

Baggerungen und wirtschaftliche Nutzung des Baggermaterials (3.1)

Umgang mit Fluid Mud in Brackwasserhäfen

Prof. Dr.-Ing. Horst Nasner
Hochschule Bremen, Institut für Wasserbau

Dipl.-Ing. Franz Westermeier
bremenports consult GmbH & Co. KG, Bremerhaven

1. Ursachen für die Entstehung von Fluid Mud

Im Brackwasserbereich von Tideflüssen kommt es in den angrenzenden Hafenbecken zu besonders hohen Sedimentationen. An der deutschen Nordseeküste ist das in Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel der Fall (Bild 1). Die Auflandungen sind dort um eine Zehnerpotenz höher als in den oberhalb des Salzwassereinflusses der Nordsee gelegenen Häfen in Bremen und Hamburg (Nasner, 1992; Christiansen u. Haar, 1996).

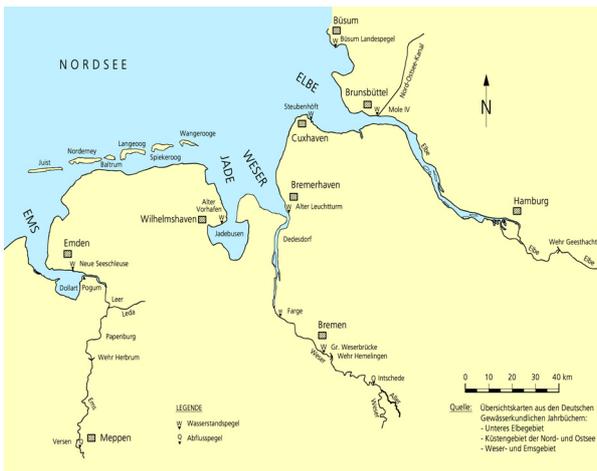


Bild 1: Lageplan

Der starke Feststoffeintrieb in die Brackwasserhäfen wird durch die Überlagerung der flutstromorientierten Walzen- und Dichteströmungen verursacht.

Die schematische Darstellung in Bild 2 beruht auf in situ Messungen in Vorhäfen an der Ems, Weser und Elbe. Sie sind in dem vom BMBF geförderten KFKI-Projekt 03 KIS 019 durchgeführt worden (Nasner, 2004). Die Sedimente werden bei Flut über die sich von den Walzen ablösenden Dichteströmungen sohlennah in die tideoffenen Hafenbecken eingetragen. Während der Ebbe sind die sich entgegengesetzt verhaltenden Walzen- und Dichteströmungen weniger intensiv. Das erklärt die positive Feststoffbilanz in den Vorhäfen.

Die mit den Strömungen in die Vorhäfen eingetragenen, überwiegend aus Schlammkornfraktionen bestehenden Sedimente, zeichnen sich durch hohe organische Anteile aus. Diese besonderen Materialeigenschaften führen dazu, dass sich Flüssigschlamm (Fluid Mud) mit Schichtdicken bis zu mehreren Metern Mächtigkeit ausbildet. In einem zur Zeit laufenden BMBF-Vorhaben (03 KIS 051) sind die Fluid Mud-Schichten im Emden Außenhafen, im Vorhafen der Doppelschleuse Bremerhaven und dem

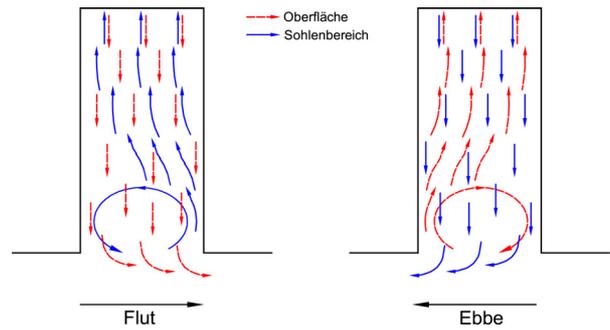


Bild 2: Überlagerung von flut- und ebbeorientiertem Strömungs- und Dichteeffekt (schematisch)

Neuen Vorhafen des Nord-Ostsee-Kanals in Brunsbüttel beprobt worden.

Im Bereich der 15 kHz Horizonte wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Glühverluste, Dichten und Feststoffgehalte ermittelt.

	Glühverlust [%]	Dichte [g/cm ³]	Feststoffe [g/l]
Außenhafen Emden	20	1,11	200
Vorhafen Doppelschleuse Bremerhaven	18	1,10	165
Neuer Vorhafen Brunsbüttel	16	1,06	193

Tabelle 1: Ergebnisse von Fluid Mud Untersuchungen

Im Labor konnte nachgewiesen werden, dass sich der Fluid Mud bei allen Proben nur sehr langsam absetzt. Die Vorgänge waren auch nach 14 Tagen noch nicht abgeschlossen. Es ist vorgesehen, mit weiteren Beprobungen auch die rheologischen Eigenschaften (Zähigkeit und Scherfestigkeit) des Flüssigschlammes zu untersuchen.

Fluid Mud ist dadurch gekennzeichnet, dass er nicht mit lages stabilen Sedimenten vergleichbar ist. Das Material konsolidiert über der festen Sohle nur sehr langsam. Wegen der geringen Dichte und Zähigkeit des überwiegend aus Wasser bestehenden Fluid Muds ist die Durchfahrbarkeit von Seeschiffen möglich. Wichtig ist dabei, dass der aerobe Zustand für die angelagerten Bakterien aufrecht erhalten bleibt. Eingehende Untersuchungen zum Phänomen Fluid Mud sind im Emden Vor- und Außenhafen durchgeführt worden (Greiser et al, 1992; Wurpts, 1997, 2003; Dasch u. Wurpts, 1999).

2. Peilplananalysen

Einen Einblick in die Fluid Mud Verhältnisse in Brackwasserhäfen ist mit der Analyse von doppelfrequenten Echolotungen möglich. Im folgenden werden für die Häfen in Emden, Bremerhaven und Brunsbüttel beispielhaft niederfrequente Peilungen (15 kHz) sowie die zugehörigen Differenzpläne und Volumen zwischen den beiden Frequenzen erläutert.

