

Sedimentation in Tidehäfen

Von HORST NASNER

Zusammenfassung

In dem vom BMFT geförderten KFKI-Projekt MTK 0470 „Sedimentation in Tidehäfen“ wurden die Verlandungen von offenen Häfen im deutschen Küstenbereich auf der Grundlage von Kontrollpeilungen untersucht. Als Ergänzung zu theoretischen Untersuchungen und hydraulischen Modellversuchen sollten hier Daten aus der Natur selbst in Verbindung mit den hydrologischen Randbedingungen aufbereitet und analysiert werden. Mit diesen Auswertungen liegen quantitative Ergebnisse für Tidehäfen oberhalb, in und unterhalb der Brackwasserzonen in deutschen Tideästuarien vor.

- Die mittleren jährlichen Auflandungen der oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Häfen Hamburg und Bremen liegen in der Größenordnung von Dezimetern.
- Für den Brackwasser- und Küstenbereich können zwei Gruppen voneinander unterschieden werden. In Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel liegen die Sedimentationen bei zwei bis drei Metern im Jahr. Für Wilhelmshaven, Büssum und die im Elbmündungsbereich gelegenen Hafenanlagen von Cuxhaven wurden ein bis eineinhalb Meter ermittelt.
- In den Brackwasserhäfen an der Ems, Weser und Elbe sind die Verlandungen im Sommerhalbjahr nachweisbar höher als in der kälteren Jahreszeit.
- Die Sedimentationsanalysen für einige Hafenbecken lassen den Schluß zu, daß der Unterhaltungsaufwand durch Vorratsbaggerungen mit Reservetiefen wesentlich eingeschränkt werden kann.
- Alternativ zu den herkömmlichen Baggermethoden bietet sich der Einsatz von Wasserinjektionsgeräten an, mit denen die Sedimente in den Tidestrom rückverlagert werden, so daß der Transport des Baggergutes in Schuten oder das Verbringen an Land entfällt.

Summary

In the KFKI-project MTK 0470 „Sedimentation in Tidal Harbours“, financed by the German Ministry for Research and Technology (BMFT), the deposition of sediments in open harbours in German coastal areas were analysed based on control soundings. The data obtained from natural conditions was analysed in addition to theoretical and hydraulic model investigations. As a result of this study there now exist quantitative results for brack water zones of German tidal estuaries.

- *The mean annual sedimentation in harbours upstream of sea water influence, namely Hamburg and Bremen, lie in the range of 20 to 30 cm.*
- *For brackish water and coastal regions it can be differentiated between two groups of harbours: in Emden, Bremerhaven and Brunsbüttel the sedimentation rates can be more than two to three metres per year. For Wilhelmshaven, Büssum and Cuxhaven in the Elbe-estuary the annual sedimentation rates were found to lie in the range of 1 to 1,5 metres.*
- *The sediment deposition in harbours situated within in the brackish zones of the Ems, Weser and Elbe estuaries were noted to be higher in summer than in the colder seasons.*
- *The sedimentation analysis for some harbour basins has led to the conclusion that maintenance-work can be largely reduced by the dredging of overdepths, i. e. by reserve dredging.*
- *Water injection can be used, as an alternative to the current dredging methods, by which the mud can be deposited back into the stream thus saving the transportation of the dredged material in barges or the deposition on land.*

I n h a l t

1. Einleitung und Aufgabenstellung	128
2. Das Untersuchungsgebiet	129
3. Vorgehensweise	130
4. Die Hafenanlagen in Bremen	131
4.1 Tidegeschehen und Oberwasser	131
4.2 Das obere Hafengebiet von Bremen	135
4.3 Handels- und Werfthafen	138
4.4 Neustädter Hafen	139
4.5 Das untere Hafengebiet von Bremen	141
4.6 Zusammenfassende und vergleichende Betrachtungen	144
5. Häfen im Brackwasser- und Küstengebiet	148
5.1 Randbedingungen	148
5.2 Emden	151
5.3 Wilhelmshaven	153
5.4 Bremerhaven	157
5.5 Brunsbüttel	160
5.6 Cuxhaven	163
5.7 Büsum	163
5.8 Zusammenfassung und Vergleich	165
6. Schlußbemerkungen	167
7. Schriftenverzeichnis	168

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Sedimentation in offenen Tidehäfen erfordert oft einen erheblichen Unterhaltungsaufwand, um die Sollwassertiefen für die Schifffahrt zu gewährleisten. Es gibt verschiedene Ursachen für die ständig wiederkehrenden Verlandungen.

Hafenbecken mit von einem Tidefluß abzweigenden Einfahrten werden durch zwei Strömungseffekte beeinflusst, die sich einander überlagern und vor allem im Einfahrtsbereich Auflandungen verursachen. Es handelt sich dabei um den Tide- und Strömungseffekt. Durch das an einer seitlichen Erweiterung (Hafenbecken) vorbeifließende Wasser wird eine Drehströmung (Walze) angefacht, in deren Zentrum es aufgrund abnehmender Strömungsintensität zu erhöhten Ablagerungen kommt. Dieser Effekt tritt bei Hafenbecken an Binnenflüssen auf. In einem Tidehafen bilden sich im Einfahrtsbereich während der Flut- und Ebephase Walzen mit entgegengesetztem Drehsinn aus. Diesen Strömungseffekten überlagert sich der Tideeffekt. Während der Flut füllt sich das Hafenbecken mit einem Wasservolumen, das dem Produkt aus Hafenfläche (A) und Tidehub (Thb) entspricht. Die dabei in den Hafen transportierten Feststoffe setzen sich ab und werden während der Ebbe nicht wieder ausgeräumt.

Im Brackwasserbereich eines Ästuars treten durch unterschiedliche Salzgehalte im Tidefluß und der Hafeneinfahrt zusätzlich Dichteströmungen auf. Dieser Dichteeffekt verursacht besonders starke Verlandungen im Hafenbecken.

Um die vielfältigen Vorgänge des Verlandungsgeschehens in Tidehäfen besser kennen und verstehen zu lernen, sind grundsätzlich drei Vorgehensweisen denkbar, die sich bei der Problemlösung ergänzen sollten. Die Lösungsansätze können theoretische Methoden, Versuche mit hydraulischen Modellen oder Untersuchungen in der Natur selbst sein.

Da die komplexen physikalischen und biologischen Vorgänge bei der Bewegung von kohäsiven und nicht kohäsiven Sedimenten mathematisch noch nicht genau genug beschrieben werden können, sind mit theoretischen Ansätzen und numerischen Modellen bisher mehr

globale und qualitative Aussagen möglich. Wegen der Maßstabeffekte und Problemen bei der naturähnlichen Nachbildung der Sedimente haben hydraulische Modellversuche eher einen vergleichenden Charakter. Bei Naturuntersuchungen ergibt sich wiederum das Problem, daß die Vorgänge nicht wie im Modell beliebig wiederholbar sind und der meßtechnische Aufwand aus Kostengründen möglichst gering gehalten werden muß.

Mit dieser Grundlagenstudie sollte deshalb zunächst das bereits vorhandene Datenmaterial aus der Natur aufbereitet und analysiert werden, um festzustellen, wie groß die Verlandungen der Tidehäfen sind und wie sie sich innerhalb der Hafengebiete verteilen.

In allen deutschen Tidehäfen werden von den zuständigen Verwaltungen in unregelmäßigen Zeitabständen Kontrollpeilungen zur Überwachung der Sollwassertiefen durchgeführt. Diese langjährig vorliegenden Peilpläne waren Grundlage und Voraussetzung für die hier durchzuführenden Sedimentationsuntersuchungen.

Um Unterschiede oder Gemeinsamkeiten zu erkennen, waren die Daten möglichst vieler Tidehäfen im deutschen Küstengebiet auszuwerten. Neben der Geometrie der Hafengebiete und ihrer Lage zum Strom sollte auch der Einfluß des Dichteeffektes auf die Sedimentation durch den Vergleich von Häfen im Brackwasserbereich und außerhalb davon erfaßt werden. Von zusätzlichem Interesse war es, ob anhand der vorhandenen Peildaten auch mögliche Einflüsse auf die Sedimentationsvorgänge durch natürliche Randbedingungen, wie das Tidegeschehen, Oberwasser, Salzgehalte oder die Temperatur, nachzuweisen sind.

Das aus den Häfen gebaggerte Sohlenmaterial ist häufig mehr oder weniger mit Schadstoffen belastet und kann aus ökologischen Gründen nicht immer problemlos, z. B. auf Spülfeldern, untergebracht werden. Genauere Kenntnisse über die Sedimentationsmengen und die Frage, ob der Unterhaltungsaufwand in den Tidehäfen optimiert werden kann, sind deshalb von Bedeutung. Die vielfachen Zusammenhänge zwischen Strömung, Sedimenttransport und Ablagerung müssen bekannt sein, wenn die Auflandung der Häfen in geeigneter Form beeinflußt werden soll. Entsprechende Maßnahmen können bauliche Veränderungen, bestimmte Baggermethoden (z. B. Baggerung von Übertiefen) oder andere Unterhaltungsmaßnahmen (z. B. Schlickegge, Wasserinjektionen) sein. Mit dem Ziel, Ansätze zu finden, um die erforderlichen Baggerungen zu optimieren und zu reduzieren, sind Bagger-Untersuchungsprogramme und Forschungsprojekte eingeleitet worden (CHRISTIANSEN, HAAR u. RADTKE, 1985; HAFENBAUAMT BREMEN, 1987; SHEALL, 1991). Auch mit dieser Grundlagenstudie sollte dazu ein Beitrag geleistet werden.

2. Das Untersuchungsgebiet

In den Mündungsbereichen der Ems, Jade, Weser und Elbe wurden Hafenanlagen von Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven und Brunsbüttel untersucht (Abb. 1). Außerdem wurde der an der schleswig-holsteinischen Küste gelegene Hafen Büsum mit in die Auswertungen einbezogen. Erkenntnisse über einen oberhalb der Brackwasserzone gelegenen Seehafen sollten die Hafenanlagen von Bremen erbringen. Die ebenfalls außerhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Hafengebiete in Hamburg wurden an anderer Stelle untersucht (CHRISTIANSEN u. KAMPS, 1985; CHRISTIANSEN u. HAAR, 1991).

Die den Hafengebieten zugeordneten Meßstellen der Tidewasserstände, des Oberwassers, der Wassertemperatur und Leitfähigkeiten sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Die Brackwasserhäfen Emden, Bremerhaven, Cuxhaven und Brunsbüttel sind deutlichen, oberwasserabhängigen Salzgehaltsschwankungen unterworfen. Der Binnenabfluß in den Jadebusen ist dagegen unbedeutend. In Wilhelmshaven wie auch in Büsum können allein

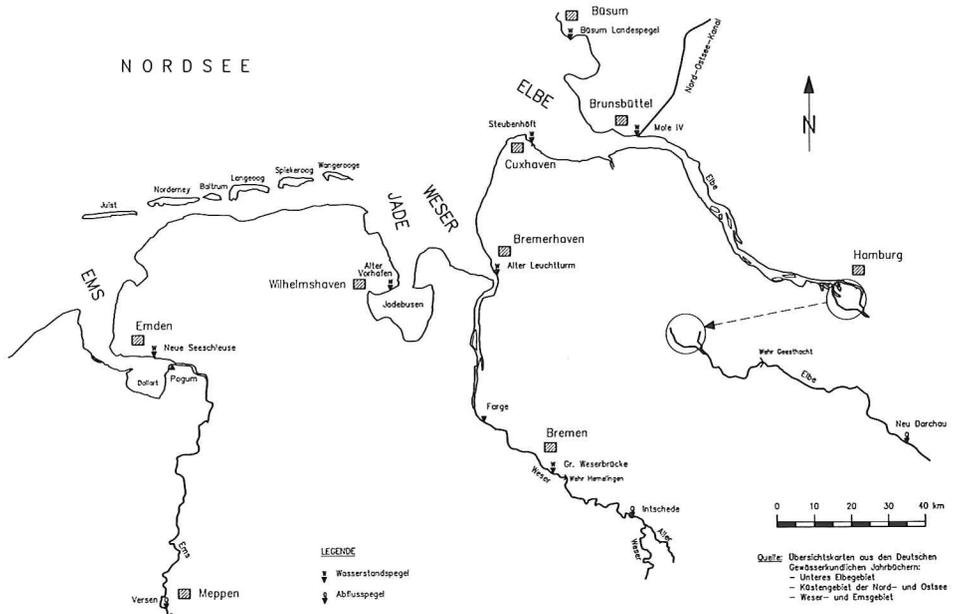


Abb. 1. Lageplan

die höheren Salzgehalte gegenüber Hamburg oder Bremen von besonderem Einfluß auf die Sedimentationsvorgänge sein. Dichteströmungen spielen jedoch dort, wenn überhaupt, nur eine untergeordnete Rolle.

Tafel 1. Hafengebiete und zugeordnete Meßstellen (vgl. Abb. 1)

Gewässer	Hafengebiet	Oberwasser Q_o	Meßstelle für Tidewasserstände	Temperatur und Leitfähigkeit
Ems	Emden	Versen	Neue Seeschleuse	Pogum
Jade	Wilhelmshaven	---	Alter Vorhafen	---
Weser	Bremerhaven	Intschede	Alter Leuchtturm	Bremerhaven
Weser	Bremen	Intschede	Gr. Weserbrücke	Farge
Elbe	Cuxhaven	Neu Darchau	Steubenhöft	Cuxhaven
Elbe	Brunsbüttel	Neu Darchau	Mole IV	Mole IV
Nordsee	Büsum	---	Büsum	---

3. Vorgehensweise

Ziel der Auswertungen war es, für die einzelnen Hafenbecken die mittlere Sedimentation und ihre Verteilung zu bestimmen. Dazu wurden bei den zuständigen Ämtern gesichtete Peilpläne und Baggerdaten für möglichst langfristige Zeiten zur Verfügung gestellt. Aufgrund der veränderlichen Strömungen wurden die Hafentflächen in einzelne Bereiche für die Sedimentationsanalyse aufgeteilt. Damit sollten die Verlandungsschwerpunkte in den Walzenbereichen erfaßt werden. Mangels Naturmessungen wurden die Strömungen dabei nach der Geometrie der Hafenbecken und ihrer Lage zum Tidefluß abgeschätzt.

Die Auswertungen sind rechnergestützt durchgeführt worden. Zunächst wurden die Daten von jeder Kontrollpeilung gespeichert. Zur Bestimmung der mittleren Sohllage eines Hafengebietes wurden die im Peilplan eingetragenen einzelnen Tiefen addiert und durch die Anzahl der Peilpunkte dividiert. Die mittlere Sohlentiefe konnte sowohl in jedem Peilprofil als auch für die vorher festgelegten Teilflächen ermittelt werden. Die veränderte Sohllage ergab sich dann jeweils aus dem Vergleich mit der vorherigen Peilung.

Bei den Auswertungen der Peilpläne wurden nur nautisch genutzte Wassertiefen erfaßt; Böschungsbereiche und Flachwasserstellen blieben somit unberücksichtigt. Für die Vergleichbarkeit war es erforderlich, daß immer die gleichen Profile vollständig aufgenommen worden waren. Lückenhaft gepeilte Flächen wurden nicht mit ausgewertet.

Aus den Planunterlagen über die Baggereinsatzzeiten ging hervor, wann und wie lange ein Gerät in einem Hafenbecken im Einsatz war. Wo im Hafen genau gebaggert wurde, war in den Baggerbüchern nicht vermerkt. Deshalb wurde die Sohlenentwicklung über den gesamten Auswertungszeitraum für jeden Bereich zusammen mit den Baggerzeiten graphisch aufgetragen. Damit konnte aufgrund der Sohlenveränderung nachvollzogen werden, in welchen Hafengebieten der Bagger zum Einsatz gekommen war. Aus den Tiefendifferenzen in den durch Baggerungen ungestörten Hafengebieten zwischen zwei Peilungen ergab sich die Auflandung im Peilintervall, die linear auf Tageswerte umgerechnet wurde. Die Summe aller Sedimentationsereignisse wurde gemittelt und daraus die jährliche Sedimentationsrate gebildet.

Um Abhängigkeiten zwischen Sedimentation und zugehörigen gewässerkundlichen Einflußgrößen zu finden, wurden zu jedem Peilintervall die zugehörigen mittleren Tidehöhe, Tidewasserstände und das Oberwasser berechnet. Für die an der Weser und Elbe gelegenen Häfen konnte noch zusätzlich die Wassertemperatur und Leitfähigkeit (Salzgehalt) bestimmt werden. Mit Korrelationsrechnungen sollten mathematische Zusammenhänge zwischen Sedimentation und den verschiedenen natürlichen Einflußgrößen gefunden werden.

4. Die Hafenanlagen in Bremen

4.1 Tidegeschehen und Oberwasser

Die stadtbremischen Häfen liegen nur wenige Kilometer unterhalb der Tidegrenze (Abb. 2). Das Tidegeschehen wird noch deutlich durch das Oberwasser (Q_o) der Weser beeinflußt. Um entsprechende Zusammenhänge aufzuzeigen, wurden zwischen Tidehub und Oberwasser Korrelationsrechnungen mit Monatsmittelwerten von 1967 bis 1989 durchgeführt. Obwohl in diese Zeit der Außenweserausbau auf SKN - 12 m (1968/71) und der Unterweserausbau auf SKN - 9 m (1973/79) fallen (WSD NORDWEST, 1985), zeigen sich recht gute Zusammenhänge. Der Tidehub verringert sich deutlich bei höheren Abflüssen (Abb. 3).

Die Austauschwassermenge (Tideeffekt) in einem Hafenbecken ist von der Grundrißform und Wassertiefe unabhängig. Der Einfluß des Wasseraustausches auf die Sedimentation in Tidehäfen als theoretische Betrachtung oder auf der Grundlage von hydraulischen Modellversuchen wird z. B. von FÜHRBÖTER/WITTE (1988) und BRINKMANN (1990) beschrieben. Die Zusammenhänge in der Weser bei Bremen werden im folgenden näher erläutert:

Mit zunehmendem Oberwasser verringert sich zwar die Austauschwassermenge (Tidehub) in Bremen, gleichzeitig wird aber auch die Flutdauer D_f und damit die Flutstromdauer D_f gegenüber der Ebbe- und Ebbestromdauer verkürzt. Um dies nachzuweisen, wurden aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern die Wasserstandslisten für den Pegel Gr. Weserbrücke

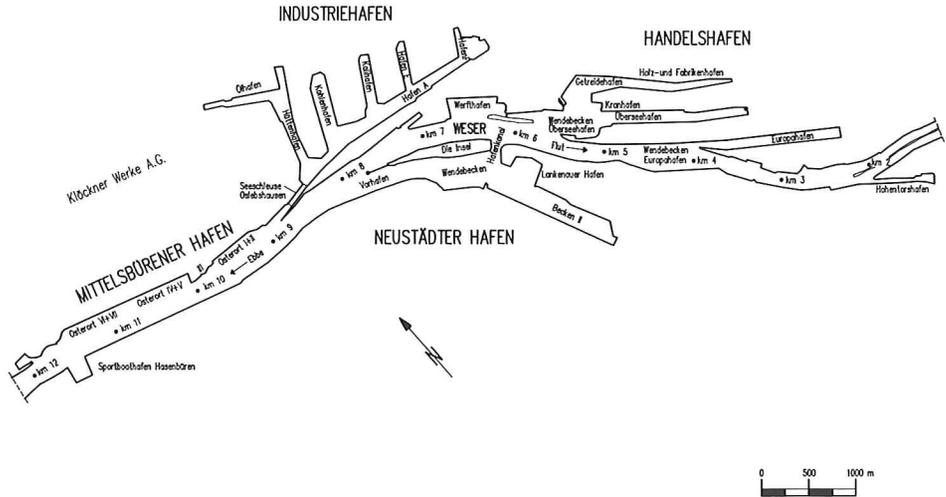


Abb. 2. Hafenanlagen in Bremen

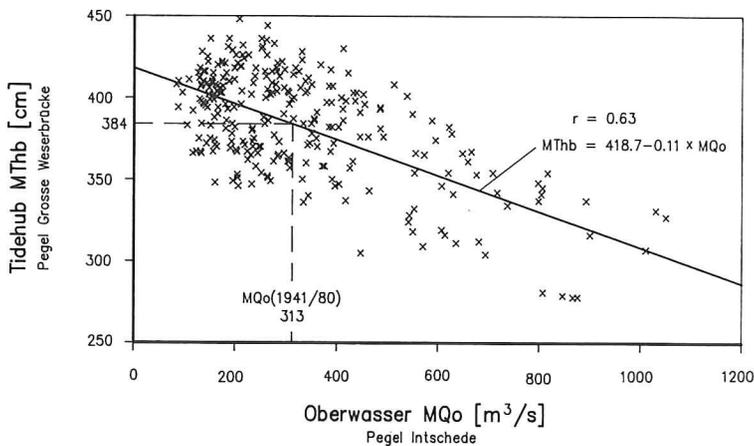


Abb. 3. Tidehub in Bremen und Oberwasser Monatsmittel von 1967 bis 1989

von 1985 bis 1988 ausgewertet. Die Berechnungsergebnisse zeigen sehr gute Zusammenhänge zwischen Flut-, Ebbdauer und Oberwasser (Abb. 4 und 5).

