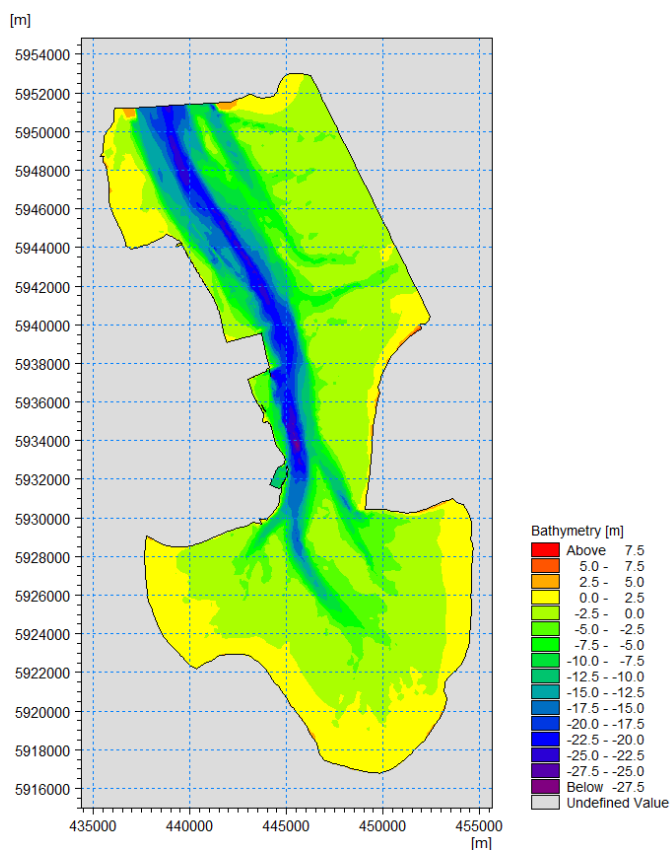


# Wärme-Ausbreitungsstudie für den LNG-Terminal Wilhelmshaven

Einleitung von Regas-Abwasser und Kühlwasser durch die FSRU und den LNG-Tanker in die Jade

Hydronumerische Modellierung





Uniper Global Commodities SE

Bericht

Juli 2022

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



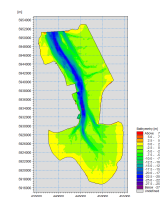
Erstellt von		Genehmigt von
<p style="text-align: right;">15.08.2022</p> <p><b>X</b> </p> <hr/> <p>Approved by</p> <p>Signed by: Hendrik Gohmann</p>		<p style="text-align: right;">15/08/2022</p> <p><b>X</b> </p> <hr/> <p>Approved by</p> <p>Signiert von: Christian Pohl</p>

# Wärme-Ausbreitungsstudie für den LNG-Terminal Wilhelmshaven

Einleitung von Regas- und Kühlwasser durch die FSRU und den LNG Tanker in die Jade

Hydronumerische Modellierung

Erstellt für: Uniper Global Commodities SE  
 Vertreten durch: Ansgar Brauer, Thomas Schönhoff, Lukas Kivilip



© DHI WASY

Projektmanager	Hendrik Gohmann
Qualitätssicherung	Stefan Leschka
Projektbearbeiter	ASC, ABE, HELS, JBR
Projektnummer	14806657
Datum Freigabe	08.07.2022
Revision	Version : 2.0
Einstufung	<b>Vertraulich</b>

## INHALT

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Zielsetzung.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehensweise und Anforderungen.....</b>	<b>4</b>
2.1	Untersuchungsgebiet .....	4
2.2	Datengrundlage und verwendete Unterlagen .....	5
<b>3</b>	<b>Modell .....</b>	<b>7</b>
3.1	Modellanpassung .....	7
3.1.1	Bathymetrie und Berechnungsnetz .....	7
3.1.2	Schiffskörper .....	8
3.2	Software MIKE 3 Flow Model FM für 3D hydrodynamische Modellierung .....	8
<b>4</b>	<b>Hydraulische Daten und Randbedingungen .....</b>	<b>12</b>
4.1	Hydraulische Randbedingungen .....	12
4.2	Thermische Randbedingungen .....	12
<b>5</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>16</b>
5.1	Vorherrschende Strömungen .....	16
5.2	Ausgewertete Situationen .....	18
5.3	Szenario 1 -Open Loop .....	21
5.3.1	Maximal- und Mittelwertauswertung .....	21
5.3.2	Temperaturänderungen zu charakteristischen Tidezeitpunkten.....	22
5.4	Szenario 2 - Closed Loop .....	26
5.4.1	Maximal- und Mittelwertauswertung .....	26
5.4.2	Temperaturänderungen zu charakteristischen Tidezeitpunkten.....	29
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>35</b>

## ABBILDUNGEN

Abbildung 2-1:	Bathymetrie des 3D- Jade-Modells mit Lage des LNG-Terminals. Die gestrichelte Linie symbolisiert die Grenze zwischen Innenjade und Jadebusen.....	5
Abbildung 3-1:	Angepasstes Berechnungsgitter im Bereich des geplanten Terminals mit Darstellung des FSRU und des LNG-Tankers.....	7
Abbildung 3-2:	Querschnitt durch die approximierten Schiffskörper im Berechnungsgitter mit vertikaler Kennzeichnung der Layer 1-8 .....	8
Abbildung 3-3:	Prinzip eines 3D-Netzes nach $\sigma$ -Methode.....	10
Abbildung 4-1:	Wasserstand Pegel Schillig am Modellrand für den Modellzeitraum 01.04.2021 bis 30.4.2021 .....	12
Abbildung 4-2:	Schematische Lage der verwendeten Auslässe der thermischen Einleitung kombiniert für beide Szenarien .....	14
Abbildung 5-1:	Tiefengemittelte mittlere Strömungsgeschwindigkeiten für den (für die Voruntersuchung erweiterten) Zeitraum 15.03.2021-31.05.2021 .....	16
Abbildung 5-2:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit bei ausgeprägtem Flutstrom am 27.04.2021 21:15 Uhr .....	17

Abbildung 5-3: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit bei ausgeprägtem Ebbstrom am 28.04.2021 4:00 Uhr .....	18
Abbildung 5-4: Wasserspiegellage am Pegel Schillig und periodische Einleitung durch einen LNG Tanker über den gesamter Modellzeitraum.....	19
Abbildung 5-5: Ausgewertete Tidezeitpunkte einer Tide dargestellt anhand des Wasserstandes (blaue Kurve) und der Strömungen (grüne Kurve) .....	20
Abbildung 5-6: Über 3 Wochen ausgewertete maximale Temperaturabsenkung nahe der Gewässersohle .....	21
Abbildung 5-7: Über 3 Wochen ausgewertete mittlere Temperaturabsenkung nahe der Gewässersohle .....	22
Abbildung 5-8: Sohlnahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Flutstrom am 22.04.2021 um 17:25 Uhr -Szenario 1 .....	23
Abbildung 5-9: Sohlnahe Temperaturänderung bei Tidehochwasser am 22.04.2021 um 20:00 Uhr Szenario 1 .....	23
Abbildung 5-10: Sohlnahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Ebbstrom am 22.04.2021 um 21:40 Uhr Szenario 1 .....	24
Abbildung 5-11: Sohlnahe Temperaturänderung bei Tideniedrigwasser am 23.04.2021 um 02:30 Uhr Szenario 1 .....	24
Abbildung 5-12: Querschnitt durch die Liegewanne bei Tideniedrigwasser am 23.04.2021 um 02:30 Uhr -Szenario 1. Die kleine Darstellung zeigt die Lage des Vertikalprofils durch den Schiffskörper. ....	25
Abbildung 5-13: Über 3 Wochen ausgewertete maximale Temperaturerhöhung nahe der Gewässeroberfläche .....	26
Abbildung 5-14: Über 3 Wochen ausgewertete mittlere Temperaturerhöhung nahe der Gewässeroberfläche .....	27
Abbildung 5-15: Über 3 Wochen ausgewertete maximale Temperaturerhöhung nahe der Gewässersohle .....	28
Abbildung 5-16: Über 3 Wochen ausgewertete mittlere Temperaturerhöhung nahe der Gewässersohle .....	29
Abbildung 5-17: Oberflächennahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Flutstrom am 22.04.2021 um 17:25 Uhr – Szenario 2.....	30
Abbildung 5-18: Oberflächennahe Temperaturänderung bei Tidehochwasser (Thw) am 22.04.2021 um 20:00 Uhr – Szenario 2.....	30
Abbildung 5-19: Oberflächennahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Ebbstrom am 22.04.2021 um 21:40 Uhr -Szenario 2.....	31
Abbildung 5-20: Oberflächennahe Temperaturänderung bei Tideniedrigwasser (Tnw) am 23.04.2021 um 02:30 Uhr -Szenario 2.....	31
Abbildung 5-21: Querschnitt durch die Liegewanne bei Tideniedrigwasser am 23.04.2021 um 02:30 Uhr -Szenario 2. Die kleine Darstellung zeigt die Lage des Vertikalprofils durch die Schiffskörper .....	32

## TABELLEN

Tabelle 2-1 Verwendete Daten .....	6
Tabelle 4-1: Auflistung der Einleitungen in den spezifizierten Szenarien .....	14

## 1 Veranlassung und Zielsetzung

Uniper Global Commodities SE (UNIPER SE) plant den Betrieb eines Flüssigerdgas- (LNG-) Import-Terminals zur Anlandung und Regasifizierung von LNG in Wilhelmshaven. Dabei soll das LNG- Terminal wasserseitig als LNG-Tankschiff mit Regasifizierungsanlage (Floating Storage and Regasification Unit, FSRU) ausgeführt werden. Über LNG-Tankschiffe wird das Flüssigerdgas angeliefert und auf der FSRU gespeichert.

Es ist vorgesehen, dass bei Betrieb des LNG-Terminals Seewasser zu verschiedenen Zwecken an Bord der FSRU genutzt wird. Das aus der Jade entnommene Wasser wird im Anschluss mit einer bekannten und konstanten Temperatur zurück ins Gewässer eingeleitet. Zudem wird Abwasser aus der Regasifizierung ins Gewässer geleitet. Auch über den LNG-Tanker erfolgt eine Einleitung von Kühlwasser.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, für den wasserrechtlichen Genehmigungsantrag die Einmischung und Ausbreitung der Wärmefracht mittels hydrodynamischer Modellrechnung zu untersuchen.

Die Berechnungen erfolgen ausgehend vom Referenzzustand für zwei verschiedene Belastungsszenarien (Betriebsmodi). Die beiden ausgewählten Szenarien (open loop, close loop) stellen sicher, dass der Worst-Case der zu erwartenden Wärmefracht durch die beantragte Nutzung für das LNG-Terminal abgebildet wird.

Für die Berechnung der Ausbreitung des thermisch veränderten Kühlwassers wurden grundlegende Parameter konservativ gewählt, um durch das Simulationsergebnis die größten möglichen Auswirkungen (worst-case) abzubilden. So wird vom Modell der Austausch mit der Atmosphäre nicht berücksichtigt. Zwischen Gewässer und der Atmosphäre erfolgt ein ständiger Wärmeaustausch, welcher durch Strahlung, Verdunstung, Konvektion und Niederschläge bestimmt wird. Überwiegend erfolgt dabei eine abkühlende Verdunstung. Da der Austausch mit der Atmosphäre nicht einbezogen wird, zeigt das Modell höhere Wärmeeinträge, wogegen in der Realität geringere Werte zu erwarten sind.

Die Schwankungen der Wassertemperatur in Jade und Jadebusen bedingt durch Jahreszeiten, Windverhältnisse und Tidegeschehen sind nicht eindeutig vorhersagbar. Im Modell wurde für den Referenzzustand bei allen Simulationen eine durchgehende Wassertemperatur von 15 °C angenommen. Da das Modell die theoretisch maximale thermische Veränderung durch das Kühlwasser als Temperaturdifferenz ( $\Delta T$ ) ermittelt, sind auch bei der Annahme einer geringeren Referenztemperatur (z.B. 10 °C) keine gravierenden Änderungen der Simulationsergebnisse zu erwarten.

DHI WASY hat 2021 bereits eine Studie zur Ausbreitung der eingeleiteten Wärme durch die FSRU und den LNG-Tanker in die Jade /1/ durchgeführt. Infolge von Planungsänderungen bezüglich der Position des Anlegers der FSRU sowie der Einleitmengen des Seewassers in die Jade ist eine Aktualisierung der bestehenden Studie zur Wärmeausbreitung erforderlich.

## 2 Vorgehensweise und Anforderungen

Zur Untersuchung der Ausbreitung der eingeleiteten Wärme wurde das bestehende 3-dimensionale (3D) numerische Jade-Modell aus vorherigen Studien /1/ und /2/ übernommen und angepasst.

Um die thermische Verteilung der Einleitungen durch die FSRU und den LNG-Tanker zu ermitteln und darzustellen, wurde wie folgt vorgegangen:

- Übernahme des Modells aus der vorherigen Studie zur Thermischen Einleitung in die Jade (DHI WASY 14805138-02 08/2020)
- Aktualisierung der bathymetrischen Daten für das Modellgebiet und der Liegewanne, Anpassung des Berechnungsgitters im genannten Bereich
- Berechnung der thermischen Einleitung und Einmischung ins Gewässer für zwei Szenarien unter Berücksichtigung der Schiffskörper von FSRU und LNG-Tanker
- Ermittlung der Temperaturänderungen im Gewässer für zwei Szenarien
- Auswertung und Darstellung der Temperaturänderungen im Nahbereich des LNG-Terminals (für zwei Szenarien).

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Die geplante Lage des LNG-Terminals Wilhelmshaven befindet sich wasserseitig im Umfeld des Voslapper Grodens Wilhelmshaven in der Innenjade. Innenjade und Jadebusen sind zusammen ca. 36 km lang und zwischen 4 km und 15 km breit, während die Tiefe auf mehr als 20 m zunehmen kann. Ungefähr 60 % der Fläche kann zeitweise trockenfallen (Wattgebiete), wobei fast die Hälfte davon (46 %) auf den Jadebusen entfällt /3/. Der überwiegende Teil der Innenjade und des Jadebusens ist dem FFH-Gebiet Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ zugehörig.

Das 3D-Modell umfasst vom Untersuchungsgebiet die Bereiche der Innenjade und den gesamten Jadebusen und wird im Norden auf Höhe des Pegels Schillig begrenzt. Im Osten wird das Modell durch das Hohe-Weg-Watt begrenzt. Der östliche Modellrand verläuft von Süd nach Nord durch das Watt.

Abbildung 2-1 zeigt die Bathymetrie im verwendeten 3D-Modell im Untersuchungsgebiet der Jade.