2.1 Emden

Der Vor- und Außenhafen von Emden sind tiefer ausgebaut als die Ems (Bild 3 der Anlage). Die SOLLtiefe in der Ems beträgt -8,50 m SKN.

Aus Peilplananalysen für einen zweijährigen Zeitraum ergab sich im Mittel ein Fluid Mud-Volumen für den Vor- und Außenhafen von $V_M \approx 662.000 \text{ m}^3$. Die Abweichungen von diesem Mittelwert betragen maximal weniger als 20 %, was eine hohe Stabilität der Fluid Mud-Lage bedeutet (Wurpts, 2003). Das liegt daran, dass die nautische Tiefe mit speziellen Baggermethoden in situ erhalten wird.

Für die Peilung vom April 2005 beträgt das Volumen außerhalb der Schleusen $V \approx 708.000 \text{ m}^3$ und im abgeschleusten Hafen $V \approx 852.000 \text{ m}^3$ (Bild 3 der Anlage). Vor der großen Seeschleuse und im inneren Teil des tiefer ausgebauten Außenhafens sind besonders hohe Differenzen von bis zu $\Delta h \approx 5 \text{ m}$ zu verzeichnen. Die mittlere Schichtstärke beträgt im Außenhafen $\Delta h \approx 3,40 \text{ m}$ und im Vorhafen $\Delta h \approx 2,40 \text{ m}$.

Die Fließfähigkeit des Fluid Muds in Emden wird an den Gegebenheiten im Binnenhafen deutlich. Der Flüssigschlick bewegt sich in die tieferen Bereiche. Bei den großen Sohl-tiefen (SKN > -9 m) wurden Peildifferenzen von 3 m bis 4 m dokumentiert.

2.2 Bremerhaven

• Fischereihafenschleusen

Mit den Peilungen vom Januar/Februar 2002 wird die Situation im Bereich der Zufahrt zur Doppelschleuse in Bremerhaven aufgezeigt (Bild 4 der Anlage). Der morphologische Zustand im Vorhafen ist mit Emden vergleichbar. Durch eine Barre in der Geesteeinfahrt ist kein natürliches Gefälle zur Weser gegeben (15 kHz in Bild 4).

Aus den für einen vierjährigen Zeitraum (2001/2004) analysierten Peilungen berechnet sich das mittlere Differenzvolumen im Vorhafen zu $V_M \approx 116.000 \text{ m}^3$. Auch hier handelt es sich um einen sehr stabilen Fluid Mud-Körper. Die Schwankungen um den Mittelwert betragen im Auswertungszeitraum lediglich bis zu 20 %.

Wie in Emden sind die höheren Differenzen im Bereich der größeren Wassertiefen anzutreffen. Die größten Werte liegen im Bereich des Außenhauptes der großen Schleuse mit $\Delta h > 3 \text{ m}$. Das dokumentiert die Fließfähigkeit des Flüssigschlicks. Betriebsbedingt gelangen die hochkonzentrierten Feststoffsuspensionen durch die Kammern bis in den Schleusenhafen.

• Kaiserschleuse

Die SOLLtiefe des Vorhafens der Kaiserschleuse in Bremerhaven liegt 7 m über der Ausbautiefe der Weser. Trotz des großen Geländesprungs führen die Strömungseffekte in der Einfahrt zur Barrenbildung (Bild 5 der Anlage, oben). In der Wanne des Vorhafens kommt es zur Fluid Mud Bildung mit Differenzwerten von $\Delta h > 2 \text{ m}$ (Bild 5 der Anlage, unten). Durch die ansteigende Vorhafensohle am Außenhaupt der Kaiserschleuse wird der sohlennahe, dichtestrombedingte Sedimenteintrieb und damit die Bildung von Flüssigschlick in der Kammer eingeschränkt. Das gilt auch für den tiefer gelegenen Wendeplatz. Durch die schiffser-

zeugten Strömungen werden die feinen Sedimente umgelagert.

Ganz anders sind die Randbedingungen bei der großen Kammer der Fischereihafenschleuse aufgrund der entgegengesetzten Gefälleverhältnisse (vgl. Bild 4).

• Nordschleuse

Die Sollsohle im Vorhafen der Nordschleuse liegt rd. 3 m über der Ausbautiefe der Weser. Die in Bild 6 der Anlage dargestellte Peilung vom Januar 2004 zeigt, wie durch das Sohlengefälle vom Außenhaupt der Schleuse zur Weser die Entstehung von Flüssigschlick verhindert werden kann. Damit wird der nach außen gerichtete, dichtebedingte Materialtransport in der Ebephase verstärkt. Während der Flutstromphase gelangen weniger Feststoffe in den Vorhafen. Deshalb sind im Differenzplan auch keine nennenswerten Höhen im Vorhafen und der Schleusen-kammer zu verzeichnen.

Die größeren Werte im Wendebecken am Binnenhaupt bis über 1,5 m sind auf örtliche Umlagerungen durch Schraubstrahlströmungen bei den häufigen Schleusungen von Seeschiffen zurückzuführen.

In den Vorhäfen von Bremerhaven wird die Unterhaltung seit 1994 mit Wasserinjektionen durchgeführt; wie in Emden wird der aerobe Zustand und damit die Navigierbarkeit der Schiffe aufrecht erhalten (KSN-Methode, Keep Sediment Navigable). Offenbar begünstigen Barren in den Hafeneinfahrten die Fluid Mud Bildung in den Vorhäfen. Das vorstehende Beispiel für die Nordschleuse zeigt, dass bei einem durchgehenden Sohlengefälle vom Außenhaupt zum Tidestrom kein Flüssigschlick entsteht (KSO-Methode, Keep Sediment Out).

2.3 Brunsbüttel

Die Vorhäfen zum Nord-Ostsee-Kanal in Brunsbüttel sind ebenfalls durch Barren von der tiefer ausgebauten Elbe getrennt (Bild 7 der Anlage). Aus Peilplananalysen von 2003 bis 2005 wurden für den Neuen Vorhafen ein durchschnittliches Differenzvolumen zwischen den 100 kHz und den 15 kHz Horizonten von $V_M \approx 337.000 \text{ m}^3$ und für den kleineren, weniger tief ausgebauten Alten Vorhafen von $V_M \approx 121.000 \text{ m}^3$ ermittelt. Die Abweichungen von den Mittelwerten sind etwas höher als in den Revieren von Emden und vor der Doppelschleuse in Bremerhaven. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die Unterhaltung der Vorhäfen in Brunsbüttel mit konventionellen Baggergeräten durchgeführt wird.

