

# SEDIMENTATION IN TIDEHÄFEN

Phase 1

Schlußbericht

MTK 0470

29701-1

Hochschule Bremen  
Labor für Wasserbau  
Neustadtwall 30  
2800 Bremen 1



# **SEDIMENTATION IN TIDEHÄFEN**

**Phase 1**

**Schlußbericht  
MTK 0470**

**Hierzu : 29 Anlagen**

# I n h a l t

	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Das Untersuchungsgebiet	3
3. Vorgehensweise	6
4. Die Hafenanlagen in Bremen	7
4.1 Tidegeschehen und Oberwasser	7
4.2 Hohentorshafen und Europahafen	14
4.2.1 Hohentorshafen	16
4.2.2 Europahafen	16
4.2.3 Wendebecken Europahafen	18
4.3 Handels- und Werfthafen	26
4.3.1 Handelshafen	26
4.3.2 Werfthafen	29
4.4 Neustädter Hafen	36
4.5 Das untere Hafengebiet von Bremen	45
4.5.1 Vorhafen Schleuse Oslebshausen	45
4.5.2 Osterort I und II	48
4.5.3 Osterort III	51
4.5.4 Osterort IV und V	51
4.5.5 Osterort VI und VII	55
4.5.6 Sportboothafen Hasenbüren	55
4.6 Zusammenfassende und vergleichende Betrachtungen	59
5. Häfen im Brackwasser- und Küstengebiet	67
5.1 Randbedingungen	67
5.2 Emden	74
5.3 Wilhelmshaven	79
5.4 Bremerhaven	83
5.5 Brunsbüttel	91
5.6 Cuxhaven	99
5.7 Büsum	106
5.8 Zusammenfassung und Vergleich	108
6. Schlußbemerkungen	113
7. Schrifttum	115

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Sedimentationen in offenen Tidehäfen erfordern 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 Ebbephase 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 Hafenbecken verteilen.

In allen deutschen Tidehäfen werden von den zuständigen Verwaltungen in unregelmäßigen Zeitabständen Kontrollpeilungen zur Überwachung der Sollwassertiefen durchgeführt. Diese langjährig vorliegenden Peilpläne waren die 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 Hafenbecken und ihrer Lage zum Strom sollte auch der Einfluß des Dichteeffektes auf die Sedimentationen durch den Vergleich von Häfen im Brackwasserbereich von Tideflüssen und außerhalb davon erfaßt werden.

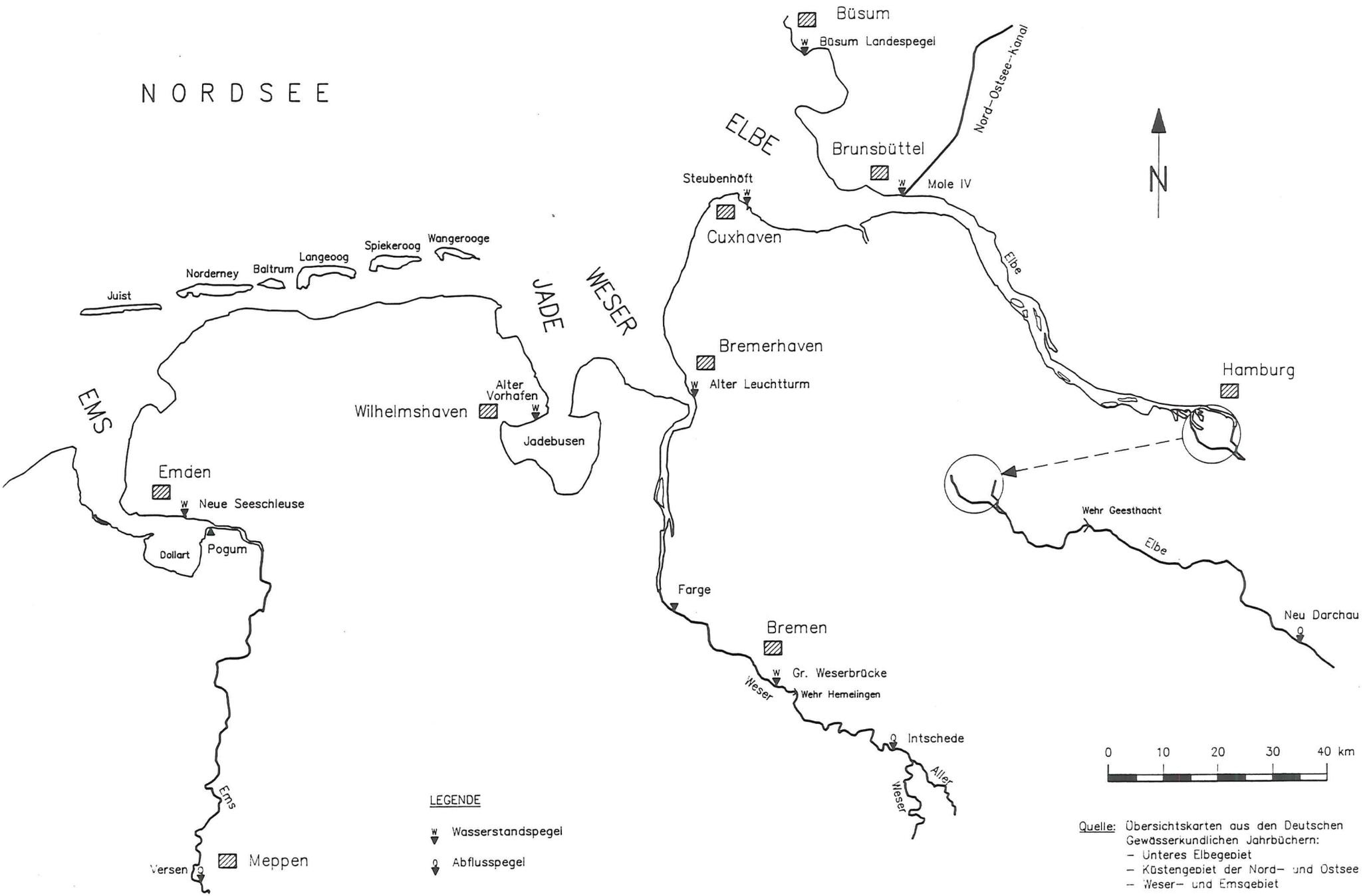
Von zusätzlichem Interesse war es, ob anhand der vorhandenen Peildaten auch mögliche Einflüsse auf die Sedimentationsvorgänge durch die natürlichen Randbedingungen wie das Tidegeschehen, Oberwasser, Salzgehalte oder die Temperatur nachzuweisen sind.

Das aus den Häfen gebaggerte Sohlenmaterial ist mehr oder weniger mit Schadstoffen belastet und kann aus ökologischen Gründen nicht mehr 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 Interesse. 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. Schlick-egge, Wasserinjektionen) sein. Mit dem Ziel, Ansätze zu finden, um die erforderlichen Baggerungen zu optimieren und reduzieren, sind Baggergutuntersuchungsprogramme und Forschungsprojekte eingeleitet worden (CHRISTIANSEN, HAAR, 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 Hafenan-

# LAGEPLAN



1  
4  
1

X

anlagen von Bremen erbringen. Die ebenfalls außerhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Hafenbecken in Hamburg wurden an anderer Stelle untersucht (CHRISTIANSEN, KAMPS, 1985; CHRISTIANSEN, HAAR, 1991).

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

Gewässer	Hafengebiet	Oberwasser $Q_o$	Meßstelle für Tidewasser- stände	Temperatur und Leitfähigkeit
Ems	Emden	Versen	Neue See- schleuse	Pogum
Jade	Wilhelmshaven	---	Alter Vorhafen	---
Weser	Bremerhaven	Intschede	Alter Leucht- turm	Bremerhaven
Weser	Bremen	Intschede	Gr. Weser- brücke	Farge
Elbe	Cuxhaven	Neu Darchau	Steubenhöft	Cuxhaven
Elbe	Brunsbüttel	Neu Darchau	Mole IV	Mole IV
Nordsee	Büsum	---	Büsum	---

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

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

### 3. Vorgehensweise

Ziel der Auswertungen war es, für die einzelnen Hafenbecken die mittleren Sedimentationen und ihre Verteilungen 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 Hafenflächen 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 Sohltiefe 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 wurden die Sohlenentwicklungen über

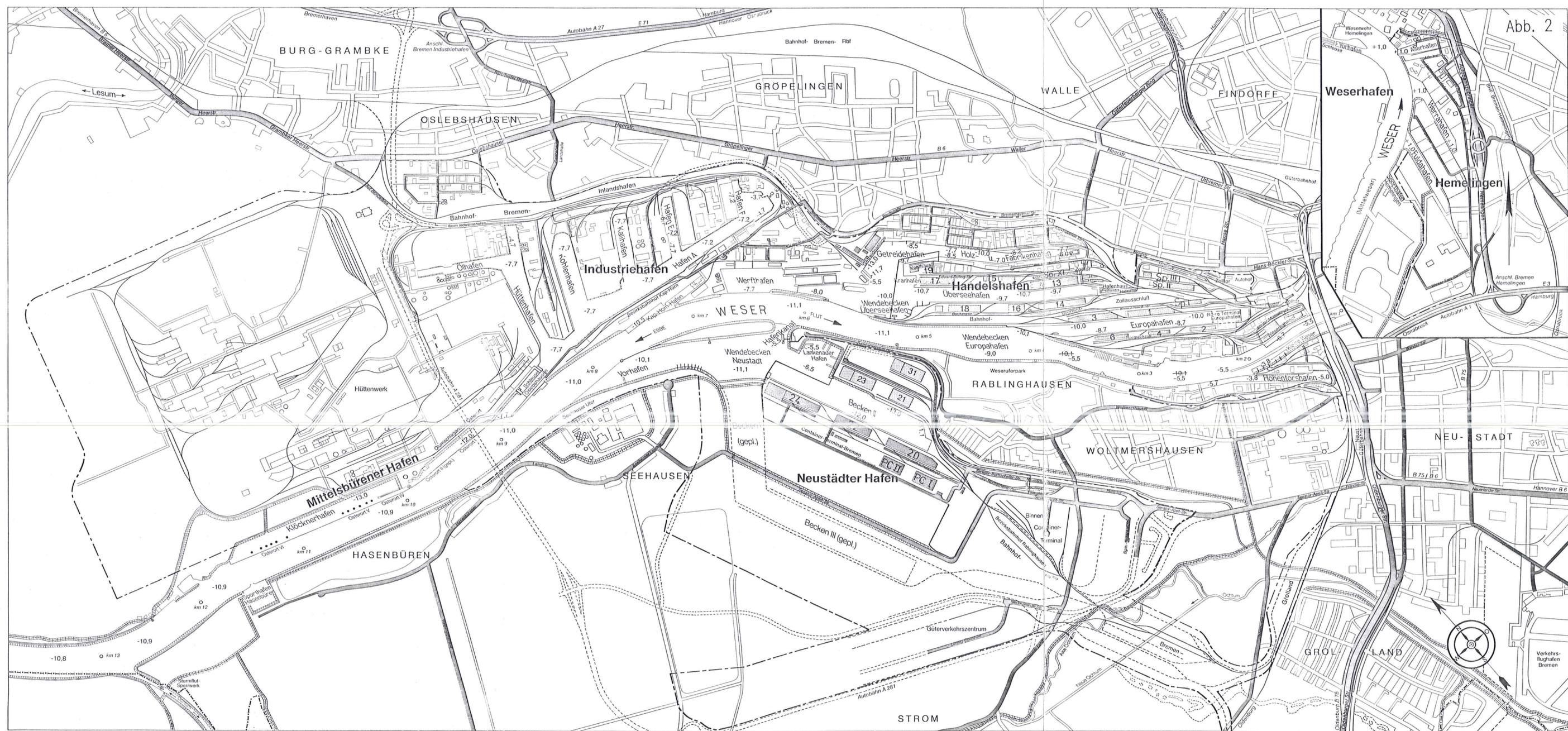
den gesamten Auswertungszeitraum für jeden Bereich zusammen mit den Baggerzeiten graphisch aufgetragen. Damit konnte aufgrund der Sohlenveränderungen nachvollzogen werden, in welchen Hafenumflächen der Bagger zum Einsatz gekommen war. Die Sohlenentwicklungen für die einzelnen Hafenumbereiche sind diesem Bericht als Anlagen beigefügt worden. Aus den Tiefendifferenzen in den durch Baggerungen ungestörten Hafenumbereichen zwischen zwei Peilungen ergab sich die Auflandung im Peilintervall, die linear auf Tageswerte umgerechnet wurde. Die Summe aller Sedimentationsereignisse wurde gemittelt und daraus die jährlichen Sedimentationsraten gebildet.

Um Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Sedimentationen von den zugehörigen gewässerkundlichen Einflußgrößen zu finden, wurden zu jedem Peilintervall die zugehörigen mittleren Tidehübe, 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 von 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  $Q_0$  der Weser beeinflusst. Um entsprechende Zusammenhänge aufzuzeigen, wurden zwischen Tidehub und Oberwasser Korrelationsrechnungen mit Monatsmitteln von 1967 bis 1989 durchgeführt. Obwohl in



Alle Höhenangaben beziehen sich auf Normal Null (NN). Seekarten Null (SKN) liegt 1,50 m unter NN  
 Mittleres Tidehochwasser (MThw) der Weser in Bremen-Oslebshausen +2,40 m NN = +3,90 m SKN  
 Mittleres Tideniedrigwasser (MTnw) der Weser in Bremen-Oslebshausen -1,68 m NN = -0,18 m SKN  
 Normaler Hafenerwasserstand im Industriehafen +2,10 m NN = +3,60 m SKN · Normalstau am Weserwehr Hemelingen (Oberwasser) +4,50 m NN

0 1000 2000 3000  
 Maßstab 1 : 25.000

Landesgrenze Bremen-Niedersachsen  
 Freihafengrenze  
 geplante Anlagen

Hafengewässer  
 Sonstige Gewässer  
 Hafen-, Gewerbeflächen

Hauptzufahrtstraßen  
 Eisenbahnanlagen  
 Gebäude für Hafenbetrieb

dieser 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).

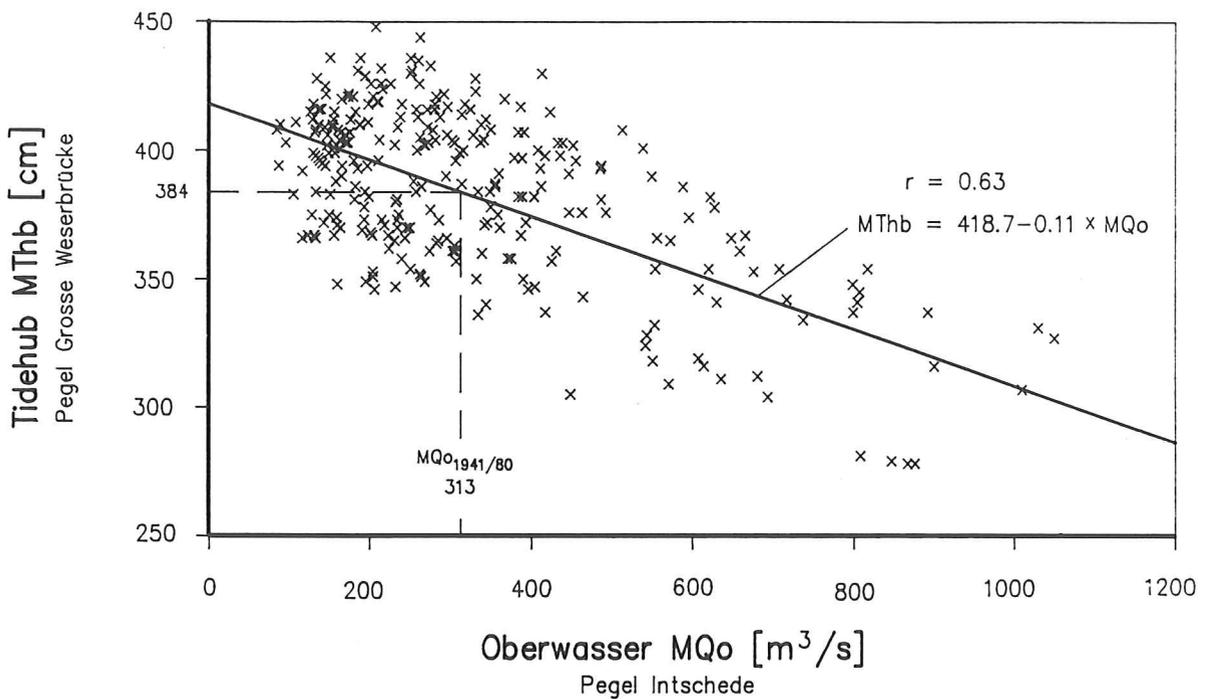


Abb. 3 Tidehub in Bremen und Oberwasser  
Monatsmittel von 1967 bis 1989

Für den langjährigen mittleren Abfluß am Pegel Intschede von  $MQ_o 1941/80 = 313 \text{ m}^3/\text{s}$  ergibt sich nach Abb. 3 ein zugehöriger Tidehub von  $Thb = 384 \text{ cm}$ , der etwa dem zehnjährigen Mittel ( $MThb 1971/80 = 391 \text{ cm}$ ) entspricht (WSD NORDWEST, 1985).

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 (der Tidehub) in Bremen, gleichzeitig wird aber auch die Flutdauer  $D_f$  und damit die Flutstromdauer  $D_{f\text{f}}$  gegenüber der Ebbe- und Ebbestromdauer verkürzt. Um dies nachzuweisen, wurden aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern die Wasserstandslisten für den Pegel Gr. Weserbrücke von 1985 bis 1988 ausgewertet. Die Berechnungsergebnisse zeigen sehr gute Zusammenhänge zwischen Flut-, Ebbedauer und Oberwasser (Abb. 4 und 5).

Mit Abb. 4 wird deutlich gemacht, daß bei höherem Oberwasser (kleinerem Tidehub und geringerem Wasseraustausch) weniger lange Sedimente wegen der kürzeren Flutphase in die Hafenbecken gelangen. Die Ebbedauer wird dementsprechend verlängert (Abb. 5). Bei einem Oberwasserzuwachs von  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  verlängert sich die Ebbedauer 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.

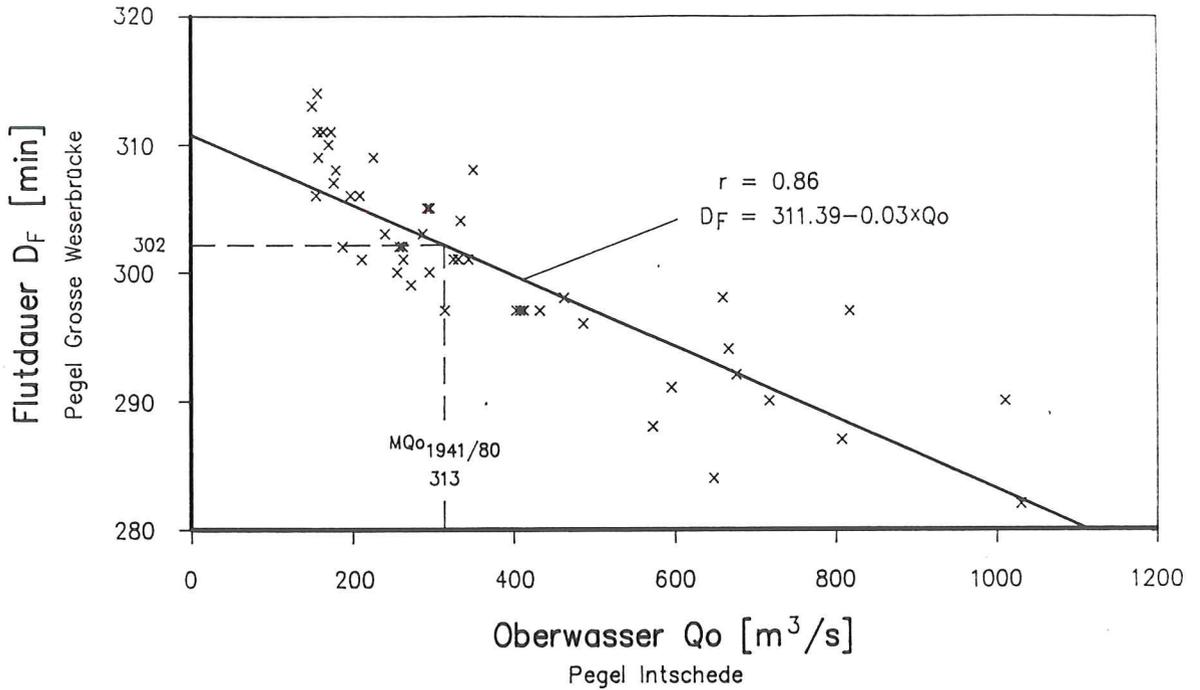


Abb. 4 Flutdauer in Bremen und Oberwasser  
Monatsmittel von 1985 bis 1988

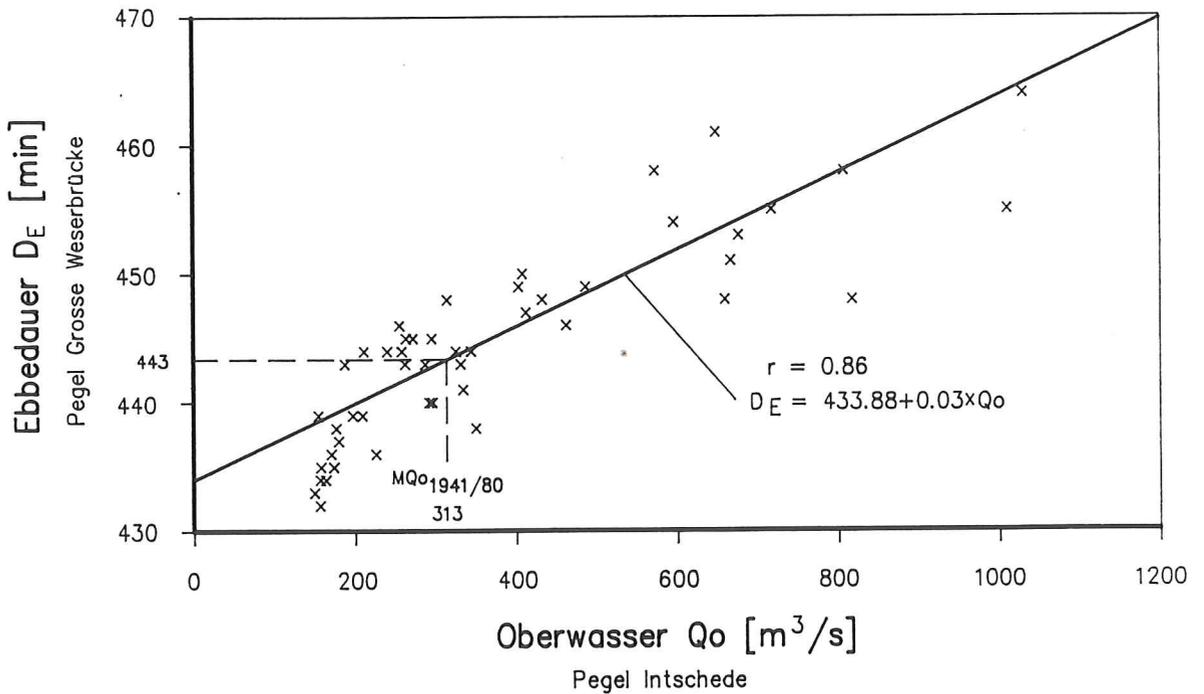


Abb. 5 Ebbdauer in Bremen und Oberwasser  
Monatsmittel von 1985 bis 1988

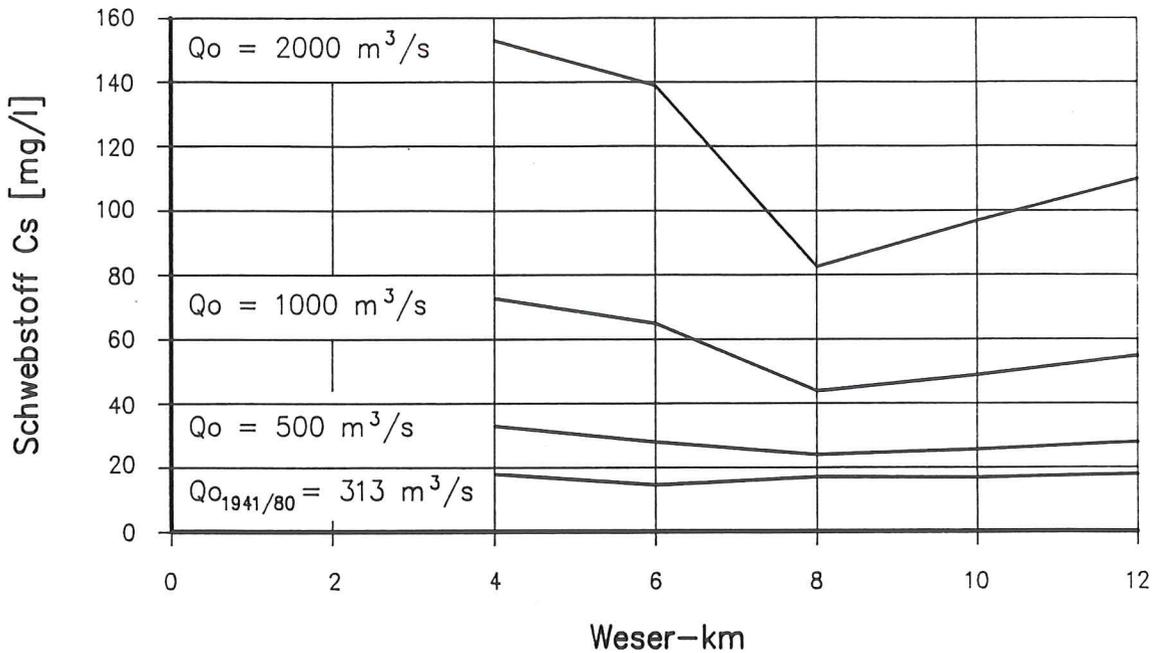


Abb. 6 Schwebstoffgehalt und Oberwasser im Bereich der stadtbremischen Häfen (nach Messungen des WASSERWIRTSCHAFTSAMTES BREMEN von 1984 bis 1987)

