

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG
Niederlassung Cuxhaven

Antrag auf Planfeststellung
für den
Anleger für verflüssigte Gase mit
Südhafen-Erweiterung in Stade-Bützfleth

Gemäß §§ 68 ff WHG iVm §§ 107 ff NWG

Heft 5

Hydromorphologische Gutachten

DHI Wasy GmbH, Berlin

Anleger für verflüssigte Gase bei Stade- Bützfleth

Hydromorphologisches Gutachten



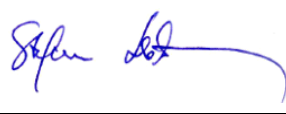

Hanseatic Energy Hub GmbH

Bericht

April 2022

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



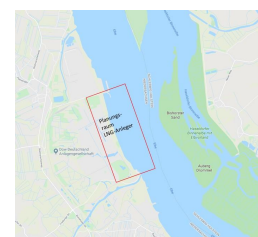
<p>Erstellt von Dr. Monika Donner/ Marion Dziengel</p>		<p>Genehmigt von Dominic Spinnreker-Czichon</p>
<p>08.04.2022</p>		<p>08.04.2022</p>
<p>X </p>		<p>X </p>
<p>Approved by</p>		<p>Approved by</p>
<p>Signed by: Stefan Leschka</p>		<p>Signiert von: Dominic Spinnreker</p>

Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth

Hydromorphologisches Gutachten

Erstellt für: Hanseatic Energy Hub GmbH und
Niedersachsen Ports GmbH & Co KG

Vertreten durch: Herr Schubert (Hanseatic Energy Hub GmbH), Herr Kokkelink (Niedersachsen Ports GmbH & Co KG)



Quelle: Planungsraum
AVG Stade Bützfleth

Projektmanager	Dr. Monika Donner, Dr. Stefan Leschka
Projektbearbeiter	Marion Dziengel, Dr. Uwe Stöber, Janett Brand
Projektnummer	14805321
Revision	2.1
Einstufung	Vertraulich

INHALT

1	Veranlassung und Zielsetzung.....	1
2	Vorgehen	1
3	Verwendete Datengrundlagen	2
4	Numerische 3D-Modelle zur Elbe	4
4.1	Numerisches Modell des Istzustandes	6
4.2	Numerisches Modell des Planzustandes	7
4.3	Berücksichtigung der Pfeiler und Dalben im Modell	8
4.4	Berücksichtigung der Spundwände im Modell	10
4.5	Modellsoftware zur Hydrodynamik	11
4.6	Modellsoftware zur Temperatur und Salinität	12
4.7	Modellsoftware zum Sedimenttransport	12
5	Modellzeiträume	14
5.1	Hydrologische Randbedingungen	15
5.2	Rauheiten und Turbulenz	18
5.3	Salzgehalte	20
5.4	Wassertemperaturen	21
5.5	Wind und meteorologische Randwerte	23
5.6	Sedimentologische Daten und Randbedingungen	25
6	Nachweis der Modellgüte	29
6.1	Wasserstände	30
6.2	Strömungen und Abflüsse	35
6.3	Salzgehalte	42
6.4	Wassertemperaturen	48
6.5	Schwebstoffkonzentrationen	53
6.6	Sohländerungen	59
7	Auswertung der hydrodynamischen Situation	62
7.1	Modellzeitraum Juli 2016	62
7.1.1	Wasserstände und Strömungen	62
7.1.2	Wassertemperaturen	71
7.1.3	Salzgehalte	75
7.2	Modellzeitraum Oktober 2017	78
7.2.1	Wasserstände und Strömungen	78
7.2.2	Wassertemperaturen	86
7.2.3	Salzgehalte	89
8	Auswertung des Sedimenttransportes	92
8.1	Modellzeitraum Juli 2016	92
8.1.1	Schwebstoffgehalte	92
8.1.2	Sohländerung	96
8.2	Modellzeitraum Oktober 2017	98
8.2.1	Schwebstoffgehalte	98
8.2.2	Sohländerung	103

9	Zusammenfassung.....	105
10	Literatur	107

ABBILDUNGEN

Abbildung 1.1: Planungsraum zum AVG Stade-Bützfleth (Quelle: NPorts, Zeichnung Gesamtlageplan, Stand: November 2020)	1
Abbildung 4.1: Tideelbemodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten	4
Abbildung 4.2: Modellgitter im Planzustand mit den Solltiefen im Planungsraum der bestehenden und geplanten Hafengebäude	5
Abbildung 4.3: Vertikale Modellauflösung als Querschnitt durch die Elbe im Bereich des Seehafens Stade.....	6
Abbildung 4.4: Modellgitter im Planungsraum Seehafens Stade für den Istzustand inkl. Elbvertiefung	7
Abbildung 4.5: Modellgitter im Planungsraum Seehafens Stade im Planzustand inkl. Elbvertiefung	8
Abbildung 4.6: Einfluss der Froudezahl auf das Widerstandsverhalten C_w von Pfeilerbauten in Gerinneströmungen nach Naudascher (1992) Definitionsskizze (rechts) für den Einfluss der Anströmrichtung nach DHI (2014)	9
Abbildung 4.7: Lage der Pfeiler im Modellgitter	9
Abbildung 4.8: Lage der Spundwände im Modellgitter für den Ist- und Planzustand.....	10
Abbildung 4.9: Definitionsskizze der Strömung über einen Deich/Damm	11
Abbildung 5.1: Modellzeiträume: Gesamtganglinie am Pegel Stadersand in den Jahren 2016 – 2017 (oben), Ganglinie am Pegel Stadersand für Modellzeitraum Juli 2016 (unten links) und Ganglinie am Pegel Stadersand für Modellzeitraum Oktober 2017 (unten rechts)	14
Abbildung 5.2: Messstationen im Modellgebiet für die Parameter Wasserstand, Strömung, Salzgehalt und Wassertemperatur.....	16
Abbildung 5.3 Wasserstands und Abfluss-Randbedingungen für den Modellzeitraum Juli 2016 (oben) und Oktober 2017 (unten)	17
Abbildung 5.4: Nebengewässer der Elbe, die im Modell erfasst sind.	18
Abbildung 5.5: verwendete Sohlrauheit im Modellgebiet	19
Abbildung 5.6: Verteilung der Turbulenzen über die Smagorinsky-Faktoren im Modellgebiet 20	
Abbildung 5.7: Zeitreihen der Salzgehalte als Randbedingung am unteren Modellrand Steinriff für den Modellzeitraum Juli 2016 (oben) und Oktober 2017 (unten), Quelle: BSH 21	
Abbildung 5.8: Zeitreihen der Wassertemperatur als Randbedingung am unteren Modellrand Steinriff (grüne Linie) und am oberen Modellrand Geesthacht (blaue Linie) für den Modellzeitraum Juli 2016 (oben) und Oktober 2017 (unten)	22
Abbildung 5.9: Zeitreihe der Windgeschwindigkeit (grüne Linie) und -richtung (blaue Linie) als Randbedingung für den Modellzeitraum im Juli 2016 (oben) und im Oktober 2017 (unten).....	23
Abbildung 5.10 Zeitreihe der relativen Luftfeuchte (blaue Linie), des Bedeckungsgrades (graue Linie) und der Lufttemperatur (orange Linie) für den Modellzeitraum im Juli 2016 (oben) und im Oktober 2017 (unten)	24
Abbildung 5.11: Zeitreihen der Schwebstoffkonzentrationen für den oberen Modellrand Geesthacht (blaue Linie) und den unteren Modellrand Steinriff (rote Linie) für den Modellzeitraum im Juli 2016 (oben) und im Oktober 2017 (unten).....	26
Abbildung 5.12: Verteilung der kritischen Sohlschubspannung im 3D-Modell.....	28
Abbildung 5.13: Verteilung der Sedimentdichte (trockene Sedimentdichte) im 3D-Modell... 28	
Abbildung 6.1: Für die Kalibrierung verwendete Wasserstandspegel im Elbe-Modellgebiet.. 30	
Abbildung 6.2: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wasserstände (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) im Juli 2016 für die Pegel Cuxhaven Steubenhöft, Glückstadt, Stadersand und Blankenese	32
Abbildung 6.3: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wasserstände (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) im Juli 2016 für die Pegel St. Pauli, Schöpfstelle, Bunthaus und Zollenspieker.....	33

Abbildung 6.4:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wasserstände (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) im Oktober 2017 für die Cuxhaven Steubenhöft, Stadersand, Blankenese und Zollenspieker.....	35
Abbildung 6.5:	Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte der Fließgeschwindigkeit, -richtung (magentafarbene Symbole) und des Abflusses (blaue Symbole) im Elbe-Modellgebiet.....	36
Abbildung 6.6:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Fließgeschwindigkeiten (graue Linie) und -richtungen (schwarze und graue Richtungspfeile) an der Oberfläche und der Sohle mit Wasserspiegellage (WSL, blaue Linie) im Juli 2016 für die Messpunkte Juelsand und Hanskalbsand	38
Abbildung 6.7:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Fließgeschwindigkeiten (graue Linie) und -richtungen (schwarze und graue Richtungspfeile) an der Oberfläche und der Sohle mit Wasserspiegellage (WSL, blaue Linie) im Juli 2016 für die Messpunkte Rhinplate Nord und Pagensand	39
Abbildung 6.8:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Abflüsse (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) im Juli 2018 für die Messpunkte Bunthaus Nord und Teufelsbrück.....	40
Abbildung 6.9:	gemessene (schwarze Linie) und simulierte Fließgeschwindigkeiten (graue Linie) und -richtungen (schwarze und graue Richtungspfeile) an der Oberfläche und der Sohle mit Wasserspiegellage (WSL, blaue Linie) im Oktober 2017 für die Messpunkte Pagensand und Juelsand.....	42
Abbildung 6.10:	Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte des Salzgehaltes im Elbe-Modellgebiet.....	43
Abbildung 6.11:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Salzgehalte (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Altenbruchbogen, Brunsbüttel und Rhinplate-Nord	45
Abbildung 6.12:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Salzgehalte (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Pagensand und Hanskalbsand	46
Abbildung 6.13:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Salzgehalte (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 für die Messpunkte Altenbruchbogen, Neufeldreede und Pagensand	48
Abbildung 6.14:	Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte der Wassertemperatur im Elbe-Modellgebiet	49
Abbildung 6.15:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wassertemperatur (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Altenbruchbogen und Rhinplate-Nord.....	50
Abbildung 6.16:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wassertemperatur (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Juelsand und Hanskalbsand	51
Abbildung 6.17:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wassertemperatur (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 für die Messpunkte Altenbruchbogen und Juelsand	52
Abbildung 6.18:	Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte der Schwebstoffkonzentration (SSC) im Elbe-Modellgebiet.....	53
Abbildung 6.19:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche im Juli 2016 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord	55
Abbildung 6.20:	Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord	56
Abbildung 6.21:	gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche im Oktober 2017 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord	58

Abbildung 6.22:	gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Sohle im Oktober 2017 für die Messpunkte Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord	59
Abbildung 6.23:	Gemessene Sedimentationsraten der Monate Januar 2013 bis Dezember 2018 in Bereichen des Hamburger Hafens, Quelle & Darstellung: HPA	60
Abbildung 6.24:	Flächige Darstellung der simulierten Sohländerung nach 16 Tagen im Hamburger Hafen in den Modellzeiträumen Juli 2016 (links) und Oktober 2017 (rechts)	61
Abbildung 7.1:	Wasserspiegelhöhen im Juli 2016 während des Tidehoch- (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	63
Abbildung 7.2:	Zeitlicher Verlauf der Wasserstände im Juli 2016 und der Differenz (rot gestrichelte Linie) zwischen Planzustand (hellblau gestrichelte Linie) und Istzustand (blaue Linie) am Extraktionspunkt in der Elbe	64
Abbildung 7.3:	Wasserspiegeldifferenzen im Juli 2016 zwischen Plan- und Istzustand während des Tidehoch- (links) und des Tideniedrigwassers (rechts)	65
Abbildung 7.4:	Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche im Juli 2016 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	66
Abbildung 7.5:	Zeitlicher Verlauf der Strömungen im Juli 2016 an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)	67
Abbildung 7.6:	Strömungsdifferenzen an der Oberfläche zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016	68
Abbildung 7.7:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Juli 2016 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	69
Abbildung 7.8:	Tiefengemittelte Strömungsdifferenzen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016	70
Abbildung 7.9:	Tiefengemittelte Wassertemperaturen im Juli 2016 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	72
Abbildung 7.10:	Zeitlicher Verlauf der Wassertemperaturen im Juli 2016 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)	73
Abbildung 7.11:	Tiefengemittelte Wassertemperaturen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016	74
Abbildung 7.12:	Tiefengemittelte Salzgehalte im Juli 2016 während des Tidehochwassers (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	75
Abbildung 7.13:	Zeitlicher Verlauf der Salzgehalte im Juli 2016 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)	76
Abbildung 7.14:	Tiefengemittelte Differenzen der Salzgehalte zwischen Plan- und Istzustand während des Tideniedrigwassers (links) und des Tidehochwassers (rechts) im Juli 2016	77
Abbildung 7.15:	Wasserspiegelhöhen im Oktober 2017 während des Tidehoch- (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	78
Abbildung 7.16:	Zeitlicher Verlauf der Wasserstände im Oktober 2017 und der Differenz (rot gestrichelte Linie) zwischen Planzustand (hellblau gestrichelte Linie) und Istzustand (blaue Linie) am Extraktionspunkt in der Elbe	79
Abbildung 7.17:	Wasserspiegeldifferenzen im Oktober 2017 zwischen Plan- und Istzustand während des Tidehoch- (links) und des Tideniedrigwassers (rechts)	80
Abbildung 7.18:	Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche im Oktober 2017 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	81

Abbildung 7.19:	Zeitlicher Verlauf der Strömungen im Oktober 2017 an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien).....	82
Abbildung 7.20:	Strömungsdifferenzen an der Oberfläche zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017	83
Abbildung 7.21:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Oktober 2017 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	84
Abbildung 7.22:	Tiefengemittelte Strömungsdifferenzen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017	85
Abbildung 7.23:	Tiefengemittelte Wassertemperaturen im Oktober 2017 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	86
Abbildung 7.24:	Zeitlicher Verlauf der Wassertemperaturen in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) im Oktober 2017 an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)	87
Abbildung 7.25:	Tiefengemittelte Wassertemperaturen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017	88
Abbildung 7.26:	Tiefengemittelte Salzgehalte im Oktober 2017 während des Tidehochwassers der Sturmflut (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	89
Abbildung 7.27:	Zeitlicher Verlauf der Salzgehalte im Oktober 2017 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)	90
Abbildung 7.28:	Tiefengemittelte Differenzen der Salzgehalte zwischen Plan- und Istzustand während des Tideniedrigwassers (links) und des Tidehochwassers der Sturmflut (rechts) im Oktober 2017	91
Abbildung 8.1:	Tiefengemittelte Schwebstoffgehalte im Juli 2016, während der Ebbphase (oben) und der Flutphase (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	93
Abbildung 8.2:	Zeitlicher Verlauf der Schwebstoffgehalte im Juli 2016 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2, P3, P4 und P5 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien) ..	94
Abbildung 8.3:	Tiefengemittelte Differenzen der Schwebstoffgehalte zwischen Plan- und Istzustand während der Ebbphase (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016	95
Abbildung 8.4:	Sohländerung nach 16 Tagen im Juli 2016 für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	96
Abbildung 8.5:	Differenzen der Sohländerung zwischen Plan- und Istzustand im Juli 2016 im Planungsbereich (links) sowie ober- und unterhalb des Planungsbereiches als Übersicht (rechts).....	97
Abbildung 8.6:	Tiefengemittelte Schwebstoffgehalte im Oktober 2017 während der Flutphase (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	99
Abbildung 8.7:	Zeitlicher Verlauf der Schwebstoffgehalte im Oktober 2017 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2, P3, P4 und P5 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)	100
Abbildung 8.8:	Tiefengemittelte Differenzen der Schwebstoffgehalte zwischen Plan- und Istzustand während der Ebbphase (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017.....	102
Abbildung 8.9:	Sohländerung nach 16 Tagen im Oktober 2017 für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)	103

Abbildung 8.10: Differenzen der Sohländerung zwischen Plan- und Istzustand im Oktober 2017 im Planungsbereich (links) sowie ober- und unterhalb des Planungsbereiches als Übersicht (rechts) 104

TABELLEN

Tabelle 3.1: Verwendete Datengrundlagen	2
Tabelle 4.1: Modellgitterauflösung im Gesamtmodell.....	5
Tabelle 5.1: Hydrologische Randbedingungen für den Pegel Cuxhaven-Steubenhöft (LLUR, 2014)	15
Tabelle 5.2: Nebengewässer der Elbe als konstante Zuflüsse.....	17
Tabelle 5.4: Meteorologische Parameter für den Wärmeaustausch im hydrodynamischen Modell der Elbe	24
Tabelle 5.5 Sedimentologische Parameter für das morphologische Modell der Elbe	26
Tabelle 6.1: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wasserstandsganglinien im Juli 2016 an den untersuchten Pegeln Cuxhaven Steubenhöft, Glückstadt, Stadersand, Blankenese, St. Pauli, Schöpfstelle, Bunthaus und Zollenspieker	31
Tabelle 6.2: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wasserstandsganglinien im Oktober 2017 an den untersuchten Pegeln Cuxhaven Steubenhöft, Stadersand, Blankenese und Zollenspieker.....	34
Tabelle 6.3: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Rhinplate Nord, Pagensand, Juelsand und Hanskalbsand	37
Tabelle 6.4: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Bunthaus Nord und Teufelsbrück.....	40
Tabelle 6.5: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 an den untersuchten Messpunkten Juelsand und Pagensand	41
Tabelle 6.6: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Salzgehalten an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen, Brunsbüttel, Rhinplate-Nord, Pagensand und Hanskalbsand ...	44
Tabelle 6.7: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Salzgehalten an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen, Neufeldreede und Pagensand.....	47
Tabelle 6.8: Analyse statistischer Kennwerte und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wassertemperaturen an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen, Rhinplate-Nord, Juelsand und Hanskalbsand	49
Tabelle 6.9: Analyse statistischer Kennwerte und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wassertemperaturen an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen und Juelsand.....	52
Tabelle 6.10: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Schwebstoffkonzentrationen an der Oberfläche (oben) und der Sohle (unten) im Juli 2016 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord	54
Tabelle 6.11: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Schwebstoffkonzentrationen an der Oberfläche (oben) und der Sohle (unten) im	

Oktober 2017 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord	57
Tabelle 6.12: Simulierte (oben) und gemessene (unten) mittlere Sedimentationsraten für die Monate Juli 2016 und Oktober 2017 in Bereichen des Hamburger Hafens	61

1 Veranlassung und Zielsetzung

Die Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG plant in Stade-Bützfleth den Neubau eines Importanlegers für verflüssigte Gase (kurz AVG) südlich des bestehenden Hafens. Am Anleger sollen LNG-Tanker mit einer Länge bis zu 345 m und einer Breite bis zu 54 m sowie Tanker für Propylen- und Ethylenumschläge mit einer Größe von 225 m × 36 m abgefertigt werden. Der geplante AVG liegt am Westufer der Elbe nahe Stade und unmittelbar nördlich der Schwingemündung (Abbildung 1.1).

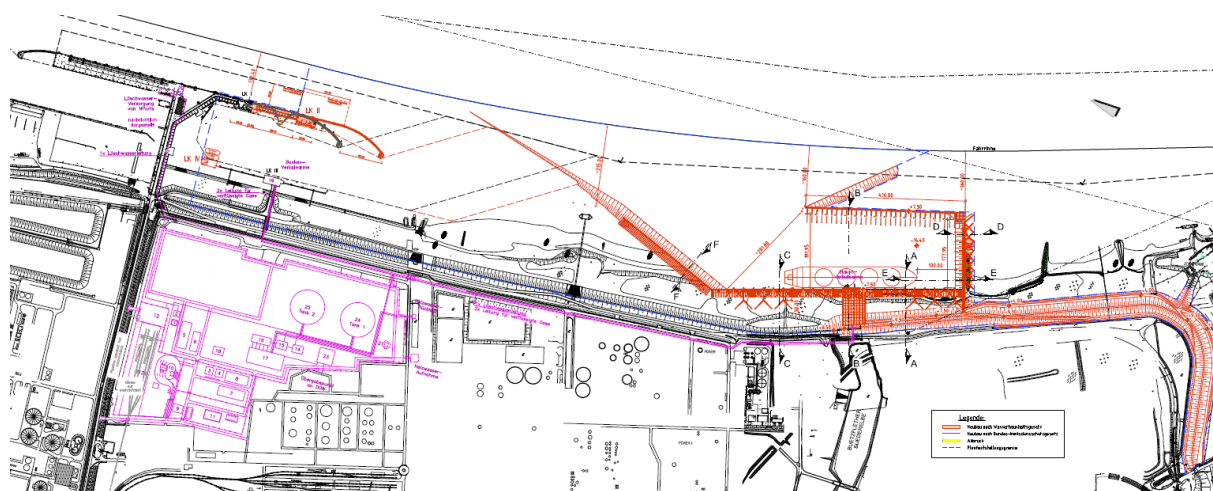


Abbildung 1.1: Planungsraum zum AVG Stade-Bützfleth (Quelle: NPorts, Zeichnung Gesamtlageplan, Stand: November 2020)

Im Rahmen der Planfeststellung des Anlegers wird ein hydro- und morphodynamisches Gutachten benötigt, das die hydromorphologische Wirkung des geplanten Anlegers in der Differenz zum Istzustand beschreibt.

2 Vorgehen

Zur Untersuchung des Einflusses des geplanten AVG Stade-Bützfleth wurde ein 3-dimensionales numerisches Modell zur Berechnung der ausbaubedingten Änderungen von Wasserständen, Strömungen, Temperaturen, Salzgehalten, des Sedimenttransportes und der Sohländerungen für die Elbe aufgebaut. Um eine Bandbreite der unterschiedlichen hydrologischen Verhältnisse untersuchen zu können, wurden zwei repräsentative Modellzeiträume von je zwei Wochen (Spring-Nipp-Zyklus) ausgewählt (Kap. 5).

Als Grundlage kommt ein hydromorphologisches 3D-Elbmodell auf Basis des DGM-W 2016 z.T. inkl. Elbvertiefung zum Einsatz. Das Modell wurde im Nahbereich um den geplanten AVG Stade-Bützfleth mit neuen Peildaten aktualisiert (Kap. 4). Basierend auf dem Elbmodell wurden für die Ausführungsplanung zwei numerische Modelle aufgebaut, die den Istzustand inkl. Elbvertiefung und den Planzustand inkl. Elbvertiefung simulieren. Aus den sich einstellenden Differenzen zwischen Ist- und Planzustand (inkl. Elbvertiefung) können die Auswirkungen auf Hydrologie und Morphologie (indikativ) prognostiziert werden.

Es werden für beide Modellzeiträume und die jeweiligen Parameter sowohl die Situation im Ist- und Planzustand als auch die Differenz beider Zustände für einen exemplarischen Zeitpunkt der Ebb- und Flutphase flächenhaft gezeigt.

Weiterhin werden für die Parameter Strömungsgeschwindigkeit und Wasserstand Zeitreihen von Ist- und Planzustand an bestimmten Punkten im Umfeld des Anlegers gezeigt.

3 Verwendete Datengrundlagen

Folgende digitale Daten (Tabelle 3.1) wurden den numerischen Modellen und der vorgelegten Auswertung zugrunde gelegt. Die Literaturquellen sind in Kap. 10 angeführt.

Tabelle 3.1: Verwendete Datengrundlagen

Quelle	Beschreibung
Niedersachsen Ports	Lageplan, Querschnitte der Planungen am AVG Anleger Stade-Bützfleth (dwg, pdf) für das numerische Modell des Planzustandes Stand: November 2020
Portal Tideelbe (WSV)	DGM-W 2016 zur Elbe für das numerische Modell Stand: 2016
BSH	Salzgehalt und zur Wassertemperatur am Standort Steinriff für die Zeiträume 2016 und 2017 aus dem BSH-HBM-Modell der BSH als Randwert für das numerische Modell
Niedersachsen Ports	Peildaten und Solltiefen vom Seehafen Stade (txt) nur das numerische Modell Stand: März – Mai 2020
Niedersachsen Ports	DOW Stade – Schiffsanleger und Kühlwassersystem, Baugrundbeurteilung und Gründungsempfehlung Stand: 19.4.2012
DOW/ HEH	Einleitungsmenge und Aufwärmspanne für die Entnahme und Rückgabe
WSV	Peildaten der Schwingemündung, Herausgeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg für das numerische Modell Datum der Messung: 12.06.2020

Quelle	Beschreibung
Portal Tideelbe (WSV)	Messdaten (Temperatur, Salzgehalt, Wasserstand, Strömung, Durchfluss) an verschiedenen Messpositionen entlang der Elbe zur Kontrolle des Modellgüte Datum der Messungen: 2015 – 2019
Portal Tideelbe	Messdaten zur Trübung an verschiedenen Messpositionen entlang der Elbe zur Kontrolle des Modellgüte, Umrechnung über BAW (2018) Datum der Messungen: 2015 – 2019
Hamburg Port Authority	Sedimentationsraten im Hamburger Hafen zur Kontrolle des Modellgüte Datum der Messung: 2013 - 2018
Portal Tideelbe (WSV)	Sedimentkataster der Elbe, Punktshape der Korngrößen für die Sohlbelegung des morphologischen Modells Stand: 2006
Niedersachsen Ports	DOW Kühlwasserdaten und Einleitungsmengen für das Jahr 2018 für die Erfassung der Einleitung im Modell
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz (NLWKN) Stade	Pegeldaten und Sperrwerksinformationen an der Schwinge für den Modellrand an der Schwinge Stand: 2016 – 2019
WSV	Fahrinnentrasse inkl. Solltiefen zur EVT für Delegationsstrecke ab Wedel bis Elbemündung in die Nordsee Stand: 2019
Hamburg Port Authority	Fahrinnentrasse inkl. Solltiefen zur EVT für Delegationsstrecke ab Hamburger Hafen bis Wedel Stand: 2019

4 Numerische 3D-Modelle zur Elbe

Als Grundlage für das hydromorphologische Gutachten wurde ein numerisches 3D-Modell zur Hydrodynamik und zum Sedimenttransport in der Tideelbe herangezogen. Das Modell umfasste den tidebeeinflussten Bereich der Elbe vom Wehr Geesthacht bei Elbekilometer 586 (Oberstrom) bis zum Steinriff bei Elbekilometer 724 (Unterstrom) und besaß eine Länge von 138 Flusskilometern. Die Modelltopografie nutzte Peildaten zur Elbe von 2016, das offizielle DGM-W 2016 vom WSV, und wurde im Planungsraum um den Seehafen Stade und den geplanten Anleger mit neuen Peildaten aus 2020 aktualisiert. Die untere Modellgrenze wurde bis zur Station Steinriff in der Außenelbe erweitert. Abbildung 4.1 zeigt das Tideelbmodell mit den im Modellgebiet liegenden Pegeln.

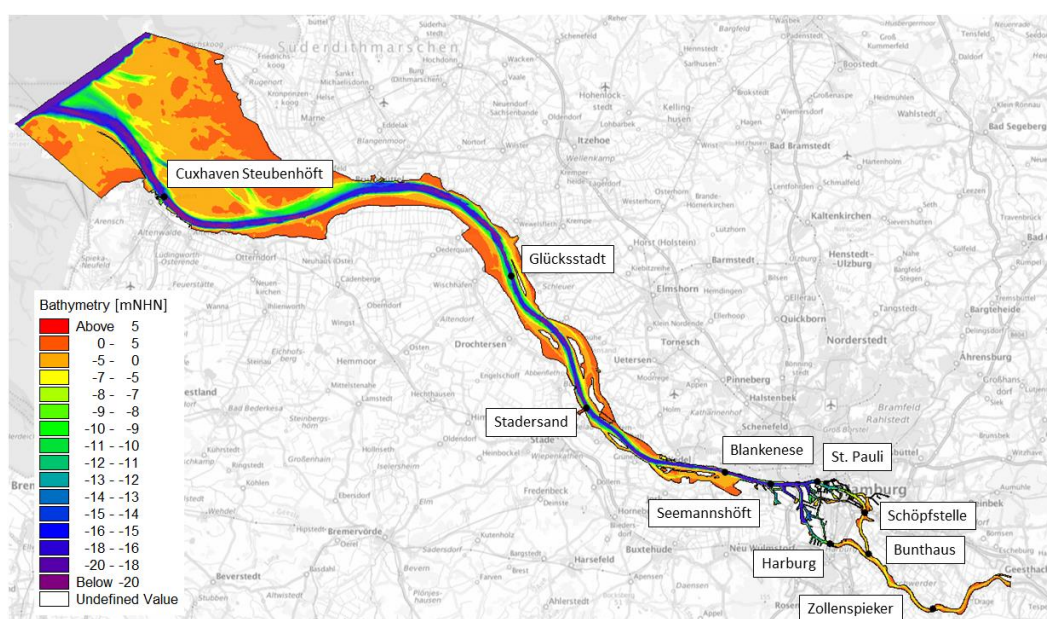


Abbildung 4.1: Tideelbmodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten

Die Elementgröße des Modellgitters wurde im Bereich des bestehenden Seehafens Stade und des geplanten Anlegers verfeinert, um die Hafenstrukturen, die Pfeiler und Spundwände sowie die Bathymetrie genauer abzubilden (Abbildung 4.4 bzw. Abbildung 4.5).

Tabelle 4.1 zeigt die Modellgitterauflösung im Gesamtmodell sowie im Bereich des geplanten Anlegers. Im gesamten Modell wurde die Fahrrinne der Elbe sowie die Zuflüsse Pinnau und Schwinge mit einem quadrangularen Netz abgebildet, wobei die größten Elemente im Bereich der Nordseemündung mit bis zu 500.000 m² und die kleinsten Elemente im Schwingemündungsbereich mit bis zu 810 m² zu finden sind. Im Planungsbereich ist die Fahrrinne der Elbe mit Elementen bis zu 4000 m² abgebildet. Die Elemente der Ufer- und Tidebereiche im Modellgebiet sind einheitlich mit triangularen Elementen abgebildet und wurden im Planungsbereich auf bis zu 250 m² verfeinert.

Tabelle 4.1: Modellgitterauflösung im Gesamtmodell

Dreieckselemente		Viereckselemente	
Vorland/Tidefläche Nordsee Mündung	max. 180000 m ²	Elbe Fahrwasser Nordsee Mündung	max. 1000 x 500 m
Vorland/Tidefläche Planungsraum	250 – 350 m ²	Elbe Fahrwasser Planungsraum	max. 100 x 40 m
Vorland/Tidefläche stromab Hamburgs	3500 – 50000 m ²	Schwinge	max. 45 x 18 m
Hamburger Hafen	1200 – 1700 m ²	Elbefahrwasser Hamburger Hafen	max. 80 x 30 m
Vorland/Tidefläche stromauf Hamburgs	max. 2000 m ²	Elbefahrwasser stromauf Hamburgs	max. 100 x 50 m

Zur Erstellung der Modellbathymetrie wurde das Berechnungsgitter auf aktuelle Peildaten am Anleger interpoliert. Hierbei handelt es sich um Peilungen aus dem Messzeitraum vom März bis Mai 2020. Da es im Hafenbecken des Süd- und Nordhafens im Jahresverlauf zu starken Schwankungen der Sohlhöhe kommt, wurden in Abstimmung mit der NPorts GmbH und Co. KG die Solltiefen für diese Bereiche angesetzt, wie in Abbildung 4.2 dargestellt.

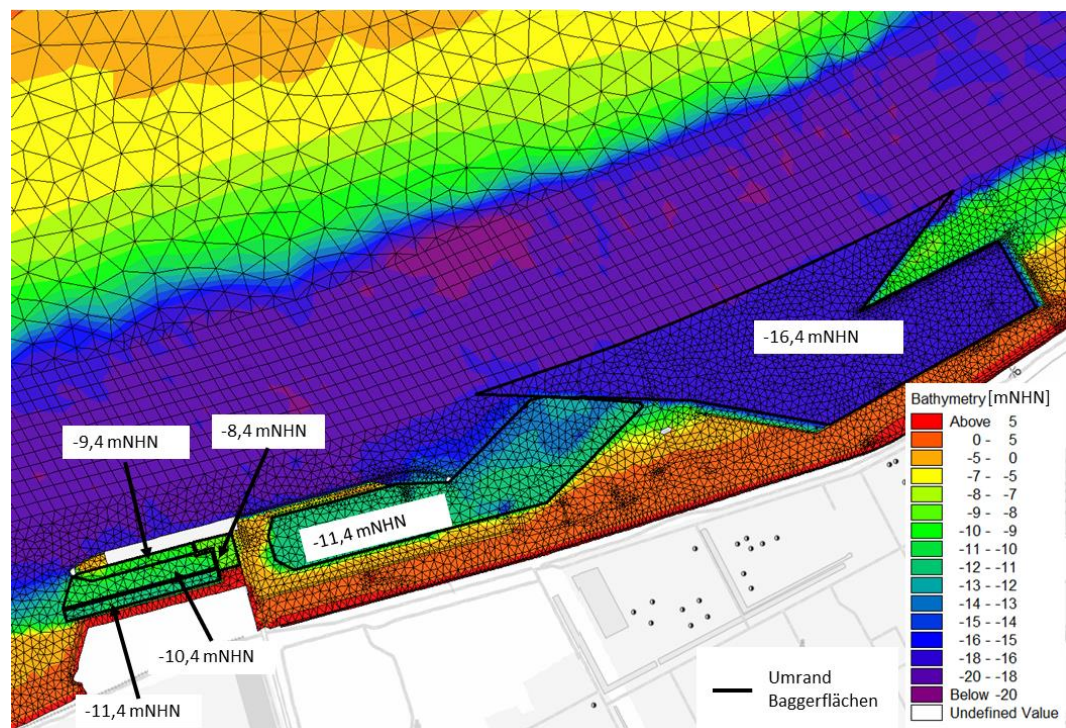


Abbildung 4.2: Modellgitter im Planzustand mit den Solltiefen im Planungsraum der bestehenden und geplanten Hafengebäcke

Die vertikale Auflösung im 3D-Modell wurde als Sigma-Koordinatensystem berücksichtigt (Abbildung 4.3). Hierbei wurden acht Schichten gewählt, die unter Berücksichtigung der freien Oberfläche dieselbe Mächtigkeit zueinander aufweisen.

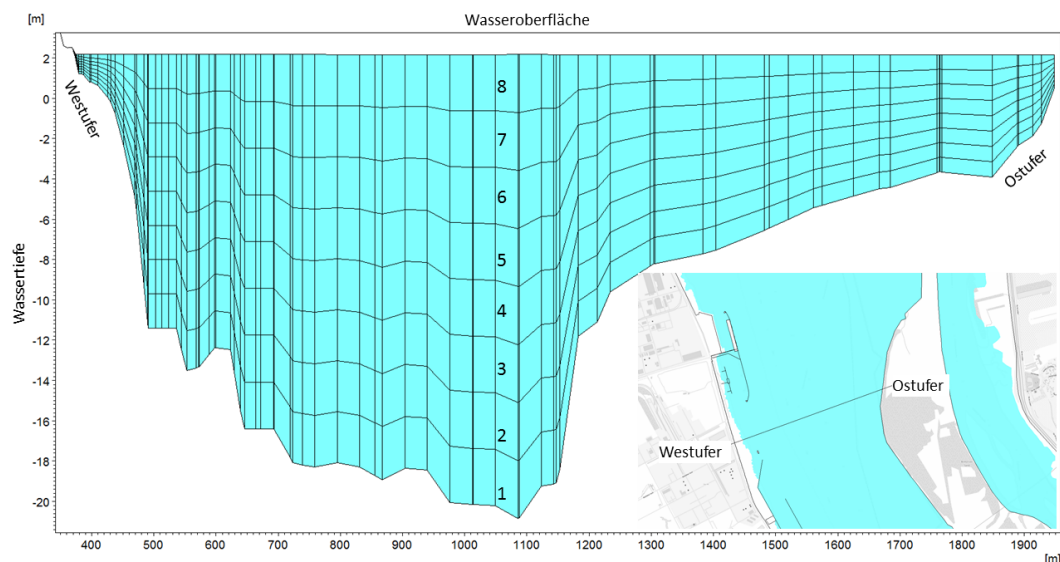


Abbildung 4.3: Vertikale Modellauflösung als Querschnitt durch die Elbe im Bereich des Seehafens Stade

4.1 Numerisches Modell des Istzustandes

Das Modellgitter des Istzustandes beinhaltet neben den obigen Grundlagen die aktuellen Peildaten im Nord- bzw. Südhafen des bestehenden Anlegers (wie in Abbildung 4.2 gezeigt) sowie die Solltiefen der planfestgestellten Elbvertiefung in der Delegationsstrecke ab Hamburger Hafen bis Wedel (Solltiefen ab -17,4 bis -17,3 mNHN) und der Delegationsstrecke unterhalb Wedel bis zur Elbemündung in die Nordsee (Solltiefen ab -17,3 bis -18,95 mNHN).

Die Einbindung der Solltiefen in das Berechnungsgitter erfolgte so, dass alle Sohllagen aus dem DGM-W 2016 mit Werten über den Solltiefen der Elbvertiefung auf die Solltiefen abgesenkt wurden und tiefere Sohllagen unter der Solltiefe bestehen blieben.

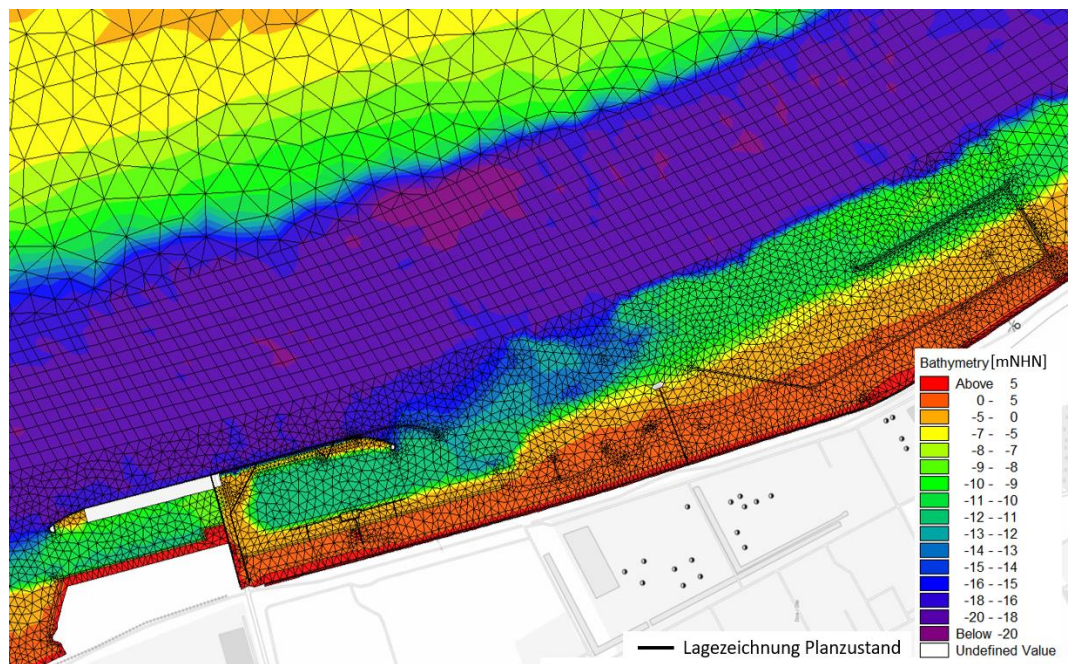


Abbildung 4.4: Modellgitter im Planungsraum Seehafens Stade für den Istzustand inkl. Elbvertiefung

In das Modell des Istzustandes wurden 181 Pfeiler (Abbildung 4.7) und vier überströmbare Spundwände (Abbildung 4.8) an den Strukturen des Nord- und Südhafens des bestehenden Anlegers eingebunden.

Die Kalibrierung wurde mit dem Modellgitter des Istzustandes aber ohne die Elbvertiefung für die Zeiträume Juli 2016 und Oktober 2017 durchgeführt.

4.2 Numerisches Modell des Planzustandes

Das Modellgitter des Planzustandes beinhaltet neben den obigen Grundlagen die aktuellen Peildaten im Nord- bzw. Südhafen des bestehenden Anlegers sowie die Solltiefen des geplanten Hafenbeckens (Abbildung 4.2).

Die Solltiefen der planfestgestellten Elbvertiefung wurden entsprechend des Istzustandes (siehe Kap. 4.1) eingebunden und in der Modellierung des Planzustandes berücksichtigt.

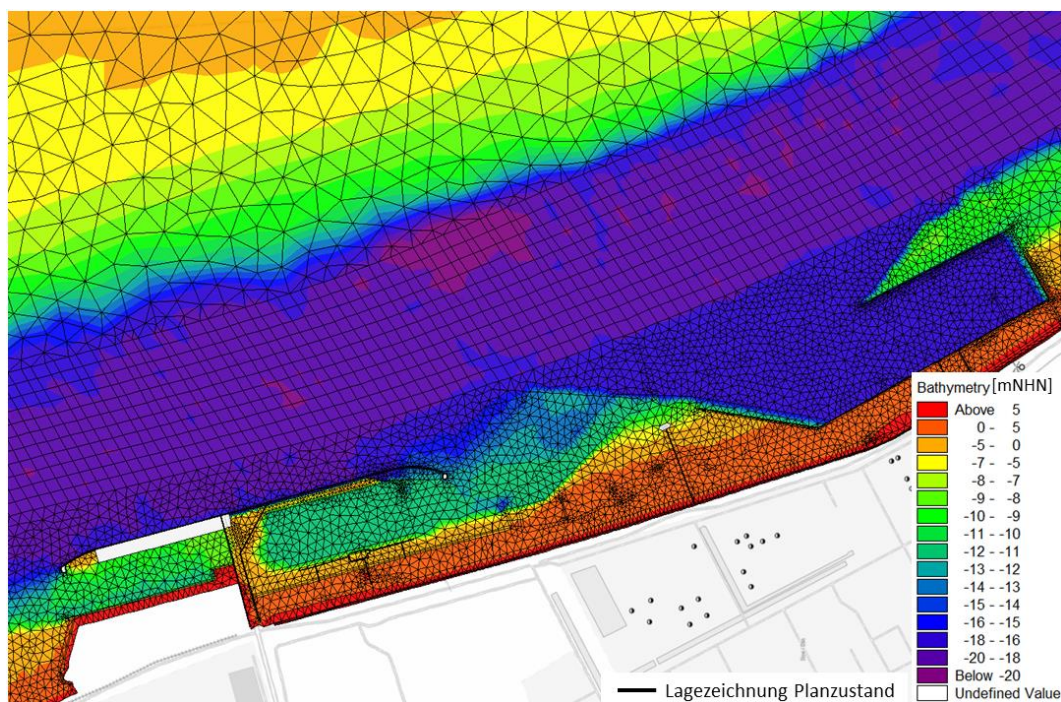


Abbildung 4.5: Modellgitter im Planungsraum Seehafens Stade im Planzustand inkl. Elbvertiefung

In das Modell des Planzustandes wurden 422 Pfeiler (Abbildung 4.7) und acht überströmbare Spundwände (Abbildung 4.8) an den Strukturen des Nord- und Südhafens des bestehenden Anlegers sowie des geplanten Hafenbeckens eingebunden.

4.3 Berücksichtigung der Pfeiler und Dalben im Modell

Die Pfeiler im Bereich des Seehafens Stade wurden im numerischen Modell über einen Sub-Grid Ansatz, dem sogenannten Pier-Module in der Software MIKE3 FM berücksichtigt. Hierbei wurde der Anströmverlust infolge Staudruck der runden Pfeiler berücksichtigt.

$$F = \frac{1}{2} \rho_w \cdot \gamma c_D A_e \cdot v^2$$

c_w

Wobei F für den Anströmverlust, ρ_w für die Wasserdichte [kg/m³], γ für den Anströmfaktor [-], c_D für den Widerstandsbeiwert [-], A_e für die Anströmfläche [m²] und v für die Strömungsgeschwindigkeit [m/s] stehen.

In diesem Ansatz fasst der Widerstandsbeiwert den Einfluss infolge Körperrauheit und Geometrie des Pfeilers zusammen, während der Anströmfaktor den Zusammenhang zwischen Pfeilerwiderstandsbeiwert und der Froudezahl wiedergibt. Der Gesamtbeiwert C_w aus Anströmfaktor und Widerstandsbeiwert variiert je nach Verbaugrad zwischen 1 und 1,5. Gemäß der zuvor aus dem Ausgangszustand bestimmten Kennwerte zur Froudezahl und der Form und benetzten Wassertiefe der Pfeiler ergaben sich Widerstandsbeiwerte von 1,25 bis 1,02. Diese wurden mit der genauen Lage des Pfahles im Element

und dem zugehörigen Durchmesser bei rundem Querschnitt bzw. der zugehörigen Länge und Breite bei rechteckigem Querschnitt überlagert und so der Anströmverlust berücksichtigt.

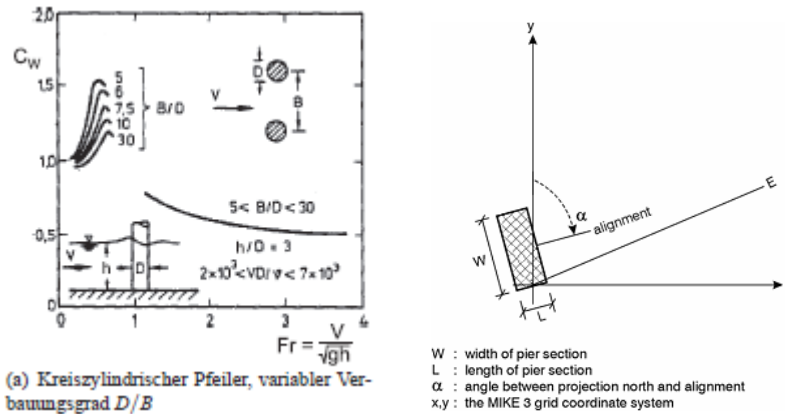


Abbildung 4.6: Einfluss der Froudezahl auf das Widerstandsverhalten C_w von Pfeilerbauten in Gerinneströmungen (links), Definitionsskizze für den Einfluss der Anströmrichtung (rechts) /7/

Die Anzahl der Pfeiler inkl. deren Durchmesser bzw. Länge und Breite sowie der Anströmverlust je Element wurde als zusätzlicher Verlust je Element mitberücksichtigt. Je dichter bzw. je größer die Pfeiler, desto höher auch der Verlust infolge Anströmung. Miterfasst wurde in diesem Ansatz auch die großskalige Wirkung auf die Turbulenz durch den hier genutzten Mischwegansatz nach Smagorinsky. Der gewählte Pieransatz (z.B. BWK Merkblatt 1, 2009: *Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern*, 3. Auflage, Mai 2009.), Naudascher, 1992, *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*, Springer Verlag) ist ein herkömmliches Verfahren, um Pfeiler in Strömungen zu berücksichtigen.

