



Planunterlagen

Anpassung der seewärtigen Zufahrt zum Seehafen Rostock

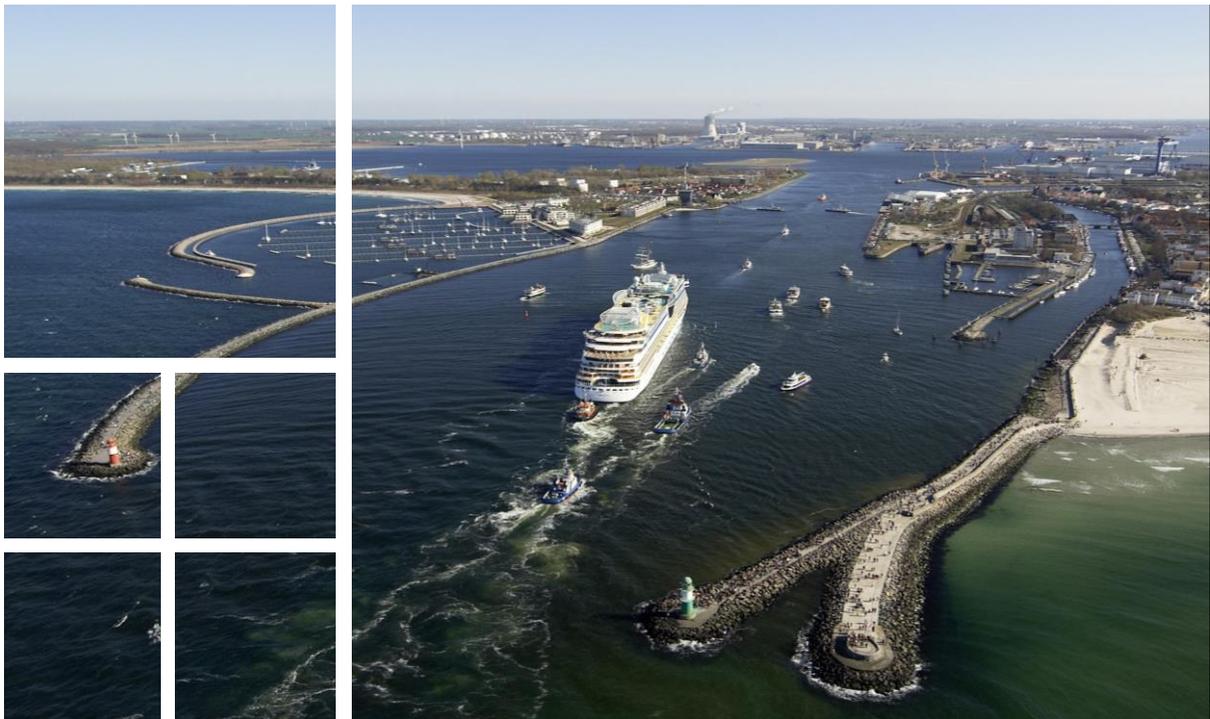


Foto: © ROSTOCK PORT/nordlicht

11_11 Hydrodynamik

**Anpassung der seewärtigen Zufahrt
zum Seehafen Rostock**

Hydrodynamik

B3955.03.06.10001

**Anpassung der seewärtigen Zufahrt
zum Seehafen Rostock**

Hydrodynamik

Auftraggeber: WSA Stralsund

Auftrag vom: 07.06.2016, Az.: 3115/2-231.2-Wa2/3

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.06.10001

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referate: Ästuarsysteme 1 & 2
Bearbeiter: Dr. Guntram Reiß
Dipl.-Oz. Marcus Boehlich

Hamburg, 14.05.2019

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

Zusammenfassung

Für den Seekanal Rostock ist eine Vertiefung der Fahrrinne zur Anpassung an größere Schiffsgrößen geplant. Dieses Vorhaben hat einen Einfluss auf die Hydrologie des Warnow-Ästuars, der hier qualitativ und quantitativ ermittelt wurde.

Das geplante Vorhaben hat auf die Hydrologie die folgenden Wirkungen:

1. Der mittlere Wasserstand, dessen Extremwerte und der dynamische Ablauf der prägenden physikalischen Phänomene (Windstau, Seiches, Tide) werden von dem Vorhaben nicht messbar beeinflusst. Die Maßnahme ist als hochwasserneutral einzustufen.
2. Die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Trasse des Seekanals werden leicht abnehmen. Ein zunehmender Unterhaltungsaufwand der Fahrrinne ist dadurch jedoch nicht zu erwarten.
3. Mit einer Erhöhung der Trübung durch Feinsedimente in der Wassersäule ist nur lokal und während der Bauzeit zu rechnen.
4. Durch die Vertiefung wird salzreiches Ostseewasser unterhalb des heutigen Sohlniveaus in die Warnow eindringen. Es wird von einer geringfügigen Erhöhung von maximal +0,1 ppt bei den mittleren, maximalen und minimalen Salzgehalten durch Vermischungsprozesse, insbesondere in den Wintermonaten, prognostiziert. Die natürliche zeitliche Schwankungsbreite des Salzgehaltes wird in der Tendenz abnehmen, da die minimalen Salzgehalte etwas stärker ansteigen als die Maximalwerte.
5. Die tiefengemittelte Wassertemperatur wird lokal in der Tendenz reduziert, die Mittelwerte und die natürliche Schwankungsbreite in der Temperatur ändern sich nicht nachweisbar.
6. Durch die Baggerarbeiten werden temporär Fein-Sedimente in das Umgebungswasser eingetragen. In der Unterwarnow führen diese lokal zu einer Trübungswolke, die weitgehend ortsfest wieder sedimentiert. Im Küstenvorfeld der Ostsee können Anteile der Sedimente während des Absetzvorgangs einige hundert Meter durch den Küstenlängstransport versetzt werden. Generell nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle die Belastung durch Trübung ab.
7. Änderungen in der Bathymetrie (morphologische Anpassungen) als Reaktion auf das Vorhaben sind nur im Bereich der Trasse und an der Umlagerungsfläche KS552a zu erwarten, soweit diese zur Verbringung genutzt wird.

Die Veränderungen in der Hydrologie sind im Verhältnis zur natürlichen Variabilität als gering einzustufen und verändern die charakteristischen Eigenschaften des Warnow-Ästuars außerhalb der Trasse des Seekanals nicht.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
1.1	Historie der Planung	1
1.2	Aufgabenstellung an die BAW	1
2	Unterlagen und Daten	3
2.1	Allgemeine Hinweise	3
2.2	Bathymetrische Datensätze	4
2.3	Topographische Geländemodelle	7
2.4	Meteorologische Datensätze	8
2.5	Hydrologische Datensätze	11
2.6	Sonstige Datengrundlagen	13
3	Beschreibung des Untersuchungsgebietes	14
3.1	Der Seekanal	14
3.2	Der Breitling	16
3.3	Der Radelsee	16
3.4	Zufahrt nach Rostock	16
4	Hydrologie der Unterwarnow	17
4.1	Dynamik im Ästuar Unterwarnow	17
4.1.1	Barotrope Prozesse	17
4.1.2	Barokline Prozesse	18
4.2	Wasserstand	19
4.3	Strömungen	19
4.4	Salzgehalt	20
4.5	Temperatur	21
5	Beschreibung des Vorhabens und der simulierten Modellvarianten	23
5.1	Planerischer Ist-Zustand	23
5.2	Ausbauzustand AZ1660	25
5.3	Physikalische Beschreibung der Wirkmechanismen des Ausbaus	31
6	Beschreibung der Untersuchungsmethode	33
6.1	Grundprinzip der modellbasierten wasserbaulichen Systemanalyse	33
6.2	Simulationszeiträume und Analysezeiträume	33
6.3	Modellsteuerung	34
6.3.1	Wasserstand am seeseitigen Rand	35
6.3.2	Temperatur und Salzgehalt am seeseitigen Rand	35
6.3.3	Binnenseitige Zuflüsse	36
7	Verwendetes Modell	37

7.1	Numerisches Verfahren, räumliche und zeitliche Auflösung	37
7.2	Vernachlässigte und parametrisierte Prozesse	37
7.3	Modellgebiet	38
8	Validierung des Warnow-Modells	39
8.1	Vorgehen	39
8.2	Vergleich von Modell und Messung für die Größe Wasserstand	40
8.3	Vergleich von Modell und Messung für die Größe Wassertemperatur	43
8.4	Vergleich von Modell und Messung für die Größe Salzgehalt	48
8.5	Bewertung des Modells	53
9	Ergebnisse des Variantenvergleiches	54
9.1	Ergebnisdarstellungen	54
9.2	Vorhabenwirkung für die Größe Wasserstand	54
9.2.1	Wirkung der Ausbauvariante, abgeleitet aus den Modellergebnissen	54
9.2.2	Auswirkungen auf den Hochwasserschutz	59
9.2.3	Auswirkungen auf die Entwässerung des Binnenlandes	59
9.3	Vorhabenswirkung für die Größe Strömungsgeschwindigkeit	60
9.3.1	Tiefengemittelte Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit	60
9.3.2	Tiefenabhängige Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit	63
9.4	Sedimentkonzentration und Sedimenttransport	67
9.5	Vorhabenswirkung auf die Größe Wassertemperatur	67
9.6	Variantenvergleich für die Größe Salzgehalt	79
10	Bauzeitliche Veränderung der Sedimentkonzentration durch Sedimentumlagerung	90
10.1	Ausbreitungsmechanismen	90
10.1.1	Vertikalbewegungen durch Gravitation und Turbulenz	90
10.1.2	Einfluss einer Hintergrundströmung	90
10.2	Statistische Analyse der hydrologischen Situation im Hinblick auf Baggern und Verbringen	91
11	Zusammenfassung	95
12	Literaturverzeichnis	97
	Abkürzungsverzeichnis	100

Bildverzeichnis		Seite
Bild 1	Digitale Bathymetrie 5x5 m, abgeleitet aus den verfügbaren Vermessungen, angegeben als Höhe z in m über NHN. Der Verlauf des Seekanals ist durch die Lage der Seezeichen gekennzeichnet.	6
Bild 2	Digitale Bathymetrie 5x5 m, abgeleitet aus den verfügbaren Vermessungen im Bereich der Ausbautrasse und des Breitlings, angegeben als Höhe z in m über NHN.	7
Bild 3	Vergleich des Luftdrucks aus Reanalyse-Daten (Rot) mit den Messwerten (Schwarz) an der meteorologischen Station Rostock-Warnemünde.	9
Bild 4	Vergleich der Windgeschwindigkeit aus Reanalyse-Daten (Rot) mit den Messwerten (Schwarz) an der meteorologischen Station Rostock-Warnemünde.	10
Bild 5	Positionen der temporären Messstationen für die Messkampagne 2016 und der Pegel des WSA Stralsund .	12
Bild 6	Die Unterwarnow stellt den wichtigsten Teil des Untersuchungsgebietes dar. Gezeigt wird hier die Bathymetrie als Höhe z in m NHN. Ortsbezeichnungen sind Magenta, die beiden Dauer-Pegel Blau beschriftet.	15
Bild 7	Prinzipiskizze der ästuarinen Zirkulation in der Unterwarnow. Die horizontalen Pfeile deuten die barokline Strömungskomponente, die kreisförmigen Pfeile die Vermischungsprozesse an. Die farbliche Veränderung der Pfeile zeigt die Veränderung des Salzgehaltes an (blau: hoher, grün: niedriger Salzgehalt).	18
Bild 8	Modellkonfiguration des Warnow-Modells mit Topographie. Die blaue Linie markiert den seeseitigen, offenen Rand, die blauen Namen die Zuflüsse. In magenta sind die Zoombereiche für die grafische Darstellung der horizontalen Kenngrößen abgebildet.	24
Bild 9	Ausbauquerschnitt für den Seekanal mit den am 13.03.2017 durch das WSA Stralsund übermittelten Solltiefen für die drei Teilabschnitte. Überarbeitet nach (WSV 2017).	26
Bild 10	Lage der auszubauenden Trasse des Seekanals, der Sandfalle sowie der zu vertiefenden Bereiche in den Hafenecken B und C	27
Bild 11	Wassertiefe auf dem Längsprofil im Seekanal, in Blau die Tiefen des DGM 2016, in Rot die Tiefen des Ausbauzustandes AZ1660	29
Bild 12	Lage des Längsprofils sowie der Kilometrierung des Seekanals. Weiterhin sind die Differenziefen zwischen dem DGM 2016 und dem AZ1660 dargestellt.	30
Bild 13	Simulation des Wasserstandsverlaufs des Sturmhochwassers vom 04.01.1954 für PIZ (schwarze Kurve) und AZ1660 (rote Linie). Die Differenz der Kurven ist in Grün dargestellt.	39
Bild 14	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Wasserstand, hier beispielhaft für die Station Rostock-Mühlendamm (ROS).	41

Bild 15	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Wasserstand, hier beispielhaft für die Messposition 10 (P010).	42
Bild 16	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, oberes Gerät, siehe auch Tabelle 2).	44
Bild 17	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, mittleres Gerät, siehe auch Tabelle 2).	45
Bild 18	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, unteres Gerät, siehe auch Tabelle 2).	46
Bild 19	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 10 (P10, einziges Gerät, siehe auch Tabelle 2).	47
Bild 20	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, oberes Gerät, siehe auch Tabelle 2).	49
Bild 21	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, mittleres Gerät, siehe auch Tabelle 2).	50
Bild 22	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, unteres Gerät, siehe auch Tabelle 2).	51
Bild 23	Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt hier beispielhaft für die Messposition 10 (P10, einziges Gerät, siehe auch Tabelle 2).	52
Bild 24	Simulierte Zeitreihen des Wasserstandes für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P06.	56
Bild 25	Simulierte Zeitreihen des Wasserstandes für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position RAD.	57
Bild 26	Simulierte Zeitreihen des Wasserstandes für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position ROS.	58
Bild 27	Maximalwert der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit im Planerischen Ist-Zustand für den Analysezeitraum August bis Dezember.	61
Bild 28	Vorhabenbedingte Änderungen des Maximalwerts der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit für den Analysezeitraum August bis Dezember. Änderungen kleiner als 0,01 m/s sind nicht dargestellt.	62
Bild 29	Simulierte Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P11.	64
Bild 30	Simulierte Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit in Bodenähe für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P11.	65

Bild 31	Simulierte Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P06.	66
Bild 32	Maximalwert der Wassertemperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.	68
Bild 33	Vorhabenbedingte Änderungen auf den Maximalwert der Temperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow. Änderungen kleiner als 0,1 °C werden nicht dargestellt	70
Bild 34	Minimalwert der Temperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.	71
Bild 35	Vorhabenbedingte Änderungen auf den Minimalwert der Temperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow. Änderungen kleiner als 0,1 °C werden nicht dargestellt.	72
Bild 36	Minimalwert der tiefengemittelten Temperatur im August im PIZ.	73
Bild 37	Vorhabenbedingte Änderungen auf den tiefengemittelten Minimalwert der Temperatur im August. Änderungen kleiner als 0,1 °C werden nicht dargestellt.	74
Bild 38	Maximalwert der Temperatur im Dezember im PIZ, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow.	75
Bild 39	Vorhabenbedingte Änderungen des Maximalwerts der Temperatur im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,1 °C werden nicht dargestellt.	76
Bild 40	Minimalwert der Temperatur im Dezember im PIZ, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow	77
Bild 41	Vorhabenbedingte Änderungen des Minimalwerts der Temperatur im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow. Änderungen kleiner 0,1 °C werden nicht dargestellt.	78
Bild 42	Minimalwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.	81
Bild 43	Vorhabenbedingte Änderung der Minimalwerte des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.	82
Bild 44	Maximalwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.	83
Bild 45	Vorhabenbedingte Änderung der Maximalwerte des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.	84
Bild 46	Mittelwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.	85

Bild 47	Vorhabenbedingte Änderung auf den Mittelwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.	86
Bild 48	Mittelwert des tiefengemittelten Salzgehaltes im Dezember im PIZ.	87
Bild 49	Vorhabenbedingte Änderung des Mittelwerts des tiefengemittelten Salzgehaltes im Dezember. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.	88
Bild 50	Verteilung der zeitlichen Veränderung des Wasserstandes, basierend auf 5-Minuten-Werten des Pegels Warnemünde von 01.01.2008-01.01.2018.	92
Bild 51	Verteilung des Betrages der Strömungsgeschwindigkeit für den simulierten Zeitraum an Position P05, abgeleitet aus den Modellwerten des Simulationszeitraums.	93
Bild 52	Verteilung des Betrages der Strömungsgeschwindigkeit für den simulierten Zeitraum an Position P11, abgeleitet aus den Modellwerten des Simulationszeitraums.	93

Tabellenverzeichnis		Seite
Tabelle 1	Für die Untersuchung bereitgestellte Daten, deren Nutzung und Herkunft.	4
Tabelle 2	Positionen und Anordnung der Messgeräte der Messkampagne und der Pegel des WSA Stralsund nach Angaben des WSA Stralsund.	11

Anlagenverzeichnis

Anlage A : Abbildungen Modellvalidierung

Anlage B : Abbildungen Variantenvergleich an Einzelpositionen

Anlage C: Abbildungen Variantenvergleich flächenhaft, Kenngrößen tiefengemittelt

Anlage D: Abbildungen Variantenvergleich entlang des Längsprofils Unterwarnow

Hinweise:

- Die Anlagen werden nur als elektronische Dokumente bereitgestellt.
- Die zugrunde liegenden Grafiken sind in einem Vektorformat erstellt worden und können daher gegebenenfalls auch in elektronischen Anzeigeprogrammen verlustfrei vergrößert werden.
- Als Navigationshilfe dienen Tabellen, die mit den zugehörigen Abbildungen verlinkt wurden.
- Als Rücksprungsymbol dient auf den Abbildungen das rote Dreieck (▲).

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der Hafenstandort Rostock blickt auf eine über 800 Jahre alte Tradition von der Zeit der Hanse bis in die Gegenwart zurück. Heute ist er ein wichtiger Verkehrsknotenpunkt für den Verkehr nach Skandinavien und das Baltikum (Bauermeister 2008).

Der Seekanal Rostock dient als Zufahrt zum Seehafen Rostock. Bereits heute laufen Schiffe den Seekanal an, die die Abmessungen des dem heutigen Ausbauzustand zugrunde liegenden Bemessungsschiffes in der Länge, Breite und Maximaltiefgang überschreiten und können daher nur teilabgeladen den Seehafen Rostock erreichen. Daher wurde eine Anpassung der Fahrrinnenabmessungen in den Bundesverkehrswegeplan aufgenommen. Der Ausbauplanung wird ein Bemessungsschiff mit den Abmessungen Länge x Breite x Tiefgang = 275 m x 48 m x 15 m zugrunde gelegt (WSV 2017).

1.1 Historie der Planung

Mit Schreiben vom 14.04.2009 beantragte das Land Mecklenburg-Vorpommern beim damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) den weiteren Ausbau des Seekanals Rostock. Träger des Gesamtvorhabens ist die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Stralsund.

Das BMVBS erteilte daraufhin am 03.07.2009 einen Planungsauftrag an die damalige WSD Nord. In einer Machbarkeitsstudie wurden die Auswirkungen der Maßnahme bereits vorläufig abgeschätzt (BAW 2011). Am 10.10.2014 wurde der Untersuchungsrahmen von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) festgesetzt.

Am 07.06.2016 wurde der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) der Auftrag zur Erstellung des Gutachtens mit der im Folgenden beschriebenen Aufgabenstellung durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Stralsund erteilt.

1.2 Aufgabenstellung an die BAW

Für die Umweltverträglichkeitsprüfung wird von der BAW eine wasserbauliche Systemanalyse zur Ermittlung vorhabenbedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter erstellt.

Die wasserbauliche Systemanalyse der abiotischen Systemparameter umfasst die Ermittlung der maßgebenden Kennwerte der Hydrodynamik, des Salzgehaltes und der Temperatur auf der Basis einer hochauflösenden 3D hydronumerischen (HN)-Modellierung und fachwissenschaftlicher Kenntnisse über das Revier.

Im Einzelnen werden im folgenden Gutachten Aussagen zu folgenden Themen getroffen:

- Änderungen der kennzeichnenden Wasserstände
- Änderungen der Strömungen
- Änderungen des Salzgehaltes und der Wassertemperatur
- Ausbreitung von Schwebstoffen während der Bautätigkeit
- Morphologische Änderungen

Die Aussagen über vorhabenbedingte Änderungen werden zum Teil modellgestützt ermittelt, d.h. die quantitativen Wirkungen werden durch die Interpretation von Berechnungsergebnissen

abgeleitet. Soweit dies nicht erfolgt, wird die Wirkung aus physikalischen Grundsätzen fachwissenschaftlich abgeleitet. Die Aussagen des Gutachtens basieren auf Simulationen mit einem hydronumerischen Modell der Unterwarnow. Die Zeitreihen für den Antrieb am seeseitigen Rand werden mit Hilfe eines numerischen Ostseemodells und Messungen abgeleitet. Das Thema Wechselwirkung Schiff – Wasserstraße wird in einem separaten Gutachten bearbeitet.

2 Unterlagen und Daten

Zur Bearbeitung der Fragestellung wurden zum Aufbau der hydronumerischen Modelle der Warnow und der Ostsee, zur Validierung des Warnow-Modells und zur Steuerung der offenen Ränder die nachfolgend genannten Datengrundlagen genutzt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Nutzung der für die Untersuchung bereit stehenden Daten.

2.1 Allgemeine Hinweise

Die verwendeten Datensätze wurden aus verschiedenen Quellen bezogen. Die Qualität der verwendeten Datensätze variiert in räumlicher und zeitlicher Auflösung. Die genutzten Datensätze besitzen unterschiedliche räumliche Bezugssysteme. Diese sind:

- Geografische Koordinaten (WGS84)
- Universal Transverse Mercator (UTM/ETRS89, Zone 33)
- Gauß-Krüger-Koordinaten (Krassowski-Ellipsoid, Streifen 4)

Alle Daten wurden wenn erforderlich einheitlich in das Koordinatenbezugssystem *UTM/ETRS89, Zone 33* überführt. Die Koordinatentransformation erfolgte mit der Software GEOTRANSFORMER (BAW 2017). Die Lagegenauigkeit der Transformation liegt zwischen 0,02 und 0,5 Metern.

Alle Datensätze wurden einer Sichtung unterzogen. Insbesondere Rohdaten (Peilungen, hydrografische Messungen) wurden auf Plausibilität geprüft. Sofern Messungen offensichtlich fehlerhaft oder nicht plausibel erschienen, wurden diese nicht berücksichtigt. Verantwortlich für die Datenqualität sind die in Tabelle 1 genannten Institutionen.

Auf die für den Aufbau des Ostseemodells verwendeten Datensätze wird hier nicht näher eingegangen. Diese sind umfassend in dem Technischen Bericht zum Ostseemodell beschrieben (Seiß 2015). Im Bereich der Baumaßnahme wurden ergänzend auch für das Ostseemodell die für das Warnow-Modell verwendeten Daten genutzt, soweit dies erforderlich war.

Großer Wert wird auf die Aktualität der verwendeten topographischen und bathymetrischen Daten gelegt. Bei Vorliegen mehrerer gleichartiger Datensätze werden die neueren Daten genutzt. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass der zugrunde gelegte Vergleichszustand (planerischer Ist-Zustand) zeitlich möglichst dicht am geplanten Ausbautermin modelliert werden soll. Die hydrologischen Daten sollen alle im Warnow-Ästuar möglichen Situationen von Relevanz widerspiegeln. Diesem Kriterium folgend, wurde die Spanne von Sommer bis Winter als Messzeitraum für die Sondererhebung der Hydrologie an Dauermessstationen gewählt. Da jedoch nicht alle Stationen durchgängig über die gesamte Dauer der Kampagne Daten liefern konnten, stehen nicht an allen Messstationen gleich lange Messzeitreihen zur Verfügung.

Tabelle 1 Für die Untersuchung bereitgestellte Daten, deren Nutzung und Herkunft.

Datentyp	Verwendungszweck	Datenquelle
Echolotungen	Beschreibung der Bathymetrie	Überwiegend WSV/BSH
Geländehöhen	Beschreibung der Topografie der Überflutungsflächen	StALU-MM, BKG
Pegelmessung	Randsteuerung (seeseitiger Rand) und Validierung	WSA Stralsund, WSA Lübeck, SMHI
Gewässerkundliche Haupttabellen	Hydrologische Informationsgrundlage	BfG, Quelldaten: WSV
Wasserdruckmessung	Validierung	WSA Stralsund
Wassertemperatur	Validierung / Randsteuerung	WSA Stralsund
Salzgehalt	Validierung / Randsteuerung	WSA Stralsund
Meteorologische Reanalyse-Felder	Randsteuerung Wasseroberfläche	Deutscher Wetterdienst
Meteorologische Messungen	Validierung der meteorologischen Randsteuerung	Deutscher Wetterdienst
Abflussdaten	Randsteuerung	WSA Stralsund, LUNG-MV
Geoinformationen aus Seekarten	Orientierungsgrundlage im Untersuchungsgebiet	BSH
Geoinformationen aus OpenStreetMap	Orientierungsgrundlage im Untersuchungsgebiet	OpenStreetMap.org

2.2 Bathymetrische Datensätze

Ein wesentlicher Bestandteil des hydronumerischen Modells der Warnow ist die Bathymetrie des Modellgebietes. Diese beeinflusst in erheblichem Maße die Charakteristik der hydrodynamischen Verhältnisse im Ästuar Warnow. Die Bathymetrie ist im Untersuchungsgebiet so gut wie möglich abzubilden, da die zu untersuchende Baumaßnahme als Veränderung der Bathymetrie im Modell eingebaut wird. Folgende bathymetrische Datensätze wurden zur Modellerstellung eingesetzt:

- Bathymetrien der Ostsee, bereitgestellt vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde (Seifert et al. 2001)
- DGM der deutschen Küstengewässer der Ostsee, erstellt vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2014)
- Die verfügbaren Echolotungen (synonym: Peilungen) der Jahre 2009 und 2010 des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie
- Die verfügbaren Echolotungen der Jahre 2011 bis 2017 des WSA Stralsund. Diese umfassen Verkehrssicherungspeilungen sowie Sonderpeilungen. Diese Peilungen werden mit Fächerlot gemessen und decken den Nahbereich der Baumaßnahme vollständig ab.

Aus den vorliegenden Geländemodellen und Peilungen sind zwei Geländemodelle mit unterschiedlicher Auflösung abgeleitet worden. Ein gröberes Modell (5x5 m Auflösung in der Fläche)

für das gesamte (wasserbedeckte) Modellgebiet und ein feineres (1x1 m Auflösung in der Fläche) für die Trasse des Seekanals und dessen unmittelbaren Nahbereich. Die aus den Daten abgeleitete digitale Bathymetrie der gröberen Auflösung ist in Bild 1 dargestellt. Zur Orientierung hinsichtlich der Lage des Seekanals dienen einige Seezeichen, die als farbige Punkte dargestellt sind. Einen vergrößerten Ausschnitt zeigt Bild 2. Dieser zeigt die komplexe Struktur und die Variabilität der Bathymetrie des Untersuchungsgebiets im Bereich des Ausbauvorhabens.

Da die Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterwarnow nur während Extremereignissen Werte annehmen, die zu Mobilisierung von größeren Sedimentmengen führen, sind die morphologischen Änderungen im Untersuchungsgebiet auch über eine größere Zeitspanne betrachtet gering. Durch Vergleich mit Messungen der Bathymetrie aus der Vergangenheit wird diese Annahme bestätigt. Daher dürfen ältere Datensätze, hier als bis zu 10 Jahre alt definiert, im Untersuchungsgebiet noch als repräsentativ angesehen werden. Im von dem Bauvorhaben beanspruchten Gebiet liegen aktuelle Daten aus 2016/2017 vor.

Die Auflösung, Aktualität und Qualität der aufgeführten bathymetrischen Daten erfüllt die für die modelltechnische Abbildung des Ästuars Warnow und der dort geplanten Baumaßnahme „Ausbau des Seekanals“ zu stellenden Qualitätsansprüche.

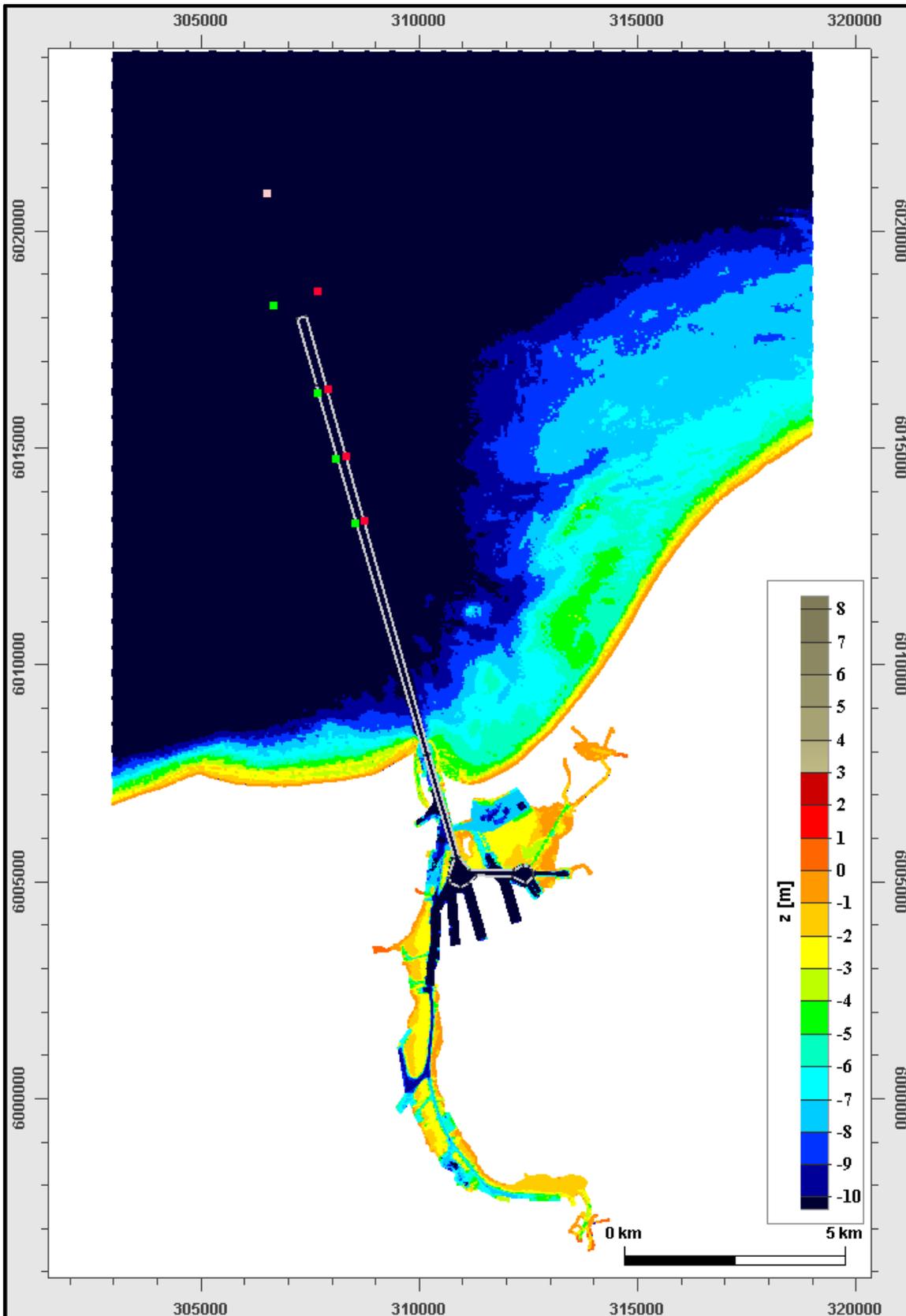


Bild 1 Digitale Bathymetrie 5x5 m, abgeleitet aus den verfügbaren Vermessungen, angegeben als Höhe z in m über NHN. Der Verlauf des Seekanals ist durch die Lage der Seezeichen gekennzeichnet.

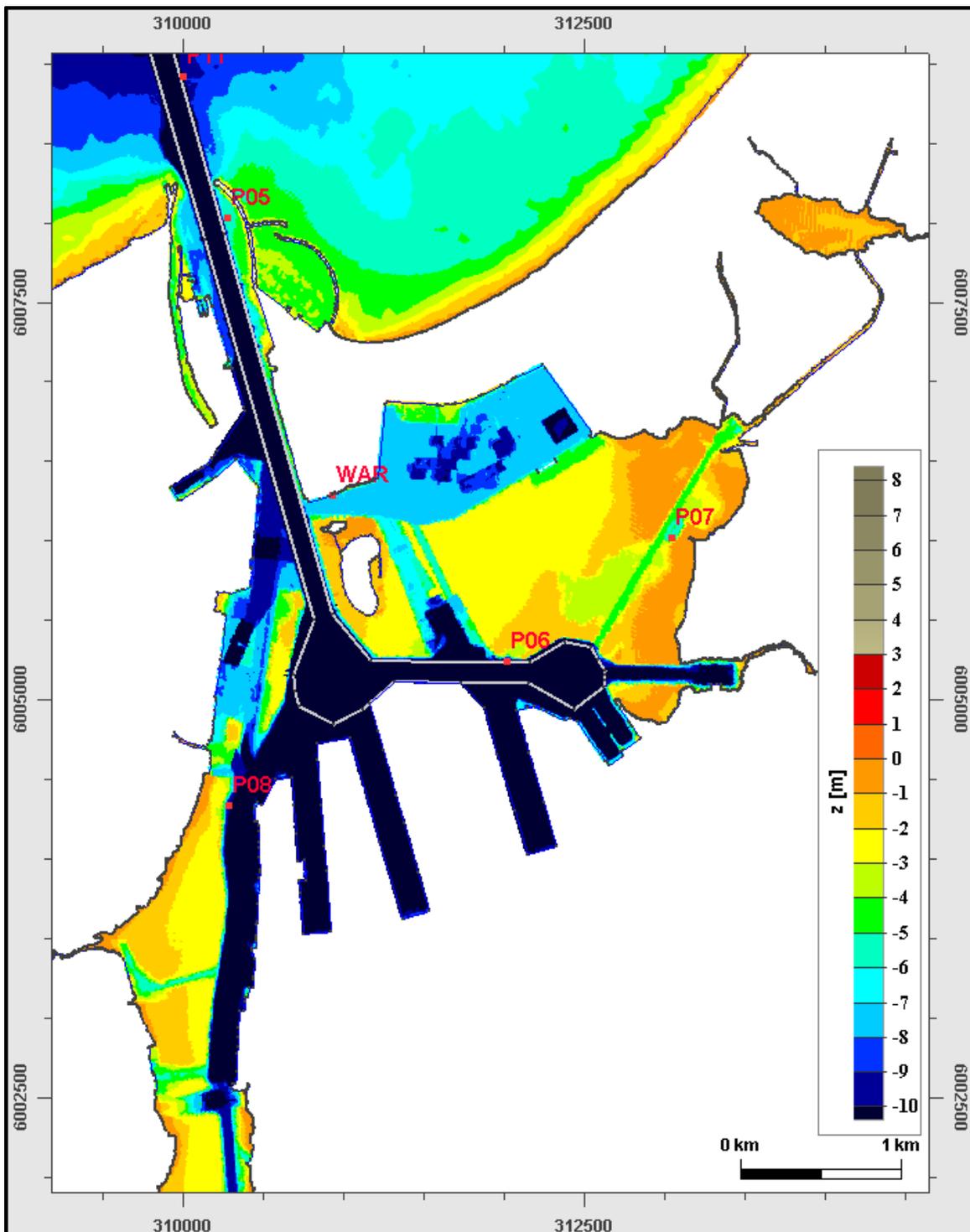


Bild 2 *Digitale Bathymetrie 5x5 m, abgeleitet aus den verfügbaren Vermessungen im Bereich der Ausbautrasse und des Breitlings, angegeben als Höhe z in m über NHN.*

2.3 Topographische Geländemodelle

Um auch Überflutungsflächen abbilden zu können, wurden zusätzlich topographische Daten aus der Geländevermessung genutzt. Diese beschreiben die Höhe von Landflächen, die sporadisch durch Sturmhochwasser überflutet werden können. Hier wurden folgende Datensätze genutzt:

- Digitales Geländemodell des Bundesamtes für Kartografie und Geodäsie (BKG) in der horizontalen Auflösung 10x10 Meter (Bundesamt für Kartografie und Geodäsie 2012).
- Digitales Geländemodell des Landes Mecklenburg-Vorpommern in der Auflösung 1x1 m. Die für das Warnow-Ästuar relevanten Daten wurden der BAW vom Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU-MM) zur Verfügung gestellt (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg 2016).
- Angaben zu Höhe und Verlauf der aktuellen und in der näheren Zukunft geplanten Hochwasserschutzlinie (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg 2016).

Aus diesen topografischen Daten und Informationen wurde ein separates digitales Geländemodell mit der Auflösung 5x5 m für die überflutungsgefährdeten, an die Unterwarnow angrenzenden Flächen abgeleitet. Dabei wurden bevorzugt die Daten des StALU-MM (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg 2016) genutzt. Dort, wo dieses DGM keine Information lieferte, wurden die gröber aufgelösten Daten des BKG verwendet.

Die im Untersuchungsgebiet liegenden Überflutungsflächen haben bei Hochwasser einen Einfluss auf die Hydrodynamik. Für die Zwecke dieses Gutachtens reicht die Genauigkeit der oben genannten Datensätze aus.

2.4 Meteorologische Datensätze

Für das Jahr 2016 liegen in der Fläche synoptische Reanalyse-Felder des ICON-Modells des DWD vor (Reinert et al. 2018). Unter Reanalyse-Daten versteht man in der Meteorologie Datensätze, die ein definiertes Gebiet in Raum und Zeit abdecken und unter Verwendung eines numerischen Wettermodells aus vorhandenen Messungen dynamisch interpoliert wurden. Sie beschreiben daher das Wettergeschehen einer vergangenen Zeitspanne, im Gegensatz zu Vorhersage-Daten, die eine mögliche Wetterentwicklung in der Zukunft beschreiben.

Der hier verwendete Datensatz beschreibt die Wetterverhältnisse der Zeitspanne 01.01.2016, 00:00 UTC bis 01.01.2017, 00:00 UTC. Für die Untersuchung werden die Größen Windgeschwindigkeit (Vektor), Luftdruck, und bodennahe Lufttemperatur verwendet.

Zur Validierung der Reanalyse-Daten wurden Messdaten (Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Lufttemperatur) der Wetterstationen Rostock-Warnemünde und Arkona des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Diese wurden direkt vom DWD bezogen. Die Reanalyse-Daten des Luftdrucks zeigen an der Messstation Rostock-Warnemünde eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen (Bild 3). Die Reanalyse der Windgeschwindigkeit zeigt dagegen zum Teil Abweichungen von den Messungen bei Warnemünde (Bild 4). Für die vorliegende Untersuchung ist jedoch nicht erforderlich, dass das simulierte meteorologische Szenario exakt einem in der Natur gelaufenen Szenario entspricht, da es gleichermaßen bei der Simulation des planerischen Ist-Zustandes wie des Ausbauzustandes verwendet wird und die Windanregung aus den Reanalyse-Daten die gleiche Variabilität besitzt wie die Messungen an der Station Warnemünde.

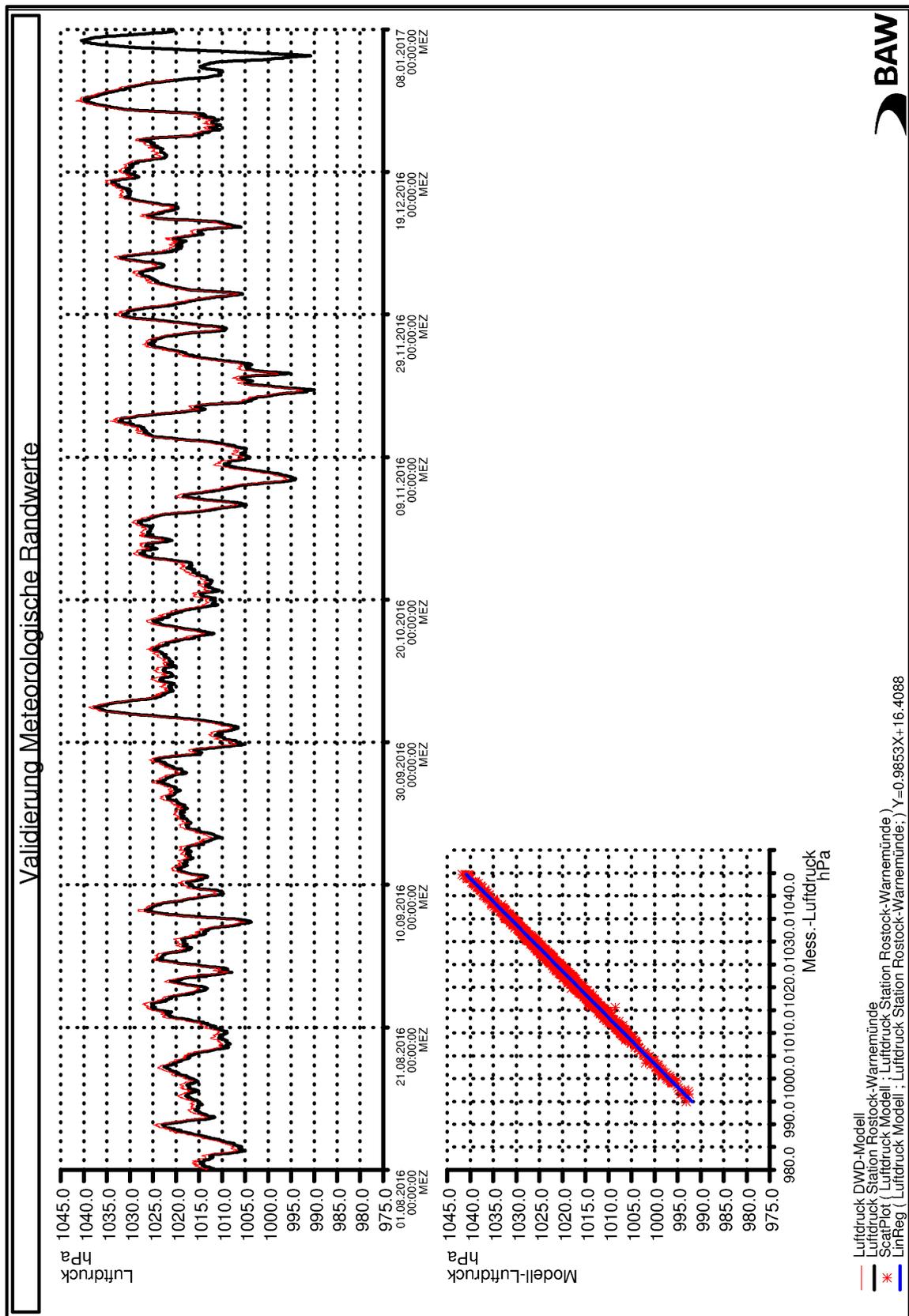


Bild 3 Vergleich des Luftdrucks aus Reanalyse-Daten (Rot) mit den Messwerten (Schwarz) an der meteorologischen Station Rostock-Warnemünde.

