

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG  
Niederlassung Cuxhaven

## 4. Antrag auf Planänderung für den

## Anleger für verflüssigte Gase mit Südhafen-Erweiterung in Stade-Bützfleth

Gemäß §§ 68 ff WHG iVm §§ 107 ff NWG

Heft 13w

FSRU Kolkpotential

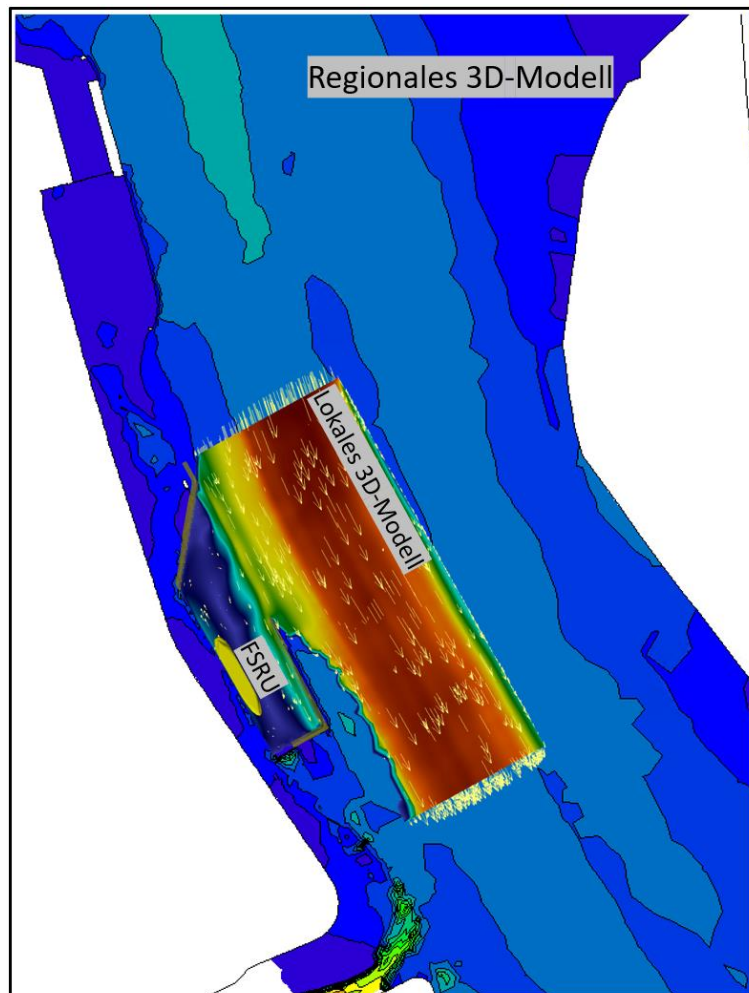
DHI Wasy GmbH, Berlin

---

# Studie zum Kolkpotential am geplanten FSRU-Anleger Stade

## Regionale und lokale Strömungen am LNG-Anleger

Wirkraumanalyse: Strömungsänderungen bedingt durch den geplanten Anleger



Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG

Niedersachsen  
Ports



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



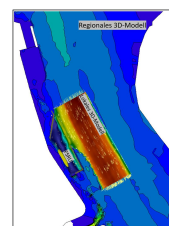
Erstellt von		Genehmigt von
01.03.2023		02.03.2023
<div>X <u>Hisham Elsafti</u></div> <div>Approved by</div> <div>Signed by: Hisham Elsafti</div>		<div>X <u>D. Spinnreker</u></div> <div>Approved by</div> <div>Signiert von: Dominic Spinnreker</div>

# Studie zum Kolkpotential am geplanten FSRU-Anleger Stade

## Regionale und lokale Strömungen am LNG-Anleger

Wirkraumanalyse: Strömungsänderungen bedingt durch den geplanten Anleger

Erstellt für:               Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG  
Vertreten durch:       Herrn Albert Schmidt  
Adresse:                 Am Schleusenpriel 2  
                                  27472 Cuxhaven, Germany



Projektmanager	Dr. Stefan Leschka
Qualitätssicherung	Dr. Hisham Elsafti
Projektbearbeiter	HELS, JMAT, HEGO

Projektnummer	14806796
Datum Freigabe	23.01.2023
Revision	Version: 1 – Revision: 1.0 - 23.01.2023.
Einstufung	Eingeschränkt

## INHALT

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen .....</b>	<b>2</b>
2.1	Datengrundlage und verwendete Unterlagen .....	2
<b>3</b>	<b>Software Numerische Modelle .....</b>	<b>4</b>
3.1	Regionales Modell .....	4
3.1.1	Software .....	4
3.1.2	Bathymetrie und Berechnungsnetz .....	5
3.1.3	Berücksichtigung der Bauwerksstrukturen .....	8
3.1.4	Berücksichtigung des Schiffskörpers .....	10
3.1.5	Randbedingungen .....	11
3.2	Lokales Modell .....	13
3.2.1	Software .....	13
3.2.2	Berechnungsgitter und Berücksichtigung des Schiffskörpers und der Bauwerksstrukturen .....	13
3.2.3	Randbedingungen .....	18
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>19</b>
4.1	Strömungsprofile am geplanten Anleger mit und ohne vertäuter FSRU .....	19
4.2	Strömungsgeschwindigkeiten unter der FSRU .....	33
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>37</b>
A.1	Zu-/Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit unterhalb der FSRU in verschiedenen Wassertiefen.....	3

## ABBILDUNGEN

Abbildung 3-1.	Prinzip eines 3-dimensionalen Netzes. ....	5
Abbildung 3-2.	Tideelbmodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten. Das rote Rechteck zeigt den Bereich des Regionalmodells .....	5
Abbildung 3-3.	Der Bereich des Regionalmodells (oben) und das Berechnungsgitter im Hafenbereich (unten) .....	7
Abbildung 3-4:	Gesamtes Berechnungsgitter des Regionalmodells .....	8
Abbildung 3-5:	Berücksichtigung der Pfähle im Modell .....	9
Abbildung 3-6:	Berücksichtigung der Spundwände im Modell .....	9
Abbildung 3-7.	Die Betrachtung der FSRU im Berechnungsgitter des Regionalmodells: Draufsicht (oben) und Querschnitt (unten) .....	10
Abbildung 3-8.	Randbedingungen des Elbmodells: Wasserstände (WSP) und Abfluss /3/ ..	11
Abbildung 3-9.	Oberer und unterer Rand des Regionalmodells.....	11
Abbildung 3-10.	Wasserspiegellage am unteren Rand des Regionalmodells.....	12

Abbildung 3-11.	Beispielhafte Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten am oberen Rand des Regionalmodells am 18.7.2019, 0:40 Uhr. Oben: horizontale Geschwindigkeit, unten: vertikale Geschwindigkeit. ....	12
Abbildung 3-12.	Maximale Flutstromgeschwindigkeit der Tide vom 18.07.2019 (00:40 Uhr) an der Gewässeroberfläche, Ausdehnung des CFD-Modells entspricht dem roten Polygon. ....	14
Abbildung 3-13.	Bathymetrie des lokalen CFD-Modells: Draufsicht.....	15
Abbildung 3-14.	Stereolithography- (STL-) Oberfläche der FSRU a) Seitenansicht und Draufsicht, b) 3D-Ansicht Richtung Bug .....	15
Abbildung 3-15.	Bathymetrie des lokalen CFD-Modells und die FSRU-Hülle: 3D-Ansicht ...	16
Abbildung 3-16.	Berechnungsgitter mit der vertäuten FSRU mit Tiefgang $T = 12$ m. ....	17
Abbildung 3-17.	Strömungsgeschwindigkeit aus dem Regionalmodell in Pagensand. Zeitpunkt für die CFD-Simulationen wurde für die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten im Hafenbecken gewählt.....	18
Abbildung 4-1.	Extraktionspunkte für Strömungsprofile unterhalb und im Nahbereich der FSRU: a) auf dem Berechnungsgitter gezeichnet und b) relativ zur FSRU .....	20
Abbildung 4-2.	Strömungsgeschwindigkeitsprofil über die Wassertiefe an den Extraktionspunkten (siehe Abbildung 4-1 und Tabelle 4-1) .....	32
Abbildung 4-3.	Strömungsgeschwindigkeit Querschnittshöhe = -14 mNHN (2,4m oberhalb der Hafenbecken-Sohle): links mit FSRU, rechts ohne FSRU. Höchste Strömungsgeschwindigkeit ist auf 0,25m/s in dieser Abbildung begrenzt, um das Strömungsbild im Hafenbecken besser zu zeigen.....	34
Abbildung 4-4.	Zunahme des Verstärkungsfaktors der Strömungsgeschwindigkeit (F) durch die FSRU, bei einem Wassertiefe von 16 m, 0,4 m oberhalb der Hafenbecken-Sohle (Tiefgang der FSRU $T = 12$ m). Die weiße Fläche kennzeichnet Bereiche der Darstellungsebene, die lokal unter dem Meeresboden liegt. Zonen von potenzieller Erosion und die FSRU sind in der Abbildung gezeigt.....	35
Abbildung A-1.	Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit (F) durch die FSRU, bei verschiedenen Wassertiefen (von -10 m bis zu -17 m; Tiefgang der FSRU $T = 12$ m und Sohlenhöhe des Hafenbeckens= -16,4 mNHN). Die weiße Fläche kennzeichnet Bereiche der Darstellungsebene, die lokal unter dem Meeresboden liegt	6

## TABELLEN

Tabelle 2-1	Verwendete Daten .....	2
Tabelle 4-1.	Koordinaten (UTM ETRS und relativ zur FSRU) der Extraktionspunkte für die vertikalen Geschwindigkeitsprofile am geplanten FSRU-Terminal und unter der FSRU (siehe Abbildung 4-1). ....	21

## ANHANG

### ANHANG A

Flächendarstellungen der Geschwindigkeitszunahme als Querschnitte unterhalb der FSRU

## 1 Veranlassung und Zielsetzung

Für den geplanten Floating-Storage-Regasification-Unit- (FSRU-) Anleger für das neue Flüssigerdgas- (LNG-) Terminal in Stade sollen die Strömungen an den geplanten Strukturen im Bereich des Hafens Stade-Bützfleth modelliert werden. Zielstellung ist eine Wirkraumanalyse der Strömungsänderungen bedingt durch die geplanten Strukturen unter Berücksichtigung des Einflusses der dauerhaft vertäuten FSRU, sowie eine dezidierte Berechnung und Analyse der Strömungen am Anleger, um die Kolkanfälligkeit an den Bauwerken des Anlegers abzuschätzen.

Basierend auf dem Angebot /1/ beauftragte Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG (Nports) die DHI WASY GmbH (DHI) mit der Durchführung und Auswertung von numerischen Berechnungen zur Beurteilung des Wirkraums des geplanten Terminals, der dauerhaft vertäuten FSRU sowie der dazugehörigen Bauwerksstrukturen (Spundwand und Pfähle) auf die Strömungen, die in einer Kolkchutzkonzeptstudie zur Ermittlung der potentiellen Erosionstiefe unterhalb und neben der FSRU herangezogen werden können. Für diesen Zweck wurde ein bei DHI vorhandenes dreidimensionales (3D-) hydrodynamisches Modell des Elbeästuars (Regionalmodell) /3/ herangezogen, um die Randbedingungen für ein hochaufgelöstes 3D-hydrodynamisches Modell (Lokalmodell) bereitzustellen. Die Ergebnisse des lokalen Modells wurden hinsichtlich des Kolkpotentials analysiert. Sie sind in diesem Gutachten zusammengefasst.

Zunächst wird in Abschnitt 2 die allgemeine Vorgehensweise und eine Aufführung der Datengrundlage und der verwendeten Unterlagen dargelegt. Anschließend wird in Abschnitt 3 auf die numerischen Modelle eingegangen, die für die Berechnung der Strömungen am Anleger zur Anwendung gelangten. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abschnitt 4 dargestellt. Schließlich wird eine Zusammenfassung in Abschnitt 5 präsentiert.



## 2 Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen

Um die Strömungen im Bereich des geplanten FSRU-Anlegers am LNG-Terminal in Stade-Bützfleth numerisch zu berechnen und entsprechend der Fragestellung analysieren zu können, wurde eine mehrstufige Vorgehensweise angewandt, die alle relevanten Aspekte berücksichtigt:

### *Regionale 3D-Modellierung der Strömungen in der Elbe:*

- Berücksichtigung von Viskosität, Dichte und 3D-Strömungsbildung mit hydrostatischem Druckansatz
- Anpassung des 3D-hydrodynamischen Modells (Stand: 2022) /3/ für den relevanten Bereich des Anlegers, unter Berücksichtigung der Bauwerksstrukturen des Anlegers (Spundwand und Pfähle) und des Schiffskörpers der FSRU
- Durchführung von numerischen Simulationen zur Beurteilung der Strömungen für eine Wirkraumanalyse (i) ohne und (ii) unter Berücksichtigung des Schiffskörpers der FSRU
- Auswahl der zeitlichen Bedingungen und Extrahierung der Randbedingungen für das lokale Modell für Simulationen (i) ohne und (ii) unter Berücksichtigung des Schiffskörpers der FSRU

### *Lokale 3D-Modellierung im Nahbereich des geplanten Terminals:*

- Berücksichtigung von Viskosität und 3D-Strömungsbildung mit hydrodynamischem Druckansatz
- Aufbau des lokalen 3D-Modells unter Berücksichtigung des Wirkraums der Strömungen und der Randbedingungen aus dem regionalen Modell
- Durchführung von numerischen Simulationen (i) ohne und (ii) unter Berücksichtigung des Schiffskörpers der FSRU
- Vergleich der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Extraktionspunkten entlang des Anlegers, unterhalb und im Nahbereich der FSRU der Simulationen (i) mit und (ii) ohne FSRU
- Abschätzung des sogenannten Verstärkungsfaktors der sohnahen Strömungsgeschwindigkeit hervorgerufen durch die FSRU

### 2.1 Datengrundlage und verwendete Unterlagen

Für den Modellaufbau sowie die Berechnung der geforderten Zustände wurden die folgenden Datensätze in Tabelle 2-1 herangezogen.

Tabelle 2-1 Verwendete Daten

Bereitgestellt durch	Datensatz (Format)	Stand
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Lage der FSRU (dxf)	2022
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Lageplan, Querschnitte der Planungen am AvG Stade-Bützfleth für das numerische Modell des Planzustandes (dwg, pdf)	2020
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Peildaten und Solttiefen vom Seehafen Stade für das numerische Modell (txt, pdf)	2019

Portal Tideelbe (WSV)	Zeitreihen der gemessenen Daten Wasserstand, Strömung, Durchfluss an verschiedenen Messpositionen entlang der Elbe als Randbedingungen des numerischen Regionalmodells	2019
Portal Tideelbe (WSV)	Digitales Geländemodell mit mittleren Sohllagen Tideelbe (DGM-W)	2016
DHI WASY	Kalibriertes morpho-dynamisches Modell der Tideelbe	2022

Alle Daten wurden, wenn nicht bereits so vorliegend, in das Koordinatensystem ETSR 1989 UTM 32N überführt.

## 3 Software Numerische Modelle

Für die detaillierte Betrachtung der Strömungen und der Einflüsse der FSRU darauf sind numerische Modelle erforderlich, welche die 3D-Strömungseffekte und die relevanten physikalischen Eigenschaften des Wasserkörpers berücksichtigen. Für die großräumigen (regionalen) Simulationen der Strömungen kommt ein entsprechendes regionales 3D-Modell zur Anwendung, während die lokalen Auswirkungen der FSRU unter dem Schiffskörper im Nahbereich des Anlegers und der FSRU mit einem lokalen 3D-Modell untersucht werden.

### 3.1 Regionales Modell

#### 3.1.1 Software

Das Programmsystem *MIKE 3 Flow model FM* (Finite-Volumen-Modell mit flexiblem Gitternetz) von DHI /4/ und die in ihm enthaltenen Module bilden die Grundlage der numerischen Berechnungen des regionalen Modells. Zur Lösung der approximierten Differentialgleichungssysteme wird die Finite-Volumen-Methode sowie die Lösung der 3D Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Berücksichtigung der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung verwendet. Das Modell beinhaltet u.a. die Kontinuitätsgleichung sowie die Impulsgleichung.

Zur Berechnung der hydrodynamischen Prozesse werden in den Gleichungen folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Gezeitenströmungen
- Viskosität
- Turbulente Diffusion, Advektion und Dispersion
- Barometrische Druckgradienten
- Variable Bathymetrien und Sohlrauheiten
- Überflutung und Trockenfallen von gezeitenbeeinflussten Bereichen

Für die Abbildung des Fließwiderstandes an der Sohle kann zwischen den empirischen Ansätzen des Chezy-Koeffizienten  $C$ , der Manning-Rauheit  $n$  oder der Nikuradse-Rauheit  $k_n$ , besser bekannt als äquivalente Sandrauheit  $k_s$ , gewählt werden.

Die Wirbelviskositäten  $\nu_t$  können als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach Smagorinsky) oder als Ergebnis eines gemischten  $k$ - $\epsilon$  Modells (1D- $k$ - $\epsilon$ -Modell in der Vertikalen) und des Smagorinsky-Ansatzes in der Horizontalen angegeben werden.

Die räumliche Diskretisierung wird mit Hilfe der elementzentrierten Finite-Volumen-Methode vorgenommen. Die Topographie und die Bathymetrie werden in der Ebene durch ein unstrukturiertes Netz aus dreieckigen und viereckigen Elementen diskretisiert. Die vertikale Auflösung erfolgt hier strukturiert nach der *Sigma*-Methode. Mittels der *Sigma*-Methode wird die vertikale Diskretisierung auf Basis der vertikalen Ausprägung der Wasserspiegeloberfläche und der Sohltopographie realisiert.

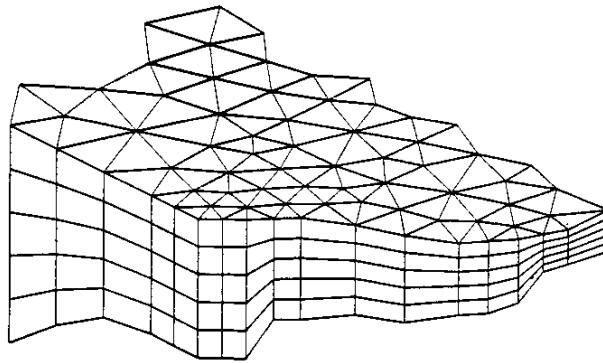


Abbildung 3-1. Prinzip eines 3-dimensionalen Netzes.

### 3.1.2 Bathymetrie und Berechnungsnetz

Als Grundlage des regionalen Modells wird das hydrodynamische 3D-Tideelbemodell /3/ (Abbildung 3-2) mit Peildaten von 2016 herangezogen. Im Rahmen der vorangegangenen Untersuchung des AvG Stade-Bützfleth wurde bereits das geplante Hafenlayout integriert sowie das Modellnetz verfeinert, um die geplanten Hafenstrukturen ausreichend genau abzubilden. Seitens des Auftraggebers bereitgestellte aktuelle Peildaten aus dem Jahr 2019 im Bereich des Südhafens des bestehenden Hafenbeckens wurden eingebunden. Das Modell beschreibt den Planzustand, den zusätzlich die Solltiefen der planfestgestellten Elbvertiefung in der Delegationsstrecke ab Hamburger Hafen bis Wedel (Solltiefen ab -17,4 mNHN bis -17,3 mNHN) und der Delegationsstrecke unterhalb Wedel bis zur Elbemündung in die Nordsee (Solltiefen ab -17,3 mNHN bis -18,95 mNHN) beinhaltet.

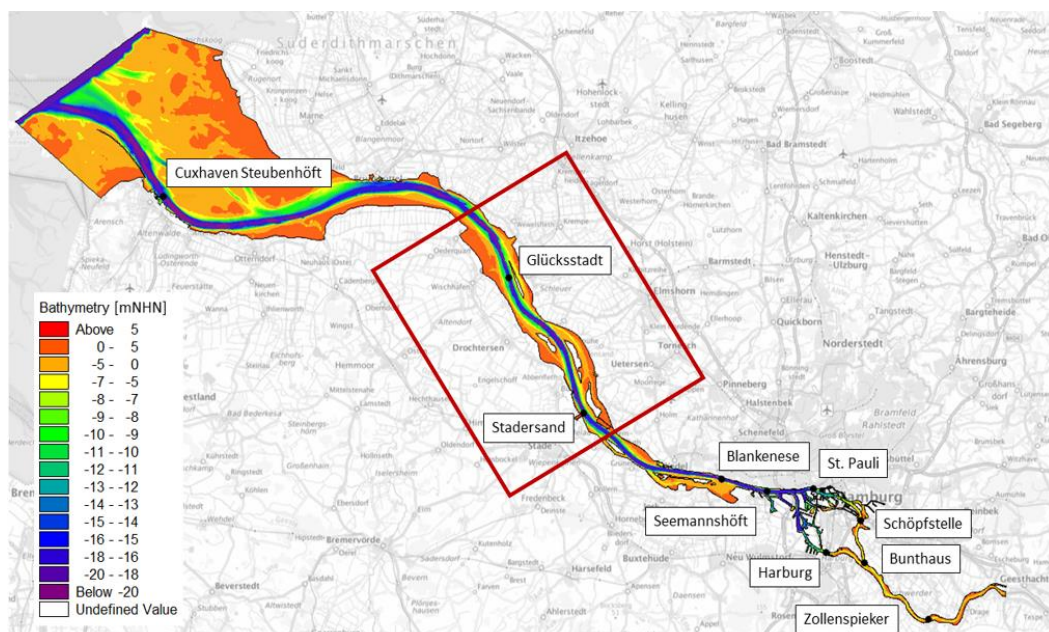


Abbildung 3-2. Tideelbemodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten. Das rote Rechteck zeigt den Bereich des Regionalmodells

Das Tideelbmodell umfasst den tidebeeinflussten Bereich der Elbe vom Wehr Geesthacht bei Elbkilometer 586 (Oberstrom) bis zum Steinriff bei Elbkilometer 724 (Unterstrom) und deckt somit eine Länge von 138 Flusskilometern ab. Für das Regionalmodell wurde ein Abschnitt mit einer Länge von ca. 38 Flusskilometern im Bereich des Anlegers extrahiert (Abbildung 3-3), um die Strömungen im Hafenbereich ohne und unter Berücksichtigung der vertäuten FSRU effizienter zu berechnen.