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 Hafenbecken größer als im umgekehrten Falle. Die Sedimentationen sind 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 den Sedimentationen und den hydrologischen Parametern zu ermitteln. Außerdem konnten extreme Ereignisse wie Sturmfluten oder Oberwasser-

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

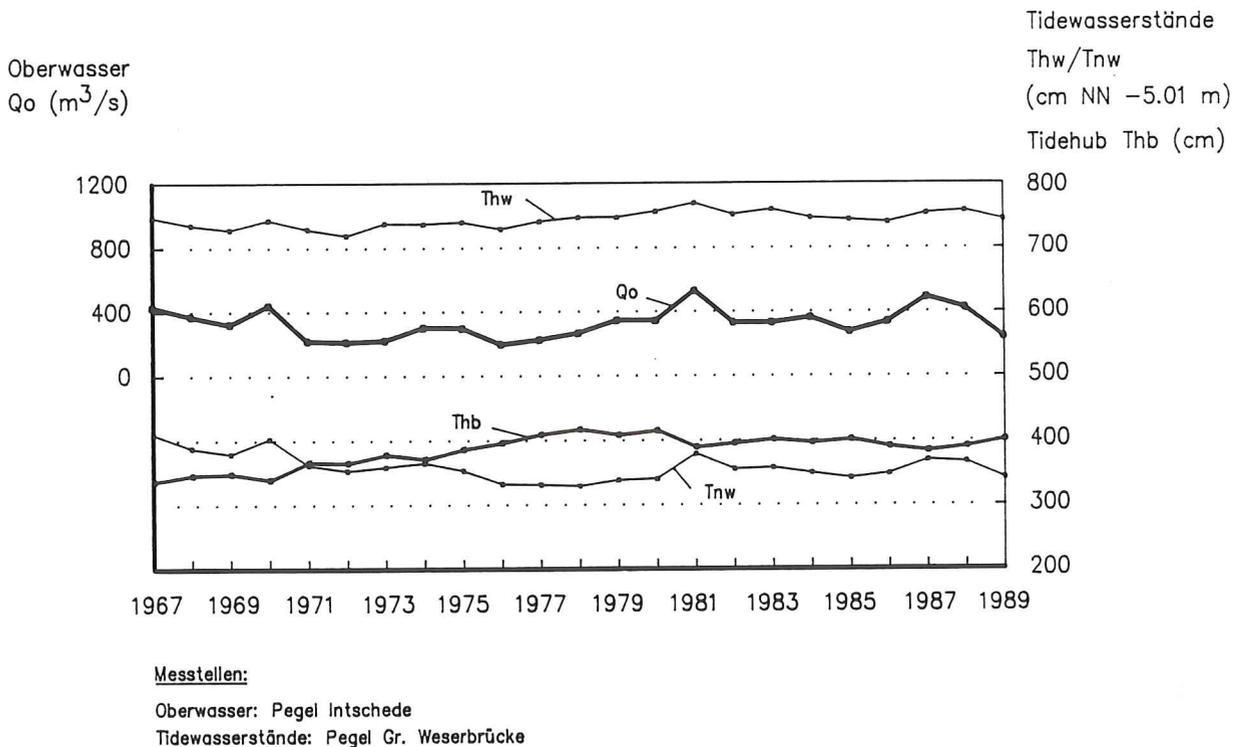


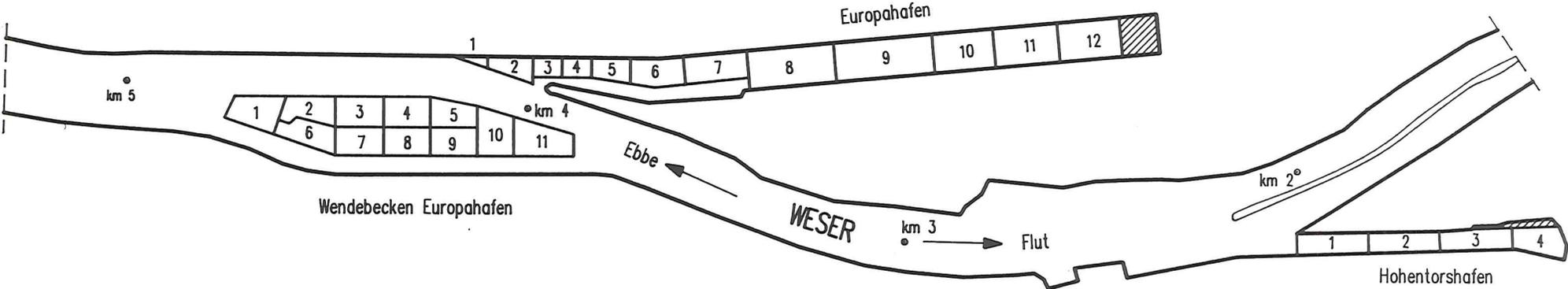
Abb. 7 Tideverhältnisse in Bremen und Oberwasser Jahresmittelwerte von 1967 bis 1989

Der gleichsinnige Verlauf von Tidehoch- (Thw), Tide-  
niedrig- (Tnw) und Oberwasser ( $Q_0$ ) wird mit Abb. 7  
deutlich. Die Ganglinie des Tidehubes (Thb) ist ent-  
sprechend den in Abb. 3 aufgezeigten Zusammenhängen  
gegenläufig zum Oberwasser. Es zeigt sich aber auch,  
wie der Unterweserausbau auf - 9 m SKN ab Mitte der  
70iger 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<sup>3</sup> Bo-  
denmassen in die Tideweser eingetrieben wurden  
(WSD NORTHWEST, 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 wie-  
der angeglichen haben, und von 1982 bis 1989 um-  
fangreiche Bühnenbauarbeiten in der Unter- und  
Außenweser vorgenommen wurden. Im folgenden wer-  
den die Sedimentationsverhältnisse in den einzel-  
nen Hafenbecken von Bremen erläutert und darge-  
stellt.

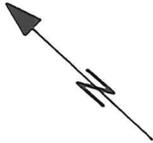
#### 4.2 Hohentorshafen und Europahafen

Die Unterweser ist bis zum Europahafen als See-  
schiffahrtsstraße ausgebaut (Abb. 2). Oberhalb da-  
von liegt die Sollsohle auf - 4 m SKN. Die für die  
Peilplananalyse vorgenommene Flächeneinteilung für  
den Hohentors- und Europahafen mit Wendebecken  
geht aus Abb. 8 hervor.

# BEREICH EUROPAHAFEN UND HOHENTORSHAFEN IN BREMEN



Rablinghausen



Woltmershausen



#### 4.2.1 Hohentorshafen

Der von Binnenschiffen genutzte Hohentorshafen liegt im Schutze eines Leitdammes. Die bei der Peilplananalyse betrachtete Gesamthafenfläche beträgt rd. 27.900 m<sup>2</sup>. Die Sohlenentwicklungen in den vier Teilbereichen sind in Anlage 1 von 1970 bis 1989 dargestellt. Die größten Differenzen zwischen den Peilintervallen - zu erkennen an den Steigungen der Verbindungslinien - liegen im Abschnitt 2 vor. Dort wurden auch die stärksten Sedimentationsraten und -mengen ermittelt. Gleichzeitig werden in diesem Hafenbereich die größten Wassertiefen vorgehalten. Die Verteilung der mittleren jährlichen Sedimentationen ist in Tafel 2 zusammengestellt worden.

Im Bereich 2 setzen sich auf nur 24 % der Hafenfläche mehr als die Hälfte aller Sedimente ab. Im inneren Hafen sind es lediglich 28 % des gesamten Feststoffeintrages von 6.046 m<sup>3</sup>/a auf 54 % der Hafenfläche. Dies zeigt, wie maßgebend der Strömungseffekt (die Walzenströmungen) die Sedimentationen im äußeren Hafen beeinflusst. Die Sedimentationsrate im Hohentorshafen von 22 cm/Jahr ist im Vergleich zu anderen Hafenanlagen nicht besonders hoch.

#### 4.2.2 Europahafen

Der Europahafen ist das älteste Hafenbecken Bremens am seeschiffstiefen Wasser. Aufgrund des günstigen Verhältnisses von Einfahrtsbreite zu Hafenlänge waren hier keine besonders hohen Auflandungen zu erwarten. Dies wird durch die in Anlage 2 aufgetragenen Sohlentwicklungen von 1981 bis 1988 und die

Bereich (s. Abb. 8)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	6200	22	20	22	1240	20
2	6728	24	47	53	3162	52
3	7334	26	12	14	880	15
4	7640	28	10	11	764	13
Summe 1 - 4 Mittelwert	27902	100	22	100	6046	100

Tafel 2: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1989  
im Hohentorshafen in Bremen

Berechnungsergebnisse (Tafel 3) bestätigt. Im inneren Hafenteil ab Bereich 8 sind nur geringe Auflandungen von weniger als 10 cm/Jahr. 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 Hafengebiet 1 bis 7 sedimentieren auf rd. einem Drittel der Fläche etwa zwei Drittel der Feststoffmenge. Die mittlere Sedimentationsrate für den Europahafen ist mit  $q_s = 13 \text{ cm/a}$  sehr gering.

#### 4.2.3 Wendebecken Europahafen

Die äußerst günstigen Verhältnisse im Europahafen selbst werden durch das im Strom gelegene Wendebecken zunichte gemacht. Das Wendebecken Europahafen ist einer der Verlandungsschwerpunkte im Bereich der stadtbremischen Häfen. Die mittlere Sedimentationsrate im Auswertungszeitraum 1970/1988 ist mit 66 cm/a ausgesprochen hoch (Tafel 4). Die stärksten Sedimentationen finden im linken Uferbereich in den Abschnitten 6 bis 8 statt. Verdeutlicht wird das mit Anlage 3, in der die unruhigsten Sohlenentwicklungen in den Randbereichen, vor allem nach der Vertiefung im Jahre 1974 zu erkennen sind. Bis 1972 wurden dort noch Mindertiefen von mehreren Metern hingenommen. Im übrigen sind im gesamten Wendebecken während des 9 m - Weserausbaues relativ hohe Auflandungen eingetreten.

Die Querschnittsvergrößerungen im Randbereich müssen zwangsläufig starke Sedimentationen zur

Bereich (s. Abb. 8)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	2231	2	40	16	892	5
2	5276	4	31	13	1636	9
3	3560	2	16	7	570	3
4	3419	2	23	9	786	4
5	5750	4	43	18	2473	13
6	9398	7	38	16	3571	19
7	12190	8	16	7	1950	10
8	23650	16	9	4	2129	11
9	25800	18	6	2	1548	8
10	17200	12	8	3	1376	7
11	18275	13	7	3	1279	6
12	17200	12	6	2	1032	5
Summe 1 - 12 Mittelwert	143949	100	13	100	19242	100

Tafel 3: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1981 bis 1988  
im Europahafen in Bremen

Bereich (s. Abb. 8)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	8760	9	38	5	3329	5
2	6149	6	54	8	3320	5
3	7800	8	53	7	4134	7
4	7800	8	51	7	3978	6
5	7020	7	53	7	3721	6
6	10168	11	86	12	8744	14
7	8400	9	96	14	8064	13
8	8400	9	84	12	7056	11
9	8400	9	62	9	5208	8
10	9213	10	58	8	5344	9
11	13120	14	74	11	9709	16
Summe 1 - 11 Mittelwert	95230	100	66	100	62607	100

Tafel 4: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1988  
im Wendebecken Europahafen in Bremen

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).

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

Sinngemäß gilt das gleiche für die Ebbephase. Diese Geschwindigkeit ist erforderlich, um das natürliche Gleichgewicht im Tidefluß zu erhalten. Wenn man den Querschnitt im Wendebcken 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, umso stärker sind die anschließenden Wiederversandungen. Der Zusammenhang zwischen Sedimentation und Sohlentiefe im linken Randbereich des Wendebckens geht aus Abb. 9 hervor.

Oberhalb des Wendebckens finden wegen des Sohlenüberganges vor allem bei hohen Abflüssen rückschreitende Erosionen statt. Das erodierte Material landet im oberen Abschnitt 11 des Wendebckens (Anlage 3 unten). Dies war bei

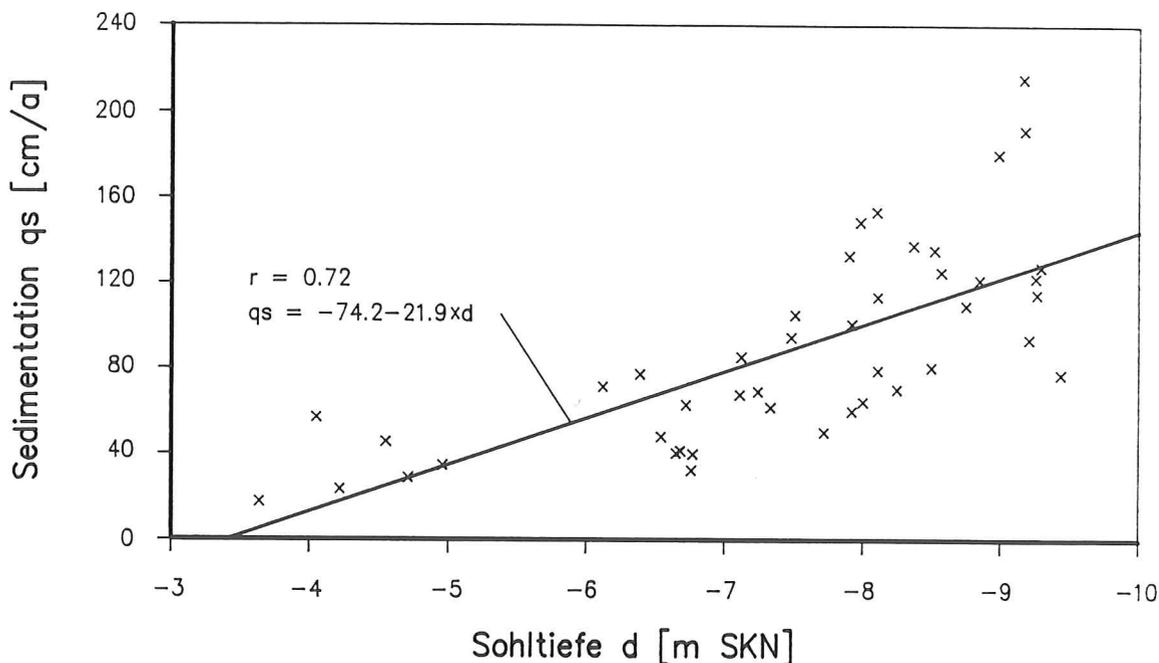


Abb. 9 Sedimentation und Sohlage im Randbereich des Wendebeckens Europahafen

dem bereits angesprochenen Hochwasserereignis vom März 1981 mit einem Extremwert von  $HQ_0 = 2.370 \text{ m}^3/\text{s}$  der Fall. Die gewässerkundlichen Daten weisen ähnlich hohe Abflüsse in den letzten Peilintervallen auf, welche die nach Anlage 3 ermittelten hohen Auflandungen im oberen Bereich des Wendebeckens verursachten. Wie deutlich dort die Abhängigkeiten zwischen der Sedimentation  $q_s$  und dem Oberwasser  $Q_0$  sind, zeigt die folgende Abb. 10, wonach sich die Sedimentationen bei hohen Abflüssen vermehrfachen.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß den sehr günstigen Verhältnissen im Europahafen

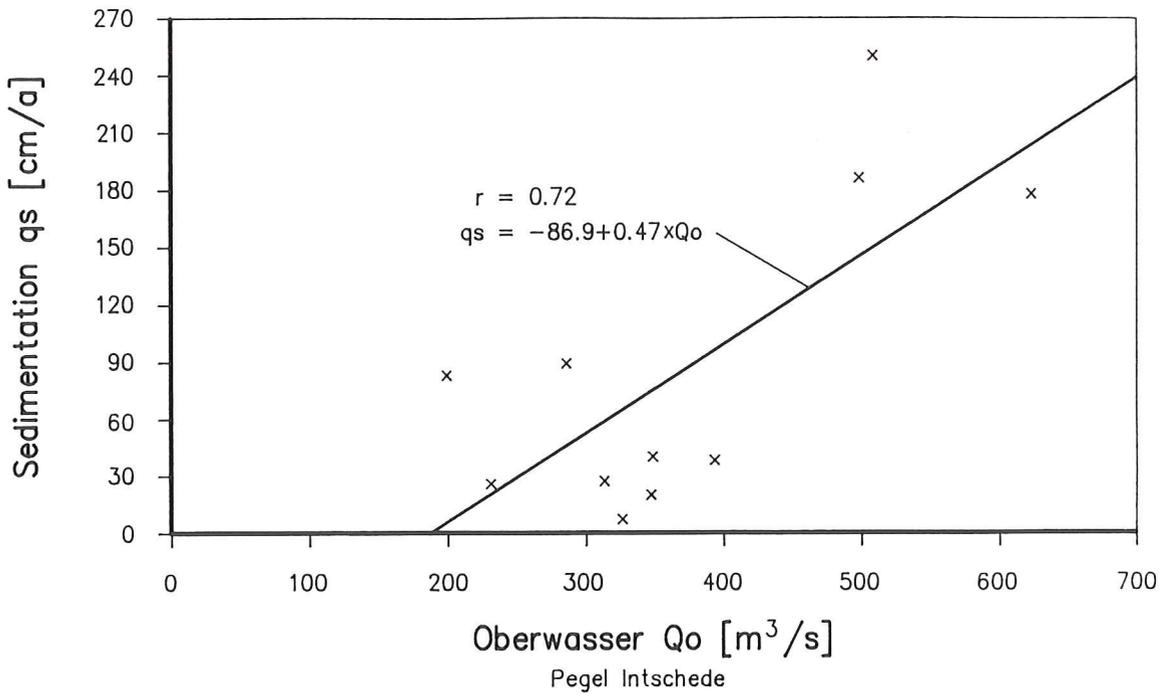


Abb. 10 Oberwasser und Sedimentation im oberen Bereich des Wendebeckens Europahafen

selbst mit durchschnittlichen Auflandungen von  $q_s = 13$  cm/a übermäßige Versandungen von  $q_s = 66$  cm/a im Wendebecken gegenüberstehen. Verbesserungen wären möglich, wenn der an das Wendebecken grenzende Sohlübergang gegen Erosionen geschützt oder weiter stromauf verlegt würde. Da Übertiefen zu verstärkten Sedimentationen führen, sollte der Baggerhorizont möglichst nicht mehr als 0,5 m unter der Solltiefe liegen.

Durch den Strukturwandel der Häfen in den letzten Jahrzehnten, z.B. vom konventionellen Stückgutumschlag zum Containerumschlag, hat

der Europahafen nicht mehr die Aufgaben wie in der Vergangenheit als Stückguthafen.

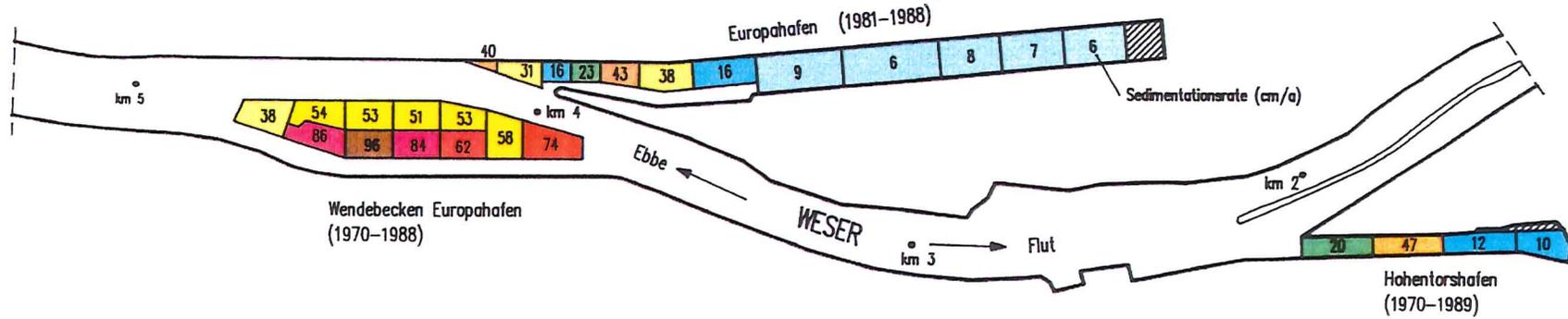
Es bedarf immer größerer Anstrengungen, das wachsende Güteraufkommen zu bewältigen. Von und zu den Seehäfen findet der Transport landgebunden auf der Straße und Schiene statt. Es ist bekannt, daß die Straßen durch den LKW-Verkehr bereits heute überlastet sind. Auf den Binnenwasserstraßen in Deutschland wird nur etwa 25 % des gesamten Güteraufkommens bewegt. Hier sind Reserven vorhanden, die künftig zur Entlastung des Straßenverkehrs besser genutzt werden müßten.

Da Bremen mit der Weser nach Minden den Anschluß an das europäische Binnenwasserstraßennetz hat, ist es denkbar, daß dem Europahafen künftig eine andere Aufgabe als Nahtstelle für den Binnenschiffsverkehr zukommt. Dann bräuchten im Wendebecken nicht mehr die großen Tiefen vorgehalten und die starken Verlandungen hingenommen zu werden.

Die Verteilungen der Sedimentationen in den oberen stadtbremischen Hafenanlagen sind in Abb. 11 zusammengestellt worden. Der Vergleich zwischen Hohentors- und Europahafen veranschaulicht, wie die Verlandungen mit der Beckenlänge abnehmen.

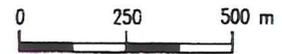
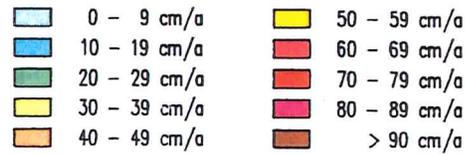
# BEREICH EUROPAHAFEN UND HOHENTORSHAFEN IN BREMEN

mittlere Sedimentation [cm/a]



Rablintshausen

Woltmershausen



### 4.3 Handels- und Werfthafen

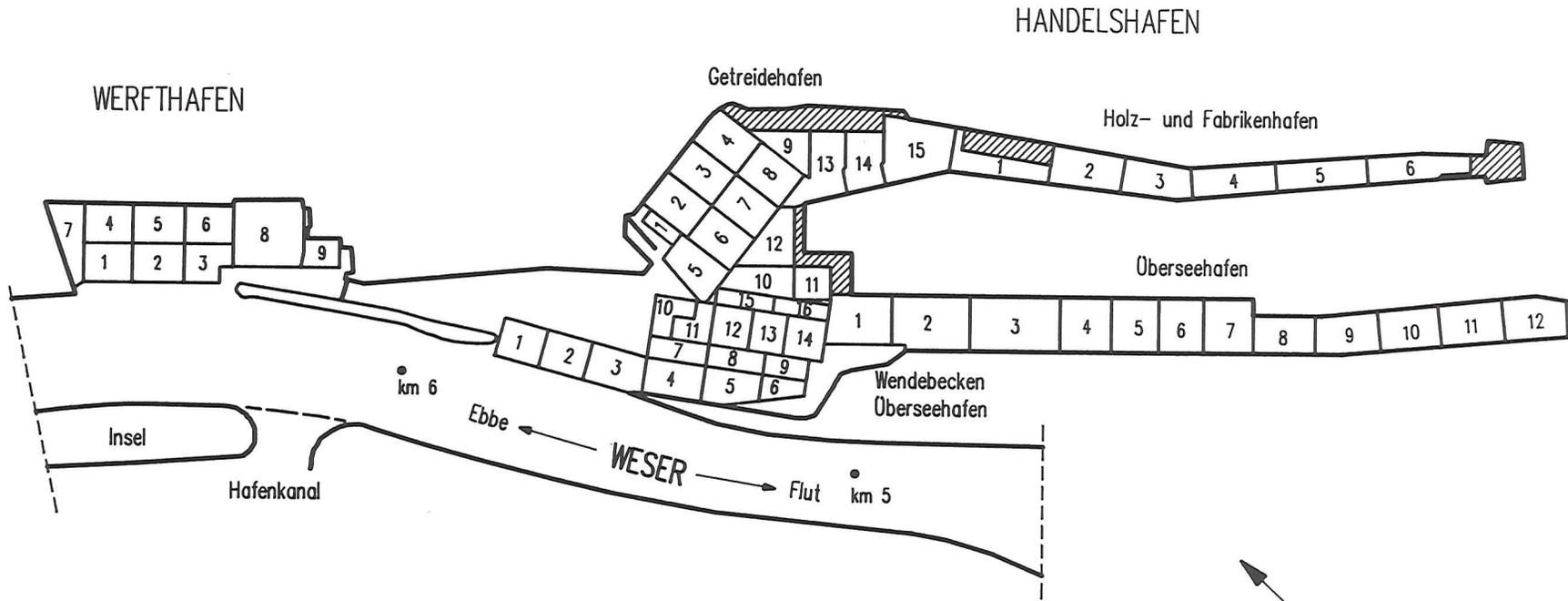
Der Handelshafen ist der größte offene Tidehafen Bremens am rechten Weserufer. Die für die Sedimentationsuntersuchungen anhand der Peilpläne vorgenommenen Flächenaufteilungen auch für den unterhalb gelegenen Werfthafen sind in Abb. 12 eingetragen. Der Handelshafen hat vier zu unterscheidende Teilbereiche. Am Strom befindet sich das Wendebecken mit dem anschließenden Überseehafen. Dahinter liegen der Getreide-, Holz- und Fabrikenhafen.

