

Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen – In situ Messungen –

Von HORST NASNER

Z u s a m m e n f a s s u n g

Das vom BMBF geförderte KFKI-Projekt 03 KIS 019 hatte zur Aufgabe, mit in situ Messungen die komplexen hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in Brackwasserhäfen zu analysieren. Die Untersuchungen wurden in Vorhäfen an der Ems und Weser durchgeführt. Mit den aus der Natur gewonnenen Daten wurden die Grundlagen für eine bessere Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit numerischer Simulationen der tideabhängigen Strömungsvorgänge geschaffen. Die Kenntnis der hydro- und morphodynamischen Gegebenheiten ist eine unabdingbare Voraussetzung, um die Sedimentationen und damit den Unterhaltungsaufwand minimieren zu können.

Trotz der unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen in der Ems und Weser sind die tide- und oberwasserabhängigen Strömungsvorgänge in den Vorhäfen von Emden und Bremerhaven miteinander vergleichbar. Weiterer Forschungsbedarf besteht, um Informationen über die unterschiedlichen Sedimenteigenschaften innerhalb der Flüssigschlicklagen in Brackwasserhäfen zu erlangen.

S u m m a r y

Main issue of the KFKI – Project 03 KIS 019, sponsored by the German Ministry for Education and Research (BMBF), was to analyse the complex hydrodynamic and morphological processes in brackish water harbours. The investigations were carried out in outer harbours situated on the estuaries of Ems and Weser. Field data collected are the basis for improved calibration and application of numerical models of tidal currents. The knowledge of the hydro- and morphodynamic conditions is crucial for minimising sedimentation and thereby maintenance dredging.

In spite of the different hydrological boundary conditions in the Ems and Weser estuary, the current processes dependent on tide and freshwater discharge in the outer harbours in Emden and Bremerhaven are comparable. However, further research is required in order to obtain more information about the different sediment properties inside the fluid mud layer in brackish water harbours.

K e y w o r d s

In situ Messungen, Brackwasserhäfen, Strömungen, Dichteeffekte, Schwebstoffkonzentration, Salzgehaltsgradienten, Oberwasser

In situ measurements, harbours in brackish water zones, currents, density effects, suspended load fresh water discharge, salinity gradients

I n h a l t

1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Zur Sedimentation in Brackwasserhäfen	3
2.1 Sedimentationsursachen	3
2.2 Besonderheiten des Fluid Mud	5
3. Untersuchungsgebiete	7
4. Tide- und Oberwasserbedingungen	9
5. Vorhäfen in Bremerhaven	10
5.1 Bremerhaven Nordschleuse	10
5.1.1 Strömungsverhältnisse	10
5.1.2 Salzgehalte	17
5.1.3 Schwebstoffe	21
5.2 Bremerhaven Kaiserschleuse	27
5.2.1 Strömungsverhältnisse	27
5.2.2 Salzgehalte	33
5.2.3 Schwebstoffe	36
6. Emden Vor- und Außenhafen	39
6.1 Strömungsverhältnisse	39
6.2 Salzgehalte	47
6.3 Schwebstoffe	53
7. Zusammenfassende Betrachtungen	61
8. Schlussbemerkungen	63
9. Schriftenverzeichnis	64

1. Einleitung und Aufgabenstellung

In den vom BMFT und BMBF geförderten KFKI-Projekten MTK 0470 und MTK 0544 wurden mit der Analyse von Kontrollpeilungen quantitative Aussagen über die Sedimentationen in Tidehäfen oberhalb, in und unterhalb der Brackwasserzone in deutschen Tide-ästuarien erarbeitet. Die tideoffenen Vorhäfen im Brackwasserbereich der deutschen Nordseeküste unterliegen besonders starken Sedimentationen.

In Brackwasserhäfen ist nicht allein die größere Sedimentationsmenge, sondern auch ihre Zusammensetzung von Bedeutung. Über der festen Sohle bildet sich flüssiger Schlick (Fluid Mud) mit bis zu mehreren Metern Mächtigkeit. Das Phänomen Fluid Mud ist nicht mit Schlicksedimenten mehr mineralischen Ursprungs vergleichbar.

Um die Ursachen der besonders hohen Auflandungen in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen besser erklären zu können, sind in dem vom BMBF geförderten KFKI Projekt 03 KIS 019 Messungen in der Natur durchgeführt worden. Damit sollten die komplexen Fließ- und Transportvorgänge erforscht werden. Außerdem sind die aus der Natur gewonnenen Daten als Grundlage für eine bessere Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit numerischer Modelluntersuchungen erforderlich.

Das Forschungsvorhaben ist deshalb in Kooperation mit dem Franzius-Institut der Universität Hannover durchgeführt worden. Vom Institut für Wasserbau (IWA) der Hochschule Bremen wurden dem Franzius-Institut dazu die aus der Natur gewonnenen Daten für numerische Modellierungen im Projekt „Maßnahmen zur Minimierung von Sedimentationen im Bereich brackwasserbeeinflusster Vorhäfen“ (BMBF 03 KIS 020) zur Verfügung gestellt.

Die in situ Messungen wurden an der Weser und Ems in Bremerhaven und Emden durchgeführt (Abb. 1). Die Vorhäfen unterscheiden sich in ihrer Geometrie, Lage zum Tidestrom und Ausbautiefen voneinander.

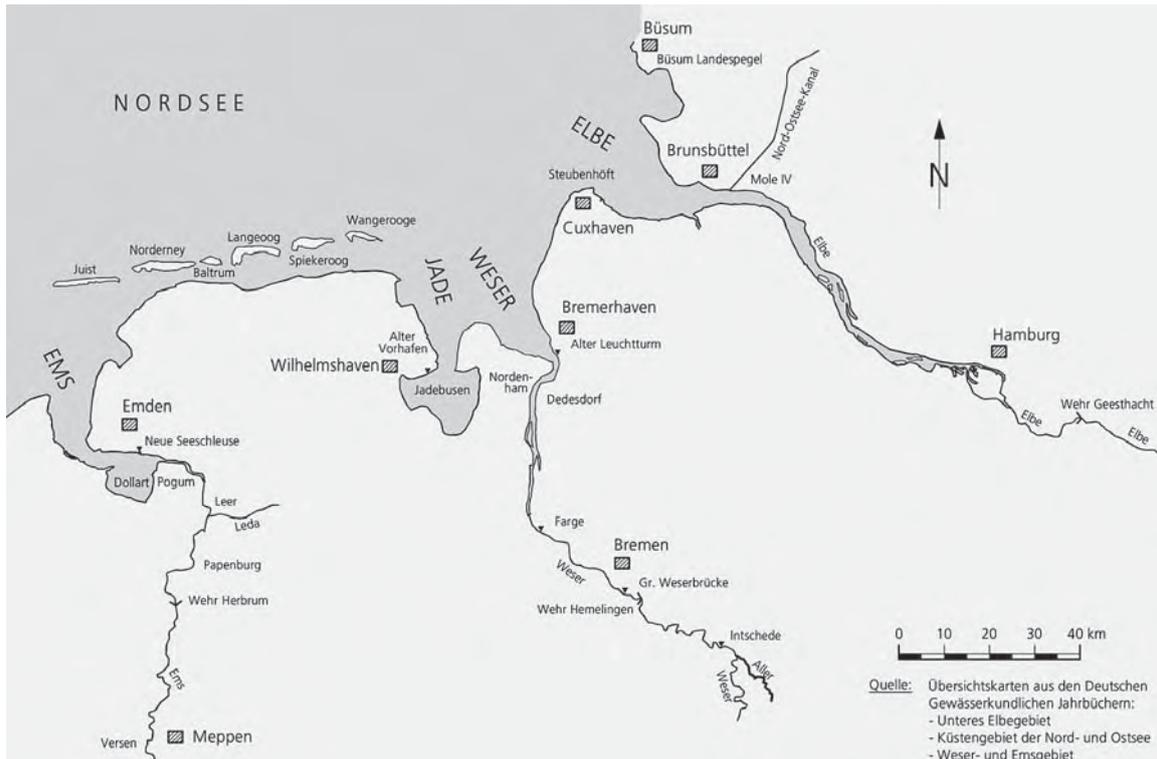


Abb. 1: Deutsche Nordseeküste, Lageplan

2. Zur Sedimentation in Brackwasserhäfen

Zum besseren Verständnis der Verlandungsprobleme wird zunächst allgemein auf die Sedimentationsursachen in Brackwasserhäfen und die Besonderheiten des sich dort ausbildenden Flüssigschlicks (Fluid Mud) eingegangen.

2.1 Sedimentationsursachen

Hafenbecken im Brackwasserbereich eines Tideflusses werden durch drei Strömungseffekte beeinflusst (s. Abb. 2).

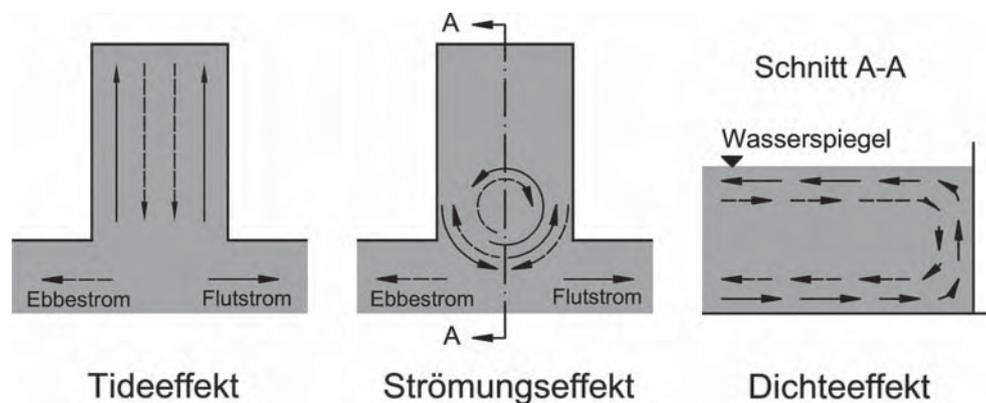


Abb. 2: Tide-, Strömungs- und Dichteeffekt

a) Tideeffekt

Bei jeder Flut füllt sich das Hafenbecken um ein Wasservolumen V , das sich aus dem Produkt von Hafenfläche A und Tidehub Th_b ergibt.

$$V = A \cdot Th_b$$

Während der Flutstromphase sedimentieren Feststoffe in der strömungsberuhigten Zone, die mit der Ausströmung des Wasservolumens bei Ebbe wegen der geringen Strömungsintensitäten nicht resuspendiert und in den Fluss zurücktransportiert werden.

b) Strömungseffekt

Neben dem Tideeffekt spielt der Stromeffekt eine bedeutende Rolle für die Sedimentation von Hafenbecken.

Wenn Wasser mit großer Transportkapazität an einem Hafen vorbeiströmt, wird im Einfahtsbereich eine als Walze bezeichnete Drehströmung mit **vertikaler** Achse angeregt. Die mit der Strömung in den Hafen transportierten Feststoffe lagern sich im Inneren der Walze ab. Von Bedeutung ist der Umstand, dass es durch die Walzenströmungen zu einem erhöhten Wasseraustausch zwischen Hafenbecken und Fluss kommt (FÜHRBÖTER u. WITTE, 1988; BRINKMANN, 1990). Es werden ständig neue Wassermengen in das Walzensystem ein- und aus Kontinuitätsgründen wieder ausgetragen.

Der Stromeffekt tritt auch in tidefreien, strömenden Gewässern auf. Im Tidestrom ändert sich die Drehrichtung der Walzen im Tiderhythmus. Die Intensität der Walzenströmung wird durch die Ausbautiefe, Hafengeometrie, Hafeneinfahrtsbreite und ihre Lage zum Strom beeinflusst.

c) Dichteeffekt

In Brackwasserhäfen werden die vorstehend beschriebenen Gegebenheiten zusätzlich durch den Dichteeffekt überlagert. Während der Flutstromphase verstärkt das in den tieferen Wasserschichten eindringende Salzwasser die Sohlströmungen im Tidestrom. In der Ebbephase werden im Brackwasserbereich aufgrund der Dichteunterschiede die Oberflächenströmungen erhöht. Auch in angrenzenden Hafenbecken wird der Stromeffekt durch die Dichteströmungen, wie in Abb. 2 schematisch dargestellt, überlagert. Während der Flut bilden sich dichtebedingt Walzenströmungen mit **horizontaler** Achse aus. Der Drehsinn kehrt sich bei Ebbestrom um. Durch diese Vorgänge wird der Wasseraustausch und damit der Feststoffeintrag zusätzlich erhöht.

Die in Abb. 2 dargestellten Vorgänge sind in der Natur sehr viel komplexer und haben in jedem Vorhafen ihren eigenen Charakter. Die besonderen hydrodynamischen Gegebenheiten in den Vorhäfen von Bremerhaven und Emden wurden deshalb vom Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen mit in situ Messungen eingehend untersucht.

Der Dichteeffekt führt dazu, dass in Brackwasserhäfen bedeutend höhere Sedimentationen eintreten als in den oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Seehäfen. Mit Peilplananalysen konnte ermittelt werden, dass die mittleren jährlichen Auflandungen in den Hafenanlagen von Bremen und Hamburg in der Größenordnung von zwei bis vier Dezimetern liegen. In Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel sind die durchschnittlichen Sedimentationen mit zwei bis drei Metern um rd. eine Zehnerpotenz höher (NASNER, 1992, 1997; CHRISTIANSEN u. HAAR, 1996). Für Bremerhaven und Brunsbüttel wurde nachgewiesen, dass die Schleusenvorhäfen in den Sommerhalbjahren bedeutend stärker sedimentieren als in der kalten Jahreszeit (NASNER, 1989, 1992).

Die vorstehenden Ausführungen sollten darlegen, welche Randbedingungen zu den erhöhten Sedimentationen in vom Brackwasser beeinflussten Vorhäfen führen.

In Brackwasserhäfen ist jedoch nicht allein die größere Sedimentationsmenge, sondern auch die Zusammensetzung der Sedimente von Bedeutung. Über der festen Sohle kann sich verflüssigter Schlick (Fluid Mud) mit unterschiedlichen Mächtigkeiten ausbilden. Dieses Phänomen ist Gegenstand intensiver Forschung. Von besonderem Interesse ist dabei die Navigierbarkeit von Schiffen in diesem Medium und damit die Frage nach der nautisch nutzbaren Wassertiefe.

2.2 Besonderheiten des Fluid Mud

In Vorhäfen mit Fluid Mud-Lagen ist die Wassertiefe nicht klar definiert. Doppeltfrequent arbeitende Echolotgeräte vermitteln stark voneinander abweichende Tiefenangaben.

Hochfrequente akustische Signale werden bereits in einer Grenzschicht zum stark schwebstoffhaltigen Wasser reflektiert. An dieser oberen Grenze, die als „schwarzes Wasser“ bezeichnet werden kann, entsprechen Dichte und Zähigkeit noch den Werten von reinem Wasser. Niederfrequente Signale dringen bis zur festen Sohle vor. Zwischen den beiden Horizonten befindet sich die Fluid Mud-Zone. Innerhalb dieser Schicht vergrößern sich die Dichte ρ und die dynamische Viskosität η . Als Maß für die nutzbare (nautische) Tiefe werden für die verschiedenen Häfen kritische Dichten ρ_{krit} zwischen $1,15 \text{ t/m}^3$ und $1,24 \text{ t/m}^3$ vorgegeben (VANTORRE, 1994). Die Unterschiede sind damit erklärt, dass für das Manövrierverhalten der Schiffe neben der Dichte zusätzlich die mit der Tiefe veränderliche Viskosität η eine Rolle spielt. Der Zusammenhang zwischen der Dichte und den rheologischen Eigenschaften wird von verschiedenen Parametern wie Korndurchmesser, Sandgehalt sowie dem mineralischen und organischen Gehalt der Feststoffe beeinflusst. Die kritische Dichte hängt von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab und ist außerdem zeitlichen Schwankungen unterworfen.

Sehr eingehende Untersuchungen zum Phänomen Fluid Mud sind bisher in Deutschland im Emden Außenhafen durchgeführt worden (WURPTS, 2003). Die Verhältnisse in der Ems können nicht verallgemeinert und vorbehaltlos auf andere Reviere übertragen werden. Es wurde vorstehend bereits gesagt, dass die hydrodynamischen Vorgänge durch die Hafengeometrie, Einfahrtsbreite und die Lage zum Strom sowie die Ausbautiefe beeinflusst werden. Hinzu kommt die unterschiedliche Zusammensetzung der Sedimente. So ist das Material im Emden Außenhafen durch sehr geringe Sandkornanteile und relativ hohe organische Bestandteile gekennzeichnet (NASNER, 1992; WURPTS, 1997).

Mit Abb. 3 können die Besonderheiten des Fluid Muds für den Emden Außenhafen erläutert werden. Während des dreimonatigen Zeitraumes vom April bis zum Juli 1999 wurden im Emden Außenhafen keine Baggerungen getätigt. Es fällt auf, dass sich die mit dem Echolot gemessenen Horizonte nur geringfügig verändert haben. Die 210 kHz und 15 kHz Linien lagen im Juli noch in der gleichen Größenordnung wie bei der Aprilpeilung. Geringe Veränderungen können schon allein auf Kursabweichungen bei der Profildfahrt zurückgeführt werden. Auffällig ist in Abb. 3, dass die Zähigkeiten bis zu $2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ zum Juli 1999 näher an den 210 kHz Horizont herangerückt sind. Außerdem ist der Verlauf im Längsschnitt mehr der hochfrequenten Echolotaufnahme angepasst. Umgekehrt ist es bei den höheren Zähigkeiten ab $5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, die eher dem 15 kHz Horizont zugeordnet werden können.

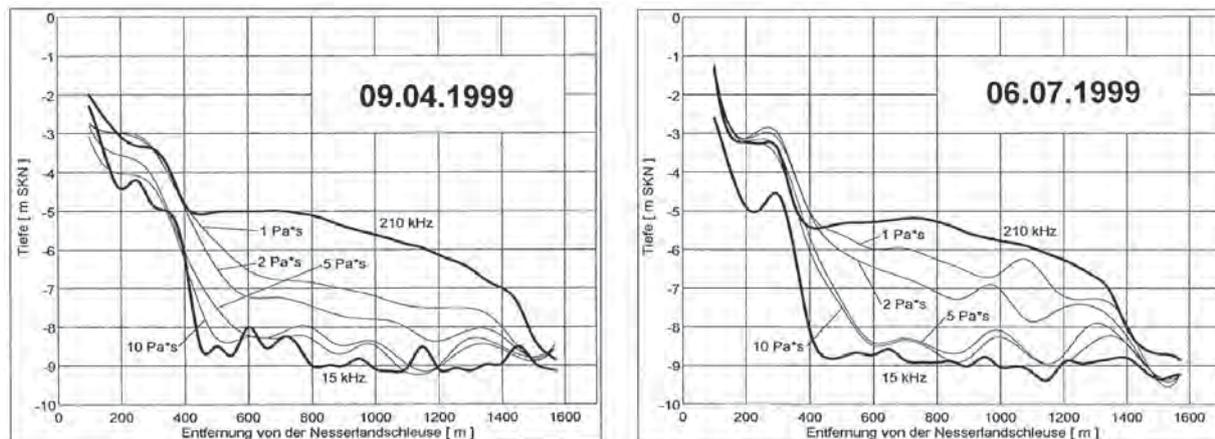


Abb. 3: Längsprofile im Emden Außenhafen, Peilungen und Linien gleicher Viskosität (Isovisken) (DASCH u. WURPTS, 1999)

Das ist von Bedeutung, weil sich mit den rheologischen Eigenschaften (Zähigkeit und Scherfestigkeit) auch das Fließverhalten des Mediums verändert. Innerhalb einer rheologischen Übergangszone nimmt der verflüssigte Schlack zunehmend plastische Eigenschaften an.

Viskositäten bis rd. 2 Pa·s sind so gering, dass das Fließverhalten mit dem von reinem Wasser vergleichbar ist. In diesem Fall handelt es sich um eine den Gesetzen der Schwerkraft folgenden Newton'schen Flüssigkeit. Ab Zähigkeiten um 5 Pa·s beginnt im Emden Außenhafen der Übergang zum konsolidierteren Zustand. Bei etwa 10 Pa·s hatte der Schlack eine Konsistenz erreicht, „dass er nicht mehr ohne Weiteres aus einem Behälter herauszukippen war“ (DASCH u. WURPTS, 1999).

Es bleibt festzustellen, dass es sich beim Fluid Mud um ein viskoses Medium handelt, welches physikalisch mit der ihm eigenen Scherspannung und dynamischen Zähigkeit beschrieben werden kann. Fluid Mud ist somit keine Newton'sche Flüssigkeit. Im Schrifttum wird er als Bingham'sche Flüssigkeit oder besser auch als Bingham'sches Medium bezeichnet (WURPTS, 1997). Das Fließverhalten von Fluid Mud ist von einer kritischen Scherspannung (Fließgrenze) und der dynamischen Viskosität abhängig. Solange die Fließgrenze des Mediums unterschritten bleibt, findet innerhalb der viskosen Flüssigkeit auch keine Bewegung statt. Wegen der organischen Anteile der Feststoffe sind die Sinkgeschwindigkeiten äußerst gering, weshalb das Material über der unberührten Hafensohle nur sehr langsam konsolidiert und höhere Scherspannungen erreicht.

Von besonderer Bedeutung ist das thixotrope Verhalten eines Bingham'schen Mediums. Wenn Fluid Mud durch äußere Einwirkungen, wie z.B. schiffserzeugte Strömungen oder Schraubenstrahlkräfte, beeinflusst wird, gerät das System durch Überschreiten der Fließgrenze in Bewegung. Wesentlich ist dabei, dass es die ursprünglich vorhandene Zähigkeit wenn überhaupt, nur zeitverzögert wiedererlangt (WURPTS, 1997). Durch die Verflüssigung werden Dichteströmungen erzeugt. Das Material wird in die Randbereiche eines Hafenbeckens bzw. in tiefer liegende Sohlenbereiche verlagert und in den Tidestrom zurücktransportiert.

3. Untersuchungsgebiete

Die beiden Zufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven haben bei annähernd gleicher Ausrichtung zum Fahrwasser der Weser einen Abstand von rd. 1 km (Abb. 4). Sie unterliegen somit etwa den gleichen hydrodynamischen Randbedingungen. Die Weser ist in diesem Abschnitt auf $-13,90$ m SKN ausgebaut (Abb. 5). Die Solltiefen in den Vorhäfen betragen $-10,80$ m SKN an der Nord- und $-6,80$ m SKN an der Kaiserschleuse. Sie liegen damit um rd. $3,10$ m bzw. $7,10$ m höher als die Wesersohle. Bemerkenswert sind neben den insgesamt größeren Abmessungen die rd. doppelt so große Einfahrtsbreite zur Nordschleuse mit $B = 120$ m am westlichen Molenkopf.

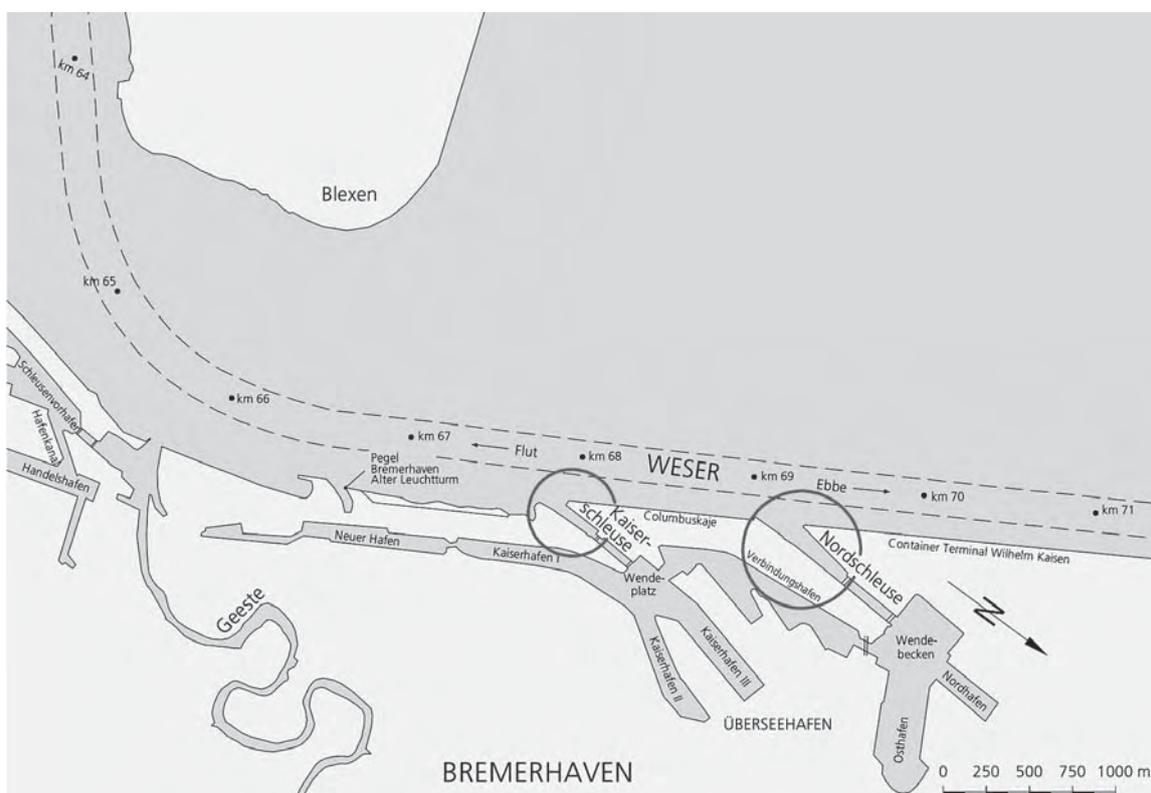


Abb. 4: Hafenanlagen von Bremerhaven

Bis zur Emdener Hafeneinfahrt ist die Ems auf $-8,50$ m SKN und oberhalb davon auf $-5,10$ m SKN ausgebaut (Abb. 6). Die Solltiefe im Vorhafen der Seeschleuse ist mit $-9,60$ m SKN um $1,10$ m tiefer als die Emssohle. Im Außenhafen beträgt die Ausbautiefe $-8,50$ m SKN und vor der Nesserlander Schleuse $-4,10$ m SKN.

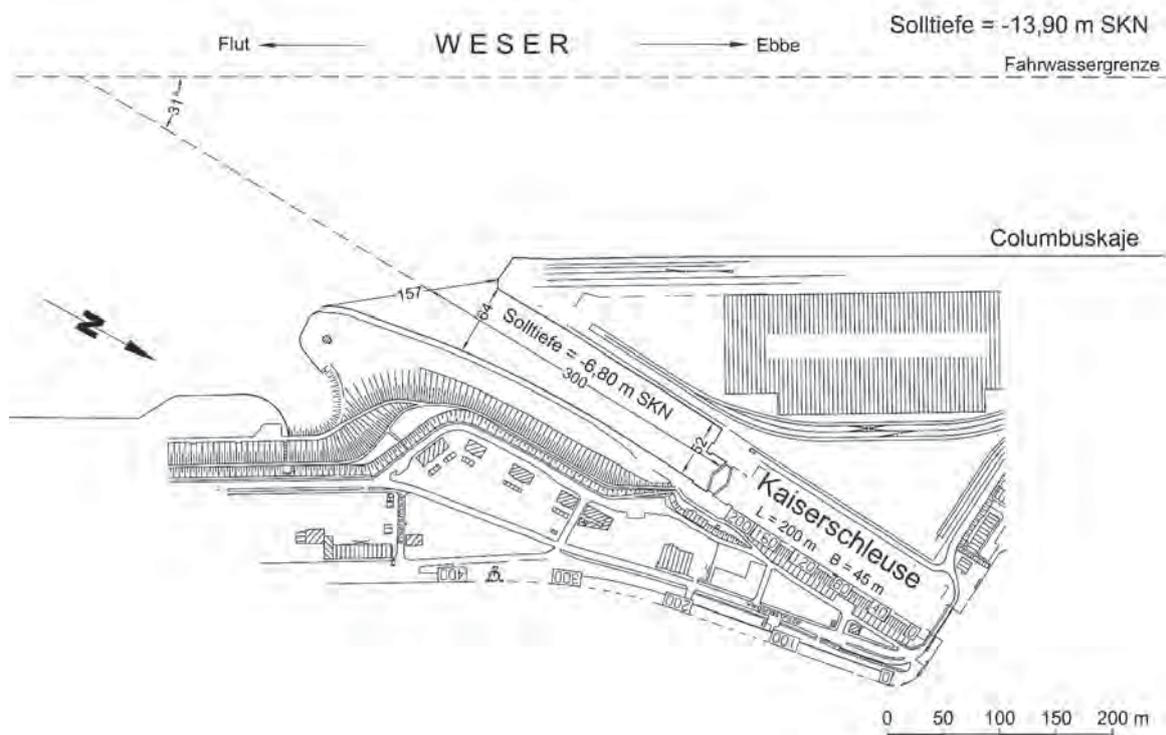
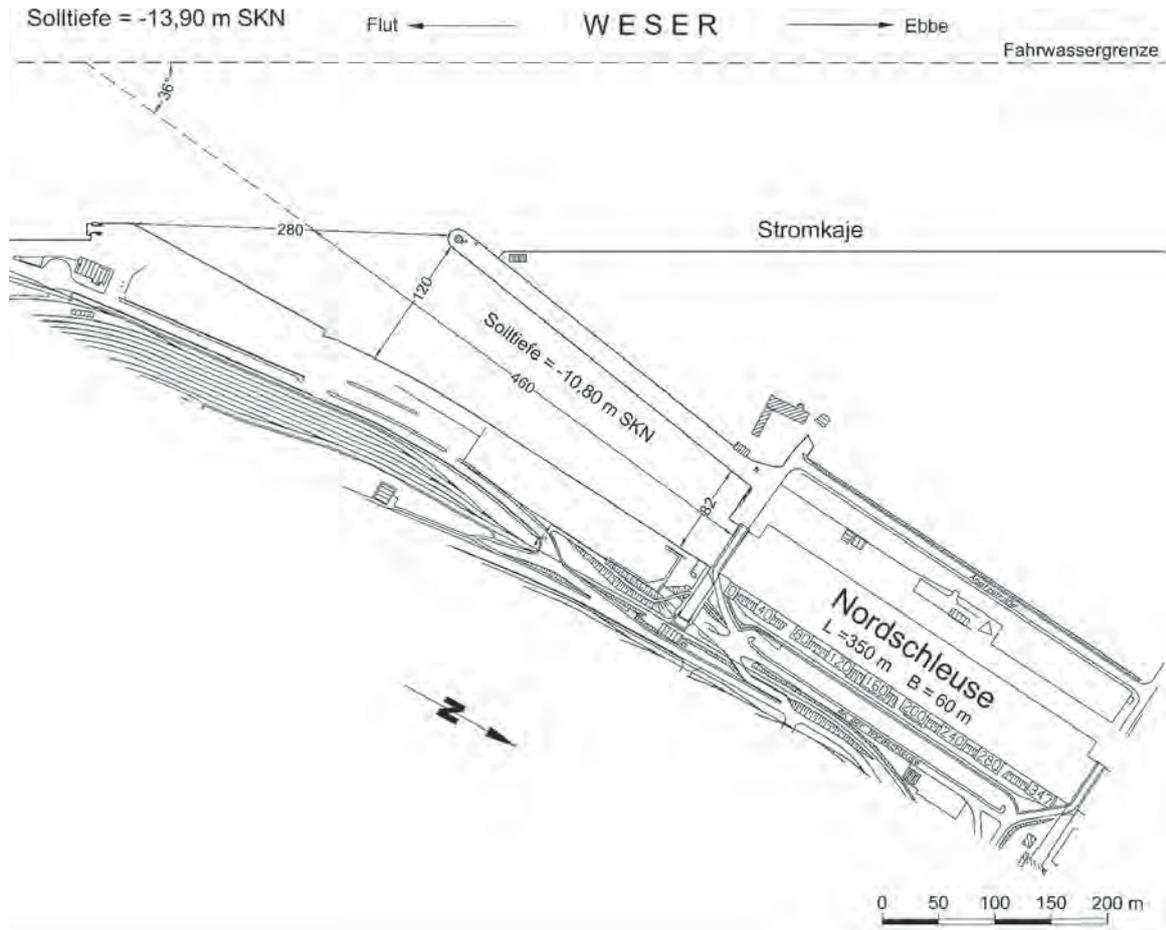


Abb. 5: Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven

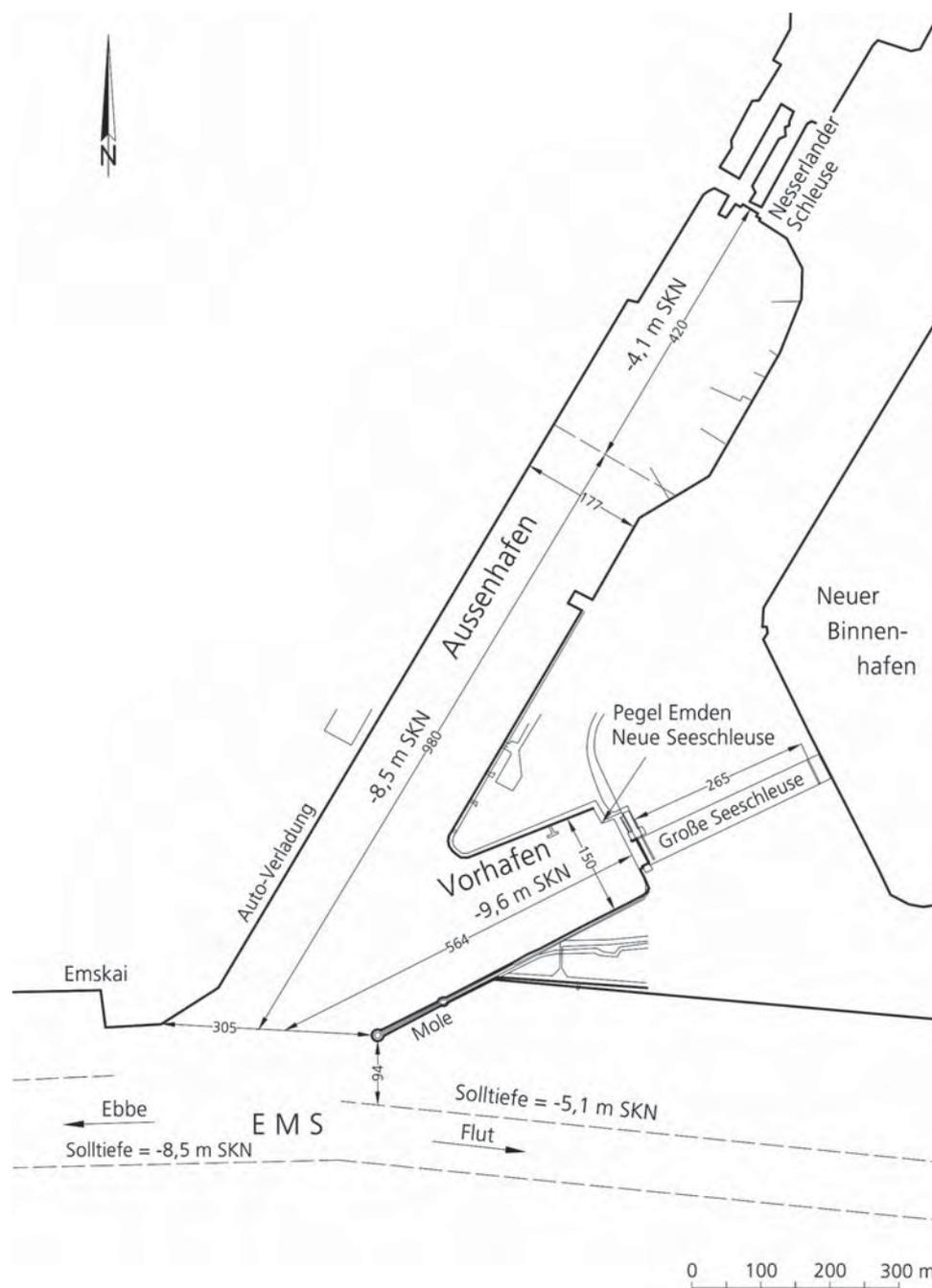


Abb. 6: Lageplan des Emders Vor- und Außenhafens

4. Tide- und Oberwasserbedingungen

Die Gezeiten an der deutschen Nordseeküste sind ständigen periodischen und aperiodischen Schwankungen unterworfen. Für vergleichende Betrachtungen sind deshalb langjährige Mittelwerte hilfreich (NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE, 2001).

