

## Das Projekt „Nautische Tiefe“

im Hamburger Hafen

Das Projekt Nautische Tiefe im Hamburger Hafen und seine hydroakustischen Herausforderungen

Nino Ohle, Thomas Thies, Jan Dlugosch, Ulrich Schmekel

Online-Vortrag im Rahmen des DHyG Hydrographentages „light“ 2021 am 08.06.2021

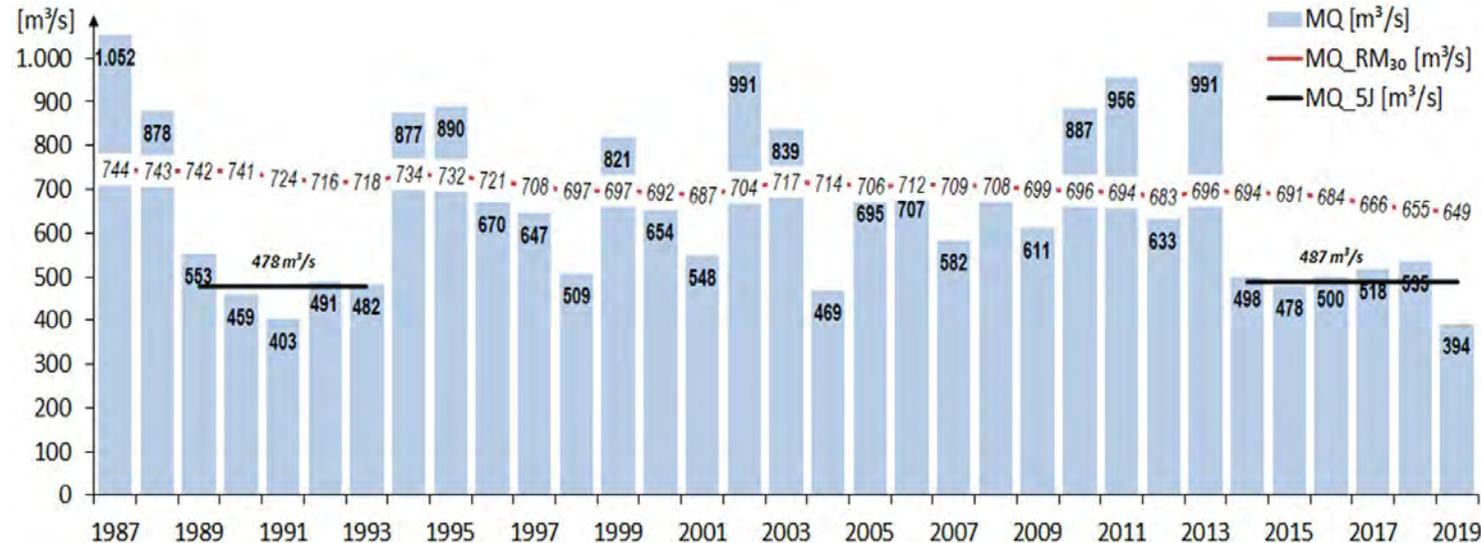


*“The nautical depth is the level where physical characteristics of the bottom reach a critical limit beyond which contact with a ship’s keel causes either damage or unacceptable effects on controllability and maneuverability.”*

**“Als nautische Tiefe wird derjenige Horizont bezeichnet, von dem ab die physikalischen Eigenschaften des Bodens einen kritischen Grenzwert erreichen, jenseits dessen eine Grundberührung des Schiffskiels entweder Schäden am Schiff oder nicht tolerierbare Wirkungen auf die Steuerbarkeit und Manövrierfähigkeit eines Schiffes verursachen.“**



- Extrem niedrige Oberwasserzuflüsse (Klimawandel), die seit 8 Jahren anhalten
- Mehr Sedimente gelangen in den Hafen, da die Menge an Sedimenten zur Umlagerung zur Tonne E3 in der Bilanzierung nicht mehr ausreichen um den Sedimentüberschuss nachhaltig auszugleichen
- Das Ergebnis ist eine zunehmende Sedimentansammlung in Hamburg



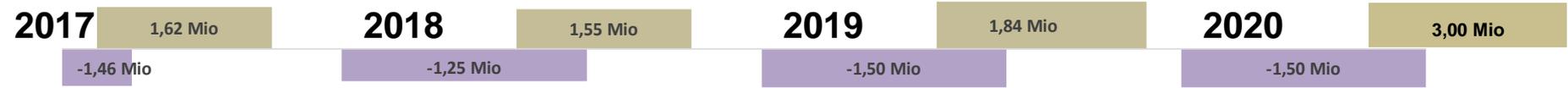
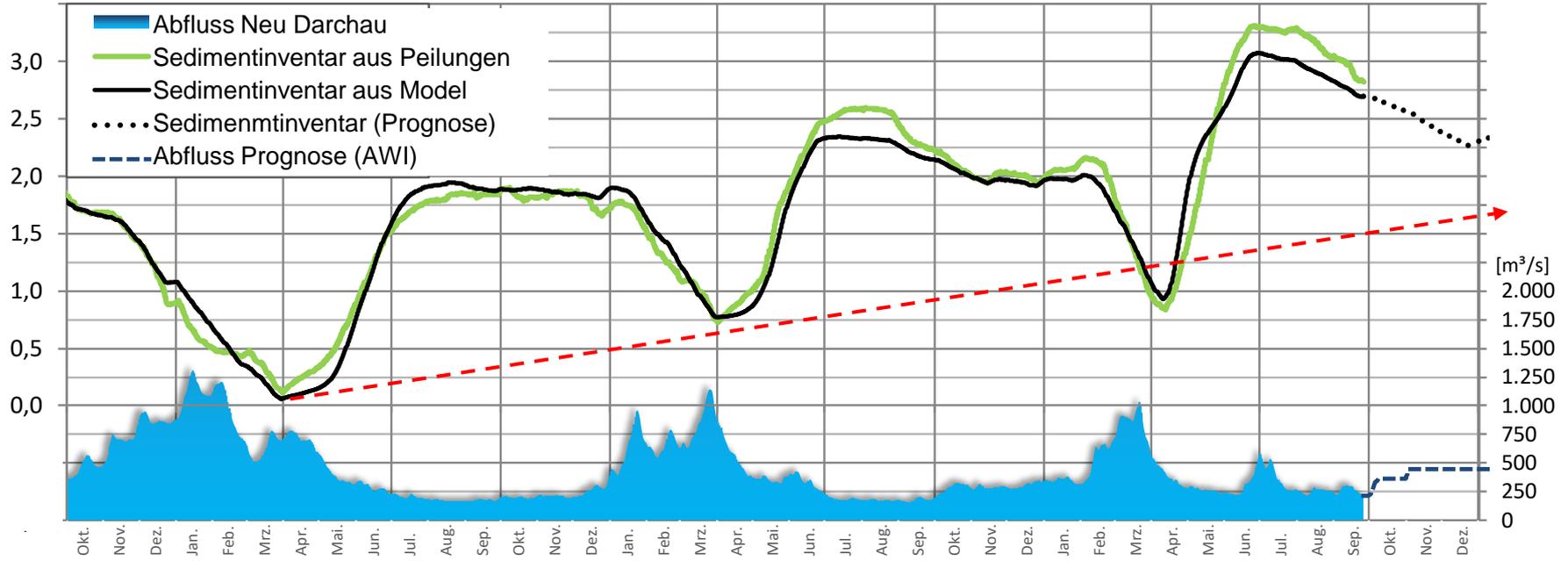
**Wenn der Abfluss von 700m<sup>3</sup>/s auf 200m<sup>3</sup>/s sinkt, dann ist die Sedimentmenge in Hamburg 5x höher!**

**Bei Abflüssen von 200 m<sup>3</sup>/s betragen die Sedimentationsraten rund 10.000 t/d!**

**Abfluss 2021 sieht glücklicherweise besser aus ....**

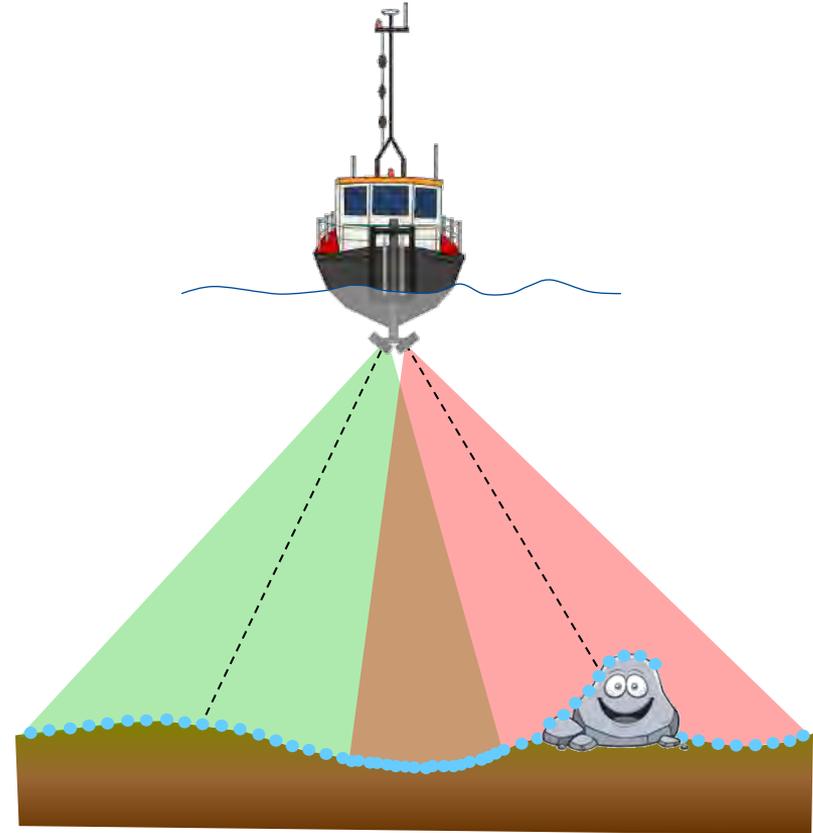
# Anwachsendes Sedimentinventar: Baggerkreisläufe aufgrund höherem Sedimenttransport und begrenztem Austrag zur Tonne E3

Mio. tTS (Tonnen Trockensubstanz)



Tonne E3 (kein Rücktransport Elbe / HH)      Neßsand / Umlagerstelle an HH's unterstromiger Grenze

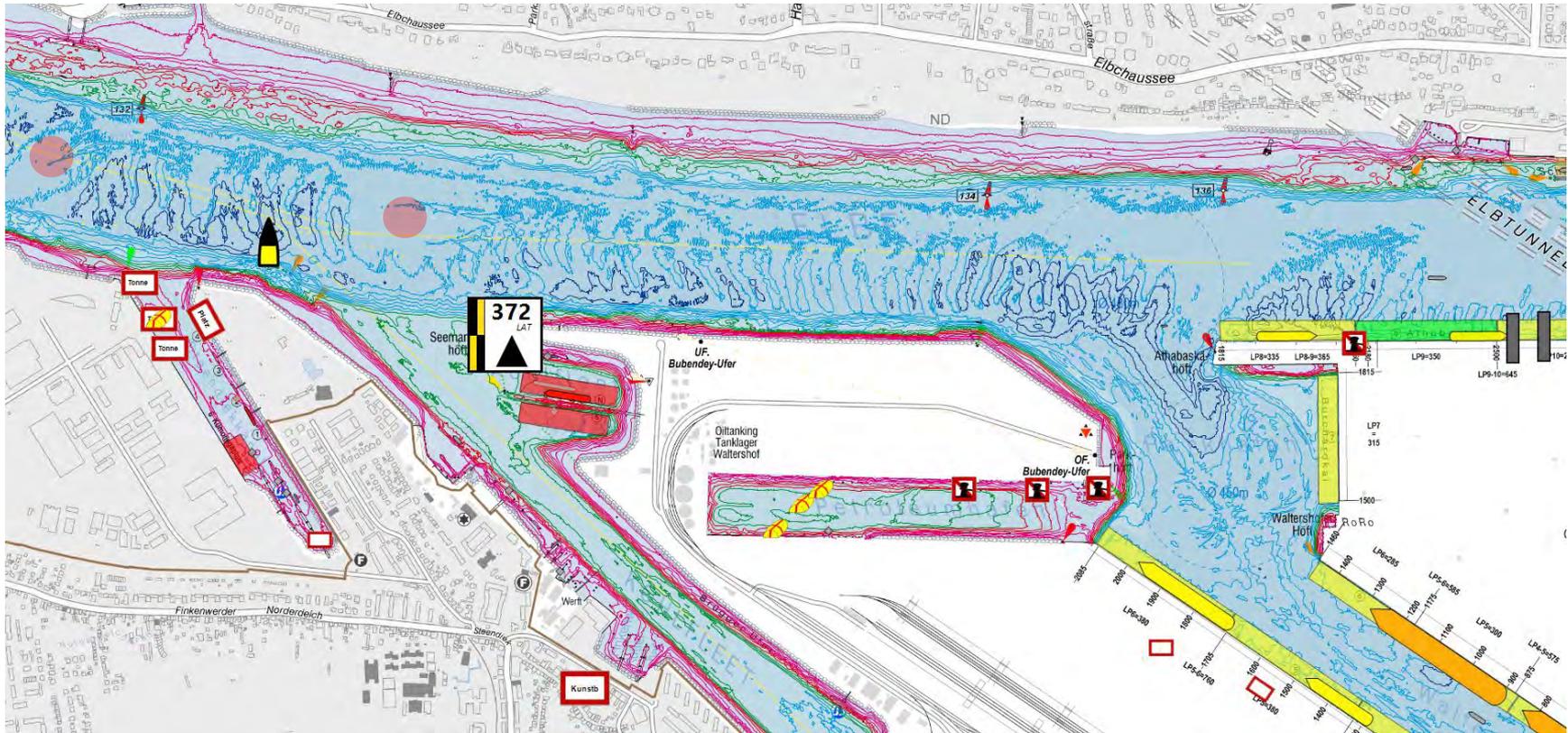
# Verkehrssicherungspeilungen basierend auf flächenhafter Fächerecholotung



