

# Maßnahmen zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch

Beratung und numerische Modellierung



Behörde für Umwelt und Energie –  
Forum Tideelbe

Bericht

Dieser Bericht wurde im Rahmen des DHI Business-Management-Systems  
(Bureau Veritas - zertifiziert nach ISO 9001, Qualitätsmanagement) erstellt.



Erstellt von  
Monika Donner & Janett Brandt



Genehmigt von  
Marcus Richter



# Maßnahmen zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch

Beratung und numerische Modellierung

Erstellt für                      Behörde für Umwelt und Energie – Forum  
Tideelbe  
Vertreten durch              Herr Manfred Meine



*Haseldorfer Marsch (GoogleMaps)*

|                    |                                                                              |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Projektmanager     | Dr. Monika Donner                                                            |
| Projektbearbeitung | Janett Brandt, Dr. Uwe Stöber, Marion Dziengel, Ines Hiller, Tobias Drückler |
| Projektnummer      | 14804647                                                                     |
| Revision           | Version: 1.2                                                                 |
| Einstufung         | offen                                                                        |

# INHALT

|          |                                                                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Veranlassung und Zielsetzung.....</b>                                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen .....</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| 2.1      | Datengrundlage und verwendete Unterlagen .....                                                                               | 1         |
| <b>3</b> | <b>Literaturstudie .....</b>                                                                                                 | <b>3</b>  |
| 3.1      | KLIMZUG-NORD (BAW).....                                                                                                      | 3         |
| 3.2      | Haseldorfer Marsch II (DHI) .....                                                                                            | 5         |
| 3.3      | LAP Hetlingen/ Giesensand (BWS, BSS & Klütz) .....                                                                           | 6         |
| 3.4      | Hochwasserstudie Haseldorfer Marsch (AG Hochwasser) .....                                                                    | 6         |
| <b>4</b> | <b>Vorprüfung und Optimierung .....</b>                                                                                      | <b>7</b>  |
| 4.1      | Hydrodynamisches System Haseldorfer Binnenelbe.....                                                                          | 8         |
| 4.2      | Varianten und Prüfung der Varianten Haseldorfer Marsch.....                                                                  | 10        |
| 4.2.1    | Variante 2.....                                                                                                              | 11        |
| 4.2.2    | Variante 3.....                                                                                                              | 13        |
| 4.3      | Entwicklung von Zustromvarianten für die Haseldorfer Marsch .....                                                            | 14        |
| 4.4      | Ableitung der Vorzugsvariante .....                                                                                          | 16        |
| <b>5</b> | <b>Untersuchungen im hydraumerischen Modell.....</b>                                                                         | <b>16</b> |
| 5.1      | Modellsoftware .....                                                                                                         | 16        |
| 5.1.1    | Hydrodynamik (HD) .....                                                                                                      | 16        |
| 5.2      | Modellaufbau.....                                                                                                            | 18        |
| 5.2.1    | Allgemeine Diskretisierung .....                                                                                             | 18        |
| 5.2.2    | Anschluss der Haseldorfer Marsch .....                                                                                       | 20        |
| 5.3      | Hydrologische Daten und Randbedingungen .....                                                                                | 21        |
| 5.3.1    | Hydraulische Randwerte .....                                                                                                 | 21        |
| 5.3.2    | Randwerte zu Salzgehalt und Temperatur .....                                                                                 | 22        |
| 5.3.3    | Gewässer- und Vorlandrauheiten .....                                                                                         | 23        |
| <b>6</b> | <b>Kalibrierung.....</b>                                                                                                     | <b>24</b> |
| 6.1      | Wasserstand .....                                                                                                            | 24        |
| 6.2      | Strömungen.....                                                                                                              | 26        |
| 6.3      | Temperatur.....                                                                                                              | 28        |
| 6.4      | Salzgehalt .....                                                                                                             | 29        |
| <b>7</b> | <b>Anbindung der Haseldorfer Marsch (Ergebnisse) .....</b>                                                                   | <b>31</b> |
| 7.1      | Wirkanalyse für die Elbe .....                                                                                               | 31        |
| 7.1.1    | Mittlerer Tidenhub .....                                                                                                     | 33        |
| 7.1.2    | Maximaler Ebb- und Flutstrom .....                                                                                           | 34        |
| 7.1.3    | Maximale Ebb- und Flutströmung .....                                                                                         | 36        |
| 7.1.4    | Maximale Strömungsgradienten .....                                                                                           | 36        |
| 7.1.5    | Salzgehalt .....                                                                                                             | 37        |
| 7.2      | Wirkanalyse für den Nahbereich der Haseldorfer Marsch.....                                                                   | 39        |
| 7.2.1    | Wirkung auf das Dwarsloch: Schubspannung & Strömung .....                                                                    | 39        |
| 7.2.2    | Wirkung auf Dwarsloch & Haseldorfer Binnenelbe: Wasserstand & Strömungen .....                                               | 41        |
| 7.2.3    | Wirkung auf Dwarsloch & Haseldorfer Binnenelbe: Salzgehalt.....                                                              | 45        |
| 7.2.4    | Einschätzung zur Schwebstoffkonzentration und Sedimentation im Dwarsloch, Haseldorfer Binnenelbe und Haseldorfer Marsch..... | 47        |

|          |                             |           |
|----------|-----------------------------|-----------|
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung.....</b> | <b>47</b> |
| <b>9</b> | <b>Literatur .....</b>      | <b>50</b> |

## ABBILDUNGEN

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2.1:  | Untersuchungsgebiet der Haseldorfer Marsch (magenta Umrandung) .....                                                                                                                                                                                                                         | 2  |
| Abbildung 3.1:  | Mittlere Überflutungsdauer gemittelt über den Analysezeitraum für den Zustand mit angeschlossener Haseldorfer Binnenelbe mit $Q = 710 \text{ m}^3/\text{s}$ ohne Meeresspiegelanstieg (entnommen aus BAW, 2014) .....                                                                        | 4  |
| Abbildung 3.2:  | Einfluss auf den mittleren Tidenhub entlang der Fahrrinne bei einem Abfluss von $710 \text{ m}^3/\text{s}$ . Abweichungen zwischen Ist und Ausbau ist $\leq 1 \text{ cm}$ , daher kaum zu erkennen .....                                                                                     | 4  |
| Abbildung 3.3:  | Wasserstand-Volumenbeziehung für die Haseldorfer Marsch (entnommen aus DHI, 1999).....                                                                                                                                                                                                       | 5  |
| Abbildung 3.4:  | Übersicht zu der Lage der Bauwerke in der der Haseldorfer Marsch, entnommen aus AG Hochwasser (2007), S. 26 .....                                                                                                                                                                            | 7  |
| Abbildung 4.1:  | Schematische Darstellung der Tidekennwerte Pegel Hetlingen (Elbekilometer 650,5, WSA). MThw: Mittleres Tidehochwasser, MTnw: Mittleres Tideniedrigwasser, MT1/2w: Mittleres Halbetidewasser, $k_{st}$ : Strickler-Beiwert für die Gerinnerrauhigkeit, $l_{wsp}$ : Wasserspiegelgefälle ..... | 8  |
| Abbildung 4.2:  | Skizze der Entnahmepunkte der hydrodynamischen Kennwerte im Bereich der Haseldorfer Marsch: Elbe, Haseldorfer Binnenelbe und Dwarsloch.....                                                                                                                                                  | 9  |
| Abbildung 4.3:  | Salzgehalt im Istzustand in der Elbe in -5 mNHN vor dem Eingang zum Dwarsloch, entnommen aus Modelldaten der Elbe zum Jahr 2016 .....                                                                                                                                                        | 10 |
| Abbildung 4.4:  | Überflutungsflächen der Haseldorfer Marsch bei einem Anschluss im Istzustand bei MThw 1,81 m NHN .....                                                                                                                                                                                       | 11 |
| Abbildung 4.5:  | Variante 2 der Haseldorfer Marsch mit einer konstanten Sohltiefe in den Hauptprielen von -1,79 m NHN und einer Aufweitung der Böschung mit 1:5 (Verbreiterung) .....                                                                                                                         | 12 |
| Abbildung 4.6:  | Wasserstand-Volumen-Beziehung der Haseldorfer Marsch der Variante 2. ..                                                                                                                                                                                                                      | 12 |
| Abbildung 4.7:  | Variante 3 der Haseldorfer Marsch mit einer konstanten Sohltiefe in den Hauptprielen von -1,79 m NHN, einer Aufweitung der Böschung mit 1:5 (Verbreiterung) und zusätzlich abgegrabenen Polderflächen. ....                                                                                  | 13 |
| Abbildung 4.8:  | Wasserstand-Volumen-Beziehung der Haseldorfer Marsch der Variante 3 ...                                                                                                                                                                                                                      | 14 |
| Abbildung 4.9:  | Sohltiefen und Breiten im Istzustand aus dem DGM 2016 .....                                                                                                                                                                                                                                  | 15 |
| Abbildung 4.10: | Erforderliche Anpassung der Sohliefen auf -2,5 m NHN im Bereich der des äußeren Prielsystems Dwarsloch und Haseldorfer Binnenelbe .....                                                                                                                                                      | 15 |
| Abbildung 5.1:  | Übersicht des Modellgebiets für das Modell der Haseldorfer Marsch.....                                                                                                                                                                                                                       | 19 |
| Abbildung 5.2:  | Übersicht 3D Modell von Geesthacht (km 586) bis Cuxhaven (km 724) und Lage der betrachteten Gebiete .....                                                                                                                                                                                    | 19 |
| Abbildung 5.3:  | Detailbereich zum Modellgitter an der Haseldorfer Marsch mit verwendeter Modellauflösung .....                                                                                                                                                                                               | 20 |
| Abbildung 5.4:  | Vertikale Modellauflösung als Schnitt durch die Elbe bei Kilometer 653 .....                                                                                                                                                                                                                 | 20 |
| Abbildung 5.5:  | Zuwässerung der Marschdorfer Marsch durch Deichöffnung entlang der alten Haseldorfer Binnenelbe .....                                                                                                                                                                                        | 21 |
| Abbildung 5.6:  | Wasserstand am Pegel Cuxhaven im Untersuchungszeitraum .....                                                                                                                                                                                                                                 | 22 |
| Abbildung 5.7:  | Im Modell eingesteuerter Salzgehalt am seewärtigen Rand bei Cuxhaven....                                                                                                                                                                                                                     | 22 |
| Abbildung 5.8:  | Gemessene Temperatur in der Elbe bei Bunthaus (schwarz) und bei Cuxhaven (blau).....                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| Abbildung 5.9:  | Rauheitskarte für das gesamte Modellgebiet Tideelbe .....                                                                                                                                                                                                                                    | 23 |
| Abbildung 5.10: | Smagorinskykarte für das gesamte Modellgebiet Tideelbe.....                                                                                                                                                                                                                                  | 23 |
| Abbildung 6.1:  | Messstationen entlang der Elbe zu Wasserstand, Strömung, Temperatur und Salzgehalt .....                                                                                                                                                                                                     | 24 |
| Abbildung 6.2:  | Vergleich der gemessenen und modellierten Wasserstände für den Kalibrierzeitraum Mai 2016 an den Stationen Otterndorf, Brokdorf, Stadersand, Blankenese, Seemanshöft, Bunthaus und Zollenspieker .....                                                                                       | 25 |
| Abbildung 6.3:  | Vergleich der gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeiten an der Gewässeroberfläche und -sohle für einen Ausschnitt (30.4.2016 bis 10.5.2016)                                                                                                                                     |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| des Kalibrierzeitraums Mai 2016 an den Stationen Rhinplate Nord (D4), Juelsand (D2) und Hanskalsand (D1). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 27 |
| Abbildung 6.4: Vergleich der gemessenen und modellierten Wassertemperatur für den Kalibrierungszeitraum Mai 2016 an den Stationen Bunthaus, Seemannshöft und Juelsand (D2).....                                                                                                                                                                                                                                             | 28 |
| Abbildung 6.5: Vergleich des gemessenen und modellierten Salzgehalts für den Kalibrierungszeitraum Mai 2016 an den Stationen LZ3c Altenbrucher Bogen, Brunsbüttel, Rhinplate Nord (D4, Gewässeroberfläche und -sohle) und Hanskalsand (D1, Gewässeroberfläche und -sohle) .....                                                                                                                                             | 30 |
| Abbildung 7.1: Analyse und Auswertung der Ergebnisse je Elbe-km in der Tidekennwertanalyse am Beispiel der Station 692.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 31 |
| Abbildung 7.2: Definition des Verhältnisses der maximalen Strömungsgradienten bei Kenterung (aus DIN 4049-3).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 33 |
| Abbildung 7.3: Kennwert Tidenhub in der Elbe. Die Abbildung zeigt den mittleren Tidenhub für den Ist-Zustand (grün gestrichelt) und Plan-Zustand mit dem Anschluss der Haseldorfer Marsch an der Elbe-km 653 (grün durchgezogen), Differenz der beiden Zustände (blau). .....                                                                                                                                               | 34 |
| Abbildung 7.4: Kennwert Flut- und Ebbstromabfluss in der Elbe. Die Abbildung zeigt den mittleren maximalen Abfluss für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) für Flut- (orange) und Ebbstrom (blau). Das Verhältnis der beiden Zustände ist in grün dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.....                                                | 35 |
| Abbildung 7.5: Tidekennwerte Verhältnis aus Flut-/Ebbstromabfluss in der Elbe. Die Abbildung zeigt das Verhältnis des mittleren maximalen Abflusses von Flut- mit Ebbstrom (grün) für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen). Die Differenz der beiden Verhältnisse ist in blau dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch. ....                    | 35 |
| Abbildung 7.6: Tidekennwert gemittelte maximale Strömung in der Elbe. Die Abbildung zeigt die maximale Strömung für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) für Flut- (orange) und Ebbströmung (blau). Das Verhältnis der beiden Zustände ist in grün dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch. ....                                               | 36 |
| Abbildung 7.7: Tidekennwert Verhältnis der Strömungsgradienten in der Elbe. Die Abbildung zeigt das Verhältnis der maximalen Strömung von Flut und Ebbe (grün) für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) Die Differenz der beiden Verhältnisse ist in blau dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.....                                         | 37 |
| Abbildung 7.8: Tidekennwert gemittelter Salzgehalt in der Elbe. Die Abbildung zeigt den Salzgehalt für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) für minimale (orange), mittlere (grün) und maximale (blau) Salzgehalte je Tide. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch. ....                                                                                   | 38 |
| Abbildung 7.9: Tidekennwert Änderung des mittleren Salzgehaltes in der Elbe. Die Abbildung zeigt die Änderungen des Salzgehaltes zwischen Plan- und Ist-Zustand für minimale (orange), mittlere (grün) und maximale (blau) Salzgehalte je Tide. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch. ....                                                                                 | 38 |
| Abbildung 7.10: Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Tnw im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarsloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Tnw). 39 | 39 |
| Abbildung 7.11: Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Flutstrom im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarsloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte                                                                                       |    |

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                 | Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Flutstrom).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 40 |
| Abbildung 7.12: | Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Thw im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarsloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Thw). 40             |    |
| Abbildung 7.13: | Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Ebbstrom im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarsloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Ebbstrom). .... | 41 |
| Abbildung 7.14: | Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Tnw (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta). 42                                                                                                                           |    |
| Abbildung 7.15: | Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Flutstroms (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta). 43                                                                                                                    |    |
| Abbildung 7.16: | Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Thws (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).....                                                                                                                                          | 44 |
| Abbildung 7.17: | Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Ebbstroms (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).....                                                                                                                                     | 45 |
| Abbildung 7.18: | Strömungsgeschwindigkeit im Plan-Zustand der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Thw inkl. Lage der Auswertepunkte für Wasserstand und Salzgehalte (oben). Wasserstand und Salzgehalte (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).....                                                                                                             | 46 |
| Abbildung 8.2:  | Modellraum Haseldorfer Marsch mit Anschluss über das Dwarsloch bzw. die äußere Haseldorfer Binnenelbe .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 49 |

## TABELLEN

|              |                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2.1: | Genutzte Datensätze und Datenursprung .....                                                                                                                                                                                                                 | 2  |
| Tabelle 3.1: | „Entwurf zur Regelung der Entwässerungsverhältnisse im neu eingedeichten Gebiet der Haseldorfer Marsch, Teil II – Rand- und Verbindungsgraben (geprüft durch ALW Itzehoe 1983): Binnenpeil: 1,50 m u. GOF“, entnommen aus AG Hochwasser (2007), S. 26 ..... | 7  |
| Tabelle 4.1: | Hydrodynamische Kennwerte an der Haseldorfer Binnenelbe mit maximalem Flut- und Ebbstrom ( $Q_{flut}$ , $Q_{ebbe}$ ) im Jahresmittel, sowie die maximale Flut- und Ebbströmung ( $cs_{flut}$ , $cs_{ebbe}$ ) im Jahresmittel aus dem Jahr 2016. ....        | 10 |

# 1 Veranlassung und Zielsetzung

Jedes Jahr werden mehrere Millionen Kubikmeter Sediment in der Tideelbe gebaggert und umgelagert, um die Schifffahrt im und zum Hamburger Hafen zu ermöglichen. Die Tideelbe ist ein schützenswerter Lebensraum von ca. 150 km Länge, von Geesthacht bis zur Mündung in die Nordsee. Ein nachhaltiger Umgang mit Sedimenten im Ästuar kann für zukünftige Entlastung durch den Rückhalt von Sediment und somit einer Reduzierung der Baggermengen mit gleichzeitiger Verbesserung der Wasserqualität sorgen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, Fluträume entlang der Tideelbe in Ihrer Wirksamkeit zu untersuchen und ggf. zu optimieren, um den Sedimenthaushalt der Tideelbe nachhaltig zu verbessern und den Flussauftransport zu reduzieren. Einer der möglichen und daher in der Wirkung zu prüfenden Fluträume liegt in der Haseldorfer Marsch.

# 2 Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen

Die Vorgehensweise begann mit der Beschaffung und Sichtung von verfügbaren Daten, Aufbereitung dieser Daten und weitere Analysen. Zusätzlich wurde Literatur und Literaturdaten zu ähnlichen Projekten zusammengestellt, sowie die Prüfung der bislang angedachten Maßnahmen unter dem Aspekt der maximal möglichen Wirksamkeit vorgenommen. Diese Wirkungsanalyse zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch umfasst eine Vorprüfung mittels Volumen-Abfluss-Beziehungen, überschlägigen Berechnungen (Phase 1), die Konzeption einer optimierten Variante sowie deren Prüfung mittels numerischem 3D-Modell (Phase 2).

Für Phase 2 wurde eine optimierte Variante zum Flutraum Haseldorfer Marsch an ein numerisches 3D-Modell der Tideelbe angebunden und die Auswirkungen auf die Elbe mittels hydrodynamischer Kennwerte geprüft.

## 2.1 Datengrundlage und verwendete Unterlagen

Der Untersuchungsraum der Haseldorfer Marsch liegt auf Höhe des Elbekilometers 653 nördlich der Elbe hinter der Deichlinie des Hauptdeichs der Haseldorfer Binnenelbe, die über das Dwarsloch in die Elbe mündet. Die Eindeichung der Haseldorfer Marsch fand im Jahr 1978 statt. Seitdem ist die Haseldorfer Binnenelbe (in der Haseldorfer Marsch) zwischen Wehr II und IV auf ca. 1 bis 1,5 m NHN aufgestaut (Abbildung 2.1). Die Haseldorfer Marsch wurde 2000 als Maßnahmengebiet nach EU-Vogelschutzgebiet „Untere Elbe bis Wedel“ ausgewiesen. Es ist Teil des FFH-Gebiets „Schleswig-Holsteinisches Elbästuar und angrenzende Flächen“. Der westliche Teil des Maßnahmengebiets ist Teil des Naturschutzgebiets (NSG) „Haseldorfer Binnenelbe mit Elbvorland“ (BWS, BSS & Klütz, 2006).



Abbildung 2.1: Untersuchungsgebiet der Haseldorfer Marsch (magenta Umrandung)

Für die Auswertung, den Modellaufbau sowie die Berechnung der Variante wurden die folgenden Datensätze und Unterlagen hinzugezogen und verwendet.

Tabelle 2.1: Genutzte Datensätze und Datenursprung

| Bereitgestellt durch | Datensatz                                                                           | Stand |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Forum Tideelbe       | Shapes der Haseldorfer Marsch zur Böschungsunter- und Böschungsoberkante der Priele | 2018  |
| HPA                  | Elbe Stationierung von Elbe-km 607 bis ca. 670                                      | 2018  |
| LKN                  | Karte Stauraum ohne Hetlinger Schanze Sohlhöhe NHN +0,60 m                          | 2018  |
| Portal Tideelbe      | Landschaftspflegerische Ausführungsplanung Hetlingen/ Giesensand (BWS, BSS, Klütz)  | 2006  |
| Portal Tideelbe      | Digitales Höhenmodell der Außenelbe, des Hamburger Hafens, und der Unterelbe        | 2016  |
| Portal Tideelbe      | Randbedingungen zu Wasserständen, Abflüssen, Salzgehalten, Schwebstoffgehalte       | 2016  |
| Portal Tideelbe      | Seekarten Haseldorfer Binnenelbe, und Abschnitt Lühesand-Pagensand                  | 2018  |

### 3 Literaturstudie

Eine Reaktivierung der Haseldorfer Marsch war bereits Bestandteil früherer Untersuchungen, wie u.a. DHI (1999) als Ausgleichsmaßnahme zur Wiederanbindung an die Elbe, AG Hochwasser (2007) zur Vermeidung von Überschwemmungen bei Binnenhochwasser und bei der BAW (2014) als Sturmflutpolder. Die Studie der BAW (2014), die der heutigen Zielstellung am nächsten kommt, zeigt das die Wirkung auf die Tidewasserstände bei ca. 1 cm liegen und Flut-/ Ebbströmung lokal in der Tideelbe verstärken.

Aus der Literatur wurden z.T. Hinweise zu Breiten, Sohlhöhen bzw. ermittelte Zustrombreiten für die vorliegende Untersuchung berücksichtigt.

#### 3.1 KLIMZUG-NORD (BAW)

Die Studie zum Projekt KLIMZUG-NORD (BAW, 2014) untersucht die Wiederanbindung der Haseldorfer Binnenelbe an die Tideelbe als Sturmflutpolder als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel. Die Untersuchung betrachtet die Schaffung von zusätzlichem Überflutungsraum, wobei keine Angaben zu Größe und Volumen des Flutraumes gemacht werden.

Angenommen wurde für die Untersuchung, dass die Haseldorfer Binnenelbe am Elbe-Kilometer 650 über einen 50 m breiten Durchlass angeschlossen wird. Untersucht wurden dabei mittlere Tideverhältnisse und Sturmfluten, mit und ohne Meeresspiegelanstieg und mit verschiedenen Oberwasserzuflüssen (710 m<sup>3</sup>/s und 350 m<sup>3</sup>/s).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anpassungsmaßnahme trotz positiver Wirkung nicht ausreichend für die Zielstellung der Sturmflutscheitelabsenkung ist. Sowohl mit als auch ohne Meeresspiegelanstieg liegen die Änderungen der Tidewasserstände unter 1 cm. Zusätzlich erzeugt die Maßnahme hohe Strömungen im 50 m breiten Anschlussbereich der Haseldorfer Binnenelbe. Hier werden Strömungsgeschwindigkeiten von 1,8 m/s maximale Flutströmung und 1,4 m/s maximale Ebbströmung erwartet.

Der Salzgehalt im Rinnensystem der Haseldorfer Binnenelbe wird in der Studie der BAW bei einem Oberwasserzufluss von 710 m<sup>3</sup>/s unter Sturmfluteinwirkung mit 0,4 PSU angegeben. Bei einem Oberwasserzufluss von 350 m<sup>3</sup>/s steigt der Salzgehalt in dem Rinnensystem der Haseldorfer Binnenelbe auf 0,5 bis 0,6 PSU.

Abbildung 3.2 zeigt den Einfluss des Anschlusses der Haseldorfer Marsch unter verschiedenen Ereignissen (mit und ohne Ausbau, mit und ohne Meeresspiegelanstieg) entlang der Fahrrinne der Tideelbe bei einem Abfluss von 710 m<sup>3</sup>/s. Die Änderungen zwischen IST und AUSBAU (Anschluss der Haseldorfer Marsch) sind so gering ( $\leq 1$  cm), dass diese Änderungen in der Abbildung kaum zu erkennen sind.