#### 4.3.1 Handelshafen

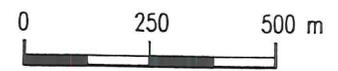
Die auswertbaren Zeiträume waren durch die im HAFENAMT BREMEN vorliegenden Peilpläne vorgegeben. Für das Wendebecken Überseehafen sind die Sohlenentwicklungen von 1973/88 in Anlage 4 und vom Getreidehafen für den Zeitraum 1976/89 in Anlage 5 aufgetragen. Die Bewegungen der Hafensohle (Sedimentationen) nehmen von außen nach innen deutlich ab. Im hinteren Teil des Getreidehafens sind nur noch sehr geringfügige Verlandungen vorhanden (Anlage 5). In den von 1981 bis 1989 untersuchten Becken des Übersee-, Holz- und Fabrikenhafen setzt sich der Trend mit durchschnittlichen Verlandungshöhen von weniger als 10 cm/a fort (Anlage 6 und 7). 42 % der gesamten Feststoffe sedimentieren vorn im Wendebecken des Handelshafens auf 20 % der Fläche (Tafel 5). Dagegen sind es lediglich 17 % der Sedimente, die sich in den hinteren Hafenbecken (52 % der Fläche) ablagern.

Die Sedimentationsrate im Handelshafen ist insgesamt mit  $q_s = 14 \text{ cm/a}$  etwa so, wie im nur

# HANDELS- UND WERFTHAFEN IN BREMEN



- 27 -



Handelshafen (s. Abb.12)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
Wendebecken Überseehafen (1973-1988)	107275	20	31	51	32752	42
Getreidehafen (1976-1989)	150399	28	21	34	32126	41
Überseehafen (1981-1989)	190409	35	4	7	8405	11
Holz- und Fabrikenhafen (1981-1989)	90479	17	5	8	4563	6
Handelshafen insgesamt	538562	100	14	100	77846	100

Tafel 5: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen im Handelshafen in Bremen

rd. einviertel so großen Europahafen ( $q_s = 13 \text{ cm/a}$ ). Das im Tidestrom gelegene Wendebucken Europahafen versendet jährlich mehr als doppelt so stark ( $q_s = 66 \text{ cm/a}$ ), als das im Handelshafen gelegene Wendebucken Überseehafen ( $q_s = 31 \text{ cm/a}$ , Tafel 5).

Der Vollständigkeit halber sind die Sedimentationsanalysen für den Handelshafen im einzelnen in den folgenden Tafeln 6 bis 9 angegeben.

#### 4.3.2 Werfthafen

Die Geometrie des Werfthafens mit der verhältnismäßig großen Einfahrtsbreite zur Hafenzlänge ließ entsprechend ungünstige Sedimentationsverhältnisse erwarten. Mit der Peilplananalyse von 1972 bis 1990 wird dies mit konkreten Zahlenwerten belegt. Die Sohlenentwicklung verläuft entsprechend unruhig (Anlage 8). Vor allem im Einfahrtsbereich wurden wiederholt und längerfristig Mindertiefen festgestellt. Die größten Sohlenerhöhungen treten in Einfahrtmitte (Bereich 2) auf, wo etwa das Zentrum der Walzenströmungen liegen wird. Die Berechnungsergebnisse weisen relativ gleichmäßige Verteilungen der Auflandungen innerhalb des Werfthafens auf (Tafel 10). Die durchschnittliche Sedimentationsrate von  $q_s = 38 \text{ cm/a}$  ist etwa dreimal so hoch wie im Handels- und Europahafen und rd. doppelt so hoch wie im Hohentorshafen.

Einen Überblick über die Sedimentationsverteilungen im Handels- und Werfthafen in Bremen gibt Abb. 13. Besonders deutlich wird hier, wie die Hafengeometrie und -größe die Sohlenveränderungen beeinflusst.

Bereich (s. Abb.12)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	7500	7	35	7	2625	8
2	7500	7	32	6	2400	7
3	8850	8	15	3	1328	4
4	8400	8	32	6	2688	9
5	8125	8	48	10	3900	12
6	3500	3	59	12	2065	6
7	7200	7	20	4	1440	4
8	7200	7	31	6	2232	7
9	6000	6	46	9	2760	8
10	6200	6	41	8	2542	8
11	5600	6	18	6	1008	3
12	8000	7	21	4	1680	5
13	8000	7	27	5	2160	7
14	8000	7	27	5	2160	7
15	3600	3	27	5	972	3
16	3600	3	22	4	792	2
Summe 1 - 16 Mittelwert	107275	100	31	100	32752	100

Tafel 6: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1973 bis 1988  
im Wendebecken Überseehafen in Bremen

Bereich (s. Abb.12)	Fläche A		Sedimentationsrate $q_s$		Sedimentationsmenge $Q_s$	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	2591	2	15	4	389	1
2	10238	7	28	8	2867	9
3	10238	7	23	7	2355	7
4	10238	7	26	8	2662	8
5	8329	6	28	8	2332	7
6	9903	6	23	7	2278	7
7	9903	6	21	6	2080	6
8	9903	6	24	7	2377	8
9	7301	5	34	10	2482	8
10	11289	8	24	8	2709	8
11	7545	5	26	8	1962	6
12	8813	6	25	8	2203	7
13	14087	9	15	4	2113	7
14	10254	7	15	4	1538	5
15	19767	13	9	3	1779	6
Summe 1 - 15 Mittelwert	150399	100	21	100	32126	100

Tafel 7: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1976 bis 1989  
im Getreidehafen in Bremen

Bereich (s. Abb.12)	Fläche A		Sedimentationsrate $q_s$		Sedimentationsmenge $Q_s$	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	19465	10	4	8	779	9
2	21830	11	5	9	1092	13
3	25240	13	4	8	1010	12
4	14051	7	7	13	984	12
5	14051	7	3	6	422	5
6	14051	7	5	9	703	8
7	14061	8	8	15	1125	14
8	13258	7	6	11	799	10
9	14069	8	2	3	281	3
10	14069	8	3	6	422	5
11	14069	8	3	6	422	5
12	12195	6	3	6	366	4
Summe 1 - 12 Mittelwert	190409	100	4	100	8405	100

Tafel 8: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1981 bis 1989  
im Überseehafen in Bremen

Bereich (s. Abb.12)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	13181	15	5	17	659	14
2	15778	17	6	20	947	21
3	15732	17	2	7	315	7
4	17055	19	8	26	1364	30
5	15880	18	4	13	635	14
6	12853	14	5	17	643	14
Summe 1 - 6 Mittelwert	90479	100	5	100	4563	100

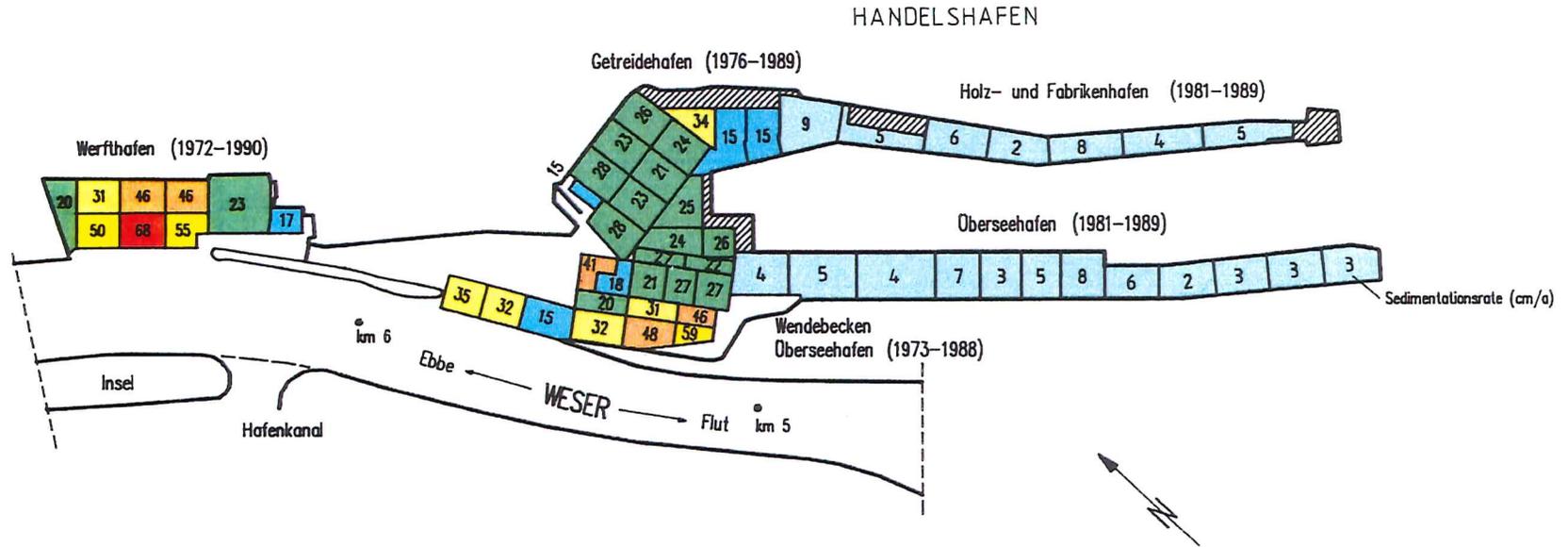
Tafel 9: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1981 bis 1989  
im Holz- und Fabrikenhafen in Bremen

Bereich (s. Abb.12)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	12000	10	50	14	6000	14
2	12000	10	68	19	8160	18
3	10200	9	55	15	5610	12
4	12600	11	31	9	3906	9
5	12600	11	46	13	5796	13
6	13175	11	46	13	6061	14
7	14645	13	20	6	2929	7
8	19263	17	23	6	4430	10
9	8649	8	17	5	1470	3
Summe 1 - 9 Mittelwert	115131	100	38	100	44362	100

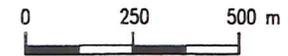
Tafel 10: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1972 bis 1990  
im Werfthafen in Bremen

# HANDELS- UND WERFTHAFEN IN BREMEN

mittlere Sedimentation [cm/a]



0 - 9 cm/a	50 - 59 cm/a
10 - 19 cm/a	60 - 69 cm/a
20 - 29 cm/a	70 - 79 cm/a
30 - 39 cm/a	80 - 89 cm/a
40 - 49 cm/a	> 90 cm/a



#### 4.4 Neustädter\_Hafen

Der Neustädter Hafen in Bremen nimmt eine Sonderstellung ein, weil er mit zwei Zufahrten durch den Vorhafen und den Hafenkana! versehen ist (Abb. 2 und 14). 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 um etwa 60 % gesenkt, wenn der Hafenkana! geschlossen ist.

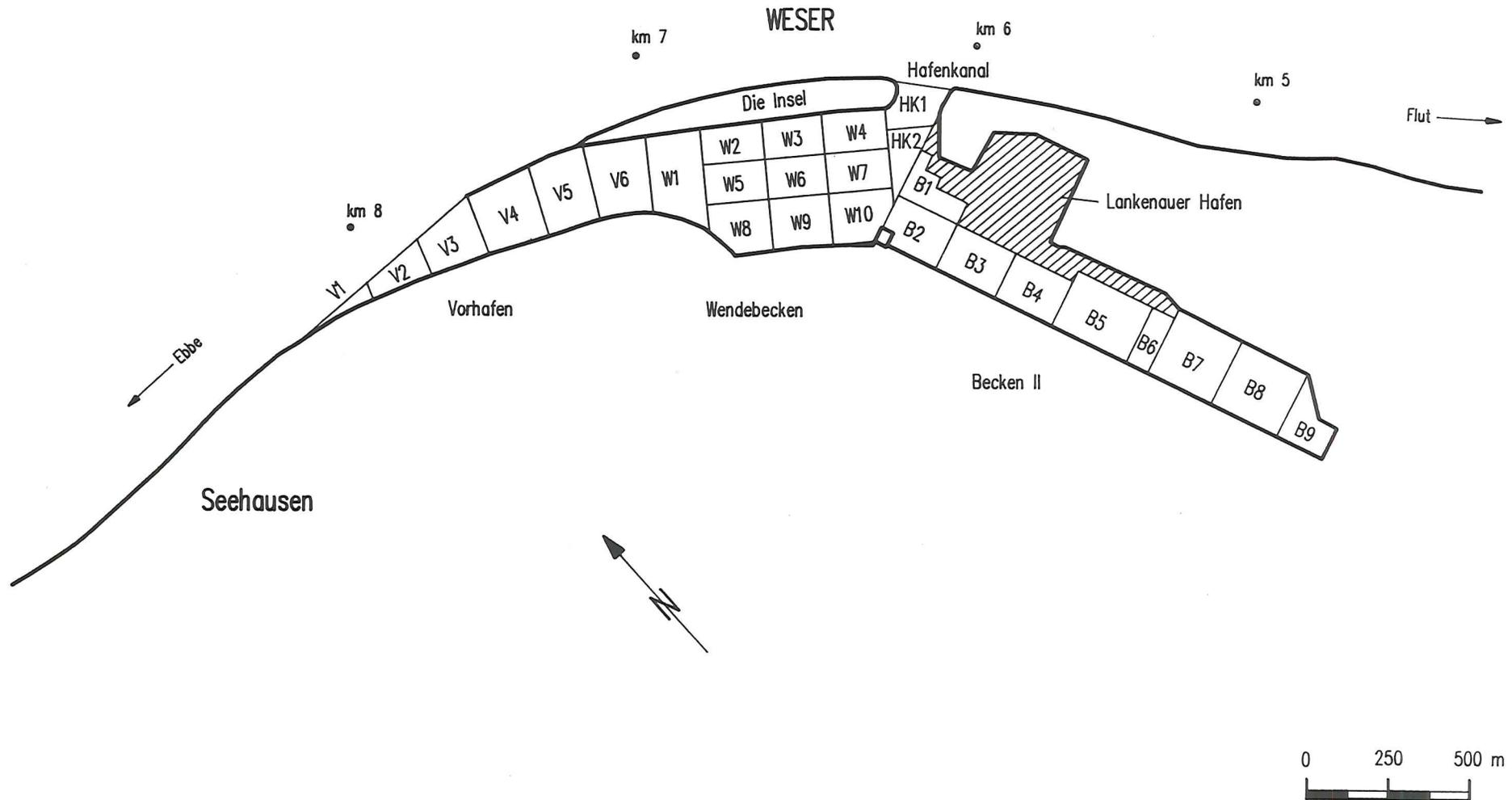
Gemäß Flächenaufteilung in Abb. 14 haben sich aus den Sedimentationsberechnungen die in Tafel 11 eingetragenen Sedimentationsraten und -mengen ergeben. Danach setzen sich im Wendebecken knapp 50 % der Feststoffe auf nur etwa 30 % der gesamten Hafensfläche ab. Mit durchschnittlich 75 cm Auflandungen im Jahr wurde im Wendebecken die höchste Sedimentationsrate von allen stadtbremischen Hafenanlagen festgestellt. Selbst das im Strom gelegene Wendebecken zum Europahafen verlandet im Mittel nur mit 66 cm/a.

Die Auswertungsergebnisse im einzelnen für den Vorhafen, das Wendebecken und Becken II (Abb. 14) sind in den Tafeln 12 bis 14 zusammengestellt worden.

Innerhalb des Vorhafens nehmen die Sedimentationen in der Tendenz von außen nach innen zu (Tafel 12). Veranschaulicht wird dies mit Anlage 9, wonach der Sohlenverlauf von V1 bis zum Übergangsbereich W1 immer unregelmäßiger wird. Die ungünstigen Sedimentationsverhältnisse im Wendebecken als Reaktion auf die Strömungen sind aus Tafel 13 und Anlage 10 abzulesen. Die Verlandungsschwerpunkte wurden im

# NEUSTÄDTER HAFEN IN BREMEN

Abb. 14



Bereich (s. Abb. 14)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
Vorhafen V1 bis V6	117896	19	30	13	35532	14
Übergangsbereich W1	37280	6	61	26	22741	9
Wendebecken W2 bis W10	168100	27	75	32	126679	48
Hafenkanal HK1 und HK2	31983	5	43	19	13752	5
Becken II B1 bis B9	273764	43	23	10	62935	24
Neustädter Hafen insgesamt	629023	100	42	100	261639	100

Tafel 11: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1967 (70) bis 1989 (90) im Neustädter Hafen in Bremen

Bereich (s. Abb.14)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
V1	6401	5	26	15	1664	5
V2	20357	17	20	12	4071	11
V3	21238	18	18	10	3823	11
V4	22140	19	27	15	5978	17
V5	28160	24	39	22	10980	31
V6	19600	17	46	26	9016	25
Summe V1 - V6 Mittelwert	117896	100	30	100	35532	100

Tafel 12: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1967 bis 1989  
im Vorhafen des Neustädter Hafens in Bremen

Bereich (s. Abb.14)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
W2	20000	12	38	5	7600	6
W3	20000	12	32	4	6400	5
W4	20000	12	44	6	8800	7
W5	19950	12	135	19	26933	21
W6	20000	12	78	11	15600	12
W7	20000	12	28	4	5600	5
W8	12150	6	164	23	19926	16
W9	18000	11	122	17	21960	17
W10	18000	11	77	11	13860	11
Summe W2 - W10 Mittelwert	168100	100	75	100	126679	100

Tafel 13: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1967 bis 1990  
im Wendebecken des Neustädter Hafens in Bremen

Bereich (s. Abb.14)	Fläche A		Sedimentationsrate $q_s$		Sedimentationsmenge $Q_s$	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
B1	14040	5	41	18	5756	9
B2	23760	9	34	15	8078	13
B3	23760	9	31	14	7366	12
B4	23760	9	30	13	7128	11
B5	41280	15	23	10	9494	15
B6	14000	5	18	8	2520	4
B7	53502	19	18	8	9630	15
B8	57942	21	16	7	9271	15
B9	21720	8	17	7	3692	6
Summe B1 - B9 Mittelwert	273764	100	23	100	62935	100

Tafel 14: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1989  
im Becken II des Neustädter Hafens in Bremen

Uferbereich (W5, W8, W9) gefunden, dort; wo sich nach den Modellversuchen ausgeprägte Flutstromwalzen ausbilden. An der Weserinsel (W2 bis W4) haben die Tideströmungen eine größere Transportkapazität, so daß dort vergleichsweise niedrige Sedimentationen eintreten.

Selbstverständlich können auch durch Reservebaggerungen Wiederverlandungen nicht verhindert werden. Die 1984 im Walzenbereich des Wendbeckens durchgeführten Vorratsbaggerungen haben aber gezeigt, daß der Unterhaltungsaufwand damit verringert werden kann (Anlage 10, Bereiche W5, W6, W8 und W9). Durch den tieferen Baggerschnitt wird festeres Material gefördert, und 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.

Bei den Peilungen durch das HAFENAMT BREMEN wird der Hafenkanal für sich kontrolliert (Abb. 14, HK 1 und HK 2). In der Einfahrt wird eine Solltiefe von - 4 m SKN für die Kleinschiffahrt vorgehalten. Im Hafen selbst (HK 2, Anlage 11) ergeben sich bei der festgelegten Sohllage von - 9,60 m SKN bereits größere Probleme mit Sedimentationsraten von im Mittel 60 cm/a.

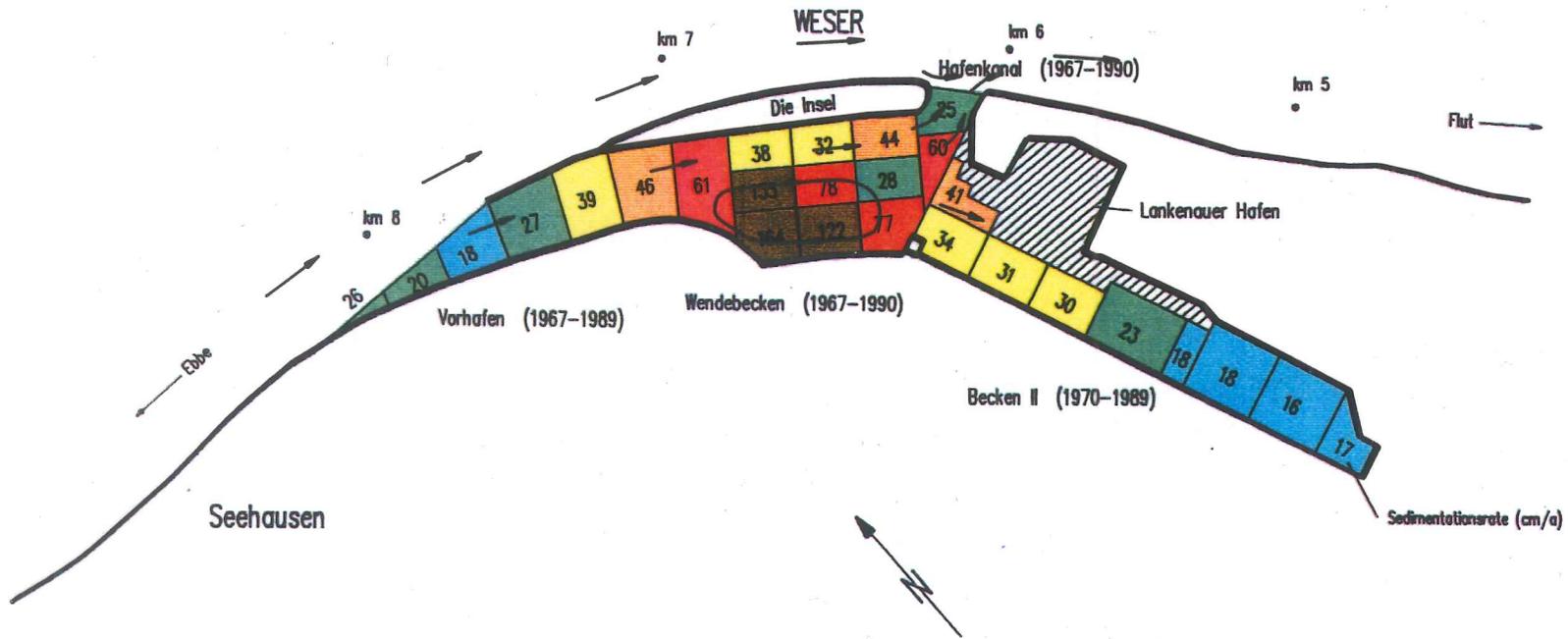
Innerhalb des Becken II im Neustädter Hafen nehmen die Sedimentationen deutlich ab (Tafel 14, Anlage 12). Die in Anlage 12 aufgetragenen Sohlenentwicklungen verdeutlichen, daß selbst Sohlenvertiefungen um mehrere Meter im hinteren Beckenbereich keine Auflandungsprobleme verursacht haben.

Insgesamt werden sich die in Abb. 15 dargestellten Sedimentationsverhältnisse im Neustädter Hafen

# NEUSTÄDTER HAFEN IN BREMEN

mittlere Sedimentation [cm/a]

Flutströmungen schematisch nach FRANZIUS-INSTITUT (1989)



0 - 9 cm/a	50 - 59 cm/a
10 - 19 cm/a	60 - 69 cm/a
20 - 29 cm/a	70 - 79 cm/a
30 - 39 cm/a	80 - 89 cm/a
40 - 49 cm/a	> 90 cm/a



künftig grundlegend ändern, da der Hafenkanal zu Beginn des Jahres 1992 geschlossen worden ist. Hauptursache der bisherigen Verlandungen waren die Flutströmungen mit einer ausgeprägten Walze im Wendebcken. Die Ebbeströmungen im Neustädter Hafen waren weniger bedeutend. Nach den Modellversuchen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) bildet sich nach der Schließung des Kanals bei Ebbe keine und bei Flut nur noch eine sehr schwache Walzenströmung im Wendebcken aus. Die Sedimentationen werden dort deshalb deutlich geringer werden, sich aber in der Vorhafeneinfahrt erhöhen. Insgesamt werden die Sedimentationen 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 unmittelbar mit dem Baggervolumen nach Schutenaufmaß verglichen werden kann. Nach den Sedimentationsberechnungen ergibt sich für den Neustädter Hafen insgesamt eine mittlere jährliche Verlandungsmenge von rd. 261.000 m<sup>3</sup>. Die nach Schutenaufmaß ermittelte Baggermenge beträgt rd. 390.000 m<sup>3</sup>/a und liegt somit um etwa 50 % über dem Profilaufmaß. Ähnliche Abweichungen wurden bei einer Untersuchung zu einer Baggerung im Hamburger Hafen festgestellt (FÜHRBÖTER, MACKE, 1985).

Wenn in Zukunft bei geschlossenem Hafenkanal nur noch etwa 60 % der vorstehend genannten Menge im Neustädter Hafen sedimentieren, müßten nach den vorstehenden Werten jährlich  $390.000 \cdot 0,4 = 156.000 \text{ m}^3$  weniger Baggermassen in Bremen deponiert werden. Das ist eine bedeutende Entlastung, da nur noch in geringem Umfang Flächen zur Hafenschlickunterbringung zur Verfügung stehen. Ob der Hafenkanal geschlossen bleibt, ist noch nicht endgültig geklärt. Zunächst ist im Rahmen einer Umweltverträglichkeits-

untersuchung festzustellen, wo das nicht mehr im Neustädter Hafen sedimentierende Sohlenmaterial verbleibt und ob es nicht zu einer unverträglichen Belastung anderer Hafenbecken oder der Unterweser kommt.

