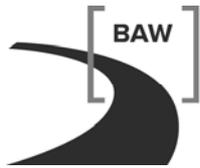


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Machbarkeitsstudie zum
Ausbau des Seekanals
Rostock auf eine Tiefe von
16,60 m unter NHN
Hydrodynamik**

A 395 503 10184



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Machbarkeitsstudie zum Ausbau des Seekanals
Rostock auf eine Tiefe von 16,60 m unter NHN
Hydrodynamik**

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund
Wamper Weg 5
18439 Stralsund

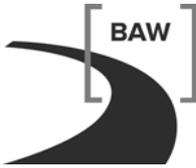
Auftrag vom: 03.02.2010, Az. 231.2_Wa2/1-4 II

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A 395 503 10184

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dr. rer. nat. G. Seiß

Hamburg, 31.01.2011

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Zusammenfassung

Der Seekanal dient als Zufahrt zu den Rostocker Häfen, insbesondere des Ölhafens. Bereits heute wird die Wasserstraße gelegentlich von Schiffen genutzt, deren Abmessungen die aus Bemessungsrichtlinien ableitbaren Werte übersteigen.

Mit dem Schreiben vom 14.04.2009 beantragte das Land Mecklenburg-Vorpommern beim Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) daher den Ausbau des Seekanals Rostock auf eine Tiefe von 16,60 m unter NHN.

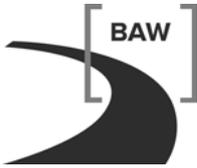
Das mit der Planung befasste WSA Stralsund beauftragte die Bundesanstalt für Wasserbau zur Abschätzung der Auswirkungen der geplanten Maßnahme auf die Hydrologie und Morphologie im Rahmen einer Umweltrisikoeinschätzung.

Hierzu wurden hydronumerische Modellsimulationen für den planerischen Ist-Zustand PIZ und den Vollausbau AZ1660 durchgeführt. Zu Bewertung wurden Analysemethoden der BAW sowie Fachkenntnisse im Bereich des Wasserbaus und der Ozeanografie zur Beurteilung herangezogen.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich auf die Unterwarnow bis zum Mühlendamm in Rostock, den Breitling und den Außenbereich des Seekanals.

Aus der Untersuchung wurden folgende Ergebnisse abgeleitet:

- Auf den Wasserstandsverlauf im Untersuchungsgebiet ist keine nachweisbare Auswirkung zu erwarten.
- Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten werden im Innenbereich des Seekanals um weniger als 3 cm/s abnehmen.
- Im Breitling ist ein dauerhafter Anstieg der Salzgehalte um bis zu 0,3 PSU zu erwarten. Qualitativ ist auch für Temperatur und andere Inhaltsstoffe mit einer Angleichung an die Verhältnisse in der offenen Ostsee in ähnlicher Größenordnung, bezogen auf die heutigen Unterschiede, zu rechnen.
- Als eine erste Abschätzung sind ausbaubedingte schiffserzeugte **langperiodische** Belastungszunahmen (Wellen und Strömung) von etwa +15 % am Westufer und von rund +12 % am Ostufer des Seekanals zu erwarten, die sich auch entsprechend den Wellenumformungsprozessen in den anliegenden Hafenbecken, Seitenarmen sowie an natürlichen und künstlichen Uferstreifen ausbreiten werden. Die prognostizierten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen liegen nicht auf der sicheren Seite, sondern sind als zu erwartende Größenordnung zu bewerten, weil bei der Prognose der schiffserzeugten Belastungen auf Basis der Teilquerschnittsverhältnisse zunächst ein linearer Zusammenhang angenommen wird, tatsächlich aber nichtlineare Wechselwirkungen bestehen.
- Die veränderte Unterwassertopographie wirkt sich auch auf den Eintrag von Seegangsenergie in den Warnemünder Hafenbereich aus. Es ist mit einer tendenziellen Erhöhung der Wellenunruhe z.B. im Yachthafen Mittelmole und im Alten Strom zu rechnen

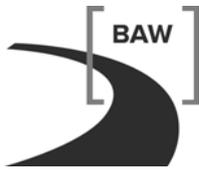


Zur Durchführung einer Beweissicherung wird empfohlen, an geeigneten Stellen für jeweils ein Jahr vor und nach dem Ausbau Dauermessstationen für Salzgehalt und Temperatur einzurichten und die aktuelle Bathymetrie vor und nach Ausbau zu erfassen.

Neben Beweissicherungsmessungen zur schiffserzeugten Belastung sowie zur Schiffsdynamik vor und nach dem Ausbau sind mit ausreichendem Vorlauf Untersuchungen zur Prognose der ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungsänderungen nach Stand von Technik und Wissenschaft zu empfehlen.

Es wird zudem empfohlen, dass der Einfluss kritischer Seegangsverhältnisse auf die Wellenruhe im Mündungsbereich für das Planungsverfahren durch ein Seegangmodell untersucht wird, welches an geeigneten Naturmessungen zu validieren ist.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Verwendete Unterlagen und Daten	2
3	Revierbeschreibung und physikalische Prozesse	2
3.1	Physikalische Prozesse	3
4	Vorhabensbeschreibung	4
5	Untersuchungsmethoden	6
5.1	Grundprinzip	6
5.2	Das mathematische Verfahren UnTRIM-3D	7
5.3	Beschreibung des Modells	8
6	Simulationszeitraum	11
7	Validierung des HN-Modells	11
7.1	Vergleich der Wasserstände an ausgesuchten Pegeln	11
8	Ausbaubedingte Änderungen	14
8.1	Wirkprinzipien	14
8.2	Wasserstände und deren ausbaubedingte Änderung	14
8.3	Strömungen und deren ausbaubedingte Änderung	15
8.4	Salzgehalte und deren ausbaubedingte Änderung	15
8.4.1	Maximaler Salzgehalt	15
8.4.2	Minimaler Salzgehalt	16
8.4.3	Mittlerer Salzgehalt	16
8.4.4	Varianz des Salzgehaltes	16
9	Weitere Betrachtungen zu möglichen Auswirkungen des Ausbaus	17
9.1	Temperaturen und andere Tracer	17
9.2	Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugte Belastungen	17
9.3	Seegang	19
9.4	Morphodynamik und Unterhaltung	20
10	Zusammenfassende Bewertung	20
10.1	Hinweise zur weiteren Planung	20



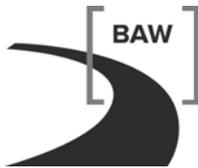
Anlage A – Abbildungen Simulationsergebnisse

24

Glossar 37

Bildverzeichnis

Bild 1: Übersichtsplan des geplanten Ausbaus des Seekanals. In Rot ist die Trassenführung und die Klappstelle 552a skizziert.	5
Bild 2: Fahrrinnenquerschnitt für den planerischen Ist-Zustand(schwarz) und den Ausbauzustand AZ1660 als Skizze.	6
Bild 3: Modellbathymetrie des verwendeten Ostseemodells mit Pegelorten.	8
Bild 4: Bathymetrie und Gitternetz (planerischer Ist-Zustand) im Untersuchungsgebiet von Warnemünde bis zu den Hafenanlagen.	9
Bild 5: Verlauf des Wasserstandes im Modell und in der Natur für den Simulationszeitraum am Pegel Stockholm.	12
Bild 6: Verlauf des Wasserstandes im Modell und in der Natur für den Simulationszeitraum am Pegel Sassnitz.	13
Bild 7: Verlauf des Wasserstandes im Modell und in der Natur für den Simulationszeitraum am Pegel Warnemünde.	13
Bild 8: Wasserstandsverlauf der Modellsimulationen PIZ und A1660 (oberes Diagramm) und die Differenzkurve (A1660 – PIZ), Auswertepunkt Warnowwerft.	24
Bild 9: Wasserstandsverlauf der Modellsimulationen PIZ und A1660 (oberes Diagramm) und die Differenzkurve (A1660 – PIZ), Auswertepunkt Rostock.	25
Bild 10: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.	26
Bild 11: Ausbaubedingte Änderung der maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.	27
Bild 12: Salzgehaltsentwicklung im Verlauf der Modellsimulation an dem Auswertepunkt Ölhafen.	28
Bild 13: maximaler Salzgehalt im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.	29
Bild 14: Ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.	30
Bild 15: minimaler Salzgehalt im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.	31
Bild 16: Ausbaubedingte Änderung des minimalen Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.	32
Bild 17: mittlerer Salzgehalt im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.	33
Bild 18: Ausbaubedingte Änderung des mittleren Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.	34
Bild 19: Varianz des Salzgehaltes im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.	35
Bild 20: Ausbaubedingte Änderung der Varianz des Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.	36



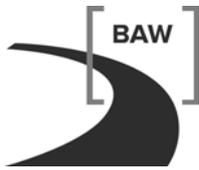
Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Kleinere Zuflüsse der Ostsee, deren mittlerer Zufluss berücksichtigt wird.	10
Tabelle 2: Abmessungen größerer Hafenbecken mit abgeschätzter Eigenperiode.	19

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
A1660	Ausbau auf Wassertiefe 16,60 m NN
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BSH	Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrologie
BSHcmod	Strömungsmodell des BSH
DWD	Deutscher Wetterdienst
DGM	Digitales Geländemodell
DHI	früher Danish Hydraulic Institute, heutige DHI-Gruppe
GLOSS	Global Sea Level Observing System
IOW	Institut für Ostseeforschung Warnemünde
HN-Modell	hydrodynamisch-numerisches Modell
NN	Normalnull, $NN = HN - 0,14 \text{ m}$
NHN	Normal-Höhennull $NHN = HN - 0,15 \text{ m}$
SMHI	Swedish Hydrological and Meteorological Institute
URE	Umweltrisikoeinschätzung, ein vorgeschriebener Planungsschritt in Bauvorhaben des Verkehrsministeriums
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der Seekanal Rostock dient als Zufahrt zum Ölhafen Rostock. Bereits heute laufen Tank-schiffe den Seekanal an, die die Abmessungen des vorgesehenen Bemessungsschiffes in der Länge, Breite und Maximaltiefgang überschreiten. Daher wird eine Anpassung der Fahr-rinnenabmessungen geprüft. Zugrunde gelegt wird ein Bemessungsschiff mit den Abmes-sungen $L \times B \times T = 275 \text{ m} \times 48 \text{ m} \times 15 \text{ m}$.

Mit dem Schreiben vom 14.04.2009 beantragte das Land Mecklenburg-Vorpommern beim Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) daher den Ausbau des Seekanals Rostock.

Das BMVBS erteilte daraufhin am 03.07.2009 einen Planungsauftrag an die WSD Nord. Diese beauftragte das WSA Stralsund zur Durchführung einer Machbarkeitsstudie.

Träger des Gesamtvorhabens sind die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund.

Für die Machbarkeitsstudie ist im Rahmen der Umweltrisikoeinschätzung von der Bundesan-stalt für Wasserbau (BAW) eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer Einschät-zung möglicher ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen. Die wasserbauliche Systemanalyse der abiotischen Systemparameter umfasst die Ermittlung der maßgebenden Kennwerte der Hydrodynamik und des Salztransports auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung und wasserbaulicher Kenntnisse des Reviers.

Im Einzelnen sind für die Umweltrisikoeinschätzung Aussagen zu folgenden Themen erfor-derlich:

- Wasserstandsänderungen
- Strömungsänderungen
- Salinitätsänderungen
- Änderungen bei schiffserzeugten Belastungen durch größere/mehr Schiffe
- Morphologische Änderungen
- Einschätzung der zukünftigen Unterhaltung

2 Verwendete Unterlagen und Daten

Für die vorliegende Untersuchung wurden die folgenden Unterlagen und Datengrundlagen verwendet:

- Peildaten des BSH für die Jahre 1984 bis 2008 (Quelle Küstenpeildatenbank KUEDAT).
- Raster-DGM der Ostsee in 667m Auflösung (Quelle: DHI, Agern Allé 5, DK-2970 Horsholm).
- Raster-DGM der Ostsee in 1 Bogenminute Auflösung (Quelle: Institut für Ostseeforschung, Warnemünde, [7]).
- Aktuelle Peildaten des Seekanals, des Ölhafens und der Klappstelle 552a (Quelle WSA Stralsund).
- stündliche Winddaten aus dem Wettervorhersagemodell LM des DWD ([6]) für den Zeitraum 01.11.2005 bis 01.01.2006 (Quelle BSH).
- Abflussvorhersagen aus dem hydrologischen Vorhersagemodell des SMHI [8] für den Zeitraum 01.11.2005 bis 01.01.2006 (Quelle SMHI, bereitgestellt durch BSH).
- Pegeldata der deutschen Ostseeküste 2005 (Quelle: WISKI-Datenbank der WSV).
- Pegeldata Smögen (Schweden) und Stockholm (Schweden) für das Jahr 2005 (Quelle: GLOSS database [9]).
- Vorläufige Vorhabensbeschreibung für die URE (Quelle WSA Stralsund).
- Seekarten INT 1354.

Fachbegriffe werden im anliegenden Glossar erläutert.

Die verwendeten Peildaten sind zum größten Teil noch auf das ältere Höhennull NN bezogen. Aufgrund des geringen Unterschiedes zwischen NN und NHN von einem Zentimeter wird in dieser Studie auf eine Umrechnung verzichtet. Gegenüber den Peilungengenauigkeiten und dem im Verhältnis großen Vertiefungsmaß spielt dieser Umstand hier keine Rolle für die abgeleitete Modellbathymetrie und damit die Aussagekraft der HN-Modellierung.

3 Revierbeschreibung und physikalische Prozesse

Die Unterwarnow ist das Ästuar des Flusses Warnow und erstreckt sich vom Mühlendammwehr in Rostock bis zu den Schutzmolen in Warnemünde, wo sie in die Mecklenburger Bucht mündet. Hydrologisch ist sie eine Bucht der Ostsee. Im nördlichen Bereich der Unterwarnow ist der Salzgehalt ähnlich hoch wie in der offenen Ostsee im Bereich der Darßer Schwellen.

Am südlichen Ufer befinden sich der Rostocker Stadthafen und die Altstadt von Rostock, am nördlichen Ufer der Rostocker Stadtteil Gehlsdorf. Im weiteren Verlauf wendet sich die Un-

terwarnow nach Norden. Nördlich von Oldendorf beginnt auf dem östlichen Ufer das Gebiet des Rostocker Seehafens. Bei Warnemünde verbreitert sich der Fluss im Breitling auf bis zu drei Kilometer. Vom Breitling gehen die fünf Hafenbecken des Seehafens Rostock ab (Becken A bis C, der Ölhafen und der Chemiehafen). Im nördlichen Teil des Breitlings liegt der Marinehafen Warnemünde.

Der Seekanal bei Warnemünde stellt die Verbindung der Unterwarnow in die Ostsee dar. Der 1903 eröffnete und mehrfach erweiterte Seekanal ist die Zufahrt zu den genannten Rostocker Häfen. Seine heutige Solltiefe beträgt 14,50 m NN

3.1 Physikalische Prozesse

Die Unterwarnow ist geprägt durch die Wasserstandsschwankungen und den Salzgehalt der Ostsee an der Mündung sowie den Oberwasserzufluss der Warnow, dessen langjähriges Mittel bei 12,7 m³/s liegt ([10]). Die Wasserstandsschwankungen der Ostsee werden durch die durchziehenden Wetterlagen maßgeblich bestimmt. Da der Wasserstand innerhalb der Unterwarnow nur kleine Gradienten aufweist, ist der barotrope Anteil der Strömung gering. Daher bildet sich eine Schichtung zwischen dem salzarmen Warnowwasser und dem salzhaltigen Ostseewasser aus, die zu einer baroklinen Zirkulation führt. Der Oberflächenstrom ist seewärts, die Bodenströmung flussaufwärts gerichtet. Starkwindperioden können die Schichtung durch Turbulenz zeitweise abschwächen. Auch die Schiffspassagen tiefgehender Schiffe im Bereich des Seekanals führen zu einem zeitweisen Abbau der Schichtung aufgrund von vertikaler Durchmischung. Kleinräumig können sich im Sommer zwischen den seeschifftiefen Bereichen und den Flachwasserregionen in ruhigen Sommerwetterlagen Temperaturgradienten ausbilden, wobei die Flachwasserbereiche wärmere Temperaturen aufweisen.