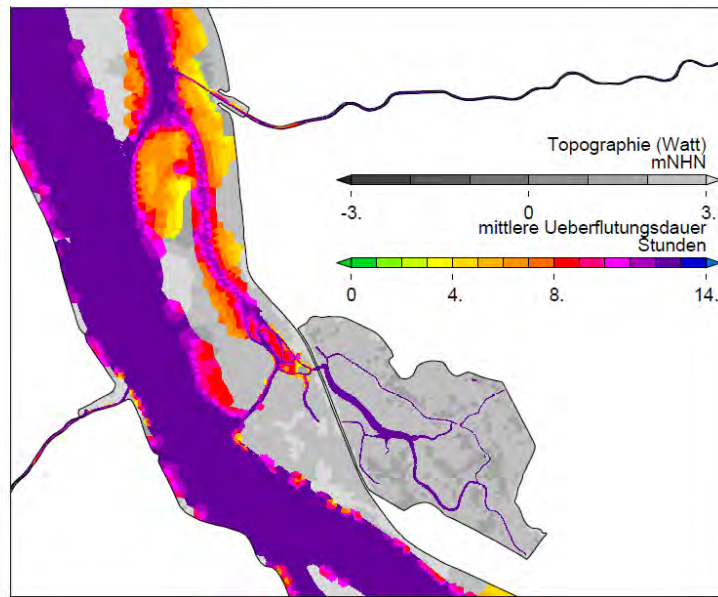


Abbildung 3.1: Mittlere Überflutungsdauer gemittelt über den Analysezeitraum für den Zustand mit angeschlossener Haseldorfer Binnenelbe mit  $Q = 710 \text{ m}^3/\text{s}$  ohne Meeresspiegelanstieg (entnommen aus BAW, 2014)

Istzustand ohne Meeresspiegelanstieg (rot)  
 Ausbauzustand ohne Meeresspiegelanstieg (grün)  
 Istzustand mit 0,8 m Meeresspiegelanstieg (gelb)  
 Ausbauzustand mit 0,8 m Meeresspiegelanstieg (lila)

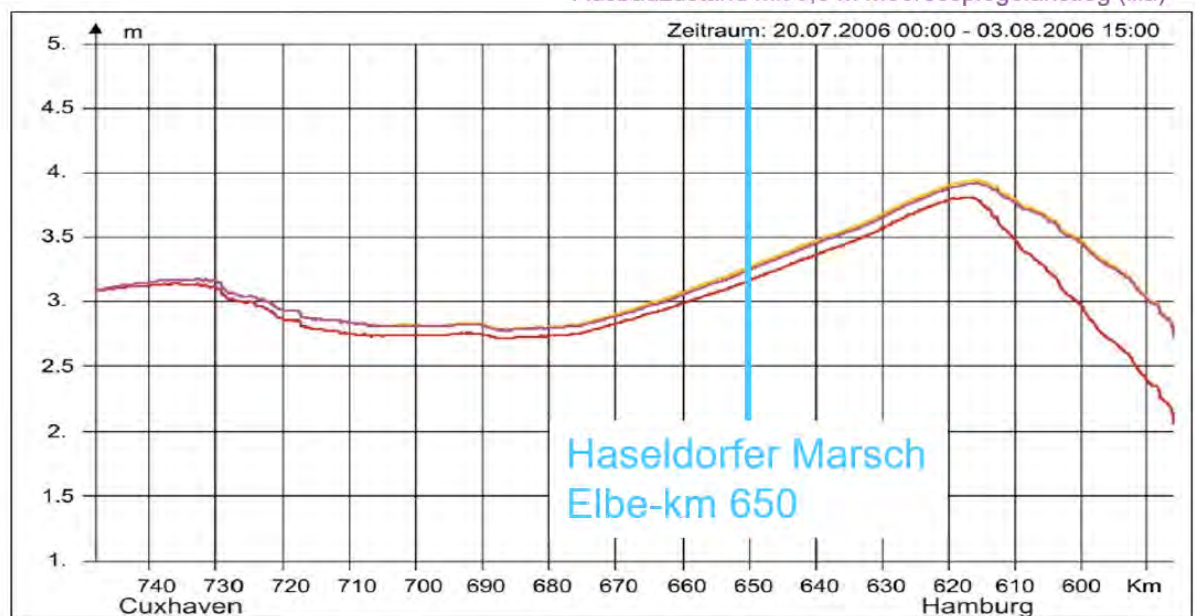


Abbildung 3.2: Einfluss auf den mittleren Tidenhub entlang der Fahrrinne bei einem Abfluss von  $710 \text{ m}^3/\text{s}$ . Abweichungen zwischen Ist und Ausbau ist  $\leq 1 \text{ cm}$ , daher kaum zu erkennen

### 3.2 Haseldorfer Marsch II (DHI)

Das Gutachten Haseldorfer Marsch II von DHI (DHI, 1999) untersuchte ebenfalls die Reaktivierung der Haseldorfer Binnenelbe und der Haseldorfer Marsch als Tide- und Sturmflutpolder. Der Fokus der hydrodynamischen Studie lag damals auf der Konzeption des erforderlichen Querbauwerkes und nicht auf der Wirkung für die Tideelbe. Folglich wurden verschiedene Torbreiten und -operationen für Sturmfluten mit Hilfe eines gekoppelten 1D-2D Modells untersucht, wobei der Elbbereich und die Haseldorfer Binnenelbe als 1D, die Steuerstruktur im Deich als 2D-Modell dargestellt wurde.

Die geplante Fläche der Reaktivierung betrug ca. 65,9 ha. Die Sohliefen in der Haseldorfer Marsch lagen als Längsschnitte vor. Die Sohle im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe liegt bei ca. -1,2 m NHN, am Deich bis ca. +0,2 m NHN (2 km vom Deich entfernt).

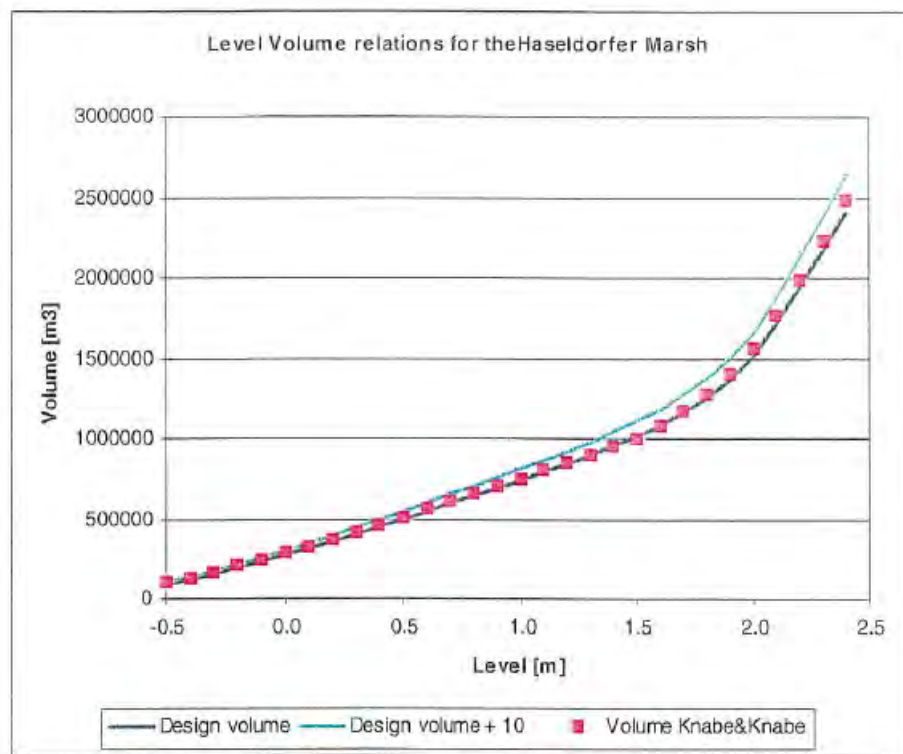


Abbildung 3.3: Wasserstand-Volumenbeziehung für die Haseldorfer Marsch (entnommen aus DHI, 1999)

Für die Untersuchung der Reaktivierung der Haseldorfer Marsch wurden zwei Szenarien betrachtet: 1. Normale Tiden, 2. Sturmflutiden bis über 5 m NHN. Die Ergebnisse für den Zustrom der Haseldorfer Marsch zeigen, dass eine Einlassbreite von 12 und 15 m für einen Durchfluss von 250 bis 234 m³/s bei 2,25 bis 2,16 m NHN erforderlich ist. Der Einlass der Tide in die Haseldorfer Marsch erfolgt bis maximal 2 m NHN, danach wird der Einlassbereich geschlossen. Die Tiefe des Zustrombauwerks wird mit -2,5 m NHN angegeben. Im Modell wurde für die Rauigkeit ein Manning-Strickler-Wert von 30 bis 40 m<sup>1/3</sup>/s angenommen. Die resultierenden Strömungen sind ≤1,6 m/s (12 m Tor) und ≤ 1,3 m/s (15 m Tor). Die Höhe des Sommerdeiches wurde mit ≥2,3 m angegeben.

### 3.3 LAP Hetlingen/ Giesensand (BWS, BSS & Klütz)

Der landschaftspflegerische Ausführungsplan (LAP) Hetlingen/ Giesensand (BWS, BSS & Klütz, 2006) wurde im Rahmen der Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt verfasst. Die Aufgabe des LAP ist die Konkretisierung der im Planfeststellungsbeschluss der WSD Nord vom 22.02.1999 beschlossenen Maßnahmen. Dazu gehört unter anderem die Verbesserung des Wasserhaushalts im Maßnahmengebiet Hetlingen/ Giesensand. Die dafür vorgeschlagenen Maßnahmen beinhalten die Verbesserung des Tideeinflusses, verbesserte Rückhaltung von Niederschlagswasser, die Anlage von Geländevertiefung bzw. Flachgewässern und die Grabenaufweitung und -vertiefung oder die Herstellung von Regelungsbauwerken zur Steuerung des Wasserstandes in einzelnen Teilgebieten.

Konkrete Vorschläge für die Verbesserung des Wasserhaushalts in der Haseldorfer Marsch sind ein temporär flacher Überstau am Ende des Winters auf 40% der Fläche. Außerdem sollen 3-4 % der Gebietsfläche im westlichen Teil zu dauerhaft wasserführenden Flachgewässern werden. Zudem sollte die Nutzung der Flächen extensiviert werden. Mit Wiederherstellung des Tideeinflusses sollen die eingedeichten Flächen als Feuchtgebiete entwickelt und erhalten werden.

Ebenso werden allgemeine Informationen zur Haseldorfer Marsch LAP Hetlingen/ Giesensand gegeben. Im LAP wird die Trennung der Hauptgewässer der Haseldorfer und Hetlinger Binnenelbe durch das Hubschützwehr (Wehr IV) beschrieben. Durch das Hubschützwehr wird die Haseldorfer Binnenelbe vollständig vom Tidegeschehen, wie es in der Hetlinger Binnenelbe vorhanden ist, abgetrennt. Die Haseldorfer Binnenelbe wird zwischen den Wehren III und IV auf einen Wasserstand von ca. 1 bis 1,5 m NHN eingestaut.

### 3.4 Hochwasserstudie Haseldorfer Marsch (AG Hochwasser)

Das Gutachten der Hochwasserstudie Haseldorfer Marsch (AG Hochwasser, 2007) beinhaltet Lösungsvorschläge zur Vermeidung von Überschwemmungen. Die Planung für die Verstärkung des Schöpfwerks des Sielverbands Haselau-Haseldorf sowie die Erweiterung der Pumpenleistung von 3,6 m³/s auf 5 m³/s sind Teil dieser Lösungsvorschläge. Zusätzlich ist eine Liste der Betriebswasserstände für Siele, Wehere und Schöpfwerke angefügt (Abbildung 3.4 und Tabelle 3.1).

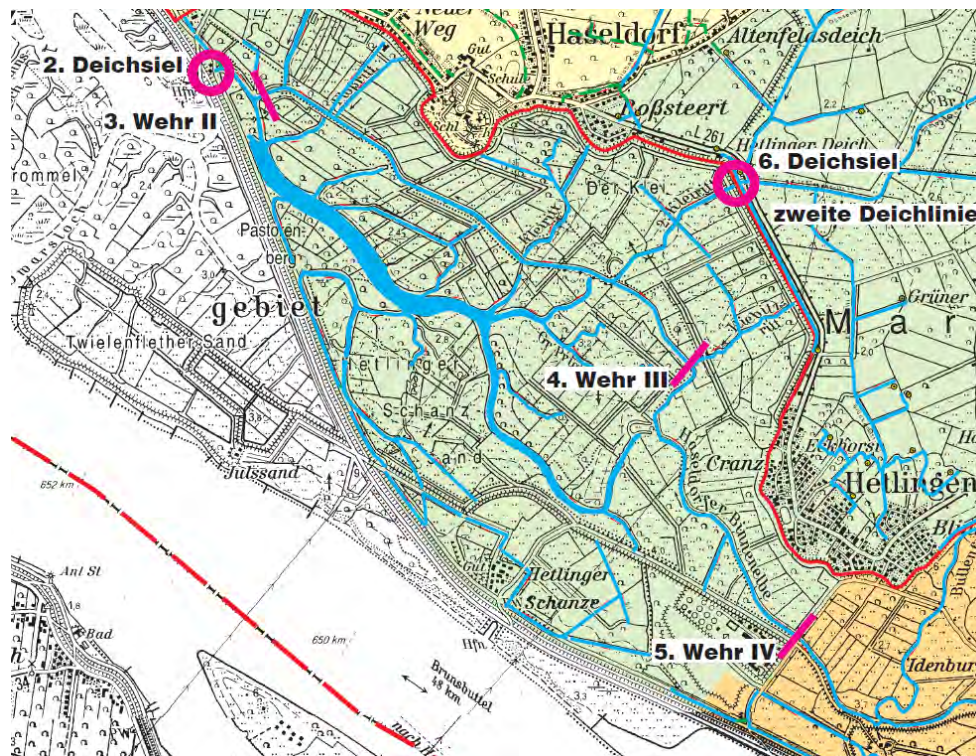


Abbildung 3.4: Übersicht zu der Lage der Bauwerke in der der Haseldorfer Marsch, entnommen aus AG Hochwasser (2007), S. 26

Tabelle 3.1: „Entwurf zur Regelung der Entwässerungsverhältnisse im neu eingedeichten Gebiet der Haseldorfer Marsch, Teil II – Rand- und Verbindungsgraben (geprüft durch ALW Itzehoe 1983): Binnenpeil: 1,50 m u. GOF“, entnommen aus AG Hochwasser (2007), S. 26

| Nr.                            | Bauwerk                     | Unterh.     | Betriebshöhen (in m ü. NN)                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                              | Pinnau-Sperrwerk            | ALR         | Geschlossen bei +2,20 m, i.d. Praxis bei Sturmflutwarnung bereits bei unter +2,00 m (Betriebsordnung: so rechtzeitig, dass ausreichend Stauraum für Oberwasser zur Verfügung steht) |
| 2                              | Sperrwerk Wedeler Au        | ALR         | Praxis: geschlossen bei +1,80 m (bei zu erwartenden Elbwasserständen deutlich über MThw bereits bei niedrigeren Wasserständen)                                                      |
| <b>SV Hellingen</b>            |                             |             |                                                                                                                                                                                     |
| 2                              | Deichsiel Landesschutzdeich | ALR         | Praxis: Winter +0,20 m, Sommer +0,80 bis +1,00 m (im Sommer kurzfristiger Einstau bis ca. +1,80 m bei geschlossenem Deichsiel 2. Deichlinie) *                                      |
| 3                              | Wehr II                     | ALR         | Praxis: Winter +0,20 m, Sommer +0,80 bis +1,00 m (im Sommer kurzfristiger Einstau bis ca. +1,80 m bei geschlossenem Deichsiel 2. Deichlinie) *                                      |
| 4                              | Wehr III                    | ALR         | Praxis: Winter +1,00 m, Sommer +1,40/1,50 m (im Sommer kurzfristiger Einstau bis ca. +1,80 m bei geschlossenem Deichsiel 2. Deichlinie) *                                           |
| 5                              | Wehr IV                     | ALR         | Praxis: Winter +1,00 m, Sommer +1,40/1,50 m (im Sommer kurzfristiger Einstau bis ca. +1,80 m bei geschlossenem Deichsiel 2. Deichlinie) *                                           |
| 6                              | Deichsiel 2. Deichlinie     | DHSV        | Praxis: Winter +0,20 m, Sommer +0,80 bis +1,00 m (Immer geöffnet außer bei Einstau im Zwischendeichsgebiete)                                                                        |
| <b>SV Haselau/Haseldorf</b>    |                             |             |                                                                                                                                                                                     |
| 8                              | Schöpfwerk Haselau          | Sielverband | Oberer Binnenpeil: -1,80 m, Unterer Binnenpeil: -2,30 m                                                                                                                             |
| <b>SV Moorrege-Klevendeich</b> |                             |             |                                                                                                                                                                                     |
| 9                              | Schöpfw./Deichsiel Moorrege | Sielverband | Oberer Betriebswasserstand: -0,80 m (abweichende Praxis: -1,10 m)<br>Unterer Betriebswasserstand: -1,35 m (Siel wegen zu hoher Lage nicht in Betrieb)                               |
| 10                             | Deichsiel Heidgraben        | Sielverband | +0,20 m                                                                                                                                                                             |

\* Entwurf zur Regelung der Entwässerungsverhältnisse im neu eingedeichten Gebiet der Haseldorfer Marsch, Teil II – Rand- und Verbindungsgraben (geprüft durch ALW Itzehoe 1983): Binnenpeil: 1,50 m u. GOF

## 4 Vorprüfung und Optimierung

Phase 1 der Wirkungsanalyse zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch umfasst eine Vorprüfung der Wirksamkeit des Flutraumes mittels Volumen-Abfluss-Beziehung und überschlägiger Berechnungen.

Diese Prüfung der Wirksamkeit und Optimierung umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Festlegung möglicher Varianten in Abstimmung mit dem AG inkl. Ausdehnung Sohltiefe und Böschungsneigung
- Einbindung und Digitalisierung der Varianten in das GIS inkl. Ermittlung von Volumen und Flächen für bestimmte Höhenlagen (Wasserstand-Volumen-Beziehung)
- Berechnung des zusätzlichen Tidevolumens bzw. des reaktivierten Flut- und Ebbstromabflusses über die Tidekennwerte und die Tidedauern (vgl. Abbildung 4.1)
- Abschätzung der Wirkung auf die Elbe über die Relation der Änderung der Flut- und Ebbstromabflüsse
- Konzeption der Öffnung der Deichlinie in Lage, Breite und Tiefe gemäß örtlicher Möglichkeiten und hydraulischer Erfordernisse inkl. Bestimmung möglicher Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserspiegelschwankungen
- Optimierung der Variante/Varianten aus hydraulischer Sicht und mit Blick auf örtliche Restriktionen

## 4.1 Hydrodynamisches System Haseldorfer Binnenelbe

Für eine Vorabschätzung der Wirkung auf die Elbe in zusätzlich gewonnenem Tidevolumen und zusätzlichen Ebb- und Flutstromabfluss wurden zunächst die Tidekennwerte (Wasserstände) für die Haseldorfer Marsch aus Daten am Pegel Hetlingen (Elbe-km 650,5, WSA) entnommen bzw. abgeleitet (Abbildung 4.1).

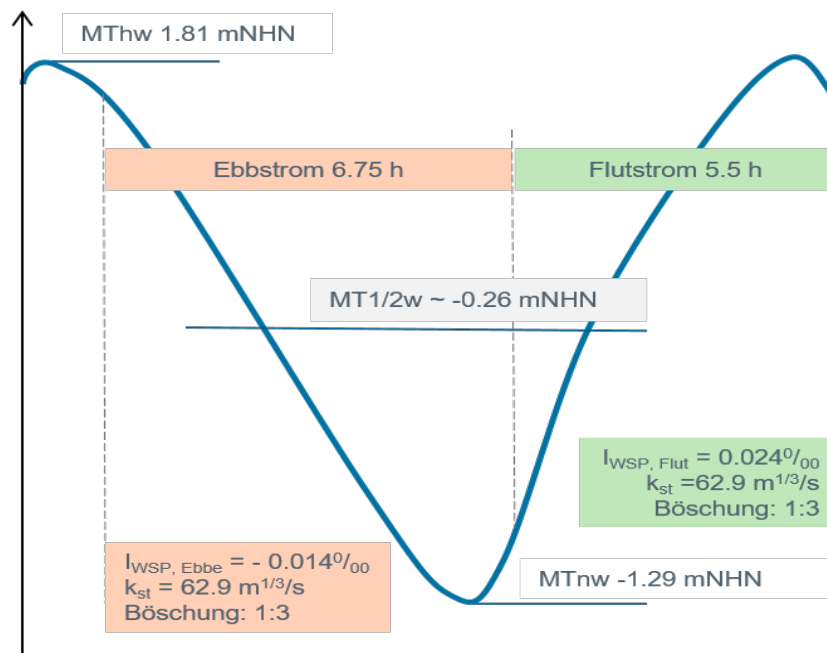


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Tidekennwerte Pegel Hetlingen (Elbekilometer 650,5, WSA). MThw: Mittleres Tidehochwasser, MTnw: Mittleres Tideniedrigwasser, MT1/2w: Mittleres Halbetidewasser,  $k_{st}$ : Strickler-Beiwert für die Gerinnerrauhigkeit,  $I_{WSP}$ : Wasserspiegelgefälle

Die Berechnung des  $I_{WSP}$  für Flut und Ebbe wurde anhand des Wasserspiegelgradienten aus extrahierten Modelldaten in der Elbe bei Elbe-km 650,5 (Abbildung 4.2) berechnet. Die Flut- und Ebbstromdauer wurde ebenfalls aus Modelldaten der Elbe bei Elbe-km 650,5 für das Jahr 2016 ermittelt. Der  $k_{st}$ -Wert mit  $62,9 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  wurde aus dem kalibrierten  $k_s$ -Wert des 3D-Modells für eine relativ glatte Sohle der Elbe umgerechnet und dient alleinig zur Vordimensionierung hydraulischer Kennwerte.

Um einen Überblick über das derzeitige hydrodynamische System der Haseldorfer Binnenelbe zu erhalten, wurden die Abflüsse, Wasserstände und Strömungen aus einem bestehenden Elbmodell für das Referenzjahr 2016 analysiert (Tabelle 4.1 und Abbildung 4.2). Diese Werte spiegeln die Hydraulik ohne die Aktivierung der Haseldorfer Marsch wider. Derzeit fließen bei Flutstrom ca.  $660 \text{ m}^3/\text{s}$  über den westlichen Bereich, der Haseldorfer Binnenelbe in Richtung Haseldorfer Marsch, während nur  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  aus dem südlichen Bereich in das Gebiet gelangen (Verhältnis West zu Süd = 2,4:1). Bei Ebbstrom fließt hingegen das Wasser in beide Richtungen gleichmäßiger ab im Verhältnis West zu Süd 1,2:1. Die derzeitige Aufteilung der Flut- und Ebbströme ist bei der Wahl der Lage der Zuwässerung von Bedeutung.

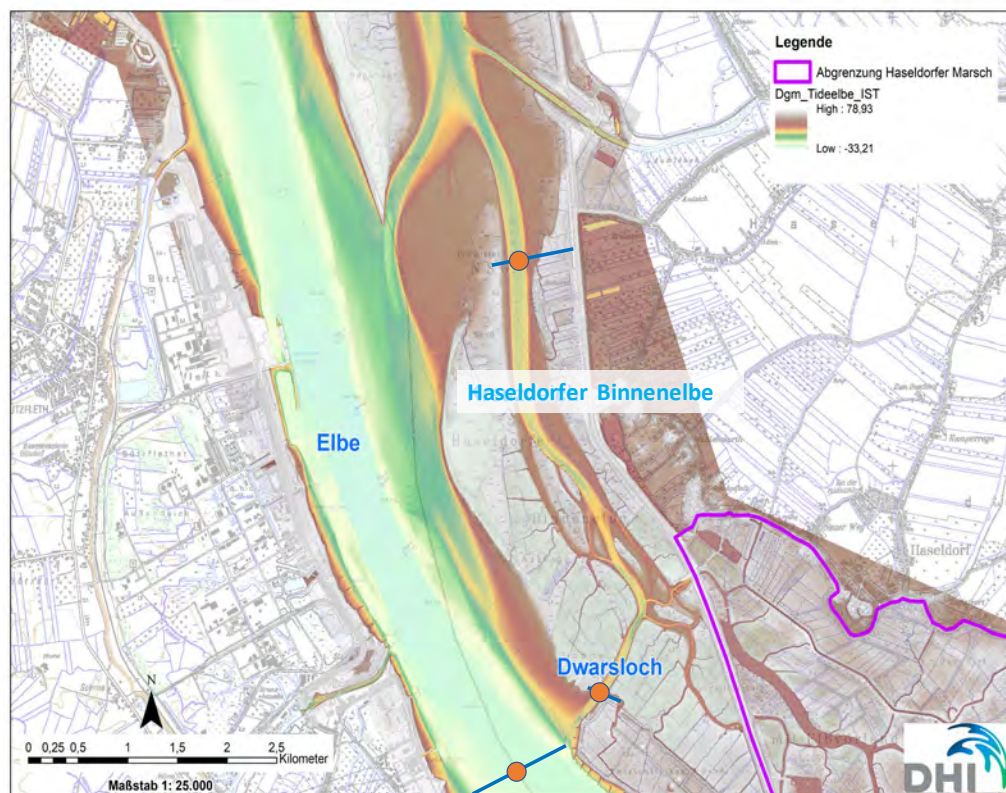


Abbildung 4.2: Skizze der Entnahmepunkte der hydrodynamischen Kennwerte im Bereich der Haseldorfer Marsch: Elbe, Haseldorfer Binnenelbe und Dwarsloch

Tabelle 4.1: Hydrodynamische Kennwerte an der Haseldorfer Binnenelbe mit maximalem Flut- und Ebbsstrom ( $Q_{\text{flut}}$ ,  $Q_{\text{ebbe}}$ ) im Jahresmittel, sowie die maximale Flut- und Ebbströmung ( $c_{\text{flut}}$ ,  $c_{\text{ebbe}}$ ) im Jahresmittel aus dem Jahr 2016.

|                        | $Q_{\text{flut}}$<br>[m <sup>3</sup> /s] | $Q_{\text{ebbe}}$<br>[m <sup>3</sup> /s] | $Q_{\text{flut}}/Q_{\text{ebbe}}$<br>[-] | $c_{\text{flut}}$<br>[m/s] | $c_{\text{ebbe}}$<br>[m/s] | $c_{\text{flut}}/c_{\text{ebbe}}$<br>[-] |
|------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Elbe                   | ca. 1600                                 | ca. 1400                                 | ca. 1,2                                  | ca. 1,25                   | ca. 1,15                   | ca. 1,1                                  |
| Haseldorfer Binnenelbe | ca. 660                                  | ca. 480                                  | ca. 1,25                                 | ca. 0,35                   | ca. 0,25                   | ca. 1,4                                  |
| Dwarsloch              | ca. 250                                  | ca. 300                                  | ca. 0,83                                 | ca. 1,1                    | ca. 0,9                    | ca. 1,2                                  |

Untersuchungen des Salzgehalts im Bereich des Dwarsloch zeigen, dass der Salzgehalt in der Elbe bei -5 m NHN vor dem Eingang zum Dwarsloch im Frühjahr (zwischen Mitte Februar und Ende April 2016) mit ca. 0,3 PSU am geringsten ist. In den Sommermonaten steigt der Salzgehalt auf bis zu 1,4 PSU an. Im Herbst 2016 sind die höchsten Salzgehalte zu verzeichnen. Anfang Oktober wird ein Wert von ca. 2,3 PSU erreicht. Im Winter sinkt der Salzgehalt infolge der höheren Oberwasserabflüsse wieder.

