



*Abbildung: Warnow während der BUGA 2025: Visualisierung aus der Bewerbung
Foto: Runze & Casper Werbeagentur GmbH, Berlin*

Neubau Warnowbrücke in Rostock

Hydraulische Auswirkungen

Auftragnehmer:
INROS LACKNER SE

Steinerstraße 15, Haus B
81369 München

Datum:
19.04.2021

Dokument Kontrollblatt

Projektnummer 2019-0500

Dokumentdaten

Dokument: 2021-04-19_Hydraulische_Auswirkungen_Brückenneubau_UntereWarnow.docx
Erstell-Datum: 19.04.2021
Revisions-Nr.: 01

Bearbeitung und Dokumentprüfung

Bearbeitet und geprüft



i.A. Dr.-Ing. Susanne Vogel

Bearbeitet



i.A. Dr.-Ing. Paolo Dapoz

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Zielstellung und Lage | 5 |
| 2 | Grundlagen | 6 |
| 3 | Analyse der Grundlagen | 7 |
| 4 | Hydraulische Modellierung | 11 |
| 4.1 | 1D-Modelle | 11 |
| 4.2 | 2D-Modelle | 11 |
| 4.3 | 3D-Modelle | 12 |
| 5 | Ergebnisse und Auswirkungen | 13 |
| 5.1 | Ergebnisse des bereits vorliegenden Strömungsgutachtens | 13 |
| 5.2 | Auswirkungen der Strömung | 13 |
| 5.3 | Vermischung der Wasserschichten hinter den Pfeilern | 14 |
| 5.4 | Plausibilisierung durch idealisiertes 3d-HN Modell | 18 |
| 5.5 | Vermischung bei Binnenhochwasser | 21 |
| 6 | Zusammenfassung und Fazit | 22 |

Begriffserklärung

- **Ästuar:** Gewässer, das sowohl von marinen Einflüssen (Meerwasser, Seegang, Tide, windbedingten Extremwasserständen), als auch binnenseitigen Einflüssen (Süßwasserzufluss) geprägt ist [4].
- **Barokline Prozesse:** Vertikale Strömungen, die durch horizontale Dichteunterschiede von Temperatur und Salzgehalte erzeugt werden [4].
- **Barotrope Prozesse:** Transport des Meereswassers über die Wassertiefe Richtung Fluss, der durch die Erhöhung des Wasserspiegels ins Meer verursacht wird. Der Wasserstand im Meer wird wesentlich durch die großräumige Wind- und Luftdruckverteilung über der gesamten Ostsee beeinflusst [4].
- **Konvektion:** vertikale Strömung eines Fluides, die durch den Dichtunterschied zwischen vertikalen Schichten verursacht wird.
- **Mesohaline:** Mesohalines Wasser hat einen niedrigen bis mittleren Salzgehalt und findet sich normalerweise in Flussmündungen, wo sich Süßwasser aus dem Fluss mit Salzwasser aus dem Meer vermischt.

2 Grundlagen

- [1] BAW Bundesanstalt für Wasserbau (2003): die Mathematische Modellierung als unverzichtbare Beratungsgrundlage. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr.86. Karlsruhe, Hamburg, Illmenau.
- [2] Federal Highway Administration (FHWA). (2019). Overview of Practices for Adopting 2D Hydraulic Modeling.
- [3] Sturmflut „Zeetje“: Land unter in Rostock. (01.2019). Ostsee-Zeitung. Link: <https://www.ostsee-zeitung.de/Mecklenburg/Rostock/Sturmflut-2019-in-Rostock>.
- [4] BAW Bundesanstalt für Wasserbau (2019).: Anpassung der seewärtigen Zufahrt zum Seehafen Rostock, Hydrodynamik. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Karlsruhe; Hamburg.
- [5] Yu, X. Y. (2008). 1D and 2D Hydraulic Simulations for Bridge Scour Prediction: A Comparative Study. Fourth International Conference on Scour and Erosion.
- [6] K. Zilch et al (2013). Wasserbau, Siedlungswasserwirtschaft, Abfalltechnik. Springer Verlag.
- [7] Peter Menzel (2009). Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegeschichteten Zylinderströmung. Menzel Verlag
- [8] Jens Unger (2006). Strömungscharakteristika um kreiszylindrische Brückenpfeiler. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

3 Analyse der Grundlagen

Bereits im Jahr 2019 wurde ein Strömungsgutachten der Unterwarnow und der Ostsee wegen der Anpassung der Sohle der seewärtigen Zufahrt zum Seehafen Rostock von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erstellt. Die hydrodynamische Analyse wurde durch ein 3D-Modell umgesetzt, das auf dem Verfahren von UnTRIM¹ basiert. Dessen Auflösung ist sowohl räumlich als auch zeitlich hoch genug, um die hydraulischen Prozesse der Unterwarnow zu beschreiben.

Obwohl die Ausbaggerung nur bis zum Seehafen-Rostock (Breitling) vorgenommen wurde, erstreckt sich die Untersuchung vom Seekanal bis Rostock-Mühlendamm, weshalb hier diese Ergebnisse verwendet werden können (siehe Abbildung 2).

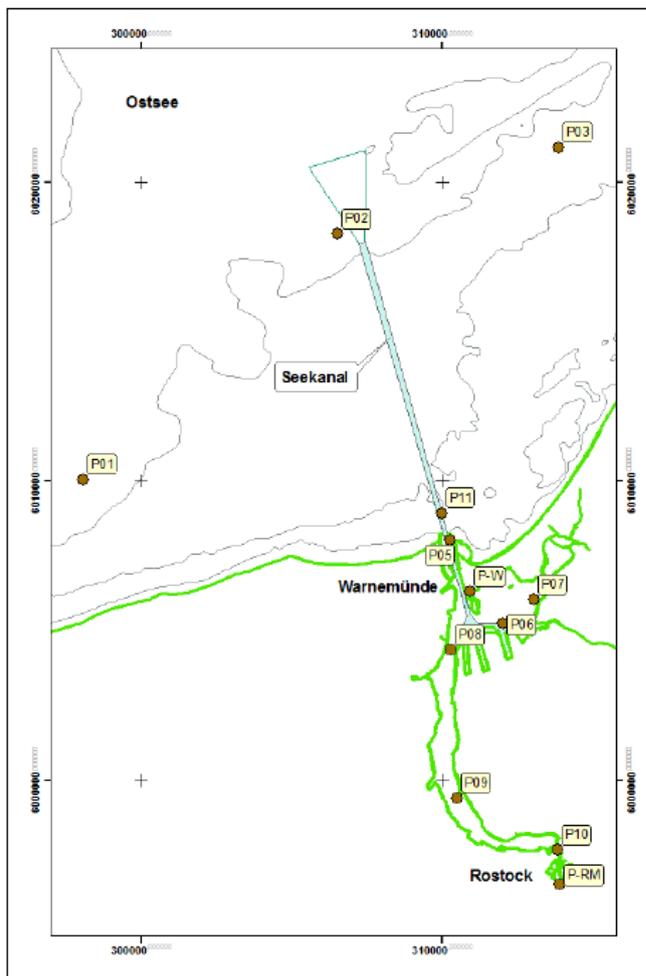


Abbildung 2: Positionen der Messstationen [4].

Der als Gewässer I. Ordnung eingestufte, untersuchte Gewässerabschnitt der Unterwarnow ist ein Ästuar (vgl. Abbildung 3), welcher sowohl von marinen als auch binnenseitigen Einflüssen geprägt ist.

¹ Das Verfahren UnTRIM, das an der Universität Trient entwickelt wurde, dient der Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen auf einem in der Ebene horizontal unstrukturierten Gitter mit einer Auflösung von 3 m bis 515 m. Die Vertikale wird in Schichten von 0,5 m Dicke (Oberfläche bis 8 m Tiefe) bzw. 1,0 m (unterhalb 8 m Tiefe) dargestellt. Die zeitliche Auflösung, der sogenannte Modellzeitschritt, beträgt 30 Sekunden [4].