Die Warnow und der Breitling stellen ein halbgeschlossenes System dar, das über den Seekanal mit der offenen Ostsee verbunden ist. Ein solches System stellt ein schwingungsfähiges System dar, welches am offenen Rand durch die Wasserstandsschwankungen zu erzwungenen Beckenschwingungen (Seiches) angeregt wird. Liegen die anregenden Frequenzen nahe bei der Eigenfrequenz des Systems, so stellt sich eine Verstärkung des anregenden Signals auf diesen Frequenzen ein (Resonanz). Dem Resonanzverhalten wirken Reibungsverluste durch Bodenreibung und Turbulenz entgegen.

Die Resonanzperioden (Eigenperioden) eines Beckens sind durch die Geometrie des Gewässers vorgegeben. Dabei sind Länge, Breite und Tiefe des Systems die maßgeblichen Größen. Eine einfache Längsschwingung besitzt für ein offenes Becken grob abgeschätzt die Grundperiode

$$T = 4L / \sqrt{gH}$$

Dabei ist g die Schwerebeschleunigung, H die mittlere Wassertiefe und L die Länge des Beckens. Die Dissipation ist abhängig von der Rauigkeit der Gewässersohle. Die Warnow ist ein Gewässer, dessen typische Eigenperiode nach obiger Formel zu 94 Minuten abgeschätzt werden kann. Hierbei wird das System als offenes Becken mit einer mittleren Was-

sertiefe von 10 m und einer Länge von 14000 m betrachtet. Die Grundperiode ist damit deutlich kleiner als die anregenden Perioden im Wasserstandssignal an der Mündung. Daher findet keine Verstärkung des maßgeblich anregenden Signals innerhalb des Gebietes statt.

Die Strömungen ergeben sich aus dem barotropen Anteil, d.h. dem Massentransport, der aufgrund der Wasserstandsgradienten erfolgt, dem vertikalen Impulsaustausch und den baroklinen Transporten aufgrund des durch das Oberwasser der Warnow aufgebauten Dichtegradienten.

Der Salzgehalt in der Unterwarnow und im Breitling wird zum einen von den Variationen des in der Ostsee vorherrschenden Salzgehaltes, zum Anderen von den Variationen im Oberwasserzufluss bestimmt. Eine Besonderheit an der Warnow stellt der Wehrbetrieb dar, der den Oberwassereinfluss antropogen überprägt. Oberwasser und Ostseewasser stehen aufgrund der Variabilität beider Einflüsse in einem dynamischen Gleichgewicht. Die Strömungen in der Warnow sind meist gering, so dass sich ein starker Gradient zwischen dem Ostseewasser und dem Warnow ausbildet. Die Lage des maximalen Salzgradienten wird im Wesentlichen von der zeitabhängigen Oberwassermenge der Warnow bestimmt. Das geringe Wasserspiegelgefälle zwischen Rostock-Mühlendamm und Warnemünde trägt dagegen nur unwesentlich zur Lage des Gradienten bei. Die Stärke des Gradienten variiert mit dem Salzgehalt der Ostsee.

4 Vorhabensbeschreibung

In der vorläufigen Projektbeschreibung für die URE ist die geplante Maßnahme im Detail beschrieben. Nach den aktuellen Planungen ist vorgesehen, die Trassenführung wie in Bild 1 dargestellt zu realisieren. Dabei soll eine Fahrwasserbreite von 120 m im Innenbereich mit einer Solltiefe von 16,60 m NHN und 120-220 m im Außenbereich mit einer Solltiefe von 17,30 m NHN realisiert werden (Bild 2). Die Böschungsneigung wird mit 1:2 angegeben. Das Vertiefungsmaß beträgt somit im Innenbereich 2,1 m, im Außenbereich 2,6 m.

Für den Flächenverbrauch der Ausbaumaßnahme werden von der Planungsbehörde 276 ha angegeben, wobei es sich hier um Flächen handelt, die bereits durch die bestehende Fahrrinne großteils abgedeckt wird. Es wird mit einer anfallenden Baggergut-Menge von 6,4 Mio. m³ gerechnet, für die bereits genehmigte Umlagerungsflächen und Spülfelder von ausreichender Kapazität verfügbar sind.

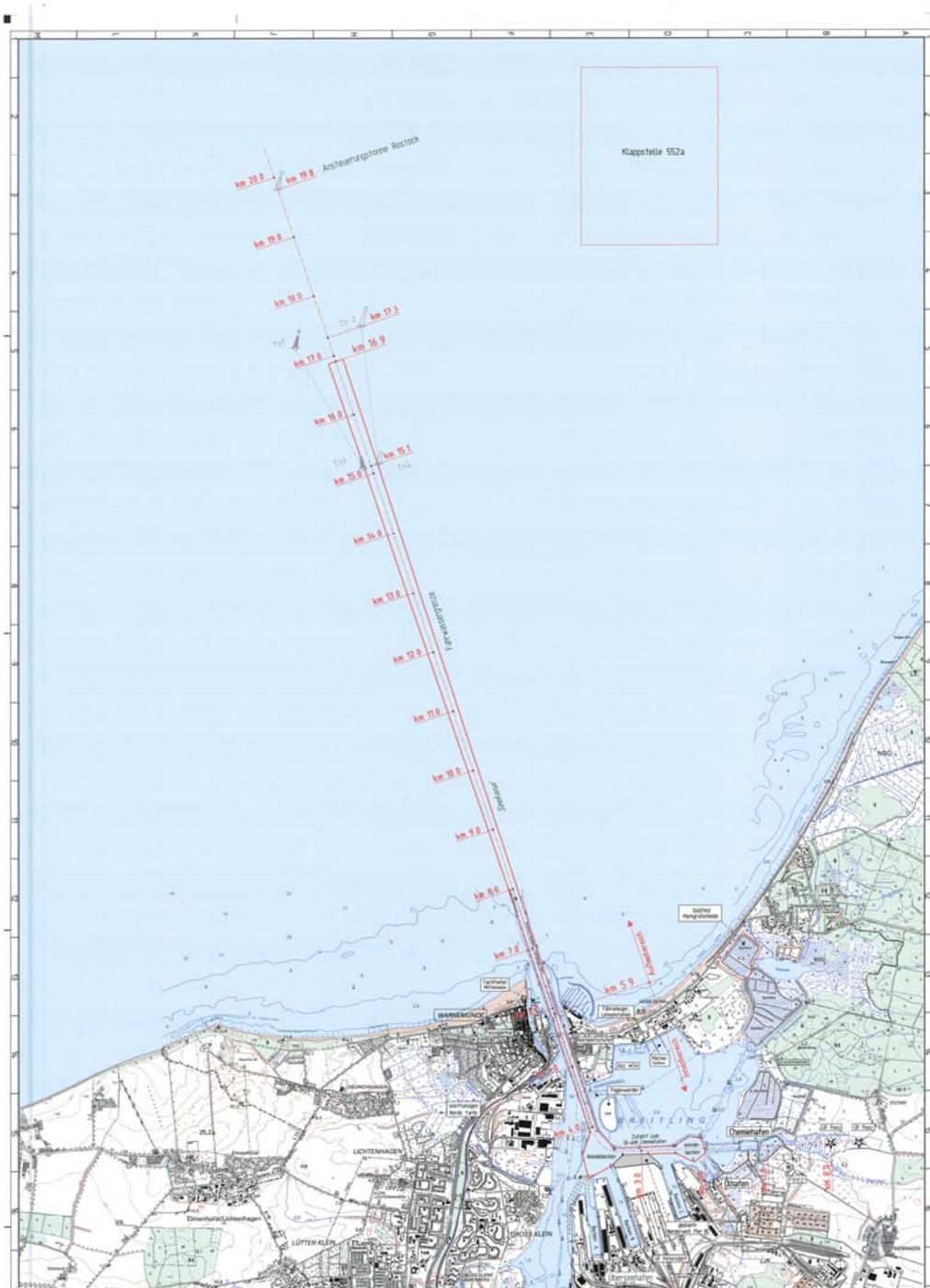


Bild 1: Übersichtsplan des geplanten Ausbaus des Seekanals. In Rot ist die Trassenführung und die Klappstelle 552a skizziert.

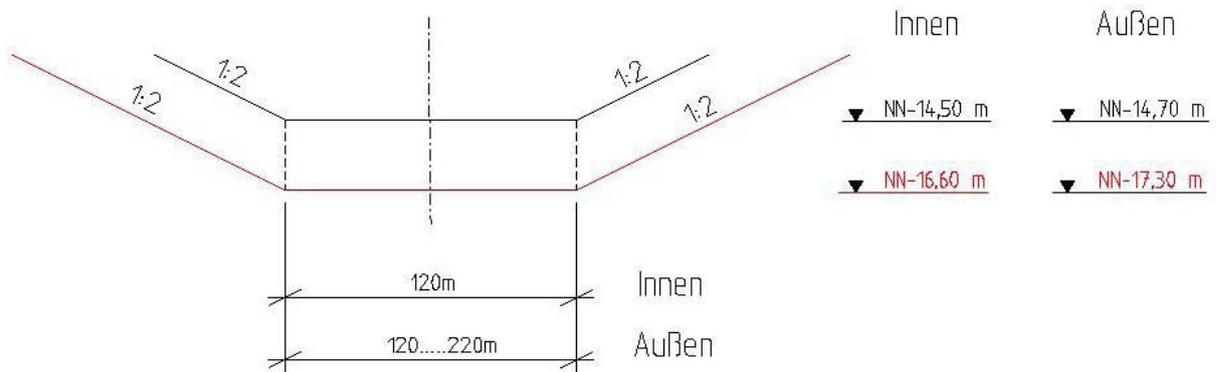


Bild 2: Fahrrinnenquerschnitt für den planerischen Ist-Zustand(schwarz) und den Ausbauzustand AZ1660 als Skizze.

5 Untersuchungsmethoden

5.1 Grundprinzip

In diesem Gutachten werden die Ergebnisse der Untersuchung zur ausbaubedingten Veränderung der

- Scheitelwasserstände für Hoch und Niedrigwasser,
- maximalen Strömungsgeschwindigkeiten und
- maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte

in der Unterwarnow und dem Breitling dargestellt. Untersucht werden der planerische Ist-Zustand (PIZ) sowie der Vollausbau als Ausbauzustand (AZ1660). Der planerische Ist-Zustand stimmt mit dem heutigen Ist-Zustand überein, da derzeit keine weiteren im Untersuchungsgebiet geplanten Maßnahmen genehmigt oder im Bau befindlich sind.

Die Validierung des numerischen Modells wird für den Zeitraum 01.11.2005 bis 30.11.2005 durchgeführt. Eine Beschreibung findet sich in Kapitel 7. Mit dem validierten HN-Modell erfolgt die Untersuchung zur Hydrodynamik und des Salztransports.

Für die Untersuchungen werden im Rahmen der wasserbaulichen Systemanalyse die hydrodynamischen Zustandsgrößen für den planerischen Ist-Zustand und für den Ausbauzustand AZ1660 bei identischen hydrologischen und meteorologischen Situationen mit einem hochauflösenden dreidimensionalen HN-Modell ermittelt.

Die Ergebnisse sind Grundlage für die Analyse der ausbaubedingten Änderungen der oben genannten Größen, die mit Hilfe einer in der BAW entwickelten Kennwertanalyse erfolgt. Die

Vorgabe identischer hydrologischer Situationen für die Berechnung des planerischen Ist-Zustandes und des Ausbauzustandes ermöglicht die eindeutige Zuordnung von Veränderungen der Hydrodynamik und des Salzgehalts auf die zu untersuchende Ausbaumaßnahme. Durch diese Vorgehensweise wird der Einfluss auf die Ergebnisse durch unvermeidliche Fehlerquellen in den Eingangsdaten (Peildaten, Meteorologie, Randwerte) minimiert.

5.2 Das mathematische Verfahren UnTRIM-3D

Die durch den Ausbau verursachten ausbaubedingten Änderungen werden mit Hilfe eines numerischen Modell der Ostsee untersucht, in dem die Auflösung des Untersuchungsgebietes Warnow und Breitling detailliert aufgelöst wird. Hierzu wird das hydrodynamische Modellverfahren *UnTRIM* verwendet. Dieses Verfahren ist zur Modellierung von Gewässern bis zur Größenordnung von Rand- und Nebenmeeren geeignet. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im *Mathematical Model UnTRIM – Validation Document* (BAW, 2004) [1]. *UnTRIM* ist ein Finite-Differenzen-Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf Grundlage eines unstrukturierten orthogonalen Gitters löst. Grundlage des Verfahrens *UnTRIM* sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für die Wassermasse und den Impuls der Strömung darstellen. Diese Erhaltungssätze sind:

- Kontinuitätsgleichung inkompressibler Fluide,
- Reynolds gemittelte Navier-Stokes-Gleichung für den Impuls und
- Advektions-Diffusions-Gleichung (Transportgleichung) für Salz, Temperatur und suspendierte Sedimente.

Zur Modellierung der hydrodynamischen und baroklinen Verhältnisse der Wismarbuch wird die dreidimensionale Version von *UnTRIM* unter Berücksichtigung des Salztransportes verwendet.

Mit diesem Berechnungsverfahren können flächendeckend für jeden aktiven Gitterpunkt und Zeitschritt u. a. folgende physikalische Größen berechnet und ausgegeben werden:

- Wasserspiegelauslenkung (bezüglich HN),
- Strömungsgeschwindigkeit (tiefengemittelt und für jede Tiefenschicht) und
- Salzgehalt (tiefengemittelt und für jede Tiefenschicht).

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell der Wismarbuch folgende Prozesse:

- Die untersuchungsrelevanten Oberwasserzuflüsse
- Sohlreibung,
- Impulseintrag durch Wind,
- Corioliskraft,
- turbulente Diffusion des Strömungsimpulses sowie den
- advektiven Impulstransport.

Die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes erzeugt einen zusätzlichen räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre, welcher Strömung und Wasserstand beeinflusst. Dieser Effekt ist bei großflächigen Flachwassergebieten von Bedeutung und muss bei der vorliegenden hydrodynamischen-numerischen Untersuchung berücksichtigt werden.

5.3 Beschreibung des Modells

Das verwendete Modell umfasst die gesamte Ostsee. Der offene seeseitige Rand liegt am Skagerak (Bild 3). Die Auflösung des Modells liegt zwischen 5 Metern und 2674 Metern auf einem unstrukturierten Gitternetz aus Dreiecken und Vierecken. Insgesamt besitzt das Gitter 108.753 Knoten und 196.468 Elemente, davon 2592 Vierecke im Bereich des zu vertiefenden Seekanals.

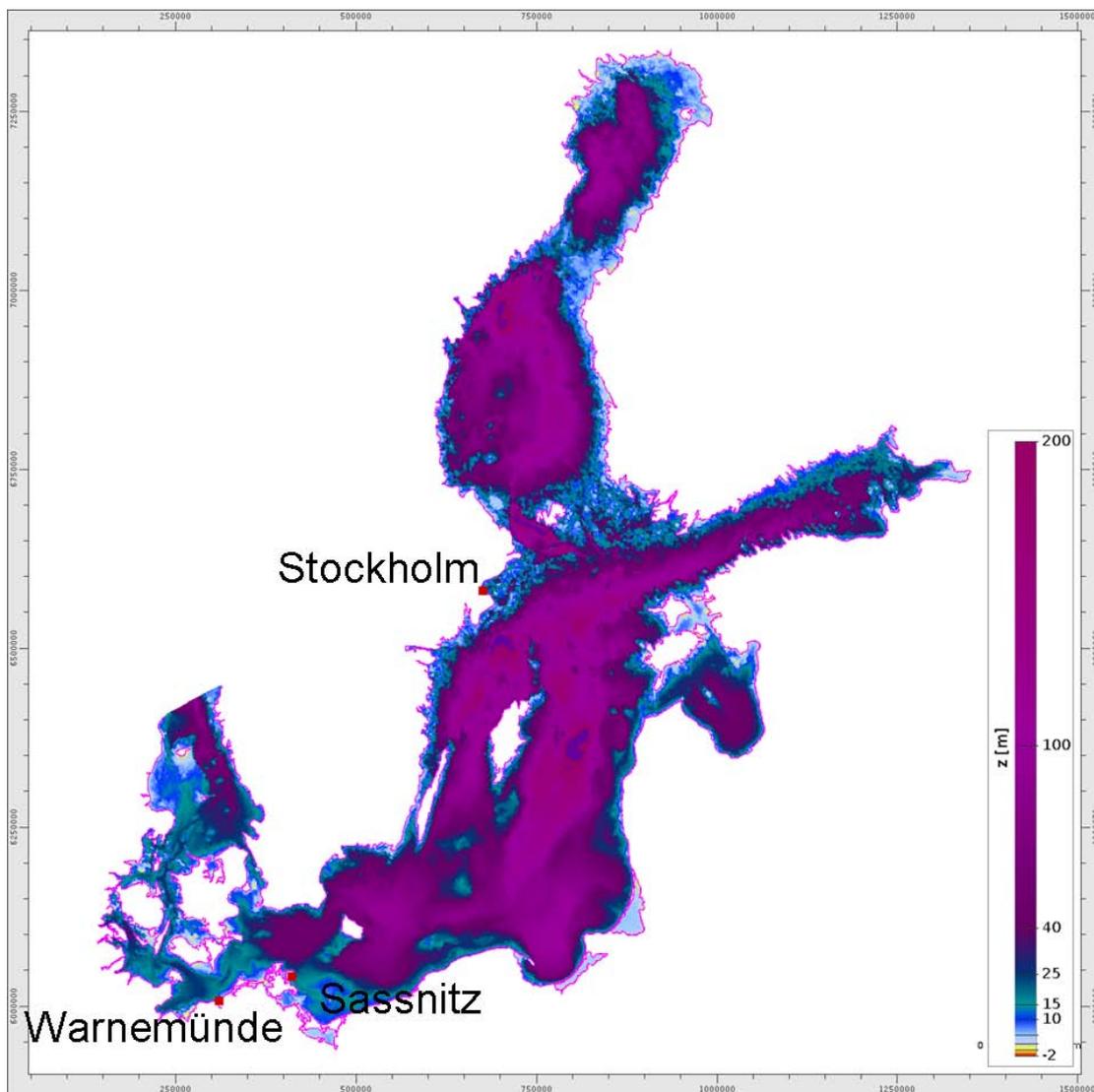


Bild 3: Modellbathymetrie des verwendeten Ostseemodells mit Pegelorten.

