

# **Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud in Brackwasserhäfen**

**03 KIS 051  
Schlussbericht**

**Hierzu: 102 Anlagen**

**Hochschule Bremen**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtwall 30  
D-28199 Bremen

Bremen, Oktober 2009

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorbemerkungen und Aufgabe</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgebiete</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Tide- und Oberwasserbedingungen</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Messungen in der Weser</b>	<b>12</b>
4.1	Bremerhaven Nordschleuse . . . . .	12
4.1.1	Strömungsverhältnisse im Tidestrom . . . . .	12
4.1.2	Salzgehalte . . . . .	23
4.1.3	Schwebstoffe . . . . .	24
4.1.4	Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen . . . . .	26
4.2	Bremerhaven Kaiserschleuse . . . . .	30
4.2.1	Strömungsverhältnisse im Tidestrom . . . . .	30
4.2.2	Salzgehalte . . . . .	39
4.2.3	Schwebstoffe . . . . .	41
4.2.4	Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen. . . . .	42
4.3	Bremerhaven Doppelschleuse . . . . .	46
4.3.1	Strömungsmessungen . . . . .	46
4.3.2	Salzgehalte . . . . .	49
4.3.3	Schwebstoffe . . . . .	50
4.3.4	Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Messungen in der Ems</b>	<b>57</b>
5.1	Emder Vor- und Außenhafen . . . . .	57
5.1.1	Strömungsverhältnisse im Tidestrom . . . . .	57
5.1.2	Salzgehalte . . . . .	66
5.1.3	Schwebstoffe . . . . .	67
5.1.4	Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Messungen in der Elbe</b>	<b>73</b>
6.1	Schleusenvorhäfen am Nord-Ostsee-Kanal . . . . .	73
6.1.1	Strömungsmessungen im Neuen Vorhafen . . . . .	73
6.1.2	Strömungsmessungen im Alten Vorhafen . . . . .	76
6.1.3	Salzgehalte . . . . .	78
6.1.4	Schwebstoffe . . . . .	80
6.2	Strömungsverhältnisse im Tidestrom . . . . .	82
6.3	Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Fluid Mud Untersuchungen</b>	<b>115</b>
7.1	Peilplananalysen . . . . .	115
7.1.1	Vorbemerkungen . . . . .	115
7.1.2	Bremerhaven . . . . .	115
7.1.3	Emden . . . . .	125
7.1.4	Brunsbüttel . . . . .	128
7.2	Bodenproben . . . . .	130
7.2.1	Vorbemerkungen . . . . .	130

7.2.2	Bremerhaven . . . . .	130
7.2.3	Emden . . . . .	135
7.2.4	Brunsbüttel . . . . .	135
7.3	Eigenschaften von Fluid Mud . . . . .	140
7.3.1	Vorbemerkungen . . . . .	140
7.3.2	Bremerhaven . . . . .	142
7.3.3	Emden . . . . .	145
7.3.4	Brunsbüttel . . . . .	149
7.4	Zusammenfassende und ergänzende Anmerkungen . . . . .	156
<b>8</b>	<b>Schlussbemerkungen</b>	<b>160</b>
	<b>Schrifttum</b>	<b>163</b>
	<b>Index</b>	<b>165</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>169</b>
	<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>173</b>

# 1 Vorbemerkungen und Aufgabe

In dem vom BMBF geförderten KFKI-Projekt 03 KIS 019 sind in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen von Bremerhaven und Emden Messungen in der Natur durchgeführt worden. Damit wurde das Ziel verfolgt, die komplexen Fließ- und Transportvorgänge besser kennenzulernen.

Die vom Institut für Wasserbau (IWA) der Hochschule Bremen aus der Natur gewonnenen Daten sind dem Franzius-Institut der Universität Hannover für ein kooperatives Forschungsvorhaben „Maßnahmen zur Minimierung von Sedimentationen im Bereich brackwasserbeeinflusster Vorhäfen“ (BMBF 03 KIS 020) zur Verfügung gestellt worden. So sollten als Grundlage für eine verbesserte Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit numerischer Modelluntersuchungen dienen.

Nach Abschluss der Projekte 03 KIS 019 und 03 KIS 020 wurde beschlossen in einem Projekt zunächst die Messungen in der Natur zu erweitern, um anschließend mit den zusätzlich zur Verfügung stehenden Daten die numerischen Modellierungen wieder aufzunehmen.

Mit diesem vom BMBF geförderten KFKI Projekt 03 KIS 051 „Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud in Brackwasserhäfen“ waren folgende Untersuchungen vorgesehen:

1. In situ Messungen in den Nahbereichen der Vorhäfen im Tidestrom.
2. Zusätzliche Messungen in Schleusenvorhäfen im Brackwasserbereich von Tideflüssen. Untersucht wurden die an der Elbe gelegenen Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals und der Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven.
3. Beprobungen und Analyse der Fluid Mud-Schichten zwischen den hoch- und niederfrequenten Horizonten. Von Interesse waren die mit der Tiefe veränderliche Dichte, Zähigkeit und Feststoffgehalt der Suspensionen. Es war die Frage zu klären, ob Fluid Mud erst in den mehr beruhigten Zonen der Vorhäfen durch anaerobe Prozesse entsteht oder bereits im Tidestrom anzutreffen ist. Um gegebenenfalls jahreszeitliche Veränderungen erfassen zu können, waren die Beprobungen mehrfach durchzuführen.

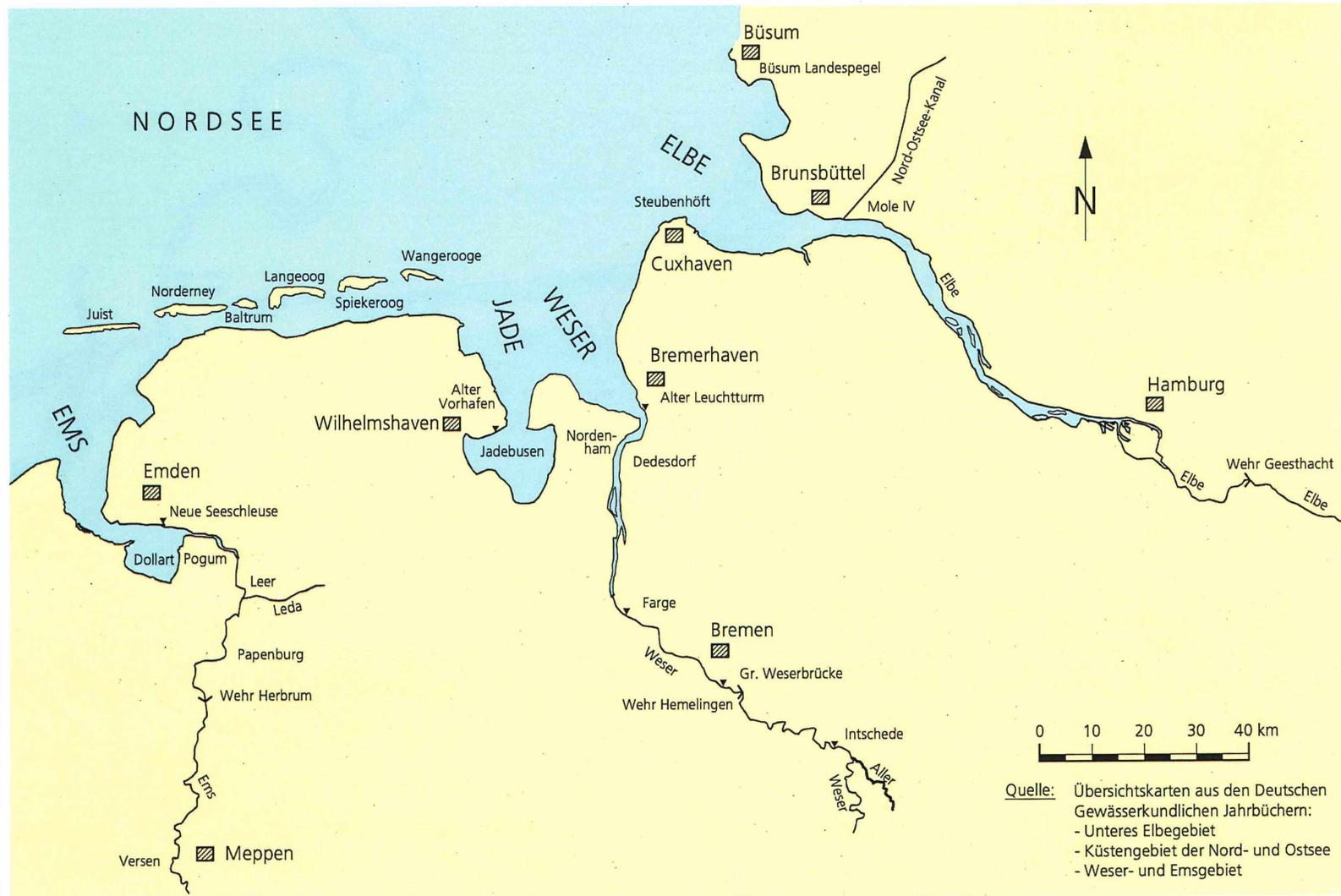
## 2 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungen wurden an der Ems, Weser und Elbe in Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel durchgeführt (Abb. 1).

Die Zufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven liegen in einem Abstand von rd. 1 km am rechten Weserufer (Abb. 2). Die Solltiefe der Weser ist in diesem Stromabschnitt auf -16,02 m NN festgelegt (Abb. 3). Die Solltiefen in den Vorhäfen betragen -12,92 m NN vor der Nord- und -8,92 m NN vor der Kaiserschleuse. Sie liegen damit 3,10 m bzw. 7,10 m höher als die Wesersohle.

Der rd. 2 km oberhalb der Kaiserschleuse gelegene Vorhafen zur Fischereihafenschleuse

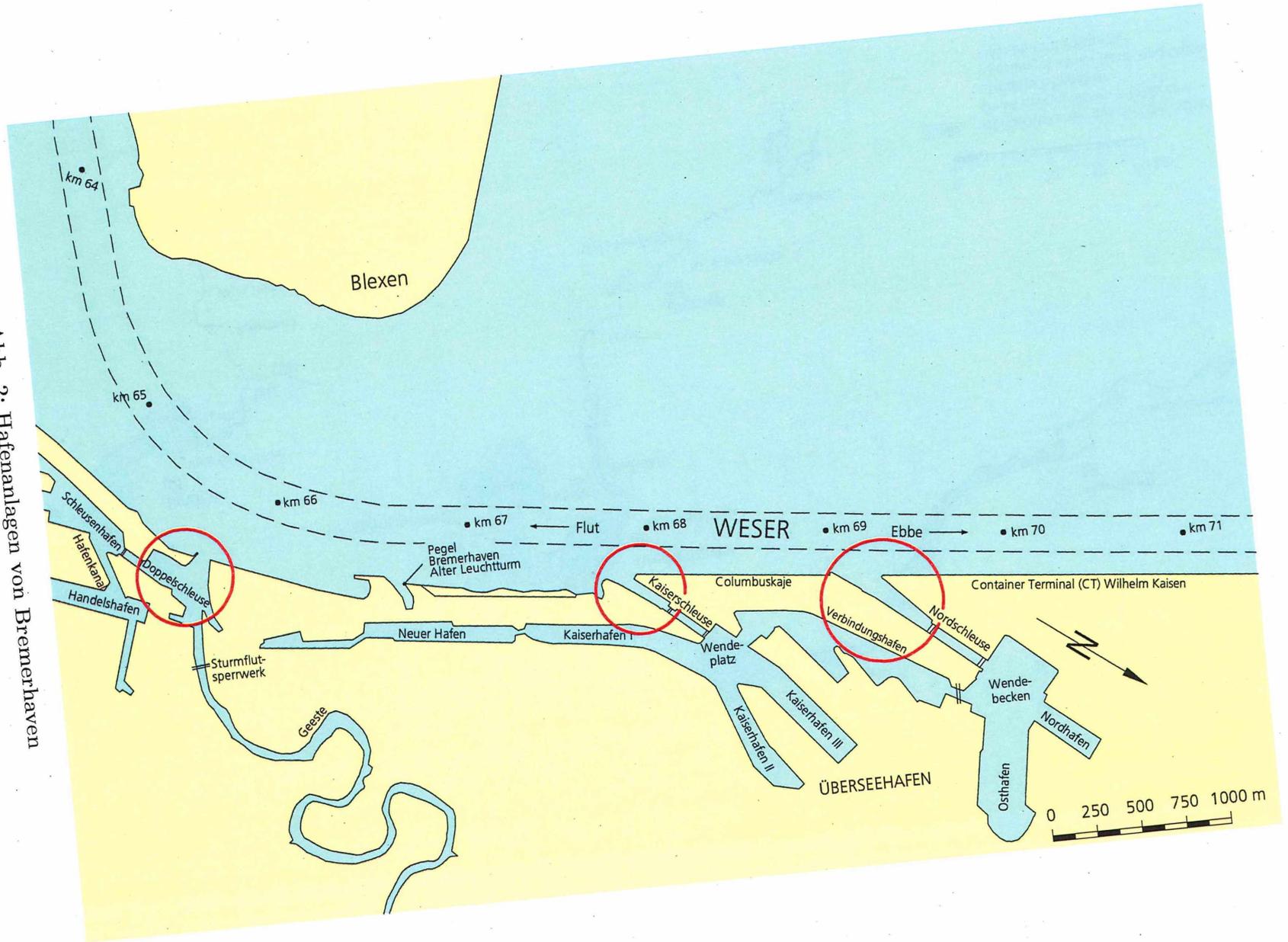
Abb. 1: Deutsche Nordseeküste



Quelle: Übersichtskarten aus den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern:  
 - Unteres Elbegebiet  
 - Küstengebiet der Nord- und Ostsee  
 - Weser- und Emsgebiet

Abb. 2: Hafenanlagen von Bremerhaven

3



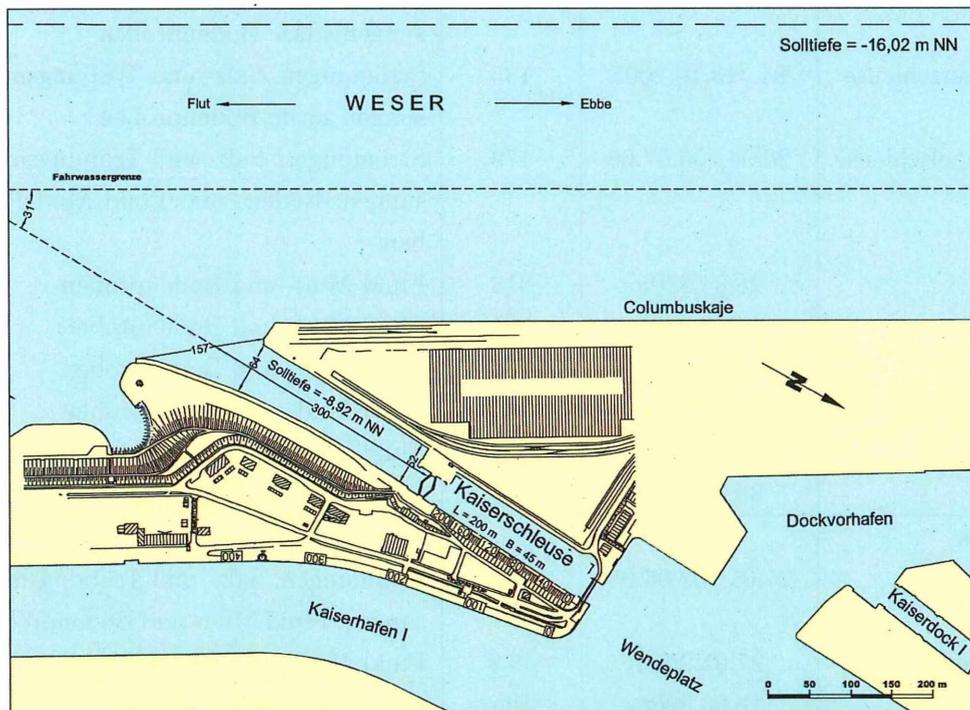
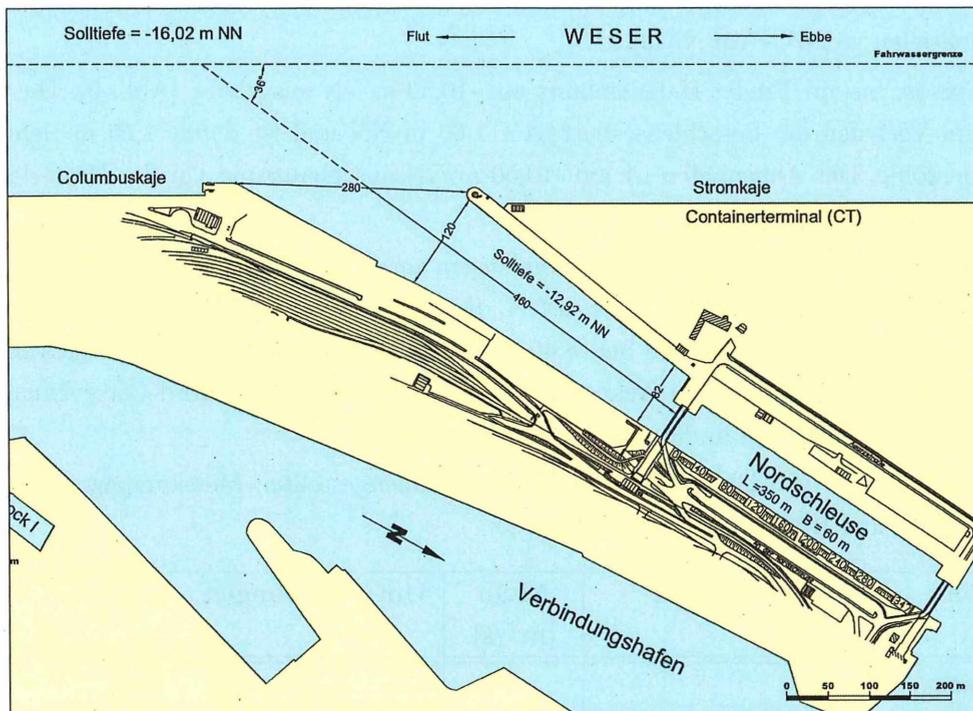


Abb. 3: Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven

hat eine Solltiefe von -7,92 m NN (Abb. 4). Die Unterweser ist dort auf -15,12 m NN ausgebaut. Die Geesteeinfahrt liegt außerhalb des Prallhangs am Blexer Bogen und weist nur Solltiefen von rd. -7 m NN auf.

Die Ems ist bis zur Emdener Hafeneinfahrt auf -10,50 m NN ausgebaut (Abb. 5). Die Solltiefe im Vorhafen der Seeschleuse beträgt -11,60 m NN und ist damit 1,10 m tiefer als die Emssohle. Der Außenhafen ist auf -10,50 m NN ausgebaut und vor der Nesserlander Schleuse auf -6,10 m NN.

Auch die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal liegen am rechten Flussufer (Abb. 6). Die Ausbautiefe der Elbe beträgt dort -15,86 m NN, die Sohle des Neuen Vorhafens -11,90 m NN und im Alten Vorhafen liegt sie bei -8,40 m NN. Wie bei der Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven sind auch die Ausbautiefen in den Vorhäfen zum Nord-Ostseekanal um mehrere Meter höher als in der angrenzenden Unterelbe.

In dem Vorhaben wurden die im folgenden zusammengestellten Messkampagnen an der Weser, Ems und Elbe durchgeführt (Tafel 1):

Gebiet	Datum	MQo [m <sup>3</sup> /s]	Untersuchungen
<b>Weser</b>			
Nordschleuse	18./28.04.2005	340	Strömungen, Salz- und Trübungsmessungen sowie Bodenproben
Kaiserschleuse	04./13.10.2005	135	Strömungen, Salz- und Trübungsmessungen sowie Bodenproben
Doppelschleuse	26.06./06.07.06	179	Strömungen, Salz- und Trübungsmessungen; Boden- und Fluid Mud Proben
	28.04.2005	313	Fluid Mud- und Bodenproben
	14.03.2006	561	Fluid Mud- und Bodenproben
	03.07.2006	157	Fluid Mud- und Bodenproben
	30.10.2006	136	Fluid Mud- und Bodenproben
	20.02.2007	572	Fluid Mud- und Bodenproben
	30.08.2007	393	Fluid Mud- und Bodenproben
<b>Ems</b>			
Vor- und	25.05./02.06.05	50,8	Strömungen, Salz- und Trübungsmessungen, Fluid Mud- und Bodenproben
Außenhafen	27.05.2005	46,9	Fluid Mud- und Bodenproben
	16.03.2006	105	Fluid Mud- und Bodenproben
	05.12.2006	42,6	Fluid Mud- und Bodenproben
	04.09.2007	76,9	Fluid Mud- und Bodenproben
	10.12.2007	285	Fluid Mud- und Bodenproben

Fortsetzung

Gebiet	Datum	MQo [m <sup>3</sup> /s]	Untersuchungen
<b>Elbe</b>			
Neuer und	28.06./14.07.05	328	Strömungen, Salz- und Trübungsmes- sungen; Fluid Mud- und Bodenproben
Alter Vorhafen	01.+08.07.05	299	Fluid Mud- und Bodenproben
	15.03.2006	769	Fluid Mud- und Bodenproben
	31.10.2006	294	Fluid Mud- und Bodenproben
	06.03./27.03.07	1019	Strömungen, Salz- und Trübungsmes- sungen; Fluid Mud- und Bodenproben

Tafel 1: Zusammenstellung der durchgeführten Messkampagnen

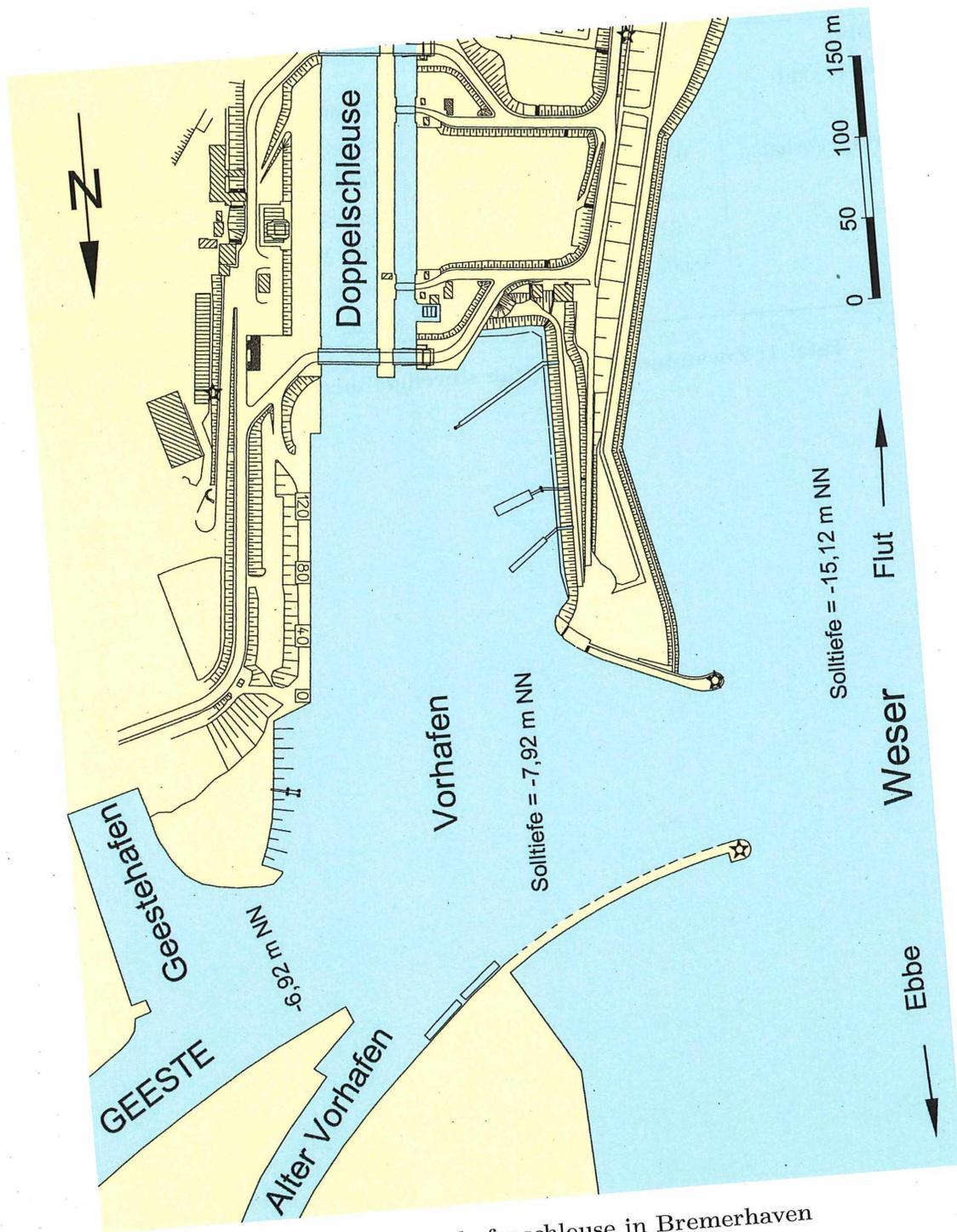


Abb. 4: Fischereihafenschleuse in Bremerhaven

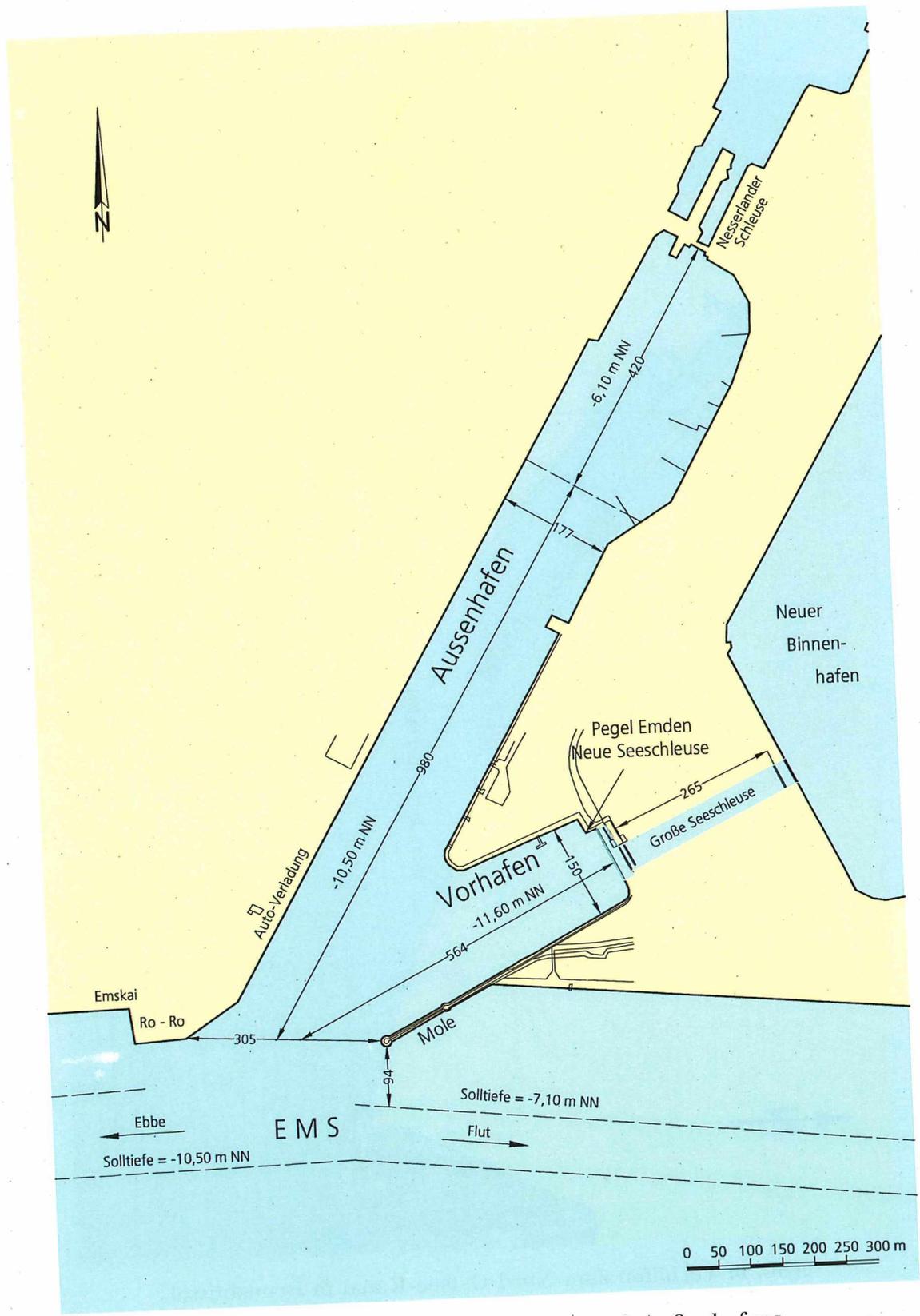


Abb. 5: Lageplan des Emden Vor- und Außenhafens

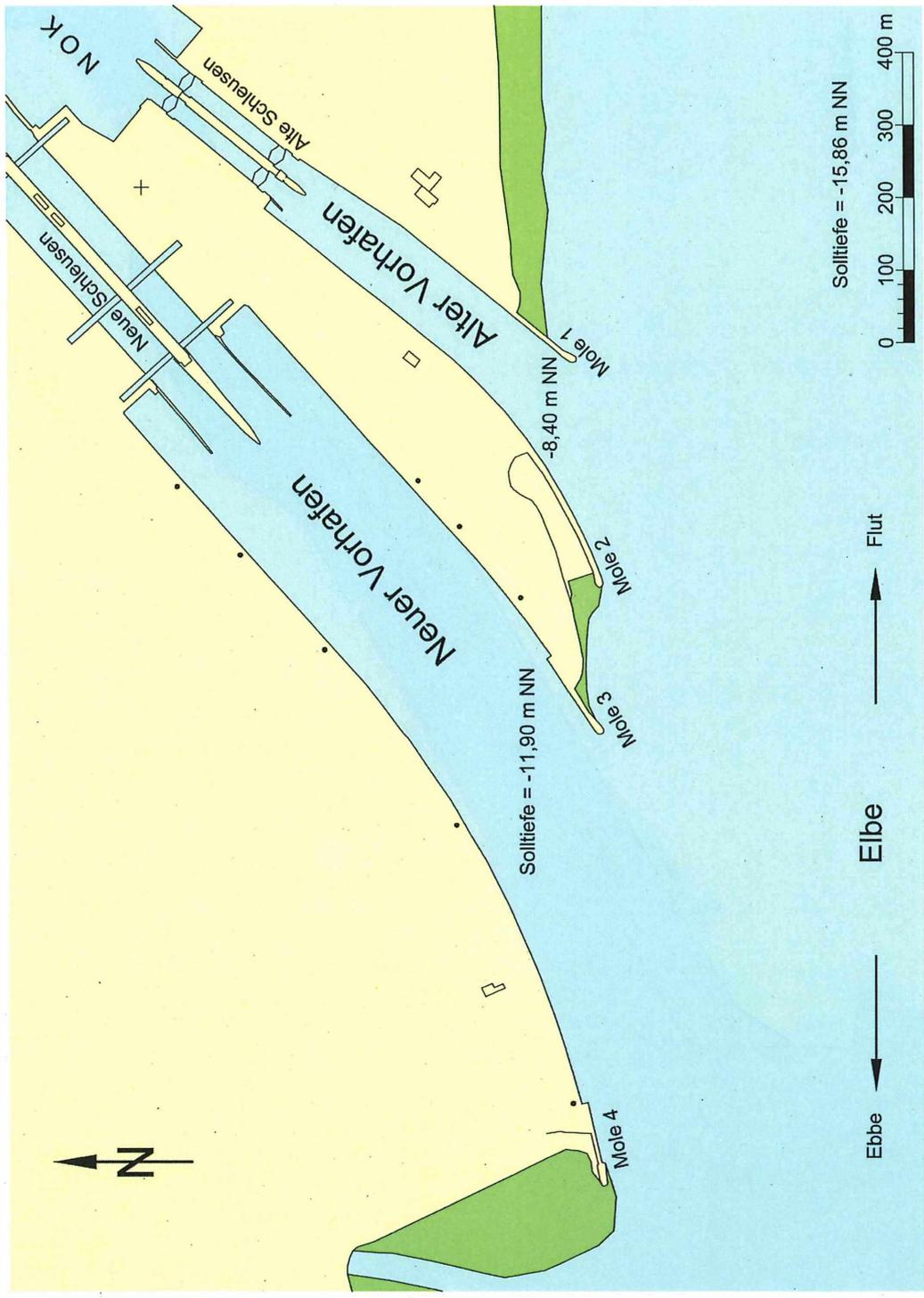


Abb. 6: Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel

### 3 Tide- und Oberwasserbedingungen

Da die Gezeiten an der deutschen Nordseeküste ständigen periodischen und aperiodischen Veränderungen unterworfen sind macht es Sinn, für vergleichende Betrachtungen langjährige Mittelwerte der Tidewasserstände heranzuziehen (NLWKN, 2007).

- **Weser bei Bremerhaven**

Für den zehnjährigen Zeitraum 1995/2004 gelten für den bei Weser-km 66,7 gelegenen Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm (Abb. 2) folgende Tidekennwerte:

#### Tidekennwerte Bremerhaven Alter Leuchtturm

Mittleres Tidehochwasser	$MThw_{1995/2004} =$	680 cm NN -4,98 m
Mittleres Tideniedrigwasser	$MTnw_{1995/2004} =$	308 cm NN -4,98 m
Mittleres Tidehalbwasser	$MT\frac{1}{2}w_{1995/2004} =$	494 cm NN -4,98 m
Mittlerer Tidehub	$MThb_{1995/2004} =$	372 cm

Seit 2005 wird das Seekartennull (SKN) nicht mehr auf das mittlere Springtideniedrigwasser (MSpTnw), sondern auf die Nodaltide (LAT = Lowest Astronomical Tide) bezogen. Das neue Seekartennull (LAT) liegt in Bremerhaven auf -2,62 m NN (WSD NORDWEST, 2007). Bezogen auf den Pegel Alter Leuchtturm liegt dieser Wert mit SKN = 236 cm NN - 4,98 m 72 cm unter dem  $MTnw_{1995/2004}$ . Der Oberwasserabfluss der Weser am Pegel Intschede (Abb. 1) beträgt im langjährigen Mittel  $MQ_{01941/2004} = 327 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- **Ems bei Emden**

Für den bei Ems-km 40,5 gelegenen Pegel Emden Neue Seeschleuse (Abb. 5) werden folgende Tidekennwerte im Gewässerkundlichen Jahrbuch angegeben (NLWKN, 2007):

#### Tidekennwerte Emden Neue Seeschleuse

Mittleres Tidehochwasser	$MThw_{1995/2004} =$	648 cm NN -5,00 m
Mittleres Tideniedrigwasser	$MTnw_{1995/2004} =$	329 cm NN -5,00 m
Mittleres Tidehalbwasser	$MT\frac{1}{2}w_{1995/2004} =$	489 cm NN -5,00 m
Mittlerer Tidehub	$MThb_{1995/2004} =$	319 cm

Das in Emden auf LAT=-2,38 m NN festgelegte Seekartennull (WSD NORDWEST, 2007) liegt 67 cm unter dem  $MTnw_{1995/2004}$ . Am Pegel Versen (Abb. 1) beträgt der mittlere Oberwasserabfluss der Ems  $MQ_{01941/2004} = 80,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- Elbe bei Brunsbüttel

Nach Auskunft des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Cuxhaven gelten für den Pegel Brunsbüttel Mole 4 folgende langjährigen Mittelwerte:

**Tidekennwerte Brunsbüttel Mole 4**

Mittleres Tidehochwasser	$MThw_{1995/2004} =$	650 cm NN -5,00 m
Mittleres Tideniedrigwasser	$MTnw_{1995/2004} =$	369 cm NN -5,00 m
Mittleres Tidehalbwasser	$MT\frac{1}{2}w_{1995/2004} =$	510 cm NN -5,00 m
Mittlerer Tidehub	$MThb_{1995/2004} =$	281 cm

Nach WSD NORD (2007) liegt das LAT in Brunsbüttel auf -1,90 m NN und damit 59 cm unter dem  $MTnw_{1995/2004}$ .

Der am Pegel Neu Darchau gemessene mittlere Oberwasserabfluss der Elbe beträgt  $MQ_{O1941/2004} = 703 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 4 Messungen in der Weser

### 4.1 Bremerhaven Nordschleuse

#### 4.1.1 Strömungsverhältnisse im Tidestrom

Die Strömungsmessungen wurden mit einer ADCP-Sonde (Acoustic Doppler Current Profiler) durchgeführt. In der oberen und unteren Wasserschicht sind bis zu etwa einem Meter wegen fehlender Dopplereffekte (no backscattering) keine Signale zu empfangen. Bei der 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 dieser Tiefenzelle sind die Strömungen nach Richtung und Stärke in Meterabständen ausgewertet worden. In den folgenden Anlagen sind die ADCP-Geschwindigkeitsvektoren zur besseren Übersicht in 2 m-Abständen dargestellt worden. Die Lage der ADCP-Profile sind aus Abb. 7 zu entnehmen.

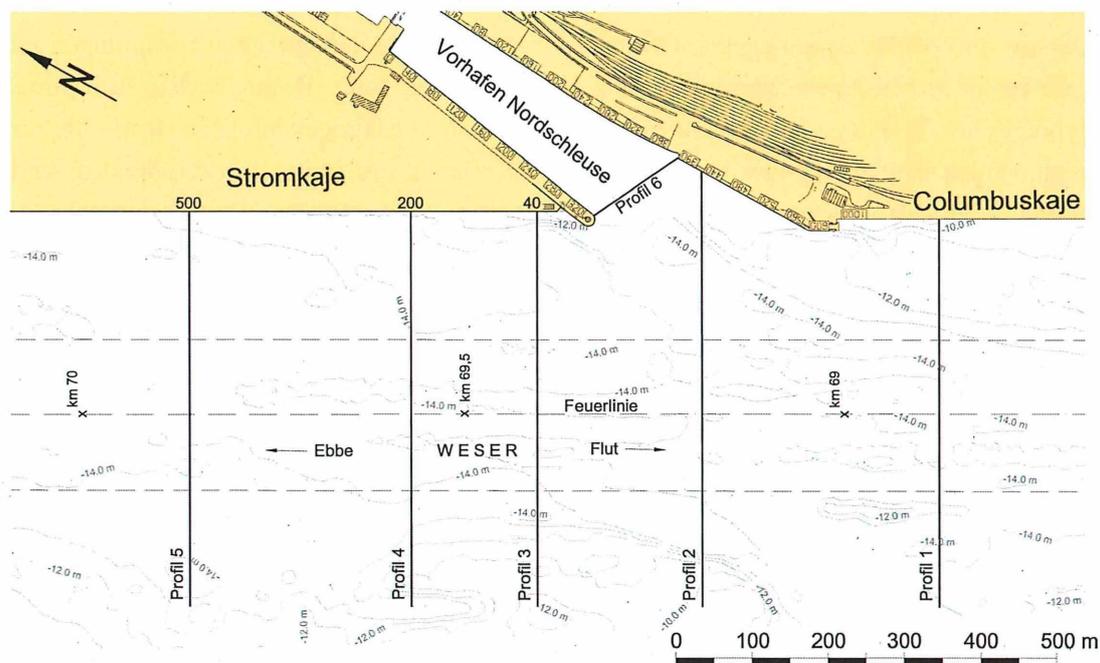


Abb. 7: Lage der ADCP-Profile

- Flutströmungen (Anlage 1 bis 4)

Bei den ADCP-Messungen am 25. April 2005 betrug der Springtidehub am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  $Th_b = 426$  cm. Es lagen etwa mittlere Oberwasserverhältnisse mit  $Q_0 = 383$  m<sup>3</sup>/s am Pegel, Intschede vor. Während der Messungen herrschten südöstliche Winde der Stärke 4 bis 5 Bft (6 bis 10 m/s). Mit den Messungen wurde jeweils an der Columbuskaje (Profil 1) begonnen. Der Zeitbedarf für einen Umlauf betrug 15 bis 22 Minuten.

In Anlage 1 sind die Strömungsvektoren von der letzten Ebbestromphase bis zum einsetzenden Flutstrom dargestellt. Bei den ersten Messungen (1 und 2) sind die ebbestromorientierten Dichteströmungen in der Hafeneinfahrt auszumachen. In der oberen Tiefenzelle strömt das Wasser in den Vorhafen und in 7,85 m Tiefe entgegengesetzt zur Weser.

Die Ebbestromkenterung setzte im tiefen Wasser mit dem Eintritt des Tnw ein (Anlage 1, Messung 1). An der Oberfläche wurden gleichzeitig noch Ebbeströmungen bis zu  $v_e > 100$  cm/s gemessen. Die Ebbestromkenterung dauerte etwa eine Stunde bis die oberen Wasserschichten erreicht wurden (Anlage 1, Messung 3). Zu diesem Zeitpunkt wurden über der Sohle vor der Stromkaje bereits Flutströmungen von bis zu  $v_f \approx 1$  m/s registriert.

Die Flut setzte sich zuerst im östlichen (rechten) Weserquerschnitt an der Stromkaje durch. Dichtebedingt wird das in die Weser eindringende Salzwasser in dem tieferen Querschnittsbereich stromauf geführt. Morphologisch bedeutend sind die bereits in der ersten Flutstromphase starken Sohlströmungen vor CT I Süd. Da der Terminal belegt war, konnte das untere Profil (Station 500) nicht bis zur Kajenkante gefahren werden.

Die aus den ADCP-Messungen entwickelten Vertikalprofile der mittleren Strömungen im Fahrwasser für die ersten Messungen sind in Abb. 8 dargestellt. Damit werden die hydrodynamischen Vorgänge im Untersuchungsgebiet von der ausklingenden Ebbestrom- bis zur beginnenden Flutstromphase veranschaulicht. Bereits in der ersten Flutstromphase sind in den unteren Wasserschichten beachtliche, morphologisch wirksame Flutstromgeschwindigkeiten zu verzeichnen.

Bemerkenswert sind die sich verändernden Geschwindigkeitsgradienten über der Gewässersohle von der ersten bis zur vierten Messung in Abb. 8. Damit wird die hohe Transportkapazität der Strömungen in der ersten Flutstromphase eindrucksvoll dargelegt.

Die anschließende Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeiten kann mit Anlage 2 nachvollzogen werden. Im Vorhafen zur Nordschleuse prägen sich ab Tidehalbwasser (Messung 5) die brackwasserbedingten Strömungseffekte aus. Im tieferen Wasser (ab 7,85 m) sind die flutstromorientierten Walzenströmungen auszumachen. Mit fortschreitender Tidedauer stabilisieren sich die Verhältnisse und führen zur Intensivierung des Dichteeffekts mit den an der Oberfläche aus dem Vorhafen in die Weser zurückströmenden Wassermassen.

Aus Anlage 2 geht hervor, wie sich die maximalen Flutströmungen in der Weser mit zunehmender Flutdauer von der Sohle zur Wasseroberfläche verlagern (Messung 5 bis 7). Die maximalen Flutströmungen treten in der dritten Stunde nach Tnw etwa bei Tidehalbwasser auf. Bei der 6. Messung wurden Geschwindigkeiten von  $v_{f,max} > 200$  cm/s aufgezeichnet. Für die in der ersten Flutphase hohen Tidedestromungen ist weniger der Tidedeub als vielmehr der steile Anstieg des Flutastes und das damit verbundene stärkere Gefälle ausschlaggebend.

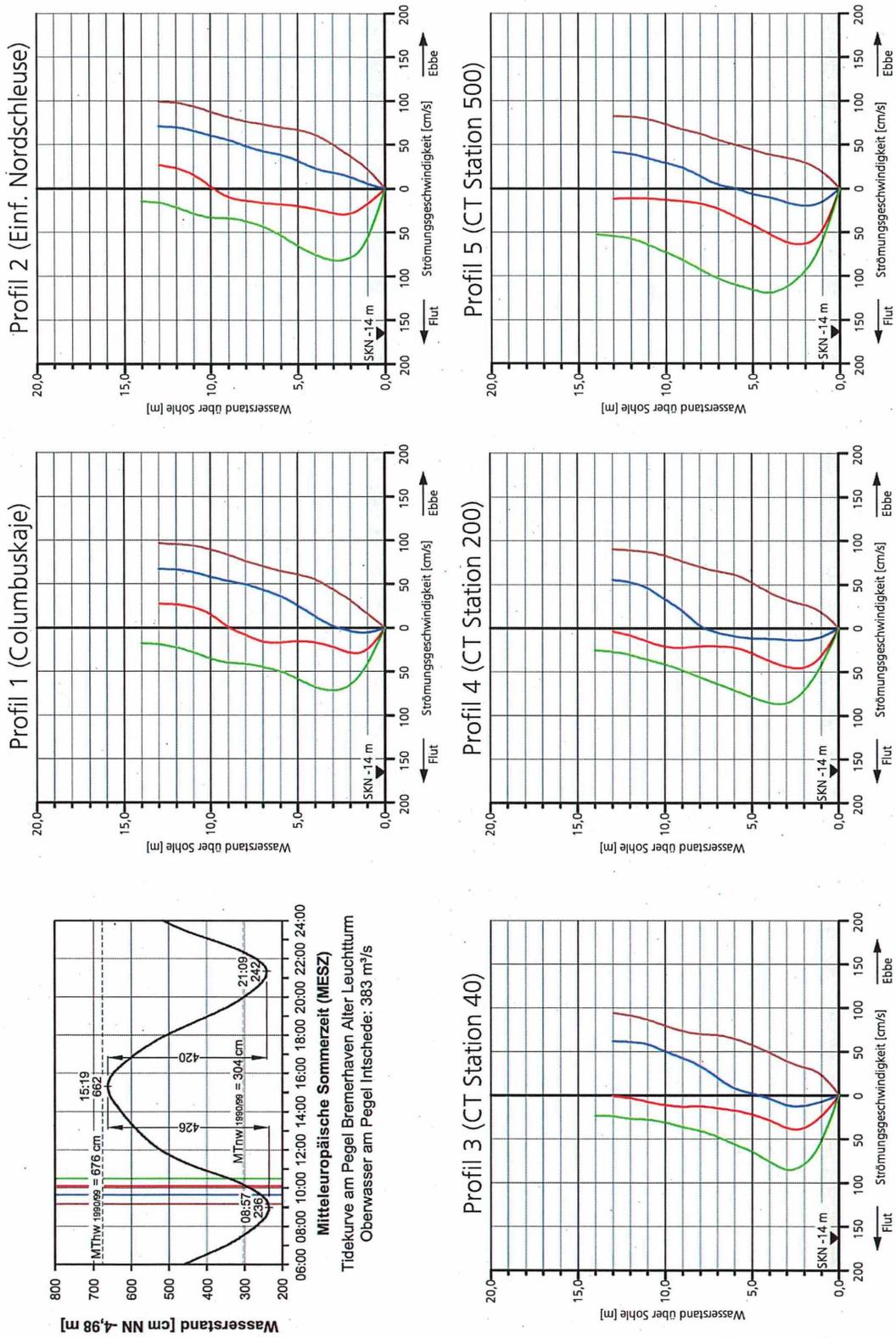


Abb. 8: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005 (Lage der Profile s. Abb. 7)

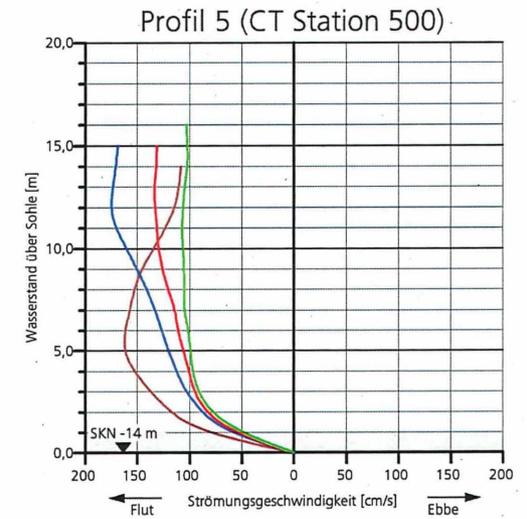
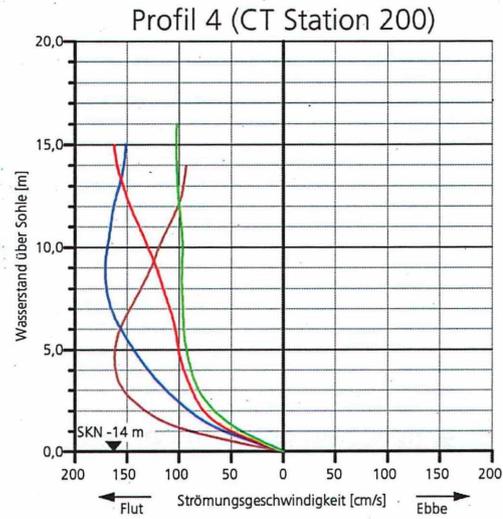
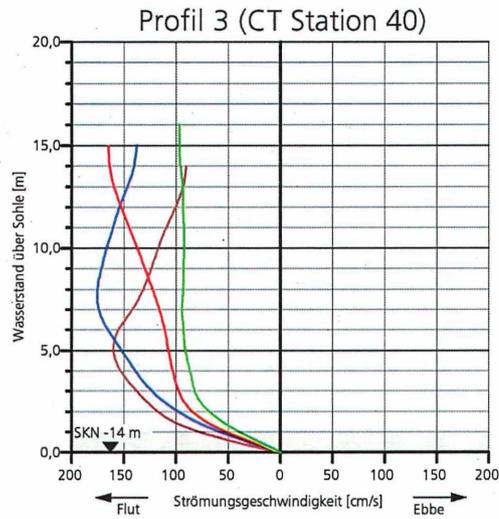
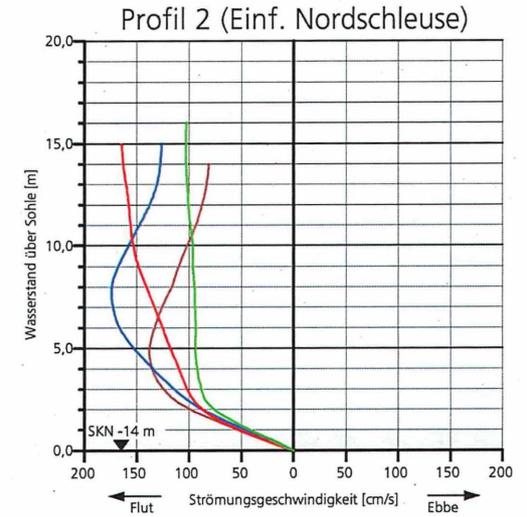
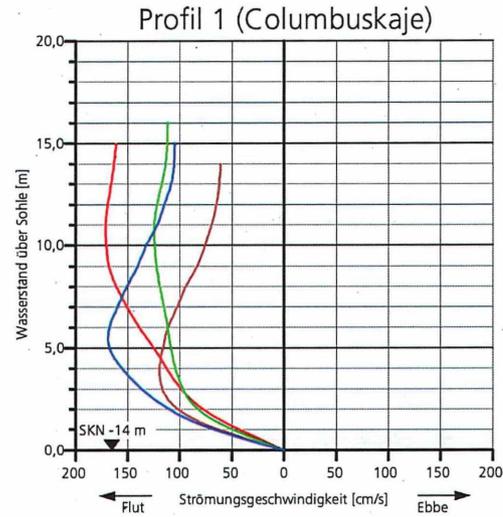
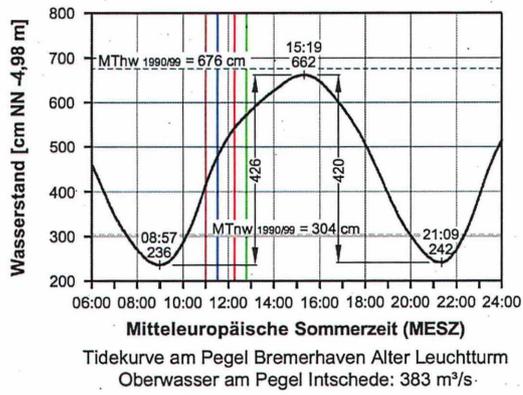
Mit sich abflachendem Flutast kommt es zu einer raschen Minderung der Strömungsgeschwindigkeiten (Messung 6 bis 8 in Anlage 2). Gleichzeitig verändert sich der Vertikalgradient. Die Geschwindigkeiten sind in der späteren Flutphase gleichmäßiger über die Tiefe verteilt als zuvor.

Aus den ADCP-Profilen ist abzulesen, wie sich die Strömungen bei Flut im Untersuchungsgebiet verlagern. Die stärksten Flutströmungen sind im unteren Profil 5 im Fahrwasser und östlich davon anzutreffen. Bei dem oberen Profil 1 vor der Columbuskaje werden die Flutwassermengen mehr im westlichen Querschnitt stromauf transportiert. Naturbedingt stellt sich die Strömungsverteilung den geometrischen und morphologischen Vorgaben entsprechend ein. Ergänzend zu Anlage 2 sind die mittleren Strömungen im Fahrwasser für die fünf Querprofile in Abb. 9 aufgetragen. Damit werden die besonders intensiven, transportwirksamen Sohlströmungen während der ersten Flutstromphase verdeutlicht. Sie sind ursächlich für den resultierend stromauf gerichteten Sedimenttransport im Untersuchungsbereich. Die maximalen Flutströmungen wurden in der dritten Stunde nach Thw gemessen (blaue Linien). Außerdem zeigt Abb. 9 wie die Flutströmungen mit zunehmender Tidedauer bei Verlagerung des Maximalwertes zur Oberfläche schwächer werden und sich zunehmend gleichmäßiger über die Wassertiefe verteilen (rote und grüne Linien in Abb. 9). Die Strömungsentwicklung in den letzten beiden Stunden vor dem Eintritt des Thw geht aus Anlage 3 hervor. Auffällig ist die stetige Geschwindigkeitsabnahme und die zunehmend gleichmäßiger werdende Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe. Außerdem werden die Flutströmungen im Bereich der Hafeneinfahrt mit fortschreitender Tidedauer in den oberen Wasserschichten durch den Wasseraustausch zwischen Vorhafen und Weser zunehmend beeinflusst. Mit den stärker ausgeprägten Dichteströmungen gelangen größere Wassermengen an der Oberfläche aus dem Vorhafen. In den tieferen Schichten wird das Wasser mit den linksdrehenden Flutstromwalzen in den Vorhafen eingetragen. Der Staupunkt an der Ostmole führt dort zu Sedimentablagerungen.

Die vorstehend angesprochene, sich von Profil 5 bis 1 dem Talweg entsprechend verändernde, horizontale Geschwindigkeitsverteilung bleibt bis kurz vor Eintritt des Thw besonders augenfällig in den unteren Tiefenzellen bestehen (Messung 9 bis 12, Anlage 3). Die Profile vor der Stromkaje (5 und 4) weisen deshalb in der Schifffahrtsrinne und östlich davon im tiefen Wasser größere Geschwindigkeiten aus als westlich des Fahrwassers. Selbst kurz vor Eintritt des Thw (Messung 12) sind vor der Stromkaje bei Station 500 noch transportwirksame, stromauf gerichtete Sohlströmungen mit bis zu  $v_f > 75$  cm/s zu verzeichnen. Die ansteigende Sohle der Liegewanne und der als Staukörper vorstehende westliche Molenkopf unterbinden den Sedimenttransport und verursachen vom südlichen Ende ausgehenden, nach Norden fortschreitenden Auflandungen.

Die bei der Tide vom 25. April nach Thw beginnende Flutstromkenterung ist in Anlage 4 dargestellt. Überlagert wurde das Tidegeschehen in der Weser von den Dichte- und Walzenströmungen in der Vorhafeneinfahrt zur Nordschleuse.

Abb. 9: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 7)



Die Profile der mittleren Geschwindigkeiten im Fahrwasser der letzten fünf Messungen sind in Abb. 10 aufgetragen. Auffällig ist der geringe Vertikalgradient der Flutströmungen am südlichen Ende des Containerterminals (Profile 3 bis 5). Die etwas anderen Profilverläufe in den oberen Wasserschichten an der Vorhafeneinfahrt (Profil 2) und dem Nordende der Columbuskaje (Profil 1) sind auf die Austauschvorgänge zwischen Weser und Vorhafen zurückzuführen.

- **Ebbeströmungen (Anlage 5 bis 8)**

Bei etwa mittleren Oberwasserbedingungen ( $Q_0 = 281 \text{ m}^3/\text{s}$  in Intschede) betrug der Nipptidefall der Vormittagstide vom 18. April 2005 251 cm. Die ersten Profile wurden bei ausklingender Flutstromphase gefahren. Zu Beginn der Messungen herrschte südöstlicher Wind der Stärke 4 Bft (7 m/s), der sich im weiteren Verlauf abschwächte. Anzumerken ist außerdem, dass der Terminal bis Station 500 von einem Containerschiff belegt war.

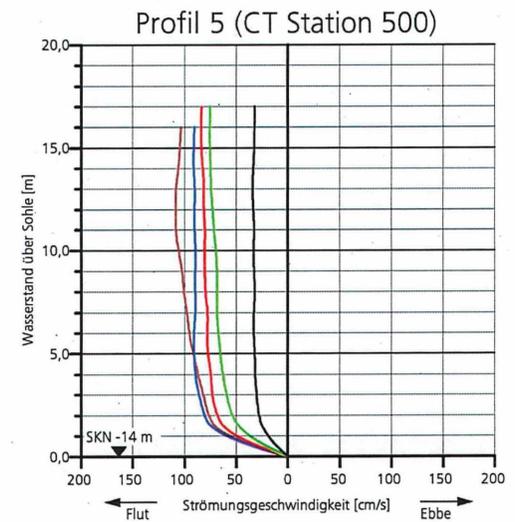
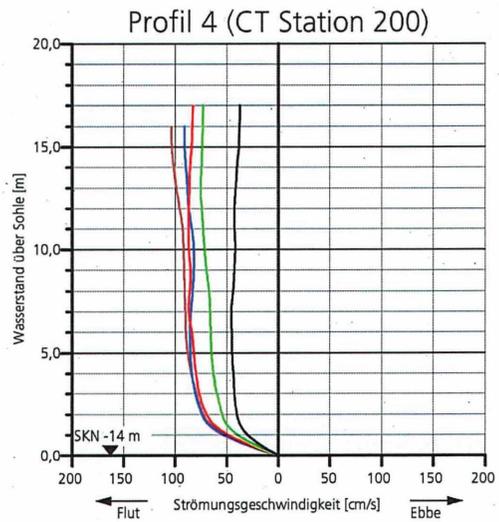
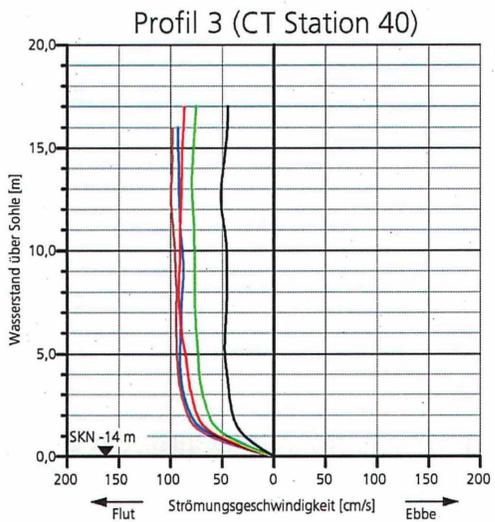
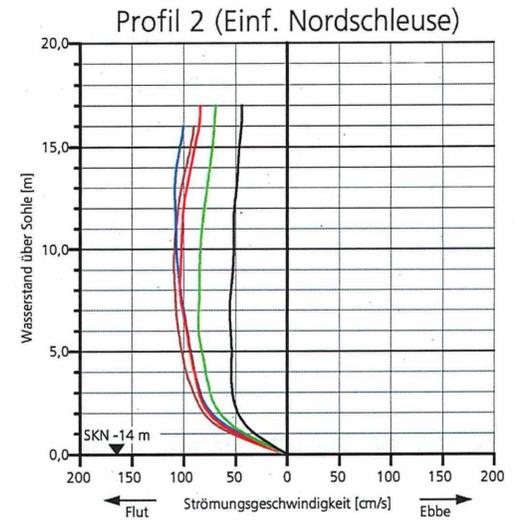
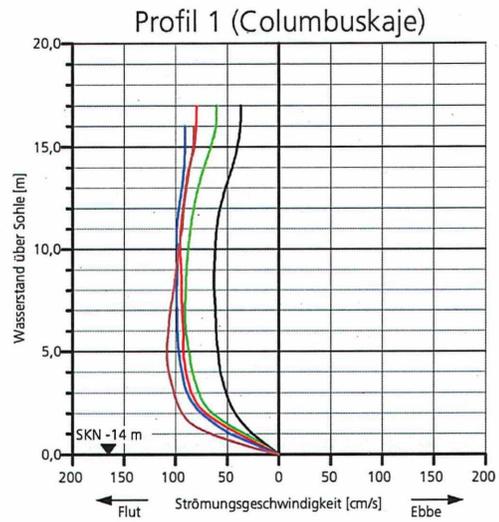
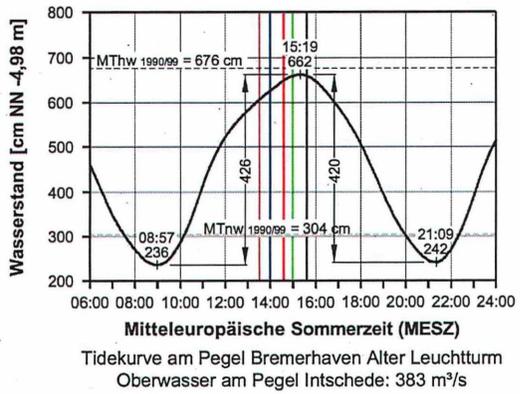
Mit den ersten vier Profilmfahrten wird die etwa einstündige Kenterphase der Flutströmungen dokumentiert (Anlage 5). Sie beginnt bei Station 500 in den oberen Tiefenzellen (Messung 2) und setzte sich langsam bis in die unteren Bereiche (Messung 4) durch. In dieser Tidephase hatte sich in den oberen Wasserschichten, verstärkt im Fahrwasser und westlich davon, der Ebbestrom eingestellt. Die ausklingende Flutstromphase und anschließende Kenterung ist mit den über den Fahrwasserbereich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten für die Profile 1 (Nordende Columbuskaje) bis 5 (CT I Süd, Station 500) in Abb. 11 als Vertikalprofile aufgetragen.

Die ab 1,85 m Wassertiefe in Meterabständen zur Verfügung stehenden ADCP-Daten sind für den grau angelegten Sohlenbereich extrapoliert worden. Typisch ist die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung der Flutströmungen über die Wassertiefe vor der Kenterung. In allen Profilen setzt sich das spezifisch leichtere Oberwasser bei der Strömungsumkehr zuerst in den oberen Wasserschichten durch. Etwa eine Stunde nach Thw war die Kenterung im untersten Profil 5 abgeschlossen (Abb. 11).

Die anschließende Entwicklung der Ebbestromgeschwindigkeiten ist mit Anlage 6 nachzuvollziehen. Kennzeichnend ist der Vertikalgradient. Bei voll ausgeprägter Ebbeströmung wurden an der Oberfläche Geschwindigkeiten von  $v_{emax} > 175 \text{ cm/s}$  erreicht (Messung 8). Ab der 9,85 m Tiefenzelle ist die deutliche Abnahme der Strömungsintensität in Anlage 6 auszumachen. Im Profil 1 zeigen die Strömungsvektoren, dass die Ebbestromgeschwindigkeiten im Fahrwasser und westlich davon stärker sind als vor der Columbuskaje. Das ist auch auf die geringen Sohlthiefen vor der Kaje zurückzuführen. Weiter unterhalb (Profil 2) wirken sich die Austauschvorgänge zwischen dem Vorhafen zur Nordschleuse und dem Tidestrom aus. Unterhalb der Vorhafeneinfahrt lehnt sich die Ebbeströmung von Station 40 bis 500 zunehmend an die Stromkaje an.

Die in Abb. 12 aufgetragenen Vertikalprofile veranschaulichen die kontinuierliche Zunahme der Ebbestromgeschwindigkeiten bis zum Erreichen der Maximalwerte etwa bei Tide-

Abb. 10: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 7)



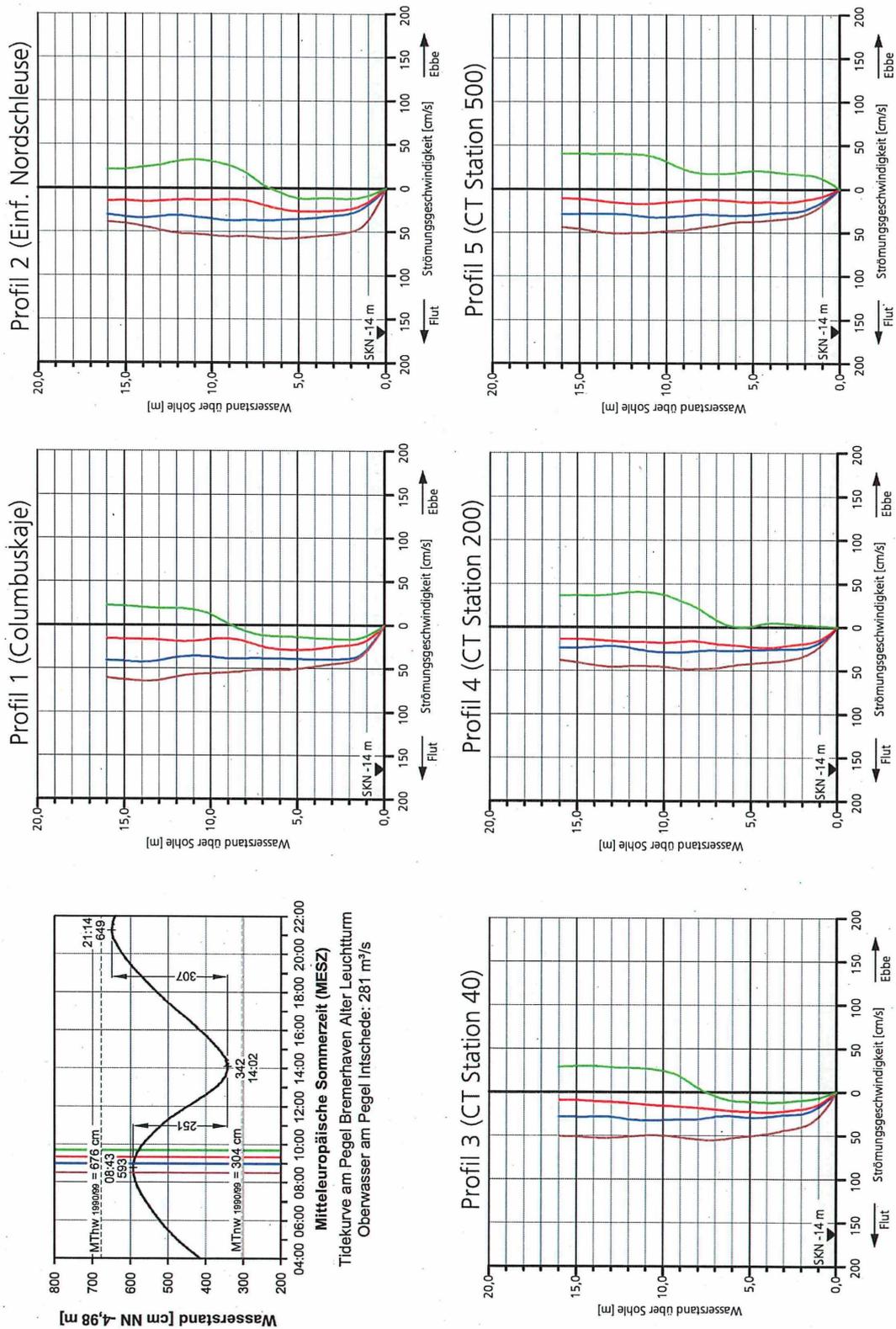


Abb. 11: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005 (Lage der Profile s. Abb. 7)

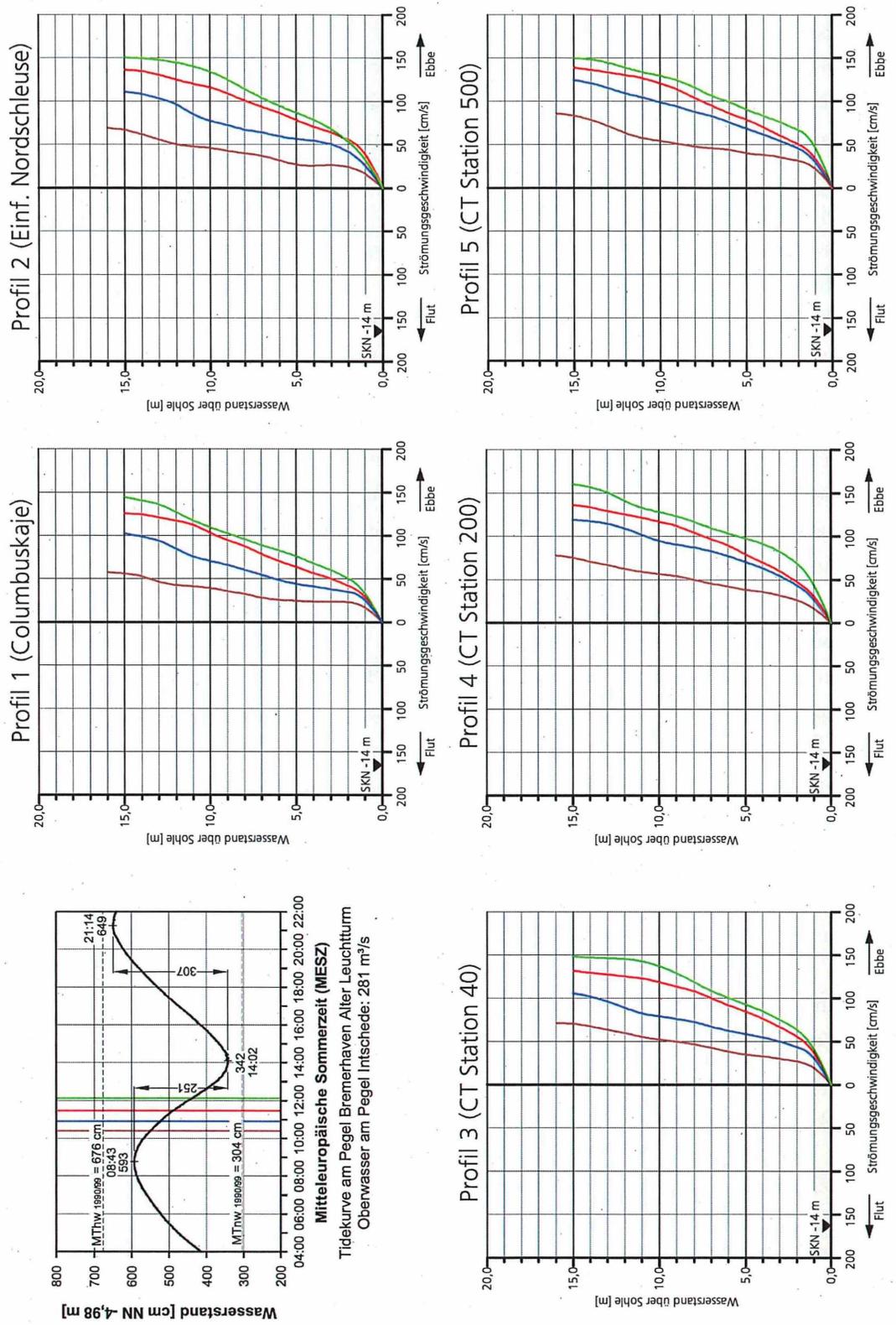


Abb. 12: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005 (Lage der Profile s. Abb. 7)

halbwasser in der dritten Stunde nach Thw. An der Oberfläche wurden Höchstwerte von  $v_{emax} \approx 150$  cm/s erreicht. Typisch sind die brackwasserbedingten Geschwindigkeitsgradienten. Das spezifisch leichtere Oberwasser wird während der Ebbestromphase verstärkt in den oberen Wasserschichten abgeführt. Von morphologischer Bedeutung bezüglich der Transportkapazität sind die geringen Strömungen im Sohlenbereich.

Die gleichmäßige Verteilung und Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten über den Ebbeast der Tidekurve wird mit Anlage 7 belegt. Bei der 9. Messung entspricht des Strömungsbild noch dem vorausgegangen Durchlauf (8. Messung in Anlage 6). Bei genauerer Betrachtung der Querprofile in Anlage 7 ist die Umlenkung der Strömungen im Untersuchungsbereich von West nach Ost zu erkennen. Vor der Columbuskaje (Profil 1) sind die höheren Geschwindigkeiten noch eher im westlichen Fahrwasser und außerhalb davon auszumachen. Nach dem Übergang im Bereich der Vorhafeneinfahrt sind die stärkeren Strömungen vor allem in den tieferen Schichten mehr im und außerhalb des östlichen Fahrwassers anzutreffen. Die Verlagerung des Stromstrichs ist auf die Tiefenverhältnisse im Strom und die Querschnittserweiterung am rechten Ufer im Bereich der Schleusenzufahrt zurückzuführen.

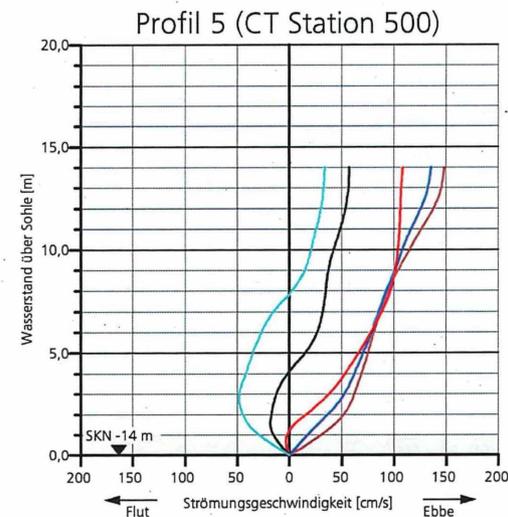
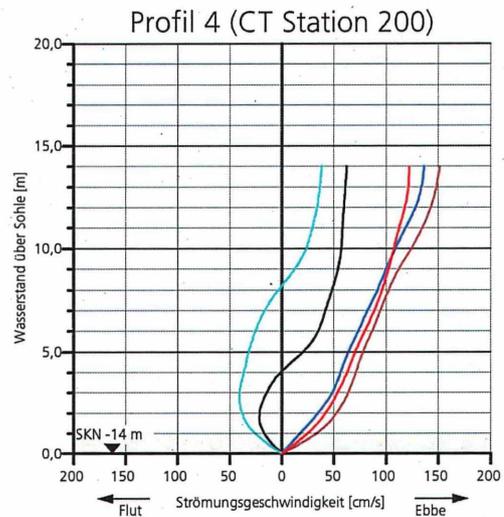
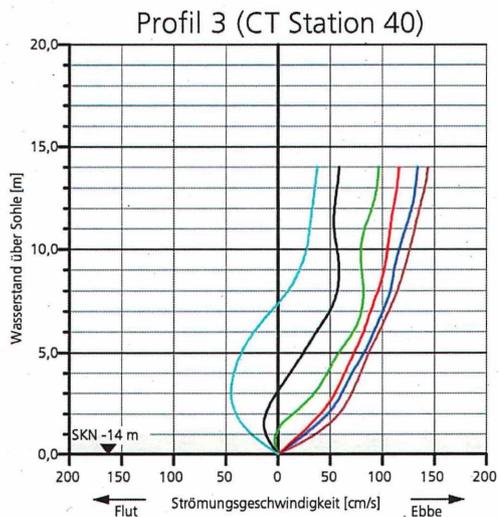
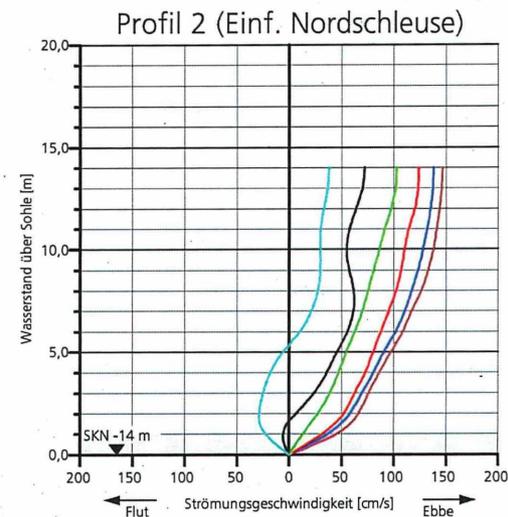
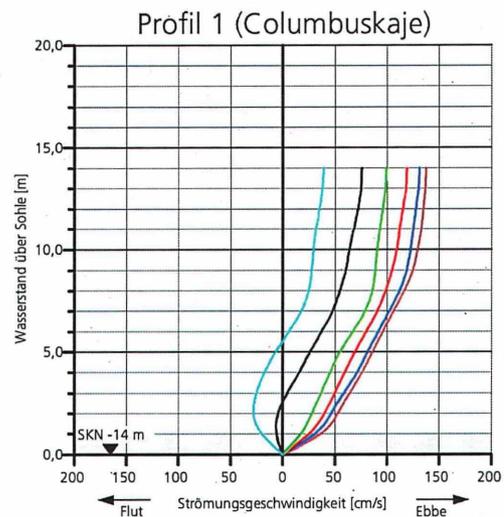
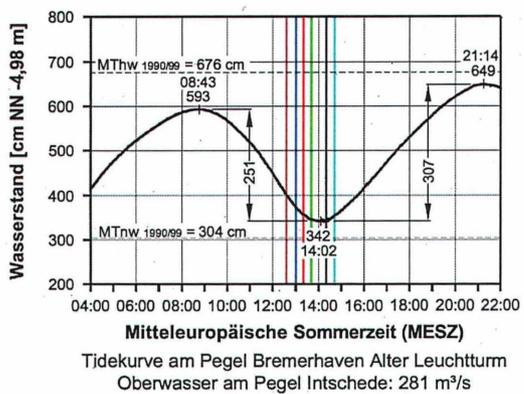
Das vorstehend beschriebene Strömungsmuster ist auch bei den folgenden Ebbemessungen bestehen geblieben. Die 12. Messung wurde gleichzeitig mit dem Ablegemanöver eines Containerschiffs durchgeführt. Aus diesem Grund fehlen die unteren Profile in Anlage 7.

Bemerkenswert sind die sich in der zweiten Ebbephase ausbildenden Dichteströmungen im Vorhafenbereich (Anlage 7). Die sohlennahen Strömungen aus dem Vorhafen (Tiefenzelle -9,85 m) wirken sich auch auf die unterhalb gelegenen Profile (bei Station 40 und bis Station 200) aus. Erst bei Station 500 wird der Einfluss merklich schwächer. Die von der Sohle ausgehende Ebbestromkenterung setzte bereits vor Eintritt des Thw im tiefen Wasser ein (Anlage 7, Messung 12).

Mit Anlage 8 wird die fortschreitende Strömungsumkehr dokumentiert. Auch knapp eine Stunde nach Tideniedrigwasser sind in den oberen Wasserschichten noch schwache Ebbeströmungen zu verzeichnen. Zur gleichen Zeit hatte die Flutströmung im Sohlenbereich bereits eingesetzt.

Die in Abb. 13 aufgetragenen Vertikalprofile veranschaulichen das hydrodynamische Geschehen in der späteren Ebbephase bis zur Kenterung. Ab etwa eine Stunde vor Tnw werden die Ebbestromgeschwindigkeiten deutlich schwächer. Bemerkenswert ist die relativ gleichmäßige Geschwindigkeitsabnahme über die Wassertiefe. Das salzhaltigere Wasser strömt an der Sohle bereits kurz nach Tnw stromauf (schwarze Linien in Abb. 13). Noch während des Kentervorgangs sind in den unteren Wasserschichten bereits beachtliche, morphodynamisch wirksame Flutstromgeschwindigkeiten zu verzeichnen (blaue Linien in Abb. 13).

Abb. 13: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 7)



#### 4.1.2 Salzgehalte

- **Flutstromverhältnisse**

Die Tide- und Oberwasserverhältnisse waren am 26.04.2005 ähnlich wie bei den ADCP-Messungen vom Vortag. Der Springtidehub betrug am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  $Thb = 432$  cm und das Oberwasser am Pegel Intschede  $Q_0 = 352$  m<sup>3</sup>/s.

Die tideabhängigen Salzgehalte wurden für die in Anlage 9 eingetragenen fünf Positionen vom nördlichen Ende der Columbuskaje (Pos. 1) bis zur Station 500 der Containerkaje (Pos. 5) dargestellt. Bei allen Messungen nimmt die Salzkonzentration mit der Wassertiefe zu. Sie erhöhen sich während der Flutstromphase um  $\Delta S \approx 10$  ‰ (Messung 3 und 17 in Anlage 9).

Besonders auffällig ist der starke Vertikalgradient in der ersten Flutstromphase im tiefen Wasser vor der Stromkaje (Pos. 5, Messung 4 bis 6). Zwischen Oberfläche und Sohle wurden Differenzen bis zu  $\Delta S > 5$  ‰ erreicht. Dies ist der Grund dafür, dass die maximalen Flutströmungen während des steilen Anstiegs des Flutastes über der Sohle festgestellt wurden. Daraus ergibt sich der stromauf gerichtete Geschiebetransport. Gleichzeitig vergrößert sich in diesem Tideabschnitt das horizontale Salzgehaltsgefälle zwischen Pos. 5 und 1. Nach Tidehalbwasser entwickeln und stabilisieren sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen der Nordschleuse. Die Austauschvorgänge werden eindrucksvoll mit den Messungen 7 bis 9 veranschaulicht. Kennzeichnend ist der sprunghafte Übergang der Salzkonzentrationen an der Pos. 2. Die linksdrehenden Flutstromwalzen transportieren das Wasser an der Ostmole (Pos. 3) in den Vorhafen. Deshalb sind dort die Salzgehalte höher als an der Westmole (Pos. 4). Dieser Zustand bleibt bis zum Thw (Messung 17) im tiefen Wasser erhalten. Die Vertikalgradienten vor der Columbus- und Containerkaje (Pos. 1 und 5) werden mit fortschreitender Flut zunehmend schwächer. Dementsprechend vergleichmäßigt sich auch die Verteilung der Flutstromgeschwindigkeiten, so wie es die ADCP-Messungen gezeigt haben.

- **Ebbestromverhältnisse**

Die Salzgehaltsprofile in Anlage 10 zeigen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser erwartungsgemäß ein ähnliches Verhaltensmuster wie bei der Flutmessung (vgl. Anlage 9). Bei Thw sind die Konzentrationen in der Vorhafeneinfahrt höher als in der Weser und bei Thw ist es umgekehrt.

Während des Tidehochwassers bis zur Flutstromkenterung sind die Salzgehalte erwartungsgemäß bei Pos. 5 am höchsten (Messung 1 bis 5). Von Bedeutung ist der Vertikalgradient. Im tiefen Wasser vor der Containerkaje sind die Konzentrationen um 1 bis 2 ‰ höher als an der Wasseroberfläche. Das erklärt, die verstärkten Strömungen an der Sohle auch noch in der letzten Flutstromphase. Die etwas geringeren Salzgehalte in der Vorhafeneinfahrt sind auf die Austauschvorgänge zurückzuführen (NASNER, 2004a). An

der Ostmole (Pos. 3) sind die Salzgehalte in den unteren Wasserschichten höher als bei Pos. 4. Aufgrund der sich überlagernden Dichteströmungen wird in den oberen Wasserschichten phasenverschoben leichteres, salzärmeres Wasser aus dem Vorhafen transportiert. Nach der Kenterung gleichen sich die Salzkonzentrationen in allen Profilen an (Messung 6 und 7). Mit sich voll ausprägenden Ebbeströmungen vermindern sich die Salzgehalte kontinuierlich. Bemerkenswert ist der zunehmend deutlicher werdende Übergang der Konzentrationen zwischen den oberen und unteren Wasserschichten bei den Profilen 2 und 5 (Messung 8 bis 12). Dies ist ein Hinweis darauf, wie die Sohlströmungen am südlichen Ende der Containerkaje durch die Brackwasserbedingungen geschwächt werden. Während der Hauptebbestromphase ist auch das ausgeprägte horizontale Salzgefälle in dem rd. 1 km langen Abschnitt zwischen Pos. 1 und 5 auszumachen (Messung 11 bis 14).

Die sich ab  $T_{\frac{1}{2}w}$  ausprägenden Strömungs- und Dichteeffekte im Bereich des Vorhafens zeigen die Vertikalprofile ab Messung 9. Die Salzkonzentrationen in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) folgen phasenverschoben den in der Weser gelegenen Positionen. Da die Ebbeströmungen an der Westmole in den Vorhafen eindringen, sind die Salzgehalte bei Pos. 4 geringer als an der Ostmole bei Pos. 3 (Messung 9 bis 12). Anschließend wurden die natürlichen Gegebenheiten durch einen Schleusungsvorgang überlagert (Messung 13 und 14). Danach stellte sich wieder der ungestörte Zustand ein.

Während der Tideniedrigwasserphase (Messung 15 bis 18) treten die höheren Konzentrationen im Vorhafenbereich auf. Das salzhaltigere Wasser wird durch die Strömungs- und Dichteeffekte verzögert aus dem Vorhafen zur Weser transportiert. Die natürlichen Vorgänge wurden mit der Niedrigwasserschleusung durch das Schleusungswasser aus dem Überseehafen verstärkt (Messung 14 und 15). Wegen der Zuwässerungen durch den Freilaufkanal bei hohen Weserwasserständen sind die Salzgehalte während der Niedrigwasserphase im Überseehafen höher als vor der Schleuse. Von den Austauschvorgängen wird auch noch das Nordende der Columbuskaje beeinflusst. Bemerkenswert ist der bis zur letzten Messung starke vertikale Salzgradient im Profil 5 an der Stromkaje in den unteren Wasserschichten. Dort setzt sich die Flutströmung bereits kurz nach  $T_{nw}$  zunächst an der Sohle durch.

#### 4.1.3 Schwebstoffe

- Flutstromverhältnisse

Aus Anlage 11 ist zu entnehmen wie die Schwebstoffkonzentrationen nach  $T_{nw}$  vor der Stromkaje bis  $C_s < 200$  mg/l abnehmen (Pos. 5, Messung 1 bis 3). Die höheren Feststoffgehalte im Bereich der Nordschleuse sind auf die ebbeorientierten Austauschvorgänge zurückzuführen.

Aus der weiteren Entwicklung der Schwebstoffprofile an der Stromkaje (Pos. 5) lassen sich wertvolle Rückschlüsse auf den Sedimenttransport ziehen. Das hohe Transportvermögen

der sohlennahen Flutströmungen (vgl. Abb. 9) führt zur raschen Schwebstoffanreicherung in den unteren Wasserschichten (Messung 4 bis 6). Besonders hohe Turbulenzen sind bei  $T_{\frac{1}{2}}^1$ w (Messung 7) zu verzeichnen, als noch bis in 6 m Wassertiefe Konzentrationen von  $C_s \approx 650$  mg/l erreicht wurden.

Die ungleichmäßige Schwebstoffverteilung über die Wassertiefe blieb bei Pos. 5 in ähnlicher Form bis zum Eintritt des Thw (Messung 16) erhalten. Bemerkenswert ist die starke Konzentrationszunahme in den unteren Wasserschichten und die durchgehend geringen Werte an der Oberfläche. Der Transport des Sohlenmaterials vor dem Containerterminal wird in der ersten Flutstromphase mobilisiert. Danach sind die nachlassenden Strömungsgeschwindigkeiten noch in der Lage, den Transport des Geschiebes und der Schwebstoffe bis zum Eintritt des Thw aufrecht zu erhalten.

Bei den Messungen 10 bis 12 sowie 14 bis 16 wurden die natürlichen Verhältnisse durch den Schleusungsbetrieb beeinflusst. Im übrigen sind die höheren Konzentrationen bei den Positionen 2 bis 4 auf die sich nach  $T_{\frac{1}{2}}^1$ w ausprägenden Austauschvorgänge zwischen Vorhafen und Weser zurückzuführen. Sie wirken sich offenbar auch noch oberhalb der Einfahrt vor der Columbuskaje (Pos. 1) aus.

- **Ebbestromverhältnisse**

Zu den in Anlage 12 aufgetragenen Schwebstoffprofilen ist folgendes anzumerken. Während der ersten drei Messungen war das Wasserinjektionsgerät „Hol Deep“ im äußeren Bereich der Ostmole im Einsatz. Außerdem war vor der Columbuskaje der Eimerkettenbagger „Bremerhaven“ tätig. Durch diese Aktivitäten sind die natürlichen Abläufe überlagert worden.

Die Schwebstoffkonzentrationen sind in der letzten Flutstromphase vor der Stromkaje vergleichsweise gering (Messung 1 bis 3, Pos. 5 in Anlage 12). Beachtenswert ist die Zunahme in den unteren Wassertiefen von  $C_s \approx 100$  mg/l auf 250 mg/l. Das ist mit den in dieser Tidephase beobachteten Vertikalgradienten der Strömungen und Salzgehalte erklärt. Die höheren Schwebstoffgehalte im Bereich der Schleusenzufahrt mit den größeren Werten an der Ostmole (Pos. 3) ist auf die in dieser Tidephase ausgeprägten Walzen- und Dichteströmungen zurückzuführen. Während der Flutstromkenterung (Messung 4 und 5) beruhigt sich das Schwebstoffgeschehen. Die mittleren Konzentrationen sinken an allen Positionen auf  $C_s < 100$  mg/l ab.

In der Hauptebbestromphase (Messung 6 bis 14) sind die Schwebstoffkonzentrationen vor der Stromkaje (Pos. 5) relativ gleichmäßig über die Wassertiefe verteilt. Das ist auf die vorstehend beschriebene, brackwasserbedingte Minderung der Sohlströmungen bei Ebbe zurückzuführen. Merklich höhere Feststoffmengen sind ab Tidehalbwasser im Bereich der Schleusenzufahrt zu beobachten (ab Messung 8). Den rechtsdrehenden Walzenströmungen entsprechend sind dabei die höheren Konzentrationen bei den Pos. 2 und 4 zu verzeichnen.

Bei den Messungen 15 bis 18 weisen die Schwebstoffe bei Pos. 5 relativ geringe Konzentrationen bei sehr gleichmäßiger Verteilung über die Wassertiefe auf. Bei der letzten Messung betrug der Feststoffgehalt lediglich  $C_s \approx 100$  mg/l. Durch die dichtebedingte, sohlennahe Strömung aus dem Vorhafen wurden an der Pos. 2 noch bis zu  $C_s \approx 250$  mg/l festgestellt.

#### 4.1.4 Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen

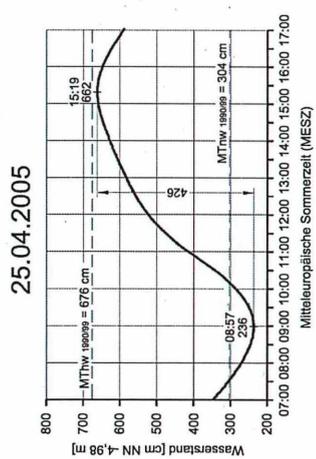
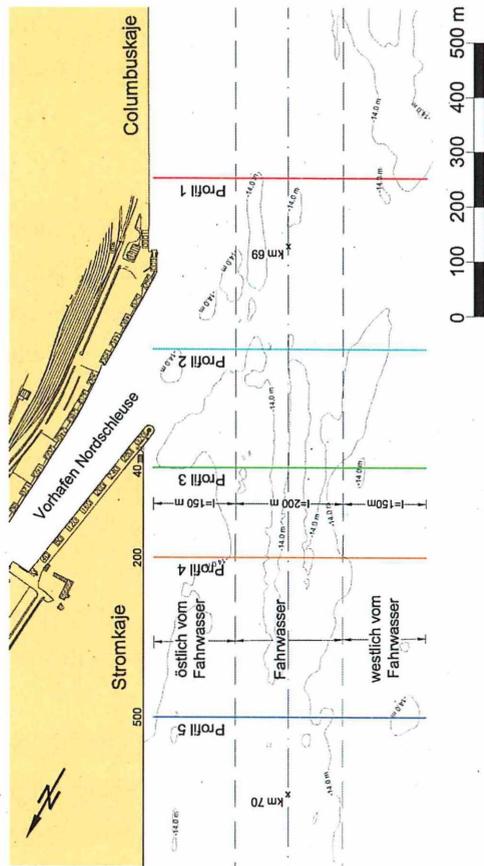
Mit den in situ Messungen wurde ein Einblick in die hydrodynamischen Verhältnisse im Bereich der Nordschleuse gewonnen. Im Tiderhythmus dominieren die Flut- über die Ebbebeströmungen. Die morphodynamischen Vorgänge bei Flut sind insgesamt intensiver als während der Ebbeperiode. Zusätzlich wirkt sich der stärkere Vertikalgradient im tiefen Wasser über der Sohle auf den resultierenden Geschiebetrieb aus. Deshalb werden die Sedimente in der Weser bei Bremerhaven stromauf transportiert. Bei Springtiden sind die Unterschiede stärker ausgeprägt als bei Nipptiden. Das wurde auch mit Messungen des tideabhängigen Schwebstoffgehaltes im Untersuchungsgebiet nachgewiesen (VISSCHER, WOLTERING 1998).

Bei der vorstehenden Beschreibung der ADCP-Messungen ist auf die unterschiedlichen Verteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten während der Ebbe- und Flutstromphase hingewiesen worden.

Ergänzend sind die tideabhängigen Änderungen der mittleren Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten in der 200 m breiten Fahrrinne sowie den westlich und östlich angrenzenden 150 m breiten Querschnitten berechnet worden. Die gemittelten Flutstromgeschwindigkeiten für die fünf Querprofile sind in Abb. 14 aufgetragen. Typisch ist die im Gegensatz zur Ebbe sehr unsymmetrische Verteilung im Tideablauf. In allen Querschnitten werden die Maximalwerte in der zweiten Stunde nach der Ebbestromkenterung, mehr als vier Stunden vor der Flutstromkenterung erreicht.

Die morphologischen Bedingungen führen im Bereich der südlichen Stromkaje (Profil 5 bis 1) zur Strömungsumlenkung vom östlichen zum westlichen Querschnitt. Dem Verlauf der -14 m SKN Tiefenlinien entsprechend verzögern sich die Flutstromgeschwindigkeiten östlich des Fahrwassers von Profil 5 bis 3. In der Fahrrinne und westlich davon ist es umgekehrt (Abb. 14 und Anlage 13).

Im Bereich der Querschnittseinengung werden die Flutwassermengen nach Westen abgelenkt und von den Austauschvorgängen in der Vorhafeneinfahrt überlagert. Dadurch werden die Auflandungen am Staupunkt an der Ostmole und die Sedimentationen oberhalb der Schleusenzufahrt verursacht. Der Stromstrich verlagert sich nach Westen. Bei Profil 1 erreicht die -13 m SKN Tiefenlinie den rechten Fahrwasserrand und schiebt sich oberhalb noch weiter nach Westen vor (Anlage 13). Umgekehrt ist der Verlauf der -14 m SKN Linie westlich des Fahrwassers. Die in Abb. 14 angegebenen gemittelten Flutstromgeschwindigkeiten stimmen mit den morphologischen und geometrischen Gegebenheiten überein. Im



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 383 m<sup>3</sup>/s

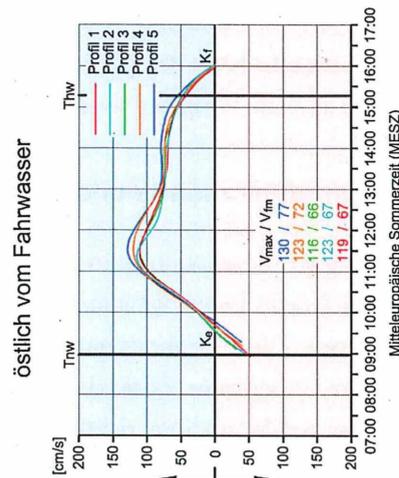
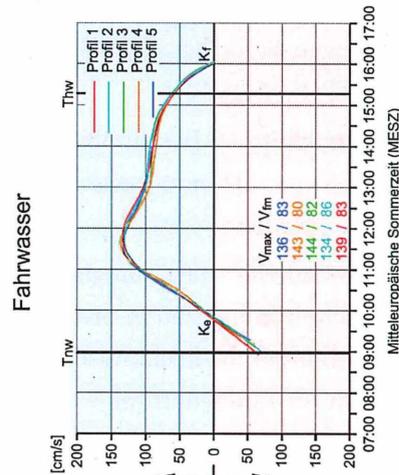
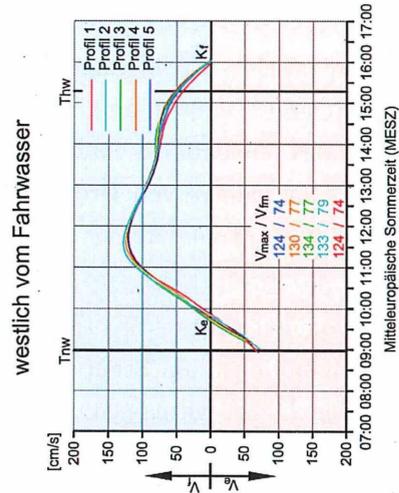


Abb. 14: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse am 25.04.2005

Profil 5 sind die Flutströmungen östlich vom Fahrwasser noch stärker als westlich davon. Weiter stromauf kehren sich die Verhältnisse um. Von besonderem Einfluss ist auch die 280 m breite Öffnung (Einfahrt Vorhafen Nordschleuse) zwischen der Strom- und Columbuskaje.

Die in Abb. 15 aufgetragenen Ebbestromgeschwindigkeiten weisen überall einen annähernd parabolischen Verlauf von der Flutstrom- bis zur Ebbestromkenterung auf. Die absoluten Werte der gemittelten Geschwindigkeiten weichen in den fünf Profilen nur geringfügig voneinander ab. Insgesamt gesehen sind sie im Fahrwasser und westlich davon stärker als im östlichen Bereich.

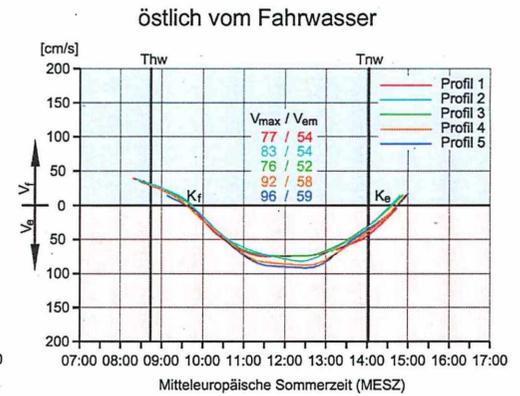
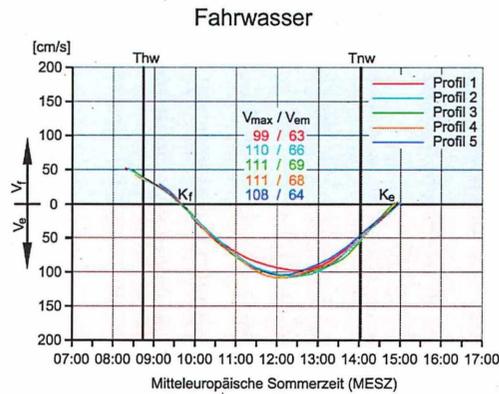
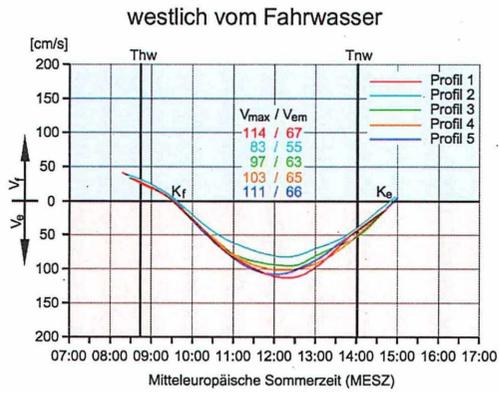
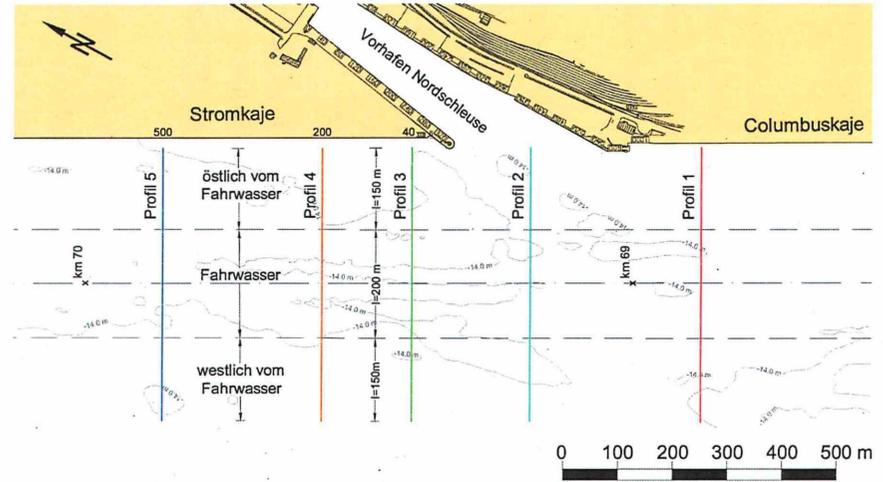
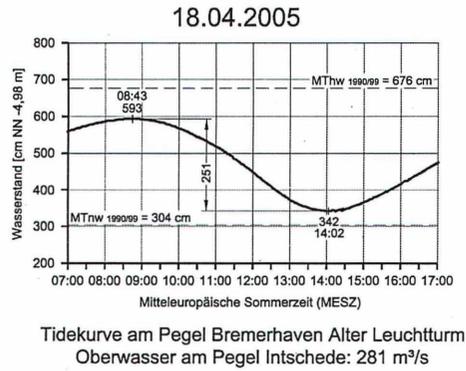
Zusätzliche Anmerkungen zu den Ebbeströmungen sind mit den in Anlage 13 dargestellten Peilungen zu machen. Vor der Columbuskaje ist der Querschnitt durch starke Sedimentationen eingeschränkt. Die SKN -13 m Tiefenlinie ist bis ins Fahrwasser vorgelagert. Folglich werden die Ebbewassermengen beschleunigt und nach Westen abgelenkt. Das ist der Grund für die Sohliefen westlich der Fahrrinne von über -14 m SKN und die dort höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Profil 1 (Abb. 15 und Anlage 13).

Mit der anschließenden Querschnittsveränderung im Bereich der Vorhafeneinfahrt (Aufweitung im Osten und Einengung im Westen) werden die Ebbewassermengen in östlicher Richtung umgelenkt (Profil 2). Unterhalb des Schleusenvorhafens findet der Übergang zum tieferen Wasser vor der Stromkaje statt (Profile 3 bis 5).

Die Verlagerung des Talwegs zur Stromkaje wird mit Anlage 13 deutlich. Ab Station 500 werden an der Stromkaje Sohliefen von  $>-14$  m SKN und ab Station 1500 von  $>-15$  m SKN erreicht. Am unteren Ende betragen die Tiefen auch noch östlich der Fahrrinne mehr als -17 m SKN.

Die Tidewassermengen werden bei Strom-km 71 mehr in den großen Wassertiefen der Fahrrinne und östlich davon transportiert (Anlage 13). So wird auch das von See eindringende Salzwasser verstärkt über der Sohle entlang der Stromkaje stromauf geführt.

Abb. 15: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse am 18.04.2005



## 4.2 Bremerhaven Kaiserschleuse

### 4.2.1 Strömungsverhältnisse im Tidestrom

Die Lage der in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse gefahrenen ADCP-Profile ist in Abb. 16 angegeben. In den zugehörigen Anlagen sind die Geschwindigkeitsvektoren wie

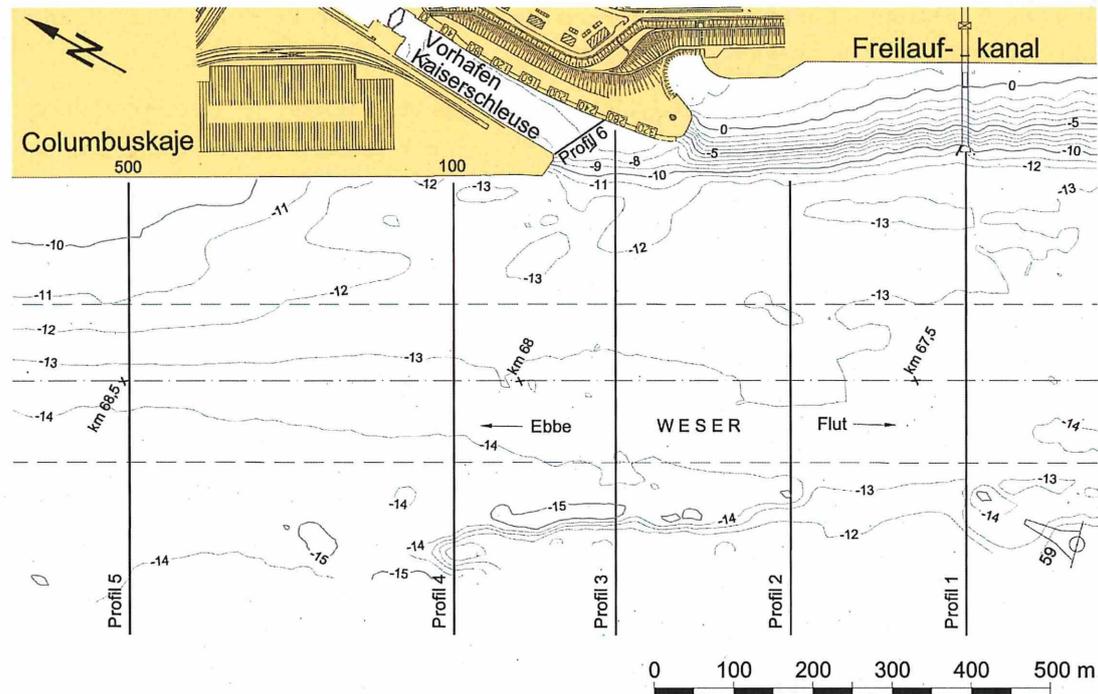


Abb. 16: Lage der ADCP-Profile

im Weserabschnitt vor der Nordschleuse in 2 m Abständen dargestellt worden. Es macht Sinn, die Strömungsverhältnisse im Zusammenhang mit den in Anlage 13 dargestellten morphologischen Randbedingungen zu erläutern.

- **Flutströmungen (Anlage 14 bis 17)**

Am 4. Oktober 2005 betrug der Tidehub 400 cm bei einem Oberwasserabfluss am Pegel Intschede von  $Q_0 = 162 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anlage 14). Die ersten Profile wurden, ausgehend vom Querschnitt am Freilaufkanal (Profil 1), zum Eintritt des Tideniedrigwassers gefahren. Für die Umläufe betrug der Zeitbedarf 20 bis 25 Minuten. Damit konnten die Strömungsverhältnisse im Tideablauf gut erfasst werden.

Mit Anlage 14 wird die Ebbestromkenterung und danach einsetzende Flutstromphase dokumentiert. Trotz des geringen Oberwassers dauerte die Ebbestromkenterung etwa eine Stunde, bis sie sich von den unteren bis in die oberen Wasserschichten durchgesetzt hatte (Anlage 14, Messung 1 bis 3). Bemerkenswert ist die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung in den oberen Tiefenzellen während der letzten Ebbestrom- (Messung 1) und der einsetzenden Flutstromphase (Messung 4).

Die Flut setzt sich zuerst im westlichen (linken) Fahrwasser und außerhalb davon vor der Columbuskaje durch. Das von See eindringende Salzwasser wird dort im tieferen Querschnitt stromauf geführt (vgl. Anlage 13). In Sohlennähe wurden bei der 4. Messung bereits Flutstromgeschwindigkeiten bis zu  $v_f > 1,25$  m/s festgestellt.

Die über den Fahrwasserbereich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten in der ausklingenden Ebbestromphase und anschließenden Kenterung sind für die Profile 1 (Freilaufkanal) bis 5 (Mitte Columbuskaje) in Abb. 17 als Vertikalprofile aufgetragen.

Damit werden die komplexen hydrodynamischen Vorgänge während der Kenterung dargelegt. Morphologisch von Interesse ist die hohe Transportkapazität der Strömungen in den unteren Wasserschichten bereits während der ersten Flutstromphase.

Die Verhältnisse bei voll ausgeprägtem Flutstrom etwa 2 Stunden nach Thw sind in Anlage 15 dargestellt. Es wurden Geschwindigkeiten bis zu  $v_f > 175$  cm/s im Fahrwasser der Weser gemessen. Zu beachten sind bei den Messungen 5 bis 7 auch die starken Sohlströmungen von  $v_f > 125$  cm/s im linken, westlichen Fahrwasser und außerhalb davon. In den Profilen oberhalb der Kaiserschleuse findet verstärkt in den oberen Tiefenzellen eine Verlagerung zum Osten statt. Das ist auch noch bei sich abschwächender Flutstromintensität etwa 2 Stunden vor dem Eintritt des Thw der Fall (Anlage 15, Messung 8). Ursächlich für die Strömungsumlenkung ist die Querschnittserweiterung durch die zurückgehende Sedimentation vor der Columbuskaje (vgl. Anlage 13).

Ergänzend zu Anlage 15 sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser zwischen Freilaufkanal und Columbuskaje in Abb. 18 aufgetragen. Damit ist die Verlagerung der maximalen Geschwindigkeiten innerhalb der Wassersäule nach oben mit fortschreitender Flutdauer nachzuvollziehen (vgl. Abb. 17). In allen Profilen wurden während der Flut am 4. Oktober mittlere Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser von  $v_f > 150$  cm/s erreicht (vgl. Abb. 18). Etwa zwei Stunden vor dem Eintritt des Thw sind die Werte bereits deutlich geringer.

Die ADCP-Profile bis zum Eintritt des Tidehochwassers gehen aus Anlage 16 hervor. Insgesamt gesehen wird die Strömungsintensität von der 8. bis zur 12. Messung deutlich schwächer. Bei genauerer Betrachtung ist die Strömungsumlenkung nach Osten auch noch in der späten Flutstromphase zu erkennen. Die Flutstromkenterung tritt zuerst im flacheren Wasser vor der Columbuskaje (Profil 5) ein. Zur Vervollständigung ist die Kenterphase in Anlage 17 dokumentiert. Etwa eine Stunde nach Thw wurden in allen Querprofilen keine nennenswerten Strömungsgeschwindigkeiten festgestellt (Anlage 17, Messung 14). In der späteren Flutstromphase sind die Strömungen im Fahrwasser relativ gleichmäßig über die Wassertiefe verteilt (Abb. 19). Bis rd. 1 Stunde vor Thw wurden noch Werte von  $v_f \approx 1$  m/s registriert. Bei der Flutstromkenterung setzt sich das spezifisch leichtere Oberwasser zunächst in den oberen Wasserschichten durch. Etwa 1 Stunde nach Thw war die Kenterung im unteren Profil vor der Columbuskaje abgeschlossen.

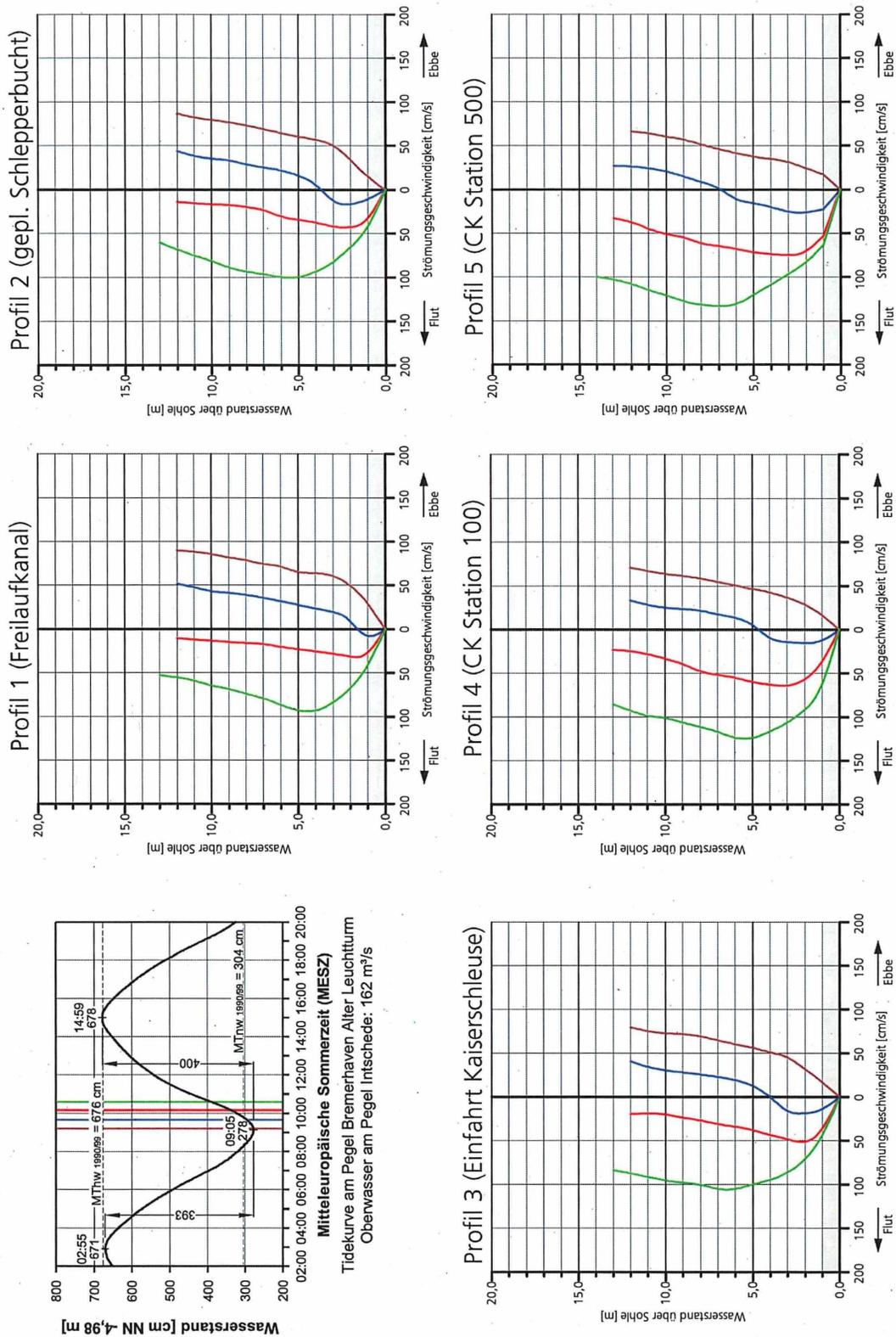


Abb. 17: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005 (Lage der Profile s. Abb. 16)

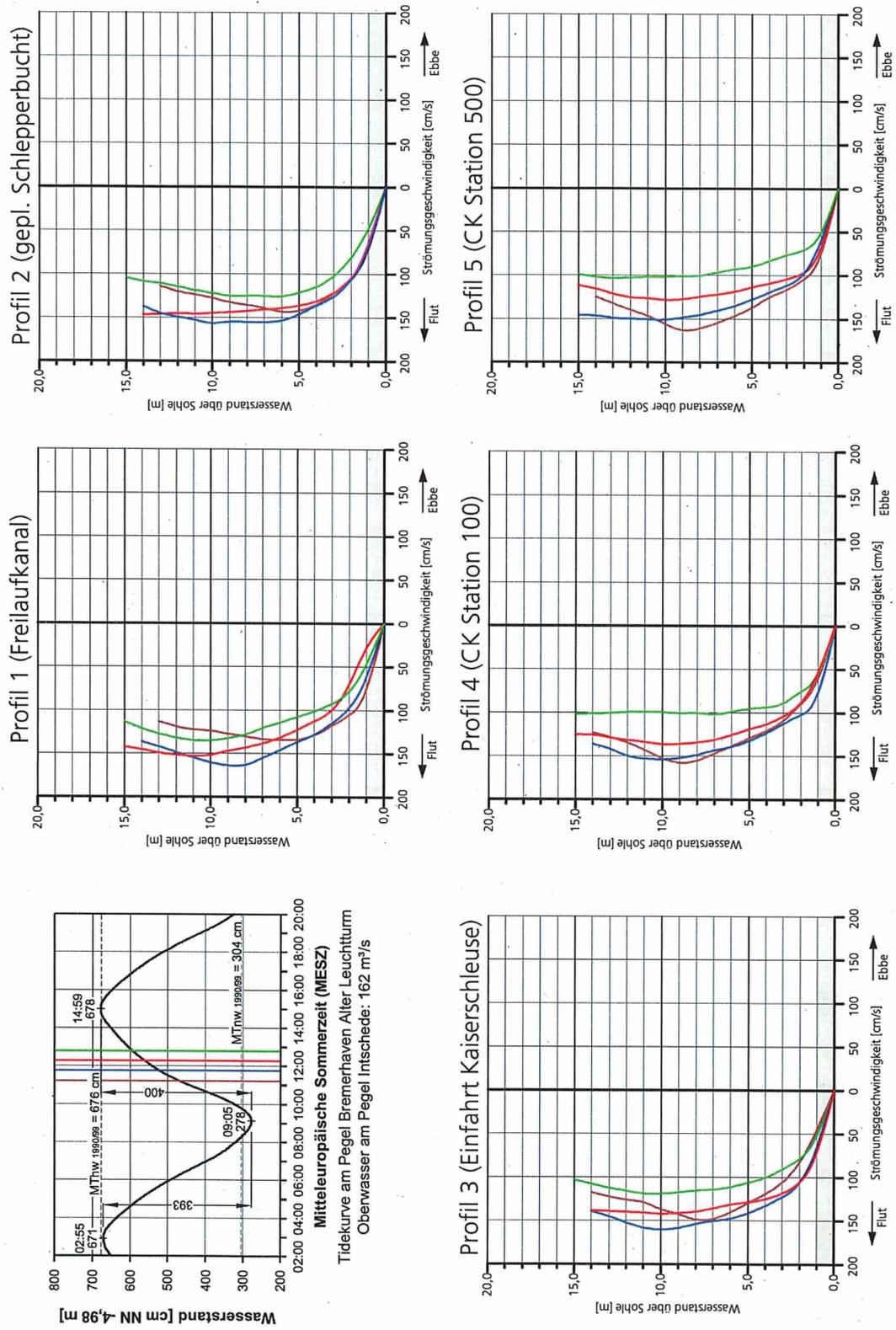


Abb. 18: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005 (Lage der Profile s. Abb. 16)

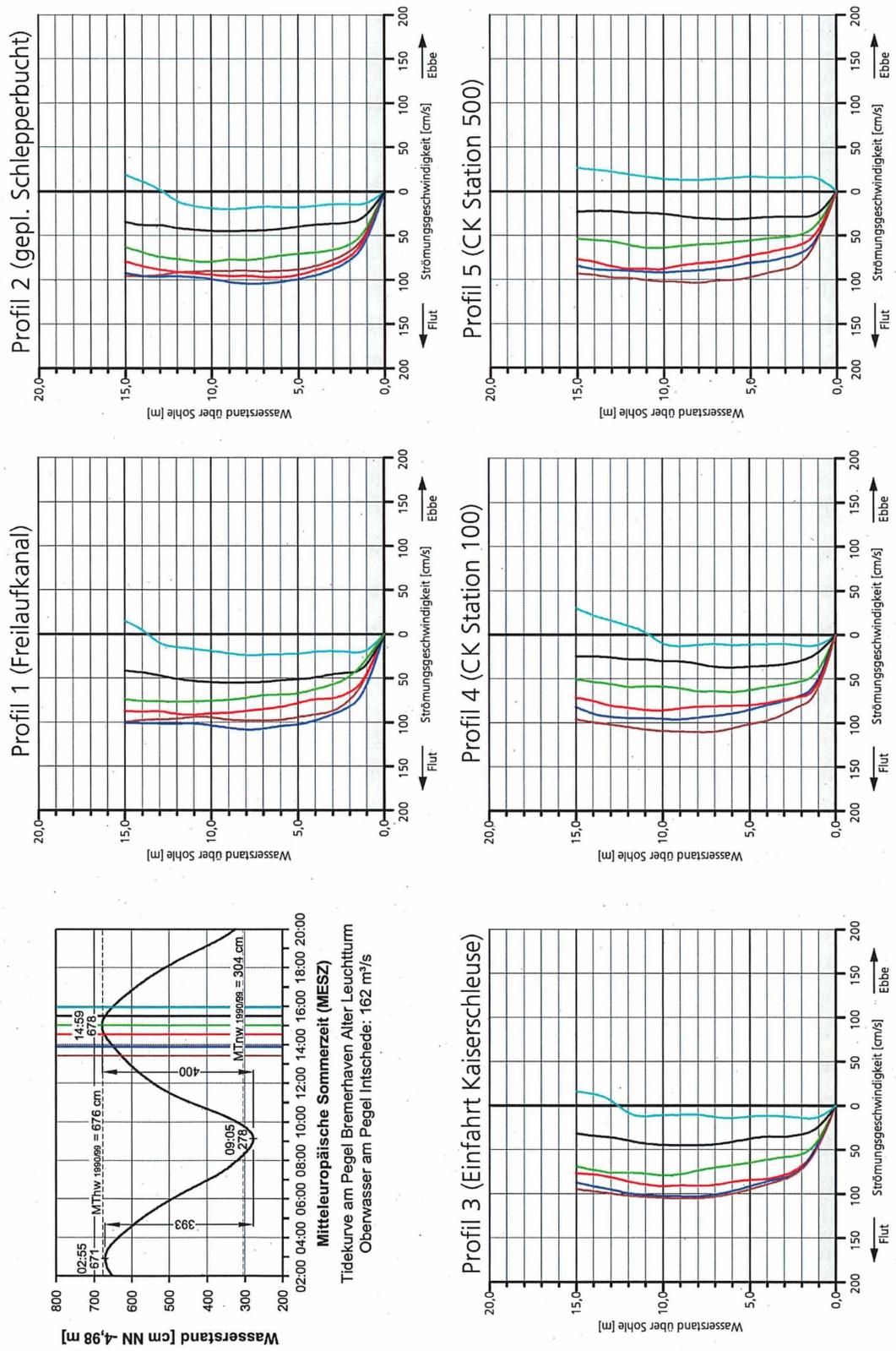


Abb. 19: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005 (Lage der Profile s. Abb. 16)

- **Ebbeströmungen (Anlage 18 bis 21)**

Bei anhaltend niedrigem Oberwasser ( $Q_0 = 123 \text{ m}^3/\text{s}$  in Intschede) betrug der Nipptidefall am 12. Oktober 2005 324 cm. Die ersten Profile wurden bei Tidehochwasser und ausklingender Flutstromphase ausgeführt. Die Kenterung vollzog sich zunächst im flacheren Wasser außerhalb der Fahrrinne (Messung 1 in Anlage 18). Bei der folgenden Messung 2 wurden im Untersuchungsgebiet nur geringe Wasserbewegungen festgestellt. Etwa eine Stunde nach Thw setzt sich der Ebbestrom zuerst in den oberen Wasserschichten und in den geringeren Wassertiefen außerhalb des Fahrwassers durch (Messung 3 in Anlage 18). Die Turbulenzen bei der 4. Messung im Profil 2 am linken Fahrwasserrand wurden durch die Durchfahrt eines Laderaumsaugbaggers verursacht.

Die über die Fahrrinnenbreite gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 20 dokumentieren den geringen Vertikalgradienten während der späten Flutstromphase mit der danach von oben nach unten eintretenden Flutstromkenterung (vgl. auch Abb. 19). Etwa 1,5 Stunden nach Thw hatte sich überall die Ebbeströmung durchgesetzt.

Die kontinuierliche Verstärkung der Ebbestromgeschwindigkeiten bis etwa Tidehalbwasser geht aus Anlage 19 hervor. Bei der 7. und 8. Messung wurden in den oberen Wasserschichten Strömungen bis  $v_{max} > 1,75 \text{ m/s}$  gemessen. Auffällig ist die morphologisch bedingte Verlagerung der Strömungsgeschwindigkeiten nach Westen mit den Maximalwerten außerhalb des Fahrwassers (vgl. Anlage 13).

Die für den Fahrwasserbereich gemittelten Strömungsprofile veranschaulichen die während der Ebbephase gleichmäßig zunehmenden Geschwindigkeiten mit den höchsten Werten an der Oberfläche und den typischen Vertikalverteilungen (Abb. 21). Bei voll ausgeprägtem Ebbestrom wurden an der Oberfläche Maximalströmungen von  $v_{max} \approx 150 \text{ cm/s}$  erreicht.

Auch mit fortschreitender Ebbedauer bis 2 Stunden vor Thw bleibt das Strömungsmuster nach Stärke und Richtung erhalten (Anlage 19, Messung 8 und Anlage 20, Messung 9). Danach nimmt die Strömungsintensität bis zum Eintritt des Tideniedrigwassers gleichmäßig ab (Messung 10 bis 13 in Anlagen 20 und 21). Der etwa eine Stunde dauernde Kentervorgang ist mit Anlage 21 nachvollziehbar. Bei der letzten Messung wurde das von See kommende spezifisch schwerere Wasser in den unteren Tiefenzellen bereits stromauf transportiert. Die stärkeren hydrodynamischen Kräfte bei Springtiden sind am 4. Oktober 2005 gemessen worden (vgl. Anlage 14, 3. Messung).

Die vorstehend beschriebenen Vorgänge während der späten Ebbephase werden mit den Vertikalprofilen in Abb. 22 vervollständigt. Die komplexen Abläufe während der Ebbestromkenterung sind mit denen bei der vorausgegangenen Messung vergleichbar (s. Abb. 17).

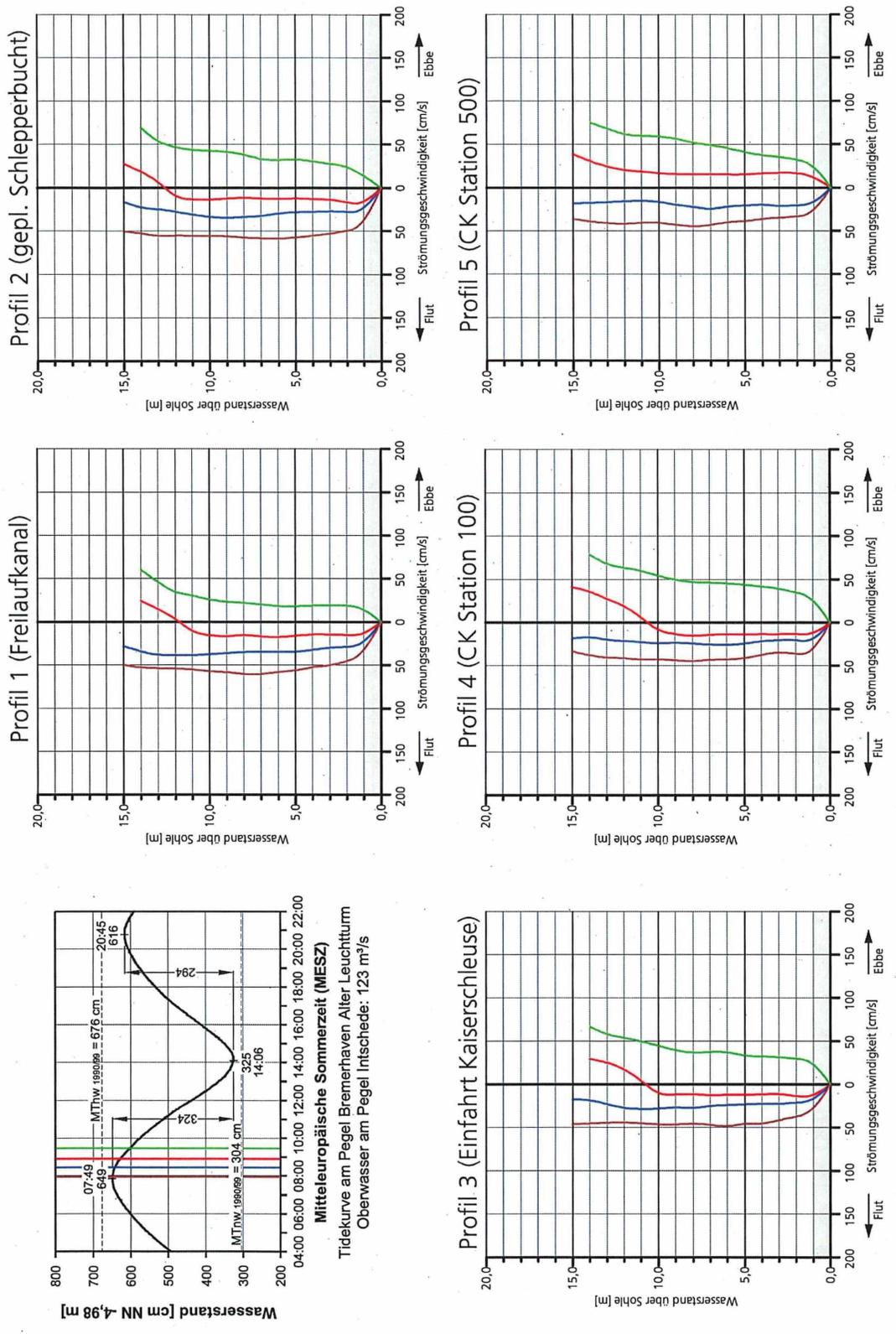


Abb. 20: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005 (Lage der Profile s. Abb. 16)

Abb. 21: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005  
 (Lage der Profile s. Abb. 16)

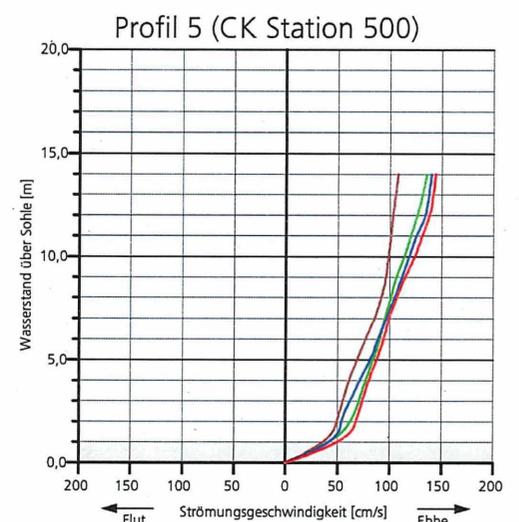
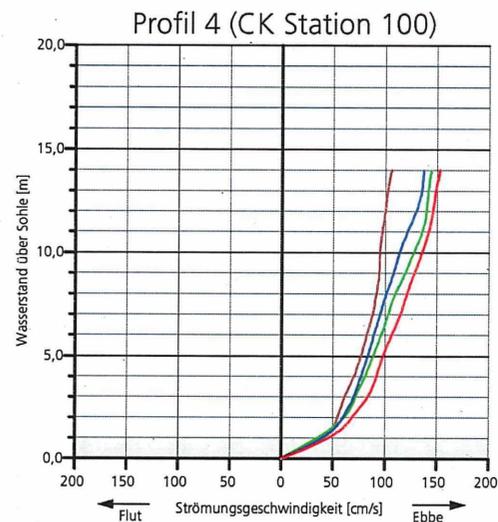
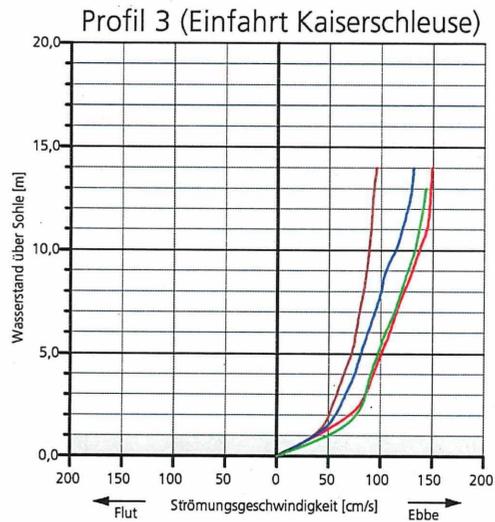
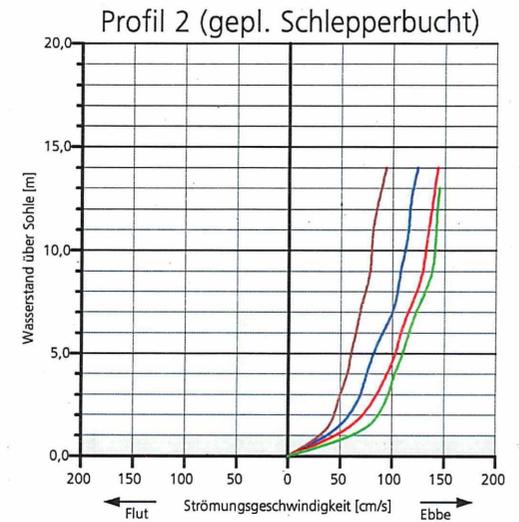
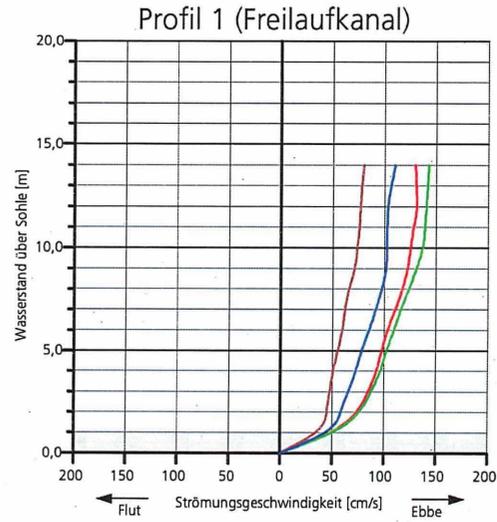
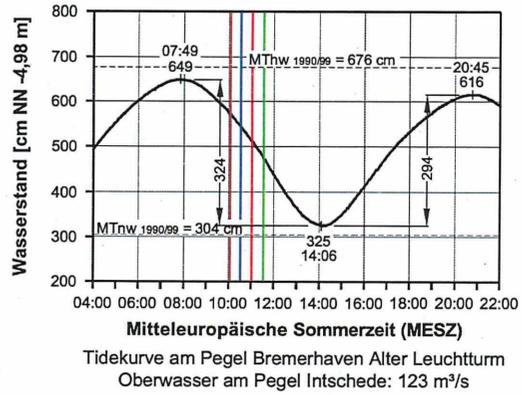
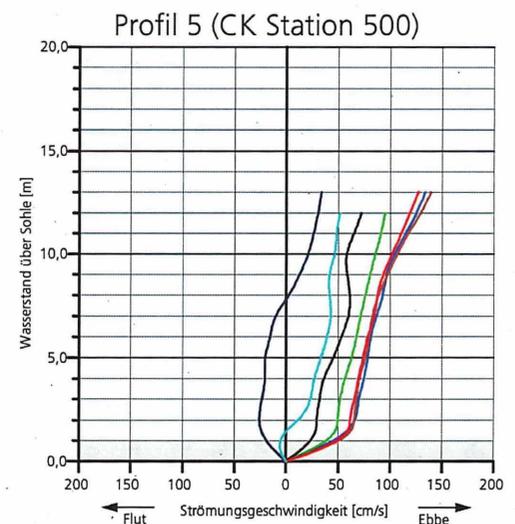
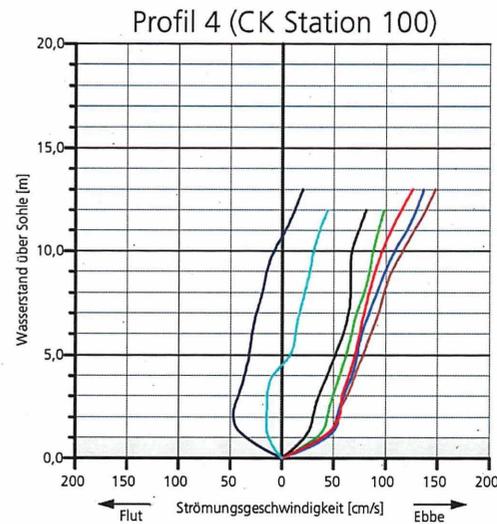
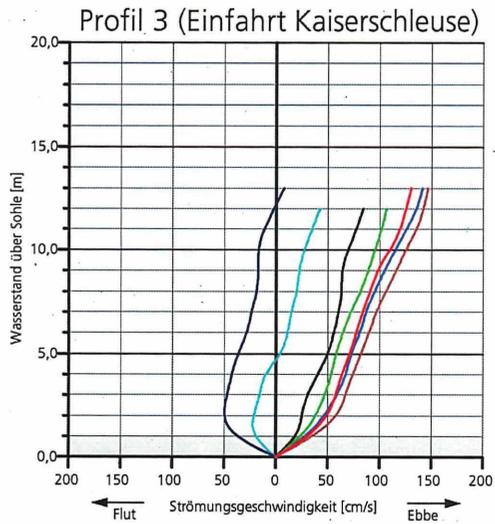
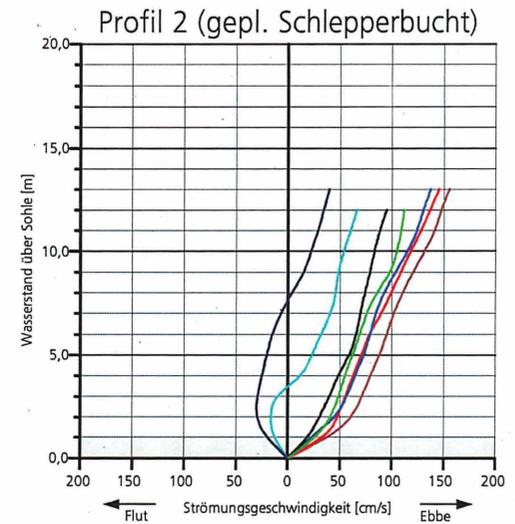
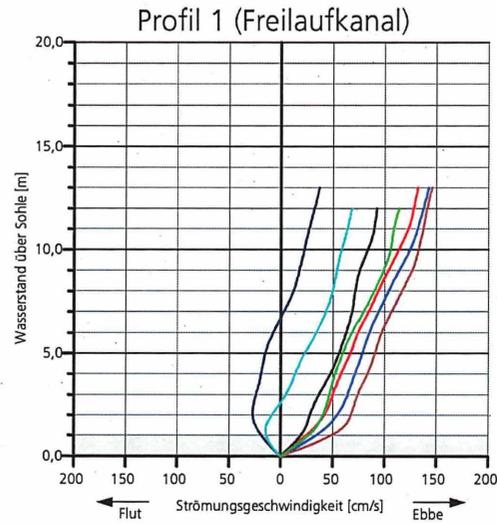
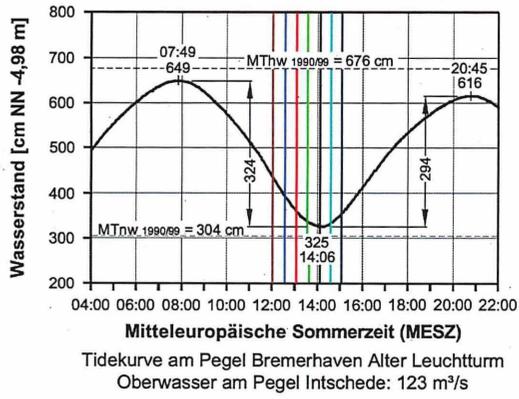


Abb. 22: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005  
 (Lage der Profile s. Abb. 16)



## 4.2.2 Salzgehalte

- **Flutstromverhältnisse**

Für die fünf in Anlage 22 eingetragenen Positionen sind die tideabhängigen Salzgehalte dargestellt worden. Die Konzentrationen erhöhten sich im Tidestrom während der Flutdauer um rd. 13 ‰. Die absoluten Werte lagen zu Beginn der Messungen bei  $S \approx 9$  ‰ und bei Eintritt des Thw bei  $S \approx 22$  ‰. Die insgesamt hohen Salzgehalte sind auf den geringen Zufluss von  $Q_0 = 135 \text{ m}^3/\text{s}$  in das Tidegebiet zurückzuführen. Wesentlich für die Sedimenttransportvorgänge in der Weser und dem angrenzenden Vorhafenbereich der Kaiserschleuse sind die horizontalen und vertikalen Salzgehaltsverteilungen im Tideablauf und die sich daraus ergebenden Dichteströmungen. Aufgrund der geringeren Vorhafenabmessungen und Ausbautiefe sind die Austauschvorgänge im Bereich der Kaiserschleuse nicht so stark ausgeprägt wie bei der Nordschleuse.