#### 4.5 Das untere Hafengebiet von Bremen

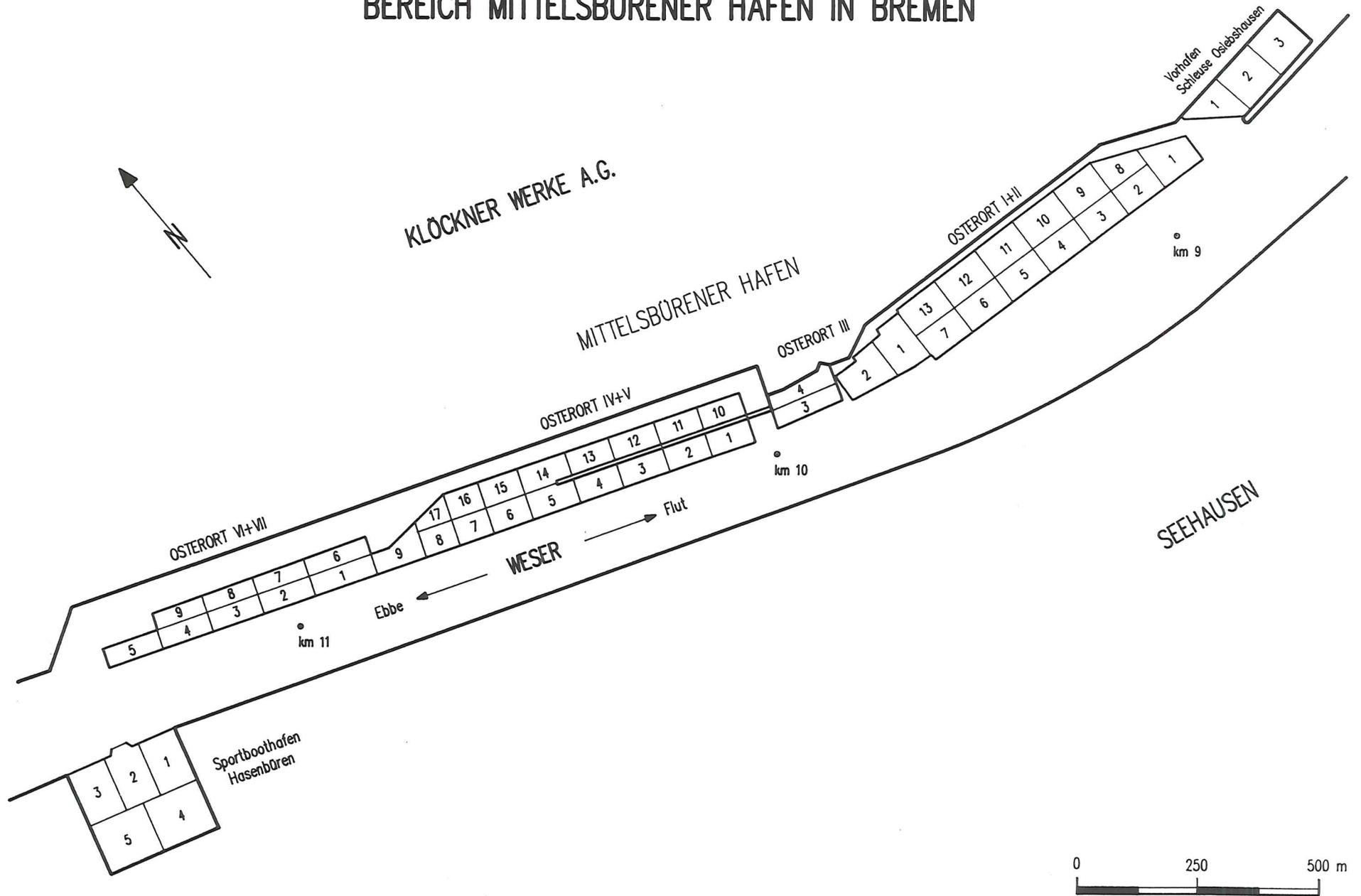
Abschließend werden von den stadtbremischen Häfen der Mittelsbürener Hafen zusammen mit dem Vorhafen zur Schleuse Oslebshausen und dem Sportboothafen Hasenbüren besprochen (Abb. 2 und 16).

Die Mittelsbürener Hafenanlagen liegen als Stromanleger am erweiterten rechten Weserufer. Aufgrund der Geometrie und den sich daraus ergebenden Strömungsbedingungen sind stärkere Versandungen unabwendbar. Dieser Umstand kann noch dadurch verschlechtert werden, wenn im Uferbereich entgegen der natürlichen Morphologie eines Flußquerschnittes große Sohltiefen für die Schiffsliegeplätze geschaffen werden müssen. Im folgenden werden die Sedimentationsverhältnisse zunächst für die Hafenanlagen am rechten Weserufer erläutert. Anschließend soll der Sportboothafen Hasenbüren kurz behandelt werden.

##### 4.5.1 Vorhafen Schleuse Oslebshausen

Der Vorhafen zur Schleuse Oslebshausen verlandet nur unwesentlich. Die mittlere jährliche Sedimentationsrate beträgt lediglich 8 cm/a (Tafel 15). So zeigt auch Anlage 13, daß im Vorhafen zwischen 1970 und 1989 nur sehr geringe Sohlenbewegungen stattgefunden haben. Begründet

# BEREICH MITTELSBÜRENER HAFEN IN BREMEN



Bereich (s. Abb.16)	Fläche A		Sedimentationsrate $q_s$		Sedimentationsmenge $Q_s$	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	4847	24	12	46	582	36
2	7425	38	5	19	371	23
3	7425	38	9	35	668	41
Summe 1 - 3 Mittelwert	19697	100	8	100	1621	100

Tafel 15: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1989  
im Vorhafen der Schleuse Oslebshausen in Bremen

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 Solltiefe 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.

#### 4.5.2 Osterort I und II

Die mittlere Sedimentationsrate beträgt im Osterorter Hafen I und II 30 cm/a (Tafel 16). Der Sedimenteintrag findet überwiegend in der einen Meter tiefer als das Fahrwasser ausgebauten Liegewanne am Ufer statt (Bereich 8 bis 13, Abb. 16). Die Sedimentationsrate ist dort mit  $q_s = 43$  cm/a überdurchschnittlich. Die starken Verlandungen im verbreiterten und vertieften Weserquerschnitt am rechten Ufer sind wie beim Wendebecken Europahafen eine Antwort auf die dort vorhandenen schwachen Strömungen mit geringer Transportkapazität. Die in Anlage 14 aufgetragenen Sohlenentwicklungen veranschaulichen, wie die Sollwassertiefen am Strom (Bereich 1 bis 7) noch verhältnismäßig gut vorgehalten werden können. Dagegen wird die außerhalb davon vorgegebene Sohlage von - 10,50 m SKN am Rande kaum erreicht. Ab 1976 wurden gegenüber anderen Zeiträumen mit vergleichbaren hydrologischen Bedingungen verhältnismäßig starke Auflandungen im Hafen Osterort I und II ermittelt. Die Ursache dafür waren die Vertiefungen des Fahrwassers während des Weserausbaues, die in dieser Zeit im Bereich Bremens ausgeführt wurden.

Bereich (s. Abb.16)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>			
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%		
Strombereich	1	7500	8.2	19	q <sub>s</sub> = 19 cm/a	4.9	1425	5.2
	2	7500	8.2	21		5.2	1575	5.7
	3	7500	8.2	23		5.7	1725	6.2
	4	7500	8.2	17		4.3	1275	4.7
	5	7500	8.2	18		4.4	1350	4.9
	6	7500	8.2	18		4.4	1350	4.9
	7	6000	6.4	22		5.4	1320	4.8
Randbereich	8	5000	5.2	64	q <sub>s</sub> = 43 cm/a	16.0	3200	11.6
	9	7500	8.2	54		13.6	4050	14.7
	10	7500	8.2	42		10.5	3150	11.4
	11	7500	8.2	40		10.1	3000	10.9
	12	7500	8.2	28		7.0	2100	7.6
	13	6000	6.4	34		8.5	2040	7.4
Summe 1 - 13 Mittelwert	92000	100	30	100	27560	100		

Tafel 16: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1971 bis 1989  
in Osterort I und II des Mittelsbürener Hafens in Bremen

Im Uferbereich von Osterort I und II konnte rechnerisch nachgewiesen werden, daß die Sedimentationen von der Sohlage abhängen. Das Ergebnis ist in Abb. 17 aufgetragen. Trotz des schwachen mathematischen Zusammenhanges zeigt sich in der Tendenz, daß die Sedimentationen deutlich mit der Sohltiefe zunehmen. Für die Sohltiefe von - 10,50 m SKN ergibt etwa der in Tafel 16 angegebene Wert von  $q_s = 43 \text{ cm/a}$ .

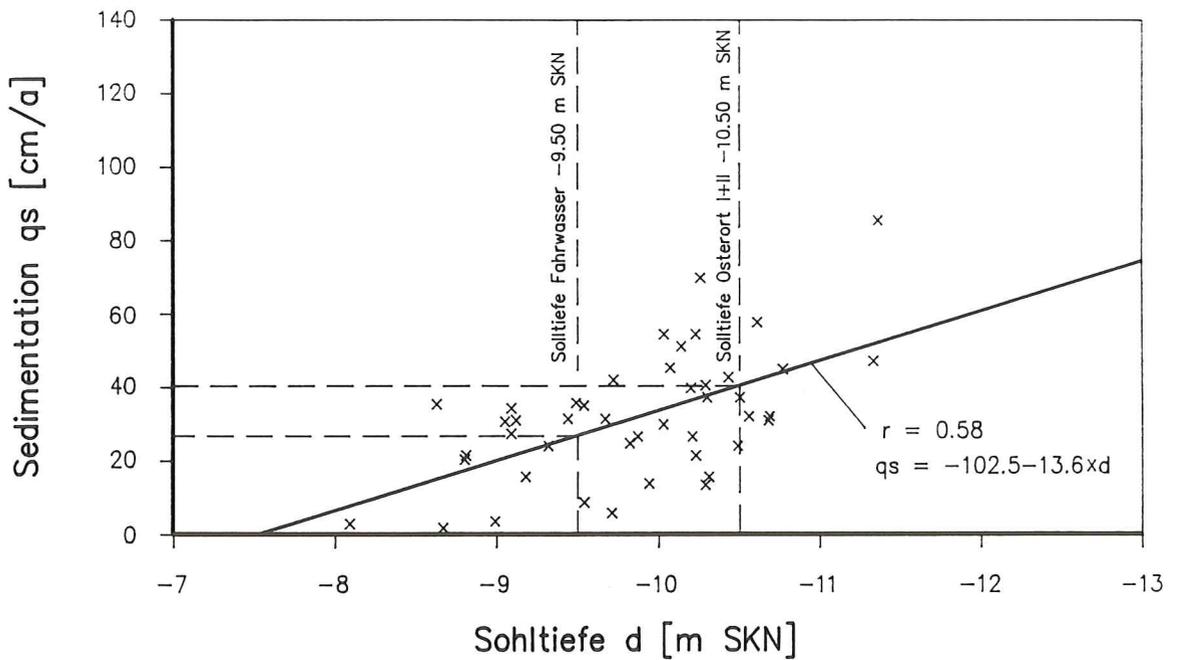


Abb. 17 Sohlage und Sedimentation im Uferbereich von Osterort I und II

#### 4.5.3 Osterort III

Lediglich zur Vervollständigung wurde der Abschnitt von Osterort III mit ausgewertet. In diesem von der Schifffahrt nicht genutzten Bereich 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 sind die Sedimentationen (Tafel 17). Auch die in Anlage 15 aufgetragenen Sohlenentwicklungen zeigen einen sehr glatten Verlauf.

#### 4.5.4 Osterort IV und V

Für den Bereich Osterort IV und V sind mit - 11,50 m SKN die größten Ausbautiefen für den Mittelsbürener Hafen vorgegeben. Dagegen beträgt die Fahrwassersolltiefe der Weser dort - 9,40 m SKN. Aufgrund dieser ungünstigen Tiefenverhältnisse sind die Sedimentationen in Osterort IV und V mit durchschnittlich  $q_s = 45 \text{ cm/a}$  verhältnismäßig hoch (Tafel 18). Auch der Randbereich (Abschnitt 10 bis 17, Abb. 16) verlandet mit  $q_s = 69 \text{ cm/a}$  bedeutend stärker als in Osterort I und II.

Die Sohlenentwicklungen in Osterort IV und V sind erwartungsgemäß im Strombereich weniger lebhaft als im Randbereich (Anlage 16 und 17). Außerdem 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.

Bereich (s. Abb.16)	Fläche A		Sedimentationsrate $q_s$		Sedimentationsmenge $Q_s$	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	10275	32.0	19.1	29.2	1963	35.2
2	9250	29.0	22.7	34.7	2100	37.6
3	6750	21.0	16.7	25.5	1127	20.2
4	5625	18.0	6.9	10.6	388	7.0
Summe 1 - 4 Mittelwert	31900	100	17	100	5578	100

Tafel 17: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1974 bis 1989  
in Osterort III des Mittelsbürener Hafens in Bremen

Bereich (s. Abb.16)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>		
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%	
Strombereich	1	6000	5.9	18	2.3	1080	2.3
	2	6000	5.9	22	2.8	1320	2.9
	3	6000	5.9	25	3.2	1500	3.2
	4	6000	5.9	31	4.0	1860	4.0
	5	7400	7.3	29	3.8	2146	4.7
	6	5850	5.8	22	2.8	1287	2.8
	7	5200	5.1	19	2.5	988	2.2
	8	5200	5.1	28	3.6	1456	3.2
	9	7655	7.5	35	4.6	2679	5.8
Randbereich	10	6000	5.9	48	6.2	2880	6.2
	11	6000	5.9	75	9.6	4500	9.7
	12	6000	5.9	87	11.2	5220	11.3
	13	6000	5.9	71	9.2	4260	9.2
	14	7400	7.3	70	9.1	5180	11.2
	15	5850	5.8	72	9.3	4212	9.1
	16	5200	5.1	72	9.3	3744	8.1
	17	3795	3.8	50	6.5	1898	4.1
Summe 1 - 17 Mittelwert	101550	100	45	100	46210	100	

Tafel 18: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1989  
in Osterort IV und V des Mittelsbürener Hafens in Bremen

Sehr deutlich macht sich bei der Sohlenentwicklung auch der Unterweserausbau in den siebziger Jahren und der Weserdurchbruch 1981 bemerkbar.

Durch die sehr unterschiedlichen Sohllagen im Auswertungszeitraum konnte mit einer Korrelationsrechnung ein recht guter Zusammenhang zwischen den Sedimentationen und den Sohlthiefen nachgewiesen werden (Abb. 18).

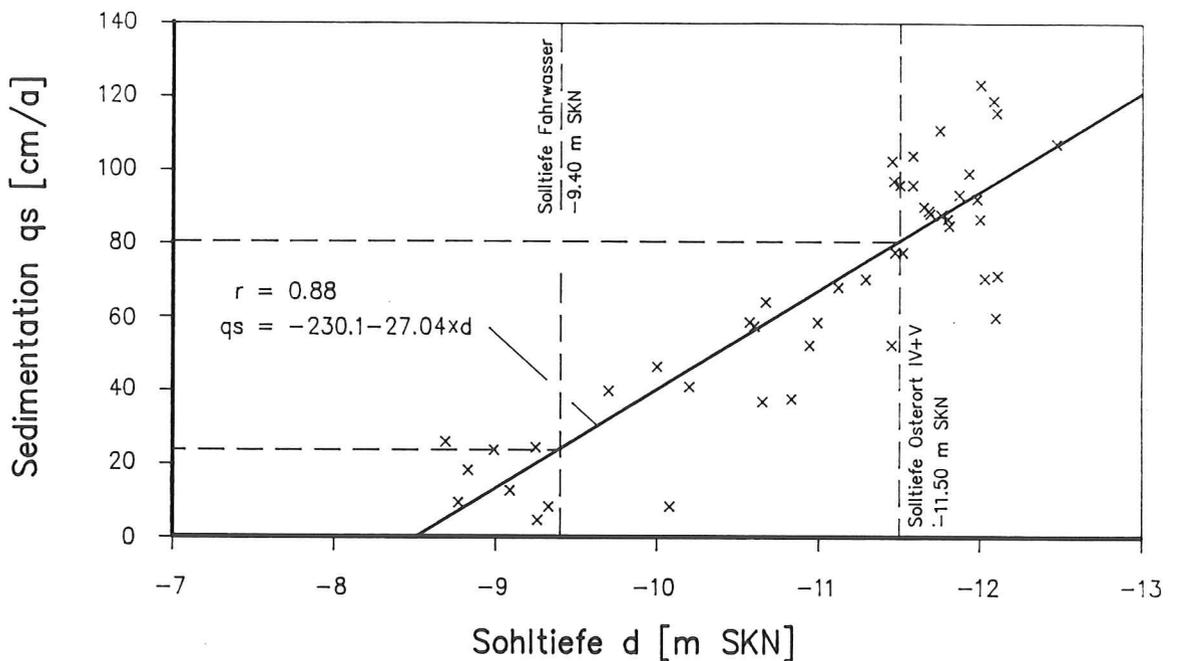


Abb. 18 Sedimentation und Sohlthiefe im Uferbereich von Osterort IV und V

Bei der Solltiefe von - 11,50 m SKN beträgt die zugehörige Sedimentation  $q_s \approx 80$  cm/a. Der aus der Sedimentationsanalyse ermittelte Wert von  $q_s = 69$  cm/a für den Randbereich (Tafel 18) muß niedriger liegen, da im Untersuchungszeitraum 1970/89 häufig Mindertiefen vorhanden waren.

#### 4.5.5 Osterort VI und VII

Der Bereich von Osterort VI und VII wird ebenfalls von der Schifffahrt nicht genutzt. Entsprechend gering ist die mittlere jährliche Auflandung von lediglich  $q_s = 15 \text{ cm/a}$  (Tafel 19). 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 (Anlage 18).

Dieses Ergebnis verdeutlicht, welcher hoher Unterhaltungsaufwand erforderlich ist, damit die Sohl-tiefen 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.

#### 4.5.6 Sportboothafen Hasenbüren

Im von der Freizeitschifffahrt genutzten Sportboothafen Hasenbüren am linken Weserufer (Abb. 16) werden geringe Wassertiefen vorgehalten. Für diesen Hafen lagen nur wenige Peilpläne und keine Baggereinsatzzeiten vor. Die ermittelten Sedimentationsraten bewegen sich für alle Hafengebiete in der gleichen Größenordnung von unter 20 cm/a. Der Mittelwert beträgt  $q_s = 16 \text{ cm/a}$  (Tafel 20 und Anlage 19).

Die durchschnittlichen Sedimentationsraten für die vorstehend beschriebenen Anlagen im unteren Hafengebiete der stadtbremischen Häfen sind für die einzelnen Flächen in Abb. 19 zusammengefaßt worden. Die starken Auflandungen im tiefsten Hafen Osterort IV und V werden hier ebenso deutlich wie die problemloseren Hafengebiete.

Bereich (s. Abb.16)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	8400	12.4	13	10.3	1092	10.9
2	7150	10.6	14	11.0	1001	10.0
3	7150	10.6	7	5.1	501	5.0
4	7150	10.6	8	5.7	572	5.7
5	7800	11.6	18	13.5	1404	14.1
6	8400	12.4	21	16.0	1764	17.7
7	7150	10.6	18	13.5	1287	12.9
8	7150	10.6	15	11.3	1073	10.8
9	7150	10.6	18	13.6	1287	12.9
Summe 1 - 9 Mittelwert	67500	100	15	100	9981	100

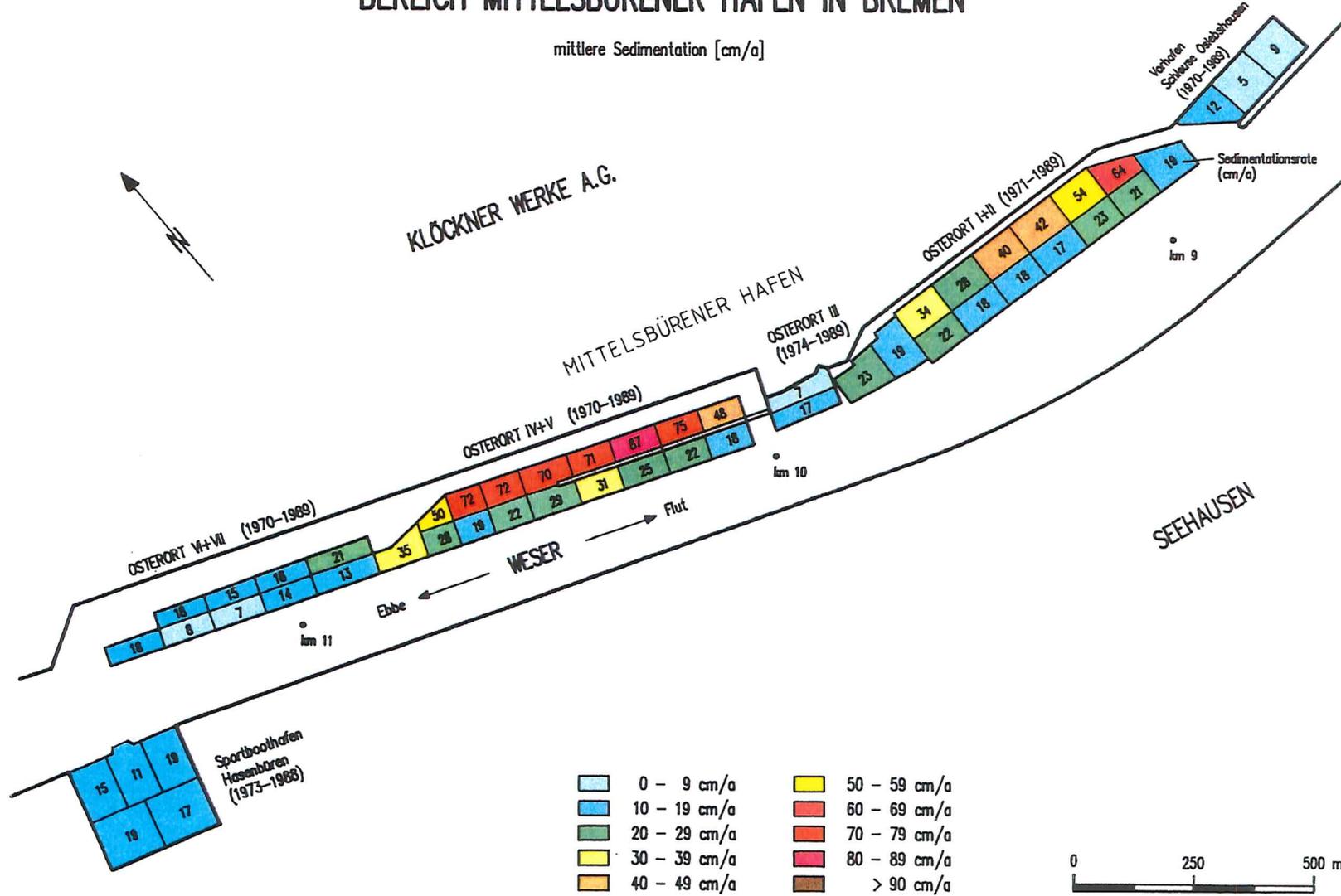
Tafel 19: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1989  
in Osterort VI und VII des Mittelsbürener Hafens in Bremen

Bereich (s. Abb.16)	Fläche A		Sedimentationsrate $q_s$		Sedimentationsmenge $Q_s$	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	9150	16	19	23	1739	18
2	9655	17	11	14	1641	17
3	9725	18	15	19	1459	15
4	13750	26	17	21	2338	24
5	13200	24	19	23	2508	26
Summe 1 - 5 Mittelwert	55480	100	16	100	9685	100

Tafel 20: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1973 bis 1988  
im Sportboothafen Hasenbüren

# BEREICH MITTELSBÜRENER HAFEN IN BREMEN

mittlere Sedimentation [cm/a]



#### 4.6 Zusammenfassende und vergleichende Betrachtungen

Einen Überblick der für die einzelnen Hafengebiete in Bremen errechneten mittleren Sedimentationsraten und -mengen gibt Tafel 21. Die Gesamtsedimentationsmenge für alle untersuchten Hafenbereiche von etwa  $Q_s = 572.000 \text{ m}^3/\text{a}$  ergibt eine auf die Fläche von rd. 1,9 Mio.  $\text{m}^2$  bezogene durchschnittliche Sedimentationsrate von  $q_s = 30 \text{ cm/a}$ . Für einige Gebiete weist Tafel 21 starke Abweichungen von diesem Mittelwert auf. Diese Problembereiche werden mit Abb. 20 auch optisch hervorgehoben.

Die stärksten Sedimentationen wurden im Wendebecken des Neustädter Hafens mit  $75 \text{ cm/a}$  festgestellt. Dadurch verlandet dieser Hafen auch insgesamt mit  $42 \text{ cm/a}$  überdurchschnittlich. Durch die inzwischen vorgenommene Schließung des Hafenkanals werden sich die Verhältnisse dort grundlegend ändern. Aus dem Stromspaltungsgebiet am linken Weserufer ist durch diese Maßnahme ein echter Tidehafen geworden. Nach den Untersuchungen des FRANZIUS-INSTITUTS (1989) werden die Verlandungen dadurch um etwa 40 % zurückgehen.