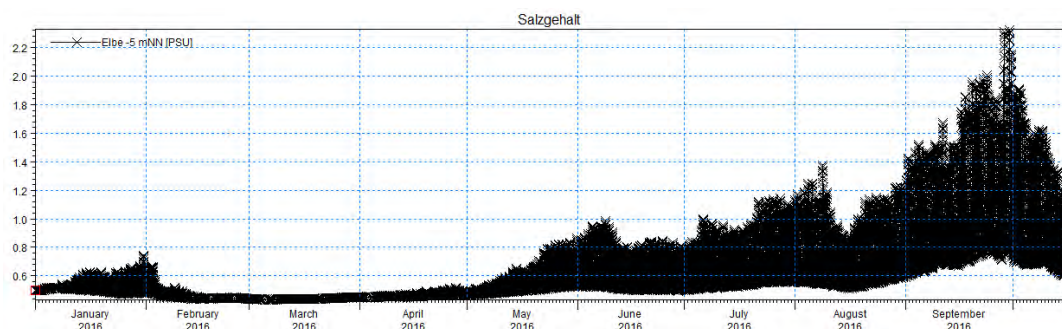


Abbildung 4.3: Salzgehalt im Istzustand in der Elbe in -5 mNHN vor dem Eingang zum Dwarsloch, entnommen aus Modelldaten der Elbe zum Jahr 2016

## 4.2 Varianten und Prüfung der Varianten Haseldorfer Marsch

Aus dem Gutachten von DHI (1999) geht hervor, dass die Sohle der Priele in der Haseldorfer Marsch rasch auf ca. -0.2 m NHN ansteigt. Folglich wurde für die Sohlentiefe der Priele in der Haseldorfer Marsch im Istzustand bei ca. -0,29 m NHN (+1 m über MTnw) als konstant angesetzt. Durch das tiefliegende Vorland der Haseldorfer Marsch werden bei MThw (+1,81 m NHN) weite Teile der Marsch über die bestehenden Entwässerungsgräben eingestaut (Abbildung 4.4) und somit eine große Fläche aktiviert.

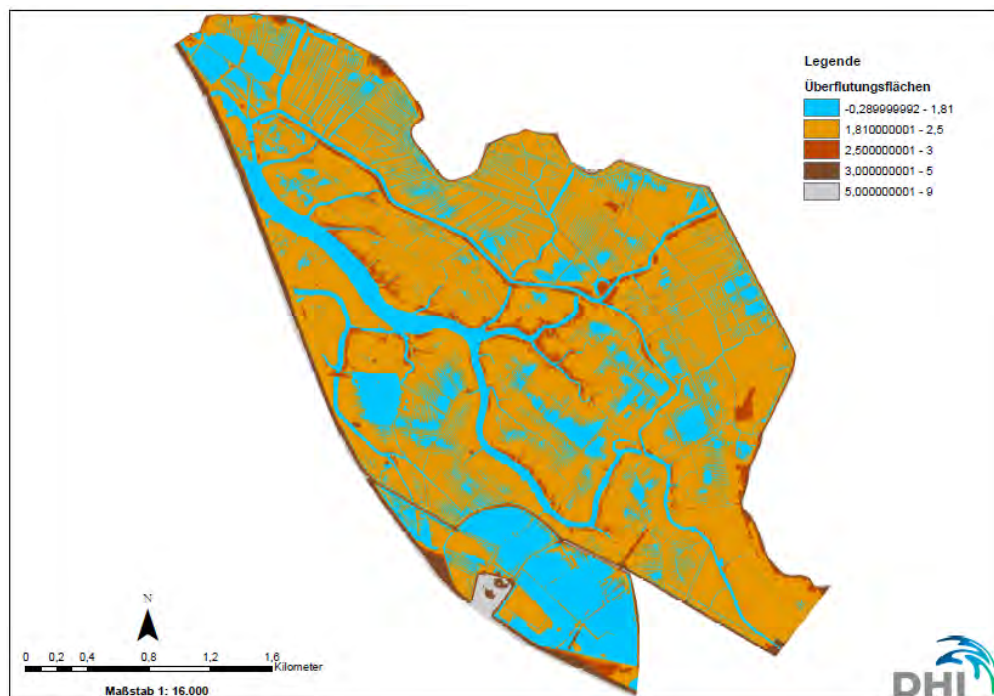


Abbildung 4.4: Überflutungsflächen der Haseldorfer Marsch bei einem Anschluss im Istzustand bei MThw 1,81 m NHN

Die Variante 1 sieht eine Beibehaltung der bisherigen Prielabmessungen in der Haseldorfer Marsch vor. Diese Variante wurde in Abstimmung mit dem AG nicht weiter betrachtet, da diese Variante zu wenig zusätzliches Tidevolumen schafft.

Die Varianten 2 und 3 bestehen jeweils aus einer Anbindung des Flutraumes mit Eintiefung der Priele auf 50 cm unter MTnw (Tidevolumen Variante 1: 1 Mio. m<sup>3</sup>), mit zusätzlicher Verbreiterung auf eine Böschungsneigung von 1:5 (Tidevolumen Variante 2: 3,3 Mio. m<sup>3</sup>) und einer zusätzlichen Abgrabung von Flächen als Polder (Tidevolumen Variante 3: 4,7 Mio. m<sup>3</sup>). Zusätzlich wurde die Entfernung der Wehre im Binnenbereich der Haseldorfer Marsch angenommen.

#### 4.2.1 Variante 2

Die Auswertung der Variante 2 erfolgte unter folgenden Anpassungen:

- Sohltiefe der Hauptpriele der Haseldorfer Binnenelbe konstant bei -1,79 m NHN (Abbildung 4.5)
- Keine Wehre in Binnenbereich der Haseldorfer Marsch
- Verbreiterung der Böschung auf eine Böschungsneigung 1:5

Die gesamte Polderfläche für die Variante beträgt 231 ha mit einem maximalen Wasservolumen von 3,8 Mio.m<sup>3</sup>. Das Tidevolumen begrenzt durch angenommene Wasserspiegelschwankungen zwischen Tideniedrig- und Tidehochwasser (gemäß Abbildung 4.1) beträgt 3,3 Mio.m<sup>3</sup> (Abbildung 4.6). Sowohl beim Ebb- als auch beim Flutstrom ist eine Stärkung der Abflüsse in der Tideelbe mit ca. 1% zu erwarten (Ebbstrom 137 m<sup>3</sup>/s (1%); Flutstrom 169 m<sup>3</sup>/s (1,1%)).

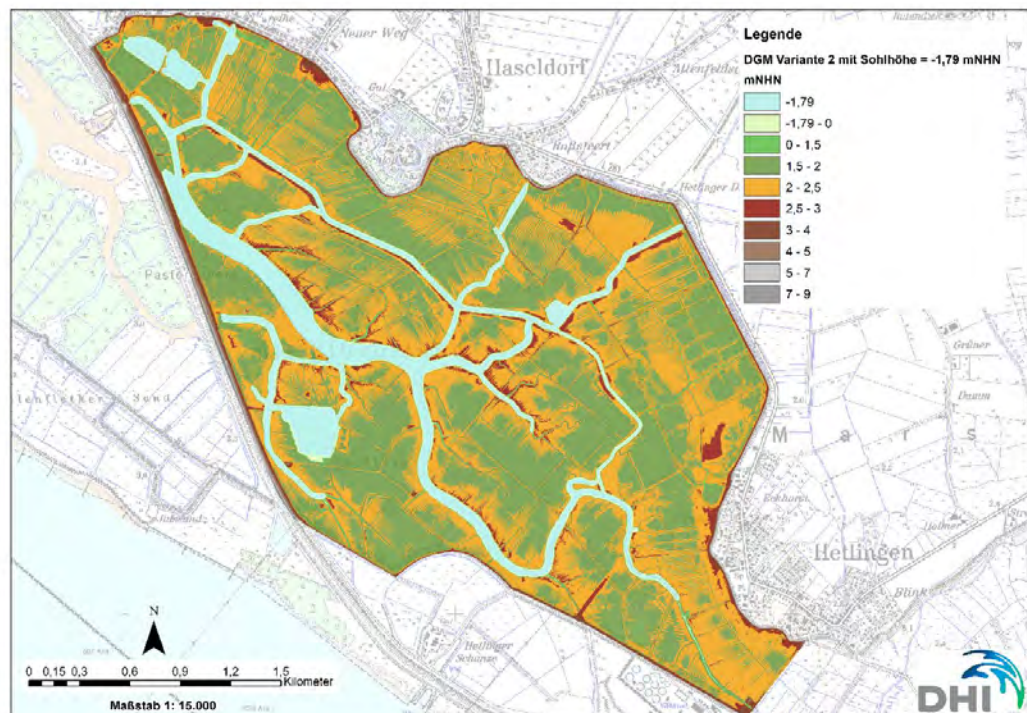


Abbildung 4.5: Variante 2 der Haseldorfer Marsch mit einer konstanten Sohlhöhe in den Haupttrieben von -1,79 m NHN und einer Aufweitung der Böschung mit 1:5 (Verbreiterung)

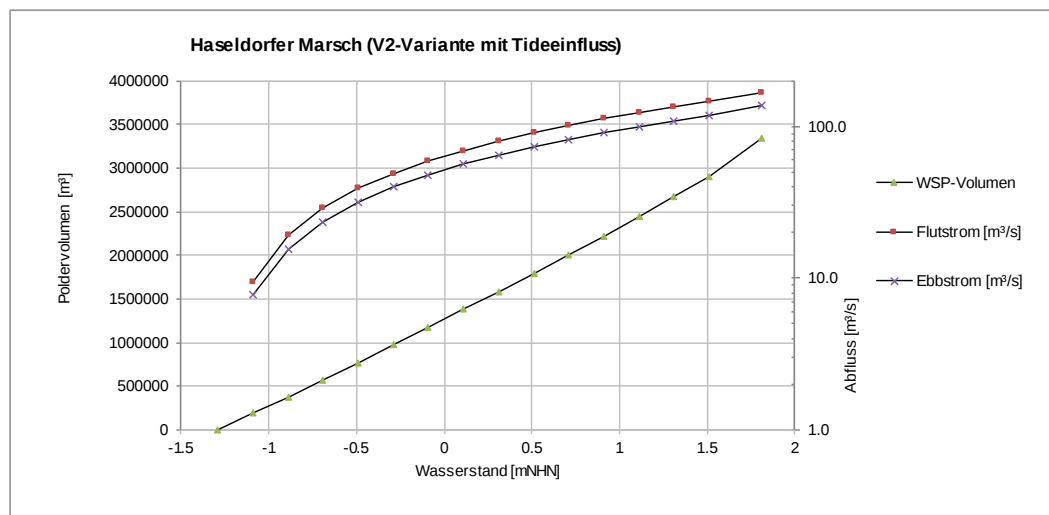


Abbildung 4.6: Wasserstand-Volumen-Beziehung der Haseldorfer Marsch der Variante 2.

Der Anschluss der Variante 2 zur Haseldorfer Marsch an das Tidegeschehen wurde in einer hydraulischen Vordimensionierung auf Basis der berechneten mittleren Flut-/Ebbströme ermittelt. Die Werte für die Rauheit und das Wasserspiegelgefälle wurden wie in Abbildung 4.1 dargestellt angenommen. Die Vordimensionierung der Deichöffnung ergab eine Sohlhöhe des Zustroms und der Öffnung des Deiches bei -2,5 m NHN. Die Breite der Deichöffnung muss mindestens 40 m (mit Aufstau, Annahme  $v_{\max}$  ca. 1,25 m/s) bzw. 105 m (ohne Aufstau) betragen.

#### 4.2.2 Variante 3

Die Auswertung der Variante 3 erfolgte unter folgenden Anpassungen:

- Sohltiefe der Hauptpriele der Haseldorfer Binnenelbe konstant bei -1,79 m NHN (Abbildung 4.7)
- Keine Wehre in Binnenbereich der Haseldorfer Marsch
- Verbreiterung der Böschung auf eine Böschungsneigung 1:5
- Zusätzliche Abgrabung von Flächen auf -1,79 m NHN als Polder

Die gesamte Polderfläche für die Variante beträgt 279 ha mit einem maximalen Volumen von 5,2 Mio.m<sup>3</sup>. Das Tidevolumen begrenzt durch angenommene Wasserspiegelschwankungen zwischen Tideniedrig- und Tidehochwasser (gemäß Abbildung 4.1) beträgt 4,7 Mio. m<sup>3</sup> (Abbildung 4.8). Sowohl beim Ebb- als auch beim Flutstrom ist eine Stärkung der Abflüsse in der Tideelbe mit ca. 1,4 % zu erwarten (Ebbstrom 192 m<sup>3</sup>/s (1,4%); Flutstrom 236 m<sup>3</sup>/s (1,4%)).

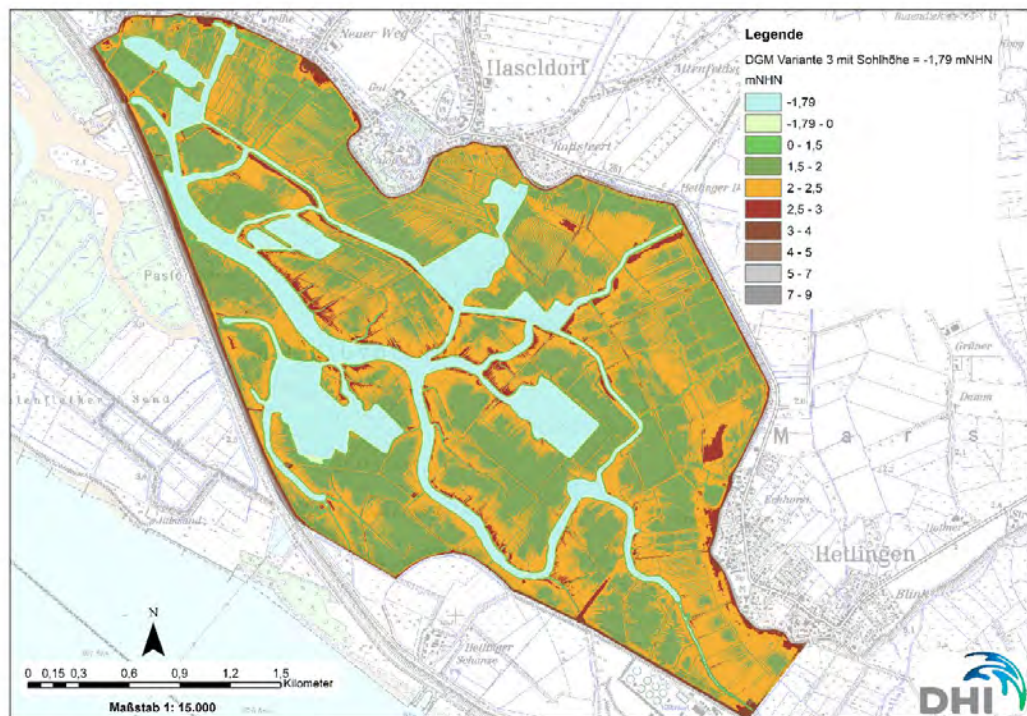


Abbildung 4.7: Variante 3 der Haseldorfer Marsch mit einer konstanten Sohltiefe in den Hauptpriele von -1,79 m NHN, einer Aufweitung der Böschung mit 1:5 (Verbreiterung) und zusätzlich abgegrabenen Polderflächen.

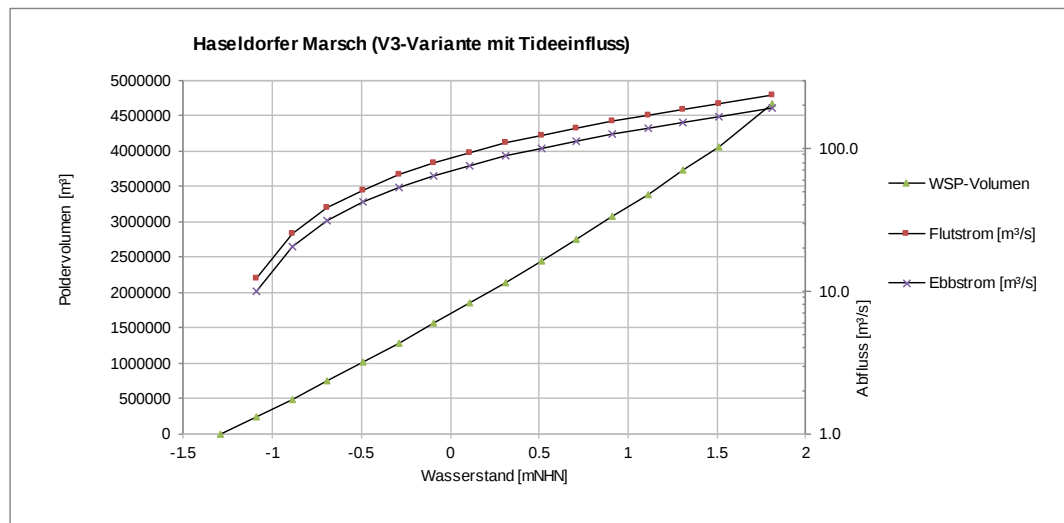


Abbildung 4.8: Wasserstand-Volumen-Beziehung der Haseldorfer Marsch der Variante 3

Der Anschluss der Variante 3 zur Haseldorfer Marsch an das Tidegeschehen wurde in einer hydraulischen Vordimensionierung auf Basis der berechneten mittleren Flut-/Ebbströme ermittelt. Die Werte für die Rauheit und das Wasserspiegelgefälle wurden wie in Abbildung 4.1 dargestellt angenommen. Die Vordimensionierung der Deichöffnung ergab eine Sohlentiefe des Zustroms und der Öffnung des Deiches bei -2,5 m NHN. Die Breite der Deichöffnung muss mindestens 60 m (mit Aufstau, Annahme  $v_{\max}$  ca. 1,25 m/s) bzw. 150 m (ohne Aufstau) betragen.

### 4.3 Entwicklung von Zustromvarianten für die Haseldorfer Marsch

Die Wiederanbindung der Haseldorfer Binnenelbe an die Elbe ist notwendig für die Tidereaktivierung der Haseldorfer Marsch und die daraus resultierende Herstellung des Tideeinflusses im Flutraum. Die Flutung der Haseldorfer Marsch darf nicht (vorgegebene Restriktion) durch die Hauptdeichlinie (z.B. bei Hetlingen), sondern soll über die Haseldorfer Binnenelbe und das Dwarsloch erfolgen.

Die derzeitige Sohlentiefe der äußeren Haseldorfer Binnenelbe liegt bei ca. -1,9 m NHN, die Sohlentiefe des Dwarsloch bei ca. -2,3 m NHN. Mögliche Anschlussbereiche der Haseldorfer Marsch wären über

1. den Sportboothafen (-3 m NHN, rechnerisch ca. 40 m Breite erforderlich),
2. den Zwischenbereich (-0,3 m NHN, rechnerisch ca. 50 m Breite erforderlich) oder
3. das Bauernloch (-0,5 m NHN, rechnerisch ca. 100 m Breite erforderlich) möglich (Abbildung 4.9).

Nötige Anpassungen für den Anschluss wäre eine Aufweitung der Sohle bzw. eine kombinierte Vertiefung und Aufweitung der Sohle.

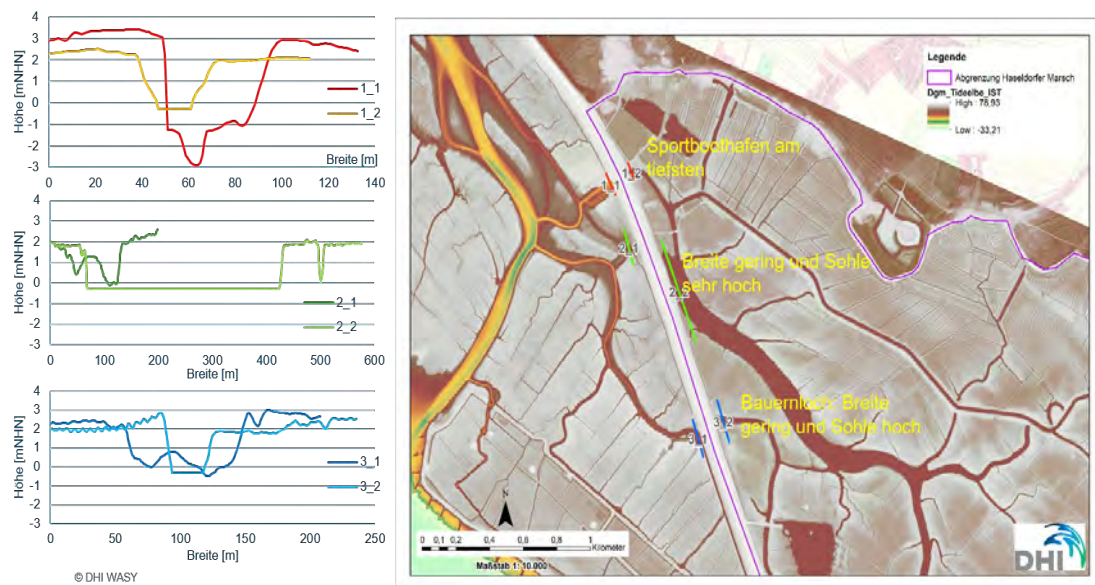


Abbildung 4.9: Sohlprofilen und Breiten im Istzustand aus dem DGM 2016

Als vorteilig empfiehlt sich eine Aufweitung und Eintiefung des Sportboothafens, da dieser bereits tief genug ist und die kürzeste Verbindung zum Binnenbereich der Haseldorfer Marsch darstellt. Zudem ist über den Zugang des Sportboothafens eine möglichst kurze hydraulische Verbindung zum Dwarsloch und zur äußeren Haseldorfer Binnenelbe möglich.

Final wurde die Zustromvariante über den Zwischenbereich (Zustrom 2, Abbildung 4.9) gewählt, da in der projektbegleitenden Arbeitsgruppe für diese naturnahe Anschlusslösung plädiert wurde. Der Anschluss erfolgt für die Varianten mit einer Eintiefung auf -2,5 m NHN und einer Verbreiterung auf 60 m gewählt. Diese Eintiefung und Aufweitung ist auch im äußeren Prielbereich zwischen dem Dwarsloch und der Haseldorfer Binnenelbe (vgl. Abbildung 4.10) zu gewährleisten.

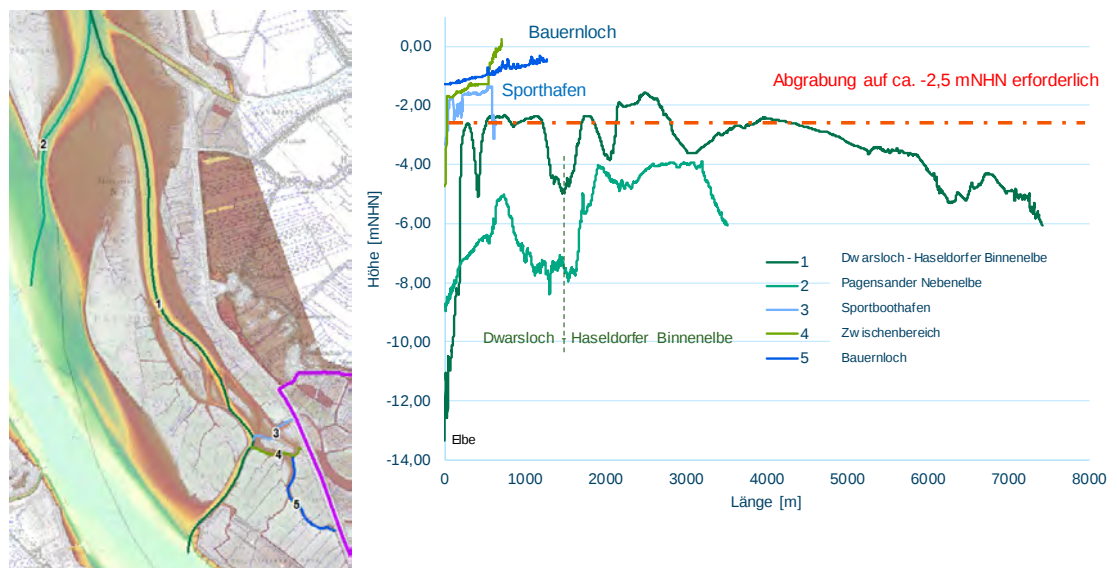


Abbildung 4.10: Erforderliche Anpassung der Sohlprofilen auf -2,5 m NHN im Bereich der des äußeren Prielsystems Dwarsloch und Haseldorfer Binnenelbe

## 4.4 Ableitung der Vorzugsvariante

Die Ergebnisse der Vorkonzeption zeigten, dass unter Ansatz der Tidekennwerte am Pegel Hetlingen für die hydraulische Wirkung der Fluträume Haseldorfer Marsch die Wirkung auf das Tidegeschehen bei ca. 1% (Variante 2) bis 1,4% (Variante 3) liegen wird. Die Wirkung auf das Tidegeschehen leitet sich aus der Polderfläche, dem Tidevolumen, der mittleren Flut- und Ebbdauer und aus den daraus hervorgehenden zusätzlichen Flut- und Ebbströmen ab.

Da die Wirkung auf die Tideelbe insgesamt gering sein wird, wurde für eine weitergehende numerische Untersuchung die Maximalvariante (Variante 3) mittels eines hydropnumerischen 3D-Modell der Tideelbe untersucht.

## 5 Untersuchungen im hydropnumerischen Modell

Die Untersuchung der Wirkung der Variante 3 zur Haseldorfer Marsch im hydropnumerischen Modell beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Einbindung der Variante 3 an das bestehende hydropnumerisches 3D-Modell der Tideelbe von Cuxhaven bis Geesthacht inkl. verfeinerte Auflösung der äußeren Prielsysteme zur Haseldorfer Binnenelbe
- Simulation des Istzustandes der Tideelbe und des Planzustandes der Tideelbe mit Flutraum für einen Referenzzustand mit geringem Oberwasserabfluss (350 m<sup>3</sup>/s) und mittleren Tideverhältnissen
- Auswertung der hydrodynamischen Tidekennwerte in der Elbe zur Einstufung der Wirksamkeit auf den Sedimenttransport in der Elbe (u.a. Tidehub, Salzgehalte, signifikante Strömungskennwerte)
- Auswertung der hydrodynamischen Wirkung auf den Planungsraum Haseldorfer Marsch und Binnenelbe (u.a. Strömungen, Wasserständen, Salzgehalte)

### 5.1 Modellsoftware

Für alle hydropnumerischen Untersuchungen wurde die Software MIKE 3 FM (FM für flexible mesh, d.h. unstrukturiertes Gitter) von DHI verwendet. Das Programmsystem MIKE 3 FM wurde speziell für die Modellierung von dreidimensionalen, dichteabhängigen, instationären Strömungszuständen (Newtonsche Fluide) und Sedimenttransportprozessen in Ästuaren und im offenen Ozean modular entwickelt. Diese Ausrichtung spiegelt sich sowohl in der allgemeinen Konzeption als auch in der Kopplung der verschiedenen Module wieder. Eine Referenzierung erfolgt mittels einheitlichen Koordinatenbezugs für verschiedene Projektionen, gleicher Diskretisierung des Modellgebietes, einheitlicher Behandlung von Randbedingungen und Ansatz eines einheitlichen Verfahrens zur Lösung der approximierten Differentialgleichungssysteme mit Hilfe der Finite-Volumen-Methode.