Die Unterwarnow und der Seekanal sind in hoher Auflösung in das Gitter der Ostsee eingearbeitet, um die kleinräumigen Strukturen der Bathymetrie zu erfassen. Der gezeigte Ausschnitt stellt das Gitternetz in dem durch den Ausbau maßgeblich betroffenen Abschnitt der Unterwarnow und des Breitlings dar (Bild 4).

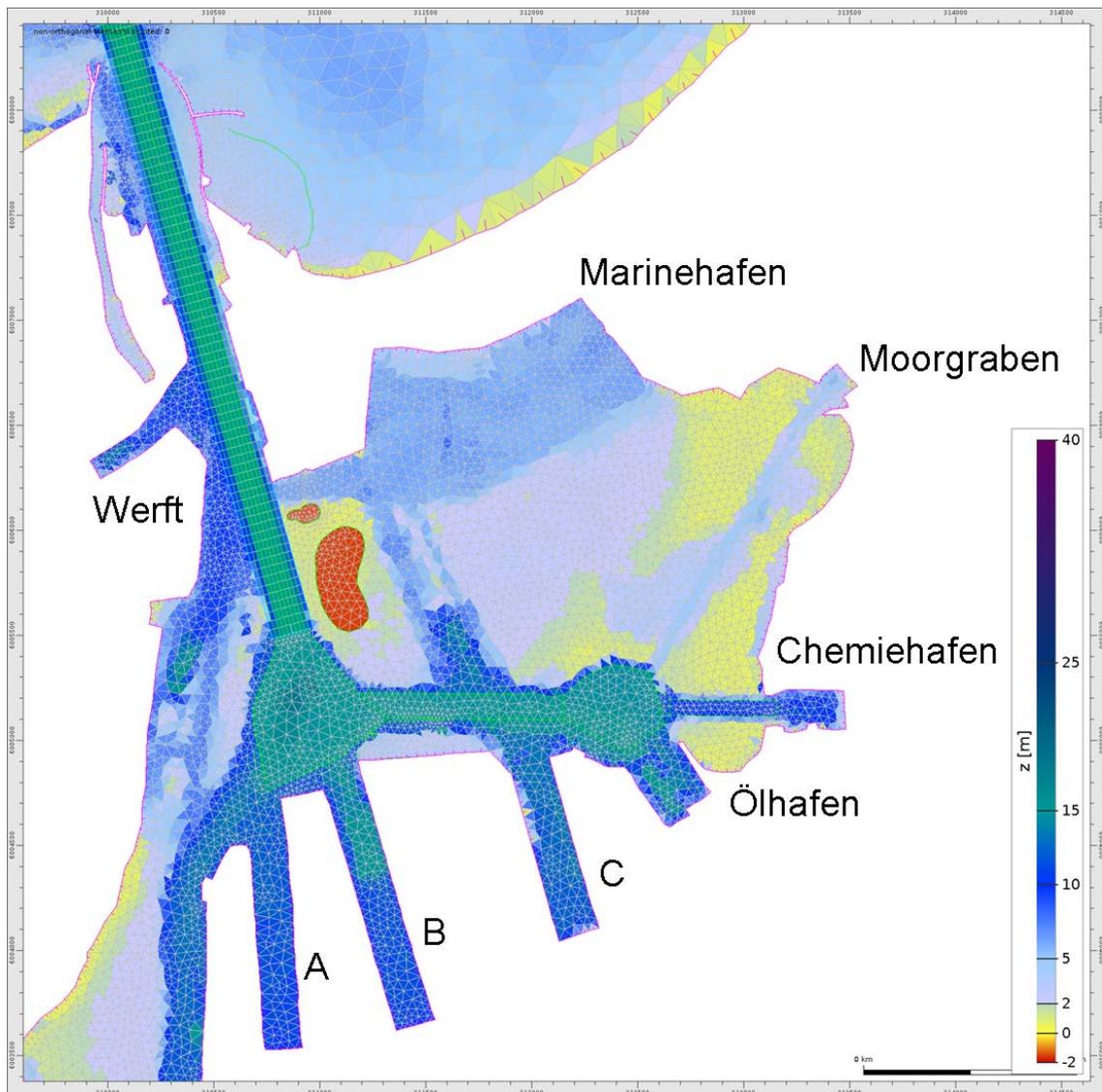


Bild 4: Bathymetrie und Gitternetz (planerischer Ist-Zustand) im Untersuchungsgebiet von Warnemünde bis zu den Hafenanlagen.

In der Vertikalen ist das Modell für das Untersuchungsgebiet in Schritten von 0,5 Metern diskretisiert. In den tieferen Bereichen der Ostsee wird die vertikale Diskretisierung gröber. Die Verwendung eines großräumigen Ostseemodells stellt sicher, dass die typischen Wasserstandsschwankungen und Salzverteilung in der Ostsee gut abgebildet werden und die vorgegebenen Randbedingungen an den offenen Rändern von der Ausbaumaßnahme nicht beeinflusst werden. Andererseits gewährleistet die hohe Auflösung im Untersuchungsgebiet eine realistische Abbildung der Hydrodynamik, vor Allem der Strömungsverteilung.

Der seeseitige Rand des Modells liegt an der Grenze des Kattegats zum Skagerak. Als Randwerte des Wasserstandes werden die Wasserstände des in der Nähe des Randes auf schwedischer Seite gelegenen Pegels Smögen [9] für den Simulationszeitraum 01.11.2005, 02:00 Uhr bis 01.01.2006, 00:00 Uhr eingesteuert.

An der Meeresoberfläche werden die Windschubspannung und der Luftdruck eingesteuert, die aus stündlichen Vorhersagefeldern der Wettervorhersage des DWD abgeleitet wurden [6].

Alle signifikanten Süßwasserabflüsse in die Ostsee wurden, soweit vorhanden, als tägliche Vorhersagewerte für den Simulationszeitraum aus einem Abflussmodell des SMHI [8] berücksichtigt. Kleinere Zuflüsse, deren mittlere Abflusspende MQ aus Literaturangaben und Internet-Quellen recherchiert werden konnte, wurden als Konstantwert eingesteuert (Tabelle 1). Für die Warnow wurde der Konstantwert $MQ=12,7 \text{ m}^3/\text{s}$ eingesteuert, da mit der Untersuchung vor allem der Einfluss der Maßnahme auf die mittleren Verhältnisse abgedeckt werden soll. Die Variabilität in der Oberwassermenge fließt in der fachlichen Bewertung jedoch mit ein.

Fluss	MQ (m ³ /s)	Quelle
Abyälv	16,0	SMHI: statistik om älvar [12]
Barta	11,1	http://en.wikipedia.org/wiki/Bartuva
Bureälv	11,0	SMHI: statistik om älvar [12]
Byskeälv	42,0	SMHI: statistik om älvar [12]
Lielupe	106,0	http://de.wikipedia.org/wiki/Lielupe
Peene	20,6	BAW Gutachten A 395 502 10070 [2]
Pirita	8,0	http://en.wikipedia.org/wiki/Pirita_River
Recknitz	3,1	http://de.wikipedia.org/wiki/Recknitz
Schwentine	7,2	Bericht an die EU-Kommission nach Art. 3 WRRL [14]
Trave	18,7	Bericht an die EU-Kommission nach Art. 3 WRRL [14]
Uecker	8,2	IKZM-Oder Ber. 29 [13]
Urpalanjoki	5,0	http://fi.wikipedia.org/wiki/Urpalanjoki
Vindelälv	188,0	SMHI: statistik om älvar [12]
Warnow	12,5	http://de.wikipedia.org/wiki/Warnow_(Fluss)

Tabelle 1: Kleinere Zuflüsse der Ostsee, deren mittlerer Zufluss berücksichtigt wird.

6 Simulationszeitraum

Als Simulationszeitraum wurde der Zeitraum zwischen dem 01.11.2005, 00:00 Uhr und dem 01.01.2006, 00:00 Uhr gewählt. Innerhalb dieses Zeitraumes finden zwei Hochwasserereignisse sowie zwei Niedrigwasserereignisse von Bedeutung statt. Zwischen den Extremereignissen schwanken die Wasserstände mit weniger als einem halben Meter um den Nullpunkt. Da die Ostsee einige Jahre benötigt, um eine realistische Salzverteilung einzustellen, wurden die Anfangsbedingungen des Modells mit Hilfe eines gröber aufgelösten Modells durch mehrfaches zyklisches Wiederholen des Rechenzeitraums 01.11.2005-01.01.2007 berechnet. In der Unterwarnow ist der Salzgehalt bereits nach etwa einem Monat eingeschwungen, so dass die Auswertung für den Zeitraum 01.12.2005, 00:00 Uhr bis 01.01.2006, 00:00 Uhr erfolgt.

7 Validierung des HN-Modells

Die Validierung des HN-Modells ist erforderlich, um den Nachweis zu erbringen, dass die modellierten Szenarien naturähnlich ablaufen und somit das Modell vom Prinzip her für die Fragestellung geeignet ist. Naturähnlichkeit bedeutet, dass die für die Aussagen des Gutachtens relevanten, in der Natur vorkommenden hydrologischen Ereignisse und Prozesse vom Modell mit einer hinreichenden Genauigkeit simuliert werden können.

In Bezug auf Wasserstände bedeutet dies an der Ostsee, dass die für sie typischen winderzeugten Beckenschwingungen (Seiches) sowie Windstauereignisse in ihrem zeitlichen Ablauf ausreichend genau reproduziert werden können. Ebenso muss gezeigt werden, dass die Strömungen und Salzgehalte im Modell in einer realistischen Größenordnung liegen.

7.1 Vergleich der Wasserstände an ausgesuchten Pegeln

Der Vergleich der Wasserstände des Modells im Ist-Zustand wird an drei Pegeln der deutschen Ostseeküste sowie am Pegel Stockholm durchgeführt. Der Pegel Stockholm liegt nahe der Schwingungsachse der longitudinalen Beckenschwingung, so dass dort die kurzperiodischen Signale in der Tendenz klein sind und daher dort die langperiodischen Schwankungen, d.h. der Füllungsgrad der Ostsee, das Signal dominieren.

Am Pegel Stockholm zeigen die Kurven von Messung und Modell eine gute Übereinstimmung etwa ab Mitte November 2005 (Bild 5). Die Abweichung der Kurve der Messung in der ersten Hälfte des Monats November erklärt sich aus dem verwendeten Anfangszustand des Modells, der von der Natur abweicht. Das Modell reproduziert also den Füllungsgrad der Ostsee zufriedenstellend.



Bild 5: Verlauf des Wasserstandes im Modell und in der Natur für den Simulationszeitraum am Pegel Stockholm.

Am Pegel Sassnitz ist die Übereinstimmung des Modells mit der Messung schlechter (Bild 6). Hier zeigt sich ebenfalls in der ersten Hälfte des November 2005 die Abweichung aufgrund des gewählten Anfangszustands. Allerdings verbleibt bis Mitte Dezember eine signifikante Abweichung des Modells vom Pegel von etwa 20 Zentimetern. Diese Abweichung ist systematischer Natur, beeinträchtigt jedoch die Modellaussagen für das Gebiet Unterwarnow nicht.

Am Pegel Warnemünde fällt der Vergleich ähnlich aus wie am Pegel Sassnitz (Bild 7). Auch hier zeigt sich noch eine geringe systematische Abweichung zwischen Modell und Natur. An beiden Pegeln kann diese Abweichung dadurch erklärt werden, dass das Salzgehaltsfeld des Modells in der Tiefe systematisch von der Natur abweicht und dies auch die Wasserstände in der westlichen Ostsee auf längeren Zeitskalen beeinflusst. Auch fehlt bisher der Temperatureinfluss im dem verwendeten Modell, was zwar für die Aussagen der gutachterlichen Interpretation der Modellergebnisse keine Bedeutung hat, jedoch zu systematischen, großräumigen Abweichungen (in der Größenordnung einige Zentimeter bis ein Dezimeter) in den Wasserständen in der Ostsee selbst führen kann.



Bild 6: Verlauf des Wasserstandes im Modell und in der Natur für den Simulationszeitraum am Pegel Sassnitz.

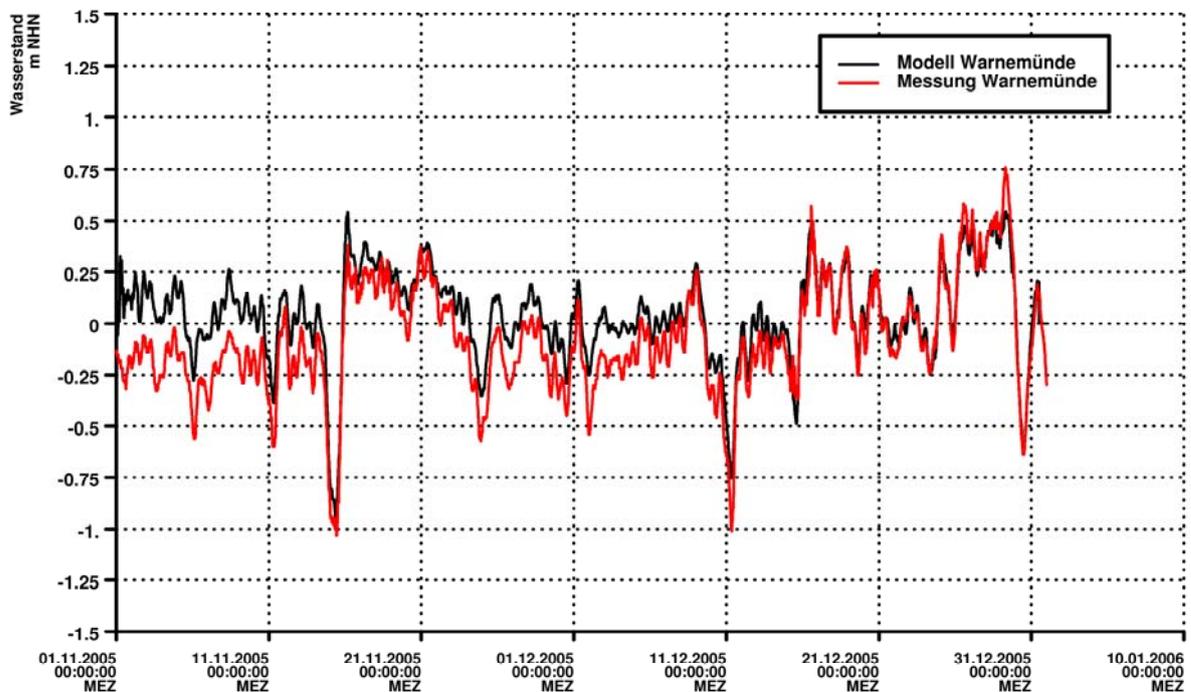


Bild 7: Verlauf des Wasserstandes im Modell und in der Natur für den Simulationszeitraum am Pegel Warnemünde.