Mit Abb. 4 wird deutlich gemacht, daß bei höherem Oberwasser (kleinerem Tidehub und geringerem Wasseraustausch) wegen der kürzeren Flutphase Sedimente über kürzere Zeitdauer in die Hafenbecken gelangen. Die Ebbdauer wird dementsprechend vergrößert (Abb. 5). Bei einem Oberwasserzuwachs von $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ verlängert sich die Ebbdauer und verkürzt sich die Flutdauer jeweils um 30 Minuten. Aus diesem Ergebnis darf jedoch nicht der Schluß gezogen werden, daß die Hafenbecken bei hohen Abflüssen wegen des geringeren Wasseraustausches weniger stark sedimentieren.

In der Zeit von 1984 bis 1987 wurden vom WASSERWIRTSCHAFTSAMT BREMEN Schwebstoffmessungen in der Unterweser im Bereich der Hafenanlagen von Bremen zwischen Weser-km 4 und 12 (Abb. 2) ausgeführt. Die Analyse der Tageswerte hat zu dem in Abb. 6 dargestellten Ergebnis geführt.

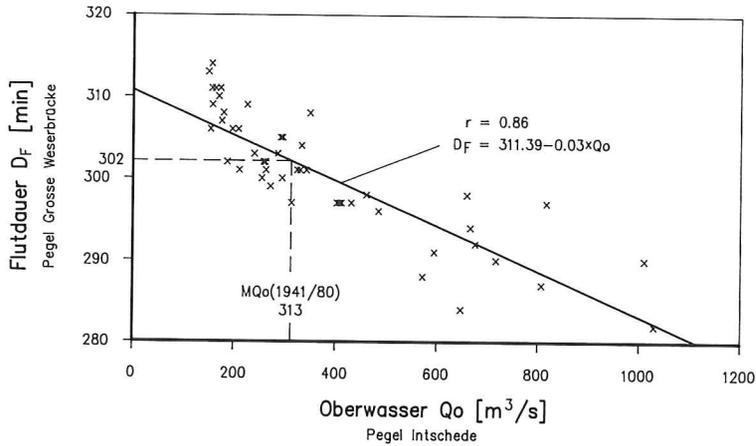


Abb. 4. Flutdauer in Bremen und Oberwasser Monatsmittel von 1985 bis 1988

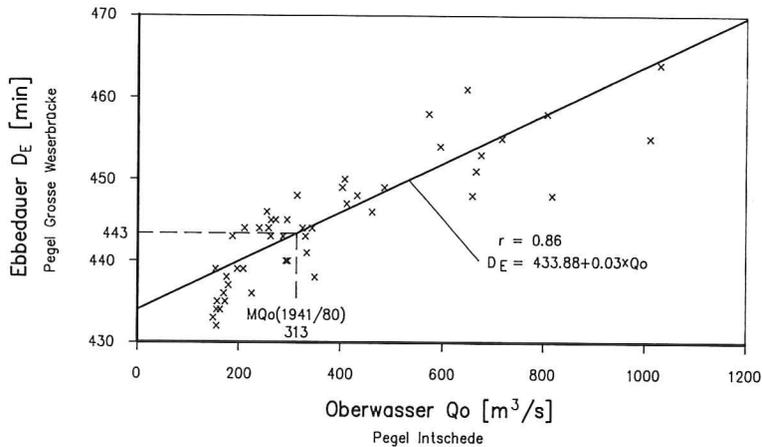


Abb. 5. Ebbdauer in Bremen und Oberwasser Monatsmittel von 1985 bis 1988

Die Auftragung verdeutlicht das größere Feststoffangebot bei hohen Abflüssen am Pegel Intschede. Mit anderen Worten: bei geringerem Wasseraustausch und kürzerer Flutdauer ist der Sedimenteintrag in die Hafenecken größer als im umgekehrten Fall. Die Sedimentation ist aber sowohl von den Tide- und Strömungsbedingungen als auch vom vorhandenen Feststoffangebot abhängig.

Die vorstehend beschriebenen, gegenläufigen Tendenzen sind sicher ein Grund dafür, daß es in dieser Studie nicht gelungen ist, mathematische Zusammenhänge zwischen Sedimentation und hydrologischen Parametern zu ermitteln. Außerdem konnten extreme Ereignisse wie Sturmfluten oder Oberwasserspitzen wegen der großen Zeiträume zwischen den Peilungen nicht genau genug erfaßt werden. Der deutliche Abfall des Schwebstoffgehaltes in der Unterweser zwischen km 6 und km 8, besonders bei hohem Oberwasser, ist auf den Einfluß des Neustädter Hafens zurückzuführen. Hierauf wird später noch näher eingegangen.

Für die Beurteilung der Sedimentationsverhältnisse in den stadtbremischen Häfen ist auch die Entwicklung der Tide- und Oberwasserverhältnisse im Untersuchungszeitraum von

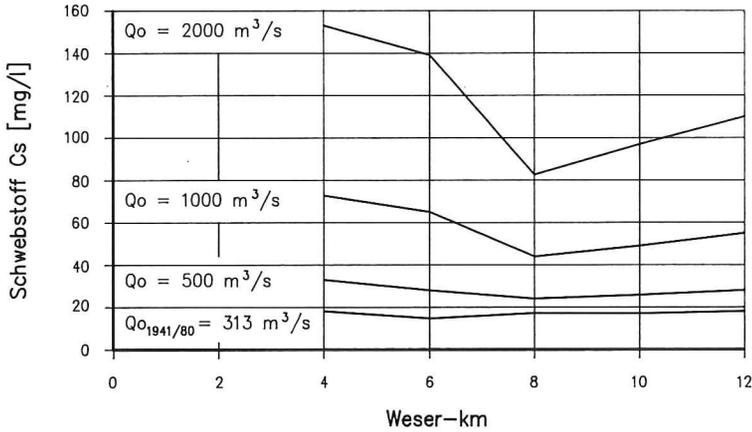


Abb. 6. Schwebstoffgehalt und Oberwasser im Bereich der stadtbremischen Häfen (nach Messungen des WASSERWIRTSCHAFTSAMTES BREMEN von 1984 bis 1987)

Interesse. Dazu wurden die entsprechenden Jahresganglinien von 1967 bis 1989 ermittelt (Abb. 7).

Der gleichsinnige Verlauf von Tidehoch- (Thw), Tideniedrig- (Tnw) und Oberwasser (Q_o) wird mit Abb. 7 deutlich. Die Ganglinie des Tidehubes (Thb) ist entsprechend den in Abb. 3 aufgezeigten Zusammenhängen gegenläufig zum Oberwasser. Es zeigt sich aber auch, wie der Unterweserausbau auf - 9 m SKN ab Mitte der 70er Jahre den Tidehub und das Tideniedrigwasser in Bremen beeinflusst hat. 1976 wurde am Pegel Gr. Weserbrücke erstmals ein Tidehub von rd. 4,0 m erreicht; gleichzeitig fiel das Tnw auf unter 350 cm NN - 5,01 m. Besondere Verhältnisse herrschten auch im Jahre 1981, als es bei extremem Oberwasser zu einem Weserdurchbruch kam und rd. 1,5 Mio. m^3 Bodenmassen in die Tideweser eingetrieben wurden (WSD NORDWEST, 1985). In den achtziger Jahren haben sich in der Tendenz wieder etwas kleinere Tidehübe und höhere Tideniedrigwasserstände eingestellt (Abb. 7). Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich die mit dem Ausbau geschaffenen Reservetiefen

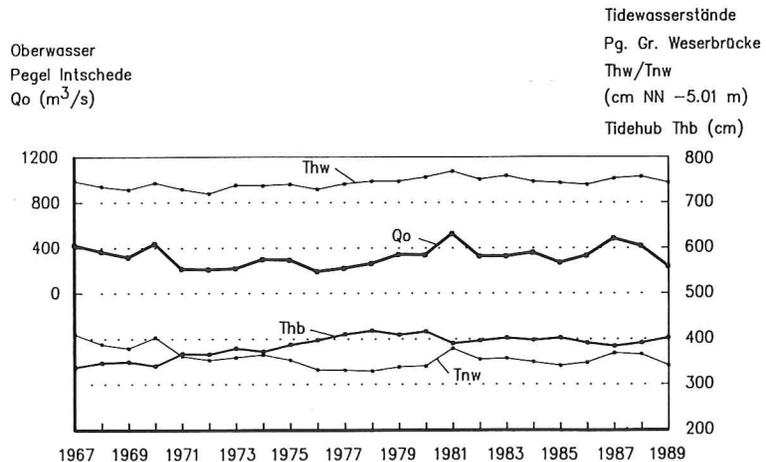


Abb. 7. Tideverhältnisse in Bremen und Oberwasser Jahresmittelwerte von 1967 bis 1989

wieder angeglichen haben und von 1982 bis 1989 umfangreiche Buhnenbauarbeiten in der Unter- und Außenweser vorgenommen wurden. Im folgenden werden die Sedimentationsverhältnisse in den einzelnen Hafenbecken von Bremen erläutert und dargestellt.

4.2 Das obere Hafengebiet von Bremen

Die Unterweser ist bis zum Europahafen als Seeschiffahrtsstraße ausgebaut (Abb. 2). Oberhalb davon liegt die Sollsohle auf -4 m SKN. Die Verteilung der Sedimentation im Bereich des Europa- und Hohentorshafen in Bremen ist in Abb. 8 zusammengestellt worden. Zur besseren Veranschaulichung und zum Vergleich sind die Sedimentationsraten für alle stadtbremischen Hafengebiete einheitlich farbig in Dezimeterabschnitten dargestellt worden.

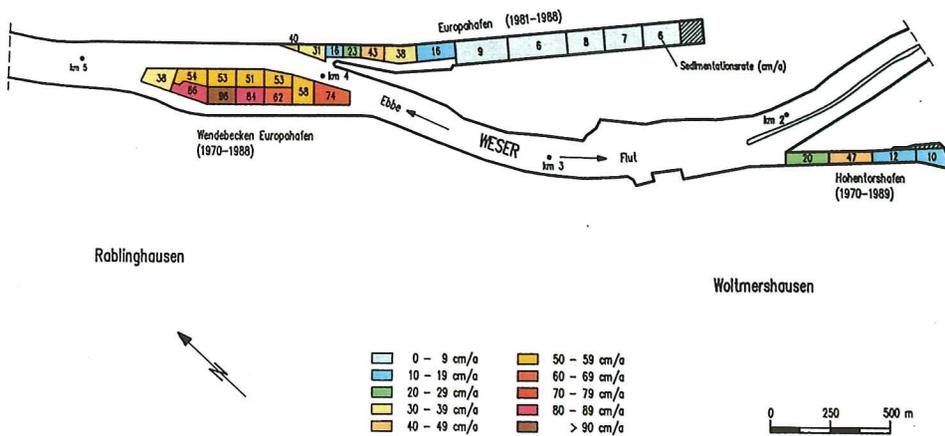


Abb. 8. Mittlere Sedimentationsraten im Bereich des Europa- und Hohentorshafens in Bremen

Der von Binnenschiffen genutzte Hohentorshafen liegt im Schutze eines Leitdammes. Die bei der Peilplananalyse betrachtete Gesamthafenfläche von rd. 27900 m^2 verlandet im Mittel mit $q_s = 22 \text{ cm/a}$. Die Sedimentation nimmt innerhalb des Hafens ab. Die höheren Werte im äußeren Hafen sind auf den Strömungseffekt zurückzuführen.

Der Europahafen ist das älteste Hafenbecken Bremens am seeschiffstiefen Wasser. Aufgrund des günstigen Verhältnisses von Einfahrtsbreite zu Hafentlänge war hier keine besonders hohe Auflandung zu erwarten. Ein Vergleich mit dem Hohentorshafen veranschaulicht, wie die Verlandung mit der Beckenlänge abnimmt (Abb. 8). Im inneren Hafenteil sind nur geringe Sedimentationsraten von weniger als 10 cm/a zu verzeichnen. Trotz der günstigen Geometrie des Hafenbeckens kommt es im äußeren Bereich zu höheren Auflandungen, weil die Walzenströmungen auch bei sehr engen Einfahrten nicht verhindert werden können. Im vorderen Hafenbereich sedimentieren auf rd. einem Drittel der Gesamtfläche von rd. 19 ha etwa zwei Drittel der Feststoffmenge. Die mittlere Sedimentationsrate für den Europahafen ist mit $q_s = 13 \text{ cm/a}$ sehr gering.

Die äußerst günstigen Verhältnisse im Europahafen selbst werden durch das im Strom gelegene Wendebcken zunichte gemacht. Das Wendebcken Europahafen ist einer der Verlandungsschwerpunkte im Bereich der stadtbremischen Häfen. Die mittlere Sedimentationsrate im Auswertungszeitraum 1970/1988 ist mit 66 cm/a ausgesprochen hoch. Die

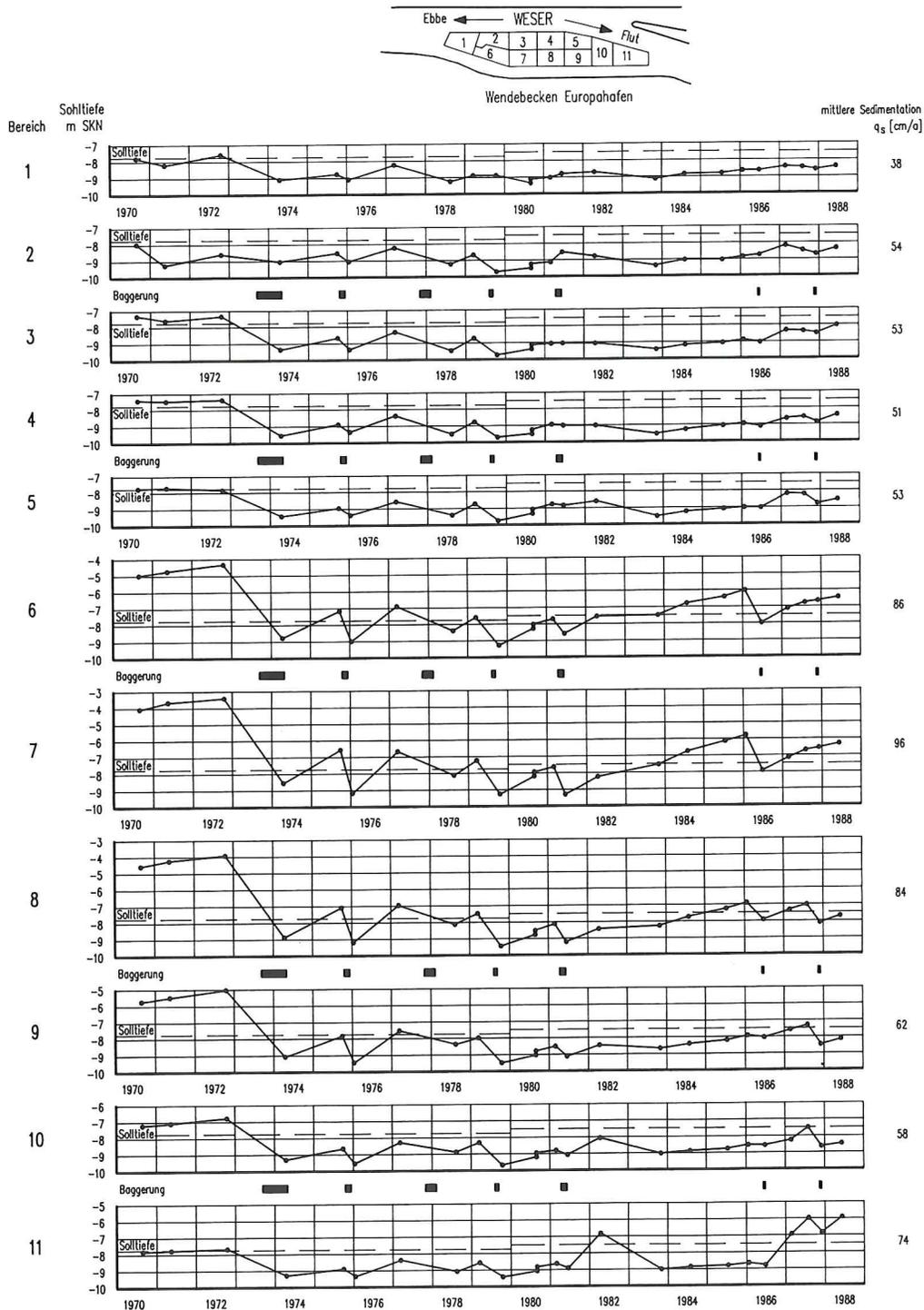


Abb. 9. Sohlenentwicklung im Wendebucken Europahafen

stärksten Sedimentationen finden im linken Uferbereich statt (Abb. 8). Verdeutlicht wird das mit den in Abb. 9 aufgetragenen Sohlenentwicklungen von 1970 bis 1988. Im Strom (Bereich 1 bis 5) ist die Sohle relativ stabil. Starke Schwankungen sind jedoch in den Randbereichen, vor allem auch nach der Vertiefung im Jahre 1974, zu erkennen. Bis 1972 wurden dort noch Mindertiefen von mehreren Metern hingenommen. Im übrigen sind im gesamten Wendebekken während des 9-m-Weserausbaues relativ hohe Auflandungen eingetreten. Der Randbereich verlandet mit durchschnittlich 82 cm/a überproportional. Querschnittsvergrößerungen durch Sohlvertiefungen im Randbereich müssen zwangsläufig starke Verlandungen zur Folge haben, wie die folgende einfache Überlegung zeigt.

Wenn man die Flutwassermenge T_f (m^3) durch den mittleren Flutstromquerschnitt A_{fm} (m^2) und die Flutstromdauer D_f (s) teilt, erhält man einen Wert c , der als „Gleichgewichtsgeschwindigkeit“ bezeichnet werden kann (HENSEN, 1971).

$$c = \frac{T_f}{A_{fm} \cdot D_f} \text{ (cm/s)}$$

Sinngemäß gilt das gleiche für die Ebbephase. Diese Geschwindigkeit ist erforderlich, um das natürliche Gleichgewicht im Tidefluß zu erhalten. Wenn man den Querschnitt im Wendebekken Europahafen vergrößert, werden dadurch T_f und D_f nicht beeinflusst. Der Quotient

$$\frac{T_f}{A_{fm} \cdot D_f}$$

und ebenso der c -Wert werden jedoch kleiner. Das bedeutet, daß sich der Durchflußquerschnitt A_{fm} durch Sedimentation solange verringern muß, bis der ursprüngliche Gleichgewichtszustand wieder hergestellt ist. Je tiefer im Randbereich gebaggert wird, um so stärker sind die anschließenden Wiederversandungen. Der Zusammenhang zwischen Sedimentation und Sohltiefe im linken Randbereich des Wendebekkens wird mit Abb. 10 verdeutlicht.

