

**In situ Messungen im Bereich  
des geplanten  
Offshore Terminals  
Bremerhaven (OTB)**

Hierzu: 18 Anlagen

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

Bremen, Oktober 2011

## Inhalt

1.	Veranlassung und Aufgabe .....	1
2.	Hydrologische und morphologische Randbedingungen.....	2
3.	Anmerkungen zu den in situ Messungen .....	4
4.	Strömungsmessungen mit der ADCP-Sonde .....	10
4.1.	Flutströmungen .....	10
4.2.	Ebbeströmungen .....	11
5.	Treibkörperbahnen .....	12
5.1.	Flutströmungen .....	12
5.2.	Ebbeströmungen .....	13
6.	Salzgehalte und Schwebstoffe .....	16
6.1.	Salzgehalte.....	16
6.2.	Schwebstoffe .....	18
7.	Bodenproben .....	20
8.	Zusammenfassung und Schlussbemerkungen.....	23
9.	Schrifttum .....	25

## 1. Veranlassung und Aufgabe

Im Zusammenhang mit der Planung eines Offshore Terminals in Bremerhaven (OTB) sind vom Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen Messungen in der Natur durchgeführt worden (Abb. 1). Sie waren die Eichgrundlage für eine von bremenports veranlassten wasserbaulichen Systemanalyse bei der BAW-Hamburg.

Es wurden Strömungsmessungen mit einer ADCP-Sonde (Acoustic-Doppler-Current-Profiler) in Querprofilen gefahren. Dabei handelt es sich um Euler'sche Strömungen mit denen die veränderlichen Strömungsintensitäten tideabhängig über die Wassertiefe und in den Querschnitten analysiert werden können. Rückschlüsse über morphologische Auswirkungen durch den Bau des Anlegers sind mit den ADCP-Messungen möglich. Außerdem bilden die Daten eine wertvolle Grundlage zur Beschreibung der komplexen Strömungsverhältnisse im Blexer Bogen.

Zusätzlich waren Strömungsbahnen (Lagrange'sche Strömungen) im Bereich des geplanten Anlegers durch Treibkörper mit abgehängten Kreuztafeln in verschiedenen Wassertiefen auszuführen. Die Strömungslinien sind hilfreich, um eine optimale Lage der Kajenflucht und der an den Kajenenden für die Strömungsführung anzuordnenden Leitwände zu ermitteln.

Im Brackwasserbereich der Unterweser werden die Strömungsverhältnisse auch durch die im Tiderhythmus veränderlichen Salzgehalte geprägt. Es wurden deshalb im Terminalbereich an verschiedenen Positionen mit einer mobilen Multifunktionssonde die Trübung und Salzgehalte für eine Flut- und Ebbestromphase ermittelt. Die gemessenen Trübungen wurden im Labor des IWA ausgewertet und in Schwebstoffkonzentrationen umgerechnet.

Zur Beurteilung des anstehenden Sohlenmaterials wurden mit einem Van-Veen-Bodengreifer Proben von der Flusssohle entnommen und im Labor die zugehörigen Körnungslinien und Glühverluste bestimmt. Die Analysen der Bodenproben lassen Rückschlüsse auf die veränderlichen Strömungs- und Sedimenttransportverhältnisse zu.

## 2. Hydrologische und morphologische Randbedingungen

Die Gezeiten an der deutschen Nordseeküste sind ständigen periodischen und aperiodischen Veränderungen unterworfen. Es macht deshalb Sinn, für vergleichende Betrachtungen langjährige Mittelwerte der Tidewasserstände heranzuziehen.

Für den zehnjährigen Zeitraum 1995/2004 gelten für den bei Weser-km 66,67 gelegenen Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm (Abb. 1) folgende Tidekennwerte (NLWKN, 2007):

### 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	$MT^1/2w_{1995/2004}$	=	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 Bremerhaven 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 (etwa 30 km oberhalb des Weserwehrs in Bremen) beträgt im langjährigen Mittel  $MQO_{1941/2004} = 327 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die Wesersohle besteht bis etwa Strom-km 55 (Nordenham) und ab Strom-km 65 (Ausgang Blexer Bogen) aus Fein- und Mittelsand. Die Sohlenstruktur ist dort durch Tideriffel geprägt (WETZEL, 1988; HOCHSCHULE BREMEN, IWA, 2006). Der dazwischen liegende Bereich von Nordenham bis zum Ausgang des Blexer Bogens zeichnet sich durch eine aus feinerem Material bestehende Sohle aus. In der Weser bei Bremerhaven ist der Geschiebetransport brackwasserbedingt bei niedrigem und mittlerem Oberwasser stromauf gerichtet. Bei höheren Binnenabflüssen in das Tidegebiet der Weser von  $Q_o > 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Intschede werden die Flutstromintensitäten geschwächt und die Ebbeströmungen verstärkt. Der von HENSEN (1955) definierte Gleichgewichtspunkt im Ästuarbereich (kein resultierender Geschiebetransport) wird mit dem veränderlichen Oberwasser stromab (hohes  $Q_o$ ) bzw. stromauf (geringes  $Q_o$ ) verschoben.

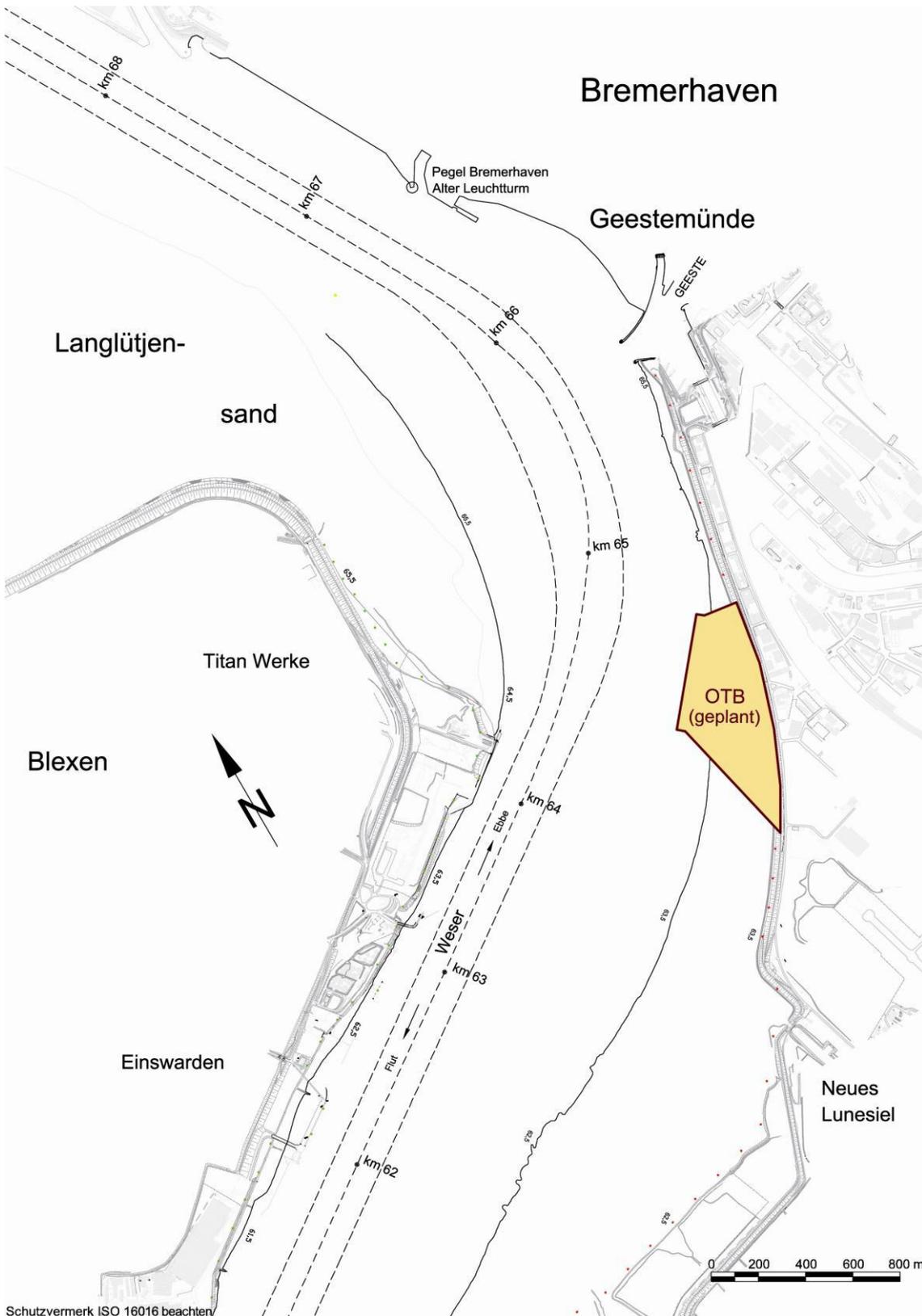


Abb. 1: Lageplan

Bei hohen Abflüssen stellen sich im oberen Stromabschnitt ab Strom-km 65 rasch erhebliche Sedimentationen ein (Abb. 2). Im Fahrwasser werden deshalb erhebliche Baggerungen in der Fahrrinne erforderlich (vgl. Abb. 3).