Die Wasserstandsschwankungen von einem halben Tag bis zwei Tagen werden an allen drei Pegeln sehr gut in Amplitude und Form wiedergegeben. Die festgestellten systematischen langperiodischen Abweichungen beeinflussen die Aussage des Modells bei der Differenzbildung zwischen Ist-Zustand und Ausbauzustand nicht, da die Wirkung der Baumaßnahme auf solche langperiodische Wasserstandsschwankungen vernachlässigbar ist.

Durch den Einsatz eines Gesamtmodells der Ostsee wird gewährleistet, dass die Auswirkungen der Baumaßnahme keinen Einfluss auf die Randwerte von Wasserstand und Salzgehalt am seeseitigen Rand haben.

8 Ausbaubedingte Änderungen

8.1 Wirkprinzipien

In der Betrachtung der Wirkung des Ausbaus kann man sich hydrologisch auf die Strecke der Unterwarnow von Warnemünde bis zum Wehr Rostock-Mühlendamm beschränken, da der Außenbereich des Seekanals hydrologisch vollständig von den großräumigen Prozessen in der Ostsee bestimmt wird. Der Einfluss der Maßnahme auf diese Prozesse ist aufgrund seiner Kleinräumigkeit im Verhältnis zur Fläche der Ostsee unerheblich, so dass maßgebliche ausbaubedingte Änderungen dort nicht zu erwarten sind.

Durch einen Ausbau der Fahrrinne wird die Resonanzfrequenz des Systems verkleinert, da sich die Wassertiefe und damit die Fortschrittsgeschwindigkeit langer Wellen vergrößert. Gleichzeitig wird die Sohle zum Teil geglättet und damit die Dissipation verringert. Zudem wird das Verhältnis zwischen Oberwasserzufluss und Volumen des Gewässers verkleinert und dadurch der Einfluss des salzhaltigen Ostseewassers erhöht. Da die Ostsee geschichtet ist, wird durch die Vertiefung zudem geringfügig salzreicherem Wasser ermöglicht, am Boden der Fahrrinne in die Unterwarnow einzudringen.

8.2 Wasserstände und deren ausbaubedingte Änderung

Die Wasserstände entsprechen dem Signal in der offenen Ostsee. Der Unterschied in den Scheitelwerten zwischen Warnemünde und Rostock-Mühlendamm ist vernachlässigbar klein.

Daher ist die Darstellung an zwei Auswertepunkten für die gesamte Unterwarnow repräsentativ (Bild 8, Bild 9).

Ausbaubedingt ändern sich die Wasserstände nicht nachweisbar, die Abweichung der Wasserstände in der Simulation der Variante A1660 bleibt außer in der kurzen Einschwingphase unterhalb einem Zentimeter.

Die Resonanzperiode der Warnow (Kapitel 3.1) liegt aufgrund der Abmessungen des Systems sehr weit von den typischen anregenden Perioden (Beckenschwingungen der Ostsee,

Windstauszenarien) entfernt. Die Veränderungen in Wassertiefe und Volumen wirken sich daher unter den vorgegebenen natürlichen Verhältnissen nicht aus.

8.3 Strömungen und deren ausbaubedingte Änderung

Die tiefengemittelten maximalen Strömungen übersteigen einen Wert von 30 cm/s nur an wenigen Stellen des Ästuars. In dem durch einen starken Salzgradienten geprägten Lauf der Unterwarnow werden diese durch eine permanent vorhandene barokline Zirkulation in der Vertikalen modifiziert, die an der Oberfläche zu einem Ausstrom, am Boden zu einem Einstrom führt.

Ausbaubedingt nehmen die tiefengemittelten Strömungen im Seekanal in dem ausgebauten Bereich um weniger als 3 cm/s ab, da die über die Wassersäule gemittelten Transporte sich nicht verändern, jedoch über einen größeren Durchflussquerschnitt erfolgen. Die barokline Zirkulation im Verlauf der Unterwarnow wird jedoch verstärkt, da der Salzgradient verstärkt wird.

8.4 Salzgehalte und deren ausbaubedingte Änderung

Durch die Vertiefung des Seekanals nimmt der Einfluss des Ostseesalzgehaltes in Relation zum Oberwasser zu. Dabei sind die Ausbauwirkungen umso höher, je höher der Oberwassereinfluss ist.

Warnemünde liegt in der Übergangszone zwischen der Beltsee und dem eigentlichen Ostseebecken. Hier kann der Salzgehalt um einige PSU aufgrund der gerade wirkenden Wetterlage schwanken und daher ist die Ausbauwirkung abhängig von der vorherrschenden Wetersituation und Oberwassersituation. In der Unterwarnow besteht aufgrund des Oberwassereinflusses ein permanenter Salzgradient nach Oberstrom, der zu einer baroklinen Zirkulation führt. Dabei ist der barokline Anteil der Strömung am Boden stromauf und an der Oberfläche stromab gerichtet. Die Vertiefung führt zu einer Verstärkung des Salzgradienten und damit zu einer Verstärkung der baroklinen Zirkulation. Im Gegensatz zu tidebeeinflussten Ästuaren findet zwischen dem Ostseewasser und dem Wasser der Warnow aufgrund der geringen Strömungen nur ein geringer Austausch statt. Die räumliche Lage des Salzgradienten wird daher maßgeblich von der aktuellen Oberwassermenge bestimmt, während die Stärke des Gradienten von dem Salzgehalt der Ostsee bestimmt wird.

Die Schwankungen im Salzgehalt der Ostsee können durch die nachfolgend aufgeführten Analysegrößen beschrieben werden.

8.4.1 Maximaler Salzgehalt

Der maximale Salzgehalt beträgt im Analysezeitraum in der Ostsee an der Warnowmündung etwas über 12 PSU. Entlang der Unterwarnow nimmt der maximale Salzgehalt bis zum Wehr

in Rostock auf Süßwasserkonzentration ($< 0,5$ PSU) ab. Im Breitling beträgt er zwischen 10 und 12 PSU.

Der maximale Salzgehalt nimmt ausbaubedingt im Breitling bis zu etwa 0,3 PSU zu. In der Unterwarnow sind die Änderungen geringer, in Rostock betragen sie nur noch 0,1 PSU.

8.4.2 Minimaler Salzgehalt

Der minimale Salzgehalt beträgt im Analysezeitraum in der Ostsee an der Warnowmündung etwas über 10 PSU. Entlang der Unterwarnow nimmt er bis auf Süßwasserkonzentration ($< 0,5$ PSU) ab. Im Breitling beträgt er zwischen 8 und 10 PSU. Die Schwankungsbreite im Salzgehalt während des Analysezeitraums beträgt also ca. 2 PSU und wird ausschließlich durch den Salzgehalt der Ostsee bestimmt. Die Differenz zwischen dem Salzgehalt der Ostsee und dem Salzgehalt im Breitling ist demnach annähernd konstant.

Der minimale Salzgehalt nimmt im gesamten Breitling um bis zu 0,35 PSU zu. In der Unterwarnow sind die Änderungen geringer, in Rostock betragen sie unter 0,05 PSU. Während also die ausbaubedingten Änderungen des minimalen Salzgehaltes im Breitling etwas höher als für den maximalen Salzgehalt ausfallen, sind sie im Bereich der Unterwarnow im Vergleich zum maximalen Salzgehalt geringer.

8.4.3 Mittlerer Salzgehalt

Der mittlere Salzgehalt beträgt in der Ostsee zwischen 10 und 12 PSU, im Breitling liegt der Wert bei 10 PSU. Entlang der Unterwarnow nimmt er bis auf Süßwasserkonzentration ($< 0,5$ PSU) ab (Bild 17).

Im Breitling wird ausbaubedingt der mittlere Salzgehalt um bis zu 0,3 PSU zunehmen. In der Unterwarnow sind die Änderungen geringer, in Rostock betragen sie unter 0,05 PSU (Bild 18).

8.4.4 Varianz des Salzgehaltes

Die Varianz des Salzgehaltes nimmt von der Ostsee in den Breitling etwas ab, in der Unterwarnow dagegen ist sie deutlich höher als in der Ostsee. In der Ostsee wird die Varianz von den Beckenschwingungen der Ostsee bestimmt, die den Salzgradienten advektiv verlagern. Gleiches gilt auch im Bereich der Unterwarnow, wo der Salzgradient höher, und damit die Varianz des Salzgehaltes höher ist. Im Breitling findet eine stärkere Durchmischung statt, weswegen dort die Varianz reduziert wird (Bild 19).

Ausbaubedingt nimmt die Varianz des Salzgehaltes im Breitling leicht ab, d.h. die Vermischung wird verstärkt. In der Unterwarnow dagegen verstärkt sich der Salzgradient, was zu einer ausbaubedingten Vergrößerung der Varianz des Salzgehaltes führt (Bild 20).

9 Weitere Betrachtungen zu möglichen Auswirkungen des Ausbaus

9.1 Temperaturen und andere Tracer

Der Einfluss des Ausbaus auf die Wassertemperaturen kann aus den Ergebnissen der Wirkung auf den Salzgehalt qualitativ abgeleitet werden. Im Bereich der Unterwarnow liegen die Wassertemperaturen im Sommer etwas höher als in der offenen Ostsee. Mit der Vertiefung der Fahrrinne und der damit verbundenen Verstärkung der salzgetriebenen baroklinen Zirkulation gelangt nicht nur salzhaltigeres, sondern im Sommer auch kühleres Wasser an der Sohle aus der Ostsee in die Unterwarnow. Dieser Prozess bewirkt, dass die Vermischung tendenziell auch zu einer Verringerung der Wassertemperaturen im Breitling führen wird. Die Varianz auf den typischen Skalen der Beckenschwingungen der Ostsee verringert sich im Breitling.

Auch für andere Tracer gilt, dass sich das Niveau des Mittelwertes in der Tendenz an den Wert in der Ostsee etwas annähert und die Pufferwirkung des Breitlings zunimmt, d.h. die Varianz der jeweiligen Größe abnimmt.

9.2 Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugte Belastungen

Die ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen können zur Zeit nicht abschließend beurteilt werden. Jedoch ist auf der Grundlage der umfangreiche Erfahrungen zum Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock eine vorläufige Einschätzung möglich. Die Vorgehensweise und ihre Ergebnisse werden in einer Stellungnahme der BAW (siehe [4]) beschrieben und im Folgenden kurz zusammengefasst.

Im Rahmen des letzten Ausbaus der Zufahrt auf eine Fahrrinnentiefe von etwa 15 m unter NHN inklusive Fahrinnenverbreiterung wurde u.a. ein Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen auf der Grundlage von Untersuchungen in einem physikalischen Maßstabsmodell erstellt. In diesem Zusammenhang wurden im Auftrag des WSA Stralsund auch Untersuchungen zu weitergehenden Ausbauplanungen, und zwar einer Vergrößerung der Fahrrinnentiefe auf 16,6 m, vorgenommen; sie sind im „Ergebnisbericht – Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock – Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen von schiffserzeugten Belastungen“ dokumentiert

Auf dieser Basis kann eine erste Einschätzung vorgenommen werden, wenn zusätzlich Betrachtungen der Teilquerschnittsverhältnisse herangezogen werden, die berücksichtigen, dass die zukünftig vorgesehene Schiffsbreite über der der damals untersuchten Fahrzeuge liegen wird:

- In der Kombination der Fahrinnenvertiefung und der zukünftigen Verringerung der Teilquerschnittsverhältnisse werden ausbaubedingte, schiffserzeugte **langperiodische** Belastungszunahmen (Wellen und Strömung) von etwa +15 % am Westufer und von rund

+12 % am Ostufer der Zufahrt zum Seehafen Rostock von See bis etwa km 4 (Pagenwerder Süd) erwartet.

- In den angrenzenden Hafenanlagen und dem Alten Strom sowie an natürlichen und künstlichen Uferstreifen sind entsprechend den lokal bedeutsamen Wellenumformungsprozessen (u.a. Shoaling, Reflexion, Refraktion, Diffraktion, Energiedissipation) gleiche prozentuale Erhöhungen der schon heute auftretenden **langperiodischen** schiffserzeugten Wellen und Beckenschwingungen zu erwarten.
- In den Wendeböden und der Zufahrt zum Öl- und Chemiehafen zwischen km 4,0 und km 2,0 ist wegen der sehr geringen Fahrgeschwindigkeit der Massengutschiffe mit keinen messbaren schiffserzeugten Belastungszunahmen zu rechnen.
- Aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeiten der großen Massengutschiffe in der gesamten Zufahrt zwischen äußerem Molensystem (km 7) und Ölhafen (km 2,0) sind durch die prognostizierten langperiodischen Belastungserhöhungen keine messbaren Änderungen der schiffserzeugten **kurzperiodischen** Sekundärwellen zu erwarten.

Die prognostizierten langperiodischen Änderungen der schiffserzeugten Belastungen liegen nicht auf der sicheren Seite, sondern sind als zu erwartende Größenordnung zu bewerten, weil bei der Prognose der schiffserzeugten Belastungen auf Basis der Teilquerschnittsverhältnisse zunächst ein linearer Zusammenhang betrachtet wird, tatsächlich aber nichtlineare Wechselwirkungen bestehen.

Die bisher schon verkehrende Schifffahrt wird nach Ausbau des Seekanals bei gleichbleibendem Fahrverhalten wegen des zukünftig geringeren Wasserstraßenwiderstands unwesentlich schneller fahren, aber wegen des gleichen Energieeintrags durch den Propeller keine Zunahme der Belastung bewirken.

Für eine abgesicherte Prognose der schiffserzeugten Belastungen nach Stand von Technik und Wissenschaft werden im Rahmen der Hauptuntersuchungen folgende Arbeitsschritte empfohlen, die mit ausreichendem Vorlauf in Auftrag zu geben sind:

- Beweissicherungsmessungen u.a. zur schiffserzeugten Belastung (Wellen und Strömung) an Positionen besonders betroffener Anlieger entlang der Zufahrt zum Seehafen Rostock vor und nach der Ausbaumaßnahme über einen repräsentativen Zeitraum (Korrelation aller Wellenereignisse mit den Schiffspassagedaten).
- Erfassung der Schiffsdynamik der tiefgangsrelevanten größten Schiffseinheiten vor dem Ausbau während der ersten Beweissicherungsmessungen zur Abschätzung des Squat- und Trimmverhaltens der Bemessungsfahrzeuge u.a. für die Schiffsführungssimulation. Erneute Messung der Schiffsdynamik des Bemessungsschiffs nach dem Ausbau des Seekanals zur Absicherung der vorgenommenen Prognosen.
- Prognose der Veränderung der Flottenstruktur hinsichtlich der maximalen Größen der Fahrzeuge, aber auch bezüglich der zukünftig am häufigsten verkehrenden (kleine-

ren) und ggf. dann tiefer abladenden Fahrzeuge zur Abschätzung der Belastungszunahme durch den Gesamtverkehr.

- Untersuchungen nach Stand der Technik zur Prognose der ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungen u.a. mit den jeweiligen Bemessungsschiffen und den am häufigsten verkehrenden Fahrzeugen.

Die einzelnen Arbeitspakete sind in jeweils eigenständigen, aber teils aufeinander aufbauenden, zitierfähigen Gutachten zu bearbeiten.

9.3 Seegang

Die derzeitige Wassertiefe des Seekanals ist bereits so groß, dass kurze Schwerewellen im Regelfall den Boden nicht mehr spüren. Kurze Schwerewellen erfahren daher keine Veränderung durch den Ausbau.

Lange Wellen, d.h. Seegang, dessen Wellenlänge groß im Verhältnis zur Wassertiefe ist, verändern ihre Wellenfortschrittsgeschwindigkeit. Hafenbecken, die aufgrund ihrer Abmessungen bereits heute durch lange Seegangswellen zu Resonanz angeregt werden, können je nach Wellenlänge eine verstärkte Resonanz mit dem Seegang der Ostsee erfahren. Die größeren Hafenbecken sind mit ihren Eigenperioden aufgeführt (Tabelle 2). Die aufgeführten Hafenbecken liegen mit ihren Perioden im Bereich der Infrarotwellen, also außerhalb des Bereiches typischer Seegangswellen vor Warnemünde. Resonanz mit langwelligem Seegang ist daher für diese Becken ausgeschlossen.