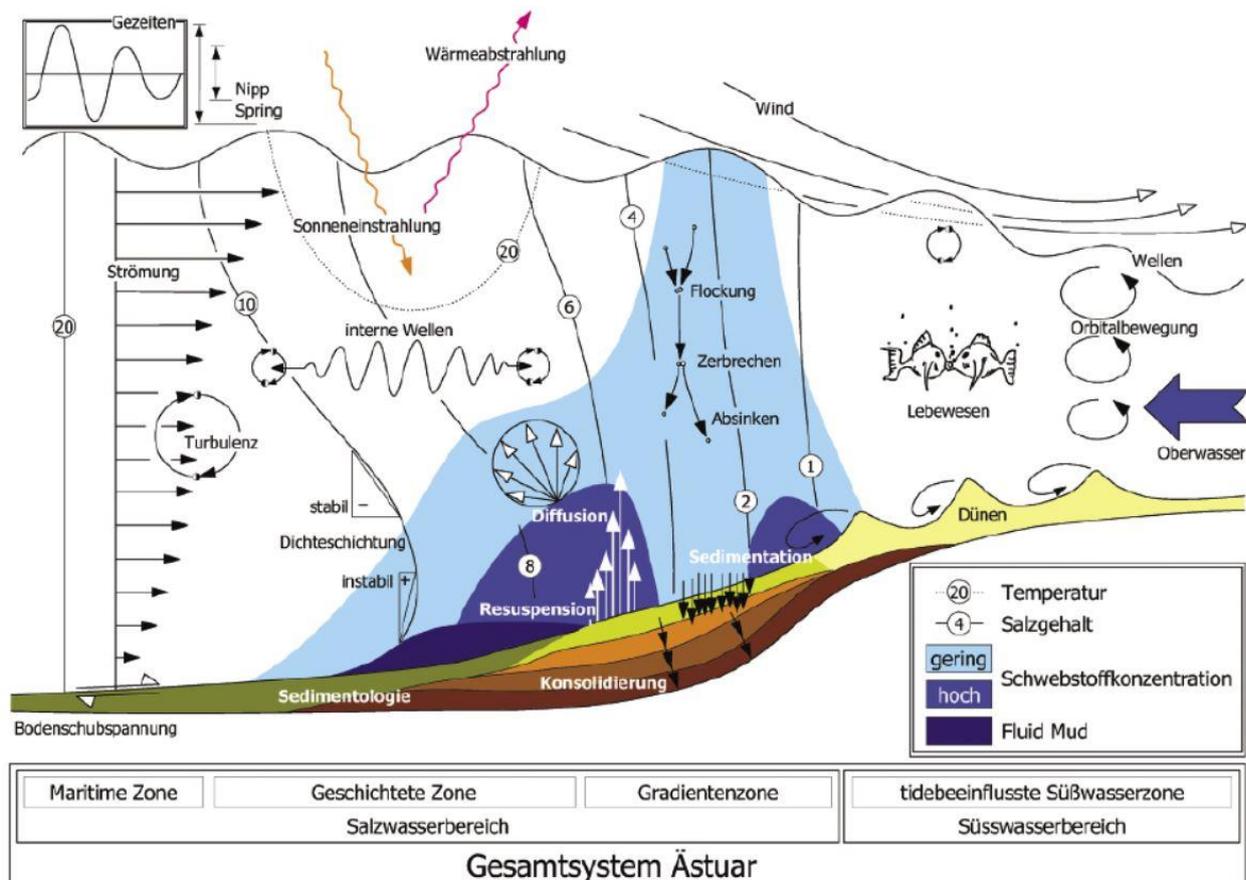


Abbildung 3: Einflussgrößen und Teilprozesse im Gesamtsystem Ästuar [1]

Die Warnow ist in diesem Abschnitt eine Bundeswasserstraße und wird wasserverkehrlich insbesondere durch Wassersportler genutzt.

Die kennzeichnenden Eigenschaften der Unterwarnow sind geringe Wassertiefen, deren Wasserstände hauptsächlich von den meteorologischen Einflüssen der Ostsee geprägt sind. Daher sind durch meteorologische Extremereignisse Schwankungen des Wasserstandes erkennbar, die jedoch selten Stände von über 2 m und unter -1,5 m erreichen [4]. Die Dynamik der mesohalinen Unterwarnow wird von zwei Prozessen geregelt: Barotrope und Barokline Prozesse beeinflussen die horizontalen und vertikalen sekundären Strömungen wegen der Vermischungen aufgrund von Salzgehalt und Temperatur. Die Konvektion wird im Herbst wegen der Abkühlung des Gewässers an der Oberfläche verstärkt und erstreckt sich bis in den Winter [4].

Der geplante Geh- und Radweg ist 450 m lang und 6 m breit. Die Höhe der Brücke soll so ausgebildet werden, dass die bisherige wasserverkehrliche Nutzung in den zwei abgebildeten Fahrinnen bestehen bleibt (Abbildung 5).

Die Brücke ist mit 17 Pfeilern geplant: hauptsächlich kreisförmig mit einem Durchmesser von 2 m und vereinzelt mit strömungsgünstiger Form bzw. als Pfeilerreihe. In Abbildung 4 ist ein Arbeitsstand dargestellt. Die Pfeiler nehmen weniger als 8% des Querschnitts ein, was den Wasserstand in der Größenordnung nicht wahrnehmbar beeinflusst. Die geschwungene Linienführung der Brücke trägt dazu bei, die Auswirkung der Einengung zu entzerren.

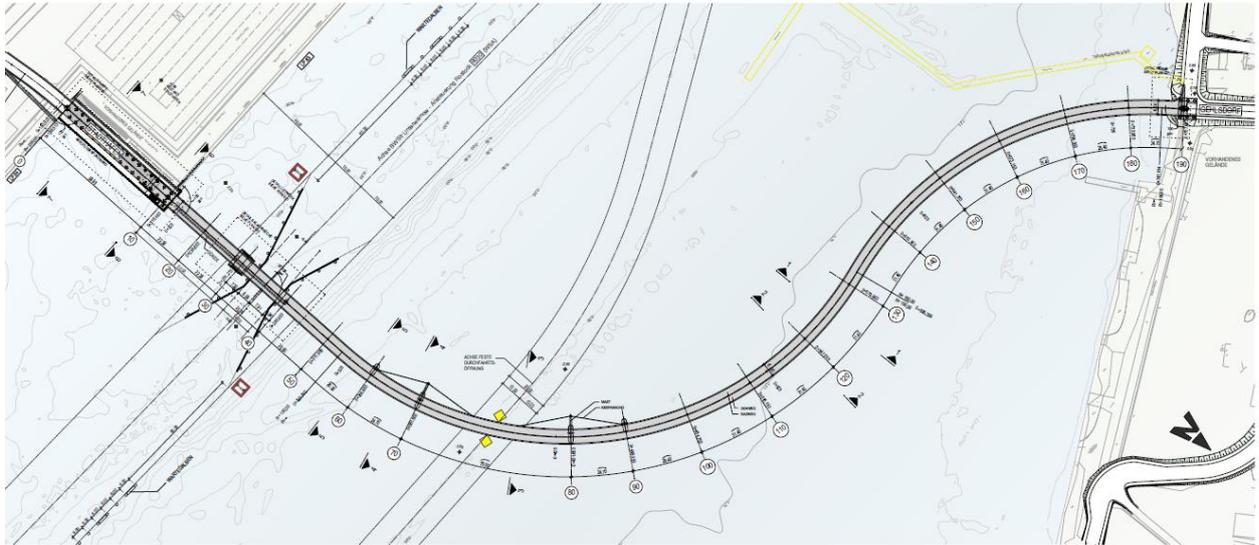


Abbildung 4: Bauwerksskizze - Lageplan (Stand 27.11.2020)

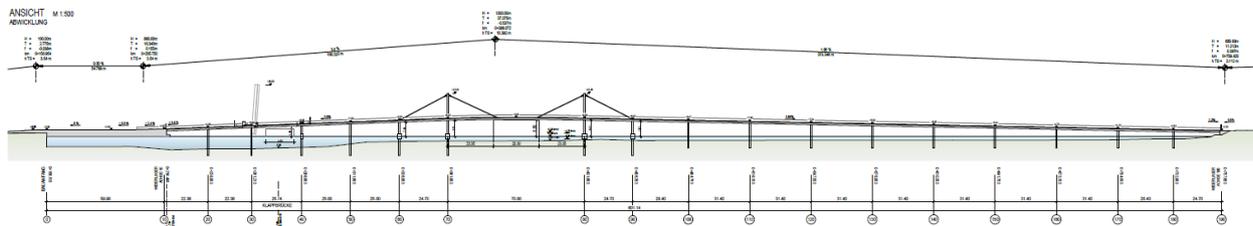


Abbildung 5: Bauwerksskizze - Ansicht (Stand 27.11.2020)

Brückenpfeiler sind Strukturen unter Wasser, die hydrodynamische und morphologische Effekte verursachen. Durch Hochwasserzustände werden diese Effekte verstärkt. Die Pfeiler erzeugen in der Strömung einen Wirbeleffekt, der sekundäre Strömungen und daraus folgende Bodenerosion um den Pfeiler verursacht (siehe Abbildung 6). Des Weiteren kann eine Verengung des Querprofils zu lokalen Wasserstands- und Strömungsgeschwindigkeitsänderungen führen.

