

Elbehafen Brunsbüttel „Jetty Westbecken – FSRU-Liegeplatz“

Unterlagen zum Antrag auf Planfeststellung gemäß § 68 Absatz 1 WHG

M7.3.2

Studie zum Strömungsbild am geplanten FSRU-Anleger Brunsbüttel

Version	Datum	Beschreibung der Änderungen	Erstellt durch	Geprüft durch
00	31.03.2022	Zulassung vorzeitiger Maßnahmenbeginn	■	■
01	07.06.2024	Finaler Planfeststellungsantrag	■	■

Studie zum Strömungsbild am geplanten FSRU-Anleger Brunsbüttel

Lokale Strömungen am LNG-Anleger

Wirkraumanalyse: Strömungsänderungen bedingt durch den geplanten Anleger



RWE Power AG

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

ISO 9001
Management System Certification
BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Studie zum Strömungsbild am geplanten FSRU-Anleger Brunsbüttel

Regionale und lokale Strömungen am LNG-Anleger

Wirkraumanalyse: Strömungsänderungen bedingt durch den geplanten Anleger

Erstellt für: RWE Power AG
Vertreten durch: [REDACTED]
Adresse: RWE Platz 7
45141 Essen, Germany



Projektmanager	[REDACTED]
Qualitätssicherung	[REDACTED]
Projektbearbeiter	[REDACTED]

Projektnummer	14806725
Datum Freigabe	28.03.2023
Revision	Version: 1 – Revision: 1.0 – 28.03.2023.
Einstufung	Eingeschränkt

INHALT

1	Veranlassung und Zielsetzung.....	1
2	Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen	2
3	Datengrundlage und verwendete Unterlagen.....	2
4	Software Numerische Modelle	4
4.1	Regionales Modell	4
4.1.1	Software	4
4.1.2	Bathymetrie und Berechnungsnetz.....	5
4.1.3	Berücksichtigung des Schiffskörpers.....	6
4.1.4	Randbedingungen.....	6
4.2	Lokales Modell	7
4.2.1	Software	7
4.2.2	Berechnungsgitter und Berücksichtigung des Schiffskörpers sowie Anpassungen an der Bauwerksstrukturen	7
4.2.3	Randbedingungen.....	11
5	Ergebnisse.....	12
5.1	Strömungsprofile am geplanten Anleger mit und ohne vertäuer FSRU	12
5.2	Strömungsbild	25
6	Zusammenfassung.....	31
7	Literatur	32

ABBILDUNGEN

Abbildung 4-1.	Prinzip eines 3-dimensionalen Netzes.....	5
Abbildung 4-2.	Tideelbemodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten. Detailansicht des Bereichs des Geplanten Anlegers.	5
Abbildung 4-3.	Der Berechnungsgitter des Regionalmodells im Bereich des geplanten Anlegers mit bereits integrierter Liegewanne	6
Abbildung 4-4.	Lage der Modellränder des Regionalmodells (Bathymetrie im Hintergrund)	7
Abbildung 4-5.	Modellgebiet des lokalen 3D Modells im Bereich de Tideelbe und den dazugehörigen Modellrändern	8
Abbildung 4-6.	Stereolithography- (.stl-) Oberfläche der FSRU a) Seitenansicht und Draufsicht, b) 3D-Ansicht.....	10
Abbildung 4-7.	Strömungsgeschwindigkeit aus dem Regionalmodell im Hafenbecken und im Fahrwasser. Zeitpunkt für die CFD-Simulationen wurde für die höchste Strömungsgeschwindigkeiten im Hafenbecken und dem Fahrwasser gewählt	11
Abbildung 5-1.	Extraktionspunkte für Strömungsprofile unterhalb und im Nahbereich der FSRU relativ zur FSRU.....	13
Abbildung 5-2.	Strömungsgeschwindigkeitsprofil über die Wassertiefe an den Extraktionspunkten (siehe Abbildung 5-1)	24

Abbildung 5-3. Strömungsbild am geplanten Anleger mit Liegewanne und ohne FSRU (Darstellung oberflächennah).....	25
Abbildung 5-4. Strömungsbild am geplanten Anleger mit Liegewanne und integrierter FSRU (Darstellung oberflächennah).....	25
Abbildung 5-5. Zunahme des Verstärkungsfaktors der Strömungsgeschwindigkeit durch die FSRU mit Tiefgang 12m am geplanten Anleger für die folgende Höhen oberhalb der Liegewanne-Sohle: (a) 0,3m, (b) 0,8m, (c) 1,3m, (d) 1,8m, (e) 2,3m, (f) 3,3m, (g) 4,3m und (h) 5,3m	30

TABELLEN

Tabelle 3-1 Verwendete Daten	2
------------------------------------	---

1 Veranlassung und Zielsetzung

Für den geplanten Floating-Storage-Regasification-Unit- (FSRU-) Anleger für das neue Flüssigerdgas- (LNG-) Terminal in Brunsbüttel sollen die Strömungen an den geplanten Strukturen, speziell dem Schiffskörper modelliert werden. Zielstellung ist eine Wirkraumanalyse (lokal) 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 das mögliche Kolkpotential abzuschätzen.

Basierend auf dem Angebot /1/ beauftragte die RWE Power AG 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. Für diesen Zweck wurde ein bei DHI vorhandenes dreidimensionales (3D-) hydrodynamisches Modell des Elbeästuars (Regionalmodell) /2/ herangezogen, um die Randbedingungen für ein hochaufgelöstes 3D-hydrodynamisches Modell (Lokalmodell) bereitzustellen. Die Ergebnisse des lokalen Modells wurden hinsichtlich des Strömungsbildes analysiert. Sie sind in diesem Gutachten zusammengefasst.

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

2 Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen

Um die Strömungen im Bereich des geplanten FSRU-Anlegers am LNG-Terminal in Brunsbüttel 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) /2/ für den relevanten Bereich des Anlegers, unter Berücksichtigung des Schiffskörpers der FSRU
- Auswahl der zeitlichen Bedingungen und Extrahierung der Randbedingungen für das lokale Modell für Simulationen

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, der geplanten Liegewanne und dem Teil-Rückbau der Hafenmauer im Bereich des Westbeckens
- Vergleich der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Extraktionspunkten entlang des Anlegers, unterhalb und im Nahbereich der FSRU der Simulationen (i) mit und (ii) ohne FSRU

3 Datengrundlage und verwendete Unterlagen

Für den Modellaufbau sowie die Berechnung der geforderten Zustände wurden die folgenden Datensätze in Tabelle 3-1 und Unterlagen herangezogen.

Tabelle 3-1 Verwendete Daten

Bereitgestellt durch	Datensatz (Format)	Stand
WKC, RWE	Lage der FSRU (dwg)	2022/2023
WKC, RWE	Änderungen Bathymetrie durch die geplante Liegewanne	2020
WKC	Rückbau von Hafenstrukturen	2023
WSV	Aktuelle Bathymetriedaten (Sohllagen)	2022
Portal Tideelbe (WSV)	Zeitreihen der gemessenen Daten Wasserstand, Strömung, Durchfluss an verschiedenen Messpositionen entlang der Elbe als Randbedingungen des numerischen Regionalmodells	2019

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.

4 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 Wasserkörper berücksichtigen. Für die großräumigen (regionalen) Simulationen der Strömungen kommt das bekannte regionale 3D-Modell der Tide-Elbe zur Anwendung, deren Aufbau und Beschreibung in /3/ beschrieben sind. Die lokalen Auswirkungen der FSRU unter dem Schiffkörper im Nahbereich des Anlegers und der FSRU mit einem lokalen 3D-Modell untersucht werden.

4.1 Regionales Modell

4.1.1 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 Flachwassergleichungen in 3D unter Berücksichtigung der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung verwendet. Das Modell beinhaltet u.a. die Kontinuitätsgleichung sowie die Impulsgleichungen.

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

- Gezeitenströmungen
- Viskosität
- Turbulenz
- 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 ν_t können als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach Smagorinsky) oder als Ergebnis eines gemischten $k-e$ Modells (1D- $k-e$ -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 Bathymetrie wird 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 /4/ .

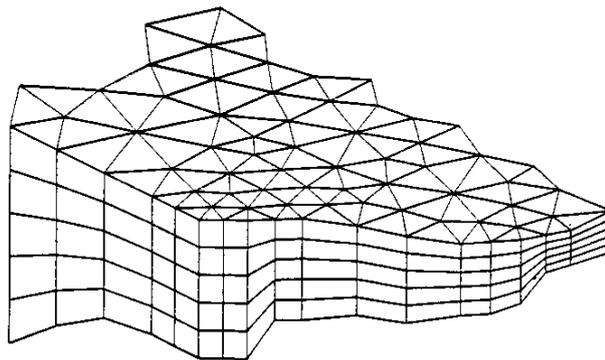


Abbildung 4-1. Prinzip eines 3-dimensionalen Netzes.

4.1.2 Bathymetrie und Berechnungsnetz

Als Grundlage des regionalen Modells wird das hydrodynamische 3D-Tideelbmodell /2/ (Abbildung 4-2) mit Peildaten von 2022 herangezogen. Das Modell beschreibt den Planzustand, den zusätzlich die Solltiefen der planfestgestellten Elbvertiefung in der Delegationsstrecke ab dem 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.

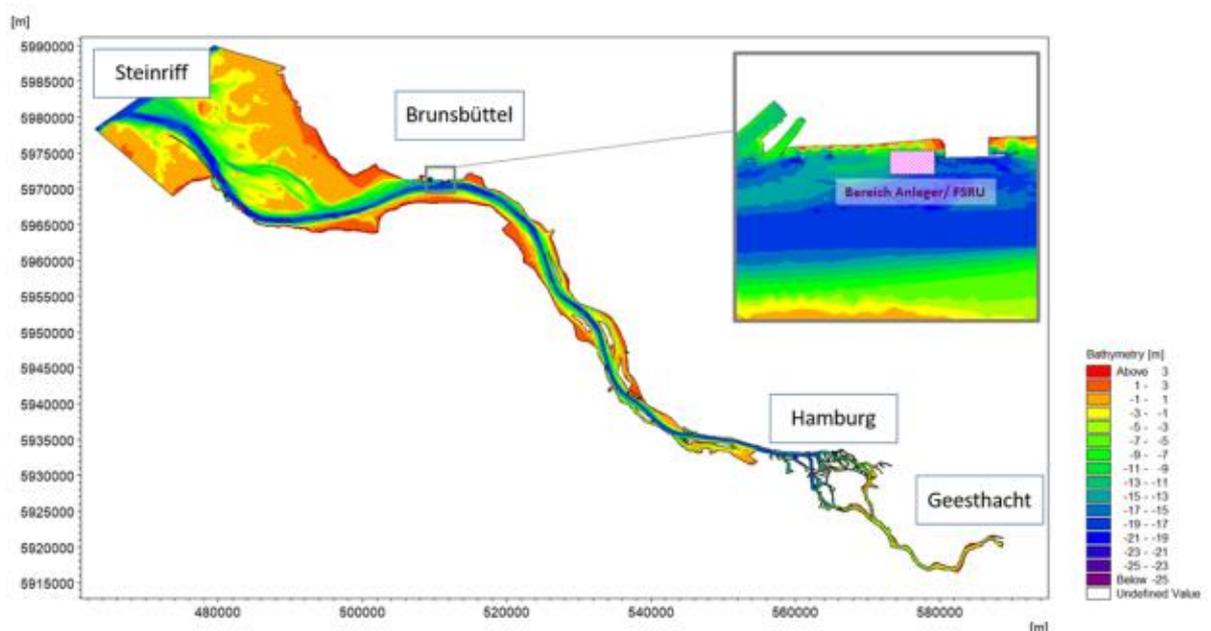


Abbildung 4-2. Tideelbmodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten. Detailansicht des Bereichs des Geplanten Anlegers.

Das Tideelbmodell umfasst den tidebeeinflussten Bereich der Elbe vom Wehr Geesthacht bei Elbekilometer 586 (Oberstrom) bis zum Steinriff bei Elbekilometer 724 (Unterstrom) und deckt somit eine Länge von 138 Flusskilometern ab.

Das Modellgebiet ist in horizontaler Richtung in Bereiche mit quadrangularen (viereckigen) sowie triangularen (dreieckigen) Elementen unterschiedlicher Größen eingeteilt.

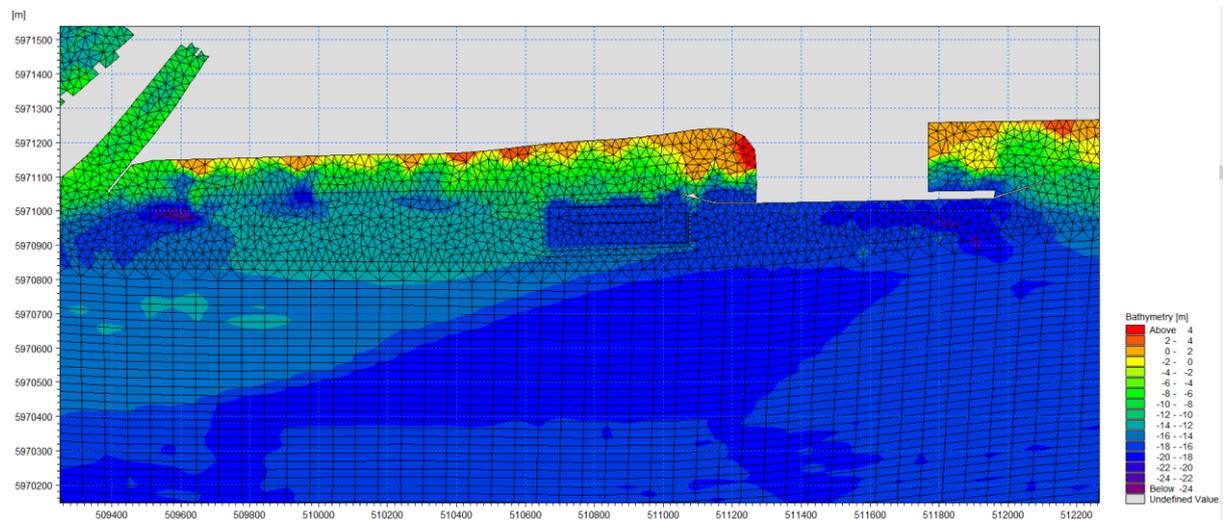


Abbildung 4-3. Der Berechnungsgitter des Regionalmodells im Bereich des geplanten Anlegers mit bereits integrierter Liegewanne

4.1.3 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.

4.1.4 Randbedingungen

Für das regionale Modell wurden folgende Randbedingungen, die in Form von Zeitreihen in das Modell eingehen, berücksichtigt.

- Die Wasserstände am unteren Modellrand am Elbe km 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

Die Lage der Randbedingungen ist in der folgenden Abbildung 4-4 dargestellt.

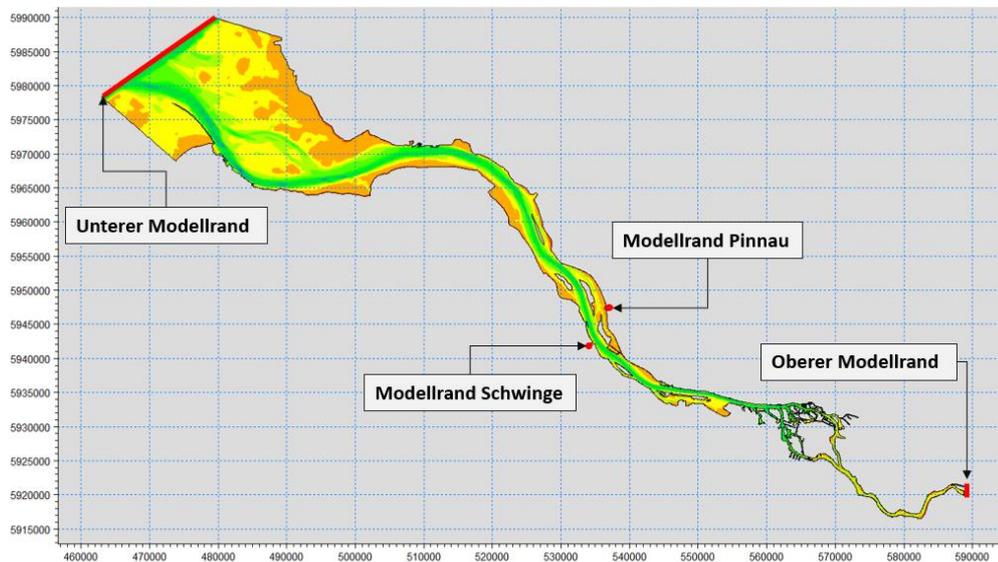


Abbildung 4-4. Lage der Modellränder des Regionalmodells (Bathymetrie im Hintergrund)

4.2 Lokales Modell

4.2.1 Software

Das lokale 3D-Modell für die Modellierung der Strömungen unter der vertäuten FSRU 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 vollständigen 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.