#### 5.1.1 Hydrodynamik (HD)

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

Berechnung der hydrodynamischen Prozesse werden in den Gleichungen folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Gezeitenströmungen
- Einfluss von Auftrieb und Schichtung auf Grund unterschiedlicher Dichten
- Turbulente Diffusion, Advektion und Dispersion
- Corioliskraft
- Barometrische Druckgradienten
- Windschubkraft (hier nicht berücksichtigt)
- Variable Bathymetrien und Sohlrauigkeiten
- Überflutung und Trockenfallen von gezeitenbeeinflussten Bereichen
- Effekte von Zuflüssen und Rückgabebauwerken
- Quellen und Senken (Massen- und Impulserhaltung)
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre inkl. Verdunstung und Niederschlag (hier nicht berücksichtigt)

Impuls- und Massenerhaltung auch für die 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.

Die 3d-Kontinuitätsgleichung lautet:

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

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

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

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

mit:

|          |                                                                           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|
| x, y, z  | kartesische Koordinaten                                                   |
| u, v, w  | Strömungsgeschwindigkeitskomponenten in x, y, z Richtung [m/s]            |
| $v_t$    | Wirbelviskosität [m <sup>2</sup> /s]                                      |
| t        | Zeit [s]                                                                  |
| f        | Coriolisbeschleunigung = $2\Omega \cdot \sin \phi$                        |
| $\eta$   | Lage der Gewässeroberfläche                                               |
| g        | Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]                                     |
| $\rho_0$ | Referenzdichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]                           |
| $p_a$    | atmosphärischer Druck [N/m <sup>2</sup> ]                                 |
| S        | Betrag des Zuflusses aus Punktquellen [m <sup>3</sup> /s/m <sup>3</sup> ] |
| $u_s$    | Einleitgeschwindigkeit an der Punktquelle [m/s]                           |

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  $v_t$  können als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach Smagorinsky) oder als Ergebnis eines gemischten k- $\epsilon$  Modells (1D-k- $\epsilon$ -Modell in der Vertikalen) und des

Smagorinsky-Ansatzes in der Horizontalen angegeben werden. In allen hydromorphologischen Untersuchungen wurde ein gemischtes k- $\epsilon$  Modell in der Vertikalen 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.

Zur Berechnung der hydrodynamischen Prozesse in der Elbe wurden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- 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- $\epsilon$  Modell in der Vertikalen und einem Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen
- Kein Wind
- Salinität oder Temperatur

## 5.2 Modellaufbau

Für die vorliegende Untersuchung wurde der Istzustand der Tideelbe (ohne Haseldorfer Marsch) sowie ein Planzustand mit Anschluss der Haseldorfer Marsch an das Tidegeschehen der Elbe simuliert, um den Einfluss des Flutraums Haseldorfer Marsch auf das Tidegeschehen der Elbe zu untersuchen. Grundlage bildet ein bereits bestehendes kalibriertes und validiertes hydronumerisches 3D-Modell der Tideelbe von Cuxhaven bis Geesthacht.

### 5.2.1 Allgemeine Diskretisierung

Das Modell zur Berechnung des Flutraums der Haseldorfer Marsch umfasst den tidebeeinflussten Bereich der Elbe vom Wehr in Geesthacht bei Elbekilometer 586 (Oberstrom) bis nach Cuxhaven bei Elbekilometer 724 (Unterstrom) und besitzt eine Länge von 138 Flusskilometern (Abbildung 5.1).

Die bathymetrischen Daten wurden aus dem digitalen Geländemodell (DGM) für die Bereiche der Außenelbe, den Hamburger Hafen und die Unterelbe entnommen. Die Auflösung der bathymetrischen Daten beträgt 5x5 m im Projektbereich, und 10x10 m im übrigen Modellgebiet.

Das Modellnetz wurde aus dreieckigen und quadrangulären Elementen erstellt und hat eine Auflösung von 40.000 m<sup>2</sup> in den groben und 50 m<sup>2</sup> in den feinsten Bereichen (Haseldorfer Marsch). Für eine Darstellung der Gitterauflösung ist eine Gesamtübersicht zu grob (Abbildung 5.2). Daher ist in der Abbildung 5.3 der Bereich Haseldorfer Marsch detailliert dargestellt. Das Modell der Elbe wurde in mehrere Bereiche mit unterschiedlichen Auflösungen eingeteilt. Im Verlauf der Hauptströmung wurde das Modell in quadranguläre Elemente (Quader) gegliedert. Die übrigen Gebiete, meist flachere Randbereiche der Elbe mit wechselnden Strömungsrichtungen, werden hingegen durch eine trianguläre Elementstruktur (Prismen) abgebildet.

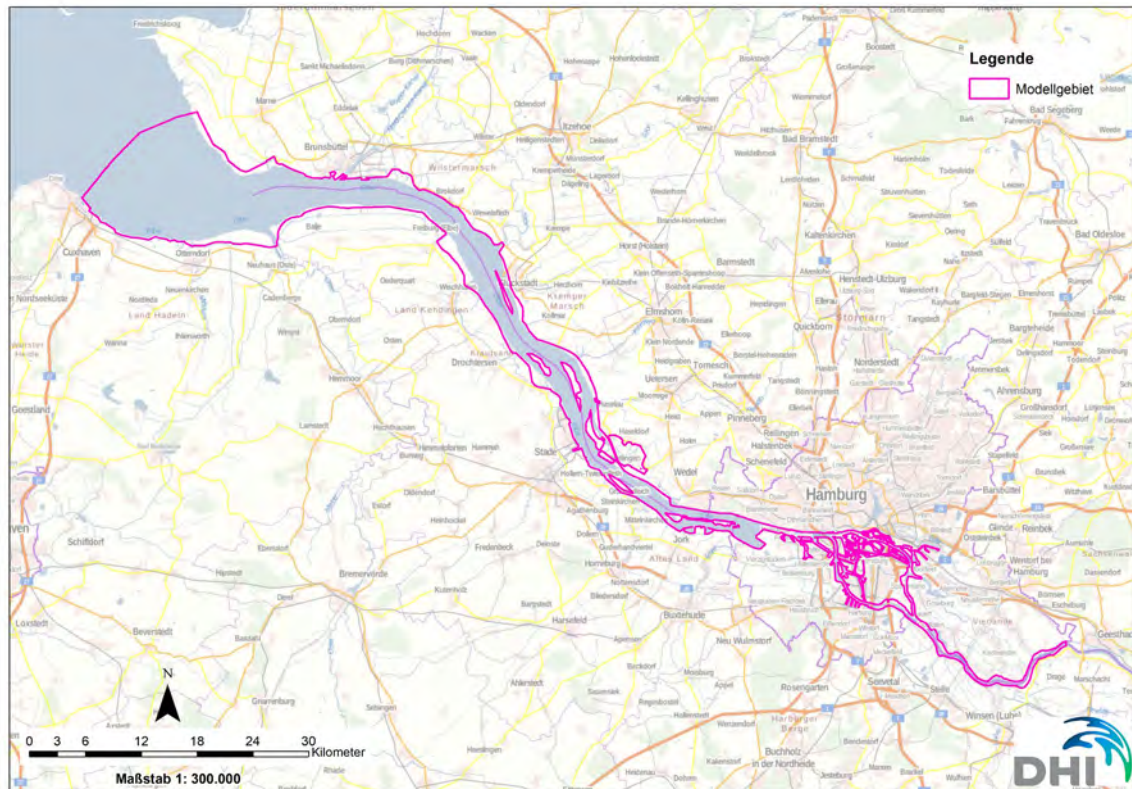


Abbildung 5.1: Übersicht des Modellgebiets für das Modell der Haseldorfer Marsch

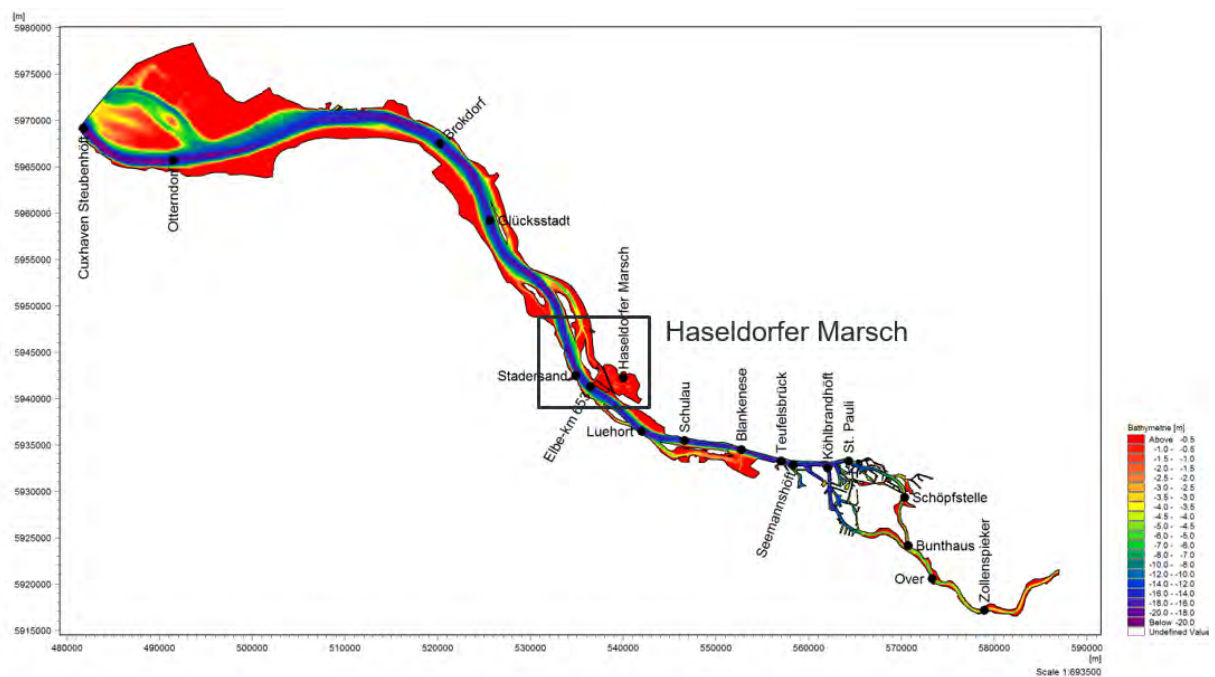


Abbildung 5.2: Übersicht 3D Modell von Geesthacht (km 586) bis Cuxhaven (km 724) und Lage der betrachteten Gebiete

Im Bereich der Haseldorfer Marsch (Abbildung 5.3) variiert die trianguläre Auflösung von maximal 10 x 10 m bis maximal 80 x 80 m. In den quadrangularen Bereichen erreichen die Elemente eine maximale Auflösung von 5 x 10 m bis maximal 90 x 50 m pro Element.

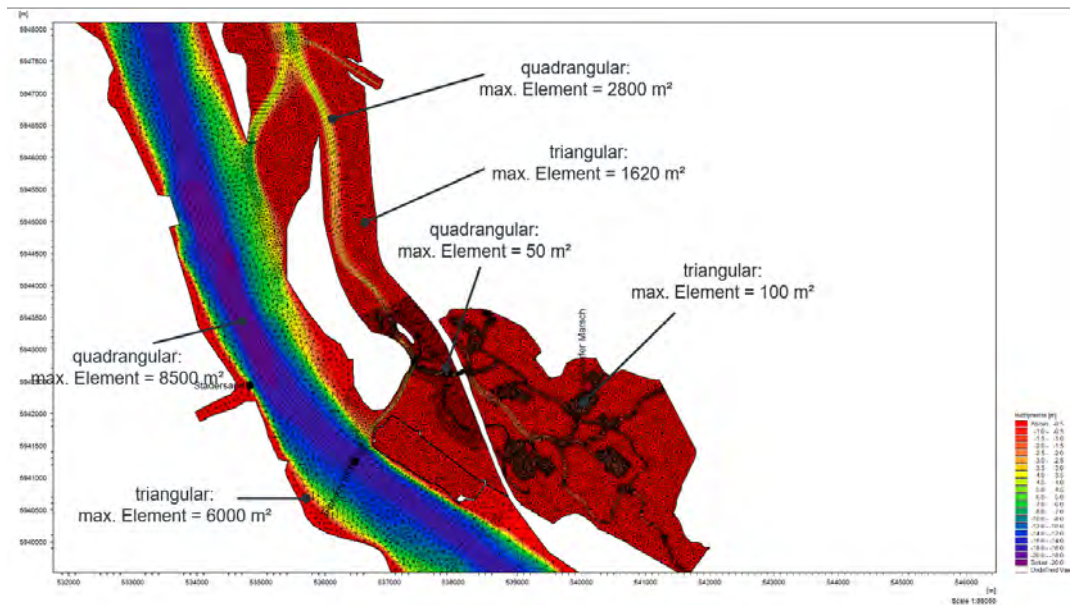


Abbildung 5.3: Detailbereich zum Modellgitter an der Haseldorfer Marsch mit verwendeter Modellauflösung

Das Modell ist in vertikaler Richtung in 8 Schichten aufgelöst, wobei ein äquidistantes Sigma-Netz verwendet wurde. Das bedeutet, dass sich die Schichthöhe der einzelnen Elemente gleichmäßig den jeweiligen Wassertiefen anpassen. Abbildung 5.4 zeigt beispielhaft in einem vertikalen Schnitt durch die Elbe am Kilometer 653 die dort vorhandene Modellauflösung.

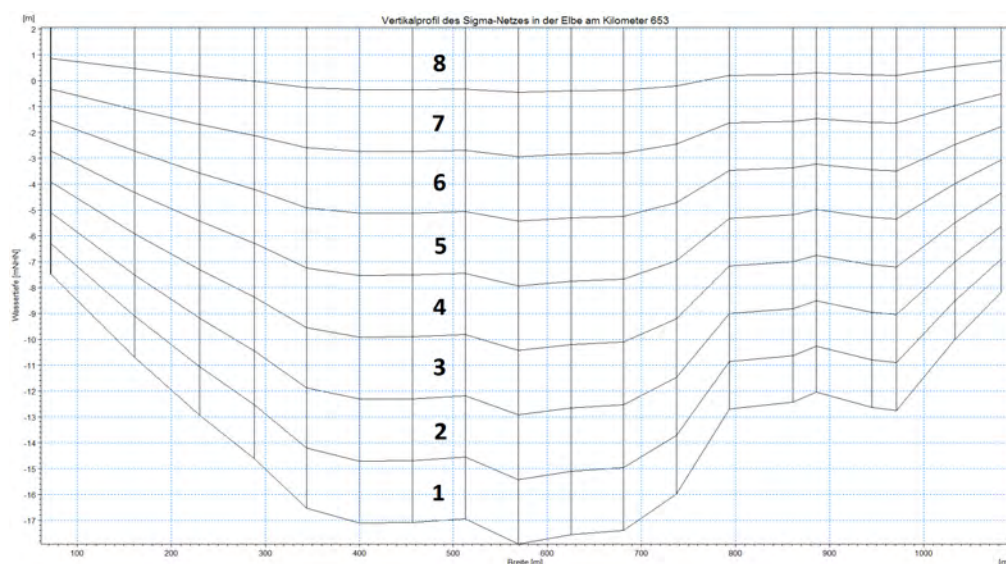


Abbildung 5.4: Vertikale Modellauflösung als Schnitt durch die Elbe bei Kilometer 653

## 5.2.2 Anschluss der Haseldorfer Marsch

Für die Berechnung des Planzustands der Variante 3 wird das Gebiet der Haseldorfer Marsch an das Tidegeschehen der Elbe angeschlossen. Die Variante 3 ist über das Dwersloch und die äußere Haseldorfer Binnenelbe mit der Haseldorfer Binnenelbe verbunden. Die bestehende Deichlinie wurde auf 60 m mit einer Sohlentiefe

von -2,5 m NHN geöffnet (zum Beispiel durch ein Sperrwerk). Die Zuwässerung findet ebenfalls über die Haseldorfer Binnenelbe und das Dwarsloch statt.

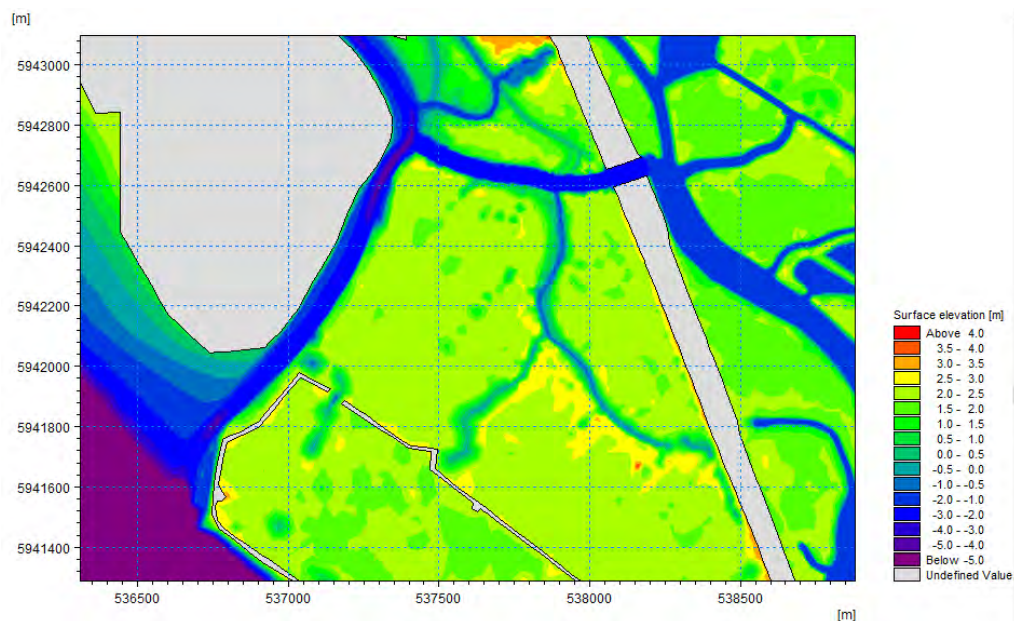


Abbildung 5.5: Zuwässerung der Marschdorfer Marsch durch Deichöffnung entlang der alten Haseldorfer Binnenelbe

Im untersuchten Zeitraum wurden mittlere Tiden (-1,9 bis 1,9 m NHN bei Cuxhaven) aus dem Juni 2016 mit einem konstanten Oberwasserabfluss von 350 m<sup>3</sup>/s angesetzt. In diesem Zeitraum bleibt das Sperrwerk offen, da keine Wasserstände über 2 m NHN zu erwarten sind. Die Sohlage im Planungsraum Haseldorfer Marsch beträgt -1,79 m NHN.

## 5.3 Hydrologische Daten und Randbedingungen

Die hydrologischen Randbedingungen in der Elbe werden durch den Oberwasserzufluss am Wehr Geesthacht und die bei Cuxhaven einlaufende Tidewelle geprägt. Anhand des Pegels Cuxhaven und der Oberwasserkurve in Neu Darchau wird die Hydraulik der Tideelbe beschrieben.

### 5.3.1 Hydraulische Randwerte

Als Referenzzeitraum wurde ein geringer Oberwasserabfluss mit einer mittleren Tide kombiniert, um ein für den Flussauftransport der Sommermonate typisches Ereignis in der Elbe zu Grunde zu legen.

Der Abflusskennwert wurde für das Modell konstant bei 350 m<sup>3</sup>/s gewählt. Dies entspricht einem Abflusswert knapp über dem MNQ. Der Abfluss wird am Wehr Geesthacht in das Modell eingespeist.

Der Wasserspiegel am Pegel Cuxhaven ist tidebeeinflusst. Als Referenzzeitraum für die Untersuchung wurde ein mittlere Nipp-Spring-Zyklus im Juni 2016 gewählt.

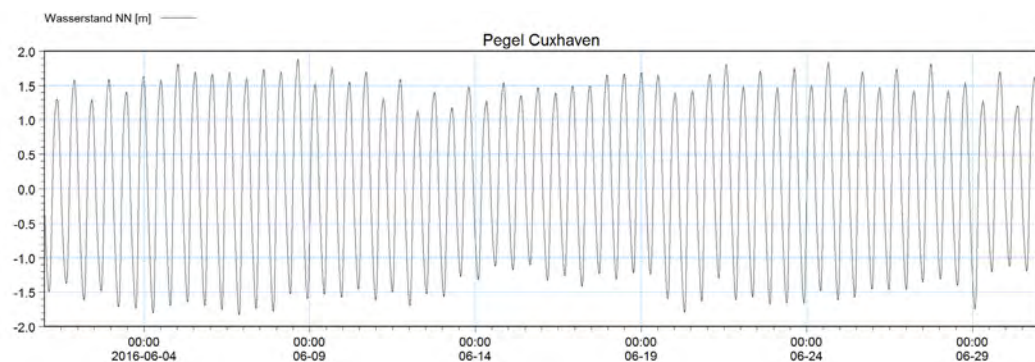


Abbildung 5.6: Wasserstand am Pegel Cuxhaven im Untersuchungszeitraum

### 5.3.2 Randwerte zu Salzgehalt und Temperatur

Salzgehalt und Temperatur sind weitere wesentliche Parameter für die hydrologischen Verhältnisse der Elbe. In Abbildung 5.7 ist der Salzgehalt dargestellt, der am seewärtigen Modellrand bei Cuxhaven gemessen und dort eingesteuert wurde. Bei Geesthacht werden 0,4 PSU konstant angesetzt.

Abbildung 5.8 zeigt die gemessene und eingesteuerte Ganglinie der Wassertemperatur zwischen 15°C und 19°C bei Cuxhaven. Die Messung zur Wassertemperatur am Pegel Bunthaus zwischen 20°C und 24°C wird bei Geesthacht als Randwerte eingesteuert.

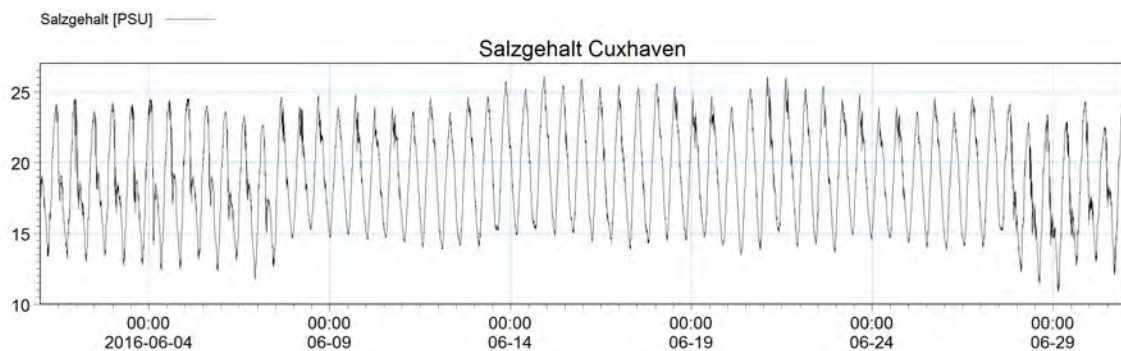


Abbildung 5.7: Im Modell eingesteuerter Salzgehalt am seewärtigen Rand bei Cuxhaven

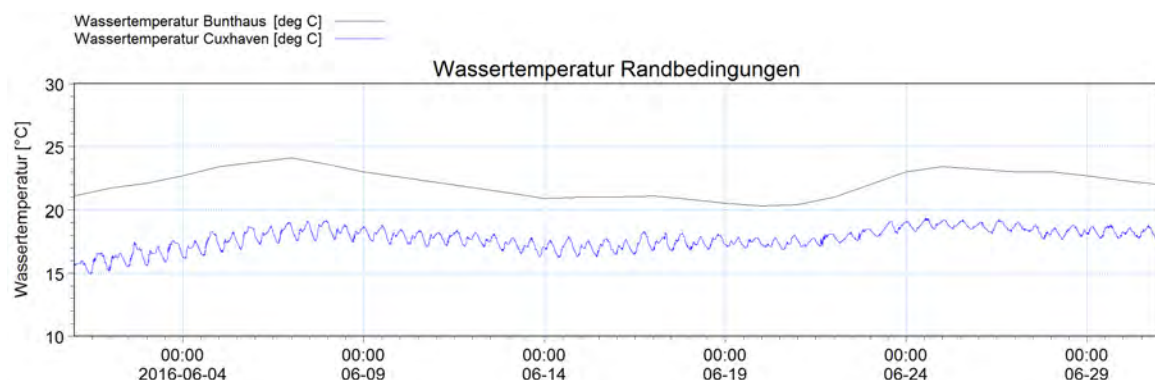


Abbildung 5.8: Gemessene Temperatur in der Elbe bei Bunthaus (schwarz) und bei Cuxhaven (blau)

Für beide Parameter, Salzgehalt und Wassertemperatur wurden Anfangswerte im Modell aus einem Initiallauf bis zum Juni 2016 3D-extrahiert und entsprechend im Modell flächig angesetzt.

### 5.3.3 Gewässer- und Vorlandrauheiten

Die Rauheiten wurden auf Basis des anstehenden Sedimentes an der Sohle (Sande bis Schluffe) und für Langzeit- und Einzelmessungen zu Wasserständen, Abfluss und Strömungen im Rahmen verschiedenster Studien nachkalibriert und validiert. Im hier zugrunde gelegten Modell sind die Rauheiten gemäß des Fließwiderstandes nach Nikuradse mit Werten zwischen 0,5 bis 11 mm belegt (Abbildung 5.9). Die gewählte Rauheit im Planungsraum der Haseldorfer Marsch beträgt 5 mm.

Die Turbulenzen werden durch ein kombiniertes k- $\epsilon$  und Mischweglängen-Turbulenzmodell im Modell erfasst. Das k- $\epsilon$  Modell hat eine geringe vertikale Dissipation. Zusätzlich wurde ein variabler Smagorinsky-Faktor zwischen 0,25 und 0,11 gewählt (Abbildung 5.10).