Für den betrachteten Fall an der Unterwarnow befinden sich die Pfeiler im Mündungsbereich des Fließgewässers. Das ursprüngliche Flussbett hat sich an dieser Stelle bereits um ein Vielfaches aufgeweitet. Weiterhin ist an dieser Stelle kein klassischer Fließvorgang wie in einem Fließgewässer vorhanden, da der Rückstau der Ostsee eine wesentliche Rolle im Fließgeschehen spielt.

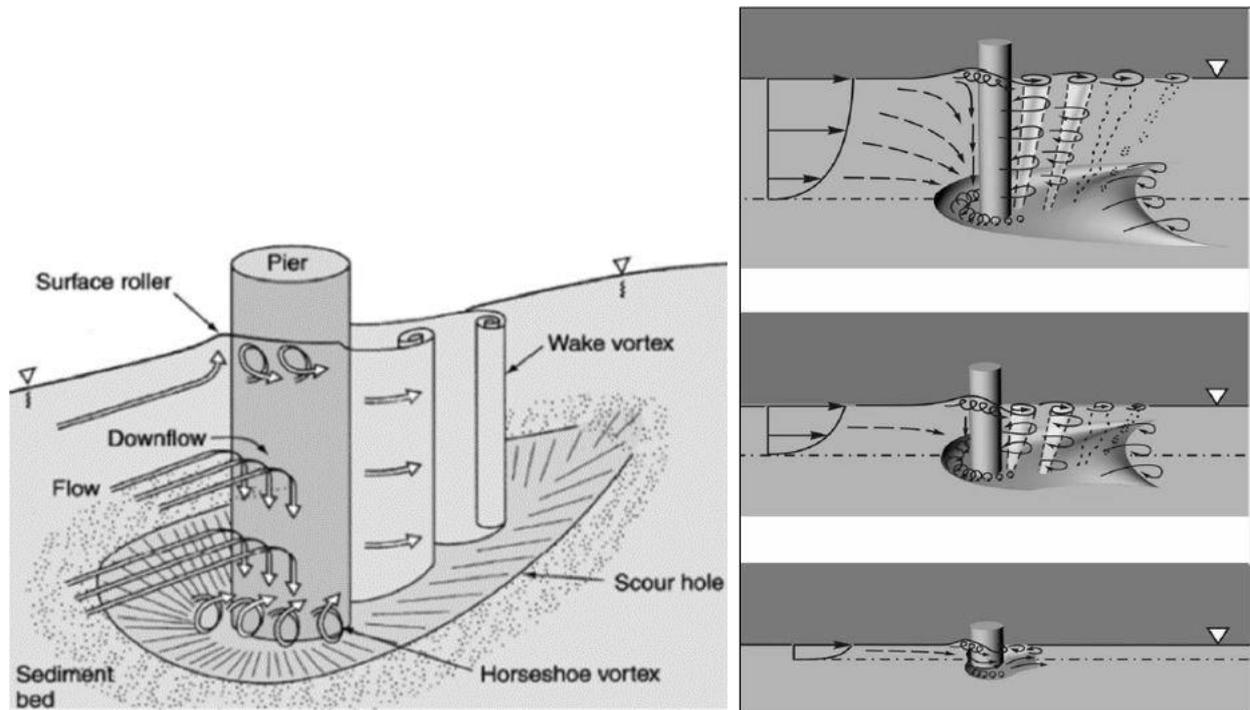


Abbildung 6: Hydrodynamische Effekte eines umströmten Pfeilers.

Unter Berücksichtigung horizontaler und vertikaler Strömungen, sowie Erosions- und Ablagerungsprozessen im Bereich von Brücken kann die Hydrologie und die Morphologie des Flusses qualitativ und quantitativ durch hydraulische Modelle analysiert werden.

In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen zu den Fließprozessen an Brückenpfeilern im Flussbett. Alle Betrachtungen basieren allerdings auf Anströmgeschwindigkeiten ab ca. 0,5 m/s (vgl. z.B. [8]) und können im vorliegenden Fall nicht herangezogen werden.

4 Hydraulische Modellierung

Hydraulische Modelle können ein-, zwei- oder dreidimensional erstellt werden.

4.1 1D-Modelle

1D-Modelle bestehen aus einer Reihe von Querschnitten, die die Topografie des Flusses und des Vorlandes beschreiben. Die Variablen (Geschwindigkeit, Tiefe usw.) ändern sich vorwiegend in einer definierten Richtung x , entlang des Kanals.

Bei 1D-Modellen müssen viele Annahmen getroffen werden, die dazu führen, dass die Ergebnisse unter- oder überschätzt werden.

Die Strömungsrichtung (Geschwindigkeitsvektoren), eine der grundlegenden Eingabedaten zur Definition des Anströmwinkels und zur Abschätzung der Erosionsdimensionen, wird durch 1D-Modelle nicht berechnet.

Da die Auswirkungen von Strömungsstörungen aufgrund hydraulischer Hindernisse nicht in 1D-Modellen berücksichtigt werden und auch die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung in der Fläche nicht berechnet werden, ist das 1D-Modell nicht geeignet, komplexe Strömungen wie im vorliegenden Fall zu simulieren [5].

4.2 2D-Modelle

Bei 2D-Modellen wird die vertikale Geschwindigkeits-Komponente tiefengemittelt. Das bedeutet, dass das Modell die Geschwindigkeit, sowie anderen Variablen, in der horizontalen Ebene berechnet, die die tiefengemittelte Strömung an diesem Koordinatenpunkt (x, y) darstellt.

Mithilfe eines 2D-Modells kann man die Wasserstände und die Entwicklung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten (Größe und Richtung) um die Brückenpfeiler analysieren (Beispiel siehe Abbildung 7). Es ist somit möglich, Bereiche mit hoher Geschwindigkeit oder Querströmungen zu identifizieren, die sich auf die Schiffbarkeit auswirken, sowie die Kolktaufe abzuschätzen.

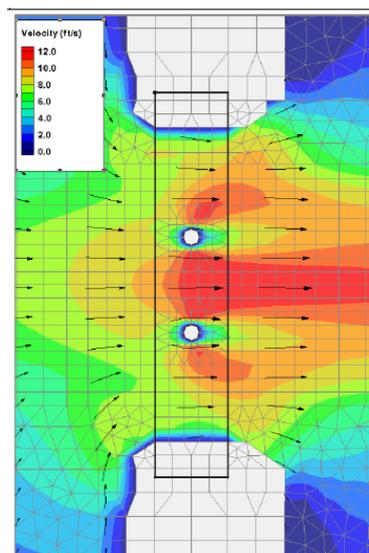


Abbildung 7: Beispiel von Geschwindigkeitskonturen unter einer Brücke [2]. Die maximale Fließgeschwindigkeit in der Abbildung erreicht bis zu 12,0 ft/s (3,6 m/s).

Aus diesem Grund sind 2D-Modellierungen besser für Berechnungen von Strömungsverteilungen an Brücken geeignet als 1D-Modellierungen [2].

Bei 2D-Modellen ist zu beachten, dass die Geschwindigkeitsverteilung in vertikaler Richtung vernachlässigt wird und somit die Analyse von Wirbeleffekten auf die x-y Ebene beschränkt ist.

Grundlagendaten, um ein 2D Modell zu erstellen, sind ein Digitales Geländemodell, hydrologischen Randbedingungen stromaufwärts und stromabwärts, Landnutzungsinformationen, die Geometrie der hydraulischen Bauwerke, Luftbilder, sowie CAD und GIS Daten.

4.3 3D-Modelle

Bei der 3D Modellierung wird mit einer variablen Geschwindigkeits-Komponente gerechnet. Sie bietet die realistische Simulation des Strömungsfelds unter Turbulenzbedingungen an Brückenpfeilern und Widerlagern.

Wenn die hydraulischen Bedingungen signifikante vertikale Beschleunigungen oder vertikale Geschwindigkeitskomponenten umfassen, die für die Analyse von Bedeutung sind, sollte ein 3D-Modell in Betracht gezogen werden [2].

Auch für die Untersuchung der Stabilität der Brückenpfeiler aufgrund der lokalen Erosions- und Ablagerungsprozesse des Sediments wäre ein 3D-Modells erforderlich.