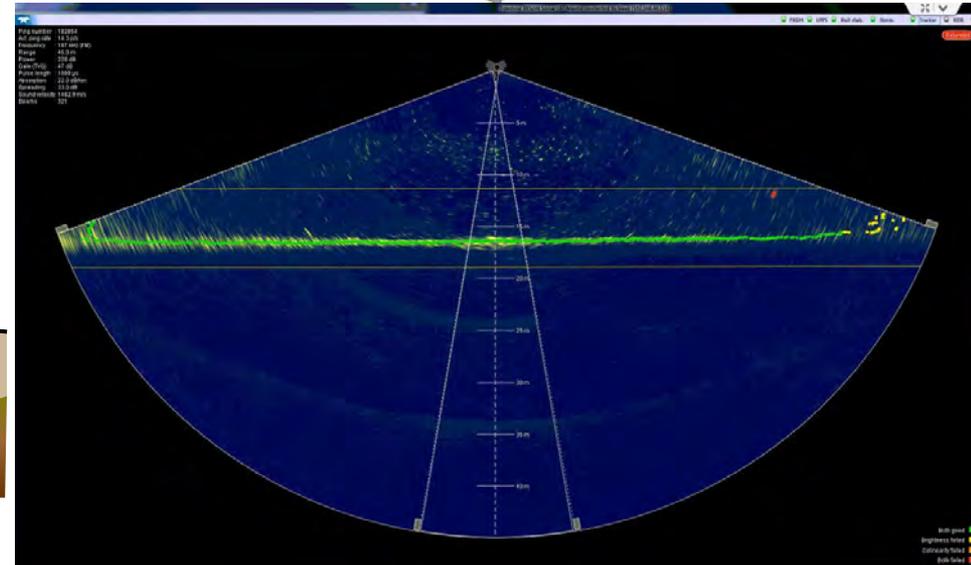
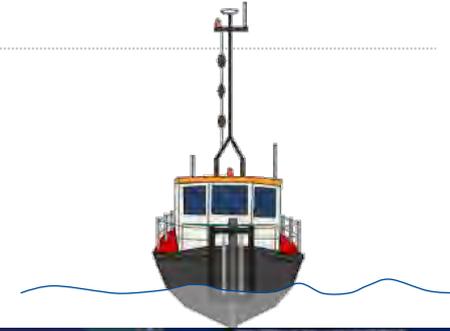
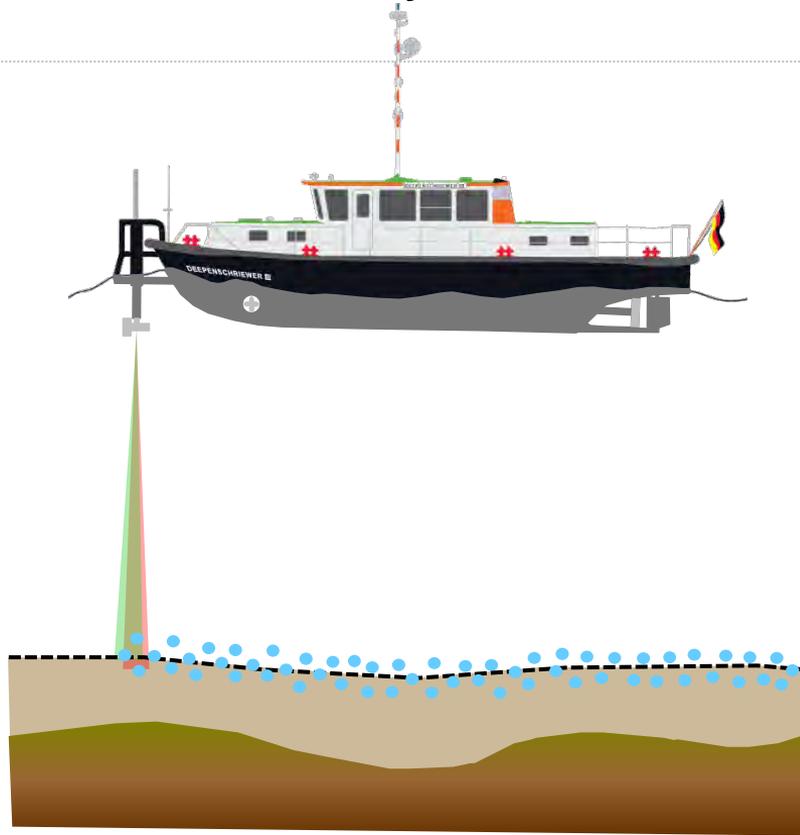
# Elektronischer Peiltisch – Prüfen von Mindertiefen am Liegeplatz



# Elektronischer Peiltisch – Prüfen von Mindertiefen in der Zufahrt



# Nautischer Horizont: Hydroakustik in „schwierigen“ Gebieten



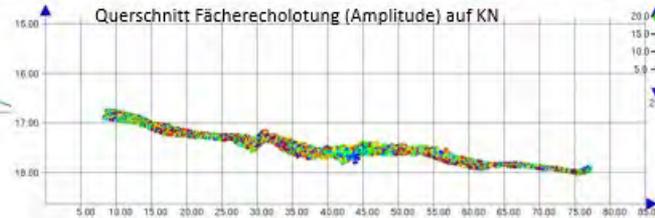
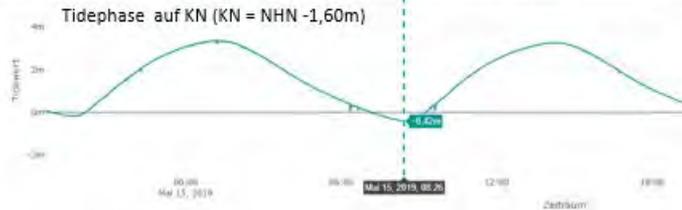
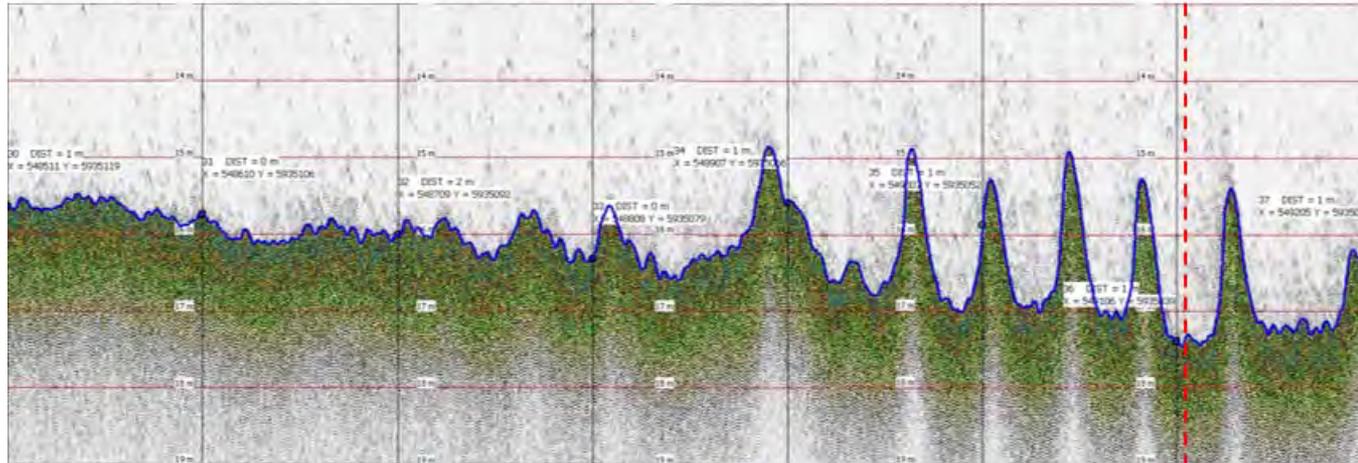


# Hydroakustik in „schwierigen“ Gebieten – Die Grenzen der Fächerecholotung

Linie 03 – 06:26UTC

Sedimentecholotung (24kHz) --- Bodendetektion auf KN  
West->Ost, --- Querschnitt Fächerecholot (240kHz)