Das Regionalmodellgebiet ist in horizontaler Richtung in Bereiche mit quadrangularen (viereckigen) sowie triangularen (dreieckigen) Elementen unterschiedlicher Größen eingeteilt (Abbildung 3-4). Das Modellnetz wurde an die FSRU angepasst. Die höchste Auflösung mit ca. 10 m<sup>2</sup> pro Element befindet sich im Bereich des geplanten Anlegers. Der Hafenbereich wurde in seinen Abmaßen diskretisiert und mit der geplanten Tiefe von -16,4 mNHN entsprechend der derzeitigen Planungen berücksichtigt.

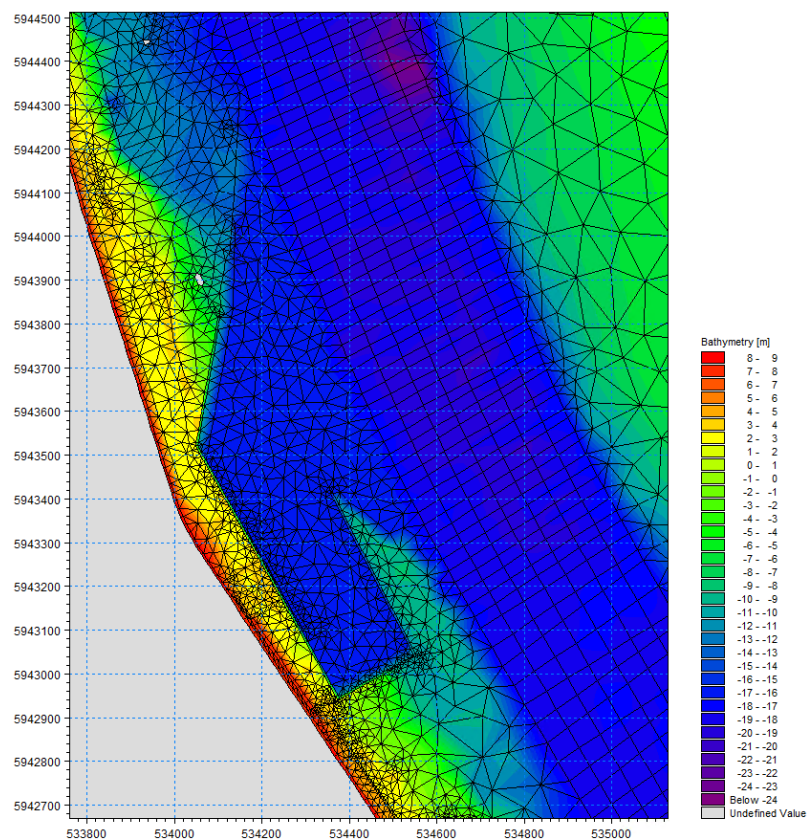
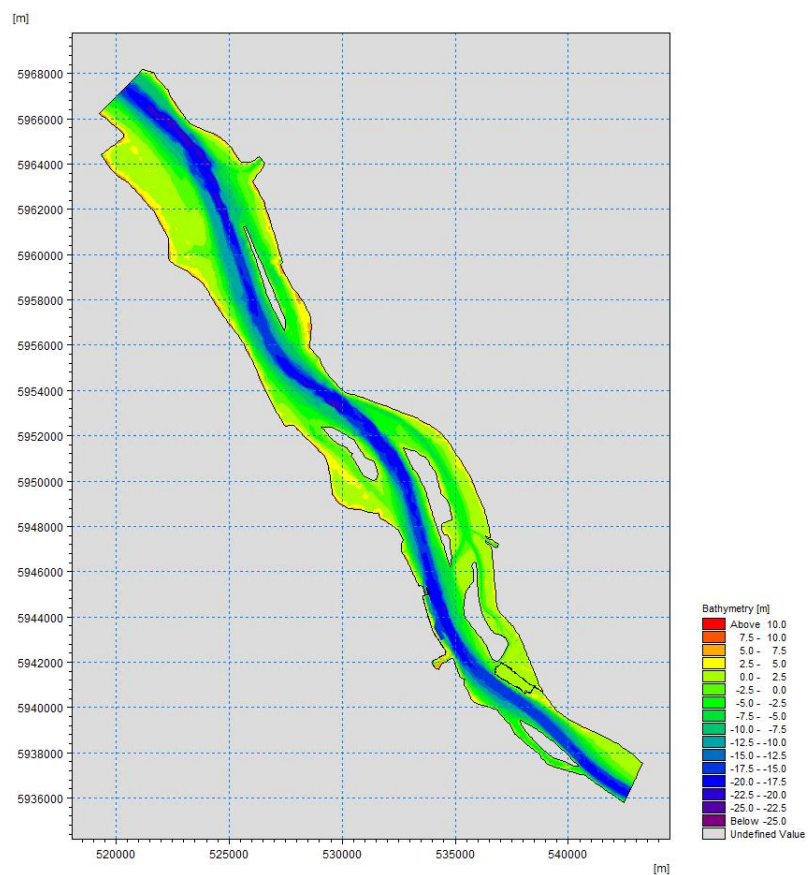


Abbildung 3-3. Der Bereich des Regionalmodells (oben) und das Berechnungsgitter im Hafenbereich (unten)



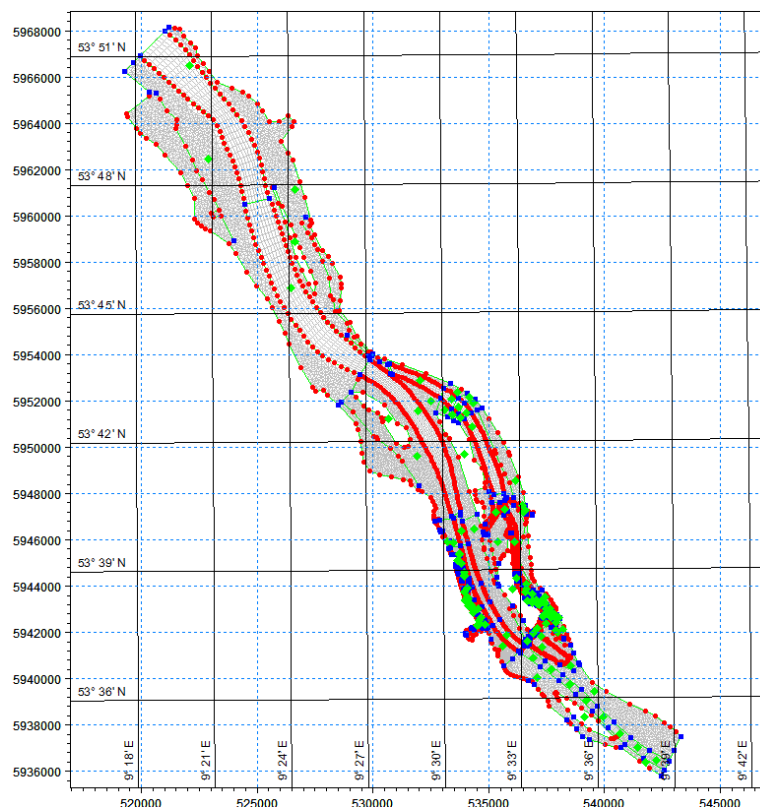


Abbildung 3-4: Gesamtes Berechnungsgitter des Regionalmodells

### 3.1.3 Berücksichtigung der Bauwerksstrukturen

Die Pfähle am geplanten Südhafen wurden im Modell über einen sogenannten „Subgrid“-Ansatz, dem sogenannten Pier-Modul, berücksichtigt. Die Pfahlstrukturen werden dabei durch ihren hydraulischen Fließwiderstand beschrieben /4/.

Durch den Ansatz wird vermieden, dass verhältnismäßig kleine Strukturen wie einzelne Pfähle direkt im Rechennetz aufgelöst werden müssen. Er liefert außerhalb des direkten Umfelds der betrachteten Struktur eine naturnahe Abbildung des Strömungsgeschehens und verkürzt dabei die Rechenzeit der Simulationen erheblich.

Bei diesem Ansatz fasst ein Widerstandsbeiwert den Einfluss infolge Körperrauheit und Geometrie des Pfahles zusammen, während der Anströmfaktor den Zusammenhang zwischen Pfahlwiderstandsbeiwert und der Froude-Zahl  $Fr$  wiedergibt. Der Widerstandsbeiwert  $C_D$  wurde auf Basis von Literaturwerten konstant mit  $C_D = 1,02$  definiert. Indem er mit der genauen Lage des Pfahles im Element und dem zugehörigen Durchmesser überlagert wird, kann so der Anströmverlust berücksichtigt werden.

Die Anzahl der Pfähle und deren Durchmesser sowie der Anströmverlust je Element werden folglich als zusätzlicher Verlust je Element berücksichtigt. Je dichter bzw. je größer die Pfähle, desto höher ist auch der Energieverlust infolge der Anströmung. Die Berücksichtigung der Pfähle ist in Abbildung 3-5 gezeigt.

Die Spundwände wurden im Modell als Deiche berücksichtigt. Die im Modell definierten Deichlinien sind in Abbildung 3-6 gezeigt.

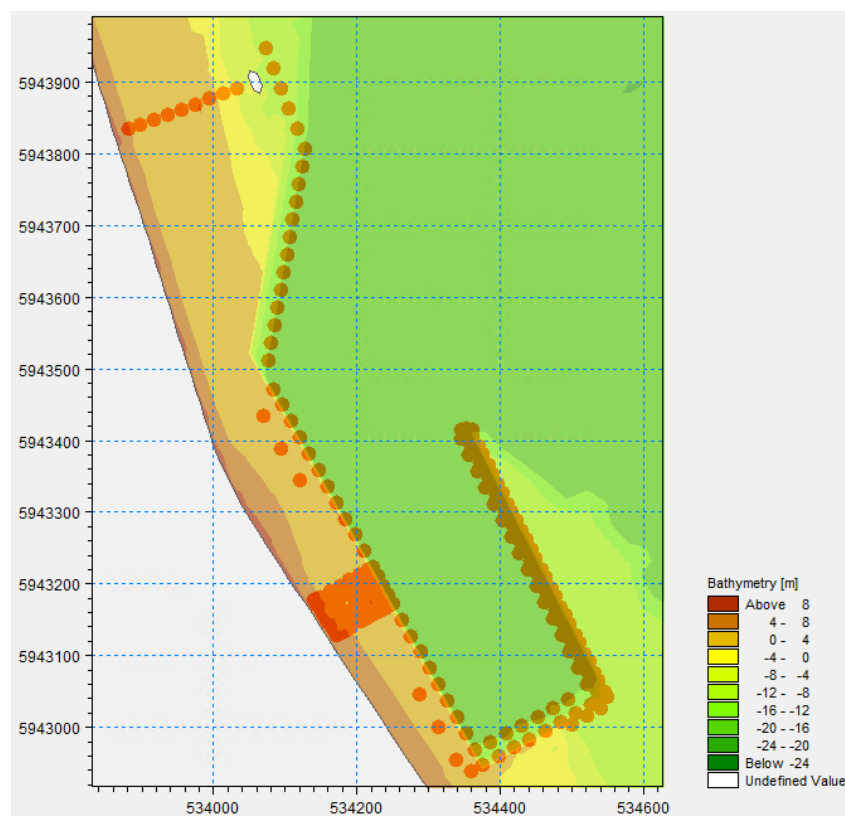


Abbildung 3-5: Berücksichtigung der Pfähle im Modell

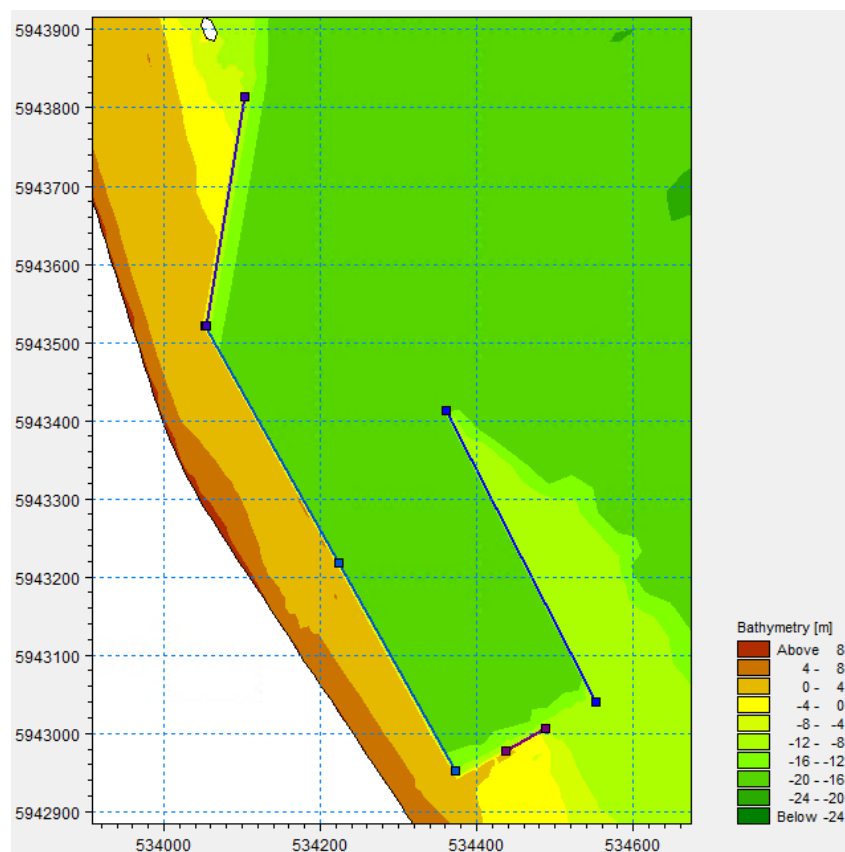


Abbildung 3-6: Berücksichtigung der Spundwände im Modell



### 3.1.4 Berücksichtigung des Schiffskörpers

Um den Einfluss des Schiffskörpers der FSRU auf die Strömungen zu berücksichtigen, wurde dieser im numerischen Modell vereinfacht integriert /4/. Es wird ein konstanter Tiefgang von ca. 12 m angenommen. Dies entspricht dem Auslegungs-Tiefgang der FSRU bei maximaler Beladung und stellt damit eine konservative Abschätzung bezüglich des zu erwartenden Strömungswiderstands dar. Abbildung 3-7 zeigt eine Draufsicht und einen Querschnitt des Berechnungsgitters und die Implementierung der FSRU im Modell in Querrichtung.

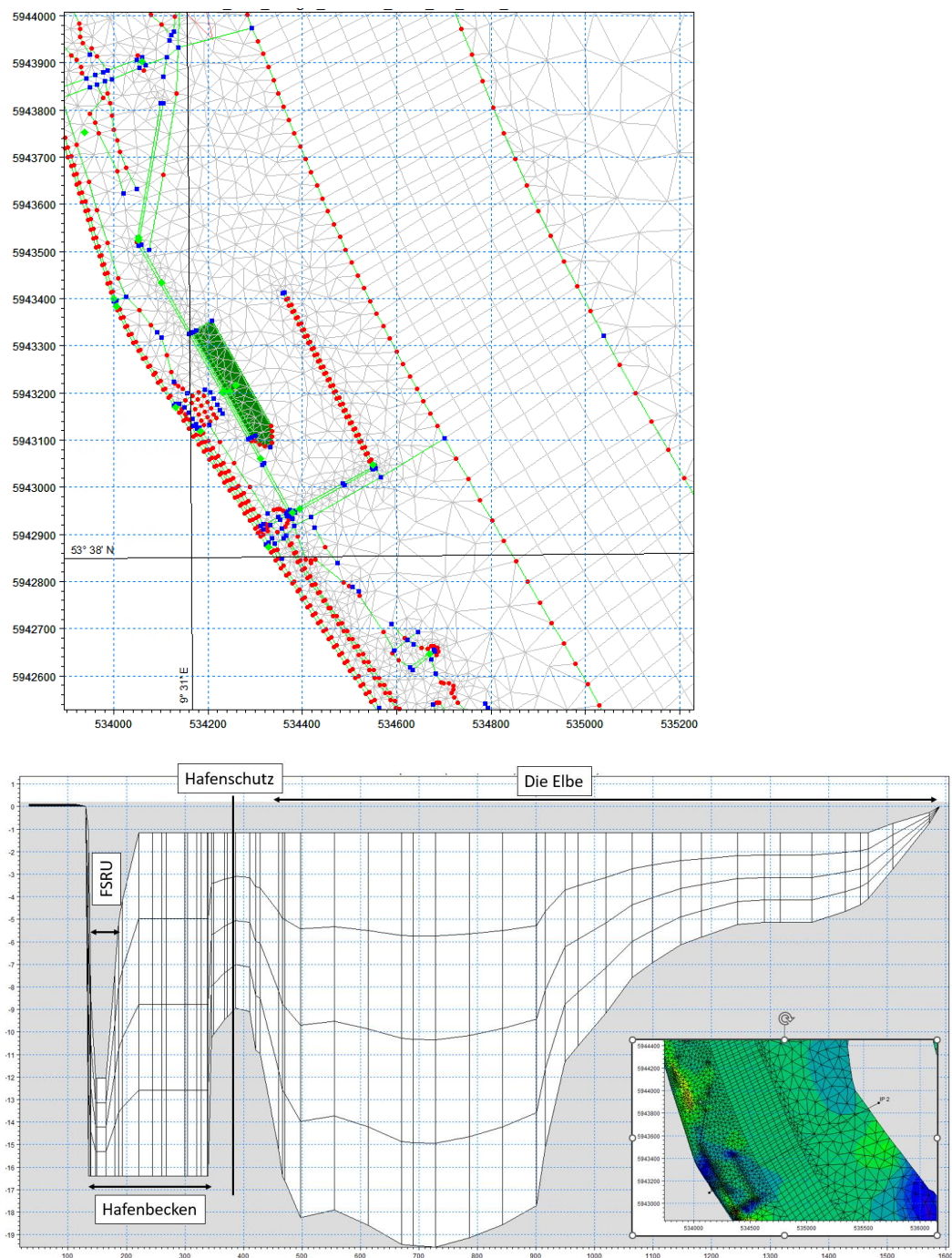


Abbildung 3-7. Die Betrachtung der FSRU im Berechnungsgitter des Regionalmodells: Draufsicht (oben) und Querschnitt (unten)

### 3.1.5 Randbedingungen

Für das Tideelbmodell wurden die Randbedingungen, die in Form von Zeitreihen in das Modell eingehen, auf den Modellzeitraum Juli-August 2019 angepasst. Dies betrifft folgende Parameter (Abbildung 3-8):

- Die Wasserstände am unteren Modellrand bei Elbkilometer 738 (Interpolation der Wasserstände und Zeitversatz zwischen den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft und Bake C)
- Die Wasserstände an den Sperrwerken der Pinnau und der Schwinge
- Den Abfluss am oberen Modellrand der Station Neu Darchau

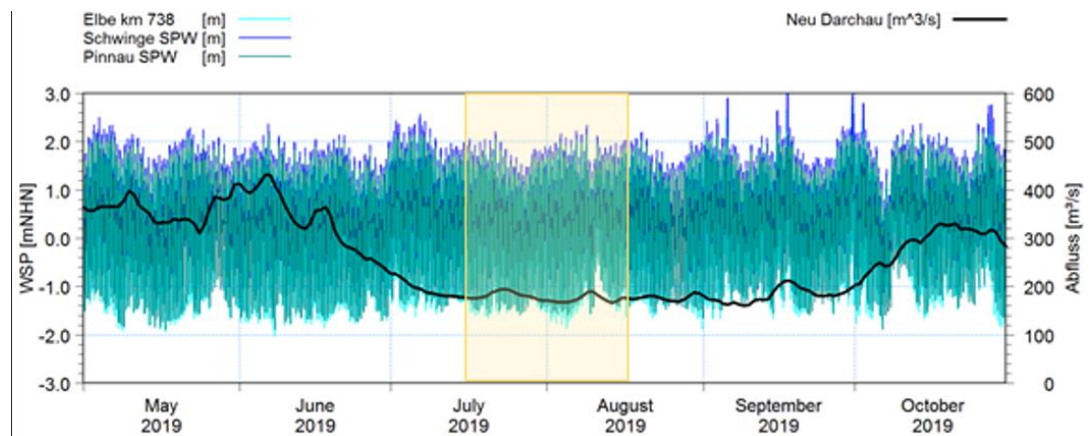


Abbildung 3-8. Randbedingungen des Elbmodells: Wasserstände (WSP) und Abfluss /3/

Für das Regionalmodell wurden die Randbedingungen (Lage siehe Abbildung 3-9) aus dem Tideelbmodell für den Zeitraum Juli-August 2019 extrahiert. Der untere Rand wurde durch die (Tide-dominierte) Wasserspiegellage gesteuert (Abbildung 3-10), wohingegen der obere Rand durch die Strömungsgeschwindigkeiten gesteuert wurde (Abbildung 3-11).

