 45: Hafenanlagen von Brunsbüttel und Morphologie im Neuen und Alten Vorhafen

Natur wurden die Strömungsverhältnisse während der zweiten Ebbephase und bei Flut bis etwa 1,5 Std. vor Thw erfaßt. Die im folgenden zu erläuternden Ergebnisse wurden dazu nach Tidephasen geordnet.

Mit Abb. 46 wird der Strömungs- und Dichteefekt veranschaulicht. In 1,5 m Wassertiefe wurden Einströmungsgeschwindigkeiten (bei Ebbe !) bis über 30 cm/s gemessen. Die Sohlströmungen sind entgegengesetzt gerichtet (rote und schwarze Linien in Abb. 46). In 6,0 m Wassertiefe wurde im Einfahrtsbereich die Ebbestromwalze und der Staupunkt an der Westmole (Mole 4) erfaßt (blaue Linien). Gleichzeitig ist am rechten Walzenrand (Mole 3) zu erkennen, wie das Wasser aus dem Vorhafen strömt. Insgesamt stimmen die in der Natur gemessenen Strömungen mit dem schematischen Bild in Abb. 28 für die Überlagerung von Tide-, Strom- und Dichteefekt überein.

Auch in der folgenden Tidephase waren die Strömungsbahnen noch in gleicher Form bei etwas geringeren Geschwindigkeiten vorhanden (Abb. 47). Es ist noch eine Ebbestromwalze im Einfahrtsbereich und die in den Vorhafen gerichtete Strömung an der Oberfläche sowie das Ausströmen in 9 m Wassertiefe auszumachen. Mit beginnender Flut setzt der Füllstrom im Bereich der Westmole ein (Abb. 48). Im weiteren Tideverlauf verlagert sich die Einströmung zur Ostmole an den Rand der Flutstromwalze, die in Abb. 49 in 9 m Wassertiefe teilweise erfaßt worden ist. Zur fortgeschrittenen Flutphase strömt das Wasser sohnah in den Vorhafen (Abb. 50). Die Strömungsrichtung ist umgekehrt wie bei vollem Ebbestrom.

Der Strömungszustand stabilisiert sich während der letzten Flutphase und bleibt bis nach Eintritt des Thw erhalten, um sich während der folgenden Ebbephase wieder umzukehren. Diese Tidephase konnte bei den Messungen im Oktober 1993 aus technischen Gründen leider nicht mit erfaßt werden. Die ausgeführten Messungen zeigen aber, daß auch die Flutströmungsverhältnisse in den Brunsbütteler Vorhafen der schematischen Darstellung in Abb. 28 entsprechen.