Hafenbecken	Länge L (m)	Wassertiefe H	Eigenperiode (min)
Warnowwerft	~630	~10	~4,2
Alter Strom	~1200	~5	~11,4
Becken A	~1100	~12	~6,8
Becken B	~1200	~13	~7,1
Becken C	~900	~12	~5,5

Tabelle 2: Abmessungen größerer Hafenbecken mit abgeschätzter Eigenperiode.

Einlaufender, langwelliger Seegang wird zudem durch Beugung und Reflexion in seiner Richtung verändert. Beugung führt zu einer Richtungsänderung, die Seegang aus der Fahrrinne in die flacheren Bereiche einträgt. Dies führt im Mündungsbereich, u.a. im Alten Strom und im Yachthafen Mittelmole zu einer Wellenunruhe, die bereits in der Vergangenheit zu Nutzungseinschränkungen geführt hat.

Refraktion und Teilreflexionen des langwelligen Seegangs finden an der Böschung der gebaggerten Rinne statt. Diese tragen ebenfalls zur Wellenunruhe in den genannten Bereichen bei. Durch den Ausbau der Fahrrinne werden die Wellenunformungsprozesse beeinflusst und u.a. der Anteil der an der Unterwasserböschung reflektierten Seegangenergie erhöht.

Dies wird zu einer Veränderung der Wellenunruhe insbesondere in dem westlich der Rinne gelegenen Yachthafen führen. Frühere Untersuchungen der BAW bestätigen diesen Effekt, so dass in Abhängigkeit der Wellenanlauffrichtung mit einer erhöhten Wellenunruhe im Warnemünder Hafengebiet zu rechnen ist.

9.4 Morphodynamik und Unterhaltung

Der Ausbau des Seekanals führt nicht zu einer stärkeren Strömungs- und Seegangbelastung der Sohle aufgrund der einwirkenden natürlichen hydrodynamischen Kräfte. Daher kann von einem Unterhaltungsaufwand im Rahmen der Erhaltung der Solltiefe nach Ausbau ausgegangen werden, der in etwa dem heutigen Unterhaltungsaufwand entspricht.

10 Zusammenfassende Bewertung

Die geplante Baumaßnahme hat keine Auswirkungen auf die Wasserstände und den Seegang in der Unterwarnow und im Breitling.

Eine Verschlechterung der Unterhaltungssituation aufgrund morphologischer Prozesse ist nicht zu erwarten.

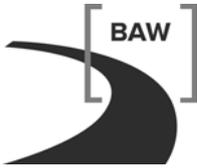
In der Unterwarnow herrscht ein stabiler Salzgradient vor, der je nach Oberwassersituation seine Lage ändert. Der Salzgradient und damit die barokline Zirkulation wird durch den Ausbau etwas verstärkt. Die barokline Zirkulation führt zu einem verstärkten Austausch zwischen Ostsee und Unterwarnow, was das Milieu des Breitling dem der Ostsee angleicht, gleichzeitig wird die Vermischung innerhalb des Breitling verstärkt und dadurch sinkt die Schwankungsbreite des Salzgehalts und anderer Tracer dort.

Als eine erste Abschätzung sind ausbaubedingte schiffserzeugte **langperiodische** Belastungszunahmen (Wellen und Strömung) von etwa +15 % am Westufer und von rund +12 % am Ostufer des Seekanals zu erwarten, die sich auch entsprechend den Wellenumformungsprozessen in den anliegenden Hafengebiet, Seitenarmen sowie an natürlichen und künstlichen Uferstreifen ausbreiten werden. Die prognostizierten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen liegen nicht auf der sicheren Seite, sondern sind als zu erwartende Größenordnung zu bewerten, weil bei der Prognose der schiffserzeugten Belastungen auf Basis der Teilquerschnittsverhältnisse zunächst ein linearer Zusammenhang angenommen wird, tatsächlich aber nichtlineare Wechselwirkungen bestehen.

Hinsichtlich der Seegangsverhältnisse wird im Mündungsbereich eine Verstärkung der Wellenunruhe im Bereich des Yachthafens Mittelmoles und des Alten Stroms erwartet.

10.1 Hinweise zur weiteren Planung

Zur Beweissicherung ist es sinnvoll, Dauermessstationen für Salzgehalt und Temperatur an ausgewählten Stellen einzurichten. Eine Messdauer von einem Jahr vor Beginn der Aus-

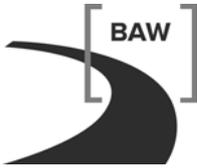


baumaßnahme und nach Fertigstellung der Maßnahme wird empfohlen, um die saisonalen Unterschiede zu erfassen. Dabei ist für die Wahl der Messzeiträume darauf zu achten, dass das Milieu der Ostsee und die Oberwasserverhältnisse der Warnow auf längeren Skalen vergleichbar sind. Die vorhandenen Pegel sind zur Beweissicherung ausreichend. Für die Ermittlung der schiffserzeugten Belastungen in kritischen Abschnitten des Fahrwassers, unter anderem im Bereich der Molenköpfe der Zufahrt zur Unterwarnow, werden Naturmessungen empfohlen. Die hydrodynamischen Belastungen der Gewässersohle sind für das Bemessungsschiff im Ausbauzustand zu ermitteln.

Für das Planfeststellungsverfahren ist die hydronumerische Untersuchung mit aktuellen Vermessungen der gesamten Gewässersohle im Untersuchungsgebiet zu wiederholen. Diese Vermessungen können gleichzeitig der Beweissicherung vor Ausbau dienen. Ein Schwerpunkt der Untersuchung ist die Entwicklung der Salzgehalte und anderer Tracer durch den Ausbau. Die derzeit laufende Planung zur Erweiterung des Seehafens im Kaiabschnitt zwischen Hafenbecken B und C (Bild 4) ist im Falle einer Planfeststellung dieser Maßnahme in einer Umweltverträglichkeitsuntersuchung zu berücksichtigen. Die Wirkung dieser Maßnahme für sich alleine wurde bereits durch die BAW untersucht [3].

Neben Beweissicherungsmessungen zur schiffserzeugten Belastung sowie zur Schiffsdynamik vor und nach dem Ausbau sind mit ausreichendem Vorlauf Untersuchungen zur Prognose der ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungsänderungen nach Stand von Technik und Wissenschaft zu empfehlen.

Es wird zudem empfohlen, dass der Einfluss kritischer Seegangsverhältnisse auf die Wellenruhe im Mündungsbereich für das Planungsverfahren durch ein Seegangmodell untersucht wird. Dieses ist an Naturmessungen zu validieren, die gegebenenfalls durchzuführen sind.



Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg

Hamburg, 31.01.2011

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. N.Winkel

gez. G. Seiß

Dr. N. Winkel
(Regierungsdirektor)

Dr. G. Seiß
(Wiss. Angestellter)

Literaturverzeichnis

- [1] BAW: Validation Document – Mathematical Model UnTRIM. Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, 2004.
<http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/PDF/vd-untrim-2004.pdf>.
- [2] BAW: Gutachten zur Anpassung der Seewasserstraße Nördlicher Peenestrom an die veränderten Anforderungen aus Hafen und Werftbetrieb der Stadt Wolgast. Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, 2007.
- [3] BAW: Stellungnahme zur Erweiterung des Hafens Rostock – Anpassung der Kaianlagen zwischen Hafenbecken B und C. Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, 2009.
- [4] BAW: Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock - Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen, Stellungnahme zur URE, BAW Nr. A 395 503 10184, Hamburg, Dezember 2010.
- [5] Casulli, V.; Walters, R. A.: An unstructured, three-dimensional model based on the shallow water equations, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 32: 331 – 348, 2000.
- [6] Steppeler, J.; Doms, G.; Adrian, G. (DWD): Das Lokal-Modell LM; promet, 27, Heft 3/4, S. 123-128, Juni 2002.
http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/promet_archiv.htm.
- [7] Seifert, T.; Tauber, F.; Kayser, B.: A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition, Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29, November 2001, Poster #147. <http://www.io-warnemuende.de/iowtopo>.
- [8] SMHI: The HBV-NP model. http://www.smhi.se/sgn0106/if/hydrologi/hbv_np.htm.
- [9] University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC): GLOSS fast delivery database. <http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhscl/woce.html>.
- [10] Wikipedia – Warnow (Fluss). [http://de.wikipedia.org/wiki/Warnow_\(Fluss\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Warnow_(Fluss)).
- [11] Winkel, N.: Das morphologische System des Warnow-Ästuars. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86 , 2003.
- [12] SMHI: Statistik om älvar.
http://web.archive.org/web/20070311012724/http://www.secretcreeks.com/river_facts.htm?f
- [13] Röttger, A.: Küste und Einzugsgebiet der Oder – Betrachtung von Einflüssen, Kooperationen und Perspektiven im grenzübergreifenden Raum. IKZM-Oder-Berichte 29, 2006.
- [14] Bundesrepublik Deutschland: Anlage 11 des Berichtes an die EU-Kommission nach Artikel 3 Wasserrahmenrichtlinie für die Flussgebietseinheit Schlei/Trave.

Anlage A – Abbildungen Simulationsergebnisse

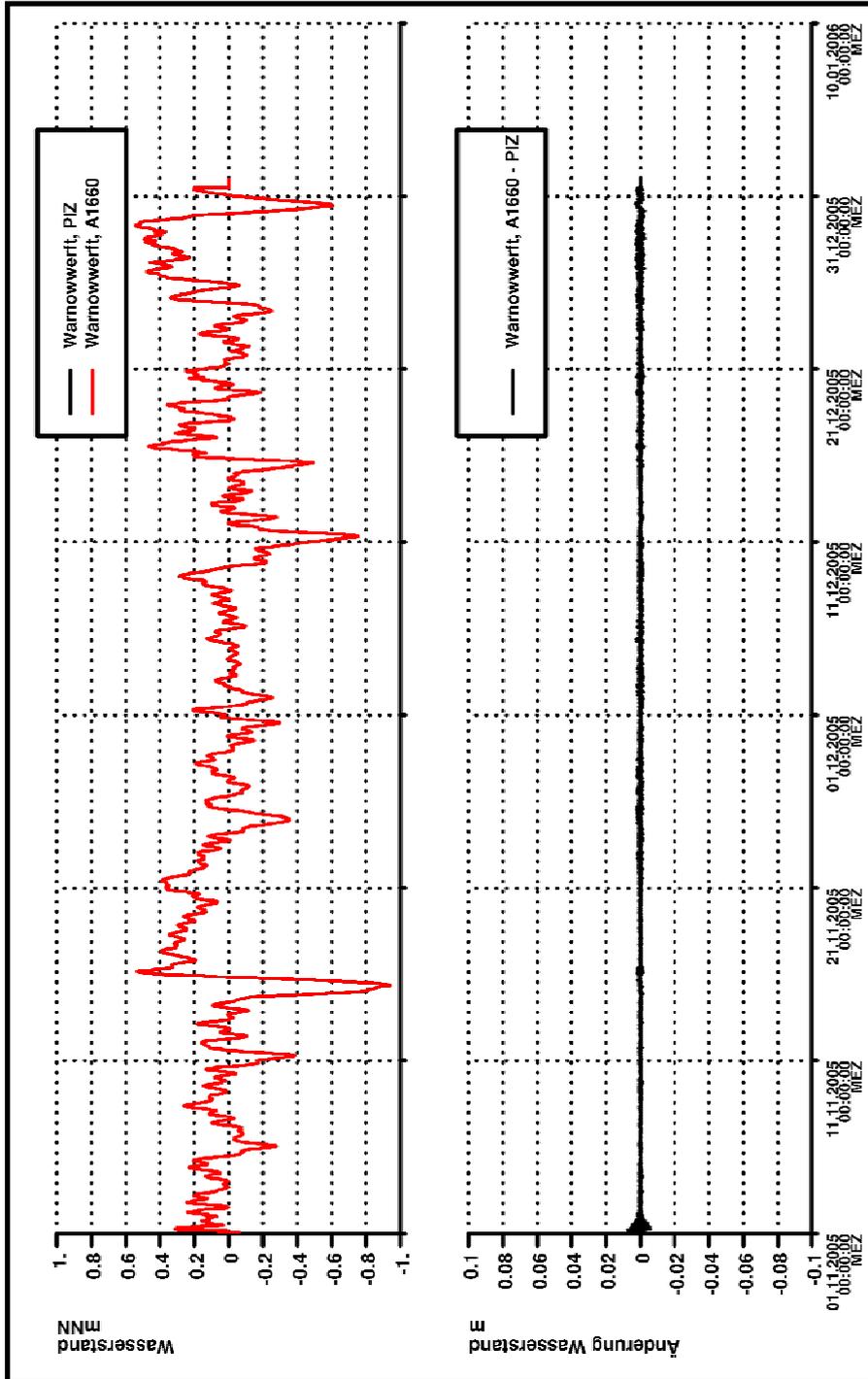


Bild 8: Wasserstandsverlauf der Modellsimulationen PIZ und A1660 (oberes Diagramm) und die Differenzkurve (A1660 – PIZ), Auswertepunkt Warnowwerft.

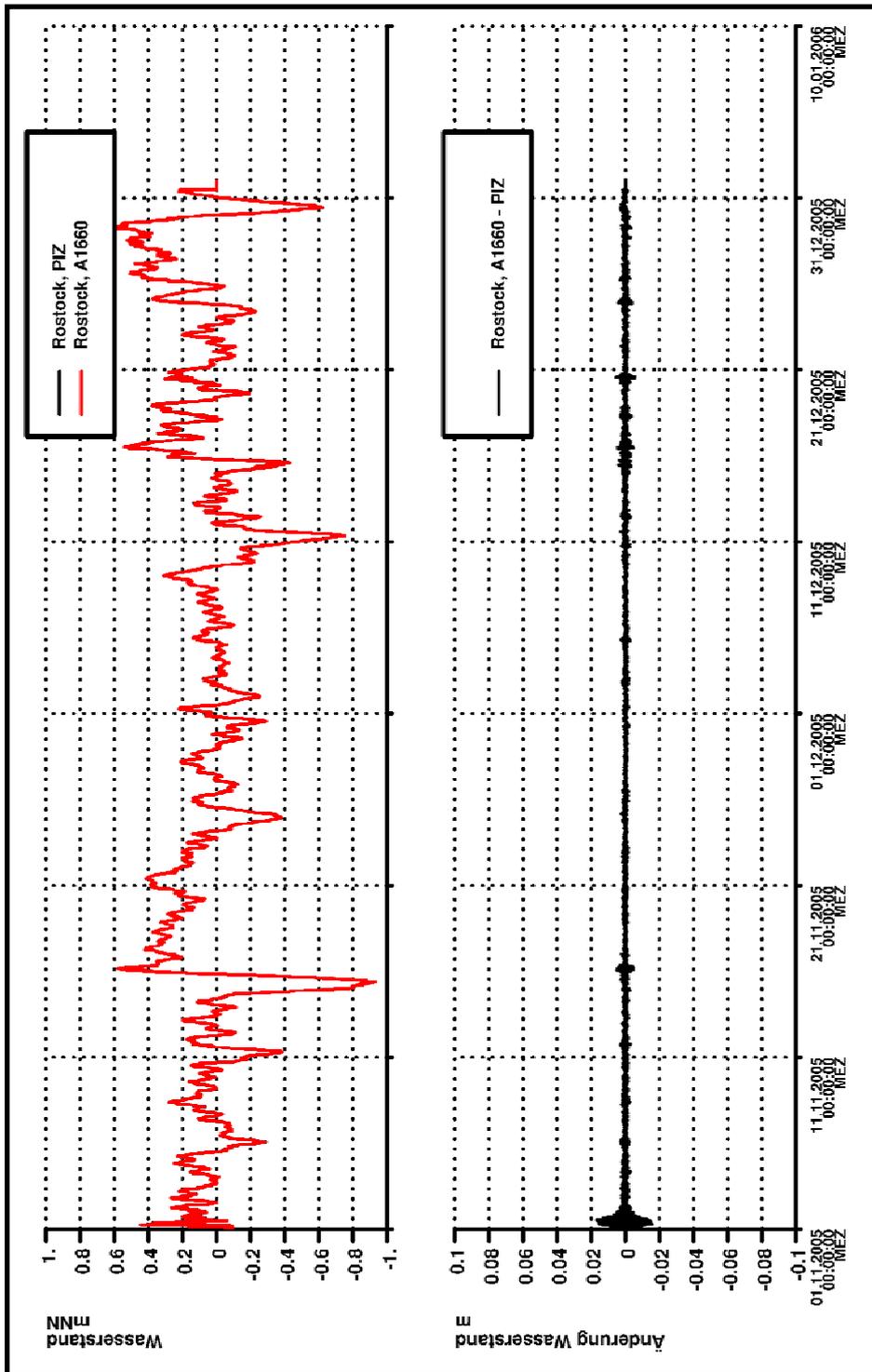


Bild 9: Wasserstandsverlauf der Modellsimulationen PIZ und A1660 (oberes Diagramm) und die Differenzkurve (A1660 – PIZ), Auswertepunkt Rostock.