Für den zehnjährigen Zeitraum 1990/99 werden für den bei Weser-km 66,7 gelegenen Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm (Abb. 4) folgende Tidekennwerte angegeben:

Tidekennwerte Bremerhaven Alter Leuchtturm:

Mittleres Tidehochwasser	MThw _{1990/99} = 676 cm NN -4,98 m
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw _{1990/99} = 304 cm NN -4,98 m
Mittleres Tidehalbwasser	MT ^{1/2} w _{1990/99} = 490 cm NN -4,98 m
Mittlerer Tidehub	MThb _{1990/99} = 372 cm

Das mittlere Springtideniedrigwasser (MSpTnw) bzw. Seekartennull (SKN) ist in Bremerhaven auf -2,12 m NN festgelegt. Bezogen auf den Pegel liegt dieser Wert mit SKN = 286 cm NN -4,98 m 18 cm unter dem MTnw_{1990/99}. Der Oberwasserabfluss der Weser am Pegel Intschede (Abb. 1) beträgt im langjährigen Mittel MQO_{1941/99} = 326 m³/s.

An dem bei Ems-km 40,5 gelegenen Pegel Emden Neue Seeschleuse (Abb. 6) gelten folgende Werte:

Tidekennwerte Emden Neue Seeschleuse:

Mittleres Tidehochwasser	MThw _{1990/99} = 645 cm NN -5,00 m
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw _{1990/99} = 324 cm NN -5,00 m
Mittleres Tidehalbwasser	MT ^{1/2} w _{1990/99} ≈ 485 cm NN -5,00 m
Mittlerer Tidehub	MThb _{1990/99} = 321 cm

Das in der Ems bei Emden auf -2,00 m NN festgelegte Seekartennull liegt 26 cm unter dem MTnw_{1990/99}. Am Pegel Versen (Abb. 1) beträgt der mittlere Oberwasserabfluss der Ems MQO_{1941/99} = 80,2 m³/s.

Die umfangreichen Daten aus den in situ Messungen wurden im IWA rechnergestützt analysiert und dem Kooperationspartner zur Verfügung gestellt. In dieser Arbeit werden lediglich einige Ergebnisse dokumentiert und die wesentlichen Erkenntnisse erläutert.

5. Vorhäfen in Bremerhaven

5.1 Bremerhaven Nordschleuse

5.1.1 Strömungsverhältnisse

Die im Folgenden zu erläuternden Strömungen wurden mit einer ADCP-Sonde (**A**coustic **D**oppler **C**urrent **P**rofiler) gemessen. Das Messprinzip wird, wie folgt, kurz erläutert:

Von der Sonde werden akustische Schallimpulse mit einer hohen Frequenz (600 kHz) gesendet. Der Impuls wird von Partikeln im Wasser reflektiert. Die Bewegungen der Wasserteilchen verursachen Frequenzänderungen der Schallwelle (Dopplereffekt). Bewegt sich das Teilchen auf die Schallquelle zu, wird vom Gerät eine erhöhte Frequenz empfangen. Umgekehrt ist es, wenn sich das Teilchen von der Sonde entfernt.

Der Dopplereffekt wird bei ADCP Sonden genutzt, indem Schallimpulse mit einer festen Ausgangsfrequenz gesendet und empfangen werden. Gleichzeitig kommt es zu Reflexionen mit den im Wasser befindlichen, bewegten Partikeln. Diese Dopplerverschiebung F_d ist proportional zur Geschwindigkeit v der Wasserteilchen. Dabei erfährt der Schallimpuls zweimal die Dopplerverschiebung. Einmal auf dem Weg zum Partikel und einmal vom Partikel zurück zur Schallquelle (Abb. 7).

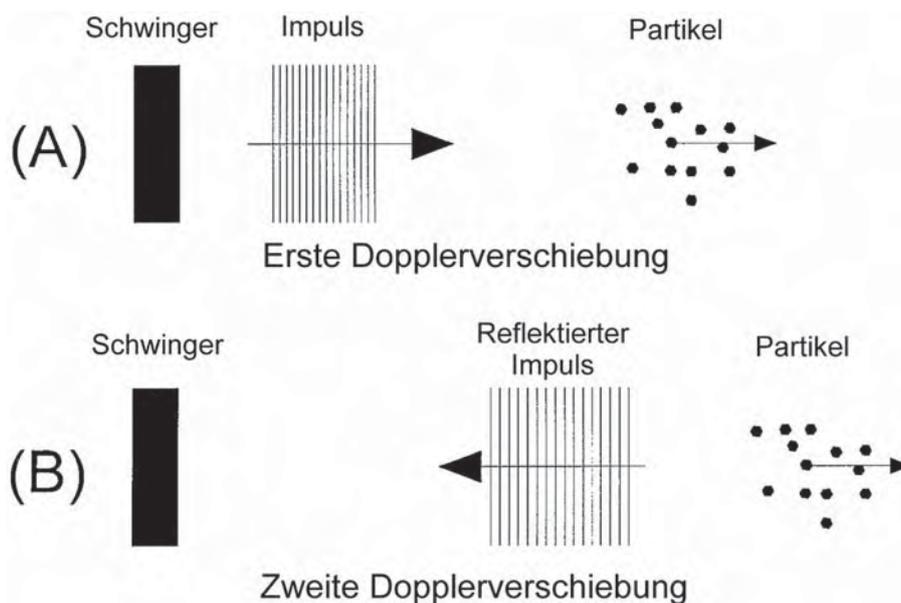


Abb. 7: Erste und zweite Dopplerverschiebung des Schallimpulses (GORDON, 1996)

Aus der Frequenzänderung kann die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Gleichung für die Dopplerverschiebung lautet

$$F_d = F_s (v/c)$$

mit F_d = Doppler Verschiebungsfrequenz
 F_s = Ausgangsfrequenz des ADCP
 v = Strömungsgeschwindigkeit der Teilchen
 c = Geschwindigkeit des Schallimpulses

Um die Strömungen eindeutig nach Richtung und Geschwindigkeit definieren zu können, sind vier Impulsgeber (Schwinger) erforderlich. Mittels eingebautem Kompass wird die Lage der Strömungsvektoren bestimmt. Mit ADCP ist es möglich, die Strömungen im Querprofil simultan über die Wassertiefe zu ermitteln. Die Tiefenmessung erfolgt in Segmenten gleicher Schichtdicke (z.B. ein Meter).

In der oberen und unteren Wasserschicht sind bis zu etwa einem Meter wegen fehlender Dopplereffekte (no backscattering) keine Signale zu empfangen. Bei einer Eintauchtiefe der Sonde von 0,35 m wurde dem obersten Messbereich von 1,35 m bis 2,35 m die mittlere Wassertiefe von 1,85 m zugeordnet. Ausgehend von der oberen Tiefenzelle sind die Strömungen mit einer im IWA entwickelten Software in Meterabständen analysiert worden. In den folgenden Abbildungen werden die ADCP-Geschwindigkeitsvektoren zur besseren Übersicht in 2-m-Abständen dargestellt.

– Flutströmungen

In Abb. 8 und 9 sind die Strömungsvorgänge bei etwa mittleren Oberwasserbedingungen ($Q_0 = 232 \text{ m}^3/\text{s}$) ab der Ebbestromkenterung aufgetragen. Der zugehörige Springtidenhub betrug am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm 417 cm. Grundsätzlich ist anzumerken, dass bei den Untersuchungen auf den Schiffsverkehr Rücksicht zu nehmen war. Aus diesem Grund konnte das Vergleichsprofil in der Weser nicht regelmäßig aufgenommen werden.

Zur Kenterphase der Ebbeströmungen (K_e) in der Weser überwiegen im Vorhafen die Dichteströmungen (Abb. 8, Messung 1). Das Wasser strömt in den oberen Zellen (1,85 m und 3,85 m) mit abnehmender Intensität in den und in den unteren Wasserschichten (ab 7,85 m) mit zunehmender Stärke aus dem Vorhafen. Die absoluten Geschwindigkeiten betragen an der Oberfläche bis zu rd. 50 cm/s und im Sohlenbereich bis $v_{\max} > 50$ cm/s. In den mittleren Schichten (5,85 m) sind dagegen kaum Wasserbewegungen zu erkennen. Der niedrige Tidewasserstand und die aktuelle Sohllage im Vorhafen erklären die fehlenden Strömungsvektoren in den tiefen Zellen 11,85 m und 13,85 m. Mit Abb. 8 wird auch dokumentiert, wie sich die Strömungsumkehr in der Weser aufgrund der Dichteunterschiede von der Sohle aus zur Wasseroberfläche durchsetzt. Erst in der zweiten Stunde nach T_{nw} lösen sich die ebbestromorientierten Dichteströmungen im Vorhafen auf (Abb. 8, Messung 2).

Die Verstärkung der Sohlenströmung in der Weser durch das während der Flutstromphase von außen eindringende Salzwasser wirkt sich auf die Strömungsvorgänge im Vorhafen aus. Mit zunehmender Wassertiefe und höherer Strömungsenergie im Strom wird der Strömungseffekt bei voll ausgeprägtem Flutstrom mit den linksdrehenden Walzen im Einfahrtsbereich intensiviert (Abb. 8, Messung 3). Gleichzeitig beginnen sich im tieferen Wasser auch die flutstromorientierten Dichteströmungen auszubilden. In den unteren Tiefenzellen ist erkennbar, wie das Wasser von den Flutstromwalzen in der Einfahrt aus in den östlichen Vorhafen fließt. Am Ende des steilen Tidestiegs hat sich der Flutstrom voll ausgeprägt.

Die ab Tidehalbwasser ($T^{1/2w}$) im Vorhafen vorhandenen hydrodynamischen Gegebenheiten sind für die davon abhängigen morphologischen Vorgänge von entscheidender Bedeutung (Abb. 9). In den oberen Wasserschichten strömen die Wassermassen bei überwiegendem Dichteeffekt aus dem Vorhafen zurück in die Weser (Messung 4). Ab 5,85 m überlagern sich Strom- und Dichteeffekt mit nach unten zunehmender Stärke. Von den Flutstromwalzen aus strömt das Wasser sohlennah mit relativ hohen Geschwindigkeiten in den Vorhafen. Beachtenswert sind die sehr starken Strömungsvektoren über der Hafensohle von bis zu $v > 75$ cm/s. Das führt zu hohen Schwebstofffrachten der überwiegend aus Schlämmkorn mit biologischen Anteilen bestehenden Feststoffteilchen, die sich durch sehr geringe Sinkgeschwindigkeiten auszeichnen. Folglich muss damit ein entsprechend hoher Sedimenteintrag in den Vorhafen verbunden sein.

Mit sich abschwächender Strömungsenergie in der Weser werden weniger starke Walzenströmungen bei weiterhin deutlich ausgeprägten Dichteströmungen angefacht (Abb. 9, Messung 5). In der späten Flutstromphase bis nach Eintritt des Tidehochwassers dominieren im Vorhafen die Dichteströmungen. Mit steigendem Wasserstand kommt es dabei zur Beruhigung in den mittleren Wasserschichten. Bemerkenswert sind die bis zum Eintritt des T_{hw} anhaltenden, relativ starken Einströmungen im sohlennahen östlichen Bereich (Abb. 9, Messung 6). An der Oberfläche wirken sich die aus dem Vorhafen gerichteten Strömungen bis zum rechten Fahrwasserrand aus (Abb. 9, 1,85 m).

– Ebbeströmungen

Die in Abb. 10 und 11 aufgetragenen Strömungen wurden bei einem Nipptidefall von 285 cm aufgenommen. Für die Strömungsverhältnisse im Vorhafen ist es von Bedeutung, dass ähnliche Oberwasserverhältnisse ($Q_0 = 228$ m³/s) wie bei den vorstehend erläuterten Flutstrombildern vorlagen.

Mit Abb. 10 werden die hydrodynamischen Vorgänge während der Kenterphase bei Flut dokumentiert. Es ist deutlich auszumachen, wie sich die Ebbeströmungen von den oberen zu den unteren Wasserschichten durchsetzen. Erst mit stärker abfließenden Ebbwassermengen in der Weser lösen sich die flutstromorientierten Dichteströmungen im Schleusenvorhafen

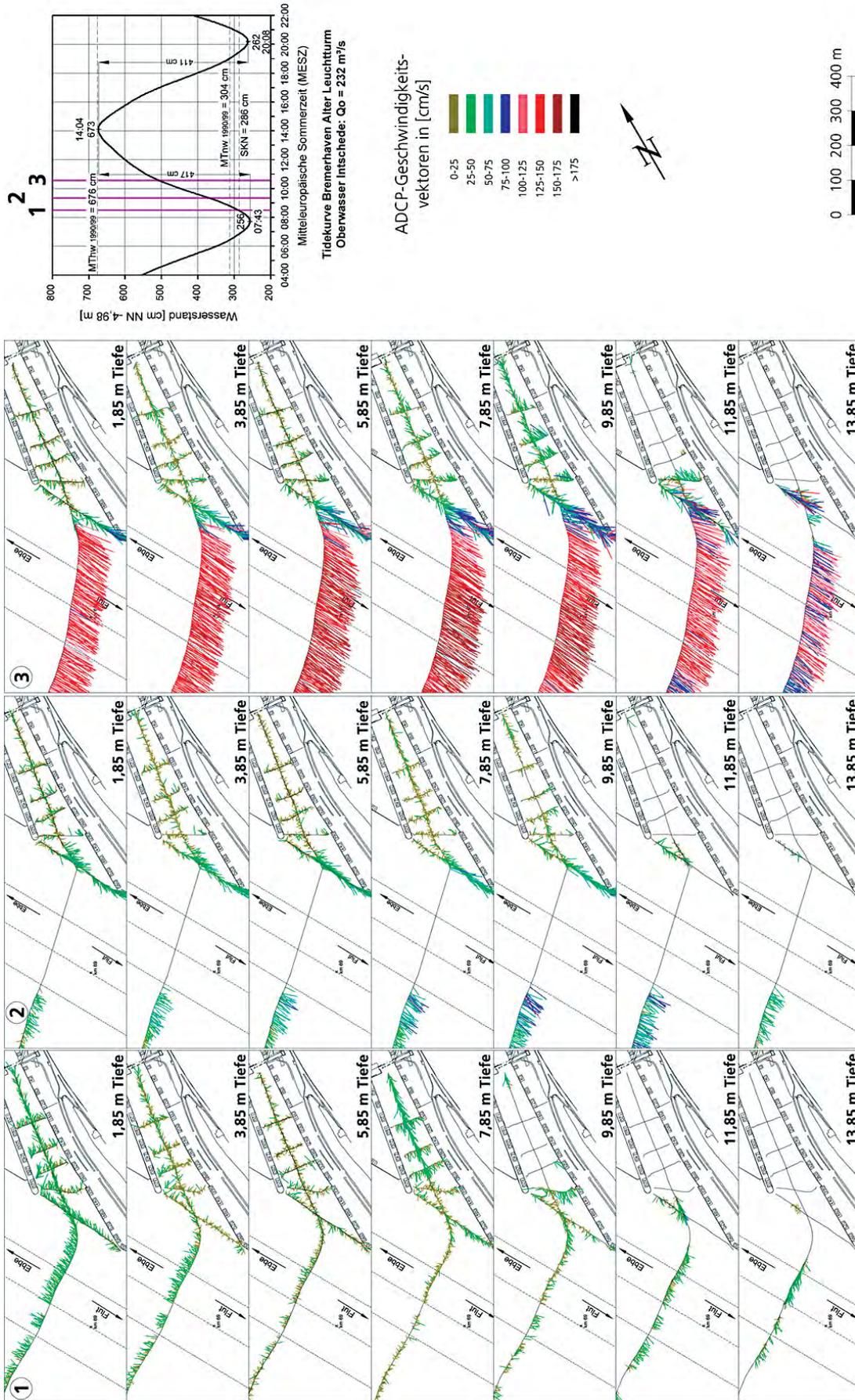


Abb. 8: Flutstrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 22.5.2001

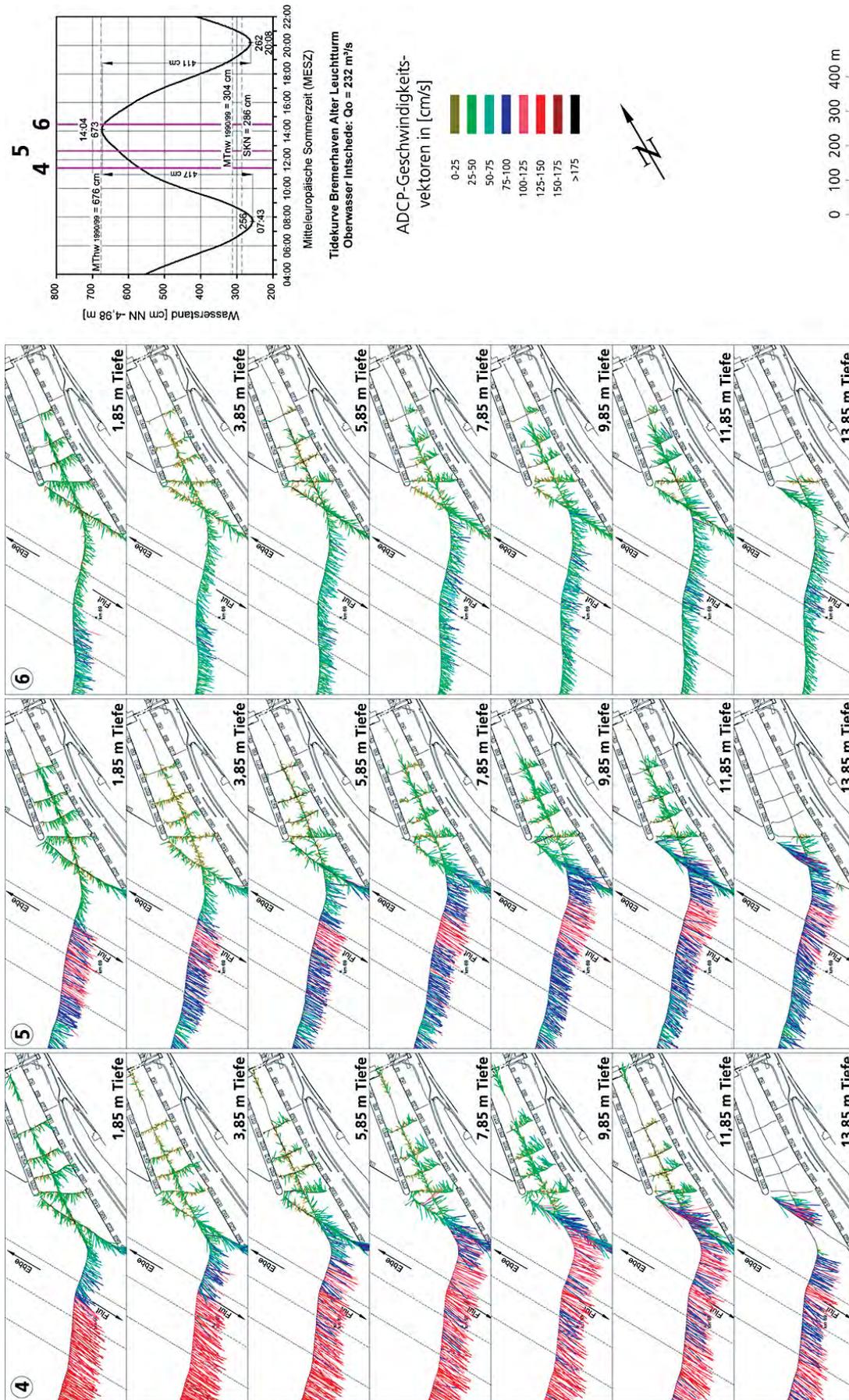


Abb. 9: Flutstrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 22.5.2001

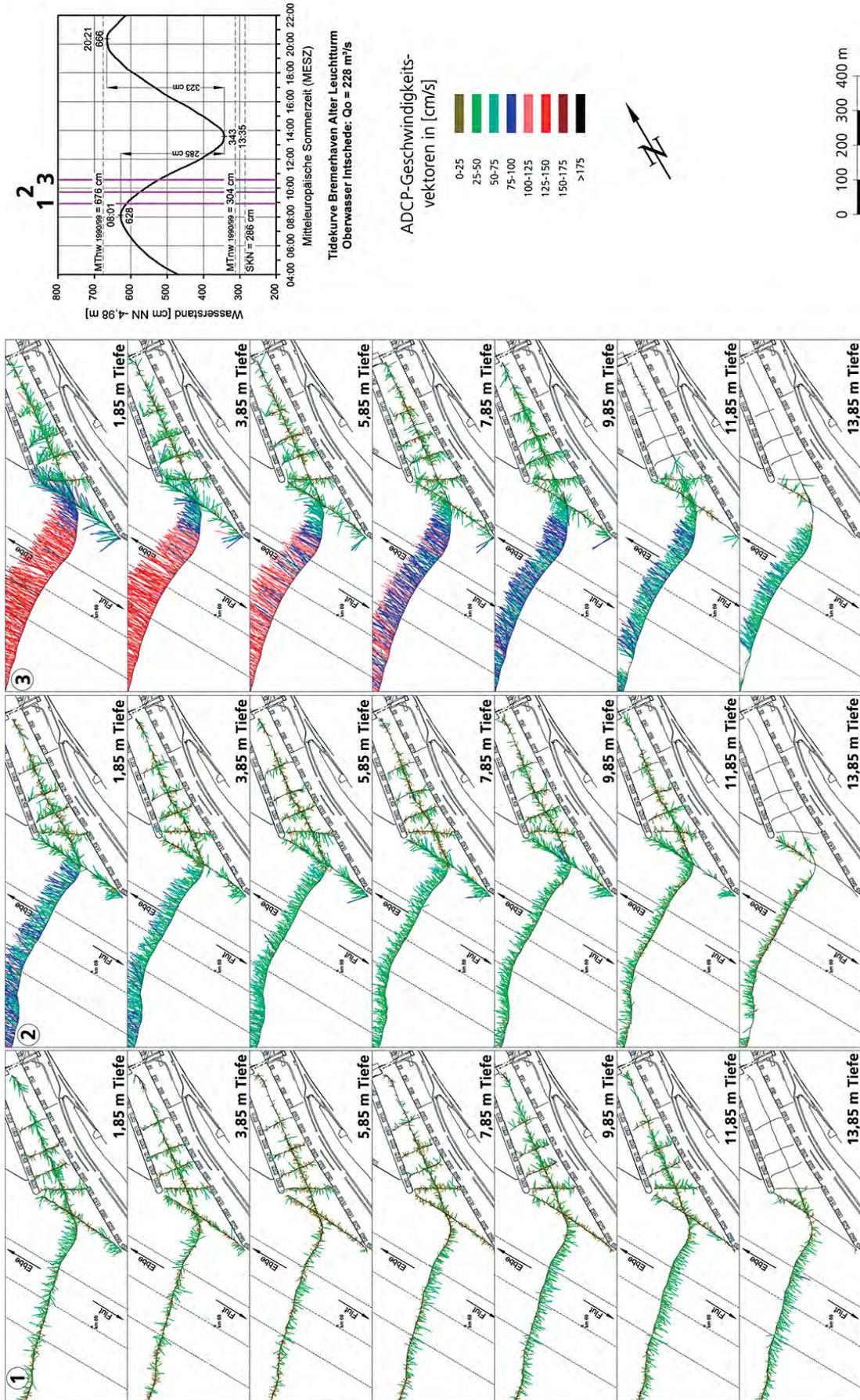


Abb. 10: Ebbestrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 16.5.2001

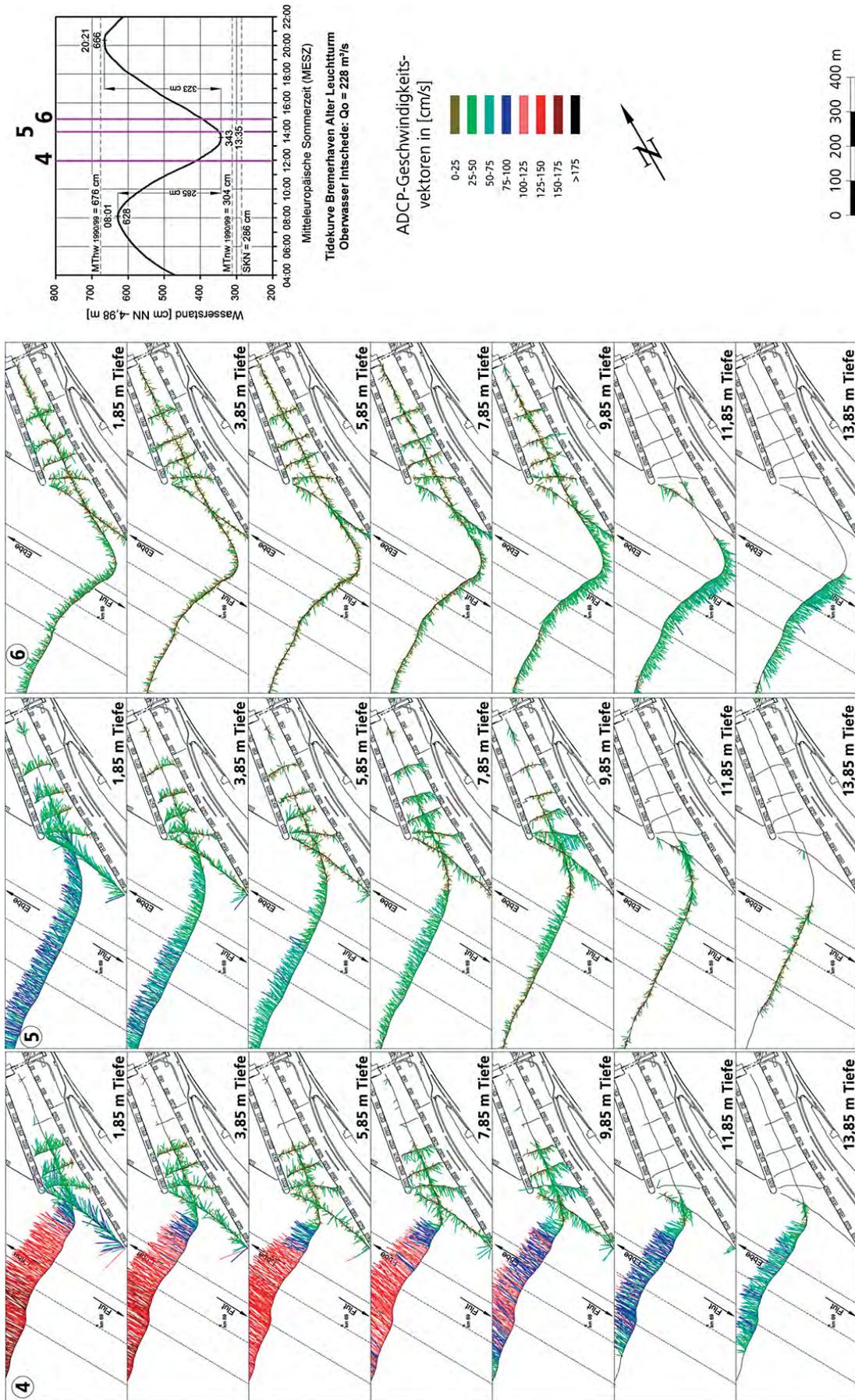


Abb.11: Ebbestrommessungen vor der Nordschleuse in Bremerhaven am 16.5.2001

auf (Abb. 10, Messung 2). Insgesamt gesehen sind dort in der zweiten Stunde nach Thw nur geringe und ungleichmäßig ausgerichtete Strömungen vorhanden.

Bei vollem Ebbestrom prägen sich im Vorhafen die zugehörigen Walzen- und Dichteströmungen aus (Abb. 10, Messung 3). Die bei Ebbe rechtsdrehenden Strömungswalzen werden im Gegensatz zur Flut vornehmlich in den oberen Wasserschichten angefacht. Das ist deshalb so, weil während der Ebbestromphase die Oberwassermenge dichtebedingt in den höheren Wasserschichten abgeführt wird. Die Verstärkung der Oberflächenströmungen führt dort zu dem höheren Energieeintrag über die Walzenströmungen in den Vorhafen. Die Walzenintensität nimmt mit der Wassertiefe ab. Im sohlennahen Bereich überwiegt die nach außen gerichtete Strömung (Abb. 10, 9,85 m).

Etwa ab $T^{1/2w}$ dominieren mit fortschreitender Ebbestromdauer die Dichteströmungen (Abb. 10 und 11, Messung 3 bis 5). Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der zweiten Flutstromphase mit umgekehrten Strömungsrichtungen. Im oberen und unteren Bereich finden vornehmlich die Ein- und Ausströmungen der Wassermassen statt. In den oberen Tiefenzellen strömt das Wasser mehr in den westlichen und in Sohlennähe aus dem östlichen Vorhafen. Innerhalb der Dichtestromwalze, in der mittleren Wasserschicht, stellt sich eine mehr wasserberuhigte Zone ein.

Mit fortschreitender Ebbedauer verstärken sich die Dichteströmungen. Bei abnehmender Wassertiefe verringert sich der im Vorhafen zur Verfügung stehende Querschnitt. Die Ein- und Ausströmungen konzentrieren sich mehr auf die oberen und unteren Wasserschichten.

Im weiteren Tideverlauf stabilisieren sich die Dichteströmungen und erreichen noch nach dem Eintritt des Tideniedrigwassers absolute Geschwindigkeiten von $v > 50$ cm/s (Abb. 11, Messung 5). Dabei wirkt sich die sohlennahe Ausströmung bis in die Weser aus.

Bemerkenswert ist die lang andauernde Ebbestromkenterphase in der Weser. Sie beginnt rd. 0,5 Std. nach Tnw in den tieferen Wasserschichten, weil sich dort das spezifisch schwerere Wasser aus der Nordsee zuerst durchsetzt (Abb. 11, Messung 5). An der Oberfläche fließt das Wasser noch mit Geschwindigkeiten bis zu rd. $v_e \approx 100$ cm/s stromab. Dort findet die Strömungsumkehr erst etwa eine Stunde später statt, wenn die stromauf gerichteten Flutstromgeschwindigkeiten im tiefen Wasser bereits bis $v_f \approx 100$ cm/s betragen (Abb. 11, Messung 6). In dieser Tidephase findet die Strömungsumkehr im Vorhafen der Nordschleuse statt (vgl. auch Abb. 8). In der dritten Stunde nach Tnw bilden sich wieder die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen aus.

5.1.2 Salzgehalte

Der Einfluss des Oberwassers der Weser ist auf die Tidewasserstände und den Tidehub in Bremerhaven von untergeordneter Bedeutung. Die Salzgehalte sind dagegen starken oberwasserabhängigen Schwankungen unterworfen. Das geht aus der Analyse von Dauermessungen des Wasser- und Schifffahrtsamts (WSA) Bremerhaven hervor (Abb. 12).

Für mittlere Abflussverhältnisse liegt Bremerhaven im mesohalinen Brackwasserbereich des Weserästuars. Die tideabhängigen periodischen Schwankungen des Salzgehaltes betragen dann $\Delta S = S_{Kf} - S_{Ke} > 10$ ‰. Die Häfen bei Bremerhaven liegen im zentralen Bereich der Brackwasserzone der Weser (Abb. 13).