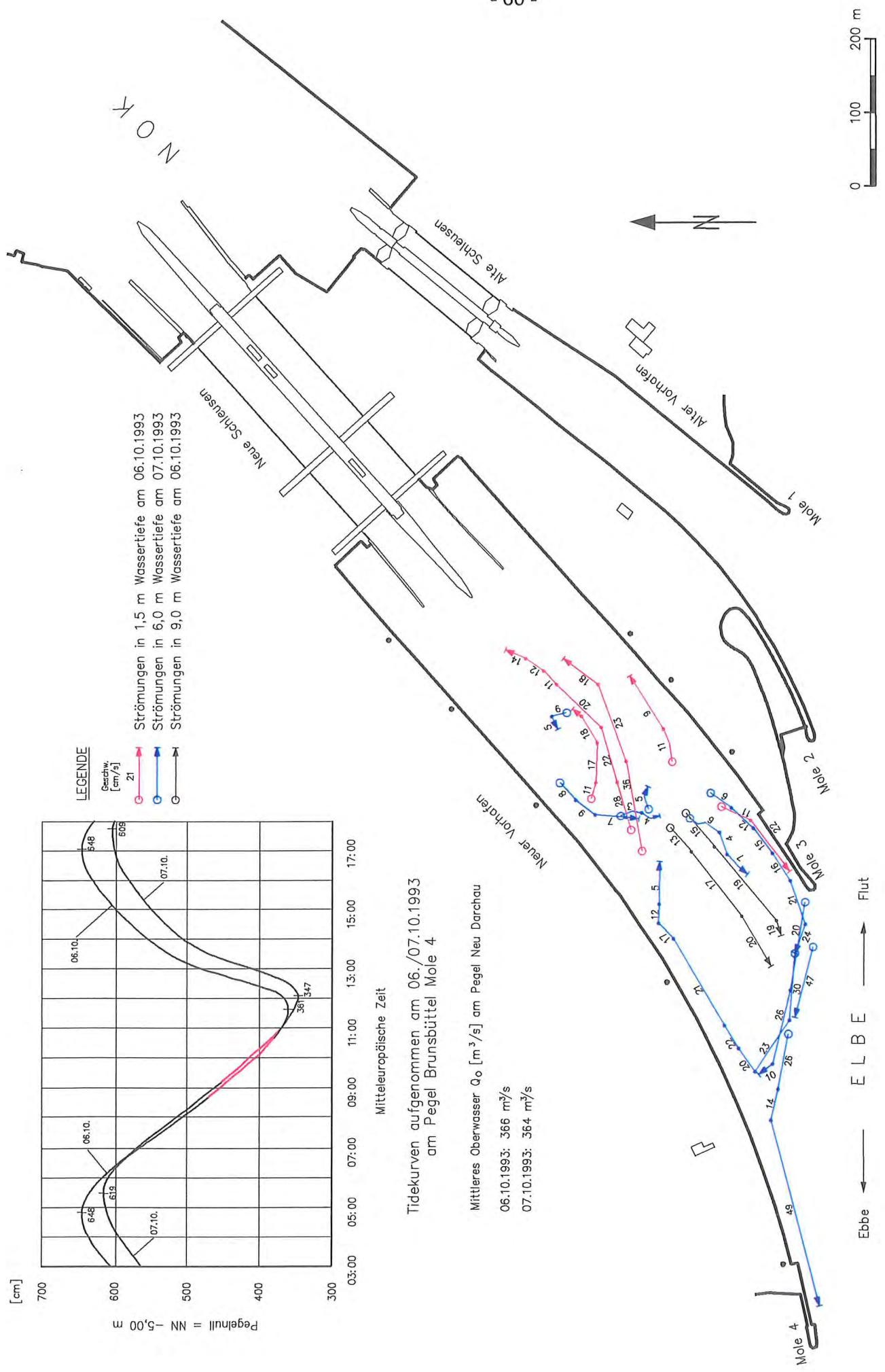


Abb. 46: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel während der Ebbephasen am 06. u. 07.10.1993