4.2.2 Berechnungsgitter und Berücksichtigung des Schiffskörpers sowie Anpassungen an der Bauwerksstrukturen

Abbildung 4-5 zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten aus dem regionalen Modell zum Zeitpunkt der maximalen Flutstromgeschwindigkeit der ausgewählten Tiden.

Zur Ableitung der Randbedingungen des lokalen Modells erfolgte eine Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Es ergibt sich, dass zum Zeitpunkt des vollen Ebbstroms (22.06.2021) die lokal höchsten Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt werden konnten und diese als stationäre Randbedingungen in das lokale CFD-Modell eingehen. Die Ausdehnung des lokalen Modells beträgt 2800

Meter in Ost-West-Ausdehnung und 500 Meter in Nord-Süd-Ausdehnung (siehe

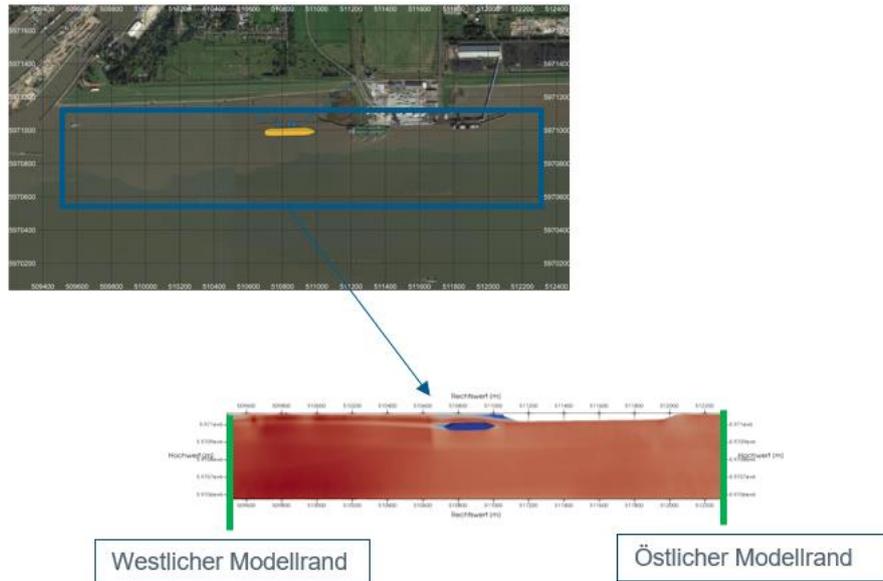


Abbildung 4-5. Modellgebiet des lokalen 3D Modells im Bereich de Tideelbe und den dazugehörigen Modellrändern

.)

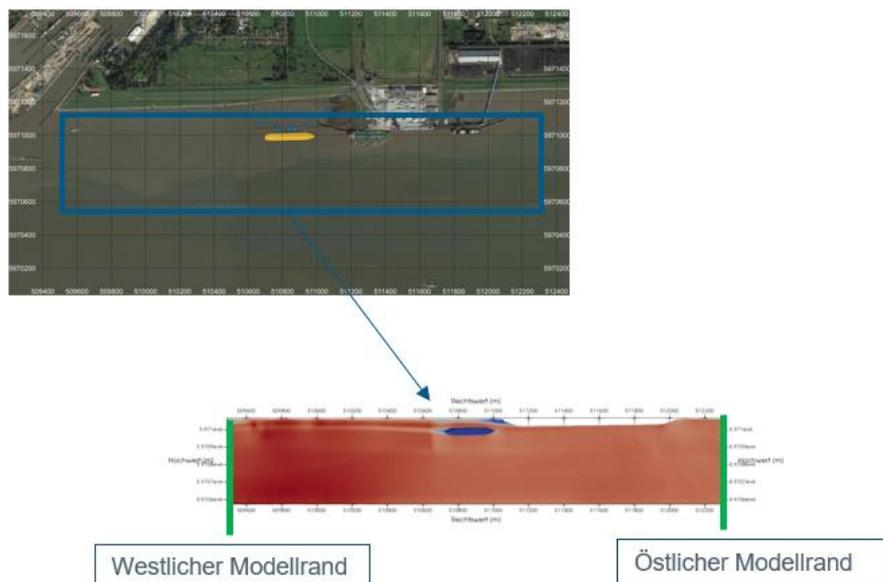


Abbildung 4-5. Modellgebiet des lokalen 3D Modells im Bereich de Tideelbe und den dazugehörigen Modellrändern

Es wurden die folgenden Szenarien untersucht:

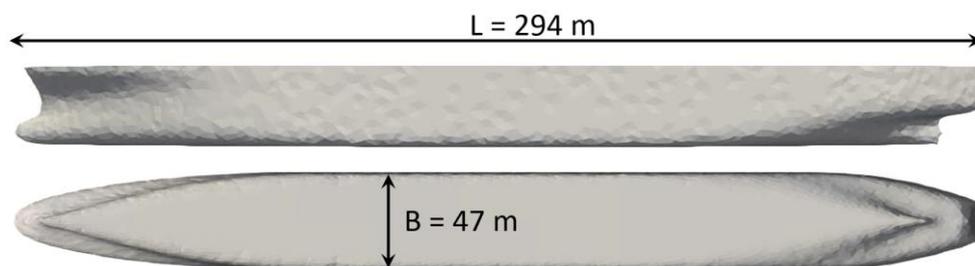
1. CFD-Modell mit hergestellter Liegewanne und Rückbau, ohne FSRU
2. CFD-Modell hergestellter Liegewanne und Rückbau mit FSRU (Tiefgang $T = 12\text{m}$)
3. CFD-Modell des aktuellen Ist-Zustandes als Referenz

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. Die verwendete Bathymetrie entspricht derjenigen des regionalen Modells. Mit dem lokalen Modell werden die von den Bauwerksstrukturen beeinflussten Strömungen numerisch berechnet, um sie als Eingangsparameter für die Abschätzung der Kolkiefen und ein Kolkschutzkonzept verwenden zu können. Die Form und die Abmessungen der FSRU sind in Abbildung 4-6 angeführt.

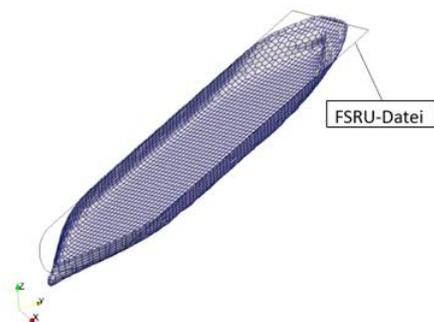
Das Berechnungsgitter für das Szenario mit FSRU besteht aus ca. 443.000 Elementen. Im Nahbereich um die FSRU ist die Auflösung sehr hoch, die Zellengröße nimmt zu den Modellrändern hin zu. Das Berechnungsgitter mit dem Schiffskörper berücksichtigt die FSRU mit einem Tiefgang von $T = 12$ m (Kieflfreiheit = $\sim 5,6$ m). Dies entspricht dem voll beladenen Zustand. Die horizontalen Elementgrenzen sind überwiegend waagrecht orientiert

Für das Szenario ohne FSRU wurde die Gitterauflösung beibehalten, um die Vergleichbarkeit zwischen den Modellen zu maximieren. Für die Referenzberechnung ohne hergestellte Liegewanne und ohne FSRU, welche den aktuellen Ist-Zustand repräsentiert, wurde ein Mesh mit 380.000 Elementen verwendet.

Die bestehenden Hafenmauer wurde im Modell als undurchlässiges Leitblech berücksichtigt.



a)



b)

Abbildung 4-6. Stereolithography- (.stl-) Oberfläche der FSRU a) Seitenansicht und Draufsicht, b) 3D-Ansicht

4.2.3 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 westlichen Modellrand eingelesen. Extrahiert wurde die Strömung am 22.06.2021 03:10. Dieser Zeitpunkt entspricht dem maximalen Ebbstrom einer repräsentativen (relativ hohen) Tide und hierzu wurden aus dem Modell die Strömungsgeschwindigkeiten am Punkt der geplanten FSRU und im Fahrwasser der Elbe extrahiert (siehe Abbildung 4-7). Am östlichen Rand wurde lediglich ein offener Modellrand angesetzt. Wegen dieser vereinfachenden Annahme ist der östliche Modellrand weiter 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 vereinfachend eine sogenannte „Slip“-Wandbedingung 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 wurde übereinstimmend mit dem Regionalmodell (siehe Abschnitt 4) 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 Ebbstroms 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 $\nu = 10^{-6}$ m²/s festgelegt.

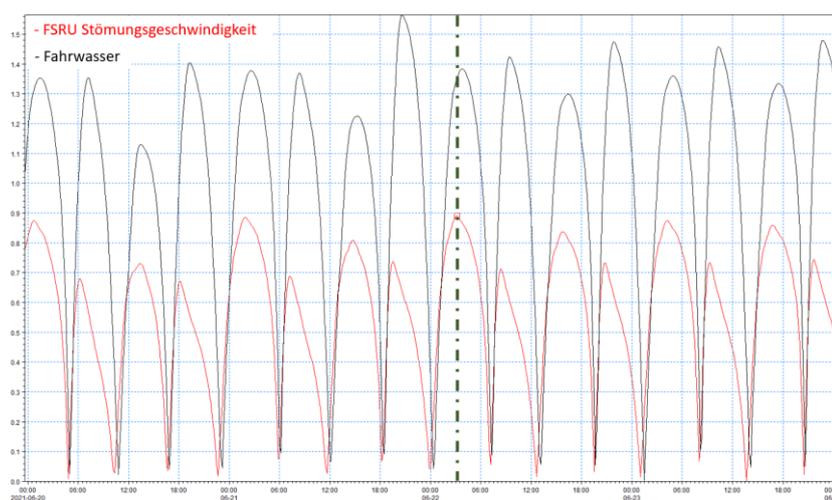


Abbildung 4-7. Strömungsgeschwindigkeit aus dem Regionalmodell im Hafenbecken und im Fahrwasser. Zeitpunkt für die CFD-Simulationen wurde für die höchste Strömungsgeschwindigkeiten im Hafenbecken und dem Fahrwasser gewählt

5 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 5.1 werden die Strömungsprofile am geplanten Anleger für ausgewählte Positionen unter und im Nahbereich der FSRU präsentiert. Zusätzlich werden die entsprechenden Strömungsbilder in Abschnitt 5.2 gezeigt.

5.1 Strömungsprofile am geplanten Anleger mit und ohne vertäuter FSRU

Abbildung 5-1 zeigt die Positionen der Extraktionsorte für vertikale Geschwindigkeitsprofile, die sich jeweils unter und im Nahbereich der FSRU befinden.

Abbildung 5-2 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 Ebbstroms zu einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit unter dem Bugbereich der FSRU (Positionen U1 und U9, siehe Abbildung 5-2. f und n). Im Strömungsschatten der FSRU (Positionen PW1 und PW8, siehe Abbildung 5-2. a und v) wird die Strömungsgeschwindigkeit reduziert. Wegen der Auswirkung der FSRU auf der Strömung erhöht sich die Stromgeschwindigkeit und damit die Kolkpotenziell unterhalb der FSRU (Positionen U5 und U6, siehe Abbildung 5-2. j und k).

Es ist erwartbar, dass sich die Situation bei Flutstrom umkehrt und somit ein Strömungsschatten am Bug der FSRU entsteht.

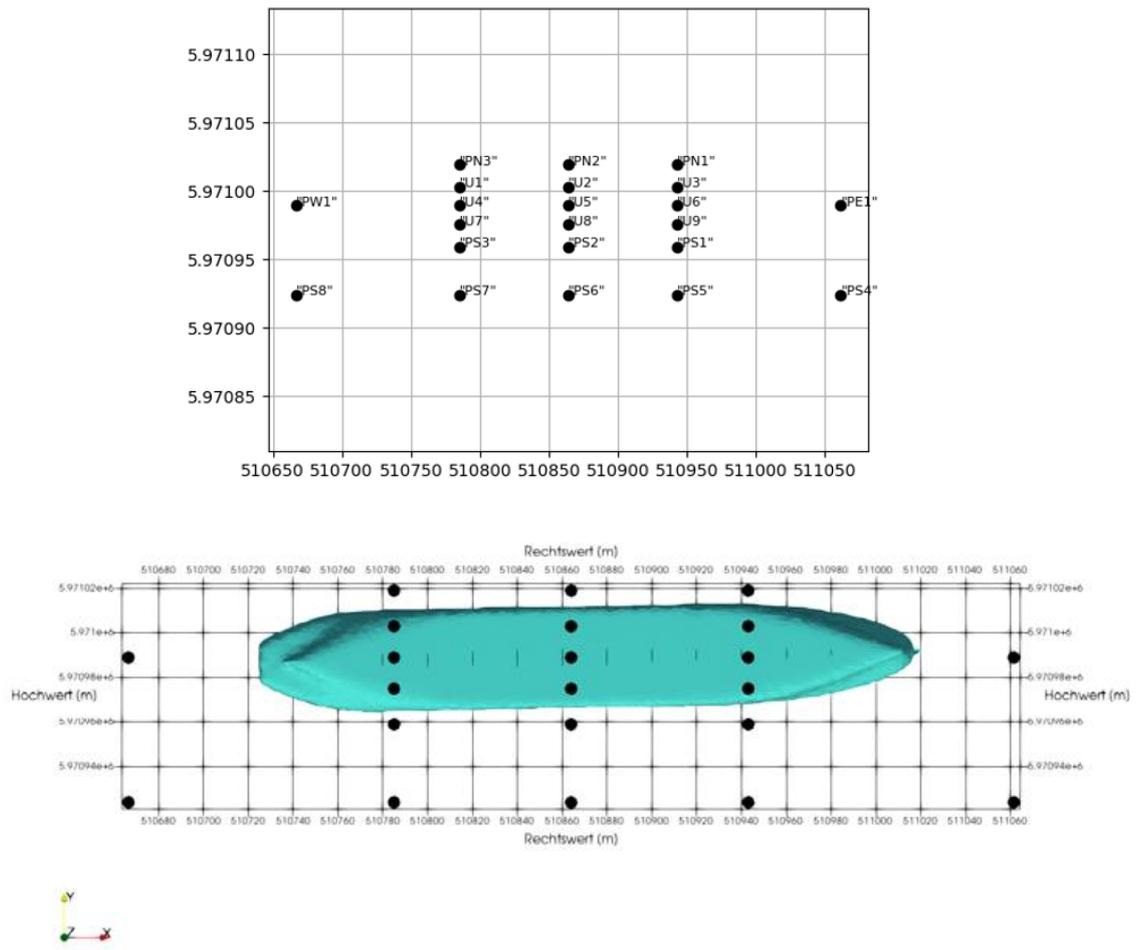
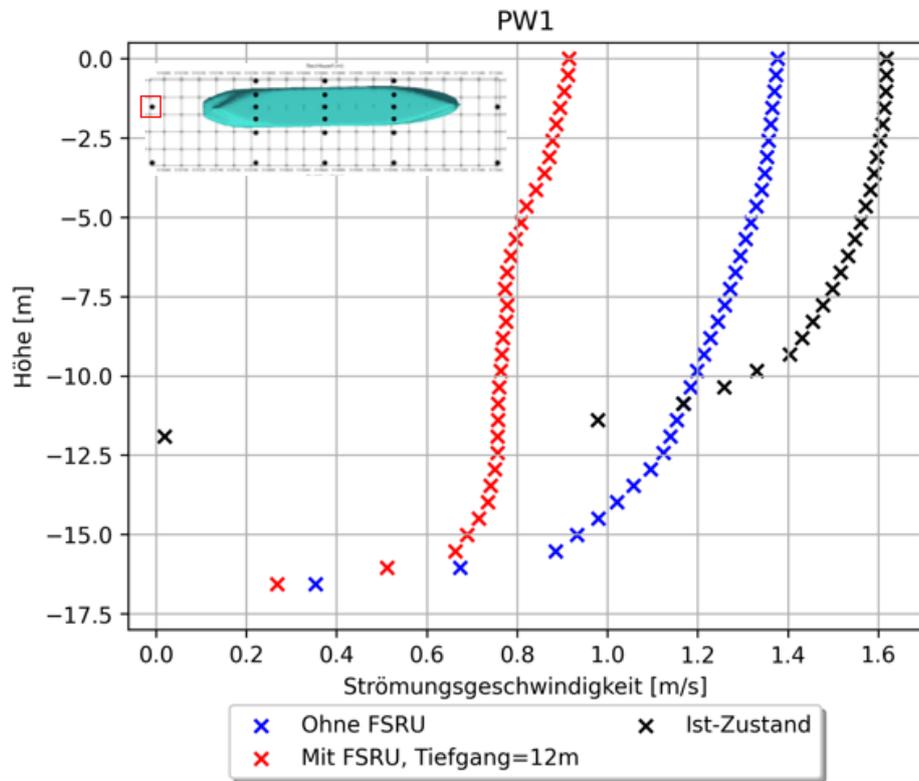
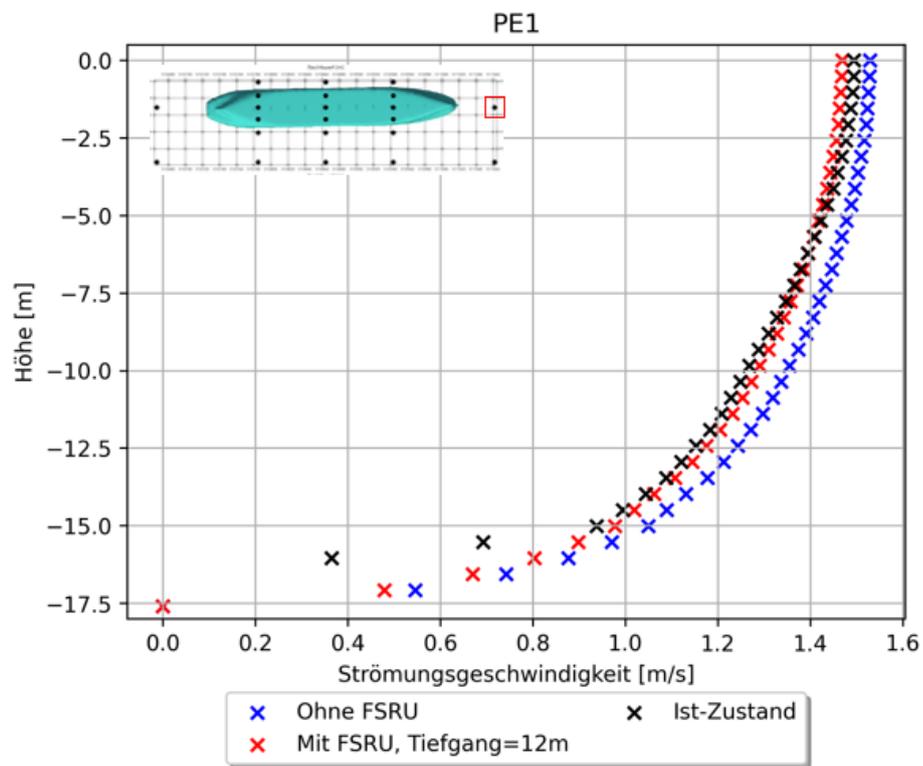