Die bei den in situ Messungen angetroffenen Abflussbedingungen zwischen $Q_0 \approx 150$ bis 500 m³/s beeinflussen zwar den mittleren Salzgehalt, jedoch nicht so sehr die Schwankungen im Tiderhythmus und die damit verbundenen Dichteströmungen. Innerhalb der Durchmischungszone von salzigem Wasser aus der Nordsee und Süßwasser aus dem Bin-

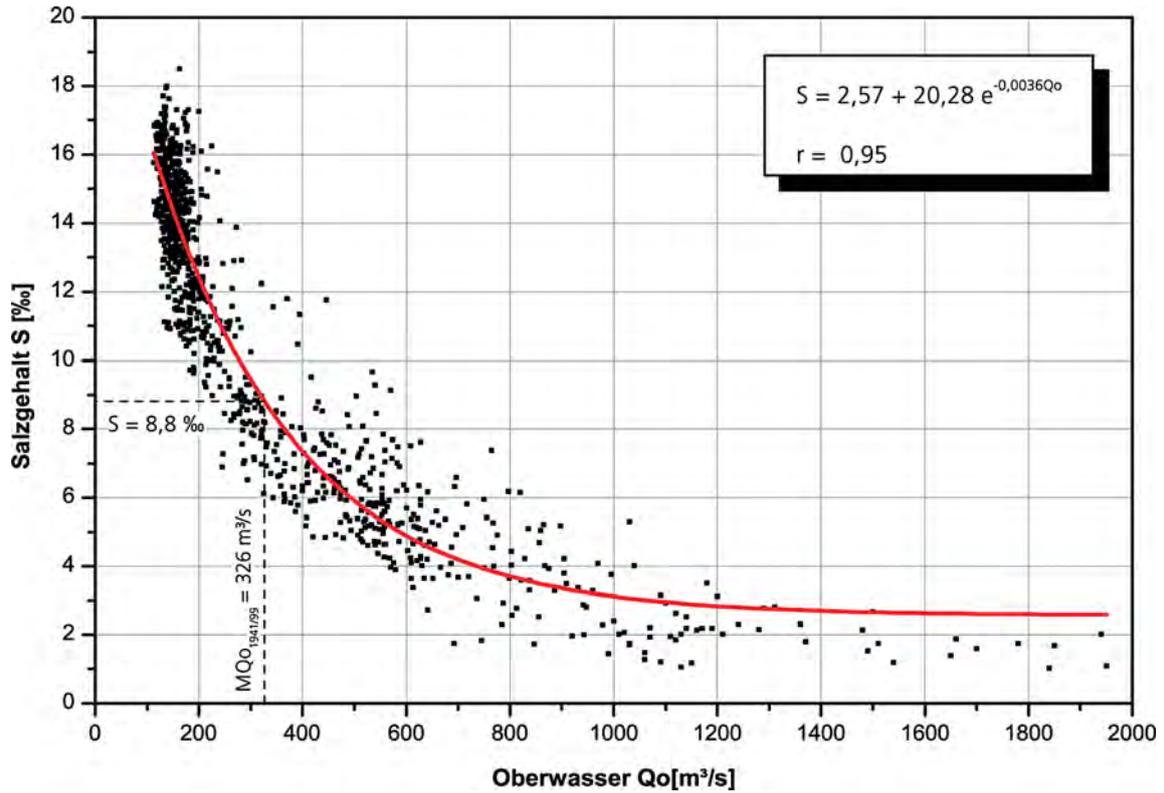


Abb. 12: Mittlere Salzgehalte in der Weser bei Bremerhaven und Oberwasser am Pegel Intschede nach Messungen des WSA Bremerhaven, Juni 1998 bis Dezember 2000

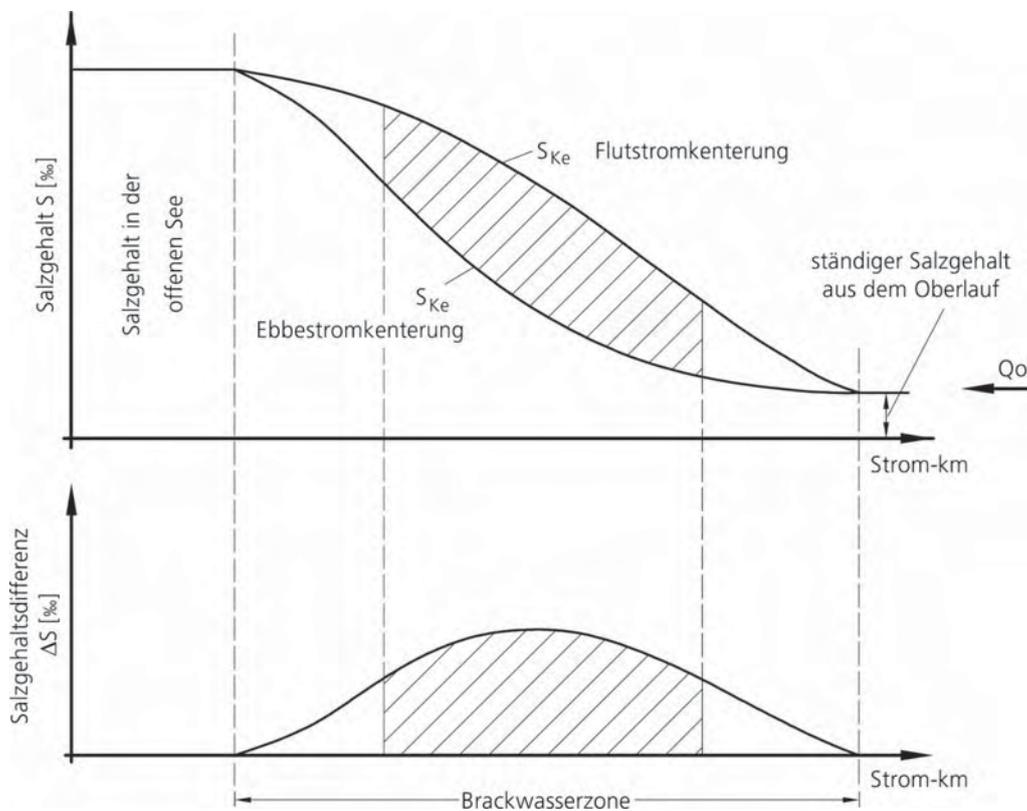


Abb. 13: Periodische Schwankungen des Salzgehaltes im Brackwassergebiet (schematisch)

nenland bildet sich eine so genannte „Trübungszone“ aus, die durch besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen ausgezeichnet ist.

Bei mittlerem Oberwasser liegt das Trübungsmaximum etwa zwischen Nordenham und Bremerhaven (Abb. 1). Die Konzentrationsanreicherung kann, wie folgt, begründet werden. Im Mündungsgebiet überwiegt der stromauf gerichtete und oberhalb der Brackwasserzone der stromab gerichtete Sedimenttransport. Innerhalb der Durchmischungszone von Salz- und Süßwasser gibt es einen „Gleichgewichtspunkt“. In diesem Bereich kommt es zu besonders hohen Schwebstoffanreicherungen und Sedimentationen durch die Vermischung der von oben eingetragenen limnischen (Süßwasser) mit den marinen (Salzwasser) Schwebstoffpartikeln. Die Brackwassererscheinungen bewirken eine Aufwärtsverschiebung des Gleichgewichtspunktes für die Sohlströmungen und eine Abwärtsverschiebung für die Strömungen an der Oberfläche. Natürliche Vorgänge wie Sturmfluten, Spring- und Nipptiden, Temperaturschwankungen oder das Oberwasser verändern die Lage der Trübungszone. Bei niedrigem Oberwasser liegt das Zentrum oberhalb von Nordenham und bei hohen Abflüssen wird es in das Tidegebiet unterhalb von Bremerhaven verlagert (GRABEMANN, 1992).

Die Salzgehalte wurden mit einer mobilen Multifunktionssonde der Firma Meerestechnik-Elektronik (ME-Sonde) über die Leitfähigkeit des Wassers ermittelt.

– Salzgehalte bei Flutstrom

Die im Tiderhythmus veränderlichen horizontalen und vertikalen Gradienten des Salzgehaltes im Bereich der Nordschleuse sind ursächlich für die unterschiedliche Stärke und Ausrichtung der Dichteströmungen. Dazu werden im Folgenden die an verschiedenen Positionen vom Fahrwasser der Weser bis zum Außenhaupt der Nordschleuse durchgeführten Salzgehaltmessungen (Abb. 14) für unterschiedliche Oberwasserhältnisse beispielhaft erläutert.

Bei einem Tidehub von 430 cm und $Q_0 = 212 \text{ m}^3/\text{s}$ herrschten am 23.5.2001 ähnliche Randbedingungen wie während der Strömungsmessungen vom Vortag. Zum Vergleich sind die ebenfalls bei Springtide ($T_{hb} = 440 \text{ cm}$) und einem Oberwasser von $571 \text{ m}^3/\text{s}$ im März 2002 gemessenen Salzgehalte in Abb. 14 mitaufgetragen.

Es ist grundsätzlich so, dass die Konzentrationen im Vorhafen zu denen im Strom phasenverschoben sind. Mit ausklingender Ebbeströmung zum Zeitpunkt des T_{nw} ist im Weserwasser weniger Salz anzutreffen als vor der Schleuse. Bei Tidehochwasser ist es umgekehrt. Die relativ hohen Salzgehalte in der unteren Wasserschicht im Vorhafen der Nordschleuse bei den niedrigen Tidewasserständen sind besonders auffällig (Messung 1 in Abb. 14). Mit den ebborientierten Dichteströmungen wird das vorher eingetragene salzhaltigere Wasser zeitverzögert in den unteren Wasserschichten aus dem Vorhafen heraustransportiert.

In der zweiten Stunde nach T_{nw} kehrt sich das Dichtegefälle um. Das ist die Tidephase, in der im Vorhafen nur geringe Wasserbewegungen zu beobachten sind.

Etwa bei $T^{1/2w}$, wenn sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen ausbilden, herrscht ein starkes, horizontales Salzgehaltsgefälle von Position 6 (Weser) zur Position 1 (Binnenhaupt), so wie es in Abb. 14 (Messung 2) dokumentiert wird. Besonders kennzeichnend ist in diesem Zusammenhang das Vertikalprofil der Position 5 in der Hafeneinfahrt (blaue Linien in Abb. 14) mit den deutlich auszumachenden Unterschieden des Salzgehaltes in den oberen und unteren Wasserschichten. Das erklärt die sich nach Tidehalbwasser ausbildenden und stabilisierenden Dichteströmungen. Mit fortschreitender Flutstromphase erhöht sich der Salzgehalt bis zum Eintritt des T_{hw} kontinuierlich. Das horizontale und vertikale Gefälle bleibt dabei erhalten.

Wie nach dem T_{nw} gleichen sich die Salzgehalte zwischen Schleuse und Weser zum Eintritt des Tidehochwassers an (Abb. 14, Messung 3).

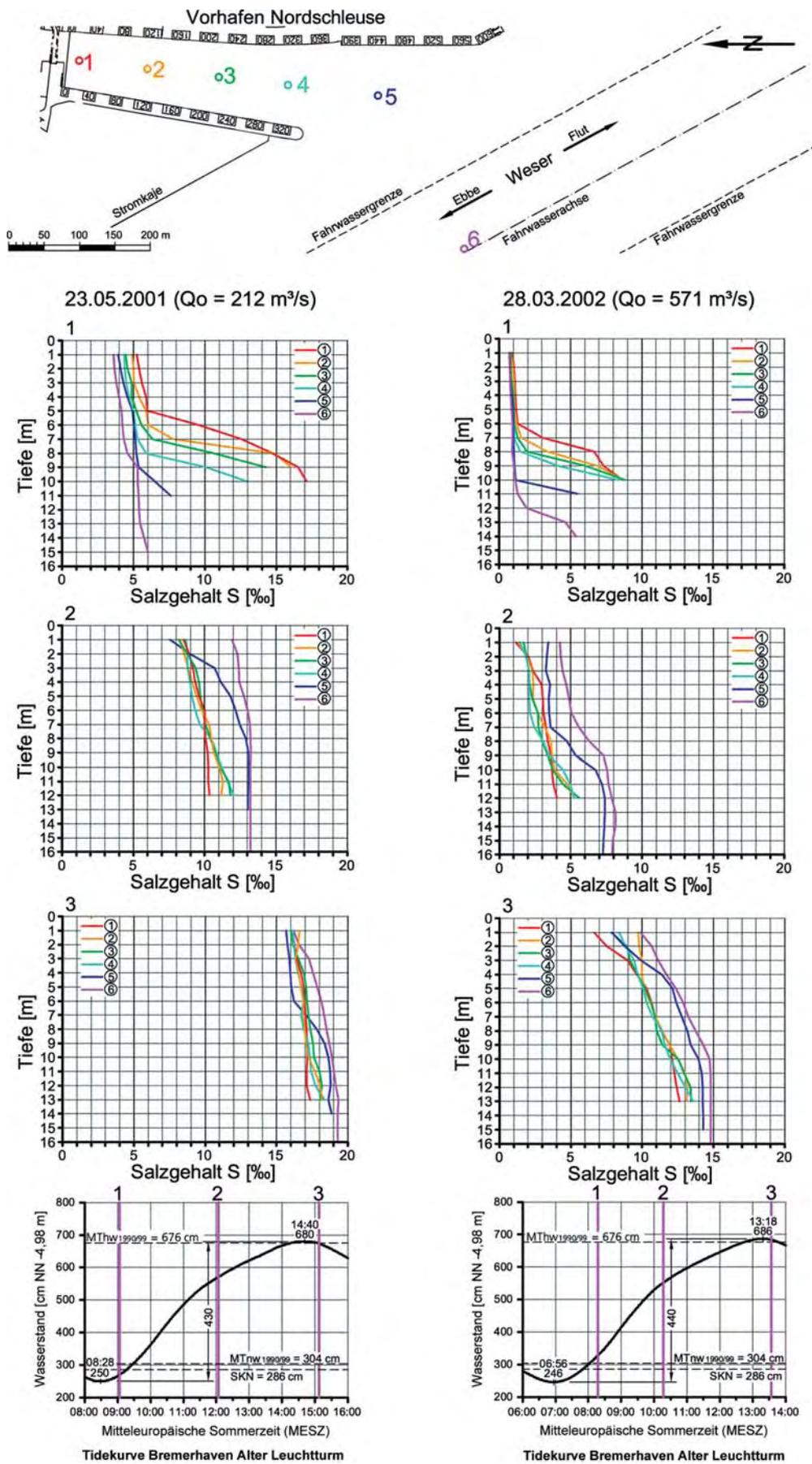


Abb. 14: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

Mit den vorstehend beschriebenen Messergebnissen wurde dargelegt, wie die veränderlichen Salzgehalte in der Tideweser zu den flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen der Nordschleuse führen. Die gleichen Randbedingungen gelten für sehr unterschiedliche Oberwasserverhältnisse. Das zeigt die Gegenüberstellung in Abb. 14 für etwa gleiche Tidebedingungen und Binnenabflüssen von $Q_0 = 212 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $571 \text{ m}^3/\text{s}$. Die absolut geringeren Salzgehalte in der Weser im März 2002 sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Wesentlich für die Erzeugung der Dichteströmungen sind die Salzgehaltsdifferenzen zwischen dem Tidestrom und dem angrenzenden Vorhafen (Abb. 14, Messung 2).

– Salzgehalte bei Ebbestrom

Am 17. Mai 2001 betrug der Nipptidefall 286 cm und das Oberwasser $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei der Nipptide vom 5. April 2002 ($T_{hb} = 339 \text{ cm}$) war der Abfluss am Pegel Intschede $Q_0 = 400 \text{ m}^3/\text{s}$.

In der letzte Flutstromphase bis etwa eine Stunde nach T_{hw} sind die in Abb. 15 eingezeichneten Salzgehaltsverteilungen (Messung 1) mit den bei Springtide gemessenen Verhältnissen (Abb. 14, Messung 3) vergleichbar.

Nach der Flutstromkenterung verringern sich die Salzgehalte im Tidestrom und Vorhafen bei Umkehrung des horizontalen Gefälles. Mit sich voll ausprägendem Ebbestrom wird zunehmend spezifisch leichteres Oberwasser in den höheren Wasserschichten stromab transportiert, was dort zu der verstärkten Abnahme der Salzkonzentration führt (Abb. 15, Messung 2). Ab etwa Tidehalbwasser werden im Vorhafen die ebbestromorientierten Strömungseffekte angeregt. Die oben über die Walzenströmungen in den Vorhafen eindringenden Ebbwassermengen werden am Binnenhaupt der Schleuse gekehrt und verursachen das sohlennahe Ausströmen des spezifisch schwereren Wassers.

Zum Eintritt des T_{nw} ist das Wasser im Vorhafen noch salzhaltiger als im Strom (Messung 3 in Abb. 15). Die zu dieser Tidezeit noch vorhandenen Gradienten erklären die bis zur Ebbestromkenterung in der Weser anhaltenden Dichteströmungen im Vorhafen. Genau umgekehrt sind die Bedingungen zum Zeitpunkt des Tidehochwassers mit den höheren Salzgehalten im Strom.

Der in Abb. 15 dargestellte Vergleich für unterschiedliche Tide- und Oberwasserbedingungen zeigt auch für die Ebbphase das gleiche Verhaltensmuster der horizontalen und vertikalen Salzgehaltsverteilungen. Neben der typischen Schichtung während der Ebbestromphase (Messung 2) sind die Salzkonzentrationen auch bei dem stärkeren Oberwasser in der Weser bei Tidehochwasser höher und bei Tideniedrigwasser geringer als im Vorhafen der Nordschleuse.

5.1.3 Schwebstoffe

Die tideabhängigen Schwebstoffkonzentrationen wurden mit einer mobilen Sonde über die Lichtdurchlässigkeit ermittelt.

Die Messung der Lichtschwächung (Attenuation) mit der ME-Sonde ist eine indirekte Methode zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes im Wasser. Mit Sensoren, die aus einer Lichtquelle und einem Empfänger bestehen, wird die Lichtschwächung gemessen, die der Lichtstrahl entlang der Messstrecke erfährt. Die Lichtschwächung wird durch Absorption und Streuung verursacht. Die Absorption findet an gelösten oder farbigen Stoffen statt. Bei der Streuung an Partikeln verändert der Lichtstrahl seine Intensität und ursprüngliche Richtung. Für jede Suspension existiert eine Streufunktion, die nicht nur von der Konzentration,

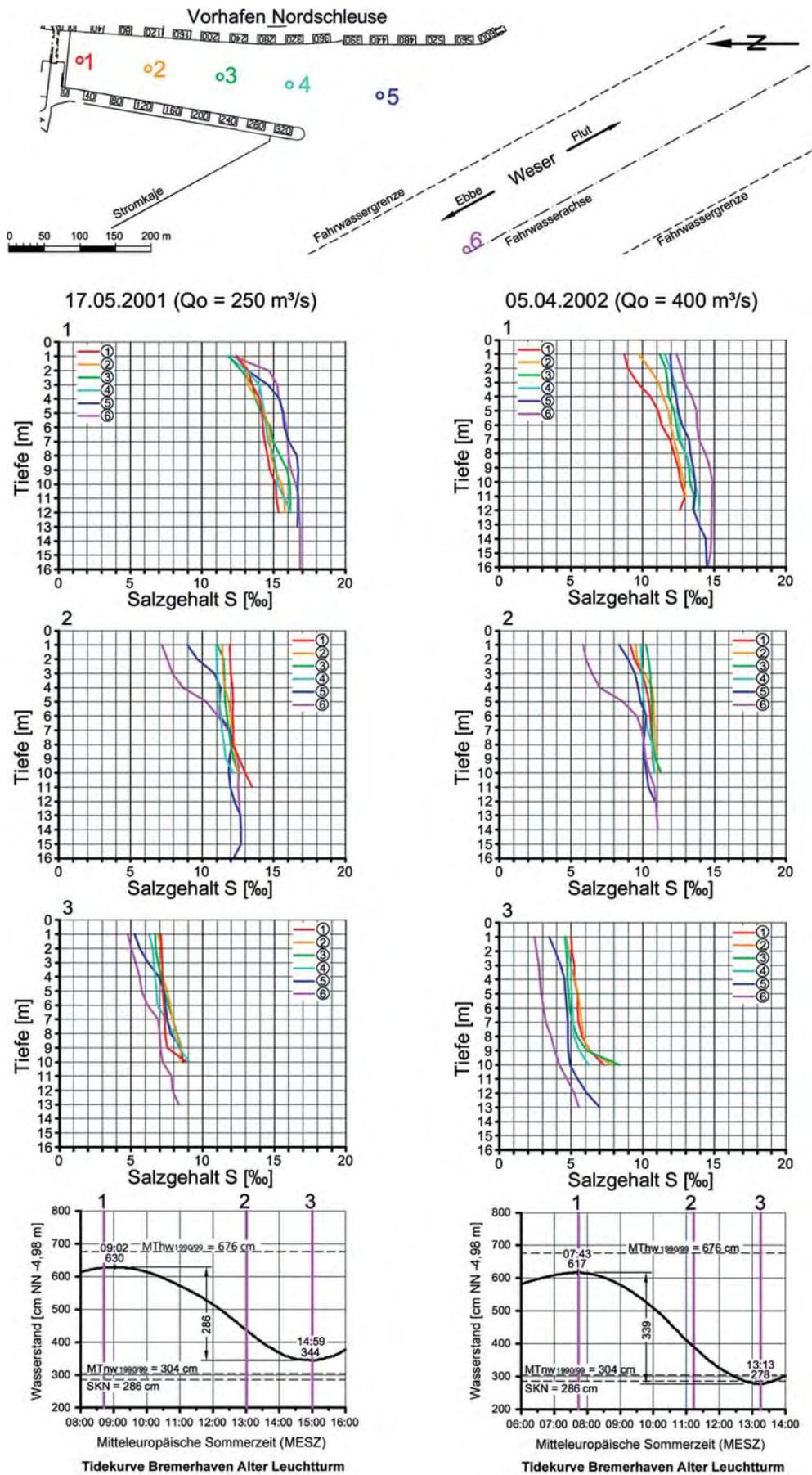


Abb. 15: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

sondern auch von der Partikelgröße und -form abhängt. Eine Proportionalität ist nur bei konstanter Partikelzusammensetzung gewährleistet. Veränderliche Fraktionierungen können daher zu beträchtlichen Schwankungen der Ergebnisse führen.

Die Attenuation folgt dem Gesetz von LAMBERT-BEER:

$$A = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-x \cdot c}$$

mit

x = Weglänge des Lichtes

I = Lichtintensität nach Weglänge x

I_0 = Anfangsintensität des Lichtes

c = Attenuationskoeffizient

Der dimensionslose Quotient $\frac{I}{I_0}$ gibt die Transmissionsrate des Lichtes an und wird vom Sensor direkt in % gemessen. Der Attenuationskoeffizient c ergibt sich zu:

$$c = \frac{-1}{x \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)} \left[\frac{1}{\text{m}} \right] \text{ mit } x = 20 \text{ mm}$$

Der Zusammenhang zwischen gemessener Attenuation und Schwebstoffgehalt muss also durch die vergleichende Entnahme und Auswertung von Wasserproben hergestellt werden.

– Schwebstoffe bei Flutstrom

Die zeitliche Verteilung der Schwebstoffe an den Messstellen 1 bis 6 im Verlauf des Springtidestiegs am 23.5.2001 ist in Abb. 16 wiedergegeben.

Die bis zwei Stunden nach T_{nw} gemessenen Schwebstoffgehalte zeichnen sich durch ihre relativ geringen Konzentrationen aus (Messung 1 und 2, Abb. 16). An allen 6 Positionen gingen die Werte an der Wasseroberfläche auf $C_s \approx 100 \text{ mg/l}$ zurück. In der zweiten Stunde nach T_{nw} erhöht sich durch den einsetzenden Flutstrom der Schwebstoffgehalt im Sohlenbereich an der Vorhafeneinfahrt (Position 5, Messung 2).

Besonders lebhaft werden die morphodynamischen Vorgänge ab Tidehalbwasser (Messung 3). Durch den Strömungs- und Dichteeffekt werden die Schwebstoffkonzentrationen besonders in den unteren Wasserschichten deutlich erhöht. Dem Neueintrag aus der Weser überlagert sich dabei das durch die Walzen- und Dichteströmungen resuspendierte Material. Die Streuungen der Messergebnisse sind auf die turbulenten Strömungen und Austauschvorgänge zurückzuführen. Durch die sich mit fortschreitender Flutstromdauer verstärkenden Sohlenströmungen in den Vorhafen wird die Schwebstofffracht beträchtlich erhöht. Zur Tidehochwasserphase wurden an der Oberfläche Werte von $C_s \approx 600 \text{ mg/l}$ und in den tieferen Wasserschichten von $C_s > 2000 \text{ mg/l}$ ermittelt (Messung 5 und 6). Die in dieser Tidephase dominierenden Dichteströmungen erklären das Ergebnis.

Die bis in die höheren Wasserschichten anzutreffenden hohen Feststoffkonzentrationen im inneren Vorhafen (Position 1 bis 3) sind mit den geringen Wasserbewegungen im Innern der Dichtestromwalze zu begründen. Die biologischen Vorgänge an den aus limnischen und marinen Sedimenten mit hohen organischen Anteilen zusammengesetzten Schwebstoffen erhöhen die Schwebefähigkeit der Partikel. Von den feinen mineralischen Feststoffkörpern

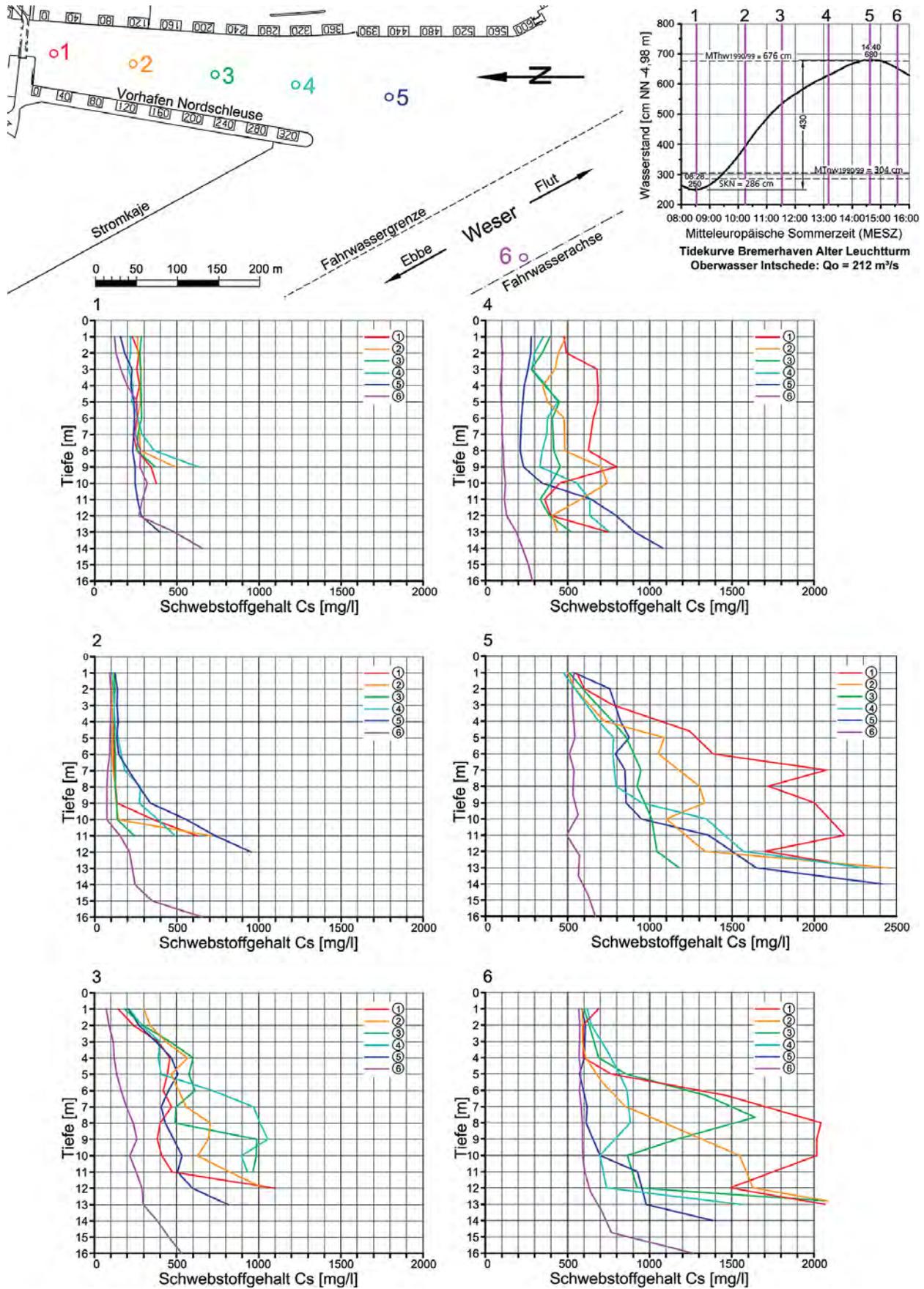


Abb. 16: Schwebstoffgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven, Flutmessung am 23.5.2001

werden leichte organische Substanzen in großen Flocken aufgenommen, was die Sinkgeschwindigkeit wesentlich verringert (GREISER et al., 1992). Dadurch wird die Sedimentation verlangsamt bzw. verhindert. Aussagen über das Sinkverhalten sind deshalb nur mit vereinfachten Annahmen möglich.

Die in den Vorhäfen eingetragenen Feststoffe sind eine Vorstufe von Fluid Mud. Der lang andauernde Sedimentationsprozess wird vor allem durch die biologischen Komponenten beeinflusst. Durch den Abbau organischer Substanzen mangels Sauerstoffzufuhr finden anaerobe Prozesse statt, die zur Verfestigung der Feststoffpartikel führen.

Die in Abb. 16 aufgetragenen Vertikalprofile mit hohen Schwebstoffkonzentrationen in den unteren Wasserschichten veranschaulichen den überwiegend in den Vorhafen gerichteten Sedimenttransport. Ursächlich ist dafür der sich ab $T^{1/2}w$ überlagernde Strömungs- und Dichteeffekt und die daraus resultierende, mit zunehmender Flutstromdauer stärker ausgeprägte bis nach Thw anhaltende sohlennahe Einströmung.

Somit kommt es während der Flutstromphase zu einer positiven Feststoffbilanz im Vorhafen. Die Transportkapazität während der Ebbestromphase ist zu gering, um die während der Flut in den Vorhafen eingetragenen Feststoffe wieder auszuräumen. Es ist vielmehr so, dass dann durch die entgegengesetzt gerichteten Dichteströmungen Feststoffpartikel mehr limnischen (Süßwasser) Ursprungs oberflächlich in den Vorhafen eingetragen werden. Die Durchmischung mit den marinen (Salzwasser) Sedimenten ist ursächlich für die Entstehung des Phänomens Fluid Mud.

– Schwebstoffe bei Ebbestrom

Bei dem Tidefall von lediglich 286 cm wurden während der gesamten Ebbestromdauer am 17. Mai 2001 nur sehr geringe Schwebstoffkonzentrationen in der Weser und dem Vorhafen zur Nordschleuse gemessen (Abb. 17). Ein Vergleich der ersten Messungen (1 und 2) mit den letzten (5 und 6) zeigt jedoch, dass in der späten Flutstromphase im Vorhafen mehr Schwebstoffe transportiert werden als bei ausklingender Ebbestromphase. Bezeichnend sind die besonders geringen Konzentrationen in der zweiten Stunde nach Thw von $C_s \leq 50$ mg/l (Messung 3).

Die Dichteströmungen sind offenbar nicht dynamisch genug, um den Wasserkörper im Vorhafen wesentlich mit Schwebstoffen anzureichern. Das Vergleichsprofil aus der Weser (Pos. 6) zeigt, dass von dort aus über die Walzen- und Dichteströmungen keine nennenswerten Feststoffmengen oberflächlich in den Vorhafen eingetragen wurden.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Schwebstoffkonzentrationen im Vorhafen der Nordschleuse maßgeblich von der erheblich schwankenden Feststofffracht im Tidestrom abhängen. Zur Springtidezeit erreichen die Konzentrationen in der Weser bedeutend höhere Werte als bei Nipptiden. Für vergleichbare Oberwasserbedingungen im Mai 2001 wurden bei Springtide bis zu $C_s > 500$ mg/l (Abb. 16) und bei Nipptide $C_s \approx 100$ mg/l (Abb. 17) festgestellt. Diese Aussage steht in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen (WOLTERING u. VISSCHER, 1998).

Die Ergebnisse einer Dauermessung an der Containerkaje unterhalb der Nordschleuse sind dazu in Abb. 18 dargestellt. Die in rd. SKN $-1,50$ m Wassertiefe gemessenen Daten zeigen bei niedrigem Oberwasser von $Q_o = 100$ bis 200 m³/s die periodischen Tideabhängigkeiten des Schwebstoffgehaltes in der Weser.