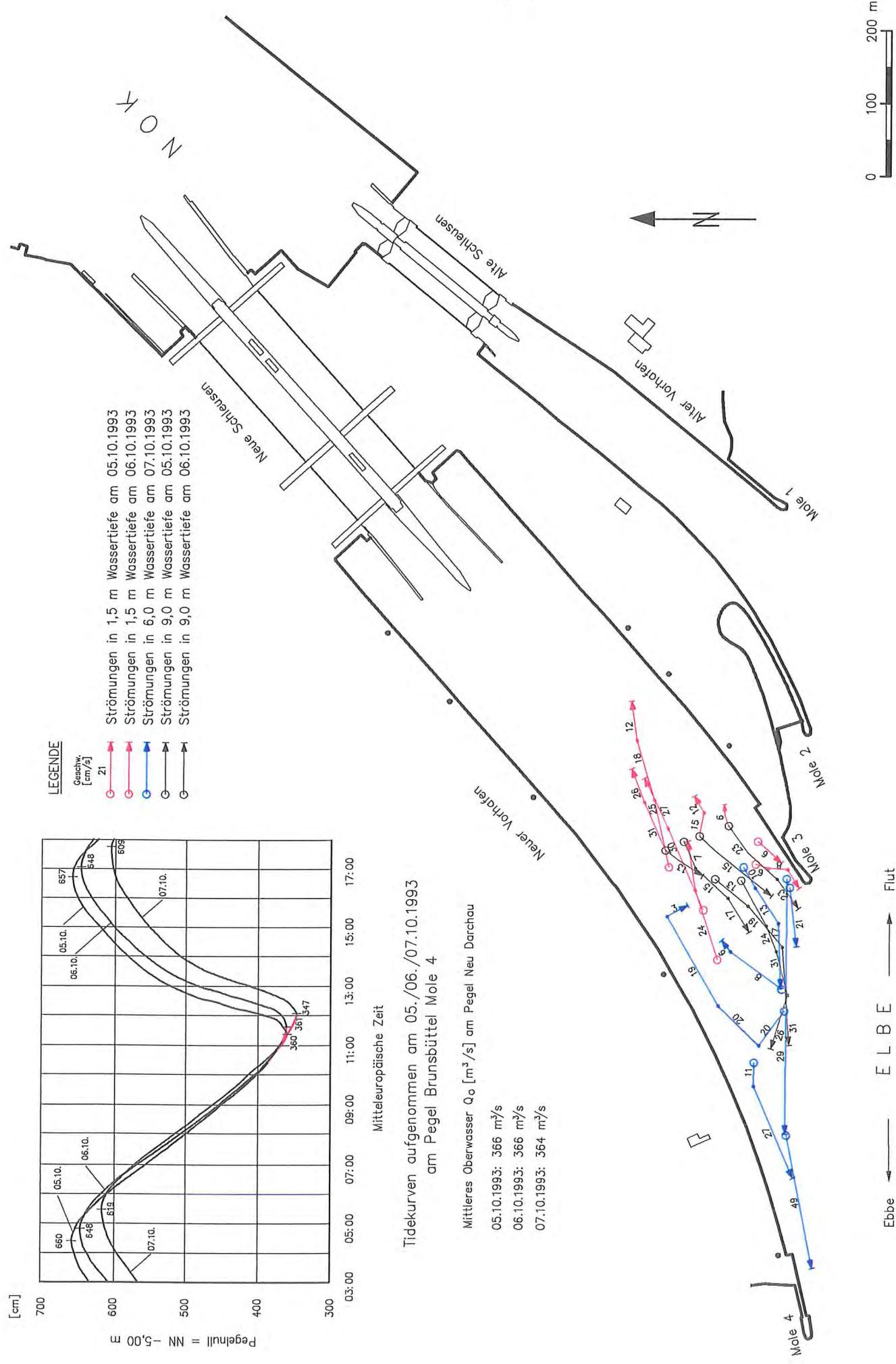