Oberhalb des Wendebekkens finden wegen des Sohlenüberganges auf -4 m SKN vor allem bei hohen Abflüssen rückschreitende Erosionen statt. Dies war bei dem bereits angesprochenen Hochwasserereignis vom März 1981 mit einem Extremwert von $HQ_o = 2.370$ m^3/s der Fall. Die gewässerkundlichen Daten weisen ähnlich hohe Abflüsse in den letzten Peilintervallen auf, welche die nach Abb. 9 ermittelten hohen Auflandungen im oberen

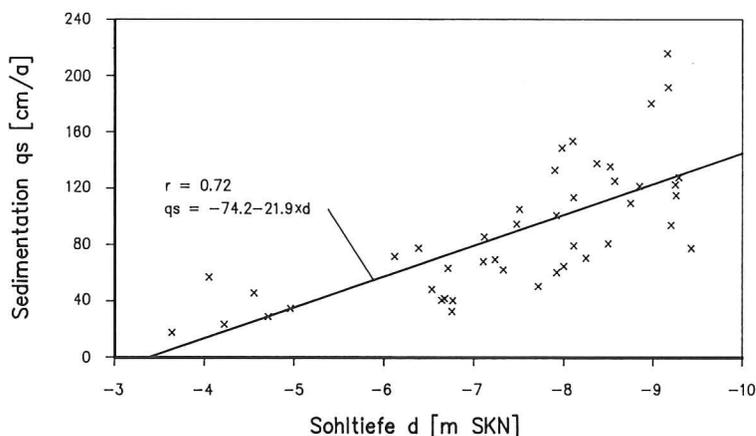


Abb. 10. Sedimentation und Sohlage im Randbereich des Wendebekkens Europahafen (vgl. Abb. 9, Abschnitt 6 bis 9)

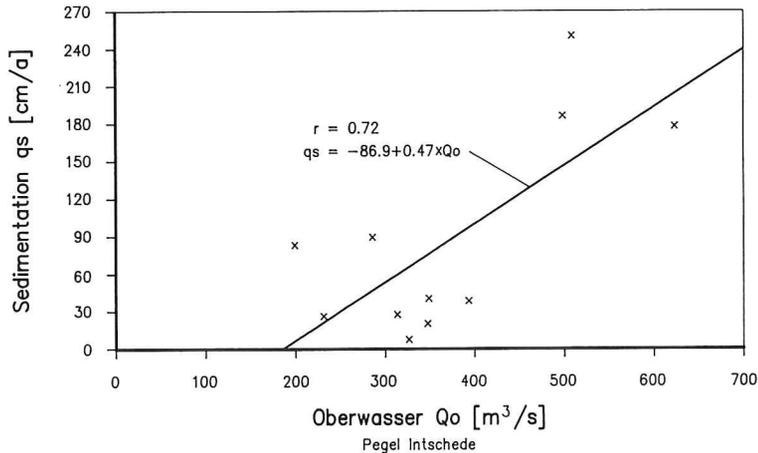


Abb. 11. Oberwasser und Sedimentation im oberen Bereich des Wendbeckens Europahafen (vgl. Abb. 9, Abschnitt 11)

Bereich des Wendbeckens verursachten. Wie deutlich dort die Abhängigkeiten zwischen der Sedimentation q_s und dem Oberwasser Q_o sind, zeigt Abb. 11, wonach sich die Sedimentation bei hohen Abflüssen vermehrt.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß den sehr günstigen Verhältnissen im Europahafen selbst übermäßige Versandungen im Wendbecken gegenüberstehen. Verbesserungen wären möglich, wenn der an das Wendbecken grenzende Sohlübergang gegen Erosionen geschützt oder weiter stromauf verlegt würde und im Randbereich nicht die großen Tiefen vorgehalten werden müßten.

4.3 Handels- und Werfthafen

Der Handelshafen ist der größte offene Tidehafen Bremens am rechten Weserufer. Die Sedimentationsanalysen sind auch für den unterhalb gelegenen Werfthafen in Abb. 12 dargestellt.

Die auswertbaren Zeiträume für den Handelshafen waren durch die im HAFENAMT BREMEN vorliegenden Peilpläne vorgegeben. Die Auflandungen der Hafensohle nehmen von außen nach innen deutlich ab. In den Becken des Übersee-, Holz- und Fabrikenhafens betragen sie weniger als 10 cm/a. 42 % der gesamten Feststoffe sedimentieren vorn im Wendbecken des Handelshafens auf 20 % der Fläche. Dagegen sind es lediglich 17 % der Sedimente, die sich in den hinteren Hafenbecken (Übersee-, Holz- und Fabrikenhafen) auf 52 % der Fläche abgelagern (Abb. 12 und Tafel 2).

Die Geometrie des Werfthafens mit der verhältnismäßig großen Einfahrtsbreite zur Hafentlänge ließ entsprechend ungünstige Sedimentationsverhältnisse erwarten. Die Peilplananalyse belegt dies mit konkreten Zahlenwerten (Abb. 12). Im Vergleich zum Handelshafen wird deutlich, wie die Hafengeometrie und -größe die Sohlenveränderungen beeinflusst. Obwohl im Werfthafen mit einer Solltiefe von -6,2 m SKN nur relativ geringe Wassertiefen vorgehalten werden, wurden vor allem im Einfahrtbereich wiederholt und längerfristig Mindertiefen festgestellt. Die größten Sohlenerhöhungen treten in Einfahrtmitte mit $q_s = 68$ cm/a auf, dort, wo etwa das Zentrum der Walzenströmungen liegt.

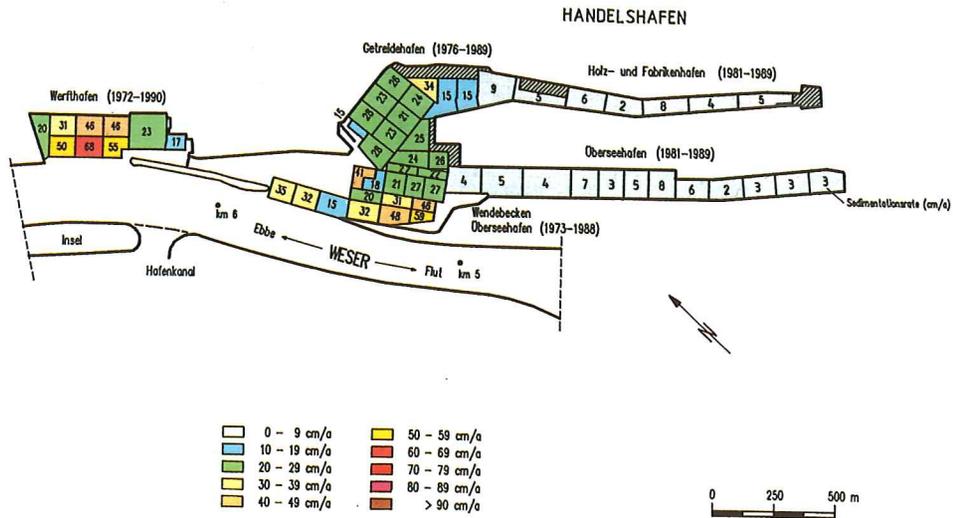


Abb. 12. Mittlere Sedimentationsraten im Handels- und Werfthafen in Bremen

Tafel 2. Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen im Handelshafen in Bremen

Handelshafen (s. Abb 12)	Fläche A		Sedimentationsrate q_s		Sedimentationsmenge Q_s	
	m ²	%	cm/a	%	m ³ /a	%
Wendebecken Überseehafen (1973-1988)	107 275	20	31	51	32 752	42
Getreidehafen (1976-1989)	150 399	28	21	34	32 126	41
Überseehafen (1981-1989)	190 409	35	4	7	8 405	11
Holz- und Fabrikenhafen (1981-1989)	90 479	17	5	8	4 563	6
Handelshafen insgesamt	538 562	100	14	100	77 846	100

4.4 Neustädter Hafen

Der Neustädter Hafen in Bremen nimmt eine Sonderstellung ein, weil er mit zwei Zufahrten durch den Vorhafen und den Hafenkanal versehen ist (Abb. 2). Vorhafen und Wendebecken befinden sich damit in einem Stromspaltungsgebiet, durch das erhebliche Tidewassermengen strömen, die im Wendebecken besonders starke Verlandungen verursachen. Nach hydraulischen Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) wird der Wasseraustausch bei geschlossenem Hafenkanal um etwa 60 % gesenkt.

Gemäß Flächenaufteilung haben sich aus den Sedimentationsberechnungen die in Abb. 13 eingetragenen Sedimentationsraten und -verteilungen ergeben. Danach setzen sich im Wendebecken knapp 50 % der Feststoffe auf nur etwa 30 % der gesamten Hafenfläche ab. Mit durchschnittlich 75 cm Auflandungen im Jahr wurde im Wendebecken die höchste Sedimen-

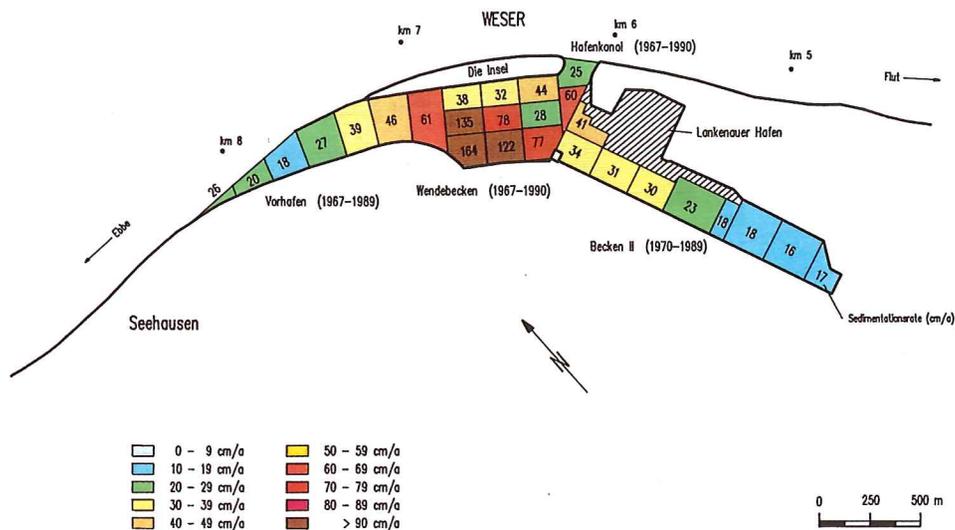


Abb. 13. Mittlere Sedimentationsraten im Neustädter Hafen in Bremen

tationsrate von allen stadtbremischen Hafenanlagen festgestellt. Selbst das im Strom gelegene Wendebecken zum Europahafen verlandet im Mittel weniger stark.

Innerhalb des Vorhafens nimmt die Sedimentation in der Tendenz von außen nach innen zu (Abb. 13). Die ungünstigen Verhältnisse im Wendebecken sind eine Reaktion auf die Strömungen. Der Verlandungsschwerpunkt wurde im Uferbereich gefunden, dort, wo sich nach den Modellversuchen ausgeprägte Flutstromwalzen ausbilden. An der Weserinsel haben die Tideströmungen eine größere Transportkapazität, so daß dort vergleichsweise niedrige Sedimentationen eintreten.

Selbstverständlich können auch durch Reservebaggerungen Wiederverlandungen nicht verhindert werden. Im Walzenbereich des Wendebeckens durchgeführte Vorratsbaggerungen (1984) haben aber gezeigt, daß der Unterhaltungsaufwand damit verringert werden kann. Durch den tieferen Baggerschnitt wird festeres Material gefördert. Die sich danach absetzenden Stoffe können in den Übertiefen besser konsolidieren. Es braucht damit seltener und weniger gebaggert zu werden. Außerdem wird die festgelegte Sollwassertiefe nicht so häufig unterschritten.

Innerhalb des Beckens II im Neustädter Hafen nimmt die Sedimentation deutlich ab (Abb. 13). Selbst Sohlenvertiefungen um mehrere Meter im hinteren Beckenbereich verursachten keine Auflandungsprobleme.

Insgesamt werden sich die Verhältnisse im Neustädter Hafen künftig grundlegend ändern, da der Hofenkanal zu Beginn des Jahres 1992 geschlossen worden ist. Nach den Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) bildet sich dadurch bei Ebbe keine und bei Flut nur noch eine sehr schwache Walzenströmung im Wendebecken aus. Die Sedimentation wird dort deshalb deutlich geringer werden, sich aber in der Vorhafeneinfahrt erhöhen. Insgesamt wird die Sedimentation und damit das Baggervolumen um rd. 40 % zurückgehen (FRANZIUS-INSTITUT, 1989).

Bei den in dieser Studie berechneten Sedimentationsmengen aufgrund der Peilplananalysen handelt es sich immer um ein Profilaufmaß, das nicht mit dem Baggervolumen nach Schutenaufmaß verglichen werden kann. Nach den Sedimentationsberechnungen ergibt sich

für den Neustädter Hafen insgesamt eine mittlere jährliche Verlandungsmenge von rd. 261000 m³. Die nach Schutenaufmaß ermittelte Baggermenge beträgt jedoch rd. 390000 m³/a und liegt somit um etwa 50 % über dem Profilaufmaß. Ähnliche Abweichungen wurden bei einer Untersuchung zu einer Baggerung im Hamburger Hafen festgestellt (FÜHRBÖTER u. MACKE, 1985).

Wenn in Zukunft bei geschlossenem Hafencanal nur noch etwa 60 % der vorstehend genannten Menge im Neustädter Hafen sedimentieren, müßten danach jährlich 390000 · 0,4 = 156000 m³ weniger Baggermassen in Bremen deponiert werden. Das ist eine bedeutende Entlastung, da nur noch in geringem Umfang Flächen zur Hafenschlickunterbringung zur Verfügung stehen.

4.5 Das untere Hafengebiet von Bremen

Die Mittelsbürener Hafenanlagen liegen als Stromanleger am erweiterten rechten Weserufer (Abb. 2 und 14). Aufgrund der Geometrie und den sich daraus ergebenden Strömungsbedingungen sind stärkere Versandungen unabwendbar. Dieser Umstand kann noch verschlechtert werden, wenn im Uferbereich entgegen der natürlichen Morphologie eines Flußquerschnittes große Sohliefen für die Schiffsliegeplätze geschaffen werden müssen.

Der Vorhafen zur Schleuse Oslebshausen verlandet nur unwesentlich. Die mittlere jährliche Sedimentationsrate beträgt insgesamt lediglich 8 cm/a. Begründet sind die günstigen Verhältnisse mit der geringen Ausbautiefe von - 6,20 m SKN. Dagegen ist die Fahrwassertiefe der Unterweser dort mit - 9,50 m SKN und die Soltiefe im Uferbereich von Osterort I und II mit - 10,50 m SKN festgelegt. Das Sohlenmaterial sedimentiert vornehmlich im unterhalb gelegenen Osterorter Hafen und gelangt dadurch nicht in den Schleusenvorhafen.

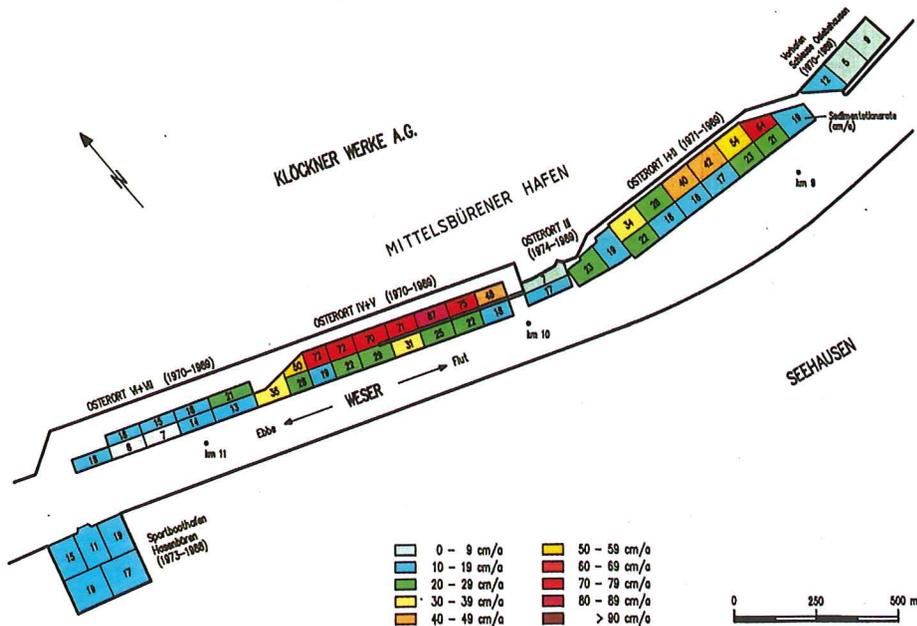


Abb. 14. Mittlere Sedimentationsraten im Bereich des Mittelsbürener Hafens in Bremen

Die mittlere Sedimentationsrate beträgt im Osterorter Hafen I und II insgesamt 30 cm/a. Der Sedimenteintrag findet überwiegend in der einen Meter tiefer als das Fahrwasser ausgebauten Liegewanne am Ufer statt (Abb. 14). Die Sedimentation ist dort mit $q_s = 43$ cm/a überdurchschnittlich. Die starken Verlandungen im verbreiterten und vertieften Weserquerschnitt am rechten Ufer sind wie beim Wendebucken Europahafen eine Antwort auf die dort vorhandenen schwachen Strömungen mit geringer Transportkapazität. Ab 1976 wurden gegenüber anderen Zeiträumen mit vergleichbaren hydrologischen Bedingungen verhältnismäßig starke Auflandungen im Hafen Osterort I und II ermittelt. Ursache dafür waren die Vertiefungen des Fahrwassers während des Weserausbaues, die in dieser Zeit im Bereich Bremens ausgeführt wurden.

Für den Uferbereich von Osterort I und II ist die Abhängigkeit zwischen Sedimentation und Sohlage nachweisbar (Abb. 15). Trotz des schwachen mathematischen Zusammenhanges zeigt sich in der Tendenz, daß die Sedimentationen deutlich mit der Sohltiefe zunehmen.

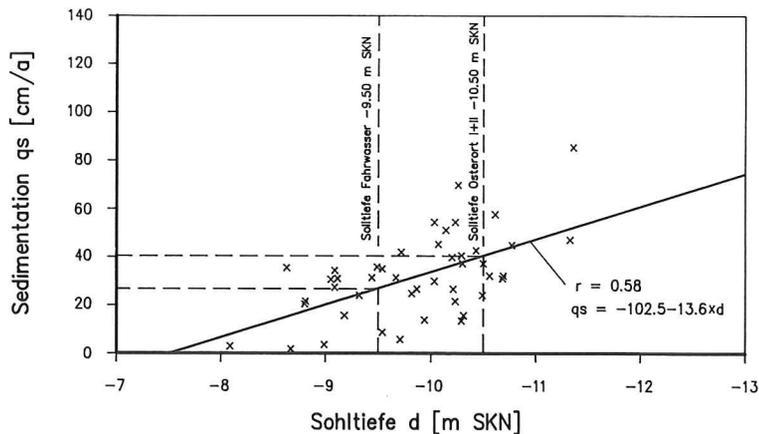


Abb. 15. Sohlage und Sedimentation im Uferbereich von Osterort I und II

In dem von der Schifffahrt nicht genutzten Bereich Osterort III wird von der Hafenbehörde nicht gebaggert, und es werden auch nur sehr unregelmäßig Peilungen durchgeführt. Die Wassertiefen sind hier kleiner als im Fahrwasser der Unterweser. Entsprechend gering ist die Sedimentation (Abb. 14).

Für Osterort IV und V sind mit $-11,50$ m SKN die größten Ausbautiefen des Mittelsbürener Hafens vorgegeben. Dagegen beträgt die Fahrwassersolltiefe der Weser dort nur $-9,40$ m SKN. Aufgrund dieser ungünstigen Tiefenverhältnisse ist die Sedimentation in Osterort IV und V mit durchschnittlich $q_s = 45$ cm/a verhältnismäßig hoch. Auch der Randbereich verlandet mit $q_s = 69$ cm/a bedeutend stärker als in Osterort I und II.