Bei den ersten Messungen waren die Salzgehalte in der Weser (Pos. 1, 2 und 5) relativ gleichmäßig über die Tiefe verteilt (Messung 1 bis 3 in Anlage 22). Die höheren Konzentrationen und stärkeren Gradienten in der Einfahrt (Pos. 3 und 4) sind ursächlich für die bis nach Tideniedrigwasser anhaltenden sohlennahen Dichteströmungen aus dem Vorhafen. Die relativ hohen Salzgehalte bei der ersten Messung wurden zusätzlich durch eine vorausgegangene Niedrigwasserschleusung verursacht. Dies wird im folgenden kurz begründet.

Bei einer Kammerfläche der Kaiserschleuse von  $A \approx 9.400 \text{ m}^2$  und einem Hafenwasserstand von etwa +1,20 m NN (HBH Bremerhaven, 2000) wurden bei Tnw (Tidewasserstand etwa -2,30 m NN) aus dem Überseehafen ein Schleusungswasservolumen von

$$V = \Delta H \cdot A = 3,50 \text{ m} \cdot 9.400 \text{ m}^2 = 32.900 \text{ m}^3$$

in den Vorhafen abgegeben. Schleusungsverluste werden bei hohen Tidewasserständen durch den Freilaufkanal ausgeglichen. Das hat entsprechend hohe Salzkonzentrationen im abgeschleusten Hafenbereich zur Folge. Aufgrund des niedrigen Oberwassers betrug der Salzgehalt im Überseehafen  $S > 20$  ‰ (NASNER, 2004b). Folglich hat das Schleusungswasser die Salzkonzentrationen und damit die nach außen gerichteten Dichteströmungen verstärkt.

Mit einsetzendem Flutstrom (3. und 4. Messung) verändern sich die horizontalen und vertikalen Salzkonzentrationen im Untersuchungsbereich. Ab der 5. Messung wurden vor der Columbuskaje (Pos. 5) deutlich höhere Salzgehalte gemessen als an den oberhalb gelegenen Positionen. Typisch sind die starken horizontalen und vertikalen Gradienten von der 6. bis zur 9. Messung (Anlage 22). Das erklärt auch die mit den ADCP-Profilen erläuterten ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilungen über die Wassertiefe (vgl. Anlage 15 und Abb. 18).

Außerdem überlagern sich ab Tidehalbwasser die Strömungs- und Dichteeffekte im Vorhafen. Mit der 8. und 9. Messung in Anlage 22 (Pos. 3 und 4) kann nachvollzogen werden, wie das salzigere Wasser unten in den Vorhafen eingetragen und im Austausch spezifisch leichteres Wasser oben zur Weser zurückfließt. Die höheren Salzgehalte an der Ostmole (Pos. 3) gegenüber der Westmole (Pos. 4) sind auf die gegen den Uhrzeigersinn drehenden Flutstromwalzen zurückzuführen.

Erst in der späteren Flutstromphase ab Messung 10 werden die vertikalen und horizontalen Salzgradienten in der Weser schwächer. Das führt auch zur Vergleichmäßigung der Strömungsverteilungen (vgl. Anlage 16). Der Wasseraustausch zwischen Vorhafen und Weser setzt sich bis nach Eintritt des Thw fort. Dabei rücken die Salzgehaltsprofile mit sich erhöhender Konzentration enger zusammen (Messung 10 bis 16). Dem geringer werdendem Gradienten entsprechend nimmt auch die Intensität der Dichteströmungen ab.

- **Ebbestromverhältnisse**

Bei den Salzgehalts- und Trübungsmessungen am 13. Oktober 2005 waren die Tide- und Oberwasserverhältnisse annähernd so, wie bei den Strömungsmessungen vom Vortag. Der Tidefall betrug 319 cm bei einem Oberwasser in Intschede von  $Q_0 = 124 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die bei Thw gemessenen Salzgehalte an den 5 Positionen (Anlage 23, Messung 1 und 2) stimmen mit den entsprechenden Profilen der Flutmessung überein (vgl. Anlage 22). Bemerkenswert sind die geringen Vertikalgradienten und die annähernd gleichen Konzentrationen an allen Positionen im tieferen Wasser. Während der Flutstromkenterung gleichen sich auch die Salzgehalte in den oberen Wasserschichten an (Anlage 23, Messung 3). Das ist ein Hinweis auf die ausbaubedingten schwächeren Austauschvorgänge im Bereich der Kaiserschleuse (NASNER, 2004a).

Auffallend sind die sich während der Ebbestromdauer einstellenden relativ starken Vertikalgradienten bis zur Kenterung (Anlage 23). In der Weser verringerten sich die Salzgehalte kontinuierlich während der Ebbestromphase von der 5. bis zur 18. Messung an der Sohle um  $\Delta S \approx 22 - 14 = 8 \text{ ‰}$  und an der Oberfläche um  $\Delta S \approx 20 - 10 = 10 \text{ ‰}$ . Die stärkere Schichtung der Salzgehalte kann auch auf die geringere turbulente Durchmischung bei Nipptiden zurückgeführt werden (STÜCKRATH, 1970; BARG, 1979).

Stärkere horizontale Salzgefälle zwischen Pos. 5 und Pos. 1 wurden in dem rd. 1 km langen Untersuchungsabschnitt während der Hauptebbestromphase in den oberen Wasserschichten festgestellt (Messung 8 bis 14, Anlage 23). Die in Anlage 19 und 20 dargestellten Strömungsvektoren (Messung 7 bis 12) zeigen, dass die Ebbwassermengen mehr im Fahrwasser und westlich davon abgeflossen sind.

Bei den gleichen Messungen lagen die Salzkonzentrationen in der Vorhafeneinfahrt höher als an den Positionen 2 und 1 was auf die Austauschvorgänge zwischen Vorhafen und Weser hinweist.

### 4.2.3 Schwebstoffe

- **Flutstromverhältnisse**

Die aus den Trübungsmessungen berechneten Schwebstoffverteilungen sind in Anlage 24 dargestellt.

Bei der ersten Messung sind die höheren Schwebstoffkonzentrationen in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) auf die ebbeorientierten Dichteströmungen und zuvor getätigte Niedrigwasserschleusung zurückzuführen. Die relativ hohen Schwebstoffgehalte im Bereich der Kaiserschleuse bei den folgenden beiden Messungen können nicht mit den hydrodynamischen und morphologischen Vorgängen in der frühen Flutphase erklärt werden.

Mit sich voll ausprägenden Flutstromverhältnissen etwa ab Tidehalbwasser stellen sich in der Vorhafeneinfahrt (Pos. 3 und 4) höhere Schwebstoffmengen als in der Weser ein. Das ist auf das mit den Walzen- und Dichteeffekten resuspendierte Sohlenmaterial in der Schleusenzufahrt erklärt. Die höchsten Suspensionen wurden dort auch bei fortschreitender Flut bis nach Tidehochwasser festgestellt.

Im flachen Wasser vor der Columbuskaje wurden die höheren Konzentrationen (Profil 5) nach Tidehalbwasser registriert (Messung 8 bis 11 in Anlage 24). Das ist mit der Verlagerung der Flutströmung in die oberen Tiefenzellen während der fortgeschrittenen Flutphase erklärt. Relativ geringe Konzentrationen wurden dagegen im strömungsberuhigten Bereich vor dem Freilaufkanal ermittelt.

Die bis nach Thw andauernden Dichteeffekte sind ursächlich für die höheren Konzentrationen in der Hafeneinfahrt. Vor dem Freilaufkanal gingen die Feststofffrachten in den oberen Wasserschichten bis auf rd. 350 mg/l zum Eintritt des Thw zurück.

- **Ebbestromverhältnisse**

Die zwischen Freilaufkanal und Columbuskaje ermittelten Schwebstoffgehalte sind in Anlage 25 dargestellt.

Den hydrologischen Randbedingungen entsprechend wurden im Untersuchungsgebiet während der Ebbe nur geringe Suspensionsmengen ermittelt. Bei dem geringen Oberwasser im Oktober 2005 liegt die Trübungszone der Tideweser oberhalb von Bremerhaven.

Von Thw bis zur Flutstromkenterung verringerten sich die Schwebstoffgehalte in der Weser bis auf  $C_s \approx 50$  mg/l (Anlage 25, Messung 1 bis 4). Lediglich an der westlichen Vorhafeneinfahrt wurden aufgrund der Strömungs- und Dichteeffekte etwas höhere Konzentrationen festgestellt.

Während der Ebbestromphase liegen die Feststoffanteile im Tidestrom unter 200 mg/l (Messung 5 bis 16 in Anlage 25). Die Ergebnisse in Anlage 25 zeigen, dass in der Hauptebbestromphase (Profil 4, Messung 8 bis 12) nur geringe Austauschvorgänge stattgefunden haben. Die etwas höheren Werte bei den letzten Messungen in Anlage 25 sind auf Schlepmanöver zurückzuführen.

Die relativ gleichmäßige Verteilung über die Wassertiefe ist mit den vorstehend beschriebenen, während der Ebbe andersartigen Strömungs- und Salzgehaltsverteilungen erklärt. Die brackwasserbedingten Einflüsse führen zur Schwächung der Sohlströmungen während der Ebbestrom- und zur Verstärkung in der Flutstromphase mit entsprechend höheren Schwebstoffmengen. Deshalb ist der resultierende Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet stromauf gerichtet. Die Verhältnisse kehren sich erst bei hohen Abflüssen aus dem Binnenland ( $Q_0 > 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) um (NASNER, 1991). Die wesentlich höheren Schwebstofffrachten in der Weser während der Flut und bei Springtiden wurden mit Langzeituntersuchungen bei niedrigem Oberwasser nachgewiesen (VISSCHER und WOLTERING, 1998).

Bei Nipptiden und vergleichbaren Oberwasserbedingungen liegen übrigens auch in der Weser oberhalb der Nordschleuse ähnliche Feststoffverhältnisse vor (NASNER, 2005). Aufgrund der größeren Vorhafenabmessungen und Ausbautiefe des Vorhafens der Nordschleuse wurden dort allerdings stärkere Austauschvorgänge festgestellt.

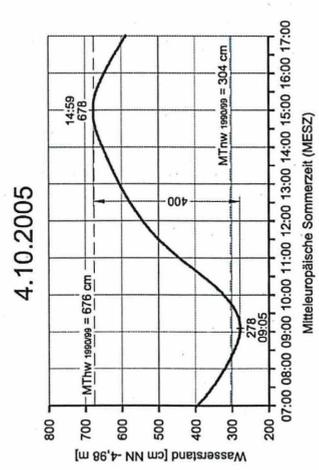
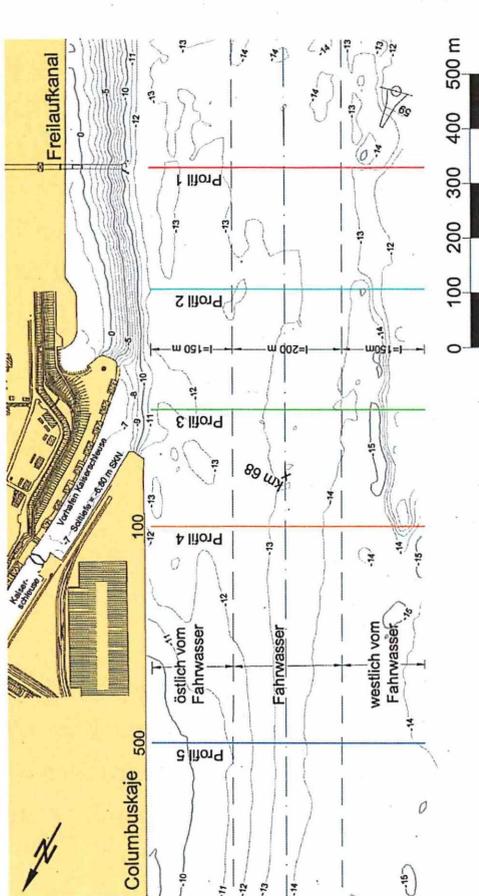
#### **4.2.4 Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen.**

Mit den Ergebnissen der Strömungs-, Salzgehalts- und Trübungsmessungen wurden vorstehend die vielschichtigen, tideabhängigen Vorgänge im Zufahrtsbereich zur Kaiserschleuse erörtert. Mit den dominierenden, transportwirksameren Flutströmungen werden die Sedimente resultierend stromauf transportiert. Aufgrund der höheren Dynamik ist die Feststoffbewegung bei Springtiden stärker ausgeprägt als zur Nipptidezeit.

Die ADCP-Messungen haben ergeben, dass die Flut- und Ebbestömungen in dem untersuchten Weserabschnitt zwischen Columbuskaje und Freilaufkanal unterschiedlich ausgerichtet sind und umgelenkt werden. Das ist auf die morphologischen Gegebenheiten und Brackwassererscheinungen zurückzuführen.

Aus den ADCP-Messungen wurden die mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in der 200 m breiten Fahrrinne sowie den westlich und östlich angrenzenden 150 m breiten Querschnitten berechnet. Die Verhältnisse bei der Flutmessung vom 4. Oktober sind in Abb. 23 dargestellt. Damit wird die typische, unsymmetrische Strömungsverteilung während der Flutstromdauer dokumentiert. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten werden überall in der zweiten Stunde nach der Ebbestromkenterung bei  $T_{\frac{1}{2}w}$  erreicht.

Die stärksten Strömungen wurden für den Fahrinnenbereich berechnet. Den morphologischen Randbedingungen entsprechend sind im Bereich der Columbuskaje westlich vom Fahrwasser höhere Flutstromgeschwindigkeiten ( $v_f$ ) festgestellt worden als vor der Columbuskaje (Profile 5 bis 3 in Abb. 23). Aufgrund der veränderten Sohliefen in den oberen Profilen 2 und 1 stellen sich außerhalb der Fahrrinne im Mittel etwa gleich starke Flutströmungen ein. Insgesamt gesehen wird dort der größere Teil der Flutwassermengen mit stärkerer Intensität östlich der Fahrwasserachse stromauf transportiert. Die morphologi-



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 162 m<sup>3</sup>/s

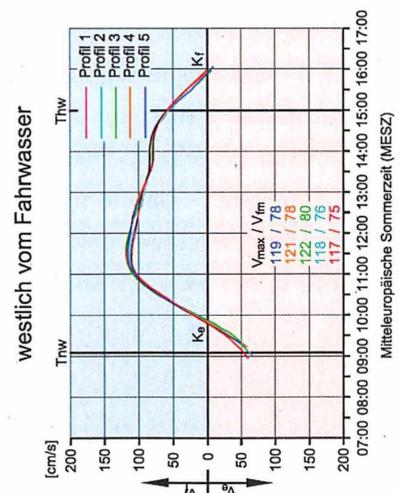
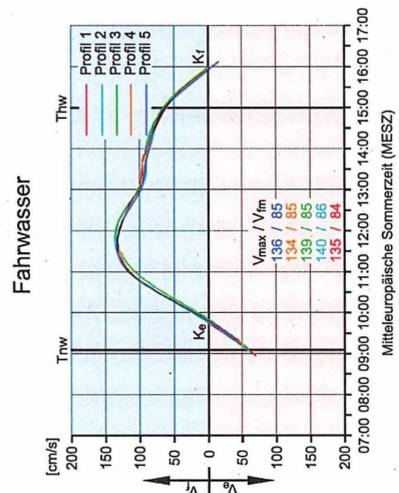
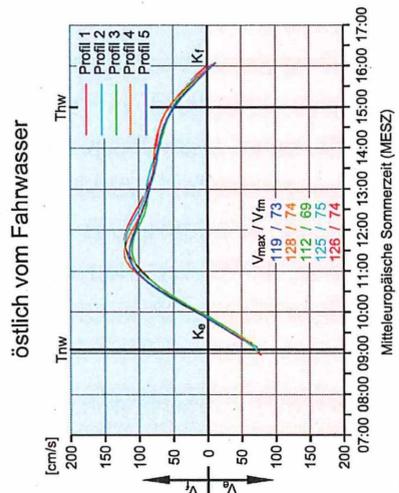


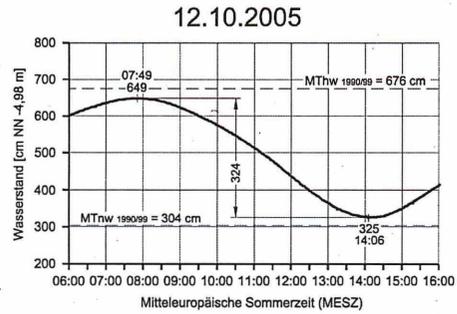
Abb. 23: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 04.10.2005

schen Bedingungen verursachen im oberen Untersuchungsgebiet die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten und Transportkapazität westlich des Fahrwassers was zu den in Anlage 13 erkennbaren Sedimentationen führt.

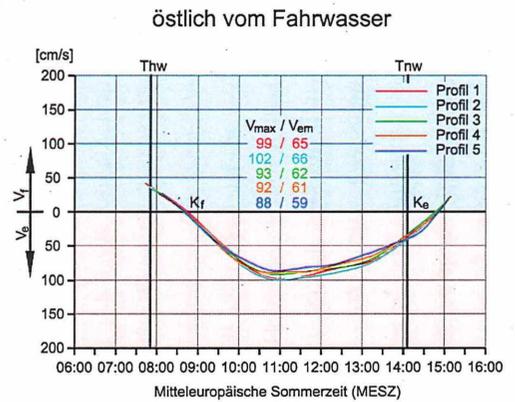
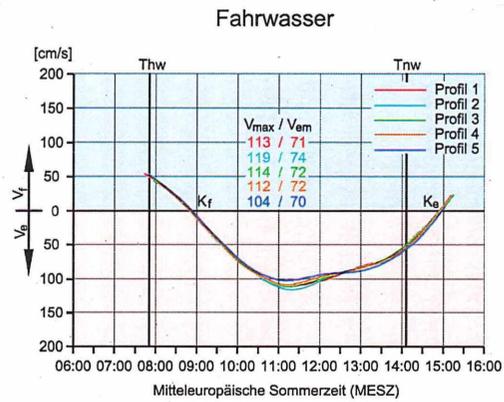
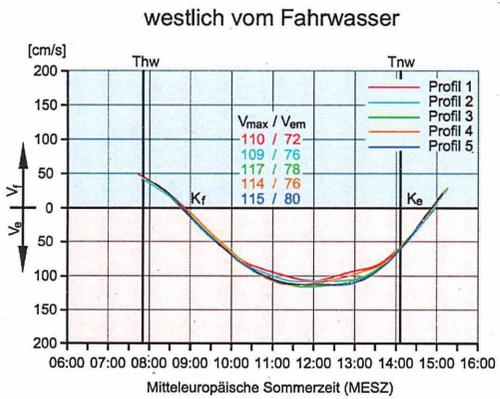
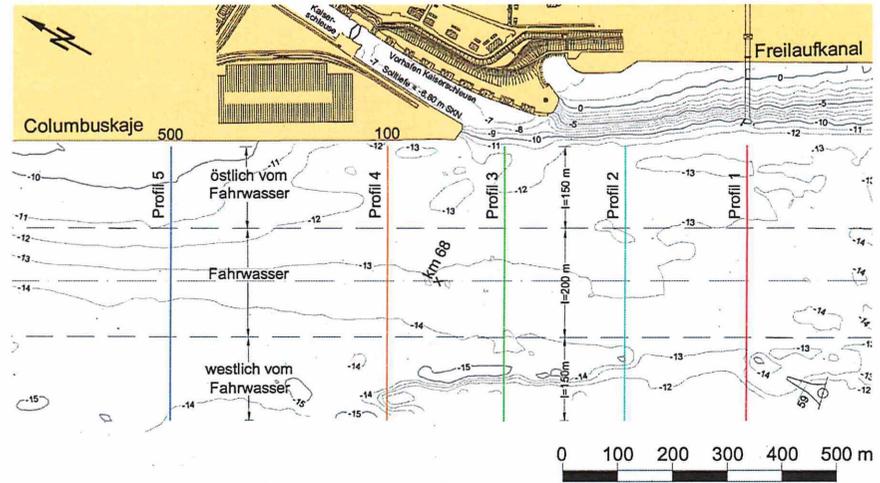
Die über die Ebbestromdauer gleichmäßiger verteilten Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abb. 24 dargestellt. Die größten Werten werden rd. 3 Stunden nach Tidehochwasser erreicht. Die ADCP-Messungen haben ergeben, dass bei Ebbe stärkere Strömungsumlenkungen stattfinden als bei Flut (vgl. Anlage 19 und 15). Aus Abb. 24 ist abzulesen, dass die höchsten mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten im westlichen Querschnitt ermittelt wurden. Im Bereich der stärksten Verengung vor der Columbuskaje sind die Unterschiede am deutlichsten (Profil 5 in Anlage 13 und Abb. 24). Im tiefen Wasser außerhalb der Fahrrinne bleibt auch die relativ hohe Strömungsintensität von  $v_e > 1$  m/s erheblich länger, bis rd. 1 Stunde vor Tideniedrigwasser, erhalten.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Ebbewassermengen mehr westlich in den tiefen Querschnittsbereichen stromab fließen. Die Flutwassermengen werden nicht so stark umgelenkt und die Strömungsgeschwindigkeiten sind gleichmäßiger über den Querschnitt verteilt. Der einlaufende Flutstrom ist trotz der geringeren Wassertiefen vor der Columbuskaje mehr östlich ausgerichtet, als der auslaufende Ebbestrom. Ursächlich dafür sind die Brackwasserbedingungen mit den horizontal und vertikal voneinander abweichenden Salzgehaltsgradienten in den Durchflussquerschnitten.

Abb. 24: Mittlere Ebbestromungsgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 12.10.2005



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 123 m<sup>3</sup>/s



## 4.3 Bremerhaven Doppelschleuse

### 4.3.1 Strömungsmessungen

In der Geestemündung und dem Vorhafen zur Doppelschleuse liegen besondere Bedingungen vor. Die Sedimentationen in der Geeste werden durch das rd. 600 m oberhalb gelegene Sturmflutsperrwerk (vgl. Abb. 2) und eine Barre an der Mündung beeinflusst (Anlage 13). Durch die mit dem Bau des Sperrwerks verursachte Teilabdämmung ist der mittlere Flutstromquerschnitt  $A_{fm}$  ( $m^2$ ) und damit auch die Flutwassermenge  $T_f$  ( $m^3$ ) erheblich verringert worden.

Wenn man die Tidewassermenge  $T_f$  die während der Flut in die Geeste einströmt durch den mittleren Flutstromquerschnitt  $A_{fm}$  und die Flutstromdauer  $D_f$  (s) teilt, erhält man einen Wert  $c$  (cm/s), der als „Gleichgewichtsgeschwindigkeit“ bezeichnet werden kann.

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

Bei gleich bleibender Flutstromdauer  $D_f$  verringert sich  $T_f$  wegen des durch den Sperrwerksbau verkleinertem Querschnitt  $A_{fm}$  bis der ursprüngliche  $c$ -Wert wieder erreicht wird (HENSEN, 1964). Deshalb kommt es unterhalb des Sturmflutsperrwerks in der Geeste zu erheblichen Sedimentationen (NASNER, 1989). Der Geesteabschnitt zwischen Sturmflutsperrwerk und Mündung verhält sich ähnlich wie ein tidebeeinflusster Vorhafen. Die geringen Oberwassermengen der Geeste erzeugen keinen Spül- oder Räumungseffekt.

#### • Flutströmungen (Anlage 26 bis 29)

Am 28. Juni 2006 betrug der Springtidehub am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm 409 cm und das Oberwasser der Weser in Intschede  $Q_o = 207 m^3/s$  (Anlage 26).

Mit Anlage 26 wird die nach Thw einsetzende rd. einstündige Ebbestromkenterung in der Weser dokumentiert. Im Vorhafen sind in dieser Tidephase nur geringe Wasserbewegungen zu beobachten. Bis zur Kenterung strömt das Wasser in den oberen Schichten, entlang der nördlichen Mole der Geeste in den Vorhafen (Messung 2). Mit einsetzendem Flutstrom wird das Wasser vom Staupunkt aus entlang der Südmole in den Vorhafen gelenkt. Wie vor der Nord- und Kaiserschleuse setzt sich die Ebbestromkenterung dichtebedingt von den unteren zu den oberen Wasserschichten durch. Das gleiche gilt für den anschließend einsetzenden Flutstrom (Anlage 26, Messung 1 bis 4). Bemerkenswert sind die schwachen Strömungen in der Weser vor der Geesteeinfahrt. Das ist morphologisch bedingt, da die Geestezufahrt außerhalb des Prallhangs im flacheren Wasser liegt (vgl. Anlage 13).

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten werden in der Weser in der dritten Stunde nach Thw erreicht (Anlage 27, Messung 6). Am Fahrwasserrand wurden Geschwindigkeiten von  $v_{fmax} > 175$  cm/s gemessen. Das von der See eindringende salzhaltigere Wasser wird aufgrund der höheren Dichte verstärkt im tiefen Wasser stromauf geführt.

In der Geesteeinfahrt prägen sich zunächst in den oberen Wasserschichten gegen den Uhrzeigersinn drehende Flutstromwalzen aus (Messung 5 und 6 in Anlage 27). Mit zunehmender Flutstromdauer verlagern sich die Walzenströmungen zum tieferen Wasser (Messung 7 und 8, Anlage 27). Nach Tidehalbwasser stabilisieren sich die linksdrehenden Strömungswalzen. In der späteren Flutstromphase dringen in den tieferen Wasserschichten größere Wassermengen mit stärkerer Intensität in den Vorhafen ein. An der Südmole werden Strömungsgeschwindigkeiten von  $v > 50$  cm/s erreicht (Anlage 28, Messung 11 und 12 unten). Die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Fahrwassergrenze und Geestemündung gleichen sich dabei an. Die sich stärker ausprägenden Dichteeffekte führen dazu, dass Wasser in den oberen Tiefenzellen aus dem Vorhafen zur Weser zurückströmt (Anlage 28, Messung 9 bis 12).

Die Verhältnisse vom 28. Juni wurden bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserbedingungen in ähnlicher Form zwei Tage vorher beobachtet. Der Ausschnitt in Abb. 25 vom 26. Juni 2006 entspricht der 9. Messung in Anlage 28. In der 6,85 m Tiefenzelle ist die Primärwalze in der Geeste und die sich davon ablösende Sekundärwalze im Vorhafen nachvollziehbar.

In der letzten Flutstromphase blieb die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung zwischen Fahrwassergrenze und Geesteeinfahrt in den tieferen Zellen erhalten. Auch noch bei einsetzender Kenterung in der Weser überlagern sich die Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen. Im tiefen Wasser werden die Flutstromwalzen in der Einfahrt auch noch kurz vor Thw mit  $v > 50$  cm/s angefacht und an der Oberfläche strömt das Wasser vom Vorhafen zurück zur Weser (Anlage 29, Messung 13 bis 15).

#### • Ebbeströmungen (Anlage 30 bis 33)

Am 5. Juli 2006 betrug der Tidefall in Bremerhaven 330 cm und das Oberwasser am Pegel Intschede  $Q_0 = 149$  m<sup>3</sup>/s.

Die bei Thw begonnene 1. Messung (Anlage 30) zeigt ein ähnliches Strömungsbild wie die vorletzte Flutmessung in Anlage 29. Die Flut kentert zuerst in den oberen Wasserschichten. Die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen sind auch noch während der Kenterphase zu beobachten. In den oberen Schichten strömt das Wasser zur Weser und weiter unten sind im Mündungsbereich der Geeste die schwächer als bei der Springtide vom 26. Juni ausgebildeten linksdrehenden Flutstromwalzen auszumachen (Anlage 29 und 30).

Bei der 4. Messung hatte sich die Ebbeströmung in der Weser rd. 1,5 Stunden nach Thw bis zur Sohle durchgesetzt (Anlage 30, Messung 4). Vor der Doppelschleuse waren im Vorhafen nur geringe Wasserbewegungen zu verzeichnen ( $v < 25$  m/s).

Auch in der folgenden Tidephase mit sich stärker ausprägenden Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser waren im Schleusenvorhafen nur schwache Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden (Anlage 31). An der rd. 300 m vom rechten Fahrwasserrand entfernten Geestemündung wurden im flachen Wasser keine rechtsdrehenden Ebbestromwalzen angeregt.

# ADCP-Messungen am 26.06.2006

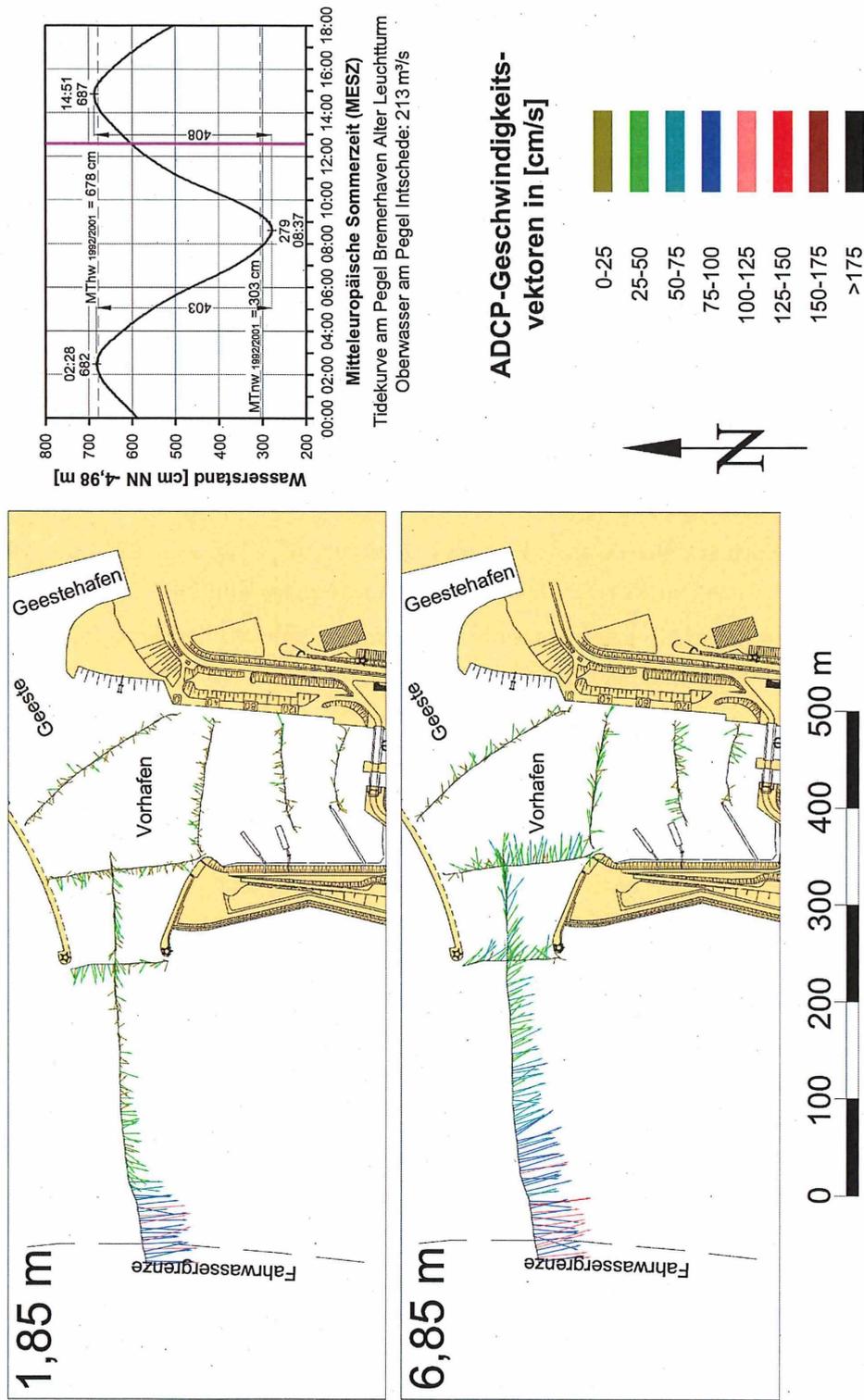


Abb. 25: Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten im Vorhafen zur Doppelschleuse; ADCP-Messung am 26.06.2006

Erst gegen Ende der Ebbephase konnten in den tieferen Zellen zwischen den Molen dichtbedingte Ausströmungen zur Weser registriert werden (Anlage 32). Ab der 12. Messung waren an der Oberfläche schwache Einströmungen zu beobachten. Die Kenterphase in der Weser wird mit Anlage 33 dokumentiert. Es sind nur sehr geringe Strömungen  $v < 25$  cm/s in den Vorhafen (Messung 13 bis 16, 1,85 m) und in den darunter liegenden Tiefenzellen Wasserbewegungen aus dem Vorhafen auszumachen.

### 4.3.2 Salzgehalte

Die in den folgenden zu erläuternden Salzgehaltsmessungen wurden bei relativ geringen Abflüssen aus dem Binnenland durchgeführt. Da das Salzwasser aus der Nordsee in diesem Fall stärker als bei hohem Oberwasser in den Tidestrom eindringt waren entsprechend hohe Salzgehalte zu erwarten.

- **Flutstromverhältnisse**

Bei einem Springtidehub vom 410 cm und  $Q_0 = 217$  m<sup>3</sup>/s lagen am 27. Juni 2006 ähnliche Randbedingungen vor wie bei den Strömungsmessungen vom folgenden Tag.

Wie bei den unterhalb gelegenen nördlichen Hafenzufahrten betragen die tideabhängigen periodischen Schwankungen des Salzgehaltes in der Weser  $\Delta S = S_{Kf} - S_{Ke} > 10$  ‰ (Anlage 34).

Auch im Vorhafen der Doppelschleuse sind die Salzkonzentrationen zu denen im Stromphasenverschoben. Bei Tideniedrigwasser ist der Salzgehalt im Weserwasser geringer als vor den Schleusen (Messung 1 in Anlage 34). Bei Thw ist es umgekehrt.

In der zweiten Stunde nach Tnw kehrt sich das Dichtegefälle zwischen Weser und Vorhafen um (Messung 3 bis 6 in Anlage 34). Etwa ab  $T_{\frac{1}{2}}^w$  bildet sich ein starkes horizontales Gefälle von Position 6 (Weser) zu den Positionen 3 (Geestehafen) und 1 (Außenhaupt) aus. Auffällig ist dabei auch der starke Vertikalgradient bei den Positionen im Vorhafen. Er verstärkt sich mit fortschreitender Flutstromdauer. Die Salzgehaltsunterschiede betragen in der späteren Flutstromphase  $\Delta S > 5$  ‰ und max.  $\Delta S \approx 9$  ‰ an der Geesteinfahrt. Bemerkenswert sind auch die deutlich höheren Konzentrationen an der Südmole (Staupunkt, Pos. 4 in Anlage 34) gegenüber Pos. 5 (Ablösungszone). Die vertikalen und horizontalen Salzgradienten erklären die ab  $T_{\frac{1}{2}}^w$  sich zunehmend verstärkenden sohlennahen Einströmungen entlang der Südmole (vgl. Anlage 27 und 28). Bei der 11. und 12. Messung wurden Geschwindigkeiten von  $v > 50$  cm/s registriert. In den unteren Tiefenzellen wurden die flutorientierten Dichteströmungen bis nach Thw aufrecht erhalten (Anlage 29). Das erklärt sich mit den in Anlage 34 aufgetragenen Salzgehaltsverhältnissen während der Flutstromphase.

- **Ebbestromverhältnisse**

Bei der Nipptide vom 6. Juli 2006 betrug der Abfluss am Pegel Intschede lediglich  $Q_0 = 144 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das ist der Grund für die relativ hohen Salzkonzentrationen (Anlage 35).

Die ersten beiden nach Thw durchgeführten Messungen am 6. Juli (Anlage 35) entsprechen den zur gleichen Tidephase ermittelten Salzgehalte bei der Springtide vom 27. Juni (Messungen 13 und 14 in Anlage 34). Die Umkehrung der horizontalen Gradienten der Salzkonzentrationen zwischen Weser und Vorhafen dauert während der Ebbestromphase wegen der geringen Wasserbewegungen deutlich länger als bei Flutströmung. Sie war erst knapp 2 Stunden vor Eintritt des Thw abgeschlossen (Messung 9 in Anlage 35). Anschließend gleichen sich die Salzgehalte im Hafen (Pos. 1 bis 3) bei abnehmender Konzentration einander an. Die Vertikalgradienten sind dabei im flacheren Wasser während der niedrigen Wasserstände deutlich schwächer als bei Tidehochwasser (vgl. auch Anlage 34). Das ist einer der Gründe für die schwachen ebbestromorientierten Dichteströmungen im Vorhafen.

#### **4.3.3 Schwebstoffe**

Die über die Lichtdurchlässigkeit zu ermittelnden Schwebstoffkonzentrationen wurden gleichzeitig mit den Salzgehalten an den selben Positionen gemessen.

- **Flutstromverhältnisse**

Während der Ebbestromkenterung am Vormittag des 27. Juni 2006 betrug der Schwebstoffgehalt am rechten Fahrwasserrand (Pos. 6) lediglich rd.  $100 \text{ mg/l}$  (Messung 1 und 2 in Anlage 36). Im Vorhafen selbst wurden etwas höhere Konzentrationen bis zu  $C_s \approx 250 \text{ mg/l}$  ermittelt. Die zum Teil, auch bei den später aufgenommenen Profilen, sprunghafte Zunahme der Schwebstoffgehalte kennzeichnet den hochfrequenten Echolothorizont. Er kann als Übergang zum Flüssigschlick definiert werden.

Mit einsetzender Flut, in der zweiten Stunde nach T<sub>nw</sub>, ist ein kontinuierlicher Anstieg der Schwebstofffracht in der Weser mit Anlage 36 nachvollziehbar. Die vertikale Verteilung der Schwebstoffe entspricht dabei dem Salzgradienten und daraus abzuleitenden Strömungsprofil. Die stärkeren Suspensionstransporte finden bei den höheren Strömungsgeschwindigkeiten und Salzkonzentrationen in den unteren Wasserschichten statt. Kennzeichnend ist der gleichartige Verlauf der Salz- und Schwebstoffgehalte an der Fahrwassergrenze (vgl. Anlage 34 und 36).

Die Schwebstoffkonzentrationen im Vorhafen schwächen sich nach T<sub>nw</sub> zunächst noch ab (3. und 4. Messung, Anlage 36). Ab Tidehalbwasser (5. Messung) nehmen die Feststoffkonzentrationen zunächst am Staupunkt der Flutströmungen (Pos. 4) deutlich zu. Die Positionen im Vorhafen und in der Ablösungszone an der Nordmole folgen zeitverzögert. Die größten Schwebstofffrachten im Vorhafen treten bei Thw und danach ein. Am Fahr-

wasser waren es am 27. Juni 2006 bis etwa 800 mg/l (Messung 12 bis 14, Anlage 36). Besonders aufschlussreich sind übrigens für alle Messungen und Positionen die ähnlichen Gradienten der Schwebstoff- und Salzgehaltsprofile.

- **Ebbestromverhältnisse**

Die ersten beiden Messungen vom 6. Juli 2006 entsprechen im Verlauf den zur gleichen Tidephase ermittelten Schwebstoffkonzentrationen der Flutmessung vom 27. Juni 2006 (Anlage 37, 1 und 2 sowie Anlage 36, 13 und 14). Die Konzentrationen waren Anfang Juli etwas höher.

Die relativ hohen Feststoffkonzentrationen im Vorhafen während der gesamten Ebbedauer sind auch darauf zurückzuführen, dass die natürlichen Verhältnisse nicht allein durch den Fährverkehr beeinflusst worden sind. Zusätzlich hat während der Messungen ein lebhafter Schleusenbetrieb stattgefunden.

Bemerkenswert ist der Umstand, dass in der fortgeschrittenen Ebbestromphase (ab Messung 9 in Anlage 37) im Vorhafen (Positionen 1 bis 3) höheren Feststoffe ermittelt wurden als in der Einfahrt und der angrenzenden Weser. Das mit der Flut in den Vorhafen eingetragene Material wird aufgrund der schwächeren Strömungseffekte während der Ebbestromphase nicht wieder ausgeräumt, was zur positiven Feststoffbilanz führt.

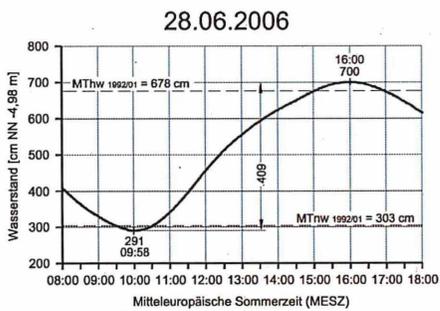
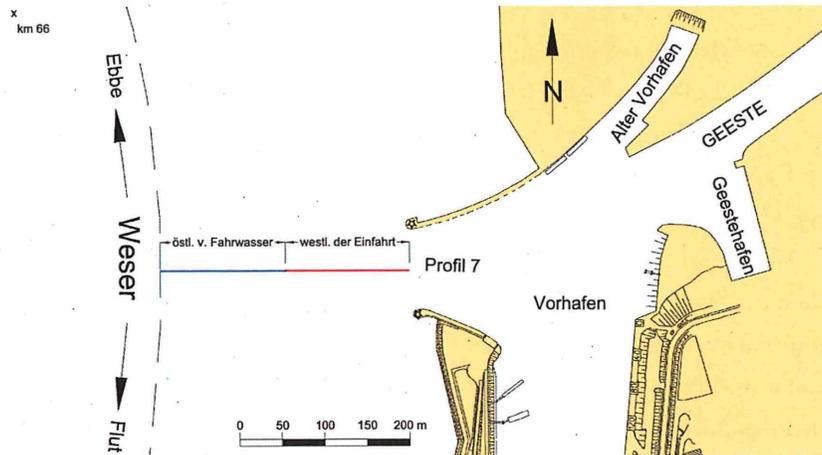
Im übrigen ist die Ähnlichkeit der Salzgehalts- und Schwebstoffgradienten auch während der Ebbephase bemerkenswert (vgl. Anlagen 35 und 37).

Die Zusammenhänge zwischen Strömungsgeschehen, den tideabhängigen Salzgehalten und Schwebstoffkonzentrationen sind für den Vorhafen zur Fischereihafenschleuse auch für die Ebbephase gut erkennbar. Das geht aus dem gleichartigen Verlauf der Salzgehalts- und Schwebstoffverteilungen hervor (vgl. Anlage 35 und 37).

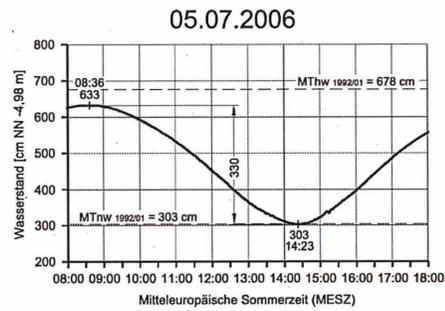
#### **4.3.4 Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen**

Die Zufahrt zur Doppelschleuse liegt im Ausgang des Blexer Bogens (vgl. Abb. 2). Die hydrologischen Randbedingungen in der Weser entsprechen denen bei den nördlich gelegenen Schleusenzufahrten. Bedingt durch niedriges Oberwasser wurden bei der Messkampagne im Sommer 2006 während der Tidehochwasserphasen polyhalines Brackwasser mit Salzkonzentrationen bis zu  $S \approx 25 \text{ ‰}$  festgestellt. Als weitere Besonderheit sind die starken Vertikalgradienten der Salzkonzentrationen in der späten Flutstromphase mit Differenzen bis zu  $\max. \Delta S \approx 9 \text{ ‰}$  zu nennen.

Die aus den ADCP-Messungen berechneten mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten im Tidestrom sind in Abb. 26 dargestellt. Wie vor der Nord- und Kaiserschleuse werden die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten an der Geestemündung in der zweiten Stunde nach der Ebbestromkenterung etwa bei  $T \frac{1}{2} w$  erreicht. Die Molenköpfe der Geeste sind etwa doppelt so weit vom rechten Fahrwasserrand entfernt, wie die Vorhafeneinfahrten der nördlich gelegenen Schleusen zum Überseehafen. Die morphologischen Randbedingun-



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 199 m<sup>3</sup>/s



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 160 m<sup>3</sup>/s

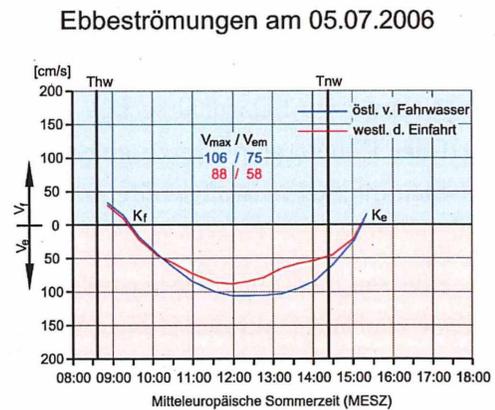
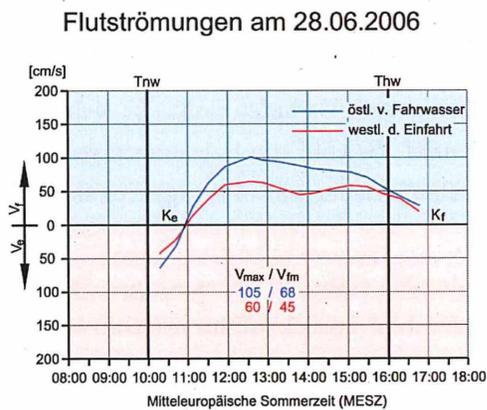


Abb. 26: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der Weser vor der Geestemündung

gen im Blexer Bogen (vgl. Abb. 2 und Anlage 13) sind ursächlich für die in den Anlagen 26 bis 33 dokumentierten relativ geringen Strömungsintensitäten vor der Geestemündung. Im Gegensatz zu den unterhalb gelegenen Hafenzufahrten dominieren vor der Geeste östlich vom Fahrwasser die Ebbeströmungen (Abb. 26). Das ist damit erklärt, dass die salzhaltigeren Flutwassermengen verstärkt im tiefen Wasser des Prallhangs weiter außerhalb stromauf gelangen. Das mit der Ebbe abfließende spezifisch leichtere Süßwasser verstärkt dagegen die Oberflächenströmung auch östlich der Fahrrinne im flacheren Wasser (vgl. Abb. 13). Die im Tiderhythmus auftretenden Strömungs-, Dichte- und Tideeffekte verursachen im Vorhafen zur Doppelschleuse eine positive Feststoffbilanz. Während der Flutstromphase werden Feinstanteile aus der Weser in den Vorhafen transportiert. Die Strömungs- und Dichteeffekte sind in der Ebbestromphase schwächer ausgeprägt. Der Vorhafen wird deshalb mit Feststoffen bis zur Sättigung aufgefüllt, so dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Insgesamt gesehen haben die Strömungen, Salz- und Schwebstoffgehalte im Vorhafen der Doppelschleuse grundsätzlich die gleiche Verhaltensmuster wie bei den im vorausgegangenen Projekt 03 KIS 019 untersuchten Vorhäfen an der Ems und Weser.

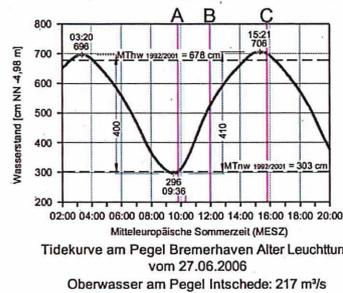
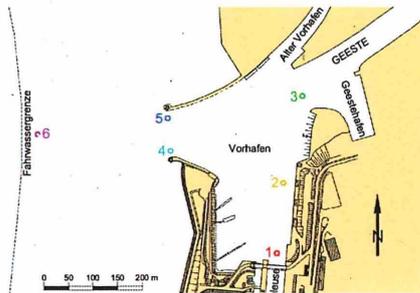
In Abb. 27 ist dargestellt, wie sich das Salzgehaltsgefälle vom Tidestrom zum Vorhafen während der Flutstromphase etwa bei  $T\frac{1}{2}w$  umkehrt. Danach prägen sich starke Vertikalgradienten bei allen Messstellen im Vorhafen aus (Abb. 27, links). Beeindruckend sind auch die Übereinstimmungen der Profile in den horizontalen und vertikalen Verteilungen. Die höchsten Schwebstoffkonzentrationen werden bei Tidehochwasser über die Flutstromwalze am Staupunkt der Südmole an der Sohle ( $C_s \approx 750 \text{ mg/l}$ ) in den Vorhafen eingetragen (Pos. 4). Dort sind auch deutlich höhere Salzgehalte als am Kopf der Nordmole (Pos. 5 in Abb. 27) zu verzeichnen.

Ähnliche Bilder zeigen sich in Abb. 28 für eine Ebbestromphase. Die Verhältnisse bei Tidehochwasser (Abb. 27C und Abb. 28A) stimmen bezüglich der Verteilungen und Größenordnungen der Salz- und Schwebstoffgehalte nahezu überein.

Die Umkehr der Salzgehaltsgefälle zwischen Tidestrom und Vorhafen vollzieht sich während der Ebbestromphase zu einen späteren Zeitpunkt. Sowohl die Salzkonzentrationen als auch die Schwebstoffgehalte nehmen im Tideverlauf wieder ab und folgen phasenverschoben denen im Tidestrom (Abb. 28 A bis C).

Die höheren Salz- und Schwebstoffgehalte am 6. Juli 2006 während der niedrigen Wasserstände sind nicht auf das geringe Oberwasser am 27. Juni zurückzuführen (Abb. 27 und 28).

Wasserverluste bei niedrigen Wasserständen in der Weser werden durch Zuwässerung bei hohen Tidewasserständen mit entsprechend salzhaltigerem Wasser ausgeglichen. Dieses Schleusungswasser hat am 6. Juli 2006 zu den relativ hohen Salz- und Schwebstoffkonzentrationen vor den Schleusenhäuptern (Pos. 1 in Abb. 28) geführt. Die Auftragungen



Oberwasser am Pegel Intschede: 217 m<sup>3</sup>/s

### Salzgehalte

### Schwebstoffgehalte

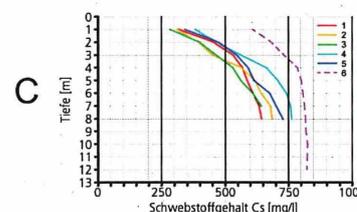
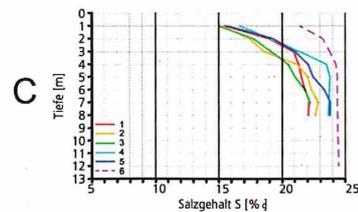
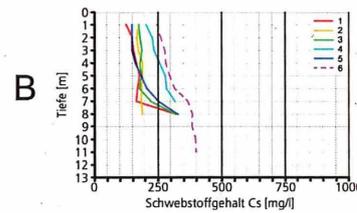
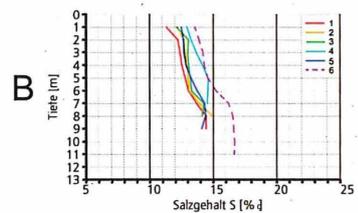
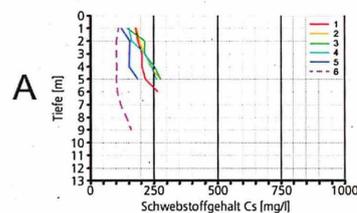
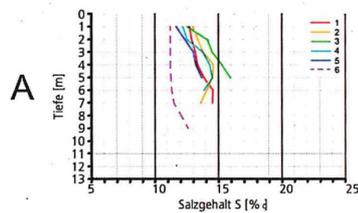
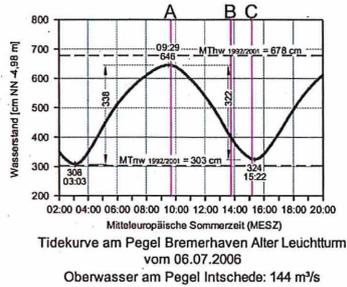
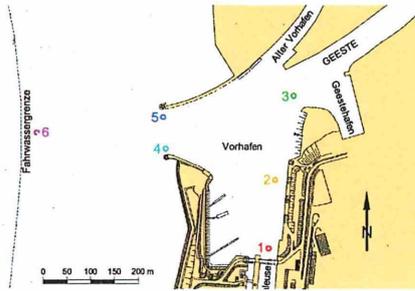


Abb. 27: Salz- und Schwebstoffgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven am 27. Juni 2006



Salzgehalte

Schwebstoffgehalte

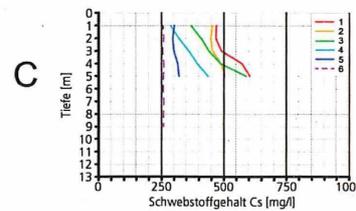
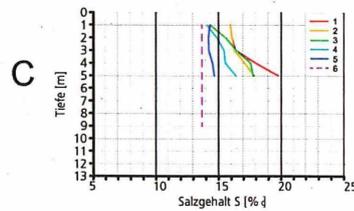
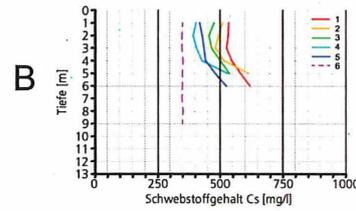
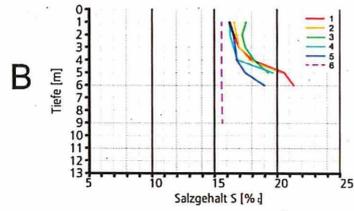
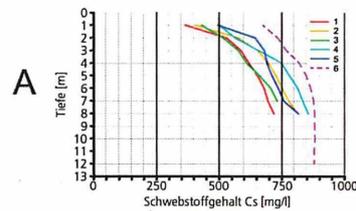
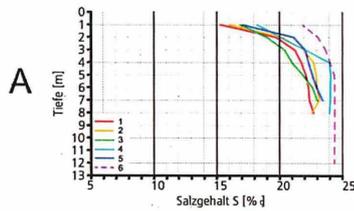


Abb. 28: Salz- und Schwebstoffgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven am 6. Juli 2006

in Abb. 28C dokumentieren die dadurch verursachten stärkeren horizontalen Gefälle im tieferen Wasser zur Hafeneinfahrt (Pos. 5 bis 1). Die insgesamt ausgeprägteren Vertikalgradienten bei den Salz- und Feststoffkonzentrationen in der späteren Flutstromphase (Abb. 27C und 28A) sind ursächlich für die Flutstromdominanz der Schwebstofftransporte in den Vorhafen.

## 5 Messungen in der Ems

### 5.1 Emders Vor- und Außenhafen

#### 5.1.1 Strömungsverhältnisse im Tidestrom

Die Lage der in der Ems gefahrenen ADCP-Profile ist aus Abb. 29 zu entnehmen. Der Zeitbedarf für die Umläufe betrug rd. 20 Minuten. Oberhalb der Hafenzufahrt verringert sich die Solltiefe der Ems um 3,40 m von -10,50 m NN auf -7,10 m NN (vgl. Abb. 5). Die Geschwindigkeitsvektoren sind in den zugehörigen Anlagen in Meterabständen dargestellt worden.

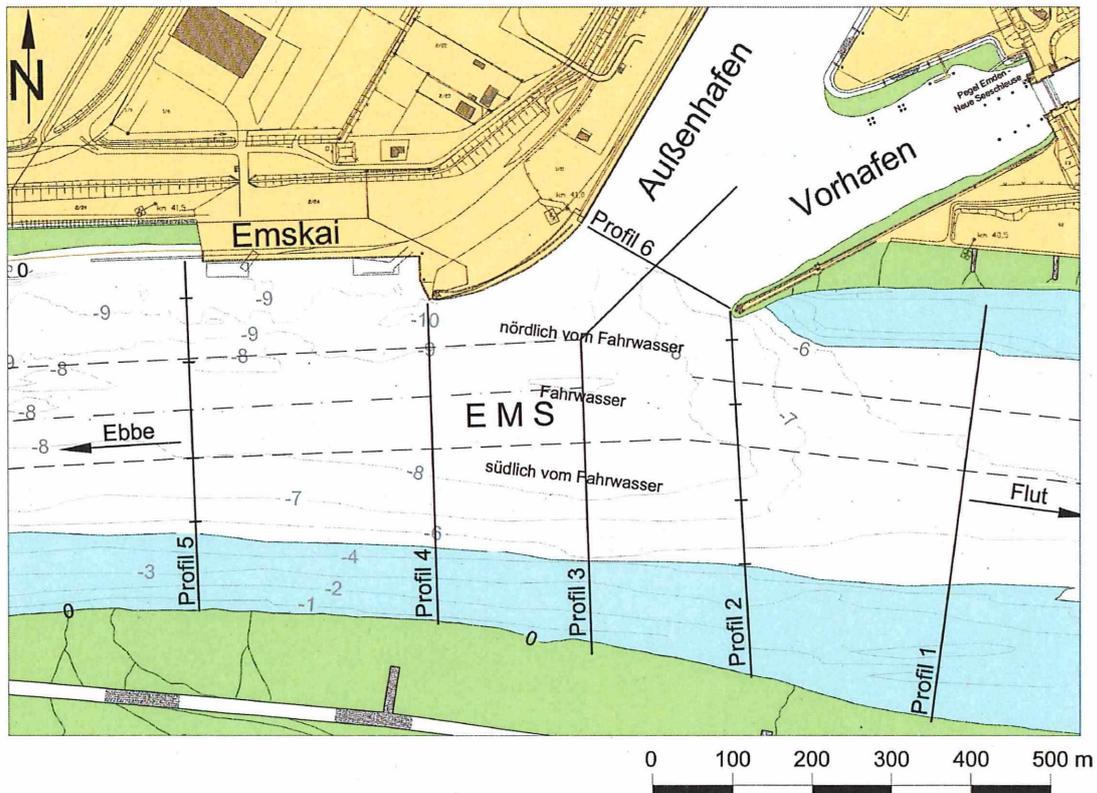


Abb. 29: Lage der ADCP-Profile

#### • Flutströmungen (Anlage 38 bis 40)

Am 25. Mai 2005 betrug der Springtidehub am Pegel Emden Neue Seeschleuse 380 cm bei einem Oberwasserabfluss am Pegel Versen von  $Q_0 = 44,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Binnenabfluss lag damit deutlich unter dem langjährigen Mittelwert von  $MQ_{01941/2004} = 80,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Während der Kenterphase (Messung 1 und 2 in Anlage 38) herrschte südwestlicher Wind von 4 Bft (6 bis 8 m/s) mit abnehmender Tendenz im Verlauf der Messungen. Mit den ersten Messungen werden die ebbestromorientierten Dichteströmungen in Anlage 38 dokumentiert. In den oberen Zellen strömt das Wasser in den Vor- und Außenhafen und in den tieferen

Wasserschichten (5,85 m und 6,85 m) zurück in die Ems. Mit dem einsetzenden Flutstrom in der Ems findet der Füllvorgang dichtebedingt noch über die Walzenströmungen an der Oberfläche statt. Das führt zur verstärkten Ausströmung des salzhaltigeren Wassers in den tieferen Schichten (Messung 3).

Wie in der Weser erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Tideems in der ersten Flutstromphase die größten Werte (Messung 4 und 5 in Anlage 38). Im Bereich der Hafenzufahrt werden die Strömungen nach Süden umgelenkt und im flacher werdenden Wasser beschleunigt. Etwa ab  $T\frac{1}{2}w$  bilden sich die flutstromorientierten Dichte- und Walzenströmungen aus. Das Profil in der Hafeneinfahrt zeigt wie bei der 5. Messung das Wasser in den oberen Schichten zur Ems strömt. In den tieferen Zellen ist die an der Ostmole einströmende, linksdrehende Flutstromwalze auszumachen.

Die aus den ADCP-Messungen ermittelten Vertikalprofile in Abb. 30 dokumentieren die brackwasserbedingten Besonderheiten von der Ebbestromkenterung bis zu den sich rasch ausprägenden, starken Flutströmungen im sohlennahen Bereich. Nur etwa eine Stunde nach der Strömungsumkehr (2 Stunden nach Thw) wurden in den Profilen 2 und 3 zwei Meter über der Flusssohle bereits mittlere Flutstromgeschwindigkeiten von  $v_f > 150$  cm/s gemessen (grüne Linien in Abb. 30). Die maximalen Geschwindigkeiten traten in den unteren Wasserschichten auf. Wie im Weserästuar verstärkt auch in der Ems das von See kommende Salzwasser die Sohlströmungen.

Die etwas anderen Geschwindigkeitsverteilungen im oberen Profil 1 ist auf die Lage im flacheren Wasser zurückzuführen. Bei dem unteren Profil 5 wirken sich Querschnittsaufweitungen durch die Liegewannen am Emskai und der Emspier auf die Strömungsverteilungen und -geschwindigkeiten aus.

Mit zunehmender Flutstromdauer und sich abflachendem Flutast der Tidekurve nimmt die Strömungsintensität in der Ems kontinuierlich ab (Anlage 39). Gleichzeitig stabilisieren sich die Austauschvorgänge zwischen dem Tidestrom und den Hafenzufahrten. Mit den ADCP-Profilen im Einfahrtsbereich wird das in Anlage 39 vermittelt.

Die Vertikalprofile in Abb. 31 zeigen ebenfalls die langsam abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten in der fortgeschrittenen Flutstromphase bis etwa 1 Stunde vor Thw. Der mehr parabolische Verlauf im Profil 1 ist auf den Sohlensprung zurückzuführen. Im unteren Profil 5 sind die Geschwindigkeiten gleichmäßiger über die Tiefe verteilt. Die Profile 2 bis 4 im Bereich der Einfahrt sind von den Austauschvorgängen beeinflusst. Die in den oberen Wasserschichten zur Ems zurückströmenden Wassermassen schwächen die Strömungen bis ins Fahrwasser. Die maximalen Flutströmungen sind im unteren Wasserkörper anzutreffen. Von dort gelangt das salzhaltigere Wasser über die linksdrehenden Walzen in den Vor- und Außenhafen.

Die letzte Flutstromphase bis zur Kenterung ist in Anlage 40 aufgetragen. Die zugehörigen Vertikalprofile zeigt Abb. 32. Die Austauschvorgänge wirken sich bis zur Strömungsumkehr

Abb. 30: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 29)

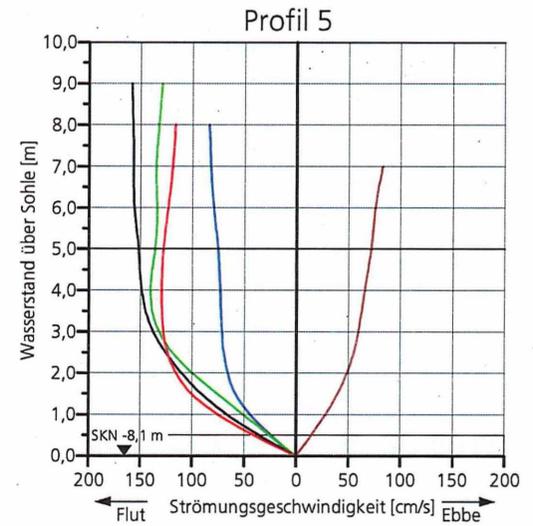
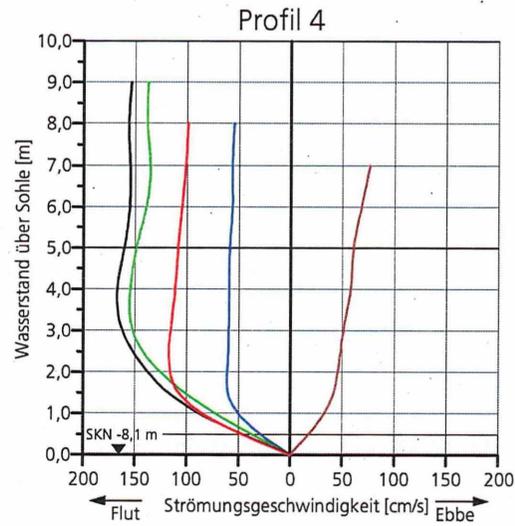
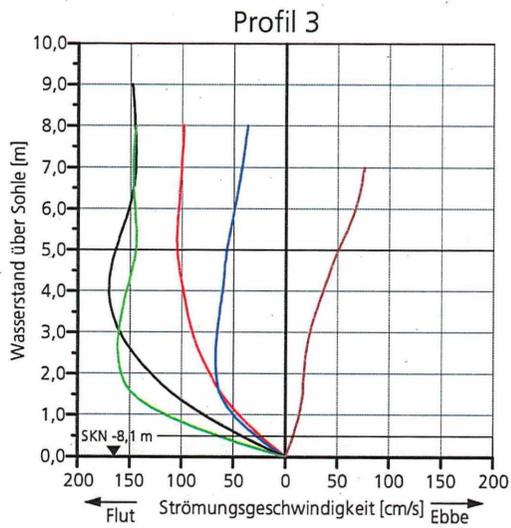
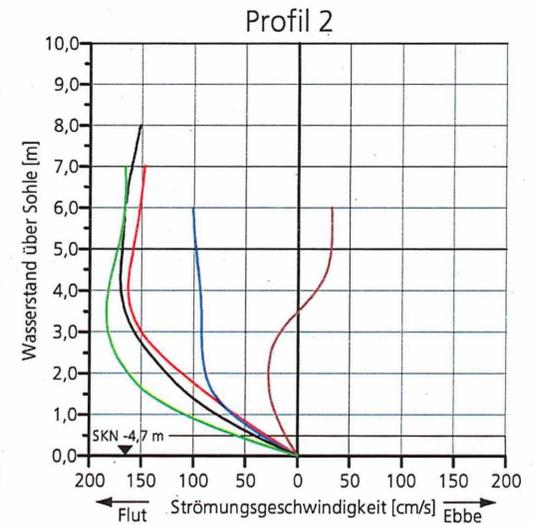
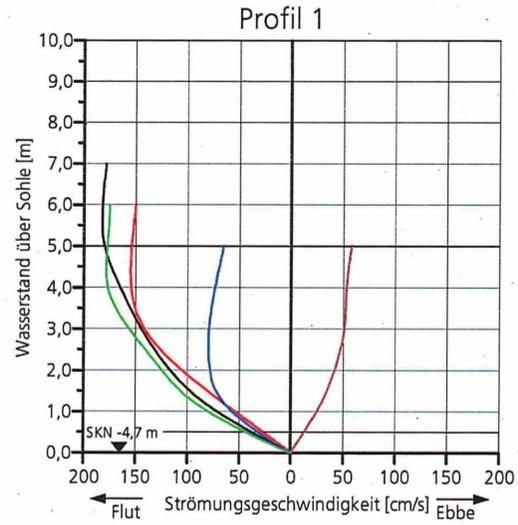
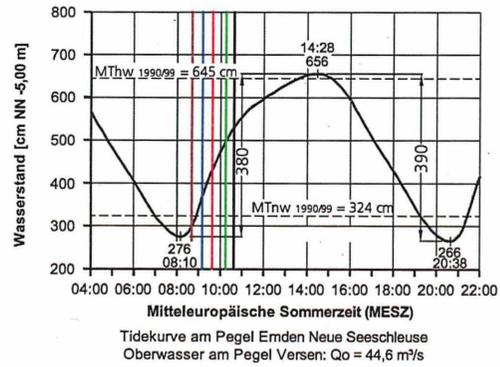


Abb. 31: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Erms am 25.05.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 29)

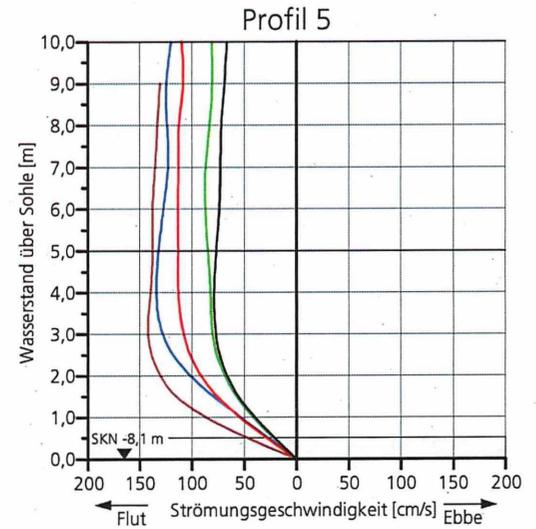
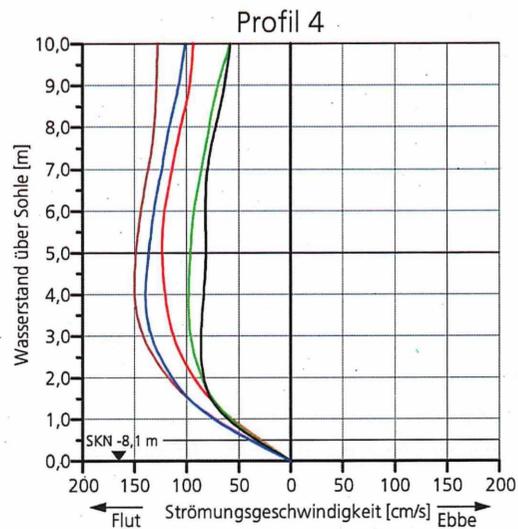
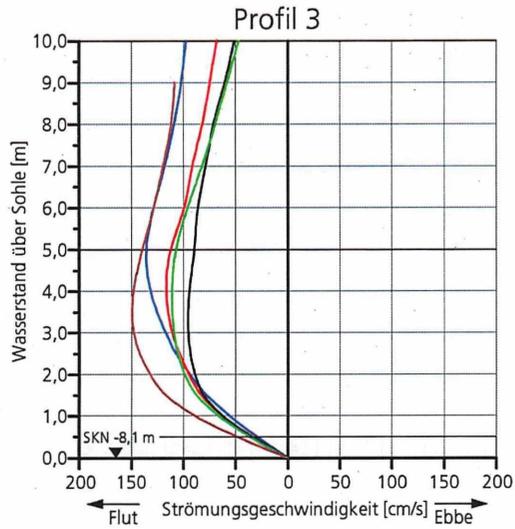
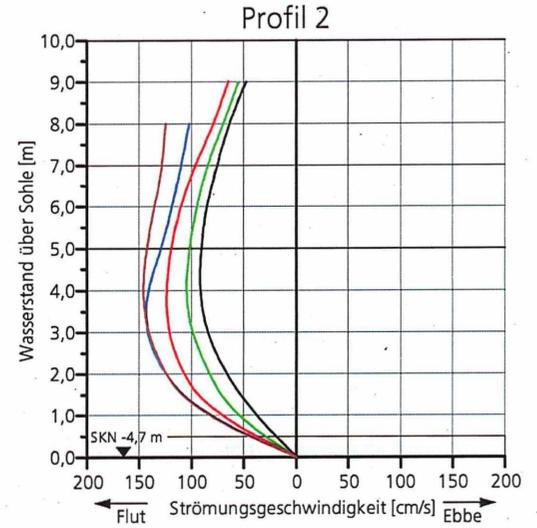
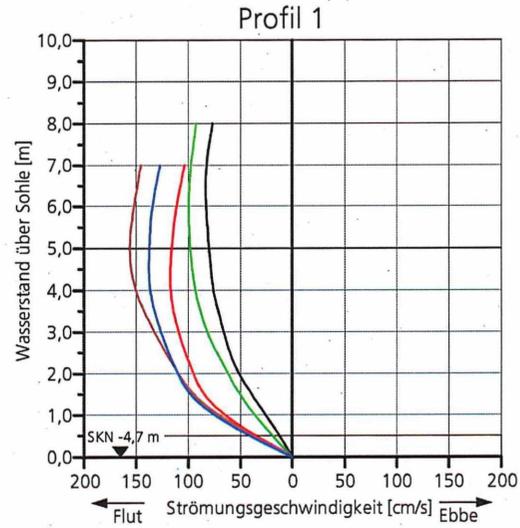
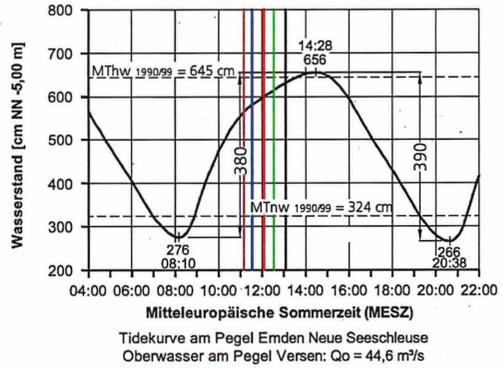
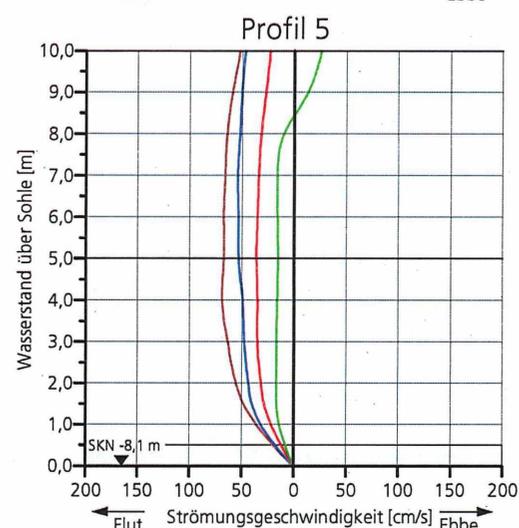
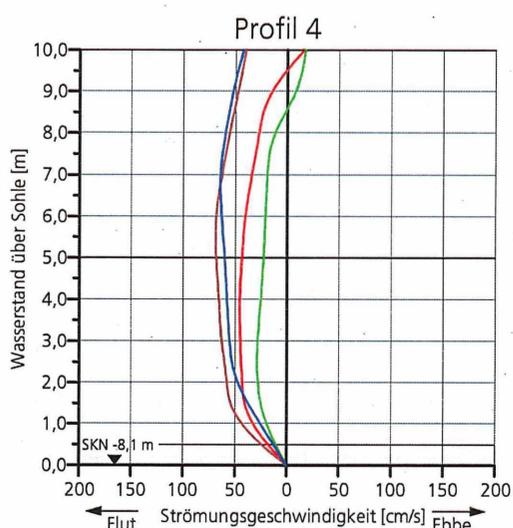
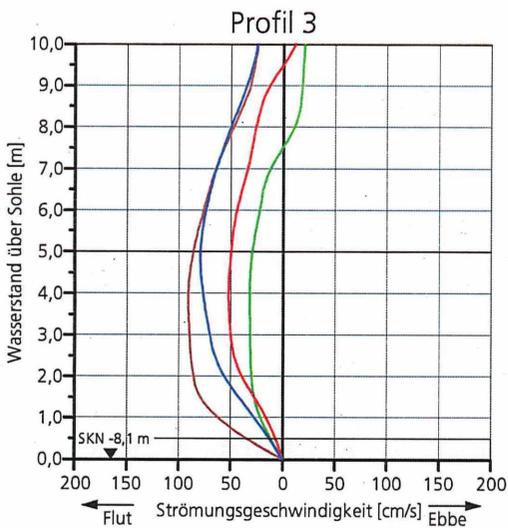
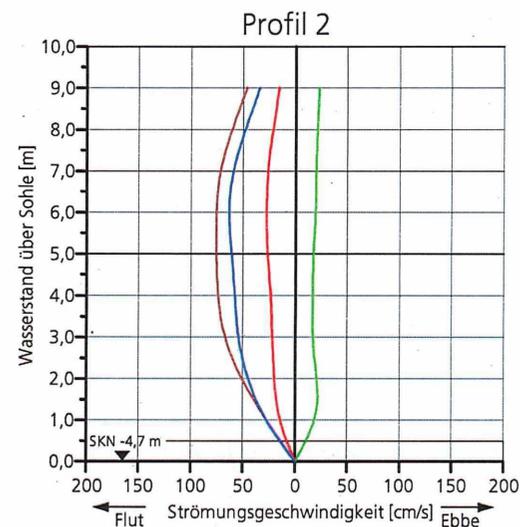
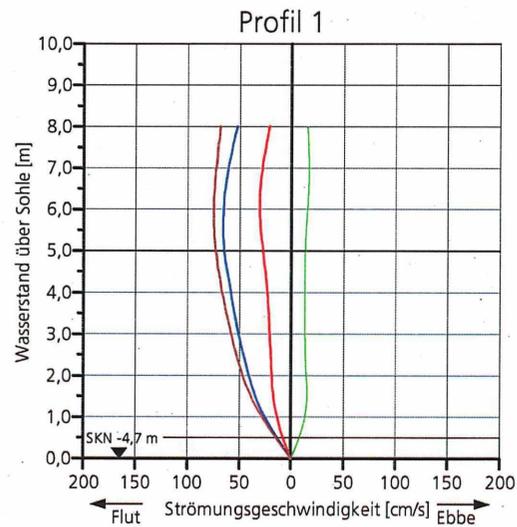
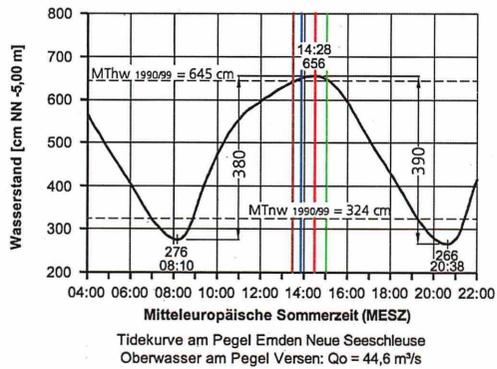


Abb. 32: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 29)



in den Profilen 2 bis 4 aus. Das zeigt sich an den Maximalwerten in den unteren und den Minderungen der Geschwindigkeiten in den oberen Schichten. Beim vorletzten Umlauf strömte das Wasser vor dem westlichen Einfahrtsbereich an der Oberfläche bereits in Ebberichtung. Die Kenterung setzte sich von oben nach unten durch.

- **Ebbeströmungen (Anlage 41 bis 43)**

Die Ebbemessung am 1. Juni 2005 wurde bei etwa mittleren Tideverhältnissen und leichtem Wind aus nordwestlicher Richtung mit 4 m/s (Bft 3) durchgeführt.

Die erste Messung wurde während der Flutstromkenterung vorgenommen (Anlage 41). Im Einfahrtsbereich werden die Strömungsvorgänge noch durch die flutstromorientierten Dichte- und Strömungseffekte beeinflusst. Etwa 3 Stunden nach Tidehochwasser (rd. 2 Stunden nach Strömungsumkehr) hatten sich die Ebbeströmungen in der Ems voll ausgeprägt (Messung 2 bis 5 in Anlage 41). Auch die Verteilung der Ebbeströmungen folgt den morphologischen Gegebenheiten in der Ems.

Von Profil 1 bis 5 (vgl. Abb. 29) verlagern sich die maximalen Strömungen mehr zum nördlichen, rechten Emsufer. Außerdem ist mit den Auftragungen der ADCP-Geschwindigkeitsvektoren nachzuvollziehen, dass die stärksten Strömungen an der Oberfläche zu verzeichnen sind. In den unteren Bereichen der Brackwasserzonen der norddeutschen Tideflüsse werden die Sohlströmungen während der Ebbestromphasen geschwächt und bei Flutstrom verstärkt, was den resultierend stromauf gerichteten Geschiebetransport verursacht.

Die in Abb. 33 aufgetragenen Vertikalprofile zeigen, wie sich die Ebbewassermengen bei der Flutstromkenterung von oben nach unten durchsetzen. In den folgenden beiden Stunden bauen sich dann die im Brackwasserbereich typischen vertikalen Strömungsprofile auf. Interessant ist ein Vergleich mit den deutlich höheren Geschwindigkeiten im sohlennahen Bereich während der Flutstromphase (Abb. 30 und 31).

Die gegenüber der Flut- gleichmäßiger verteilten Strömungen während der Ebbestromphase wird mit Anlage 42 und Abb. 34 belegt. Erst in der letzten Stunde vor Tideniedrigwasser wurden die Ebbeströmungen deutlich schwächer (Anlage 43 und Abb. 35). Die Kenterung trat während der letzten Messung (14) etwa 1 Stunde nach Tideniedrigwasser, von der Flussohle ausgehend, ein.

Abb. 33: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005  
 (Lage der Profile s. Abb. 29)

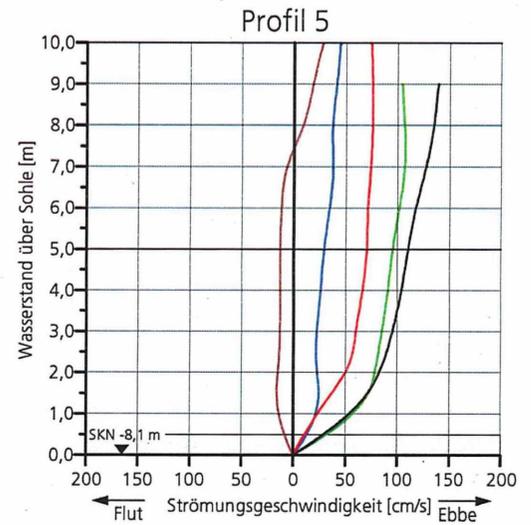
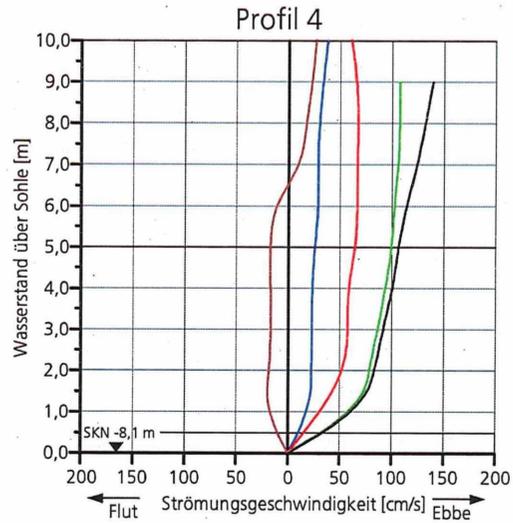
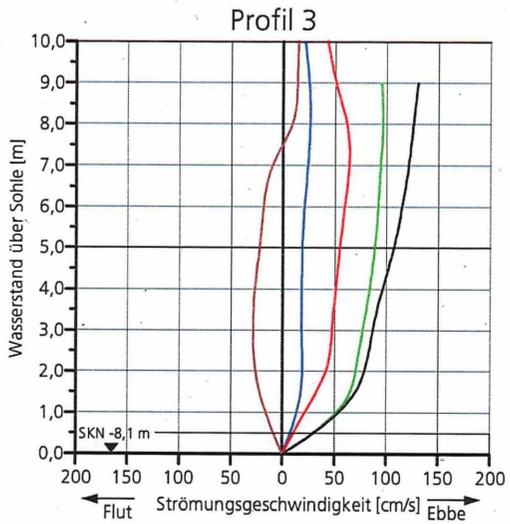
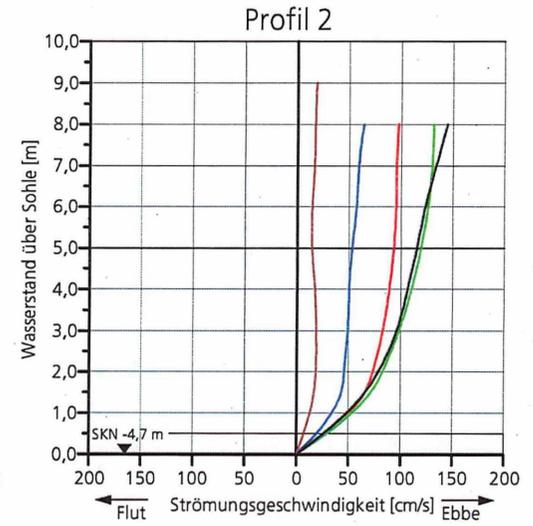
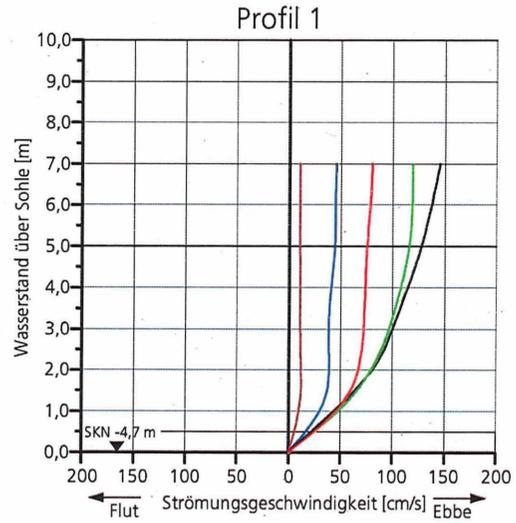
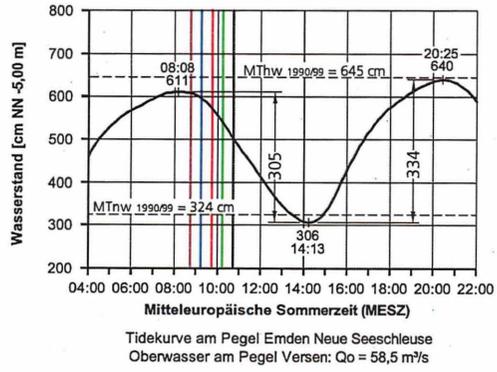
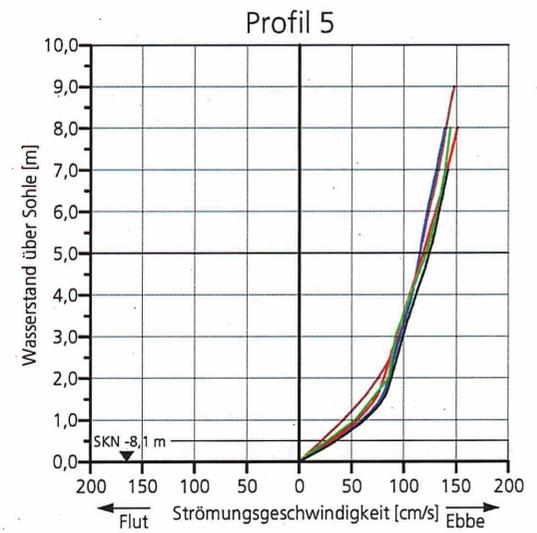
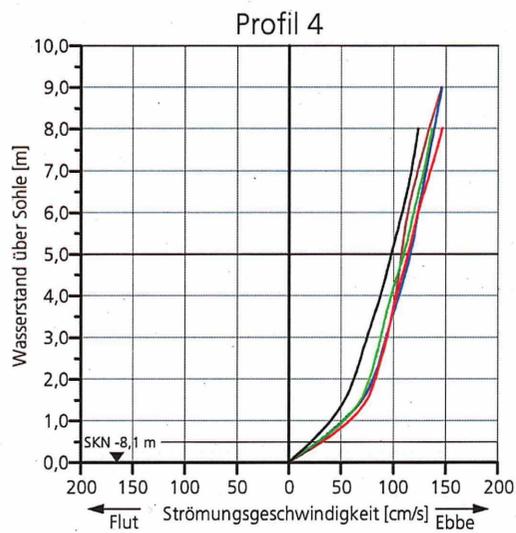
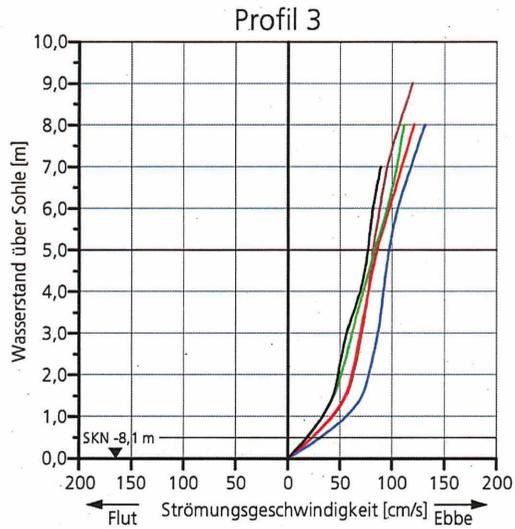
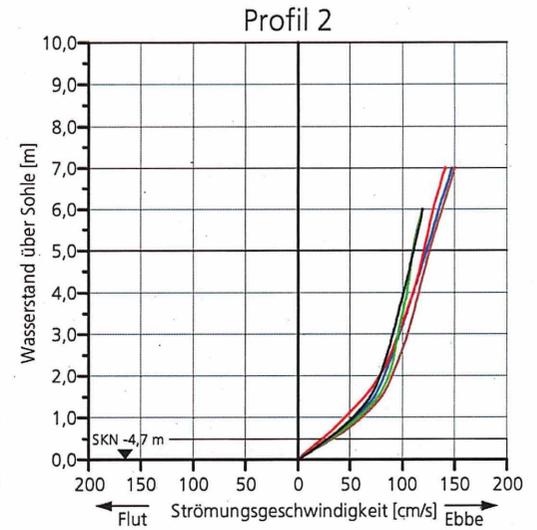
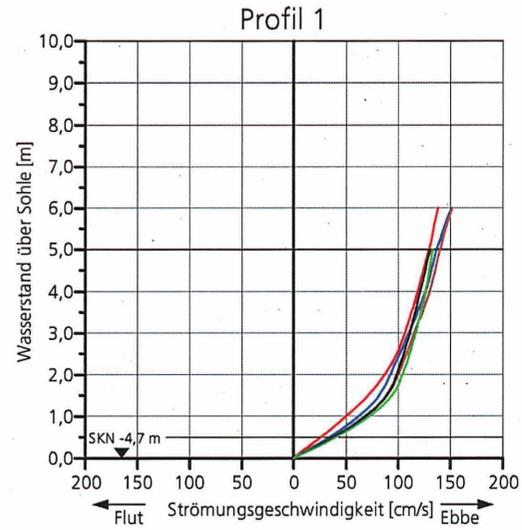
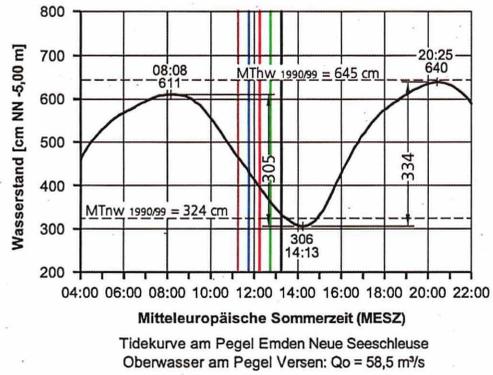


Abb. 34: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 29)



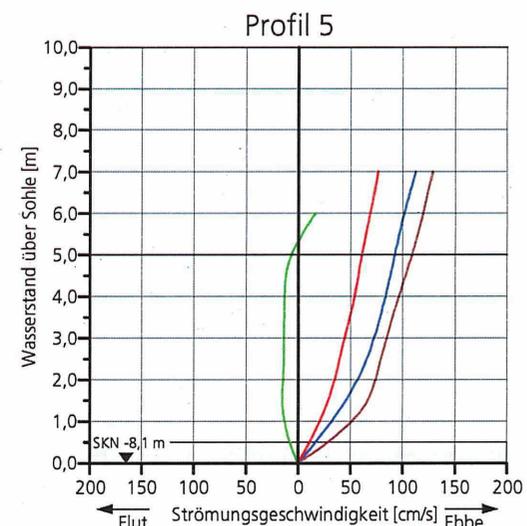
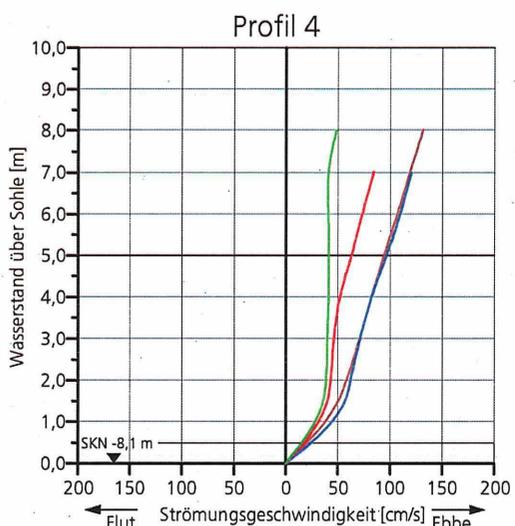
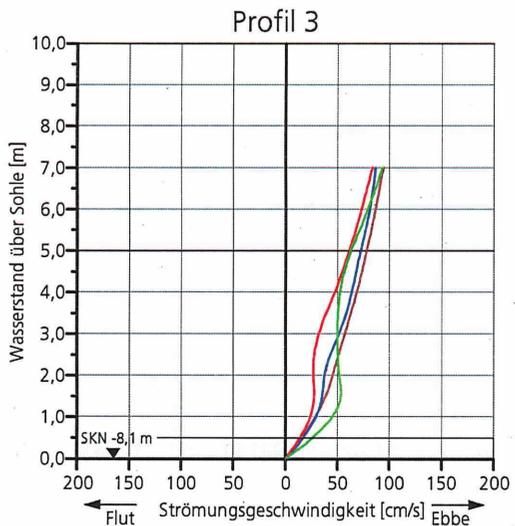
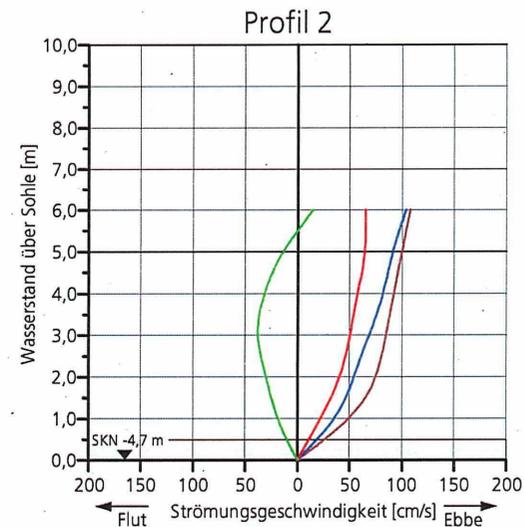
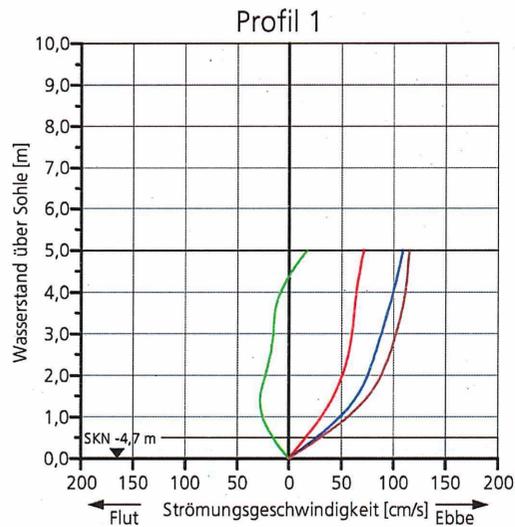
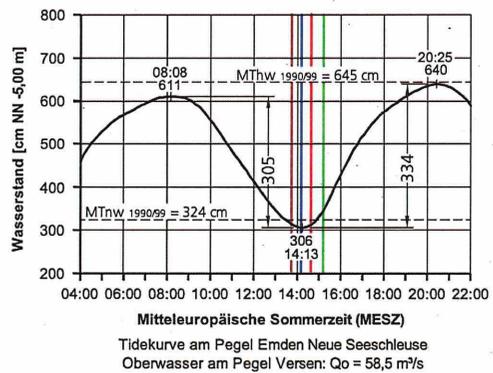


Abb. 35: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 29)

### 5.1.2 Salzgehalte

Die Salzgehalte im äußeren Vor- und Außenhafen und der Ems wurden jeweils einen Tag nach den Flut- und Ebbestrommessungen bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserverhältnissen durchgeführt.

- **Flutstromverhältnisse**

Am 26. Mai 2005 betrug der Springtidehub am Pegel Neue Seeschleuse  $Thb = 385$  cm bei niedrigem Oberwasser in Versen mit  $Q_0 = 43,2$  m<sup>3</sup>/s (Anlage 44).

Besonders auffällig sind die starken Vertikalgradienten mit bis zu  $\Delta S \approx 8$  ‰ bei den unterschiedlichen Salzgehalten während der ersten Messung nach Tideniedrigwasser. Kennzeichnend ist auch das horizontale Salzgefälle in der Einfahrt zwischen Pos. 2 und Pos. 3 von rd. 5 ‰ an der Oberfläche. Mit dem Ebbestrom wird dort bekanntlich die im Uhrzeigersinn drehende Strömungswalze angeregt.

Es ist ebenfalls aus Anlage 44 zu entnehmen, wie mit den Ebbeströmungen das spezifisch leichtere Wasser an der Oberfläche in den Hafen und das salzigere Wasser in den tieferen Schichten aus dem Hafen strömt. Diese ebbestromorientierten Dichteströmungen dauern bis nach der Strömungsumkehr an. Bis zur 5. Messung, etwa zwei Stunden nach Tideniedrigwasser wurden immer noch in der Ems die geringsten Salzgehalte, bei sich abschwächenden Vertikalgradienten, registriert (vgl. Anlage 44).

Etwa bei  $T\frac{1}{2}w$  kehren sich die Salzgehaltsverhältnisse um (Messung 6 bis 8 in Anlage 44). In der Ems werden die stärksten Salzkonzentrationen registriert. Wegen der linksdrehenden Flutstromwalzen sind die Salzgehalte an der Ostmole (Pos. 2) höher als an der Westmole (Pos. 3). Mit zunehmender Flutstromdauer verstärkt sich das Salzgefälle zwischen dem Strom und Hafenbereich (Messung 9 bis 12 in Anlage 44). Mit den Flutstromwalzen strömt das Wasser vornehmlich an der Sohle in den Vorhafen. Die Salzgehalte an den Positionen 2 und 5 sind höher als bei 3 und 4 (vgl. Messung 9 bis 12). Bemerkenswert ist das zunehmende horizontale Gefälle mit der Wassertiefe zwischen Pos. 2 und 3. Die Flutwassermengen dringen an der Ostmole (Pos. 2) in den Hafen ein. Aufgrund des Dichteeffekts strömt das spezifisch leichtere Wasser an der Oberfläche aus dem Hafen. Wie in anderen Brackwasserhäfen überlagern sich die Strömungseffekte (linksdrehende Walze in der Einfahrt mit vertikaler Achse) und Dichteeffekte (Einströmung an der Sohle und oberflächliche Ausströmung; Walze mit horizontaler Achse (NASNER, 2004a).

Etwa bis zur 13. Messung hatten sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen voll ausgeprägt, was an den starken Vertikalgradienten und den Horizontalgradienten in größerer Wassertiefe zwischen Pos. 3 und 2 zu erkennen ist. Bei den letzten beiden Messungen nach  $Thw$  gleichen sich die Salzgehalte der 5 Positionen aneinander an.

- **Ebbestromverhältnisse**

Auch während der Nipptide vom 2. Juni 2005 wurden bei Tidehochwasser bemerkenswerte Vertikalgradienten registriert. Dies zeigt ein Vergleich der letzten Messungen von Anlage 44 mit den ersten Profilen in Anlage 45. Die Zunahme der Salzgehalte über die Wassertiefe beträgt an allen Positionen  $\Delta S > 5 \text{ ‰}$  (Messung 1 in Anlage 45). Das salzigere Wasser aus der Ems wird mit den Flutstromwalzen (dem Strömungseffekt) in den tieferen Wasserschichten in den Vorhafen transportiert (Pos. 1, 2 und 5). Im Außenhafen waren die Salzkonzentrationen deutlich schwächer (Pos. 3 und 4). Die geringeren Werte an der Oberfläche sind auf das aus den Hafen zur Ems zurückströmende Wasser zurückzuführen (Dichteeffekt).

Wie bei der Flut- kehren sich die Salzgehaltsgefälle zwischen dem Tidestrom und Vorhafen etwa ab Tidehalbwasser auch während der Ebbestromphase um (Messung 7 bis 11 in Anlage 45). Der Vorgang dauert länger als während der Flutstromphase. Anschließend werden die Ebbewassermengen durch den Strömungseffekt mit den im oberen Wasserkörper rechtsdrehenden Walzen in das Hafengebiet eingetragen (Pos. 3 in Anlage 45). Zu beachten sind dazu die von 14 ‰ (Messung 12) auf 7 ‰ (Messung 18) abnehmenden Salzgehalte in den oberen Schichten und die mit fortschreitender Tidedauer deutlich höheren Konzentrationen in den unteren Bereichen. Der besonders starke Wasseraustausch während der Niedrigwasserphase wird mit den letzten Messungen 15 bis 18 an den Positionen 1 und 3 dokumentiert (Anlage 45). Bei den letzten Messungen war der Salzgehalt unten um rd. 7 ‰ größer als an der Wasseroberfläche. Das wird durch die relativ starken Ausströmungen im tiefen Wasser aus dem Vor- und Außenhafen verursacht. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Vergleich mit den ersten beiden Messungen in Anlage 45 bei entgegengesetzten Strömungsverhältnissen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Überlagerungen der Walzen- und Dichteströmungen bei Flut- und Ebbestrom mit den vertikalen und horizontalen Salzgehaltsverteilungen in der Ems und den Schleusenvorhäfen erklären lassen.

### **5.1.3 Schwebstoffe**

Mit den vorausgegangenen Untersuchungen (KFKI-Projekt 03 KIS 019) wurden in der Ems und dem Emdor Vor- und Außenhafen bei mittleren Oberwasserbedingungen besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen festgestellt. Dieser Umstand wird mit den in diesem Vorhaben ausgeführten Messungen in der Ems und im Vor- und Außenhafen durchgeführten Trübungsmessungen bestätigt.

- **Flutstromverhältnisse**

Bei der Springtide vom 26. Mai 2005 wurden noch nach Tideniedrigwasser während der letzten Ebbestromphase hohe Schwebstoffkonzentrationen in der Ems ermittelt (Pos. 1 in Anlage 46, Messung 1 und 2). Mit der 2. Messung ist nachvollziehbar, wie die Sedimente

aus der Ems an der Wasseroberfläche über die Ebbestromwalze (Pos. 2 und 3) in den Außenhafen transportiert werden (Pos. 4). Im Vorhafen sind die Schwebstoffgehalte deutlich geringer (Pos. 5). Das im tieferen Wasser dichtebedingt zur Ems zurückströmende Wasser war ebenfalls schwebstoffärmer (Messung 2, Pos. 2 und 5).

Während der ersten Flutstromphase (Messung 3 bis 6) gingen die Feststoffkonzentrationen vor der Einfahrt in der Ems stark zurück. Besonders starke Turbulenzen waren am Staupunkt der Flutströmungen, dem Kopf der Ostmole zu beobachten (Pos. 2).

Kennzeichnend sind die geringen Schwebstoffgehalte in der Ems bei weiter fortschreitender Tidephase. Bereits bei der 7. Messung in Anlage 46 wurden nur noch  $C_s \approx 250$  mg/l mit abnehmender Tendenz bis zu  $C_s \approx 100$  mg/l während der Kenterphase. Bei voll ausgeprägten Flutstrom verursachen die Strömungs- und Dichteeffekte im Vor- und Außenhafen besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen bis hin zu den oberen Wasserschichten (Messungen 7 bis 14). Erst rd. 1 Stunde vor dem Eintritt des Tidehochwassers ab Messung 15 verringerten sich die Schwebstoffgehalte. Die höheren Werte im Vorhafen (Pos. 5) bei den Messungen 16 und 17 sind auf in der Zeit ausgeführten Aktivitäten eines Schleppers mit einer mechanischen Egge zurückzuführen.

Die bei Thw durchgeführte Messung 18 in Anlage 46 zeigt, wie in größerer Wassertiefe schwebstoffhaltigeres Wasser mit der Flutstromwalze in den Vorhafen gelangt (Pos. 2). Auch an den Pos. 3 und 5 sind im tieferen Wasser höhere Suspensionen festzustellen. Das an der Oberfläche zur Ems zurückströmende Wasser ist weniger schwebstoffhaltig.

- **Ebbestromverhältnisse**

Am 2. Juni 2005 betrug der Tidefall lediglich 267 cm. Dementsprechend gering waren die Schwebstoffkonzentrationen in der Ems und den Schleusenvorhäfen (Anlage 47). Die insgesamt geringeren Schwebstofffrachten während der Ebbephase sind auch bei vorausgegangenen Untersuchungen nachgewiesen worden (NASNER, 2004a). Sie sind auf die im Brackwasserbereich tideabhängig veränderlichen Salzgehalte und die daraus entstehenden Strömungen zurückzuführen. So haben auch die vorstehend erläuterten Strömungsmessungen gezeigt, dass in der Ems während der Flut die Sohlströmungen und in der Ebbestromphase die Oberflächenströmungen verstärkt werden.

Bei der Messung vom 2. Juni 2005 wurden in den oberen Wasserschichten erst in der fortgeschrittenen Ebbestromphase ab der 10. Messung in der Ems Schwebstoffkonzentrationen von  $C_s > 500$  mg/l ermittelt (Anlage 45). Bei den folgenden Messungen ist zu erkennen, wie der Feststoffeintrag in den Vor- und Außenhafen stattfindet. Mit den letzten drei Messungen wird dokumentiert, wie das Material oberflächlich mit der rechtsdrehenden Ebbestromwalze im Staubereich der Ebbeströmungen (Pos. 3) in den Hafenbereich gelangt und das Wasser mit der Dichteströmung im unteren Bereich zur Ems weniger schwebstoffhaltig zurückströmt. Die geringsten Schwebstoffkonzentrationen waren in der letzten Ebbestromphase im Vorhafen festzustellen (Messung 15 bis 18 und 1 bis 2 in Anlage 46).

#### 5.1.4 Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen

In der Brackwasserzone der Ems werden die Sohlströmungen wie in der Weser durch Dichteeffekte während der Flut verstärkt und in der Ebbestromphase geschwächt. Das während einer Tide anfallende Oberwasser wird mit der Ebbeströmungen verstärkt in den oberen Wasserschichten abgeführt.

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten treten in der Ems ebenfalls in der zweiten Stunde nach der Strömungsumkehr, am Ende des steilen Flutastes auf (Abb. 36).

Anschließend nimmt die Strömungsintensität kontinuierlich bis zur Kenterung ab. Kennzeichnend ist auch die unsymmetrische Verteilung der Flutstromgeschwindigkeiten im Tideablauf.

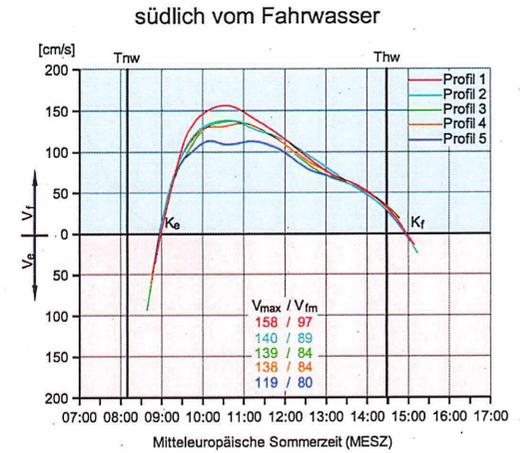
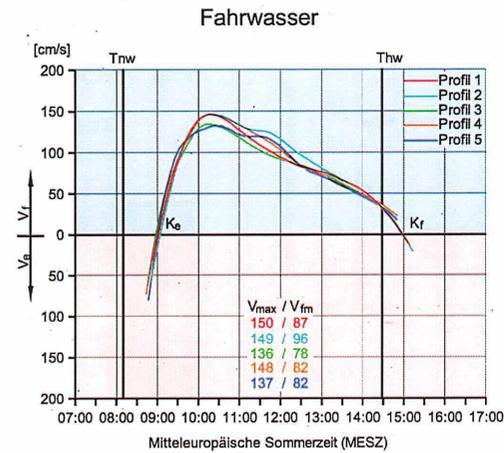
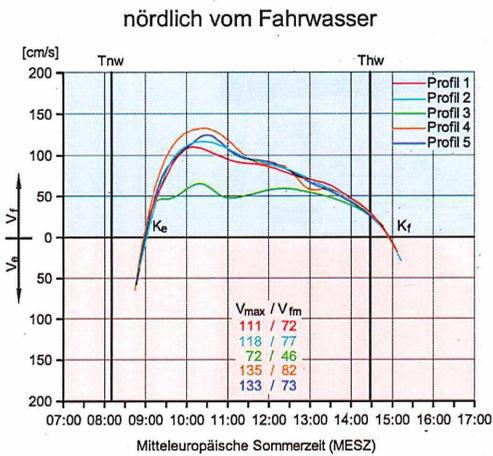
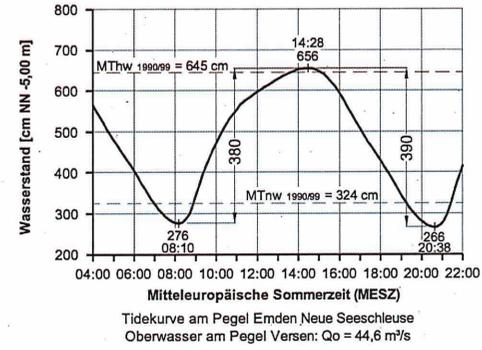
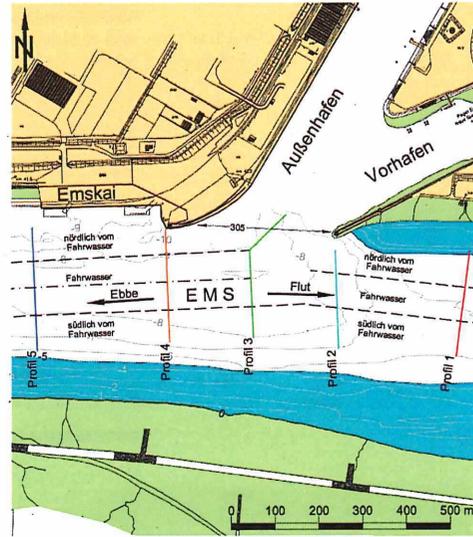
Das zur Einfahrt ausgerichtete nordöstliche Profil 3 dokumentiert die Austauschvorgänge zwischen dem Vor- und Außenhafen und der Ems. Im Einfahrtsbereich (Profile nördlich vom Fahrwasser in Abb. 36). sind durch die Überlagerung der Strömungs-, Dichte- und Tideeffekte relativ geringe Strömungen während der Flutstromphase zu verzeichnen (vgl. Anlage 38 und 39). Am stärksten sind die Flutströmungen nördlich des Fahrwassers im Profil 4 im Bereich der Einengung am oberen Ende des Emskais (Abb. 36). Von der Westmole aus strömen die Flutwassermengen zum Staupunkt am Kopf der Ostmole und fachen die linksdrehenden Flustromwalzen an (vgl. Anlage 38, Messung 3 und 4). Mit zunehmender Flutdauer verlagern sich die Walzenströmungen in die tieferen Wasserschichten (Messung 5 bis 9 in Anlage 38 und 39). Aufgrund der Dichteunterschiede strömt das während der vorausgegangenen Ebbestromphase eingetragene spezifisch leichtere Wasser an der Oberfläche aus dem Vor- und Außenhafen in die Ems zurück.

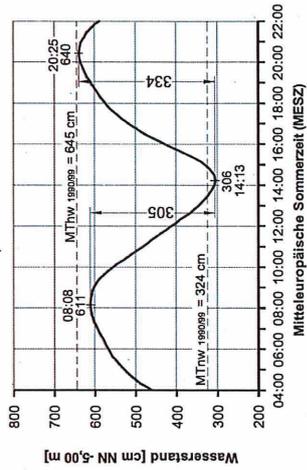
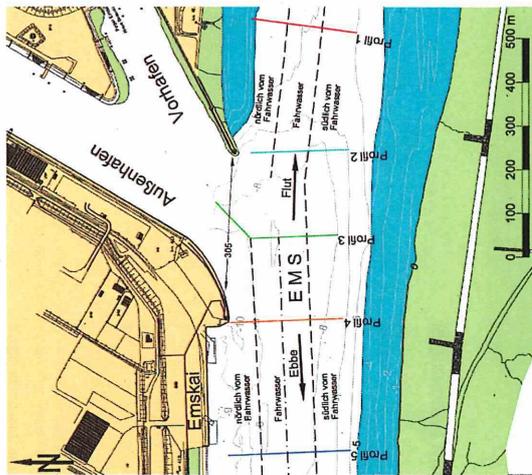
Oberhalb der Ostmole erhöht sich die Emssohle um rd. 3 m. Im Bereich der Schleusenzufahrten kommt es zu einer Umlenkung der Strömungen nach Süden, was auf die in Anlage 48 dargestellten morphologischen Bedingungen im Tidestrom, die Linienführung der Ems und die Austauschvorgänge mit dem Vor- und Außenhafen zurückzuführen ist. Die größten Geschwindigkeiten wurden, kontinuieritätsbedingt südlich im verringerten Durchflussquerschnitt ermittelt.

Die gemittelten Ebbestromgeschwindigkeiten für die am 1. Juni 2005 in der Ems gemessenen 5 Profile sind in Abb. 37 dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Ebbestromgeschwindigkeiten, dem Verlauf der Tidekurve entsprechend, gleichmäßiger verteilt, als die Flutströmungen. Auch während der Ebbephase sind die Austauschvorgänge im Einfahrtsbereich stark ausgeprägt. Sie wirken sich im Profil 3 bis in den Fahrwasserbereich aus.

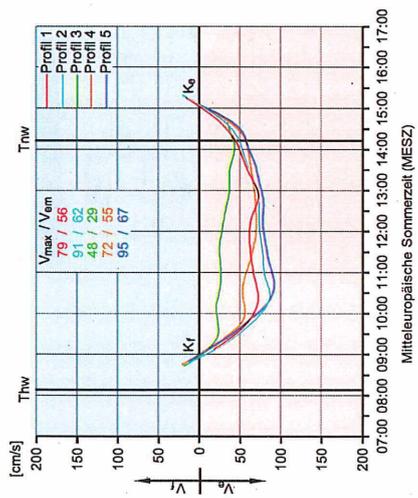
Die stärksten Ebbeströmungen wurden ebenfalls im südlichen Bereich von Profil 1 bestimmt. Insgesamt ist aus den Auftragungen in Abb. 37 abzulesen, wie sich die maximalen Ebbeströmungen in den Querschnitten stromab zum rechten Emsufer verlagern (vgl. Anlage 41 bis 43). Sie folgen wie in der Flutphase der Flussgeometrie und den bathymetrischen Gegebenheiten (vgl. Anlage 48).

Abb. 36: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden  
am 25.05.2005

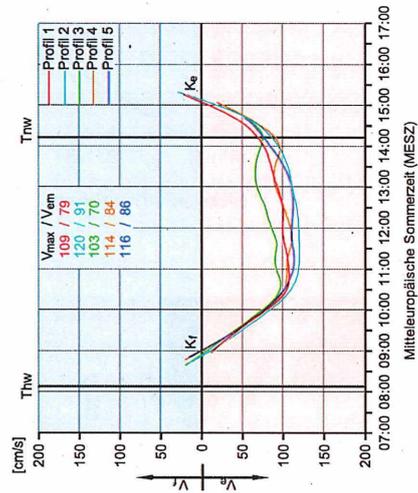




nördlich vom Fahwasser



Fahwasser



südlich vom Fahwasser

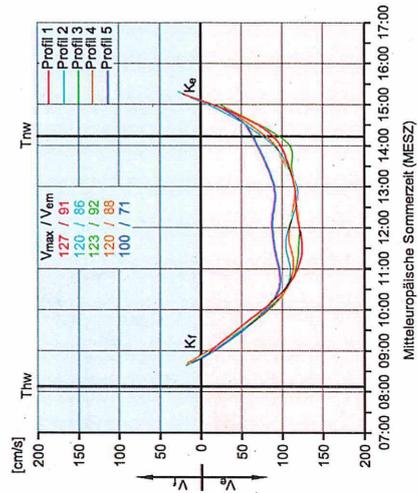


Abb. 37: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 01.06.2005

Es bleibt festzustellen, dass die tideabhängigen Strömungs-, Salzgehalts- und Schwebstoffverhältnisse im Brackwasserbereich der Ems mit denen in der Weser bei Bremerhaven ähnlich und miteinander vergleichbar sind.

## 6 Messungen in der Elbe

### 6.1 Schleusenvorhöfen am Nord-Ostsee-Kanal

Ergänzend zu den im vorausgegangenen vom BMBF geförderten KFKI-Projekt 03 KIS 019 waren in diesem Vorhaben 03 KIS 051 zusätzlich die im Brackwasserbereich der Elbe liegenden Vorhöfen der Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals zu untersuchen. Damit sollte geprüft werden, ob die tide- und oberwasserabhängigen Strömungsvorgänge in den Brackwasservorhöfen der Weser und Ems mit denen an der Elbe vergleichbar sind und die bisher gewonnenen Erkenntnisse verallgemeinert werden können.

#### 6.1.1 Strömungsmessungen im Neuen Vorhafen

Die Schleusenvorhöfen des Nord-Ostsee-Kanals ähneln sich in ihrer Geometrie und Lage zum Tidestrom. Von Interesse ist es, wie sich die unterschiedlichen Abmessungen und Ausbautiefen der Vorhöfen bei gleichen Randbedingungen in der Tideelbe auf die Strömungs- und Dichteeffekte auswirken.

- **Flutströmungen (Anlage 49 bis 55)**

Bei der Tide vom 5. Juli 2005 trat das Tideniedrigwasser (Tnw) gegenüber dem langjährigen Mittelwert von 5 dm höher ein (Anlage 49). Der Nipptidehub betrug 252 cm ( $MThb_{1992/01} = 283$  cm) und auch das Tidehochwasser (Thw) war durch Windstau um rd. 2 dm erhöht. Bis zur beginnenden Flutstromphase sind im Neuen Vorhafen die ebbestromorientierten Dichteströmungen in Anlage 49 auszumachen. In der letzten Ebbestromphase ist an den äußeren Profilen im Vorhafen in den oberen Wasserschichten der Stromeffekt zu erkennen (Messungen 1 und 2 in Anlage 49). Typisch sind auch die nach außen gerichteten Dichteströmungen in den unteren Wasserschichten.

In der dritten Stunde nach Tnw kommt es zur Strömungsumkehr im Neuen Vorhafen (Anlage 50). Bei der 6. Messung sind nur geringe Wasserbewegungen zu erkennen. Mit fortschreitender Tidedauer prägen sich die flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen aus (Anlage 50, Messung 7 und 8).

Typisch sind die sich von der Strömungswalze ablösenden Einströmungen in den tieferen Wasserschichten und die Ausströmungen in den oberen Tiefenzellen. Dabei wird das Wasser verstärkt auf der südlichen Vorhafenseite ein- und im nördlichen Bereich ausgetragen. Die Überlagerungen der Walzen- und Dichteströmungen sind auch noch nach Thw zu beobachten (Anlage 51). Die Strömungsintensitäten schwächen sich erst mit der in den oberen Wasserschichten einsetzenden Ebbestromung ab (Anlage 51, Messung 9 und 10).

Die Flutmessungen wurden im Neuen Vorhafen während der gleichen Messkampagne bei mittleren Tidebedingungen ( $Thb = 278$  cm) und höherem Oberwasser ( $Q_0 = 435$  m<sup>3</sup>/s) am 14. Juli 2005 wiederholt (Anlage 52). Die Ebbestromkenterung fand wie bei der Vor-

messung etwa 1 Stunde nach dem Eintritt des Tnw ein (Messung 2) und die Flutströmung setzte sich verstärkt an der Flusssohle durch (Messungen 3 und 4 in Anlage 52).

Die ebeorientierten Strömungen im Neuen Vorhafen kamen wie bei der Vormessung ebenfalls in der dritten Stunde nach Tnw zum Erliegen. Die linksdrehenden Flutstromwalzen traten zunächst in den oberen Schichten auf (Messung 3) und setzten sich dann mit den veränderlichen Salzgehalten mehr in den unteren Tiefenzellen durch (Messungen 4 in Anlage 52).

Anschließend kommt es in der fortgeschrittenen Flutstromphase, wie in den anderen Brackwasserhäfen zu den voll ausgeprägten Dichte- und Strömungseffekten. Die Ausströmung in den oberen Wasserschichten wirken sich bis in den Tidestrom aus (Anlage 53). Zum Vergleich wird auch auf die Anlagen 50 und 51 (Messungen 7 bis 10) verwiesen. Auch in den unteren Tiefenzellen zeigen sich bei den beiden Messungen vom Juli 2005 vergleichbare Strömungsbilder.

Der Kentervorgang beginnt in der oberen Tiefenzelle (Anlage 53, Messung 6). Es dauert etwa eine Stunde, bis sich die Kenterung bis zu den unteren Wasserschichten durchgesetzt hat (vgl. Anlage 51).

Im März 2007 wurden die Messungen in Brunsbüttel zum Vergleich bei erhöhtem Oberwasser der Elbe durchgeführt (Abb. 38). Der mittlere Abfluss betrug  $MQ_o = 1008 \text{ m}^3/\text{s}$

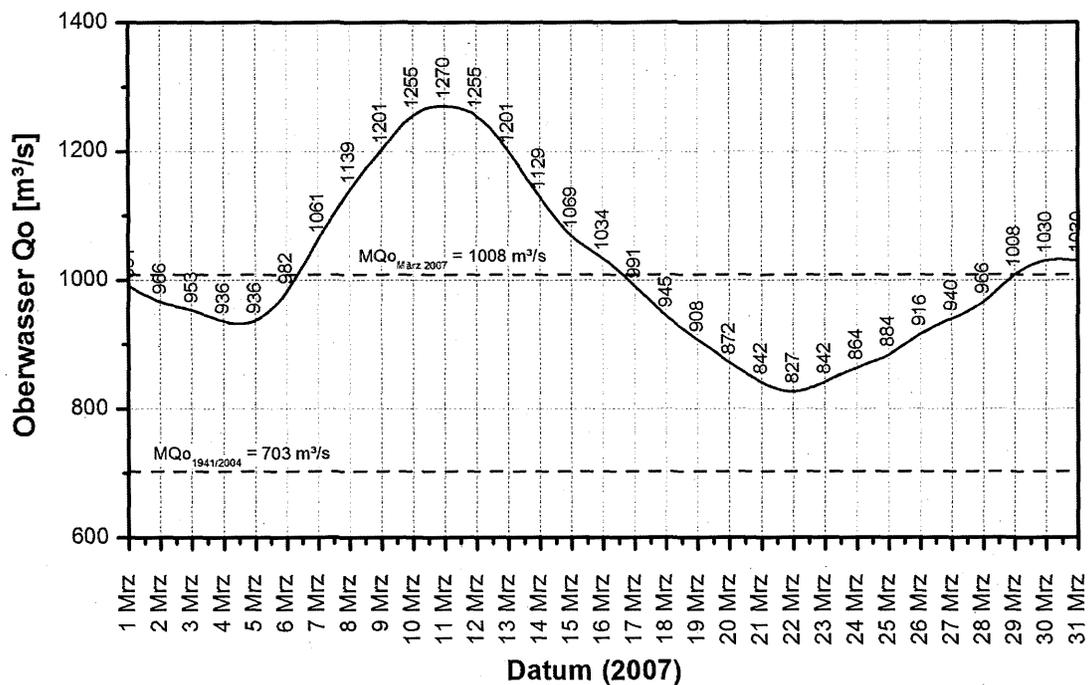


Abb. 38: Oberwasserganglinie am Pegel Neu Darchau im März 2007

und lag damit deutlich über dem langjährigen Mittelwert von  $MQ_{o1941/2004} = 703 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der höchste Binnenabfluss wurde in Neu Darchau am 11. März mit  $Q_o = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$  und

der niedrigste am 22. März mit  $Q_0 = 827 \text{ m}^3/\text{s}$  festgestellt. Der Pegel Neu Darchau liegt ca. 47 km oberhalb der Tidegrenze in Geesthacht und rd. 160 km oberhalb von Brunsbüttelkoog.

Die Strömungsmessungen im Neuen Vorhafen wurden am 21. März 2007 bei einem Springtidehub von  $Thb = 327 \text{ cm}$  durchgeführt (Anlage 54). In Neu Darchau betrug der Abfluss 10 Tage nach dem Durchgang der Oberwasserspitze  $Q_0 = 842 \text{ m}^3/\text{s}$  (Abb. 38). Die Salzgehaltsverhältnisse in Brunsbüttel entsprachen jedoch mehr den höheren Oberwasserbedingungen, die sich inzwischen bis Brunsbüttel durchgesetzt hatten.

Während der Niedrigwasserphase sind die Strömungs- und Dichteeffekte im Vorhafen deutlich schwächer ausgeprägt als bei den Messungen vom Juli 2005 (vgl. Anlage 54 mit 49 und 52). Aufgrund des Brackwassereinflusses im Tidestrom setzt sich auch noch bei den höheren Binnenabflüssen vom März 2007 die Ebbestromkenterung von den unteren zu den oberen Wasserschichten durch (Anlage 54, Messungen 1 und 2).

In der anschließenden ersten Flutstromphase sind nur schwache Flutstromwalzen und Einstömungen im südlichen Vorhafenbereich zu erkennen (Anlage 54, Messungen 3 und 4).

Auch während der Tidehochwasserphase waren am 21. März 2007 trotz Springtide nur geringe Wasserbewegungen im Neuen Vorhafen zu verzeichnen (Anlage 55). Zum Vergleich können die Ergebnisse vom Juli 2005 herangezogen werden (Anlagen 51 und 53).

#### • Ebbeströmungen (Anlage 56 bis 63)

Die Ebbeströmungen sind am 28. Juni 2005 bei etwa mittleren Tideverhältnissen untersucht worden. Der Abfluss am Pegel Neu Darchau betrug  $Q_0 = 320 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anlage 56).

Zu Beginn der Messungen herrschte reger Schiffsverkehr im Neuen Vorhafen. Offenbar sind dadurch die natürlichen Strömungs- und Dichteeffekte durch schiffserzeugte Strömungen überlagert worden. Das erklärt die verhältnismäßig starken und ungleichmäßigen Ausströmungen zur Elbe in den oberen Tiefenzellen bei den ersten beiden Messungen (Anlage 56). Die nach Thw typischen, sohlennahen Dichteströmungen in den Vorhafen (vgl. Anlagen 51 und 53) wurden ebenfalls schifffahrtsbedingt unterbunden. Die Ebbeströmungen im Tidestrom setzte sich zuerst und verstärkt in den oberen Wasserschichten durch.

Bei voll ausgeprägtem Ebbestrom sind in den oberen Schichten die im äußeren Vorhafen im Uhrzeigersinn drehenden Walzenströmungen auszumachen (Anlage 57, Messungen 5 bis 8). Gleichzeitig führen die Dichteeffekte zu einer sich verstärkenden Ausströmung des schwereren, salzhaltigeren Wassers in den tiefer liegenden Schichten (Anlage 57, untere Tiefenzellen). Die Dichteeffekte bleiben bis zur Ebbestromkenterung erhalten (Anlage 58).

Am 13. Juli 2005 wurde die Ebbemessung bei einem Nipptidehub von 255 cm und etwas erhöhtem  $Q_0 = 425 \text{ m}^3/\text{s}$  in Neu Darchau wiederholt (Anlage 59).

Die Flutstromkenterung wird mit den ersten beiden Messungen in Anlage 59 (Messungen 1 und 2) dokumentiert. Sie beginnt an der Oberfläche und hat sich bei der zweiten Messung bis zur Sohle durchgesetzt. Die dichtebedingten, oberflächlich aus dem Hafen strömenden

Wassermengen wirkt sich bis in den Tidestrom aus. Das salzhaltigere Wasser wurde in den tiefen Zellen in den Vorhafen eingetragen. Im Zentrum der Dichtewalze waren die geringsten Wasserbewegungen zu verzeichnen (mittlere Tiefenzellen, 5,85 m und 6,85 m in Anlage 59).