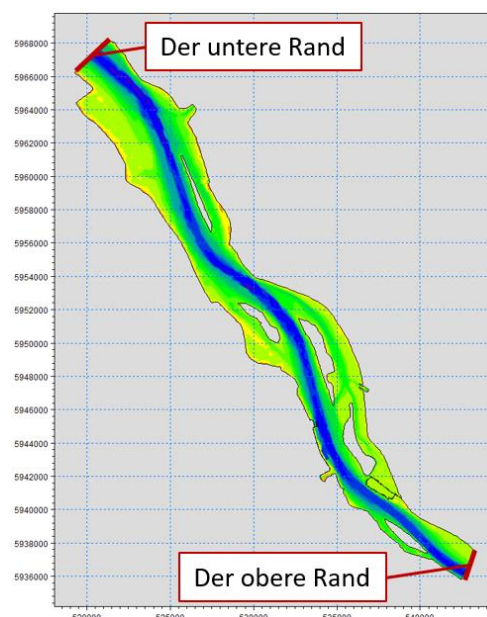


Abbildung 3-9. Oberer und unterer Rand des Regionalmodells

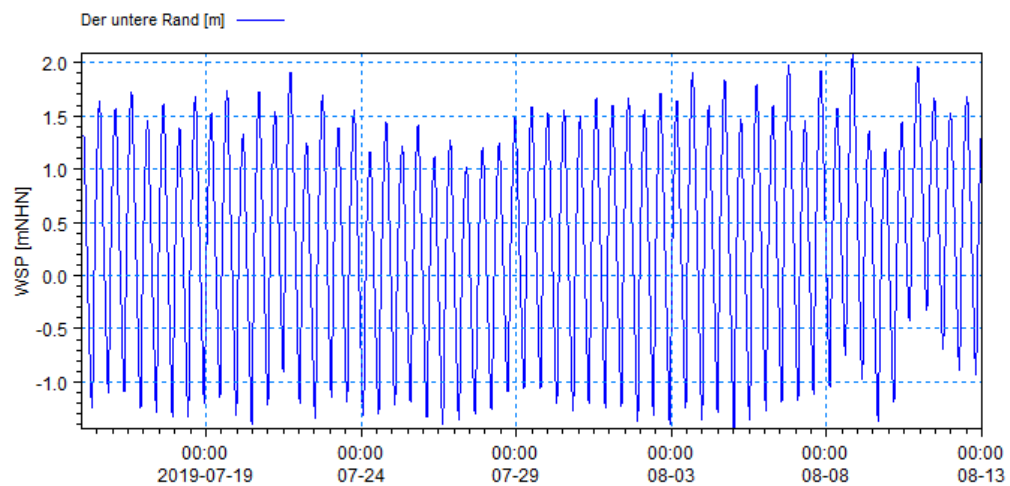


Abbildung 3-10. Wasserspiegellage am unteren Rand des Regionalmodells

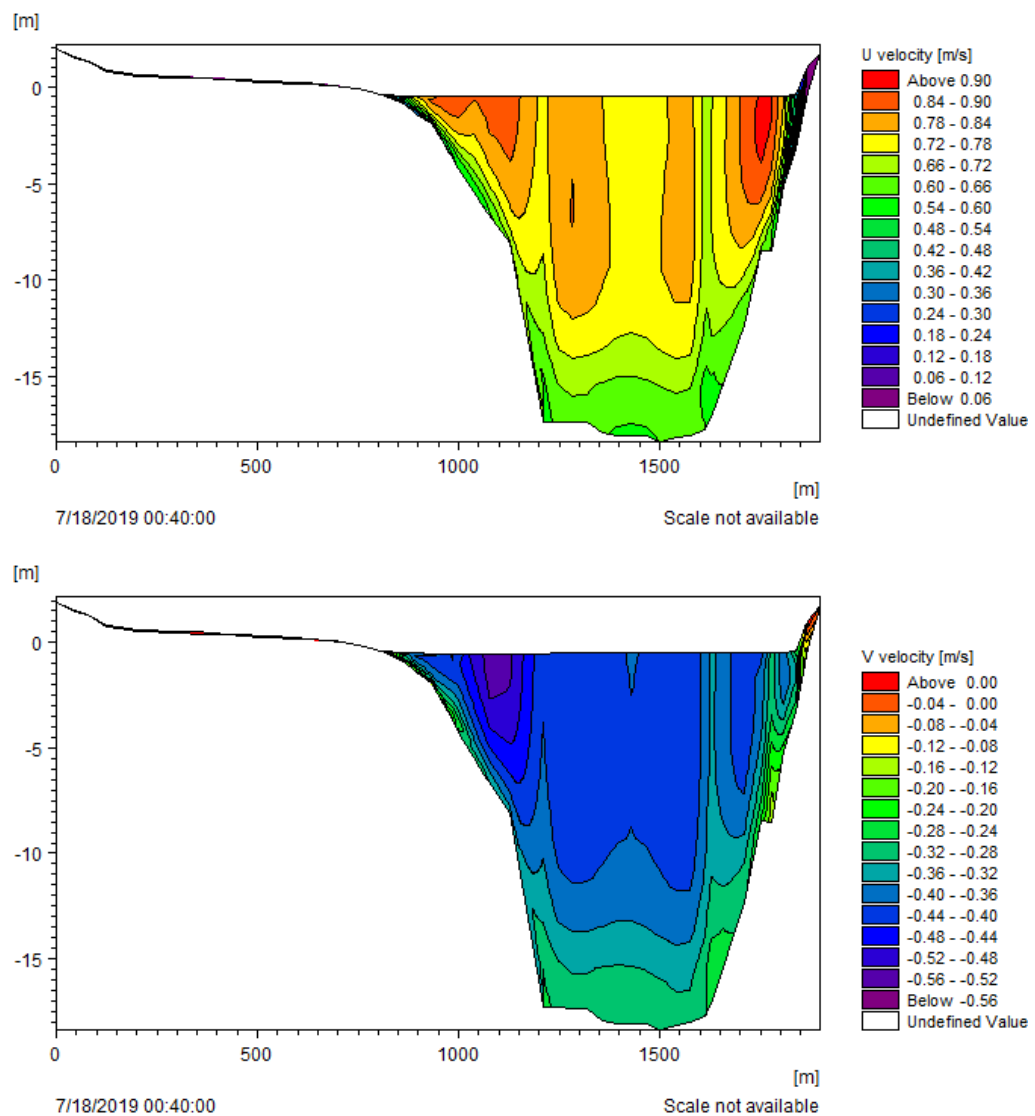


Abbildung 3-11. Beispielhafte Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten am oberen Rand des Regionalmodells am 18.7.2019, 0:40 Uhr. Oben: horizontale Geschwindigkeit, unten: vertikale Geschwindigkeit.

## 3.2 Lokales Modell

### 3.2.1 Software

Das lokale 3D-Modell für die Modellierung der Strömungen unter der vertäuten FSRU sowie um den Südhafen herum, wurde mit der Open-Source-Software *OpenFOAM* (v2012) /5/ aufgebaut. Es handelt sich dabei um ein sogenanntes Computational-Fluid-Dynamics- (CFD-) Modell, welches im Unterschied zum regionalen Modell von einer voll-dynamischen Druckverteilung unter Einbeziehung der hydrodynamischen Effekte ausgeht. Das verwendete Modell nutzt die stationären Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) in 3D, unter Berücksichtigung des  $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodells zur Lösung der Reynolds-Kräfte. Der sogenannte SIMPLE-Algorithmus wurde verwendet, um die hydrodynamischen Prozesse im stationären Zustand zu lösen. Dabei wird die Viskosität des Wassers berücksichtigt und der Schiffskörper dreidimensional aufgelöst.

### 3.2.2 Berechnungsgitter und Berücksichtigung des Schiffskörpers und der Bauwerksstrukturen

Abbildung 3-12 zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten aus dem regionalen Modell zum Zeitpunkt der maximalen Flutstromgeschwindigkeit der ausgewählten Tiden. Diese stellen die stationären Randbedingungen des lokalen CFD-Modells dar, dessen Ausdehnung durch einen roten Rahmen (Ausdehnung 1400 x 790 m<sup>2</sup>) dargestellt ist. Der geplante Anleger liegt am linken Rand des CFD-Modells. Die Bathymetrie des lokalen CFD-Modells wird in Abbildung 3-13 (Draufsicht) und in Abbildung 3-15 (3D-Ansicht) präsentiert.

Es wurden zwei Szenarien untersucht:

1. CFD-Modell ohne FSRU
2. CFD-Modell mit FSRU (Tiefgang  $T = 12\text{m}$ )

Die Berechnungsgitter für das CFD-Modell wurde mit *snappyHexMesh* aufgebaut, einem Modul von OpenFOAM. Das generierte Berechnungsgitter besteht aus überwiegend achteckigen Elementen. Eingangsdaten für die sogenannte Meshing-Routine sind Stereolithography- (STL-) Oberflächen, die in diesem Fall die Bathymetrie im Modellbereich und die Geometrie der FSRU beschreiben (Abbildung 3-15). Die verwendete Bathymetrie entspricht derjenigen des regionalen Modells, dargestellt in Abbildung 3-13. Mit dem lokalen Modell werden die von den Bauwerksstrukturen beeinflussten Strömungen numerisch berechnet, um sie als Eingangsparameter für die Abschätzung der Kolkiefen und ein Kolkenschutzkonzept verwenden zu können. Das heißt, dass die Auswirkung sowohl der Pfähle als auch der Spundwände im lokalen Modell enthalten sind. Die Form und die Abmessungen der FSRU sind in Abbildung 3-14 angeführt.

Beispielhaft ist das Berechnungsgitter für das Szenario mit FSRU in Abbildung 3-16 dargestellt. Es besteht aus ca. 300.000 Elementen. Im Nahbereich um die FSRU ist die Auflösung sehr hoch, die Zellengröße nimmt zu den Modellrändern hin zu. Das Berechnungsgitter mit dem Schiffskörper berücksichtigt die FSRU mit einem Tiefgang von  $T = 12\text{ m}$  (Kielfreiheit =  $\sim 4,6\text{ m}$ ). Dies entspricht dem voll beladenen Zustand. Die horizontalen Elementgrenzen sind überwiegend



waagrecht orientiert. Die Elementgrenzen erscheinen im Nahbereich der FSRU in Abbildung 3-16 als blaue Fläche, weil sie sehr dicht nebeneinander liegen.

Für das Szenario ohne FSRU wurde die Gitterauflösung beibehalten, um die Vergleichbarkeit zwischen den Modellen zu maximieren.

Die Spundwände wurden im Modell als undurchlässige Leitbleche berücksichtigt. Die Auswirkung der Pfähle auf die Strömung wurde mithilfe des Ansatzes poröser Medien im CFD-Modell betrachtet. Die Bauwerksstrukturen des Südhafens sind in Abbildung 3-16 gezeigt.

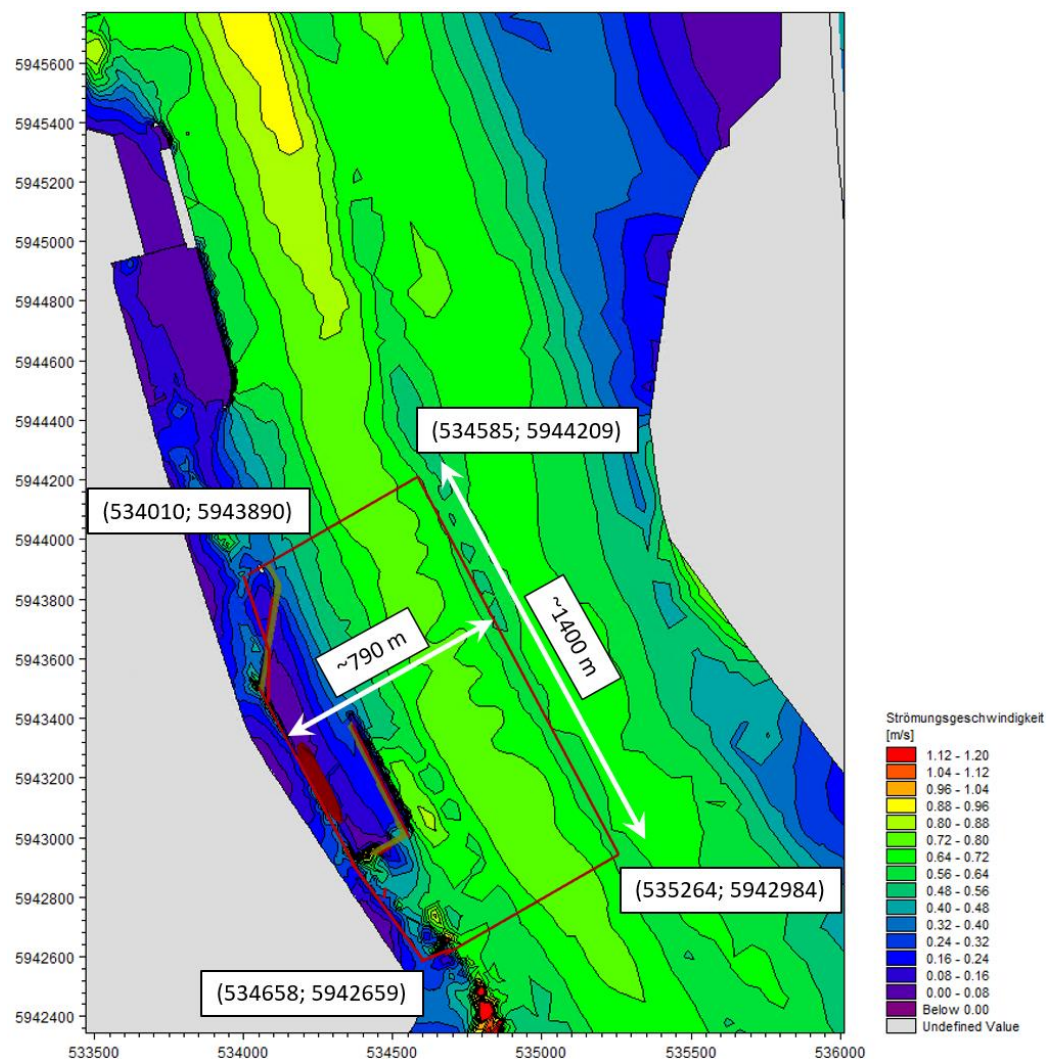


Abbildung 3-12. Maximale Flutstromgeschwindigkeit der Tide vom 18.07.2019 (00:40 Uhr) an der Gewässeroberfläche, Ausdehnung des CFD-Modells entspricht dem roten Polygon.

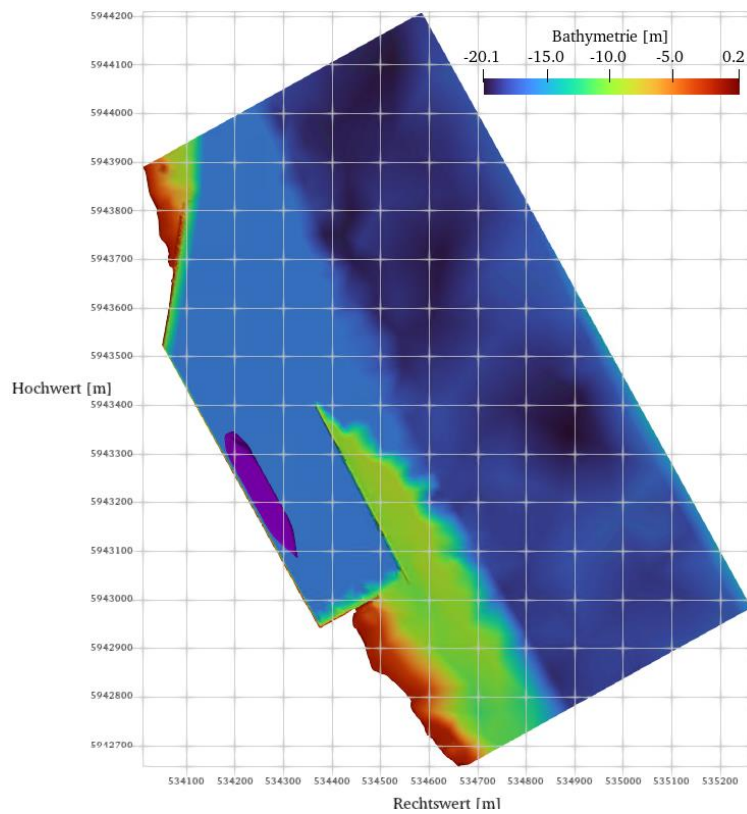


Abbildung 3-13. Bathymetrie des lokalen CFD-Modells: Draufsicht

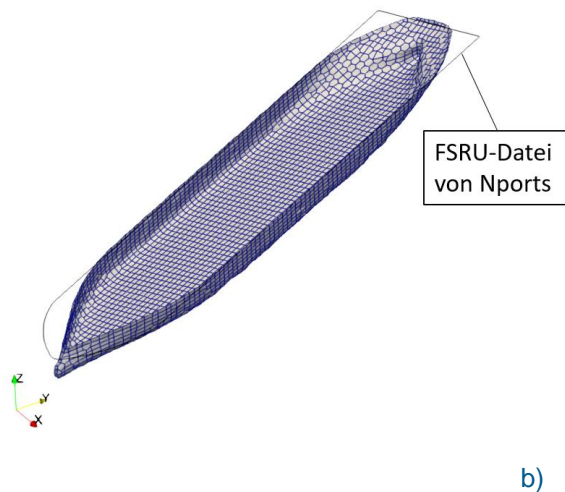
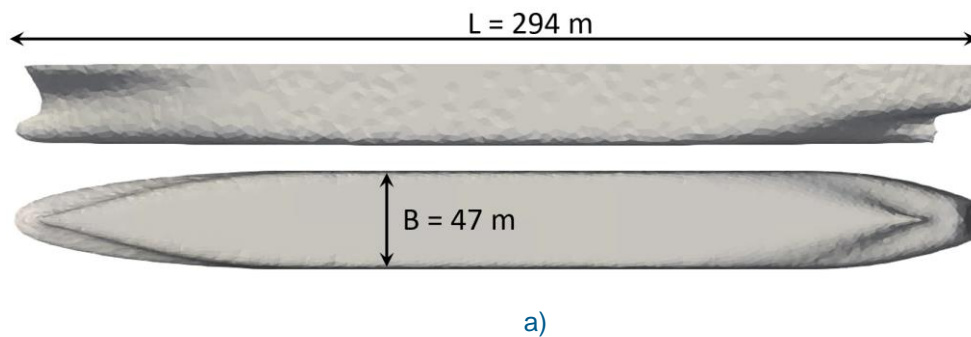


Abbildung 3-14. Stereolithography- (STL-) Oberfläche der FSRU a) Seitenansicht und Draufsicht, b) 3D-Ansicht Richtung Bug

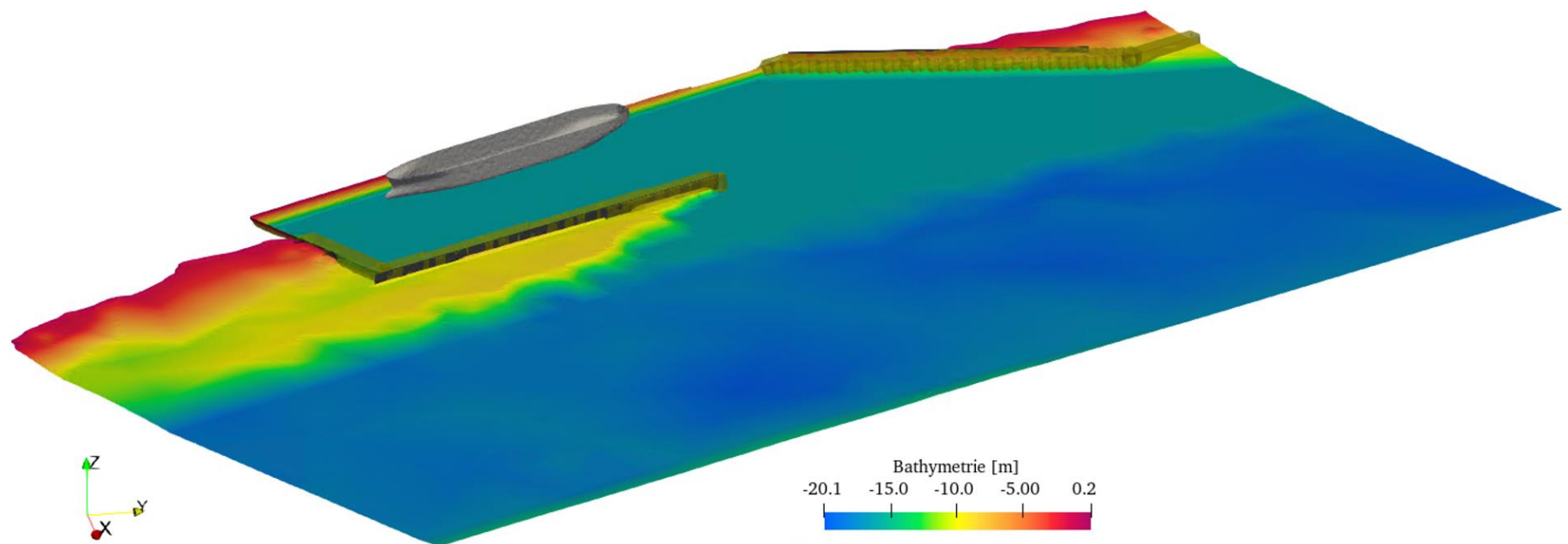


Abbildung 3-15. Bathymetrie des lokalen CFD-Modells und die FSRU-Hülle: 3D-Ansicht



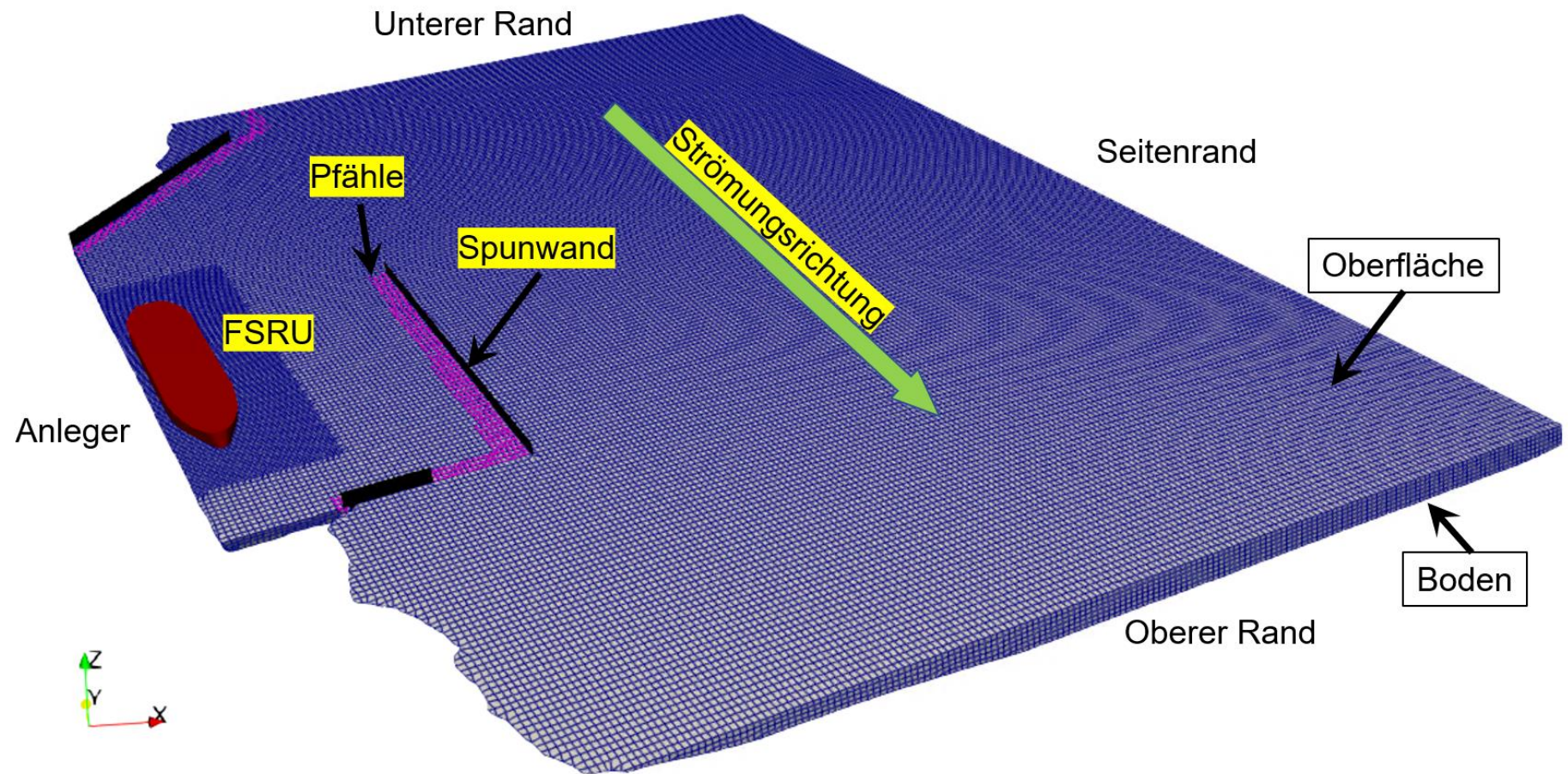


Abbildung 3-16. Berechnungsgitter mit der vertäuten FSRU mit Tiefgang  $T = 12$  m.