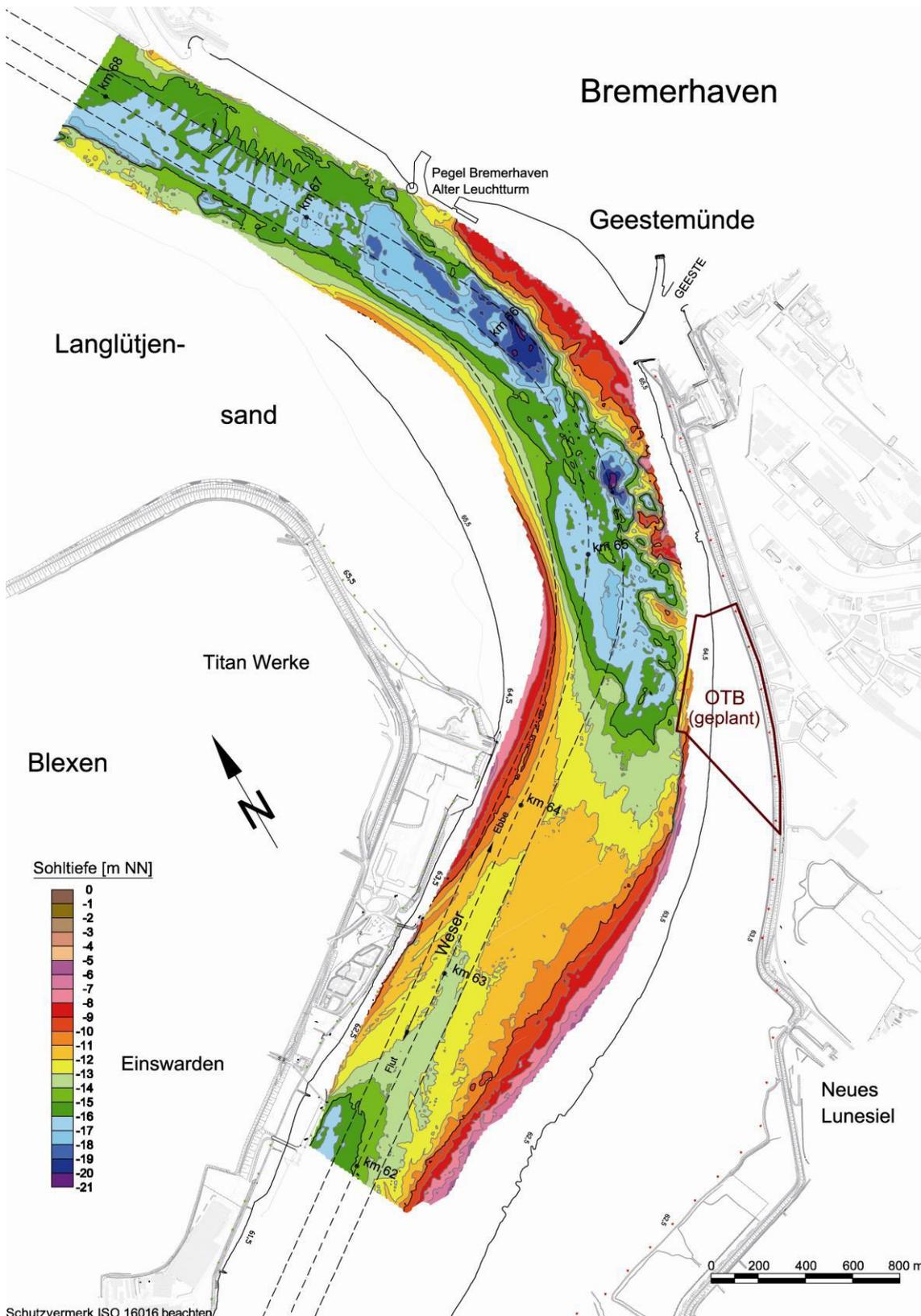
Ausgehend von dem bei km 66 gelegenen Kolk unterhalb der Geestemündung bei mittlerem und niedrigem Oberwasser bildet sich durch die dann dominierenden Flutströmungen eine tiefe Rinne aus. Sie quert das Fahrwasser ab km 65 und verläuft in südlicher Richtung bis zum oberen Ende des geplanten OTB. Danach schwächt sich die erodierende Kraft der Flutströmungen ab. Der auslaufende Talweg wird der Flussgeometrie entsprechend nach Westen umgelenkt. Da im Winter 2010/2011 hohe Binnenabflüsse nach dem Januar 2011 ausgeblieben sind, wurden die morphologischen Randbedingungen in Abb. 3 im Bereich des OTB für die Beschreibung der Messungen vom Frühjahr 2011 zugrunde gelegt (Abb. 3). Dabei ist davon auszugehen, dass sich die Verhältnisse im Fahrwasser bereits wieder mehr denen in der Peilung vom März 2010 angepasst hatten.

### **3. Anmerkungen zu den in situ Messungen**

Das Prinzip des Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) wird wie folgt kurz erläutert.

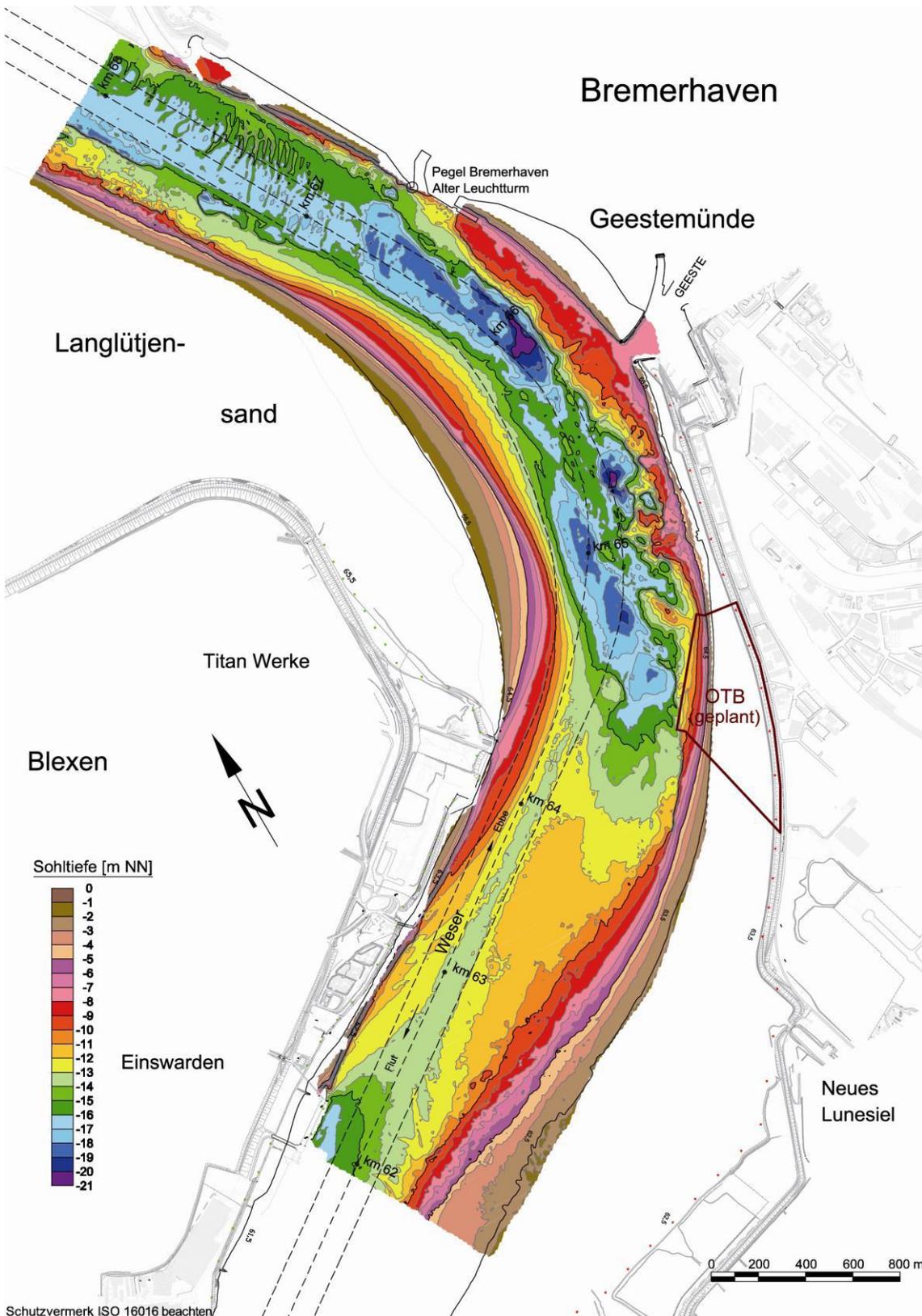
Von der Sonde werden akustische Schallimpulse mit einer hohen Frequenz (600 kHz) gesendet. Der Impuls wird von Partikeln im Wasser reflektiert. Die Bewegungen der Wasserteilchen verursachen Frequenzänderungen der Schallwelle (Dopplereffekt). Bewegt sich das Teilchen auf die Schallquelle zu, wird vom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