Das zweite Gebiet mit überdurchschnittlichen Sedimentationen ist das im Strom gelegene Wendebecken des Europahafens (Abb. 20) mit einer durchschnittlichen Sedimentationsrate von  $q_s = 66 \text{ cm/a}$ . Solange hier unterhalb der Sohlstufe bei Weser-km 4 vor allem im linken Flußbereich größere Sollwassertiefen für Seeschiffe vorgehalten werden, müssen die starken Wiederversandungen hingenommen werden. Im Hinblick auf die Überlastung des landgebundenen Güterverkehrs und die ökologischen Vorteile der Binnenschifffahrt ist es denkbar, daß der Europahafen bei künftigen Planungen vielleicht mehr für

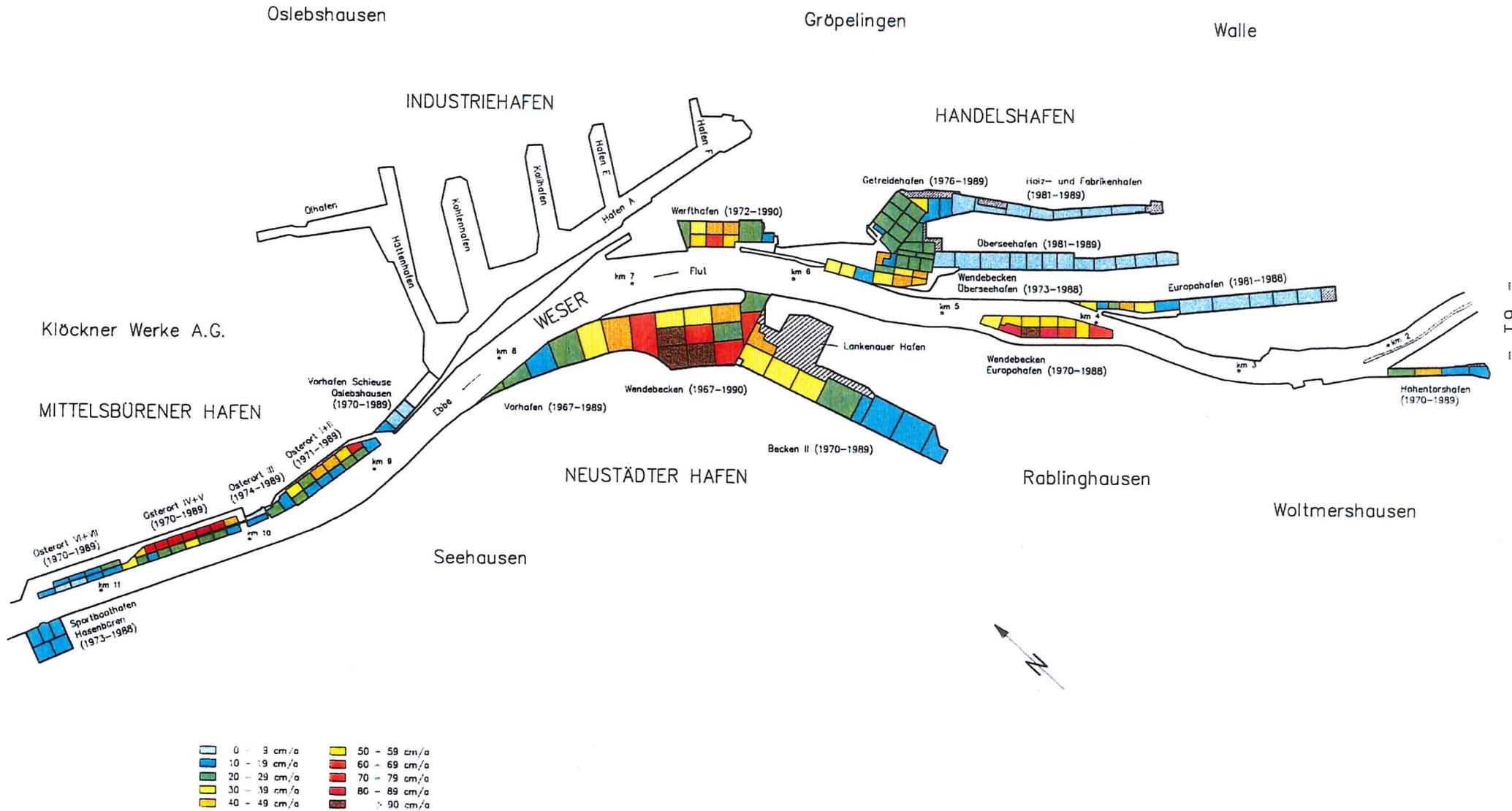
Hafenbereich	Fläche $A_2$ m <sup>2</sup>	Sedimentationsrate $q_s$ cm/a	Sedimentationsmenge $Q_s$ m <sup>3</sup> /a
Hohentorshafen	27.902	22	6.046
Europahafen	143.949	13	19.242
Wendebecken Europahafen	95.230	66	62.607
<b>Handelshafen insgesamt</b>	<b>538.562</b>	<b>14</b>	<b>77.846</b>
Wendebecken Überseehafen	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
<b>Neustädter Hafen insgesamt</b>	<b>629.023</b>	<b>42</b>	<b>261.639</b>
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
<b>Mittelsbürener Hafen</b>			
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
<b>Summe (Mittelwert)</b>	<b>1.917.924</b>	<b>30</b>	<b>572.377</b>

Tafel 21: Sedimentationsraten und -mengen in den Hafenanlagen von Bremen

# HAFENANLAGEN IN BREMEN

Abb. 20

Sedimentationsverhältnisse in den untersuchten Hafenbereichen



61

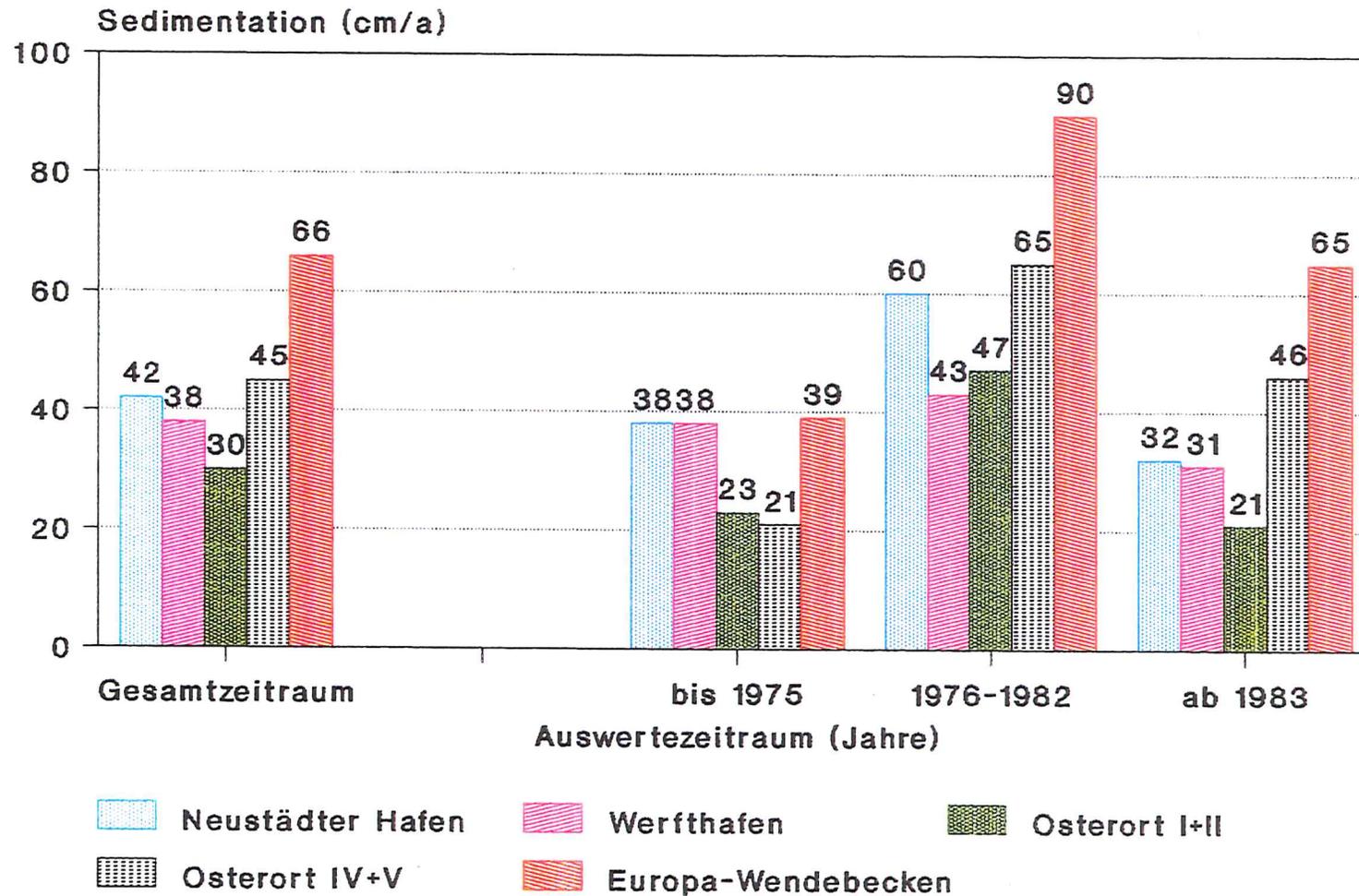
den Binnenschiffsverkehr genutzt wird. Bei den dafür erforderlichen Wassertiefen könnten die Sedimentationen im Wendebecken Europahafen auf ein normales Maß gebracht werden.

Als dritter Bereich ist hier noch die Liegewanne von Osterort IV und V mit der Sedimentationsrate von  $q_s = 45 \text{ cm/a}$  zu nennen. Wie vorstehend erläutert, können die dort erforderlichen Wassertiefen für die Seeschiffe aufgrund der Morphologie des Flußquerschnittes und der Lage der Liegewanne am ausbuchtenden Ufer nur mit verhältnismäßig hohem Unterhaltungsaufwand vorgehalten werden.

Mit einer vergleichenden Betrachtung wird gezeigt, wie sich künstliche Eingriffe wie 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. Das Untersuchungsergebnis zeigt, daß im mittleren Zeitraum überall besonders hohe Auflandungen zu verzeichnen waren (Abb. 21). 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 1976. Die Gründe dafür wurden vorstehend erläutert. Verantwortlich für die höheren Versandungen sind die größeren Ausbautiefen am Fahrwasserrand bzw. in der Liegewanne im letzten Beobachtungszeitraum.

## SEDIMENTATIONSVERHÄLTNISSSE IN VERSCHIEDENEN HAFENGEBIETEN BREMENS



Das Balkendiagramm in Abb. 21 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 Ausbaumaßnahmen das Geschehen. Die Vertiefungen im Wendebekken Europahafen und Osterort IV und V haben nachweislich zu ungünstigeren Sedimentationsverhältnissen geführt. Die Vorratsbaggerungen im Walzenbereich des Wendebekkens im Neustädter Hafen haben die Gesamtsituation offensichtlich etwas verbessert.

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.  $\text{m}^2$  Fläche etwa 1,1 Mio.  $\text{m}^3$  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 Umlenkwand in der Hafeneinfahrt, beeinflusst jetzt die Strömungen so, daß 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 Sedimentationen 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 Hafenzlänge  $B/L$  aufzuzeigen. Dabei sind auch die ausgebauten Osterorter Häfen in die Überlegungen mit einbezogen worden. Wegen seiner besonderen Grundrißform wurde dazu für den Handelshafen die äquivalente Hafenzlänge nach FÜHRBÖTER/WITTE (1988) bestimmt. Das Berechnungsergebnis für die Hafenbecken in Bremen (Abb. 22) zeigt trotz der vereinfachenden Annahmen einen sehr deutlichen Zusammenhang zwischen Hafengeometrie und Sedimentation in Übereinstimmung mit grundsätzlichen, theoretischen Überlegungen und Modellversuchen (FÜHRBÖTER/WITTE, 1988; BRINKMANN, 1990). Die Hafenbecken mit großen Längenausdehnungen und kleinen Einfahrtsquerschnitten verhalten 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. In den Brackwasserhäfen liegen völlig andere Verhältnisse vor, wie es die folgenden Ausführungen zeigen werden.

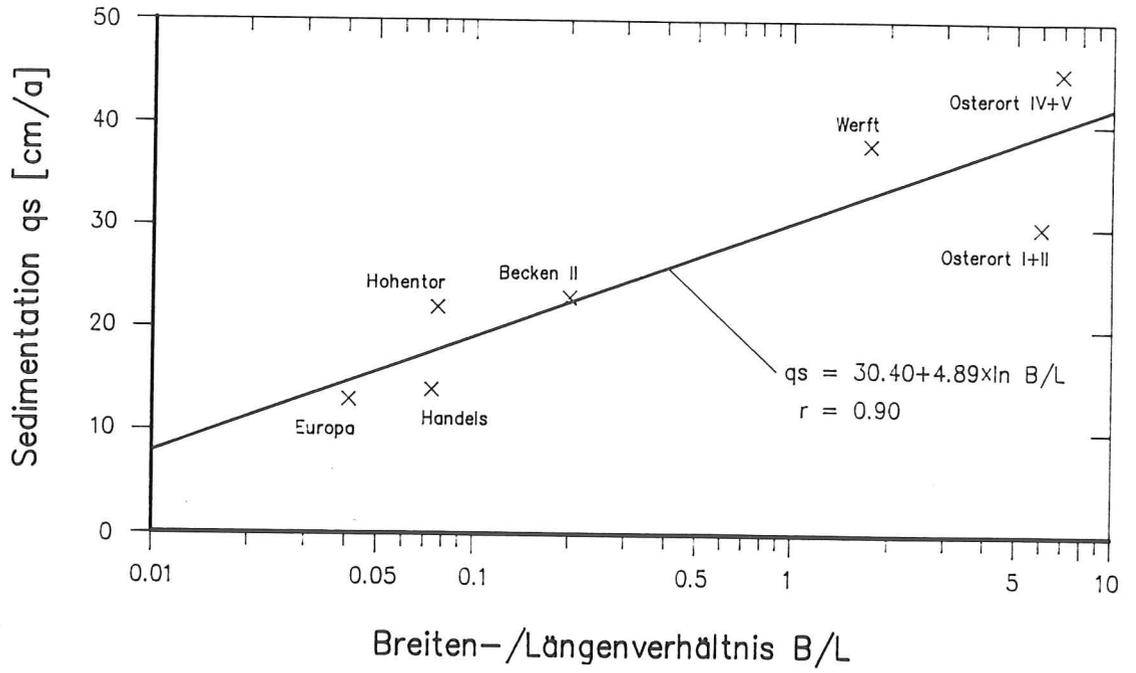


Abb. 22 Einfluß des Breiten-/Längenverhältnisse der Hafenbecken in Bremen auf die Sedimentationen

## 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 22 zusammengestellt worden. Für Brunsbüttel sind die mittleren Wasserstände 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. Es ist bekannt, daß im Brackwasserbereich weniger der Tide- und Strömungseffekt für die Sedimentation der Häfen verantwortlich ist. Vielmehr spielen die Dichteströmungen aufgrund der unterschiedlichen Salzgehalte eine entscheidende Rolle. 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, 1990) 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

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

Tafel 22: Tidewasserstände und Oberwasser für die untersuchten Häfen

\* Tidewasserstände 1977/89

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. Von August 1986 bis November 1989 wurden dort mit Unterbrechungen die mittleren Leitfähigkeiten gemessen. Aus den vom NIEDERSÄCHSISCHEN HAFENAMT zur Verfügung gestellten Daten wurden Monatsmittelwerte bestimmt und nach SCHULZE (1988) auf die entsprechenden Salzgehalte umgerechnet. Aus der Korrelation zwischen Salzgehalt und Oberwasser der Ems ergab sich der in Abb. 23 dargestellte Zusammenhang.

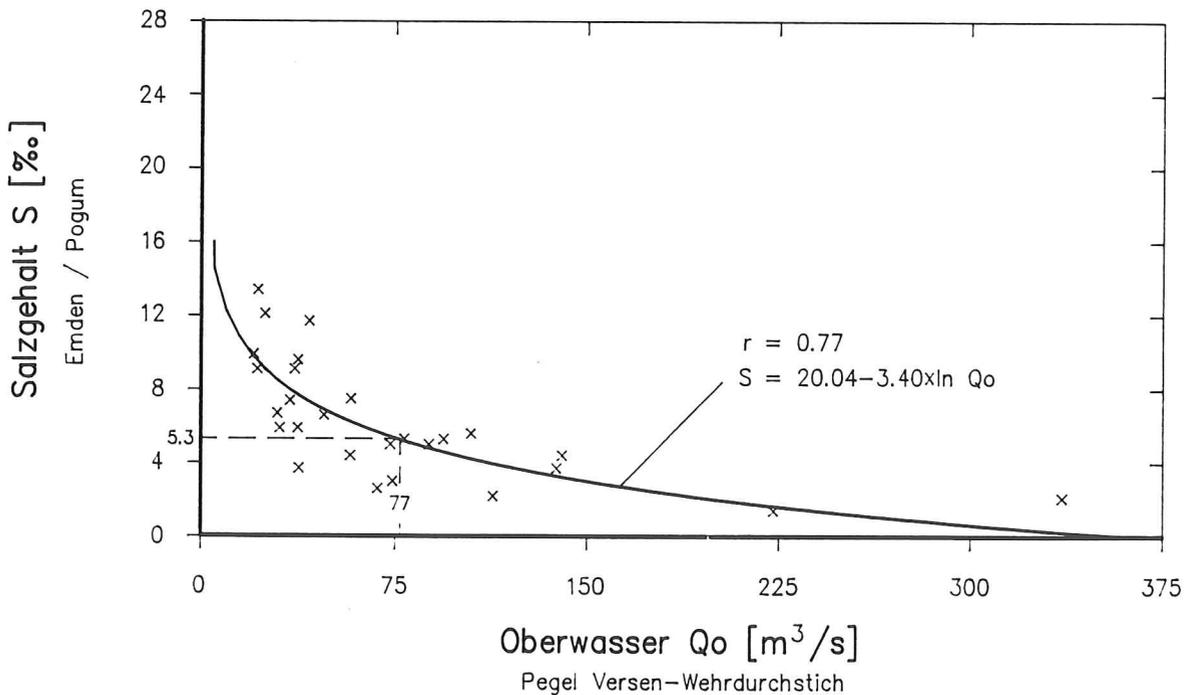


Abb. 23 Mittlere Salzgehalte in der Ems bei Emden und Oberwasser (Monatsmittelwerte) Messungen aus den Jahren 1986/89

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). Das entspricht einem mittleren Salzgehalt von 17,5‰ bis 20‰. Für die durchschnittlichen Sedimentationen 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. Vom WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT WILHELMSHAVEN wurden einige Salzgehaltsmessungen aus den Jahren 1978/80 ausgewertet. Der mittlere Salzgehalt liegt danach bei 29 ‰ mit nur geringen Schwankungen, so daß man dort ähnlich wie bei Büsum von Meerwasserbedingungen ausgehen kann.

Aus Bremerhaven standen Tagesmittel der Leitfähigkeiten des Weserwassers von Juli 1977 bis März 1990 zur Verfügung. Die physikalische Meßstelle liegt bei Strom km 69,4 unmittelbar unterhalb des Vorhafens zur Nordschleuse, für den die Verlandungen im folgenden noch beschrieben werden. Aus den vorhandenen Daten wurden wie für die Ems die zugehörigen Salzgehalte berechnet und die monatlichen Mittelwerte denen des Oberwassers gegenübergestellt (Abb. 24). Das Ergebnis stimmt recht gut mit den Untersuchungen von BARG (1979) überein. Mit 8,3‰ Salzgehalt bei mittleren Abflüssen am Pegel Intschede befindet sich das Untersuchungs-

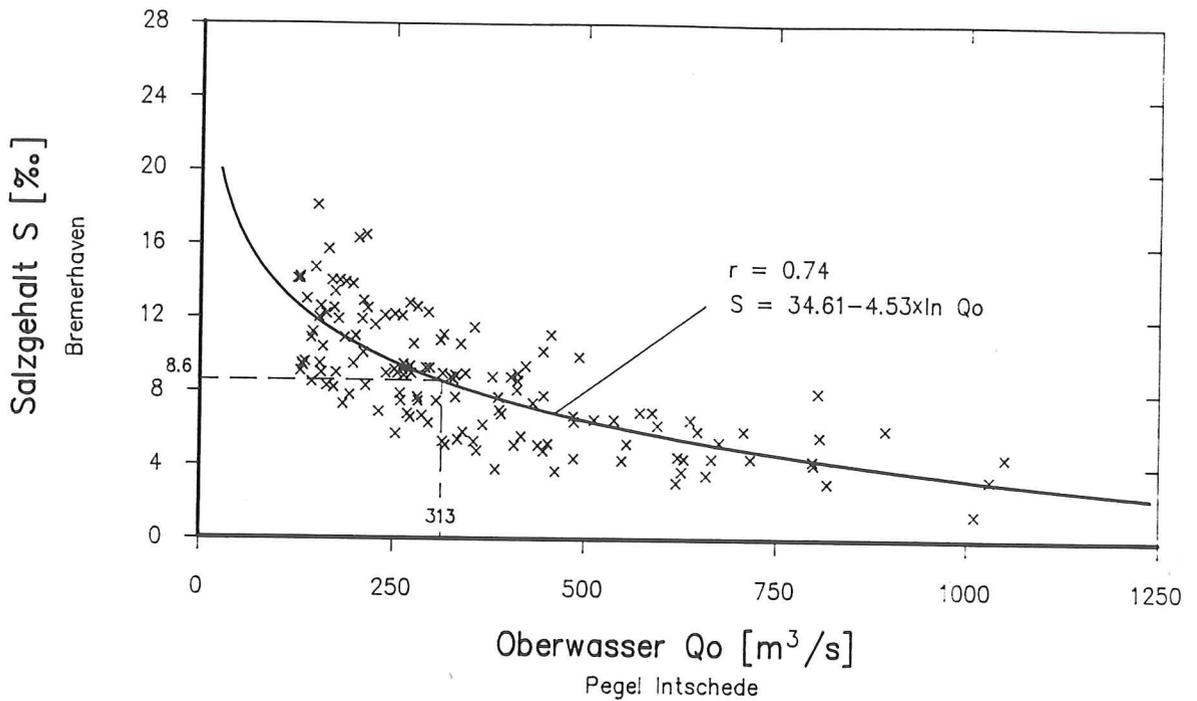


Abb. 24 Mittlere Salzgehalte in der Weser bei Bremerhaven und Oberwasser (Monatsmittelwerte) Messungen von Juli 1977 bis März 1990

gebiet von Bremerhaven nach der vorstehenden Einteilung im mesohalinen Brackwasser. Auch dieser Bereich wirkt lebensfeindlich auf die marinen und limnischen Mikroorganismen und führt zu entsprechend starkem Schlickfall.

Für die Elbe lagen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser gemessene Salzgehalte für Brunsbüttel (Mole IV) und Cuxhaven (Alte Liebe, Steubenhöft) vor. Zum Vergleich mit den Ergebnissen für die Ems und Weser wurden ebenfalls Monatsmittel bestimmt und miteinander korreliert (Abb. 25 und 26).