Die in Abb. 16 aufgetragenen Sohlenentwicklungen veranschaulichen, wie die Sollwassertiefen am Strom (Bereich 1 bis 9) noch verhältnismäßig gut vorgehalten werden können. Sehr viel lebhafter sind die Sohlenschwankungen im Randbereich (Abschnitt 10 bis 17). In diesem Zusammenhang ist die Feststellung wichtig, daß der Hafen erst in den achtziger Jahren auf die Solltiefe gebaggert worden ist. Vornehmlich im unteren Hafenabschnitt und im Uferbereich wurden zu Beginn des Auswertungszeitraumes Mindertiefen von mehreren Metern hingenommen (Abb. 16). Die Sedimentation in Osterort IV und V wurde im vertieften Randbereich merklich durch den Unterweserausbau in den siebziger Jahren beeinflusst.

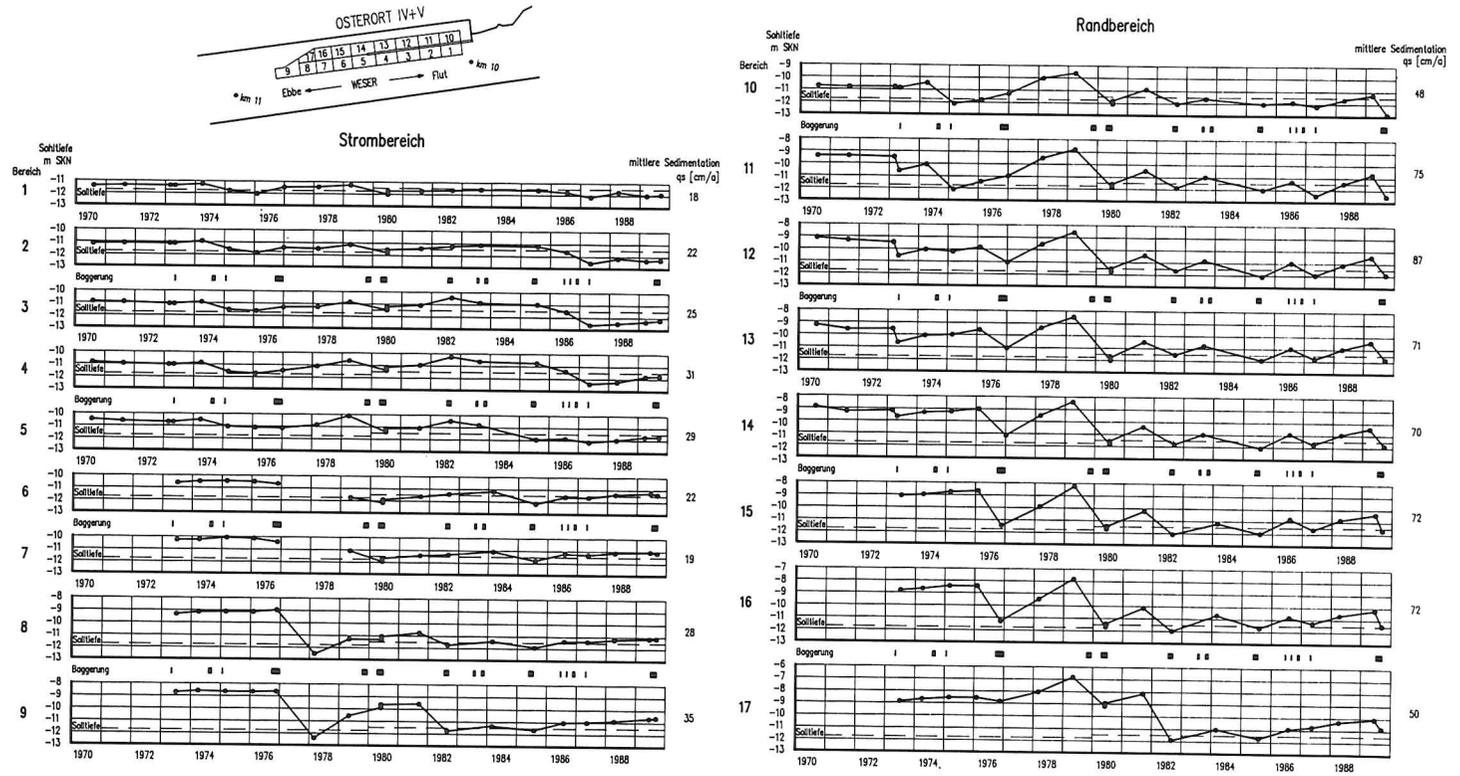


Abb. 16. Sohlenentwicklung im Bereich Osterort IV und V des Mittelbünener Hafens von 1970 bis 1989

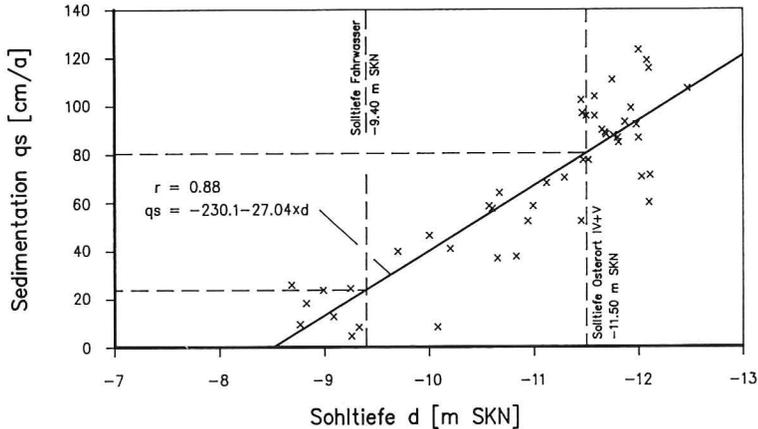


Abb. 17. Sohllage und Sedimentation im Uferbereich von Osterort IV und V (vgl. Abb. 16, Abschnitt 10 bis 17)

Wegen der sehr unterschiedlichen Sohllagen im Auswertungszeitraum konnte mit einer Korrelationsrechnung ein recht guter Zusammenhang zwischen der Sedimentation und den Sohltiefen nachgewiesen werden (Abb. 17).

Der Bereich von Osterort VI und VII wird ebenfalls von der Schifffahrt nicht genutzt (Abb. 14). Entsprechend gering ist die mittlere jährliche Auflandung von insgesamt $q_s = 15 \text{ cm/a}$. Der sich selbst überlassene Hafengebiete ist im Randbereich kontinuierlich verlandet, so daß sich dort mit Sohllagen von etwa 3,5 bis knapp 6 m unter SKN wieder ein natürliches Gleichgewicht eingestellt hat.

Dieses Ergebnis verdeutlicht, welcher hoher Unterhaltungsaufwand erforderlich ist, damit die Sohltiefen in Osterort I und II und vor allem in Osterort IV und V gehalten werden. Ohne Baggerungen würden sich dort alsbald ähnliche Zustände einstellen wie in Osterort VI und VII.

Im von der Freizeitschifffahrt genutzten Sportboothafen Hasenbüren am linken Weserufer (Abb. 14) werden nur geringe Wassertiefen vorgehalten. Für diesen Hafen lagen wenige Peilpläne und keine Baggereinsatzzeiten vor. Die ermittelten Sedimentationsraten bewegen sich für alle Hafengebiete in der gleichen Größenordnung von unter 20 cm/a .

4.6 Zusammenfassende und vergleichende Betrachtungen

Einen Überblick der für die einzelnen Hafengebiete in Bremen errechneten mittleren Sedimentationsraten und -mengen gibt Tafel 3. Die Gesamtsedimentationsmenge für alle untersuchten Hafengebiete von etwa $Q_s = 572\,000 \text{ m}^3/\text{a}$ ergibt eine auf die Fläche von rd. $1,9 \text{ Mio. m}^2$ bezogene durchschnittliche Sedimentationsrate von $q_s = 30 \text{ cm/a}$. Für einige Gebiete weist Tafel 3 starke Abweichungen von diesem Mittelwert auf. Die Problembereiche werden mit Abb. 18 auch optisch hervorgehoben.

Die stärksten Sedimentationen wurden im Wendebecken des Neustädter Hafens festgestellt. Dadurch verlandet dieser Hafen auch insgesamt mit 42 cm/a überdurchschnittlich. Durch die inzwischen vorgenommene Schließung des Hafenkanales werden sich die Verhältnisse dort grundlegend ändern, weil durch diese Maßnahme aus dem Stromspaltungsgebiet am linken Weserufer ein echter Tidehafen geworden ist.

Tafel 3. Sedimentationsraten und -mengen in den Hafenanlagen von Bremen

Hafenbereich	Fläche A m ²	Sedimentationsrate		Sedimentationsmenge	
		q _s cm/a	Q _s m ³ /a		
Hohentorshafen	27 902	22	6 046		
Europahafen	143 949	13	19 242		
Wendebecken Europahafen	95 230	66	62 607		
Handelshafen insgesamt	538 562	14	77 846		
Wendebecken Überseehafen	107 275	31	32 752		
Getreidehafen	150 399	21	32 126		
Überseehafen	190 409	4	8 405		
Holz- und Fabrikenhafen	90 479	5	4 563		
Werfthafen (Neubauhafen)	115 131	38	44 362		
Neustädter Hafen insgesamt	629 023	42	261 639		
Vorhafen	117 896	30	35 532		
Wendebecken	168 100	75	126 679		
Hafenkanal	31 983	43	13 752		
Becken II	273 764	23	62 935		
Vorhafen Schl. Oslebshausen	19 697	8	1 621		
Mittelsbürener Hafen					
Osterort I und II	92 000	30	27 560		
Osterort III	31 900	17	5 578		
Osterort IV und V	101 550	45	46 210		
Osterort VI und VII	67 500	15	9 981		
Sportboothafen Hasenbüren	55 480	16	9 685		
Summe (Mittelwert)	1 917 924	30	572 377		

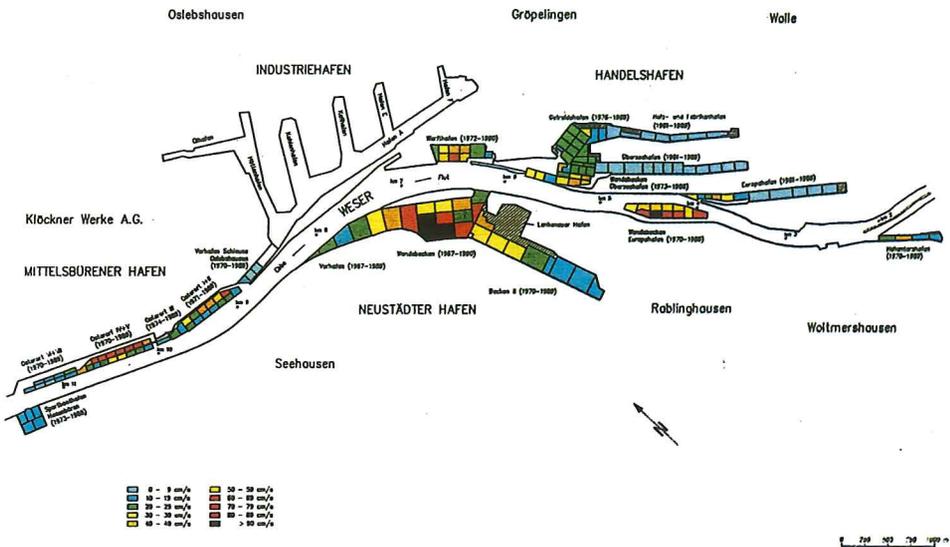


Abb. 18. Sedimentationsverhältnisse in den stadtbremischen Hafengebieten

Das zweite Gebiet mit überdurchschnittlichen Sedimentationen ist das im Strom gelegene Wendebecken des Europahafens (Abb. 18). Solange hier unterhalb der Sohlstufe bei Weser-km 4, vor allem im linken Uferbereich, größere Sollwassertiefen für Seeschiffe vorgehalten werden, müssen die starken Wiederversandungen hingenommen werden.

Als dritter Bereich ist hier noch die Liegewanne von Osterort IV und V zu nennen. Wie vorstehend erläutert, können auch dort die erforderlichen Wassertiefen für die Seeschiffe aufgrund der Morphologie des Flußquerschnittes und der Lage der Liegewanne am ausbuchenden Ufer nur mit verhältnismäßig hohem Unterhaltungsaufwand vorgehalten werden.

Mit einer vergleichenden Betrachtung wird im folgenden gezeigt, wie sich der Unterweserausbau oder außergewöhnliche Zustände wie der Weserdurchbruch auf die Sedimentation in den stadtbremischen Hafengebieten ausgewirkt haben. Dazu wurden einige Hafenanlagen, für die langfristig genug Peilungen vorlagen, für verschiedene Zeitabschnitte betrachtet.

Die Jahre 1976 bis 1982, in die der Unterweserausbau bei Bremen und der Weserdurchbruch fielen, wurden dazu von den davor und danach liegenden Zeiträumen getrennt ausgewertet. Das Untersuchungsergebnis zeigt, daß im mittleren Zeitraum überall höhere Auflandungen zu verzeichnen waren (Abb. 19).

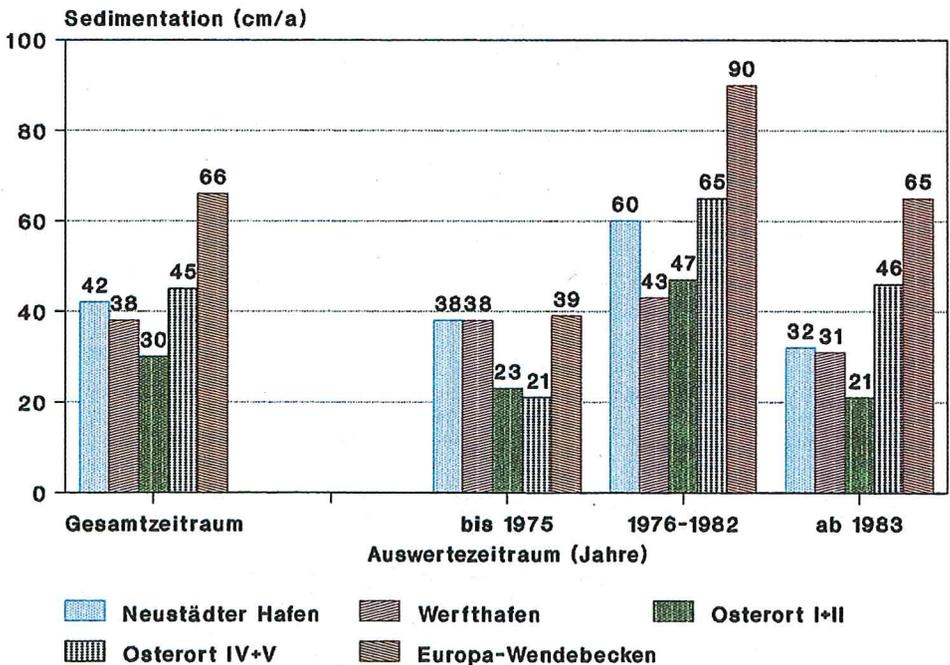


Abb. 19. Sedimentationen in einigen stadtbremischen Häfen für verschiedene Auswertzeiträume

Im Neustädter Hafen, dem Werfthafen und Osterort I und II waren die Verhältnisse vorher und nachher etwa gleich. Das Wendebecken Europahafen und Osterort IV und V verlandeten in der letzten Phase (ab 1983) bedeutend stärker als bis 1975. Die Gründe dafür wurden vorstehend mit den Sohlenentwicklungen erläutert (Abb. 9 und 16). Verantwortlich für die höheren Versandungen sind die größeren Ausbautiefen am Fahrwasserrand bzw. in der Liegewanne im letzten Beobachtungszeitraum.

Das Balkendiagramm in Abb. 19 erklärt auch, weshalb es nicht möglich ist, hinreichende

mathematische Zusammenhänge zwischen den natürlichen hydrologischen Einflußgrößen und der Sedimentation nachzuweisen. Abgesehen von den gegenläufigen Einflüssen aus Tidegeschehen und Schwebstoffangebot sind zum einen die großen Peilintervalle dafür verantwortlich. Zum anderen dominierten Ereignisse wie der Weserdurchbruch oder die Ausbaumaßnahmen das Geschehen.

Die mittlere Sedimentationsrate von $q_s = 30 \text{ cm/a}$ für die Hafenanlagen in Bremen liegt in der gleichen Größenordnung wie im ebenfalls oberhalb des Brackwassergebietes gelegenen Hamburger Hafen. Nach CHRISTIANSEN und KAMPS (1985) sedimentieren dort auf rd. 5 Mio. m^2 Fläche etwa 1,1 Mio. m^3 Feststoffe im Jahresdurchschnitt. Das entspricht einer Sedimentationsrate von $q_s = 22 \text{ cm/a}$. Die ungünstigsten Verhältnisse herrschen dort im Köhlfleethafen mit $q_s = 44 \text{ cm/a}$. Eine bauliche Maßnahme, eine Umlenk wand in der Hafeneinfahrt, beeinflusst jetzt die Strömungen so, daß dort der Schlickfall im Hafen vermindert wird (CHRISTIANSEN/KIRBY, 1991).

Mit der Baumaßnahme im Neustädter Hafen von Bremen ist auch dort ein wichtiger Schritt zur Minderung des Feststoffeintrages gemacht worden, so daß sich die Sedimentationsraten in Hamburg und Bremen noch mehr angleichen werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß die Auflandungen in den beiden außerhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Häfen insgesamt in einer Größenordnung von zwei bis drei Dezimetern liegen.

Für keinen anderen Hafen konnten in diesem Vorhaben mehr einzelne Hafenbecken analysiert werden als für Bremen. Wegen der in sich gleichen äußeren Randbedingungen sollen deshalb abschließend einige Überlegungen zum Einfluß der Hafengeometrie auf die Sedimentation angestellt werden.

Unabhängig von der Wassertiefe im Hafenbecken und seiner Lage zum Strom wurde hier in einem ersten Schritt versucht, Beziehungen zwischen der mittleren Sedimentationsrate q_s und dem Verhältnis von Einfahrtsbreite zu Hafentlänge B/L aufzuzeigen. Dabei sind auch die ausgebauten Osterorter Häfen in die Überlegungen mit einbezogen worden. Wegen seiner besonderen Grundrißform wurde für den Handelshafen die äquivalente Hafentlänge nach FÜHRBÖTER/WITTE (1988) bestimmt. Das Berechnungsergebnis für die Hafenbecken in Bremen (Abb. 20) zeigt trotz der vereinfachenden Annahmen einen sehr deutlichen Zusammenhang zwischen Hafengeometrie und Sedimentation in Übereinstimmung mit grundsätzli-

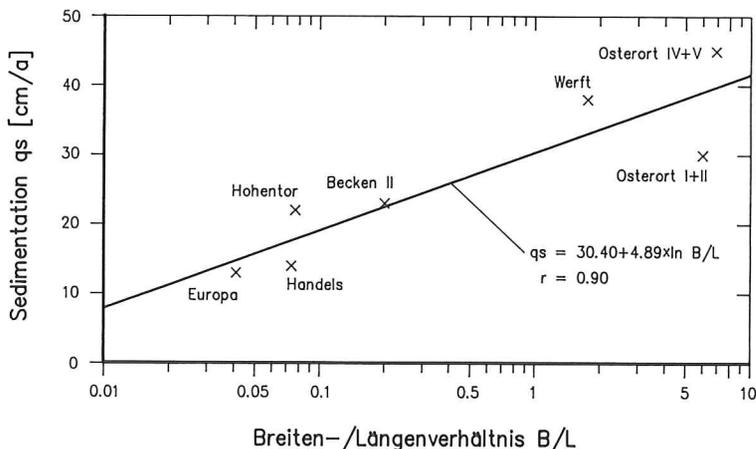


Abb. 20. Einfluß des Breiten-/Längenverhältnisses der Hafenbecken in Bremen auf die Sedimentationen

chen, theoretischen Überlegungen und Modellversuchen (FÜHRBÖTER/WITTE, 1988; BRINKMANN, 1990). Die Hafengebiete mit großen Längenausdehnungen und kleinen Einfahrtsquerschnitten verhalten sich deutlich weniger als umgekehrt.