Die Fließeigenschaften des Fluid Muds führen auch in den Elbevorhäfen dazu, dass sich die stärksten Mächtigkeiten (Differenzen) dort einstellen, wo die 15 kHz-Peilungen die größten Sohl-tiefen ausweisen (Bild 7, unten). Dieses Ergebnis ist für die vorstehend betrachteten Brackwasserhäfen an der Deutschen Nordseeküste allgemein gültig.

3. Zusammenfassung

Die Fluid Mud Bildung wird in den Brackwasserhäfen aufgrund der durch Strömungseffekte hervorgerufenen Barrenbildung in den Hafeneinfahrten begünstigt. Der Flüssigschlick zeichnet sich durch hohe organische Bestandteile, geringe Sinkgeschwindigkeiten, Dichte und Zähigkeiten aus. Den hydrodynamischen Randbedingungen überlagern sich mikrobiologische Vorgänge.

Die an die Schwebstoffe angelagerten Bakterien erzeugen Schleime, die die Sedimentation und Konsolidierung der hochkonzentrierten Suspensionen verhindern. Solange der aerobe Zustand des Fluid Muds erhalten bleibt, bleibt die Durchfahrbarkeit mit Schiffen gewährleistet.

Im Emden Vor- und Außenhafen wird das mit speziellen Baggermethoden (selektive Baggerungen, WURPTS, 2003) erreicht. In Bremerhaven wird die Sauerstoffzufuhr mit Wasserinjektionen durchgeführt.

Mit der Einführung dieser innovativen Unterhaltungsmethoden wird die nautische Tiefe erhalten (Keep Sediment Navigable, KSN).

Das hat zu erheblichen Kosteneinsparungen geführt. Gegenüber konventionellen Baggerungen entfällt die aufwendige Umlagerung des Baggerguts oder die Verbringung in Spülfeldern.

Die Fließeigenschaften von Fluid Mud führen dazu, dass sich die hochkonzentrierten Feststoffe zu den tiefer gelegenen Bereiche hin bewegen. Am Beispiel des Vorhafens zur Nordschleuse in Bremerhaven konnte gezeigt werden, wie die Fluid Mud Bildung bei einem Sohlgefälle vom Außenhaupt der Seeschleuse zum Tidestrom verhindert werden kann (Keep Sediment Out, KSO).

Schließlich sei noch erwähnt, dass mit den Methoden in Emden und Bremerhaven die Sedimente im Tideregime verbleiben (Keep Sediment in the System, KSS) und mit dem Sauerstoffeintrag schadstoffbelastete Sedimente positiv beeinflusst werden.

Literatur

CHRISTIANSEN, H. UND HAAR, S.: Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken - Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1995 -, Gewässerkundliche Studie Nr. 15 Strom- und Hafengebäude Hamburg, Referat Gewässerkunde, 1996

GREISER, N., GRESIKOWSKI, S. UND HARMS, H.: Feststofftransport und Verschlickung im Emden Hafen, Universität Hamburg, Institut für allgemeine Botanik - Abteilung Mikrobiologie - 1992, -unveröffentlicht-

NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen, Die Küste, Heft Nr. 53, 1992

NASNER, H.: Hydrodynamische und morphologische Verhältnisse in brackwasserbeeinflussten Häfen - In situ Messungen, Die Küste, Heft Nr. 68, 2004

WURPTS, R.: Zur Frage der Bestimmung der nautischen Sohle von Fluid Mud am Beispiel des Emden Hafens, Tagungsband HTG-Kongress '97 Bremen, 24.-27.09.97

WURPTS, R.: 15 Jahre Erfahrung mit fluid mud Bestimmung der nautischen Sohle durch rheologische Parameter, Hansa 140. Jg. Nr. 9 und 10, 2003

WURPTS, R.: Hyperconcentrated flow - Reduzierter Unterhaltungsaufwand bei Berücksichtigung der Fließfähigkeit des Baggergutes - HANSA 142. Jg., Nr. 9, 2005