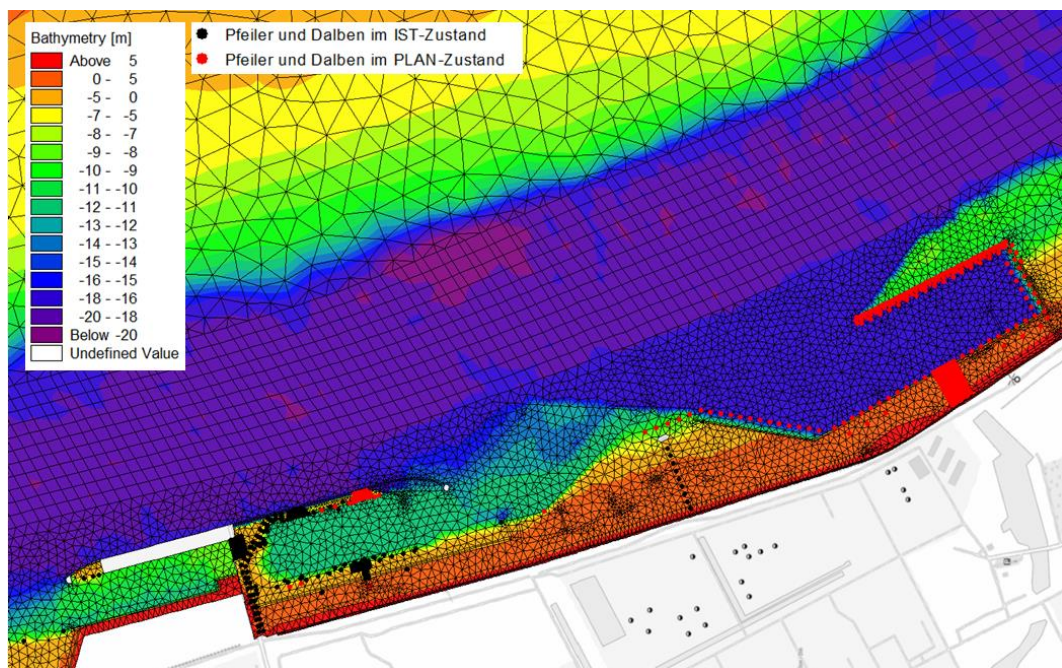


Abbildung 4.7: Lage der Pfeiler im Modellgitter

Über den hier zugrunde liegenden Modellansatz (finite Volumen) können keine kleinskalige 3d-Entwicklung von Turbulenzen oder Kolken im jeweiligen Strömungsschatten bzw. innerhalb des Pfahlrostes erfasst werden. Auch die Gruppenwirkung der Pfeiler, jedoch nur im Hinblick auf eine sich einstellende Nachlaufströmung ist daher über diesen Ansatz nicht berücksichtigt. Auch über ein Ausstanzen der Pfeiler aus dem finite Volumen Modell können beide Phänomene nicht berücksichtigt werden, da hierzu ein Wechseln auf einen CFD-Ansatz erforderlich wäre, der jedoch nur auf Basis einer Plausibilisierung mit physikalischen Modellversuchen empfohlen wird. Vergleichbare Untersuchungen (MIKE 3, CFD-Modelle und physikalische Versuche) wurden für die feste Fehmarnbeltquerung durchgeführt. Die Ergebnisse aus dieser einmaligen Kombination von Untersuchungen sind als Erfahrungswerte hier in den Modellaufbau mit eingeflossen.

4.4 Berücksichtigung der Spundwände im Modell

Die Sohle der Hafenbecken innerhalb des Seehafens Stade und des geplanten Anlegers ist im Ist- und Planzustand mit Spundwänden umsäumt. Die Abbildung 4.8 zeigt die Lage der Spundwände im Modellnetz.

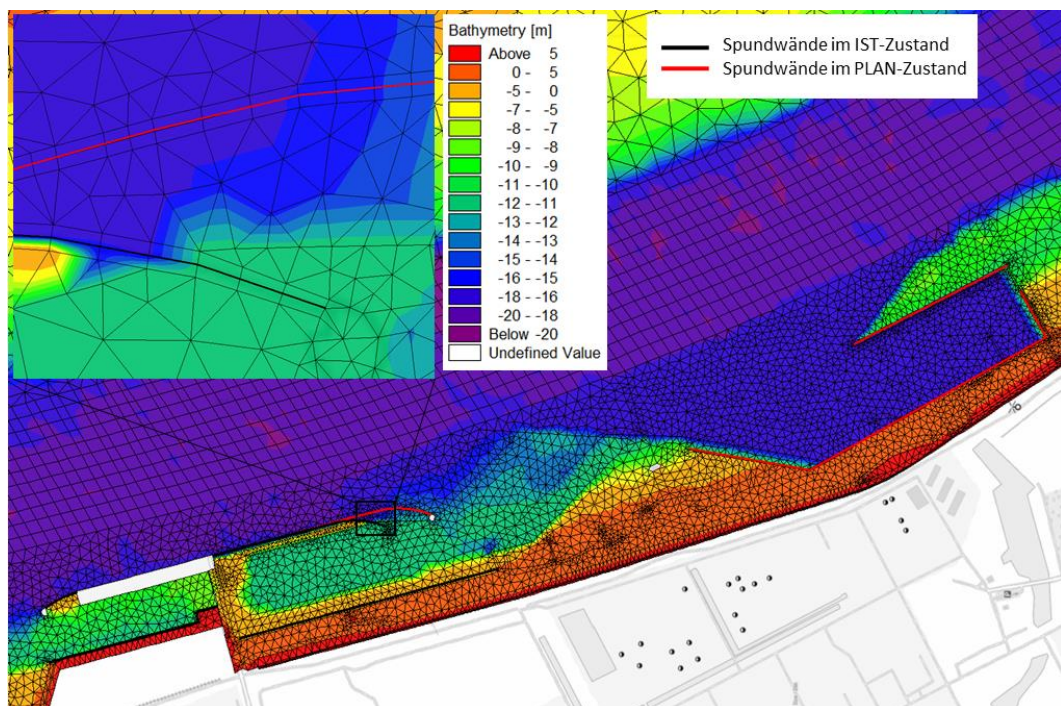


Abbildung 4.8: Lage der Spundwände im Modellgitter für den Ist- und Planzustand

Die Spundwände werden im Modell über eine Deich- bzw. Dammstruktur abgebildet. Dazu wird die Lage über eine Linie im Modellnetz (siehe Abbildung 4.8), die Scheitelhöhe der Struktur und der Abfluss über die Struktur angegeben. Der Abfluss über ein Strukturelement mit einer Elementlänge W wird über die Villemonte-Formel (1947) berechnet:

$$Q = WC(H_{US} - H_W)^k \left[1 - \left(\frac{H_{DS} - H_W}{H_{US} - H_W} \right)^{0,385} \right]$$

wobei Q für den Abfluss über das Bauwerk, W für die Elementlänge, C für den Wehrkoeffizienten, k für den exponentiellen Wehrkoeffizienten, H_{US} für den Wasserstand stromaufwärts, H_{DS} für den Wasserstand stromabwärts und H_W für die Deichhöhe in Bezug auf den globalen Bezugspunkt steht (Abbildung 4.9). Der Wehrkoeffizient k hat einen Wert von 1,5, der Standardwert des Wehrkoeffizienten ist 1,838.

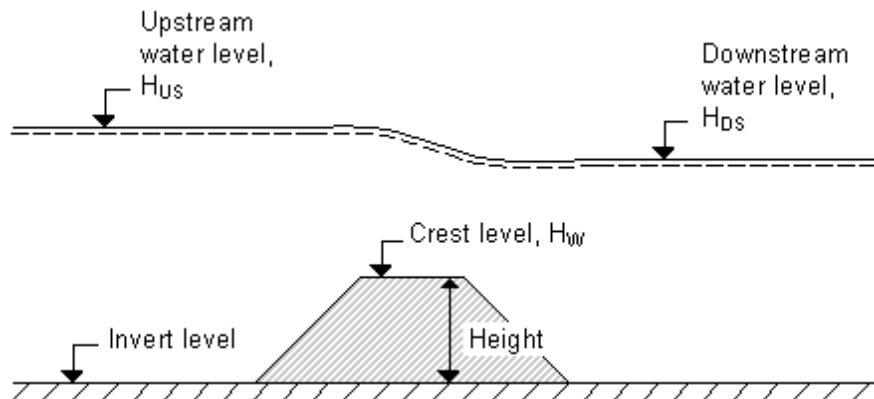


Abbildung 4.9: Definitionsskizze der Strömung über einen Deich/Damm

4.5 Modellsoftware zur Hydrodynamik

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird die Hydrodynamik (3D) in einem unstrukturierten Gitter mit der Software MIKE 3 FM abgebildet. Das Programmsystem wurde speziell für die Modellierung von 3-dimensionalen, instationären Strömungsprozessen in Ästuaren und Fließgewässern entwickelt /1/.

Die hydrodynamische Modellsoftware MIKE 3 FM für freie Oberflächengewässer basiert auf einem dreidimensionalen Ansatz für vertikal inhomogene Fluide. In der Vertikalen wird der Geschwindigkeits- und Dichtegradient in diskretisierter Form berücksichtigt, was die Betrachtung dichtegeschichteter Fluide erlaubt.

Für die Abbildung des Fließwiderstandes an der Sohle wird der empirische Ansatz der Nikuradse Rauheit k_n mit einer äquivalenten Rauheitshöhe in [m] genutzt. Die Wirbelviskositäten ν_t können als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach Smagorinsky) oder als Ergebnis eines gemischten k - ϵ Modells (1D- k - ϵ -Modell in der Vertikalen) und des Smagorinsky-Ansatzes in der Horizontalen angegeben werden. In allen hydromorphologischen Untersuchungen wurde ein gemischten k - ϵ Modells und ein Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen genutzt.

Teil des hydrodynamischen Moduls ist auch die Erfassung des passiven Transportes von Temperatur und Salzgehalt auf Basis der dreidimensionalen Advektions-Diffusions-Gleichung. Beide Prozesse wurden in dieser Studie mitberücksichtigt. Impuls- und Massenerhaltung auch für Inhaltsstoffe, wie z.B. Salz und Temperatur werden in dem zugrunde liegenden Ansatz erfasst. Dieser basiert auf den inkompressiblen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen unter Berücksichtigung der Annahmen von Boussinesq und unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung.

Zur Berechnung der hydrodynamischen Prozesse wurden folgende Einflüsse erfasst:

- Gezeitenströmungen
- Einfluss von Auftrieb und Schichtung auf Grund unterschiedlicher Dichten
- Turbulente Diffusion, Advektion und Dispersion
- Corioliskraft
- Überflutung und Trockenfallen
- Sohlrauheit nach Nikuradse (Modellparameter zur Kalibrierung)
- Turbulenz mit einem gemischten k- ϵ Modells im vertikalen und einen Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen
- Wirkung von Wind, Salinität oder Temperatur
- Wirkung der Spundwände auf die Hydromorphologie
- Wirkung der Pfeiler auf die Hydromorphologie

4.6 Modellsoftware zur Temperatur und Salinität

Zusammen mit der hydrodynamischen Berechnung wird auch die Salz- und Wärmeausbreitung erfasst (DHI, 2020, *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation*, Horsholm Dänemark, 2020.).

Hierbei wird der passive Transport von Temperatur und Salzgehalt im Fluid auf Basis der dreidimensionalen Advektions-Diffusions-Gleichung gelöst.

Der Austausch mit der Atmosphäre wurde miteffasst. Hierbei kann sowohl eine Abgabe an die Atmosphäre erfolgen, ebenso wie eine Aufnahme von Sonneneinstrahlung in die (oberen) Wasserschichten. Folgende Parameter wurden berücksichtigt:

- Relative Luftfeuchte [%]
- Bedeckungsgrad [%]
- Kurz- und Langwellige Sonnenstrahlung [W/m²]
- Lufttemperatur [°C]

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

4.7 Modellsoftware zum Sedimenttransport

Das Sedimenttransport-Modul MIKE 3 FM MT dient zur numerischen Abbildung von kohäsiven und nicht-kohäsiven Sedimenttransportprozessen und der zugehörigen morphologischen Veränderung an der Gewässersohle (DHI, 2020, *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation*, Horsholm Dänemark, 2020.).

Neben dem advektiven und diffusiven Sedimenttransport in der Wassersäule, bildet das MT-Modul den vertikalen Austausch zwischen Sedimenten in der

Wassersäule und an der Gewässersohle, als auch die zeitliche Veränderung der Sedimente an der Gewässersohle mittels eines schichtenbasierten Evolutionsprozesses ab. Das MT-Modul ist dabei ein additives Modul und erfordert eine Kopplung zur Hydrodynamik MIKE 21/ 3 HD (und dessen Solver) MIKE 21/ 3 HD und zum Transportprozess passiver Komponenten in MIKE 21/3 AD FM (und dessen Solver).

Für die hier vorliegenden sandigen und kohäsiven (schluffigen) Sedimente ist das MT-Modul besonders geeignet, da es sowohl sandige als auch mehrere kohäsive Fraktionen in ihrer Sediment- und Morphodynamik erfassen kann. Folgende physikalische Prozesse werden mitberücksichtigt:

- Überlagerung strömungsinduzierter Schubspannungen
- Sedimenttransport für mehrere Fraktionen, kohäsives und nicht kohäsives Sediment
- Flockenbildung infolge Schwebstoffkonzentration
- Effekte infolge vertikaler Dichteschichtung
- Behindertetes Absinken
- Morphologische Veränderung der Gewässersohle

5 Modellzeiträume

Um die Bandbreite der unterschiedlichen hydrologischen Verhältnisse zu untersuchen, wurden zwei Modellierungszeiträume von rund 2 Wochen im Juli 2016 mit häufigen Tide- und Abflussverhältnissen und mit einer mittleren Sturmflut im Oktober 2017 gewählt (Abbildung 5.1).

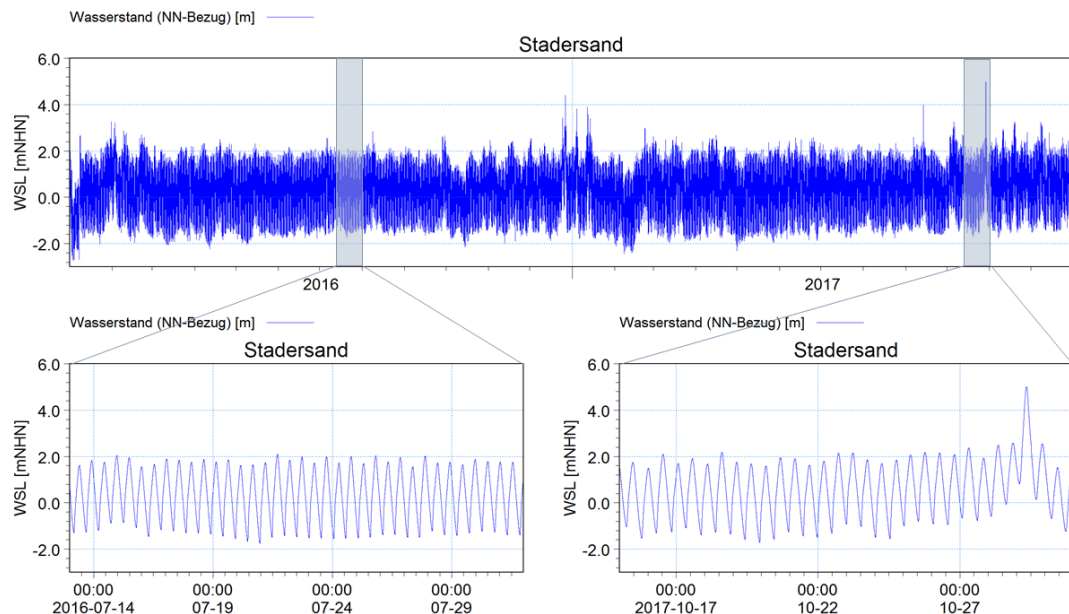


Abbildung 5.1: Modellzeiträume: Gesamtganglinie am Pegel Stadersand in den Jahren 2016 – 2017 (oben), Ganglinie am Pegel Stadersand für Modellzeitraum Juli 2016 (unten links) und Ganglinie am Pegel Stadersand für Modellzeitraum Oktober 2017 (unten rechts)

Der erste Modellzeitraum reichte vom 13.07.2016 bis 01.08.2016. In dieser Zeit führte die Elbe einen geringeren Oberwasserabfluss ($< 400 \text{ m}^3/\text{s}$) und es traten relativ gleichmäßige Tiden auf. Der Oberwasserabfluss entspricht gleichzeitig dem häufigsten Abfluss bei Neu Darchau. Dieses Szenario stellt den Normalfall der hydrodynamischen Bedingungen dar.

Der zweite Modellzeitraum reichte vom 15.10.2017 bis 31.10.2017. Während dieser Zeit führte die Elbe einen mittleren Oberwasserabfluss ($460 \text{ bis } 490 \text{ m}^3/\text{s}$) und hatte, verursacht durch eine schwere Sturmflut mit $3,33 \text{ m}$ über dem mittleren Hochwasser bei St. Pauli (BSH, 2017, *Nordsee-Sturmflut am 29.10.2017, Wasserstandsvorhersagedienst Hamburg, Stand 6.11.2017, Link: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Nordsee_Sturmflut_20171029.pdf;jsessionid=C35A8F3D5AAEA B94C13FC718EC56B0CE.live11293?__blob=publicationFile&v=4*), sehr hohe Tiden. Die Kombination des hohen Tidehubes sowie des mittleren Oberwasserabflusses beschreiben einen Lastfall, der die größten ausbaubedingten Änderungen bei den Strömungen, Wasserständen und dem Sedimenttransport hervorrufen kann. Dieses ist ein selten auftretendes Szenario.

5.1 Hydrologische Randbedingungen

Die hydrologischen Randbedingungen können anhand des Pegels Cuxhaven Steubenhöft beschrieben werden. Da die Gezeiten der Elbe ständigen Schwankungen unterworfen sind, werden langfristige Mittelwerte betrachtet. Für den Pegel Cuxhaven Steubenhöft gelten für einen zehnjährigen Betrachtungszeitraum (2004 – 2013) die folgenden Werte (LLUR, 2014, *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Küstengebiet der Nordsee, 2013, publiziert 2014*).

Tabelle 5.1: Hydrologische Randbedingungen für den Pegel Cuxhaven-Steubenhöft (LLUR, 2014, *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Küstengebiet der Nordsee, 2013, publiziert 2014*)

Kennwert	Abkürzung	Wert
Mittleres Tidehochwasser	MThw _{2004/13}	1,52 mNHN
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw _{2004/13}	-1,42 mNHN
Mittlerer Tidehub	MThb _{2004/13}	2,94 m
Niedrigstes Tidehochwasser	NThw _{2004/13}	-0,63 mNHN
Niedrigstes Tideniedrigwasser	NTnw _{2004/13}	-2,91 mNHN
Höchstes Tidehochwasser	HThw _{2004/13}	4,42 mNHN
Höchstes Tideniedrigwasser	HTnw _{2004/13}	1,49 mNHN

Für die Kalibrierung des Modells können gemessene Wasserstände der Pegel Cuxhaven-Steubenhöft, Glückstadt, Stadersand, Blankenese, Seemannshöft, St. Pauli, Schöpfstelle, Harburg, Bunthaus und Zollenspieker verwendet werden. Die folgende Abbildung 5.2 zeigt die Messstationen im Modellgebiet, für die in den Modellzeiträumen Juli 2016 und Oktober 2017 Messwerte zur Verfügung stehen.

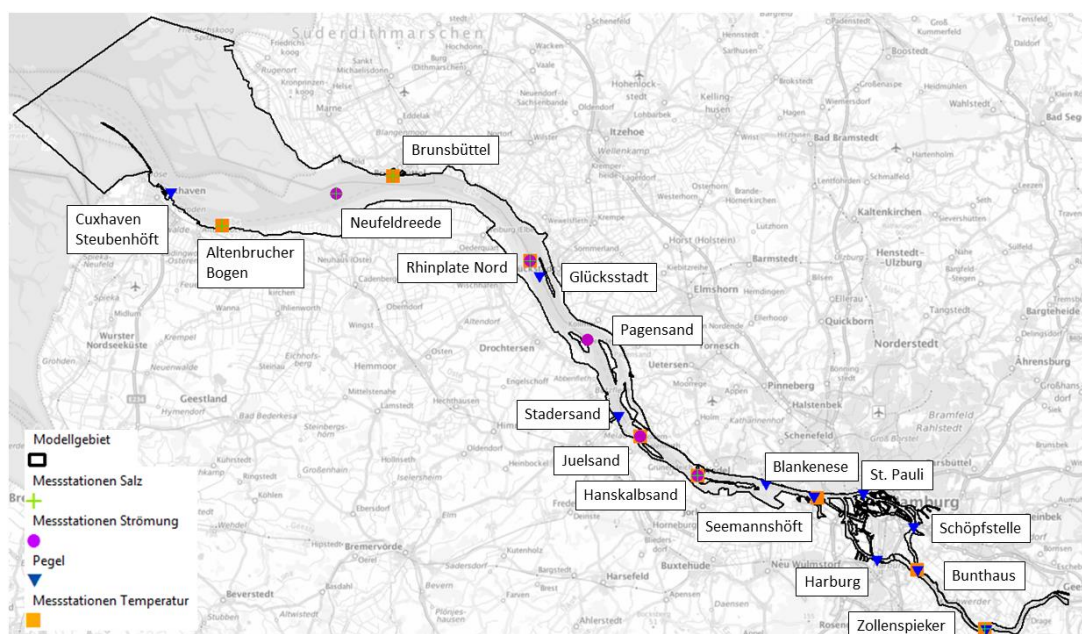


Abbildung 5.2: Messstationen im Modellgebiet für die Parameter Wasserstand, Strömung, Salzgehalt und Wassertemperatur

Der Zufluss bei Geesthacht wurde über den Ansatz des Abflusses bei Neu Darchau und einer zeitlichen Verschiebung der Zuflussganglinie um einen Tag vorgenommen. Dieses Vorgehen hat sich aus Erfahrung in zurückliegenden Projekten an der Elbe sowohl als realistische Annahme als auch zur Steigerung der Abbildungsqualität des Modells bewährt.

Der Wasserstand der Pinnau und der Schwinde gingen als Randbedingungen in das Modell ein. Abbildung 5.3 zeigt die im Modell integrierten Wasserstände am unteren Modellrand, an der Mündung der Pinnau und der Schwinde sowie die Abflüsse am oberen Modellrand.

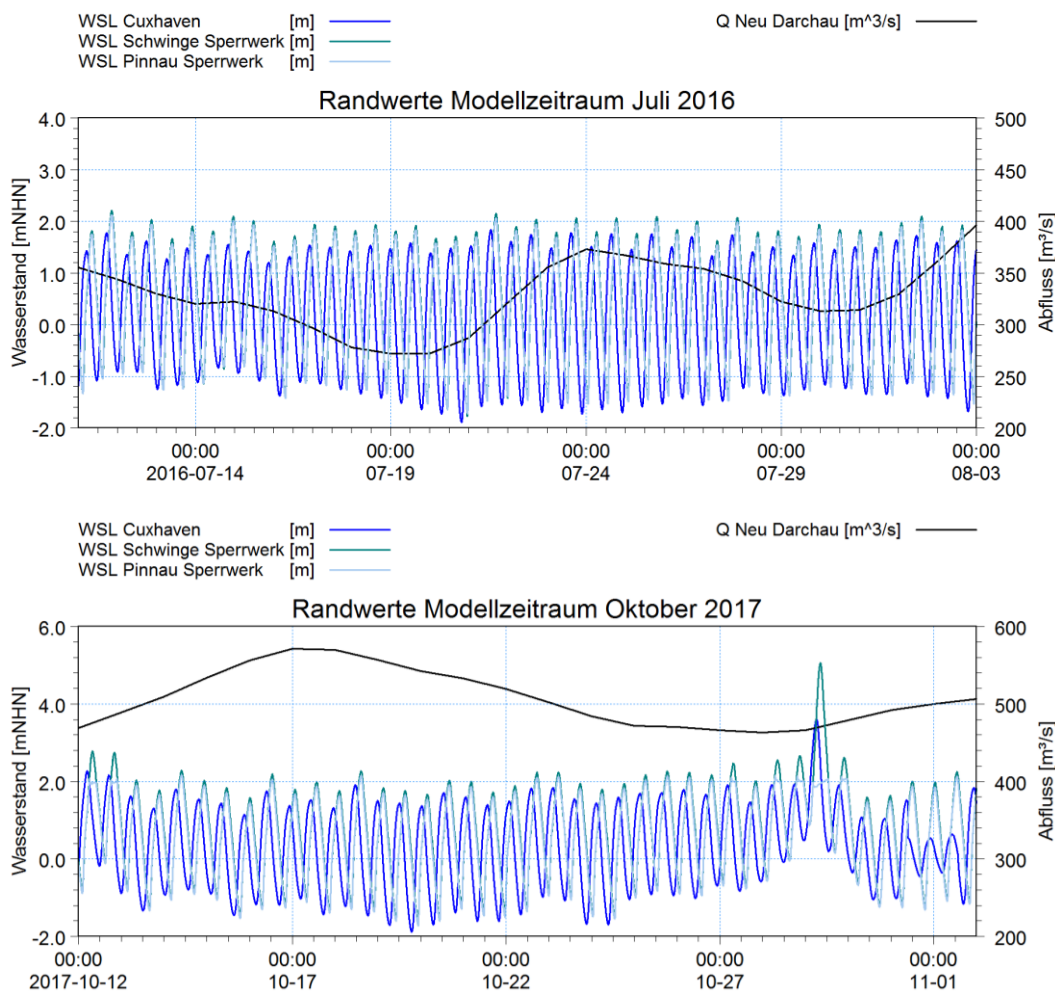


Abbildung 5.3 Wasserstands und Abfluss-Randbedingungen für den Modellzeitraum Juli 2016 (oben) und Oktober 2017 (unten)

Neben den Wasserständen der Pinnau und Schwinge, die über variable Zeitreihen in das Modell eingehen, wurden alle verbleibenden größeren Nebengewässer als konstante Zuflüsse in das Modell eingesteuert. Abbildung 5.4 zeigt die im Modell integrierten Zuflüsse und in Tabelle 5.2 sind die dazugehörigen Durchflussmengen aufgelistet. Die Durchflussmengen entsprechen einem mittleren Abflussereignis und wurden *Nehlsen, E., 2017, Wasserbauliche Systemanalyse zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels für tidebeeinflusste Nebengewässer der Elbe, Dissertation am Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburger Wasserbauschriften, Band 19.* entnommen.

Tabelle 5.2: Nebengewässer der Elbe als konstante Zuflüsse

Zufluss (Mündung des Flusses)	Punktuell, konstanter Durchfluss [m³/s]
Oste	6.35
Stör	5.89
Krückkau	1.29
Lühe	0.34
Este	1.78

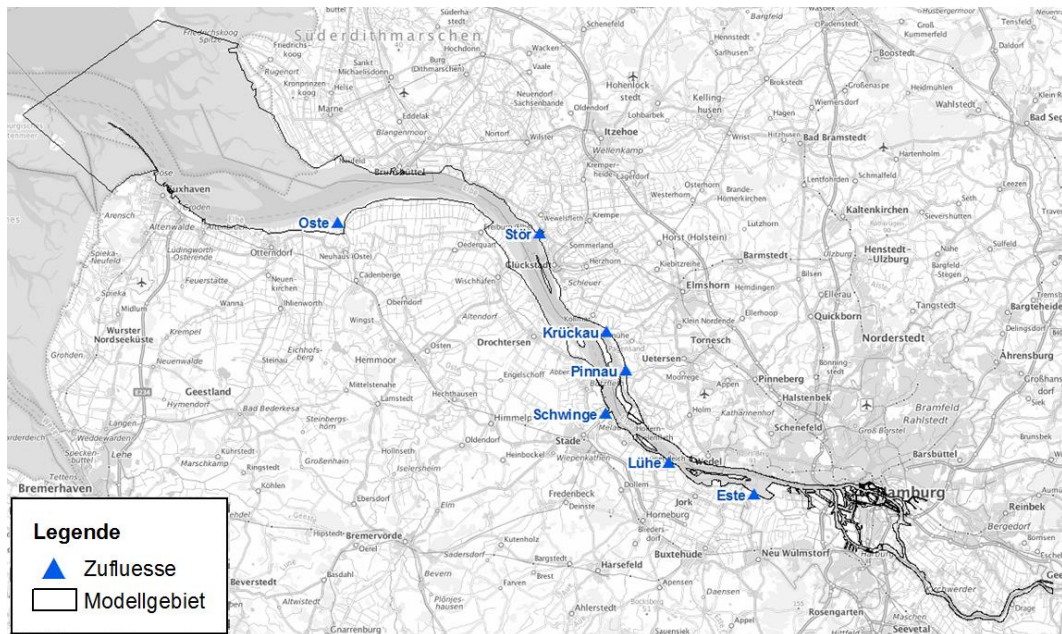


Abbildung 5.4: Nebengewässer der Elbe, die im Modell erfasst sind.

5.2 Rauheiten und Turbulenz

Die Sohlrauheit und Turbulenz sind empirische Modellparameter und dienen zur Kalibrierung der Modellgüte (Kap. 6). Hierzu wurden die Parameter in physikalisch sinnvollen Bereichen variiert, um die Modellgenauigkeit zu verbessern und eine möglichst optimale Überstimmung zwischen Messungen und Simulation zu erreichen.

Die Sohlrauheit k_s wurde nach dem Fließgesetz nach Nikuradse abgebildet. Die hydrodynamischen Verhältnisse im Modell reagierten in geringem Maße (z.B. Änderung der Wasserstände im Zentimeterbereich) sensitiv auf Änderungen der Rauheit der Sohle sowie Änderungen der Turbulenzparameter. Ausgehend von bereits in Vorgängerprojekten kalibrierten Rauheiten der Tideelbe, wurde insbesondere der Bereich der unteren Elbe bis zur Elbemündung für die jeweiligen Modellzeiträume nachkalibriert. In Abbildung 5.5 sind die final kalibrierten Rauheiten gezeigt.

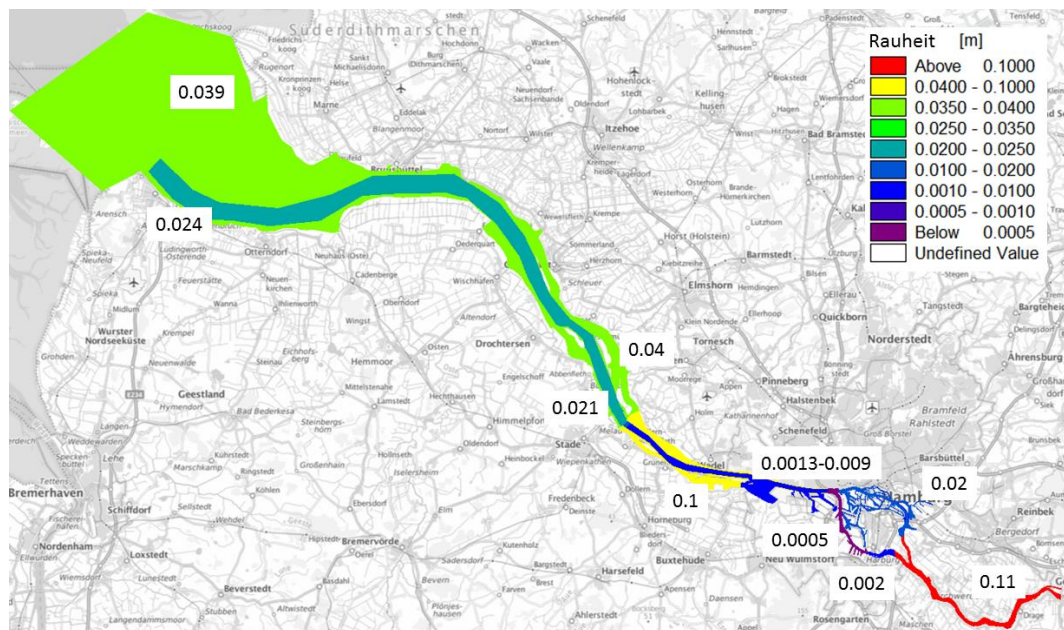


Abbildung 5.5: verwendete Sohrrauheit im Modellgebiet

In der vorliegenden hydrodynamischen Untersuchung wurde ein gemischtes $k-\epsilon$ Turbulenzmodell in der Vertikalen und ein Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen genutzt. Für die Turbulenzparameter sind die Einstellungen der Koeffizienten in der Horizontalen und in der Vertikalen zu differenzieren. In der Ebene wurde ein Mischweglängenansatz nach Smagorinsky (1963) genutzt, der unter anderem die Gradienten der Fließgeschwindigkeiten in der Ebene, die Elementgröße und einen konstanten Faktor (Smagorinsky-Faktor) verknüpft. Dieser Faktor liegt laut Literatur zwischen ca. 0,07 (Piomelli et al., 1987) und 0,28 (voreingestellter Wert in der Software MIKE). In der vorliegenden Untersuchung wurde ein im Modellgebiet variabler Smagorinsky-Beiwert angesetzt. Die Verteilung der Smagorinsky Faktoren im Modellgebiet ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

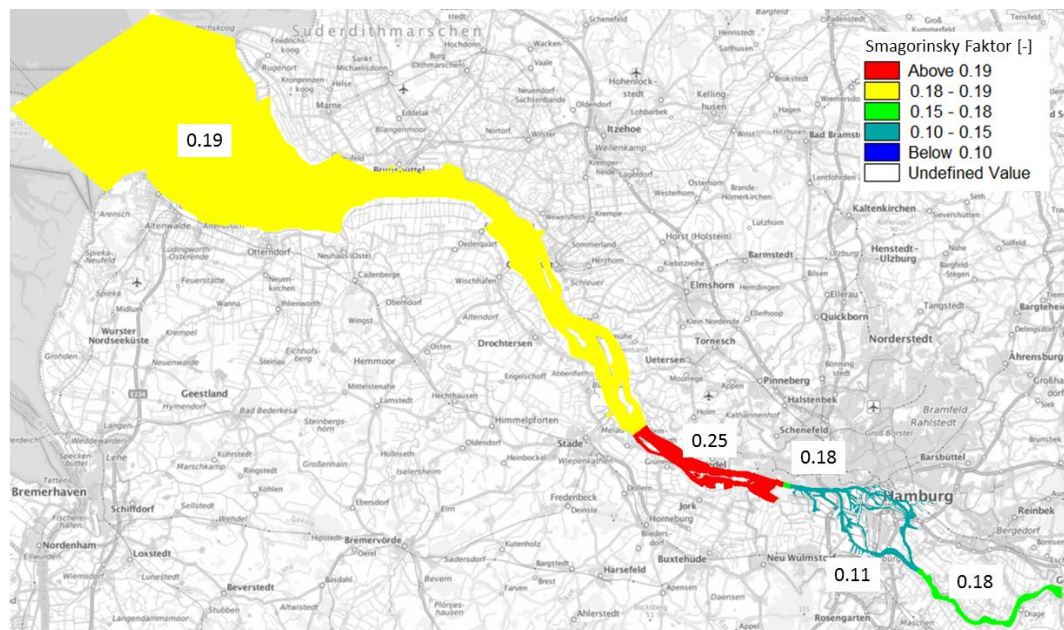


Abbildung 5.6: Verteilung der Turbulenzen über die Smagorinsky-Faktoren im Modellgebiet

5.3 Salzgehalte

Um den Jahrgang sowie die Schwankungen über die Tide zu berücksichtigen, wurden simulierte Zeitreihen des BSH aus dem großräumigen BSH-HBM-Modell vom Standort Steinriff verwendet. Am oberen Modellrand in Geesthacht war der Salzgehalt auf Grund des Oberwasserabflusses gering und auf einem konstanten Niveau von 0,5 PSU.

Für die Salzgehalte am Modellrand der Schwinde und der Pinnau wurden jeweils die Gleichgewichtsrandbedingungen angesetzt. Das heißt, der Salzgehalt, der am offenen Modellrand ansteht, wurde aus- bzw. eingetragen. Es stellt sich an den offenen Rändern der Schwinde und der Pinnau, so die vereinfachte Annahme, kein Gradient im Salzgehalt ein. Abbildung 5.7 zeigt die am unteren Modellrand Steinriff integrierten Zeitreihen der Salzgehalte für beide Modellzeiträume.

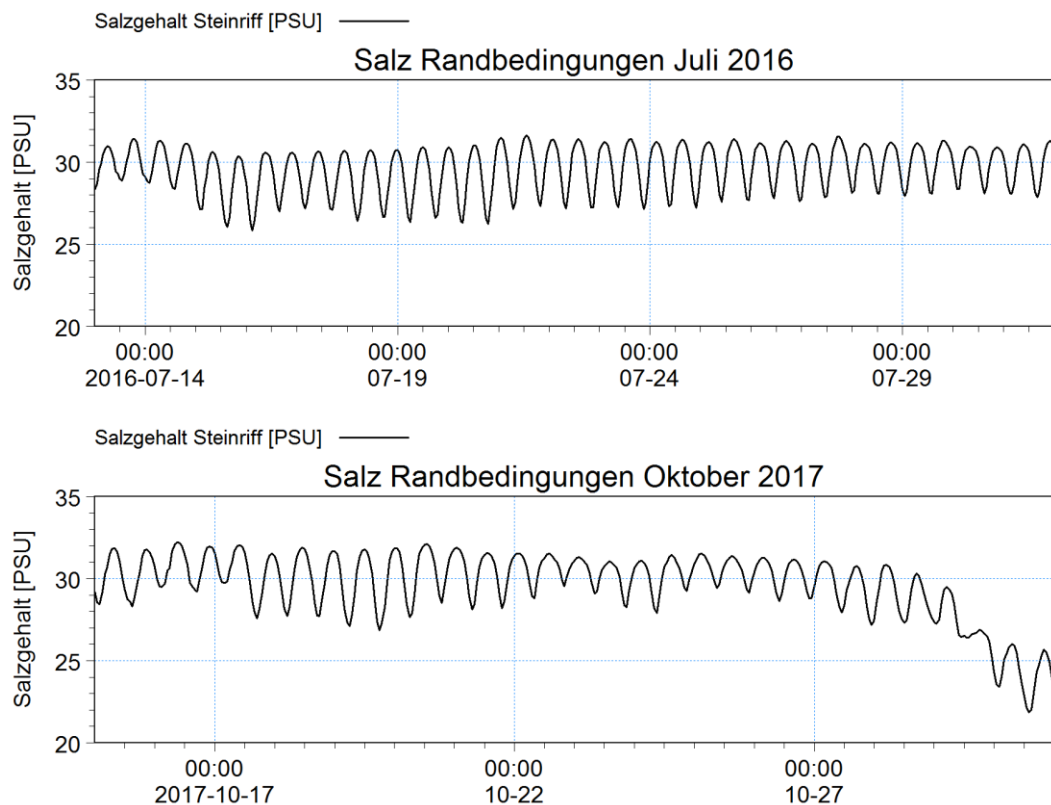


Abbildung 5.7: Zeitreihen der Salzgehalte als Randbedingung am unteren Modellrand Steinriff für den Modellzeitraum Juli 2016 (oben) und Oktober 2017 (unten), Quelle: BSH

5.4 Wassertemperaturen

Um den Jahresgang sowie die Schwankungen über die Tide zu berücksichtigen, wurden simulierte Temperaturzeitreihen vom BSH aus dem großräumigen BSH-HBM-Modell an den jeweiligen Standorten verwendet. Die eingesteuerten Gewässertemperaturen an den Modellrändern Steinriff und Geesthacht sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

Für die Station Geesthacht lagen für das Jahr 2017 keine Messdaten für die Wassertemperatur vor, daher wurden Messungen der nächstgelegenen Station Bunthaus verwendet. Auch für die Wassertemperaturen am Modellrand der Schwinde und der Pinnau wurden jeweils die Gleichgewichtsrandbedingungen angesetzt. Das bedeutet, dass die Temperatur, die im Wasser am jeweiligen Modellrand vorherrscht, aus- und eingetragen wurde.

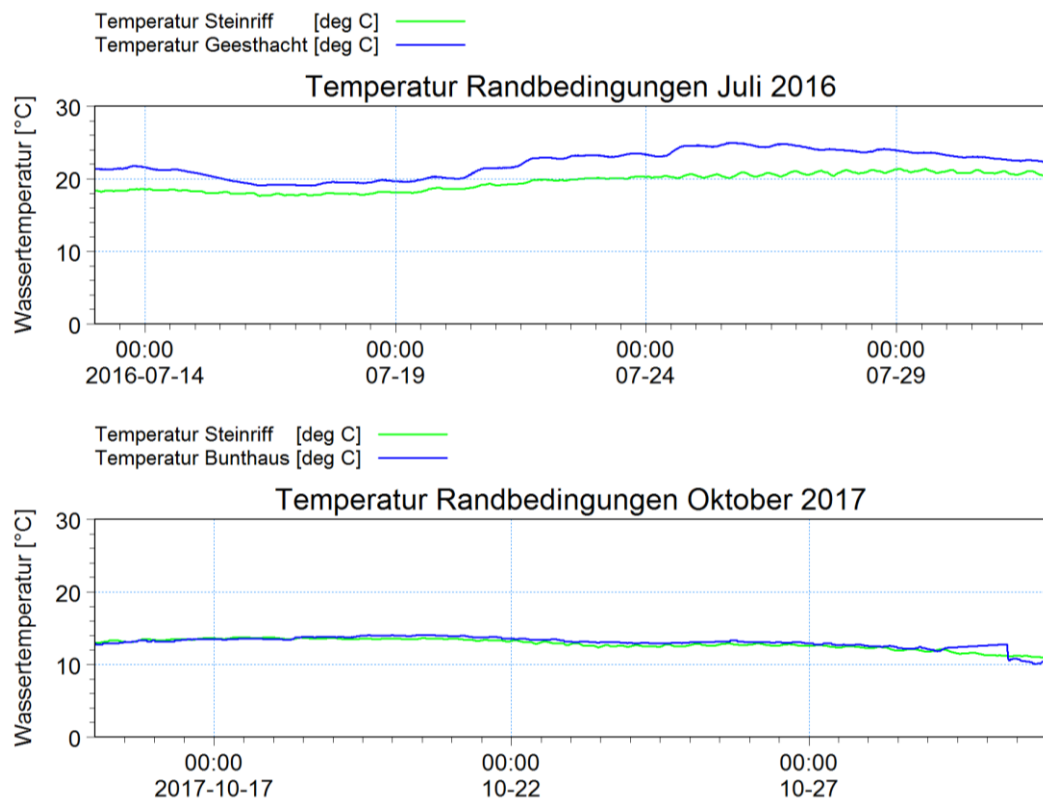


Abbildung 5.8: Zeitreihen der Wassertemperatur als Randbedingung am unteren Modellrand Steinriff (grüne Linie) und am oberen Modellrand Geesthacht (blaue Linie) für den Modellzeitraum Juli 2016 (oben) und Oktober 2017 (unten)

Die Temperaturverteilung in der Tideelbe wird von einer Vielzahl von Wärmeeinleitungen geprägt. Im numerischen Modell der Elbe sind siebzehn Entnahmen und Rückgaben mit der jeweiligen Einleitmenge und Aufwärmspanne berücksichtigt.

5.5 Wind und meteorologische Randwerte

Für beide Modellzeiträume wurde ein flächiges, aber räumlich konstantes Windfeld bei Cuxhaven berücksichtigt. In Abbildung 5.9 sind die verwendeten Windparameter für den Modellzeitraum Juli 2016 bzw. Oktober 2017 dargestellt.

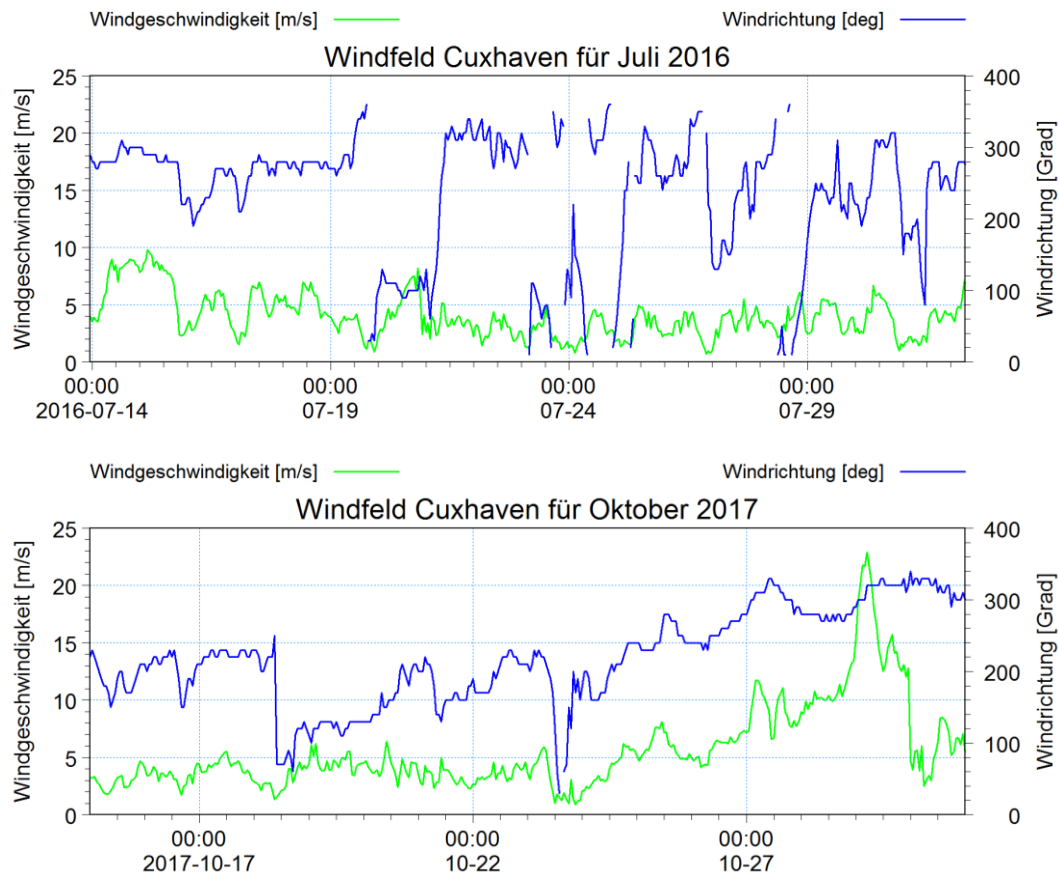


Abbildung 5.9: Zeitreihe der Windgeschwindigkeit (grüne Linie) und -richtung (blaue Linie) als Randbedingung für den Modellzeitraum im Juli 2016 (oben) und im Oktober 2017 (unten)

Für die Erfassung des Wärmetransportes in der Elbe mit der zugehörigen Wassertemperatur wurde der Wärmemaustausch mit der Atmosphäre miterfasst. Dieser berücksichtigt folgende Parameter mit deren Ansätzen in Tabelle 5.3.

- latenten und sensiblen Wärmestrom [J/kg]
- Kurz- und Langwellige Sonnenstrahlung [W/m²]
- Lufttemperatur [°C]
- Relative Feuchte [%]
- Bedeckungsgrad [%]

Tabelle 5.3: Meteorologische Parameter für den Wärmeaustausch im hydrodynamischen Modell der Elbe

Parameter	Wert
Latenter Wärmestrom	Konstante (Daltonsches Gesetz) = 0,5 Windkoeffizient (Daltonsches Gesetz) = 0,9 Kritische Windgeschwindigkeit = 2 m/s
Sensibler Wärmestrom	Transferkoeffizient Erwärmung = 0,0011 Transferkoeffizient Abkühlung = 0,0011 Kritische Windgeschwindigkeit = 2 m/s
Kurzwellige Sonnenstrahlung	Konstante a (Ångstrøm Gesetz) = 0,295 Konstante b (Ångstrøm Gesetz) = 0,371 Standardmeridian für Zeitzone = 8 Beta in Beer's Gesetz = 0,3 Extinktionskoeffizient = 1
Langwellige Sonnenstrahlung	Über empirische Formel

Die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Bedeckungsgrad gehen über Zeitreihen der Station Fuhlsbüttel ein. Für den Modellzeitraum Juli 2016 können Zeitreihen der Luftfeuchte bzw. -temperatur der Station Cuxhaven verwendet werden (Abbildung 5.10).