Der Dopplereffekt wird mit ADCP Sonden genutzt, indem Schallimpulse mit einer festen Ausgangsfrequenz gesendet und empfangen werden. Gleichzeitig kommt es zu Reflexionen mit den im Wasser befindlichen, bewegten Partikeln. Diese Dopplerverschiebung  $F_d$  ist proportional zur Geschwindigkeit  $v$  der Wasserteilchen. Dabei erfährt der Schallimpuls zweimal die Dopplerverschiebung. Einmal auf dem Weg zum Partikel und einmal vom Partikel zurück zum ADCP (Abb. 4).



Peilung vom März 2010 (WSA Bremerhaven)

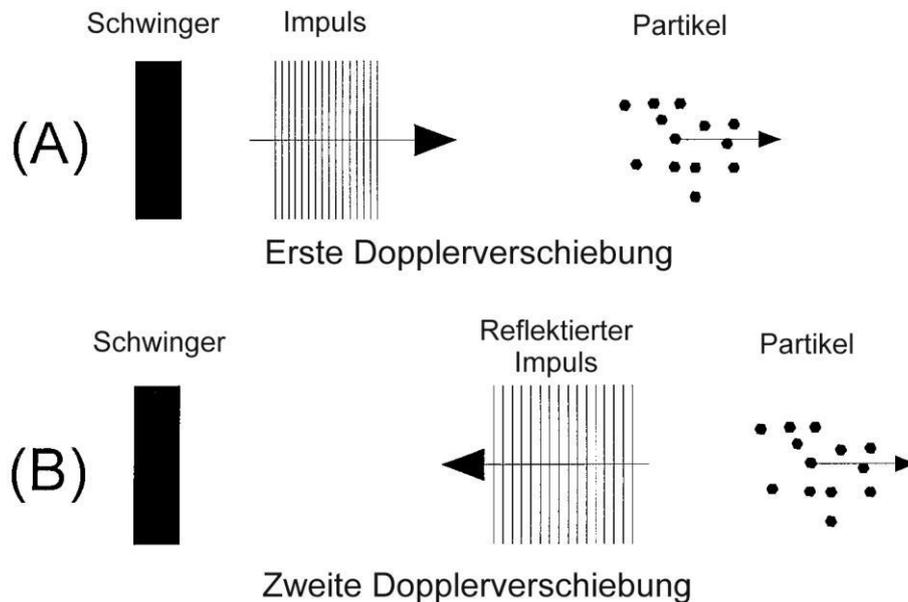
**Abb. 2: Morphologische Verhältnisse nach erhöhtem Oberwasser in Intschede**



Schutzvermerk ISO 16016 beachten

Peilung vom September/Oktober 2010 (WSA Bremerhaven)

**Abb. 3: Morphologische Verhältnisse nach mittlerem und niedrigem Binnenabfluss**



**Abb. 4: Erste und zweite Dopplerverschiebung des Schallimpulses (GORDON, 1996)**

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

$$F_d = F_s \left( \frac{v}{c} \right)$$

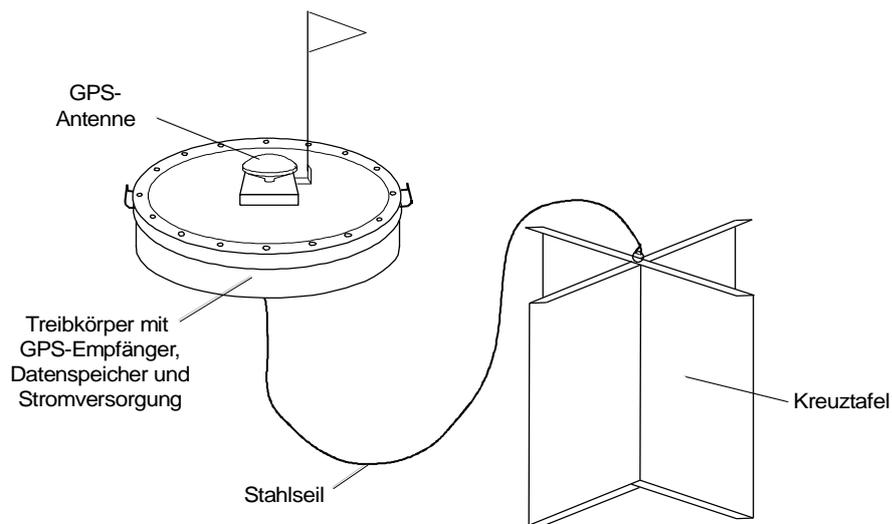
mit  $F_d$  = Doppler Verschiebungsfrequenz  
 $F_s$  = Ausgangsfrequenz des ADCP  
 $v$  = Strömungsgeschwindigkeit der Teilchen  
 $c$  = Geschwindigkeit des Schallimpulses

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

In der oberen und unteren Wasserschicht sind bis zu etwa einem Meter wegen fehlender Dopplereffekte (no backscattering) keine Signale zu empfangen. Bei einer Eintauchtiefe der Sonde von 0,35 m wurde dem obersten Messbereich von 1,35 m bis

2,35 m die mittlere Wassertiefe von 1,85 m zugeordnet. Ausgehend von der oberen Tiefenzelle sind die Strömungen mit einer im IWA entwickelten Software nach Richtung und Stärke in Meterabständen ausgewertet worden. In den folgenden Abbildungen sind die ADCP-Geschwindigkeitsvektoren zur besseren Übersicht in 2m-Abständen dargestellt worden.

Für die Messung der Strombahnen wurde Treibkörper mit abgehängter Kreuztafel verwendet (Abb. 5).



**Abb. 5: DGPS-Treibkörper mit Kreuztafel**

Der Strömungswiderstand der Kreuztafeln von 0,5 x 0,5 m ist etwa fünfmal so groß als der des um 0,1 m eingetauchten Treibkörpers von 0,5 m Durchmesser. Dementsprechend werden die Strömungen in der von der Seillänge abgehängten Tiefe der Kreuztafel gemessen. Der Treibkörper aus Aluminium ist mit einer GPS-Antenne und einem GPS-Empfänger ausgerüstet, der durch einen Akkumulator mit Energie versorgt wird. Es handelt sich somit um eine selbständige Positionierungseinheit.

In der Weser wurden bis zu vier Treibkörper gleichzeitig ausgesetzt. Die Strömungsbahnen sind in 1,5 und 4,0 m Wassertiefe im Bereich des geplanten Terminals gemessen worden.

Neben den Strömungsverhältnissen wurden zusätzlich die tideabhängigen Salzgehalte und Schwebstoffkonzentrationen in der Natur mit einer Multifunktionssonde untersucht. Die Salzgehalte werden über Leitfähigkeitsmessungen ermittelt und auf Salzgehalte  $S$  [% $\text{‰}$ ] umgerechnet.

Die tideabhängigen Schwebstoffkonzentrationen wurden mit einer mobilen Sonde über die Lichtdurchlässigkeit ermittelt. Die Messung der Lichtschwächung (Attenuation) mit der ME-Sonde ist eine indirekte Methode zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes im Wasser. Mit Sensoren, die aus einer Lichtquelle und einem Empfänger bestehen wird die Lichtschwächung gemessen, die der Lichtstrahl entlang der Messstrecke erfährt. Die Lichtschwächung wird durch Absorption und Streuung verursacht. Die Absorption findet an gelösten oder farbigen Stoffen statt. Bei der Streuung an Partikeln verändert der Lichtstrahl seine Intensität und ursprüngliche Richtung. Für jede Suspension existiert eine Streufunktion, die nicht nur von der Konzentration, sondern auch von der Partikelgröße und -form abhängt. Eine Proportionalität ist nur bei konstanter Partikelzusammensetzung gewährleistet. Veränderliche Fraktionierungen können daher zu beträchtlichen Schwankungen der Ergebnisse führen.