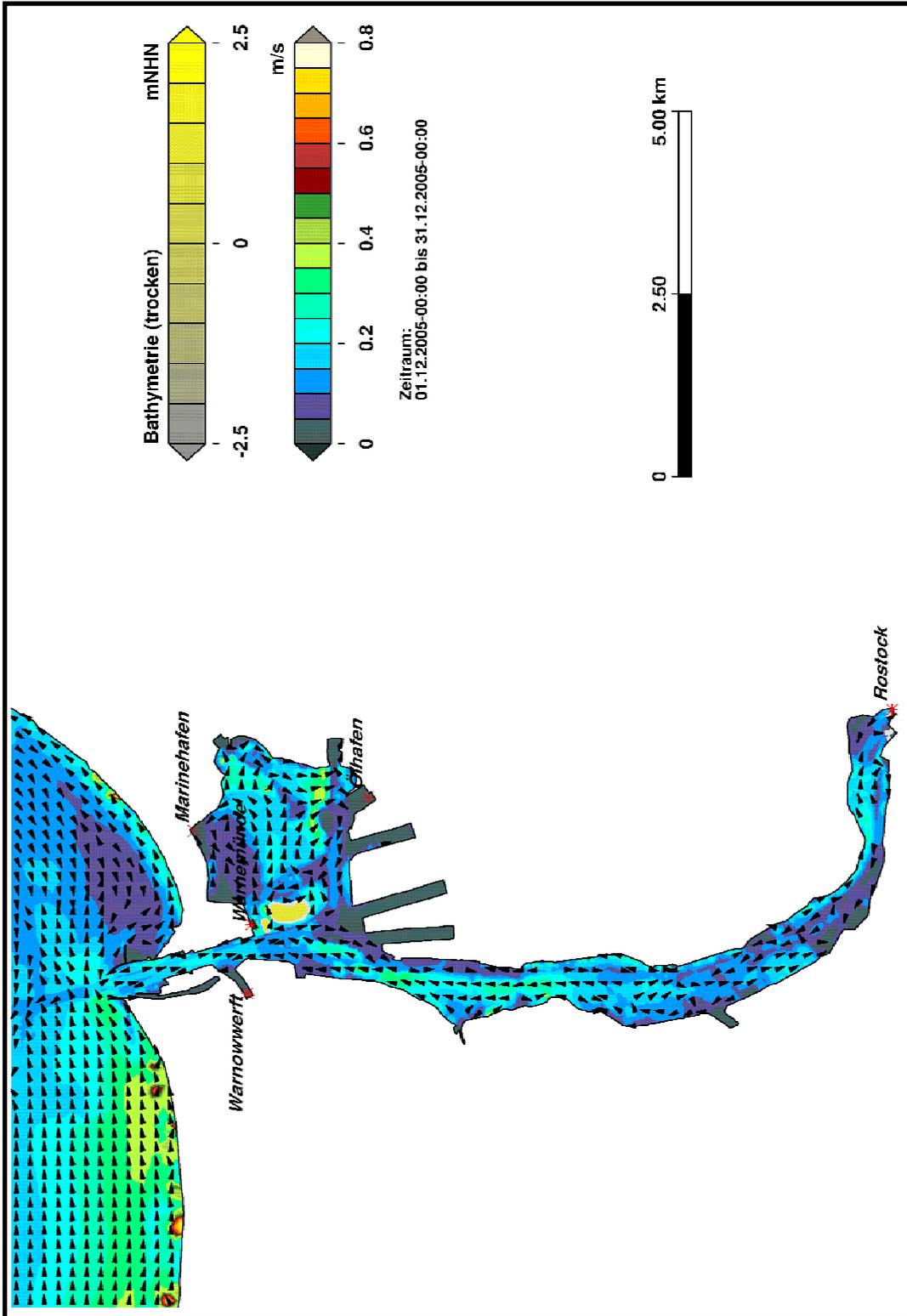


Bild 10: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.

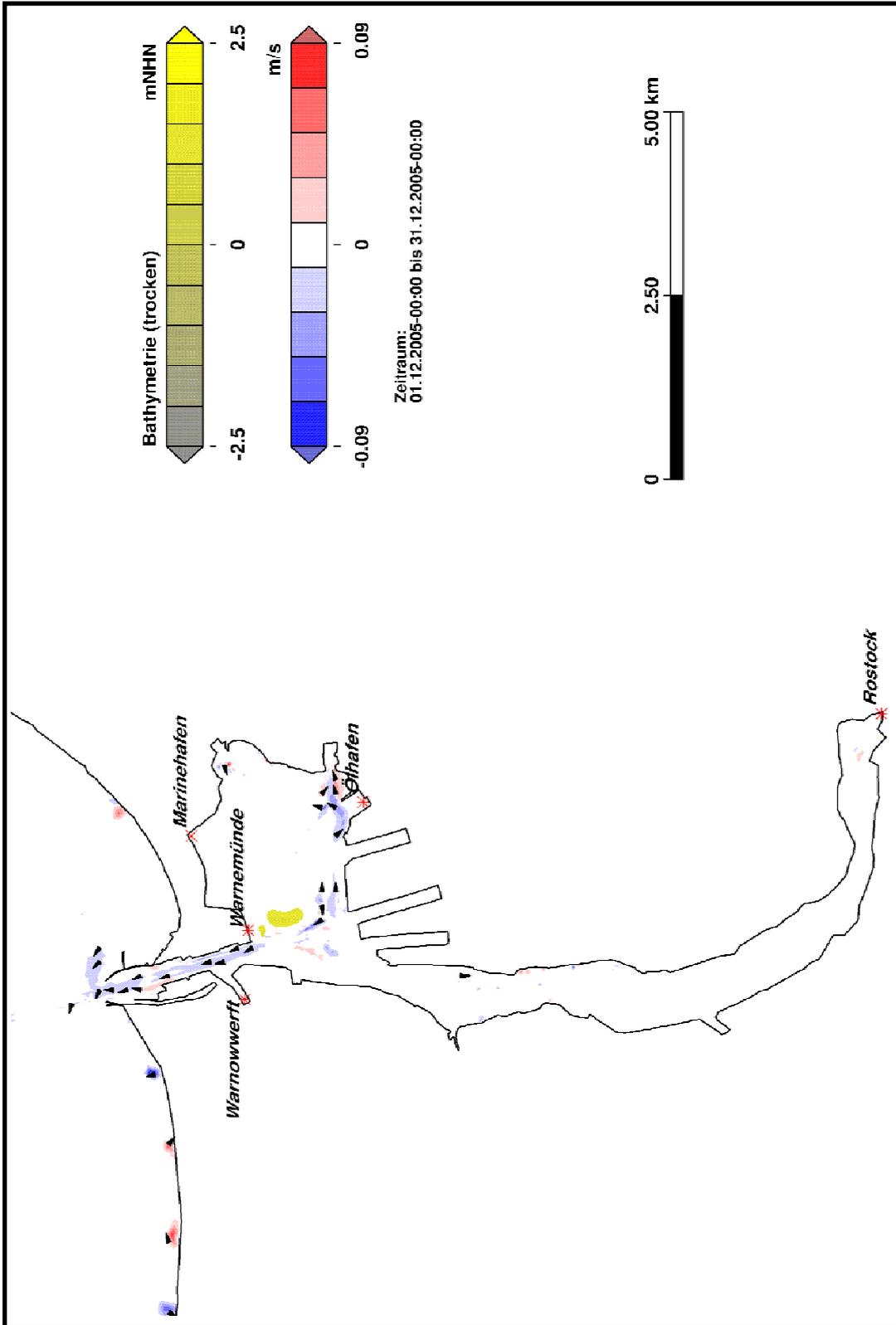


Bild 11: Ausbaubedingte Änderung der maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.

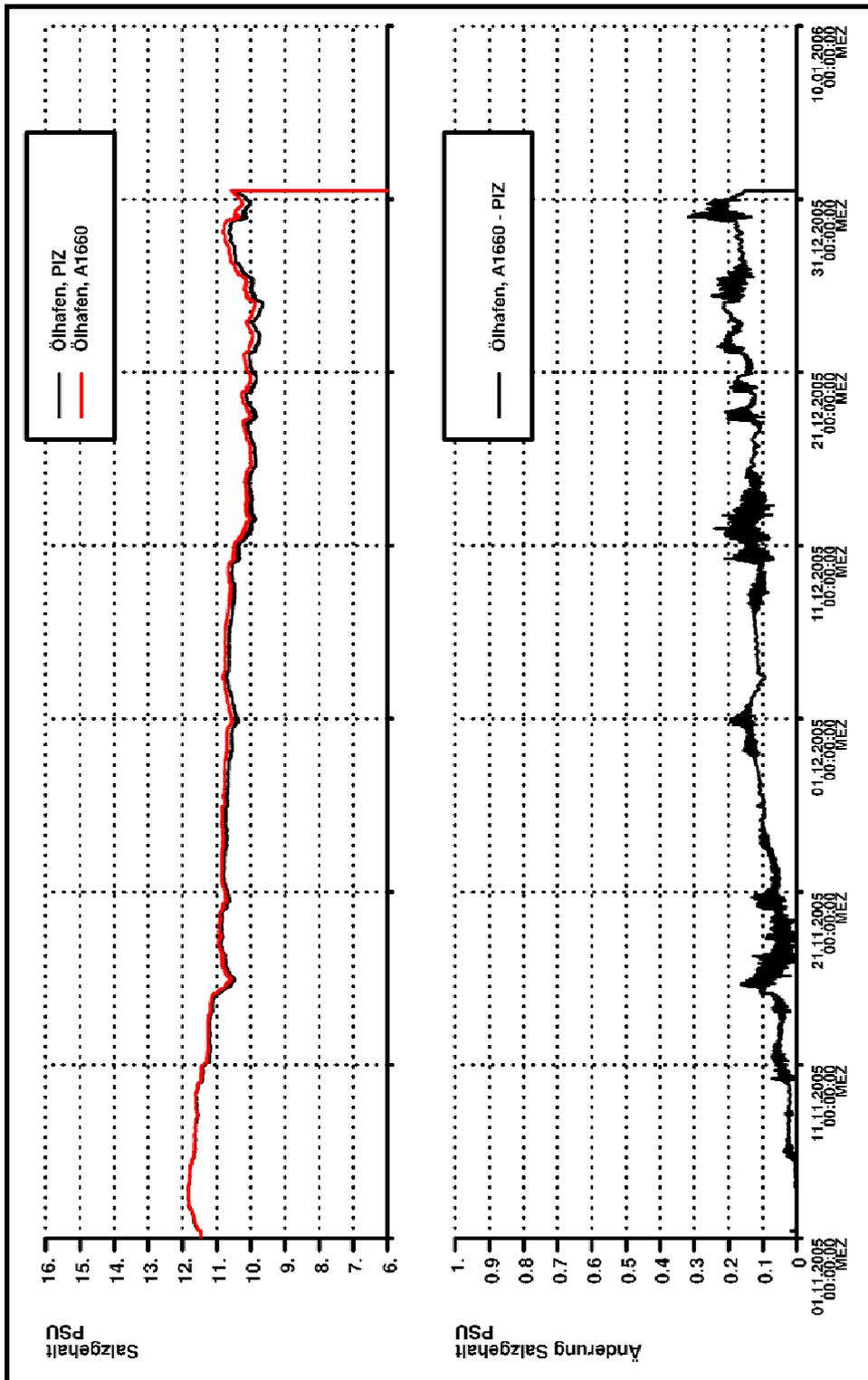


Bild 12: Salzgehaltsentwicklung im Verlauf der Modellsimulation an dem Auswertpunkt Ölhafen.

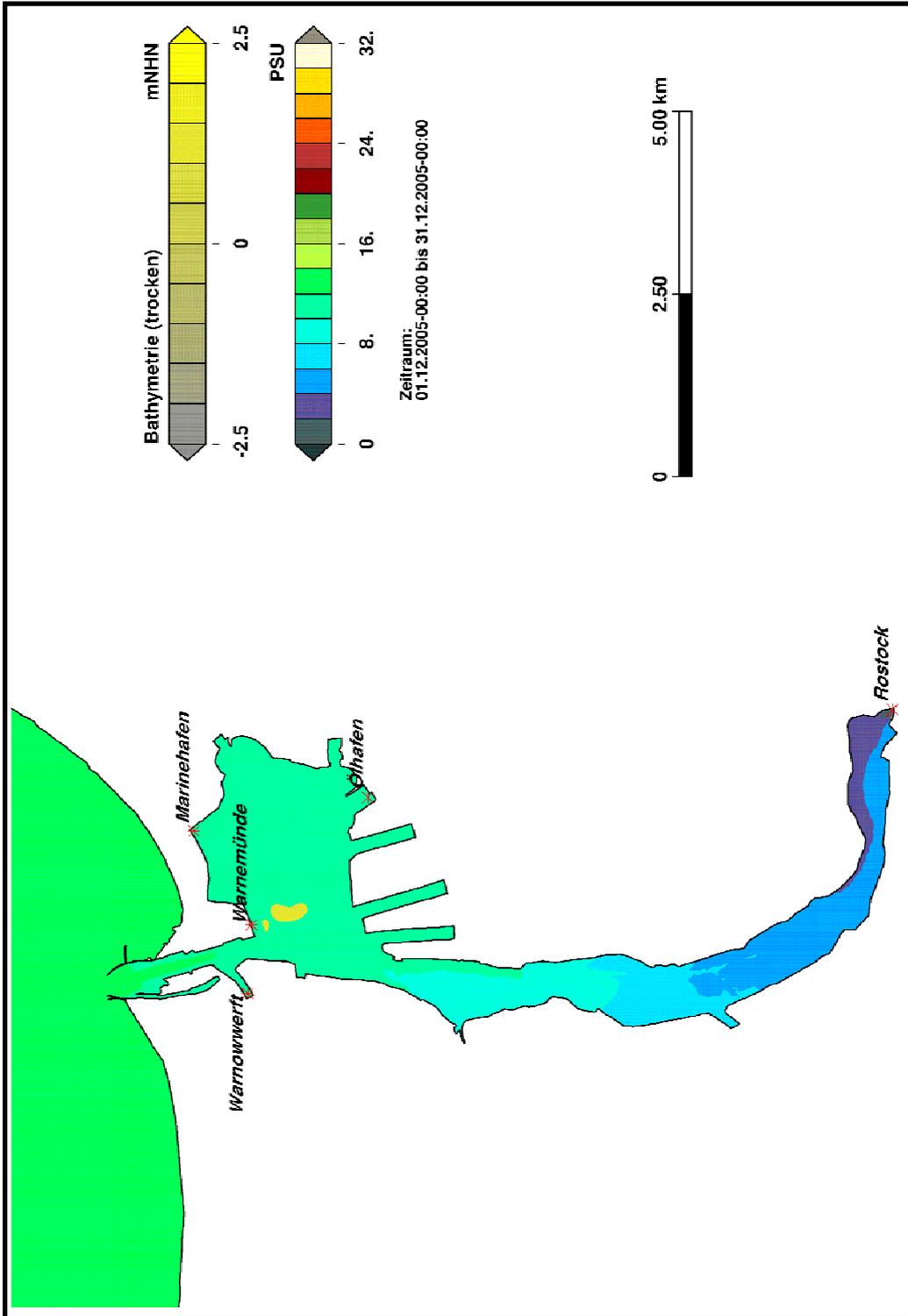


Bild 13: maximaler Salzgehalt im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.