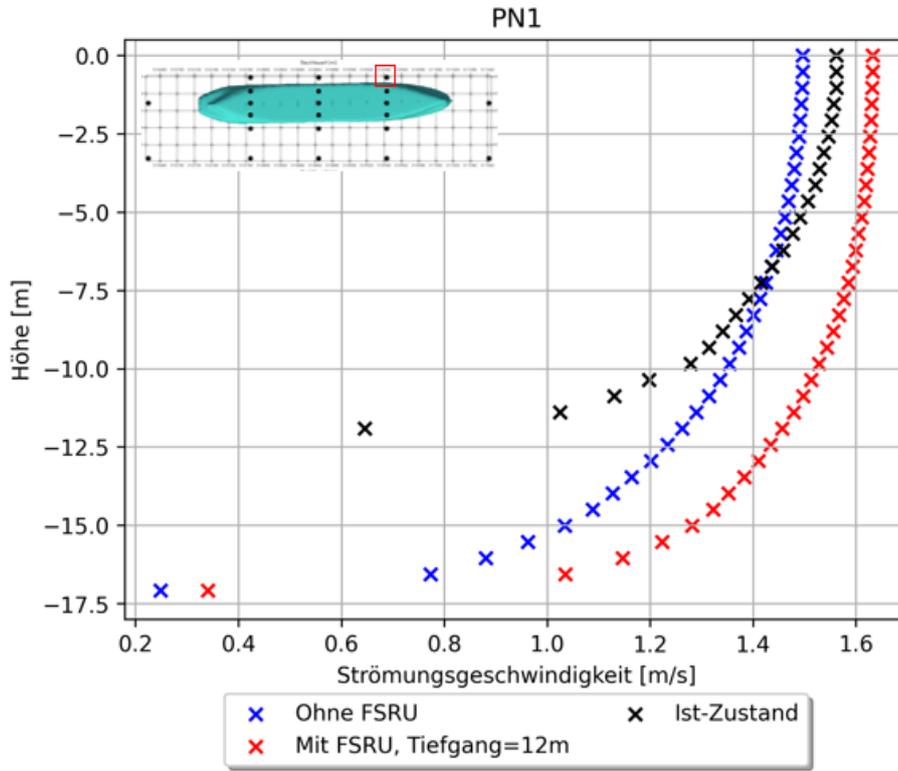
Abbildung 5-1. Extraktionspunkte für Strömungsprofile unterhalb und im Nahbereich der FSRU relativ zur FSRU



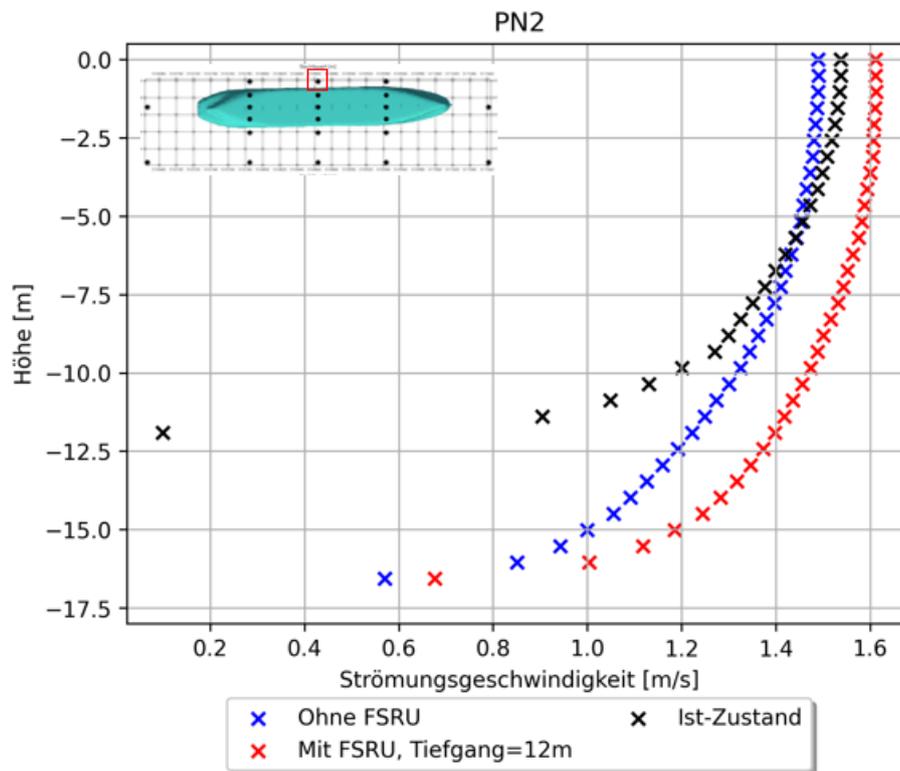
a)



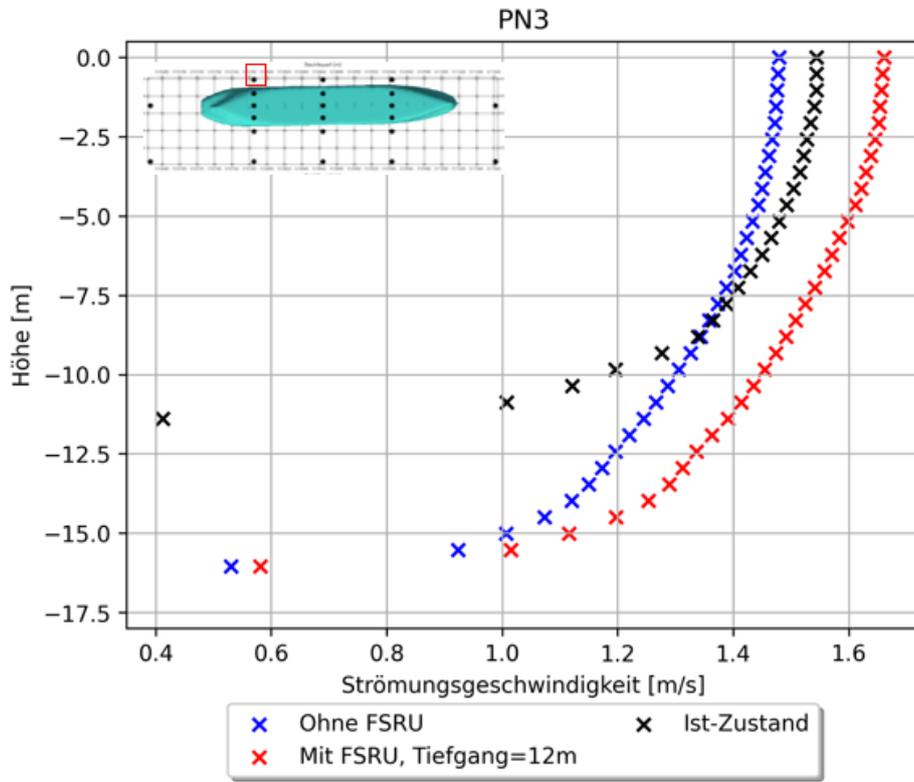
b)



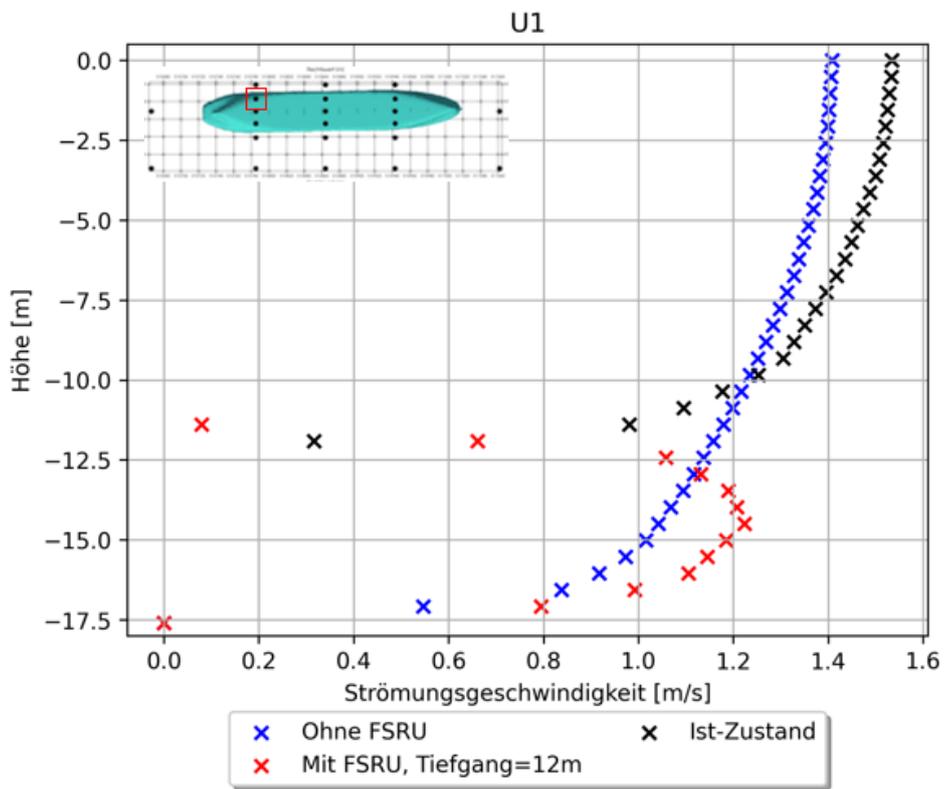
c)



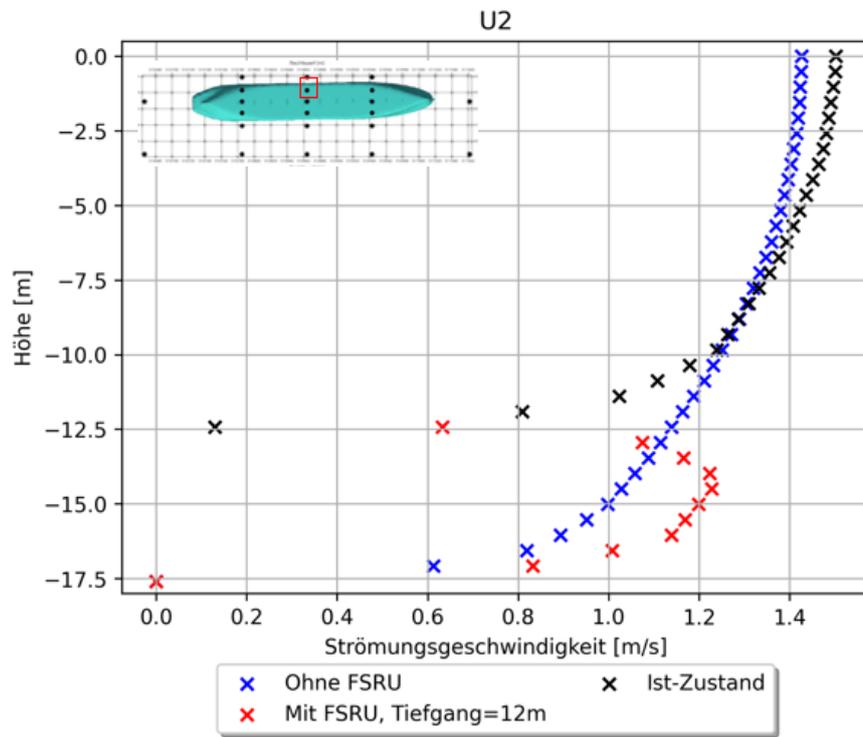
d)