Die Auswertungen zeigen wie bei SIEFERT (1976), daß Brunsbüttel bei mittlerer Oberwasserführung der

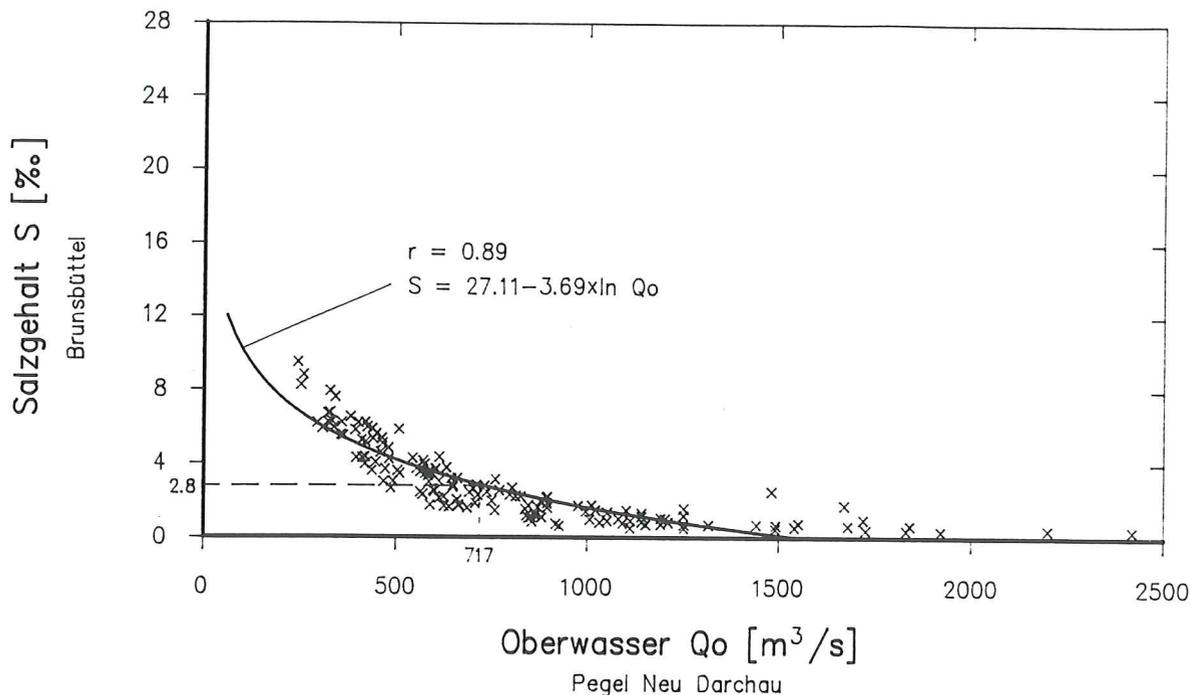


Abb. 25 Mittlere Salzgehalte in der Elbe bei Brunsbüttel und Oberwasser (Monatsmittelwerte) Messungen von Juni 1977 bis Dezember 1989

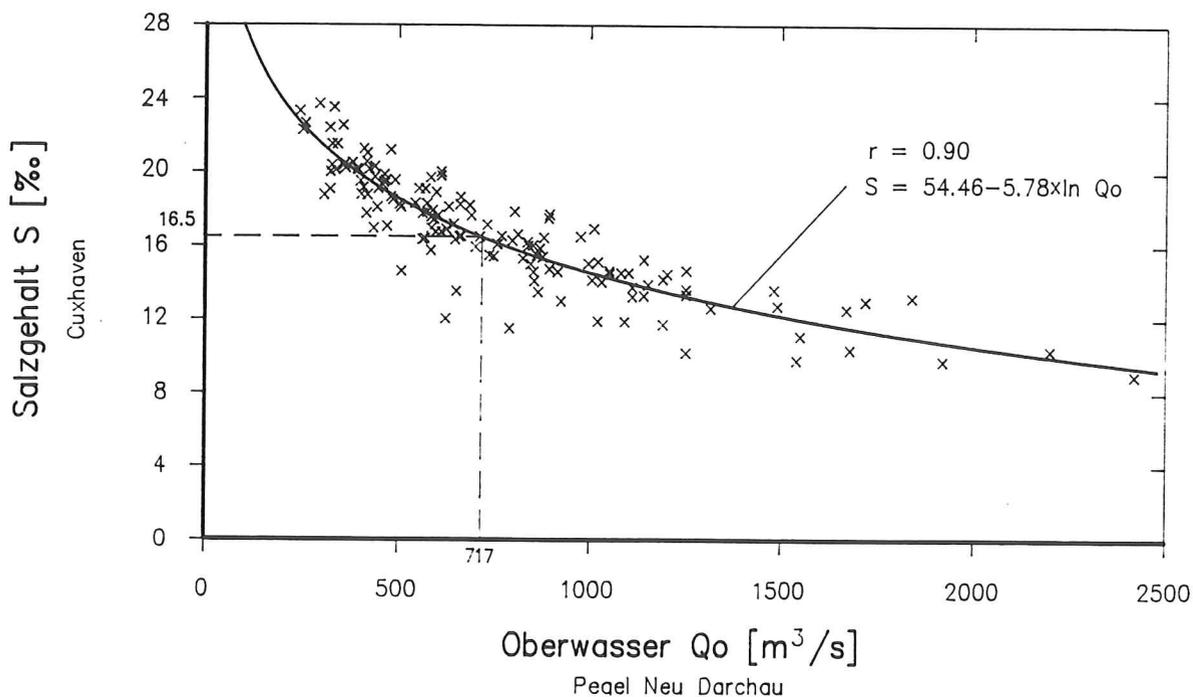


Abb. 26 Mittlere Salzgehalte in der Elbe bei Cuxhaven und Oberwasser (Monatsmittelwerte) Messungen von Januar 1977 bis Dezember 1989

Elbe dem oberen und Cuxhaven mehr dem unteren Brackwasserbereich (mesohaline bis polyhaline Zone) zuzuordnen ist. Die relativen, oberwasserabhängigen Salzgehaltsschwankungen liegen in Brunsbüttel und Cuxhaven in der gleichen Größenordnung. Die absoluten Werte weichen jedoch erheblich voneinander ab. Bei hohen Abflüssen sind die für Brunsbüttel ermittelten Werte von  $S < 5\%$  äußerst gering und damit dem Süßwasserbereich zuzuordnen. In Cuxhaven sinken die mittleren Salzgehalte nicht unter  $9\%$ . Anders ausgedrückt ist das Elbewasser bei Cuxhaven unabhängig vom Oberwasser stets noch so salzhaltig, daß sich die Lebensbedingungen für die Mikroorganismen nicht so entscheidend ändern wie bei Brunsbüttel. Vergleichbare Verhältnisse wie in der Elbe bei Brunsbüttel herrschen bei Emden und auch bei Bremerhaven. Nach dem vorstehend Gesagten sind deshalb aufgrund der Salzwasserbedingungen in Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel höhere Schlickfallraten zu erwarten als in Cuxhaven oder in den dem Meerwasser zuzuordnenden Häfen wie Wilhelmshaven und Büsum. Einschränkend muß dazu bemerkt werden, daß die Salzwasserbedingungen nur eine von vielen anderen Einflußgrößen sind, die die Sedimentationen in Tidehäfen beeinflussen. So ist bei einem Vergleich der Wasseraustausch aufgrund des Tidehubes in Wilhelmshaven am größten und in den Elbehäfen am kleinsten. Hinzu kommen noch die vielfältigen anderen Einflüsse, die auch bei den Tidehäfen oberhalb der Brackwasserzone von Bedeutung sind.

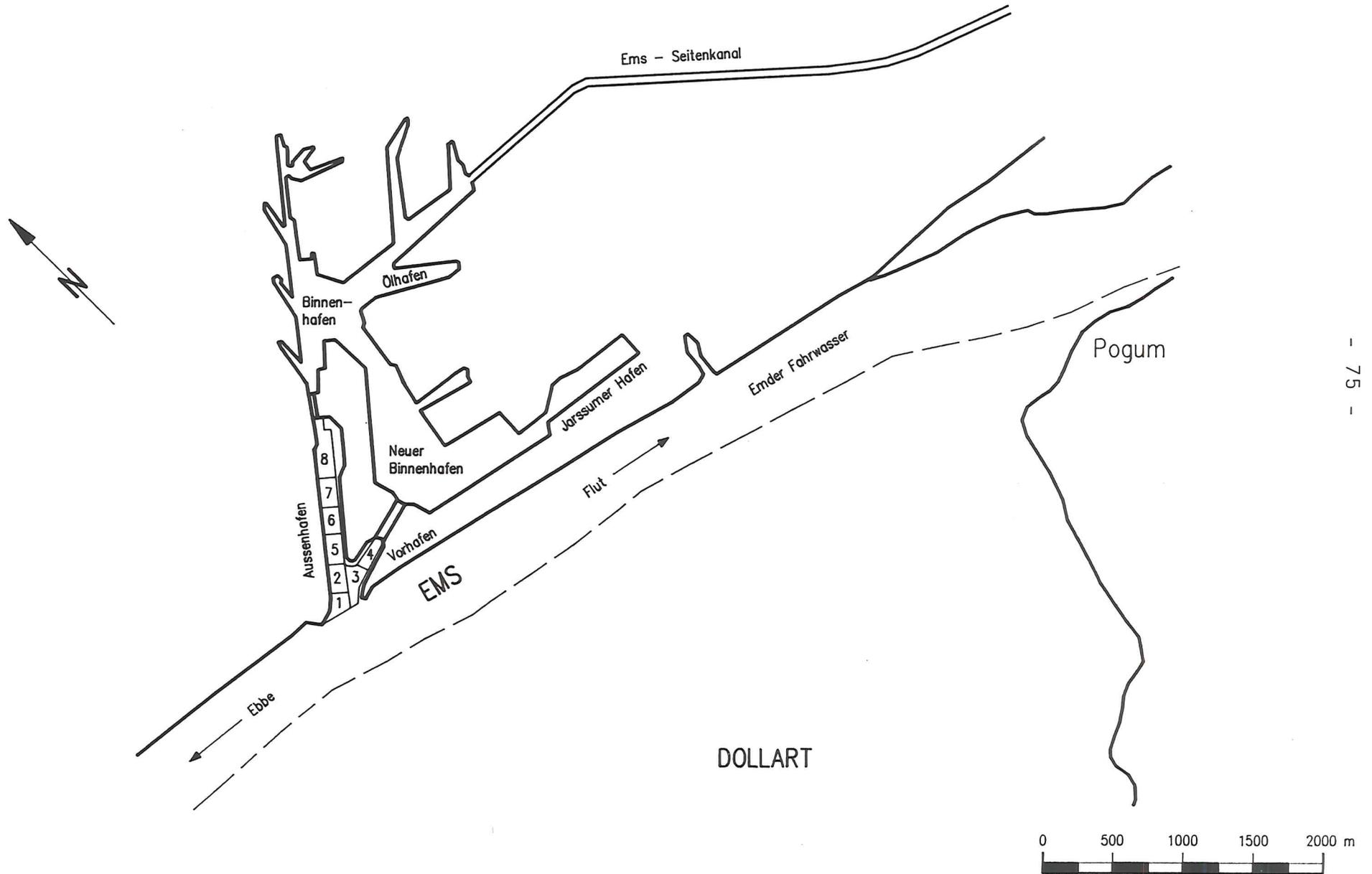
Im folgenden werden die Sedimentationen für die verschiedenen Häfen im deutschen Brackwasser- und Küstengebiet im einzelnen erläutert.

## 5.2 Emden

Der Außen- und Vorhafen von Emden wurde in acht einzelne Abschnitte für die Sedimentationsanalysen eingeteilt (Abb. 27). Im Vorhafen ist die Sollwassertiefe auf - 9,60 m SKN und im Außenhafen auf - 8,50 m SKN festgelegt worden. 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 bis zum Frühjahr 1983 wurden die Unterhaltungsarbeiten durch das zuständige NIEDERSÄCHSISCHE HAFENAMT EMDEN mit 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 ausgeführt (Anlage 20).

Zu den verschiedenen Baggerstrategien ist folgendes zu bemerken. In den Brackwasserhäfen ist der Übergang zur Sohle fließend, weil sich im sohlnahen 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 im Vor- und Außenhafen von Emden, als nicht auf Vorrat gebaggert wurde (Erhalt der Solltiefen), bei insgesamt längeren Baggereinsatzzeiten um etwa 50 % höher.

# HAFENANLAGEN IN EMDEN



Dieses Ergebnis läßt den Schluß zu, daß Baggerungen von Übertiefen die wirtschaftlichere Methode ist. Im Übrigen sind die berechneten Sedimentationsraten und -mengen (Profilaufmaß) auch in den Brackwasserhäfen nicht mit den Baggermengen (Schutenaufmaß) unmittelbar vergleichbar.

Die mittlere Sedimentationsrate im Außen- und Vorhafen von Emden beträgt  $q_s = 233$  cm/a (Tafel 23). 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. 28). Eine mögliche Ursache können die dort auftretenden Walzenströmungen sein.

Aufgrund der kurzen Peilintervalle war es möglich, die Sedimentationen getrennt nach hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahren auszuwerten. Die durchschnittliche Sommerrate ist für Emden mit  $q_s = 245$  cm/a höher als im Winter ( $q_s = 201$  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 erklärt, 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 keine mathematischen Zusammenhänge zwischen gewässerkundlichen Daten und Sedimentationen ermittelt werden konnten.

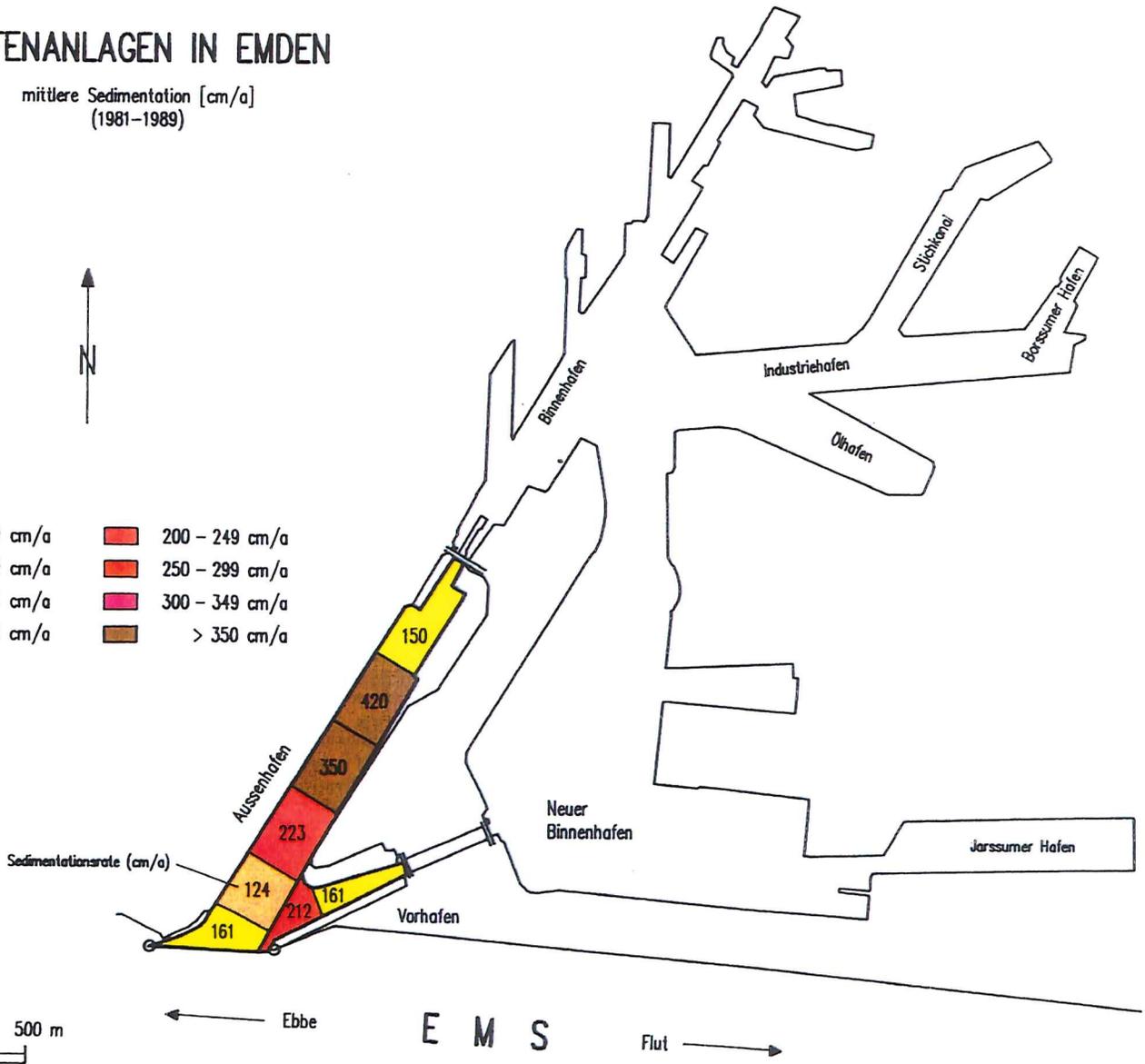
Bereich (s. Abb.27)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	33440	14	161	9	53838	10
2	31320	13	124	7	38837	7
3	16480	7	212	12	34938	6
4	17640	7	161	9	28400	5
5	35600	15	223	12	79388	14
6	35040	14	350	20	122640	22
7	35424	15	420	23	148781	26
8	37080	15	150	8	55620	10
Summe 1 - 8 Mittelwert	242024	100	233	100	562442	100

Tafel 23: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1981 bis 1989  
im Vor- und Außenhafen in Emden

# HAFENANLAGEN IN EMDEN

mittlere Sedimentation [cm/a]  
(1981-1989)

- |  |  |
|--|--|
|  0 - 49 cm/a    |  200 - 249 cm/a |
|  50 - 99 cm/a   |  250 - 299 cm/a |
|  100 - 149 cm/a |  300 - 349 cm/a |
|  150 - 199 cm/a |  > 350 cm/a     |



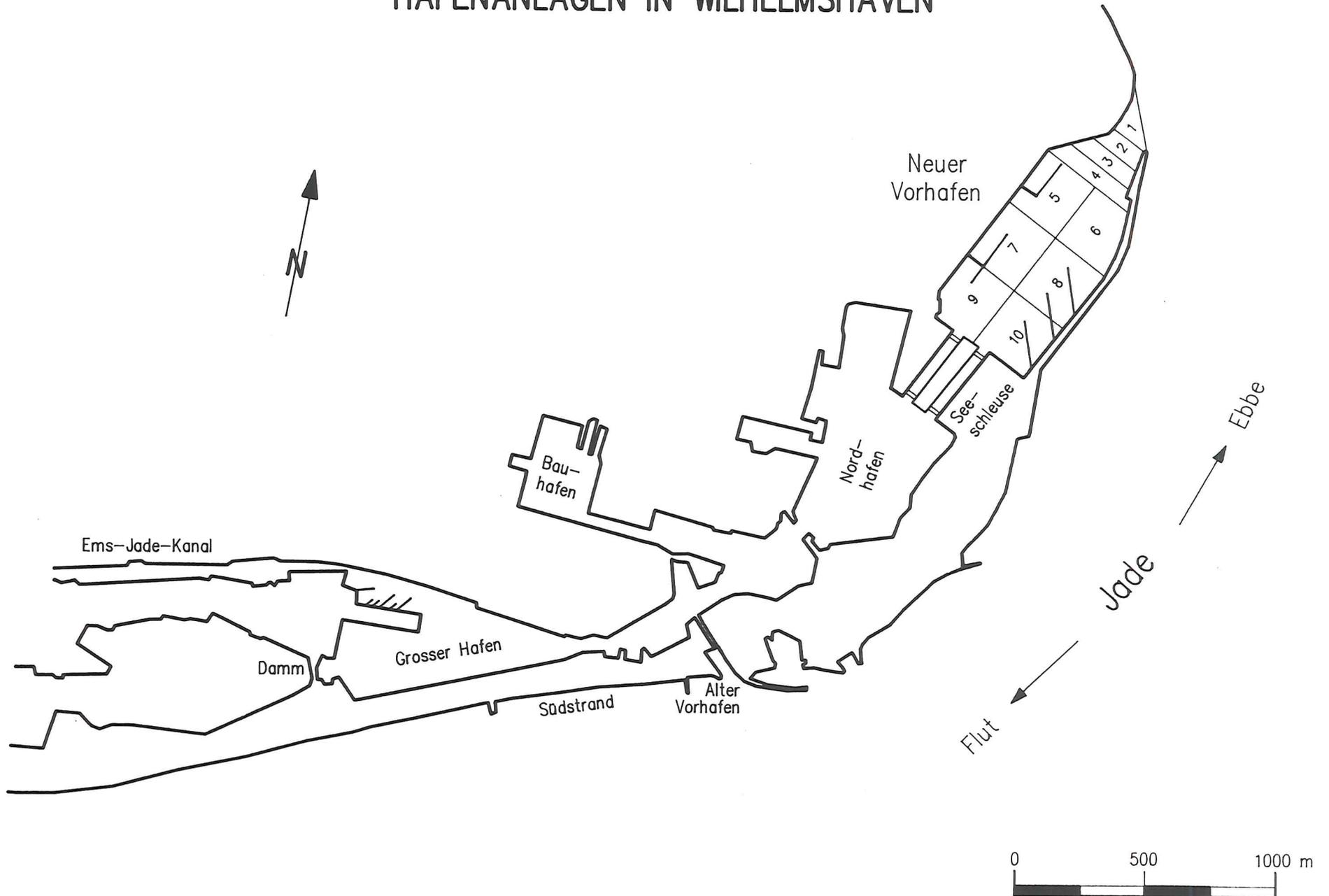
### 5.3 Wilhelmshaven

Der dem Salzwasserbereich zuzuordnende Vorhafen zur Seeschleuse in Wilhelmshaven wurde von 1974 bis 1990 auf das Sedimentationsverhalten untersucht (Abb. 29). Die Sedimentationsraten nehmen von der Einfahrt bis zur Schleuse deutlich ab (Tafel 24). 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 Sedimentationen liegen damit deutlich unter dem im oberen Brackwassergebiet gelegenen Emdener Hafen ( $q_s = 233 \text{ cm/a}$ ). Die Verteilungen der mittleren Sedimentationen im Vorhafen zur Seeschleuse veranschaulicht Abb. 30.

Am Beispiel von Wilhelmshaven kann deutlich gemacht werden, wie die gewählte Baggermethode den Unterhaltungsaufwand beeinflusst (Anlage 21). Bis einschließlich 1980 wurden mit relativ wenigen Baggereinsätzen (i.M. 2,5 Monate/Jahr) wiederholt Über-tiefen von bis zu mehreren Metern geschaffen. Die zugehörige Sedimentationsrate beträgt für den gesamten Vorhafen für 1974/80  $q_s = 67 \text{ cm/a}$  und liegt damit erheblich unter dem für den Gesamtzeitraum ermittelten Wert von  $q_s = 152 \text{ cm/a}$ .

Nach 1980 wurde versucht, die Solltiefen von - 8 m SKN im Vorhafen zu halten. Die Baggereinsatzzeiten verlängerten sich erheblich. Von 1981 bis 1985 waren die Geräte durchschnittlich 8 Monate und von 1988 bis 1990 fast ständig im Einsatz. Die Baggermengen waren 1981/90 im Durchschnitt 2,4 mal so hoch wie im davor liegenden Zeitraum. Die aus der Peilplananalyse berechnete Sedimentationsrate liegt für 1981/90 mit  $q_s = 171 \text{ cm/a}$  ebenfalls entsprechend hoch.

# HAFENANLAGEN IN WILHELMSHAVEN

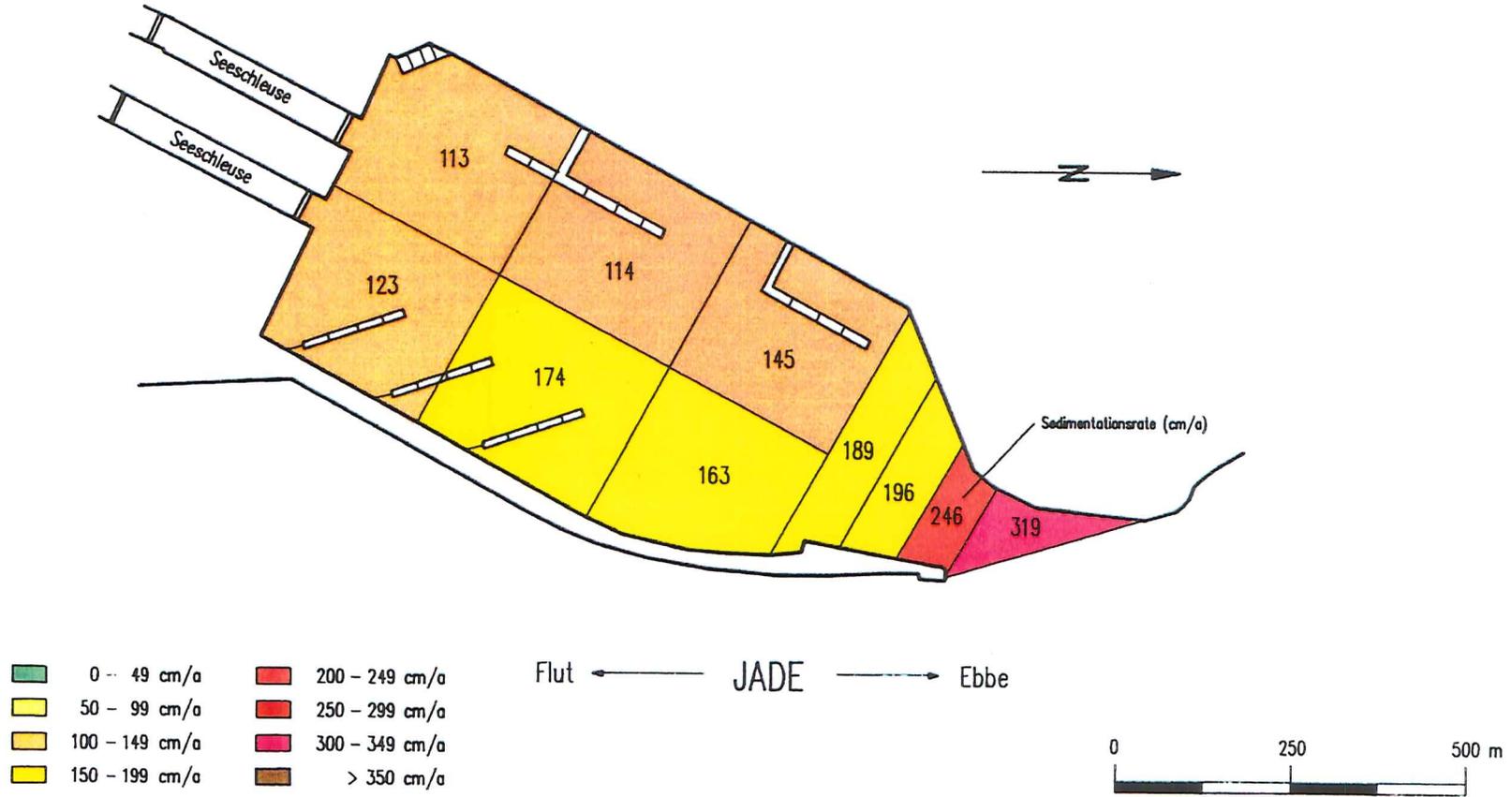


Bereich (s. Abb.29)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	23389	3	319	18	74611	7
2	20420	3	246	14	50233	5
3	30966	4	196	11	60693	5
4	43263	6	189	11	81767	7
5	103222	14	145	8	149672	13
6	91274	12	163	9	148777	13
7	103196	14	114	6	117643	11
8	106439	15	174	10	185204	17
9	100341	14	113	6	113385	10
10	107182	15	123	7	131834	12
Summe 1 - 10 Mittelwert	729692	100	152	100	1113819	100

Tafel 24: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1974 bis 1990  
im Neuen Vorhafen von Wilhelmshaven

# NEUER VORHAFEN WILHELMSHAVEN

mittlere Sedimentation [cm/a]  
(1974-1990)



Wie bei den Hafenanlagen von Emden zeigt sich für Wilhelmshaven, daß Vorratsbaggerungen mit Reservetiefen das Sedimentationsverhalten 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 Auflandungen in Verbindung mit den häufigen Baggereinsätzen können hier nicht abschließend geklärt werden. Es ist denkbar, daß die ständigen Eingriffe in den verlüssigten 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 diesem Übergang zur festen Sohle liegt bei einer Dichte von 1,15 bis 1,2 t/m<sup>3</sup> die nautische Wassertiefe (ROOVERS, 1988).