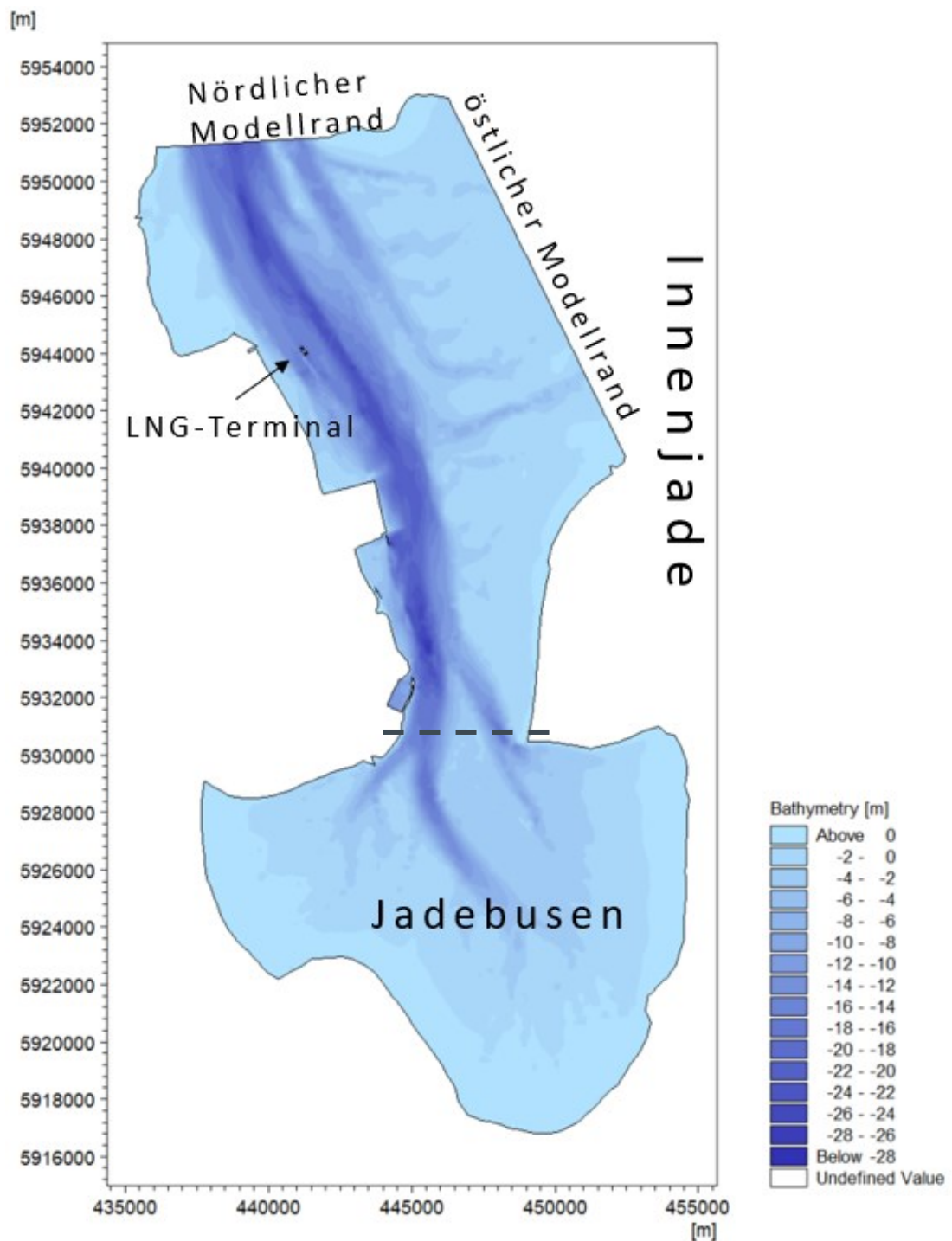


Abbildung 2-1: Bathymetrie des 3D- Jade-Modells mit Lage des LNG-Terminals. Die gestrichelte Linie symbolisiert die Grenze zwischen Innenjade und Jadebusen.

## 2.2 Datengrundlage und verwendete Unterlagen

Für das numerische Modell und die erweiterte Berechnung der thermischen Einleitung wurden die in Tabelle 2-1 angegebenen Datensätze verwendet.



Tabelle 2-1      Verwendete Daten

Bereitgestellt durch	Datensatz	Stand
DHI WASY	Numerisches Modell Jade	2021
WSA Wilhelmshaven	Wasserstand Pegel Schillig für das Jahr 2021	2021
WSV	Digitales Geländemodell der Jade	2018
UNIPER SE	lokalen Peilungen und derzeitigen Planungsdaten zur Liegewanne	2022
UNIPER SE	Shapefile zur Lage von FSRU, LNG-Tanker	Mai 2022
UNIPER SE	Geographische Lage & Tiefe der Einleitstellen; Informationen zu den Einleitmengen (Volumenstrom und thermische Abweichung zum Referenzzustand)	2022

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

## 3 Modell

Basis der Untersuchung bildet das 3D-Modell der Jade aus vorheriger Ausbreitungsstudie /1/ sowie die Aktualisierungen aus /2/.

### 3.1 Modellanpassung

#### 3.1.1 Bathymetrie und Berechnungsnetz

Die neueren Bathymetrie-Daten der WSV von 2018 wurden zusammen mit lokalen Peilungen im Rahmen der parallel durchgeführten Studie zur Biozidausbreitung /2/ integriert und in der Auflösung angepasst.

Das Modellgebiet ist in horizontaler Richtung in Bereiche mit quadrangulären (viereckigen) sowie triangulären (dreieckigen) Elementen unterschiedlicher Größe eingeteilt. Das Berechnungsnetz besteht in der Horizontalen aus 32091 Elementen. In der Vertikalen ist das Mesh in 8 Schichten (sogenannten Layer) aufgeteilt, wobei sich die Schichtdicke variabel sowohl dem tidebeeinflussten Wasserstand während der Simulation als auch der anstehenden Sohlagen anpasst

Die höchste Modellauflösung befindet sich im Bereich der Liegewanne an den Schiffrändern (Abbildung 3-1). Hier haben die Elemente eine Größe von ca. 7 m<sup>2</sup>. Die größte Elementauflösung liegt im Jadebusen westlich der Fahrrinne in der Innenjade mit maximal 76.000 m<sup>2</sup> pro Element.

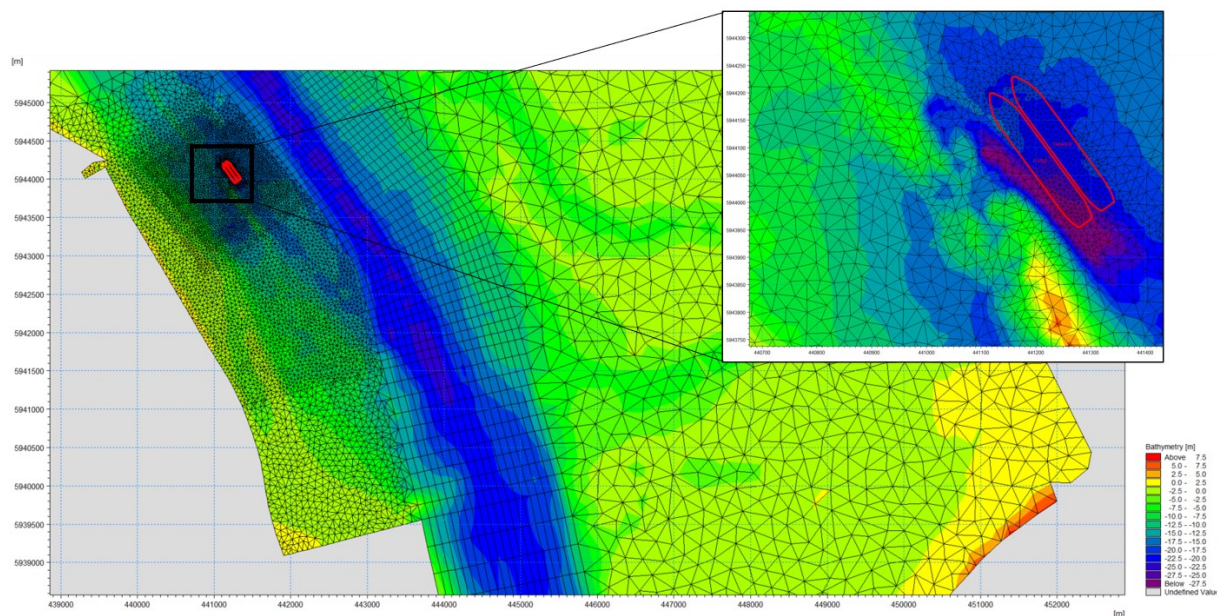


Abbildung 3-1: Angepasstes Berechnungsgitter im Bereich des geplanten Terminals mit Darstellung des FSRU und des LNG-Tankers

### 3.1.2 Schiffskörper

Um den Einfluss der Schiffskörper auf die Einleitungen und die dadurch ggf. behinderte Einmischung ins Gewässer zu berücksichtigen, wurden die Schiffskörper approximiert und im numerischen Modell integriert. Für beide Schiffskörper (290 m LOA) wird ein konstanter Tiefgang von 12 m angenommen. Dies entspricht dem Tiefgang der FSRU bei maximaler Beladung und stellt damit eine konservative Abschätzung bezüglich des zur Einmischung verfügbaren Wasservolumens dar. Ein schematischer Querschnitt durch das Berechnungsgitter mit den im Modell implementierten Schiffskörpern ist in Abbildung 3-2 zu sehen.

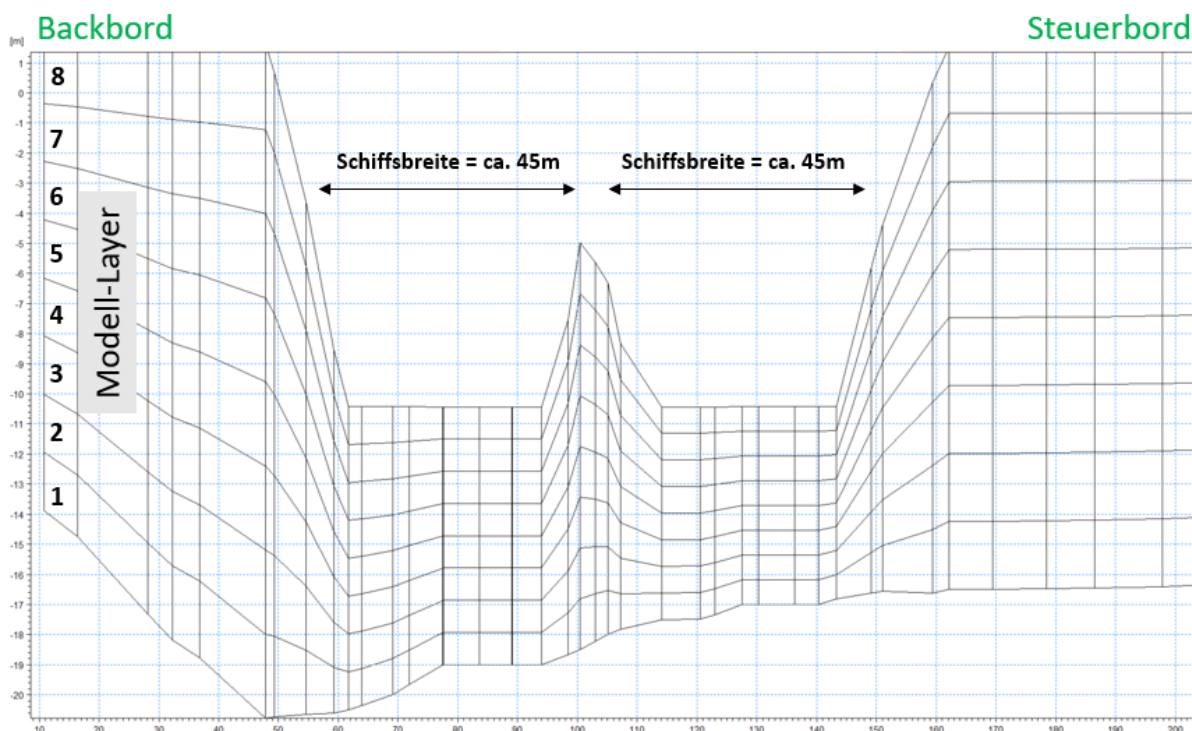


Abbildung 3-2: Querschnitt durch die approximierten Schiffskörper im Berechnungsgitter mit vertikaler Kennzeichnung der Layer 1-8

Der FSRU Schiffskörper ist während des gesamten Modellzeitraums im Modell integriert. Der Schiffskörper des LNG Tankers findet nur zu den definierten Liegezeiten (siehe Tabelle 4-1) Berücksichtigung im Modell.

## 3.2 Software MIKE 3 Flow Model FM für 3D hydrodynamische Modellierung

Das MIKE 3-Programmsystem<sup>1</sup> wurde speziell für die Modellierung von 3-dimensionalen (3D), instationären Strömungsprozessen in Ästuaren und Fließgewässern entwickelt. Die Software basiert auf der Lösung partieller Differenzialgleichungen für inkompressible Flüssigkeiten mit wahlweise hydrostatischem (Flachwassergleichungen) oder nicht-hydrostatischem (Navier-Stokes-Gleichungen).

<sup>1</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>

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

- Gezeitenströmungen
- Einfluss von Auftrieb und Schichtung auf Grund unterschiedlicher Dichten
- Turbulente Diffusion, Advektion und Dispersion
- Variable Bathymetrien und Sohlrauheiten
- Überflutung und Trockenfallen von gezeitenbeeinflussten Bereichen
- Sohlrauheit nach Nikuradse
- Effekte von Zuflüssen und Rückgabebauwerken
- Turbulenz mit einem gemischten k-ε Modells im vertikalen und einen Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen
- Wirkung von Salinität oder Temperatur

Beispielhaft sind hier die Gleichungen für den hydrostatischen Druckansatz wiedergegeben, der in diesem Projekt zur Anwendung kam.

Die 3D-Kontinuitätsgleichung lautet:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Unter der Verwendung von kartesischen Koordinaten lauten die zwei horizontalen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen für die x- und y-Komponenten:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\ = f \cdot u - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\ = f \cdot v - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned}$$

Mit:

$x, y, z$	Kartesische Koordinaten
$u, v, w$	Strömungsgeschwindigkeitskomponenten in x, y, z Richtung [m/s]
$\nu_t$	Wirbelviskosität [m <sup>2</sup> /s]
$t$	Zeit [s]
$f$	Coriolisbeschleunigung = $2\Omega \sin \phi$
$\eta$	Lage der Gewässeroberfläche
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

$\rho_0$	Referenzdichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_a$	Atmosphärischer Druck [N/m <sup>2</sup> ]
$S$	Betrag des Zuflusses aus Punktquellen [m <sup>3</sup> /s/m <sup>3</sup> ]
$u_s, v_s$	Einleitgeschwindigkeit an der Punktquelle [m/s]

Für die Abbildung des Fließwiderstandes an der Sohle kann zwischen den empirischen Ansätzen des Chezy-Koeffizienten  $C$ , der Mannings' Rauheit  $n$  oder der Nikuradse Rauheit  $k_n$  bzw. 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  $k$ - $\varepsilon$  Modells (1D- $k$ - $\varepsilon$ -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 Bathymetrie werden in der Ebene in ein unstrukturiertes Netz aus dreieckigen und viereckigen Elementen diskretisiert. Die vertikale Auflösung erfolgt strukturiert nach  $\sigma$ -Methode.

Mittels der  $\sigma$ -Methode wird die vertikale Diskretisierung auf Basis der vertikalen Ausprägung der Wasserspiegeloberfläche und der Sohltopographie realisiert (Abbildung 3-3), d.h. die Mächtigkeit der vertikalen Elemente variiert je nach Wassertiefe.

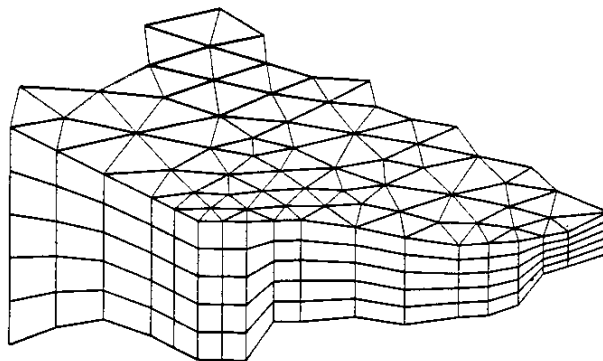


Abbildung 3-3. Prinzip eines 3D-Netzes nach  $\sigma$ -Methode.