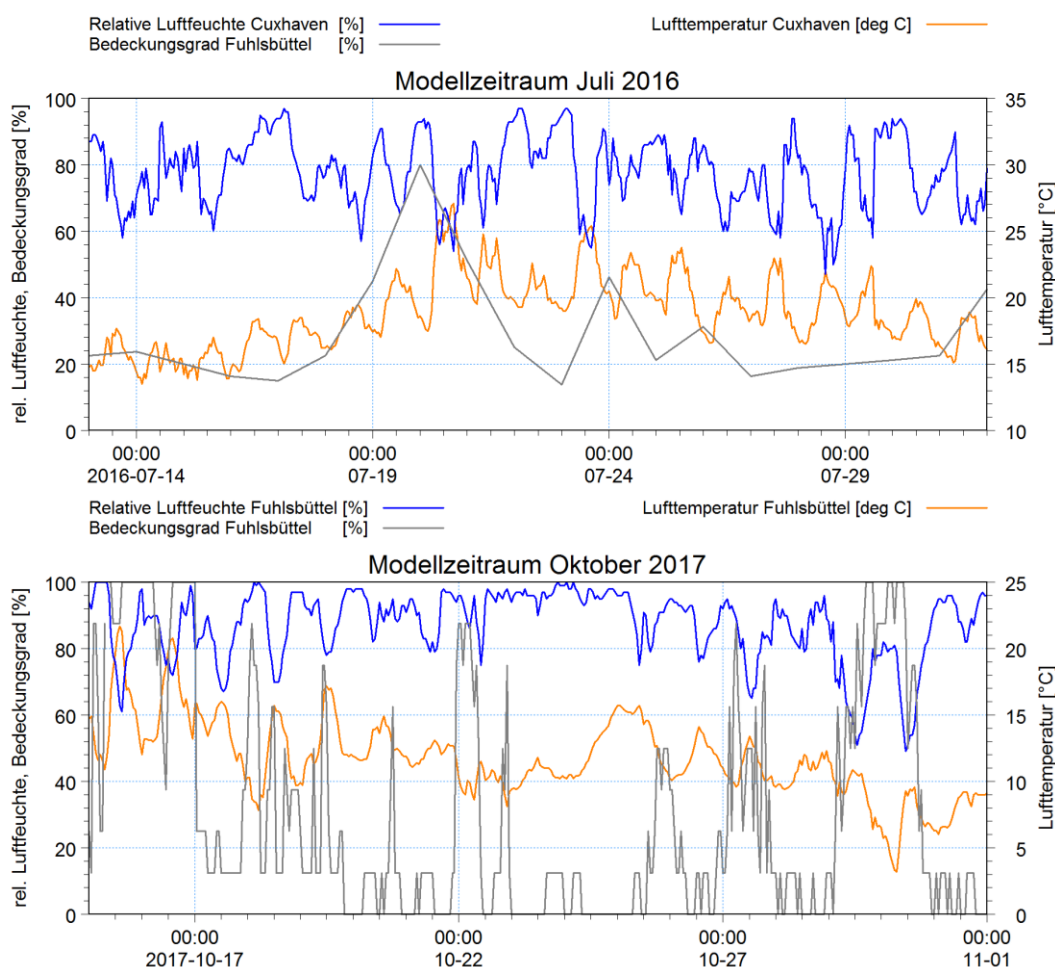


Abbildung 5.10 Zeitreihe der relativen Luftfeuchte (blaue Linie), des Bedeckungsgrades (graue Linie) und der Lufttemperatur (orange)

Linie) für den Modellzeitraum im Juli 2016 (oben) und im Oktober 2017 (unten)

5.6 Sedimentologische Daten und Randbedingungen

Für den Schwebstofftransport sind Anfangsbedingungen für die Schwebstoffverteilung im Modell, die Randbedingungen an den offenen Modellrändern und an der Gewässersohle zu definieren.

Da für die Schwebstoffzufuhr am seeseitigen Modellrand keine gemessenen Schwebstoffkonzentrationen (SSC) vorliegen, wurde die nachstehende Annahme angesetzt. Für die Schwebstoffzufuhr über den Modellrand bei Steinriff wird die Annahme eines konstanten Schwebstoffeintrags von $0,07 \text{ kg/m}^3$ (nur Schluff) herangezogen. Dieser Werte wurde aus den Unterlagen der BAW im Zuge der Fahrrinnenanpassungen aus BAW (2006) am seeseitigen Rand ausgelesen.

Für die Schwebstoffzufuhr über den Oberwasserrand bei Geesthacht werden die gemessenen Tagesmittelwerte der BfG zur Schwebstoffkonzentration bei Hitzacker mit einem zeitlichen Versatz von 1,5 Tagen berücksichtigt. Dieser Versatz ist konsistent mit dem Versatz von einem Tag für den gemessenen Abfluss bei Neu Darchau und dessen Übertrag auf Geesthacht. Die gemessenen Tagesmittelwerte werden analog zum Unterwasserrand als reiner Schluffeintrag berücksichtigt. Abbildung 5.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Schwebstoffkonzentrationen, wie sie am oberen und unteren Modellrand berücksichtigt wurden.

Für die Sandfraktion werden jeweils die Gleichgewichtsrandbedingungen angesetzt. Das heißt, der Sandanteil, der am jeweiligen Modellrand abtransportiert wird, wird auch als Zustrom in das Modell angesetzt. Dies verhindert gleichzeitig eine Erosion oder Sedimentation am Rand und ist eine hinreichende Annahme bei unbekanntem Randwerten, wie hier für den sohnahen Sandtransport.

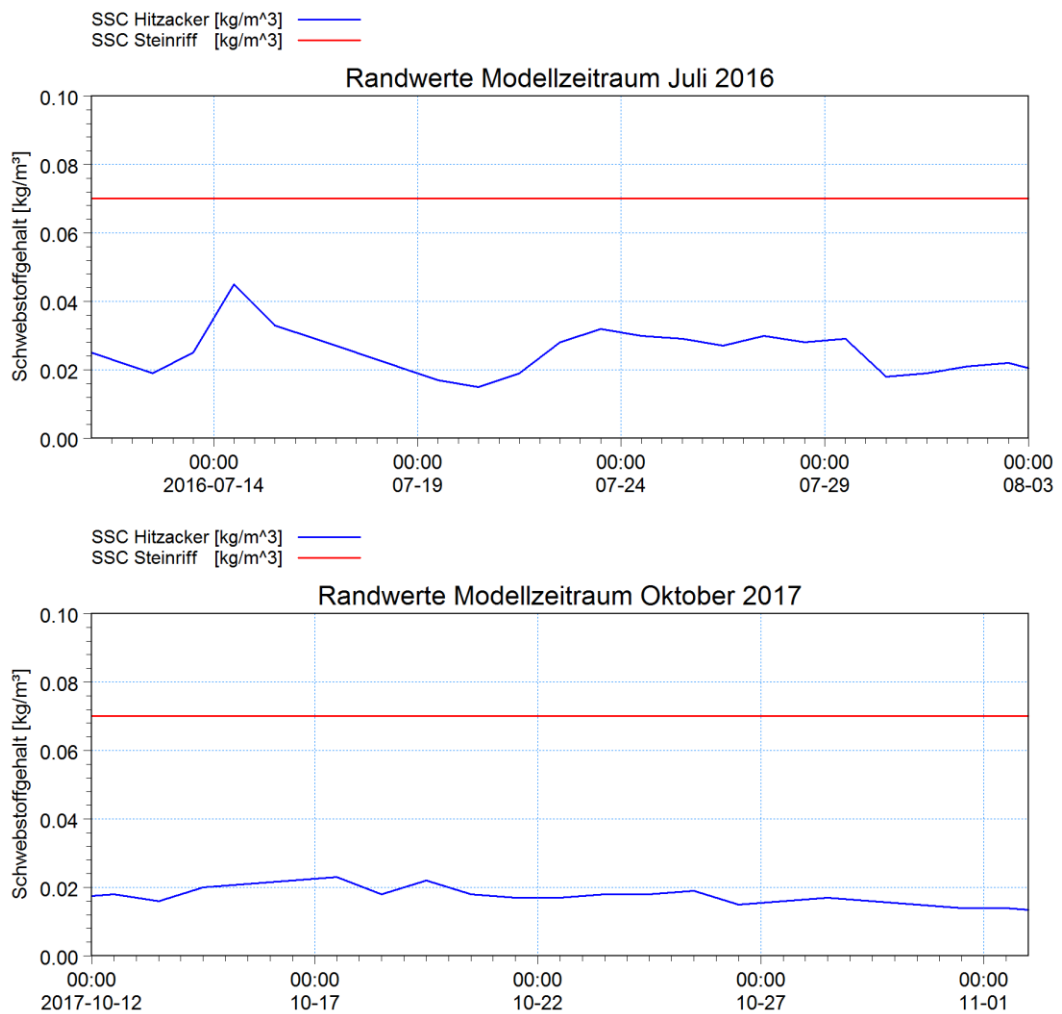


Abbildung 5.11: Zeitreihen der Schwebstoffkonzentrationen für den oberen Modellrand Geesthacht (blaue Linie) und den unteren Modellrand Steinriff (rote Linie) für den Modellzeitraum im Juli 2016 (oben) und im Oktober 2017 (unten)

Die Sedimentbelegung im Elbmodell wurde auf Basis bisheriger Untersuchungen und neuer Messdaten zur Schwebstoffkonzentration in der Elbe und zur Sohländerung leicht modifiziert und nachkalibriert. Für die Ermittlung der Fraktionen wurden dabei die Fraktionsgruppen Mittel- und Feinsand unter Sand und Grobschluff bis Feinschluff unter Schluff zusammengefasst. Die Sedimentparameter wurden für das Modell gemäß Tabelle 5.4 definiert.

Tabelle 5.4 Sedimentologische Parameter für das morphologische Modell der Elbe

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Fraktionen	2 (Fraktion1 = Sand, Fraktion2 = Schluff)	Fraktionsverteilung	Layer 1: 30% Sand, 70% Schluff Layer 2: 70% Sand, 30% Schluff
Layer	2	Sinkgeschwindigkeit Sand	0,001 m/s

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Sedimentdichte als trockene Dichte	Layer 1 und 2: 300 bis 1510 kg/m ³	Sinkgeschwindigkeit Schluff Grenzwerte Referenzsinkgeschwindigkeit (Beiwert) nach Winterwerp $w_{s,r}$	Konstant bis 10 mg/l und Flokkulation ab 10 mg/l berücksichtigt Hindered Settling wird ab 10 kg/m ³ berücksichtigt $w_{s,r} = 20$ m/s
Erosionsschubspannung	Sand: 0,28 N/m ² Schluff: 0,1 N/m ²	Rauheit (Nikuradse)	Untere Elbe bis Hafen Hamburg: 0,005 m Hafen Hamburg: 0,002 m Hafen Hamburg bis Geesthacht: 0,011 m
Erodibilität	Layer 1: 0,000005 bis 0,0004 kg/m ² /s Layer 2: 0,000006 bis 0,00001 kg/m ² /s	Erosionsansatz	Nach Partheniades (1965) für festen Schluff, Exponent der Erosion = 1,1
Layerdicke	Layer 1: 0,2 bis 5 m Layer 2: 0,05 bis 5 m	Anfangsbedingung Schwebstoffgehalt	Sand: 0 kg/m ³ Schluff: 0,04 kg/m ³

Für die Bestimmung der Sedimentparameter (Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13) wurde Verfahren auf Basis bestehender Korngrößenverteilungen aus dem Sedimentkataster (WSV, 2006) in der Elbe gewählt. Eine weitere Kalibrierung der Sedimentparameter war nicht notwendig.

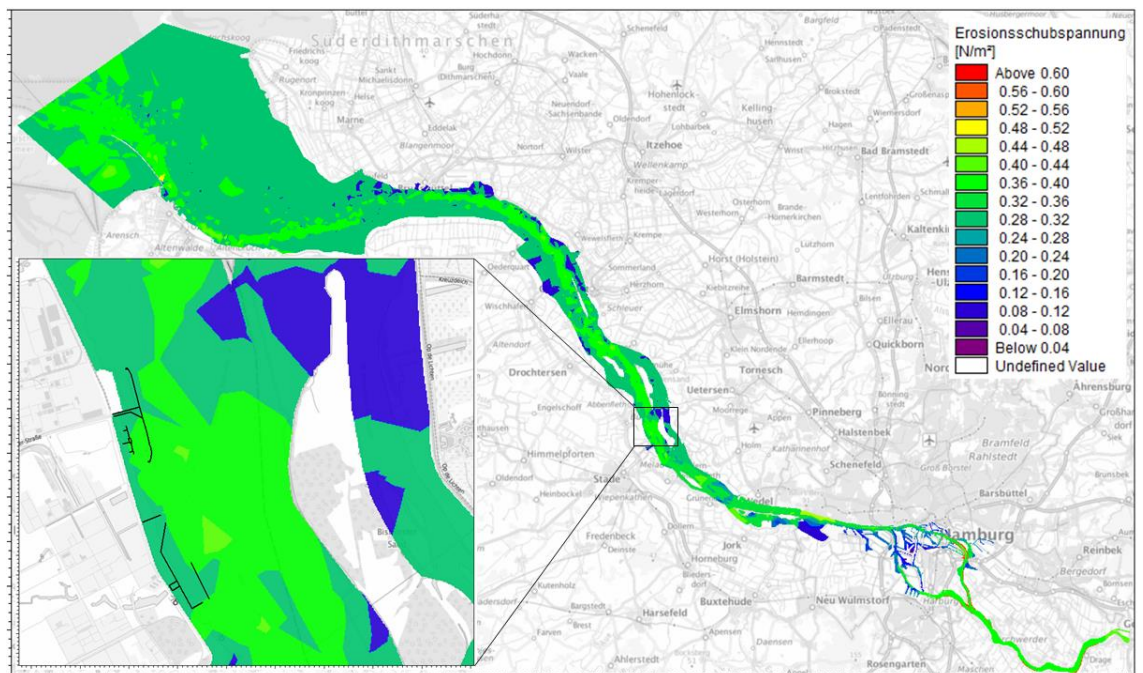


Abbildung 5.12: Verteilung der kritischen Sohlschubspannung im 3D-Modell

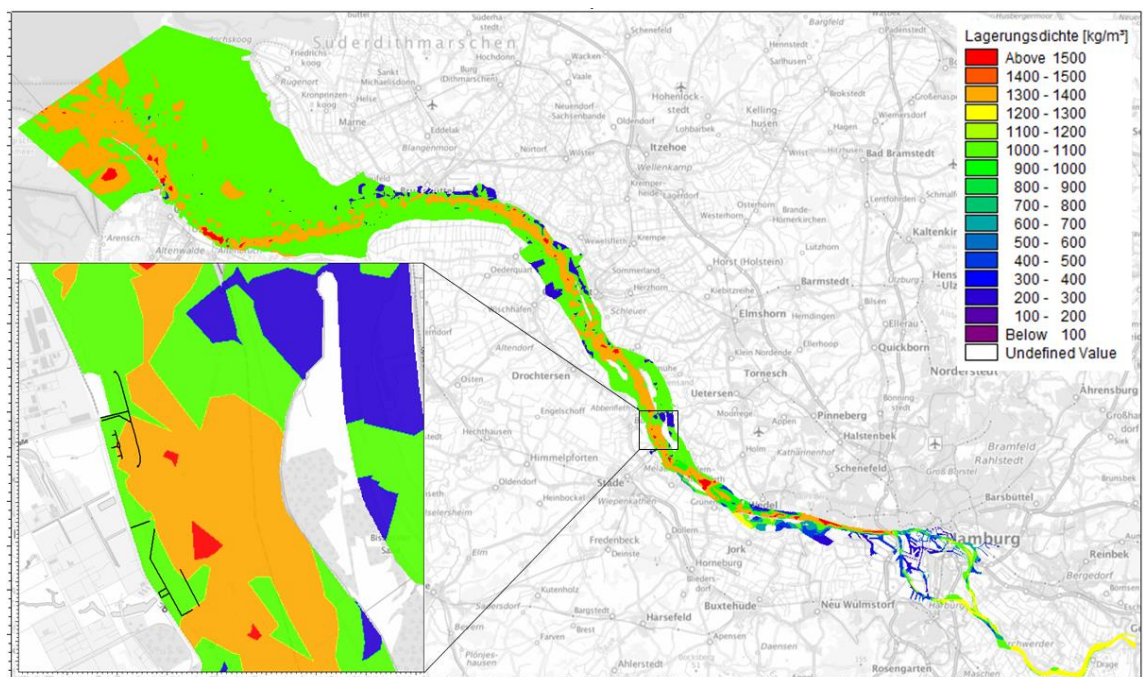


Abbildung 5.13: Verteilung der Sedimentdichte (trockene Sedimentdichte) im 3D-Modell

6 Nachweis der Modellgüte

Die Modellgenauigkeit wurde für einen Kalibrierungszeitraum im Juli 2016 und für einen Validierungszeitraum im Oktober 2017 ausgewertet. Im Rahmen der Kalibrierung wurden jeweils gemessene Wasserstände, Strömungen, Abflüsse, Temperaturen, Salz- und Schwebstoffgehalte in der Elbe den simulierten Größen gegenübergestellt, die Ergebnisse wurden diskutiert und ggf. auftretende Abweichungen interpretiert.

Neben den Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten wurden zusätzlich die Amplituden- und Phasenabweichungen diskutiert. Fällt die Phasenverschiebung negativ aus, so kentert die Simulation früher als die Messung. Fällt die Phasenverschiebung positiv aus, so kentert die Simulation später als die Messung.

Die Analyse der Kalibrierungsgüte wurde durch eine statistische Auswertung der Differenz zwischen der Messung und der Simulation gestützt, in der die Parameter mittlere Abweichung, mittlere absolute und mittlere quadratische Abweichung, die Standardabweichung der Differenzen und der Korrelationskoeffizient ausgewertet wurden. Diese Parameter werden über folgende Gleichungen beschrieben:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i) = \overline{OBS} - \overline{SIM} \quad \text{Gl.1}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |OBS_i - SIM_i| \quad \text{Gl.2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2} \quad \text{Gl.3}$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(OBS_i - SIM_i - (\overline{OBS} - \overline{SIM}) \right)^2} \quad \text{Gl.4}$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})(SIM_i - \overline{SIM}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2 \sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2} \quad \text{Gl.5}$$

wobei ME die mittlere Abweichung, MAE die mittlere absolute Abweichung, RMSE die mittlere quadratische Abweichung, STD die Standardabweichung der Differenzen und R der Korrelationskoeffizient ist. OBS steht für die gemessenen Werte und SIM für die simulierten Werte. N ist die Anzahl der Werte der Zeitreihe.

Idealerweise, bei optimaler Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten, liegen die Kennwerte der Abweichungen (ME, MAE, RMSE und STD) bei Null und der Korrelationskoeffizient bei 1. Fällt die Abweichung ME negativ aus, so überschätzt die Simulation den Messwert, fällt die Abweichung ME positiv aus, so unterschätzt die Simulation den Messwert.

6.1 Wasserstände

Für die Kalibrierung der Wasserstände wurden Messwerte der Pegel Cuxhaven Steubenhöft, Glücksstadt, Stadersand, Blankenese, St. Pauli, Schöpfstelle, Bunthaus und Zollenspieker verwendet. Abbildung 6.1 zeigt die Lage der genutzten Pegel im Modellgebiet.



Abbildung 6.1: Für die Kalibrierung verwendete Wasserstandspegel im Elbe-Modellgebiet

Der Verlauf der Tidekurve im Kalibrierzeitraum wurde sehr gut im numerischen Modell wiedergegeben und weichte nur leicht in der Phase mit weniger als 18 Minuten ab. Die mittleren absoluten Abweichungen lagen für alle Wasserstände unter 11 cm. Sehr gute Ergebnisse erzielte die Kalibrierung der Pegel Stadersand und Schöpfstelle nahe dem Anleger mit mittleren absoluten Abweichungen unter 8 cm. Dies entspricht prozentualen Abweichungen zwischen 2,3 und 2,7 %. In Tabelle 6.1 sind alle statistischen Analyseparameter für die untersuchten Pegel aufgelistet.

Tabelle 6.1: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wasserstandsganglinien im Juli 2016 an den untersuchten Pegeln Cuxhaven Steubenhöft, Glückstadt, Stadersand, Blankenese, St. Pauli, Schöpfstelle, Bunthaus und Zollenspieker

Pegel	Cuxhaven Steubenhöft	Glückstadt	Stadersand	Blankenese
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16
Phasenverschiebung WSP _{gemessen} - WSP _{simuliert} [hh:mm]	- 00:06 Flutphase -00:09 Ebbphase	- 00:16 Flutphase -00:17 Ebbphase	- 00:10 Flutphase -00:11 Ebbphase	- 00:04 Flutphase -00:16 Ebbphase
Amplitudenabweichung WSP _{gemessen} - WSP _{simuliert} [m]	0.17 Flutphase bis -0.17 Ebbphase	0.26 Flutphase bis -0.17 Ebbphase	0.2 Flutphase bis -0.17 Ebbphase	0.2 Flutphase bis -0.2 Ebbphase
mittl. Abweichung [m]	0.00	-0.02	-0.03	-0.04
mittl. abs. Abweichung [m]	0.09	0.11	0.08	0.09
mittl. quadrat. Abweichung [m]	0.10	0.12	0.09	0.10
Standardabweichung [m]	0.10	0.12	0.09	0.09
Korrelationskoeffizient [-]	1.00	0.98	0.99	0.99

Pegel	St. Pauli	Schoepfstelle	Bunthaus	Zollenspieker
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16
Phasenverschiebung WSP _{gemessen} - WSP _{simuliert} [hh:mm]	- 00:05 Flutphase -00:18 Ebbphase	-00:08 Flutphase -00:08 Ebbphase	-00:05 Flutphase 00:06 Ebbphase	-00:07 Flutphase 00:15 Ebbphase
Amplitudenabweichung WSP _{gemessen} - WSP _{simuliert} [m]	0.17 Flutphase bis -0.28 Ebbphase	0.25 Flutphase bis -0.2 Ebbphase	0.2 Flutphase bis -0.16 Ebbphase	0.3 Flutphase bis -0.2 Ebbphase
mittl. Abweichung [m]	-0.07	-0.02	0.00	0.01
mittl. abs. Abweichung [m]	0.10	0.08	0.09	0.10
mittl. quadrat. Abweichung [m]	0.12	0.10	0.10	0.11
Standardabweichung [m]	0.10	0.10	0.10	0.11
Korrelationskoeffizient [-]	0.99	1.00	1.00	1.00

Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 zeigen die gemessenen und simulierten Wasserstände im Verlauf eines ausgewählten Ausschnittes mit zwei Tiden im Kalibrierzeitraum Juli 2016.

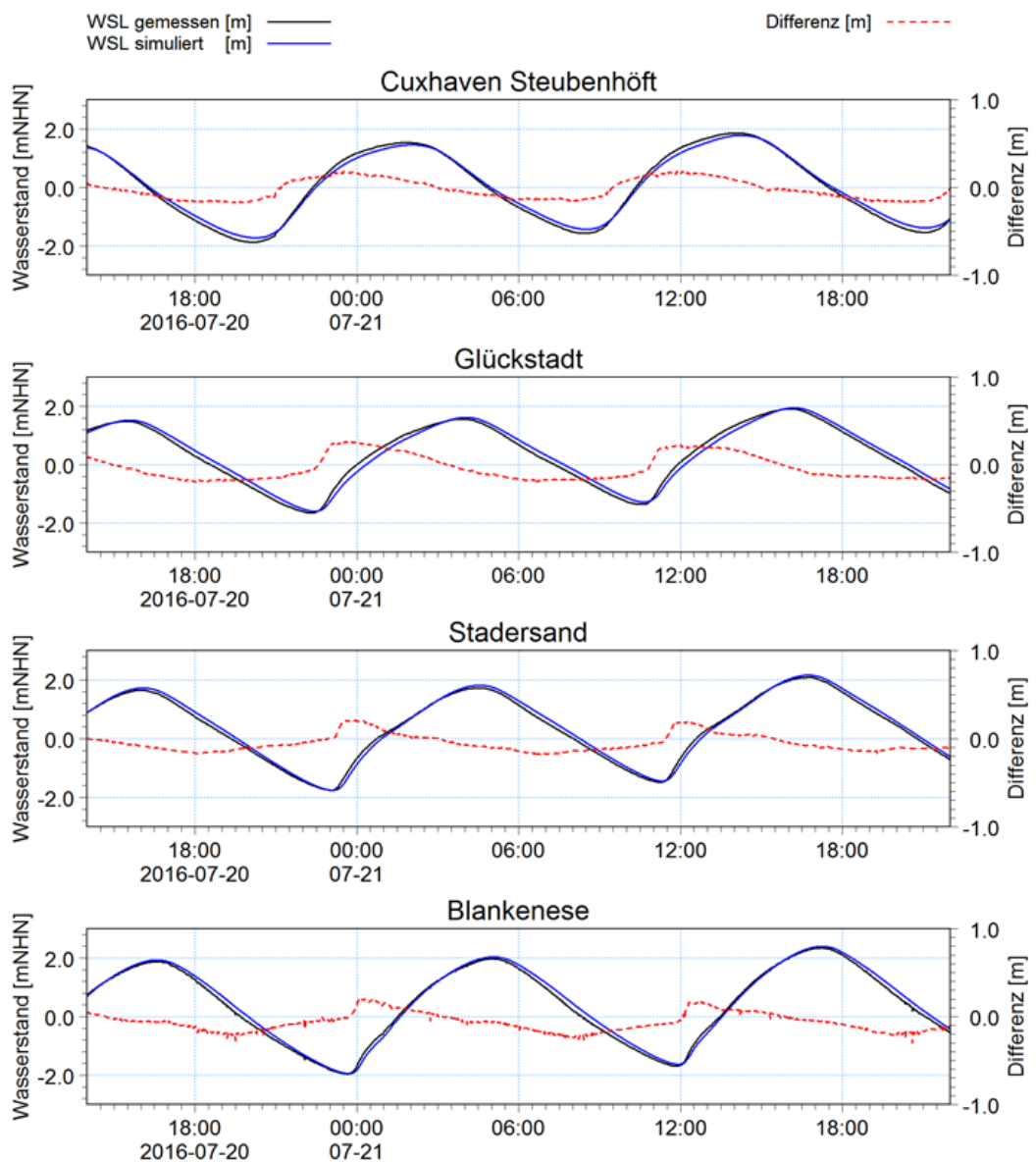


Abbildung 6.2: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wasserstände (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) im Juli 2016 für die Pegel Cuxhaven Steubenhöft, Glückstadt, Stadersand und Blankenese

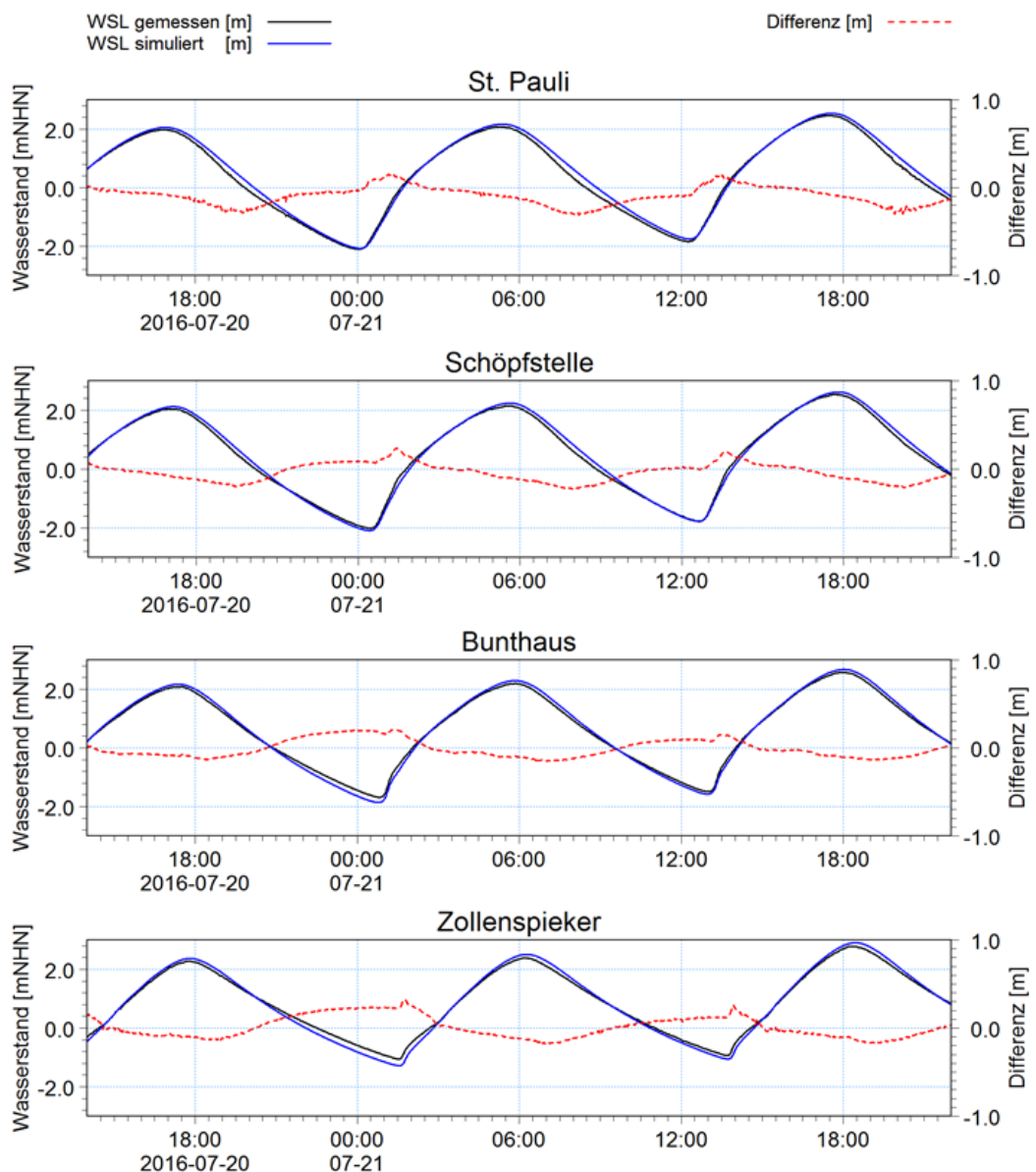


Abbildung 6.3: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wasserstände (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) im Juli 2016 für die Pegel St. Pauli, Schöpfstelle, Bunthaus und Zollenspieker

Auch der Verlauf der Sturmflutidekurve im Validierungszeitraum vom Oktober 2017 wurde sehr gut im numerischen Modell wiedergegeben und weichte nur leicht in der Phase mit weniger als 17 Minuten ab. Die mittleren absoluten Abweichungen lagen für die untersuchten Wasserstände unter 16 cm, was einer prozentualen Abweichung von weniger 3,4 % entspricht (Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wasserstandsganglinien im Oktober 2017 an den untersuchten Pegeln Cuxhaven Steubenhöft, Stadersand, Blankenese und Zollenspieker

Pegel	Cuxhaven Steubenhöft	Stadersand	Blankenese	Zollenspieker
Vergleichszeitraum	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17
Phasenverschiebung WSP _{gemessen} - WSP _{simuliert} [hh:mm]	00:00 Flutphase -00:10 Ebbphase	00:00 Flutphase -00:12 Ebbphase	00:00 Flutphase -00:17 Ebbphase	-00:13 Flutphase 00:00 Ebbphase
Amplitudenabweichung WSP _{gemessen} - WSP _{simuliert} [m]	0.1 Flutphase bis -0.2 Ebbphase	0.1 Flutphase bis -0.1 Ebbphase	0.1 Flutphase bis -0.2 Ebbphase	-0.3 Flutphase bis 0.1 Ebbphase
mittl. Abweichung [m]	-0.05	-0.04	-0.07	-0.06
mittl. abs. Abweichung [m]	0.09	0.11	0.15	0.16
mittl. quadrat. Abweichung [m]	0.12	0.16	0.20	0.22
Standardabweichung [m]	0.11	0.15	0.18	0.21
Korrelationskoeffizient [-]	0.99	0.99	0.99	0.99

Abbildung 6.4 zeigt die gemessenen und simulierten Wasserstände im Verlauf der Sturmfluttide und zwei folgenden Tiden im Validierzeitraum im Oktober 2017. Die Sturmfluthochwasserkurve wird im oberhalb Hamburgs vom Modell eher überschätzt, was für die Auswertung der Modellergebnisse eher positiv auf der konservativen Seite liegend bewertet werden kann.

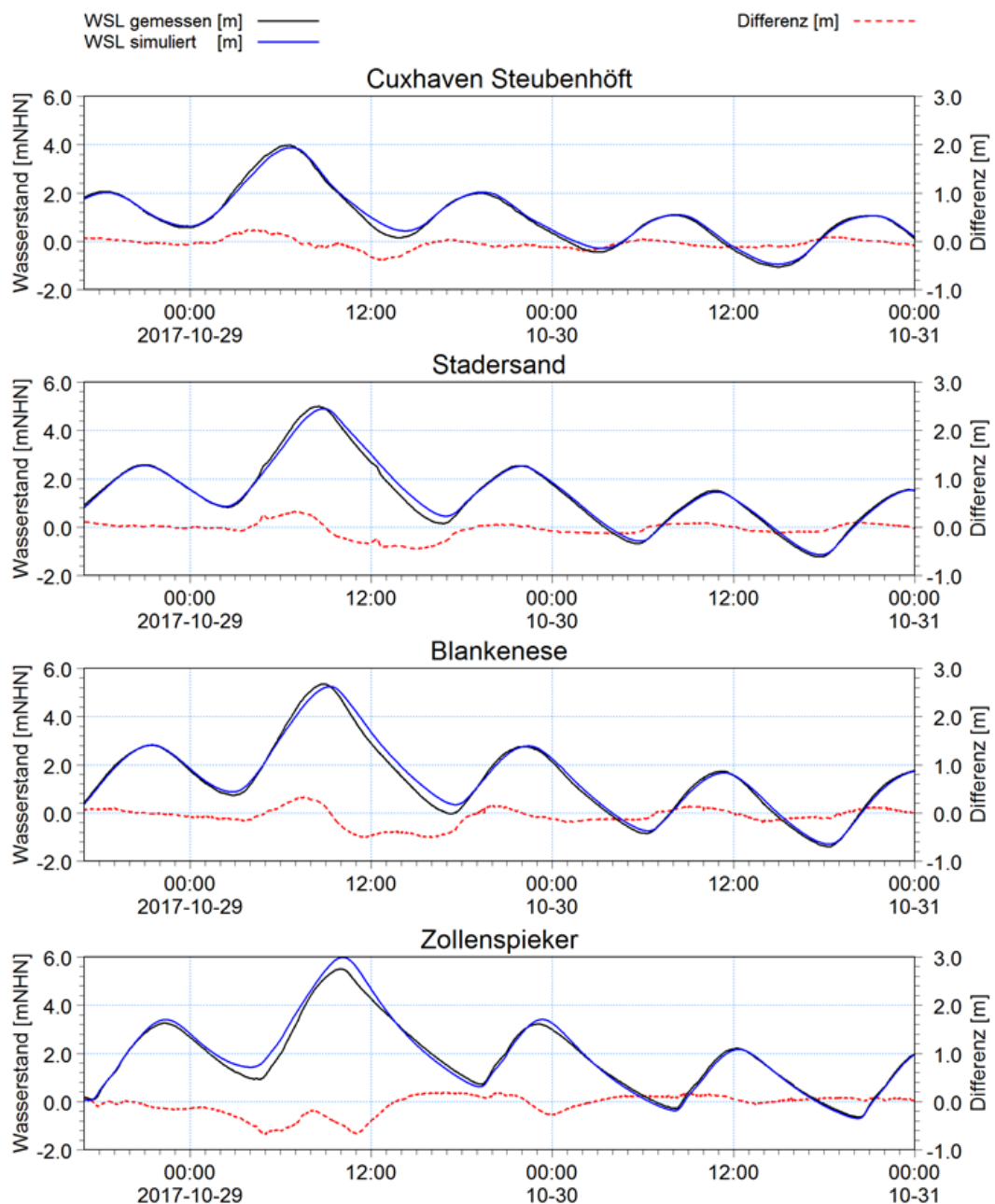


Abbildung 6.4: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wasserstände (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) im Oktober 2017 für die Cuxhaven Steubenhöft, Stadersand, Blankenese und Zollenspieker

6.2 Strömungen und Abflüsse

Für die Kalibrierung und Validierung wurden gemessene Fließgeschwindigkeiten und -richtungen der Stationen Rhinplate-Nord, Pagensand, Juelsand und Hanskalbsand in zwei Tiefen verwendet. Die simulierten Abflüsse wurden im Kalibrierzeitraum im Juli 2016 mit gemessenen Werten der Stationen Teufelsbrück und Bunthaus Nord verglichen. Für den Validierzeitraum im Oktober 2017 lagen keine gemessenen Abflusszeitreihen vor. Abbildung 6.5

zeigt die Lage der genutzten Messstationen für Strömung (magentafarbene Symbole) und Abfluss (blaue Symbole) im Modellgebiet.

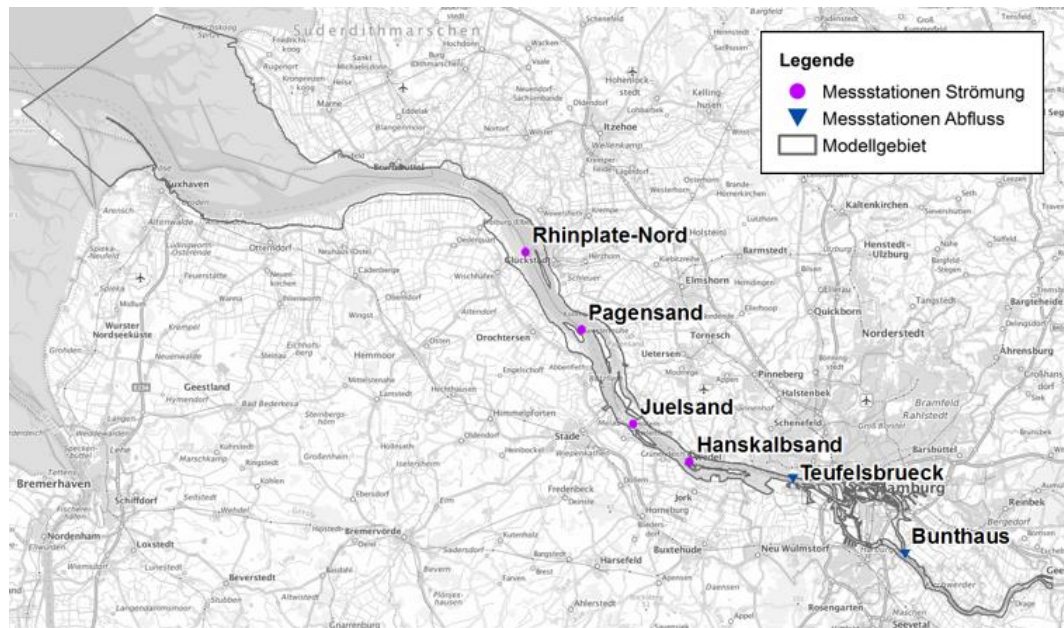


Abbildung 6.5: Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte der Fließgeschwindigkeit, -richtung (magentafarbene Symbole) und des Abflusses (blaue Symbole) im Elbe-Modellgebiet

Der Verlauf der minimalen und maximalen Strömungen im Kalibrierzeitraum wurde gut im numerischen Modell wiedergegeben (Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7) und wich in der Phase weniger als 30 Minuten ab. Die mittleren absoluten Abweichungen (siehe Tabelle 6.3) zeigten mit Werten unter 0,2 m/s sehr gute Ergebnisse, was einer prozentualen Abweichung von maximal 18 % entspricht.

Tabelle 6.3: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Rhinplate Nord, Pagensand, Juelsand und Hanskalbsand

Messpunkt	Rhinplate Nord Oberfläche	Rhinplate Nord Sohle	Pagensand Oberfläche	Pagensand Sohle
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16
Phasenverschiebung $CS_{\text{gemessen}} - CS_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	-00:10 Ebbe -00:15 Flut	-00:20	max. 00:05	00:00 Ebbe -00:30 Flut
Amplitudenabweichung $CS_{\text{gemessen}} - CS_{\text{simuliert}}$ [m/s]	0.1 Flutphase -0.3 Ebbphase	0.1 Flutphase -0.2 Ebbphase	0.2 Flutphase 0.2 Ebbphase	-0.1 Flutphase 0.05 Ebbphase
mittl. Abweichung [m/s]	-0.05	-0.08	0.18	0.02
mittl. abs. Abweichung [m/s]	0.18	0.15	0.18	0.10
mittl. quadrat. Abweichung [m/s]	0.21	0.18	0.21	0.12
Standardabweichung [m/s]	0.20	0.17	0.11	0.11
Korrelationskoeffizient [-]	0.73	0.66	0.92	0.71

Messpunkt	Juelsand Oberfläche	Juelsand Sohle	Hanskalbsand Oberfläche	Hanskalbsand Sohle
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16
Phasenverschiebung $CS_{\text{gemessen}} - CS_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	-00:05 Ebbe -00:10 Flut	-00:10 Ebbe 00:00 Flut	-00:25 Ebbe 00:05 Flut	-00:25 Ebbe 00:05 Flut
Amplitudenabweichung $CS_{\text{gemessen}} - CS_{\text{simuliert}}$ [m/s]	-0.25 Flutphase 0.00 Ebbphase	-0.3 Flutphase -0.1 Ebbphase	0.25 Flutphase -0.4 Ebbphase	0.10 Flutphase -0.20 Ebbphase
mittl. Abweichung [m/s]	-0.04	-0.17	-0.09	-0.08
mittl. abs. Abweichung [m/s]	0.10	0.18	0.27	0.18
mittl. quadrat. Abweichung [m/s]	0.13	0.19	0.32	0.21
Standardabweichung [m/s]	0.12	0.10	0.31	0.19
Korrelationskoeffizient [-]	0.88	0.88	0.36	0.51

Die gemessenen und simulierten Fließrichtungen sind in den Diagrammen (Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7) über Richtungspfeile (schwarz für gemessen, grau für simuliert) abgebildet. Damit ist ein qualitativer Vergleich der Richtungen möglich. In den Flut- und Ebbphasen wurden die Fließrichtungen sehr gut abgebildet. Der Zeitpunkt der Kenterung wurde in wenigen Fällen mit einem zeitlichen Versatz abgebildet.

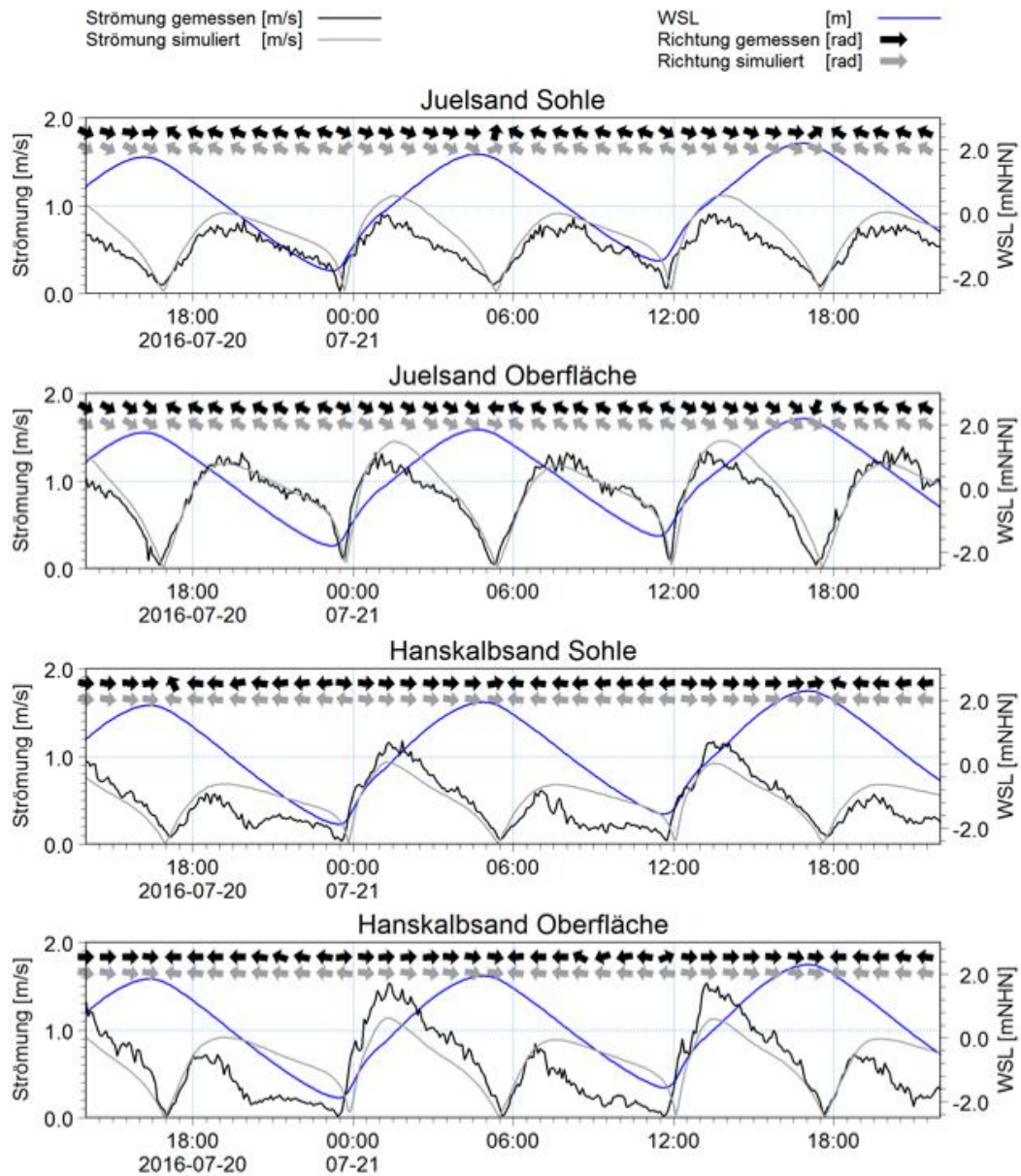


Abbildung 6.6: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Fließgeschwindigkeiten (graue Linie) und -richtungen (schwarze und graue Richtungspfeile) an der Oberfläche und der Sohle mit Wasserspiegellage (WSL, blaue Linie) im Juli 2016 für die Messpunkte Juelsand und Hanskalbsand

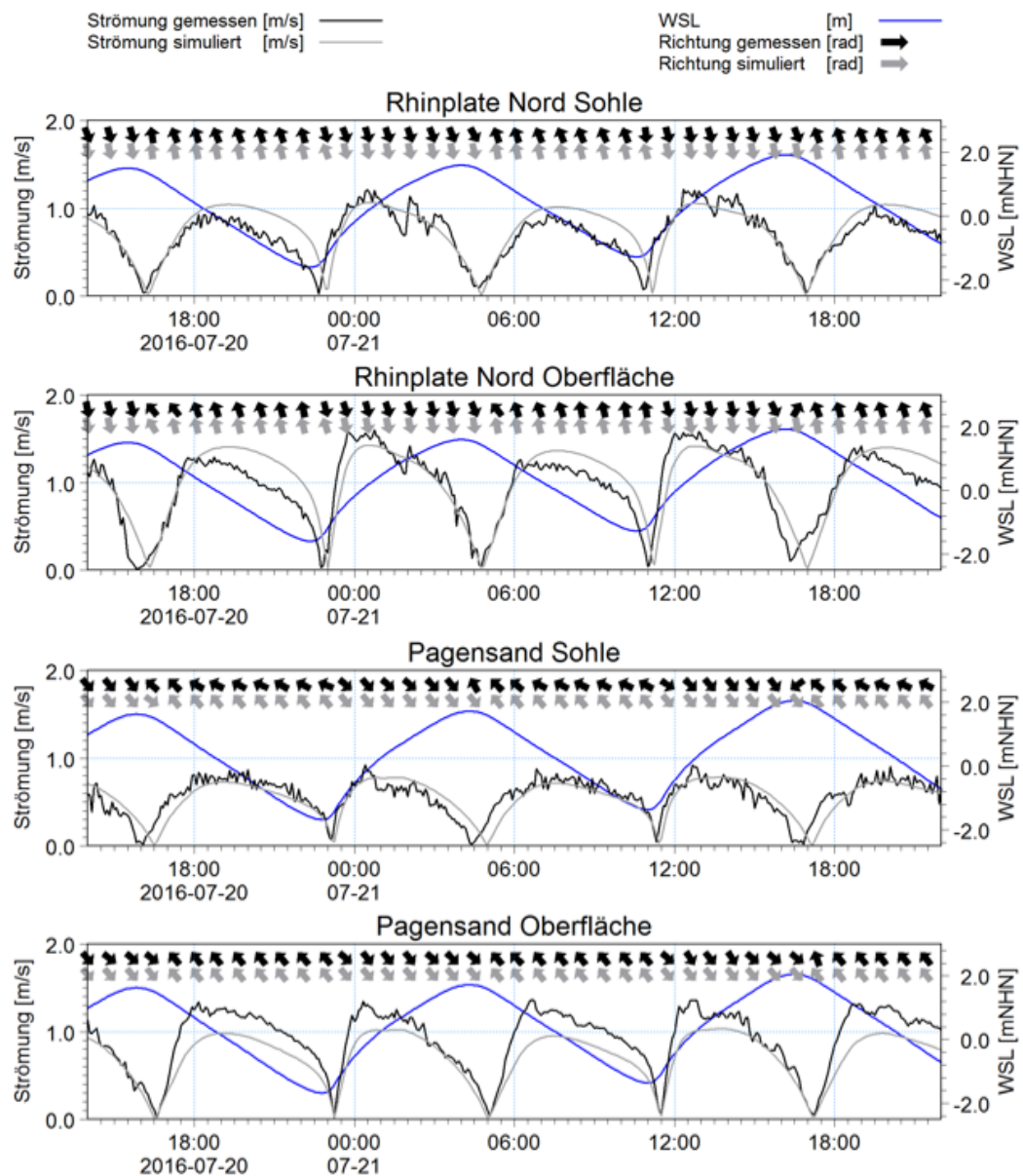


Abbildung 6.7: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Fließgeschwindigkeiten (graue Linie) und -richtungen (schwarze und graue Richtungspfeile) an der Oberfläche und der Sohle mit Wasserspiegellage (WSL, blaue Linie) im Juli 2016 für die Messpunkte Rhinplate Nord und Pagensand

Auch der Abfluss wurde vom Modell sehr gut abgebildet (Tabelle 6.4 und Abbildung 6.8). Die maximalen Abflüsse an den Hochwasserscheitelpunkten wurden eher überschätzt und zeigten im Verhältnis zu den maximalen Abflüssen (die an der Stromspaltung in Süder- und Norderelbe am Messpunkt Teufelsbrück um ca. das Zehnfache höher liegen als am Messpunkt Bunthaus Nord) ähnliche Abweichungen mit 11 bis 15 %. In der Phase betragen die Abweichungen weniger als 10 min.