In der ersten Ebbestromphase waren im Neuen Vorhafen keine bemerkenswerten Wasserbewegungen vorhanden (Anlage 59, Messungen 3 und 4).

Die auch in den anderen Brackwasserhäfen typischen Walzen- und Dichteströmungen bilden sich erst in der späteren Ebbestromphase aus (Anlage 60).

Über die rechtsdrehenden Walzen gelangt das leichtere Wasser aus der Elbe oberflächlich in den Vorhafen. Das im Vorhafen anstehende salzigere Wasser strömt dichtebedingt sohlennah zurück zum Tidestrom. Diese Strömungsvorgänge lösen sich erst nach Abschluss der Ebbestromkenterung in der dritten Stunde nach Thw mit der einsetzenden Flutstromphase auf (vgl. Anlage 52, Messungen 3 und 4).

Die veränderte Situation im Neuen Vorhafen bei höheren Binnenabflüssen und einer Nipp tide wurde am 14. März 2007 beobachtet (Anlage 61). Das Oberwasser betrug in Neu Darchau drei Tage nach dem Höchstabfluss noch  $Q_0 = 1129 \text{ m}^3/\text{s}$  (s. Abb. 38) bei einem Tidefall in Brunsbüttel von 215 cm.

Die hydrologischen Randbedingungen (hohes Oberwasser, geringer Tidefall) erklären die insgesamt schwachen Strömungsvorgänge in Anlage 61. An den ersten beiden Messungen ist zu erkennen, dass sich die Flutstromkenterung brackwasserbedingt von oben nach unten durchsetzt und rd. zwei Stunden nach Thw abgeschlossen ist (Messungen 1 bis 3 in Anlage 61).

Im Neuen Vorhafen waren im Verlauf der Ebbestromphase bei oberwasser- und tidebedingten geringen Salzgehalten nur sehr geringe Wasserbewegungen zu verzeichnen. Die ebbestromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte waren nur schwach ausgeprägt (Anlage 61 bis 63).

### **6.1.2 Strömungsmessungen im Alten Vorhafen**

- **Flutströmungen (Anlage 64 bis 68)**

Am 11. Juli 2005 herrschten mittlere Tideverhältnisse bei einem  $Q_0 = 410 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anlage 64). Erwartungsgemäß sind die Strömungs- und Dichteeffekte im Alten Vorhafen wegen der geringeren Abmessung und Ausbautiefe schwächer ausgeprägt als in der größeren Schleusenzufahrt. Bis zum Abschluss der Ebbestromkenterung etwa 1,5 Stunden nach Thw (Messung 3) sind in der oberen Tiefenzelle die zur Schleuse gerichteten Strömungsvektoren in Anlage 64 auszumachen. Weiter unten ist die Strömung entgegengesetzt zur Elbe gerichtet. In der späteren Flutstromphase (Messung 5 und 6 in Anlage 65) sind in den unteren Schichten im Einfahrtbereich die schwachen Flutstromwalzen und Einströmungen im südlichen Vorhafen zu erkennen. Mit nachlassender Flutströmung in der Elbe

verstärken sich die hydrodynamischen Vorgänge im Vorhafen (Anlage 65, Messungen 7 und 8). Die oben und unten entgegengesetzt ziehenden Dichteströmungen halten wie im Neuen Vorhafen bis zum Ende der Kenterphase in sich abschwächender Form an (Anlage 66).

Bedingt durch das höhere Oberwasser sind die Brackwassereffekte bei der Messung vom März 2007 kaum noch auszumachen (Anlage 67 und 68). Dabei sind die Dichteströmungen sind zum Ende der Ebbestromphase (Messungen 1 und 2 in Anlage 67) weniger stark ausgeprägt als nach dem Eintritt des Thw. Mit der 7 und 8. Messung in Anlage 68 wird die Strömung zur Elbe (oben) und zur Schleuse (unten) dokumentiert. Auch bei höherem Binnenabfluss sind die Strömungs- und damit die Sedimentationsursachen in den Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals flutstromorientiert.

- **Ebbeströmungen (Anlage 69 bis 74)**

Am 14. Juli 2005 betrug der Nipptidefall 252 cm bei einem Oberwasserabfluss in Neu Darchau von  $Q_0 = 435 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anlage 69). Die Flutstromkenterung begann rd. eine Stunde nach Thw in den oberen Wasserschichten (Messung 1) und hatte sich bei der zweiten Messung rd. 1,5 Stunden nach Thw bis zur unteren Tiefenzelle durchgesetzt. Die flutstromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte schwächen sich während der Kenterphase ab (Messungen 1 und 2). In der ersten Ebbestromphase waren keine nennenswerten Strömungsvorgänge im Alten Vorhafen zu beobachten (Anlage 69, Messungen 3 und 4).

Wie in anderen Brackwasserhäfen findet mit fortschreitender Ebbestromdauer der Wasseraustausch durch die in den oberen Wasserschichten rechtsdrehende Ebbestromwalze im Einfahrtbereich statt. Von der Walze aus strömen die Wassermengen zum Außenhaupt und in den tieferen Zellen zur Elbe zurück (Anlage 70). Es stellen sich die ebbestromorientierten Dichtestromwalzen mit horizontaler Achse ein. Die Überlagerungen der Strömungs- und Dichteeffekte sind bis zur letzten Messung auszumachen (Anlage 71). Sie kommen erst nach der Ebbestromkenterung zum Erliegen.

Am 27. März 2007 betrug der Tidefall lediglich 227 cm und das Oberwasser in Neu Darchau  $Q_0 = 940 \text{ m}^3/\text{s}$ . Wie bei den Messungen an der Weser und Ems zeigte sich auch an der Unterebbe, dass sich die geringeren Tidewassermengen bei Nipptiden auf die Salzkonzentrationen und Gradienten auswirken. Außerdem verschiebt sich bekanntlich die Brackwasserzone bei höherem Binnenabfluss in Richtung Nordsee, was zusätzlich zur Minderung der Salzkonzentrationen in der Elbe bei Brunsbüttel führt.

Die vorstehenden Anmerkungen sind die Gründe für die bei der Märzmessung 2007 (Anlagen 72 bis 74) deutlich schwächer ausgeprägten Strömungs- und Dichteeffekte im Alten Vorhafen als im Juli 2005 (Anlagen 69 bis 71).

### 6.1.3 Salzgehalte

- Messungen im Bereich des Neuen Vorhafens (Anlage 75 bis 78)

Am 7. Juli 2005 wurden die Salzgehalte im Neuen Vorhafen bei annähernd mittleren Tideverhältnissen und niedrigem Oberwasser am Pegel Neu Darchau ( $Q_0 = 292 \text{ m}^3/\text{s}$ ) gemessen (Anlage 75). Die Salzkonzentrationen im Tidestrom (Pos. NV6) erhöhten sich während der Flutphase von rd. 4 ‰ (Messung 1) auf bis zu 13 ‰ bei den letzten Messungen. Die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal liegen bereits bei niedrigen Abflüssen aus dem Binnenland mehr im mesohalinen Brackwasserbereich der Elbe. Bei Tideniedrigwasser beträgt das horizontale Salzgehaltsgefälle vom inneren Vorhafen zur Elbe (Messung 1, NV1 bis NV6 in Anlage 75)  $\Delta S \approx 4 \text{ ‰}$ . Der Strömungseffekt mit den im Uhrzeigersinn drehenden Walzen im Einfahrtbereich hat die geringeren Salzgehalte im westlichen Vorhafenbereich (NV5 und NV4) im Vergleich zum östlichen Molenkopf zur Folge. Die Vertikalgradienten erklären die während der Ebbestromphase in den oberen Wasserschichten nach innen und im tieferen Wasser nach außen gerichteten Dichteströmungen. Das leichtere Elbewasser gelangt über die Walzenströmungen oben in den Vorhafen. Gleichzeitig fließt das salzigere Wasser unten aus dem Vorhafen.

Nach der 4. Messung kehren sich die Salzgehaltskonzentrationen zwischen Elbe und Vorhafen um (Anlage 75). Im weiteren Verlauf der Flutstromphase verstärkt sich das horizontale Salzgehaltsgefälle von der Elbe zu den Schleusen. Gleichzeitig bilden sich zunehmend stärkere Vertikalgradienten aus. Aus den Diagrammen ist abzulesen, wie der Wasseraustausch über die Flutstromwalzen im tieferen Wasser, in der Hafeneinfahrt stattfindet. Das wird durch die Salzgehaltsdifferenzen der Positionen NV3 und NV4 dokumentiert (ab Messung 7 in Anlage 75). Das salzigere Wasser aus der Elbe gelangt über die linksdrehenden Flutstromwalzen in den unteren Wasserschichten in den Vorhafen. Das weniger salzhaltige Wasser wird mit den Dichteströmungen oberflächlich aus den Vorhafen transportiert.

Typisch für die fortgeschrittene Flutstromphase sind die geringeren Salzgehalte und -gradienten in den oberen und die höheren in den unteren Wasserschichten im Vorhafen (Messungen 9 bis 12 in Anlage 75).

Die Ebbemessungen wurden am 30. Juni 2005 bei vergleichbaren Oberwasserbedingungen ( $Q_0 = 297 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und einem Nipptidefall von 246 cm durchgeführt (Anlage 76). Der geringere Tidehub gegenüber der Flutmessung ist ursächlich für die insgesamt schwächeren Salzkonzentrationen in der Elbe. Zu Beginn der Messungen während der Hochwasserphase wurden im Tidestrom bis zu  $S \approx 10 \text{ ‰}$  ermittelt (Messungen 2 und 3) und bei den letzten Messungen 14 und 15 waren es noch  $S \approx 2,5 \text{ ‰}$ . Die tideabhängigen horizontalen und vertikalen Salzgehaltsgradienten stimmen in der Hoch- und Niedrigwasserphase in ihrer Form mit der Flutmessung überein (vgl. Anlage 75, Messungen 9 bis 12 und Anlage 76, Messungen 1 bis 3; sowie Anlage 75, Messungen 1 bis 3 und Anlage 76, Messungen 12 bis 15). Die Umkehrung der Salzgehaltsgefälle findet ebenfalls etwa bei Tidehalbwasser jedoch

über einen längeren Zeitraum statt. In der zweiten Ebbephase prägen sich dann die ebbestromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte aus. Das lässt sich an den Verteilungen der Salzgehalte ab der 5. Messung in Anlage 76 erkennen.

In der Ebbestromphase wird die während der Flutstromphase aufgelaufenen Tidewassermenge zusammen mit dem während der Tide anfallendem Oberwassers in Richtung Nordsee transportiert. Das spezifisch leichtere, salzärmere Wasser wird verstärkt in den oberen Wasserschichten transportiert (Vertikalverteilung Profil NV6, Messungen 5 bis 9 in Anlage 76). Dadurch wird die in den oberen Schichten rechtsdrehende Ebbestromwalze in der Einfahrt angefacht (Profil NV4 und NV5, Messungen 5 bis 15 in Anlage 76). Von der Walze aus ziehen die Dichteströmungen oben in den Hafen. Sie werden an den Außenhäuptern der Schleusen gekehrt, so dass im tieferen Wasser die Strömung zur Elbe gerichtet ist. Der dadurch verursachte Wasseraustausch zwischen Vorhafen und Elbe führt zeitverzögert zur Abnahme der Salzkonzentrationen im inneren Vorhafenbereich (Positionen NV2 und NV1, Messungen 5 bis 15 in Anlage 76).

Die Flutmessungen am 7. März 2007 wurden bei erhöhtem Oberwasser  $Q_0 = 1061 \text{ m}^3/\text{s}$  und einem Tidehub von 316 cm ausgeführt (Anlage 77). Wegen der höheren Binnenabflüsse (Abb. 38) hatte sich die Brackwasserzone der Elbe seewärts verlagert. Im Tidestrom wurden nur geringe, überwiegend dem oberen, oligohalinen Brackwasser zuzuordnende Salzgehalte zwischen 0,5 und 5 ‰ gemessen.

Zum Eintritt des Tideniedrigwassers betrug das horizontale Salzgehaltsgefälle zwischen NV1 und NV2  $\Delta S \approx 1,5 \text{ ‰}$  und an den Positionen in der Einfahrt lagen die Vertikalgradienten in der gleichen Größenordnung. Bei den geringeren Konzentrationen entsprachen die horizontalen und vertikalen Salzgradienten etwa denen bei geringem Oberwasser (vgl. Anlage 75).

Deutlich höhere Salzgehalte als im Vorhafen hatten sich in der Elbe erst zum Eintritt des Tidehochwassers eingestellt. Etwa eine Stunde nach Thw war der Salzgehalt in der Elbe bis zu  $S = 8 \text{ ‰}$  angestiegen. Bemerkenswert sind die Unterschiede in der Hafeneinfahrt (NV3 und NV4, Messungen 7 bis 9 in Anlage 77) und das stärkere horizontale Gefälle zwischen der Elbe und dem inneren Vorhafen in den unteren Wasserschichten gegenüber der Messung vom Juli 2005 (Anlage 75).

Mit der Ebbemessung in Anlage 78 wird dokumentiert, dass das Untersuchungsgebiet bei erhöhtem Binnenabfluss zur Nipptidezeit auch bei Thw nur von oligohalinem Brackwasser mit Konzentrationen von  $S < 2,5 \text{ ‰}$  erreicht wird. Die stärksten horizontalen und vertikalen Gradienten der Salzverteilungen traten erst nach Thw bis zur Flutstromkehrung auf. Während der Ebbestromphase waren die Salzgehalte an allen Messpunkten etwa gleich niedrig bei nur geringfügigen Änderungen. Es ist noch anzumerken, dass die in Anlage 78 aufgetragenen Salzgehalte 4 Tage nach dem Durchgang der Oberwasserspitze von  $Q_{0max} = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$  in Neu Darchau (vgl. Abb. 38) gemessen wurden.

- Messungen im Bereich des Alten Vorhafens (Anlage 79 bis 82)

Die Flutmessungen im Alten Vorhafen am 11. Juli 2005 (Anlage 79) wurden bei ähnlichen Tide- und Oberwasserbedingungen durchgeführt wie die Salzgehaltsmessungen im Bereich des Neuen Vorhafens 4 Tage zuvor (vgl. Anlage 75). Ein Vergleich der Messungen zeigt ganz ähnliche Verhaltensmuster bei den tideabhängigen Salzgehalten. Die vorstehenden Erläuterungen zu den Untersuchungsergebnissen im Bereich des Neuen Vorhafens sind auf den Alten Vorhafen übertragbar.

Die Ebbmessungen am 14. Juli 2005 im Alten Vorhafen (Anlage 80) wurden ebenfalls bei etwa gleichen hydrologischen Randbedingungen durchgeführt wie die Untersuchungen im Neuen Vorhafen am 30. Juni 2005 (Anlage 76). Wie bei den Flutmessungen sind die tideabhängigen Salzkonzentrationen im Bereich der beiden Vorhäfen miteinander vergleichbar. Die Salzkonzentrationen in den Vorhäfen folgen phasenverschoben denen in der Elbe. In den Tidehochwasserphasen sind die Salzgehalte in der Elbe stärker als in den Vorhäfen. In der zweiten Ebbestromphase bis nach Thw ist es umgekehrt. Die horizontalen und vertikalen Salzgradienten erklären die sich mit der Tide umkehrenden Walzen- und Dichteströmungen in den Vorhäfen.

Die am 8. März 2007 im Bereich des Alten Vorhafens bei erhöhtem Oberwasser durchgeführten Salzgehaltsmessungen während der Flutstromphase (Anlage 81) bestätigen ebenfalls die Ergebnisse des Vortages im Neuen Vorhafen (vgl. Anlage 77). In der ersten Flutphase wurden in der Elbe nur sehr geringen Salzgehalte von  $S < 1 ‰$  registriert. Nennenswerte Gradienten traten erst ab dem Eintritt des Tidehochwassers ein. Das größte Gefälle zwischen der Elbe und den Außenhäuptern wurde in der Stunde nach Thw beobachtet. In der Elbe wurden Salzgehalte bis zu  $S > 5 ‰$  erreicht (Anlage 81, Messung 8).

Die bei Nipptide am 27. März 2007 ausgeführten Messungen (Anlage 82) bestätigen, dass Brunsbüttel bei Oberwasserabflüssen von  $Q_0 \approx 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  im oberen Bereich der Brackwasserzone liegt. Wie bei der Messung im Bereich des Neuen Vorhafens (vgl. Anlage 78) betragen die maximalen Salzgehalte in der Elbe nach Thw  $S < 3 ‰$  und während der Niedrigwasserphasen lediglich  $S \approx 0,5 ‰$ . Auch die Salzgehaltsgefälle waren nur schwach ausgeprägt.

#### 6.1.4 Schwebstoffe

- Messungen im Bereich des Neuen Vorhafens (Anlage 83 bis 86)

Die neuen Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals werden jährlich von etwa vierzig- bis fünfzigtausend Seeschiffen passiert. Durchschnittlich sind das täglich mehr als hundert Schiffe. Die Zuflüsse zum Nord-Ostsee-Kanal werden bei Bedarf über die Schleusen des Alten Vorhafens in die Elbe entwässert. Die Abflüsse betragen dabei bis zu 600 bis 700  $\text{m}^3/\text{s}$ , was etwa dem mittleren Oberwasser der Elbe entspricht. Die natürlichen hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in den Schleusenvorhäfen werden also erheblich von den

betrieblichen Vorgängen überlagert.

Die Salzgehalts- und Schwebstoffmessungen wurden gleichzeitig mit einer Multifunktionssonde ausgeführt. Die bei mittleren Tideverhältnissen und geringen Binnenabflüssen getätigten Messungen 1 bis 4 weisen bei der Flut vom 7. Juli 2005 relativ geringe Schwebstoffkonzentrationen auf (Anlage 83). Die sich nach Tidehalbwasser ausprägenden Dichte- und Walzenströmungen remobilisieren die feinen Sedimente im Vorhafen und verursachen dort höhere Schwebstoffkonzentrationen als in der Elbe. Überlagert wird das natürliche Geschehen durch die betrieblichen Vorgänge. So kam es z. B. bei der 6. Messung im inneren Vorhafen (Position NV1) zu erhöhten Schwebstoffkonzentrationen durch Schleusungen. Im natürlichen Zustand sind die Schwebstoffmengen innerhalb der Flutstromwalzen im äußeren Vorhafen am größten und vermindern sich nach innen (z. B. Messungen 8 und 9 in Anlage 83).

Wie bei den Brackwasserhäfen an der Ems und Weser zeigte sich auch in Brunsbüttel, dass während der Ebbestromphase weniger Sedimente mobilisiert werden (Anlage 84). Es bleibt festzustellen, dass die positive Feststoffbilanz durch den Sedimenteintrag mit den Walzen- und Dichteströmungen während der Flutstromphase verursacht wird. Bemerkenswert sind die etwas höheren Schwebstoffkonzentrationen von der 7. bis zur 11. Messung im Stau- und Walzenbereich der Ebbeströmungen (Pos. NV5 und NV4 in Anlage 84).

Während der Flutmessungen am 7. März 2007 wurden gleichzeitig im Neuen Vorhafen Unterhaltungsarbeiten mit einem Hopperbagger durchgeführt. Das Baggergut wurde unterhalb der Schleusenzufahrten auf der rechten Elbeseite außerhalb des Fahrwassers umgelagert.

Die Auftragungen in Anlage 85 zeigen im Tidestrom und Vorhafen deutlich höhere Schwebstoffkonzentrationen bis in die oberen Wasserschichten als bei der Messung vom Juli 2005 (vgl. Anlage 83). Das ist sicher nicht allein auf den Springtidehub und die höhere Oberwasserführung sondern vielmehr auf die Baggeraktivitäten zurückzuführen.

Bei einem Vergleich der Ebbmessungen vom 15. März 2007 und 30. Juni 2005 (Anlage 86 und 84) sind 2007 höhere Schwebstoffkonzentrationen zu verzeichnen. Nach den Aufzeichnungen im Protokoll ist das ebenfalls auf Unterhaltungsbaggerungen im Neuen Vorhafen zurückzuführen.

- **Messungen im Bereich des Alten Vorhafens (Anlage 87 bis 90)**

Die tideabhängige Schwebstoffverteilung während der Flutstromphase im Bereich des Alten Vorhafens (Anlage 87) zeigt einen ähnlichen Verlauf, wie im neuen Vorhafen (vgl. Anlage 83). Bis Tidehalbwasser sind die Schwebstoffkonzentrationen relativ gering. Anschließend erhöhen sich die Werte zunächst an den äußeren Positionen 3 und 5 (Anlage 83, Messung 5 und Anlage 87, Messung 4). Danach verstärken sich die Feststoffgehalte auch bei Pos. 4 bis in die höheren Bereiche der Wassersäule.

Bei der Ebbemessung vom 14. Juli 2005 (Anlage 88) wurden insgesamt geringere Schwebstoffkonzentrationen festgestellt als bei der vorausgegangenen Flutmessung (vgl. Anlage 87). Die höheren Werte vor den Außenhäuptern (Pos. AV1) bei der 8. Messung sind auf die in der Zeit durchgeführten Niedrigwasserschleusungen zurückzuführen.

Während der Flutmessung vom 8. März 2007 wurden die natürlichen Randbedingungen ebenfalls durch Unterhaltungsarbeiten im Neuen Vorhafen mit Umlagerungen in der Elbe sowie durchgehenden Schleusenbetrieb überlagert. Die ersten Messungen in Anlage 89 zeigen, wie die Sedimente durch die Niedrigwasserschleusungen bis in die oberen Wasserschichten gelangen. Bemerkenswert ist auch die 5. Messung bei der die durch Umlagerungen des Baggerguts erhöhten Feststoffkonzentrationen in die Flutstromwalze der Vorhafeneinfahrt eingetragen werden.

Auch am 27. März 2007 war reger Schleusenbetrieb zu verzeichnen. Insgesamt gesehen waren die Schwebstoffkonzentrationen im Vorhafen deutlich höher als in der Elbe (Anlage 90). Auffällig sind die höheren Werte und starken Durchmischungen bis zur Wasseroberfläche im inneren Vorhafen bei den Niedrigwassermessungen (ab Messung 5 in Anlage 90). Sie sind mit Sicherheit auf betriebliche Ursachen wie Schleusungen bzw. Entwässerungen zurückzuführen.

## 6.2 Strömungsverhältnisse im Tidestrom

Die Lage der in der Elbe gefahrenen Querprofile sind in Abb. 39 dargestellt. Abhängig vom

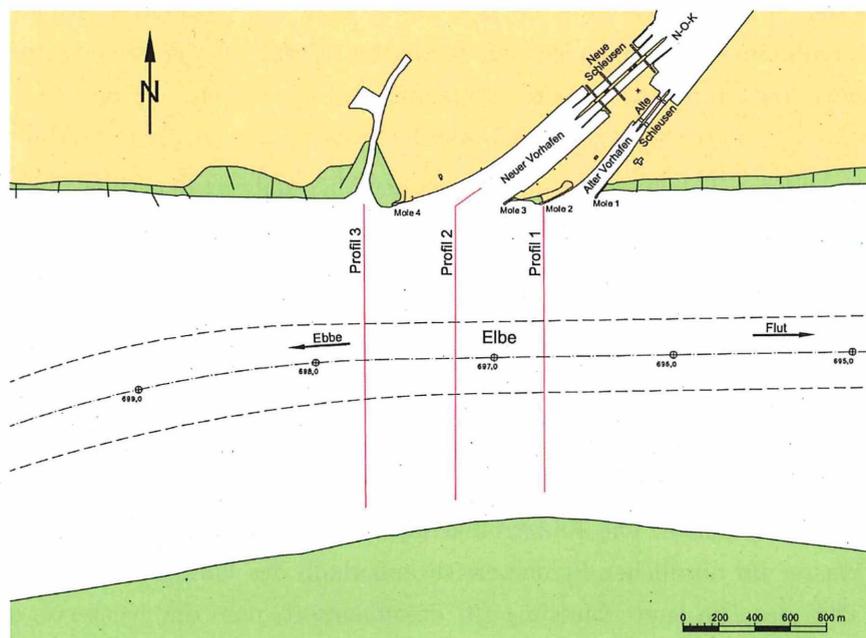


Abb. 39: Lage der ADCP-Profile

Schiffsverkehr und den Wetterverhältnissen betrug der Zeitbedarf für eine Messung der drei

Profile rd. 40 bis 50 Minuten. Die mit einer ADCP-Sonde ermittelten Strömungen wurden nach Stärke und Richtung in Meterabständen ausgewertet. In den folgenden Anlagen sind die Ergebnisse in 2 m-Abständen dargestellt worden.

- **Flutströmungen (Anlage 91 bis 95)**

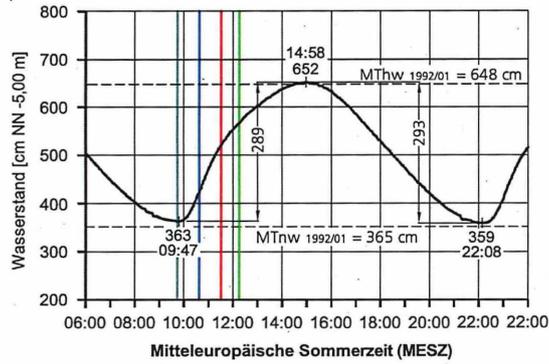
Am 6. Juli 2005 wurden die Messungen bei mittleren Tideverhältnissen ( $T_{hb} = 289$  cm) und einem Binnenabfluss am Pegel Neu Darchau von  $Q_0 = 276$  m<sup>3</sup>/s durchgeführt (Anlage 91). Es herrschten südöstliche Winde der Stärke 4-5 Bft (7-8 m/s). Mit den ersten beiden Messungen in Anlage 91 ist die Ebbestromkenterung nachvollziehbar. Zu Beginn (Messung 1) wurden in den oberen Wasserschichten noch Ebbestromgeschwindigkeiten von  $v_e > 100$  cm/s gemessen. Im Sohlenbereich setzte gleichzeitig die Kenterphase ein. Während des zweiten Umlaufs, etwa eine Stunde nach  $T_{hw}$ , hatte sich die Kenterung bis zur 1,85 m Tiefenzelle durchgesetzt. Während der Kenterphase (Messungen 1 und 2 in Anlage 91) sind in der Einfahrt zum Neuen Vorhafen noch die ebbestromorientierten Strömungsvorgänge zu beobachten. In der ersten Flutstromphase, während des steilen Anstiegs der Tidekurve, kommt es zur raschen Beschleunigung der Flutströmungen. Beim 4. Umlauf wurden Geschwindigkeiten bis zu  $v_{f \max} > 175$  cm/s ermittelt (Anlage 91, Messung 4).

Die für die drei Querprofile in den Fahrwasserbereichen gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind für die ersten 4 Messungen in Abb. 40 dargestellt. Die ersten Vertikalprofile zeigen die ausklingende Ebbestromphase. Bei der ersten Messung (Profil 2) betrug die Strömungsgeschwindigkeiten kurz vor  $T_{hw}$  an der Oberfläche noch knapp  $v_e > 1$  m/s. Bei der letzten (Profil 1) waren es noch  $v_e \approx 0,5$  m/s. Von Bedeutung ist es, wie sich die Flutströmung im sohlennahen Bereich durchsetzt. Kurz nach der Ebbestromkenterung wurde im mittleren Profil 2 sohlennah bereits maximal  $v_f = 50$  cm/s ermittelt. Im Profil 1 betrug der Größtwert bei dem gleichen Umlauf bereits  $v_{f \max} \approx 75$  cm/s (Abb. 40).

Wie bei den anderen Tideflüssen verlagert sich der Maximalwert der Flutströmungen mit fortschreitender Flutstromdauer von unten nach oben. Außerdem sind die Vertikalgradienten im oberen Brackwassergebiet der Tideelbe nicht so stark ausgeprägt wie in den anderen Revieren. Die stärksten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser wurden -ebenso wie an der Weser und Ems- in der dritten Stunde nach Tideniedrigwasser mit  $v_{fm} \approx 150$  cm/s ermittelt.

Mit sich abflachendem Flutast der Tidekurve werden die Strömungen kontinuierlich schwächer (Anlage 92). Gleichzeitig verstärken sich die flutstromorientierten Strömungs- und Dichteeffekte im Vorhafen. Die Flutstromkenterung setzte während der 8. Messung im flacheren Wasser im nördlichen Strombereich außerhalb des Fahrwassers etwa 40 Minuten nach  $T_{hw}$  ein. Die letzte Messung (9) dokumentiert, dass der Kentervorgang auch 90 Minuten nach dem Eintritt des  $T_{hw}$  noch nicht abgeschlossen war (Anlage 93).

Die kontinuierliche Abnahme der Flutstromintensitäten wird mit Abb. 41 verdeutlicht. Bis zum Ende der Flutstromphase sind die größten Geschwindigkeiten dichtebedingt in



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 276 m<sup>3</sup>/s

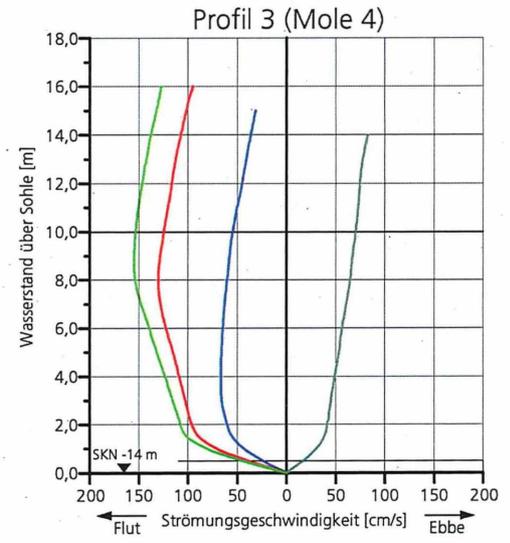
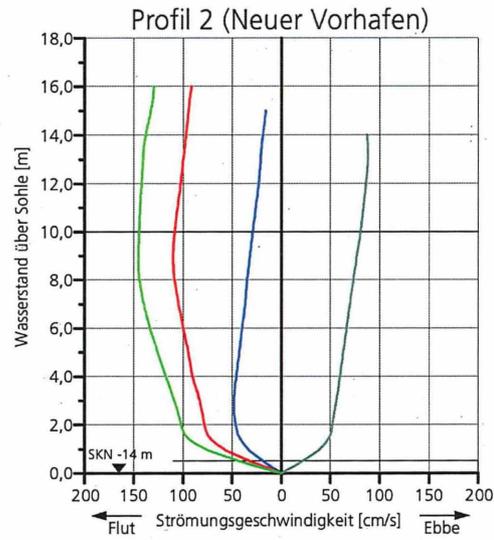
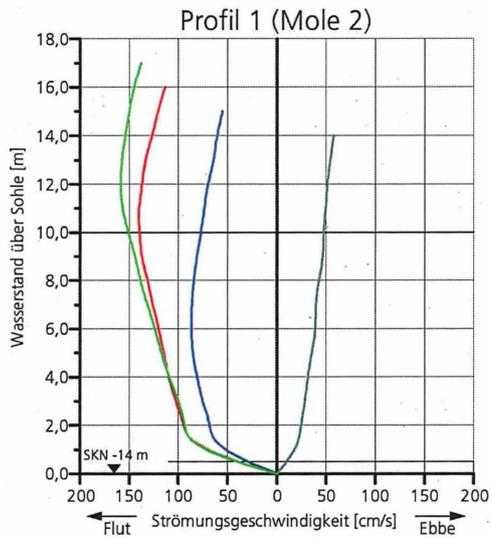
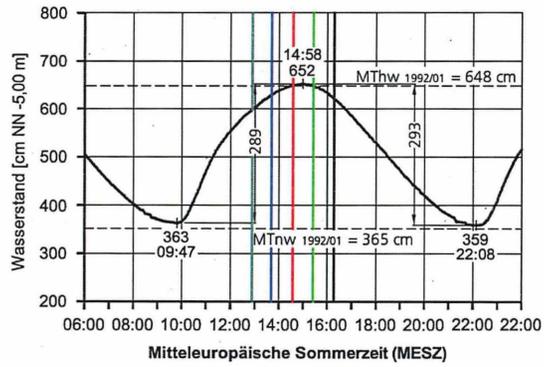


Abb. 40: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 39)



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 276 m³/s

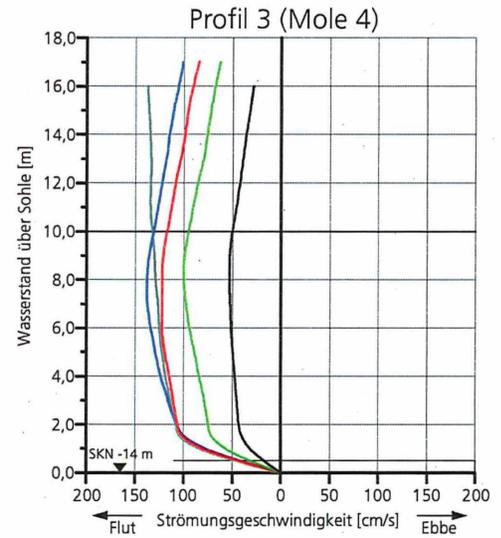
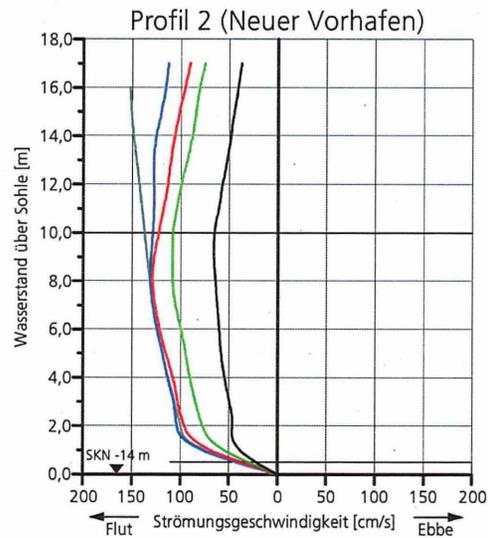
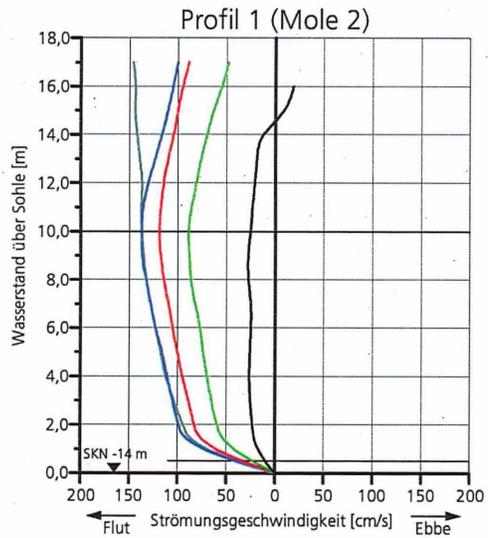


Abb. 41: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 39)

größeren Wassertiefen anzutreffen. Die Ebbeströmung setzte sich erst rd. 1,5 Stunden nach Thw an der Wasseroberfläche im oberstromigen Profil 1 durch.

Am 20. März 2007 betrug der Tidehub am Pegel Brunsbüttel Mole 4  $Thb = 324$  cm bei einem Oberwasser in Neu Darchau von  $Q_0 = 872$  m<sup>3</sup>/s (Anlage 95). Das Hochwasser vom 11. März 2007 mit  $Q_{0max} = 1270$  m<sup>3</sup>/s war in Neu Darchau bereits deutlich zurückgegangen. Die hydrologischen Randbedingungen in Brunsbüttel waren am 20. März noch von den höheren Abflüssen beeinflusst. Die gegenüber den langjährigen Mittelwerten erhöhten Wasserstände waren durch leichten Windstau geprägt.

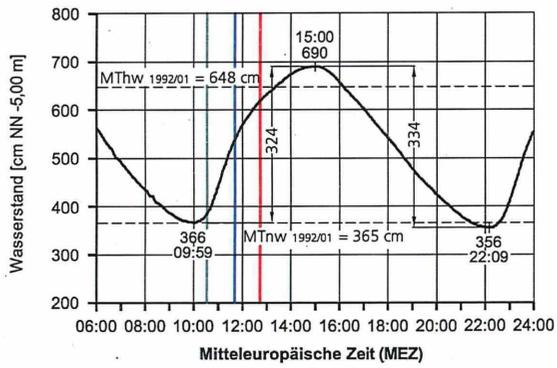
Mit dem ersten Umlauf wurde die Ebbestromkenterung erfasst. In den unteren beiden Profilen sind nach Tideniedrigwasser noch schwache Ebbeströmungen gemessen worden (Anlage 94, Messung 1). Etwa 1 Stunde nach Tnw war im Profil 1 querab von Mole 2 die Strömungsumkehr nahezu abgeschlossen.

Trotz des erhöhten Oberwassers traten bei der Messung vom März 2007 höhere Flutstromgeschwindigkeiten auf als bei der Vormessung (vgl. Anlage 94 und 91). Das liegt sicher an dem mit 324 cm um 35 cm höheren Tidehub und den damit verbundenen größeren Tidewassermengen. Es fällt auf, dass die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Hauptflutstromphase in den tieferen Wasserschichten anzutreffen sind (Messungen 3 und 4 in Anlage 94 und Messung 4 in Anlage 91). Auch mit schwächer werdender Strömungsintensität liegen die maximalen Geschwindigkeiten nicht in den oberen Wasserschichten (Anlage 95, Messungen 5 und 6). Dort setzt sich zuerst die Ebbeströmung durch (Messungen 7 und 8 in Anlage 95).

In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass bei den Oberwasserbedingungen vom März 2007 in der Elbe erst zur späten Flutstromphase und bei Springtiden deutliche Vertikalgradienten der Salzgehalte auftreten (vgl. Anlage 77). Bemerkenswert ist die Beobachtung, dass die Kenterung bei der Messung vom März 2007 trotz des höheren Oberwassers im Fahrwasser erst etwa 1,5 Stunden nach Thw an der Wasseroberfläche einsetzte (Messung 7, mittleres Profil). Sie hatte sich dann allerdings rasch bis zur Sohle durchgesetzt (Messung 8).

Die für den Fahrwasserquerschnitt gemittelten Geschwindigkeiten in Abb. 42 zeigen die Kenterphase der Ebbeströmungen. Anschließend ist die rasche Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten beim steilen Anstieg des Flutastes der Tidekurve nachzuvollziehen. Gegenüber der Vormessung haben die Geschwindigkeitsverteilungen einen mehr parabolischen Verlauf (vgl. Abb. 40). Wie vorstehend erläutert ist das auf die in dieser Tidephase bei niedrigem Oberwasser stärkeren vertikalen Salzgradienten in der Elbe zurückzuführen.

Bei der Flut vom März 2007 wurden die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten relativ spät erreicht (vgl. Abb. 43 mit Abb. 41). Bemerkenswert sind die Veränderungen der Vertikalprofile in Abb. 42 und Abb. 43. In der ersten Flutstromphase ist die Verteilung mehr parabolisch mit den größten Werten an der Wasseroberfläche (Abb. 42). Mit zunehmenden



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 872 m³/s

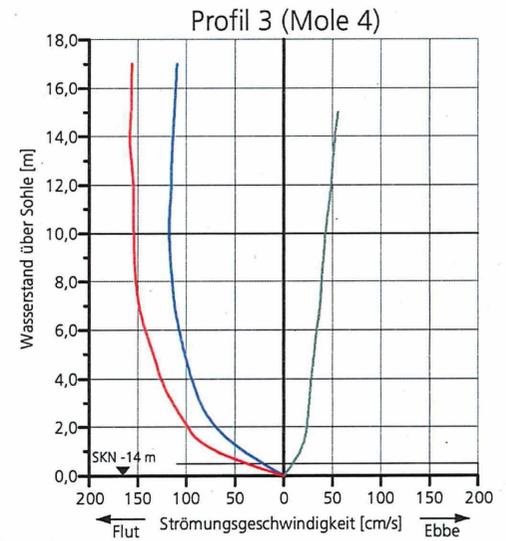
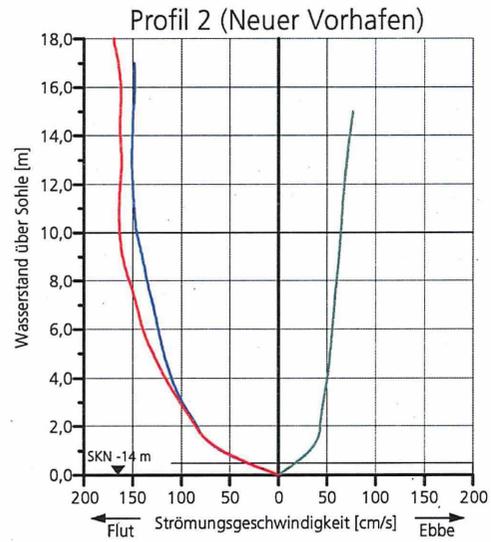
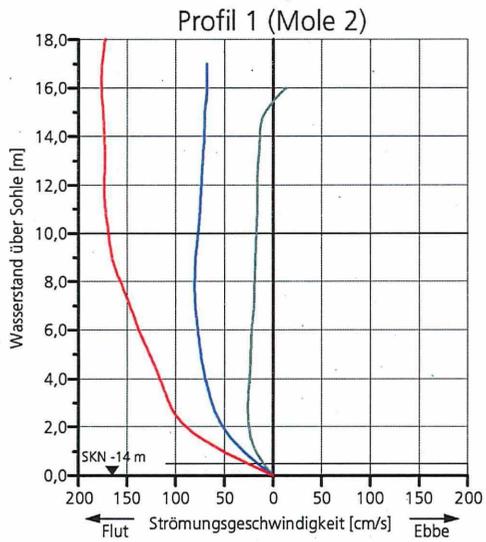
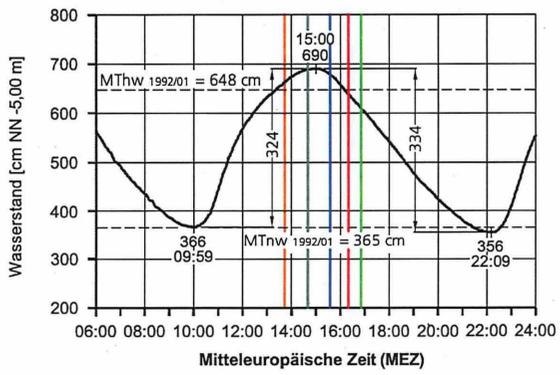


Abb. 42: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007  
(Lage der Profile s. Abb. 39)



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 872 m³/s

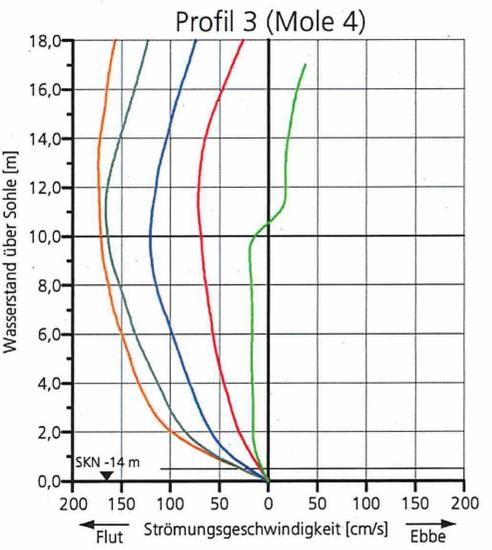
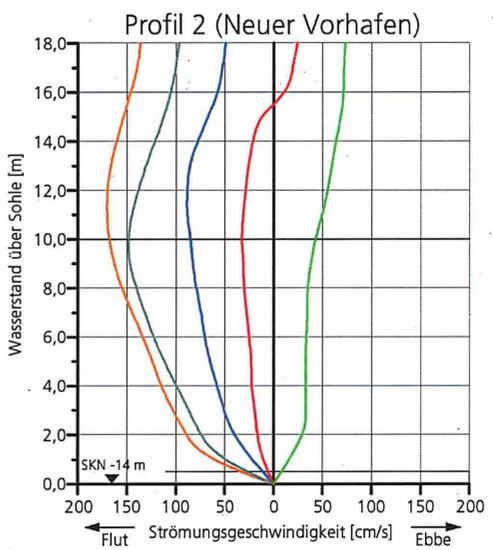
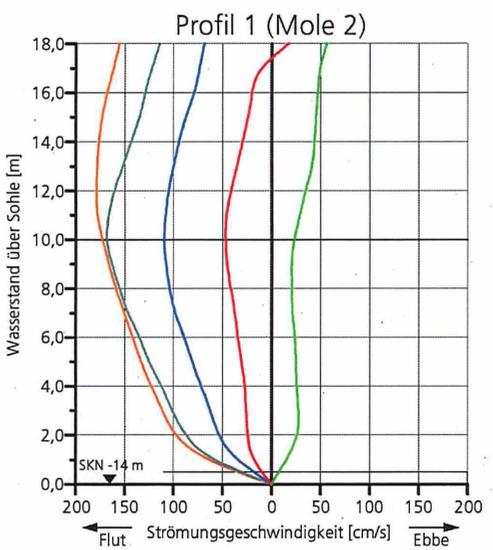


Abb. 43: Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007  
(Lage der Profile s. Abb. 39)

der Flutstromdauer verursacht das von See eindringende Salzwasser eine Verschiebung der Maximalgeschwindigkeiten in tiefere Wasserschichten. Gleichzeitig setzt sich nach und nach das leichtere Oberwasser in den höheren Bereichen durch. Dieser Vorgang schreitet bis zur Strömungsumkehr fort, die sich von oben nach unten vollzieht.

- **Ebbeströmungen (Anlage 96 bis 101)**

Am 29. Juni 2005 betrug der Nipptidefall in Brunsbüttel 256 cm und der Abfluss in Neu Darchau  $Q_0 = 305 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anlage 96). Während der ADCP-Messungen herrschte recht ruhiges Wetter.

Mit den ersten beiden Messungen wird in Anlage 96 die ausklingende Flutstromphase dargestellt. Die 3. und 4. Messung zeigen, wie sich die Flutstromkenterung von den oberen zu den unteren Wasserschichten durchsetzt. Beim 4. Umlauf wurden in den oberen Tiefenzellen bereits Ebbestromgeschwindigkeiten bis über 75 cm/s registriert. An der Fahrwasser-sole war die Kenterung knapp 2 Stunden nach Tidehochwasser gerade abgeschlossen.

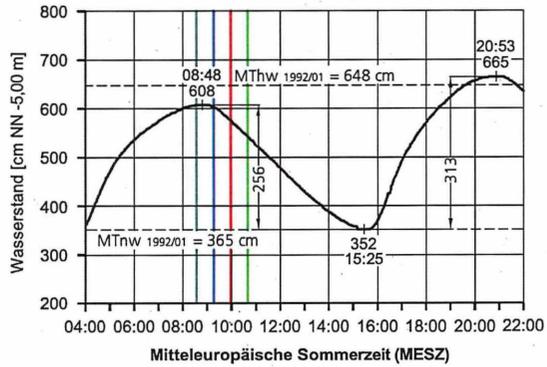
Im übrigen hat sich auch bei den Flutstrommessungen in der Elbe gezeigt, dass sich die Flutstromkenterung gegenüber dem Eintritt des Scheitelwasserstands mehr verspätet als die Ebbestromkenterung (vgl. Anlagen 91, 93 sowie 94 und 95). Für Brackwasserbereiche von Tideflüssen ist es außerdem so, dass sich die Ebbeströmungen im flacheren Wasser außerhalb der Fahrrinne eher durchsetzen (Anlage 96, 3. Messung). Die gleichen Vorgänge sind in den Wattengebieten der Außenweser in Bremerhaven zu beobachten.

Die für den Fahrwasserbereich in Anlage 96 aufgetragenen Strömungsvektoren sind als mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 44 dargestellt. Die Vertikalverteilungen der Flutströmungen sind typisch für die späte Flutstromphase. Sie entsprechen auch den Gradienten der Salzgehalte in der Elbe während der hohen Tidewasserstände (vgl. z.B. Anlage 75). Auch im oberen Brackwasserbereich wird das Transportvermögen der Flutströmungen durch Brackwassereffekte erhöht. Die Einflüsse sind in Emden und Bremerhaven an der Ems und Weser jedoch stärker ausgeprägt.

Mit Abb. 44 wird veranschaulicht, wie sich die Flutstromkenterung im Fahrwasser von oben nach unten durchsetzt. Außerdem sind nach abgeschlossener Strömungsumkehr die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten in den oberen Wasserschichten anzutreffen.

Die stärksten Strömungen wurden nach Tidehalbwasser beobachtet (Anlage 97, Messungen 6 und 7). Dabei fällt auf, dass die Ebbestromgeschwindigkeiten, besonders in den oberen Wasserschichten nördlich des Fahrwassers zum rechten Ufer stärker sind als in dem sich erweiternden Querschnitt links bzw. südlich des Fahrwassers. Bei etwa gleich bleibender Verteilung in den Querschnitten werden die Strömungsintensitäten in der zweiten Stunde vor Tideniedrigwasser insgesamt etwas schwächer (Anlage 97).

Im Fahrwasser bleiben die Ebbestromgeschwindigkeiten auch in der fortgeschrittenen Tidephase noch annähernd gleich. Das wird mit den berechneten Vertikalprofilen deutlich (Abb. 45). Von der 6. bis zur 8. Messung sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 305 m³/s

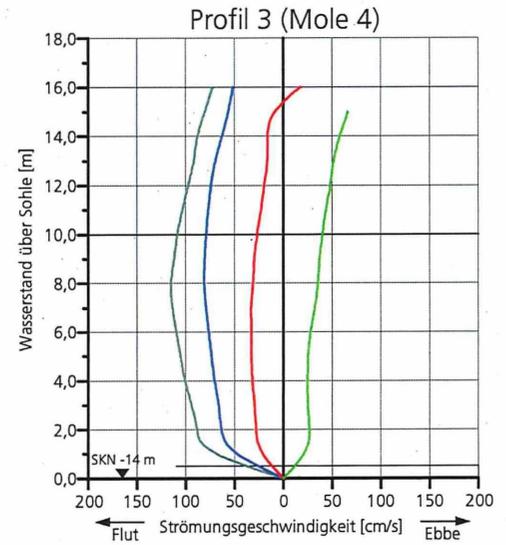
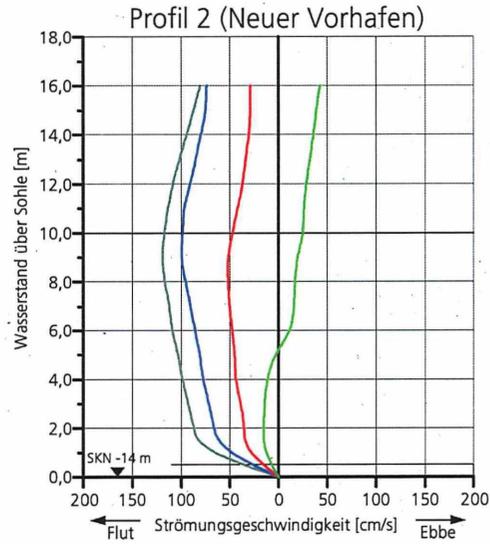
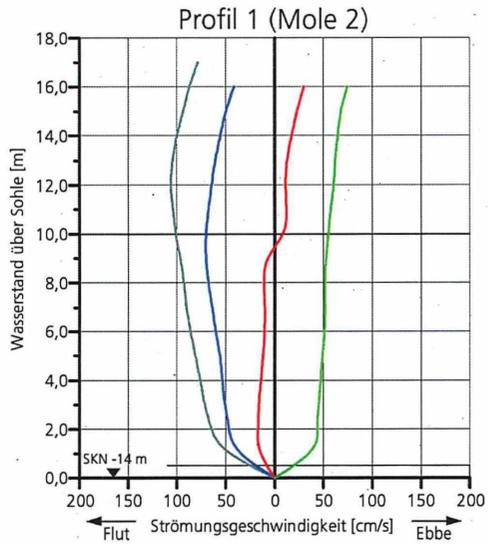
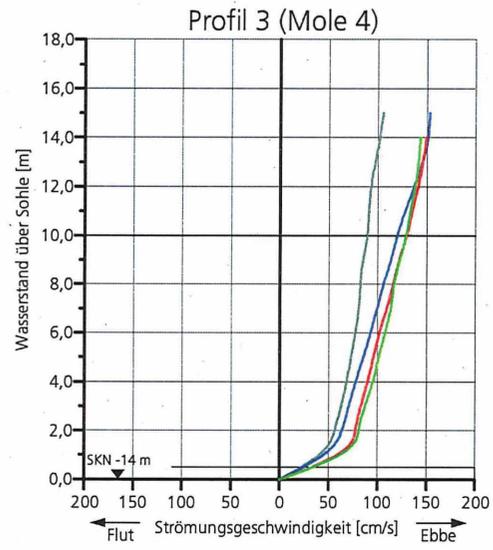
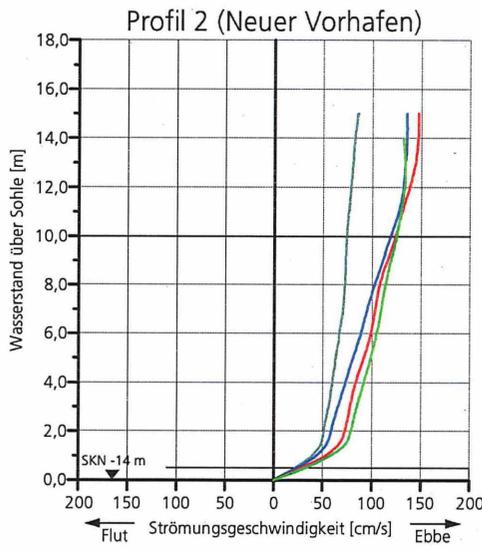
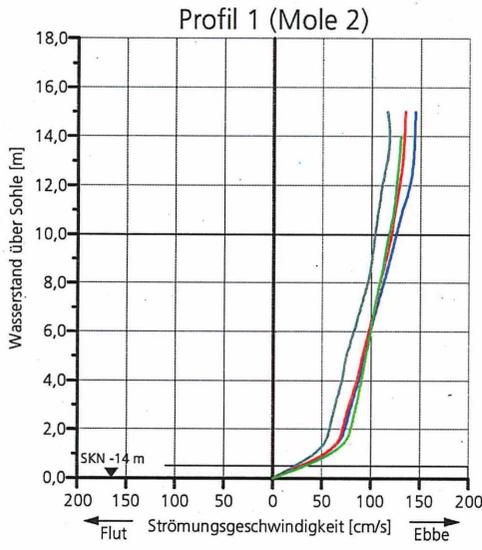
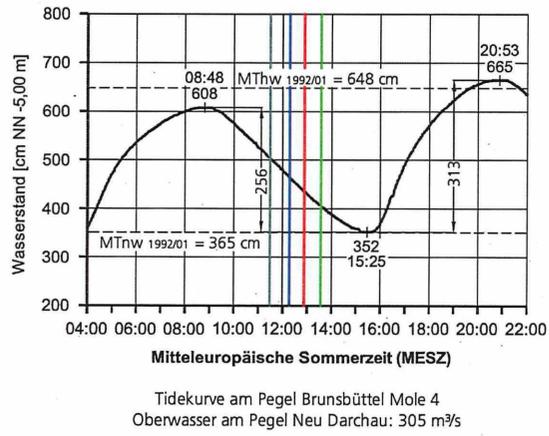


Abb. 44: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005  
(Lage der Profile s. Abb. 39)

Abb. 45: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005  
 (Lage der Profile s. Abb. 39)



etwa gleich stark. Maximal wurden an der Oberfläche  $v_e \approx 150$  cm/s erreicht.

Die Strömungsvorgänge in der letzten Ebbephase bis zur einsetzenden Flutströmung sind mit Anlage 98 nachvollziehbar. Die Strömungsintensitäten im Fahrwasser werden erst nach der 10. Messung, die bei Tideniedrigwasser beendet wurde, deutlich schwächer. Knapp 1 Stunde nach T<sub>hw</sub> begann in den tieferen Wasserschichten die Kenterung. Nach 1,5 Stunden wurden auch an der Oberfläche Flutströmungen gemessen (Anlage 98, 12. Messung). Die Anlage 98 zuzuordnenden Vertikalprofile der mittleren Strömungen in den Fahrwasserquerschnitten sind in Abb. 46 eingetragen. Bis kurz vor T<sub>hw</sub> erreichten die Ebbeströmungen im Fahrwasser an der Oberfläche noch Werte von  $v_e \approx 1$  m/s. Nach 16.00 Uhr setzte im oberen Profil die Kenterung ein. In der folgenden ersten Flutstromphase wurden mit den Strömungsprofilen, die brackwassergeprägten Vertikalgradienten ermittelt.

Die Ebbestrommessung am 13. März 2007 wurde bei hohem Oberwasser zwei Tage nach Durchgang des Höchstabflusses in Neu Darchau durchgeführt (Abb. 38). Der Tidefall betrug lediglich 223 cm (Anlage 99). Während der Messungen wehte schwacher Wind aus Nordwest mit der Stärke 3 Bft (4-5 m/s).

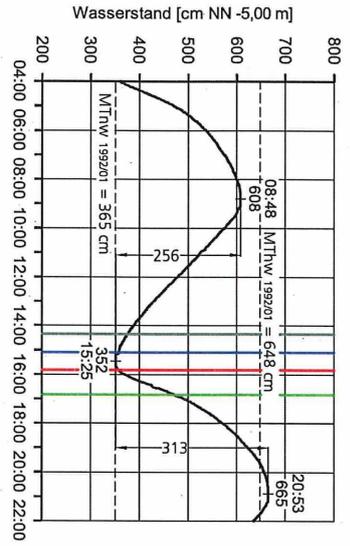
Mit den Messungen wurde kurz nach Tideniedrigwasser während der letzten Flutstromphase begonnen (Messung 1 in Anlage 99). Mit dem zweiten Umlauf ist die abschließende Kenterung erfasst worden. Etwa 2 Stunden nach Tideniedrigwasser wurden im Profil 1 Ebbestromgeschwindigkeiten von mehreren Dezimetern in den oberen Tiefenzellen festgestellt. In Sohlennähe war die Strömungsumkehr gerade erst vollzogen. Es ist bemerkenswert, dass die hydrodynamischen Gegebenheiten gegenüber der Vormessung, mit einem deutlich größeren (+33 cm) Tidefall und wesentlich geringeren Binnenabfluss, nicht erheblich verändert waren.

Auch nach der Flutstromkenterung wurde ein ähnlicher Ablauf festgestellt wie bei der Messung vom Juni 2005. Die Ebbestromgeschwindigkeiten steigerten sich kontinuierlich und erreichten die Höchstwerte bei der 5. Messung in der 3. Stunde nach der Kenterung (Anlage 99, Messungen 3 und 4 und Anlage 100, Messung 5 und 6). Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten waren in den oberen Wasserschichten zu verzeichnen.

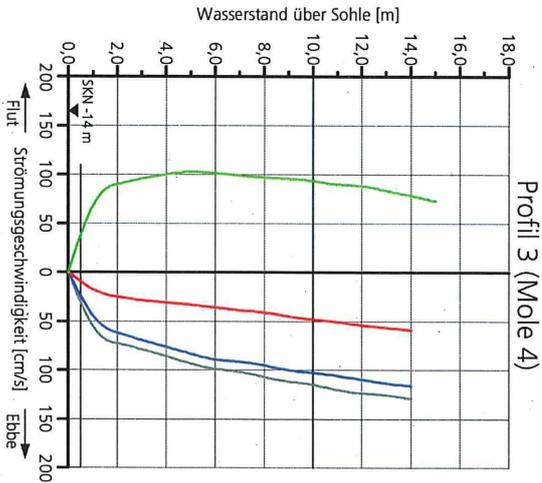
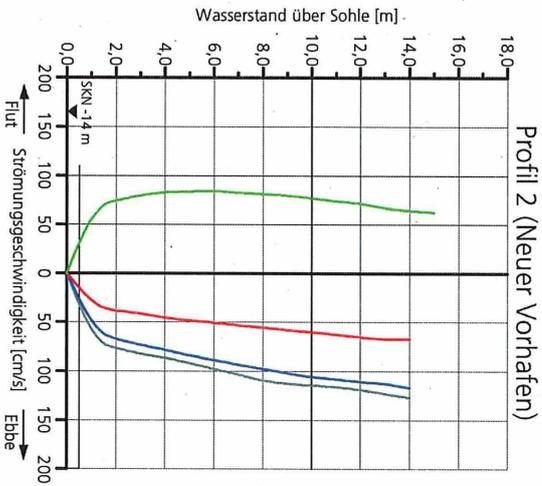
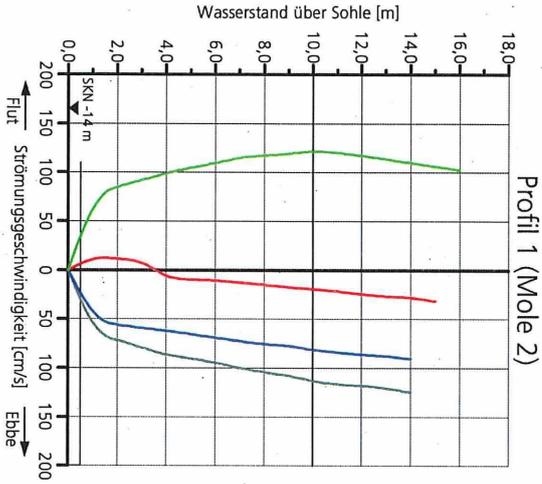
Die aus den ADCP-Messungen entwickelten Strömungsprofile im Fahrwasser zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der Messung vom Juni 2005 (vgl. Abb. 47 mit 44 und 45). Das gilt für die Vertikalprofile in der ausklingenden Flutstromphase mit den höchsten Geschwindigkeiten im tieferen Wasser, den Kentervorgang und die Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe während der ersten Ebbestromphase. Bei genauerer Betrachtung der Anlage 100 fällt auf, dass die Ebbewassermengen in der Hauptabflussphase verstärkt in den oberen Wasserschichten und auch außerhalb des Fahrwassers auf der rechten Seite des Flusses stromab geführt wurden.

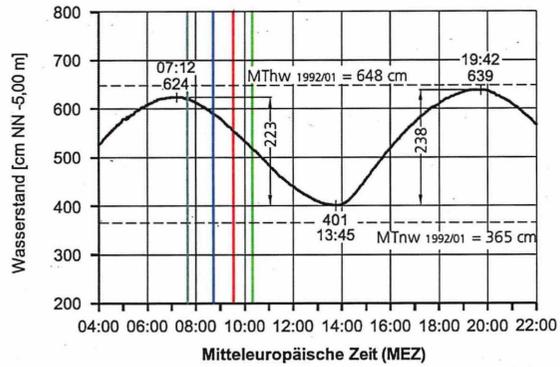
Bis zum Eintritt des Tideniedrigwassers wurden die Ebbestromintensitäten kontinuierlich schwächer. Im Fahrwasser wurden bei T<sub>hw</sub> noch sehr bemerkenswerte Geschwindigkeiten

Abb. 46: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005 (Lage der Profile s. Abb. 39)



Mittleuropäische Sommerzeit (MESZ)  
 Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
 Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 305 m³/s





Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
 Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1201 m³/s

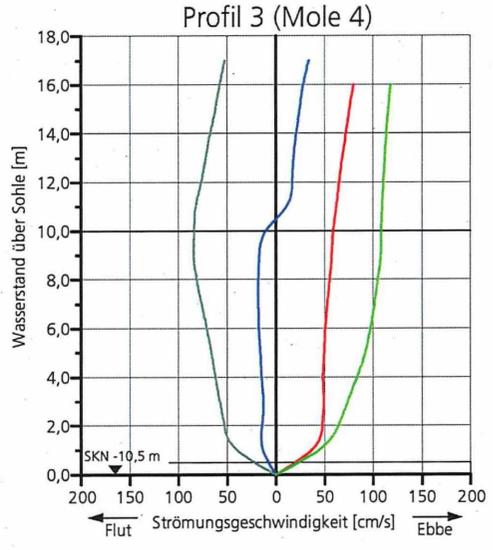
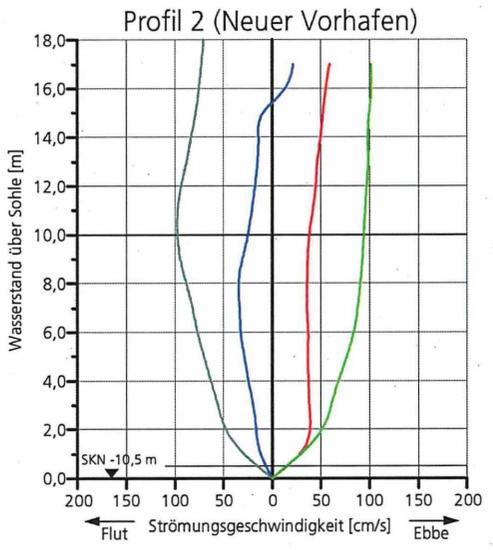
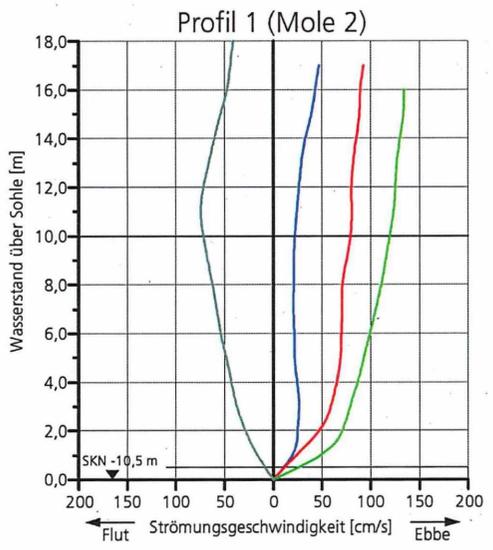
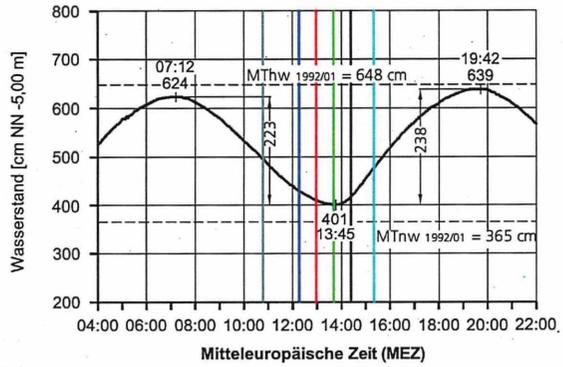


Abb. 47: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007  
 (Lage der Profile s. Abb. 39)

bis zu  $v_e > 100$  cm/s registriert (Anlage 100 und Abb. 48). Etwa eine Stunde nach Tideniedrigwasser begann die Ebbestromkenterung im mittleren Querprofil in den tieferen Wasserschichten (Anlage 101, Messung 10).

Mit Abb. 48 kann das Abklingen der Ebbestromintensitäten bis zur Strömungsumkehr nachvollzogen werden. Zum Vergleich kann Abb. 46 herangezogen werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die hydrodynamischen Vorgänge in der Elbe bei Brunsbüttel durch das erhöhte Oberwasser im März 2007 nicht nachhaltig verändert worden sind. Das haben der Vergleich mit den ADCP-Messungen aus dem Jahr 2005 gezeigt.



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1201 m³/s

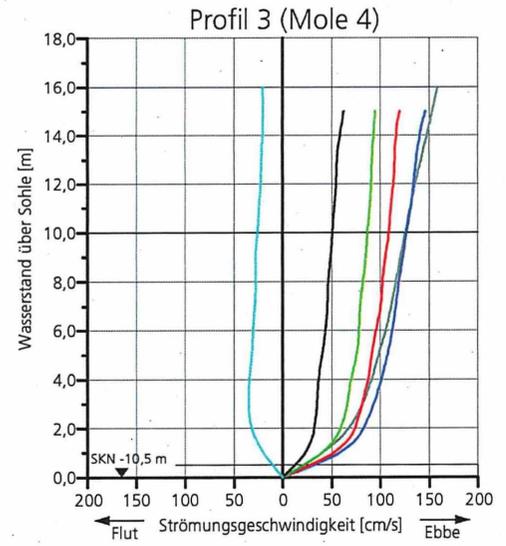
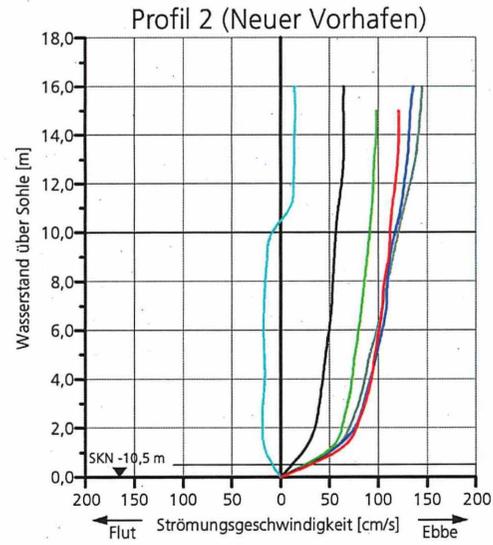
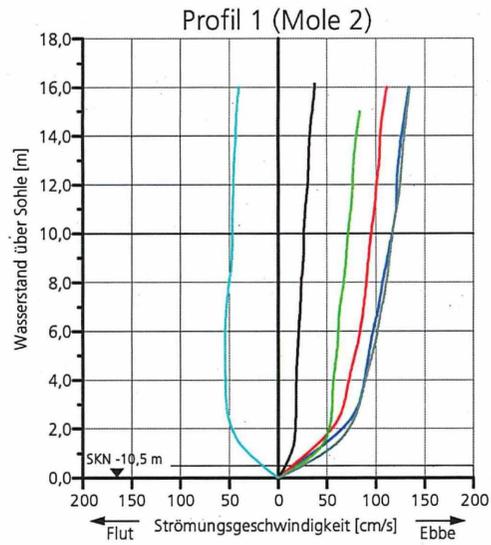


Abb. 48: Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007  
(Lage der Profile s. Abb. 39)

### 6.3 Zusammenfassende und ergänzende Betrachtungen

Ergänzend zu dem vorausgegangenen vom BMBF geförderten KFKI-Projekt 03 KIS 019 waren in diesem Vorhaben 03 KIS 051 Messungen in der Natur vom Institut für Wasserbau (IWA) der Hochschule Bremen im Neuen und Alten Vorhafen des Nord-Ostsee-Kanals und der angrenzenden Elbe durchzuführen. Es war damit die Frage zu klären, ob die in den Brackwasserhäfen an der Ems und Weser ermittelten hydrodynamischen und morphologischen Randbedingungen auch im oberen Brackwasserbereich der Unterelbe anzutreffen sind. Zusammenfassend bleibt dazu festzustellen, dass in den Brackwasserregionen der deutschen Tideflüsse vergleichbare und allgemein gültige Verhältnisse herrschen. Die Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten führt überall zu positiven Feststoffbilanzen in den Vorhäfen. Die besonderen Zusammensetzungen der Schwebstofffrachten im Mischbereich von Süß- und Salzwasser führt in den Vorhäfen zur Bildung von Flüssigschlamm.

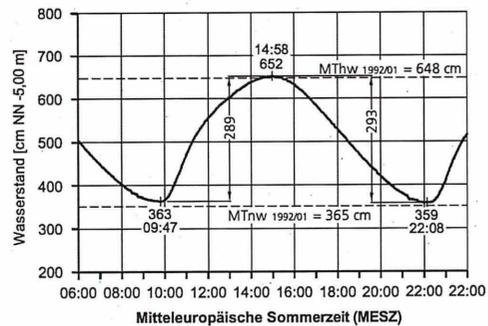
#### • Strömungsverhältnisse

Die ADCP-Messungen im Tidestrom sind in den Anlagen 91 bis 101 dargestellt und vorstehend im einzelnen erläutert worden. Zusätzlich sind die mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in der 400 m breiten Fahrrinne und den nördlich und südlich angrenzenden 500 m breiten Querschnitten berechnet worden. Die gemittelten Flutstromgeschwindigkeiten vom 6. Juli 2005 sind in Abb. 49 aufgetragen. Die zugehörigen morphologischen Randbedingungen gehen aus Anlage 102 hervor. Die drei Profile liegen oberhalb der Linkskrümmung der Elbe. Dem Talweg entsprechend treten im Fahrwasser die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten auf. Auch südlich der Fahrrinne sind die Strömungsgeschwindigkeiten noch merklich stärker als auf der nördlichen Seite (Abb. 49 und Anlagen 91 und 92). Offenbar gelangen die von der See kommenden salzhaltigeren Flutwassermengen auch in der Elbe mehr im tiefen Wasser stromauf. Aus Abb. 49 geht ebenfalls hervor, dass sich die Flutstromkenterung gegenüber dem Thw mehr verspätet als die Ebbestromkenterung gegenüber dem Thw.

Erwähnenswert ist es, dass die Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe bei Brunsbüttel gleichmäßiger verteilt sind als in der Ems und Weser in Emden und Bremerhaven. Außerdem werden die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten zu einem späteren Tidezeitpunkt erreicht (vgl. Abb. 49 mit Abb. 14, 23 und 36).

Die im März 2007 nach dem Durchgang der Hochwasserwelle in Neu Darchau durchgeführten Messungen zeigen ein ähnliches Bild bezüglich der Kenterzeiten und mittleren Geschwindigkeiten (Abb. 50). Aufgrund der höheren Tide mit den größeren Flutwassermengen waren die Strömungsgeschwindigkeiten insgesamt höher als Anfang Juli 2005. Die intensiveren Strömungen wurden wieder im Fahrwasser und südlich davon ermittelt (Abb. 50 sowie Anlagen 94 und 95). Die geringeren Tiefen in den nördlichen Bereichen der Profile sind ursächlich für die geringeren Wassermengen mit den kleineren Fließgeschwin-

Abb. 49: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 06.07.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 276 m<sup>3</sup>/s

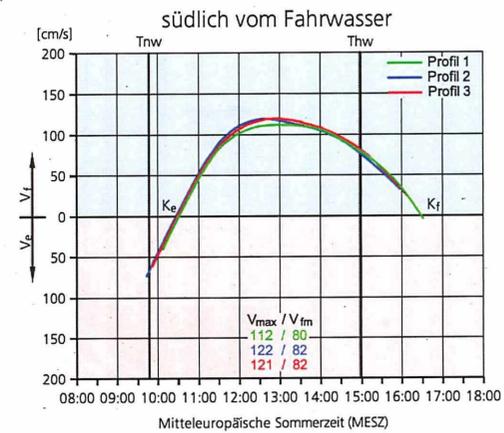
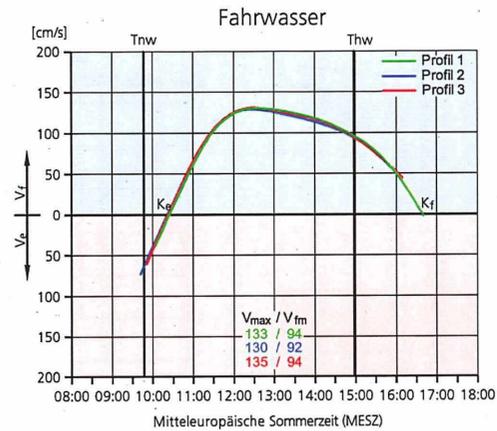
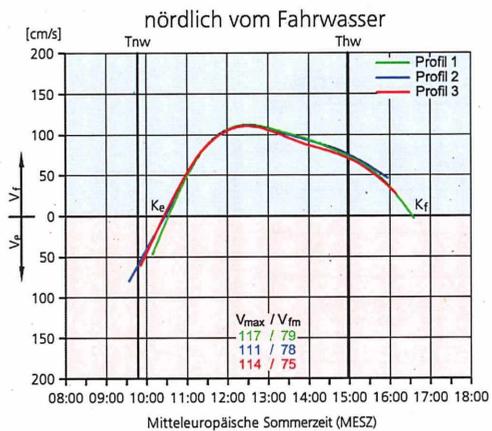
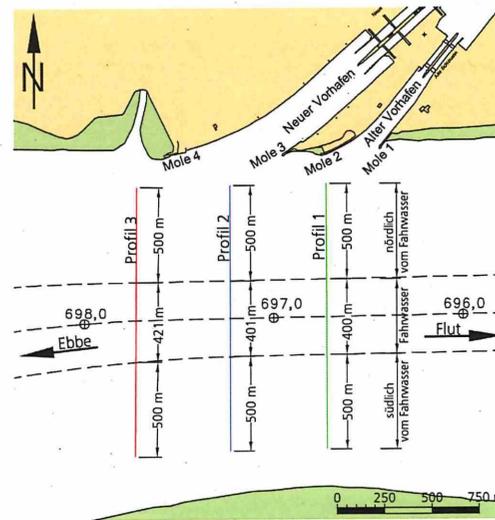
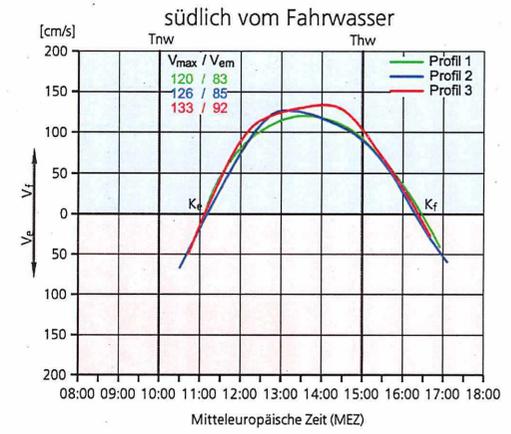
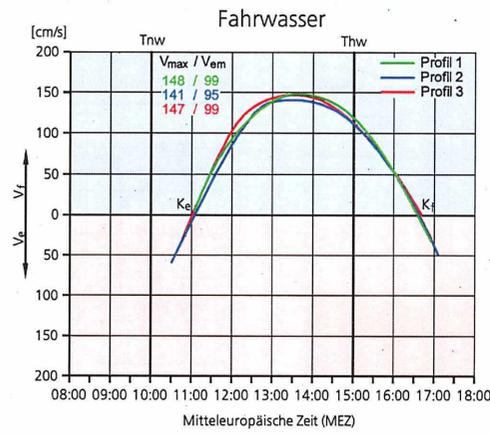
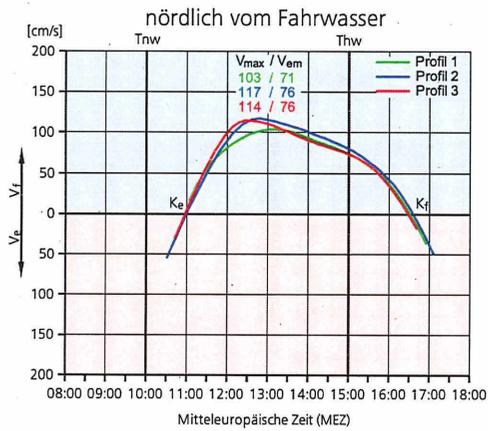
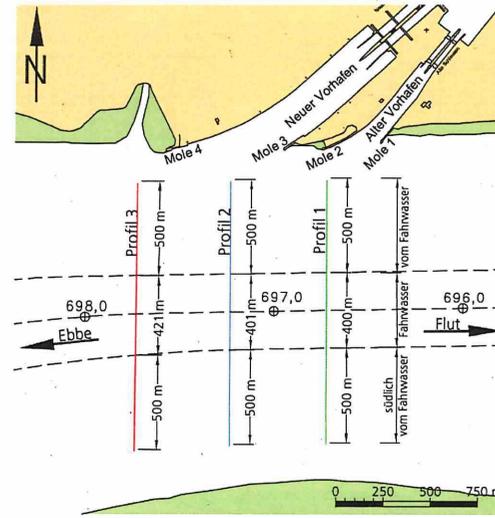
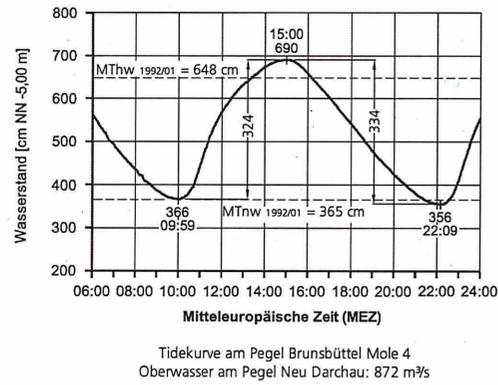


Abb. 50: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 20.03.2007



digkeiten (vgl. Anlage 102).

Vor allem bei den Strömungsverteilungen im Fahrwasser fällt die gleichmäßigere Symmetrie mit dem späteren Eintritt der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten auf. Dieser Umstand kann darauf zurückgeführt werden, dass sich die Flut gegen das höhere Oberwasser im März 2007 durchzusetzen hatte.

Wie in den Revieren an der Ems und Weser sind die Ebbestromgeschwindigkeiten auch in der Elbe im Tideablauf gleichmäßiger als die Flutströmungen verteilt (Abb. 51). Die Ebbestromverteilungen im Querschnitt folgen dem natürlichen Verlauf der Elbe, die insgesamt im Bereich der Nord-Ostsee-Kanal-Schleusen eine leichte Linkskrümmung hat (Anlage 102). Die Ebbwassermengen fließen verstärkt außerhalb des Fahrwassers im nördlichen Elbequerschnitt stromab (vgl. Anlagen 97 und 100). Die maximalen Fließgeschwindigkeiten sind dabei dichtebedingt in den oberen Wasserschichten anzutreffen. Mit Abb. 51 wird veranschaulicht, wie die Strömungsintensitäten in den Querschnitten von Nord nach Süd geringer werden. Nördlich des Fahrwassers waren die Ebbestromgeschwindigkeiten im Juni 2005 (Abb. 51) trotz des geringeren Tidehubs von  $Thb = 256$  cm stärker als bei der Flutmessung im Juli 2005 bei vergleichbarem Oberwasser und einem Tidehub von  $Thb = 289$  cm (Abb. 49). Es bestätigt sich, dass das spezifisch leichtere Oberwasser während der Ebbestromphase die Oberflächenströmungen verstärkt. Bemerkenswert ist der starke Geschwindigkeitsabfall bei den Ebbeströmungen von Nord nach Süd in Abb. 51.

Die Nipptide vom 13. März 2007 ( $Thb = 223$  cm) mit den damit verbundenen Tidewassermengen ist offenbar ursächlich für die insgesamt geringen Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 52 trotz des höheren Oberwassers gegenüber der Messung vom Juni 2005 (Abb. 51). Im Fahrwasser und nördlich davon wurden jedoch stärkere Ebbeströmungen ermittelt als in den südlichen Abschnitten.

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, dass die hydraulischen Gegebenheiten zwar vom Oberwasser aber auch ganz bedeutend vom Tidegeschehen beeinflusst wird.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass im Bereich der Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal die Flutwassermengen dichtebedingt verstärkt im tiefen Fahrwasserquerschnitt und südlich davon stromauf gelangen. Die Ebbwassermengen erreichen in den oberen Wasserschichten und nördlich des Fahrwassers die stärksten Geschwindigkeiten.

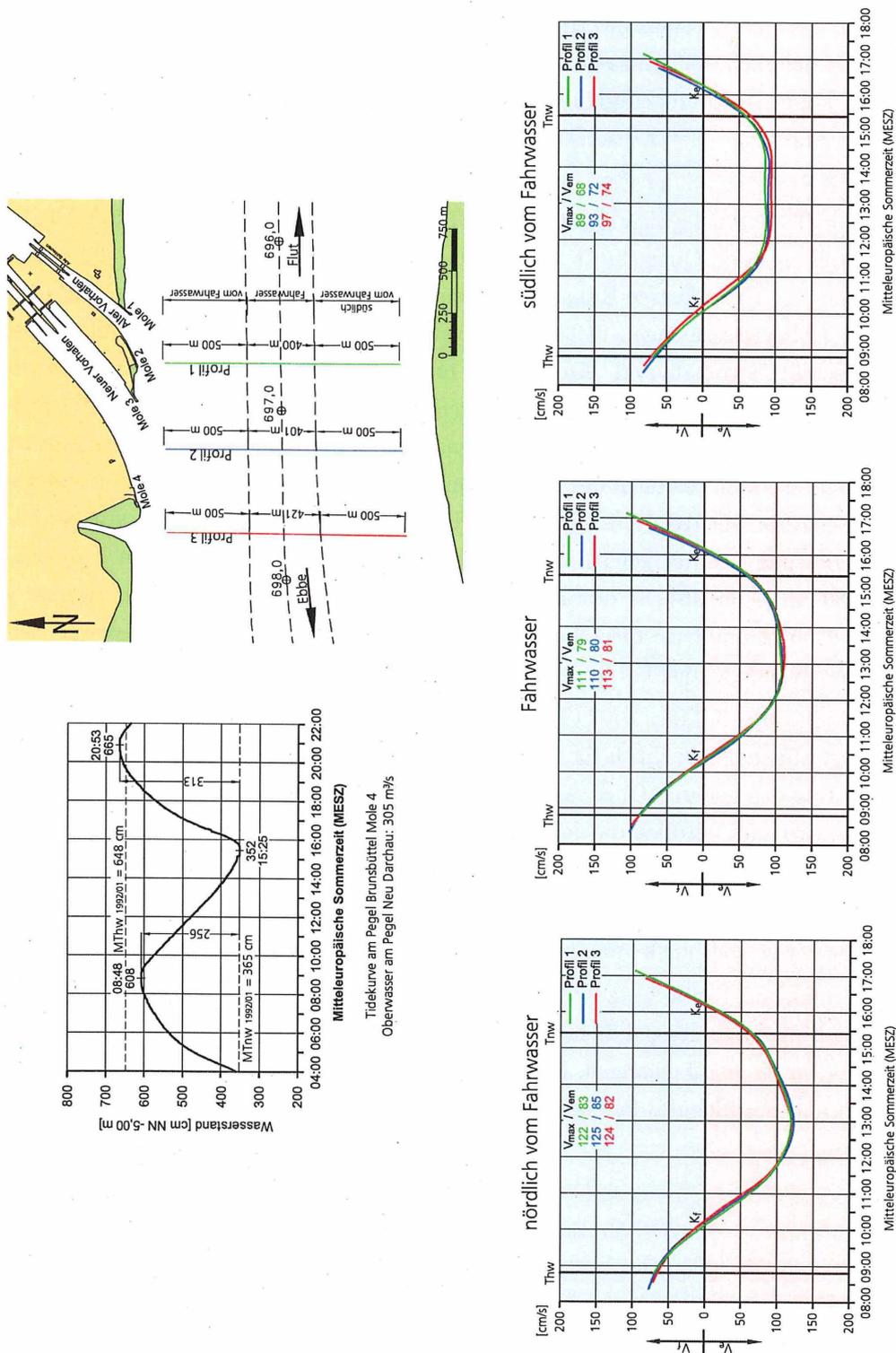
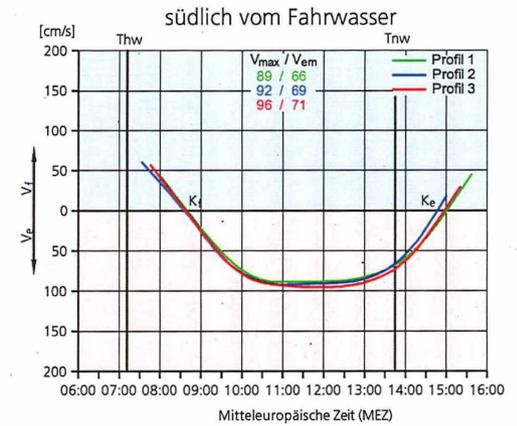
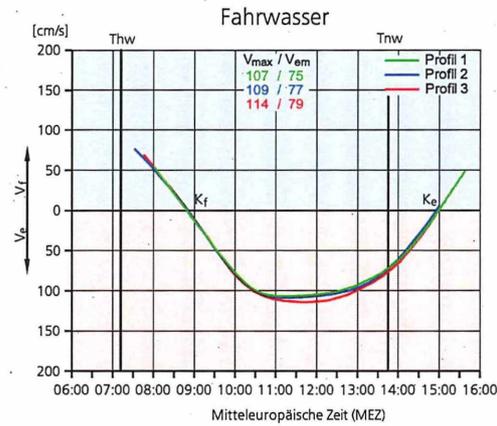
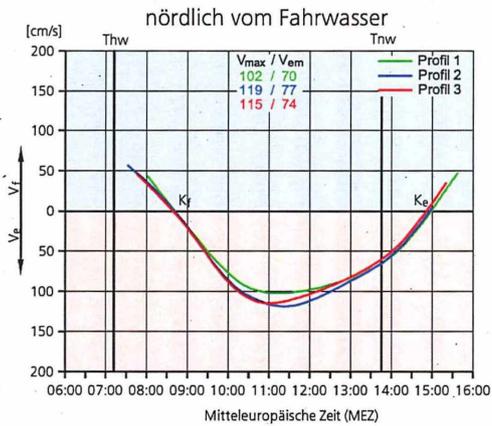
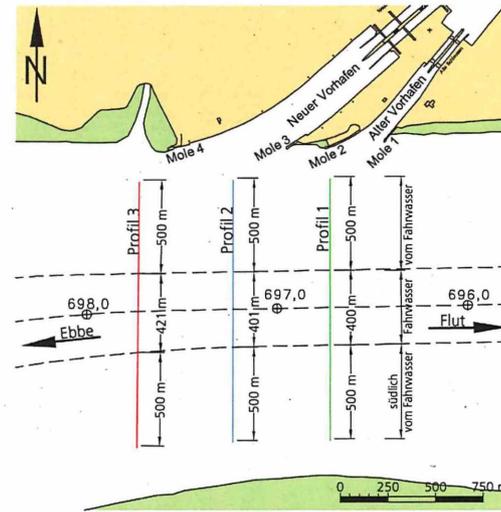
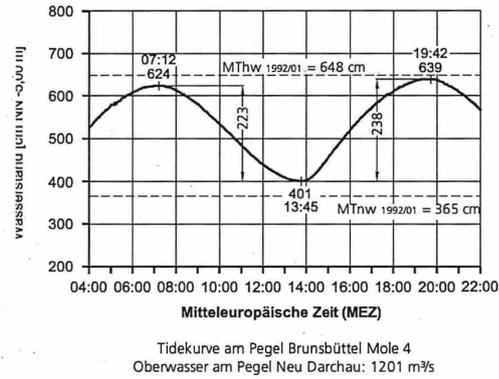


Abb. 51: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 29.06.2005

Abb. 52: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee-Kanal am 13.03.2007



- Salzgehaltsverhältnisse

Die tideabhängigen Salzkonzentrationen in den Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal sind insgesamt schwächer als in Emden und Bremerhaven. Allgemein gültig ist es, dass die Salzgehalte in den Vorhäfen denen in den Tideströmen verzögert folgen. Bei Tideniedrigwasser wurden in allen Revieren geringere Salzgehalte im Tidefluss als in den Vorhäfen gemessen. In der Tidehochwasserphase sind die Konzentrationen in den Vorhäfen niedriger als in den Flüssen.

Die in Abb. 53 aufgetragenen Messungen zeigen die Situation im Neuen Vorhafen bei etwa mittleren Tiden und unterschiedlichen Binnenabflüssen. Die horizontalen Salzgradienten kehren sich nach  $T\frac{1}{2}w$  um. Bei dem höheren Oberwasser im März 2007 (Abb. 53, rechts) sind die Gradienten der Salzgehalte schwächer ausgeprägt als im Juli 2005. Außerdem kehren sich die Gefälle zu einem späteren Tidezeitpunkt um (Abb. 53, Messung B). Stärkere Vertikalgradienten der Salzkonzentrationen wurden im oberen Brackwasserbereich der Unterelbe im März 2007 lediglich während der Flutstromphase bei hohen Tidewasserständen ermittelt. Die flutstromorientierten Dichteströmungen sind bei geringen und erhöhtem Oberwasser stärker ausgeprägt als die ebbestromorientierten Dichteeffekte während der Niedrigwasserphase. Dieser Umstand führt auch in den Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal zu dem hohen Feststoffeintrieb während der Flutstromphase

Die in Abb. 53 im Bereich des Neuen Vorhafens sehr unterschiedlichen Verteilungen der Salzgehalte in horizontaler und vertikaler Richtung sind neben der Lage, Geometrie und dem Ausbauzustand des Vorhafens ursächlich für die Intensität der Austauschvorgänge. Die insgesamt stärkeren Gradienten der Salzkonzentrationen im Juli 2005 (Abb. 53, linke Seite) haben die deutlich ausgeprägten Strömungs- und Dichteeffekte im Bereich des Neuen Vorhafens während der Flutstromphase zur Folge (vgl. Anlage 49 bis 53). Im März 2007 wurden nur geringe Salzkonzentrationen mit entsprechend unbedeutenden Gradienten gemessen (Abb. 53, rechte Seite). Dementsprechend gering waren die strömungs- und dichtebedingten Wasserbewegungen im Neuen Vorhafen der Nord-Ostsee-Kanal-Schleusen.

Die Leitfähigkeitsmessungen im Alten Vorhafen und der Elbe wurden ebenfalls bei etwa mittleren Tideverhältnissen und deutlich voneinander abweichendem Oberwasser durchgeführt (Abb. 54). Im März 2007 war bei niedrigen Wasserständen und höherem Oberwasser in der Elbe nur noch sehr geringe Salzkonzentrationen  $S < 1 ‰$  vorhanden (Abb. 54 und 53, Messung A, rechts). Im Juli 2005 lagen die Salinitäten zwischen  $S \approx 3$  bis  $5 ‰$ . Bei den geringen Abflüssen in Neu Darchau wurden bei den Profilen in den Vorhäfen stärkere horizontale und vertikale Gradienten während der Niedrigwasserphase registriert. Die flutstromorientierten Strömungseffekte stellen sich im Alten Vorhafen bei höherem Oberwasser ebenfalls erst zu einem späteren Tidezeitpunkt nach Umkehr der Salzgehaltsgefälle (Abb. 54, B rechte Seite) ein. An den stärkeren Gradienten der Salzgehalte bei Thw (Messung C) ist abzulesen, dass die Austauschvorgänge in der Flutstromphase stärker ausgeprägt sind als bei Tideniedrigwasser (Abb. 54). Bei genauerer Betrachtung der

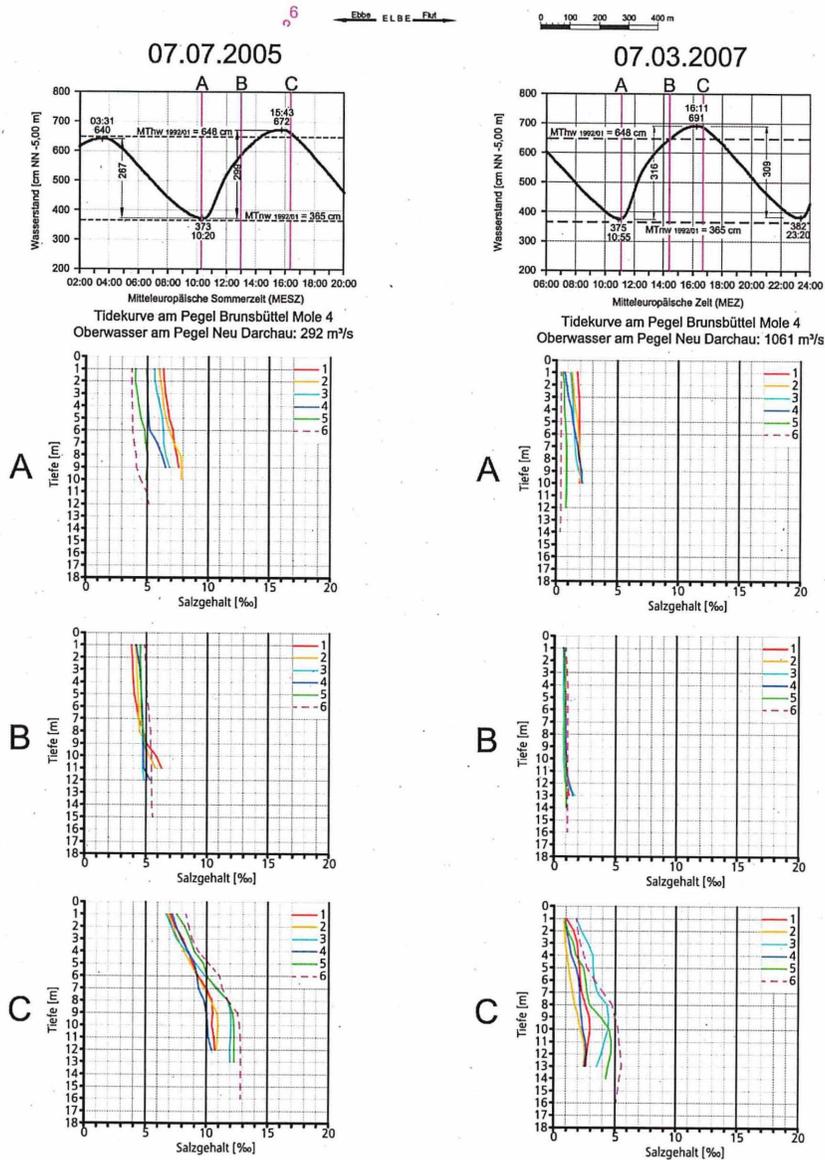
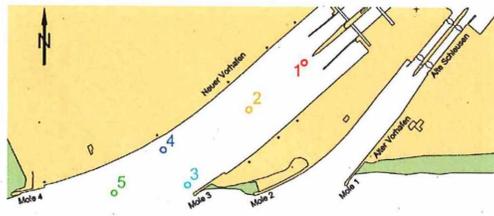


Abb. 53: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

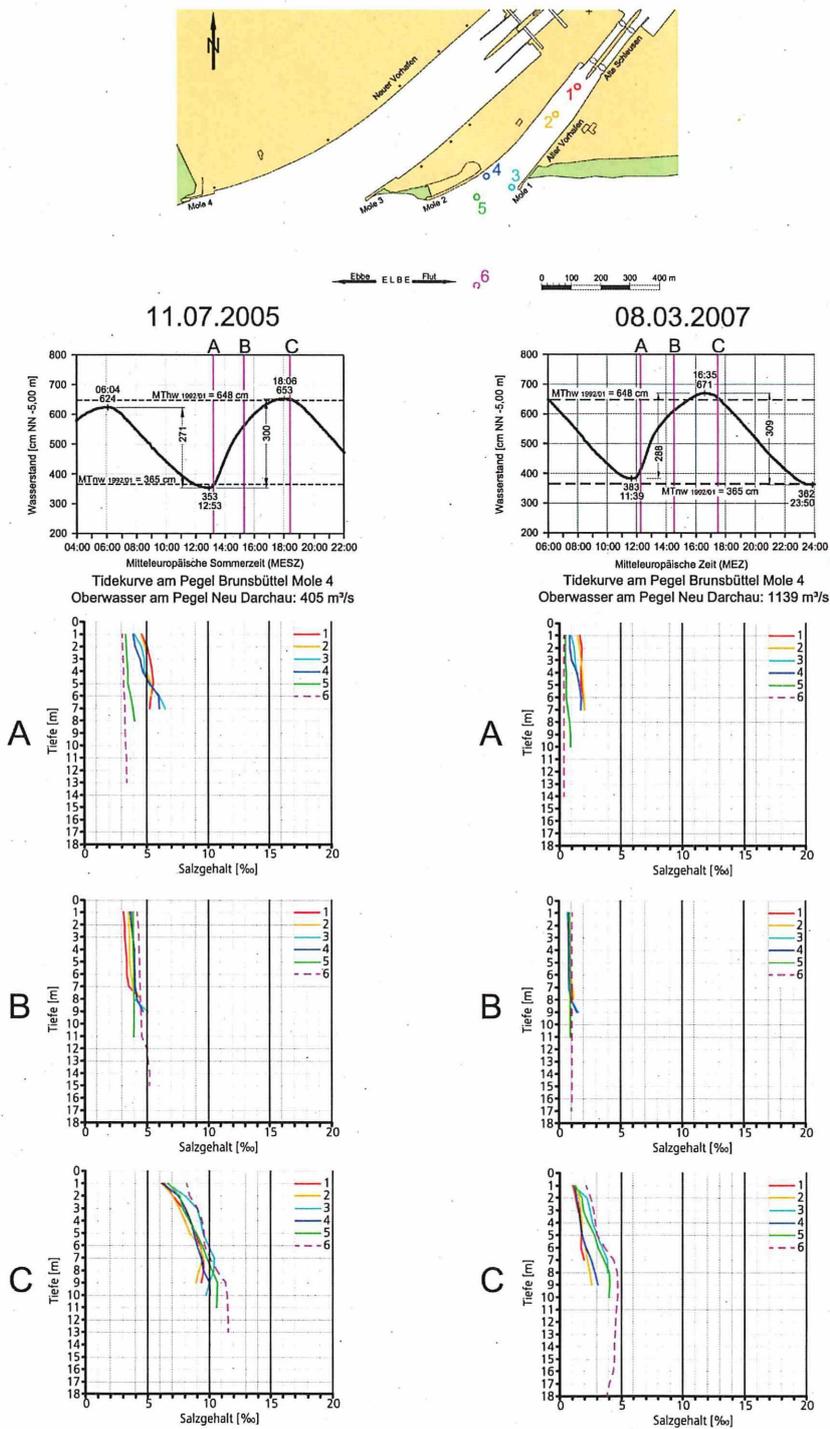


Abb. 54: Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

Abb. 53 und 54 ist erkennbar, dass die Salzgehalte im März 2007 nicht nur absolut geringer sind. Die Gradienten sind bei den ebbestromorientierten Walzen- und Dichteströmungen während der Niedrigwasserphase auch schwächer ausgeprägt.

Die Ebbemessungen zeigen die Salzgehaltsverhältnisse im Neuen Vorhafen (Abb. 55) unter Nipptidebedingungen und in umgekehrter Reihenfolge. Die bei vergleichbaren Oberwasserhältnissen wie bei der Flut vom 7. Juli 2005 durchgeführten Ebbemessungen vom 30. Juni 2005 zeigen ähnliche Gradienten der Salzgehaltsverteilungen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser (Abb. 53 und 55, linke Seiten). Da bei Nipptiden weniger Wassermengen mit geringerer Energie stromauf gelangen sind die Salzgehalte bei der Ebbemessung folglich deutlich niedriger. Für die Anregung der Dichteströmungen ist das von untergeordneter Bedeutung. Maßgebend sind dabei die Gradienten der Salzgehalte.

Vier Tage nach dem Höchstabfluss des Hochwasserereignisses in Neu Darchau mit  $MQ_0 = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$  betrug der Tidedeckungsfall in Brunsbüttel am 15. März 2007 lediglich 217 cm. Das Zusammentreffen dieser Ereignisse hatte dazu geführt, dass während der Ebbephase im Neuen Vorhafen und davor nur noch sehr geringe Salzgehalte ohne nennenswerte Gradienten gemessen wurden (Abb. 55). Folglich wurden am Vortag bei vergleichbaren Tide- und Oberwasserbedingungen nur sehr schwache Dichteströmungen im Neuen Vorhafen mit den ADCP-Messungen festgestellt (v. Anlagen 61 bis 63 mit 56 bis 60).

Ähnliche Verhältnisse sind für den Alten Vorhafen in Abb. 56 dargestellt. Den gegenüber dem Neuen Vorhafen insgesamt schwächeren Salzgehaltsgefällen entsprechend sind auch die Strömungs- und Dichteeffekte aufgrund der geringeren Abmessungen und Ausbautiefe insgesamt weniger stark ausgeprägt. Bei den geringen Salzgehaltsunterschieden im März 2007 (Abb. 56) wurden bei den Ebbemessungen nur sehr schwache Wasserbewegungen im Alten Vorhafen ermittelt (vgl. Anlagen 72 bis 74 mit 69 bis 71).

#### • Schwebstoffverhältnisse

Der besonders starke Schiffsverkehr und die häufigen Schleusungen überlagern sich mit den tideabhängigen natürlichen Schwebstoffkonzentrationen in den Schleusenvorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals. Bei der Messung vom 7. Juli 2005 (Abb. 57, links) betrug der Tideanstieg 299 cm bei einem Oberwasser von  $Q_0 = 292 \text{ m}^3/\text{s}$  in Neu Darchau.

Den während der Ebbestromphase schwächer ausgeprägten Strömungs- und Dichteeffekt entsprechend wurde bei  $T_{nw}$  im Neuen Vorhafen nur geringe Schwebstoffgehalte zwischen  $C_s = 100$  bis  $200 \text{ mg/l}$  festgestellt (Abb. 57, links Messung A). Nach Tidehochwasser erhöhen sich zunächst in der Vorhafeneinfahrt in den tieferen Wasserschichten die Schwebstoffkonzentrationen (Abb. 57, B). Der Sedimenttransport ist -wie in den anderen Brackwasserhäfen- überwiegend in den Vorhafen gerichtet. Die Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekt verstärkt die positive Feststoffbilanz in der späteren Flutstromphase (Abb. 57, C). Deutlich sind bei der letzten Messung die hohen Schwebstoffgehalte im sohlennahen Einströmbereich und die geringeren Konzentrationen im Be-

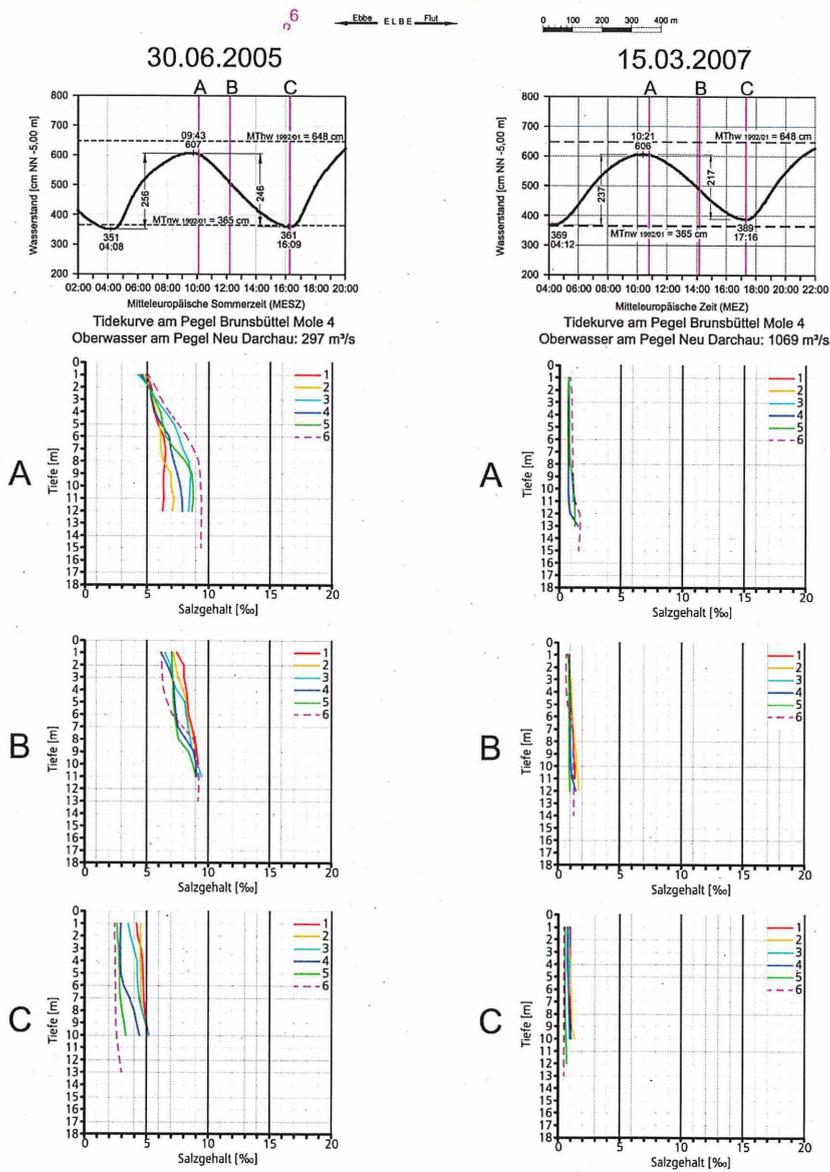
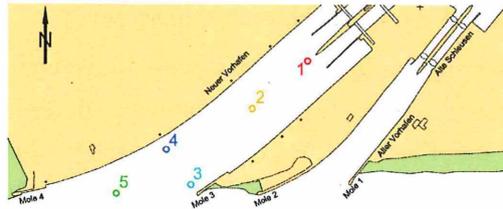


Abb. 55: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

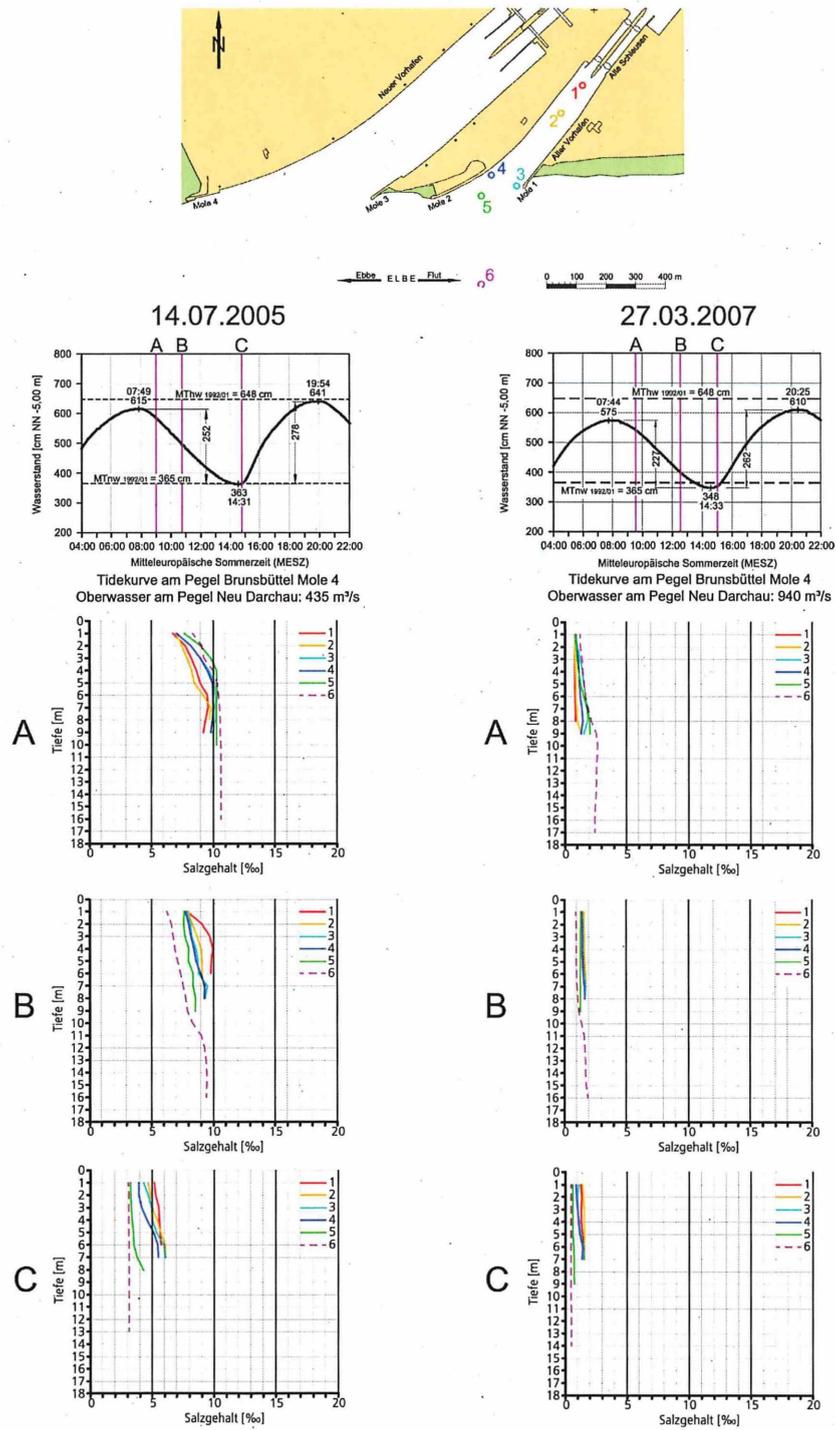


Abb. 56: Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

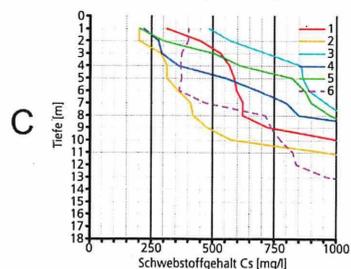
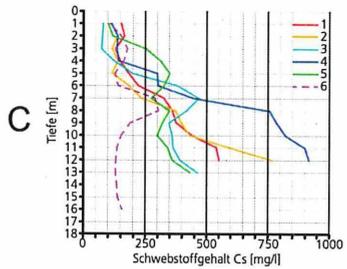
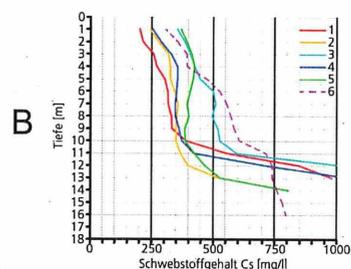
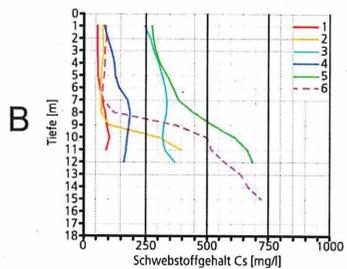
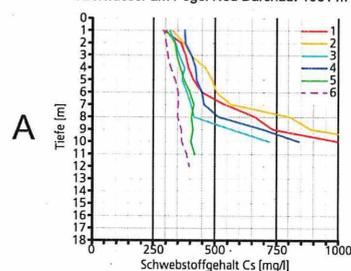
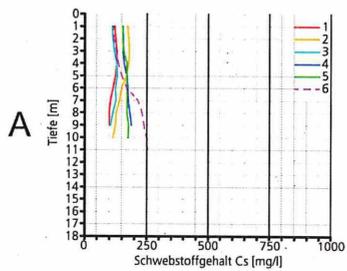
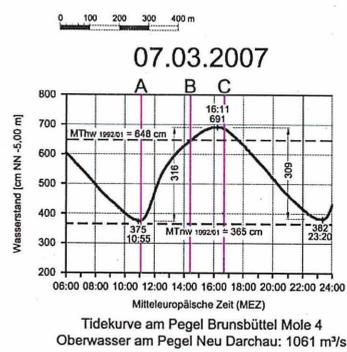
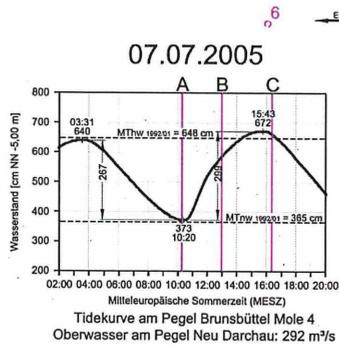
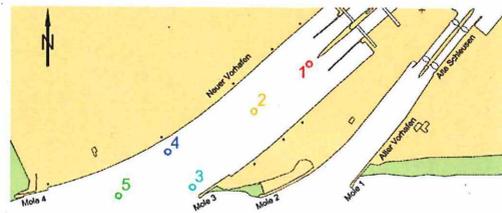


Abb. 57: Schwebstoffe während der Flutstromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

reich der zur Elbe gerichteten Oberflächenströmung auszumachen (vgl. auch Anlagen 49 bis 51). Dieses Beispiel zeigt, dass die hydro- und morphodynamischen tideabhängigen Abläufe in den Brackwasserhäfen an der deutschen Nordseeküste verallgemeinert werden können.

Wie vorstehend bereits angesprochen, wurden während der Messung vom 7. März 2007 gleichzeitig Unterhaltungsbaggerungen im Neuen Vorhafen durchgeführt. Das Baggergut wurde im Tidestrom unterhalb der Schleusenzufahrten umgelagert. Die insgesamt höheren Schwebstoffkonzentrationen in der Elbe sind deshalb auf die Baggeraktivitäten und eher nicht auf das höhere Oberwasser zurückzuführen.

Auch am 8. März 2007 wurde im Neuen Vorhafen gebaggert und in der Elbe umgelagert. Zusätzlich herrschte reger Schleusenbetrieb im Alten Vorhafen. Die Remobilisierung der feinen Sedimente im inneren Vorhafen durch eine Niedrigwasserschleusung wird mit Abb. 58 (Messung A, rechte Seite) dokumentiert. Ungewöhnlich sind auch die relativ hohen Feststoffkonzentrationen in der Elbe. Die umgelagerten Feinstoffe wurden mit der Flutströmung wieder stromauf transportiert (Abb. 58, Messung B und C).

Weniger gestört waren die Schwebstoffverhältnisse im Alten Vorhafen am 11. Juli 2005 (Abb. 58, linke Seite). Die Situation ist mit den Vorgängen im Neuen Vorhafen vergleichbar (s. Abb. 57). Bei Thw wurden ebenfalls nur geringe Feststoffkonzentrationen ermittelt (Messung A). Nach  $T_{\frac{1}{2}w}$  nehmen die Konzentrationen zunächst bei den Positionen 3 und 5 im Einströmbereich der Flutwassermengen zu (Messung B). Bei Tidehochwasser (Messung C) überlagern sich Strömungs- und Dichteeffekt mit den stark zunehmenden Feststoffkonzentrationen im Vorhafen von den oberen zu den unteren Wasserschichten.

Die Ebbemessung während der Nipptide vom 30. Juni 2005 ( $Thb = 246$  cm) und einem  $Q_0 = 297$  m<sup>3</sup>/s weist bei Thw noch relativ hohe Schwebstoffkonzentrationen auf (Abb. 59, links Messung A). Die Verhältnisse sind mit der Flutmessung vom 7. Juli 2005 vergleichbar (Abb. 57, C). Mit den schwächer werdenden Strömungseffekten im Vorhafen in der ersten Ebbestromphase verringern sich die Schwebstoffkonzentrationen bis  $T_{\frac{1}{2}w}$  (Messung B in Abb. 59). Die von der Ebbe angeregten Walzenströmungen sind weniger intensiv als während der der Flut. Das wird mit den geringen Schwebstoffkonzentrationen bei Thw dargestellt (Abb. 59, Messung C).

Am 15. März 2007 wurden noch Unterhaltungsarbeiten im Neuen Vorhafen mit Baggerumlagerungen durchgeführt. Die höheren Konzentrationen im Neuen Vorhafen sind sicher auf die Baggeraktivitäten zurückzuführen (Abb. 59).

Die Ebbemessungen vom Juli 2005 im Alten Vorhafen zeigen den erwarteten Verlauf mit den höheren Schwebstoffkonzentrationen während der ausklingenden Flutstromphase (Abb. 60, linke Seite, Messung A).

Am 27. März 2007 herrschte im Alten Vorhafen reger Schiffsverkehr und Schleusenbetrieb. Die höheren Werte in der Elbe können auf das höhere Oberwasser und die Baggerakti-

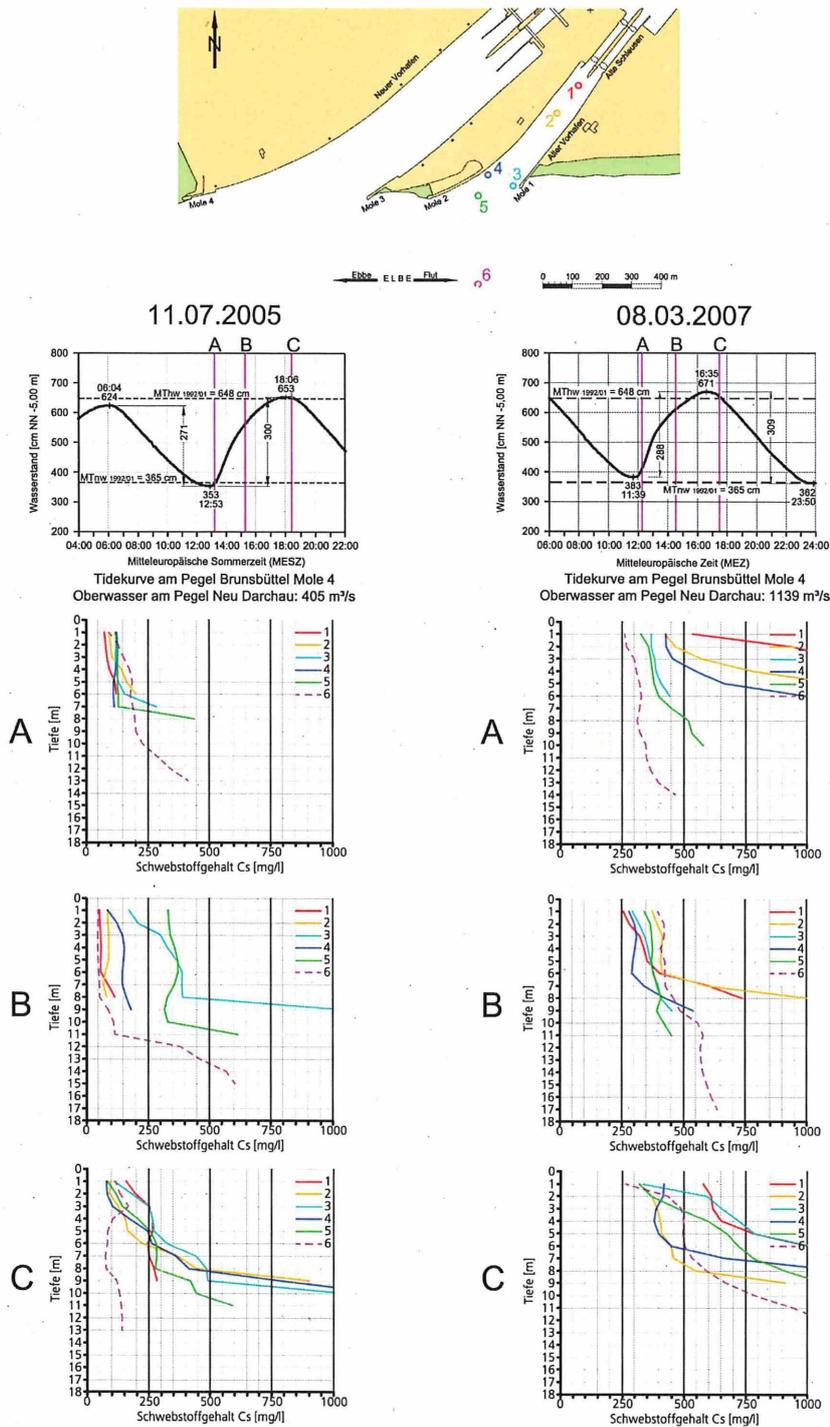


Abb. 58: Schwebstoffe während der Flutstromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

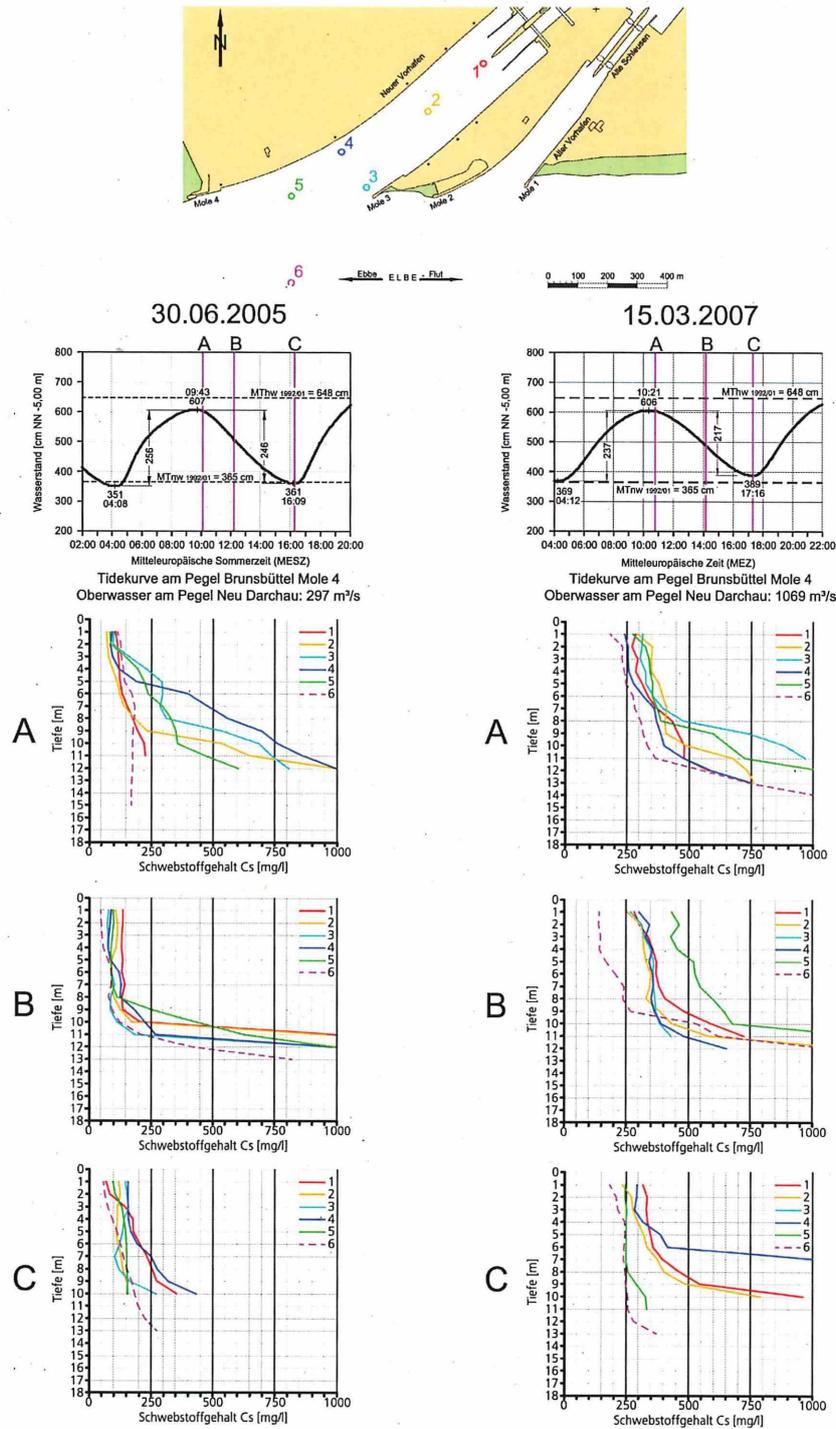


Abb. 59: Schwebstoffe während der Ebbestromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

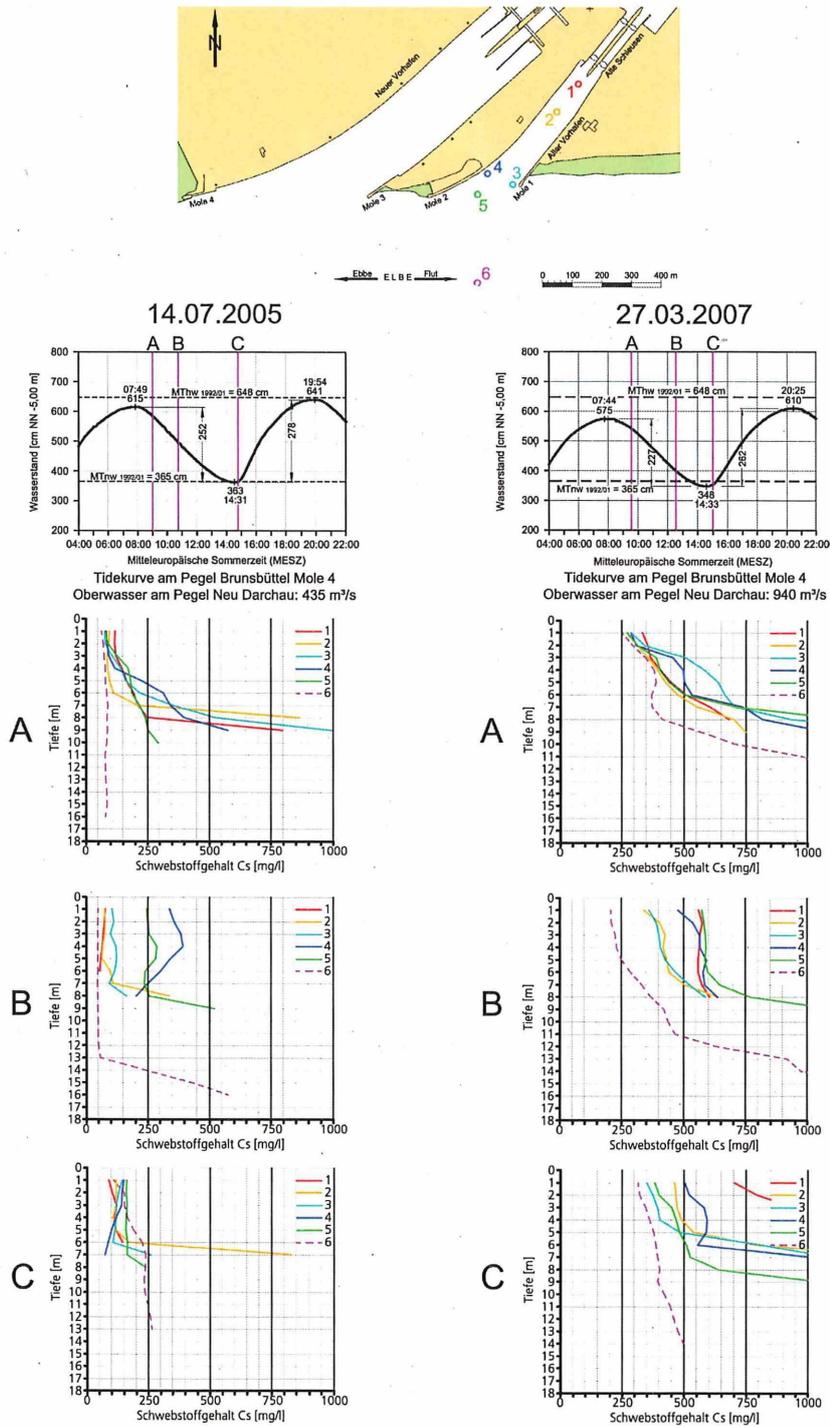


Abb. 60: Schwebstoffe während der Ebbestromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser

vitäten zurückgeführt werden (Abb. 60, rechte Seite). Kennzeichnend ist der Umstand, dass –wie auch in anderen Vorhäfen– abgesetztes Material im Tideverlauf resuspendiert wird, was dort zu höheren Konzentrationen als im Tidestrom führt. Der Einfluss einer Niedrigwasserschleusung wird mit Messung C (Abb. 60, rechts) dokumentiert. Die hohen Schwebstoffgehalte im Alten Vorhafen können auch durch Entwässerungen des Nord-Ostsee-Kanals verursacht werden. Dazu müssten die Zeiten analysiert werden, bei denen entsprechende Sielungen aus dem N-O-K vorgenommen wurden.

## 7 Fluid Mud Untersuchungen

### 7.1 Peilplananalysen

#### 7.1.1 Vorbemerkungen

Mit der Analyse doppeltfrequenter Peilungen lassen sich die Mächtigkeiten und das Volumen von Flüssigschlick ermitteln. Für die Reviere an der Weser, Ems und Elbe sind dazu Peilungen ausgewertet worden. In den Brackwasserzonen der norddeutschen Tideflüsse bildet sich in den strömungsberuhigten Zonen der Vorhäfen verflüssigter Schlick (Fluid Mud) mit bis zu mehreren Metern Mächtigkeit. Die Schichtstärken und das Volumen von Fluid Mud ist mit den Differenzen aus den nieder- und hochfrequenten Echolotsignalen bestimmt. Der Flüssigschlick wird durch die Seeschleusen bis in die abgeschleusten Hafengebiete eingetragen.

#### 7.1.2 Bremerhaven

Die für den Zeitraum von 2001 bis 2004 betrachteten Flächen im Bereich der Nord-, Kaiser- und Doppelschleuse in Bremerhaven sind in Abb. 61 dargestellt. Die zugehörigen Solltiefen sind auf das in der Zeit gültige Seekartennull (SKN), dem mittleren Springtideniedrigwasser (M<sub>SpTnw</sub>), bezogen worden ( $SKN = -2,12 \text{ m NN} = M_{SpTnw}$ ).

Die Fluid Mud Stärken und Mengen schwanken in den höher gelegenen Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse erheblich um den 4-jährigen Mittelwert. Das in Tafel 2 eingetragene mittlere Volumen von  $V \approx 26.000 \text{ m}^3$  im Vorhafen der Nordschleuse wurde bis zu rd. 70 % über- und bis etwa 80 % unterschritten. Die Auswertungen für den Vorhafen der Kaiserschleuse ergaben Abweichungen vom Mittelwert ( $V \approx 20.000 \text{ m}^3$ ) bis zu rd. 65 %. Im Zufahrtbereich zur Doppelschleuse (Geeste und Vorhafen) herrschten ausgeglichene Verhältnisse. Für den Beobachtungszeitraum 2001 bis 2004 lagen die Abweichungen vom Mittelwert ( $V \approx 116.000 \text{ m}^3$ ) bei maximal 25 %.

Trotz der vergleichsweise geringen Wassertiefen sind im Zufahrtbereich zur Doppelschleuse die größten Unterschiede zwischen den Echolothorizonten (Fluid Mud-Stärken) zu verzeichnen (Tafel 2). Das liegt, ebenso wie die konstanteren Mengen an den besonderen morphologischen Bedingungen. An der Geesteeinfahrt befindet sich eine stabile Sandbarre, die die Wassertiefe dort auf rd. -5 m SKN begrenzt. Die Drempele der großen Schleusenkammer liegen mit -8,38 m SKN, ebenso wie die mittleren Sohl-tiefen in der Geeste mit -6,68 m SKN und im östlichen Vorhafen mit -7,52 m SKN um rd. 1,7 m bis 3,40 m unter der Wassertiefe im Einfahrtbereich der Geeste. In dem strömungsberuhigten, tiefer liegenden Bereich zwischen Barre und Außenhäuptern bestehen damit gute Voraussetzungen für die Bildung von Flüssigschlick und dessen Konsolidierung.