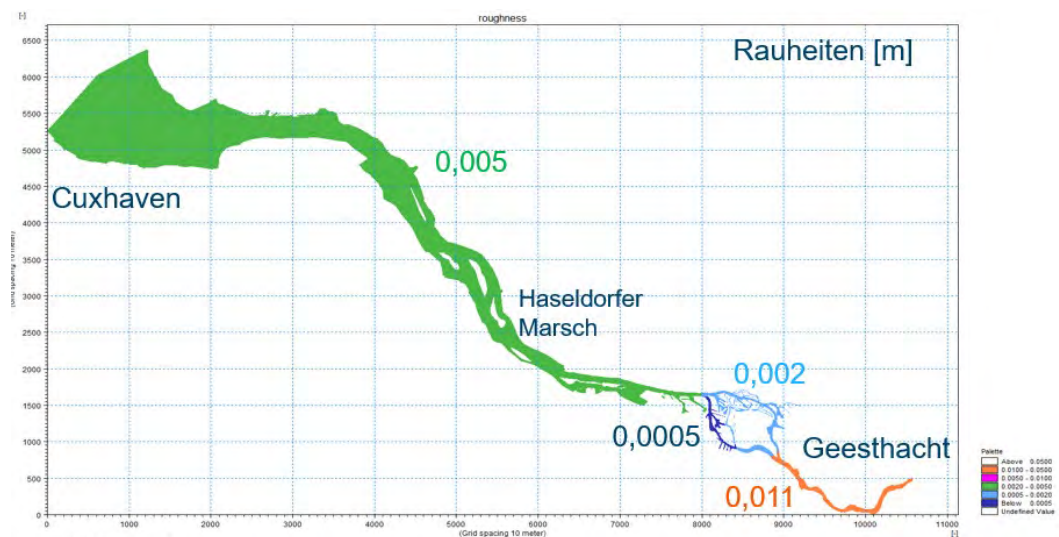


Abbildung 5.9: Rauheitskarte für das gesamte Modellgebiet Tideelbe

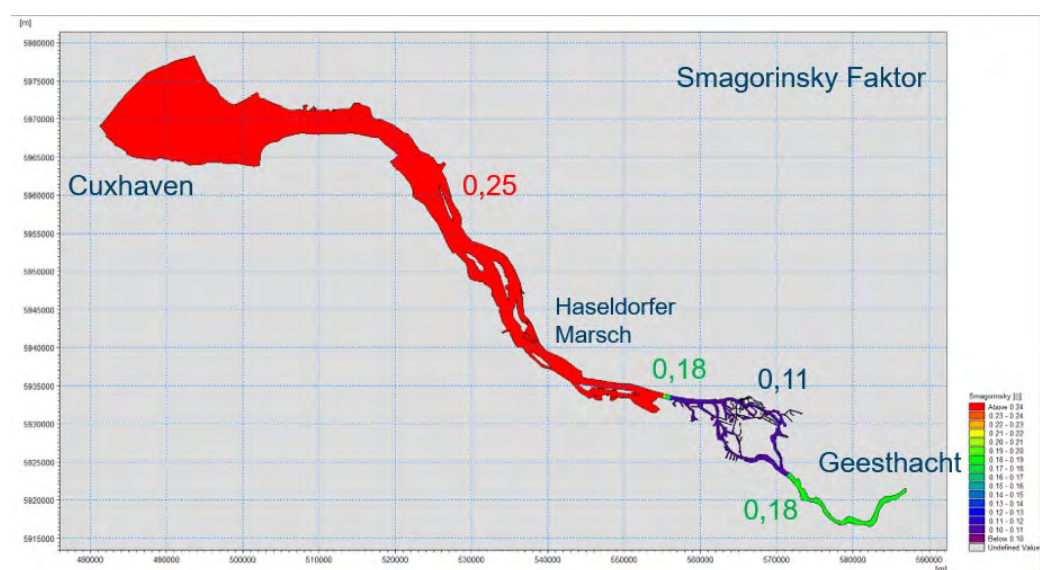


Abbildung 5.10: Smagorinskykarte für das gesamte Modellgebiet Tideelbe

## 6 Kalibrierung

Das bisherige dreidimensionale, hydrodynamische Modell zur Tideelbe wurde bereits in zurückliegenden Projekten kalibriert und validiert. Nach der Modellaktualisierung wurde eine Validierung bzw. eine Nachkalibrierung mit aktuellen Messdaten für das Jahr 2016 durchgeführt. Für den Zeitraum Mai 2016 stehen Messwerte des Wasserstands an 8 Stationen, Strömungen, Temperatur und Salzgehalt an 6 Stationen zur Verfügung, Abflusswerte wurden aus dem Jahr 2015 verwendet.

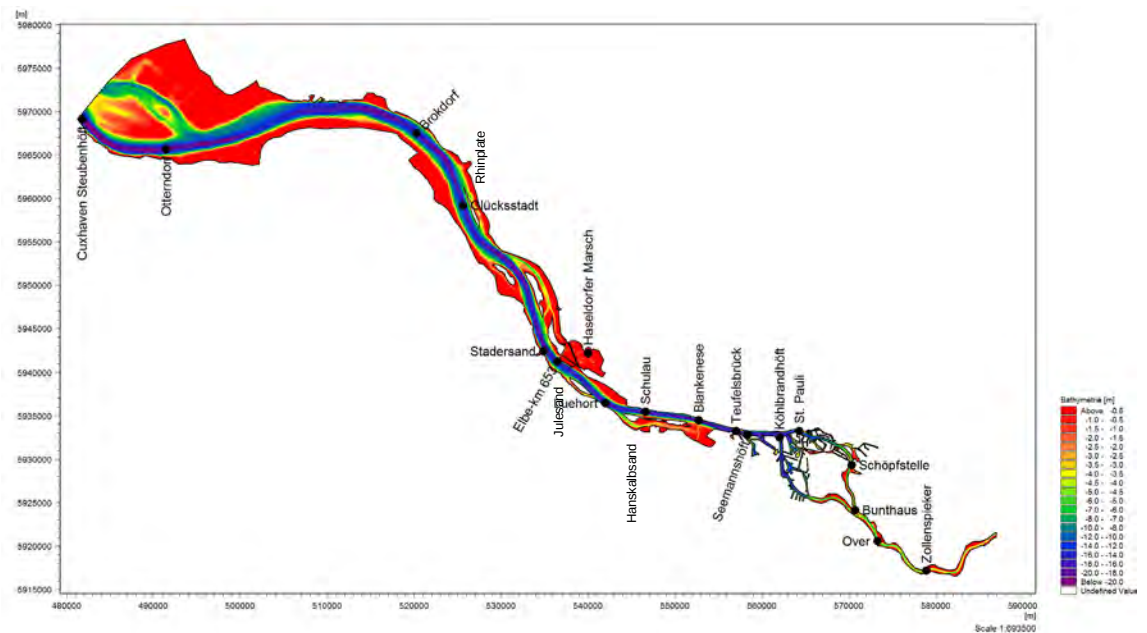


Abbildung 6.1: Messstationen entlang der Elbe zu Wasserstand, Strömung, Temperatur und Salzgehalt

### 6.1 Wasserstand

Das Modell der Tideelbe wurde mit Wasserstandsdaten an den Pegeln Otterndorf, Brokdorf, Stadersand, Blankenese, Seemannshöft, Bunthaus und Zollenspieker kalibriert. Die Auswertung in Abbildung 6.2 zeigt, dass durch die gesamte Tideelbe von der Mündung (Otterndorf) bis in den Oberlauf (Zollenspieker) sowohl die Tidephase (zeitlicher Verlauf der Tidekurve) als auch die Tideamplitude (Tidehochwasser und Tideniedrigwasser) vom Modell sehr gut abgebildet werden.

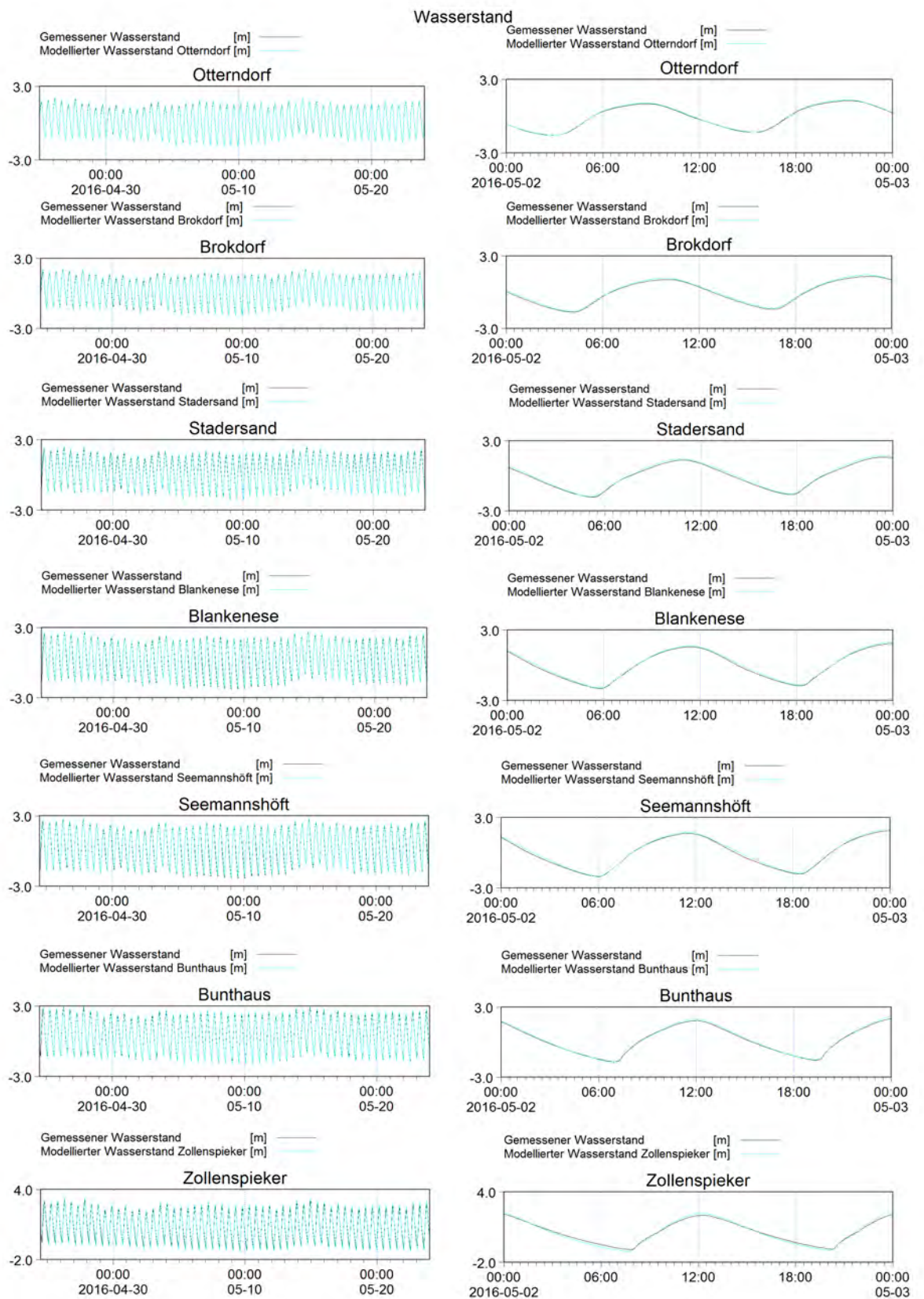


Abbildung 6.2

Vergleich der gemessenen und modellierten Wasserstände für den Kalibrierzeitraum Mai 2016 an den Stationen Otterndorf, Brokdorf, Stadersand, Blankenese, Seemannshöft, Bunthaus und Zollenspieker

## 6.2 Strömungen

Die Auswertung erfolgt an den Stationen Rhinplate Nord (D4), Juelsand (D2) und Hanskalbsand (D1) jeweils an der Gewässeroberfläche und -sohle. Die Auswertung in Abbildung 6.3 zeigt den Vergleich der modellierten mit den gemessenen Strömungen. Die Modellqualität an den Stationen Rhinplate Nord (D4) und Juelsand (D2) ist hinsichtlich der Amplitude der Strömungsgeschwindigkeiten, auch differenziert über die Wassertiefe (höhere Geschwindigkeiten an der Gewässeroberfläche) ebenso wie im Verlauf der Strömungen (Anstieg und Abfall bei Ebbe und Flut) gut. An der Station bei Hanskalbsand (D1) sind Abweichungen in der Strömungsform bei Ebbstrom und in der Amplitude zu erkennen, der zeitliche Lage der Strömungskenterung und die Maxima sind jedoch stimmig.

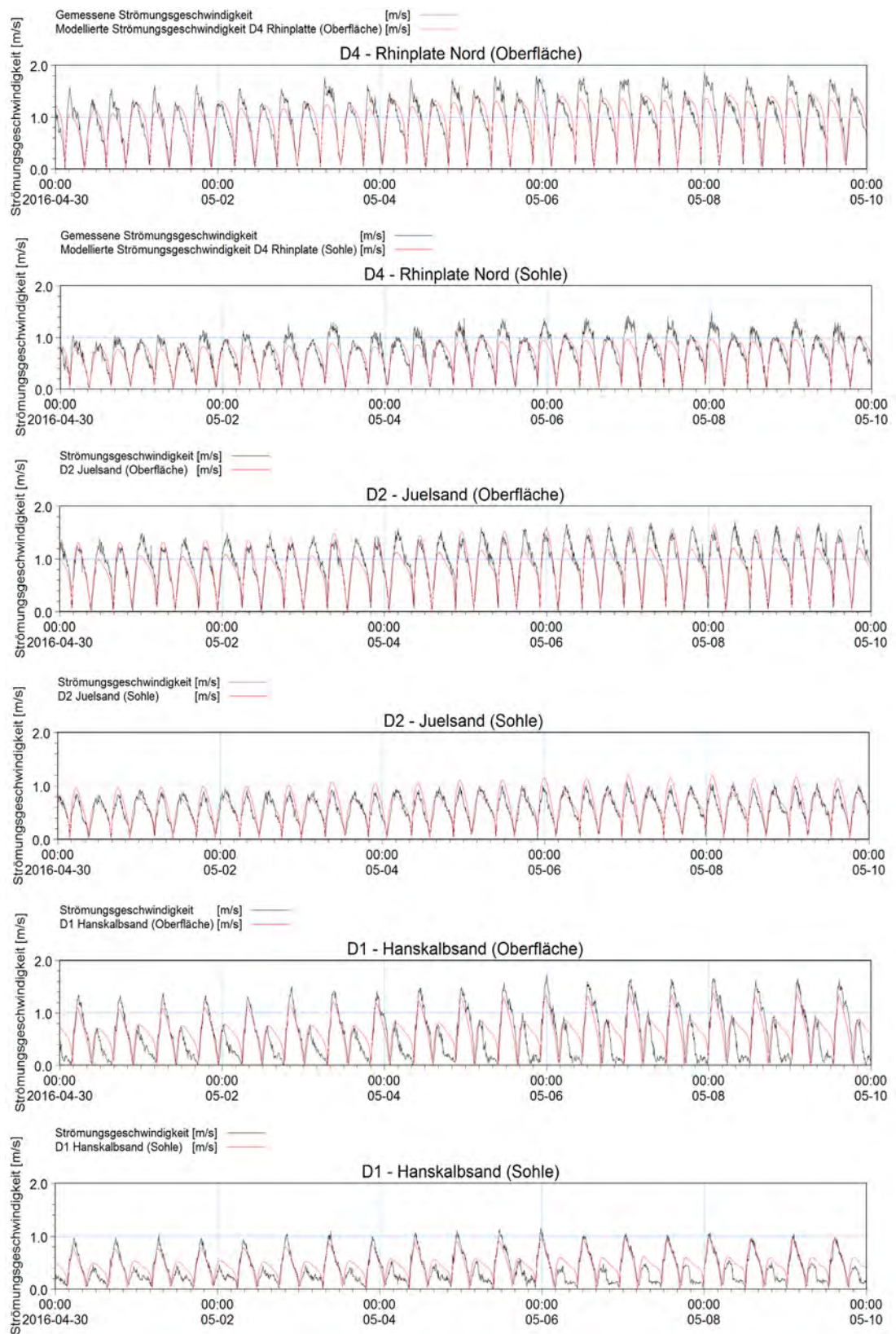


Abbildung 6.3: Vergleich der gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeiten an der Gewässer Oberfläche und -sohle für einen Ausschnitt (30.4.2016 bis 10.5.2016) des Kalibrierzeitraums Mai 2016 an den Stationen Rhinplate Nord (D4), Juelsand (D2) und Hanskalbsand (D1).

## 6.3 Temperatur

Abbildung 6.4 zeigt die Modellergebnisse sowie die gemessenen Wassertemperaturen an den Stationen Bunthaus, Seemannshöft und Juelsand Oberfläche (D2). Die Abweichungen der berechneten und gemessenen Temperaturen nehmen im Fließverlauf von Geesthacht bis Cuxhaven tendenziell leicht zu. So liegen die Modellergebnisse an der Station Juelsand zeitweise knapp 1°C über den Messergebnissen. Insgesamt wird die Temperatur durch das Modell gut abgebildet.

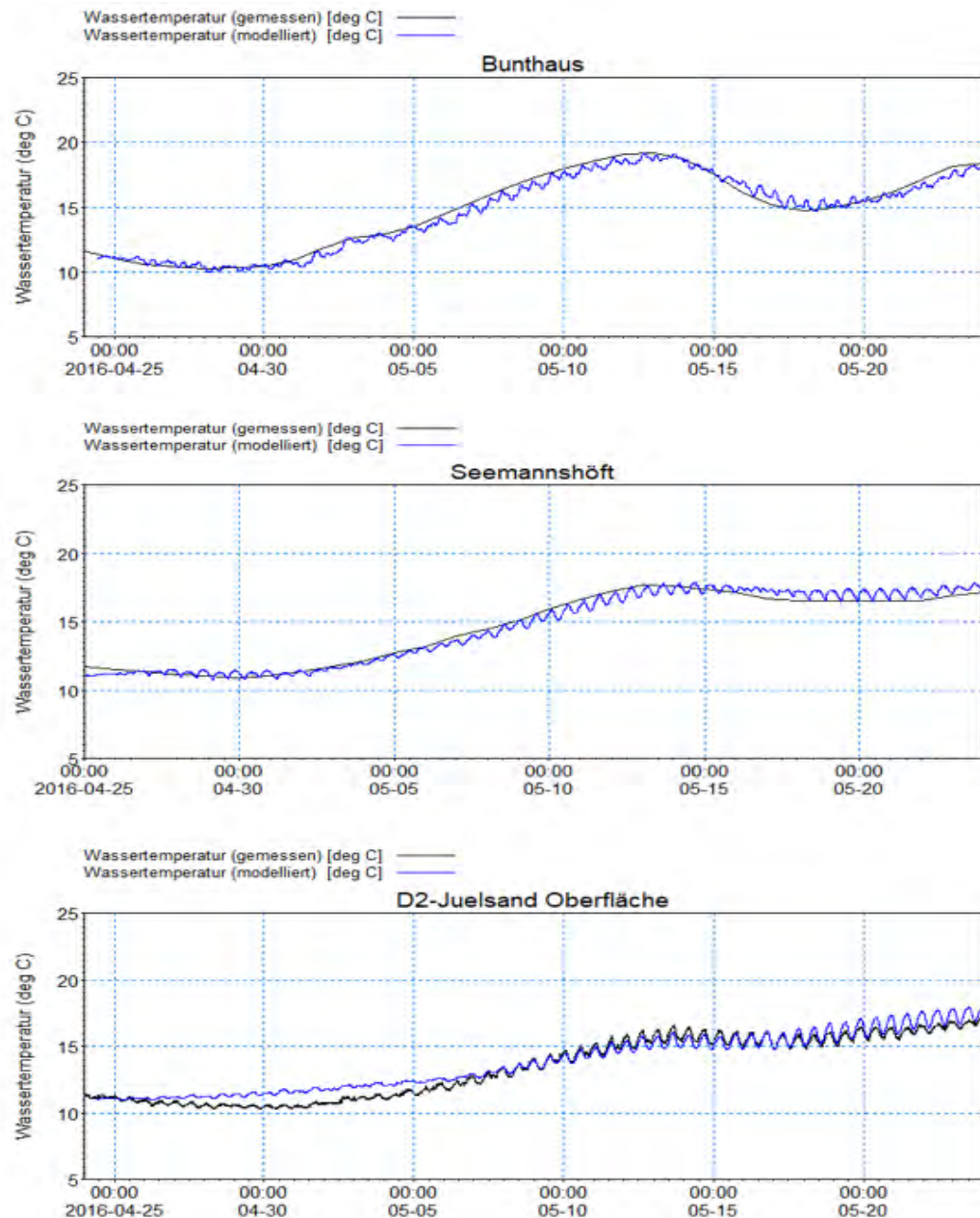


Abbildung 6.4: Vergleich der gemessenen und modellierten Wassertemperatur für den Kalibrierungszeitraum Mai 2016 an den Stationen Bunthaus, Seemannshöft und Juelsand (D2)

## 6.4 Salzgehalt

Abbildung 6.5 vergleicht die Zeitreihen der modellierten und gemessenen Salzgehalte und zeigt die Abnahme des Salzgehalts im Verlauf der Tideelbe nach Oberstrom von 6 bis 21 PSU in der Nähe des Nordseemodellrands (Altenbrucher Bogen) bis nur noch 0,6 bis 3,6 PSU im Bereich der Rhinplate bis hin zu 0,4 bis 0,7 PSU auf Höhe Hanskalbsand. Der Vergleich der modellierten und gemessenen Salzgehaltverteilung zeigt insbesondere für die Stationen LZ3c Altenbrucher Bogen und Brunsbüttel, dass das Modell sowohl die Schwankungen über die Tide, als auch die abnehmende Konzentration nach Oberstrom gut abbildet. Ebenso werden die hydrodynamisch bedingten Schwankungen gut berücksichtigt.

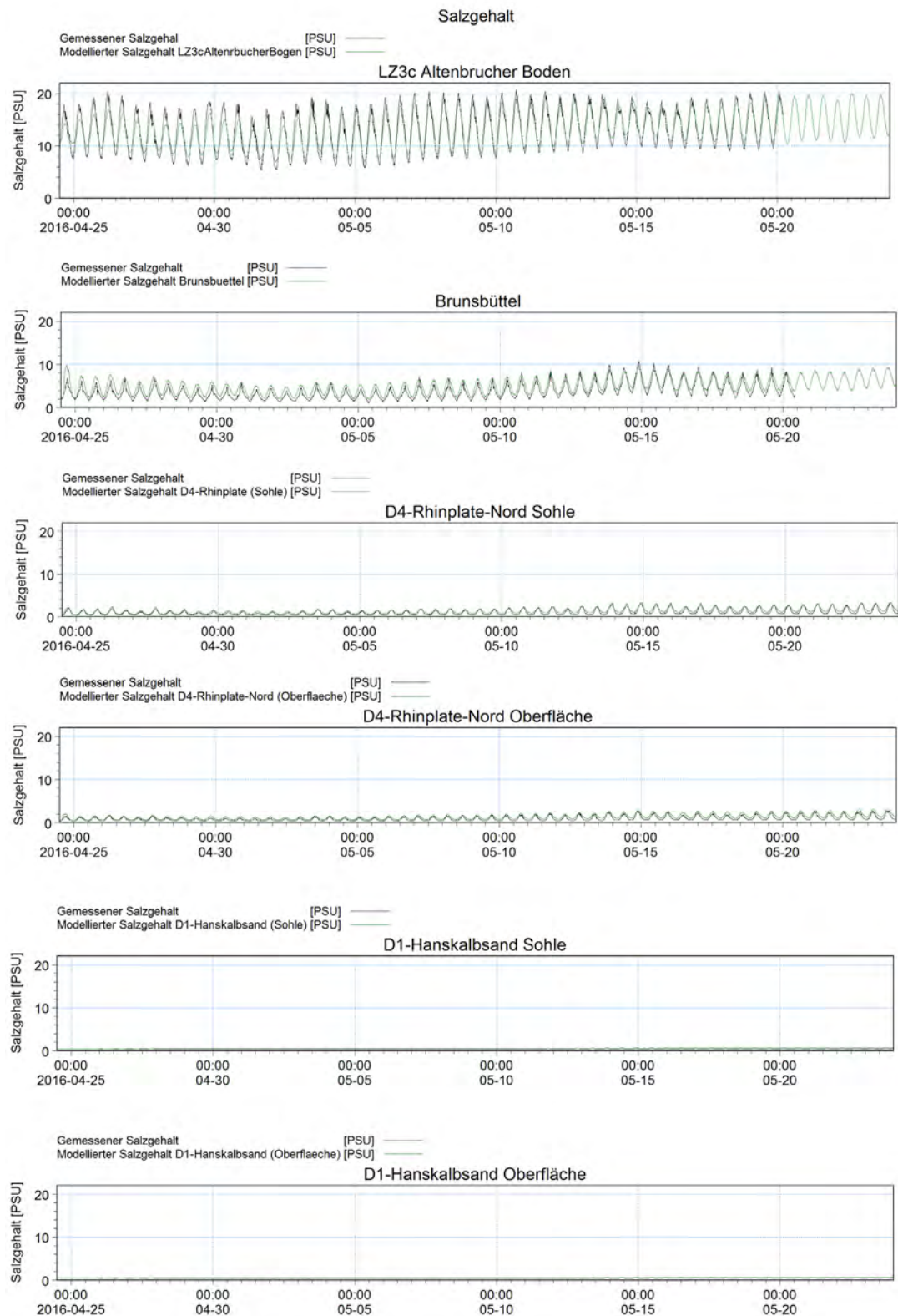


Abbildung 6.5: Vergleich des gemessenen und modellierten Salzgehalts für den Kalibrierzeitraum Mai 2016 an den Stationen LZ3c Altenbrucher Bogen, Brunsbüttel, Rhinplate Nord (D4, Gewässeroberfläche und -sohle) und Hanskalbsand (D1, Gewässeroberfläche und -sohle)

## 7 Anbindung der Haseldorfer Marsch (Ergebnisse)

Die Wirkung der Anbindung der Haseldorfer Marsch (Variante 3) im hydronumerischen Modell wird mit Fokus auf Elbe und im Hinblick auf den Nahbereich am Flutraum ausgewertet und interpretiert.