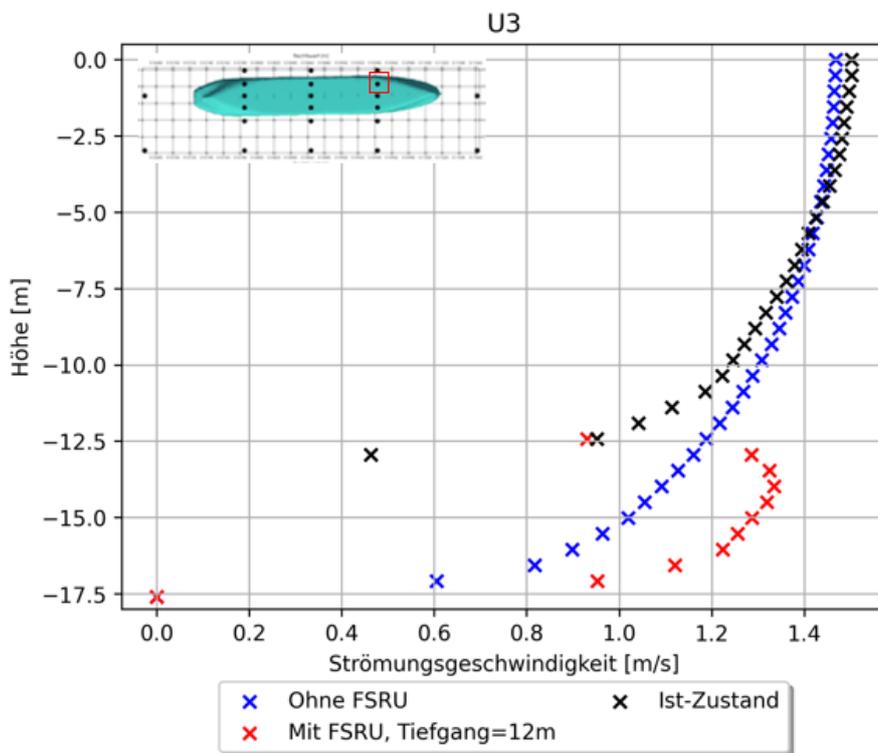
e)



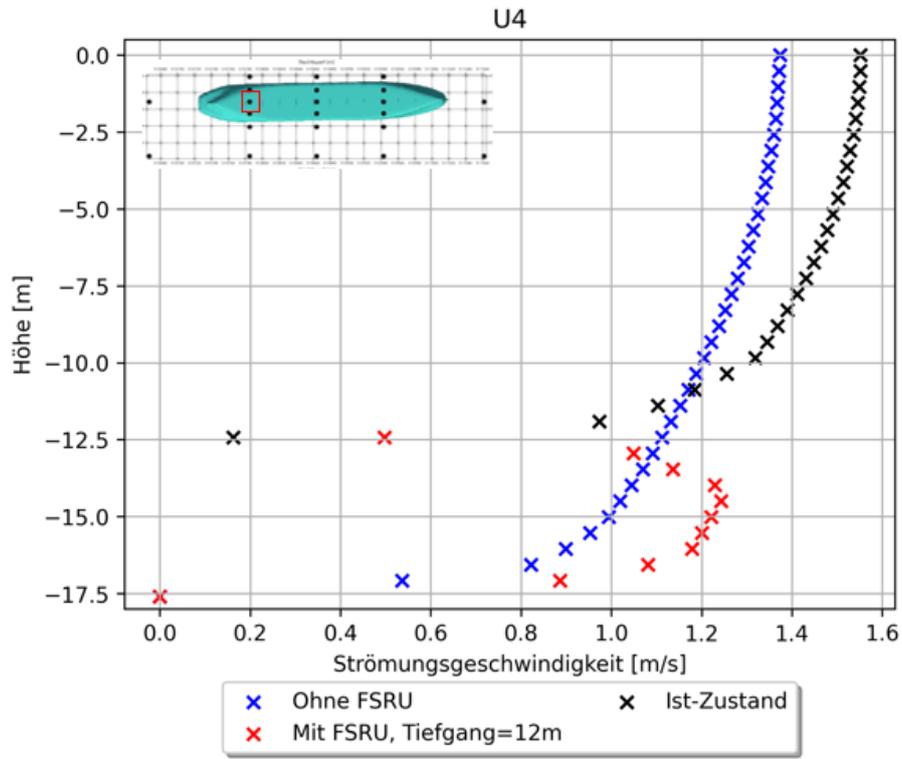
f)



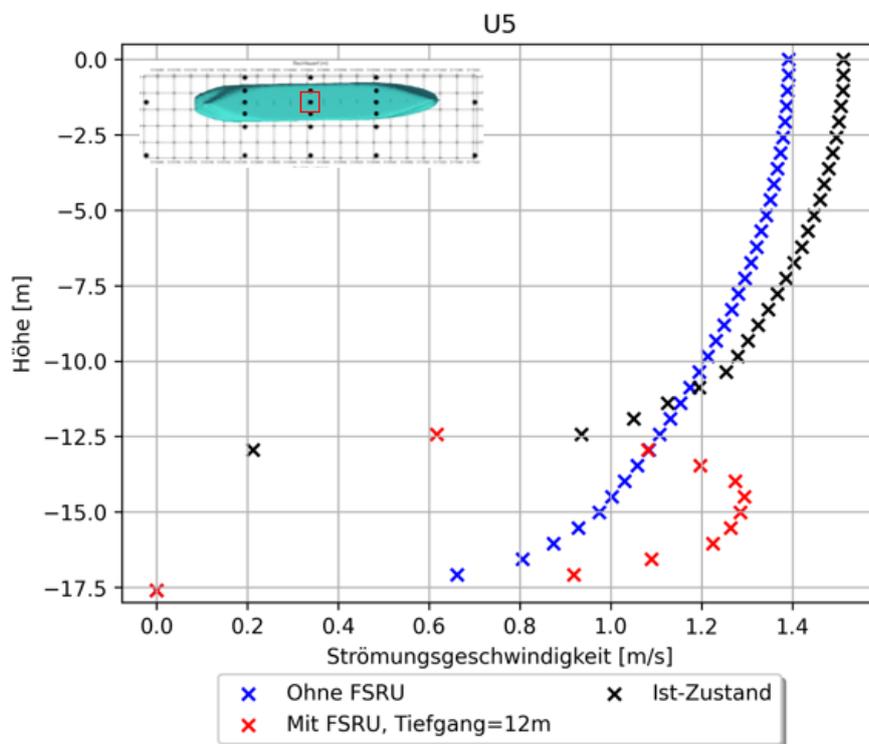
g)



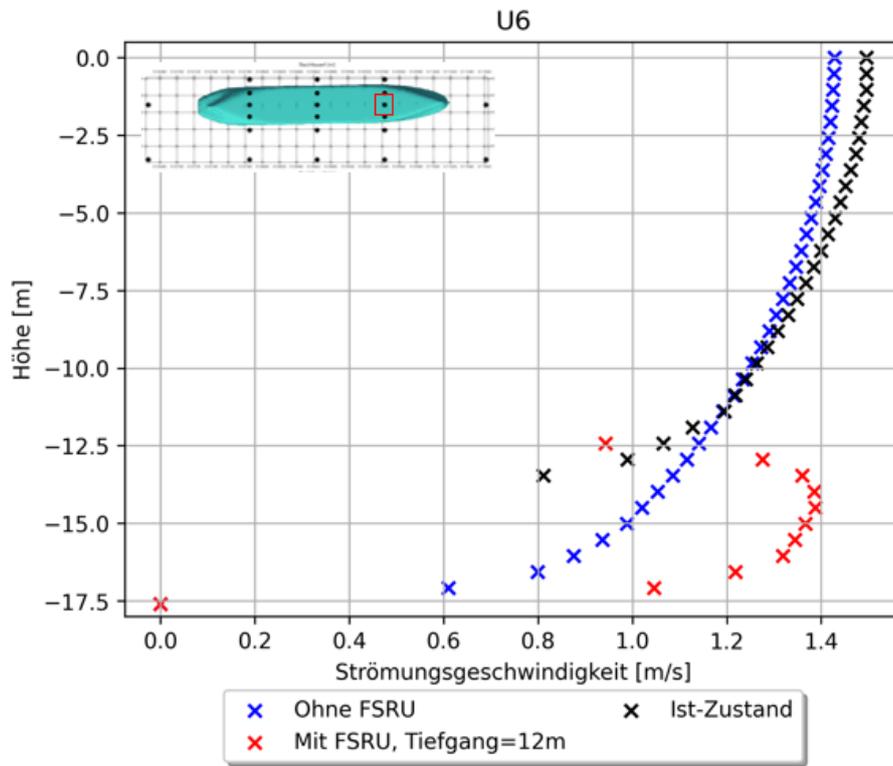
h)



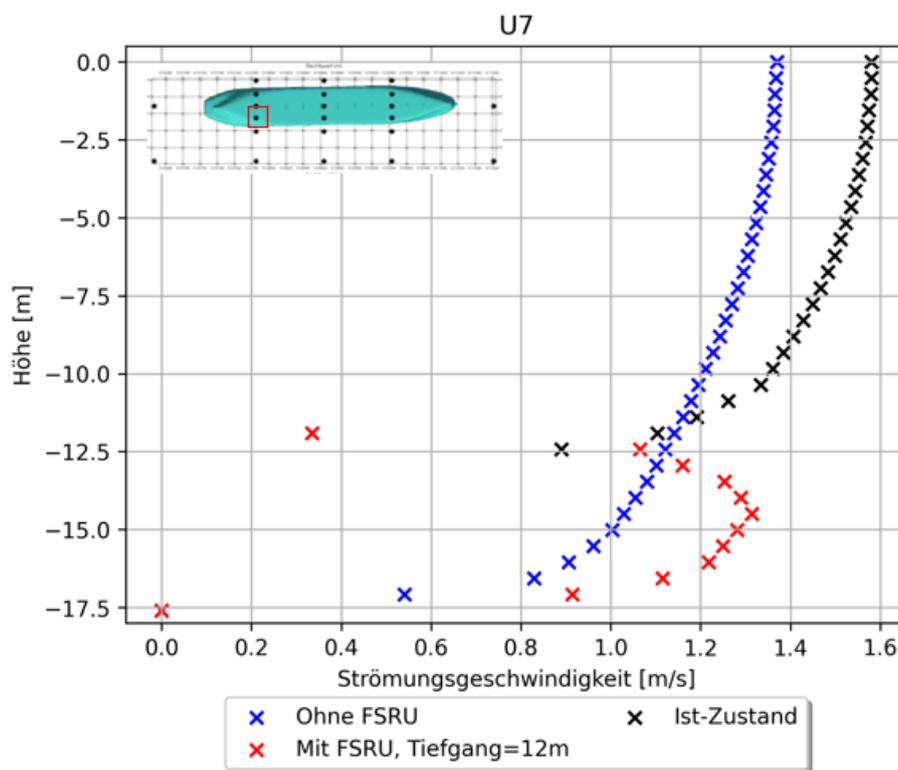
i)



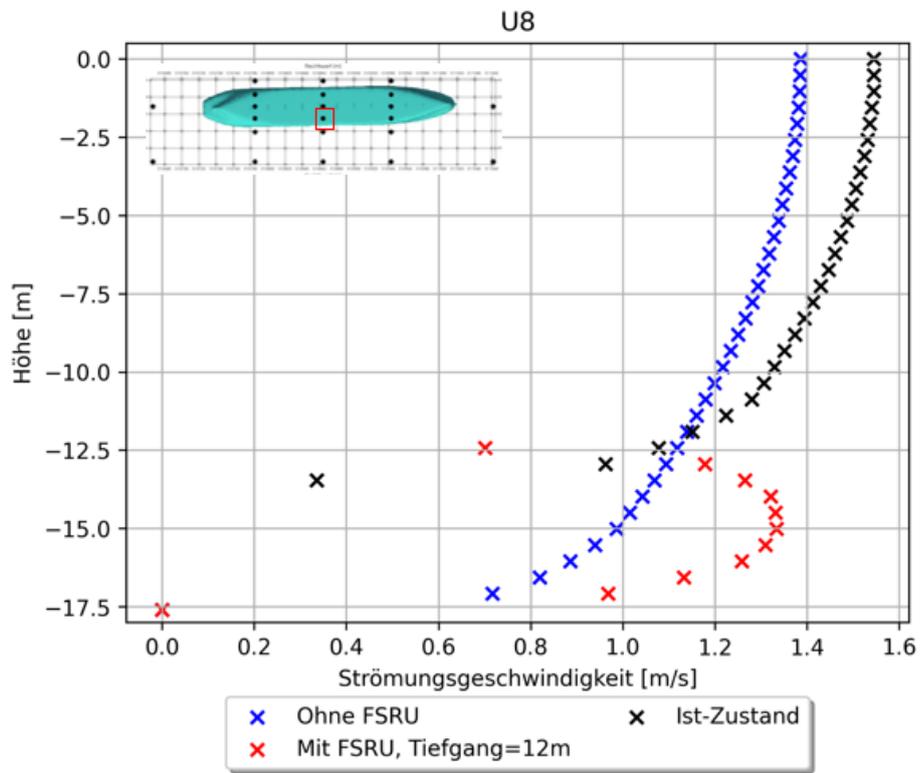
j)



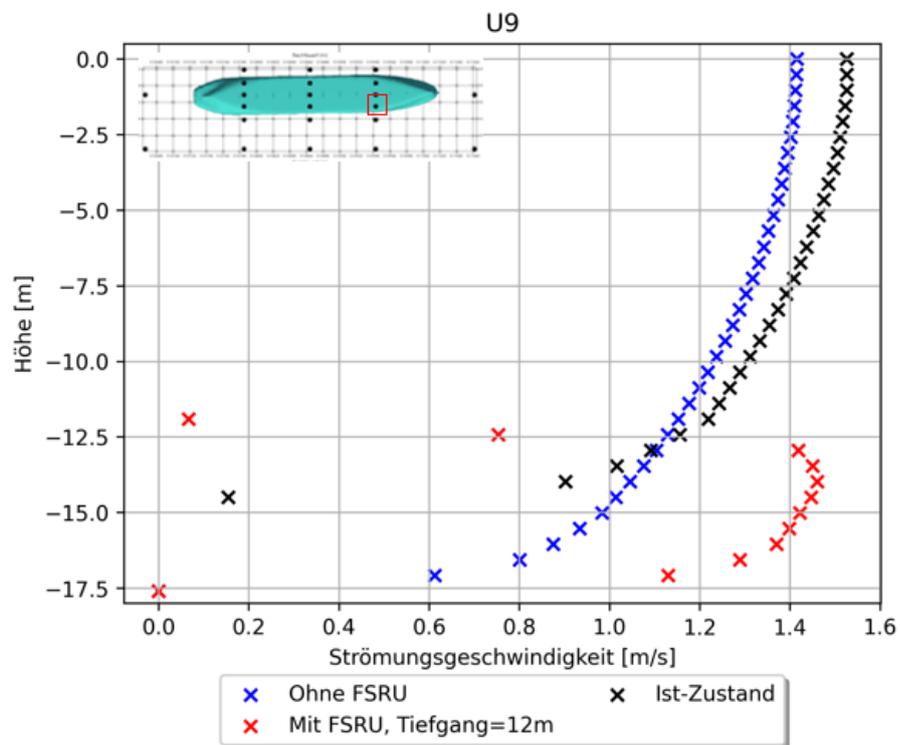
k)



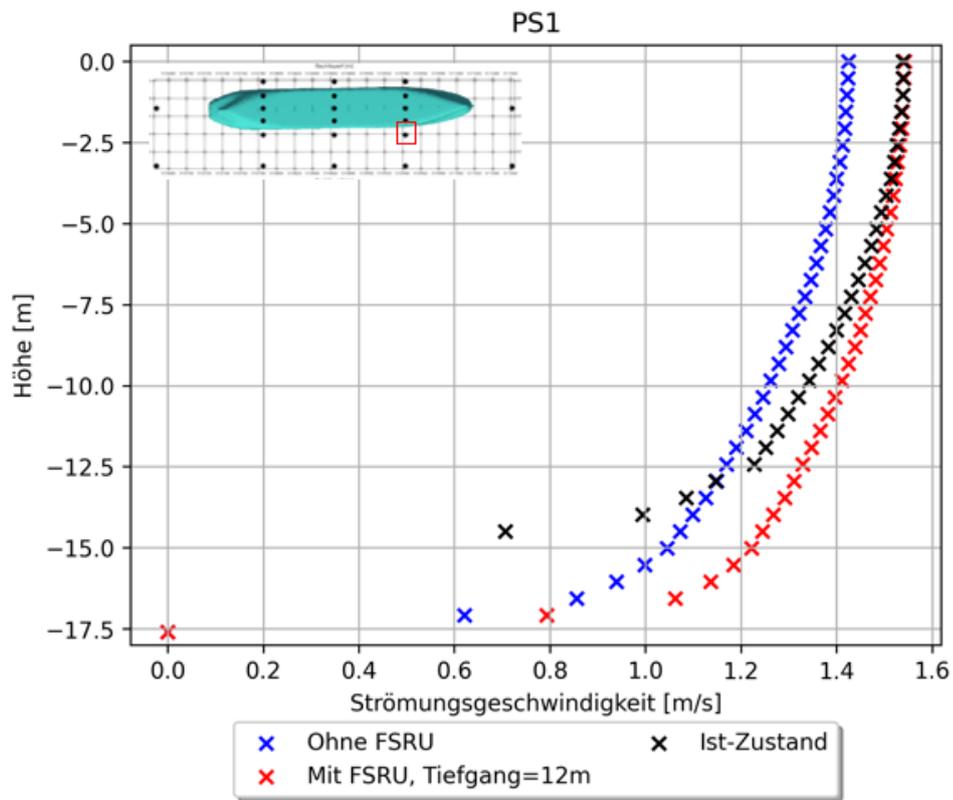
l)