Zur Berechnung der Wärmeausbreitung wurde das numerische Modell um das Temperaturmodul erweitert /5/. Durch das Temperaturmodul wird der passive Transport von Temperatur und Salzgehalt im Fluid auf Basis von dreidimensionalen Advektions-Diffusions-Gleichungen erfasst /4/, /5/.

Die Größen Temperatur, Salzgehalt und Druck sind über Zustandsgleichungen an die lokalen Dichteverhältnisse gekoppelt (UNESCO, 1981). Diese Beziehung ist für einen Temperaturbereich von -2,1°C bis 40°C gültig. Die Anwendbarkeit der Zustandsgleichung für Salinität ist für 0 bis 45 PSU ("Practical Salinity Unit") gegeben.

Ein Wärmeaustausch mit der Atmosphäre wird für die vorliegende Untersuchung explizit nicht berücksichtigt, dadurch wird die thermische Einleitung ausschließlich über die Durchmischung mit dem Wasserkörper aufgenommen und somit konservativ betrachtet.



## 4 Hydraulische Daten und Randbedingungen

### 4.1 Hydraulische Randbedingungen

Das hydraulische Modell wird über den nördlichen Modellrand eingesteuert. Der gemessene Wasserstand am Pegel Schillig stellt hierbei die alleinige hydrodynamische Randbedingung dar (Abbildung 4-1). In Hinblick auf die vorgegebenen Szenarien wurde der Modellzeitraum für die Dauer eines Monats gewählt, um die Einstellung eines stabilen Zustands zu gewährleisten.

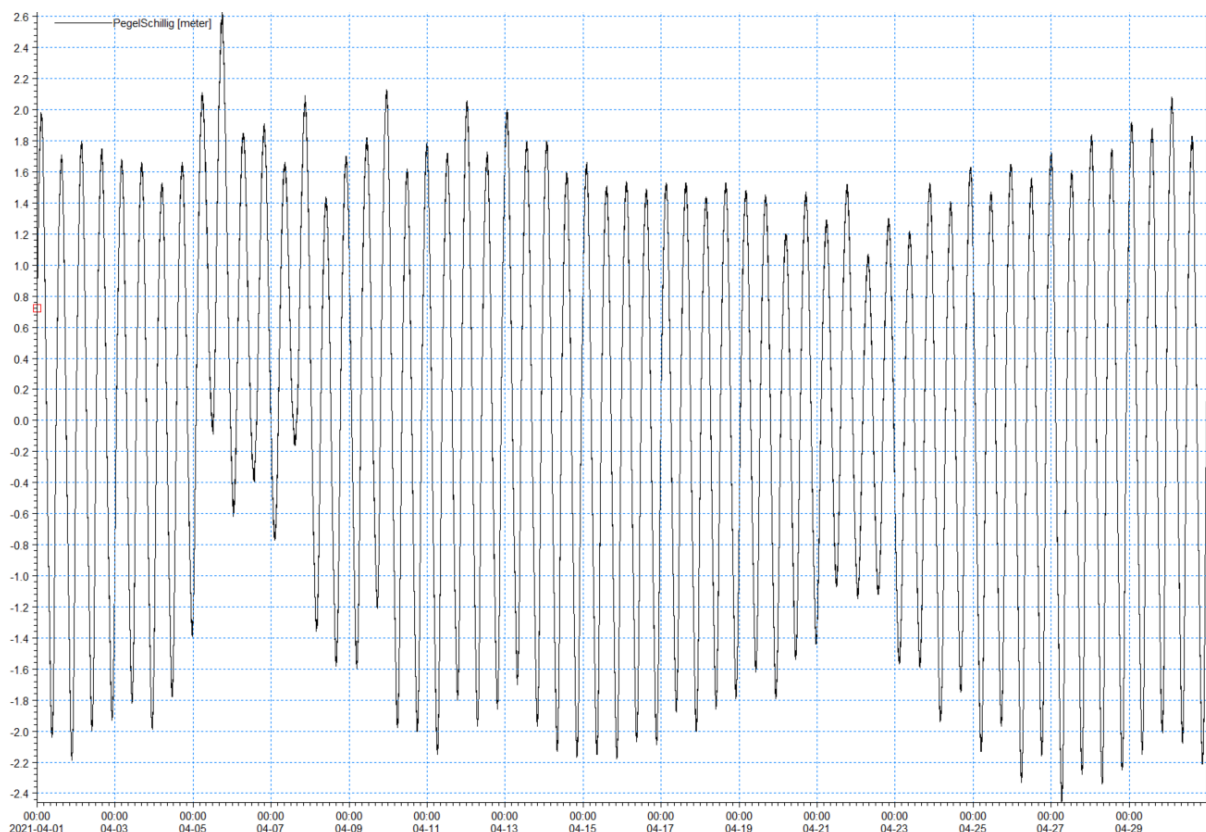


Abbildung 4-1: Wasserstand Pegel Schillig am Modellrand für den Modellzeitraum 01.04.2021 bis 30.4.2021

### 4.2 Thermische Randbedingungen

Als Referenzwert für die Wassertemperatur wird am Modellrand des Pegels Schillig ein konstanter Wert von 15°C angenommen (Referenzzustand). Dieser wird ebenfalls zu Simulationsbeginn im Wasserkörper angenommen.

Atmosphärische Austauschprozesse durch Wind werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Dies entspricht einem konservativen Ansatz, da erwärmtes Wasser nicht durch atmosphärische Effekte abgekühlt wird. Analog zur vorherigen Studie und zur besseren Vergleichbarkeit werden alle Modellergebnisse in der Differenz zum Referenzzustand angegeben. Die Temperatur der Jade ist innerhalb der Modellierung von untergeordneter Rolle anzusehen, da die thermische Einleitung als  $\Delta T$  [K] in das umgebende Wasser

abgegeben wird und somit der Fokus auf den Abweichungen zum Referenzzustand liegt.

### *Einleitungen*

Es wurden 2 Szenarien untersucht. Hierbei erfolgt eine getrennte Betrachtung, welche einerseits ausschließlich die Einleitung von abgekühltem Wasser durch die FSRU (ohne parallel liegenden LNG-Tanker) berücksichtigt [**Szenario Open Loop**], sowie die Einleitung von ausschließlich erwärmten Betriebswässern durch die FSRU und anliegenden LNG Tankern [**Szenario Closed Loop**].

Die thermischen Einleitungen sind der nachfolgenden Tabelle 4-1 zu entnehmen (eingeleitetes Volumen in  $\text{m}^3/\text{s}$  und die relative Temperaturänderung  $\Delta T$  [K]). Ein Einbezug möglicher Rezirkulationsprozesse, durch eine simultane Brauchwasseraufnahme der FSRU und/oder des LNG-Tankers, ist im Rahmen der zu untersuchenden Szenarien nicht vorgesehen. Die FSRU verfügt über drei Auslässe, wobei sich der Regas-SW-Auslass steuerbord in zentraler Position an der Außenkante des Rumpfs 1 m unter der Wasseroberfläche befindet. Die Auslässe für Kühlwasser der Hilfsmaschine (backbord) und des Hauptgenerators (steuerbord) befinden sich im Heck der FSRU. Der Auslass der Hilfsmaschine liegt 7 m und der Auslass des Hauptgenerators 7,5 m unter der Wasseroberfläche. Die thermische Einleitung von kaltem Betriebswasser erfolgt ausschließlich über den Regas-SW-Auslass mit  $\Delta T < 0$  K. Die Einleitung von warmem Betriebswasser mit  $\Delta T > 0$  K erfolgt über die zwei Kühlwasser-Auslässe.

Der LNG-Tanker verfügt lediglich über einen Auslass im Heck steuerbordseitig 8 Meter unter der Wasseroberfläche, welcher zur Einleitung von warmem Betriebswasser mit  $\Delta T > 0$  K dient. Die Einleitung erfolgt hierbei in den Spalt zwischen FSRU und LNG Tanker. Dies ist ungünstig für die Einmischung und wird daher als konservativ angesehen.

Die thermische Einleitung durch die FSRU findet an allen Auslässen kontinuierlich statt. Dies erfolgt für das Szenario Open Loop ausschließlich aus dem Regas-SW-Auslass mit  $\Delta T < 0$  K, für das Szenario Closed Loop aus den Kühlwasser-Auslässen der Hilfsmaschinen und des Hauptgenerators mit  $\Delta T > 0$  K.

Für den LNG-Tanker wird eine Liegedauer von 30 Stunden angenommen. Die thermische Einleitung erfolgt hierbei nicht zwangsläufig bereits unmittelbar nach dem Festmachen des LNG Tankers. In dieser Studie wird dies aber konservativ angenommen.

Abbildung 4-2 zeigt die Lage der FSRU und des LNG-Tankers sowie die in den beiden Szenarien spezifizierten Einleitpunkte. Hierbei entsprechen blaue Hervorhebungen einer kühleren thermischen Einleitung mit  $\Delta T < 0$  K und orange Hervorhebungen einer wärmeren thermischen Einleitung mit  $\Delta T > 0$  K.



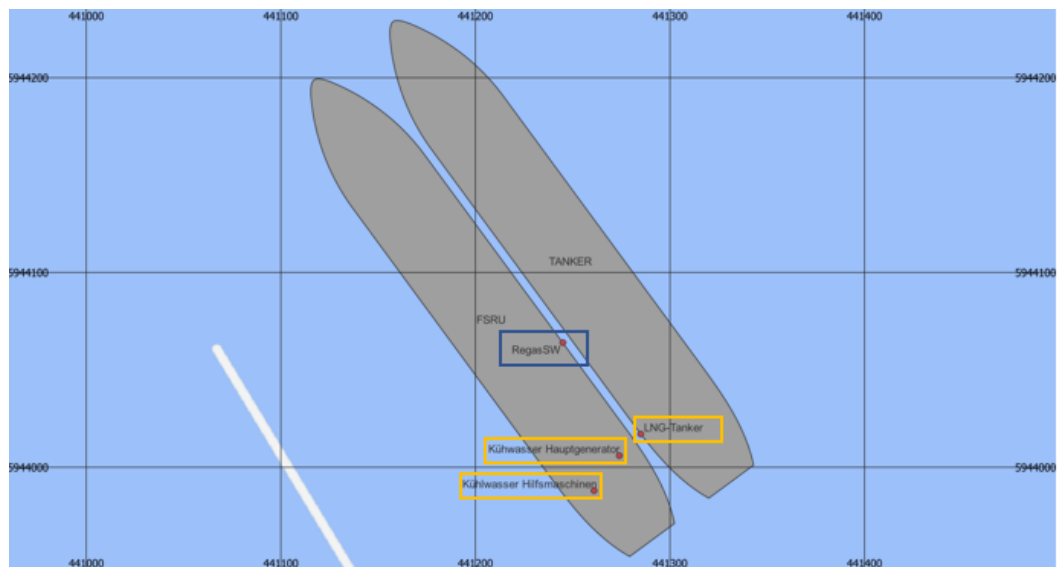


Abbildung 4-2: Schematische Lage der verwendeten Auslässe der thermischen Einleitung kombiniert für beide Szenarien

Tabelle 4-1: Auflistung der Einleitungen in den spezifizierten Szenarien

FSRU Einleitung						
	Szenario1 Open Loop			Szenario 2 Closed Loop		
Bezeichnung	Flow [m³/h]	Q (m³/s)	ΔT [K]	Flow [m³/h]	Q (m³/s)	ΔT [K]
REGAS SW	20.000	5,55	-7	-	-	-
Kühlwasser Hauptgenerator	-	-	-	1.300	0,361	+15
Kühlwasser Hilfsmaschine	-	-	-	2000	0,555	+5
LNG Tanker Einleitung						
	Szenario1 Open Loop			Szenario 2 Closed Loop		
Bezeichnung	Flow [m³/h]	Q (m³/s)	ΔT [K]	Flow [m³/h]	Q (m³/s)	ΔT [K]
LNG Tanker	-	-	-	30h: 2.500	0,694	+10
	-	-	-	30h: 0	0,0	-

Um eine reibungslose Simulation zu gewährleisten, erfolgte eine Teilung des Regas-SW-Auslasses in 2 vertikale Auslässe. Dies bewirkt, dass der Volumenstrom über zwei Modellelemente eingeleitet wird. Das hohe Volumen von 20.000 m³/h, eingetragen in ein einzelnes Modellelement, kann zu einem

instabilen Modellverhalten führen. Die vertikale Teilung löst dieses Problem, ohne dabei eine geographische Abweichung zu erzeugen.

## 5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ausbreitung der eingeleiteten Wärmefracht auf Basis der Strömungsverhältnisse sind in diesem Kapitel beschrieben. Zunächst werden in Abschnitt 5.1 die vorherrschenden Strömungen in der Jade dargestellt. In Abschnitt 5.2 werden die ausgewerteten Situationen und Zeiträume beschrieben und begründet. Die Kälteausbreitung infolge der Regas-SW-Einleitungen der FSRU (Open Loop) sind in Abschnitt 5.3 und die Kühlwassereinleitungen der FSRU zusammen mit denen des LNG-Tankers (Closed Loop) sind in Abschnitt 5.4 ausgewertet. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Beurteilung der Temperatureausbreitung im untersuchten Zeitraum.

### 5.1 Vorherrschende Strömungen

Das für die Modellierung der thermischen Einleitung verwendete Modul basiert auf Informationen zur genauen Strömungssituation. Zum besseren Verständnis der Strömungssituation, welche maßgeblichen Einfluss auf die nachfolgend gezeigten Ergebnisse hat, sind in Abbildung 5-1 die vorherrschenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in der Innenjade und dem Jadebusen dargestellt, wobei die typischen Richtungen der Tideströmungen vereinfacht schematisch eingezeichnet sind.

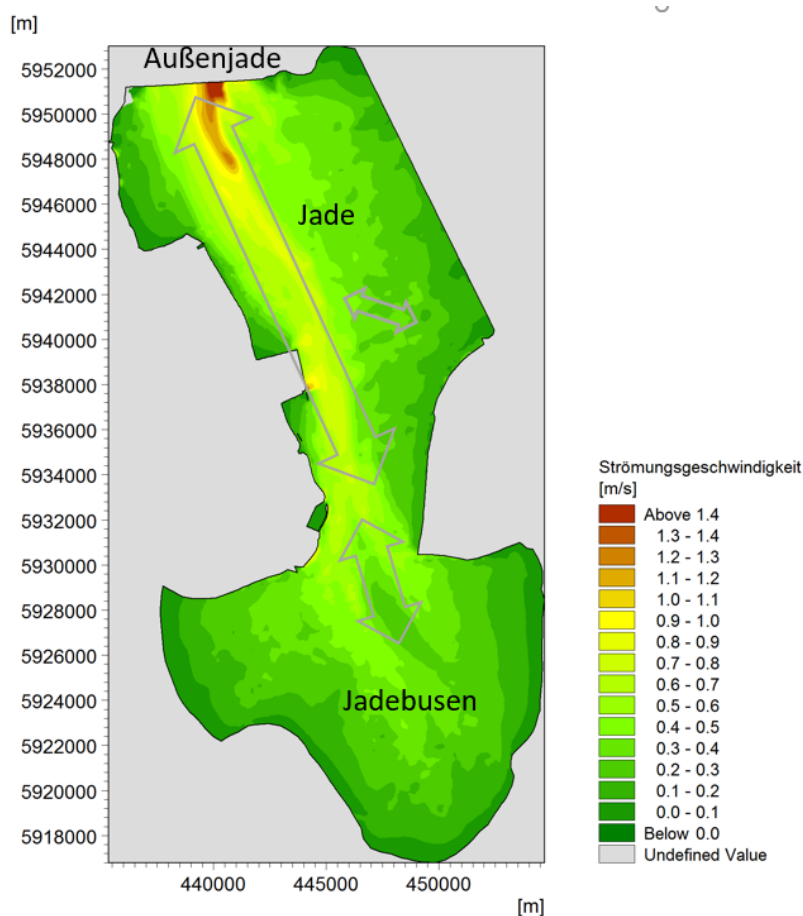


Abbildung 5-1: Tiefengemittelte mittlere Strömungsgeschwindigkeiten für den (für die Voruntersuchung erweiterten) Zeitraum 15.03.2021-31.05.2021

Um ein besseres Verständnis von den Geschwindigkeiten im Bereich des LNG-Terminals zu erhalten, sind die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten mit Strömungsvektoren für zwei Tidezeitpunkte (maximaler Ebbstrom, und maximaler Flutstrom) in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 dargestellt. Die Strömungsmuster zu den genannten Zeitpunkten wurden exemplarisch für eine Tide mit hoher Amplitude (27. und 28. April 2021) dargestellt und exemplarisch aus den Ergebnissen des Szenarios 1 (Open Loop) extrahiert.