Der vierwöchige Messzeitraum weist während der Ebbestromdauer durchgehend geringere Konzentrationen aus als bei Flutstrom. Die größeren Unterschiede treten bei Springtiden auf. Der Schwankungsbereich lag zwischen $C_{s_{\min}} \approx 50$ mg/l (Ebbestrom, Nipptide) und einzelnen Spitzenwerten bis zu $C_{s_{\max}} \approx 700$ mg/l (Flutstrom, Springtide). Im Mit-

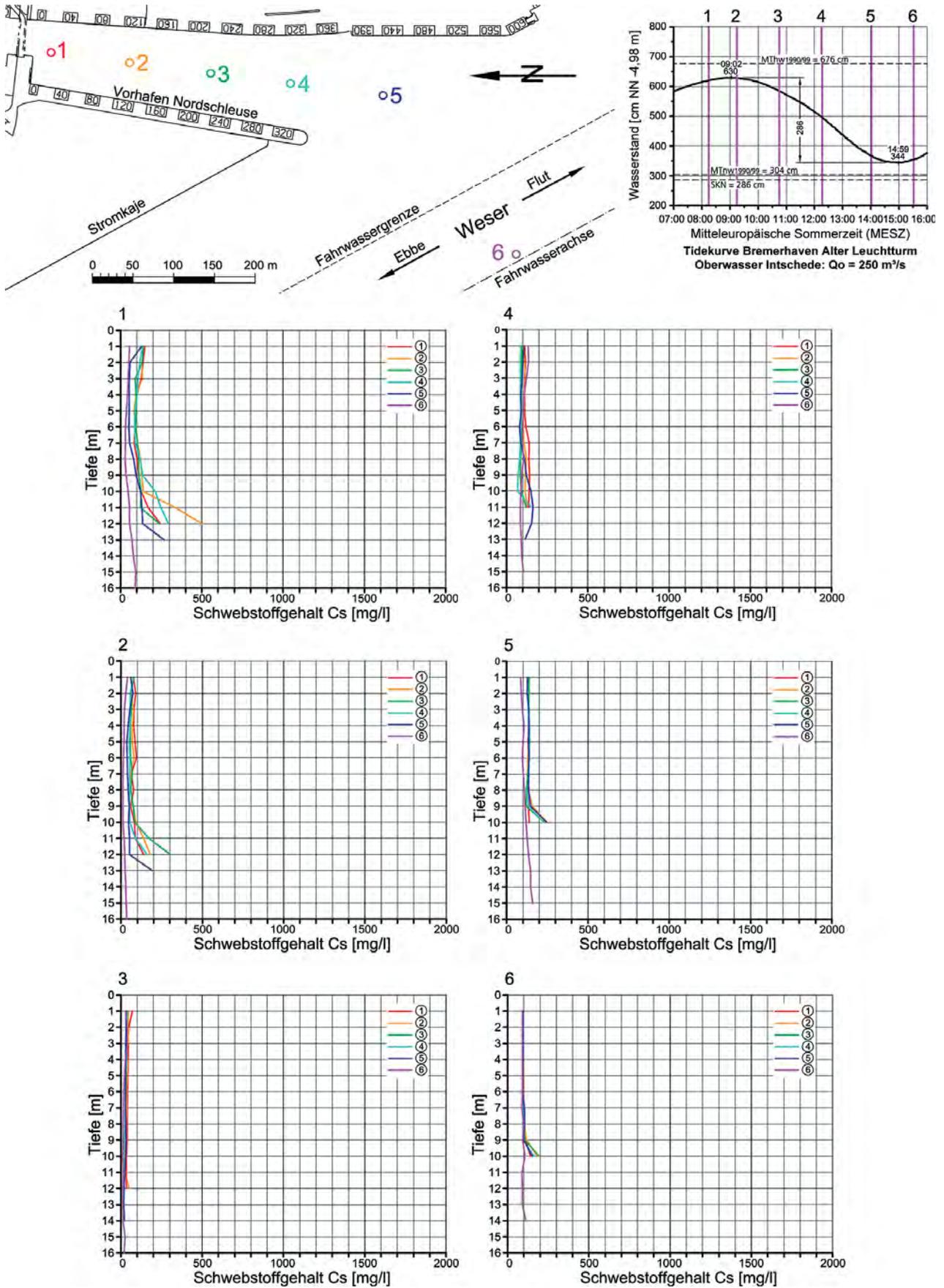


Abb. 17: Schwebstoffgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven Ebbemessung am 17.5.2001

tel der 54 Tiden führte die Weser Suspensionen von 178 mg/l, für die Flutstromdauer waren es durchschnittlich 224 mg/l und während der Ebbestromdauer 138 mg/l.

Die in Abb. 18 dargestellten Ergebnisse werden mit den Schwebstoffmessungen vom 17. Mai 2001 grundsätzlich bestätigt (Abb. 16 und 17).

Für die morphologischen Verhältnisse in den Vorhäfen ist von Bedeutung, dass die in der Flutstromphase (besonders bei Springtiden) eingetriebenen Feststoffe in den hydrodynamisch ruhigeren Ebbestromphasen (vor allem bei Nipptiden) nicht wieder ausgeräumt werden.

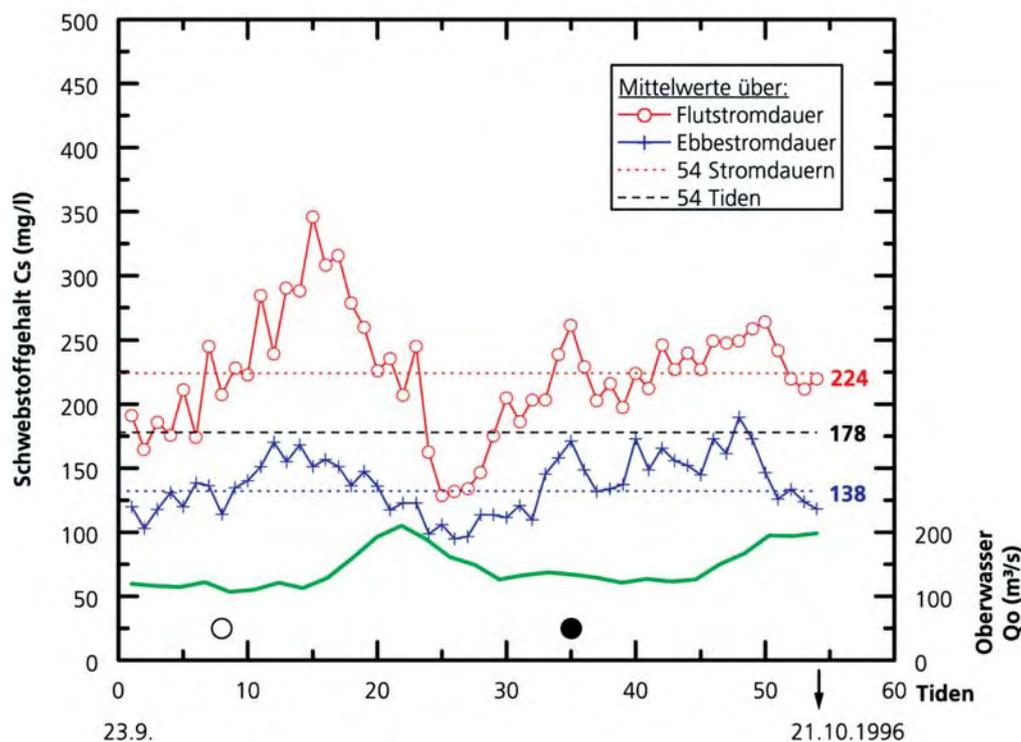


Abb. 18: Mittelwerte der Schwebstoffkonzentration während der Flut- und Ebbestromdauer (WOLTERING u. VISSCHER, 1998)

5.2 Bremerhaven Kaiserschleuse

5.2.1 Strömungsverhältnisse

– Flutströmungen

Die Flutstromverhältnisse im Bereich der Kaiserschleuse haben in abgeschwächter Form ein ähnliches Verhaltensmuster wie an der unterhalb gelegenen Nordschleuse.

Am 17.10.2001 betrug der Springtidehub 424 cm bei einem Oberwasser von $Q_o = 189 \text{ m}^3/\text{s}$. Die ausklingende Ebbestrom- und erste Flutphase sind mit den Messung 1 bis 3 in Abb. 19 nachzuvollziehen. Deutlich zu erkennen sind die für die Brackwasserzone typischen, unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilungen. Bis zur Ebbestromkenterung werden die Oberflächenströmungen durch das abzuführende Oberwasser verstärkt und danach die Sohlströmungen durch das von außen eindringende Salzwasser. Deshalb setzt sich die Flutstromkenterung bekanntlich von unten nach oben durch. Bei etwa gleichen hydrologi-

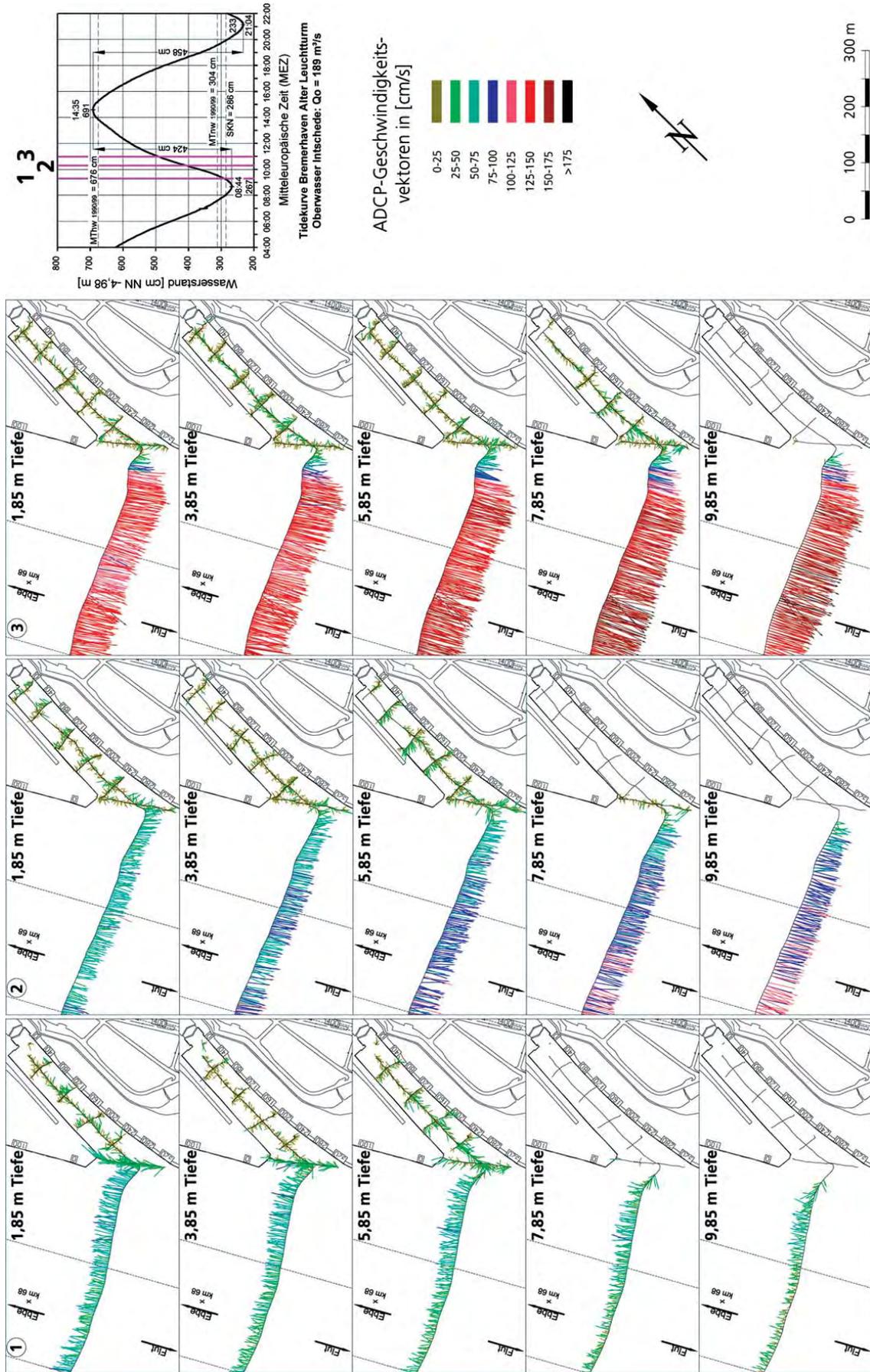


Abb. 19: Flutstrommessungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 17.10.2001

schen Randbedingungen sind die ebbeorientierten Dichteströmungen bei Tideniedrigwasser im Vorhafen der Kaiserschleuse deutlich schwächer ausgeprägt als vor der Nordschleuse. Die absoluten Geschwindigkeiten liegen unter 50 cm/s. Das ist auf die insgesamt geringeren Vorhafenabmessungen und Ausbautiefen zurückzuführen.

Übereinstimmend mit den Beobachtungen an der Nordschleuse kehren sich Strom- und Dichteeffekt im Vorhafen der Kaiserschleuse etwa bei $T^{1/2w}$ um und stabilisieren sich in der zweiten Hälfte der Flutstromphase (Abb. 20). Die Überlagerung der Strömungseffekte ist ebenfalls mehr in den unteren Tiefenzellen zu beobachten. Trotz der insgesamt weniger intensiven Dichteströmungen sind die Auswirkungen in den oberflächennahen Zellen bei Eintritt des Thw bis vor der Hafeneinfahrt zu beobachten.

– Ebbeströmungen

Mit den Messungen am 25. Oktober 2001 wurde bei Kenterung der Flutströmungen etwa 1 Std. nach Thw begonnen. Der Tidedefall betrug 306 cm bei einem Oberwasser von $Q_0 = 191 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 21). Im Vorhafen der Kaiserschleuse waren bei einsetzendem Ebbestrom keine nennenswerten Strömungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen. Auch mit fortschreitender Ebbedauer sind die Tideströmungen in der Weser vor der Kaiserschleuse geringer als vor der Nordschleuse. Das liegt an dem zum Ufer versetzten Ostmolenkopf und dem breiteren Fließquerschnitt der Weser oberhalb davon (vgl. Abb. 4 und 5). Die Querschnittseinengung durch die Columbuskaje und die weiter zum Fahrwasser ausgebaute Ostmole der Nordschleuse sorgen dort für die stärkere Strömungsenergie in der Ebbestromphase vor allem in den höheren Wasserschichten.

Bemerkenswert ist es, wie sich auch im Vorhafen der Kaiserschleuse etwa bei $T^{1/2w}$ die ebbeorientierten Strömungs- und Dichteeffekte einstellen (Abb. 21, Messung 3). An der Oberfläche wird das spezifisch leichtere Wasser über die Walzenströmungen in den Vorhafen eingetragen. Durch den damit angeregten Dichteeffekt wird das in den tieferen Schichten noch vorhandene spezifisch schwerere Wasser aus dem Vorhafen in die Weser transportiert.

In der anschließenden Ebbestromphase stabilisieren sich die Dichteströmungen bis zum Eintritt des Tnw (Abb. 22). Sie sind übrigens wie im Vorhafen der Nordschleuse zum Ende der Ebbestromphase mehr auf die oberen und unteren Wasserschichten konzentriert. Bei Tideniedrigwasser sind die Einströmungen in der oberen Tiefenzelle (1,85 m) und die Ausströmungen in der unteren (5,85 m) auszumachen. Zum Zentrum der Dichtestromwalze, in den dazwischen liegenden Wasserschichten, sind nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten erkennbar.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Strömungs- und Dichteeffekte in den Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse in sich vergleichbar sind. Aufgrund der kleineren Abmessungen und Ausbautiefe sind sie im Bereich der Kaiserschleuse insgesamt schwächer ausgeprägt.

Für beide Vorhäfen gilt, dass sich die tideabhängigen Walzen- und Dichteströmungen etwa ab Tidehalbwasser einstellen und bis zu den jeweiligen Strömungskenterungen Bestand haben.

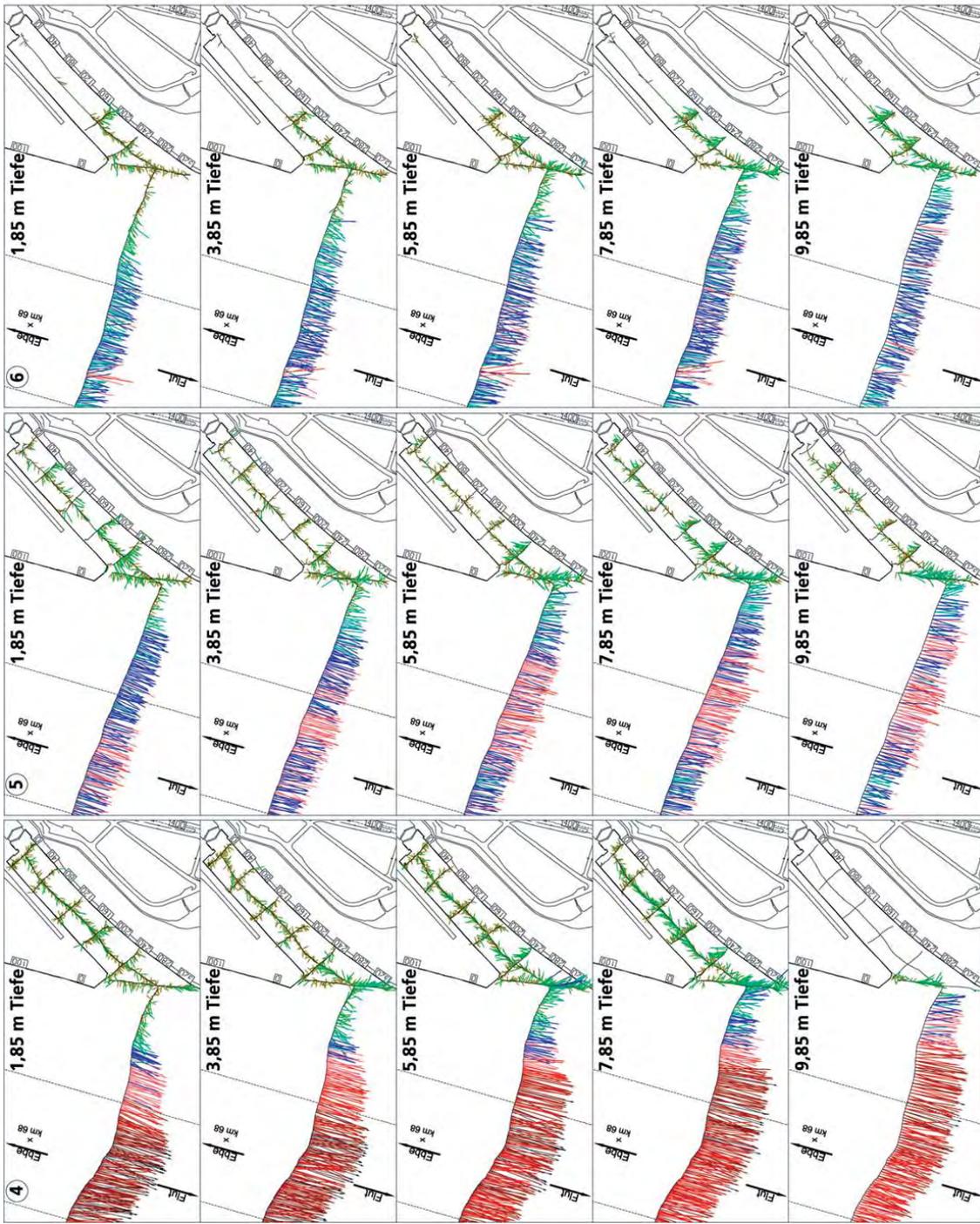
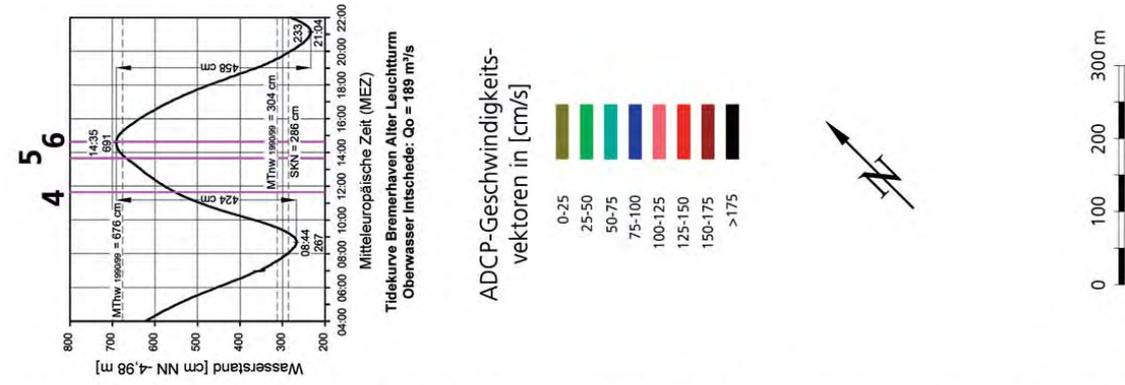


Abb. 20: Flutstrommessungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 17.10.2001

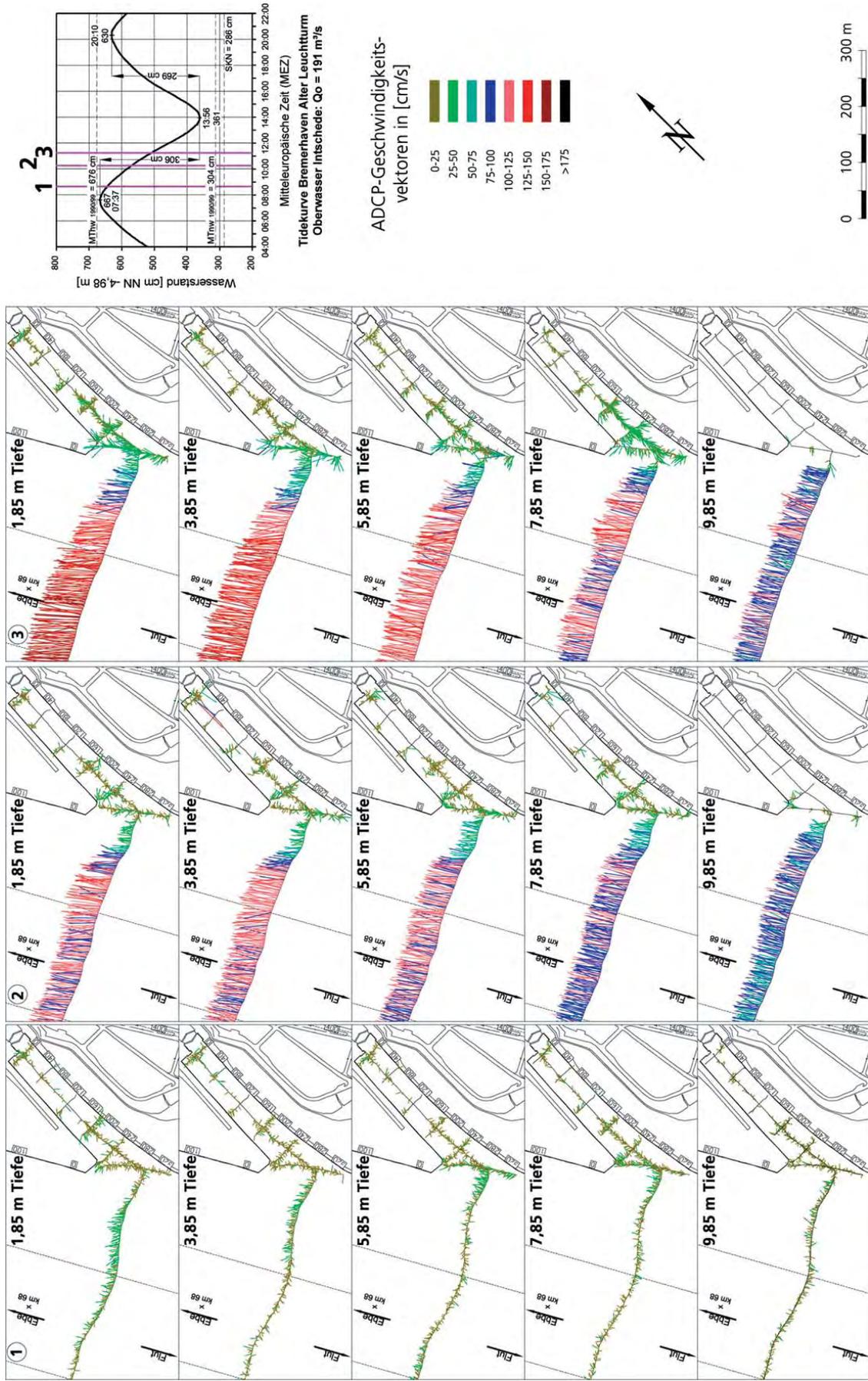


Abb. 21: Ebbestrommessungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 25.10.2001

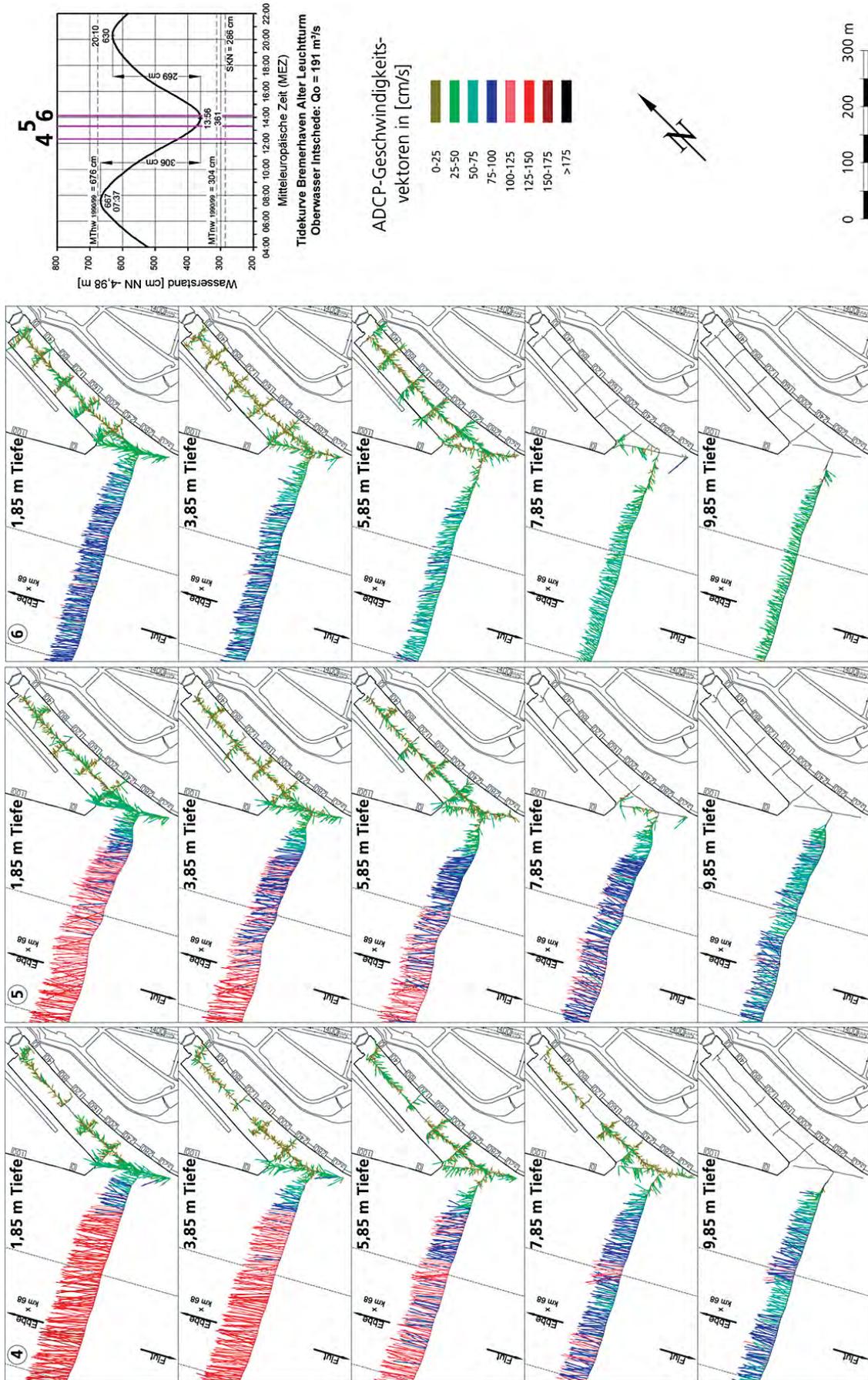


Abb. 22: Ebbestromungen vor der Kaiserschleuse in Bremerhaven am 25.10.2001

5.2.2 Salzgehalte

– Salzgehalte bei Flutstrom

Bei den Salzgehaltsmessungen vor der Kaiserschleuse vom 23. Oktober 2001 und 27. März 2002 betrug der Tidehub 335 cm bzw. 418 cm bei einem zugehörigem Oberwasser von $Q_0 = 182 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $607 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 23).

Übereinstimmend mit den Untersuchungen vor der Nordschleuse sind auch im Vorhafen der Kaiserschleuse bei Tideniedrigwasser relativ starke Gradienten der Salzgehalte zu beobachten (Messung 1 in Abb. 23 oben links). Mit den ebborientierten Dichteströmungen wird das salzhaltigere Wasser in den unteren Wasserschichten zeitverzögert aus dem Vorhafen transportiert. In dieser Tidephase sind die Salzgehalte im Strom niedriger als im Vorhafen.

Mit voll einsetzendem Flutstrom kehrt sich das Gefälle der Salinität vom Tidefluss zum Vorhafen um. Etwa ab $T^{1/2w}$ kommt es bei starkem Vertikalgradienten in der Weser zu den flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen, die bis nach dem Eintritt des Thw andauern.

Der Dichteunterschied bei den Messpunkten im Vorhafen von bis zu $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ ist darauf zurückzuführen, dass das spezifisch schwerere Wasser unten in den Vorhafen strömt und das weniger salzhaltige Wasser aus den oberen Tiefenzellen heraustransportiert wird. Bezeichnend ist der mit zunehmender Flutdauer schwächer werdende Vertikalgradient in der Weser im Gegensatz zu den Profilen im Vorhafen vor allem in der Einfahrt (blaue Linie in Abb. 23). Wie bei der Nordschleuse werden phasenverschoben die Konzentrationen im Tidestrom erreicht.

Mit Abb. 23 wird aufgezeigt, dass die für die Dichteströmungen erforderlichen Salzgehaltsdifferenzen zwischen der Weser und dem Vorhafen auch noch bei einem Oberwasser von $Q_0 = 607 \text{ m}^3/\text{s}$ vorhanden sind. Das geht aus den etwa zu gleichen Flutphasen durchgeführten Messungen 2 und 3 hervor. Die ersten Messungen (1) dokumentieren die tideabhängigen Gradienten zur Ebbestromkenterung und bei der Umkehr der Dichteströmungen im Vorhafen.

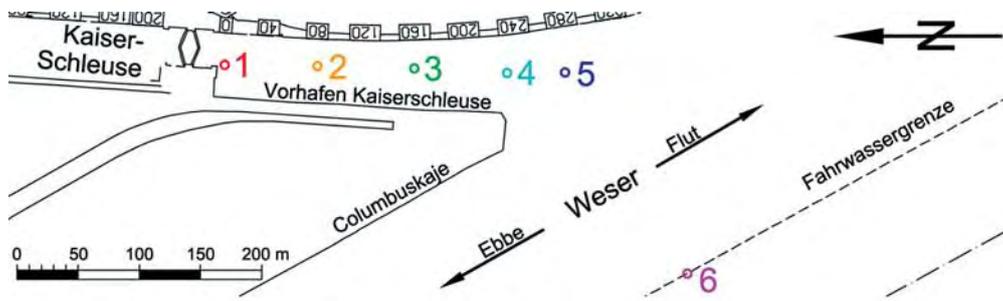
– Salzgehalte bei Ebbestrom

Die Salzgehaltsverhältnisse bei den Nipptiden vom 26. Oktober 2001 und 4. April 2002 sowie Abflüssen von $Q_0 = 193 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $Q_0 = 419 \text{ m}^3/\text{s}$ sind in Abb. 24 dargestellt. Nach Thw besteht nur noch ein geringes Gefälle zwischen Weser und Vorhafen (Messung 1, Abb. 24). Die Differenzen von bis zu $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ in den Vertikalen geben einen Hinweis auf die zu dieser Tidephase noch vorhandenen flutorientierten Dichteströmungen.

Die Profile in der Weser ab der dritten Stunde nach Thw (Abb. 24, Messung 2) erklären die verstärkten Oberflächenströmungen während der Ebbestromphase. Die Salzgehaltsunterschiede erreichen im Tidestrom (Pos. 6) Werte bis zu $\Delta S \approx 6 \text{ ‰}$. Bezeichnend ist die deutliche Trennung zwischen den Wasserschichten unterschiedlichen Salzgehaltes.

Mit der Zunahme des horizontalen Salzgehaltsgefälles vom Strom zum Vorhafen entwickeln sich die rechtsdrehenden Walzen- und durch das damit in den oberen Tiefenzellen einströmende „leichte“ Wasser die zur Ebbestromphase zugehörigen Dichteströmungen. Die für T_{nw} in Abb. 24 aufgetragenen Salzgehaltsprofile und -gefälle erklären, weshalb der Dichteeffekt bis nach dem Eintritt des T_{nw} aufrecht erhalten wird.