Tabelle 6.4: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Bunthaus Nord und Teufelsbrück

Messpunkt	Bunthaus Nord	Teufelsbrück
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 22.07.16	14.07.16 bis 22.07.16
Phasenverschiebung $Q_{\text{gemessen}} - Q_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	00:03 Ebbe -00:01 Flut	00:01 Ebbe 00:06 Flut
Amplitudenabweichung $Q_{\text{gemessen}} - Q_{\text{simuliert}}$ [m ³ /s]	80 Ebbphase -150 Flutphase	500 Ebbphase -1500 Flutphase
mittl. Abweichung [m ³ /s]	3.71	-30.06
mittl. abs. Abweichung [m ³ /s]	54.75	776.07
mittl. quadrat. Abweichung [m ³ /s]	62.98	912.31
Standardabweichung [m ³ /s]	62.87	911.81
Korrelationskoeffizient [-]	1.00	0.99

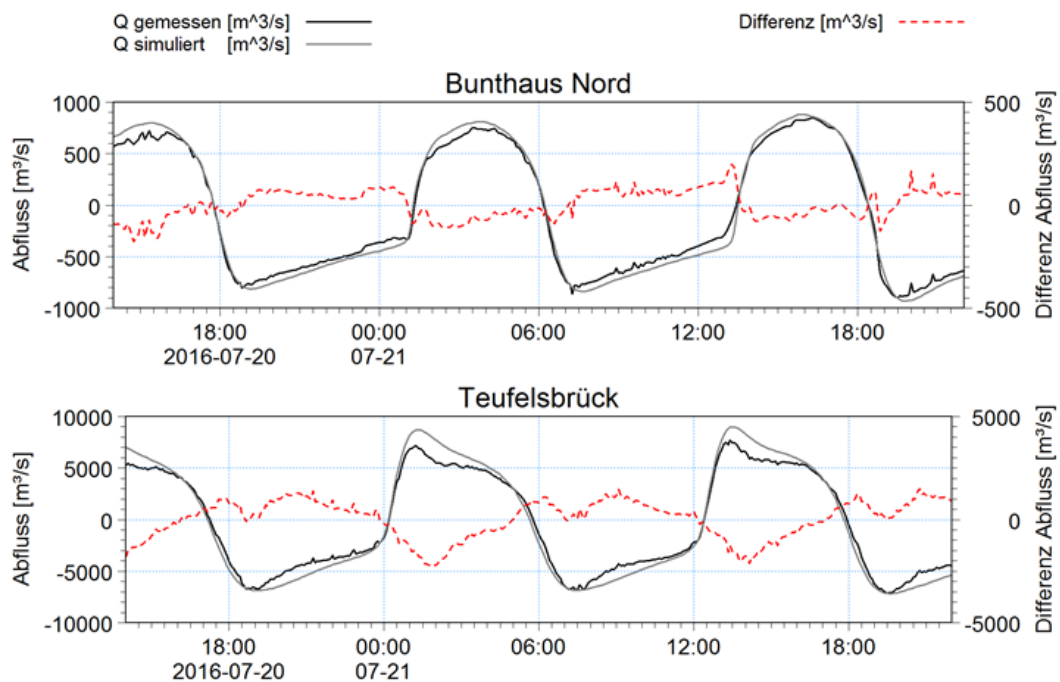


Abbildung 6.8: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Abflüsse (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) im Juli 2016 für die Messpunkte Bunthaus Nord und Teufelsbrück

Auch der Verlauf der minimalen und maximalen Strömungen im Validierungszeitraum im Oktober 2017 wurde sehr gut im numerischen Modell wiedergegeben (Abbildung 6.9) und wich in der Phase weniger als 20 Minuten ab. Die mittleren absoluten Abweichungen (Tabelle 6.5) zeigten mit Werten unter 0,23 m/s sehr gute Ergebnisse, was einer maximalen prozentualen Abweichung von 17 % entspricht.

Tabelle 6.5: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 an den untersuchten Messpunkten Juelsand und Pagensand

Messpunkt	Juelsand Sohle	Juelsand Oberfläche	Pagensand Sohle	Pagensand Oberfläche
Vergleichszeitraum	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17
Phasenverschiebung $CS_{\text{gemessen}} - CS_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	00:00 Ebbe -00:15 Flut	00:00 Ebbe -00:15 Flut	-00:10 Ebbe -00:20 Flut	00:15 Ebbe -00:10 Flut
Amplitudenabweichung $CS_{\text{gemessen}} - CS_{\text{simuliert}}$ [m/s]	-0.15 Flutphase -0.15 Ebbphase	-0.1 Flutphase 0.3 Ebbphase	0.1 Flutphase -0.05 Ebbphase	0.4 Flutphase 0.4 Ebbphase
mittl. Abweichung [m/s]	-0.11	0.06	0.01	0.22
mittl. abs. Abweichung [m/s]	0.13	0.12	0.07	0.23
mittl. quadrat. Abweichung [m/s]	0.15	0.16	0.09	0.27
Standardabweichung [m/s]	0.11	0.15	0.09	0.16
Korrelationskoeffizient [-]	0.83	0.83	0.83	0.82

Die Fließrichtungen wurden in den Flut- und Ebbphasen vom Modell sehr gut abgebildet. Nur in sehr wenigen Fällen wurde der Zeitpunkt der Kenterung mit einer zeitlichen Verschiebung abgebildet.

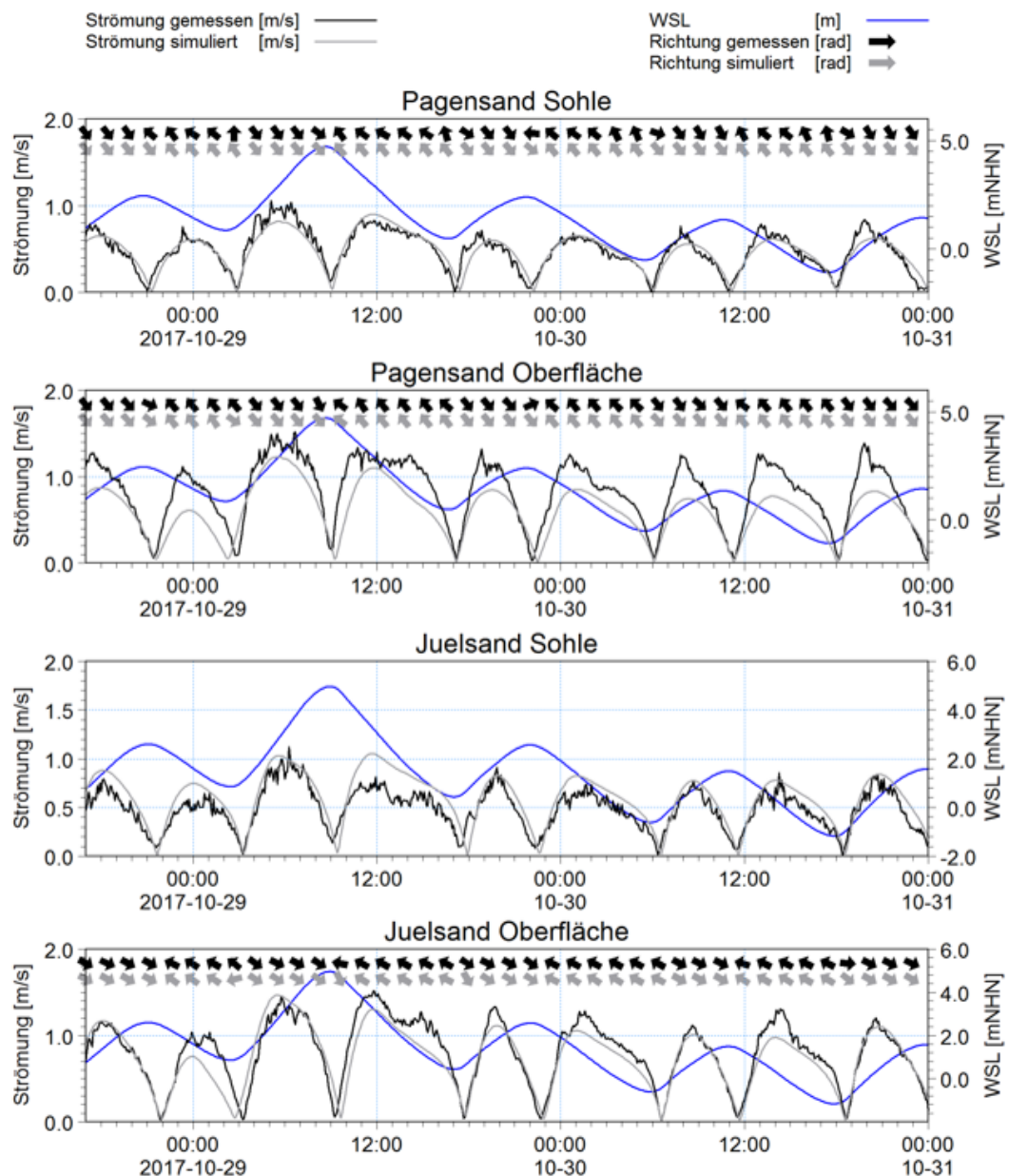


Abbildung 6.9: gemessene (schwarze Linie) und simulierte Fließgeschwindigkeiten (graue Linie) und -richtungen (schwarze und graue Richtungspfeile) an der Oberfläche und der Sohle mit Wasserspiegellage (WSL, blaue Linie) im Oktober 2017 für die Messpunkte Pagensand und Juelsand

6.3 Salzgehalte

Für die Kalibrierung und Validierung der Salzgehalte der Elbe wurden gemessene Zeitreihen der Stationen Altenbruchbogen, Neufeldrede, Brunsbüttel, Rhinplate-Nord, Pagensand und Hanskalbsand verwendet. Abbildung 6.10 zeigt die Lage der genutzten Messstationen im Modellgebiet.



Abbildung 6.10: Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte des Salzgehaltes im Elbe-Modellgebiet

Der Verlauf der simulierten Salzgehalte im Kalibrierzeitraum zeigte eine gute Modellgüte (Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12). In der Phase ergaben sich Differenzen von weniger als 35 Minuten. Die mittleren absoluten Abweichungen lagen im Planungsraum bei Werten unter 0,2 PSU, stromaufwärts unter 0,03 PSU und im Mündungsraum bei 1,7 PSU. Die prozentualen Abweichungen entsprechen im Planungsraum 27%, im Mündungsraum der Elbe 7,7% und stromaufwärts von Stade 4,6%. Da die Abweichung des Salzgehaltes im Planungsraum über den gemessenen Wert liegt, wird sie als auf der sicheren Seite liegen eingestuft. In Tabelle 6.6 sind alle statistischen Analyseparameter für die untersuchten Zeitreihen aufgelistet.

Die Salzgehaltmessungen an der nahe zum Planungsraum gelegenen Messstation Pagensand in der Elbe weisen nur eine geringe Salzkonzentration von 0,5 bis ca. 1 PSU (2 PSU bei Sturmflut) auf. An dieser Station wurden die Salzgehalte vor allem in den Phasen mit Tidehochwasserständen mit Differenzen um -0,5 PSU (-1 PSU bei Sturmflut) leicht überschätzt. Damit liegen die Simulationsergebnisse für die Wirkungsprognose eher auf der konservativen Seite.

Tabelle 6.6: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Salzgehalten an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen, Brunsbüttel, Rhinplate-Nord, Pagensand und Hanskalbsand

Messpunkt	Altenbruchbogen	Brunsbüttel	Rhinplate Nord Oberfläche	Rhinplate Nord Sohle
Vergleichszeitraum	20.07.16 bis 21.07.16	20.07.16 bis 21.07.16	20.07.16 bis 21.07.16	20.07.16 bis 21.07.16
Phasenverschiebung $Sal_{\text{gemessen}} - Sal_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	00:00 Flutphase -00:30 Ebbphase	-00:20 Ebbphase und Flutphase	00:20 Flutphase -00:35 Ebbphase	00:00 Flutphase -00:20 Ebbphase
Amplitudenabweichung $Sal_{\text{gemessen}} - Sal_{\text{simuliert}}$ [PSU]	-4 Flut -0.5 Ebbe	1.5 Flut -0.5 Ebbe	0.0 Flut -0.2 Ebbe	0.5 Flut -0.2 Ebbe
mittl. Abweichung [PSU]	-1.59	-0.01	-0.21	0.00
mittl. abs. Abweichung [PSU]	1.69	0.52	0.28	0.39
mittl. quadrat. Abweichung [PSU]	2.15	0.68	0.31	0.44
Standardabweichung [PSU]	1.45	0.68	0.23	0.44
Korrelationskoeffizient [-]	0.91	0.91	0.91	0.94

Messpunkt	Pagensand Oberfläche	Pagensand Sohle	Hanskalbsand Oberfläche	Hanskalbsand Sohle
Vergleichszeitraum	20.07.16 bis 21.07.16	20.07.16 bis 21.07.16	20.07.16 bis 21.07.16	20.07.16 bis 21.07.16
Phasenverschiebung $Sal_{\text{gemessen}} - Sal_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	00:00	00:00	00:00	-00:20
Amplitudenabweichung $Sal_{\text{gemessen}} - Sal_{\text{simuliert}}$ [PSU]	-0.4 Flut 0.05 Ebbe	-0.4 Flut 0.0 Ebbe	0.0 Flut -0.05 Ebbe	0.02 Flut -0.05 Ebbe
mittl. Abweichung [PSU]	-0.18	-0.21	-0.02	-0.02
mittl. abs. Abweichung [PSU]	0.20	0.22	0.03	0.03
mittl. quadrat. Abweichung [PSU]	0.25	0.27	0.03	0.03
Standardabweichung [PSU]	0.17	0.16	0.02	0.03
Korrelationskoeffizient [-]	0.47	0.80	0.43	0.52

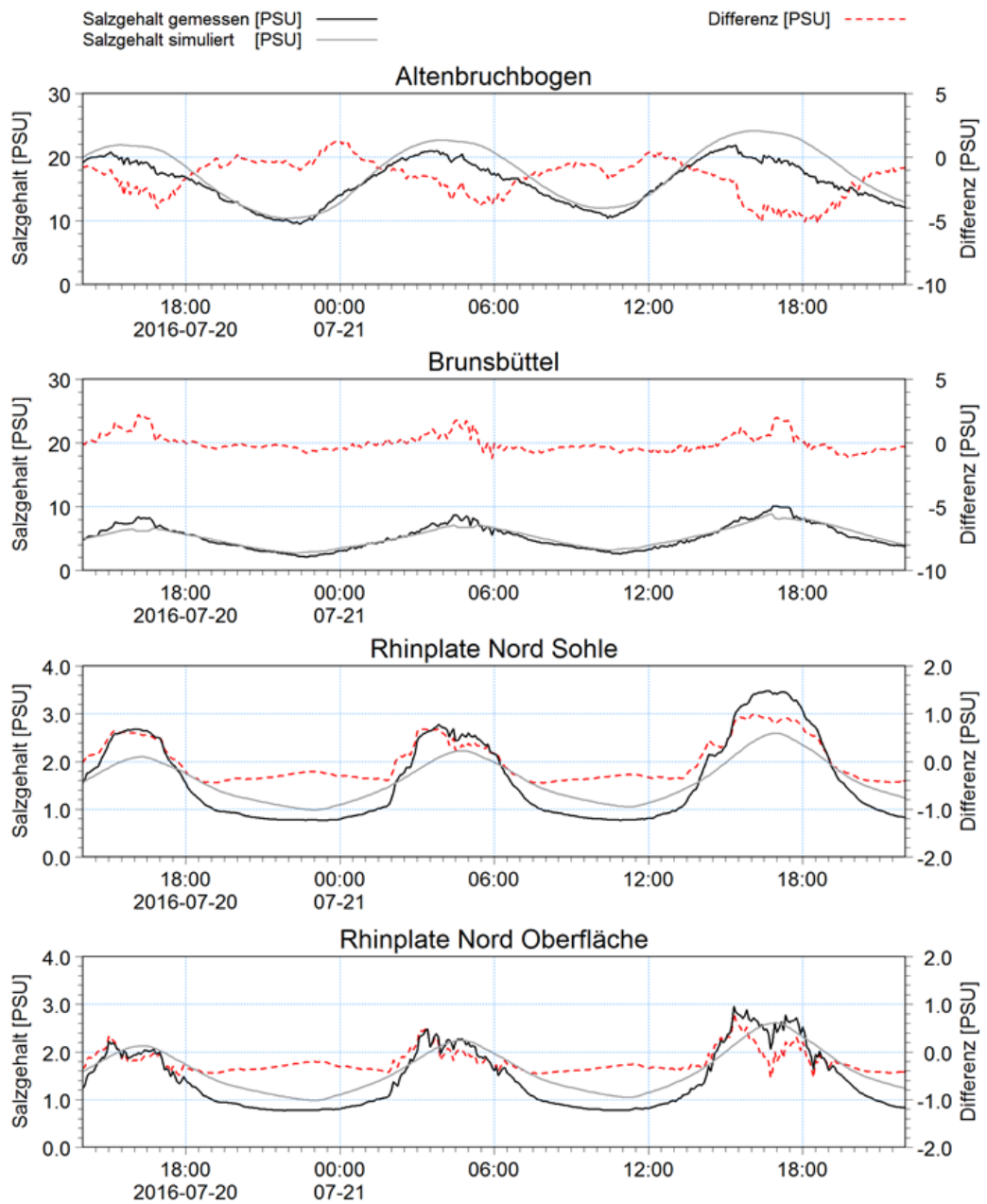


Abbildung 6.11: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Salzgehalte (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Altenbruchbogen, Brunsbüttel und Rhinplate-Nord

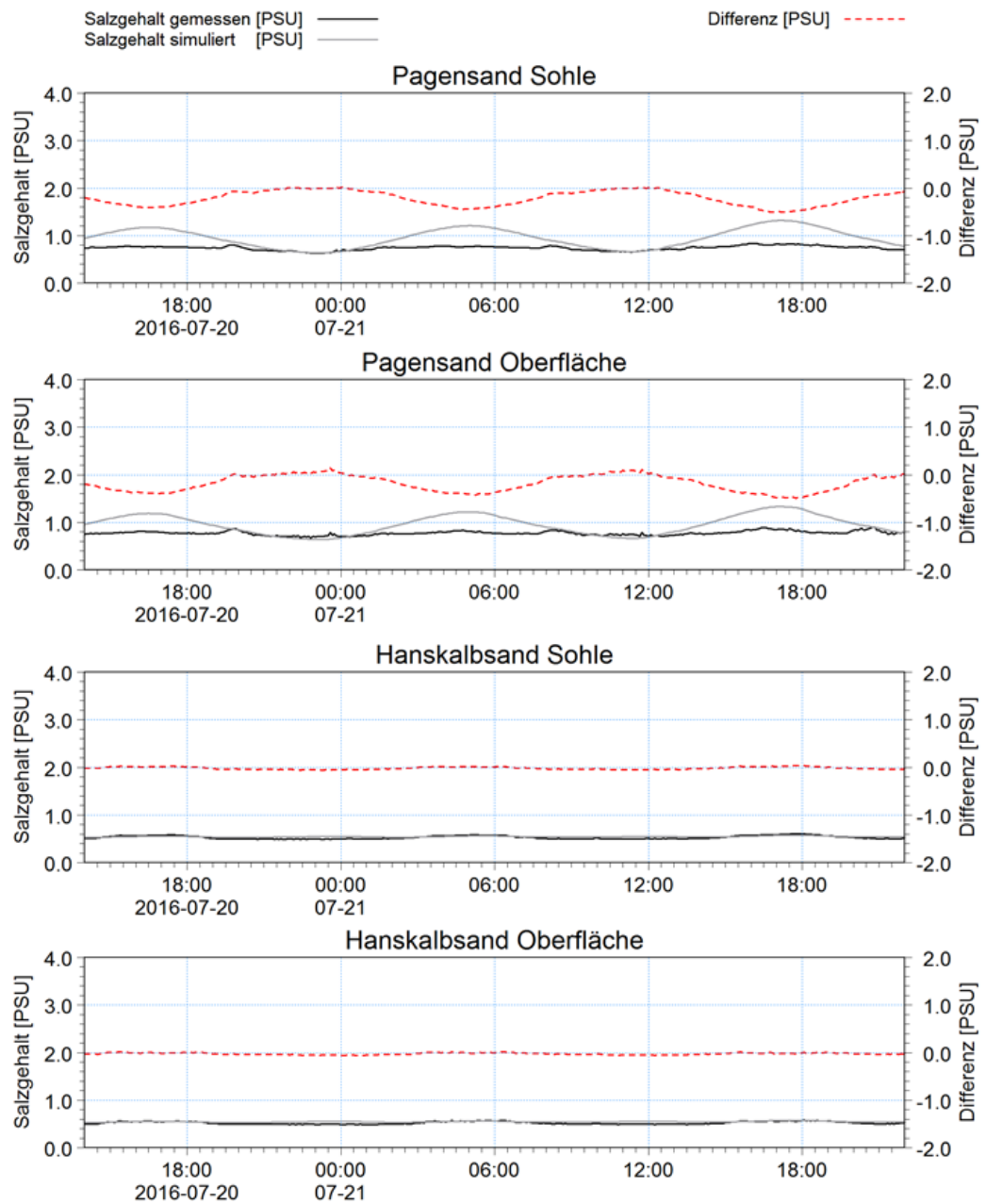


Abbildung 6.12: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Salzgehalte (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Pagensand und Hanskalbsand

Auch der Verlauf der simulierten Salzgehalte im Validierzeitraum zeigte eine gute Modellgüte (Abbildung 6.13). In der Phase ergaben sich Differenzen von weniger als 25 Minuten. Die mittleren absoluten Abweichungen lagen im Planungsraum auch hier bei Werten unter 0,2 PSU (8,3 %) und im Mündungsraum bei 1,7 PSU (6,4 %) (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Salzgehalten an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen, Neufeldreede und Pagensand

Messpunkt	Altenbruchbogen	Neufeldreede	Pagensand Oberfläche	Pagensand Sohle
Vergleichszeitraum	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17
Phasenverschiebung $Sal_{\text{gemessen}} - Sal_{\text{simuliert}}$ [hh:mm]	00:00 Flutphase -00:25 Ebbphase	00:00 Flutphase / Ebbphase	00:00 Flutphase / Ebbphase	00:00 Flutphase / Ebbphase
Amplitudenabweichung $Sal_{\text{gemessen}} - Sal_{\text{simuliert}}$ [PSU]	2 bis -4 Flut -0.5 bis -2 Ebbe	2 bis 8 Flut -1 Ebbe	-0.1 bis -1.2 Flut / Ebbe	-0.1 bis -0.7 Flut / Ebbe
mittl. Abweichung [PSU]	-0.30	0.46	-0.18	-0.15
mittl. abs. Abweichung [PSU]	1.70	1.61	0.18	0.16
mittl. quadrat. Abweichung [PSU]	2.09	2.45	0.25	0.18
Standardabweichung [PSU]	2.07	2.41	0.16	0.10
Korrelationskoeffizient [-]	0.56	0.92	0.81	0.88

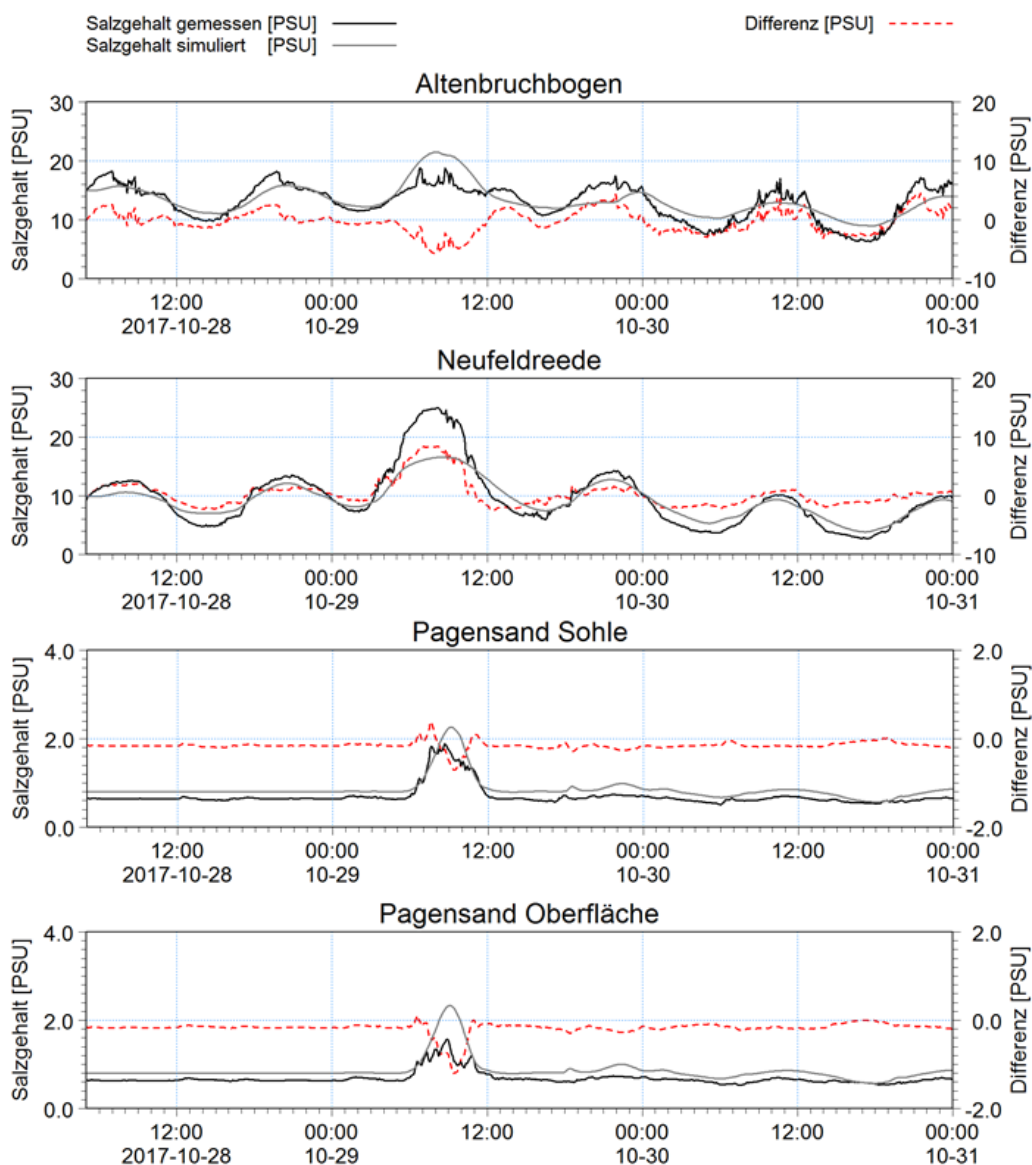


Abbildung 6.13: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Salzgehalte (graue Linie) und deren Differenzen (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 für die Messpunkte Altenbruchbogen, Neufeldreedee und Pagensand

6.4 Wassertemperaturen

Für die Kalibrierung und Validierung der Wassertemperaturen in der Elbe wurden gemessene Werte der Messstationen Altenbruchbogen, Rhinplate-Nord, Juelsand und Hanskalbsand verwendet. Abbildung 6.14 zeigt die Lage der genutzten Messstationen im Modellgebiet.



Abbildung 6.14: Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte der Wassertemperatur im Elbe-Modellgebiet

Bei der Simulation der Wassertemperaturen wurde für den Kalibrierzeitraum im Juli 2016 eine gute Modellgüte erreicht. Es ergaben sich Abweichungen unter 1 °C, was einer prozentualen Abweichung von 4,5 % entspricht. Die Wassertemperaturen wurden vom Modell vorrangig leicht überschätzt. In Tabelle 6.8 sind alle statistischen Analyseparameter für die untersuchten Zeitreihen aufgelistet. Die Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 zeigen die gemessenen und simulierten Wassertemperaturen im Juli 2016 an den untersuchten Messstationen und deren Differenzen zueinander.

Tabelle 6.8: Analyse statistischer Kennwerte und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wassertemperaturen an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen, Rhinplate-Nord, Juelsand und Hanskalbsand

Messpunkt	Altenbruchbogen	Rhinplate Nord Oberfläche	Rhinplate Nord Sohle
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16
Amplitudenabweichung $T_{\text{gemessen}} - T_{\text{simuliert}} [^{\circ}\text{C}]$	0.5 bis -0.6	0 bis -0.7	0 bis -0.8
mittl. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.01	-0.39	-0.39
mittl. abs. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.30	0.41	0.39
mittl. quadrat. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.34	0.45	0.43
Standardabweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.34	0.22	0.19
Korrelationskoeffizient [-]	0.97	0.97	0.98

Messpunkt	Juelsand Oberfläche	Juelsand Sohle	Hanskalbsand Oberfläche	Hanskalbsand Sohle
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16	14.07.16 bis 01.08.16
Amplitudenabweichung $T_{\text{gemessen}} - T_{\text{simuliert}} [^{\circ}\text{C}]$	-0.5 bis -1.4	-0.5 bis -1.4	-0.3 bis -1.7	-0.4 bis -1.5
mittl. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	-0.84	-0.84	-0.89	-0.93
mittl. abs. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.84	0.84	0.89	0.93
mittl. quadrat. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.87	0.87	0.93	0.97
Standardabweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.23	0.22	0.27	0.26
Korrelationskoeffizient [-]	0.96	0.97	0.96	0.97

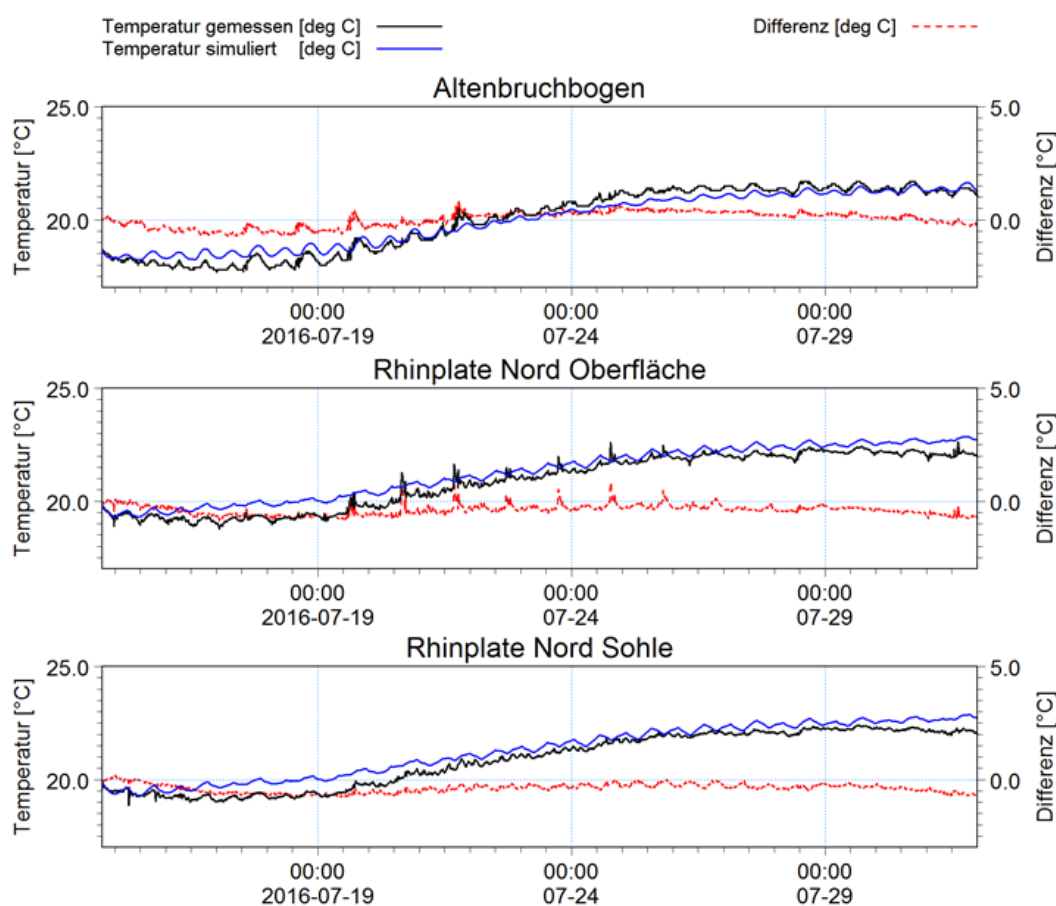


Abbildung 6.15: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wassertemperatur (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Altenbruchbogen und Rhinplate-Nord

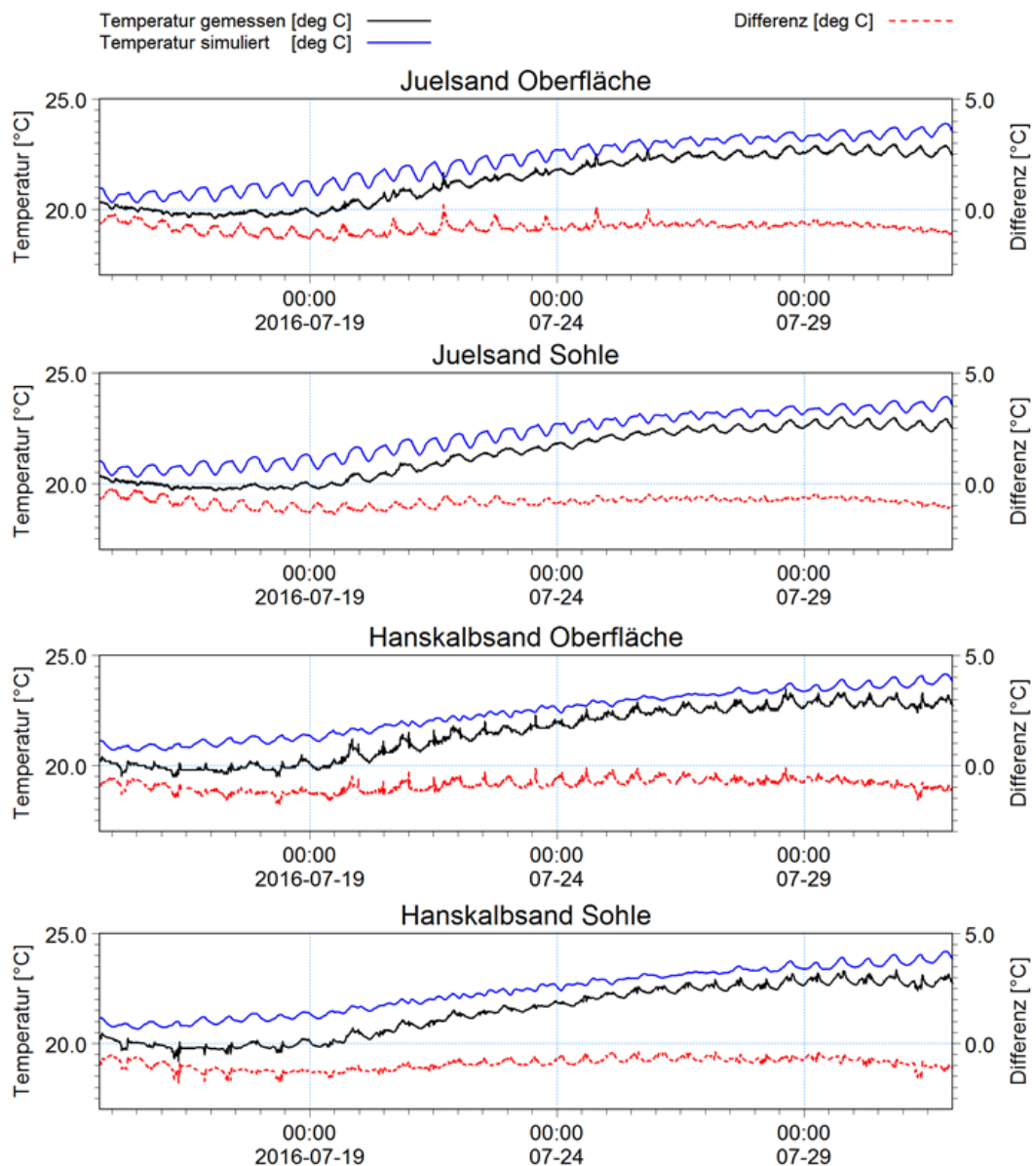


Abbildung 6.16: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wassertemperatur (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Juelsand und Hanskalbsand

Auch die Simulation der Wassertemperaturen im Validierzeitraum im Oktober 2017 erreichte eine gute Modellgüte. Es ergaben sich Abweichungen unter 0,5 °C (siehe Tabelle 6.9 und Abbildung 6.17). Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 2,2 %.

Tabelle 6.9: Analyse statistischer Kennwerte und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Wassertemperaturen an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 an den untersuchten Messpunkten Altenbruchbogen und Juelsand

Messpunkt	Altenbruchbogen	Juelsand Oberfläche	Juelsand Sohle
Vergleichszeitraum	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17	28.10.17 - 31.10.17
Amplitudenabweichung $T_{\text{gemessen}} - T_{\text{simuliert}} [^{\circ}\text{C}]$	0.0 bis -0.5	-0.1 bis 0.15	-0.1 bis 0.15
mittl. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	-0.26	0.03	0.04
mittl. abs. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.26	0.04	0.05
mittl. quadrat. Abweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.29	0.05	0.07
Standardabweichung [$^{\circ}\text{C}$]	0.12	0.05	0.05
Korrelationskoeffizient [-]	0.91	0.98	0.97

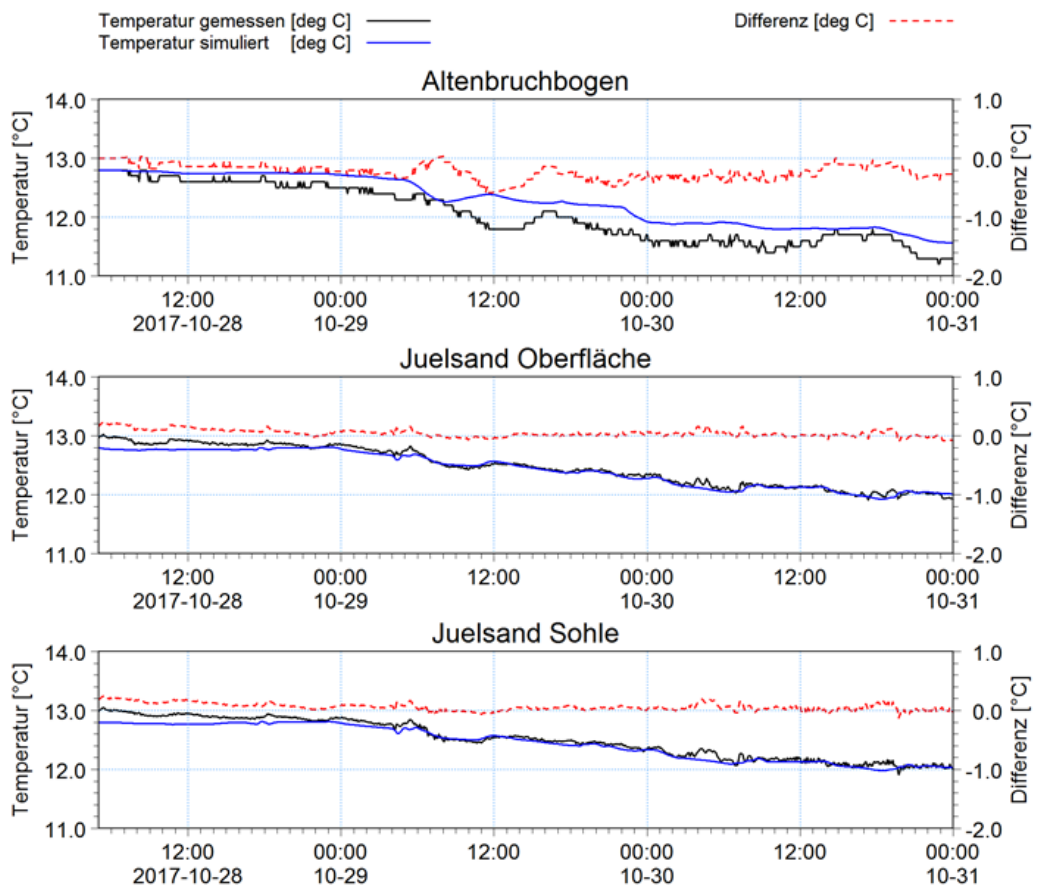


Abbildung 6.17: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Wassertemperatur (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche und der Sohle im Oktober 2017 für die Messpunkte Altenbruchbogen und Juelsand

6.5 Schwebstoffkonzentrationen

Die simulierten Schwebstoffkonzentrationen in der Elbe wurden mit gemessenen Werten an den Stationen Rhinplate-Nord, Pagensand, Grauerort, Juelsand und Hanskalbsand gegenübergestellt. Abbildung 6.18 zeigt die für die Kalibrierung und Validierung der Schwebstoffgehalte genutzten Messstationen im Modellgebiet.

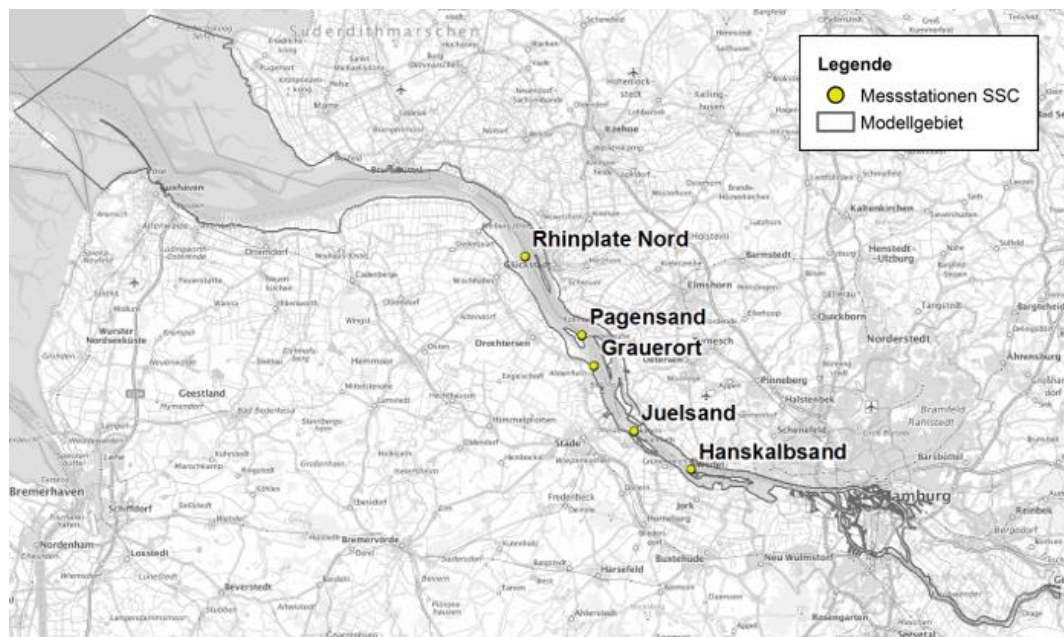


Abbildung 6.18: Für die Kalibrierung verwendete Messpunkte der Schwebstoffkonzentration (SSC) im Elbe-Modellgebiet

Die Simulation der Schwebstoffkonzentrationen erreichte für den Kalibrierzeitraum im Juli 2016 eine gute Modellgüte. Es ergeben sich Abweichungen in der Phase von weniger als 50 Minuten und mittlere absolute Abweichungen unter $0,08 \text{ kg/m}^3$, was einer prozentualen Abweichung von maximal 33 % entspricht (siehe Tabelle 6.10). Die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Schwebstoffgehalten an der Sohle sind etwas stärker ausgeprägt. Es werden mittlere absolute Abweichungen von bis zu $0,3 \text{ kg/m}^3$ am Messpunkt Rhinplate-Nord erreicht.

Tabelle 6.10: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Schwebstoffkonzentrationen an der Oberfläche (oben) und der Sohle (unten) im Juli 2016 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord

Messpunkt	Juelsand Oberfläche	Pagensand Oberfläche	Hanskalbsand Oberfläche	Rhinplate Nord Oberfläche	Grauerort
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16
Phasenverschiebung SSC _{gemessen} - SSC _{simuliert} [hh:mm]	-00:30 bis -00:50 Ebbphase und Flutphase	00:00 Ebbphase und Flutphase	-00:20 bis -00:30 Ebbphase und Flutphase	00:00 Ebbphase und Flutphase	-00:30 Ebbphase und Flutphase
Amplitudenabweichung SSC _{gemessen} - SSC _{simuliert} [kg/m ³]	0.05 - 0.15 Flut / Ebbe	0.04 - 0.14 Flut / Ebbe	-0.05 - 0.3 Flut / Ebbe	-0.05 - 0.3 Flut / Ebbe	-0.2 Flut -0.1 Ebbe
mittl. Abweichung [kg/m ³]	0.05	0.06	0.02	0.05	-0.07
mittl. abs. Abweichung [kg/m ³]	0.08	0.06	0.05	0.06	0.08
mittl. quadrat. Abweichung [kg/m ³]	0.10	0.08	0.07	0.08	0.10
Standardabweichung [kg/m ³]	0.08	0.05	0.06	0.07	0.07
Korrelationskoeffizient [-]	0.24	0.36	0.40	0.30	0.27

Messpunkt	Juelsand Sohle	Pagensand Sohle	Hanskalbsand Sohle	Rhinplate Nord Sohle
Vergleichszeitraum	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16	14.07.16 bis 17.07.16
mittl. Abweichung [kg/m ³]	0.03	-0.01	-0.08	-0.16
mittl. abs. Abweichung [kg/m ³]	0.10	0.20	0.13	0.30
mittl. quadrat. Abweichung [kg/m ³]	0.16	0.25	0.18	0.37
Standardabweichung [kg/m ³]	0.15	0.25	0.16	0.33
Korrelationskoeffizient [-]	0.04	0.04	0.09	0.01

Die Diagramme in Abbildung 6.19 zeigen die gemessenen und simulierten Schwebstoffgehalte im Juli 2016 an den untersuchten Messstationen und deren Differenzen zueinander.