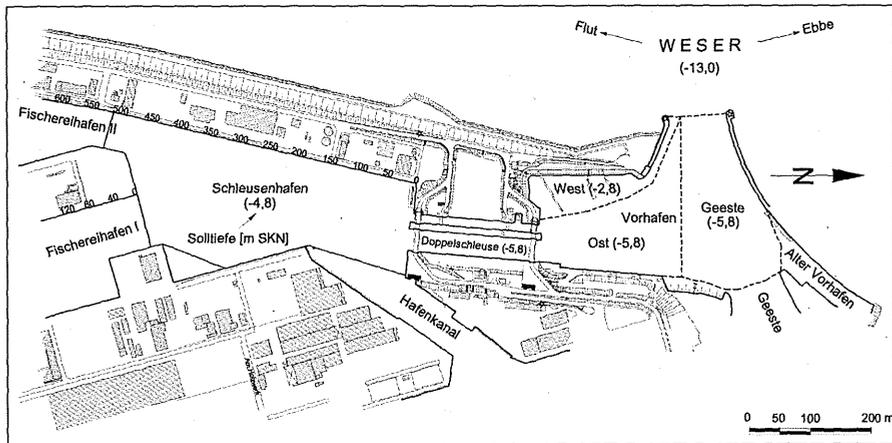
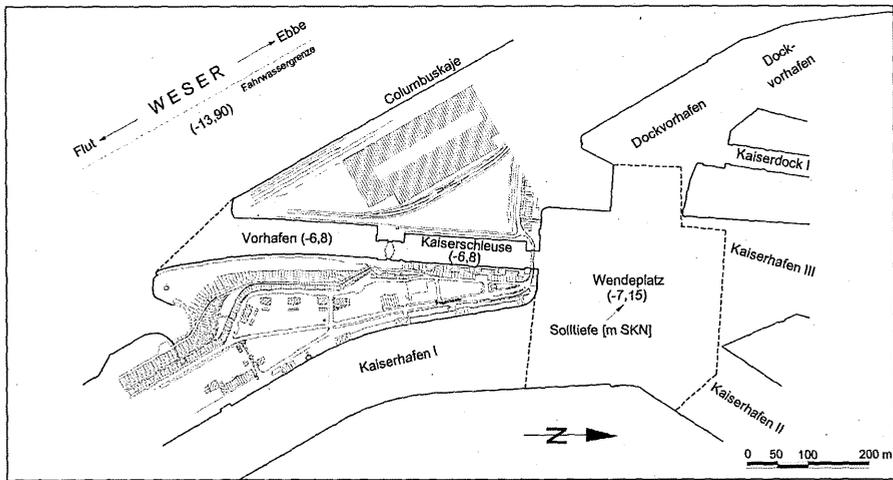
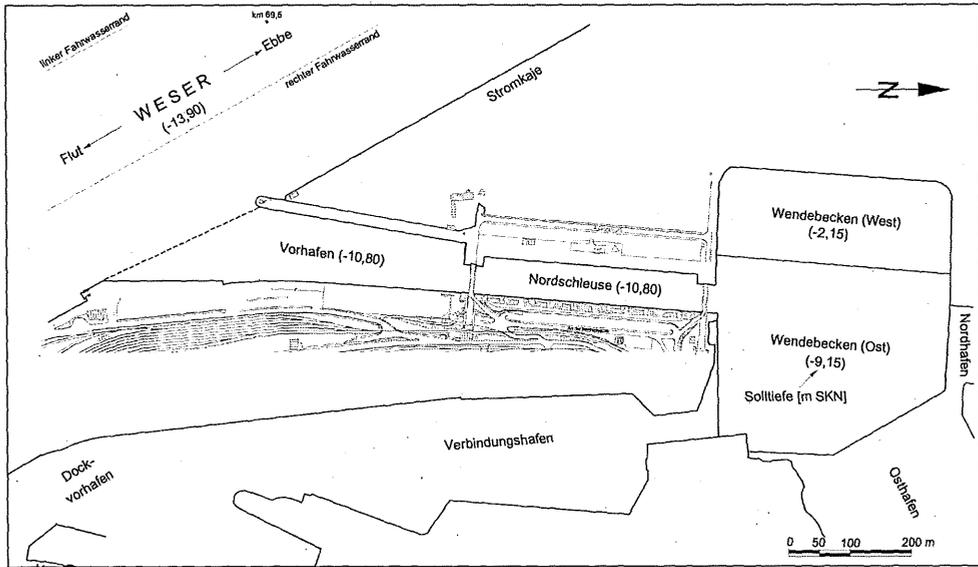


Abb. 61: Untersuchungsbereiche in Bremerhaven und zugehörige Solltiefen (m SKN)

Nordschleuse	Fläche A [m <sup>2</sup> ]	Solltiefe [m SKN]		Mittlere Sohlentiefe [m SKN]		Fluid-Mud	
		15 kHz	210 kHz	15 kHz	210 kHz	Höhe h [m] 15kHz-210kHz	Volumen V [m <sup>3</sup> ] h · A
Vorhafen	43.725	-10.80	-10.02	-10.61	-10.02	0.59	25.798
Kammer	21.564	-10.80	-10.40	-10.95	-10.40	0.55	11.860
Wendebecken West	46.275	-2.15	-2.13	-2.47	-2.13	0.34	15.734
Wendebecken Ost	102.925	-9.15	-8.84	-9.22	-8.84	0.38	39.112
<b>Zwischensumme</b>	<b>214.489</b>						<b>92.503</b>

Kaiserschleuse	Fläche A [m <sup>2</sup> ]	Solltiefe [m SKN]		Mittlere Sohlentiefe [m SKN]		Fluid-Mud	
		15 kHz	210 kHz	15 kHz	210 kHz	Höhe h [m]	Volumen V [m <sup>3</sup> ]
Vorhafen	16.825	-6.80	-7.06	-8.26	-7.06	1.20	20.190
Kammer	9.344	-6.80	-6.50	-7.22	-6.50	0.72	6.728
Wendeplatz	89.700	-7.15	-8.82	-9.04	-8.82	0.22	19.734
<b>Zwischensumme</b>	<b>115.869</b>						<b>46.652</b>

Doppelschleuse	Fläche A [m <sup>2</sup> ]	Solltiefe [m SKN]		Mittlere Sohlentiefe [m SKN]		Fluid-Mud	
		15 kHz	210 kHz	15 kHz	210 kHz	Höhe h [m]	Volumen V [m <sup>3</sup> ]
Geeste	31.800	-5.80	-4.95	-6.68	-4.95	1.73	55.014
Vorhafen West	8.975	-2.80	-2.82	-3.40	-2.82	0.58	5.206
Vorhafen Ost	26.450	-5.80	-5.41	-7.52	-5.41	2.11	55.810
Grosse Kammer	7.446	-5.80	-5.24	-7.08	-5.24	1.84	13.701
Kleine Kammer	2.362	-5.80	-5.85	-6.14	-5.85	0.29	685
Schleusenhafen	75.588	-4.80	-4.27	-4.70	-4.27	0.43	32.503
<b>Zwischensumme</b>	<b>152.621</b>						<b>162.917</b>

<b>Summe</b>	<b>482.979</b>						<b>302.072</b>
--------------	----------------	--	--	--	--	--	----------------

Tafel 2: Mittelwerte in den Hafenbereichen in Bremerhaven von 2001 bis 2004

Flächenbezogen wurden mit den Peilplananalysen folgende mittlere Mengen ermittelt (s. Tafel 2):

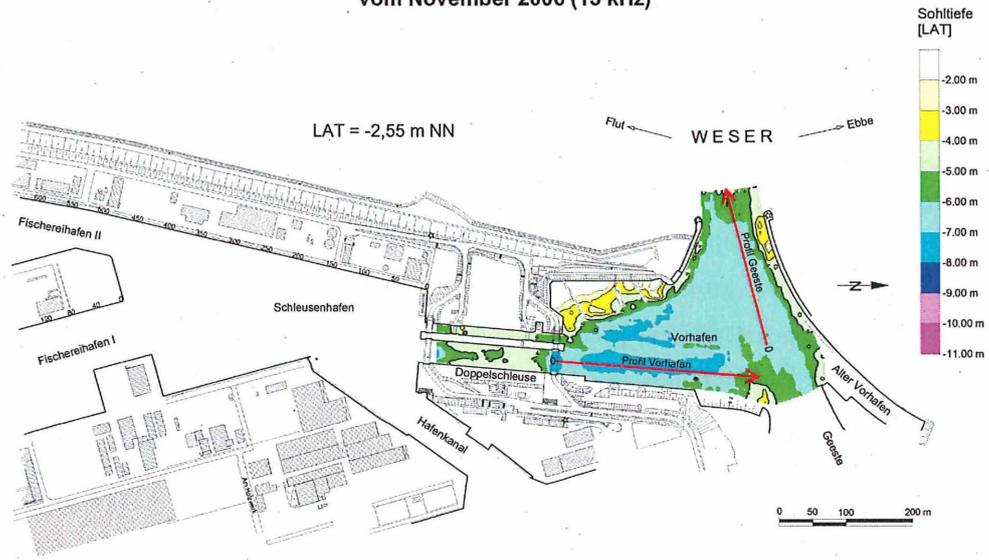
$$\begin{array}{l} \text{Geeste} \quad \frac{V}{A} = h = 1,73 \text{ m} \\ \text{Östlicher Vorhafen} \quad \frac{V}{A} = h = 2,11 \text{ m} \end{array}$$

Selbst in der großen Schleusenkommer wurden noch  $\frac{V}{A} = h = 1,84 \text{ m}$  und im Schleusen-  
hafen  $\frac{V}{A} = h = 0,43 \text{ m}$  berechnet.

Als Beispiel ist in Abb. 62 eine 15 kHz Peilung vom Zufahrtbereich zur Doppelschleuse in Bremerhaven und ein Differenzplan (210 kHz – 15 kHz Horizonte) vom November 2006 dargestellt. Die größten Differenzen wurden im Bereich des östlichen Schleusenvorhafens und am Außenhaupt der großen Schleuse mit  $h \approx 3,00 \text{ m}$  ermittelt (Abb. 62).

Die aus Abb. 62 entwickelten Längsprofile (Abb. 63) veranschaulichen den gleichmäßigeren Verlauf des 210 kHz-Horizonts mit den größeren Differenzen im östlichen Vorhafen, dort wo der 15 kHz-Horizont die größten Sohl-tiefen aufweist. Im Barrenbereich der Geesteeinfahrt stimmen die Ergebnisse beider Peilfrequenzen annähernd überein (Abb. 63). Es bleibt festzustellen, dass die bathymetrischen Verhältnisse im Zufahrtbereich zur Doppelschleuse mit zunehmenden Sohl-tiefen zur Doppelschleuse gute Voraussetzungen für die Bildung und Konsolidierung von Flüssigschlick bilden. Mit einem vertretbaren Aufwand ist es wohl nicht möglich, ein Sohlengefälle vom Außenhaupt über den Vorhafen und der Geeste bis zur Weser zu schaffen und freizuhalten. Die Methode, mit Wasserinjektionen die nautisch nutzbaren Tiefen zu gewährleisten, ist sicher die geeignete Maßnahme.

Peilung im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven  
vom November 2006 (15 kHz)



Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven  
zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont  
Peilungen vom November 2006

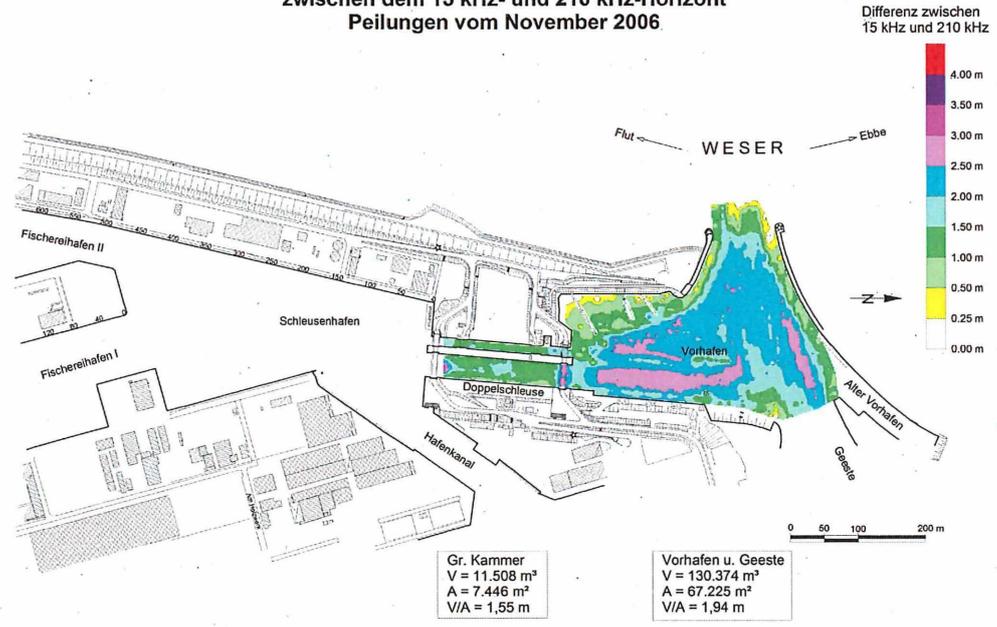


Abb. 62: Peilung und Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven vom November 2006

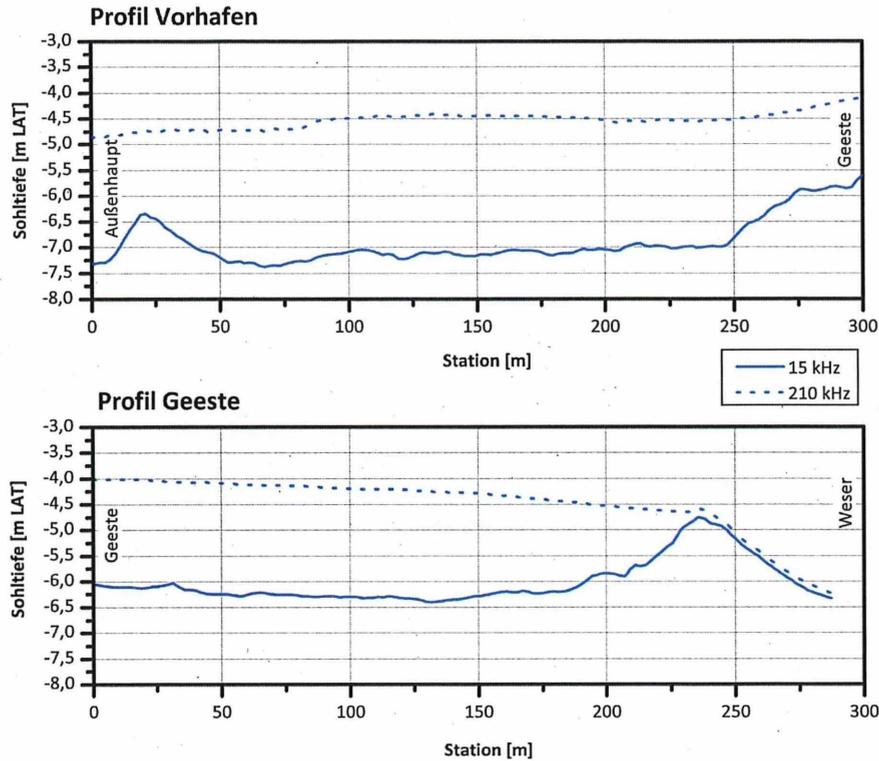


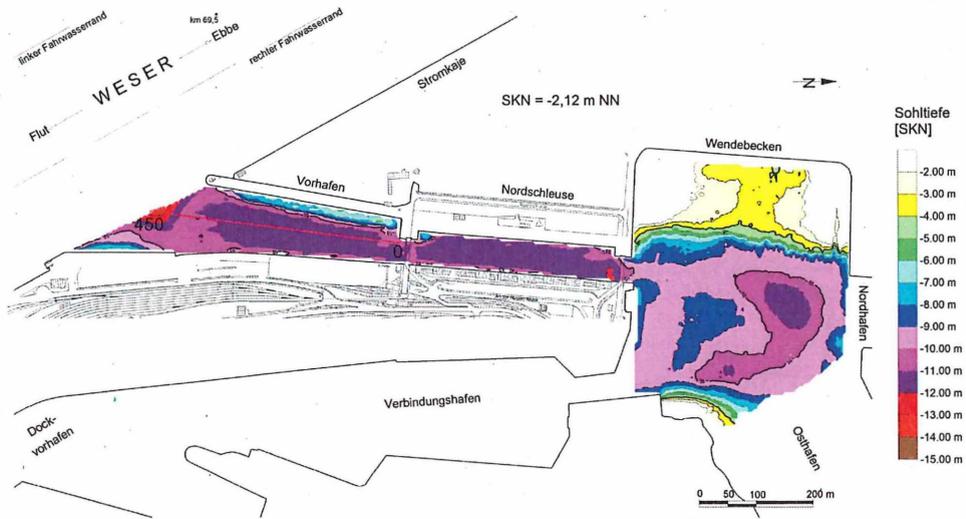
Abb. 63: Längsprofile im Vorhafen der Doppelschleuse und der Geeste vom November 2006

Auch in den gegenüber der Weser höher gelegenen Hafenzufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven bilden sich durch die Strömungseffekte in den Vorhafenzufahrten Barren aus. Zum Februar 2003 war die Sohle im inneren Vorhafen der Nordschleuse und auch in der Kammer tiefer als in der Einfahrt (Abb. 64). Aufgrund der bathymetrischen Voraussetzungen betragen die mittleren Schichtstärken im Vorhafen und der Schleusenammer etwa einen Meter. Die Schwebstoffe gelangen von der Weser über den Vorhafen und die Nordschleuse bis in den abgeschleusten Hafenbereich.

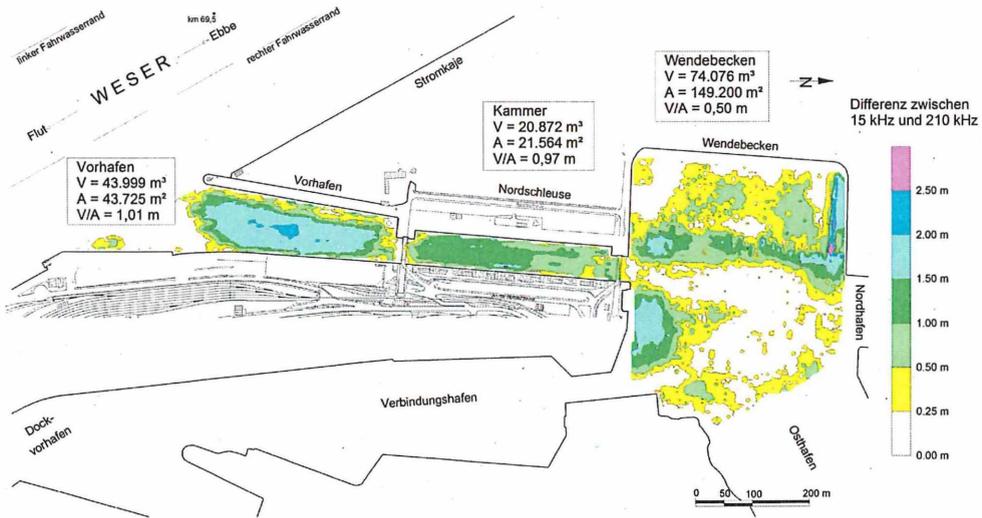
Ganz andere Verhältnisse wurden im Januar 2004 ermittelt (Abb. 65). Die erheblich geringeren Fluid Mud Mengen vom Vorhafen der Nordschleuse bis zum Wendebassin sind auf die günstigen Gefälleverhältnisse zurückzuführen. Der in Abb. 66 eingetragene Längsschnitt der Vorhafenachse vom Februar 2003 veranschaulicht, wie sich im strömungsberuhigten Wannbereich zwischen Schleuse und Barre Flüssigschlick bilden kann. In der Wanne hatten Sedimentationen und Konsolidierungen von Flüssigschlick stattgefunden.

Bei der Peilung vom Januar 2004 war die Barre in der Einfahrt abgetragen worden (Abb 66, unten). Bei geringen Unterschieden ist zwischen den hoch- und niederfrequenten Horizonten in Abb. 66 unten ein Gefälle von der Nordschleuse zur Weser auszumachen. Dadurch wird die während der Flutstromphase nach innen gerichtete Dichteströmung an der Sohle geschwächt. Die Transportkapazität der nach außen gerichteten ebbestromorientierten

**Peilung im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Februar 2003 (15 kHz)**

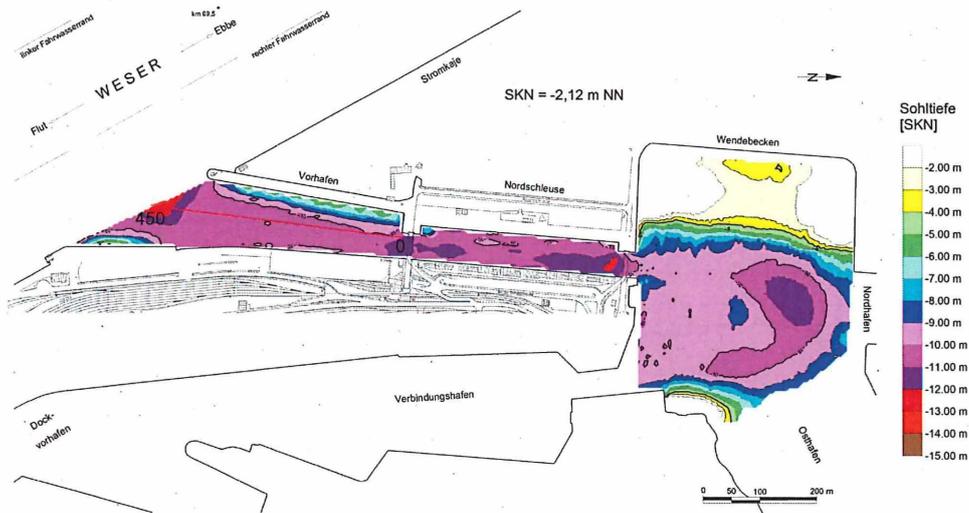


**Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont Peilungen vom Februar 2003**



**Abb. 64: Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Februar 2003**

**Peilung im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Januar 2004 (15 kHz)**



**Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont Peilungen vom Januar 2004**

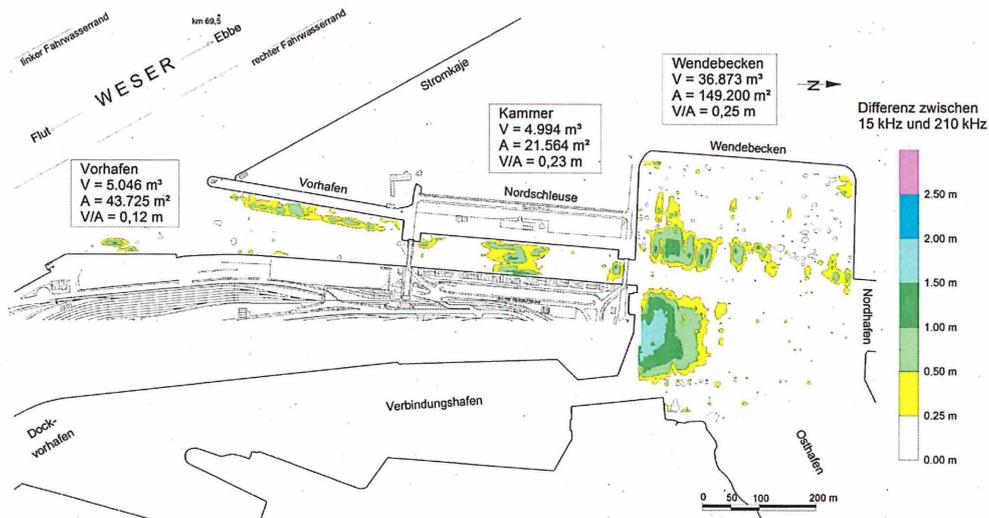


Abb. 65: Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Januar 2004

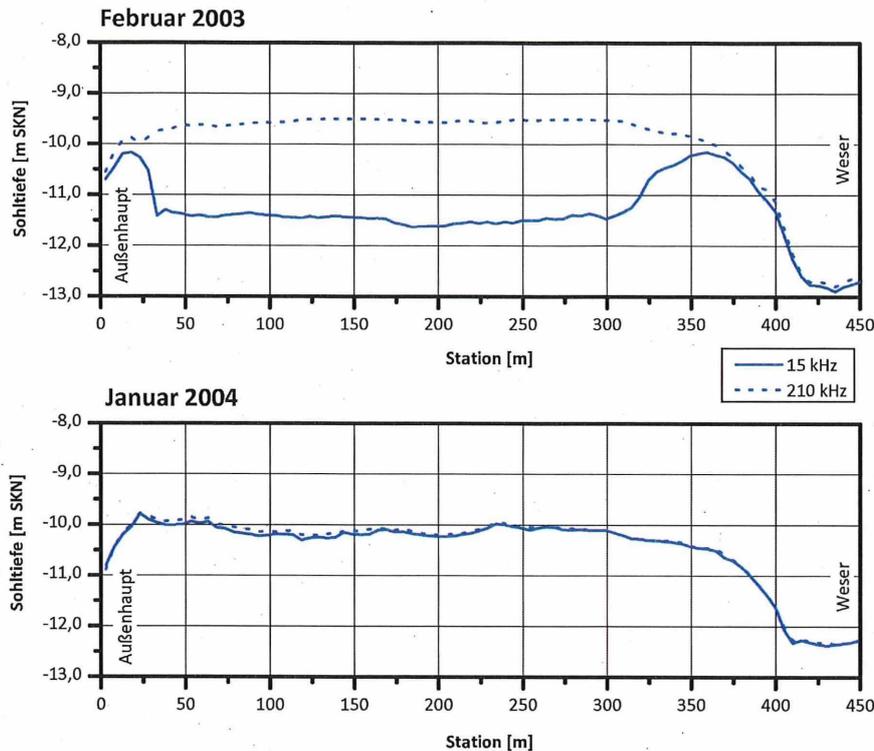


Abb. 66: Längsprofile im Vorhafen der Nordschleuse vom Februar 2003 und Januar 2004

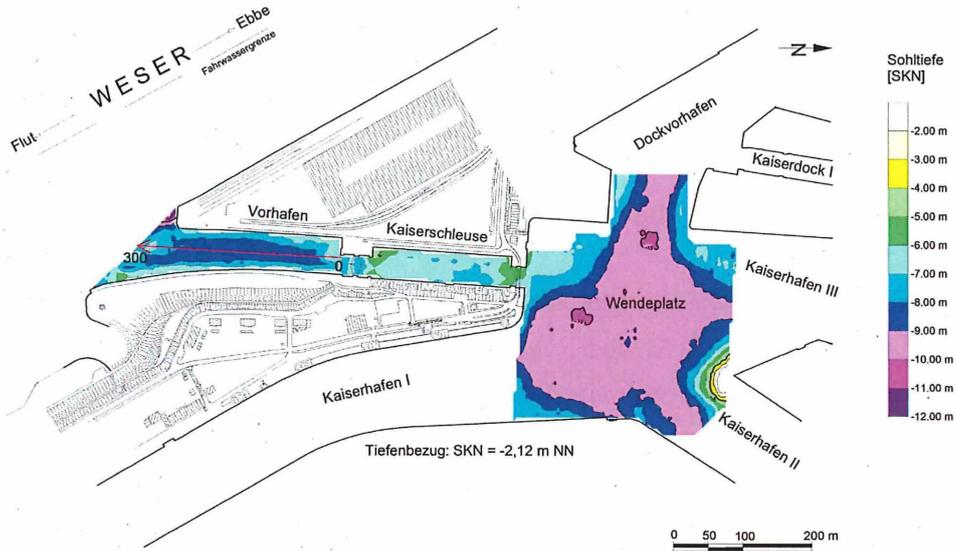
Sohlströmungen wird gleichzeitig verstärkt. Mit entsprechenden Gefälleverhältnissen der Vorhafensohle ist es damit möglich, in den hochgelegenen Vorhäfen die Bildung von Fluid Mud von vornherein zu unterbinden.

Im gesamten Untersuchungszeitraum von 2001 bis 2004 waren die Sohliefen im inneren Vorhafen der Kaiserschleuse größer als in der Einfahrt und Schleusenkammer. Wie bei der Nordschleuse bilden sich hinter der Barre in den tiefen Bereichen des Vorhafens Fluid Mud Schichten von bis zu mehreren Metern Mächtigkeit aus. Der Eintrieb von Feststoffen über die Schleusen in den Überseehafen hängt von den Gefälleverhältnissen ab. Bei der Peilung vom Mai 2002 lag die Sohle in der Kammer deutlich höher als im Vorhafen. Dementsprechend geringer war dort mit  $\frac{V}{A} = 0,37$  m die Differenz der Peilhorizonte (Abb. 67).

Im Übrigen haben die Peilplananalysen ergeben, dass auch der Sedimenteintrag in den Schleusenhafen der Doppelschleuse bei höher liegender Sohle der großen Kammer und im abgeschleusten Hafen gemindert werden kann.

Der für die Peilung vom Mai 2002 in Abb. 68 aufgetragene Längsschnitt dokumentiert die größeren Differenzen zwischen dem 210 kHz und 15 kHz Horizonten im inneren Vorhafen. Im Einfahrtbereich rücken die beiden Horizonte, wie bei dem Vorhafen der Nordschleuse und in der Geesteeinfahrt näher zusammen. Das liegt an den dort auftretenden Strömungseffekten, durch die verhindert wird, dass sich die vom Tidestrom mitgeführten Schwebstoffe

Peilung im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven vom Mai 2002 (15 kHz)



Differenzplan im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont Peilungen vom Mai 2002

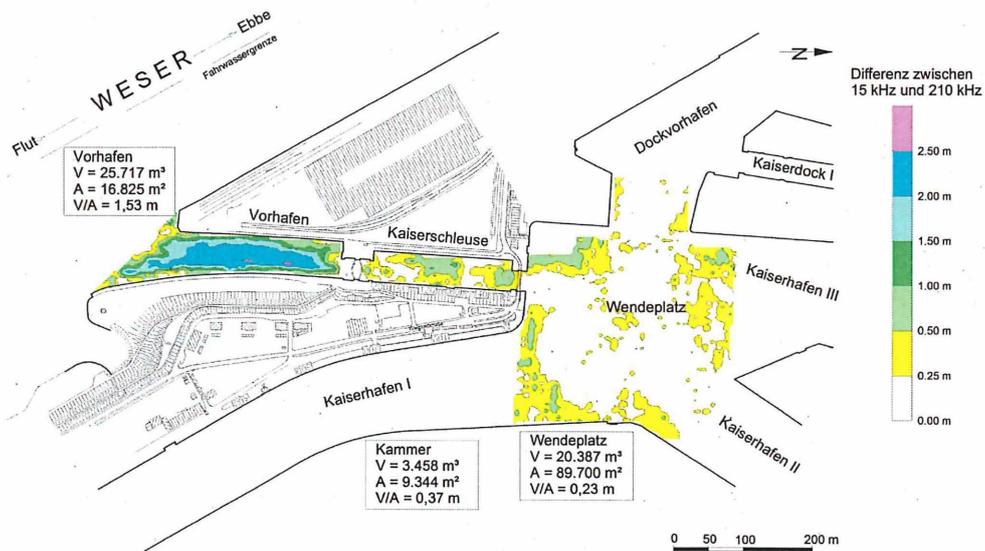


Abb. 67: Peilung und Differenzplan im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven vom Mai 2002

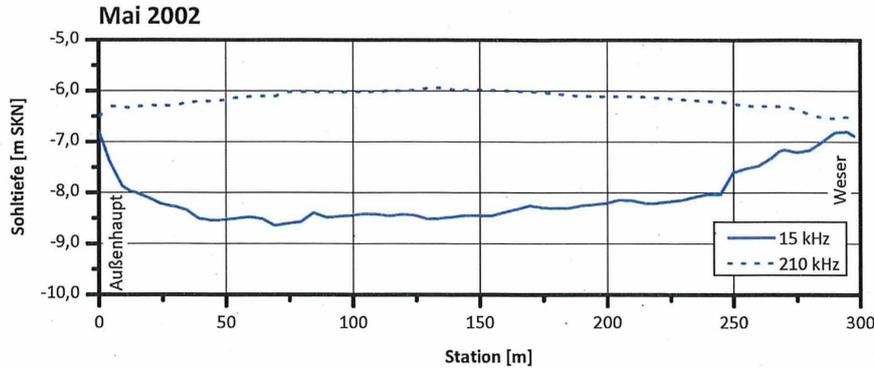


Abb. 68: Längsprofile im Vorhafen der Kaiserschleuse vom Mai 2002

dauerhaft absetzen oder konsolidieren können.

Bei den beiden hochliegenden Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse macht es Sinn, von den Schleusenhäuptern zur Weser ein Sohlgefälle zu schaffen. Damit wird die Transportkapazität der flutstromorientierten Dichteströmungen geschwächt und der Sedimenttransport der nach außen gerichteten ebbestromorientierten Sohlströmungen verstärkt. In der Summe wird damit die Feststoffbilanz günstig beeinflusst. Folglich wird auch der Feststofftransport über die Schleusenkammern bis in den Überseehafen gemindert.

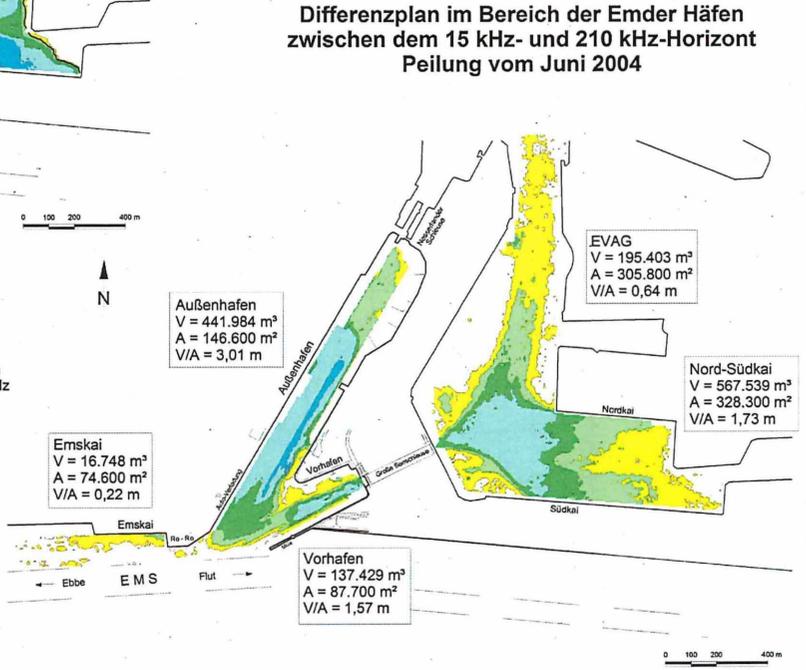
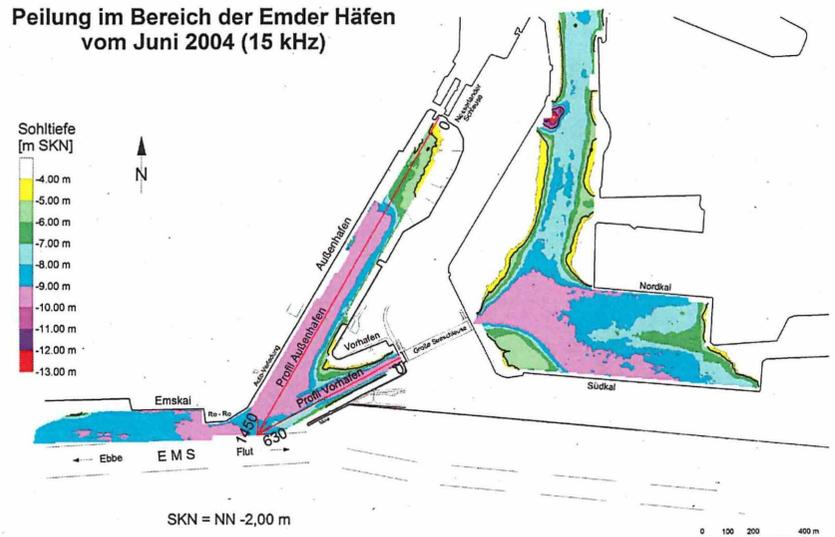
### 7.1.3 Emden

Für den Emdener Hafen wurden vom Januar 2004 bis zum April 2005 sechs Peilpläne analysiert. Als Beispiel ist in Abb. 69 die Peilung vom 29. Juni 2004 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Einfahrtbereich zum Emdener Vor- und Außenhafen ebenfalls zur Barrenbildung neigt. Wie bei den vorstehend besprochenen Beispielen für Bremerhaven ist die Differenz der beiden Echolotsignale dort am höchsten, wo die größten niederfrequent gemessenen Sohlentiefen ermittelt wurden. Das gilt auch für den abgeschleusten Hafengebiete in Abb. 69. Im Mittel wurden für die einzelnen Bereiche folgende Volumen ( $V$ ) und Höhendifferenzen ( $h$ ) ermittelt:

Hafenbereich	Fläche	Differenzvolumen	Höhendifferenz
	$A[m^2]$	$V[m^3]$	$\frac{V}{A} = h[m]$
Außenhafen	146.600	490.264	3,36
Vorhafen	87.700	197.125	2,25
Nord-Südkai	328.300	517.134	1,51
EVAG	305.800	167.960	0,55

Mit Abb. 69 ist nachvollziehbar, dass erhebliche Schwebstoffmengen über die Große Seeschleuse in den abgeschleusten Bereich gelangen. Im tidebeeinflussten Bereich des Vor- und Außenhafens ist das Volumen sehr stabil. Die Abweichungen betragen maximal bei +17% und -16% vom Mittelwert ( $V \approx 700.000 \text{ m}^3$ ). Der Wasser- und Schwebstoffaustausch

Abb. 69: Peilung und Differenzplan im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden vom Juni 2004



zwischen dem kürzeren Vorhafen ist mit Volumenänderungen gegenüber dem Mittelwert von rd.  $\pm 30\%$  deutlich stärker als beim Außenhafen. Dort betragen die Abweichungen vom Mittelwert ( $V \approx 500.000 \text{ m}^3$ ) rd.  $\pm 12\%$ .

Die Längsprofile für die Peilung vom Juni 2004 veranschaulichen die Schwebstoffverteilungen in den tideoffenen Hafenbecken (Abb. 70). Im flacheren, oberen Teil des Außenhafens

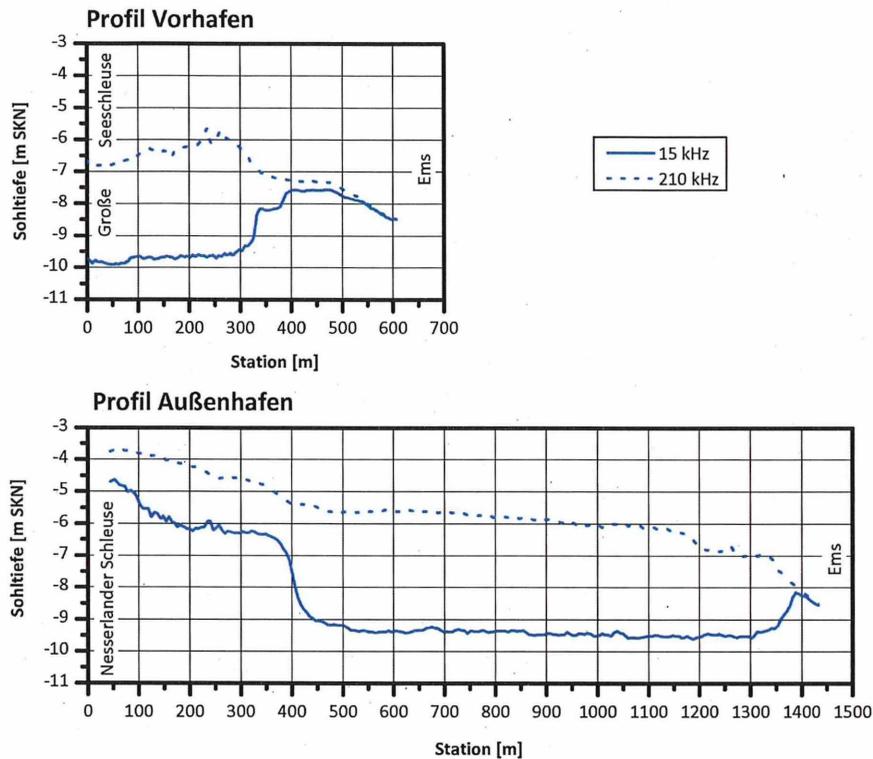


Abb. 70: Längsprofile im Vor- und Außenhafen in Emden vom Juni 2004

liegt der 200 kHz-Horizont höher als im Wannbereich zwischen Station 350 und 1400 (vgl. Abb. 63). Bemerkenswert ist die Sohlerhöhung im Einfahrtsbereich und das Zusammenrücken der Echolothorizonte. Bezeichnend ist auch der unruhige Verlauf des 210 kHz Horizonts im Vorhafen vor der großen Seeschleuse (Abb. 70). Das ist auf die in Emden entwickelte Unterhaltungsmethode zurückzuführen, bei der das verflüssigte Baggergut in die oberen Wasserschichten wieder zurückfließt.

### 7.1.4 Brunsbüttel

Für die Schleusenvorhäfen in Brunsbüttel standen 26 doppeltfrequente Peilungen vom Januar 2003 bis zum September 2005 zur Verfügung. Die Vorhafenflächen sowie die mittleren Differenzvolumen zwischen dem 100 kHz und 15 kHz Horizonten und mittleren Höhenunterschiede sind im folgenden zusammengestellt:

Hafenbereich	Fläche	Differenzvolumen	Höhendifferenz
	$A[m^2]$	$V[m^3]$	$\frac{V}{A} = h[m]$
Neuer Vorhafen	246.400	336.993	1,37
Alter Vorhafen	70.375	120.977	1,72

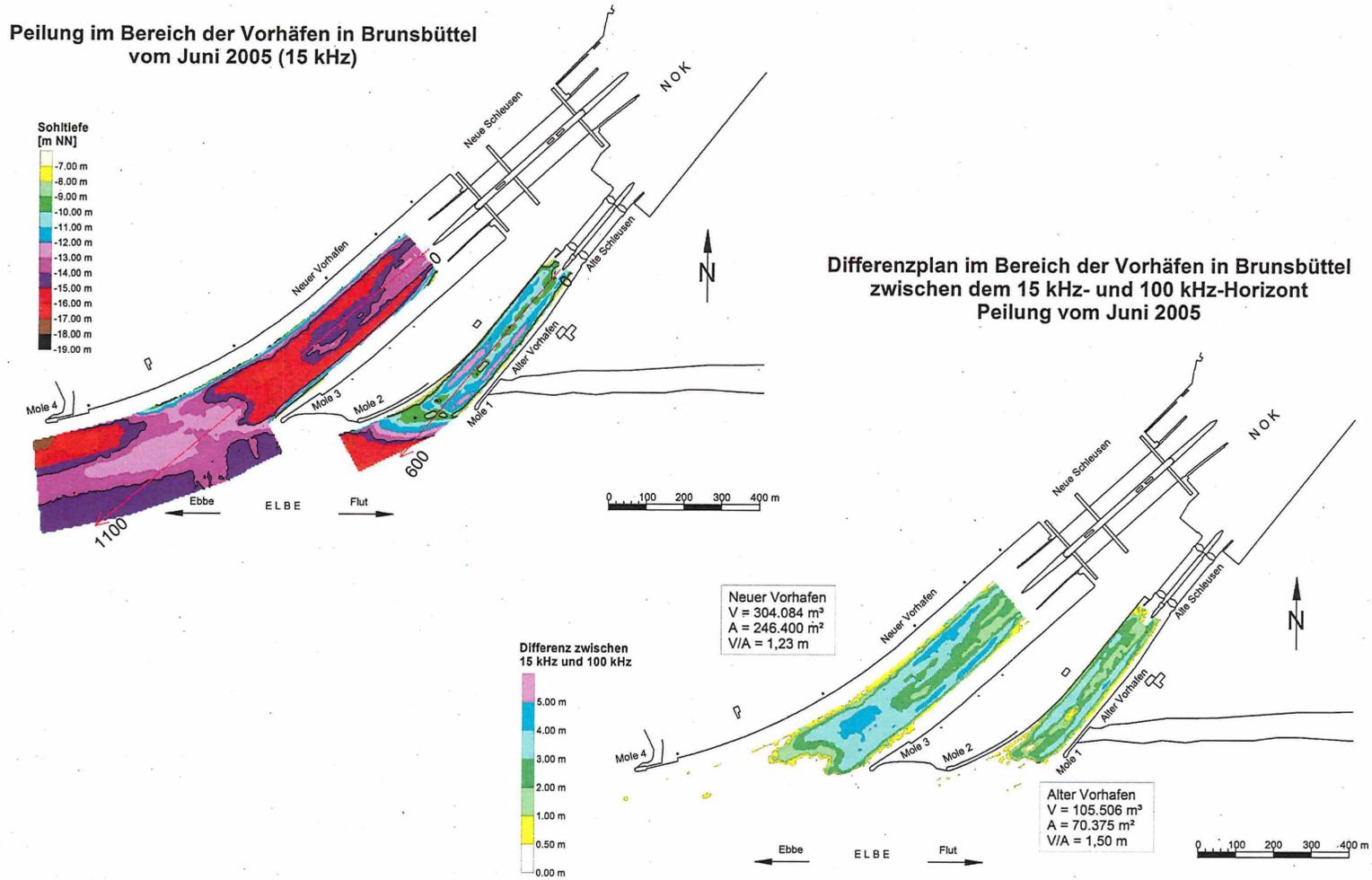
Die Abweichungen von den Durchschnittswerten betragen für den Neuen Vorhafen bis zu rd. 26% und im Alten Vorhafen bis zu 40%. Die Verhältnisse sind vergleichbar mit dem Zufahrtsbereich zur Doppelschleuse in Bremerhaven und dem Vorhafen zur Seeschleuse in Emden. Besondere Bedingungen herrschen im 1400 m langen Emder Außenhafen mit Abweichungen von lediglich rd. 12%. Das liegt an den großen Vorhafenabmessungen und der relativ geringen Größe der Nesserlander Schleuse. Wie bei den hochliegenden Schleusenzufahrten in Bremerhaven ist das Differenzvolumen bei größeren Höhendifferenzen zum Tidestrom im kleineren Alten Vorhafen geringer als im Neuen Vorhafen.

Einen Einblick in die morphologischen Verhältnisse ist beispielhaft mit Abb. 71 gegeben. Im Einfahrtsbereich der Vorhäfen sind ausgeprägte Sandbarren anzutreffen. Die höchsten Differenzen zwischen den Peilfrequenzen ergeben sich für die tiefsten Punkte der Wannen in den Schleusenzufahrten. Außerhalb der Barre kommt es aufgrund der turbulenteren Strömung nicht zu den hohen Sedimentkonzentrationen wie in den beruhigten Vorhafenbereichen. Das ist auch der Grund, weshalb sich dort die verschiedenen Echolothorizonte annähern Abb. 72.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal, in Emden und vor der Doppelschleuse in Bremerhaven stabile morphologische Verhältnisse aufweisen. In den höher gelegenen Hafenzufahrten zum Überseehafen in Bremerhaven sind die Sohlen stärkeren Veränderungen unterworfen mit stark schwankenden Volumen und Schichtstärken zwischen den Echolotsignalen. Vor allem im Vorhafen der Nordschleuse wird nach den Erkenntnissen aus früheren BMBF-Vorhaben (03 KIS 019) bei der Unterhaltung mit Wasserinjektionen ein Gefälle zur Weser geschaffen. Damit ist es möglich, die Fluid Mud Bildung stark einzuschränken oder ganz zu unterbinden.

Zur Untersuchung der Eigenschaften und des Verhaltens von Flüssigschlick zwischen den Echolothorizonten ist der Vorhafen zur Doppelschleuse in Bremerhaven, die tidebeeinflussten Vorhäfen in Emden und die Zufahrten zum Nord-Ostsee-Kanal besser geeignet als die nördlichen Hafenzufahrten in Bremerhaven.

Abb. 71: Peilung und Differenzplan im Bereich Neuen und Alten Vorhafens in Brunsbüttel vom Juni 2005



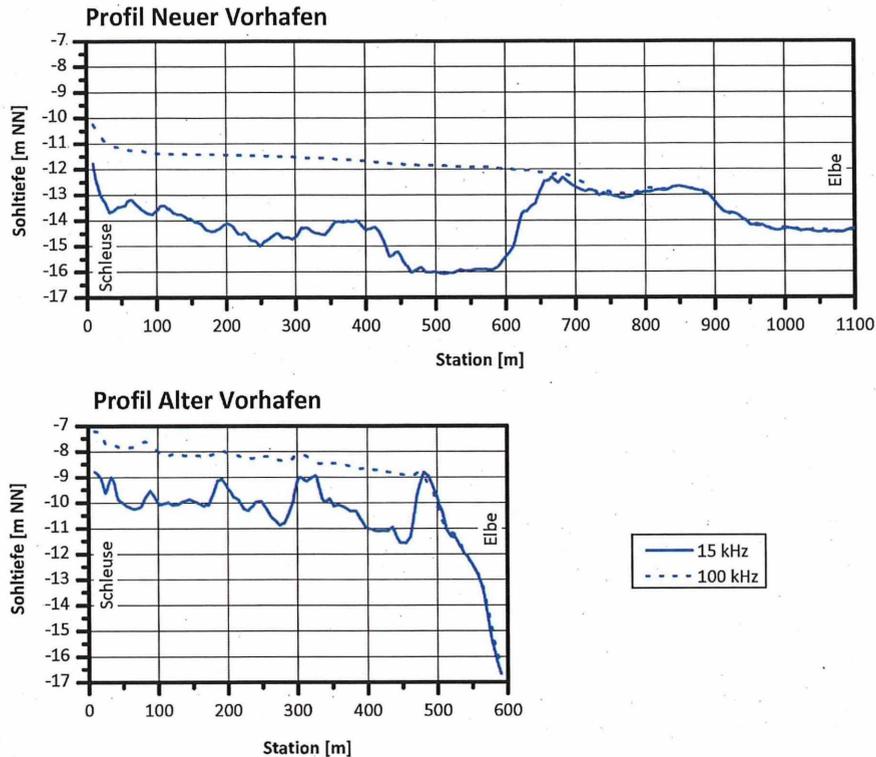


Abb. 72: Längsprofile im Alten und Neuen Vorhafen in Brunsbüttel vom Juni 2005

## 7.2 Bodenproben

### 7.2.1 Vorbemerkungen

Die an einer Flusssohle oder einem offenen Hafenbecken abgelagerten Sedimente sind eine Reaktion auf die einwirkenden hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge. Mit der Entnahme von Bodenproben und Bestimmung der Kornverteilungen können wertvolle Aufschlüsse über das Strömungs- und Sedimentationsgeschehen gewonnen werden.

### 7.2.2 Bremerhaven

Die Bereiche der Nord- und Kaiserschleuse wurden bereits im Rahmen des BMBF- Vorhabens 03 KIS 019 beprobt. Bei erneuten Probenentnahmen für 03 KIS 051 wurden besonders vor der Nordschleuse weniger organisches Material und relativ hohe Feinsandanteile gefunden.

- Nordschleuse

Die in Abb. 73 dargestellten Körnungslinien weisen im Vorhafen (Proben 1 und 2) lediglich bis zu 40% Schlammkornanteile auf. Die organischen Anteile sind relativ gering mit bis zu 7% Glühverlusten. Die hohen Feinsandanteile und geringen Glühverluste sind ein Hinweis

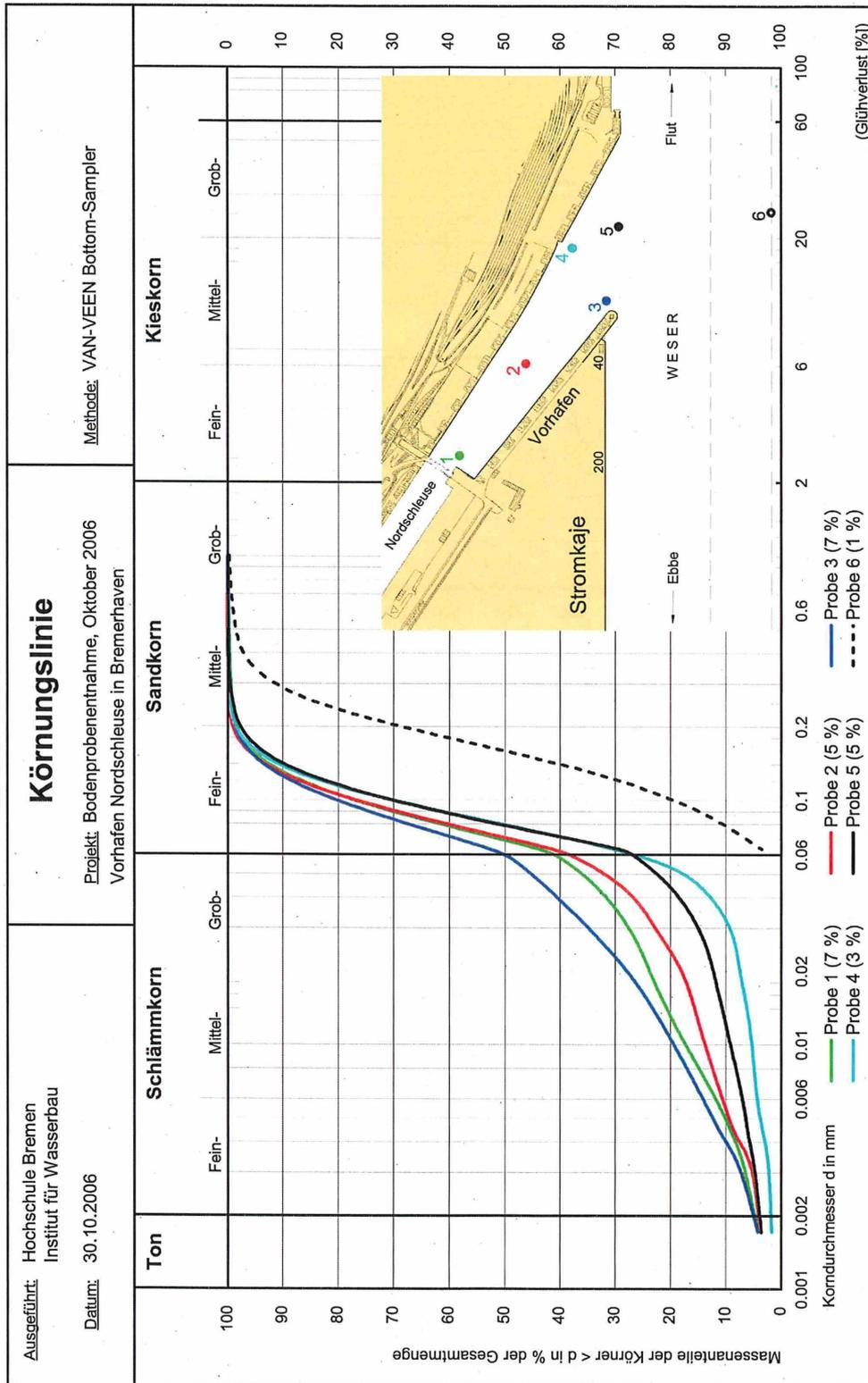


Abb. 73: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven

darauf, dass mit einem Sohlgefälle vom Außenhaupt der Schleuse zur Weser die Bildung von Flüssigschlick eingeschränkt bzw. von vornherein verhindert wird.

Morphologisch interessant ist es, dass sich am Ablösungspunkt der Flutströmungen (Pos 3) feineres Material absetzt als im Bereich der im tiefen Wasser einlaufenden Flutstromwalze (Pos. 5) und dem Staupunkt (Pos. 4). Im Fahrwasser der Weser wurden fast ausschließlich Sandkornfraktionen mit sehr geringen organischen Anteilen ( $\approx 1\%$ ) angetroffen.

#### • Kaiserschleuse

Das Sohlenmaterial am Fahrrinnenrand der Weser vor der rd. einem Kilometer oberhalb der Nordschleuse gelegenen südlichen Zufahrt zum Überseehafen besteht ebenfalls aus Sandkornfraktionen mit lediglich 1% organischen Anteilen (Abb. 74). In dem höher gelegenen Vorhafen der Kaiserschleuse setzen sich jedoch merklich feinere Schwebstoffe aus der Weser ab, als vor der Nordschleuse. Die Schlämmkornanteile betragen innerhalb des Vorhafens rd. 60% (Pos. 1 und 2). Es wurden Glühverluste bis zu rd. 10% im Labor ermittelt (Abb. 74). Relativ feines Material mit rd. 70% Schlämmkorn und 11% Glühverluste wurde im Ablösungsbereich der Flutströmungen (Pos. 3) angetroffen. Eine Reaktion auf die Flutstromwalzen sind die gröberen Kornfraktionen an den Positionen 4 und 5 in Abb. 74.

Allein die höhere Sohlage des Vorhafens der Kaiserschleuse ist ursächlich dafür, dass mehr feineres Material aus den oberen Wasserschichten zu den Sedimentationen führt. Außerdem liegen in der angrenzenden Weser unterhalb der Columbuskaje andere morphologische und hydrodynamische Randbedingungen vor (vgl. auch Anlage 13). Es wurde mit den ADCP-Messungen gezeigt, dass die Strömungsintensitäten vor der Kaiserschleuse schwächer ausgeprägt sind. Schließlich ist noch der stärkere Schiffsbetrieb an der Nordschleuse und der wesentlich höhere Unterhaltungsaufwand in der Zufahrt zu nennen. Mit den Peilplananalysen wurde erkannt, dass die Barre in der Vorhafeneinfahrt der Nordschleuse häufiger und intensiver mit Wasserinjektionen bearbeitet wurde. In der Einfahrt zum Vorhafen der Kaiserschleuse wurde die Barrenbildung eher hingenommen.

Für beide höher als die Wesersohle gelegenen Vorhäfen bleibt festzustellen, dass sich durch die Unterhaltung mit Wasserinjektionsmaßnahmen dort keine stabilen Flüssigschlicklagen ausbilden.

#### • Doppelschleuse

Die Geesteeinfahrt liegt im flachen Wasser außerhalb des Prallhangs der Weserkrümmung (vgl. Anlage 13). Außerdem wird die Geesteeinfahrt von der Weser durch eine stabile Barre getrennt. Dementsprechend schwach sind die im Tiderhythmus erzeugten Walzen- und Dichteströmungen im Vorhafen und der Geestemündung. In der südlichen Hafenzufahrt sind folglich deutlich feinere Sedimente als vor der Kaiserschleuse analysiert worden (Abb. 75).

Bei den Proben 1 bis 4 betragen die Schlämmkornanteile 90 bis 95% mit bis zu 17% organischen Anteilen. Selbst in der Geesteeinfahrt betrug Feinanteile noch  $\geq 80\%$  (Proben

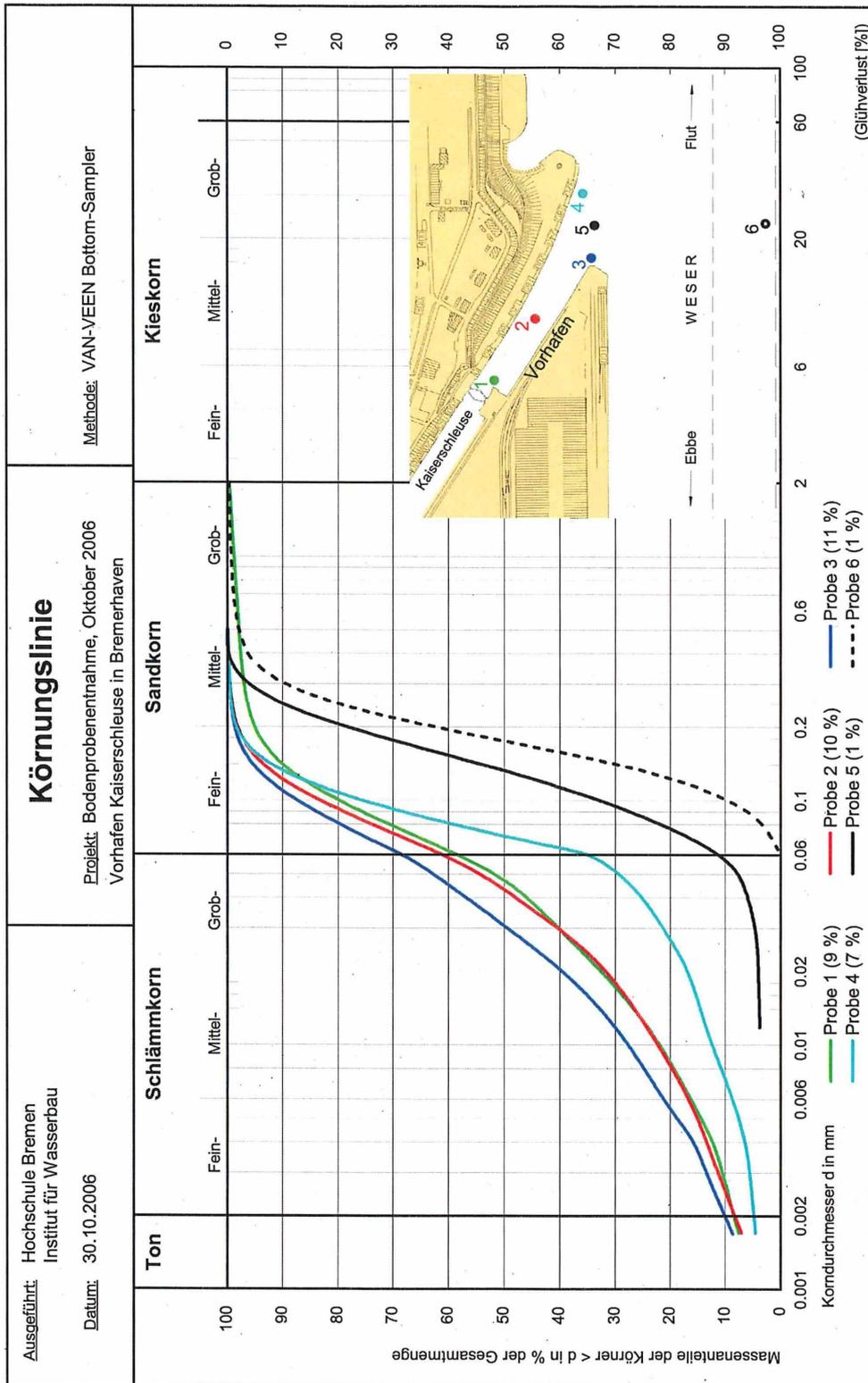


Abb. 74: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven

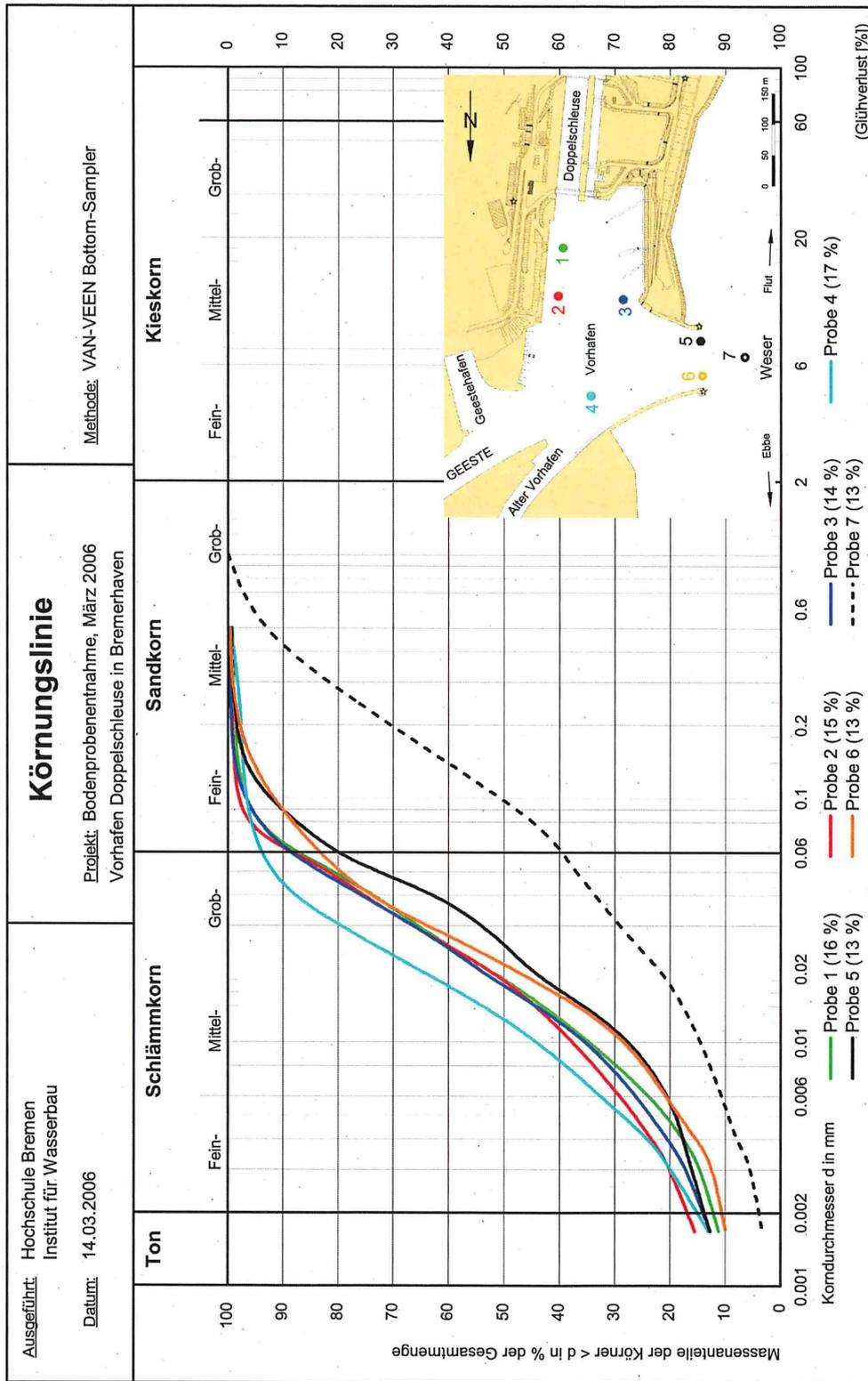


Abb. 75: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven

5 und 6). Bei der äußeren Probe 7 überwogen bereits die Sandkornanteile mit rd. 60%. Näher zum Fahrwasser wurde kiesiges Material angetroffen, welches mit dem Van-Veen-Greifer wegen zu grober Körnung nicht mehr in ausreichenden Mengen gegriffen werden konnte.

Wesentlich ist die Tatsache, dass über der hochliegenden Barre nur sehr feine, stark organische Schwebstoffe in den Zufahrtsbereich zur Doppelschleuse eingetragen werden. Das Material setzt sich in den strömungsberuhigten tiefen Bereichen zwischen der Barre und den Außenhäuptern ab. Im Gegensatz zu den direkt am Strom gelegenen erhöhten Hafenzufahrten kann sich vor der Doppelschleuse im Schutz der Barre eine relativ stabile Schlicklage ausbilden.

### **7.2.3 Emden**

Die Zusammensetzung der Sohlensedimente im Emdener Vor- und Außenhafen sind mit denen von der Doppelschleuse vergleichbar (Abb. 76). Die Proben aus dem inneren Bereich des Außenhafens bestehen fast ausschließlich aus Schlämmkornanteilen mit bis zu 20% organischer Substanz (Proben 1 und 2). Auch die Proben 3 und 4 beinhalten noch weniger als 10% Feinsand bei hohen Glühverlusten.

Beachtenswert sind die Entnahmestellen im vorderen Hafenbereich in Abb. 76. Im Schutz der Westmole des Außenhafens in der Ablösezone der Flutströmungen (Pos. 5) lagert sich noch sehr feines Material ab. Ganz anders sind die Bedingungen am Kopf der Ostmole, dem Staupunkt der Flutströmungen. In dem Bereich werden im tiefen Wasser die intensiven Flustromwalzen angeregt (Pos. 6). Das erklärt den relativ hohen Fein- und Mittelsandanteil von rd. 40% der Bodenprobe. Im Fahrwasser der Ems wurde bei der Beprobung kein konsolidierter Flüssigschlick angetroffen. Das zeigt die Probenanalyse der Position 7 in Abb. 76 bei der lediglich Sandkornfraktionen und 4% organische Anteile analysiert wurden.

### **7.2.4 Brunsbüttel**

Für den Neuen Vorhafen des Nord-Ostsee-Kanals sind die Körnungslinien der Bodenproben vom März 2006 in Abb. 77 dargestellt. Das feinste Material mit den höchsten Schlämmkornanteilen und Glühverlusten von 11 bis 14% wurde im inneren Vorhafen (Pos. 1 bis 3) angetroffen. In der Einfahrt wurden im Anströmbereich (Pos. 6) und am Staupunkt der Flutströmungen (Pos. 4) höhere Sandkornanteile und geringere organische Bestandteile analysiert als an der westlichen Mole (Pos. 5). Wie bei den Vorhäfen an der Weser und Ems besteht das Sohlenmaterial in der Elbe bei Brunsbüttel ausschließlich aus Sandkornfraktionen.

Die in Abb. 78 aufgetragenen Körnungslinien der aus dem Alten Vorhafen entnommenen Proben stimmen mit den Beprobungsergebnissen für den Neuen Vorhafen recht gut überein. Im inneren Vorhafen wurde das feinste Sohlenmaterial mit Glühanteilen von 10 bis

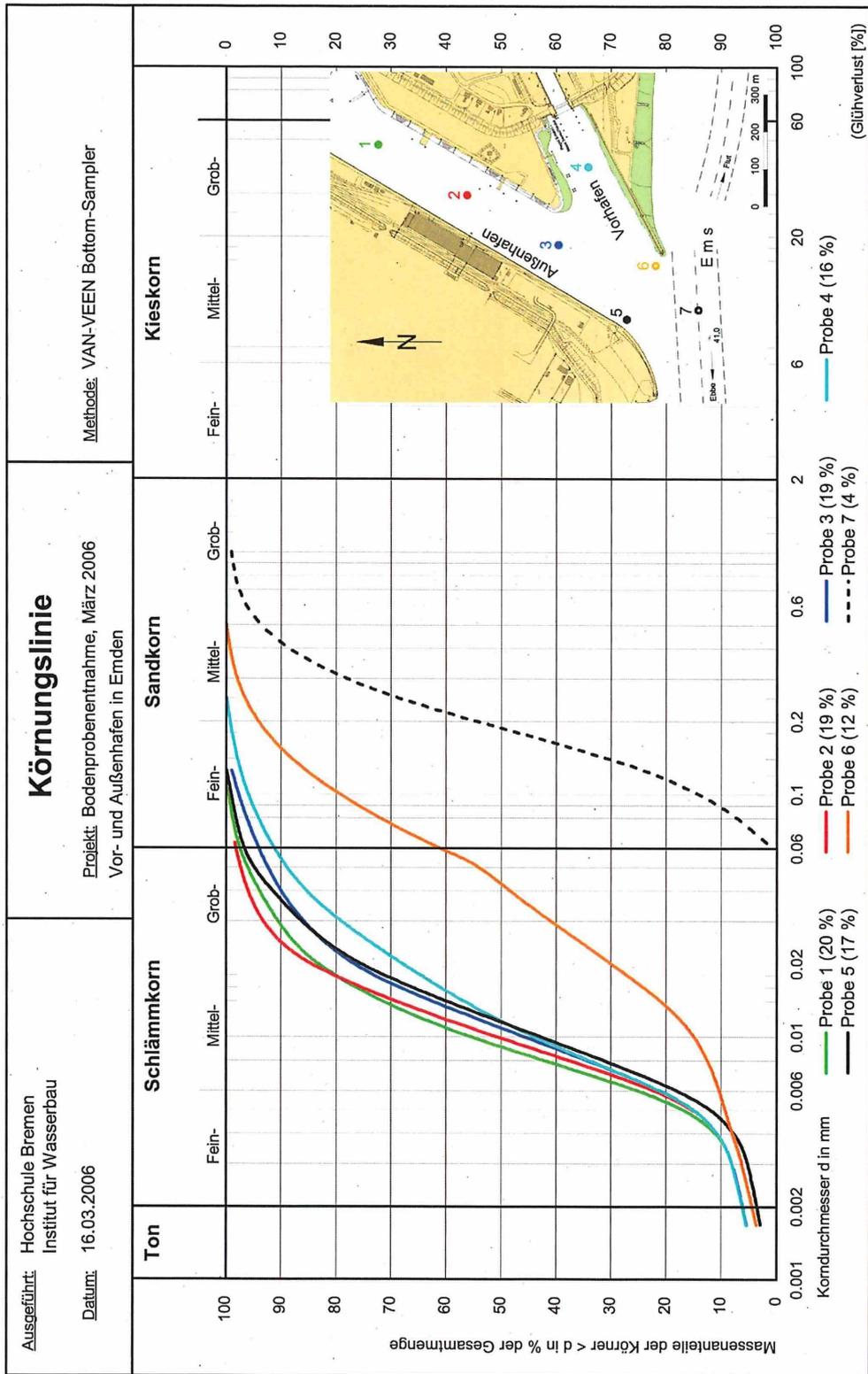


Abb. 76: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Emders Vor- und Außenhafens

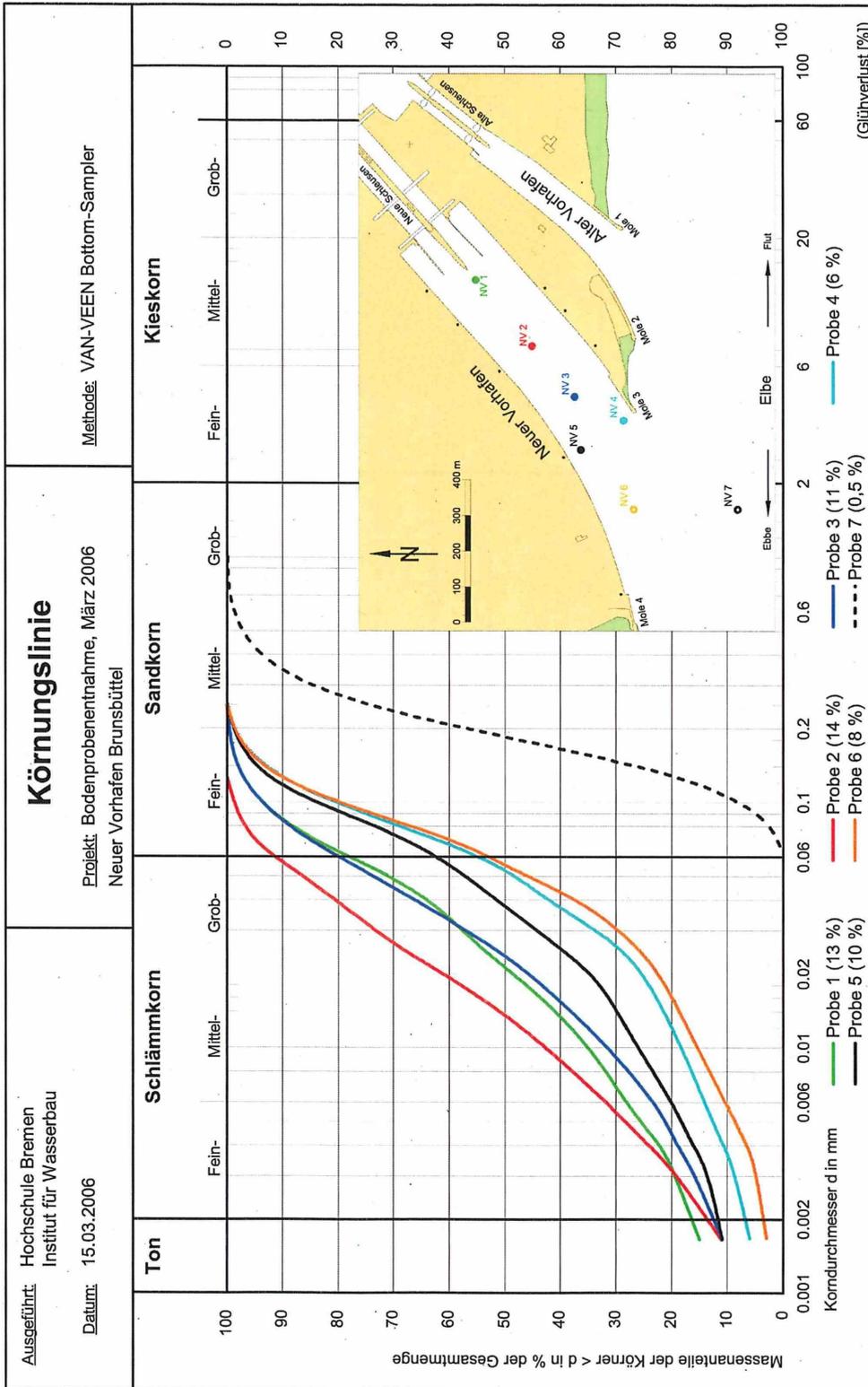


Abb. 77: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Neuen Vorhafens von Brunsbüttel

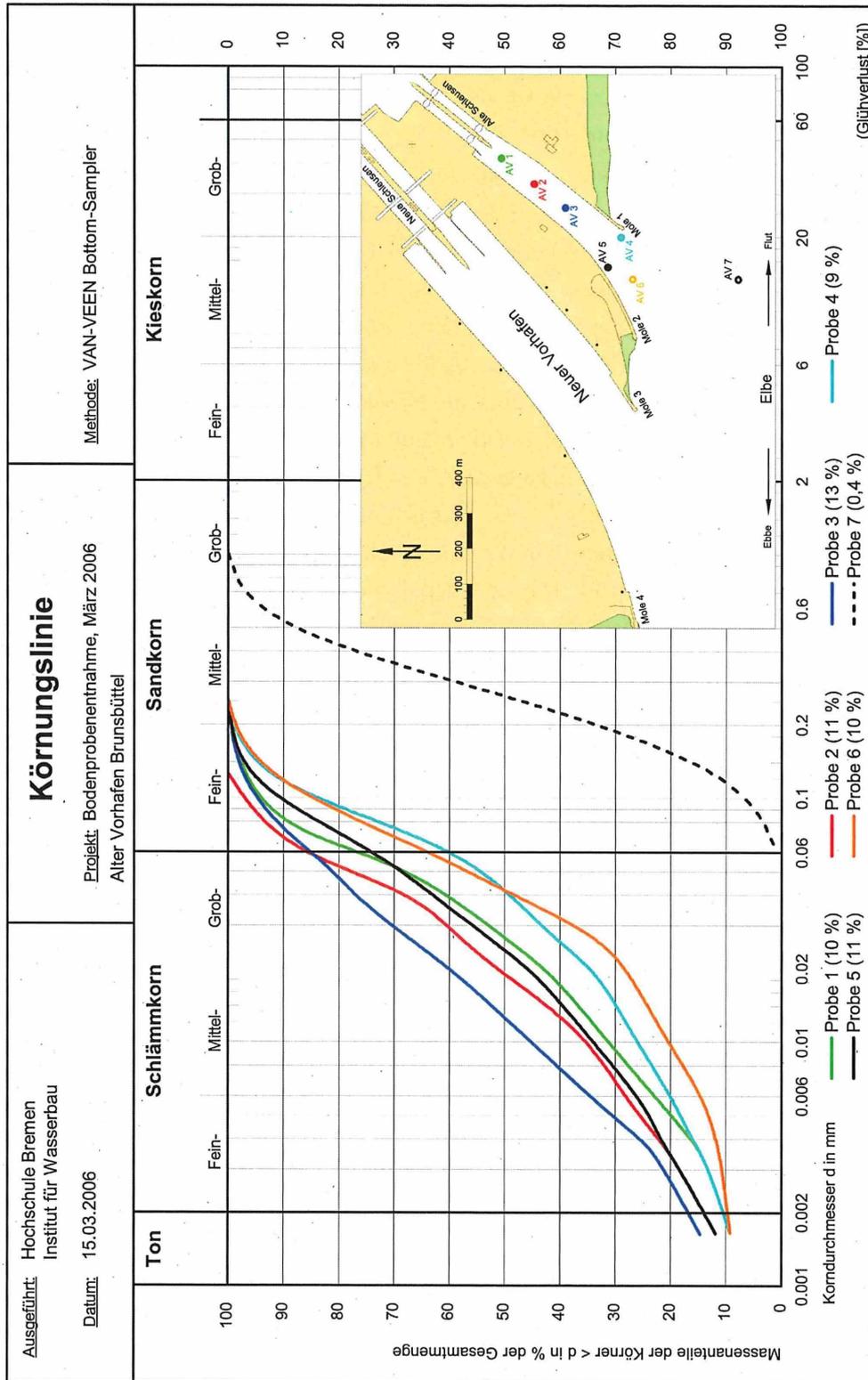


Abb. 78: Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Alten Vorhafens von Brunsbüttel

13% angetroffen (Proben 1 bis 3). Im Anströmbereich der Flutströmung (Pos. 6) und am Staupunkt (Pos. 4) wurden mit 30 bis 40% höhere Feinsandanteile ermittelt als an der Mole 2 (Pos. 5). Von der Elbsohle wurden auch vor dem Alten Vorhafen ausschließlich Sandkornfraktionen entnommen (Pos. 7).

In den strömungsberuhigten Zonen der Brackwasserhäfen lagern sich die in den Tideflüssen im Wasserkörper mitgeführten feinen Schwebstoffe ab. Die Bodenanalysen haben ergeben, dass mit den Flutstromwalzen auch Sandkornfraktionen in die Vorhäfen eingetragen und am Staupunkt abgelagert werden. Die komplexen Strömungsbedingungen begünstigen die Bildung von Sandbarren in den Hafeneinfahrten. Die Barren und dahinter tiefer liegende Vorhafensohlen sind eine gute Voraussetzung für die Bildung stabiler Flüssigschlickschichten. Selbst in der Einfahrt zur gegenüber der Weser 7 m höher ausgebauten Zufahrt der alten Kaiserschleuse bildet sich eine stabile Sandbarre aus. Dahinter bestand die Sohle zu rd. 60% aus Schlämmkorn. Die Erkenntnisse aus früheren BMBF-Vorhaben haben dazu geführt, dass die Barre im Vorhafen zur Nordschleuse mit Wasserinjektionen abgeflacht und ein Gefälle vom Außenhaupt zur Weser geschaffen wird. Damit kann die Bildung von Fluid Mud unterbunden werden. Die Bodenanalysen ergaben, dass an der Vorhafensohle zur Nordschleuse lediglich bis 40% Schlämmkornanteile angetroffen wurden.

## 7.3 Eigenschaften von Fluid Mud

### 7.3.1 Vorbemerkungen

Bei den Erläuterungen der Peilplananalysen wurde als Fluid Mud Menge das Differenzvolumen zwischen dem hoch- und niederfrequenten Echolotsignalen definiert. Oberhalb des hochfrequenten Echos erreichen Schwebstoffkonzentrationen Werte von bis zu  $C_s \approx 1$  bis  $2 \text{ g/l}$ , die noch mit einer Trübungssonde über die Lichtdurchlässigkeit bestimmt werden können.

Mit den hochfrequenten Signalen wird ein sprunghafter Übergang (Lutokline) zu höheren Feststoffkonzentrationen angezeigt. Die Eigenschaften der hochkonzentrierten Feststoffe und ihre Veränderungen zwischen dem hoch- und niederfrequenten Horizont wurden mit Probenentnahmen vor Ort und durch Laboranalysen ermittelt. Im einzelnen sind die Glühverluste  $GV$  [%], die Schwebstoffkonzentrationen  $C_s$  [g/l], die dynamischen Viskositäten  $\eta$  [Pa·s] und Dichten  $\rho$  [t/m<sup>3</sup>] von den einzelnen Proben ermittelt worden. Die ab 2006 durchgeführten Beprobungen mit einer Ruttner-Flasche von 50 cm Höhe und 5 kg Gewicht wurden im Labor mehrfach kontrolliert. Im Jahre 2005 wurden die Proben mit einer Saugflasche entnommen. Kritisch sind die von einer Ultraschallsonde gleichzeitig bei einem Einsatz in Bremerhaven registrierten Werte für die Schlickdichten zu bewerten. Sie waren erheblich geringer als die für die gleichen Tiefen im Labor bestimmten Werte. Der sprunghafte Übergang der Sedimentkonzentrationen wird mit der Probe vom 100 kHz Horizont im Alten Vorhafen von Brunsbüttel vom 31.10.2006 dokumentiert (Abb. 79).



Abb. 79: Ruttner-Probe aus der Lutokline im Alten Vorhafen von Brunsbüttel am 31.10.2006

Die Ruttner-Proben wurden bei gleichzeitig laufendem Echolotgerät von der oberen (an der Lutokline), mittleren und unteren Fluid Mud Schicht entnommen. Aus Abb. 80 gehen

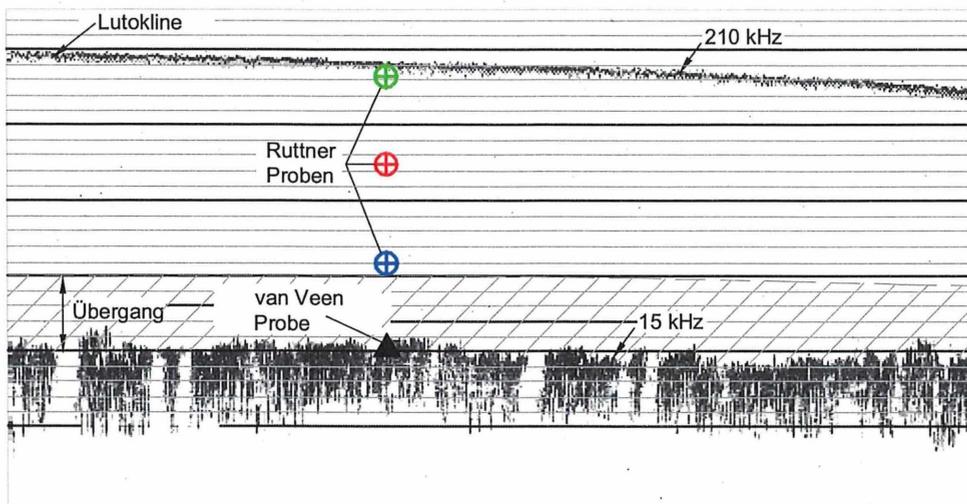


Abb. 80: Entnahmepositionen innerhalb der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emdrer Außenhafen)

die Entnahmepositionen hervor. Die maximale Eindringtiefe der 5 kg schweren Ruttner-Flasche lag in den Häfen bei 70 bis 80% der Frequenzdifferenzen. Abgeschlossen wurden die Profile mit einer Greiferprobe. Der mit Bleiplatten beschwerte Van-Veen-Greifer hat ein Gewicht von 12,5 kg, so dass er bis zum 15 kHz Horizont eindringt.

Abb. 81 zeigt eine Greiferprobe aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven.



Abb. 81: Bodenprobe aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 15.03.2006

Das feste Sohlenmaterial ist nicht mehr als schiffbar einzustufen. Im folgenden werden die Ergebnisse der Fluid Mud Untersuchungen in den Emdrer Vorhäfen, Vorhafen Bremerhaven

Doppelschleuse und den Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals in Brunsbüttel erläutert. In den Vorhäfen der Nord- und Kaiserschleuse sind die Fluid Mud Mengen starken Schwankungen unterworfen. Mit entsprechenden Unterhaltungsmaßnahmen – Beseitigung der Barre in der Einfahrt – kann die Entstehung von Flüssigschlick unterbunden werden. Außerdem hat das Sohlenmaterial der Zufahrten zu den Seeschleusen des Überseehafens in Bremerhaven höhere Sandanteile. Die Fließ- und Viskositätskurven verhalten sich dort dilatant und nicht strukturviskos.

### 7.3.2 Bremerhaven

Der Vorhafen zur Fischereihafenschleuse wurde insgesamt sechsmal beprobt. Die Ergebnisse sind in Abb. 82 nach der Jahreszeit geordnet aufgetragen. Bei den verschiedenen

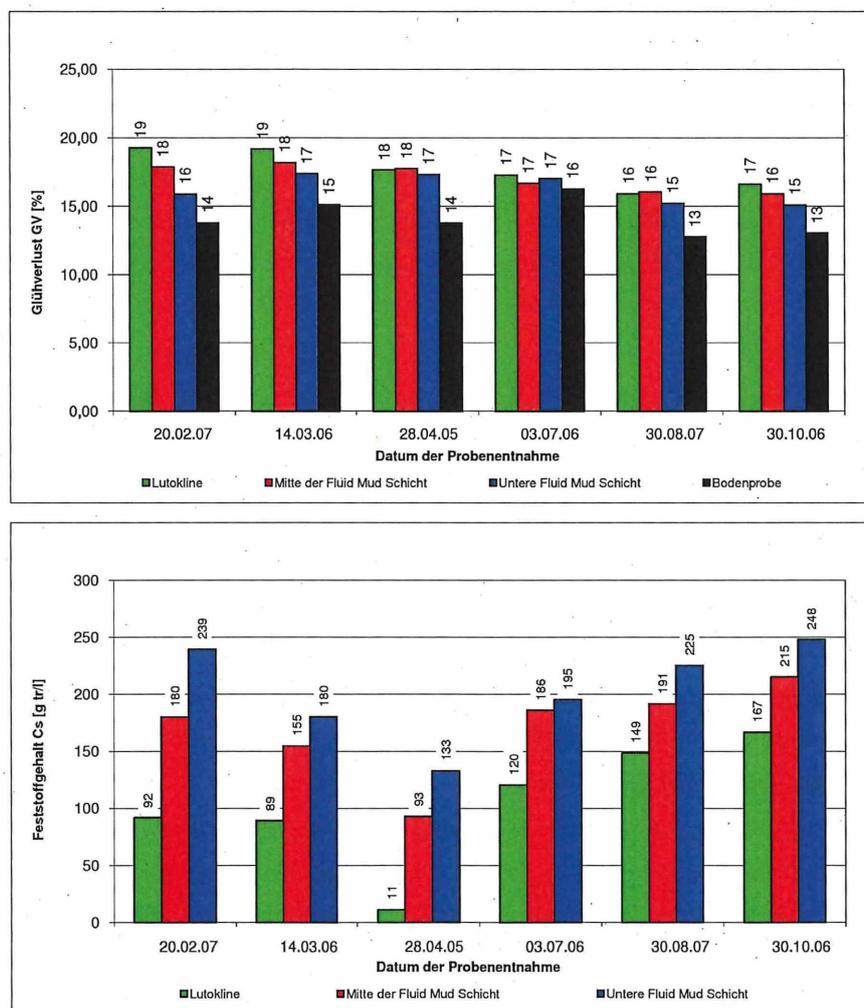


Abb. 82: Glühverluste und Feststoffgehalte im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven

Ergebnissen handelt es sich um Mittelwerte mehrerer Proben.

Die Proben zeichnen sich durch hohe organische, mit der Tiefe abnehmende Anteile aus. Die geringsten Glühverluste wurden in dem verfestigten, plastischen Material der Bodenprobe angetroffen. Insgesamt ist der Trend zu erkennen, dass die organischen Anteile der Proben in der ersten Jahreshälfte größer als in den Sommer- und Herbstmonaten sind (Abb. 82, oben).

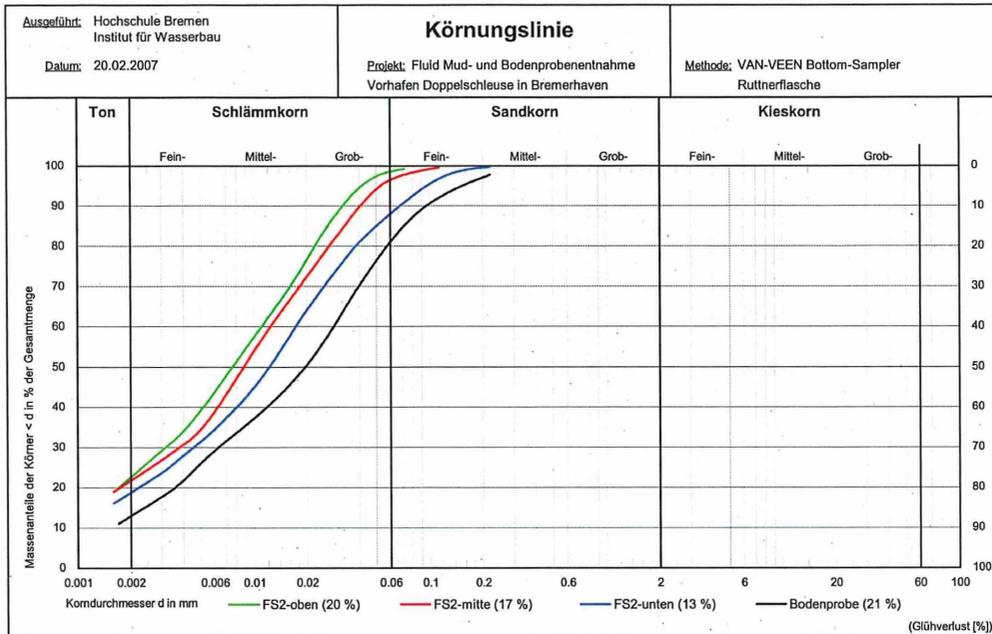
Das gleiche gilt für die Laboruntersuchungen der Feststoffgehalte. Dazu ist anzumerken, dass vor und während der Probenentnahmen im Februar 2007 und März 2006 vor der Doppelschleuse Wasserinjektionen durchgeführt worden sind, die in den mittleren und unteren Schichten höhere Feststoffkonzentrationen verursacht haben. Bei den Werten vom April 2005 können die geringeren Konzentrationen auch auf das andere Entnahmegerät zurückgeführt werden. Ein eindeutiger Trend ist in der zweiten Jahreshälfte vom Juli bis zum Oktober auszumachen (Abb. 82, unten).

Die rheologischen Untersuchungen der Schöpfer- und Bodenproben wurden im Labor des Niedersächsischen Hafenamtes Emden durchgeführt. Als Beispiel sind in Abb. 83 die mit dem Rheometer gewonnenen Ergebnisse von Proben aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven aufgetragen. Die Körnungslinien wurden von den mit der Ruttnerflasche entnommenen Proben von der Lutokline (grün) bis zur größtmöglichen Eindringtiefe (blau) und von der Greiferprobe in Abb. 83 dargestellt. Die relativ hohen Feinsandanteile an der Sohle und in der unteren Ruttnerprobe können auf zeitnah getätigte Wasserinjektionen zurückgeführt werden.

Die aus den drei Tiefen entnommenen Ruttnerproben weisen in Abb. 83 keine Fließgrenzen und nur geringe dynamische Viskositäten mit annähernd horizontalem Verlauf auf. Es handelt sich dabei noch um Flüssigkeiten mit Newton'schen Eigenschaften. Im Bereich der unteren Ruttnerprobe wird eine Übergangszone mit einem deutlich zähflüssigeren Medium erreicht. Bis zum 15 kHz Horizont nehmen die dynamischen Zähigkeiten sprunghaft zu. Mit  $\eta = 2354 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  ist die Viskosität tausendfach höher als bei der darüber entnommenen Ruttnerprobe mit  $\eta \approx 23 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (vgl. Abb. 83).

Die aus vier Beprobungen gebildeten mittleren Zähigkeiten weisen vom Februar zum Oktober keinen erkennbaren jahreszeitlichen Trend auf (Abb. 84, oben). Das gleiche ist für die im Labor bestimmten Dichten auszusagen (Abb. 84, unten).

Die Viskositäten betragen im Bereich des hochfrequenten Echolothorizonts  $\eta < 0,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , in der mittleren Ebene  $\eta \leq 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  und in der maximalen Entnahmetiefe mit der Ruttnerflasche  $\eta < 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Ein deutlich höherer Wert wurde im März 2006 mit  $\eta = 62 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  ermittelt. Die Fließgrenzen der Bodenproben liegen mit  $\eta = 3750 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  bis  $\eta = 64110 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  um ein Vielfaches höher (Abb. 84, oben). Im Bereich des 15 kHz Horizonts erreichen die Bodenproben Dichten von  $\rho \geq 1,2 \text{ t/m}^3$ . In den Häfen vieler Länder wird die nautisch nutzbare Tiefe eines Gewässers bei einer Dichte von  $\rho = 1,2 \text{ t/m}^3$  festgelegt (PIANC, 2008). Danach wäre die untere Probenebene mit der Ruttnerflasche bei  $\rho = 1,1 \text{ t/m}^3$  noch als schiffbar zu bezeichnen (blaue Balken in Abb. 84, unten).



FS2

Probenentnahme am: 20.02.2007

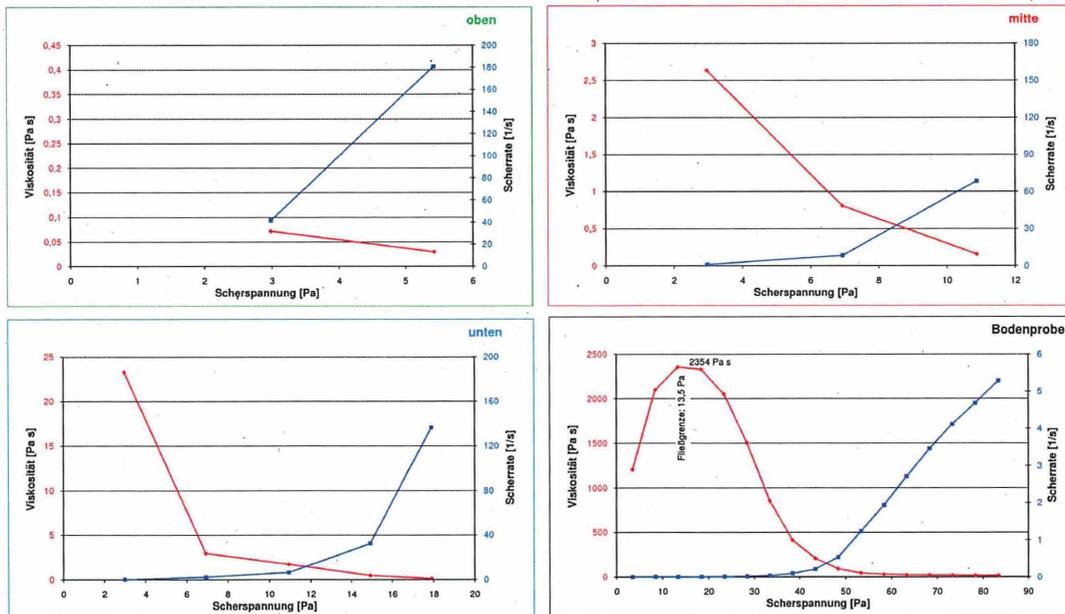


Abb. 83: Körnungslinien und Viskositäten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 20.02.2007 (Lage der Proben s. Abb. 75)

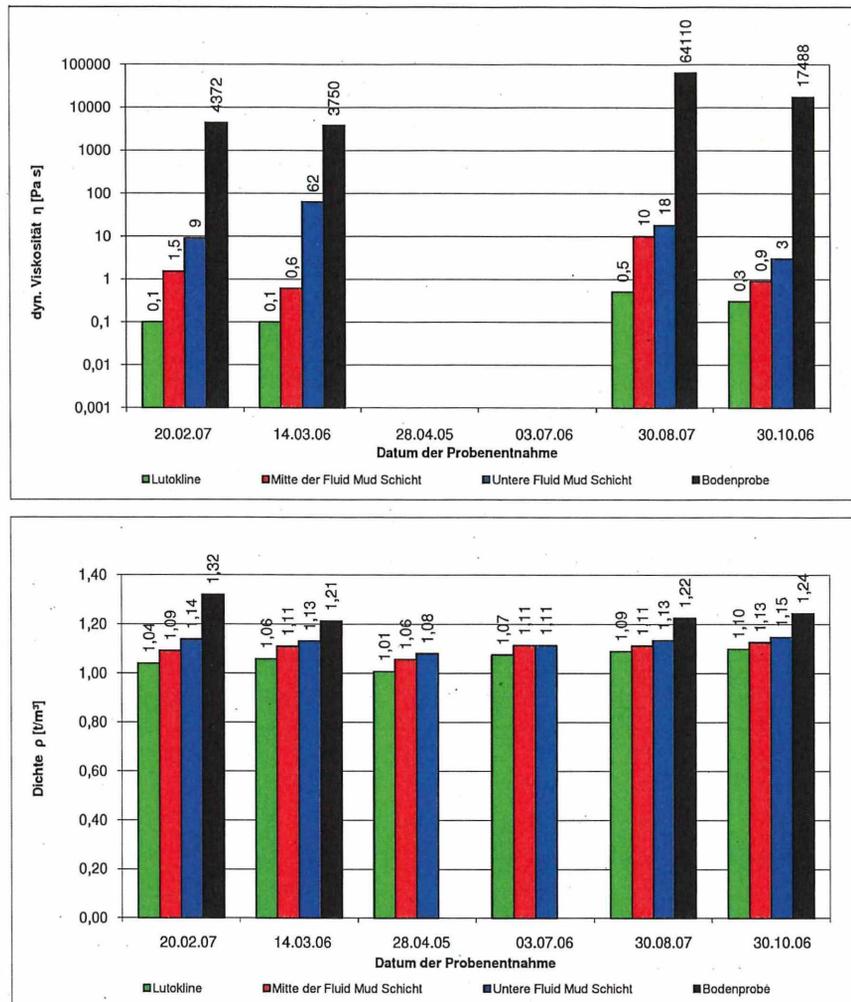


Abb. 84: Dynamische Viskositäten und Dichten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven

### 7.3.3 Emden

Die aus dem Vor- und Außenhafen in Emden entnommenen Ruttnerproben weisen ebenfalls in den Frühjahrsmonaten höhere organische Anteile auf als in der zweiten Jahreshälfte (Abb. 85, oben). Insgesamt gesehen wurden im Emdener Untersuchungsgebiet höhere Glühverluste ermittelt als in Bremerhaven (vgl. Abb. 82). Das liegt an einem in Emden entwickelten Baggerverfahren (WURPTS, 2003; WURPTS und TORN, 2005). Bei der in situ Behandlung (Konditionierung) wird das Baggergut im Laderaum des Saugbaggers durch die Luftberührung mit Sauerstoff angereichert. In Bremerhaven wird der verfestigende Flüssigschlück mit Wasserinjektionen wieder verflüssigt und dabei sauerstoffreicheres Wasser von der Oberfläche des Gewässers entnommen und damit der aerobe Zustand des Flüssigschlücks verbessert. Die beiden Verfahren werden alternativ zu konventionellen Baggermethoden seit mehr als 15 Jahren erfolgreich durchgeführt.

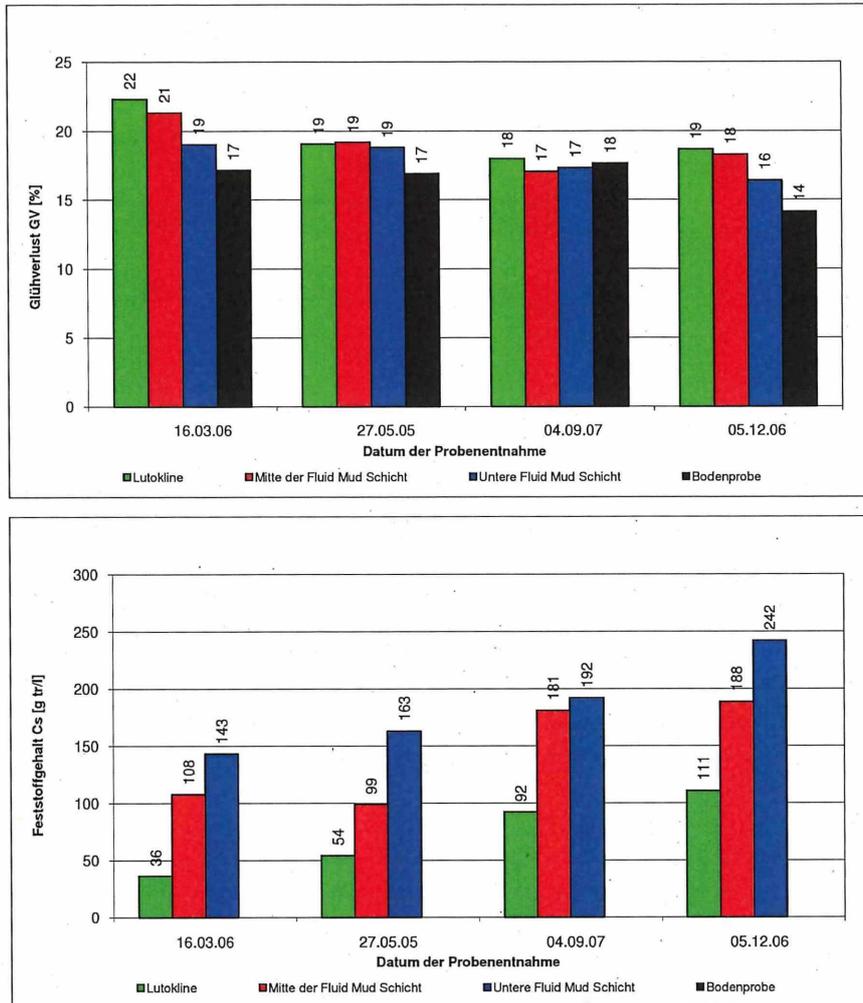
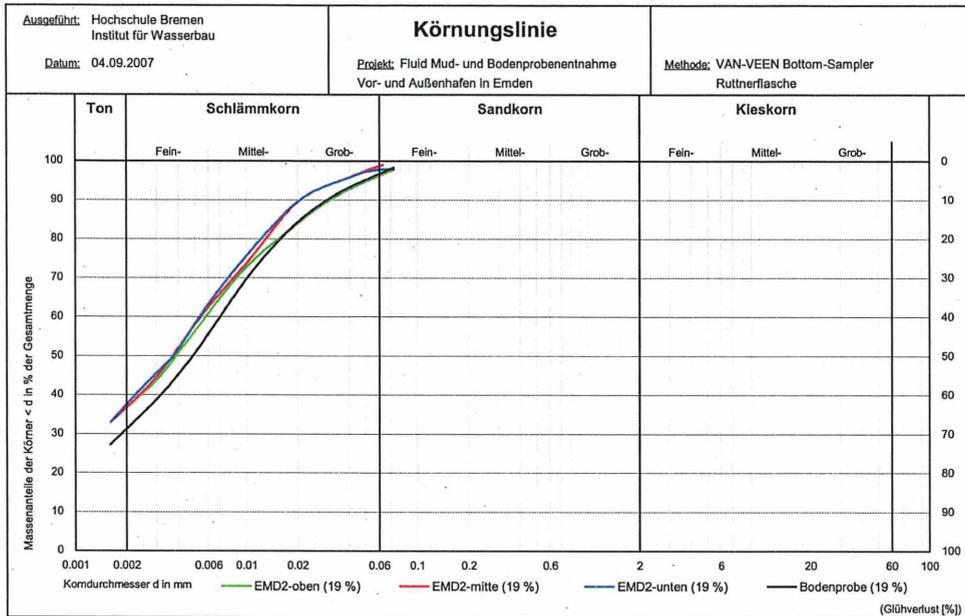


Abb. 85: Glühverluste und Feststoffgehalte im Emden Vor- und Außenhafen

Bemerkenswert ist die Zunahme der Feststoffgehalte in den Messebenen im Jahresverlauf im Emden Vor- und Außenhafen (Abb. 85, unten). Der Trend ist deutlicher als bei den vorstehend beschriebenen Ergebnissen für den Doppelschleusenvorhafen in Bremerhaven (s. Abb. 82). Wie angesprochen sind dort die relativ hohen Feststoffanteile auf zeitnah durchgeführte Wasserinjektionen zurückzuführen.

Das Ergebnis einer rheologischen Laboruntersuchung ist in Abb. 86 aufgetragen. Die eingezeichneten Körnungslinien zeigen die sehr feinen Schwebstoffe. Auch das mit dem Bodengreifer entnommene Sohlenmaterial besteht fast ausschließlich aus Schlammkorn und feinerem Material. Interessant sind auch die sich schneidenden Körnungslinien. Die Grobanteile der oberen Wasser- und der Bodenprobe sind etwa gleich (Abb. 86). Das folgt aus der in Emden ausgeführten Baggermethode, bei der die gesamte Wassersäule mit dem verflüssigten Baggergut angereichert wird. Als Ergebnis kommt es zu der an den Körnungslinien in Abb. 86 erkennbaren Vermischungen der feinen Feststoffteilchen (Abb. 86).



EMD2

Probenentnahme am: 04.09.2007

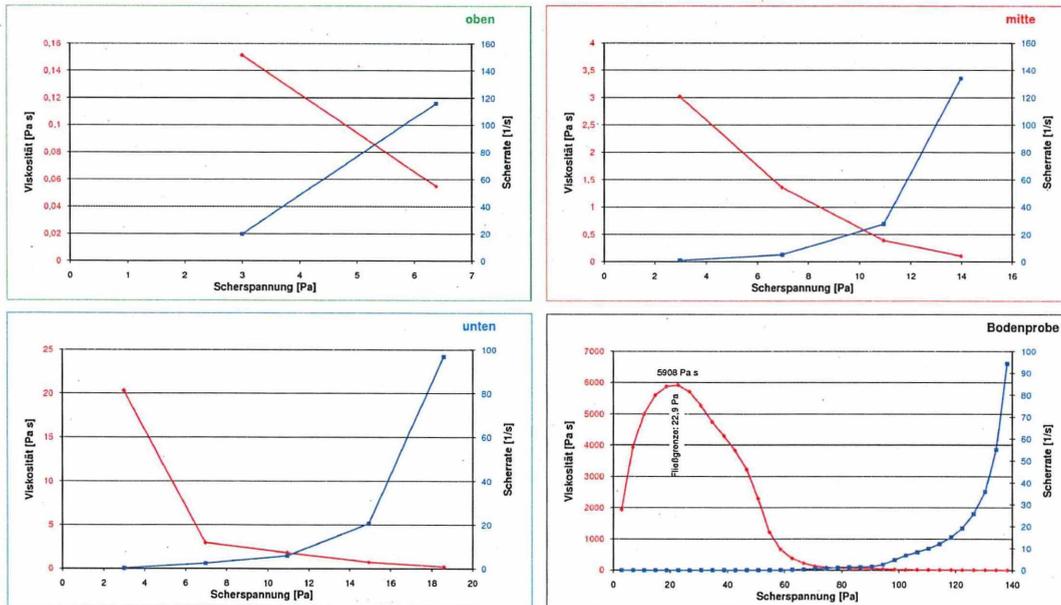


Abb. 86: Körnungslinien und Viskositäten im Vor- und Außenhafen in Emden vom 04.09.2007 (Lage der Proben s. Abb. 76)

Die Laborergebnisse dokumentieren die innerhalb der Wassersäule zunehmenden Zähigkeiten der Flüssigkeit. Danach haben die Ruttnerproben aus der oberen und mittleren Schicht noch annähernd Newton'sche Fließeigenschaften (Abb. 86). Mit der unteren Probe beginnt mit stärker ansteigender Viskosität die Übergangszone. Die Bodenprobe lag oberhalb der Fließgrenze, die am Rheometer bei rd. 6 kPa·s erreicht wurde.

Trotz der Feinkörnigkeit des Emders Sohlenmaterials ist es nicht homogen, so dass die im Labor bestimmten dynamischen Viskositäten entsprechende Schwankungen ergeben. In Abb. 87 sind deshalb die mittleren Werte der verschiedenen Beprobungen aufgetragen. Die

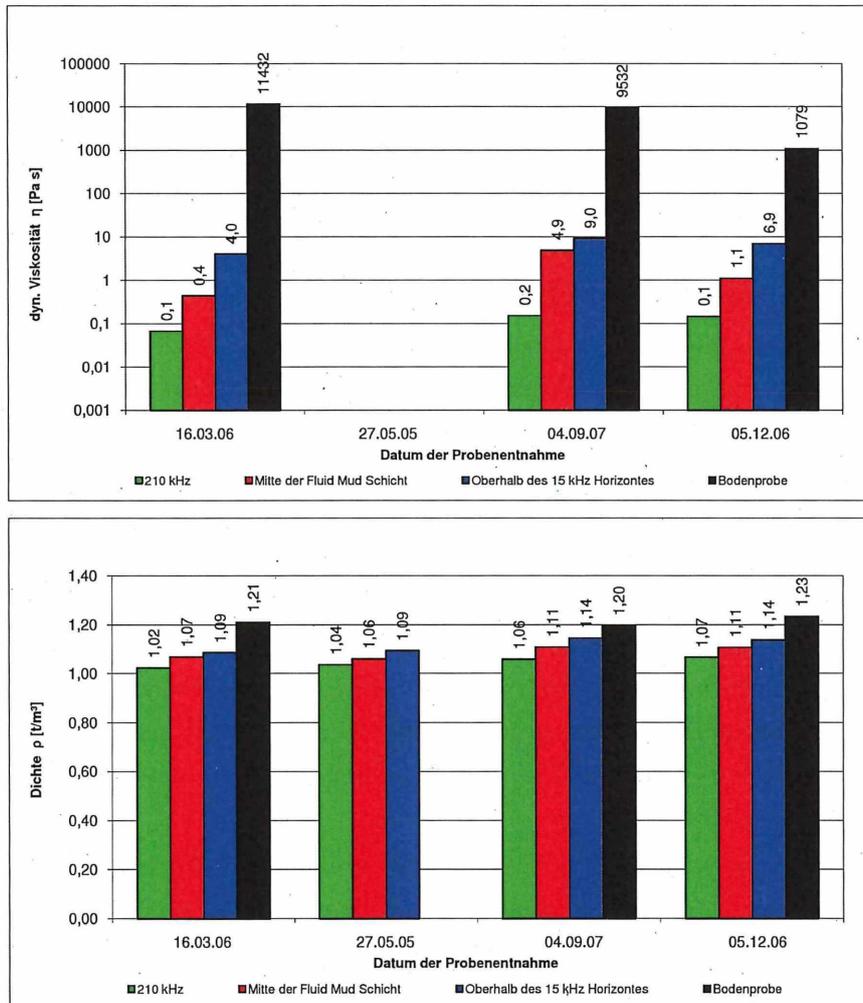


Abb. 87: Dynamische Viskositäten und Dichten im Emders Vor- und Außenhafen

Viskositäten der Flüssigproben mit der Ruttnerflasche weisen im September und Dezember insgesamt etwas höhere Werte auf als im März. Auch die Dichten sind in der zweiten Jahreshälfte etwas höher ( $\rho \leq 1,14 \text{ t/m}^3$ ) als im ersten Halbjahr ( $\rho \leq 1,10 \text{ t/m}^3$ ). Sowohl die dynamischen Viskositäten mit  $\eta < 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  als auch die Dichten der Flaschenproben

können als schiffbar eingestuft werden. Das gilt jedoch nicht mehr für die Bodenproben, für die Dichten von  $\rho \geq 1,2 \text{ t/m}^3$  und Zähigkeiten im Kilopascalbereich bestimmt wurden (1100 bis 11400 Pa·s). Oberhalb der Fließgrenze ist die Zähigkeit des verfestigten Schlicks mit  $\eta \geq 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  um sechs bis sieben Zehnerpotenzen höher als die von reinem Wasser ( $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ).

#### 7.3.4 Brunsbüttel

Die natürlichen Sedimentationsvorgänge werden in den Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals im Vergleich zu den Untersuchungsgebieten an der Weser und Ems sehr viel stärker durch betriebliche Vorgänge beeinflusst. Besondere Auswirkungen hat der sehr starke Schiffsverkehr durch den Seekanal. Außerdem ist anzumerken, dass bei Bedarf erhebliche Wassermengen aus dem Kanal durch den Alten Vorhafen zur Elbe abgegeben werden. Die erforderlichen Unterhaltungsmaßnahmen werden konventionell mit einem Laderaumsaugbagger durchgeführt. Das Baggergut wird einige Kilometer unterhalb in der Elbe umgelagert.

##### • Neuer Vorhafen Brunsbüttel

Die in Abb. 88 über das Kalenderjahr verteilten Glühverluste sind insgesamt etwas geringer als in den vorstehend beschriebenen Revieren an der Ems und Weser. Mit den Ruttnerproben wurde auch für den Neuen Vorhafen festgestellt, dass die Feinstoffe zum Frühjahr mehr organische Bestandteile haben als im Juli und September (Abb. 88). Die Beprobung von Ende Oktober 2006 fällt etwas aus dem Rahmen. Es ist denkbar, dass vorher organisch weniger aktives Material durch Baggerungen aus dem Vorhafen entfernt und Schwebstoffe mit höheren organischen Anteilen neu eingetragen wurden.

Mit Abb. 88 wird der an den anderen Tideflüssen beobachtete Trend bestätigt, dass die Feststoffgehalte in den verschiedenen Ebenen unterhalb des hochfrequenten Echolotsignals im Verlauf des Kalenderjahres ansteigen. Die kleine Unstimmigkeit bei der oberen Wasserprobe vom Mai 2005 ist auf die andere Entnahmemethode (Saug- anstatt Ruttnerflasche) zurückzuführen (Abb. 88).

Die in Abb. 89 eingetragenen Körnungslinien und dynamischen Viskositäten dokumentieren die Ergebnisse von Laboruntersuchungen für Beprobungen des Neuen Vorhafens im September 2007. Im Vergleich zu den Ruttnerproben weist die Entnahme mit dem Bodengreifer etwas gröberes Schlämmkorn mit rd. 10% Feinsandanteilen auf. Mit dem Rheometer wurden für die oberen Entnahmen noch sehr geringe Viskositäten bestimmt, die die guten Fließeigenschaften der Wasserproben bestätigen. Auch die Probe aus der unteren Wasserschicht war noch deutlich von einer Fließgrenze entfernt. Bei der Bodenprobe hatte die der Fließgrenze zuzuordnende Zähigkeit mit 37 kPa·s einen sehr hohen Wert.

Auch für den Neuen Vorhafen in Brunsbüttel weisen selbst die gemittelten dynamischen Viskositäten der Beprobungen starke Abweichungen aus (Abb. 90). Das gilt vor allem für die Entnahmen mit den Bodengreifer. Die Streuungen sind mit der inhomogenen Boden-

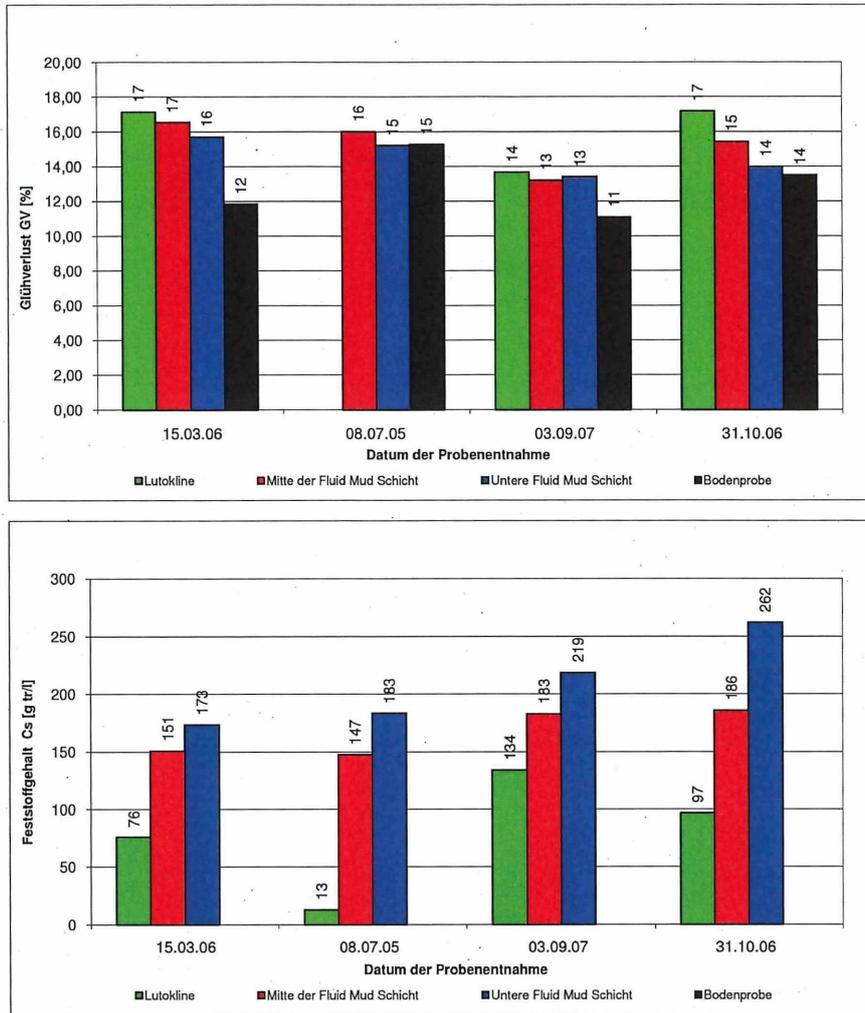


Abb. 88: Glühverluste und Feststoffgehalte im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel

zusammensetzung zu erklären und damit, dass mit dem Rheometer nur geringe Mengen (im Milliliterbereich) untersucht werden.

Erkennbar ist in Abb. 90 wie die Viskositäten der Ruttnerproben mit der Tiefe (grüne bis blaue Balken) langsam zunehmen. Auch in der unteren Wasserschicht wurden im Neuen Vorhafen lediglich Zähigkeiten zwischen  $0,7$  und  $9,9 Pa \cdot s$  festgestellt. Die für die Bodenproben an den Fließgrenzen ermittelten Werte sind erheblich höher. Sie streuen aber beträchtlich, wie aus Abb. 90 zu ersehen ist. Das Ergebnis vom März 2006 ist dennoch als „Ausreißer“ zu betrachten, obwohl der geringere Wert für die Bodenprobe mit  $\eta = 346 Pa \cdot s$  etwa 500 mal so hoch ist wie der der unteren Flüssigprobenentnahme von  $\eta = 0,73 Pa \cdot s$ .

Die eingetragenen Dichten in Abb. 90 weisen für die Bodenproben Werte von  $\rho \approx 1,2$  bis  $1,3 t/m^3$  aus, die in Übereinstimmung mit dem Schrifttum als nicht mehr schiffbar ein-



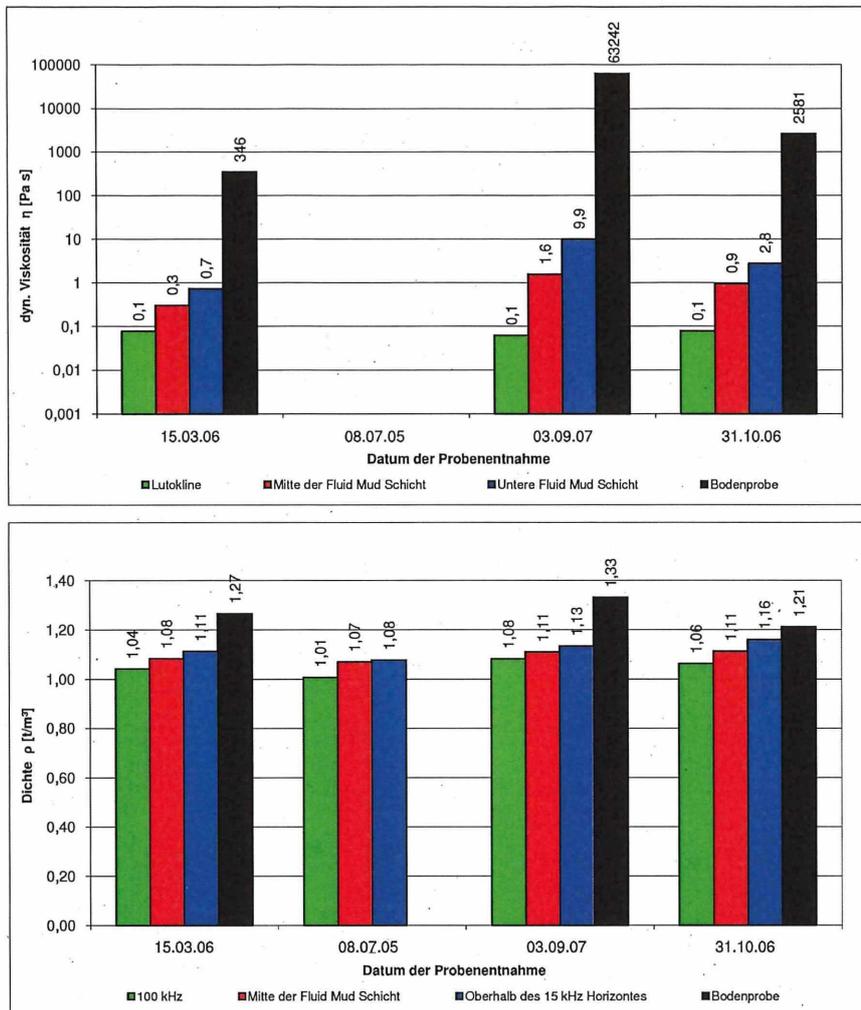


Abb. 90: Dynamische Viskositäten und Dichten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel

zustufen sind. Alle Ruttner Proben liegen deutlich unter diesen Werten.

- **Alter Vorhafen Brunsbüttel**

Die Glühverluste für den Alten Vorhafen dokumentieren in Abb. 91 (oben), wie bei allen anderen Untersuchungsgebieten, wie die organischen Anteile der Feststoffe von dem hochfrequenten Echo (grün) bis zur Sohle (schwarz) abnehmen. Vom März bis zum September zeigt sich bei den Ruttnerproben ebenfalls die abnehmende Tendenz der Glühverluste. Wie im Neuen Vorhafen wurden im Oktober 2006 höhere Werte gemessen als im September 2007. Bei den zugehörigen Feststoffgehalten ist es umgekehrt (Abb. 91, unten). Die geringeren Mengen im Juli 2005 sind auf die andere Entnahmeart zurückzuführen.

Die Körnungslinien der Ruttnerproben in Abb. 92 stimmen mit denen im Neuen Vorhafen annähernd überein (vgl. Abb. 89). Das ist selbstverständlich, da es sich in beiden Fällen um Schwebstoffe handelt, die von der Elbe in die benachbarten Vorhäfen transportiert wurden,

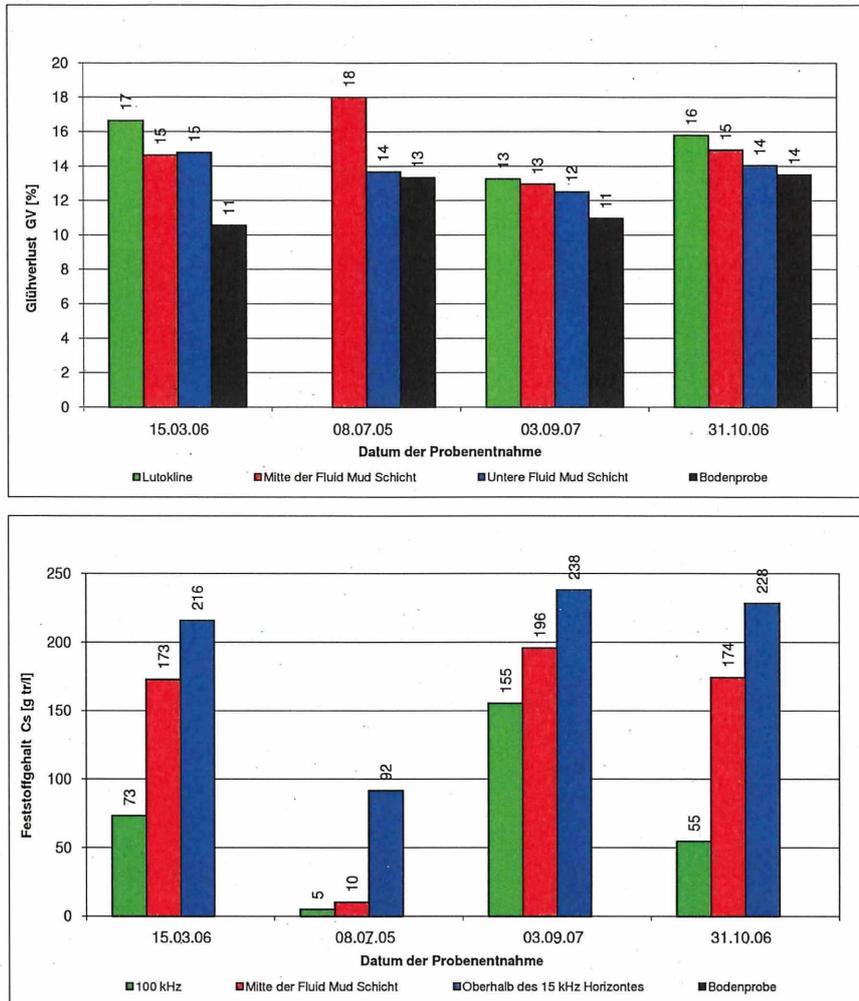
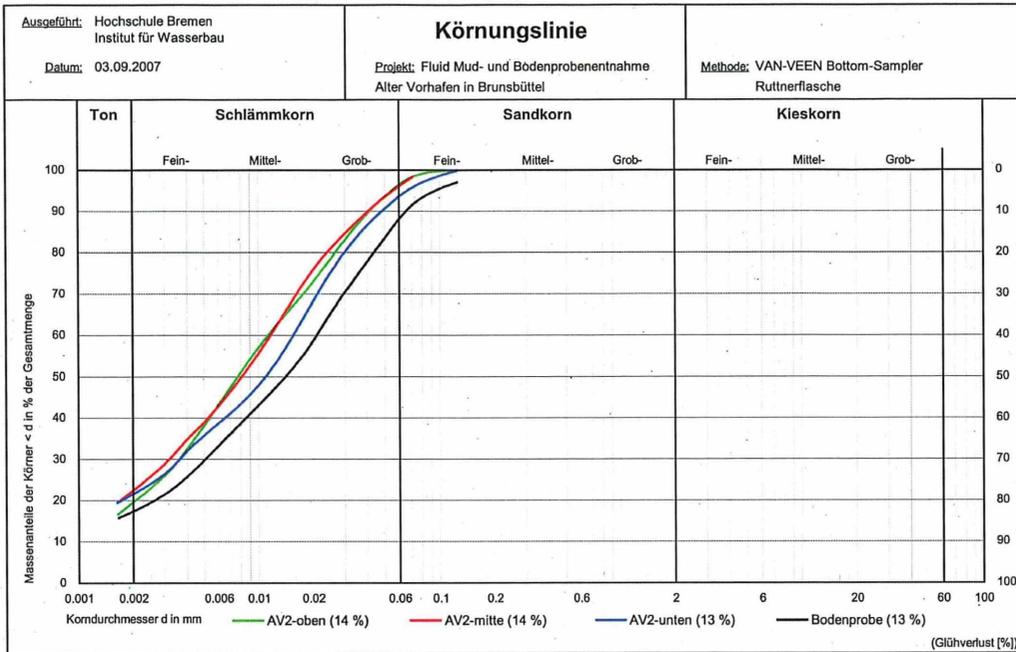


Abb. 91: Glühverluste und Feststoffgehalte im Alten Vorhafen von Brunsbüttel

sich dort absetzen und langsam verfestigen. Deshalb ähneln sich auch die Körnungslinien der Bodenprobe (vgl. Abb. 92 und Abb. 89).

Bemerkenswert sind die geringen dynamischen Viskositäten der Ruttnerproben in allen Ebenen. Auch das ist ein Hinweis darauf, dass zeitnah vor dem Messeinsatz Baggerungen und Materialumlagerungen durchgeführt worden sind. Bei den Proben handelt es sich damit um frisches aus der Elbe eingetriebenes, noch nicht abgesetztes Material. Die entnommene Bodenprobe hatte viskoelastische Eigenschaften. Die Fließgrenze wurde im Labor mit  $\eta = 4311 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  festgestellt. Die zugehörige Dichte betrug  $\rho = 1,2 \text{ t/m}^3$ .