### 3.2.3 Randbedingungen

Die Randbedingungen für den Zustrom wurden für die Strömungsgeschwindigkeit ( $U$ ) aus dem Regionalmodell entlang des Randes des lokalen Modells extrahiert und hier übernommen. Die Parameter wurden am unteren (nördlichen) Modellrand (Abbildung 3-16) eingelesen. Extrahiert wurde die Strömung am 18.07.2019 00:40. Dieser Zeitpunkt entspricht dem maximalen Flutstrom einer repräsentativen (relativ hohen) Tide an der Messstation Pagensand (siehe Abbildung 3-17). Am oberen Rand wurde lediglich eine hydrostatische Druckverteilung angesetzt. Wegen dieser vereinfachten Annahme ist der untere Modellrand weit vom Schiff entfernt, um sicher zu stellen, dass diese Vereinfachung keine Auswirkungen auf das Untersuchungsergebnis in unmittelbarer Nähe des Schiffskörpers hat. An den seitlichen Rändern wurde eine sogenannte „Slip“-Randbedingung angesetzt, so dass Wasser ungehindert entlang gleiten, jedoch das Modellgebiet nicht verlassen kann. Diese Vereinfachung ist aufgrund des ebenfalls großen Abstands des Randes zum Schiffskörper und wegen der ermittelten Strömungsrichtung im Regionalmodell hinreichend genau.

Die Sohloberfläche (= „Sohle“ in Abbildung 3-16) wurde übereinstimmend mit dem Regionalmodell (siehe Abschnitt 3.1.5) als Rauheitsbehafteter Modellrand unter der Verwendung der Nikuradse-Sohlrauheit  $k_s = 0,05$  m berücksichtigt. Der „Oberflächen“-Rand wurde vereinfachend als reibungsfrei mit Höhenlage  $z = 0,22$  m angesetzt, welche dem Wasserstand während des maximalen Flutstroms entspricht. Die Oberfläche der FSRU wurde als sogenannte „Wand“ mit einer oberflächenparallelen Geschwindigkeit von  $v = 0$  m/s berücksichtigt. Die kinematische Viskosität des Wassers wurde mit  $\nu = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s festgelegt.

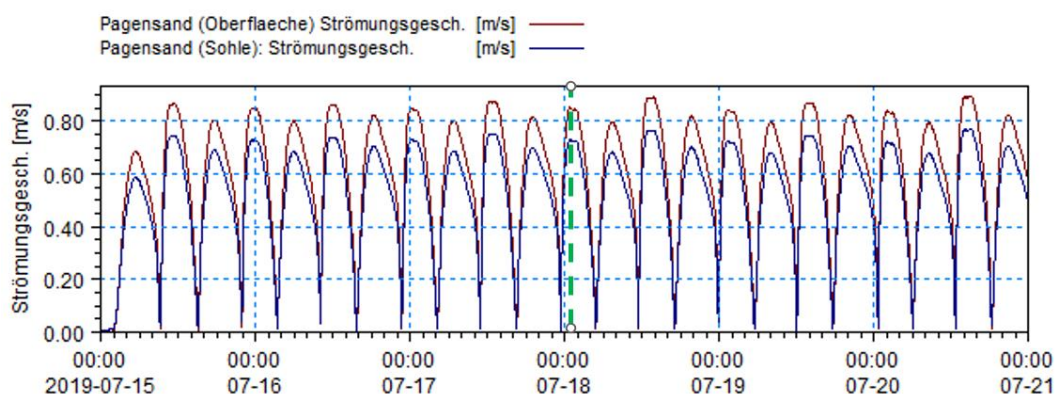


Abbildung 3-17. Strömungsgeschwindigkeit aus dem Regionalmodell in Pagensand. Zeitpunkt für die CFD-Simulationen wurde für die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten im Hafenbecken gewählt

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Strömungsgeschwindigkeiten unter und im Nahbereich der vertäuten FSRU aus den Simulationen des lokalen CFD-Modells mit und ohne FSRU beschrieben. In Abschnitt 4.1 werden die Strömungsprofile am geplanten Anleger für ausgewählte Positionen unter und im Nahbereich der FSRU präsentiert. Zusätzlich werden die Zu- und Abnahme der sohnahen Strömungsgesschwindigkeiten unter der FSRU in Abschnitt 4.2 gezeigt.

### 4.1 Strömungsprofile am geplanten Anleger mit und ohne vertäuter FSRU

Abbildung 4-1 zeigt die Positionen der Extraktionsorte für vertikale Geschwindigkeitsprofile. In Tabelle 4-1 sind deren Koordinaten (in ETRS 1989 UTM 32N und relativ zum Schiffsmittelpunkt der FSRU) aufgeführt, die sich jeweils unter und im Nahbereich der FSRU befinden.

Abbildung 4-2 zeigt die extrahierten Geschwindigkeitsprofile über die Wassertiefe ohne und mit vertäuter FSRU bei einem Tiefgang von  $T = 12\text{m}$ .

Durch die FSRU kommt es während des Flutstroms zu einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit nur unter dem Bugbereich der FSRU (U1 und U4, Abbildung 4-2.a und d). Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten ist auf der Backbordseite der FSRU am stärksten (Abbildung 4-2.a). Zwischen der FSRU und dem Anleger (Abbildung 4-2.l-n, PL1-3) wird die Strömungsgeschwindigkeit reduziert. Wegen der Auswirkung der FSRU auf die Strömung erhöht sich die Stromgeschwindigkeit und damit das Kolkpotenzial neben dem Heck der FSRU (Abbildung 4-2.q und v, PR3 und PR8).

Es ist zu erwarten, dass sich die Situation bei Ebbstrom umkehrt und die größte Zunahme des Kolkpotenzials wahrscheinlich am Heck und nicht am Bug der FSRU befindet.

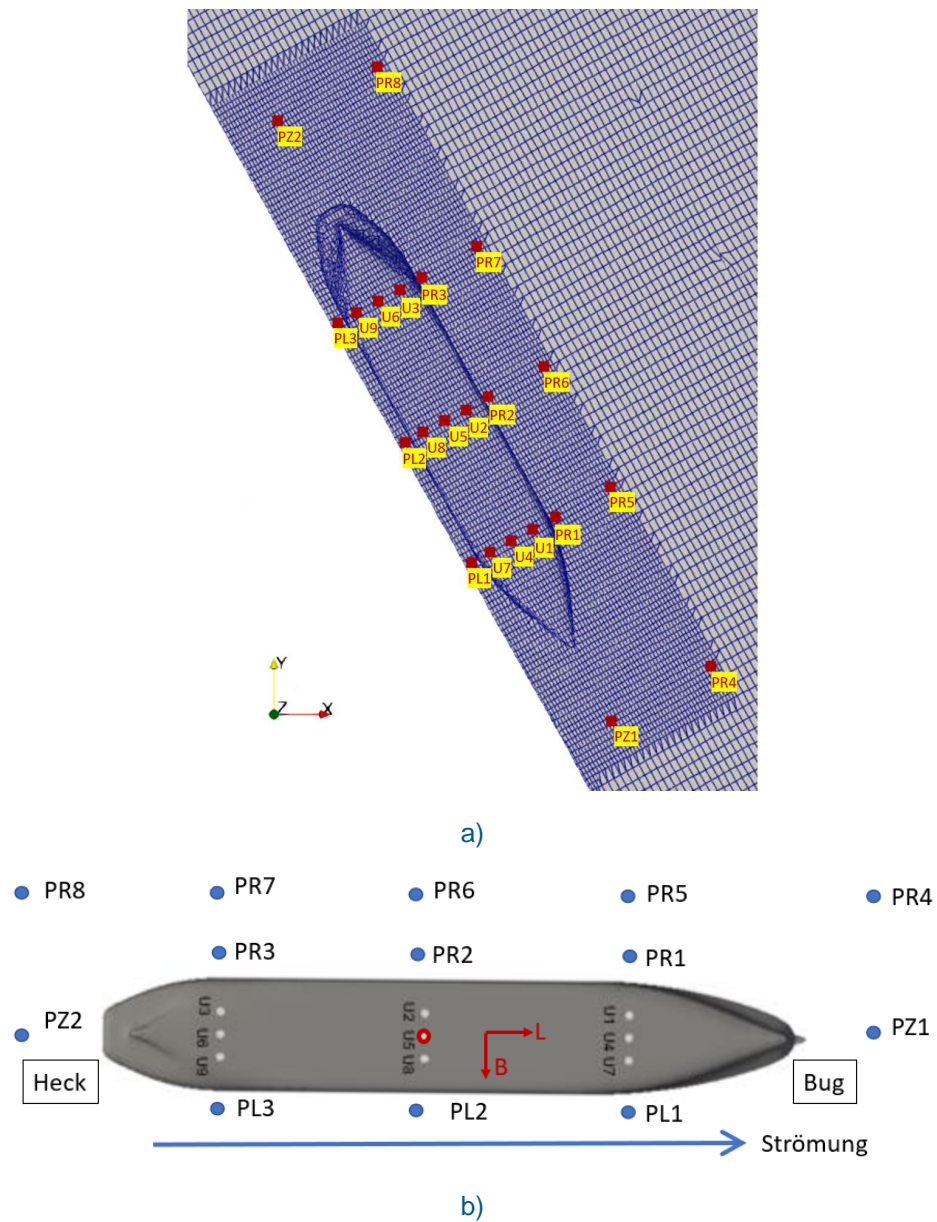
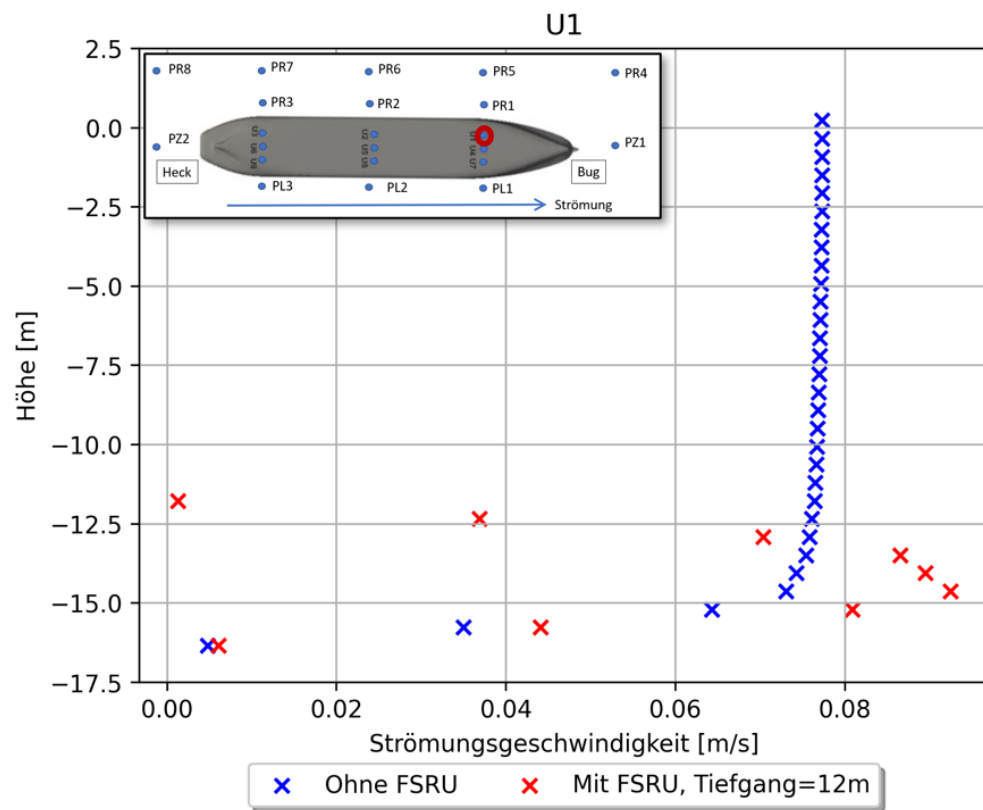


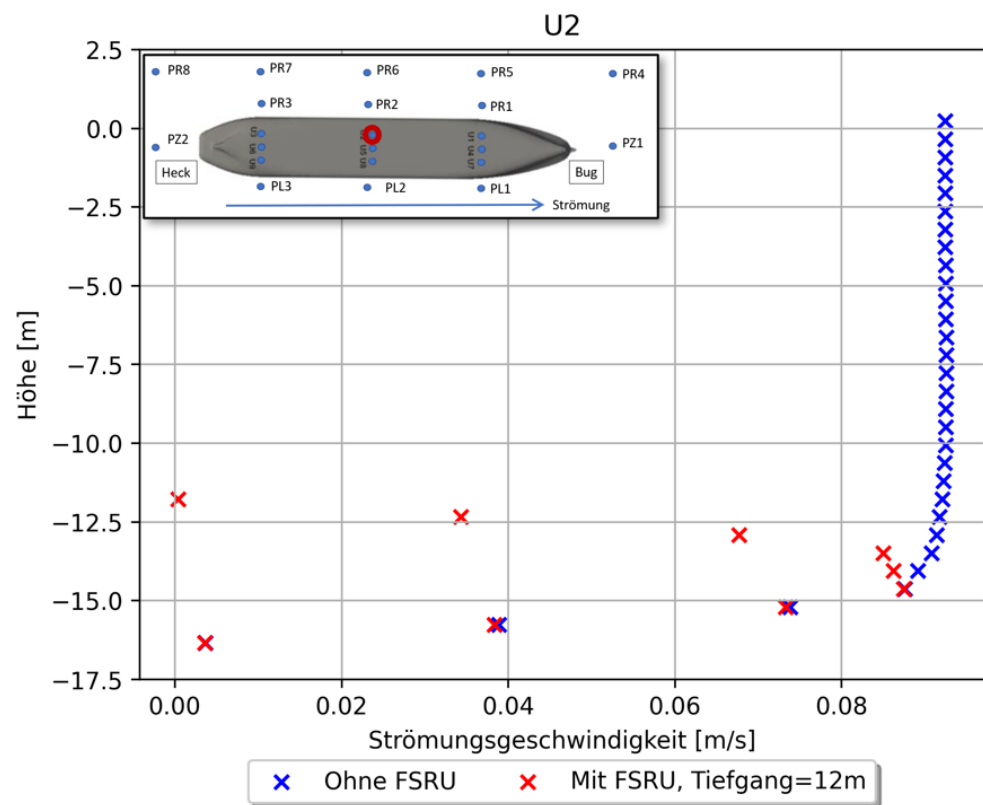
Abbildung 4-1. Extraktionspunkte für Strömungsprofile unterhalb und im Nahbereich der FSRU: a) auf dem Berechnungsgitter gezeichnet und b) relativ zur FSRU

Tabelle 4-1. Koordinaten (UTM ETRS und relativ zur FSRU) der Extraktionspunkte für die vertikalen Geschwindigkeitsprofile am geplanten FSRU-Terminal und unter der FSRU (siehe Abbildung 4-1).

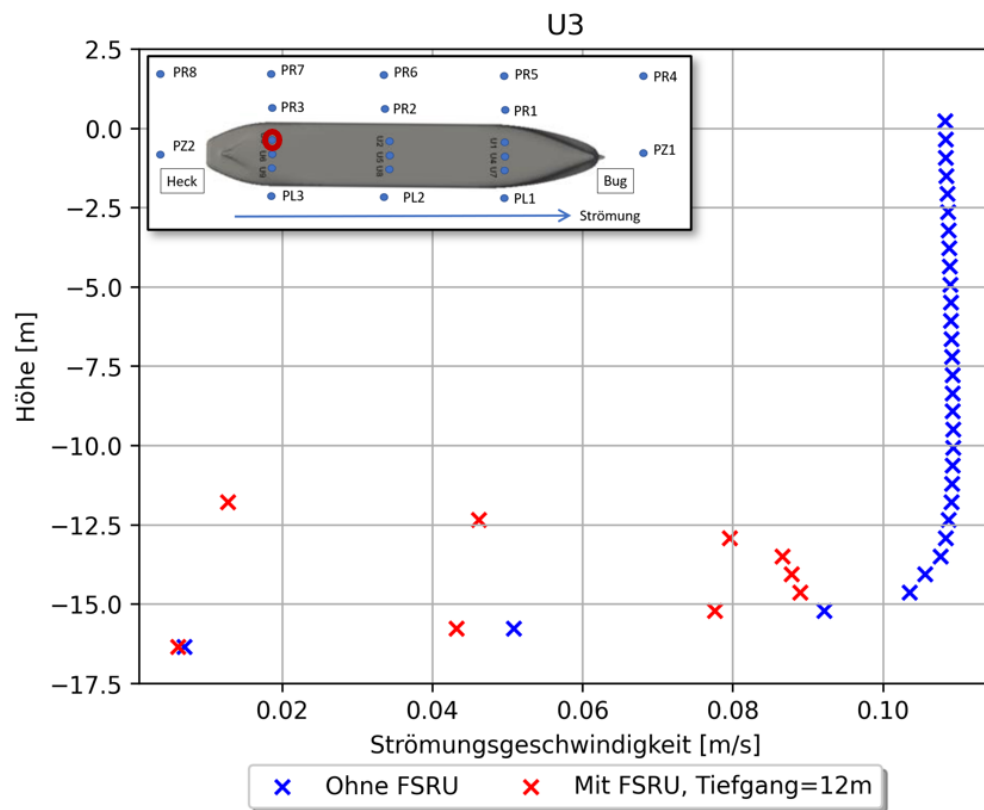
Punkt	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	L [m]	B [m]
PR1	534315	5943166	79	-28,6
PR2	534277	5943235	0	-28,6
PR3	534239	5943304	-79	-28,6
PR4	534405	5943080	197,4	-65
PR5	534347	5943184	79	-65
PR6	534309	5943253	0	-65
PR7	534271	5943322	-79	-65
PR8	534213	5943425	-197,4	-65
U1	534303	5943159	79	-14
U2	534264	5943228	0	-14
U3	534226	5943297	-79	-14
U4	534290	5943153	79	0
U5	534252	5943222	0	0
U6	534213	5943291	-79	0
U7	534278	5943146	79	14
U8	534240	5943215	0	14
U9	534201	5943284	-79	14
PZ1	534348	5943049	197,4	0
PZ2	534156	5943394	-197,4	0
PL1	534267	5943140	79	26
PL2	534229	5943209	0	26
PL3	534191	5943278	-79	26