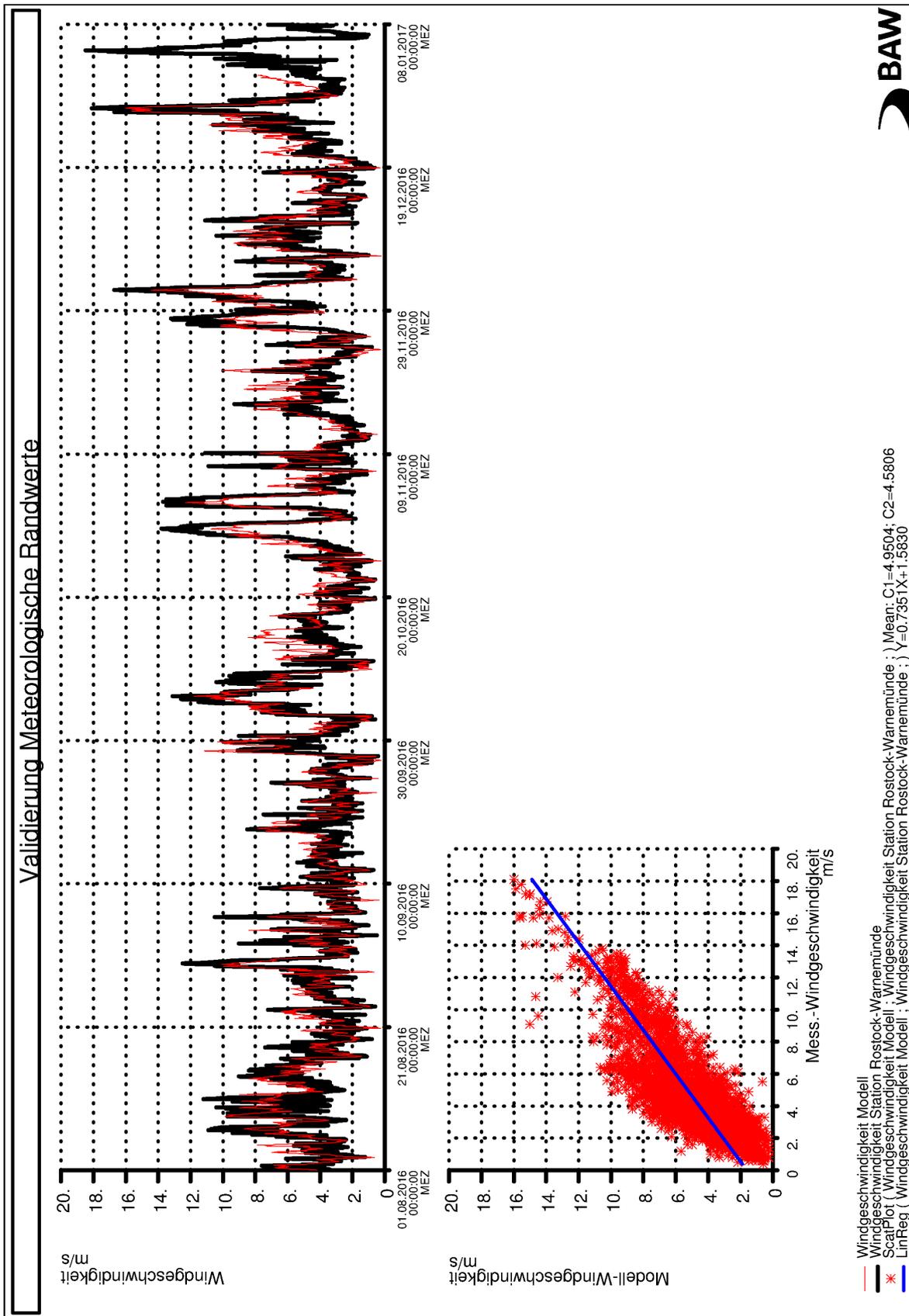


Bild 4 Vergleich der Windgeschwindigkeit aus Reanalyse-Daten (Rot) mit den Messwerten (Schwarz) an der meteorologischen Station Rostock-Warnemünde.

2.5 Hydrologische Datensätze

Hydrologische Datensätze wurden sowohl vorhandenen Datenbeständen entnommen als auch in einer Messkampagne durch das WSA Stralsund neu erhoben. Es standen zur Verfügung:

- Zeitreihen des Wasserstandes für die Pegel Warnemünde und Rostock-Mühlendamm. Diese wurden der Datenbank der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WISKI entnommen. Die Pegeldaten der genannten Pegel liegen seit 1989 weitgehend durchgängig in der Datenbank vor. Für dieses Gutachten wurden die Daten des Jahres 2016 verwendet. Die Positionen der Pegel sind in Bild 5 dargestellt.
- Abflussganglinie der Warnow am Pegel Rostock-Geinitzbrücke (LUNG-MV) für den Zeitraum 01.01.2016 bis 01.01.2017.
- Der Abfluss des Prahmgrabens in den Radelsee für das Jahr 2016.
- Temperatur, Leitfähigkeit und Chlorid-Gehalt für den Radelsee aus 1997 und 2016.
- Messungen von Temperatur, Leitfähigkeit und Druck an elf temporären Messpositionen in mehreren Tiefenniveaus für den Zeitraum 12.07.2016 bis 12.12.2016. Die Positionen und die Messanordnung sind in Bild 5 und Tabelle 2 dargestellt. Die Messstelle P05 wurde im Dezember durch P12 ersetzt, die in ihrer Lage sehr nahe an P05, aber auf größerer Wassertiefe liegt.

Hydrologische Messungen können die Hydrodynamik eines Gewässers aufgrund ihrer begrenzten räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht vollständig abbilden. Die Datenlage wird jedoch für den zu erfüllenden Zweck, das im Gutachten verwendete hydronumerische Modell zu validieren, als ausreichend angesehen.

Tabelle 2 Positionen und Anordnung der Messgeräte der Messkampagne und der Pegel des WSA Stralsund nach Angaben des WSA Stralsund.

Bezeichnung	Geogr. Länge (WGS84)	Geogr. Breite (WGS84)	Anzahl Geräte	Geplante Tiefen (m unter NHN)
P01	11°54,279' E	54°11,913' N	3	2; ~10; 17,7
P02	12°01,705' E	54°16,538' N	3	2; ~9,5; 17,1
P03	12°08,357' E	54°18,262' N	3	2; ~9; 15,45
P05	12°05,536' E	54°11,108' N	3	2; ~ 5; 8,3
P06	12°07,242' E	54°09,648' N	3	2; ~5,5; 9,1
P07	12°08,156' E	54°10,085' N	2	2; 4,5
P08	12°05,688' E	54°09,121' N	3	2; ~5,5; 8,5
P09	12°06,075' E	54°06,462' N	2	2; 4,9
P10	12°09,186' E	54°05,594' N	1	1,6
P11	12°05,251' E	54°11,587' N	3	2; ~7,5; 13,2
P-W	12°06,203'E	54°10,1836N	1	Pegel
P-RM	12°09,306'E	54°04,9837N	1	Pegel

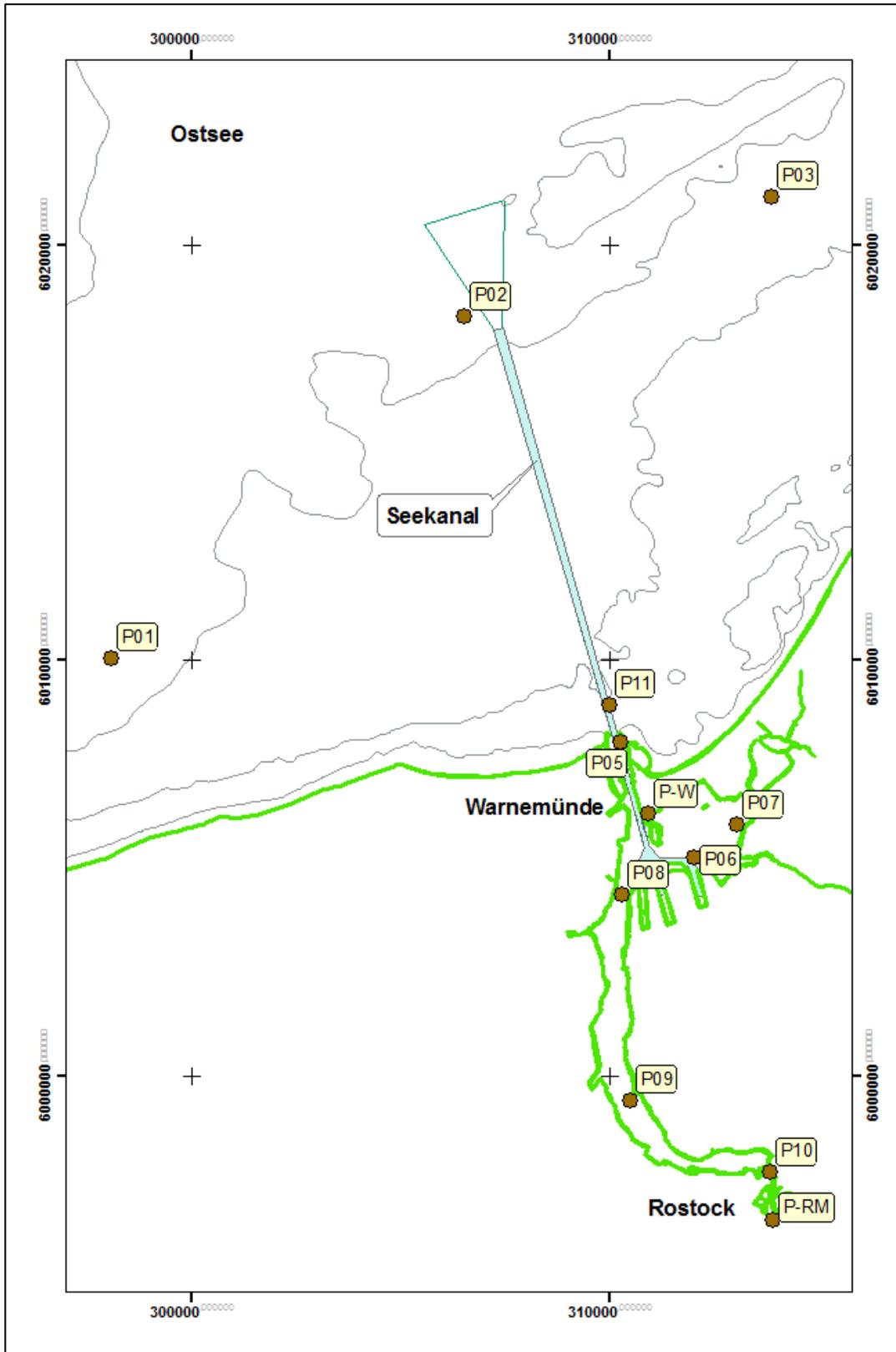


Bild 5 Positionen der temporären Messstationen für die Messkampagne 2016 und der Pegel des WSA Stralsund.

2.6 Sonstige Datengrundlagen

Ergänzend wurden zur Orientierung im Revier sowie zur Modellerstellung die folgenden Unterlagen genutzt:

- Seekarten des BSH in analoger und digitaler Form (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH))
- OpenStreetMap-Karten (<https://www.openstreetmap.org/#map=12/54.1426/12.1169>) als Kartengrundlage für Übersichtsdarstellungen.
- Ausführungsplanung Wohngebiet Petriviertel (Wisotzki 27.04.2011).
- Digitale Luftbilder des Geodatenzentrums (Bundesamt für Kartografie und Geodäsie 2018) zur Extraktion von Uferverläufen.

3 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Unterwarnow und die als Seekanal bezeichnete Schiffahrtsrinne in die Ostsee (Bild 6).

Binnenseitig endet die Unterwarnow am Mühlendammwehr in Rostock. Von dort verläuft die Unterwarnow an dem linksseitig gelegenen Stadthafen vorbei bis auf Höhe Lichtenhagen flussähnlich nach Norden. Das Westufer ist stark überbaut.

Im Nordteil verbreitert sich die Unterwarnow zu einer Bucht, die „Breitling“ genannt wird. Die Bezeichnung „Breitling“ findet man auch an anderen Küstengewässern für eine Verbreiterung eines sonst schmalen Verlaufs. Im vorliegenden Text ist mit der Bezeichnung „Breitling“ der Gewässerteil gemeint, der südlich von den Seehafenbecken und nördlich von den Kaianlagen des Marinehafens begrenzt wird und im Westen an die Hauptrinne der Unterwarnow angrenzt.

An den Breitling ist der Radelsee, ein Brackwassersee, über den Moorgraben angebunden.

Außerdem grenzen an den Breitling die vier für große Seeschiffe zugänglichen Hafenbecken des Seehafens Rostock an. Der Seehafen ist von der Ostsee durch den Seekanal zugänglich. Die Unterwarnow endet an den Molenköpfen, jedoch führt die Fahrrinne des Seekanals noch ca. 12 km quer zur Küste in die Ostsee. Auf den letzten 4 km dieses Streckenabschnittes besitzt die aktuelle Trasse von Natur aus ausreichende Tiefen. Der Verlauf ist in Bild 1 durch die Lage der Fahrwasserbetonung zusätzlich angedeutet.

An der Wurzel der West-Mole zweigt der „Alte Strom“ von dem Hauptfahrwasser ab. Östlich grenzt der neue Yachthafen „Hohe Düne“ seeseitig an die Ost-Mole an.

3.1 Der Seekanal

Der Seekanal ist die künstlich vertiefte Schiffahrtsrinne von der vorgelagerten Ostsee in die Unterwarnow und weist aktuell eine Solltiefe von 14,5 m unter NHN auf. Die Zufahrt zum Seehafen beginnt an der Ansteuerungstonne Rostock bei (12°01'35,486"O, 54°17'55,017"N) und verläuft als gerade Linie in Richtung 161,6° bezogen auf geografisch Nord an den Molen beim Leuchtfeuer Warnemünde und der Mittelmole am alten Strom vorbei bis zur ersten Wendeplatte. Dabei durchschneidet er in der Ostsee die zur Küste hin allmählich ansteigende Bathymetrie. An der ersten Wendeplatte knickt das Hauptfahrwasser nach Osten ab und verläuft bis zur zweiten Wendeplatte vor dem Petroleumhafen. Von diesem zweiten Teilstück zweigen die Hafenbecken „B“ und „C“ ab, die als eigenständige Maßnahme etwa zeitgleich zu der geplanten Maßnahme mit angepasst werden (Bild 6). Aus diesem Grunde wurde die Anpassung der Hafenbecken in diesem Gutachten mit berücksichtigt.

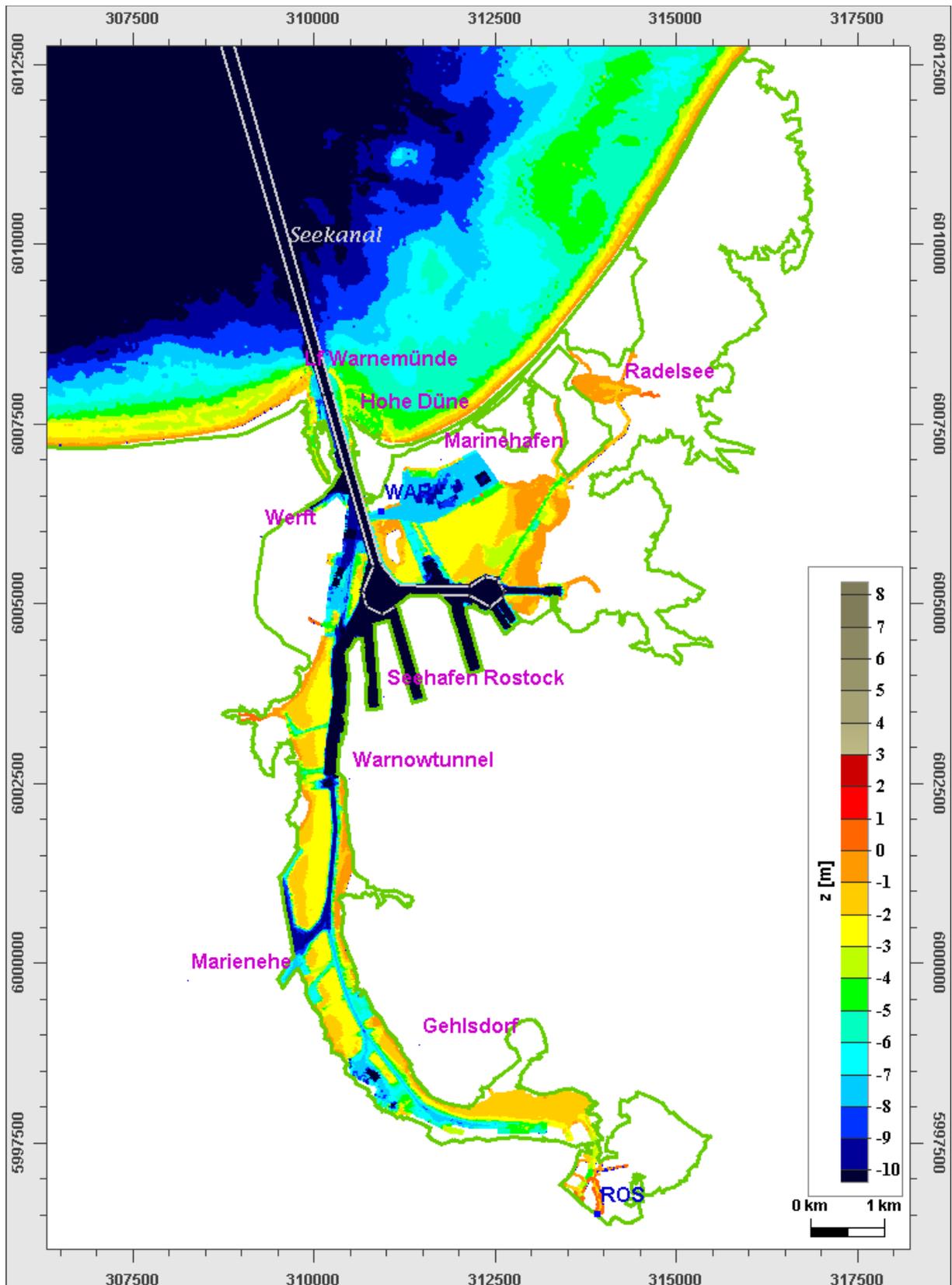


Bild 6 Die Unterwarnow stellt den wichtigsten Teil des Untersuchungsgebietes dar. Gezeigt wird hier die Bathymetrie als Höhe z in m NHN. Ortsbezeichnungen sind Magenta, die beiden Dauer-Pegel Blau beschriftet.

3.2 Der Breitling

Der Breitling ist ursprünglich ein Flachwasserbereich mit Wassertiefen zwischen NHN -1 m und NHN -5 m. Er ist jedoch durch die vertiefte Hafenzufahrt zu den Becken A-C und dem Petroleumhafen, die Hafenbecken selbst sowie den vertieften Bereich des Marinehafens bereits sehr stark anthropogen überprägt. Zwischen Marinehafen und Seekanal liegt die künstlich erweiterte Insel Pagenwerder. Östlich der Insel verläuft die Zufahrt zum Marinehafen. Weiterhin führt eine gebaggerte Rinne zum Moorgraben, der Verbindung zum Radelsee.

3.3 Der Radelsee

Vom Breitling führt der Moorgraben bis in den Radelsee. Dieser wird gelegentlich von Freizeitbooten und einem kleinen Touristikschiff (Kammel 2017) befahren. Der Radelsee ist ein Brackwassersee innerhalb des gleichnamigen Naturschutzgebietes. In unmittelbarer Nachbarschaft vom Radelsee liegen Spülfelder, auf denen Sedimente aus der Unterhaltung der Schifffahrtsrinne abgelagert wurden. Der Radelsee wird von zwei kleinen Zuflüssen gespeist, dem Prahmgraben und dem Radelbach. Diese reduzieren den Salzgehalt des Sees, der bei extremen Hochwasserereignissen ansteigt, allmählich wieder. Um den Radelsee befinden sich größere Flächen, die bei Sturmhochwassern überflutet werden können. Die Verbindung zum Breitling und die damit verbundenen hydrografischen Besonderheiten machen das Gebiet um den Radelsee als Naturlandschaft einzigartig, daher ist es als Naturschutzgebiet ausgewiesen (Berg und Schmidt 2000). Nordöstlich wird das mögliche Überflutungsgebiet durch die Kreisstraße K43 begrenzt. Diese liegt auf etwa 2 bis 2,5 m über NHN, so dass sie im Regelfall auch bei schweren Sturmhochwassern nicht überflutet wird und der nordöstlich von ihr liegende Polder (Hütelmoor) vor Hochwassern geschützt ist. Nur sehr schwere Sturmhochwasser wie das Ereignis 1872 (Baensch 1875), welches den höchsten jemals dokumentierten Hochwasserstand in der westlichen Ostsee erreichte, können die Barriere K43 überwinden. In solchen Fällen ist allerdings auch eine Überflutung des östlich gelegenen Gebietes über die Dünenkette, die das Gebiet nach Norden zur Ostsee abgrenzt, möglich. Im Rahmen der Modellierung wurden die nordöstlich der Kreisstraße K43 liegenden Flächen in der Bathymetrie berücksichtigt.

3.4 Zufahrt nach Rostock

Vom tiefen Seekanal zweigt an dem ersten Wendebecken die Fahrrinne Richtung Stadthafen ab, die nicht Teil der Ausbauplanung ist. Entlang dieser Rinne befinden sich kleinere Hafenbecken. Bis zum Warnow-Tunnel (B105) hat diese Rinne 11-12 m Wassertiefe bezogen auf NHN, von dort bis Marienehe eine Tiefe von ca. 9 bis 9,5 m NHN. Der letzte Abschnitt von Marienehe bis zum Stadthafen besitzt noch etwa 7 m Tiefe bezogen auf NHN. Beiderseits der Fahrrinne ist das Gewässer sehr flach und kann nur von Kleinfahrzeugen (überwiegend Sportbooten) befahren werden. Insbesondere das linke Ufer ist durch Uferbefestigungen und Kaianlagen stark anthropogen überprägt.

4 Hydrologie der Unterwarnow

Der als Unterwarnow bezeichnete Gewässerabschnitt der Warnow (Bild 6) ist ein Ästuar. Dies ist ein Gewässer, das sowohl von marinen Einflüssen (Meerwasser, Seegang, Tide, windbedingten Extremwasserständen), als auch binnenseitigen Einflüssen (Süßwasserzufluss) geprägt ist. Der Einfluss der Tide ist in der Ostsee im Verhältnis zu den meteorologischen Einflüssen, die die Wasserstände prägen, gering. Daher spielt die turbulente Vermischung in der Ostsee nur zeitweise eine Rolle, nämlich wenn windbedingt Strömungen auftreten. Der Salzgehalt in der vorgelegerten Ostsee ist durch den Eintrag von Süßwasser in die zentrale und nördliche Ostsee deutlich geringer als in der Nordsee. Der saisonale Zyklus der Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die vertikale Vermischung durch Konvektion und Schichtung. Eine ausgeprägte Schichtung vermindert die vertikale Vermischung. Die Konvektion durch Abkühlung des Wassers an der Oberfläche verstärkt die vertikale Vermischung. Die Konvektion kommt bei geringen Salzgehalten zum Erliegen, sobald der gesamte Wasserkörper das Dichtemaximum erreicht hat. Während im Sommer ein stark geschichteter Wasserkörper vorliegt, wird im Winter der Temperaturgradient weitgehend aufgelöst. Die vertikale Schichtung ist daher im Winter schwächer ausgeprägt als im Sommer.

Die abiotischen Eigenschaften des Wasserkörpers der Unterwarnow unterliegen sowohl räumlich als auch zeitlich großen Schwankungen. Erkennbar sind vor allem die durch meteorologische Extremereignisse hervorgerufenen Schwankungen des Wasserstandes. Diese Schwankungen induzieren im Ästuar auch Schwankungen des Salzgehaltes, der Temperatur und anderer Eigenschaften. Die Unterwarnow wird in der Gewässerkunde als ein mesohalines, geschichtetes Ästuarsystem eingeordnet (Herrmann et al. 2015).

4.1 Dynamik im Ästuar Unterwarnow

4.1.1 Barotrope Prozesse

Der Wasserstand im Ästuar Unterwarnow folgt dem Steigen und Fallen des Wasserstandes in der vorgelagerten Ostsee. Diese Bewegungen werden wesentlich durch die großräumige Wind- und Luftdruckverteilung über der gesamten Ostsee verursacht. Hinzu kommen Einflüsse aus der Nordsee. Es werden die folgenden Phänomene beobachtet:

1. Windstauwirkung: durch länger anhaltende, hohe Windgeschwindigkeiten wird Wasser großräumig verlagert, so dass in der westlichen Ostsee ein erhöhter oder abgesenkter Wasserstand auftritt.
2. Seiches: das sind freie Beckenschwingungen des Systems Ostsee, die dann auftreten, wenn die Windstauwirkung schnell nachlässt, weil der Wind abflaut oder dreht.
3. Fernwellen: das sind langperiodische Wellen aus dem Atlantik, die über den Skagerak auch in die Ostsee einlaufen
4. Tidebewegungen: diese laufen im Wesentlichen über den Skagerak in die Ostsee ein. Die in der Ostsee durch die Astronomie angeregte Tide ist von untergeordneter Bedeutung.

Da der Querschnitt der Mündung bei Warnemünde leistungsfähig genug ist, um das durch Schwankungen des Wasserstandes in der Ostsee zwischen der Unterwarnow und der Ostsee auszugleichende Wasservolumen zu transportieren, ist die Dämpfung der langperiodischen, windbedingten Schwankungen der Ostsee durch die bei Warnemünde bestehende Querschnitts-

einengung vernachlässigbar. Der über die Wassertiefe integrierte Wassertransport (barotrope Transport) ist aufgrund der Massenerhaltung mit dem Steigen und Fallen des Wasserstandes verbunden. Die maßgeblichen Schwankungen des Wasserstandes in der Ostsee mit Grundperioden von ~ 27 h und ~ 36 h induzieren aufgrund ihrer niedrigen Frequenz im tiefen Wasser des Seekanals nur geringe vertikal gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten. Die Schwankungen des Wasserstandes lassen sich als lange Wellen beschreiben. In der Ostsee sind es die durch den Wind angeregten Beckenschwingungen, die als stehende Wellen einzuordnen sind. Auch in der Unterwarnow lassen sich durch den Wind stehende Wellen anregen. Da jedoch die Ausdehnung der Unterwarnow sehr viel kleiner als die Ostsee ist, schwingen diese Wellen mit einer deutlich kleineren Periode ($\sim 1/6$ h). Da diese Periode in der Ostsee nicht vorkommt, passt sich der Wasserstand der Unterwarnow an den der Ostsee an, ohne dass eine Verstärkung von Schwankungen des Wasserstandes aus der Ostsee stattfindet.

4.1.2 Barokline Prozesse

Durch horizontale Unterschiede der Temperatur und des Salzgehaltes werden Dichteunterschiede erzeugt, die zu Ausgleichsströmungen innerhalb des Wasserkörpers der Unterwarnow führen (barokline Strömung). Das salzreiche, kältere und damit auch schwerere Wasser der Ostsee strömt am Boden in den Seekanal und in die Unterwarnow ein, an der Oberfläche strömt das durch den Zufluss aus der Oberwarnow ausgesüßte, leichtere Wasser aus (Bild 7). Zwischen den beiden Wassermassen findet ein langsamer Austausch durch Vermischung statt, so dass das Oberflächenwasser in Richtung Ostsee immer salzreicher wird. Im Sommer verstärkt die Erwärmung des Oberflächenwassers die Dichteunterschiede zwischen dem leichteren Wasser an der Oberfläche und dem Ostseewasser in Bodennähe. Die sich so aufbauende thermische Schichtung führt zu einer Reduktion der vertikalen Vermischung.

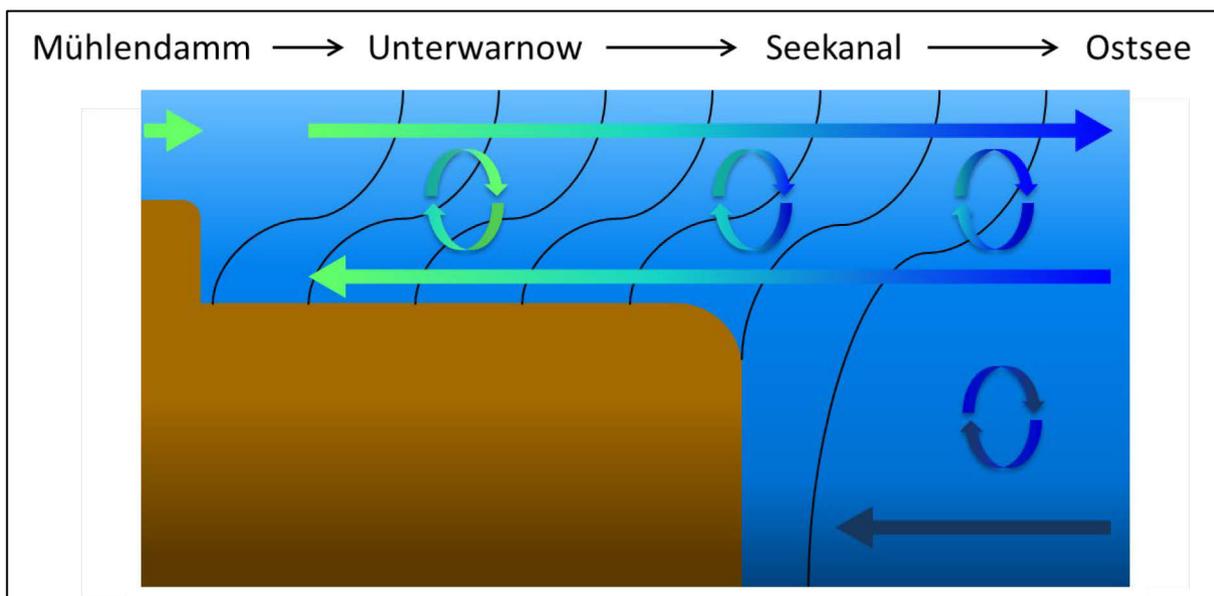


Bild 7 *Prinzipalskizze der ästuarinen Zirkulation in der Unterwarnow. Die horizontalen Pfeile deuten die barokline Strömungskomponente, die kreisförmigen Pfeile die Vermischungsprozesse an. Die farbliche Veränderung der Pfeile zeigt die Veränderung des Salzgehaltes an (blau: hoher, grün: niedriger Salzgehalt).*

Die barokline Bewegung schwächt die bei mittleren Verhältnissen Richtung Ostsee gerichtete Strömung aus dem Abfluss der Warnow. In Bodennähe können barokline Effekte die Strömung sogar in ihrer Richtung umkehren. Die Oberflächenströmung wird dagegen verstärkt. Selbst bei in der gesamten Unterwarnow steigendem Wasserstand kann daher die Oberflächenströmung noch in Richtung Ostsee gerichtet sein.

Der durch Änderungen des Wasserstandes in der Ostsee hervorgerufene, advektive, horizontale Transport findet üblicherweise auf einer Zeitskala von mehreren Stunden bis zu zwei Tagen statt. Dagegen finden die Vermischungsprozesse zwischen dem Ostseewasser und dem Wasser der Unterwarnow auf einer Zeitskala von mehreren Wochen statt. Dieser Umstand führt dazu, dass die lokalen Eigenschaften des Wasserkörpers der Unterwarnow primär mit den Zeitskalen der Schwankung des Wasserstandes variieren.

4.2 Wasserstand

Die Wasserstände in der Unterwarnow werden von den Wasserständen in der Ostsee bestimmt. Diese wiederum werden primär vom Wettergeschehen über der Ostsee bestimmt (Luftdruck und Windverteilung). Langperiodische Schwankungen des mittleren Wasserstandes der Nordsee werden über das Skagerak in die Ostsee übertragen. Die extremen Hochwasser seit 1900 erreichten jeweils einen Höchststand von 1,5-2 m NHN (LUNG-MV 2005; BfG 2019). Nur das Hochwasser von 1872 (Baensch 1875), welches in der westlichen Ostsee als das höchste, jemals beobachtete gilt, erreichte in Warnemünde einen Stand von 2,7 m NHN. Selten sinkt der Wasserstand in der Unterwarnow unter -1,5 m NHN (LUNG-MV 2005; BfG 2019).

Die Gezeitenwirkung ist in der Ostsee gering. In der Unterwarnow ist ein Tidehub von nur ca. 1-2 Dezimetern vorhanden.

Im Radelsee schwankt der Wasserstand mit dem Wasserstand im Breitling, wobei das Signal durch den kleinen Querschnitt des Moorgrabens etwas gedämpft wird. Daher werden dort im Regelfall während eines Extremereignisses geringere Schwankungen des Wasserstandes beobachtet als im Breitling.

Die Hochwasserschutzanlagen werden entlang der Unterwarnow auf einen Bemessungswasserstand von 2,8 - 3,0 m NHN bemessen. Diese Höhe entspricht einem Ereignis mit statistisch 200-jähriger Wiederkehr (Tiepolt 2016). Die bauliche Infrastruktur der Kreisstraße K43 gewährleistet für die allermeisten Hochwasserereignisse einen Schutz für die nordöstlich von ihr gelegenen Niederungen.

Extreme Niedrigwasserstände reduzieren die Befahrbarkeit des Gewässers, insbesondere in den Flachwassergebieten außerhalb der Schifffahrtsrinne. Dies betrifft hauptsächlich Kleinfahrzeuge. Großflächige, durch Sturmniedrigwasser gelegentlich für einige Stunden trockenfallende Gebiete („Windwatten“) gibt es in der Unterwarnow jedoch nicht. Vereinzelt können kleinräumig Flächen im Flachwasserbereich des Breitlings trockenfallen.

4.3 Strömungen

In der Unterwarnow sind Strömungen die Folge des Zusammenspiels von Schwankungen des Wasserstands in der Ostsee, der durch den Abfluss der Warnow hervorgerufenen Hintergrund-

strömung und den daraus resultierenden Dichtegradienten. Im in der Unterwarnow gelegenen Abschnitt des Seekanals können in seltenen Fällen tiefengemittelt Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 m/s auftreten. Typische Werte liegen bei 0,1-0,3 m/s. Von den Molenköpfen bis zur ersten Wendepalte ist die Richtung der Strömungsgeschwindigkeit am Verlauf der Fahrrinne ausgerichtet. Bei geringen Schwankungen des Wasserstandes der Ostsee dominieren die dichtegetriebenen Strömungen. Im Breitling sind die Strömungsgeschwindigkeiten geringer und können abhängig von Windrichtung und -stärke sehr unterschiedliche Richtungen aufweisen.

In der Ostsee, seewärts der Molen wird der Seekanal in der Regel quer überströmt. Die Strömungen folgen außerhalb der Fahrrinne den parallel zum Strand verlaufenden Isolinien der Bathymetrie. Die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten können Maximalwerte von 0,3 m/s erreichen. Der Salzgehalt und damit auch die Dichte nehmen von Westen nach Osten entlang der Küste ab, weshalb in der Ostsee eine entlang der Küste gerichtete, barokline Strömungskomponente existiert. Bei Strömung nach Westen sind daher die bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund der Dichtegradienten etwas niedriger, bei Strömung nach Osten etwas höher als die vertikal gemittelten Geschwindigkeiten.

Aufgrund der nur ab und zu auftretenden, größeren windbedingten Schwankungen des Wasserstandes, erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet nur selten Werte von mehr als 0,1 m/s. Die resultierenden Sedimenttransportraten sind daher in der Unterwarnow um Größenordnungen geringer als es von den stark tidedominierten Flussmündungen an der Nordsee bekannt ist. Daher ist die Bathymetrie nur vergleichsweise geringen Umformungen unterworfen.

4.4 Salzgehalt

Der Salzgehalt ist in der Unterwarnow räumlich und zeitlich stark variabel. Er nimmt vom Mühlendammwehr kommend in Richtung Ostsee zu. Der horizontale Gradient des Salzgehaltes ist in der Nähe der Messposition P10 am stärksten und verändert seine Lage in Abhängigkeit von der Menge des Oberwasserzuflusses der Oberwarnow.

Der Breitling wird sowohl vom Süßwasser der Oberwarnow als auch durch das Salzwasser der Ostsee beeinflusst. Daher ist sein Salzgehalt im Mittel niedriger als der der Ostsee. Hoher Abfluss aus der Oberwarnow ist durch ein Absinken des Salzgehaltes des Oberflächenwassers im Breitling erkennbar. Der Breitling wirkt durch sein Volumen als Puffer, so dass der Gradient des Salzgehaltes zwischen Breitling und Ostsee geringer ist, als der Gradient des Salzgehaltes zwischen Breitling und Mühlendammwehr. Da das salzreiche Wasser aus der Ostsee sich unter dem Süßwasser der Warnow einschichtet, nimmt der Salzgehalt von der Oberfläche zum Boden zu. Die Flachwasserbereiche haben daher auch einen niedrigeren Salzgehalt als die Ostsee, während die tiefen Rinnen am Boden salzreicheres Ostseewasser aufweisen. Die zeitliche Variabilität ergibt sich in der Unterwarnow aufgrund von Schwankungen des Abflusses der Oberwarnow sowie durch die bereits unter 4.2 und 4.3 erwähnte Variabilität des Wasserstandes und der Strömung, die den Salzeinstrom aus der Ostsee und die Vermischung mit dem Süßwasser der Warnow beeinflussen. Da die saisonal im Herbst und Winter auftretende, durch Abkühlung der Wasseroberfläche induzierte Konvektion den vertikalen Austausch ebenfalls beeinflusst, stellt diese einen wichtigen Prozess bei der Umverteilung des Salzgehaltes dar. Der an der Oberfläche der Unterwarnow eingetragene Niederschlag und die stattfindende Verdunstung sind dagegen

im Verhältnis zum Abfluss der Oberwarnow als zusätzlicher Wirkmechanismus vernachlässigbar.

Das oberflächennahe Wasser im Seekanal wird durch die Wassermasse des Breitlings und der Unterwarnow beeinflusst. Die hydrographischen Bedingungen in Wassertiefen unterhalb 8-10 Metern sind geprägt durch den Salzgehalt der Ostsee. Eine Beeinflussung der Flachwasserbereiche durch das salzhaltige, bodennahe Wasser des Seekanals erfolgt nur bei vertikaler Vermischung, für die die Vertikalkonvektion im Herbst und Frühwinter wesentlich verantwortlich ist. Der an die Oberfläche transportierte Salzgehalt wird dabei primär durch die barokline Zirkulation Richtung Ostsee zurücktransportiert.

Bei hohem Wasserstand dringt zusätzliches Wasser aus der Ostsee in den Breitling ein, so dass der Salzgehalt der Ostsee die obere Grenze des Salzgehaltes im Breitling und den angrenzenden Gewässern darstellt.

Im Radelsee schwankt der Salzgehalt zwischen 3 und 11 ppt (Berg und Schmidt 2000). Dabei wird ein hoher Salzgehalt durch das bei Sturmhochwasser in die Unterwarnow eindringende Ostseewasser verursacht. Aus den vom LUNG vorliegenden Informationen über den Salzgehalt im Radelsee kann entnommen werden, dass der mittlere Salzgehalt vor ca. 20 Jahren (Daten aus 1997) geringer als heute (Daten aus 2016) war.

4.5 Temperatur

Die Wassertemperatur folgt mit einer zeitlichen Verzögerung im Wesentlichen der Lufttemperatur. Dadurch erfolgt im Sommer eine Erwärmung des Wasserkörpers und die Dichte des oberflächennahen, ausgesüßten Wassers wird weiter reduziert. Die Schichtung des Wasserkörpers verstärkt sich bis in den Hochsommer hinein. Dieses Phänomen führt im Sommer zu einer geringeren vertikalen Vermischung des salzreichen, kälteren Ostseewassers mit dem wärmeren, salzärmeren Wasser der Unterwarnow. Die Verstärkung der Schichtung im Sommer führt zu einer Verringerung des Wasseraustausches zwischen dem Oberflächenwasser und dem Bodenvasser. Die Unterschiede bei den Eigenschaften der beiden Wassermassen (Salzgehalt, Temperatur u. a.), sind daher im Sommer größer als im Winter. Dies gilt insbesondere in Gewässerabschnitten, die nur kleine Verbindung zum übrigen Gewässer haben oder nur sehr wenig durchströmt sind, wie zum Beispiel die Hafenbecken des Seehafens und der Marinehafen.

Im Herbst führt die Abkühlung des Gewässers an der Oberfläche zu vertikaler Konvektion, da die Dichte des Wassers mit sinkender Temperatur zunächst zunimmt. Bei niedrigen Salzgehalten sinkt die Temperatur solange ab, bis das Dichtemaximum erreicht ist. Dann kommt die Konvektion zum Erliegen. Bei höheren Salzgehalten bleibt die winterliche Konvektion auch bei tieferen Temperaturen erhalten, da die Dichte dann mit abnehmender Temperatur weiter zunimmt. Der Prozess der winterlichen Konvektion führt zu einer Vermischung des Salzgehaltes und weiterer Eigenschaften. Im Winter spielt die Temperaturschichtung keine wesentliche Rolle, so dass dann ausschließlich der Zufluss aus der Oberwarnow die Schichtung erhält. Im Winter wird somit das Oberflächenwasser stärker mit dem salzreichen Wasser in den tiefen Rinnen vermischt.

Die langperiodischen Schwankungen der Temperatur sind die wesentliche treibende Kraft für die Ausbildung der Schichtung im Breitling. Im Sommer erwärmt sich das Flachwasser im Breitling schneller als in der Ostsee und trennt dadurch das oberflächennahe, ausgesüßte Wasser von

dem salzreichen, kälteren Ostseewasser in der Schifffahrtsrinne. Konvektion führt im Herbst bis Winter zu einer vollständigen Durchmischung der Wassersäule.

5 Beschreibung des Vorhabens und der simulierten Modellvarianten

5.1 Planerischer Ist-Zustand

Der Planerische Ist-Zustand (PIZ) repräsentiert die aktuell vorhandene Bathymetrie des Systems Unterwarnow mit Breitling und angeschlossenen Gewässern mit Bedeutung für die Hydrologie der Unterwarnow (Bild 8). Dazu gehören auch Flächen, die bei normalen Wasserständen trocken sind, jedoch bei Hochwasser überflutet werden können. Insbesondere wurden der Radelsee sowie die umgebenden Überflutungsflächen in die Modell-Bathymetrie integriert.

Im Gegensatz zum Ist-Zustand wird im Bereich der Fahrrinne die aktuelle Solltiefe vorgegeben, d.h. gegebenenfalls werden im Ist-Zustand der Bathymetrie vorhandene Mindertiefen für den Variantenvergleich auf die aktuelle Solltiefe gebracht. Zudem werden im PIZ hydraulisch relevante Maßnahmen, die eine gewisse Planungsreife haben, so dass von ihrer Realisierung auszugehen ist, mit berücksichtigt, dies jedoch nur, soweit deren Planung bei Beginn der Arbeit an diesem Gutachten bekannt war.