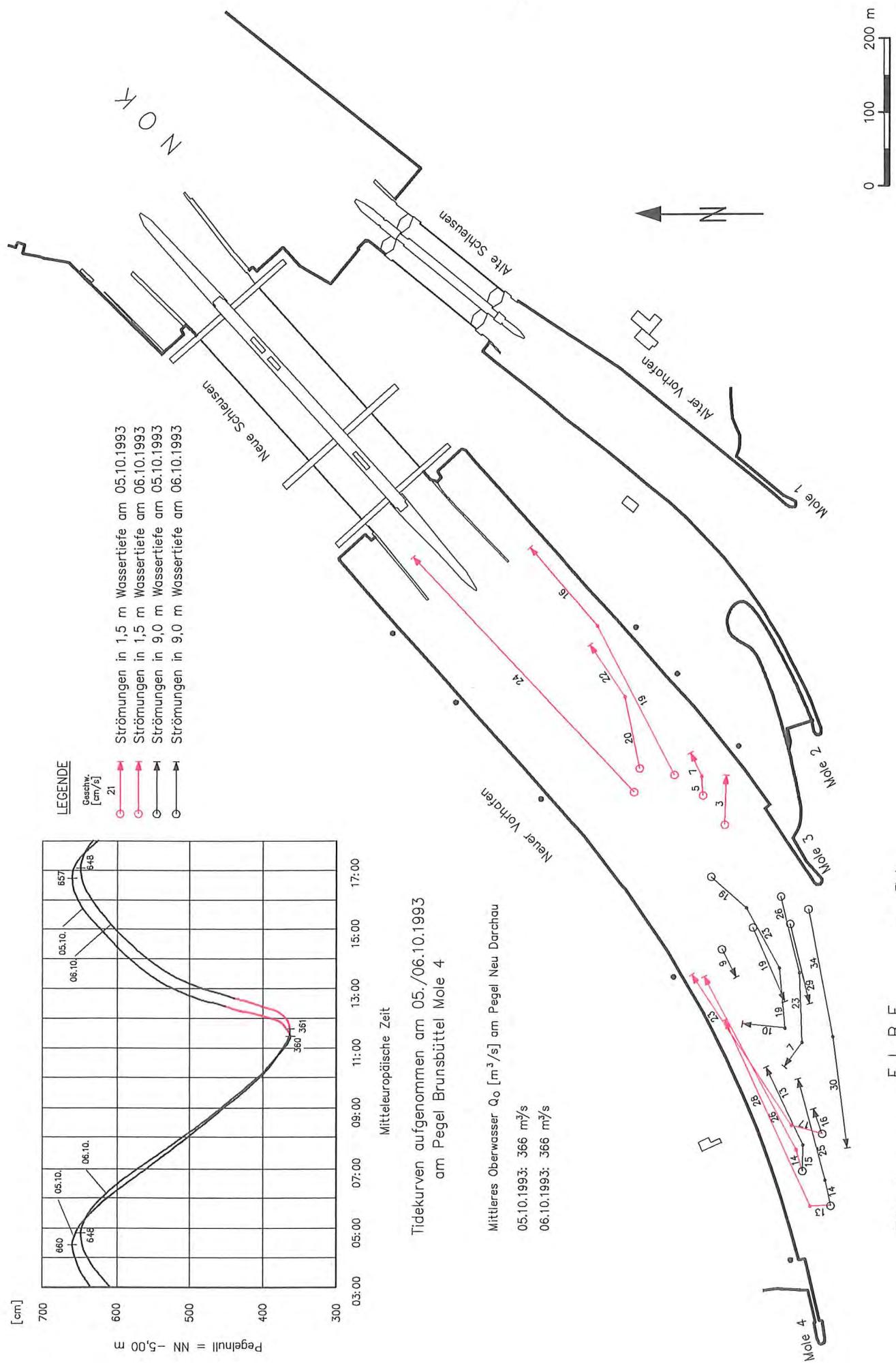
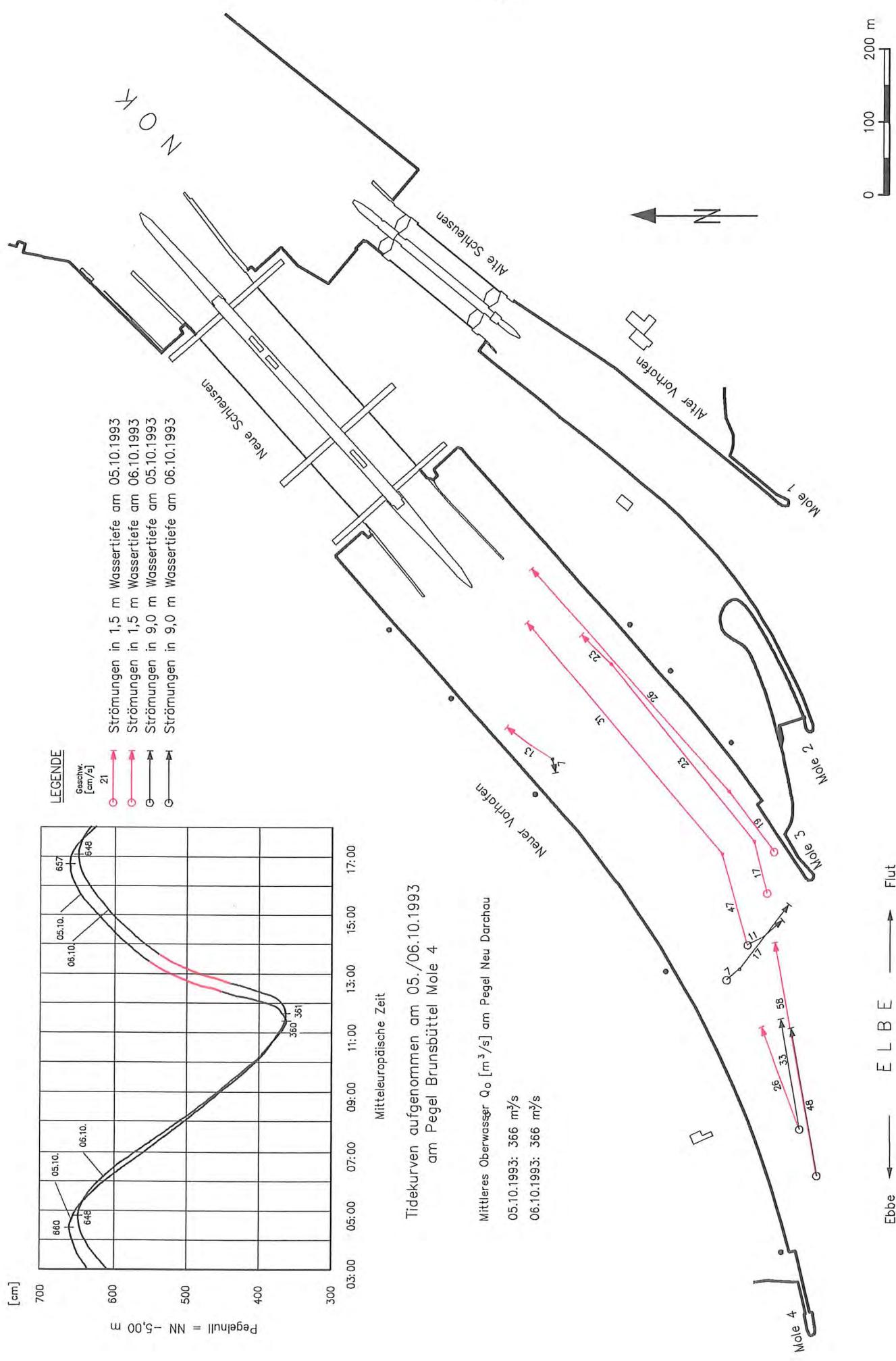