Dieses für Bremen gefundene, quantitative Ergebnis darf jedoch nicht verallgemeinert werden. So herrschen z. B. im Stromspaltungsgebiet der Hamburger Hafenanlagen bereits ganz andere äußere Randbedingungen. Völlig andere Verhältnisse liegen in den Brackwasserhäfen vor, wie es die folgenden Ausführungen zeigen werden.

5. Häfen im Brackwasser- und Küstengebiet

5.1 Randbedingungen

Die Häfen an den deutschen Tideflüssen unterliegen unterschiedlichen Randbedingungen. Die Küstenmorphologie und verschiedene Ausbauzustände der einzelnen Flüsse bewirken voneinander abweichende Tidehübe. Die mittleren Tideverhältnisse, das Oberwasser und die Fahrwassertiefen der deutschen Tideflüsse sind in Tafel 4 zusammengestellt worden. Die mittleren Wasserstände in Brunsbüttel sind für 1977/89 nach den Planunterlagen des WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMTES BRUNSBÜTTEL berechnet worden. Für Wilhelmshaven wurde mit 375 cm der größte, für Brunsbüttel mit 281 cm der kleinste Tidehub festgestellt.

Tafel 4. Tidewasserstände und Oberwasser für die untersuchten Häfen
*Tidewasserstände 1977/89

Hafen	Gewässer mit Ausbauzustand Fahrwasser m SKN	Tidewasserstände 1971/80			Oberwasser Q_0 m ³ /s
		Thw cm a.P.	Tnw cm a.P.	Thb cm	
Emden	Ems - 8.50	636	326	310	77 (1941/80)
Wilhelmshaven	Jade -18.50	673	298	375	-----
Bremerhaven	Unterweser - 9.00	667	305	362	313 (1941/80)
	Außenweser -12.50				
Cuxhaven	Unterelbe -13.50	645	350	295	717 (1926/85)
Brunsbüttel	Unterelbe -13.50	*649	*368	*281	717 (1926/85)
Büsum	Nordsee	653	326	327	-----

Über die Salzgehaltsverteilungen in den Brackwassergebieten der deutschen Tideflüsse gibt es zahlreiche Abhandlungen. Beispielhaft seien hier die Arbeiten von SCHULZE (1990) für die Ems, von BARG (1979) für die Weser oder von SIEFERT (1970; 1976) für die Elbe genannt. Nach CASPERS (bei SCHULZE, 1980) können die Brackwasserregionen in einem Ästuar in folgende Abschnitte eingeteilt werden:

Bereich	Salzgehalt S‰
Meerwasser	> 30
polyhalines Brackwasser	30 bis 18
mesohalines Brackwasser	18 bis 5
oligohalines Brackwasser	5 bis 0,5
Süßwasser	< 0,5

Die Wasserstände sind im Mündungsbereich der Tideflüsse nahezu unabhängig von der Größe der Oberwasserabflüsse. Es bestehen jedoch eindeutige Zusammenhänge zwischen Oberwasser und Salzgehalt. Danach können die in dieser Grundlagenstudie untersuchten Häfen verschiedenen Brackwasserregionen zugeordnet werden.

Die Einfahrt zum Emdener Seehafen liegt etwa 6 km unterhalb der Meßstelle Pogum. Aus den vom NIEDERSÄCHSISCHEN HAFENAMT zur Verfügung gestellten Daten wurden Monatsmittelwerte der Leitfähigkeiten bestimmt und nach SCHULZE (1988) auf die entsprechenden Salzgehalte umgerechnet. Aus der Korrelation zwischen Salzgehalt und Oberwasser der Ems ergab sich der in Abb. 21 dargestellte Zusammenhang.

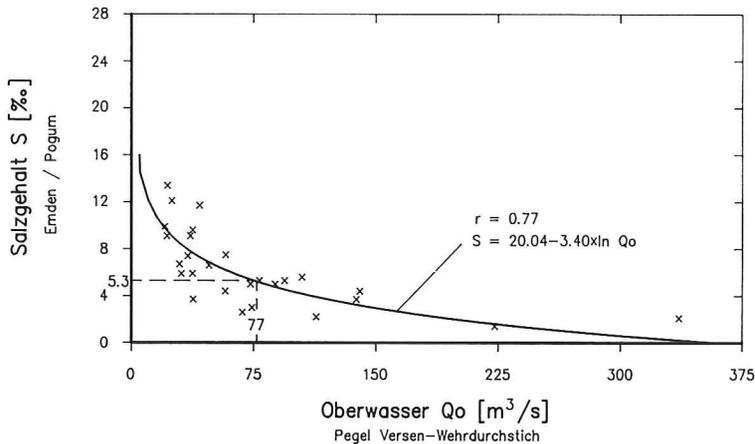


Abb. 21. Mittlere Salzgehalte in der Ems bei Emden und Oberwasser (Monatsmittelwerte), Messungen aus den Jahren 1986/89

Für mittlere Abflußverhältnisse kann demnach Emden dem oberen Brackwasserbereich, der oligohalinen Zone, zugeordnet werden. Bei langanhaltenden, sehr niedrigen Abflüssen verschiebt sich die Brackwasserzone deutlich nach oben. Bei Kenterung des Flutstromes wurden dann Salzgehalte von mehr als 25 ‰ gemessen, die zur Ebbestromkenterung nur auf rd. 10 ‰ bis 15 ‰ zurückgingen (SCHULZE, 1990). Für die durchschnittliche Sedimentation sind mehr die mittleren Abfluß- und Salzgehaltsverhältnisse verantwortlich. Mit 5,3 ‰ Salzgehalt liegt Emden in der Trübungszone des Emsästuars mit entsprechend hohen Auflandungen durch den Vermischungsvorgang zwischen Meer- und Flußwasser.

Ganz anders sind die Verhältnisse in der Jade bei Wilhelmshaven. Nach Messungen des WSA WILHELMSHAVEN liegt der mittlere Salzgehalt bei 29 ‰ mit nur geringen Schwankungen, so daß man dort, ähnlich wie bei Büsum, von Meerwasserbedingungen ausgehen kann.

Für Bremerhaven wurden aus Tagesmitteln der Leitfähigkeiten des Weserwassers die zugehörigen Salzgehalte berechnet und die monatlichen Mittelwerte denen des Oberwassers gegenübergestellt (Abb. 22). Das Ergebnis stimmt recht gut mit den Untersuchungen von BARG (1979) überein. Mit 8,6 ‰ Salzgehalt bei mittleren Abflüssen am Pegel Intschede befindet sich das Untersuchungsgebiet von Bremerhaven nach der vorstehenden Einteilung im mesohalinen Brackwasser.

Für die Elbe lagen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser gemessene Salzgehalte für Brunsbüttel und Cuxhaven vor.

Die Auswertungen (Abb. 23 und 24) zeigen wie bei SIEFERT (1976), daß Brunsbüttel bei

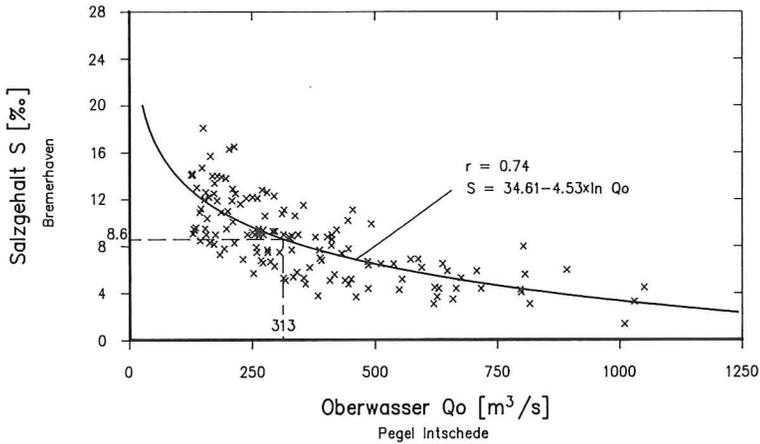


Abb. 22. Mittlere Salzgehalte in der Weser bei Bremerhaven und Oberwasser (Monatsmittelwerte), Messungen von Juli 1977 bis März 1990

mittlerer Oberwasserführung der Elbe dem oberen und Cuxhaven mehr dem unteren Brackwasserbereich (mesohaline bis polyhaline Zone) zuzuordnen ist. Bei hohen Abflüssen sind die für Brunsbüttel ermittelten Werte von $S < 0,5\%$ äußerst gering und damit dem Süßwasserbereich zuzuordnen. In Cuxhaven sinken die mittleren Salzgehalte nicht unter 9% .

Vergleichbare Verhältnisse wie in der Elbe bei Brunsbüttel herrschen bei Emden und Bremerhaven. Deshalb sind dort höhere Schlickfallraten zu erwarten als in Cuxhaven oder in den dem Meerwasser zuzuordnenden Häfen Wilhelmshaven und Büsum.

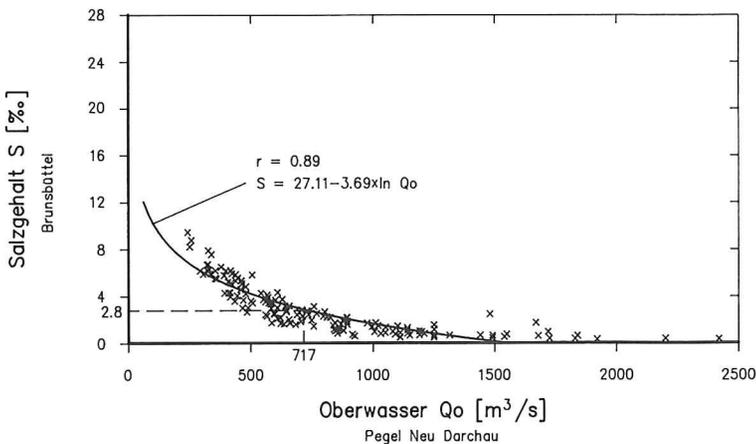


Abb. 23. Mittlere Salzgehalte in der Elbe bei Brunsbüttel und Oberwasser (Monatsmittelwerte), Messungen von Juni 1977 bis Dezember 1989

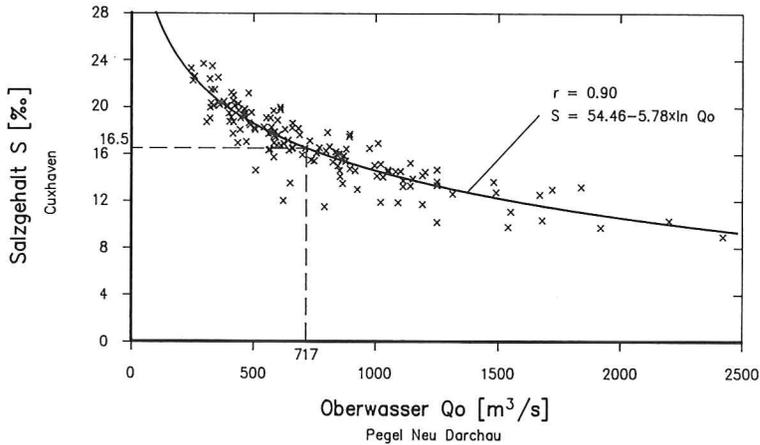


Abb. 24. Mittlere Salzgehalte in der Elbe bei Cuxhaven und Oberwasser (Monatsmittelwerte), Messungen von Januar 1977 bis Dezember 1989

5.2 Emden

Im Vorhafen von Emden ist die Sollwassertiefe auf $-9,60$ m SKN und im Außenhafen auf $-8,50$ m SKN festgelegt worden (Abb. 25). Im inneren Außenhafen nehmen die Wassertiefen im Bereich der Erweiterung bis zur Schleuse auf $-3,8$ m SKN ab. Insgesamt wurden Peilungen von 1981 bis 1989 ausgewertet. Zu Beginn des Auswertungszeitraumes wurden die Unterhaltungsarbeiten durch das zuständige NIEDERSÄCHSISCHE HAFENAMT EMDEN mit

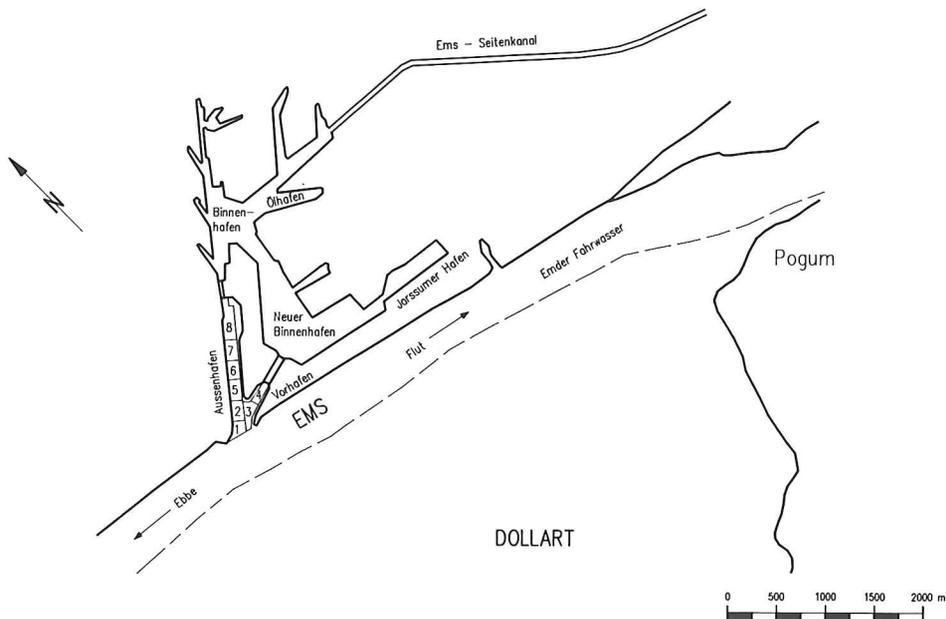


Abb. 25. Hafenanlagen in Emden, Lageplan

Eimerkettenbaggern durchgeführt. Seit Mitte 1983 werden die Baggerungen vergeben und die Solltiefen der Hafensohle im Rahmen eines Pflegevertrages in fast ständigem Einsatz mit Hopperbaggern erhalten. Mit dem Eimerkettenbagger wurde früher versucht, durch Übertiefen Reserve für die Wiederverlandungen zu schaffen, dagegen werden heute mit dem Hopperbagger nicht so tiefe Schnitte durchgeführt.

Zu den verschiedenen Baggerstrategien ist folgendes zu bemerken. In den Brackwasserhäfen ist der Übergang zur Sohle fließend, weil sich im sohlennahen Bereich verflüssigter Schlick (fluid-mud) mit geringer Dichte bildet. Deshalb wird mit tieferen Baggerschnitten mehr festes Sohlenmaterial gefördert. In den so geschaffenen Reservetiefen kann sich das neu eintreibende Material problemloser ablagern und verfestigen. Umgekehrt wird bei dem Versuch, eine bestimmte Solltiefe zu halten, mehr verflüssigtes Sohlenmaterial gebaggert. So lag die mittlere jährliche Baggermenge (Hopperaufmaß) im Vor- und Außenhafen von Emden, als nicht auf Vorrat gebaggert wurde (Erhalt der Solltiefen), bei insgesamt längeren Baggereinsatzzeiten um etwa 50 % höher. Dieses Ergebnis läßt den Schluß zu, daß Baggerungen von Übertiefen die wirtschaftlichere Methode sind. Im übrigen sind die berechneten Sedimentationsraten und -mengen (Profilaufmaß) auch in den Brackwasserhäfen nicht mit den Baggermengen (Schuten- oder Hopperaufmaß) vergleichbar.

Die mittlere Sedimentationsrate im Außen- und Vorhafen von Emden beträgt $q_s = 233$ cm/a. Sie liegt damit um etwa eine Zehnerpotenz höher als in Bremen oder Hamburg. Besonders hohe Auflandungen finden im inneren Bereich des Außenhafens mit bis zu über 4 m/Jahr statt. Dies ist auf die ungünstige Lage des Hafens im Brackwasserbereich der Ems zurückzuführen. Der Vorhafen verlandet im Einfahrtbereich stärker als oberhalb davon (Abb. 26). Eine mögliche Ursache können die dort auftretenden Walzenströmungen sein. Für

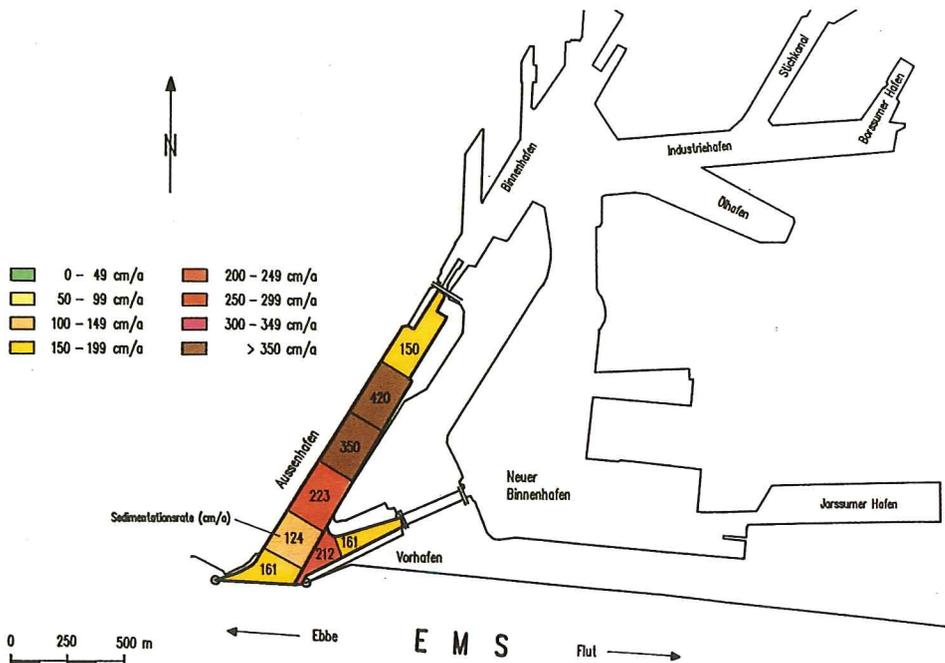


Abb. 26. Mittlere Sedimentationen im Außen- und Vorhafen von Emden (1981/89)

die farbige Darstellung wurden bei Emden und den folgenden Häfen einheitlich Intervalle von 0,5 m/a gewählt.

Aufgrund der kurzen Peilabstände war es möglich, die Sedimentation getrennt nach hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahren auszuwerten. Die durchschnittliche Sommer-rate ist für Emden mit $q_s = 245 \text{ cm/a}$ höher als im Winter ($q_s = 201 \text{ cm/a}$). Im inneren Außenhafen werden im Sommer – auf das Jahr extrapolierte – Sedimentationen von bis zu rd. 500 cm/a erreicht. Die größeren Werte im Sommerhalbjahr sind mit den dann vorhandenen höheren Schwebstoffgehalten geklärt, da durch steigende Wassertemperaturen die Biomassenproduktion im Frühjahr zunimmt (GREISER, 1988). Diese biologischen Prozesse sind offenbar auch ein Grund dafür, daß für die Häfen im Brackwasser- und Küstengebiet noch keine mathematischen Zusammenhänge zwischen gewässerkundlichen Daten und Sedimentationen ermittelt werden konnten.

5.3 Wilhelmshaven

Der dem Salzwasserbereich zuzuordnende Vorhafen zur Seeschleuse in Wilhelmshaven wurde von 1974 bis 1990 auf das Sedimentationsverhalten untersucht (Abb. 27). Für den Gesamtzeitraum beträgt die durchschnittliche Auflandung im Vorhafen $q_s = 152 \text{ cm/a}$. Das entspricht einer Sedimentationsmenge von $Q_s \approx 1,1 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$. Die Auflandungen liegen damit deutlich unter dem im oberen Brackwassergebiet gelegenen Emdener Hafen. Die Sedimentationsverteilungen im Vorhafen zur Seeschleuse veranschaulicht Abb. 28. Deutlich ist die Abnahme innerhalb des Vorhafens zu erkennen.