Die Attenuation folgt dem Gesetz von LAMBERT-BEER:

$$A = 1 - \frac{l}{l_0} = 1 - e^{-xc}$$

mit  $x$  = Weglänge des Lichtes  
 $l$  = Lichtintensität nach Weglänge  $x$   
 $l_0$  = Anfangsintensität des Lichtes  
 $c$  = Attenuationskoeffizient

Der dimensionslose Quotient  $\frac{l}{l_0}$  gibt die Transmissionsrate des Lichtes an und wird vom Sensor direkt in % gemessen. Der Attenuationskoeffizient  $c$  ergibt sich zu:

$$c = \frac{-1}{x \cdot \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)} \left[ \frac{1}{m} \right] \text{ mit } x = 20 \text{ mm}$$

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

## 4. Strömungsmessungen mit der ADCP-Sonde

### 4.1. Flutströmungen (Anlage 1 und 2)

Die Flutmessungen am 18.05.2011 wurden bei einem Springtidehub von  $M_{Thb} = 425$  cm am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm durchgeführt. Der Binnenabfluss am Pegel Intschede betrug  $Q_0 = 159$  m<sup>3</sup>/s und lag damit deutlich unter dem langjährigen Mittelwert. Es herrschte Südwind von 6 bis 8 m/s, was einer Windstärke von 4 Bft entspricht.

Die letzte Ebbestromphase mit der anschließenden Strömungsumkehr bis zum voll entwickelten Flutstrom ist in Anlage 1 dokumentiert.

Bei der ersten Messung wurden in der oberen Tiefenzelle noch Ebbestromgeschwindigkeiten bis zu  $v > 1$  m/s registriert. Die Vektoren veranschaulichen die starke Abnahme der Geschwindigkeiten und Richtungsänderungen gegen den Uhrzeigersinn zum tieferen Wasser.

Während der zweiten Messung waren lediglich in den oberen Wasserschichten noch schwache Ebbeströmungen auszumachen.

Etwa eine Stunde nach Thw war die Ebbestromkenterung abgeschlossen (Messung 3 in Anlage 1). In der schräg auf den OTB zulaufenden Rinne wurden im tieferen Wasser die höheren Geschwindigkeiten mit bis zu  $v_f > 75$  cm/s registriert. In den oberen Zellen war die Strömungsumkehr gerade erst abgeschlossen. In den oberen Wasserschichten wurden die stärkeren Strömungen im flacheren Wasser und linken Böschungsbereich, westlich des Fahrwassers ermittelt.

Die folgenden beiden Messungen 4 und 5 zeigen in Anlage 1 die rasche Zunahme der Flutstromgeschwindigkeiten während des steilen Flutastes der Tidekurve. Dichtebedingt werden große Tidewassermengen durch die tiefe, in nordsüdlicher Richtung verlaufenden Rinne transportiert (vgl. Abb. 3). Durch das von der See einlaufende Salzwasser werden die Sohlströmungen verstärkt und die Oberflächenströmungen geschwächt. Die größten Flutstromgeschwindigkeiten verlagern sich dadurch in tiefere Wasserschichten.

Es ist festzustellen, dass die Flutströmungen den OTB schräg anströmen. Nach Beseitigung des Hindernisses im nördlichen Kajebereich (Abb. 2 und 3) wird sich dieser Umstand noch verstärken. Aus wasserbaulicher Sicht wäre eine zur Strömung parallele Ausrichtung der Kaje optimaler.

Die Flutstromgeschwindigkeiten erreichen in der Weser bei Bremerhaven die größten Werte in der dritten Stunde nach Tnw (Messung 6 in Anlage 1). Das gilt auch für den Weserabschnitt unterhalb des Blexer Bogens im Bereich der Zufahrten zum Überseehafen von Bremerhaven (HOCHSCHULE BREMEN, IWA, 2009).

In der Flutstromphase wurden vereinzelt Strömungen von  $v_f > 175$  cm/s registriert. Die Geschwindigkeitsverteilungen über die Wassertiefe sind auch noch bei sich abflachender Tidekurve und geringer werdender Strömungsintensität vom Brackwassereffekt geprägt. Das wird mit den hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den unteren und sohlennahen Tiefenzellen dokumentiert (Anlage 1).

In der fortgeschrittenen Flutstromphase nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten kontinuierlich ab und sind zunehmend gleichmäßiger über die Wassertiefe verteilt (Anlage 2). Die Strömungsrichtungen in den beiden Profilen bleiben bis zur Flutstromkenterung nahezu unverändert. Die Strömungsumkehr setzte am 18 Mai 2011 etwa 20 Minuten nach Thw auf der linken, westlichen Seite im flachen Wasser ein (Messung 13 in Anlage 2). Im tiefen Wasser wurden gleichzeitig noch Flutstromgeschwindigkeiten von  $v_f \approx 1$  m/s gemessen. Erst etwa eine Stunde nach Thw hatte sich die Kenterung bis zu den tiefen Wasserschichten durchgesetzt.

#### 4.2. Ebbeströmungen (Anlage 3 und 4)

Bei der Vormittagstide vom 23. Mai 2011 betrug der Tidefall 354 cm am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm bei einem Binnenabfluss in Intschede von  $Q_0 = 147$  m<sup>3</sup>/s (Anlage 3). Während der Ebbe herrschte Wind aus südwestlicher Richtung zu Beginn der Messung mit 4 m/s (Bft 3).

Mit den ersten drei Messungen wird in Anlage 3 die Flutstromkenterung dokumentiert. Wie bei der Flutmessung beginnt die Kenterphase im flachen Wasser der Böschung des Gleitufers auf der linken Weserseite (obere Tiefenzellen in Anlage 3).

Bei der zweiten Messung, etwa 1 Stunde nach Thw hatte die Flutstromkenterung auch die untersten Tiefenzellen erreicht. Erst beim dritten Durchlauf, als an der Oberfläche bereits  $v_e = 0,75$  bis 1,00 m/s registriert wurden, setzte im Sohlbereich die Ebbe mit einer Verspätung zum Thw von rd. 80 Minuten ein.

Durch das während der Ebbestromphase zusammen mit der Flutwassermenge abzuführende Oberwasser werden dichtebedingt die Oberflächenströmungen verstärkt und die Sohlströmungen gemindert. Dieser Umstand wird mit den Messungen 4 bis 7

in Anlage 3 veranschaulicht. Die Ebbeströmungen verstärken sich kontinuierlich und erreichen später als bei der Flutmessung erst in der vierten Stunde nach Thw die höchsten Geschwindigkeiten (Messung 7 in Anlage 3). Die maximalen Strömungen traten bei Ebbe in der oberen Wasserschicht auf. Bei der 7. Messung wurden an der Oberfläche bis zu  $v_{\text{emax}} \approx 2,0$  m/s ermittelt (Anlage 3). Im Übrigen ist die Unregelmäßigkeit im oberen Profil ab der 7. Messung durch ein dort ankerndes Schiff bedingt.

In der späteren Ebbestromphase verstärkte sich der Südwestwind auf 8 bis 10 m/s (Bft 5). Die Strömungsintensität schwächt sich während der Ebbe langsamer ab (Messung 7 bis 12 in Anlage 3 und 4). So wurden rd. 1 Stunde vor Eintritt des Tnw bei der 10. Messung noch  $v_e \approx 175$  cm/s in der oberen Tiefenzelle ermittelt. Kurz nach Tide-niedrigwasser setzte in den unteren Wasserschichten die Ebbestromkenterung ein.

Bemerkenswert und morphologisch von Bedeutung ist der starke Vertikalgradient der Ebbeströmungen. Die Oberflächenströmungen sind bei der Ebbemessung brackwasserbedingt höher als bei der Flutmessung. Bei den sohlennahen Strömungen ist es umgekehrt. Bei geringem Oberwasser dominieren vor dem OTB die Flutströmungen und schaffen die größeren Wassertiefen in der nordsüdlich verlaufenden Rinne. Bei hohen Binnenabflüssen ( $Q_0 > 1.000$  m<sup>3</sup>/s) werden die Flutstromgeschwindigkeiten an der Sohle schwächer und die Ebbeströmungen stärker. Der dann stromab gerichtete Sedimenttransport führt zu Sedimentationen in der dem OTB vorgelagerten Rinne. Die in Abb. 2 dargestellte Märzpeilung 2010 wurde nach dem Durchgang eines hohen Binnenabflusses erstellt. Nach dem trockenen Sommer 2010 mit entsprechend geringem Oberwasser in Intschede zeigt sich eine ganz andere Situation (NASNER, 2011).

## 5. Treibkörperbahnen

Die ADCP-Profile wurden mit Treibkörpermessungen im Bereich des geplanten Offshore Terminals ergänzt.

### 5.1. Flutströmungen (Anlage 5 bis 9)

Die Flutströmungen wurden am 1. Juni 2011 bei mittleren Tideverhältnissen ( $Thb = 368$  cm am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm) durchgeführt. In Intschede betrug der Abfluss  $Q_0 = 148$  m<sup>3</sup>/s. Während der Messungen herrschte Wind aus nordwestlicher Richtung von 4,5 bis 6,5 m/s (Bft 3 bis 4). Die Untersuchungsergebnisse sind in Anlage 5 bis 9 aufgetragen.