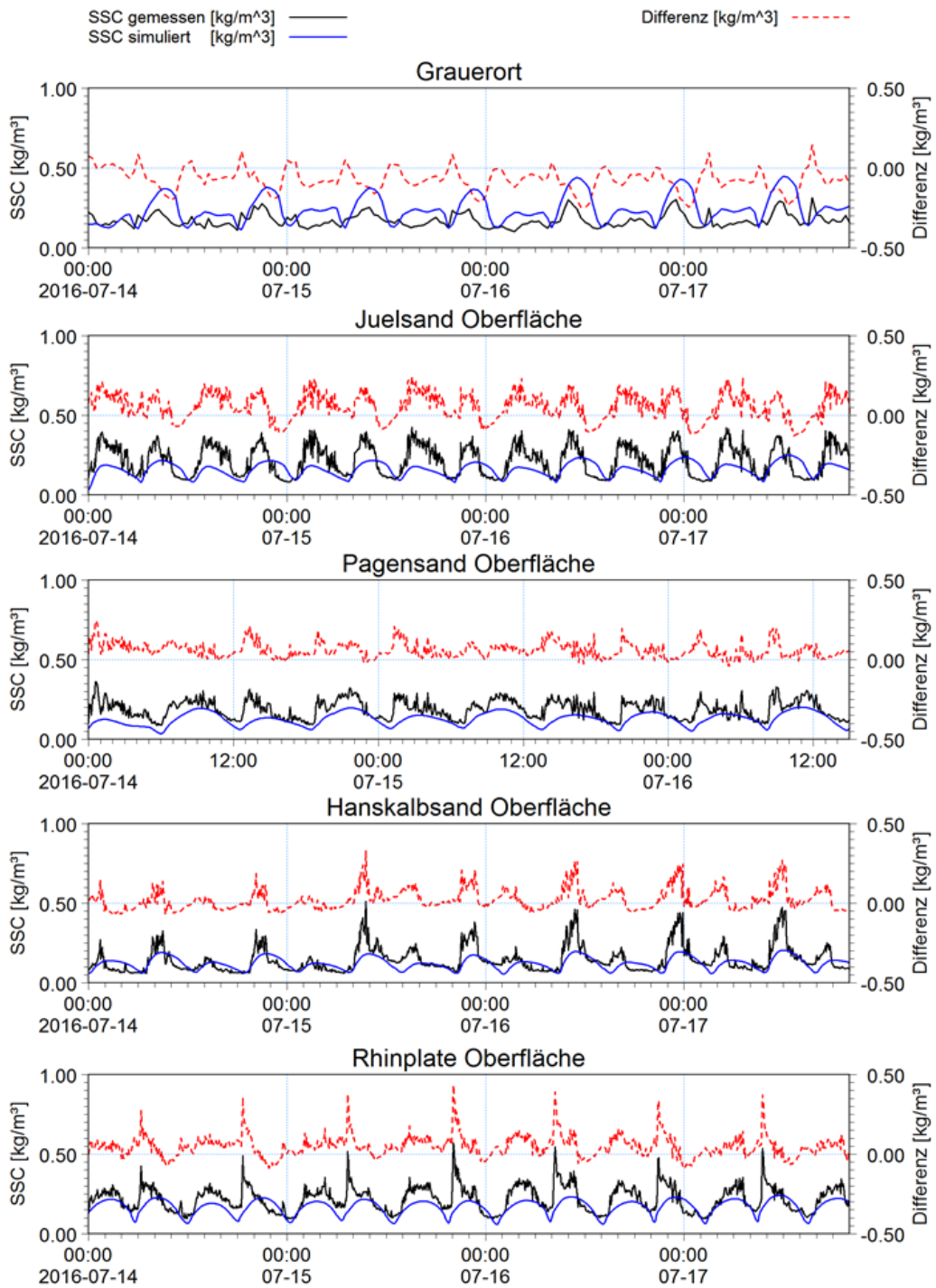


Abbildung 6.19: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche im Juli 2016 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord

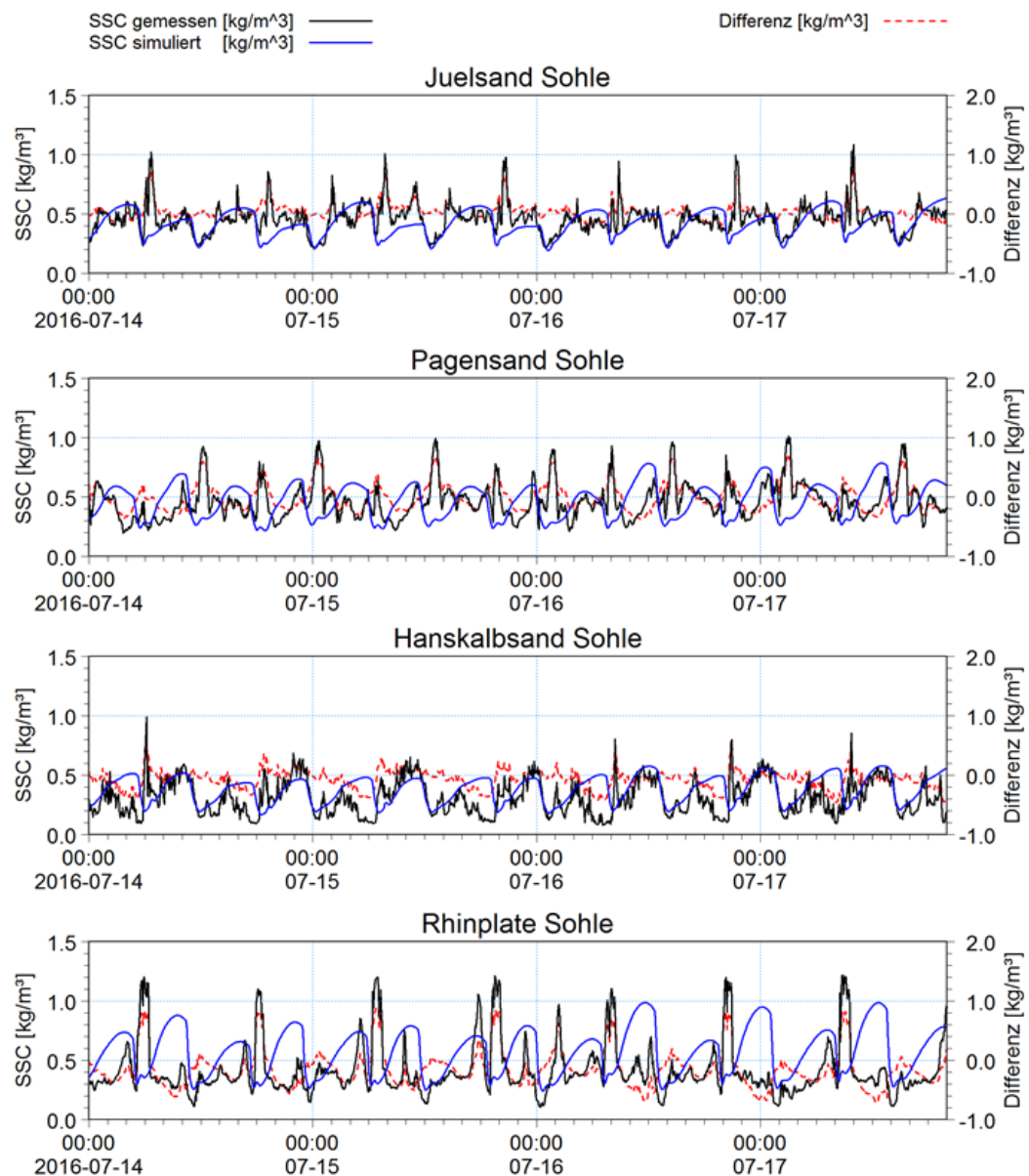


Abbildung 6.20: Gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Sohle im Juli 2016 für die Messpunkte Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord

Auch die Simulation der Schwebstoffkonzentrationen für den Validierzeitraum im Oktober 2017 erreichte eine gute Modellgüte. Es ergaben sich Abweichungen in der Phase von weniger als 60 Minuten und mittlere absolute Abweichungen unter 0,09 kg/m³ (Tabelle 6.11 und Abbildung 6.21). Dies entspricht einer maximalen prozentualen Abweichung von 20 %. Die mittleren absoluten Abweichungen an der Sohle erreichen im Modellzeitraum Oktober 2017 Werte von bis zu 0,25 kg/m³ am Messpunkt Pagensand und Rhinplate-Nord.

Tabelle 6.11: Analyse statistischer Kennwerte, der Phasenverschiebung und der Amplitudenabweichung zwischen gemessenen und simulierten Schwebstoffkonzentrationen an der Oberfläche (oben) und der Sohle (unten) im Oktober 2017 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord

Messpunkt	Juelsand Oberfläche	Pagensand Oberfläche	Hanskalbsand Oberfläche	Rhinplate Nord Oberfläche	Grauerort
Vergleichszeitraum	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17
Phasenverschiebung SSC _{gemessen} - SSC _{simuliert} [hh:mm]	00:00 Ebbphase -00:60 Flutphase	-00:30 Ebbphase und Flutphase	-00:00 Ebbphase -00:60 Flutphase	00:00 Ebbphase -00:60 Flutphase	-00:30 Ebbphase und Flutphase
Amplitudenabweichung SSC _{gemessen} - SSC _{simuliert} [kg/m ³]	0.1 - 0.2 Flut/ Ebbe	0.05 - 0.3 Flut/ Ebbe	0.2 Flutphase 0.1 Ebbphase	0.4 Flutphase 0.2 Ebbphase	-0.2 - 0.6 Flutphase -0.07 Ebbphase
mittl. Abweichung [kg/m ³]	0.03	0.09	-0.01	0.06	-0.03
mittl. abs. Abweichung [kg/m ³]	0.07	0.09	0.05	0.09	0.08
mittl. quadrat. Abweichung [kg/m ³]	0.09	0.11	0.07	0.12	0.10
Standardabweichung [kg/m ³]	0.09	0.07	0.07	0.10	0.10
Korrelationskoeffizient [-]	0.32	0.47	0.41	0.25	0.30

Messpunkt	Juelsand Sohle	Pagensand Sohle	Hanskalbsand Sohle	Rhinplate Nord Sohle
Vergleichszeitraum	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17	15.10.17 bis 31.10.17
mittl. Abweichung [kg/m ³]	0.03	0.12	-0.03	-0.02
mittl. abs. Abweichung [kg/m ³]	0.11	0.25	0.11	0.25
mittl. quadrat. Abweichung [kg/m ³]	0.16	0.33	0.14	0.32
Standardabweichung [kg/m ³]	0.15	0.31	0.14	0.32
Korrelationskoeffizient [-]	0.23	0.01	0.15	0.01

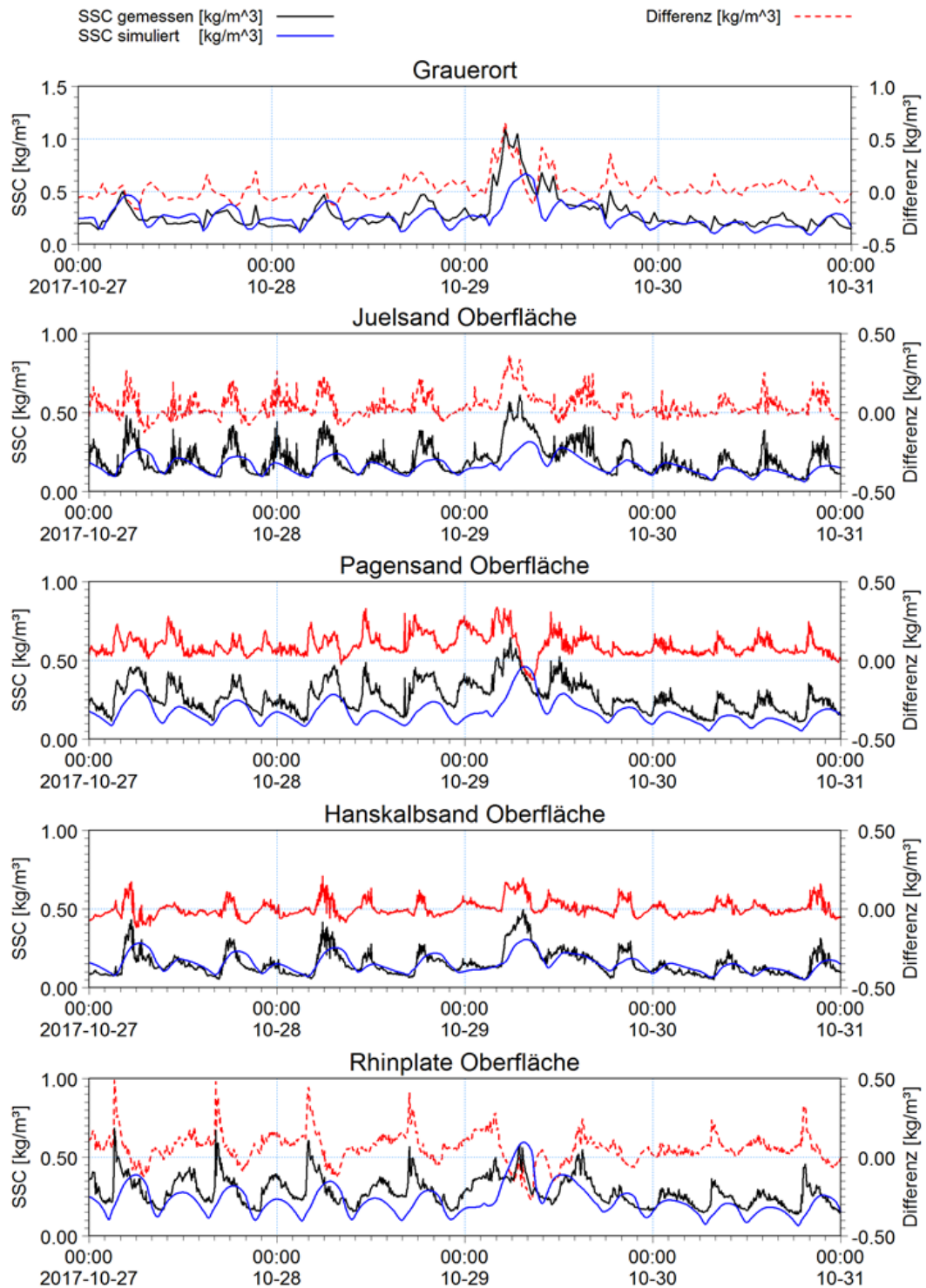


Abbildung 6.21: gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Oberfläche im Oktober 2017 für die Messpunkte Grauerort, Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord

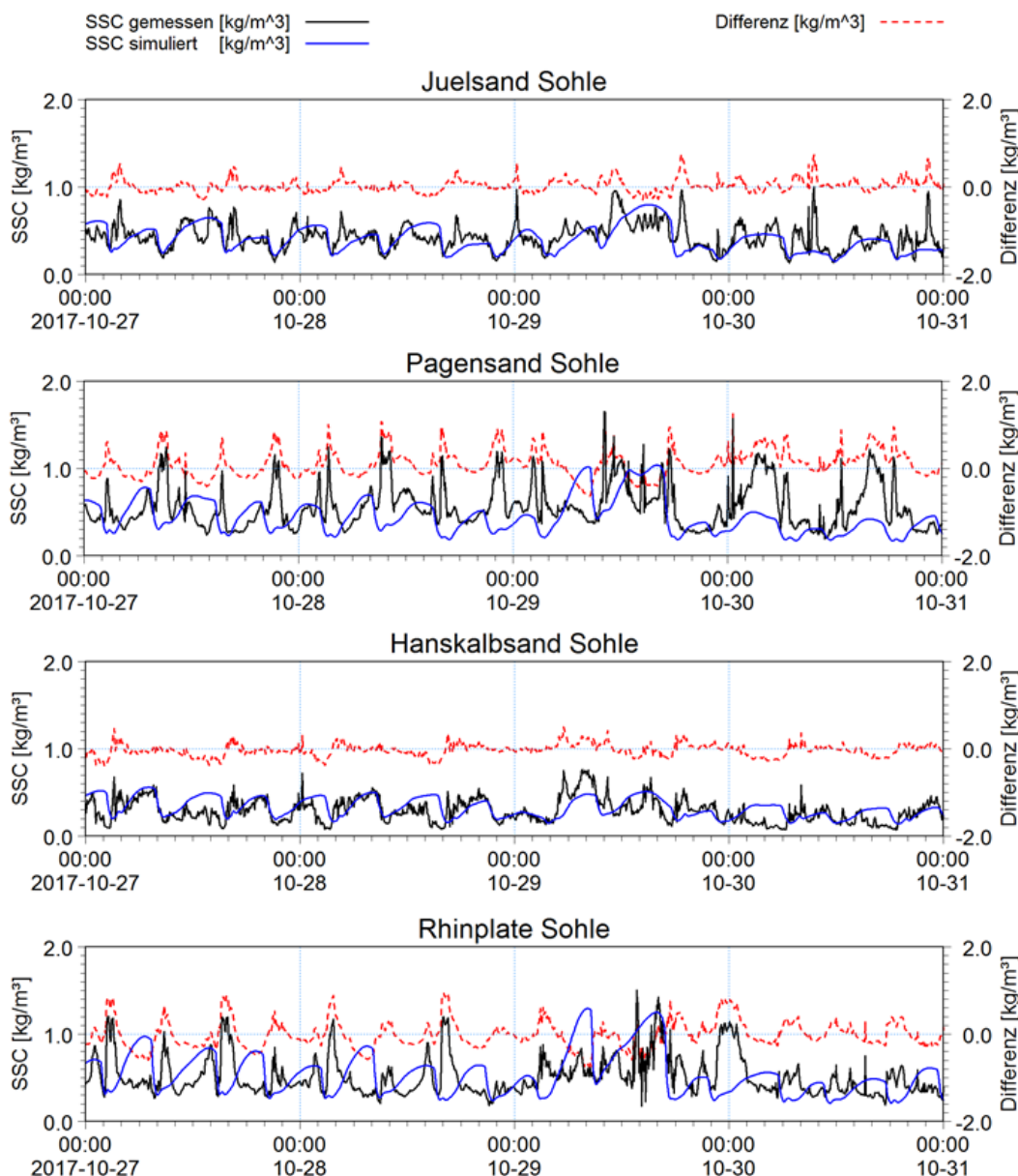


Abbildung 6.22: gemessene (schwarze Linie) und simulierte Schwebstoffkonzentrationen (blaue Linie) und deren Differenz (rot gestrichelte Linie) an der Sohle im Oktober 2017 für die Messpunkte Juelsand, Pagensand, Hanskalbsand und Rhinplate-Nord

6.6 Sohländerungen

Für dieses Gutachten lagen Sedimentationsraten des Hamburger Hafens der HPA als Monatsraten der Jahre 2013 bis 2018 vor (Abbildung 6.23). Diese konnten mit simulierten Werten aus dem Kalibrierzeitraum im Juli 2016 und dem Validierzeitraum im Oktober 2017 gegenübergestellt werden. Zu beachten ist dabei, dass die Sohländerungen nicht über einen gesamten Monat modelliert werden, sondern über jeweils 16 Tage. Eine qualitative Gegenüberstellung ist dennoch möglich.

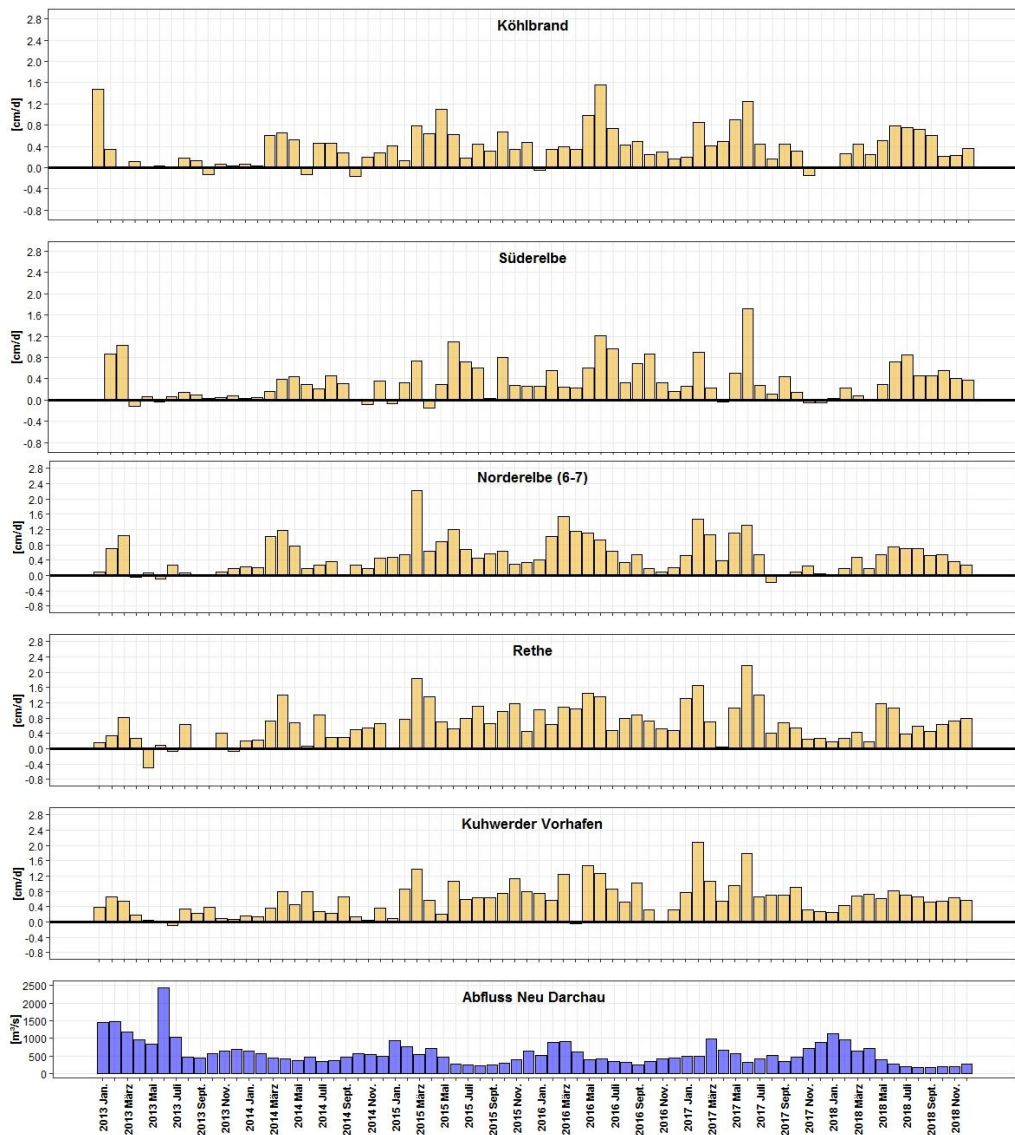


Abbildung 6.23: Gemessene Sedimentationsraten der Monate Januar 2013 bis Dezember 2018 in Bereichen des Hamburger Hafens, Quelle & Darstellung: HPA

Abbildung 6.24 zeigt die simulierte flächige Verteilung der Sedimentationsraten in den ausgewerteten Bereichen des Hamburger Hafens. Diese flächigen simulierten Raten sind gemittelt in Tabelle 6.12 zusammen mit den gemessenen Raten für beide Modellzeiträume aufgelistet. Die simulierten Werte unterschieden sich für beide Modellzeiträume kaum. Bei den gemessenen Werten sind besonders in der Norder- und Süderelbe deutliche Unterschiede erkennbar. In den Größenordnungen waren die gemessenen und simulierten Sedimentationsraten aber durchaus vergleichbar, sodass auch hier die Modellgenauigkeit als gut eingestuft wurden.

Tabelle 6.12: Simulierte (oben) und gemessene (unten) mittlere Sedimentationsraten für die Monate Juli 2016 und Oktober 2017 in Bereichen des Hamburger Hafens

mittlere Sedimentationsraten in cm/d - simuliert							
Monat / Hafen	Parkhafen	Rethe	Köhlbrand	Köhlfleet	Kuhwerder Vorhafen	Norderelbe	Süderelbe
Jul-16	0.44	0.84	0.77	1.18	0.46	1.43	1.06
Okt-17	0.45	0.76	0.78	1.28	0.46	1.45	0.90

mittlere Sedimentationsraten in cm/d - gemessen							
Monat / Hafen	Parkhafen	Rethe	Köhlbrand	Köhlfleet	Kuhwerder Vorhafen	Norderelbe	Süderelbe
Jul-16		0.5	0.75		0.9	0.7	1.0
Okt-17		0.3	0.35		1.0	0.1	0.2

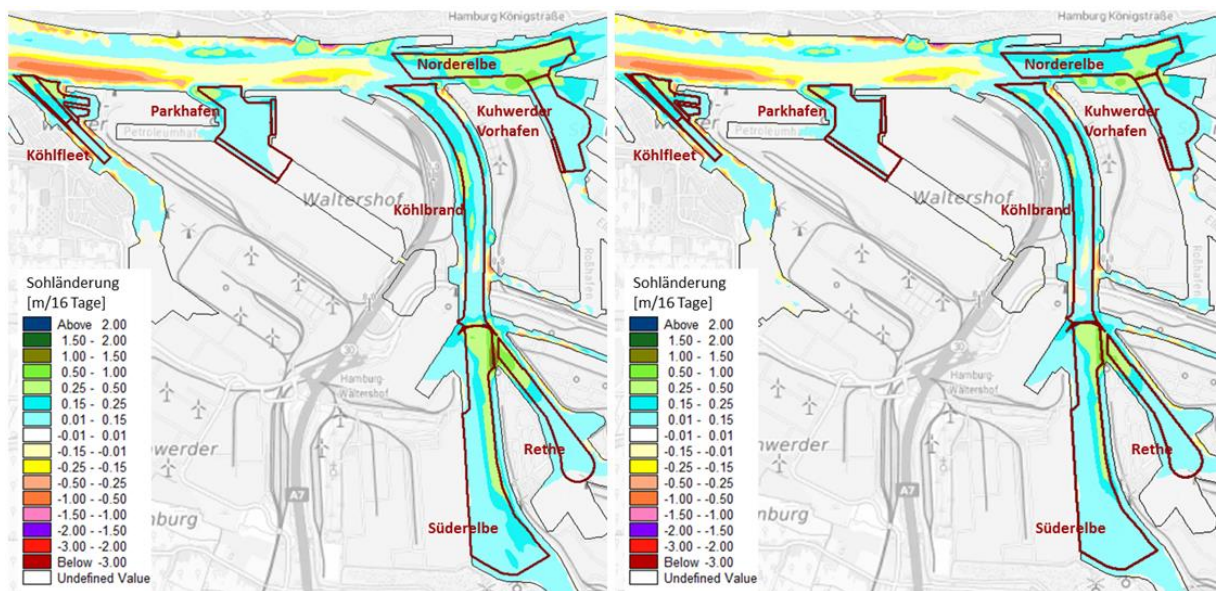


Abbildung 6.24: Flächige Darstellung der simulierten Sohländerung nach 16 Tagen im Hamburger Hafen in den Modellzeiträumen Juli 2016 (links) und Oktober 2017 (rechts)

7 Auswertung der hydrodynamischen Situation

Die Auswirkungen auf Strömungen, Wasserstand, Wassertemperaturen und Salinität durch den geplanten Anleger wurden in den in Kapitel 5 vorgestellten Modellzeiträume betrachtet. Im Bereich des geplanten Anlegers ist ein Wärmeeinleiter- bzw. Kühlwasserentnahmepunkt (DOW Prokon) vorhanden, dieser wurde in beiden Modellen (Ist- und Planzustand) integriert. Ebenfalls sind im Ist- und Planzustand die Elbvertiefung eingebunden.

Es wurden für beide Modellzeiträume und die jeweiligen Parameter sowohl die Situation im Ist- und Planzustand als auch die Differenz beider Zustände für einen exemplarischen Zeitpunkt der Ebb- und Flutphase bzw. des Thw und Tnw flächenhaft gezeigt. Für die Differenzkarten wurden die Parameter des Ausgangszustandes von denen des Planzustandes abgezogen. Die Auswertung erfolgte oberflächennah und tiefengemittelt für die Strömung, die Wassertemperatur und den Salzgehalt.

Weiterhin wurden für die ausgewerteten Parameter Zeitreihen von Ausgangs- und Planzustand an bestimmten Punkten (Punkt P1 im geplanten Hafenbecken, Punkt P2 im Flussstrom der Elbe und Punkt P3 im bestehenden Südhafenbecken des Hafens Stade-Bützfleth) im Umfeld der Baumaßnahme extrahiert und in Diagrammen dargestellt.

7.1 Modellzeitraum Juli 2016

7.1.1 Wasserstände und Strömungen

Die Wasserstände im Modellzeitraum Juli 2016 wurden im Bereich des bestehenden und geplanten Anlegers für ein Tidehochwasser am 21.07.2016 um 16:45 Uhr und ein Tideniedrigwasser am 21.07.2016 um 11:20 Uhr analysiert. Die Auswertung der maximalen Strömungen erfolgte für die Flut- und Ebbphase des Tidehochwassers am 21.07.2016 um 13:45 Uhr bzw. 19:50 Uhr. Es wurden oberflächennahe und tiefengemittelte Strömungen abgebildet.

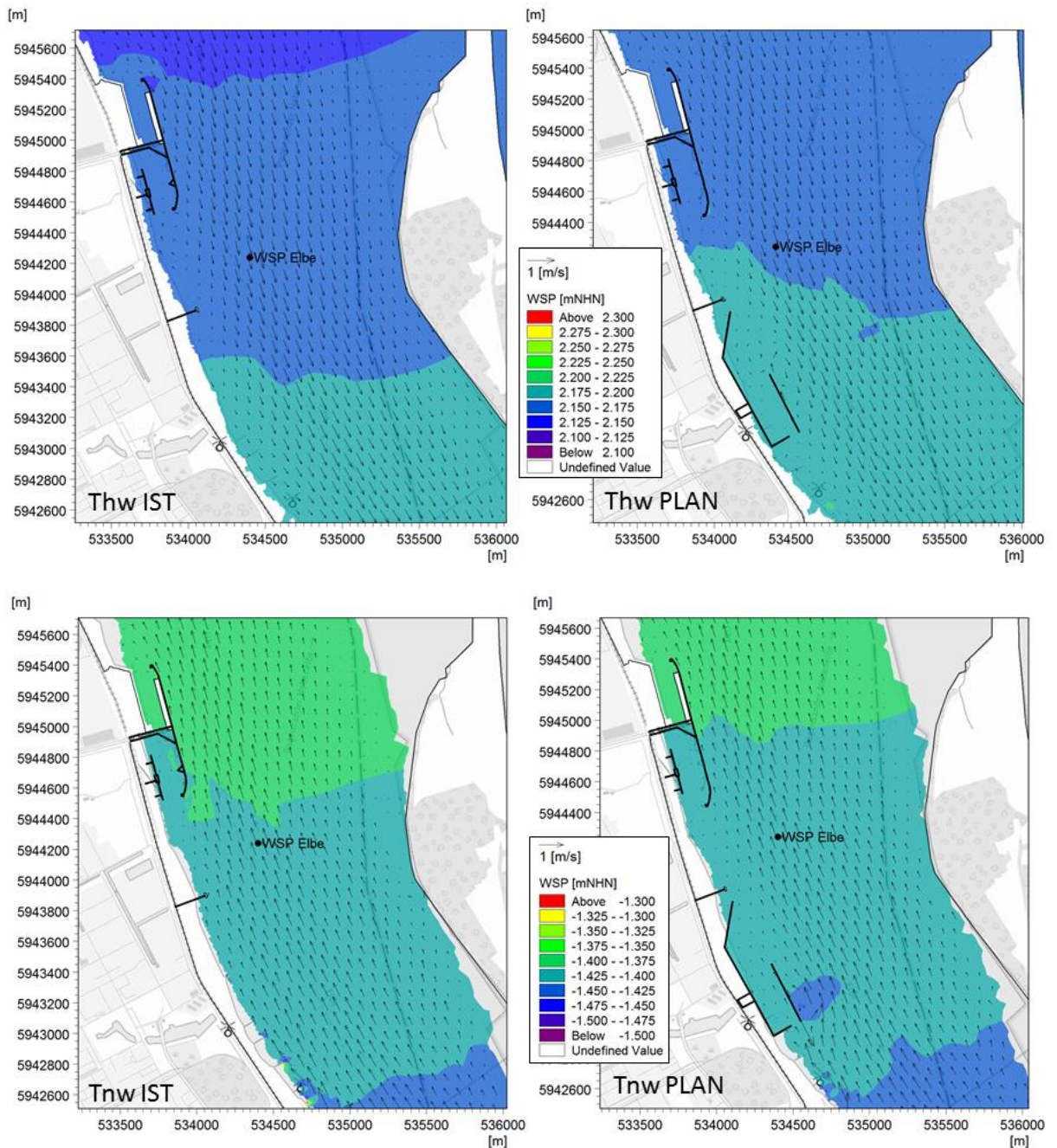


Abbildung 7.1: Wasserspiegellagen im Juli 2016 während des Tidehoch- (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Abbildung 7.1 zeigte die Wasserspiegellagen im Planungsraum während des gewählten Tideniedrig- und Tidehochwasserstandes. In Abbildung 7.2 wird der zeitliche Verlauf der Wasserspiegellagen im Ist- und im Planzustand gezeigt und Abbildung 7.3 zeigt die Auswirkungen der Planungen in Differenzenkarten. Es ergaben sich durch die Planungen lokal begrenzte und dort geringe Änderungen in der Wasserspiegellage. Während des Tideniedrigwassers wurde ein lokal engbegrenzter, minimaler Absenk, der unter 5 cm lag, im Bereich des Südhafens und des geplanten Hafenbeckens ausgewiesen, der ebenfalls lokal bei < 8 cm liegt. Dieser Absenk infolge Rückströmung ergab sich, wie in Abbildung 7.1 zu erkennen ist, durch die Wirkung der stromparallelen Spundwand zur Elbe.

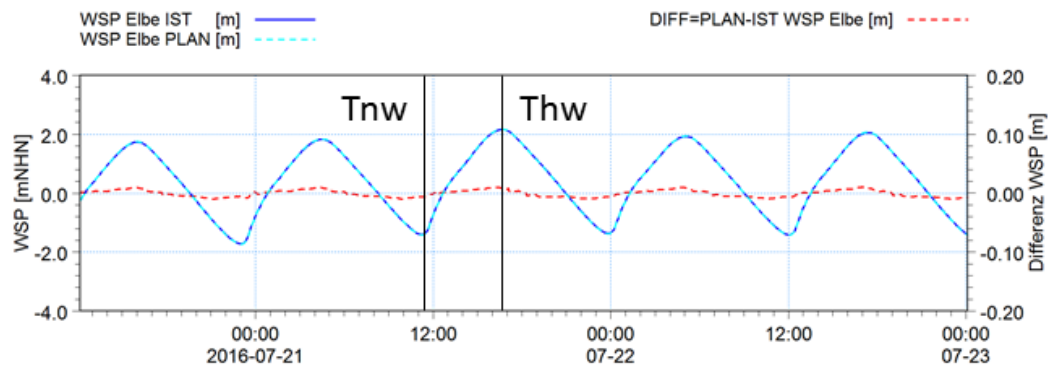


Abbildung 7.2: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände im Juli 2016 und der Differenz (rot gestrichelte Linie) zwischen Planzustand (hellblau gestrichelte Linie) und Istzustand (blaue Linie) am Extraktionspunkt in der Elbe

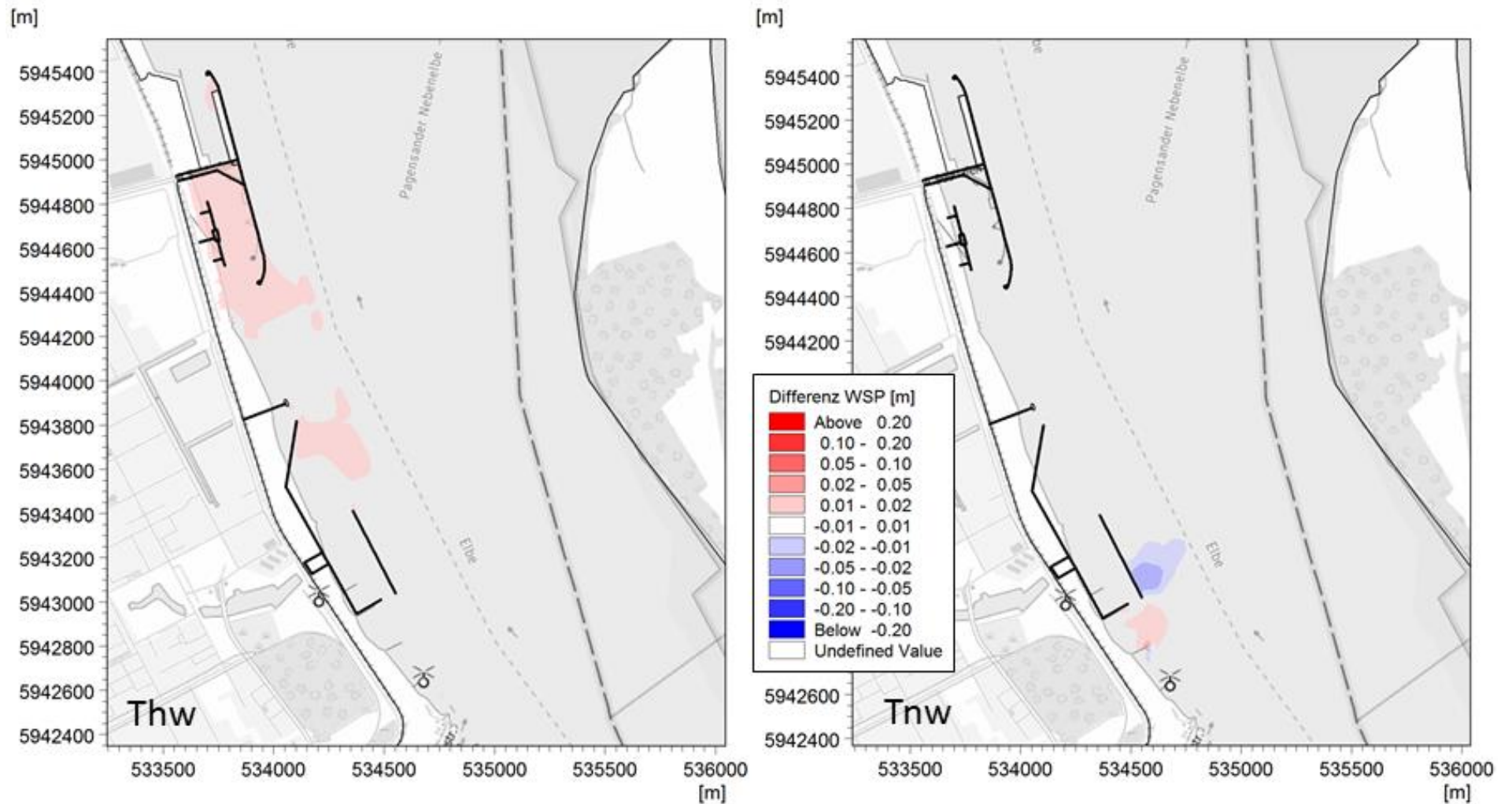


Abbildung 7.3: Wasserspiegeldifferenzen im Juli 2016 zwischen Plan- und Istzustand während des Tidehoch- (links) und des Tideniedrigwassers (rechts)

Abbildung 7.4 zeigt die Strömungen an der Oberfläche im Planungsraum während der gewählten Flut- und Ebbphase. In Abbildung 7.5 wird der zeitliche Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten im Ist- und im Planzustand gezeigt. Abbildung 7.6 stellt die Auswirkungen der Planungen während der Flut- und Ebbphase in Strömungsdifferenzenkarten dar.

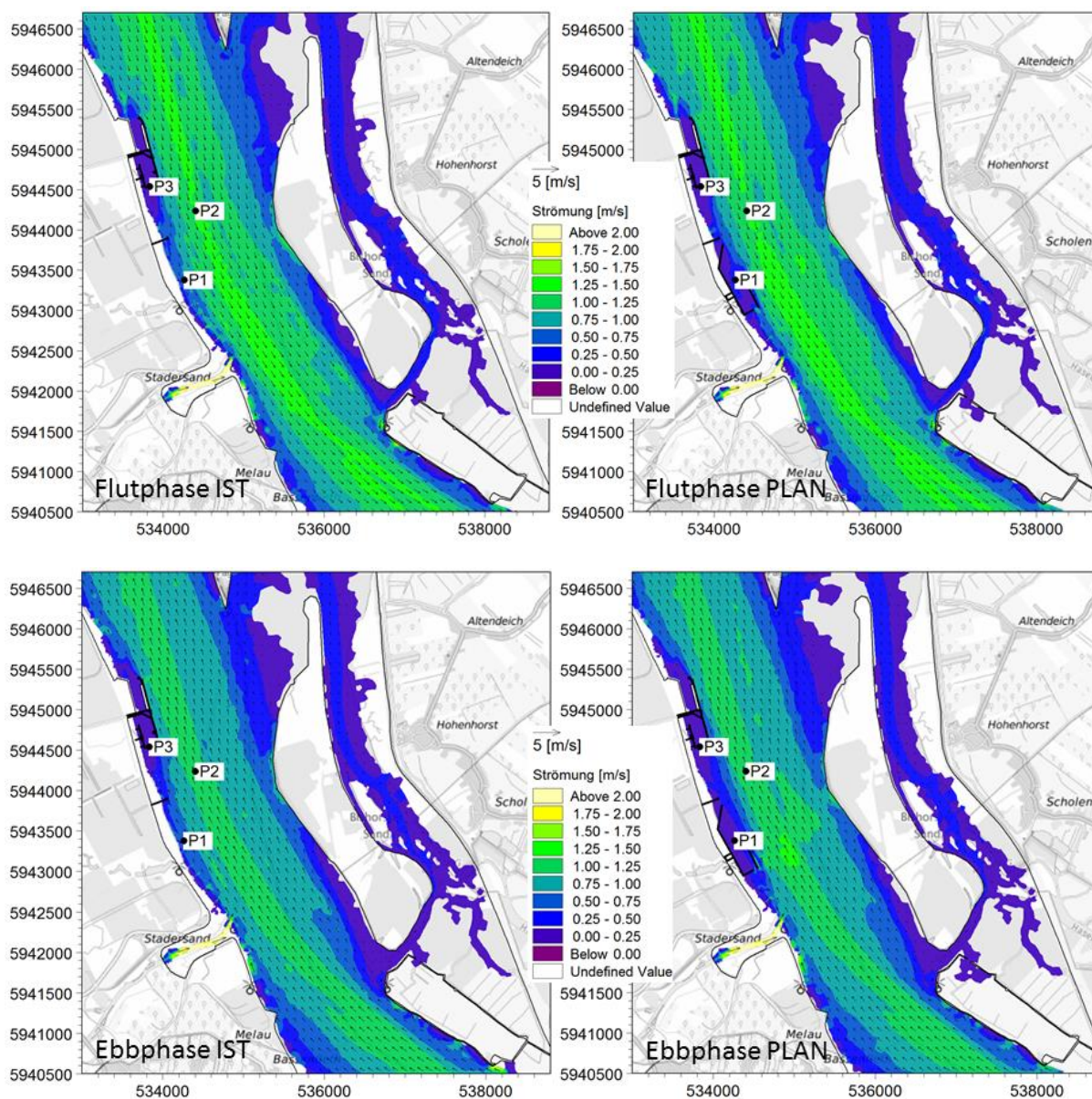


Abbildung 7.4: Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche im Juli 2016 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

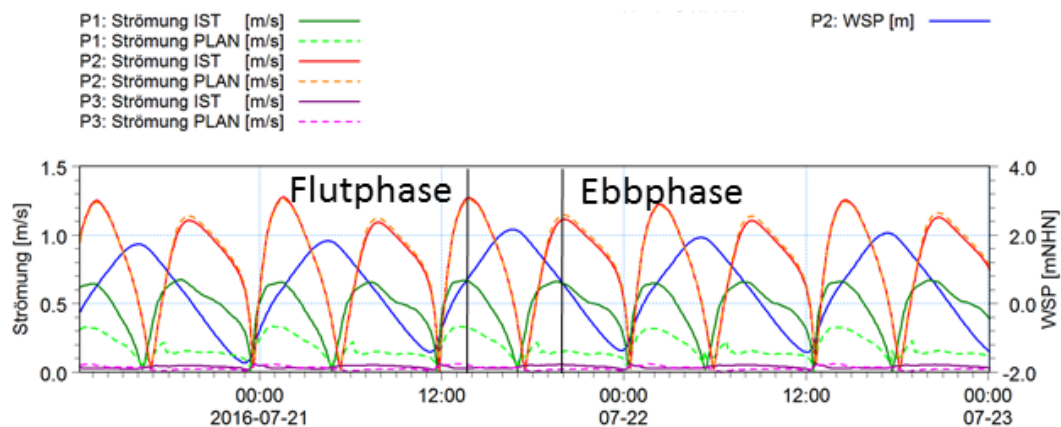


Abbildung 7.5: Zeitlicher Verlauf der Strömungen im Juli 2016 an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

Im zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten und in den Differenzkarten war im neu geplanten Hafenbecken (Punkt P1) eine deutliche Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten um bis zu 0,8 m/s zu erkennen. Im bestehenden Hafenbecken des Hafens Stade-Bützfleth ergab sich durch die Verlängerung des Anlegers eine minimale Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu -0,05 m/s (Punkt P3). An Extraktionspunkt P2 im Hauptflussstrom der Elbe waren keine nennenswerten Veränderungen oder Erhöhungen zu erkennen. Die Differenzkarte der Strömungen an der Oberfläche (Abbildung 7.6) zeigt bei Ebb- und Flutstrom eine leichte Zunahme der oberflächennahen Strömungen von bis zu 0,1 m/s. In der tiefengemittelten Strömung blieben die Differenzen in der Fahrrinne unter 0,05 m/s (Abbildung 7.8).

In den tiefengemittelten Differenzkarten (Abbildung 7.8) ist die Änderung der Strömungen etwas weniger ausgeprägt als bei den Strömungen an der Oberfläche (Abbildung 7.6) und auch flächig begrenzter durch die Spundwände in Fließrichtung. Die tiefengemittelten Differenzen von bis -0,8 m/s waren aber wie die Differenzen an der Oberfläche noch genauso deutlich erkennbar.