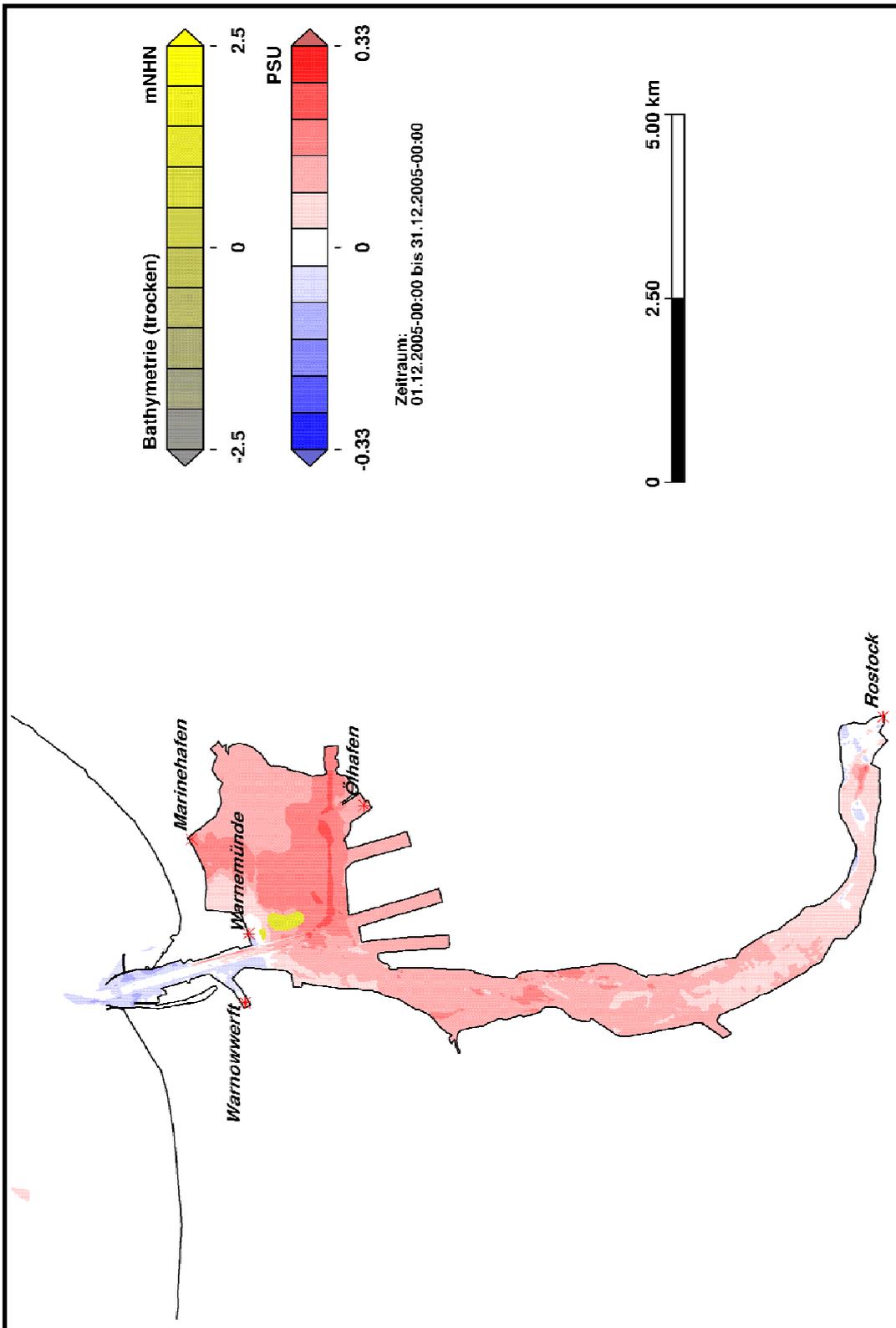


Bild 14: Ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.

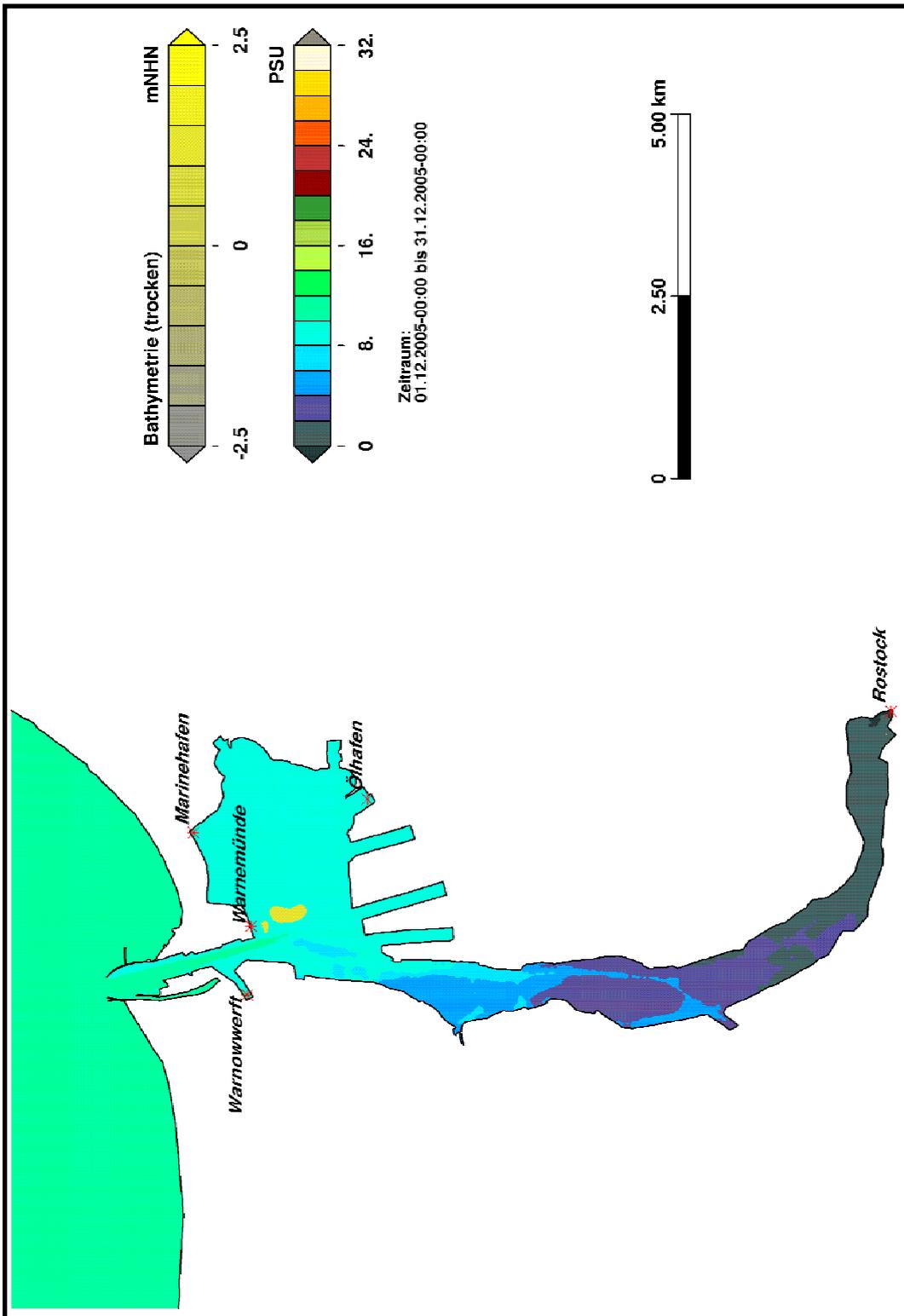


Bild 15: minimaler Salzgehalt im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.

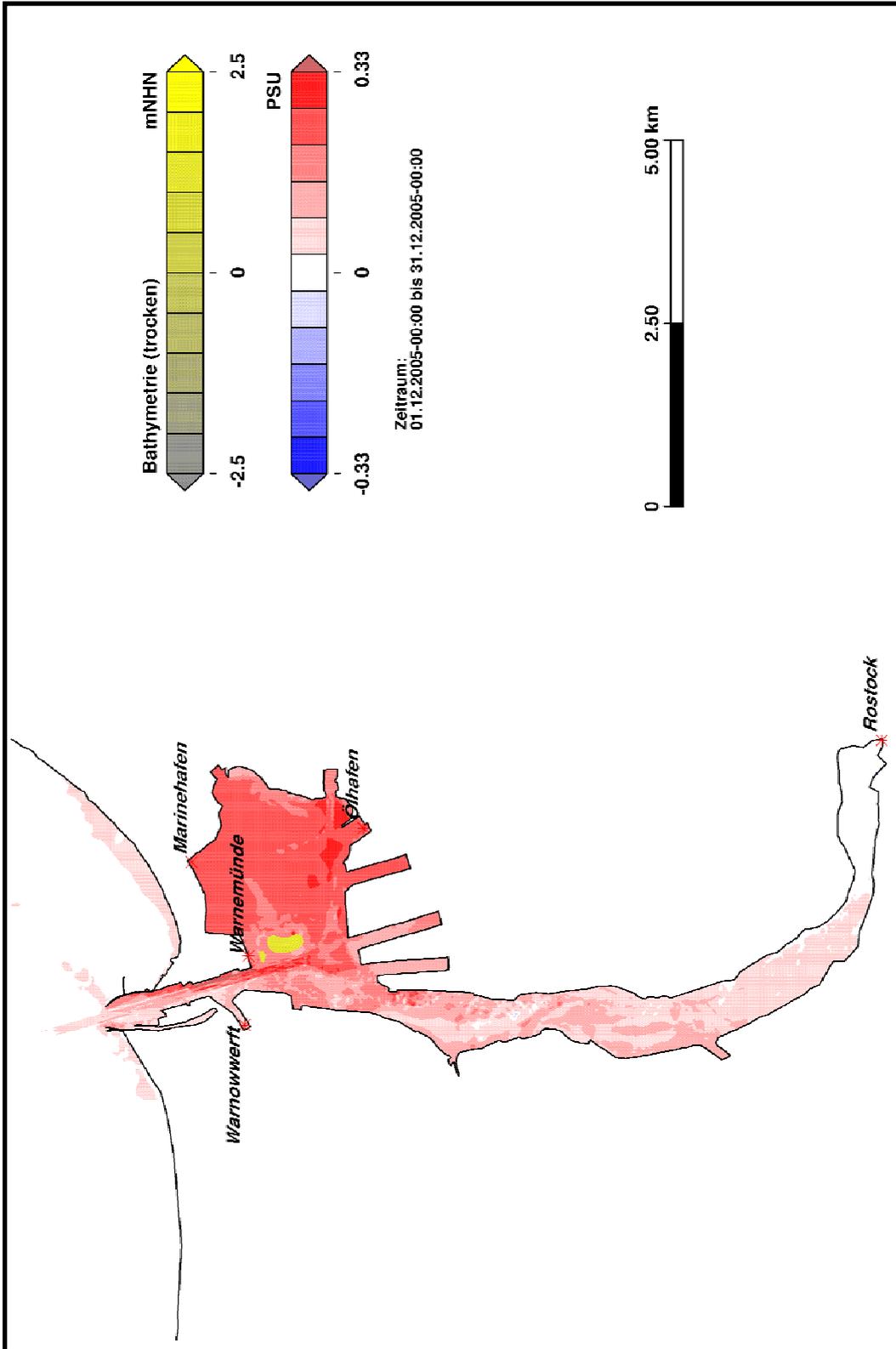


Bild 16: Ausbaubedingte Änderung des minimalen Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.

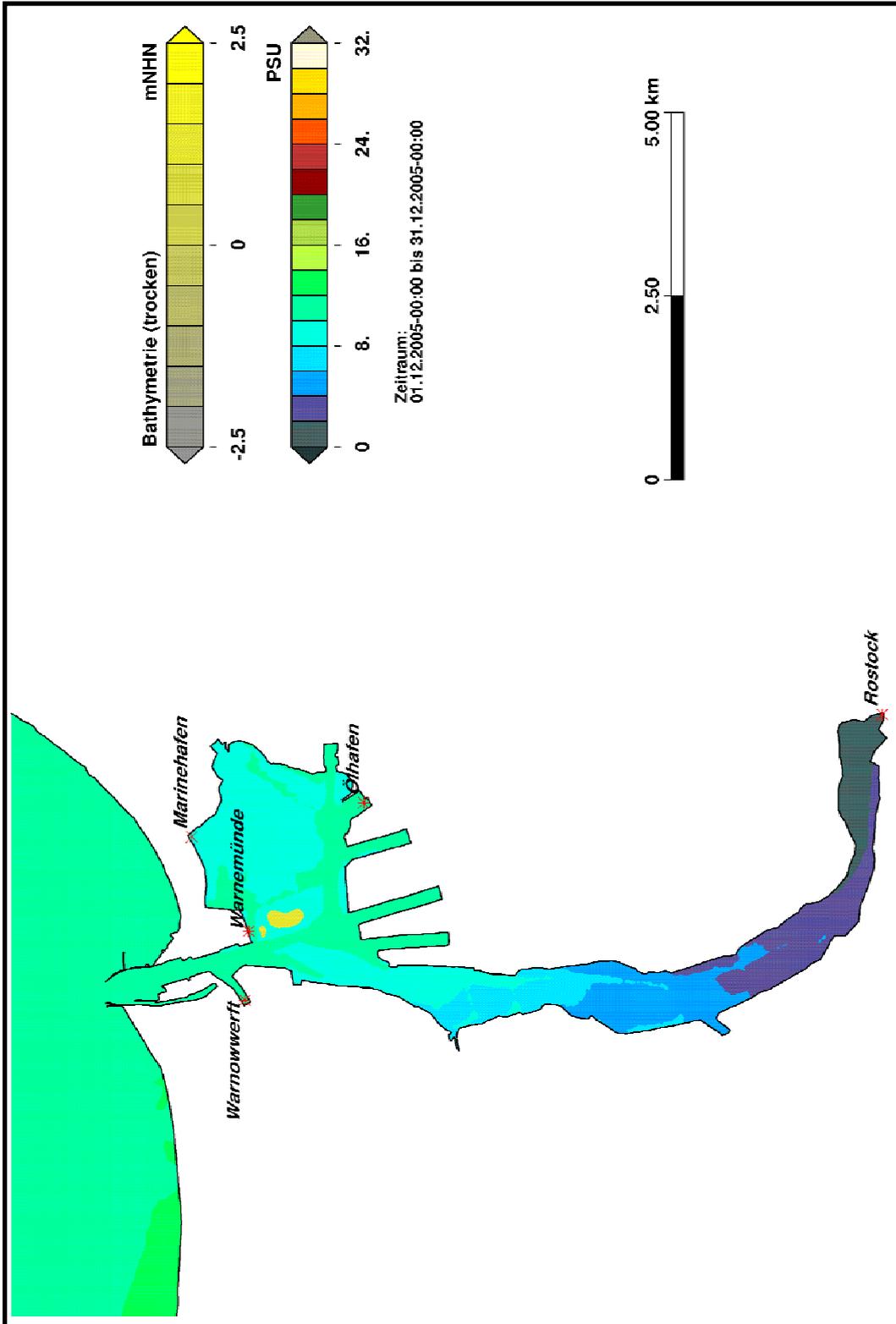


Bild 17: mittlerer Salzgehalt im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.