Verfasser

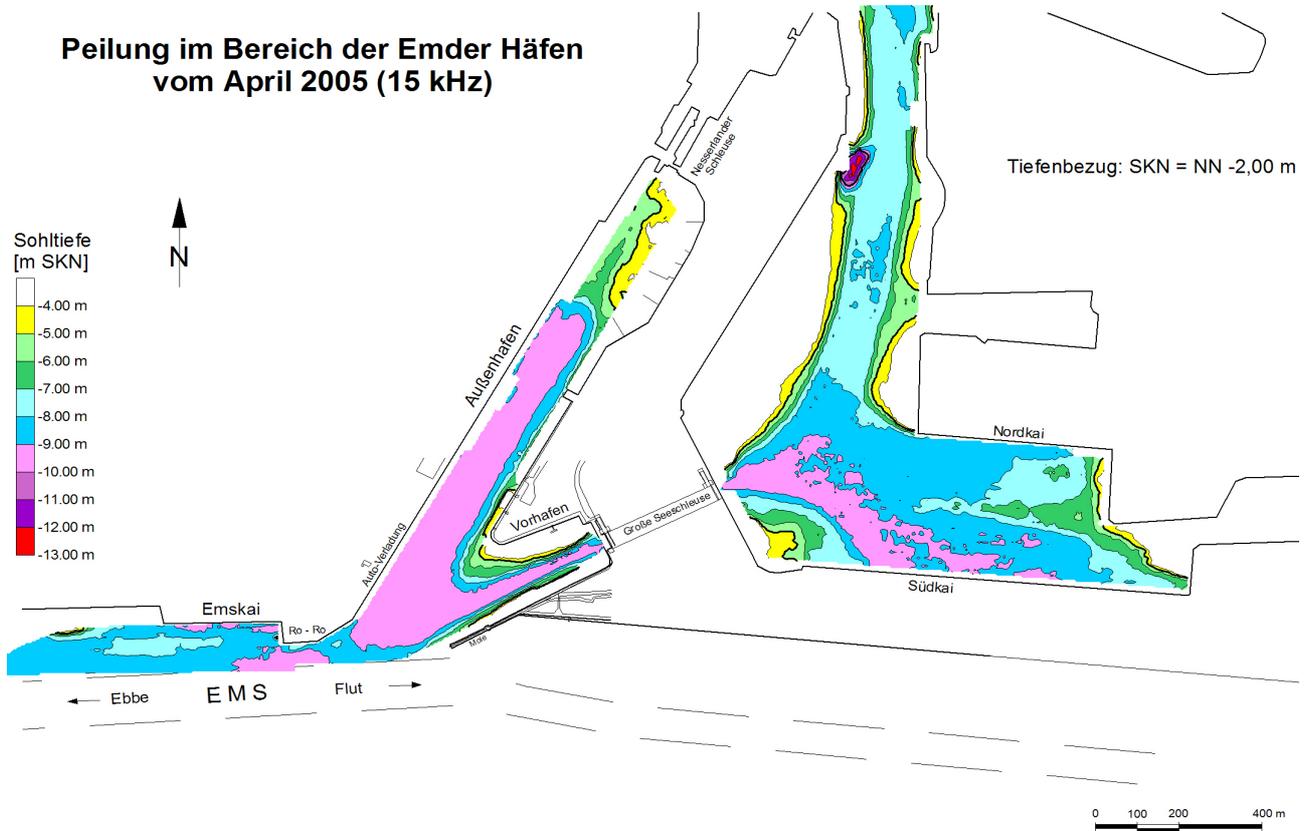
Prof. Dr.-Ing. Horst Nasner
Institut für Wasserbau
Hochschule Bremen
Neustadtswall 30, 28199 Bremen
Tel.: 0421 5905 – 2313
E-Mail: hnasner@fbb.hs-bremen.de

Dipl.-Ing. Franz Westermeier

Baggerei
bremenports dredging GmbH
Elbinger Platz 1, 27570 Bremerhaven
Tel.: 0471 596 – 10 488
E-Mail: franz.westermeier@bremenports.de

Umweltfragen (3)
Umgang mit Fluid Mud in Brackwasserhäfen

Anlage



**Differenzplan im Bereich der Emdener Häfen
zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont
Peilung vom April 2005**

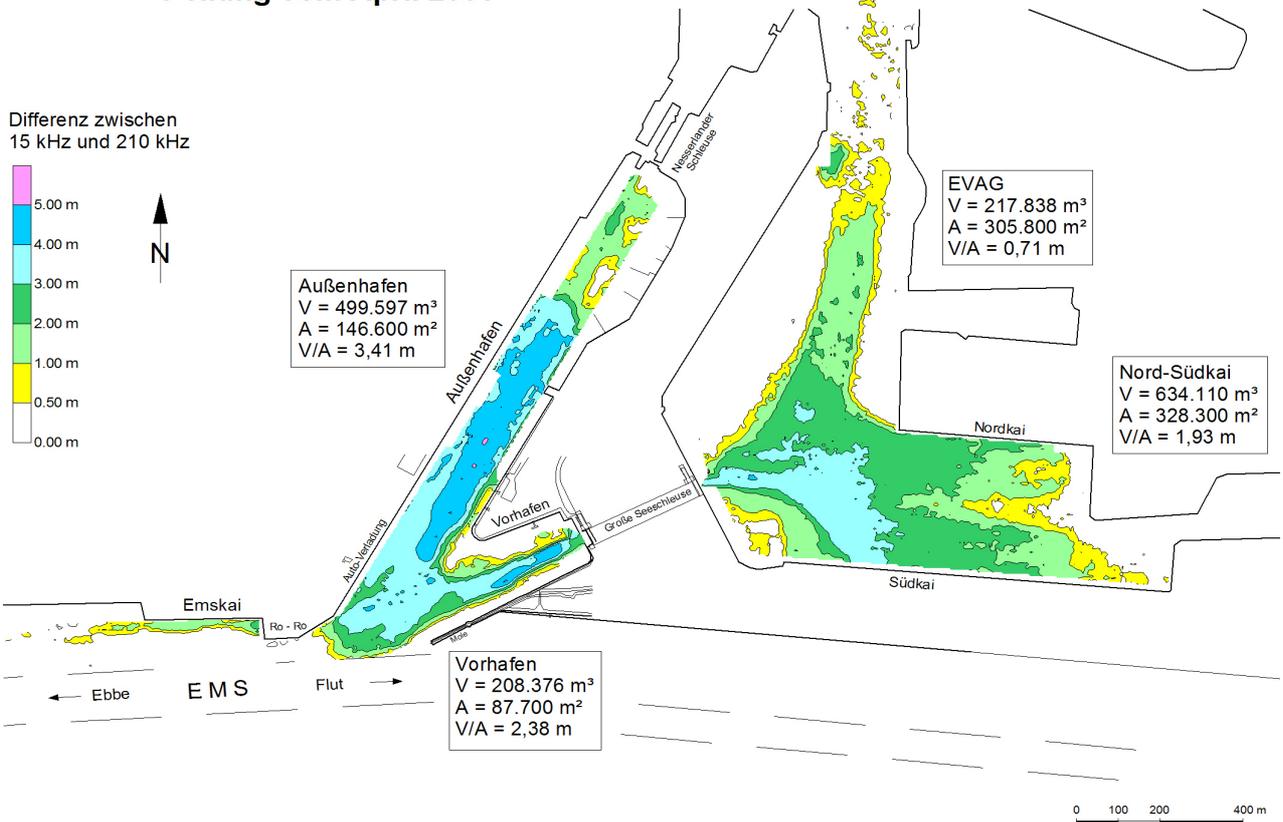
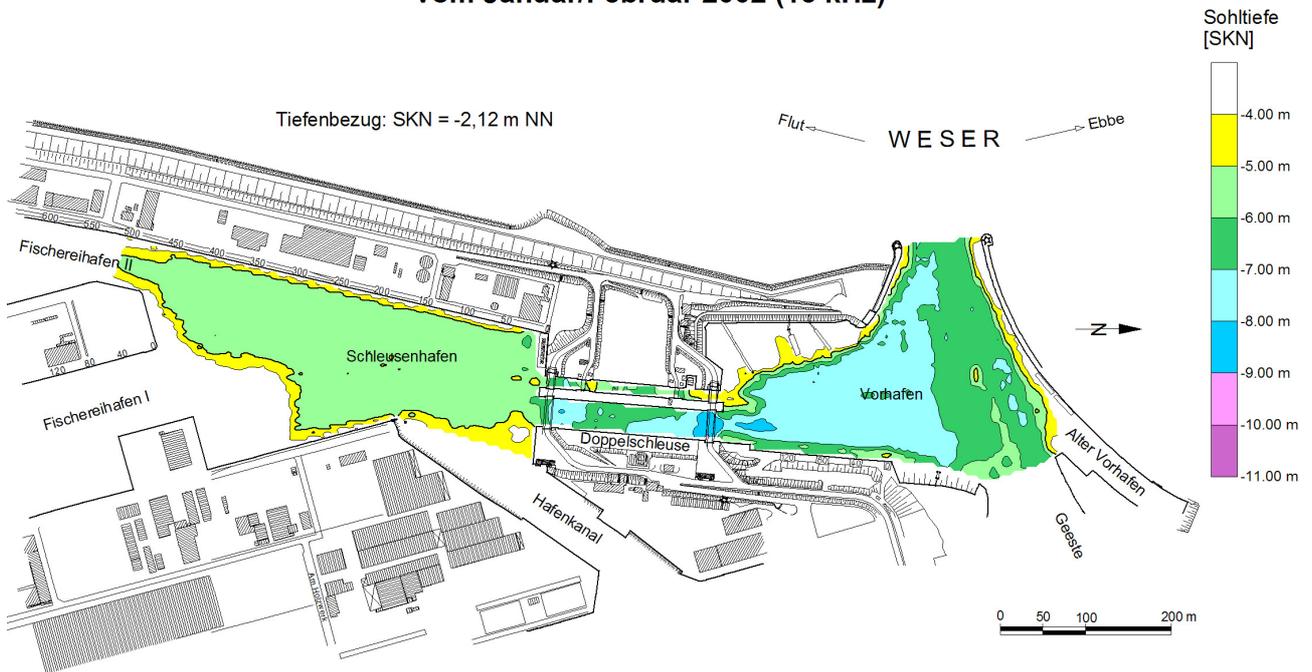