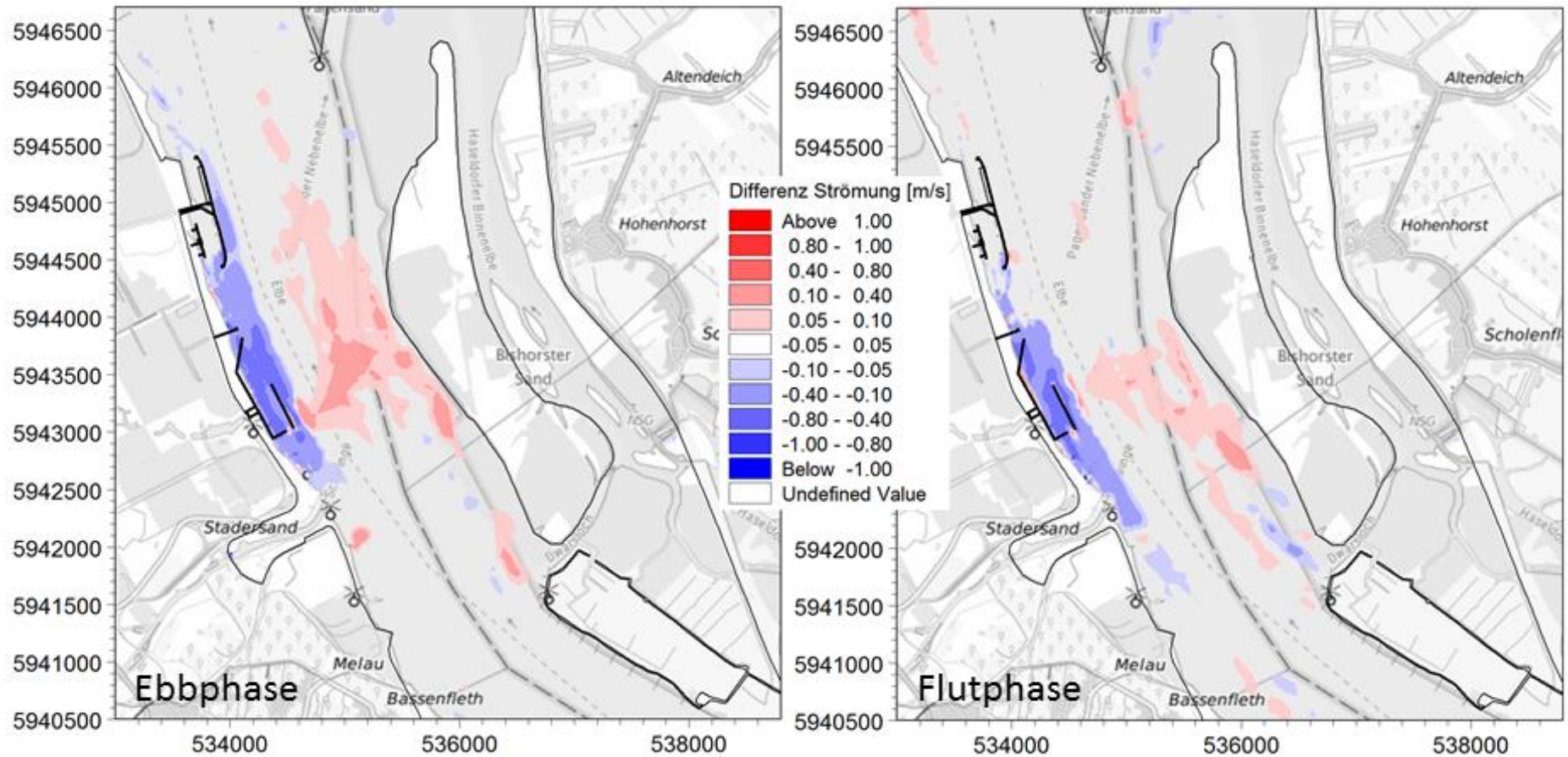


Abbildung 7.6: Strömungsdifferenzen an der Oberfläche zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016

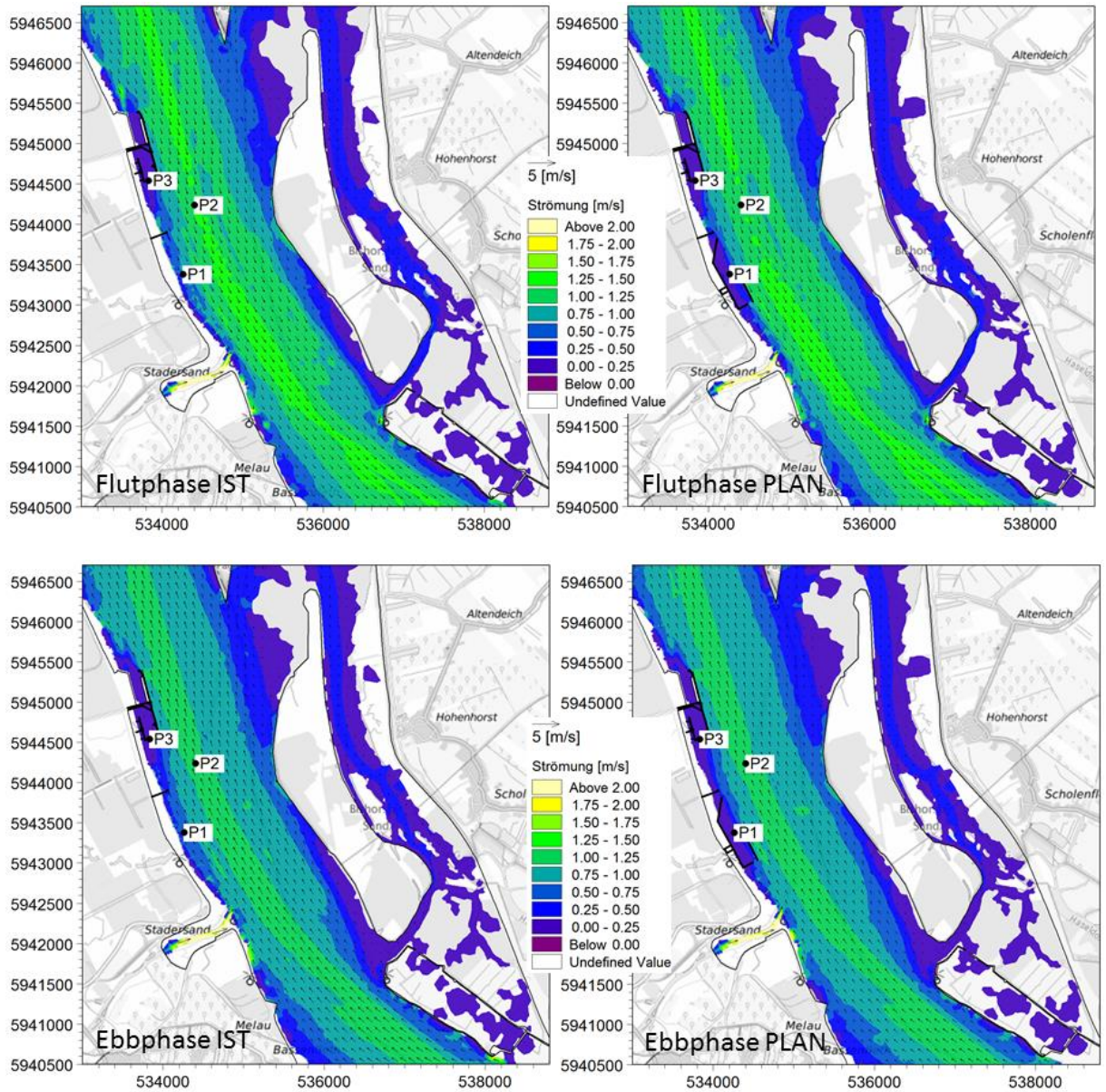


Abbildung 7.7: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Juli 2016 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

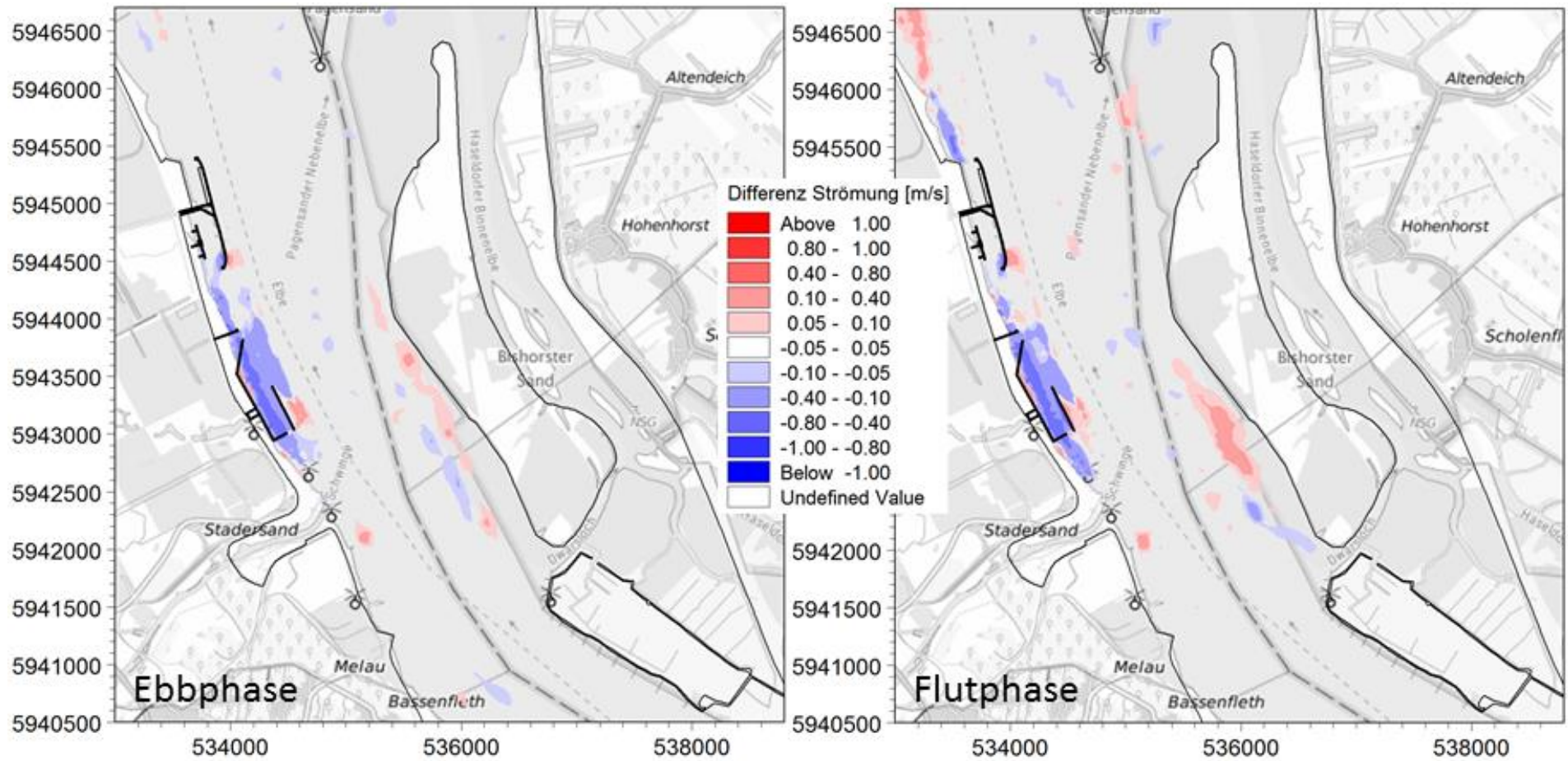
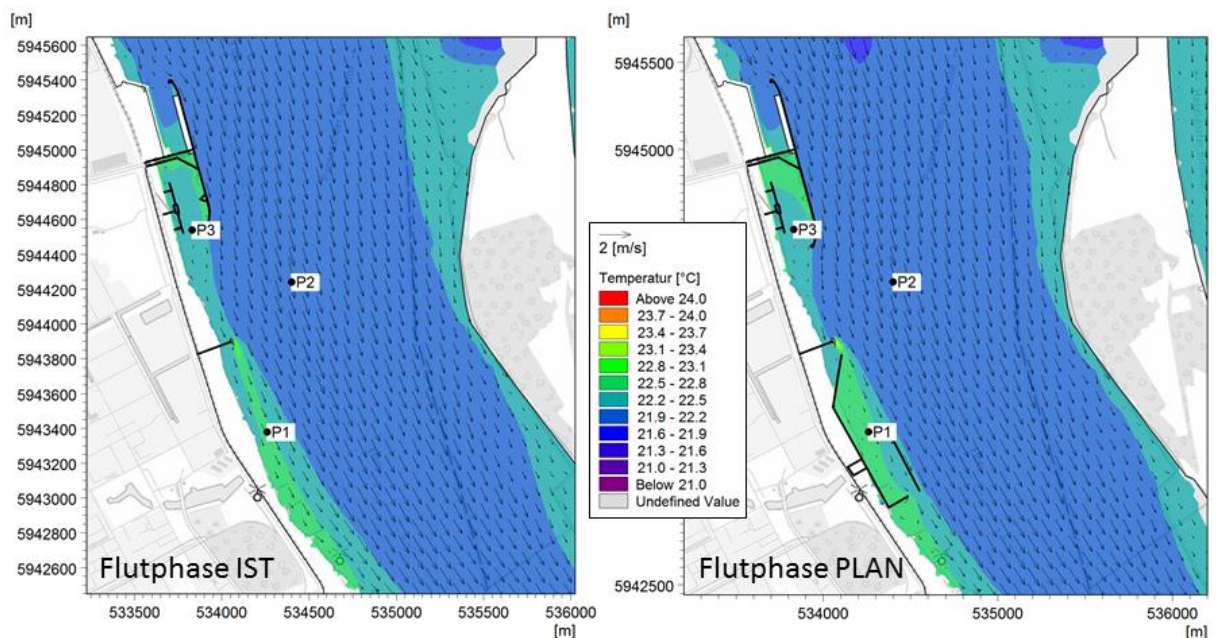


Abbildung 7.8: Tiefengemittelte Strömungsdifferenzen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016

7.1.2 Wassertemperaturen

Die Auswertung der Wassertemperaturen erfolgte für die Flut- und Ebbphase des Tidehochwassers am 21.07.2016 um 13:45 Uhr bzw. 19:50 Uhr, es werden tiefengemittelte Wassertemperaturen abgebildet. Abbildung 7.9 zeigt die tiefengemittelten Wassertemperaturen im Planungsraum während des gewählten Tideniedrig- und Tidehochwasserstandes. In Abbildung 7.10 wird der zeitliche Verlauf der Wassertemperaturen in mittlerer Tiefe im Ist- und im Planzustand gezeigt. In der Abbildung 7.11 ist die Auswirkungen der Planungen in Differenzenkarten der gemittelten Wassertemperaturen dargestellt.



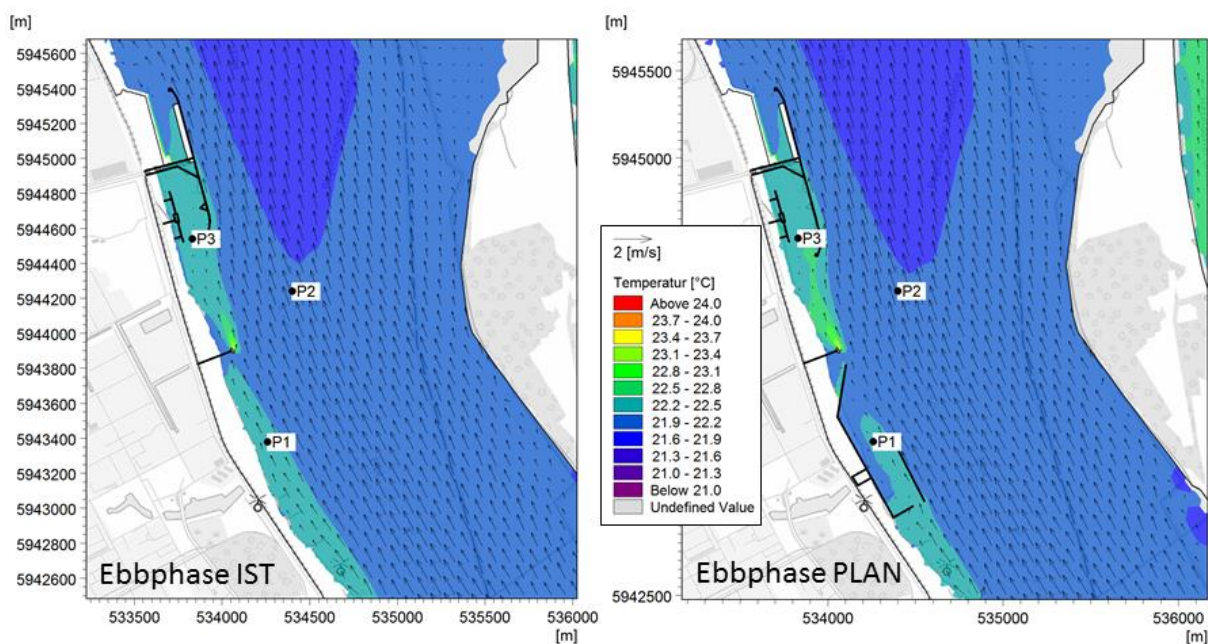


Abbildung 7.9: Tiefengemittelte Wassertemperaturen im Juli 2016 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Im zeitlichen Verlauf der Wassertemperaturen fiel am Punkt P1 im neu geplanten Hafenbecken ein kurzer, aber starker Temperaturanstieg um bis zu 1,5°C in den Flutphasen des Istzustandes auf. Der Anstieg war im Planzustand auch erkennbar, war aber nicht so steil wie im Istzustand. Dieser wurde durch die Kühlwasserrückgabe der DOW erzeugt. Der Anstieg der Wassertemperaturen war im Planzustand nicht so deutlich, weil das einströmende wärmere Wasser durch die schräge Spundwand des neuen Anlegers gebremst wurde. Zusätzlich wurde das wärmere Wasser durch die Verwirbelungen hinter der Spundwand besser durchmischt. Das wärmere Wasser kam im Planzustand zeitlich etwas versetzt am Extraktionspunkt P1 an (siehe Abbildung 7.10), daher ergaben sich die positiven Differenzen (bis 0,4 °C) im Bereich des geplanten Hafenbeckens und nördlich des geplanten Anlegers in Abbildung 7.11.

Im Allgemeinen waren keine nennenswerten und nur lokal sehr begrenzte Änderungen der Wassertemperaturen im Planungsgebiet erkennbar.

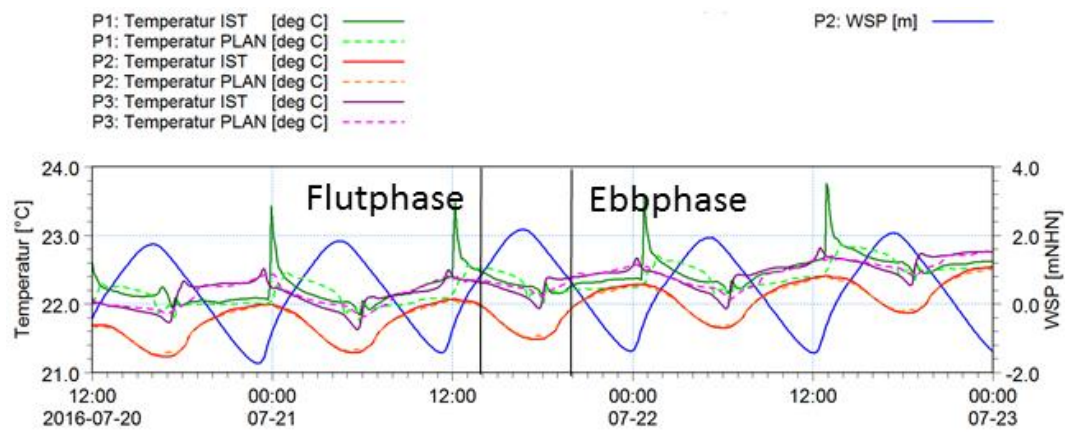


Abbildung 7.10: Zeitlicher Verlauf der Wassertemperaturen im Juli 2016 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

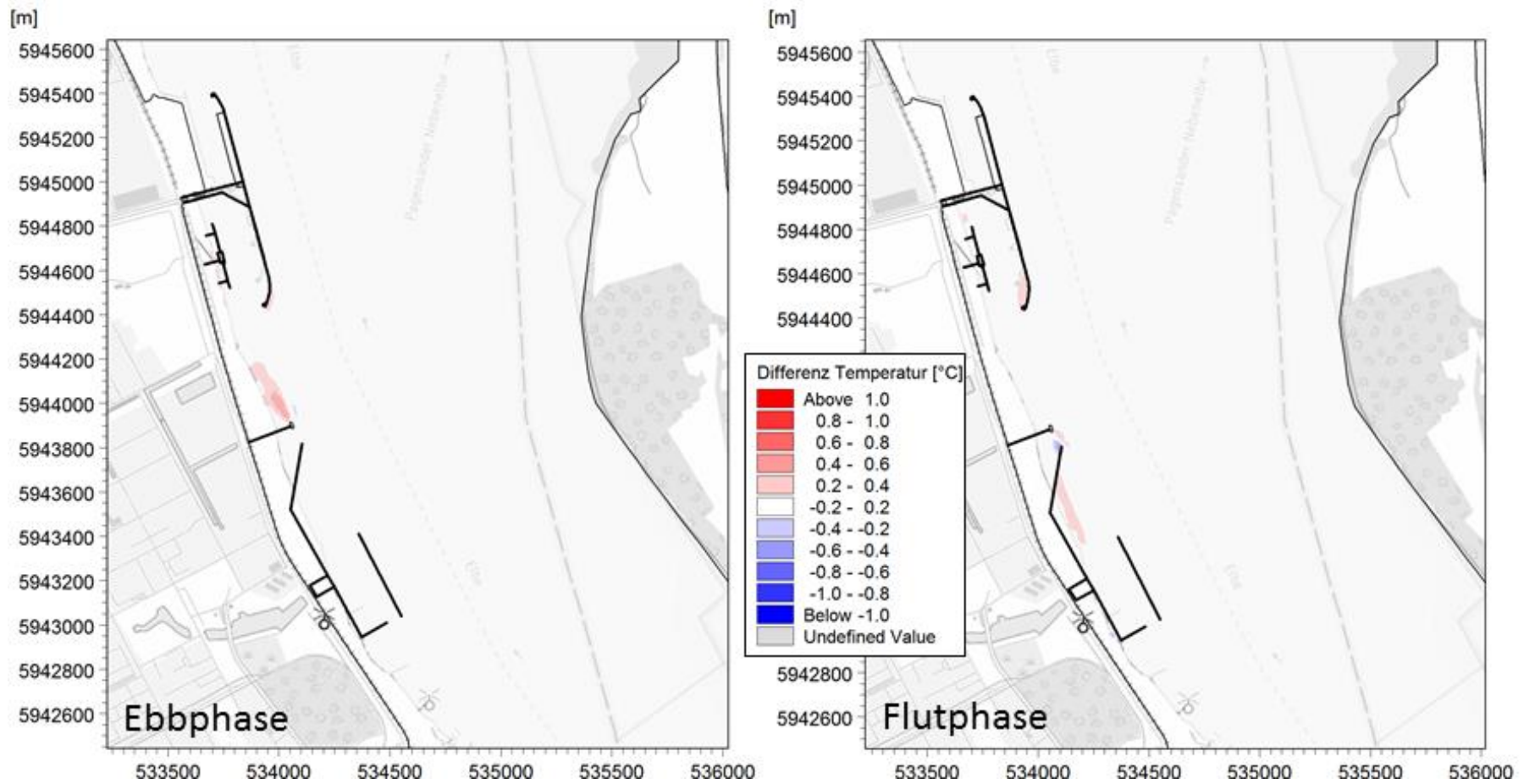


Abbildung 7.11: Tiefengemittelte Wassertemperaturen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016

7.1.3 Salzgehalte

Die Salzgehalte wurden für das Tidehochwasser am 21.07.2016 um 16:45 Uhr und das Tideniedrigwasser am 21.07.2016 um 11:20 Uhr betrachtet. Es wurden tiefengemittelte Salzgehalte abgebildet. Abbildung 7.12 zeigt die tiefengemittelten Salzgehalte im Planungsraum während des gewählten Tideniedrig- und Tidehochwasserstandes. In Abbildung 7.13 wird der zeitliche Verlauf der Salzgehalte in mittlerer Tiefe im Ist- und im Planzustand gezeigt. Die Abbildung 7.14 stellt die Auswirkungen der Planungen in Differenzenkarten der gemittelten Salzgehalte dar.

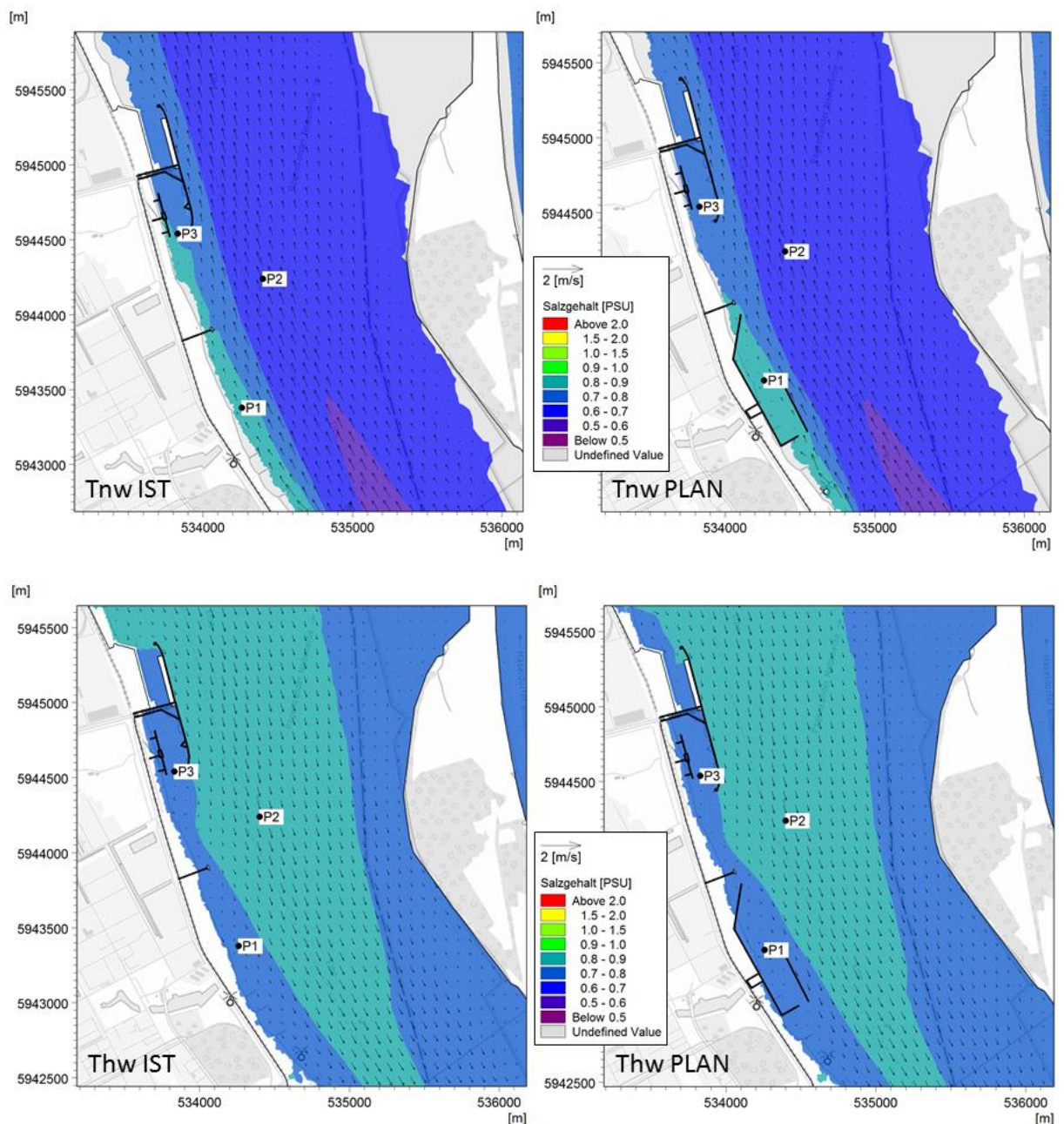


Abbildung 7.12: Tiefengemittelte Salzgehalte im Juli 2016 während des Tidehochwassers (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Die Salzgehalte änderten sich durch die neuen Strukturen im Planzustand kaum. Im zeitlichen Verlauf war am Punkt P1 im neu geplanten Hafenbecken und an Punkt P3 im Südhafen des bestehenden Hafens eine etwas geringere Salinität von ca. - 0,05 PSU vor allem in den Ebbphasen erkennbar, die durch die geringere Durchströmung im Planzustand zustande kam. In den Differenzkarten der tiefengemittelten Salzgehalte waren diese geringen Unterschiede von weniger als 0,1 PSU nicht zu erkennen.

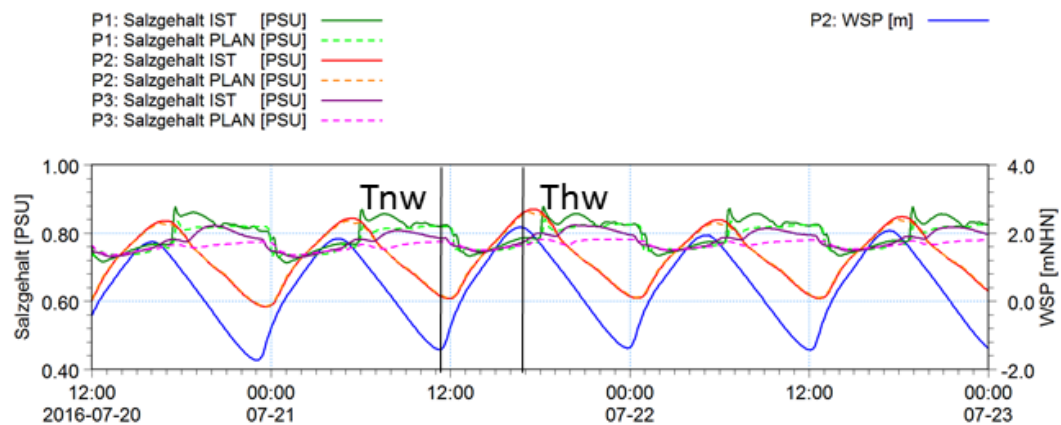


Abbildung 7.13: Zeitlicher Verlauf der Salzgehalte im Juli 2016 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

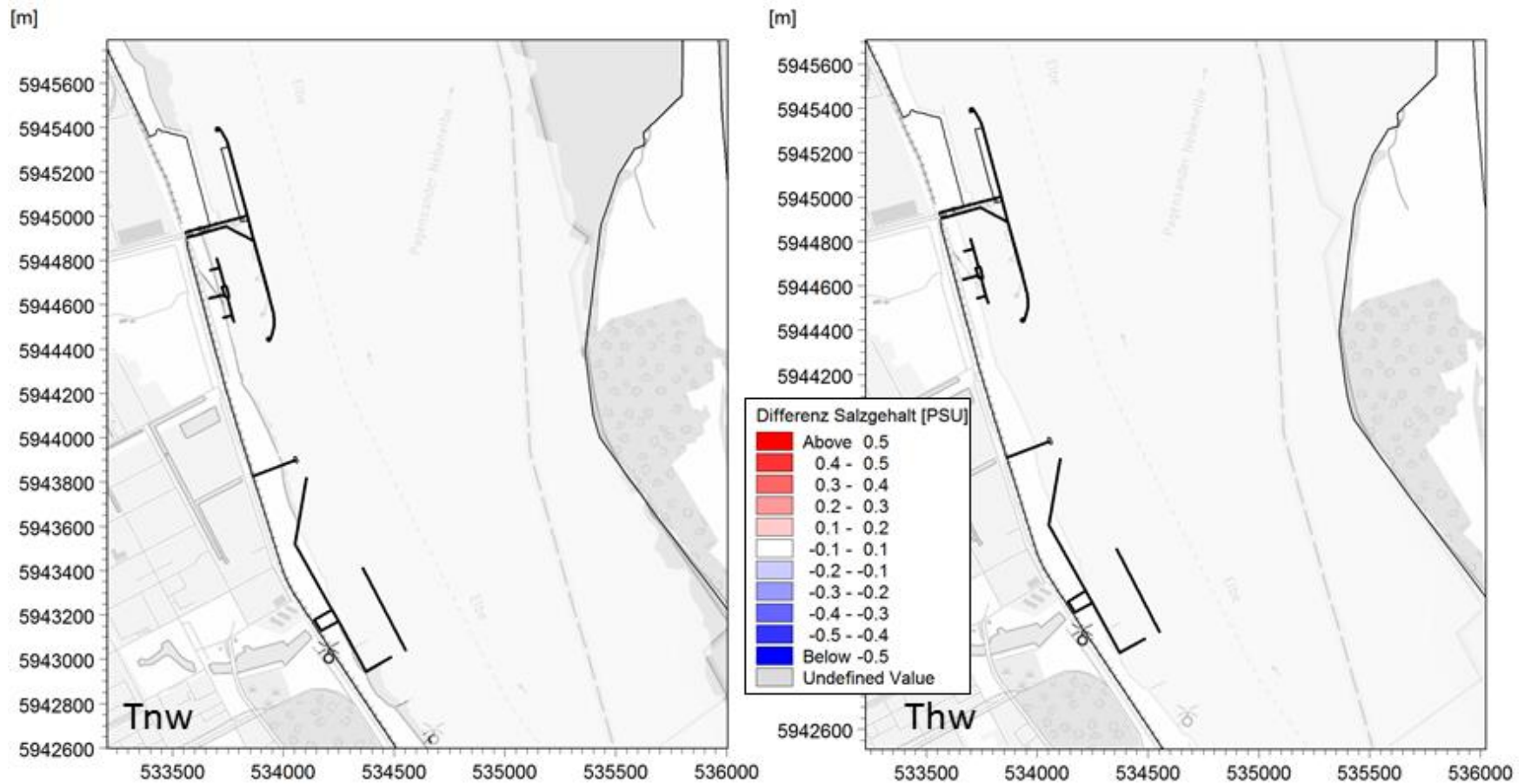


Abbildung 7.14: Tiefengemittelte Differenzen der Salzgehalte zwischen Plan- und Istzustand während des Tideniedrigwassers (links) und des Tidehochwassers (rechts) im Juli 2016

7.2 Modellzeitraum Oktober 2017

7.2.1 Wasserstände und Strömungen

Die Wasserstände wurden im Modellzeitraum 2 im Bereich des bestehenden und geplanten Anlegers für das Tidehochwasser der Sturmflut am 29.10.2017 um 08:50 Uhr und ein darauffolgendes Tideniedrigwasser am 30.10.2017 um 05:45 Uhr betrachtet. Die Auswertung der maximalen Strömungen erfolgte für die Flut- und Ebbphase der Sturmflut am 29.10.2017 um 5:40 Uhr bzw. 12:00 Uhr. Es wurden oberflächennahe und tiefengemittelte Strömungen abgebildet.

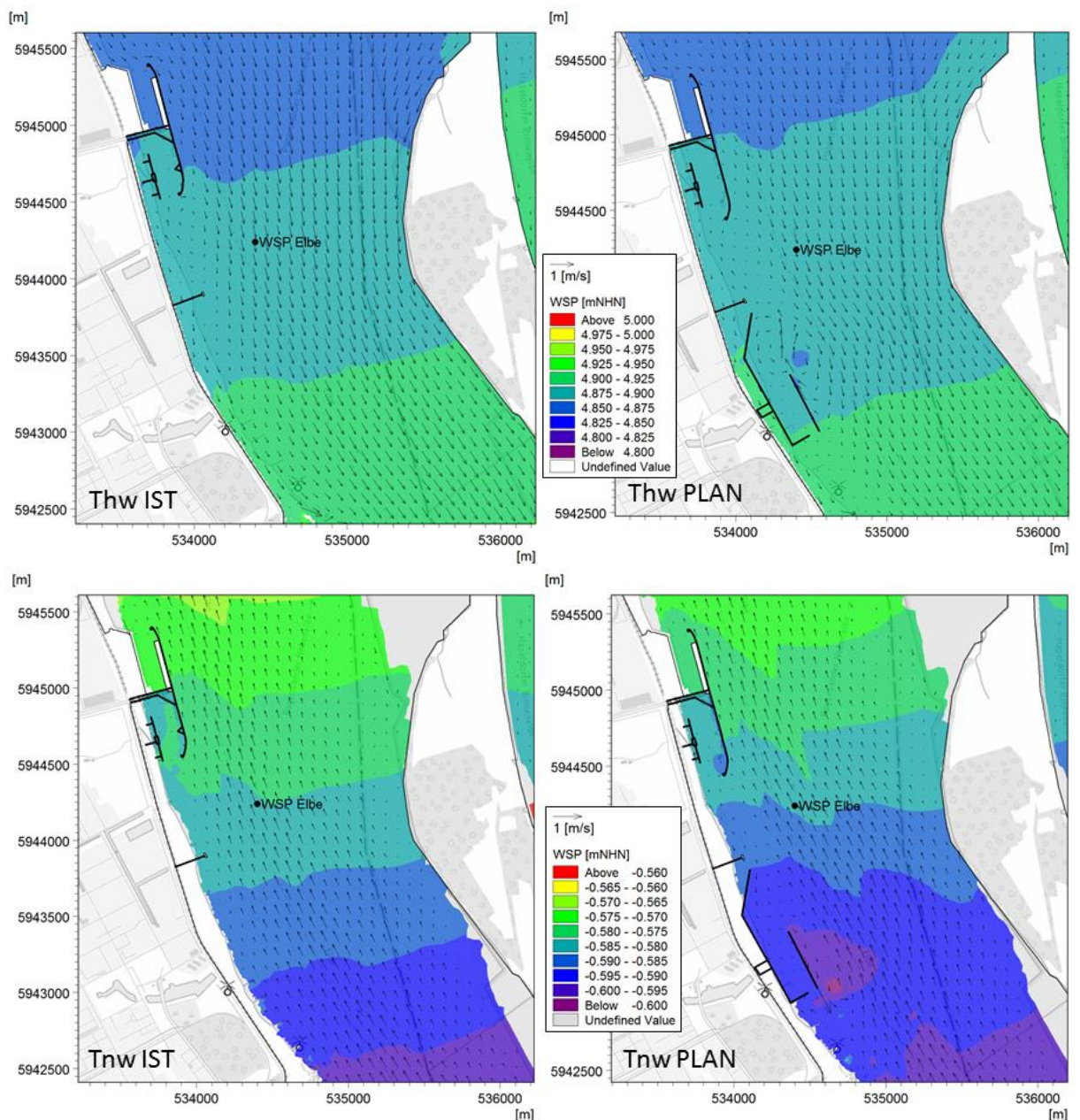


Abbildung 7.15: Wasserspiegelhöhen im Oktober 2017 während des Tidehoch- (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Die Abbildung 7.15 zeigt den Ausgangszustand (links) und den Planzustand (rechts) für das Tidehochwasser (oben) der Sturmflut und ein Tideniedrigwasser (unten). Die Auswirkungen der Veränderungen sind im zeitlichen Verlauf an einem Extraktionspunkt in der Elbe in Abbildung 7.16 und als flächige Differenzkarte in Abbildung 7.17 dargestellt. Die Differenz schwankte im zeitlichen Verlauf zwischen -1 und +1 cm. In der Differenzkarte war ein lokal engbegrenzter Absenk während des Tidehochwassers von bis zu 5 cm im Bereich des geplanten Hafenbeckens zu erkennen. Dieser Absenk infolge Rückströmung ergab sich, wie in Abbildung 7.15 zu erkennen ist, durch die Wirkung der stromparallelen Spundwand zur Elbe.

Während des Tideniedrigwassers war im direkten Vergleich in Abbildung 7.15 eine marginale Abnahme des Wasserspiegels am geplanten Anleger zu erkennen. Die Differenzen lagen unter 1 cm und sind daher in der Differenzkarte nicht dargestellt.

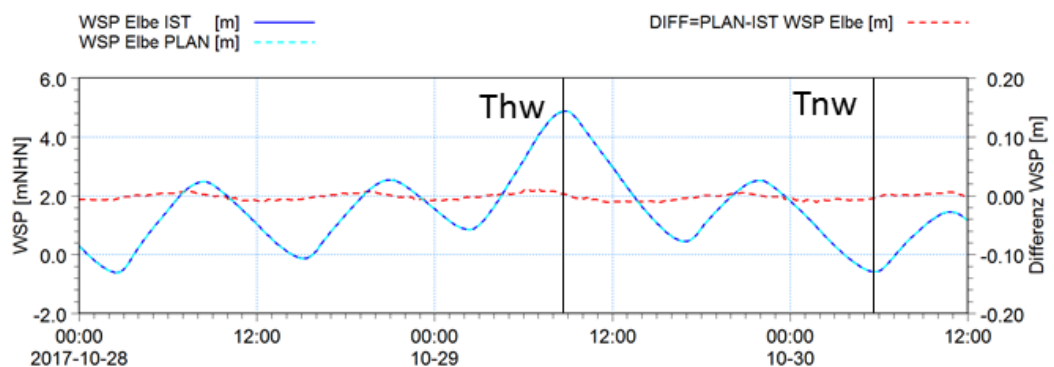


Abbildung 7.16: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände im Oktober 2017 und der Differenz (rot gestrichelte Linie) zwischen Planzustand (hellblau gestrichelte Linie) und Istzustand (blaue Linie) am Extraktionspunkt in der Elbe

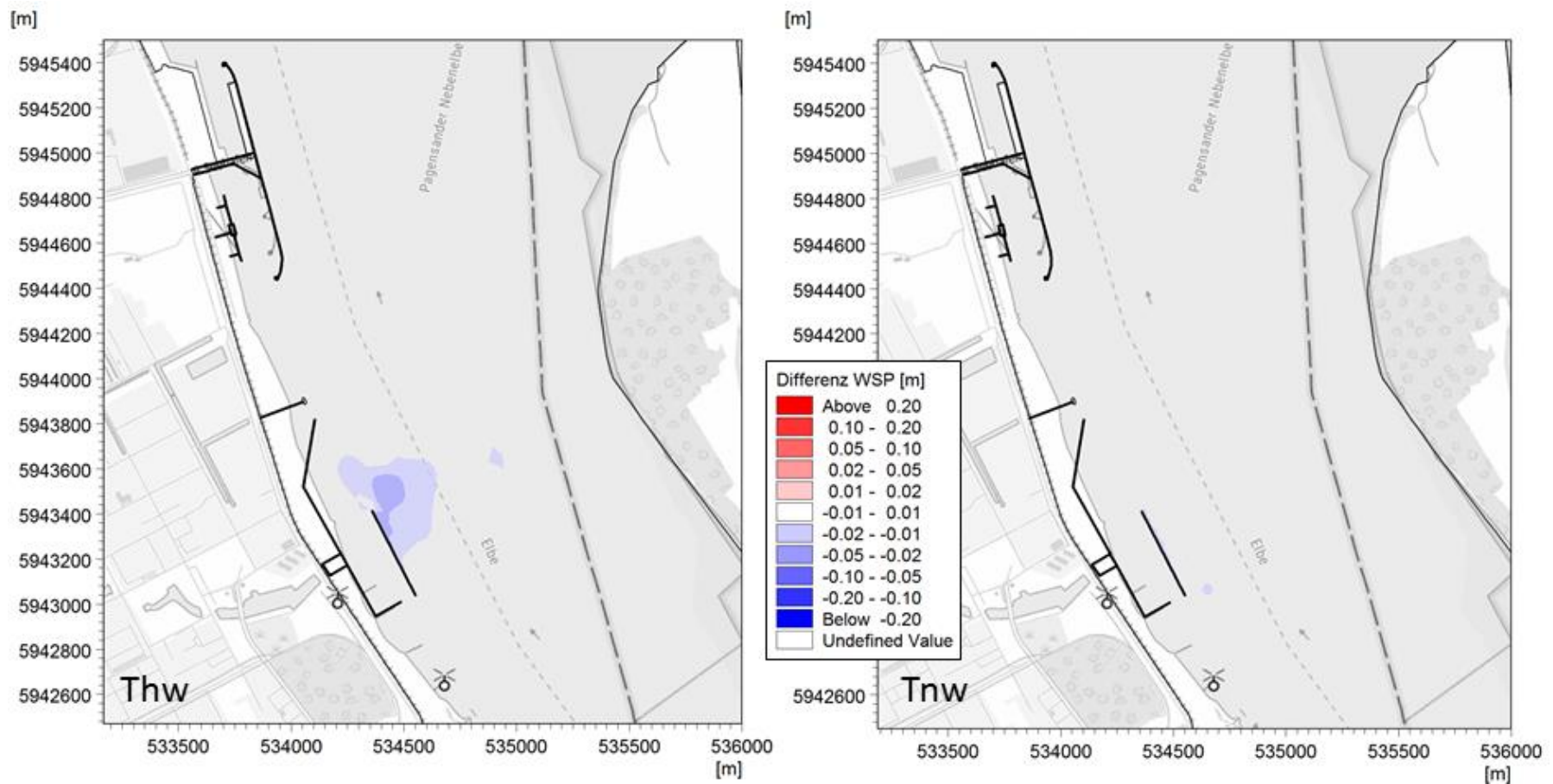


Abbildung 7.17: Wasserspiegeldifferenzen im Oktober 2017 zwischen Plan- und Istzustand während des Tidehoch- (links) und des Tideniedrigwassers (rechts)

Abbildung 7.18 zeigt die Strömungen an der Oberfläche im Planungsraum, während der gewählten Flut- und Ebbphase. In Abbildung 7.19 wird der zeitliche Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten im Ist- und im Planzustand gezeigt. Die Abbildung 7.20 stellt die Auswirkungen der Planungen während der Flut- und Ebbphase in Strömungsdifferenzenkarten dar.