Bei den voll ausgeprägten Strömungen während Flut und Ebbe ist der Einfluss des Schiffskörpers in beiden Abbildungen zu erkennen. Vor und hinter dem Schiffskörper lässt sich eine abschirmende Wirkung der FSRU mit deutlich geringeren Fließgeschwindigkeiten im Vergleich zur Umgebung erkennen. Die Fließrichtung ist bei vollem Flut- und Ebbstrom parallel zum Schiffskörper in Längsrichtung. Unter dem Schiffskörper treten höhere Fließgeschwindigkeiten von bis zu 1,6 m/s auf, bedingt durch die Einengung des Fließquerschnitts über die Wassersäule.

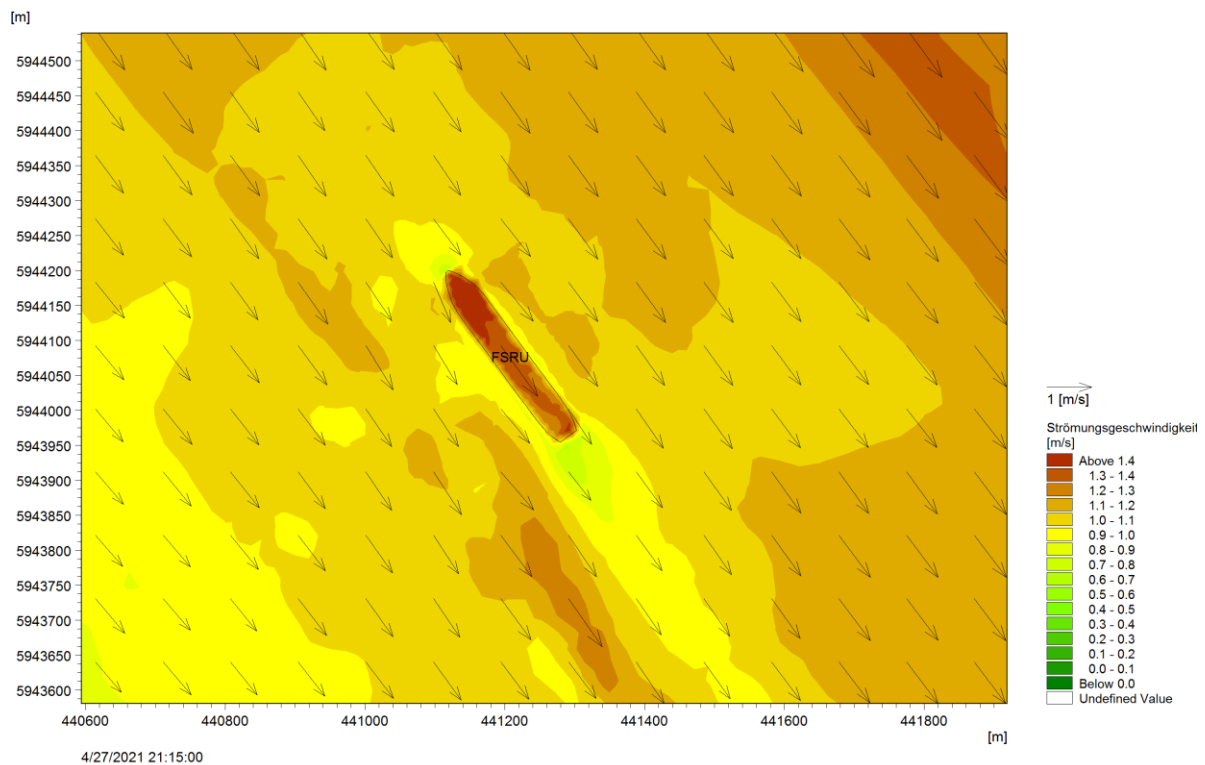


Abbildung 5-2: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit bei ausgeprägtem Flutstrom am 27.04.2021 21:15 Uhr

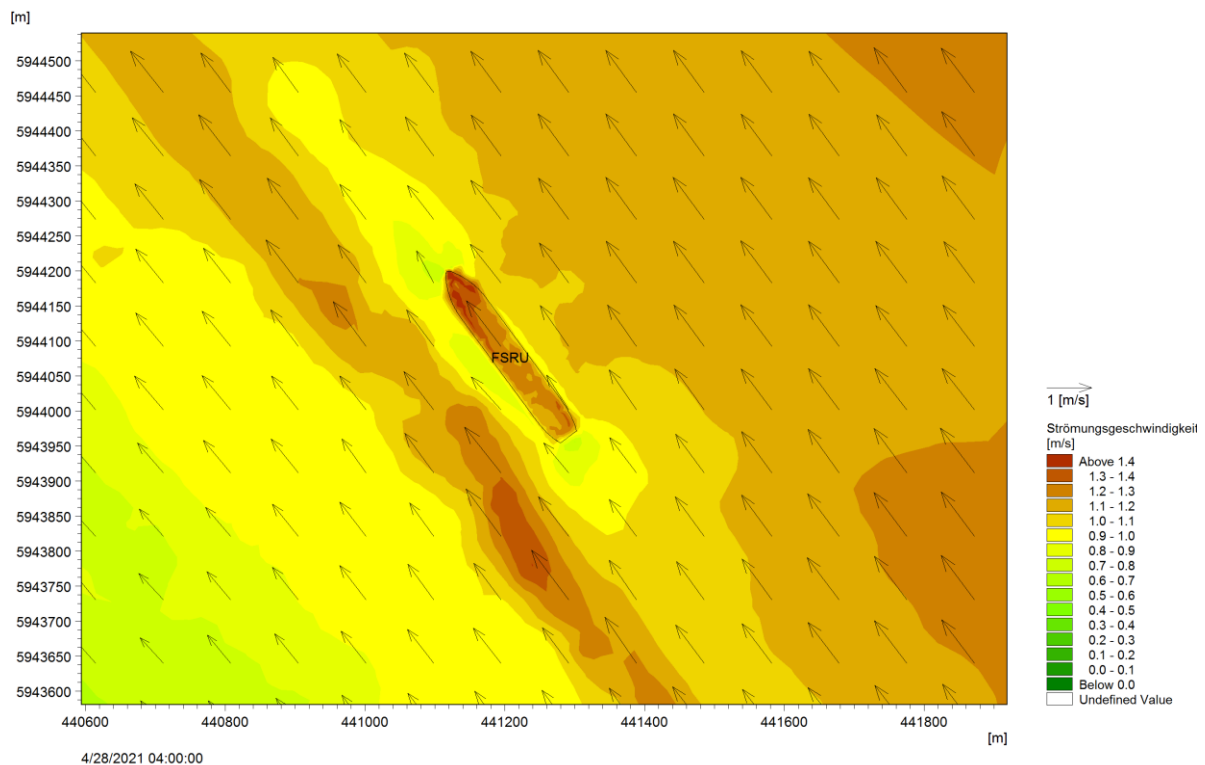


Abbildung 5-3: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit bei ausgeprägtem Ebbstrom am 28.04.2021 4:00 Uhr

## 5.2 Ausgewertete Situationen

Die numerischen Ergebnisse zum Szenario 1 (Open Loop) und Szenario 2 (Closed Loop) wurden wie folgt ausgewertet:

### *Berechnung der Temperaturänderung durch Differenzbildung*

Zunächst wurden die absoluten Temperaturveränderungen durch Differenz der Modellergebnisse zum konstanten Referenzzustand von 15°C ermittelt.

### *Darstellung der Maximal- und Mittelwerte der Temperaturänderung im Gewässer über einen dreiwöchigen Simulationszeitraum*

Um die Auswirkungen einer langfristigen thermischen Einleitung in den Wasserkörper der Jade darzustellen, wurden über 3 Wochen (07.04.2021 bis zum 30.04.2021), was dem gesamten Modellzeitraum exklusive einer Modelleinlaufzeit der ersten sieben Tage entspricht, statistische Lageparameter, wie Maximal- und Mittelwerte abgeleitet. Dieser Zeitraum beinhaltet auch einen typischen Spring-Nipptidezyklus, mit entsprechenden Schwankungen von Tideniedrig- und Tidehochwasser. So werden sowohl geringe als auch hohe Strömungsgeschwindigkeiten sowie geringe wie hohe Tidevolumina einbezogen. Diese Betrachtung gewährleistet darüber hinaus eine angemessene Berücksichtigung der (nur in Szenario 2 vorhandenen) periodischen Einleitung durch den LNG Tanker (vgl. Abbildung 5-4).

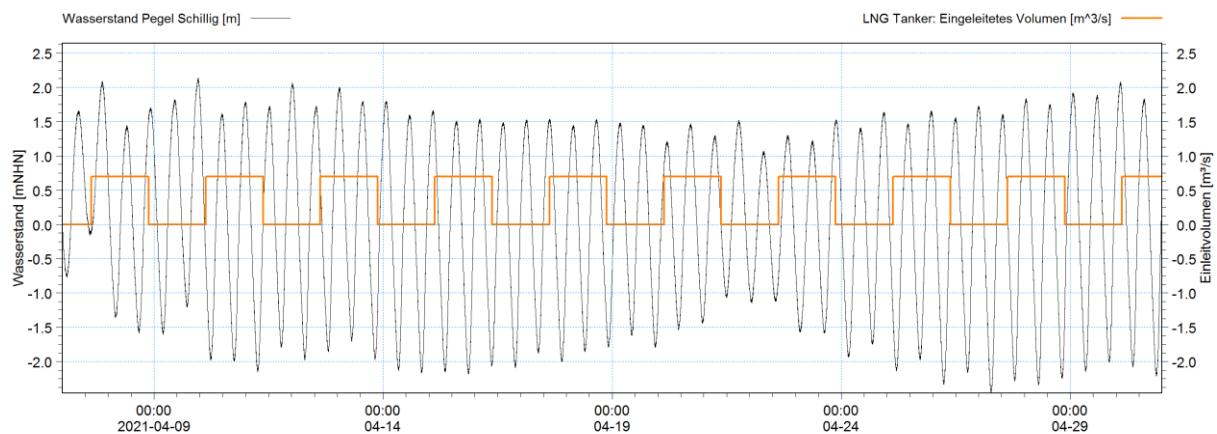


Abbildung 5-4: Wasserspiegellage am Pegel Schillig und periodische Einleitung durch einen LNG Tanker über den gesamten Modellzeitraum

#### *Auswertung anhand 4 charakteristischer Tidezeitpunkte*

Die Verteilung der thermischen Einleitung wird anhand markanter Tidezeitpunkte innerhalb einer exemplarischen geringen Tide (22.04.2022 - 23.04.2022) näher betrachtet. Zum Zeitpunkt der Strömungskenterung bleibt eine Verlagerung des eingeleiteten Wassers mit der Strömung aus und kann so lokal eine ausgeprägtere Abweichung zum Referenzzustand hervorrufen. Dies gilt besonders zur Strömungskenterung bei Niedrigwasser, da zusätzlich ein geringeres Wasservolumen am Ort der Einleitung vorliegt. Im Gegensatz dazu ist bei stärkerem Gezeitenstrom bei einer stärkeren Tide von einer schnelleren räumlichen Verlagerung des thermisch eingeleiteten Wassers mit der Strömung und einer schnelleren Durchmischung zu rechnen.

Die Abbildung 5-5 zeigt die hierzu gewählten 4 Tidezeitpunkte (maximaler Flutstrom, Tidehochwasser, maximaler Ebbstrom, Tideniedrigwasser), welche für die spezifizierten Szenarien ausgewertet wurden.

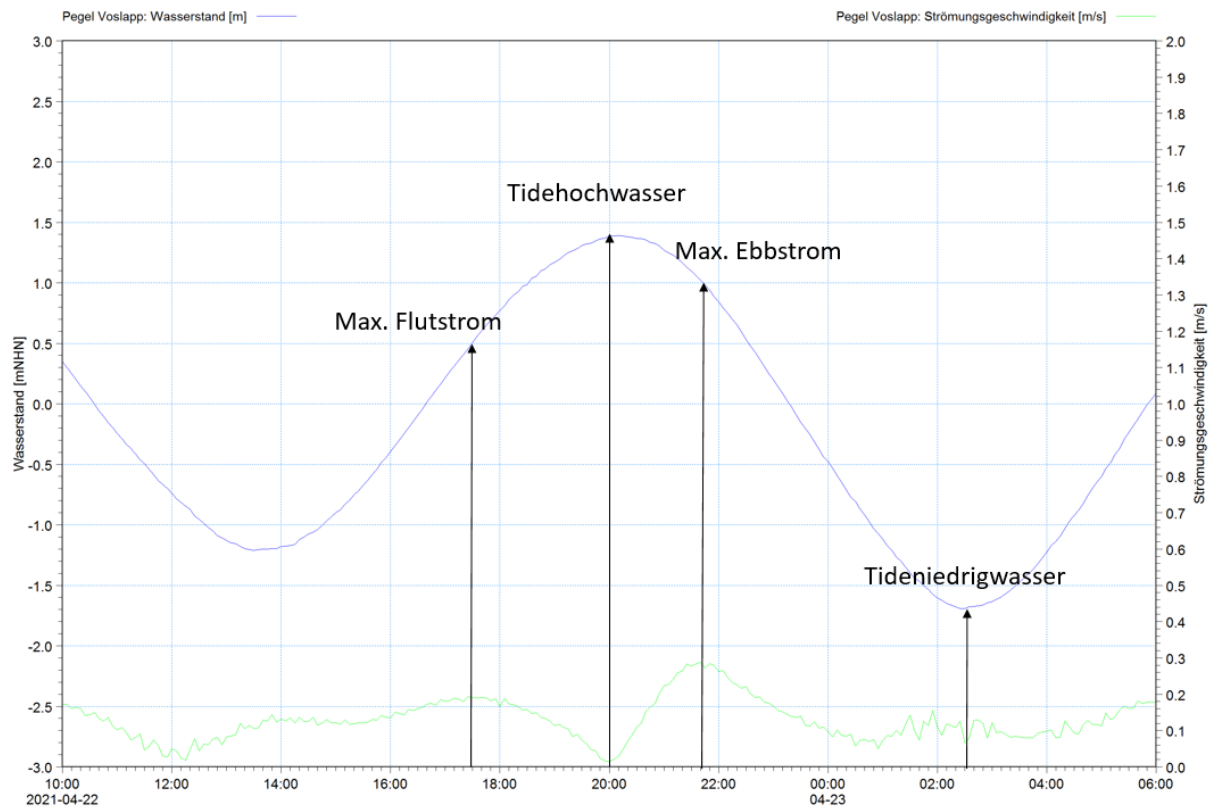


Abbildung 5-5: Ausgewertete Tidezeitpunkte einer Tide dargestellt anhand des Wasserstandes (blaue Kurve) und der Strömungen (grüne Kurve)

## 5.3 Szenario 1 -Open Loop

In Szenario 1 (Open loop) wird über den Regas-SW-Auslass nahe der Wasseroberfläche abgekühltes Wasser mit einer Temperaturdifferenz  $-7^{\circ}\text{C}$  in die Jade eingeleitet (vgl. Tabelle 4-1).