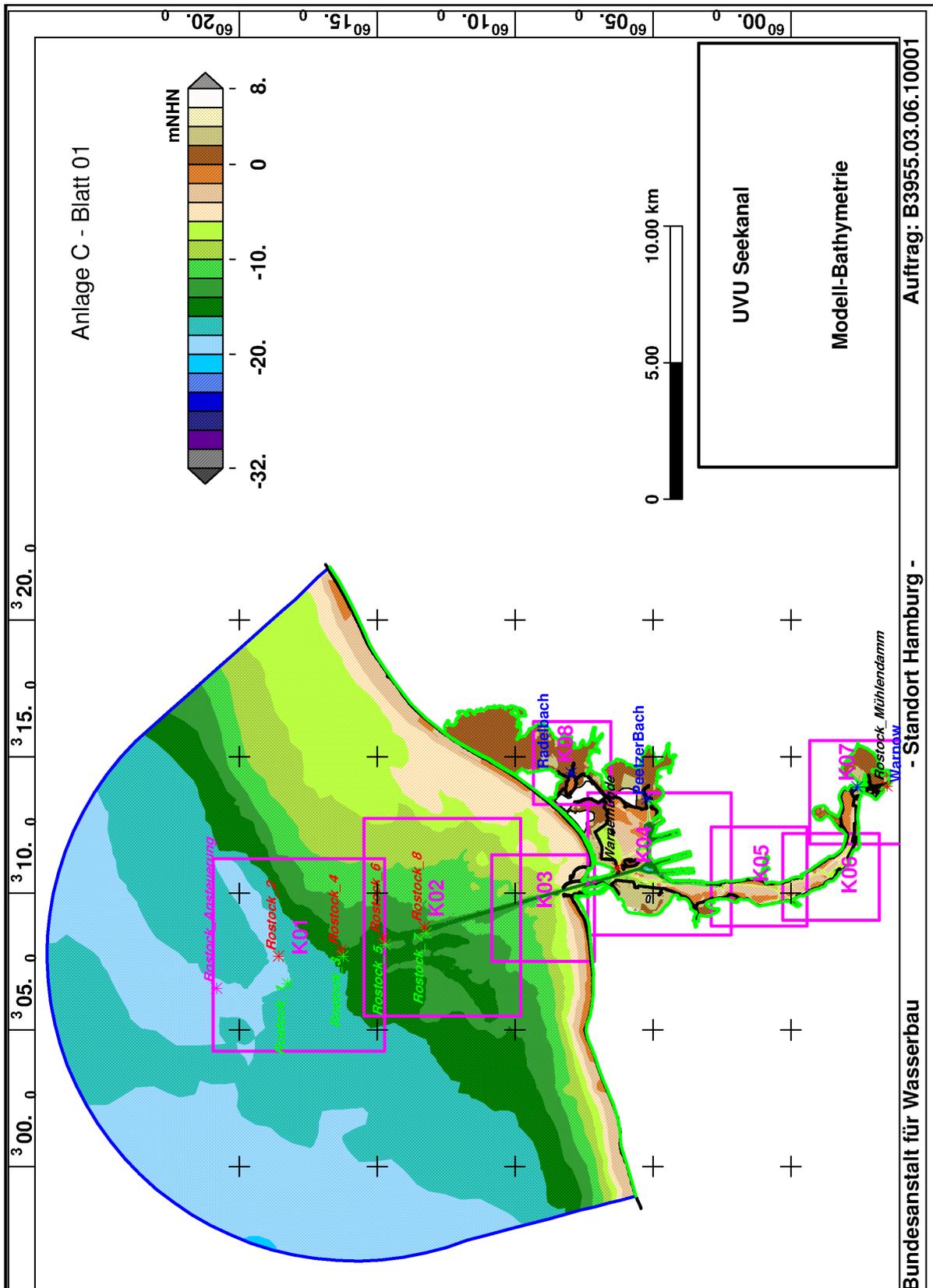


Bild 8 Modellkonfiguration des Warnow-Modells mit Topographie. Die blaue Linie markiert den seeseitigen, offenen Rand, die blauen Namen die Zuflüsse. In magenta sind die Zoombereiche für die grafische Darstellung der horizontalen Kenngrößen abgebildet.

Im PIZ berücksichtigt wird die Ausführungsplanung für das Wohngebiet „Petriviertel“ (Wisotzki 27.04.2011).

Im PIZ nicht berücksichtigt sind die Maßnahmen

- Umnutzung des ehemaligen Werftbeckens in Warnemünde als Mehrzweckhafen (Ruhnke 2018)
- Erweiterung Sportboothafen Warnemünde (Opfermann 36.2018)

Diese beiden im PIZ nicht berücksichtigten Maßnahmen waren zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung planerisch noch nicht hinreichend verfestigt. Sollte sich im Verlaufe des Planfeststellungsverfahrens zur Anpassung der seewärtigen Zufahrt zum Seehafen Rostock eine ausreichende Planungstiefe ergeben, so können diese, da es sich um im Vergleich zum hier betrachteten Vorhaben „Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Raostock“ geringe Eingriffe in das System im Hinblick auf Veränderungen der Gewässergeometrie handelt, im Rahmen von wasserbaulichen Stellungnahmen mit berücksichtigt werden.

Die Fahrrinne im Planerischen Ist-Zustand ist für Schiffe mit einer Länge von 250 m, einer Breite von 40 m und einem Tiefgang von 13 m ausgelegt (WSV 2017). Die Solltiefe beträgt NHN -14,5 m im Innenbereich und NHN -14,7 m im Außenbereich.

5.2 Ausbauzustand AZ1660

Im Ausbauzustand soll der Seekanal für einen Einbahnverkehr mit Schiffen bis zu 275 m Länge, 48 m Breite und 15 m Tiefgang befahrbar sein. Für diesen Zweck wird die Fahrrinne in drei Teilabschnitten auf die Solltiefen NHN -16,8 m (Warnow-km 16,9 bis 5,9), NHN -16,6 m (Warnow-km 5,9 bis 4,0) und NHN -16,1 m (Warnow-km 4,0 bis 1,9) gebracht. Dabei ist keine Verbreiterung des Trapezprofils vorgesehen, sondern der Böschungsverlauf (Neigung 1:2) wird bis zur neuen Solltiefe fortgesetzt. Somit ergibt sich für die neue Sohle eine etwas geringere Sohlbreite (Skizze Bild 9) gegenüber dem jetzigen Zustand. Der Verlauf der auszubauenden Trasse (Bild 10) wurde am 31.08.2016 vom WSA Stralsund übergeben.

Der untersuchte Ausbauzustand wurde nach der geplanten Solltiefe des mittleren Abschnitts benannt und wird im folgenden Text mit AZ1660 abgekürzt.

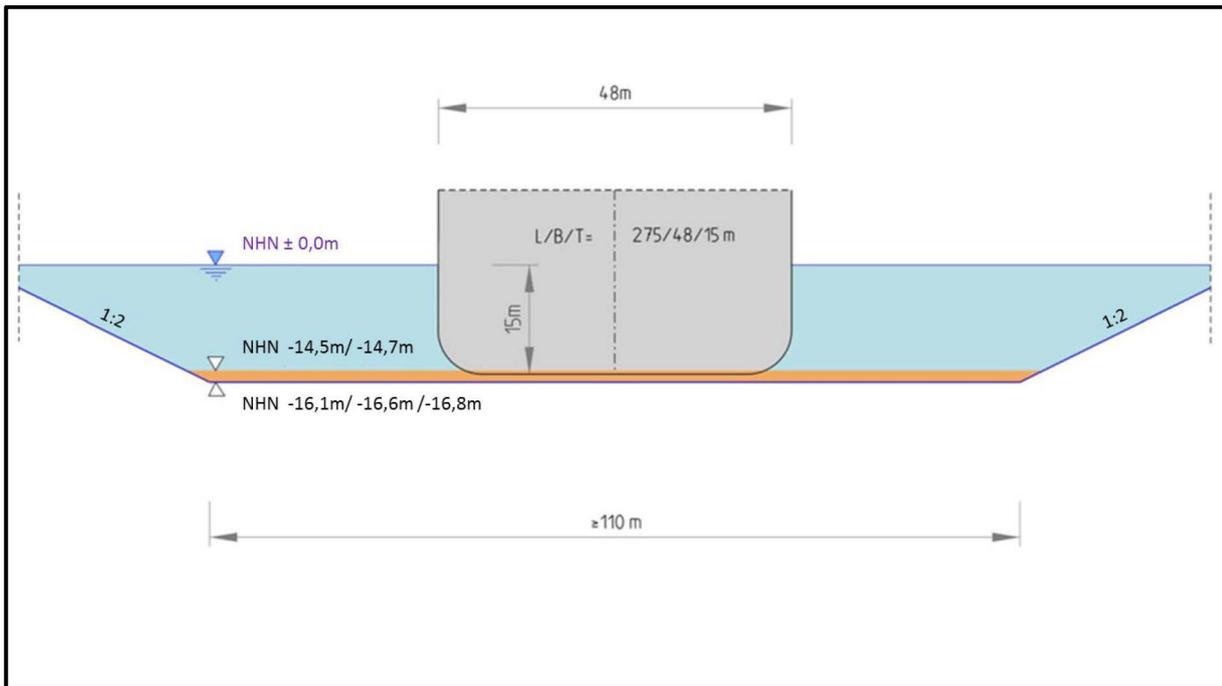


Bild 9 Ausbauquerschnitt für den Seekanal mit den am 13.03.2017 durch das WSA Stralsund übermittelten Solltiefen für die drei Teilabschnitte. Überarbeitet nach (WSV 2017).

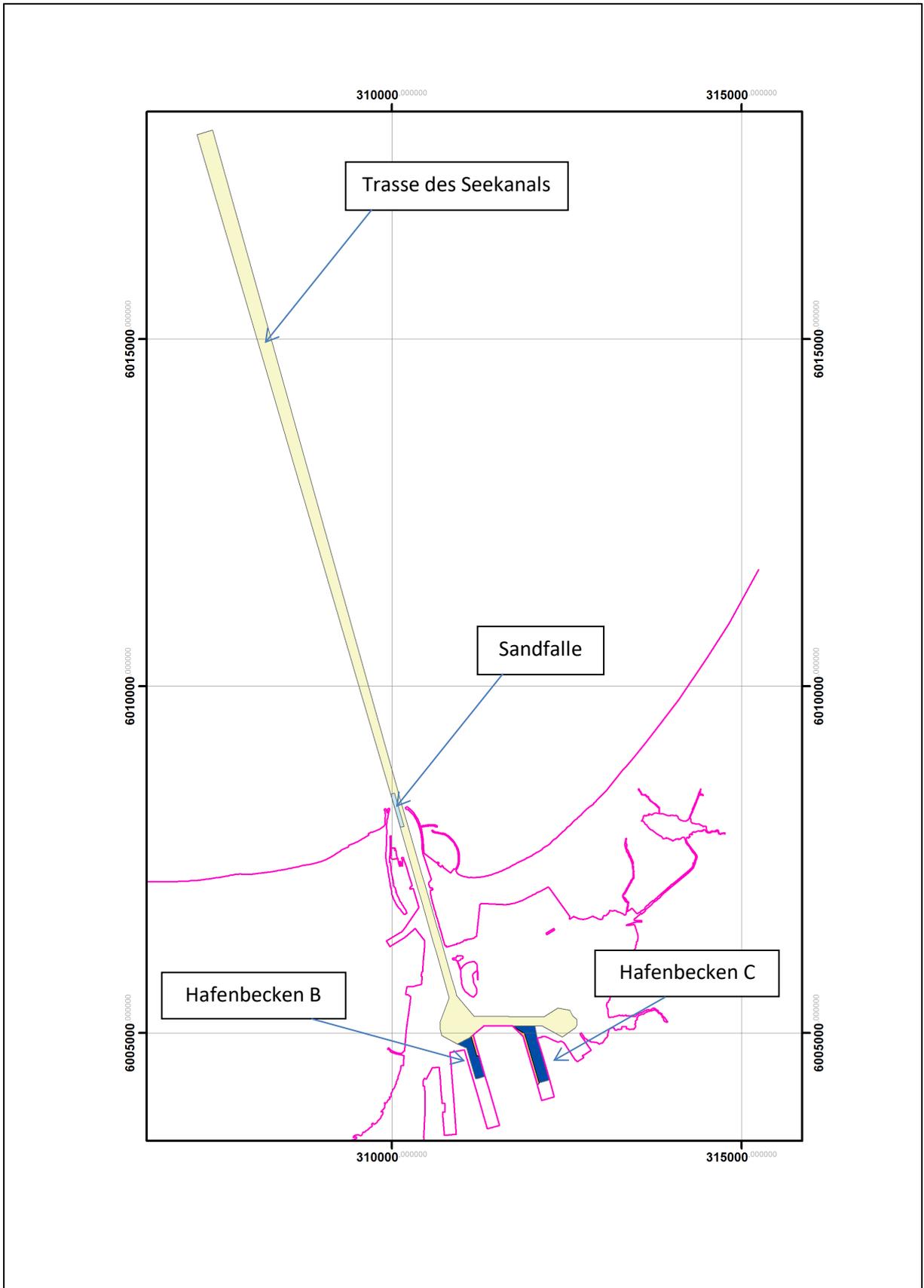


Bild 10 Lage der auszubauenden Trasse des Seekanals, der Sandfalle sowie der zu vertiefenden Bereiche in den Hafenbecken B und C

Die Angaben des WSA wurden wie folgt in eine zu simulierende Ausbautopografie umgesetzt:

1. Für jeden Teilabschnitt wurde die herzustellende Sohltiefe um einen Unterhaltungsvorrat von 0,4 m gegenüber den Sollwerten vergrößert. Es ergeben sich somit in den Teilabschnitten im Ausbauzustand die Tiefen von NHN -17,20m (Warnow-km 16,9 bis 5,9), NHN -17,00m (Warnow-km 5,9 bis 4,0) und NHN -16,50m (Warnow-km 4,0 bis 1,9).
2. Die jeweilige Sohlbreite des Seekanals ergibt sich durch Verlängerung der vorhandenen Böschung, die eine Steigung von 1:2 aufweist (siehe Bild 9).
3. Die Übergänge zwischen den Tiefen der Teilabschnitte wurden auf einer Strecke von 120 m linear geglättet, um Stufen zu vermeiden.
4. Die Sandfalle westlich des Längsprofils südlich von Warnow-km 7, die im Zuge der Maßnahme ebenfalls angepasst wird, wurde auf NHN -19,20 m vertieft.
5. Die in Bild 10 in Blau markierten Bereiche der Hafenbecken B und C des Seehafens Rostock wurden auf NHN -16,50 m vertieft.

Die Wassertiefen des Ist-Zustandes 2016 und des oben beschriebenen AZ1660 sind auf einem Längsprofil in Bild 11 dargestellt. Dieses Längsprofil sowie die Kilometrierung des Seekanals sind in Bild 12 dargestellt. In Bild 12 ist weiterhin die Differenztiefe zwischen dem DGM 2016 und dem AZ1660 dargestellt.

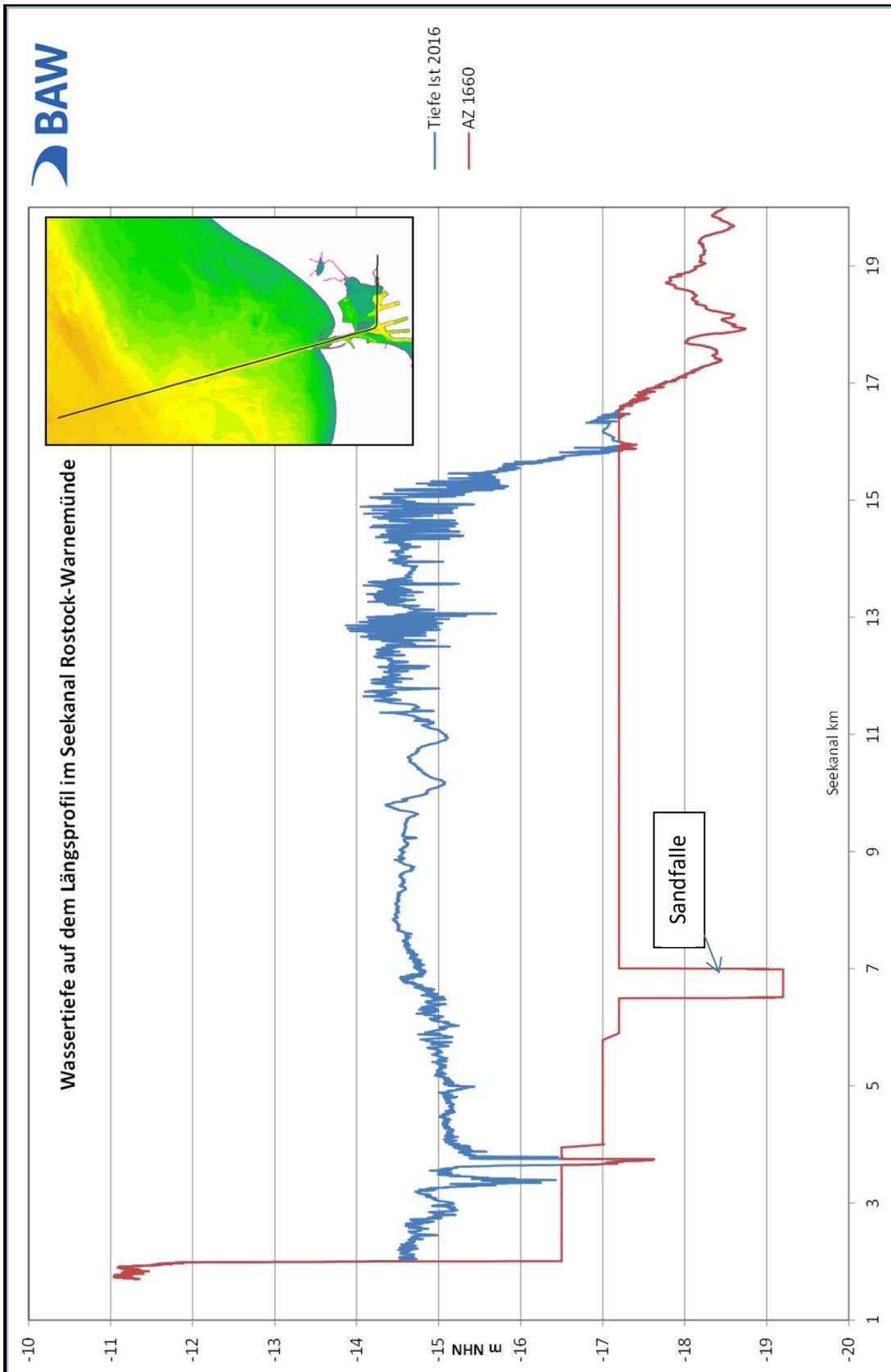


Bild 11 Wassertiefe auf dem Längsprofil im Seekanal, in Blau die Tiefen des DGM 2016, in Rot die Tiefen des Ausbauszustandes AZ1660

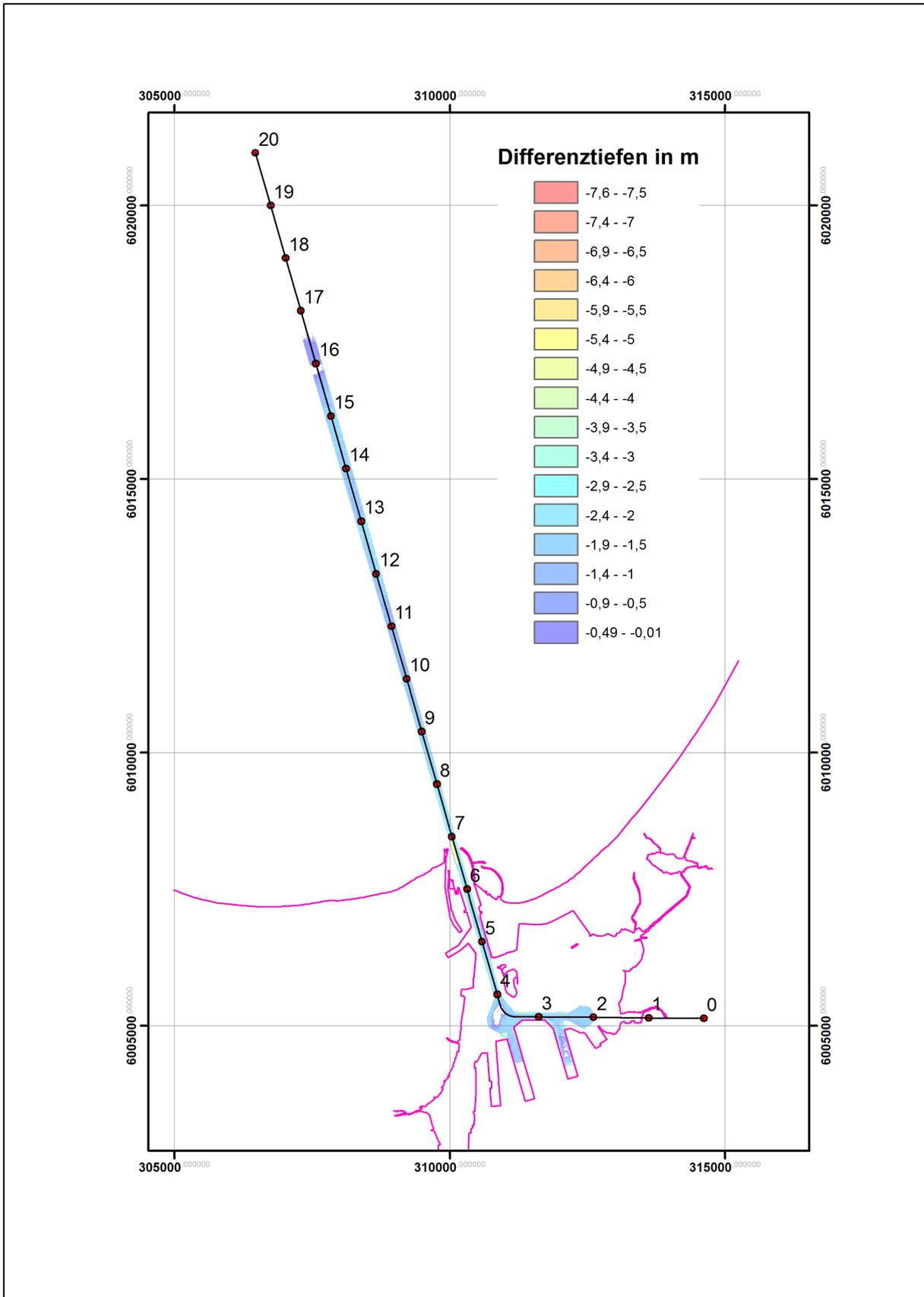


Bild 12 Lage des Längsprofils sowie der Kilometrierung des Seekanals. Weiterhin sind die Differenziefen zwischen dem DGM 2016 und dem AZ1660 dargestellt.

5.3 Physikalische Beschreibung der Wirkmechanismen des Ausbaus

Änderungen der Bathymetrie haben eine Rückwirkung auf die Physik des Gewässers. Folgende Eigenschaften der hier behandelten Baumaßnahme wirken auf die Hydrologie:

1. Der Querschnitt wird durchgängig vertieft und bewirkt somit, dass Ostseewasser aus einer größeren Tiefe als bisher in die Unterwarnow und den Breitling eindringen kann. Dieses Wasser besitzt einen höheren Salzgehalt und im Sommer eine geringere Temperatur als das der Unterwarnow, und wird sich daher am Boden des Seekanals ausbreiten. Durch vertikale Vermischungsprozesse werden Anteile dieses Bodenwassers in den darüber liegenden Wasserkörper der Unterwarnow gelangen. Der wichtigste Vermischungsprozess ist dabei die winterliche Konvektion, da dieser Prozess im Gegensatz zur turbulenten Vermischung schnell abläuft.
2. Das Volumen der Unterwarnow wird durch die Vertiefungsmaßnahme etwas vergrößert. Diese Veränderung beeinflusst das Schwingungsverhalten (Eigenperioden) des Ästuars.
3. Die größere Wassertiefe verändert die Phasengeschwindigkeit langer Wellen im Seekanal und verringert das Verhältnis von Energiedissipation am Boden zur im Wasserkörper vorhandenen kinetischen und potentiellen Energie.

Die Vertiefung der Fahrrinne stellt eine Veränderung der geometrischen Eigenschaften des Ästuars Unterwarnow dar. Diese Veränderung der geometrischen Eigenschaften führt zu Veränderungen der Hydrodynamik, deren Größenordnung von der Art der Veränderung und der relativen Volumenänderung im Verhältnis zum Volumen des Gesamtsystems steht.

Die Wirkung besteht in einer Änderung des Schwingungsverhaltens des Systems und der Verteilung der physikalisch-chemischen Eigenschaften im Wasserkörper.

Die Unterwarnow ist ein nahezu geschlossenes Becken, welches über einen begrenzten Querschnitt zwischen den Molen an der Mündung der Unterwarnow und die Oberfläche zu Eigenschwingungen angeregt werden kann. Die Anregungskräfte sind:

1. Schwankungen des Wasserstands am zur Ostsee offenen Querschnitt des Systems.
2. Impulseintrag durch Wind an der Wasseroberfläche

Die erstgenannte Anregung bestimmt den Wertebereich des Wasserstandes in der Unterwarnow maßgeblich. Die in ihm enthaltenen Anregungsfrequenzen werden auf das Ästuar, welches einem länglichen Becken ähnlich ist, übertragen.

Die Eigenperiode eines länglichen, geschlossenen, rechteckigen Beckens konstanter Tiefe ist nach der Merian'schen Formel (Merian 1828) umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Wassertiefe. Damit wird sie kürzer, wenn das System vertieft wird, d.h. die Eigenfrequenz wird größer. Für komplexere Geometrien ist der Zusammenhang zwischen Eigenperioden und Wassertiefe nicht mehr so einfach, jedoch gilt das Grundprinzip auch hier, dass die Eigenfrequenz größer wird, je tiefer das System bei gleichbleibender horizontaler Abmessung wird. Die Eigenperiode des Systems Unterwarnow ($\sim 1/6$ Stunde), die aus Messungen des Wasserstandes hervorgeht, ist schon jetzt deutlich kleiner als die des anregenden Systems Ostsee (> 1 Tag). Es ist daher kein Einfluss des Ausbaus auf die Größen Wasserstand und Massentransport zu erwarten. Die Vertiefung des Seekanals um zwei Meter führt dazu, dass der Tiefenbereich zwischen der alten und der neuen Solltiefe im Seekanal mit Ostseewasser gefüllt wird. Diese Wassermasse ist

salzreicher und im Sommer kälter als das in den flacheren Bereichen der Unterwarnow salzärmere Wasser.

Durch die geringe vertikale Turbulenz wird das Wasser langsam innerhalb der Wassersäule nach oben gemischt und gelangt mit dem oberflächennah im Mittel seewärts gerichteten Transport wieder in die Ostsee zurück. Die sommerliche Erwärmung des Oberflächenwassers verstärkt die Schichtung und reduziert damit den vertikalen Austausch. Daher wirkt sich die im Ausbauzustand in der neuen Tiefe des Seekanals zusätzlich vorhandene Wassermasse mit ihren Eigenschaften im Winter, wenn die thermische Schichtung durch Konvektion abgebaut wird, stärker aus als im Sommer.

Das Verhältnis der Zeitskala der Vermischung und der Zeitskala des advektiven Transportes ist so, dass letzterer schneller erfolgt, als der Vermischungsprozess. Während die Advektion von Periodendauern von etwa 0,5 bis 1,5 Tagen geprägt ist, ist eine typische Zeitskala des Vermischungsprozesses 1-4 Wochen. Daher ist der Einfluss der Wassermasse am Boden des Seekanals auf die Eigenschaften des oberflächennahen Wassers der Unterwarnow von untergeordneter Bedeutung. Die Oberflächensalzgehalte werden primär durch die horizontale Verlagerung des Oberflächenwassers, nicht durch vertikale Vermischung verändert. Eine Vertiefung beeinflusst somit die tieferen Schichten des Gewässers stärker als den oberflächennahen Bereich.

6 Beschreibung der Untersuchungsmethode

In diesem Kapitel wird das Vorgehen, mit dem die quantitativen Aussagen zu den Wirkungen des Ausbauvorhabens auf die Hydrologie erarbeitet wurden, beschrieben.

6.1 Grundprinzip der modellbasierten wasserbaulichen Systemanalyse

In diesem Gutachten werden die Ergebnisse der Untersuchung zur vorhabensbedingten Veränderung der Wasserstände, der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte und maximalen, mittleren und minimalen Temperaturen in der Unterwarnow und dem Breitling dargestellt.

Der planerische Ist-Zustand (PIZ) sowie der Vollausbau als Ausbauzustand (AZ1660) werden simuliert und miteinander verglichen.

Die Validierung des numerischen Modells, die dessen Eignung zur Darstellung der in der Natur ablaufenden Prozesse dokumentieren soll, wird für den Zeitraum vom 01.10.2016 bis 30.11.2016, für den Messdaten im ausreichenden Umfang vorliegen, durchgeführt. Mit dem validierten HN-Modell erfolgt die vergleichende Untersuchung zur Hydrodynamik und des Salztransports.

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

Die Modellergebnisse sind Grundlage für die Ableitung der vorhabenbedingten Änderungen der oben genannten Größen, die mit Hilfe der in der BAW entwickelten Kennwertanalyse (BAW 2018) erfolgt. Die Vorgabe identischer hydrologischer Situationen für die Berechnung des planerischen Ist-Zustandes und des Ausbauzustandes ermöglicht die eindeutige Zuordnung von Veränderungen der Hydrodynamik, des Salzgehaltes und der Temperatur zur untersuchenden Ausbaumaßnahme.

Da der saisonale Temperaturverlauf einen stark prägenden Einfluss auf das Untersuchungsgebiet ausübt, werden die Kenngrößen von Salzgehalt und Temperatur sowohl für eine Sommersituation als auch eine Wintersituation ermittelt. Für die Wasserstände und Strömungen wird dagegen der Gesamtzeitraum als Grundlage der Bewertung herangezogen, da der Jahreszyklus der Temperatur hier keinen wesentlichen Einfluss auf die vorhabenbedingten Änderungen ausübt.

6.2 Simulationszeiträume und Analysezeiträume

Als Zeitraum für die vergleichenden Modellsimulationen wurde das zweite Halbjahr 2016 (01.08.2016 00:00 MEZ bis 31.12.2016 23:00 MEZ) gewählt. Für den Einschwingvorgang (Erzeugung eines dynamisch balancierten Anfangszustandes) der Größen Wasserstand, Strömung, Temperatur und Salzgehalt wurde zusätzlich der Monat Juli 2016 mitgerechnet. Dieser wurde jedoch nicht ausgewertet. Während der genannten Zeitspanne stehen zeitweise aufgrund der Durchführung der Messkampagne für alle betrachteten hydrologischen Größen Messungen zur

Verfügung. Diese dienen dazu, einschätzen zu können, ob die Naturähnlichkeit des Modells gegeben ist. Außerdem enthält der Zeitraum alle typischen, das Ästuar prägende, hydrologische Zustände und Ereignisse. Durch den gewählten Zeitraum werden die folgenden Aspekte der Dynamik abgebildet:

- Stark geschichteter Wasserkörper im Sommerhalbjahr
- Abbau der Schichtung im Herbst
- Wintersituation mit niedriger, räumlich und zeitlich wenig variabler Temperatur
- Sturmhoch- und -niedrigwasser-Ereignisse
- Niedriger und hoher Abfluss aus der Warnow

Als Analysezeiträume wurden gewählt:

- 01.08. bis 01.09.2016 (Sommersituation, thermohalin geschichtet)
- 31.11. bis 31.12.2016 (Wintersituation, rein haline Schichtung)
- 01.08.-31.12.2016 (Wasserstand, repräsentiert die barotrope Komponente der Dynamik).
- 01.10.2016-22.11.2016 (Modellvalidierung)

6.3 Modellsteuerung

Das Modell der Unterwarnow ist kein geschlossenes System, sondern besitzt offene Ränder. Diese sind:

1. der offene Rand in der Ostsee, für den die hydrologischen Größen Wasserstand, Temperatur und Salzgehalt bekannt sein müssen,
2. der offene Rand am Mühlendammwehr und an den Mündungen des Peezer Bachs und des Radelbachs, für die die Zuflüsse mit ihren hydrologischen Eigenschaften (Temperatur und Salzgehalt) bekannt sein müssen,
3. der offene Rand der Wasseroberfläche, an der die meteorologischen Größen Wind, Luftdruck und Lufttemperatur bekannt sein müssen.

Die folgenden Informationen standen für die Erzeugung geeigneter Randwerte für das Jahr 2016 zur Verfügung:

1. Zeitreihen des Wasserstandes, der Temperatur und des Salzgehaltes am seeseitigen Rand des Modells. Diese werden mit dem Ostseemodell (Seiß 2015) erzeugt. Sie umfassen die Zeitspanne des gesamten Jahres und enthalten die unterschiedlichen, in der Ostsee vorkommenden Szenarien.
2. Messreihe des Wasserstandes am Pegel Warnemünde für das gesamte Jahr 2016 sowie Messreihen an den Messstationen P01 bis P03 für die Zeitspanne September bis November 2016,
3. Messreihen von Salzgehalt und Temperatur in drei Tiefenschichten an der Position P02 für die Zeitspanne September bis November 2016,
4. der Abfluss der Oberwarnow am Pegel Geinitzbrücke für das gesamte Jahr,
5. Meteorologische Datensätze aus Reanalyse-Daten aus dem ICON-Modell (Näheres in Kapitel 2.4).

Die Güte der Randwerte hat einen großen Einfluss auf die Qualität, mit der die natürlichen Prozesse im Modell abgebildet werden können. An die Modellvalidierung wird der Anspruch gestellt, zu zeigen, dass die in der Natur gemessene Hydrologie möglichst gut vom Modell abgebildet wird. Daher werden für diesen Zweck Messungen zur Steuerung des Modells genutzt. Beim Vergleich der Untersuchungsvarianten ist sicherzustellen, dass alle möglichen in der Natur vorkommenden Szenarien, die im Zusammenhang mit dem Ausbau von Interesse sein können, in den Randwerten enthalten sind und die Randwerte nicht dazu führen, dass das Modell unempfindlicher auf Änderungen der Bathymetrie reagiert als in der Natur. Für die Validierung des Modells wurden die Messungen als Modellsteuerung verwendet, um die in der Natur abgelaufene Hydrodynamik in der Simulation möglichst realistisch abzubilden. Dies ist erforderlich, um den Vergleich mit den in der Unterwarnow gemessenen Zeitreihen durchführen zu können.

Bei dem Vergleich der Ausbauvariante mit dem planerischen Ist-Zustand dagegen ist es wichtiger, einen Zeitraum zu simulieren, der die möglichen hydrologischen Situationen von Relevanz enthält. Dieser beinhaltet mindestens einen repräsentativen Sommer- und Wintermonat. Diese Bedingung kann nur durch die mit dem Ostseemodell erzeugten Randwerte abgedeckt werden.

6.3.1 Wasserstand am seeseitigen Rand

Bei der Validierung des Modells werden Messreihen zur Steuerung des Randes genutzt, um zu zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die Physik des Systems abzubilden. Für eine ausreichende Steuerung des Modells müssen die horizontalen Gradienten des Wasserstandes am Rand abgebildet werden. Daher wurden für die Steuerung des Modells auch bei der Simulation für die Validierung die simulierten Daten des Ostseemodells genutzt, um die räumlichen Unterschiede am seeseitigen Rand abzubilden. Zusätzlich wurde die Messreihe des Pegels Warnemünde dafür genutzt, die aus dem Ostseemodell vorliegenden Ganglinien um systematische Fehler (mittleres Niveau, langperiodische Abweichungen) zu korrigieren. So wurde durch die Daten des Ostseemodells der räumliche Gradient entlang des Randes erfasst, ohne dass dabei systematische Abweichungen des Ostseemodells von der Messung Warnemünde zum Tragen kamen. Da für den Wasserstand das gesamte Jahr sowohl durch Messung als auch das Ostseemodell abgedeckt wird, konnten die so gewonnenen Randwerte auch beim Variantenvergleich genutzt werden.

6.3.2 Temperatur und Salzgehalt am seeseitigen Rand

Mit dem Ostseemodell wird ein Jahreslauf für das Jahr 2016 durchgeführt, um den seeseitigen Rand des Modells der Unterwarnow mit langen Zeitserien steuern zu können. Diese Vorgehensweise ist nötig, da am seeseitigen Rand des Modells keine geeigneten Messungen vorliegen, die die Variabilität der Größen Temperatur und Salzgehalt über einen Jahreszyklus beschreiben. Das verwendete Ostseemodell ist näher in Seiß (2015) beschrieben und wird mit den gleichen meteorologischen Reanalyse-Daten angetrieben wie das Modell der Unterwarnow.

Mit dem Ostseemodell werden glattere Werte für Salzgehalte und Temperaturen am Modellrand des Modells der Unterwarnow ermittelt, als sie in der Natur auftreten, was sich auf die Ausprägung von Maximal- und Minimalwerten auswirkt. Die horizontale Verteilung der Eigenschaften wird durch die gewählte Gitternetzauflösung abgebildet. Die vertikale Schichtung ist im Modell weniger ausgeprägt als in Messungen. Bodennahe Salzwassereinbrüche aus dem Kattegat in das Untersuchungsgebiet werden durch die Verwendung der simulierten Randwerte nicht erfasst.

Für die gutachterliche Aussage ist diese Einschränkung des Modells jedoch nicht von Bedeutung, Die vertikale Schichtung verringert den vertikalen Austausch umso mehr, je stärker der Dichteunterschied ist, da die Turbulenz aufgrund geringerer Strömungsgeschwindigkeiten gering ist. Die größten Vorhabenswirkungen treten daher bei geringer Schichtung auf, wenn der vertikale Austausch verstärkt ist und so das salzige Ostseewasser am Boden mit dem oberflächennahen, ausgesüßten Wasser vermischt werden kann. Die modellbasierten Aussagen liegen aufgrund der geringeren vertikalen Schichtung der Steuerdaten des Warnow-Modells für die Abschätzung vorhabenbedingter Änderungen auf der sicheren Seite. Der Zustand der Unterwarnow während eines Salzeinbruchs stellt zudem in Bezug auf die Vorhabenswirkung keinen kritischen Zustand dar, die Vorhabenswirkungen nehmen mit zunehmendem mittlerem Salzgehalt ab, da der Einfluss der Oberwarnow geringer wird im Verhältnis zur Ostsee, je größer das Volumen des salzhaltigen Ostseewassers in der Unterwarnow ist.

Die Größen Temperatur und Salzgehalt werden von dem Ostseemodell jedoch noch nicht in der Qualität geliefert, wie sie für die Verwendung als Randwerte im Rahmen einer Validierungsrechnung benötigt werden. Das betrifft vor allen Dingen die Abbildung der vertikalen Struktur. Für die Validierung wird auf die Messungen des Messprogramms (siehe Abschnitt 2.5) zurückgegriffen, die für eine Zeitspanne von September bis November in zufriedenstellender Qualität vorliegen.

Die Messposition P02 wurde aufgrund der Länge der vorhandenen Zeitreihe und der Nähe zum Seekanal als am besten geeignet angesehen, Temperatur und Salzgehalt am seeseitigen Rand naturähnlich zu repräsentieren. Daher wurden die Messungen dieser Station für die Modellsteuerung des Validierungslaufes genutzt.

6.3.3 Binnenseitige Zuflüsse

Die binnenseitigen Zuflüsse (Warnow, Radelbach, Peezer Bach) wurden den in Kapitel 2.5 genannten Datenquellen entnommen. Über die Temperatur und den Salzgehalt dieser Zuflüsse lagen jedoch keine Angaben vor, so dass hier zusätzliche Annahmen getroffen werden mussten. Der Salzgehalt der Oberwarnow wird mit 0,2 ppt, einem typischen Hintergrundwert für Süßwasser, konstant vorgelegt. Der Salzgehalt der Zuflüsse Radelbach und Peezer Bach wird mit 0,5 ppt aufgrund der Nachbarschaft zu den Spülfeldern der Hansestadt Rostock, aus deren Sedimente noch Salze ausgewaschen werden, vorgegeben. Bei der Temperatur des Wassers aller Zuflüsse wurde ein Jahresgang mit Temperaturen zwischen 3 und 13 °C vorgegeben.

7 Verwendetes Modell

Das Modell der Unterwarnow stellt ein vereinfachtes Abbild der Natur dar. Ziel ist die naturähnliche Abbildung der für das Ästuar Unterwarnow maßgeblichen Prozesse, die Einfluss auf die Umweltbedingungen haben. Diese Prozesse sind:

- Wechselnde Wasserstände, die in der Ostsee vorherrschen und in die Unterwarnow übertragen werden.
- Erwärmung und Abkühlung des Wassers im Verlauf des Jahres
- Eindringen salzreichen Ostseewassers in die Unterwarnow
- Ausströmen des Süßwasser-Abflusses der Oberwarnow und die Vermischung mit dem Ostseewasser

Die in der Natur in einem Kontinuum (das bedeutet, in einer unendlich kleinen Skala der Auflösung) vorliegenden Eigenschaften des Wasserkörpers liegen im numerischen Modell nur an diskreten Punkten (Stützstellen des verwendeten Gitters) vor. Auch in der Zeit wird der dynamische Verlauf des Geschehens an diskreten Zeitpunkten berechnet. Prozesse, deren räumliche Gradienten oder zeitliche Änderung von der gewählten Auflösung nicht mehr ausreichend dargestellt werden, werden im Modell durch Parametrisierungen dargestellt (7.2).

7.1 Numerisches Verfahren, räumliche und zeitliche Auflösung

Das Modell basiert auf dem Verfahren UnTRIM, welches an der Universität Trient entwickelt wurde (Casulli und Walters 2000; BAW 2007). Das Verfahren dient der Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen auf einem in der Ebene horizontal unstrukturierten Gitter mit einer Auflösung (Centerpunktabstand) von 3 m bis 515 m. Die Vertikale wird in Schichten von 0,5 Metern Dicke (Oberfläche bis 8 m Tiefe) bzw. 1,0 Metern (unterhalb 8 m Tiefe) dargestellt. Die zeitliche Auflösung, der sogenannte Modellzeitschritt, ist 30 Sekunden. Diese Auflösung des Modells ist sowohl räumlich als zeitlich hoch genug, um die hydrologischen Prozesse der Unterwarnow zu beschreiben.

7.2 Vernachlässigte und parametrisierte Prozesse

Im vorliegenden hydrodynamischen Modell wird der Seegang vernachlässigt. Für die hydrologischen Eigenschaften des Ästuars spielt der Seegang keine direkte Rolle, daher ist die Vernachlässigung zulässig.

Turbulenz und Vermischung innerhalb des Wasserkörpers, deren räumliche Skala unterhalb der Gitterauflösung liegt, wird ebenso parametrisiert.