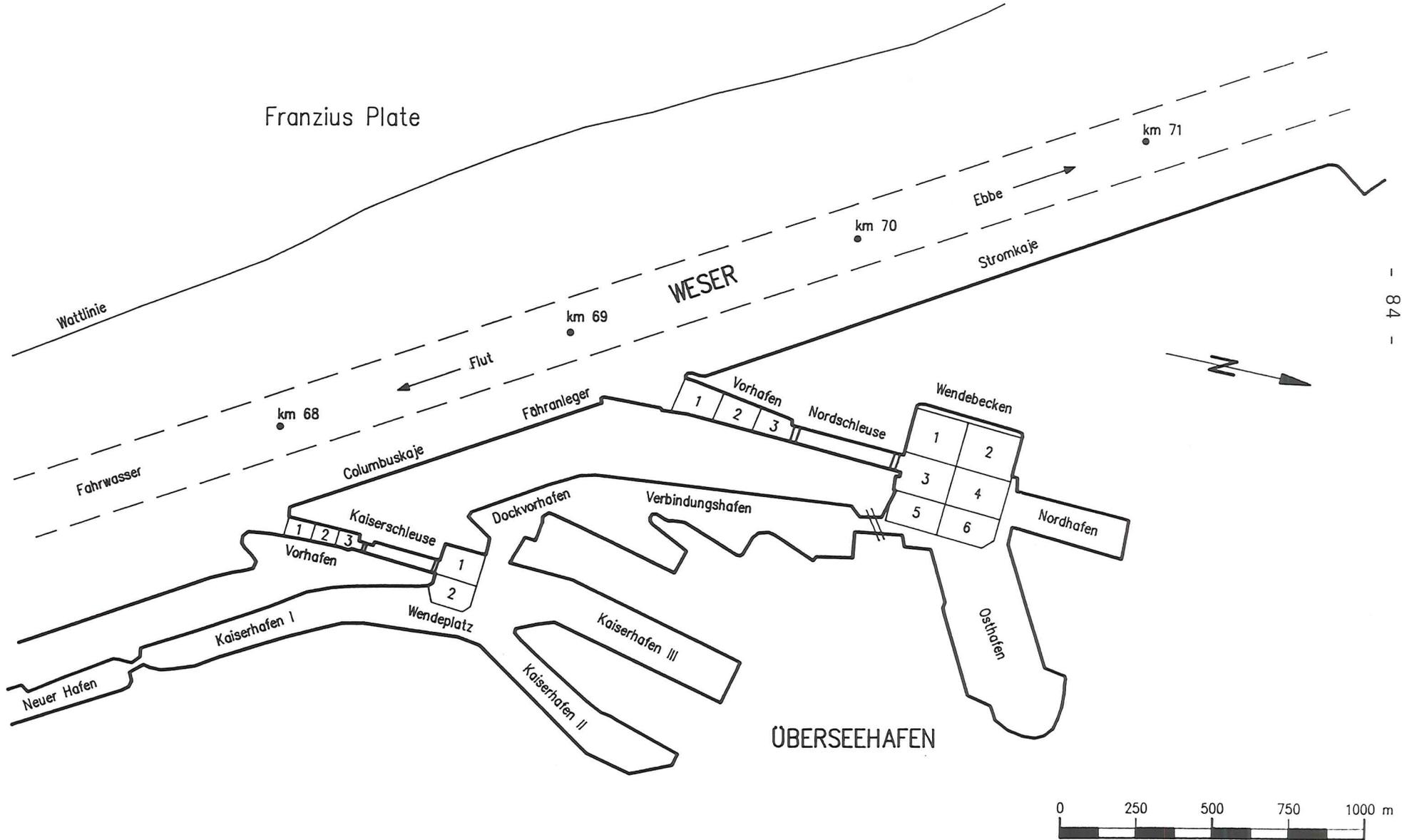
Zusammenfassend wird festgestellt, daß die Sedimentationen in Wilhelmshaven deutlich niedriger sind als im Brackwasserbereich der Ems bei Emden. In beiden Häfen kann der Unterhaltungsaufwand offenbar durch Reservebaggerungen erheblich eingeschränkt werden.

#### 5.4 Bremerhaven

Der Überseehafen in Bremerhaven kann über die Kaiser- und Nordschleuse angelaufen werden (Abb. 31).

Die Unterhaltungsbaggerungen in den Vorhäfen mit dem Eimerkettenbagger werden durch den Einsatz

# HAFENANLAGEN IN BREMERHAVEN



von mechanischen Schlickeggen ergänzt. Die Sedimentationsanalysen haben ergeben, daß die Hafensohlen durch intensives Eggen zeitweise gehalten bzw. sogar vertieft werden können. Dies wurde erreicht, wenn im Vorhafen zur Nordschleuse mit zwei Schleppern in je zwei Schichten gearbeitet wurde, d.h. mit einer Eggeinsatzzeit von 32 Stunden/Tag. Positive Auswirkungen der mechanischen Egge waren vor allem in den Wintermonaten zu erkennen.

Anhand der Sohlenentwicklungen und Baggereinsatzzeiten konnte auch für die Vorhäfen in Bremerhaven nachgewiesen werden, daß es insgesamt wirtschaftlicher ist, Reservebaggerungen mit Übertiefen durchzuführen (Anlage 22). Der Einsatz von Großgeräten nur zum Erhalt der Solltiefe erfordert längere Einsatzzeiten und 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 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. 32).

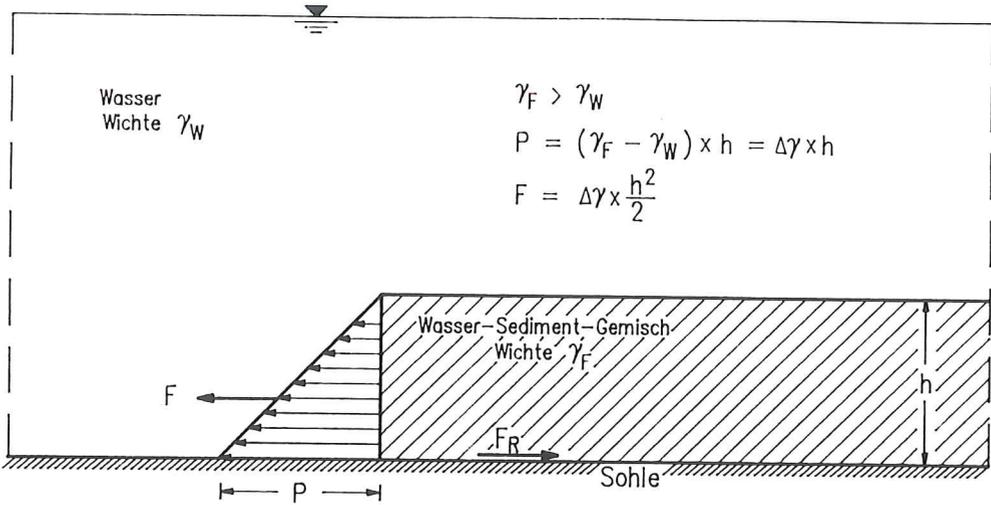


Abb. 32 Schematische Darstellung der vom suspendierten Sohlenmaterial auf das umgebende Wasser ausgeübte Druckspannung P und Druckkraft F

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 Schlack mit überwiegender 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 (Anlage 22). 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 ergab jedoch umgekehrte Ergebnisse (Tafel 25 und 26). Die größeren Auflandungen finden mit  $q_s = 294 \text{ cm/a}$  vor der Kaiserschleuse statt. Der Vorhafen zur Nordschleuse hat dagegen eine vergleichsweise geringe Sedimentationsrate von  $q_s = 211 \text{ cm/a}$ . 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 mehr den Salzwasserhältnissen der Nordsee zuzuordnenden Hafengebiet von Wilhelmshaven.

Die Schleusenvorhäfen in Bremerhaven sedimentieren in den Sommerhalbjahren sehr viel stärker als in der kalten Jahreszeit. Der Anteil des gelösten Sauerstoffes nimmt durch die vermehrte Sauerstoffzehrung bei Temperaturanstieg ab. Den Mikroorganismen wird dadurch die Lebensgrundlage entzogen, sie sterben ab und vermehren den Sedimentfall (GREISER, 1988). Für die Vorhäfen zur Nord- und Kaiserschleuse wurden die folgenden auf das Jahr umgerechneten Sedimentationen ermittelt:

Bereich (s. Abb.31)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	12188	42	281	47	34248	56
2	10062	34	163	27	16401	27
3	6875	24	156	26	10725	17
Summe 1 - 3 Mittelwert	29125	100	211	100	61375	100

Tafel 25: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1977 bis 1990 im Vorhafen an der Nordschleuse in Bremerhaven

Bereich (s. Abb.31)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	3797	36	333	38	12644	41
2	3452	33	300	34	10356	34
3	3200	31	241	28	7712	25
Summe 1 - 3 Mittelwert	10449	100	294	100	30712	100

Tafel 26: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1975 bis 1990 im Vorhafen an der Kaiserschleuse in Bremerhaven

	Winter $q_s$ (cm/a)	Sommer $q_s$ (cm/a)
Vorhafen Nordschleuse	102	320
Vorhafen Kaiserschleuse	210	369

Die Unterschiede sind vor allem im Vorhafen zur Nordschleuse außerordentlich hoch. Es mag sein, daß sich dort besonders die Aufrührungen durch die mechanische Egge bemerkbar machen. Die Egge wird auch vor der Kaiserschleuse, jedoch nicht so häufig, eingesetzt. Es wurde bereits vorstehend erwähnt, daß sich die Eggerei vornehmlich in den Wintermonaten positiv auswirkt.

Die relativ geringen Sedimentationen im Vorhafen zur Nordschleuse haben betriebliche Gründe. Wasserverluste aus dem Überseehafen durch Schleusungen werden bei höheren Wasserständen in der Weser über die Nordschleuse mit Sielungen ausgeglichen. Diese Sielwassermengen können bei den entsprechenden Druckhöhen mehr als  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  betragen, die mit einer Geschwindigkeit von rd.  $2,5 \text{ m/s}$  durch die Torumläufe in das Wendebecken fließen. Mit diesen Wassermengen gelangen erhebliche Feststoffe in das Wendebecken des Überseehafens. Gleichzeitig tritt im Vorhafen zur Nordschleuse ein gewisser Spüleffekt ein, womit die geringeren Auflandungen gegenüber dem Vorhafen der Kaiserschleuse begründet sind. Entsprechend hoch sind jedoch die Sedimentationen des Wendebeckens im Vergleich zum Wendeplatz hinter der Kaiserschleuse (Tafel 27 und 28). Das Wendebecken verlandet mit durchschnittlich  $q_s = 157 \text{ cm/a}$  außergewöhnlich hoch. In Teilbereichen wurden Werte von mehr als  $2 \text{ m/a}$  ermittelt. Entsprechend lebhaft ist die Sohlenentwicklung im Wendebecken hinter dem Binnenhaupt der Nordschleuse (Anlage 23). Im Wendeplatz an der Kaiserschleuse,

Bereich (s. Abb.31)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	26941	19	122	12	32868	15
2	36324	25	118	12	42862	19
3	17996	12	168	17	30233	13
4	23900	17	194	20	46366	20
5	17728	12	214	22	37938	17
6	21686	15	171	17	37083	16
Summe 1 - 6 Mittelwert	144575	100	157	100	227350	100

Tafel 27: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1975 bis 1990 im Wendebecken des Überseehafens an der Nordschleuse in Bremerhaven

Bereich (s. Abb.31)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	33158	52	35	53	11605	55
2	30628	48	31	47	9495	45
Summe 1 - 2 Mittelwert	63786	100	33	100	21100	100

Tafel 28: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1975 bis 1990 im Wendeplatz des Überseehafens an der Kaiserschleuse in Bremerhaven

Über die nicht gesielt wird, liegen die Auflandungen mit  $q_s = 33 \text{ cm/a}$  um Größenordnungen darunter. Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, wie sehr die natürlichen Sedimentationsvorgänge durch betriebliche Erfordernisse beeinflusst werden können. Ein Überblick der Sedimentationsverteilungen im Bereich der beiden Hafenzufahrten ist mit Abb. 33 gegeben.

### 5.5 Brunsbüttel

Die neuen Schleusen des Nordostseekanals bei Brunsbüttel passieren jährlich etwa vierzig- bis fünfzigtausend Seeschiffe (Abb. 34), also im Durchschnitt mehr als hundert Schiffe täglich. Die Schleusenvorhäfen 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 Vorhäfen und im Binnenhafen.

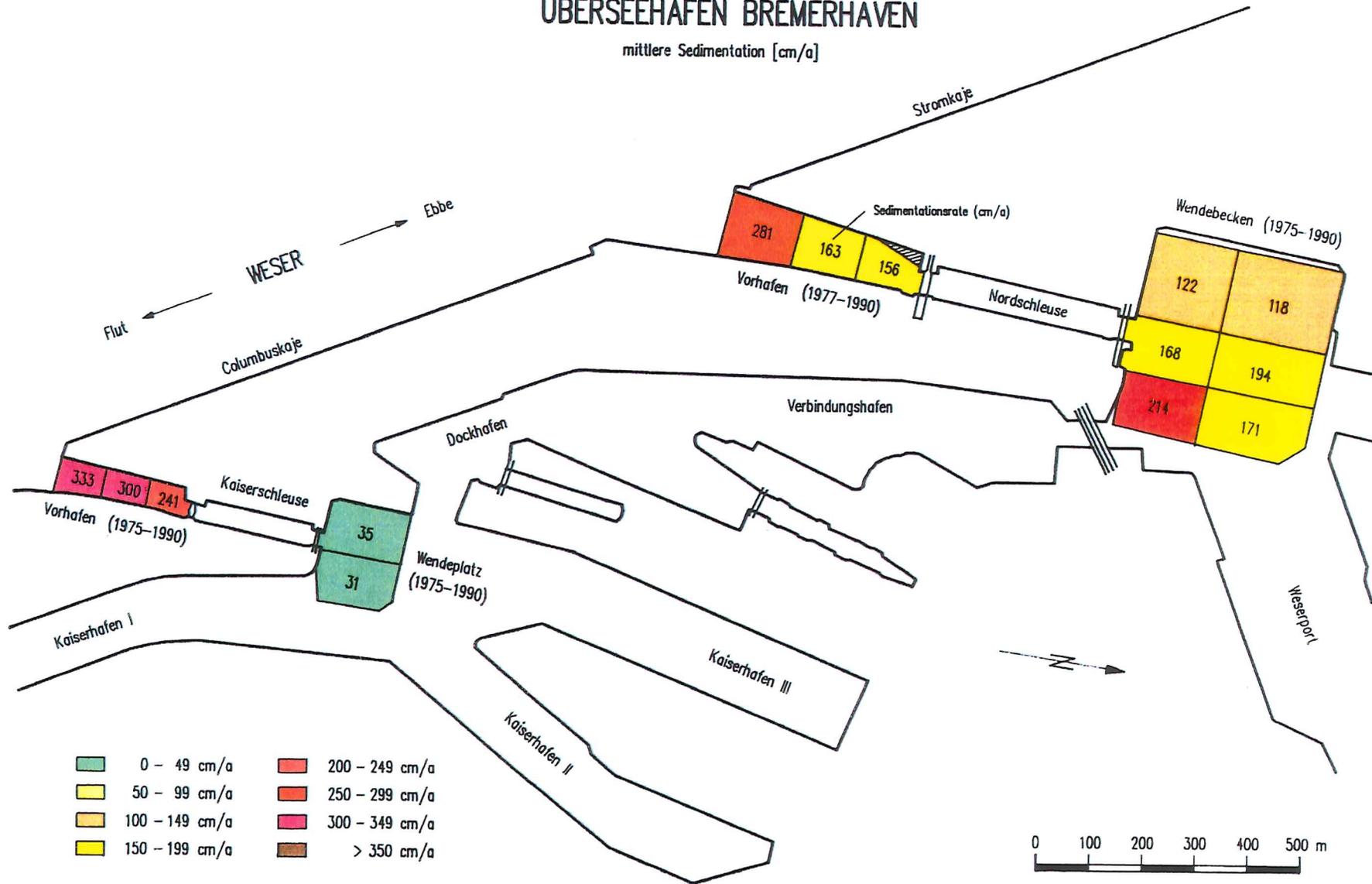
Das Tideniedrigwasser der Elbe liegt etwa 1,30 m unter dem Kanalwasserspiegel. Nach Auskunft des WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMTES BRUNSBÜTTEL hat der Nordostseekanal einen natürlichen mittleren Zufluß von rd.  $MQ_0 = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Etwa 60 % dieser Zuflüsse werden bei Bedarf über die alten Schleusen in die Elbe entwässert. Dabei kommt es zu Abflüssen von 600 bis 700  $\text{m}^3/\text{s}$ , was immerhin etwa dem mittleren Oberwasser der Elbe bei Neu-Darchau entspricht.

Die höchsten Sedimentationen wurden im Einfahrtsbereich zum Neuen Vorhafen mit bis zu knapp 4 m/a ermittelt, mit abnehmender Tendenz in Richtung Außenhaupt der Schleuse (Tafel 29). Die gesamte Fläche verlandet mit durchschnittlich 268 cm/a.

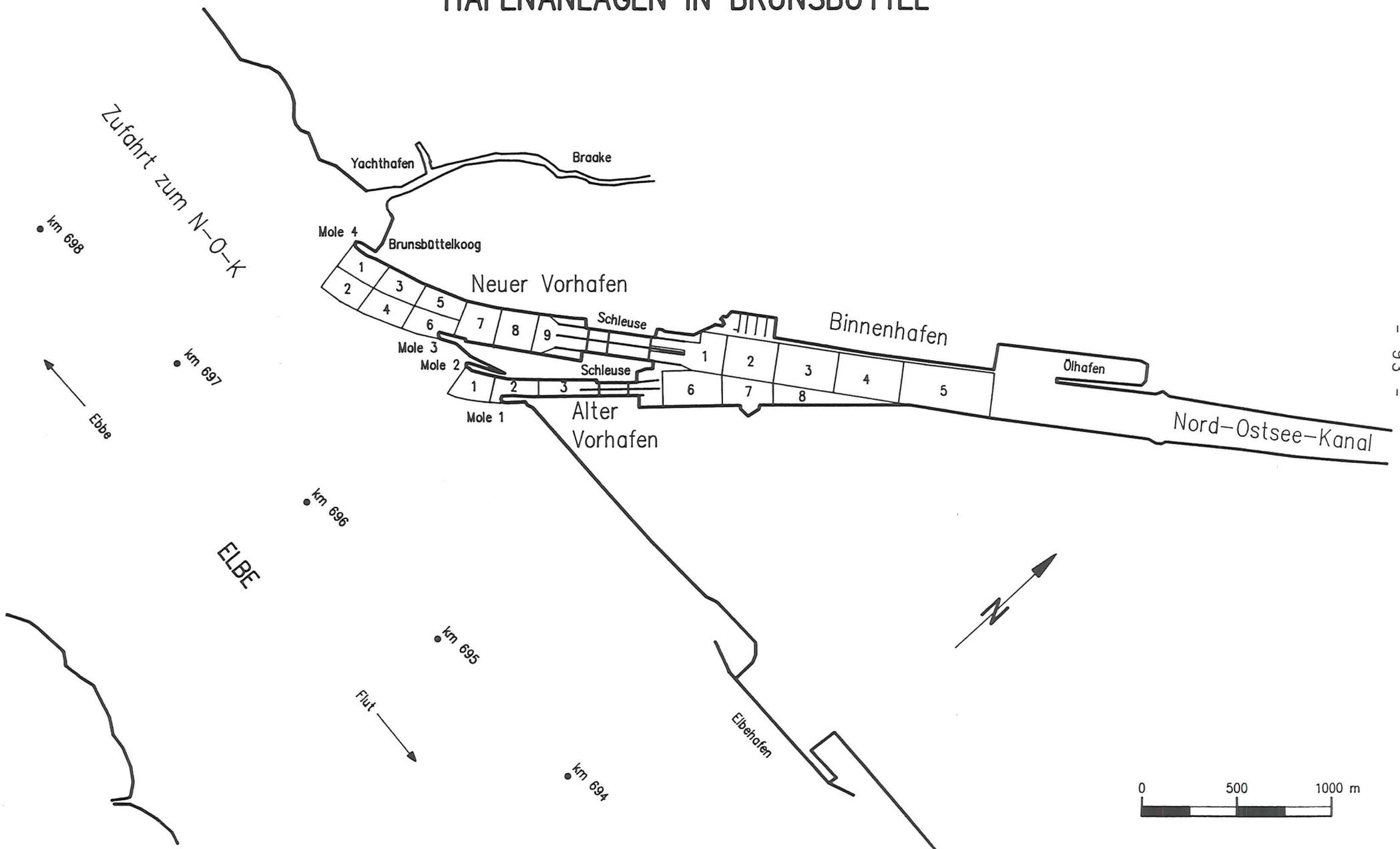
# ÜBERSEEHAFEN BREMERHAVEN

mittlere Sedimentation [cm/a]

Abb. 33



# HAFENANLAGEN IN BRUNSBÜTTEL



103



Bereich (s. Abb.34)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	22231	10	237	10	52687	9
2	30299	13	235	9	71203	12
3	21268	9	297	12	63166	10
4	27964	12	263	11	73545	12
5	19419	9	388	16	75346	12
6	22282	10	317	13	70634	11
7	35200	15	259	10	91168	15
8	30136	13	238	10	71724	12
9	20473	9	225	9	46064	7
Summe 1 - 9 Mittelwert	229272	100	268	100	615537	100

Tafel 29: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1977 bis 1989  
im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel

Im Alten Vorhafen herrschen ähnliche Verhältnisse bei einer mittleren Sedimentationsrate von 274 cm/a (Tafel 30). Dieser Wert zeigt, daß sich die Entwässerung aus dem Kanal in den Alten Vorhafen insgesamt nicht merklich auswirkt. Innerhalb der betrachteten drei Teilgebiete verringern sich die Auflandungen von 317 cm/a auf 252 cm/a.

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

	Winter cm/a	Sommer cm/a
Neuer Vorhafen	218	295
Alter Vorhafen	197	285

Die höheren, etwa gleich großen Sommerwerte sind mit den in der wärmeren Jahreszeit herrschenden anderen Randbedingungen erklärt. Es ist möglich, daß die im Winter häufiger vorzunehmenden Spülungen aus dem Nordostseekanal durch den Alten Vorhafen dort geringere Sedimentationen verursachen als im Neuen Vorhafen.

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.

Die Sollwassertiefen in den Vorhäfen werden durch ständige Baggereinsätze im allgemeinen mit guten Reserven freigehalten (Anlage 24 und 25). Im Binnenhafen unterliegt die Sohle insgesamt etwas geringeren Schwankungen (Anlage 26).

Bereich (s. Abb.34)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	27859	41	317	39	88313	47
2	25311	37	239	30	60493	32
3	15470	22	252	31	38984	21
Summe 1 - 3 Mittelwert	68640	100	274	100	187790	100

Tafel 30: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1977 bis 1989  
im Alten Vorhafen von Brunsbüttel

Direkte Abhängigkeiten zwischen hydrologischen Randbedingungen und Sedimentationen konnten für die Zufahrten zum Nordostseekanal 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 problemlos gehalten als bei höheren Salzgehalten des Elbewassers. 1980 und 1987 betrug der Abfluß in Neu-Darchau im Jahresmittel über 1.000 m<sup>3</sup>/s. In diesen beiden Jahren wurde im Neuen Vorhafen nur etwa halb so viel gebaggert, wie 1983 und 1989 bei geringen Oberwasserführungen von 625 m<sup>3</sup>/s bzw. 553 m<sup>3</sup>/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 (Anlage 24).

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß der Zufahrtsbereich zum Nordostseekanal im Sommerhalbjahr stärker auflandet und auch immer dann, wenn die Elbe wenig Oberwasser führt und sich die Brackwasserzone stromauf verschiebt.

Aufgrund des lebhaften Schiffsverkehrs war zu erwarten, daß durch Schleusungen auch im Binnenhafen bemerkenswerte Sohlerhöhungen zu verzeichnen sind. Die Peilplananalyse hat ergeben, daß der Binnenhafen mit 157 cm/a noch besonders heftigen Verschlickungen unterworfen ist (Tafel 31). Dieser Wert liegt um etwa eine Zehnerpotenz höher als in den offenen Hafengebäcken von Hamburg oder Bremen. Er ist vergleichbar mit dem tideoffenen Vorhafen

Bereich (s. Abb.34)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	38625	8	176	13	67980	9
2	66765	13	176	13	117506	15
3	63747	13	143	11	91158	12
4	69603	14	120	9	83524	11
5	93246	19	125	10	116558	15
6	70060	14	155	12	108593	14
7	50079	10	204	16	102161	13
8	42277	9	210	16	88782	11
Summe 1 - 8 Mittelwert	494402	100	157	100	776262	100

Tafel 31: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1977 bis 1989  
im Binnenhafen von Brunsbüttel (N-O-K)

zur Seeschleuse in Wilhelmshaven ( $q_s = 152 \text{ cm/a}$ ).

Die Gesamtsituation außerhalb der Brunsbütteler Schleusen und im Binnenhafen für die einzeln untersuchten Teilbereiche ist in Abb. 35 dargestellt. Deutlich gehen daraus die Sedimentationsmaxima in den Vorhafeneinfahrten hervor. Es zeigt sich auch, wie die Verlandungen innerhalb des Binnenhafens im Kanal rasch abnehmen.