In Anlage 5 ist die Kenterung der Ebbeströmungen und erste Flutphase dargestellt. Im Böschungsbereich lagen die Flutstromgeschwindigkeiten zwei Stunden nach Thw am oberen Ende des Terminals noch im unteren bis mittleren Dezimeterbereich. In Übereinstimmung mit den ADCP-Messungen verläuft die Flutströmung nicht parallel zur Stromkaje.

In der Flutrinne wurden die stärksten Strömungen mit  $v_f > 175$  cm/s in der dritten Stunde nach Tnw erreicht (vgl. Anlage 1, Messungen 6 und 7). Mit den Treibkörpern wurden in der entsprechenden Tidephase im Bereich des OTB deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten mit maximal  $v_{fmax} \approx 1$  m/s gemessen (Anlagen 6 und 7). Das hat verschiedene Gründe.

Während der Flutstromphase werden die Tidewassermengen vornehmlich in der tiefen nordsüdlich ausgerichteten Rinne stromauf transportiert. Am südlichen Ende des Terminals befindet sich eine nördlich ausgerichtete Sohlenschwelle. Sie mindert oberhalb vor dem Anleger die Strömungsintensität. Außerdem ist es so, dass im flacheren Wasser des Prallhangs im Blexer Bogen die Flutströmungen nicht dominant sind. Vergleichbare Zusammenhänge haben ADCP-Messungen östlich des Fahrwassers vor der Geestemündung ergeben (HOCHSCHULE BREMEN, IWA, 2009).

Mit sich abflachendem Flutast der Tidekurve werden die Strömungsgeschwindigkeiten im Terminal bis zum Eintritt des Thw stetig schwächer (Anlage 8 und 9).

## 5.2. Ebbeströmungen (Anlage 10 bis 14)

Bei den Ebbmessungen vom 25.05.2011 lagen mit  $Q_0 = 142$  m<sup>3</sup>/s in Intschede ähnliche Oberwasserbedingungen wie bei der Flutmessung vor (Anlage 10). Der Nipptidehub betrug bei der Vormittagstide vom 25. Mai 334 cm. Zu Beginn der Messungen herrschte Westwind mit  $u = 5,5$  m/s (Bft 4). Um 10.00 Uhr kam es kurzfristig zu  $u = 8,5$  m/s (Bft 5) (Anlage 10).

Zu Beginn der Messungen hatte am unteren Ende des OTB bereits die Ebbestromphase eingesetzt. Etwa zwei Stunden nach Thw wurden Ebbestromgeschwindigkeiten zwischen  $v_e > 50$  cm/s am rechten Ufer und  $v_e \approx 80$  bis 90 cm/s (im Bereich der künftigen Kaje) ermittelt (Anlage 10). Die gemessenen Strömungsbahnen verliefen auch in der ersten Ebphase nicht parallel zur Kajenflucht.

Bei der zweiten und dritten Messphase (Anlage 11 und 12) zeigt sich bei den roten Treibkörperbahnen im flachen Wasser der Einfluss des in dieser Tidephase auffrischenden Westwindes an den Verdriftungen. Bemerkenswert ist es, dass trotz der

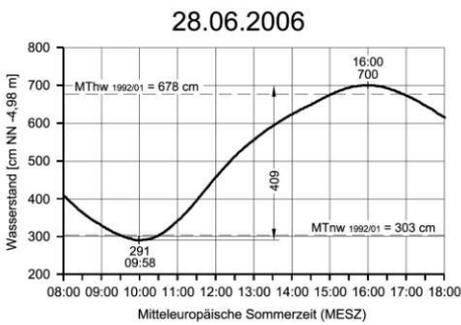
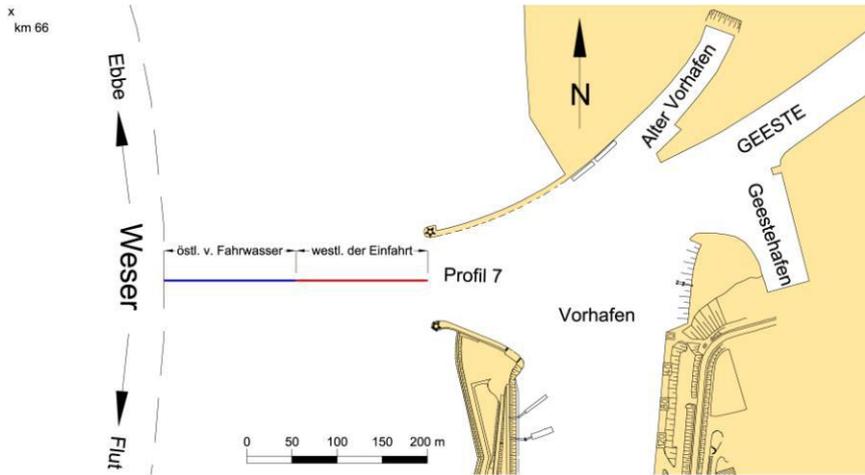
Nipptide die Ebbestromgeschwindigkeiten Werte von bis zu  $v_e \approx 120$  cm/s erreichten (Anlage 11 und 12).

Wie bei den ADCP-Messungen weisen auch die Treibkörperbahnen in der späteren Ebbestromphase noch etwa gleichbleibend hohe Geschwindigkeiten aus (Anlage 13). Sehr anschaulich ist auch die strömungshemmende Wirkung im flacheren Wasser vor dem Terminal in Anlage 13 zu erkennen. Über die Störstelle und unterhalb im Strömungsschatten verringert sich die Geschwindigkeit des um 11.53 Uhr ausgesetzten Treibkörpers (blaue, äußere Linie in Anlage 13) deutlich. Erst in der letzten Stunde vor Tnw werden die Ebbestromgeschwindigkeiten östlich des Fahrwassers schwächer (Anlage 14).

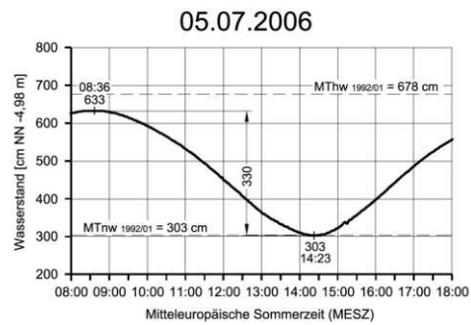
Mit den Strömungsmessungen ist gezeigt worden, dass im flacheren Wasser am Prallhang des Blexer Bogens im Bereich des geplanten OTB die Ebbeströmungen dominieren. Das während der Flutphasen von See eindringende spezifisch schwerere Salzwasser wird in den tiefen Schifffahrtrinnen stromauf transportiert. Die dort herrschende Flutstromdominanz verstärkt den stromauf gerichteten Sedimenttransport.

Auch vor der Geestemündung dominieren östlich vom Fahrwasser die Ebbeströmungen. Das mit der Ebbe abfließende leichtere Süßwasser verstärkt die Oberflächenströmungen im flacheren Wasser vor der Geesteeinfahrt (vgl. Abb. 2 und 3). Die salzhaltigeren Flutwassermengen gelangen mehr im tiefen Wasser des Prallhangs weiter außerhalb stromauf (HOCHSCHULE BREMEN, IWA, 2009).

Die aus den Querprofilfahrten ermittelten Strömungsvektoren mit einer ADCP-Sonde wurden die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten östlich des Fahrwassers und westlich der Einfahrt ermittelt. Die Auftragungen in Abb. 6 bestätigen die vorstehenden Interpretationen der Strömungsmessungen im Bereich des geplanten OTB. Folgerichtig ist die Ebbestromdominanz im flacheren Wasser westlich der Geesteeinfahrt stärker ausgeprägt.