### 5.3.1 Maximal- und Mittelwertauswertung

In Abbildung 5-6 sind die über den gesamten Modellzeitraum von 3 Wochen errechneten maximalen negativen Temperaturänderungen (= Abkühlung) nahe der Gewässersohle dargestellt. Das in Richtung Sohle absinkende kühle Wasser führt dort zu den größten Temperaturunterschieden. Nahe des Einleitpunktes beträgt die maximale Abkühlung sohnnah bis zu  $-3,8\text{ K}$  (direkt am Mesh-Element des Auslasses). Die Kühlfahne mit Abkühlungen  $>-1\text{ K}$  ist kleinräumig und beschränkt sich auf den Liegebereich von der Mitte bis zum Heck der FSRU. Berechnete Temperaturdifferenzen  $>0,1\text{ K}$  sind in der Längsausdehnung in bis zu insgesamt  $2000\text{ m}$  sichtbar.

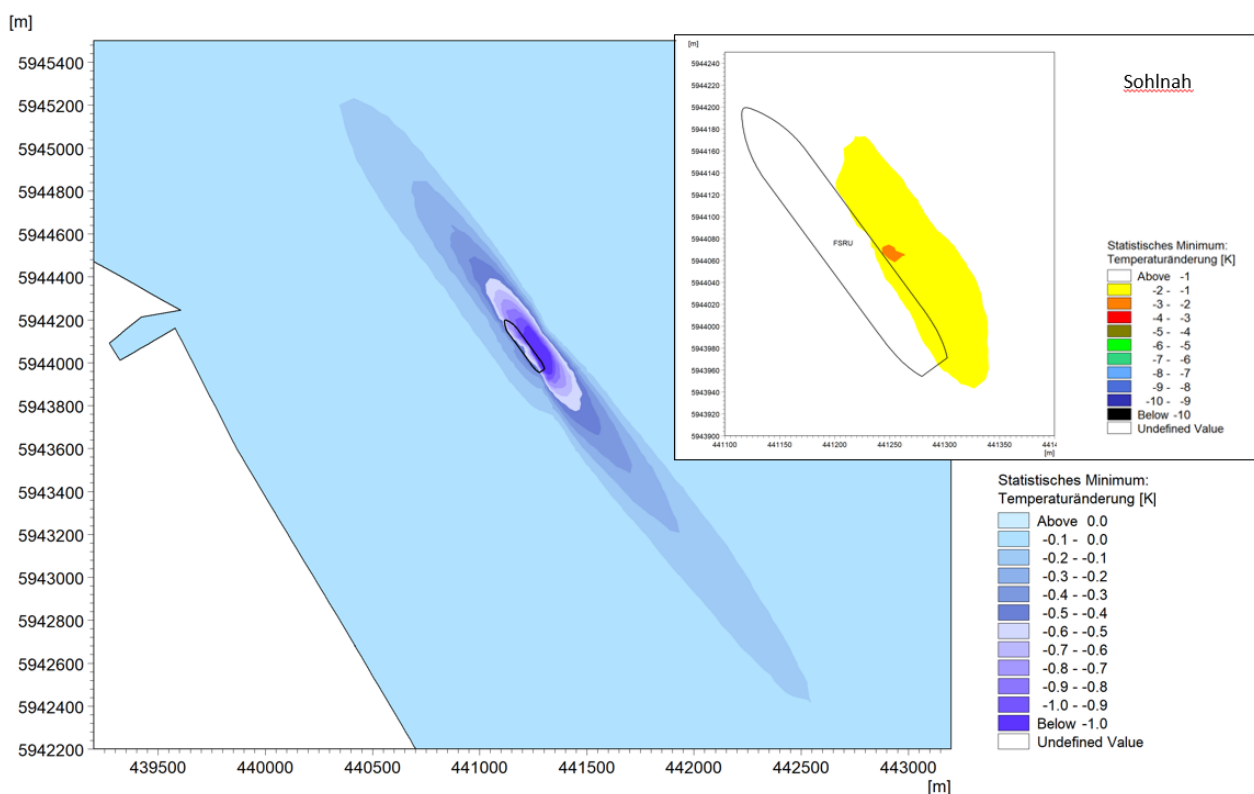


Abbildung 5-6: Über 3 Wochen ausgewertete maximale Temperaturabsenkung nahe der Gewässersohle

In Abbildung 5-7 sind die über drei Wochen errechneten mittleren negativen Temperaturänderungen (= Abkühlung) nahe der Gewässersohle dargestellt. Es prägt sich keine Kältefahne aus. Im Nahbereich der FSRU treten Temperaturunterschiede  $<0,1\text{ K}$  auf. Diese Unterschiede sind kaum abbildbar und bewegen sich zudem im Bereich der Modelltoleranz.



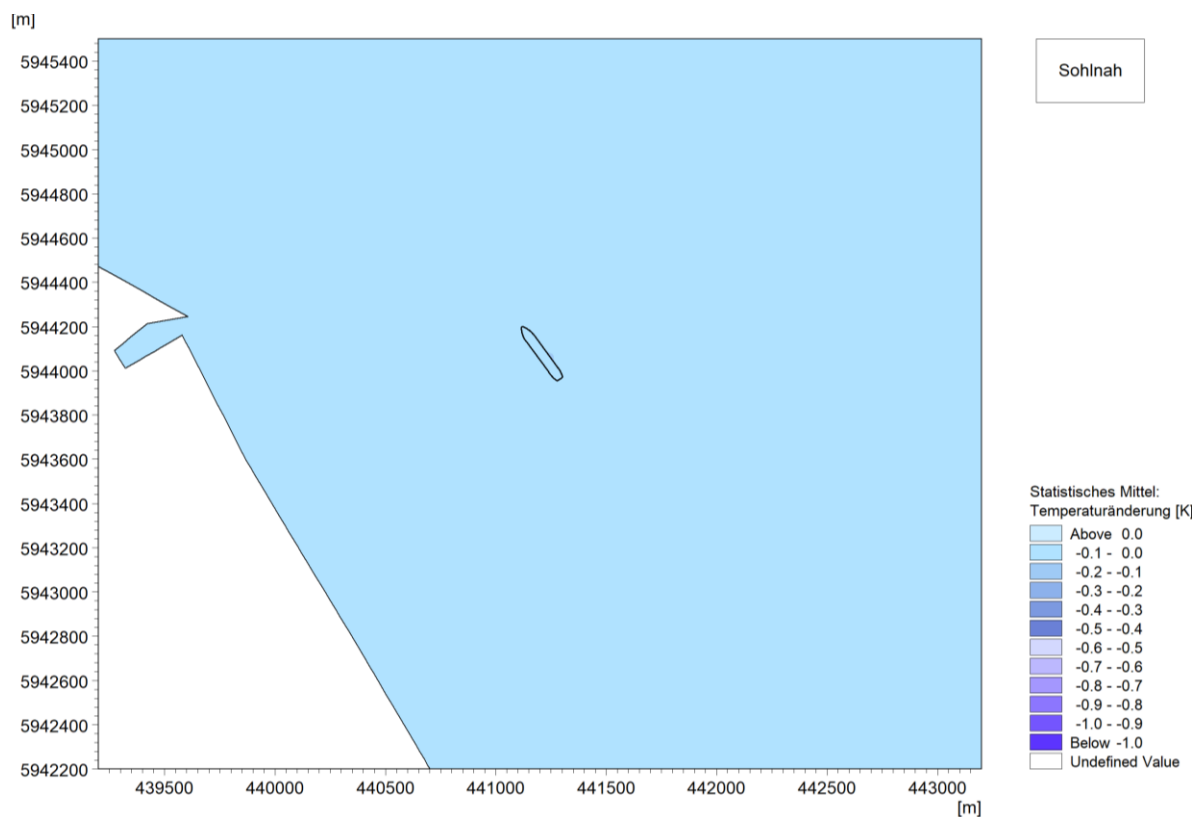


Abbildung 5-7: Über 3 Wochen ausgewertete mittlere Temperaturabsenkung nahe der Gewässersohle

### 5.3.2 Temperaturänderungen zu charakteristischen Tidezeitpunkten

Die Berechnungen zeigen in Abhängigkeit des Tidezeitpunktes verschiedene Ausbreitungsbereiche des abgekühlten Wassers. Exemplarisch ist das in Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-11 dargestellt.

Nach der Ebbkenterung am 22.04.2021 nimmt der Flutstrom ab 15:00 Uhr in Richtung Süden (Jadebusen) zu. Im weiteren Verlauf der Flut und bei vollem Flutstrom um 17:25 Uhr sind keine sohnlahen Temperaturänderungen erkennbar, was durch den steigenden Wasserstand (größeres Wasservolumen) und die stärkere Vermischung begründet ist (Abbildung 5-8). Mit nachlassender Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt Tidehochwasser zeigt sich die Kühlfahne ausgehend vom Regas-SW-Auslass noch in Richtung Süden (Abbildung 5-9). Mit dem Ebbstrom kehrt 21:40 Uhr abgekühltes Wasser zurück in den Bereich der FSRU und wird seewärts in Richtung Außenjade transportiert (Abbildung 5-10). Am 23.04.2021 um 02:30 Uhr zum Zeitpunkt Tideniedrigwasser (Abbildung 5-11) wird die Kühlwasserfahne in Richtung Ebbkenterung aufgrund abnehmender Strömungsgeschwindigkeiten kompakter in ihrer Ausdehnung und der Tidezyklus beginnt erneut.

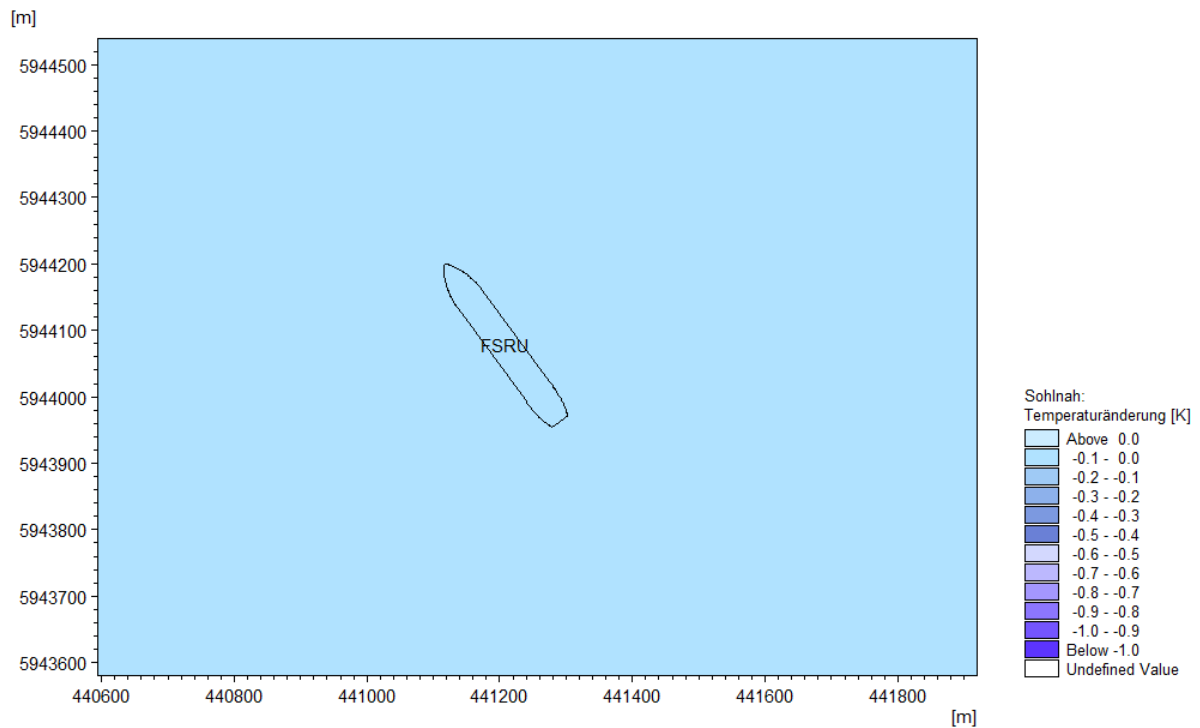


Abbildung 5-8: Sohlnah Temperaturänderung bei ausgeprägtem Flutstrom am 22.04.2021 um 17:25 Uhr -Szenario 1

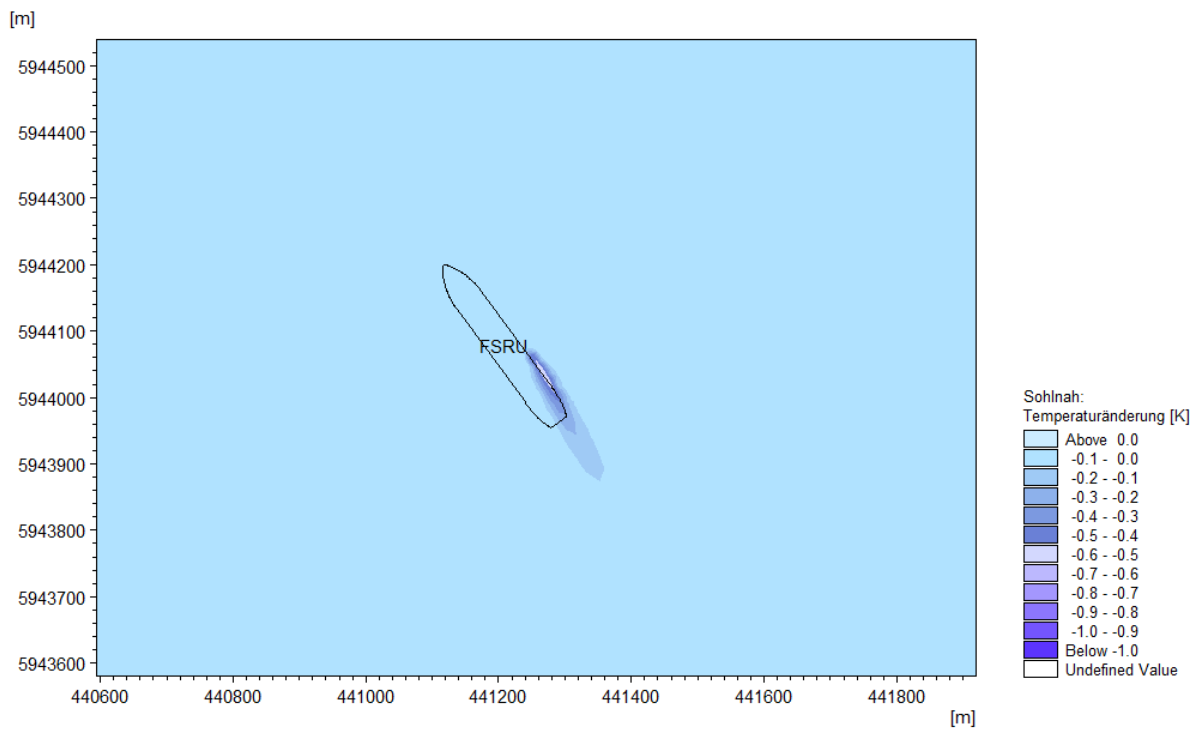


Abbildung 5-9: Sohlnah Temperaturänderung bei Tidehochwasser am 22.04.2021 um 20:00 Uhr Szenario 1