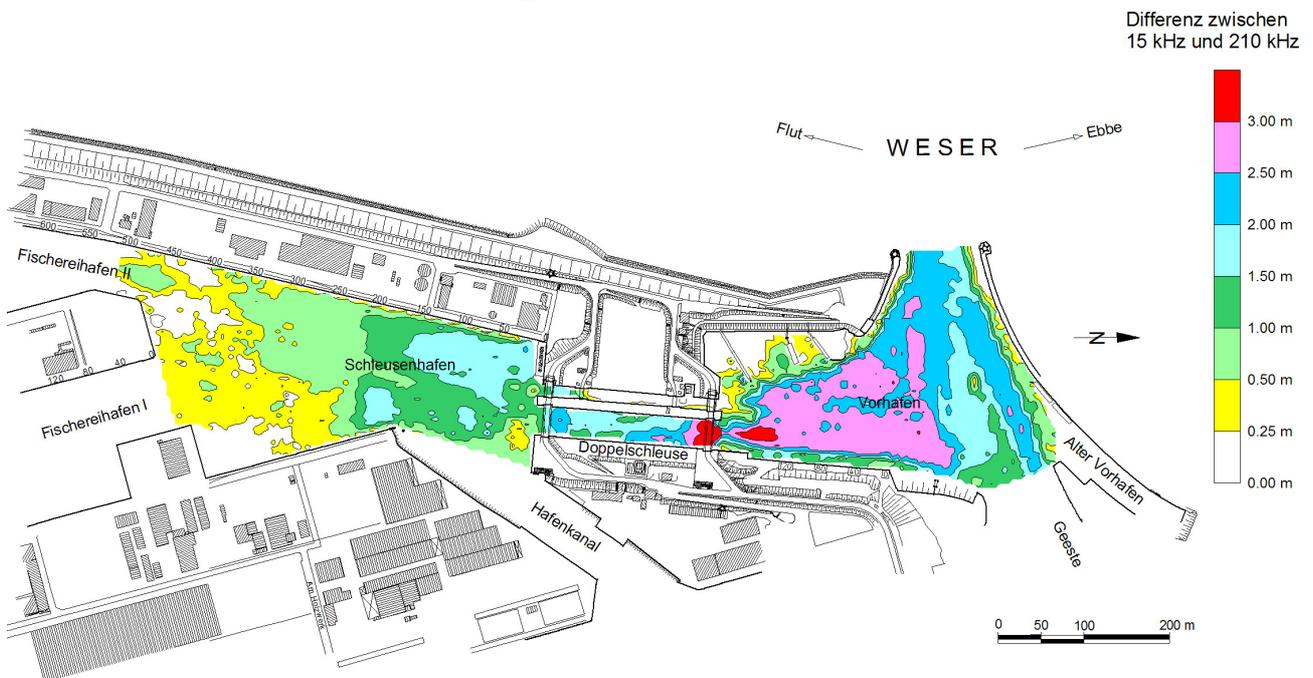
Bild 3: Peilung im Bereich der Emdener Häfen (15 kHz) vom April 2005 und Differenzplan

Anlage

Peilung im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven vom Januar/Februar 2002 (15 kHz)



Differenzplan im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven zwischen dem 15 kHz- und 210 kHz-Horizont Peilungen vom Januar/Februar 2002