Tabelle 1: Grundlagendaten des BAW Strömungsgutachten 2019 [4]

| Grundlagendaten | | | |
|--|---|------------|---------------|
| | Datenquelle | Zeitreihen | Auflösung [m] |
| Bathymetrische Datensätze | | | |
| Bathymetrie der Ostsee | Institut für Ostseeforschung Warnemünde | 2001 | |
| DGM Ostsee | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 2014 | |
| Echolotungen (Peilungen) | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 2009-2010 | |
| Echolotungen (Peilungen) | WSA Stralsund | 2011-2017 | |
| abgeleiteten Modellen | Gesamte (wasserbedeckte) Modellgebiet | | 5x5 |
| | Trasse des Seekanals und dessen unmittelbaren Nahbereich | | 1x1 |
| Topographische Geländemodelle | | | |
| Digitales Geländemodell | Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) | 2012 | 10x10 |
| DGM M-V | | 2016 | 1x1 |
| Angaben zu Höhe und Verlauf der aktuellen und in der näheren Zukunft geplanten Hochwasserschutzlinie | Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg | 2016 | |
| abgeleitete Modell | Überflutungsgefährdeten Flächen | | 5x5 |
| Hydrologische Datensätze | | | |
| Pegel Warnemünde und Rostock-Mühlendamm | Datenbank der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WISKI | seit 1989 | |
| Abflussganglinie am Pegel Rostock-Geinitzbrücke | (LUNG-MV) | 01.01.2016 | |
| | | 01.01.2017 | |

| Grundlagendaten | | | |
|--|-------------|------------|---------------|
| | Datenquelle | Zeitreihen | Auflösung [m] |
| Abfluss des Prahmgrabens - Radelsee | | 2016 | |

5 Ergebnisse und Auswirkungen

5.1 Ergebnisse des bereits vorliegenden Strömungsgutachtens

Wie bereits anfangs erwähnt, wurden die Ergebnisse des Strömungsgutachtens der BAW von 2019 [4] in diesem Bericht als Grundlage verwendet.

Im vorliegenden Fall erreichen die horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der geplanten Brücke nur selten Werte von mehr als 0,1 m/s [4] und somit ist es unwahrscheinlich, dass starke Vertikalströmungen entstehen, die die wasserverkehrliche Funktionalität beeinträchtigen. Außerdem weist die beobachtete Konvektion im Vergleich zu horizontalen Strömungen nur geringe Größenänderungen auf [4].

Die Werte der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten aus dem 3D-Modell sind in Abbildung 8 dargestellt.

Der Maximalwert der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit auf Höhe der Brücke (Rostock-Stadthafen) ist in der Abbildung 8 gekennzeichnet. Er liegt ungefähr bei 0,1 m/s.

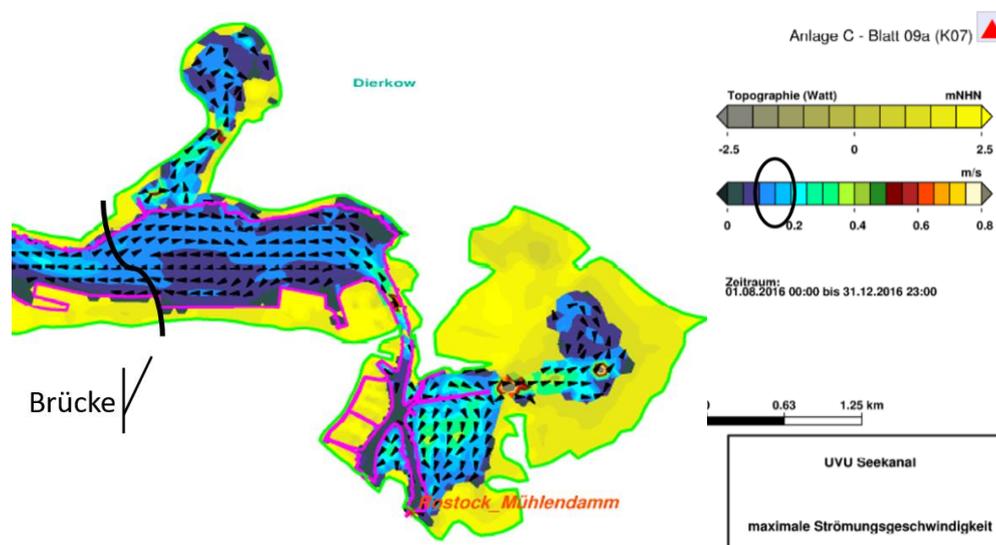


Abbildung 8: Maximalwert der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit Anlage C – [4].

5.2 Auswirkungen der Strömung

Da die Strömungsgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet nur selten Werte von mehr als 0,1 m/s erreichen, sind die natürlichen Sedimenttransportraten nur in geringen Größenordnungen zu erwarten [4].

Unter normalen klimatischen Bedingungen ist wegen der bodennahen und tiefgemittelt vorwiegend niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterwarnow mit eher geringen resultierenden, hydrodynamischen Auswirkungen der neuen Brücke zu rechnen.

Bei der Betrachtung wird die tendenzielle Zunahme der Häufigkeit von Hochwasserereignissen mit berücksichtigt. Seit dem Jahr 2006 hat der Wasserstand in Warnemünde 5-mal einen Pegel von mehr als 1,60 m erreicht (siehe Abbildung 9). Dabei wächst die Wirkung des Barokline Druckgradienten quadratisch mit der Wassertiefe an, was hauptsächlich die Dynamik der tiefen Rinnen beeinflussen kann [1].

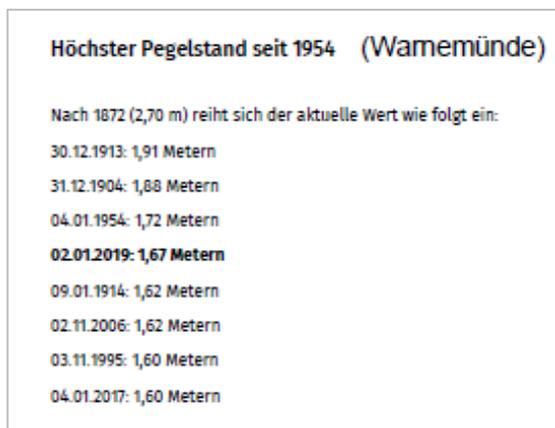


Abbildung 9: Sturmflut „Zeetje“: Land unter in Rostock – Ostsee-Zeitung, Jan. 2019 [3].

5.3 Vermischung der Wasserschichten hinter den Pfeilern

Die chemische und biologische Qualität des Wassers im Ästuar würde sich verschlechtern, wenn sich Wasserschichten mit unterschiedlichem Salzgehalt vermischen. Im Bereich oberhalb des Stadthafens verlaufen die Isolinien des Salzgehaltes annähernd horizontal (vgl. Abbildung 10).