Da das Modell hydrostatisch gerechnet wird, ist der Vorgang der Konvektion beim Abkühlen der Oberfläche im Modell nicht direkt enthalten. Da jedoch die Konvektion einen wichtigen Prozess im Herbst und Winter darstellt, der die während des Sommers aufgebaute Schichtung abbaut, wird hierfür ein einfacher Mechanismus im Modell genutzt, der dafür sorgt, dass bei instabiler Schichtung (schweres Wasser liegt über leichtem) während eines Zeitschrittes das Wasser einer Schicht solange mit dem Wasser der darunterliegenden Schicht vermischt wird, bis die Wassersäule wieder stabil geschichtet ist.

Verfügbarer Speicherplatz und Rechenzeit für die Simulation sind begrenzt. Mit der gewählten vertikalen Auflösung von 0,5 m betrug die für die Simulation eines Zustandes benötigte Rechenzeit ca. ein Monat. Eine Verdoppelung der Auflösung hätte mindestens zu einer Verdoppelung der Rechenzeit geführt. Daher wurde ein Kompromiss zwischen benötigter Rechenzeit und der vollständigen Abbildung der vertikalen Gradienten von Salzgehalt und Temperatur gewählt. Bei der Interpretation der Ergebnisse wird dieser Umstand berücksichtigt.

7.3 Modellgebiet

Das Modellgitter umfasst alle möglichen Überflutungsflächen, die nicht durch Hochwasserschutzanlagen geschützt sind. Vom Modellgebiet ausgenommen werden die Flächen westlich von Warnemünde, die in der Hochwassergefahrenkarte von Badrow (2012) als potentielle Überflutungsflächen ausgewiesen werden. Eine Überflutung dieser Gebiete wird aufgrund des bestehenden Hochwasserschutzes in Warnemünde nicht über die Unterwarnow erfolgen, sondern direkt von der Ostsee. Damit spielen diese Flächen in für die Dynamik der Unterwarnow relevanten Situationen keine Rolle und können in den Modellstudien weggelassen werden. Das bedeutet, dass mit dem verwendeten Modell für alle denkbaren Hochwasserszenarien, also auch für ein Sturmhochwasser wie das von 1872 (Baensch 1875), der zeitlichen Ablauf und die räumliche Ausdehnung in der Unterwarnow abgebildet werden können. Die Simulation eines vergleichbaren Extrem-Ereignisses (Sturmhochwasser vom 04.01.1954) ergab kein Erkenntnisgewinn in Bezug auf die Wirkung des Ausbaus auf das Verändern von Hochwassermaxima (Bild 13). Daher wird darauf verzichtet, die Variantenrechnungen für dieses Extremereignis darzustellen.

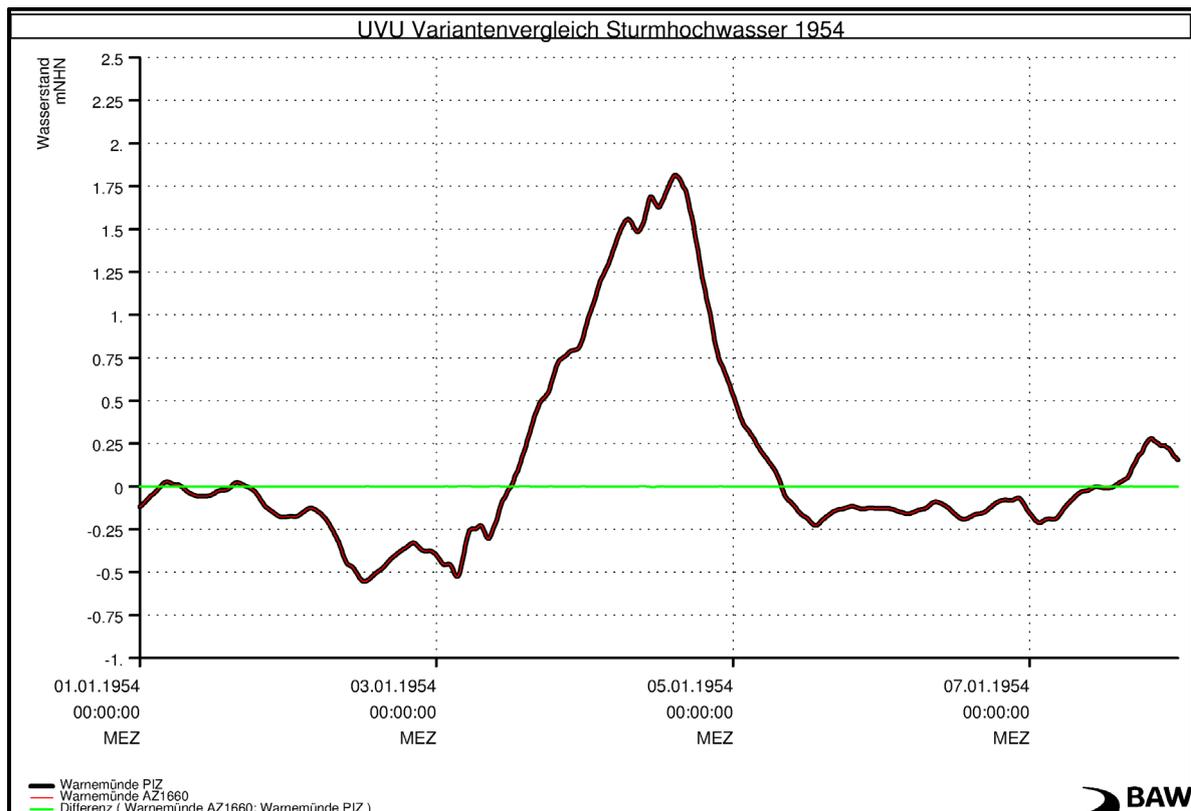


Bild 13 Simulation des Wasserstandsverlaufs des Sturmhochwassers vom 04.01.1954 für PIZ (schwarze Kurve) und AZ1660 (rote Linie). Die Differenz der Kurven ist in Grün dargestellt.

8 Validierung des Warnow-Modells

8.1 Vorgehen

Für den Validierungszeitraum wird das Modell mit Ausnahme der Temperatur und des Salzgehaltes am seeseitigen Rand mit den gleichen Randwerten wie für den Variantenvergleich gesteuert. Da jedoch die aus dem Ostseemodell abgeleiteten Randwerte für Temperatur und Salzgehalt von den Werten in der Natur abweichen, werden die Messwerte der Station P02 für Temperatur und Salzgehalt als Randwerte auf dem gesamten seeseitigen, offenen Modellrand verwendet. Das Modell wird für den Validierungszeitraum 26.09.2016 12:00 MEZ bis 22.11.2016 14:00 MEZ, ausgehend von einem bereits eingeschwungenen Systemzustand zeitlich weiter gerechnet. Die Zeitreihen der Simulationsergebnisse werden dann gegen die gemessenen Zeitreihen dargestellt und deren Korrelation dargestellt. Für den Vergleich der Wasserstände wird jeweils der gesamte verfügbare Datenumfang verglichen, da davon auszugehen ist, dass der Wasserstand zum Beginn der Simulation nicht nennenswert von dem dynamischen Gleichgewicht entfernt war. Für den Vergleich der Größen Temperatur und Salzgehalt wird berücksichtigt, dass das Modell erfahrungsgemäß etwa einen halben Monat benötigt, um aus einem nicht eingeschwungenen Anfangszustand in ein dynamisches Gleichgewicht zu gelangen. Daher wird nur die zeitliche Entwicklung nach dem 10.10.2016 00:00 MEZ mit den Messungen verglichen.

8.2 Vergleich von Modell und Messung für die Größe Wasserstand

Zum Vergleich wurden die Pegel Rostock-Mühlendamm und Warnemünde sowie die aus den Messstationen des WSA Stralsund (P01 bis P12) verfügbaren Druckmessungen herangezogen. Die Druckmessungen wurden unter Berücksichtigung des Luftdrucks und der jeweiligen mittleren Wassertiefe des Messgerätes in Wasserstände wie folgt umgerechnet:

$$h = (P - P_A) / (\rho g) - z_0$$

Dabei ist h die Auslenkung der Wasseroberfläche aus der Ruhelage, P der gemessene Druck in der Tiefe z_0 bezogen auf die Ruhelage, ρ die Dichte, g die Erdbeschleunigung und P_A der Luftdruck an der Wasseroberfläche.

Da die Werte Temperatur und Salzgehalt an den Messpositionen nicht durchgängig zur Verfügung standen, wird auf eine exakte Berechnung der Dichteabhängigkeit verzichtet. Vereinfachend wird für die Berechnung des Wasserstandes aus den Druckmessungen stattdessen eine konstante Dichte von 1000 kg/m^3 angenommen. Die Schwankungsbreite der Dichte des Wassers aufgrund der Abhängigkeit von Salzgehalt und Temperatur hat bei den hier vorliegenden Gerätetiefen nur sehr geringen rechnerischen Einfluss auf das Ergebnis. Für den Luftdruck wurde die Messung an der Wetterstation Warnemünde genutzt.

P05 und P12 wurden aufgrund ihrer räumlichen Nähe wie eine Station behandelt, da P12 als Ersatz für P05 eingerichtet worden ist. Für die Betrachtung der Größe Wasserstand ist diese Zusammenfassung der dicht beieinander liegenden Stationen aufgrund der sehr viel größeren räumlichen Skala der Gradienten des Wasserstandes zulässig.

Wie in Bild 14 und Bild 15 zu erkennen, ist die zeitliche Entwicklung des Wasserstandes im Modell (rot) und in der Messung (schwarz) sehr ähnlich (jeweils oberes Diagramm). Die Modellwerte korrelieren sehr gut mit den Messwerten.

Der Vergleich wird hier stellvertretend für die beiden betrachteten Stationen ROS und P010 dargestellt, die die größten Abweichungen zwischen Messung und Modell zeigen (hier mit dem Fehlermaß Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung („root mean square error“, RMSE)). An den oben genannten Stationen beträgt der RMSE 0.08 m bzw. 0.09 m . An allen weiteren Stationen bildet das Modell die Messungen mit vergleichbarer oder besserer Qualität ab. Der vollständige Satz der Abbildungen zur Validierung des Wasserstandes ist in Anlage A (Blatt 3 bis 14) zu finden.

Für die Größe Wasserstand und für den damit gekoppelten Wassertransport wird damit die für die Beurteilung der Modellresultate erforderliche Naturähnlichkeit des Modelles nachgewiesen.

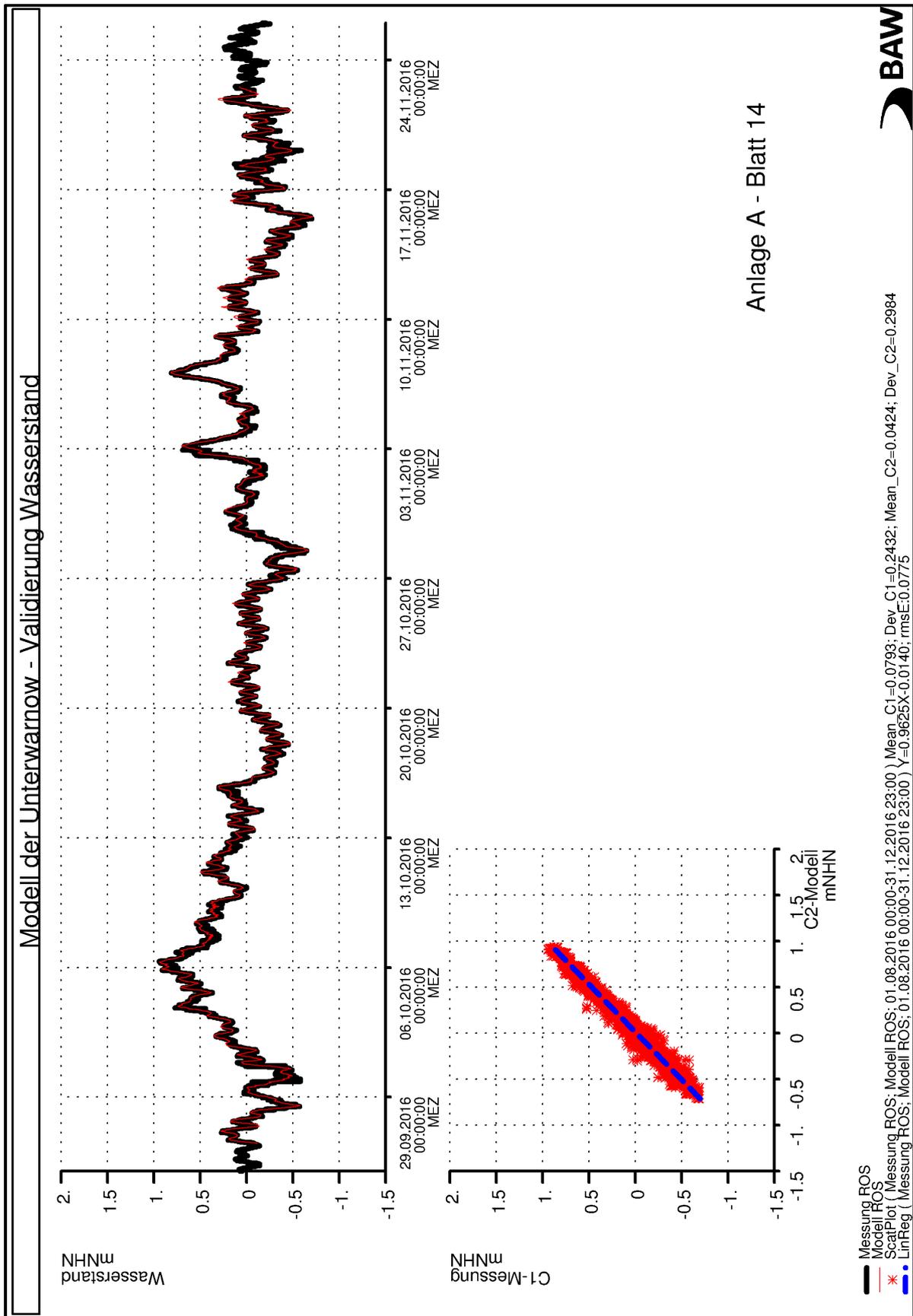


Bild 14 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Wasserstand, hier beispielhaft für die Station Rostock-Mühlendamm (ROS).

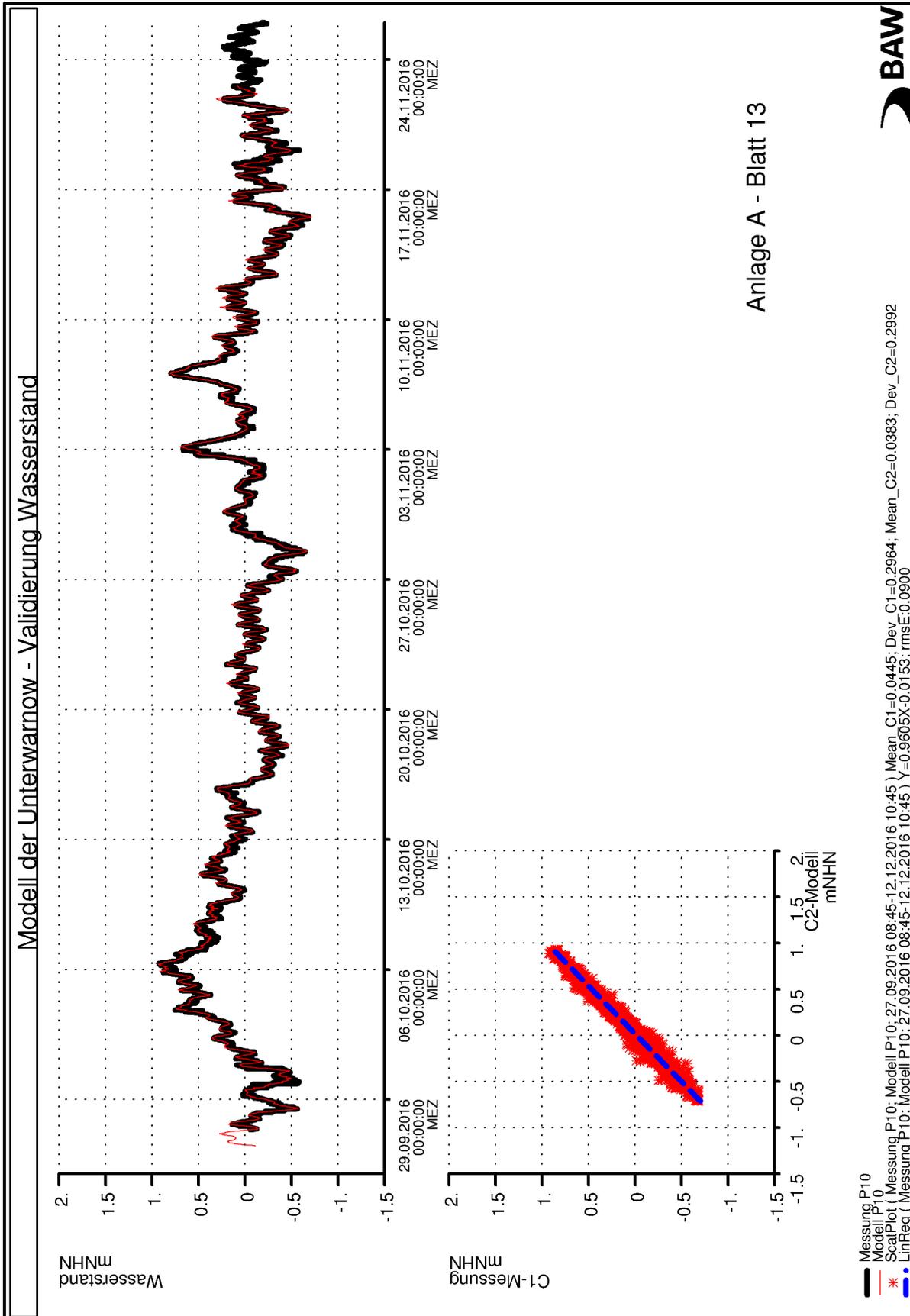


Bild 15 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Wasserstand, hier beispielhaft für die Messposition 10 (P010).

8.3 Vergleich von Modell und Messung für die Größe Wassertemperatur

Für den Vergleich der Modellergebnisse für die Größe Wassertemperatur mit den Messungen werden die Positionen im Warnow-Ästuar (P05 bis P11) herangezogen. Für diese Stationen liegen im Regelfall Messreihen aus drei Tiefen vor. Für Position P07 liegen zwei, für Position P10 liegt eine Messreihe vor. Bei den Messungen handelt es sich um Punktmessungen. Im Modell liegen die Werte als Repräsentant einer Tiefenschicht an der Station vor. Daher ist zu erwarten, dass die Modellzeitreihen eine geringere Streuung aufweisen. Dies ist bei der Bewertung zu berücksichtigen.

Beispielhaft werden in Bild 16 bis Bild 18 die Zeitreihen der Simulation mit den korrespondierenden Messreihen vergleichend dargestellt. Die Systematik der Abbildungen wird an die der Größe Wasserstand angelehnt. Die Abbildungen zeigen für die drei Tiefenschichten jeweils im oberen Diagramm den gesamten zeitlichen Verlauf von Simulation (rot) und Messung (schwarz) im jeweils vorhandenen Zeitintervall der Messung. Im unteren Diagramm wird ein Korrelationsdiagramm dargestellt, wobei hier erst der Verlauf ab dem 10.10.2016 00:00 MEZ eingeht (wie in Abschnitt 8.1 erläutert).

Die Simulationsergebnisse bilden den zeitlichen Verlauf der Wassertemperatur im Untersuchungsgebiet zufriedenstellend ab. Dies zeigt sich dadurch, dass die Phasenverschiebung zwischen Zeitserien der Simulation und der Messung und der RMSE fast an allen Positionen klein sind. Da die Wassertemperatur in strömungsarmen Gewässern (außer in der Nähe von Zuflüssen) im Wesentlichen vom Verlauf der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit sowie dem lokalen vertikalen Austausch bestimmt wird, ist dieser Umstand ein Indikator für die gute Qualität der meteorologischen Randwerte und der Modellierung des vertikalen Austauschs. Die vertikale Auflösung ist ausreichend, um die in der Unterwarnow in der warmen Jahreszeit vorhandene Temperaturschichtung naturähnlich abzubilden.

Systematische Abweichungen sind in der Nähe des binnenseitigen Modellrandes bei P10 erkennbar (Bild 19). Wie schon in 6.3.3 beschrieben, ist die Temperatur des Zuflusses Oberwarnow nicht bekannt und wurde daher vorgegeben. Dieses Vorgehen führt in den dargestellten Simulationen zu einem systematisch unterschätzten Temperaturmittelwert des Abflusses der Oberwarnow. Dieser systematische Fehler der Temperatur führt dazu, dass das Wasser am Mühlendammwehr schwerer als in der Natur ist, und daher leichter absinken kann. Dieser Prozess führt zu einer stärkeren vertikalen Vermischung. Das Wasser ist daher im Modell nahe beim Wehr insbesondere am Boden zu kalt. Der Einfluss des Abflusses schwächt sich Richtung P08 deutlich ab, so dass für das Untersuchungsgebiet dieser systematische Modellfehler vernachlässigbar ist. Im Abschnitt der Unterwarnow zwischen Warnow-Tunnel und Mühlendamm-Wehr werden die Vorhabenwirkungen in der Tendenz aufgrund der im Modell gegenüber der Natur zu starken vertikalen Vermischung im Sommer überschätzt.

Das Modell verhält sich im Untersuchungsgebiet hinsichtlich der Größe Wassertemperatur naturähnlich. Die systematischen Abweichungen in der Nähe des binnenseitigen Modellrandes sind für die Aussagefähigkeit des Modells nicht relevant, denn die Rechenwerte überschätzen die vorhabensbedingte Wirkung beim Vergleich zweier Varianten mit identischen Randwerten. Die Abbildungen für die weiteren, im Gebiet der Unterwarnow ausgelegten Messstationen (P05, P07 bis P09, P11) sind in Anlage A, Blatt 15 bis Blatt 50 zu finden.

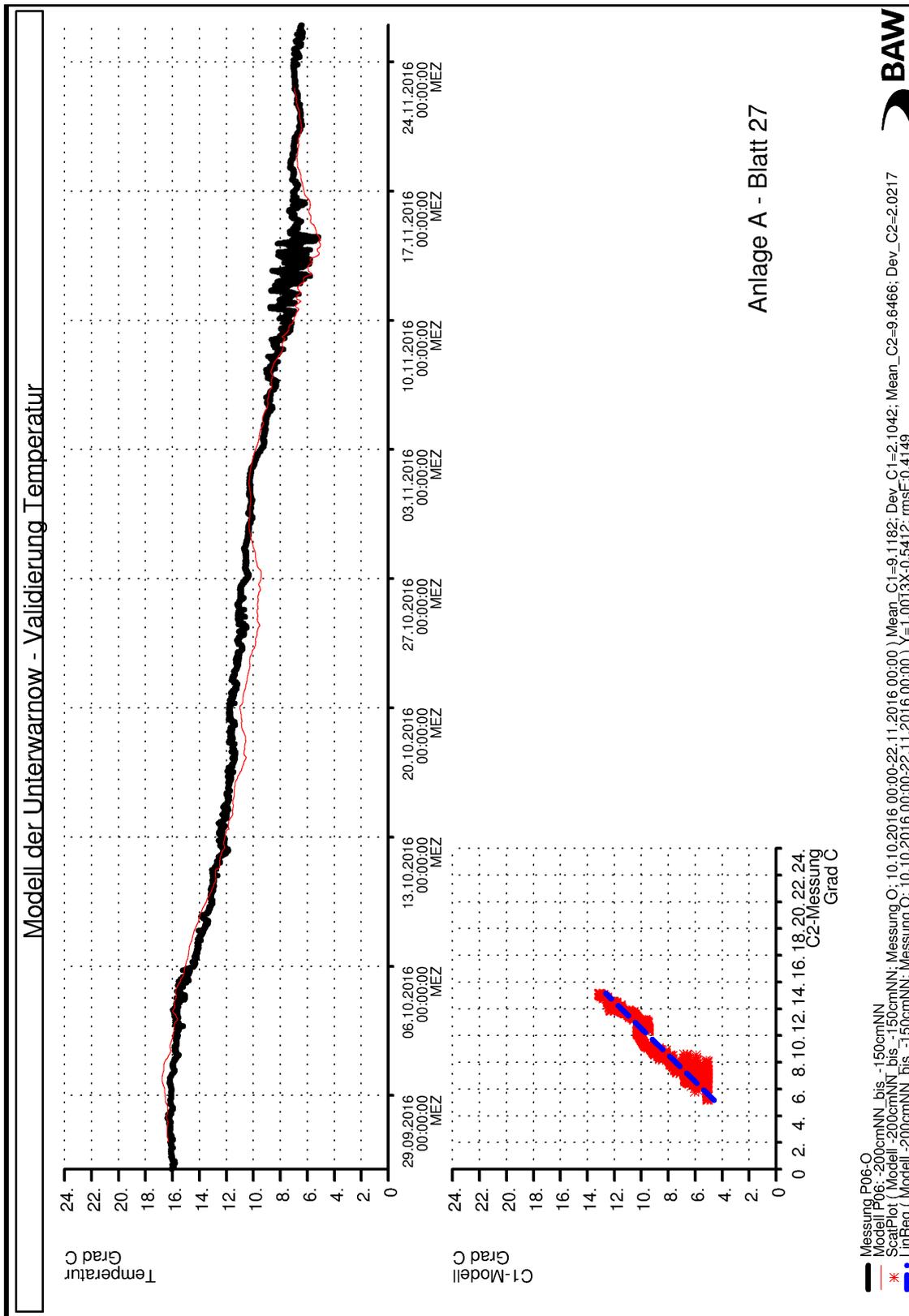


Bild 16 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, oberes Gerät, siehe auch Tabelle 2).

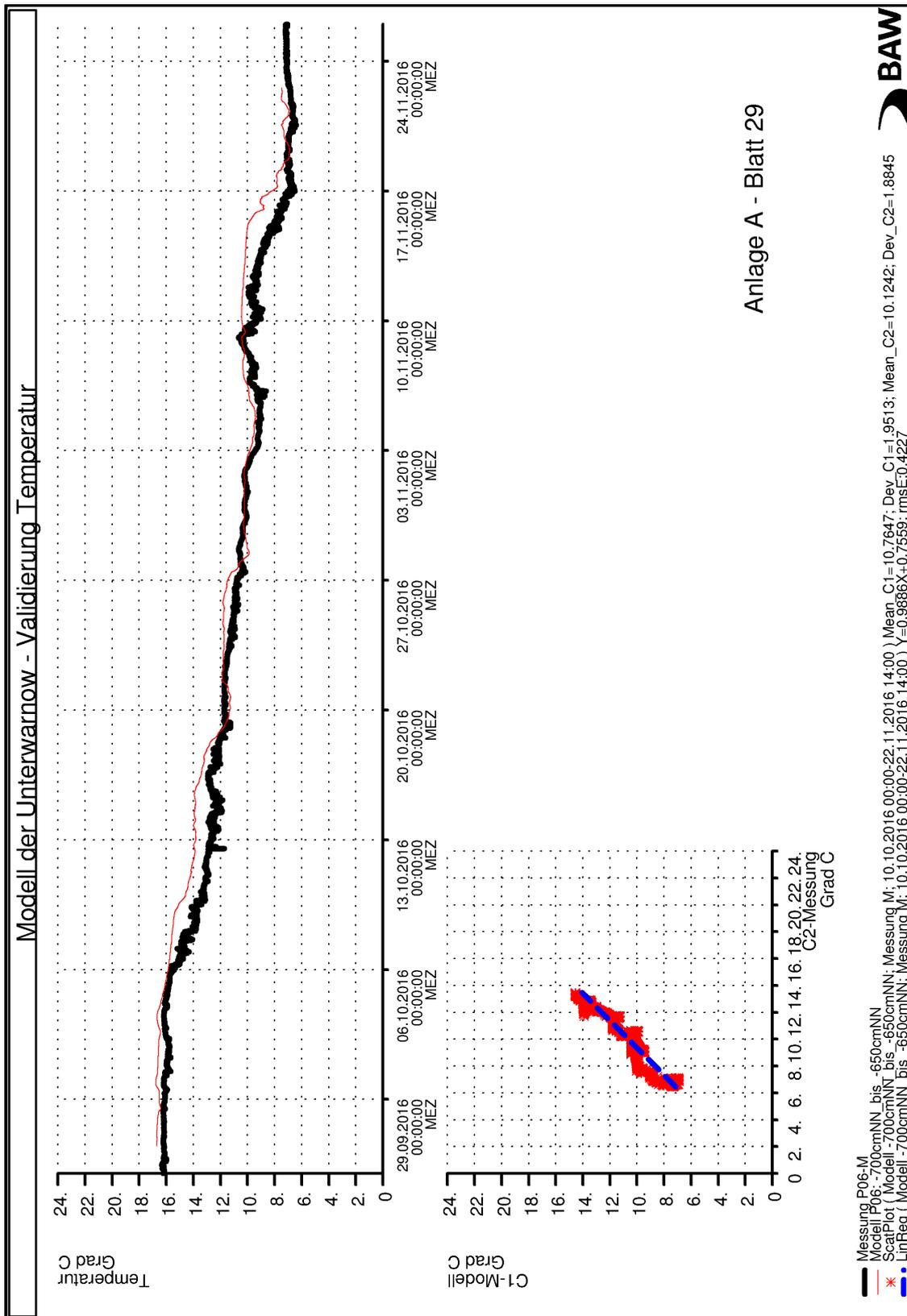


Bild 17 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, mittleres Gerät, siehe auch Tabelle 2).

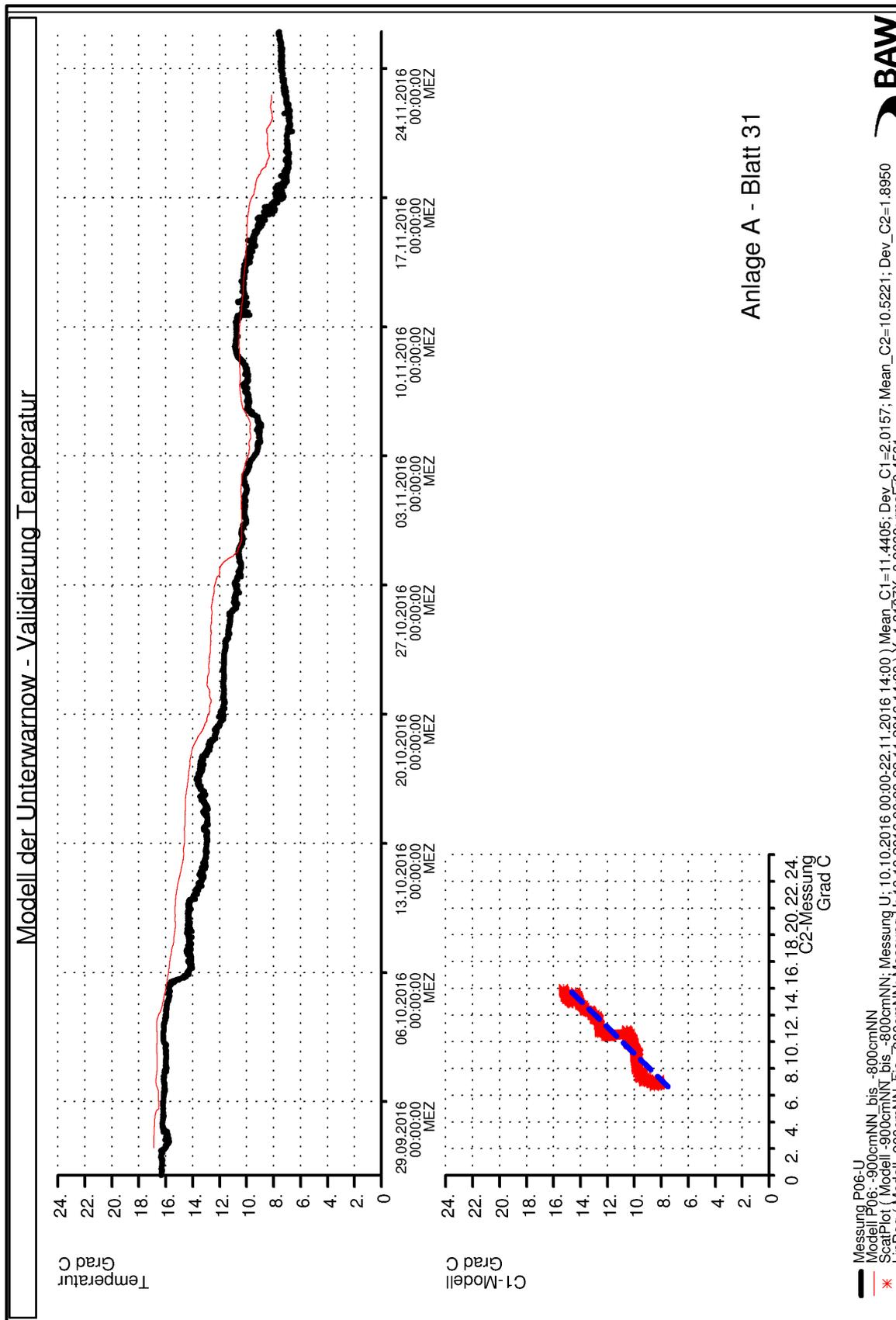


Bild 18 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, unteres Gerät, siehe auch Tabelle 2).

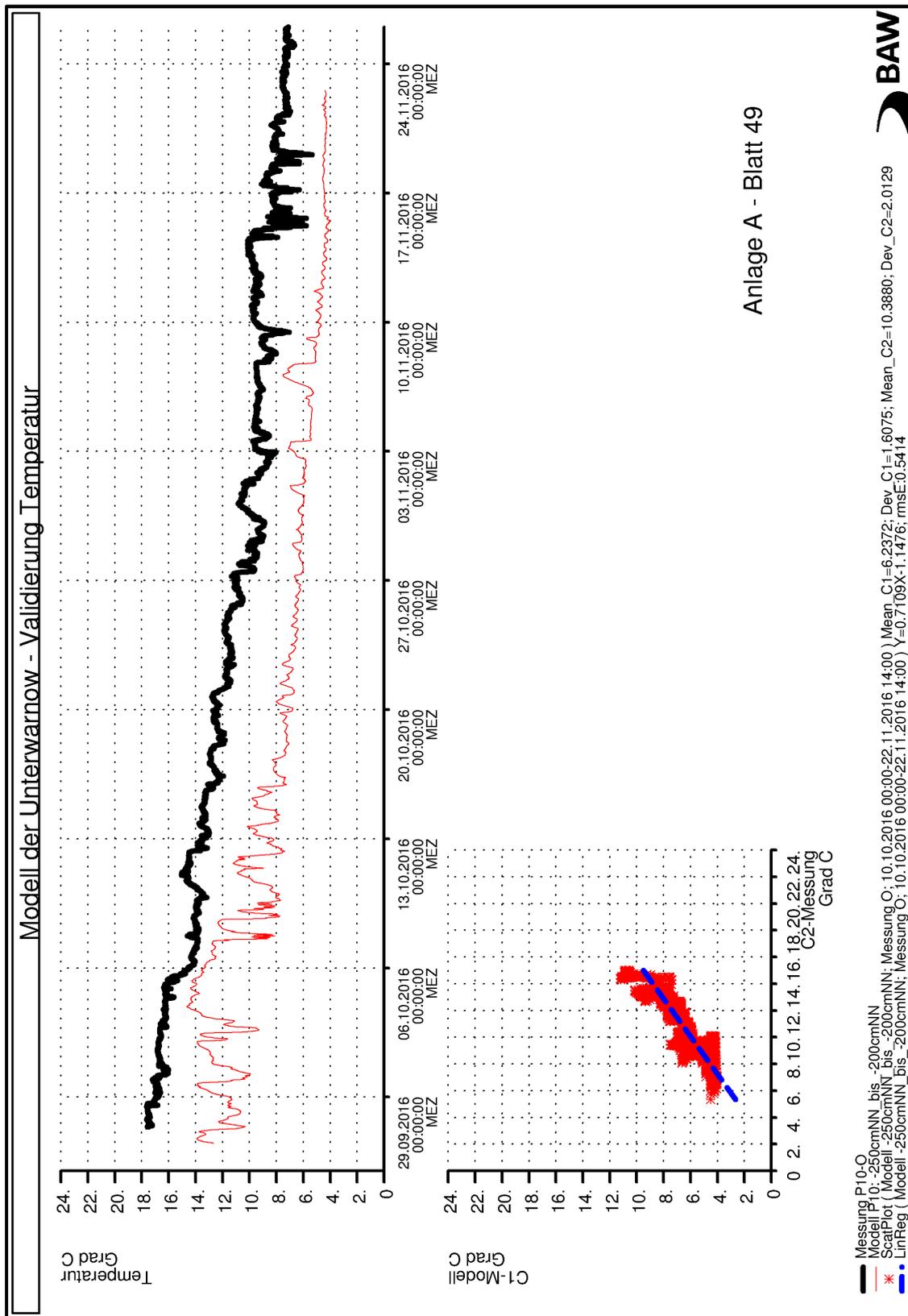


Bild 19 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Temperatur, hier beispielhaft für die Messposition 10 (P10, einziges Gerät, siehe auch Tabelle 2).

8.4 Vergleich von Modell und Messung für die Größe Salzgehalt

Für den Vergleich der Modellergebnisse für die Größe Salzgehalt mit den Messungen werden wie bei der Temperatur die Positionen im Warnow-Ästuar (P05 bis P11) herangezogen. Die gezeigten Darstellungen sind in gleicher Weise aufgebaut wie in 8.2 und 8.3.

An Station P06 wird der mittlere Salzgehalt gut getroffen, jedoch ist die Schwankungsbreite der Simulationsergebnisse (die Salzgehaltsvariation) etwas geringer als der Messwerte, insbesondere werden die Maximalwerte etwas unterschätzt (Bild 20, Bild 21 und Bild 22). Der zeitliche Verlauf ist naturähnlich, da die Phasenverschiebung und der RMSE klein sind. Die Übereinstimmung der Simulation mit den Messdaten ist in der Tiefe höher als an der Oberfläche.

An Station P10 wird der Salzgehalt dauerhaft unterschätzt (Bild 23). Das zeigt, dass das Modell im Bereich des Wehres sehr empfindlich auf die Randwerte des Abflusses reagiert. Der Gradient zwischen dem Süßwasser aus der Oberwarnow und dem salzigeren Wasser der Unterwarnow ist räumlich sehr begrenzt. Daher kann schon eine geringe, im Modell gegenüber der Natur vorhandene, systematische horizontale Verschiebung des Salzgehaltsgradienten Richtung Ostsee dazu führen, dass die Messwerte der Position P10 nicht richtig getroffen werden.

Festhalten lässt sich, dass die Messungen im Bereich des Breitlings und des Seekanals deutlich besser getroffen werden, als nahe beim Mühlendammwehr. Mit zunehmender Wassertiefe und Entfernung vom Wehr werden die Salzgehalte besser getroffen als an P10. In der Tendenz wirkt der Abfluss der Warnow im Modell weiter in das Ästuar hinein als in der Natur und führt zu einer stärkeren Senkung des Salzgehaltes des Oberflächenwassers. Auch an den restlichen Stationen liegt der mittlere Salzgehalt des Modells in der Tendenz unterhalb der gemessenen Werte. Dadurch wird der starke Salzgradient in der Nähe des Wehres systematisch etwas seewärts verschoben. Die Wirkungen des Ausbaus auf den Salzgehalt müssen sich daher in der Simulation stärker zeigen, als dies in der Natur der Fall ist. Die Ursache liegt in der Unterschätzung des Salzgehaltes im oberen Teil der Unterwarnow. Dieses etwas zu süße Wasser wird durch das vorhabenbedingt eindringende Salzwasser stärker verändert, als das bei bereits salzigem Wasser der Fall wäre.

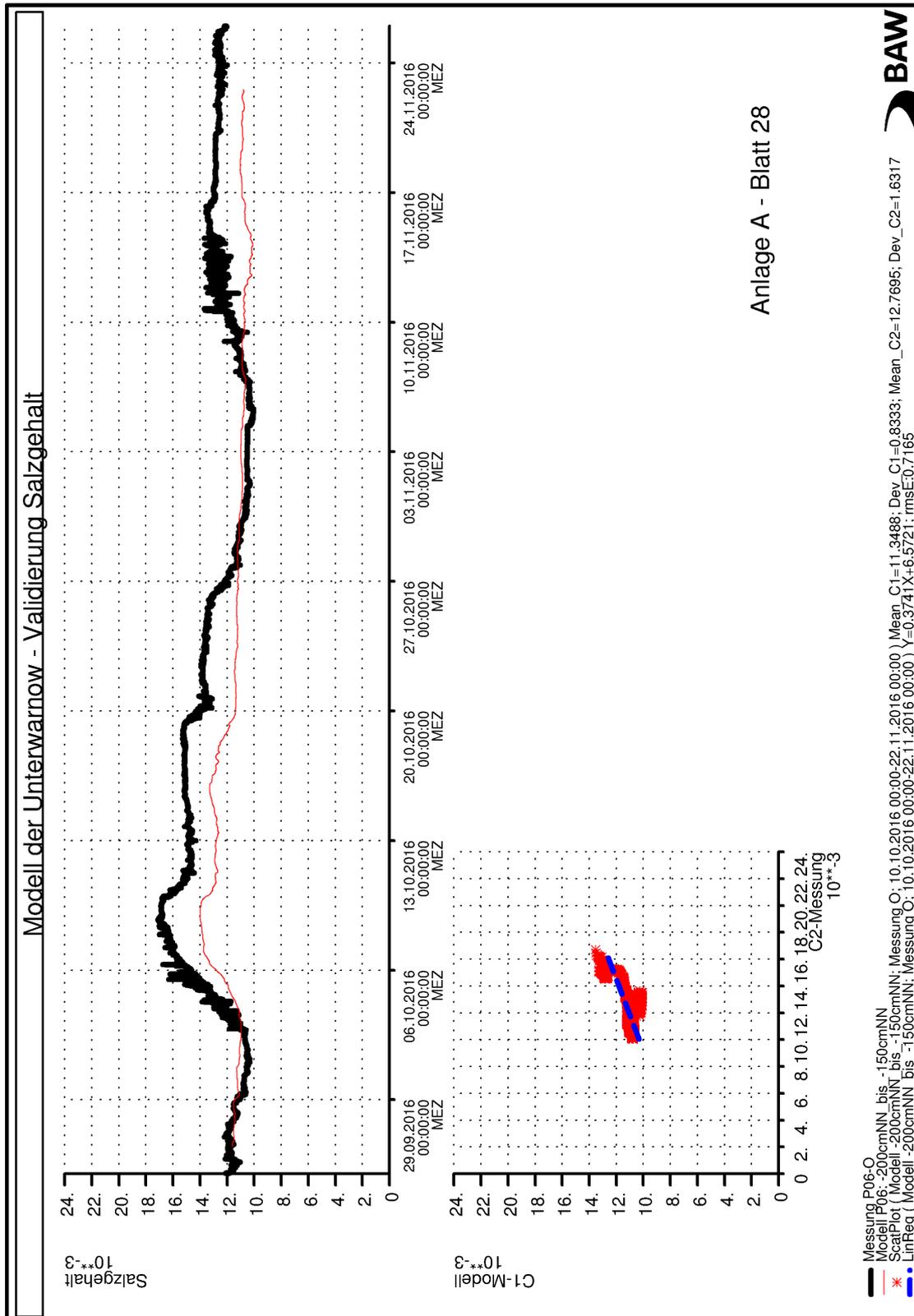


Bild 20 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, oberes Gerät, siehe auch Tabelle 2).