Mit Abb. 24 wird die Abnahme der Salzgehalte während der Ebbestromphase bei unterschiedlichen Tide- und Oberwasserbedingungen aufgezeigt. Trotz der absolut im April 2002 um rd. 5 ‰ niedrigeren Salzgehalte sind die Horizontal- und Vertikalgradienten der



23.10.2001 ($Q_0 = 182 \text{ m}^3/\text{s}$)

27.03.2002 ($Q_0 = 607 \text{ m}^3/\text{s}$)

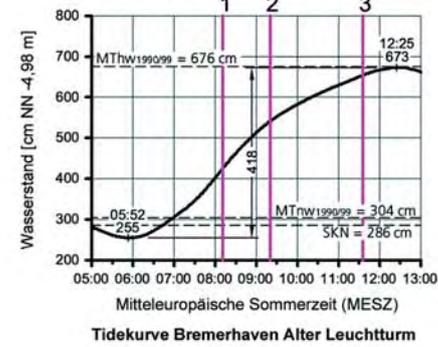
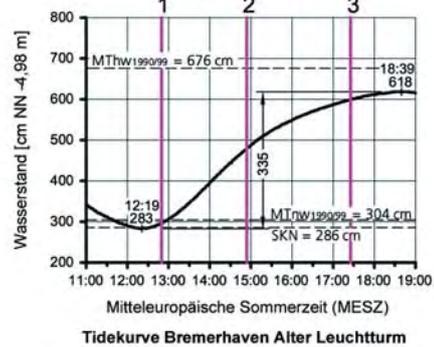
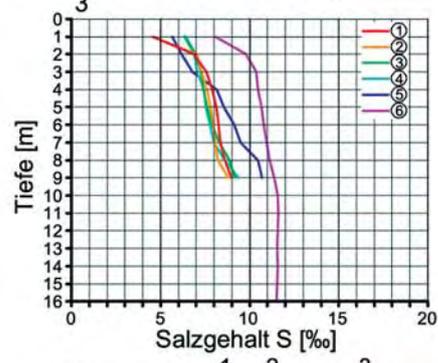
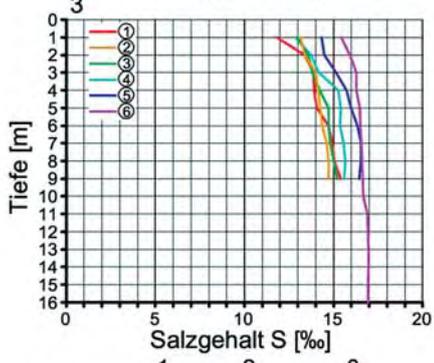
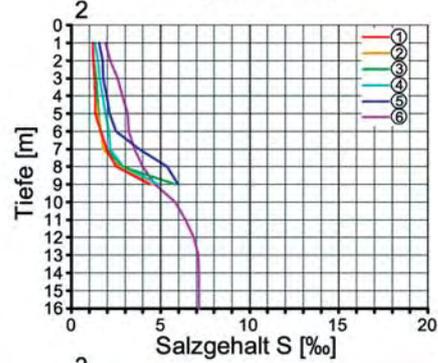
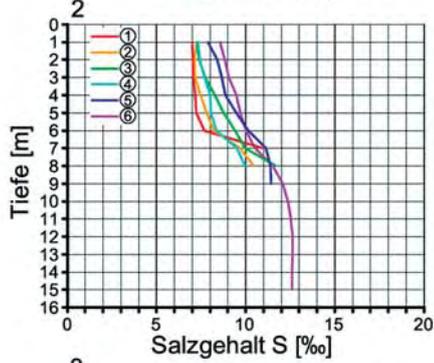
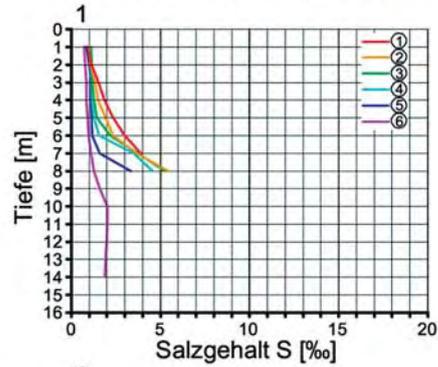
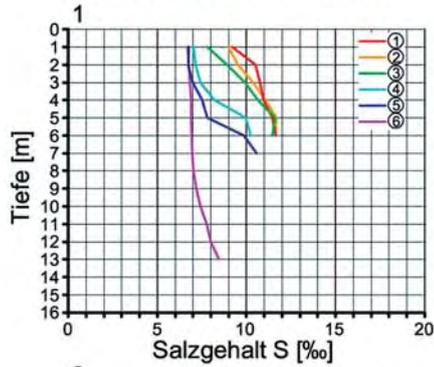
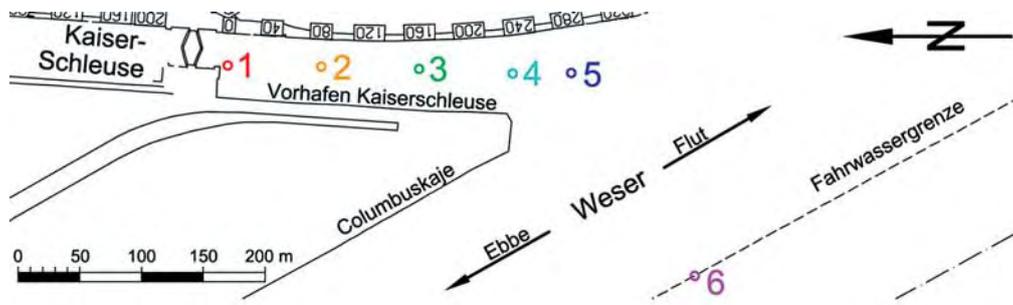


Abb. 23: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen



26.10.2001 ($Q_0 = 193 \text{ m}^3/\text{s}$)

04.04.2002 ($Q_0 = 419 \text{ m}^3/\text{s}$)

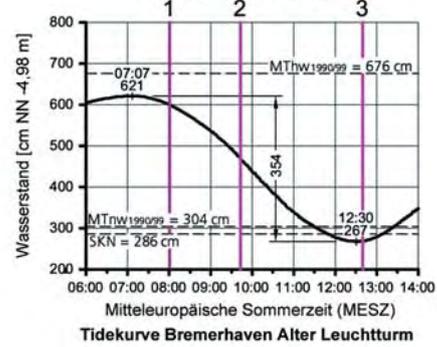
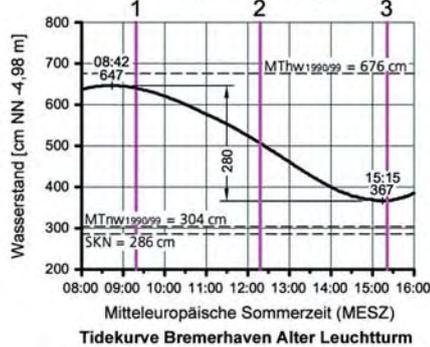
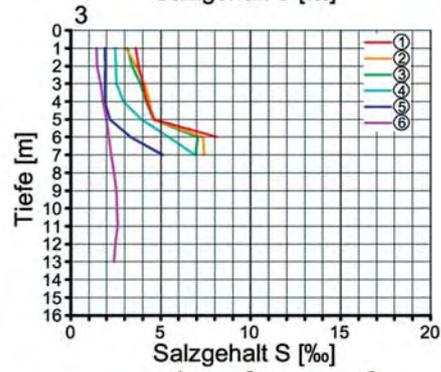
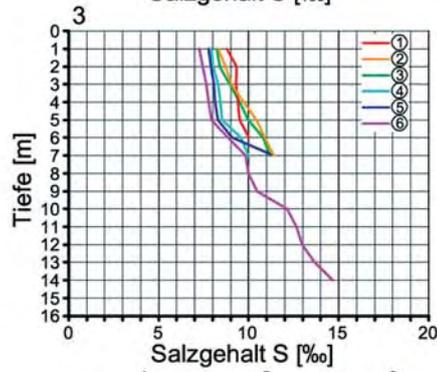
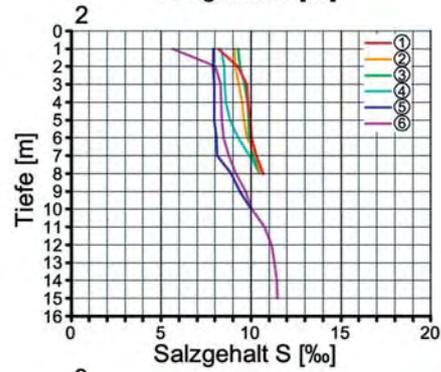
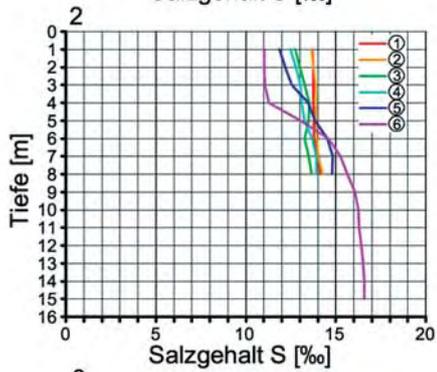
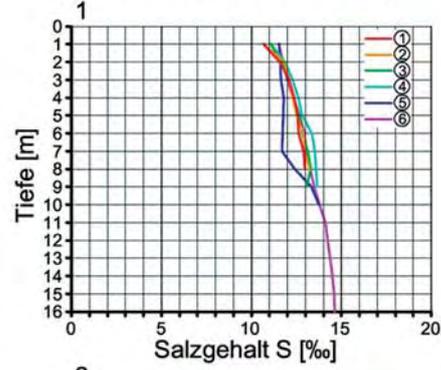
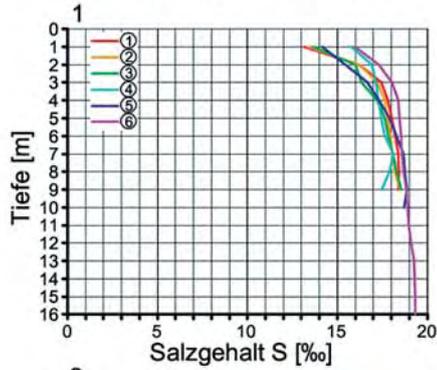


Abb. 24: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

Salzgehalte im Tideablauf in sich vergleichbar. Im Übrigen wurde an anderer Stelle nachgewiesen, dass Dichteströmungen bereits bei geringen Salzgehaltsdifferenzen hervorgerufen werden (DE BROE, 2003).

5.2.3 Schwebstoffe

– Schwebstoffe bei Flutstrom

Die tideabhängigen Schwebstoffverhältnisse im Vorhafen zur Kaiserschleuse sind beispielhaft für den Flutast der Tide vom 23. Oktober 2001 in Abb. 25 dargestellt. Der Tidehub betrug 335 cm bei einem Oberwasser von $Q_0 = 182 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Schwebstoffkonzentrationen waren in der Weser (Pos. 6 in Abb. 25) bei der Oktobermessung insgesamt geringer als bei der Springtide vom Mai 2001 (vgl. Abb. 16). Für die tideabhängigen Feststoffanreicherungen in den Vorhäfen spielt jeweils die vorausgegangene Entwicklung eine Rolle.

Mit den während der Flutstromphase über die Walzenströmungen sohlennah eindringenden Wassermengen werden Schwebstoffe aus dem Strom in die Vorhäfen eingetragen. Gleichzeitig bewirken die hydrodynamischen Kräfte, dass die aus den vorausgegangenen Tiden bereits vorhandenen Feststoffmengen resuspendiert werden. Die positive Feststoffbilanz verringert sich mit zunehmendem Sättigungsgrad in den Vorhäfen.

Bis etwa rd. 2 Stunden nach Tideniedrigwasser wurden im Vorhafen zur Kaiserschleuse relativ geringe Trübungen festgestellt (Messung 1 und 2, Abb. 25). Aufgrund des besonderen Sinkverhaltens waren die Feststoffkonzentrationen insgesamt höher als in der Weser. Mit dem Einsetzen des vollen Flutstroms kommt es durch die Anfachung der Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen zur Resuspension und stärkerer Durchmischung der Feststoffpartikel.

In der folgenden Tidephase nach Tidehalbwasser wird die Feststoffkonzentration mit Werten von $C_s > 1000 \text{ mg/l}$ zunehmend erhöht (Messung 4 bis 6 in Abb. 25). Die starke turbulente Durchmischung ist auch auf die geringere Ausbautiefe des Vorhafens im Vergleich zur Nordschleuse zurückzuführen.

Kennzeichnend sind die hohen Schwebstoffanreicherungen in der späteren Flutstromphase im inneren Vorhafen besonders vor dem Binnenhaupt mit maximalen Schwebstoffgehalten von $C_s \approx 2000 \text{ mg/l}$ (Messung 6, Abb. 25; vgl. auch Messung 5 und 6, Abb. 16). Dieser Umstand erklärt sich mit den in dieser Tidephase besonders ausgeprägten sohlennah eindringenden Dichteströmungen, die am Binnenhaupt gekehrt werden. Übereinstimmend ist für die beiden Vorhäfen festzustellen, dass starke Feststoffkonzentrationen, insbesondere bei hohen Tidewasserständen, während der Flut auftreten.

– Schwebstoffe bei Ebbestrom

Mit den vor der Kaiserschleuse durchgeführten Trübungsmessungen bei der Nipptide vom 26.10.2001 (Tidefall 280 cm, $Q_0 = 193 \text{ m}^3/\text{s}$) werden die Ergebnisse vom Vorhafen der Nordschleuse grundsätzlich bestätigt (Abb. 26). Während der Ebbe wurden in der Weser relativ geringe Konzentrationen ($C_s < 150 \text{ mg/l}$) registriert.

Auch im Vorhafen der Kaiserschleuse lagen die absoluten Werte insgesamt deutlich unter den bei Flutstrom gemessenen Größenordnungen. Die insgesamt etwas stärkeren Durchmischungen in der zweiten Ebbestromphase bis nach Eintritt des T_{nw} gegenüber der Nordschleuse sind mit den Dichteströmungen in Verbindung mit der geringeren Ausbautiefe zu erklären.

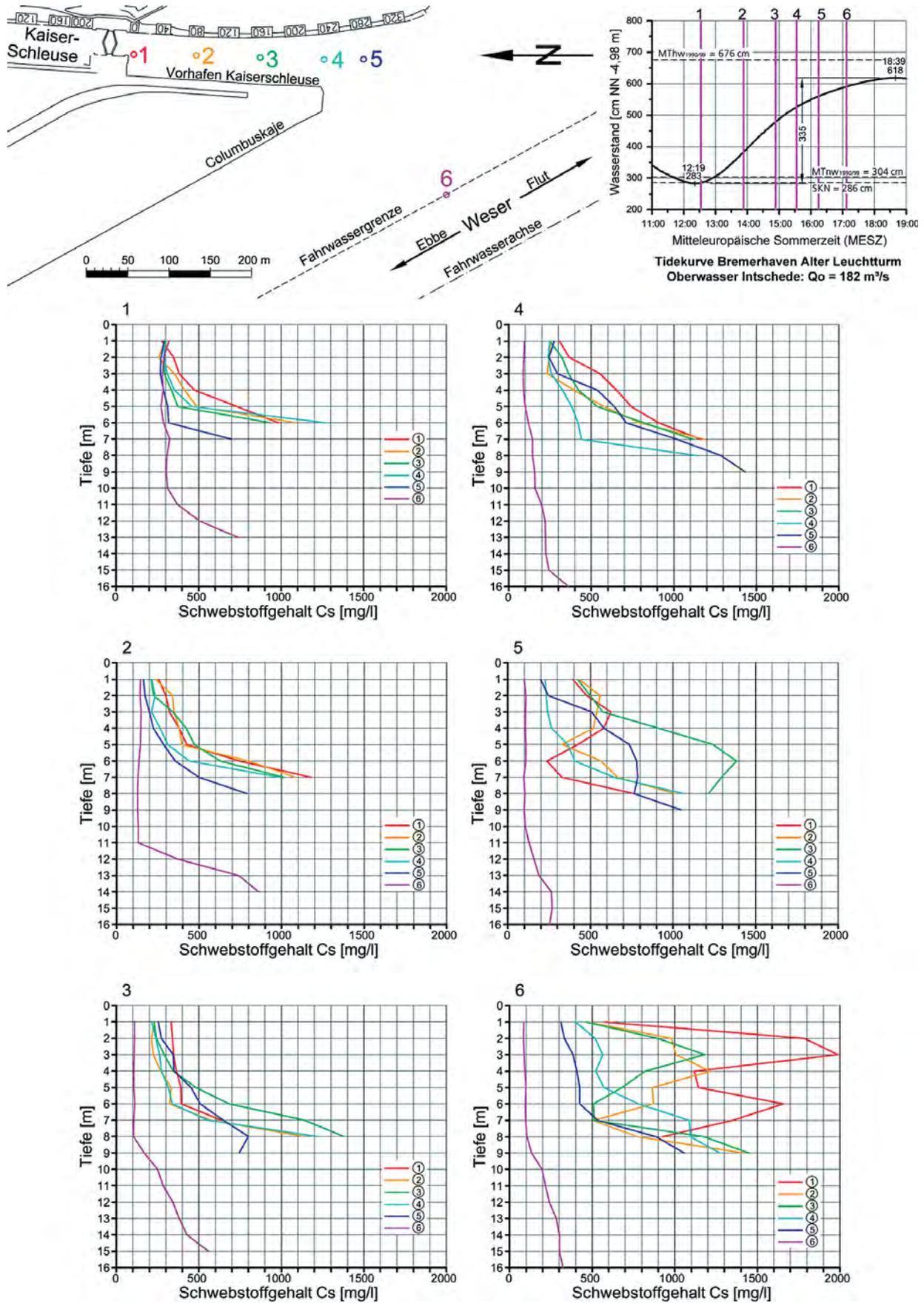


Abb. 25: Schwebstoffgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Flutmessung am 23.10.2001

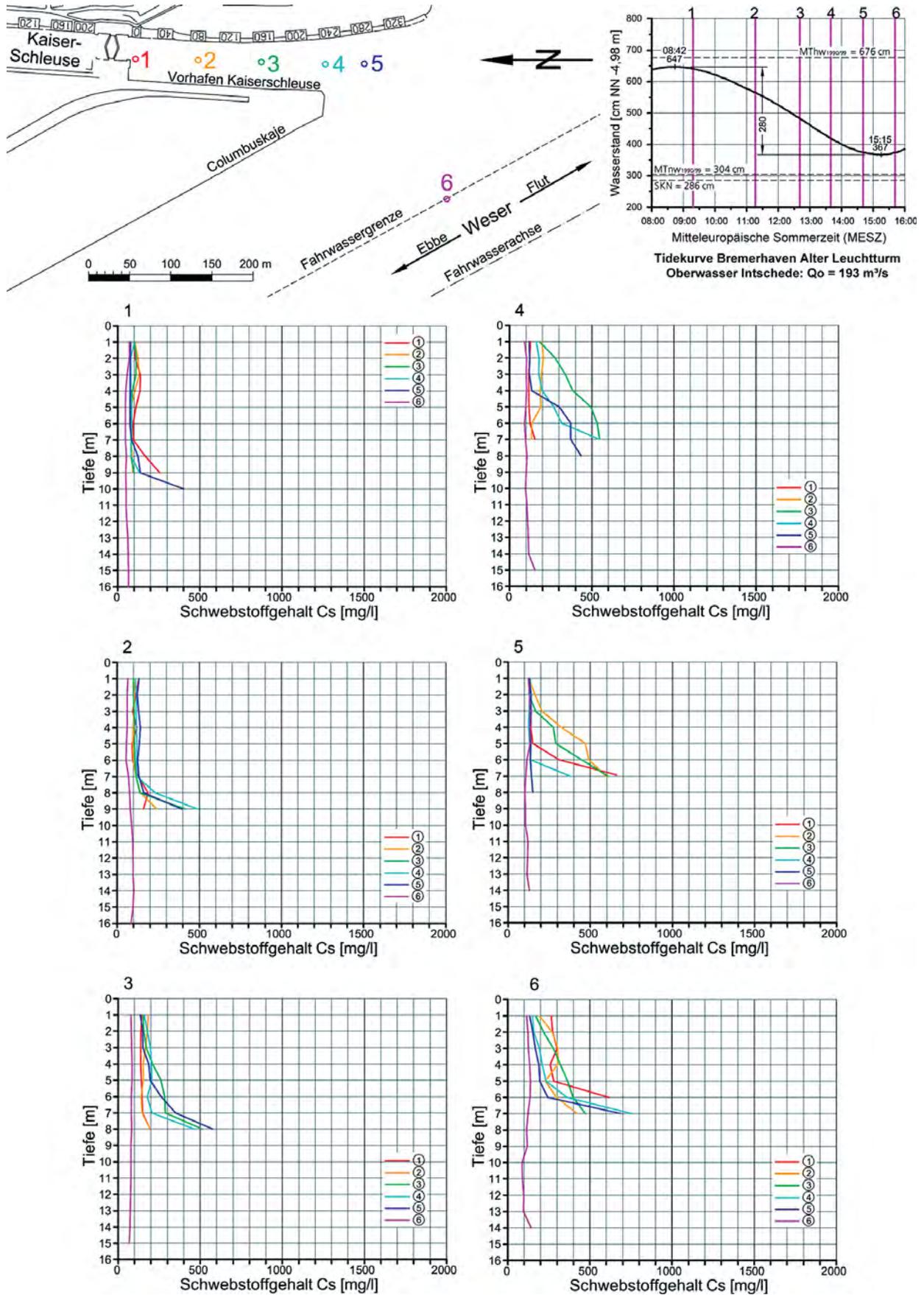


Abb. 26: Schwebstoffgehalte im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven, Ebbemessung am 26.10.2001

Die in situ Untersuchungen haben für beide Vorhäfen in Bremerhaven ergeben, dass es im Tiderhythmus bei Flutstrom zu besonders hohen Feststoffkonzentrationen in der zweiten Fluthälfte kommt. Durch die Analyse der Salzgehalte im Strom und den angrenzenden Vorhäfen wurde auch ein besserer Einblick in die damit verbundenen, komplexen Strömungsverhältnisse gewonnen. Mit der genaueren Kenntnis der Überlagerungen von Strömungs- und Dichteeffekten während der Flut- und Ebbestromphasen jeweils ab etwa Tidehalbwasser können die tideabhängigen Schwebstoffkonzentrationen erklärt werden.

6. E m d e r V o r - u n d A u ß e n h a f e n

6.1 S t r ö m u n g s v e r h ä l t n i s s e

Die Tideems und der Emders Vor- und Außenhafen zeichnen sich durch besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen aus. Deshalb sind dort hochfrequente Dopplermessungen mit der bottom-track-Methode problematisch. Mit der ADCP-Sonde und der bisher praktizierten satellitengestützten Positionierung bei den Profilmessungen wurden wiederholt keine ausreichenden Ergebnisse erzielt. Es wird deshalb daran gearbeitet, mit einem Echolot und einem speziellen Positionierungsverfahren, dem RTK-GPS (Real-Time-Kinematic-GPS), zeitlich und örtlich bessere Auflösungen zu erreichen, um die Messergebnisse zu optimieren. Bei künftigen Untersuchungen in sehr schwebstoffhaltigen Gewässern und Vorhäfen werden mit der GPS/Echolot-Methode als Ersatz für das bottom-tracking bessere Ergebnisse aus den Dopplermessungen erwartet.

Die folgenden Ausführungen zeigen, dass es dennoch im Bereich des Emders Hafens gelungen ist, mit Dopplermessungen Dichteströmungen nachzuweisen. Wegen der insgesamt verbesserungswürdigen ADCP-Messungen werden die folgenden Ausführungen mit Ergebnissen von Treibkörpermessungen ergänzt.

– Flutströmungen

Bei etwa mittleren Tide- und Oberwasserbedingungen wurde mit den Flutstrommessungen am 10. Juni 2002 rd. 1,5 Stunden nach Tideniedrigwasser begonnen (Abb. 27). Bei etwa mittlerem Oberwasser ($Q_0 = 53,3 \text{ m}^3/\text{s}$) betrug der Tidestieg 347 cm am Pegel Emden Neue Seeschleuse.

Im Längsprofil zum Außenhafen sind innen bei der ersten Messung in den oberen Tiefenzellen noch schwache Einströmungen auszumachen (Abb. 27). In den unteren Wasserschichten (7,85 m) ist es umgekehrt. Mit sich voll ausprägendem Flutstrom wurden in der Ems Strömungsgeschwindigkeiten mit Maximalwerten von $v_f > 175 \text{ cm/s}$ erreicht. Auffällig ist der vergleichsweise schwache Vertikalgradient gegenüber der tiefer ausgebauten Weser. Es ist jedoch so, dass das spezifisch schwerere Wasser bei Flut die Sohlenströmungen auch in der Ems intensiviert und deshalb im Emders Vorhafen ebenfalls Dichteströmungen angeregt werden.

Die Messung 2 nach Tidehalbwasser in Abb. 27 zeigt die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse in der oberen (1,85 m) und den unteren (5,85 m und 7,85 m) Tiefenzellen an der Hafeneinfahrt. Oben sind schwache Ausströmungen auszumachen. Im tiefen Wasser sind dagegen kräftige Strömungen in den Vorhafen an der Ostmole zu verzeichnen.

Bei den Querprofilen in der Ems ist übrigens der Sohlprung von $-8,5 \text{ m SKN}$ auf $-5,1 \text{ m SKN}$ (vgl. Abb. 4) zu beachten. Das erklärt die geringeren Fließgeschwindigkeiten in den tiefen Wasserschichten oberhalb der Hafeneinfahrt.

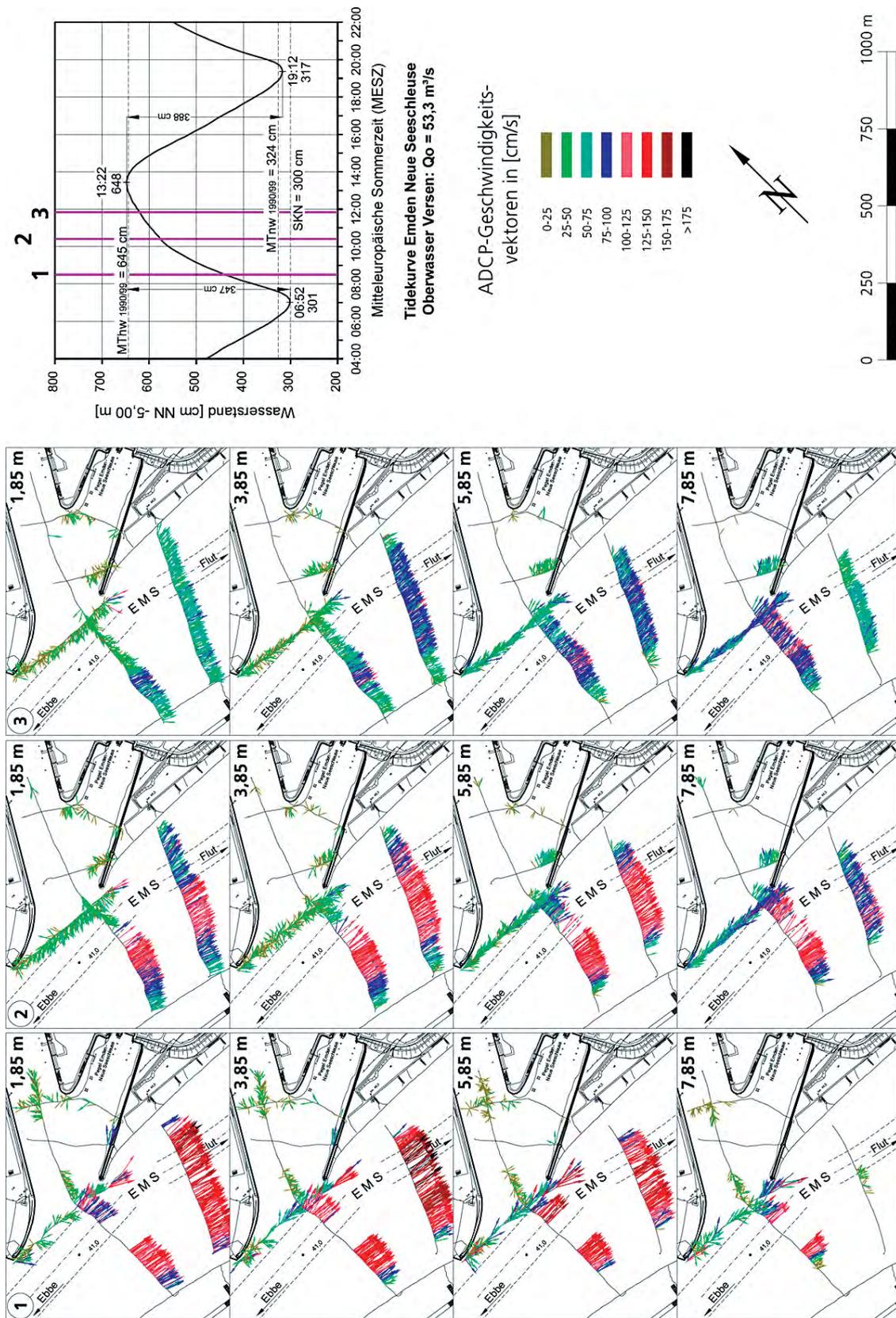


Abb. 27: Flutstrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 10.6.2002

Ab etwa 3 Stunden nach T_{nw} prägen sich im Emdener Vorhafen mit sich abflachendem Flutast die tideabhängigen Strömungseffekte aus (Messung 2 und 3 in Abb. 27). An den ADCP-Profilen in der Hafeneinfahrt ist zu erkennen, wie die Wassermassen in den oberen Schichten aus dem Hafen strömen. Die Oberflächenströmungen wirken sich bis in das Fahrwasser der Ems aus. In den unteren Tiefenzellen dringt das Wasser aus der Ems mit zunehmender Intensität entlang der Ostmole in den Vorhafen. Dabei wurden absolute Werte von bis zu $v > 50$ cm/s gemessen. In dieser Tidephase werden, wie bei den Vorhäfen in Bremerhaven, Walzenströmungen angefacht, von denen aus das salzigere Wasser der Ems sohlenah in den Vorhafen eindringt. Damit wird die Dichtestromwalze erzeugt, mit der das Wasser an der Oberfläche aus dem Hafen verdrängt wird. Mangels hinreichender Dopplermessungen werden die vorstehenden Erläuterungen durch die in Abb. 28 aufgetragenen Treibkörperbahnen ergänzt.

Mit den Messungen vom Juli 2000 wurden die Walzenströmungen in 6,0 und 9,0 m Wassertiefe nachgewiesen. Außerdem veranschaulicht Abb. 28 den Dichteeffekt mit dem in 6,0 m Wassertiefe vom östlichen Walzenrand in den Hafen einströmenden Wasser und die zur Ems gerichteten Strömungen in 1,5 m Wassertiefe.

In Abb. 29 sind die letzte Flutstromphase, Kenterung und einsetzende Ebbestromphase in der Ems dargestellt. An den Profilen vor und in der Hafeneinfahrt sind die oben und unten entgegengesetzten Dichteströmungen erkennbar. Auch für diese Tidephase mögen die Treibkörpermessungen vom Juli 2000 in 1,5 und 6,0 m Wassertiefe die in Abb. 29 aufgetragenen Strömungsbilder für vergleichbare Tide- und Oberwasserbedingungen verdeutlichen und ergänzen (Abb. 30).

Als Besonderheit ist dazu anzumerken, dass das an der Oberfläche vom Außenhafen zur Ems strömende Wasser zur Walzenbildung im Vorhafen neigt. Die Treibkörperbahnen in 6,0 m Wassertiefe dokumentieren die Einströmungen von der Flutstromwalze aus in den Vor- und Außenhafen.

– Ebbeströmungen

Die Strömungsverhältnisse bei einer Springtide und erhöhtem Oberwasser wurden am 4. November 2002 mit Dopplermessungen aufgenommen (Abb. 31). Der Tidefall betrug am Pegel Emden Neue Seeschleuse 386 cm und das Oberwasser in Versen $Q_o = 167$ m³/s.

Die Flutstromkenterung in der Ems trat knapp eine Stunde nach T_{hw} ein (Abb. 31, Messung 1). Auch nach eingesetzter Ebbestromung in der Ems dauern die fluterzeugten Dichteströmungen noch an (Messung 2). In den oberen Tiefenzellen (1,85 m) sind die Strömungen nach außen zur Ems gerichtet. Im tieferen Wasser (ab 5,85 m) sind sie entgegengesetzt. Erst in der dritten Stunde nach dem Tidehochwasser kam es zur Umkehrung (Messung 3, Abb. 31).

Wegen des vergleichsweise hohen Oberwassers wurden bei vollem Ebbestrom (etwa $T_{1/2w}$) an der Wasseroberfläche der Ems maximale Fließgeschwindigkeiten von $v_{max} \approx 200$ cm/s erreicht (Abb. 32, Messung 4). Mit dementsprechend hoher Energie gelangen die Wassermassen in den äußeren westlichen Vorhafen. Dadurch werden in den oberen Tiefenzellen (bis 3,85 m) rechtsdrehende Walzenströmungen angefacht mit merklich geringerer Energie an der Ostmole. Aus der Ebbestromwalze heraus strömt das Wasser oben in den Außenhafen und verursacht die Ausströmung in den tieferen Wasserschichten (7,85 m). Mit zunehmender Ebbestromdauer stabilisieren sich die Dichteströmungen in den oberen und unteren Wasserschichten (Messung 5, Abb. 32). Im dazwischen liegenden Wasserkörper mit sehr hohen Feststoffkonzentrationen finden dagegen weniger turbulente hydrodynamische Vorgänge statt.

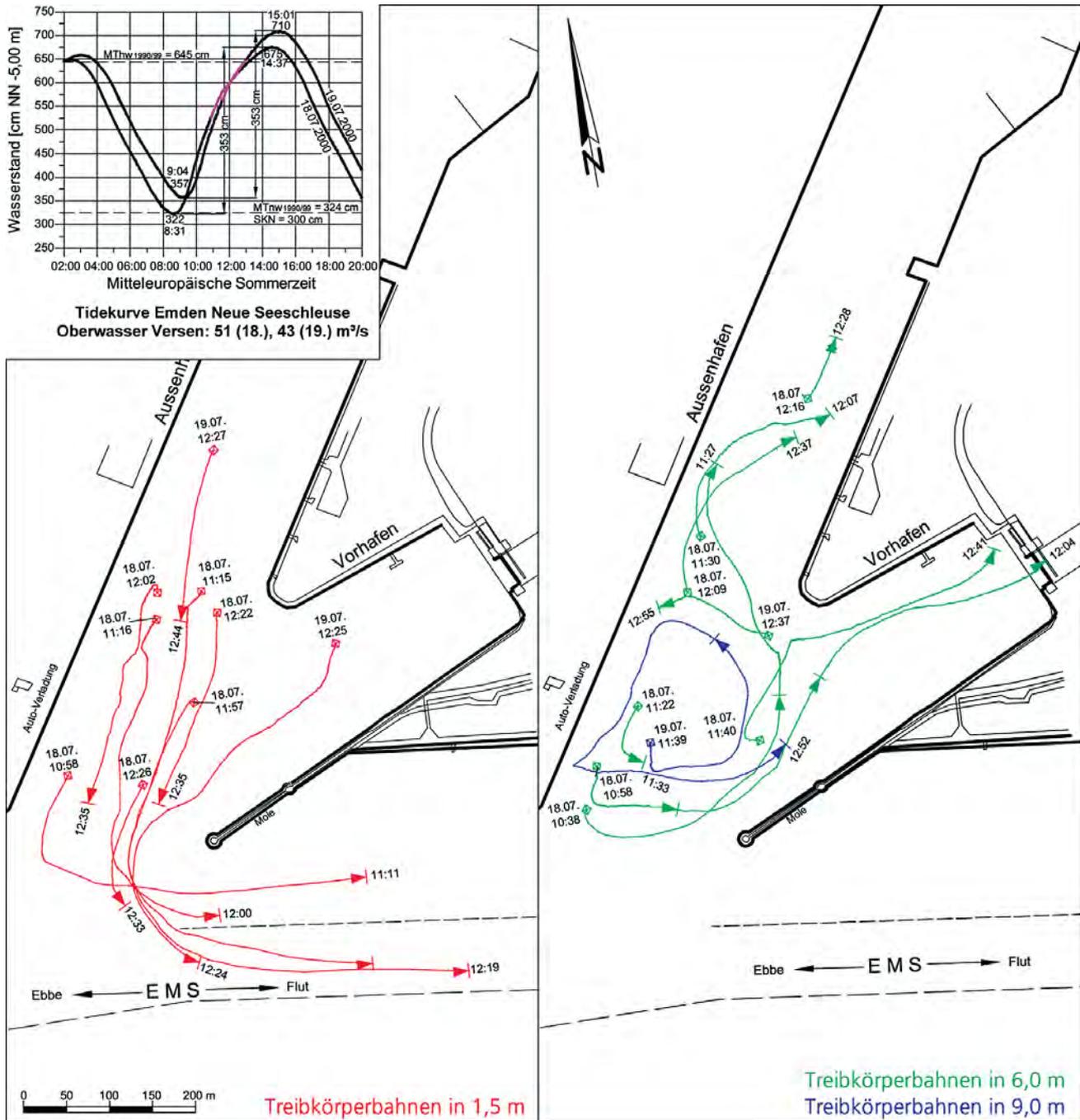


Abb. 28: Flutströmungen im Vor- und Außenhafen in Emden am 18./19.7.2000

Bei weiter fortschreitender Ebbedauer verstärken sich die Einströmungen in den westlichen Vorhafen bis zu $v_e > 50$ cm/s (Messung 6). Auch die dichtebedingten Ausströmungen hielten bis 1 Std. vor Tnw fast unvermindert an.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die tideabhängigen Walzen- und Dichteströmungen in den Vorhäfen an der Ems und Weser trotz der unterschiedlichen Randbedingungen miteinander vergleichbar sind und verallgemeinert werden können.