Schleusenhafen
V = 60.180 m³
A = 75.588 m²
V/A = 0,80 m

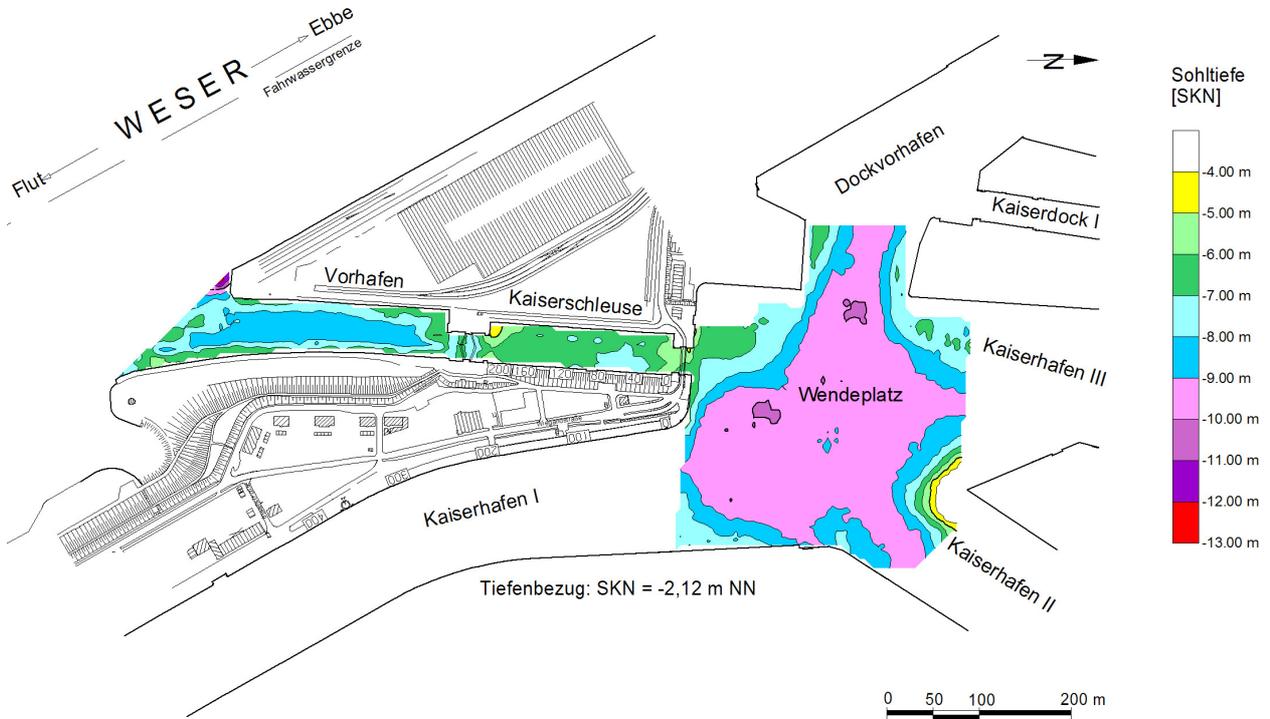
Gr. Kammer
V = 16.106 m³
A = 7.446 m²
V/A = 2,16 m

Vorhafen
V = 128.564 m³
A = 67.225 m²
V/A = 1,91 m

Bild 4: Peilung im Bereich der Doppelschleuse in Bremerhaven (15 kHz) vom Januar/Februar 2002 und Differenzplan

Anlage

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

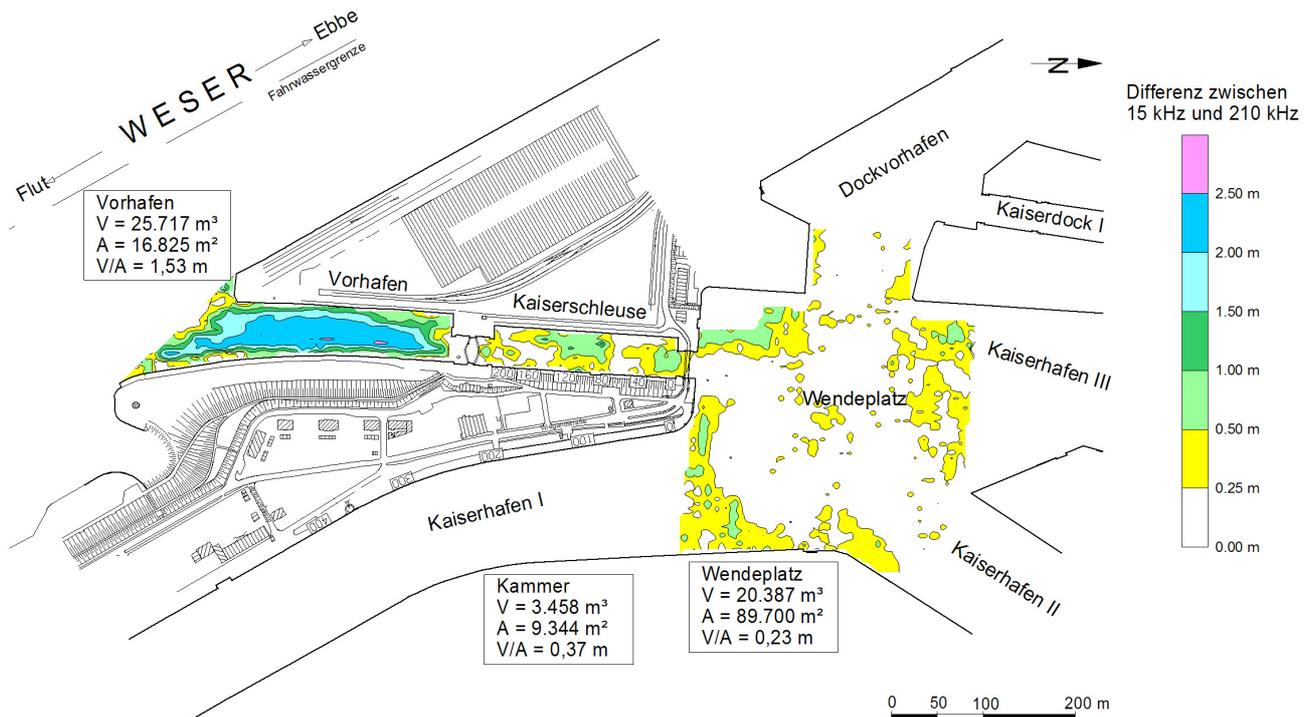
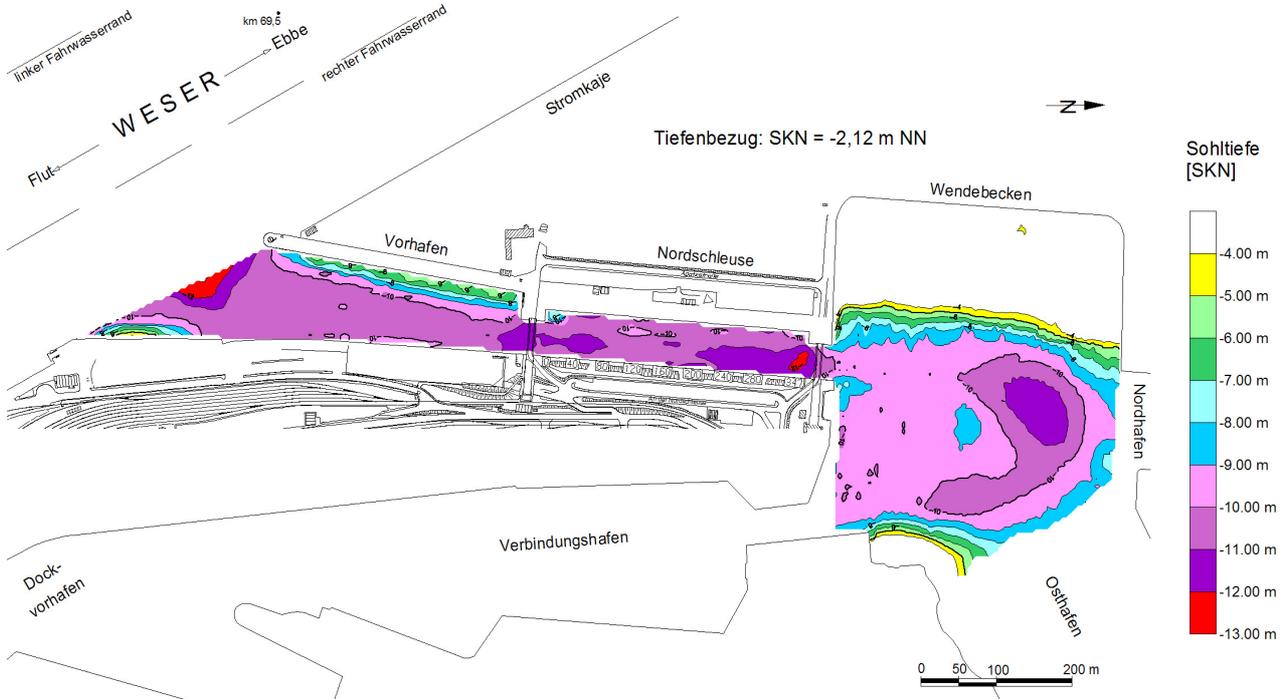