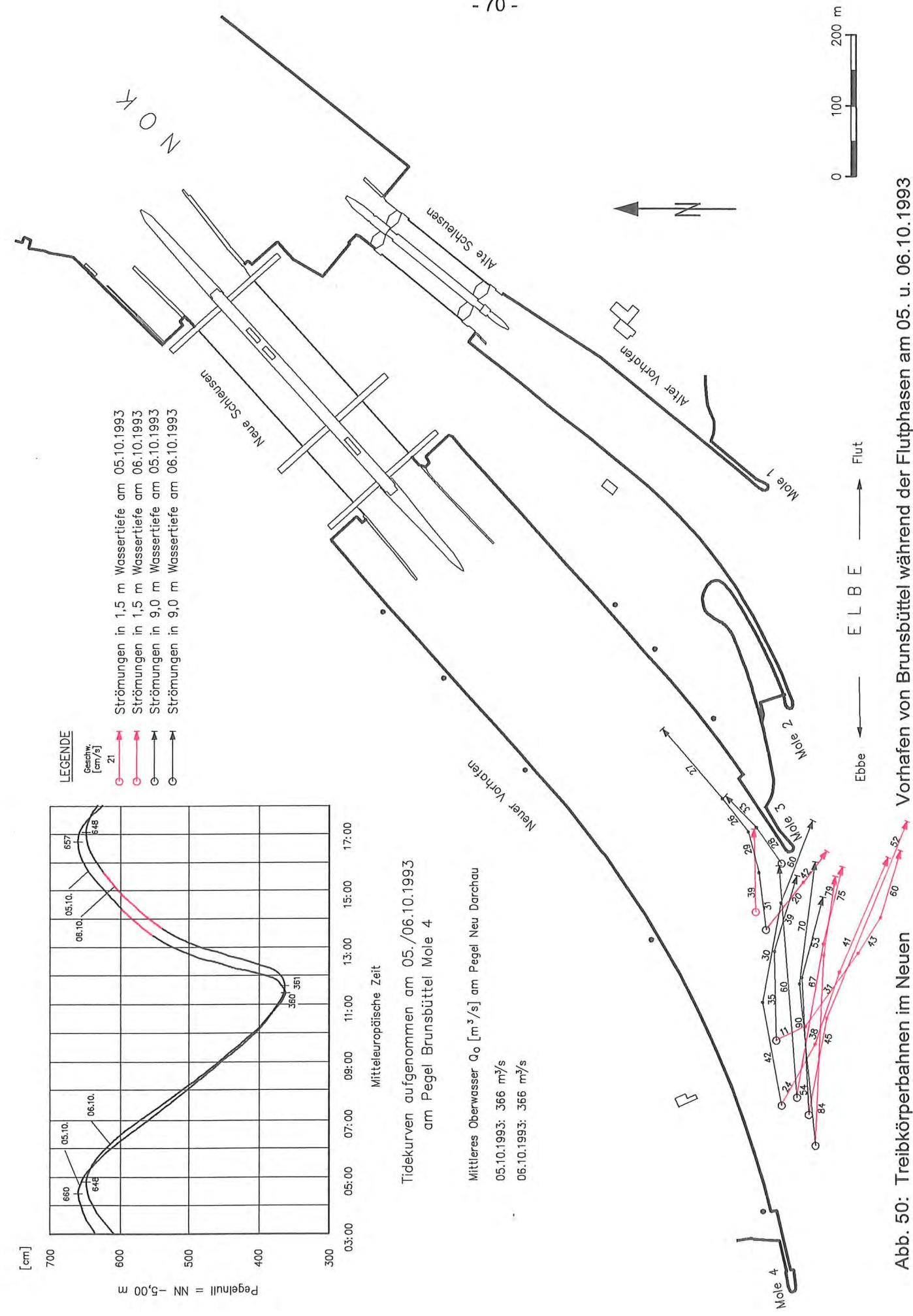