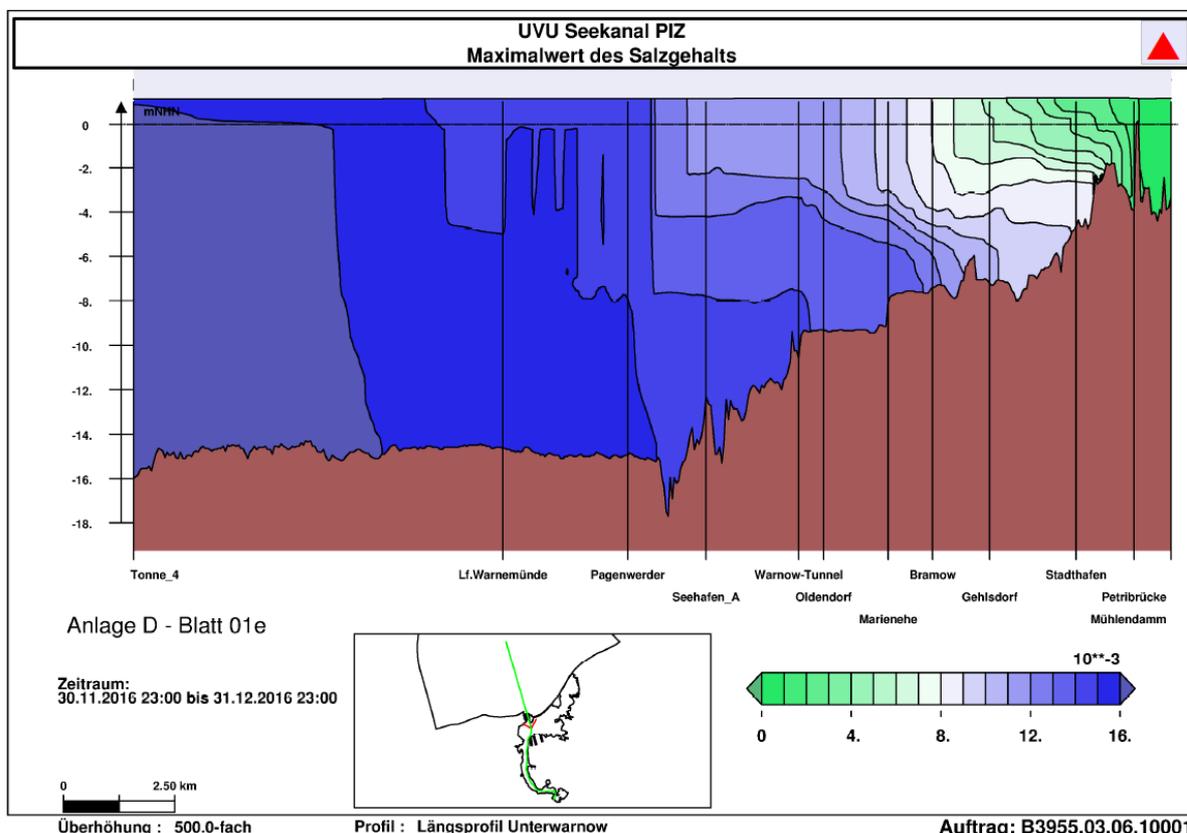


Abbildung 10: Maximalwert des Salzgehaltes Anlage C – [4]

Eine durch die Pfeiler verursachte Vermischung wäre gegeben, wenn die z-Komponente der Strömung einen Massentransport zwischen den unterschiedlichen Wasserschichten induzieren würde. Als erste Abschätzung der Verwirbelung in z-Richtung am Brückenpfeiler wird die Fließgeschwindigkeit der Stromlinie betrachtet, die in der Symmetrieachse des Pfeilers anschlägt (vgl. Abbildung 11).

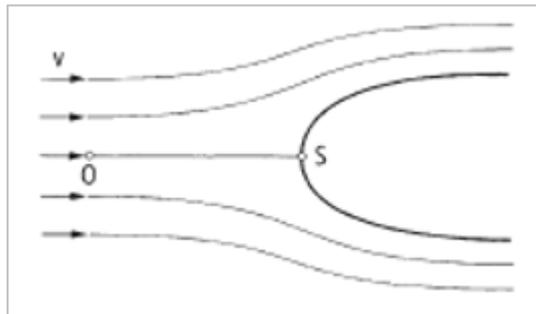


Abbildung 11: Umströmung eines Körpers (aus [6]).

„Am Verzweigungspunkt S weisen die Stromlinien eine vertikale Tangente auf, da die Flüssigkeit nach beiden Seiten abgelenkt wird. Im Punkt S muss daher die Geschwindigkeit gleich null sein, da der Körper nicht durchströmt wird.“ Zitat: [6]. Der Ansatz der Energiegleichung an dieser Stelle ergibt:

$$z_0 + \frac{p_0}{\delta * g} + \frac{v^2}{2 * g} = z_s + \frac{p_s}{\delta * g} + 0$$

Wegen $z_0 = z_s$ wird mit $\Delta p = p_s - p_0$ schließlich

$$\Delta p = \delta * \frac{v^2}{g}$$

Im betrachteten Fall mit einer Anströmgeschwindigkeit von 0,1 m/s ergibt sich

$$\Delta p = 1000 * \frac{0,1^2}{9,81} = 5,0 \text{ Pa} = 0,5 \text{ mm WS}$$

Dieser minimale Aufstau am Brückenpfeiler ist ein Indikator für die Strömung in z-Richtung.

Wissenschaftliche Erkenntnisse können aus [7] abgeleitet werden; darin wurden „Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegeschichteten Zylinderströmung“ an der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock umfangreich erforscht:

Für runde Gründungspfeiler für offshore Windkraftanlagen mit Durchmesser 8 m wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, mit dem Zweck, die Vermischung infolge der vorhandenen offshore Strömung um den Pfeiler zu quantifizieren.

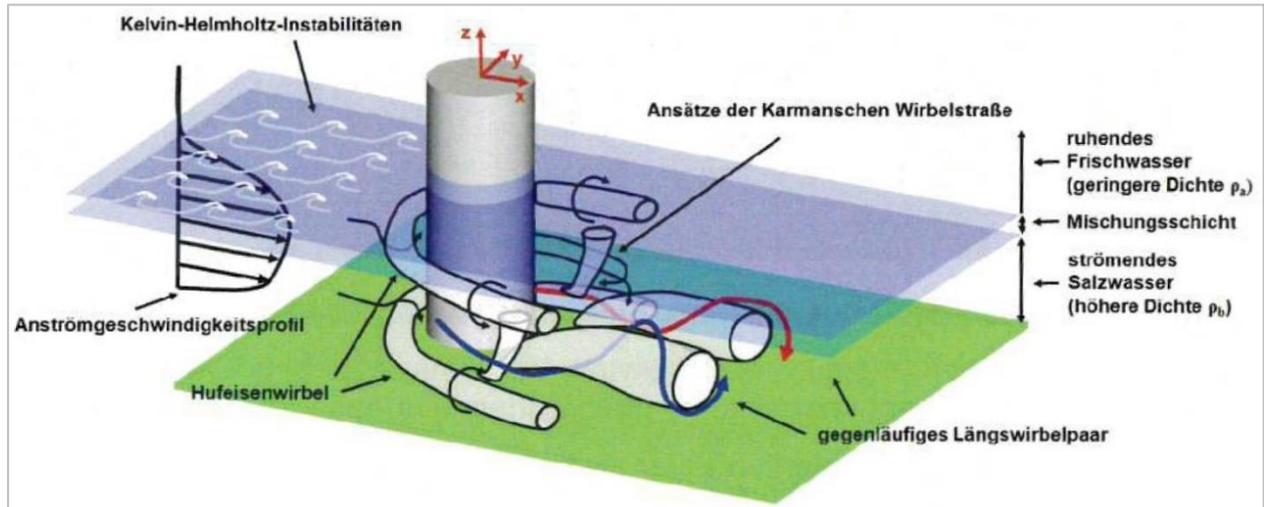


Abbildung 12: Prinzipskizze der zu erwartenden Strömungen (aus [7]).

Die 8 m großen Gründungselemente sind um den Faktor 4 größer als die Brückenpfeiler der an der Unteren Warnow geplanten Maßnahme, die angesetzte Geschwindigkeit von 0,5 m/s ist um einen Faktor 5 größer als die angenommene tiefengemittelte Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet der Unteren Warnow. Hinzu kommt, dass die Laboruntersuchungen mit nur zwei unterschiedlichen Schichten konzipiert waren: obere Schicht stehend mit Süßwasser auf $\frac{3}{4}$ der Höhe und untere Schicht aus Salzwasser mit einer Geschwindigkeit beschickt. Die aufgelisteten Unterschiede zwischen den Untersuchungen von Menz [7] und die betrachtete Maßnahme an der Unteren Warnow zeigen, dass die Laboruntersuchungen ein „worst-case“ Szenario darstellen.

Die Schlussfolgerungen der Forschungsarbeit von Menzel [7] werden nachfolgend wiedergegeben:

1. Eine Entmischung der zwei Schichten konnte infolge der sehr geringen Diffusionsgeschwindigkeit nach 24 Stunden Laborversuch nicht festgestellt werden.
2. Die Annahme isothermer Schichtung im Labor bestimmt tendenziell zu große Mischungseffekte.
3. Die Untersuchung zeigen ein dominantes, gegenläufiges Wirbelpaar im nahen Zylinder-nachlauf, welches aber unter diesen Versuchsbedingungen keinen großvolumigen Austausch zwischen Frisch- und Salzwasser bewirkt, da die Strömungsvorgänge innerhalb der Salzwasserschicht ablaufen.