Großschiffspassage: **Nein**

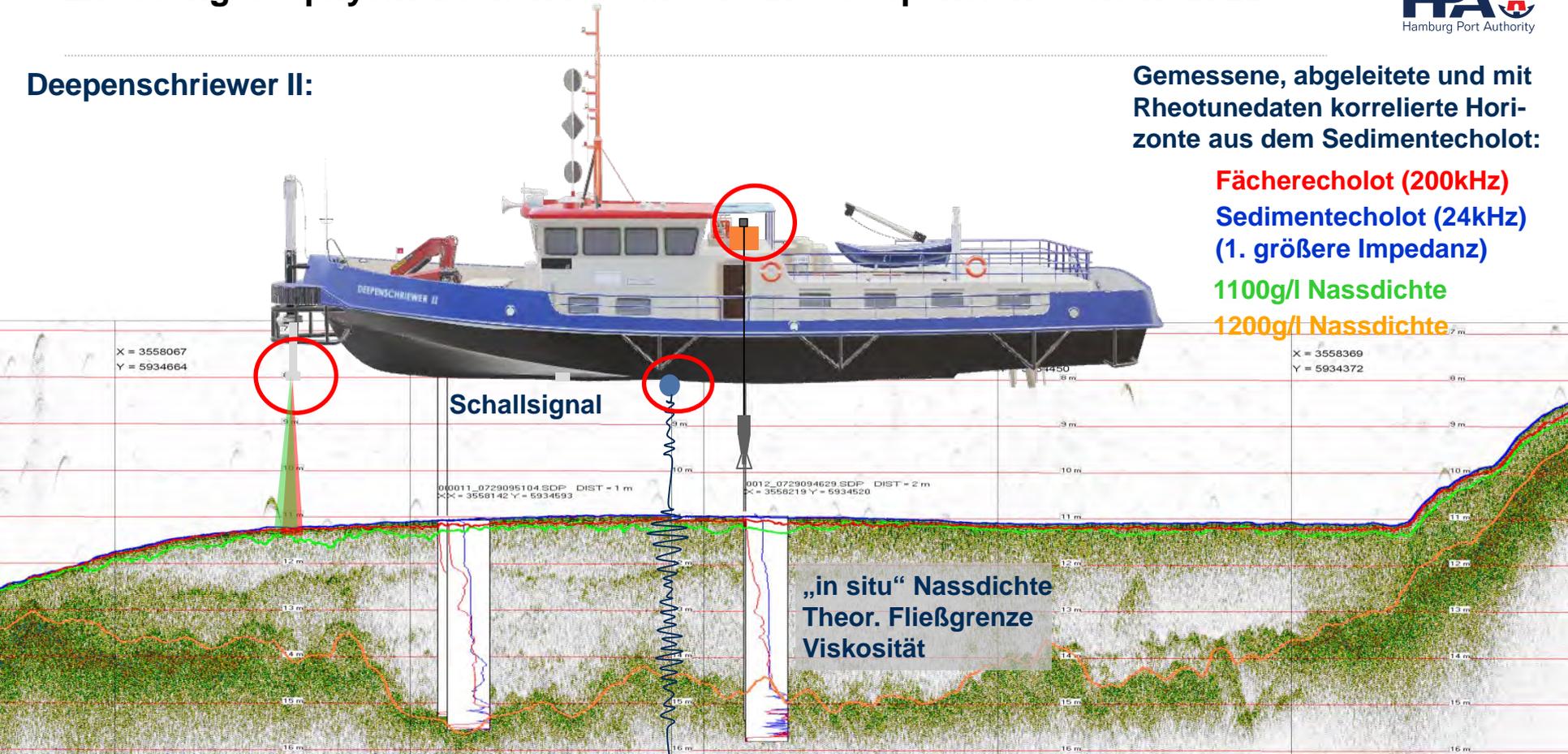


# Erfassung der physikalischen Parameter einer Suspensionsschicht in 2D

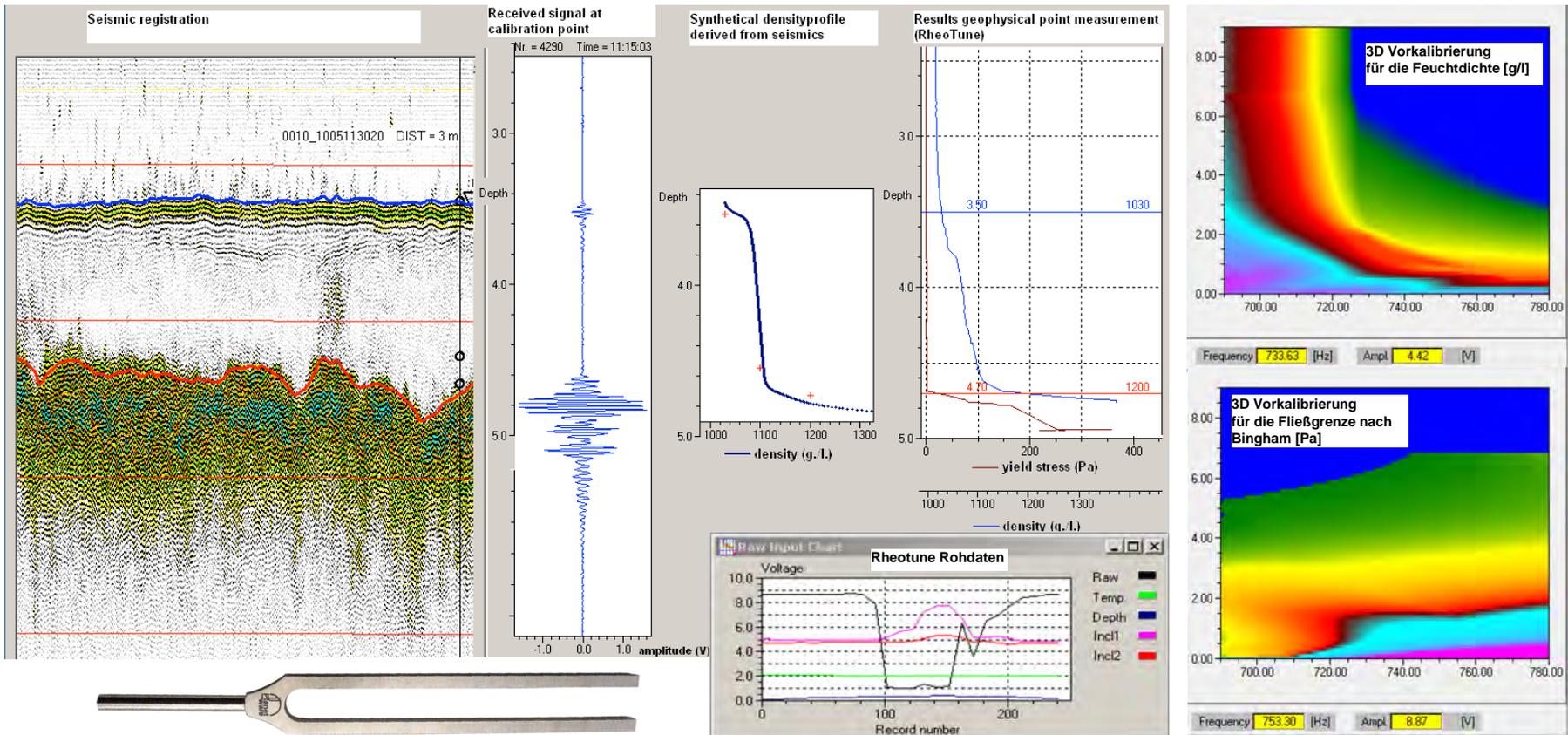
## Deepenschriewer II:

Gemessene, abgeleitete und mit Rheotunedaten korrelierte Horizonte aus dem Sedimentecholot:

- Fächerecholot (200kHz)
- Sedimentecholot (24kHz)  
(1. größere Impedanz)
- 1100g/l Nassdichte
- 1200g/l Nassdichte

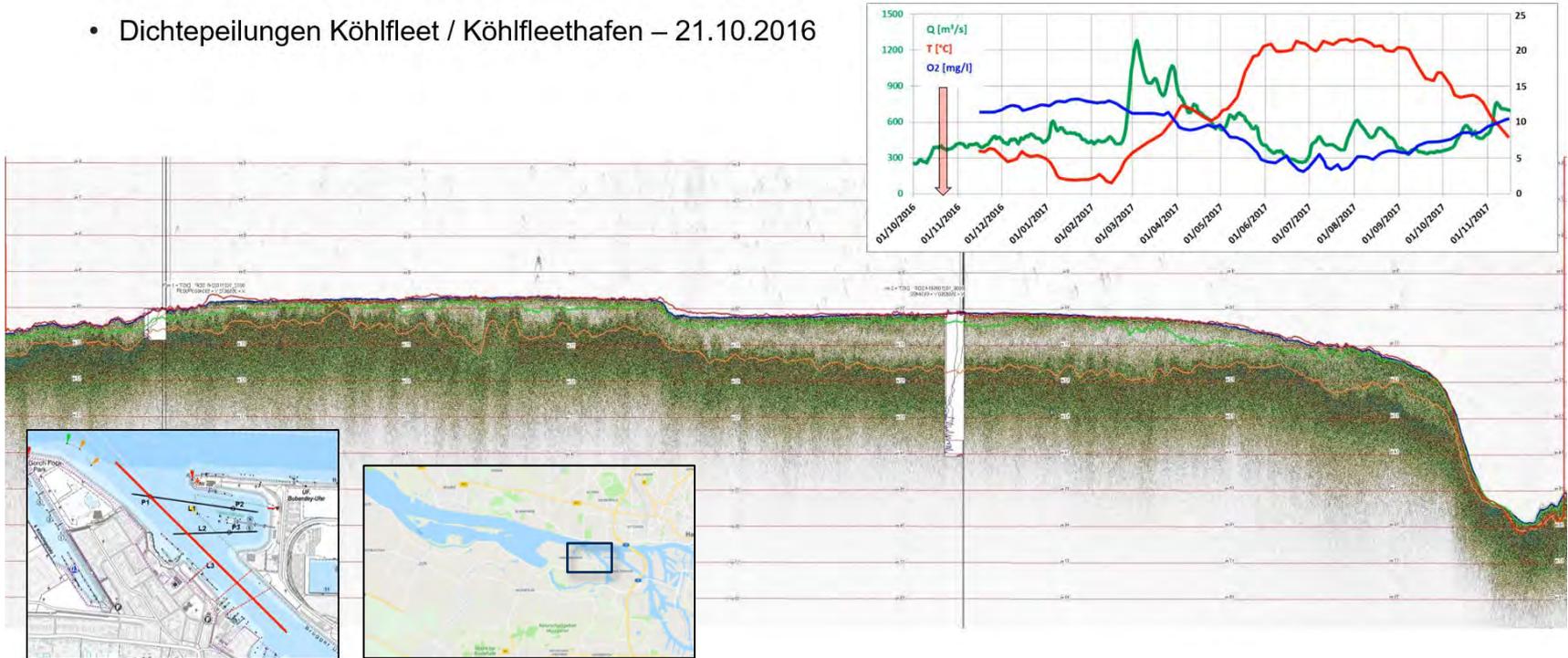


# Ableitung von physikalischen Sedimentparametern aus *in-situ* Messungen

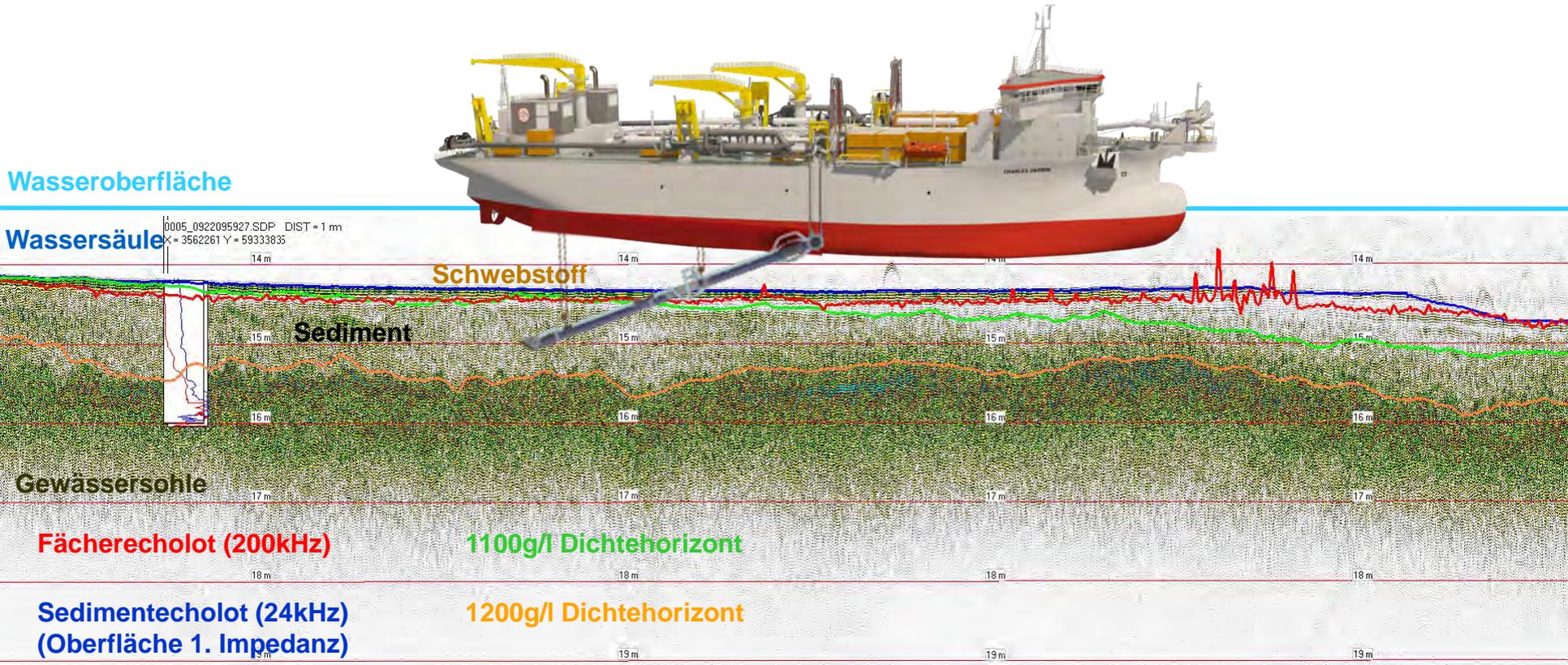


## Räumliche und zeitliche Variabilität der Sedimentation und Konsolidierung

- Dichtepeilungen Köhlfleet / Köhlfleethafen – 21.10.2016



# Hydrographische Messungen zur Optimierung der Baggersteuerung

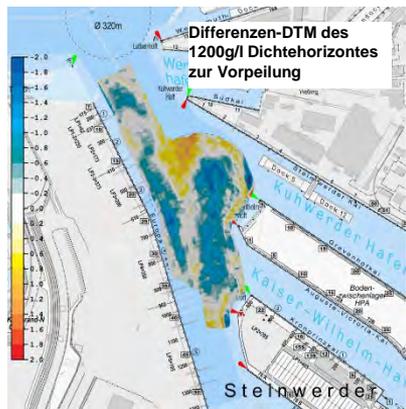
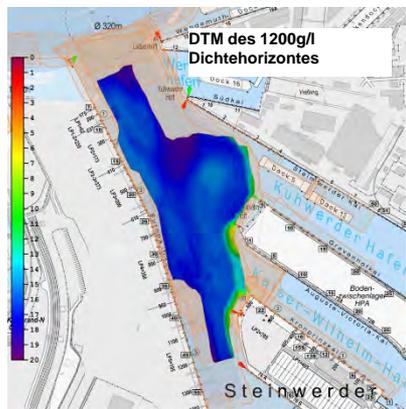
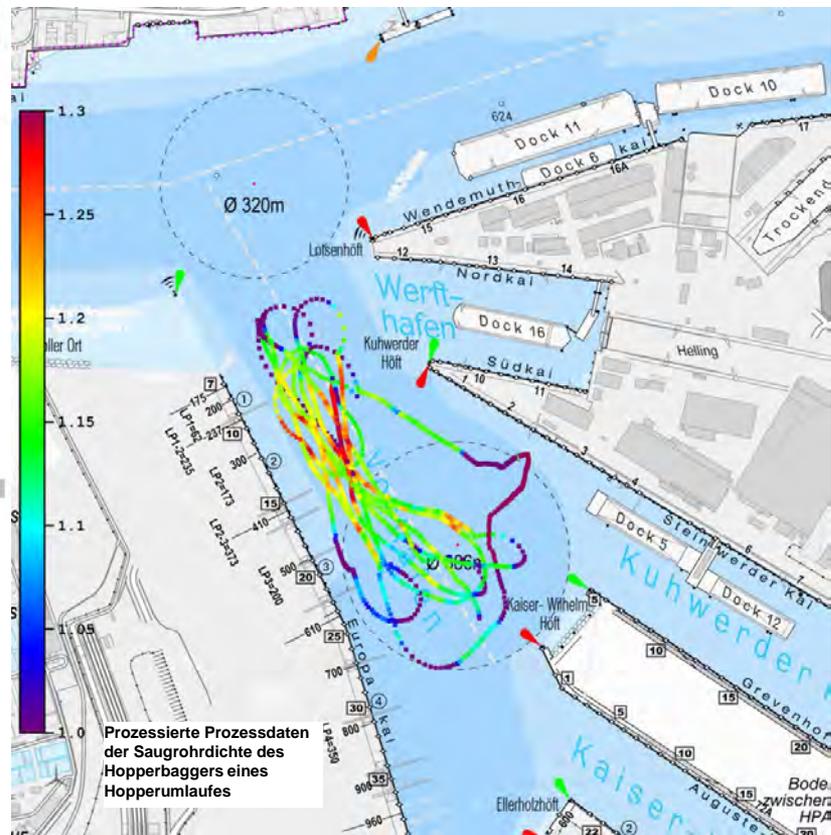
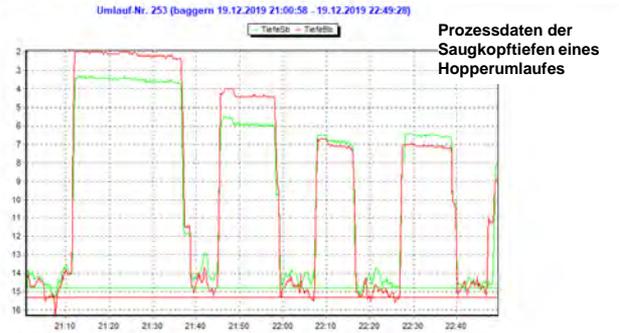