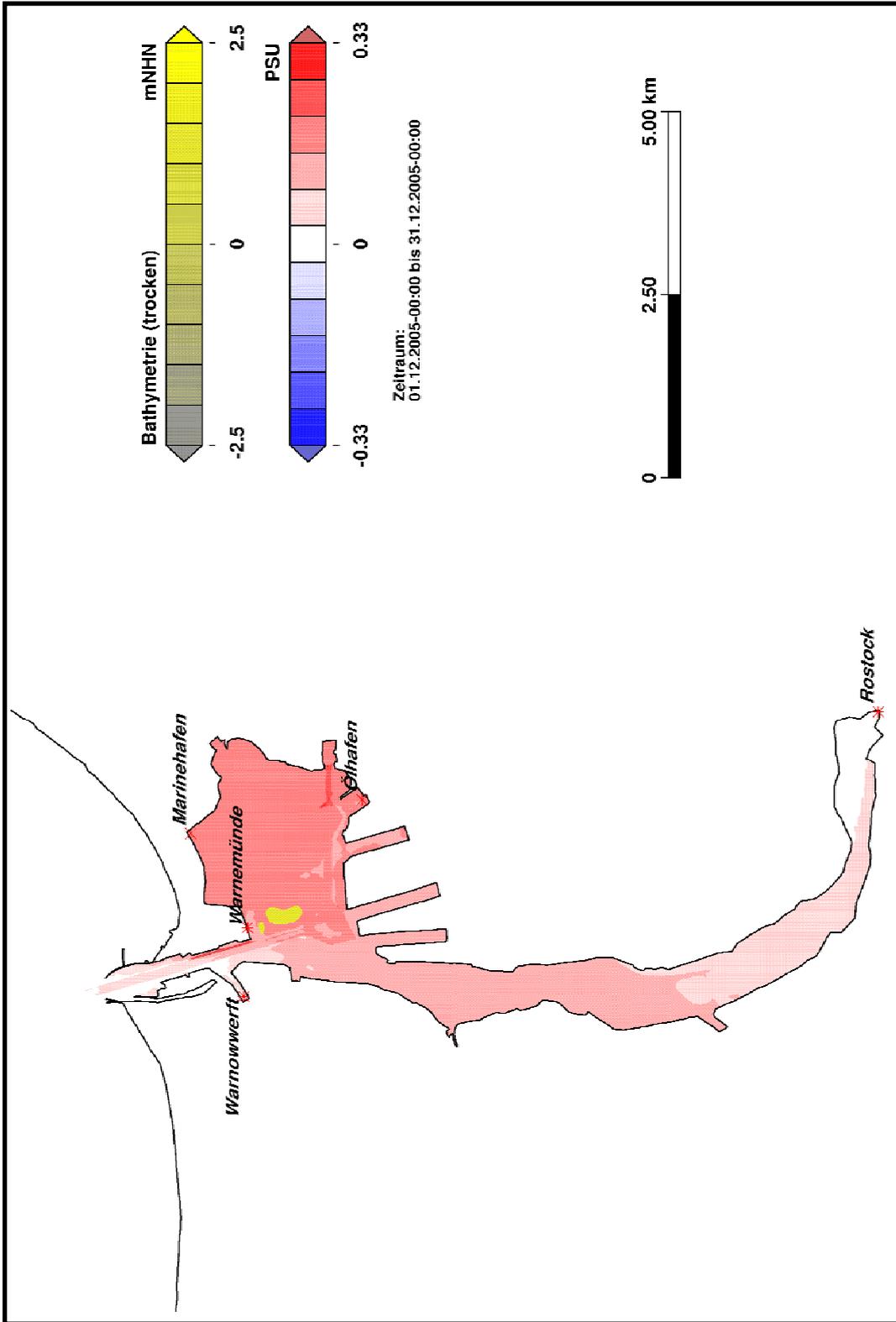


Bild 18: Ausbaubedingte Änderung des mittleren Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.

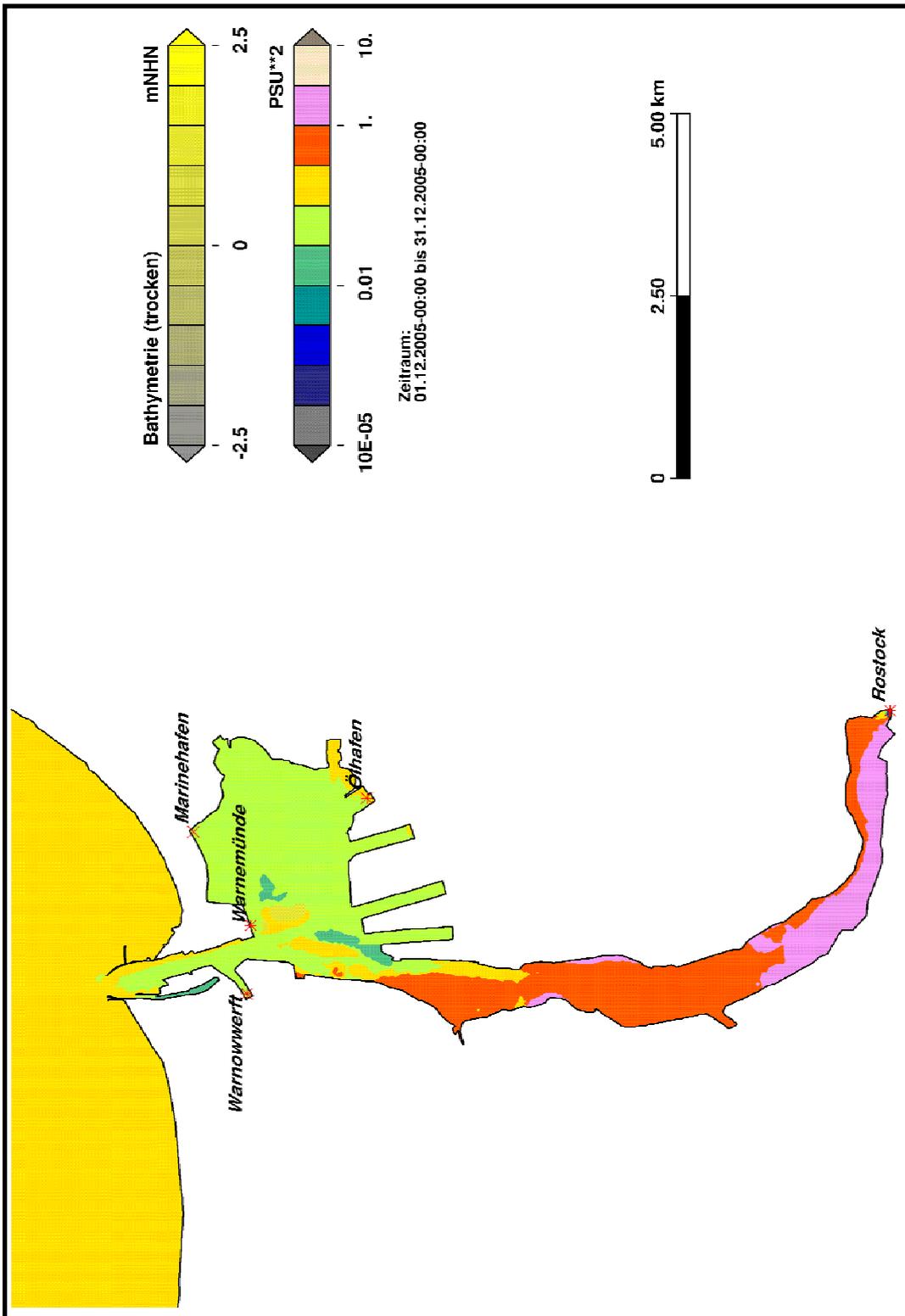


Bild 19: Varianz des Salzgehaltes im Analysezeitraum für den planerischen Istzustand.

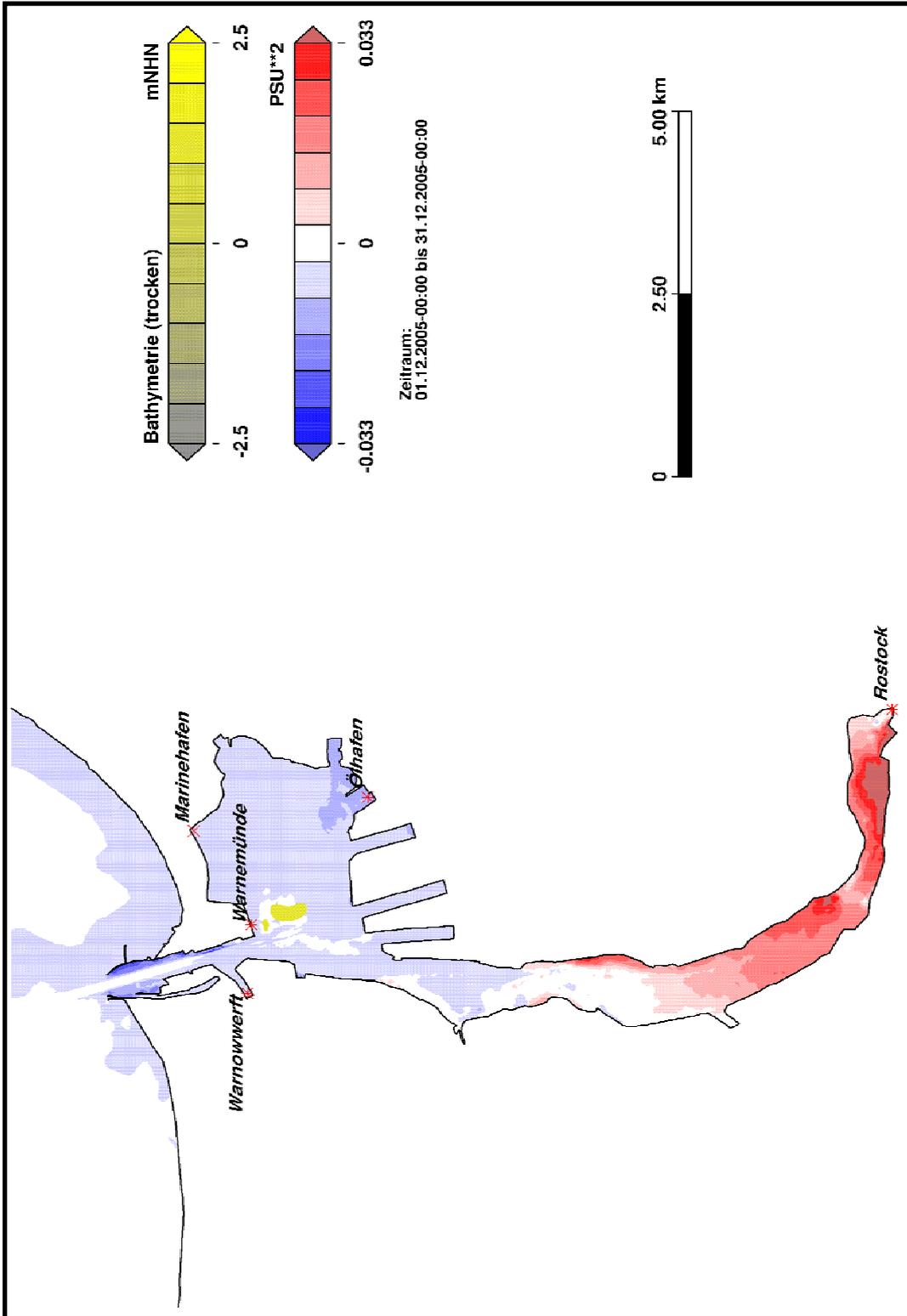
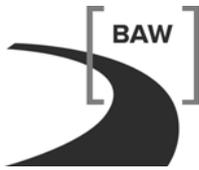


Bild 20: Ausbaubedingte Änderung der Varianz des Salzgehaltes im Analysezeitraum für den Ausbauzustand A1660.



Glossar

A

Ästuar – eine Meeresbucht, die von Land her Süßwassereinträge hat.

Ausbau – die Erweiterung eines bereits wirtschaftlich genutzten Gewässerabschnitts.

B

Bathymetrie – ungestörte Tiefe des Meeresbodens unter dem mittleren Meeresniveau.

Beugung – Richtungsänderung einer Welle aufgrund einer Änderung der Phasengeschwindigkeit innerhalb des Mediums.

Bundeswasserstraße – Gewässerabschnitt, für den eine Befahrenserlaubnis mit Wasserfahrzeugen besteht und der unter der Verwaltung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland steht.

C

Corioliskraft – eine auf einem rotierenden System (Erde) horizontal quer zur Bewegung eines Wasserteilchens gerichtete Scheinkraft, die auf der Nordhalbkugel eine Rechtsablenkung der Strömung bewirkt.

D

Deposition – Aufhöhung der Gewässersohle durch Absetzen von Feststoffen.

Diskretisierung – Beschreibung eines Kontinuums in Raum und Zeit durch endlich viele Stützstellen.

Dünung – der langwellige Anteil des Seegangs, der durch Umformung entsteht und nicht mehr der unmittelbaren Einwirkung des Windes zuzuschreiben ist.

E

Erosion – Abtragung der Gewässersohle und des Ufers durch Wasserbewegung.

F

Fahrrinne – künstlich auf eine Mindesttiefe gebaggerter Gewässerabschnitt, der als Schifffahrtsweg genutzt werden kann.

Fernwelle – langperiodische Wasserstandsschwankungen, die durch die meteorologischen Druckverhältnisse auf dem Ozean erzeugt werden und in die Schelfmeere einlaufen.

Fetch – Strecke, über die der Wind auf die Wasseroberfläche einwirken kann. Sie beeinflusst den maximal möglichen Seegang.

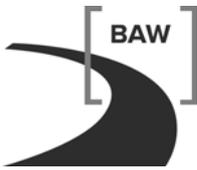
Flachwasser – Gewässerbereich mit in Relation zur mittleren Gewässertiefe geringen ungestörten Wassertiefen.

G

Gradient – räumliche Änderung einer physikalischen Größe.

H

Hydrologie – Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter der Landoberfläche sowie in Küstengewässern.



J

Jahresgang – Variation physikalischer (hier hydrologischer) Eigenschaften mit einer Periodendauer von einem Jahr.

M

Modell – schematische Nachbildung eines Systems bezüglich ausgewählter Eigenschaften und Vorgänge, z.B. für ein Einzugsgebiet, eine Gewässerstrecke, einen Grundwasserkörper.

Morphologie – die Umformung der Gewässersohle durch Einwirken von äußeren Kräften wie Seegang, Strömung.

N

Numerik – Eigenschaften von Rechenverfahren zur Berechnung der Lösungen mathematischer oder physikalischer Gleichungen durch Rechenanlagen (Computern).

O

Orbitalbewegung – ellipsenförmige Vertikalbewegung der Wasserteilchen in einer Wasserwelle.

P

Parametrisierung – Kapselung von physikalischen Prozessen, die durch eine Diskretisierung nicht mehr erfasst werden, in Formeln, die durch definierte Parameter gesteuert werden (Beispiel: turbulenter Austausch unterhalb der Maschenweite eines Gitters).

Pegel – Messeinrichtung zur Bestimmung des Wasserstandes über einem definierten Höhenniveau (Pegelnulppunkt).

Planerischer Ist-Zustand – Zustand der Bathymetrie des untersuchten Systems, der die aktuellsten verfügbaren Vermessungen sowie alle bereits planfestgestellten geplanten und im Bau befindlichen und für die Untersuchung maßgeblichen Bauvorhaben beinhaltet.

Planfeststellungsverfahren – In der Bundesrepublik Deutschland vorgeschriebenes Verfahren zur Genehmigung größerer Bauvorhaben wie Verkehrsinfrastruktur.

R

Reflexion – Richtungskehr einer Welle aufgrund erhöhten Widerstandes. Bei einer vollständigen Umkehrung der Wellenenergie spricht man von Totalreflexion.

Resonanz – Extreme Verstärkung einer Schwingung bei einer anregenden Kraft mit einer bestimmten Frequenz, der sogenannten Resonanzfrequenz.

S

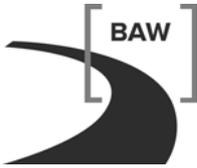
Schichtung – Bildung unterschiedlicher, in sich weitgehend homogener horizontaler Zonen in einem Wasserkörper sowie das Ergebnis dieses Vorgangs.

Seegang – durch Einwirkung von Naturkräften entstandenes lokales Wellenfeld an der Oberfläche eines Gewässers, das durch Überlagerung verschiedener Einzelwellen entsteht, die unterschiedliche Ursachen haben können.

Seiche – Eigenschwingungen (Beckenschwingungen) eines Meeresbeckens, Sees oder einer Bucht ohne direkte Einwirkung von äußeren Kräften.

Sturmhochwasser – im Bereich der Ostsee gebräuchlicher Ausdruck für windbedingte Erhöhung des Wasserstandes durch Einfluss von Sturmereignissen.

Süßwasser – Wasser mit einer geringen Konzentration an Salzen.



System – das in seinem Verhalten zu beschreibende Gewässer mit seinen physikalischen Eigenschaften.

U

Unterhaltung – Aufwendungen, die dem Erhalt eines definierten Zustandes der Wasserstraße oder eines Hafens dienen (z.B. Baggern von Untiefen).

Untiefe – eine für die Schifffahrt zu flache Stelle des Gewässers, die von tieferem Wasser umgeben ist.

V

Validierung – Überprüfung der Gültigkeit einer bereits erfolgten Kalibrierung des Modells für eine neue Bathymetrie (Gitternetz).

W

Windsee – der kurzweilige Anteil des Seegangs, der durch direkte Windeinwirkung entsteht.

Windwatt – Bereiche, die durch Extremwindereignisse trocken fallen können, da sie bei Normalwasserständen bereits geringe Wassertiefen haben.

Windstau – die Anhebung des Wasserstandes aufgrund einer länger anhaltenden, stetigen Windsituation mit hohen Windgeschwindigkeiten aus einer Richtung.



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

Am Ehrenberg 8 · 98693 Ilmenau
Tel. 03677 669-0 · Fax 03677 669-33 33

www.baw.de