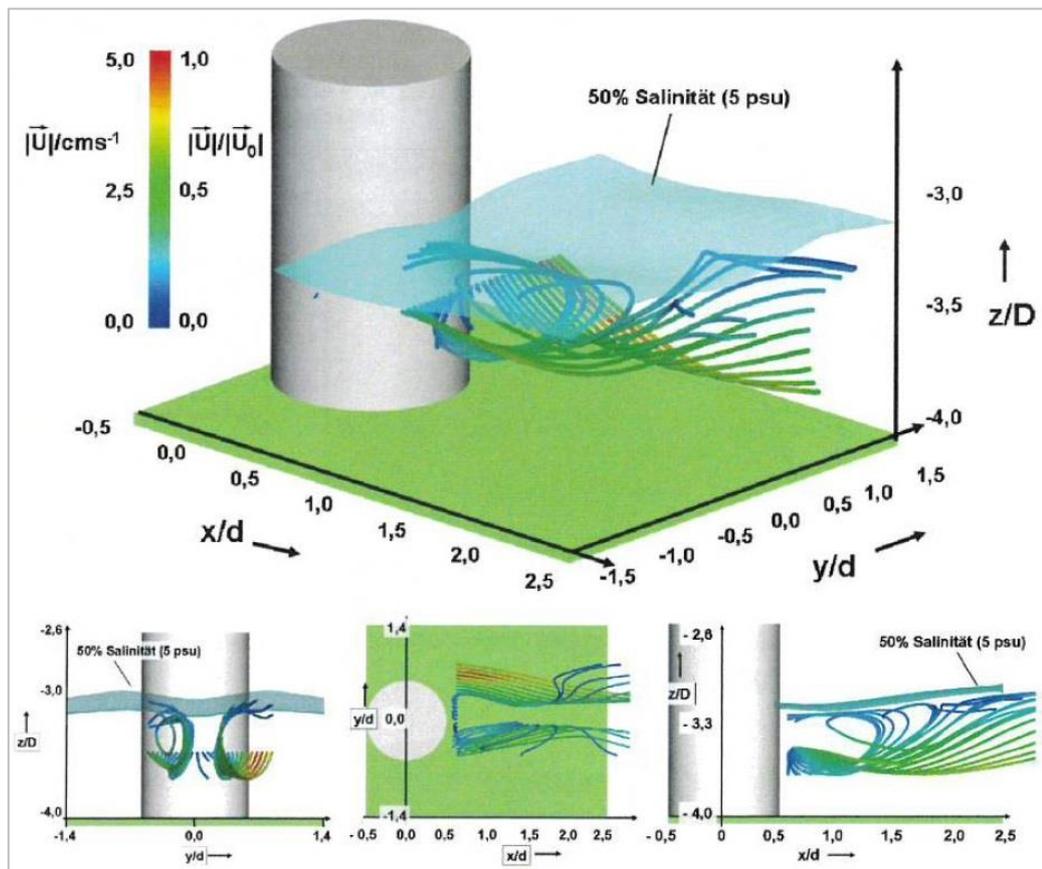


Abbildung 13: Dreidimensionale Strömungsstruktur im Zylindernachlauf (aus [7]).

4. Im Fernfeld des Zylinders ($x/d \geq 20$; d = Durchmesser des Zylinders) ist kein Einfluss der Störung auf die vertikale Position der Mischungsschicht nachweisbar.
5. Die vertikale Ausdehnung der Mischungsschicht im Falle mit und ohne Zylinder über die Lauflänge bleibt nahezu konstant. Die absolut betrachtete geringe vertikale Ausdehnung stellt sich im Größenbereich von 4 mm ein.

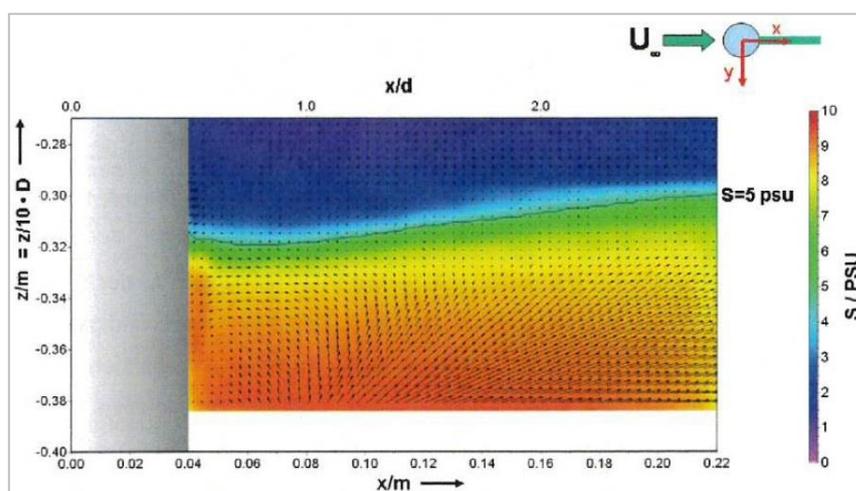


Abbildung 14: Zeitlich gemittelttes Geschwindigkeitsvektorfeld hinter dem Zylinder sowie die Verteilung der Salinität bei $y/d=0$ hinter dem Zylinder (aus [7]).

6. Die ermittelte Mischungsgröße besagt, dass der Salzwasser-Volumenstrom, auf den Zylinderquerschnitt bezogen, um maximal 1,3% Frischwasser angereichert wird.

Menzel [7] leitet aus seiner Forschungsarbeit folgendes ab: „Demnach kann die zusätzlich durch ein einzelnes zylindrisches Fundament einer Offshore-Windenergieanlage hervorgerufene Mischung festgestellt und im Vergleich zur natürlichen auftretenden Mischung als gering quantifiziert werden“.

Die zuvor aufgeführten Abweichungen in den Randbedingungen der geplanten Brückenpfeiler gegenüber denen der Laboruntersuchungen (in erster Linie die Fließgeschwindigkeit sowie die Abmessungen des Pfeilers) legen eine noch niedrigere Einstufung der Auswirkungen infolge der Störung nahe.

5.4 Plausibilisierung durch idealisiertes 3d-HN Modell

Zur Plausibilisierung der im vorigen Abschnitt abgeleiteten Erkenntnisse aus Menz [7] wurde von INROS LACKNER ein stark vereinfachtes 3d-Schnittmodell um einen Pfeiler aufgestellt. Die Abmessungen des Modells weisen eine Breite von 6,0 m, eine Höhe von 1,0 m und eine Länge von 14,0 m auf. Die angesetzten Kantenlängen der Zellen belaufen sich auf ca. 21 cm. In der z-Richtung wurden eine Diskretisierung von 10 Schichten gewählt. Die verwendete Berechnungssoftware heißt Telemac-3d und ist in Form einer open source verwendbar, welche seit über 10 Jahren auch an deutschen Hochschulen für Forschungsarbeiten eingesetzt wird ([TELEMAC-3D - 3D Hydrodynamics \(opentelemac.org\)](http://opentelemac.org)).

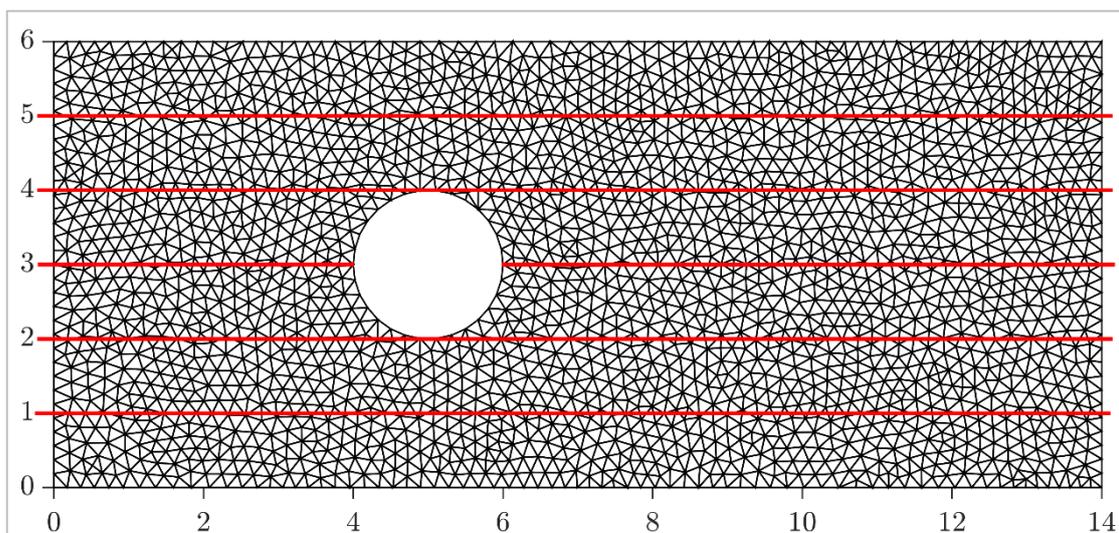


Abbildung 15: Darstellung des Berechnungsgitters mit den wesentlichen geometrischen Größen

Als wesentliche Randbedingung wurde ein konstanter Zufluss im Oberwasser von $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ angesetzt der auf der vollständigen Zuströmfläche des Modells eine konstante Zuflussgeschwindigkeit in Höhe der mittleren Fließgeschwindigkeit aus Abbildung 8 von $0,1 \text{ m/s}$ widerspiegelt. Die Unterwasserrandbedingung wurde als „Auslauf“ mit einer konstanten Fließtiefe von $1,0 \text{ m}$ definiert. Die seitlichen und die Unterkante des Modells wurden als glatte Oberflächen definiert, um der Bezeichnung eines Schnittmodelles gerecht zu werden. Der Brückenpfeiler wurde mit glatter Oberfläche (k_s -Wert= $0,1 \text{ mm}$) definiert.