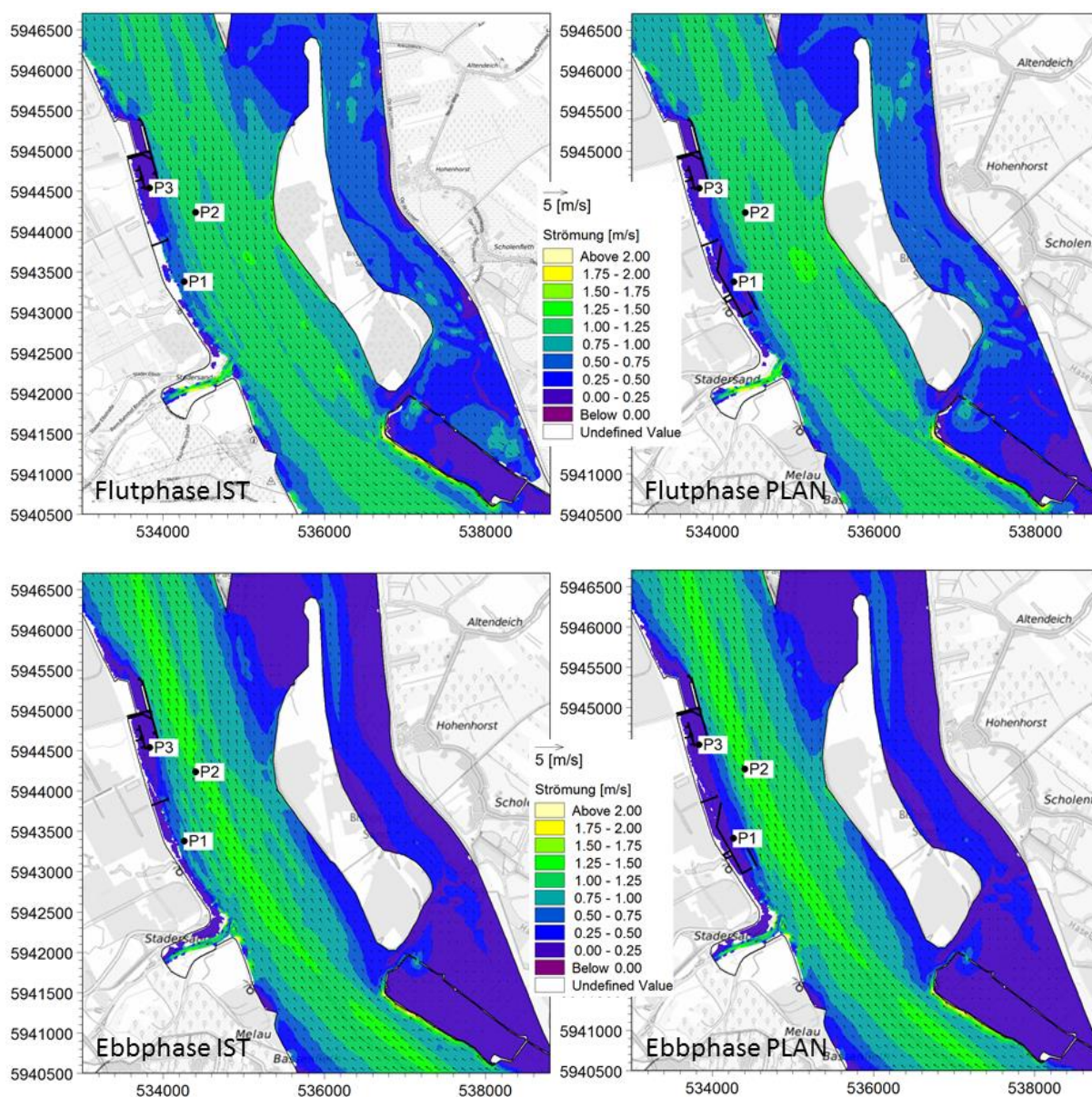


Abbildung 7.18: Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche im Oktober 2017 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Im zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten und in den Differenzenkarten war im neu geplanten Hafenbecken (am Extraktionspunkt P1) eine deutliche Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten um bis zu 0,8 m/s zu erkennen. Die Abnahme der Fließgeschwindigkeiten im Planzustand während der Ebbphase (mit bis zu -0,6 m/s) war stärker ausgeprägt, als während der Flutphase (mit -0,2 bis -0,3 m/s). Im bestehenden Hafenbecken des Hafens

Stade-Bützfleth ergab sich durch die Verlängerung des Anlegers eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten von weniger als $-0,1$ m/s (Punkt P3). An Extraktionspunkt P2 im Hauptflussstrom der Elbe waren keine nennenswerten Veränderungen zu erkennen. Die Differenzenkarte der Strömungen an der Oberfläche (Abbildung 7.20) zeigt bei Ebb- und Flutstrom eine leichte Zunahme der oberflächennahen Strömungen von bis zu $0,1$ m/s. In der tiefengemittelten Strömung blieben die Differenzen in der Fahrrinne unter $0,05$ m/s (Abbildung 7.22).

In den tiefengemittelten Differenzenkarten (Abbildung 7.22) war die Änderung der Strömungen etwas weniger ausgeprägt als bei den Strömungen an der Oberfläche (Abbildung 7.20) und waren auch flächig begrenzter durch die Spundwände in Fließrichtung. Die tiefengemittelten Differenzen von bis $-0,8$ m/s waren aber wie die Differenzen an der Oberfläche noch genauso deutlich erkennbar.

In Abbildung 7.20 und Abbildung 7.22 war bei Flutstrom, also kurz vor dem Sturmflutscitel auch eine Änderung der Strömung südlich des Dwarsloches zu erkennen. Der Vorlandbereich wird über die Haseldorfer Binnenelbe angeströmt und erst bei Sturmfluten benetzt. Diese Benetzung dieses Vorlandbereiches erfolgt mit einer leichten zeitlichen Verschiebung, die ohne eine nennenswerte Differenz in der Wasserspiegellage, sondern lediglich in der veränderten Strömung im Flachwasserbereich des Polders zu erkennen ist.

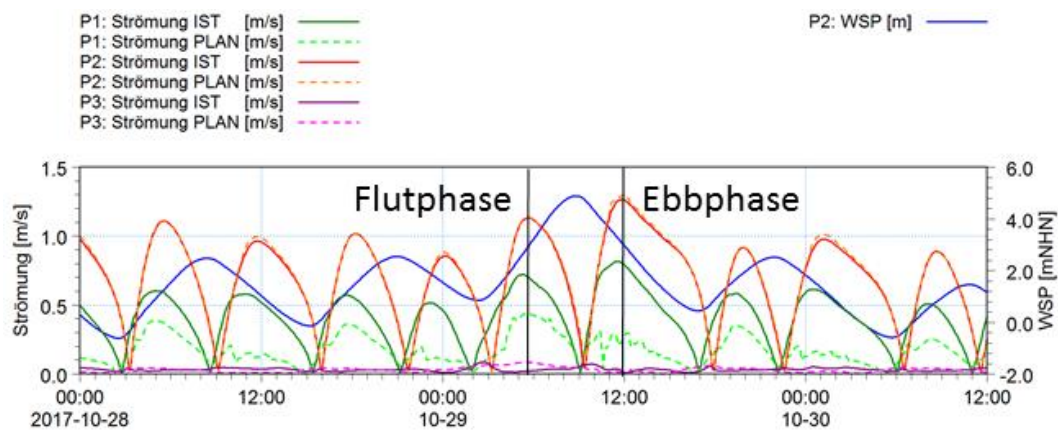


Abbildung 7.19: Zeitlicher Verlauf der Strömungen im Oktober 2017 an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

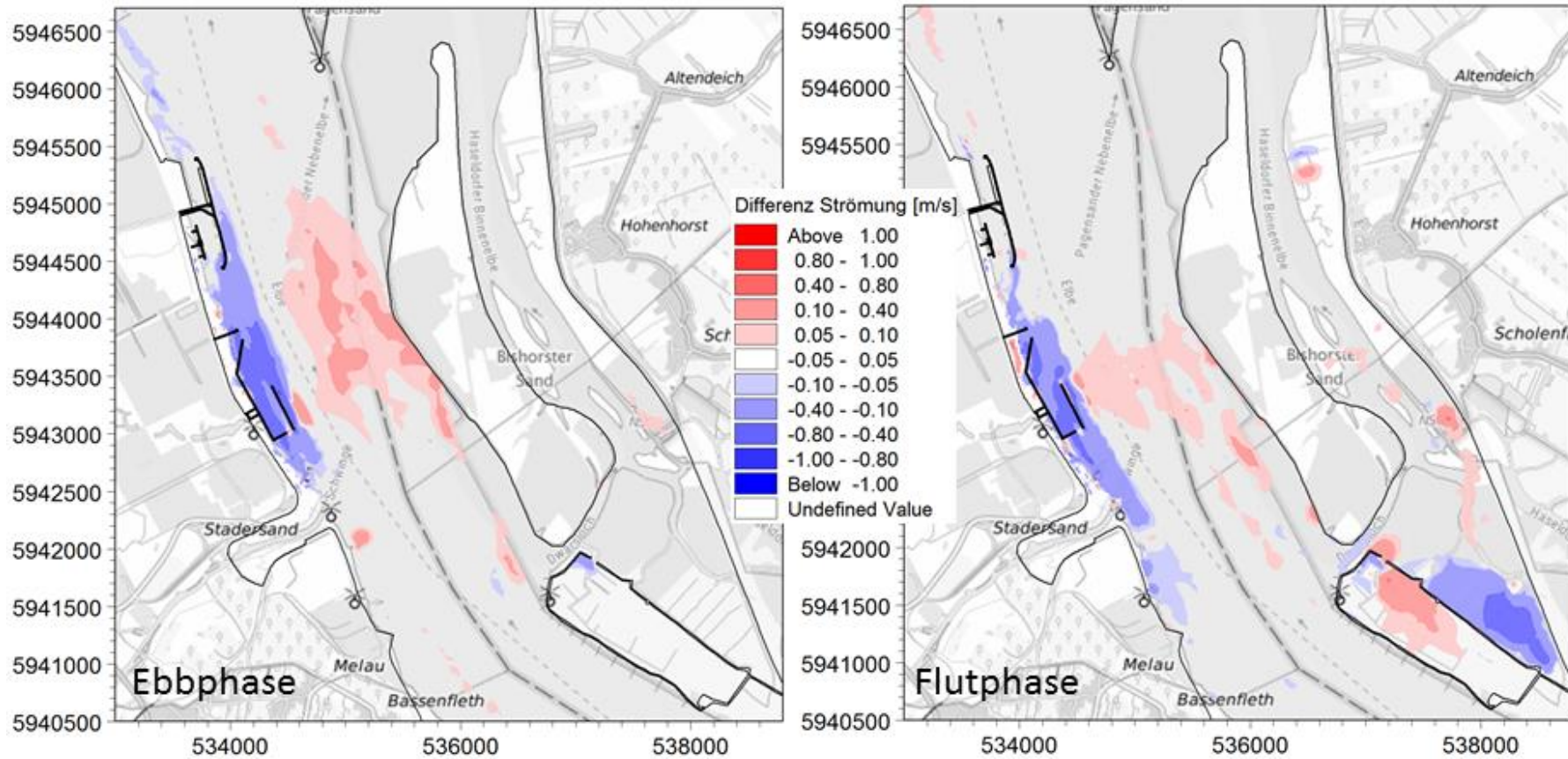


Abbildung 7.20: Strömungsdifferenzen an der Oberfläche zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017

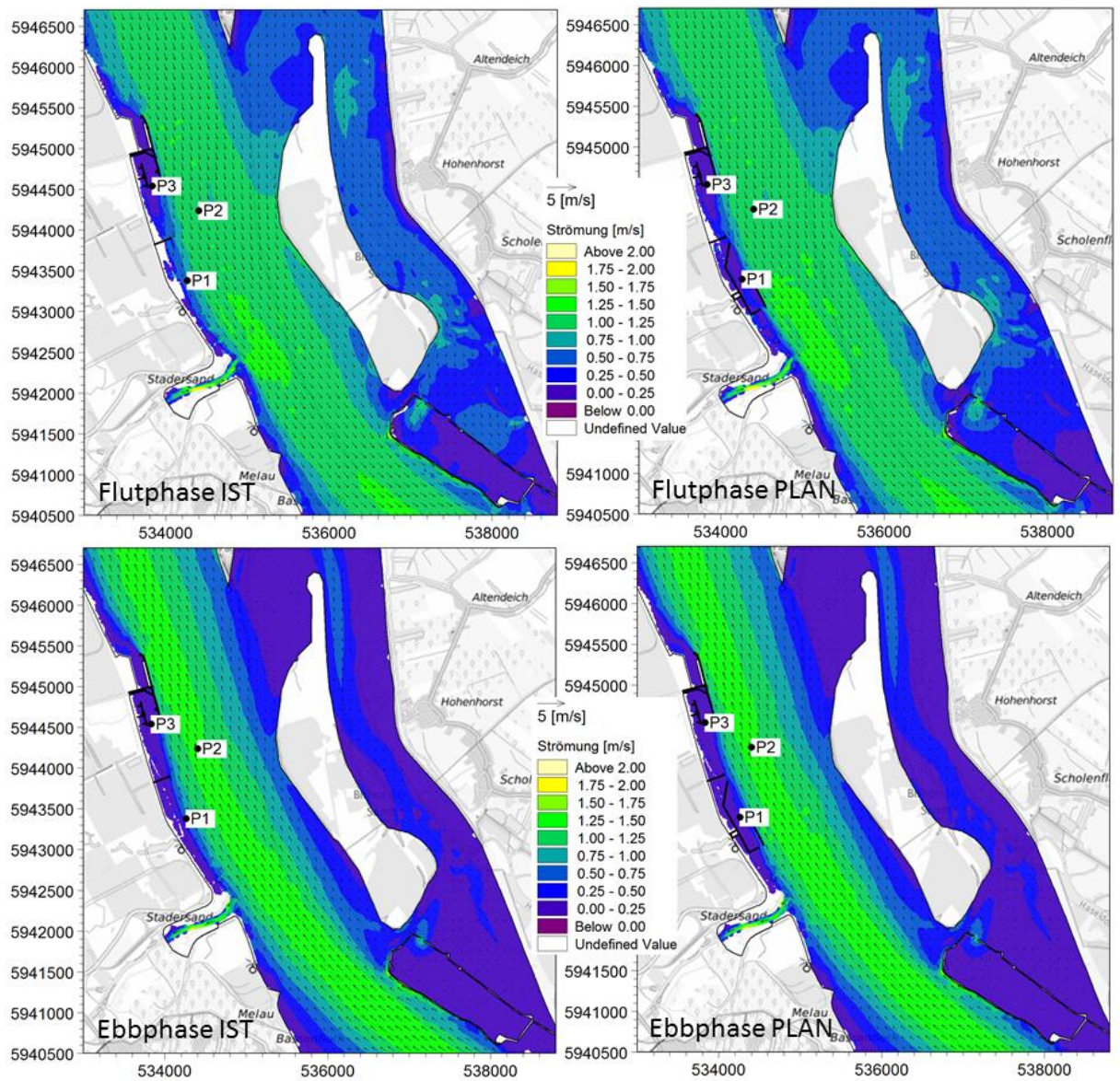


Abbildung 7.21: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Oktober 2017 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

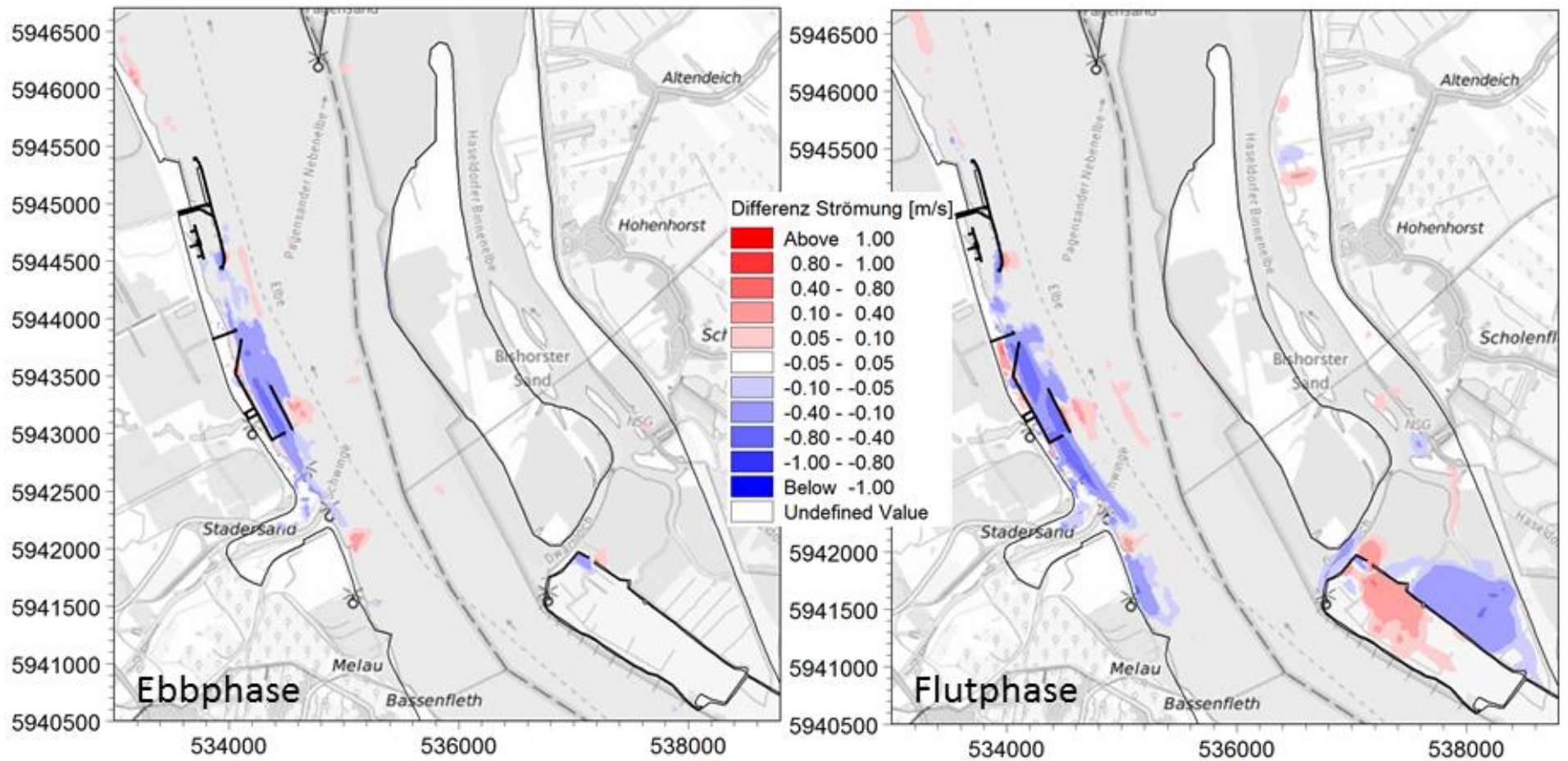


Abbildung 7.22: Tiefengemittelte Strömungsdifferenzen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017

7.2.2 Wassertemperaturen

Die Auswertung der Wassertemperaturen erfolgte für die Flut- und Ebbphase der Sturmflut am 29.10.2017 um 5:40 Uhr bzw. 12:00 Uhr. Es wurden tiefengemittelte Wassertemperaturen abgebildet. Abbildung 7.23 zeigt die tiefengemittelten Wassertemperaturen im Planungsraum während des gewählten Tideniedrig- und Tidehochwasserstandes. In Abbildung 7.24 wird der zeitliche Verlauf der Wassertemperaturen in mittlerer Tiefe im Ist- und im Planzustand gezeigt. Die Abbildung 7.25 stellt die Auswirkungen der Planungen in Differenzkarten der gemittelten Wassertemperaturen dar.

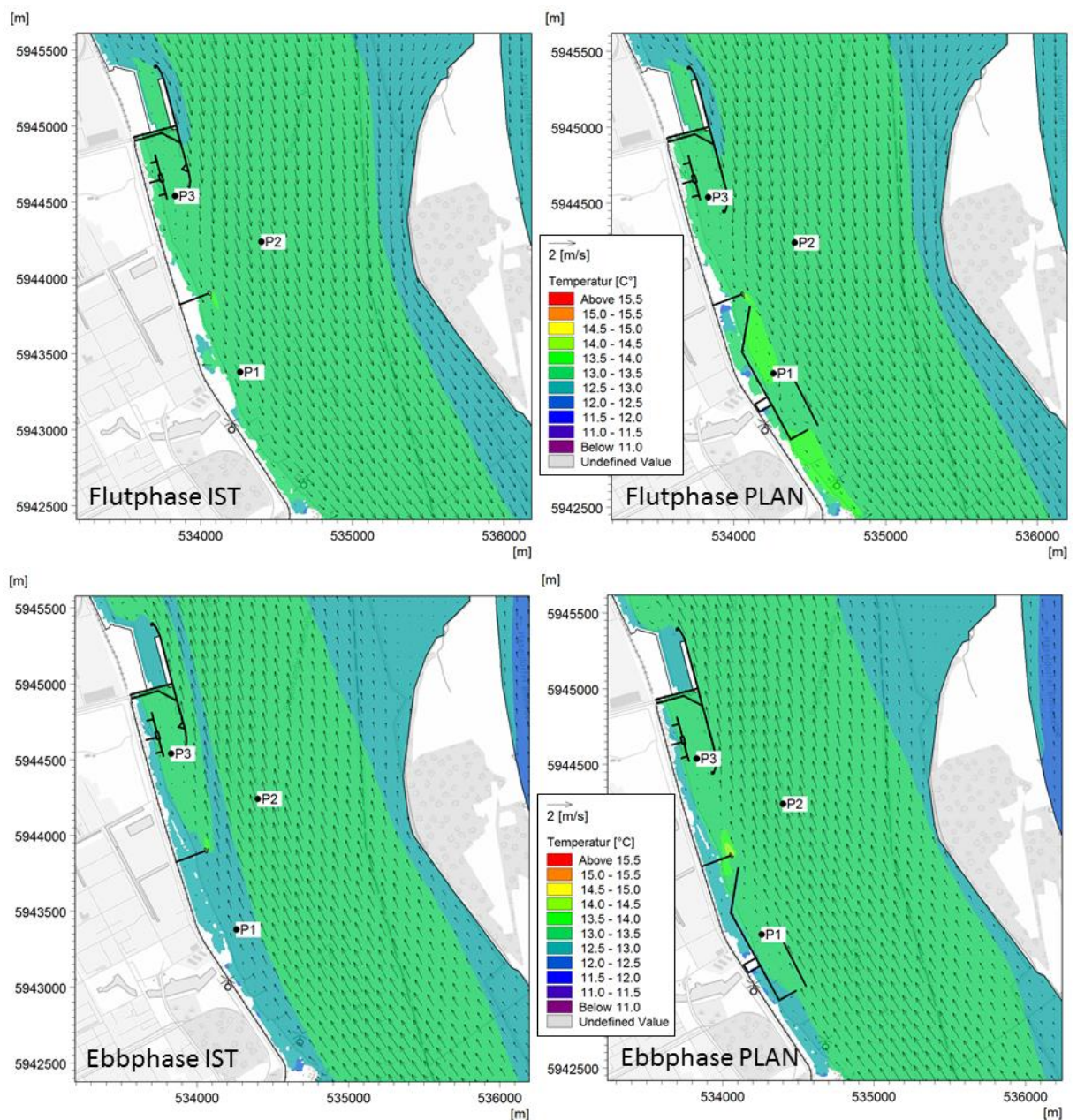


Abbildung 7.23: Tiefengemittelte Wassertemperaturen im Oktober 2017 während der Flut- (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Im zeitlichen Verlauf der Wassertemperaturen fiel am Punkt P1 im neu geplanten Hafenbecken ein kurzer, aber starker Temperaturanstieg um bis zu 1,5°C in den Flutphasen des Istzustandes auf. Die Wirkung war vergleichbar mit der im Juli 2016. Der Anstieg war im Planzustand ebenfalls erkennbar, aber nicht so stark wie im Istzustand. Dieser Anstieg wurde durch die Kühlwasserrückgabe der DOW erzeugt. Der Anstieg der Wassertemperaturen fiel im Planzustand nicht so stark aus, da sich der Wasseraustausch durch die schräge Spundwand des neuen Hafenbeckens reduziert wurde. Zudem wurde das wärmere Wasser durch die Verwirbelungen hinter der Spundwand besser durchmischt. Das wärmere Wasser kam im Planzustand auch zeitlich etwas versetzt am Extraktionspunkt P1 an (siehe Abbildung 7.24), daher ergaben sich die positiven Differenzen (bis 0,4 °C) im Bereich des geplanten Hafenbeckens in Abbildung 7.25. Nördlich des geplanten Hafenbeckens direkt am Kühlwassereinlaufbauwerk ergeben sich in der Ebbphase positive Differenzen von bis zu 0,8 °C. Diese werden durch die verzögerte Durchmischung des Wassers (hervorgerufen durch die geringeren Strömungen durch das geplante Hafenbecken) erzeugt.

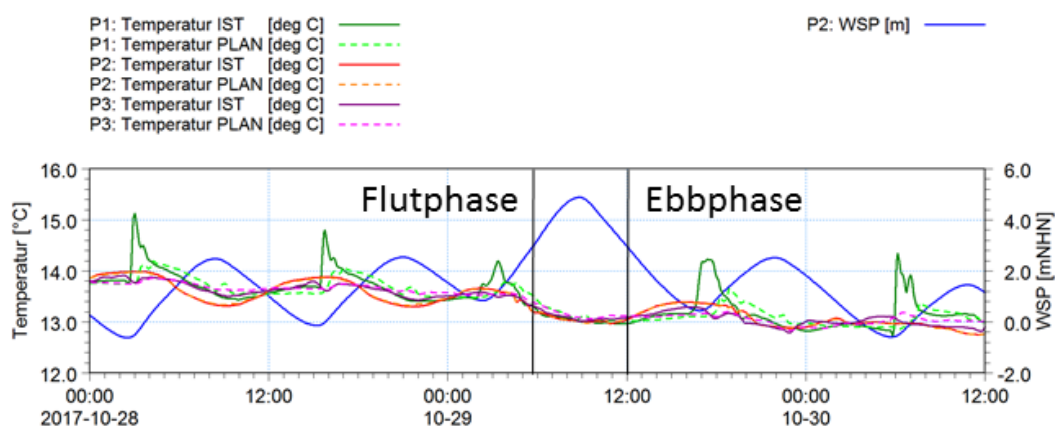


Abbildung 7.24: Zeitlicher Verlauf der Wassertemperaturen in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) im Oktober 2017 an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

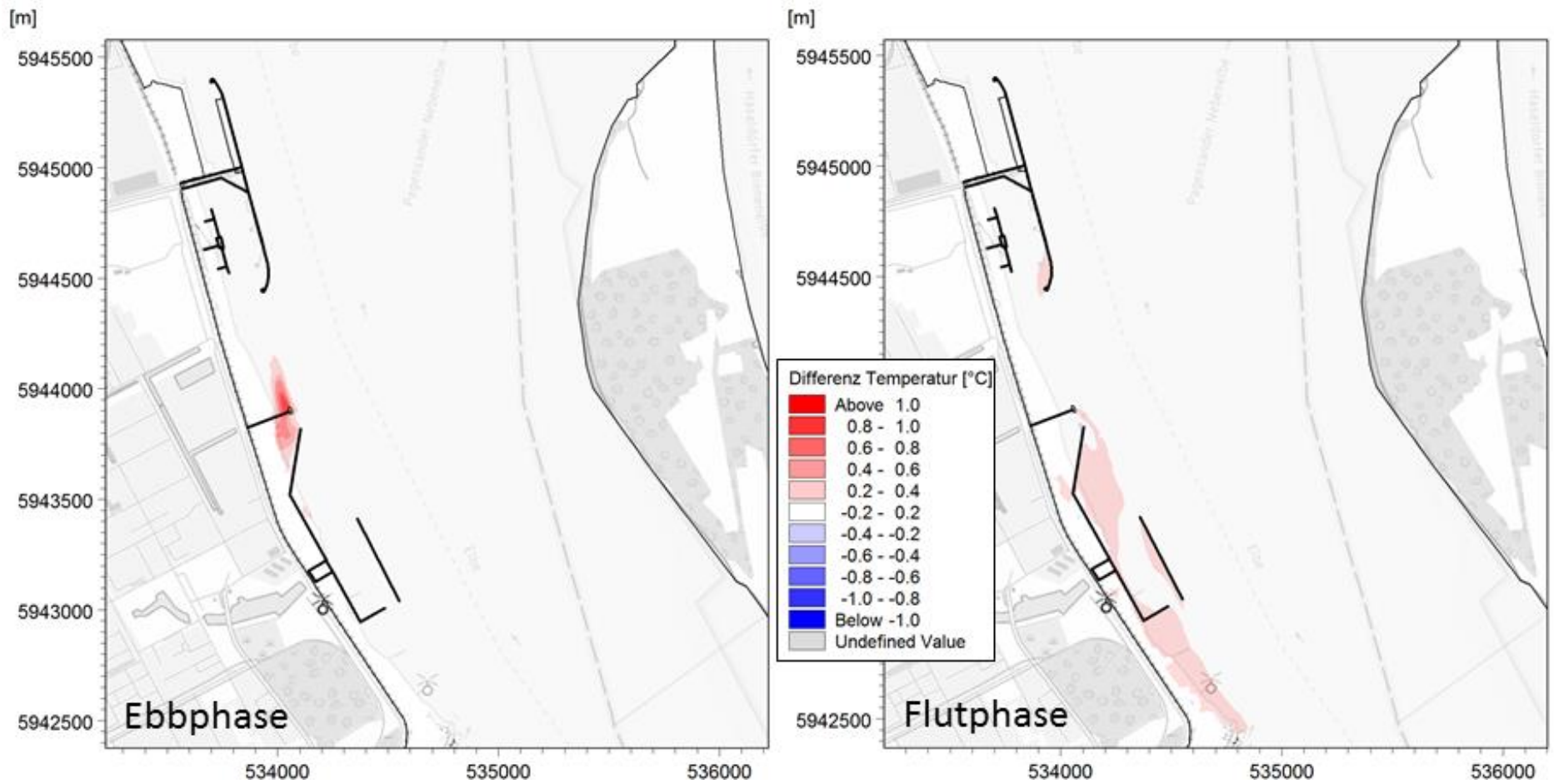


Abbildung 7.25: Tiefengemittelte Wassertemperaturen zwischen Plan- und Istzustand während der Ebb- (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017

7.2.3 Salzgehalte

Die Salzgehalte wurden für das Tidehochwasser der Sturmflut am 29.10.2017 um 08:50 Uhr und ein darauffolgendes Tideniedrigwasser am 30.10.2017 um 05:45 Uhr betrachtet. Es wurden tiefengemittelte Salzgehalte abgebildet. Abbildung 7.26 zeigt die tiefengemittelten Salzgehalte im Planungsraum während des gewählten Tideniedrig- und Tidehochwasserstandes. In Abbildung 7.27 wird der zeitliche Verlauf der Salzgehalte in mittlerer Tiefe im Ist- und im Planzustand gezeigt. Die Abbildung 7.28 stellt die Auswirkungen der Planungen in Differenzenkarten der gemittelten Salzgehalte dar.

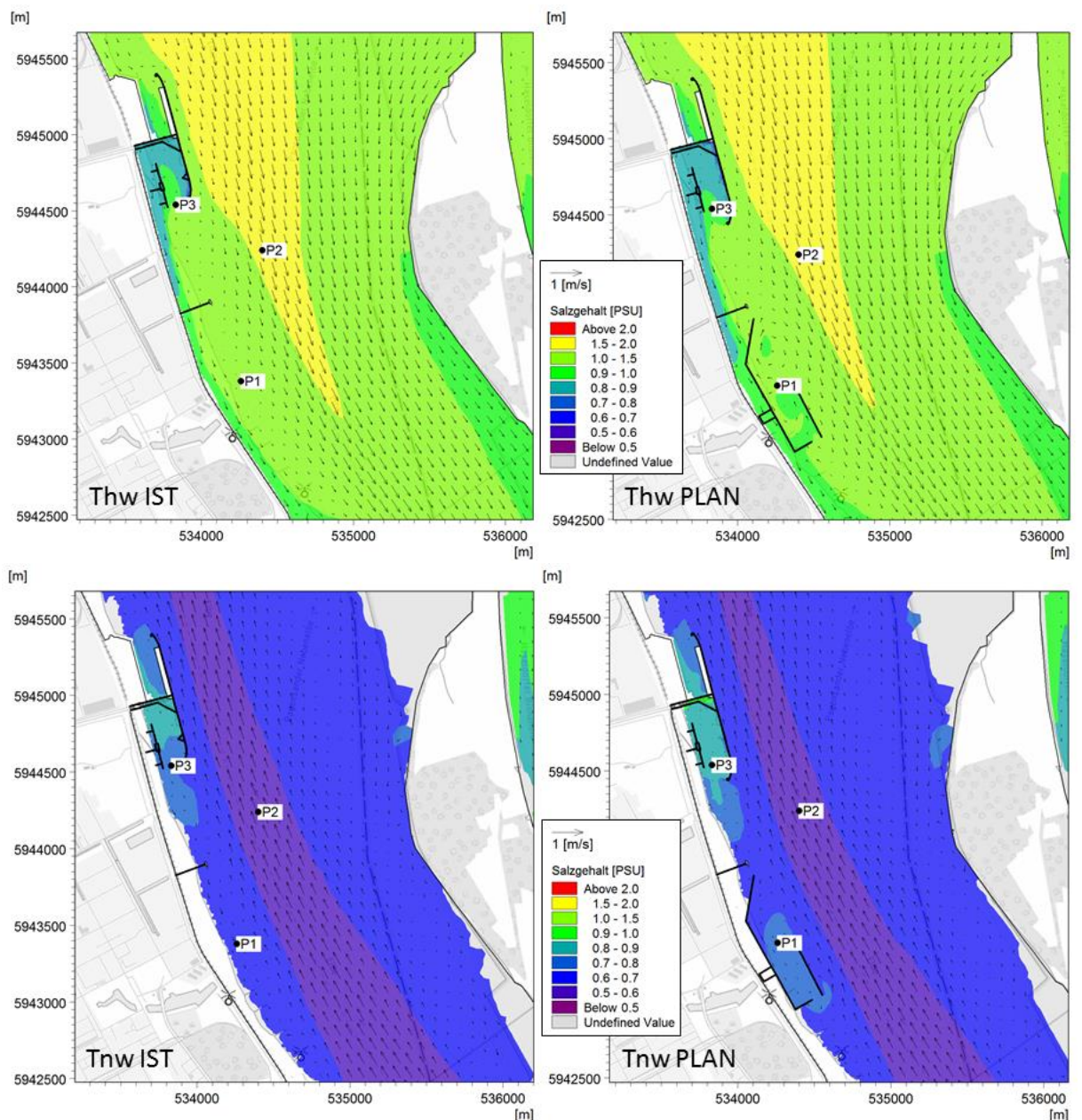


Abbildung 7.26: Tiefengemittelte Salzgehalte im Oktober 2017 während des Tidehochwassers der Sturmflut (oben) und des Tideniedrigwassers (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Durch die neuen Strukturen im Planzustand ergaben sich geringe Änderungen der Salzgehalte. Im zeitlichen Verlauf war am Punkt P1 im neu geplanten Hafenbecken und an Punkt P3 im Südhafen des bestehenden Hafens eine etwas höhere Salinität im Planzustand von ca. 0,2 PSU vor und in der Ebbphase der Sturmflut erkennbar. Diese wurde durch die geringere Durchströmung im Planzustand verursacht. Dadurch gelangte nur langsam Wasser mit geringer Salinität in die Hafenbecken. Der hohe Salzgehalt aus dem Eintrag der Sturmflut blieb länger erhalten, wobei der Salzgehalt in den Hafenbecken im Istzustand durch die höhere Durchströmung schneller abnahm. Die höheren Salzgehalte von bis zu 0,2 PSU im Planzustand während des Tideniedrigwassers bzw. die niedrigeren Salzgehalte von bis zu -0,4 PSU im Planzustand während des Tidehochwassers sind in der Differenzkarte (Abbildung 7.28) zu sehen. Die Änderungen wurden als gering, lokal auf 500 m im Anleger selbst und temporär auf ca. 3 Tiden nach der Sturmflut begrenzt eingestuft.

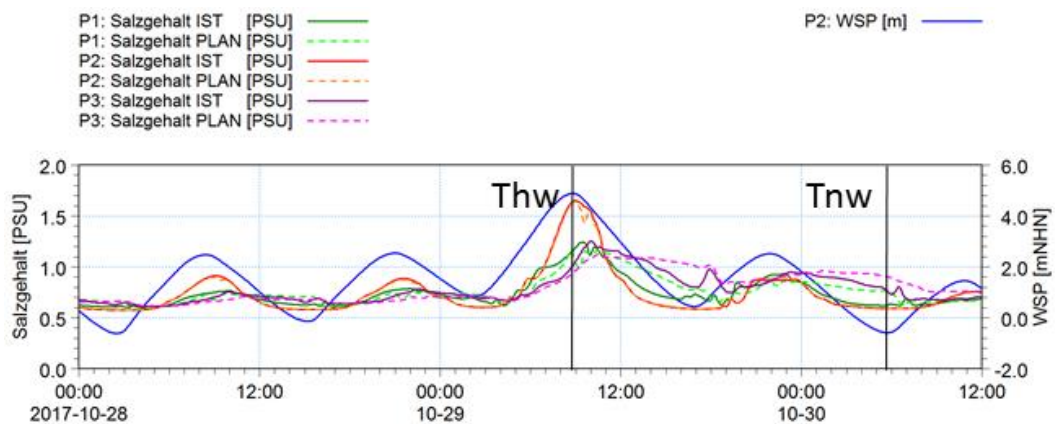


Abbildung 7.27: Zeitlicher Verlauf der Salzgehalte im Oktober 2017 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2 und P3 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

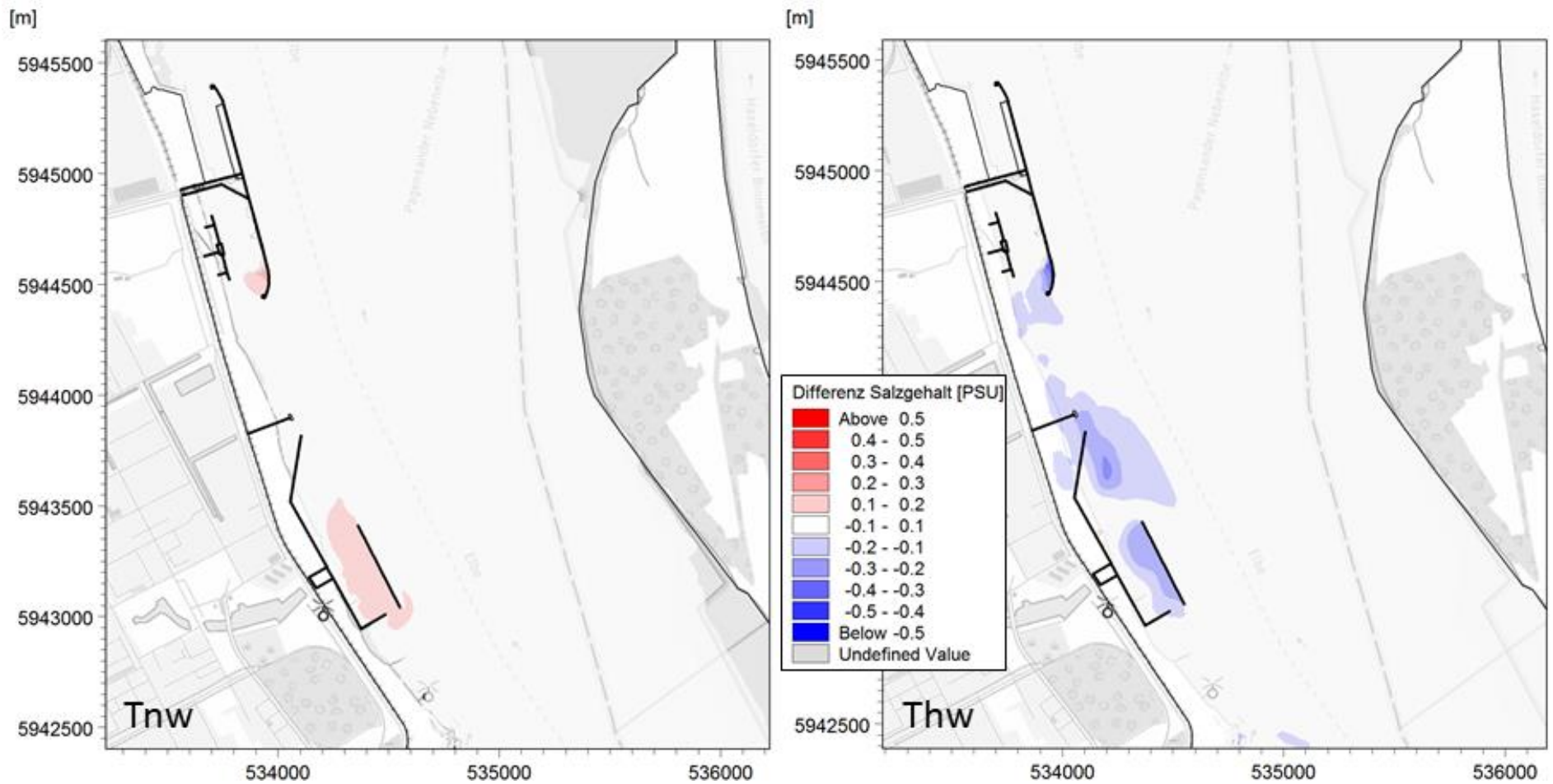


Abbildung 7.28: Tiefengemittelte Differenzen der Salzgehalte zwischen Plan- und Istzustand während des Tideniedrigwassers (links) und des Tidehochwassers der Sturmflut (rechts) im Oktober 2017

8 Auswertung des Sedimenttransportes

Für beide Modellzeiträume wird die Situation im Ist- und Planzustand als auch die Differenz beider Zustände für den Parameter Schwebstoffkonzentration für einen exemplarischen Zeitpunkt der Ebb- und Flutphase flächenhaft, tiefengemittelt gezeigt. Die Sohländerung wird für den Ist- und Planzustand und auch die Differenz beider Zustände nach 16 Tagen gezeigt. Für die Differenzkarten werden die Parameter des Ausgangszustandes von denen des Planzustandes abgezogen.

Weiterhin wurden für die Schwebstoffkonzentrationen Zeitreihen von Ist- und Planzustand an bestimmten Punkten (Punkt P1 im geplanten Hafenbecken, Punkt P2 im Flussstrom der Elbe und Punkt P3 im bestehenden Südhafenbecken des Hafens Stade-Bützfleth) im Umfeld der Baumaßnahme extrahiert und in Diagrammen dargestellt.

Diese hier getroffenen Aussagen der Sohländerung sind nur qualitativer Natur. Für quantitative Aussagen war der Modellzeitraum von 16 Tagen zu kurz. In dieser kurzen Zeit kann kein morphologisches Gleichgewicht erreicht werden.

8.1 Modellzeitraum Juli 2016

8.1.1 Schwebstoffgehalte

Die Auswertung der Schwebstoffgehalte erfolgte für eine Ebb- und eine Flutphase am 21.07.2016 um 10:15 Uhr bzw. 15:45 Uhr. Es werden tiefengemittelte Schwebstoffkonzentrationen abgebildet. Abbildung 8.1 zeigt die tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen im Planungsraum, während der Ebb- und der Flutphase. In Abbildung 8.2 wird der zeitliche Verlauf der Schwebstoffkonzentrationen in mittlerer Tiefe im Ist- und im Planzustand gezeigt. Die Abbildung 8.3 stellt die Auswirkungen der Planungen in Differenzkarten der tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen dar.

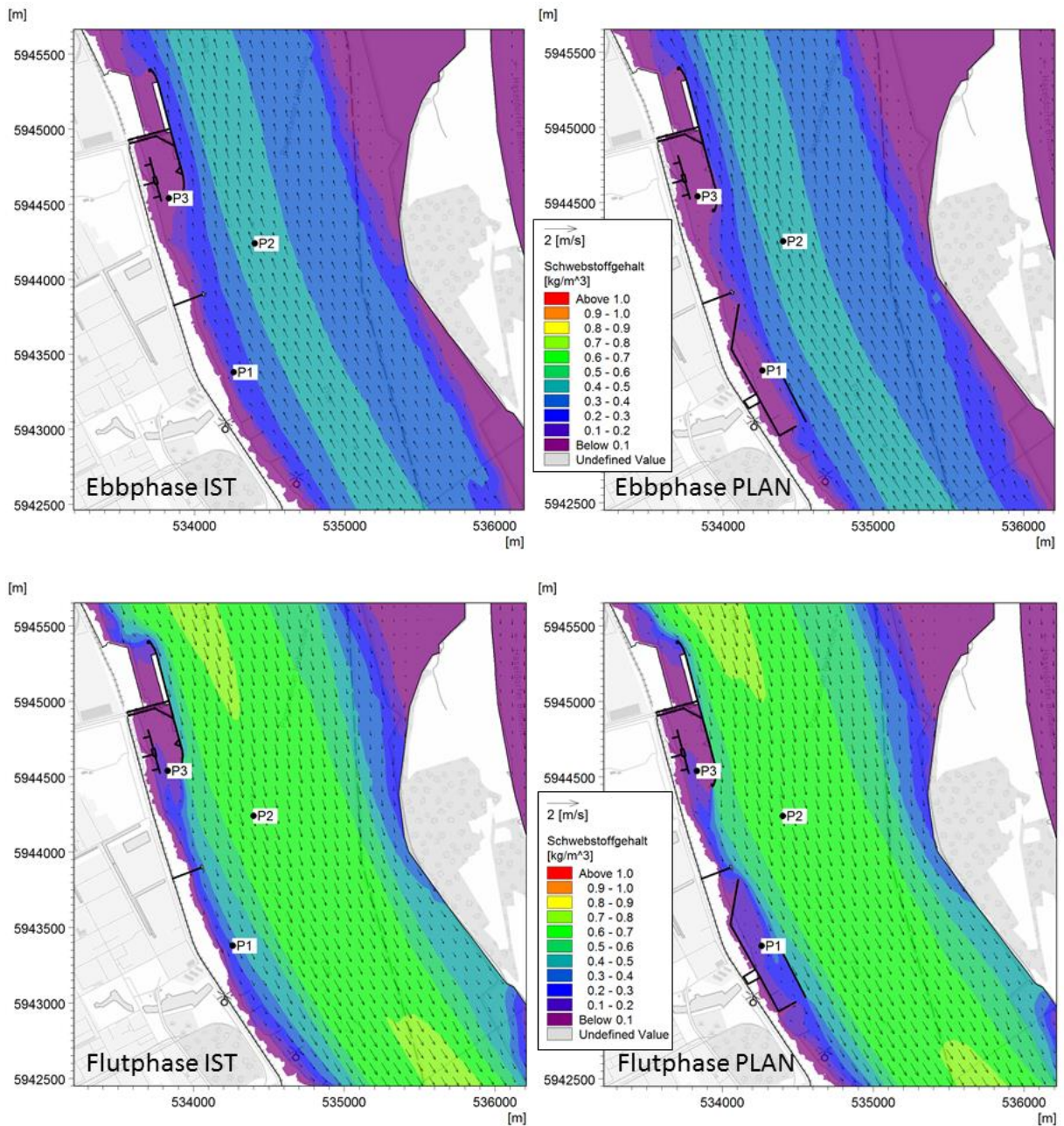


Abbildung 8.1: Tiefengemittelte Schwebstoffgehalte im Juli 2016, während der Ebbphase (oben) und der Flutphase (unten) für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

In Abbildung 8.1 war in der Ebb- als auch in der Flutphase eine Verringerung der Schwebstoffkonzentrationen im neu geplanten Hafenbecken zu erkennen. Die Differenz lag im neu geplanten Hafenbecken in der Flutphase bei ca. $-0,3 \text{ kg/m}^3$ und in der Ebbphase bei ca. $-0,2 \text{ kg/m}^3$ (Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3). Im südlichen Hafenbecken des bestehenden Hafens Stade-Bützfleth kam es durch die Verlängerung des Anlegers zu einer Verlagerung der minimalen und maximalen Schwebstoffkonzentrationen. Insgesamt wurden durch das natürliche Strömungsverhalten mit sehr geringen Strömungen von unter $0,1 \text{ m/s}$ im bestehenden Südhafen (siehe Kapitel 7.1.1) nur geringe Schwebstoffgehalte erzielt.

Die Änderungen in der Schwebstoffkonzentration südlich des Anlegers gegenüber der Schwingemündung auf der Ostseite der Elbe war auf leichte Änderungen der Strömungen an dieser Stelle zurückzuführen. Wie in Abbildung 7.8 zu erkennen ist, kam es lokal zur leichten Erhöhung bzw. temporär auch zur Absenkung der Strömungen auf dem gegenüberliegenden Ufer. Dies führte im Schwebstofftransport zur veränderten Ausbreitung der Schwebstoffe in der Elbe am Ufer und entsprechend zur lokalen Erhöhung bzw. Absenkung der Schwebstoffkonzentrationen um ca. 0,1 bis 0,05 kg/m³ (Abbildung 8.3). Die Änderungen waren kleinräumig bis punktuell und auf kurze Uferabschnitte (< 400 m) begrenzt.