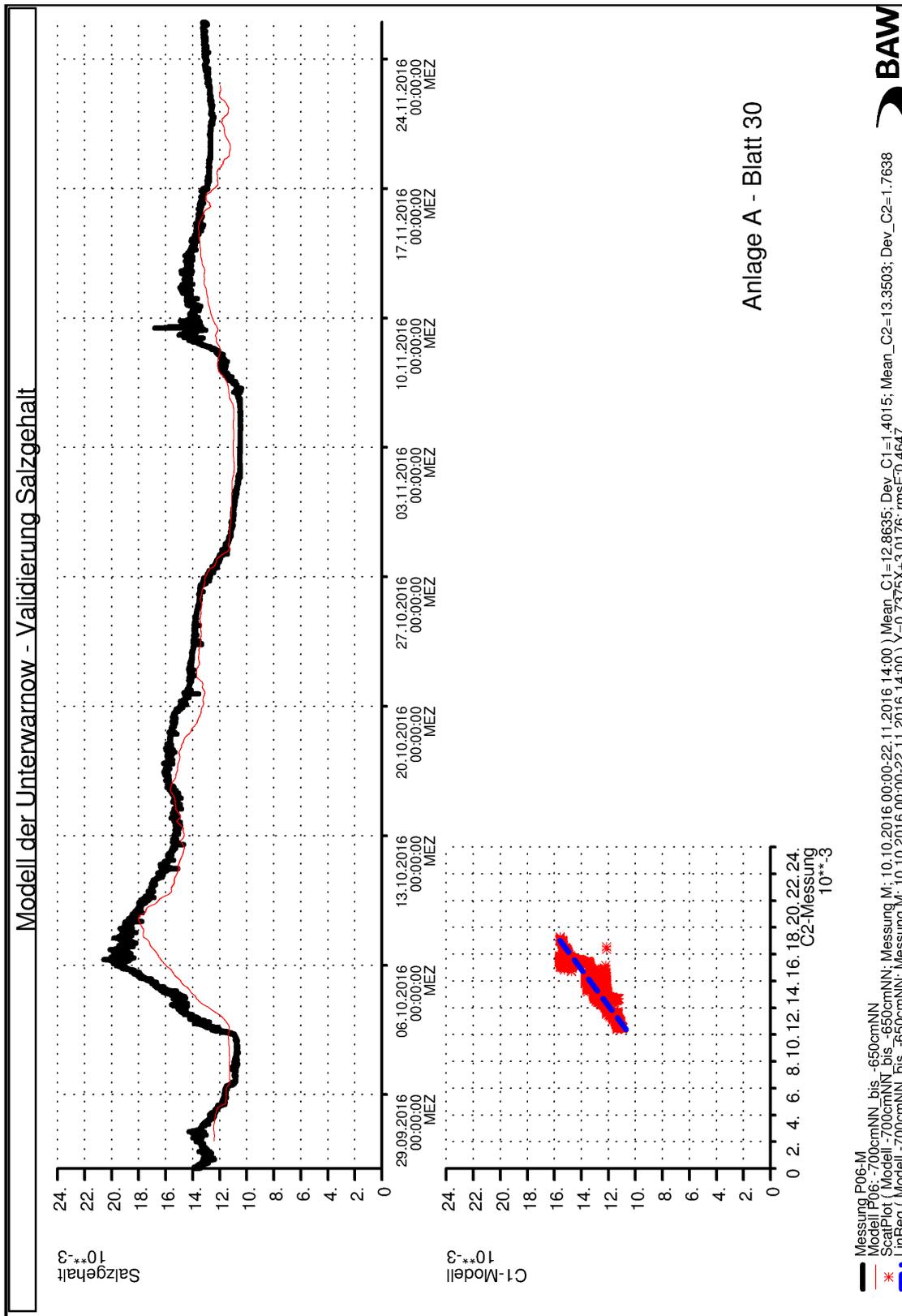


Bild 21 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, mittleres Gerät, siehe auch Tabelle 2).

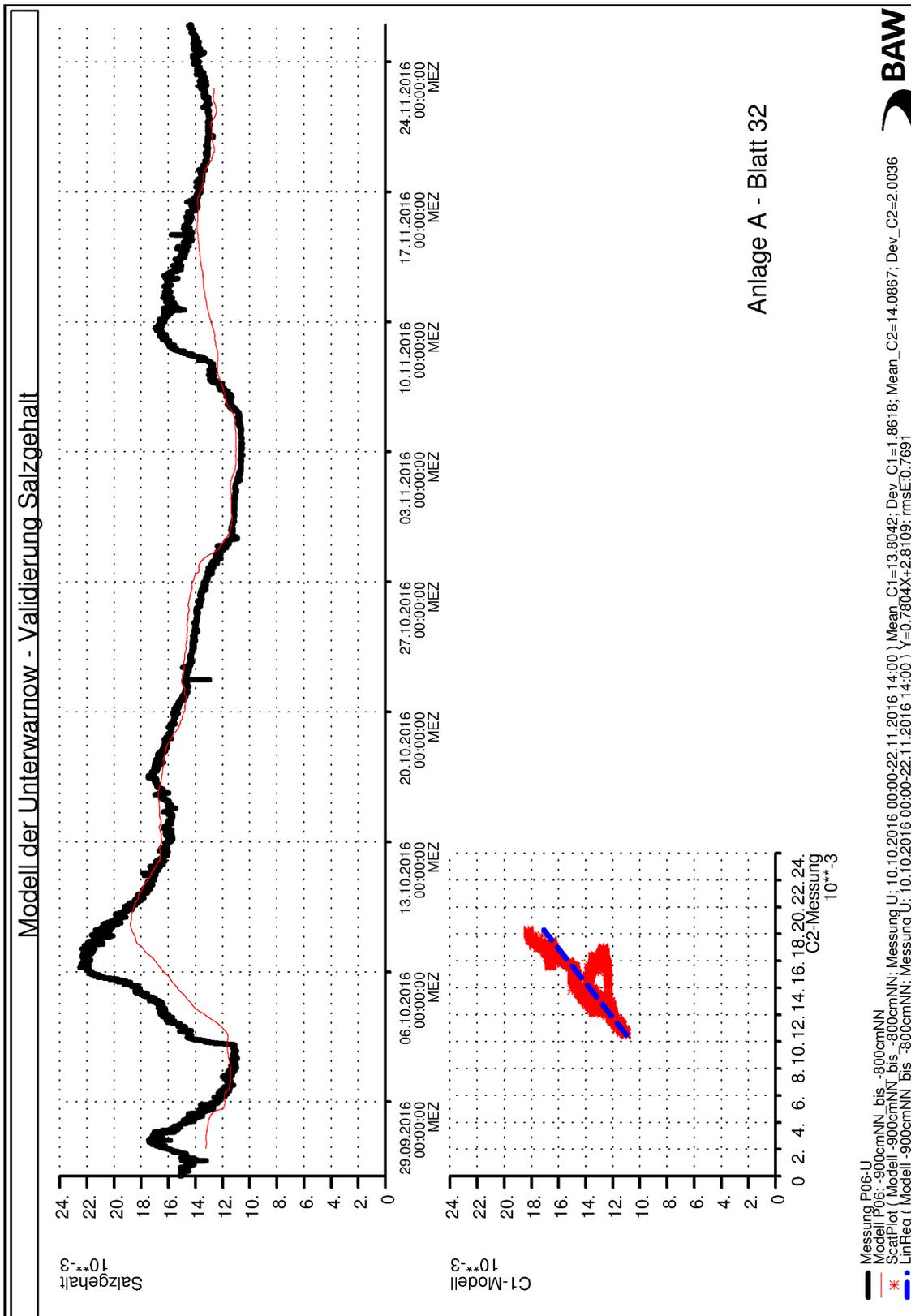


Bild 22 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt, hier beispielhaft für die Messposition 6 (P06, unteres Gerät, siehe auch Tabelle 2).

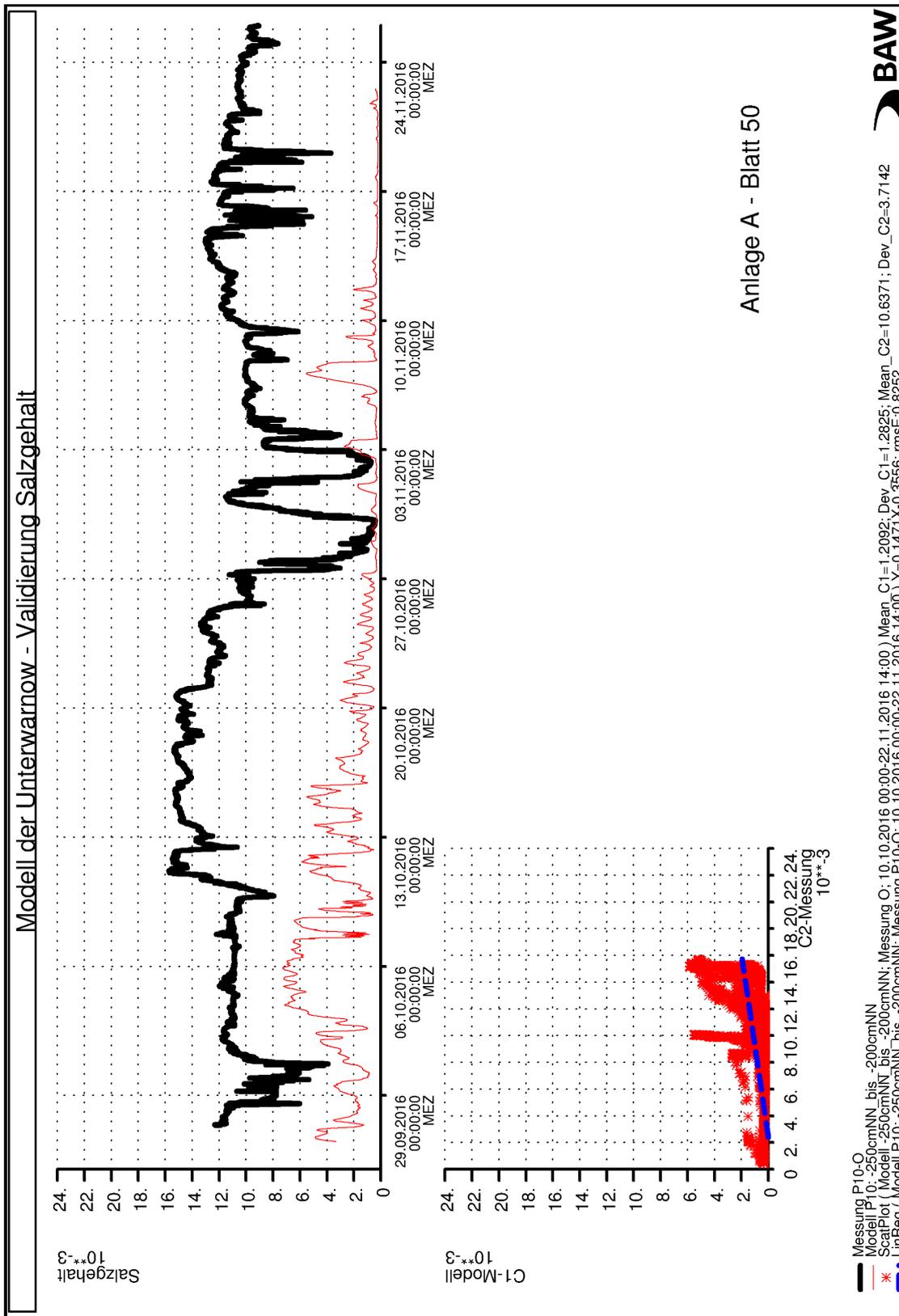


Bild 23 Vergleich zwischen Modell und Messung für die Größe Salzgehalt hier beispielhaft für die Messposition 10 (P10, einziges Gerät, siehe auch Tabelle 2).

Die Reproduzierbarkeit des Salzgehaltes an den Messpositionen ist schlechter als die der Temperatur, denn während die Temperatur über die gesamte Wasseroberfläche gesteuert wird, somit in den oberen Schichten sehr stark von der Güte der meteorologischen Randwerte bestimmt ist, wird der Salzgehalt an den seitlichen Rändern gesteuert. Die Randwerte an den seitlichen Rändern sind mit größerer Unsicherheit behaftet als die der Meteorologie, da nur eine verwendbare Messung in der Nähe des seeseitigen Randes für den Salzgehalt vorliegt, deren Werte daher am gesamten seeseitigen Rand angenommen werden. Der Salzgehalt des Oberwassers ist unbekannt und kann daher nur abgeschätzt werden.

Bei der Ermittlung einer Vorhabenwirkung können die oben beschriebenen, systematischen Fehler nahe dem Mühlendammwehr toleriert werden, denn sie beeinflussen die beiden zu vergleichenden Systemzustände in gleicher Weise.

Die Fehler in der binnenseitigen Randsteuerung führen zu einem verstärkten Absinken des salzarmen Wassers am Wehr und damit einer stärkeren Vermischung, als dies in der Natur der Fall wäre. Dies wiederum führt zu einer stärkeren Aussüßung des bodennahen, salzhaltigen Wassers, also zum Abbau der vertikalen Gradienten. Da bei der Simulation in beiden Varianten in gleicher Weise eher eine Überschätzung der vertikalen Vermischung im Maßnahmengebiet erfolgt, resultiert daraus eine Überschätzung der Wirkung der Baumaßnahme auf die Salzgehalte im Oberflächenwasser.

8.5 Bewertung des Modells

Der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Vergleich zwischen Modell und Messungen führt zu folgenden Schlüssen:

- Die barotrope Dynamik, die den Wasserstand und den tiefengemittelten Transport widerspiegelt, wird vom Modell in hoher Qualität abgebildet. Daher können die Rechenwerte für eine Vorhabenwirkung direkt bewertet werden.
- Das Verhalten bezüglich der Temperatur wird vom Modell in guter Qualität abgebildet. Auch hier können die Wirkungen direkt interpretiert werden.
- Hinsichtlich des Salzgehaltes zeigt das Modell systematische Abweichungen besonders im flacheren Teil der Warnow zwischen Warnow-Tunnel und Mühlendamm-Wehr. Diese führen in der Tendenz zu einer Überschätzung der Vorhabenwirkung, da die vertikale Vermischung zwischen dem salzreichen Tiefenwasser und dem Oberflächenwasser im Modell stärker ist, als in der Natur. Daher können die Rechenwerte für den Salzgehalt als obere Grenze der Wirkung des Ausbaus angesehen werden.

Das Modell ist geeignet für die naturähnliche Simulation des Ästuars Unterwarnow einschließlich Breitling und Radelsee.

9 Ergebnisse des Variantenvergleiches

Der qualitative und quantitative Vergleich der Variante AZ1660 (Ausbauzustand) mit der Variante PIZ (Planerischer Ist-Zustand) dient der Beurteilung der Wirkung der Baumaßnahme auf die abiotischen Systemparameter Wasserstand, Strömung, Temperatur und Salzgehalt.

9.1 Ergebnisdarstellungen

Da der Wasserstand innerhalb der Unterwarnow nur sehr kleine räumliche Gradienten hat, reicht es für diese Größe aus, die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der vorhabenbedingten Änderung an einzelnen repräsentativen Punkten zu bewerten. Die Interpretation kann dann auf das gesamte Untersuchungsgebiet übertragen werden. Im folgenden Text werden ausgewählte Darstellungen gezeigt, der vollständige Satz der Ergebnisgrafiken für den Wasserstand ist in Anlage B, Blatt 01 bis Blatt 13 zu finden.

Die Kennwerte des Salzgehaltes und der Temperatur werden in der Fläche tiefengemittelt und entlang der Fahrrinne auf einem Längsprofil aus den Simulationsergebnissen abgeleitet und ausgewertet. Aus den flächenhaften Darstellungen (Anlage C) lässt sich das Auftreten der Wirkungen lokal eingrenzen. Die Profildarstellungen (Anlage D) zeigen die vorhabenbedingte Änderung in verschiedenen Tiefenhorizonten. Zusätzlich wird an Einzelpunkten die zeitliche Entwicklung der Größen Temperatur, Salzgehalt und Strömungsgeschwindigkeit ausgewertet.

9.2 Vorhabenwirkung für die Größe Wasserstand

Die Zeitreihen des Wasserstandes der zu vergleichenden Systemzustände werden für den gesamten Simulationszeitraum dargestellt. Für die Monate August bis Dezember wird zusätzlich der Wasserstand des Ausbauzustandes AZ1660 gegen den Wasserstand des planerischen Ist-Zustandes dargestellt und es werden statistische Kennwerte ermittelt. Letztere sind in die Legende der Diagramme aufgenommen worden.

Für die beiden Zeitreihen werden jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung verglichen sowie als Abweichungsmaß der RMSE ermittelt.

Der Einfluss des Vorhabens auf den Hochwasserschutz wird anschließend dargestellt und bewertet.

9.2.1 Wirkung der Ausbauvariante, abgeleitet aus den Modellergebnissen

Der Vergleich zwischen den Systemzuständen PIZ und AZ1660 wird im Text exemplarisch an den Stationen P06 (im Breitling), RAD (im Radelsee) und ROS (am Mühlendamm-Wehr) erläutert.

Diese drei Stationen werden hinsichtlich der Wirkung auf die Größe Wasserstand als repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet angesehen, da auch alle weiteren betrachteten Stationen (Anlage A) ein vergleichbares Verhalten in Bezug auf das Ausbaivorhaben zeigen.

An der Position P06 weichen die Zeitreihen des Wasserstandes für den gesamten Simulationszeitraum nicht nennenswert voneinander ab (Bild 24). Die Wurzel der mittleren quadratischen

Abweichung (RMSE) beträgt weniger als 0,1 cm. Die Mittelwerte der beiden Kurven weichen nur um 0,01 cm voneinander ab.

in diesem Zeitraum sind einige Hoch- und Niedrigwasserereignisse erkennbar. Das Hochwasserereignis vom 06.10.2016 wurde durch langsam steigenden Wasserstand in der Ostsee verursacht. Der lokale, windinduzierte Anteil am Hochwasserstand ist hier relativ gering. Mit diesem Ereignis war auch ein erhöhter Salzwassereinstrom vom Skagerak zu beobachten, der sich auch an den Messreihen der Messkampagne des WSA Stralsund ablesen lässt. Das kurzperiodische Ereignis im Dezember stellt dagegen eine typische Reaktion auf den schnellen Durchzug eines kräftigen Sturmtiefs dar. Die Korrelation der Simulationen für die beiden Varianten ist sehr hoch. Sowohl Mittelwerte wie auch Extremwerte beider Simulationen weichen weniger als ein Millimeter voneinander ab. Die Schwankungsbreite, die an der Länge der blauen Ausgleichsgerade im unteren Diagramm abzulesen ist, ist vergleichbar mit der der offenen Ostsee.

Auch im Radelsee weichen die Zeitreihen des Wasserstands in beiden Varianten nur minimal voneinander ab (RMSE=0,03 cm). Die Schwankungsbreite des Wasserstandes ist geringer als in der Ostsee und der Unterwarnow. Hier macht sich die dämpfende Wirkung des im Verhältnis zum Volumen des Radelsees kleinen Durchflussquerschnittes des Moorgrabens auf Hochwasserwellen mit Perioden von einigen Stunden bis zu etwa einem Tag bemerkbar.

Am Pegel Rostock-Mühlendamm verhalten sich die Wasserstände in den beiden Varianten wie an Position P06. Auch hier liegt der RMSE unterhalb von 0,1 cm.

Auch an den weiteren betrachteten Positionen (Anlage B, Blätter 01 bis 13) ist der Verlauf des Wasserstandes in beiden Varianten kaum zu unterscheiden. Der RMSE-Wert liegt unterhalb von 0,1 cm.

Die Wirkung des geplanten Ausbaus des Seekanals hat einen Einfluss auf die kennzeichnenden Wasserstände und die barotropen Transporte im System Unterwarnow. Beim Wasserstand liegt der RMSE unterhalb von 0,1 cm, und die Abweichung des Mittelwertes liegt unterhalb von 0,01 cm. Mit der derzeit verwendeten Aufzeichnungsgenauigkeit an den Dauerpegeln von $\pm 0,5$ cm ist eine solch geringe Wirkung jedoch nicht nachweisbar. Der Querschnitt der Verbindung zwischen Unterwarnow und Ostsee ist bereits heute so groß, dass die in der Ostsee vorhandenen Schwankungen des Wasserstandes nahezu ohne Dämpfung in die Unterwarnow übertragen werden. Dies wird durch die Vertiefung des Seekanals nicht verändert. Die Ergebnisse der Voruntersuchung (BAW 2011), dass hinsichtlich der Wasserstände aus wasserbaulicher Sicht keine maßgeblichen Vorhabenwirkungen zu erwarten sind, werden damit bestätigt. Die Aussage gilt hier sowohl für die Kenngrößen des Wasserstandes als auch für den zeitlichen Verlauf von Einzelereignissen.

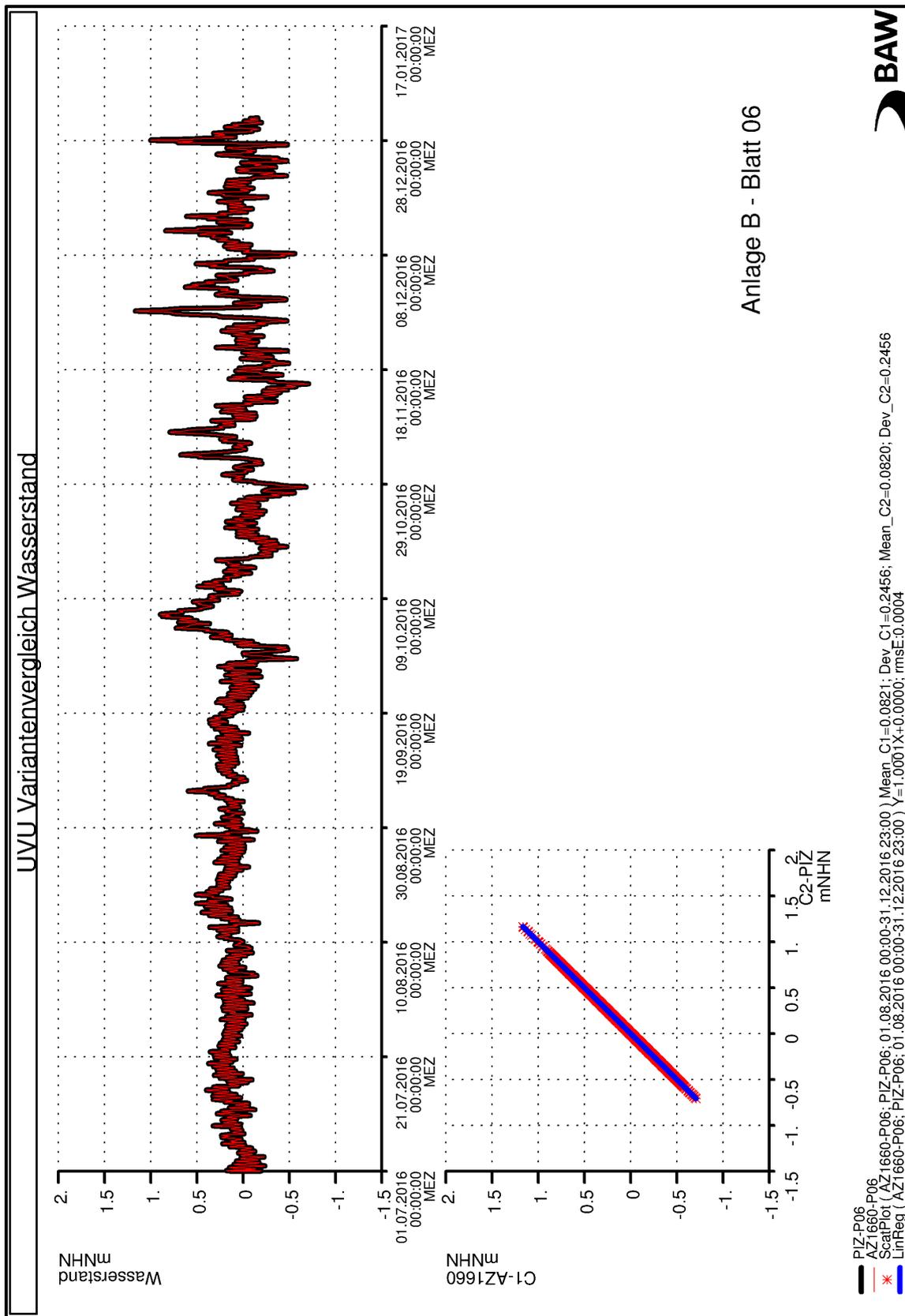


Bild 24 Simulierte Zeitreihen des Wasserstandes für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P06.

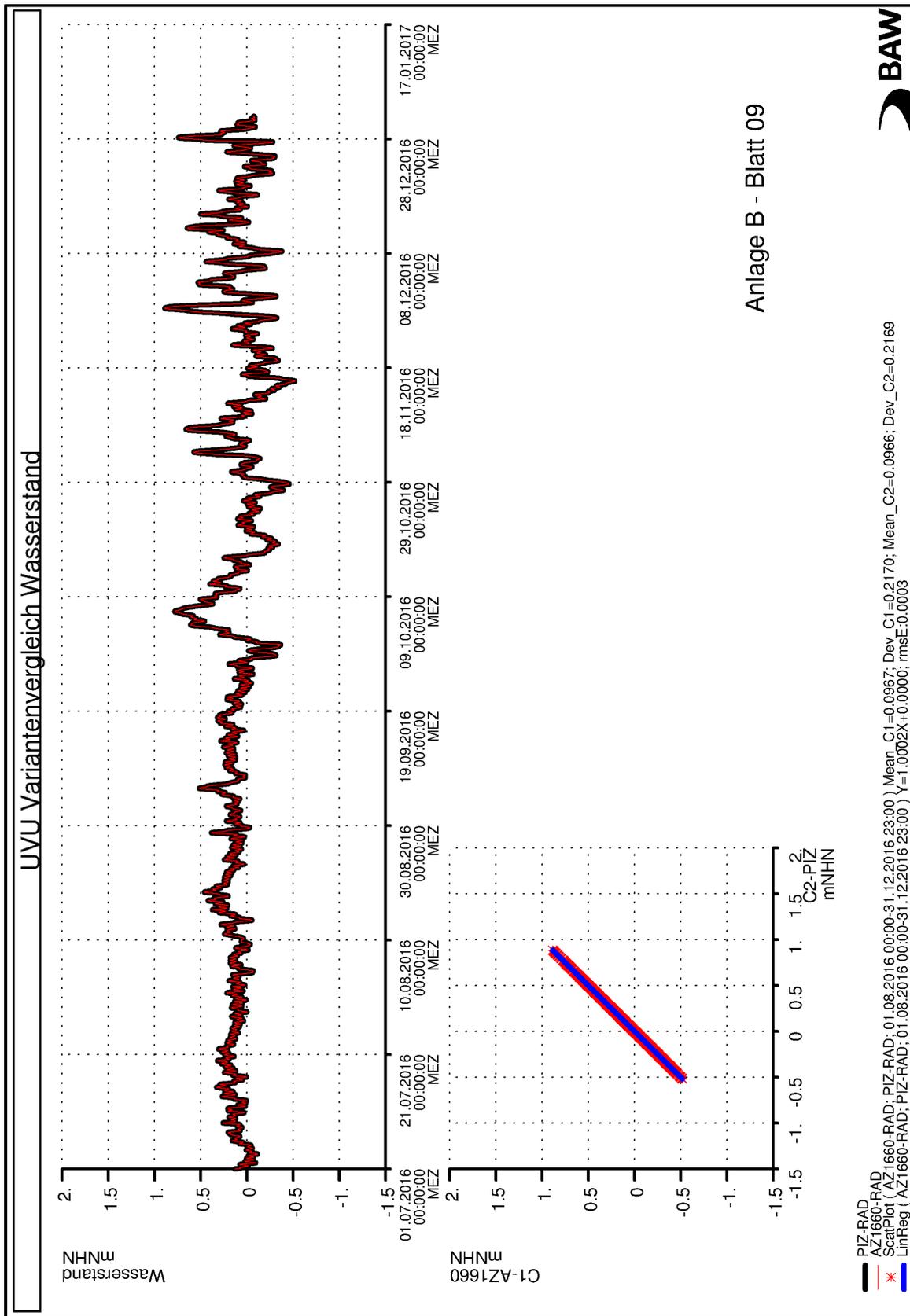


Bild 25 Simulierte Zeitreihen des Wasserstandes für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position RAD.

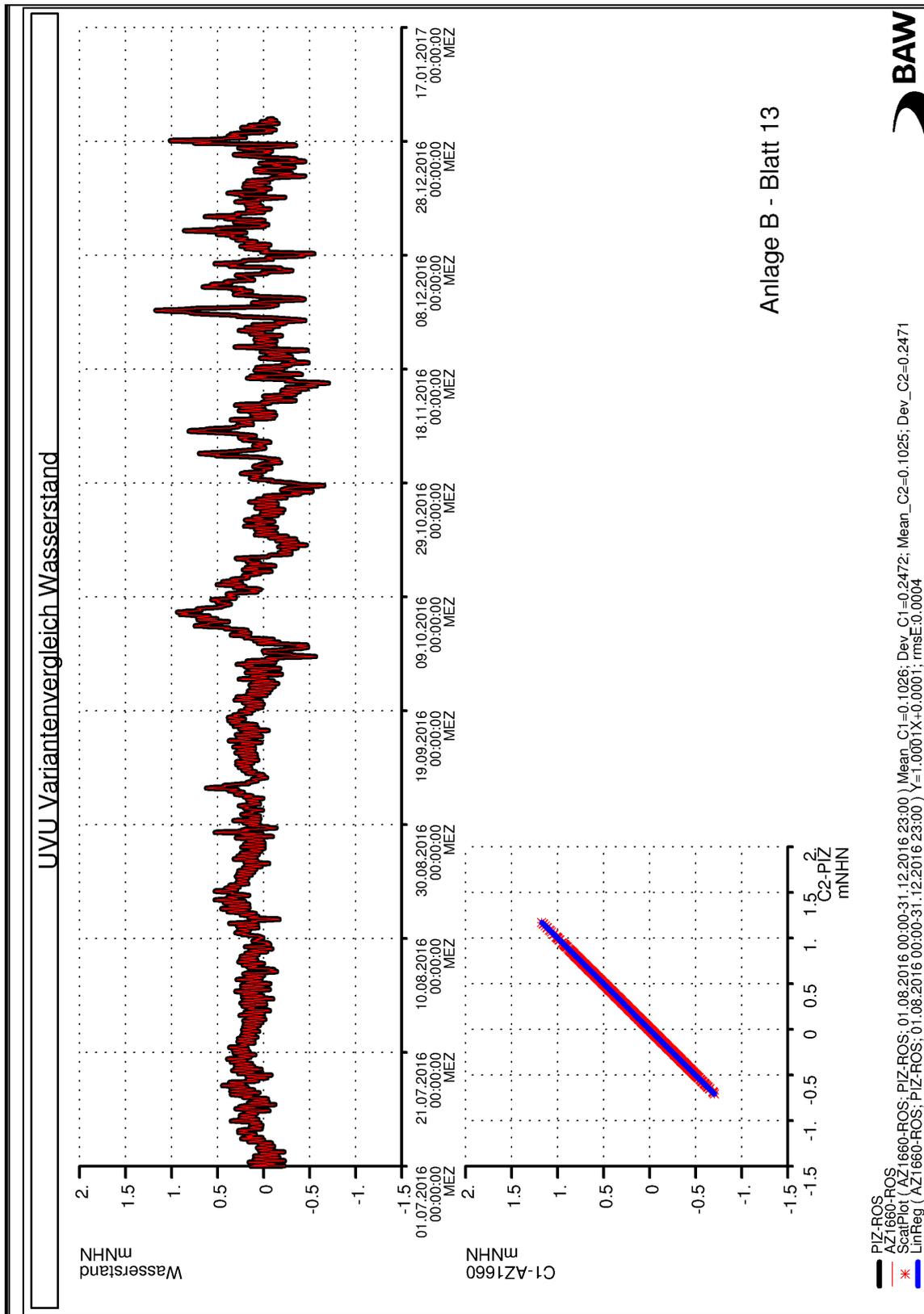


Bild 26 Simulierte Zeitreihen des Wasserstandes für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position ROS.

9.2.2 Auswirkungen auf den Hochwasserschutz

Im Untersuchungsgebiet befinden sich große Bereiche, die von den örtlichen Behörden als potentielle Überflutungsflächen bei Hochwasserereignissen angesehen werden (Badrow 2012). Die Ursache von Hochwasserereignissen an der Unterwarnow sind Sturmereignisse über der Ostsee. Indirekt kann auch das Gebiet um die Oberwarnow von Hochwasserereignissen betroffen sein, wenn bei hohem Wasserstand in der Unterwarnow und gleichzeitig hohem Abfluss eine ausreichende Entwässerung über das Mühlendammwehr nicht möglich ist.

Laut Bundeswasserstraßengesetz in der derzeit aktuellen Fassung (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 02.04.1968) ist der Ausbau einer Wasserstraße hochwasserneutral durchzuführen: (Zitat §12 (7): *Ausbau- oder Neubaumaßnahmen werden so durchgeführt, dass mehr als nur geringfügige Auswirkungen auf den Hochwasserschutz vermieden werden.*

Es ist also der Nachweis zu erbringen, dass die Maßnahme entweder in diesem Sinne geringfügige Wirkungen auf den kennzeichnenden Maximalwasserstand (höchstes Hochwasser, HHW) hat, oder geeignete Kompensationsmaßnahmen im Rahmen der Planung dergestalt erfolgen, dass die Wirkungen die Eigenschaft „geringfügig“ im Sinne des Hochwasserschutzes erfüllt.

Die nachfolgenden Aussagen betreffen ausschließlich die Wirkung der Maßnahme auf die Hochwassersicherheit im Sinne einer Veränderung des Hochwasserscheitels, der Grundlage der Bemessung der Hochwasserschutzanlagen ist.

Die Wirkung einer Vertiefungsmaßnahme wird vom Verhältnis der Wassertiefe des Ausbau-Querschnitts zur vorhandenen Wassertiefe beim jeweils eintretenden Scheitelwasserstand bestimmt. Je höher der Scheitelwasserstand ist, desto weniger Anteil hat die zusätzliche Wassertiefe an der Gesamtwassertiefe. Somit wird die resultierende Wirkung umso geringer, je höher ein Sturmhochwasser aufläuft.

Beim zeitlichen Verlauf des Wasserstandes und der Eintrittszeit und -höhe der Scheitelwasserstände sind nach den oben dargestellten Ergebnissen keine Vorhabenwirkungen zu erwarten. Dies gilt somit auch für den Scheitelwasserstand von Hochwasserereignissen. Die Wirkung des Ausbausvorhabens, die aus der hier dargestellten Systemstudie abgeleitet wurde, beträgt weniger als ± 1 cm und kann im Sinne des o.g. Gesetzes als „geringfügig“ betrachtet werden.

9.2.3 Auswirkungen auf die Entwässerung des Binnenlandes

Die Entwässerungskapazität über das Mühlendammwehr ist ein maßgeblicher Faktor für die Entwässerung des Binnenlandes und damit den binnenseitigen Hochwasserschutz an der Oberwarnow. Die Entwässerung des Binnenlandes wäre bei einem Eintreten nachhaltiger systematischer Änderungen des mittleren Wasserstandes und des Niedrigwasserstandes in der Unterwarnow betroffen. Eine Verschlechterung würde dann eintreten, wenn der mittlere Wasserstand sowie Niedrigwasserstände im Ausbauzustand in der Unterwarnow systematisch höher eintreten würden. Der mittlere Wasserstand ändert sich durch den Ausbau jedoch, wie bereits erwähnt, um weniger als ± 1 cm, so dass vorhabenbedingt keine Verschlechterung der Situation hinsichtlich der Entwässerung des Binnenlandes erwartet wird. Ebenso sind keine vorhabenbedingten Veränderungen der Niedrigwasserstände erkennbar.

Eine Verschlechterung hinsichtlich des binnenseitigen Hochwasserschutzes im Einzugsgebiet der Oberwarnow kann somit ausgeschlossen werden, da die Entwässerungskapazität der Unterwarnow nicht verschlechtert wird.

9.3 Vorhabenswirkung für die Größe Strömungsgeschwindigkeit

9.3.1 Tiefengemittelte Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit

Die Auswertung wird in der Fläche für die maximale, tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt. Im Folgenden ist der Text auf die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit beschränkt.

Die Maximalwerte der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit liegen überwiegend unter 0,4 m/s (Bild 27). Nur entlang der Küste westlich der Molen bei Warnemünde treten höhere Werte bis 0,6 m/s auf. Besonders geringe Geschwindigkeiten sind östlich des Yachthafens „Hohe Düne“, den Hafenbecken des Seehafens und im Bereich des Marinehafens festzustellen. Letztere sind überwiegend auf die im Verhältnis zum übrigen Breitling große Wassertiefe zurück zu führen. In der Unterwarnow folgt die Strömungsrichtung mehr oder weniger den tiefen Rinnen, in der Ostsee dagegen verläuft die Strömung meist quer zum Seekanal. Oberflächennah kann die Strömung auch in der Warnow von der Rinnengeometrie abweichende Richtungen einnehmen.

Die bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten sind in der Warnow und im Seekanal die größte Zeit gering (bis zu 10 cm/s), da die barokline Zirkulation, die zu einem Einstrom am Boden führt, im Mittel von einem barotropen Ausströmen des Wassers der Unterwarnow überlagert wird. Nur bei Hoch- und Niedrigwasserereignissen kann der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit auch bodennah soweit ansteigen, dass eine strömungsbedingte Erosionswirkung auftreten kann. Durch den Ausbau werden die maximalen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der ausgebauten Trasse um bis zu 3 cm/s reduziert (Bild 28). Seewärts der Molenköpfe treten auch Zunahmen bis 3 cm/s auf. Außerhalb der Ausbaustrecke liegen die Änderungen unter ± 1 cm/s.

Die beiden hier gezeigten Abbildungen geben einen Überblick über das gesamte Untersuchungsgebiet. Die detaillierteren Abbildungen der einzelnen in Bild 8 dargestellten purpurfarbenen Kacheln befinden sich in Anlage C, Blatt 03a/b bis Blatt 10a/b.

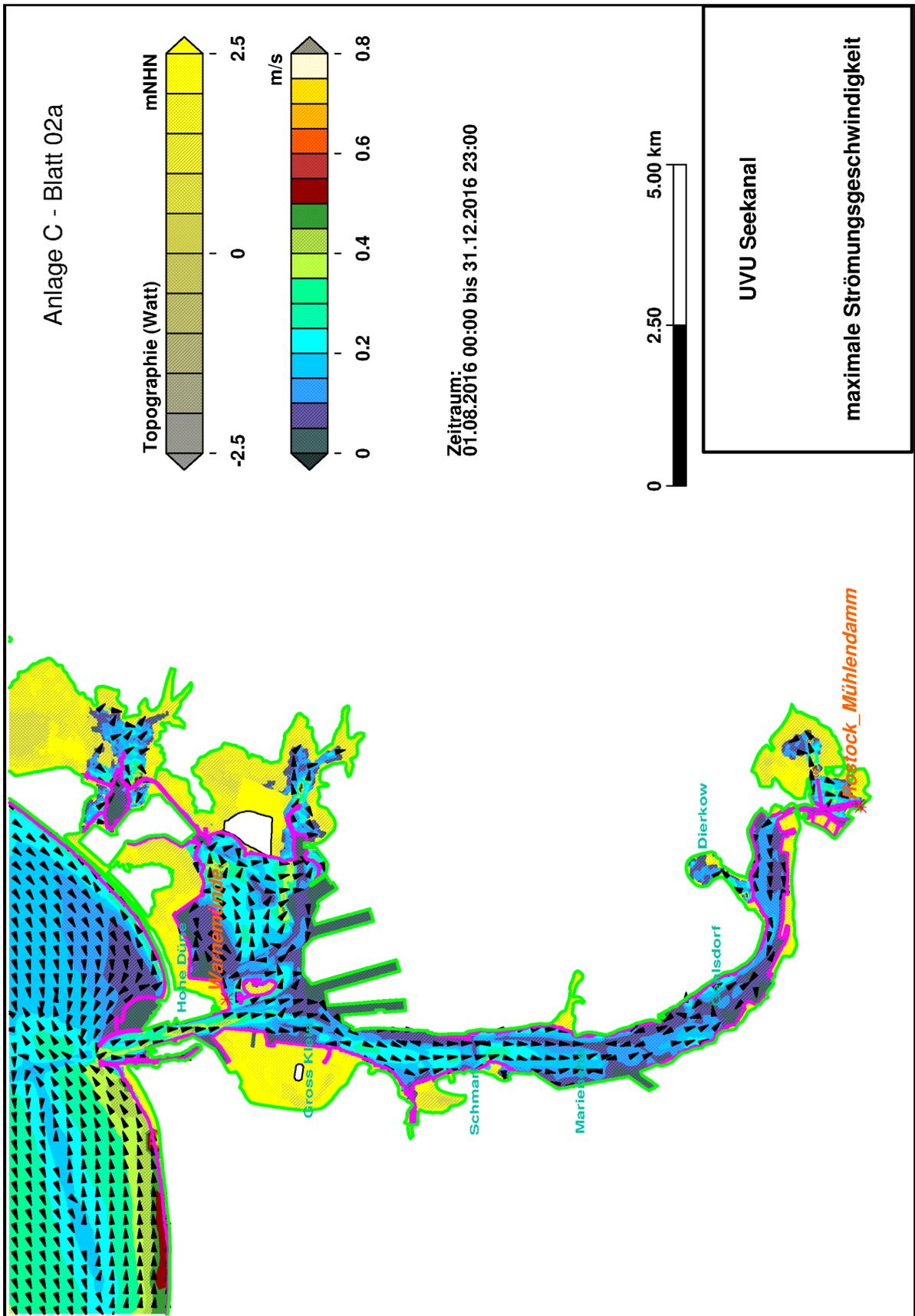


Bild 27 Maximalwert der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit im Planerischen Ist-Zustand für den Analysezeitraum August bis Dezember.