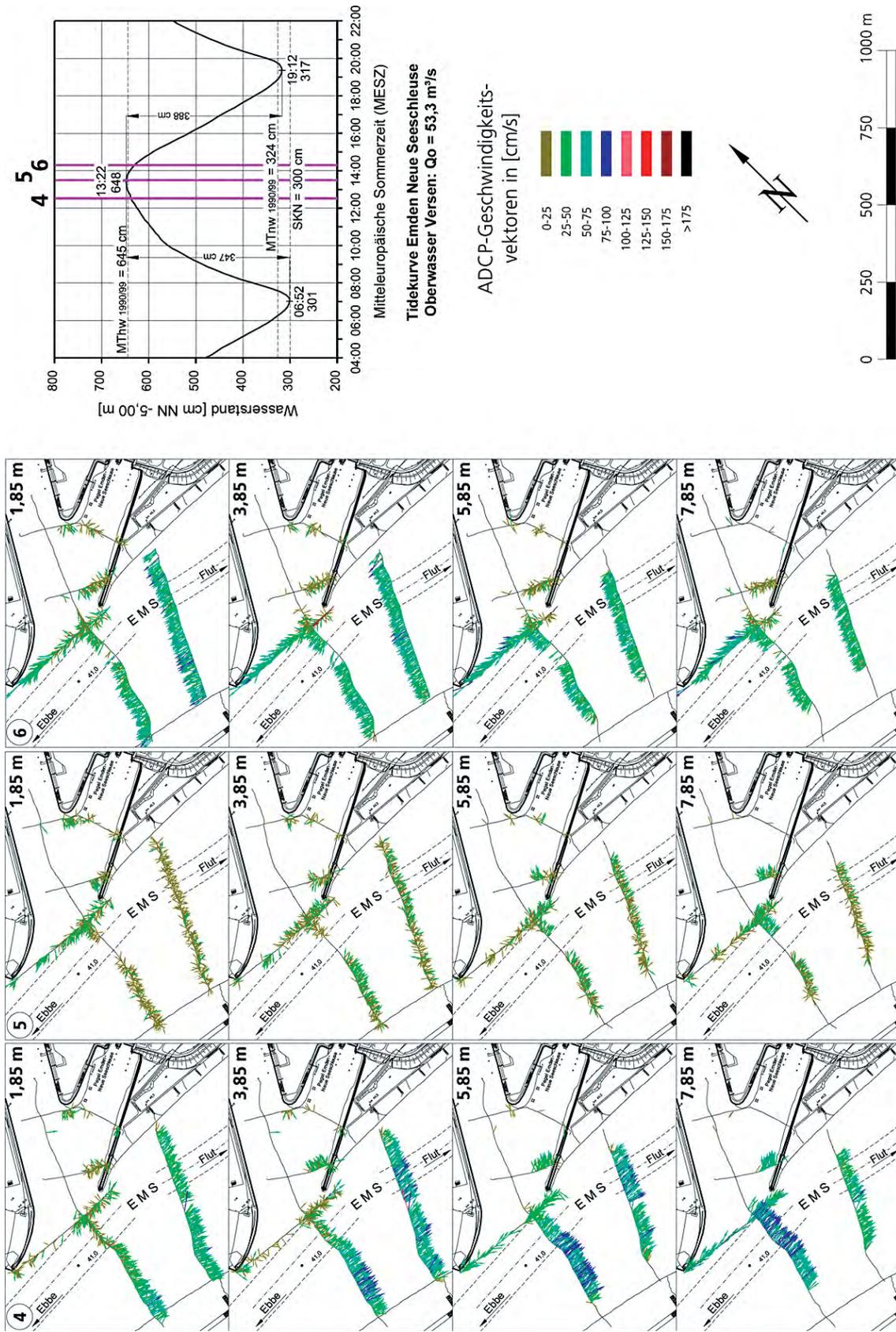


Abb. 29: Flutstrommessungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 10.6.2002

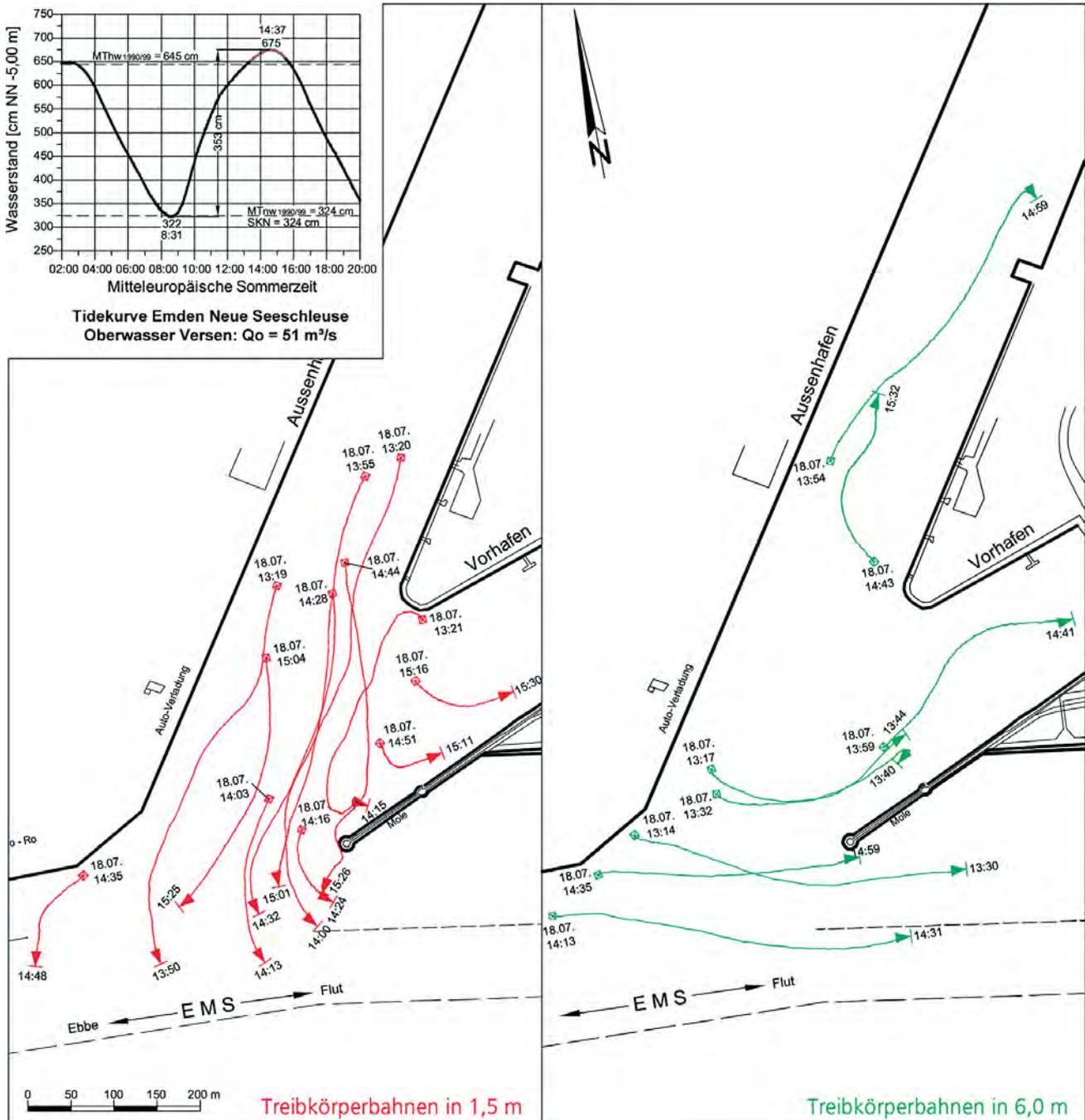


Abb. 30: Flutströmungen und Kenterung zur Ebbe im Vor- und Außenhafen in Emden am 18.7.2000

Die Dichteströmungen in den Schleusenvorhäfen werden jeweils etwa ab Tidehalbwasser ausgeprägt, sie verstärken sich im weiteren Tideverlauf und bleiben bis nach der Kenterung erhalten.

Während der Flut werden die Dichteströmungen über die an der Sohle besonders intensiven Walzenströmungen angefacht. Das sohlennah eindringende salzhaltigere Wasser verdrängt das spezifisch leichtere Wasser in der oberen Wasserschicht zurück in den Tidestrom. Während der Ebbestromphase sind die Vorgänge entgegengesetzt.

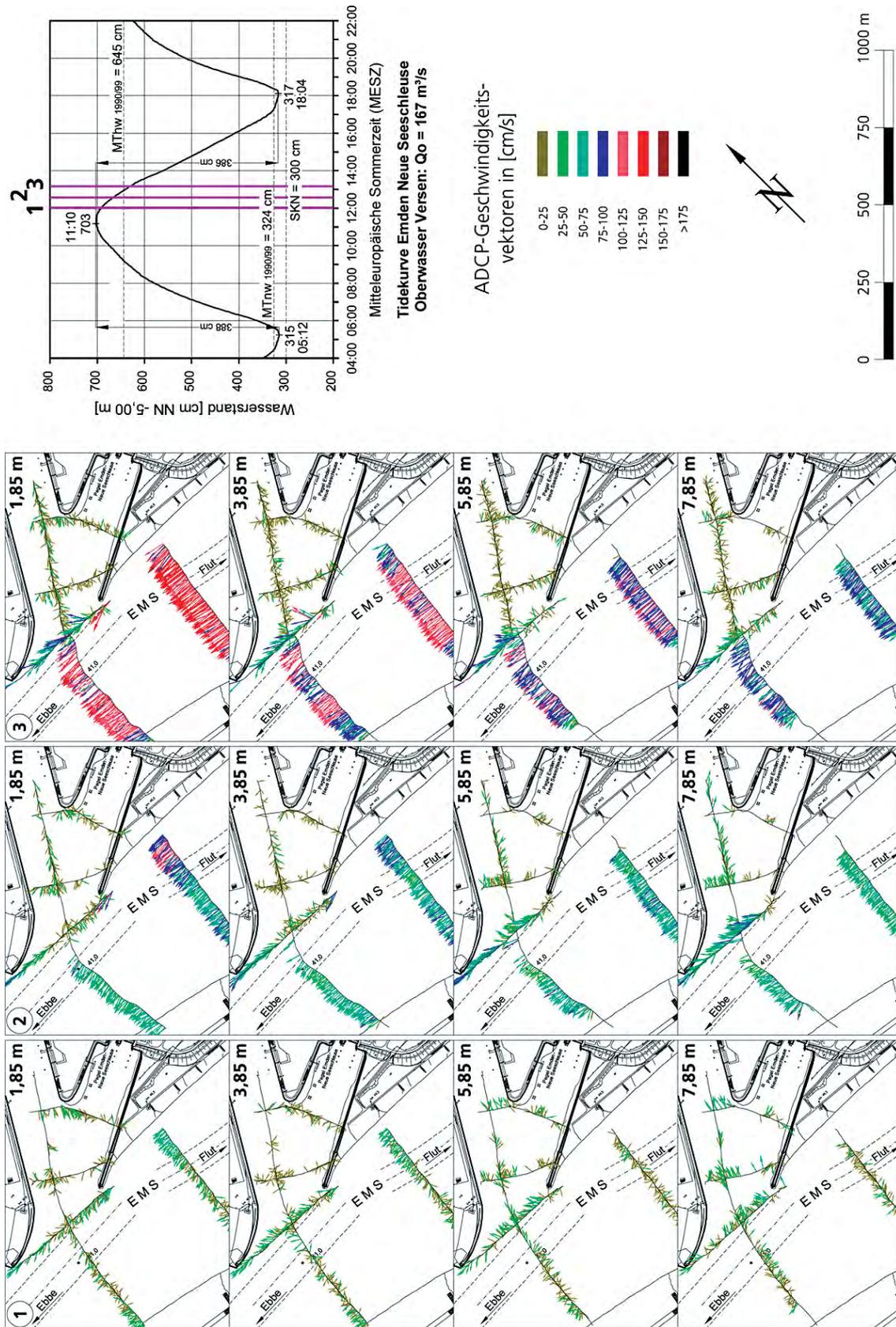


Abb. 31: Ebbestromungen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens am 4.11.2002

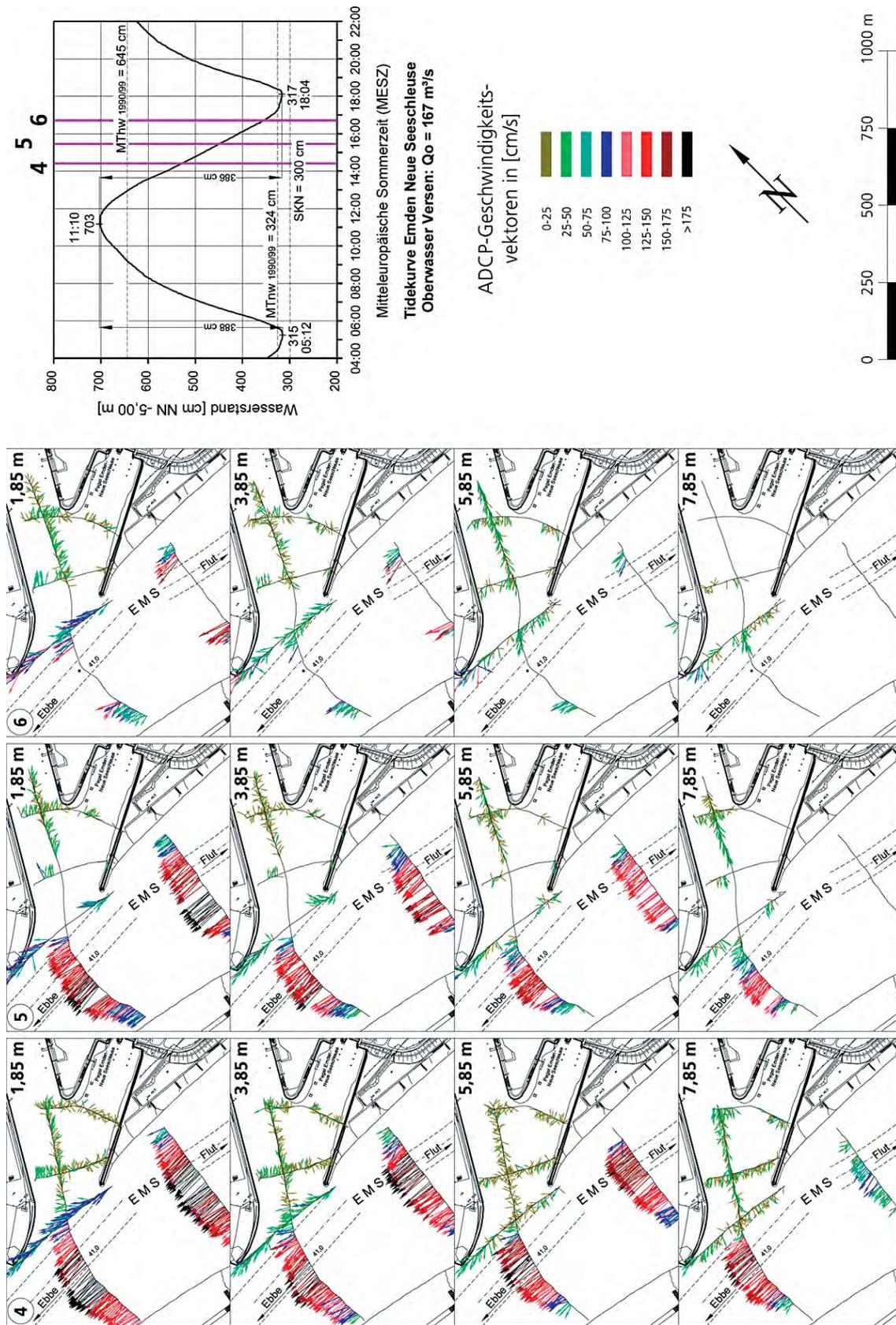


Abb. 32: Ebbestromungen im Bereich des Emdener Vor- und Außenhafens am 4.11.2002

6.2 Salzgehalte

Der Einfluss des Oberwassers der Ems ist auf die Tidewasserstände und den Tidehub in Emden von untergeordneter Bedeutung und rechnerisch nicht nachweisbar (SPINGAT, 1997). Beachtenswert sind jedoch die oberwasserabhängigen Veränderungen der Salzgehalte im Bereich des Emders Seehafens.

Für die in situ Messungen wurden vom Niedersächsischen Hafenamts Ems-Dollart Multifunktionssonden (Aanderaa, RCM 9 MK II) zur Verfügung gestellt. Für die unterhalb der Hafeneinfahrt im Mai/Juni 2002 bei Ems-km 42 ausgelegte Sonde kann mit Abb. 33 nachvollzogen werden, wie die Salzgehalte in der Ems mit der Wasserstandsganglinie am Pegel Emden Neue Seeschleuse bei geringem Oberwasser übereinstimmen.

Die tideabhängigen Differenzen der Salzkonzentrationen sind bei Springtiden merklich höher als zu den Nipptidezeiten. Bei Springtiden werden die Salzgehalte durch die größeren Tidewassermengen verstärkt. Besonders hohe und niedrige Scheitelwasserstände haben entsprechende Salzkonzentrationen in der Ems zur Folge.

Erwähnenswert ist der Einfluss von Sturmtiden auf den Salzgehalt in der Ems. Die Windflut vom 26. Oktober und die Sturmflut vom 27./28.10.2002 haben trotz des erhöhten Oberwassers zu polyhalinen Bedingungen $S > 20 \text{ ‰}$ geführt (Abb. 34). Zum Niedrigwasser der Vormittagstide des 27.10. lagen noch oligohaline Verhältnisse mit $S < 3 \text{ ‰}$ vor. Bis zum HThw in der Nacht zum 28. Oktober hatte sich der Salzgehalt um $\Delta S = 20 \text{ ‰}$ in der Ems erhöht.

Korrelationsrechnungen zwischen den bei Thw vorhandenen maximalen Salzgehalten und unterschiedlichen Oberwasserbedingungen ergeben recht gute mathematische Zusammenhänge (Abb. 35 oben). Die deutlich geringeren Konzentrationen im November 2002 zeigen, wie die Brackwasserzone durch das hohe Oberwasser ($MQ_0 = 198 \text{ m}^3/\text{s}$) zur Außenems verlagert wird.

Zwischen den minimalen Salzgehalten und dem Tnw sind für die Dauermessungen vom Frühjahr 2002 ($MQ_0 = 47 \text{ m}^3/\text{s}$) noch schwache Zusammenhänge nachweisbar. Bei den hohen Abflüssen vom November streuten die Salzgehalte zwischen $S = 0,5$ bis $2,5 \text{ ‰}$ (Abb. 35 Mitte).

Von entscheidender Bedeutung sind die gleich großen tideabhängigen Salzgehaltsschwankungen von $\Delta S \approx 13 \text{ ‰}$ (Abb. 35 unten) für die unterschiedlichen Abflüsse aus dem Binnenland. Aus diesem Grund wurden sowohl im Juni als auch im November 2002 im Emders Vor- und Außenhafen Dichteströmungen nachgewiesen (vgl. Abb. 27 bis 32).

Hohe Schwebstoffgehalte verändern sowohl die Lichtdurchlässigkeit als auch die Leitfähigkeit des Wassers. Bei der im Emders Außenhafen ständig vorhandenen stabilen Fluid Mud Lage liegt die Grenze für eine korrekte Messwerterfassung im Bereich des hochfrequenten Echolothorizontes. Die Peilungen des IWA vom September 2001 haben gezeigt, dass sich die Lage des 200 kHz-Horizontes nicht nennenswert verändert (Abb. 3 und 36). Im Emders Außenhafen wird die stabile Fluid Mud Lage in einem natürlichen Gleichgewichtszustand belassen. Mit einem in Emden entwickelten Baggerungssystem wird die Schiffbarkeit erhalten (WURPTS, 2003).

In den bedeutend kürzeren Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse wird die Fluid Mud Bildung mit regelmäßigen Wasserinjektionen verhindert. Das erklärt die Übereinstimmung der hoch- und niederfrequenten Echolothorizonte der Längspeilungen in Abb. 36. Als in Bremerhaven noch mit konventionellen Methoden gebaggert wurde, haben sich in den Vorhäfen ebenfalls zwischen den Horizonten Abstände von rd. 3 m eingestellt (NASNER, 1997).

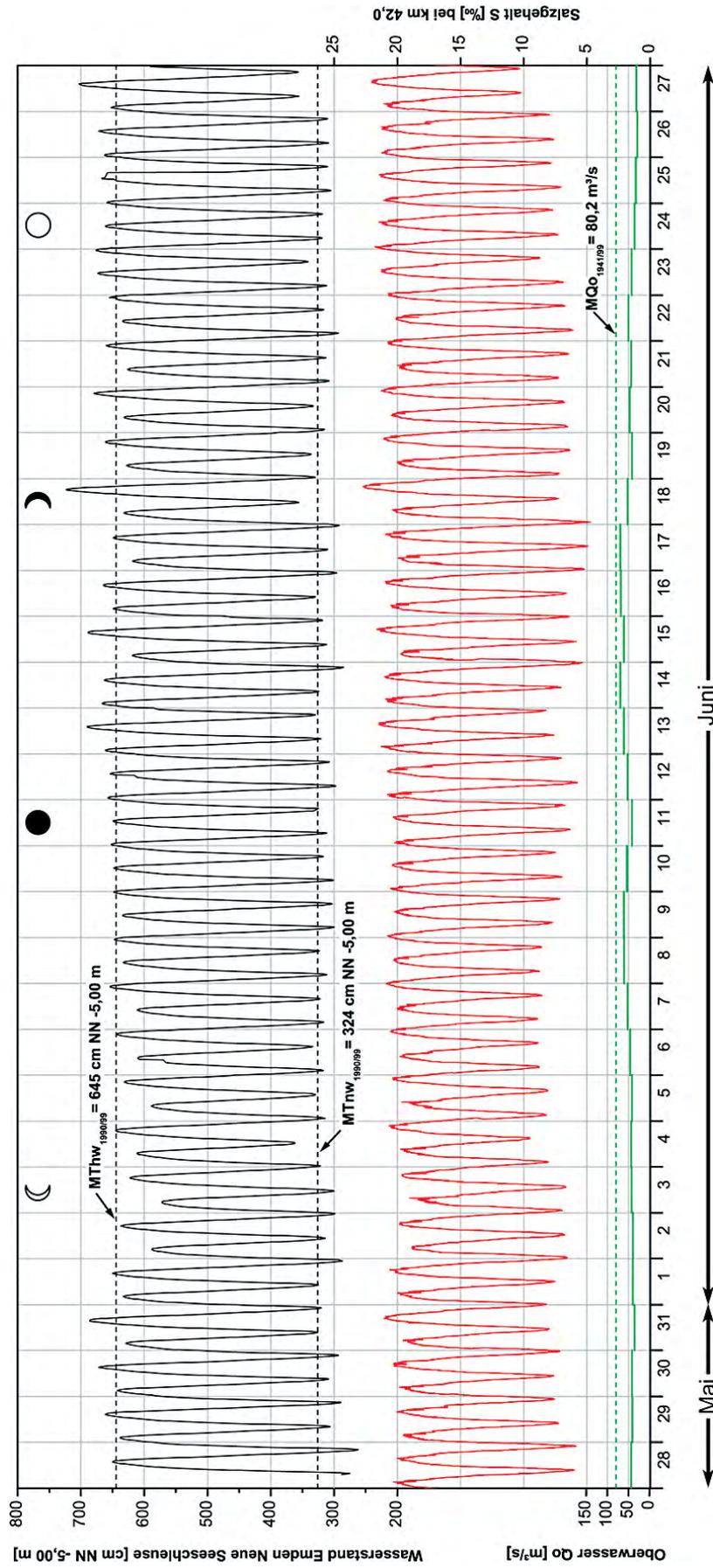


Abb. 33: Tidewasserstände am Pegel Emden Neue Seeschleuse sowie Salzgehalte der Ems bei km 42 vom 28.5. bis 27.6.2002

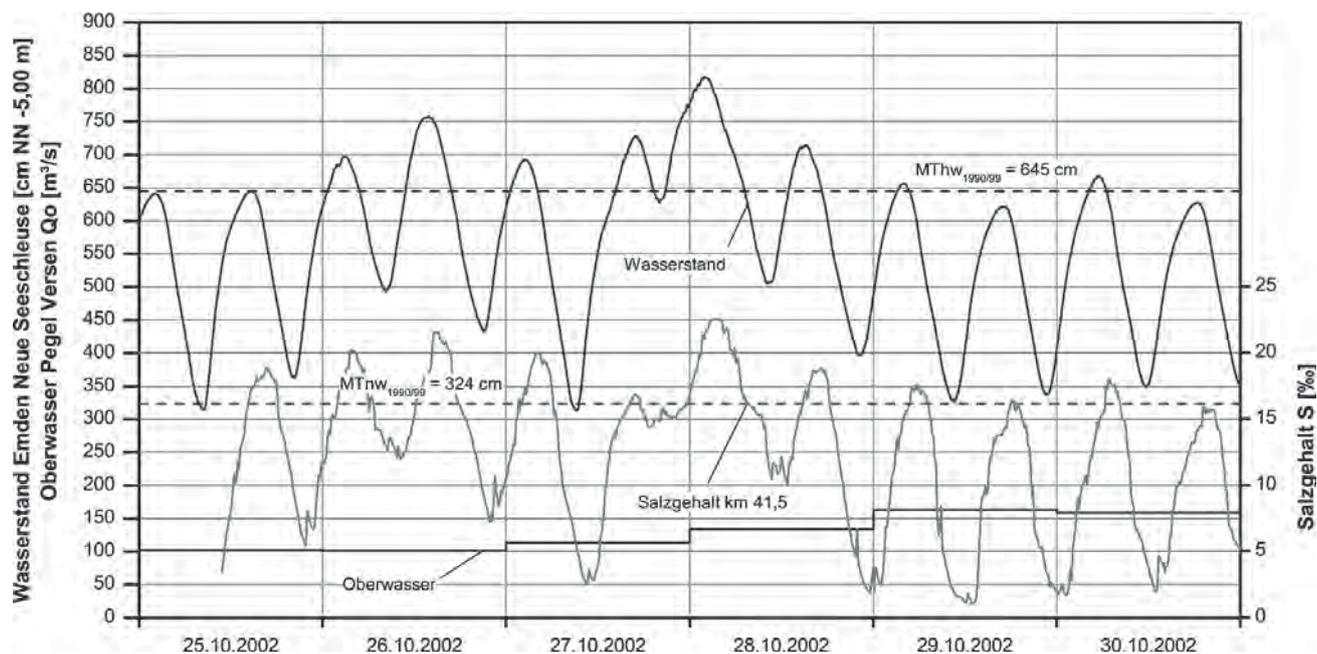


Abb. 34: Salzgehalte vor dem Emden Vor- und Außenhafen im Verlauf der Sturmflut vom 27./28.10.2002

– Salzgehalte bei Flutstrom

Die Salzgehaltsveränderungen in der Ems sowie dem Emden Vor- und Außenhafen sind beispielhaft für geringes und erhöhtes Oberwasser ($Q_o = 43 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_o = 140 \text{ m}^3/\text{s}$) bei den Springtiden vom Juli 2000 und März 2001 in Abb. 37 dargestellt.

In Übereinstimmung mit den Untersuchungen für Bremerhaven sind während der Niedrigwasserstände auch in der Ems niedrigere Salzgehalte zu verzeichnen als im Vor- und Außenhafen (Messung 1 in Abb. 37). Bemerkenswert ist das starke Gefälle innerhalb des rd. 1400 m langen Außenhafens von etwa $\Delta S = 10 \text{ ‰}$ bei niedrigem Oberwasser. Gleichzeitig ist erkennbar, wie sich die Salzkonzentrationen im Vor- und Außenhafen durch die bis nach Thw andauernden Dichteströmungen phasenverschoben an die der Ems annähern.

Das horizontale Salzgehaltsgefälle zwischen Ems und Hafen kehrt sich in der dritten Stunde nach T_{nw} um (Messung 2 in Abb. 37) bei insgesamt geringer werdenden Vertikalgradienten der Salzgehaltsprofile.

Ab $T^{1/2w}$ werden über die sohlennahen Walzenströmungen die Dichteströmungen ausgelöst. Abb. 37 veranschaulicht, wie sich damit die vertikalen Salzgehaltsgefälle bei den Profilen im Hafensbereich wieder verstärken. Mit diesem Vorgang ist die Zunahme der absoluten Salzgehalte bis zum Eintritt des Tidehochwassers verbunden. Außerdem geht aus Abb. 37 die phasenverschobene Erhöhung der Salzgehalte innerhalb des Hafens zwischen den äußeren (Position 3 und 4) und inneren Messstellen (Position 1 und 2) hervor.

Trotz der wegen des höheren Oberwassers insgesamt geringeren Salzkonzentrationen im März 2001 sind die Horizontal- und Vertikalverteilungen bei T_{nw} und Thw (Abb. 37, 1 und 3) in sich vergleichbar. Mit den Profilen der mittleren Messung 2 wird die sich bei $T^{1/2w}$ vollziehende Umkehrung des Dichtegefälles zwischen Vorhafen und Ems aufgezeigt. Die Julimessung 2000 wurde dabei zu einem späteren Tidezeitpunkt aufgenommen als die vom März 2001 (Abb. 37 Mitte).