Bei allen Beprobungen des Alten Vorhafens lagen die dynamischen Zähigkeiten der Bodenproben an der Fließgrenze zwischen  $\eta \approx 1 \text{ bis } 25 \text{ kPa} \cdot \text{s}$  und die zugehörigen Schlickdichten zwischen  $\rho \approx 1,2 \text{ bis } 1,3 \text{ t/m}^3$  (Abb. 93). Damit ist die Schiffbarkeit und Manövrierfähigkeit von Schiffen wegen zu hoher Dichten und Zähigkeiten im Bereich des 15 kHz Horizonts



AV2

Probenentnahme am: 03.09.07

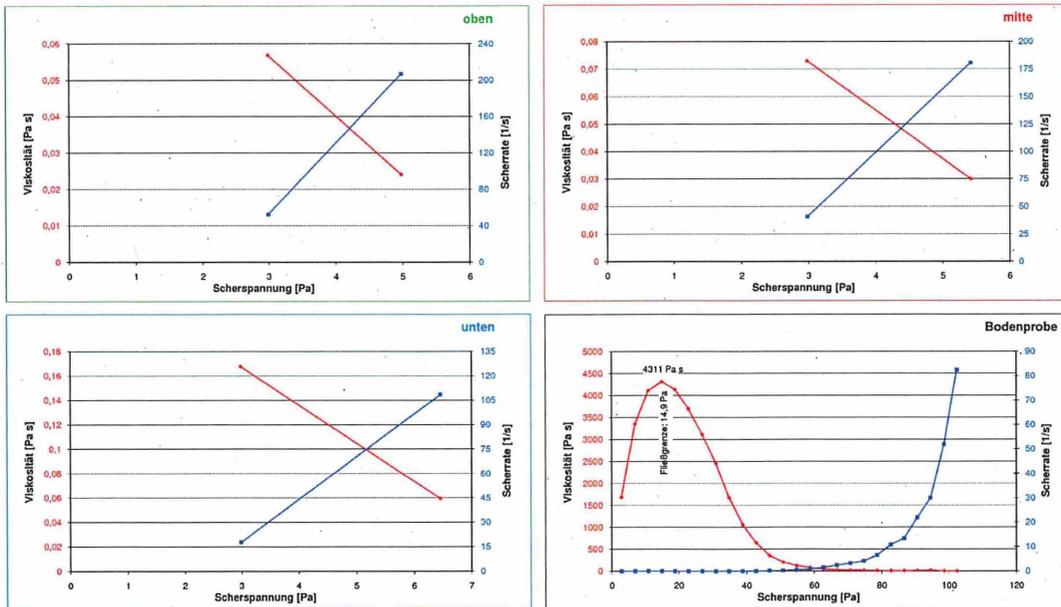


Abb. 92: Körnungslinien und Viskositäten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.2007 (Lage der Proben s. Abb. 78)

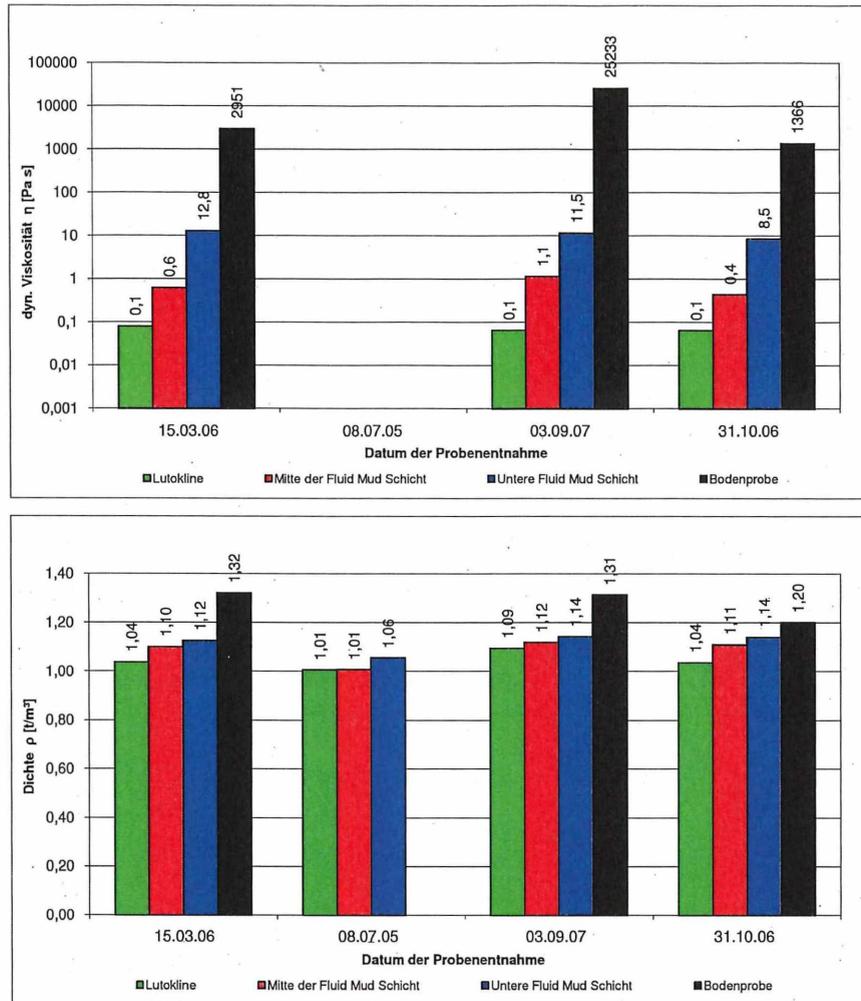


Abb. 93: Dynamische Viskositäten und Dichten im Alten Vorhafen von Brunshüttel

nicht mehr gewährleistet.

Für die Ruttnerproben aus der oberen und mittleren Entnahmeebene wurden Viskositäten bis zu  $\eta \approx 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  und Dichten von  $\rho \leq 1,11 \text{ t/m}^3$  ermittelt (Abb. 93). Die Viskositäten und Dichten sind so gering, dass das Fließverhalten mit dem von reinem Wasser vergleichbar ist. Es handelt sich um den Gesetzen der Schwerkraft folgende Newton'sche Flüssigkeiten. Der Übergang, bei dem die Newton'schen Eigenschaften nicht mehr maßgebend sind beginnt in der unteren Entnahmeebene der Ruttnerproben. Dort wurden im Alten Vorhafen Zähigkeiten von  $\eta \approx 9 \text{ bis } 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  festgestellt.

DASCH und WURPTS (1999) berichten über Untersuchungen im Emden Außenhafen, dass bei etwa  $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  der Schlick eine Konsistenz erreicht, „dass er nicht mehr ohne weiteres aus einem Behälter herauszukippen war“.

## 7.4 Zusammenfassende und ergänzende Anmerkungen

Mit Peilplananalysen wurden für die verschiedenen Reviere die Differenzen und das Volumen von doppeltfrequenten Peilungen ermittelt. In erster Näherung wurden die Abstände der Echolothorizonte als Flüssigschlickstärken und die daraus ermittelten Volumen als Fluid Mud Mengen bezeichnet.

Eine Voraussetzung für die Bildung von Flüssigschlick in Brackwasserhäfen sind Sandbarren in den Hafeneinfahrten. Die hinter den Barren tiefer gelegenen Vorhafensohlen begünstigen die Entstehung und Konsolidierung von Flüssigschlick.

Nach den Erkenntnissen aus dem BMBF-Vorhaben 03 KIS 019 wird bei der gegenüber dem Weserfahrwasser um 4 m höher gelegenen Zufahrt zur Nordschleuse die Barre in der Einfahrt bei Bedarf mit Wasserinjektionen abgeflacht. Durch das Sohlgefälle vom Außenhaupt der Schleuse zur Weser werden die während der Flut sohlennah einwärts gerichteten Dichteströmungen gemindert und die während der Ebbe auswärts gerichteten Sohlströmungen verstärkt. Die Bildung von Fluid Mud kann damit unterbunden werden (vgl. Abb. 65). Diese Unterhaltungsmethode wurde später auch im Vorhafen zur Kaiserschleuse angewandt. Wegen der geänderten Unterhaltungsmethoden in den nördlichen Seehafenzufahrten von Bremerhaven wurden dort nur noch geringe Fluid Mud Mengen und stärkere Feinsandanteile mit entsprechend hohen Dichten bei Bodenproben festgestellt.

Die Peilplananalysen haben gezeigt, dass der Flüssigschlick, dem Gefälle des niederfrequenten Echolothorizonts folgend, in größeren Tiefen stärkere Schichten bildet. Bei ungünstigen Randbedingungen können die Schwebstoffe über die Seeschleusen bis in die abgeschleusten Hafenbereiche gelangen (vgl. Abb. 64). Auch in Emden werden große Feststoffmengen aus dem Vorhafen über die Seeschleuse in den Binnenhafen transportiert. Die Stärke der Fluid Mud Schichten ist dabei jeweils von der Tiefe des niederfrequenten Signals abhängig. Das dokumentieren die für die einzelnen Reviere in Abschnitt 7.1 dargestellten Längsprofile.

Die langsame Konsolidierung der aus den Tideflüssen eingetragenen Schwebstoffe findet in den strömungsberuhigten Zonen der Vorhäfen statt.

Mit den in Abschnitt 7.2 dargestellten Körnungslinien wird dokumentiert, dass außerhalb der Vorhäfen, in den angrenzenden Tideflüssen, aufgrund ganz anderer Strömungsbedingungen überwiegend gröberes, aus Sandkorn bestehendes, Material anzutreffen ist. Die Glühverluste sind um so höher je stärker der Schluffkornanteil der Proben ist. Die lediglich aus Sandkorn bestehenden Greiferproben haben sehr geringe organische Anteile.

Der Umwandlungsprozess vom stark schwebstoffhaltigen Wasser zum Flüssigschlick bis zum nicht mehr flüssigen Boden wurden mit Beprobungen zwischen den hoch- und niederfrequenten Echolothorizonten erforscht.

Die in den verschiedenen Revieren erzielten Untersuchungsergebnisse werden im folgenden mit den Beprobungen vom Frühjahr und Herbst 2006 zusammengefasst (Abb. 94).

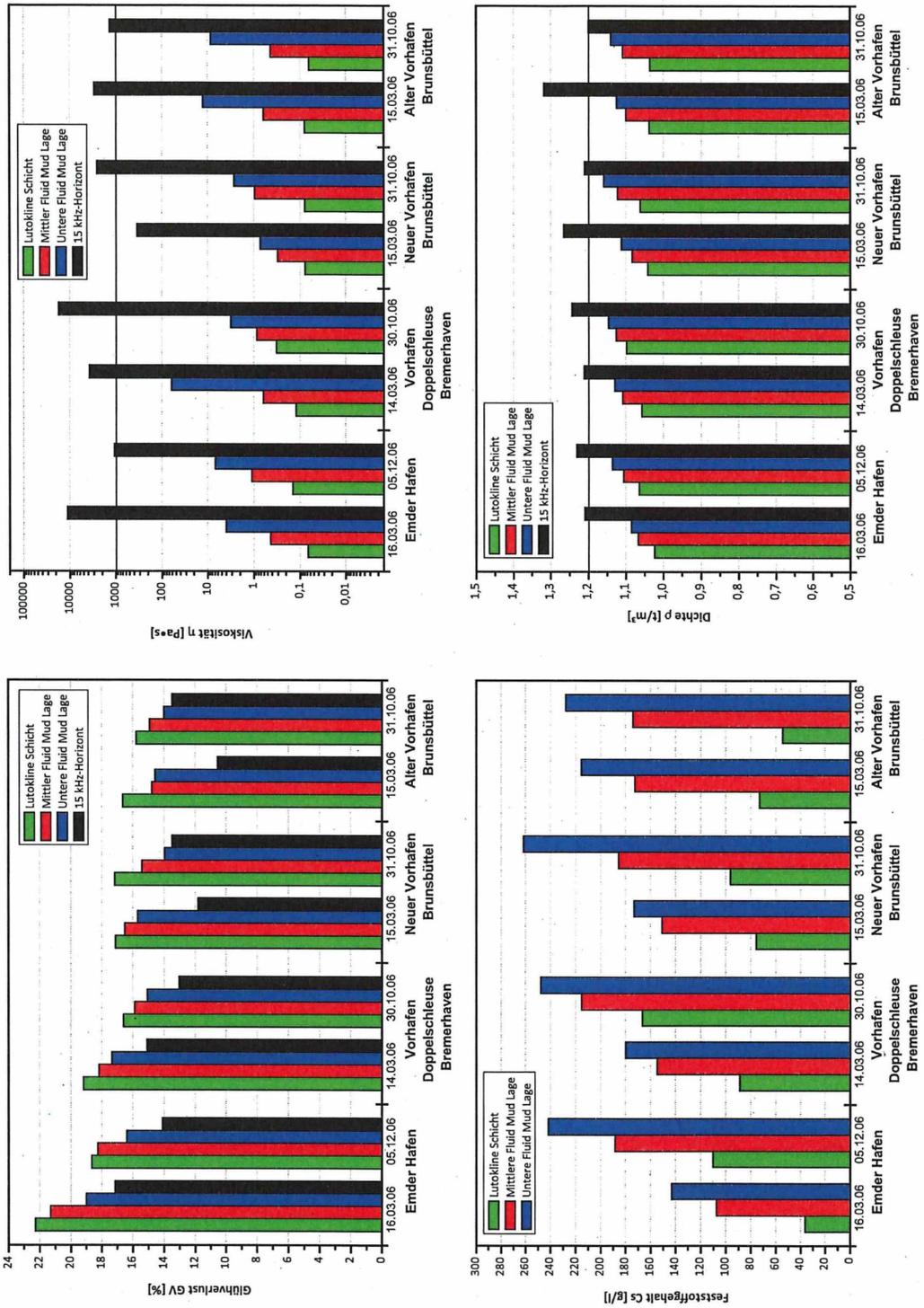


Abb. 94: Eigenschaften von Flüssigschlack in den verschiedenen Brackwasserhäfen

Die Flüssigschlickproben aus den Brackwasserhäfen zeichnen sich durch hohe Glühverluste aus (Abb. 94, oben links). Im Herbst sind die organischen Anteile geringer als in der biologisch aktiveren Jahreszeit. Die Unterschiede sind in Emden und Bremerhaven deutlicher als in Brunsbüttel. Das kann auf die dort stärkeren betrieblichen Einflüsse zurückgeführt werden. Neben dem sehr starken Schiffsverkehr, der Entwässerung des Nord-Ostsee-Kanals in den Alten Vorhafen, sind die konventionellen Baggertätigkeiten zu nennen. Damit wird Baggergut in größeren Mengen aus den Vorhäfen ausgeräumt und umgelagert.

Im Übrigen spielen neben den saisonalen Einflüssen auch die Baggertätigkeiten bei der Beurteilung der Glühverluste für die Bodenproben (schwarze Balken in Abb. 94) eine Rolle. Aus den Bodenanalysen ist bekannt, dass die Glühverluste mit dem Anteil der Schlämmerkornfraktionen korrelieren. So waren in Emden und Bremerhaven die Feinsandanteile der Bodenproben im März geringer als bei den Beprobungen im Herbst 2006. Das hat zusätzlich zu den höheren organischen Anteilen geführt.

Im Neuen und Alten Vorhafen von Brunsbüttel wurden im Oktober bei den Bodenproben (schwarze Balken in Abb. 94) höhere Glühverluste festgestellt als im März 2006. Im Alten Vorhafen war der Feinsandanteil mit im Mittel 29% im März etwa doppelt so hoch wie im Herbst. Auch im Neuen Vorhafen waren im Herbst größere Schlämmerkornanteile zu finden als im Frühjahr. Die veränderten, auf betriebliche und unterhaltungstechnische Ursachen, zurückzuführenden unterschiedlichen Sohlenverhältnisse haben 2006 in Brunsbüttel offenbar bei den Bodenproben über die saisonalen Einflüsse dominiert. Die noch nicht konsolidierten Ruttnerproben weisen auch für die Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in der späteren Jahreszeit geringere organische Anteile auf. Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen ein Trend zu höheren Glühverlusten in der ersten Jahreshälfte für die Ruttner- und Bodenproben gezeigt. Die mit der Tiefe zunehmenden Feststoffgehalte der Wasserproben sind im Frühjahr in allen Schichten geringer als im Herbst, wie es die Beispiele in Abb. 94 (links unten) zeigen.

Sämtliche aus dem Bereich des niedrigen 15 kHz Horizonts gezogenen Bodenproben waren nicht flüssig. Bis auf das eine in Abb. 94 (rechts) dargestellte Ergebnis vom 15. März 2006 für den neuen Vorhafen Brunsbüttel betragen die mit dem Rheometer ermittelten mittleren dynamischen Viskositäten  $\eta > 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . In diesem Zusammenhang sei nochmals erwähnt, dass die Viskositätsanalysen mit dem Rheometer vor allem bei den Bodenproben erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Genauer sind die im Labor bestimmten Dichten der Bodenproben, die bei allen Revieren Werte von  $\rho > 1,2 \text{ t/m}^3$  ergeben haben. Damit ist der 15 kHz Horizont als nicht mehr schiffbar auszuweisen. Das gilt sowohl für die dynamischen Zähigkeiten als auch für die Dichte des dort anstehenden verfestigten Schlicks.

Die Ruttnerprobe unterhalb der Lutokline (grüne Balken) und aus der mittleren Fluid Mud Lage (rote Balken) weisen noch sehr geringe Viskositäten von  $\eta \leq 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  und Dichten von  $\rho < 1,15 \text{ t/m}^3$  auf. Es handelt sich dabei um Flüssigkeiten mit noch annähernd

Newton'schen Eigenschaften, die als schiffbar eingestuft werden können.

Merklich zähere Eigenschaften haben die Flaschenproben aus der unteren Ebene in der die dynamischen Zähigkeiten vereinzelt Werte von  $\eta > 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  und  $\rho > 1,15 \text{ t/m}^3$  erreicht haben. Dort beginnt der Übergang zu dem nicht Newton'schen Fließverhalten und einer Übergangszone zum nicht mehr schiffbaren Bereich. Die untere Entnahmeebene mit der Ruttnerflasche lag bei 70 bis 80% der Fluid Mud Stärke (d) (Abb. 95).

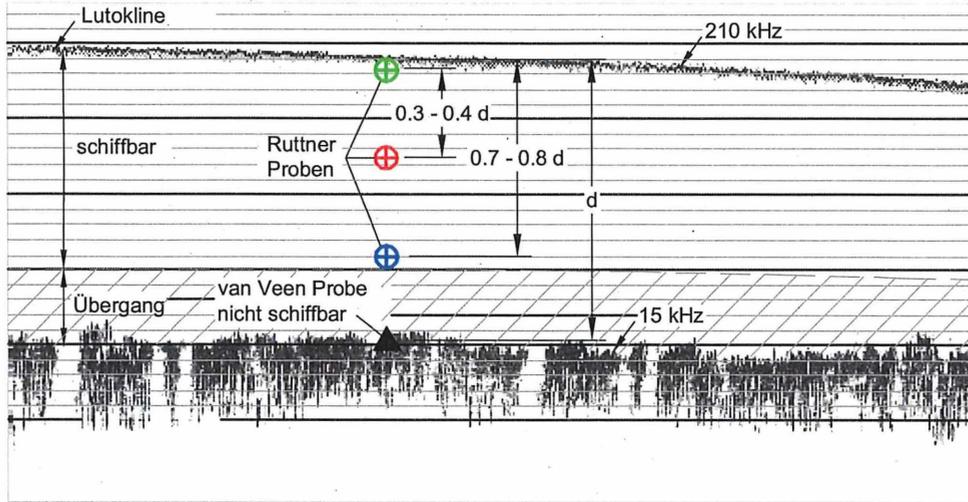


Abb. 95: Entnahmepositionen in verschiedenen Tiefen in der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emdrer Außenhafen)

## 8 Schlussbemerkungen

Die hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Ems und Weser wurden mit dem vom BMBF geförderten KFKI Projekt 03 KIS 019 untersucht. Damit wurde die Grundlage für ein gleichzeitig durchgeführtes kooperatives Forschungsvorhaben am Franzius-Institut der Universität Hannover für numerische Modelluntersuchungen geschaffen (BMBF 03 KIS 020).

Mit diesem BMBF Projekt 03 KIS 051 „Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud in Brackwasserhäfen“ waren die Messungen in der Natur zu erweitern.

Im einzelnen waren Strömungsmessungen in den an die Vorhäfen angrenzenden Tideströmen durchzuführen. Außerdem waren noch der Vorhafen zur Doppelschleuse in Bremerhaven und die Vorhäfen des Nord-Ostsee-Kanals in Brunsbüttel messtechnisch zu erfassen.

Zusätzlich waren in den verschiedenen Revieren die mit der Tiefe veränderlichen Fluid Mud Eigenschaften wie Dichte, Zähigkeit, Feststoffgehalt und organischer Anteil von Interesse. Nach Abschluss dieses vom BMBF geförderten KFKI-Projekts 03 KIS 051 liegen für die brackwasserbeeinflussten Vorhäfen an der Ems, Weser und Elbe große Datenmengen vor, die für eine verbesserte Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit von numerischen Modelluntersuchungen dienen können. Die Ergebnisse aus diesem Vorhaben werden in den vom BMBF geförderten Projekten 03 KIS 065 „Erweiterung eines morphodynamisch-numerischen Simulationsmodells zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (Fluid Mud) im Bereich der deutschen Nordseeküste und der angrenzenden Ästuar- und Tideflüsse“, Institut für Wasserbau der Universität Darmstadt und 03 KIS 066/067 „Beschreibung der Dynamik (Entstehung, Entwicklung und Transport) von Flüssigschlick auf der Grundlage der physikalischen Prozesse und deren mathematische Implementation zum Sedimentmanagement in Küstengewässern“, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Hamburg und Universität der Bundeswehr München (Hydromechanik und Wasserbau) bereits für numerische Betrachtungen verwendet.

Die grundlegenden hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge in den Brackwasserhäfen der Tideflüsse Ems, Weser und Elbe sind allgemein gültig. Das gilt z. B. für die Flutstromdominanz in den Tideflüssen oder positiven Feststoffbilanzen der Vorhäfen. Die Strömungs- und Dichteeffekte haben in den Vorhäfen ebenfalls das gleiche Verhaltensmuster. Das gilt auch für die daraus resultierenden unterschiedlichen Kornverteilungen, der sich in den Vorhäfen und Einfahrtsbereichen absetzenden Sedimente.

Die Eigenschaften von Fluid Mud wie z. B. Feststoffkonzentration und organischer Anteil sind jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Flüssigschlick entsteht in strömungsberuhigten Vorhafenbereichen. Gute Voraussetzungen bilden die hinter Barren in den Hafeneinfahrten liegenden Wannsen. Der Flüssigschlick entsteht aus den mit der Tideströmung in die Vorhäfen eingetragenen Schwebstoffe.

Die mit den Untersuchungen gemessenen Daten, wie Strömungsgeschwindigkeiten im Ti-

destrom oder die Walzen- und Dichteströmungen sind in jedem Revier anders. Das liegt z. B. an den unterschiedlichen Tidewassermengen, Ausbauzuständen der Ströme und Vorhäfen sowie deren Abmessungen, Geometrie und Lage zum Strom. Da das anstehende Sohlenmaterial und die Fluidmudeigenschaften eine Folge der Strömungsvorgänge sind, sind die absoluten Werte ebenfalls in jedem Revier anders. Miteinander vergleichbar und allgemein gültig sind die Veränderungen des Flüssigschlicks innerhalb der Echolothorizonte bis hin zur festen Sohle. Das gilt auch für die unterschiedliche Zusammensetzung des Sohlenmaterials im Ablösungs- und Staubereich der Hafeneinfahrten und im inneren Vorhafen. Selbstverständlich ist das auch bei den tide- und oberwasserabhängigen Salz- und Schwebstoffkonzentrationen der Fall.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten haben wieder ein erfreuliches Interesse in der Fachwelt hervorgerufen. Das zeigt die folgende Liste von Vorträgen und Veröffentlichungen.

- |  |  |
|--|--|
| NASNER, H.:  | Prevention of Sedimentation in Brackish Harbour Basins.<br>8 <sup>th</sup> International Conference on Cohesive Sediment Transport,<br>20. bis 23.09.2005 in Saga, Japan; Proceedings 8 <sup>th</sup> INTERCOH<br>2005 |
| PIEPER, R.,<br>NASNER, H.:                                 | Flüssigschlick in der Ems und Weser.<br>Tagungsband HTG-Kongress 2005 in Bremen vom 14. bis<br>17.09.2005  |
| NASNER, H.,<br>WESTERMEIER, F.:                            | Management of Fluid Mud in Brackish Water Harbours.<br>31 <sup>th</sup> PIANC-Congress, 14. bis 18.05.2006 in Estoril, Portugal<br>Proceedings 31 <sup>th</sup> PIANC-Congress   |
| NASNER, H.,<br>PIEPER, R.,<br>TORN, P.,<br>KUHLENKAMP, H.: | Prevention of Sedimentation in Brackish Water Harbours.<br>30 <sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ICCE),<br>03. bis 08.09.2006 in San Diego, USA; Proceedings 30 <sup>th</sup> ICCE         |
| NASNER, H.:  | Maintenance Work in Harbours with Fluid Mud.<br>3 <sup>rd</sup> Chinese-German Joint Symposium in Coastal and Ocean<br>Engineering, 08. bis 16.11.2006 in Tainan, Taiwan   |

NASNER, H.,  
PIEPER, R.,  
TORN, P.,  
KUHLENKAMP, H.:  
Properties of Fluid Mud and Prevention of Sedimentation.  
World Dredging Conference (WODCON) XVIII, Mai/Juni 2007  
in Orlando, USA; Proceedings WODCON XVIII

NASNER, H.,  
PIEPER, R.,  
TORN, P.:  
Behaviour and Properties of Fluid Mud.  
7<sup>th</sup> International Conference on Coastal and Port Engineering  
in Developing Countries (PIANC-COPEDEC VII), 24. bis  
28.02.2008 in Dubai, Vereinigte Arabische Emirate  
Proceedings 7<sup>th</sup> COPEDEC

NASNER, H.:  
Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud in Brackwasserhä-  
fen.  
13. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 05.11.2008 in Bremer-  
haven; Tagungsband zum 13. KFKI Seminar

---

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

---

Dipl.-Ing. R. Pieper  
(Sachbearbeiter)

## Schrifttum

- BARG, G.: *Untersuchungen über Salzgehaltsverteilungen in Brackwassergebieten von Tideflüssen am Beispiel der Unterweser*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 49, 1979.
- DASCH, W. und WURPTS, R.: *Isoviskten als Beurteilungsparameter*. Hansa, Heft 9, 1999.
- HANSESTADT BREMISCHES HAFENAMT (HBH) BREMERHAVEN: *Bearbeitung der Baggergutproblematik in den Bremischen Häfen von Bremerhaven*. HBH Bremerhaven, 2000.
- HENSEN, W.: *Probleme bei der Regelung von Tideflüssen*. Jahresheft der Staatlichen Ingenieurschule Suderburg, 1964.
- NASNER, H.: *Sedimentationsverhältnisse im Tidegebiet von Bremerhaven*. Erarbeitet im Auftrag des HBH, Bezirk Bremerhaven, unveröffentlicht, 1989.
- NASNER, H.: *Sedimentationsuntersuchungen vor der Stromkaje Bremerhaven Überseehafen*. Erarbeitet im Auftrag des HBH, Bezirk Bremerhaven, unveröffentlicht, 1991.
- NASNER, H.: *Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen -In situ Messungen-*. Die Küste, Heft 68, 2004a.
- NASNER, H.: *Sedimentation im Wendebassin des Überseehafens in Bremerhaven. Auswirkungen durch den Schleusenbetrieb*. Erarbeitet im Auftrag von bremenports, unveröffentlicht, 2004b.
- NASNER, H.: *Containerterminal "Wilhelm Kaisen" in Bremerhaven. Unterhaltungsaufwand im südlichen Bereich*. Erarbeitet im Auftrag von bremenports, unveröffentlicht, 2005.
- NLWKN: *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser- und Emsgebiet, 2004*. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 2007.
- PIANC: *Minimising Harbour Siltation*. Report 102, 2008.
- STÜCKRATH, T.: *Über die Durchmischung von Süß- und Salzwasser in den Brackwassergebieten von Tideflüssen*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Techn. Universität Hannover, Heft 35, 1970.
- VISSCHER, G. und WOLTERING, S.: *Messungen des tideabhängigen Schwebstoffgehaltes in der Brackwasserzone der Weser bei Bremerhaven*. Wasser und Boden, 50. Jahrgang, 1998.

WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION (WSD) NORD: *Ab 01.01.2005 gültige SKN-Werte an den Tidepegeln im Bereich der WSD Nord (nachrichtlich WSD Ost und Hamburg Port Authority (HPA) ehemals Amt für Strom- und Hafenausbau Hamburg)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2007.

WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION (WSD) NORDWEST: *Ab 01.01.2008 gültige SKN-Werte an den Pegeln im Bereich der WSD Nordwest*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2007.

WURPTS, R.: *15 Jahre Erfahrung mit Fluid Mud*. Hansa 140. Jg. Nr. 10, 2003.

WURPTS, R. und TORN, P.: *15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters*. Terra et Aqua, Number 99, 2005.

## Index

- ADCP-Messungen, 106
- ADCP-Profile, 12, 57
- ADCP-Profilen, 39, 58
- ADCP-Sonde, 12
- aerobe, 145
- Alten Vorhafen, 77
- Außenhäuptern, 79
- Außenhafen, 66
- Auflandungen, 15
- Ausbautiefen, 5
- Ausströmung, 74
- Austauschvorgänge, 17, 25, 40, 69
- Austauschvorgängen, 26, 58
  
- Baggeraktivitäten, 81, 110
- Baggermethoden, 145
- Barre, 115
- Barren, 156, 160
- Barrenbildung, 125
- Blexer Bogen, 5
- BMBF, 1, 73
- Bodengreifer, 146
- Bodenprobe, 150, 153
- Bodenproben, 130, 158
- Bodenzusammensetzung, 150
- Brackwasserbedingungen, 44
- Brackwasserhäfen, 1, 158
- Brunsbüttel, 75, 86
  
- Columbuskaje, 17, 42
  
- Dichten, 143, 148, 153
- Dichteströmungen, 13, 15, 21, 49, 57
- Differenzen, 118, 123
- Differenzvolumen, 128
- dilatant, 142
- doppeltfrequenter, 115
- Durchmischungen, 82
  
- Ebbeströmung, 17
- Ebbestromdauer, 40
- Ebbestromkenterung, 21, 46
- Ebbestromphase, 50
- Ebbewassermengen, 28
- Echolothorizonte, 127
- Eimerkettenbagger, 25
- Einengung, 69
- Einfahrtsbereich, 62
- Elbe, 73
- Emden, 57
- Ems, 57
- Emsufer, 62, 69
  
- Fahrrinne, 89
- Fahrwasser, 86
- Fahrwasserrand, 35
- Fahrwassersohle, 89
- Feinsandanteil, 158
- Feinsandanteile, 156
- Feststoffanteile, 41
- Feststoffbewegung, 42
- Feststoffbilanz, 51, 125
- Feststoffeintrag, 68
- Feststoffgehalte, 158
- Feststoffkonzentrationen, 68
- Flüssigschlick, 97, 115, 156
- Flüssigschlicklagen, 132
- Flüssigschlickstärken, 156
- Fließeigenschaften, 148
- Fließgrenze, 149, 153
- Fließgrenzen, 143
- Fluid Mud, 115, 128, 140, 141, 156
- Flutströmungen, 13, 15
- Flutstromdominanz, 56
- Flutstromgeschwindigkeiten, 46
- Flutstromkenterung, 31, 92
- flutstromorientierten, 103

Flutstromphase, 13, 83  
 Flutstromwalzen, 23, 47  
 Flutwassermengen, 97  
 Franzius-Institut, 1  
 Freilaufkanal, 24, 30  
  
 Geeste, 46  
 Geestemündung, 46, 51  
 Geesthacht, 75  
 Gefälle, 120  
 Geometrie, 103  
 Geschiebetransport, 62  
 Geschwindigkeitsgradienten, 13  
 Geschwindigkeitsvektoren, 30  
 Geschwindigkeitsverteilung, 17  
 Geschwindigkeitsverteilungen, 58  
 Gezeiten, 10  
 Glühverluste, 140, 145, 149, 158  
 Glühverlusten, 135  
 Gradienten, 80  
 Greiferprobe, 141  
  
 Hafenbecken, 130  
 Hafenwasserstand, 39  
 Hochschule Bremen, 1, 97  
 Horizontalgradienten, 66  
  
 Körnungslinien, 130, 146, 156  
 Kaiserschleuse, 30, 39  
 Kenterphase, 17  
 Kentervorgang, 35  
 KFKI, 1, 160  
 Konsolidierung, 118  
 Konzentrationen, 23, 41, 106  
 Kornverteilungen, 130  
  
 Längsschnitt, 120  
 Laboruntersuchungen, 143  
 Laderaumsaugbagger, 149  
 Lutokline, 141, 143  
 Manövrierfähigkeit, 153  
  
 Messbereich, 12  
 Messkampagnen, 6  
 Messungen, 97  
 Mittelwerte, 10  
 Modelluntersuchungen, 160  
 morphodynamisch, 21  
  
 Neu Darchau, 76  
 Neuen Vorhafen, 73  
 Nipptidefall, 35  
 Nord-Ostsee-Kanal, 78, 100  
 Nordmole, 50  
  
 Oberflächenströmungen, 100  
 Oberwasserabfluss, 11  
  
 Pegel, 10  
 Peilfrequenzen, 118  
 Peilplananalysen, 123, 156  
 Peilungen, 115  
 phasenverschoben, 80  
  
 Querschnittserweiterung, 21, 31  
  
 rheologischen, 143  
 Rheometer, 143, 150, 158  
 Ruttner-Proben, 141  
 Ruttnerflasche, 159  
 Ruttnerproben, 155  
  
 Salzgehalte, 23, 39, 79, 103  
 Salzgehaltsdifferenzen, 78  
 Salzgehaltsgefälle, 23, 78, 80  
 Salzgehaltsprofile, 40  
 Salzgehaltsverhältnisse, 66  
 Salzkonzentrationen, 49  
 Salzwasser, 28  
 Sandbarren, 128, 139  
 Sandkornfraktionen, 135  
 Schichtstärken, 120  
 Schiffahrtsrinne, 15  
 Schiffsverkehr, 106

Schlämmkorn, 149  
 Schlämmkornanteile, 139  
 Schlämmkornanteilen, 135  
 Schleusenbetrieb, 110  
 Schleusenkommer, 118  
 Schleusenzufahrt, 76  
 Schleusungswasser, 39  
 Schlick, 115  
 Schwebstoffe, 25, 156  
 Schwebstofffrachten, 42  
 Schwebstoffgehalt, 50  
 Schwebstoffkonzentrationen, 24, 41, 140  
 Sedimentationen, 132  
 Sedimente, 81  
 Sedimentkonzentrationen, 140  
 Sedimenttransport, 106  
 Seekartennull, 10, 115  
 Sohlenmaterial, 135  
 Sohlströmungen, 15  
 Sohliefen, 115  
 Solltiefe, 1, 5  
 Solliefen, 115  
 Springtidehub, 12, 66  
 Springtideniedrigwasser, 115  
 Staupunkt, 15  
 Strömungsbild, 47  
 Strömungseffekte, 13  
 Strömungseffekten, 110  
 Strömungsgeschwindigkeiten, 17  
 Strömungsintensität, 58  
 Strömungsintensitäten, 73  
 Strömungsmuster, 35  
 Strömungsprofile, 35, 62, 92  
 Strömungsumkehr, 58, 69  
 Strömungsvektoren, 13  
 Strömungsverteilung, 15  
 stromauf, 31  
 Stromeffekt, 73  
 strukturviskos, 142  
 Sturmflutsperrwerk, 46  
 Suspensionen, 68  
 Suspensionsmengen, 41  
 Tideelbe, 73  
 Tidegrenze, 75  
 Tidehalbwasser, 10, 11, 21  
 Tidehochwasser, 10, 11  
 Tidehub, 10, 11  
 Tidekennwerte, 10  
 Tidekurve, 83  
 Tideniedrigwasser, 10, 11  
 Tidephase, 86  
 Tiderhythmus, 26, 53  
 Tidestrom, 17  
 Tideverlauf, 53  
 Tidewasserstände, 10  
 Tiefenzellen, 30, 47, 49  
 Transportkapazität, 21, 125  
 Turbulenzen, 25  
 Ultraschallsonde, 140  
 Unterelbe, 77  
 Unterhaltungsarbeiten, 82  
 Unterhaltungsbaggerungen, 81  
 Unterhaltungsmaßnahmen, 142  
 Van-Veen-Greifer, 135, 141  
 Versen, 57  
 Verteilungen, 26  
 Vertikalgradient, 17, 23, 49  
 Vertikalgradienten, 35  
 Vertikalprofile, 13, 21, 31, 58, 92  
 Viskosität, 143  
 Viskositäten, 140, 148  
 Volumen, 115  
 Vorgänge, 80  
 Walzenströmungen, 58  
 Wasserbewegungen, 46  
 Wasserinjektionen, 128, 146, 156  
 Wassermengen, 106

Wasserschichten, 89

Wassertiefe, 15

Wassertiefen, 115

Wasserverluste, 53

Wendebecken, 120

Weserquerschnitt, 13

Weserufer, 1

Zähigkeiten, 153, 158

Zellen, 49

## Abbildungsverzeichnis

1	Deutsche Nordseeküste . . . . .	2
2	Hafenanlagen von Bremerhaven . . . . .	3
3	Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven . . . . .	4
4	Fischereihafenschleuse in Bremerhaven . . . . .	7
5	Lageplan des Emden Vor- und Außenhafens . . . . .	8
6	Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel . . . . .	9
7	Lage der ADCP-Profile . . . . .	12
8	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005 . . . . .	14
9	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005 . . . . .	16
10	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 25.04.2005 . . . . .	18
11	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005 . . . . .	19
12	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005 . . . . .	20
13	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 18.04.2005 . . . . .	22
14	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse am 25.04.2005 . . . . .	27
15	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Nordschleuse am 18.04.2005 . . . . .	29
16	Lage der ADCP-Profile . . . . .	30
17	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005 . . . . .	32
18	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005 . . . . .	33
19	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Weser am 04.10.2005 . . . . .	34
20	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005 . . . . .	36
21	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005 . . . . .	37
22	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Weser am 12.10.2005 . . . . .	38
23	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 04.10.2005 . . . . .	43
24	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Weser vor der Kaiserschleuse am 12.10.2005 . . . . .	45
25	Überlagerung von Strömungs- und Dichteeffekten im Vorhafen zur Doppel- schleuse; ADCP-Messung am 26.06.2006 . . . . .	48
26	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der Weser vor der Geestemündung	52
27	Salz- und Schwebstoffgehalte während der Flutstromphase im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven am 27. Juni 2006 . . . . .	54
28	Salz- und Schwebstoffgehalte während der Ebbestromphase im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven am 6. Juli 2006 . . . . .	55
29	Lage der ADCP-Profile . . . . .	57
30	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005 . . . . .	59
31	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005 . . . . .	60

32	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Ems am 25.05.2005 . . . . .	61
33	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005 . . . . .	63
34	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005 . . . . .	64
35	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Ems am 01.06.2005 . . . . .	65
36	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 25.05.2005	70
37	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Ems bei Emden am 01.06.2005	71
38	Oberwasserganglinie am Pegel Neu Darchau im März 2007 . . . . .	74
39	Lage der ADCP-Profile . . . . .	82
40	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005 . . . . .	84
41	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 06.07.2005 . . . . .	85
42	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007 . . . . .	87
43	Mittlere Flutströmungen im Fahrwasser der Elbe am 20.03.2007 . . . . .	88
44	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005 . . . . .	90
45	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005 . . . . .	91
46	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 29.06.2005 . . . . .	93
47	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007 . . . . .	94
48	Mittlere Ebbeströmungen im Fahrwasser der Elbe am 13.03.2007 . . . . .	96
49	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee- Kanal am 06.07.2005 . . . . .	98
50	Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee- Kanal am 20.03.2007 . . . . .	99
51	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee- Kanal am 29.06.2005 . . . . .	101
52	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten in der Elbe vor dem Nord-Ostsee- Kanal am 13.03.2007 . . . . .	102
53	Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	104
54	Salzgehalte während der Flutstromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	105
55	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	107
56	Salzgehalte während der Ebbestromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	108
57	Schwebstoffe während der Flutstromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	109
58	Schwebstoffe während der Flutstromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	111
59	Schwebstoffe während der Ebbestromphase im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	112

60	Schwebstoffe während der Ebbestromphase im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel bei unterschiedlichem Oberwasser . . . . .	113
61	Untersuchungsbereiche in Bremerhaven und zugehörige Solltiefen (m SKN)	116
62	Peilung und Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven vom November 2006 . . . . .	119
63	Längsprofile im Vorhafen der Doppelschleuse und der Geeste vom November 2006 . . . . .	120
64	Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Februar 2003 . . . . .	121
65	Peilung und Differenzplan im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven vom Januar 2004 . . . . .	122
66	Längsprofile im Vorhafen der Nordschleuse vom Februar 2003 und Januar 2004 . . . . .	123
67	Peilung und Differenzplan im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven vom Mai 2002 . . . . .	124
68	Längsprofile im Vorhafen der Kaiserschleuse vom Mai 2002 . . . . .	125
69	Peilung und Differenzplan im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden vom Juni 2004 . . . . .	126
70	Längsprofile im Vor- und Außenhafen in Emden vom Juni 2004 . . . . .	127
71	Peilung und Differenzplan im Bereich Neuen und Alten Vorhafens in Brunsbüttel vom Juni 2005 . . . . .	129
72	Längsprofile im Alten und Neuen Vorhafen in Brunsbüttel vom Juni 2005 .	130
73	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven . . . . .	131
74	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven . . . . .	133
75	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven . . . . .	134
76	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Emder Vor- und Außenhafens . . . . .	136
77	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Neuen Vorhafens von Brunsbüttel . . . . .	137
78	Körnungslinien der Bodenprobenentnahmen im Bereich des Alten Vorhafens von Brunsbüttel . . . . .	138
79	Ruttner-Probe aus der Lutokline im Alten Vorhafen von Brunsbüttel am 31.10.2006 . . . . .	140
80	Entnahmepositionen innerhalb der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emder Außenhafen) . . . . .	141
81	Bodenprobe aus dem Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 15.03.2006 . . . . .	141

82	Glühverluste und Feststoffgehalte im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven . . . . .	142
83	Körnungslinien und Viskositäten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven vom 20.02.2007 . . . . .	144
84	Dynamische Viskositäten und Dichten im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven . . . . .	145
85	Glühverluste und Feststoffgehalte im Emder Vor- und Außenhafen . . . . .	146
86	Körnungslinien und Viskositäten im Vor- und Außenhafen in Emden vom 04.09.2007 . . . . .	147
87	Dynamische Viskositäten und Dichten im Emder Vor- und Außenhafen . . . . .	148
88	Glühverluste und Feststoffgehalte im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel . . . . .	150
89	Körnungslinien und Viskositäten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.2007 . . . . .	151
90	Dynamische Viskositäten und Dichten im Neuen Vorhafen von Brunsbüttel . . . . .	152
91	Glühverluste und Feststoffgehalte im Alten Vorhafen von Brunsbüttel . . . . .	153
92	Körnungslinien und Viskositäten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel vom 03.09.2007 . . . . .	154
93	Dynamische Viskositäten und Dichten im Alten Vorhafen von Brunsbüttel . . . . .	155
94	Eigenschaften von Flüssigschlick in den verschiedenen Brackwasserhäfen . . . . .	157
95	Entnahmepositionen in verschiedenen Tiefen in der Fluid Mud Schicht (Peilung vom Dezember 2006 im Emder Außenhafen) . . . . .	159

## Anlagenverzeichnis

### A. Bremerhaven im Bereich der Nordschleuse

- Anlage 1 bis 4: ADCP-Messungen am 25.04.2005 (Flutströmungen in der Weser)
- Anlage 5 bis 8: ADCP-Messungen am 18.04.2005 (Ebbeströmungen in der Weser)
- Anlage 9: Salzgehalte in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 26.04.2005 (Flut)
- Anlage 10: Salzgehalte in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 20.04.2005 (Ebbe)
- Anlage 11: Schwebstoffe in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 26.04.2005 (Flut)
- Anlage 12: Schwebstoffe in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 20.04.2005 (Ebbe)
- Anlage 13: Peilung vom August und November 2005 (WSA Bremerhaven & bremenports)

### B. Bremerhaven im Bereich der Kaiserschleuse

- Anlage 14 bis 17: ADCP-Messungen am 04.10.2005 (Flutströmungen in der Weser)
- Anlage 18 bis 21: ADCP-Messungen am 12.10.2005 (Ebbeströmungen in der Weser)
- Anlage 22: Salzgehalte in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 07.10.2005 (Flut)
- Anlage 23: Salzgehalte in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 13.10.2005 (Ebbe)
- Anlage 24: Schwebstoffe in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 07.10.2005 (Flut)
- Anlage 25: Schwebstoffe in der Weser und Vorhafeneinfahrt am 13.10.2005 (Ebbe)

## **C. Bremerhaven im Bereich der Doppelschleuse**

- Anlage 26 bis 29: ADCP-Messungen am 28.06.2006 (Flutströmungen in der Weser)  
Anlage 30 bis 33: ADCP-Messungen am 05.07.2006 (Ebbeströmungen in der Weser)  
Anlage 34: Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse am 27.06.2006 (Flut)  
Anlage 35: Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse am 06.07.2006 (Ebbe)  
Anlage 36: Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse am 27.06.2006 (Flut)  
Anlage 37: Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse am 06.07.2006 (Ebbe)

## **D. Emden im Bereich des Vor- und Außenhafens**

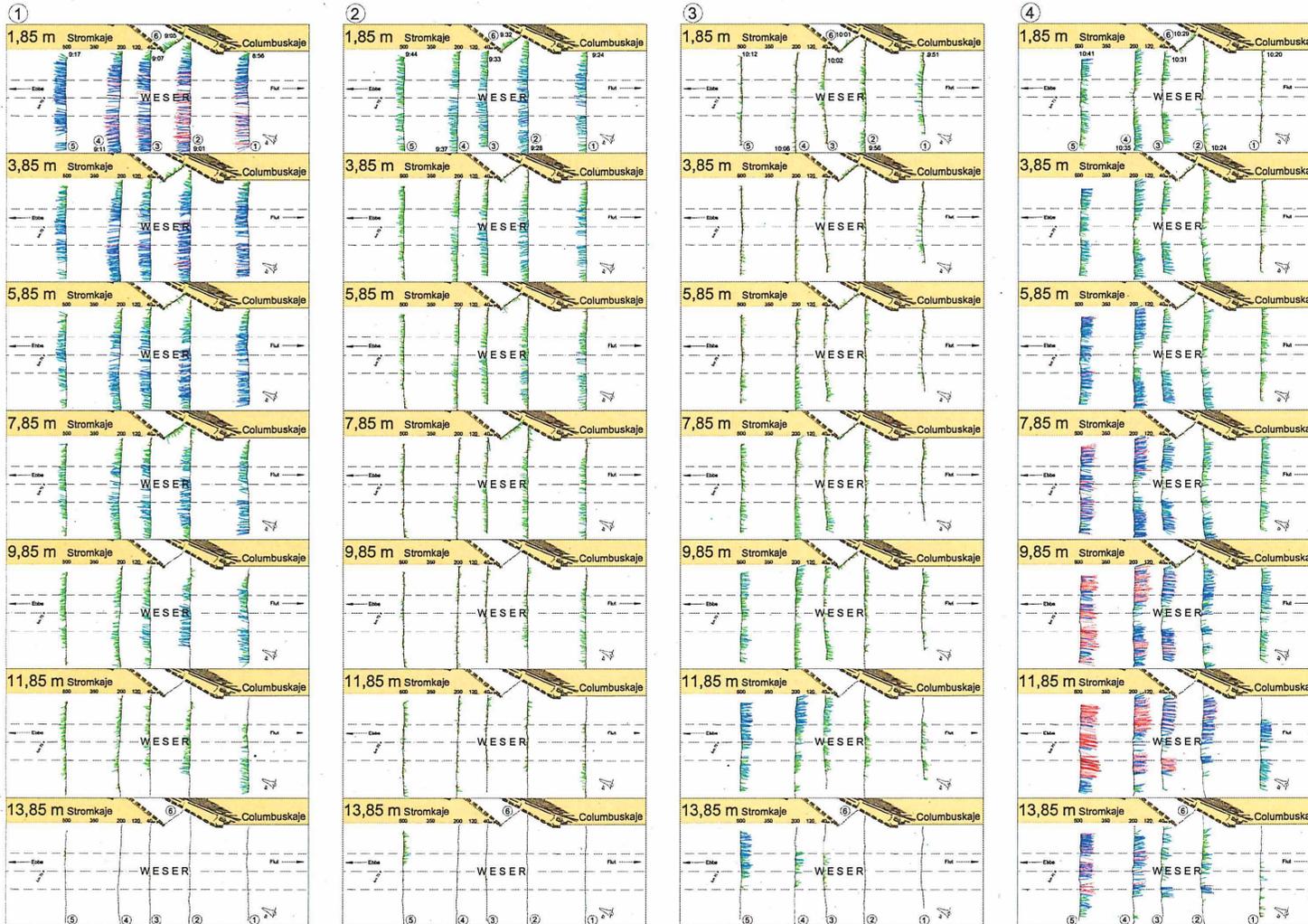
- Anlage 38 bis 40: ADCP-Messungen am 25.05.2005 (Flutströmungen in der Ems)  
Anlage 41 bis 43: ADCP-Messungen am 01.06.2005 (Ebbeströmungen in der Ems)  
Anlage 44: Salzgehalte im Bereich des Vor- und Außenhafens am 26.05.05 (Flut)  
Anlage 45: Salzgehalte im Bereich des Vor- und Außenhafens am 02.06.05 (Ebbe)  
Anlage 46: Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens am 26.05.05 (Flut)  
Anlage 47: Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens am 02.06.05 (Ebbe)  
Anlage 48: Peilung vom März und April 2005 (WSD Nordwest & NHA Emden)

## **E. Brunsbüttel im Bereich des Neuen und Alten Vorhafens zum Nord-Ostsee-Kanal**

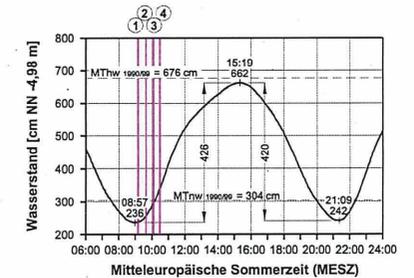
- Anlage 49 und 51: ADCP-Messungen am 05.07.2005 (Flutströmungen im Neuen Vorhafen)  
Anlage 52 und 53: ADCP-Messungen am 14.07.2005 (Flutströmungen im Neuen Vorhafen)  
Anlage 54 und 55: ADCP-Messungen am 21.03.2007 (Flutströmungen im Neuen Vorhafen)  
Anlage 56 bis 58: ADCP-Messungen am 28.06.2005 (Ebbeströmungen im Neuen Vorhafen)

- Anlage 59 und 60: ADCP-Messungen am 13.07.2005 (Ebbeströmungen im Neuen Vorhafen)
- Anlage 61 bis 63: ADCP-Messungen am 14.03.2007 (Ebbeströmungen im Neuen Vorhafen)
- Anlage 64 bis 66: ADCP-Messungen am 11.07.2005 (Flutströmungen im Alten Vorhafen)
- Anlage 67 und 68: ADCP-Messungen am 08.03.2007 (Flutströmungen im Alten Vorhafen)
- Anlage 69 bis 71: ADCP-Messungen am 14.07.2005 (Ebbeströmungen im Alten Vorhafen)
- Anlage 72 bis 74: ADCP-Messungen am 27.03.2007 (Ebbeströmungen im Alten Vorhafen)
- Anlage 75: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens am 07.07.2005 (Flut)
- Anlage 76: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens am 30.06.2005 (Eb-  
be)
- Anlage 77: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens am 07.03.2007 (Flut)
- Anlage 78: Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens am 15.03.2007 (Eb-  
be)
- Anlage 79: Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens am 11.07.2005 (Flut)
- Anlage 80: Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens am 14.07.2005 (Eb-  
be)
- Anlage 81: Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens am 08.03.2007 (Flut)
- Anlage 82: Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens am 27.03.2007 (Eb-  
be)
- Anlage 83: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens am 07.07.2005 (Flut)
- Anlage 84: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens am 30.06.2005 (Eb-  
be)
- Anlage 85: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens am 07.03.2007 (Flut)
- Anlage 86: Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens am 15.03.2007 (Eb-  
be)
- Anlage 87: Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens am 11.07.2005 (Flut)
- Anlage 88: Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens am 14.07.2005 (Eb-  
be)
- Anlage 89: Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens am 08.03.2007 (Flut)

Anlage 90:	Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens am 27.03.2007 (Ebbe)
Anlage 91 bis 93:	ADCP-Messungen am 06.07.2005 (Flutströmungen in der Elbe)
Anlage 94 und 95:	ADCP-Messungen am 20.03.2007 (Flutströmungen in der Elbe)
Anlage 96 bis 98:	ADCP-Messungen am 29.06.2005 (Ebbeströmungen in der Elbe)
Anlage 99 bis 101:	ADCP-Messungen am 13.03.2007 (Ebbeströmungen in der Elbe)
Anlage 102:	Peilung vom August und November 2005 (WSA Brunsbüttel)



### Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 25.04.2005



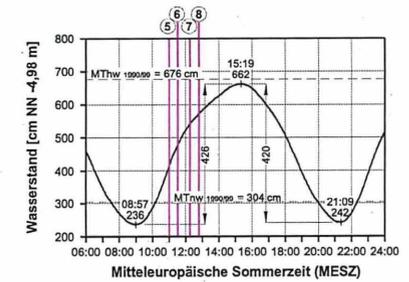
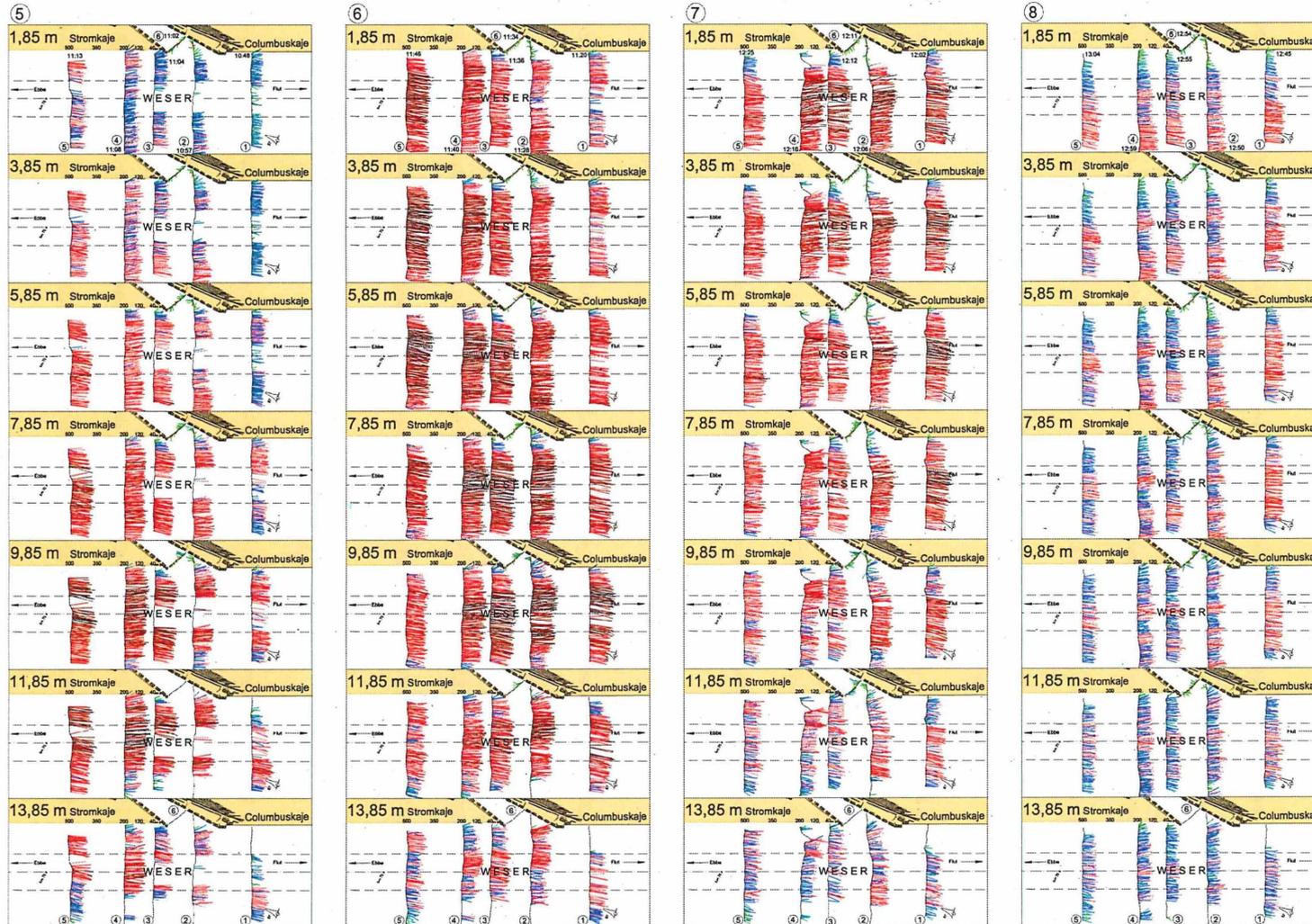
Mittteleuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 383 m³/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



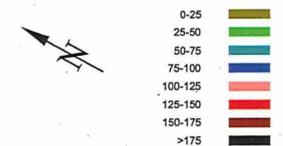
Institut für Wasserbau  
Neustadtwall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibb.hs-bremen.de

### Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 25.04.2005

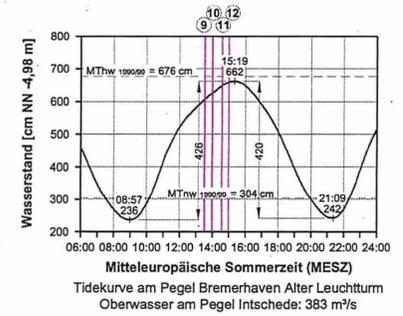
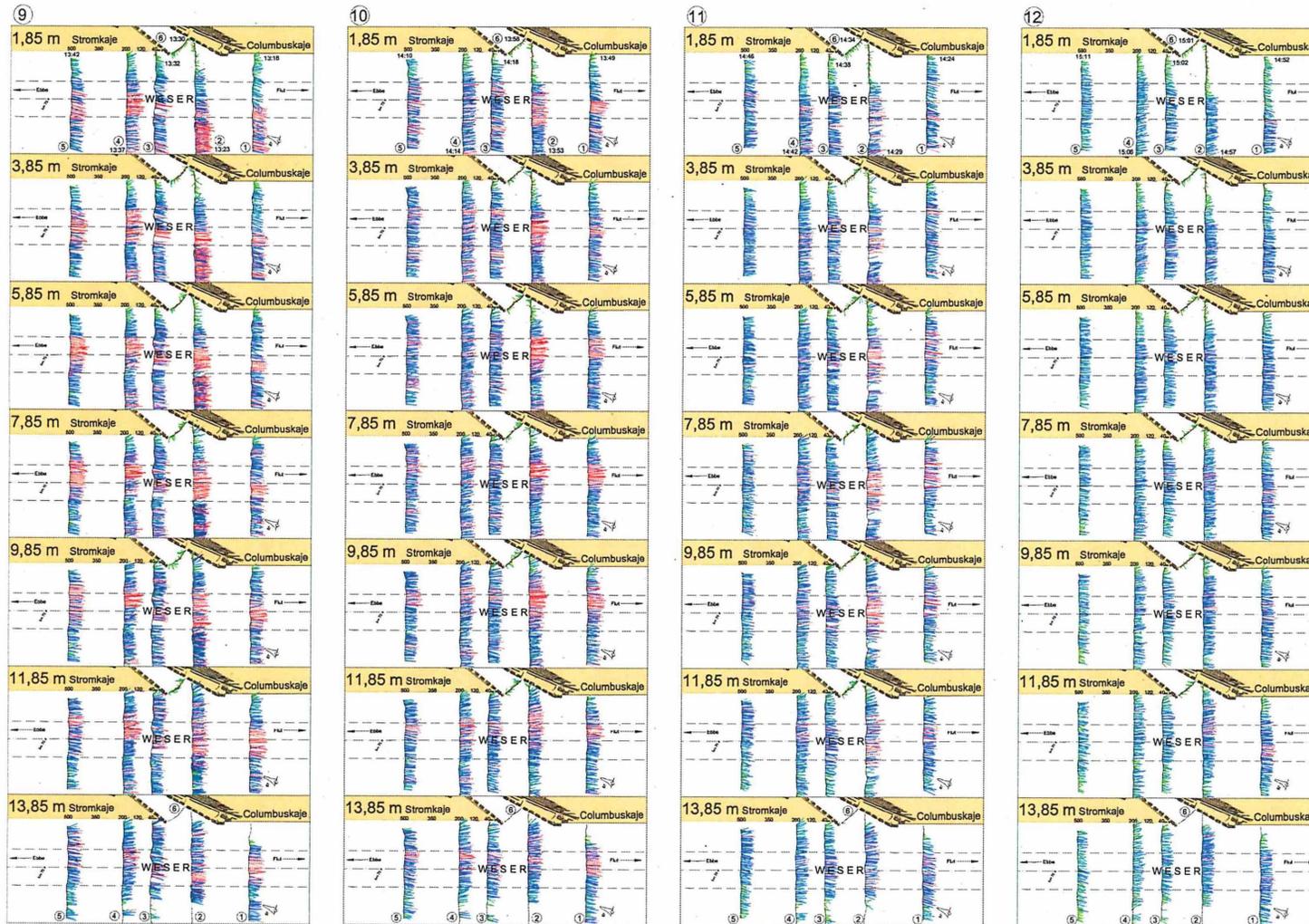


Mitteuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 383 m³/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



## Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 25.04.2005

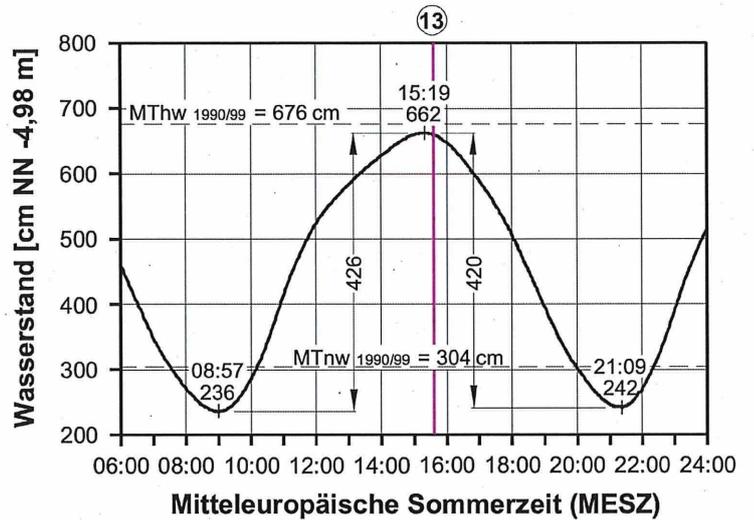
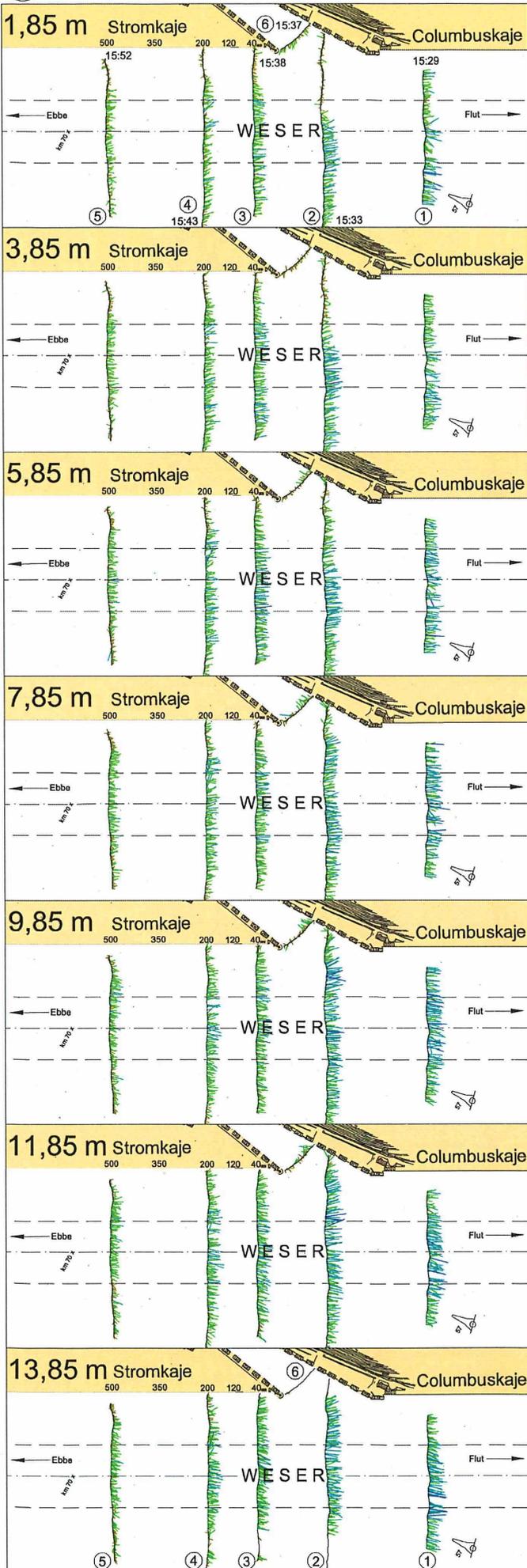


ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau  
Neustädterwall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fb.hs-bremen.de

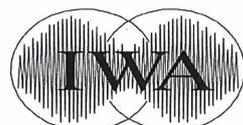
# Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 25.04.2005



Mitteuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 383 m³/s

### ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175

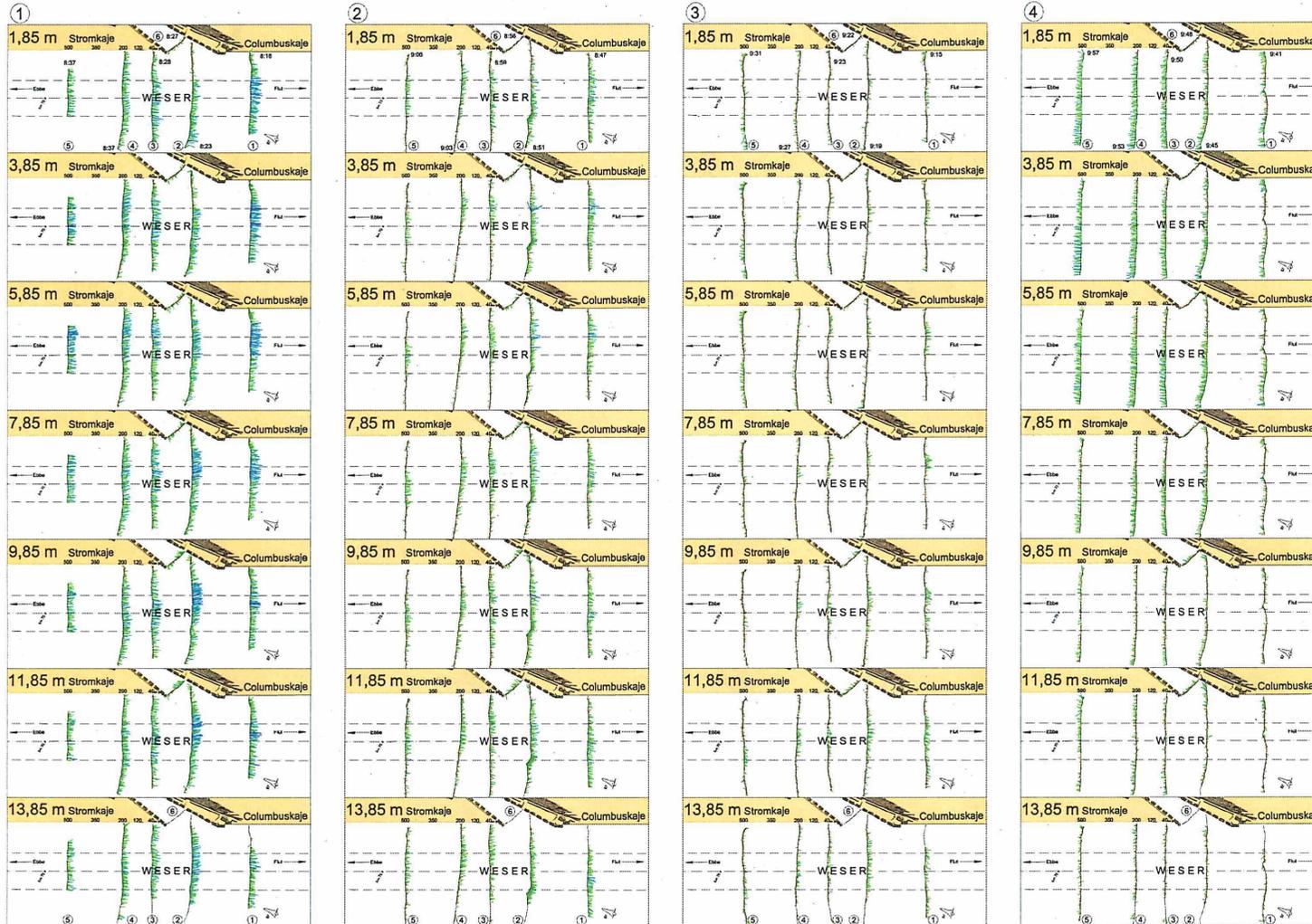


Institut für Wasserbau

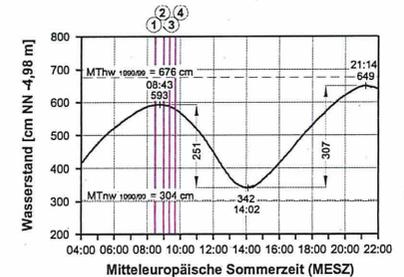
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen

Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382

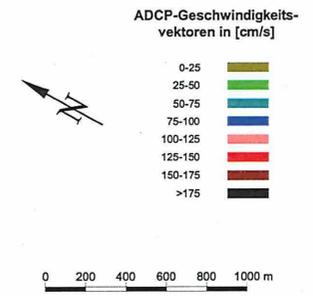
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de

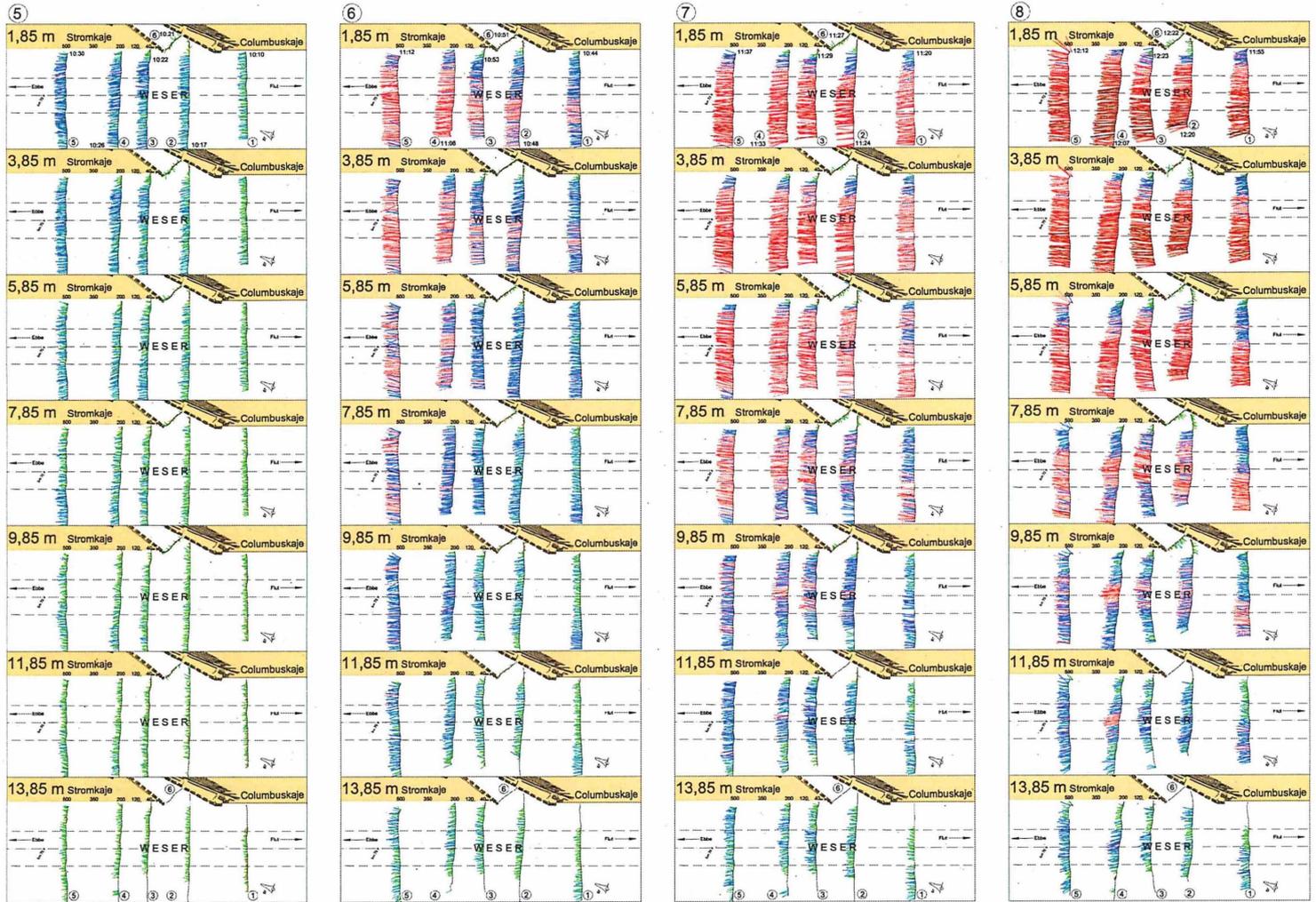


### Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 18.04.2005

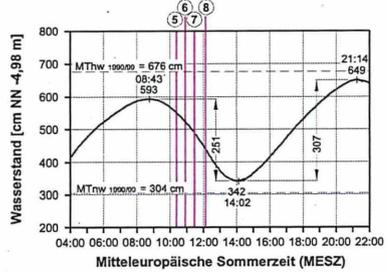


Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 281 m/s





**Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven  
ADCP-Messungen am 18.04.2005**



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 281 m<sup>3</sup>/s

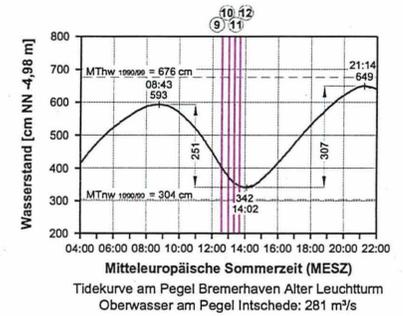
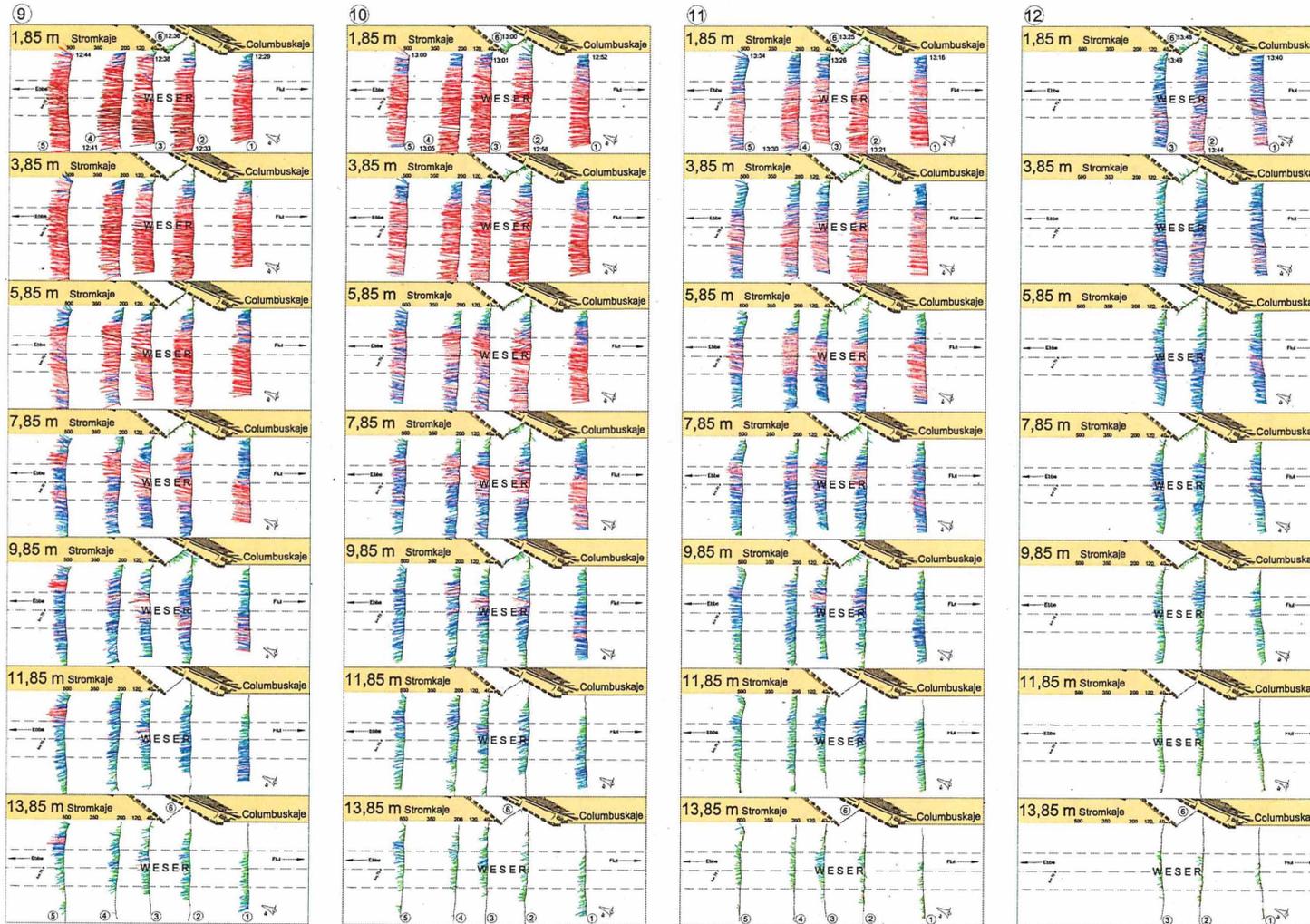
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



Institut für Wasserbau  
Neustadtswal 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibb.ha-bremen.de

### Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 18.04.2005

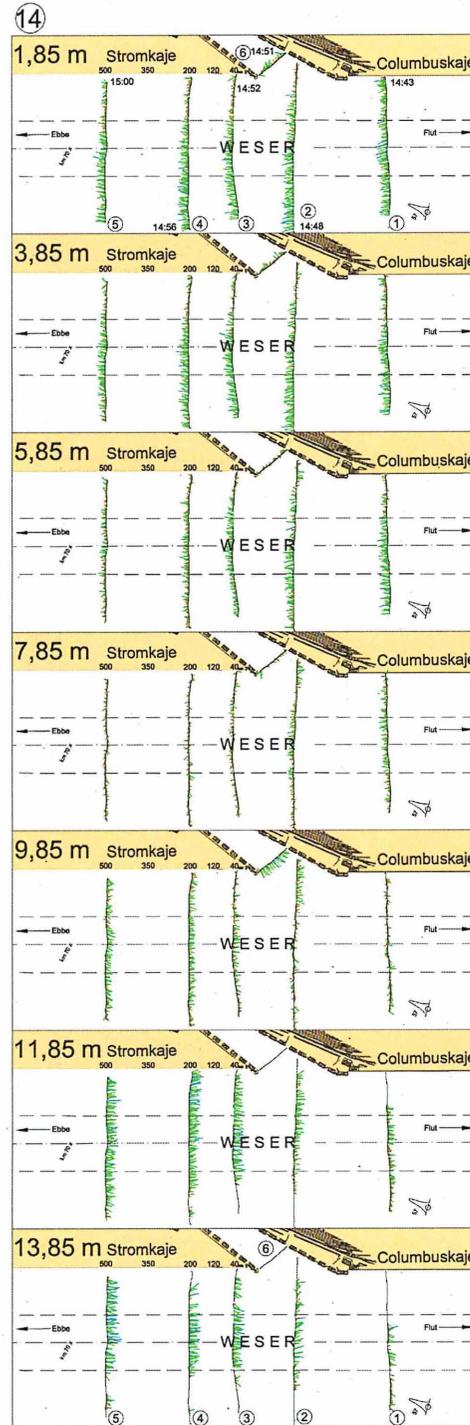
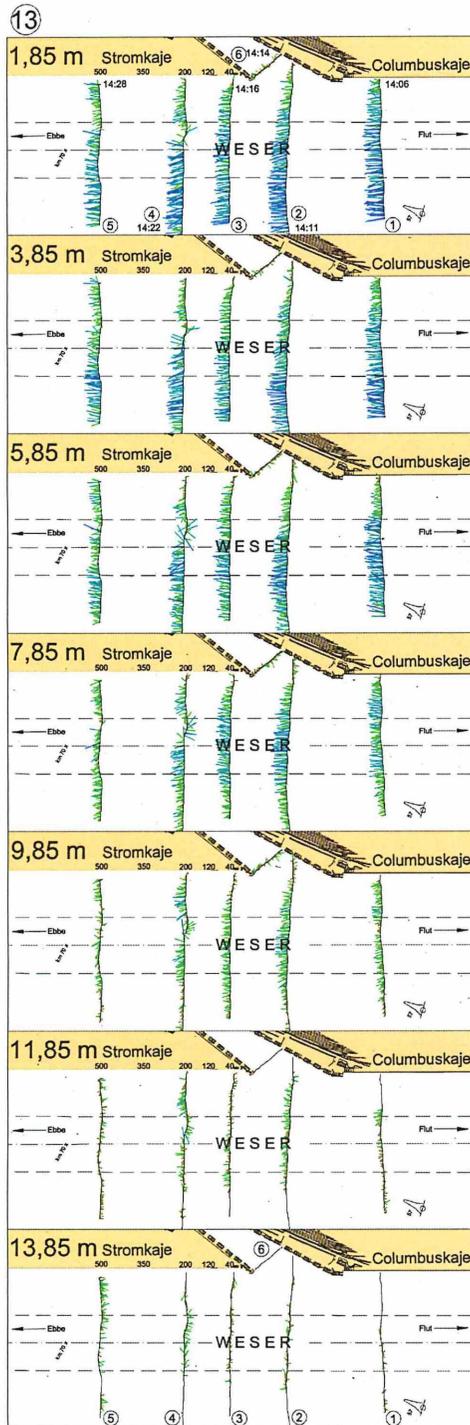


ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

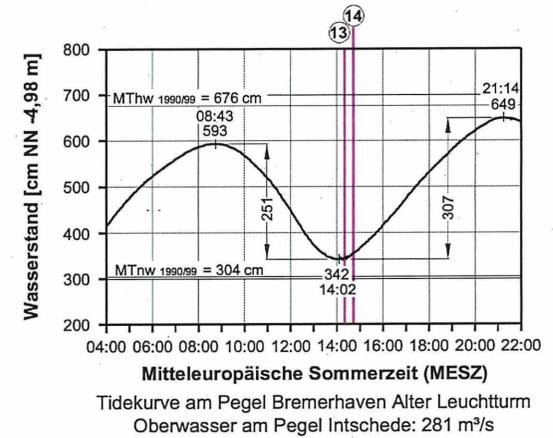
- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



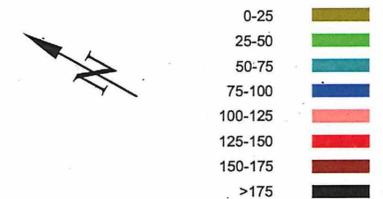
Institut für Wasserbau  
Neusadewai 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2392  
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de

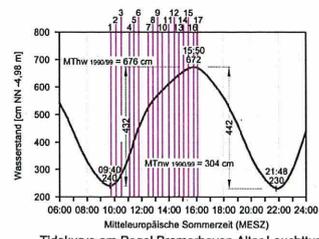
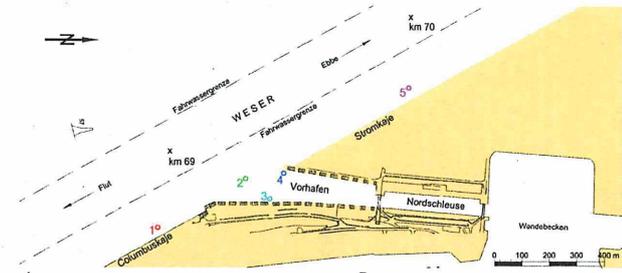


## Strömungen in der Weser im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 18.04.2005

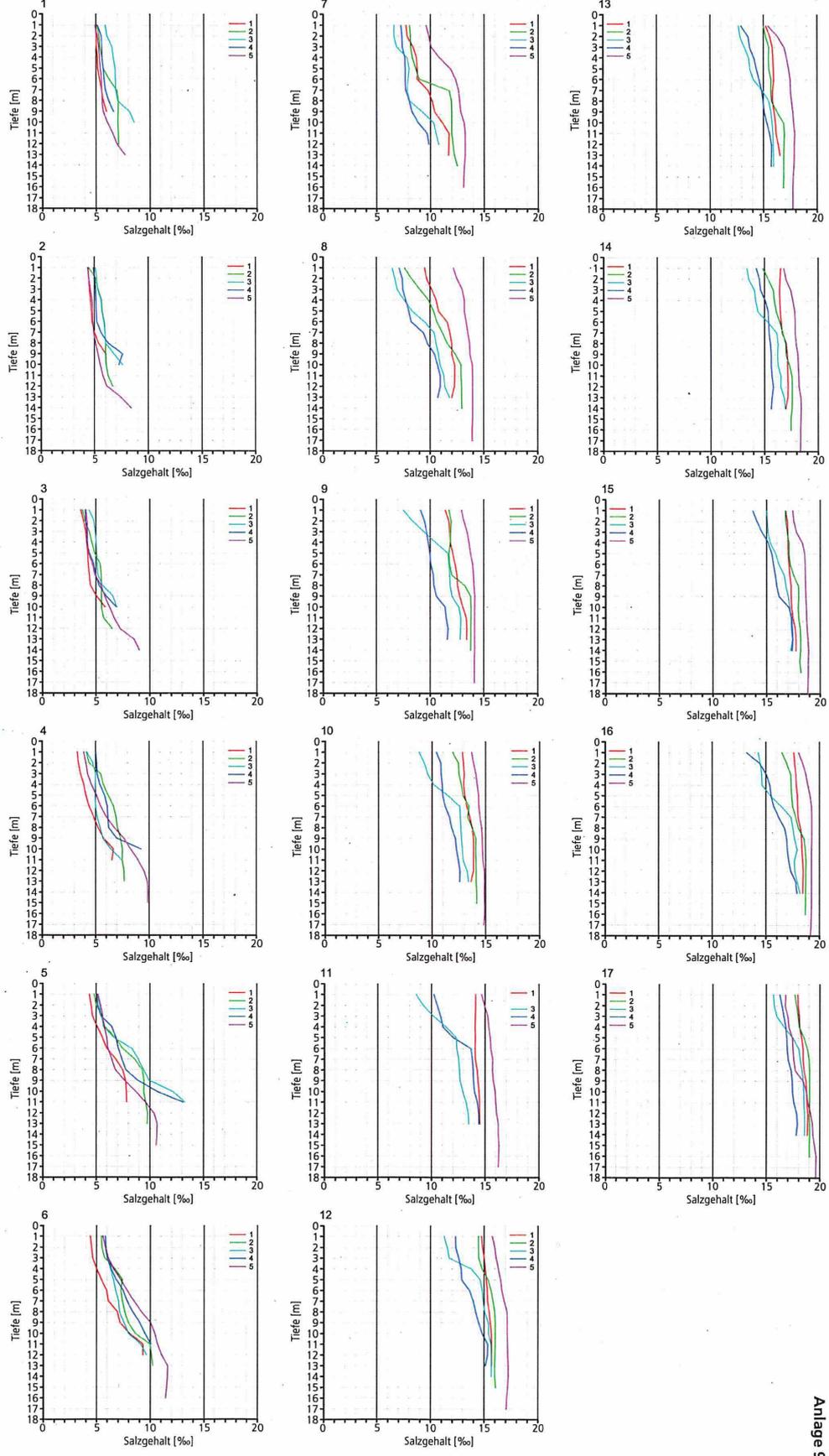


### ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

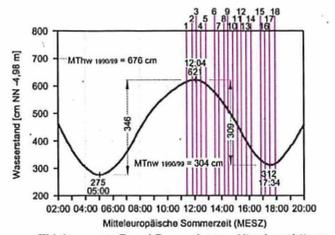
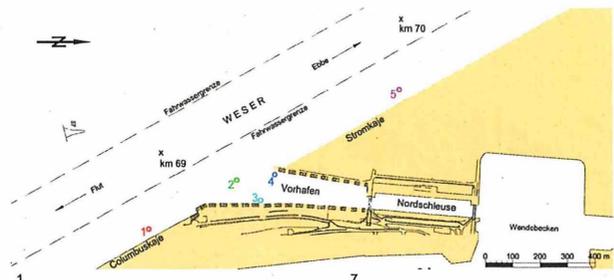




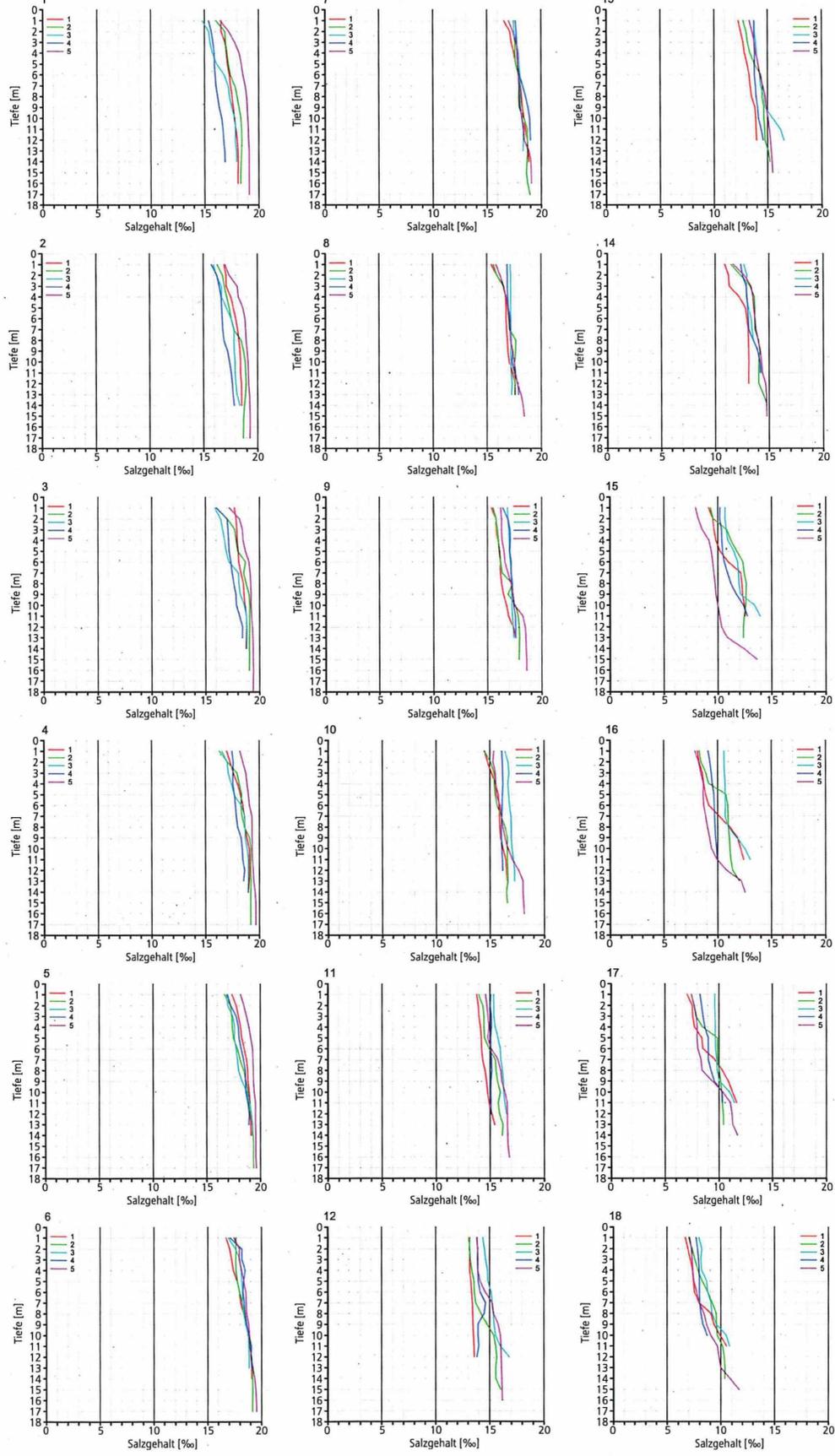
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Aller Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 352 m/s



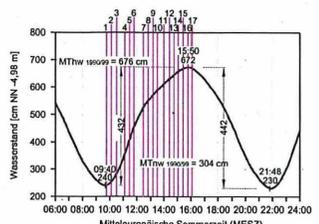
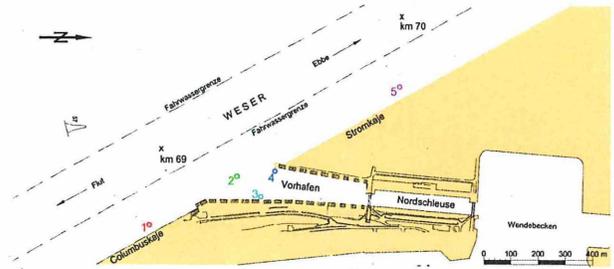
Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 26.04.2005



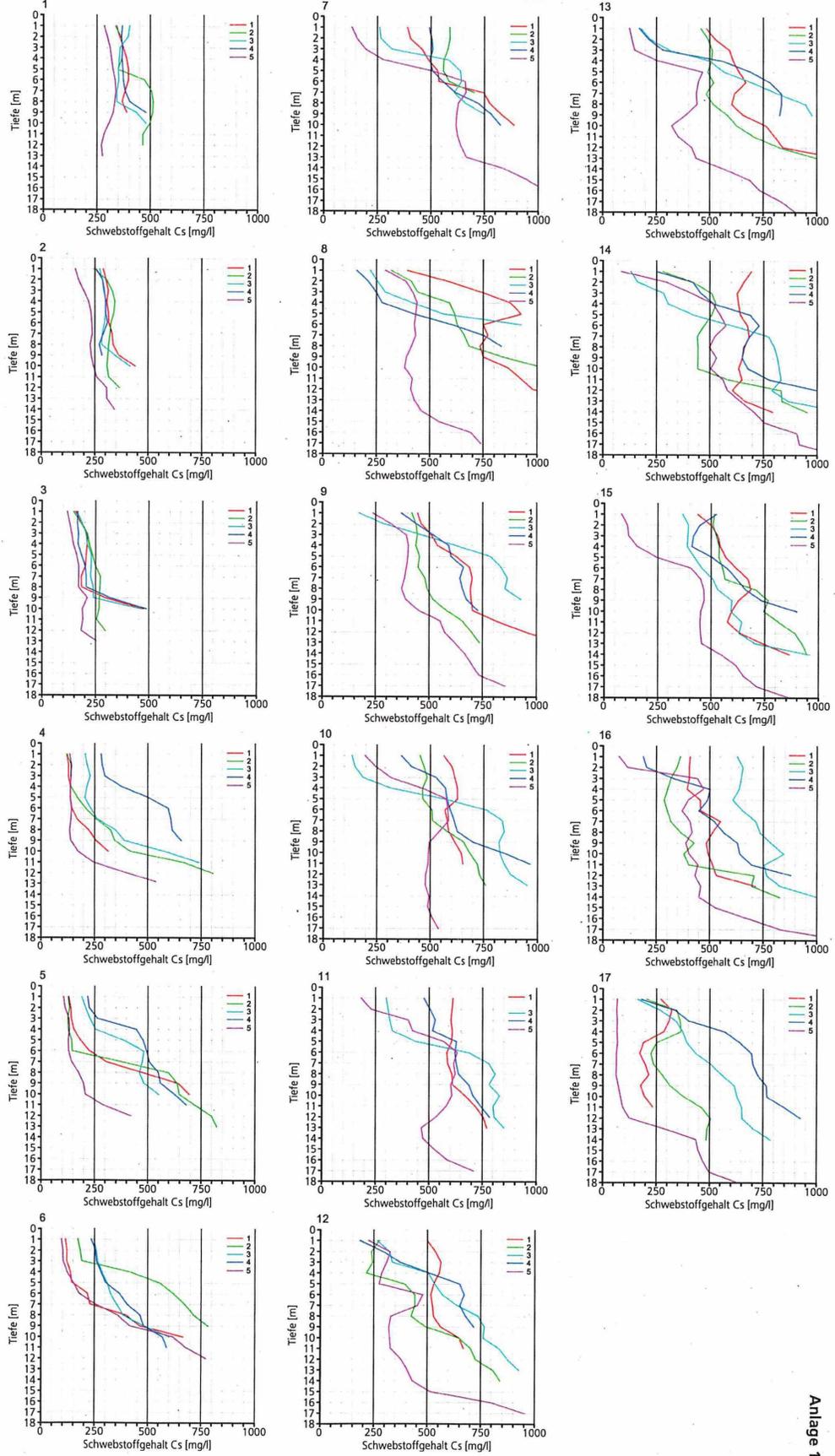
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 289 m³/s



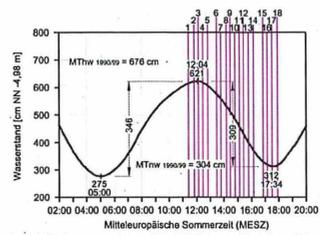
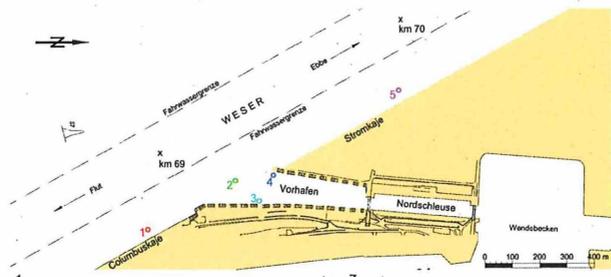
Salzgehalte im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven  
Ebbmessung am 20.04.2005



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 352 m³/s

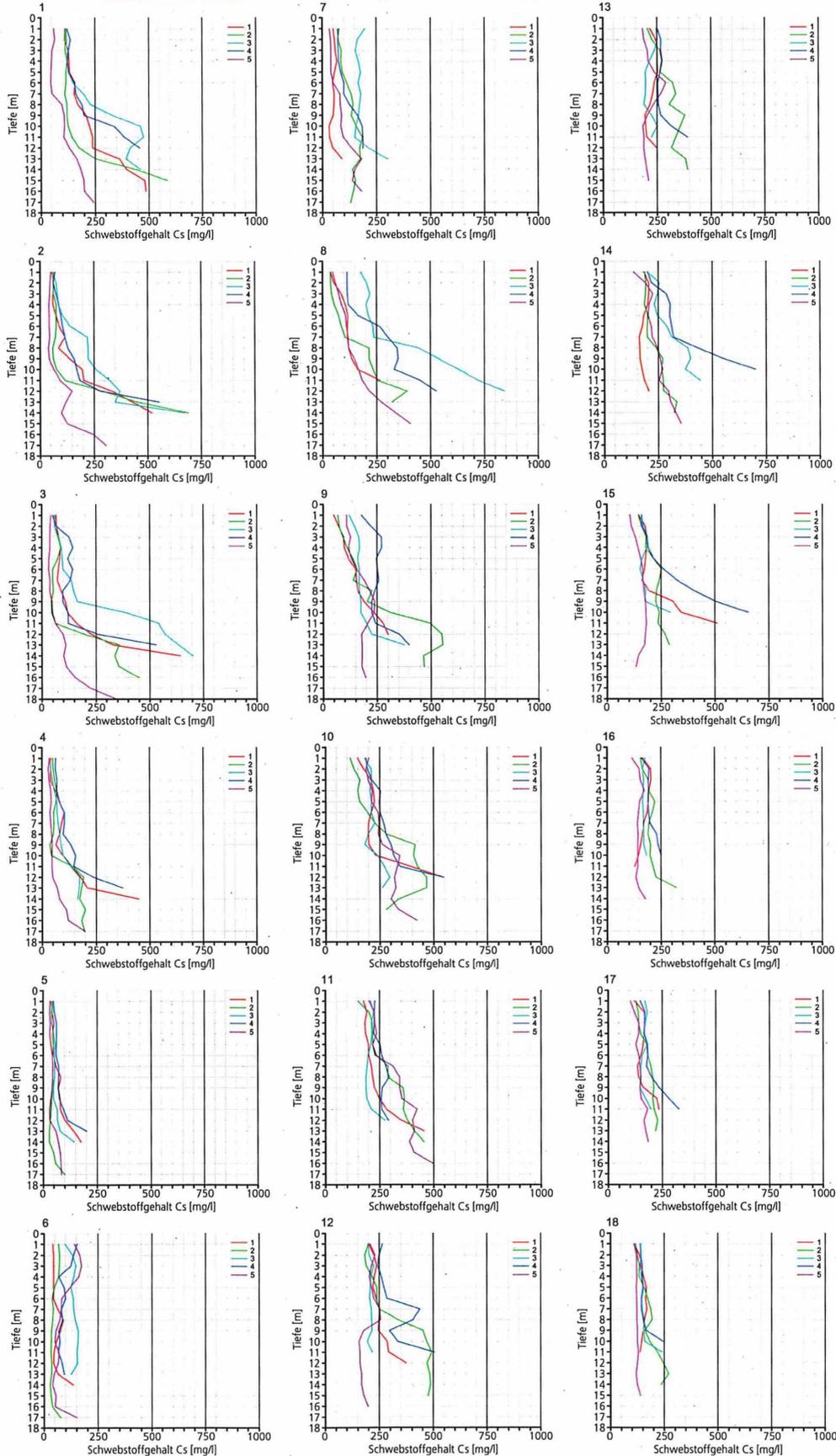


Schwebstoffe im Bereich der Nordeschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 26.04.2005



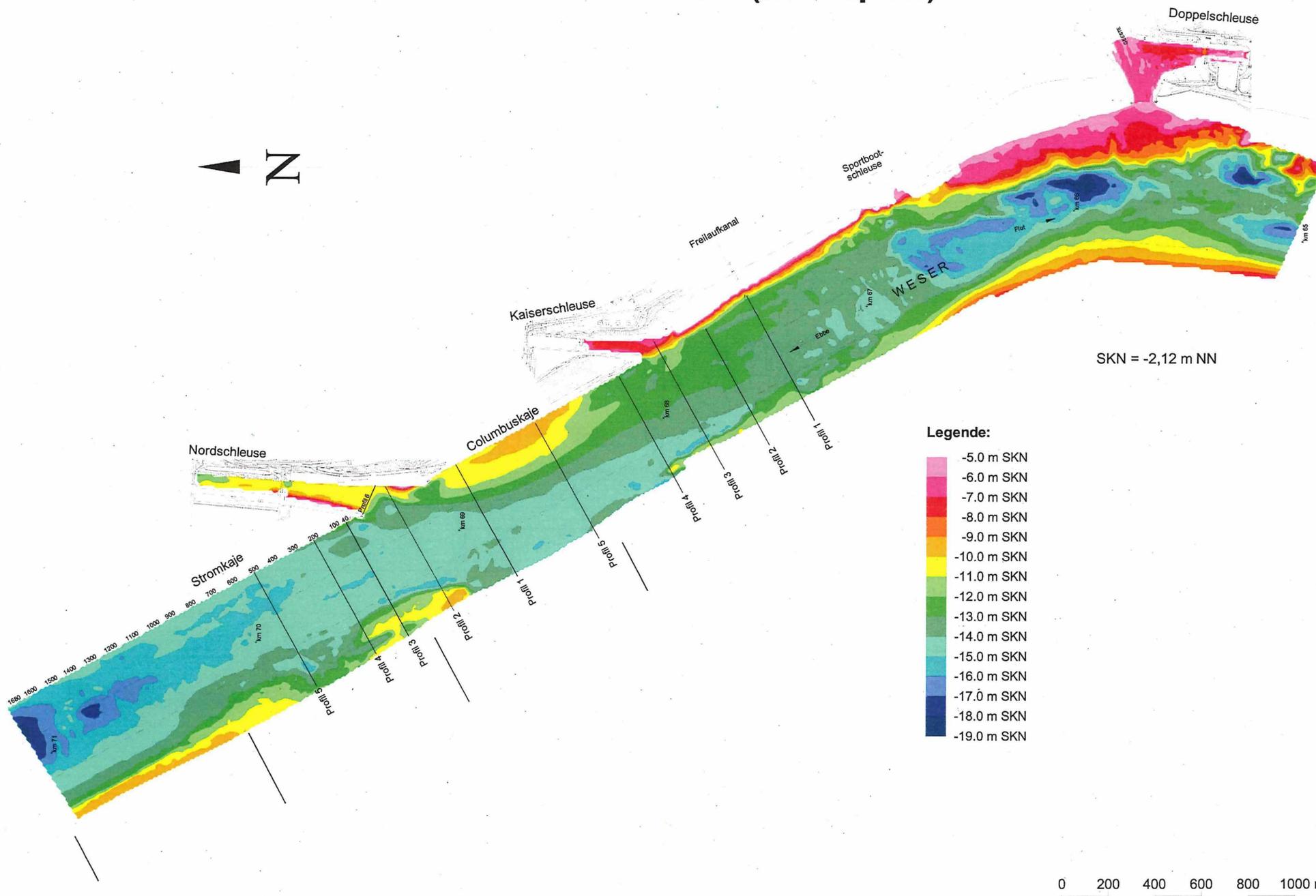
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Aller Leuchtturm

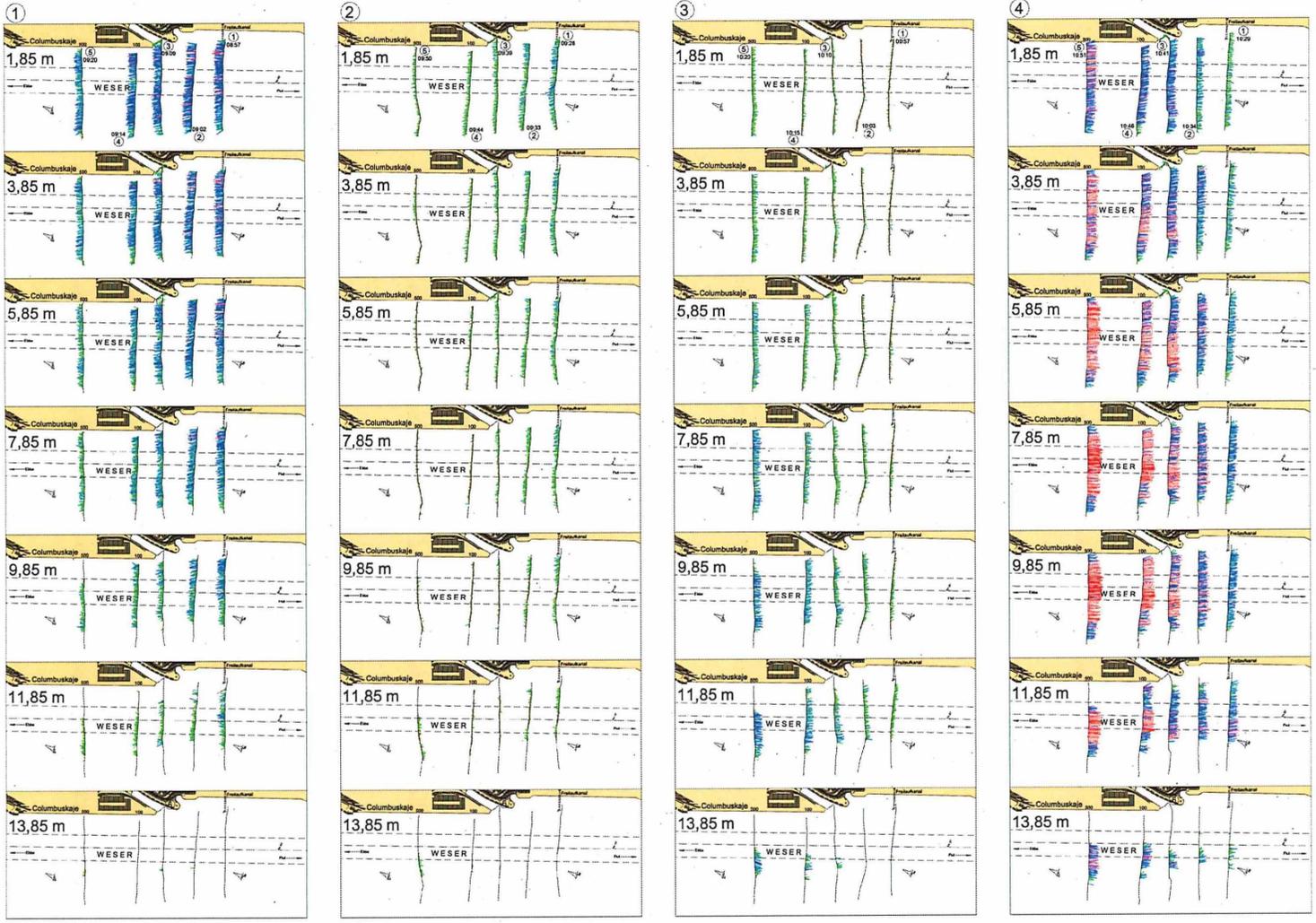
Oberwasser am Pegel Intschede: 289 m³/s



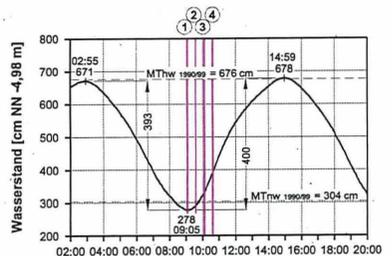
Schwebstoffe im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 20.04.2005

# Peilung vom August 2005 (WSA Bremerhaven) und November 2005 (bremenports)



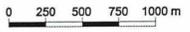


**Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven  
ADCP-Messungen am 04.10.2005**



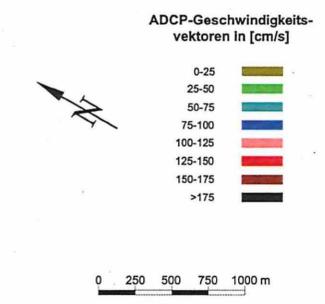
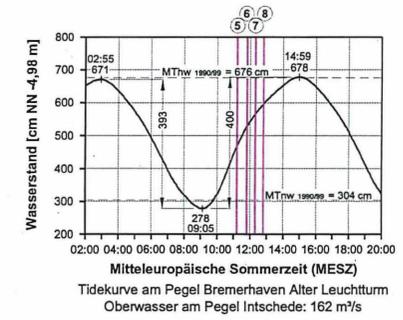
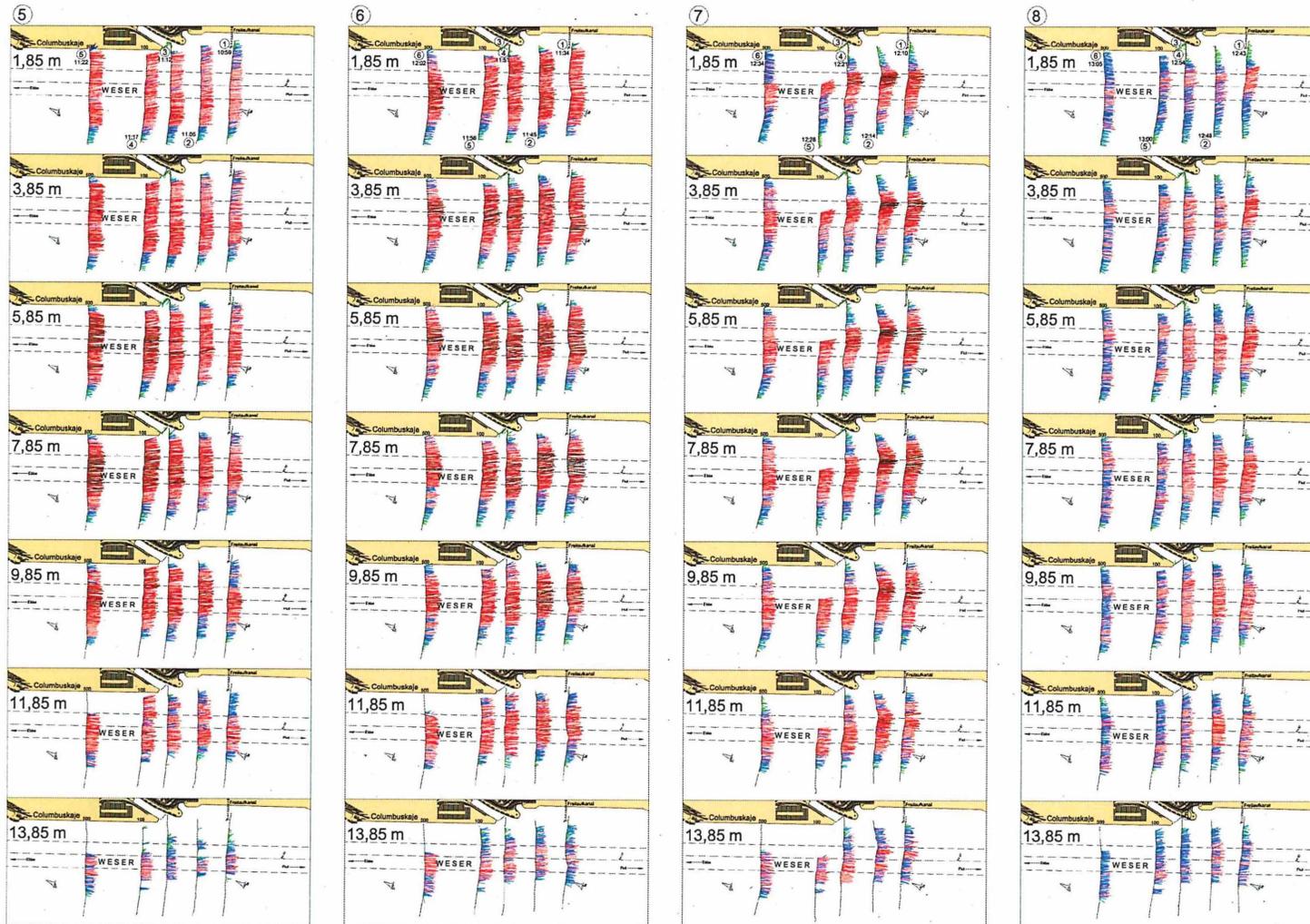
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



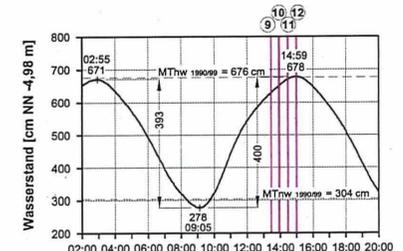
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de

### Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 04.10.2005

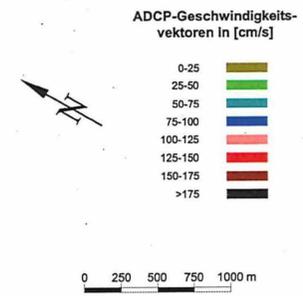


**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustädterwall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de

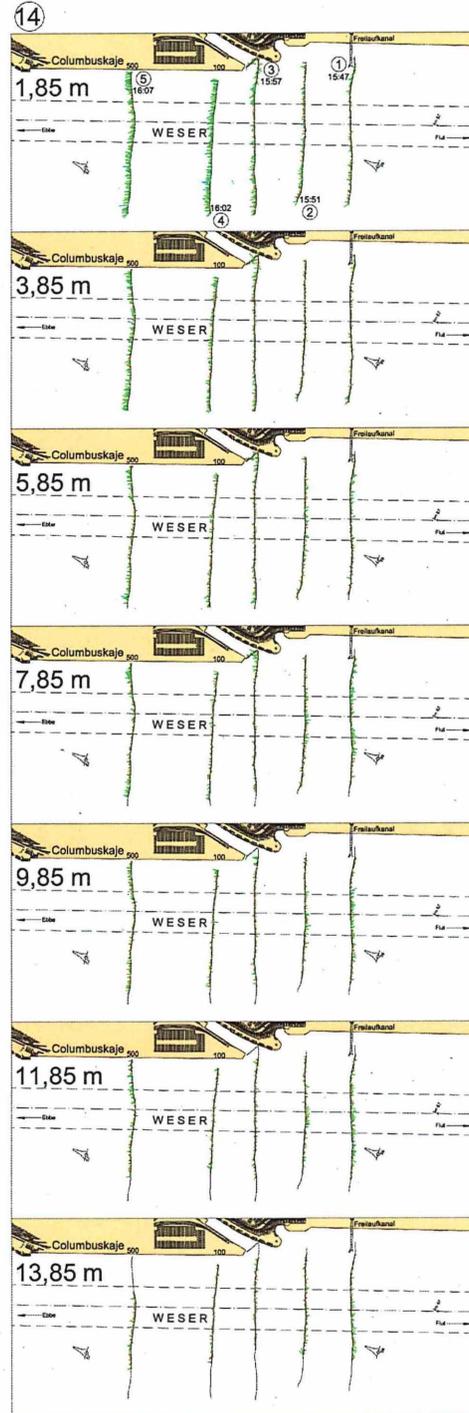
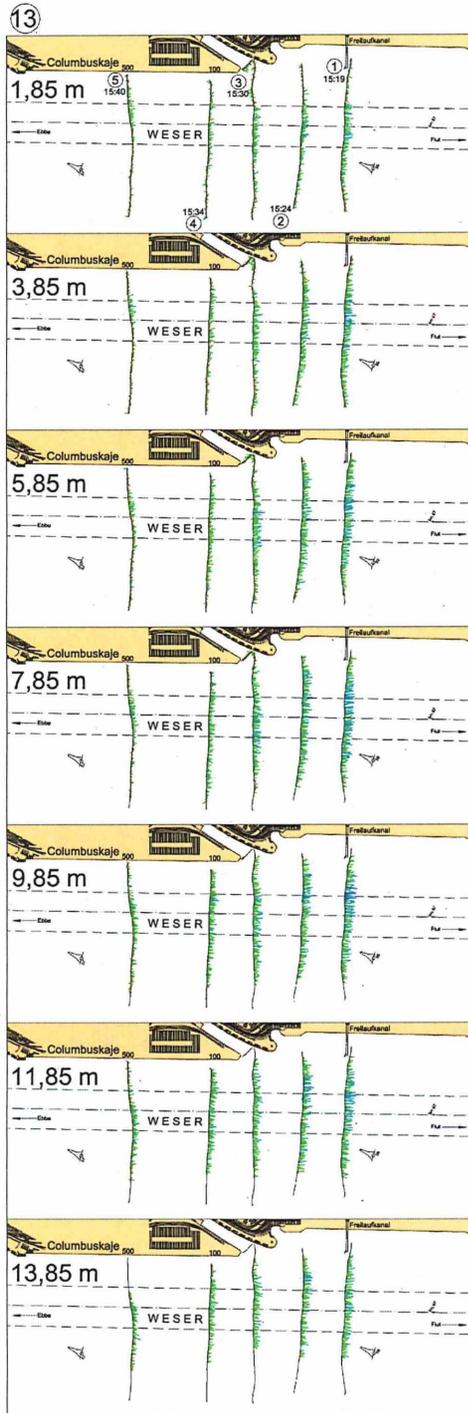
### Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 04.10.2005



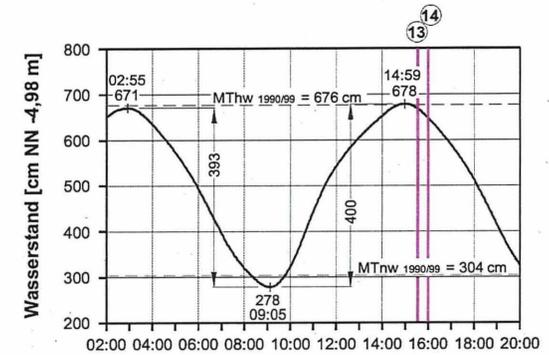
Mitteuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 162 m³/s



**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wsbau@ibw.hs-bremen.de

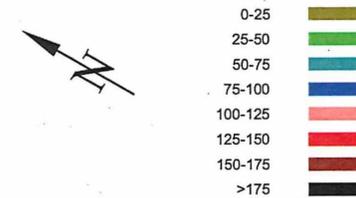


## Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 04.10.2005

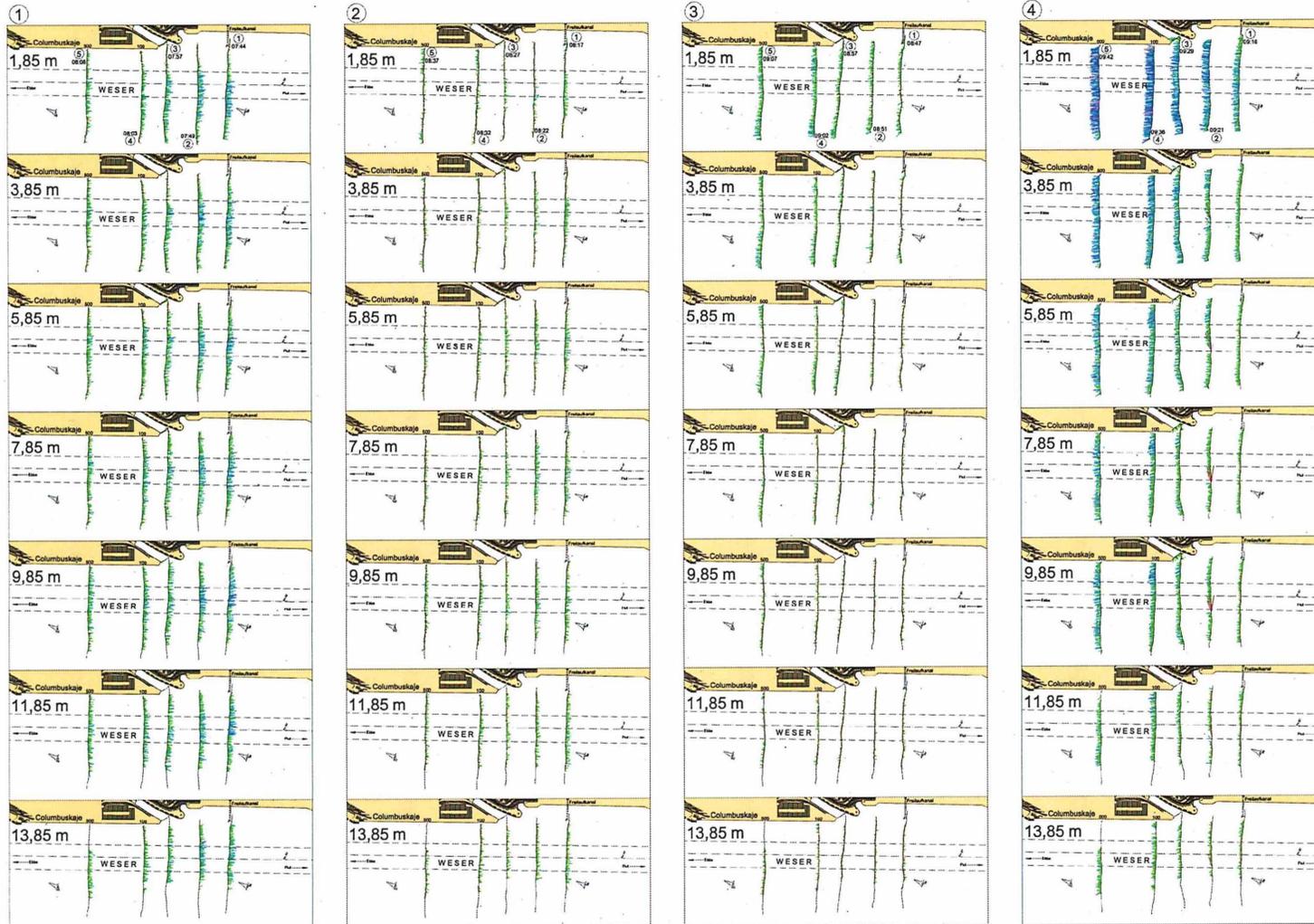


Mittleuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 162 m³/s

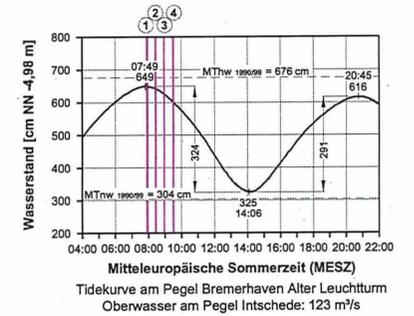
### ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



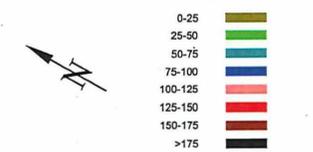
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbb.hs-bremen.de



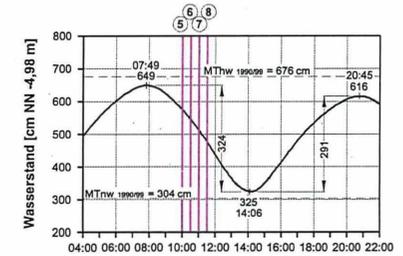
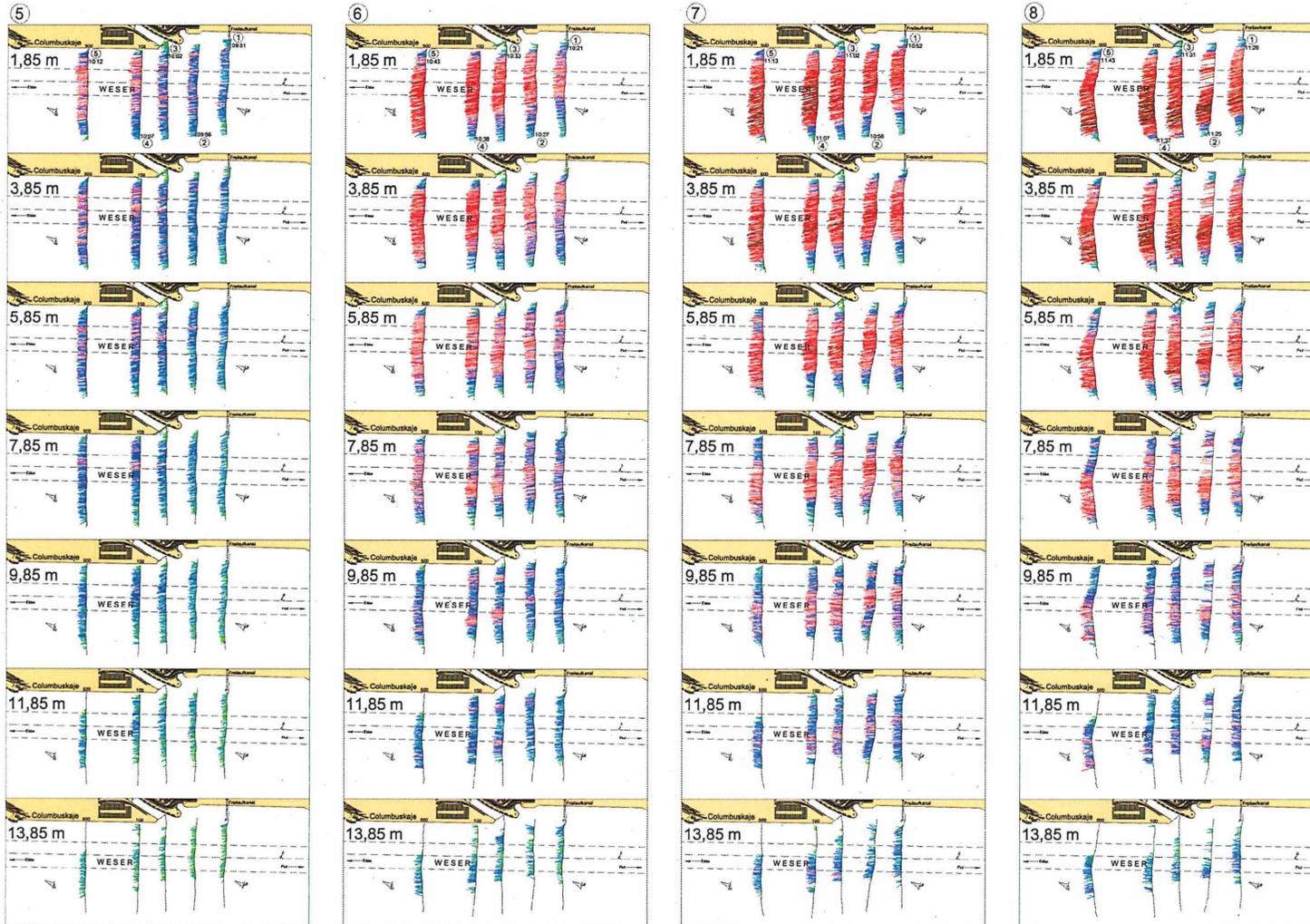
### Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 12.10.2005



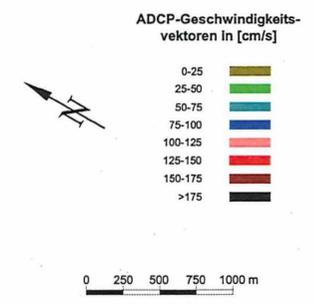
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



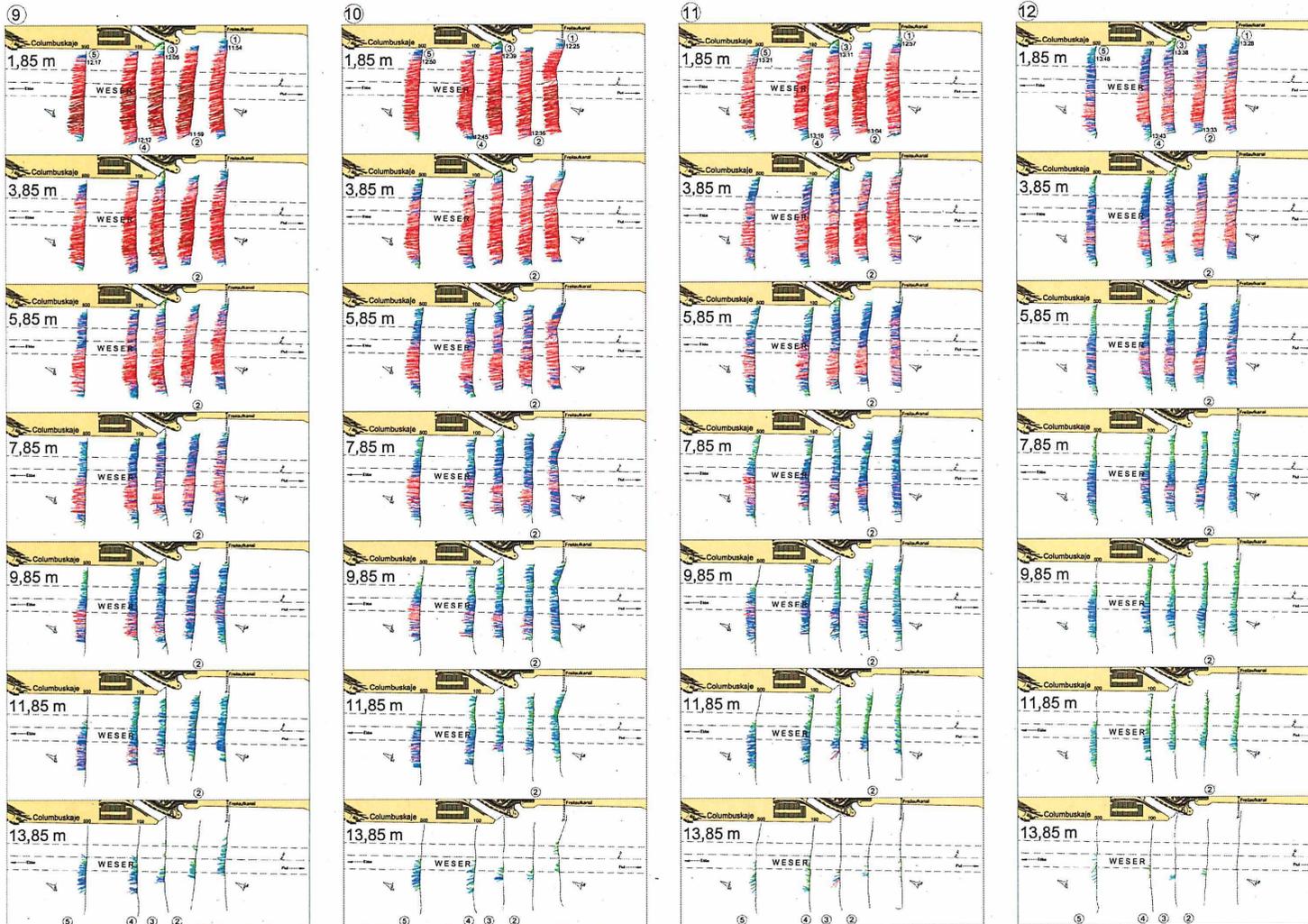
**Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven  
ADCP-Messungen am 12.10.2005**



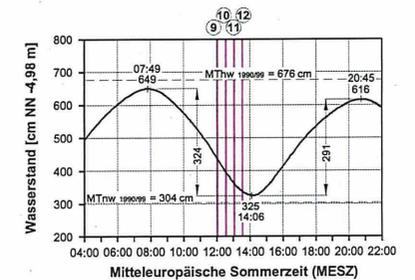
Mitteuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 123 m³/s



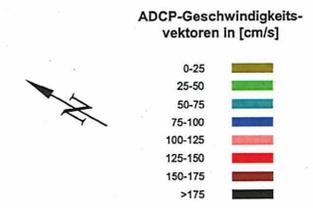
**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@iwb.hs-bremen.de