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 199 m³/s



Tidekurve am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm  
Oberwasser am Pegel Intschede: 160 m³/s

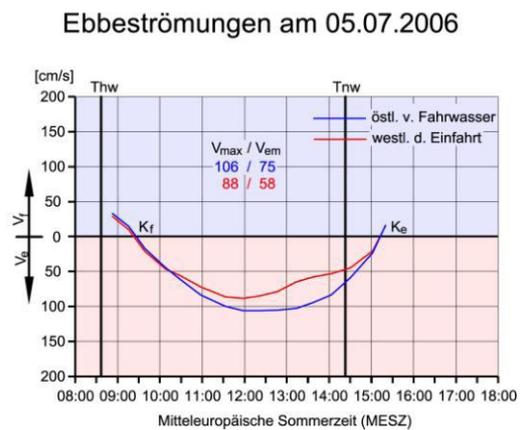
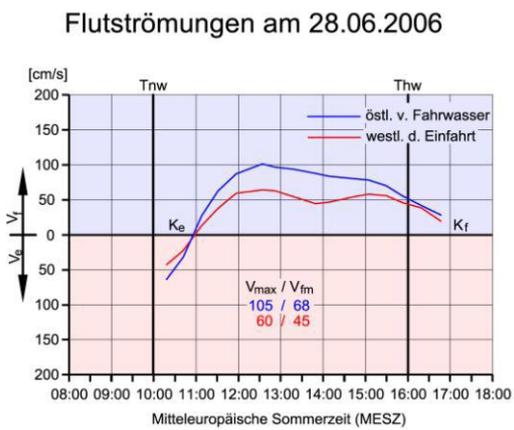


Abb. 6: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der Weser vor der Geestemündung (HOCHSCHULE BREMEN, IWA, 2009)

## 6. Salzgehalte und Schwebstoffe

Die Messungen der Salzgehalte und Trübungen wurden zusammen mit den ADCP-Messungen und damit bei den gleichen Randbedingungen durchgeführt.

### 6.1. Salzgehalte

- **Flutmessung (Anlage 15)**

Die in Anlage 15 dargestellten Salzgehalte der Flutmessung vom 18. Mai 2011 wurden jeweils vor den entsprechenden ADCP-Profilen gemessen (vgl. Anlage 1, 2 und 14).

Bis rd. 1 Stunde nach Tnw während der letzten Ebbestromphase und anschließenden Strömungskenterung wurden nur geringfügige Veränderungen der Salzgehalte ermittelt. Am geringsten waren die Konzentrationen bei der zweiten Messung mit  $S \leq 7 \text{ ‰}$ .

Mit stärker einsetzendem Flutstrom (Messung 5 in Anlage 15) ist die Verteilung an den Positionen 2 und 5 von Interesse. Die Salzgehalte sind dort in der tieferen Rinne in den unteren Wasserschichten um 1 ‰ höher als im oberen Wasserkörper. Der Übergang vollzieht sich bei Pos. 5 innerhalb von 2 Metern. Das ist ein Hinweis darauf, dass die spezifisch schwereren Flutwassermengen durch das tiefere Wasser stromauf fließen (vgl. auch Messung 5 in Anlage 1).

Im weiteren Verlauf der Flutströmungen von der 6. bis zur 8. Messung stellten sich im unteren Profil im Bereich der nordsüdlich verlaufenden Rinne die höchsten Salzgehalte ein (Pos. 4 und 5 in Anlage 15).

Anschließend kam es im Untersuchungsbereich zu auffälligen Durchmischungen der Wassermassen, wie ein Vergleich der Messungen 8 und 9 in Anlage 15 zeigt. Die starke Streuung der Strömungsvektoren in Anlage 2 bei der 9. Messung ist ein Hinweis auf die turbulenten Durchmischungsvorgänge.

Ab Tidehalbwasser wird das östlich der Fahrrinne gelegene Wattgebiet des Mündungstrichters der Weser zunehmend überströmt. Damit werden zusätzliche Flutwassermengen in den Blexer Bogen eingetragen. Das erklärt auch die sich verändernden Strömungsverteilungen in den Anlagen 1 und 2 und die vorstehend beschriebene Durchmischung der Salzgehalte.

Mit sich weiter abflachendem Flutast beruhigt sich das Strömungsgeschehen kontinuierlich bis zur Flutstromkenterung (vgl. Anlage 2).

Bei der 10. Salzgehaltsmessung wurde im Untersuchungsgebiet fast vollkommen durchmisches Wasser mit Salzgehalten an der Oberfläche von  $S = 10 \text{ ‰}$  und  $11 \text{ ‰}$  im tieferen Wasser angetroffen (Messung 10 in Anlage 15).

In der späteren Flutstromphase bildet sich ein Quergefälle der Salzgehalte aus, mit den höheren Werten östlich der Fahrrinne (Messung 11 in Anlage 15).

Mit der 12. Messung wurden an allen Positionen in größerer Wassertiefe Salzkonzentrationen von  $S \approx 19 \text{ ‰}$  registriert. Bemerkenswert ist der starke Vertikalgradient bei den Positionen 4 und 1 am linken Fahrwasserrand mit  $13$  bis  $14 \text{ ‰}$  Salzkonzentration an der Wasseroberfläche. Die geringeren Werte sind mit der Zuströmung von weniger salzhaltigem Wasser aus dem Wattgebiet erklärt. Das gilt im Übrigen ebenfalls für die Positionen 1 bis 4 der Messung 13 in Anlage 15.

Mit der 14. Messung wird belegt, dass die Ebbeströmungen zuerst im flachen Wasser einsetzen (Anlage 15, Messung 14, Pos. 1 bis 4 und Anlage 2, Messung 14). Etwa eine Stunde nach Tidehochwasser betragen die Salzgehalte im tieferen Wasser noch fast unverändert  $S \approx 20 \text{ ‰}$  (Anlage 15, letzte Messung). An der Wasseroberfläche lagen die Konzentrationen bei allen Profilen noch bei  $S = 16$  bis  $17 \text{ ‰}$ . Das bedeutet, dass die Flutstromkenterung in den oberen Wasserschichten abgeschlossen war.

- **Ebbemessung (Anlage 16)**

Die Salzgehalte am 23. Mai 2011 wurden jeweils nach den entsprechenden Strömungsprofilen mit der ADCP-Sonde gemessen (vgl. Anlage 16 mit Anlage 3 und 4).

Die ersten drei Messungen in der Anlage 16 zeigen die Salzgehaltsverhältnisse vor, während und nach Abschluss der Flutstromkenterung (Anlage 16 und 3, Messung 1 bis 3). Die Messungen 1 und 2 in Anlage 16 entsprechen den ebenfalls nach Thw ermittelten Salzgehalten bei der Flutmessung vom 18. Mai 2011 (vgl. Anlage 15, Messung 14 und 15).

Auch bei der Ebbemessung betragen die Salzkonzentrationen nach Tidehochwasser im tieferen Wasser  $S \approx 20 \text{ ‰}$ . Die hohen Konzentrationen waren durch das niedrige Oberwasser bedingt.

An der dritten Messung ist abzulesen, wie sich die weniger salzhaltigen Ebbe-wassermengen zunächst in den oberen Wasserschichten und im rechten Querschnittsbereich durchsetzen (Pos. 3 und 6 in Anlage 16).

Nach der dritten Messung setzen sich die Salzgehaltsunterschiede in den Querschnitten bei zunehmender Ebbestromintensität bis in die unteren Wasserschichten durch. Gleichzeitig gleichen sich die Konzentrationen an der Oberfläche an (Anlage 16, Messung 3 bis 6). In beiden Querprofilen hatte sich ein Gefälle der Salzkonzentration vom Gleithang zum Prallhang eingestellt (Pos. 1 bis 3 und 4 bis 6 in Anlage 16). Aufgrund der schwächeren Durchströmung verringern sich Salzkonzentrationen am Gleithang (Pos. 1 und 4) langsamer als am Prallhang (Pos. 3 und 6).

Im weiteren Verlauf der Ebbestromphase nehmen die Salzgehalte und horizontalen Gradienten kontinuierlich ab (Messung 7 bis 12 in Anlage 16). Bei Tideniedrigwasser lagen die Konzentrationen noch bei  $S = 8$  bis  $12$  ‰. Die absolut geringeren Konzentrationen von  $S = 6$  bis  $8$  ‰ bei der ersten Flutmessung in Anlage 15 kann auf den um 85 cm stärkeren Springtidefall von 439 cm am 18. Mai 2011 zurückgeführt werden.

Im Brackwasserbereich verstärkt das mit der Ebbe abfließende leichtere Süßwasser die Oberflächenströmungen. Mit den Salzgehalts- und Strömungsmessungen wurde aufgezeigt, dass die Ebbeströmungen im Untersuchungsgebiet östlich des Fahrwassers im Bereich des Prallhangs dichtebedingt intensiviert werden.

## 6.2. Schwebstoffe

Das Fahrwasser der Unterweser zwischen Strom-km 62,5 und 64,5 erfordert einen hohen Unterhaltungsaufwand. Besonders starke Sedimentationen sind bei hohen Abflüssen aus dem Binnenland hinzunehmen. Der damit ebbestromorientierte Sedimenttransport führt dann rasch zu starken Auflandungen im linken Durchflussquerschnitt gelegenen Fahrwassers. Das war z. B. Anfang 2010 der Fall, wie es die Peilungen vom März 2010 dokumentieren (Abb. 2).

Der verbesserte Zustand vom Herbst 2010 (Abb. 3) war nach dem hohen Oberwasser vom Januar 2011 nicht mehr gegeben. Damit wurden zum Frühjahr 2011 erneut Baggerungen erforderlich.