Für Wilhelmshaven kann beispielhaft mit der Sohlenentwicklung im Neuen Vorhafen erläutert werden, wie die gewählte Baggermethode den Unterhaltungsaufwand beeinflusst

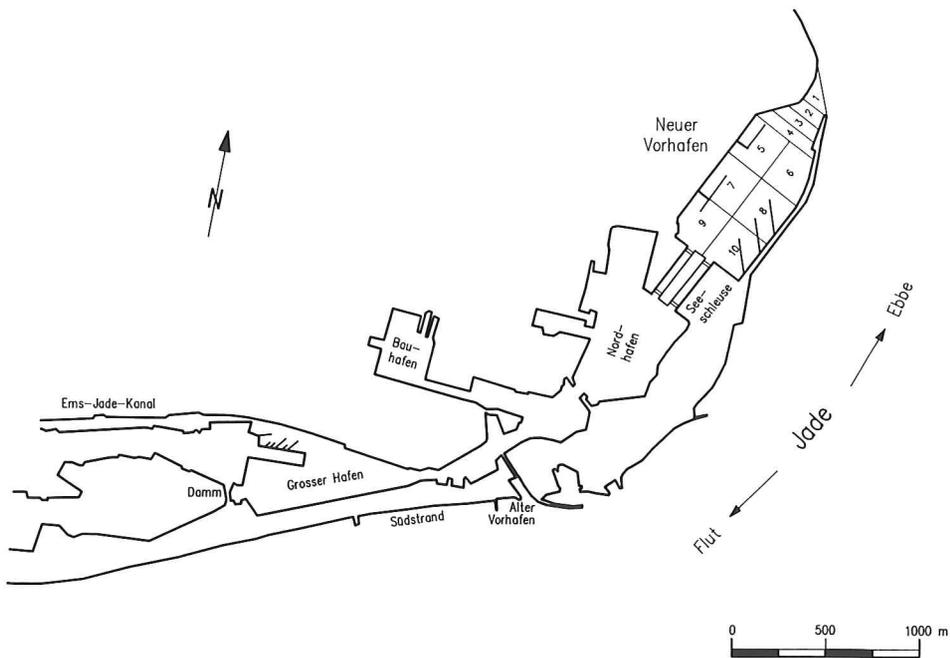
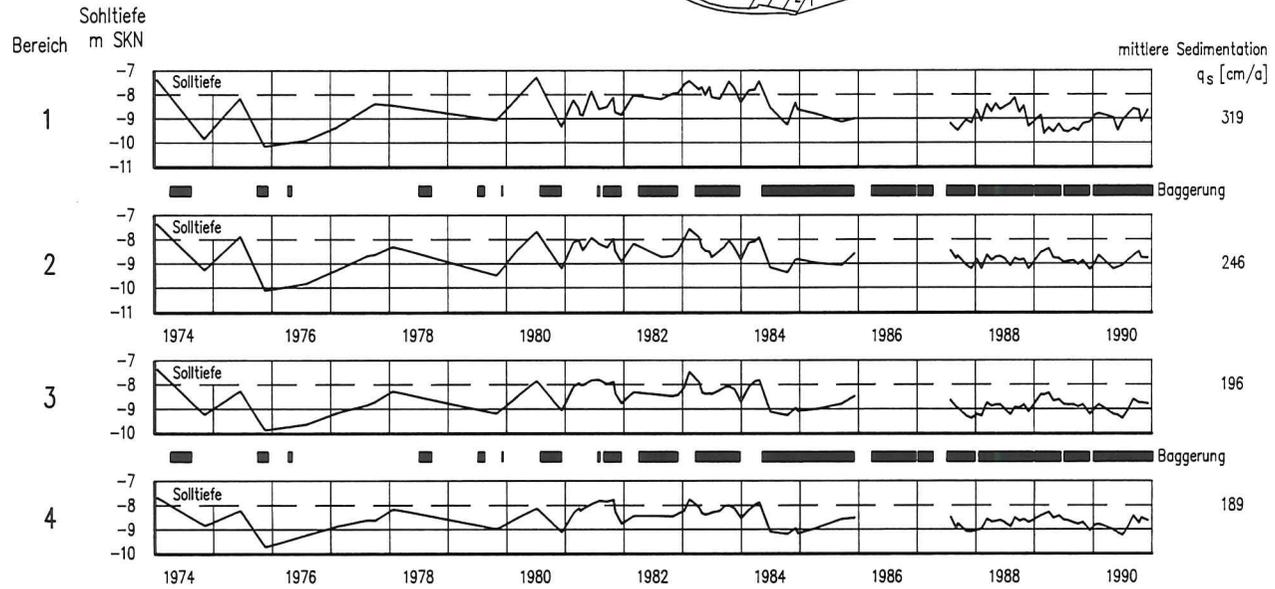
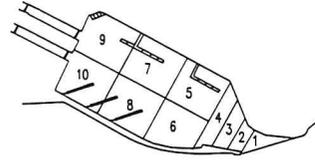


Abb. 27. Hafenanlagen in Wilhelmshaven, Lageplan



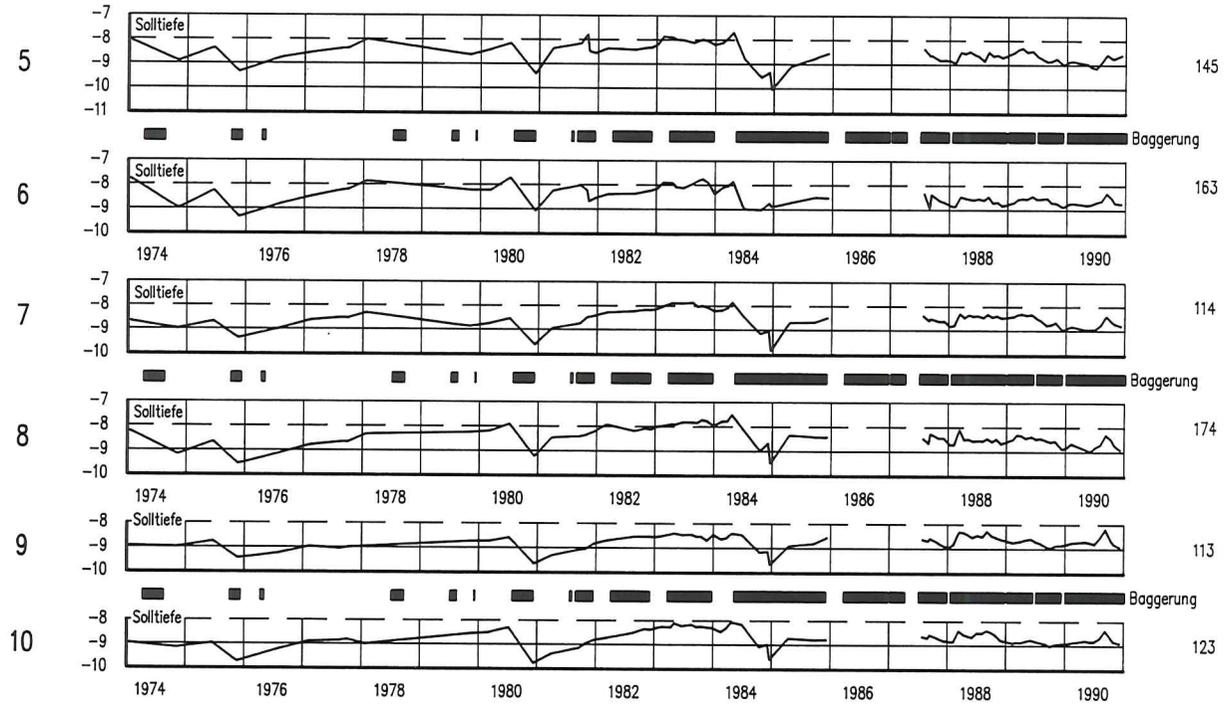


Abb. 29. Sohlenentwicklung im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven von 1974 bis 1990

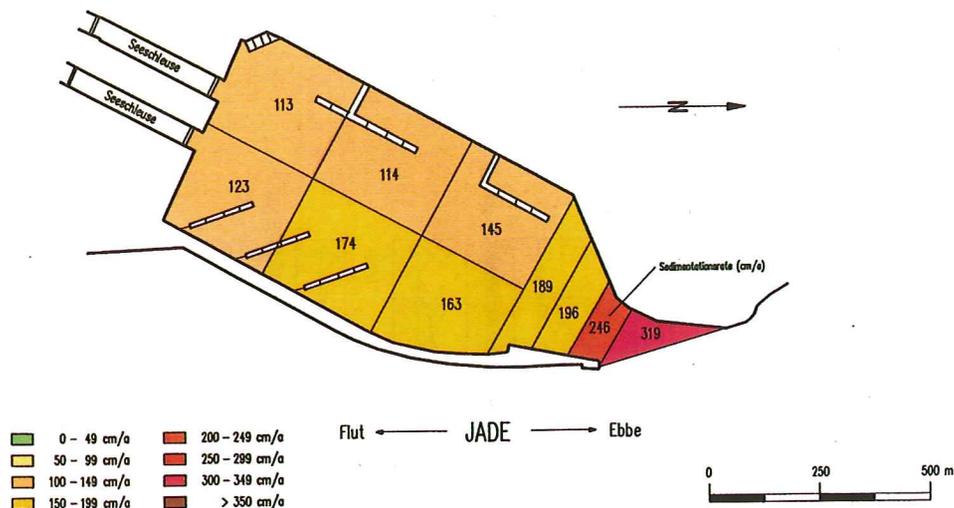


Abb. 28. Mittlere Sedimentationen im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven (1974/90)

(Abb. 29). Bis einschließlich 1980 wurden mit relativ wenigen Baggereinsatzzeiten (Eimerkettenbagger i. M. 2,5 Monate/Jahr) wiederholt Übertiefen von bis zu mehreren Metern geschaffen. Die zugehörige Sedimentationsrate beträgt für den gesamten Vorhafen für 1974/80 lediglich $q_s = 67 \text{ cm/a}$ und liegt damit erheblich unter dem für den Gesamtzeitraum ermittelten Wert von $q_s = 152 \text{ cm/a}$.

Nach 1980 wurde versucht, die Solltiefe im Vorhafen zu halten. Die Baggereinsatzzeiten (Hopperbagger) verlängerten sich erheblich. Von 1981 bis 1985 waren die Geräte durchschnittlich 8 Monate und ab 1988 fast ständig im Einsatz. Die Baggermengen waren 1981/90 2,4 mal so hoch wie im davor liegenden Zeitraum. Die berechnete Sedimentationsrate liegt mit $q_s = 171 \text{ cm/a}$ ebenfalls entsprechend hoch. Außerdem traten nach 1980 wiederholt Mindertiefen auf, was davor nicht der Fall war (Abb. 29).

Wie bei den Hafenanlagen von Emden zeigt sich für Wilhelmshaven, daß Vorratsbaggerungen mit Reservetiefen den Baggeraufwand günstig beeinflussen. Der Unterhaltungsaufwand kann damit offenbar ganz erheblich eingeschränkt werden. Die Geräte sind nicht so häufig einzusetzen und gleichzeitig wird das Baggervolumen deutlich verringert.

Die hohen Aufladungen in Verbindung mit den häufigen Baggereinsätzen können hier nicht abschließend geklärt werden. Es ist denkbar, daß die ständigen Eingriffe in den verflüssigten Schlick (fluid-mud) der Übergangszone zur festeren Hafensohle ungewollte biologische Prozesse bei den Mikroorganismen bewirken, indem Sauerstoff gelöst und zusätzlich Biomasse produziert wird. Vielleicht wird aber auch lediglich die sohlennahe Schlickschicht mehr mit Wasser verdünnt, so daß sich die fluid-mud-Zone vergrößert. Dieser Bereich mit weichen bis flüssigen Schlickablagerungen ist für die Schifffahrt von besonderer Bedeutung. In dem Übergang zur festen Sohle liegt bei einer Dichte von $1,15$ bis $1,2 \text{ t/m}^3$ die nautische Wassertiefe (ROOVERS, 1988).

Zusammenfassend wird festgestellt, daß die Sedimentationen in Wilhelmshaven deutlich niedriger sind als im Brackwasserbereich der Ems bei Emden. In beiden Häfen kann der Unterhaltungsaufwand offenbar durch Reservebaggerungen erheblich eingeschränkt werden.

5.4 Bremerhaven

Die Unterhaltungsbaggerungen in den Vorhäfen zum Überseehafen in Bremerhaven (Abb. 30) werden durch den Einsatz von mechanischen Schlickeggen ergänzt. Die Hafensohle kann durch intensives Eggen zeitweise gehalten bzw. sogar vertieft werden. Dies wurde erreicht, wenn im Vorhafen zur Nordschleuse mit zwei Schleppern in je zwei Schichten gearbeitet wurde. Positive Auswirkungen der mechanischen Egge waren vor allem in den Wintermonaten zu erkennen.

Anhand der Sohlenentwicklungen und Baggereinsatzzeiten zeigte sich auch für die Vorhäfen in Bremerhaven, daß es insgesamt wirtschaftlicher ist, Reservebaggerungen mit Übertiefen durchzuführen. Der Einsatz von Großgeräten nur zum Erhalt der Solltiefe erfordert auch dort längere Einsatzzeiten und ergibt größere Fördermengen. Im Vorhafen zur Nordschleuse wurde z. B. 1985 und 1986 durch je zwei Baggereinsätze im Frühjahr und Herbst auf Vorrat gebaggert. Dabei wurden die Solltiefen besser freigehalten als 1982/83 mit etwa 50 % längeren und häufigeren Baggereinsätzen. Die Baggermengen waren 1982/83 ebenfalls etwa 1,5 mal so hoch wie 1985/86.

Alternativ zu den herkömmlichen Methoden bietet sich z. B. auch für die Räumung der Vorhäfen in Bremerhaven die Methode der Wasserinjektionen an. Dabei wird über eine Diffusorleitung Druckwasser in die Sohle eingetragen und das Material in einer darüberliegenden Schicht in Suspension gebracht. Die Schichtdicke hängt von der Wasserzugabe und dem zu lösenden Material ab und beträgt nach ESTOURGIE (1988) 1 bis 3 m. Der verflüssigte Schlick hat eine höhere Wichte als das umgebende Wasser, wodurch eine Dichteströmung entsteht, mit der das suspendierte Material transportiert wird. Eine einfache hydrostatische Überlegung mag dies veranschaulichen (Abb. 31).

Aufgrund der geringen Viskosität sind die Reibungskräfte F_R gegenüber der hydrostatischen Druckkraft F gering, so daß die Suspensionsschicht zu fließen beginnt. Die erreichbaren Transportwege sind von der Zusammensetzung des bewegten Sohlenmaterials abhängig. Der in den Brackwasserhäfen sedimentierende Schlick mit überwiegenden Schlammkornanteilen bleibt dabei länger in Suspension als gröbere Sedimente. Für „Injektionsbaggerungen“ sind damit günstige Voraussetzungen geschaffen.

Eine Probegaggerung vom Juni 1990 im Vorhafen der Kaiserschleuse mit Wasserinjektionen hat gezeigt, daß damit in kurzer Zeit Sohlenvertiefungen von mehreren Metern möglich sind. Die Unterhaltungsarbeiten könnten danach allein mit Wasserinjektionen durchgeführt werden. Der Einsatz von Baggern und der mechanischen Egge wäre nicht mehr erforderlich. Wasserinjektionsgeräte arbeiten geräusch- und energieärmer als Eimerkettenbagger. Sie sind außerdem beweglicher, so daß auch Randbereiche und Winkel erreicht werden. Durch die Rückverlagerung der Sedimente in den Tidestrom entfällt zusätzlich der Transport des Baggergutes in Schuten oder das Verbringen an Land.

Die beiden Vorhäfen ähneln sich in ihrer Geometrie und der Lage zum Tidestrom. Aufgrund der geringeren Einfahrtsbreite und dem günstigeren Breiten-/Längenverhältnis wurden für den Vorhafen zur Kaiserschleuse geringere Sedimentationen als vor der Nordschleuse erwartet. Die Auswertung der Peilpläne des HANSESTADT BREMISCHEN AMTES BREMERHAVEN ergab jedoch umgekehrte Ergebnisse (Abb. 32). Die größeren Auflandungen finden mit insgesamt $q_s = 294 \text{ cm/a}$ vor der Kaiserschleuse statt. Der Vorhafen zur Nordschleuse hat dagegen eine vergleichsweise geringe Sedimentationsrate von im Mittel $q_s = 211 \text{ cm/a}$. In beiden Vorhäfen nehmen die Verlandungen zu den Außenhäuptern der Schleusen hin ab. Insgesamt gesehen sind die Verhältnisse mit dem Brackwasserhafen in Emden vergleichbar. Die Verlandungen in Bremerhaven sind auch beträchtlich größer als in dem

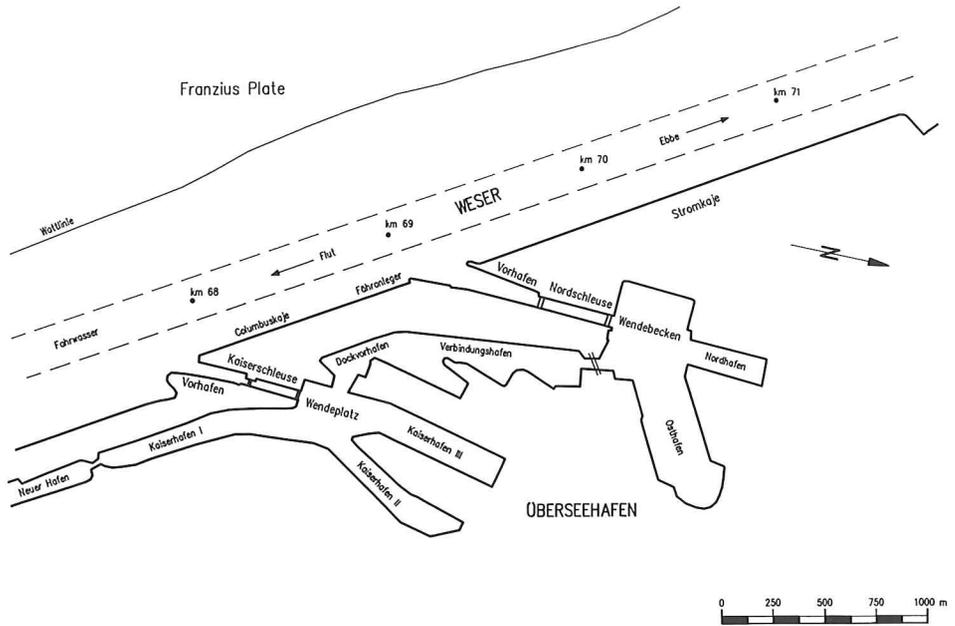


Abb. 30. Hafenanlagen in Bremerhaven, Lageplan

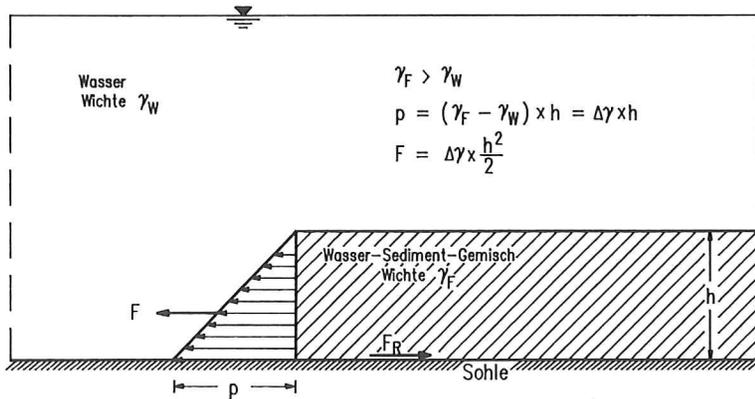


Abb. 31. Schematische Darstellung der vom suspendierten Sohlenmaterial auf das umgebende Wasser ausgeübten Druckspannung p und Druckkraft F

mehr den Salzwasserhältnissen der Nordsee zuzuordnenden Hafengebiet von Wilhelmshaven.