Bild 5: Peilung im Bereich der Kaiserschleuse in Bremerhaven (15 kHz) vom Mai 2002 sowie Differenzplan

Anlage

**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**

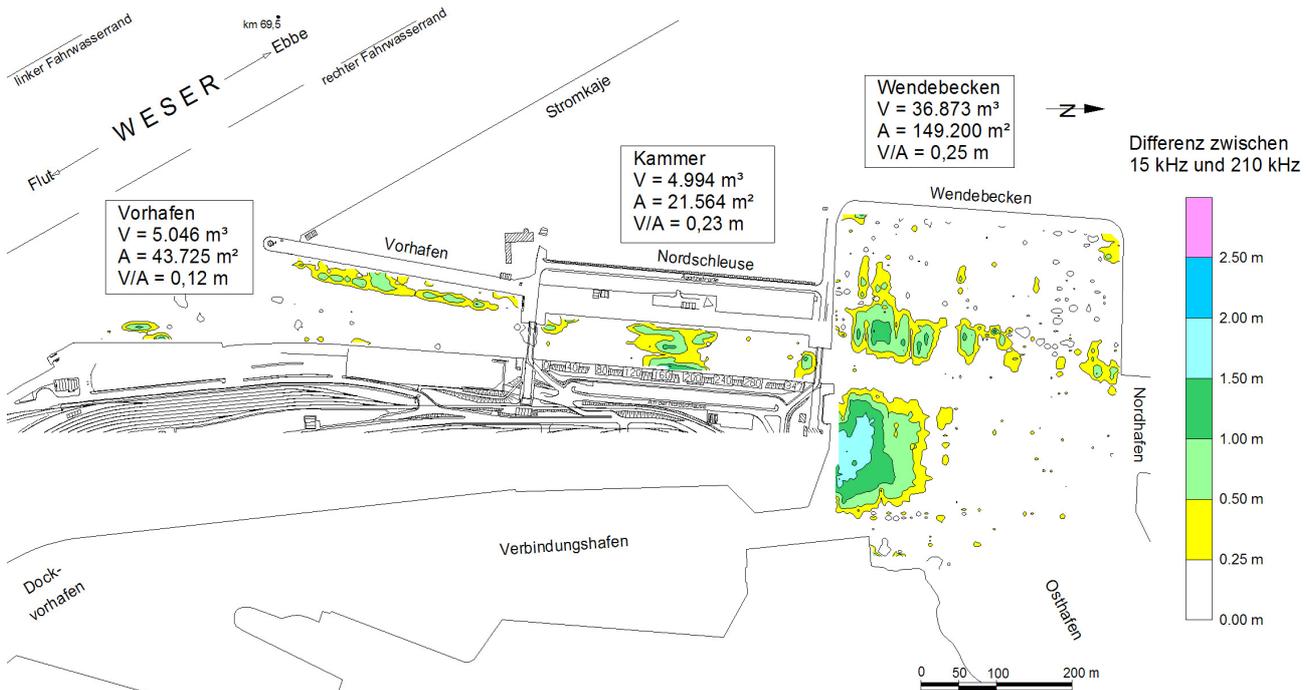
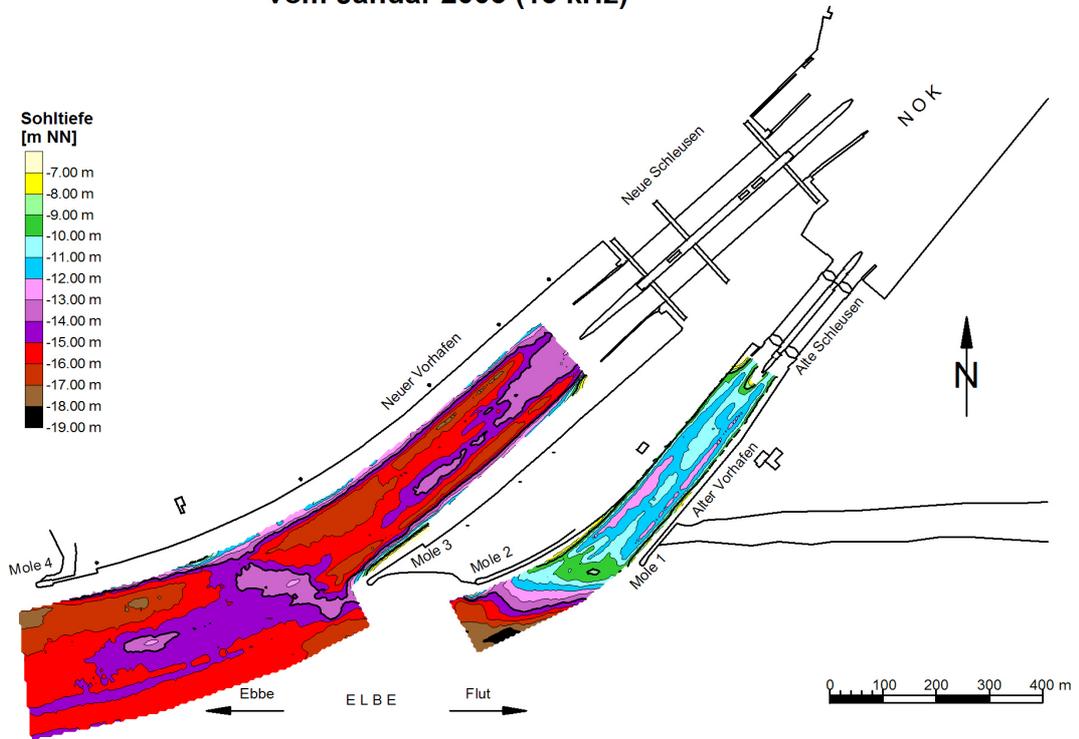