### 7.1 Wirkanalyse für die Elbe

Für die Wirkanalyse in der Elbe wurden die Tidekennwerte entlang der Elbe ausgewertet. Die Tidekennwerte (Abbildung 7.1) Wasserstände, Abflüsse, Strömungen und Salzgehalte wurden je Tide über zwei Nipp-Spring-Zyklen ausgewertet und über den Gesamtzeitraum gemittelt. Die Werte für die Wasserstände, Strömungen und Salzgehalte sind nachträglich tiefengemittelte Größen, die entlang der Fahrrinne je Flusskilometer extrahiert wurden. Die Abflüsse bzw. Volumina wurden anhand von Querprofilen an den strömungslotrechten Achsen je Flusskilometer extrahiert.

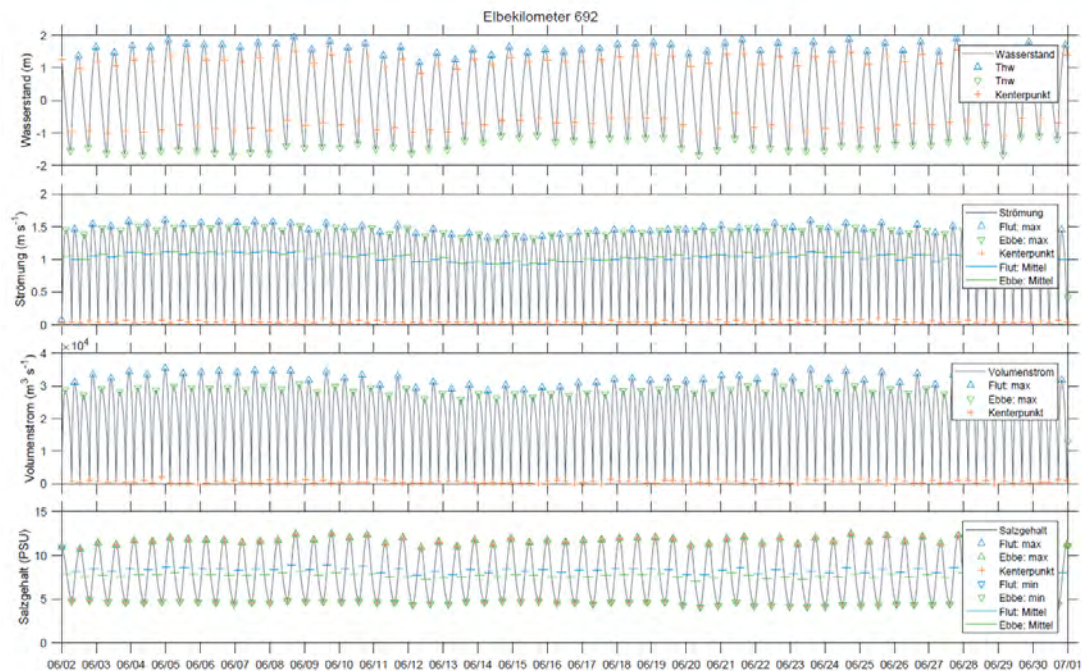


Abbildung 7.1: Analyse und Auswertung der Ergebnisse je Elbe-km in der Tidekennwertanalyse am Beispiel der Station 692

Der Tidenhub und der Salzgehalt dienen als Indikator für eine großräumige Systemwirkung. Die Flutstromdominanz, der Gradient der Strömungskenterung und das Verhältnis des Tidestroms dienen als maßgebende Indikatoren für die Wirkung auf den Sedimenttransport.

Zur Bewertung der Variante wurden für Feinsedimente repräsentative Kennwerte aus der Hydrodynamik ausgewählt. Die Wahl der Kennwerte erfolgte entsprechend ihrer Bedeutung für den Transport von feinen Sedimenten:

- Abnahme des Tidehubs als allgemeiner Indikator für eine Verbesserung der hydraulischen Situation mit der Folge einer Schwächung der maximalen Flutströmung und einer Stärkung der maximalen Ebbströmung.

- Verringerung der Tideasymmetrie basierend auf einem Verhältniswert der Abflüsse als Verhältnis zwischen Flut- und Ebbstrom. Darin enthalten ist eine Abnahme des Flutstroms als Indikator für einen Rückgang des durch den Flutstrom induzierten Sedimenttransports und eine Zunahme des Ebbstroms.
- Verringerung des Verhältnisses der maximalen Strömungsgradienten von Flut- und Ebbstrom ( $dv/dt$ ), das Dronkers (1986) zufolge ein Indikator für Sedimenttransport ist. Die Abnahme der maximalen Kenterungsgradienten von Flut- und Ebbströmung ist eine Indikation für die abnehmende Sedimentmobilisierung bei einsetzendem Flut- bzw. Ebbstrom. Der maximale Gradient der Flutströmung steht für den Grad der Remobilisierung nach der Ebbstromkenterung. Je steiler der Gradient, desto größer die Beschleunigung in  $m/s^2$  und desto stärker die Remobilisierung. Nimmt der maximale Gradienten der Flutströmung ab, nimmt auch die Remobilisierungskraft für den flussaufwärtigen Transport ab.
- Reduktion der Flutstromdominanz auf Basis eines Verhältnisses der maximalen Flutströmung zur maximalen Ebbströmung im Hauptgerinne von weniger als 1 (Flutstromdominanz mit einem Verhältnis von  $> 1$ ). Diese kennzeichnet die sich typischer Weise aufsteilenden Tidewelle in Richtung Oberwasser (hypersynchroner Charakter) des Ästuars und ist nach Dronkers (1986) ein Indikator für den Transport grober Sedimente.

Bei der Interpretation des Verhältnisses der maximalen Strömungsgradienten ist zu beachten, dass die Gradienten der Strömungskenterung bewertet werden. Gemäß DIN 4049-3 (Abbildung 7.2) wird der Gradient für den Ebbstrombeginn als Flutstromkenterung bezeichnet, der Gradient für den Flutstrombeginn als Ebbstromkenterung bezeichnet.

$$\text{Faktor} = \frac{\text{Gradient Flutstromkenterung}}{\text{Gradient Ebbstromkenterung}} = \frac{\text{Gradient Ebbstrombeginn}}{\text{Gradient Flutstrombeginn}}$$

Folglich ist die Abnahme des Faktors negativ zu bewerten, da dies darauf hinweisen kann, dass der Flutstrombeginn steiler verläuft als bisher. Die Zunahme des Faktors der Gradienten ist hingegen positiv zu bewerten.

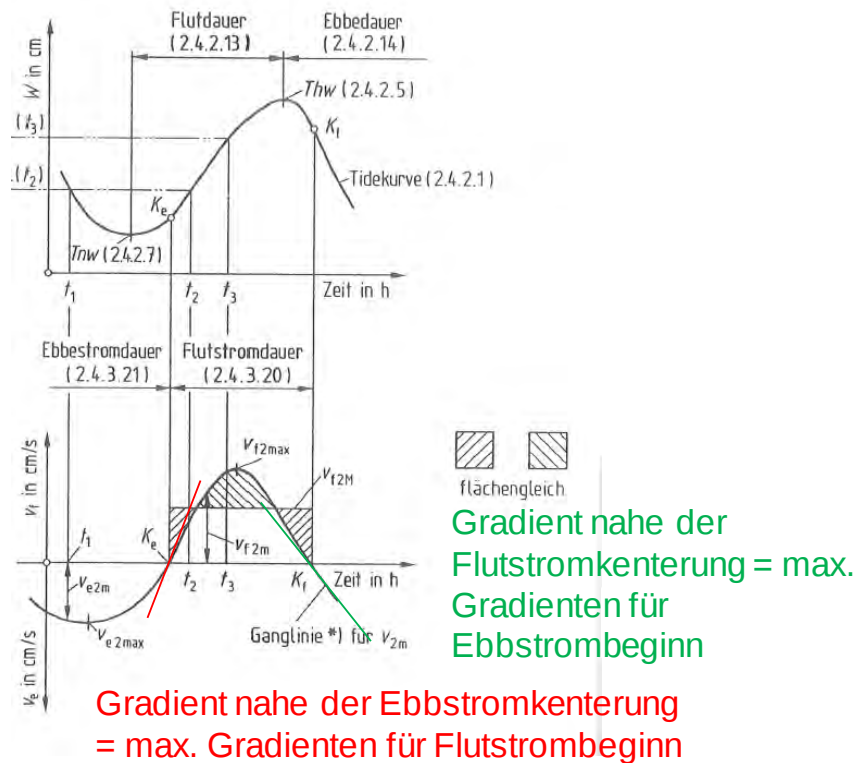


Abbildung 7.2: Definition des Verhältnisses der maximalen Strömungsgradienten bei Kenterung (aus DIN 4049-3)

### 7.1.1 Mittlerer Tidenhub

In Abbildung 7.3 wird der Kennwert mittlerer Tidenhub entlang der in Strommitte zwischen Bunthaus und Cuxhaven im Plan- (grün), Ist-Zustand (grün gestrichelt) und der Differenz (blau) zwischen beiden Zuständen dargestellt. An Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch an die Elbe. Der Anschluss des Flutraums zeigt eine Abnahme des Tidenhubs um ca. 3 cm. Die Wirkung der Tidehubabnahme reicht von Bunthaus bis Elbe-km 690.

Die Entwicklung des Tidehubs infolge des Flutraumanschlusses ist positiv durch die, wenn auch geringe Abnahmen zu bewerten.

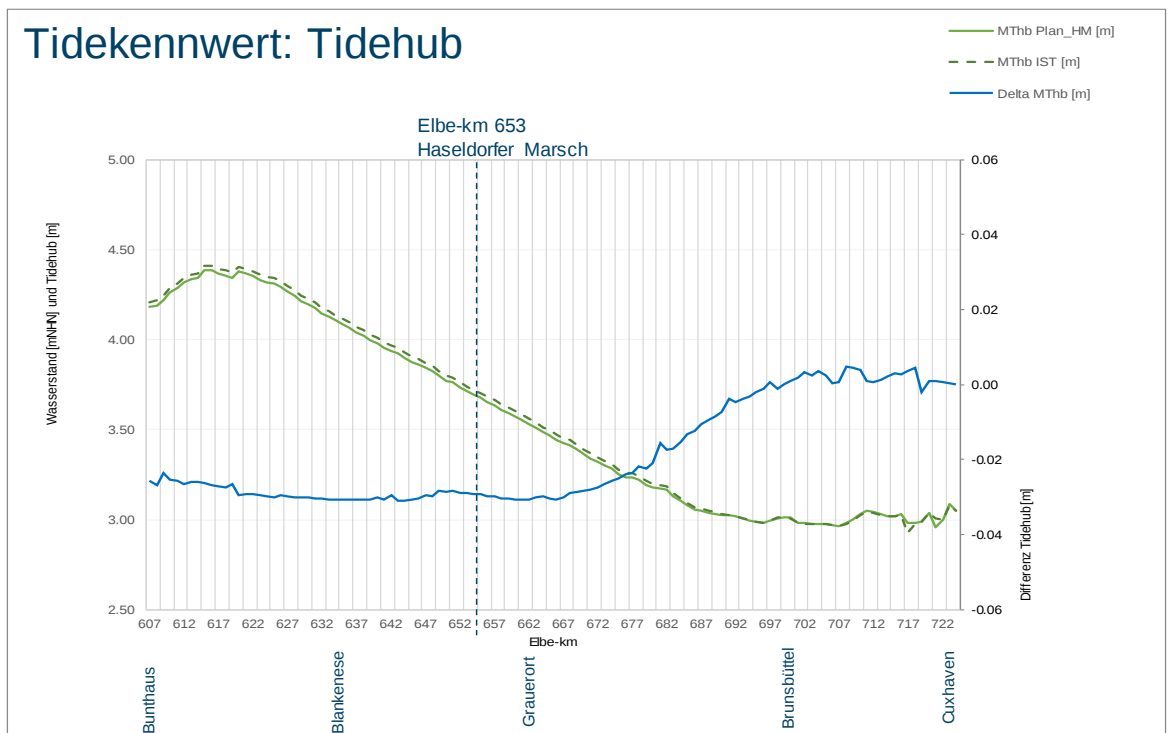


Abbildung 7.3: Kennwert Tidenhub in der Elbe. Die Abbildung zeigt den mittleren Tidenhub für den Ist-Zustand (grün gestrichelt) und Plan-Zustand mit dem Anschluss der Haseldorfer Marsch an der Elbe-km 653 (grün durchgezogen), Differenz der beiden Zustände (blau).

### 7.1.2 Maximaler Ebb- und Flutstrom

Abbildung 7.4 stellt den über den Nipp-Spring-Zyklus gemittelten, maximalen Abfluss für Ebb- und Flutstrom für Ist- und Planzustand (rot und blau) sowie das Verhältnis des mittleren maximalen Flut- und Ebbstroms (grün) zwischen Bunthaus und Cuxhaven dar. Änderungen zwischen Ist- und Planzustand für diesen Kennwert sind kaum zu erkennen. Maximale Unterschiede betragen bei Ebbstrom ca. 200 m<sup>3</sup>/s und bei Flutstrom ca. 250 m<sup>3</sup>/s.

Der Verhältniswert aus maximalen Flut- und Ebbstrom zeigt sein Maximum im Unterwasser des Hamburger Hafen bei ca. Elbe-km 635 (Istzustand). Dieses Maximum wird durch den Anschluss des Flutraums (Planzustand) nicht merklich verändert. In Abbildung 7.5 wird zu dem Verhältnis von Flut- und Ebbstrom (grün) die Differenz der beiden (blau) dargestellt. Aus der Differenz wird ersichtlich, dass es ab dem Anschluss der Haseldorfer Marsch flussaufwärts im Planzustand im maximalen Flutstromabfluss zu einer leichten Zunahme kommt im Vergleich zum maximalen Ebbstromabfluss. Flussabwärts der Maßnahme zeigt sich eine positive Entwicklung mit einer leichten Abnahme der Maximalwerte.

## Tidekennwert: Abfluss

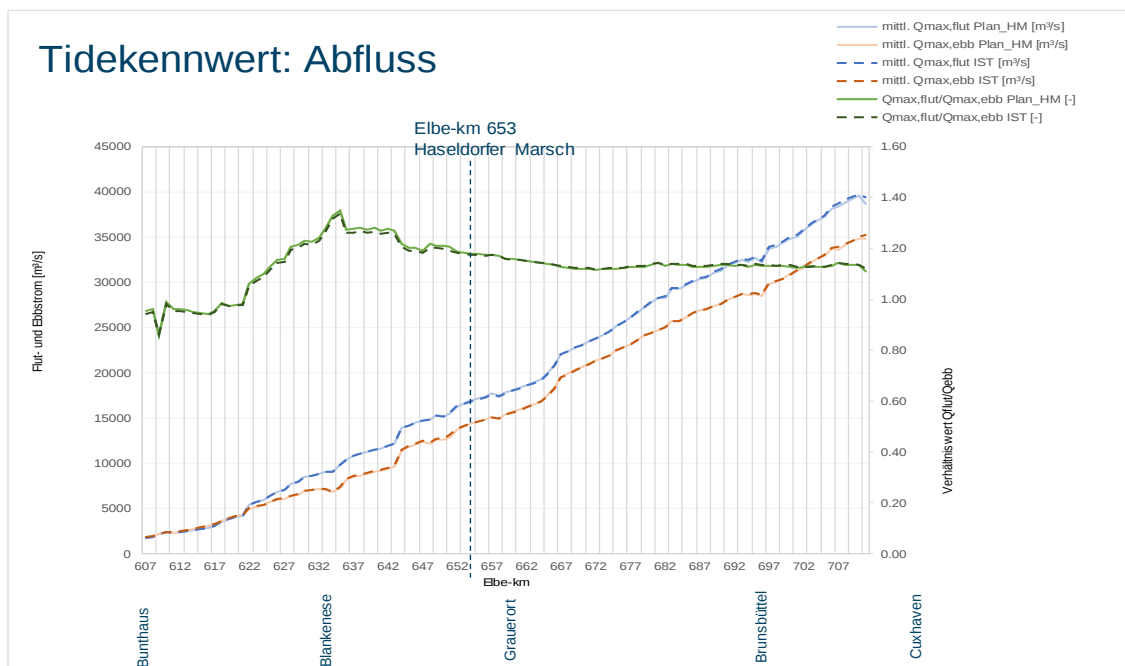


Abbildung 7.4: Kennwert Flut- und Ebbstromabfluss in der Elbe. Die Abbildung zeigt den mittleren maximalen Abfluss für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) für Flut- (orange) und Ebbstrom (blau). Das Verhältnis der beiden Zustände ist in grün dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.

## Tidekennwert: Flut-/Ebbabfluss

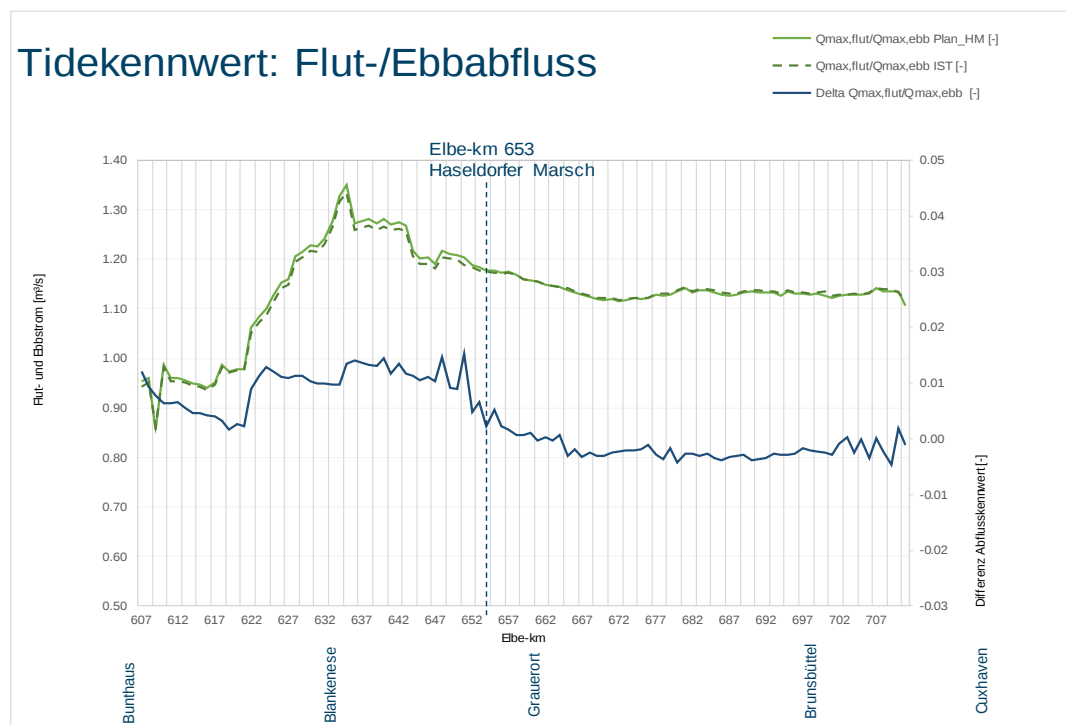


Abbildung 7.5: Tidekennwerte Verhältnis aus Flut-/Ebbstromabfluss in der Elbe. Die Abbildung zeigt das Verhältnis des mittleren maximalen Abflusses von Flut- mit Ebbstrom (grün) für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen). Die Differenz der beiden Verhältnisse ist in blau dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.

### 7.1.3 Maximale Ebb- und Flutströmung

Der Tidekennwert der über den Nipp-Spring-Zyklus gemittelten, maximalen Strömungen in Abbildung 7.6 zeigt die Strömungen für Ebbe und Flut im Ist- und Plan-Zustand. Die Ergebnisse zeigen, dass der Anschluss der Haseldorfer Marsch an das Tidegeschehen eine sehr geringe und lokale Dämpfung der maximalen Flutströmung erzeugt.

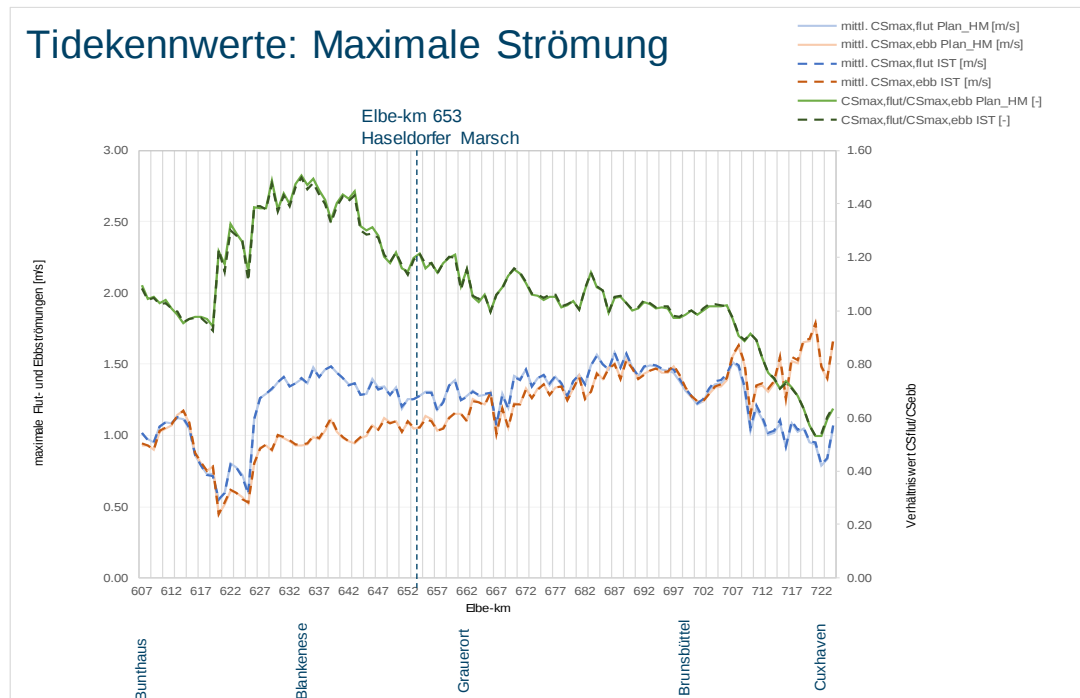


Abbildung 7.6: Tidekennwert gemittelte maximale Strömung in der Elbe. Die Abbildung zeigt die maximale Strömung für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) für Flut- (orange) und Ebbströmung (blau). Das Verhältnis der beiden Zustände ist in grün dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.

### 7.1.4 Maximale Strömungsgradienten

Die Entwicklung des Verhältnisses der Gradienten (Abbildung 7.7) ist positiv zu bewerten, wenn der Wert zunimmt (vgl. Kap. 7.1). Mit dem Anschluss der Haseldorfer Marsch zeigt sich analog zu der Entwicklung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten nur eine sehr geringe Änderung die zwischen Ab- und Zunahme oszilliert. Lediglich im Unterwasser des Flutraumes zwischen Elbe-km 660 und 690 ist ein marginaler Trend zu einer Zunahme, was einer Dämpfung der Remobilisierung entspricht und daher positiv zu bewerten ist, zu verzeichnen.

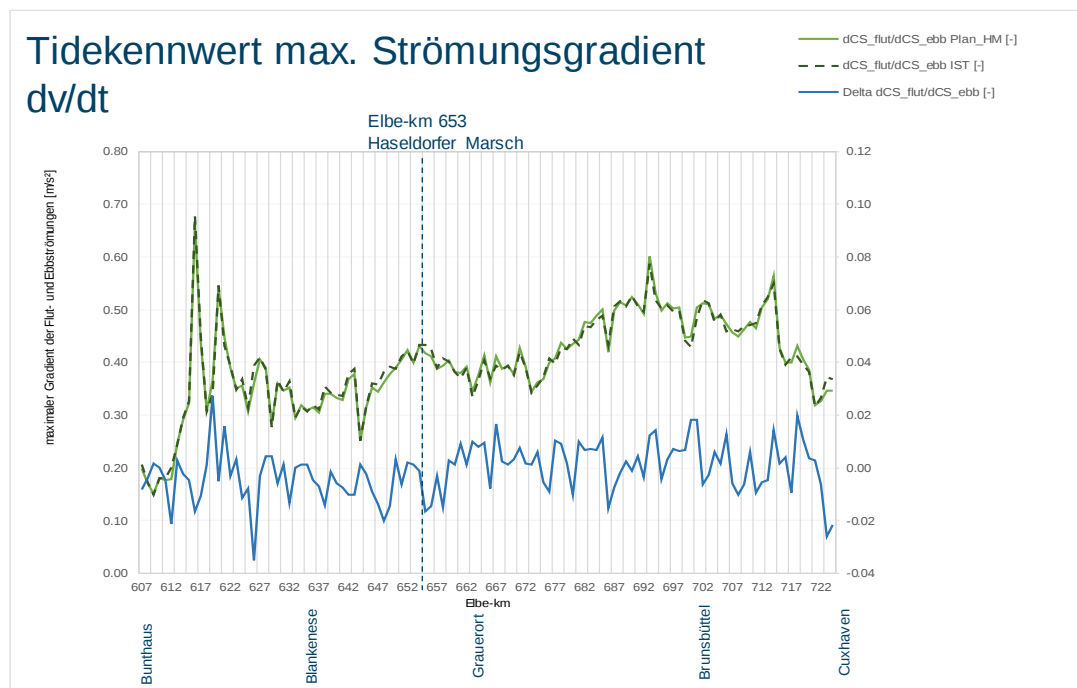


Abbildung 7.7: Tidekennwert Verhältnis der Strömungsgradienten in der Elbe. Die Abbildung zeigt das Verhältnis der maximalen Strömung von Flut und Ebbe (grün) für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen). Die Differenz der beiden Verhältnisse ist in blau dargestellt. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.

### 7.1.5 Salzgehalt

Mit dem Anschluss von zusätzlichen Tidevolumen, wird flussab des angeschlossenen Flutraumes nicht nur das bewegte Wasservolumen vergrößert, sondern auch die darin bewegten bzw. gelösten Stoffe, wie Salz oder Schwebstoffe. Durch den Anschluss eines zusätzlichen Tidevolumens von 4,7 Mio m<sup>3</sup> erhöht sich die bewegte Wassermenge durch Vergrößerung dieses Volumens und es wird auch die Menge des transportierten Salzes bzw. Schwebstoffe erhöht.