Die Berechnung wurde mit dem $k-\varepsilon$ Turbulenzmodell durchgeführt.

Als Ergebnis zeigt sich wie erwartet, dass die Umströmung der runden Pfeiler im Wesentlichen in der x-y- Ebene stattfindet. In z-Richtung erfolgt am Pfeilerrand eine minimale, nach oben ge-

richtete Strömung von ca. 2 mm/s verteilt auf voller Höhe des Modelles. Hinter dem Pfeiler entsteht eine nach unten gerichtete Strömung die geometrisch etwas kleinräumiger, aber dafür intensiver (7 mm/s) ausfällt (vgl. Abbildung 16).

Eine Betrachtung der x-z Ebene in Pfeilerachse zeigt Werte vor dem Pfeiler nahezu bei null (0,2 mm/s) und hinter dem Pfeiler bei ca. 13 mm/s. Der Vermischungsbereich hinter dem Pfeiler ist konzentrierter und kleinräumiger als am Pfeilerrand.

Die Strömungskomponente in der z-Richtung klingt bereits nach wenigen Metern ab; der Abstand ist in erster Linie vergleichbar mit dem Pfeilerdurchmesser.

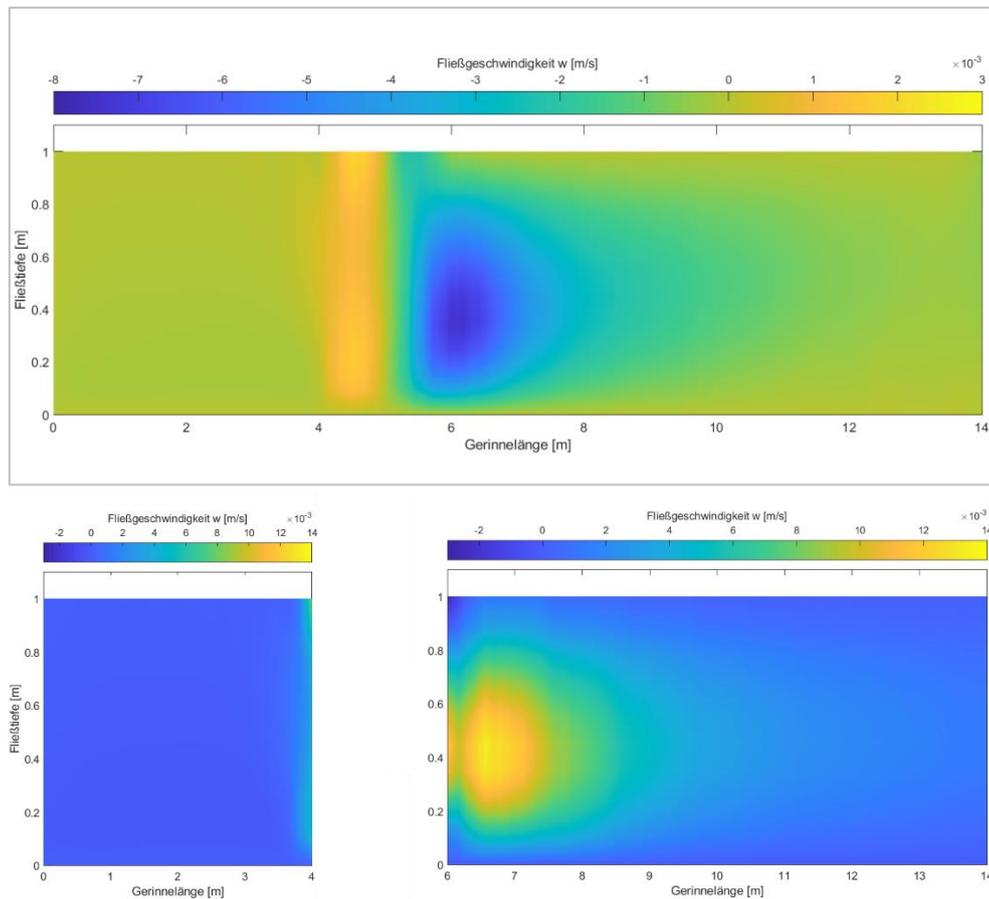


Abbildung 16: Geschwindigkeitsverteilung der z-Komponente entlang des Pfeilerrandes $y=2,0$ m (oben) und in Pfeilermittle (unten). Achtung: unterschiedliche Farbskala!

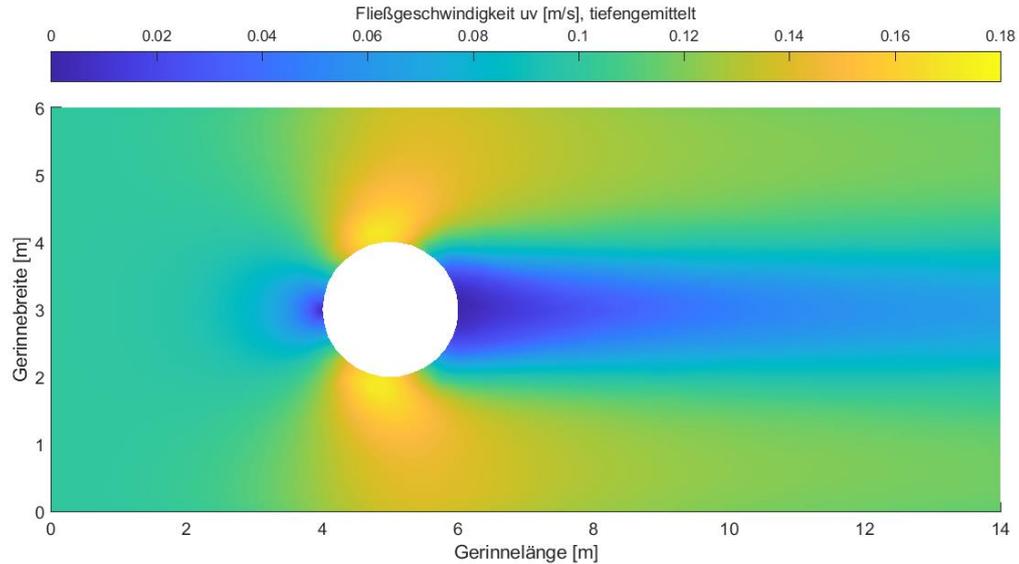


Abbildung 17: Tiefengemittelte Geschwindigkeitsverteilung der x-y-Komponenten.