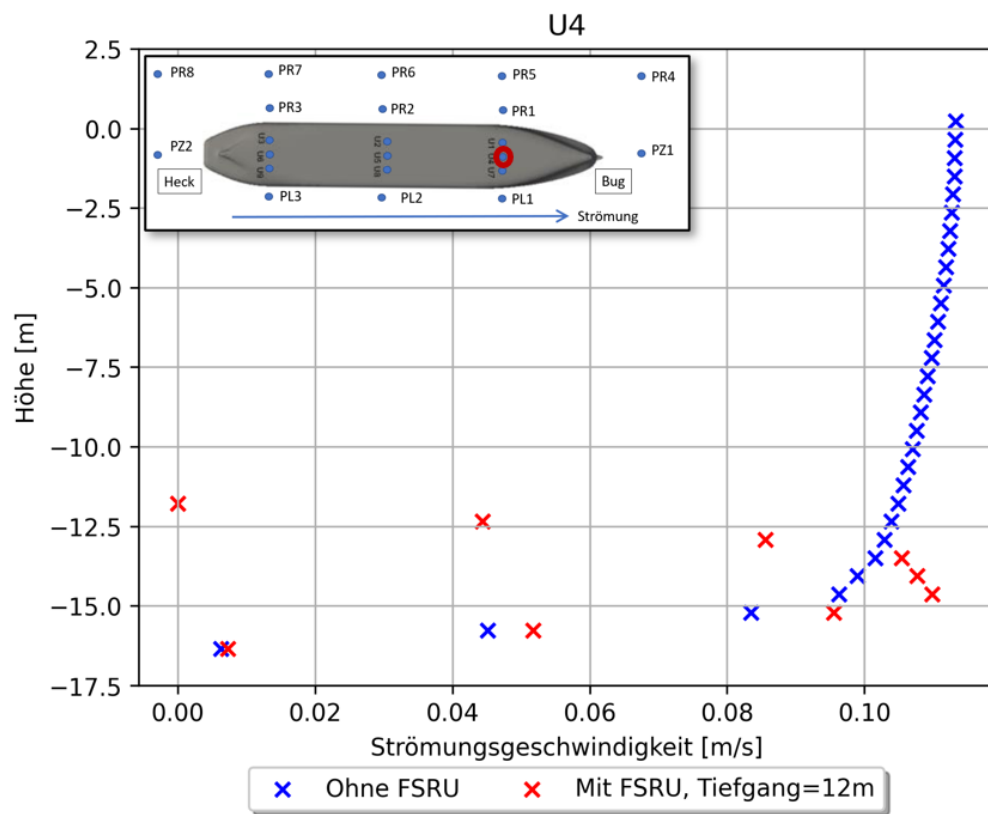
a)



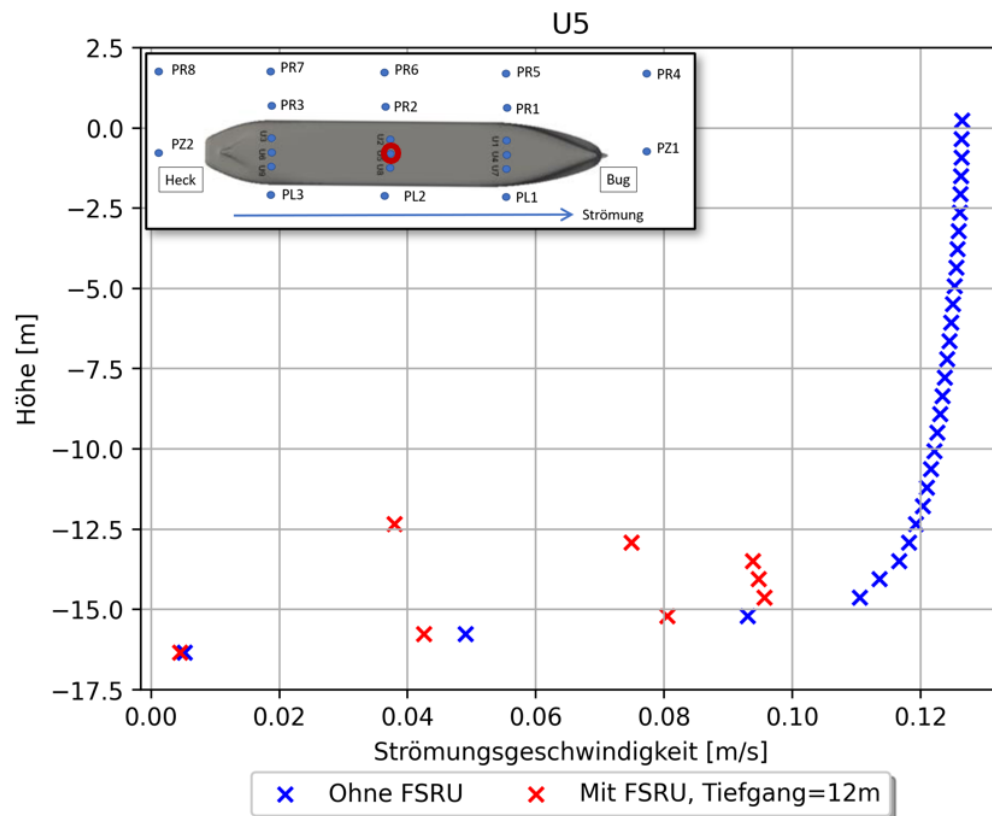
b)



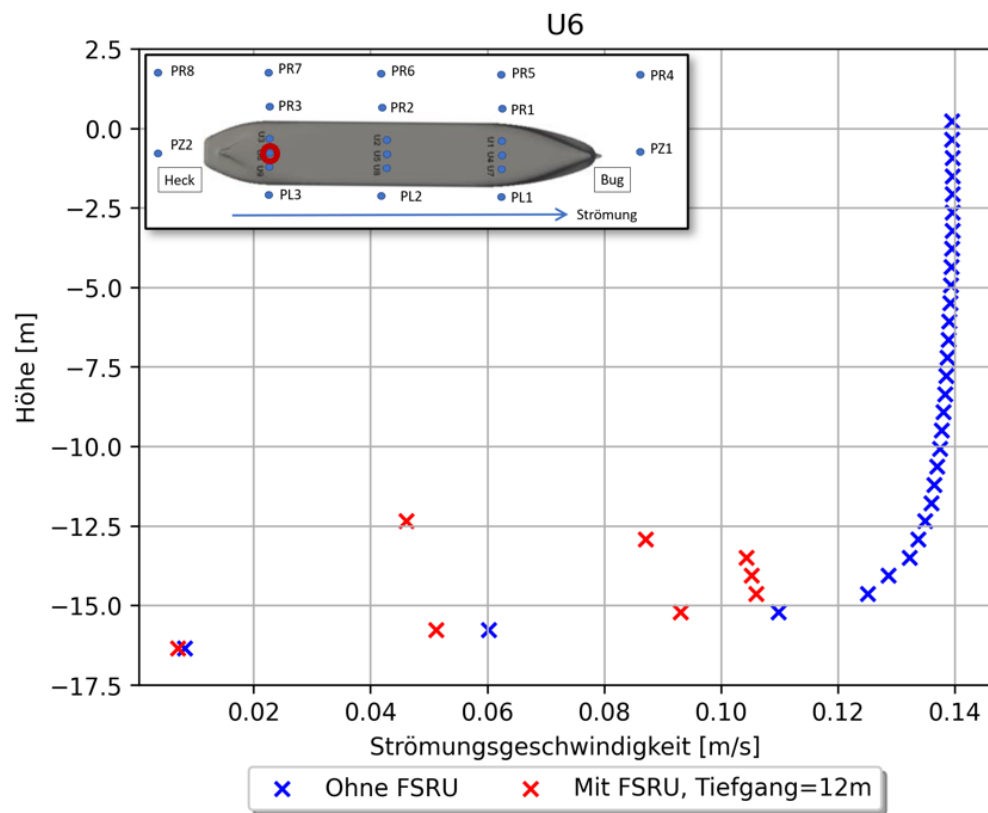
c)



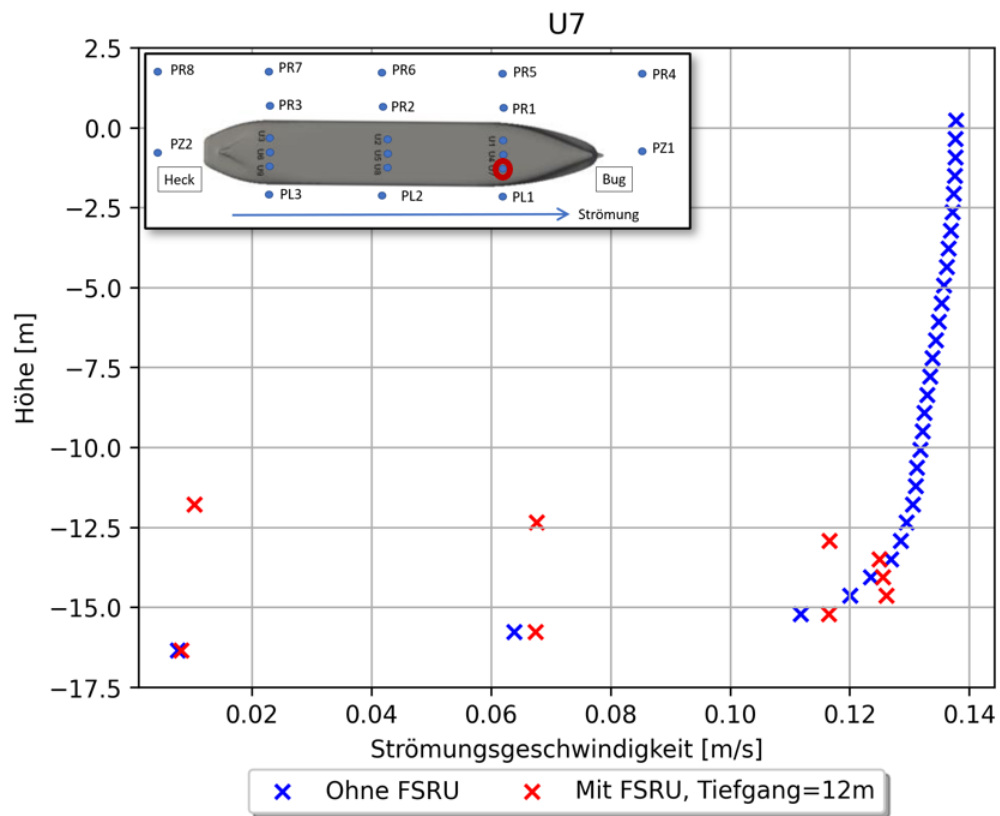
d)



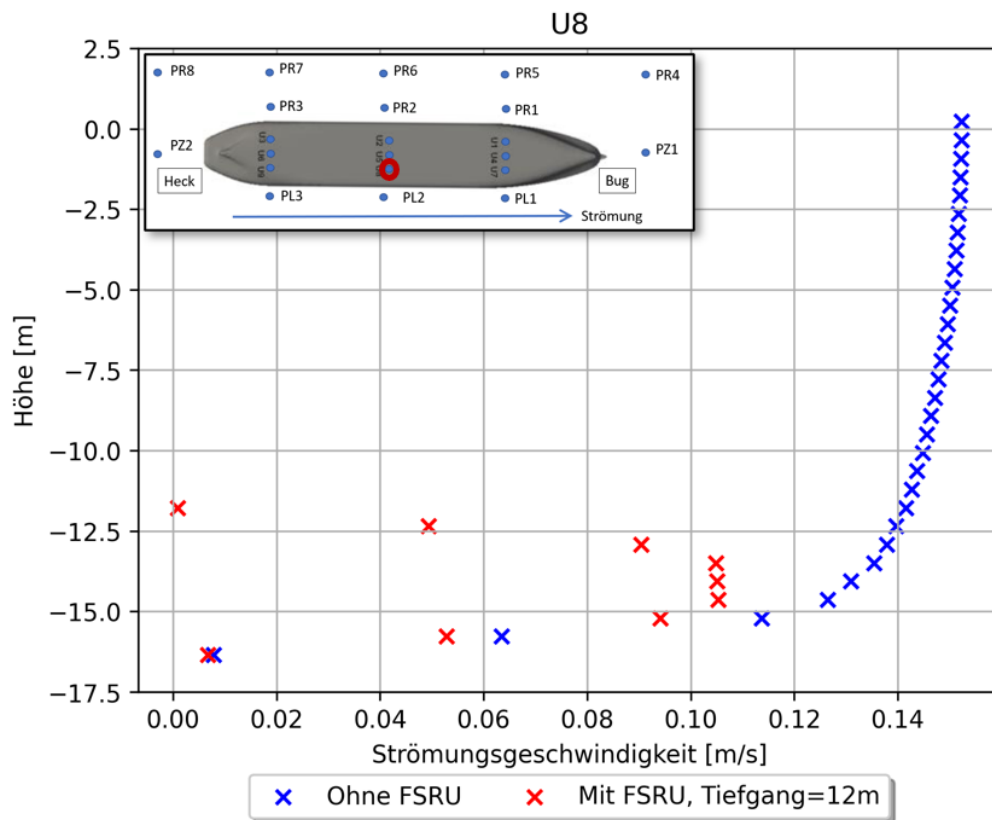
e)



f)

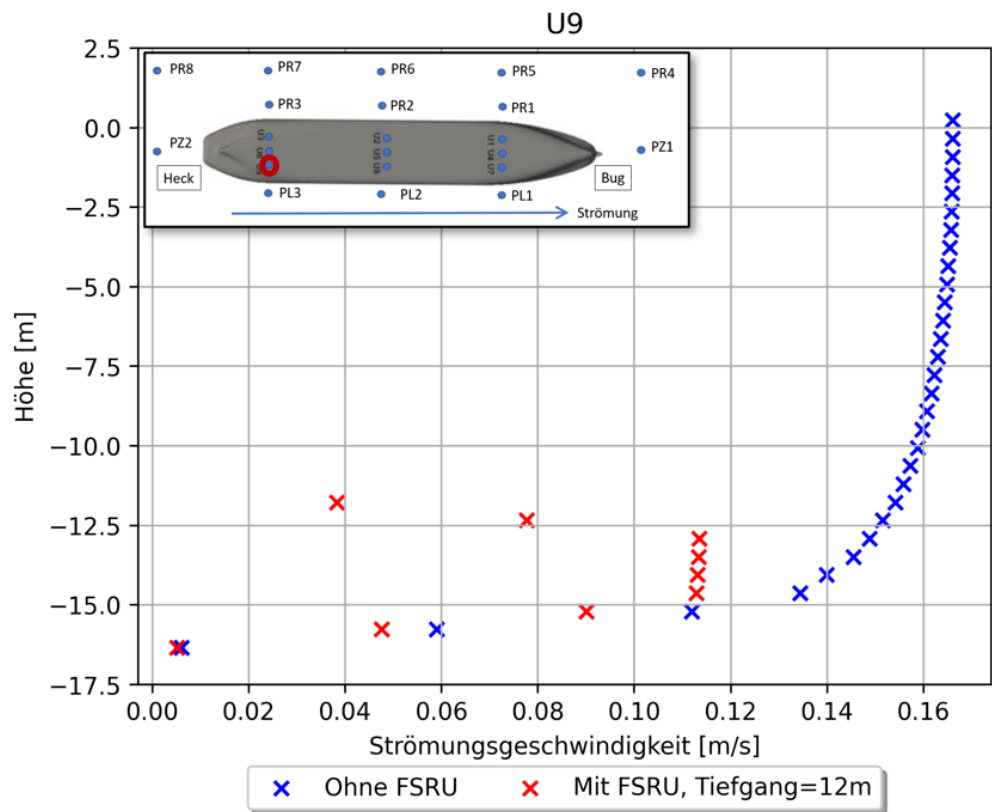


g)

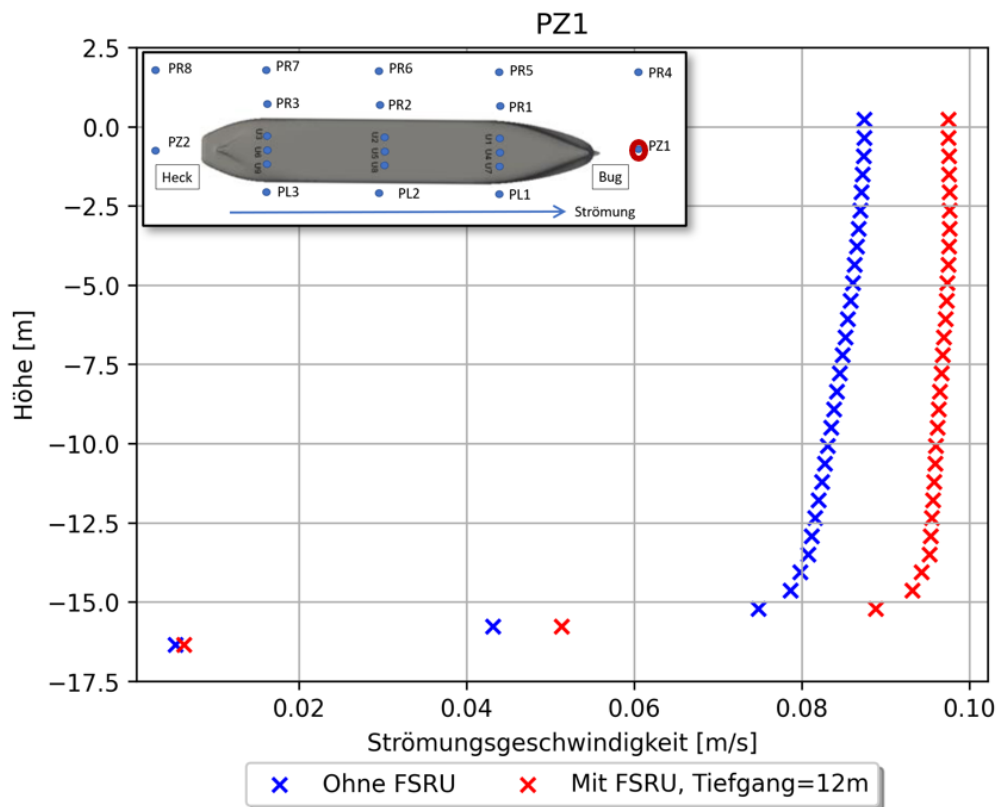


h)

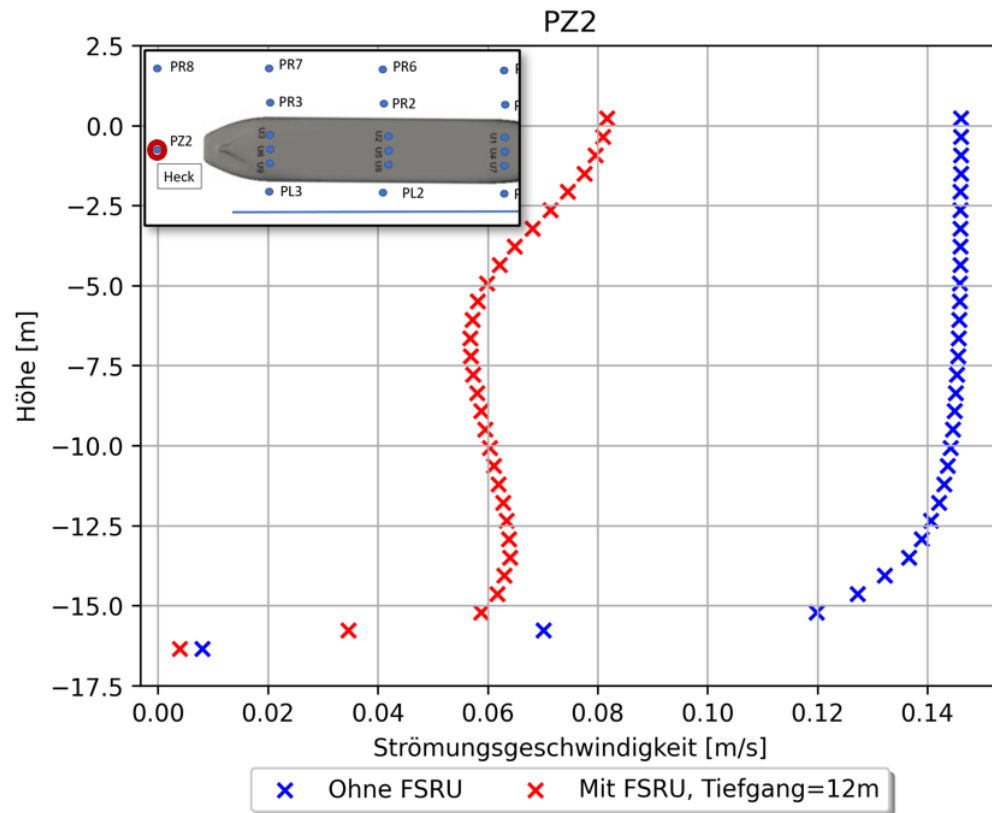




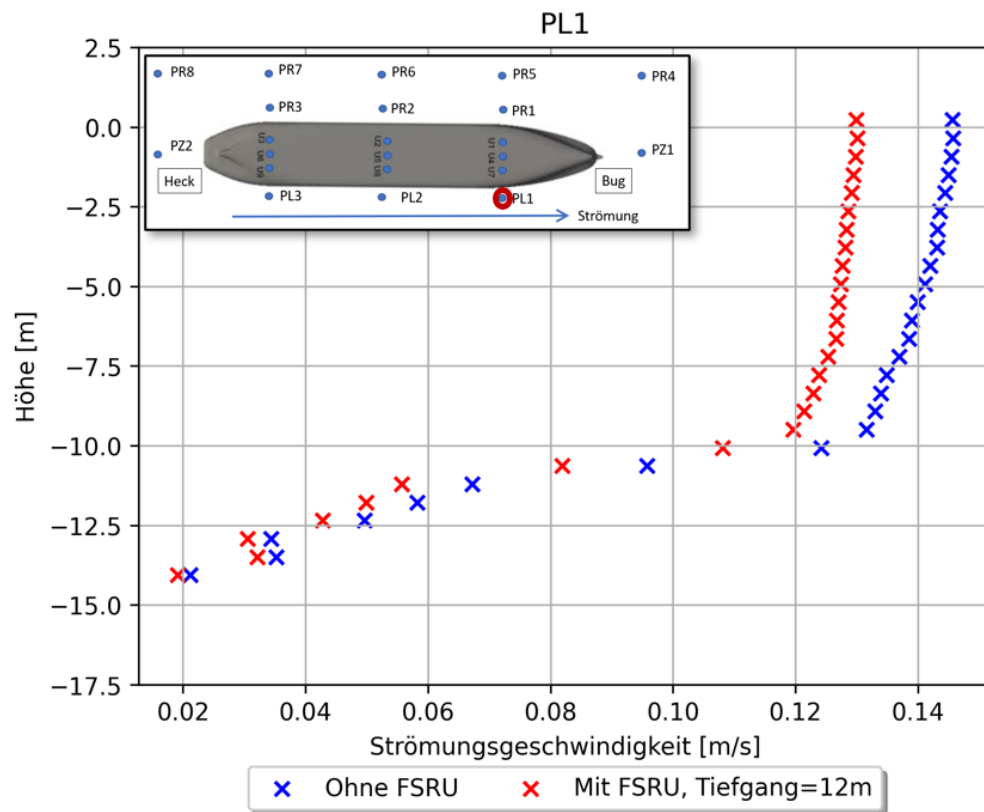
i)