Abb. 47: Treibkörperbahnen im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel während der Ebbephasen am 05., 06. u. 07.10.1993







Am 04.10.1993 wurden in den Vorhafenbereichen von Brunsbüttel Bodenproben entnommen. Außerhalb der Streichlinien der Buhnenköpfe bestand das Sohlenmaterial überwiegend aus Feinsand (Abb. 51). Innerhalb der Vorhäfen 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 hier lediglich um einzelne Stichproben handelt. Wie in den anderen Untersuchungsgebieten zeigt sich auch hier der gute Zusammenhang zwischen Korngrößen und Glühverlusten.

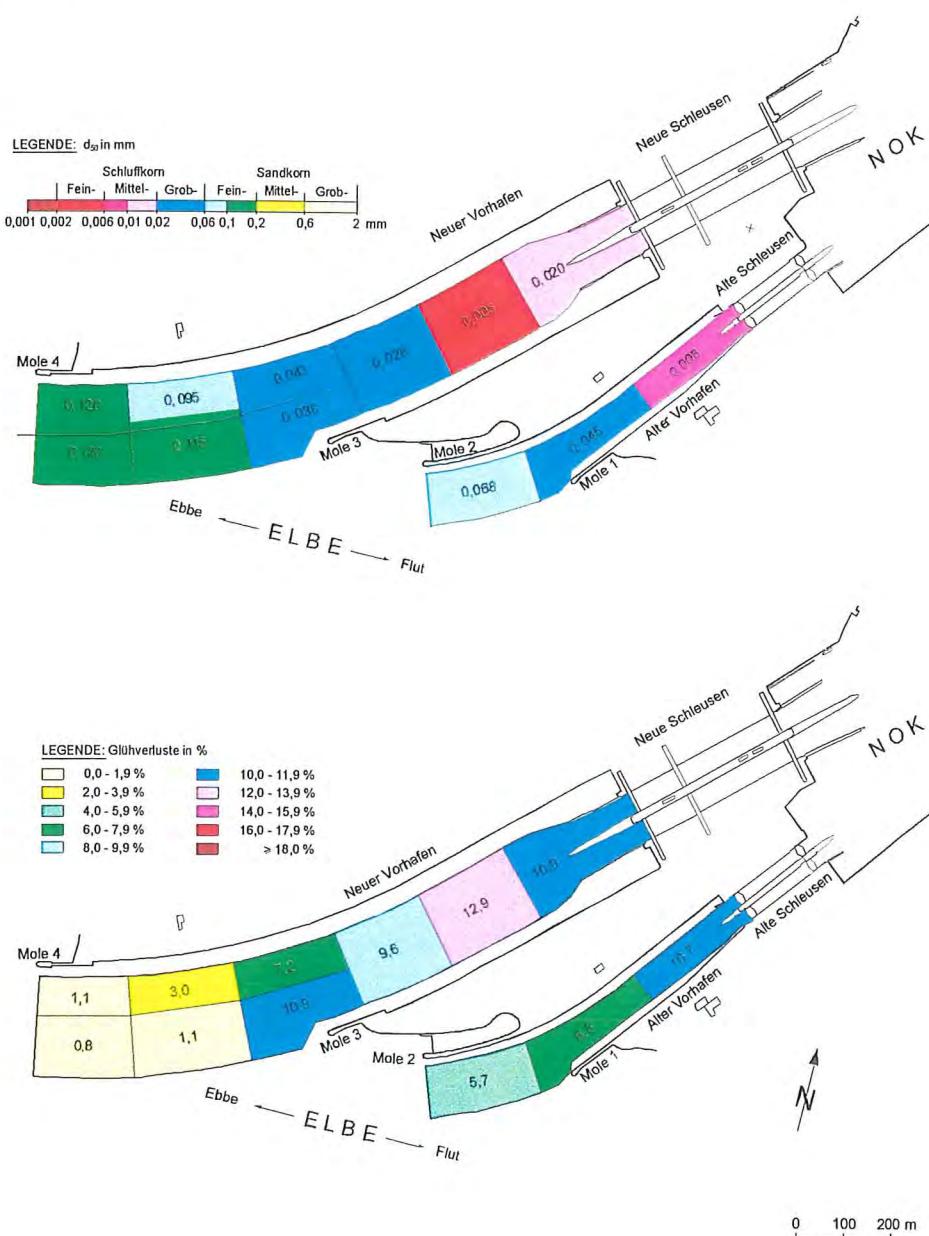


Abb. 51: Mittlere Korndurchmesser und Glühverluste im Neuen und Alten Vorhafen von Brunsbüttel der Probenentnahme vom 04.10.1993

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 Aufflandungen 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 Dichteefekt 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. 32). 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 zusätzlich 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 Wasseraus-

tauschvorgänge 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).

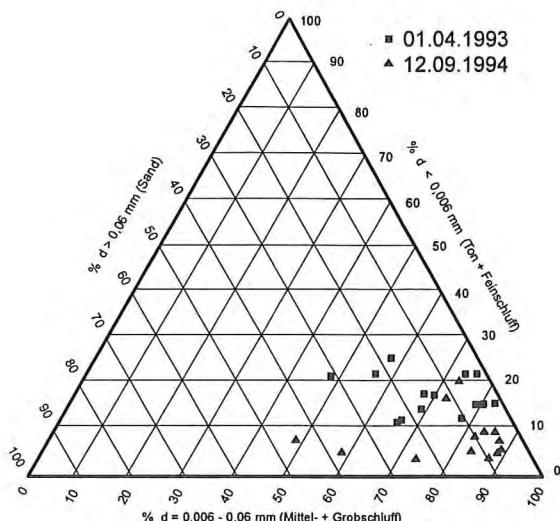
Die aus den verschiedenen Hafengebieten analysierten Bodenproben sind zum Vergleich in Körnungsdreiecke zur Bodenklassifizierung eingetragen worden (Abb. 52). Die Beprobungen für Emden und Wilhelmshaven haben ergeben, daß es sich dort nach der Definition in Abb. 22 überwiegend um mageren, im wesentlichen aus Mittel- bis Grobschluffanteilen bestehenden Schlick handelt (Abb. 52 oben).

Für den Vorhafen der Kaiserschleuse und in der Kammer selbst zeigt sich der Erfolg des Versuches mit Wasserinjektionen vom Juni 1990 (Abb. 52 Mitte links). Nach der Maßnahme waren die Körnungen in der Schleusenkammer und davor deutlich größer. 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.