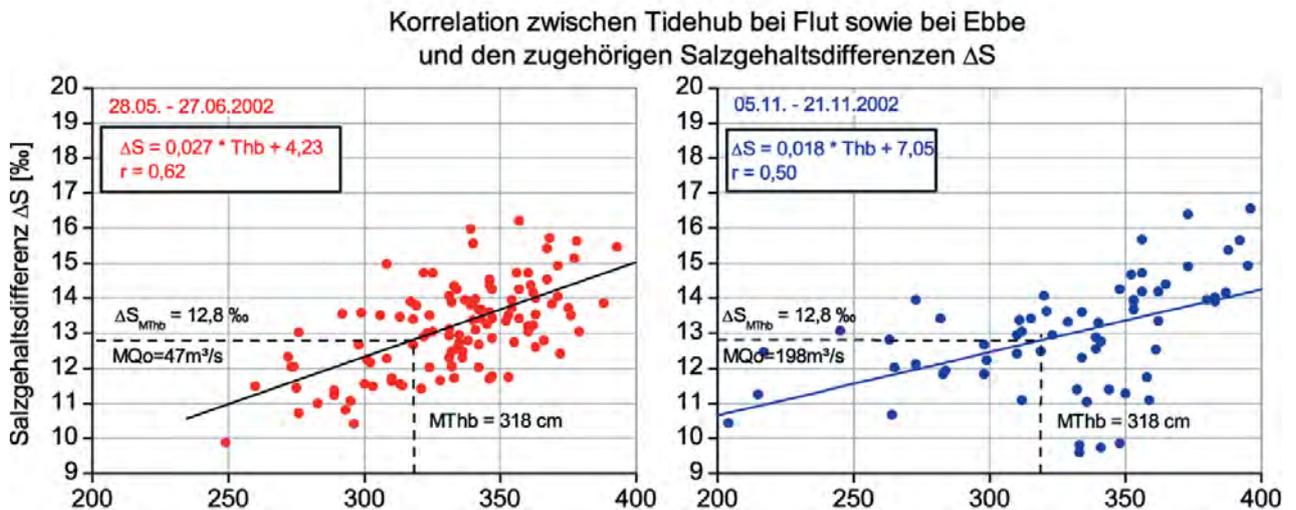
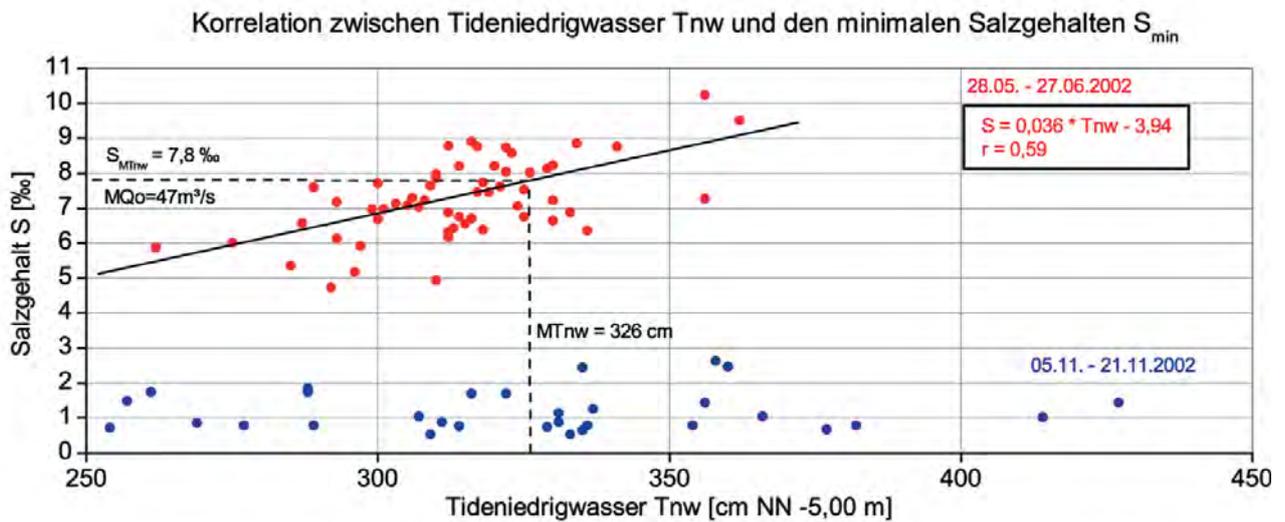
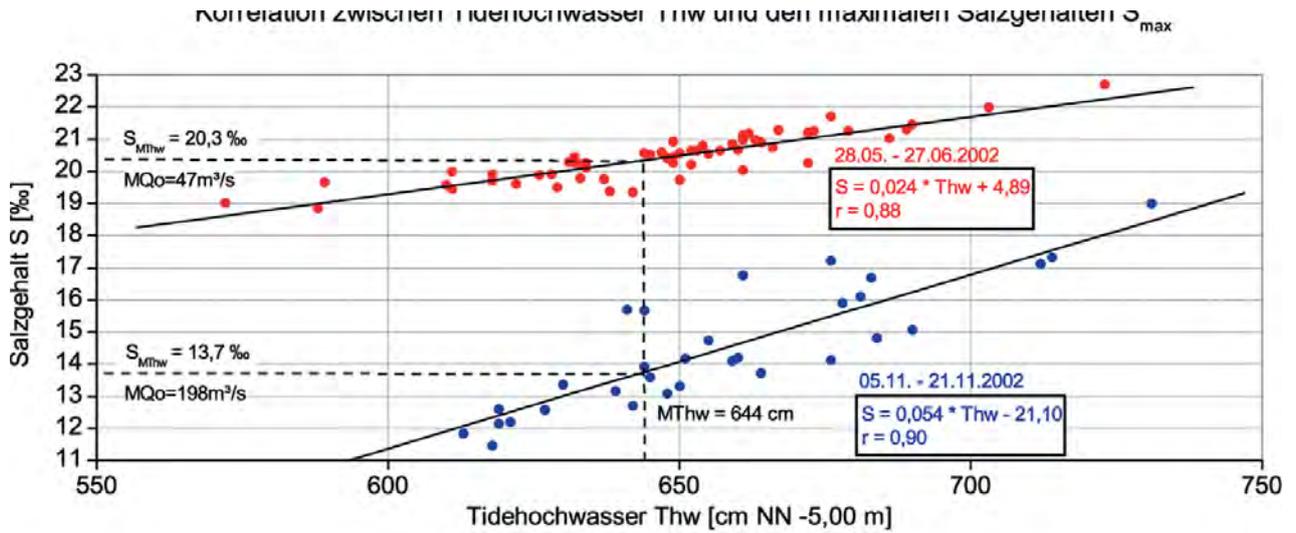


Abb. 35: Zusammenhang zwischen Thw , Tnw , Thb und S bei Ems-km 42 für verschiedene Oberwasserverhältnisse

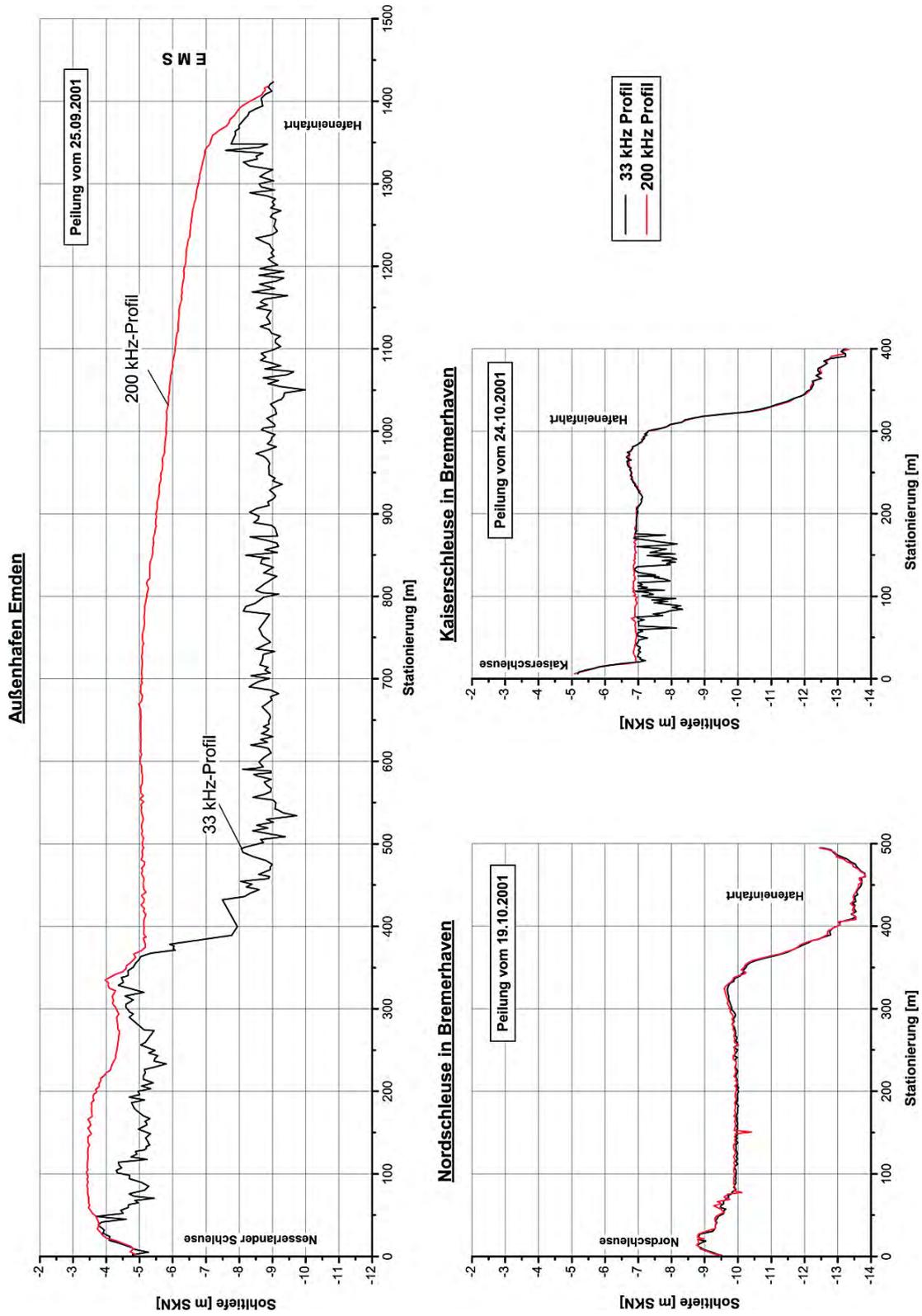


Abb. 36: Längsprofile im Emdener Außenhafen und den Vorhäfen in Bremerhaven

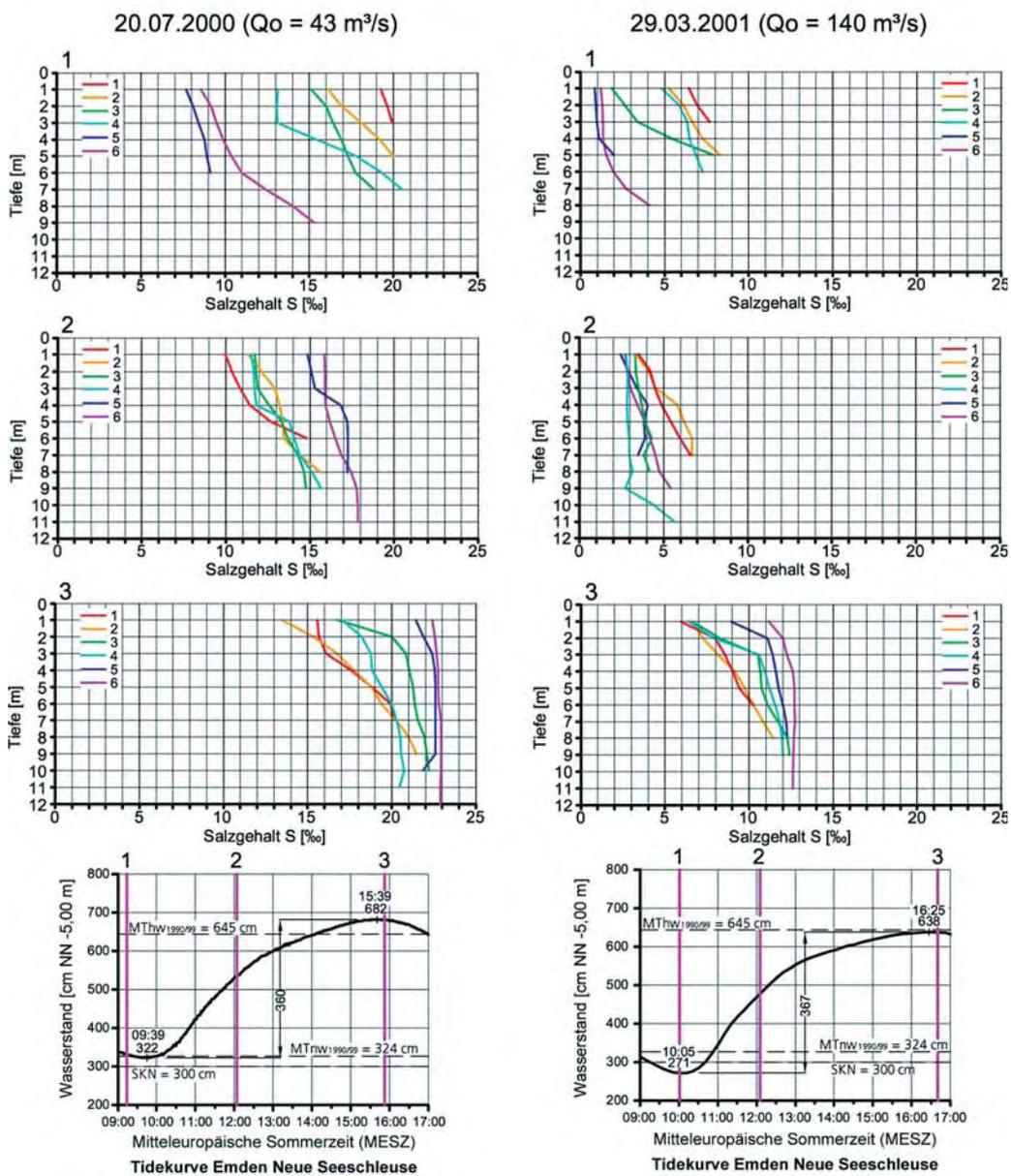
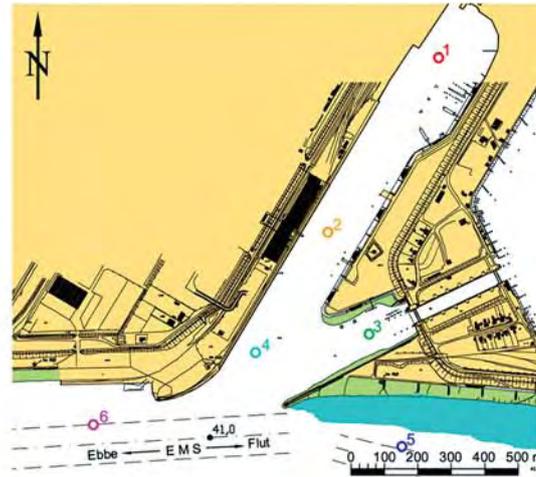


Abb. 37: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

– Salzgehalte bei Ebbestrom

Die bei Nipptiden im Juli 2000 ($Q_0 = 47 \text{ m}^3/\text{s}$) und März 2001 ($Q_0 = 199 \text{ m}^3/\text{s}$) ausgeführten Messungen vervollkommen das für die Flutströmungen aufgezeigte Bild (Abb. 38).

Bei Tidehochwasser sind die Salzgehalte in der Ems merklich höher als im Vorhafen (Messung 1, Abb. 38). Bei Tideniedrigwasser (Messung 3, Abb. 38) wurde, wie bei der Flutmessung im Juli 2000, ein horizontales Gefälle von rd. $\Delta S = 10 \text{ ‰}$ zwischen Position 1 und der Ems registriert. Bei dem hohen Binnenabfluss im März 2001 betrug es etwa die Hälfte.

Die Umkehr des Horizontalgradienten vollzieht sich in der zweiten Stunde nach Thw. Ab $T^{1/2}w$ verstärkt sich das Gefälle vom Hafen zur Ems mit zunehmender Ebbedauer bzw. sich intensivierenden Dichteströmungen. Bezeichnend ist wieder das besonders starke horizontale Gefälle bei Tnw und geringem Q_0 . Ebenso fallen die ausgeprägten Vertikalgradienten in der Hafeneinfahrt (Position 4) bei Thw und Tnw sowie die relativ geringen Unterschiede bei Tidehalbwasser auf.

Wie für die Flutstromverhältnisse gilt auch bei Ebbestrom, dass die Salzkonzentrationen bei erhöhtem Oberwasser der Ems zwar durch die damit verbundene Verschiebung der Brackwasserzone zur Außenems absolut geringer werden. Durch die tideabhängigen Gradienten des Salzgehaltes werden jedoch auch bei höheren Binnenabflüssen Dichteströmungen im angrenzenden Vor- und Außenhafen angeregt. Das wurde mit den Strömungsmessungen vom November 2002 (Abb. 31 und 32) nachgewiesen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die für den Dichteeffekt in den brackwasserbeeinflussten Vorhäfen der Weser und Ems maßgebenden, im Tiderhythmus veränderlichen Salzgehalte trotz der unterschiedlichen Randbedingungen miteinander vergleichbar sind. Im Emden Außenhafen kommt es dabei wegen der relativ großen Länge von rd. 1400 m vor allem während der Ebbe bei niedrigen Tidewasserständen zu besonders starken Salzgehaltsgefällen zwischen dem Außenhaupt der Nesserlander Schleuse und der Ems.

6.3 Schwebstoffe

Über die tide- und oberwasserabhängige Verlagerung der Brackwasserzone in der Ems und die damit verbundenen Einflüsse auf die Schwebstoffkonzentrationen liegen verschiedenen Ausarbeitungen vor (SCHULZE, 1990; SPINGAT, 1997; SPINGAT u. OUMERACI, 2000). In Abb. 39 ist die stromaufwärtige Verlagerung der Brackwasserzone bei abnehmender Oberwasserführung ersichtlich.

Bei mittleren Oberwasserbedingungen liegt das Untersuchungsgebiet im Maximum der „Trübungszone“, die sich durch besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen auszeichnet. Bei hohen Abflüssen aus dem Binnenland wird das Zentrum in das Tidegebiet unterhalb von Emden verlagert. Insgesamt gesehen sind in der Ems bei Emden erheblich höhere Schwebstoffkonzentrationen vorhanden als in der Weser bei Bremerhaven.

– Schwebstoffe bei Flutstrom

Die mit der mobilen Sonde während der Springtide vom 20. Juli 2000 gemessenen Schwebstoffkonzentrationen sind in Abb. 40 dargestellt.

Gegenüber den Vorhäfen in Bremerhaven führt die bedeutend größere Länge des Emden Außenhafens, der Sohl sprung oberhalb der Hafeneinfahrt sowie die anstehende, stabile Fluid Mud Lage zu anderen Schwebstoffverhältnissen im Tideablauf.

Im inneren Außenhafen wird das Schwebstoffgeschehen durch den Tide- oder Strömungseffekt nicht mehr merklich beeinflusst (Abb. 40, Position 1). Auch durch den Dich-

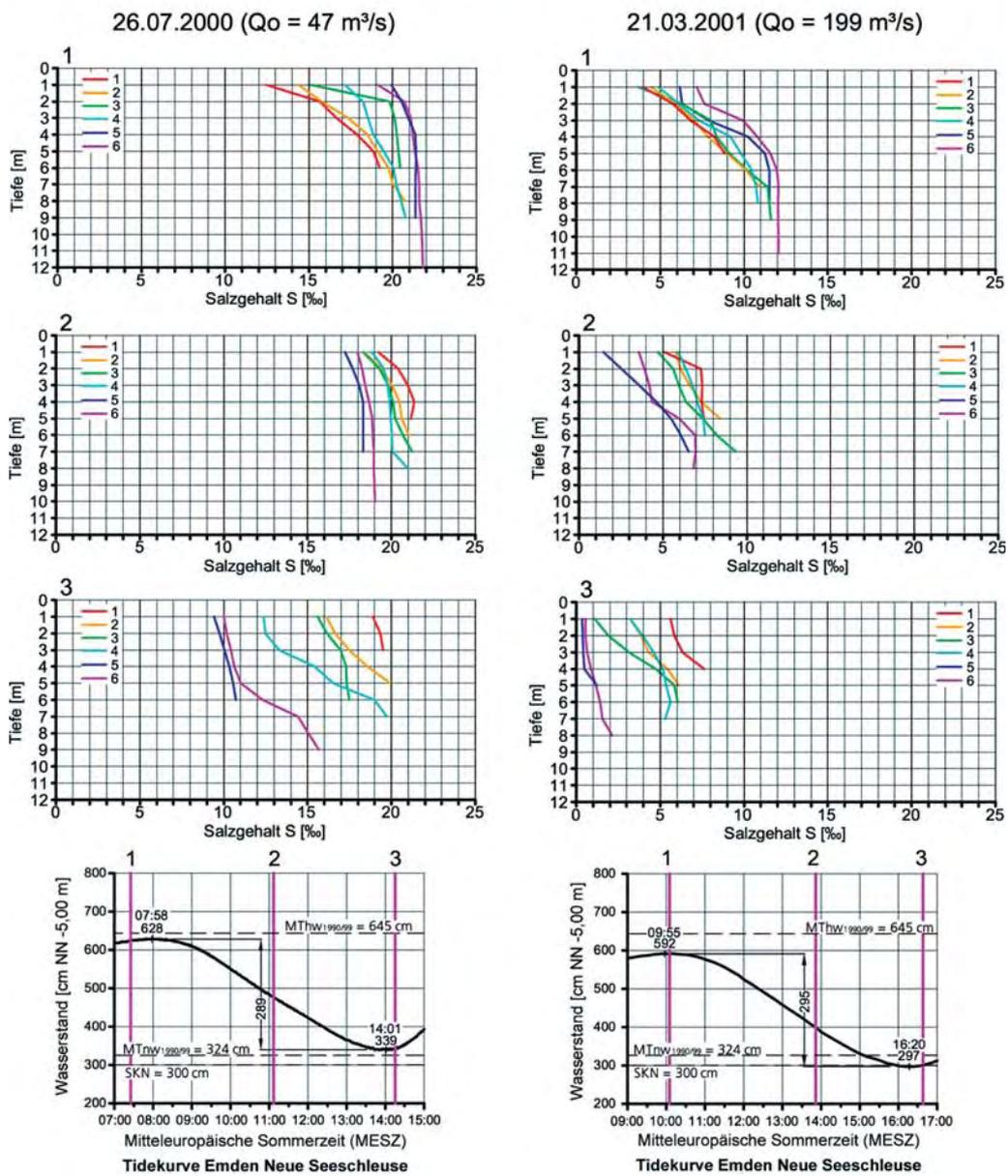
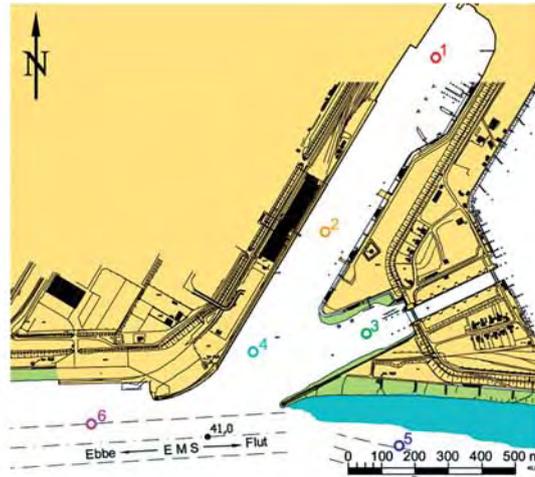


Abb. 38: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens bei unterschiedlichen Oberwasserbedingungen

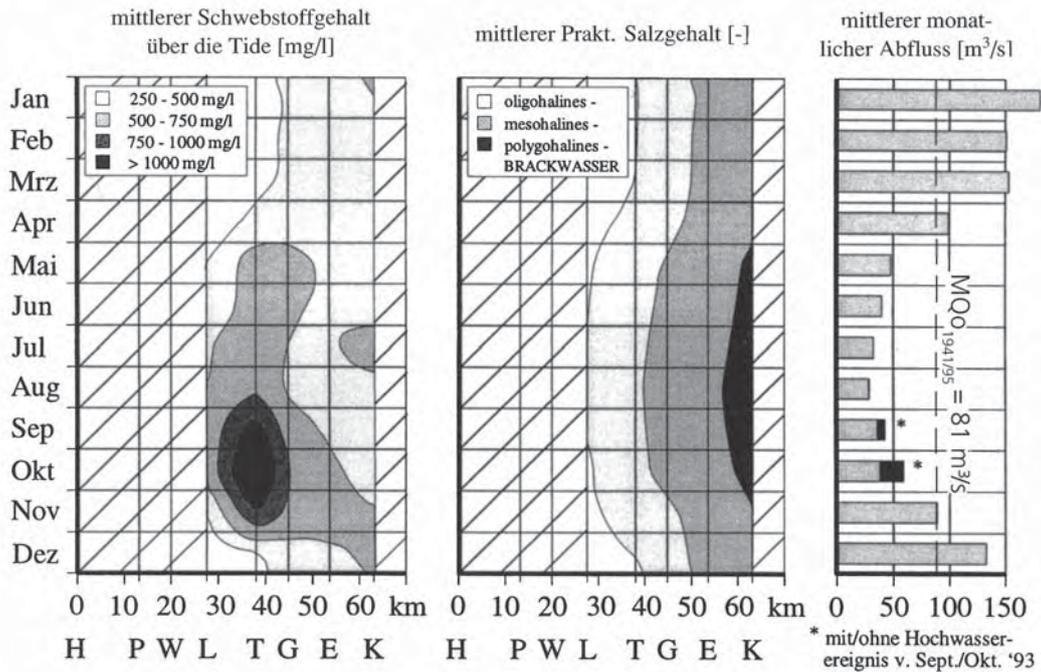


Abb. 39: Trübungs- und Brackwasserzone bei mittleren Abflussverhältnissen über den Jahreszyklus zwischen Ledamündung und Knock (nach SPINGAT, 1997) (H = Herbrum, P = Papenburg, W = Weener, L = Leda, T = Tede, G = Gede, E = Ede, K = Knock)

teffekt treten dort keine morphologisch nachhaltigen hydrodynamischen Vorgänge mehr auf. Über der sich im Gleichgewichtszustand befindlichen Fluid Mud Schicht bleiben die Feststoffkonzentrationen nahezu unverändert. Die feinen Partikel verharren im Schwebezustand bei Konzentrationen von $C_s \approx 300$ bis 500 mg/l. Die höheren Werte bei der zweiten Messung sind auf Schiffsbewegungen zurückzuführen.

Weiter außen finden strömungs- und dichtebedingte Austauschvorgänge mit der Ems statt (Pos. 2 bis 4 in Abb. 40). Während der späteren Ebbestromphase werden relativ hohe Schwebstoffkonzentrationen aus der Ems an der Wasseroberfläche entlang der Westmole in den Hafen transportiert (vgl. Abb. 32). Dieser Vorgang hält bis zur Strömungsumkehr in der Ems an (Messung 1 und 2 in Abb. 40). Zur Kenterphase kommt es vorübergehend zu deutlich geringeren Schwebstoffkonzentrationen in der Ems.

Während der Flutstromphase erhöht sich die Feststofffracht im Tidestrom besonders im flacheren Wasser oberhalb des Sohlsprungs (Abb. 40, Messung 3 und 4). Der sich bei Tidehalbwasser im tiefen Wasser verstärkende Energieeintrag über die Walzen- und Dichteströmungen entlang der Ostmole (vgl. Abb. 27, Messung 2) führt zunächst dort zur Sedimentanreicherung des Wasserkörpers. Dabei handelt es sich offenbar mehr um die Remobilisierung von Feststoffen, weil das Wasser im Emdor Vor- und Außenhafen bereits mit Schwebstoffen gesättigt ist.

Mit den sich nach $T^{1/2}w$ verstärkenden Dichteströmungen erhöhen sich die Schwebstoffkonzentrationen im Vor- und Außenhafen bis zu $C_s \approx 2000$ mg/l (Abb. 40, Messung 4, Position 2 und 3).

Gleichzeitig werden in den oberen Wasserschichten entsprechend hohe Konzentrationen durch den Dichtestromeffekt in die Ems zurücktransportiert (Messung 4, Position 4 in Abb. 40). Aufgrund der Sättigung des Außenhafens mit Schwebstoffen und dem damit vorhandenen „Gleichgewichtszustand“ bleibt die Feststoffbilanz gegenüber den Vorhäfen in

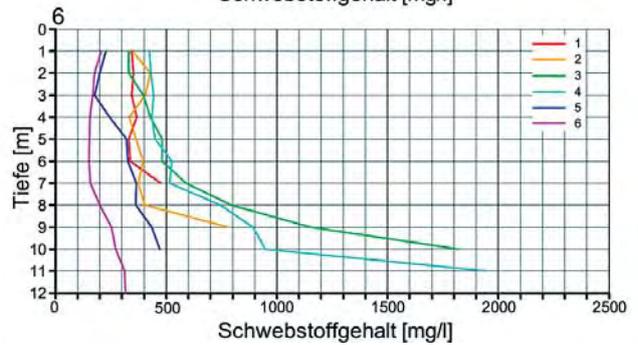
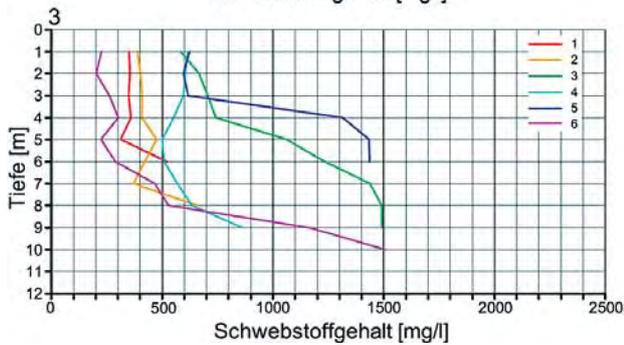
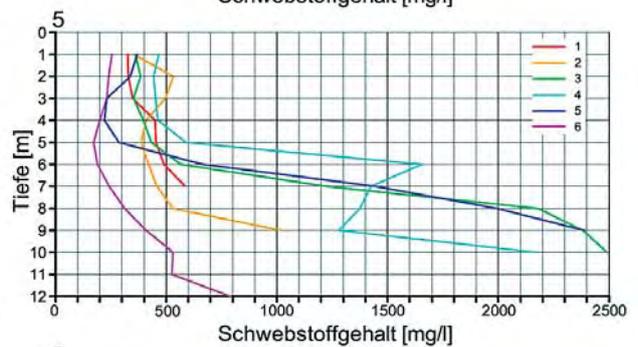
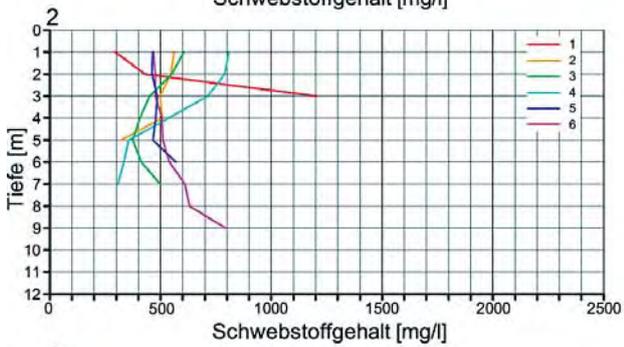
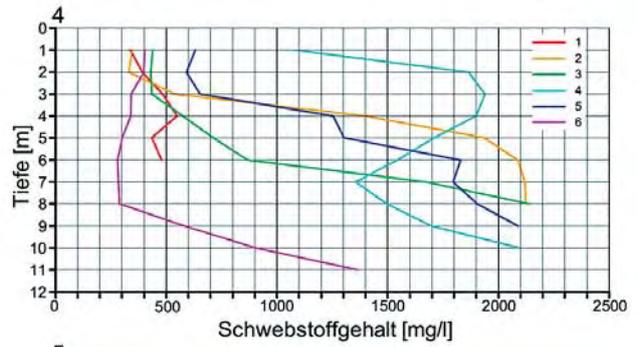
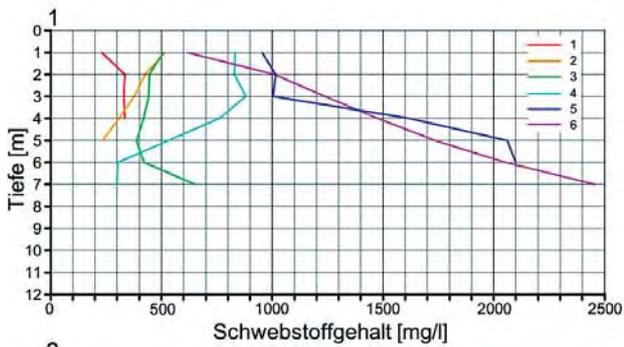
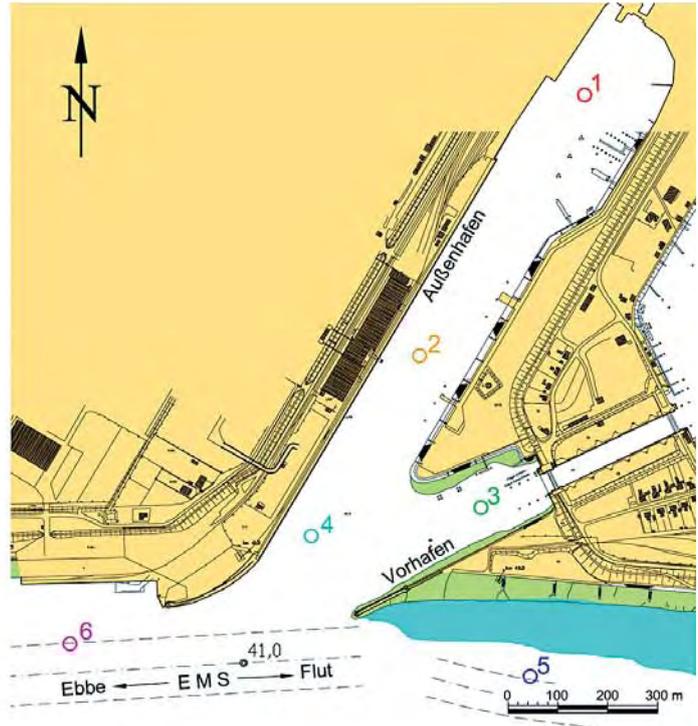
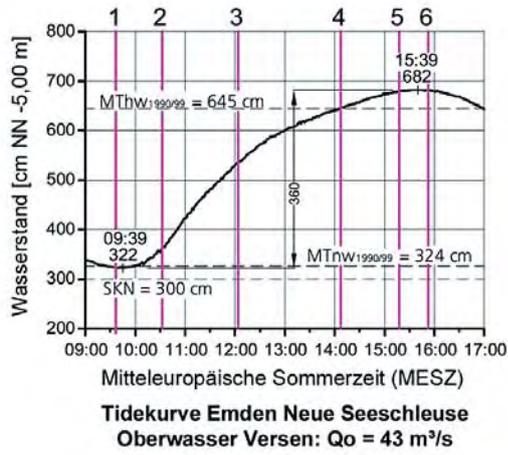


Abb. 40: Schwebstoffgehalte im Bereich des Emdner Vor- und Außenhafens, Flutmessung am 20.7.2000

Bremerhaven im Tideablauf mehr ausgeglichen. Die hohen Konzentrationen sind eher auf die Remobilisierung des vorhandenen Materials im Bereich des hochfrequenten Peilhizontes zurückzuführen. Die hydrodynamisch bedingten Austauschvorgänge finden zwischen dem äußeren Hafeneinfahrtbereich und der Ems statt.

Zum Eintritt des Thw beruhigt sich die Situation in der Ems und zeitverzögert auch im Vor- und Außenhafen (Messung 5 und 6 in Abb. 40).

– Schwebstoffe bei Ebbestrom

Die bei dem Nipptidefall vom 26. Juli 2000 gemessenen Trübungen sind in Abb. 41 aufgetragen.

Die Schwebstofffrachten erhöhen sich in der Ems nach der Flutstromkenterung kontinuierlich bis zum Tideniedrigwasser (Abb. 41). Dem Vertikalgradienten der Ebbeströmungen entsprechend und aufgrund der unterschiedlichen Wassertiefen stellen sich oberhalb der Hafeneinfahrt sehr viel höhere Konzentrationen ein als unterhalb davon.

Im Vor- und Außenhafen wurden bis Tidehalbwasser (Abb. 41, Messung 3) an allen Positionen relativ geringe Schwebstoffkonzentrationen von $C_s = 200$ bis 300 mg/l festgestellt.

In der zweiten Ebbestromphase führen die Strömungs- und Dichteeffekte (vgl. Abb. 32) zu den Austauschvorgängen zwischen der Ems und dem angrenzenden Hafeneinfahrtbereich. In den oberen Wasserschichten (Position 4, Abb. 41) werden zunehmend Feststoffe in den Hafen eingetragen. Mit den zur Ems gerichteten Dichteströmungen in den tieferen Wasserschichten findet der Rücktransport zur Ems statt (Position 3, Abb. 41). Besonders ausgeprägt sind die entgegengesetzt verlaufenden Schwebstoffverteilungen kurz nach Tideniedrigwasser (Abb. 41, Messung 6).