# Hydrographische Messungen zur Optimierung der Baggersteuerung

**Betriebsüberwachung Hopperbagger**

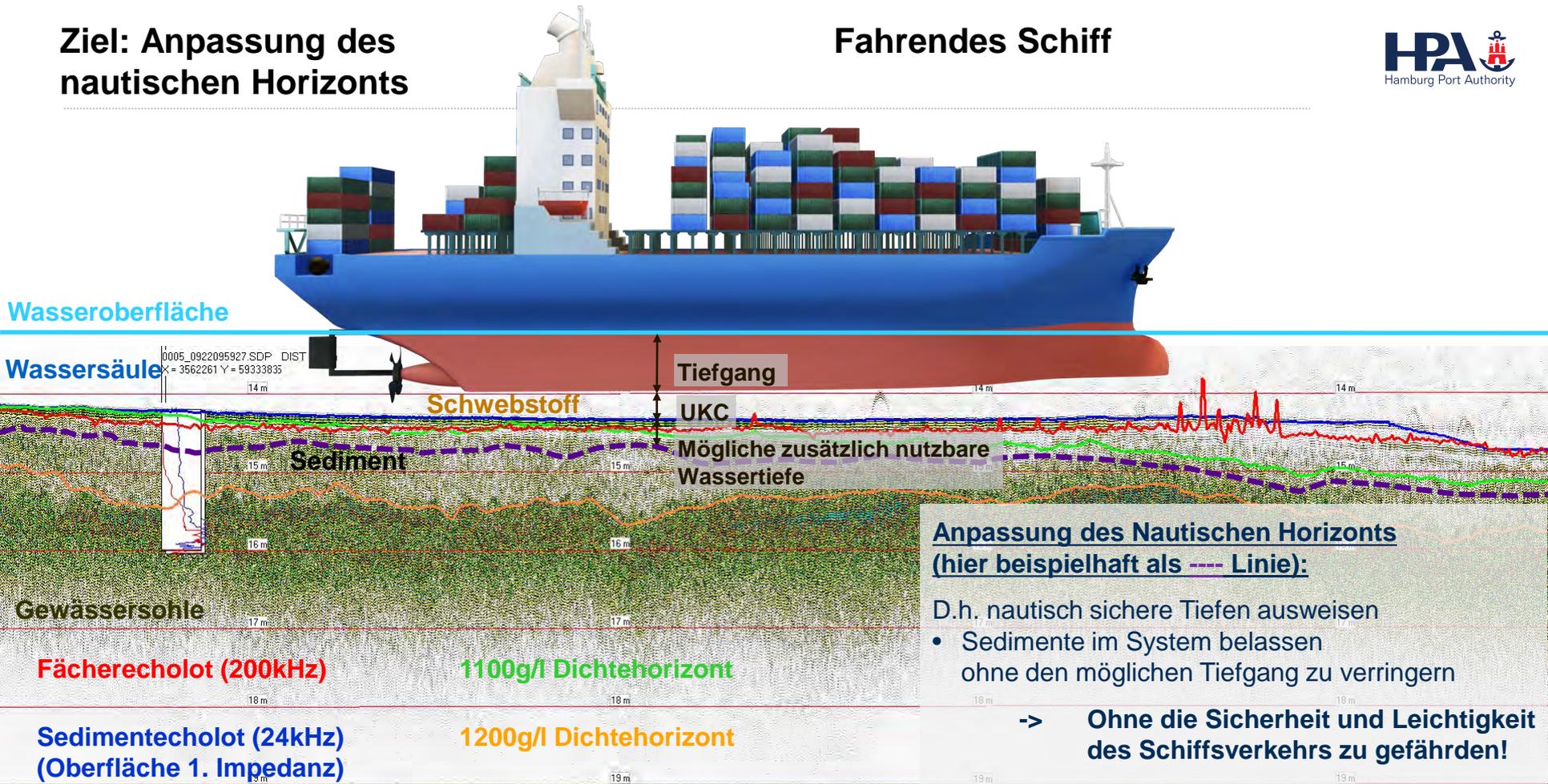
**Umlaufdaten**  
 Vergabe-Nr. W-0180-17-O-Schlickverbringung Nordsee E3 AKZ: Y0819  
 LV-Pos.: 3 Nordereibe Bl. 7 baggern Umlaufbeginn: 19.12.2019 14:27:47  
 Bagger: James Cook Umlauf-Nr.: 253 Umlaufende: 20.12.2019 05:49:13

**Baggertiefe**



# Ziel: Anpassung des nautischen Horizonts

# Fahrendes Schiff



## Anpassung des Nautischen Horizonts (hier beispielhaft als --- Linie):

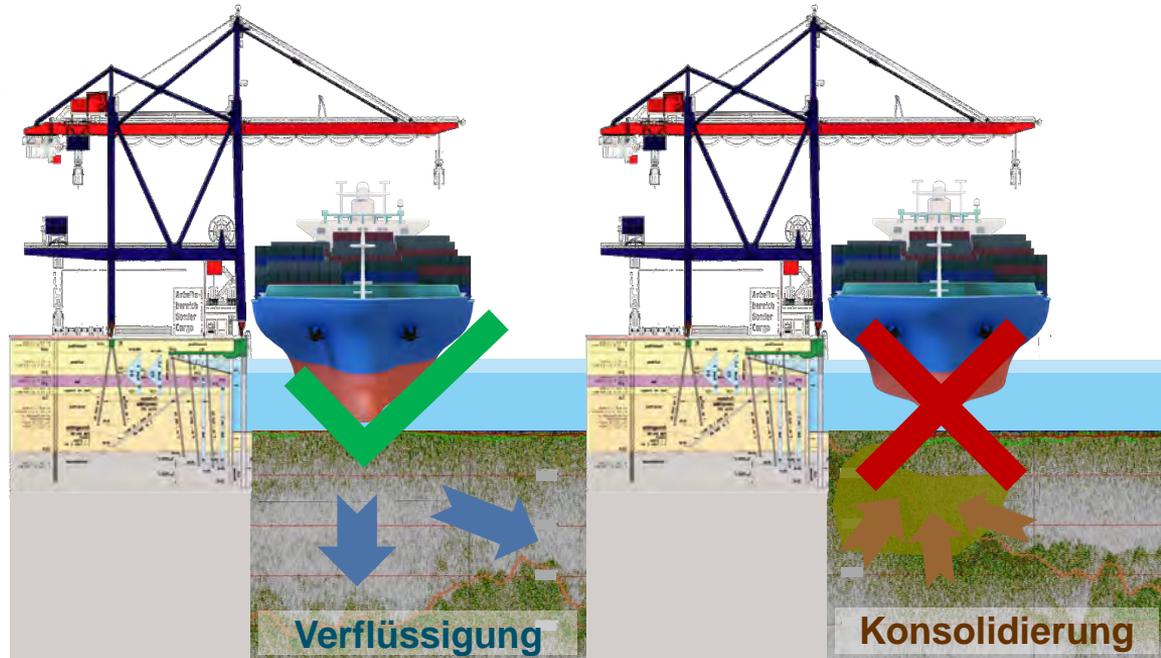
D.h. nautisch sichere Tiefen ausweisen

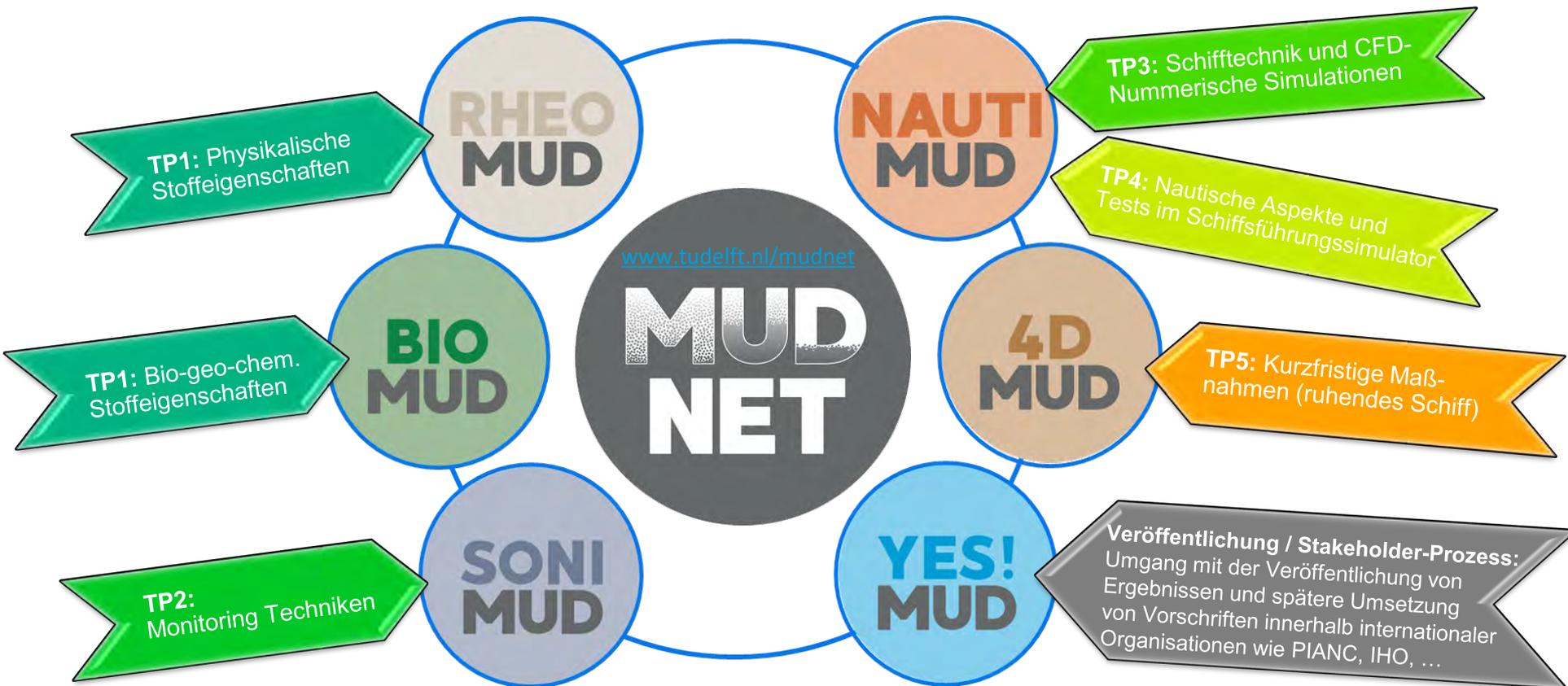
- Sedimente im System belassen ohne den möglichen Tiefgang zu verringern

-> **Ohne die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu gefährden!**

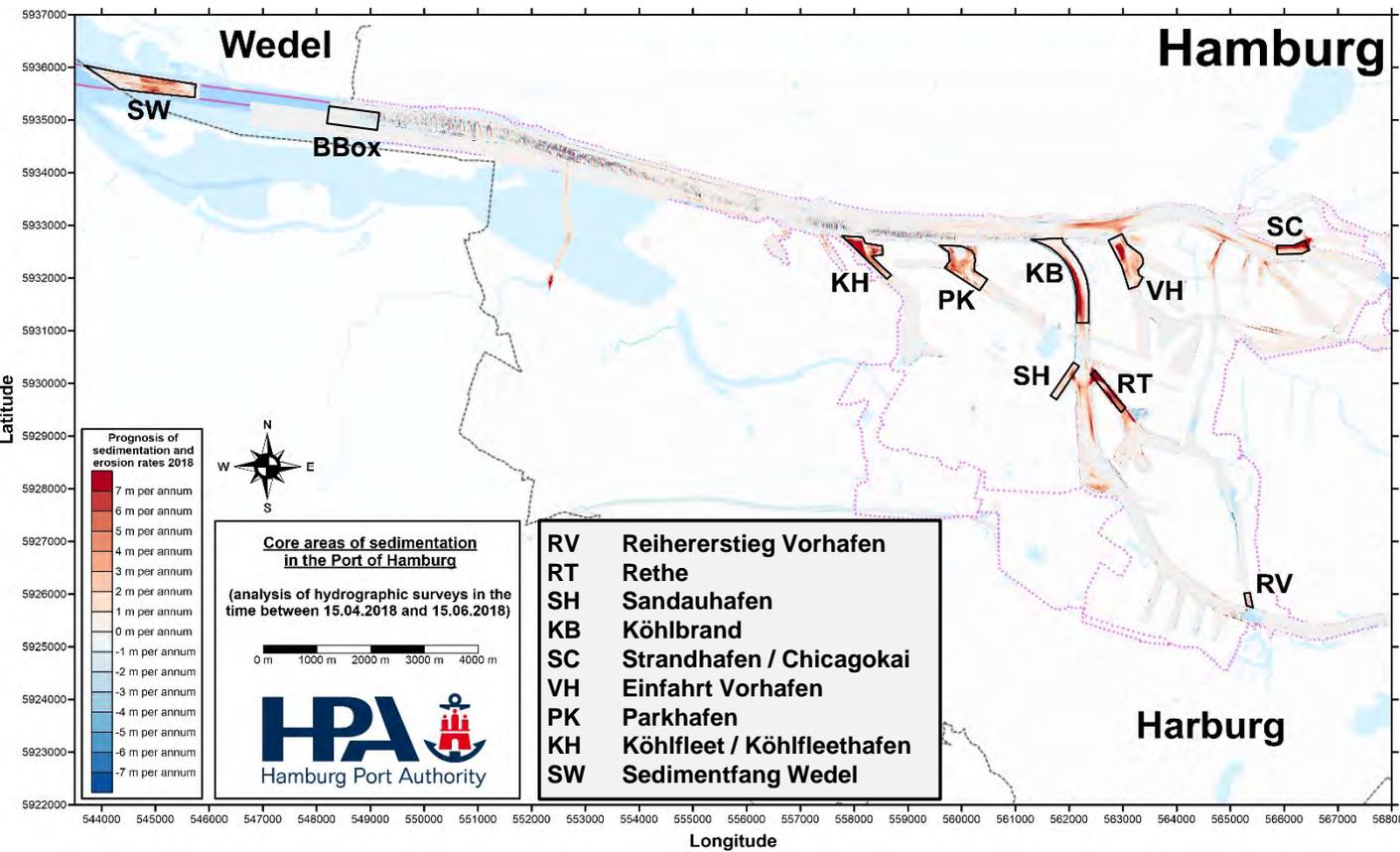
# Ziel: Anpassung des nautischen Horizonts: Ruhendes Schiff