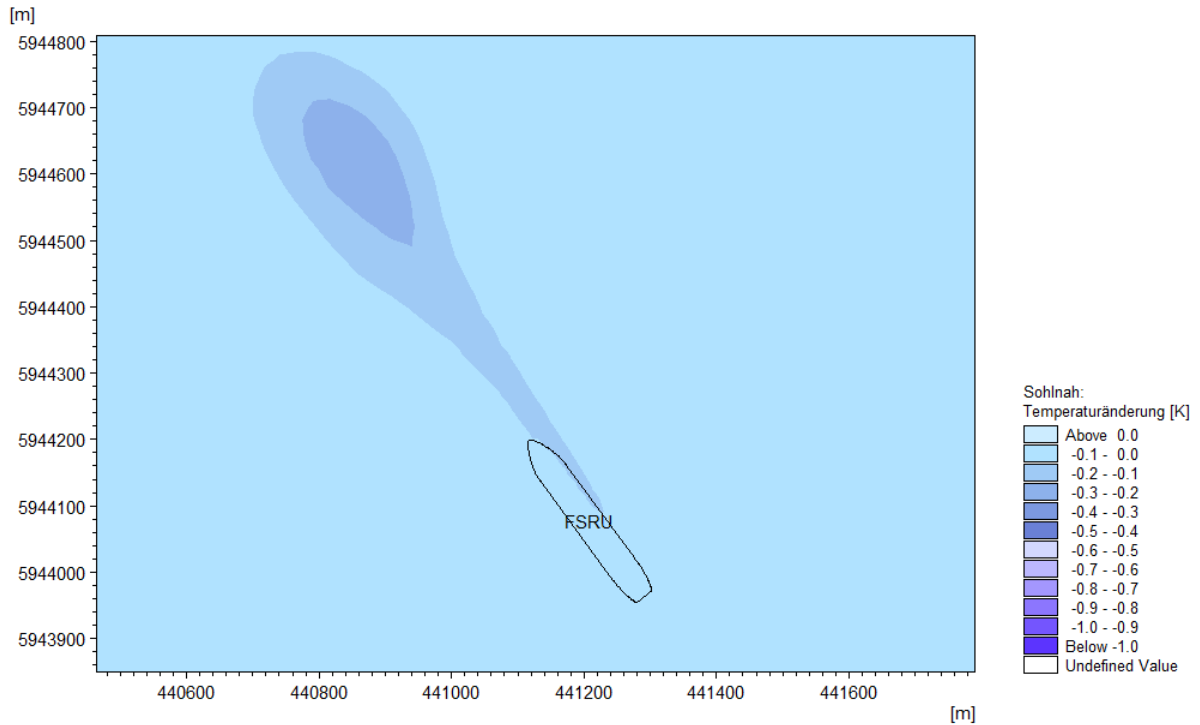


Abbildung 5-10: Sohlinahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Ebbstrom am 22.04.2021 um 21:40 Uhr Szenario 1

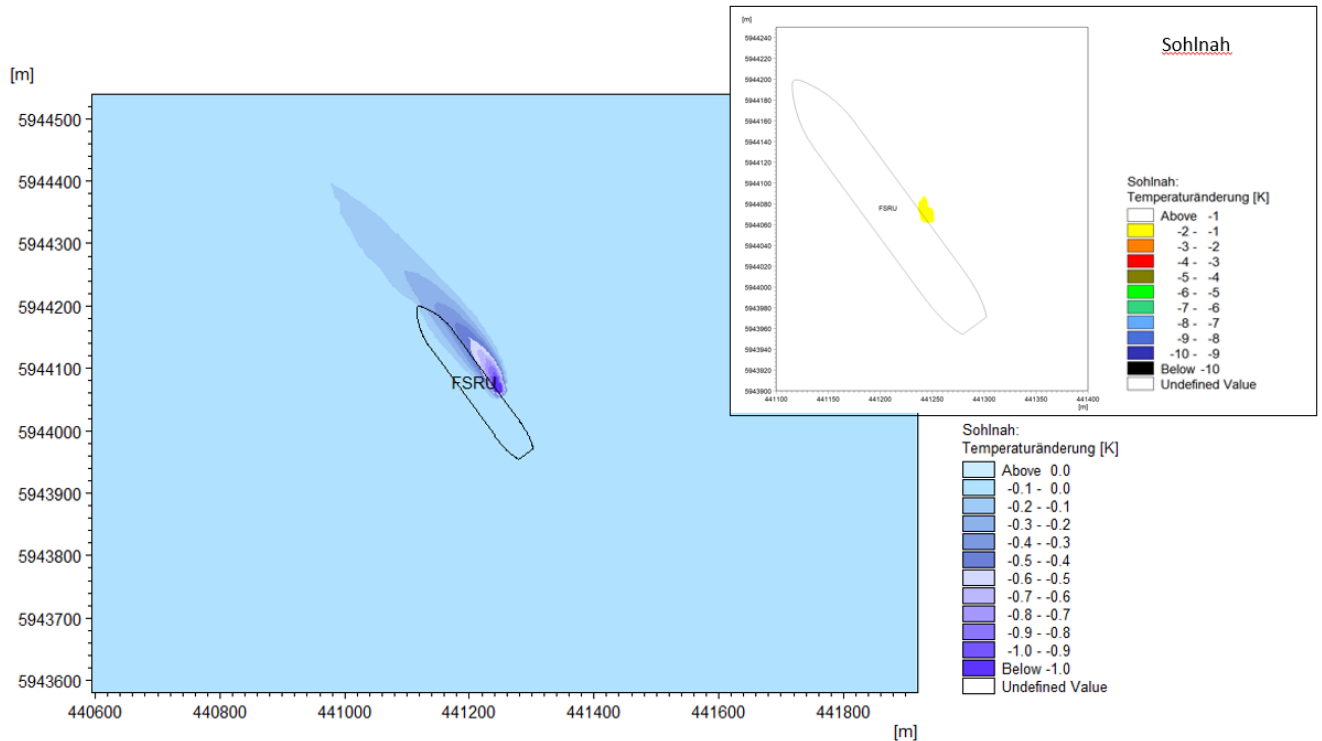


Abbildung 5-11: Sohlinahe Temperaturänderung bei Tideniedrigwasser am 23.04.2021 um 02:30 Uhr Szenario 1

Für den Zeitpunkt des Tideniedrigwassers, in dem die stärkste Temperaturveränderung infolge der Strömungskenterung (Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 0 m/s) und des geringen

Tidevolumens zu beobachten ist, wird in Abbildung 5-12 ein Querschnitt auf Höhe der Einleitungen dargestellt. Diese zeigt die vertikale Durchmischung in der Wassersäule. Ausgehend von der Einleitstelle liegt das eingeleitete kühlere Wasser in der Vertikalen gut gemischt bis zur Sohle vor und weist Temperaturunterschiede von bis zu -1 K über eine Breite auf, die ungefähr der Breite der FSRU entspricht.

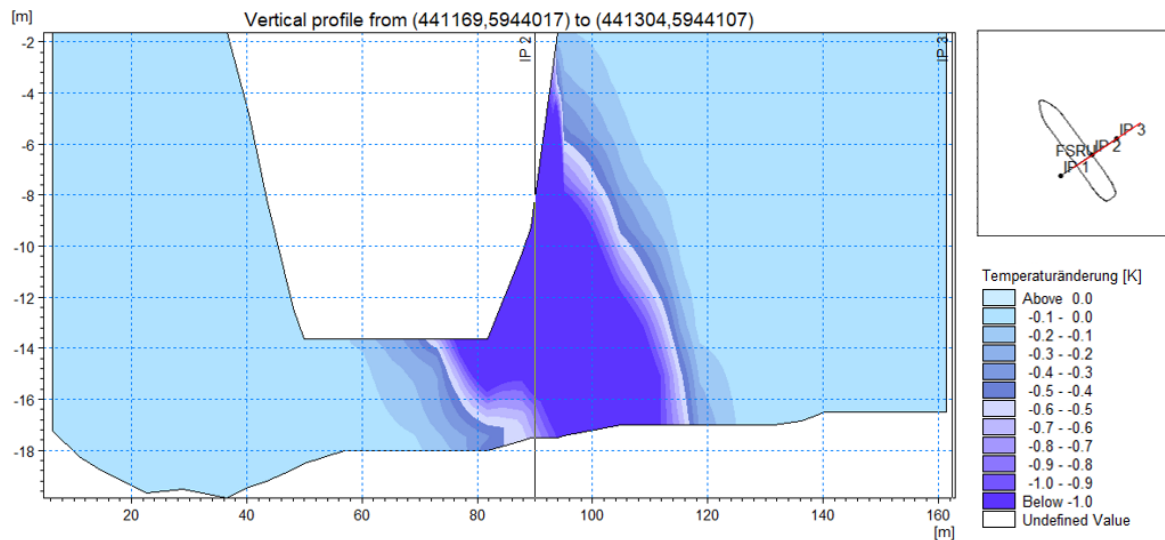


Abbildung 5-12: Querschnitt durch die Liegewanne bei Tideniedrigwasser am 23.04.2021 um 02:30 Uhr -Szenario 1. Die kleine Darstellung zeigt die Lage des Vertikalprofils durch den Schiffskörper.

## 5.4 Szenario 2 - Closed Loop

In Szenario 2 (Closed loop) wird über Kühlwasserauslässe der FSRU in 7 m und 7,5 m unter der Wasseroberfläche kontinuierlich erwärmtes Wasser mit einer Temperaturdifferenz von +15°K und +5°K in die Jade eingeleitet. Periodisch erfolgt eine zusätzliche Einleitung durch den LNG-Tanker mit einer Temperaturdifferenz von +10°K im Zeitraum von jeweils 30 Stunden im Wechsel (vgl. Tabelle 4-1).

### 5.4.1 Maximal- und Mittelwertauswertung

Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15 zeigen die über drei Wochen (siehe Abbildung 5-4) auftretenden maximalen und mittleren positiven Temperaturänderungen (= Erwärmung) an der Gewässeroberfläche und der sohnahen Schicht.

In Abbildung 5-13 sind die über drei Wochen errechneten maximalen positiven Temperaturänderungen (= Erwärmung) nahe der Gewässeroberfläche dargestellt. Das in Richtung Gewässeroberfläche aufsteigende warme Wasser verursacht dort die größten Temperaturunterschiede. Nahe des Einleitpunktes beträgt die maximale Erwärmung oberflächennah kurzfristig bis zu +6,6 K (direkt am Mesh-Element des Auslasses). Die maximalen Temperaturerhöhungen mit >1 K beschränken sich auf den Bereich der Liegewanne in Höhe des Hecks der FSRU. Diese Erwärmung erstreckt sich über eine Länge von etwa 100 m in Strömungsrichtung. Berechnete Temperaturdifferenzen von mindestens 0,1 K sind in der Längsausdehnung auf etwa 1800 m sichtbar.

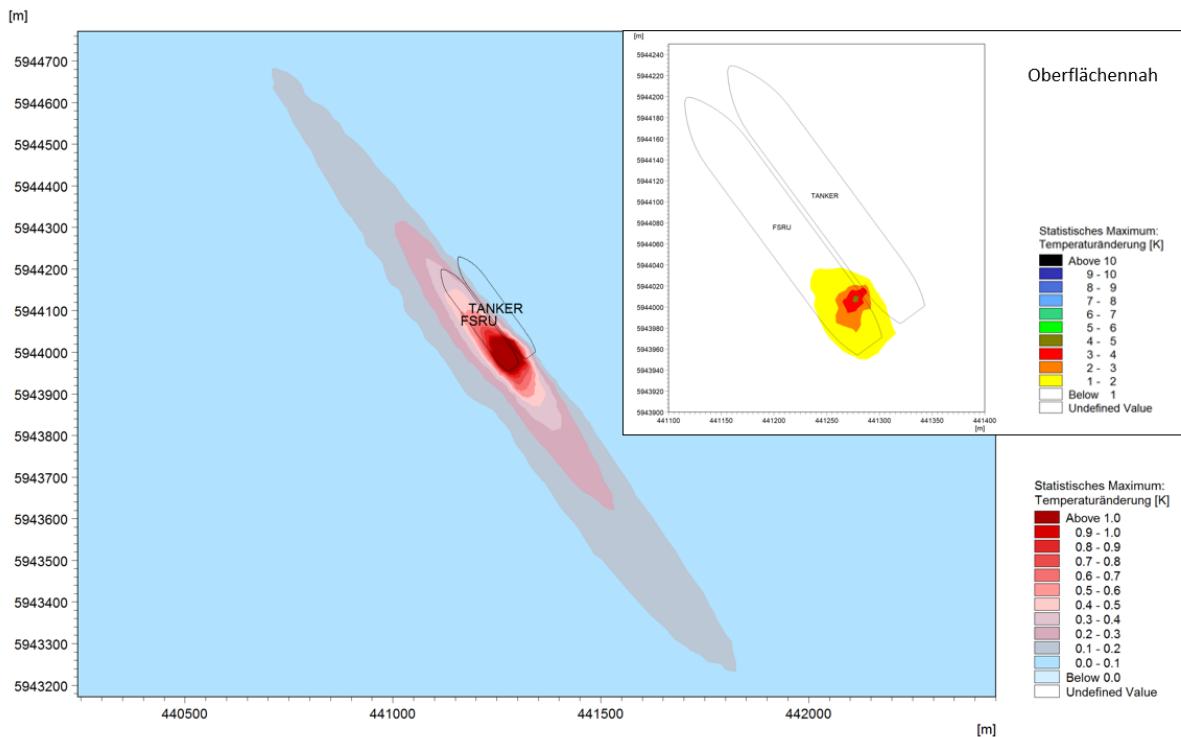


Abbildung 5-13: Über 3 Wochen ausgewertete maximale Temperaturerhöhung nahe der Gewässeroberfläche

Abbildung 5-14 zeigt die über drei Wochen errechneten mittleren positiven Temperaturänderungen (= Erwärmung) nahe der Gewässeroberfläche. Hierbei ist in der Abbildung eine Erwärmung von  $>0,1$  K ausschließlich unmittelbar am Auslass der FSRU in einer horizontalen Ausdehnung von etwa 10 m zu sehen. Die lokale Erwärmung liegt in einer Größenordnung von  $+0,25$  K.