Im inneren Außenhafen (Position 1 und 2) sind die hydrodynamischen Vorgänge offenbar von untergeordneter Bedeutung. Die relativ hohen Feststoffkonzentrationen sind dort auf die sehr geringen Sinkgeschwindigkeiten der Partikel zurückzuführen.

– Dauermessungen

Die Aanderaa-Sonden messen die Trübung des Wassers mit rückstreuendem Infrarotlicht. Dazu senden Dioden Licht aus, das von den Feststoffpartikeln reflektiert und von einem Infrarotdetektor aufgefangen wird. Die Trübung wird in NTU-Einheiten (Naphelometric Turbidity Units) gemessen. Zum besseren Verständnis und Vergleich wurden die NTU-Werte in Schwebstoffgehalte C_s [mg/l] umgerechnet.

Bei der Messung vom Frühjahr 2002 wurden die Sonden des NHA-Ems-Dollart außerhalb des Fahrwassers, ober- und unterhalb des Emder Außenhafens bei Strom-km 40 und 42 ausgelegt. Die 3 Meter über Grund im 5-Minutentakt gemessenen Trübungen sind in Abb. 42 dargestellt.

In der Übersicht sind die tideabhängigen Schwankungen der Schwebstoffgehalte zu erkennen. Relativ geringe Suspensionen wurden zur Hochwasser- und besonders hohe Konzentrationen während der Niedrigwasserphasen beobachtet. Die stärkeren Turbulenzen bei km 40 sind durch den Sohlsprung zu erklären. Die geringere Wassertiefe führt zu einer turbulenteren Durchmischung als bei Strom-km 42. Das zeigt sich besonders im Rückgang der maximalen Schwebstoffgehalte bis auf $C_s \approx 1600$ mg/l während der Nipptide am 4. Juni 2002 unterhalb der Hafeneinfahrt.

Die in Abb. 43 aufgetragenen Beispiele zeigen die Schwebstoffganglinien in der Ems bei Spring- und Nipptiden vom 12. und 4. Juni 2002. Die insgesamt höheren Schwebstoffgehalte

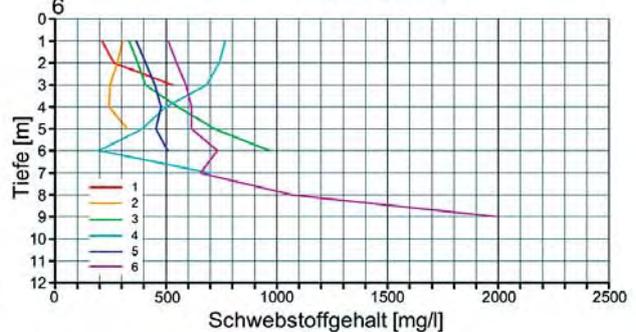
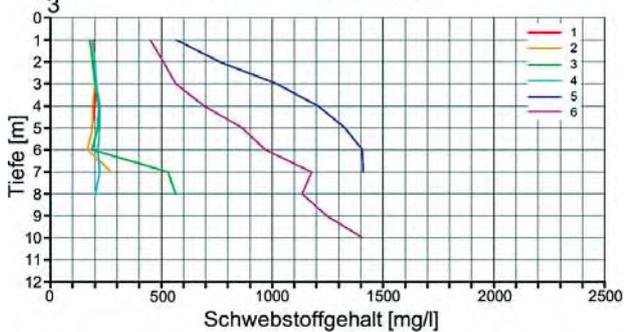
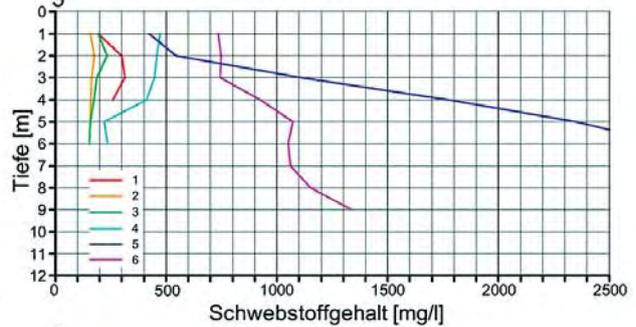
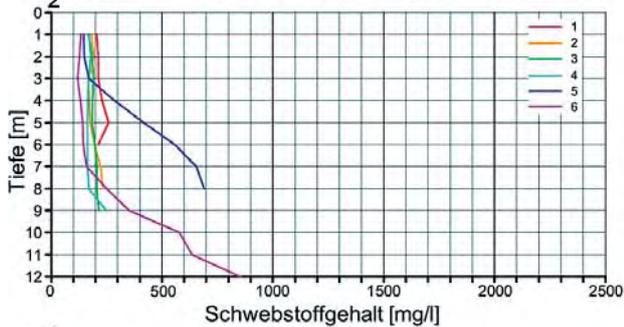
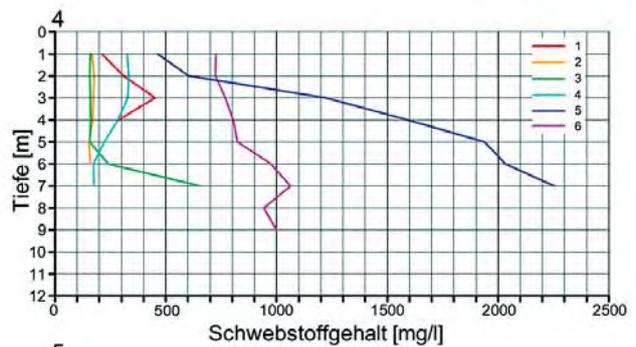
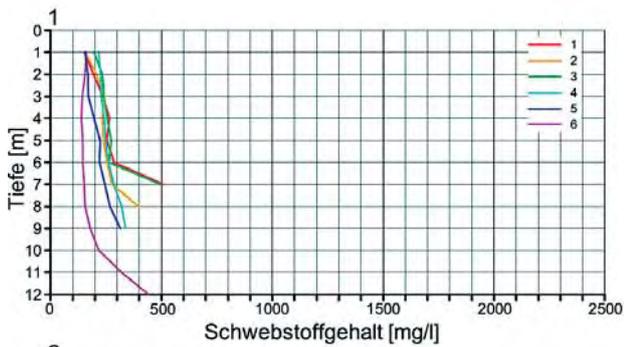
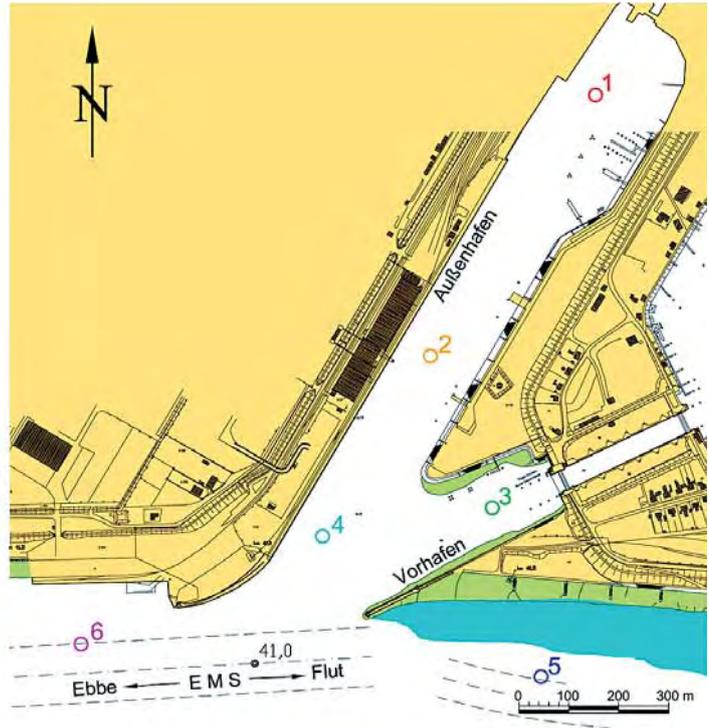
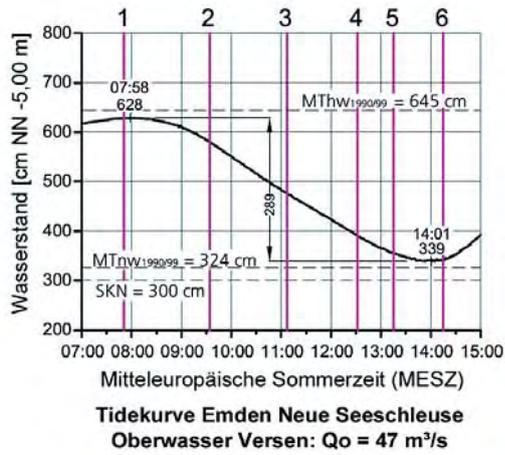


Abb. 41: Schwebstoffgehalte im Bereich des Emders Vor- und Außenhafens, Ebbmessung am 26.7.2000

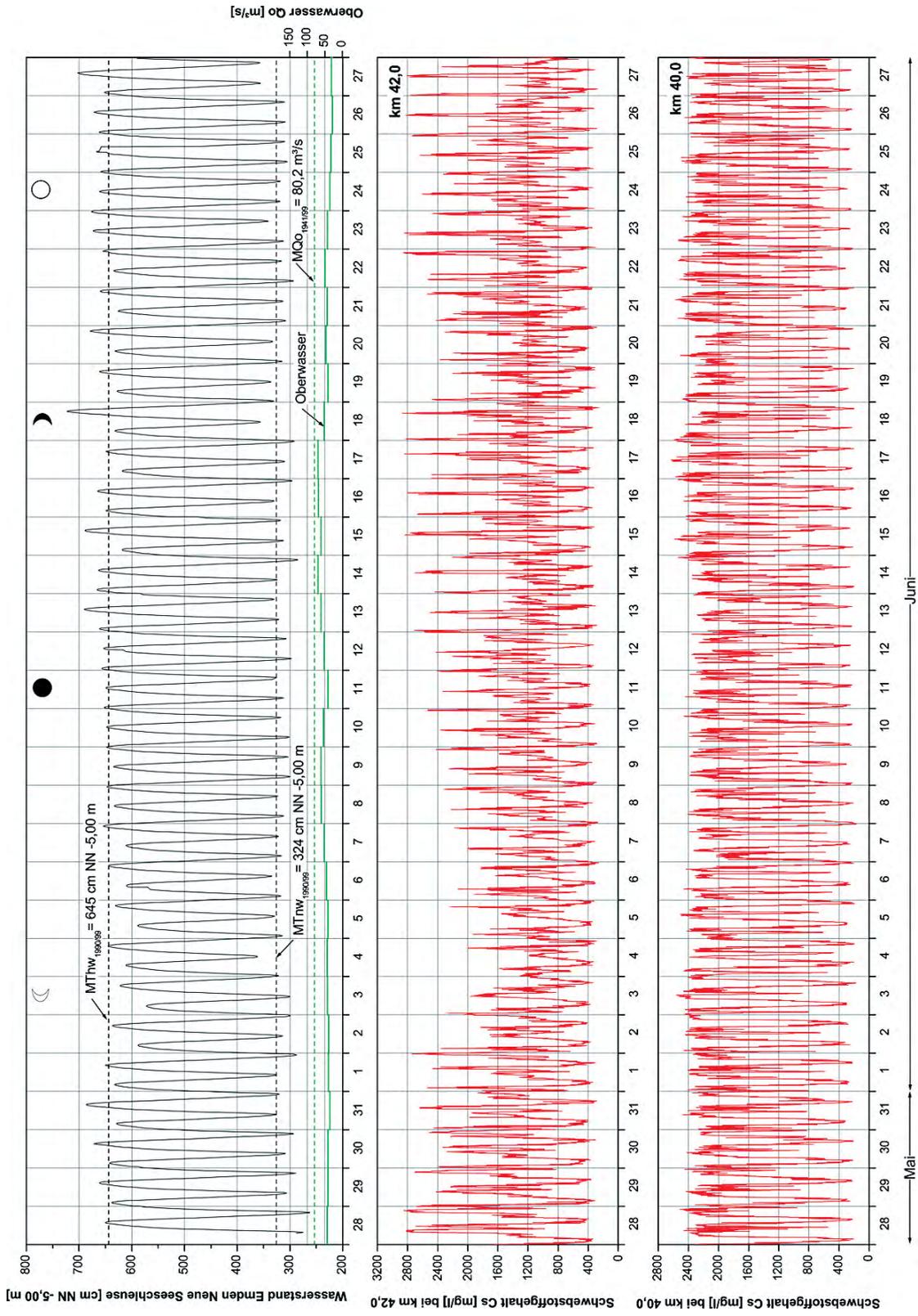


Abb. 42: Tidewasserstände am Pegel Neue Seeschleuse sowie Schwebstoffgehalte der Ems bei km 40,0 und 42,0 vom 28.5. bis 27.6.2002

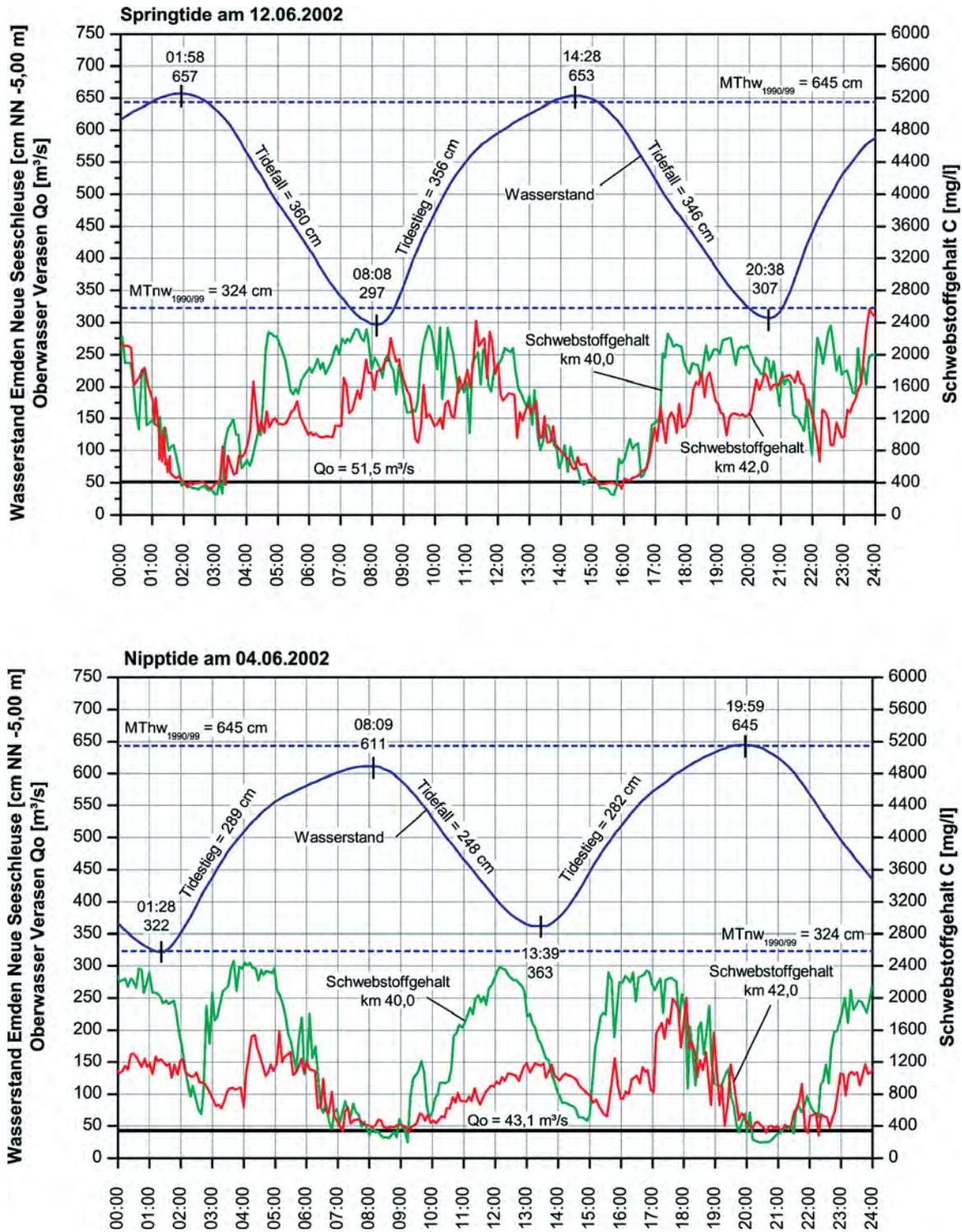


Abb. 43: Schwefstoffgehalte bei Ems-km 40 und 42 während der Springtide am 12.6.2002 und Nipptide am 4.6.2002

im flacheren Wasser bei km 40 (grüne Linien) sind bei den niedrigen Wasserständen während der Nipptide vom 4.6.2002 besonders ausgeprägt.

Grundsätzlich sind die hohen, tideabhängigen Feststoffmengen in der Ems durch die dort vorhandenen sehr feinen Sedimente bedingt. Mit abnehmendem Gradienten des Salzgehaltes und daraus resultierenden schwächeren Sohlströmungen wird die Transportkapazität

und damit die Schwebstofffracht in der zweiten Hälfte der Flutstromphase (rd. 2 Stunden vor Thw) bis zur nach Thw einsetzenden Kenterung schwächer. Die geringsten Feststoffkonzentrationen von $C_s = 400 \text{ mg/l}$ werden mit der gegenüber dem Thw verspäteten Flutstromkenterung bei der Spring- und Nipptide erreicht.

Wegen der gleichmäßigeren Strömungen während der Ebbestromphase nehmen die Schwebstoffe in der Ems bis etwa zum Eintritt des Tnw zu. Die anders gearteten hydrodynamischen Vorgänge während der Ebbestromkenterung lassen bei Springtiden nur ein schwächeres Absinken der Schwebstoffgehalte zu. Der sohlennah einsetzende Flutstrom führt zur relativ raschen Resuspension des Materials.

Bei den niedrigen Wasserständen während der letzten Ebbe- und ersten Flutstromphase wurden in der Ems maximale Schwebstoffgehalte von $C_s > 2000 \text{ mg/l}$ erreicht (Abb. 43).

Im Brackwasserbereich der Ems werden bedeutend höhere Feststoffkonzentrationen im Tiderhythmus bewegt als in der Weser bei Bremerhaven. Die höchsten Schwebstoffgehalte stellen sich in allen Vorhäfen bei Springtiden während der Flutstromphase und hohen Tidewasserständen ein.

Mit zunehmender Vorhafenlänge vermindert sich die Energie der Dichteströmungen. An den nahe zum Tidestrom gelegenen Außenhäuptern der Kaiser- und Nordschleuse führt die Kehrung der Dichteströmungen zum Tidehochwasser zu besonders starken Schwebstoffanreicherungen in den Vorhäfen. Die insgesamt gesehen vergleichsweise geringen Schwebstoffbewegungen im Emdor Vor- und Außenhafen sind durch die dort anstehende stabile Fluid Mud Lage und ausgeglichene Schwebstoffbilanz bedingt. Vor der über 1 km von der Ems entfernten Nesserlander Schleuse im Emdor Außenhafen haben Dichte- und Strömungseffekte keine merklich tideabhängigen dynamischen Auswirkungen mehr.

7. Zusammenfassende Betrachtungen

Die in situ Messungen in den brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Weser und Ems hatten zur Aufgabe, die komplexen hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge näher kennen zu lernen.

In den Schleusenvorhäfen sind die sich im Tideablauf überlagernden Walzen- und Dichteströmungen von entscheidender Bedeutung für die daraus resultierenden morphologischen Vorgänge mit den besonders hohen Auflandungen und dem daraus entstehenden verflüssigten Schlick (Fluid Mud).

Übereinstimmend haben die Untersuchungen an der Weser und Ems ergeben, dass sich die Dichteströmungen jeweils etwa ab Tidehalbwasser entwickeln und in der anschließenden Tidephase verstärken. Sie dauern über die jeweiligen Kenterungen hinaus an und lösen sich erst in der zweiten Stunde nach dem Eintritt der Scheitelwasserstände auf.

Die schwerkraftbedingten, intensiveren Sohlströmungen im Tidefluss fachen bei Flut verstärkt in den tieferen Wasserschichten der Hafeneinfahrt Walzenströmungen an. Dem Stromeffekt überlagert sich der Dichteeffekt, indem das spezifisch schwerere Wasser vom Walzenrand aus unten in den Vorhafen strömt. Trotz der in Bremerhaven um rd. 3 bzw. 7 m gegenüber der Weser höher gelegenen Vorhafensohlen gelangen die Wassermengen durch den Dichteeffekt sohlennah mit hoher Energie bis zu den rd. 460 m bzw. 300 m entfernten Außenhäuptern der Seeschleusen. Aufgrund der hydrodynamischen Kräfte kommt es an der Hafenoberfläche zur Rückströmung des Wassers zum Tidestrom.

Während der Ebbe sind die Vorgänge durch die besonders intensiven Oberflächenströmungen im Tidefluss entgegengesetzt. Das spezifisch leichtere Wasser strömt oben vom Rand

der Ebbestromwalzen aus in den Vorhafen. Mit diesem Vorgang wird als Folge das spezifisch schwerere Wasser im unteren Wasserkörper des Vorhafens zurück in den Strom verdrängt.

Die hydrodynamischen Gegebenheiten sind im Emden Vor- und Außenhafen in Emsnähe mit denen in Bremerhaven vergleichbar. Aufgrund der großen Tidewege bis zur rd. 1400 m von der Ems entfernten Nesserlander Schleuse wirken sich dort Tide- und Strömungseffekte nicht mehr aus. Das morphologische Geschehen wird nur noch geringfügig durch den Dichteeffekt beeinflusst.

Mit den Salzgehaltsmessungen ist ein verbesserter Einblick in die Strömungsvorgänge gewonnen worden. In der Flut- und Ebbestromphase prägen sich in Weser und Ems zum Tidehalbwasser die horizontalen und vertikalen Salzgradienten mit den zugehörigen brackwassertypischen Geschwindigkeitsverteilungen aus. Dadurch werden die Walzen- und Dichteströmungen in den Vorhäfen ausgelöst. Die Salzgehalte in den Vorhäfen passen sich jeweils phasenverschoben mit fortschreitender Tidedauer denen im Tidefluss an. Für alle Vorhäfen wurde festgestellt, dass die Salzgehalte bei Tidehochwasser im Strom höher und bei Tideniedrigwasser geringer als in den Vorhäfen sind. In dem rd. 1400 m langen Emden Außenhafen sind die Salzgehaltsgefälle bei Tnw und Thw im Vergleich zu den relativ kurzen Vorhäfen in Bremerhaven sehr viel deutlicher ausgeprägt. Die horizontalen Gefälle kehren sich nach den Strömungskenterungen in der zweiten Stunde nach Thw bzw. Tnw um. In dieser Zeit lösen sich auch die tidebedingten Dichteströmungen in den Vorhäfen auf.

Die Verhaltensmuster der tideabhängigen Strömungs- und Salzgehaltsverhältnisse können für die untersuchten Vorhäfen in Bremerhaven und Emden verallgemeinert werden. Die Verlagerung der Brackwasserzone durch höheres Oberwasser führt in den Tideflüssen der Weser und Ems zu absolut geringeren Salzgehalten. Die tideabhängigen Differenzen und Gradienten mit den daraus resultierenden Strömungs- und Dichteeffekten bleiben für einen relativ großen Schwankungsbereich der Binnenabflüsse erhalten. Die hydrodynamischen Vorgänge sind bei Springtiden durch den höheren Energieeintrag stärker ausgeprägt als zur Nipptidezeit.

Die Überlagerung der Strömungs- und Dichteeffekte führt zu den besonderen morphologischen Gegebenheiten in den brackwasserbeeinflussten Vorhäfen. In der Flutstromphase sind die Schwebstoffanreicherungen in den Vorhäfen wegen des sohlennahen Energieeintrags in den Vorhäfen höher als während der Ebbestromphase.

Mit den in Bremerhaven ausgeführten in situ Messungen wurde nachgewiesen, wie in den Vorhäfen vorhandene Sedimente durch die Dichteströmungen bei Flut resuspendiert und gleichzeitig zusätzliche Feststoffmengen eingetragen werden. Vor den nahe der Einfahrt gelegenen Außenhäuptern der Nord- und Kaiserschleuse wird das Wasser zum Ende der Flutstromphase bis nach Tidehochwasser besonders stark mit Schwebstoffen angereichert. Die damit verbundene positive Feststoffbilanz wird mit den entgegengesetzt gerichteten Walzen- und Dichteströmungen während der Ebbestromphase nicht ausgeglichen.

In Bremerhaven werden drohende Fluid Mud Bildungen durch den Einsatz eines Wasserinjektionsgerätes verhindert. Diese Unterhaltungsmethode hat sich bei den relativ kurzen Vorhafenlängen und den günstigen Gefälleverhältnissen zur Wesersohle gut bewährt. In Kenntnis der Strömungsvorgänge in den Vorhäfen ist es möglich, die Einsatzzeiten der Wasserinjektionen tideabhängig zu optimieren.

Bei der sich im Gleichgewicht befindlichen, stabilen Fluid Mud Lage im Emden Außenhafen ist der Wasserkörper mit Schwebstoffen gesättigt. Es findet deshalb mehr ein Austausch zwischen Ems und angrenzendem Hafenbereich statt. Die Feststoffbilanz ist dort im Tideablauf ausgeglichener als in Bremerhaven. Durch die Dichteströmungen werden die vorhandenen Sedimente im äußeren Hafenbereich am stärksten in der zweiten Hälfte der Flutstromphase remobilisiert. Die Schwebstoffkonzentrationen verringern sich wieder durch Se-

dimentation mit sich abschwächender Dichteströmung. Die während der Ebbedauer relativ hohen Feststoffgehalte im Wasser des Emdener Außenhafens bis vor dem Außenhaupt der Nesserlander Schleuse sind auf die besonderen Eigenschaften der Brackwassersedimente in der Ems zurückzuführen. Aufgrund der Koagulationsprozesse und biologischer Vorgänge handelt es sich bei den Partikeln im wörtlichen Sinn mehr um Schweb- als um Sinkstoffe. Auch bei Tideniedrigwasser findet trotz der hohen Feststoffkonzentrationen im Strom nur ein geringer Feststoffaustausch im emsnahen Bereich statt.

8. Schlussbemerkungen

Mit den in situ Untersuchungen wurde durch das vom BMBF geförderte KFKI Projekt 03 KIS 019 „Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen“ ein verbesserter Einblick in die komplexen Fließ- und Transportvorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen gewonnen. Damit sind die Voraussetzungen dafür geschaffen worden, dass die Strömungsbedingungen mit theoretischen Ansätzen und numerischen Modellrechnungen realistischer simuliert werden können.

Die Ergebnisse der in situ Untersuchungen haben ein erfreuliches Interesse in der Fachwelt hervorgerufen. Das mag die Liste der Vorträge und Veröffentlichungen im Anhang zum Schrifttum bekunden. Diskussionen mit den Fachkollegen im In- und Ausland haben deutlich gemacht, dass die Sedimentationsprobleme nicht allein auf die norddeutschen Tidehäfen begrenzt sind. Von der PIANC wurde dazu eine international zusammengesetzte Expertengruppe gegründet (MarCom Working Group 43 „Minimising Harbour Siltation“). Der Verfasser dieses Berichts ist dankbar dafür, dass er als Mitglied dieser Gruppe die eigenen Erfahrungen und die in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen, neuen Erkenntnisse einbringen kann. Selbstverständlich ist auch der ständige Gedankenaustausch mit den Kollegen für künftige Aufgaben von besonderem Wert.

Es werden weltweit Anstrengungen unternommen, den Unterhaltungsaufwand in Tidehäfen zu optimieren bzw. den Feststoffeintrag zu minimieren. Aus diesem Anlass besteht dringender, weiterer Forschungsbedarf, der in einem Anschlussvorhaben abzarbeiten wäre. Zur Verbesserung mathematischer Simulationen sind zusätzliche in situ Messungen in den Nahbereichen der Vorhäfen – oberhalb und unterhalb im Tidestrom – erforderlich. Die salzwasserabhängigen Strömungen und Schwebstofffrachten im angrenzenden Tidestrom müssen dazu noch untersucht und analysiert werden. Zur Verallgemeinerung der bisher gewonnenen Ergebnisse ist beabsichtigt, die Vorhafenmessungen auf zusätzliche Reviere auszuweiten.

Von besonderem Interesse ist die Frage nach der Sinkgeschwindigkeit der von den Strömungen in die Brackwasserhäfen eingetragenen Sedimente. Bisher gibt es keine quantitativen Aussagen über die unterschiedlichen Feststoffanteile und ihre Zusammensetzungen innerhalb der Fluid-Mud-Schicht. Es fehlen vor allem Kenntnisse über die Sedimenteigenschaften wie Korngrößen, mineralische, biogene Anteile und das Absetzverhalten. Die Analyse der Dynamik hochkonzentrierter Suspensionen im Tidestrom und Vorhafen ist eine unabdingbare Voraussetzung, um zuverlässige Aussagen und Maßnahmen zur Minimierung von Sedimentationen treffen zu können.

Die in dem abgeschlossenen Projekt erzielten Ergebnisse waren nur durch die gute Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Hafenamts Ems-Dollart und bremenports möglich. Dafür sei an dieser Stelle ebenso gedankt wie dem BMBF und Projektträger für die reibungslose Abwicklung des Vorhabens nach erfolgter Bewilligung. Zu erwähnen sind auch

die sehr wertvollen Hinweise und Anregungen der KFKI-Projektgruppenmitglieder. Schließlich ist noch anzumerken, dass die mit der Durchführung des Vorhabens betrauten Mitarbeiter des Instituts für Wasserbau, die Herren Pieper, Torn und Kuhlenkamp wesentlich zum Gelingen des Projekts beigetragen haben. Ihre Einsatzbereitschaft und Erfahrung bei den Messungen in der Natur, der Aufbereitung umfangreicher Daten und Dokumentation der Ergebnisse bedarf ganz besonderer Anerkennung.

9. Schriftenverzeichnis

- 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. u. HAAR, S.: Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken – Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1995 – Gewässerkundliche Studie Nr. 15, Strom- und Hafenaufbau Hamburg, Referat Gewässerkunde, 1996.
- DASCH, W. u. WURPTS, R.: Isovisken als Beurteilungsparameter, Hansa 9/1999.
- DE BROE, E.: Controlling Sediment Accumulation Behind the Locks of Zandvliet and Berendrecht, PIANC, Bull. No. 112, 2003.
- FÜHRBÖTER, A. u. WITTE, H.-H.: Über Sedimentationen in Tidehäfen, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 43. Band, Schifffahrtsverlag HANSA, Hamburg, 1988.
- GORDON, R. L.: Acoustic Doppler Current Profiler, Principles of Operation, A Practical Primer, RD Instruments, 1996.
- GRABEMANN, I.: Die Trübungszone im Weser-Ästuar: Messungen und Interpretation, GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht GmbH, GKSS, 91/E/15 Geesthacht, 1992.
- GREISER, N.; GRESIKOWSKI, S. u. HARMS, H.: Feststofftransport und Verschlickung im Emdrer Hafen, Universität Hamburg, Institut für allgemeine Botanik – Abteilung Mikrobiologie, Mai 1992, unveröffentlicht.
- NASNER, H.: Sedimentationsverhältnisse im Tidegebiet von Bremerhaven, 1989, unveröffentlicht.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen, Die Küste, Heft 53, 1992.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen Phase 2, Die Küste, Heft 59, 1997.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Weser- und Emsgebiet 1999, Hildesheim, 2001.
- SCHULZE, M.: Zur Dynamik des Schwebstoffhaushaltes in Brackwassergebieten am Beispiel des Ems-Ästuars, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Mitteilungen, Heft 108, 1990.
- SPINGAT, F. M.: Analyse der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone eines Tideflusses, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Mitteilungen, Heft 139, 1997.
- SPINGAT, F. M. u. OUMERACI, H.: Schwebstoffdynamik in der Trübungszone des Ems-Ästuars, Die Küste, Heft 62, 2000.
- VANTORRE, M.: Ship Behaviour and Control in Muddy Areas: State of the Art, Proceedings 3. Inter. Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Southampton, 1994.
- WOLTERING, S. u. VISSCHER, G.: Messungen des tideabhängigen Schwebstoffgehaltes in der Brackwasserzone der Weser bei Bremerhaven, Wasser und Boden, 50. Jahrgang, Mai 1998.
- WURPTS, R.: Zur Frage der Bestimmung der nautischen Sohle von FLUID MUD am Beispiel des Emdrer Hafens, Tagungsband HTG-Kongress 1997 Bremen, 24.–27.9.1997.
- WURPTS, R.: 15 Jahre Erfahrung mit fluid mud, Hansa 140. Jg., Nr. 9 und 10, 2003.

Vorträge und Veröffentlichungen des vom BMBF geförderten KFKI-Projektes 03 KIS 019

- NASNER, H.: Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in Brackwasserhäfen, – In situ Messungen –, Vortrag zum 7. KFKI-Seminar zur Küstenforschung am 28.10.2002 in Bremerhaven, 2002.
- NASNER, H.: In situ Messungen in Brackwasserhäfen, 4. FZK-Kolloquium am 20.3.2003 in Hannover, Proceedings Forschungszentrum Küste (FZK), 2003.

- NASNER, H.; PIEPER, R. u. TORN, P.: Optimizing Maintenance Dredging in Harbours Situated in the Brackish Zone, 13th Int. Harbour Congress, Antwerpen, Belgien vom 30.3. bis 2.4.2003, Proceedings 13th ICH, 2003.
- NASNER, H.: Dichteströmungen in Brackwasserhäfen, Hansa, 140. Jahrgang, Nr. 6, 2003.
- NASNER, H.; PIEPER, R. u. TORN, P.: Hydrodynamic and Morphological Processes in Brackish Water Harbours, 3rd International Association of Hydraulic Research (IAHR) Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Barcelona, Spanien vom 1. bis 5.9.2003, Proceedings 3rd RCEM, 2003.
- NASNER, H.; PIEPER, R. u. TORN, P.: Sedimentation and Maintenance Dredging in Bremerhaven, 6th International Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Colombo, Sri Lanka vom 15. bis 19.09.2003, Proceedings 6th COPEDEC, 2003.