- Ermittlung von Grenzwerten zum „sicheren“ Eintauchen von Schiffen in Bodensuspensionen während des Niedrigwassers
- Beteiligung von BG Verkehr, Reedern, Versicherungen
- Versicherungsstatus muss beachtet werden:
  - Für Hamburg gilt der Status “Safe Port”
  - Hamburg darf kein “NAABSA“ Port werden (Not Always Afloat, But Safe Aground)
- Für Liegeplätze heißt dass:
  - Schiff muss in der Bodensuspension noch schwimmen -> **das Archimedische Prinzip muss eingehalten werden!**
  - Wasserkühlung der Schiffsmaschinen muss über obere Seekästen erfolgen!
- Keine weitere Regularien bekannt, welche gegen das Einsinken der Schiffe in Bodensuspensionen sprechen!





# Monitoring-Kampagnen 2018 - 2020 im Hamburger Hafen



- ### 2018
- KW17: 23.04. - 27.04.2018 #00
  - KW23: 04.06. - 08.06.2018 #01
  - KW26: 25.06. - 29.06.2018 #02
  - KW32: 06.08. - 10.08.2018 #03
  - KW38: 17.09. - 21.09.2018 #04
  - KW45: 05.11. - 09.11.2018 #05

- ### 2019
- KW 12: 18.03. - 20.03.2019 #06
  - KW 19: 06.05. - 08.05.2019 #07
  - KW 23: 04.06. - 06.06.2019 #08
  - KW 27: 02.07. - 04.07.2019 #09
  - KW 33: 13.08. - 15.08.2019 #10
  - KW 39: 24.09. - 26.09.2019 #11
  - KW 45: 05.11. - 07.11.2019 #12

- ### 2020
- KW 18: 27.04. - 29.04.2020 #13
  - KW 20: 11.05. - 12.05.2020 #14
  - KW 22: 25.05. - 27.05.2020 #15
  - KW 24: 08.06. - 09.06.2020 #16
  - KW 26: 19.06. - 23.06.2020 #17
  - KW 33: 10.08. - 12.08.2020 #18
  - KW 37: 07.09. - 08.09.2020 #19
  - KW 40: 25.09. - 30.09.2020 #20
  - KW 45: 02.11. - 03.11.2020 #21

... weitere Kampagnen in 2021

# Untersuchung der Sedimente/Schlicke mit umfangreichen Naturmessungen

- Gravi- | BAW-Kernot | Frahmplot 2018  $\varnothing$ 10cm ohne/mit Rheotune | Frahmplot 2019  $\varnothing$ 15cm ohne/mit Rheotune | Admodus probe

USP pro



# Welche Sedimente finden sich im Hamburger Hafen?

Suspended Matter  
= Schwebstoff

SPM

## Überprüfung

Bereiche, welche nach den Untersuchungen u.U. noch gefahrlos befahrbar sind

## Überprüfung

Bereiche, welche sicherlich nicht ohne Einschränkungen befahrbar sind, aber u.U. nach den Untersuchungen ein Schiff noch gefahrlos am Liegeplatz einsinken kann

Bereiche, welche auch zukünftig nautisch nicht nutzbar sein werden, aber gut mit Nassbaggergeräten unterhalten werden können

Gewässerboden unterhalb der Solltiefe, welcher standardmäßig nicht unterhalten wird

Vanillesoße



Fluid Mud (FM)  
 $\rho < 1,15 \text{ kg/l}$

Babybrei



Pre-Consolidated (PS)  
 $1,15 \text{ kg/l} < \rho < 1,20 \text{ kg/l}$

Pudding



Pre-Consolidated (PS) bis Consolidated (CS)  
 $1,20 \text{ kg/l} < \rho < 1,25 \text{ kg/l}$

Grießpudding



Consolidated (CS)  
 $\rho > 1,25 \text{ kg/l}$



FM



PS



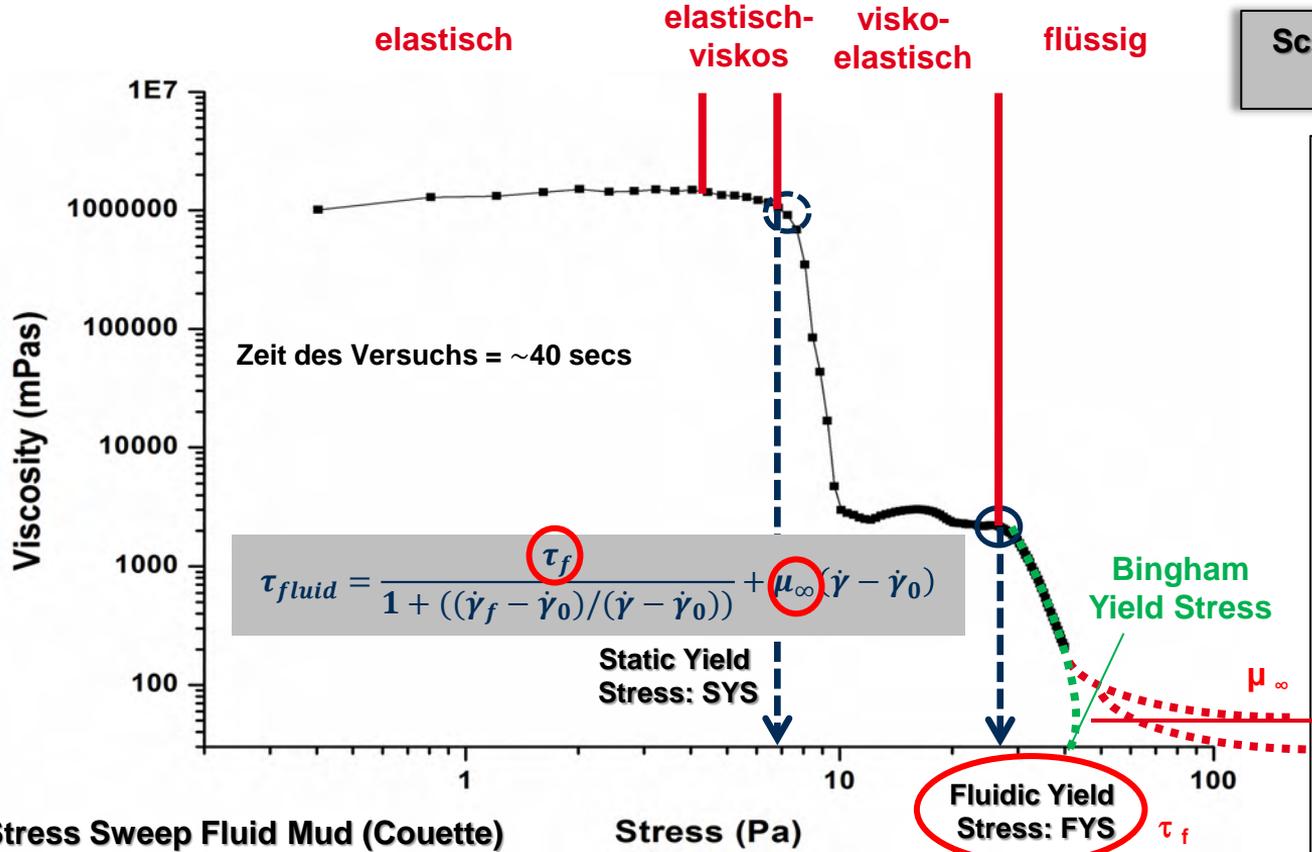
PS-CS



CS



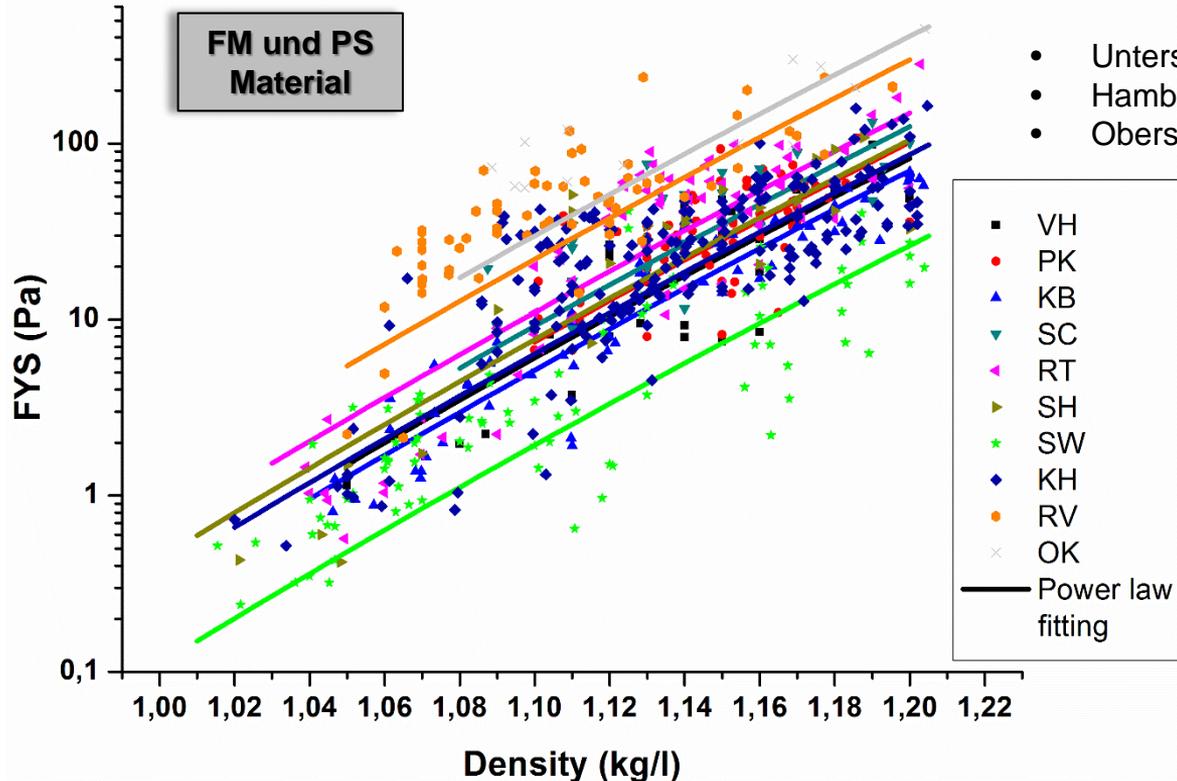
# Beispielhafte Fließkurve von Schlick / Sedimente im Hamburger Hafen



**Schlicke verflüssigen sich jederzeit unter Scherung Belastung!**

**Die Aufnahme einer Fließkurve ist das wichtigste Ergebnis einer rheologischen Untersuchung:**

- Elastischer Bereich  
=>
- Elastisch-viskoser Bereich  
=>
- Visko-elastischer Bereich  
=>
- Flüssiger Bereich  
=>



3 unterschiedliche Cluster erkennbar:

- Unterstrom: SW
- Hamburger Hafen: VH, PK, KB, SC, RT, SH, KH
- Oberstrom: RV, OK

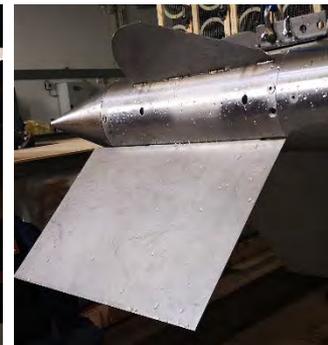
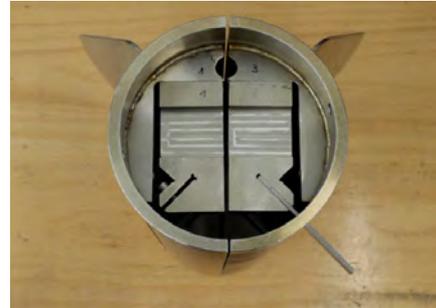
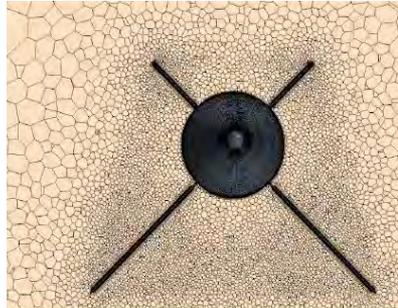
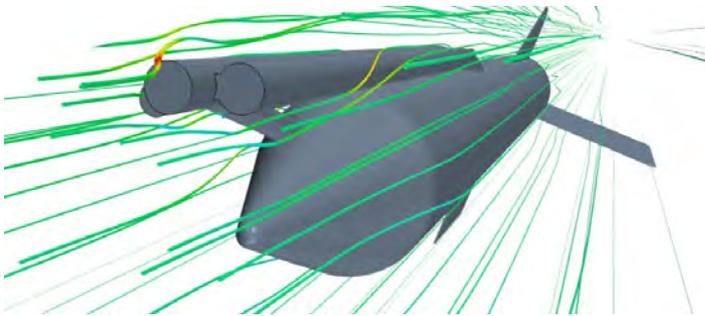
$$\tau_f = a \cdot \rho^{30}$$