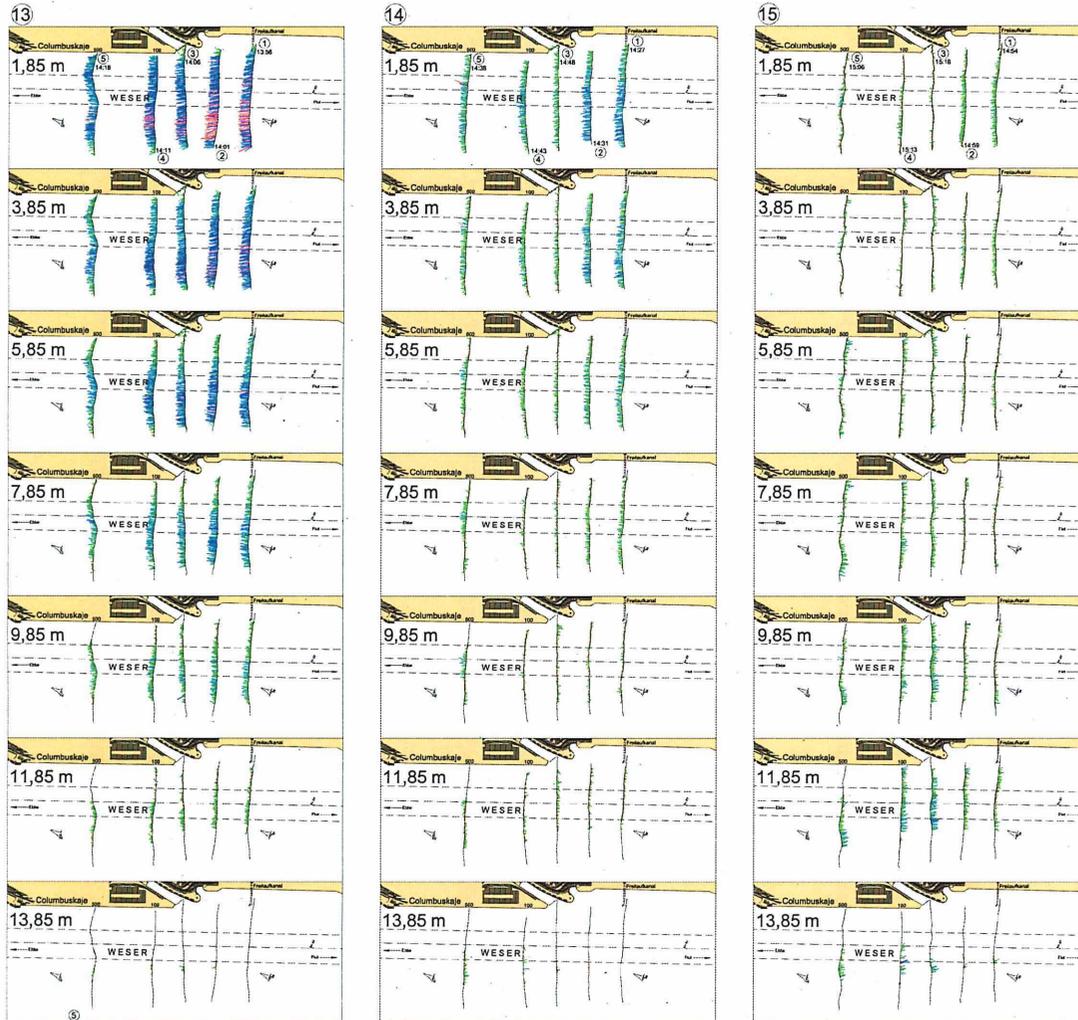


### Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 12.10.2005

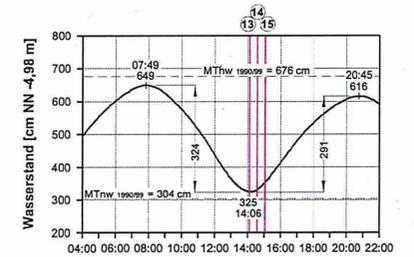


Mittteleuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 123 m/s





**Strömungen in der Weser im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven  
ADCP-Messungen am 12.10.2005**



Mitteuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 123 m³/s

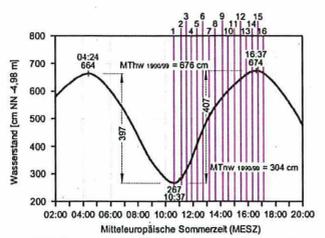
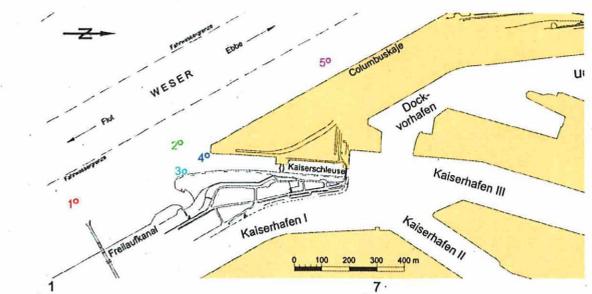
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



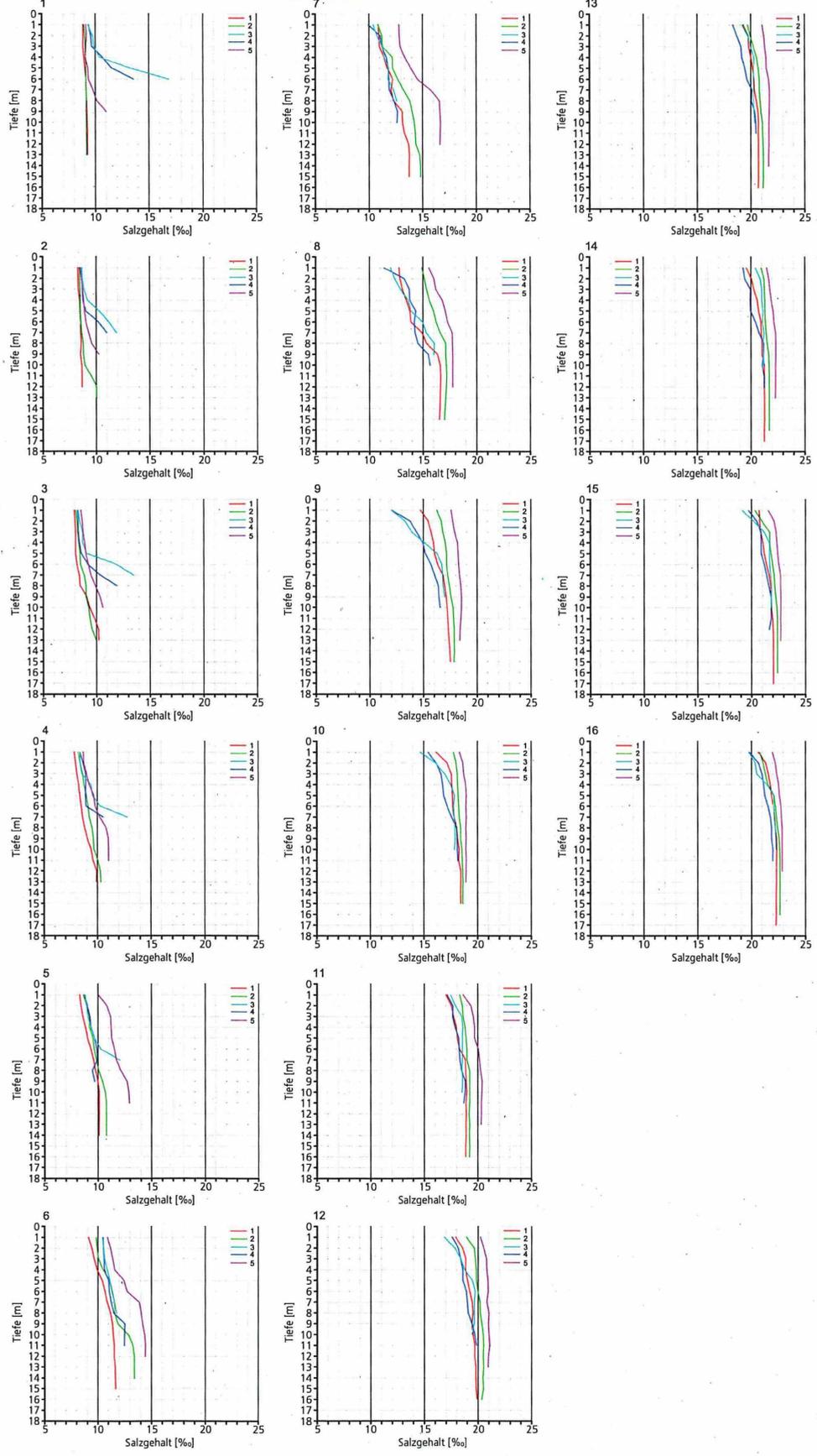
- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



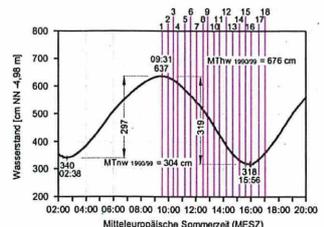
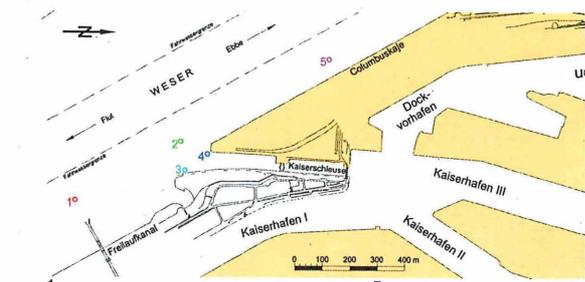
Institut für Wasserbau  
Neustädterwall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de



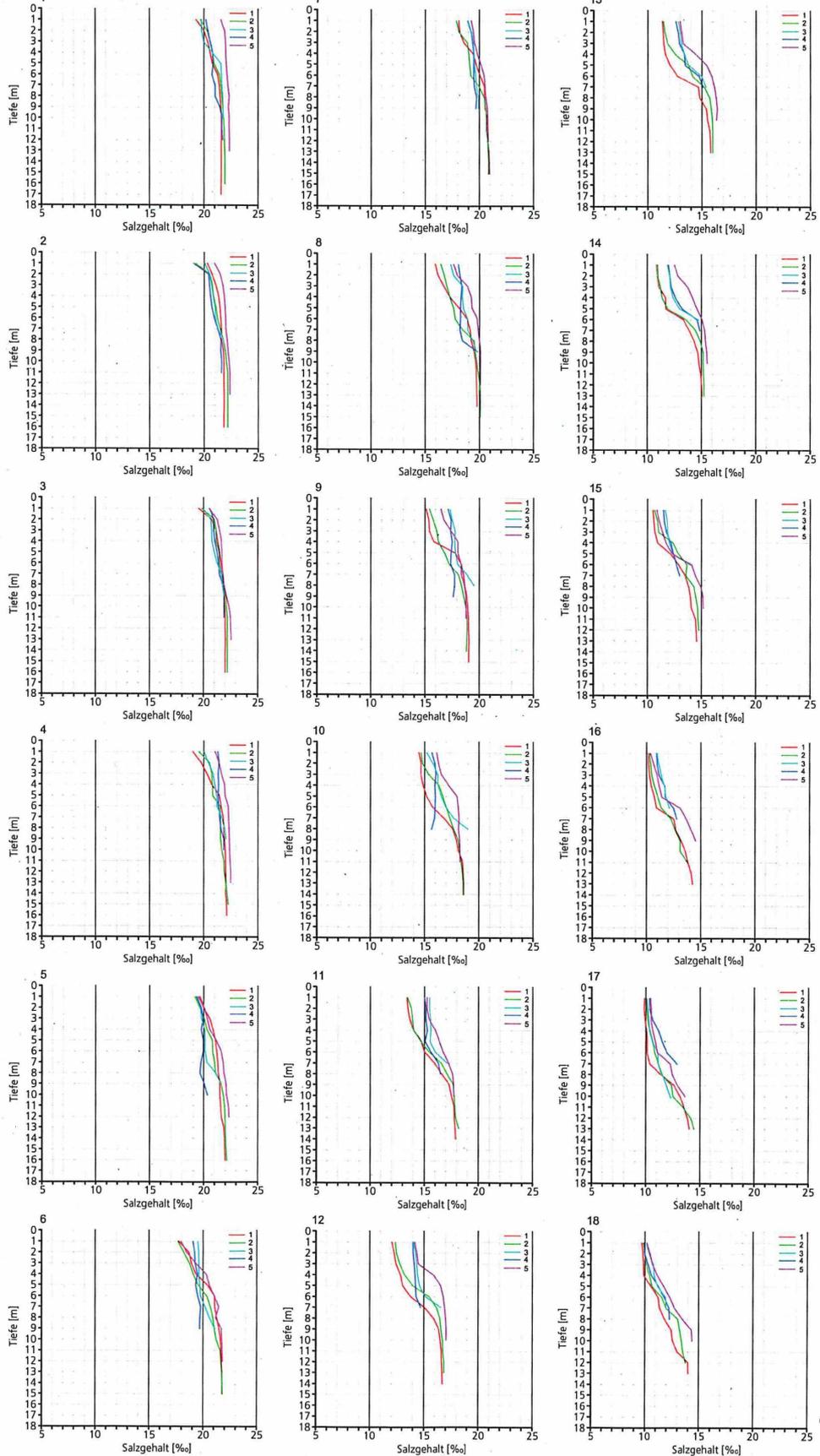
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 135 m³/s



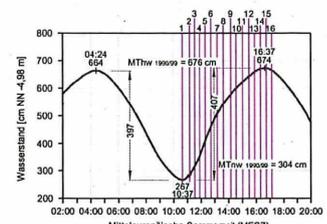
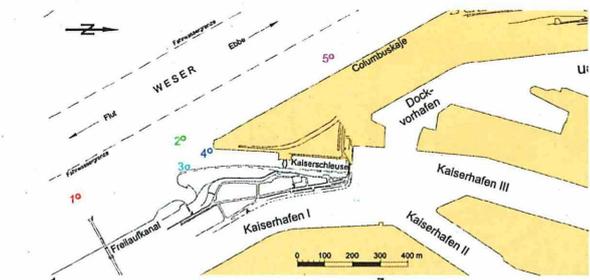
Salzgehalte im Bereich der Kaltschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 07.10.2005



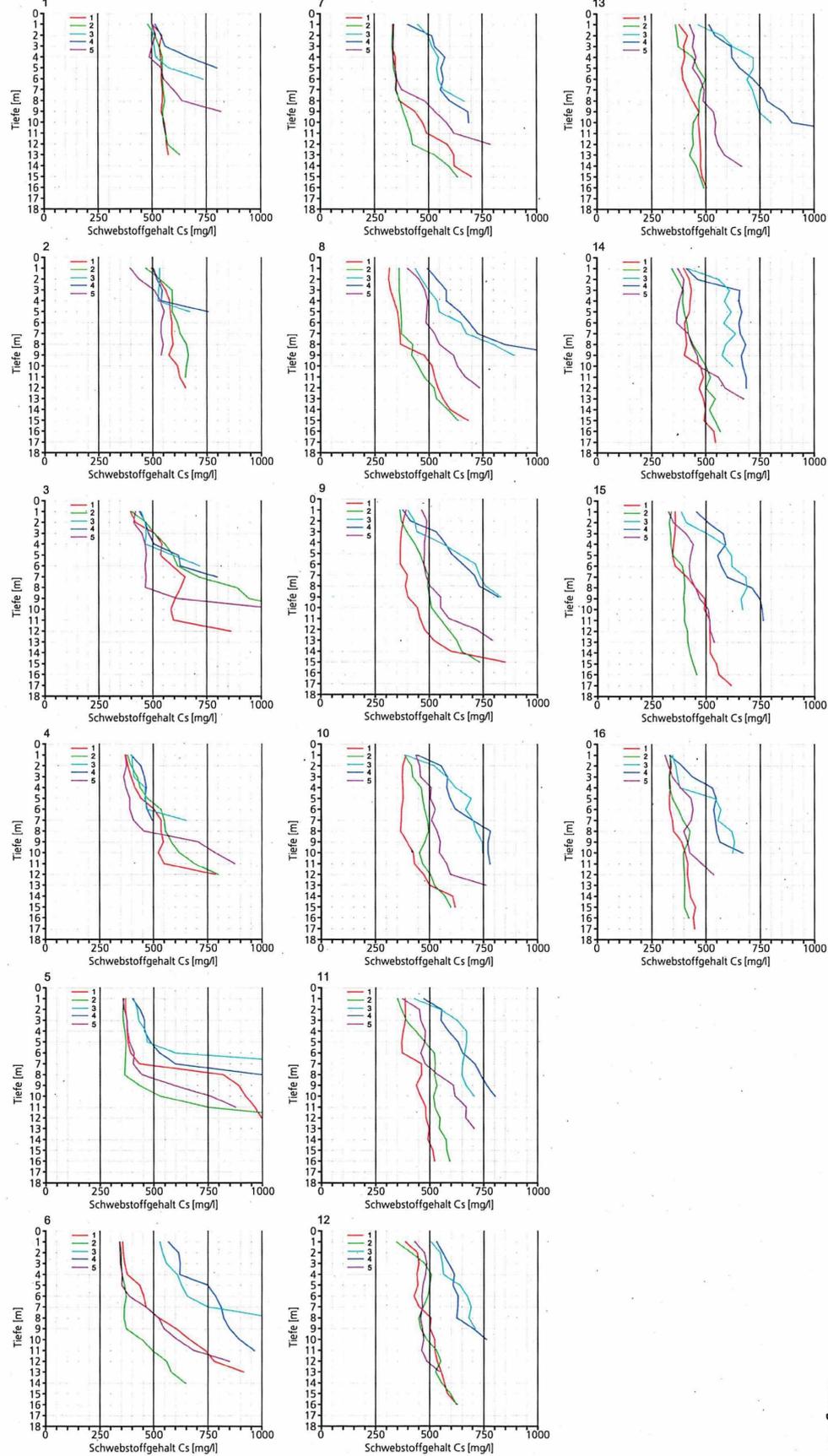
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Itzschede: 124 m³/s



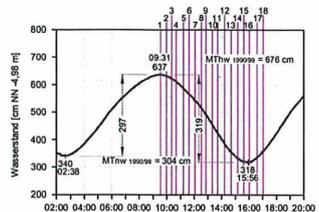
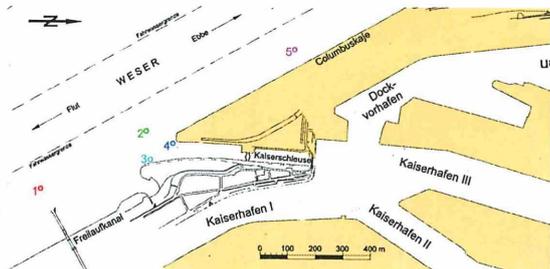
Salzgehalte im Bereich der Kaisererschleuse in Bremerhaven  
Ebbemessung am 13.10.2005



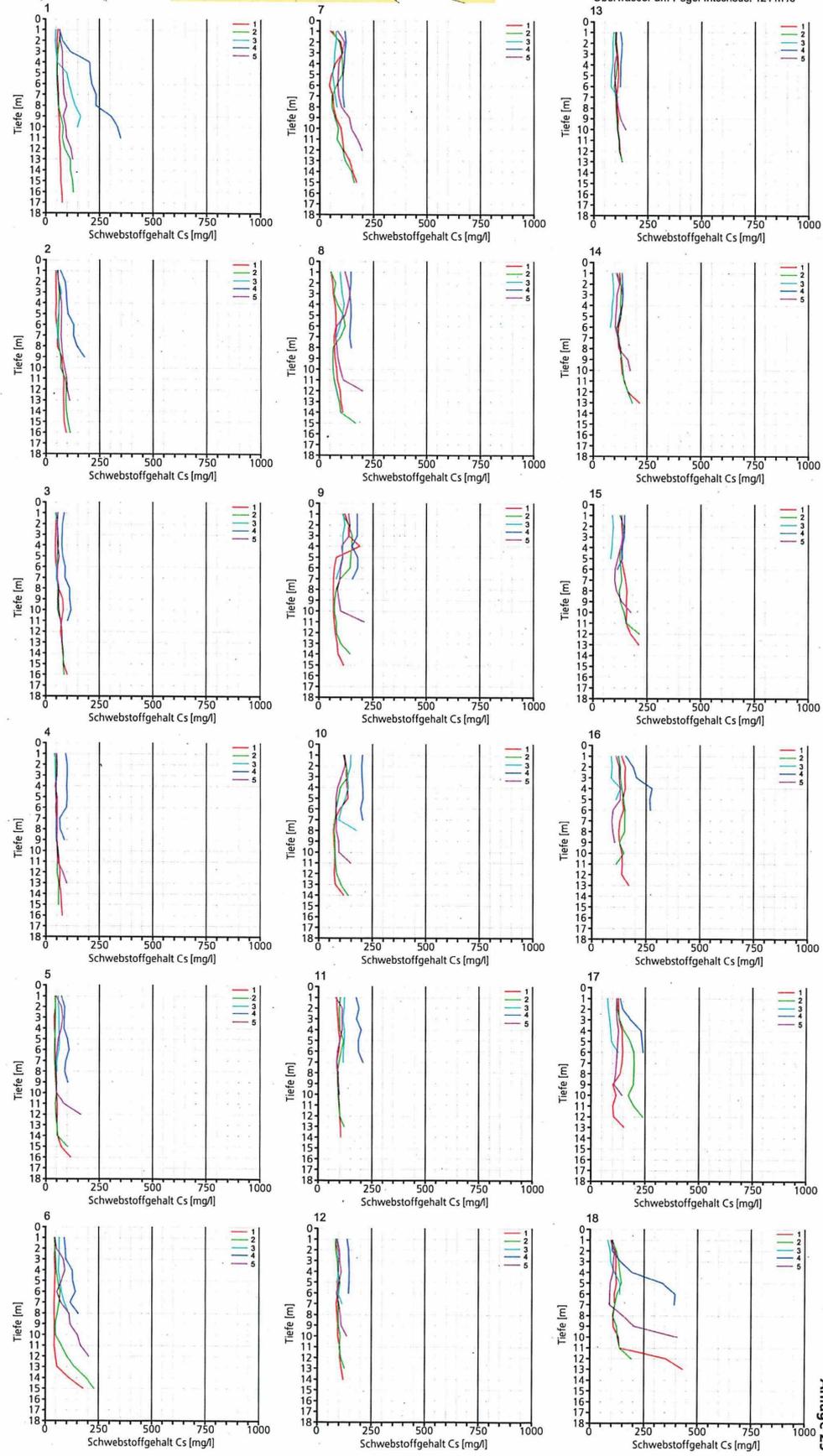
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Aller Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 135 m³/s  
Mittleuropäische Sommerzeit (MESZ)



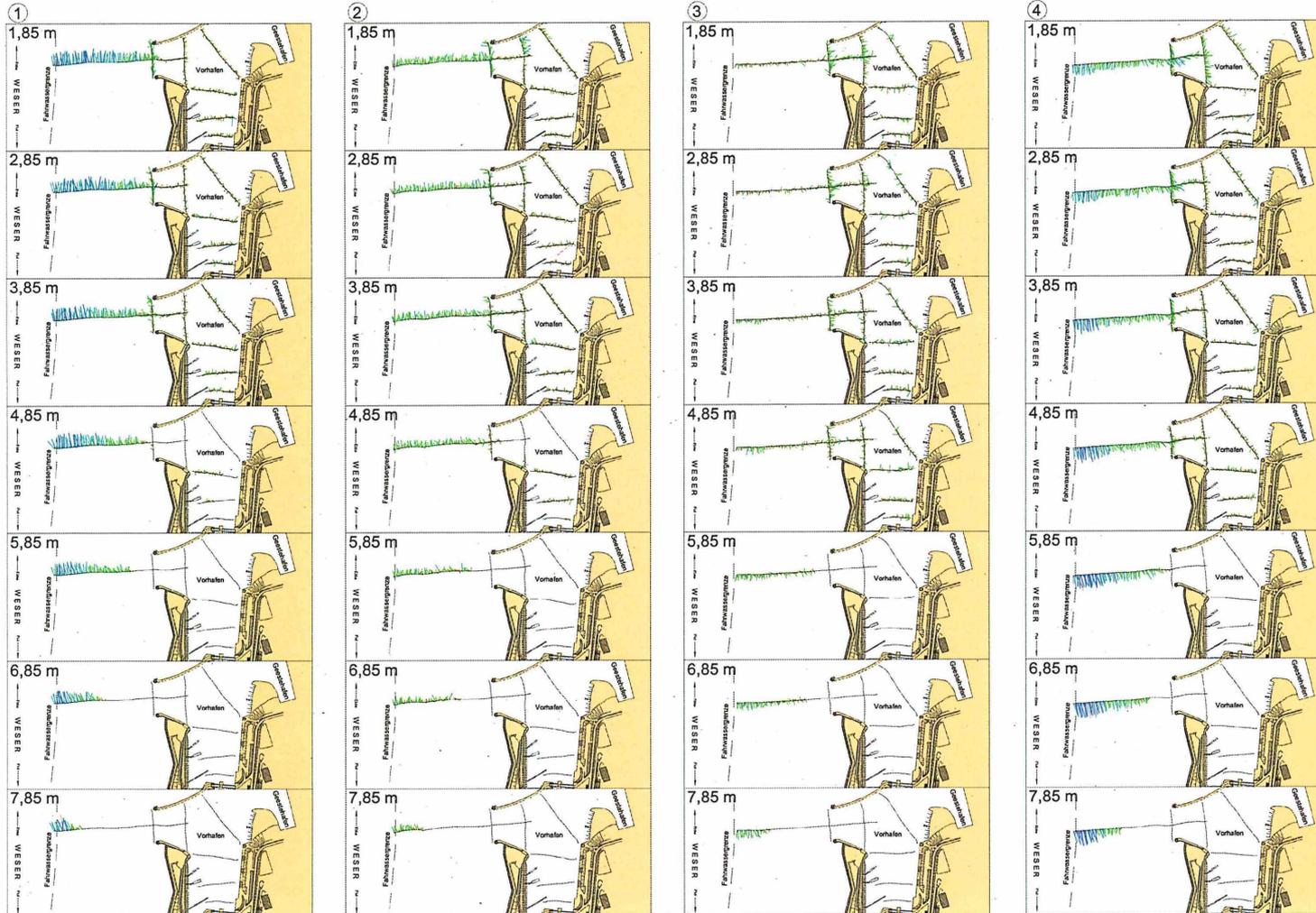
Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 07.10.2005



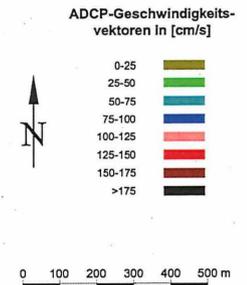
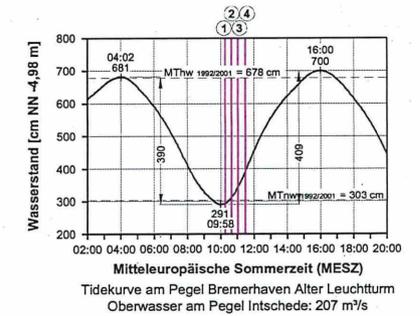
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 124 m³/s  
Mitteltagesplütsche Sommerzeit (MESZ)



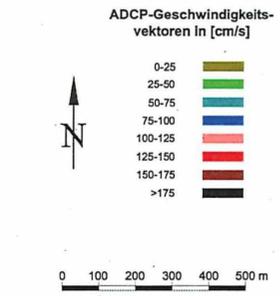
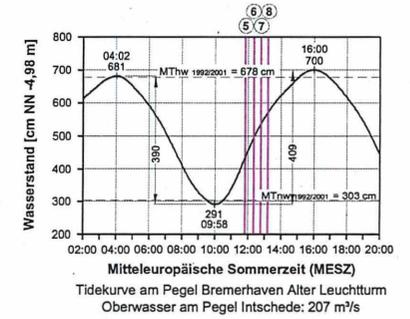
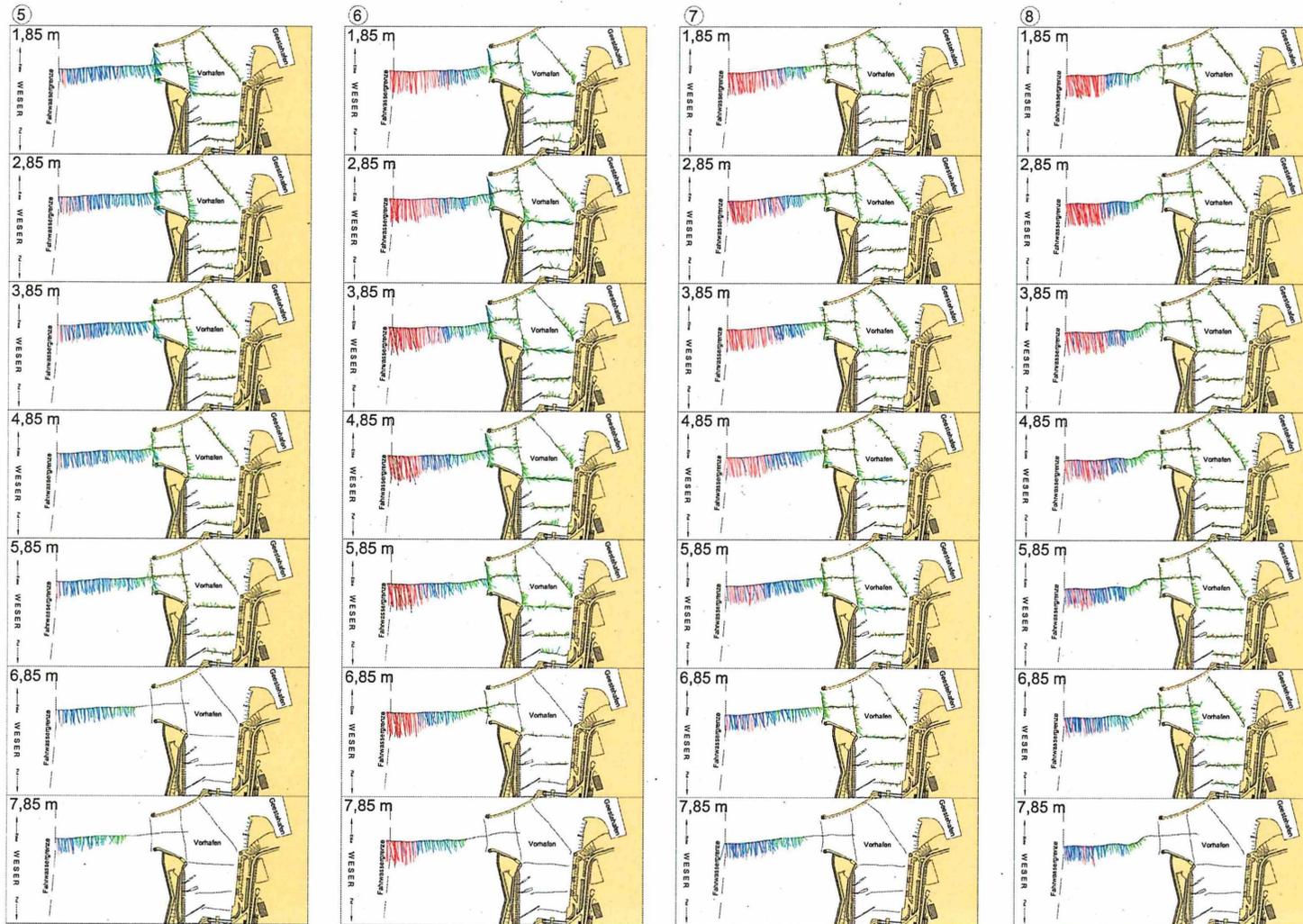
Schwebstoffe im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven  
Erbemessung am 13.10.2005



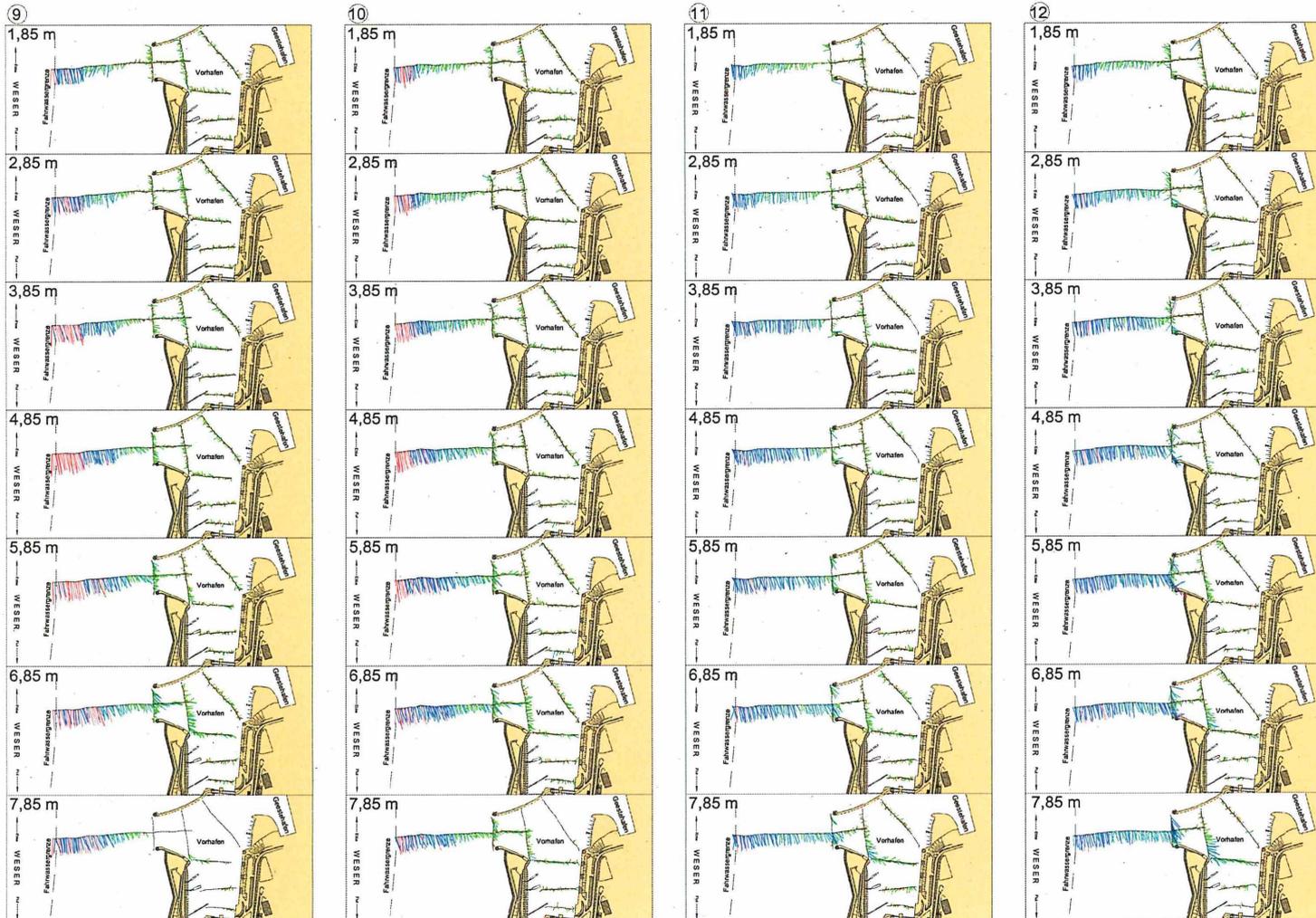
### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 28.06.2006



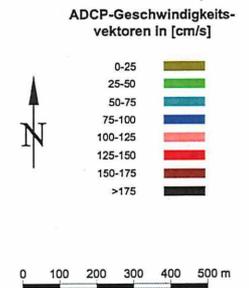
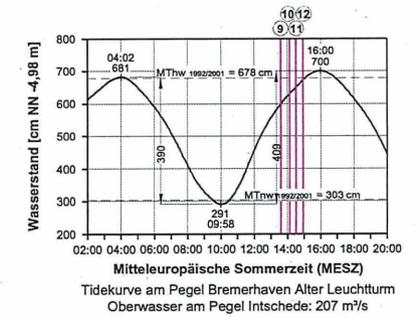
## Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 28.06.2006



**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de

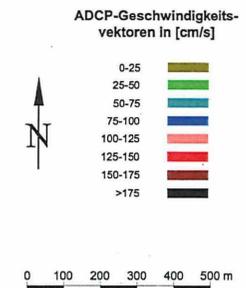
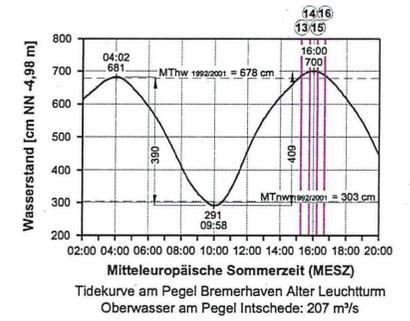
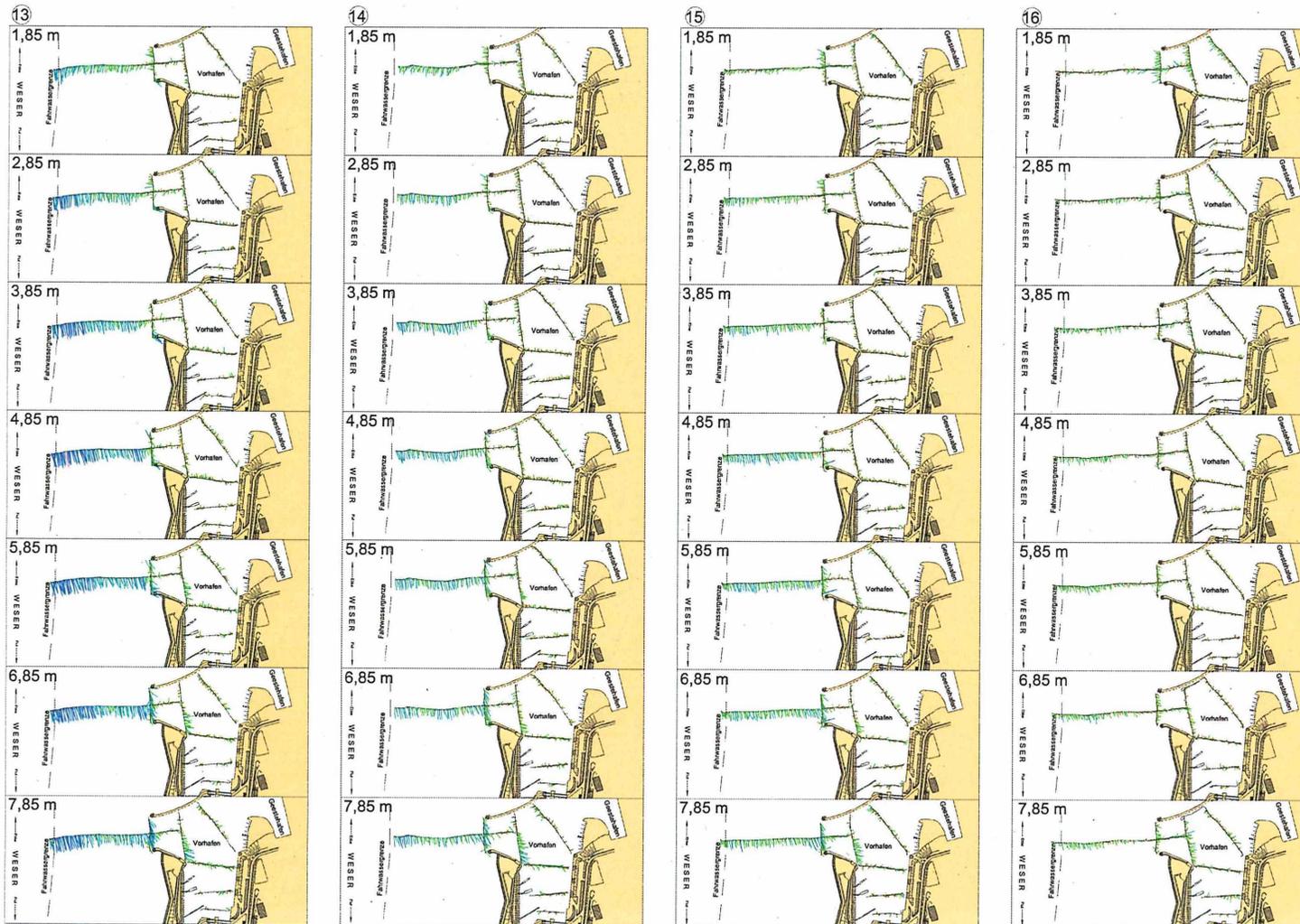


### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 28.06.2006

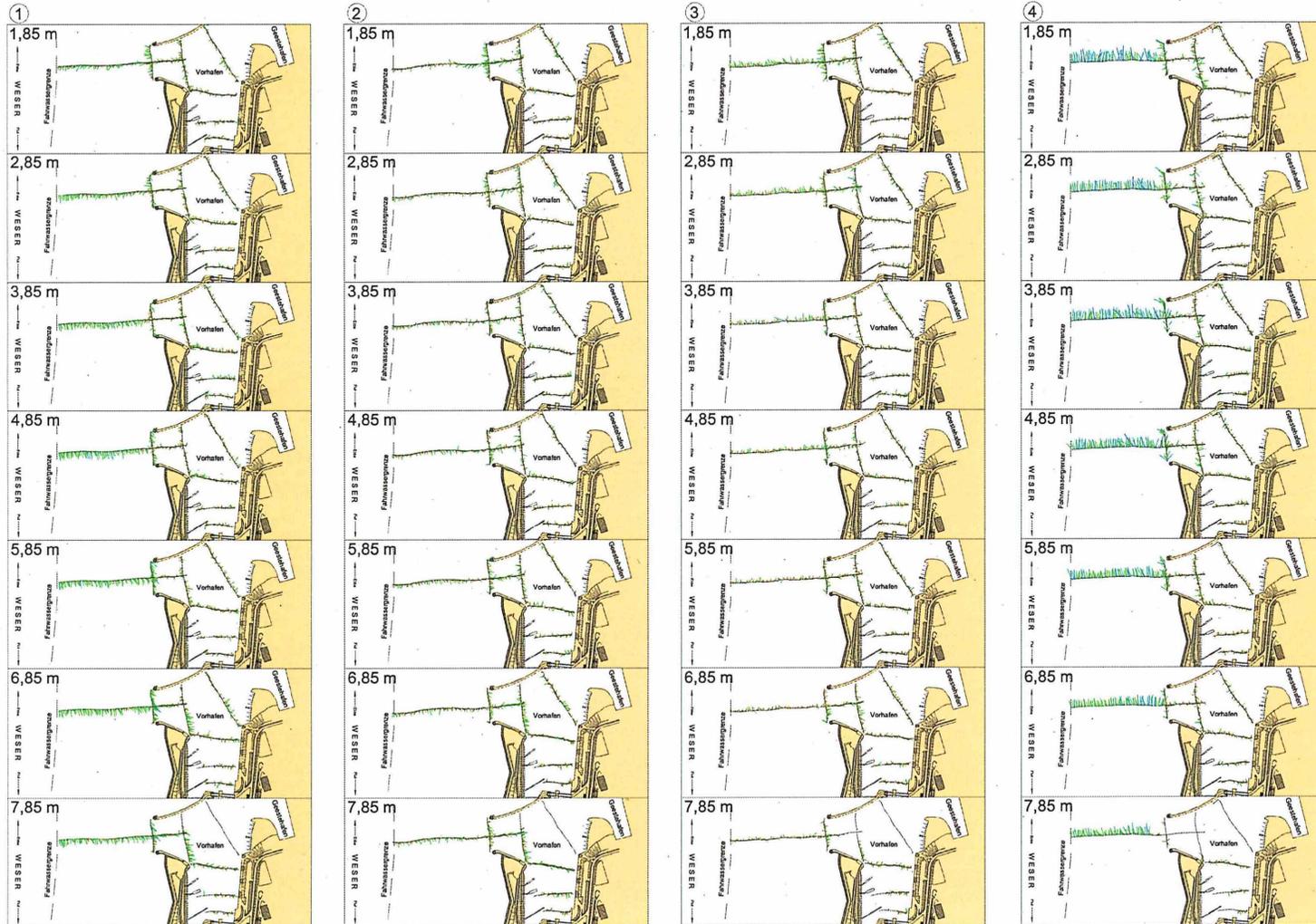


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de

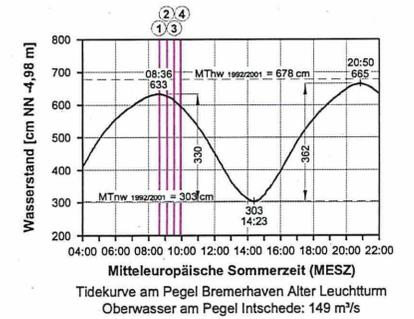
### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 28.06.2006



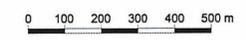
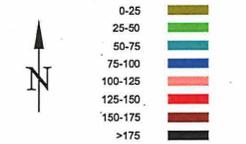
Institut für Wasserbau  
Neustadtwall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibb.hs-bremen.de



### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 05.07.2006

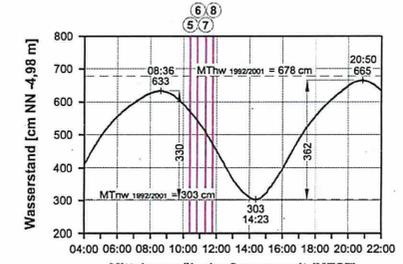
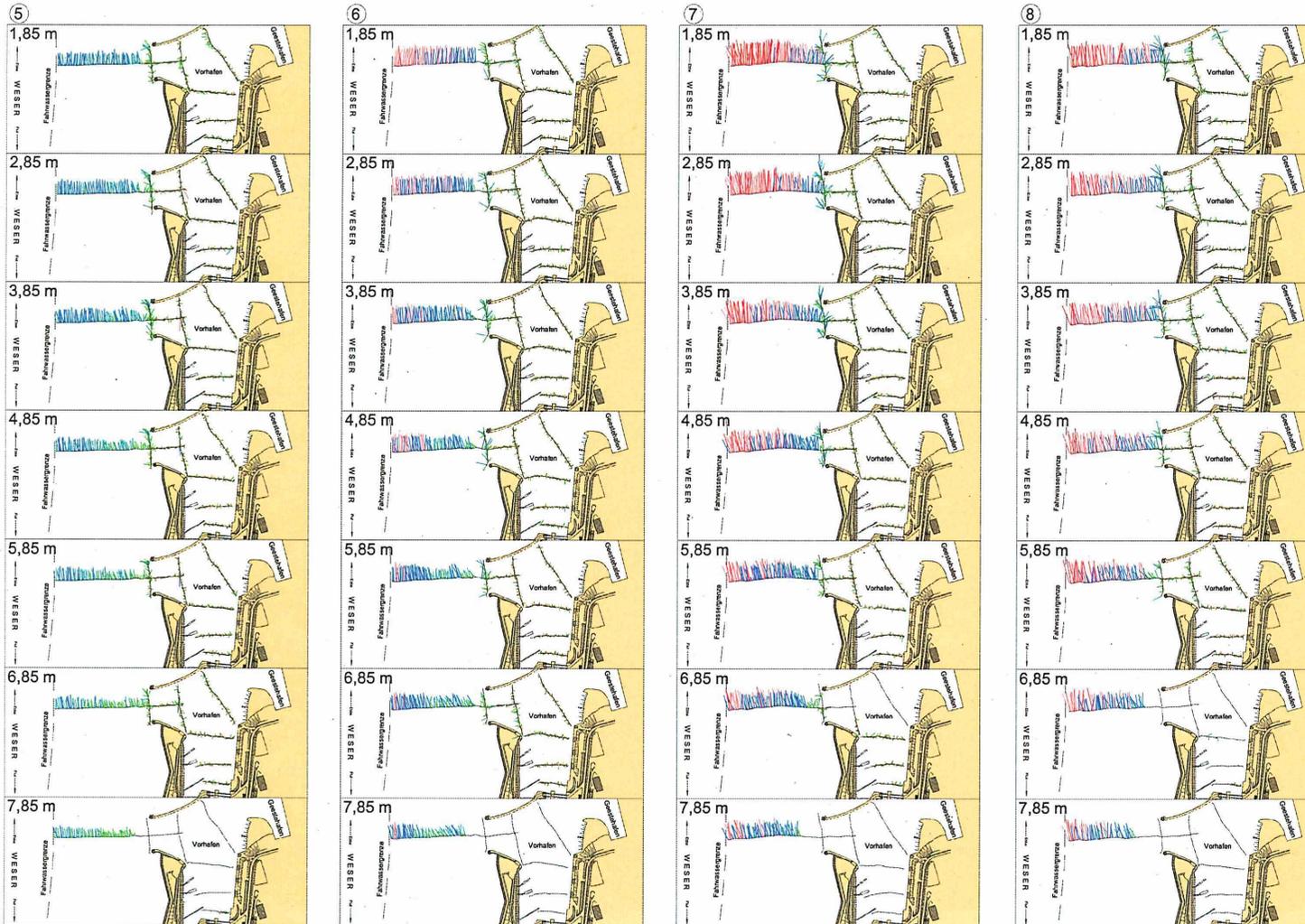


ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

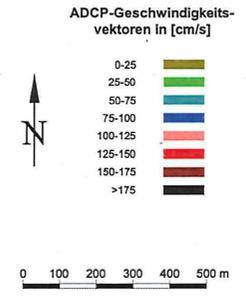


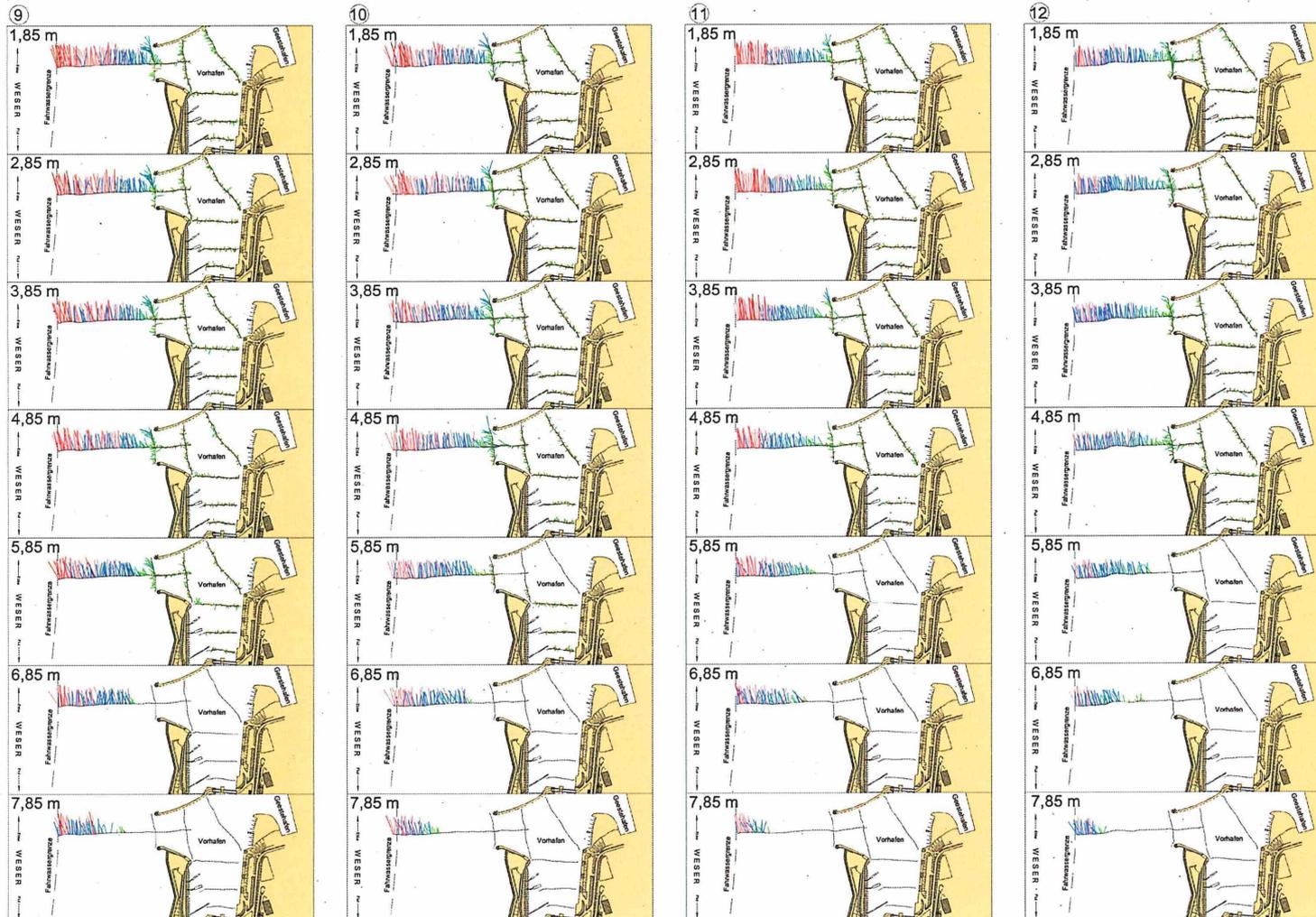
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de

### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 05.07.2006

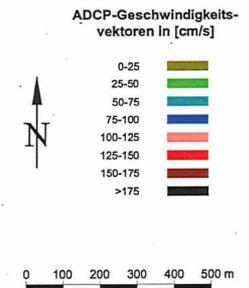
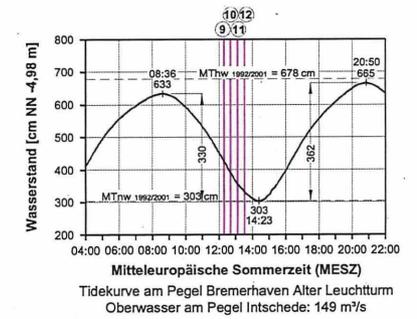


Mittteleuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 149 m³/s



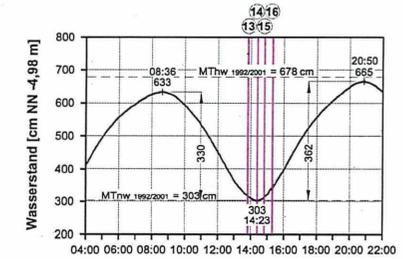
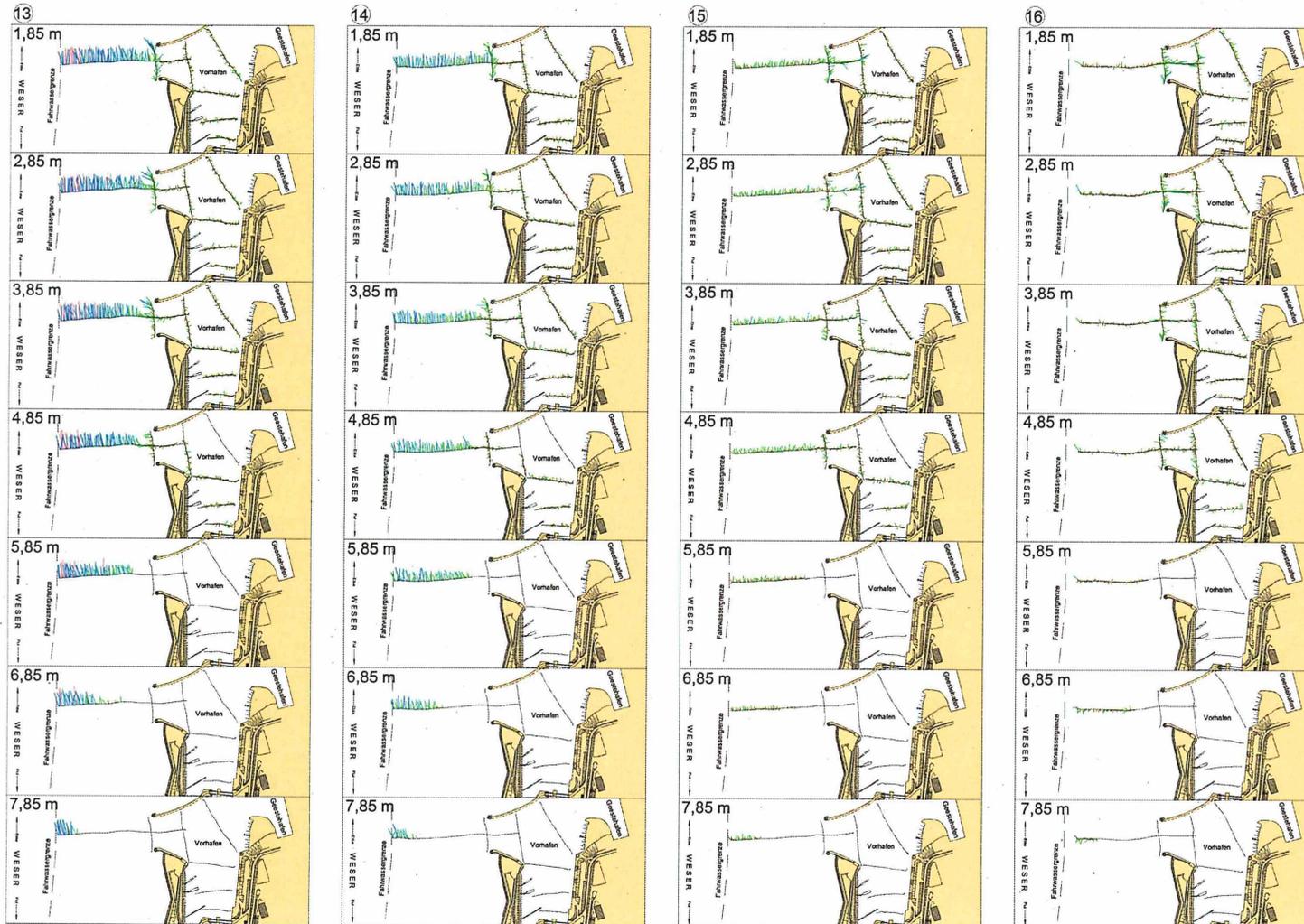


### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 05.07.2006

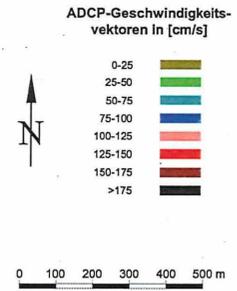


**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
26119 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de

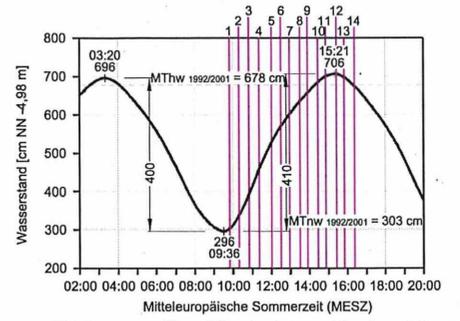
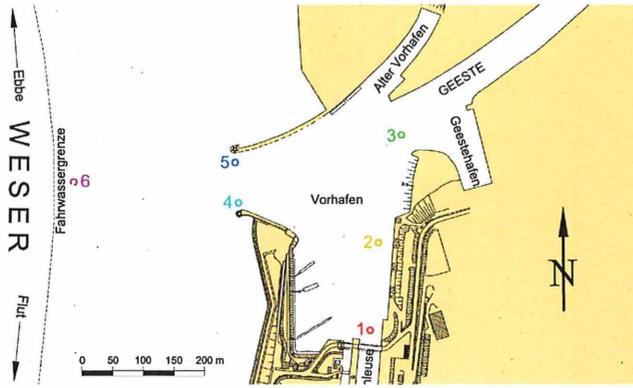
### Strömungen im Vorhafen der Doppelschleuse in Bremerhaven ADCP-Messungen am 05.07.2006



Mittleuropäische Sommerzeit (MESZ)  
Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 149 m³/s

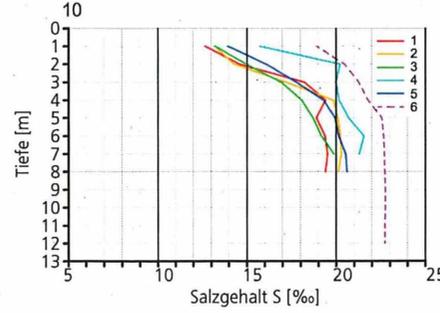
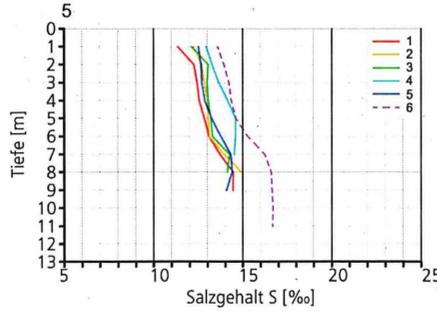
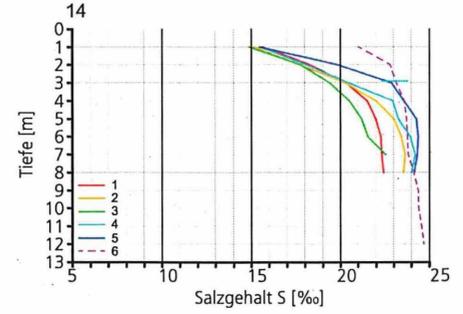
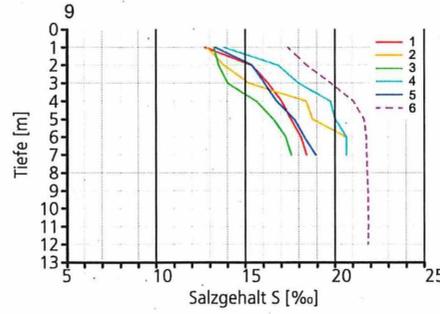
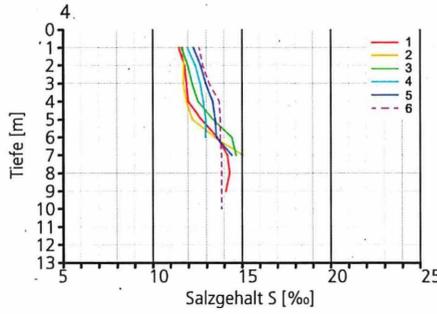
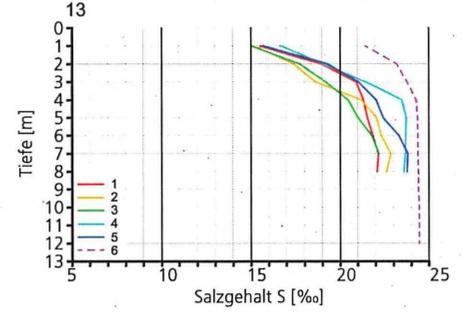
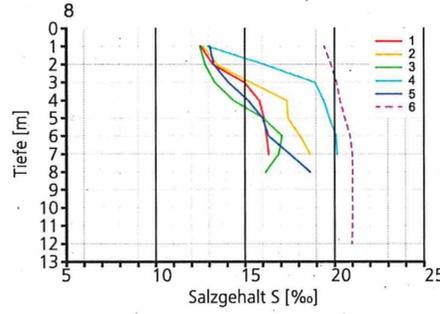
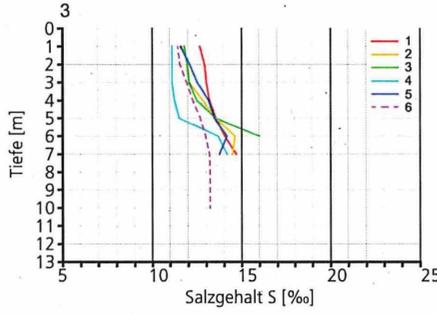
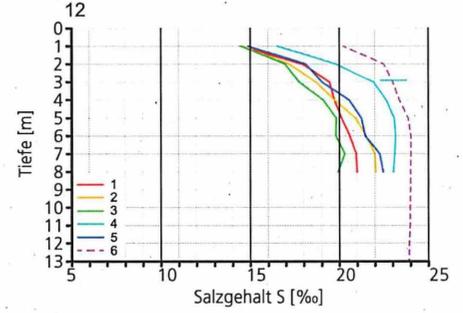
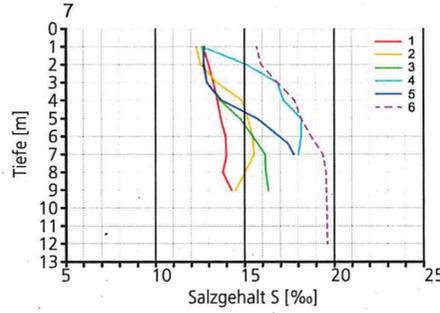
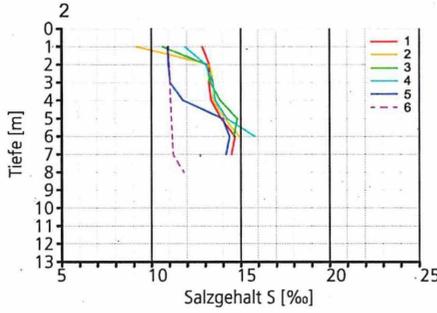
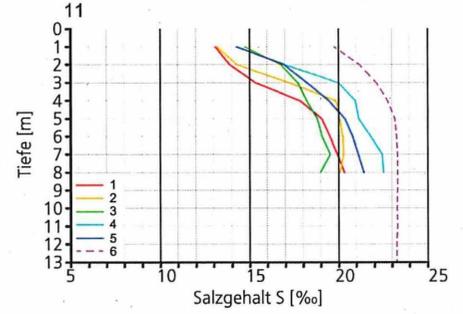
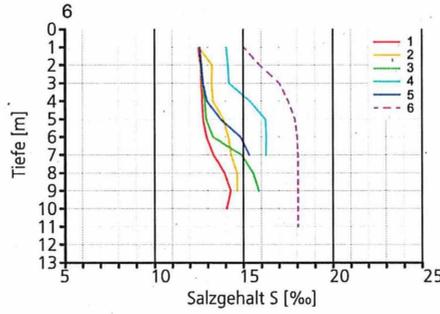
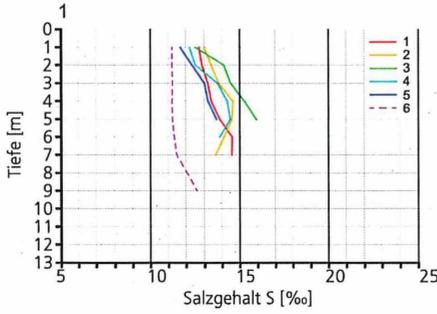


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibb.hb-bremen.de

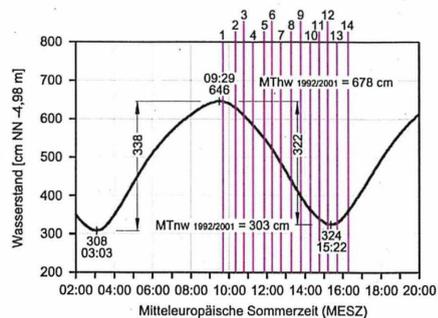
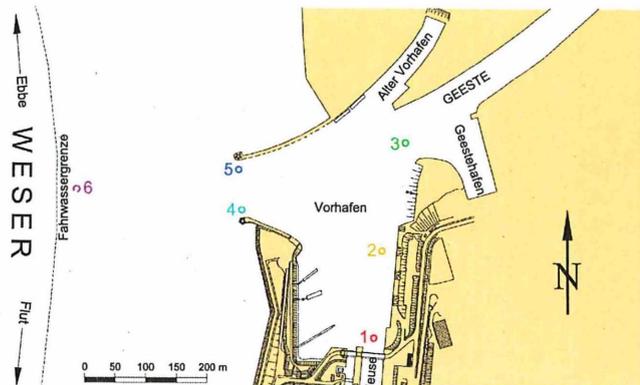


Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm vom 27.06.2006

Oberwasser am Pegel Intschede: 217 m³/s

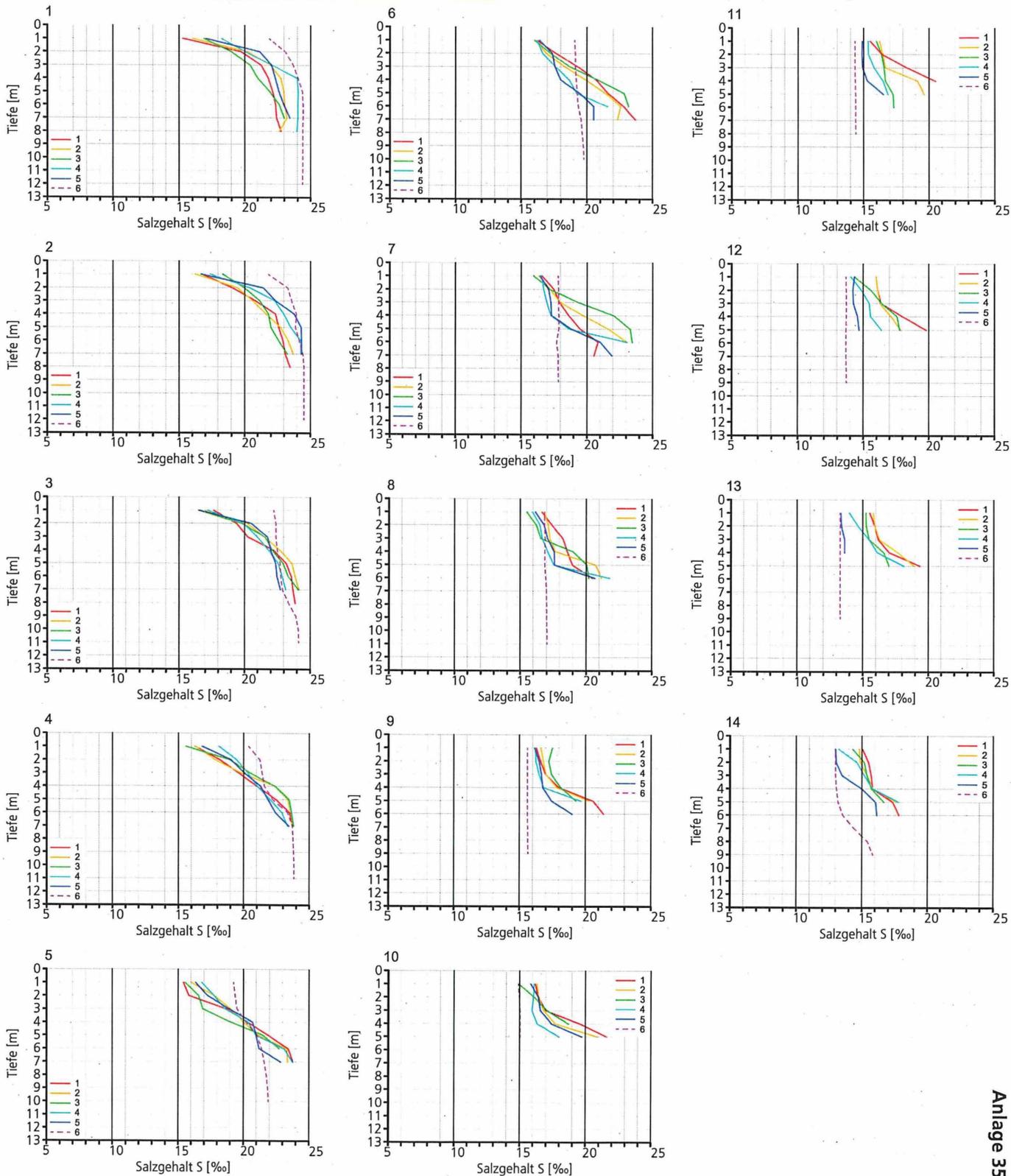


Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 27.06.2006

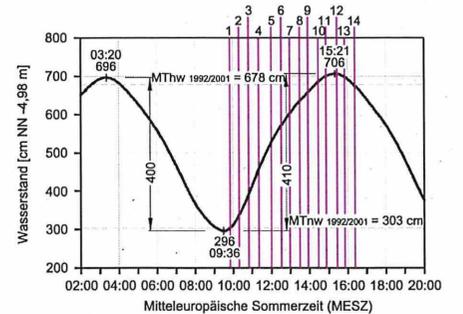
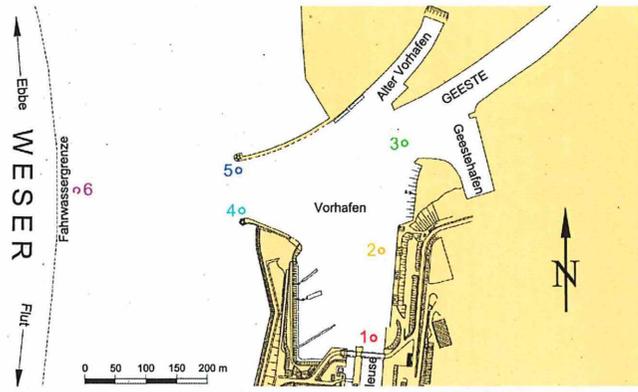


Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm vom 06.07.2006

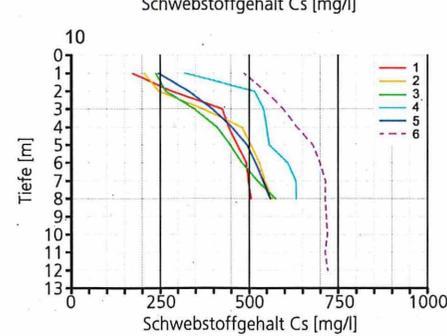
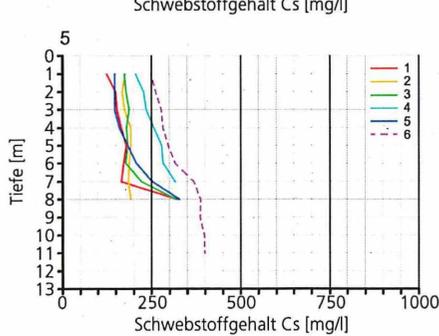
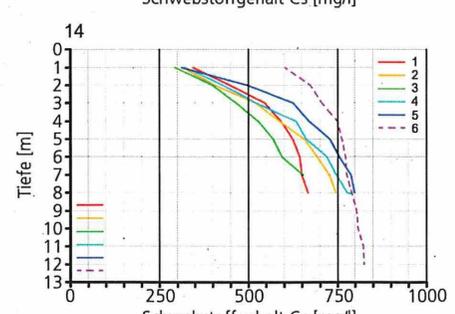
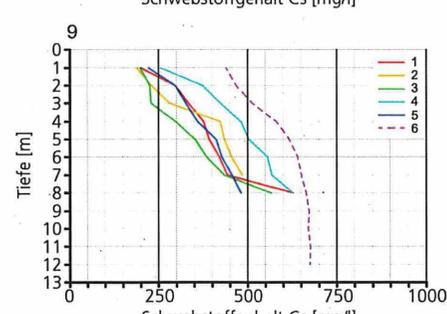
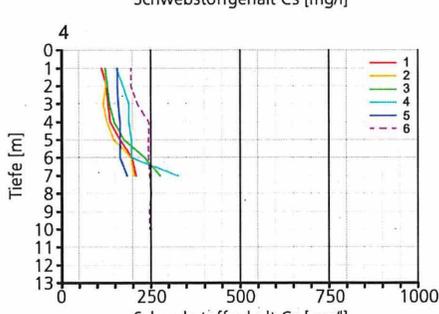
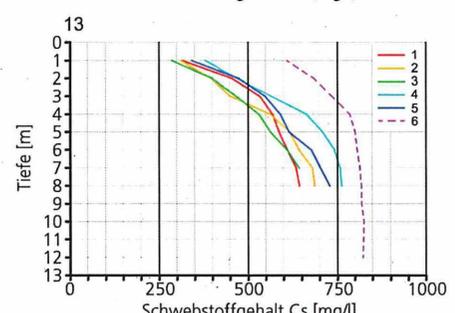
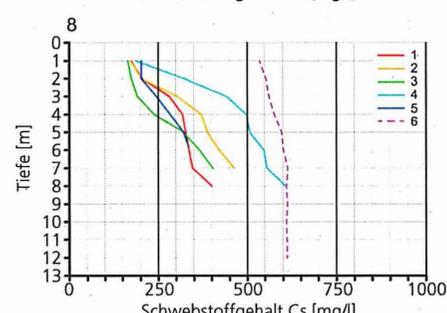
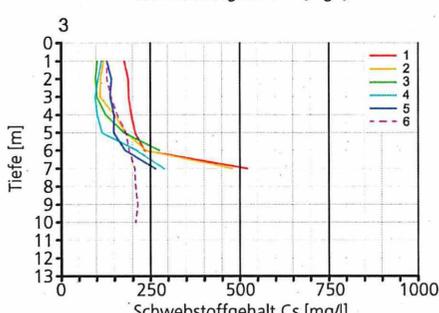
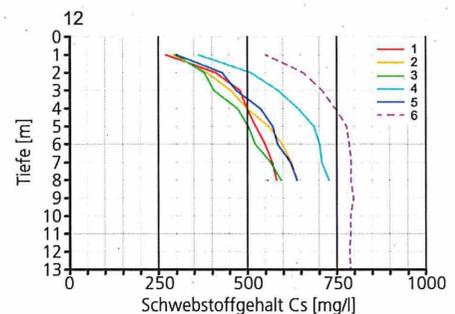
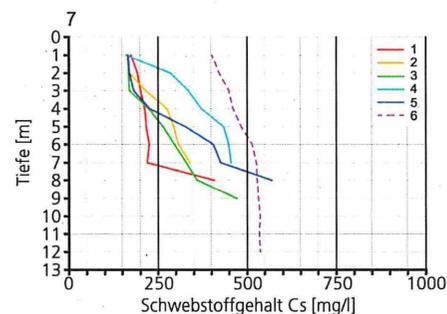
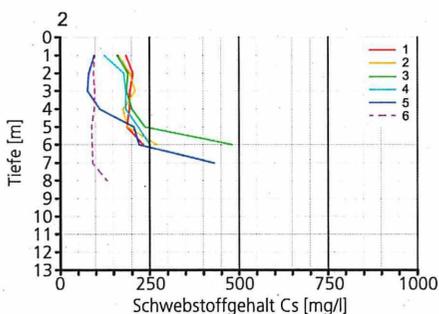
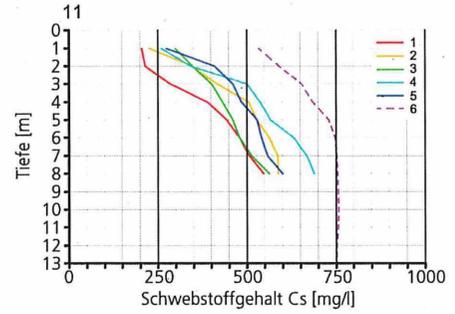
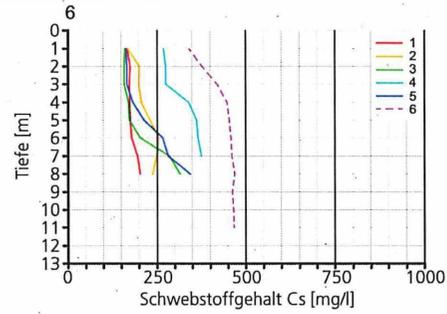
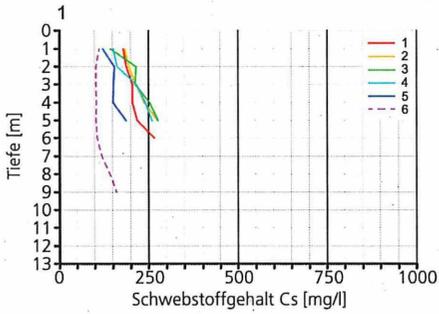
Oberwasser am Pegel Intschede: 144 m³/s



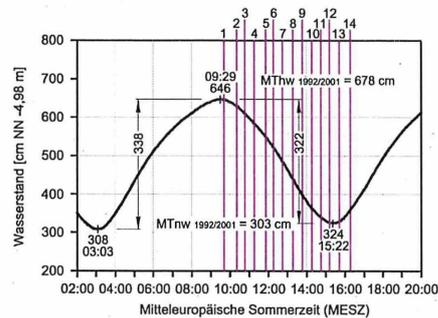
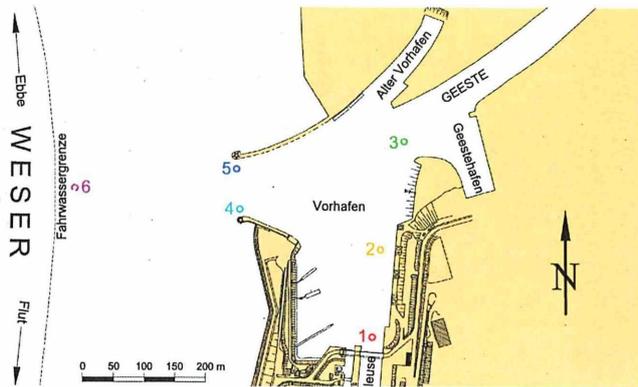
Salzgehalte im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven  
Ebbemessung am 06.07.2006



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm vom 27.06.2006  
Oberwasser am Pegel Intschede: 217 m³/s

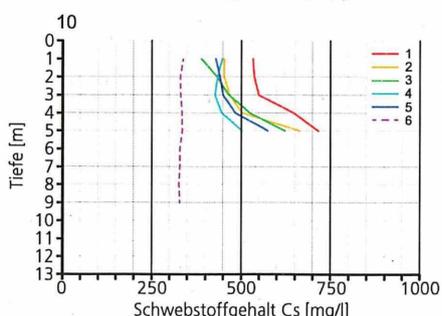
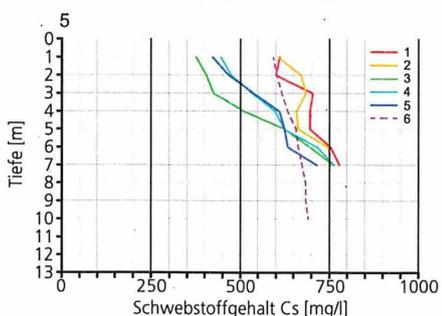
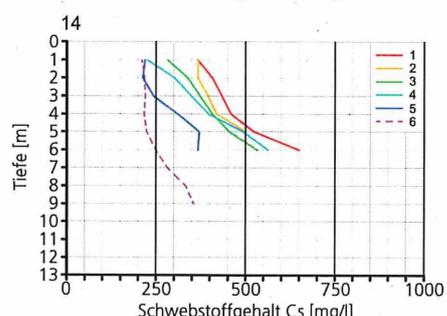
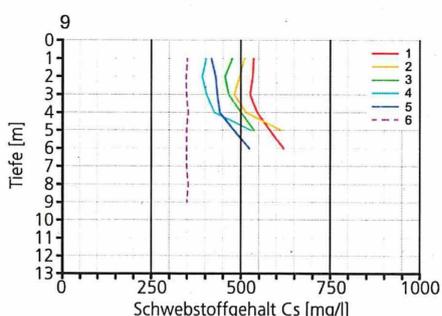
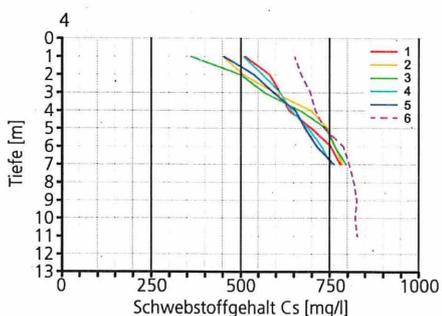
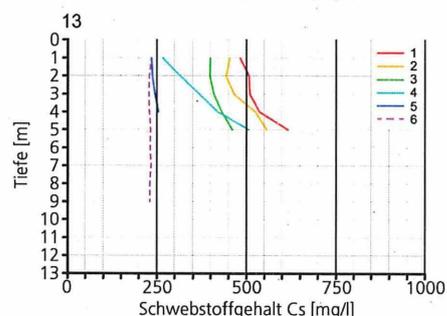
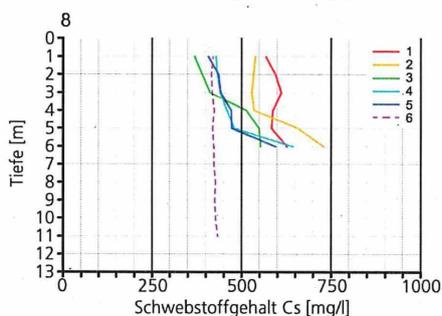
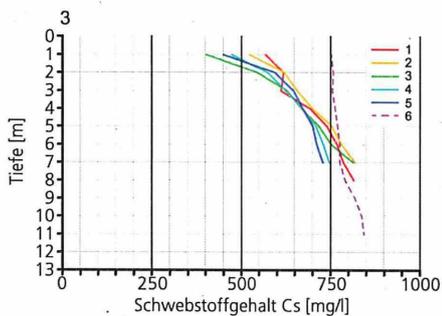
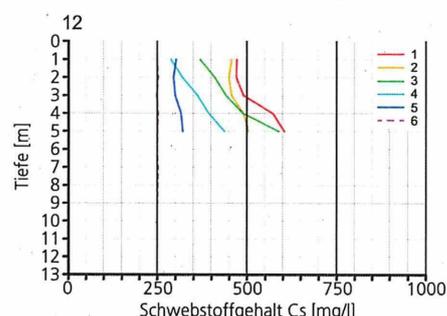
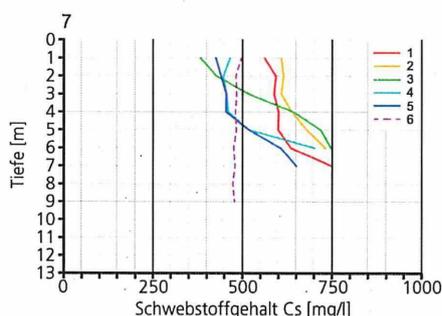
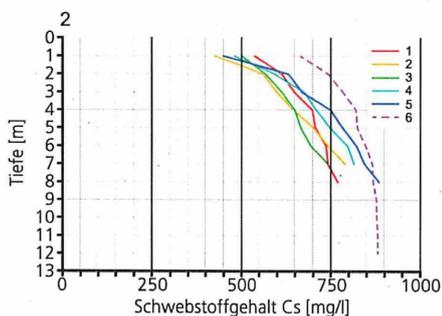
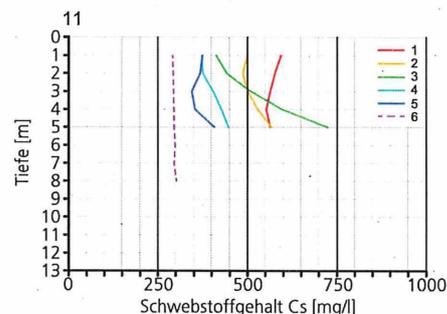
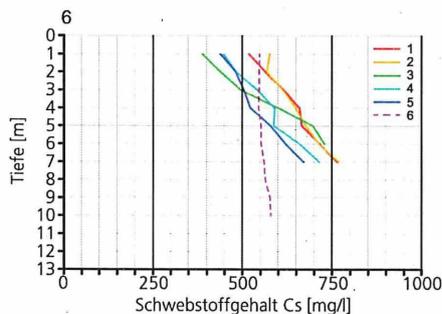
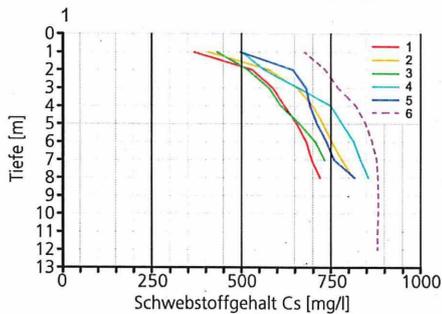


Schwebstoffe im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven  
Flutmessung am 27.06.2006

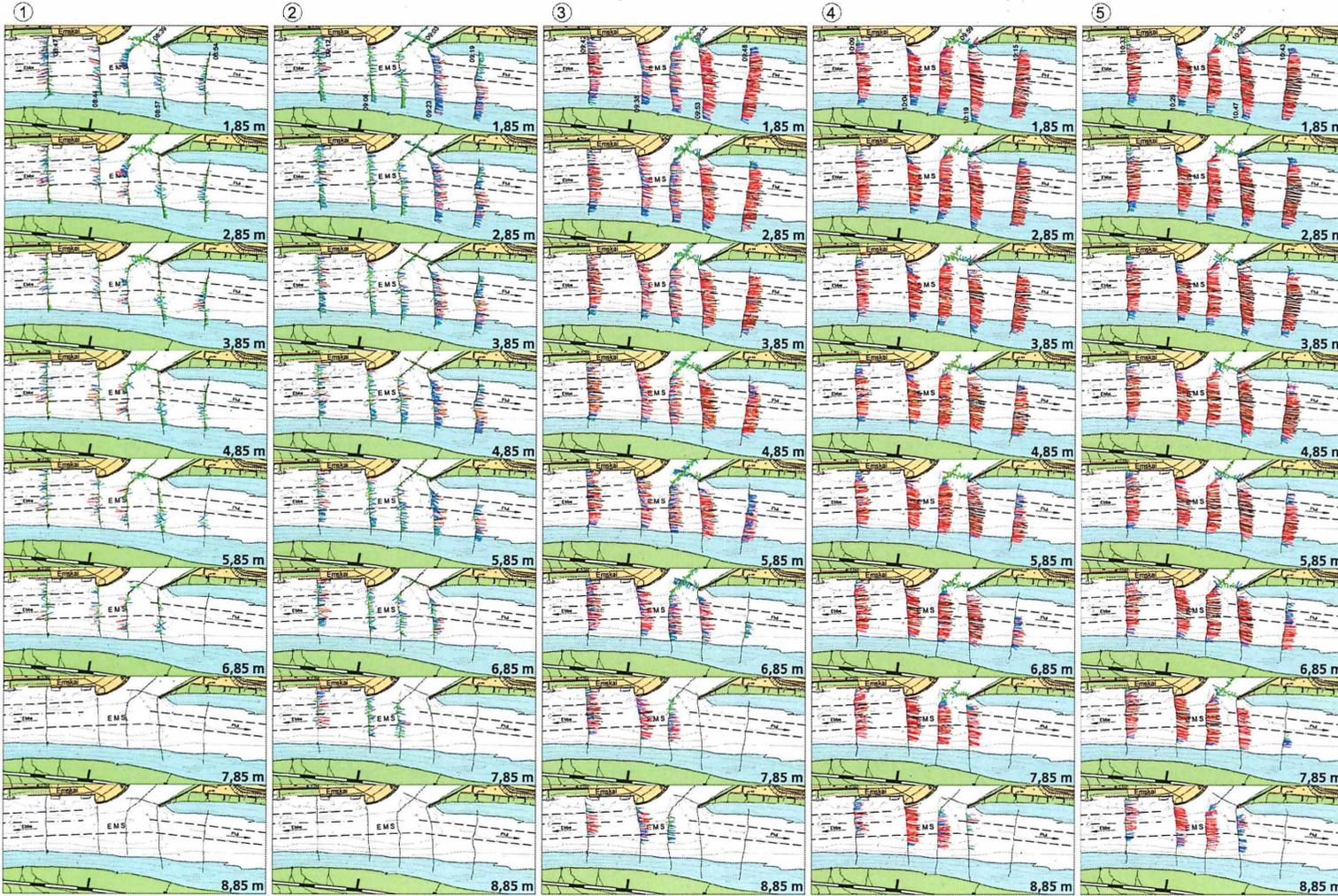


Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm vom 06.07.2006

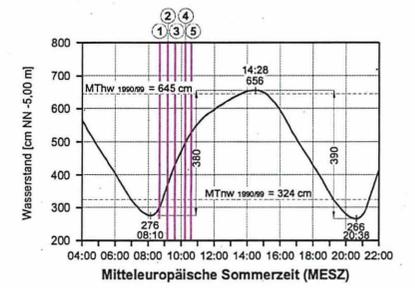
Oberwasser am Pegel Intschede: 144 m<sup>3</sup>/s



Schwesstoffe im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven  
Ebbmessung am 06.07.2006



### Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden ADCP-Messungen am 25.05.2005



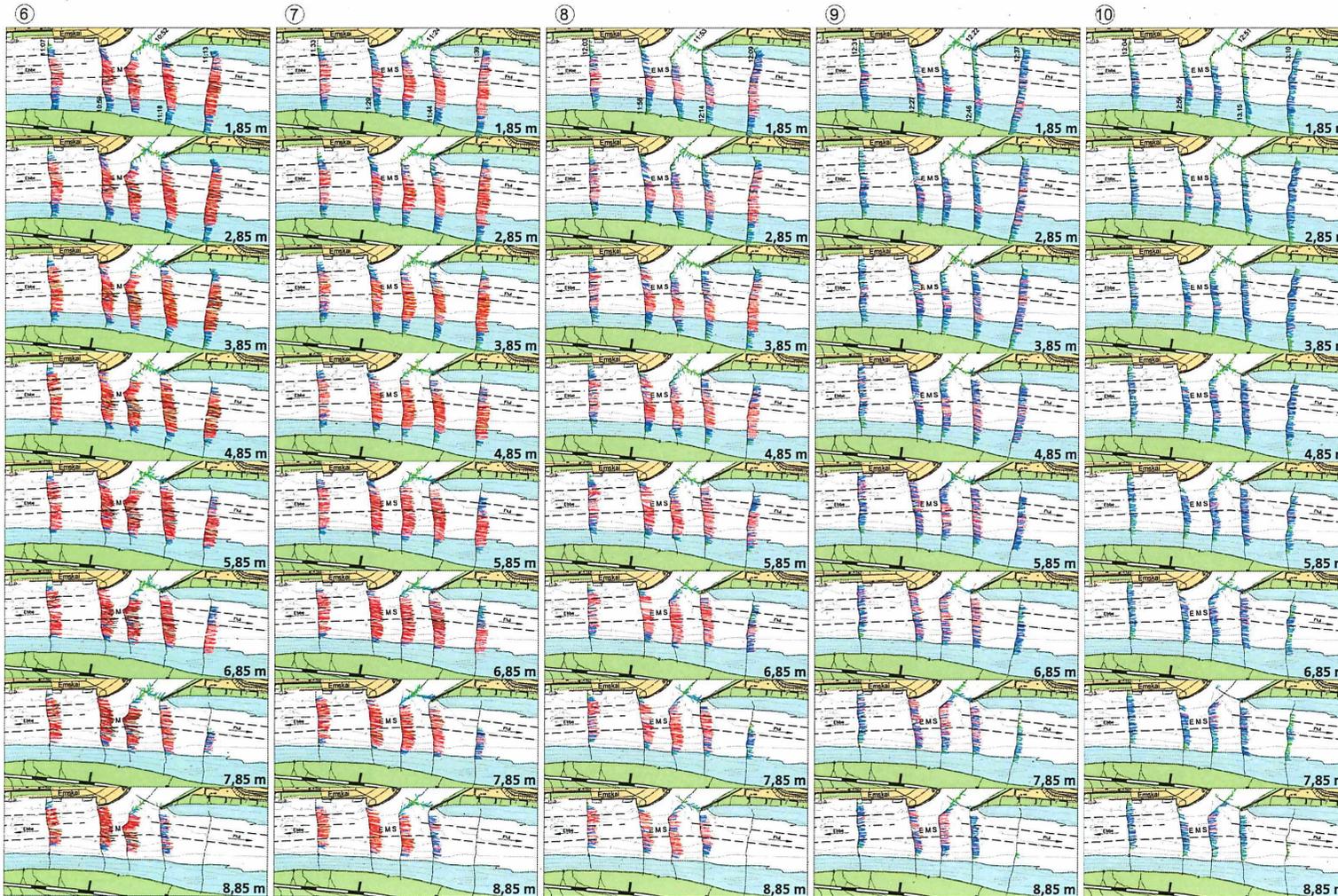
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



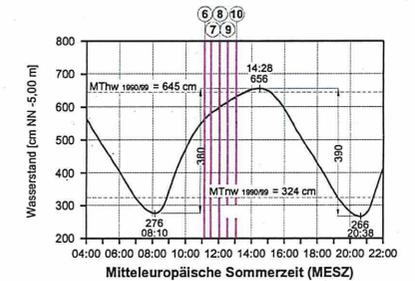
- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de



### Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden ADCP-Messungen am 25.05.2005



Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 44,6 \text{ m}^3/\text{s}$

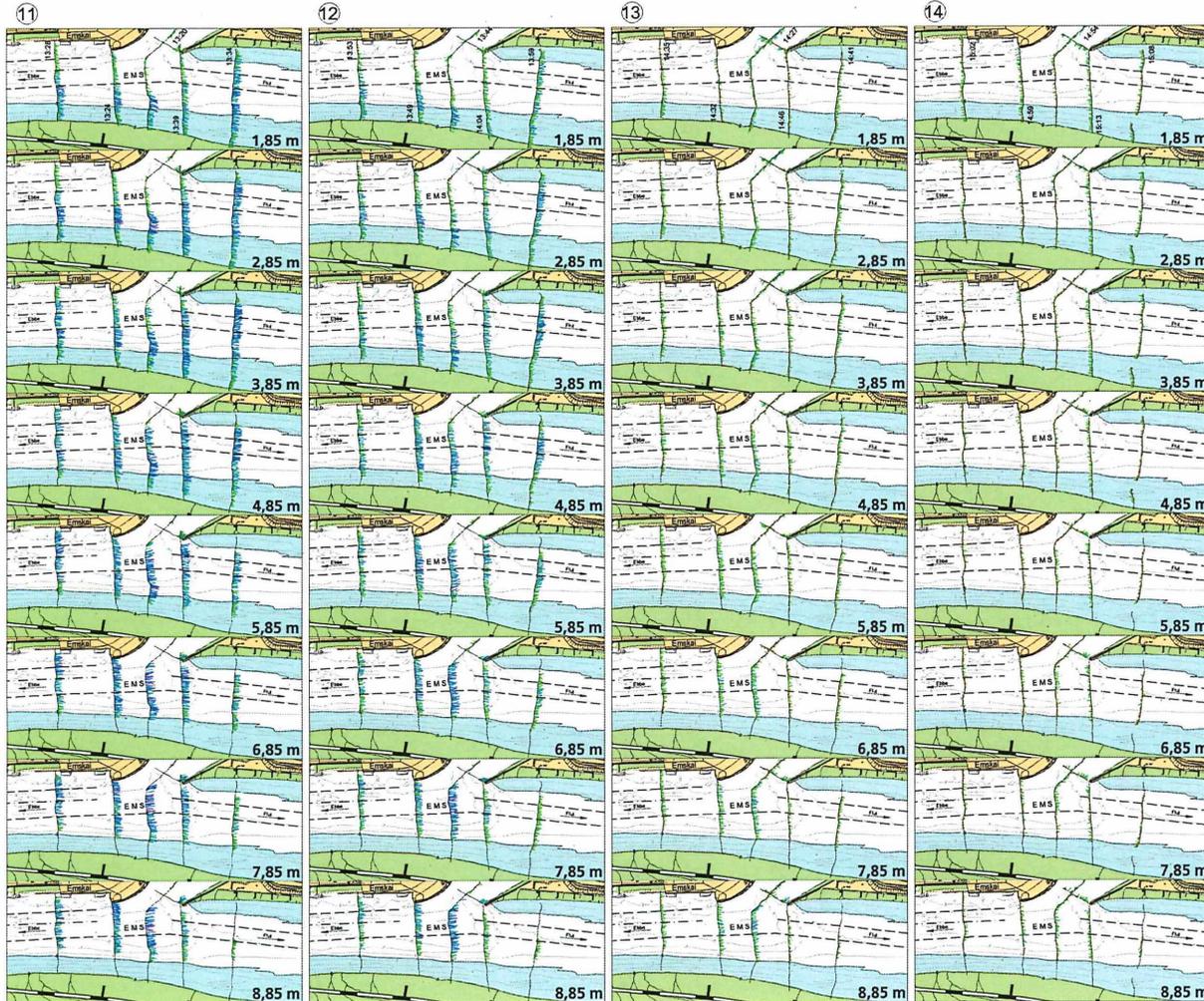
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]



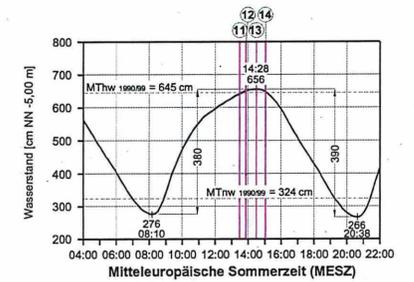
- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbb.hs-bremen.de

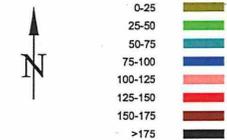


### Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden ADCP-Messungen am 25.05.2005

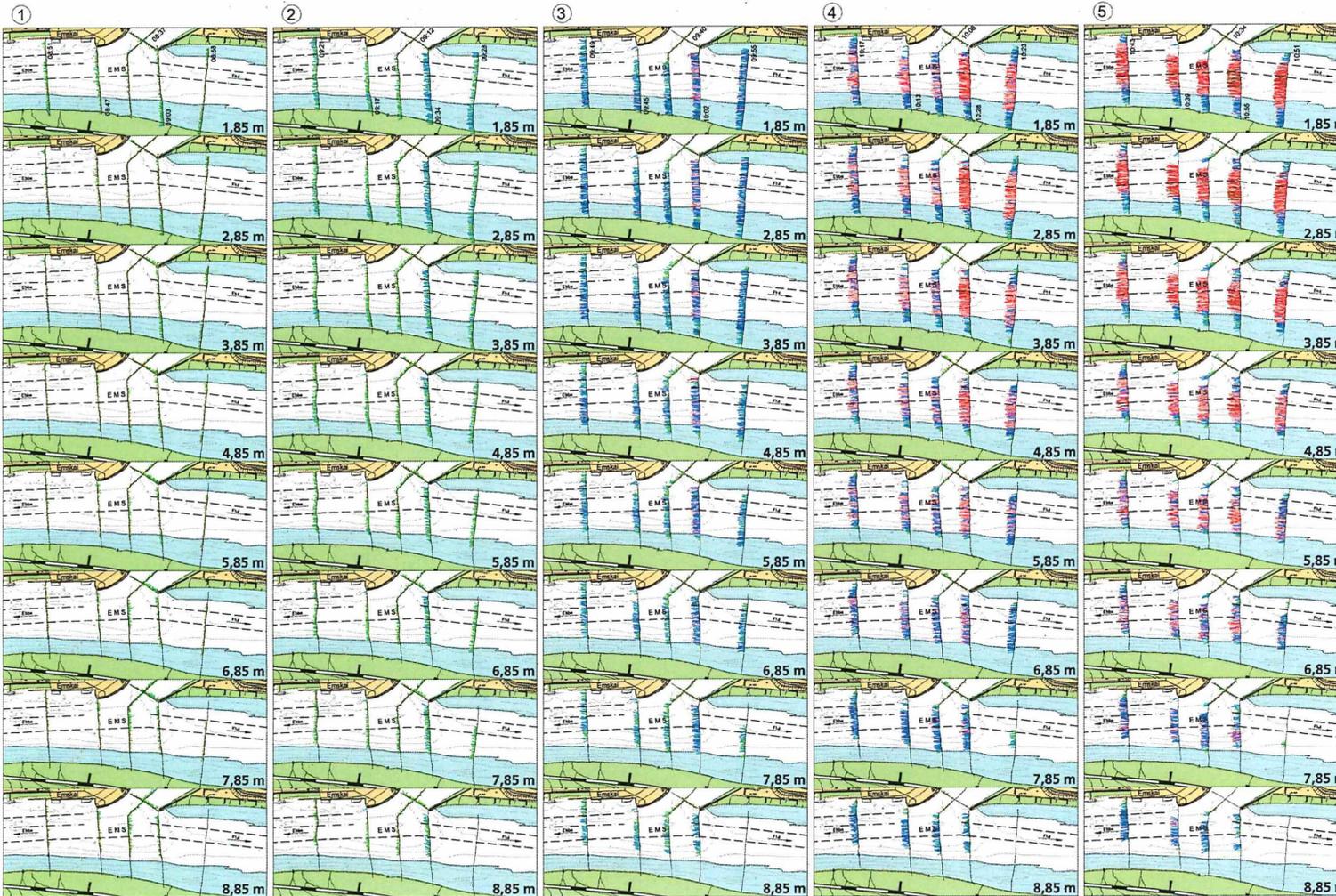


Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 44,6 \text{ m}^3/\text{s}$

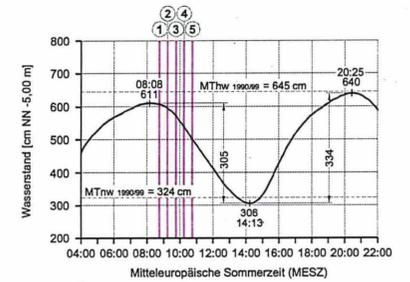
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de

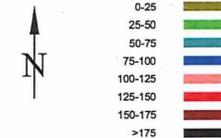


### Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden ADCP-Messungen am 01.06.2005



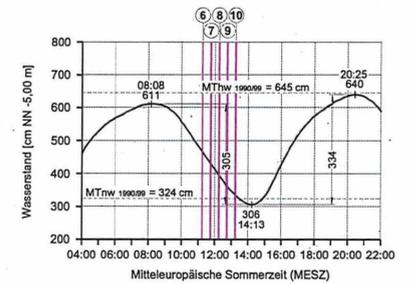
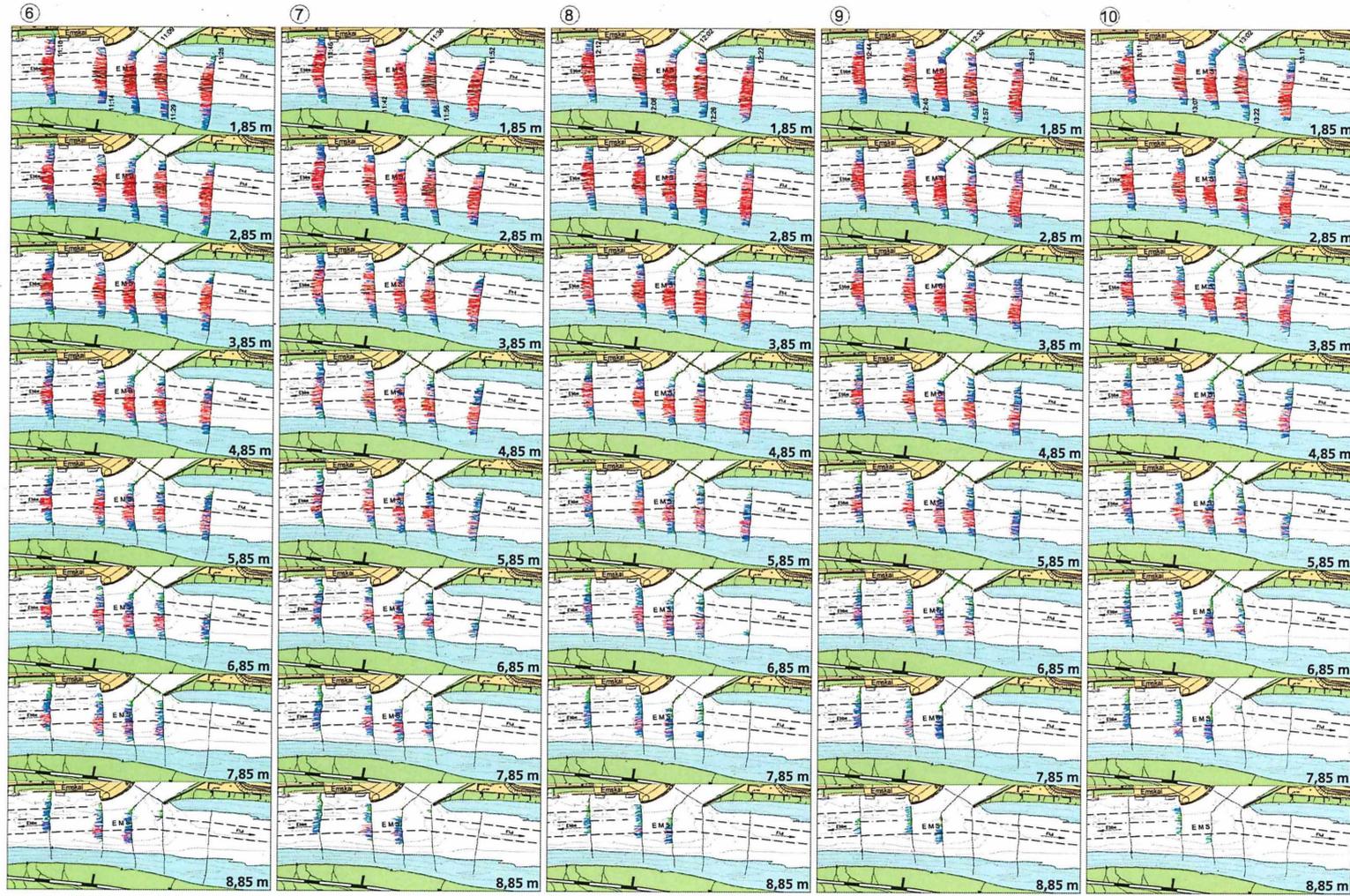
Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 58,5 \text{ m}^3/\text{s}$

ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]

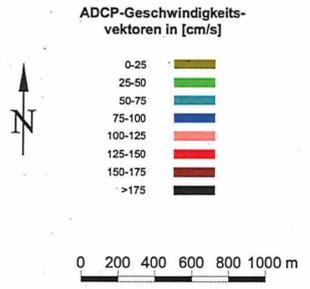


**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@iwb.hs-bremen.de

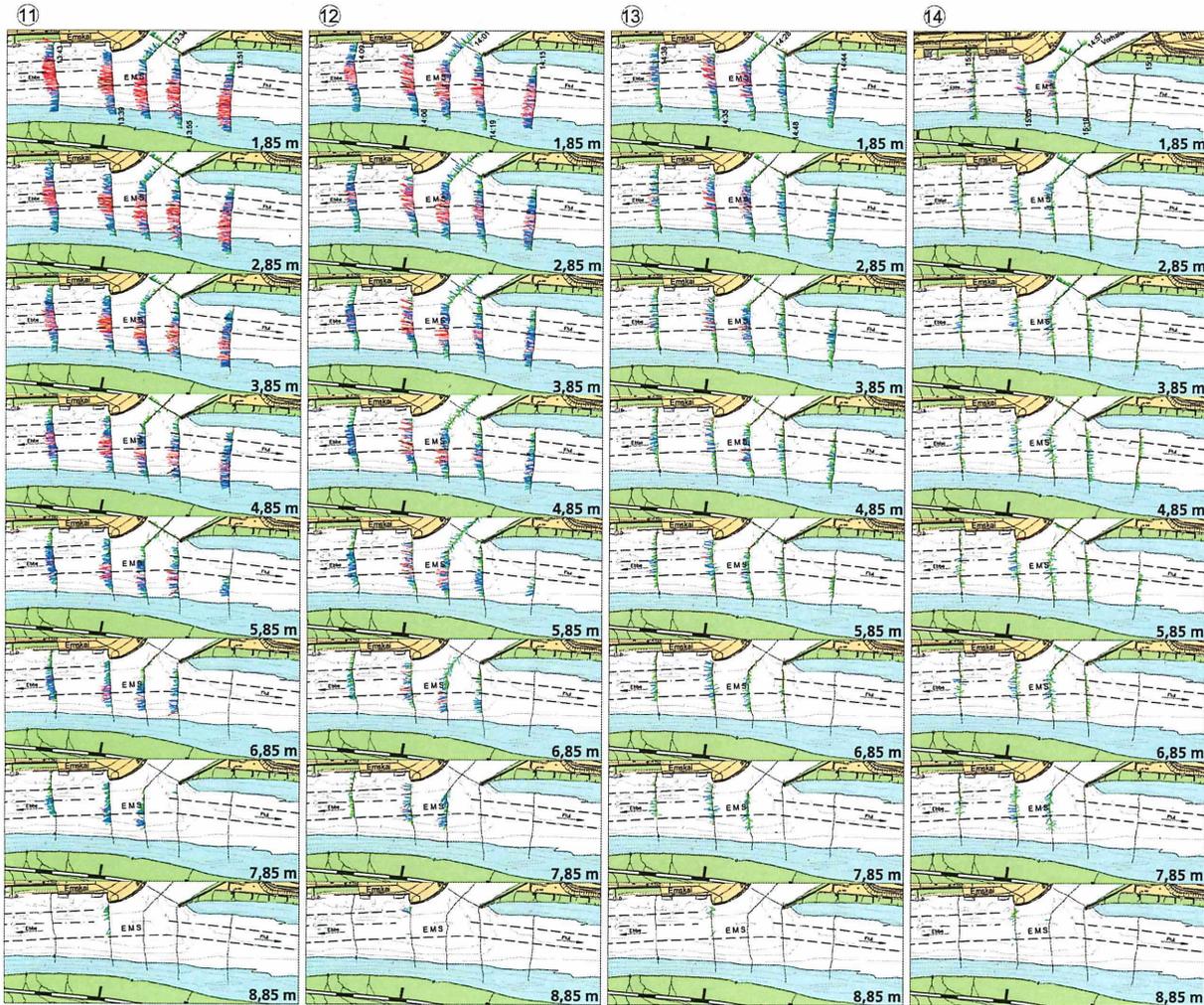
### Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden ADCP-Messungen am 01.06.2005



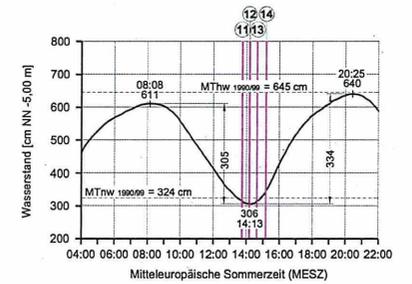
Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 58,5 \text{ m}^3/\text{s}$



**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtal 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabu@iwb.bremen.de

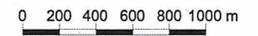
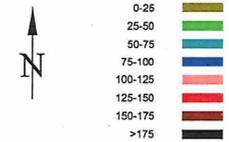


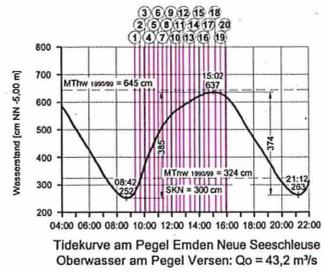
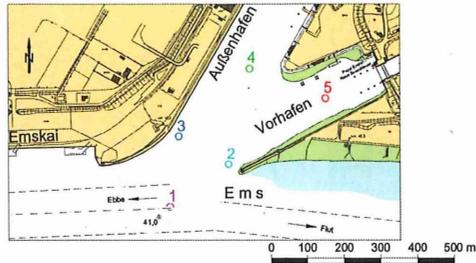
### Strömungen in der Ems im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden ADCP-Messungen am 01.06.2005



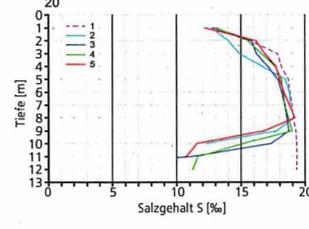
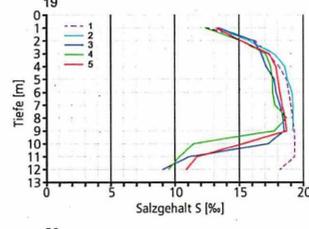
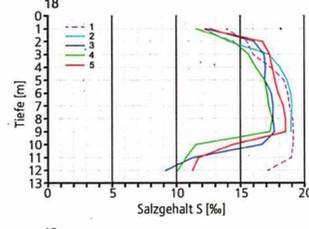
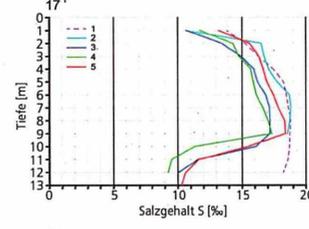
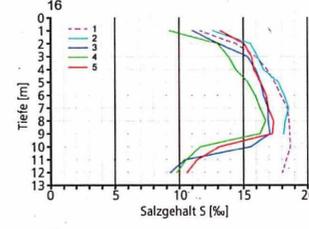
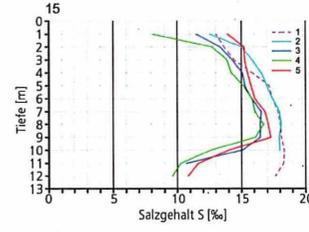
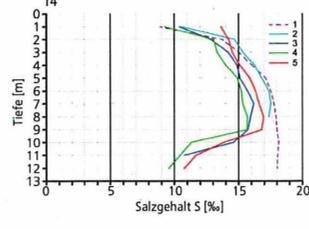
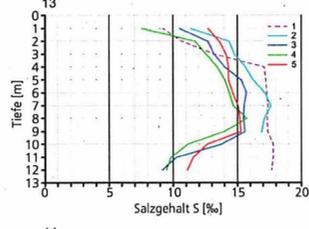
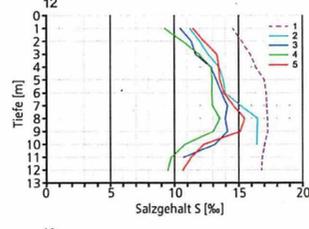
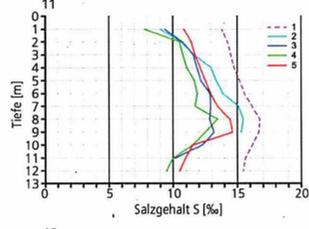
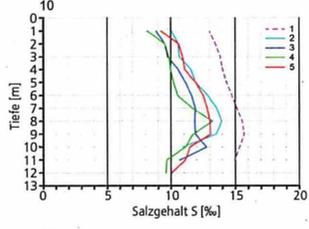
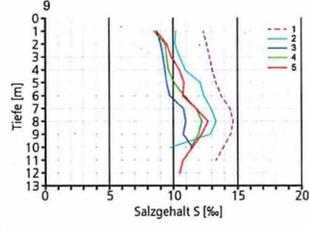
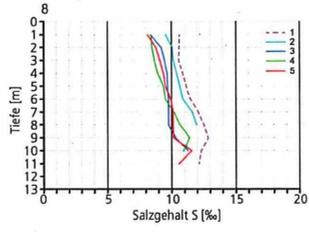
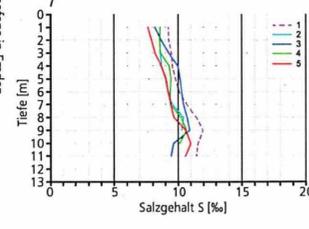
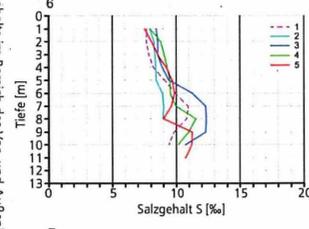
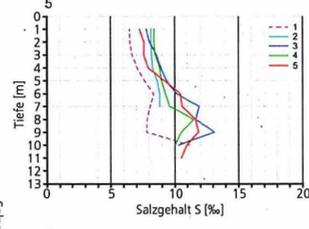
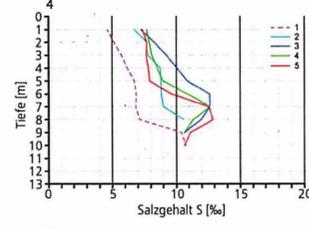
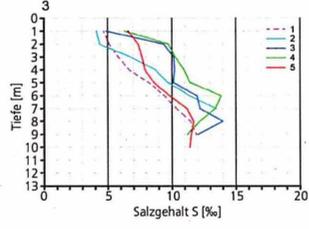
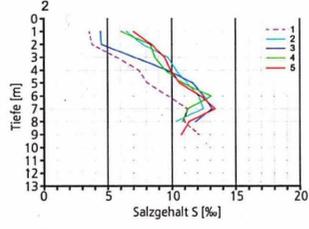
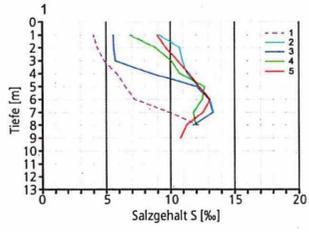
Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 58,5 \text{ m}^3/\text{s}$

ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]

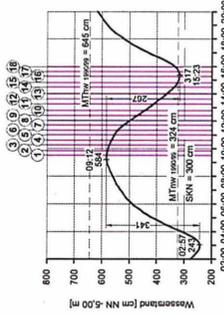
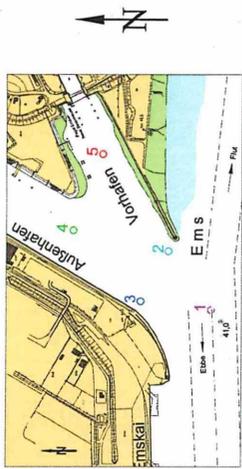




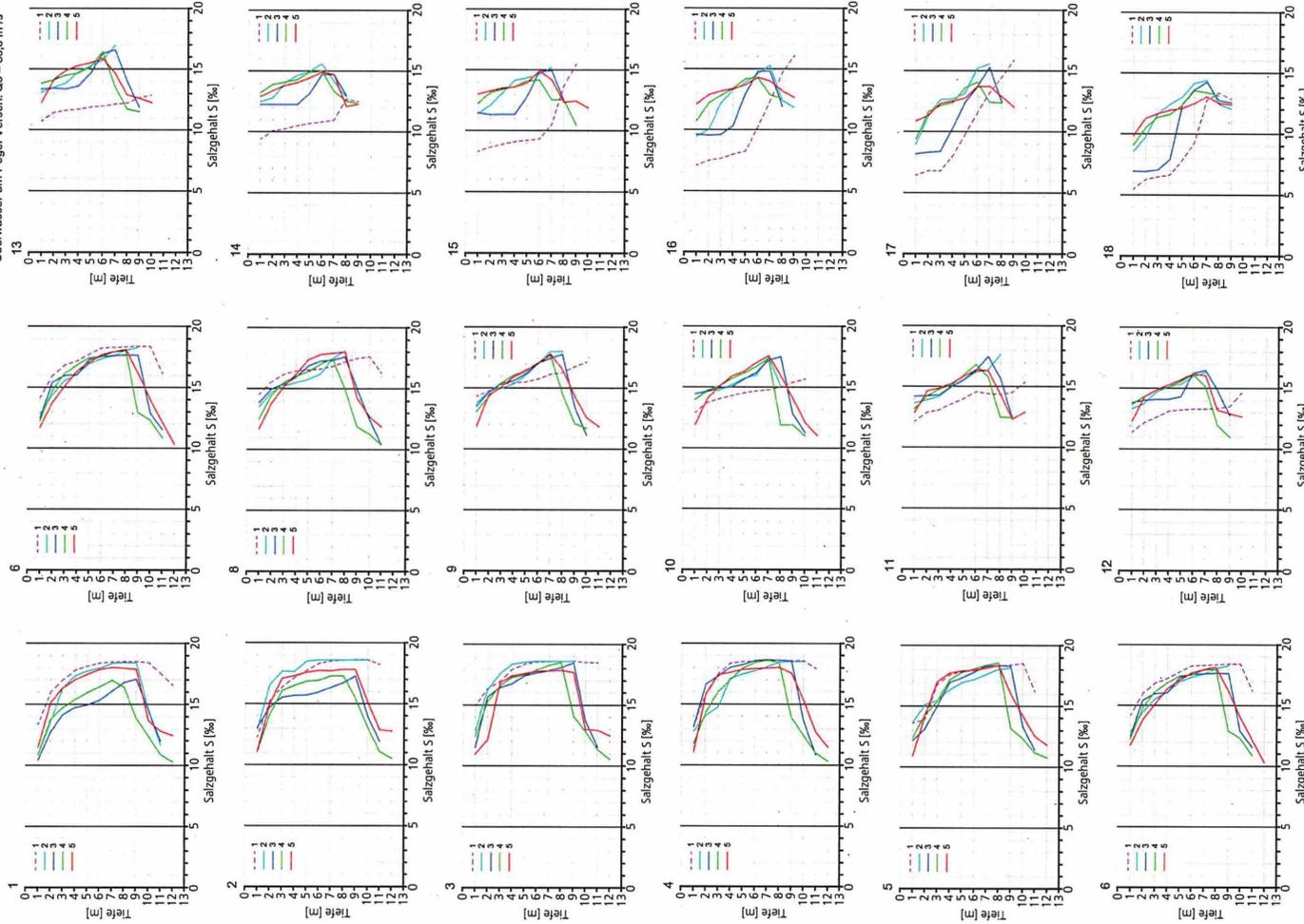
Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 43,2 \text{ m}^3/\text{s}$



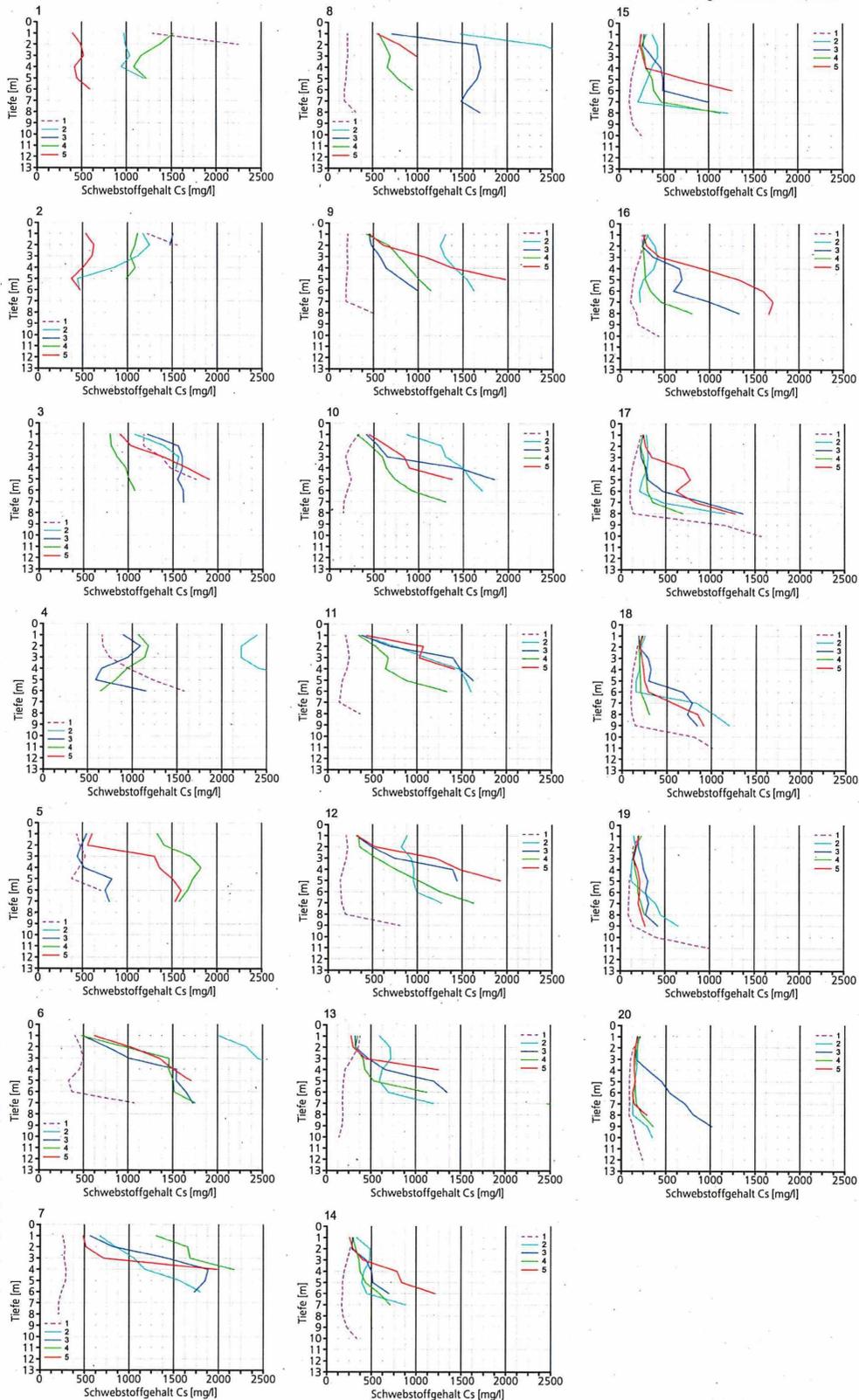
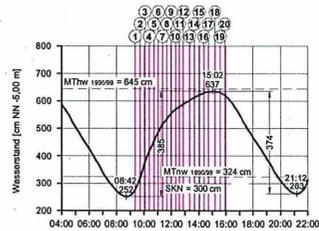
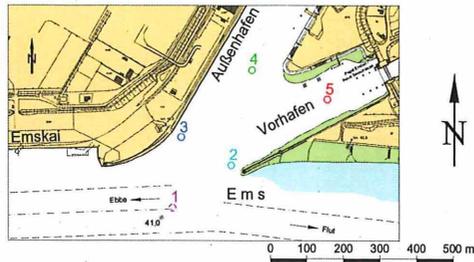
Salzgehalte im Bereich des Vor- und Audenhatens in Emden  
Flutmessung am 26.05.2005



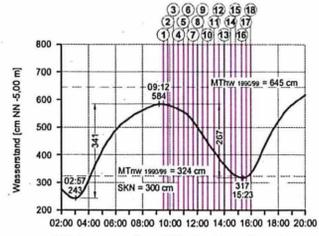
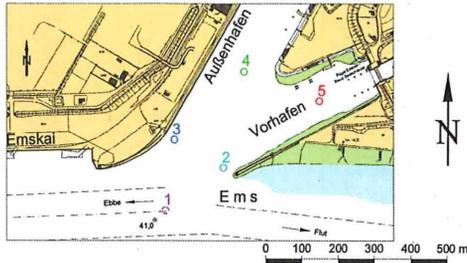
Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
 Oberwasser am Pegel Versen: Co = 63,8 m³/s



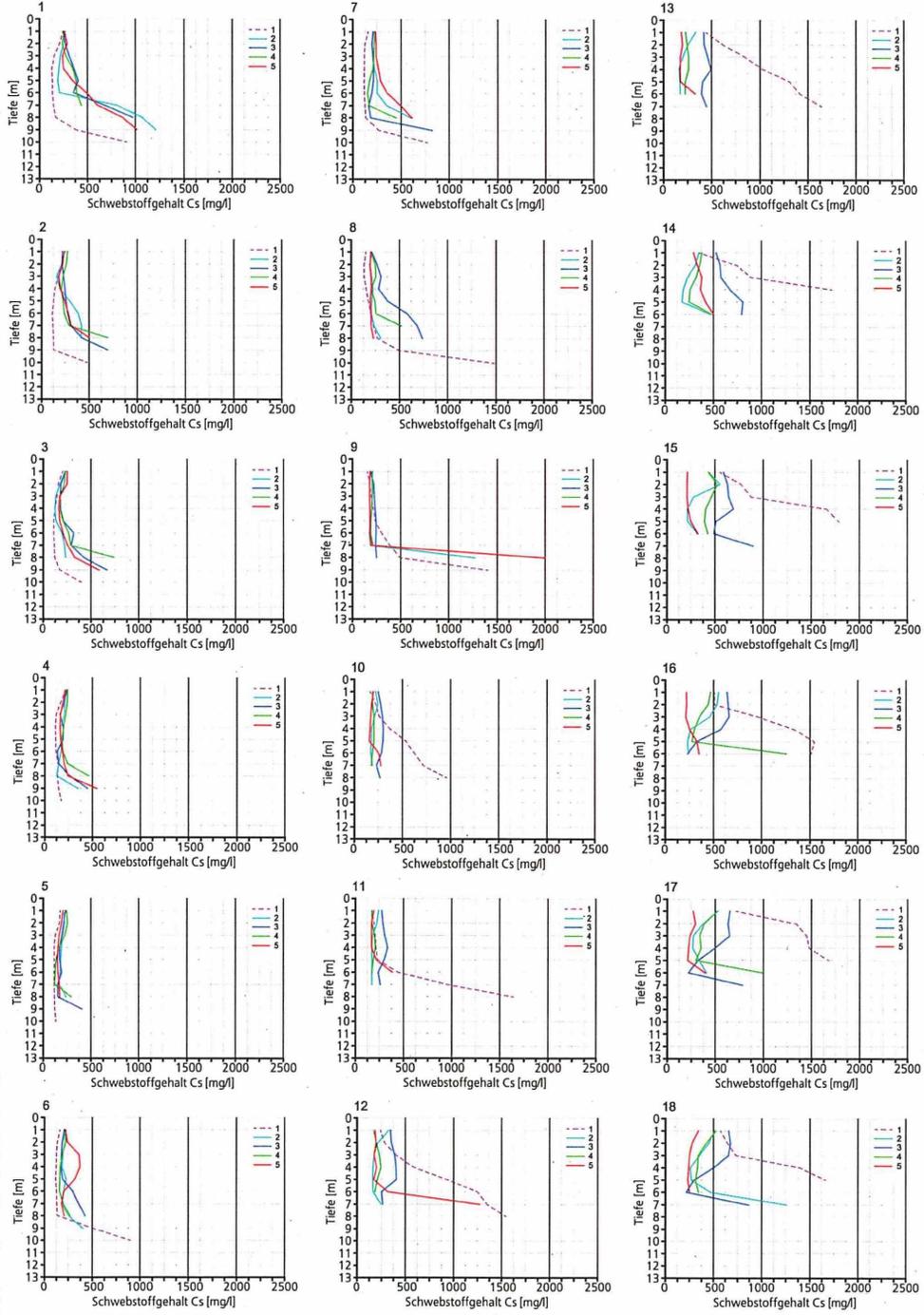
Salzgehalte im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden  
 Ebbmessung am 02.06.2005



Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden  
Flutmessung am 26.05.2005



Tidekurve am Pegel Emden Neue Seeschleuse  
Oberwasser am Pegel Versen:  $Q_0 = 63,8 \text{ m}^3/\text{s}$