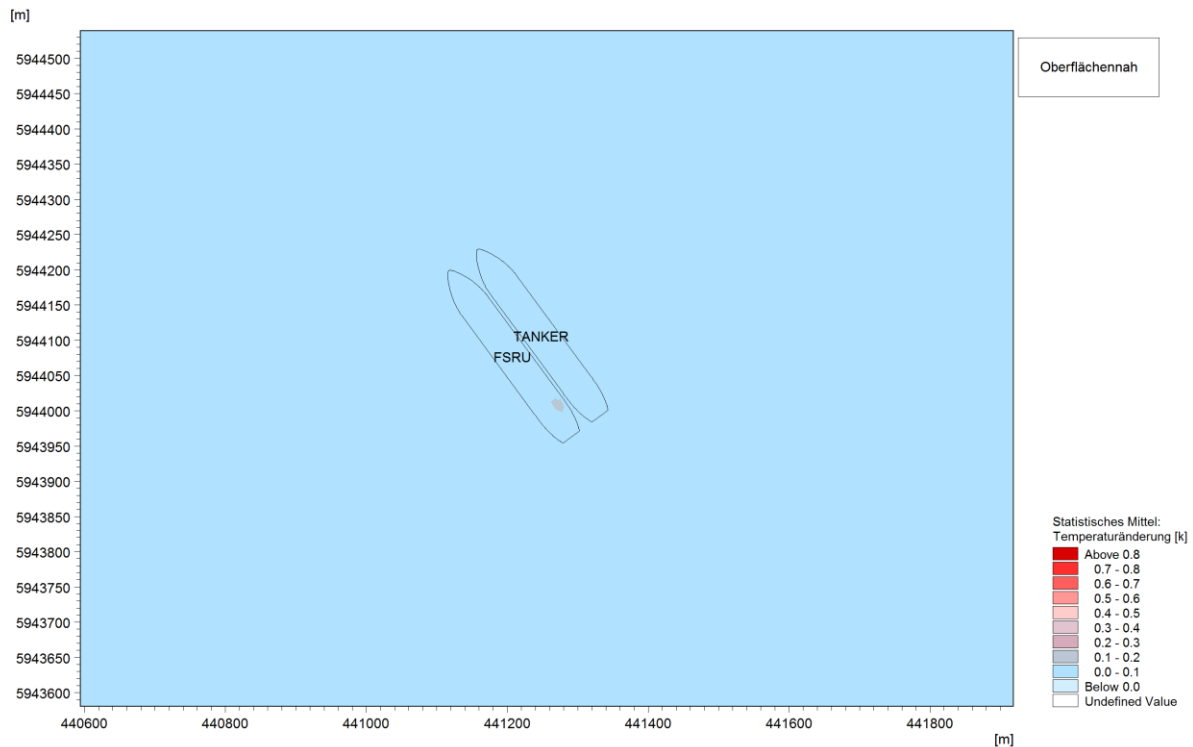


Abbildung 5-14: Über 3 Wochen ausgewertete mittlere Temperaturerhöhung nahe der Gewässeroberfläche

In Abbildung 5-15 sind die über drei Tiden errechneten maximalen positiven Temperaturänderungen (= Erwärmung) nahe der Gewässersohle dargestellt. Temperaturerhöhungen von mindestens  $0,1$  K sind innerhalb der Liegewanne zu beobachten. Nur im unmittelbaren Nahbereich des Auslasses tritt eine lokale Erwärmung von bis zu  $+0,4$  K auf.

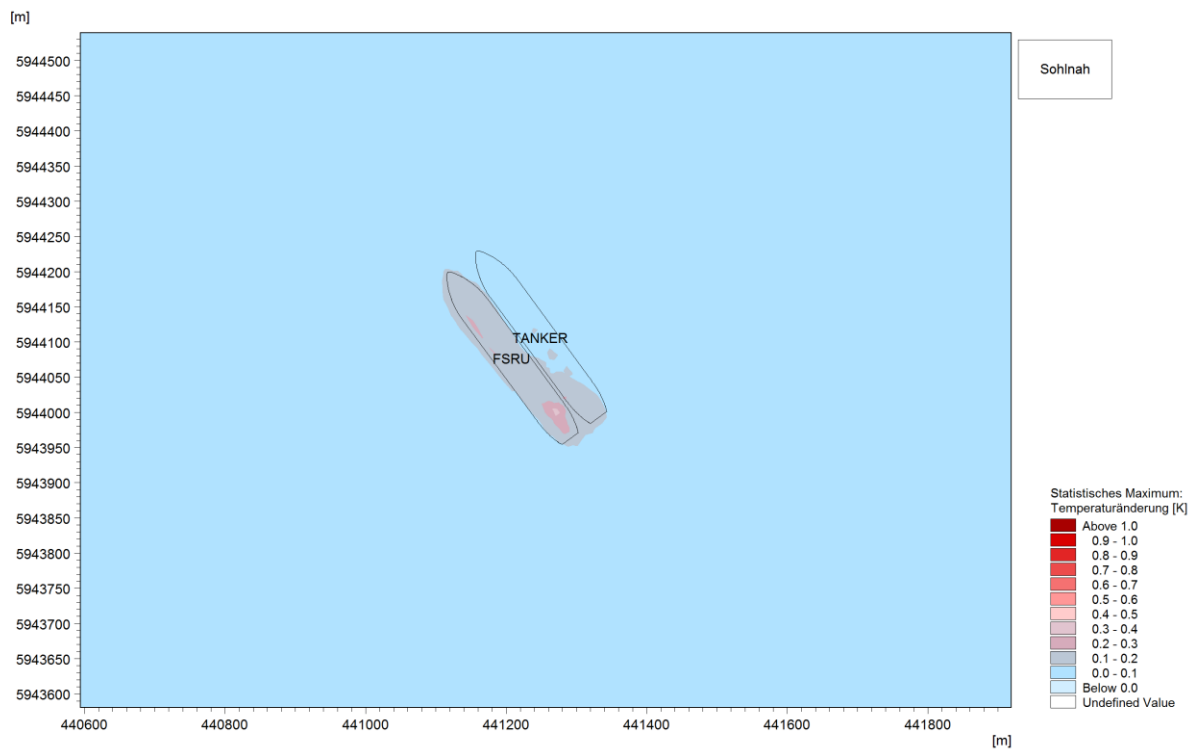


Abbildung 5-15: Über 3 Wochen ausgewertete maximale Temperaturerhöhung nahe der Gewässersohle

Abbildung 5-16 zeigt die über drei Wochen errechneten mittleren positiven Temperaturänderungen (= Erwärmung) nahe der Gewässersohle. Hierbei ist, erwartungsgemäß zum gezeigten Ergebnis in Abbildung 5-14 keine Erwärmung ersichtlich.

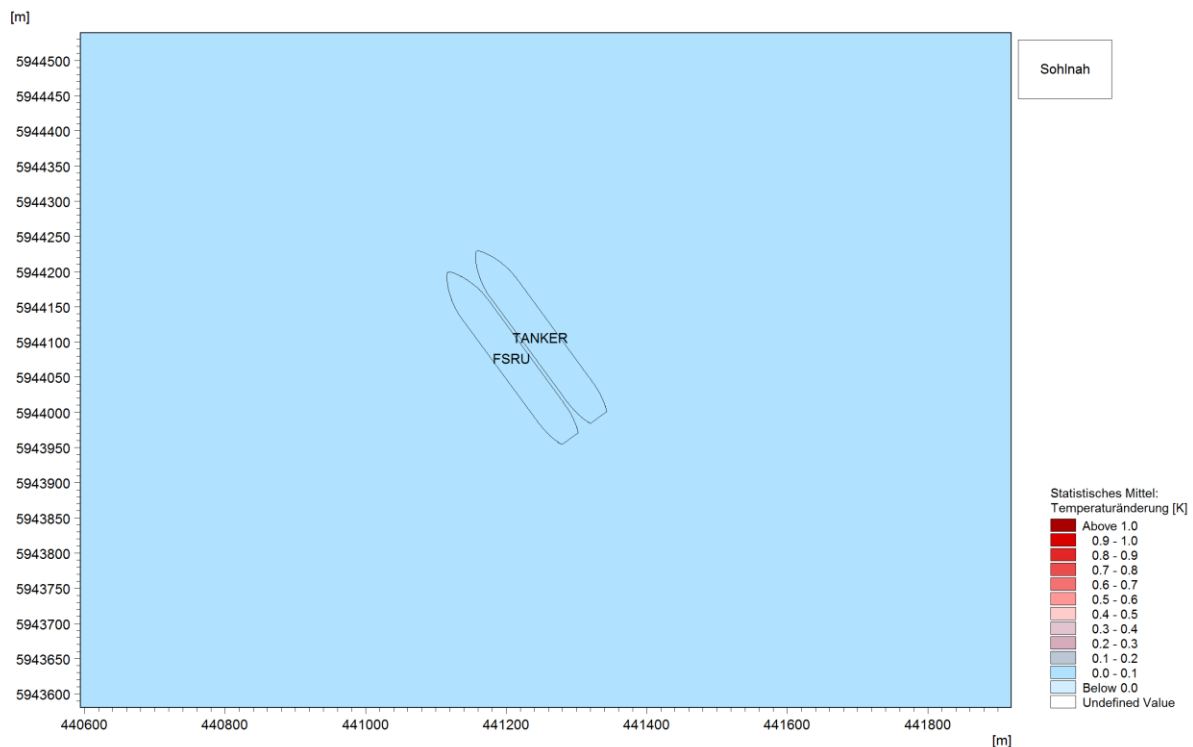


Abbildung 5-16: Über 3 Wochen ausgewertete mittlere Temperaturerhöhung nahe der Gewässersohle

#### 5.4.2 Temperaturänderungen zu charakteristischen Tidezeitpunkten

Die Berechnungen zeigen in Abhängigkeit des Tidezeitpunktes verschiedene Ausbreitungsbereiche des erwärmten Wassers. Dies ist an der ausgewählten Tide in Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-20 dargestellt.

Nach der Ebbkenterung am 22.04.2021 nimmt der Flutstrom ab 15:00 Uhr in Richtung Süden (Jadebusen) zu. Im weiteren Verlauf der Flut nehmen die Temperaturänderungen durch den steigenden Wasserstand und die stärkere Verdünnung ab, zu sehen in Abbildung 5-17 bei vollem Flutstrom um 17:25 Uhr. Mit nachlassender Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt Tidehochwasser nimmt ab 20:00 Uhr die Wärmefahne an Breite wieder zu (Abbildung 5-18). Mit dem Ebbstrom kehrt erwärmtes Wasser zurück zur FSRU und wird seewärts in Richtung Außenjade transportiert (Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20), bis mit der nächsten Ebbkenterung der Tidezyklus neu beginnt.



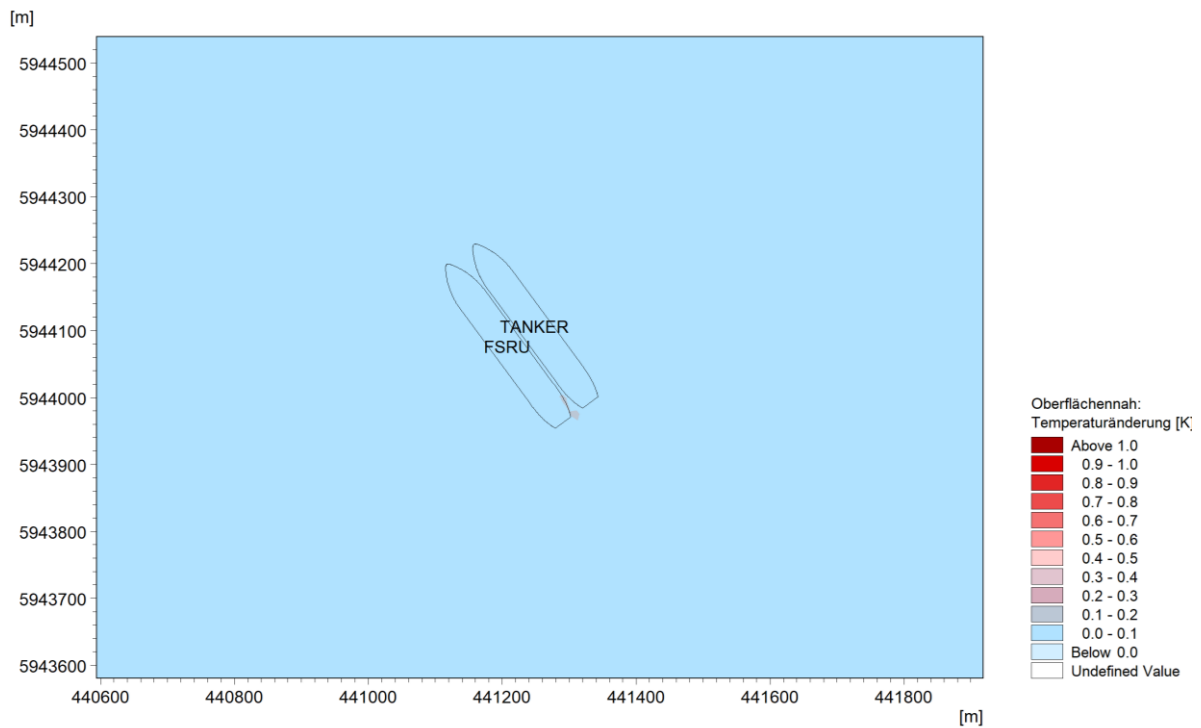


Abbildung 5-17: Oberflächennahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Flutstrom am 22.04.2021 um 17:25 Uhr – Szenario 2

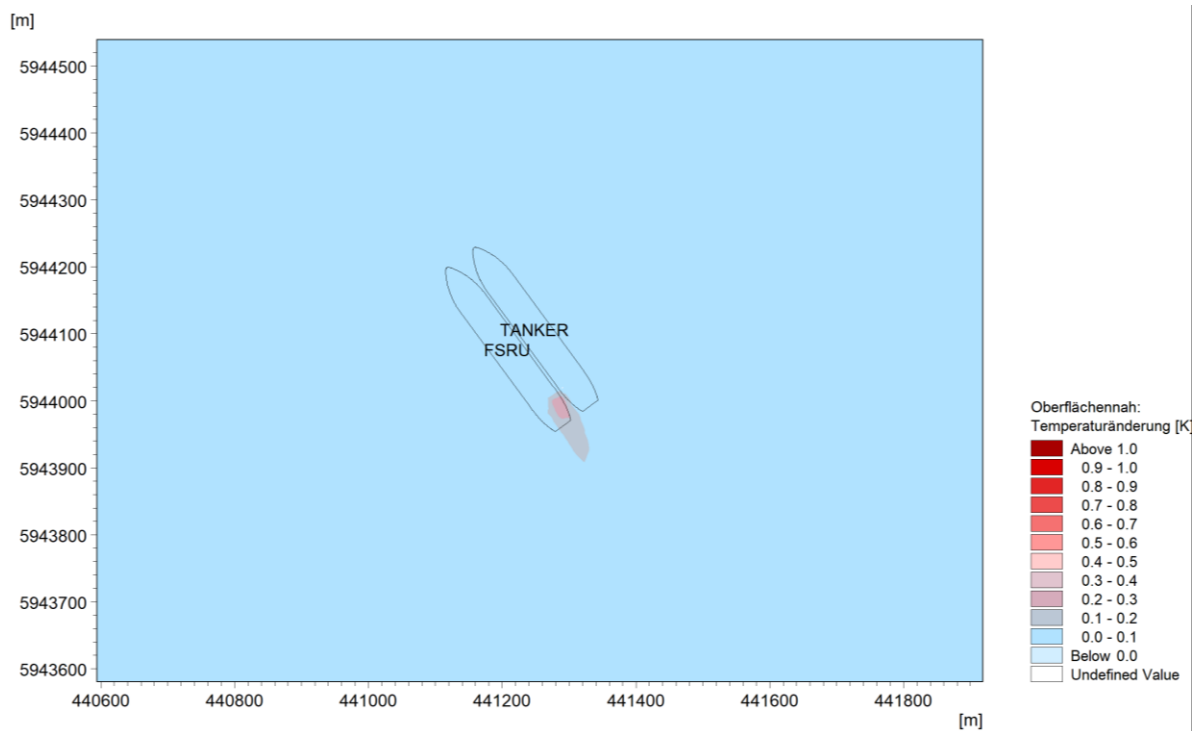


Abbildung 5-18: Oberflächennahe Temperaturänderung bei Tidehochwasser (Thw) am 22.04.2021 um 20:00 Uhr – Szenario 2