**Unterschiedliche Abhängigkeit von Dichte und Fließgrenze auf Grund unterschiedlich hoher Organikanteile!**

# Untersuchungen der TUHH, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie zur Kraftwirkung von Flüssigschlick auf Schiffskörper



- Erweiterung von CFD-Modellen (Star CFD und OpenFoam) und Berücksichtigung von Bodeneigenschaften
- Validierung mit „vereinfachtem“ CUX-Sampler Modell
- Ermittlung von Manöverkoeffizient im hydro-nummerischen Modell



# Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zu Manövrierfähigkeit im hydraul. Modell und Anpassung d. Schifführungssimulators



- Untersuchungen und Gerätebereitstellung für die Sediment- und Suspensionsentnahme
- Durchführung von Manöverfahrten im hydraulischen Modell
- Erweiterung des Schifführungssimulators bei MTC

## Kernlotuntersuchungen

Grundlage zur Ermittlung der Nautischen Sohle



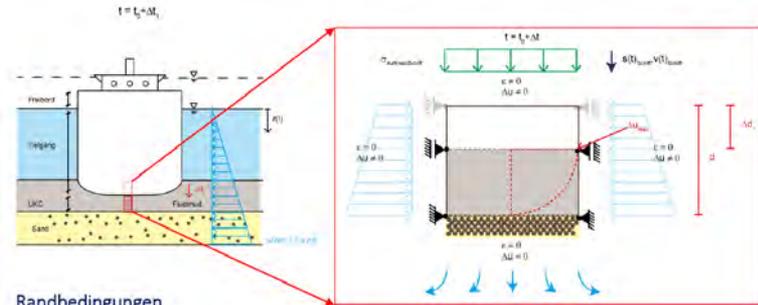
Kernlotentnahmegesät der BAW



# Nachweis der Änderung von Flüssigschlick unter Auflast: Untersuchungen an der TUHH, Institut für Geotechnik



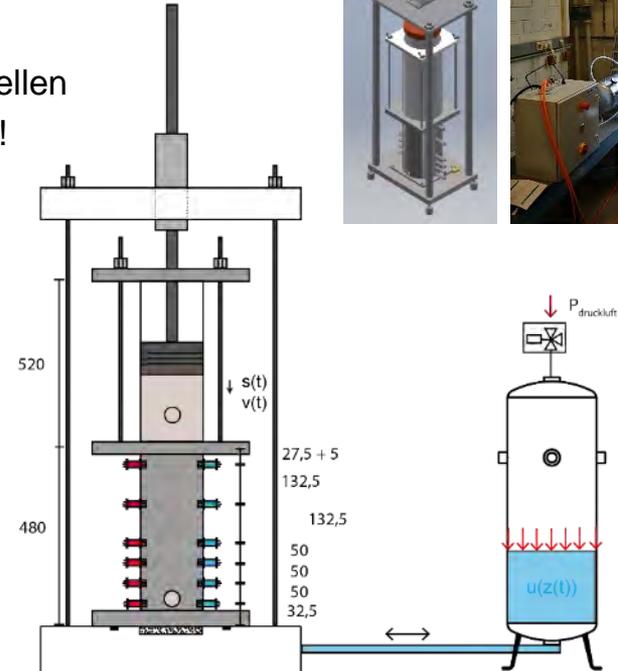
- Ergebnis aus den ein-axialen Ödometer Versuchen im Labor
  - Ab welcher Nassdichte und Viskosität des Schlicks findet keine Verdrängung des Schlicks mehr statt, so dass dieser konsolidiert und Boden bildet.
  - In-situ Überprüfung mit den Stahlplattenversuchen
- Ein numerische Modellverfahren bietet die Übertragung der punktuellen Untersuchungen des Ödometers und der Stahlplatten in die Fläche!



## Randbedingungen

- Schiff sinkt tideabhängig mit  $s(t)$  in Fluid Mud
- Druckverteilung tideabhängig  $u(z,t) = \rho_l g z(t)$
- **Ungünstigster Fall -> Einaxiale Kompression**
- Aufbau Porenwasserüberdrücke  $\Delta u \neq 0$
- Vertikale Verformung um  $\Delta d_1$  zum Zeitpunkt  $t = t_0 + \Delta t$ ;  $\epsilon \neq 0$
- Unterer Rand wasserdurchlässig
- Abbau Porenwasserüberdruck am durchlässigen Rand

-> Sedimentationsschicht am unteren Rand



# Nachweis der Änderung von Flüssigschlick unter Auflast: Großversuch mit Laderaumsaugbagger Pedro Álvares Cabral



## Messablauf:

Vorpeilung am 24.06.2020

Eintauchversuch am 25.06.2020

Nachpeilung am 26.06.2020

## Vermessung der Freibordänderung:

Tachymetermessung von 1 Standpunkt

8+1(Wasserlinie) Reflektor-Messpunkte  
auf dem Schiff

148 Halbsätze mit 1320 Messungen =  
74 Vollsätze (ca. 3-6 min pro Vollsatz)

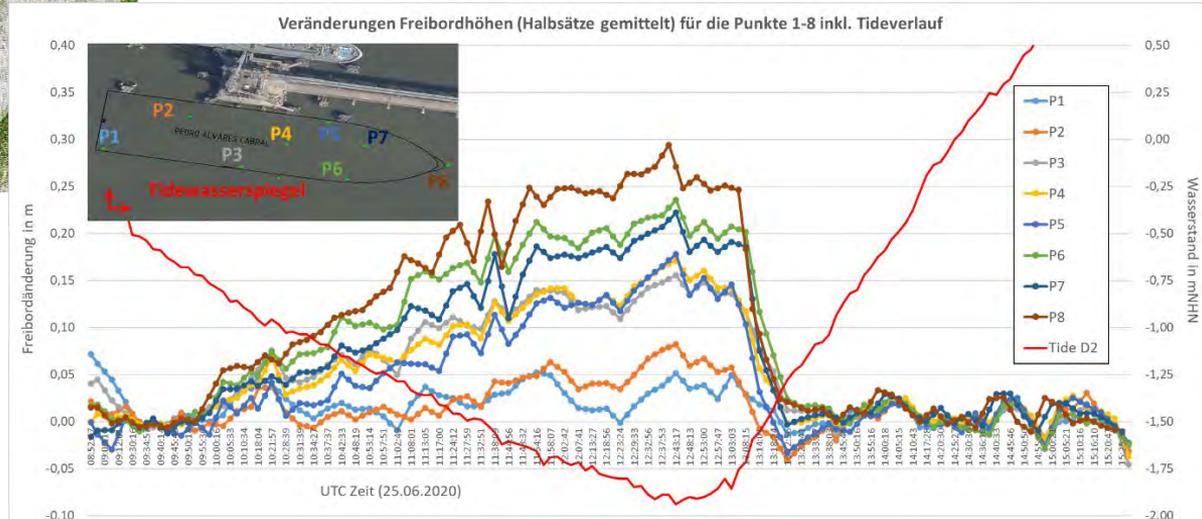
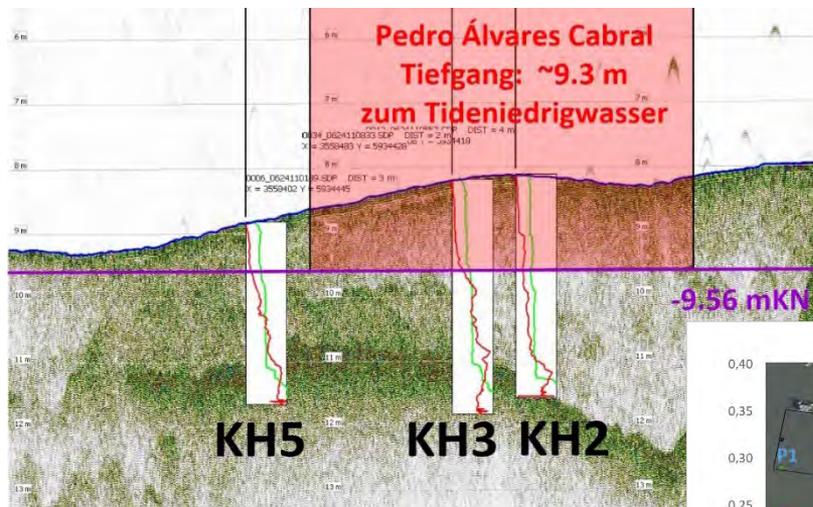
## Randbedingungen von PAC:

Tiefgang während des Versuches: 9.3m

Eintauchtiefe zu Niedrigwasser: -9.56mKN



# Nachweis der Änderung von Flüssigschlick unter Auflast: Großversuch mit Laderaumsaugbagger Pedro Álvares Cabral

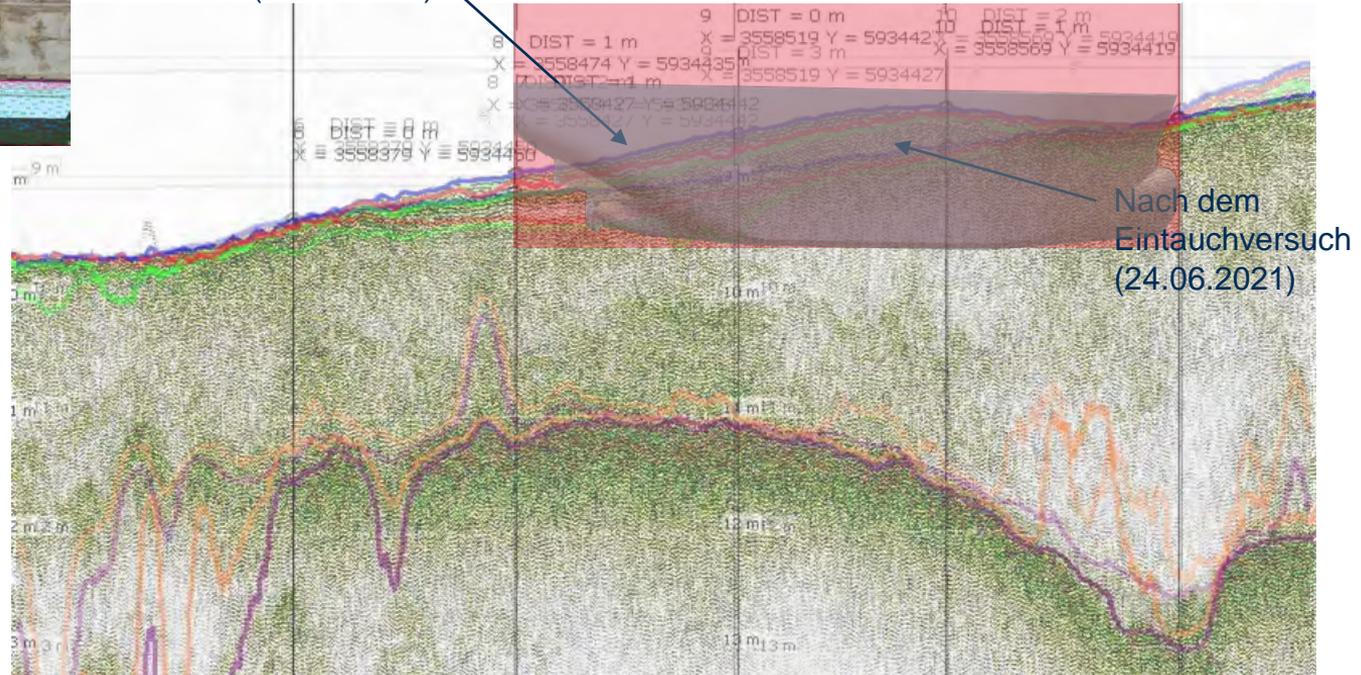


# Nachweis der Änderung von Flüssigschlick unter Auflast: Großversuch mit Laderaumsaugbagger Pedro Álvares Cabral

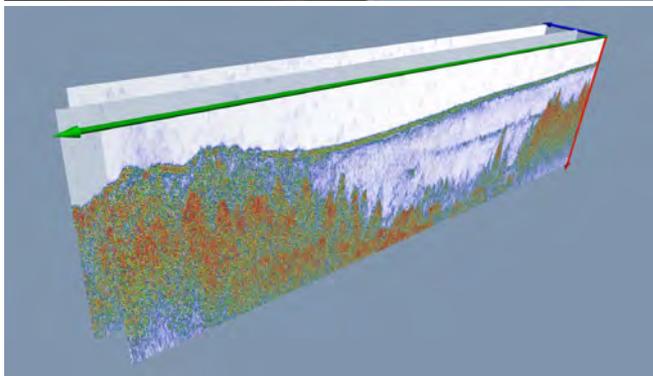
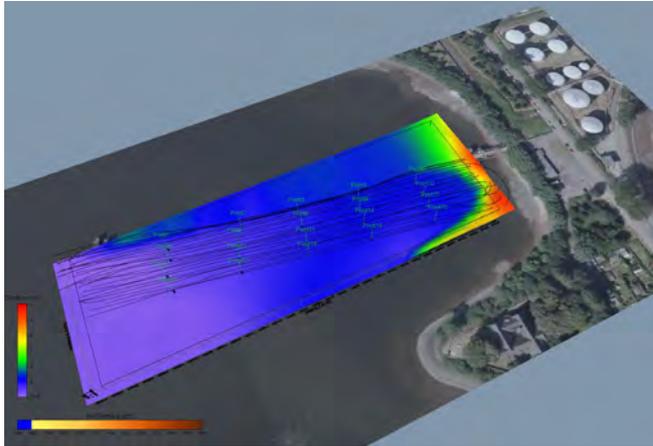