Die relativ geringen Sedimentationen im Vorhafen zur Nordschleuse haben betriebliche Gründe. Wasserverluste aus dem Überseehafen durch Schleusungen werden bei höheren Wasserständen in der Weser mit Sielungen über die Nordschleuse ausgeglichen. Mit diesen Sielwassermengen gelangen erhebliche Feststoffe in das Wendebassin des Überseehafens. Gleichzeitig tritt im Vorhafen zur Nordschleuse ein gewisser Spüleffekt ein, womit die geringeren Auflandungen gegenüber dem Vorhafen der Kaiserschleuse begründet sind. Ent-

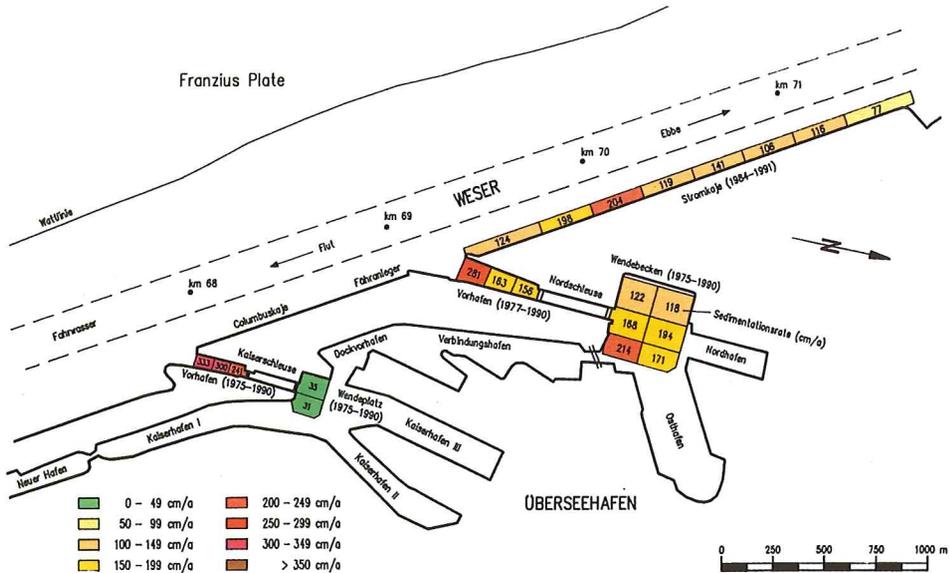


Abb. 32. Mittlere Sedimentationen in Hafengebieten von Bremerhaven

sprechend hoch ist jedoch die Sedimentation des Wendbeckens im Vergleich zum Wendepfad hinter der Kaiserschleuse (Abb. 32). Das Wendbecken verlandet mit durchschnittlich $q_s = 157 \text{ cm/a}$ außergewöhnlich hoch. Im Wendepfad an der Kaiserschleuse, über die nicht gesiebt und weniger geschleust wird, liegen die Auflandungen um Größenordnungen darunter. Dies zeigt, wie sehr die natürlichen Sedimentationsvorgänge durch betriebliche Erfordernisse beeinflusst werden können.

Die Schleusenvorhäfen in Bremerhaven sedimentieren in den Sommerhalbjahren sehr viel stärker als in der kalten Jahreszeit. Vor der Nord- und Kaiserschleuse wurden die folgenden auf das Jahr umgerechneten Sedimentationen ermittelt:

	Winter $q_s \text{ (cm/a)}$	Sommer $q_s \text{ (cm/a)}$
Vorhafen Norderschleuse	102	320
Vorhafen Kaiserschleuse	210	369

Die Unterschiede sind vor allem im Vorhafen zur Norderschleuse außerordentlich hoch. Es mag sein, daß sich dort besonders die Aufrührungen durch die mechanische Egge bemerkbar machen. Die Egge wird auch vor der Kaiserschleuse, dort jedoch nicht so häufig, eingesetzt.

Zusätzlich wurden noch die Sedimentationsverhältnisse vor der Stromkaje des Containerterminals in Bremerhaven unterhalb der Norderschleuse untersucht (Abb. 32). Mit dem Bau des Terminals ist der Durchflußquerschnitt der Weser gegenüber der vorher vorhandenen Deichlinie erheblich eingengt worden. Das ehemalige weiträumige Außendeichswattgelände wurde aufgespült, so daß die heutige Stromkaje bis zu rd. 1000 m vor dem früheren Landesschutzdeich dicht am Fahrwasser der Weser liegt. Damit wurden vor der Kaje hydraulisch günstige Bedingungen mit den entsprechend vergrößerten Strömungsgeschwindigkeiten geschaffen, die für eine weitgehende Stabilisierung der erforderlichen Sollwassertiefen sorgen. Die Peilplan-

analysen haben relativ geringe Sedimentationen vor der Stromkaje ergeben (Abb. 32). Insgesamt liegt die mittlere Sedimentationsrate bei $q_s = 133 \text{ cm/a}$. Sie ist damit trotz der größeren Sollwassertiefen deutlich niedriger als in den Schleusenvorhöfen zum Überseehafen. Selbst das Wendebassin im Überseehafen verlandet noch stärker als die Liegeplätze an der Stromkaje. Interessant ist hier der Vergleich mit den vorstehend beschriebenen Mittelsbürener Hafenanlagen in Bremen, wo aus den bekannten Gründen vergleichsweise ungünstige Sedimentationsverhältnisse vorliegen.

5.5 Brunsbüttel

Die neuen Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals bei Brunsbüttel passieren jährlich etwa vierzig- bis fünfzigtausend Seeschiffe (Abb. 33), also im Durchschnitt mehr als hundert Schiffe täglich. Die Schleusenvorhöfen in der Elbe sind aufgrund ihrer Lage im oberen Brackwasserbereich außerordentlich hohen Auflandungen unterworfen. Dieser Umstand erfordert praktisch einen ständig wechselnden Einsatz von Baggern in den Vorhöfen und im Binnenhafen.

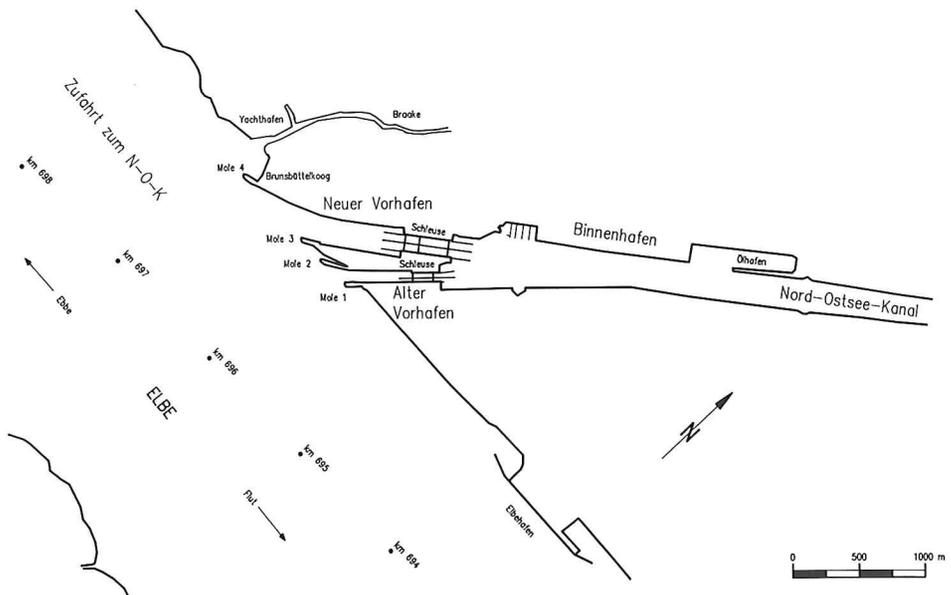


Abb. 33. Hafenanlagen von Brunsbüttel, Lageplan

Nach Auskunft des WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMTES BRUNSBÜTTEL werden die Zuflüsse zum Nord-Ostsee-Kanal bei Bedarf über die Schleusen des Alten Vorhafens in die Elbe entwässert. Dabei kommt es zu Abflüssen von 600 bis 700 m^3/s , was immerhin etwa dem mittleren Oberwasser der Elbe bei Neu-Darchau entspricht.

Wegen der ständigen Baggereinsätze in Brunsbüttel war es bei den Auswertungen schwierig, immer ungestörte Peilintervalle zuzuordnen. Die aus der Peilplananalyse berechneten Sedimentationen können somit als untere Grenzwerte angesehen werden. In Brunsbüttel wird die Wichte γ der Baggermengen im Laderaum durch Druckmeßdosens genau bestimmt. Die vom WSA BRUNSBÜTTEL nach Baggeraufmaß mit $\gamma = 1,4 \text{ t/m}^3$ ermittelten Sedimentationen werden im folgenden den Ergebnissen der Peilplananalyse zum Vergleich gegenübergestellt.

Die höchste Sedimentation wurde im Einfahrtsbereich zum Neuen Vorhafen mit bis zu knapp 4 m/a ermittelt, mit abnehmender Tendenz in Richtung Außenhaupt der Schleuse (Abb. 34). Die gesamte Vorhafenfläche verlandet mit durchschnittlich 268 cm/a (9,3 m/a nach Baggeraufmaß). Im Alten Vorhafen herrschen ähnliche Verhältnisse bei einer mittleren Sedimentationsrate von 274 cm/a (4,1 m/a nach Baggeraufmaß). Dieser Wert zeigt, daß Entwässerungen aus dem Nord-Ostsee-Kanal in den Alten Vorhafen keinen merklichen Spüleffekt haben.

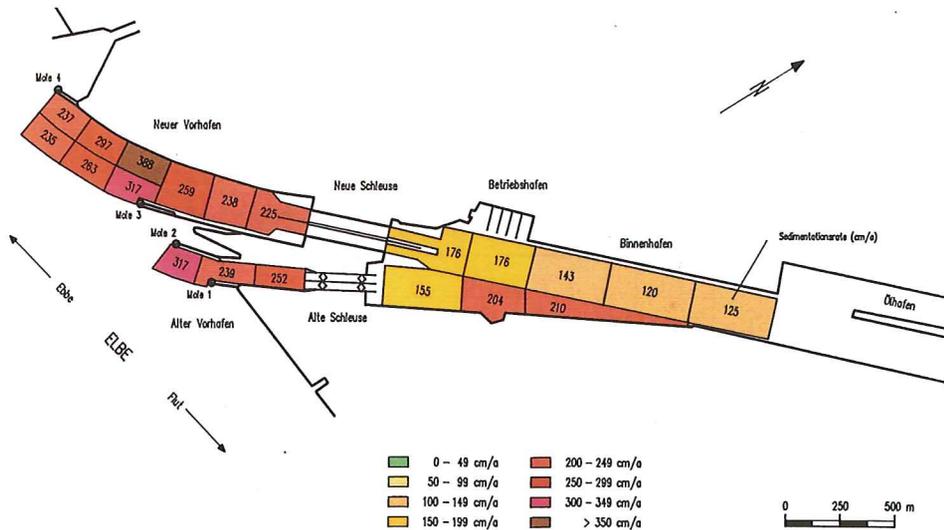


Abb. 34. Mittlere Sedimentationen in den Hafenanlagen von Brunsbüttel

Die Sedimentation in den Vorhäfen von Brunsbüttel ist ebenfalls jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Nach Sommer- und Winterhalbjahren getrennte Auswertungen ergaben für die untersuchten Zeiträume folgende auf ein Kalenderjahr extrapolierte Ergebnisse:

	Winter $q_s(\text{cm/a})$	Sommer $q_s(\text{cm/a})$
Neuer Vorhafen	218	295
Alter Vorhafen	197	285

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die grundsätzliche Feststellung, daß sich in den Brackwasserhäfen von Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel überall nachweisbar im Sommer mehr Material absetzt als in den Wintermonaten.

Direkte Abhängigkeiten zwischen hydrologischen Randbedingungen und Sedimentationen konnten für die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal bisher nicht nachgewiesen werden. Die Untersuchungen lassen aber erkennen, daß die oberwasserbedingte Verschiebung der Brackwasserzone Auswirkungen hat. Bei hohem Oberwasser der Elbe, wenn Brunsbüttel nach den vorstehenden Ausführungen mehr dem Süßwasserbereich zugeordnet werden kann, werden die Sollwassertiefen problemloser gehalten als bei höheren Salzgehalten des Elbewas-

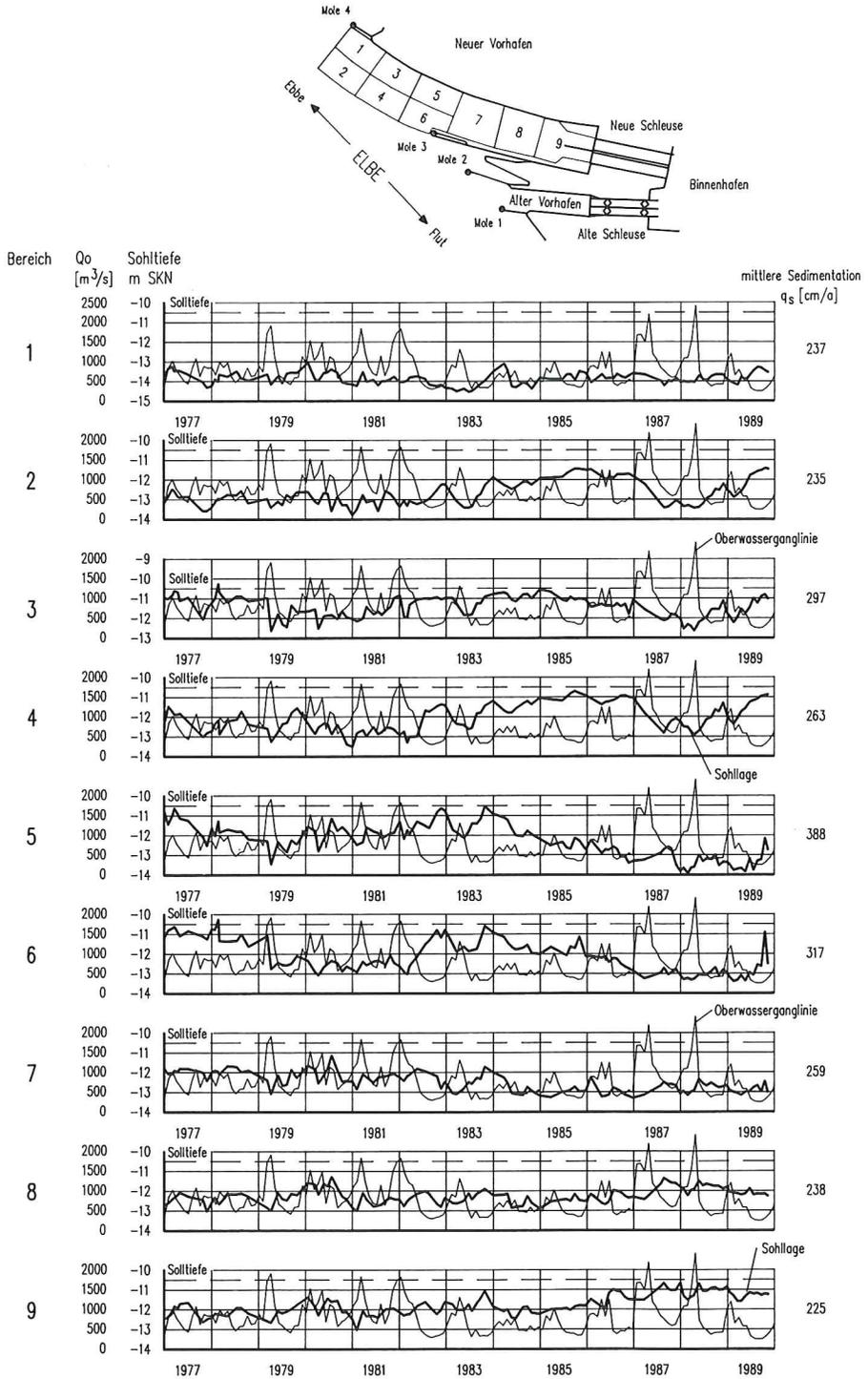


Abb. 35. Sohlenentwicklung im Bereich des Neuen Vorhafens von Brunsbüttel und Oberwasserganglinie von 1977 bis 1989

sers. 1981 und 1987 betrug der Abfluß in Neu-Darchau im Jahresmittel über $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. In diesen beiden Jahren wurde im Neuen Vorhafen nur etwa halb so viel gebaggert wie 1983 und 1989 bei geringen Oberwasserführungen von $623 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $530 \text{ m}^3/\text{s}$, als die Trübungszone Brunsbüttel erreichte. Bei niedrigem Oberwasser erreicht der Salzgehalt des Elbewassers bei Brunsbüttel Werte von über 15%. Vor allem im Neuen Vorhafen bestehen bei solchen natürlichen Voraussetzungen Probleme, überall die Sollwassertiefen vorzuhalten. Ein Vergleich der Sohlenentwicklungen mit der Oberwasserganglinie am Pegel Neu-Darchau mag dies veranschaulichen (Abb. 35). Besonders in den Verlandungsschwerpunkten (Bereich 3 bis 6) ist erkennbar, daß bei hohen Abflüssen aus dem Binnenland günstigere Bedingungen herrschen als in trockenen Jahren.

Aufgrund des lebhaften Schiffsverkehrs war zu erwarten, daß durch Schleusungen auch im Binnenhafen bemerkenswerte Sohlerhöhungen zu verzeichnen sind (Abb. 34). Mit durchschnittlich $q_s = 157 \text{ cm/a}$ (2 m/a nach Baggeraufmaß) ist der Binnenhafen noch besonders heftigen Verschlickungen unterworfen, vergleichbar mit denen im tideoffenen Vorhafen von Wilhelmshaven.

5.6 Cuxhaven

Für den im Elbmündungsgebiet gelegenen Standort Cuxhaven wurden nach den Peilungen des NIEDERSÄCHSISCHEN HAFENAMTES CUXHAVEN die Sedimentationen im Fährhafen und dem oberhalb davon gelegenen Vorhafen und Alten Hafen untersucht (Abb. 36).

Der auf $-8,5 \text{ m SKN}$ ausgebaute Fährhafen verlandet am stärksten im vorderen und mittleren Abschnitt (Abb. 37). Insgesamt ist die durchschnittliche Sedimentationsrate mit $q_s = 109 \text{ cm/a}$ beträchtlich geringer als in den Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal bei Brunsbüttel.

Vom Vorhafen und Alten Hafen standen für die Auswertungen erst ab 1980 von allen Teilbereichen ausreichende Peildaten zur Verfügung. Seit 1985 wird die Hafensohle mit Wasserinjektionen erfolgreich auf Solltiefe gehalten. Es liegen keine Angaben darüber vor, wie häufig diese Geräte zum Einsatz kommen. Im jetzt bestehenden Zustand findet die stärkste Sedimentation innerhalb des auf $-8,5 \text{ m SKN}$ ausgebauten Vorhafens aufgrund der dort auftretenden Walzenströmungen statt. Der höchste Betrag wurde mit $q_s = 160 \text{ cm/a}$ ermittelt (Abb. 37). Der Vorhafen selbst verlandet im Mittel mit 130 cm/a . In den Schleusenzufahrten herrschen günstigere Verhältnisse. Im Alten Hafen, wo die Sollsohle lediglich auf $-4,5 \text{ m SKN}$ festgelegt ist, liegt die Sedimentation bei 60 bis 70 cm/a . Im Zufahrtsbereich zu den Fischereihäfen bewirkt die größere Solltiefe von $-8,5 \text{ m SKN}$ höhere Auflandungen.

Insgesamt gesehen ist die Sedimentation im Hafengebiet von Cuxhaven aufgrund der Lage im unteren Brackwasserbereich bedeutend geringer als vor den Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals in Brunsbüttel.

5.7 Büsum

Für den Vorhafen von Büsum standen Peilpläne von 1982 bis 1990 zur Verfügung (Abb. 38). Da die Peilungen nicht in genau festgelegten, in sich vergleichbaren Profilen vorgenommen werden, war es nicht möglich, Teilbereiche zu analysieren. Zum Vergleich mit den anderen Tidehäfen ist jedoch die Kenntnis der Auflandungen von Interesse, die insgesamt im Vorhafen von Büsum stattfinden.

Im Bereich der Schleusenzufahrt werden Wassertiefen von -6 bis -7 m NN vorgehalten. Die mittlere Sohlage im Untersuchungsbereich des Vorhafens bewegte sich im Auswertungszeitraum zwischen -3 und -8 m NN .