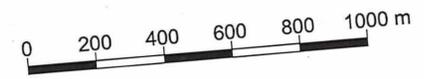
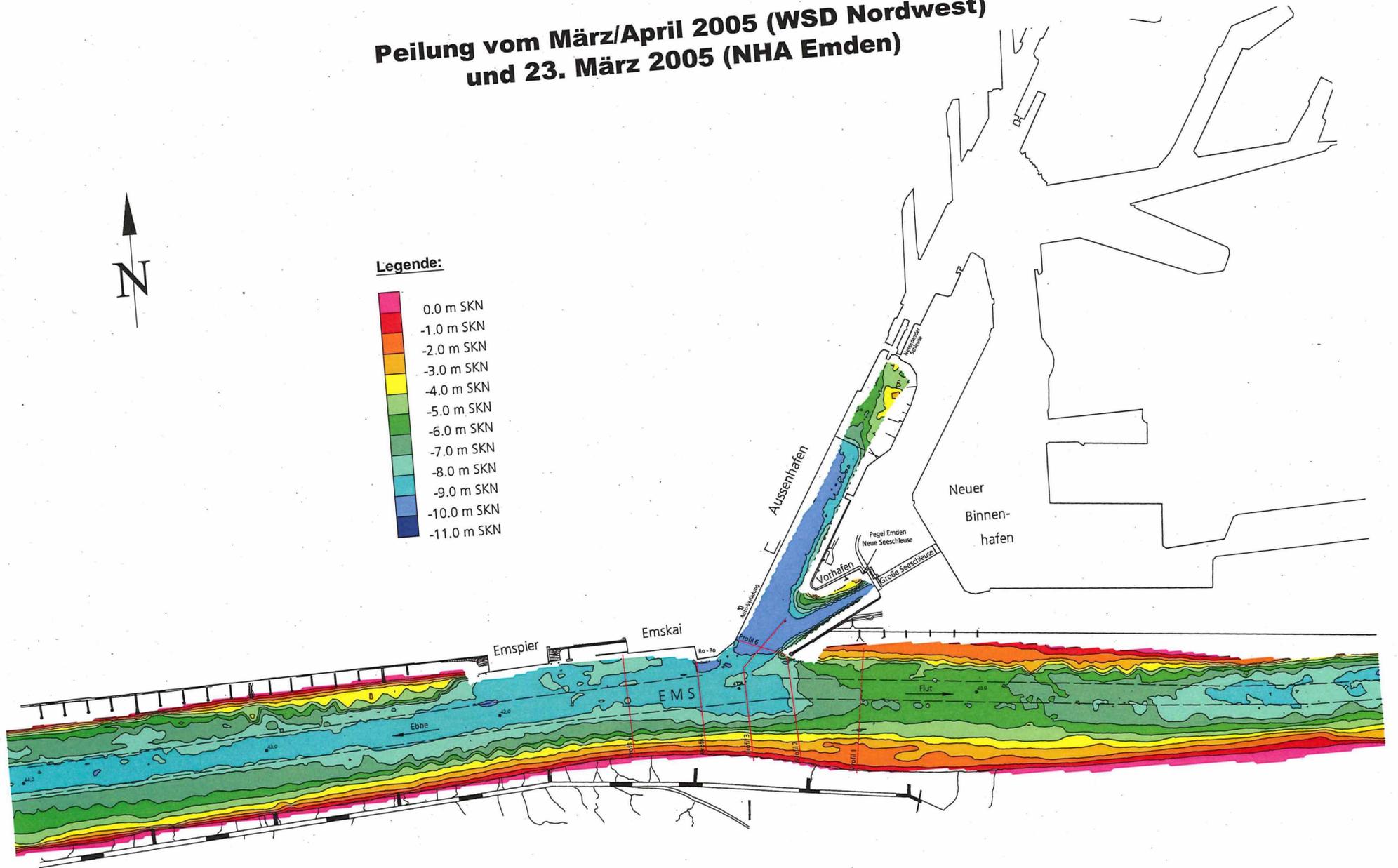
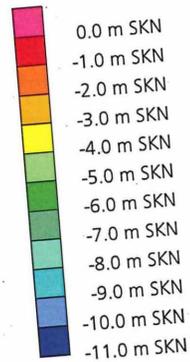


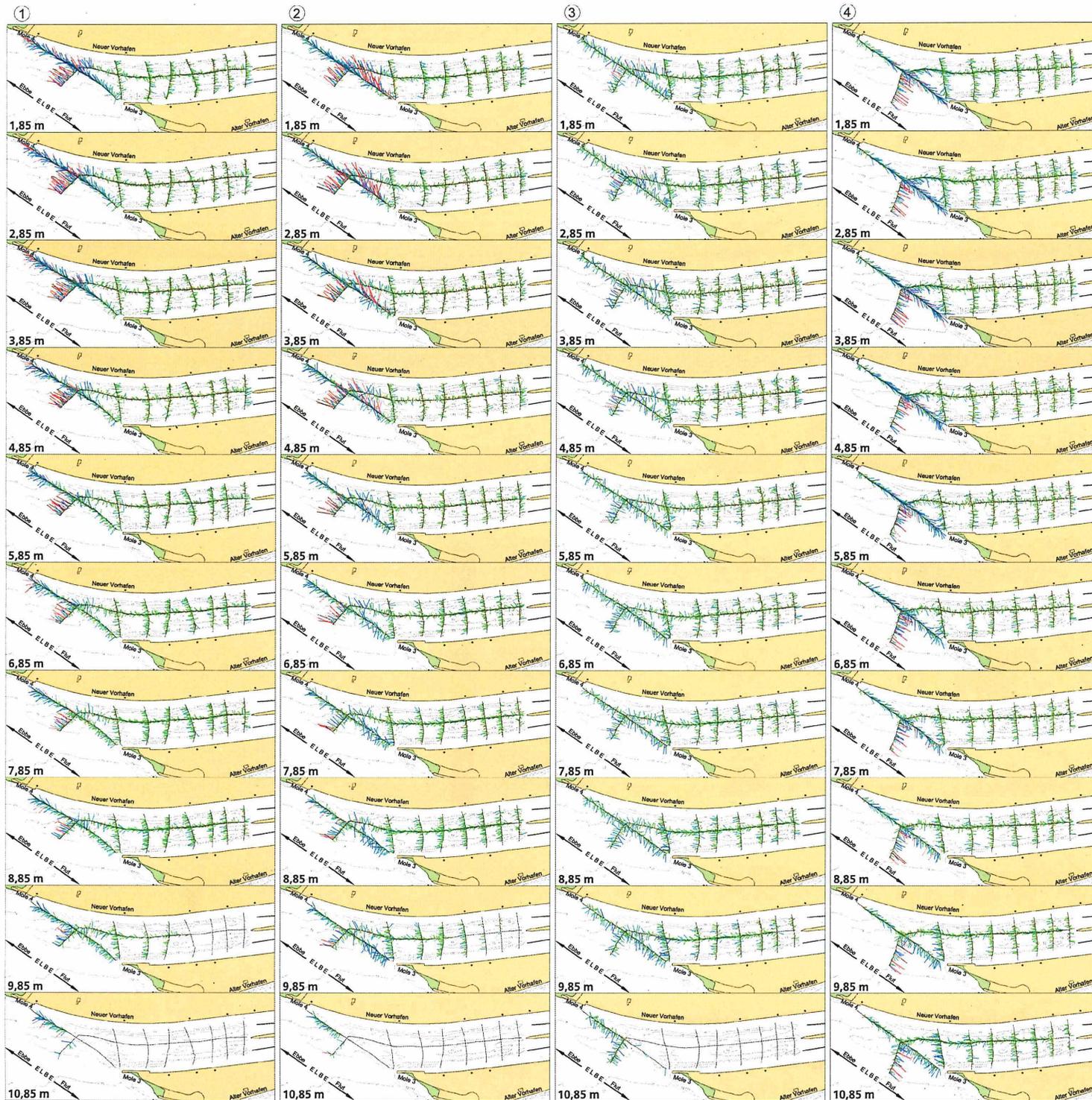
Schwebstoffe im Bereich des Vor- und Außenhafens in Emden  
Ebbmessung am 02.06.2005

# Peilung vom März/April 2005 (WSD Northwest) und 23. März 2005 (NHA Emden)



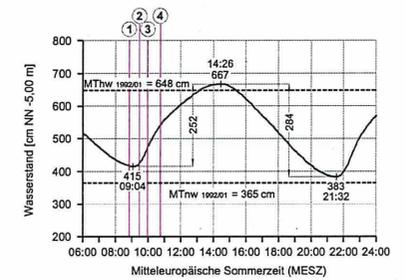
**Legende:**





Anlage 49

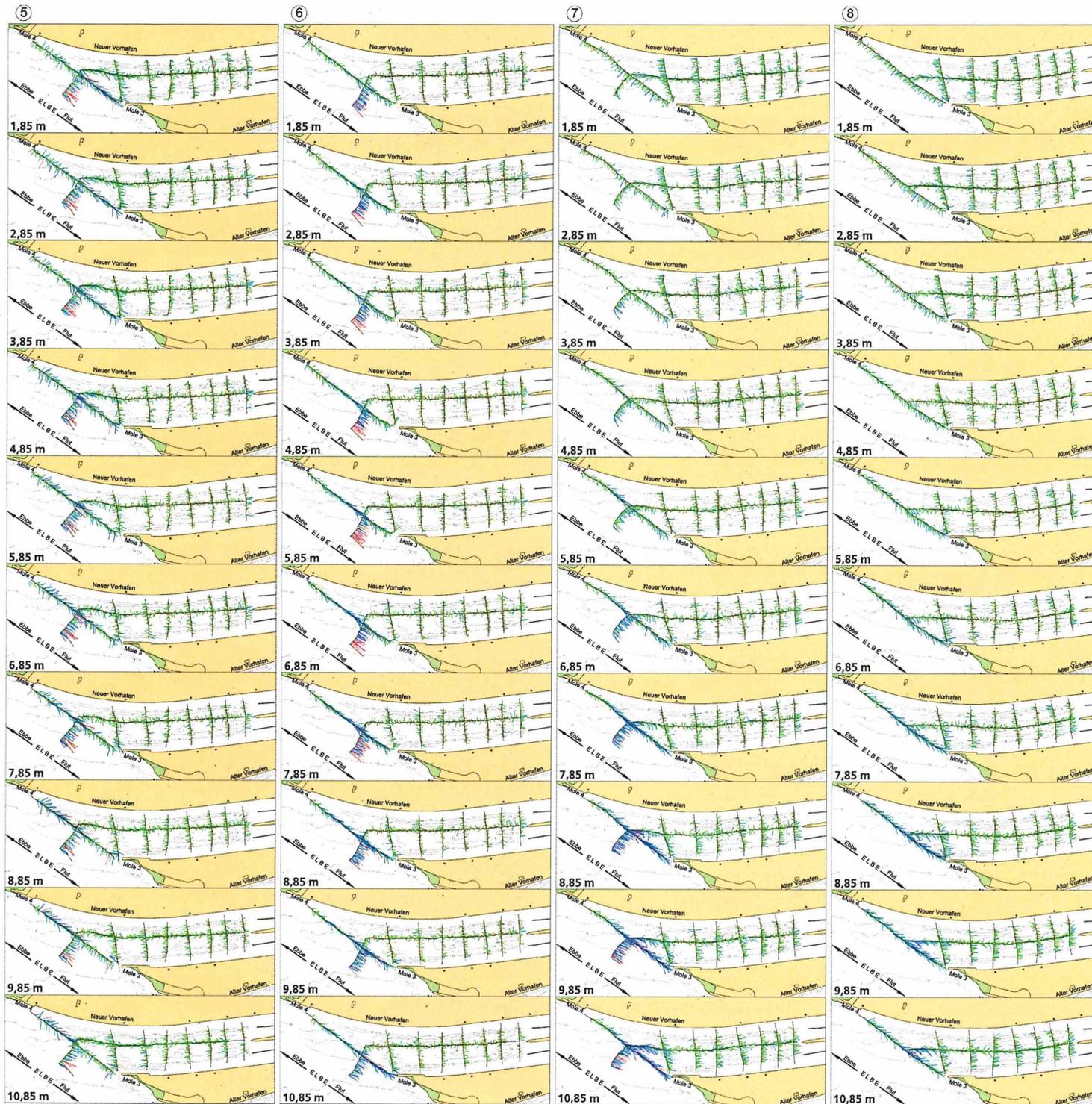
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 05.07.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 264 m³/s

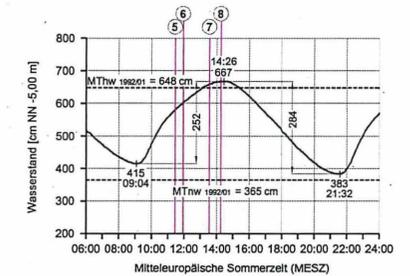
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]





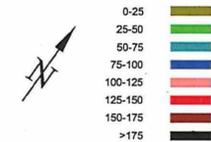
Anlage 50

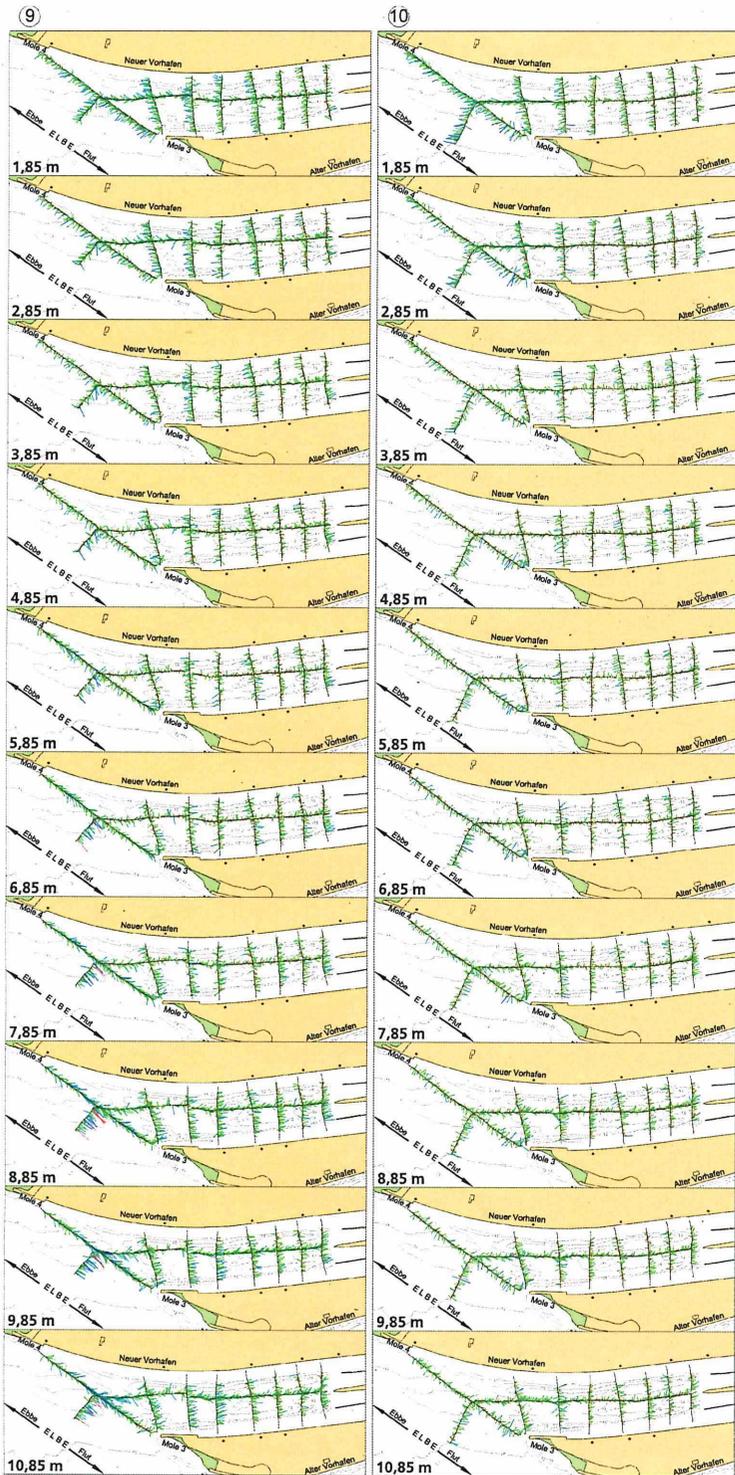
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 05.07.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 264 m³/s

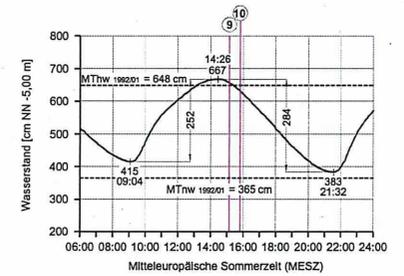
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]





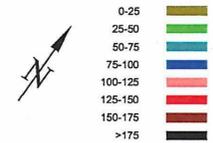
Anlage 51

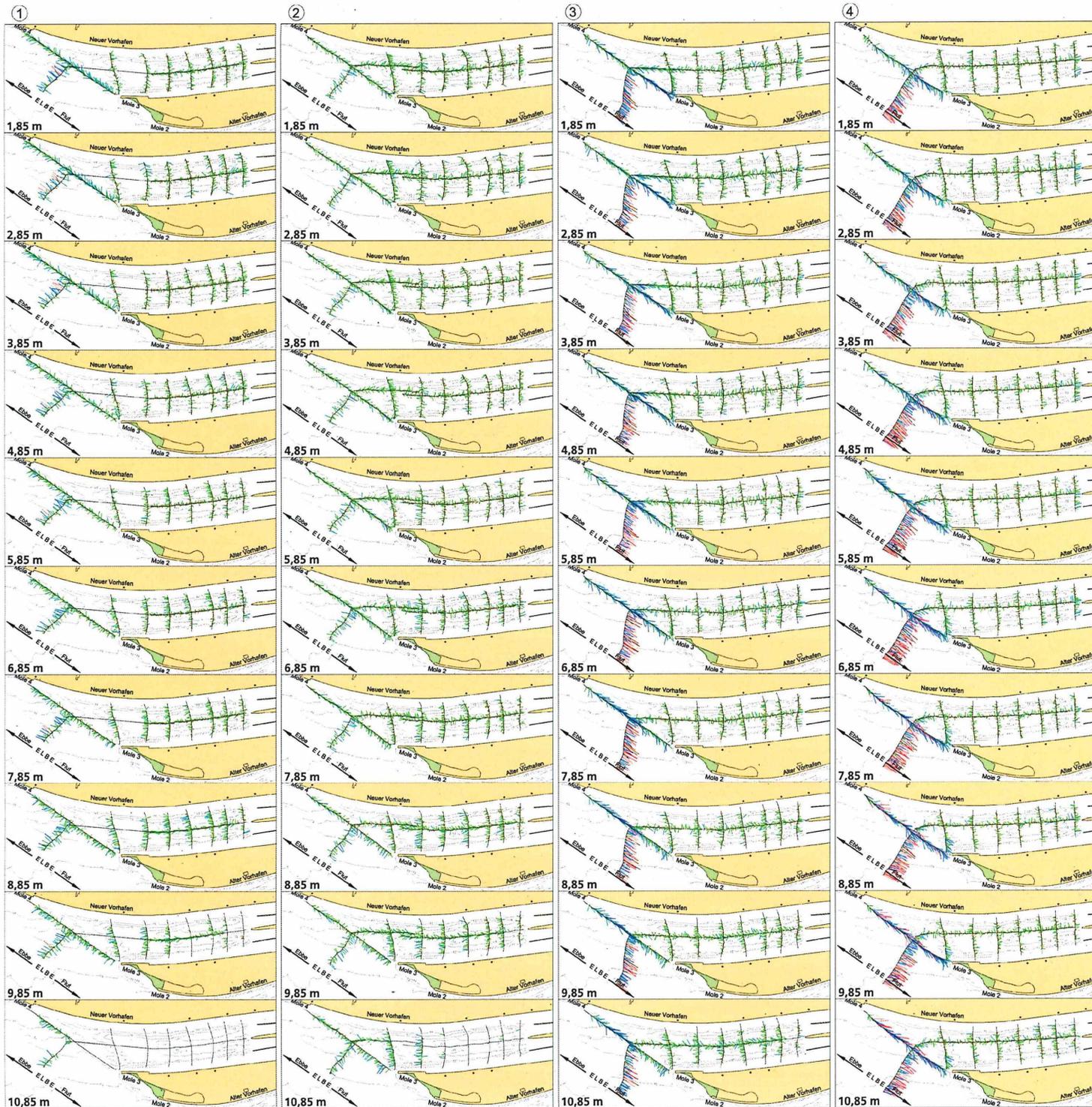
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 05.07.2005



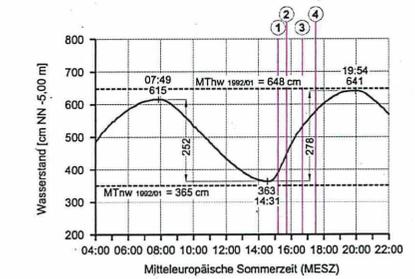
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 264 m³/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

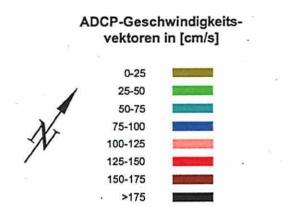


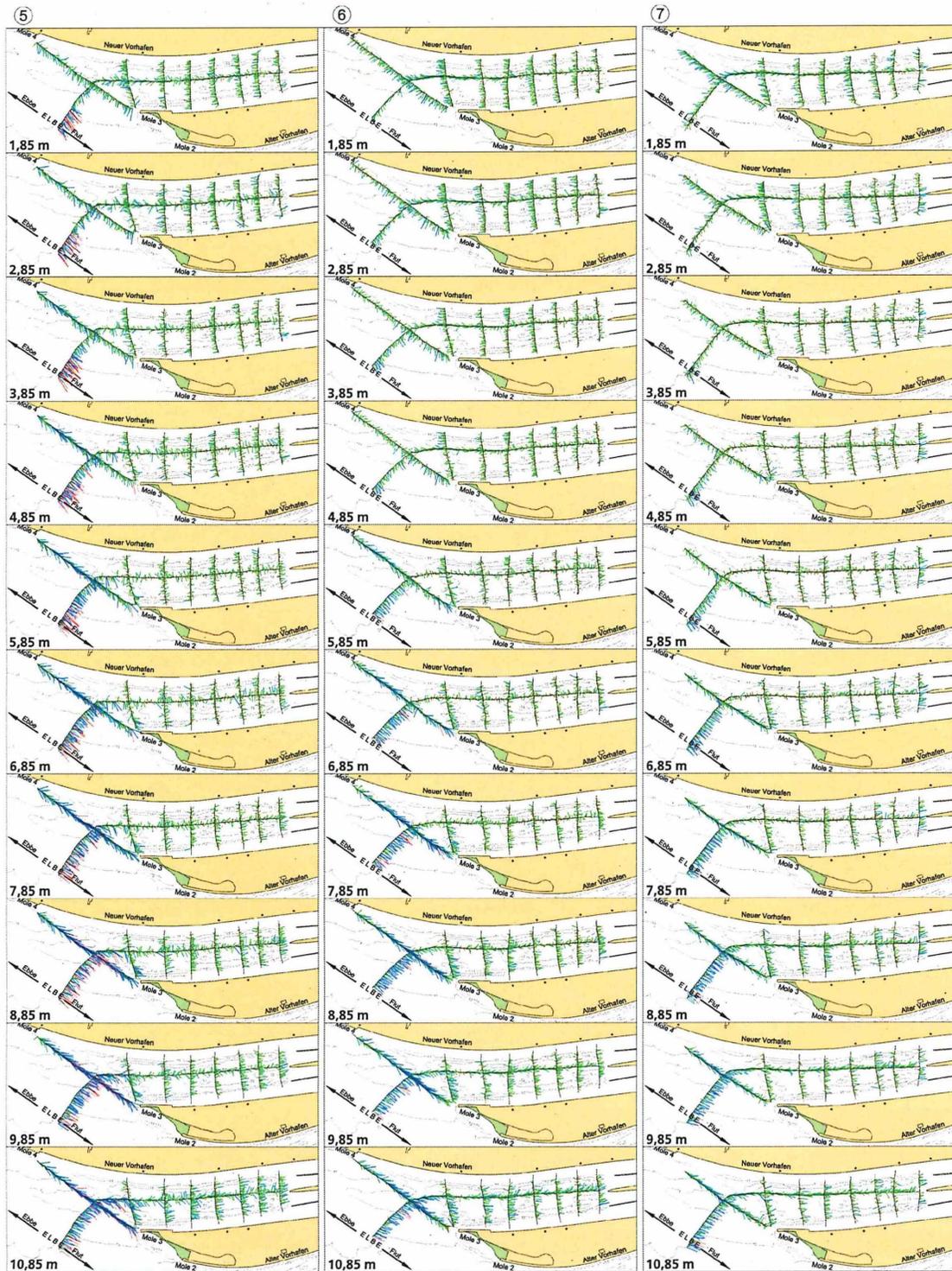


### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.07.2005



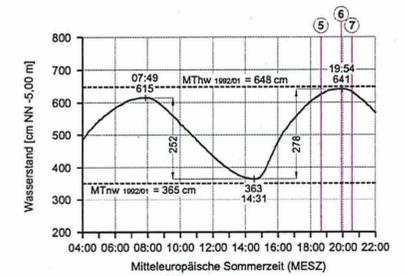
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m³/s





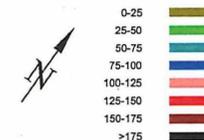
Anlage 53

### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.07.2005

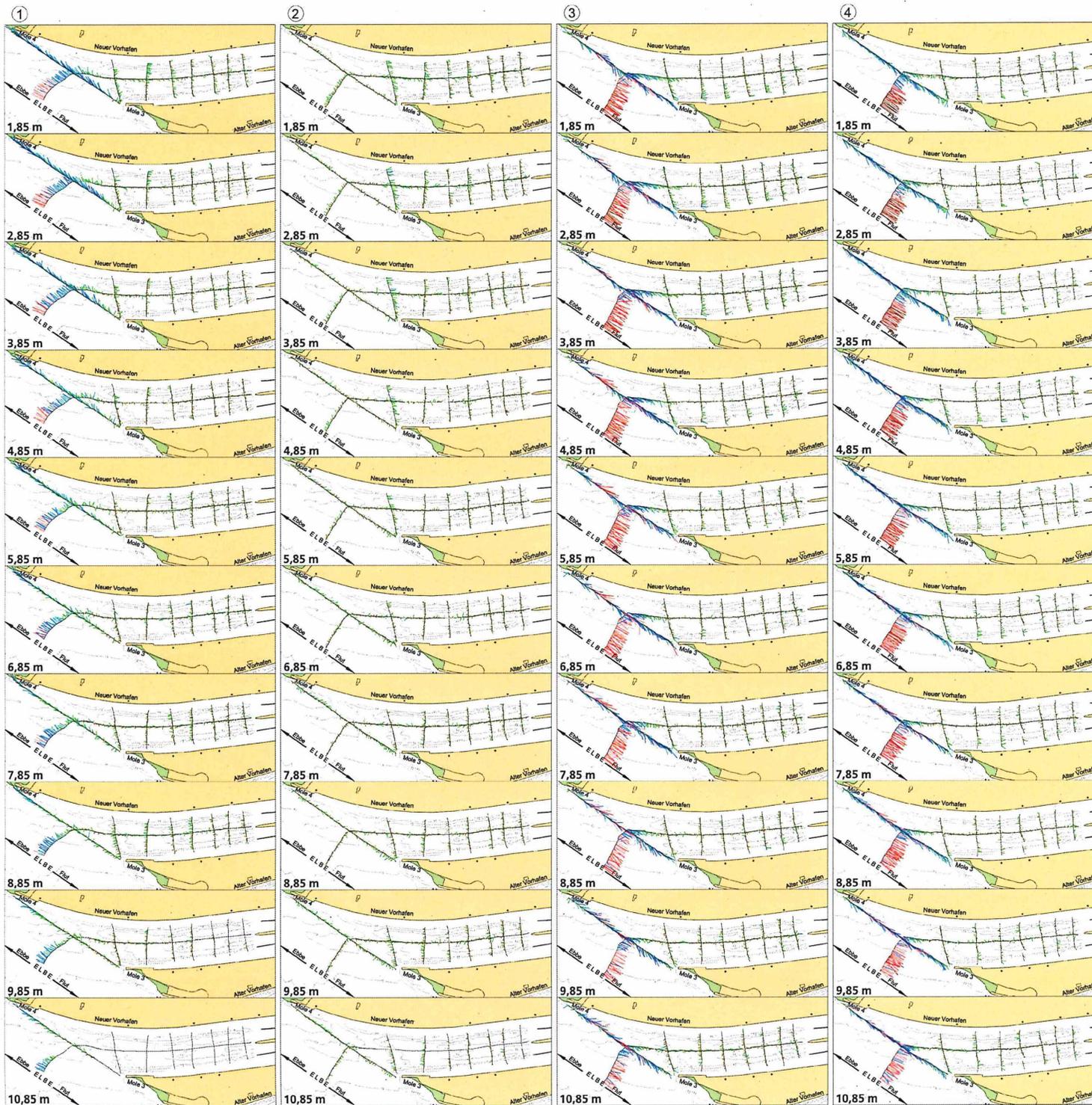


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m³/s

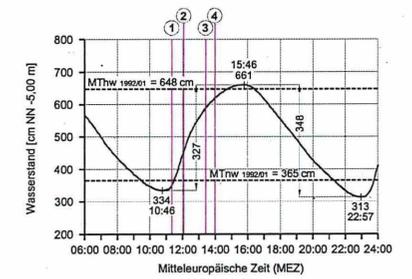
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau  
Neustadtswal 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wsbau@bb.hs-bremen.de

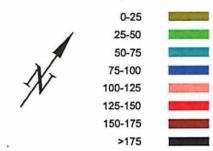


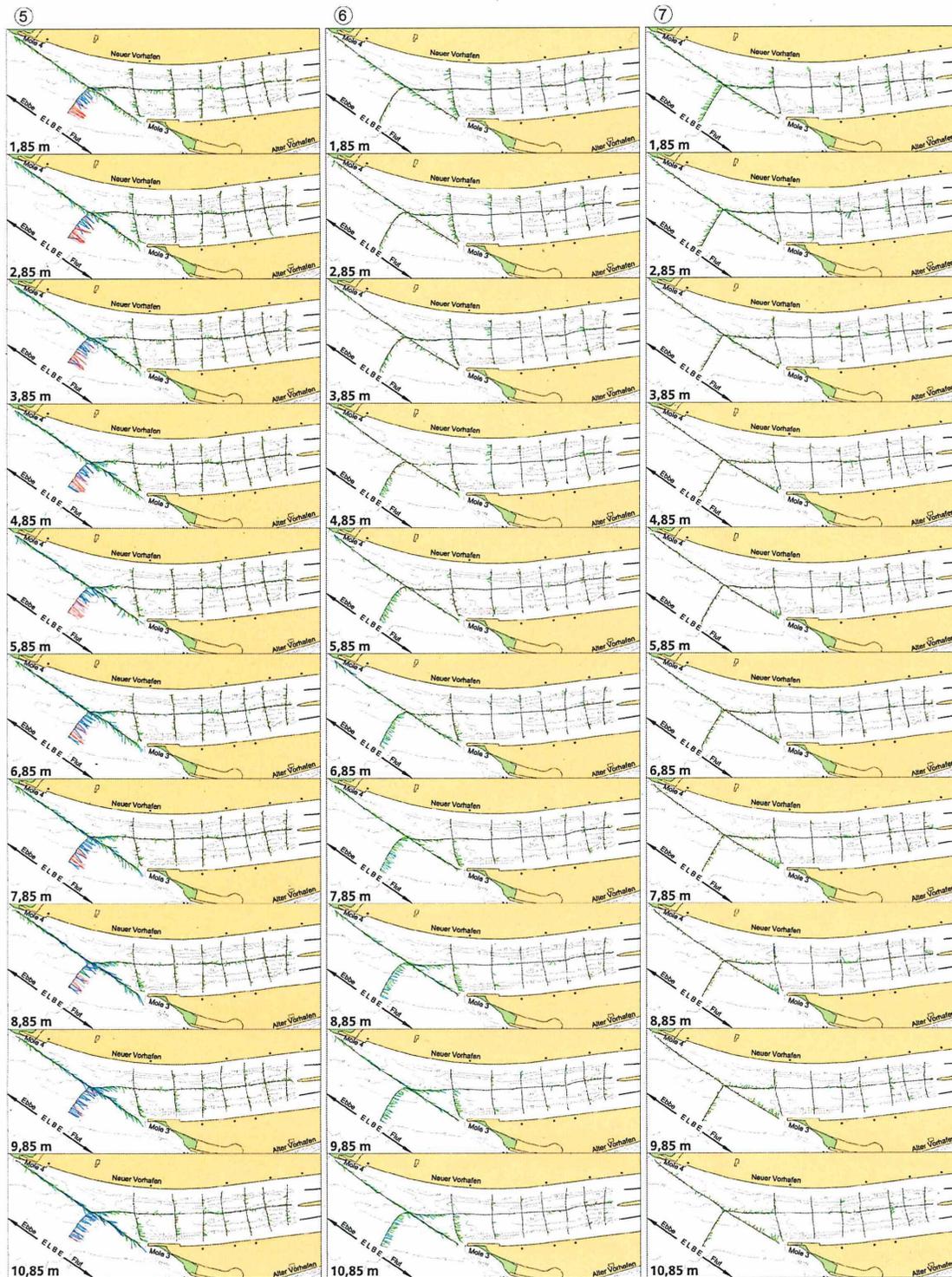
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 21.03.2007



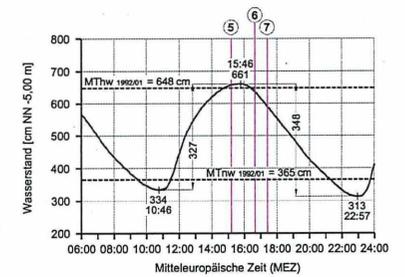
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 842 m³/s

ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]





### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 21.03.2007

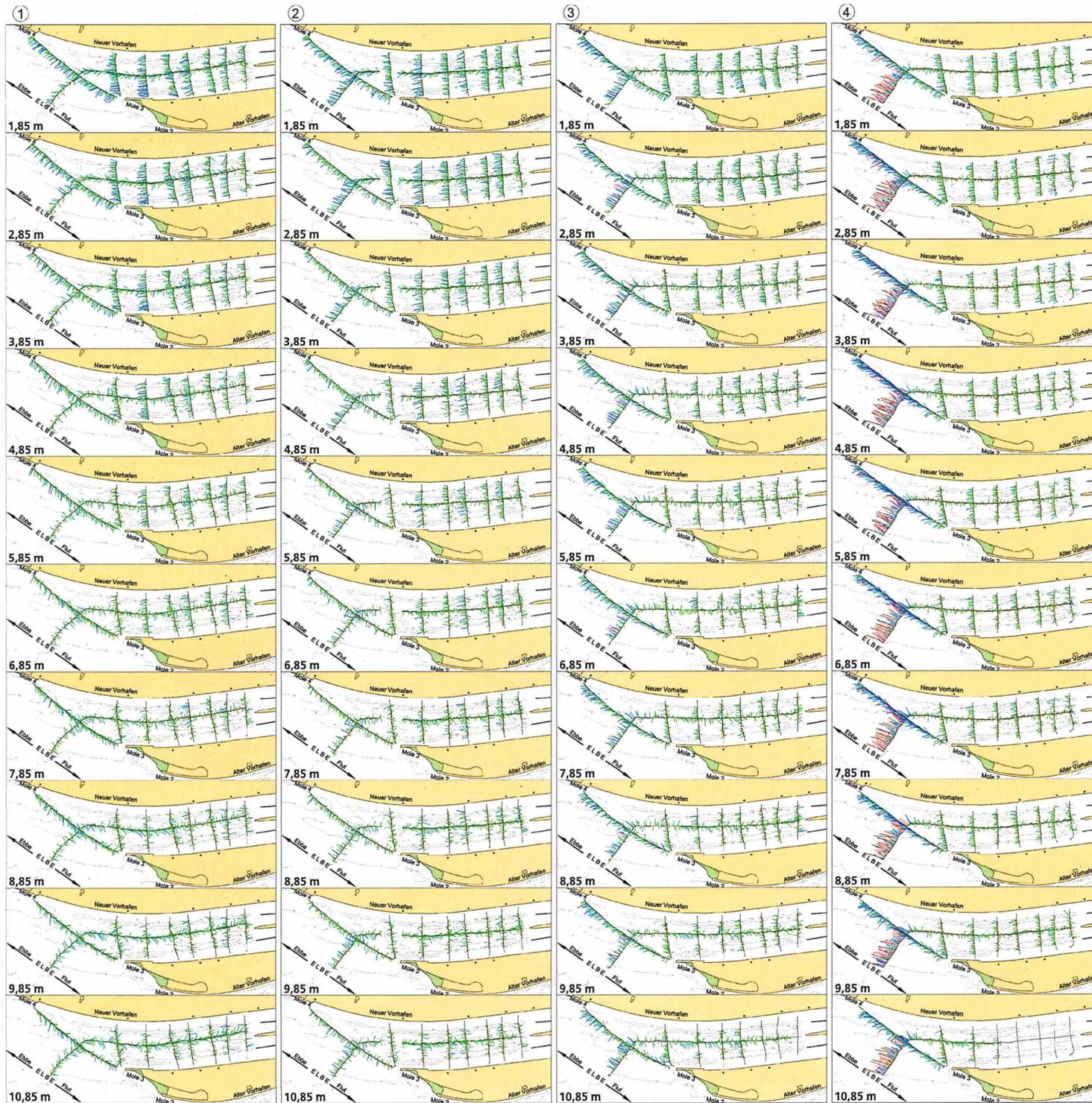


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 842 m³/s

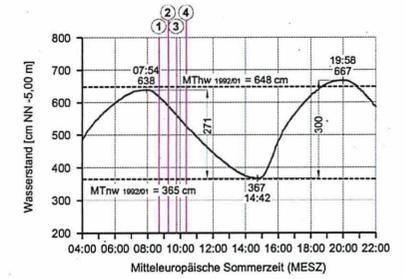
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: waba@iwab-hs-bremen.de

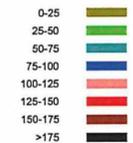


### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 28.06.2005

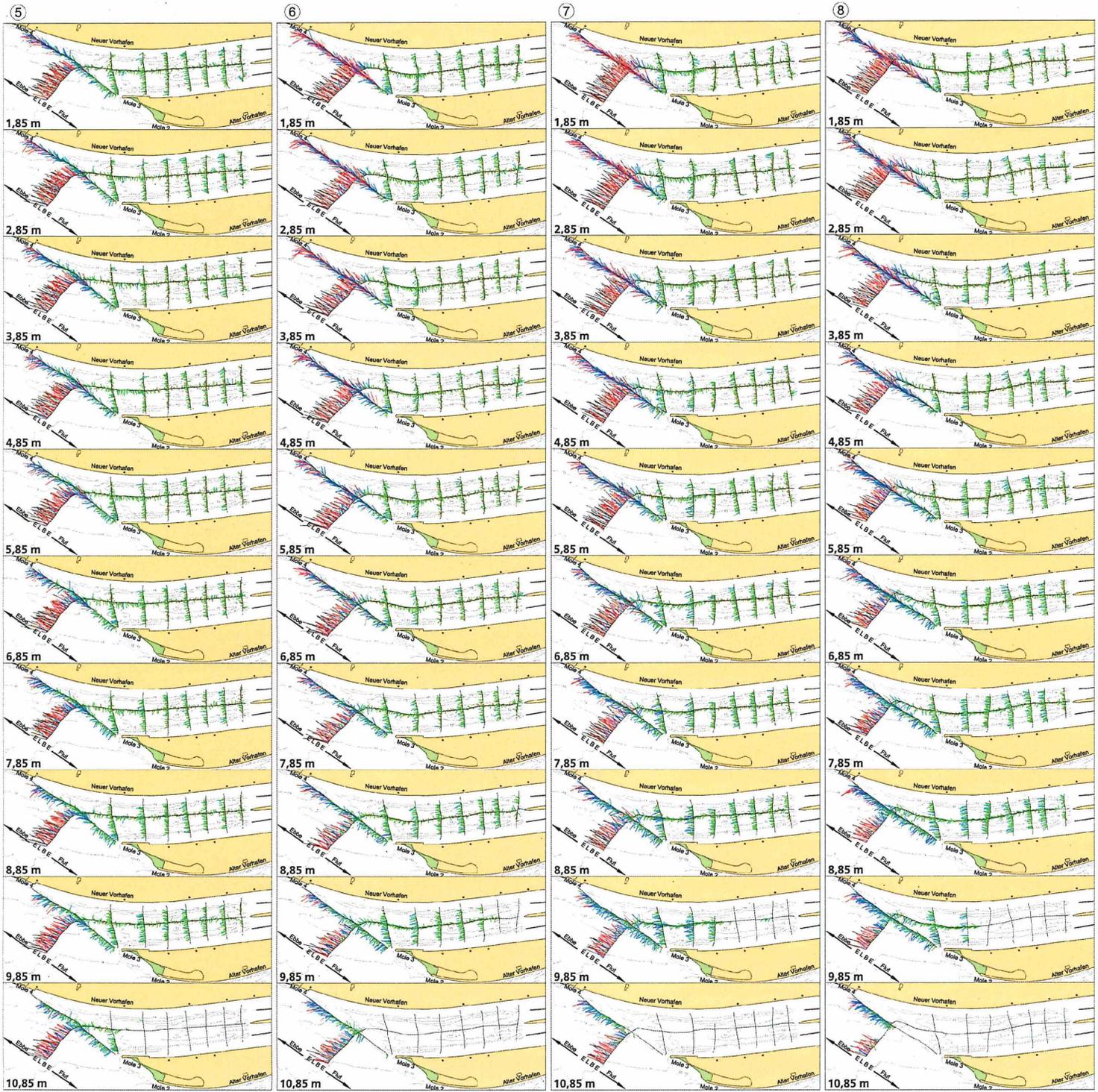


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 325 m<sup>3</sup>/s

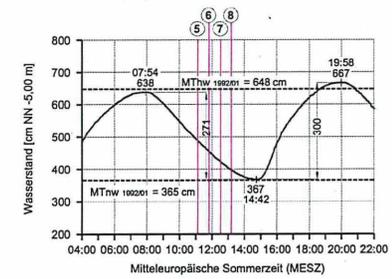
#### ADCP-Geschwindigkeits- vektoren in [cm/s]



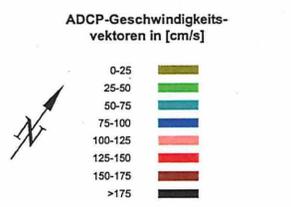
Institut für Wasserbau  
Neustadtswal 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wbbau@ibb.hs-bremen.de

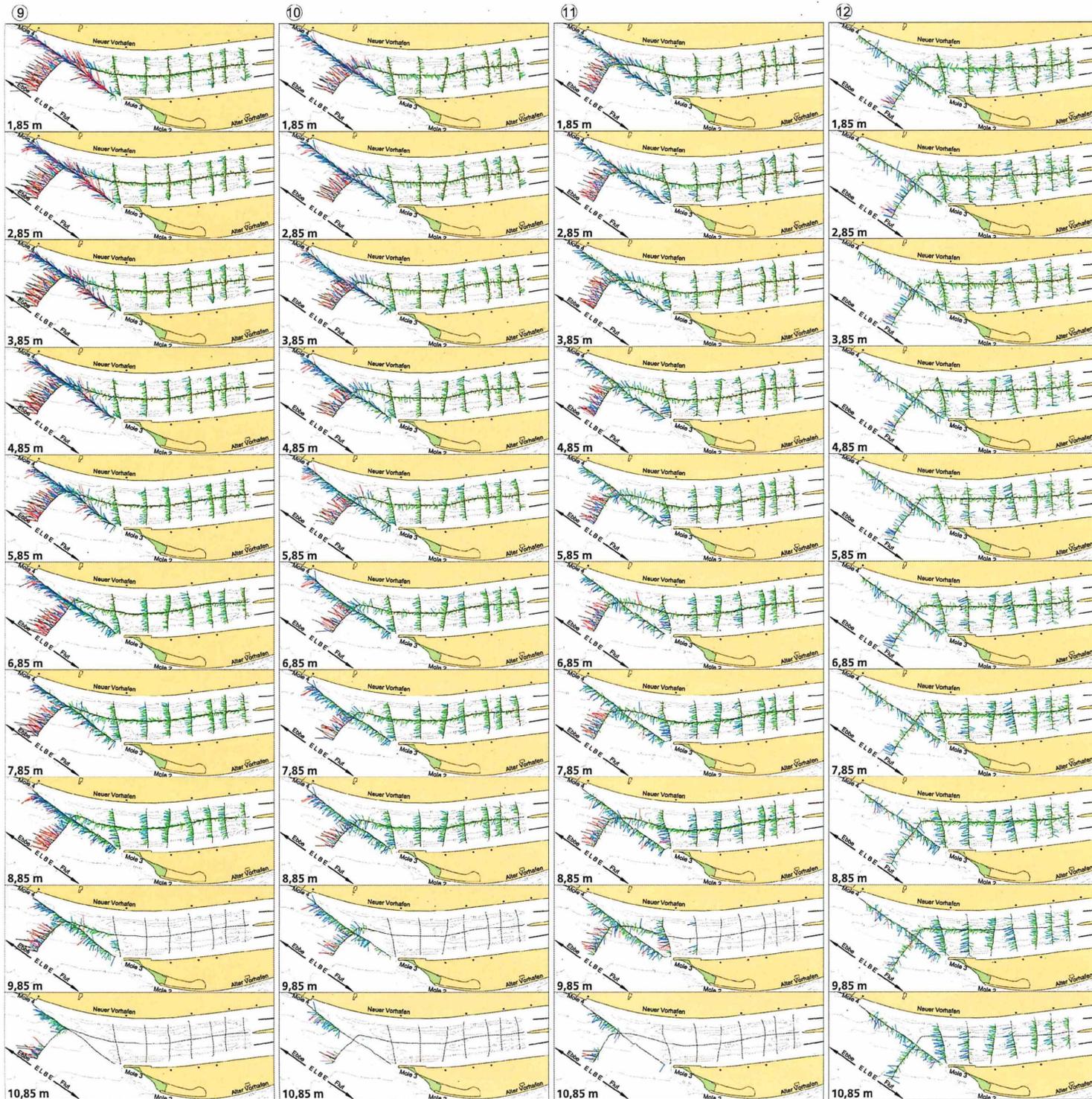


**Strömungen im Neuen Vorhafen  
des NOK Brunsbüttel  
ADCP-Messungen am 28.06.2005**



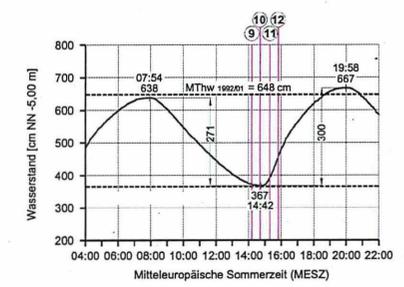
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 325 m³/s





Anlage 58

### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 28.06.2005



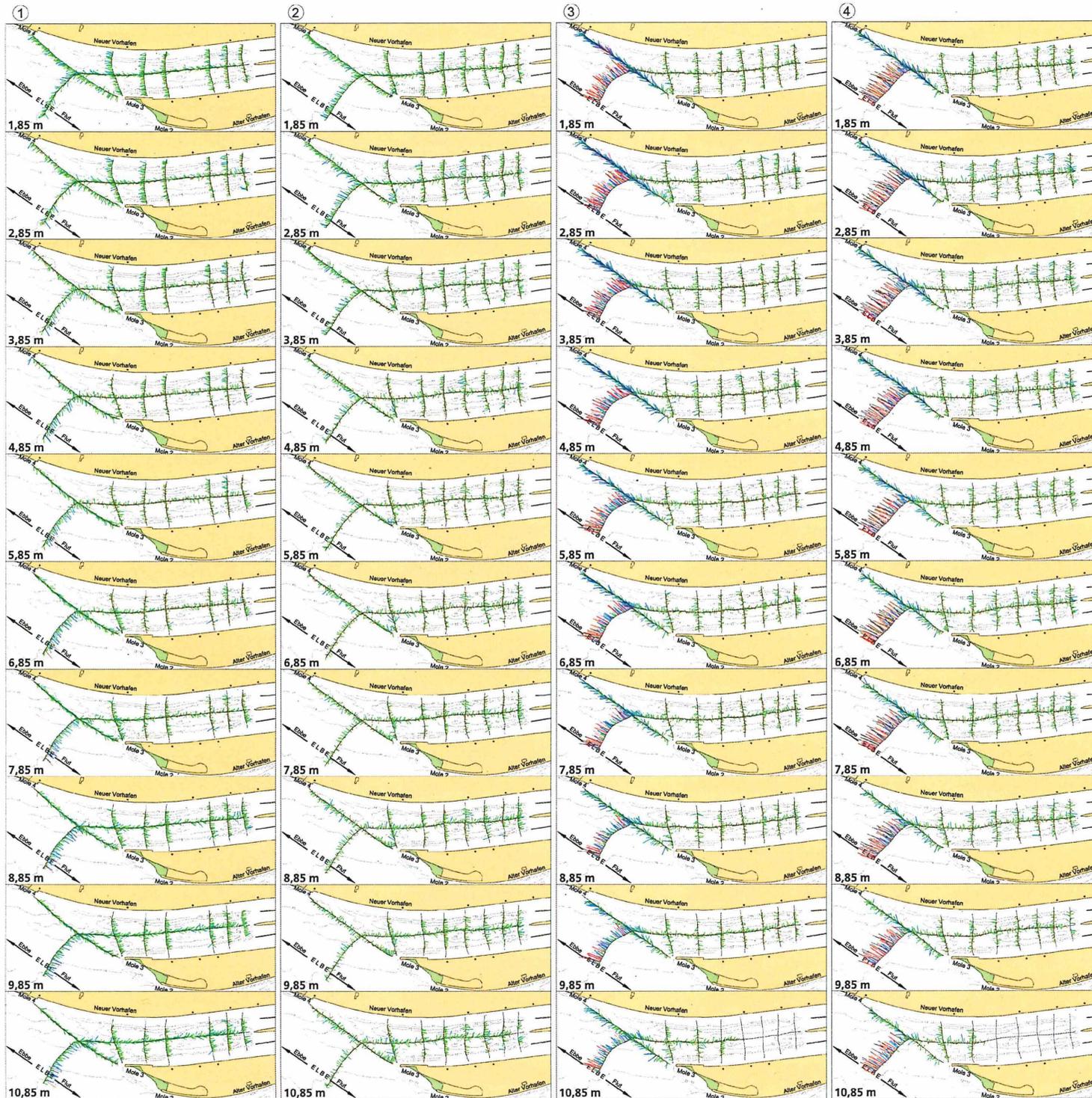
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 325 m³/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

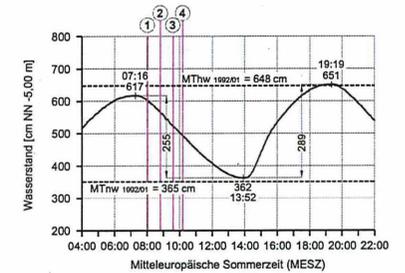
- 0-25
- 25-50
- 50-75
- 75-100
- 100-125
- 125-150
- 150-175
- >175



**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wiba@iwb.bremen.de



### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 13.07.2005

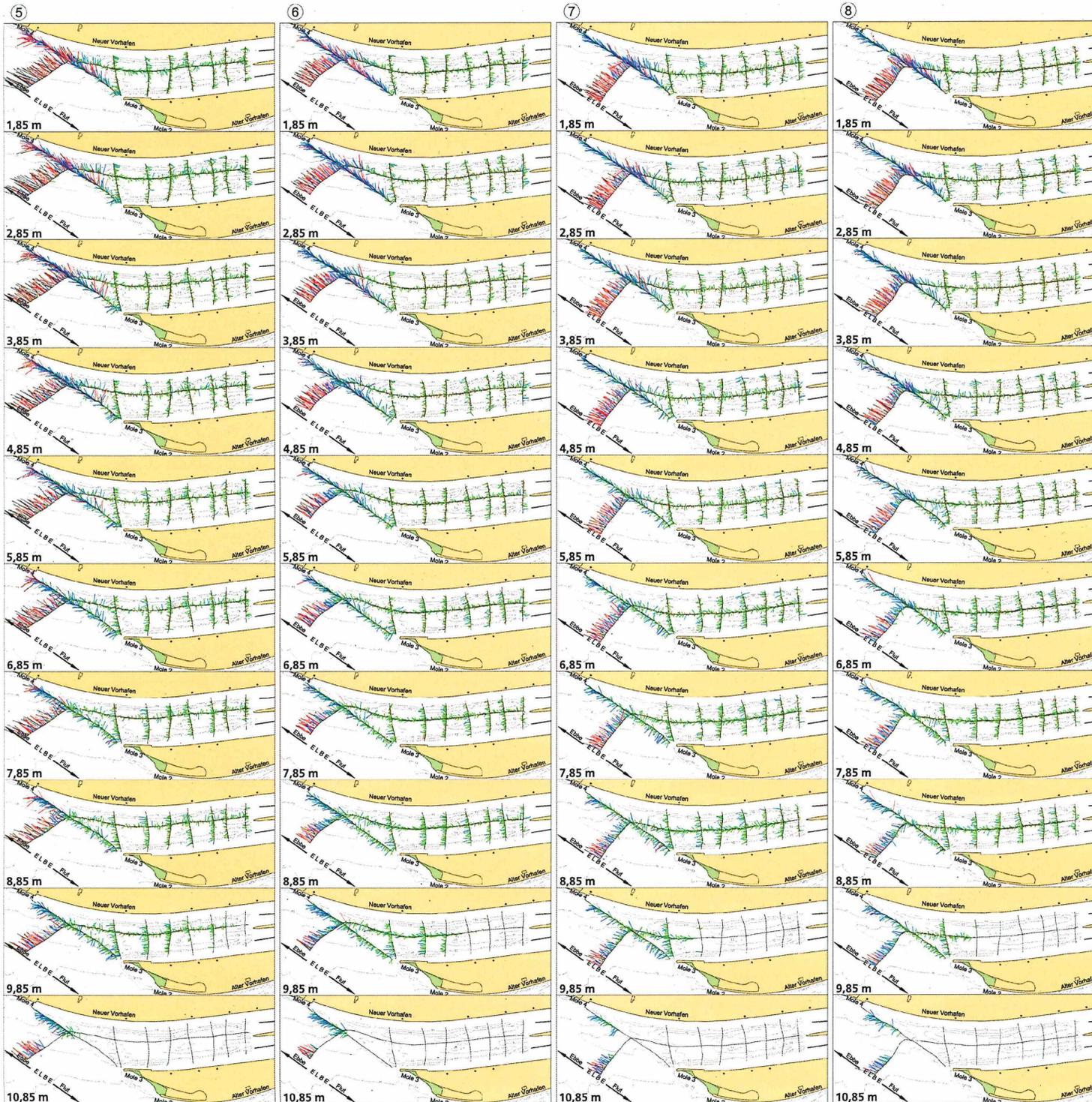


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 425 m³/s

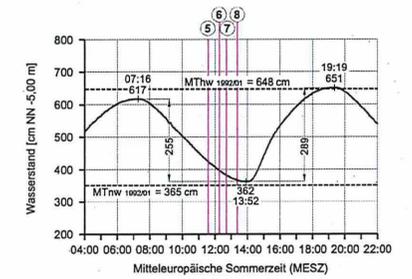
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2392  
e-mail: wabau@ibb.hs-bremen.de

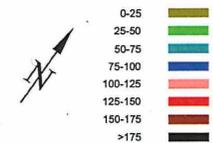


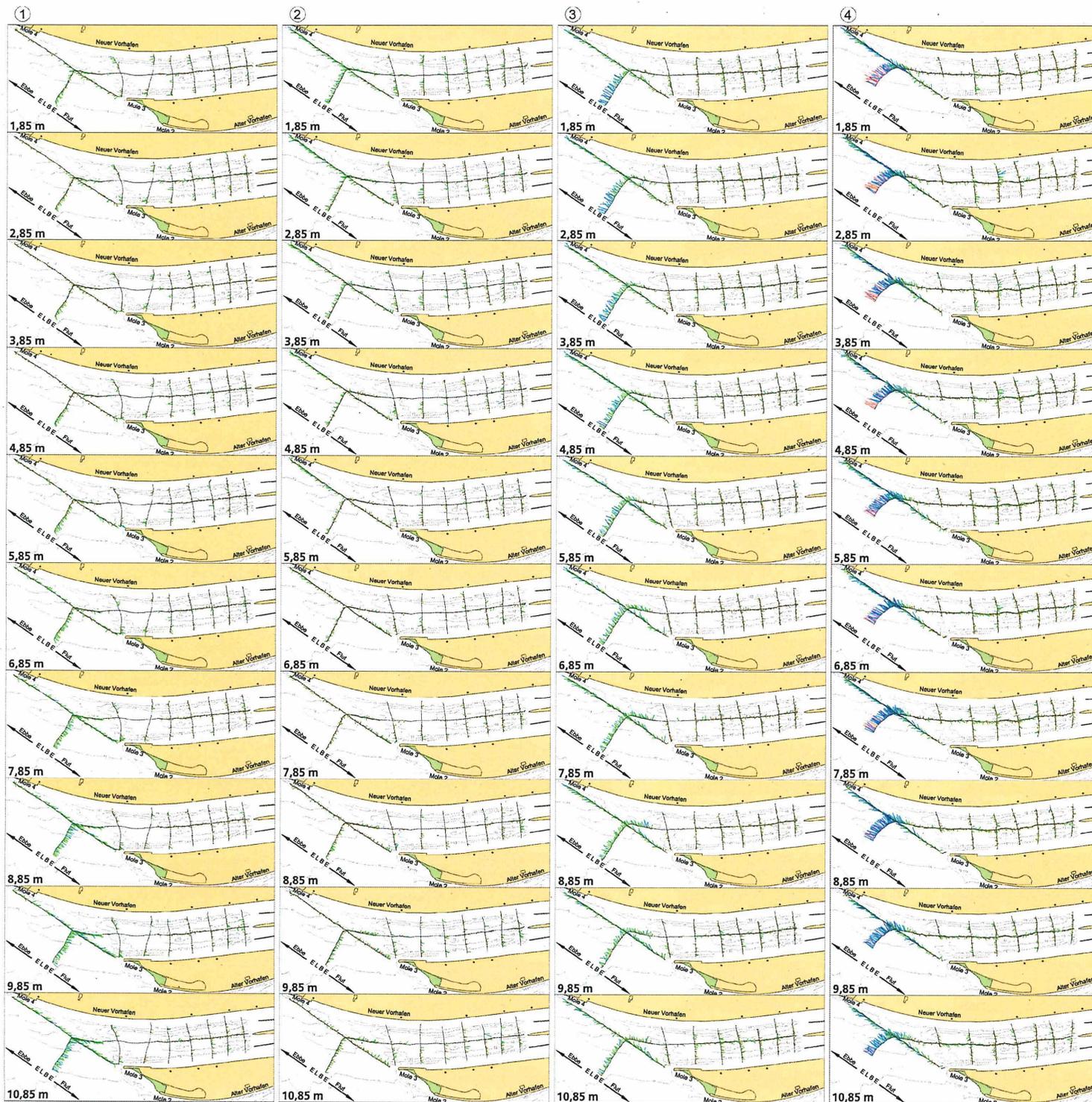
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 13.07.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 425 m³/s

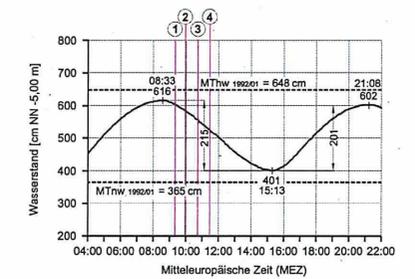
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]





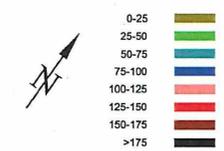
Anlage 61

### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.03.2007

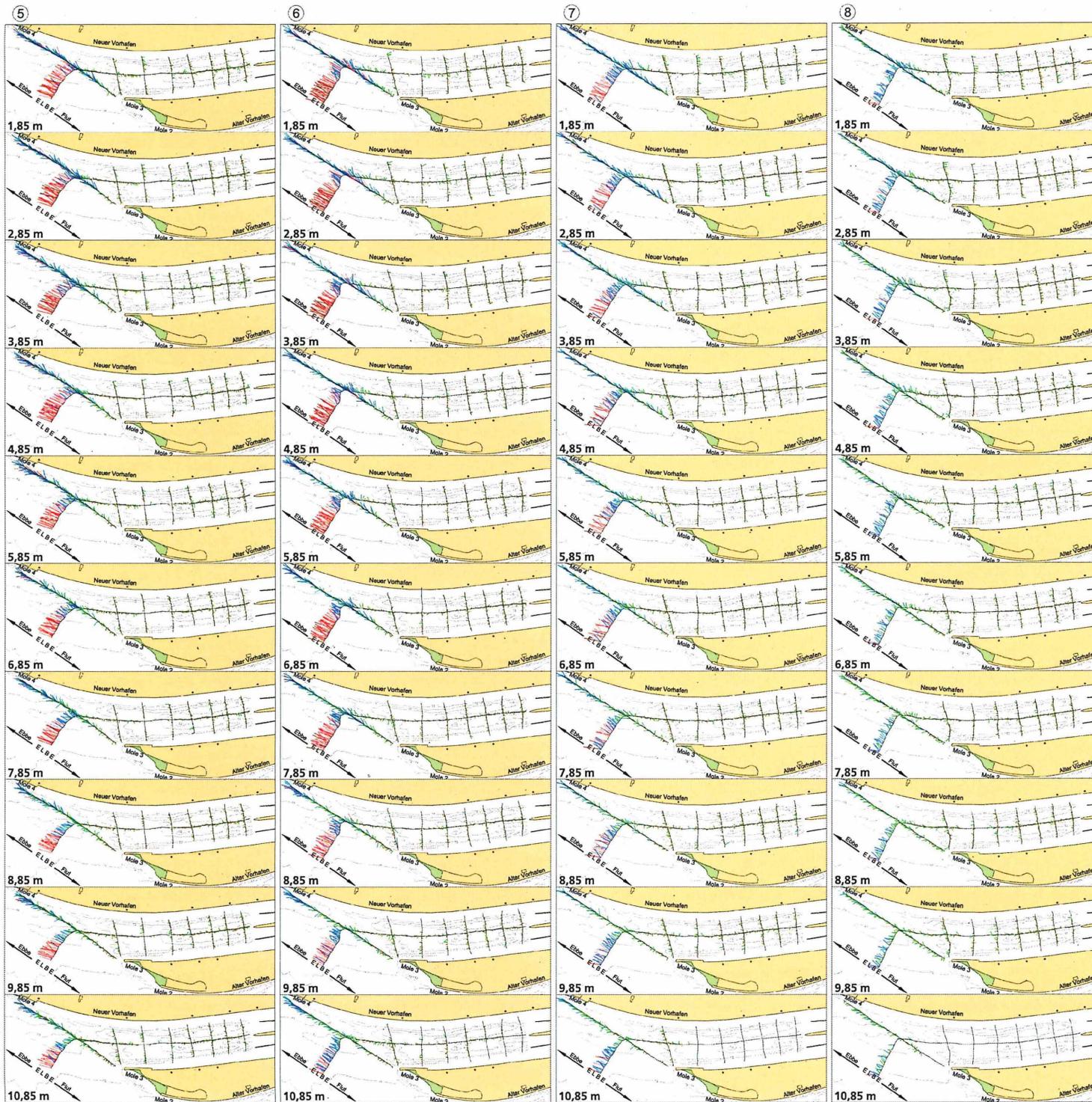


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1129 m³/s

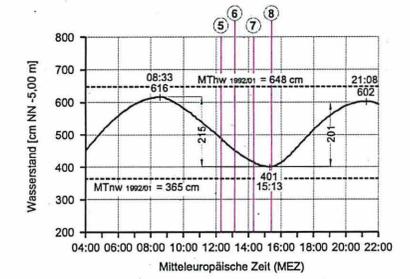
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



**IWA**  
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabu@ibb.hs-bremen.de

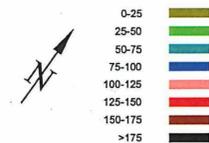


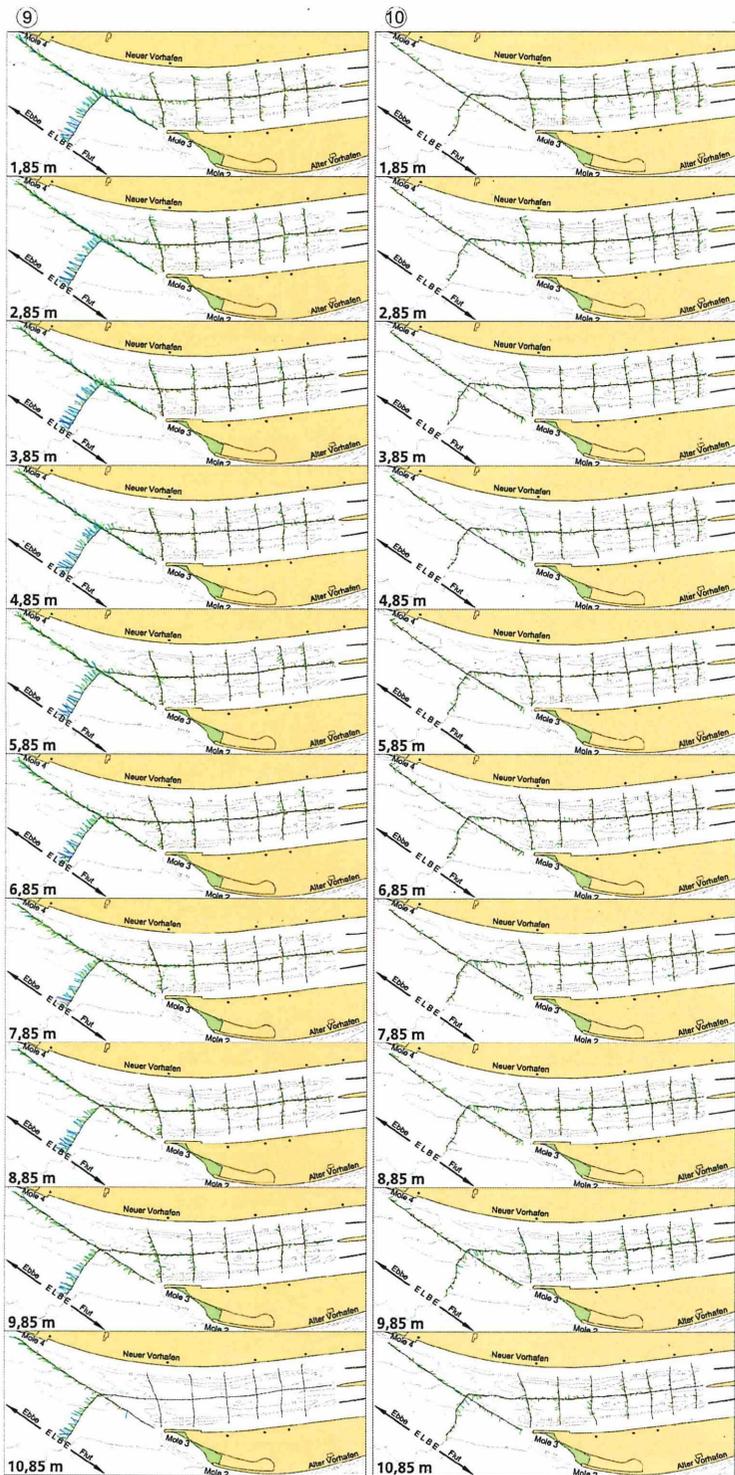
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.03.2007



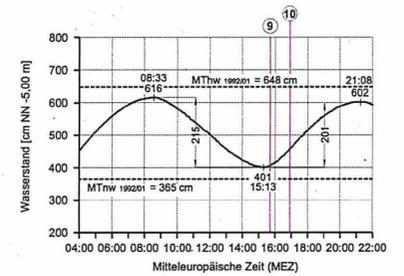
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1129 m³/s

#### ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



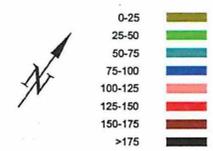


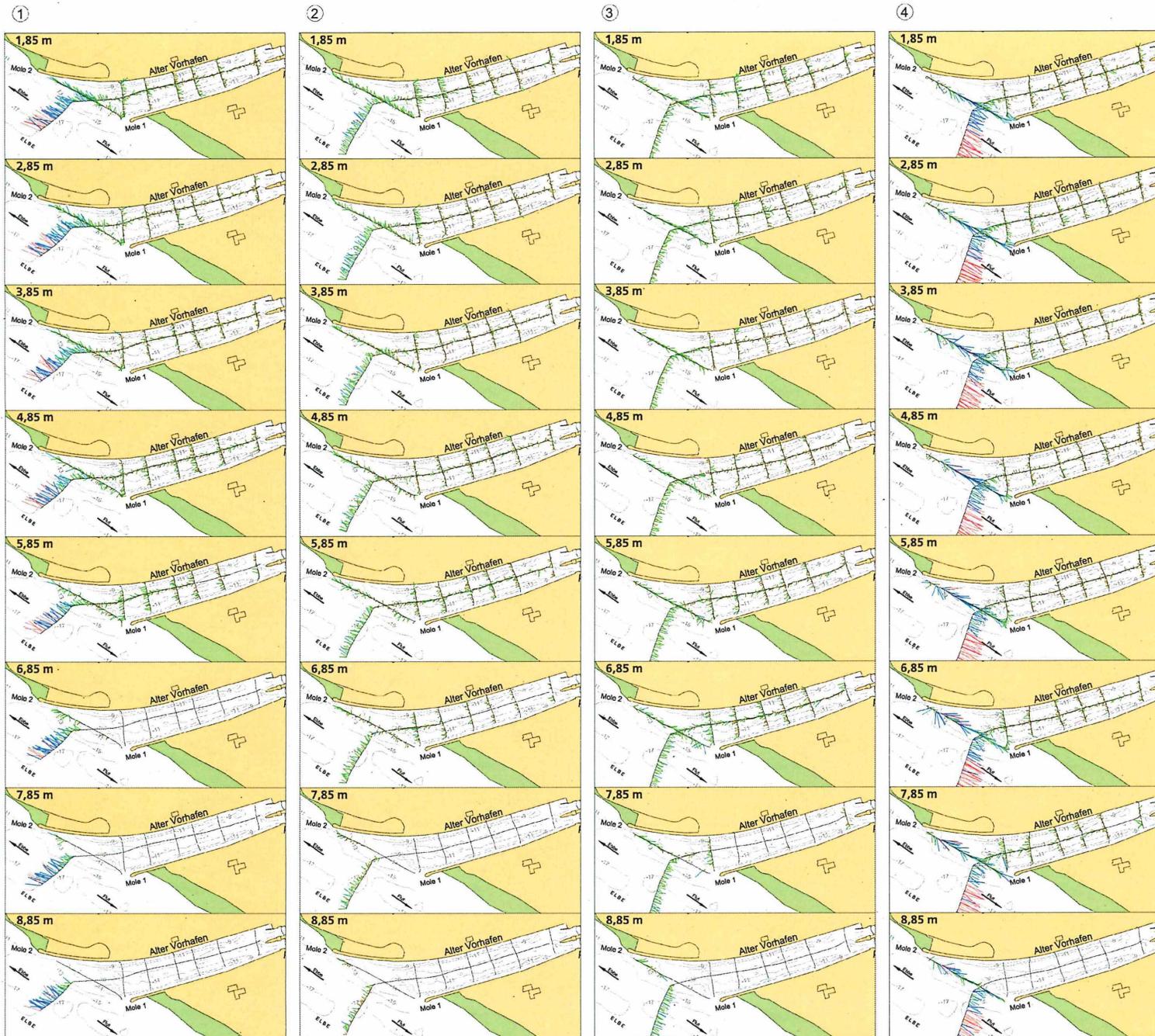
### Strömungen im Neuen Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.03.2007



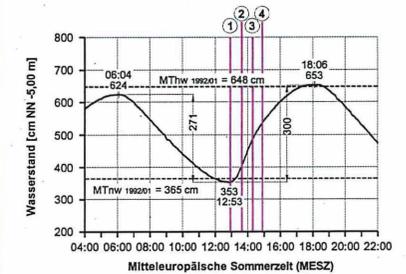
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1129 m<sup>3</sup>/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



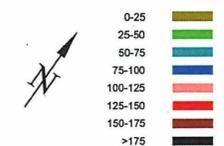


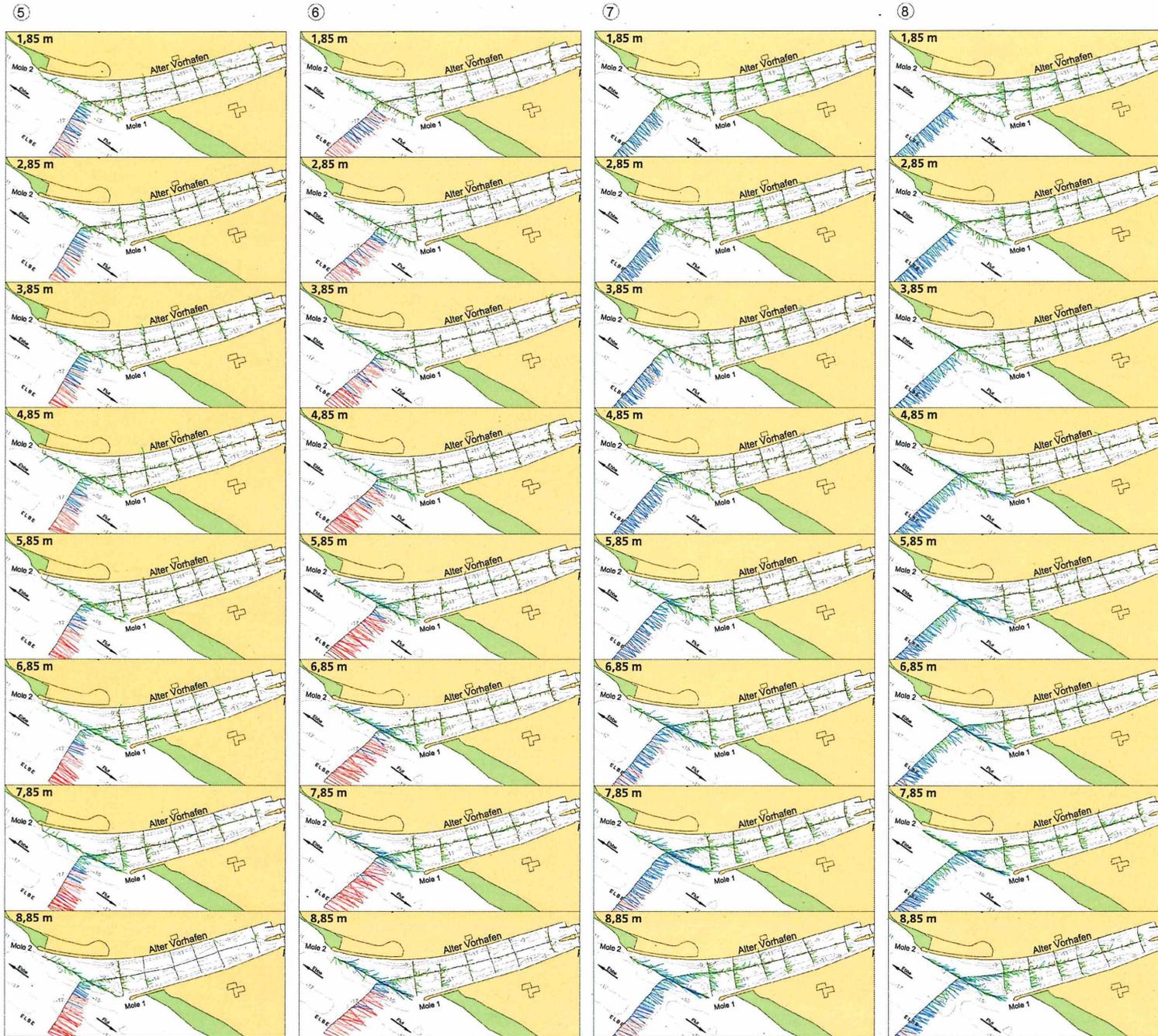
**Strömungen im Alten Vorhafen  
des NOK Brunsbüttel  
ADCP-Messungen am 11.07.2005**



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 410 m³/s

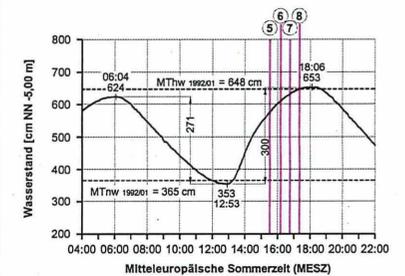
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]





Anlage 65

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 11.07.2005

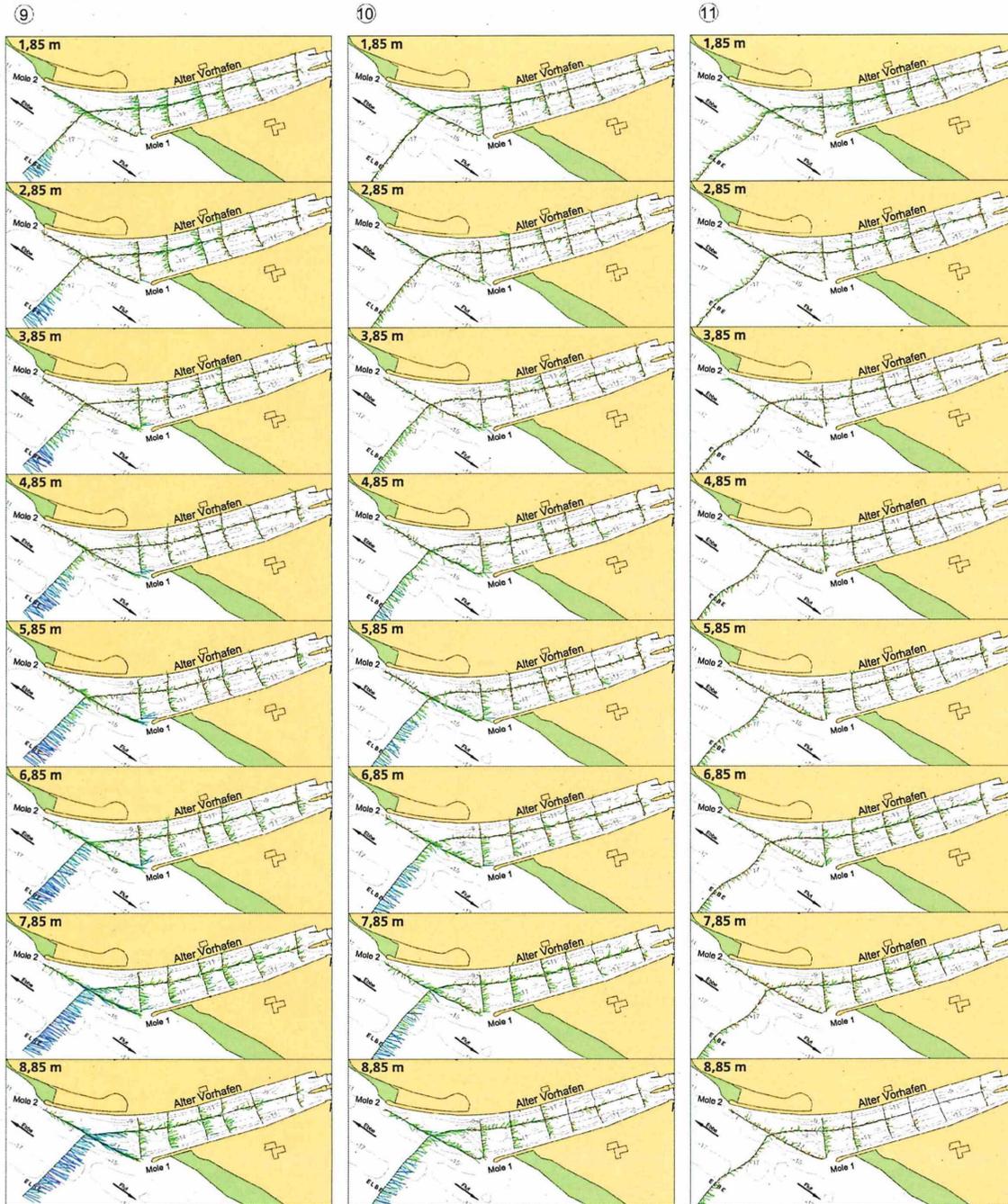


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 410 m³/s

ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]

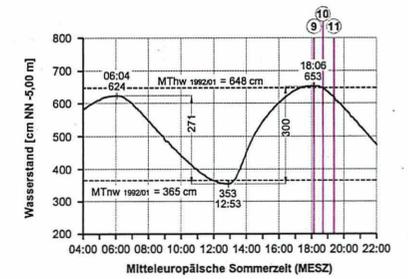


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de



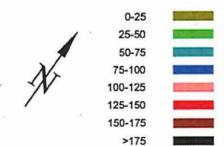
Anlage 66

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 11.07.2005

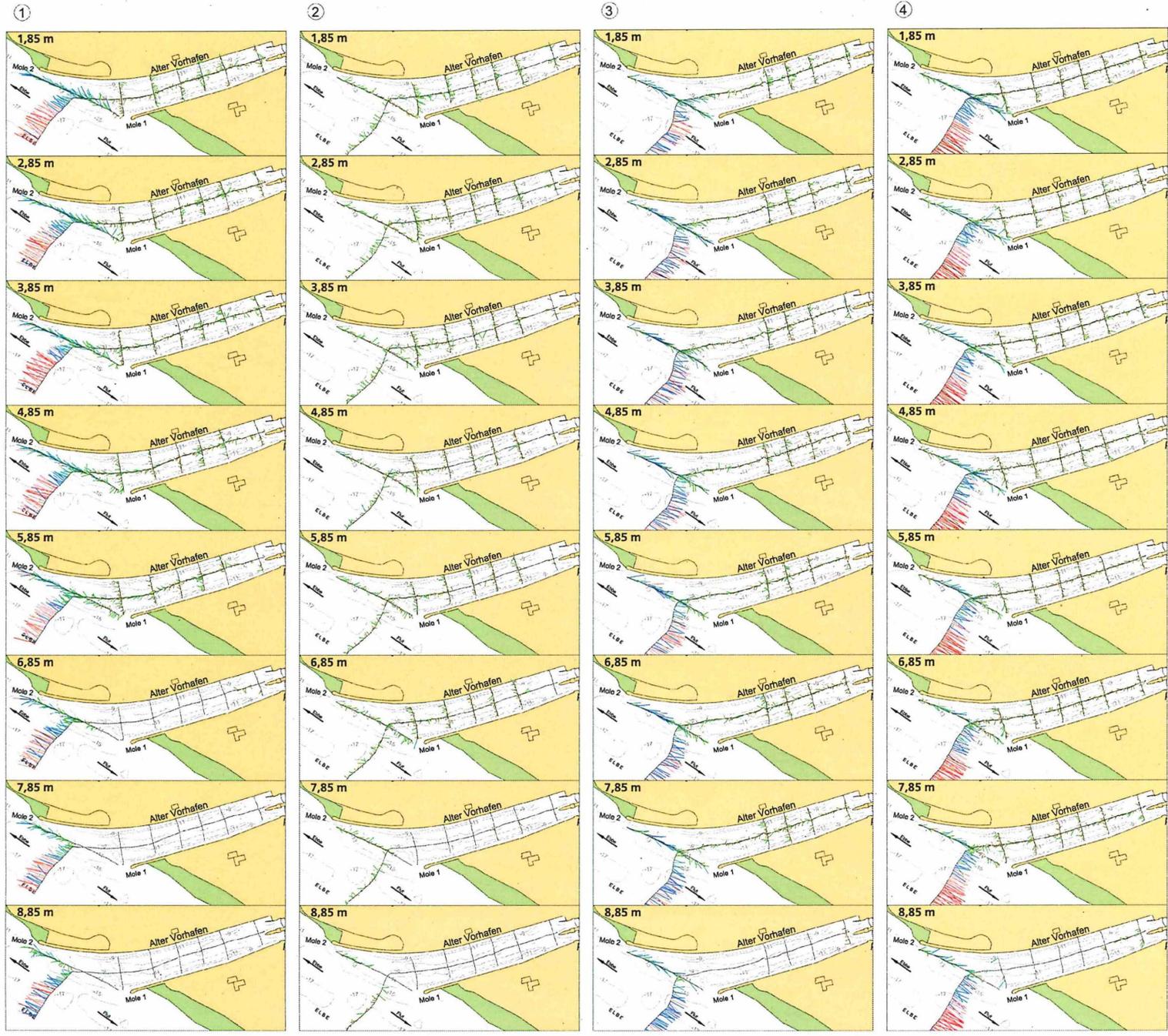


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 410 m³/s

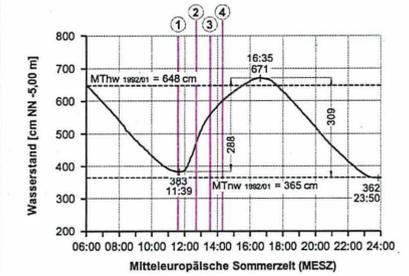
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



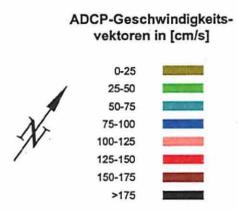
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.tis-bremen.de



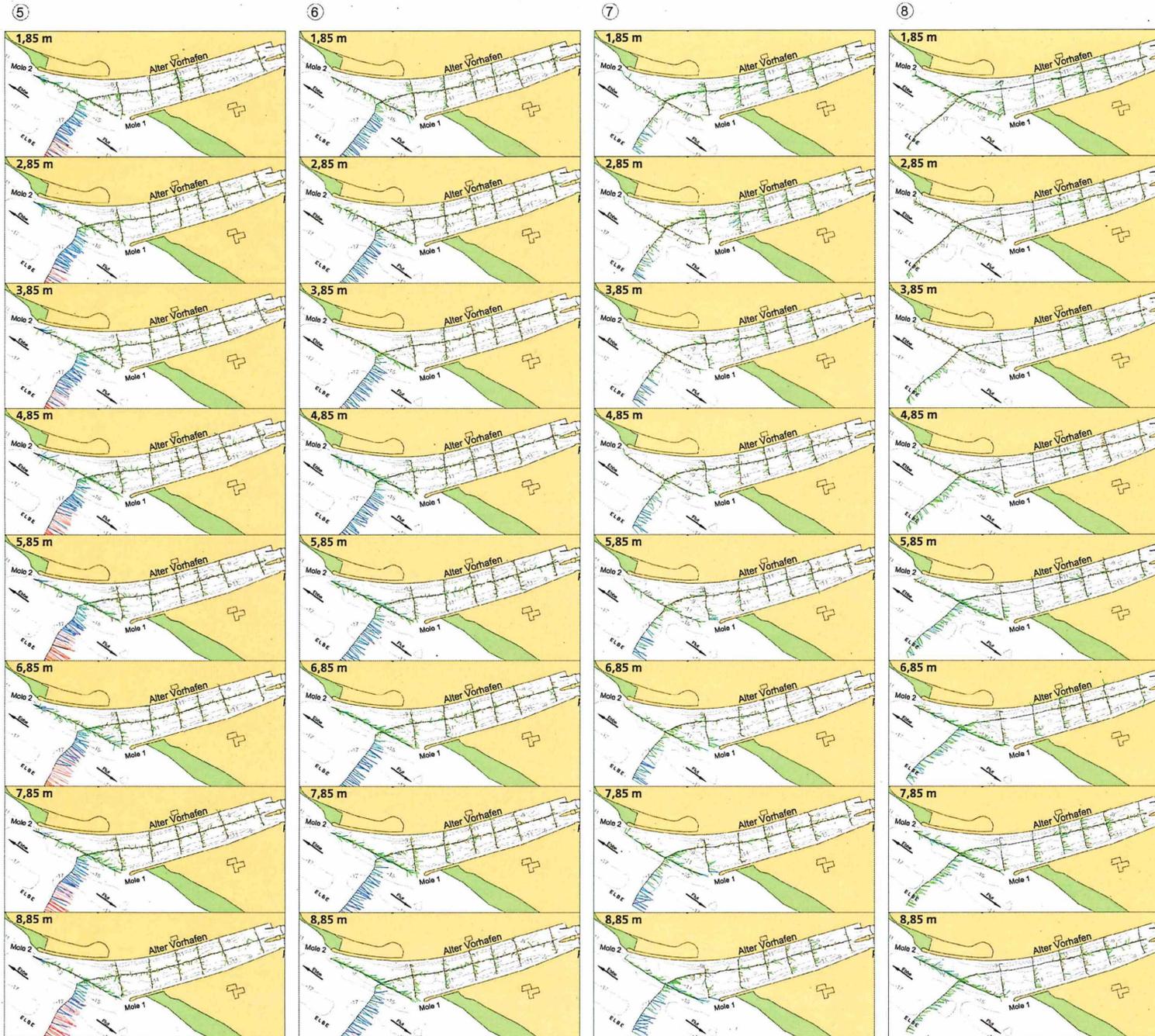
**Strömungen im Alten Vorhafen  
des NOK Brunsbüttel  
ADCP-Messungen am 08.03.2007**



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1139 m³/s

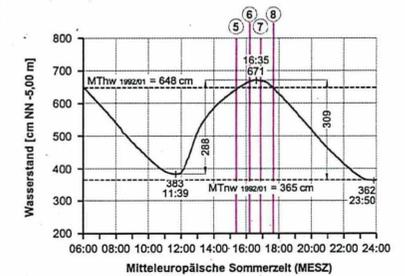


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5935 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@bb.hs-bremen.de



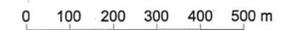
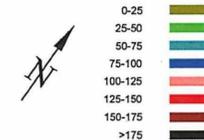
Anlage 68

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 08.03.2007



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1139 m<sup>3</sup>/s

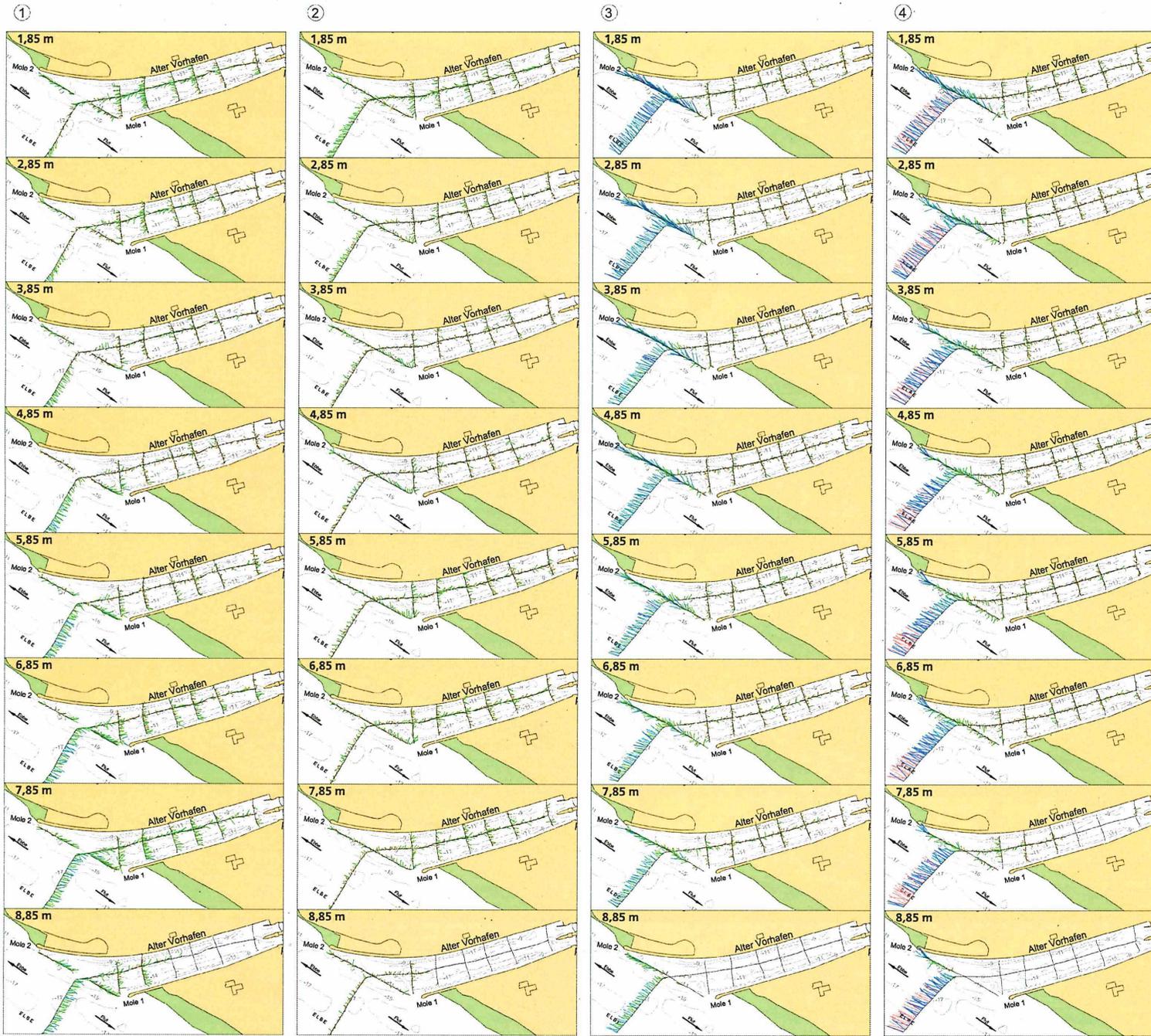
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau

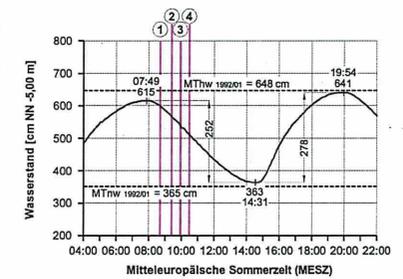
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen

Tele: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibw.hs-bremen.de

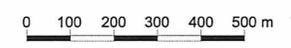
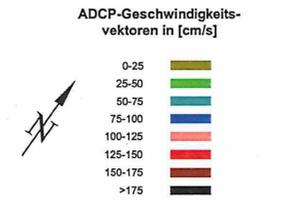


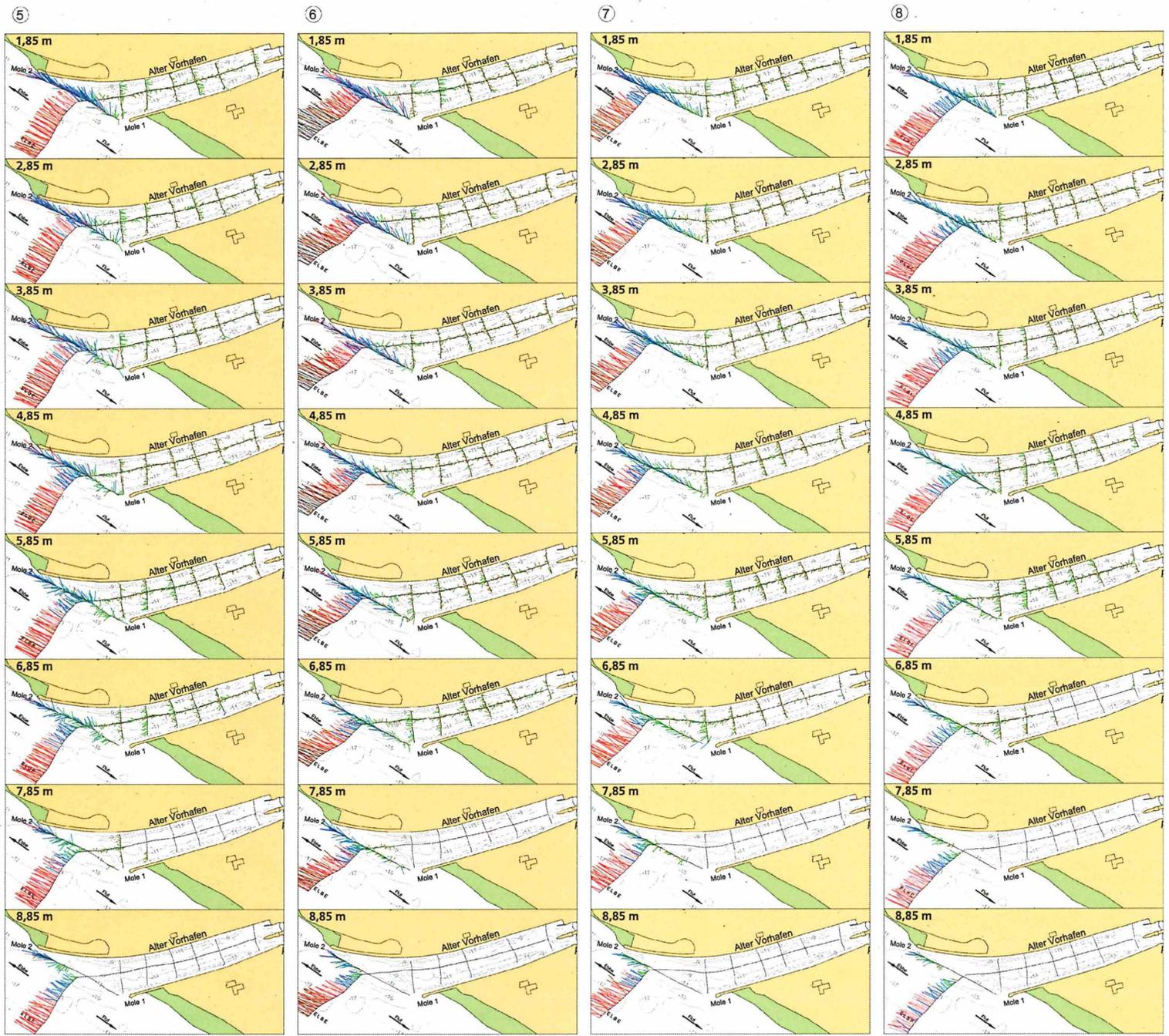
Anlage 69

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.07.2005



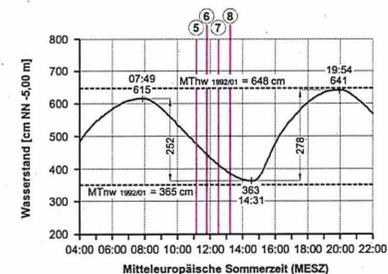
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m<sup>3</sup>/s





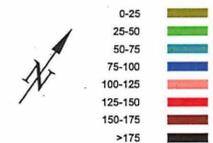
Anlage 70

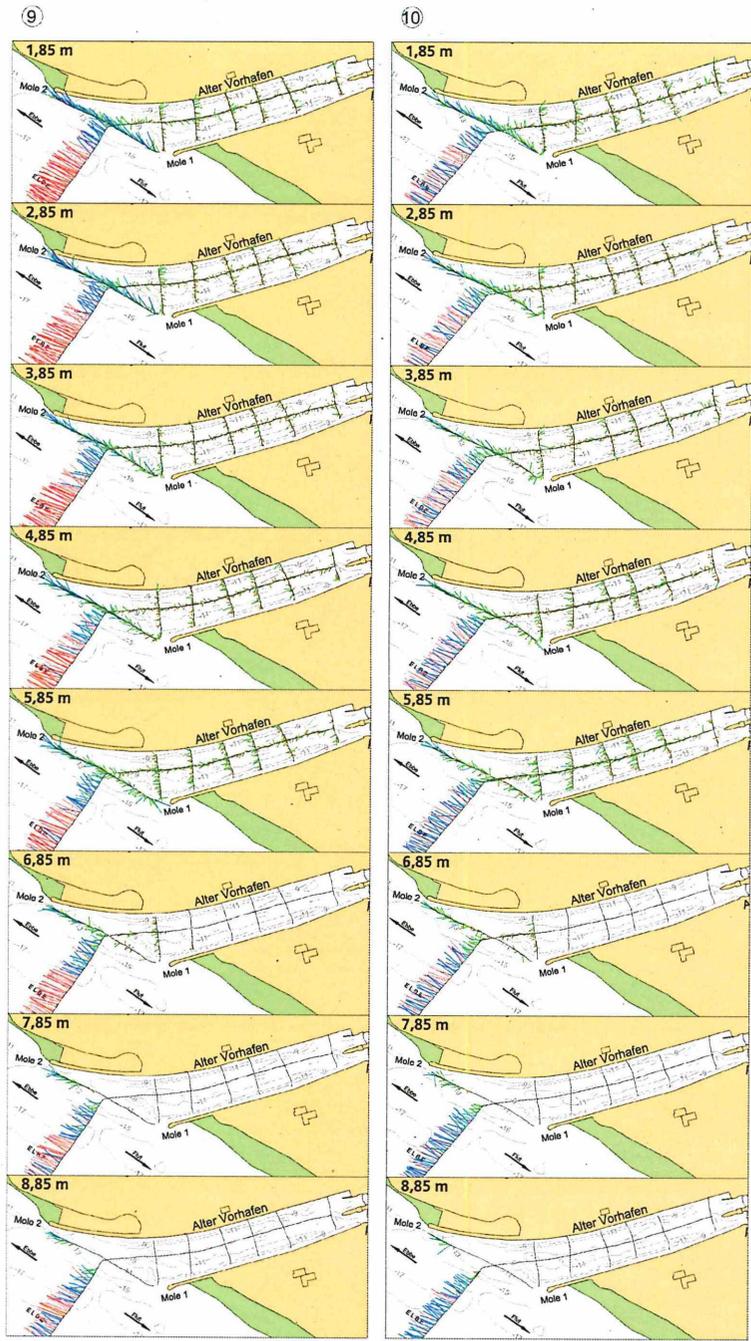
### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.07.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m³/s

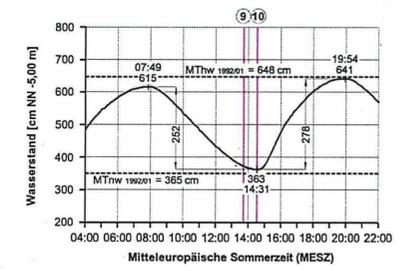
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]



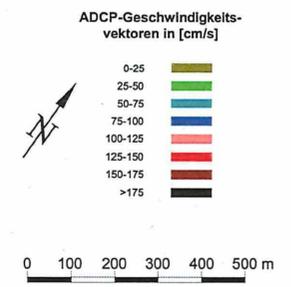


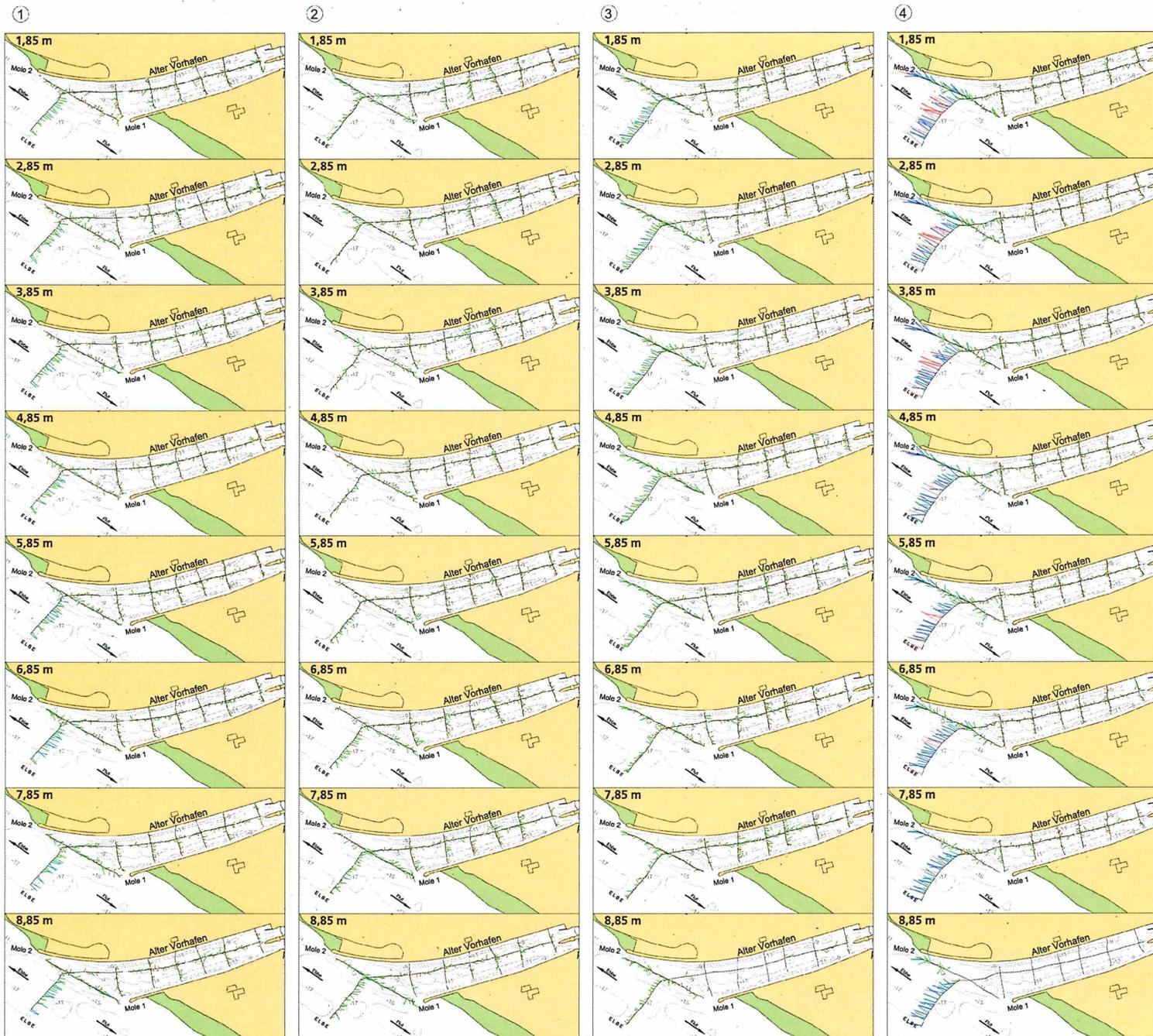
Anlage 71

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 14.07.2005



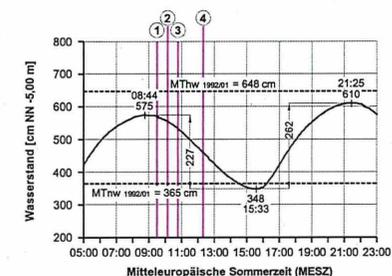
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m³/s





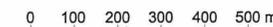
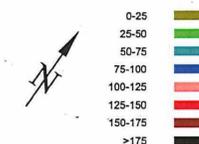
Anlage 72

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 27.03.2007

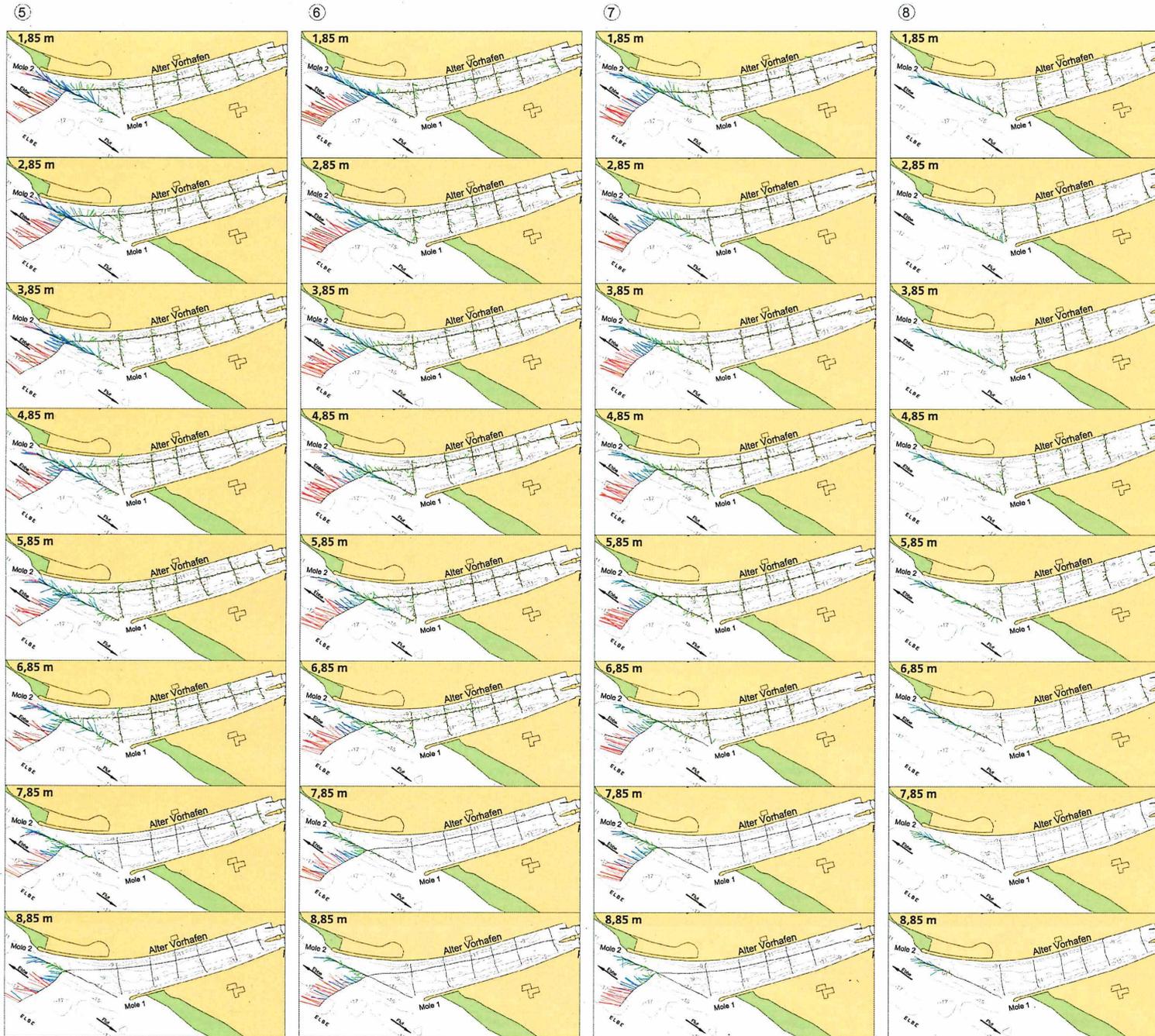


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 940 m<sup>3</sup>/s

ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]

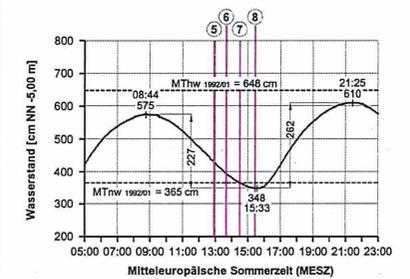


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabaug@iwb.hs-bremen.de

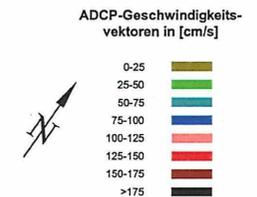


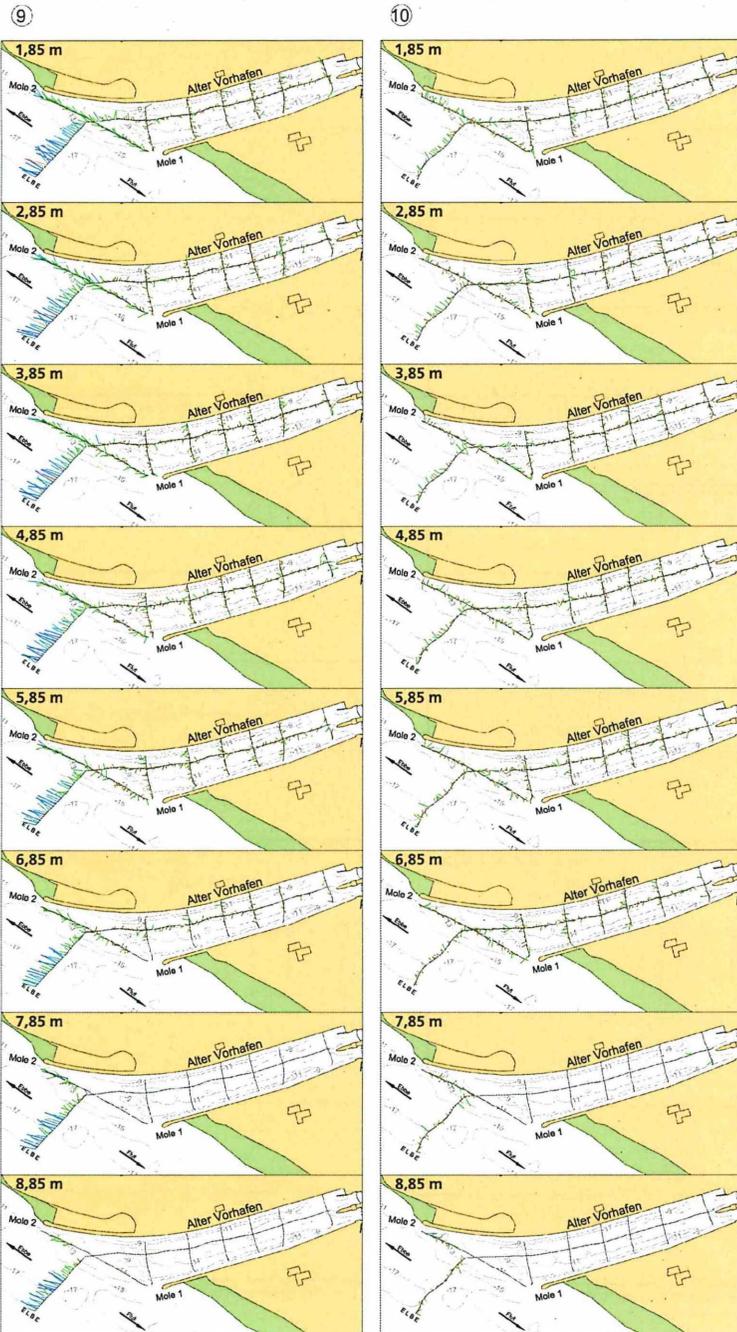
Anlage 73

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 27.03.2007



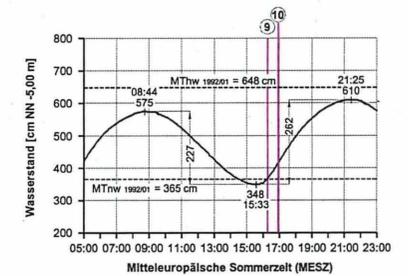
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 940 m³/s





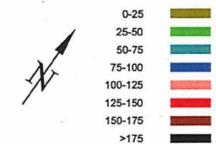
Anlage 74

### Strömungen im Alten Vorhafen des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 27.03.2007

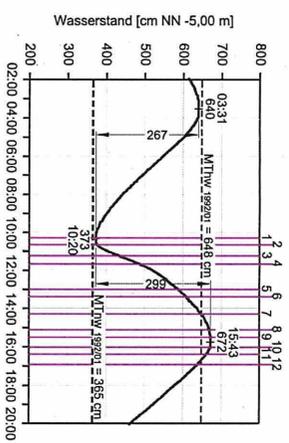
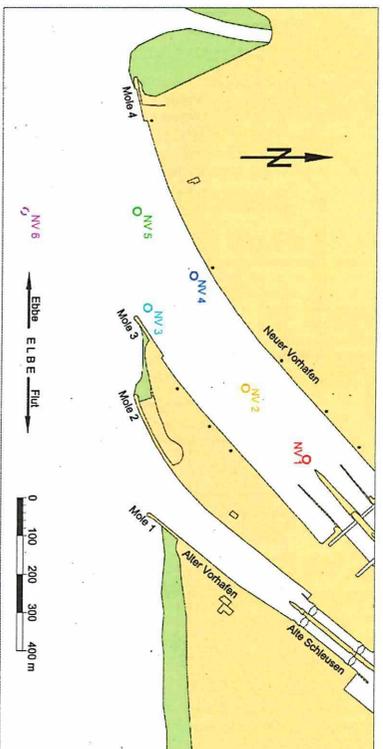


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 940 m<sup>3</sup>/s

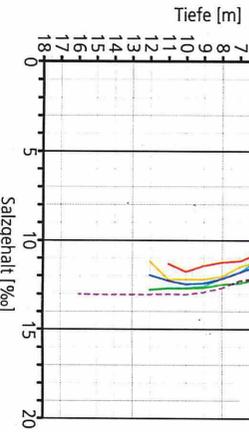
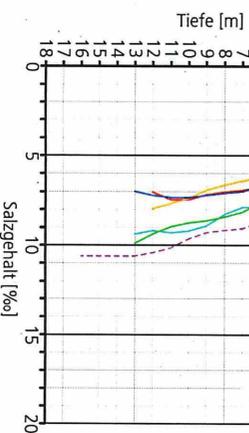
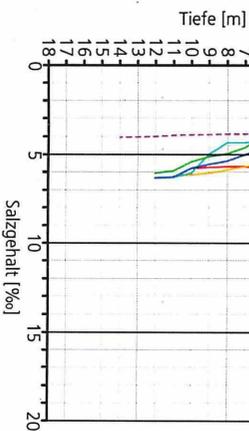
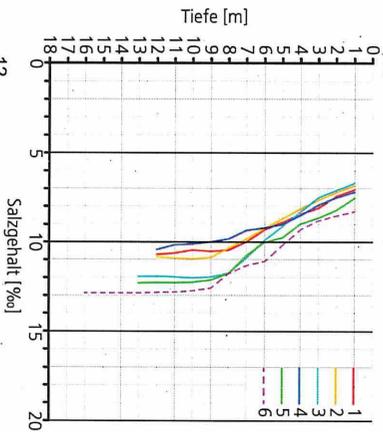
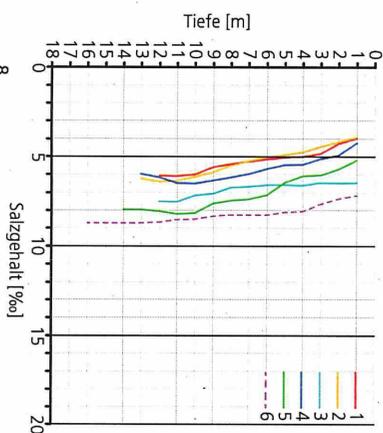
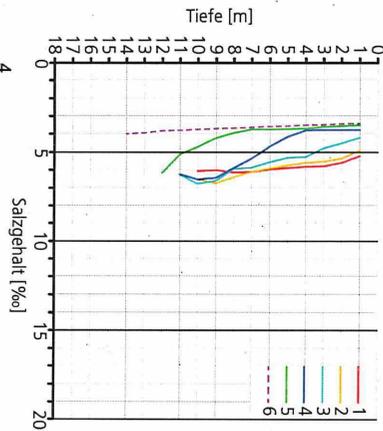
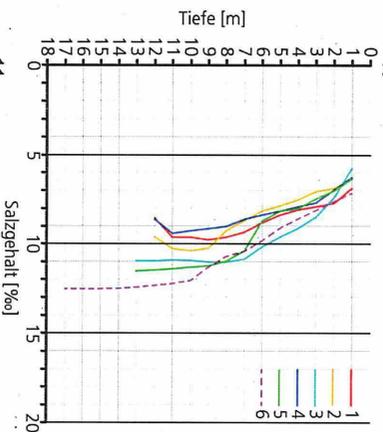
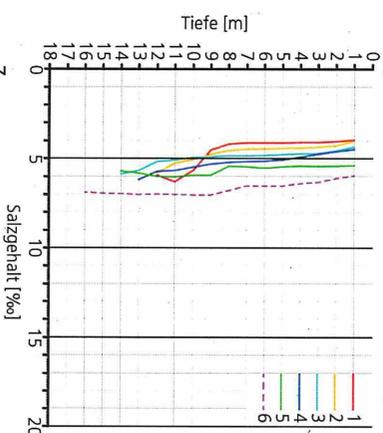
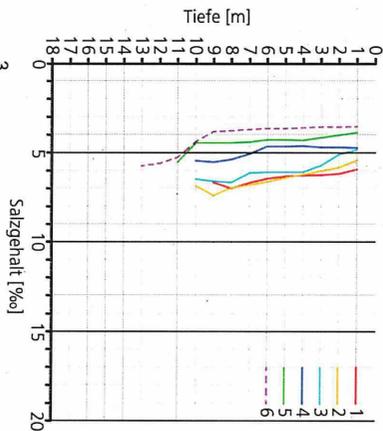
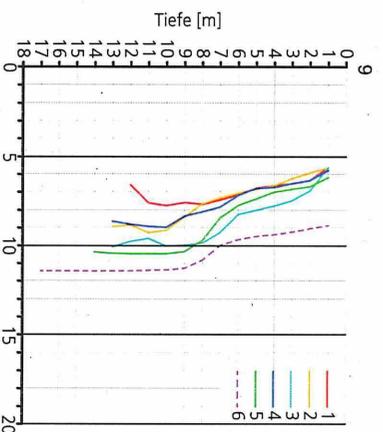
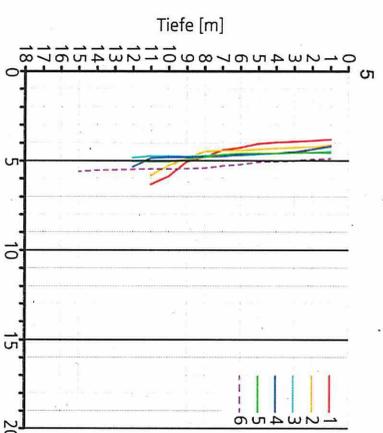
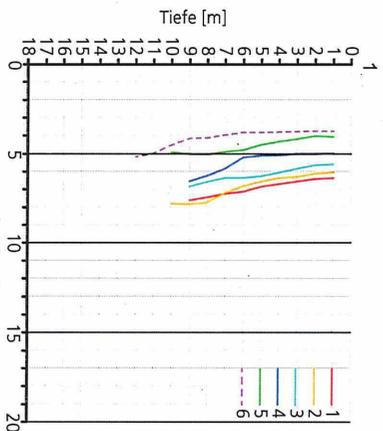
ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]

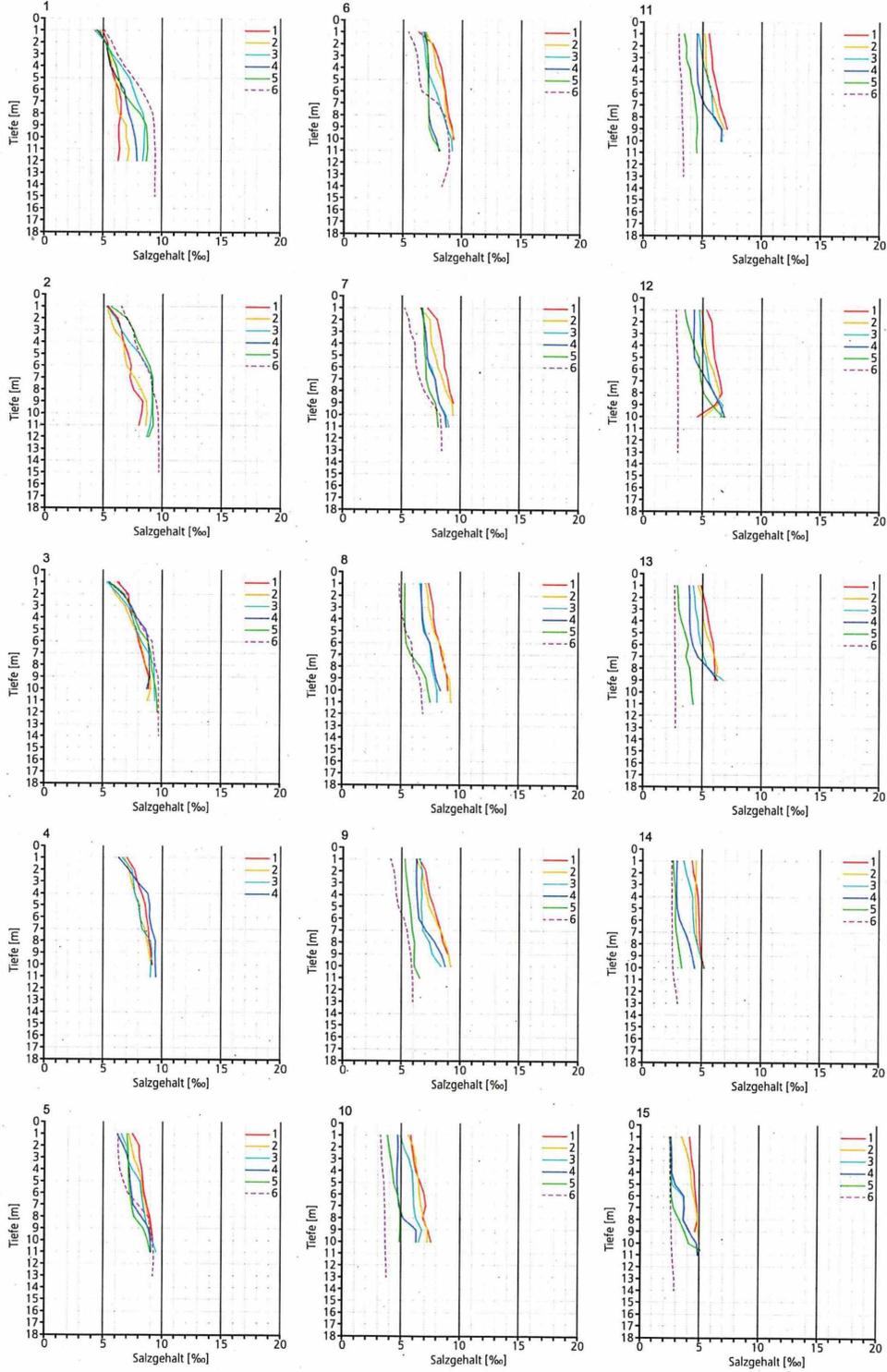
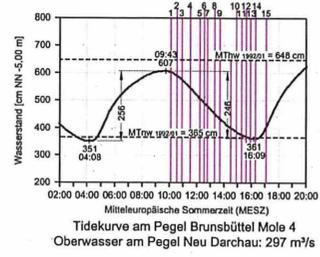
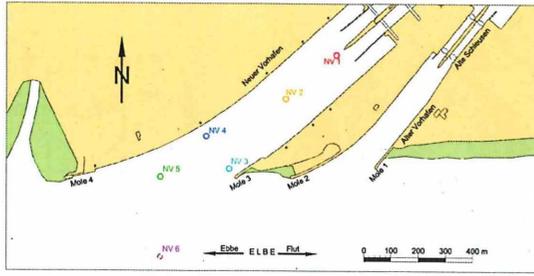


Institut für Wasserbau  
Neustadtwall 50  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: waba@ibb.hs-bremen.de

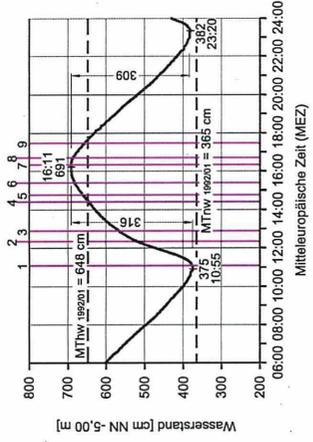
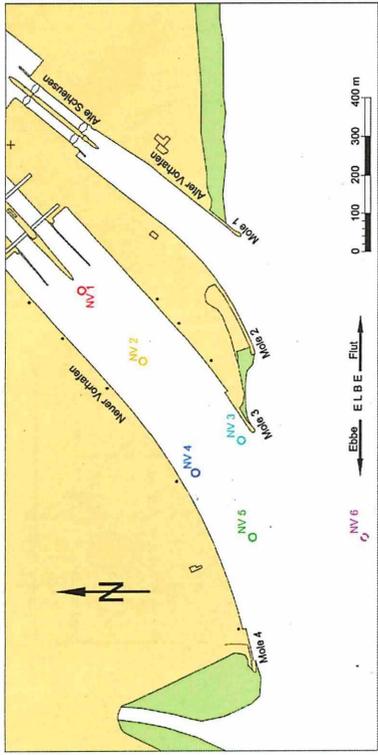


Titelkurve am Pegel Brunshüttei Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 292 m<sup>3</sup>/s

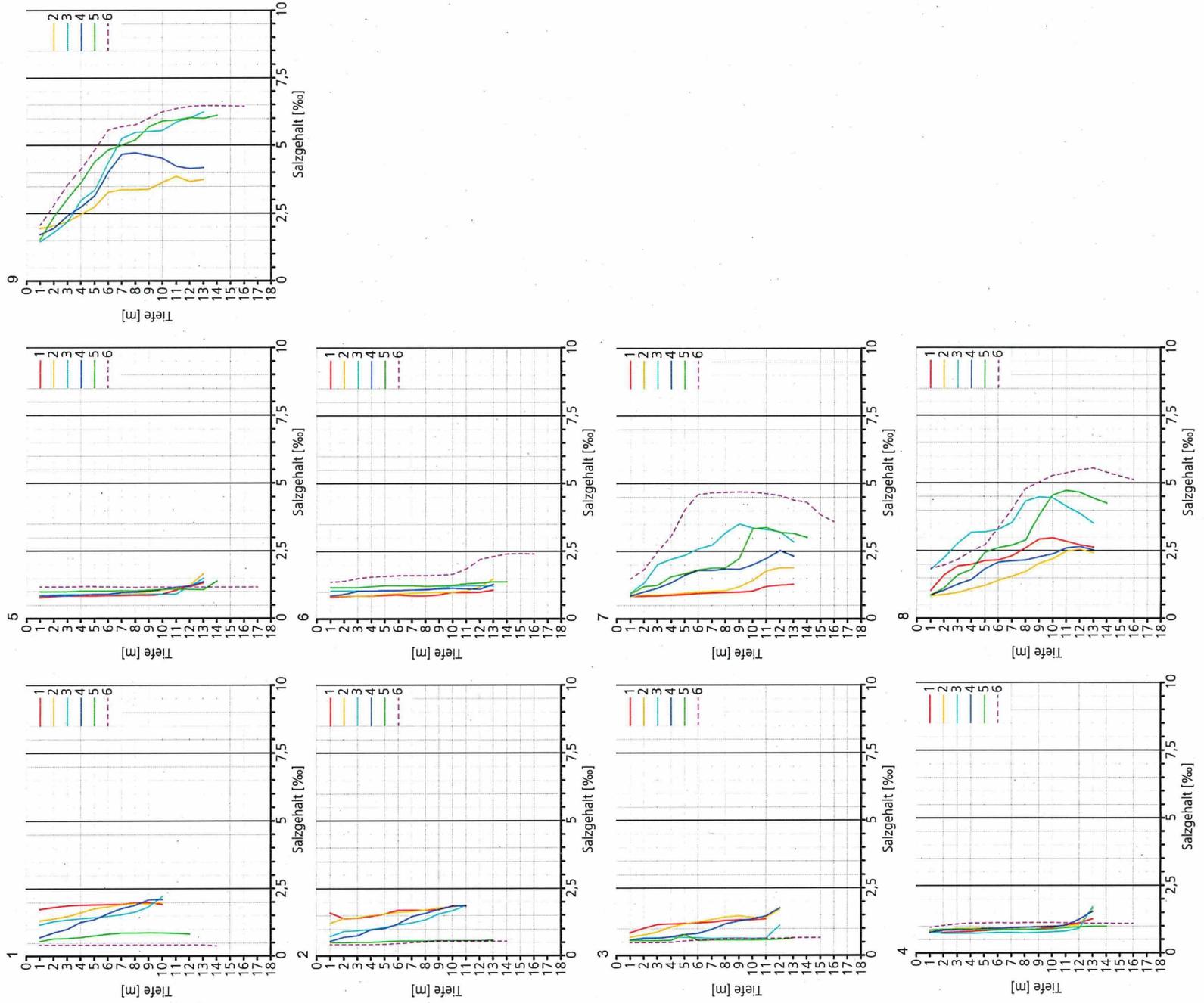




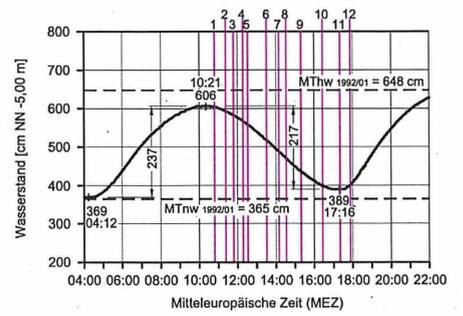
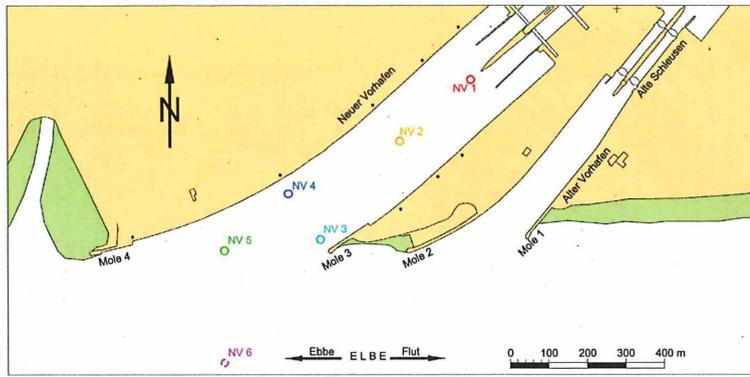
Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Erbemessung am 30.06.2005