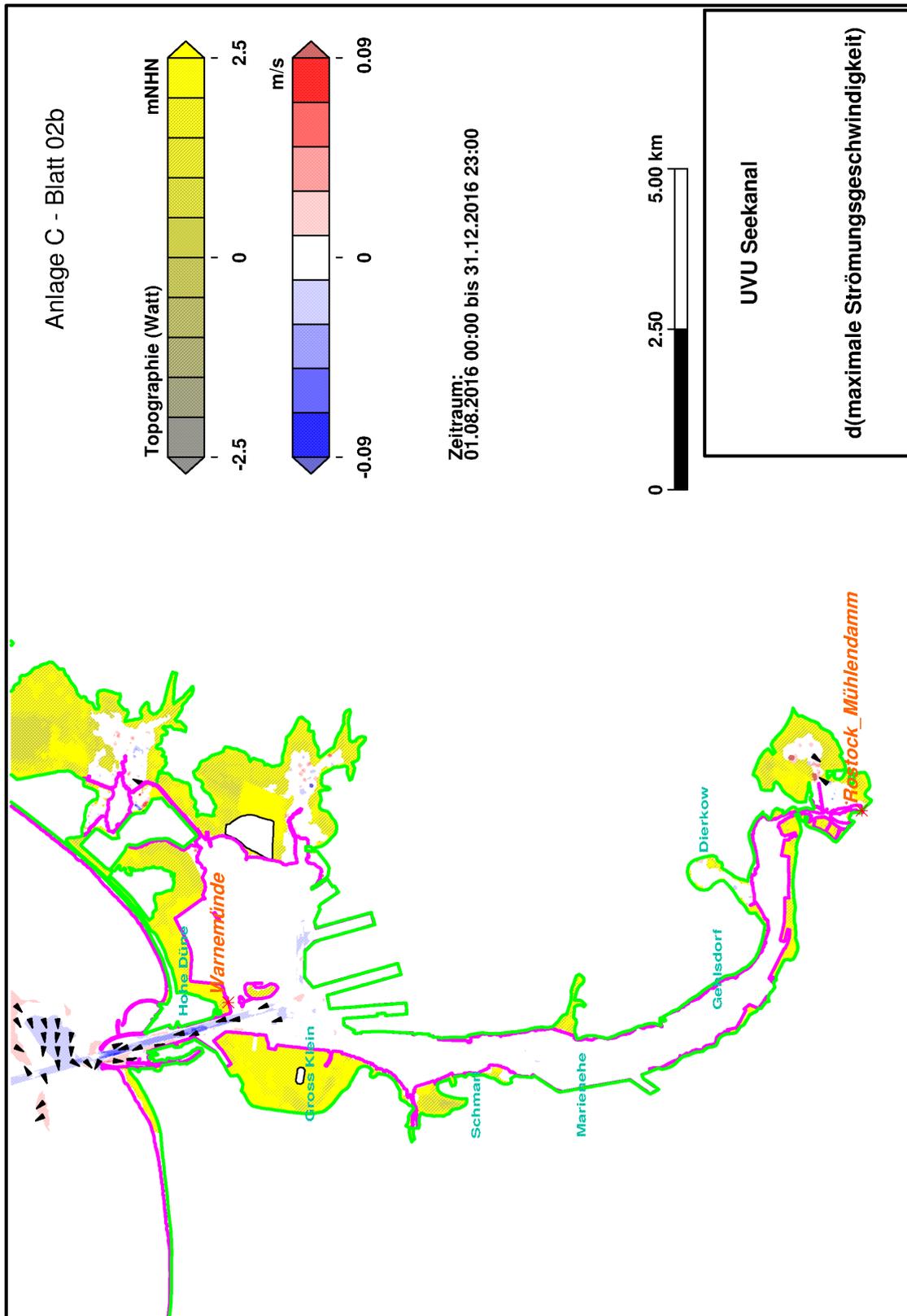


Bild 28 Vorhabenbedingte Änderungen des Maximalwerts der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit für den Analysezeitraum August bis Dezember. Änderungen kleiner als 0,01 m/s sind nicht dargestellt.

9.3.2 Tiefenabhängige Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit

Aufgrund der Bodenreibung nimmt der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit von der Oberfläche zur Tiefe hin ab. Da sich jedoch durch den Abfluss der Warnow und die sommerliche Erwärmung des Oberflächenwassers horizontale Dichtegradienten ausbilden, kann die Strömungsgeschwindigkeit über die Tiefe auch die Richtung wechseln. Typischerweise findet man die größten Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche. Beispielhaft soll hierfür die Station P11 betrachtet werden, die in der Ostsee nördlich der Molenköpfe liegt. Weitere Abbildungen sind in Anlage B, Blatt 36 bis 57 dargestellt. Bei Station P11 erreicht die Strömungsgeschwindigkeit in der simulierten Zeitspanne an der Oberfläche Werte um 0,5 m/s. Im Mittel liegt sie jedoch bei 0,11 m/s (Bild 29, siehe Legende).

Unterschiede zwischen den Systemzuständen AZ1660 und PIZ sind im Vergleich der Zeitreihen nicht zu erkennen (Bild 29). Der statistische Vergleich beider Systemzustände zeigt ebenfalls keine systematischen Unterschiede, die Punkte streuen etwas um die Hauptdiagonale. Die Korrelation der beiden Varianten ist sehr hoch und der RMSE liegt bei 0,5 cm/s.

Die Strömungsgeschwindigkeiten am Boden sind deutlich kleiner und liegen im Mittel bei 0,8 cm/s (Bild 30). Dort werden Maximalwerte von 0,1 m/s erreicht.

Auch hier sind Unterschiede zwischen den Varianten AZ1660 und PIZ im Vergleich der Zeitreihen nicht zu erkennen. Die Steigung der Korrelationsgeraden weist auf eine geringfügige, systematische Reduktion der Strömung in AZ1660 im Vergleich zum PIZ hin.

Die Vertiefung wirkt sich relativ zu den jeweiligen Maximalwerten daher am Boden stärker aus, als an der Oberfläche. Der an Station P11 erkennbare Einfluss stellt bereits die Obergrenze der durch den Ausbau zu erwartenden Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit dar.

Die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten an Station P06 erreichen bereits an der Oberfläche nur Maximalwerte um 0,05 m/s (Bild 31). Die Korrelation zwischen AZ1660 und PIZ ist sehr hoch und der RMSE sehr klein (0,0004 m/s). Vorhabenbedingte Änderungen sind dort nicht zu erkennen.

Der Ausbau führt somit nur zu einer lokalen Veränderung der Strömungsmuster im Bereich der Ausbautrasse, nicht jedoch in den außerhalb der Trasse liegenden Flächen des Breitlings, im Radelsee und im nicht vom Ausbau berührten Abschnitt der Unterwarnow vom Seehafen bis zum Mühlendammwehr.

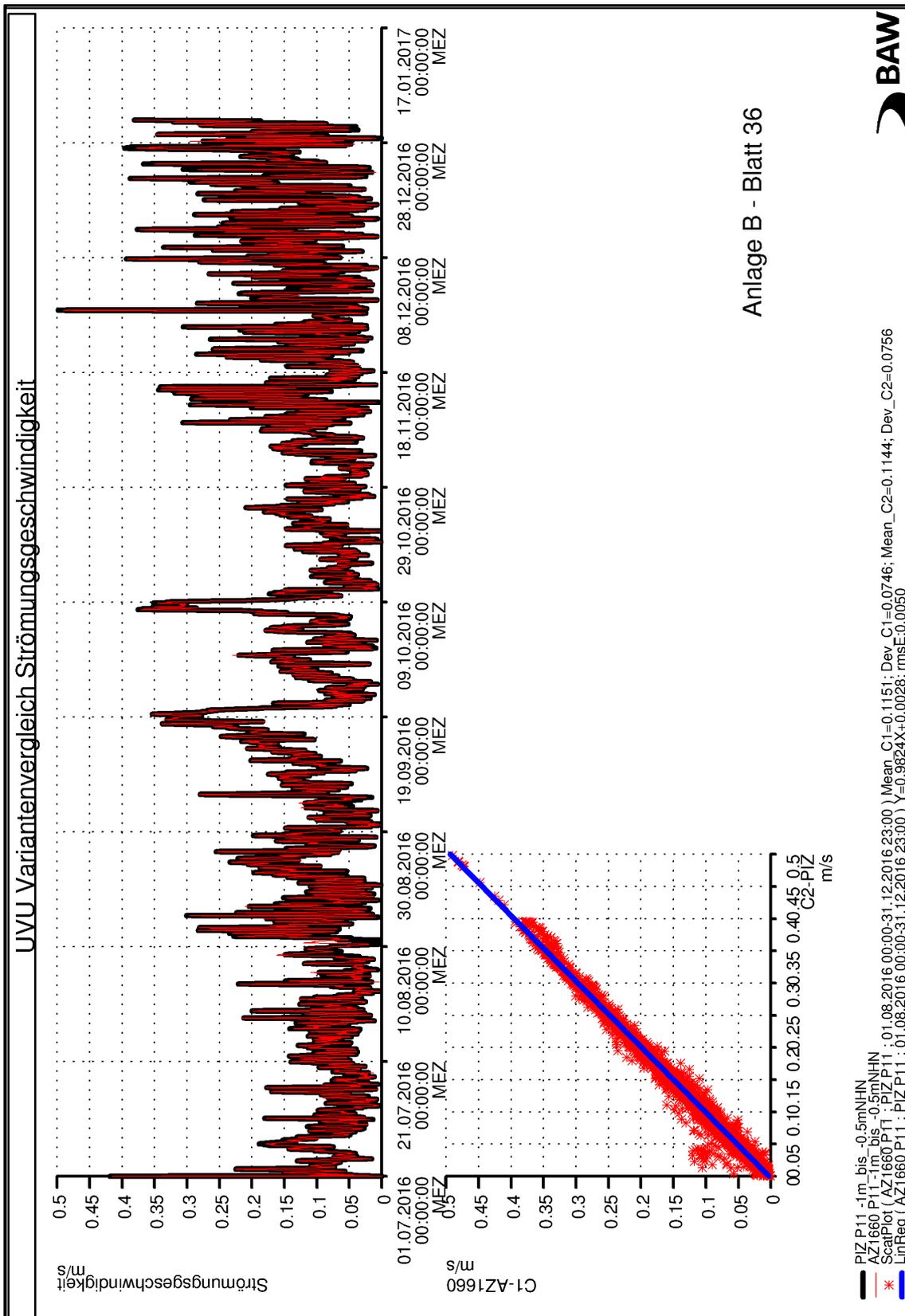


Bild 29 Simulierte Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P11.

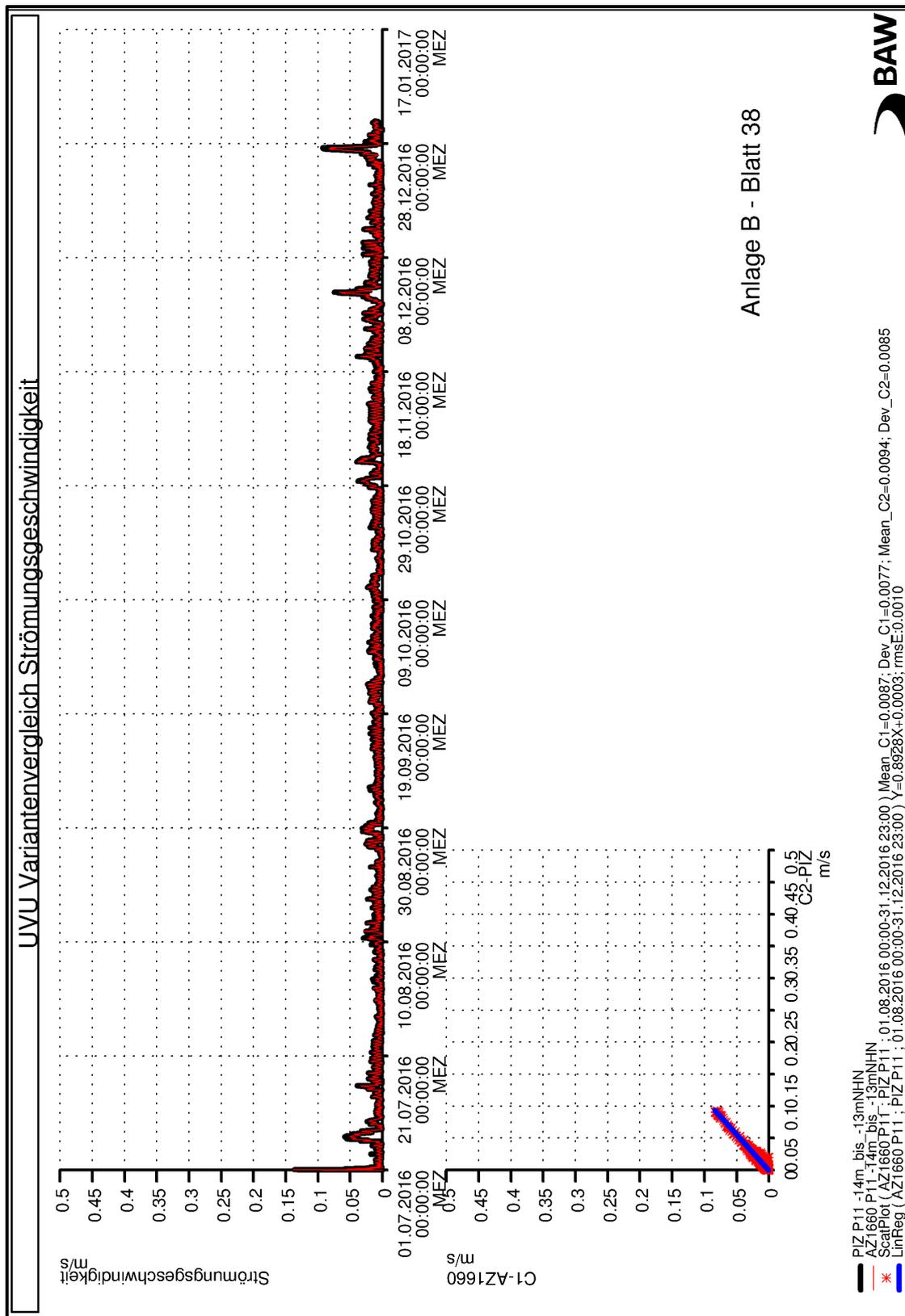


Bild 30 Simulierte Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit in Bodenähe für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P11.

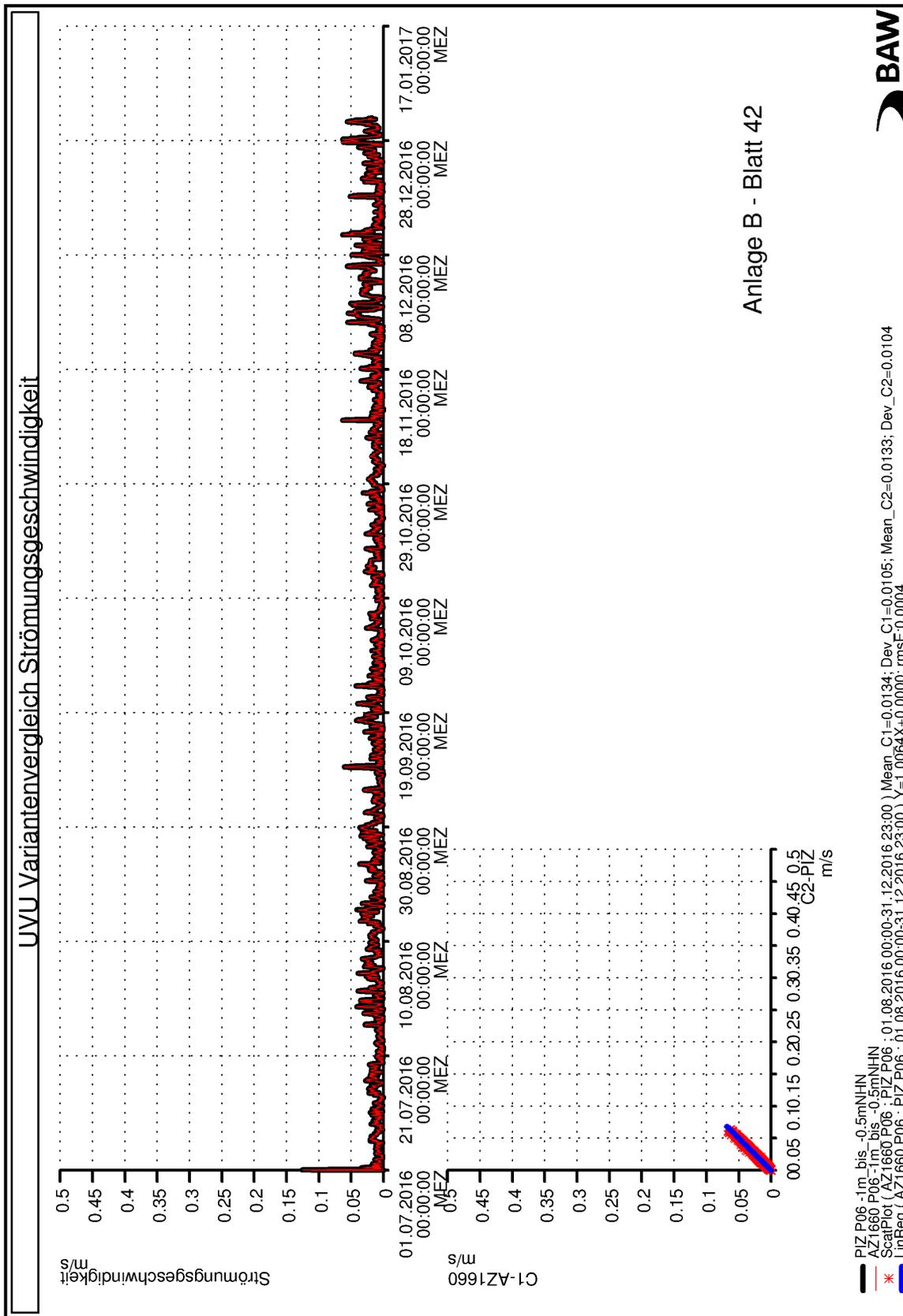


Bild 31 Simulierte Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche für die Varianten AZ1660 (rot) und PIZ (schwarz) im oberen Diagramm und Korrelationsdiagramm (unten) an Position P06.

9.4 Sedimentkonzentration und Sedimenttransport

Aufgrund der bodennah vorwiegend niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten (0 - 0,2 m/s) in der Unterwarnow sind die natürlichen Erosionsraten gering. Gleiches gilt für die Sedimentkonzentrationen. Aus den in diesem Gutachten berechneten Wirkungen des Ausbaus auf die Strömung kann abgeleitet werden, dass mit einer vorhabenbedingt dauerhaft ansteigenden Trübung durch in Suspension befindliche Sedimente nicht zu rechnen ist.

Der natürliche Sedimenttransport entlang der Küste in der Ostsee wird durch die Strukturen des Seekanals (Molen, Fahrrinne) prinzipiell beeinflusst. Dieser Sedimenttransport wird durch die Maßnahme jedoch nicht wesentlich verändert. Im äußeren Seekanal kann es aufgrund der Reduktion der Strömungen zu geringfügig höheren Ablagerungen kommen. Diese werden dem natürlichen System durch Umlagerung während der Unterhaltung wieder zugeführt. Da es sich im Außenbereich des Seekanals überwiegend um seitlich eingetriebene, sandige Sedimente handelt, die bereits nach etwa einer Stunde vollständig zu Boden absinken, ist kein maßgeblicher, negativer Einfluss auf die Unterhaltung in der Unterwarnow selbst zu erwarten, d.h. mit höheren Unterhaltungslasten als im planerischen Ist-Zustand ist auch nach Ausbau des Seekanals nicht zu rechnen.

Die temporären Belastungen durch Freisetzung und Verdriftung von Sedimenten während der Bauphase werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da sie nicht im direkten Zusammenhang mit der Hydrodynamik des Systems stehen. Auf dieses Thema wird im Kapitel 0 gesondert eingegangen.

9.5 Vorhabenswirkung auf die Größe Wassertemperatur

Der maßgebliche Prozess, der die Wassertemperatur in der Unterwarnow steuert, ist der saisonale Verlauf der Lufttemperatur an der Wasseroberfläche.

Im Frühjahr bis Sommer bildet sich auch in der Modellsimulation durch oberflächennahe Erwärmung des Wassers eine stabile Schichtung aus. Diese Schichtung vermindert den Austausch zwischen dem Wasser an der Oberfläche und dem Boden. Der Schichtungseffekt im Sommer ist beispielsweise bei dem Maximalwert der Temperatur im August (Bild 32) erkennbar. Sobald das Oberflächenwasser im Herbst beginnt sich abzukühlen, wird das bodennahe Wasser in die Oberflächenschicht durch Konvektion eingemischt und Richtung Ostsee ausgetragen. Daher ist im Winter nur noch eine durch den Abfluss der Oberwarnow hervorgerufene, schwächere, haline Schichtung vorhanden, deren Ausprägung vom Abfluss der Oberwarnow bestimmt wird. Die Temperatur ist dagegen weitgehend homogen (Anlage D, Blatt 38).

Die Maximalwerte der Temperatur in der betrachteten Sommerperiode betragen in Tiefen unterhalb 8 m NHN zwischen 16 und 18 Grad Celsius. Darüber betragen sie zwischen 18 und 22 Grad Celsius. Im Nahbereich des Mühlendammwehres nehmen die maximalen Temperaturen auf Werte zwischen 16 und 18 Grad ab (Bild 32).

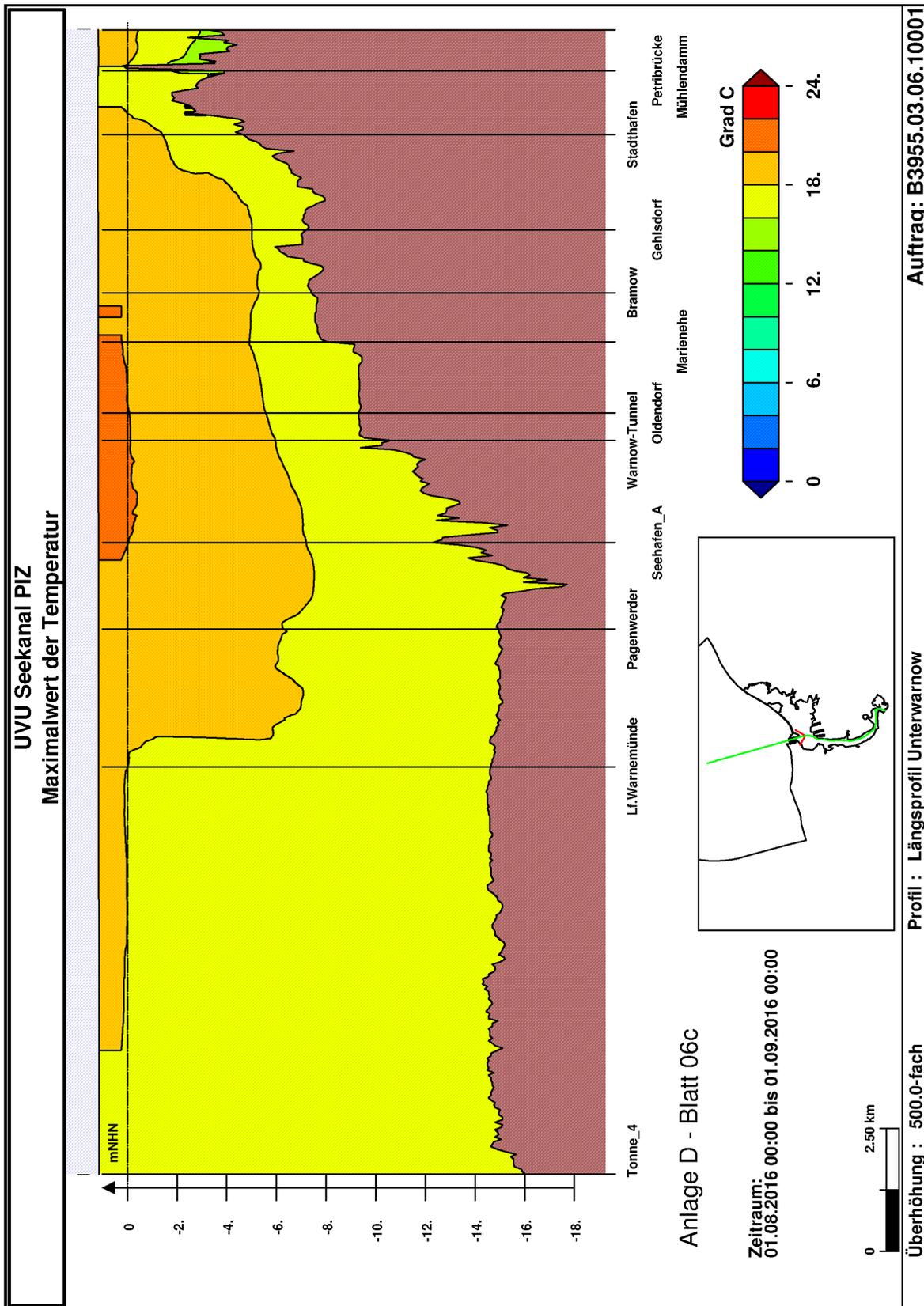


Bild 32 Maximalwert der Wassertemperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.

Die Vertiefung des Seekanals führt dazu, dass Ostseewasser in größerer Tiefe als im PIZ in den vom Seekanal überprägten Abschnitt der Unterwarnow eindringt und sich dann in die darüber liegenden Schichten einmischen kann. Da diese Wassermasse im Sommer eine geringere Temperatur besitzt, als die Schichten darüber, ergibt sich als Vorhabenwirkung eine leichte Abkühlung oberhalb der alten Solltiefe. Die Abkühlung zeigt sich nur lokal im Bereich der Ausbaustrecke. In den Flachwasserbereichen ist keine erkennbare Wirkung des Ausbaus auf die Temperatur vorhanden.

Am deutlichsten zeigt sich die beschriebene Wirkung für den Analysezeitraum August sowohl beim Maximalwert (Bild 33) als auch beim Minimalwert der Temperatur (Bild 35). Hier sind jeweils Änderungen bis $-0,3\text{ °C}$ ab einer Tiefe von $\sim\text{NHN}-10\text{ m}$ bzw. $\text{NHN}-14\text{ m}$ erkennbar. Die Änderung des Mittelwertes liegt jedoch unter $\pm 0,1\text{ °C}$ (siehe Anlage D, Blatt 43). Der dunkelrote Bereich in den Differenzdarstellungen zeigt, wo im Ausbauzustand das Ostseewasser das gebaggerte Volumen ersetzt. In der Fläche beschränken sich die Änderungen im Wesentlichen auf die Trasse des Seekanals, wie exemplarisch für den Minimalwert der Temperatur gezeigt wird (Bild 37).

Die Temperaturschichtung und die horizontalen Unterschiede der Temperatur sind im Winter gering. Zum Mühlendammwehr hin nimmt die maximale und die minimale Temperatur ab (Bild 38, Bild 40). Im Winter ist daher eine gegenüber der Sommersituation umgekehrte Wirkung des Ausbaus auf die Kennwerte der Temperatur festzustellen. Das bodennah aus der Ostsee eindringende Wasser ist nun etwas wärmer, aber auch salzreicher als die darüber liegende Schicht. Der Ausbau führt daher zu einer leichten Erhöhung des Maximalwertes der Temperatur zwischen Pagenwerder und Bramow, die maximal $+0,3\text{ °C}$ beträgt und von der Sohle bis etwa $\text{NHN}-5\text{ m}$ reicht. Beim Minimalwert der Temperatur ist ebenfalls eine Erhöhung um bis zu $+0,3\text{ °C}$ festzustellen, die oberhalb der alten Sollsohle des Seekanals bis etwa $\text{NHN}-7\text{ m}$ reicht. Tiefengemittelt liegen die Wirkungen des Ausbaus auch im Winter nur im Bereich der Trasse des Seekanals zwischen $+0,1$ und $+0,3\text{ °C}$ (Anlage C, Blatt 16b/d/f). Im übrigen Untersuchungsgebiet ist die vorhabenbedingte Änderung kleiner als $\pm 0,1\text{ °C}$.

Die Tatsache, dass sich die durch den Ausbau hervorgerufene Wirkungen bei den Extremwerten der Größe Temperatur am deutlichsten zeigen, deutet darauf hin, dass es sich hier um sporadisch auftretende Wirkungen handelt, die mit dem Auftreten der Extremwerte zusammenhängen. Die Wirkung auf den Mittelwert liegt dagegen unterhalb von $\pm 0,1\text{ °C}$.

Die vorhabenbedingte Änderung der Standardabweichung der Temperatur, die als Maß für die Variabilität der Größe steht, beträgt im gesamten Modellgebiet weniger als $\pm 0,1\text{ °C}$, wenn der Zeitraum des Sommers oder des Winters bei der Analyse zugrunde gelegt wird. Betrachtet man den gesamten Analysezeitraum von August bis Dezember, so ist tiefengemittelt eine Abnahme der Standardabweichung um bis zu $-0,3\text{ °C}$ im Bereich der Trasse erkennbar.

Aus dem Vergleich der Varianten ergibt sich, dass sich die Wirkungen des Ausbaus auf die Temperatur im Wesentlichen auf die Fläche der gebaggerten Trasse beschränken und vom Boden zur Oberfläche geringer werden. Die Hauptursache, dass dort Wirkungen bei den tiefengemittelten Werten erkennbar sind, ist die Tatsache, dass sich das Volumen des kälteren Ostseewassers im Bereich der Trasse im Verhältnis zu dem darüber liegenden, von der Oberwarnow beeinflussten wärmeren Oberflächenwasser vergrößert.

Für die Flachwasserbereiche sind die durch den Ausbau hervorgerufenen Änderungen der Temperaturmittelwerte und Temperaturextremwerte kleiner als $\pm 0,1\text{ °C}$. In der Tendenz wirkt das zusätzliche Ostseewasservolumen dahingehend, dass sich die Schwankungsbreite der Größe Temperatur in der Unterwarnow verringert.

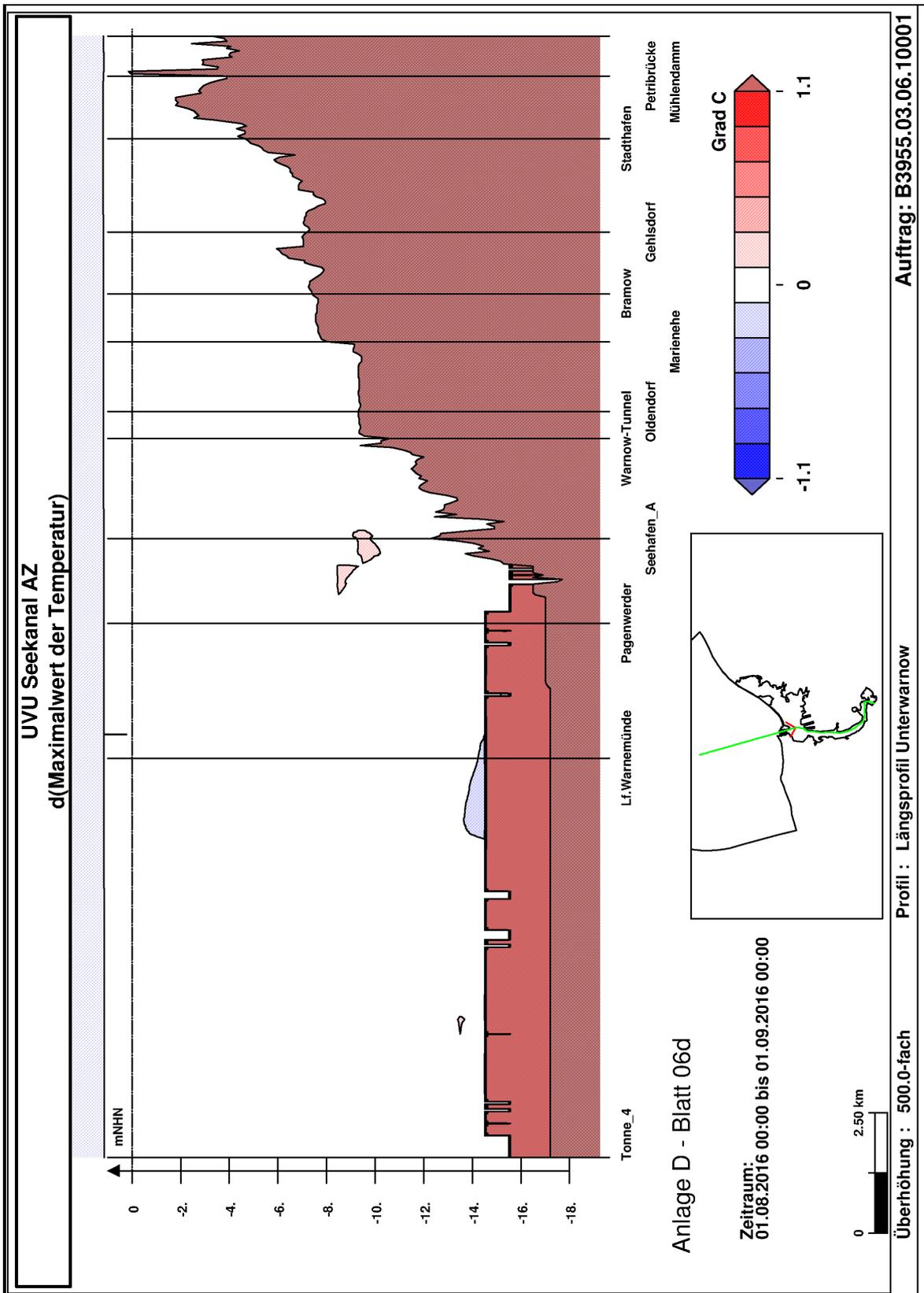


Bild 33 Vorhabenbedingte Änderungen auf den Maximalwert der Temperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow. Änderungen kleiner als 0,1 °C werden nicht dargestellt

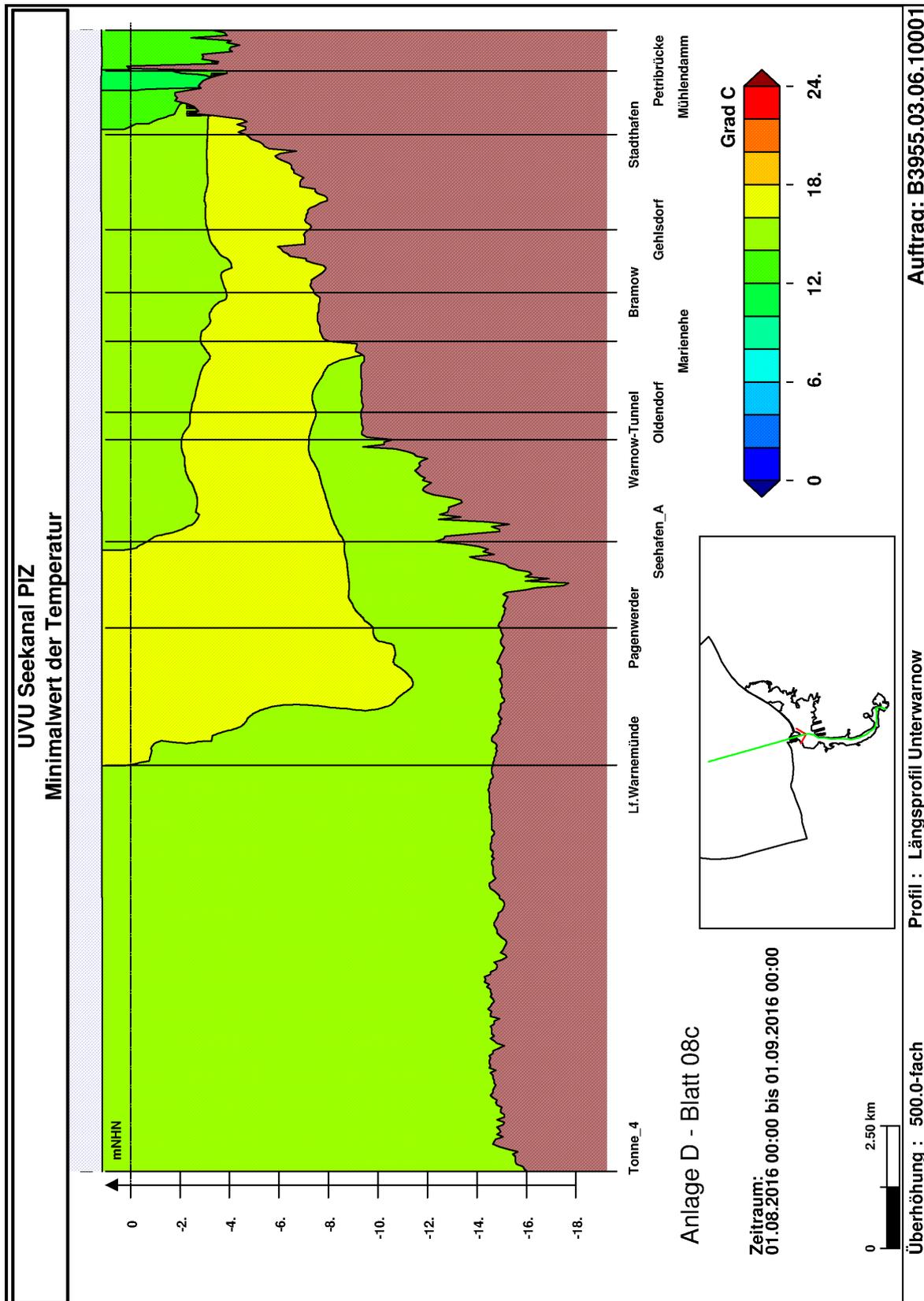


Bild 34 Minimalwert der Temperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.

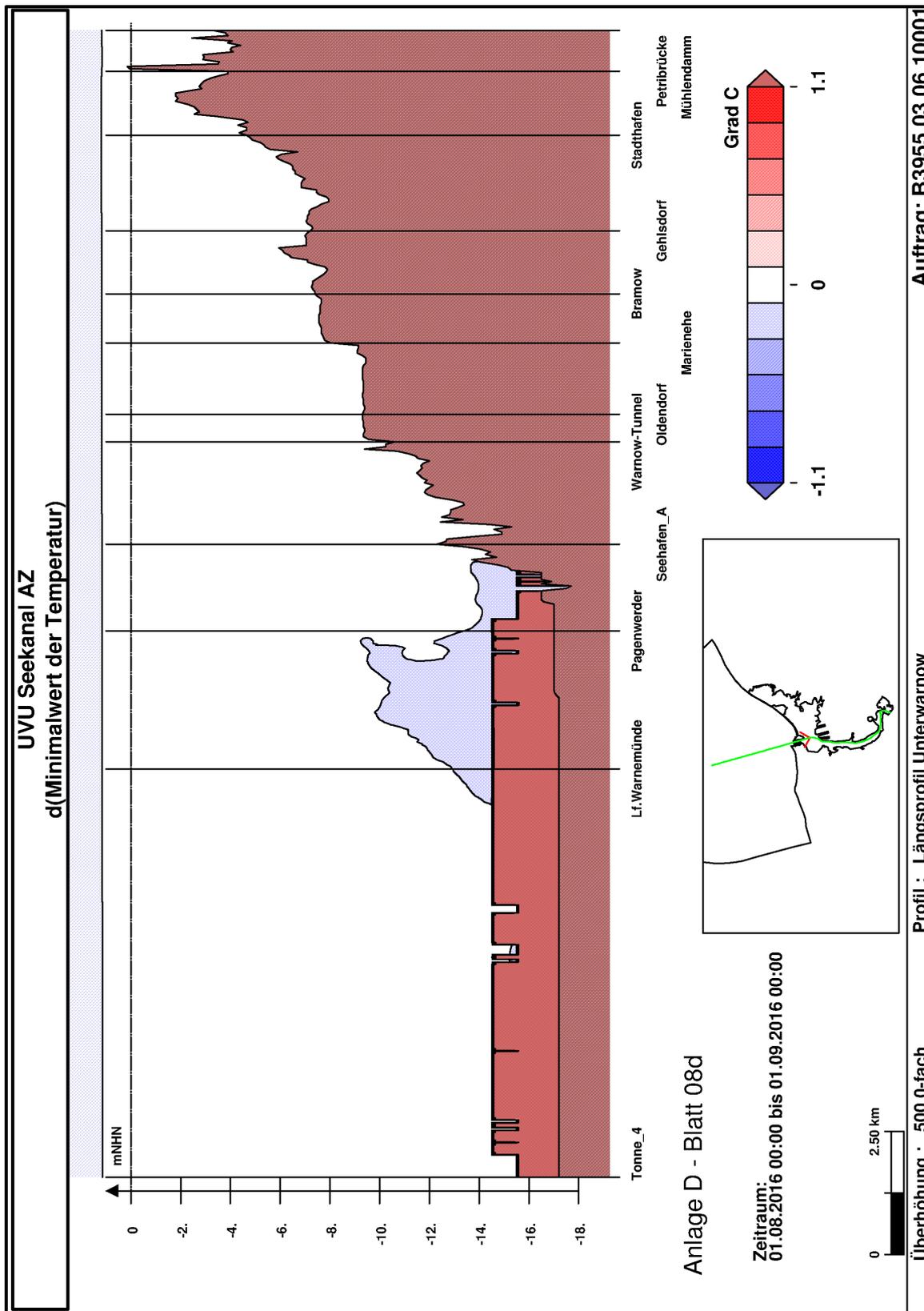


Bild 35 Vorhabenbedingte Änderungen auf den Minimalwert der Temperatur im August, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Unterwarnow. Änderungen kleiner als 0,1 °C werden nicht dargestellt.

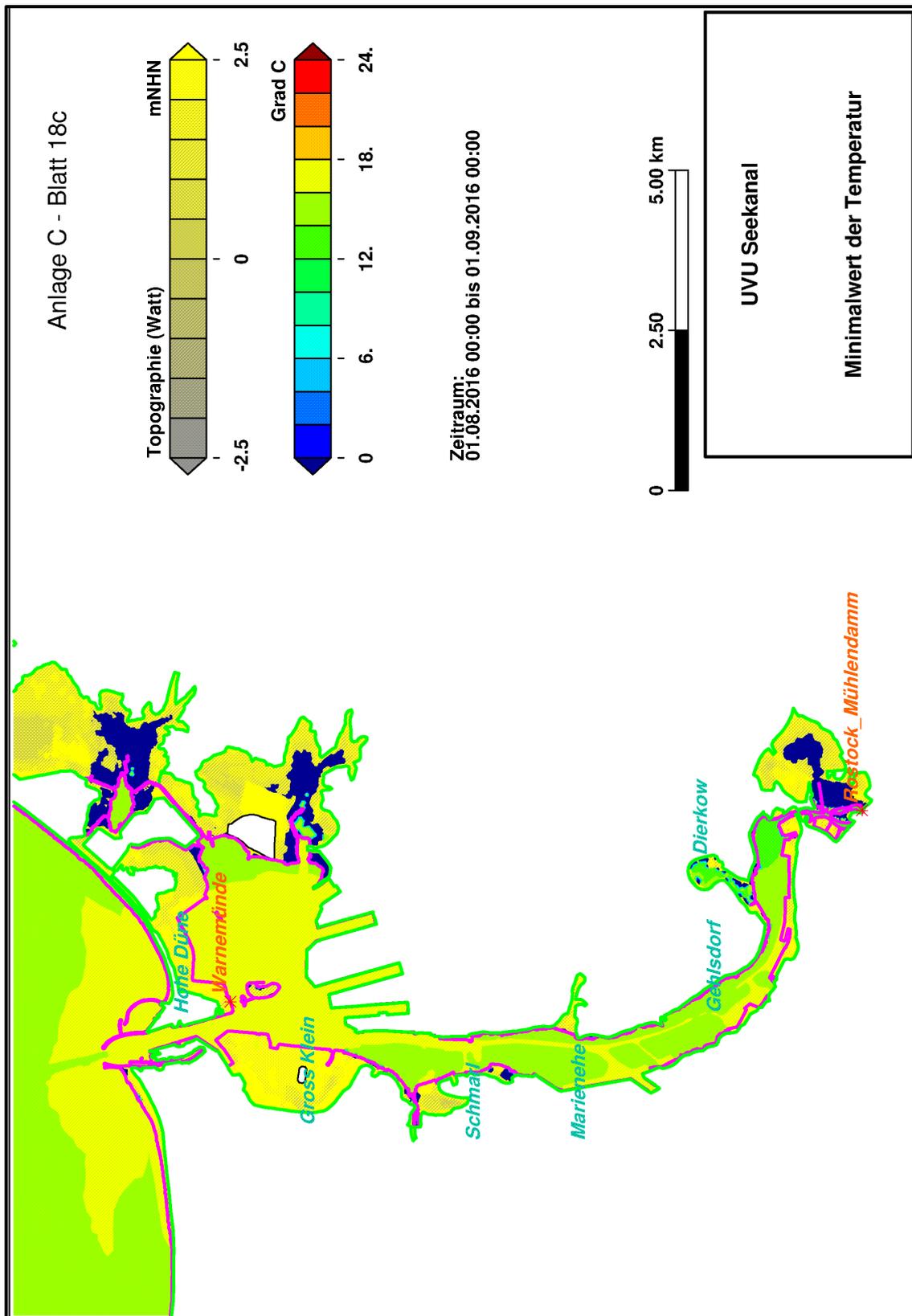


Bild 36 Minimalwert der tiefengemittelten Temperatur im August im PIZ.