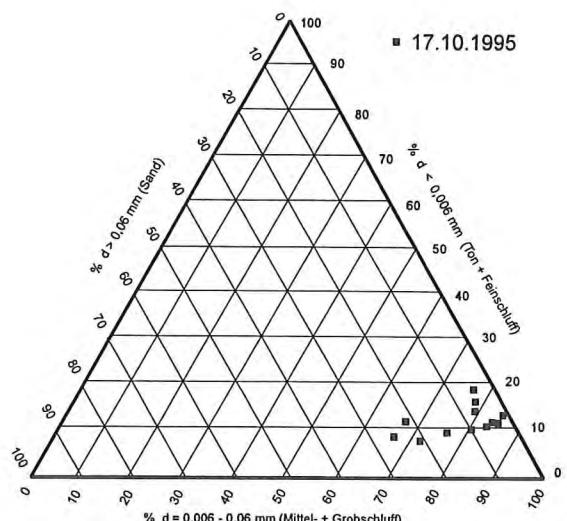
Alle Probenentnahmen von Bremerhaven lassen erkennen, daß die Körnungen innerhalb der Vorhäfen zur Kaiser- und Nordschleuse feiner werden. Die Unterschiede zwischen 1992 und 1994 sind von den Unterhaltungsarbeiten vor den Entnahmen abhängig. Die Proben von 1994 mit feineren Körnungen sind offenbar nach 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 befindet sich im Gegensatz zu Emden und Wilhelmshaven „fetterer“ Schlick mit relativ hohen Feinkornanteilen. Im Körnungsdreieck (Abb. 52 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.

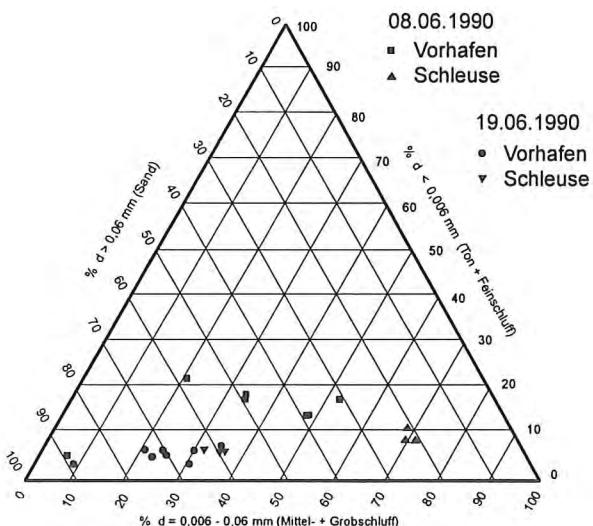
Der hier vorgenommene Vergleich der Kornverteilungen von Sedimenten der Hafensohle aus den verschiedenen Untersuchungsgebieten hat übereinstimmend gezeigt, daß die Körnungen den hydraulischen Randbedingungen entsprechend von außen nach innen feiner werden. Nach Unterhaltungsmaßnahmen sind die absoluten Werte größer. Beachtenswert sind örtliche Unterschiede in den Zusammensetzungen der