Linie 9

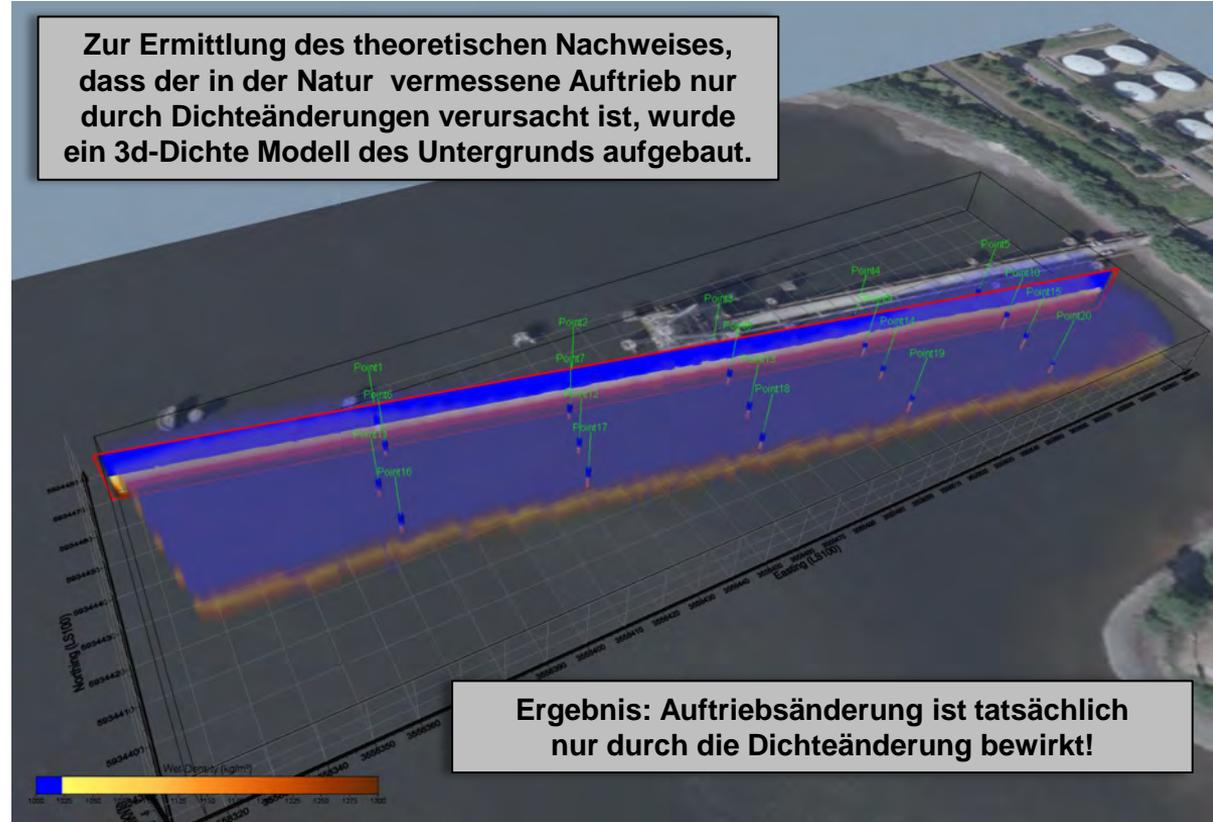
Vor dem  
Eintauchversuch  
(24.06.2021)



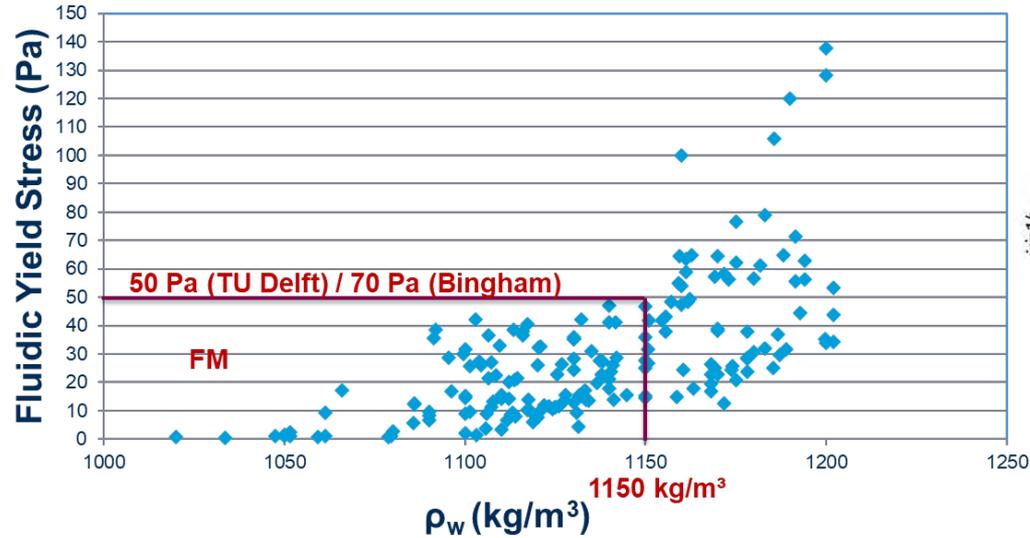
# Volumetrisierung der linienhaften Sedimentinformationen Großversuch mit Laderaumsaugbagger Pedro Álvares Cabral



Zur Ermittlung des theoretischen Nachweises, dass der in der Natur vermessene Auftrieb nur durch Dichteänderungen verursacht ist, wurde ein 3d-Dichte Modell des Untergrunds aufgebaut.



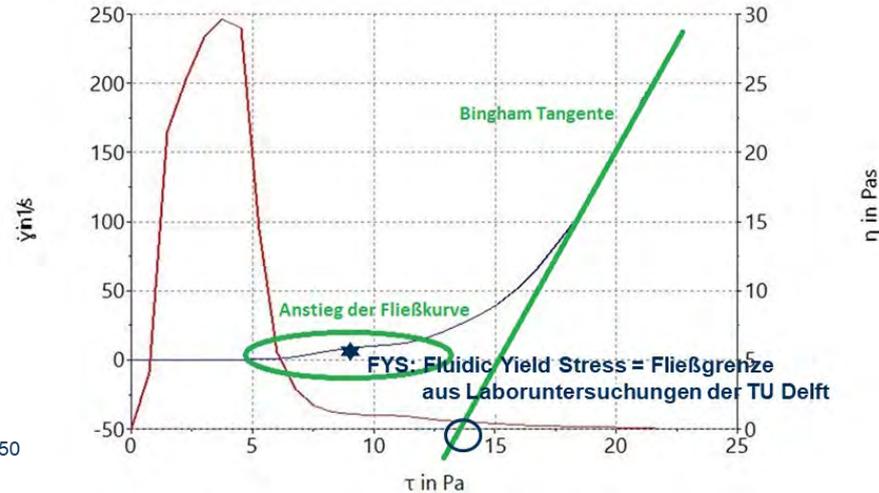
## Lokation "KH"



**Wichtig: Nur gültig für Köhlfleet / Köhlfleethafen (KH)!**

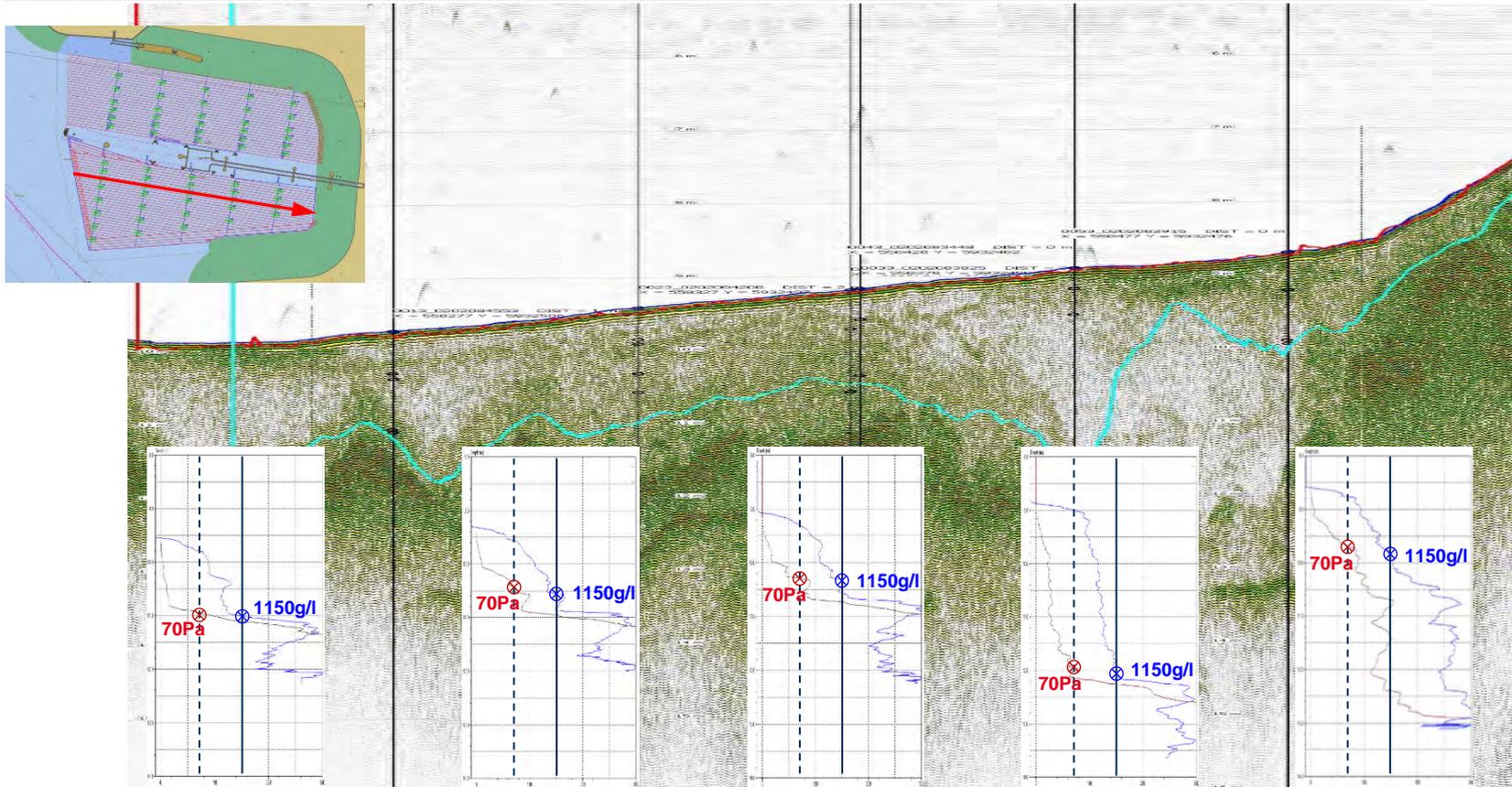
**Grenzwerte für Flüssigschlick(FM) im Köhlfleet (KH):**

- $\rho_w < 1150 \text{ kg/m}^3$
- FYS < 50 Pa (TU Delft)
- FYS < 70 Pa (Bingham)