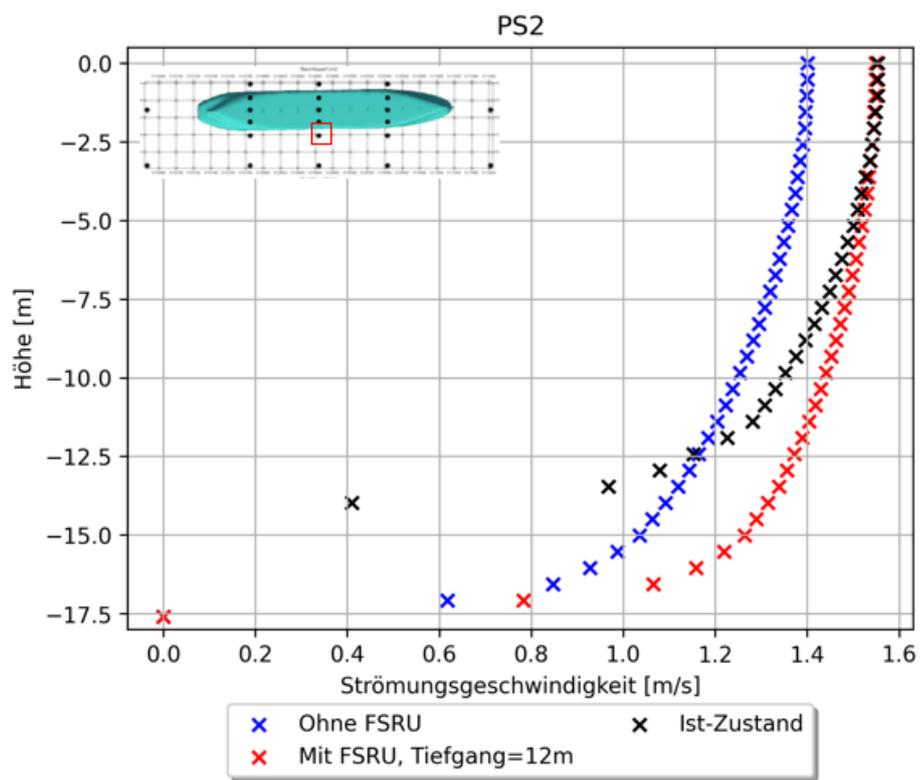
m)



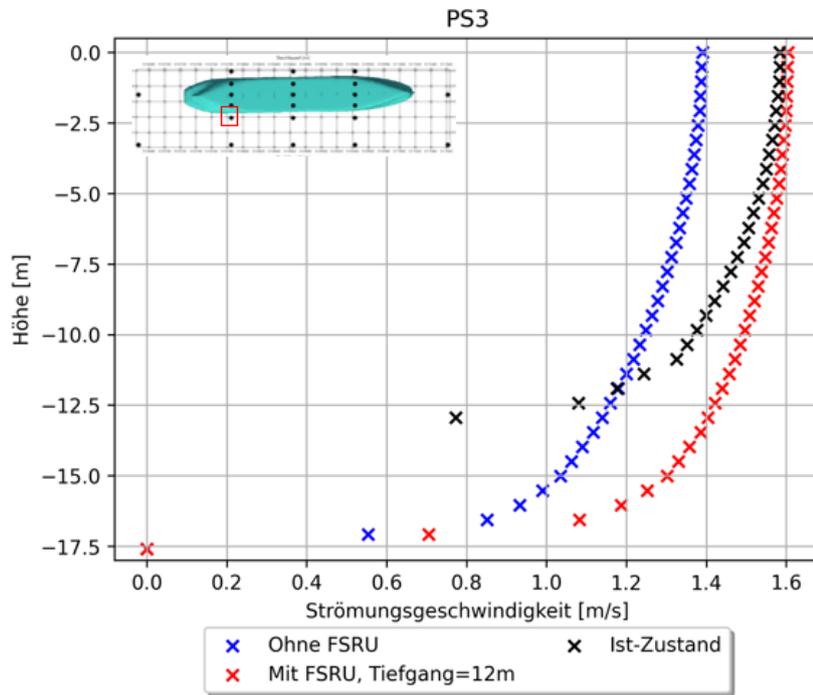
n)



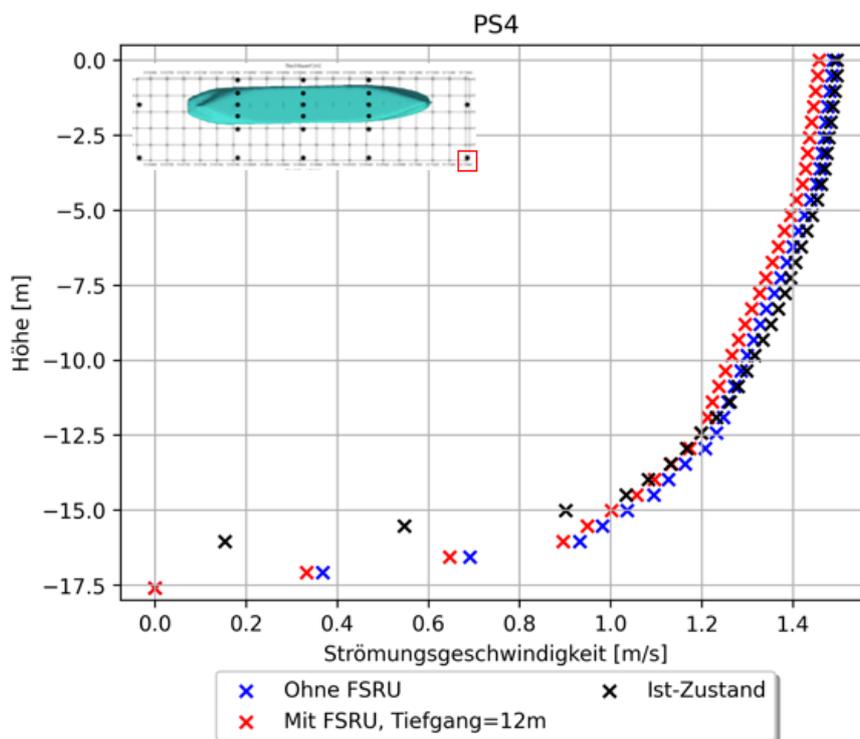
o)



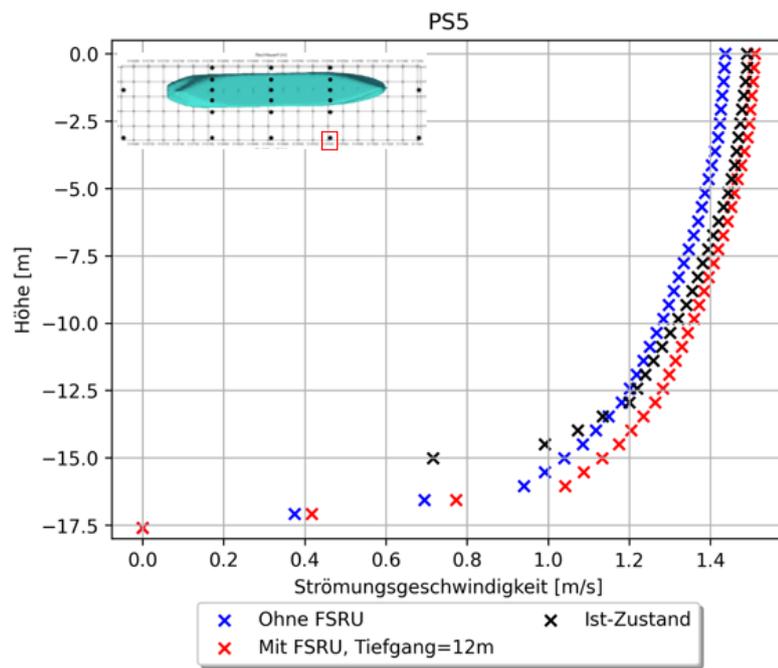
p)



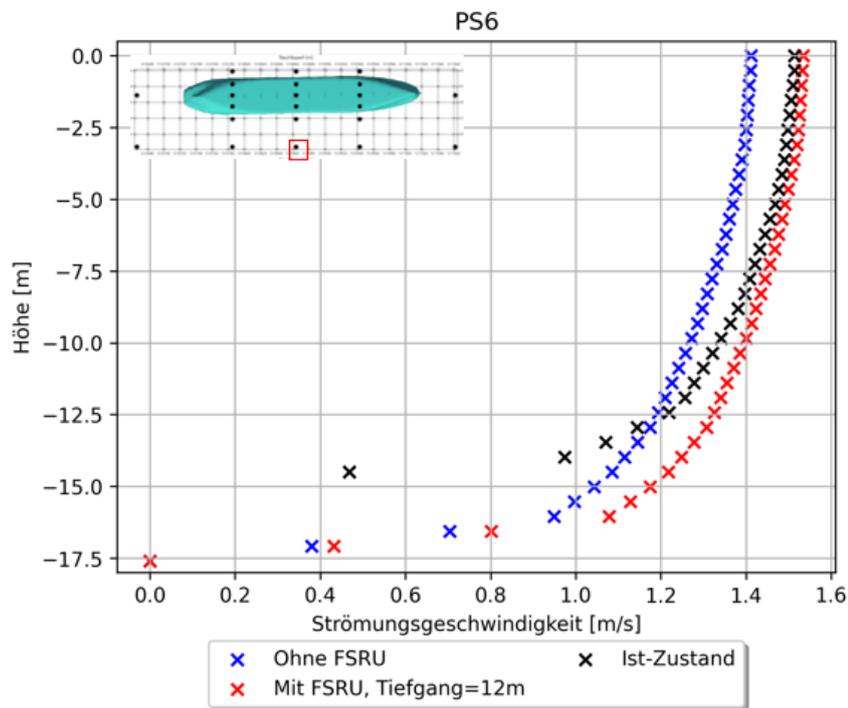
q)



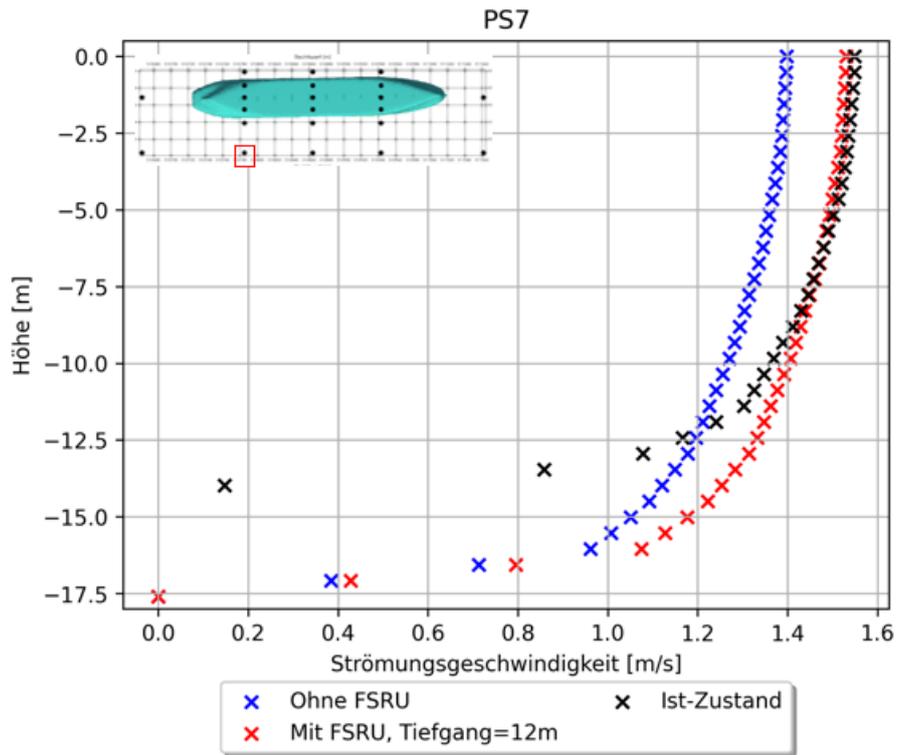
r)



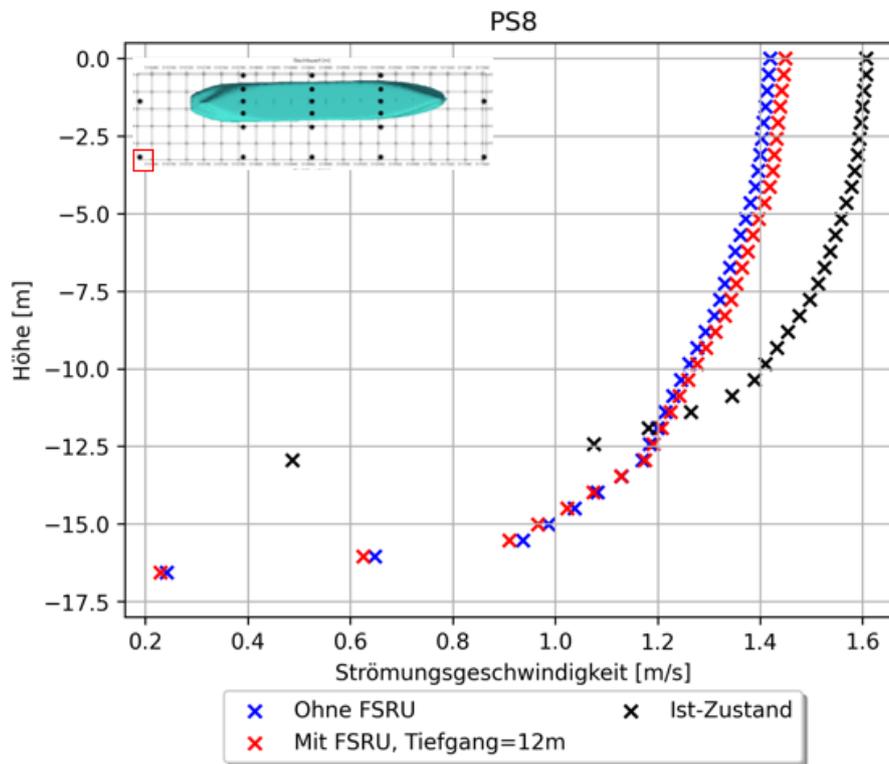
s)



t)



u)



v)

Abbildung 5-2. Strömungsgeschwindigkeitsprofil über die Wassertiefe an den Extraktionspunkten (siehe Abbildung 5-1)

5.2 Strömungsbild

Um den Einfluss des Schiffskörpers auf die lokalen Strömungen zu bestimmen, wurden die bereits in Abschnitt 4.1 dargestellten punktuellen Strömungsprofile abgeleitet und ausgewertet. Zusätzlich erfolgte eine Analyse der Strömungsbildes mittels Darstellung der 2-dimensionalen Strömungsvektoren als Pfeile. Die folgende Abbildung 5-3 zeigt das Strömungsbild für den Bereich des geplanten Anlegers mit integrierter Liegewanne, aber ohne FSRU. Nachfolgend wird in Abbildung 5-4 derselbe Bereich mit integrierter Liegewanne sowie mit der FSRU dargestellt.