Bild 6: Peilung im Bereich der Nordschleuse in Bremerhaven (15 kHz) vom Januar 2004 sowie Differenzplan

Anlage

**Peilung im Bereich der Vorhäfen in Brunsbüttel
vom Januar 2003 (15 kHz)**



**Differenzplan im Bereich der Vorhäfen in Brunsbüttel
zwischen dem 15 kHz- und 100 kHz-Horizont
Peilung vom Januar 2003**

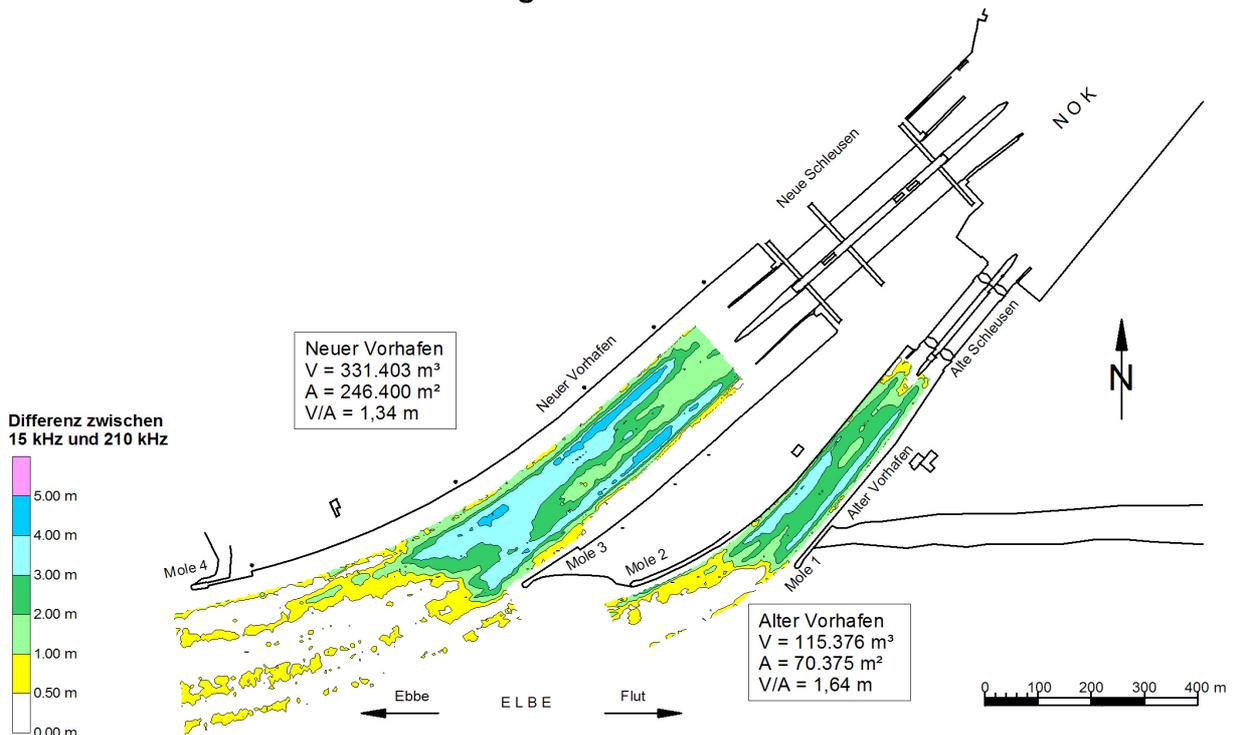


Bild 7: Peilung im Bereich der Vorhäfen in Brunsbüttel (15 kHz) vom Januar 2003 sowie Differenzplan