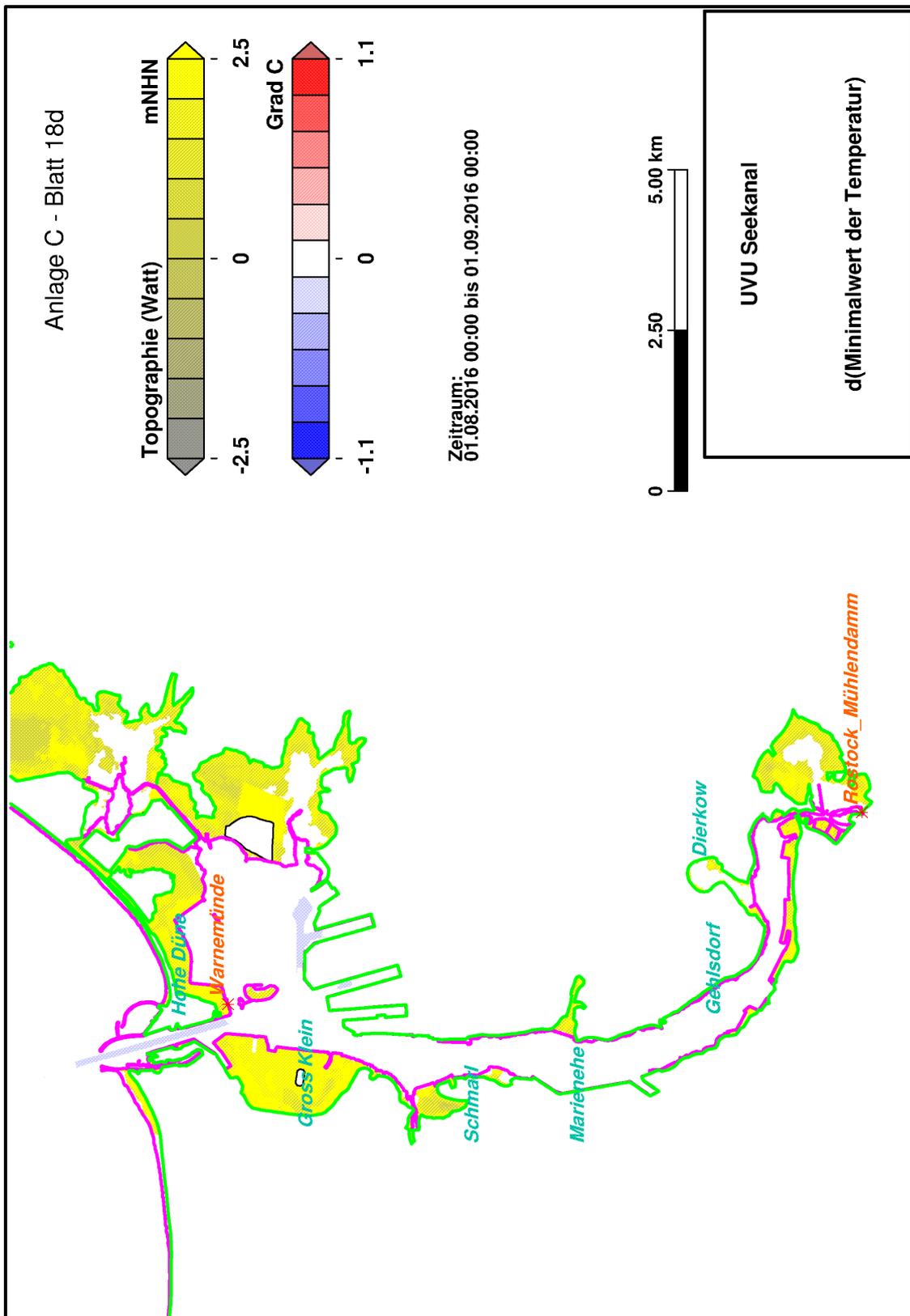


Bild 37 Vorhabenbedingte Änderungen auf den tiefengemittelten Minimalwert der Temperatur im August. Änderungen kleiner als 0,1 °C werden nicht dargestellt.

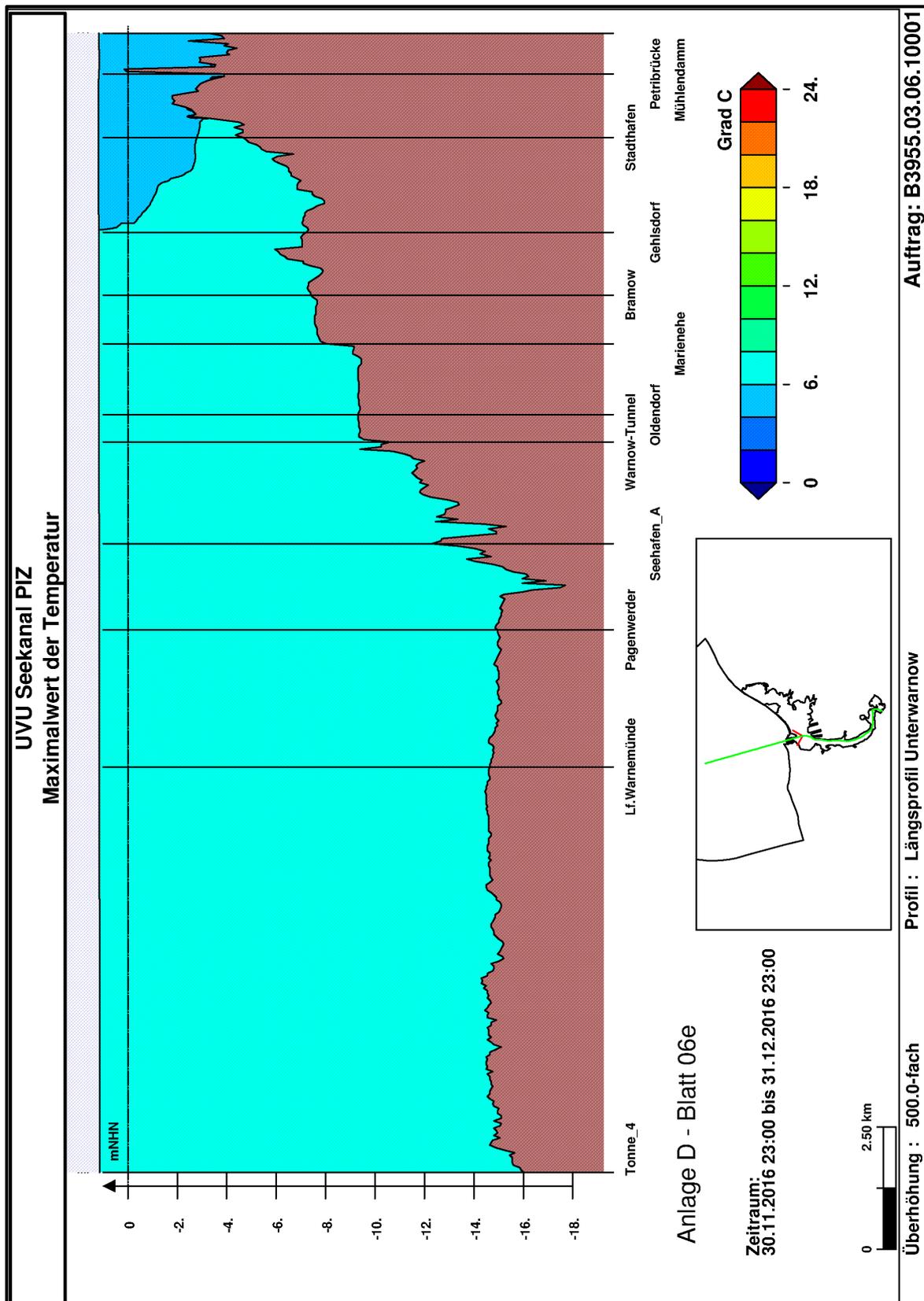


Bild 38 Maximalwert der Temperatur im Dezember im PIZ, dargestellt entlang des Längs-schnitts durch die Unterwarnow.

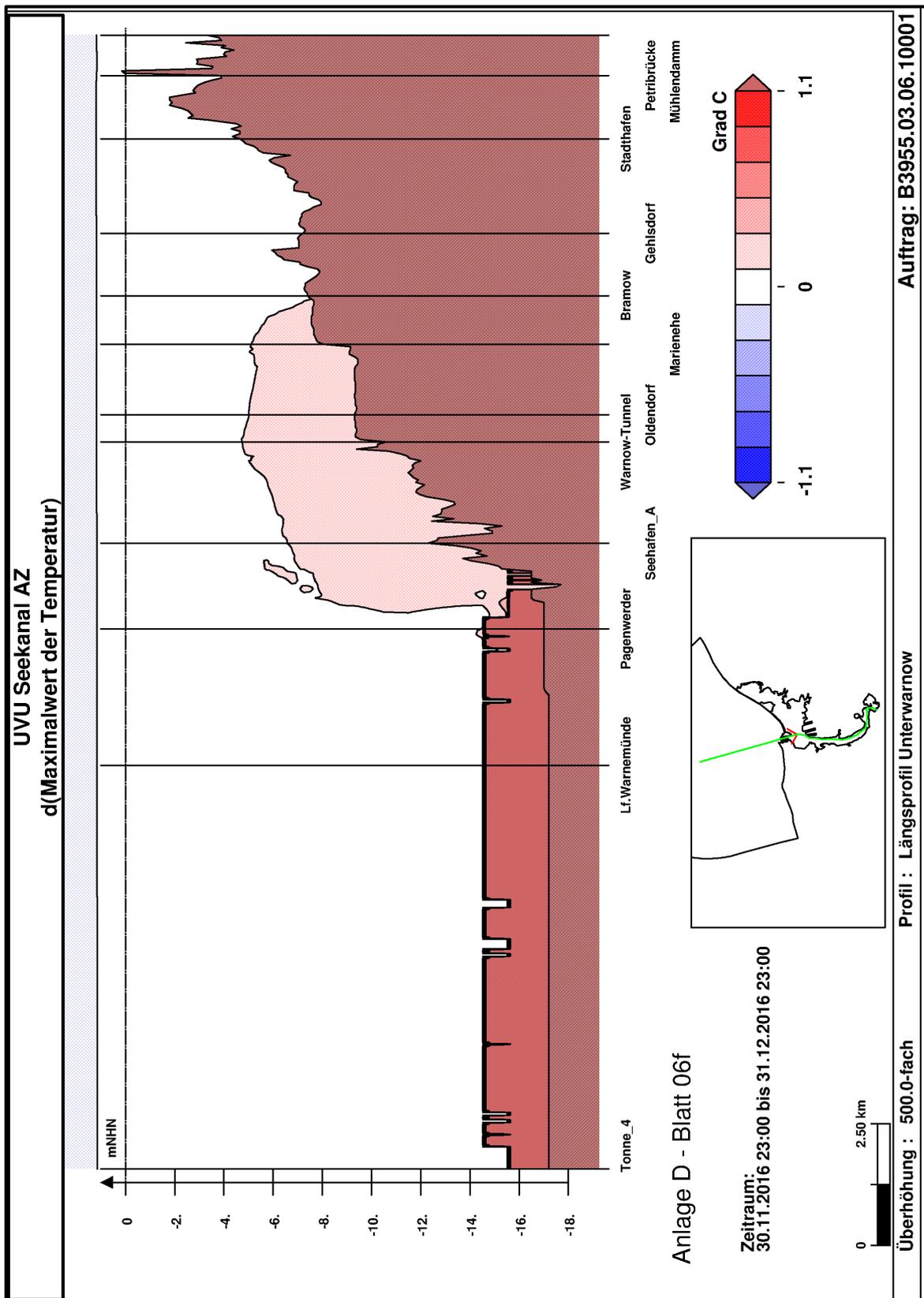


Bild 39 Vorhabenbedingte Änderungen des Maximalwerts der Temperatur im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnitts durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,1 °C werden nicht dargestellt.

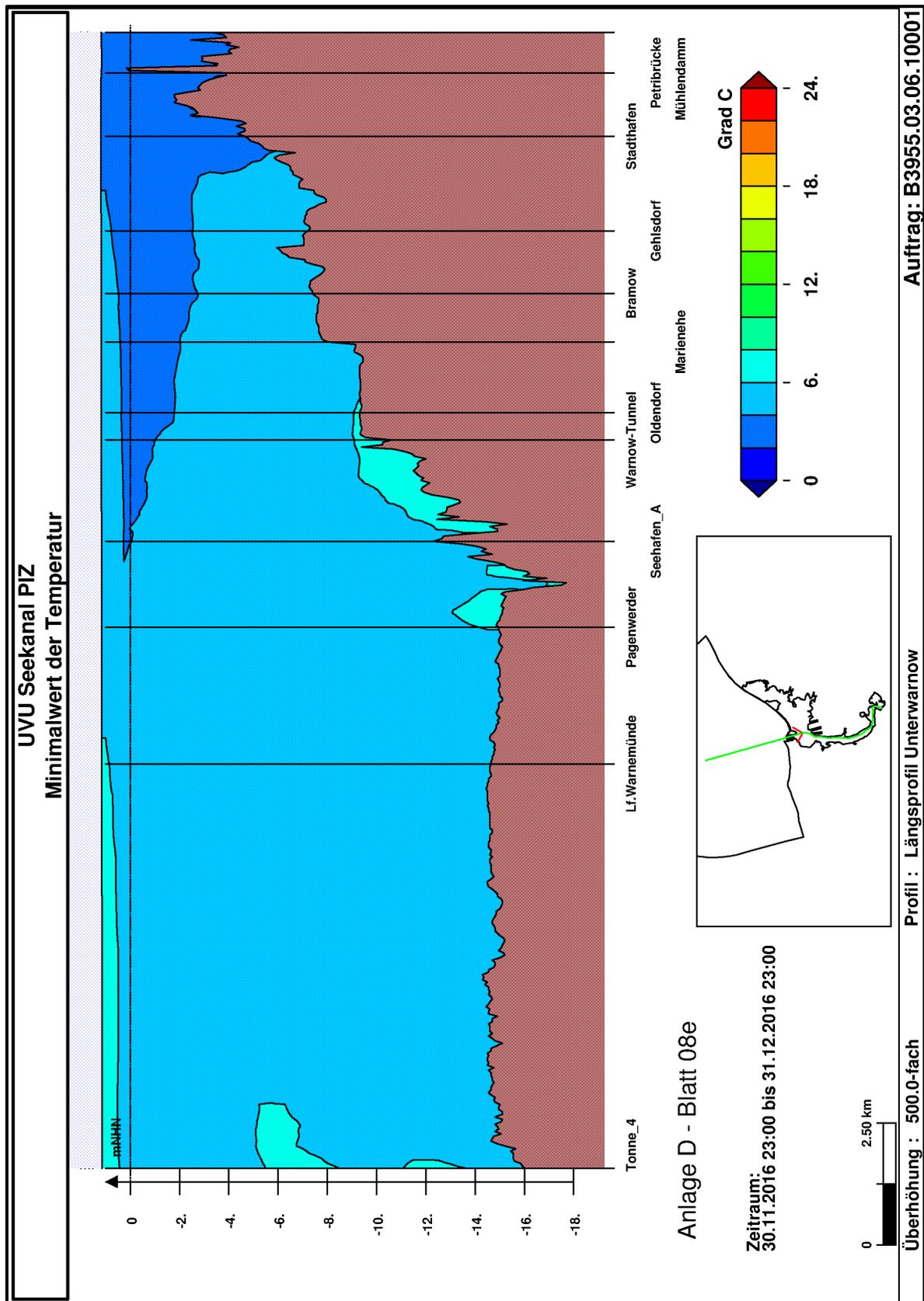


Bild 40 Minimalwert der Temperatur im Dezember im PIZ, dargestellt entlang des Längs-schnitts durch die Unterwarnow

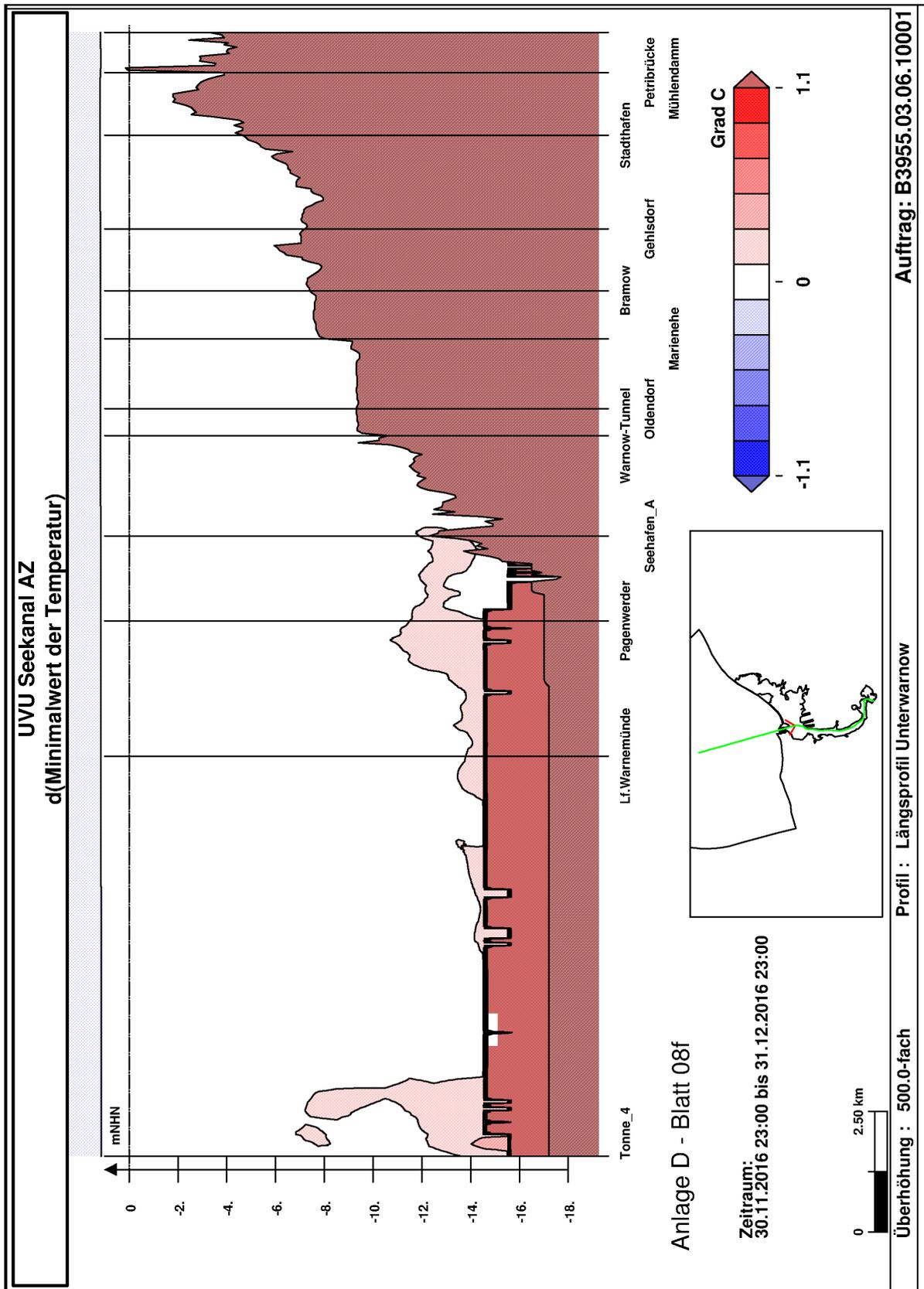


Bild 41 Vorhabenbedingte Änderungen des Minimalwerts der Temperatur im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnitts durch die Unterwarnow. Änderungen kleiner 0,1 °C werden nicht dargestellt.

Der Vergleich der Zeitreihen der Temperatur an Einzelpositionen (Anlage B, Blätter 14a bis 35a) bestätigt die Einschätzung, dass die Wirkung des Ausbaus auf die Temperatur gering und auf den Bereich der Ausbaustrecke beschränkt ist. Bei der Temperatur sind nur dort phasenweise Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar, die durch eine lokal veränderte Dynamik hervorgerufen werden.

9.6 Variantenvergleich für die Größe Salzgehalt

Während bei der Temperatur die Sommersituation die relevante Situation hinsichtlich der wasserbaulichen Bewertung der Vorhabenwirkung darstellt, weil in diesem Zeitraum die größten horizontalen Gradienten der Temperatur vorhanden sind, ist für den Salzgehalt die größte Wirkung eines Ausbaus im Winter zu erwarten. Im Winter ist das Oberwasser im Regelfall höher als im Sommer, und die den vertikalen Austausch verringernde Temperaturschichtung fehlt. Manche Effekte, wie beispielsweise der dämpfende Einfluss der Ostsee auf die Variabilität zeigen sich jedoch nur bei der Analyse längerer Zeiträume. Daher werden drei Analysezeiträume betrachtet:

1. Im Gesamtzeitraum (August bis Dezember) ist die Variabilität des Salzgehaltes am größten.
2. Für den Winterzeitraum (Dezember) werden die größten vorhabenbedingten Änderungen der Kenngrößen Maximaler Salzgehalt, Minimaler Salzgehalt und Mittelwert des Salzgehaltes erwartet.
3. Der Sommerzeitraum (August) dient der Kontrolle der unter dem vorangegangenen Punkt genannten Erwartung.

Nur beispielhaft werden hier einige Grafiken gezeigt, die die im Text beschriebenen Zusammenhänge verdeutlichen. Die vollständige Auswertung ist in den Anlagen B (Vergleich der Zeitreihen), C (Vergleich der flächenhaften, tiefengemittelten Kenngrößen) und D (Vergleich der Kenngrößen entlang des Längsprofiles) dargestellt.

Der Salzgehalt nimmt von Warnemünde bis zum Mühlendammwehr ab. Dabei schichtet sich das Ostseewasser unter dem durch die Oberwarnow ausgesüßten Brackwasser ein. Je nach Abfluss ist die Reduktion des Salzgehaltes durch die Oberwarnow mal stärker, mal schwächer vorhanden. Die größte Ausbreitung erreicht das Süßwasser bei hohem Abfluss. Die Ausbreitungsgrenze ist in Bild 42, welches den Minimalwert des Salzgehaltes entlang des Längsprofils durch die Unterwarnow zeigt, deutlich erkennbar.

Lokal ist die Wirkung des Ausbaus so, dass der Salzgehalt im Bereich der Trasse um bis zu 0,4 ppt zunimmt, wobei diese maximale Änderung bei den Maximalwerten außerhalb der Warnow küstennah auftritt. Die Ursache ist hier, dass der Beginn des Brackwassereinflusses im Ausbauzustand näher an die Küste verschoben wurde. Auf die Änderung des tiefengemittelten Salzgehaltes hat zudem die Vergrößerung des Volumens salzreichen Wassers unterhalb der alten Solltiefe einen Einfluss, da in die Bildung des tiefengemittelten Wertes im AZ1660 ein größerer Volumenanteil salzhaltigen Bodenwassers eingeht als im PIZ.

Beim Minimalwert des Salzgehaltes ist das Maximum der Änderung sehr kleinräumig im Seekanal auf Höhe Pagenwerder zu erkennen. Auch dieses Maximum resultiert aus einer Verlagerung lokaler Salzgehaltsgradienten. Im restlichen Ästuar werden vorhabenbedingte Änderungen von 0,09 ppt nicht überschritten (Bild 43 bis Bild 49). Dies gilt insbesondere für den Flachwasserbe-

reich des Breitlings und den Radelsee. In der vertikalen Darstellung ist erkennbar, dass die gesamte Unterwarnow im Winter von einer Erhöhung der Kennwerte des Salzgehaltes kleiner als 0,09 ppt betroffen ist, sowohl die der mittleren Verhältnisse, als auch die der Extremwerte. Ausgenommen ist nur der unmittelbare Nahbereich des Mühlendamm-Wehres, wo der Salzgehalt der Ostsee aufgrund des Abflusses der Oberwarnow keinen Einfluss mehr hat. Dort hat der Ausbau keine Wirkung mehr. Die leichte Erhöhung des Salzgehaltes stellt eine dauerhafte Veränderung des Systems dar.

Die hier verwendete numerische Simulation ist nicht geeignet, Gewässer auf sehr kleiner räumlicher Skala, wie die Zuflüsse zum Breitling und Radelsee, realistisch abzubilden. Für diese Zuflüsse, die der Gefahr des Rückstaus unterliegen (z. B. Peezer Bach), und an deren Mündung in die Unterwarnow eine Änderung der Eigenschaften des Wassers durch den Ausbau erfolgt, ist die ermittelte Änderung auch für den Rückstaubereich der einmündenden Fließgewässer anzunehmen.

Die horizontale Verteilung des Salzgehaltes wird hier für den PIZ beispielhaft am Mittelwert über den Dezember gezeigt (Bild 48). Die tiefen Bereiche der Schifffahrtsrinnen heben sich hervor, weil hier über eine größere Tiefe gemittelt wird und da das nach Ausbau vorhandene, zusätzliche Tiefenwasser salzhaltiger ist, ist somit der Mittelwert über die Wassersäule im AZ1660 höher. Die vorhabenbedingten Änderungen für diesen Kennwert sind über nahezu das ganze Modellgebiet als Erhöhung um bis zu 0,09 ppt sichtbar (Bild 49). Die Ausbauwirkung auf den Maximal- und Minimalwert ist sehr ähnlich.

Die Wirkung des Ausbaus auf den Salzgehalt in der aktuellen Untersuchung ist geringer als in der Machbarkeitsstudie (BAW 2011) prognostiziert. Dies hat die folgenden Ursachen:

- In der Machbarkeitsstudie wurde der die vertikale Schichtung stabilisierende Effekt der Temperatur im Sommer nicht berücksichtigt.
- Das in der Machbarkeitsstudie untersuchte Vertiefungsmaß war im Abschnitt des Seekanals zwischen den Molen und den Seehafenbecken etwas größer.

Die neuen Modelluntersuchungen stehen daher hinsichtlich der Größe Salzgehalt nicht im Widerspruch zu den älteren Untersuchungen. Sie bestätigen die damals bereits erkannten, grundlegenden Systemveränderungen, ermöglichen jedoch eine bessere Einschätzung der Größenordnung derselben, da die Vertikalstruktur durch den zusätzlichen Temperatureinfluss auf die Dichte besser abgebildet wird.

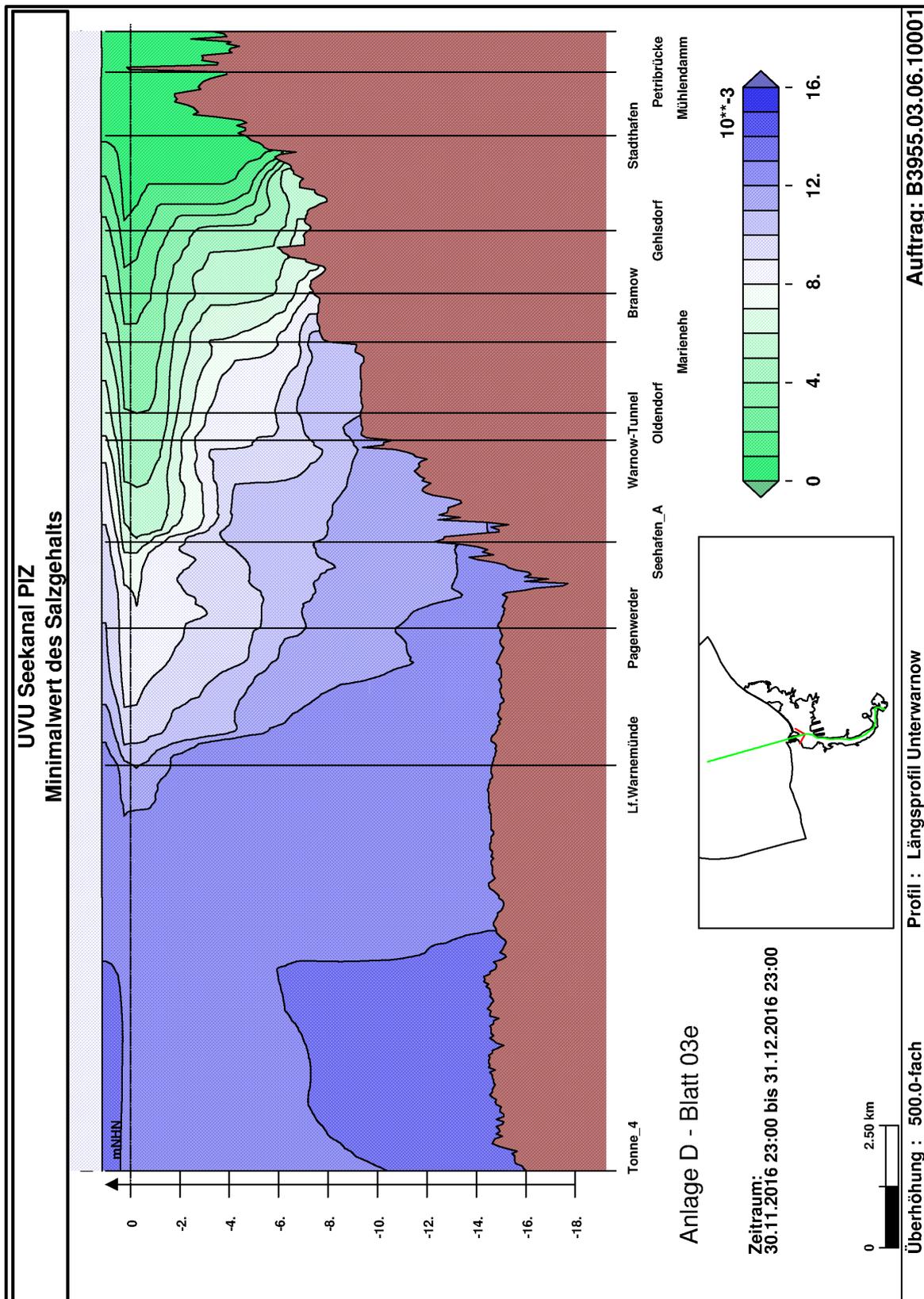


Bild 42 Minimalwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.

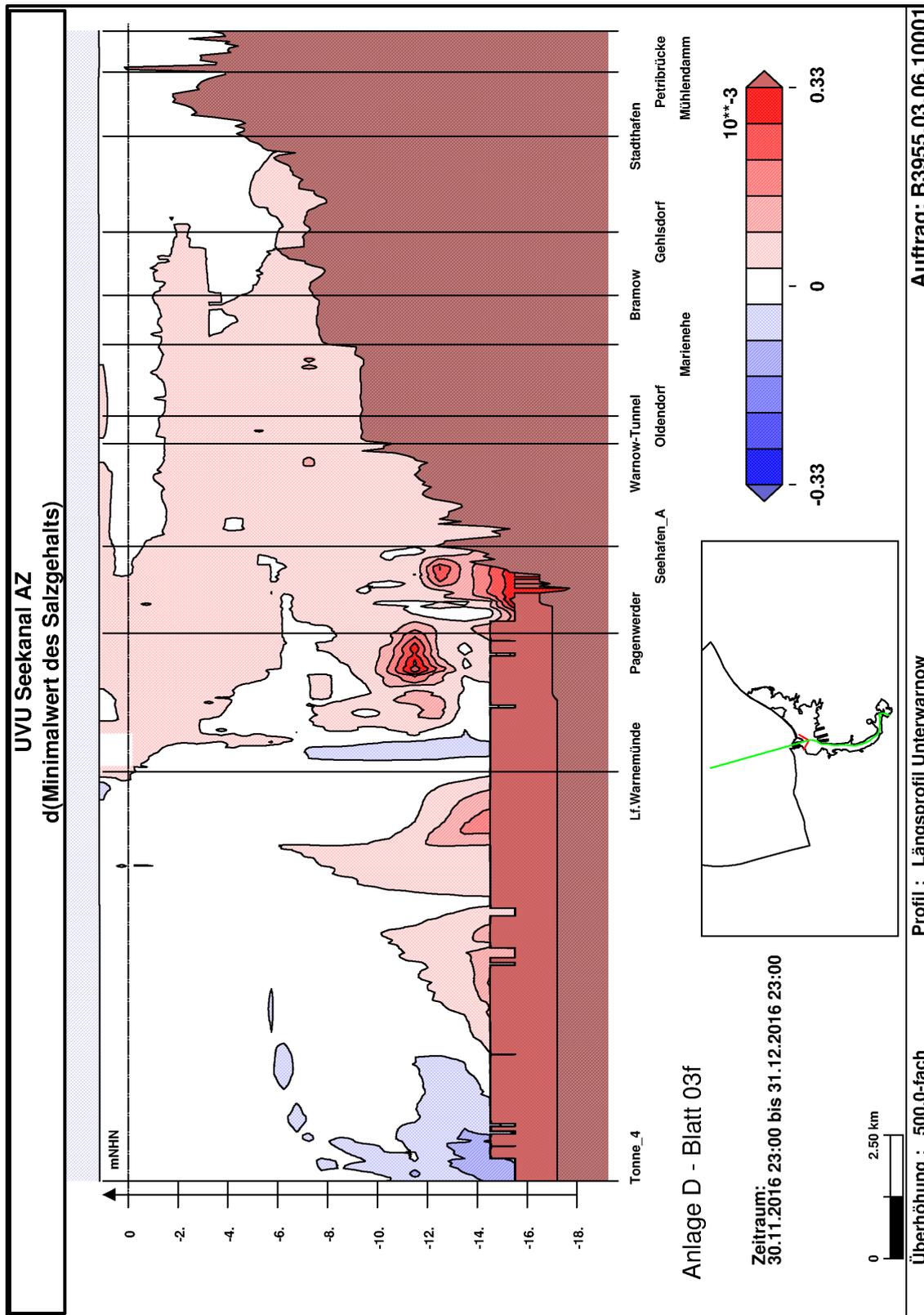


Bild 43 Vorhabenbedingte Änderung der Minimalwerte des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.

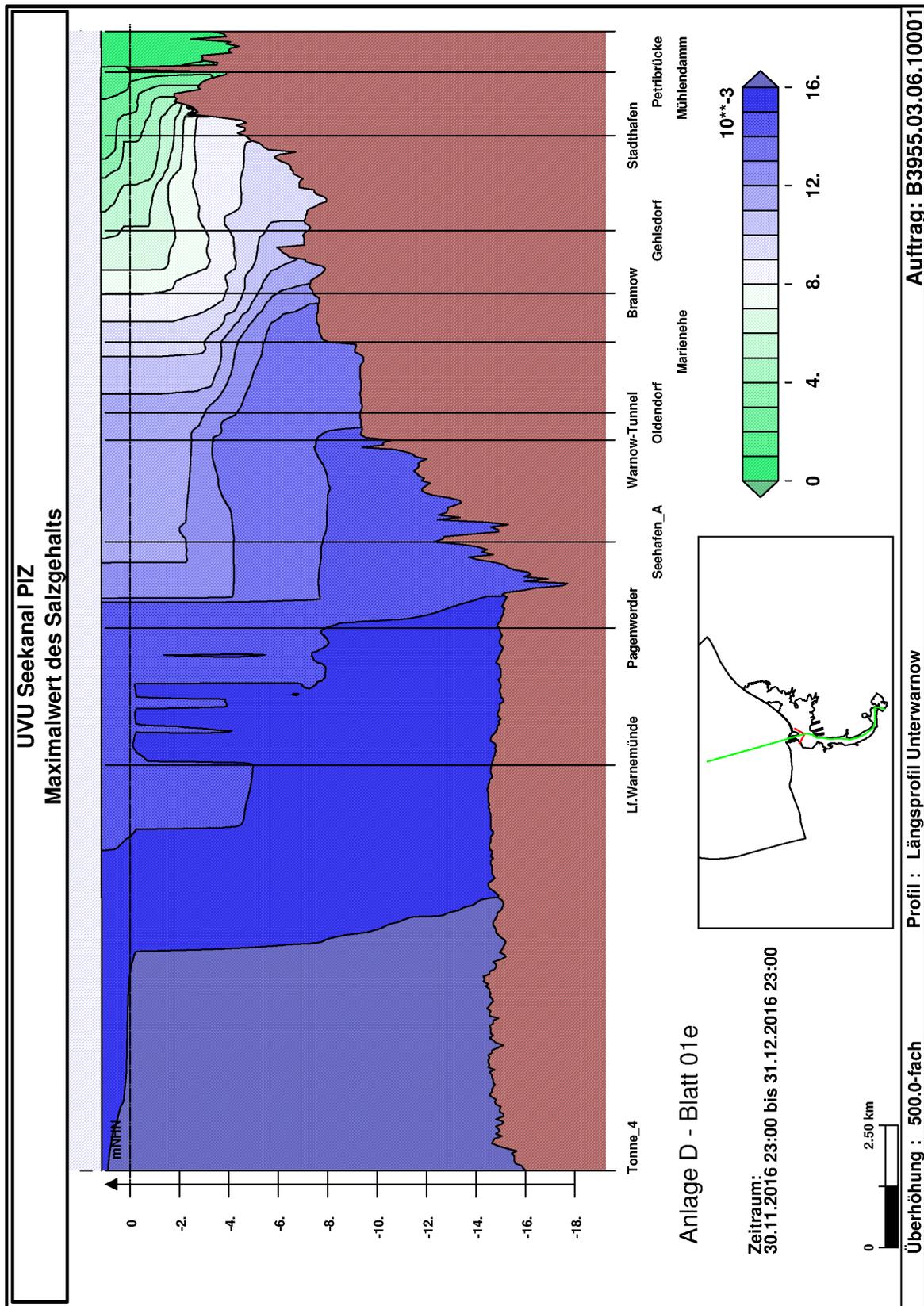


Bild 44 Maximalwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.

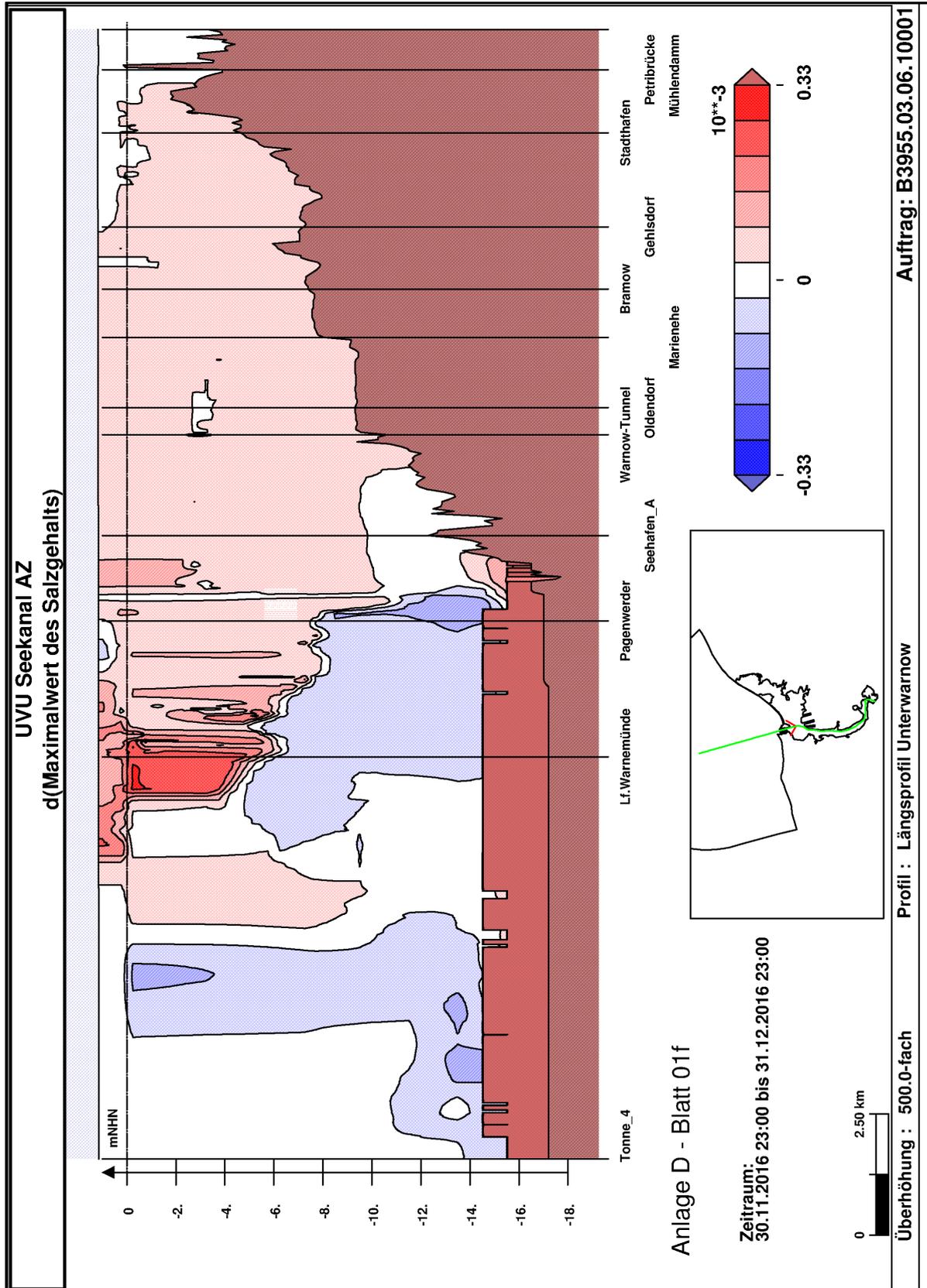


Bild 45 Vorhabenbedingte Änderung der Maximalwerte des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.