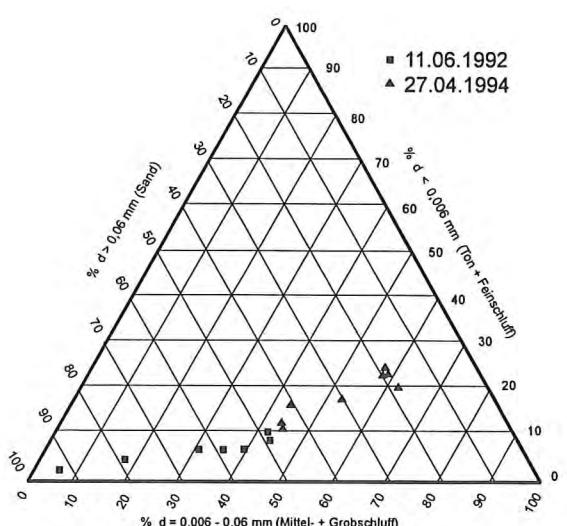
Emder Vor- und Außenhafen



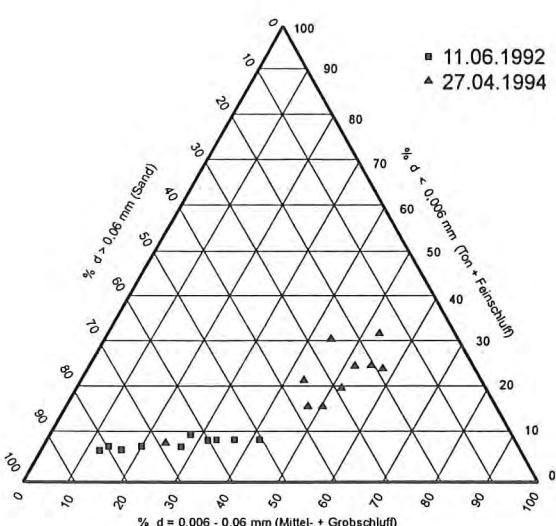
Neuer Vorhafen Wilhelmshaven



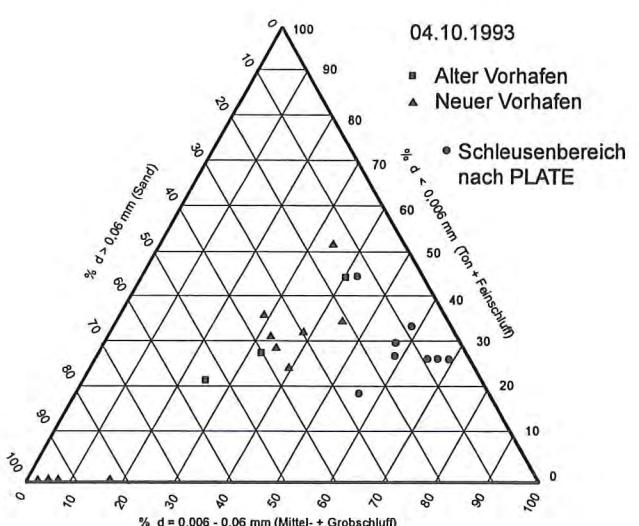
Bremerhaven Kaiserschleuse



Bremerhaven Kaiserschleuse



Bremerhaven Nordschleuse



Brunsbüttel

Abb. 52: Kornverteilung der Brackwasserhäfen im Bodendreieck

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 resultierenden Dichteströmungen zu einem vielfachen Wasser austausch 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 Tide häfen durch gezielte Peilplananalysen zu bestimmen. Einblicke in die Wechselwirkungen zwischen Sedimentation und der Zusammensetzung des sedimentierenden Materials mit 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 Treib körpermeßsystem 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 und TORN, 1995). Anlässlich des 11th International Harbour Congresses in Antwerpen wurde das im Real-Time DGPS arbeitende System der internationalen Fachwelt vorgestellt (NASNER, PIEPER, 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 Hafenkanals zum Neustädter Hafen einen besonderen Stellenwert. Durch die Baumaßnahme ist die Sedimentation und damit der Unterhaltungsaufwand ganz er heblich zurückgegangen. Andere stadtremische 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 Ju ni 1996 berichtet (NASNER, PIEPER, 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 festen 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.



(Prof. Dr.-Ing. H. Nasner)

Bremen, Dezember 1996

7. Schrifttum

- 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.
u. KAMPS, A.: Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbekken. Auswertung der Peilungen der Jahre 1977 bis 1984. Gewässerkundliche Studie Nr. 3, Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Gewässerkunde -S341-, 1985.
- CHRISTIANSEN, H.: The mainfactors causing harbour siltation and measures for ist reduction
Report of the second Workshop on Dredging and Surveying 1996, Leer, Germany.
- 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 SCHIFFAHRTSAMT WILHELMSHAVEN, 1995.
- GREISER, N.: Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihrer biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg
Hamburger Küstenforschung, Heft 45, 1988.
- GREISER, N.
GRESIKOWSKI, S.
u. HARMS, H.: Feststofftransport und Verschlickung im Emder 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 stadtbrémischen 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. Improvement of maintenance work in a tidal harbour.
- PIEPER, R.: Proceedings 10th International Harbour Congress
Antwerpen, 1992
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen
DIE KÜSTE, Heft 53, 1992
Boyens & Co. Heide.
- NASNER, H. Lagrangian Flow Velocities measured with DGPS
PIEPER, R. Drifter Buoys
u. TORN, P.: Proceedings 11th International Harbour Congress
Antwerpen, 1996a.
- NASNER, H. Influences of the Closure of one Entrance to the Neustadt Harbour in Bremen
PIEPER, R. Proceedings 11th International Harbour Congress
u. TORN, P.: 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
HANSA, 132. Jg. Nummer 11, 1995.
- PLATE, U.: Versuch einer Definition von Baggerschlick. Kurzvor-
trag anlässlich der KFKI-Projektgruppensitzung
„Sedimentation in Tidehäfen“, 1992
-unveröffentlicht-.
- RECHLIN, D.: Bestimmung der nautischen Tiefe in Hauptschlickge-
bieten
HANSA, 133. Jg. Nummer 7, 1996.
- SCHUCHARDT, B.
u. SCHIRMER, M.: Zur Sedimentationsdynamik in den tideoffenen Bre-
mer Seehäfen
DIE KÜSTE, Heft 52, 1991.
- STROTMANN, B.: Verteilung der Schwermetallgehalte im Hafenschlick
des Neustädter Hafens (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)
Diplomarbeit, Universität Bremen, Fachbereich Geo-
wissenschaften, 1995, -unveröffentlicht-.
- WURPTS, R.: Determination of the Nautical Depth in the Harbour of
Emden
Report of the second Workshop on Dredging and Sur-
veying 1996, Leer, Germany.