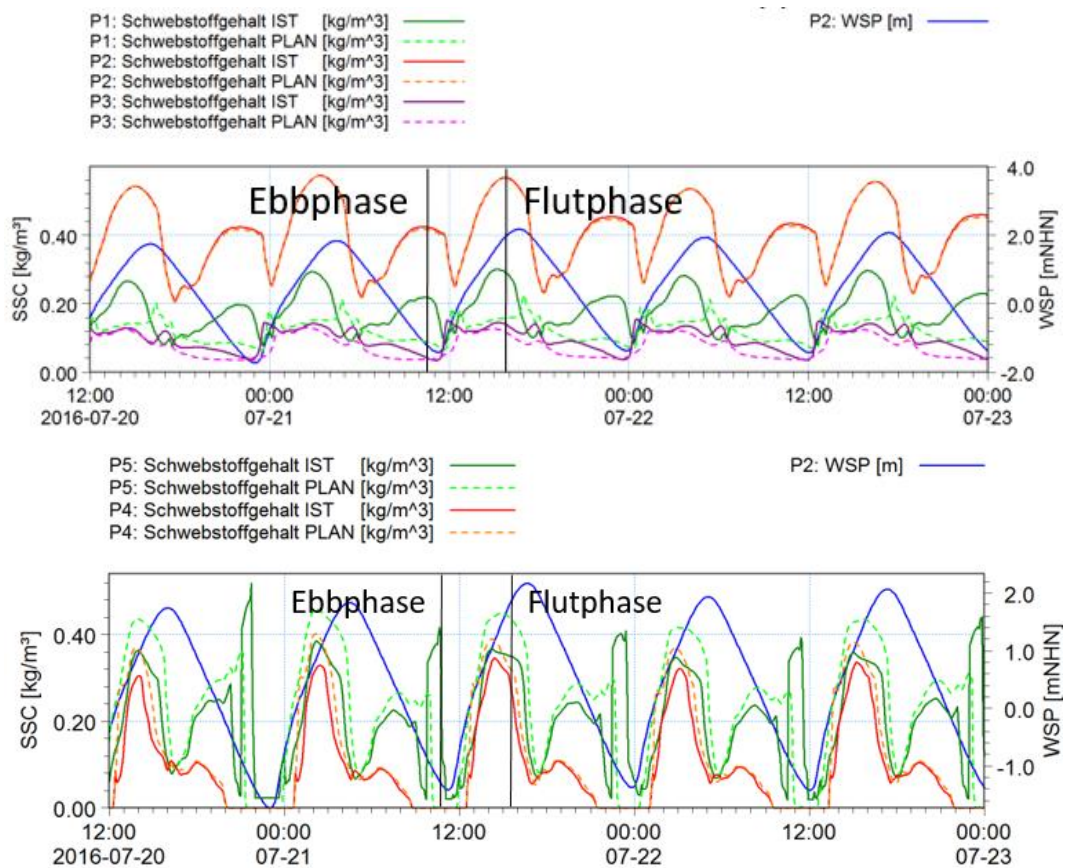


Abbildung 8.2: Zeitlicher Verlauf der Schwebstoffgehalte im Juli 2016 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2, P3, P4 und P5 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

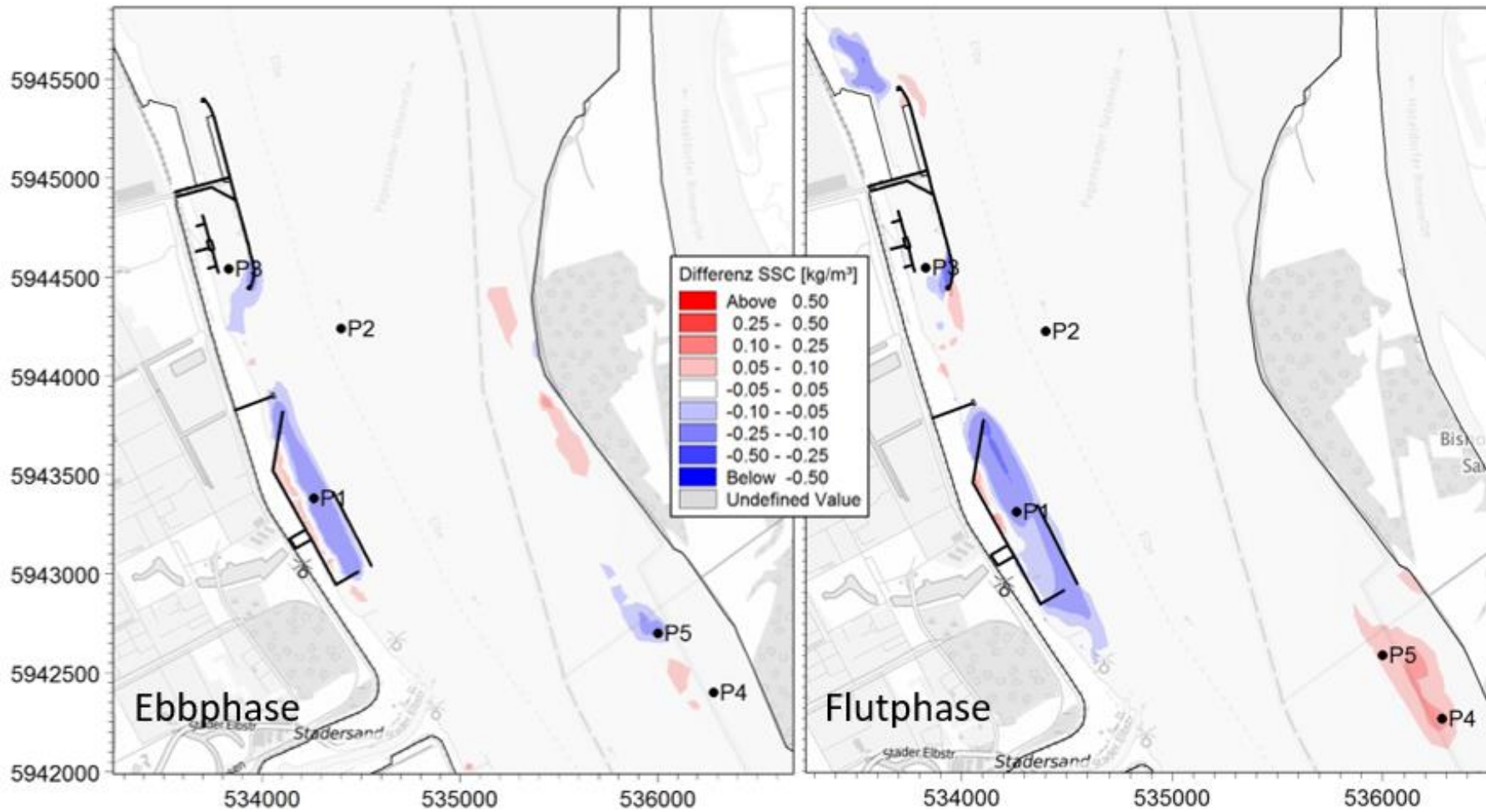


Abbildung 8.3: Tiefengemittelte Differenzen der Schwebstoffgehalte zwischen Plan- und Istzustand während der Ebbphase (links) und der Flutphase (rechts) im Juli 2016

8.1.2 Sohländerung

Die Veränderungen im Strömungsfeld erzeugen eine Veränderung der Morphologie im Bereich des geplanten Hafenbeckens und des verlängerten Anlegers am Südhafen Stade-Bützfleth. Abbildung 8.4 zeigt die Sohländerung nach 16 Tagen im Planungsraum im Ist- und im Planzustand. Die Abbildungen zeigen Ergebnisse mit Sedimentationen in den Farbskalen orange bis rot und Erosionen in den Farbskalen hellblau bis dunkelblau.

Abbildung 8.5 zeigt die Auswirkungen der Planungen in Differenzkarten der Sohländerung. Rote Flächen zeigen eine Zunahme der Sedimentation bzw. eine Abnahme der Erosion im Planzustand und blaue Flächen dagegen eine Abnahme der Sedimentation bzw. eine Zunahme der Erosion im Planzustand.

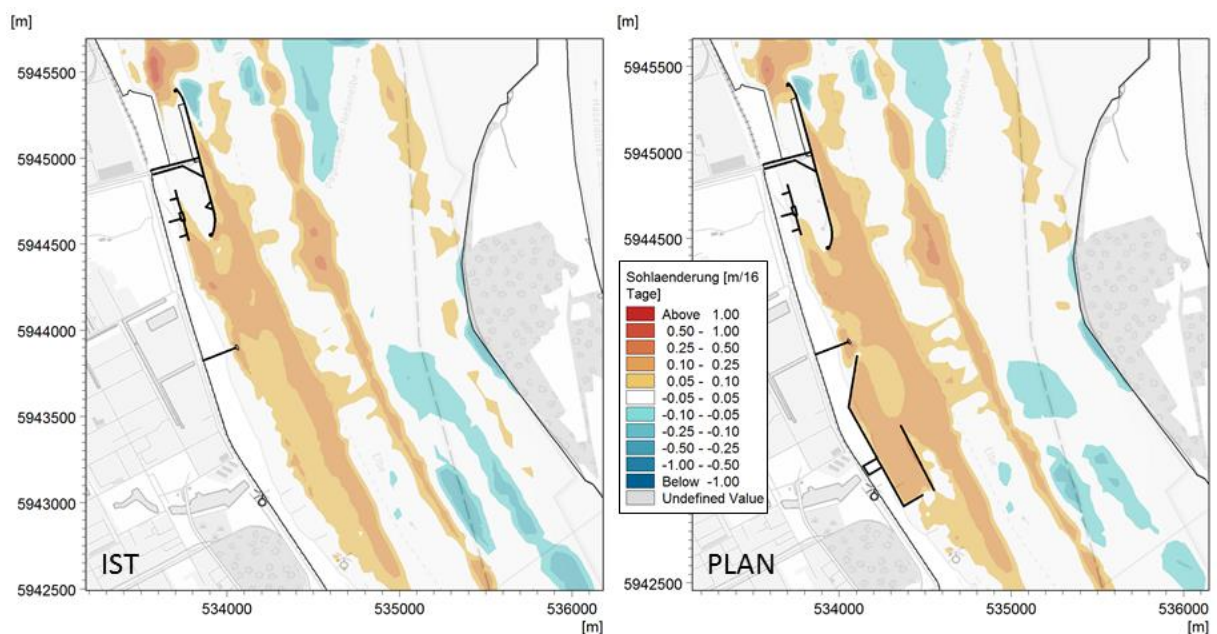


Abbildung 8.4: Sohländerung nach 16 Tagen im Juli 2016 für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Im direkten Vergleich der Sohländerungen zwischen Ist- und Planzustand (Abbildung 8.4) als auch in der Differenzkarte war eine Zunahme der Sedimentation von bis zu 25 cm nach 16 Tagen im neu geplanten Hafenbecken erkennbar. Durch die Verlängerung des Anlegers am Südhafen des bestehenden Hafens Stade-Bützfleth kam es zu einer Verlagerung der Sedimentation in südliche Richtung und damit zu einer kleinen Fläche mit einer Abnahme der Sedimentation. Nördlich und südlich des Planungsraumes kam es mit Ausnahme der lokalen Änderung südlich von Pagensand zu keinen nennenswerten Veränderungen der Morphologie, wie die Übersicht der Differenzen in Abbildung 8.5 rechts zeigt. Die Änderung bei Pagensand war auf veränderte Strömungen und ggf. Stauwasserdauern in diesem Bereich zurückzuführen.

Nicht auf die Natur zurückzuführende, technische Faktoren, die die Morphologie in den Hafenbecken beeinflussen, wie das Manövrieren / Anlegen der Schiffe oder Unterhaltungen in der Elbe bzw. in den Anlegern wurden in den vorgelegten Auswertungen und Modellierungen nicht berücksichtigt.

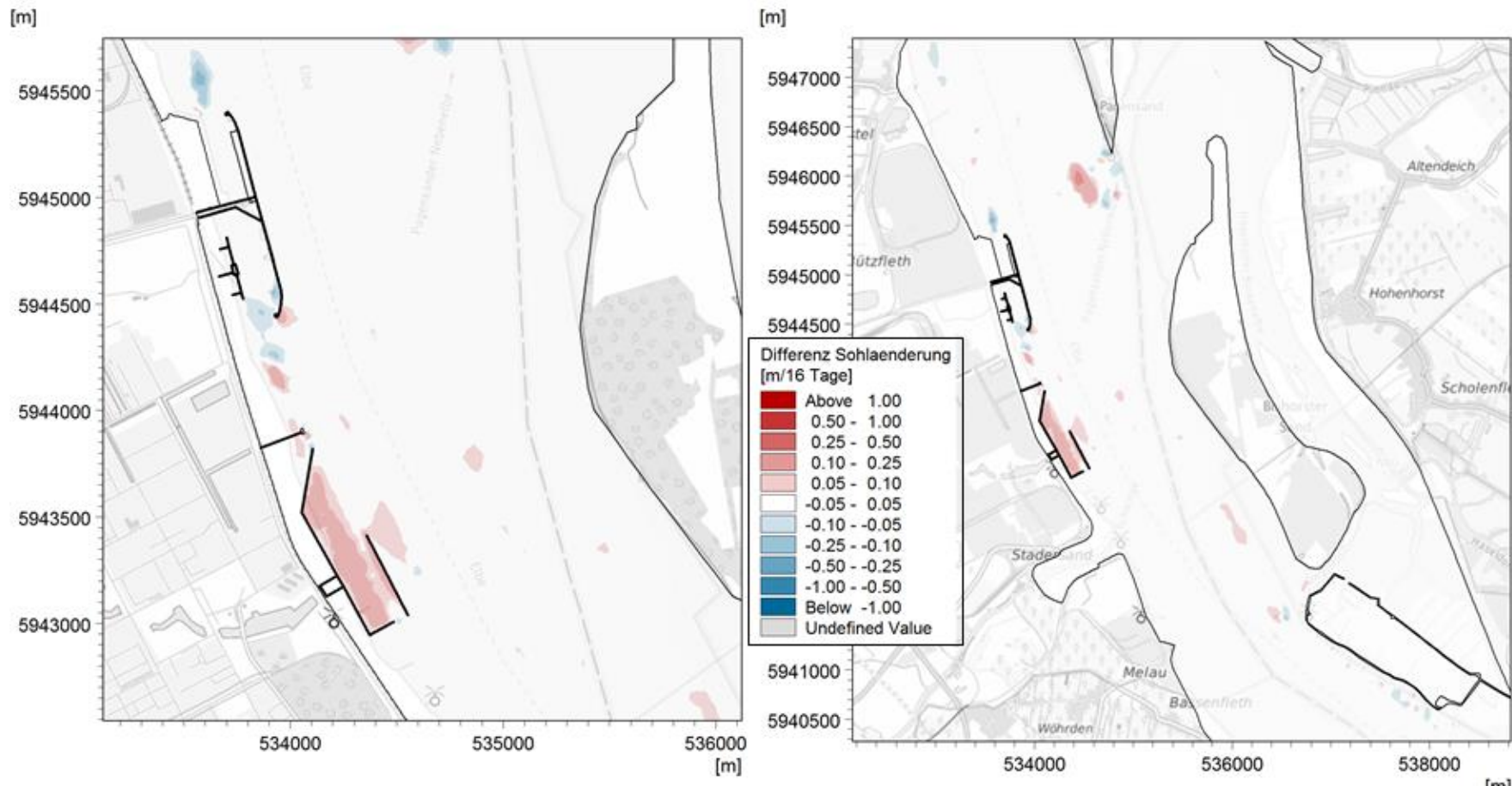


Abbildung 8.5: Differenzen der Sohländerung zwischen Plan- und Istzustand im Juli 2016 im Planungsbereich (links) sowie ober- und unterhalb des Planungsbereiches als Übersicht (rechts)

8.2 Modellzeitraum Oktober 2017

8.2.1 Schwebstoffgehalte

Die Auswertung der Schwebstoffgehalte erfolgte im Modellzeitraum Oktober 2017 für eine Flut- und eine Ebbphase des Sturmfluthochwassers am 29.10.2017 um 7:50 Uhr bzw. 14:35 Uhr. Es wurden tiefengemittelte Schwebstoffkonzentrationen abgebildet. Die Abbildung 8.6 zeigt die tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen im Planungsraum, während der Ebb- und der Flutphase. In Abbildung 8.7 wird der zeitliche Verlauf der Schwebstoffkonzentrationen in mittlerer Tiefe im Ist- und im Planzustand gezeigt. Die Abbildung 8.8 stellt die Auswirkungen der Planungen in Differenzkarten der tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen dar.

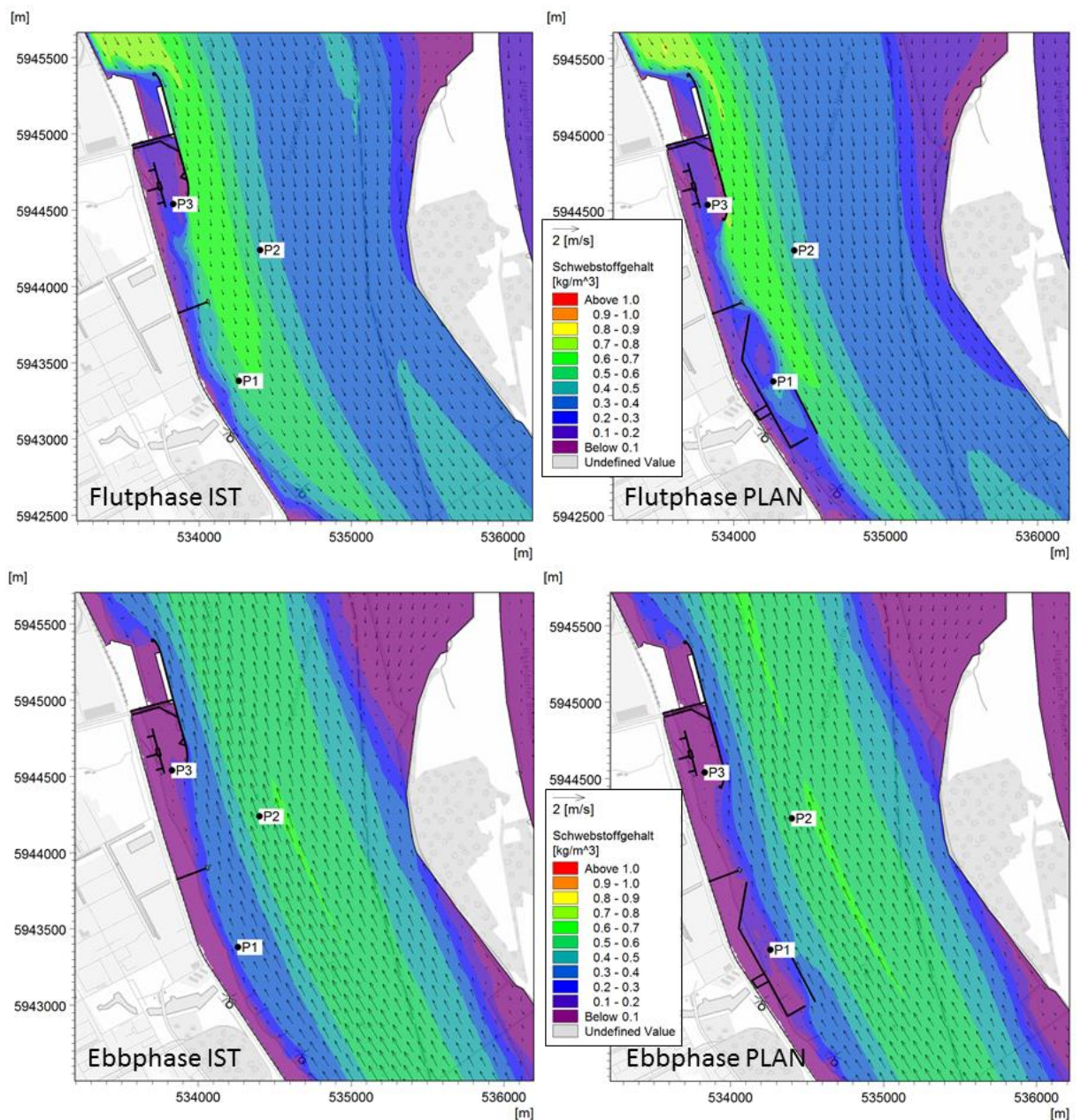


Abbildung 8.6: Tiefengemittelte Schwebstoffgehalte im Oktober 2017 während der Flutphase (oben) und der Ebbphase (unten) der Sturmflut für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

In der Sturmflut war eine Verringerung der Schwebstoffkonzentrationen im neu geplanten Hafenbeckens in der Ebb- als auch in der Flutphase zu erkennen. Grundsätzlich gelangte in allen Zuständen (Ist und Planzustand) in der Flutphase gelangte durch die Strömung mehr Wasser und damit mehr Schwebstoffe in dieses Hafenbeckens als in der Ebbphase. Im Istzustand zeigte sich höhere Schwebstoffgehalte bis zum westlichen Elbufer. Im abgeschirmten geplanten Anleger dringt bei Flutstrom weniger Schwebstoffgehalt in den geplanten Anleger ein und folglich auch bei Ebbstrom. Dadurch war auch in den Ebbphasen ein deutlicherer Rückgang der Schwebstoffe im Planzustand gegenüber dem Istzustand in diesem Bereich zu erkennen. Dies zeigen besonders die Ganglinien des Punktes P1 in Abbildung 8.7. In den Flutphasen lagen die Differenzen bei ca. $-0,1 \text{ kg/m}^3$, in den Ebbphasen bei ca. $-0,2 \text{ kg/m}^3$.

In den Differenzkarten der tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen (Abbildung 8.8) sind während der Flutphase geringere Schwebstoffgehalte im Planzustand im neu geplanten Hafenbecken von bis zu $-0,5 \text{ kg/m}^3$ zu erkennen. Der durch die Sturmflut erzeugte hohe Schwebstoffgehalt von ca. $0,6 \text{ kg/m}^3$ im Istzustand ging im Planzustand im geplanten Hafenbecken bis auf $0,1 \text{ kg/m}^3$ zurück (siehe Abbildung 8.6, Flutphase).

In der unteren großräumigen Darstellung von Abbildung 8.8 ist zu sehen, dass die Abnahme des Schwebstoffgehalts bei Sturmflut und Flutstrom auf der gegenüberliegenden Seite lokal begrenzt war und durch eine leichte Verschiebung in der Schwebstoffdynamik am gegenüberliegenden Ufer zustande kam. Diese Änderungen in der Schwebstoffkonzentration nördlich des Anlegers in der Mündung der Pagensander Nebenelbe war an dieser Stelle auf Änderungen der Strömungen kurz vor dem Sturmflutscheitel zurückzuführen. Durch die veränderte Strömung, wie in Abbildung 7.20 zu erkennen ist, zeigten sich geringe Schwebstoffkonzentrationen bei Sturmflut an der Mündung (P4) und im Gegenzug erhöhte Schwebstoffkonzentrationen im rückwärtigen Mündungsbereich (P5). Ursächlich hierfür ist die Flutströmung in der Elbe, die im Planzustand etwas weiter östlich in die Mündung hineinreichte und somit an der Mündung zu Umverteilung der Schwebstoffkonzentrationen führte.

Nach der Sturmflut kehrten die Schwebstoffkonzentrationen in diesem Bereich wieder auf das Niveau des Istzustandes zurück. Folglich handelt sich um eine temporäre Absenkung bzw. Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen um ca. $0,1 \text{ kg/m}^3$ (Abbildung 8.8) im Sturmflutauflauf.

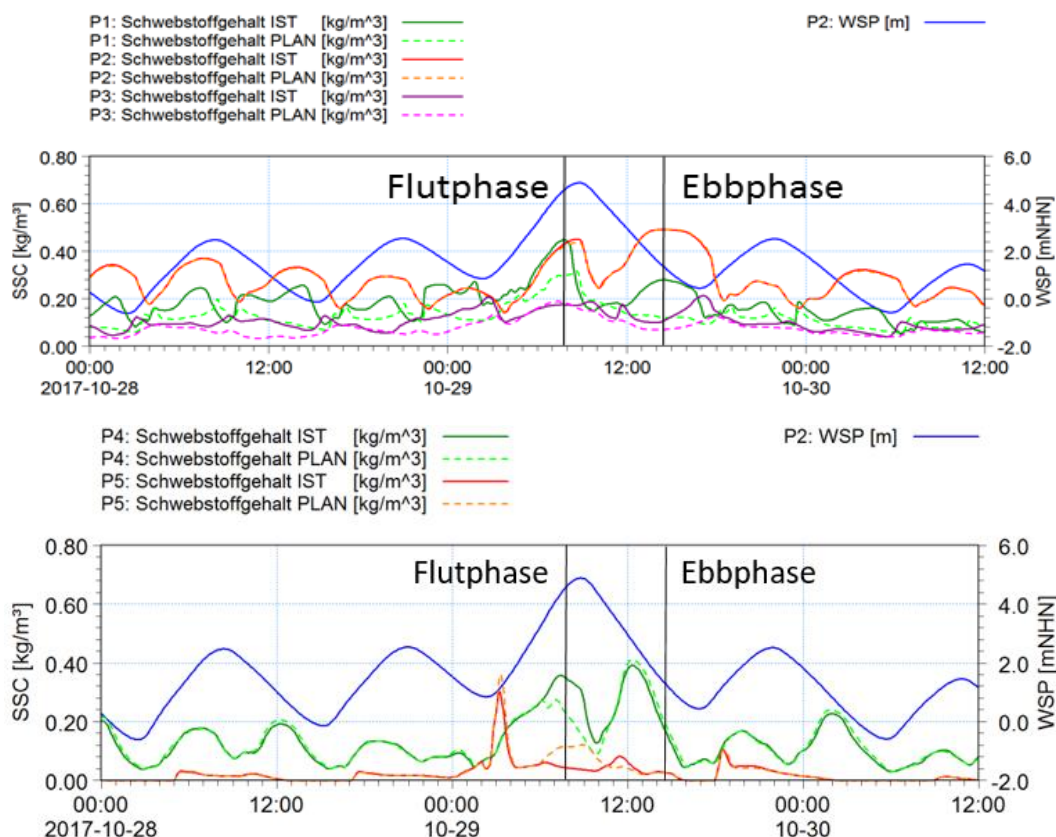


Abbildung 8.7: Zeitlicher Verlauf der Schwebstoffgehalte im Oktober 2017 in mittlerer Gewässertiefe (Layer 4 von 8) an den Extraktionspunkten P1, P2, P3,

P4 und P5 im Istzustand (durchgezogene Linien) und im Planzustand (gestrichelte Linien)

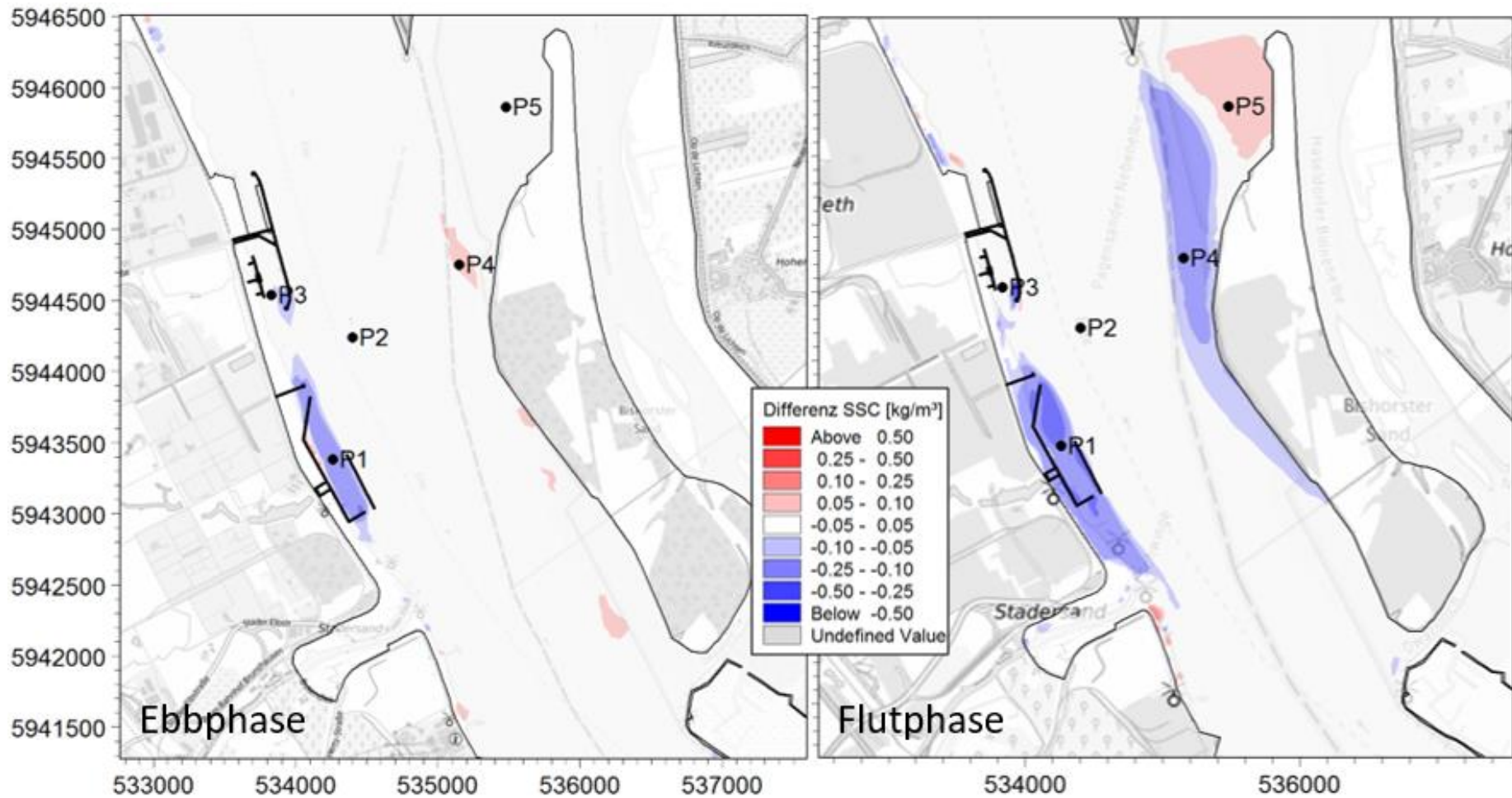


Abbildung 8.8: Tiefengemittelte Differenzen der Schwebstoffgehalte zwischen Plan- und Istzustand während der Ebbphase (links) und der Flutphase (rechts) der Sturmflut im Oktober 2017

8.2.2 Sohländerung

Auch im betrachteten Zeitraum der Sturmflut im Oktober 2017 erzeugten die Veränderungen im Strömungsfeld eine Veränderung der Morphologie im Bereich des geplanten Hafenbeckens und des verlängerten Anlegers am Südhafen Stade-Bützfleth. Abbildung 8.9 zeigt die Sohländerung nach 16 Tagen im Planungsraum im Ist- und im Planzustand. Die Abbildungen zeigen Ergebnisse mit Sedimentationen in den Farbskalen orange bis rot und Erosionen in den Farbskalen hellblau bis dunkelblau.

Abbildung 8.10 zeigt die Auswirkungen der Planungen in Differenzkarten der Sohländerung. Rote Flächen zeigen eine Zunahme der Sedimentation bzw. eine Abnahme der Erosion im Planzustand und blaue Flächen dagegen eine Abnahme der Sedimentation bzw. Zunahme der Erosion im Planzustand.

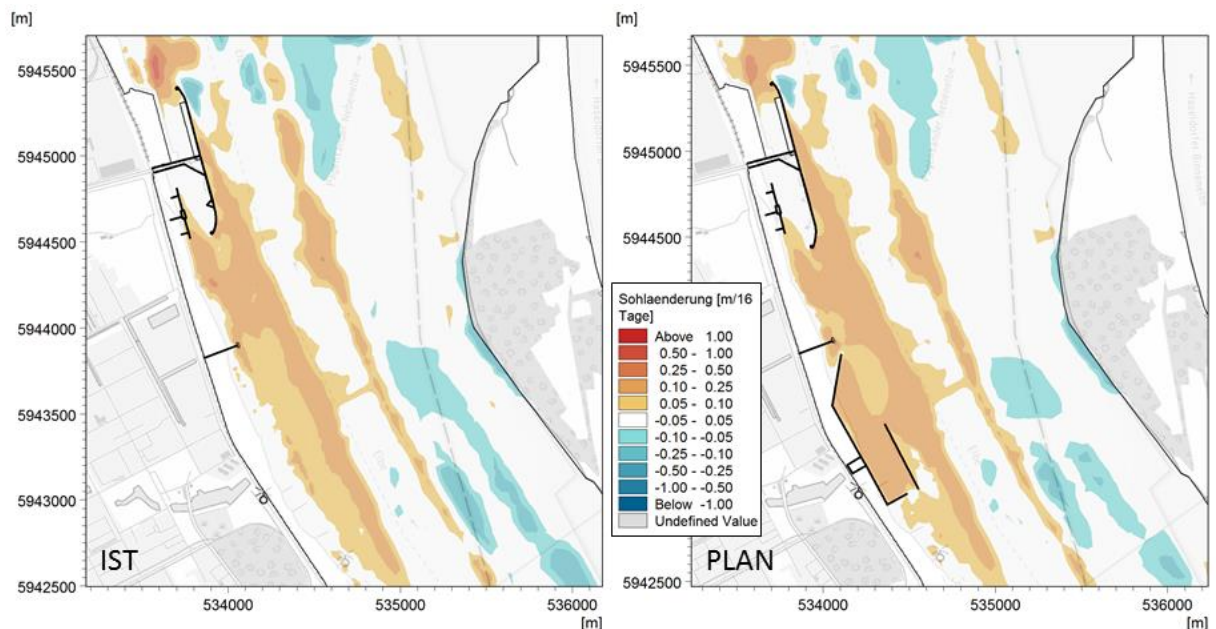


Abbildung 8.9: Sohländerung nach 16 Tagen im Oktober 2017 für den Ist- (links) und den Planzustand (rechts)

Im Modellzeitraum der Sturmflut im Oktober 2017 wurden ähnliche morphologische Entwicklungen wie im Modellzeitraum im Juli 2016 modelliert. Im direkten Vergleich der Sohländerungen zwischen Ist- und Planzustand (Abbildung 8.9) als auch in der Differenzkarte war eine Zunahme der Sedimentation von bis zu 25 cm nach 16 Tagen im neu geplanten Hafenbecken erkennbar. Durch die Verlängerung des Anlegers am Südhafen des bestehenden Hafens Stade-Bützfleth kam es auch hier zu einer Verlagerung der Sedimentation in südliche Richtung und damit zu einer kleinen Fläche mit einer Abnahme der Sedimentation. Nördlich und südlich des Planungsraumes kam mit Ausnahme des Bereiches südlich von Pagensand es zu keinen nennenswerten Veränderungen der Morphologie, wie die Übersicht der Differenzen in Abbildung 8.10 rechts zeigt. Die Änderung bei Pagensand ist auf veränderte Strömungen und ggf. Stauwasserdauern in diesem Bereich zurückzuführen.

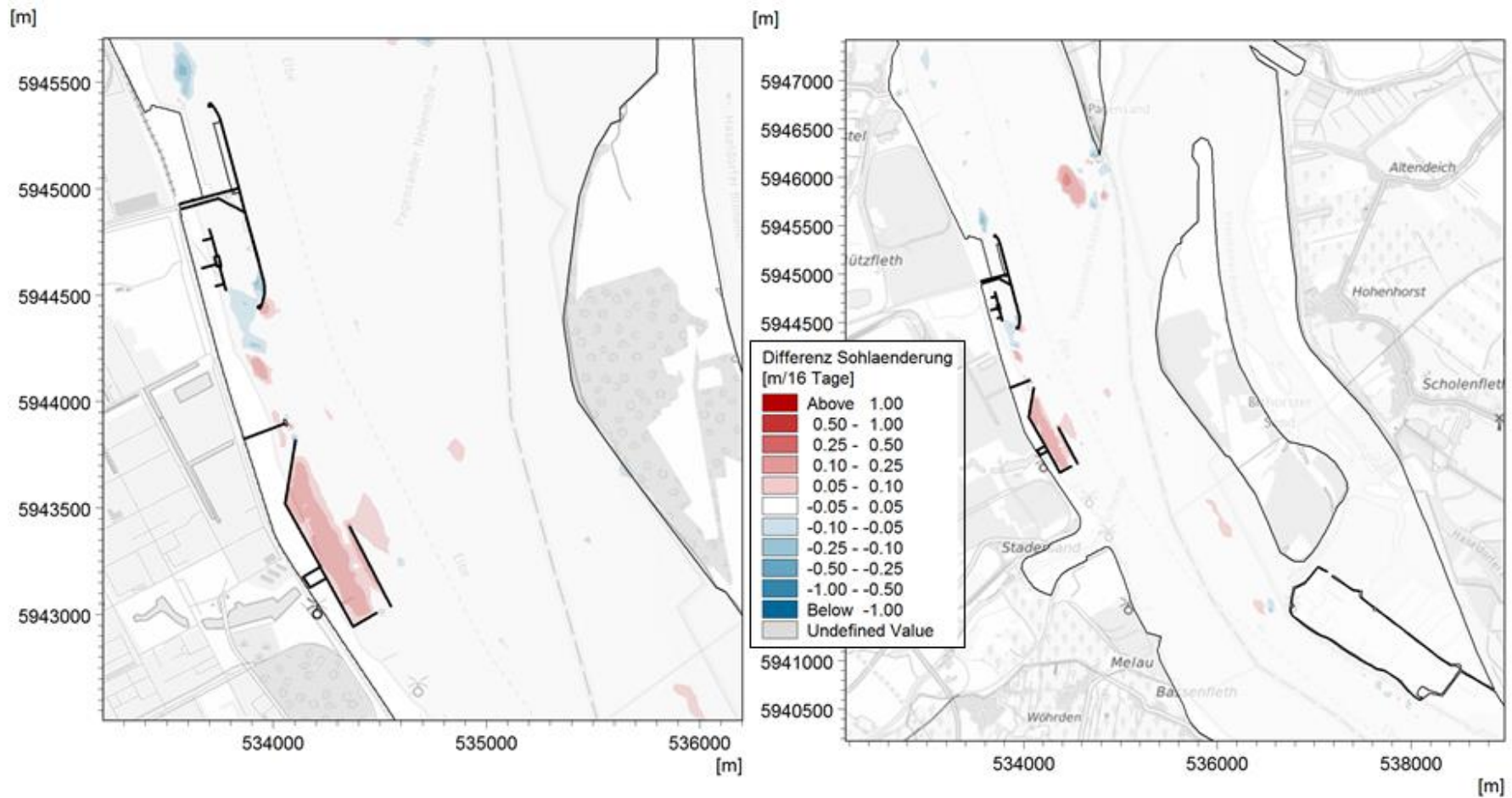


Abbildung 8.10: Differenzen der Sohländerung zwischen Plan- und Istzustand im Oktober 2017 im Planungsbereich (links) sowie ober- und unterhalb des Planungsbereiches als Übersicht (rechts)

9 Zusammenfassung

Für das hydromorphologische Gutachten des Anlegers für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth wurden die Auswirkungen der Planung auf Wasserspiegel, Strömungen, Temperatur, Salzgehalt, Sedimenttransport und Sohländerung untersucht.

Als Grundlage wurde das hydromorphologische 3D-Elbmodell von Geesthacht bis Steinriff auf Basis des DGM-W 2016 inkl. Elbvertiefung herangezogen. Das Modell wurde lokal im Nahbereich um den Seehafen Stade und den geplanten Anleger mit neuen Peildaten aktualisiert, verfeinert und alle neuen Strukturen (Pfeiler, Dalben und Spundwände) eingebunden.

Die Modellgenauigkeit wurde für einen Kalibrierungszeitraum im Juli 2016 und für einen Validierungszeitraum im Oktober 2017 ausgewertet. Die zwei Zeiträume mit rund 2 Wochen erfassten mit dem Juli 2016 häufige Abflussverhältnisse und mittlere Tiden und mit dem Oktober 2017 eine schwere Sturmflut. Für beide Zeiträume wurden jeweils gemessene Wasserstände, Strömungen, Abflüsse, Temperaturen, Salz- und Schwebstoffgehalte in der Elbe den simulierten Größen gegenübergestellt. Die Wasserstände wurden mit mittleren absoluten Abweichungen von weniger als 10 cm (2,7%), Strömungen mit mittleren Abweichungen von 0,27 m/s (18%), die Abflüsse mit mittleren Abweichungen unter 30 m³/s (15%) kalibriert und validiert, was einer sehr guten Modellgüte entspricht. Die Temperaturen wurden mit Abweichungen unter 0,9 °C (4,5%), die Salzgehalte mit mittleren Abweichungen von 1,6 PSU (27%) im Planungsraum (auf der sicheren Seite liegend) und die Schwebstoffkonzentration mit mittleren Abweichungen unter 0,06 kg/m³ (30%) kalibriert und validiert, was einer guten Modellgüte entspricht. Die simulierten Sohländerungen wichen von den gemessenen Änderungen im Hamburger Hafen leicht ab, lagen qualitativ aber in der gleichen Größenordnung. Zusammenfassend für alle Parameter wurde eine gute Modellgüte erreicht.

Mit dem kalibrierten Modell wurden die Auswirkungen der Planungen am Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth auf die Elbe inkl. Elbvertiefung für beide Ereignisse untersucht. Die Änderungen in allen Parametern waren lokal auf den Bereich des Anlegers bzw. auf wenige Kilometer nördlich und südlich des Anlegers begrenzt.

Großräumig ergaben sich keine Änderungen in den Wasserständen. Lokale Änderungen in den Wasserständen T_{nw} und T_{hw} waren auf weniger als 100 m an den Bauwerksstrukturen durch veränderte Strömungen begrenzt. Entlang der geplanten stromparallelen Spundwand zur Elbe hin, zeigte sich lokal engbegrenzt ein lokaler Absenk. Verursacht wird dieser durch eine temporäre Rückströmung und ist räumlich eng begrenzt.

Änderungen der Flut- und Ebbströmungsgeschwindigkeiten werden durch die geplanten Strukturen lokal im Bereich von 1000 m im geplanten Hafenbecken um bis zu 0,8 m/s für beide Modellzeiträume verringert. Zunahmen der Strömungen in der Elbe oder in der Fahrrinne waren nur auf Höhe des geplanten Anlegers an der Oberfläche mit 0,1 m/s zu verzeichnen. Die Änderungen der Strömungen bleiben im Tiefenmittel unter 0,05 m/s in der Fahrrinne.

Die Auswirkungen des Anlegers Stade-Bützfleth auf die Wassertemperatur zusammen mit der bestehenden Kühlwasserentnahme bzw. -einleitung der DOW zeigten eine bessere Durchmischung, aber einen verzögerten Abtransport der aufgewärmten Kühlwassermengen. Durch die lokal verringerten Strömungen im Hafenbecken in den Flutphasen beider Modellzeiträume kam es zu einer leichten Erhöhung der Wassertemperaturen von bis zu 0,4°C im Bereich des geplanten Hafenbeckens und nördlich des geplanten Anlegers.

Die Auswirkungen auf die Änderungen der Salzgehalte im Modellzeitraum im Juli 2016 durch die neuen Strukturen im Planzustand wurden als marginal eingestuft. Im neu geplanten Hafenbecken und im Südhafen des bestehenden Hafens wurden nur sehr geringe Änderungen in der Salinität von ca. -0,05 PSU in den Ebbphasen erkennbar. Im Modellzeitraum im Oktober 2017 kam es im Sturmflutzeitpunkt zu geringeren Salzgehalten mit -0,4 PSU im Bereich des Anlegers. Durch den natürlich bedingten, höheren Salzeintrag über die Sturmflut und die geringere Durchströmung des neu geplanten Hafenbeckens blieb dieser höhere Salzgehalt länger im Hafenbecken erhalten, was kurzfristig höhere Salzgehalte von bis zu 0,2 PSU im Hafenbecken bei Tnw führte. Die Änderungen wurden als gering, lokal auf 500 m im Anleger selbst und temporär auf ca. drei Tiden nach der Sturmflut begrenzt eingestuft.

Die Schwebstoffkonzentrationen verteilten sich durch veränderte lokale Strömungen im und um den Anleger im Planzustand leicht abweichend. So nahmen die Schwebstoffkonzentrationen in beiden Modellzeiträumen durch den geplanten Anleger und die verringerten Strömungen im Hafenbecken ab (ca. -0,1 kg/m³ bis -0,5 kg/m³). In der Fahrrinne der Elbe nahmen die Schwebstoffkonzentrationen nicht zu. Durch die Verlängerung des Anlegers am Südhafen kam es zu einer leichten Verschiebung der Schwebstoffdynamik, aber keiner Erhöhung oder Absenkung. Die Änderungen in der Schwebstoffkonzentration südlich des Anlegers gegenüber der Schwingemündung auf der Ostseite der Elbe war auf leichte Änderungen der Strömungen an dieser Stelle zurückzuführen. Lokal leicht erhöhte bzw. temporär auch reduzierte Strömungen auf diesem Ufer führten im Schwebstofftransport zur veränderten Ausbreitung der Schwebstoffe an dieser Stelle. Die Änderungen lagen bei ca. 0,1 bis 0,05 kg/m³, sind kleinräumig bis punktuell und auf kurze Uferabschnitte (< 400 m) begrenzt.

Für den Sturmflutzeitraum war zu sehen, dass der Schwebstoffgehalt bei Flutstrom auf der gegenüberliegenden Seite des Anlegers wie auch im Anleger selbst lokal begrenzt abnahm. Die Änderungen in der Schwebstoffkonzentration nördlich des Anlegers in der Mündung der Pagensander Nebenelbe war auf Änderungen der Anströmung der Mündung kurz vor dem Sturmflutzeitpunkt zurückzuführen. Ursächlich hierfür ist die Flutströmung in der Elbe, die im Planzustand etwas weiter östlich in die Mündung hineinreichte und somit an der Mündung zu Umverteilung der Schwebstoffkonzentrationen führte.

Die Sohländerungen infolge des geplanten Anlegers zeigten in beiden Modellzeiträumen eine Zunahme der Sedimentation von bis zu 25 cm nach 16 Tagen im geplanten Hafenbecken. In der Fahrrinne der Elbe zeigte sich über die Zeitspanne von 16 Tagen keine Änderung infolge Anleger. Die Sedimentationsneigung im neuen Anleger wird voraussichtlich eine Unterhaltung der Sohle erfordern. Die Sohländerungen infolge Anleger waren räumlich auf den Nahbereich der Planung begrenzt und reichen nicht in das Fahrwasser der Elbe.

10 Literatur

- /1/ DHI, 2020, MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation, Horsholm Dänemark, 2020.
- /2/ DHI, 2020, MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Mud Transport Module, Scientific Documentation, Horsholm Dänemark, 2020.
- /3/ BAW, 2006: Anlagenband 1 zum Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse, BAW-Nr. A3955 03 10062 – H1c, Stand: August 2006
- /4/ BAW, 2018, Kalibrierung von Trübungsmessungen für Aussagen zur Schwebstoffkonzentration in den Ästuaren Weser und Elbe, Bericht B3955.02.04.70227-1.
- /5/ BWK Merkblatt 1, 2009: Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern, 3. Auflage, Mai 2009.
- /6/ KFKI, 1997, Sedimentation in Tidehäfen, Horst Nasner, Die Küste Heft 59
- /7/ Naudascher, 1992, Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke, Springer Verlag
- /8/ WSV, 2008, WSV Sedimentmanagement Tideelbe, Strategien und Potenziale – eine Systemstudie (30.6.2008)
- /9/ Smagorinsky, J., 1963, General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. the Basic Equations. Monthly Weather Review, 91, 99-164.
- /10/ Piomelli U., Ferziger, J.H. and Moin, P., 1987, Models for Large Eddy simulations of turbulent channel flows including transpiration, Dept. Mech. Engng., Stanford University, Rep. TF-32
- /11/ HPA, 2013, Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Elbegebiet Teil III, 2010 (publiziert 2013)
- /12/ LLUR, 2014, Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Küstengebiet der Nordsee, 2013, publiziert 2014
- /13/ BSH, 2017, Nordsee-Sturmflut am 29.10.2017, Wasserstandsvorhersagedienst Hamburg, Stand 6.11.2017, Link: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Nordsee_Sturmflut_20171029.pdf;jsessionid=C35A8F3D5AAEAB94C13FC718EC56B0CE.live11293?__blob=publicationFile&v=4
- /14/ Nehlsen, E., 2017, Wasserbauliche Systemanalyse zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels für tidebeeinflusste Nebengewässer der Elbe, Dissertation am Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburger Wasserbauschriften, Band 19.