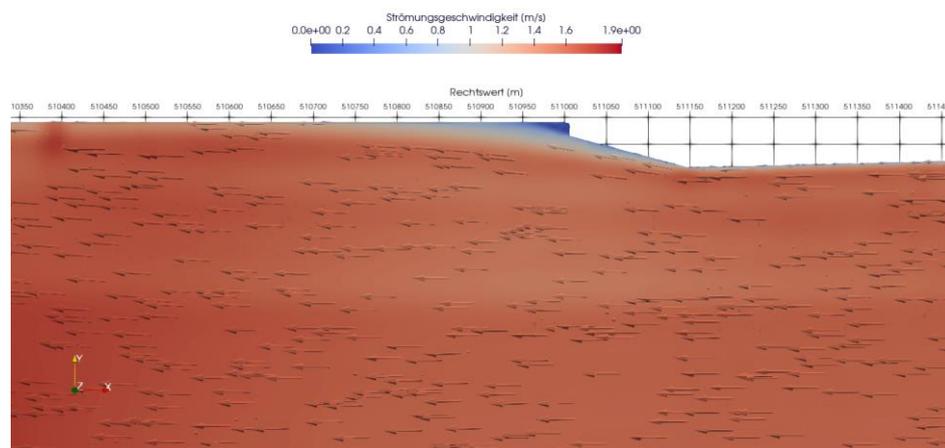


Abbildung 5-3. Strömungsbild am geplanten Anleger mit Liegewanne und ohne FSRU (Darstellung oberflächennah)

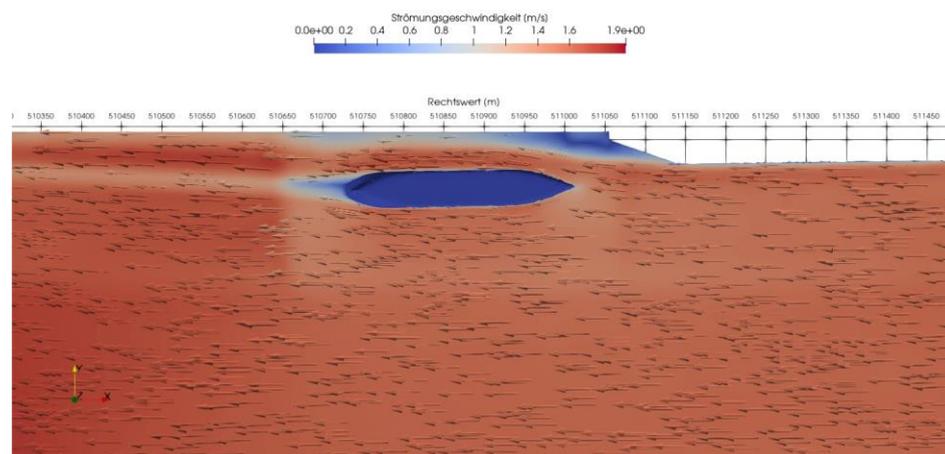


Abbildung 5-4. Strömungsbild am geplanten Anleger mit Liegewanne und integrierter FSRU (Darstellung oberflächennah)

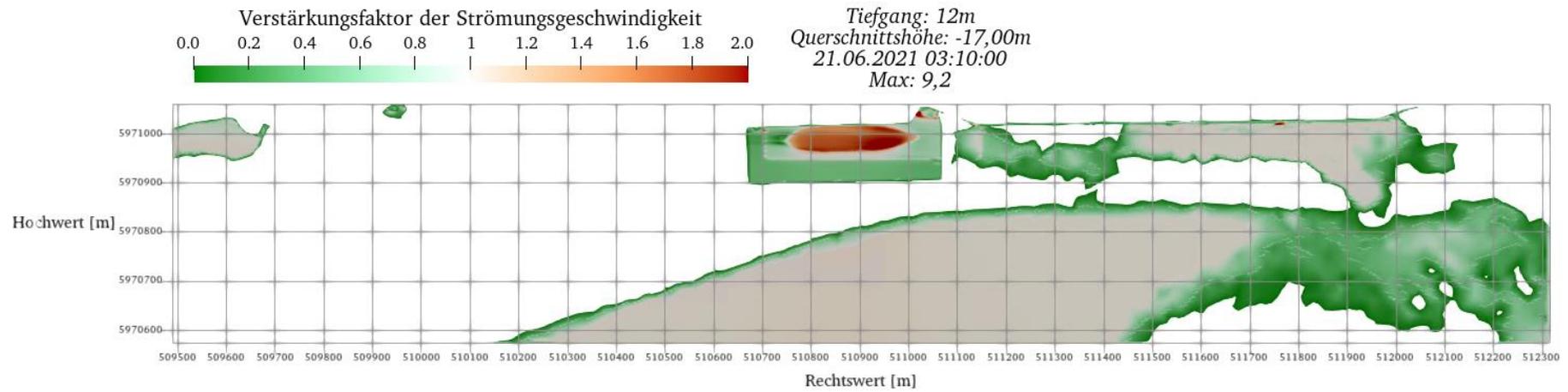
Die Auswertung des Strömungsbildes zeigt, dass es nicht zur Ausbildung von Querströmungen durch die Präsenz der FSRU am geplanten Anleger kommt.

Abbildung 5-5 zeigt Bereiche potenzieller Erosion in der Liegewanne auf Schnitten durch den Wasserkörper auf den Höhen von -17 mNHN bis -12 mNHN (0,3 bis 5,3 m oberhalb der Liegewannen-Sohle). Die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit ist als Verstärkungsfaktor S dargestellt. Er wird berechnet als Quotient aus den Strömungsgeschwindigkeiten U aus den Szenarien ohne FSRU und mit FSRU:

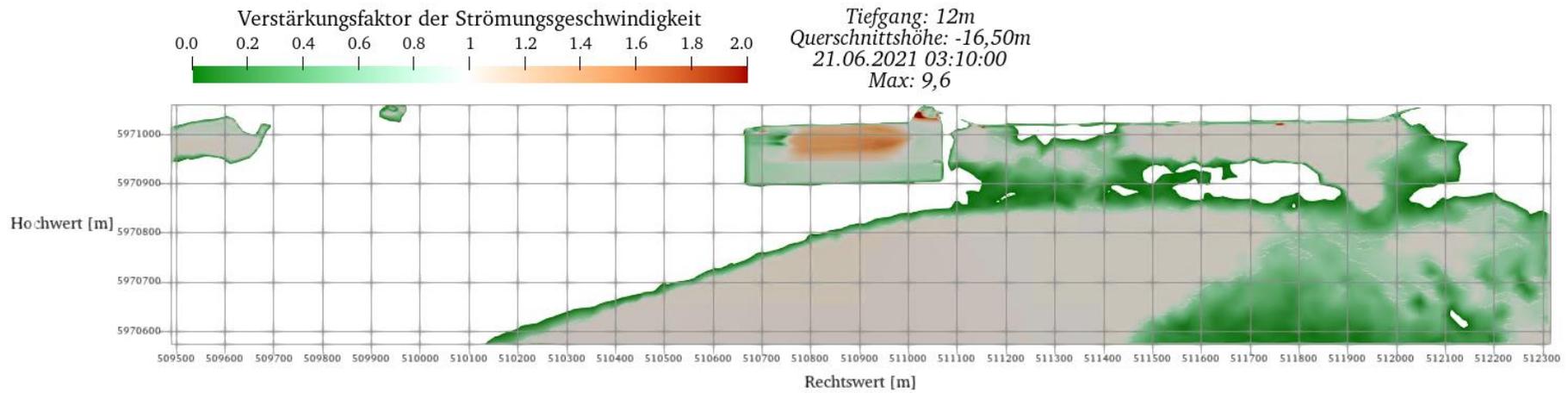
$$S = \frac{U_{ohne\ FSRU}}{U_{mit\ FSRU}}$$

D.h. Werte $S < 1$ (grünlich dargestellt) zeigen eine Tendenz zur Sedimentation, wohingegen Werte $S > 1$ (rötlich dargestellt) eine Tendenz zur Erosion/Kolkbildung zeigen. Die weiße Fläche in Abbildung 5-5 kennzeichnet Bereiche der Darstellungsebene, die lokal unter dem Meeresboden liegt.

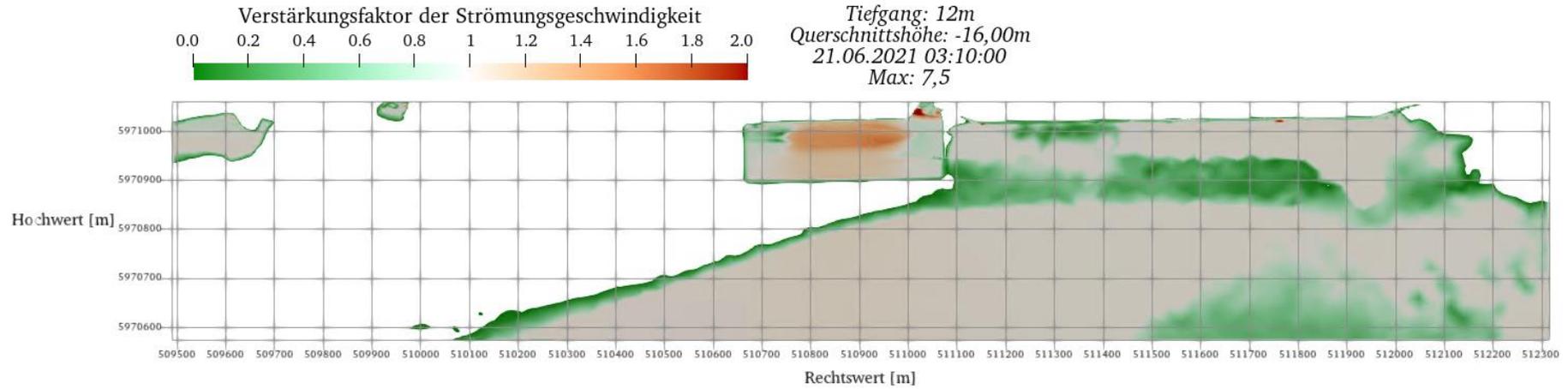
Es ist zu erkennen, dass unterhalb der FSRU von einer Erosionsneigung auszugehen ist. Je nach Strömungsrichtung ist zeitweise von einer Sedimentationsneigung im Strömungsschatten der FSRU auszugehen.



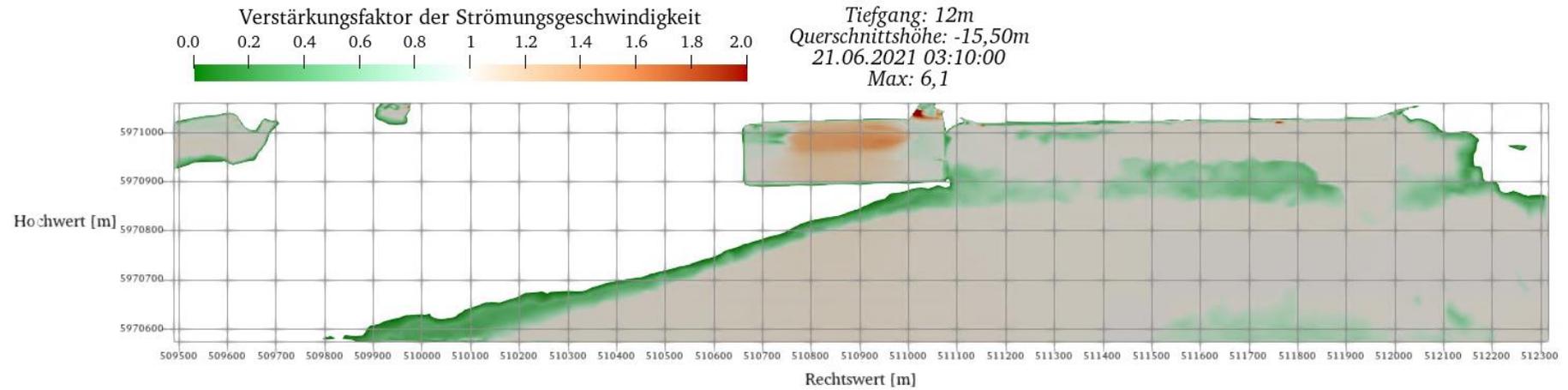
(a)



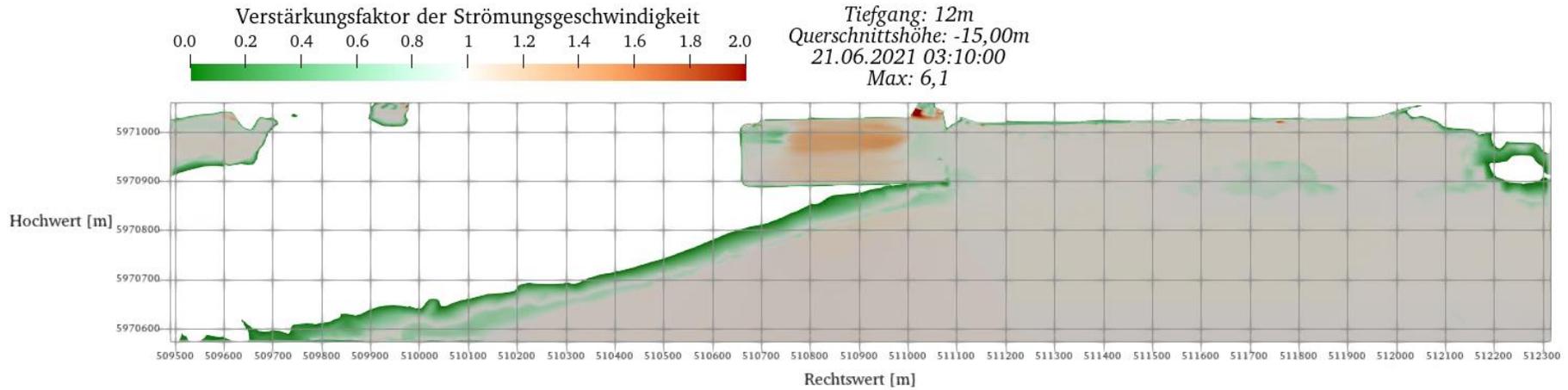
(b)



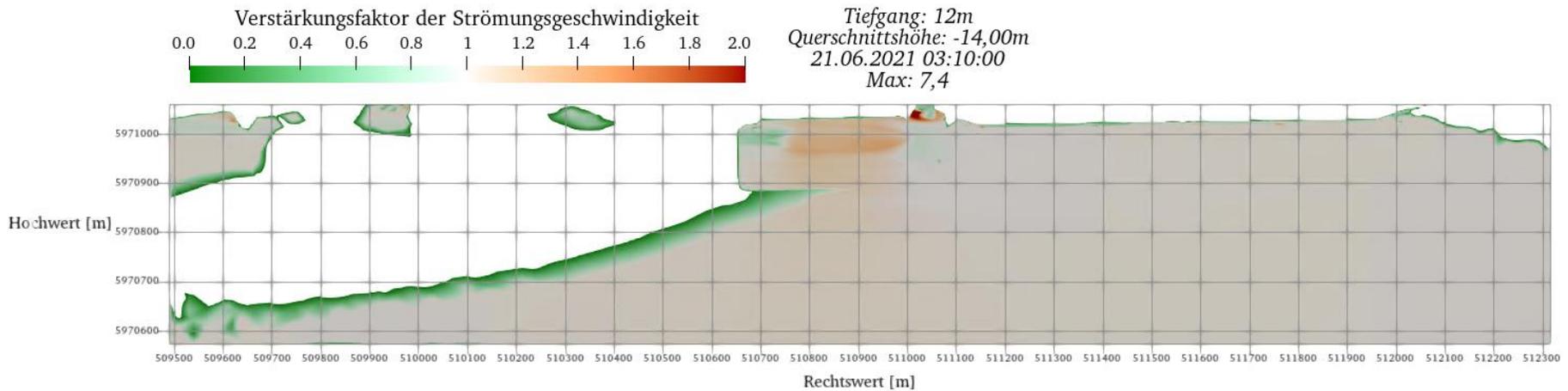
(c)