- **Flutmessung (Anlage 17)**

In der letzten Ebbephase der Springtide vom 18. Mai 2011 wurden die stärksten Schwebstofftransporte am linken Fahrwasserrand ermittelt (Anlage 17, Messung 1 und 2). Während der Ebbestromkenterung (Messung 3 in Anlage 17) kam es zu einer deutlichen Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen.

Mit den einsetzenden und sich voll ausprägenden Flutströmungen kam es zu starken Schwebstoffanreicherungen (Messungen 4 bis 6 in Anlage 17).

Bemerkenswert ist es, dass die Schwebstoffgehalte im tiefen Wasser (Pos. 2 und 5) mit abflachendem Flutast und sich stetig vermindernder Flutstromintensität ab der 7. Messung (Anlage 17) die geringsten Konzentrationen ergaben. Die stärkeren morphodynamischen Vorgänge waren in den Randbereichen zu verzeichnen.

Bis zu 10. Messung waren die Schwebstoffverhältnisse am linken Fahrwasserrand am auffälligsten (Pos. 1 und 4) und gegen Ende der Flutstromphase wurden an den Pos. 3 und 6 noch etwas höhere Feststoffkonzentrationen ermittelt. Die insgesamt starken Reaktionen auf die hydrodynamischen Kräfte im linken Böschungsbereich erklären die Sedimentationsprobleme im Fahrwasserbereich.

- **Ebbemessung (Anlage 18)**

Aufgrund des gleichbleibend niedrigem Oberwassers und der Nipptide wurden bei den Ebbemessungen vom 23. Mai 2011 insgesamt geringere Schwebstoffkonzentrationen ermittelt (Anlage 18).

Während der Flutstromkenterung wurden wie bei den Messungen vom 18. Mai 2011 an den Pos. 3 und 6 die höheren Schwebstoffkonzentrationen festgestellt (Anlage 18, Messung 1 und Anlage 17, Messung 14).

Bei den Salzgehaltsmessungen wurden bei voll ausgeprägten Ebbeströmungen am linken Fahrwasserrand (Pos. 1 und 4) die stärksten Vertikalgradienten und höchsten Salzgehalte im tieferen Wasser gemessen (Messung 5 bis 12 in Anlage 16). Folglich wurden an gleicher Stelle die höchsten Feststoffmengen aus den Trübungsmessungen ermittelt (Anlage 18, Messung 5 bis 12). Dieses Ergebnis gibt einen Hinweis darauf, dass sich die Situation bei hohem Oberwasser deutlich verändert. Der ebbestromorientierte Sedimenttransport führt

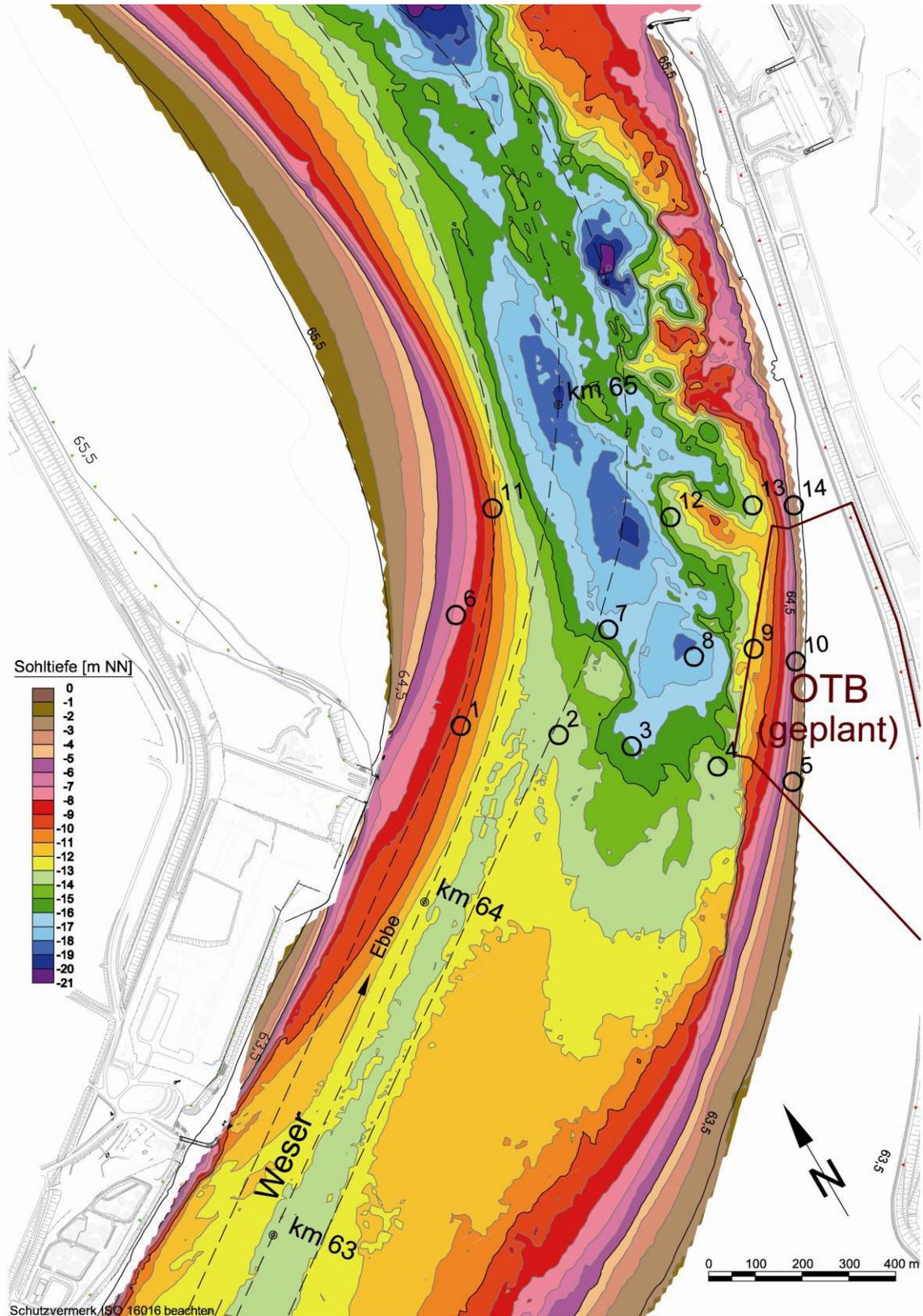
dann zu den raschen Auflandungen in dem am linken Weserufer verlaufenden Fahrwasser.

## 7. Bodenproben

Um einen Einblick in die Zusammensetzung des Sohlenmaterials im Untersuchungsgebiet zu bekommen wurden am 1. Juni 2011 Bodenproben mit einem VAN-VEEN Backengreifer entnommen. Im IWA sind die Körnungslinien der Proben und die Glühverluste ermittelt worden. Die Entnahmestellen zu den Kornverteilungen und Glühverlusten sind Abb. 7 und Abb. 8 zu entnehmen.

Im Bereich des geplanten OTB wurde insgesamt sehr feines Sohlenmaterial angetroffen. Die in Abb. 8 aufgetragenen Ergebnisse der Laboranalysen zeigen, dass die Proben mit 65 bis 90 % Schluff- und Tonanteilen überwiegend aus Schlämmkorn bestehen. Im oberen Profil bei Strom-km 64,5 wurden die etwas höheren Sandanteile im rechten Querschnittsbereich angetroffen. Bei den Proben 5, 10 und 13 wurden die höchsten Sandkornteile und geringsten Glühverluste (7,3 bis 10,7 %) bestimmt (Abb. 8). Naturgemäß setzt sich am Gleithang feineres Material mit höheren biologischen Anteilen ab (Proben 1, 6 und 11 mit 12,5 bis 13,9 % Glühverlust). Sehr fein waren auch die Körnungen der Proben aus dem oberen Bereich der Flutrinne (3, 7 und 8) mit lediglich 10 bis 15 % Feinsandanteilen.

Im östlichen Prallhangbereich des Blexer Bogens bestehen, unabhängig vom Binnenabfluss der Weser, gute Voraussetzungen für ausreichende Wassertiefen im Bereich der Zufahrt und Liegeplätze des geplanten OTB. Die in dem Weserabschnitt transportierten feinen Feststoffe sedimentieren im Bereich des Gleithangs und führen dort zu starken Sedimentationen des Fahrwassers.