## 5.6 Cuxhaven

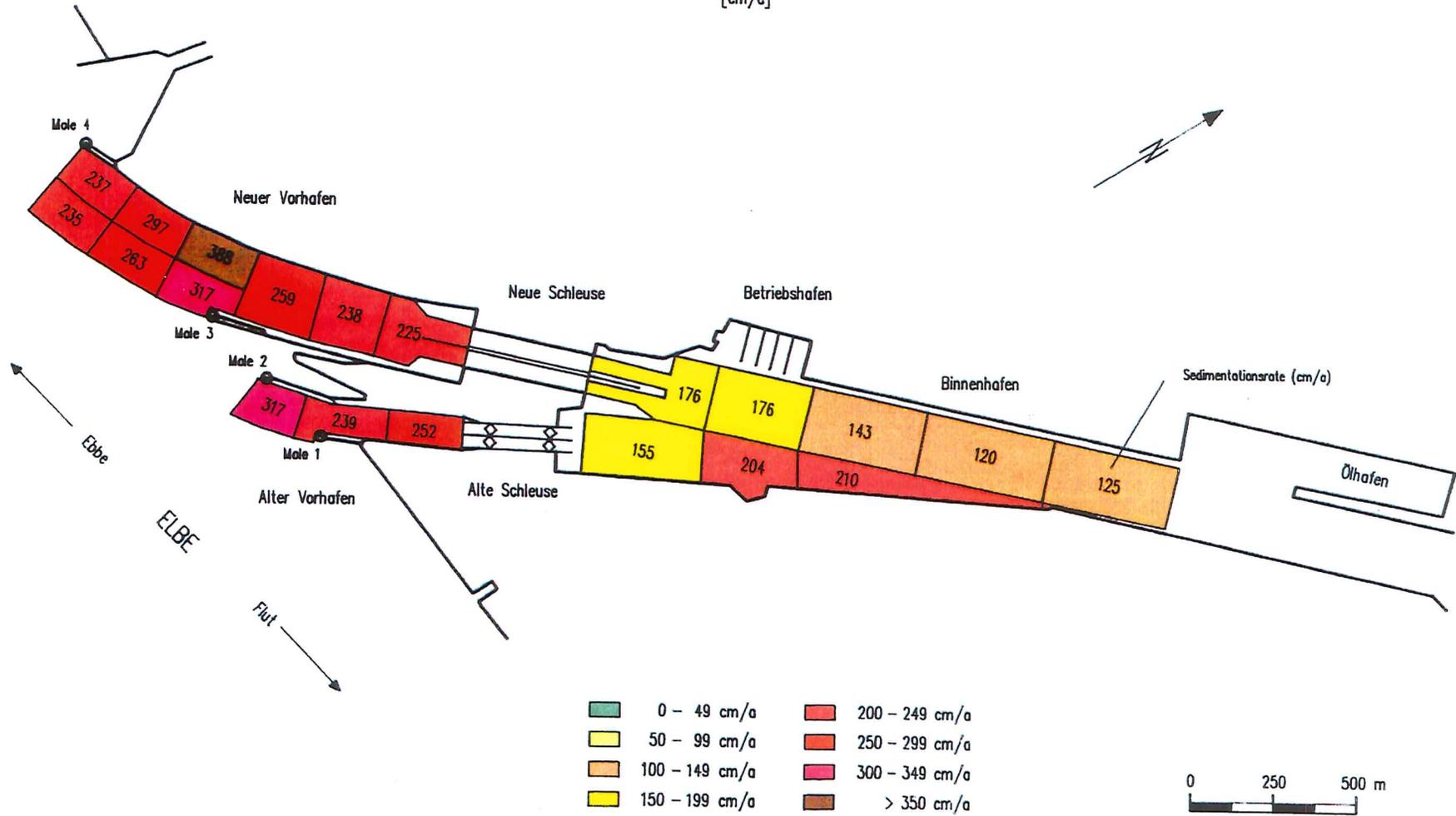
Für den im Elbmündungsgebiet gelegenen Standort Cuxhaven wurden nach den Peilungen des WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMTES CUXHAVEN die Sedimentationen im Fährhafen und dem oberhalb davon gelegenen Vorhafen und Alten Hafen untersucht (Abb. 36).

Der Fährhafen ist in seiner Form seit 1973 grundsätzlich nicht verändert worden. Lediglich die Einfahrt wurde durch Umbaumaßnahmen etwas verkleinert. Im inneren Teil des Fährhafens liegen Schwimmstege für Sportboote, Behörden- und Rettungsfahrzeuge. Die Sollsohle ist dort auf - 5,0 m SKN, im mittleren und äußeren Bereich auf - 8,5 m SKN, festgelegt.

Größere Umbauten haben im Vorhafen stattgefunden. In den siebziger Jahren lag im heutigen Einfahrtbereich ein Jachthafen mit geringen Wassertiefen. Der Alte Hafen und der Alte Fischereihafen hatten getrennte Zufahrten ober- und unterhalb davon mit jeweils 65 m Einfahrtbreite. Im heute bestehenden Zustand beträgt die Solltiefe in der 85 m breiten Hafeneinfahrt - 8,5 m SKN.

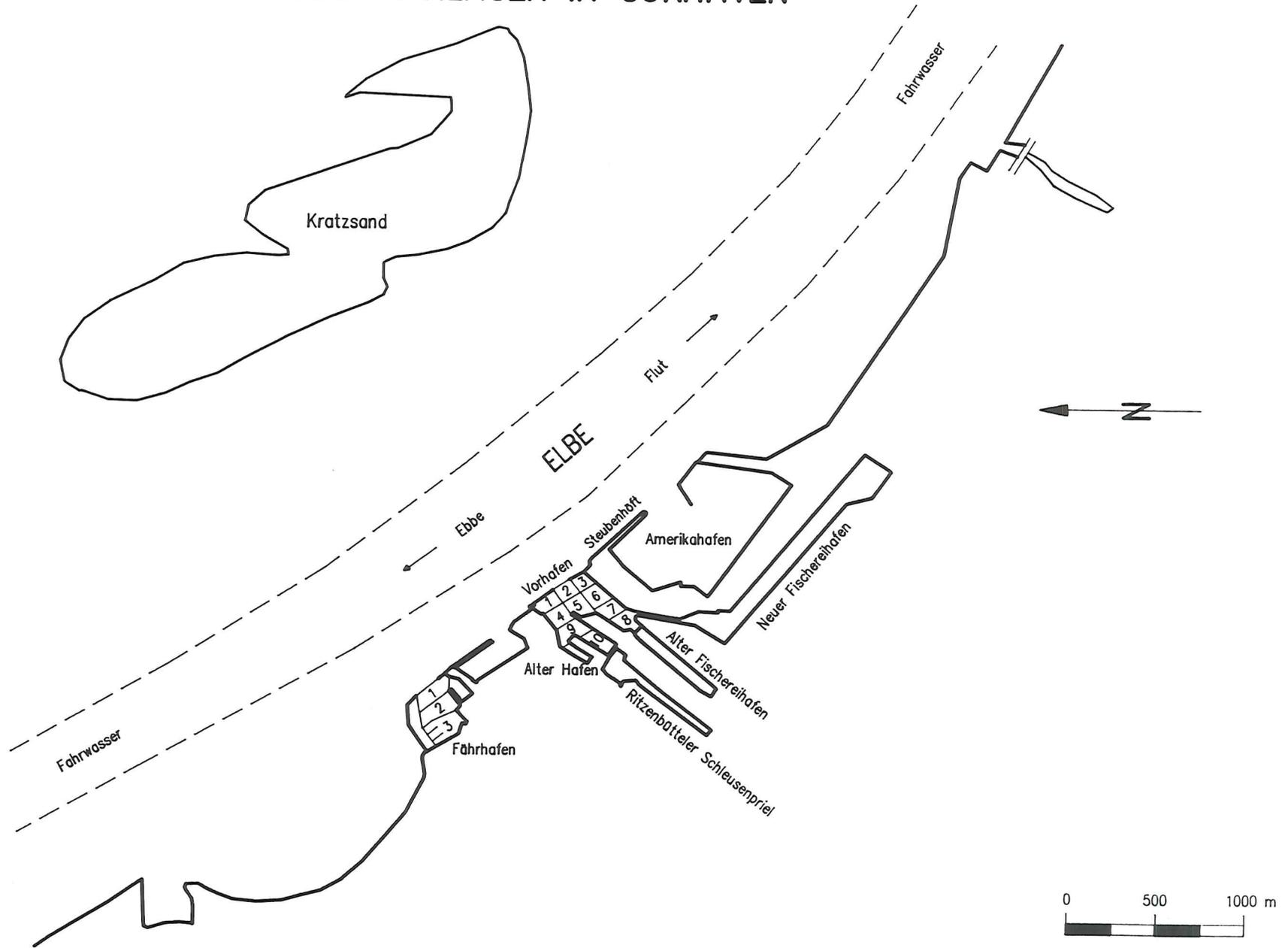
# HAFENANLAGEN IN BRUNSBÜTTEL

mittlere Sedimentation (1977-1989)  
[cm/a]



# HAFENANLAGEN IN CUXHAVEN

Abb. 36



Der Fährhafen verlandet am stärksten im mittleren Abschnitt (Anlage 27, Tafel 32). Insgesamt ist die durchschnittliche Sedimentationsrate mit  $q_s = 109 \text{ cm/a}$  beträchtlich geringer als in den Zufahrten zum Nordostseekanal bei Brunsbüttel. Offenbar liegt die Elbe bei Cuxhaven bereits so weit unterhalb der Trübungszone im Brackwasserbereich der Elbe, daß sich dort entsprechend weniger Feststoffe in den Tidehäfen absetzen.

Vom Vorhafen und Alten Hafen standen für die Auswertungen erst ab 1980 von allen Teilbereichen ausreichende Peildaten zur Verfügung (Anlage 28). 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 finden die stärksten Sedimentationen innerhalb des Vorhafens aufgrund der dort auftretenden Walzenströmungen statt. Der höchste Betrag wurde mit  $q_s = 160 \text{ cm/a}$  ermittelt (Tafel 33). Der eigentliche Vorhafen (Bereich 1 bis 6) verlandet im Mittel mit  $130 \text{ cm/a}$ . In den Schleusenzufahrten herrschen günstigere Verhältnisse. Im Alten Hafen, wo die Sollsohle lediglich auf  $- 4,5 \text{ m SKN}$  festgelegt ist, liegen die Sedimentationen bei  $60$  bis  $70 \text{ cm/a}$ . Im Zufahrtsbereich zu den Fischereihäfen bewirkt die größere Solltiefe von  $- 8,5 \text{ m SKN}$  höhere Auflandungen (Abb. 37).

Zusammenfassend wird festgestellt, daß die Sedimentationen im Hafengebiet von Cuxhaven bedeutend geringer als vor den Schleusen des Nordostseekanals in Brunsbüttel sind. Ursächlich dafür ist die Lage von Cuxhaven im unteren Brackwasserbereich der Elbe. Dadurch ist das Sedimentationsgeschehen eher mit dem in Wilhelmshaven als mit den Vorgängen in Emden, Bremerhaven oder Brunsbüttel vergleichbar.

Bereich (s. Abb.36)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>	
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%
1	19890	29	106	33	21083	28
2	28634	41	122	38	34933	46
3	20566	30	94	29	19332	26
Summe 1 - 3 Mittelwert	69090	100	109	100	75348	100

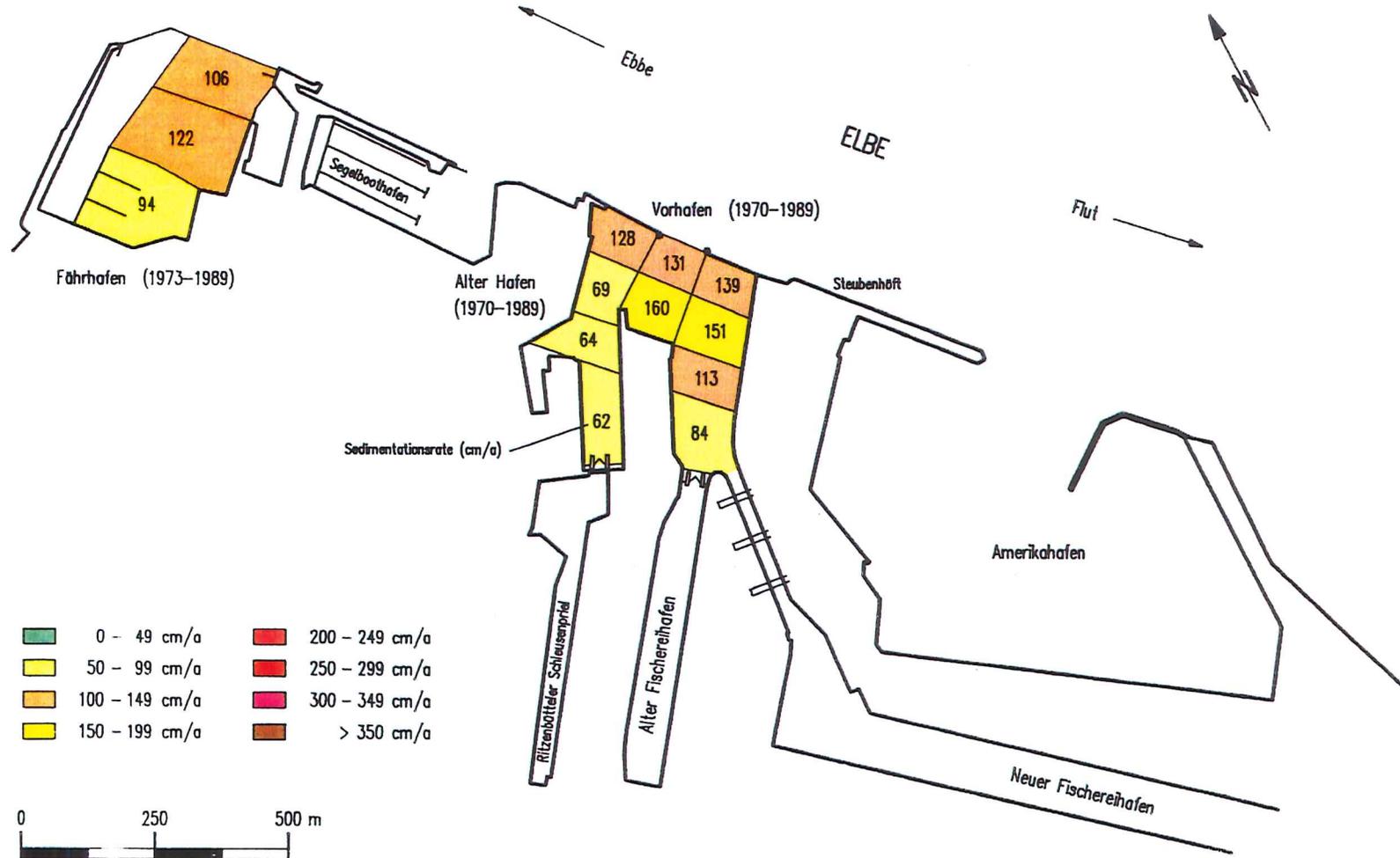
Tafel 32: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1973 bis 1989  
im Fährhafen von Cuxhaven

Bereich (s. Abb.36)	Fläche A		Sedimentationsrate q <sub>s</sub>		Sedimentationsmenge Q <sub>s</sub>		
	m <sup>2</sup>	%	cm/a	%	m <sup>3</sup> /a	%	
1	11780	10	128	} Vorhafen q <sub>s</sub> = 130 cm/a	11	15078	12
2	10120	9	131		12	13257	11
3	8250	7	139		13	11468	9
4	9945	9	69		6	6862	6
5	10630	9	160		14	17008	14
6	12005	10	151		14	18128	14
7	12750	11	113	} q <sub>s</sub> = 80 cm/a	10	14408	12
8	13230	11	84		8	11113	9
9	12270	11	64		6	7853	6
10	14600	13	62		6	9052	7
Summe 1 - 10 Mittelwert	115580	100	107		100	124227	100

Tafel 33: Mittlere jährliche Sedimentationsraten und -mengen von 1970 bis 1989  
im Alten Hafen und Vorhafen von Cuxhaven

# HAFENANLAGEN IN CUXHAVEN

mittlere Sedimentation [cm/a]



## 5.7 Büsum

Abschließend werden die Verlandungen des an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste gelegenen Vorhafens von Büsum kurz erläutert (Abb. 38). Für die Auswertungen standen Peilpläne von 1982 bis 1990 zur Verfügung. 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 Sohllage im Untersuchungsbereich des Vorhafens bewegte sich im Auswertungszeitraum zwischen - 3 und - 8 m NN (Anlage 29).

Durchschnittlich sedimentierte der Vorhafen von Büsum mit  $q_s = 132 \text{ cm/a}$ . Die Auflandungen sind von der Größenordnung 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 liegen die Sedimentationen um Größenordnungen höher. Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Standorte sind in Tafel 34 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 Mio. m<sup>3</sup>/a an. 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, sind andere Dinge dafür ausschlaggebend. Es kommt ganz 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 Brackwasser. 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

Hafenbereich	Fläche $A$ $m^2$	Sedimentationsrate $q_s$ $cm/a$	Sedimentationsmenge $Q_s$ $m^3/a$
<b>EMDEN</b>			
Vor- und Außenhafen	242.024	233	562.442
<b>WILHELMSHAVEN</b>			
Neuer Vorhafen	729.692	152	1.113.819
<b>BREMERHAVEN</b>			
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
<b>BRUNSBÜTTEL</b>			
Neuer Vorhafen	229.272	268	615.537
Alter Vorhafen	68.640	274	187.790
Binnenhafen (N-O-K)	494.402	157	776.262
<b>CUXHAVEN</b>			
Fährhafen	69.090	109	75.348
Vor- und Alter Hafen	115.580	107	124.227
<b>BÜSUM</b>			
Vorhafen	25.500	132	33.660

Tafel 34: Sedimentationsraten und -mengen in den Hafenanlagen an der deutschen Nordseeküste

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.

Erwähnenswert ist die Tatsache, daß sich auch hinter den Seeschleusen in Brunsbüttel im Binnenhafen noch große Feststoffmengen absetzen. Durch den regen Schiffsverkehr mit den häufigen Schleusungen werden Sedimente in den Nordostseekanal transportiert. Der Binnenhafen verlandet durchschnittlich mit  $q_s = 157 \text{ cm/a}$  (Tafel 34). Das ergibt eine etwa gleich große Sedimentationsmenge wie in den Schleusenvorhäfen. Das Sedimentationsvolumen ist im Binnenhafen etwa viermal so groß wie in dem den Tideströmungen unterworfenen Alten Vorhafen. Entsprechend hoch ist der Baggeraufwand.

Auch hinter der Nordschleuse in Bremerhaven sind im Wendebecken des Überseehafens recht hohe Auflandungen zu verzeichnen. Mit ebenfalls  $q_s = 157 \text{ cm/a}$  sind die Sedimentationsraten dort so, wie in dem tideoffenen Vorhafen von Wilhelmshaven. Hinter dem Binnenhaupt der Kaiserschleuse in Bremerhaven sind die Verhältnisse sehr viel günstiger ( $q_s = 33 \text{ cm/a}$ , Tafel 34).

Mehr Schiffsverkehr durch die Nordschleuse, vor allem aber die zum Ausgleich des Hafenwasserstandes erforderlichen Sielungen von Weserwasser in den Überseehafen, sind die Ursache für die großen

Feststoffmengen im Wendebecken. 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 (fluid-mud), innerhalb der die für die Schifffahrt maßgebende nautische Wassertiefe liegt, bedarf noch besonderer Untersuchungen, um die Vorgänge besser verstehen zu können.

Die für die Schifffahrt 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. Als dort Reservetiefen vorgehalten wurden, waren die Bagger durchschnittlich 2,5 Monate/Jahr im Einsatz, bei dem Versuch, die Solltiefe zu erhalten, fast monatlich. Darüber hinaus wurden erheblich größere Mengen gebaggert und höhere Sedimentationen festgestellt. Vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Baggereinsatzzeiten und -mengen ergaben die Auswertungen für Bremerhaven und Emden. Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß der Unterhaltungsaufwand durch Vorratsbaggerungen mit Reservetiefen wesentlich eingeschränkt werden kann.

Alternativ zu den herkömmlichen Baggermethoden können heute Wasserinjektionsgeräte eingesetzt werden. Der Vorhafen in Cuxhaven wird seit 1985 damit erfolgreich auf Solltiefe gehalten. Der Vorhafen zur Kaiserschleuse in Bremerhaven wurde im Juni 1990 mit Wasserinjektionen kurzfristig um mehrere Meter vertieft. 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 Schleusen ungewollt in die Häfen gelangen kann. 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 die Baggergeräte (PENNEKAMP, BLOKLAND, VERMEER; 1991).

Ob und wie Wassereinjektionsgeräte für die Unterhaltung in den Tidehäfen eingesetzt werden können, müßte von Fall zu Fall gesondert beurteilt werden. Unabhängig davon haben die Sedimentationsanalysen dazu geführt, daß der Baggeraufwand mit herkömmlichen Geräten durch Reservetiefen optimiert werden kann.

## 6. Schlußbemerkungen

Ziel dieses Vorhabens war es, Erkenntnisse über die Sedimentationen in Tidehäfen zu erhalten. Grundlage und Voraussetzung für die Untersuchungen waren die bei den zuständigen Verwaltungen vorliegenden Kontrollpeilungen der Wassertiefen. Als Ergänzung zu theoretischen Untersuchungen und hydraulischen Modellversuchen zum Verlandungsproblem von Tidehäfen sollten hier die Daten aus der Natur selbst in Verbindung mit den hydrologischen Randbedingungen aufbereitet und analysiert werden.

Mit diesen Auswertungen liegen konkrete Ergebnisse für verschiedene Tidehäfen oberhalb, in und außerhalb der Brackwasserregionen der deutschen Tideästuarien vor, die vorstehend im einzelnen erläutert worden sind. Die Berechnungsergebnisse für die Hafengebiete in Bremen sind in Tafel 21 (Seite 60) und für die Häfen in den Brackwasser- und Küstenbereichen in Tafel 34 (Seite 109) zusammengestellt. Die stadtbremischen Häfen verlanden wie die unabhängig untersuchten Hamburger Hafenbecken in der Größenordnung von Dezimetern. Der Salzwasser-einfluß bewirkt Auflandungen im Meterbereich. In Wilhelmshaven, Büsum und den im Elbmündungsbereich gelegenen Hafenanlagen von Cuxhaven betragen die jährlichen Sedimentationen etwa einen bis eineinhalb Meter. In den Brackwasserzonen der Ems, Weser und Elbe bei Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel liegen die Verlandungen bei zwei bis drei Metern.

Es ist geplant, die Ergebnisse des Vorhabens in Heft 54 "Die Küste" zu veröffentlichen. Teilergebnisse wurden anlässlich der CEDA-PIANC Konferenz in Amsterdam (NASNER/MESSER, 1991) und bei einem Symposium "Stadt am Strom" am 20.03.1992 in Bremen vorgestellt (NASNER, 1992). Außerdem wird in einem Beitrag zum 10<sup>th</sup> International Harbour Congress im Juni 1992 über das Vorhaben berichtet (NASNER/PIEPER, 1992).

Nach dieser Bestandsaufnahme soll in einer zweiten Phase 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 vom BMFT geförderten KFKI 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 übernommen hat und den Herren Dipl.-Ing. K. Messer und Dipl.-Ing. R. Pieper für ihren unermüdlichen Einsatz bei der rechnergestützten Aufbereitung und Analyse des umfangreichen Datenmaterials.

*Nasner*

Bremen, den 16.04.1992

7. Schrifttum

- BARG, G. Untersuchungen über Salzgehaltsverteilungen in Brackwassergebieten von Tideflüssen am Beispiel der Unterweser  
Mitt. des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover  
Heft 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  
Heft 70, 1990
- CHRISTIANSEN, H.  
HAAR, S. Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken  
- Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1990 -  
Gewässerkundliche Studie Nr. 12 Strom- und Hafenausbau Hamburg  
Referat Gewässerkunde, 1991
- CHRISTIANSEN, H.  
HAAR, S.  
RADTKE, G. Zur Sedimentation in Hamburger Hafenbecken  
Gewässerkundliche Studie Nr. 1, Strom- und Hafenausbau Hamburg  
Referat Gewässerkunde, - SB 41 -, 1985
- CHRISTIANSEN, H.  
KAMPS, A. Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken  
Auswertungen der Peilungen der Jahre 1977 bis 1984  
Gewässerkundliche Studie Nr. 3 Strom- und Hafenausbau Hamburg  
Referat Gewässerkunde, - SB 41 -, 1985
- CHRISTIANSEN, H.  
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 -



- SCHULZE, M.                   Über die Abhängigkeit zwischen elek-  
trischer Leitfähigkeit und Salzgehalt  
am Beispiel von Untersuchungen am Ems-  
Ästuar  
Mitt. des Leichtweißinstituts für  
Wasserbau der TU Braunschweig  
Heft 102, 1988
- SCHULZE, M.                   Zur Dynamik des Schwebstoffhaushaltes  
in Brackwassergebieten am Beispiel  
des Ems-Ästuars  
Mitt. des Leichtweißinstituts für  
Wasserbau der TU Braunschweig  
Heft 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 Elb-  
mündungsgebiet  
Hamburger Küstenforschung Heft 15, 1970
- SIEFERT, W.                  Hydrologische Daten aus dem Tidegebiet  
der Elbe und ihrer Nebenflüsse  
Hamburger Küstenforschung Heft 35, 1976
- WSD NORTHWEST               Festschrift zum Tag der offenen Tür  
der Wasser- und Schifffahrtsdirektion  
Nordwest 9. Juni 1985  
Eigenverlag WSD Northwest, 1985