In Abbildung 7.8 wird die Entwicklung des Salzgehaltes zwischen Bunthaus und Cuxhaven im Plan- und Ist-Zustand dargestellt. An Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch. Durch den Anschluss des Flutraumes zeigt sich eine Erhöhung des Salzgehaltes und eine flussaufwärtige Verschiebung des Maximums. Im Bereich der Änderungen zeigt sich eine Zunahme um bis zu 1,1 PSU (Abbildung 7.9). Diese Zunahme ist negativ zu bewerten und wirkt nachteilig auf den Bereich zwischen Elbe-km 647 und 720. Die merkliche und flussaufwärtige Erhöhung der Salzgehalte wird vor allem dem gewählten Ereignis mit geringem Oberwasserabfluss von 350 m<sup>3</sup>/s zugeordnet. Bei höheren Abflüssen ist eine abnehmende Wirkung auf den Salzgehalt zu erwarten.

Eine vergleichbare Studie der BAW (2011) zeigte eine geringere und flussabwärtig gelegene Erhöhung im Salzgehalt infolge Flutraumanschluss an der Süderelbe von 0.6 bis 1 PSU im Scheitelwert. Wobei der hierin zugrundgelegte Oberwasserabfluss aus dem Juni 2002 bei ca. 550 m<sup>3</sup>/s deutlich über dem Wert von 350 m<sup>3</sup>/s lag. Aus dem Längsschnitt der Salzgehalte ist ebenfalls zu entnehmen, dass es sich um einen höheren Oberwasserabfluss handelt.

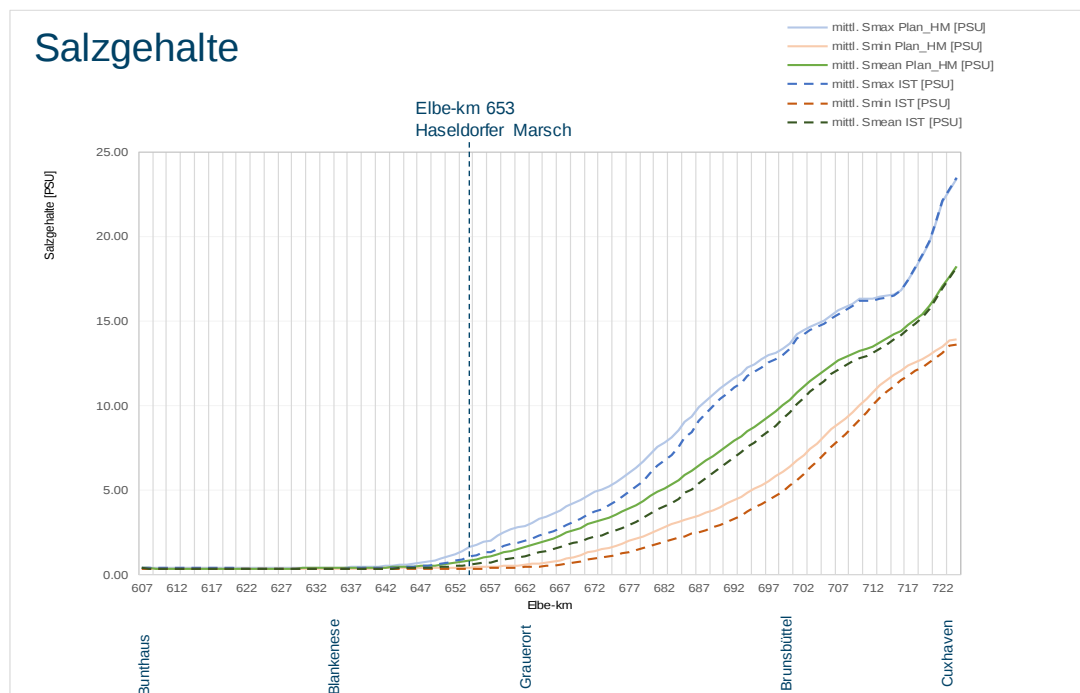


Abbildung 7.8: Tidekennwert gemittelter Salzgehalt in der Elbe. Die Abbildung zeigt den Salzgehalt für den Ist- (gestrichelt) und Plan-Zustand (durchgezogen) für minimale (orange), mittlere (grün) und maximale (blau) Salzgehalte je Tide. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.

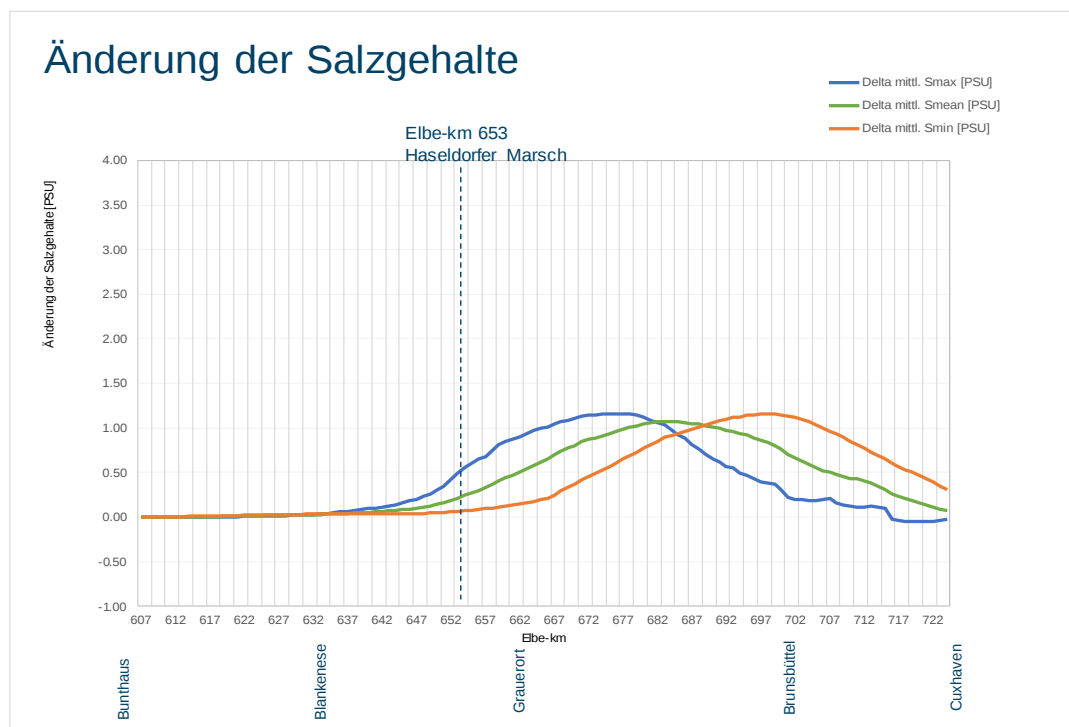


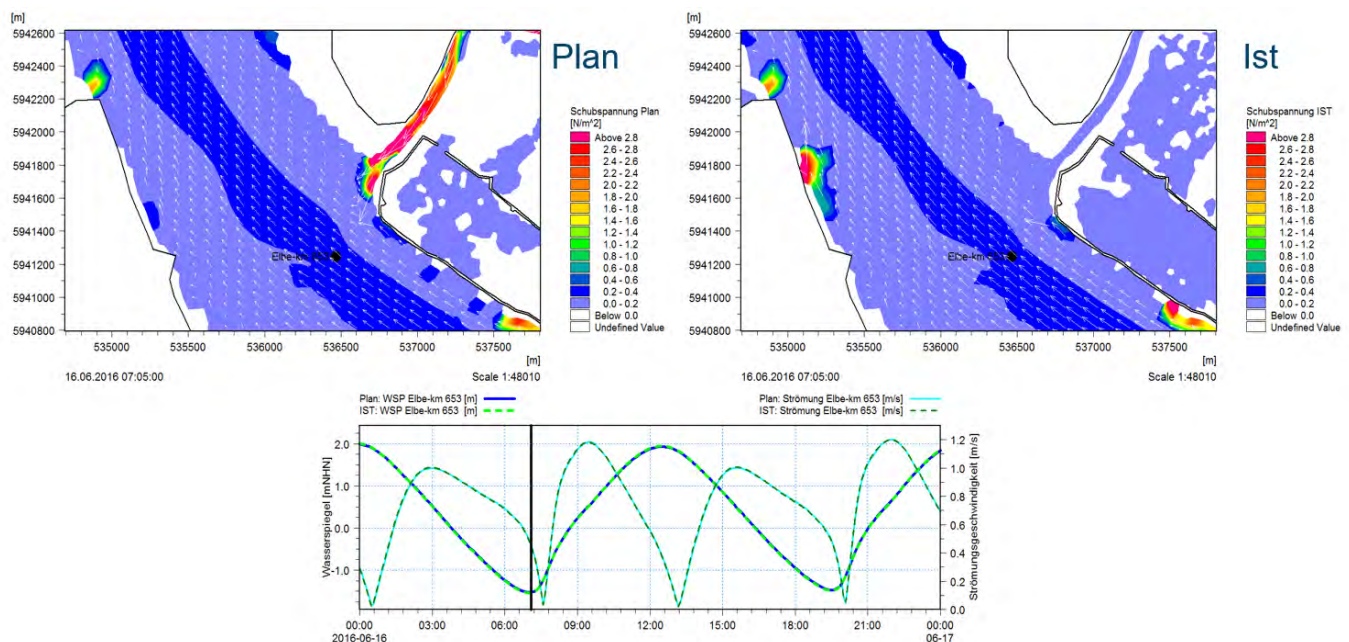
Abbildung 7.9: Tidekennwert Änderung des mittleren Salzgehaltes in der Elbe. Die Abbildung zeigt die Änderungen des Salzgehaltes zwischen Plan- und Ist-Zustand für minimale (orange), mittlere (grün) und maximale (blau) Salzgehalte je Tide. An dem Elbe-km 653 befindet sich im Plan-Zustand der Anschluss der Haseldorfer Marsch.

## 7.2 Wirkanalyse für den Nahbereich der Haseldorfer Marsch

Die hydrodynamische Wirkung auf die Haseldorfer Marsch wird mit Fokus auf die angrenzenden Nebeneiben, dem Dwarsloch und der Haseldorfer Binnenelbe im Hinblick auf eine Veränderung der Wasserstände, Strömungen, Sohlschubspannungen und Salzgehalte untersucht und zudem Aussagen zum Unterhaltungsaufwand abgeleitet. Durch die Anbindung der Haseldorfer Marsch ist eine stärkere und veränderte Durchströmung der beiden Bereiche zu erwarten.

### 7.2.1 Wirkung auf das Dwarsloch: Schubspannung & Strömung

In Abbildung 7.10 wird die Schubspannung, Strömung und Wasserstand im Dwarsloch während des Tnw im Plan- und Ist-Zustand dargestellt. Im Dwarsloch ist eine Verlängerung und Stärkung des Ebbstroms im Plan-Zustand im Vergleich zum Ist-Zustand zu erkennen. Erzeugt wird dieser verstärkte Ebbstrom durch das ausströmende Wasser aus dem Flutraum.



**Abbildung 7.10:** Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Tnw im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarsloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Tnw).

Während des Flutstroms (Abbildung 7.11) sind kaum Veränderungen in der Schubspannung und der Strömung zu erkennen. Sowohl im Ist- als auch Planzustand strömt nur wenig Wasser über das Dwarsloch zur Haseldorfer Binnenelbe bzw. Marsch. Die Speisung bei Flutstrom erfolgt vorrangig über den äußere Haseldorfer Binnenelbe. Ursächlich hierfür ist die strömungsgeschützte Lage und fast rechtwinklige Neigung des Dwarslochs zum Hauptstrom der Elbe.

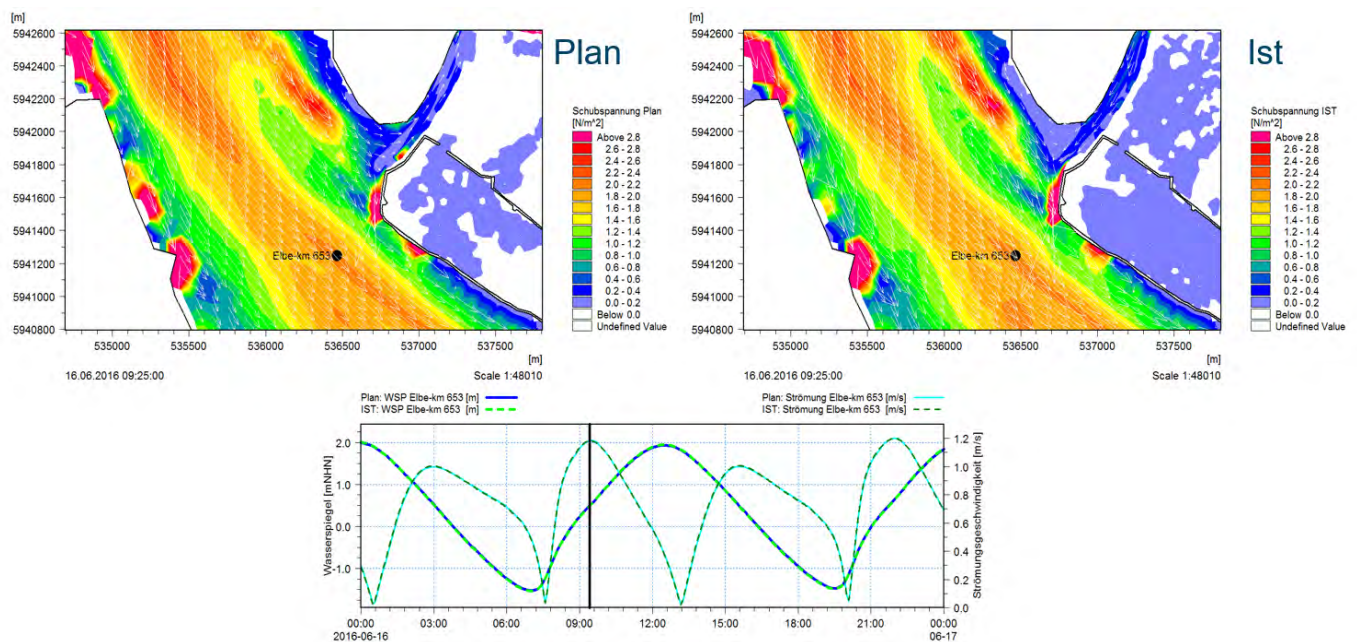


Abbildung 7.11: Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Flutstrom im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarssloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Flutstrom).

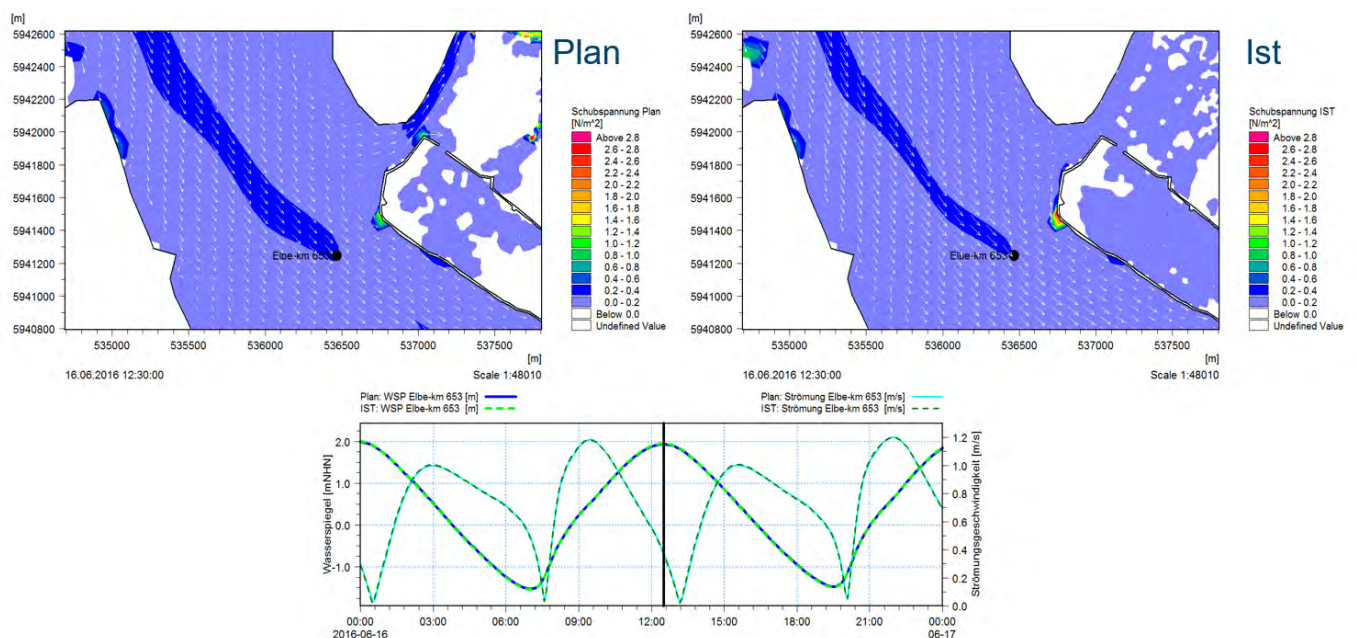


Abbildung 7.12: Flächige Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Thw im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarssloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Thw).

Beim Thw (Abbildung 7.12) ist ein leicht verlängerter Flutstrom im Plan-Zustand zu erkennen. Dieser wird bedingt durch das noch weiter einlaufende Wasser in die Haseldorfer Marsch.

Während des Ebbstroms (Abbildung 7.13) zeigt sich im Istzustand des Dwarsslochs ein weiteres Einströmen von Süd nach Nord. Im Planzustand mit Anbindung der Haseldorfer Marsch verändert sich dies grundlegend: statt eines Einströmen des Wassers durch das Dwarssloch, findet ein Abfluss aus der Haseldorfer Marsch durch das Dwarssloch in die Elbe statt.

Somit wird die Hydrodynamik im Dwarssloch durch die Anbindung der Haseldorfer Marsch deutlich dynamisiert und kehrt sich von flutstromgeprägt zu ebbstromgeprägt um. Diese Veränderung ist auch im Hinblick auf eine Selbstfreihaltung der Zuwässerung (Kap.7.2.4) positiv einzustufen.

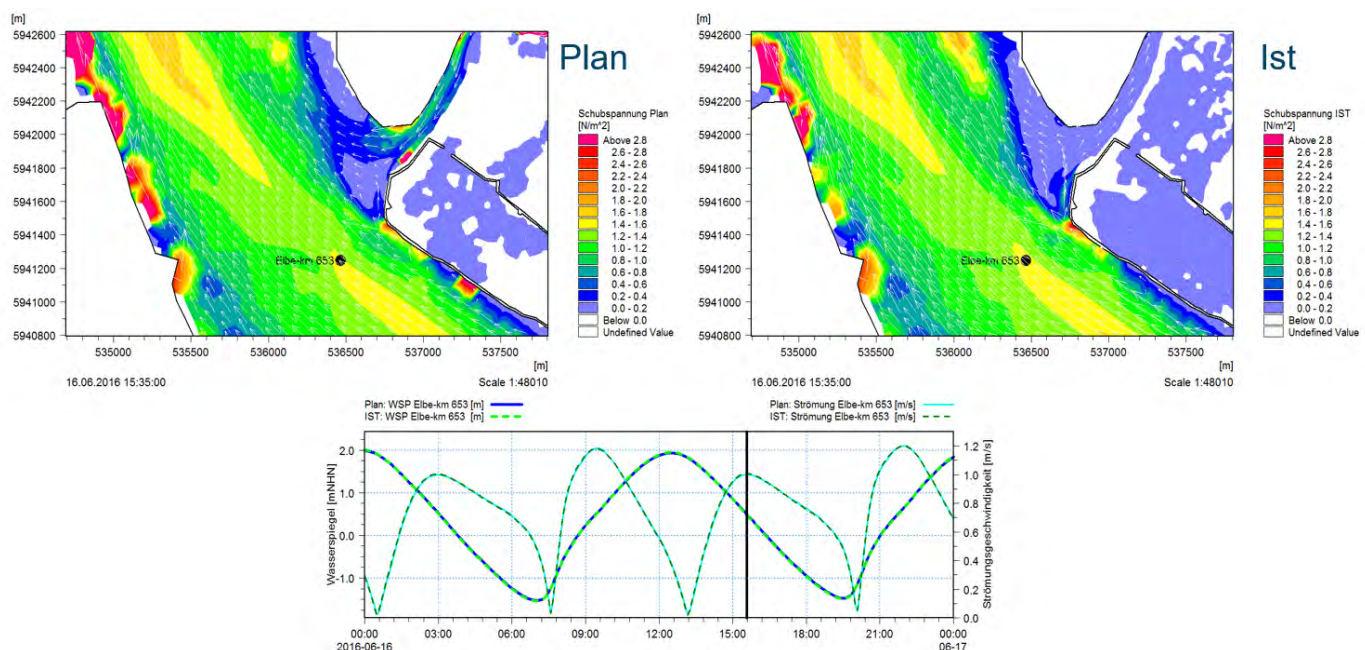


Abbildung 7.13: Flächenhafte Sohlschubspannung und Strömungsvektoren bei Ebbstrom im Plan- (links, oben) und Ist-Zustand (rechts, oben) am Dwarssloch zur Tideelbe. Die untere Abbildung zeigt den Wasserspiegel und die Strömungsgeschwindigkeit für den Plan- (blau) und Ist-Zustand (grün) in einer Zeitreihe. Die schwarze senkrechte Linie zeigt den Zeitpunkt der flächigen Darstellung für die oberen Abbildungen an (Ebbstrom).

## 7.2.2 Wirkung auf Dwarssloch & Haseldorfer Binnenelbe: Wasserstand & Strömungen

Die Anbindung der Haseldorfer Marsch verändert die Strömungen und Wasserstände im Dwarssloch und der Haseldorfer Binnenelbe. Aus Abbildung 7.14 unten ist zu erkennen, dass die Strömungen in der Elbe bei km 653 und im Sperrwerk Haseldorfer Marsch flutstromdominanten sind (maximale Flutströmung > maximale Ebbströmung). Im Dwarssloch hingegen ist eine Ebbstromdominanz zu verzeichnen.

Bei Tnw ist liegen noch alle benetzten Bereiche (vgl. Abbildung 7.14, oben) im Ebbstrom, der im Dwarssloch und im Sperrwerk Haseldorfer Marsch länger andauert, als in der Elbe selbst. Ursache ist der angeschlossene Flutraum, der durch sein großes Volumen und die schmale Öffnungsbreite am Sperrwerk eine Wasserspiegeldifferenz bewirkt. Dadurch strömt das Wasser in die Haseldorfer Marsch verzögert ein und leicht verzögert aus

(vergleiche Versatz der Kenterungspunkte zwischen Elbe-km 653 und Sperrwerk Haseldorfer Marsch).

Bei Tnw liegt die Strömung im Plan-Zustand in der Elbe-km 653 bei ca. 0,6 m/s (Abbildung 7.14). Im Dwarsloch beträgt die Strömung bei Tnw ca. 1,0 m/s und im Zulauf der Haseldorfer Marsch erreichen die Strömungen bei Tnw ca. 1,2 m/s. Die Strömungen in den Prielen der Haseldorfer Marsch bleibt bei Tnw am Ende des Ebbstroms unter 0,7 m/s.

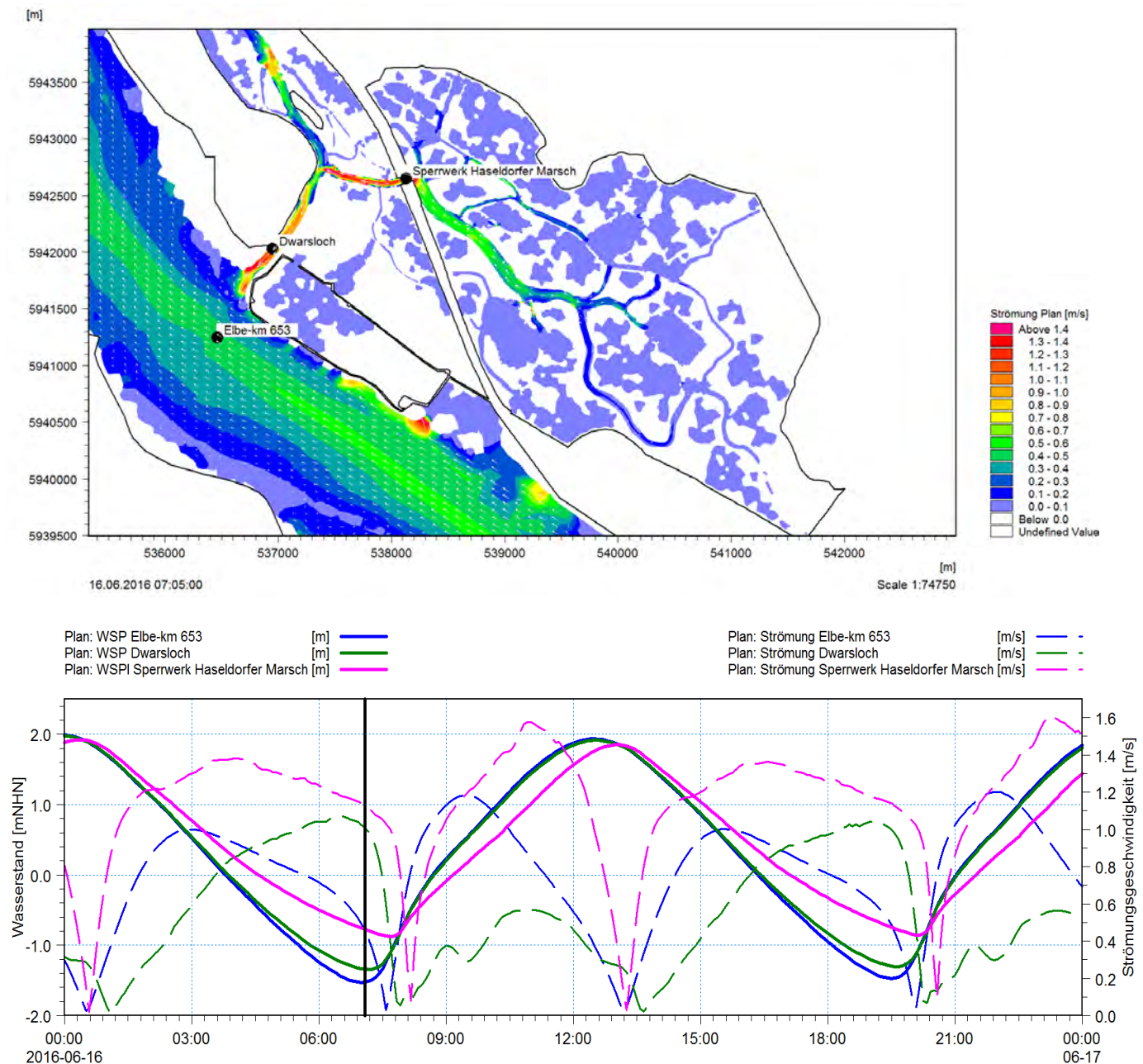


Abbildung 7.14: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Tnw (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).