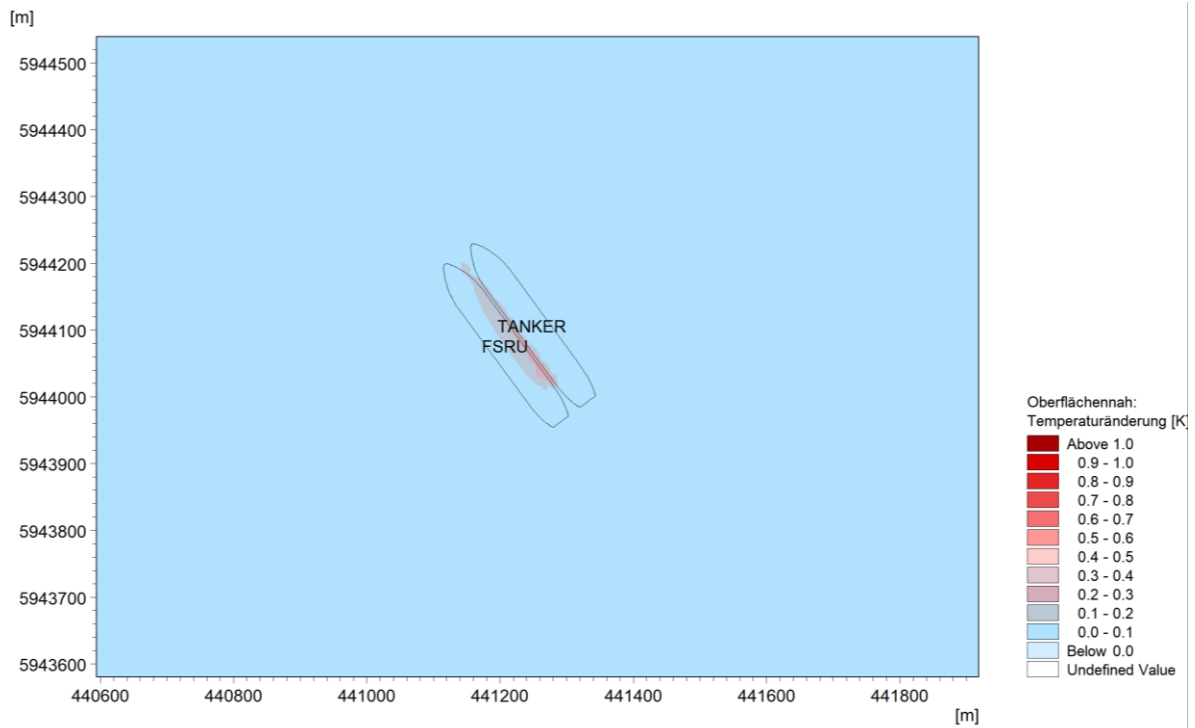


Abbildung 5-19: Oberflächennahe Temperaturänderung bei ausgeprägtem Ebbstrom am 22.04.2021 um 21:40 Uhr -Szenario 2

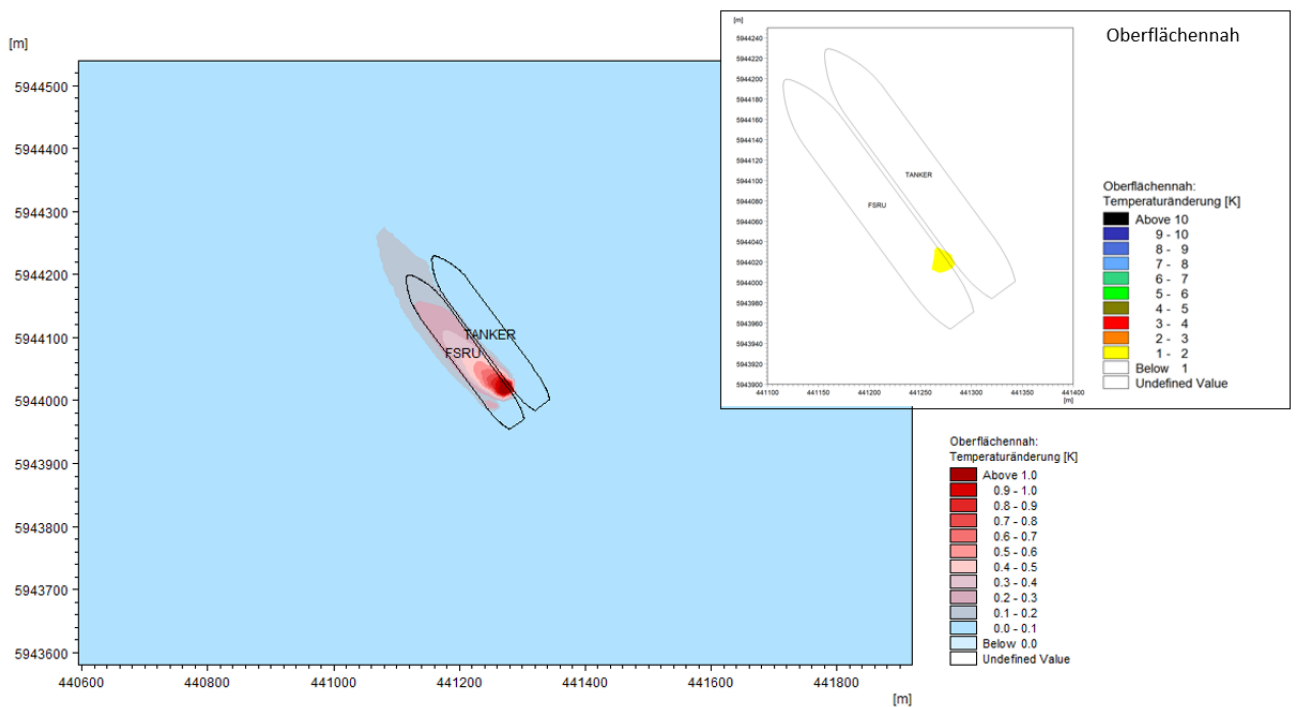


Abbildung 5-20: Oberflächennahe Temperaturänderung bei Tideniedrigwasser (Tnw) am 23.04.2021 um 02:30 Uhr -Szenario 2

Für den Zeitpunkt des Tideniedrigwassers, in dem die stärkste Temperaturveränderung infolge der Strömungskenterung (Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 0 m/s) und des geringen Tidevolumens zu beobachten ist, wird in Abbildung 5-21 ein Querschnitt auf

Höhe der Einleitungen dargestellt. Diese zeigt die vertikale Durchmischung in der Wassersäule. Das eingeleitete wärmere Wasser liegt in der Wassersäule geschichtet vor. Ausgehend von der Einleitestelle reicht die Wärmefahne nicht bis zur Sohle.

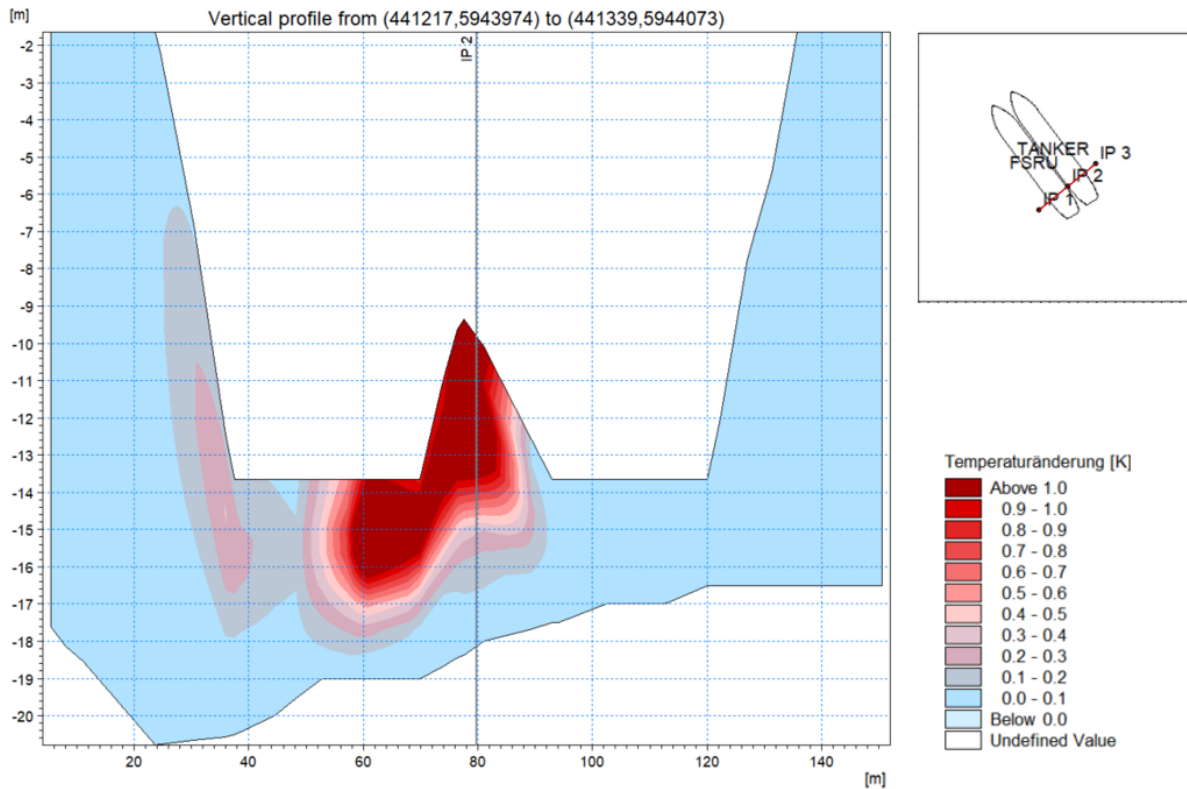


Abbildung 5-21: Querschnitt durch die Liegewanne bei Tideniedrigwasser am 23.04.2021 um 02:30 Uhr -Szenario 2. Die kleine Darstellung zeigt die Lage des Vertikalprofils durch die Schiffskörper

## 6 Zusammenfassung

Für den geplanten Anleger einer schwimmenden Regasifizierungsanlage (Floating Storage Regasification Unit; FSRU) für das neue Flüssigerdgas- (LNG-) Terminal in Wilhelmshaven wurde im Rahmen des wasserrechtlichen Genehmigungsantrags eine hydronumerische Studie zur Verteilung und Einmischung von Wärmeeinleitungen durchgeführt. Dabei wurden die thermischen Einleitungen sowohl durch die FSRU als auch durch den LNG-Tanker anhand eines Open Loop Szenarios (Szenario 1) und ein Closed Loop Szenarios (Szenario 2) untersucht.

Das bei DHI WASY vorhandene Modell der Jade, welches bereits in mehreren Studien /1//2/ zur Anwendung kam, wurde im Bereich des LNG-Terminals angepasst. Die Berechnung der thermischen Einleitung und Einmischung ins Gewässer wurde für zwei Szenarien unter Berücksichtigung der Schiffskörper von FSRU und LNG-Tanker durchgeführt. Die in diesem Bericht dargestellten simulierten Werte sind als Ergebnis eines annähernd physikalischen Computermodells zu verstehen und spiegeln keine in situ Messwerte wider

Für die Auswertung wurden die statistischen maximalen und mittleren Änderungen in einem dreiwöchigen Modellzeitraum bestimmt. Die mittleren Temperaturveränderungen lagen in den beiden untersuchten Szenarien mit  $< -0,1$  K bzw.  $> +0,1$  K außerhalb der Liegewanne im vernachlässigbaren Bereich. Berechnete Temperaturänderungen mit Werten  $> -0,1$  K sind in Szenario 1 insgesamt ca. 1000 m sohnah um die Liegewanne nördlich und südlich der FSRU vorhanden. Nahe des Regas-SW-Auslasses beträgt die maximale Abkühlung sohnah bis zu  $-3,8$  K. Werte von  $> -1$  K werden nur kleinräumig im Nahbereich der Liegewanne ermittelt. Im Mittel sind die Temperaturänderungen deutlich geringer und bewegen sich im Wertebereich  $> 0,1$  K.

Im Szenario 2 tritt die maximale Aufwärmung am Heck der FSRU auf und beträgt lokal am Einleitpunkt oberflächennah bis zu  $+6,6$  K und sohnah bis zu  $0,4$  K. Außerhalb des Bereichs der Liegewanne liegen die maximalen oberflächennahen Temperaturerhöhungen unter  $1$  K. Die Maximalwerte der Erwärmung mit über  $0,1$  K erstrecken sich horizontal insgesamt über eine Distanz von bis zu  $900$  m um den Ort der Einleitung. Im Mittel sind die Temperaturänderungen deutlich geringer. Oberflächennah werden Mittelwerte  $> 0,1$  K nur am Auslass berechnet. Sohnah ist keine mittlere Erwärmung von  $> 0,1$  K zu sehen.

Die Auswirkung der thermischen Einleitung über eine Tide wurde anhand charakteristischer Tidezeitpunkte betrachtet. Im Vergleich der einzelnen Zeitpunkte zueinander zeigt sich lokal die größte Auswirkung der thermischen Einleitung bei Tideniedrigwasser. Durch die reduzierte Strömungsgeschwindigkeit (Kenterpunkt) findet ein, entsprechend geringerer, Abtransport durch die Strömung bzw. Verteilung statt. Des Weiteren ist bei geringem Tidevolumen weniger Wasser für die Einmischung (Verdünnungseffekt) gegeben. Die bei Szenario 1 erfolgte Einleitung abgekühlten Wassers erreicht hierbei die Gewässersohle und bewirkt eine Temperaturänderung von bis zu  $-1$  K über die gesamte Wassersäule mit einer ungefähren Breite der FSRU im Bereich des Auslasses.

Das in Szenario 2 eingeleitete warme Wasser steigt zur Gewässeroberfläche und bewirkt zur Strömungskenterung nach Niedrigwasser eine lokale kurzfristige Erwärmung um  $> +1,0$  K. Im Querschnitt wird ersichtlich, dass es hierbei zu einer

Stauung zwischen den Schiffskörpern kommt, welche aber nicht zur Gewässersohle reicht und sich bei einsetzendem Gezeitenstrom wieder verflüchtigt.

## 7 Literatur

- /1/ DHI WASY GmbH (08/2020): Studie zur Ausbreitung thermischer Einleitung durch die FSRU und den LNG Tanker in die Jade
- /2/ DHI WASY GmbH (06/2022): Studie zur Biozidausbreitung durch die FSRU und den LNG Tanker in die Jade
- /3/ Lang, G. 2003. Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86. S. 33-42.
- /4/ DHI "MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, User Guide", Horsholm Dänemark, 2014
- /5/ DHI "MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation", Horsholm Dänemark, 2014
- /6/ DHI WASY GmbH (11/2019): WHV LNG Kolkanfälligkeit - 3D Strömungs-Modellierung: Berechnung von Strömungen am bestehenden und geplanten LNG Terminal in Wilhelmshaven zur Bewertung der Kolkanfälligkeit (14804873).
- /7/ BSH (2022). Meeresumweltsmessnetz.  
[https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Meeresumweltsmessnetz/Historische\\_Daten/historische\\_daten\\_node.html;jsessionid=AB1E312202C285818B879BEBB095E817.live21301](https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Meeresumweltsmessnetz/Historische_Daten/historische_daten_node.html;jsessionid=AB1E312202C285818B879BEBB095E817.live21301)