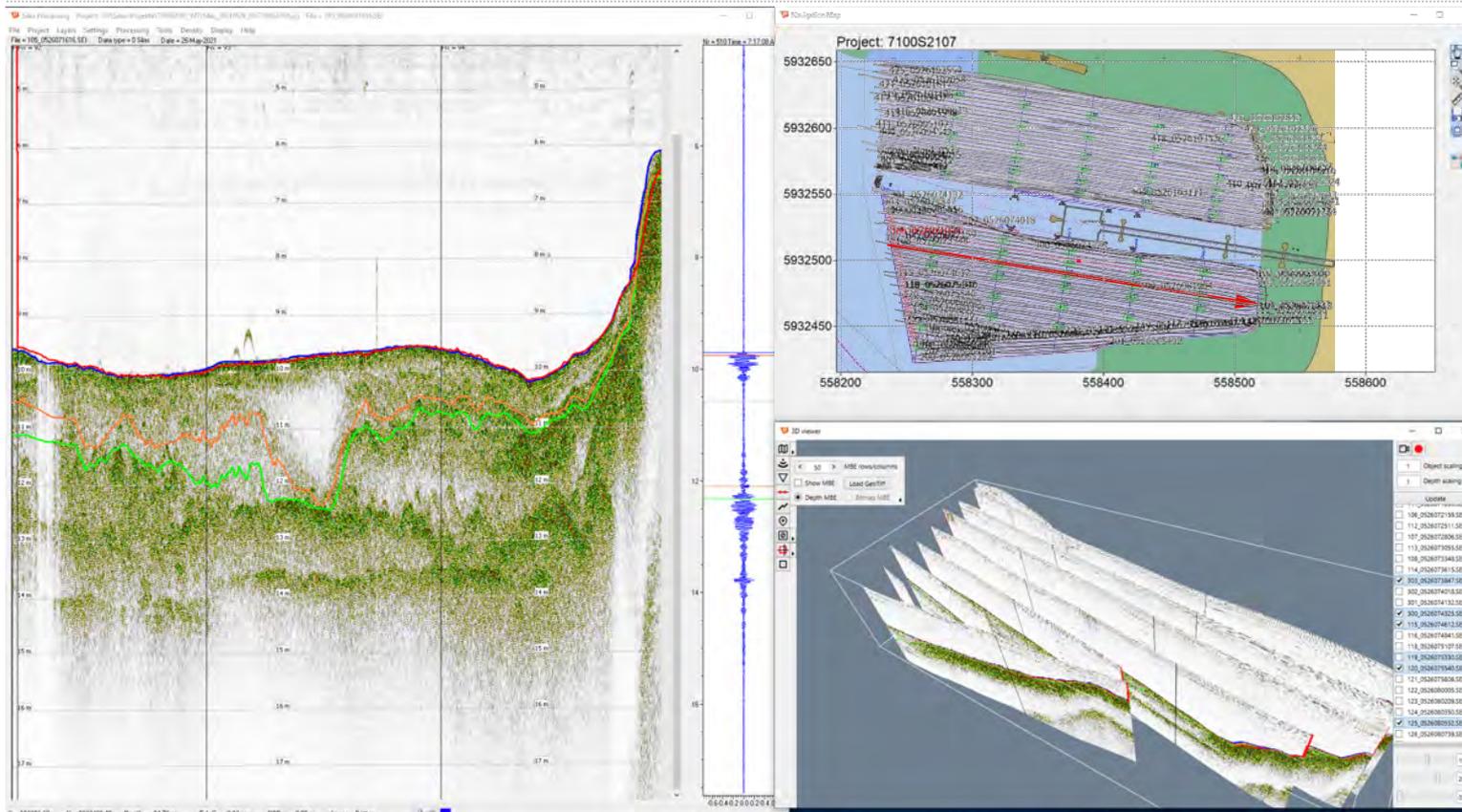


Wert nach Bingham, welcher derzeit für die Kalibrierung der genutzten Rheotune genutzt wird!  
 -> **Dieser liegt 40% höher!**

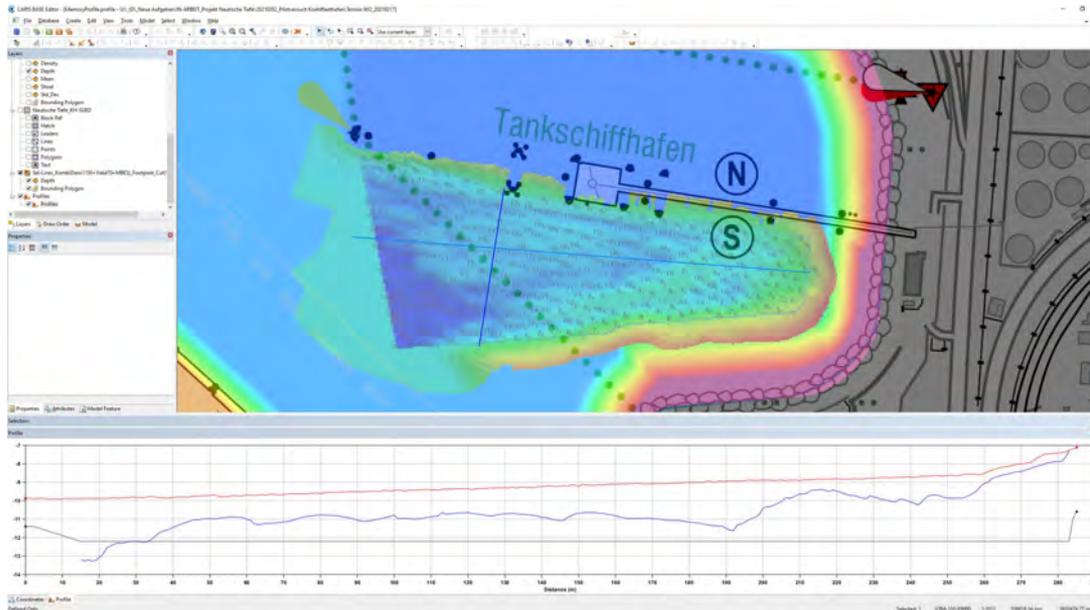
# Start der Pilotphase im Köhlfleethafen – Kombination aus 1150g/l + 70Pa



# Start der Pilotphase im Köhlfleethafen – Flächenhafte Erfassung

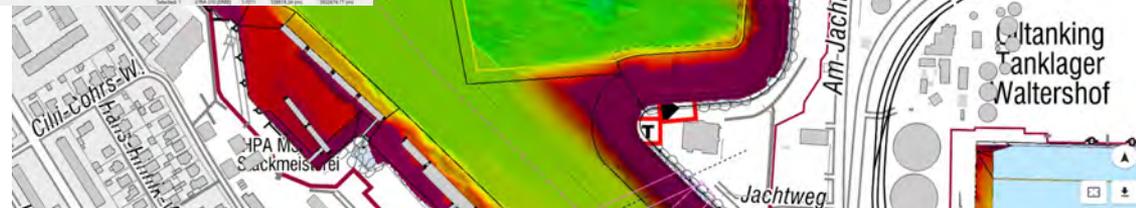


# Start der Pilotphase im Köhlfleethafen – Etablierung der Auswerteworkflows



Datenprozessierung und Plausibilisierung mittels Stema SILAS, automatisierte Datenverarbeitung und Archivierung in HydroCAD2

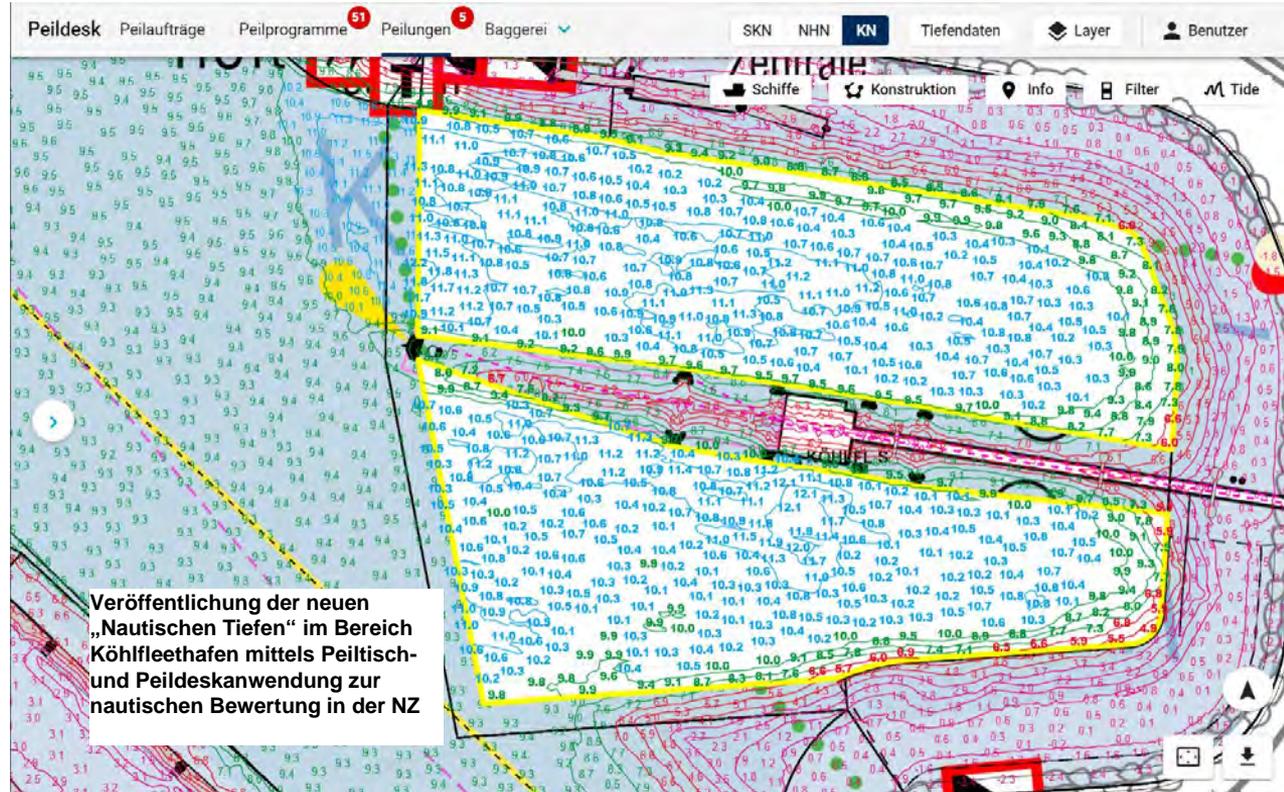
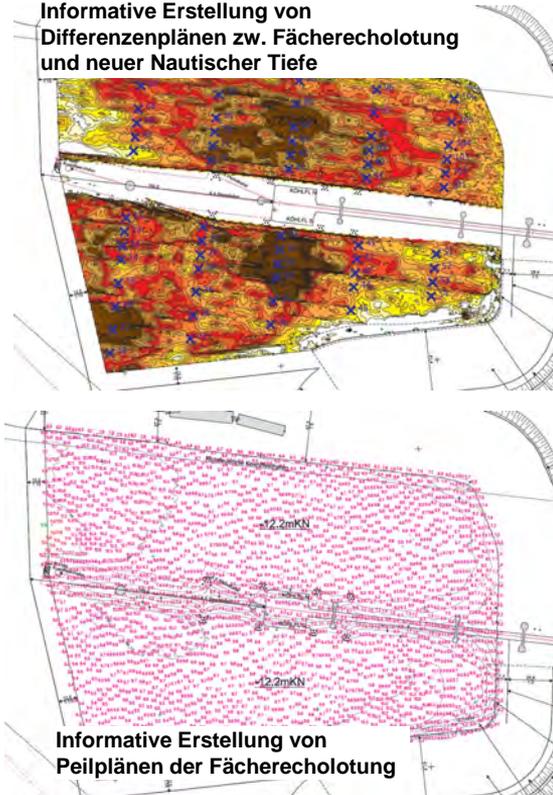
Inhouse Datenbereitstellung mittels Web-Diensten und automatisierte Berechnungen für die Wassertiefeninstandhaltung



# Start der Pilotphase im Köhlfleethafen – Veröffentlichung der Daten

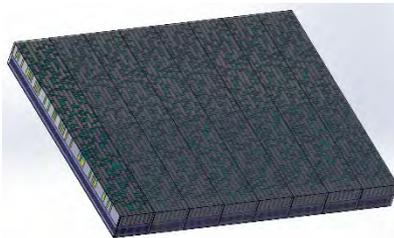
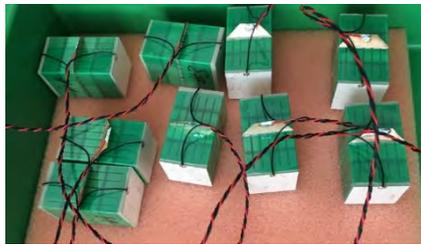


Informative Erstellung von Differenzenplänen zw. Fächerecholotung und neuer Nautischer Tiefe



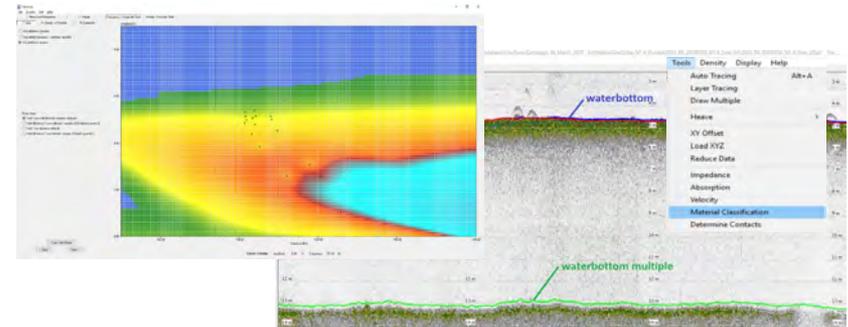
- **IHATEC Projekt AHOi (HPA=Assoziierter Partner)**

- Verfahren und Systementwicklung zur schallbasierten volumetrischen Sedimentklassifizierung mit dem Ziel einer verbesserten Ausweisung eines sicheren Nautischen Horizontes sowie einer optimierten Wassertiefenausnutzung in Häfen



- **Entwicklungsauftrag Stema Systems (HPA=AG)**

- Anpassung und Erweiterung der Rheotune Kalibrierdatenbanken um die Messergebnisse der HPA-Sedimentbeprobungen und den daraus abgeleiteten neuen TU-Delft Parametern zur in-situ Bestimmung der benötigten Fließkurven-Parameter
- Durchgreifende Anpassung der Softwarepakete RheoCalc, RheoLog, RheoEdit, SILAS zur in-situ Erfassung, Prozessierung der neuen rheologischen Parameter und Korrelation mit der Hydroakustik



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