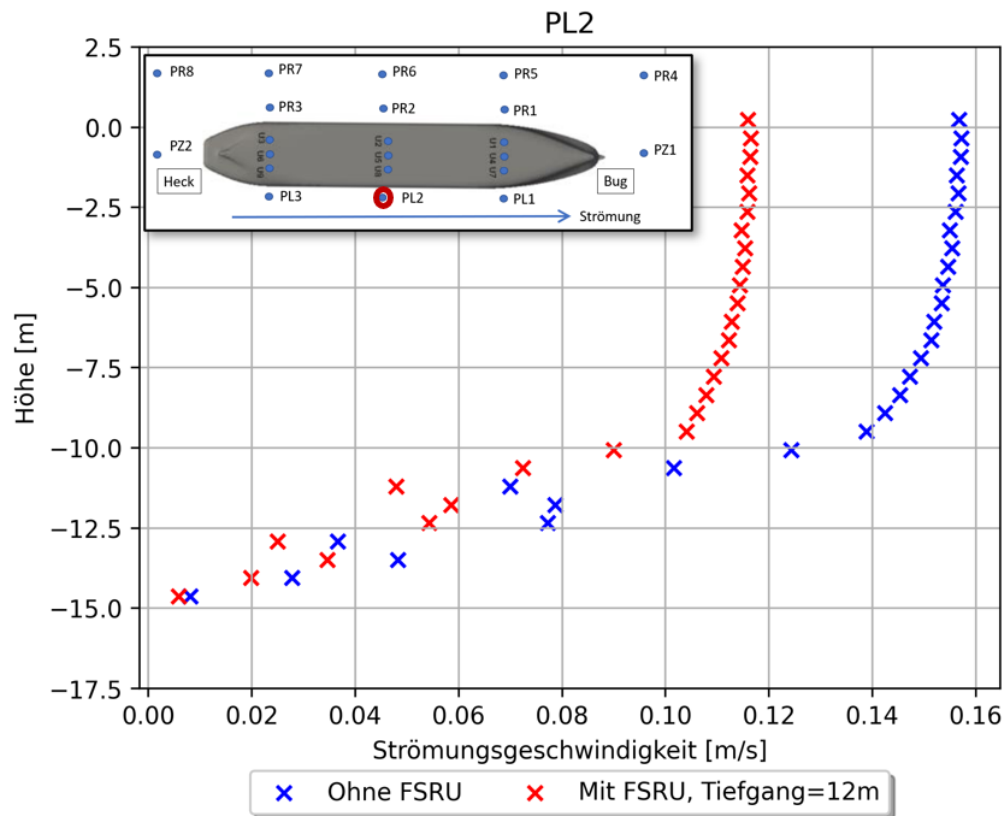
j)



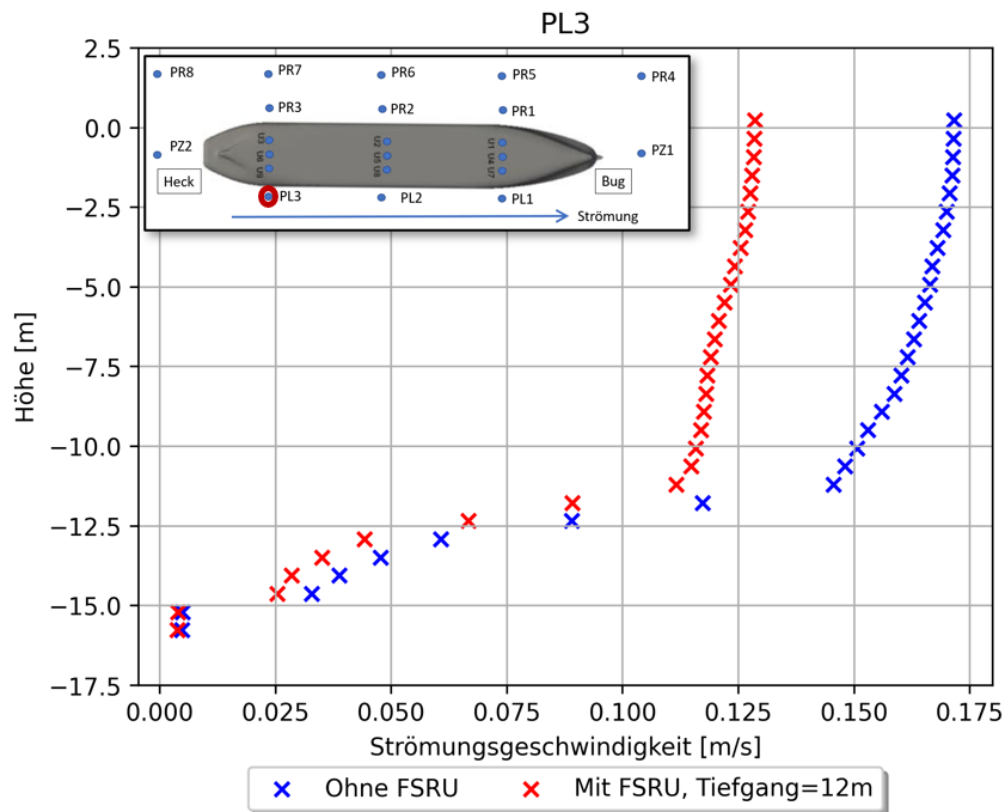
k)



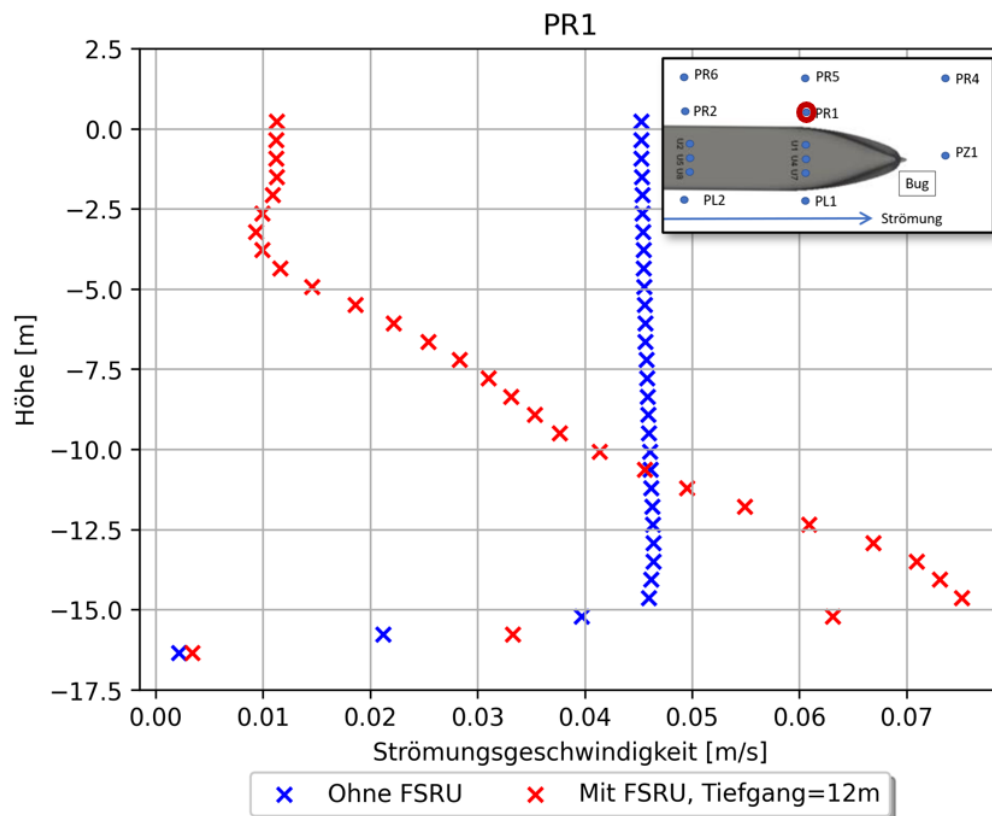
l)



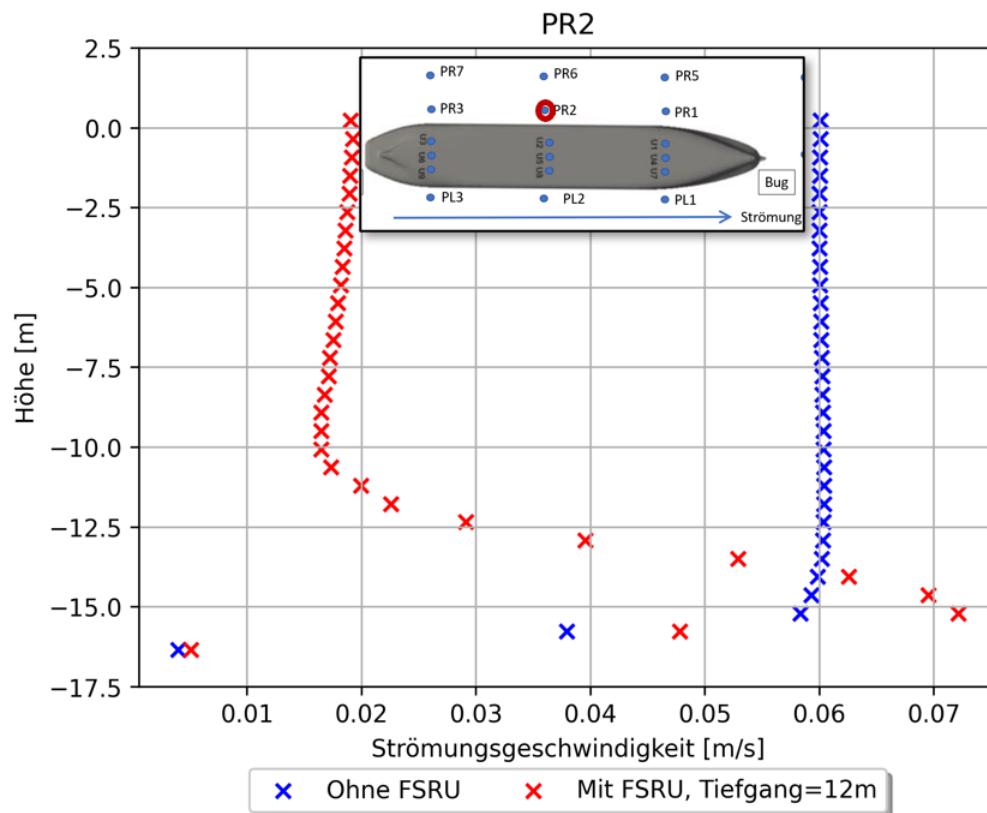
m)



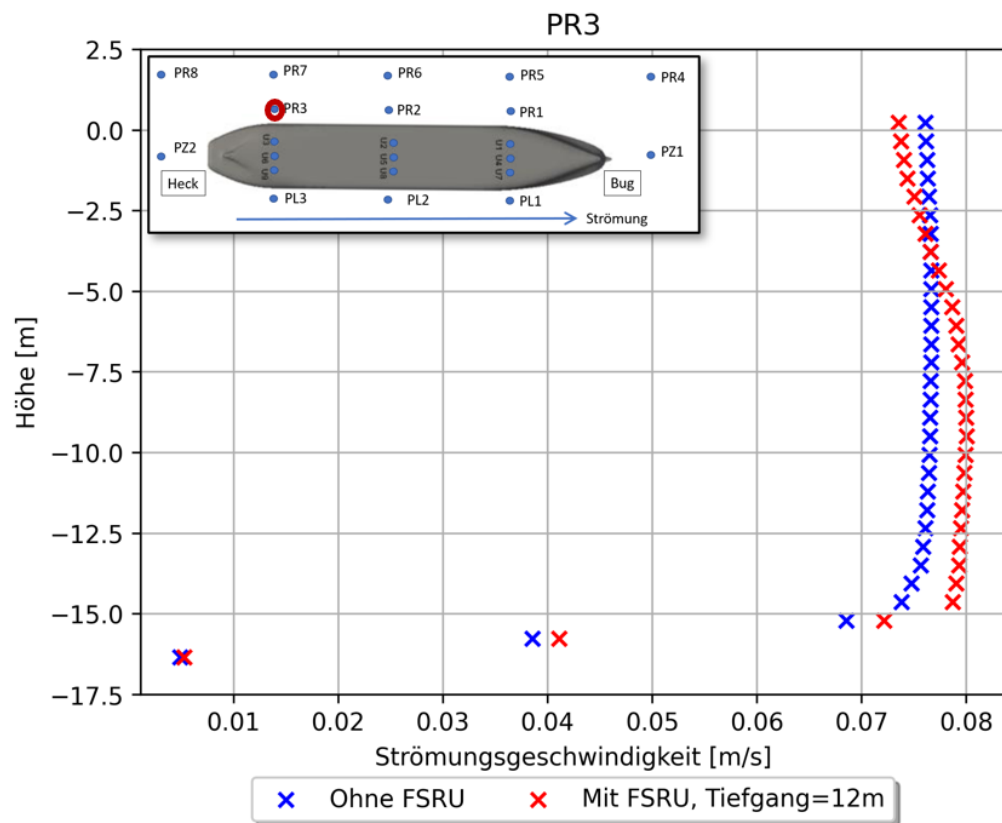
n)



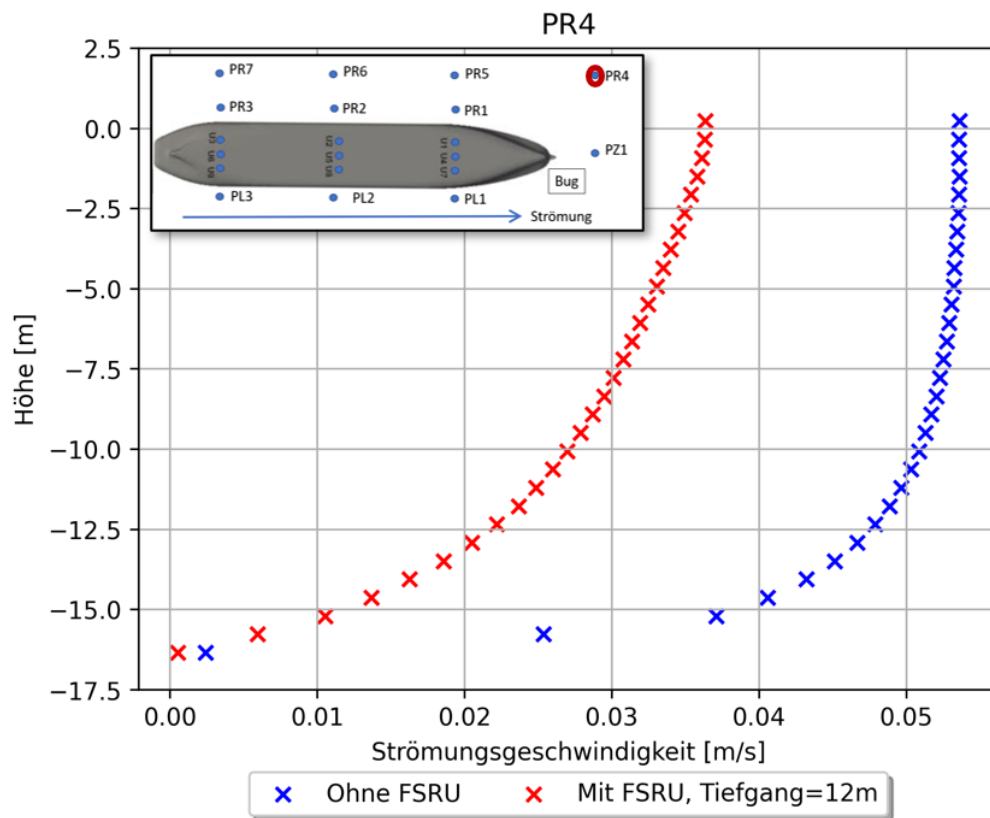
o)



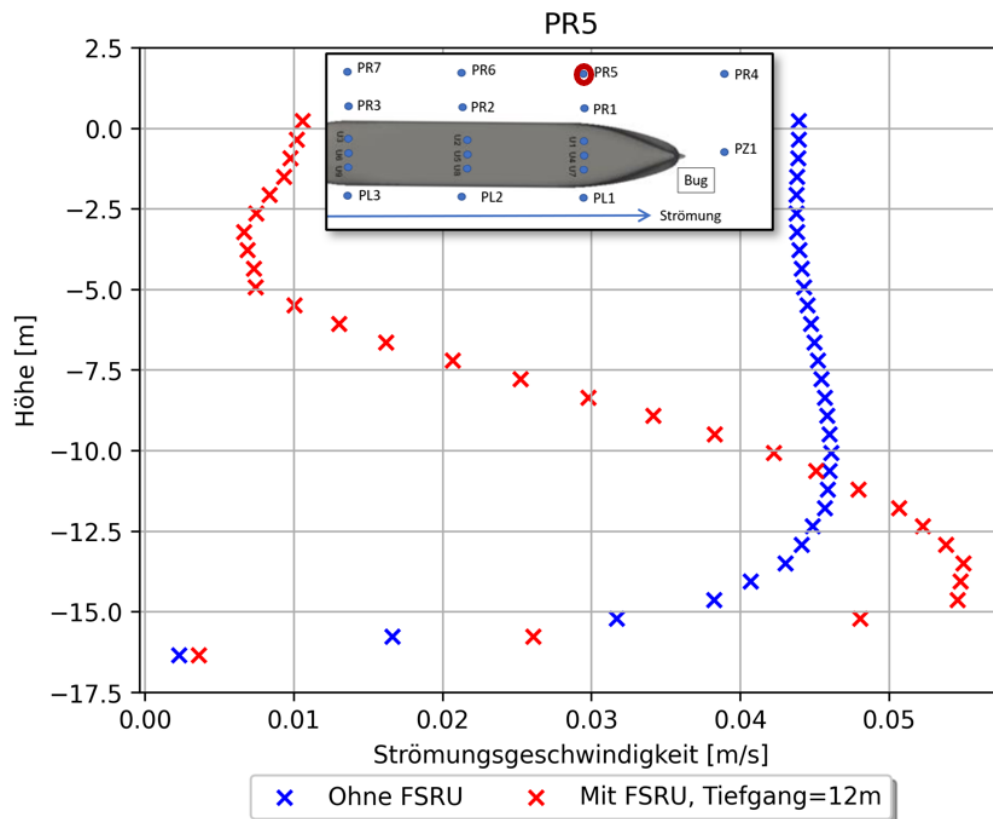
p)



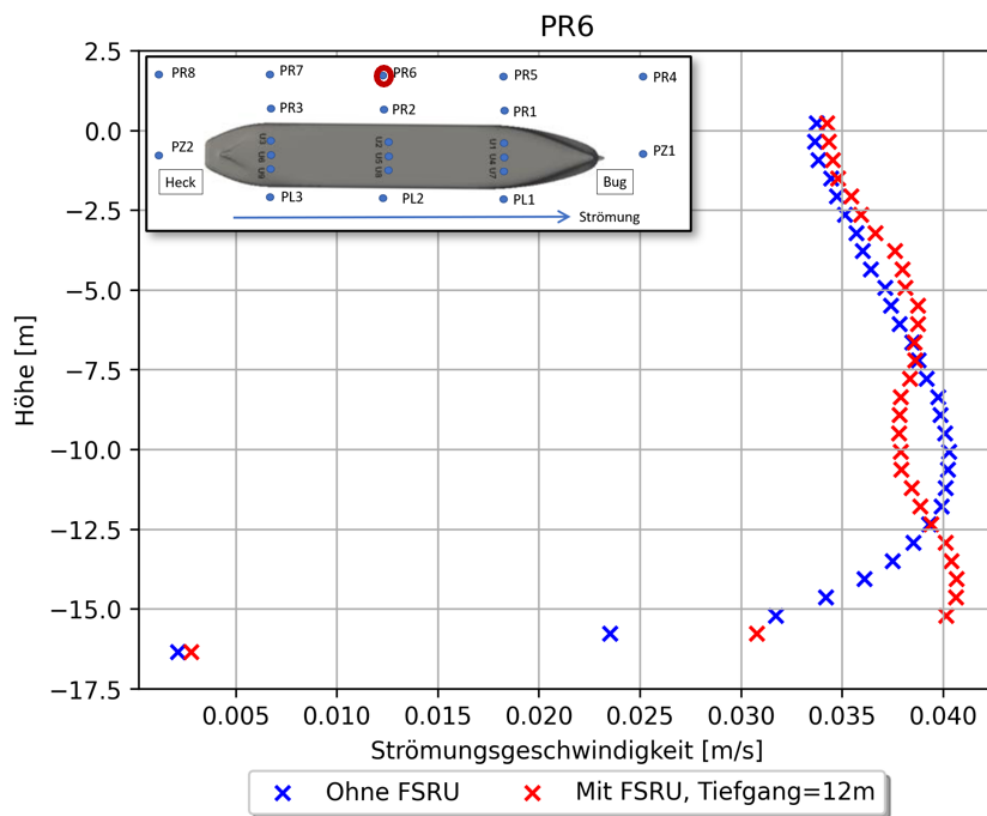
q)