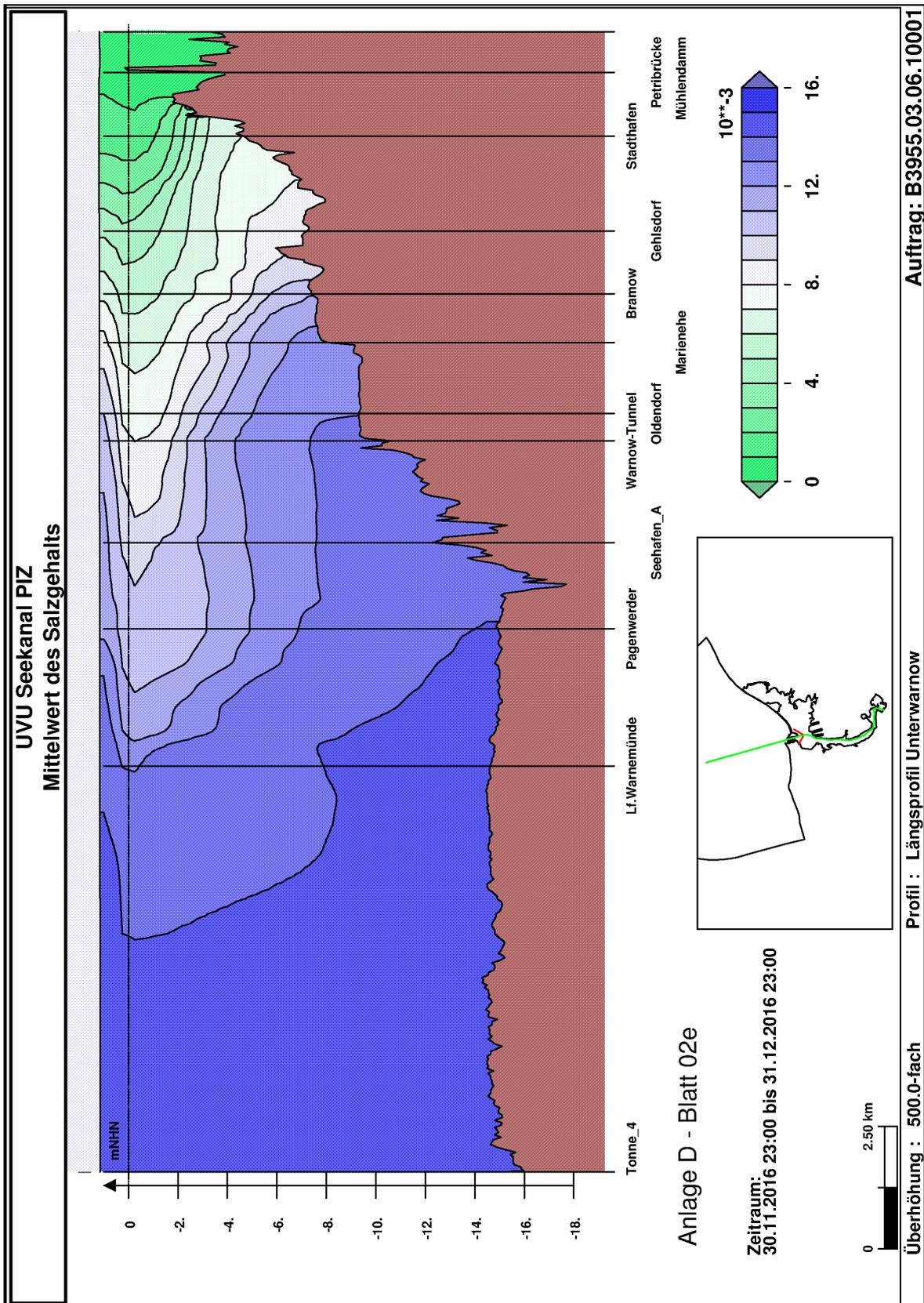


Bild 46 Mittelwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow.

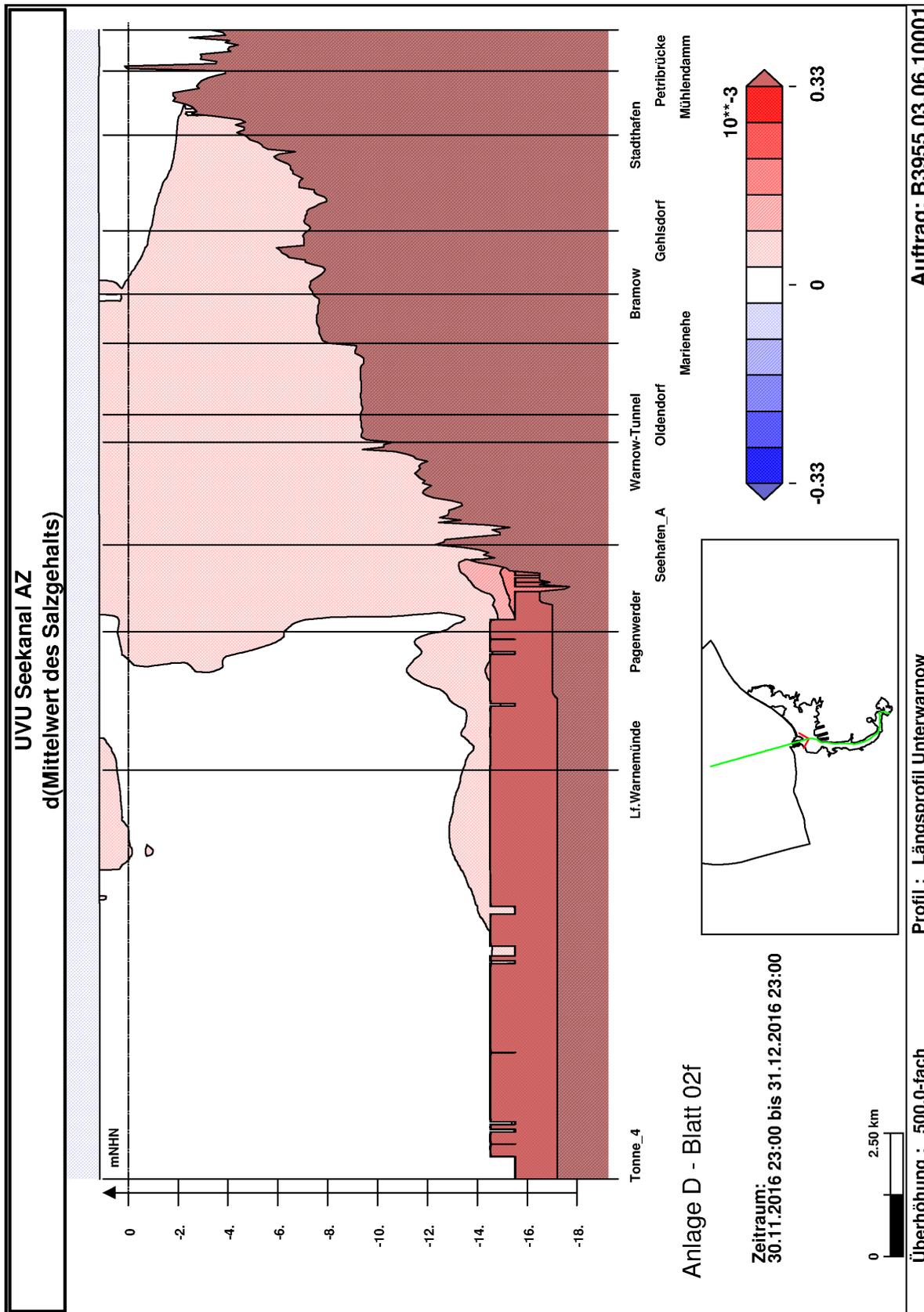


Bild 47 Vorhabenbedingte Änderung auf den Mittelwert des Salzgehaltes im Dezember, dargestellt entlang des Längsschnittes durch die Warnow. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.

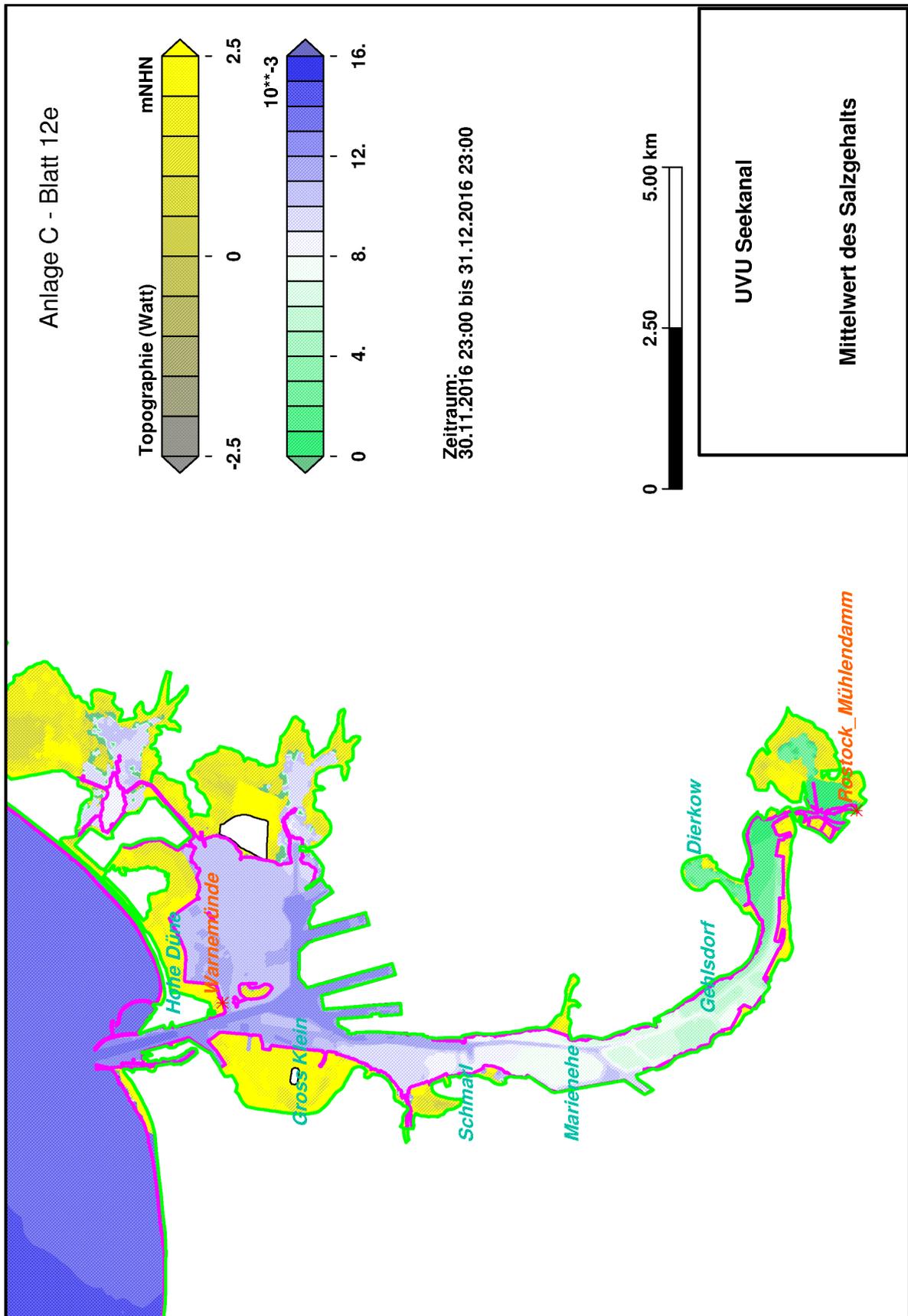


Bild 48 Mittelwert des tiefengemittelten Salzgehaltes im Dezember im PIZ.

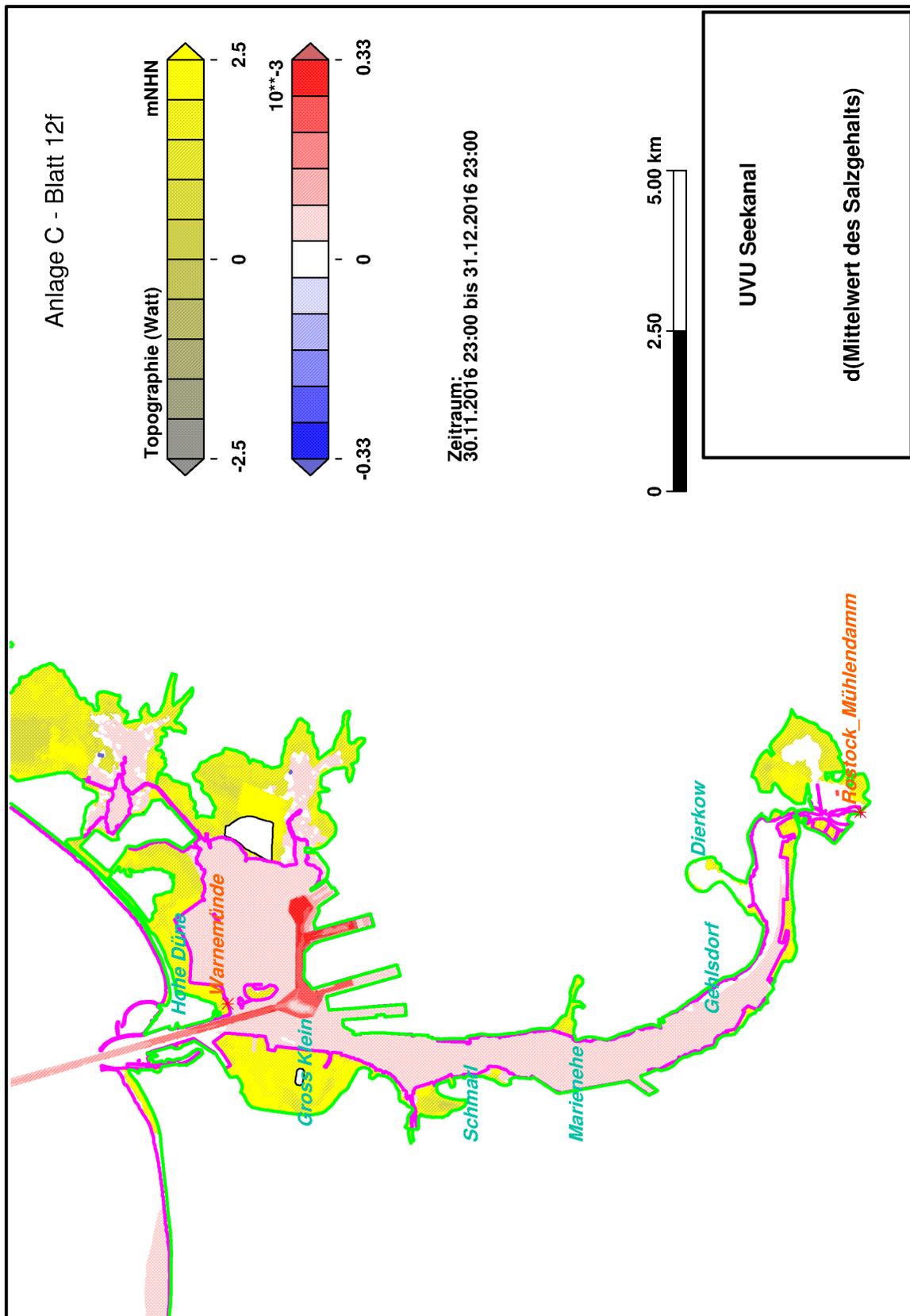


Bild 49 Vorhabenbedingte Änderung des Mittelwerts des tiefengemittelten Salzgehaltes im Dezember. Änderungen kleiner 0,03 ppt werden nicht dargestellt.

Bei den Zeitreihen des Salzgehaltes der Varianten PIZ und AZ1660 an einzelnen Positionen ist in den unteren Schichten teilweise eine systematische, leichte vorhabenbedingte Erhöhung vorhanden (Anlage B, Blatt 14b bis 35b). An der Oberfläche ist dagegen die vorhabenbedingte Änderung des Salzgehaltes gering. Die geringe Zunahme des Salzgehaltes in der Variante AZ1660 am Boden des Seekanals ist als permanente Systemveränderung zu betrachten. Verglichen mit der Schwankungsbreite des Salzgehaltes ist diese Veränderung klein. In den Flachwasserbereichen sind geringe vorhabenbedingte Erhöhungen des Salzgehaltes im Winter zu erwarten. Auch hier sind die Veränderungen klein im Verhältnis zur Schwankungsbreite des Salzgehaltes.

10 Bauzeitliche Veränderung der Sedimentkonzentration durch Sedimentumlagerung

Für die Betrachtung der temporären Auswirkungen des Ausbaus durch Baggern und Verbringen von Sediment gibt es ausreichende Studien, die hier herangezogen werden.

Durch die Baggerarbeiten kommt es beim Baggervorgang selbst, sowie bei der Umlagerung auf Verbringstellen zur Freisetzung von Sedimenten. Die Folge ist eine Erhöhung der Trübung durch Feinkornanteile im Arbeitsumfeld, wie auf Abbildung 1, Seite 1 bei (Kibbel et al. 2000) zu erkennen ist. Auf Luftbildern, die im Rahmen des DYNAS-Projektes aufgenommen wurden, ist deutlich zu erkennen, dass sich zwischen dem mit Sedimenten angereicherten Wasserkörper und dem Umgebungswasser eine Grenze ausbildet (Harff et al. 2006, Abbildung 1, Seite 5). Der Umfang der allmählichen Anreicherung des Umgebungswassers ist von der Art der gebaggerten Sedimente (Kornverteilung) sowie den Mechanismen der Verbreitung und deren Zeitskalen abhängig.

10.1 Ausbreitungsmechanismen

10.1.1 Vertikalbewegungen durch Gravitation und Turbulenz

Da Sedimentkörner etwa die 2,5-fache Dichte gegenüber Wasser aufweisen, sinkt freigesetztes Sediment durch die Schwerkraft allmählich zu Boden. Die Sinkgeschwindigkeit wird von Größe, Dichte und Form der Teilchen bestimmt. Beim Baggervorgang werden die Sedimentteilchen jedoch am Arbeitsgerät in einer so großen Menge freigesetzt, dass das entstehende, mit Sediment vermischte Wasser eine größere Dichte aufweist, als das Umgebungswasser. Zwischen dem sedimentarmen Umgebungswasser und dem sedimenthaltigen Wasser bildet sich eine Grenzschicht aus. Beim Baggern und Umlagern von Sedimenten treten in unmittelbarer Nähe des Arbeitsgerätes so hohe Konzentrationen auf, dass das Material sich unter den vorherrschenden Bedingungen in der Unterwarnow/Ostsee dynamisch als eigenständiger Wasserkörper verhält, der aufgrund seiner höheren Dichte absinkt. Beim Absinken wird an der Grenzfläche des Wasserkörpers Umgebungswasser eingemischt, so dass sich der Absinkvorgang durch Dichtereduktion verlangsamt und gleichzeitig das Volumen des sedimenthaltigen Wasserkörpers vergrößert.

Die Dauer des Absinkens des Sedimentes hängt von den Korngrößen und der Dichte der Körner sowie von der Konzentration ab. Je schwerer und größer ein Einzelkorn ist, desto schneller erfolgt das Absinken. Ebenso tragen hohe Konzentrationen zu einem schnelleren Absinken bei.

10.1.2 Einfluss einer Hintergrundströmung

Hintergrundströmungen haben auf das freigesetzte Sediment-Wassergemisch die folgenden Wirkungen:

- Advective Verlagerung des Gemischs. Der langsam absinkende, sedimenthaltige Wasserkörper bewegt sich von der Quelle (z.B. Baggerschaufel) mit der Geschwindigkeit der Hintergrundströmung in Strömungsrichtung.
- Vertikale Turbulenz (Wirbel) in der Hintergrundströmung halten die Sedimente länger in Schwebelage.

- Horizontale Turbulenz verstärkt den Vermischungsvorgang mit dem Umgebungswasser und führt so zu einer langsamen Vergrößerung des vermischten Wasservolumens bei gleichzeitiger Reduktion der Sedimentkonzentration.

Übersteigt die Hintergrundströmung bei Weitem die Geschwindigkeit des Absinkens um eine oder mehrere Größenordnungen, so findet eine nennenswerte Verdriftung des freigesetzten Sedimentes in Richtung der Hintergrundströmung statt.

10.2 Statistische Analyse der hydrologischen Situation im Hinblick auf Baggern und Verbringen

Generell ist im Gebiet des Seekanals nur mit Strömungsgeschwindigkeiten von wenigen Zentimetern/Sekunde bis einigen Dezimetern/Sekunde zu rechnen. In letztgenannter Größenordnung treten diese nur im Zusammenhang mit Starkwind- und Sturmereignissen auf. Da eine Vorhersage der Strömungsgeschwindigkeiten zum Zeitraum der Ausführung der Baggerarbeiten hier nicht möglich ist, wird aufgrund statistischer Parameter eine Einschätzung der hydrologischen Rahmenbedingungen vorgenommen, unter denen die Baggerarbeiten voraussichtlich erfolgen werden.

Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten treten üblicherweise bei kurzperiodischen Schwankungen des Wasserstandes (große Änderung in kurzer Zeit) auf. Eine statistische Analyse der Pegelreihe Warnemünde für die Jahre 2008 bis 2018 (Bild 50) zeigt, dass die zeitliche Veränderung des Wasserstandes nur selten Werte von 1 mm/min überschreitet, somit nennenswerte Strömungen in der Unterwarnow, die Material von der Baustelle weg transportieren könnten, ebenfalls sehr selten auftreten, wie in Bild 51 an Position P05 erkennbar wird, an der Geschwindigkeiten über 10 cm/s selten auftreten. In der Unterwarnow werden daher beim Baggern freigesetzte Sedimente überwiegend wieder auf der Baustelle sedimentieren. An Position P11 in der Ostsee vor Warnemünde können etwas höhere Strömungen auftreten (Bild 52), jedoch auch hier überwiegen Strömungen unter 15 cm/s.

Aus der statistischen Betrachtung kann abgeleitet werden, dass die natürliche Hintergrundströmung im Seekanal und der Unterwarnow nur selten eine maßgebliche Rolle für die Verdriftung von freigesetzten Sedimenten spielt. Der Wesentliche Prozess der Verteilung ist daher die Erzeugung von Turbulenz durch das Baggern selbst, und der Schraubenwirkung des Baggerschiffes (nur bei fahrendem Bagger) und der daraus folgenden Vermischung. Im Küstenbereich vor der Warnow-Mündung kommt die Strömung der Ostsee als Transportprozess hinzu. Durch sie kann das freigesetzte Sediment einige hundert Meter versetzt werden, bevor es sich weitgehend abgesetzt hat. Mol (2011) zeigt, wie sich eine Trübungswolke, die durch einen Laderaumsaugbagger freigesetzt wird, mit der Zeit verändert. Durch die im Beispiel geringen Strömungsgeschwindigkeiten verbleibt die Wolke nahezu ortsfest, verbreitert sich etwas und schwächt sich mit der Zeit durch Absinken des Sedimentes ab.

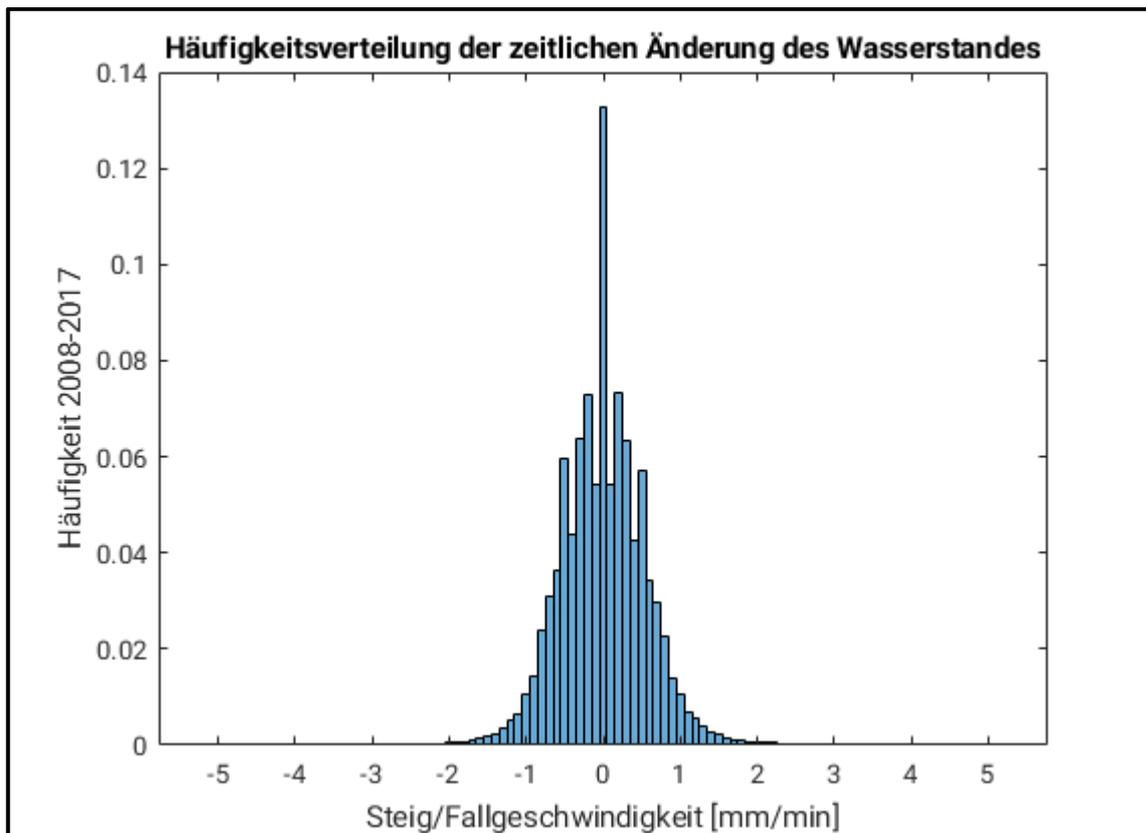


Bild 50 Verteilung der zeitlichen Veränderung des Wasserstandes, basierend auf 5-Minuten-Werten des Pegels Warnemünde von 01.01.2008-01.01.2018.

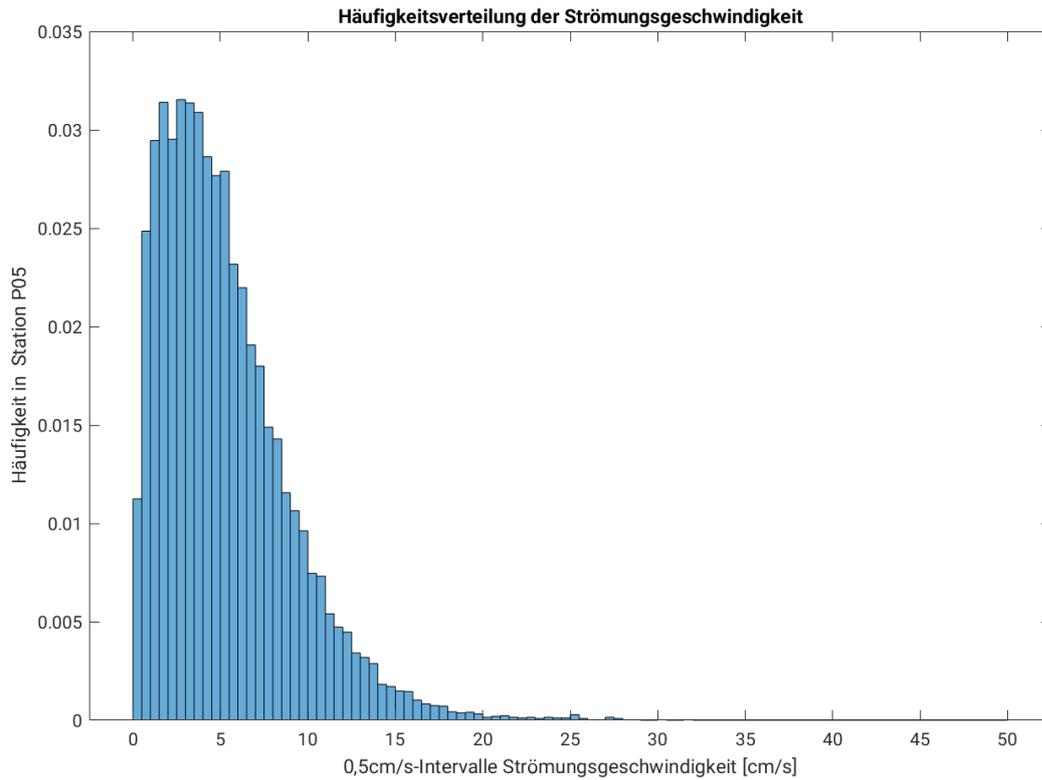


Bild 51 Verteilung des Betrages der Strömungsgeschwindigkeit für den simulierten Zeitraum an Position P05, abgeleitet aus den Modellwerten des Simulationszeitraums.

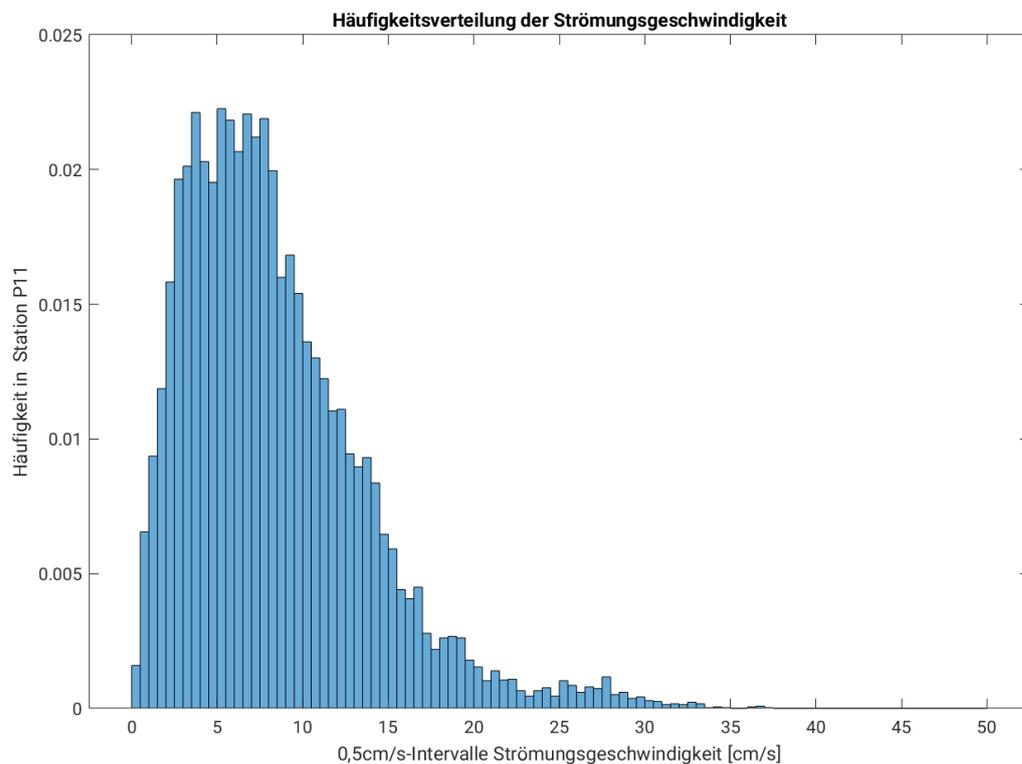


Bild 52 Verteilung des Betrages der Strömungsgeschwindigkeit für den simulierten Zeitraum an Position P11, abgeleitet aus den Modellwerten des Simulationszeitraums.

Die temporären Wirkungen in der Bauphase werden wie folgt sein:

- In der Unterwarnow durchgeführte Baggerarbeiten werden zu lokalen Trübungswolken führen, die sich im Wesentlichen auch wieder lokal absetzen. Eine Ausbreitung der Trübungswolken in die Flachwassergebiete ist nicht zu erwarten.
- Im Seegebiet vor Warnemünde können die Trübungswolken mit der mittleren Strömung versetzt werden. Jedoch sind auch hier aufgrund der überwiegend niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten keine weiten Driftwege zu erwarten.

11 Zusammenfassung

Für den Seekanal Rostock ist eine weitere Vertiefung zur Anpassung an 15 m tiefgehende Schiffe geplant. Dieses Vorhaben hat einen Einfluss auf die Hydrologie des Warnow-Ästuars, der unter Zuhilfenahme eines 3D-HN-Modellverfahrens qualitativ und quantitativ ermittelt wurde.

Das geplante Vorhaben hat auf die Hydrologie die folgenden Auswirkungen:

1. Der mittlere Wasserstand, dessen Extremwerte und der dynamische Ablauf (Windstau, Seiches, Tide) werden von dem Vorhaben nahezu nicht beeinflusst. Die Maßnahme ist hochwasserneutral.
2. Die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Trasse des Seekanals werden leicht abnehmen.
3. Auf die Unterhaltungsbaggermengen im Seekanal hat dieser Umstand jedoch keinen Einfluss.
4. Eine dauerhafte Erhöhung der Trübung durch Feinsedimente in der Wassersäule ist aufgrund der sich verringernden Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu erwarten.
5. Durch die Vertiefung wird salzreiches Ostseewasser unterhalb des heutigen Sohl-niveaus in die Unterwarnow eindringen. Auch wenn dieser Wasserkörper durch eine stabile Schichtung in der Tiefe verbleibt, führt der Ausbau zu einer geringfügigen Erhöhung der oberflächennahen Salzgehalte von weniger als 0,1 ppt bei den mittleren, maximalen und minimalen Salzgehalten, insbesondere in den Wintermonaten. Die natürliche Schwankungsbreite des Salzgehaltes wird abnehmen, da die minimalen Salzgehalte etwas stärker ansteigen als die maximalen Salzgehalte.
6. Da das Wasser am Boden des Seekanals kälter ist, und sich durch den Ausbau das Wasservolumen vergrößert, wird die Temperatur im Seekanal in Bodennähe reduziert. Die Mittelwerte und die natürliche Schwankungsbreite der Temperatur ändern sich geringfügig durch den Ausbau des Seekanals.
7. Durch die Baggerarbeiten können temporär Fein-Sedimente in das Umgebungswasser eingetragen werden. In der Unterwarnow kann dies lokal zu einer Trübungswolke führen, die weitgehend ortsfest bleibt während das suspendierte Sediment wieder sedimentiert. Im Küstenvorfeld der Ostsee können Anteile der suspendierten Sedimente während des Absetzvorgangs einige hundert Meter durch den Küstenlängstransport versetzt werden. Generell nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle die Belastung durch Trübung überproportional ab.
8. Änderungen der Bathymetrie durch Erosion und Sedimentation werden nur im Bereich der Trasse und an der Umlagerungsfläche KS552a, soweit diese zur Verbringung genutzt wird, erfolgen.

Die Veränderungen der Hydrologie sind im Verhältnis zur natürlichen Variabilität gering und verändern die Eigenschaften des Ästuars Unterwarnow außerhalb der Trasse des Seekanals nicht.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Mai 2019

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Frank Kösters

gez. Dr. Guntram Seiß

12 Literaturverzeichnis

Badrow, Uwe (2012): Hochwassergefahrenkarte Sturmflut Ostsee. Online verfügbar unter http://rathaus.rostock.de/sixcms/media.php/rostock_01.a.894.de/datei/HWKGK_Pegel_800.pdf, zuletzt geprüft am 06.12.2018.

Baensch, O. (1875): Die Sturmfluth vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des preußischen Staates. In: G. Erbkam (Hg.): Zeitschrift für Bauwesen. Zeitschrift für Bauwesen XXV (25). Berlin: Verlag von Ernst & Korn, S. 155–220.

Bauermeister, U. (2008): Ports in Mecklenburg-Vorpommern. In: KFKI (Hg.): ICCE 2008. Heide (Holstein): Boyens (Die Küste, 74), S. 390–403. Online verfügbar unter <https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/101619/k074131.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

BAW (Hg.) (2007): Mathematisches Verfahren UNTRIM. Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter http://wiki.baw.de/de/index.php/Mathematisches_Verfahren_UNTRIM, zuletzt geprüft am 04.12.2018.

BAW (2011): Machbarkeitsstudie zum Ausbau des Seekanals Rostock auf eine Tiefe von 16,60 m unter NHN. Hydrodynamik. BAW Nr. A39550310184. Unter Mitarbeit von Guntram Seiß und Norbert Winkel. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg.

BAW (2017): GEOTRANSFORMER – BAWiki. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg. Online verfügbar unter <http://wiki.baw.de/de/index.php/GEOTRANSFORMER>, zuletzt aktualisiert am 28.09.2017, zuletzt geprüft am 02.02.2018.

BAW (Hg.) (2018): Analyse der Berechnungsergebnisse – BAWiki. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg. Online verfügbar unter http://wiki.baw.de/de/index.php/Analyse_der_Berechnungsergebnisse#Tideunabh.C3.A4ngige_Kennwerte, zuletzt aktualisiert am 29.03.2018, zuletzt geprüft am 04.07.2018.

Berg, Ch; Schmidt, J. (2000): NSG Radelsee. Hg. v. Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern. Rostock.

BfG (2019): Haupttabellen der Pegel Warnemünde und Rostock-Mühlendamm 2009-2018, Quelle: Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung des Bundes. Koblenz, 08.02.2019. e-mail an BAW. PDF.

Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (Hg.) (2012): Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m. DGM10. Online verfügbar unter <http://www.geodatenzentrum.de/docpdf/dgm10.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2015.

Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (Hg.) (2018): DOP Viewer. Online verfügbar unter http://sg.geodatenzentrum.de/web_bkg_webmap/applications/dop/dop_viewer.html, zuletzt aktualisiert am 05.02.2018, zuletzt geprüft am 13.02.2018.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hg.) (2014): Seevermessung Meeresboden DGM – GDIWiki. Online verfügbar unter https://linwiki-gdi60.bsh.de/wiki/index.php/Seevermessung_Meeresboden_DGM, zuletzt aktualisiert am 03.08.2016, zuletzt geprüft am 26.01.2015.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH): Seekarten. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Seekarten/seekarten_node.html, zuletzt geprüft am 25.02.2019.

Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (02.04.1968): Bundeswasserstrassengesetz, vom 18.07.2016.

Casulli, Vincenzo; Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32 (3), S. 331–348.

Harff, J.; Bobertz, B.; Bohling, B.; Forster, S.; Seifert, T. (2006): Bericht für Anwender zum Abschlussbericht des Projektes DYNAS - Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation. Ergebnisse zur Baggergutverbringung im Küstenbereich (Ostsee). Hg. v. Institut für Ostseeforschung. Warnemünde.

Herrmann, Ch.; Waber, M. von; Zscheile, Kristin; Gosselk, F. (2015): Nationalpark unter Wasser – Marine Lebensräume in Ostsee und Bodden. In: *Meer und Museum* (25), S. 72–88. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/54039075-Nationalpark-unter-wasser-marine-lebensraeume-in-ostsee-und-bodden.html>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.

Kammel, R. (2017): Heiderundfahrt von Markgrafenheide nach Warnemünde und zurück. Hg. v. Warnow Personenschifffahrt. Warnemünde. Online verfügbar unter <https://heiderundfahrt.de/>, zuletzt geprüft am 06.02.2018.

Kibbel, E.-M.; Neumann, R.; Henneberg, M. (2000): Baggergutmanagement der Hansestadt Rostock. Hg. v. Steinbeis Transferzentrum Angewandte Landschaftsplanung. Rostock. Online verfügbar unter https://www2.auf.uni-rostock.de/ll/baggergut/pdf/BM_HRO.pdf, zuletzt geprüft am 06.02.2018.

LUNG-MV: Steckbrief des Pegels Rostock-Geinitzbrücke. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Güstrow. Online verfügbar unter http://www.pegelportal-mv.de/pdf/pegelsteckbrief_04402.2.pdf, zuletzt geprüft am 06.09.2017.

LUNG-MV (Hg.) (2005): Wasserstände und Durchflüsse 2005 für Pegel Mecklenburg-Vorpommerns. aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Teil Küstengebiet der Ostsee. Online verfügbar unter http://www.dgj.de/datadgj/ko_2005.pdf, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

Merian, J. R. (1828): Ueber die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefäßen. Basel: Schweighauser.

Mol, J. W. (2011): Messung von Sedimenten in Suspension während des Baggerns und der Rohrverlegung. Hg. v. Aqua Vision BV. Utrecht.

Opfermann, B. (36.2018): Sportboothafen Warnemünde - Planungsunterlagen. Rostock, 36.03.2018. e-mail an Bundesanstalt für Wasserbau. pdf.

Reinert, D.; Prill, F.; Frank, H.; Zängl, G. (2018): Database Reference Manual for ICON and ICON-EPS. Version 1.2.0. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Online verfügbar unter

https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon_db_beschr_aktuell.html, zuletzt geprüft am 13.02.2018.

Ruhnke, G. (2018): Planungsstand Umgestaltung Werftbecken Warnemünde - Mehrzweckhafen. Rostock, 27.07.2018. e-mail. PDF.

Seifert, Torsten; Tauber, Franz.; Kayser, Bernd (2001): A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition. Poster 147. In: Baltic Sea Science Congress 2001: past, present and future - a joint venture; abstract volume, S. 298. Online verfügbar unter <http://www.io-warnemuende.de/topografie-der-ostsee.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2018.

Seiß, Guntram (2015): Das Ostseemodell der Bundesanstalt für Wasserbau. Technische Dokumentation. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg. Online verfügbar unter http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/Technische_Dokumentationen/pdf/Ostseemodell_der_BAW.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2016.

Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (2016): Digitales Geländemodell 1x1m Mecklenburg und geplante/fertiggestellte Hochwasserschutzlinie. Rostock, 09.09.2016. elektronisch an Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg.

Tiepolt, L. (2016): Hochwasserschutz Rostock - Bemessungswasserstände. Rostock, 09.09.2016. e-mail an G. Seiß. PDF-Dokument.

Wisotzki (27.04.2011): Ausführungsplanung Wohngebiet Petrierviertel. B-Plan Nr. 11.W.150 "Östlich der Stadtmauer". CAD-Datei.

WSV (2017): Anpassung Seekanal Rostock. Hg. v. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Online verfügbar unter https://www.wsv.de/wsa-hst/Ausbaumassnahmen/Anpassung_Seekanal_Rostock/index.html, zuletzt aktualisiert am 24.07.2017, zuletzt geprüft am 21.03.2018.

Abkürzungsverzeichnis

AZ1660	Der im Gutachten behandelte Ausbauzustand mit einer Solltiefe von 16,5 m im mittleren Abschnitt
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BKG	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie
DGM	Digitales Geländemodell (Abbild einer Geländeoberfläche, abgeleitet aus Vermessungsdaten)
DWD	Deutscher Wetterdienst
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
LUNG-MV	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
NHN	Normalhöhennull
PIZ	Planerischer Ist-Zustand (Systemzustand, auf den sich die rechnerisch ermittelte Vorhabenwirkung bezieht)
ppt	Parts per thousand (gleichbedeutend mit Promille)
RMSE	„root mean square error“, Quadratwurzel der mittleren quadratischen Abweichung
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska Institut
StALU-MM	Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion (frühere Bezeichnung der GDWS)



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de