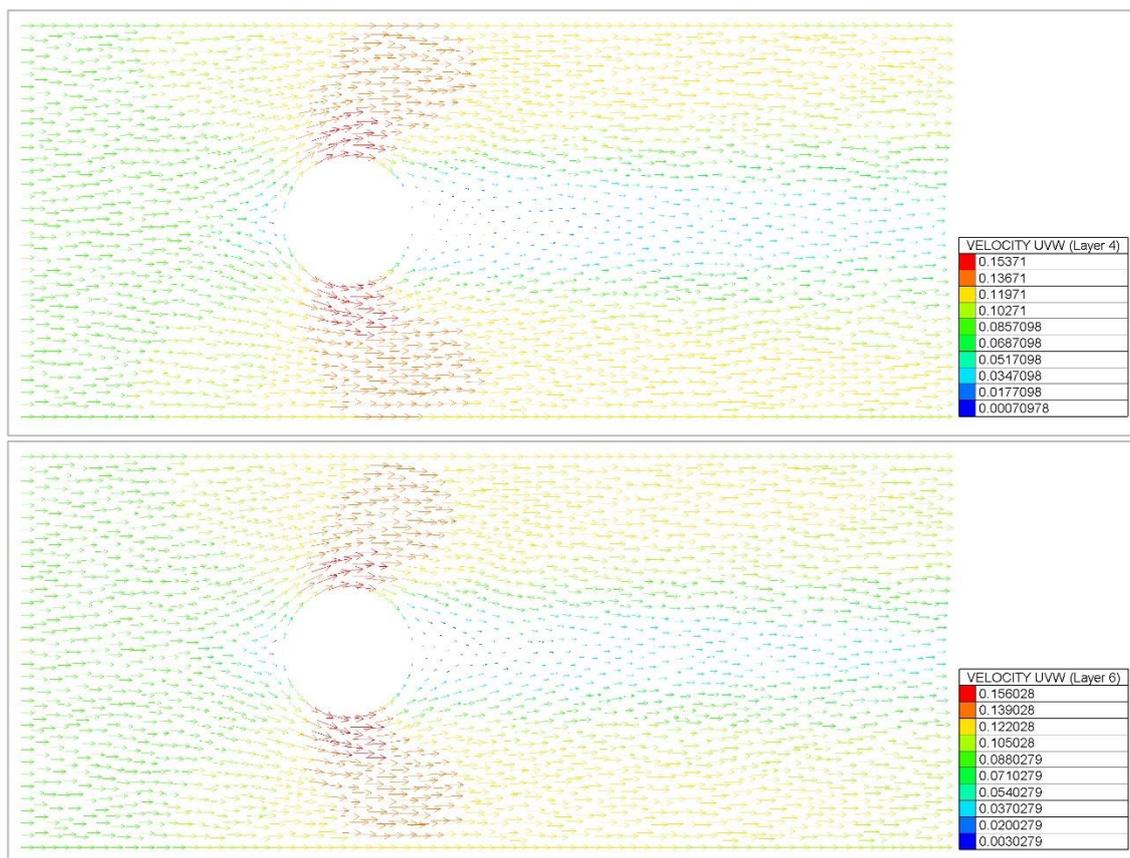


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] in der x-y Ebene für $z=0,33$ m (oben) und $0,55$ m (unten).

Als zweite Erkenntnis kann anhand des Geschwindigkeitsfeldes in den x-y Ebene (vgl. Abbildung 18) gezeigt werden, dass der Pfeiler als Abschottungskörper wirkt, hinter dem sich ein strömungsberuhigter Bereich ausbildet, der sich über mehrere Meter erstreckt. Die Strömungsberuhigte Zone erstreckt sich über nahezu alle Ebenen. Es ist kein gegenläufiges Längswirbel-paar erkennbar, wie in Abbildung 12 dargestellt.

Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die in diesem Abschnitt dargestellten Erkenntnissen auf einem stark vereinfachten Modell beruhen. Die Ergebnisse dienen nur zur Plausibilisierung der Literaturrecherche sowie der Einschätzung der Strömung.

5.5 Vermischung bei Binnenhochwasser

Die Wirkung der Brücke auf die Schichtung der Unterwarnow ist wichtig für die Zeiten, in denen eine Phosphor-Freisetzung stattfindet. Diese Freisetzung erfolgt hauptsächlich in den warmen Sommermonaten. Typischerweise treten Binnenhochwasser an der Warnow sehr selten in dieser Zeit auf, sodass ein Zusammentreffen der zwei Ereignisse als unwahrscheinlich einzustufen ist (wie von StALU MM-44 am 25.03.2021² kommuniziert).

Die Feststellungen unter Abschnitt 5.3 in Verbindung mit den Erkenntnissen von Menzel [7] können für die Bewertung auch für den Hochwasserfall herangezogen werden, da im Mündungsbereich der Warnow die Geschwindigkeiten bei Hochwasser geringfügig höher als die ausgewiesenen tiefengemittelten Geschwindigkeiten der BAW ausfallen werden.

Die Aussage aus Menzel [7] lautet nämlich: „Demnach kann die zusätzlich durch ein einzelnes zylindrisches Fundament einer Offshore-Windenergieanlage hervorgerufene Mischung festgestellt und im Vergleich zur natürlichen auftretenden Mischung als gering quantifiziert werden“.

²Zitat aus Stellungnahme: „Ein HQ100 kann es aus fachlicher Sicht für die Unterwarnow nicht geben. Im Küstengewässer können keine Durchflüsse ermittelt und damit auch keine Hochwasserstatistik durchgeführt werden. Daher können keine entsprechenden Daten zur Verfügung gestellt werden. In PhosWaM ist in einem Teilprojekt des IOW versucht worden für die UW einen Durchfluß zu ermitteln. Die Ergebnisse können dort abgefragt werden. Ob sie in diesem Fall hilfreich sind, kann ich nicht sagen. Die Wirkung der Brücke auf die Schichtung der UW ist wichtig für die Zeiten in denen eine P-Freisetzung erfolgt. Auch dies eine Ergebnis im PhosWaM Projekt. Da spielt das HQ100, selbst wenn er vorhanden wäre, keine Rolle, da die Freisetzung im Sommer erfolgt. Die Frage ist, ob die Brücke als Störfaktor dazu in der Lage ist phosphorangereichertes Tiefenwasser an die Oberfläche zu bringen. Für mich ist die Fläche/Form der Brückenpfeiler und die Verwirbelung/Vermischung an ihnen maßgebend. ...“

6 Zusammenfassung und Fazit

Aus den gesichteten Unterlagen geht hervor, dass die Brücke mit den geplanten Brückenpfeilern großräumig keine relevanten Auswirkungen auf das Strömungsverhalten der Warnow hat.

Die Strömungsgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet erreichen nur selten Werte von mehr als 0,1 m/s, so dass hohe Sedimenttransportraten kaum zu erwarten sind. Im Binnenhochwasserfall liegen keine Fließgeschwindigkeiten vor. Infolge des sehr breiten Gewässerquerschnitts im Untersuchungsbereich und infolge der minimalen Einengung des Fließquerschnittes (kleiner 8% vgl. Abschnitt 3) kann davon ausgegangen werden, dass die Geschwindigkeiten bei Hochwasser geringfügig höher ausfallen als die angenommene tiefengemittelte Geschwindigkeit von 0,1 m/s. Für diesen Fall sind die im Abschnitt 5.3 dargestellten Schlussfolgerungen übertragbar.

Eine hydraulische 2d-Modellierung wäre für die großräumige Strömungsbetrachtung gut geeignet, ist aber bei den geringen ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten nicht erforderlich.

Kleinräumig können die Pfeiler die Strömung beeinflussen und Sedimentumlagerungen sowie gegenläufige Wirbelpaare hervorrufen. Die Vorgänge im Wasserkörper mit den daraus resultierenden Sedimentumlagerungen sowie Wasserschichtenvermischungen sind in Abbildung 13 dargestellt, diese werden jedoch gering ausfallen (beispielhaft ca. 1 m bei einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s – vgl. Abbildung 13).

Abgemildert werden evtl. Sedimentumlagerungen durch die täglich mehrmals wechselnde Strömungsrichtung. Die Sedimentumlagerungen können als gering eingestuft werden. Das tatsächliche Ausmaß wäre erfahrungsgemäß auch mit einem 3d-Modell oder einem physikalischen Modell schwer nachweisbar infolge der niedrigen Fließgeschwindigkeiten.

Die eventuellen kleinräumigen Sedimentumlagerungen an den Pfeilern können auch an Stellen mit niedrigen Wassertiefen den Sportschiffverkehr nicht beeinflussen. Eine Ausrichtung von asymmetrischen Pfeilern oder von Pfeilerreihen in Hauptströmungsrichtung ist dennoch empfehlenswert, um die Verwirbelungseffekte so gering wie möglich zu halten.

Die Durchmischung der unterschiedlichen Wasserschichten fällt infolge der ermittelten Geschwindigkeiten in z-Richtung (maximal 13 mm/s) sehr gering aus (vgl. Abschnitt 5.3 und 5.4). Der infolge der runden Pfeiler induzierte Vermischungsprozess zwischen den Wasserschichten ist in einer Entfernung vom Pfeiler von ca. 2 m nahezu komplett abgeklungen. Eine genaue Quantifizierung durch ein 3-D-Modell wird nicht als zielführend eingeschätzt, da die sehr geringe Strömung in z-Richtung kaum vom Modell erfassbar ist. Die induzierten Fehler, durch die per Definition vereinfacht anzusetzenden Randbedingungen wie z.B. das Geschwindigkeitsprofil im OW des Pfeilers, würden die Quantifizierung der Durchmischung verfälschen.