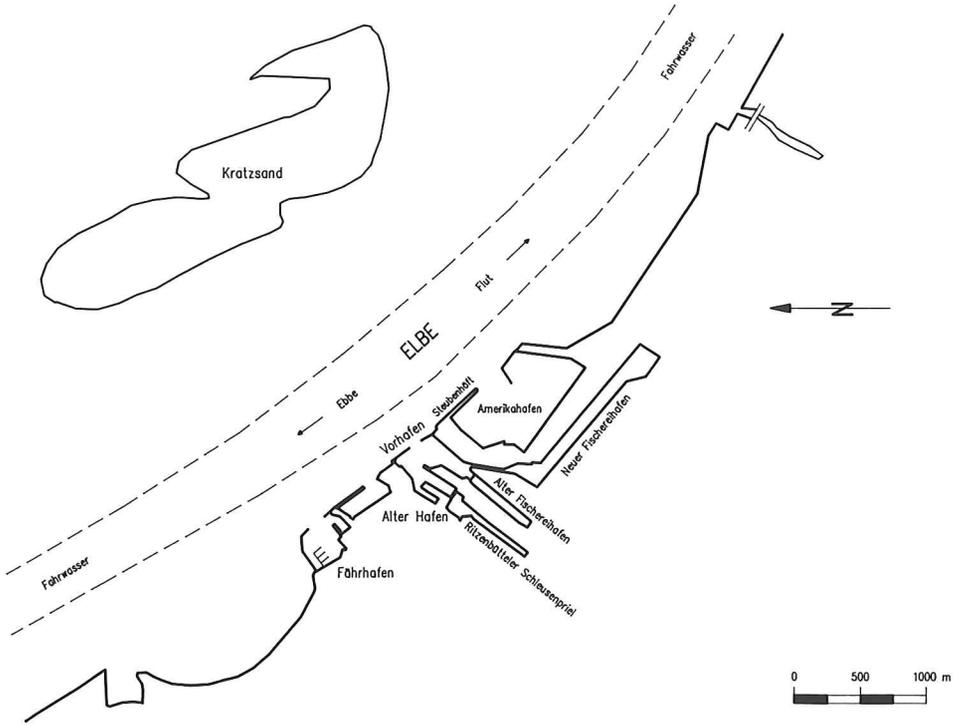


Abb. 36. Hafenanlagen in Cuxhaven, Lageplan

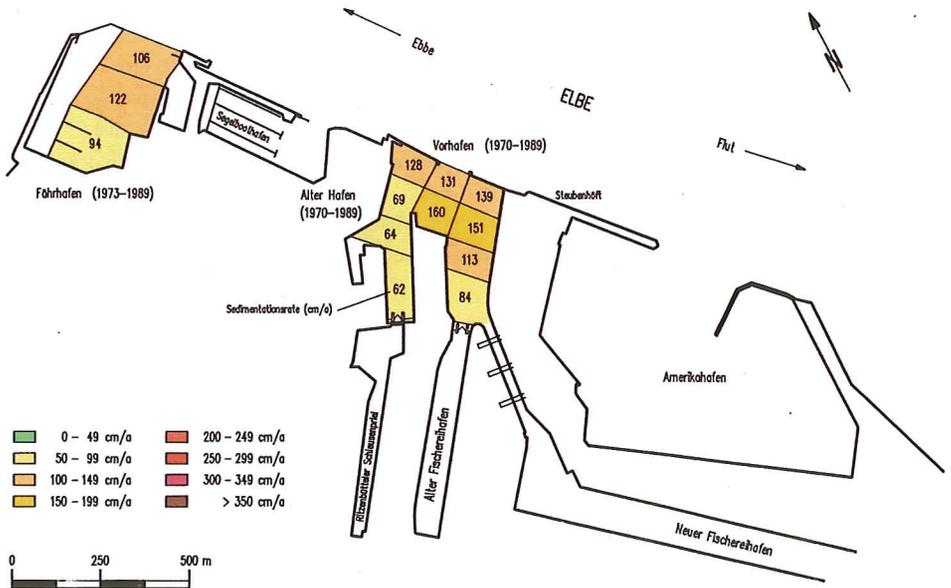


Abb. 37. Mittlere Sedimentationsraten in Hafengebieten von Cuxhaven

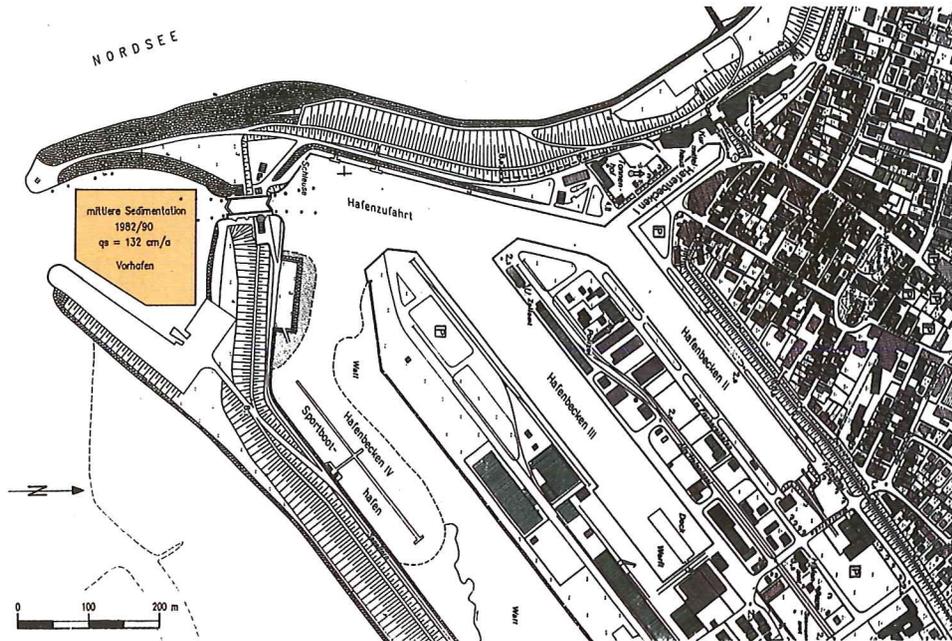


Abb. 38. Hafenanlagen von Büsum

Durchschnittlich sedimentierte der Vorhafen von Büsum zwischen 1982 und 1990 mit $q_s = 132 \text{ cm/a}$. Die Auflandungen sind von der Größenordnung her mit denen für Wilhelmshaven und Cuxhaven vergleichbar. Sie sind deutlich geringer als in den Brackwasserhäfen von Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel.

5.8 Zusammenfassung und Vergleich

Mit den vorstehenden Erläuterungen der Verlandungen von Tidehäfen im Brackwasser- und Küstengebiet wurde gezeigt, daß die Verhältnisse nicht mit denen im oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen tideoffenen Häfen von Hamburg oder Bremen vergleichbar sind. Aufgrund anderer Randbedingungen liegt die Sedimentation um Größenordnungen höher. Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Standorte sind in Tafel 5 zusammengestellt worden.

Es können grundsätzlich zwei Gruppen voneinander unterschieden werden. Für Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel wurden jährliche Verlandungen von zwei bis drei Metern ermittelt. Die größten Sedimentationsmengen fallen in Brunsbüttel mit etwa $1,6 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ an. Das entspricht einem Baggeraufmaß von $6 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$. Für Wilhelmshaven, Cuxhaven und Büsum wurden vergleichsweise geringe Sedimentationsraten berechnet. Die Höhen der Auflandungen betragen dort etwa einen bis eineinhalb Meter jährlich. Ursächlich dafür sind nicht andere Tidewasserstände oder die unterschiedlichen Ausbauzustände der Tideflüsse oder Häfen. Wie vorstehend beschrieben, kommt es darauf an, in welchem Bereich der Brackwasserzone eines Ästuars sich der Hafen befindet. Emden, Brunsbüttel und auch Bremerhaven liegen mehr im oberen Brackwasserbereich, dem oligo- bis mesohalinen Brack-

Tafel 5. Sedimentationsraten und -mengen in den Hafenanlagen an der deutschen Nordseeküste

Hafenbereich	Fläche A m ²	Sedimentationsrate q _s cm/a	Sedimentationsmenge Q _s m ³ /a
EMDEN			
Vor- und Außenhafen	242 024	233	562 442
WILHELMSHAVEN			
Neuer Vorhafen	729 692	152	1 113 819
BREMERHAVEN			
Vorhafen Nordschleuse	29 125	211	61 375
Vorhafen Kaiserschleuse	10 449	294	30 712
Wendebecken Überseehafen	144 575	157	227 350
Wendeplatz Überseehafen	63 786	33	21 100
Stromkaje Überseehafen	113 000	133	150 290
BRUNSBÜTTEL			
Neuer Vorhafen	229 272	268	615 537
Alter Vorhafen	68 640	274	187 790
Binnenhafen (N-O-K)	494 402	157	776 262
CUXHAVEN			
Fährhafen	69 090	109	75 348
Vor- und Alter Hafen	115 580	107	124 227
BÜSUM			
Vorhafen	25 500	132	33 660

wasser. Dort bewirken der Dichteeffekt und biologische Prozesse die hohen Verlandungen. Die Verschlickungen sind im Sommerhalbjahr nachweisbar höher als in der kälteren Jahreszeit. In Brunsbüttel kommt es immer dann zu besonders ungünstigen Verhältnissen, wenn sich der Brackwasserbereich bei geringem Oberwasser der Elbe stromauf verschiebt. Dann erreicht die Trübungszone Brunsbüttel, und es muß etwa doppelt so viel gebaggert werden wie in abflußreichen Jahren.

Cuxhaven kann dem unteren Brackwasserbereich, der polyhalinen Zone, zugeordnet werden, Wilhelmshaven und Büsum dagegen mehr den Salzwasserbedingungen der Nordsee. Die äußeren Bedingungen sind dort weniger lebensfeindlich für die Mikroorganismen, was zu erträglicheren Sedimentationsverhältnissen in den Tidehäfen führt.

Hinter den Seeschleusen in Brunsbüttel setzen sich im Binnenhafen noch große Feststoffmengen ab. Durch den regen Schiffsverkehr mit den häufigen Schleusungen werden Sedimente in den Nord-Ostsee-Kanal transportiert.

Auch hinter der Nordschleuse in Bremerhaven sind im Wendebecken des Überseehafens recht hohe Auflandungen zu verzeichnen. Der Schiffsverkehr durch die Nordschleuse und die zum Ausgleich des Hafenwasserstandes erforderlichen Sielungen von Weserwasser in den Überseehafen sind dort die Ursache für die großen Feststoffmengen. Diese betrieblichen Vorgänge sind sicher mit ein Grund dafür, daß der Vorhafen zur Nordschleuse weniger verlandet als der von den Abmessungen her günstigere Vorhafen zur Kaiserschleuse.

Insgesamt gesehen müssen die starken Verschlickungen in Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel wohl aufgrund der besonderen äußeren Bedingungen hingenommen werden. Die sich absetzenden Feststoffe sind offenbar gerade in diesen Häfen von besonderer, vielleicht

mit der Jahreszeit veränderlicher Konsistenz. Es bilden sich stetige Übergänge von stark schwebstoffhaltigem Wasser zu verflüssigtem Schlick bis hin zur festeren Sohle aus. Das Verhalten dieser Übergangszone, innerhalb der die für die Schifffahrt maßgebende nautische Wassertiefe liegt, bedarf noch besonderer Untersuchungen, um die Vorgänge besser verstehen zu können.

Die erforderlichen Wassertiefen können mit unterschiedlichen Baggermethoden gewährleistet werden. Es ergibt sich dazu die Frage, ob es wirtschaftlicher ist, die Solltiefen zu halten oder ob besser Reservetiefen durch Vorratsbaggerungen vorgenommen werden sollten. Nach den in dieser Studie erstellten langfristigen Sohlenentwicklungen in den verschiedenen Häfen sowie der Analyse von Baggereinsatzzeiten und -mengen ist dazu folgendes anzumerken:

Für die Vorhäfen von Emden, Wilhelmshaven und Bremerhaven hat sich gezeigt, daß Vorratsbaggerungen zu kürzeren Baggereinsatzzeiten und geringeren Baggermengen führen. Mit den tieferen Baggerschnitten wird mehr festes Sohlenmaterial gefördert. In den Reservetiefen kann sich dann das neu eintreibende Material problemloser ablagern und konsolidieren. Bei dem Versuch, durch Baggerungen der oberen Schichten lediglich die Solltiefe zu halten, wird mehr verflüssigtes Sohlenmaterial (fluid-mud) gebaggert. Am deutlichsten haben sich die Unterschiede am Beispiel von Wilhelmshaven gezeigt. Vergleichbare Ergebnisse ergaben die Auswertungen für Bremerhaven und Emden. Die vorliegenden Erkenntnisse lassen den Schluß zu, daß der Unterhaltungsaufwand in den Hafenbecken durch Vorratsbaggerungen mit Reservetiefen wesentlich eingeschränkt werden kann.

Alternativ zu den herkömmlichen Baggermethoden können heute Wasserinjektionsgeräte eingesetzt werden. Durch die Rückverlagerung der Sedimente in den Tidestrom entfällt dabei der Transport des Baggergutes in Schuten oder das Verbringen an Land. Bei Schleusenvorhäfen ist dabei zu beachten, daß das verflüssigte Sohlenmaterial mit den Schleusungen nicht ungewollt in die Häfen gelangt. Dieser Effekt ist ja bereits durch den starken Schiffsverkehr im Bereich der Brunsbütteler Schleusen vorhanden. Es ist bekannt, daß der Schiffsverkehr zu gleich hohen Schwebstoffkonzentrationen im sohlennahen Bereich führen kann wie Baggergeräte (PENNEKAMP, BLOKLAND u. VERMEER; 1991). Ob und wie Wasserinjektionsgeräte für die Unterhaltung in den Tidehäfen eingesetzt werden können, müßte von Fall zu Fall gesondert beurteilt werden.

6. Schlußbemerkungen

Mit der vorliegenden Ausarbeitung wurde die Sedimentation für verschiedene Tidehäfen oberhalb, in und unterhalb der Brackwasserregionen der deutschen Tideästuarien quantitativ ermittelt.

Über Teilergebnisse dieses vom BMFT geförderten KFKI-Projektes MTK 0470 ist anlässlich der CEDA-PIANC Konferenz in Amsterdam (NASNER/MESSER, 1991), bei einem Symposium „Stadt am Strom“ am 20. 3. 1992 in Bremen (NASNER, 1992) und in einem Beitrag zum 10th International Harbour Congress im Juni 1992 berichtet worden (NASNER/PIEPER, 1992).

In einer zweiten Phase soll versucht werden, mit gezielten Untersuchungen der Verlandungsschwerpunkte, mit Strömungsmessungen und Bodenanalysen vertiefte Kenntnisse über die Transport- und Sedimentationsprozesse zu erlangen. Es ist das Ziel, Voraussetzungen dafür zu schaffen, daß die Sedimentationsvorgänge in Tidehäfen künftig realistischer mit theoretischen Ansätzen, hydrodynamisch-numerischen oder hydraulischen Modellen simuliert werden können.

Die im Rahmen dieses Projektes bisher erzielten Ergebnisse waren nur durch die gute

Zusammenarbeit mit den zuständigen Ämtern für Emden, Wilhelmshaven, Bremen, Bremerhaven, Brunsbüttel, Cuxhaven und Büsum möglich. Für die Unterstützung durch den BMFT, die wertvollen Hinweise und Ratschläge der beteiligten KFKI-Projektgruppenmitglieder und die Kooperation der beteiligten Behörden sei an dieser Stelle gedankt. Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Bliesener, der als Obmann die Projektgruppenleitung im KFKI übernommen hat, und den Herren Dipl.-Ing. K. Messer und Dipl.-Ing. R. Pieper für ihren unermüdlchen Einsatz bei der rechnergestützten Aufbereitung und Analyse des umfangreichen Datenmaterials.

7. Schriftenverzeichnis

- BARG, G.: Untersuchungen über Salzgehaltsverteilungen in Brackwassergebieten von Tideflüssen am Beispiel der Unterweser. Mitt. des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 49, 1979.
- BRINKMANN, B.: Ein Beitrag zur Bestimmung des Wasseraustausches zwischen Fluß und Hafen in Tidegebieten. Mitt. des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 70, 1990.
- CHRISTIANSEN, H. u. HAAR, S.: Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken – Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1990 –. Gewässerkundliche Studie Nr. 12 Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Gewässerkunde, 1991.
- CHRISTIANSEN, H., HAAR, S. u. RADTKE, G.: Zur Sedimentation in Hamburger Hafenbecken. Gewässerkundliche Studie Nr. 1 Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Gewässerkunde – SB 41 –, 1985.
- CHRISTIANSEN, H. u. KAMPS, A.: Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken. Auswertungen der Peilungen der Jahre 1977 bis 1984. Gewässerkundliche Studie Nr. 3 Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Gewässerkunde – SB 41 –, 1985.
- CHRISTIANSEN, H. u. KIRBY, R.: Fluid mud intrusion and evaluation of a passive device to reduce mud deposition. Proceedings CEDA-PIANC Conference 1991, Amsterdam.
- ESTOURGIE, A. L. P.: Theory and Practice of Water Injection Dredging Terra et Aqua. IADC, No. 38., Dec. 1988.
- FRANZIUS-INSTITUT: Hydraulische Modellversuche zur Reduzierung des Schlickfalls im Neustädter Hafen in Bremen. Versuchsbericht 1989 – unveröffentlicht –.
- FÜHRBÖTER, A. u. MACKE, E.: Untersuchung zum Ablauf einer Hafenschlickbaggerung. Entnahme aus dem Köhlfleet, Transport und Deponierung auf dem Spülfeld. Bericht Nr. 597 des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, 1985. – unveröffentlicht –.
- FÜHRBÖTER, A. u. WITTE, H.-H.: Über Sedimentationen in Tidehäfen. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 43. Band, 1988, Schiffsverlag HANSA, Hamburg.
- GREISER, N.: Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihren biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg. Hamburger Küstenforschung, H. 45, 1988.
- HAFENBAUAMT BREMEN: Baggergutuntersuchungsprogramm, Sachstandsbericht. Bremen, April 1987, – unveröffentlicht –.
- HENSEN, W.: Ausbau der seewärtigen Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen. Hansa, 108. Jg. Nr. 15, 1971.
- NASNER, H. u. MESSER, K.: Siltation problems in the Neustädter Hafen in Bremen. Proceedings CEDA-PIANC Conference Amsterdam, 1991.
- NASNER, H.: Hafenerhaltung in Bremen. BDA-Symposium „Stadt am Strom“ am 20. 3. 1992, Veröffentlichung in Vorbereitung.
- NASNER, H. u. PIEPER, R.: Improvement of maintenance work in a tidal harbour. Proceedings 10th International Harbour Congress Antwerpen, 1992.
- PENNEKAMP, J. G. S., BLOKLAND, T. u. VERMEER, E. A.: Turbidity caused by Dredging compared to Turbidity caused by normal Navigational Traffic. Proceedings CEDA-PIANC Conference Amsterdam, 1991.
- ROOVERS, P.: Maintenance Dredging Work. 9th International Harbour Congress Antwerpen, General Report, 1988.

- SCHULZE, M.: Über die Abhängigkeit zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Salzgehalt am Beispiel von Untersuchungen am Ems-Ästuar. Mitt. des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 102, 1988.
- SCHULZE, M.: Zur Dynamik des Schwebstoffhaushaltes in Brackwassergebieten am Beispiel des Ems-Ästuars. Mitt. des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 108, 1990.
- SHEALL, I. L.: Reducing Costs and Improving the Industry: Goals of the Dredging Research Program of the United States. CERF, Vol 7, No.2, Spring 1991.
- SIEFERT, W.: Die Salzgehaltsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamburger Küstenforschung H. 15, 1970.
- SIEFERT, W.: Hydrologische Daten aus dem Tidegebiet der Elbe und ihrer Nebenflüsse. Hamburger Küstenforschung H. 35, 1976.
- WSD NORDWEST: Festschrift zum Tag der offenen Tür der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, 9. Juni 1985. WSD Nordwest, 1985.