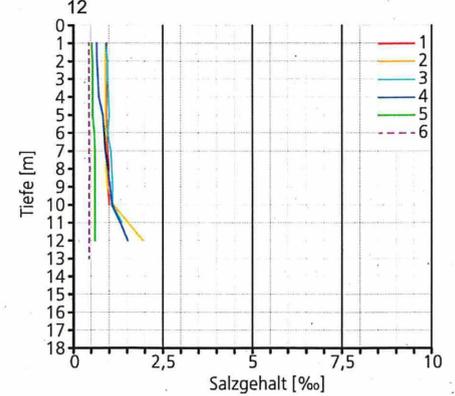
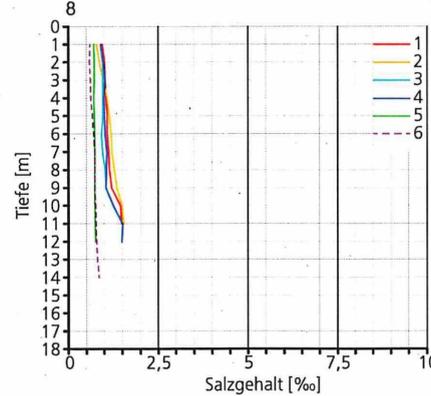
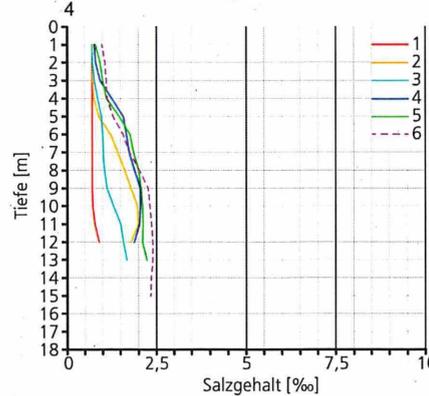
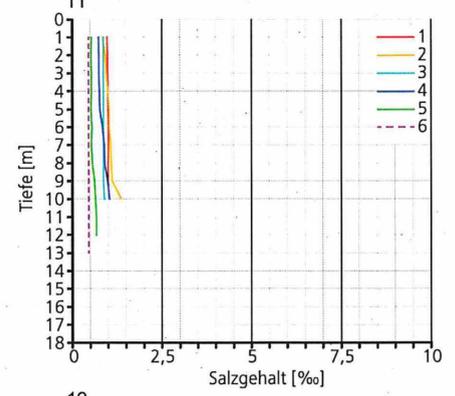
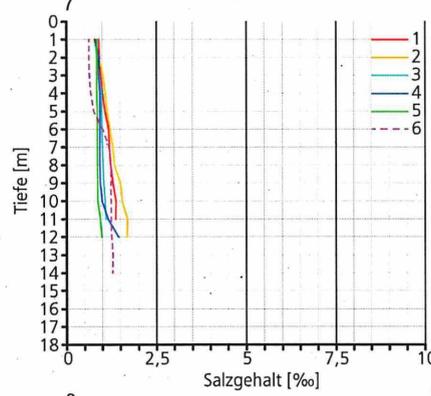
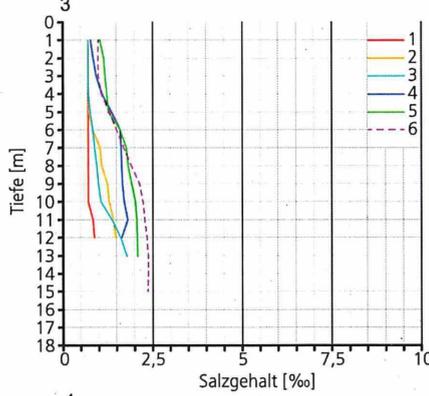
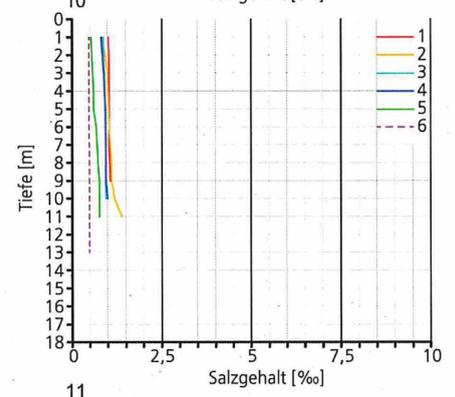
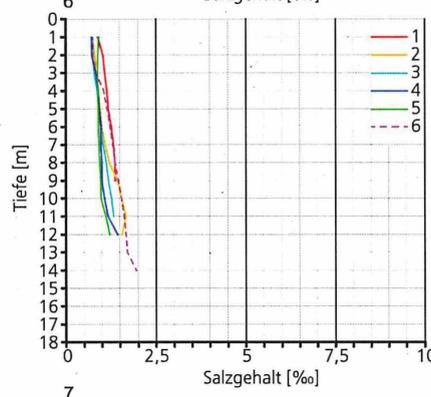
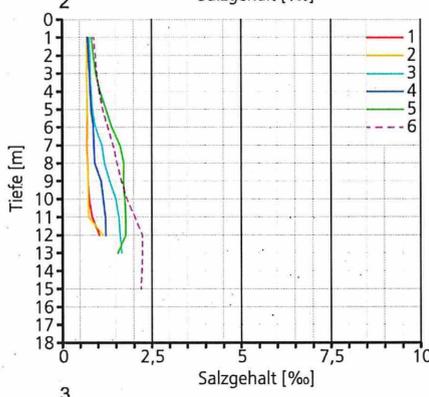
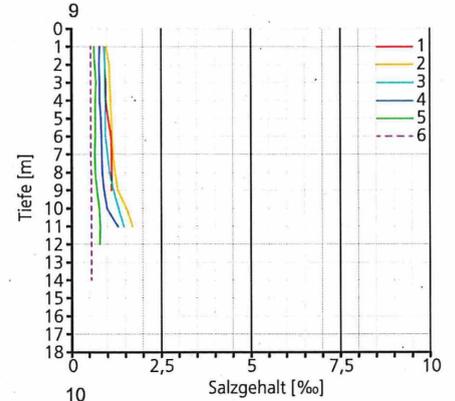
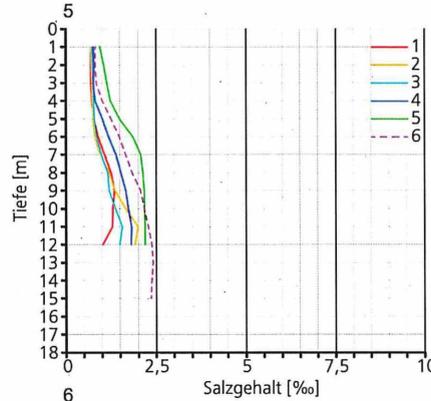
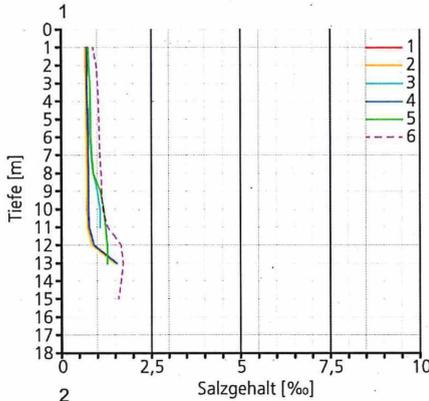
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1061 m³/s



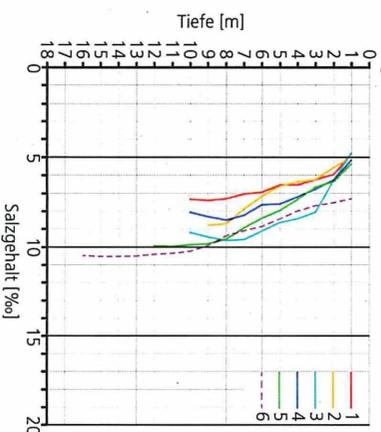
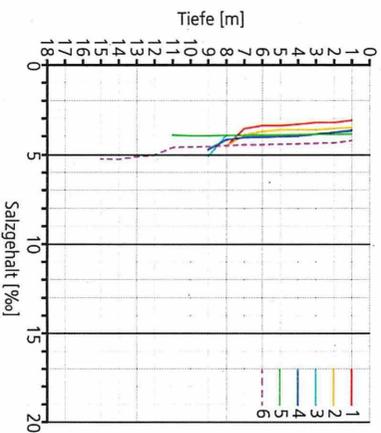
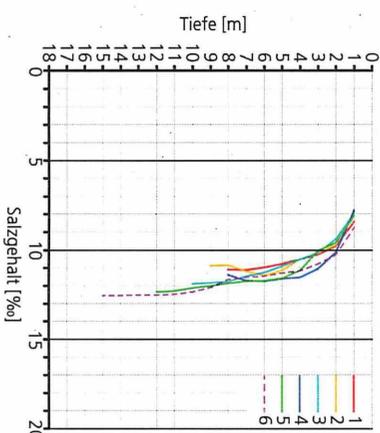
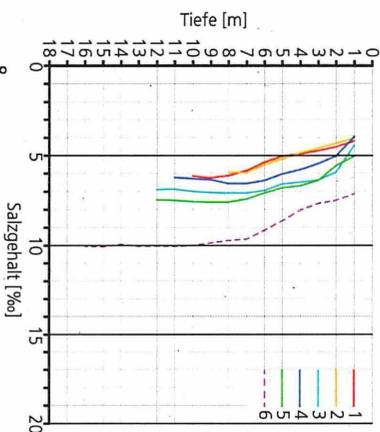
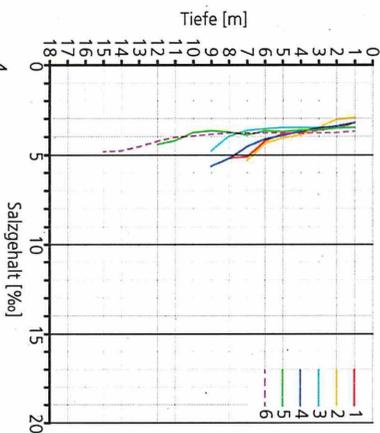
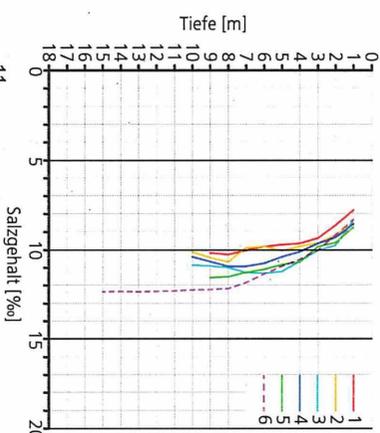
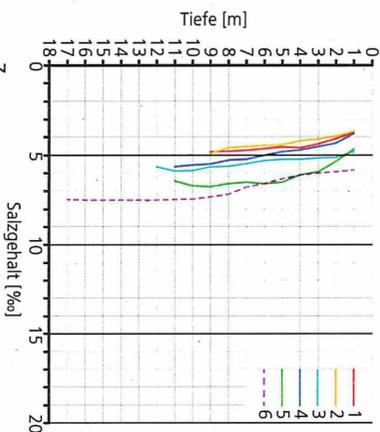
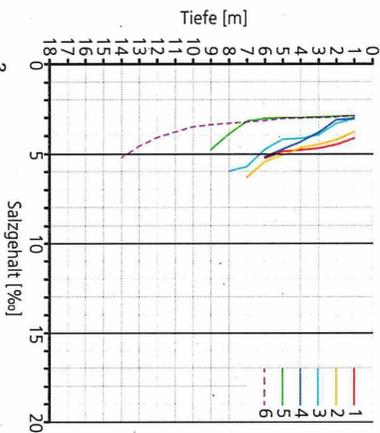
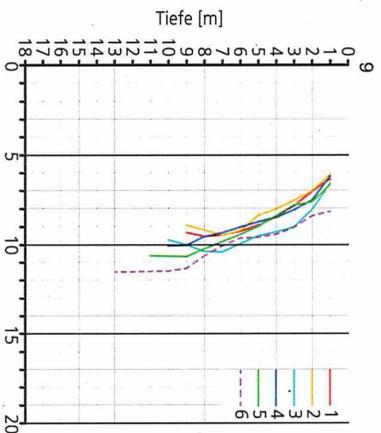
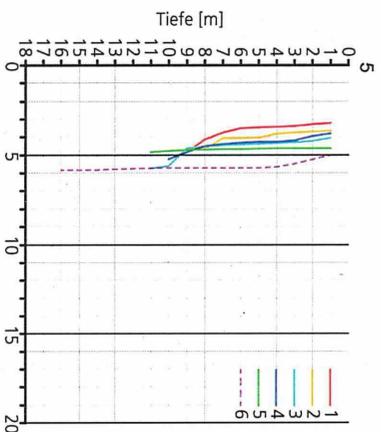
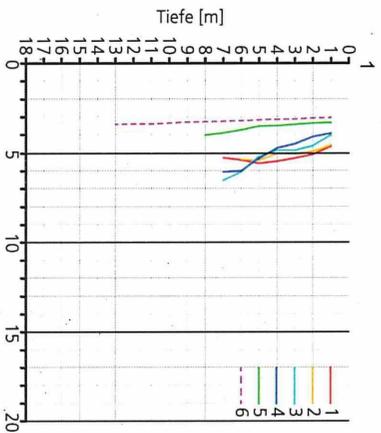
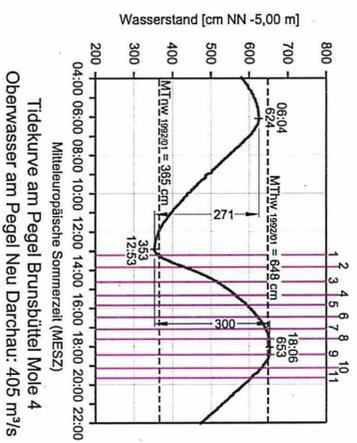
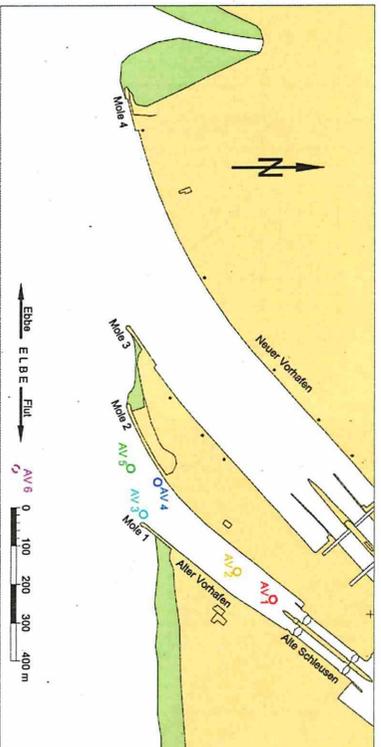
Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Flutmessung am 07.03.2007

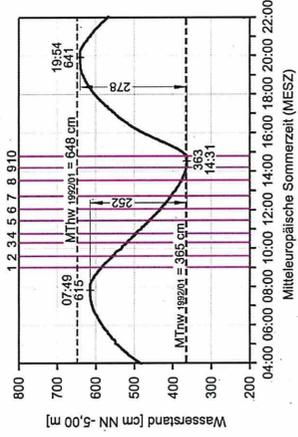
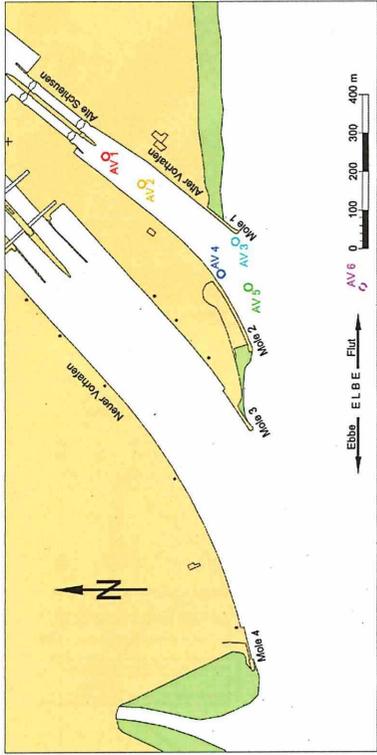


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1069 m<sup>3</sup>/s

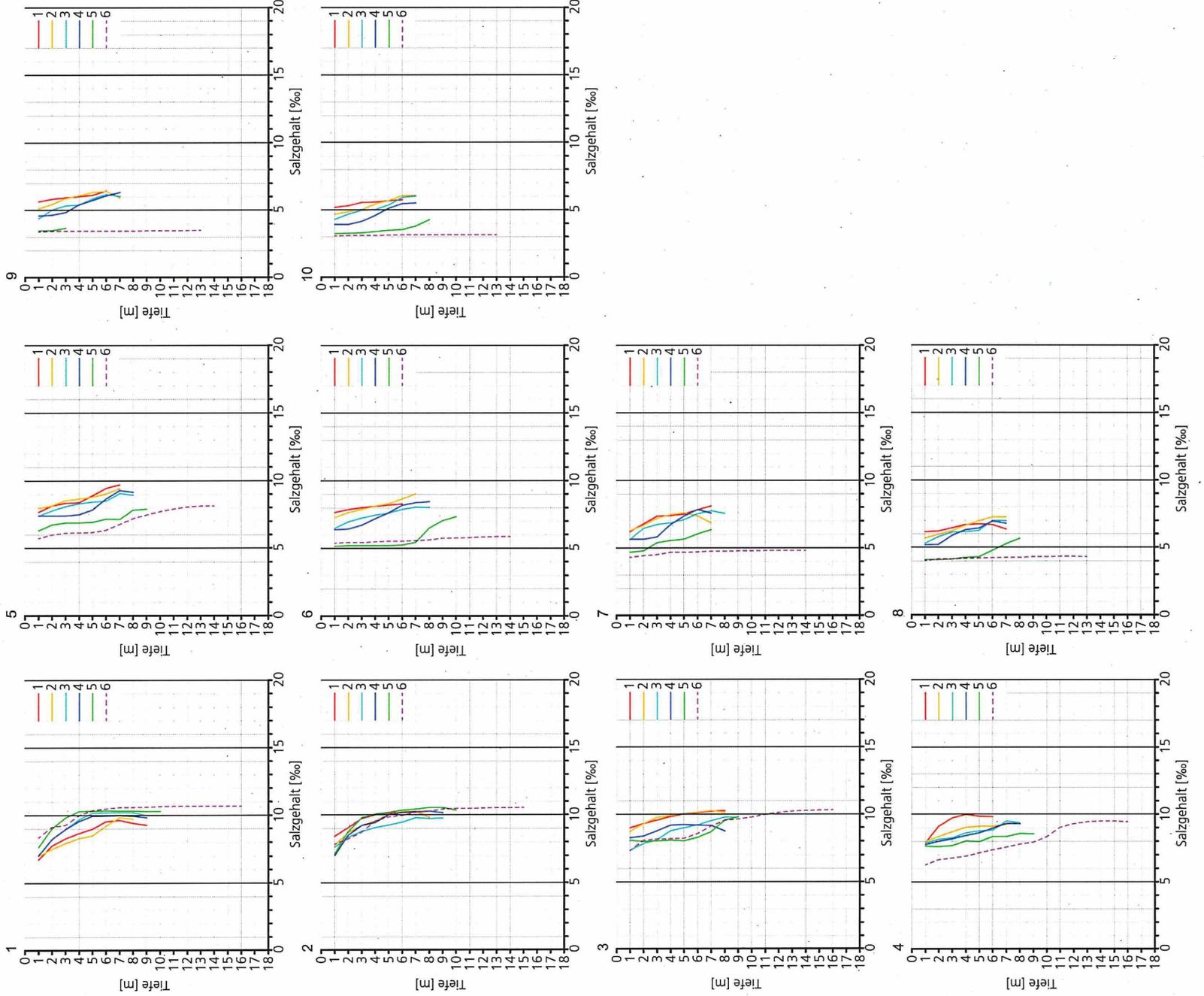


Salzgehalte im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebbmessung am 15.03.2007

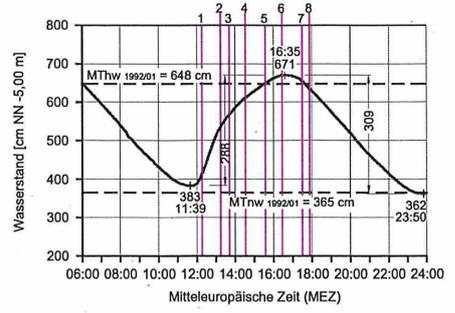
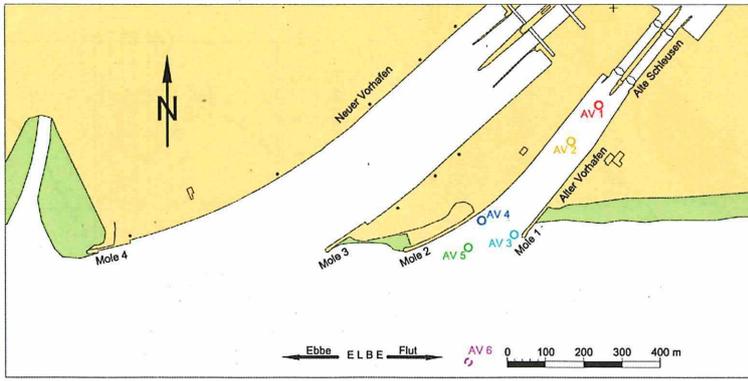




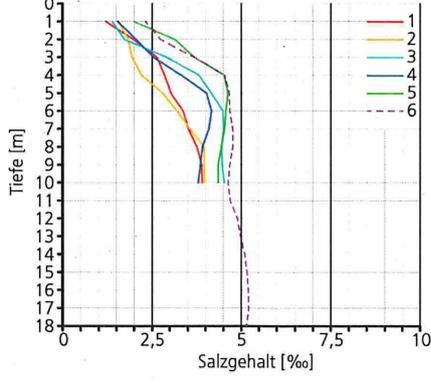
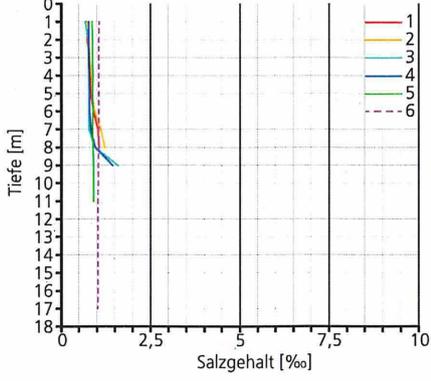
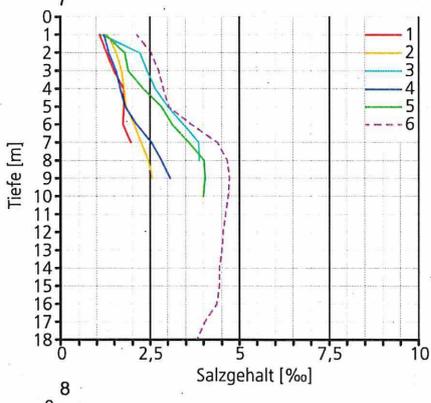
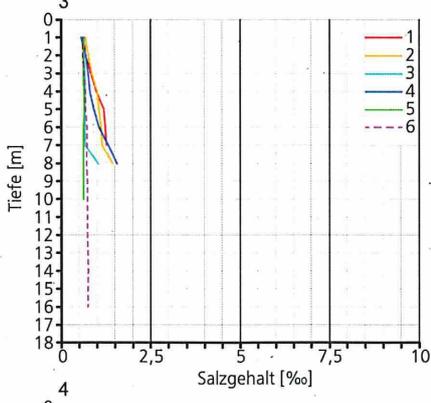
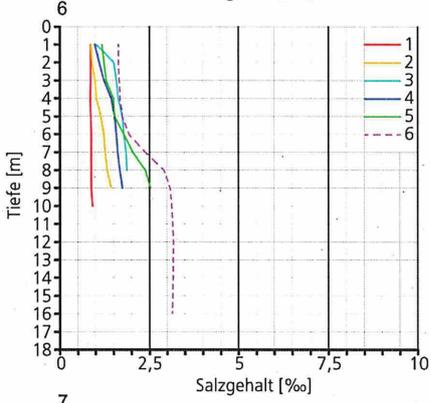
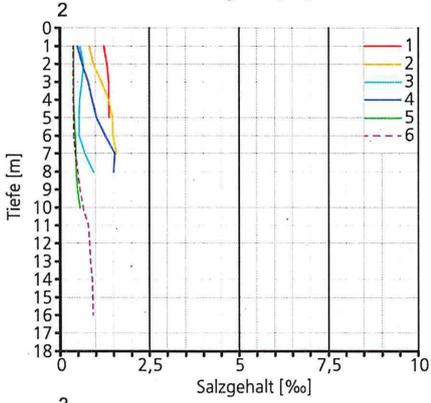
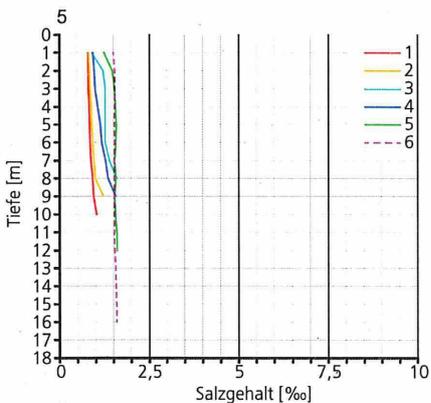
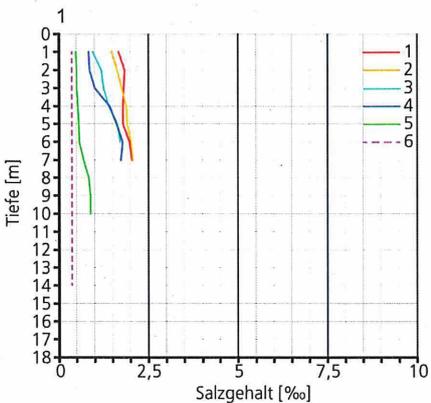
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m<sup>2</sup>/s



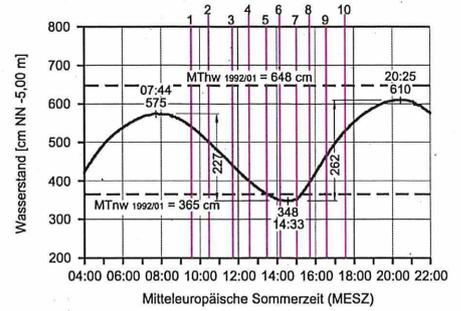
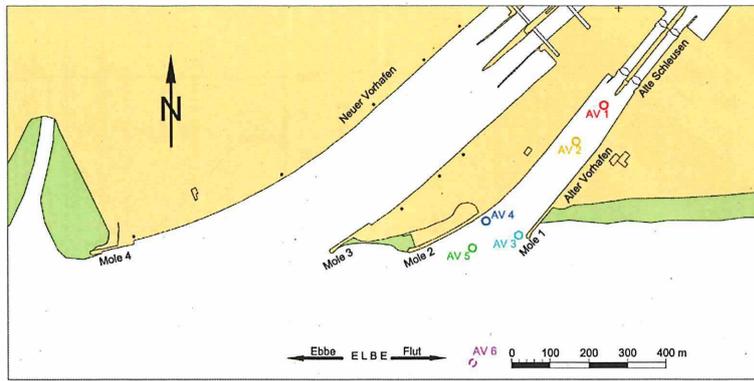
Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebbmessung am 14.07.2005



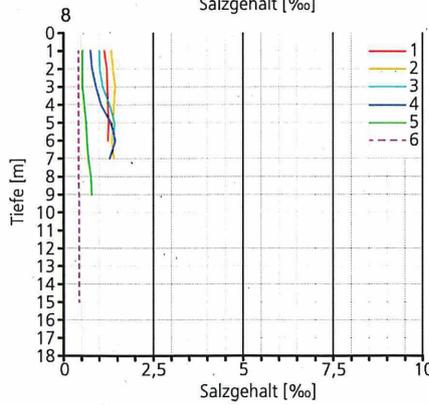
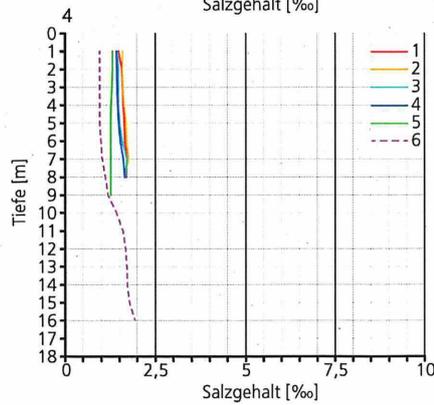
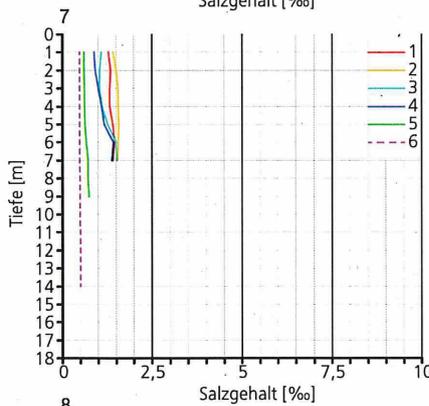
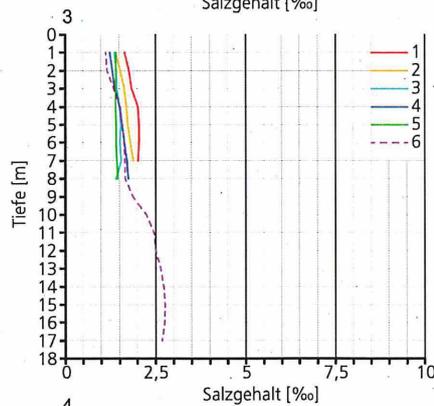
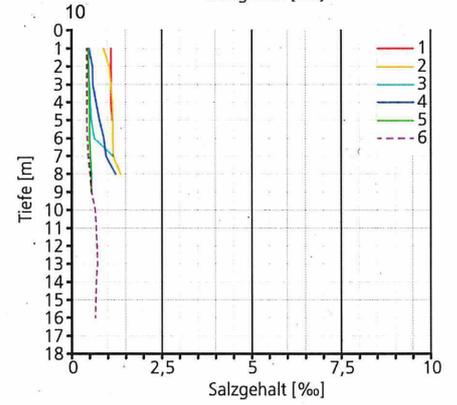
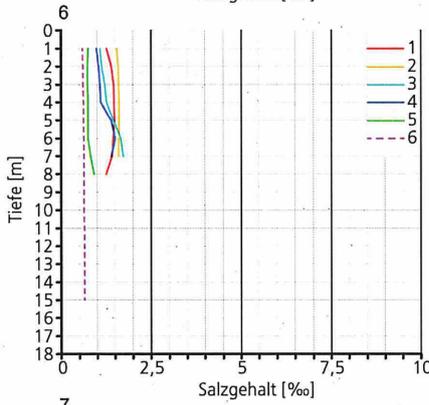
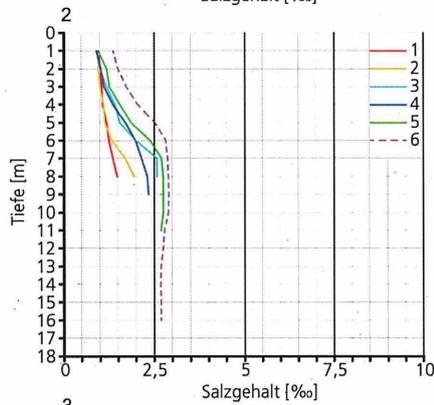
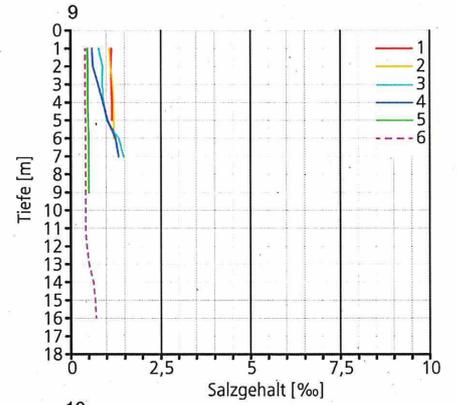
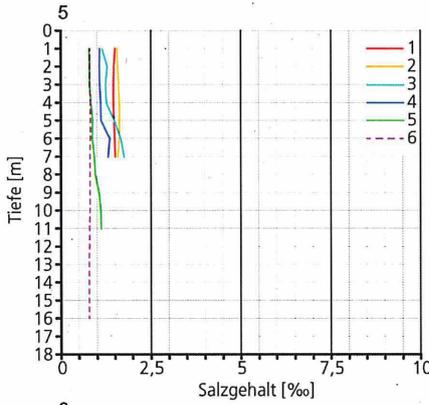
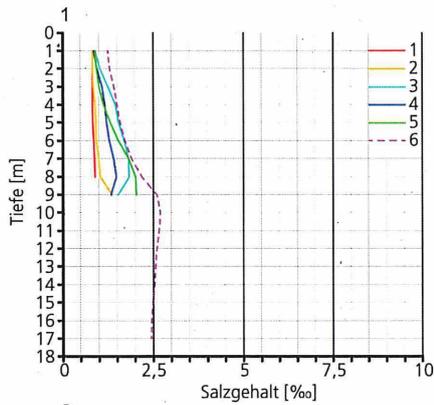
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1139 m<sup>3</sup>/s



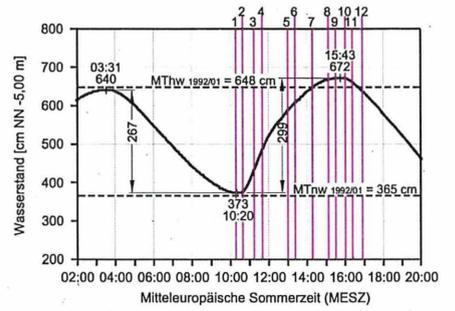
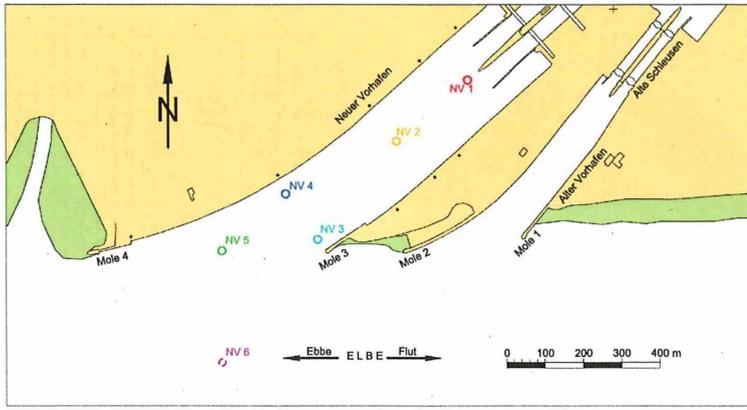
Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Flutmessung am 08.03.2007



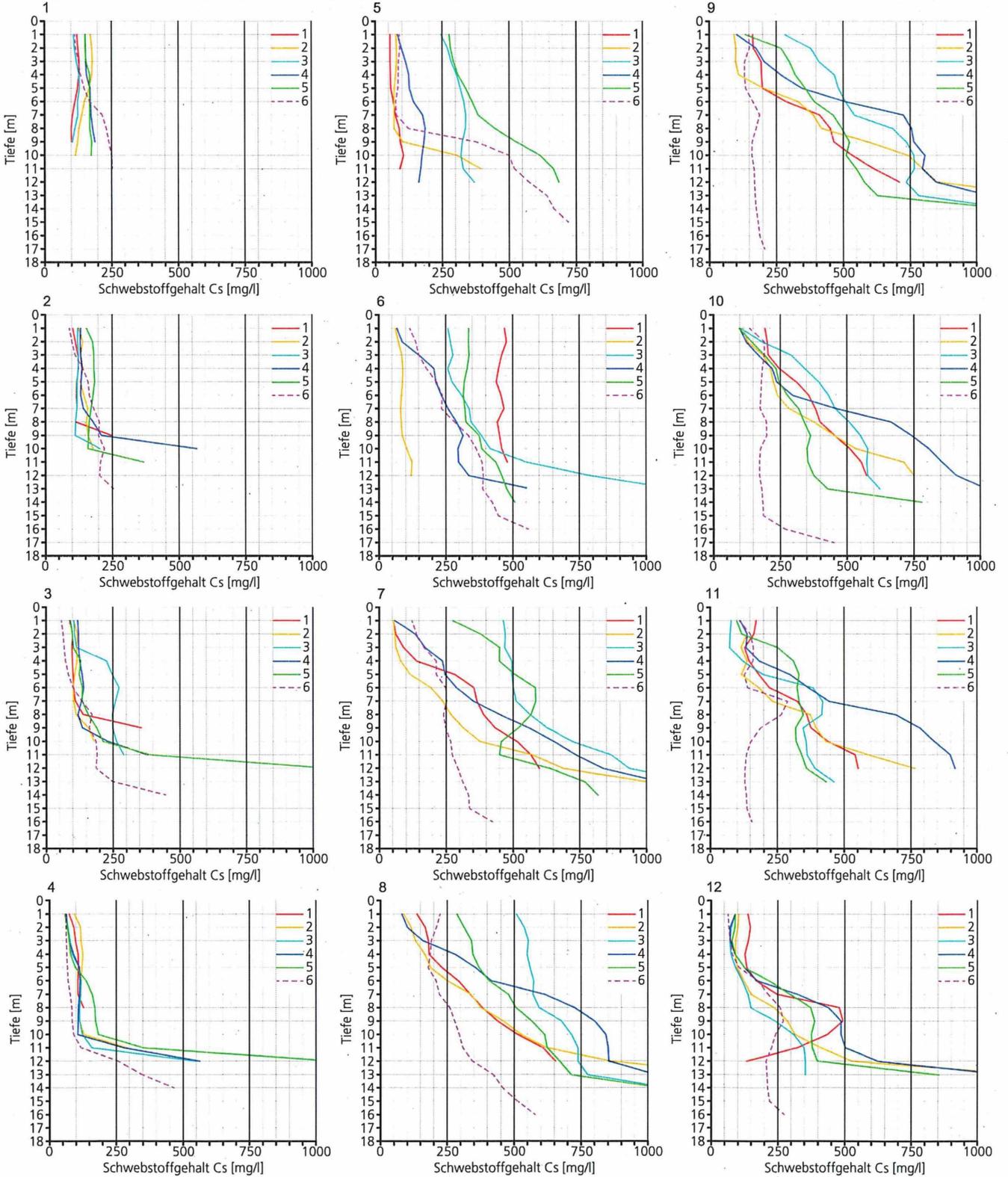
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 940 m³/s



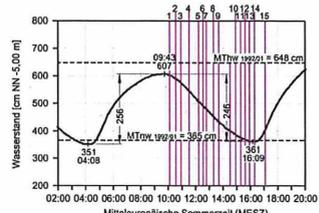
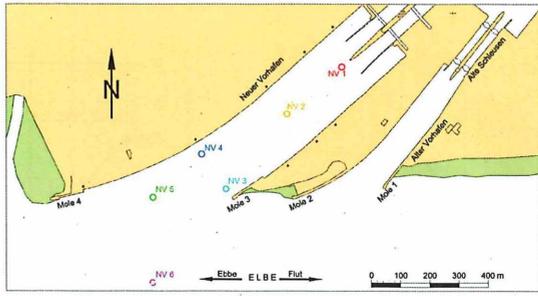
Salzgehalte im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebbemessung am 27.03.2007



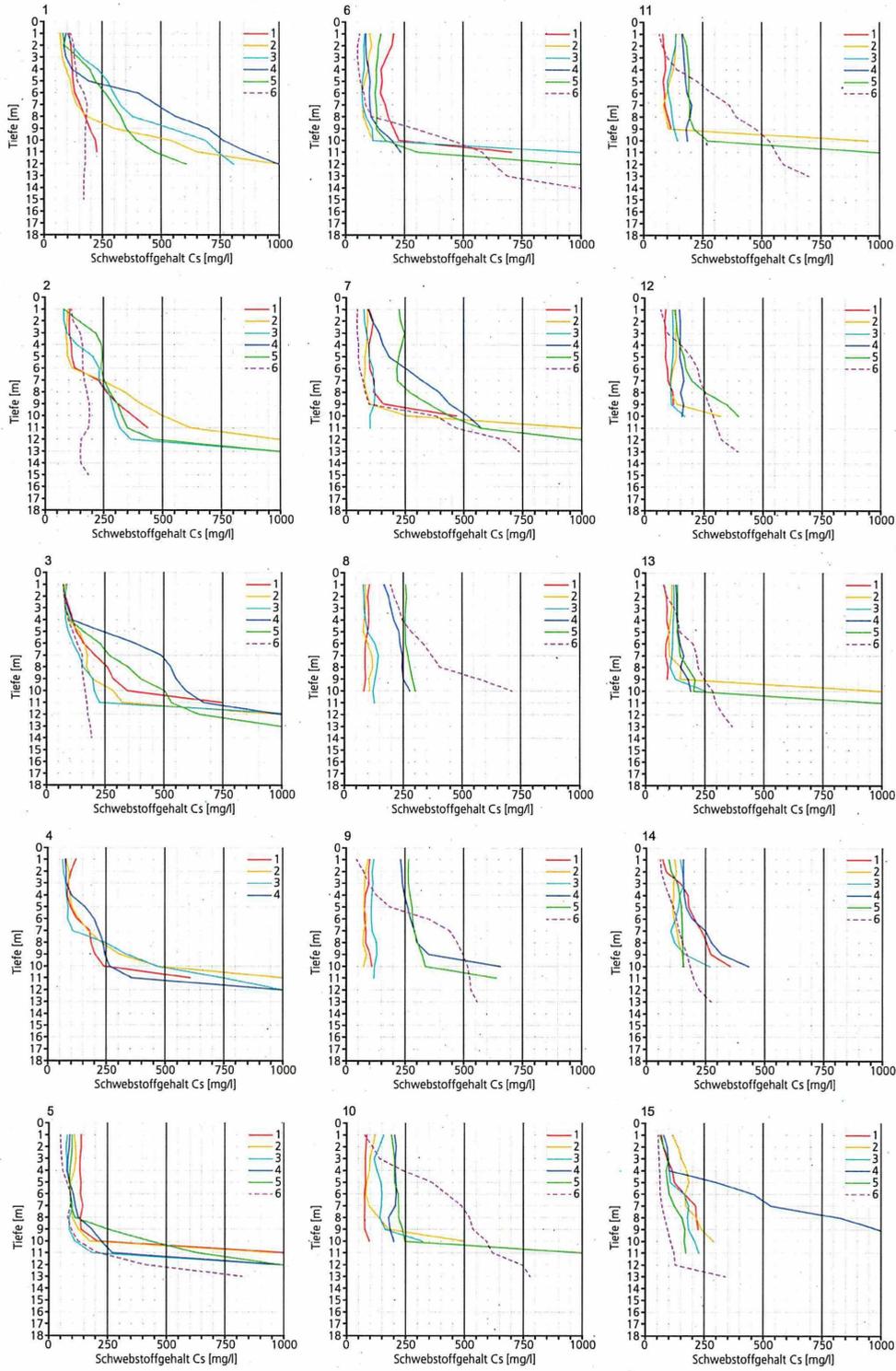
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 292 m³/s



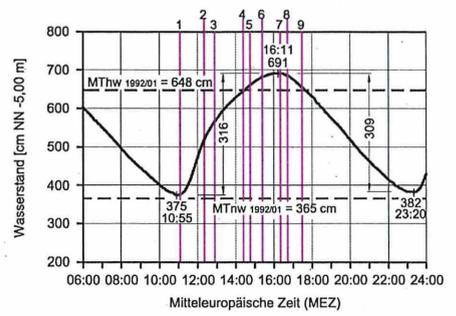
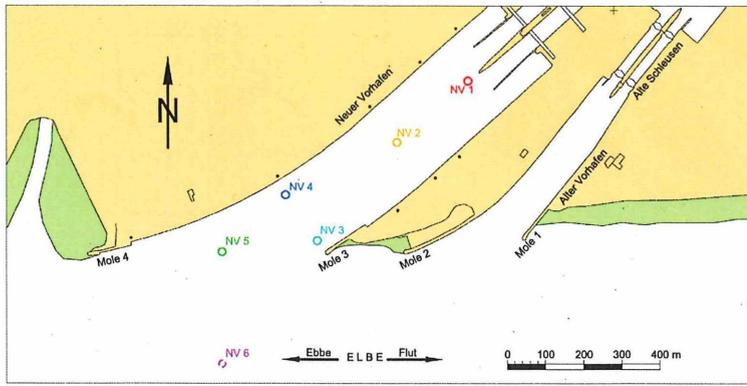
Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Flurmessung am 07.07.2005



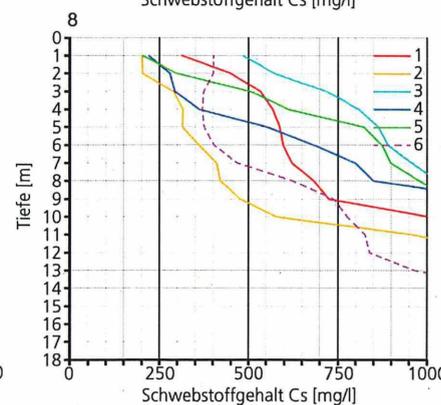
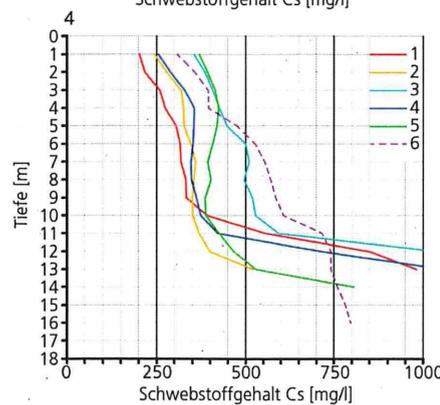
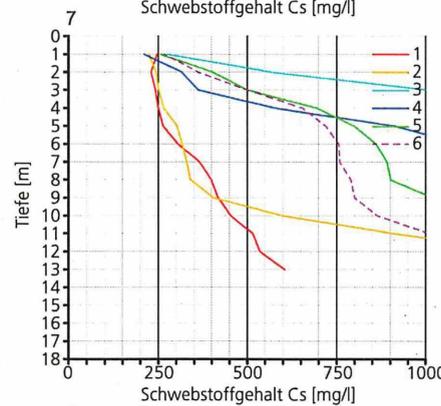
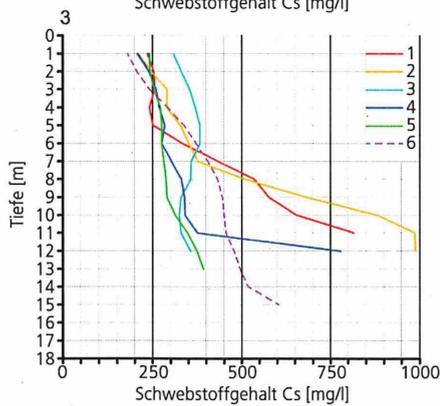
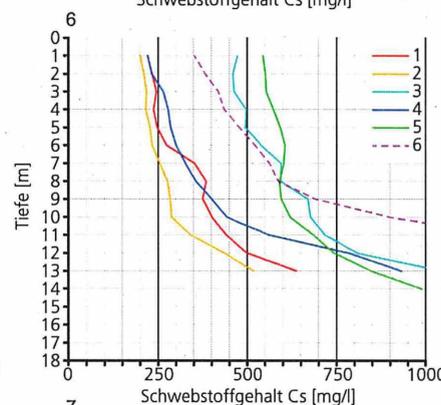
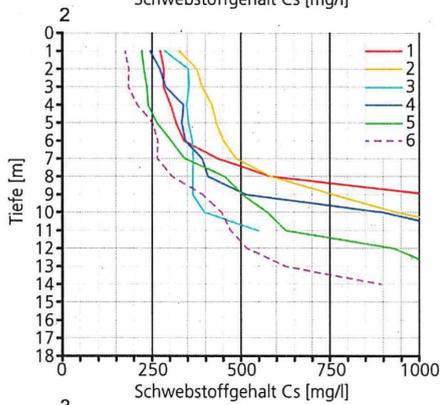
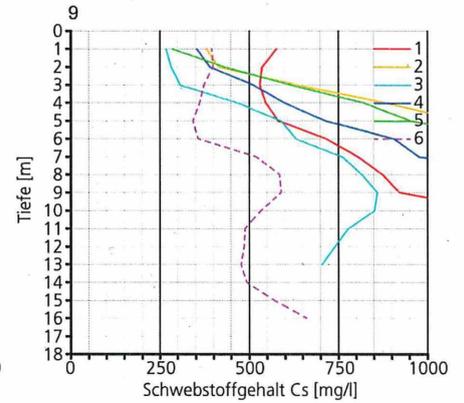
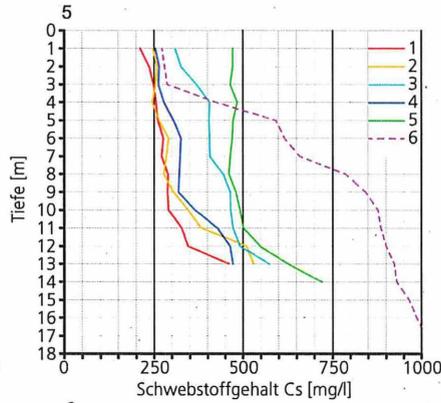
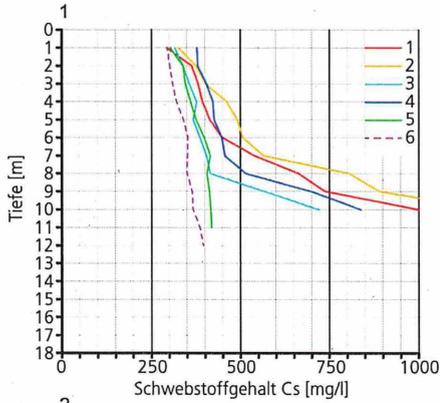
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 297 m³/s



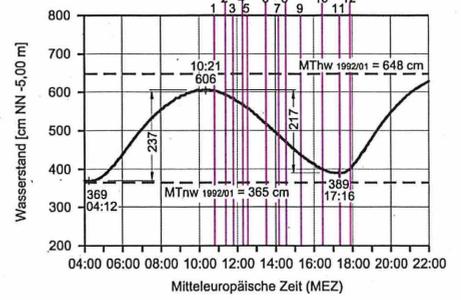
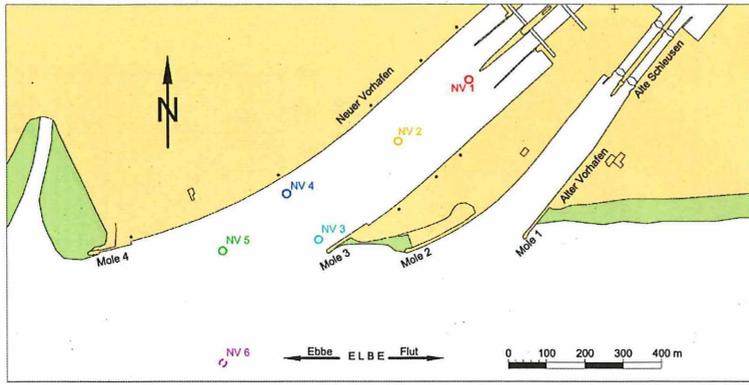
Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebhessung am 30.06.2005



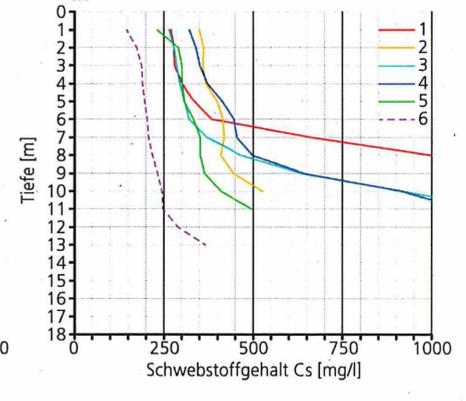
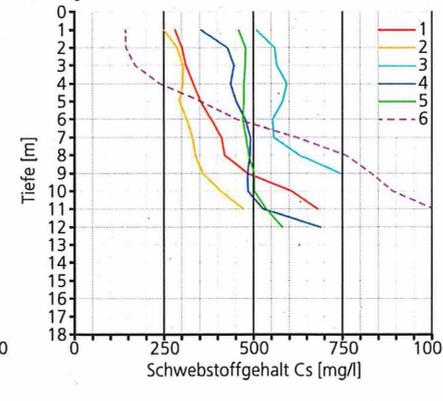
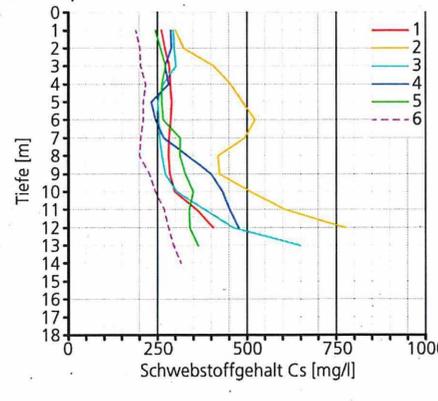
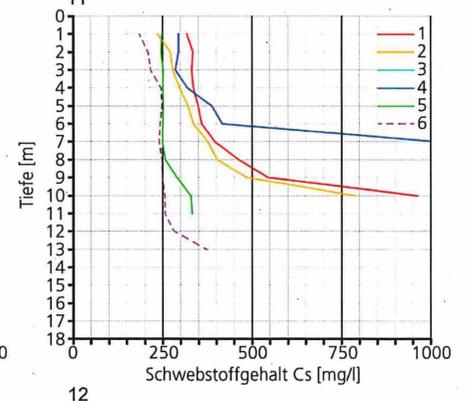
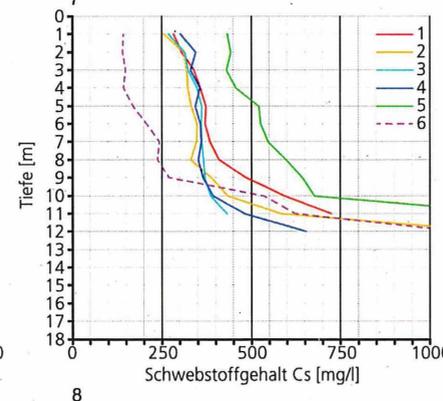
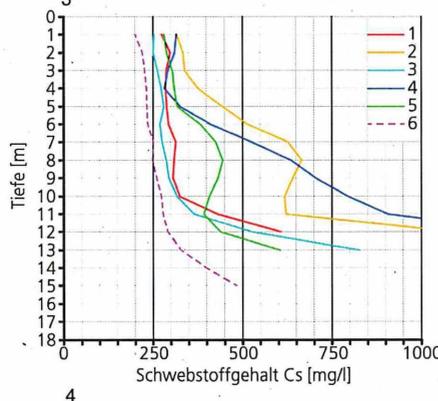
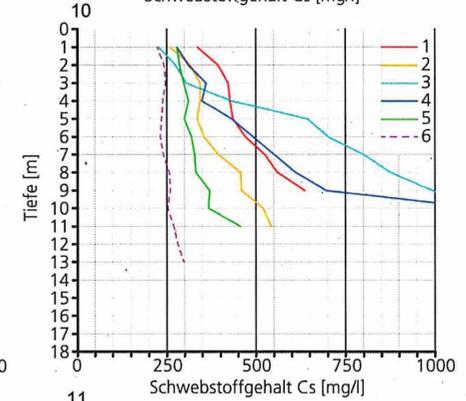
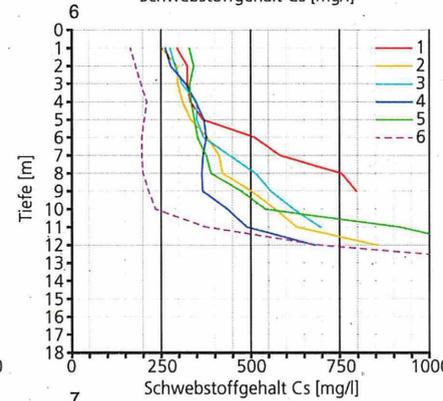
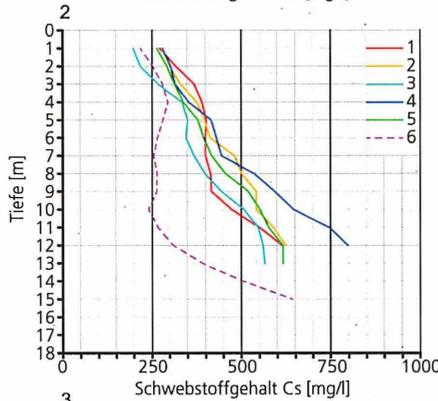
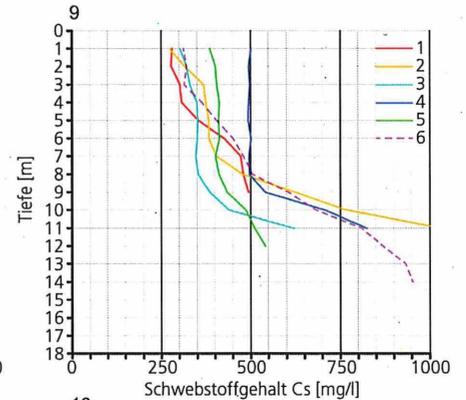
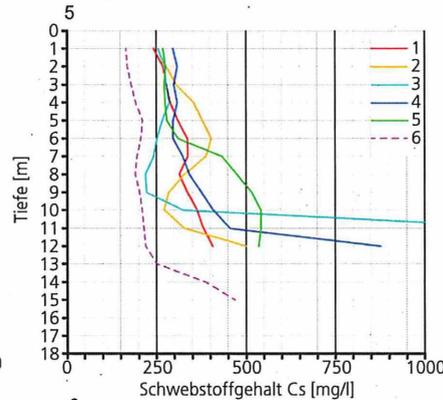
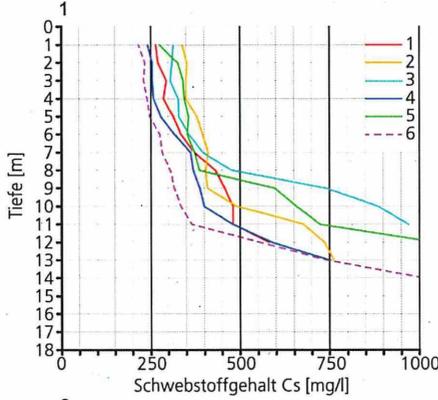
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1061 m<sup>3</sup>/s



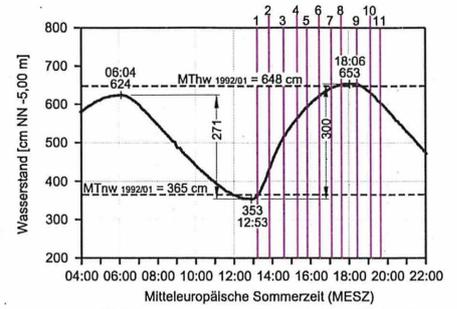
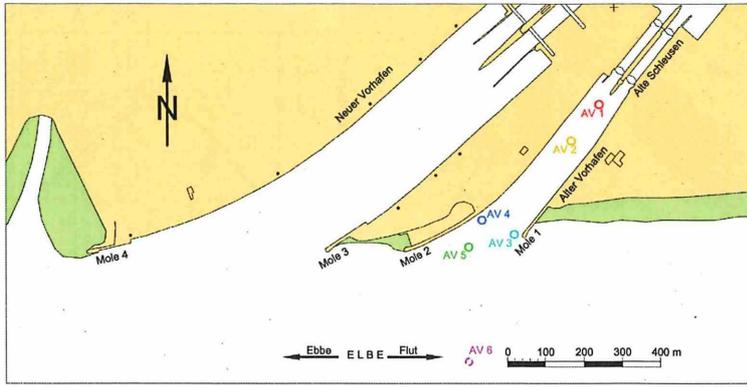
Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Flurmessung am 07.03.2007



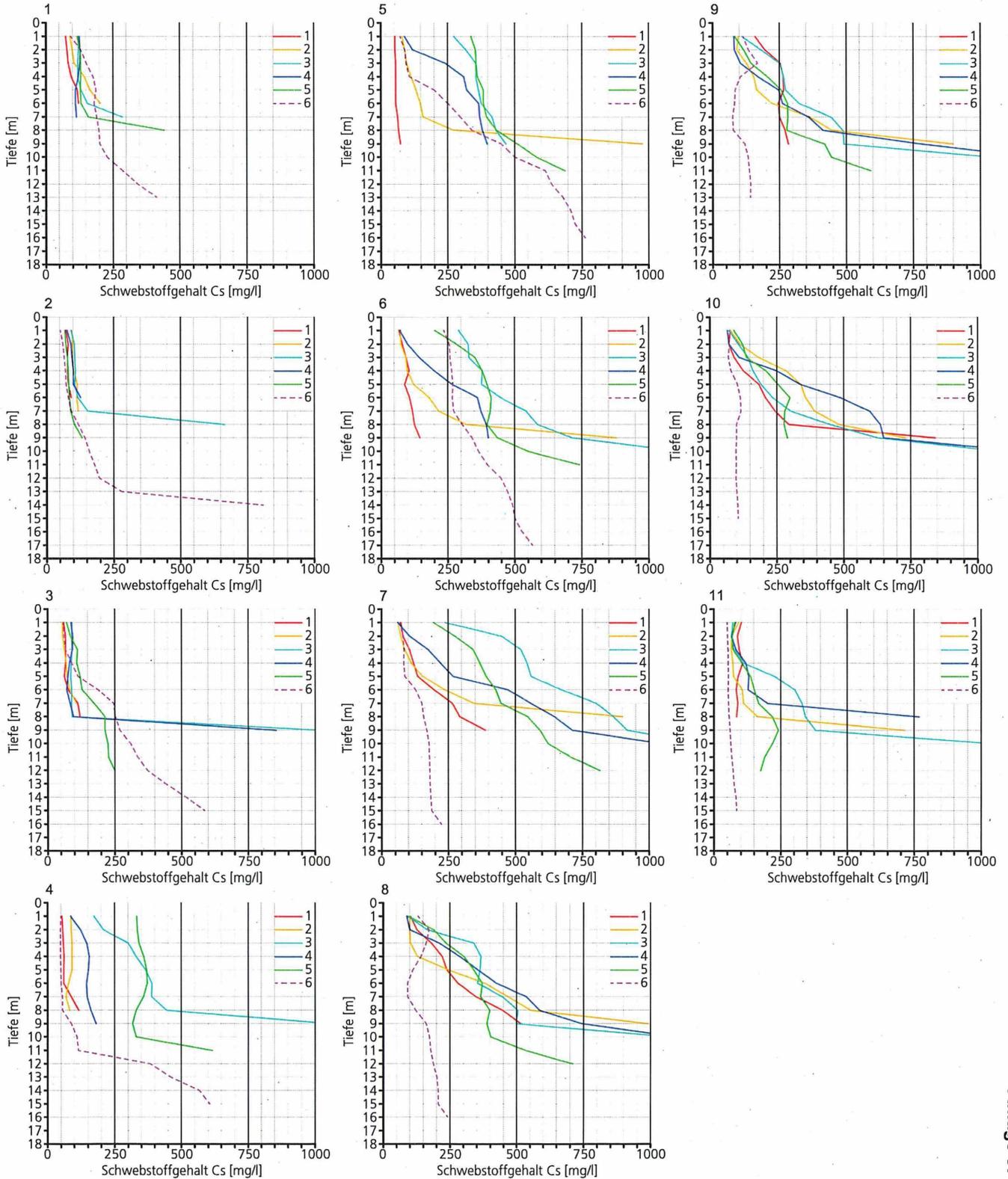
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1069 m³/s



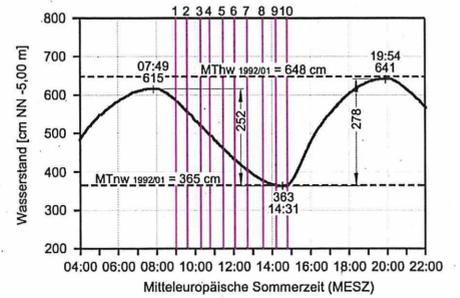
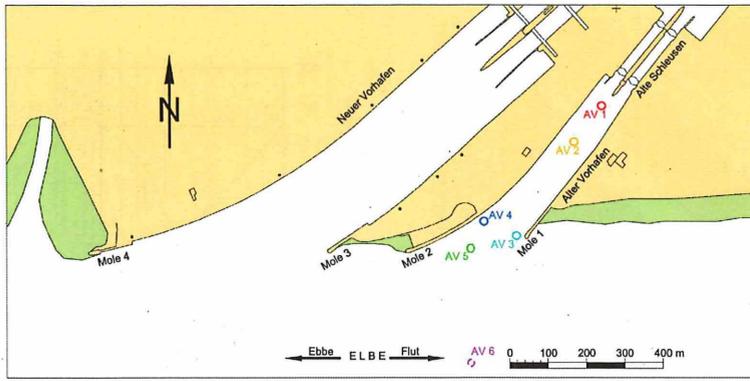
Schwebstoffe im Bereich des Neuen Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebbemessung am 15.03.2007



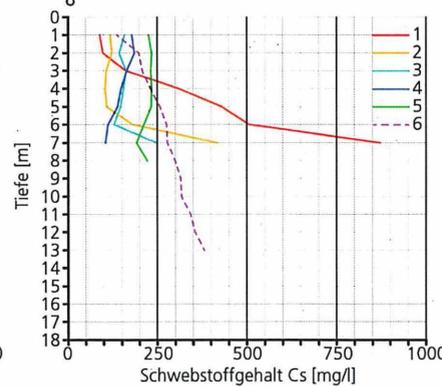
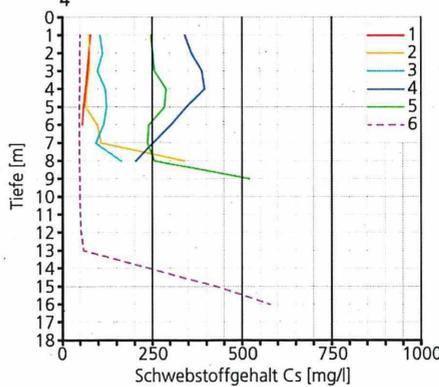
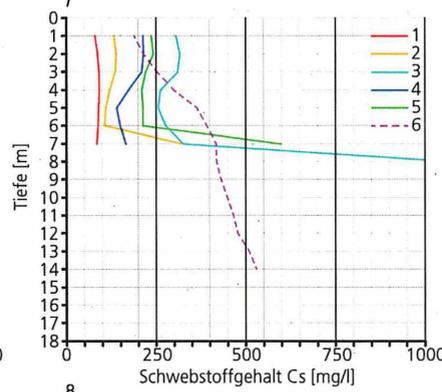
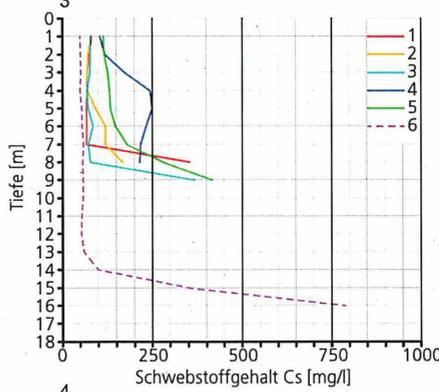
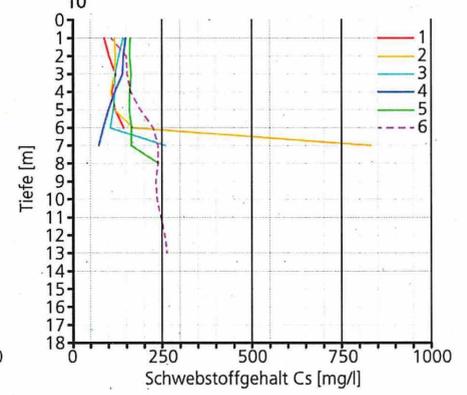
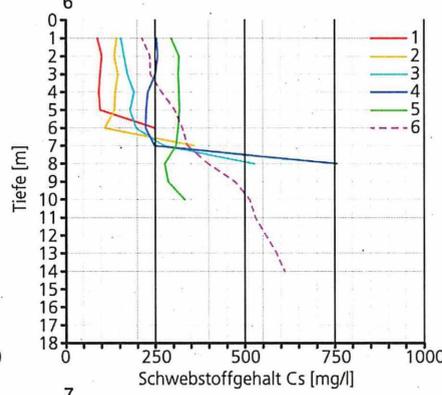
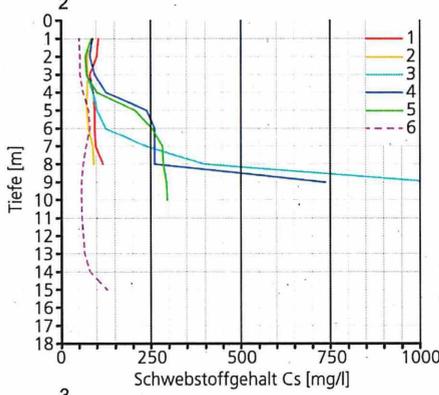
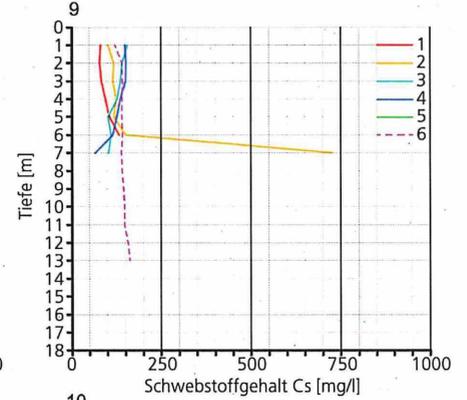
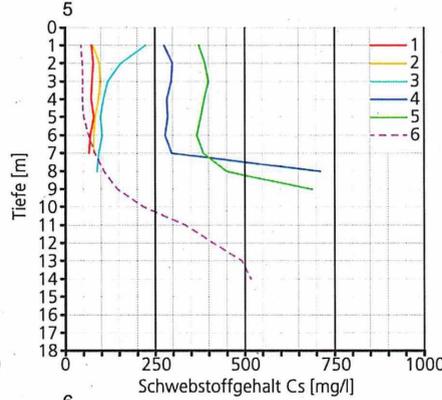
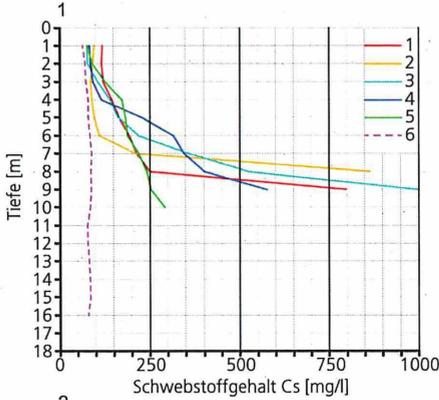
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 405 m³/s



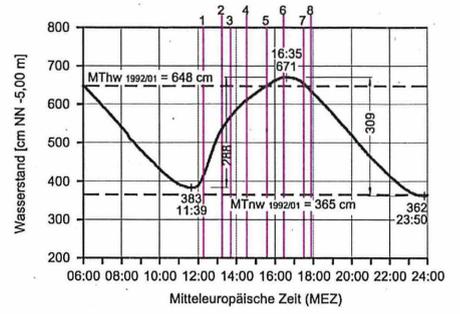
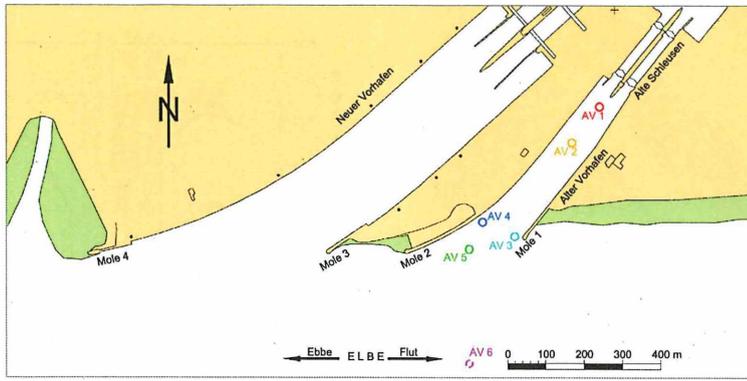
Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Flutmessung am 11.07.2005



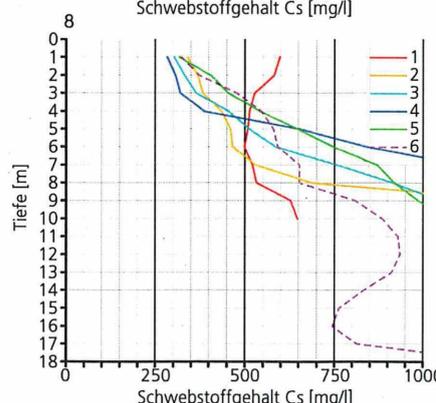
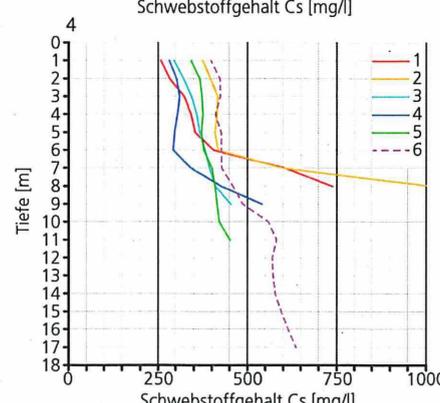
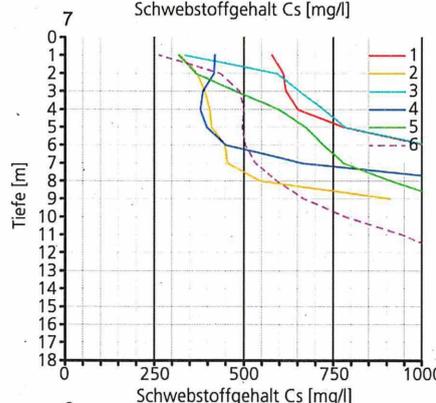
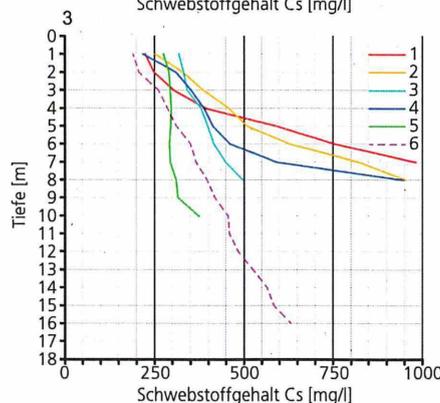
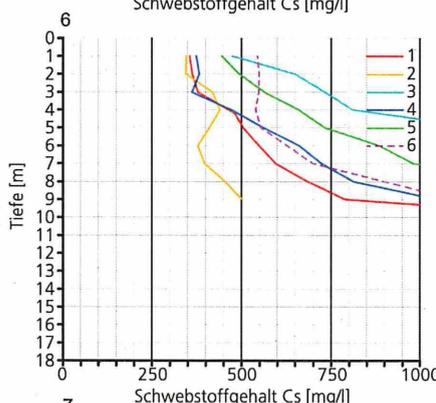
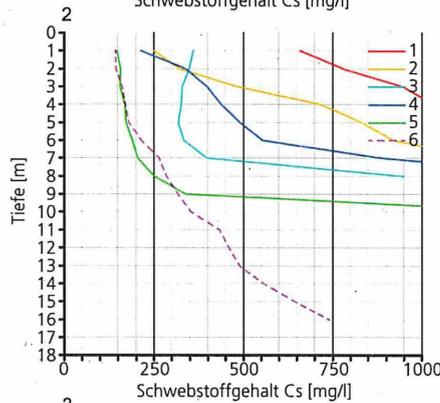
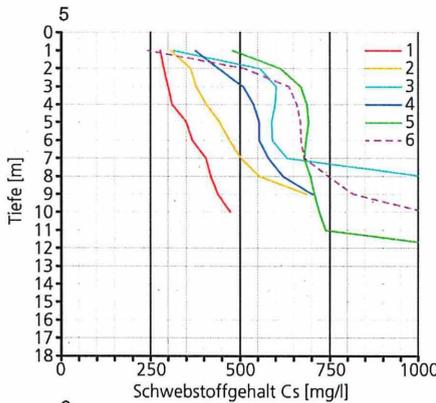
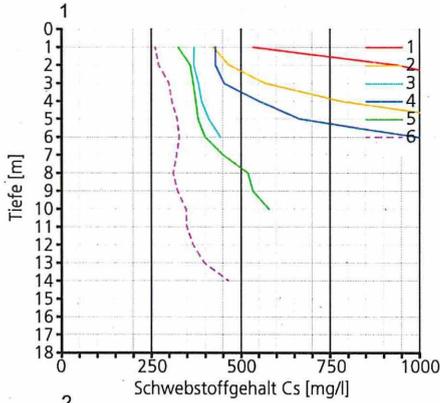
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 435 m³/s



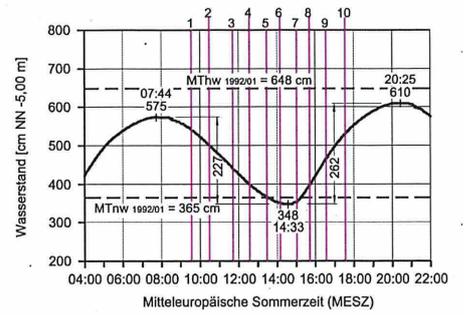
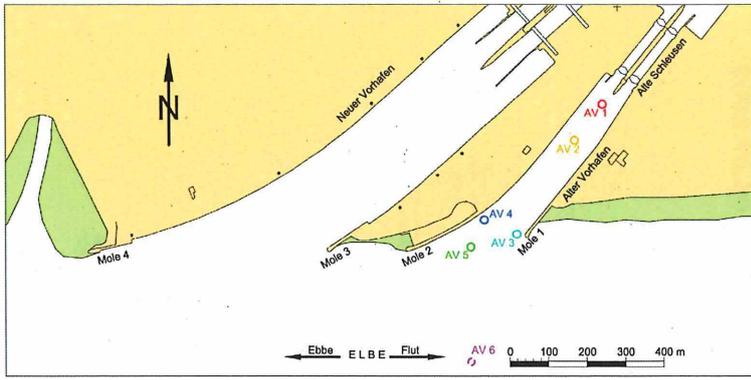
Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebbemessung am 14.07.2005



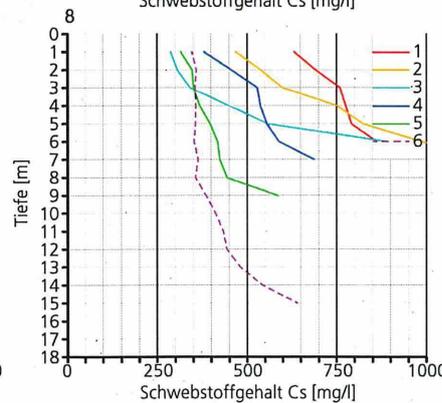
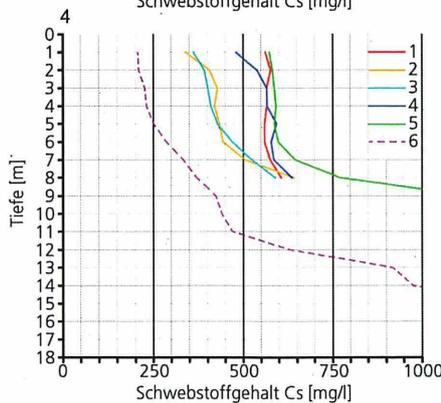
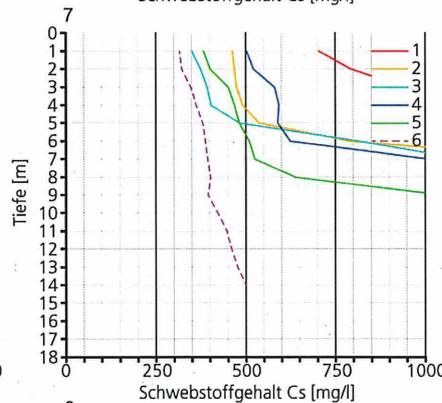
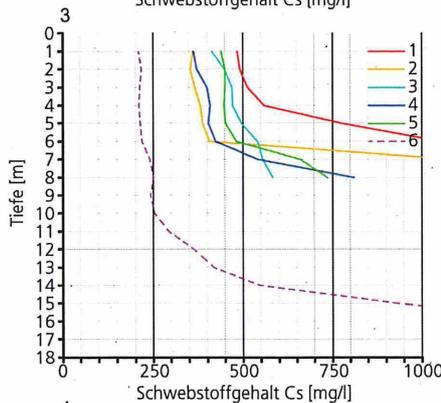
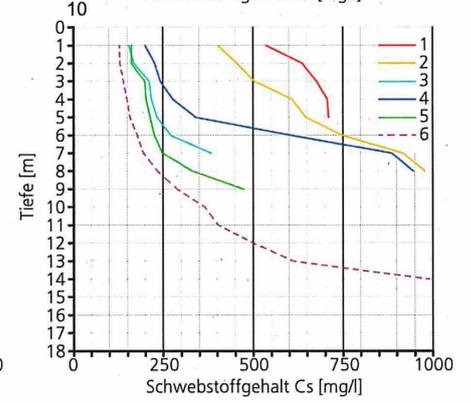
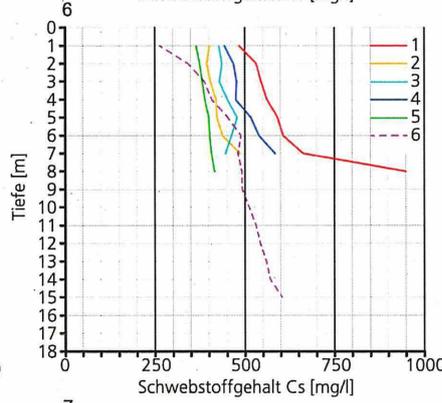
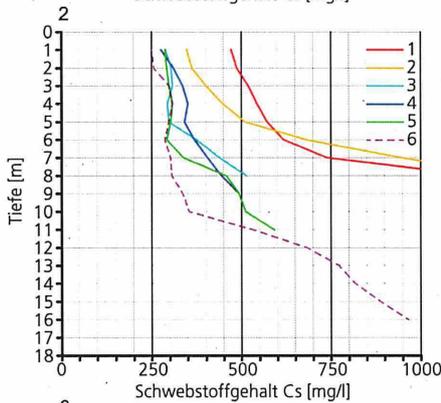
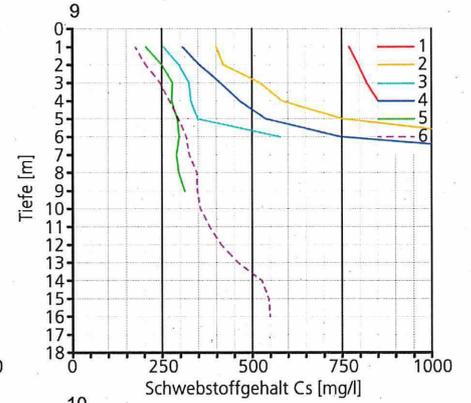
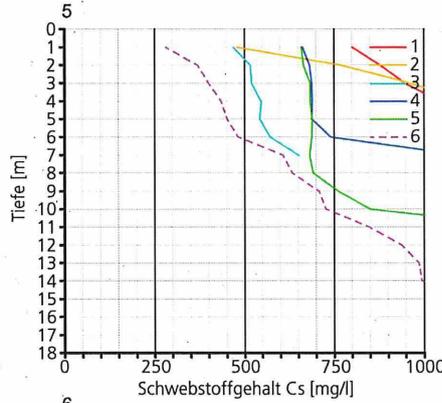
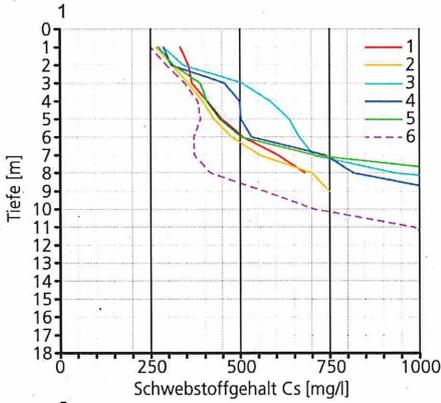
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1139 m<sup>3</sup>/s



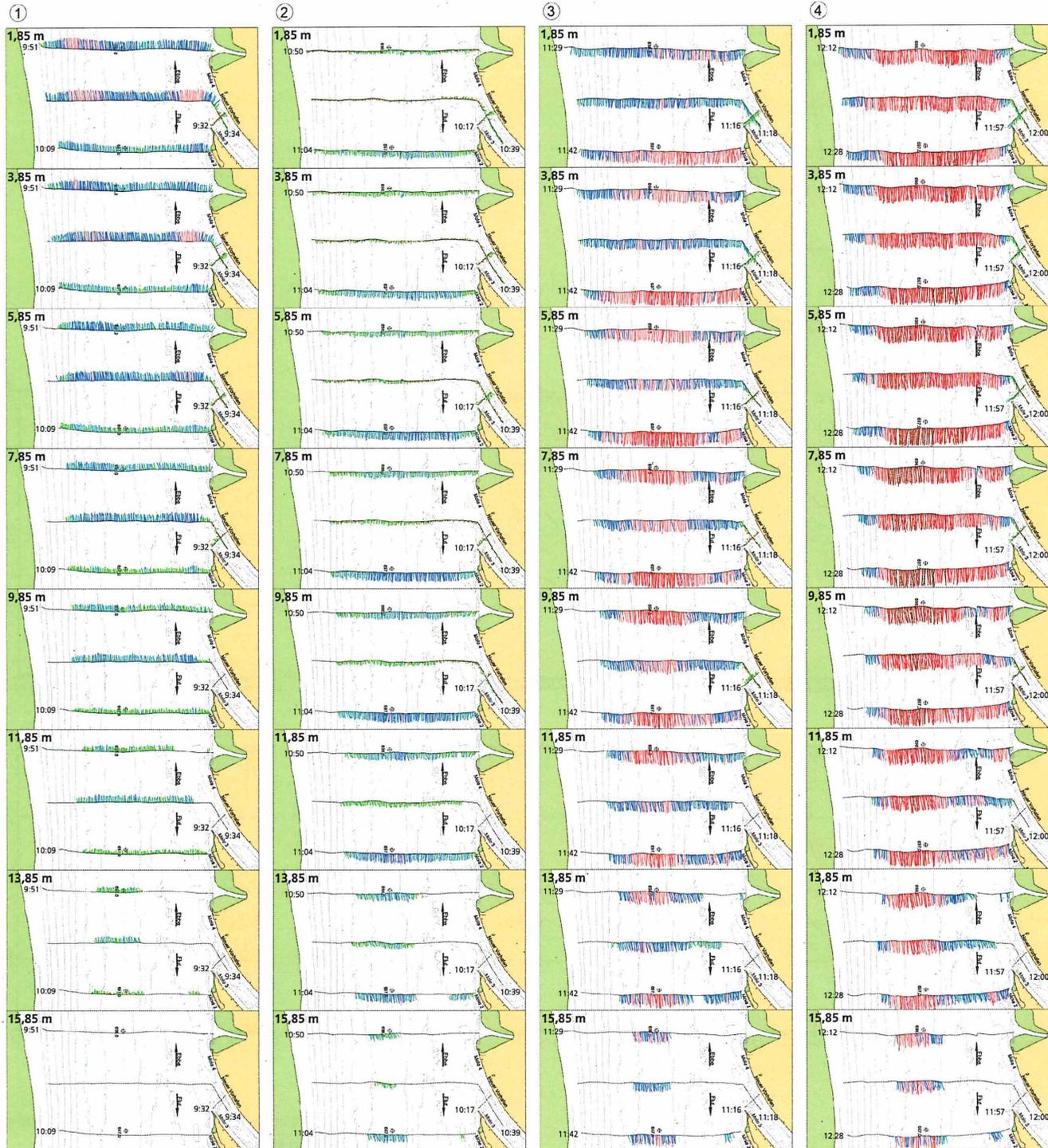
Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Flutmessung am 08.03.2007



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 940 m³/s

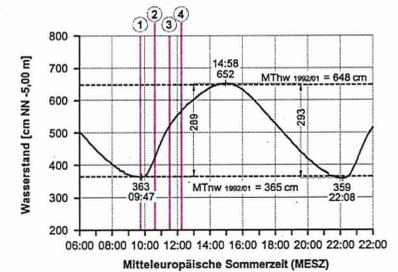


Schwebstoffe im Bereich des Alten Vorhafens in Brunsbüttel  
Ebbemessung am 27.03.2007



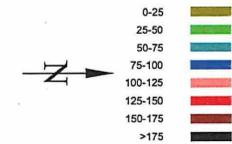
Anlage 91

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 06.07.2005



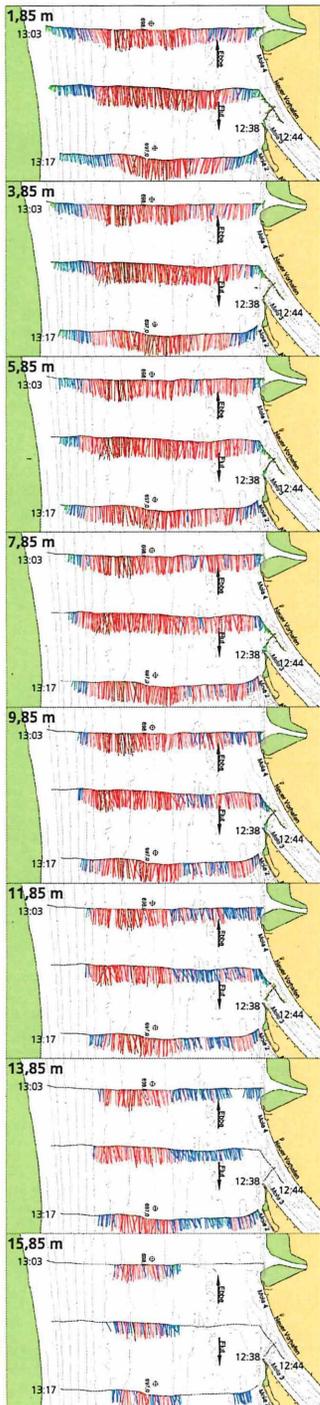
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 276 m³/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

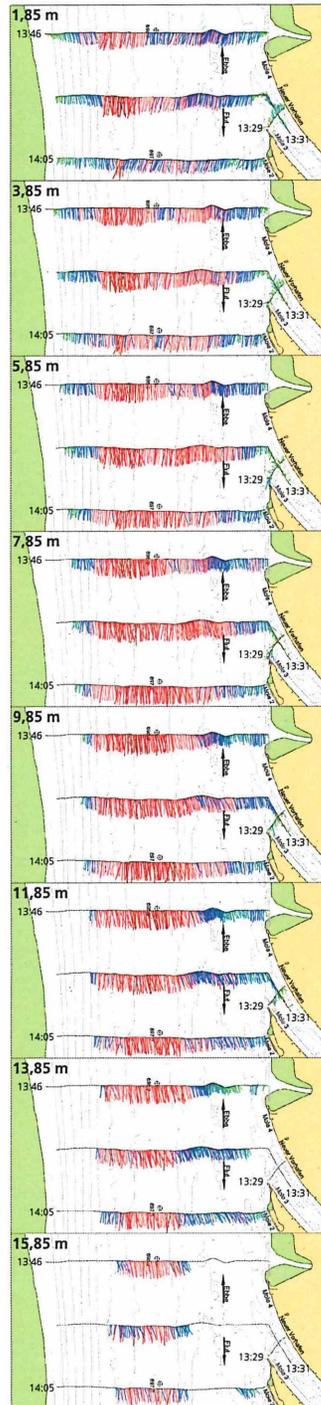


Institut für Wasserbau  
Neustadtsweg 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2392  
e-mail: wabau@ibb.hs-bremen.de

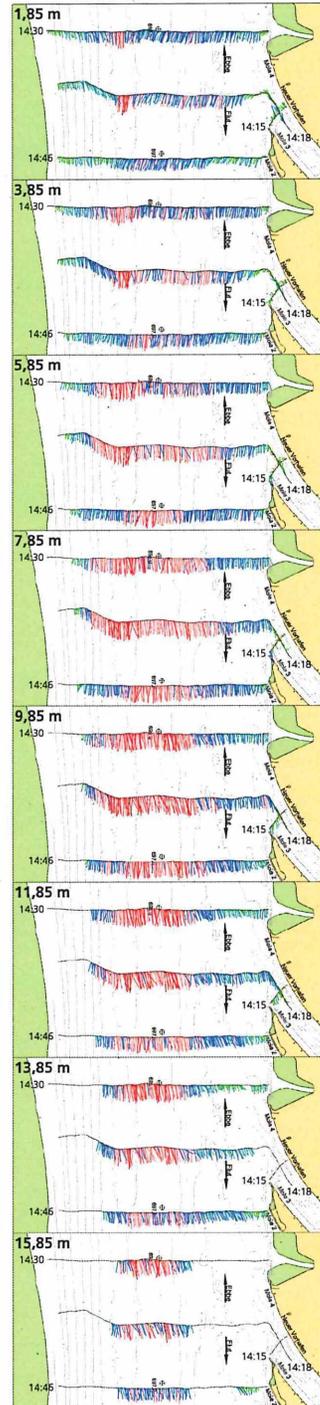
⑤



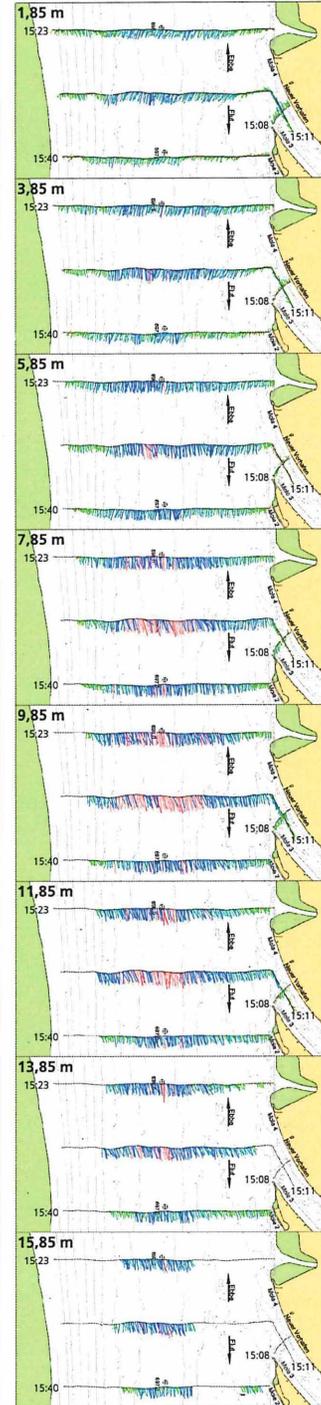
⑥



⑦

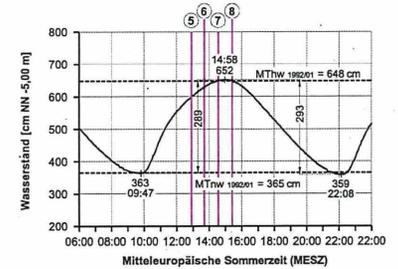


⑧



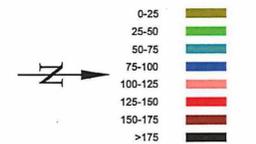
Anlage 92

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 06.07.2005

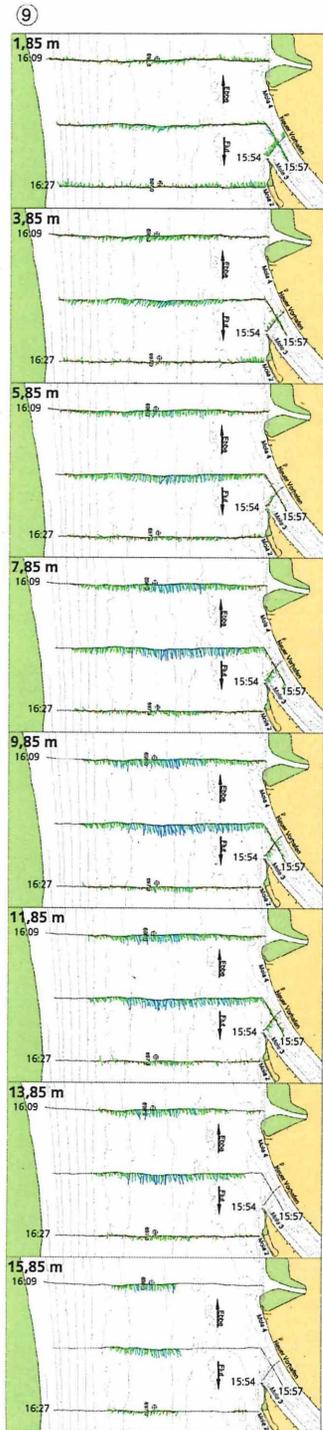


Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 276 m³/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

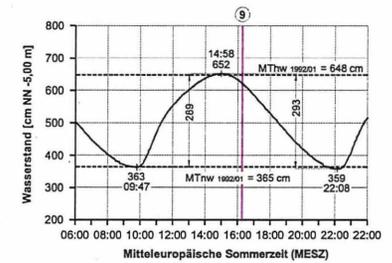


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@iwb.hs-bremen.de

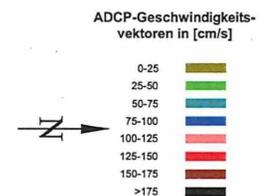


Anlage 93

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 06.07.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 276 m³/s

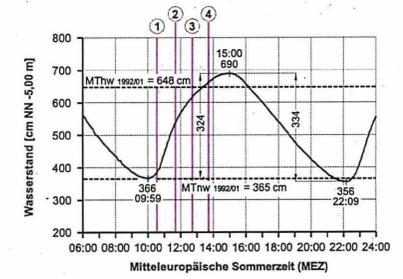
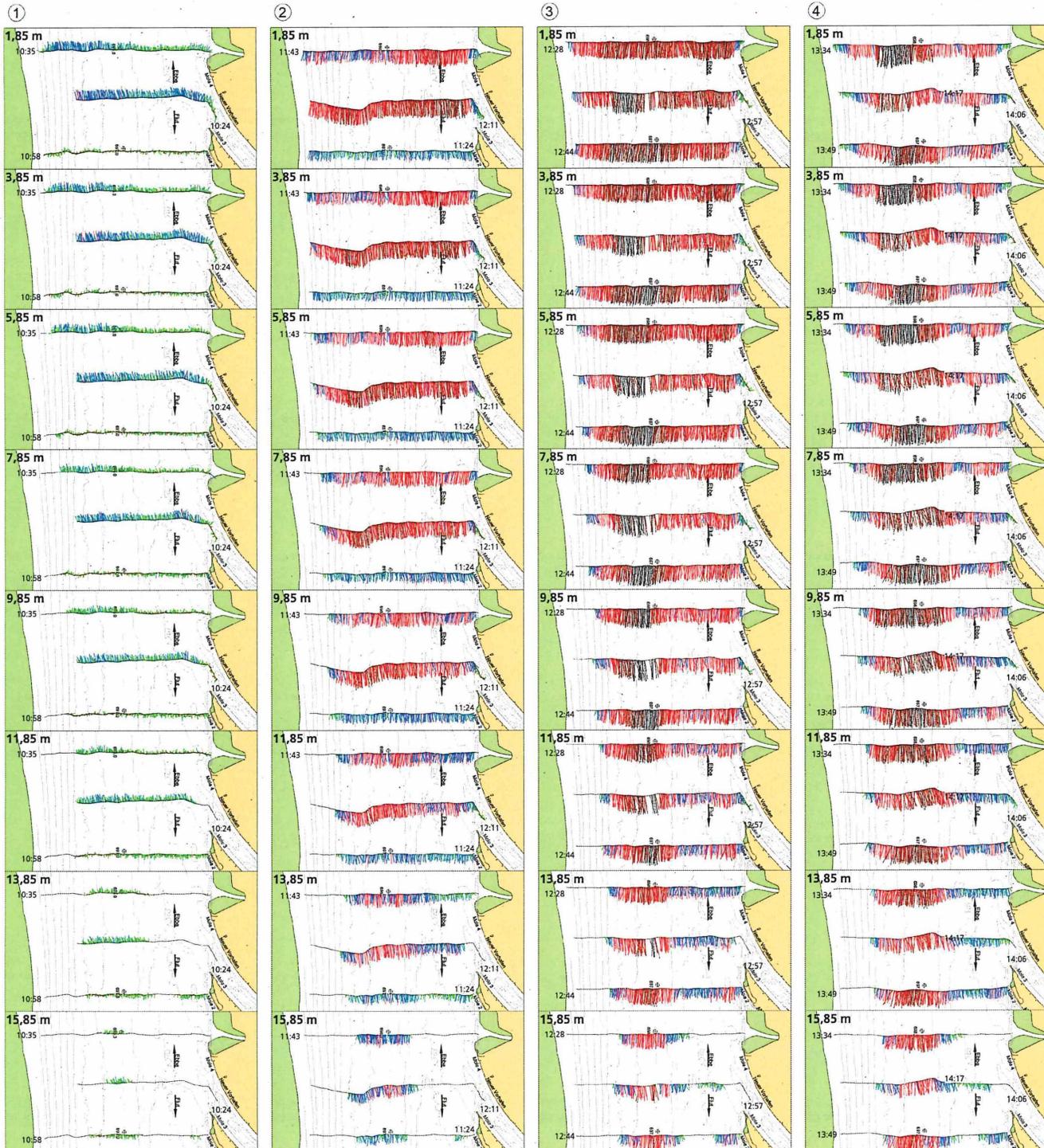


0 250 500 750 1000 m

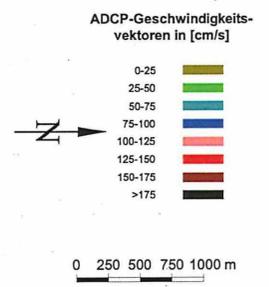


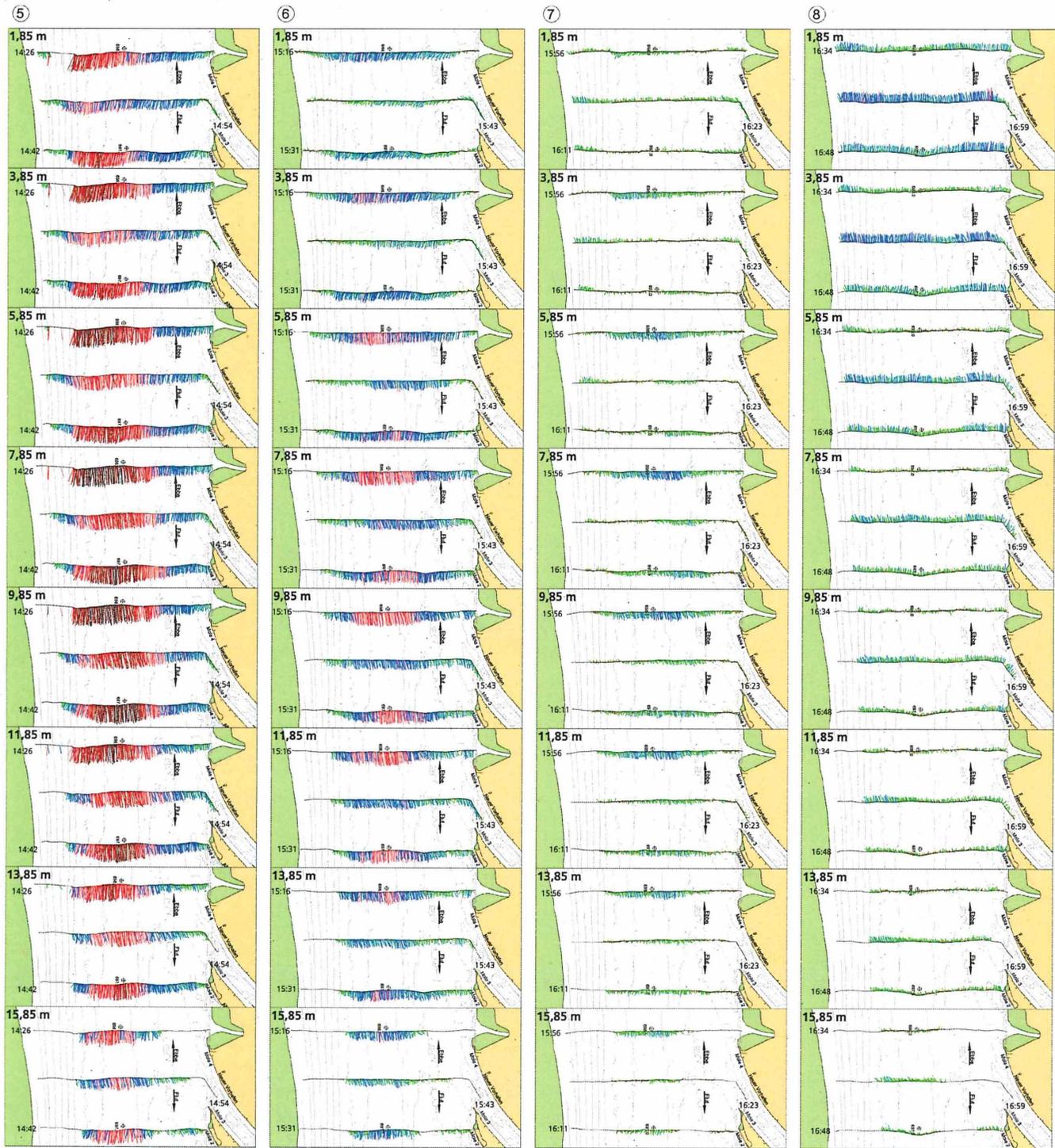
Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibb.tu-bremen.de

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 20.03.2007



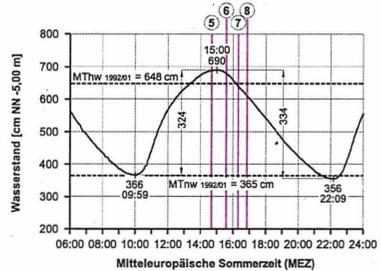
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 872 m³/s



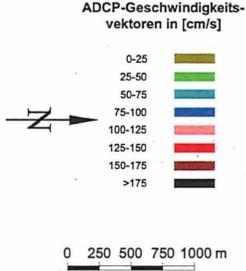


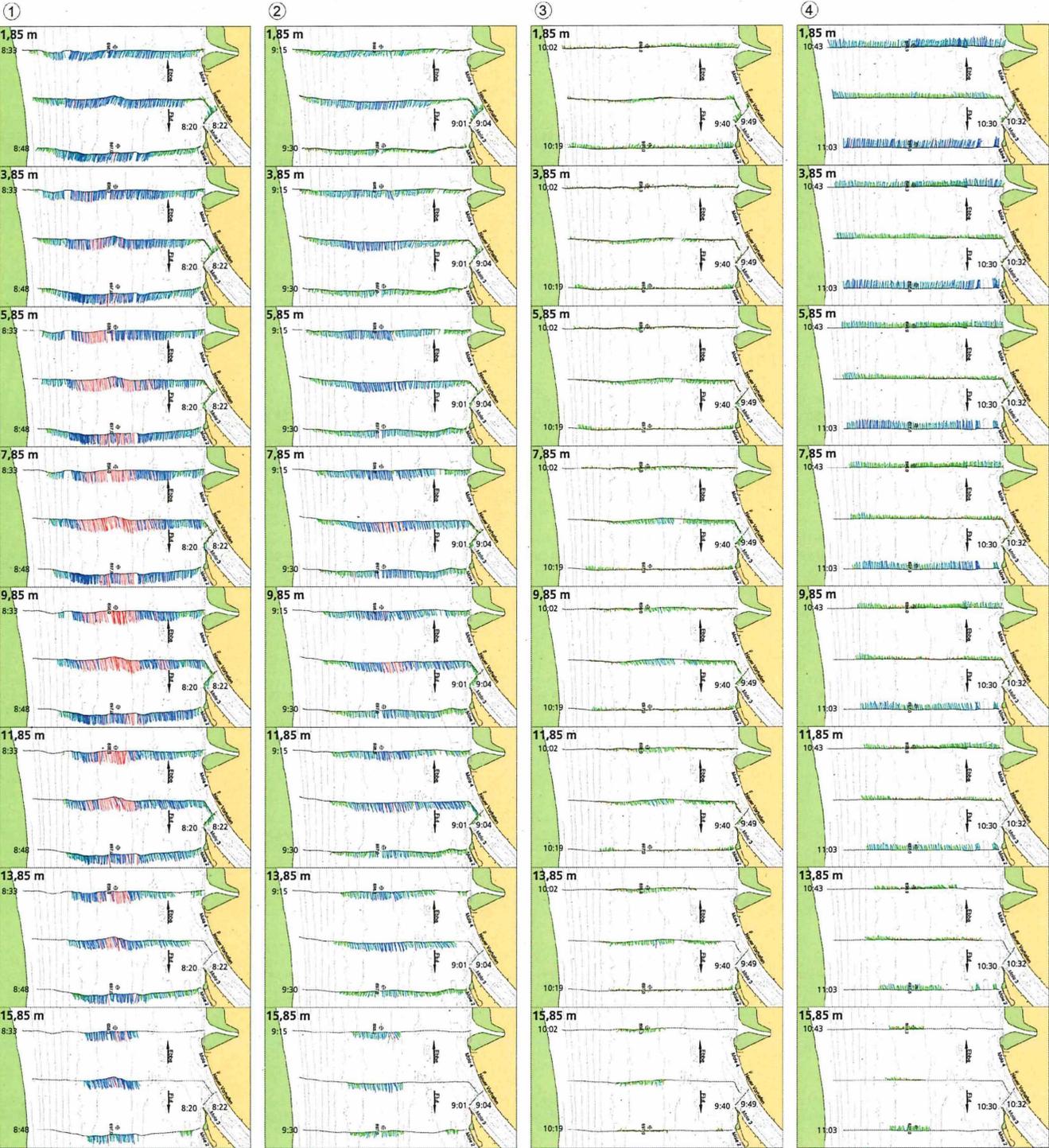
Anlage 95

**Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 20.03.2007**



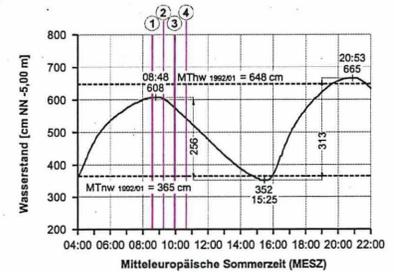
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 872 m³/s





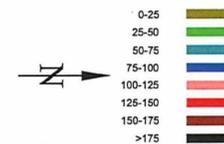
Anlage 96

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 29.06.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 305 m³/s

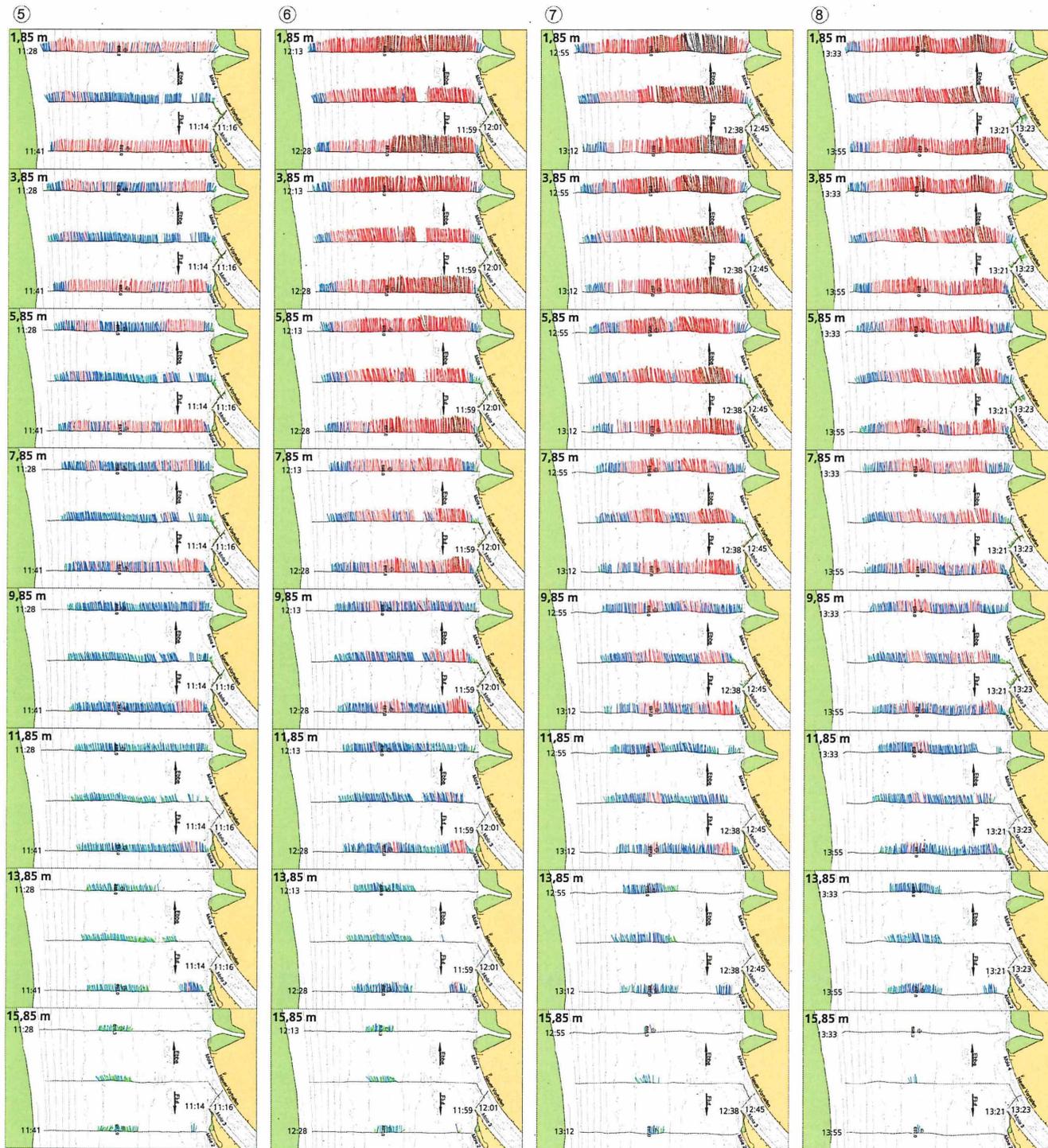
ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



0 250 500 750 1000 m

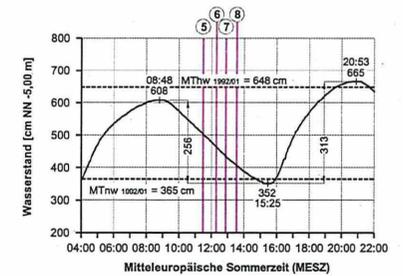


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@iwb.bremen.de



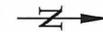
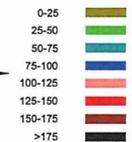
Anlage 97

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 29.06.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 305 m<sup>3</sup>/s

ADCP-Geschwindigkeits-  
vektoren in [cm/s]

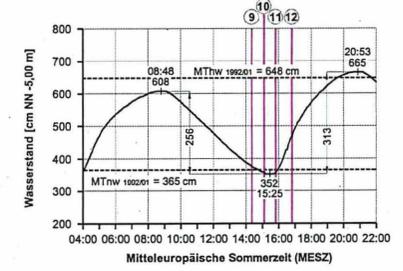
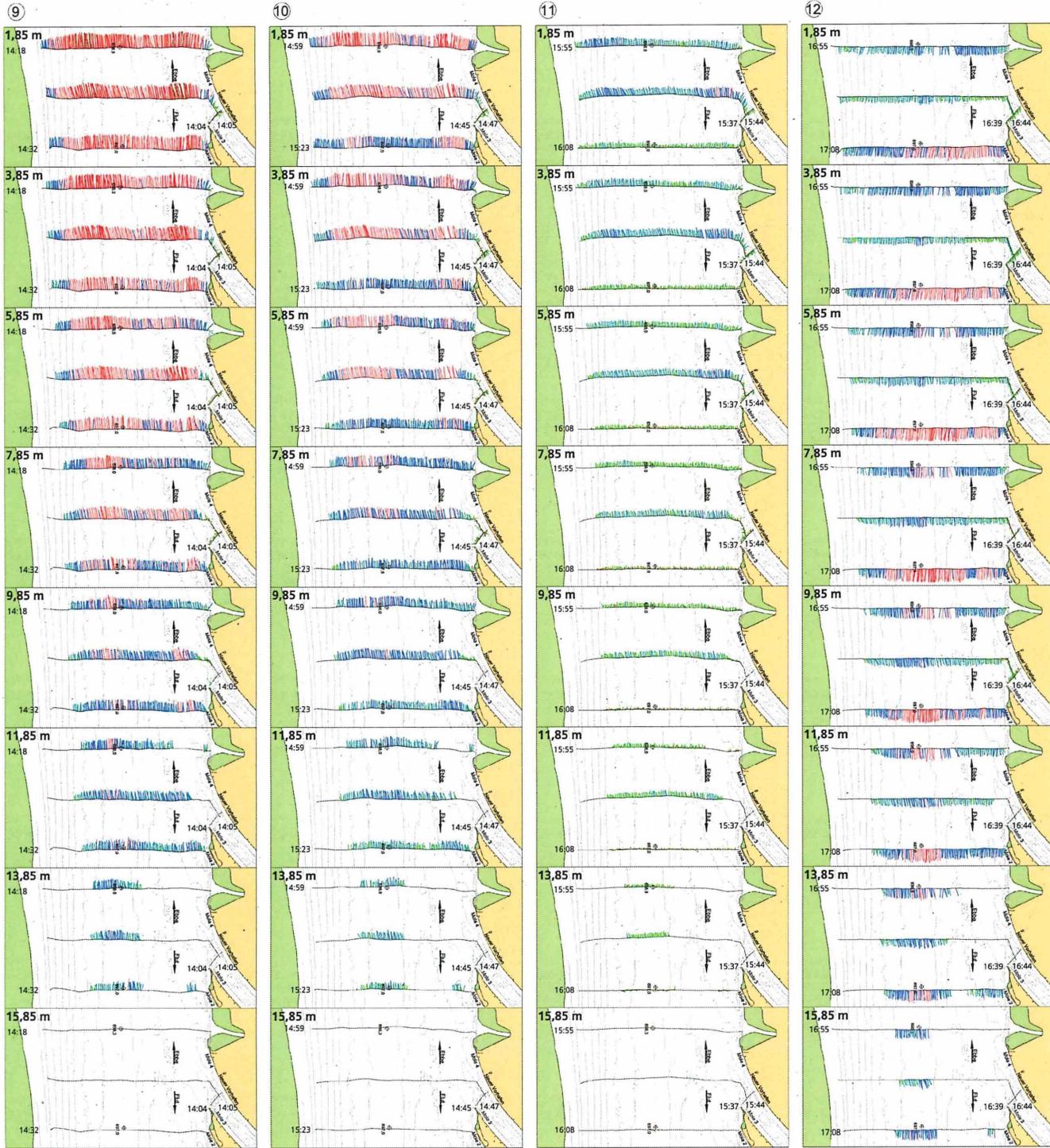


0 250 500 750 1000 m

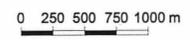
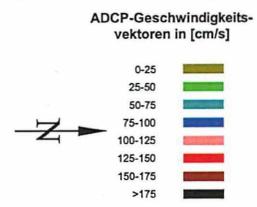


Institut für Wasserbau  
Neustadtwall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibw.hs-bremen.de

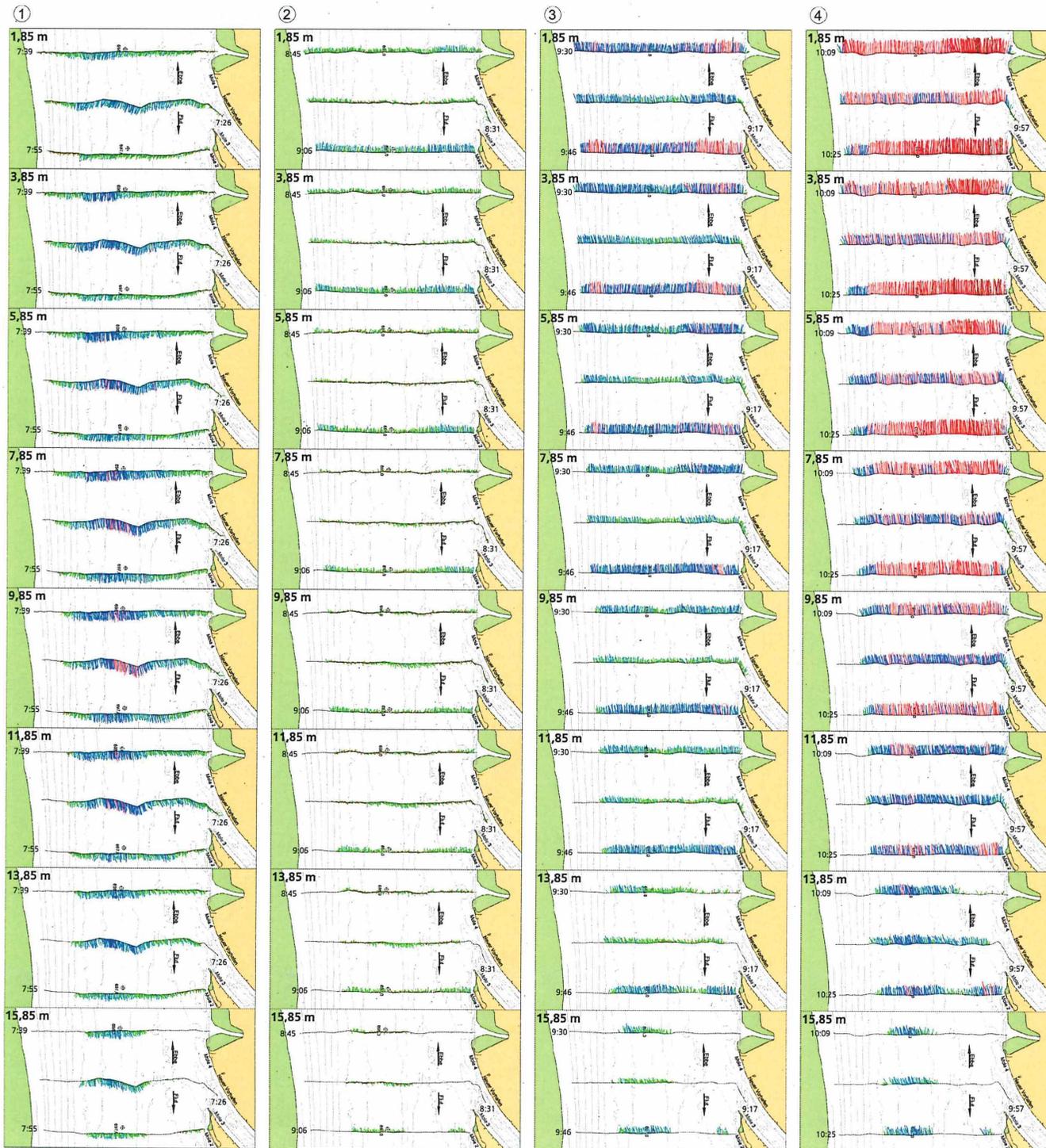
### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 29.06.2005



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 305 m³/s

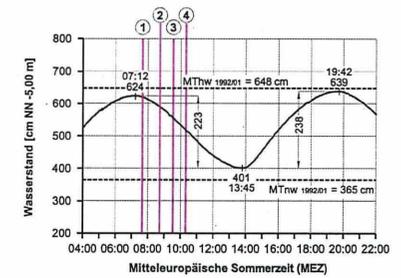


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: waba@ib.bremen.de



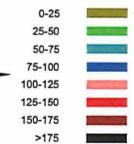
Anlage 99

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 13.03.2007



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1201 m<sup>3</sup>/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]

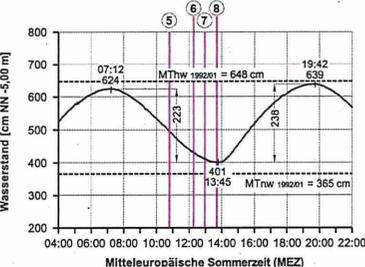
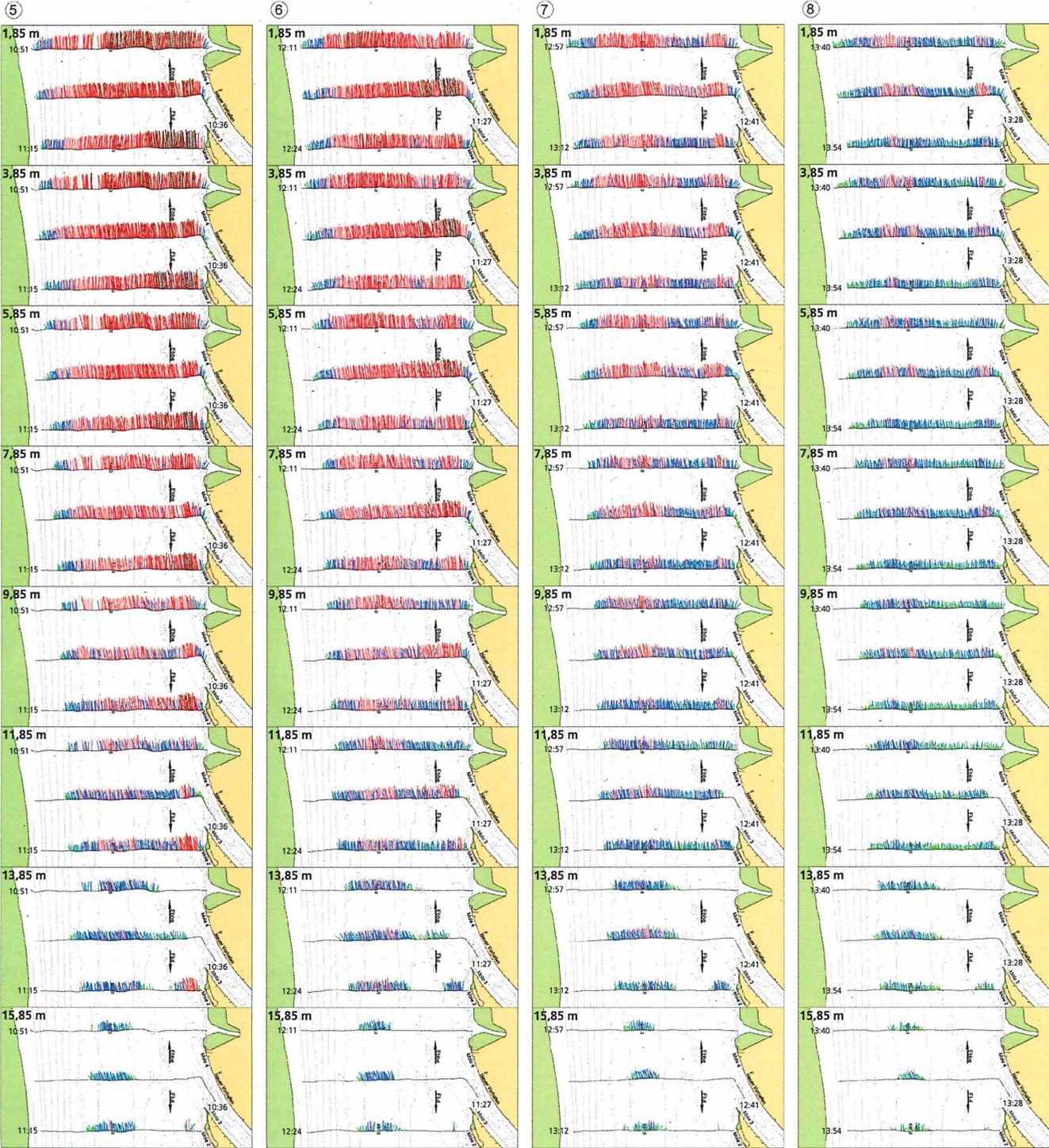


0 250 500 750 1000 m

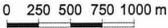
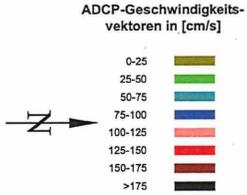


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 33  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibw.hs-bremen.de

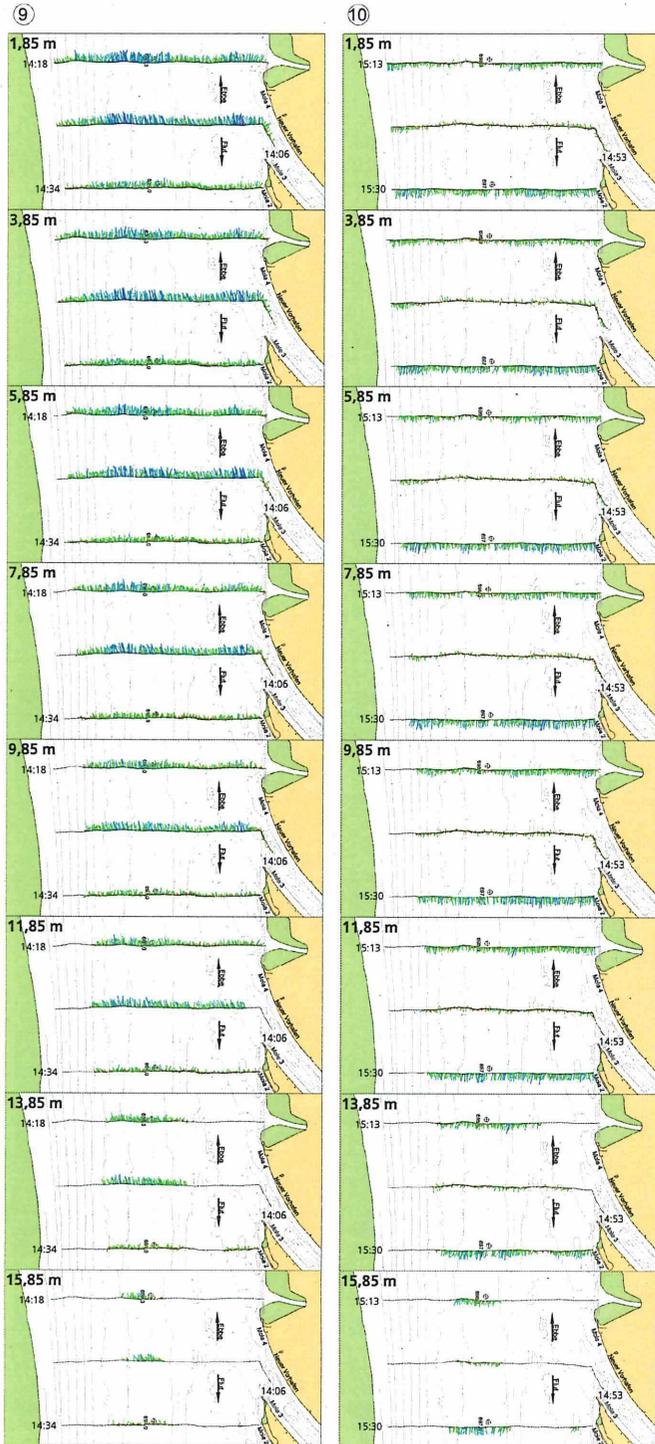
**Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 13.03.2007**



Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1201 m<sup>2</sup>/s

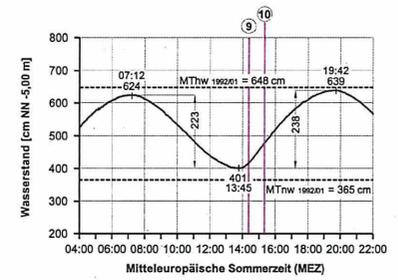


Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@ibb.hi-bremen.de



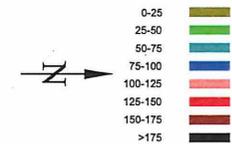
Anlage 101

### Strömungen in der Elbe im Bereich des NOK Brunsbüttel ADCP-Messungen am 13.03.2007



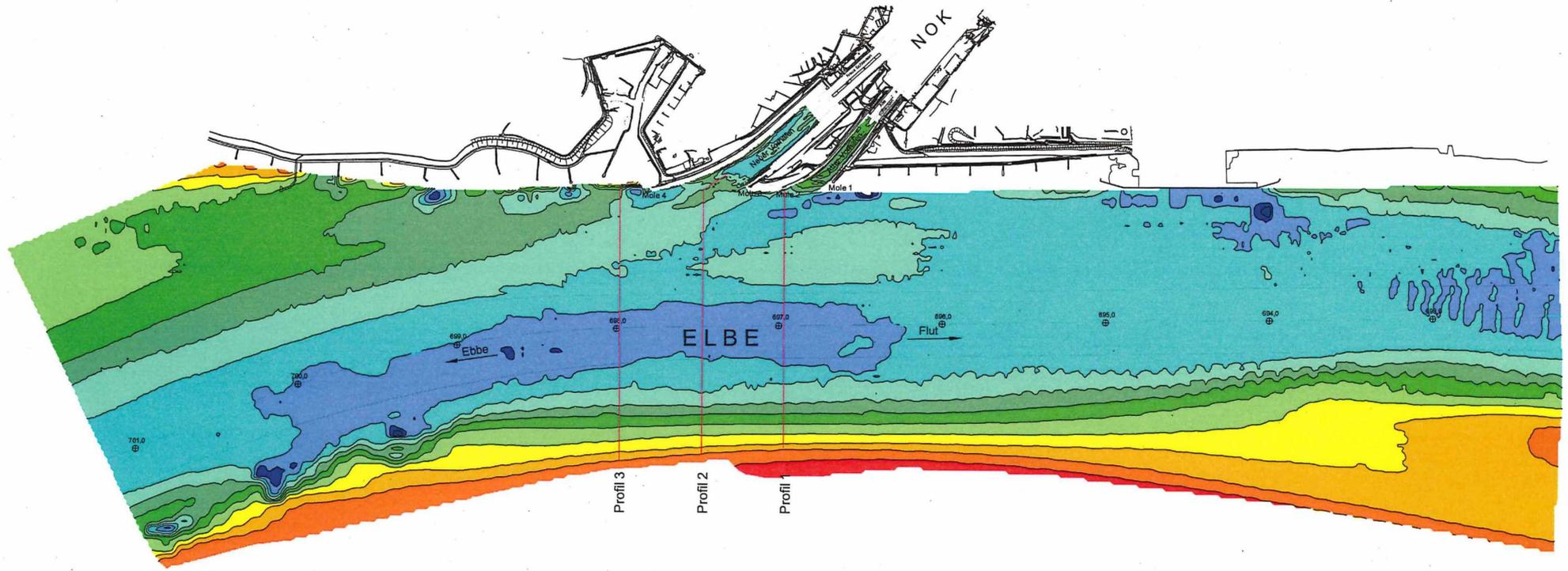
Tidekurve am Pegel Brunsbüttel Mole 4  
Oberwasser am Pegel Neu Darchau: 1201 m<sup>3</sup>/s

ADCP-Geschwindigkeitsvektoren in [cm/s]



Institut für Wasserbau  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen  
Tel: 0421-5905 2313  
Fax: 0421-5905 2382  
e-mail: wabau@fbw.hs-bremen.de

# Peilung vom Mai/August 2005 (WSA Cuxhaven, WSA Brunsbüttel)



**Legende:**