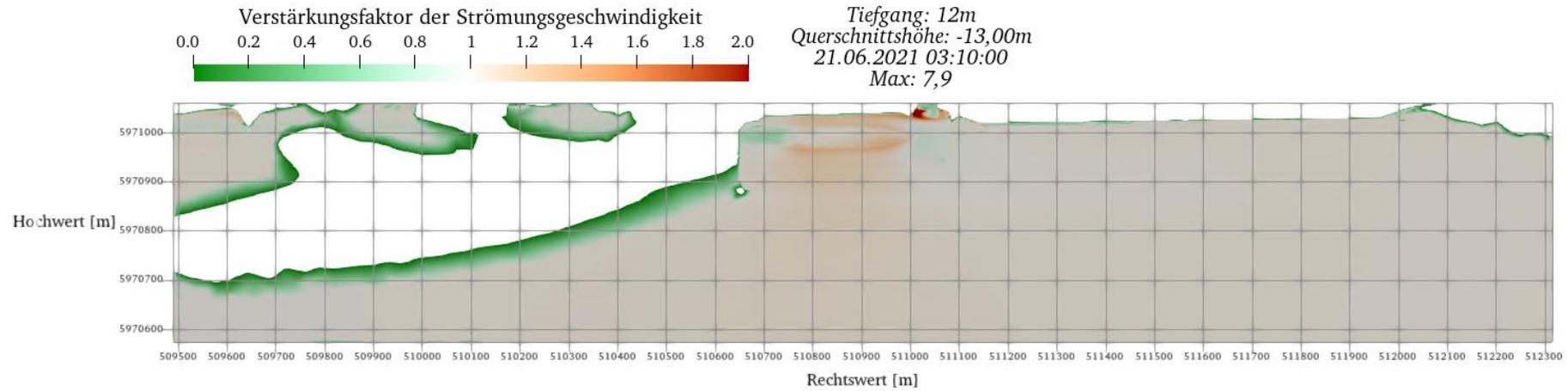
(d)



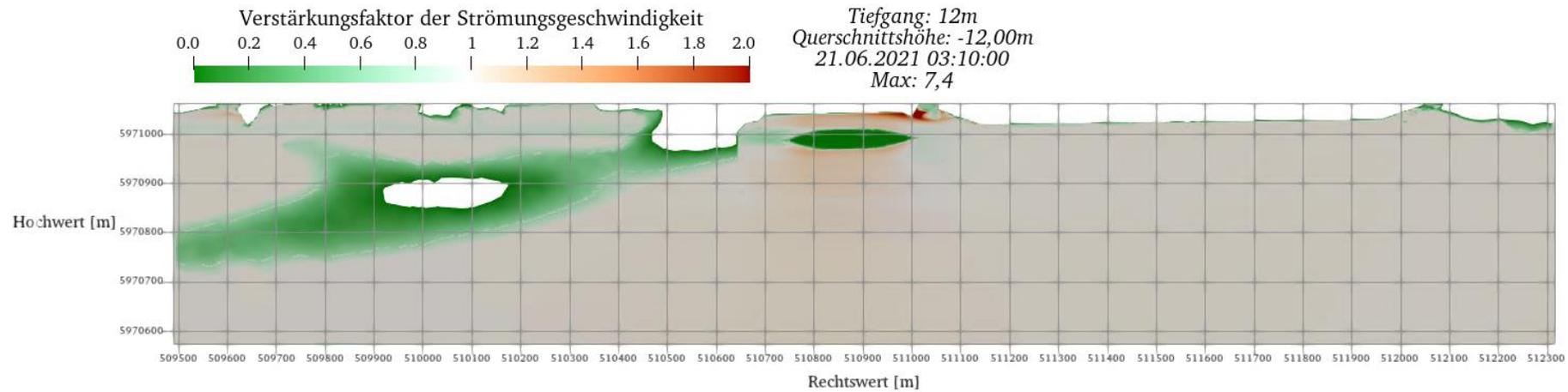
(e)



(f)



(g)



(h)

Abbildung 5-5. Zunahme des Verstärkungsfaktors der Strömungsgeschwindigkeit durch die FSRU mit Tiefgang 12m am geplanten Anleger für die folgende Höhen oberhalb der Liegewanne-Sohle: (a) 0,3m, (b) 0,8m, (c) 1,3m, (d) 1,8m, (e) 2,3m, (f) 3,3m, (g) 4,3m und (h) 5,3m

6 Zusammenfassung

Für die geplanten Floating Storage Regasification Unit (FSRU-) Anleger für das neue Flüssiggas- (LNG-) Terminal Brunsbüttel wurden die Strömungen am geplanten Anleger numerisch untersucht, um den Einfluss der geplanten Liegewanne und des Schiffskörpers der FSRU auf die lokalen Strömungen zu analysieren.

Hierfür wurden die Strömungsgeschwindigkeiten zunächst regional für die Tideelbe im vorliegenden 3D-Modell der Tideelbe modelliert. Damit kann eine Abschätzung der 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 (sowie als Referenz im aktuellen Ist Zustand) genau zu erfassen.

Durch den Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten wurde eine relative Größenordnung der zu erwartenden Strömungsänderung verursacht durch die FSRU im Vergleich zum geplanten Anleger ohne FSRU abgeschätzt. Der Einfluss der vertäuten FSRU auf die Strömungen im Bereich des geplanten Anlegers wurde an den Extraktionspunkten für die Strömungsprofile untersucht, welches den Bereich unter dem Schiff einschließt.

Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- Die Strömungsgeschwindigkeit im Nahbereich steuerbord (PS1 bis PS3) und backbord (PN1 bis PN3) erhöhen sich um bis zu 0,3 m/s.
- im Strömungsschatten des Schiffskörpers reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit um ca. 0,4 m/s (PW1).
- Stromaufwärts (PE1) erfolgt eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit um 0,1 m/s
- Unter der vertäuten FSRU nehmen die Geschwindigkeiten gegenüber dem Zustand ohne FSRU sohnah um bis zu 0,4 m/s zu.
- Die Analyse des Strömungsbildes ergibt, dass die Präsenz des Schiffskörpers nicht zur Ausbildung von Querströmungen führt. In Kombination mit den Ergebnissen der ausgewerteten Querprofile bestätigt sich eine strömungsparallele Lage der FSRU.
- Durch die dauerhaft vertäute FSRU ergibt sich ein Kolkpotential während der Flut- und Ebb-Phase durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb des Schiffskörpers

7 Literatur

- /1/ DHI WASY GmbH *„Angebot für eine Studie zum Kolkpotential am geplanten FSRU-Anleger Stade“*, Angebot 14806796, 25.10.2022
- /2/ DHI WASY GmbH *„Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth: Sedimentverdriftung und Unterhaltung“*, Bericht 14805854, 07.04.2022
- /3/ DHI WASY GmbH *„Hydrodynamische Studie zu den Auswirkungen des Betriebs der FSRU auf die Wasserqualität und die Gewässersohle – Thermische Einleitung“*, Bericht 14806725, November 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, 2021
- /5/ OpenCFD (2023, 6. Januar), *„OpenFOAM v2012“*, <https://www.openfoam.com/news/main-news/openfoam-v20-12>, 2020

Auswirkungen der FSRU auf das lokale Strömungsbild am geplanten Anleger in Brunsbüttel

09.03.2023

Inhalt

- 01 Modellaufbau
- 02 Ergebnisse Ist-Zustand
- 03 Ergebnisse Plan-Zustand
- 04 Vergleich Strömungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Schiffskörpers im Planzustand
- 05 Zusammenfassung

01.

Modellaufbau



Übersicht Modellansatz und Modellgebiet

- Reduzierung des Modellraums auf den Regionalbereich um ein detailliertes Strömungsbild abzubilden
- Ableitung der Randbedingungen aus dem bekannten regionalen Elbe Modell (vgl. Temperaturstudie)
- Umsetzung durch CFD-Modell (Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichungen).
- Ca. 443000 Mesh-Elemente (Plan-Zustand), ca. 380000 Mesh-Elemente (Ist-Zustand)

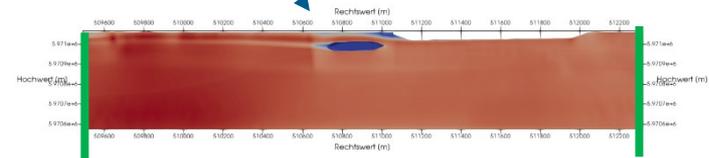
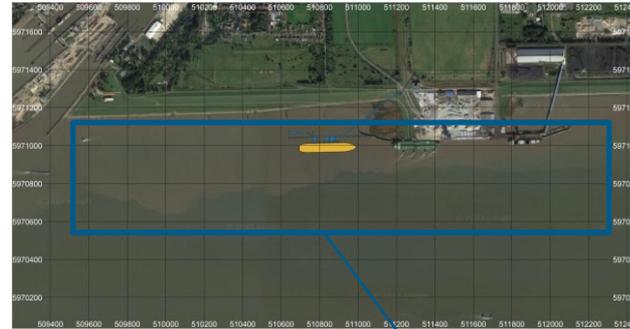


Hinweis:

- Alle Koordinaten in ETRS89 UTM-32N
EPSG:25832

Eingangsdaten und Randbedingungen

- **Bedingung am Modellrand**
 - Modellrand für lokales CFD-Modell aus regionalem Tide-Elbe-Modell (vgl. Temperaturstudie)
- **Bathymetrie**
 - WSV, 2022 (letzte verfügbare Messung)
- **Strömungssituation**
 - Voranalyse auf Basis des regionalen Tide-Elbe Modell
 - Extraktion der höchsten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Schiffskörpers; voller Ebbstrom (konservativer Ansatz, da hier stärker als Flutstrom)
- **Schiffskörper (aus DHIs Katalog für repräsentative Schiffshüllen)**
 - Plandaten des Auftraggebers; Maße: 294m LOA, 46m Breite, 12m Tiefgang



Westlicher Modellrand

Östlicher Modellrand

Hinweise:

- Der östliche Modellrand fungiert als *inlet*
- Der westliche Modellrand als *pressure outlet*

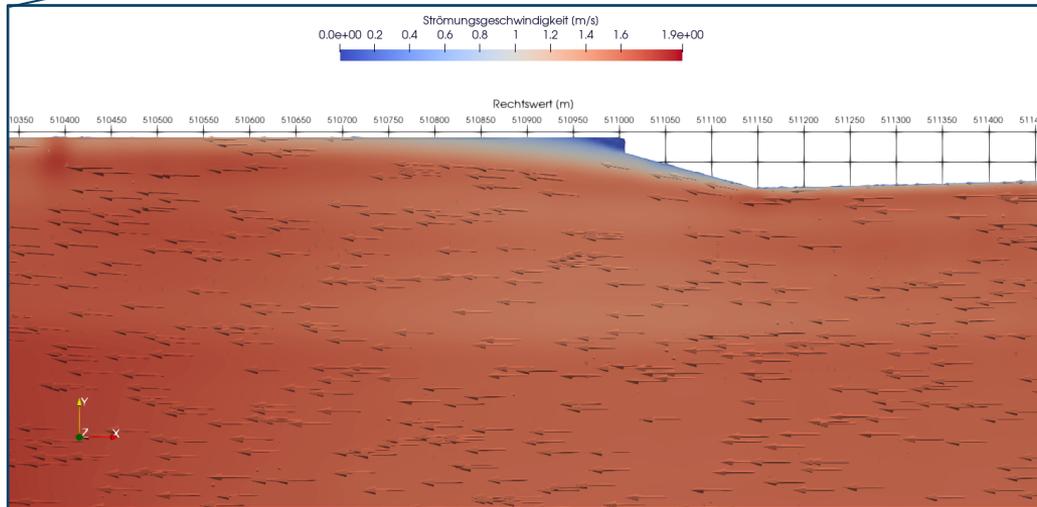
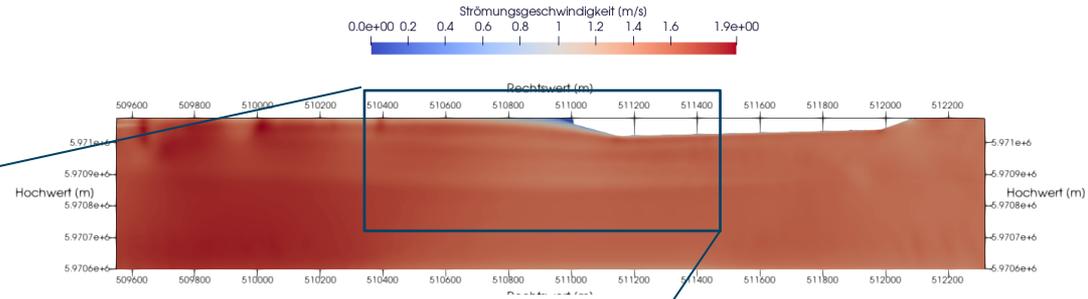
02.

Ergebnisse Ist-Zustand



Strömungsbild im Ist-Zustand

- Abbildung der lokalen Strömungen im Modellgebiet
- Fokus auf den Bereich der geplanten Liegewanne und der geplanten Position des FSRU-Schiffskörpers mit Strömungsvektoren
- Darstellung oberflächennah



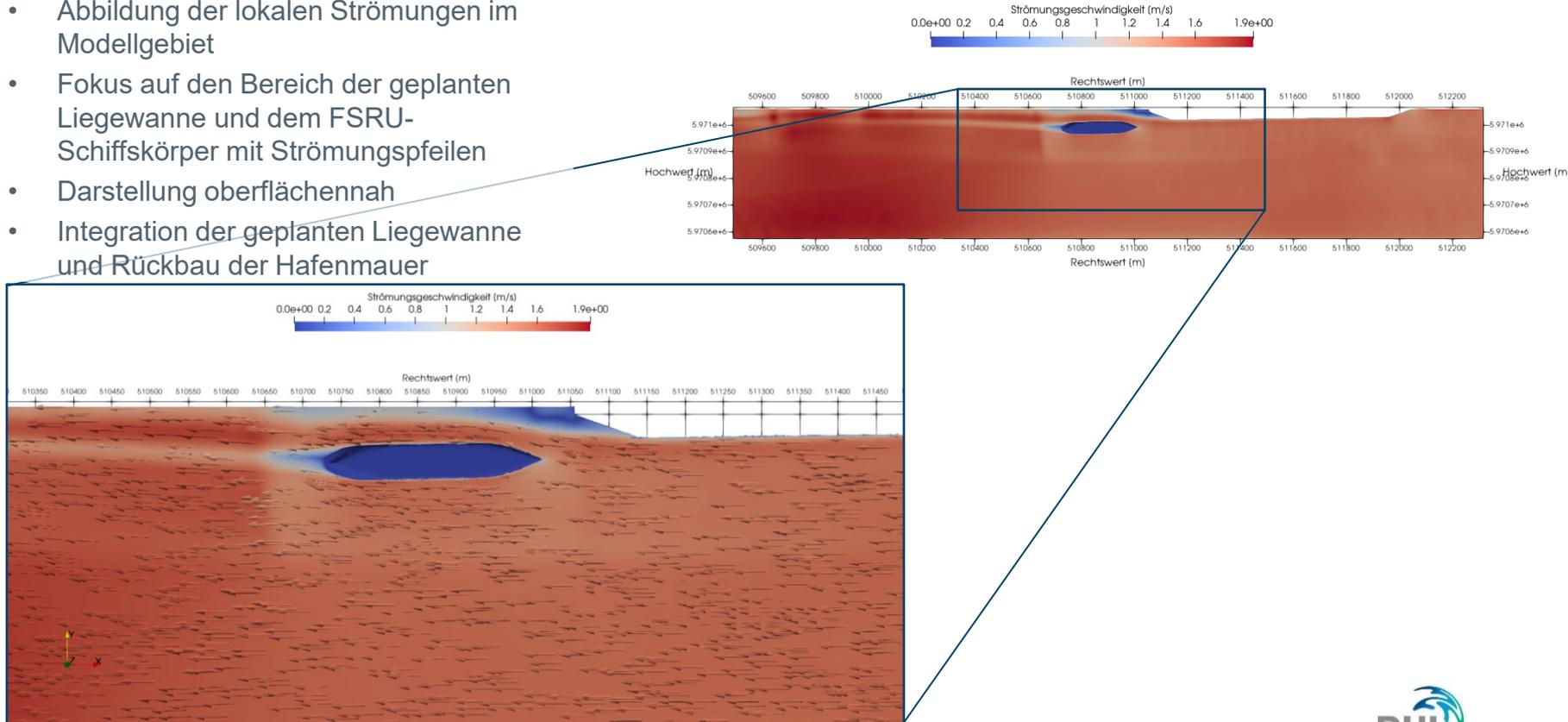
03.