**Abb. 7: Bodenprobenentnahmestellen mit Peilung vom Sept./Okt. 2010  
(WSA Bremerhaven)**

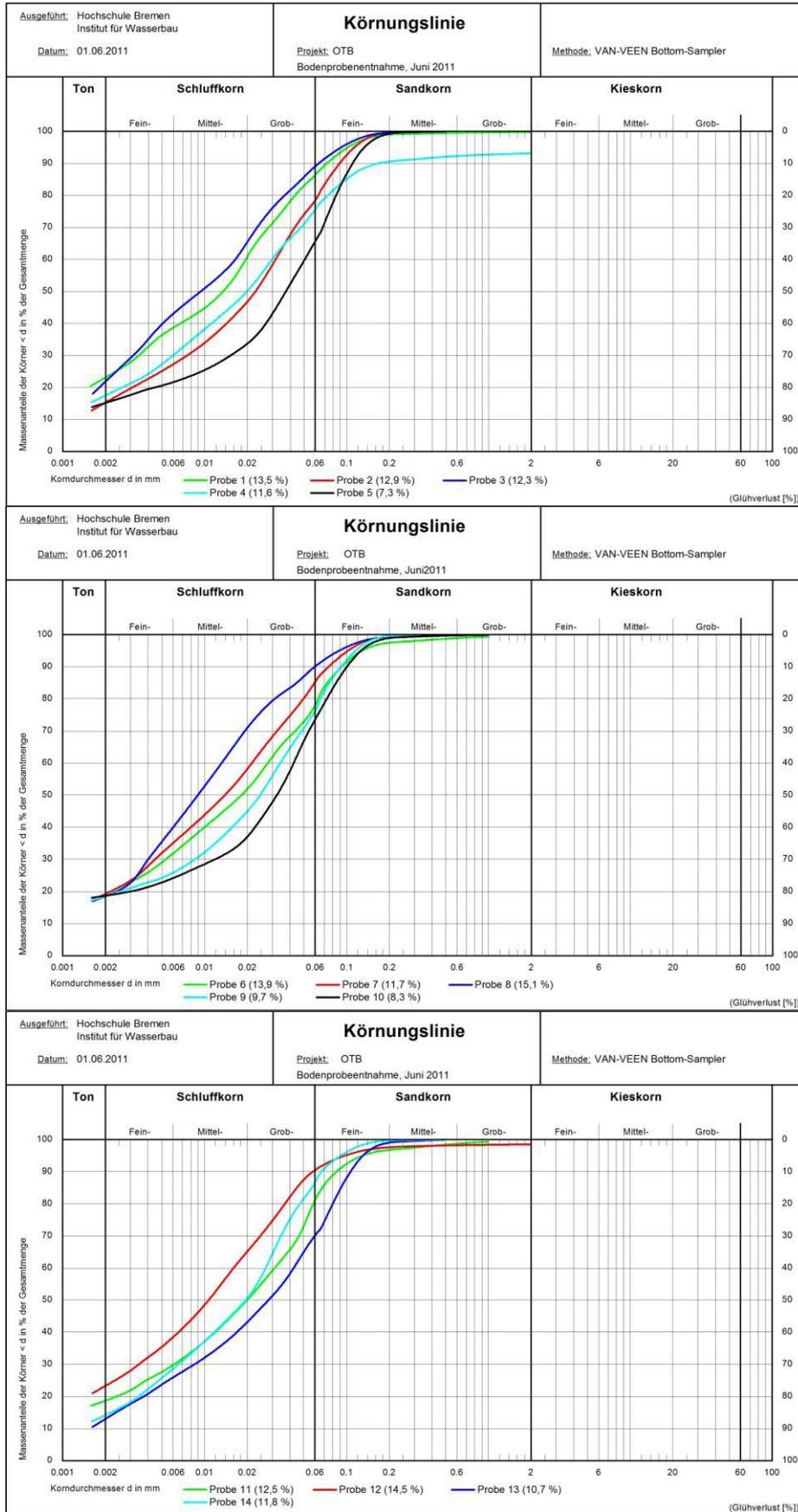


Abb. 8: Körnungslinien und Glühverluste (Entnahmestellen siehe Abb. 7)

## 8. Zusammenfassung und Schlussbemerkungen

Im Brackwasserbereich des Blexer Bogens herrschen komplexe Strömungsverhältnisse. Die Flut- und Ebbeströmungen werden im Bereich des geplanten Offshore Terminals (OTB) entscheidend durch die im Tiderhythmus veränderlichen Salzgehalte bestimmt.

Bei hohen Binnenabflüssen in das Tidegebiet dominieren die Ebbeströmungen. Verstärkte Sedimentationen der Schifffahrtsrinne oberhalb Strom-km 62 sind die Folge (Abb. 2). Der Zustand nach erfolgter Baggerung in der Fahr Rinne bis Strom-km 64,5 ist in Abb. 3 wiedergegeben. Die bei niedrigem Oberwasser der Weser im Sommer 2010 dominierenden Flutströmungen haben die größeren Wassertiefen in den tiefen Rinnen vor dem OTB und oberhalb davon geschaffen.

Mit den bei niedrigem Oberwasser im Frühjahr 2011 ausgeführten ADCP-Messungen im geplanten Terminalbereich wurde aufgezeigt, wie in der Flutstromphase die von See kommenden salzigeren Tidewassermengen die Strömungen im tiefen Wasser verstärken. Der stromauf gerichtete Sedimenttransport führt zu den größeren Sohl-tiefen in den Flutrinnen (vgl. Abb. 2 und 3).

Die ADCP-Messungen haben in Verbindung mit den Untersuchungen der veränderlichen Salzgehalte gezeigt, dass vor dem OTB im Durchflussquerschnitt während der Flutstromphase turbulente Durchmischungen der Flutwassermengen stattfinden. In der fortgeschrittenen Flutstromphase kommt es neben dem Transport der Flutwassermengen im tiefen Wasser auch zur verstärkten Einströmung über den Langlütjensand durch den östlich gelegenen Mündungstrichter. Die Schwebstofffrachten waren während der Flut- und bei einer Springtide deutlich höher als bei der Ebbemessung.

Bei ebenfalls geringen Binnenabflüssen konnte mit den Ebbestrommessungen dokumentiert werden, wie dichtebedingt im tiefen Wasser die Oberflächengeschwindigkeiten verstärkt und die Sohlströmungen durch den Brackwassereffekt geschwächt werden. Das erklärt den stromauf gerichteten Sedimenttransport. Das mit den Tidewassermengen während der Ebbestromphase abzuführende Oberwasser fließt verstärkt am Prallhang im flacheren Wasser ab. Das wurde mit Treibkörpermessungen im Bereich des geplanten OTB nachgewiesen. Trotz Nipptide wurden dort bei Ebbe größere Geschwindigkeiten registriert als während der Flutmessung. Während der Ebbemessung wurden im Querschnitt deutliche Salzgehaltsunterschiede mit den geringeren Werten am Prallhang registriert.

Stärkere Turbulenzen und Schwebstoffkonzentrationen wurden am linken Fahrwasserrand im Gleithangbereich während der Flut- und Eb bemessung ermittelt.

Abschließend bleibt folgendes anzumerken.

- Die Lage der Kaje am Prallhang des Blexer Bogens bietet nach der Erstbaggerung von Zufahrt und Liegewanne gute Voraussetzungen für ausreichende Wassertiefen. Es ist dort nicht mit übermäßigem Unterhaltungsaufwand zu rechnen.
- Die Stromkaje ist aus wasserbaulicher Sicht nicht optimal ausgerichtet, da sie bei der vorgesehenen Ausrichtung nicht parallel angeströmt wird.
- Mit strömungsgerecht ausgerichteten Leitwänden an den Terminalenden können unerwünschte Kolkbildungen oder Sedimentationen eingeschränkt werden.

---

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

Bremen, den 07.10.2011

## 9. Schrifttum

- GORDON, R. L.: Acoustic Doppler Current Profiler. Principles of Operation, second Edition for Broadband ADCPs. RD Instruments, San Diego, 1996.
- HENSEN, W.: Stromregelungen, Hafengebauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluss auf den Tideablauf  
Festschrift zum XXX. Geographentag in Hamburg, 1955.
- HOCHSCHULE BREMEN  
Institut für Wasserbau: Gutachten über die morphologischen Veränderungen in der Unterweser seit dem 9 m-Ausbau.  
Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen, 2006, unveröffentlicht.
- HOCHSCHULE BREMEN  
Institut für Wasserbau: Eigenschaften und Verhalten von Fluid Mud. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 03KIS051.  
Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen, 2009, unveröffentlicht.
- NASNER, H.: Offshore Terminal Bremerhaven.  
Studie zur Stabilität der Kolke im Blexer Bogen.  
2011, unveröffentlicht.
- NIEDERSÄCHSISCHES  
LANDESAMT FÜR  
ÖKOLOGIE (NLWKN): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Weser- und Emsgebiet 2004.  
Hildesheim 2007.

Wasser- und Schifffahrts-  
direktion (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 Hafenubau Hamburg). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2007.

WETZEL, V.:

Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute.

Jahrbuch der Hafenubautechnischen Gesellschaft, 42. Band, 1988.