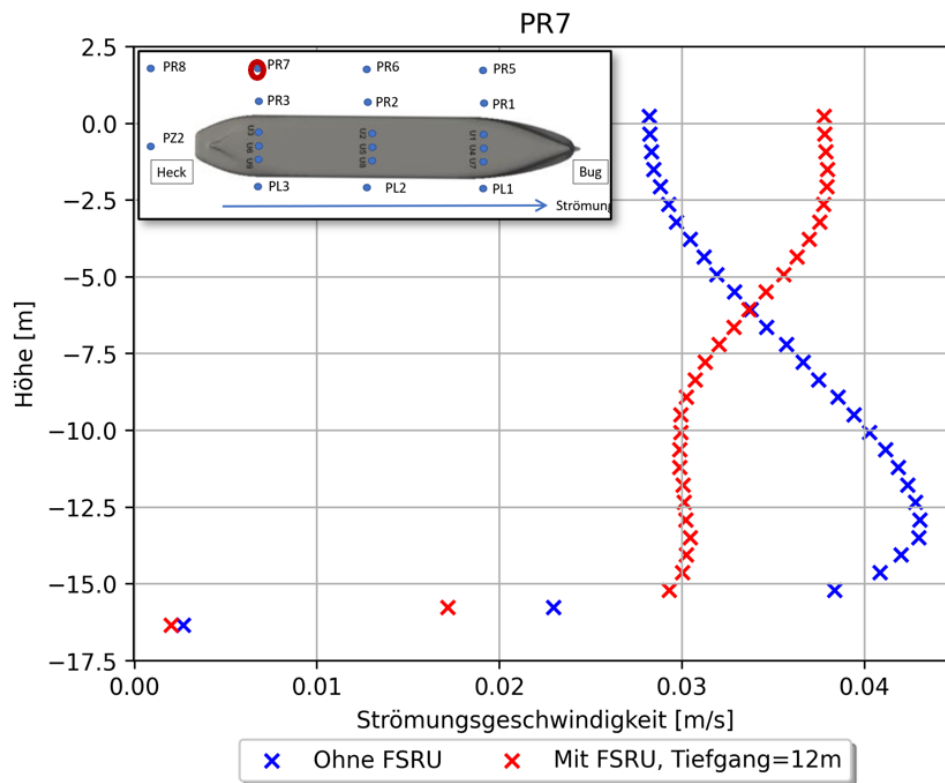
r)



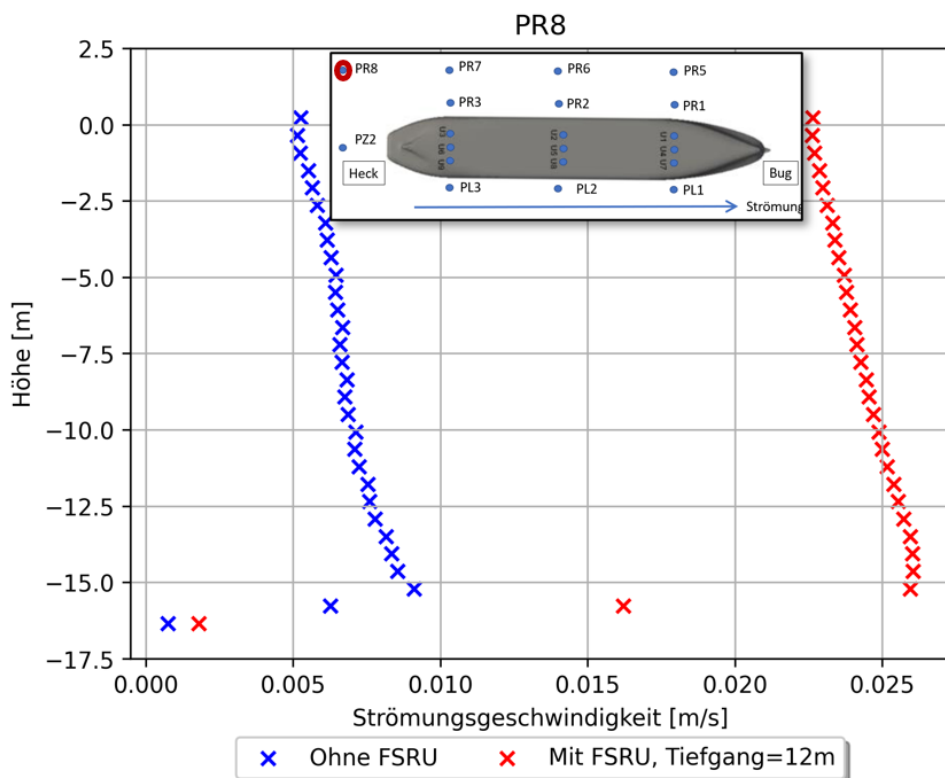
s)



t)



u)



v)

Abbildung 4-2. Strömungsgeschwindigkeitsprofil über die Wassertiefe an den Extraktionspunkten (siehe Abbildung 4-1 und Tabelle 4-1)

## 4.2 Strömungsgeschwindigkeiten unter der FSRU

Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt durch den Quotienten der Strömungsgeschwindigkeit  $U$  aus den Szenarien mit FSRU und ohne FSRU ist wie folgt mit dem Verstärkungsfaktor  $F$  ausgedrückt:

$$F = \frac{U_{\text{mit FSRU}}}{U_{\text{ohne FSRU}}} \quad (1)$$

Für den Tiefgang der FSRU von  $T = 12$  m ist die Zu- und Abnahme der Geschwindigkeit in den Wassertiefen von  $z = -17$  zu  $-10$  mNHN (bis 6,4m oberhalb der Sohle des Beckens,  $-16,4$  mNHN) in (a-h) dargestellt.

Abbildung A-1.e und Abbildung A-1.f (2,4 m und 1,4 m oberhalb der Hafenbecken-Sohle) im Anhang A zeigen eine Zunahme (rötlich) der Strömungsgeschwindigkeiten auf der Backbordseite der FSRU und in nördlicher Richtung in unmittelbarer Umgebung der FSRU. Abbildung 4-3 zeigt die Veränderung des Strömungsbildes innerhalb des Hafenbeckens für eine Querschnittshöhe von  $-14$  mNHN (2,4 m oberhalb der Hafenbecken-Sohle). Das Hafenbecken agiert als eine Kavität für die Strömung in der Elbe (Hohlraum auf der Seite der Elbe). Deswegen entsteht eine Wirbelstruktur der Strömung im Becken ohne FSRU (Abbildung 4-3 rechts). Wenn die FSRU anliegt (Abbildung 4-3 links), strömt insgesamt weniger Wasser durch das Hafenbecken. Außerdem bilden sich zwei kleinere Wirbeln im Hafenbecken, die durch die Umströmung des Schiffskörpers hervorgerufen werden. Dadurch erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar an der Backbordseite der FSRU und reduziert sich in anderen Bereichen des Hafenbeckens (grünlich in Abbildung A-1).

Zudem kann in und Abbildung A-1 festgestellt werden, dass die Unterschiede in der Strömung sich mit zunehmender Entfernung von der Sohle erhöhen. Ein grauer Farbton stellt Bereiche unveränderter Strömungsgeschwindigkeit dar. In diesen Abbildungen zeigen rote Bereiche einen Verstärkungsfaktor größer als eins ( $F > 1$ ) an, in denen ein erhöhtes Erosionspotential während des Flutstroms erwarten lässt. Hingegen zeigen grüne Bereiche einen Verstärkungsfaktor niedriger als eins ( $F < 1$ ) an, welche ein erhöhtes Sedimentationspotential während des Flutstroms aufweisen. Die weißen Flächen sind Bereiche, in denen die Wassertiefe geringer als die Lage der horizontalen Schnitte ist. An diesen Stellen schneidet die Darstellungsebene den Meeresboden, weshalb dort keine Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt werden können.

Abbildung 4-4 zeigt Bereiche potenzieller Erosion im Südhafenbecken auf einem Querschnitt auf Höhe  $-16$  mNHN (0,4m oberhalb der Hafenbecken-Sohle). Der Bereich unmittelbar nah zur Backbordseite der FSRU unterliegt einem erhöhten Verstärkungsfaktor der Strömungsgeschwindigkeit und damit erhöhtem Erosionspotential für Flut- und Ebbstrom (in der Abbildung 4-4 violett dargestellt). Die Zone mit erhöhtem Erosionspotential während des Flutstroms wird in Abbildung 4-4 neben dem Heck der FSRU in einer durchgezogenen roten Linie dargestellt. Hingegen wird eine vorläufige Zone mit erhöhtem Erosionspotential während des Ebbstroms in Abbildung 4-4 neben dem Bug der FSRU in einer gestrichelten roten Linie dargestellt. In den in Grün dargestellten Bereichen ist von einer ähnlichen Sedimentationsneigung auszugehen (siehe /3/). Lokal kann es auch unter dem Schiffskörper der FSRU zu Sedimentation kommen. Es wird empfohlen, diese in einer detaillierteren Untersuchung zu quantifizieren.



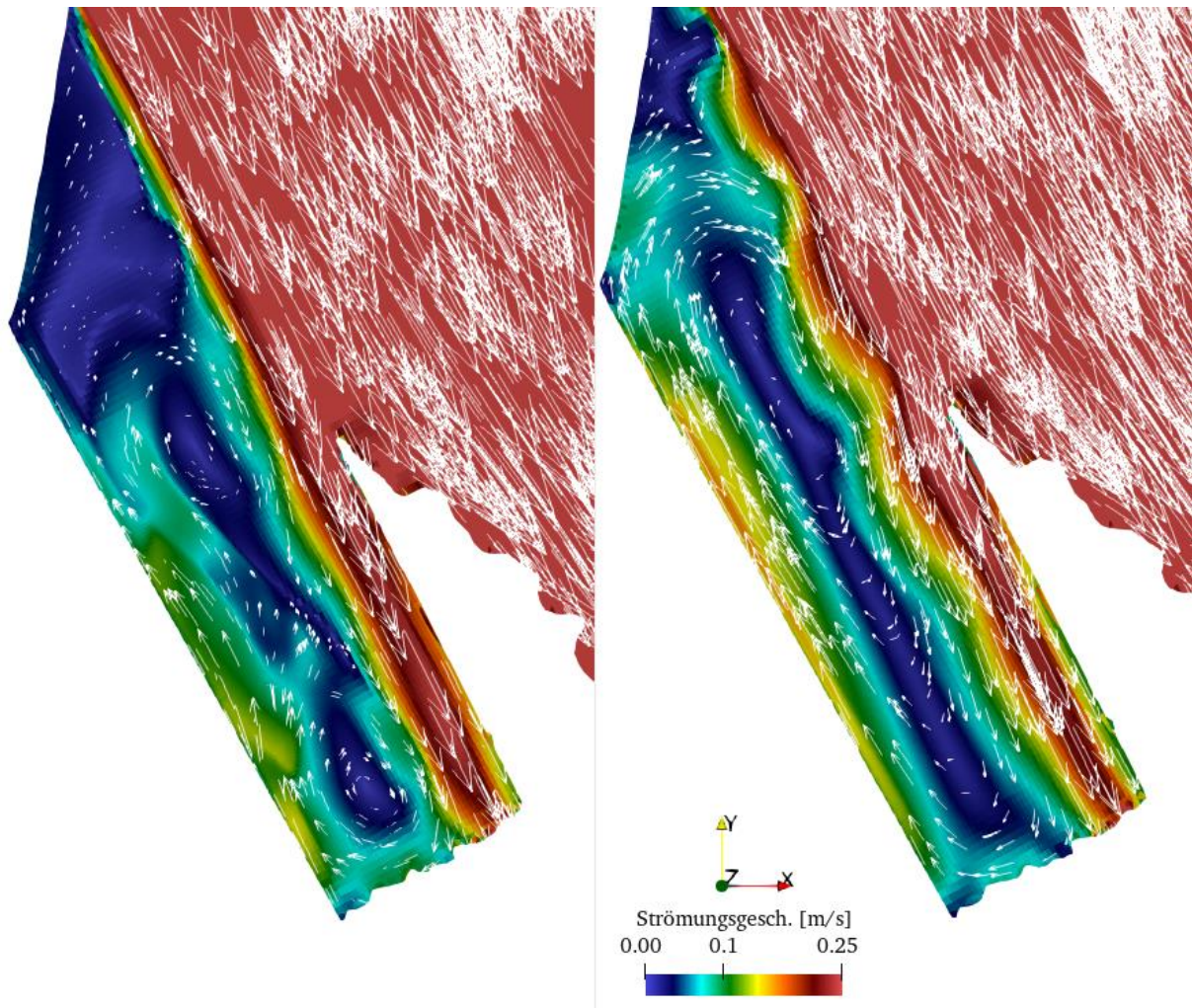


Abbildung 4-3. Strömungsgeschwindigkeit Querschnittshöhe = -14 mNHN (2,4m oberhalb der Hafenbecken-Sohle): links mit FSRU, rechts ohne FSRU. Höchste Strömungsgeschwindigkeit ist auf 0,25m/s in dieser Abbildung begrenzt, um das Strömungsbild im Hafenbecken besser zu zeigen

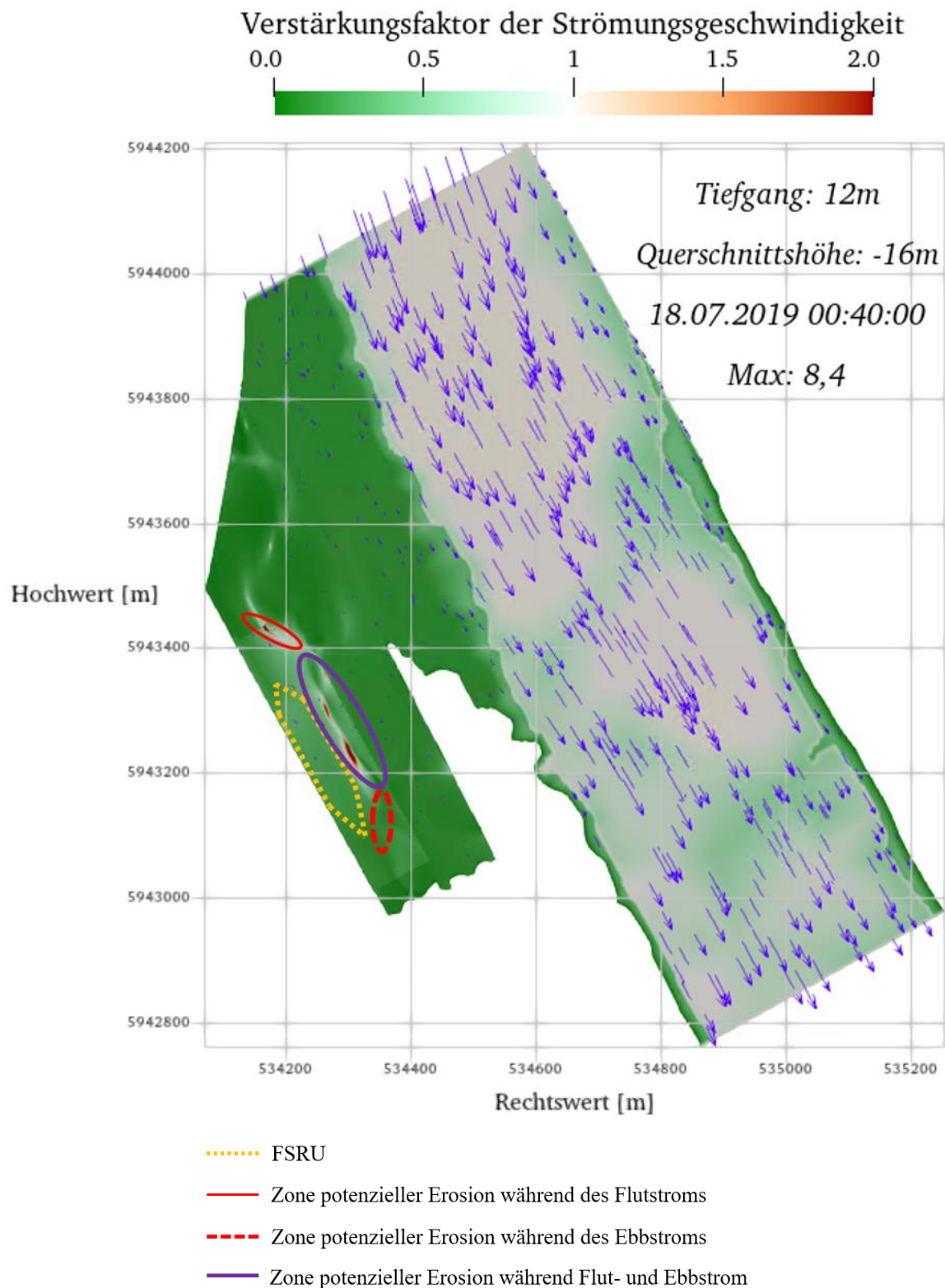


Abbildung 4-4. Zunahme des Verstärkungsfaktors der Strömungsgeschwindigkeit (F) durch die FSRU, bei einem Wassertiefe von 16 m, 0,4 m oberhalb der Hafenbecken-Sohle (Tiefgang der FSRU T = 12 m). Die weiße Fläche kennzeichnet Bereiche der Darstellungsebene, die lokal unter dem Meeresboden liegt. Zonen von potenzieller Erosion und die FSRU sind in der Abbildung gezeigt

## 5 Zusammenfassung

Für die geplanten Floating Storage Regasification Unit (FSRU-) Anleger für das neue Flüssiggas- (LNG-) Terminal in Stade-Bützfleth wurden die Strömungen am geplanten Anleger numerisch untersucht, um das Potenzial der Kolkanfälligkeit abschätzen zu können.

Hierfür wurden die Strömungsgeschwindigkeiten zunächst regional für einen Abschnitt der Tideelbe mit einem Ausschnitt des vorliegenden 3D-Modells der Tideelbe mit und ohne FSRU modelliert. Damit kann eine Abschätzung zu den Strömungen im Bereich des geplanten Anlegers durchgeführt werden. Weiterhin wurde eine hochaufgelöste lokale sogenannte Computational-Fluid-Dynamics- (CFD-) Modellierung durchgeführt, um die Strömungen im Nahbereich des Anlegers mit und ohne FSRU genau zu erfassen.

Durch den Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten wurde eine relative Größenordnung der zu erwartenden Strömungsänderung und daraus die potenzielle Kolkanfälligkeit verursacht durch die FSRU im Vergleich zum geplanten Anleger ohne FSRU abgeschätzt. Der Einfluss der vertäuten FSRU auf die Strömungen wurde im Bereich des geplanten Anlegers sowohl an den Extraktionspunkten für die Strömungsprofile als auch unter dem Schiff untersucht.

Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- Die Anwesenheit der vertäuten FSRU im Hafenbecken verändert das Strömungsbild des gesamten Beckens und führt zu weniger Durchfluss durch das Hafenbecken. Allerdings sind die Strömungsgeschwindigkeiten überall im Becken verhältnismäßig gering.
- Die Strömungsgeschwindigkeit direkt neben dem Schiff auf der Backbordseite erhöht sich um ca. 22 % (PR2) und bis maximal 66 % (PR1). Auf der Steuerbordseite der FSRU nimmt die Strömungsgeschwindigkeit sehr gering (~5% PL1-3) ab.
- Unter der vertäuten FSRU nehmen die Geschwindigkeiten gegenüber dem Zustand ohne FSRU am Bug der FSRU um bis zu 0,02 m/s (~15%) zu. An anderen Positionen unter der FSRU sind kleine Änderungen oder Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeit zu beobachten.
- Durch die dauerhaft vertäute FSRU ergibt sich ein Kolkpotential während der Flut- und Ebbphase in unmittelbarer Nähe zur Backbordseite der FSRU. Bei Ebbstrom ergibt sich eine erhöhte Kolkpotential nah zum Bug der FSRU, wohingegen bei Flutstrom sich ein erhöhtes Kolkpotential nah am Heck der FSRU ergibt.
- Im Hafenbecken einschließlich und unter der FSRU ist mit einer ähnlichen Sedimentationsneigung wie in /3/ zu rechnen. Es wird empfohlen, eine genauere Abschätzung der entsprechend betroffenen Bereiche und der zugehörigen Sedimentationsraten durch eine detailliertere Untersuchung festzustellen.