Ergebnisse Plan-Zustand



Strömungsbild im Plan-Zustand

- Abbildung der lokalen Strömungen im Modellgebiet
- Fokus auf den Bereich der geplanten Liegewanne und dem FSRU-Schiffkörper mit Strömungspfeilen
- Darstellung oberflächennah
- Integration der geplanten Liegewanne und Rückbau der Hafenanlage



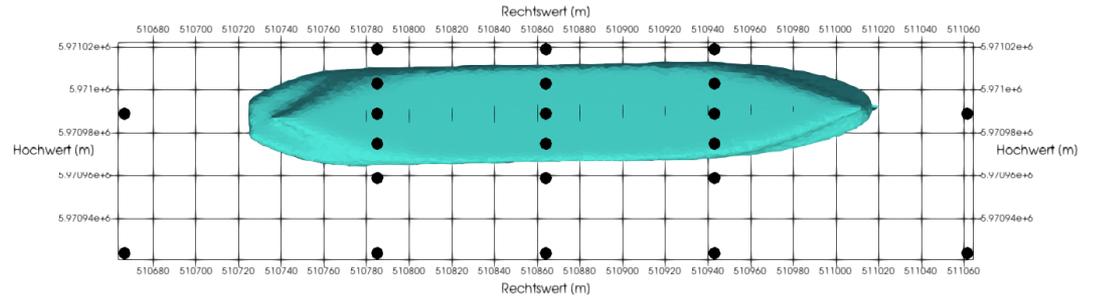
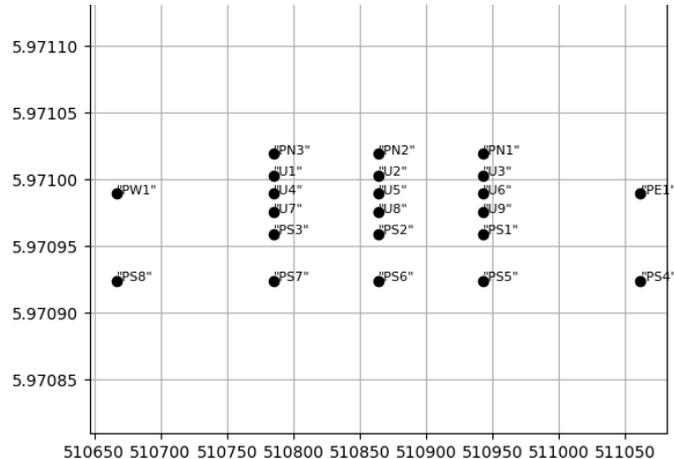
04.

Vergleich Strömungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Schiffskörpers im Planzustand



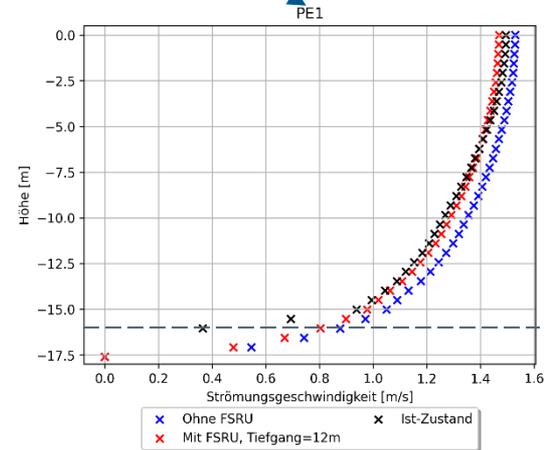
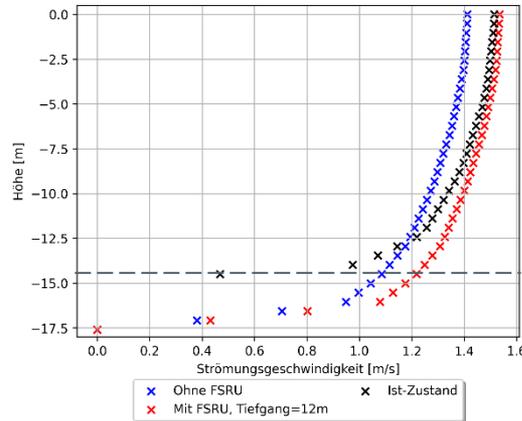
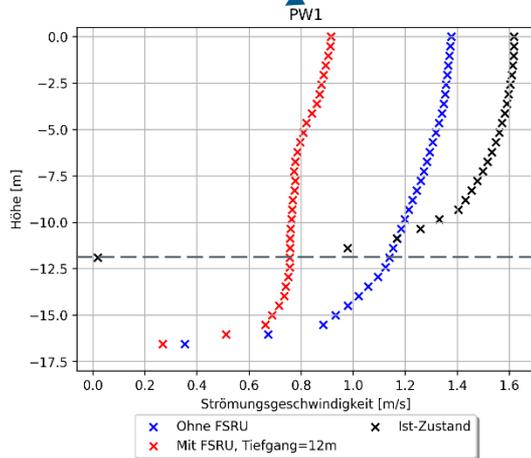
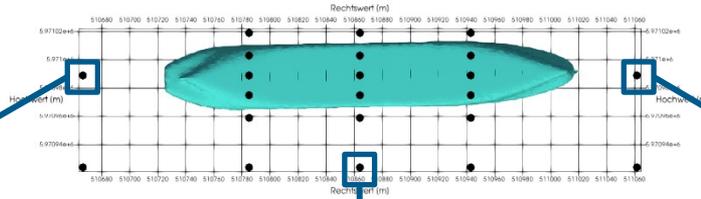
Ermittelte Abweichungen an relevanten Auswertepunkten

- Position der vertikalen Auswertungsprofile
- Vergleich im Planzustand mit und ohne FSRU (zusätzlich Referenzwerte des Ist-Zustandes)



Ermittelte Abweichungen (mit und ohne FSRU) an beispielhaften Auswertepunkten

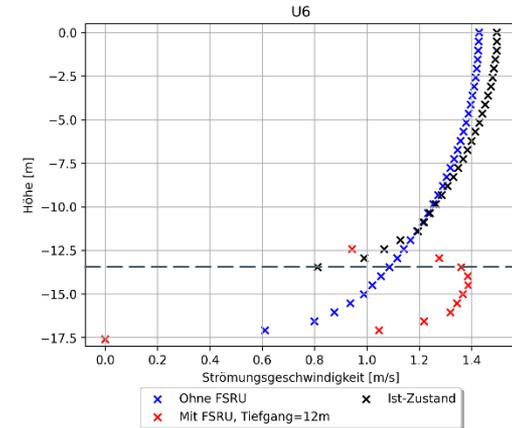
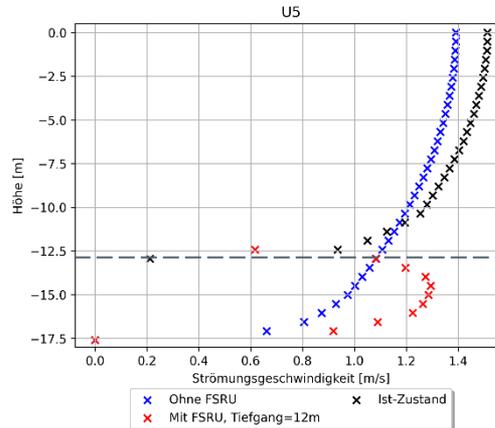
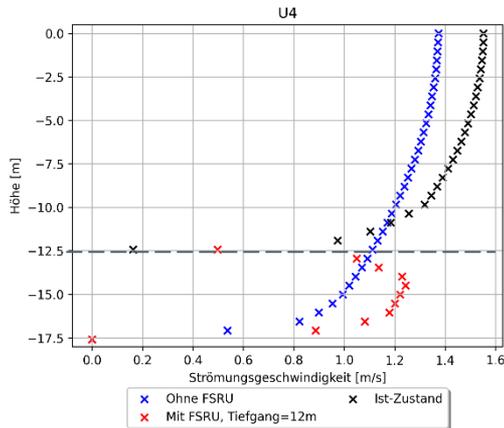
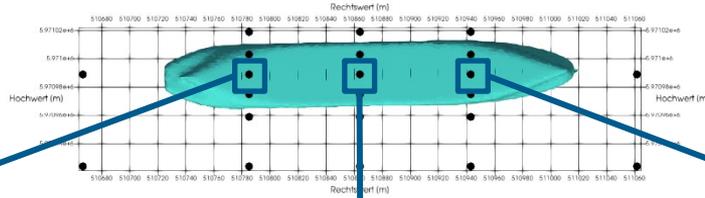
- Position PW1, PS6, PE1 um den geplanten Schiffskörper



--- Sohlage im Ist-Zustand

Ermittelte Abweichungen (mit und ohne FSRU) an beispielhaften Auswertepunkten

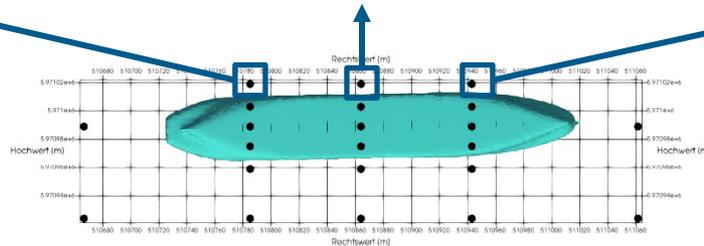
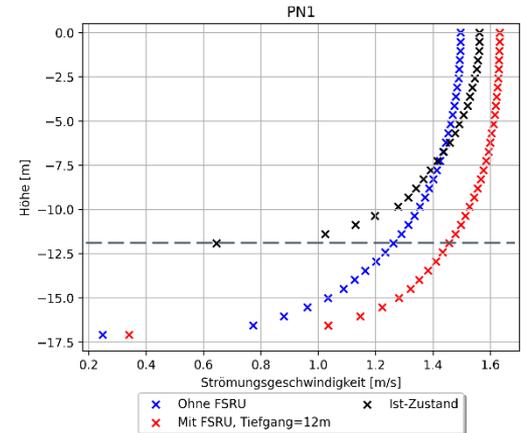
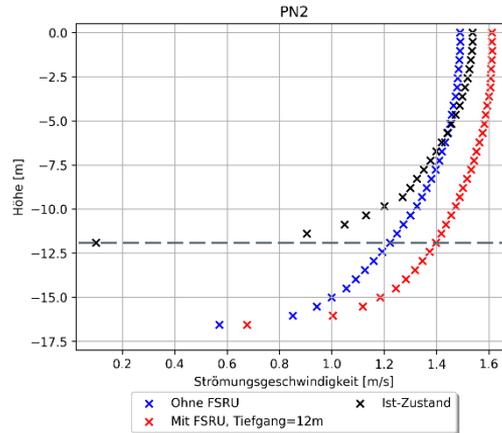
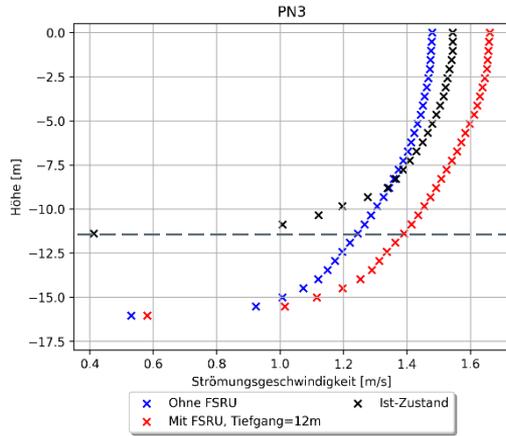
- Position U6, U5, U4 unter dem geplanten Schiffkörper



— — Sohlage im Ist-Zustand

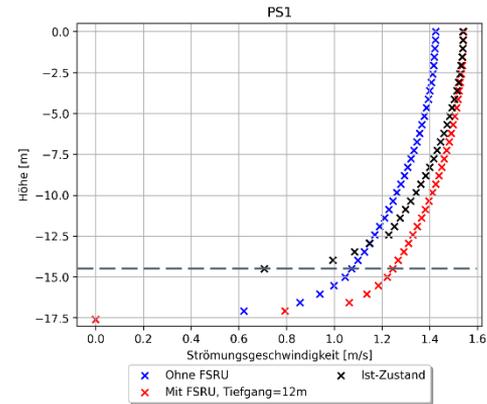
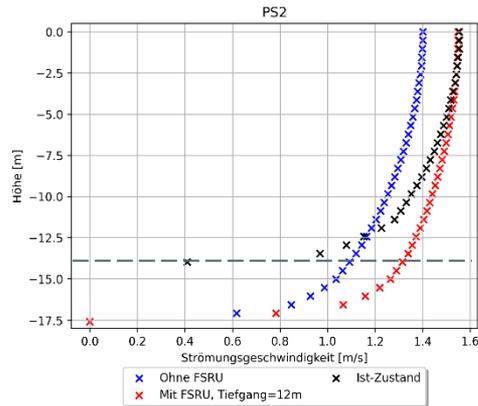
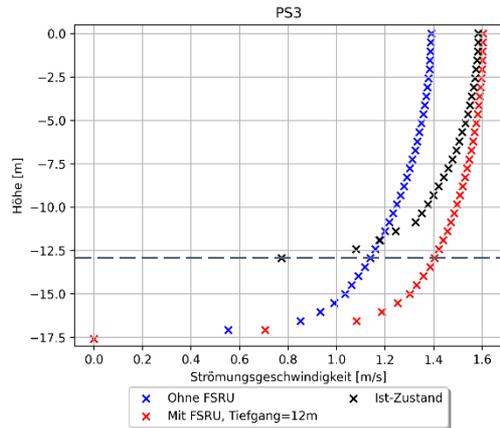
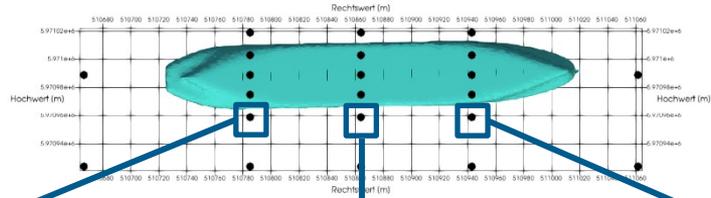
Ermittelte Abweichungen (mit und ohne FSRU) an beispielhaften Auswertepunkten

- Position PN1, PN2, PN3 im Nahbereich nördliche des Schiffsköpers



Ermittelte Abweichungen (mit und ohne FSRU) an beispielhaften Auswertepunkten

- Position PS1, PS2, PS3 im Nahbereich nördliche des Schiffsköpers



--- Sohlage im Ist-Zustand

05.

Zusammenfassung



Zusammenfassung

Vergleich zwischen Ist-Zustand und Plan-Zustand

- Die Präsenz der FSRU verändert in Kombination mit der geplanten Liegewanne die lokalen Strömungen im Nahbereich
- Im Strömungsbild der Ergebnisse des Plan-Zustands (Abschnitt 03.) wird ersichtlich, dass es nicht zur Ausbildung von Querströmungen kommt

Lage des Schiffskörpers

- Das Strömungsbild im Bereich der FSRU (Abschnitt 03/04) bestätigt die strömungsparallele Lage der FSRU

Einfluss des Schiffskörpers

- Die Auswertungen der Strömungsgeschwindigkeiten über die Tiefe an relevanten Positionen um und unter dem Schiffskörper zeigen:
 - Im Strömungsschatten der FSRU (PW1): Abnahme um bis zu 0,4 m/s
 - Stromaufwärts der FSRU (PE1): Abnahme um bis zu 0,1 m/s
 - Zur Fahrrinne hin (PS6): Zunahme um ca. 0,1 m/s
 - Unterhalb des Schiffskörpers (U4 bis U6): sohnnahe Zunahme von 0,2 m/s bis 0,4 m/s
 - In nördlichen (PN1 bis PN3) und südlichen Nahbereich (PS1 bis PS3) am Schiffskörper: Zunahme von 0,2 bis 0,3 m/s

Unter und im Nahbereich der FSRU ist mit verstärkter Erosion zu rechnen.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

[REDACTED]
DHI WASY GmbH
Knochenhauerstraße 20/25
28195 Bremen

Wir digitalisieren, modellieren und visualisieren Wassersysteme.