## 6 Literatur

- /1/ DHI WASY GmbH "Angebot für eine Studie zum Kolkpotential am geplanten FSRU-Anleger Stade", Angebot 14806796, 25.10.2022
- /2/ Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG „Auftrag: Gutachtens zum prognostizierten Kolkpotential zum Unterhaltungsaufwand“, Auftragsnummer JM 21/22, 27.10.2022
- /3/ DHI WASY GmbH „Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth: Sedimentverdriftung und Unterhaltung“, Bericht 14805854, 07.04.2022
- /4/ DHI "MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation", Horsholm Dänemark, [https://manuals.mikepoweredbydhi.help//2021/Coast\\_and\\_Sea/MIKE\\_3\\_Flow\\_FM\\_Scientific\\_Doc.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help//2021/Coast_and_Sea/MIKE_3_Flow_FM_Scientific_Doc.pdf), 2021
- /5/ OpenCFD (2023, 6. Januar), „OpenFOAM v2012“, <https://www.openfoam.com/news/main-news/openfoam-v20-12>, 2020

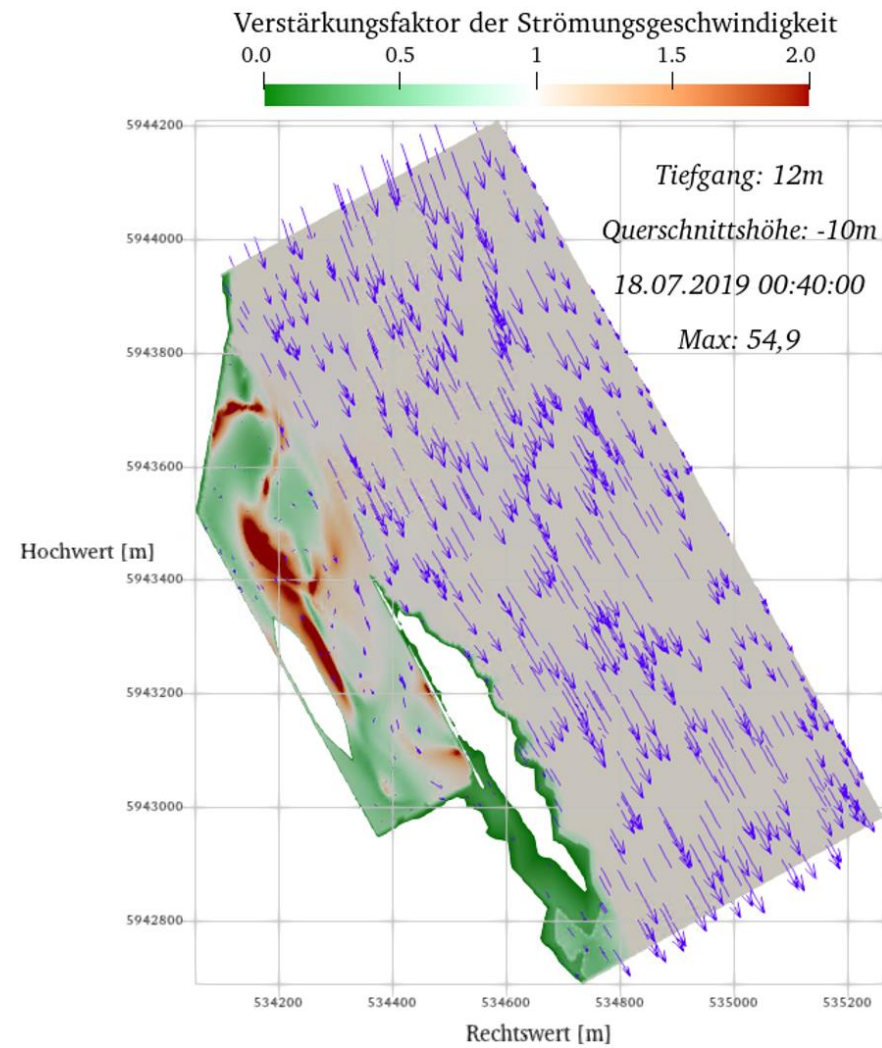
ANHANG

## ANHANG A

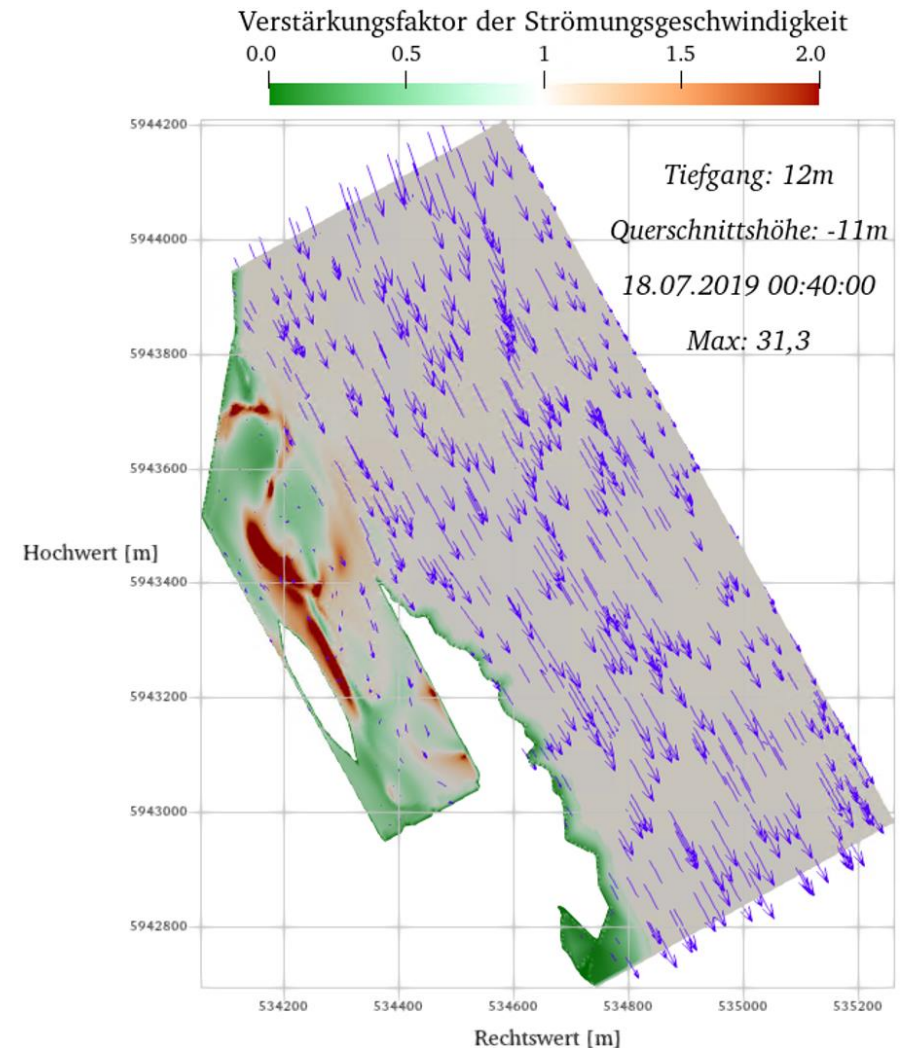
Flächendarstellungen der Geschwindigkeitszunahme als  
Querschnitte unterhalb der FSRU



## A.1 Zu-/Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit unterhalb der FSRU in verschiedenen Wassertiefen

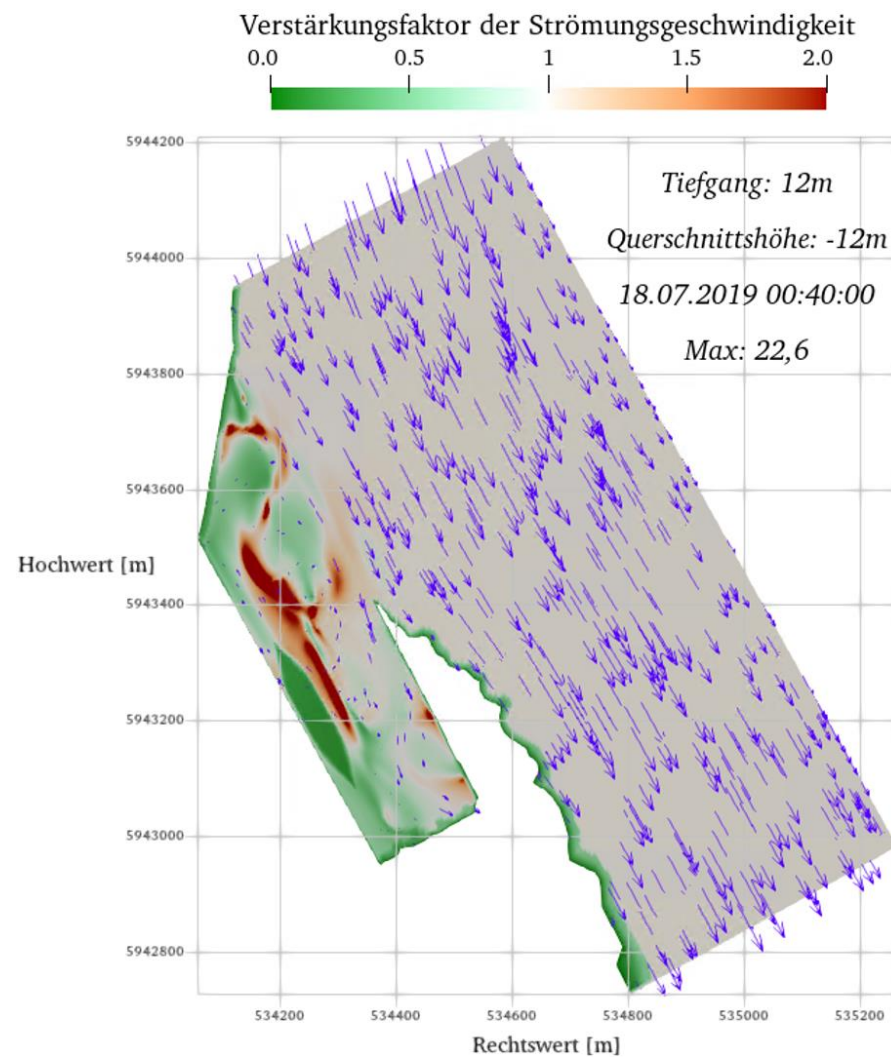


a)

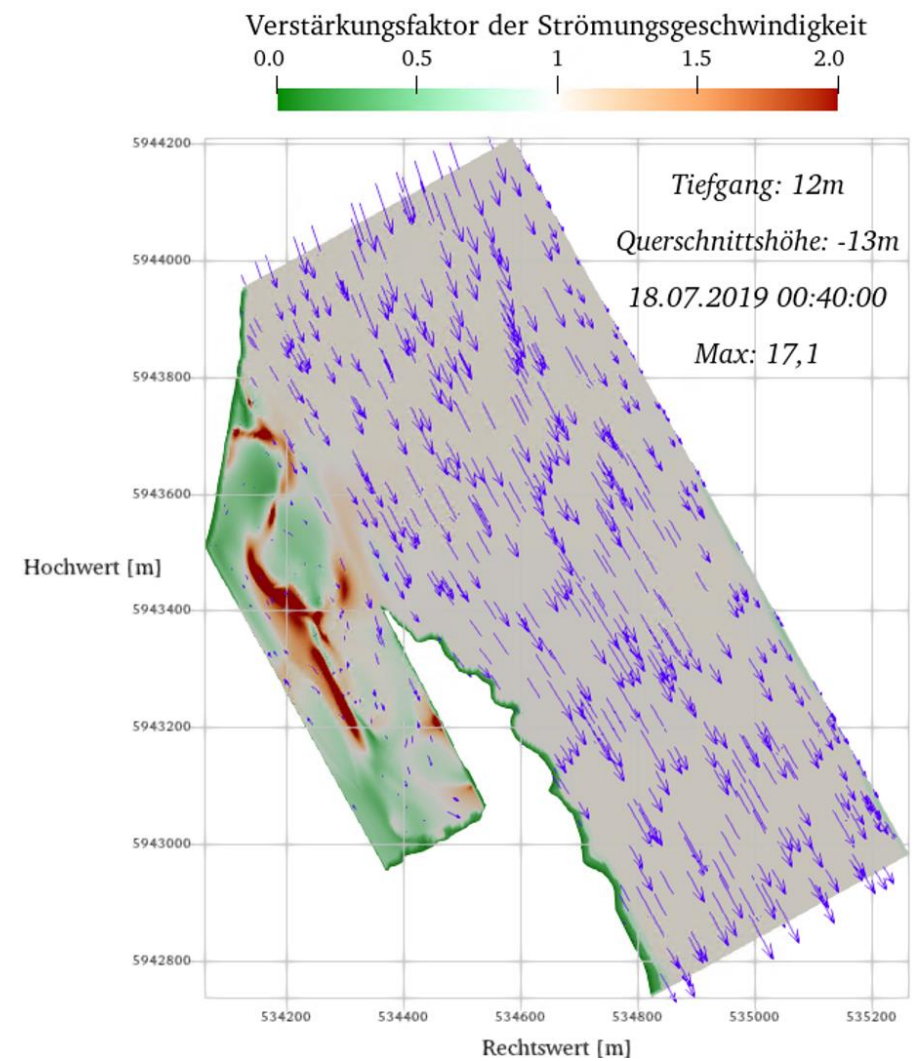


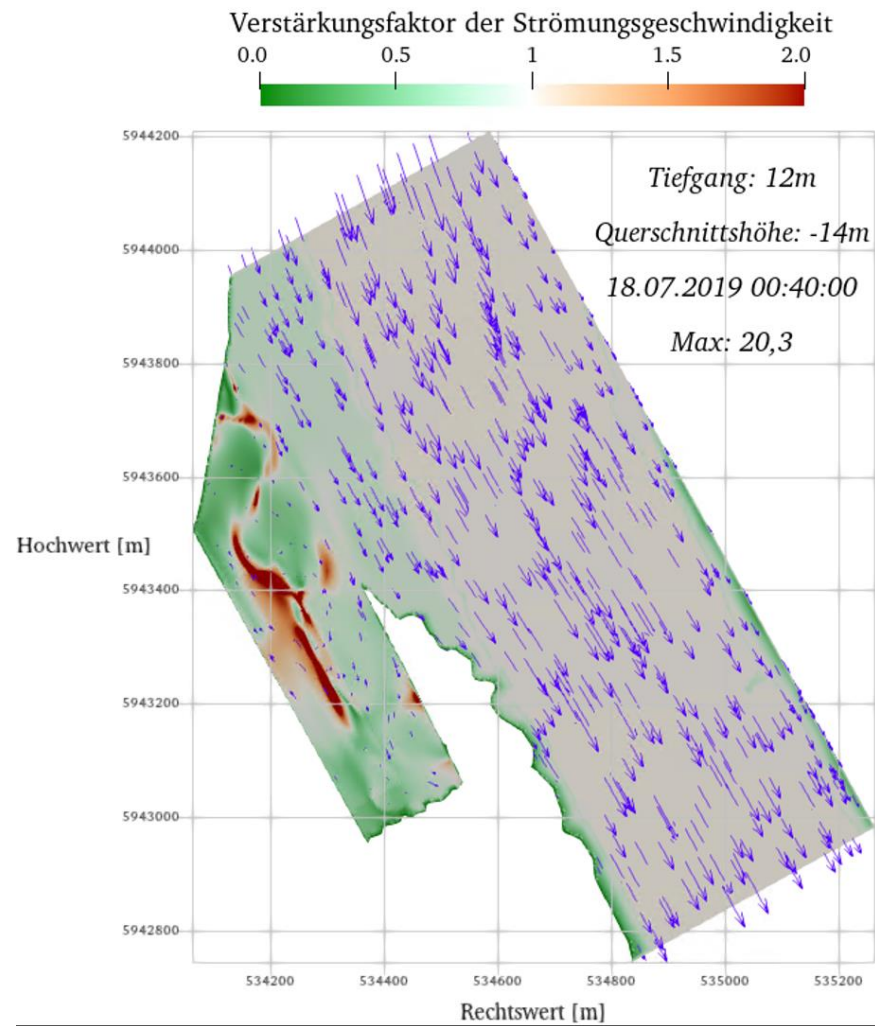
b)



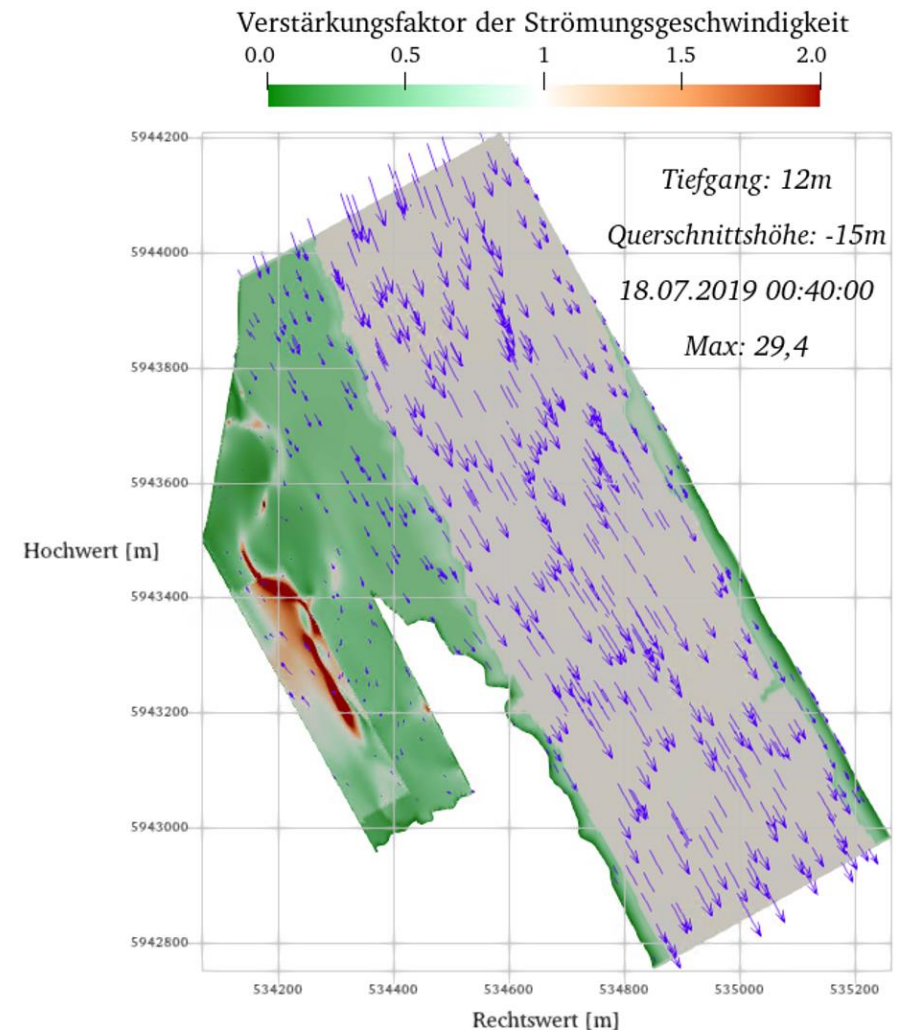


g) d)

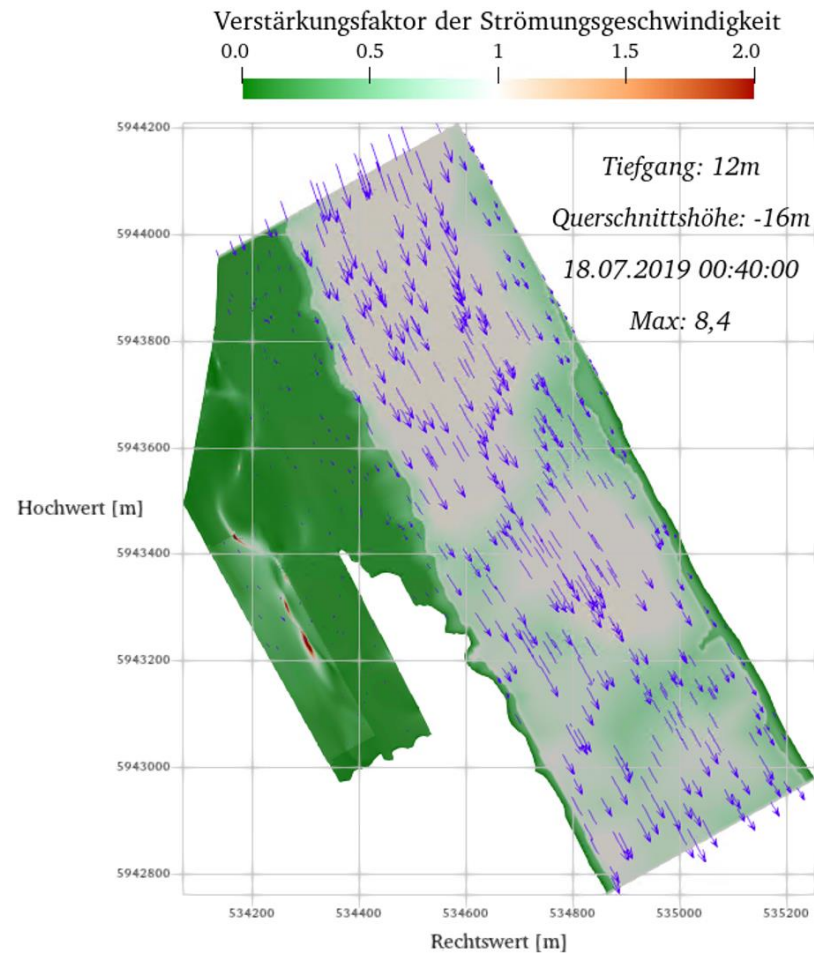




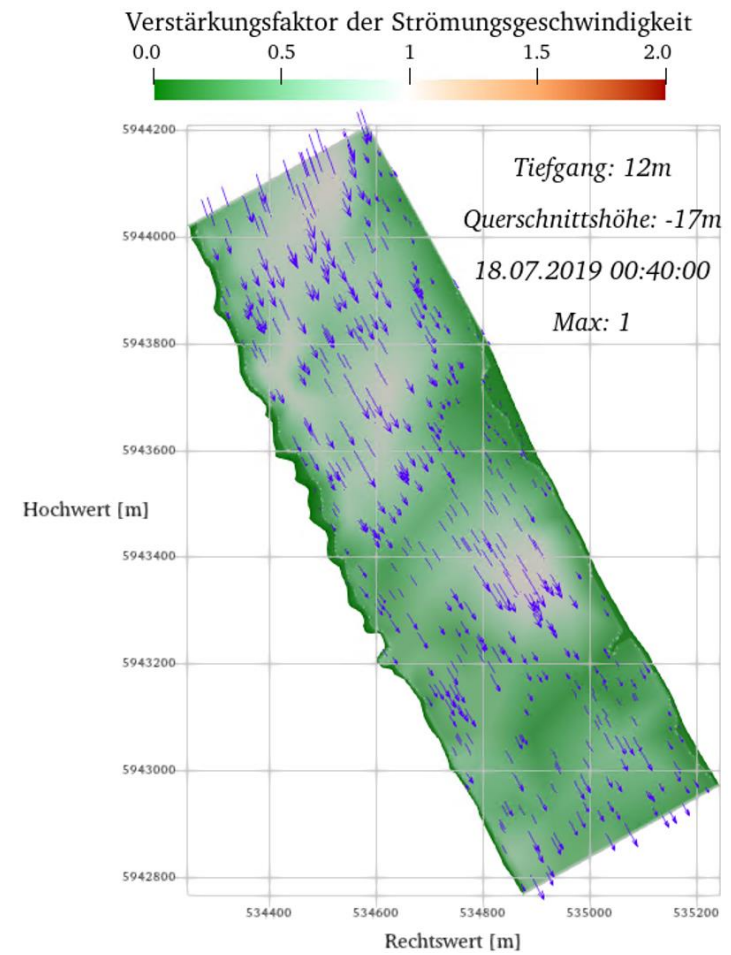
e)



f)



g)



h)

Abbildung A-1. Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit (F) durch die FSRU, bei verschiedenen Wassertiefen (von -10 m bis zu -17 m; Tiefgang der FSRU T = 12 m und Sohlenhöhe des Hafenbeckens= -16,4 mNHN). Die weiße Fläche kennzeichnet Bereiche der Darstellungsebene, die lokal unter dem Meeresboden liegt