Während des Flutstroms wird die Haseldorfer Marsch vorrangig über die äußere Haseldorfer Binnenelbe gespeist, während das Dwarsloch hydraulisch eine untergeordnete Rolle spielt (Abbildung 7.15).

Im Planzustand sind hohe Flutströmungen in der Elbe mit ca. 1,2 m/s, im Sperrwerk Haseldorfer Marsch mit ca. 1,6 m/s und im Polder mit ca. 1,0 bis 1,2 zu erkennen. Geringe Flutströmungen sind hingegen im Dwarsloch mit ca. 0,6 m/s zu verzeichnen. In Abbildung 7.15 unten ist deutlich der zeitliche Versatz zwischen den Flutstromscheiteln der Elbe und den beiden Scheiteln Sperrwerk Haseldorfer Marsch und Dwarsloch zu erkennen. Die Hydrodynamik im Dwarsloch wird maßgeblich durch den Zu- und Abfluss in/ aus dem Polder geprägt.

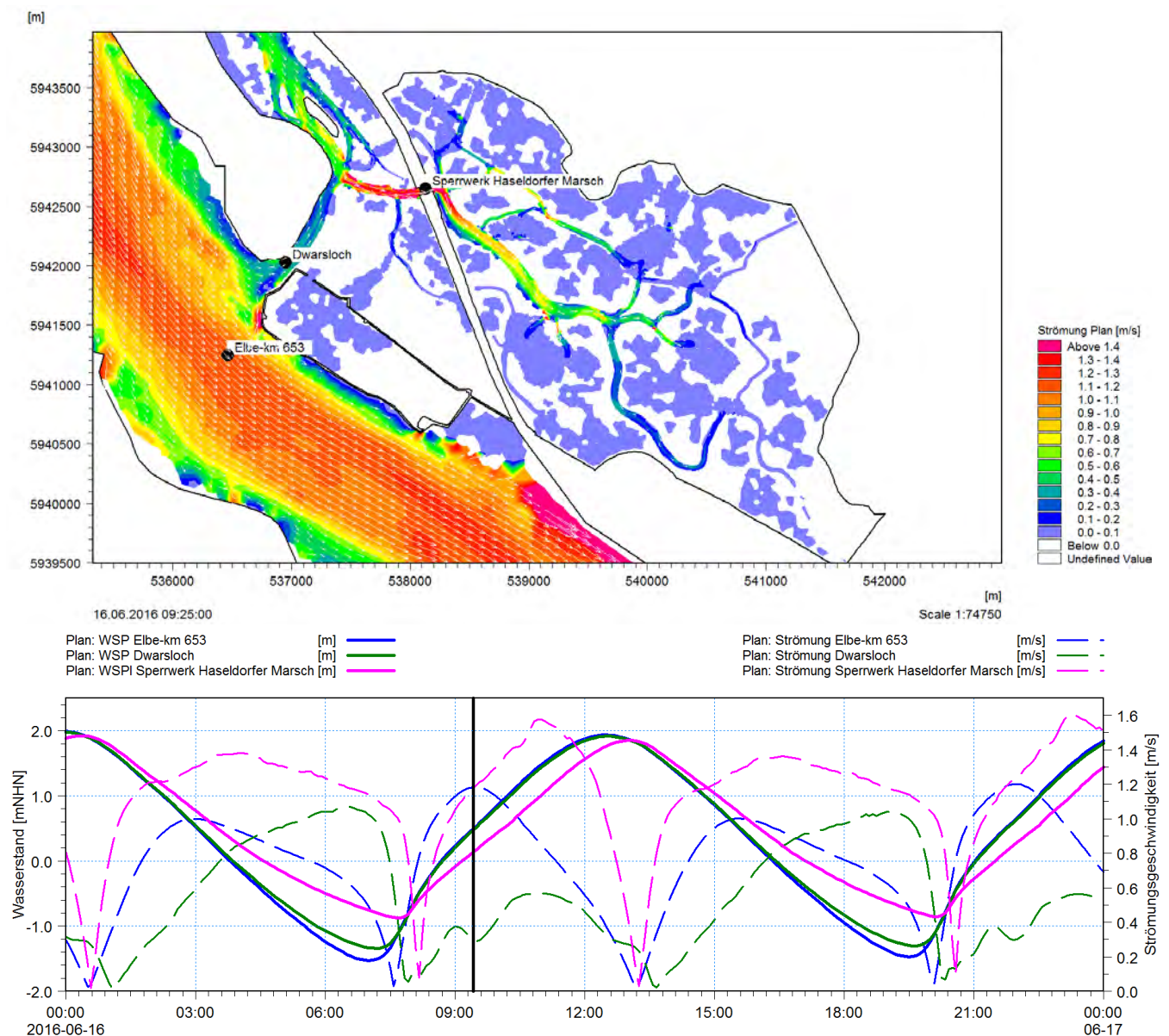


Abbildung 7.15:

Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Flutstroms (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).

Durch die Wasserspiegeldifferenz zwischen der Elbe und dem Polder gibt es im Plan-Zustand während des Thw noch andauernde Flutströmung im Zulauf zur Haseldorfer Marsch und im Polder (Abbildung 7.16).

Die Flutströmungen bei Thw in der Elbe liegen bei ca. 0,4 m/s, im Sperrwerk Haseldorfer Marsch bei ca. 1,0 m/s und im Polder bei ca. 1,0 bis 0,8. Die Flutströmungen im Dwarsloch liegen ebenfalls bei ca. 0,4 m/s. In Abbildung 7.16 unten ist nur ein geringer zeitlicher Versatz zwischen den Flutstromkenterungen der Elbe und des Sperrwerks Haseldorfer Marsch und ein etwas größerer Versatz zur Kenterung im Dwarsloch zu erkennen.

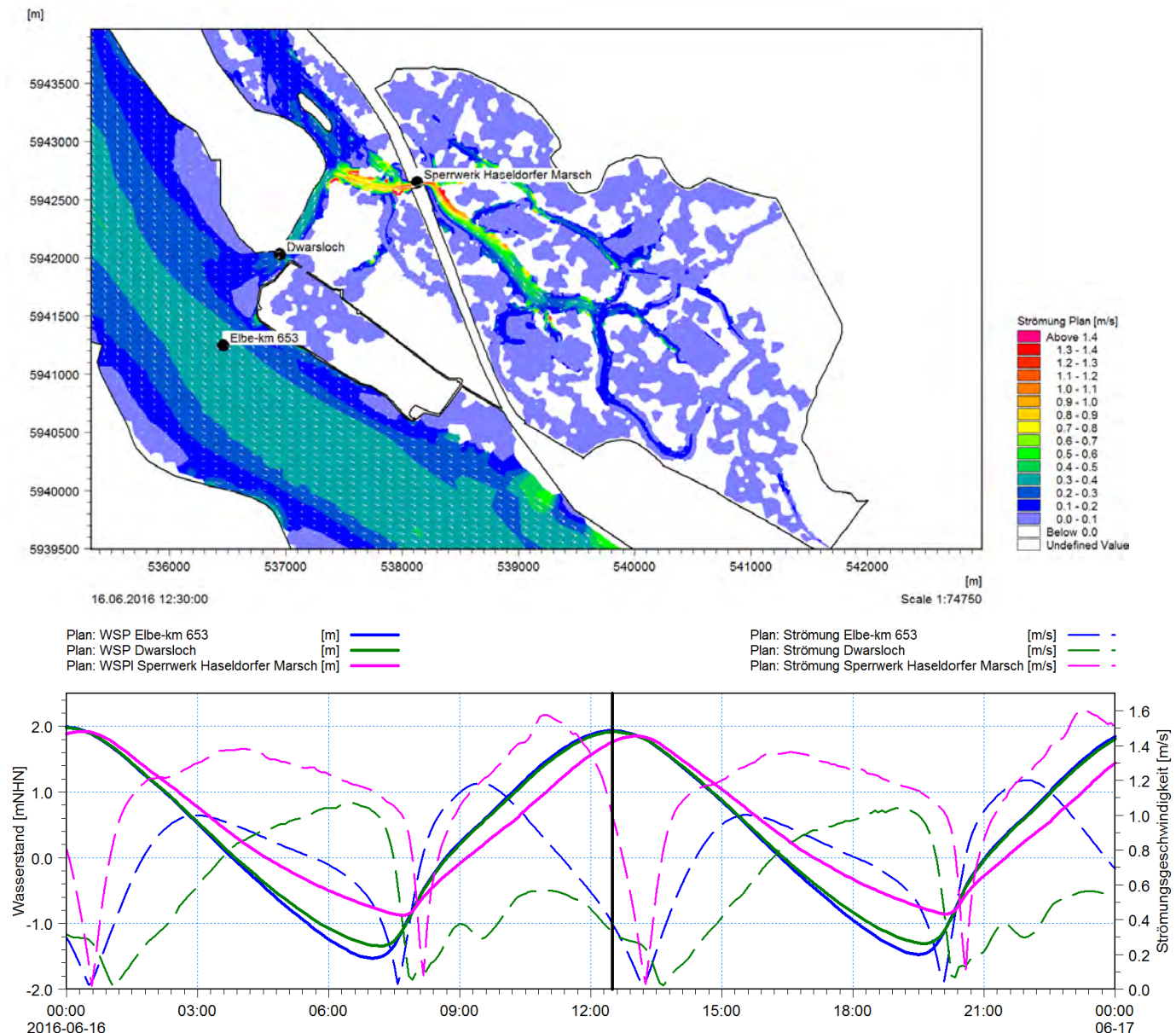


Abbildung 7.16: Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Thws (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).

Der Ebbstrom wird nahezu gleichmäßig über die Haseldorfer Binnenelbe und das Dwarsloch in die Elbe abgeführt (Abbildung 7.17, unten).

Während der Ebbströmung (Abbildung 7.17, unten) treten hohe Strömungen in der Elbe mit ca. 1,0 m/s und im Zulauf der Haseldorfer Marsch mit ca. 1,4 m/s auf. Die maximalen Ebbströmungen liegen im Dwarsloch bei ca. 1,0 m/s und im Polder bei ca. 0,6 bis 0,8 m/s.

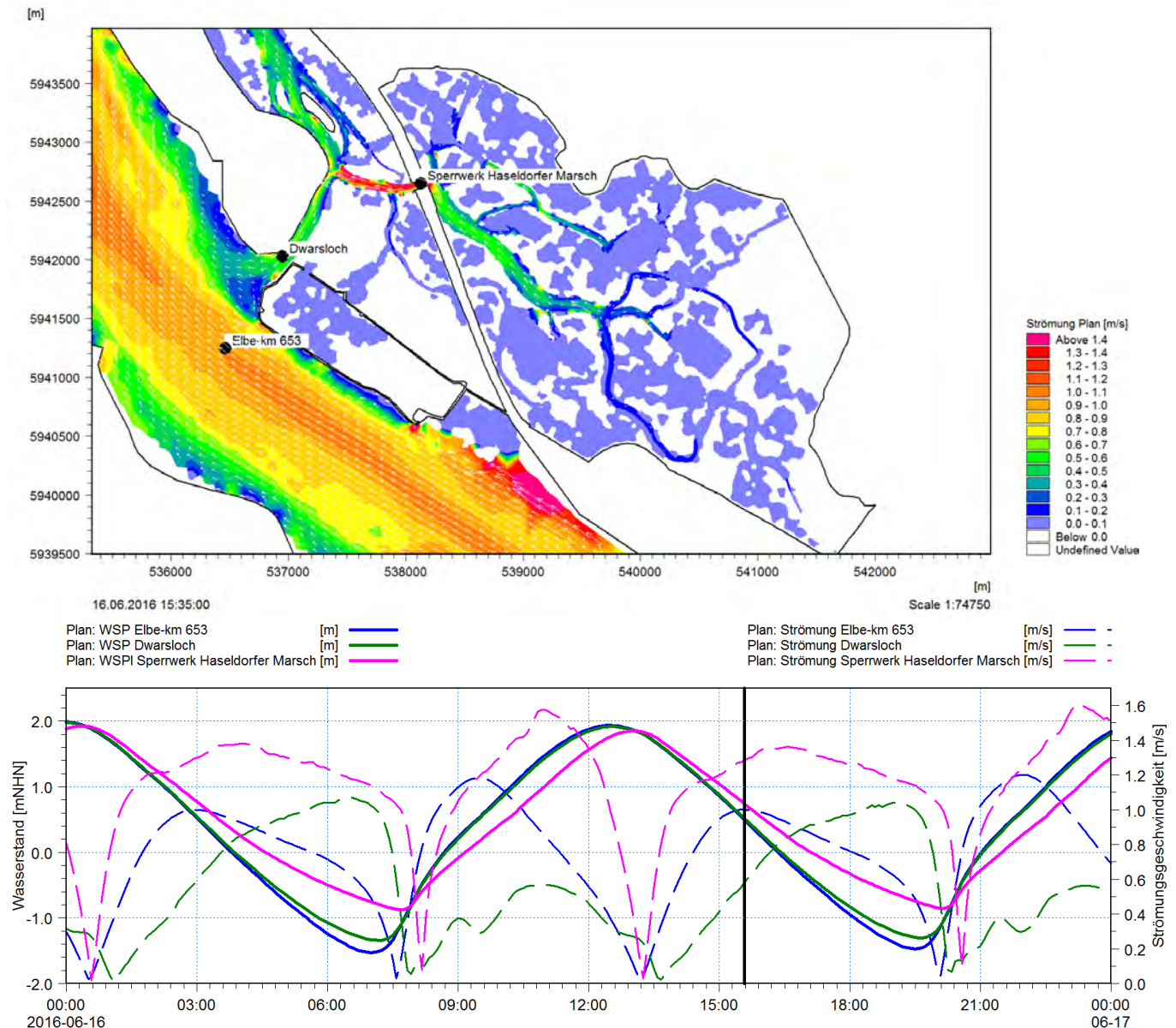


Abbildung 7.17: Strömungsgeschwindigkeit des Plan-Zustands der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Ebbstroms (oben). Wasserstand und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Dwarsloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).

### 7.2.3 Wirkung auf Dwarsloch & Haseldorfer Binnenelbe: Salzgehalt

Durch den Anschluss der Haseldorfer Marsch zeigte sich bereits für die Tideelbe eine Veränderung in den Salzgehalten (Kap. 7.1.5). Von einer Veränderung der Salzgehalte ist auch für das Dwarsloch und die Haseldorfer Binnenelbe auszugehen, da sich dort die Hydrodynamik ebenfalls verändert.

Im Plan-Zustand schwankt der Salzgehalt in der Elbe bei km 653 ca. 0,5 bis 1,3 PSU und zeigt keine merkliche vertikale Variation mehr (Abbildung 7.18) durch die große Entfernung vom baroklinen Elbeabschnitt. Der Salzgehalt im Drawslloch (Abbildung 7.18, grün) nimmt im Planzustand Werte zwischen 0,5 und 0,9 PSU ein und vor allem bei Thw etwas unter den Salzgehaltsschwankungen in der Elbe. Der Salzgehalt am Zulauf zur Haseldorfer Marsch (Abbildung 7.18, magenta) nimmt Werte zwischen 0,75 und 0,95 PSU ein und unterliegt somit geringen Schwankungen als der Salzgehalt in der Elbe.

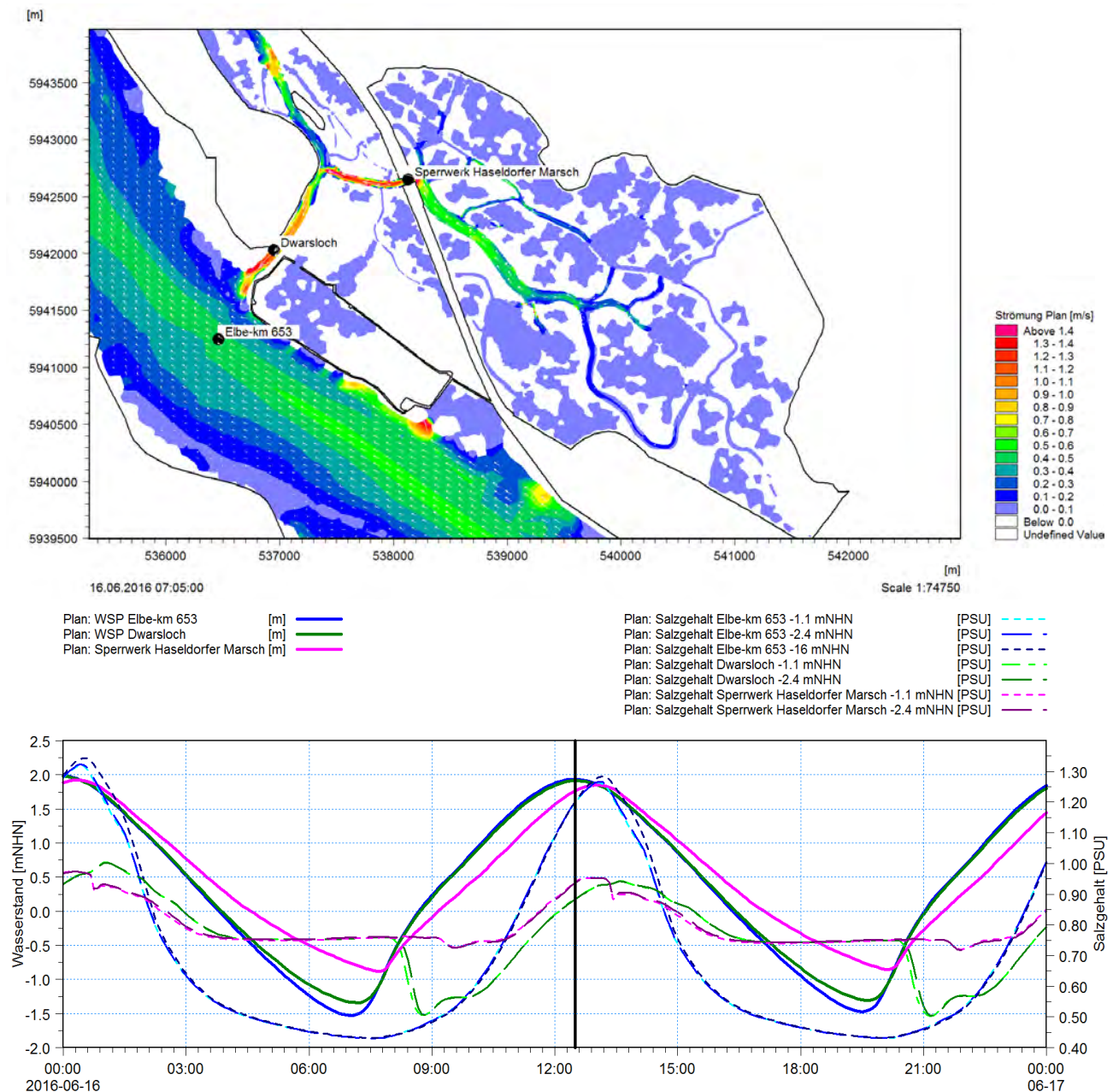


Abbildung 7.18: Strömungsgeschwindigkeit im Plan-Zustand der Haseldorfer Marsch zum Zeitpunkt des Thw inkl. Lage der Auswertepunkte für Wasserstand und Salzgehalte (oben). Wasserstand und Salzgehalte (unten) am Elbe-km 653 (blau), im Drawslloch (grün) und am geplanten Sperrwerk zur Haseldorfer Marsch (magenta).

#### 7.2.4 Einschätzung zur Schwebstoffkonzentration und Sedimentation im Dwarsloch, Haseldorfer Binnenelbe und Haseldorfer Marsch

Durch die Anbindung des Polder Haseldorfer Marsch über die äußere Haseldorfer Binnenelbe und das Dwarsloch ist von einem geringeren Schwebstoffeintrag während der Flut in den Polder auszugehen, als bei einer direkten Anbindung an die Elbe. Da der Hauptflutstrom nicht durch das Dwarsloch, sondern vorrangig über die äußere Haseldorfer Binnenelbe einströmt, ist von einer Schwebstoffkonzentration von ca. 100 bis 200 mg/l auszugehen. Diese Abschätzung lässt sich aus langfristigen Schwebstoffmesswerten der Elbe nahe der Pinnaumündung aus Kappenberg und Fanger 2007 (vgl. Nehlsen, 2017) herleiten.

Der Bereich zwischen dem Sperrwerk zum Polder Haseldorfer Marsch und dem Dwarsloch wird sich durch hohe Strömungen bzw. die langanhaltende Ebbströmung im Wesentlichen eigenständig freihalten. So ist davon auszugehen, dass das Dwarsloch ähnlich zu unterhalten wäre, wie derzeit. Eine Sedimentation ist hingegen in der Haseldorfer Marsch durch geringere Strömungen und einströmendes, schwebstoffhaltiges Wasser zu erwarten. Insbesondere in den zusätzlich geschaffenen tieferen Polderbereichen ist von einer kontinuierlichen Sedimentation mit ca. 25 bis 50 cm/a auszugehen.

## 8 Zusammenfassung

Im Auftrag des Forums Tideelbe werden derzeit Maßnahmen zur Gewinnung von Flutraum an der Tideelbe untersucht. Ziel dieser Maßnahmen ist es, den Sedimenthaushalt der Tideelbe nachhaltig zu verbessern und den Flussauftransport zu reduzieren. Einer der möglichen und daher in der Wirkung zu prüfenden Fluträume liegt in der Haseldorfer Marsch.

Eine Reaktivierung der Haseldorfer Marsch war bereits Bestandteil von früheren Untersuchungen wie u.a. BAW (2014) als Sturmflutpolder, DHI (1999) als Ausgleichsmaßnahme zur Wiederanbindung an die Elbe und AG Hochwasser (2007) zur Vermeidung von Überschwemmungen bei Binnenhochwasser. Die Studie der BAW (2014), die der heutigen Zielstellung wohl am nächsten kommt, zeigte das die Wirkung auf die Tidewasserstände bei ca. 1 cm liegt und Flut-/Ebbströmungen lokal in der Tideelbe verstärkt werden.

Die Wirkungsanalyse zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch umfasst eine Vorprüfung von drei Varianten mittels Volumen-Abfluss-Beziehungen und überschlägigen Berechnungen (Phase 1) und die Prüfung einer in der Wirkung optimierten Variante (Variante 3) mittels hydronumerischem 3D-Modell (Phase 2).

Die Varianten der Vorprüfung bestanden aus jeweils einer Anbindung des Flutraumes mit Eintiefung der Priele auf 50 cm unter MT<sub>nw</sub> (Tidevolumen Variante 1: 1 Mio m<sup>3</sup>), mit zusätzlicher Verbreiterung auf eine Böschungsneigung von 1:5 (Tidevolumen Variante 2: 3,3 Mio m<sup>3</sup>) und einer zusätzlichen Abgrabung von Flächen als Polder (Tidevolumen Variante 3: 4,7 Mio m<sup>3</sup>). Die Ergebnisse der Vorkonzeption zeigten, dass unter Ansatz der Tidekennwerte am Pegel Hetlingen für die hydraulische Wirkung der Fluträume Haseldorfer Marsch die Wirkung auf das Tidegeschehen bei ca. 1% (Variante 2) bis 1,4% (Variante 3) liegen wird. Folglich wurde für eine weitergehende numerische Untersuchung die Maximalvariante 3 im numerischen 3D-Modell der Tideelbe untersucht.

Diese Variante 3 ist über das Dwarsloch und die äußere Haseldorfer Binnenelbe mit der Haseldorfer Binnenelbe verbunden. Die bestehende Deichlinie auf 60 m mit einer Sohltiefe von – 2,5 m NHN geöffnet (z.B. durch ein Sperrwerk). Im untersuchten Zeitraum wurden mittlere Tiden (–1,9 bis 1,9 m NHN bei Cuxhaven) aus dem Juni 2016 mit einem

konstanten Oberwasserabfluss von 350 m<sup>3</sup>/s angesetzt. In diesem Zeitraum bleibt das Sperrwerk offen, da keine Wasserstände über 2 m NHN zu erwarten sind.

Auf die Tidekennwerte der Elbe wirkt sich, wie aus der hydraulischen Abschätzung und vergleichbaren Studien (u.a. BAW, 2014) bereits ableitbar war, die Anbindung der Haseldorfer Marsch nur gering aus. Der Tidehub nimmt um bis zu 3 cm flussaufwärts der Maßnahme ab. Im Tideabfluss, -volumen und der Flutstromdominanz (Verhältnis aus Flut-/ Ebbstrom) zeigt sich lediglich lokal eine geringe Wirkung (<1 %). Die Wirkung auf die Tidekennwerte ist daher als gering mit bis maximal 1,4 % einzustufen. Eine Interpretation der hydraulischen Kennwerte auf die Wirkung auf den Sedimenttransport der Elbe lässt sich anhand der Strömungskennwerte (Flutstromdominanz, Strömungsgradienten, Verhältnis der Volumina) ebenfalls als sehr gering einstufen. Nachteilig ist hingegen die Zunahme des Salzgehaltes für die Elbe und Nutzer entlang der Elbe um bis zu 1,1 PSU in der Elbe. In der Haseldorfer Marsch selber werden Werte um die 0,8 PSU erwartet.

Vorteilig erweist sich hingegen die Wirkung des Flutraumanschlusses auf das Prielsystem Haseldorfer Marsch und Dwarsloch. Durch eine Verstärkung der Ebbströmungen im Dwarsloch und eine deutliche Verlängerung des Ebbstroms ist davon auszugehen, dass der Tideanschluss zur Haseldorfer Marsch mit sehr geringem bzw. keinem Unterhaltungsaufwand freibleiben wird.

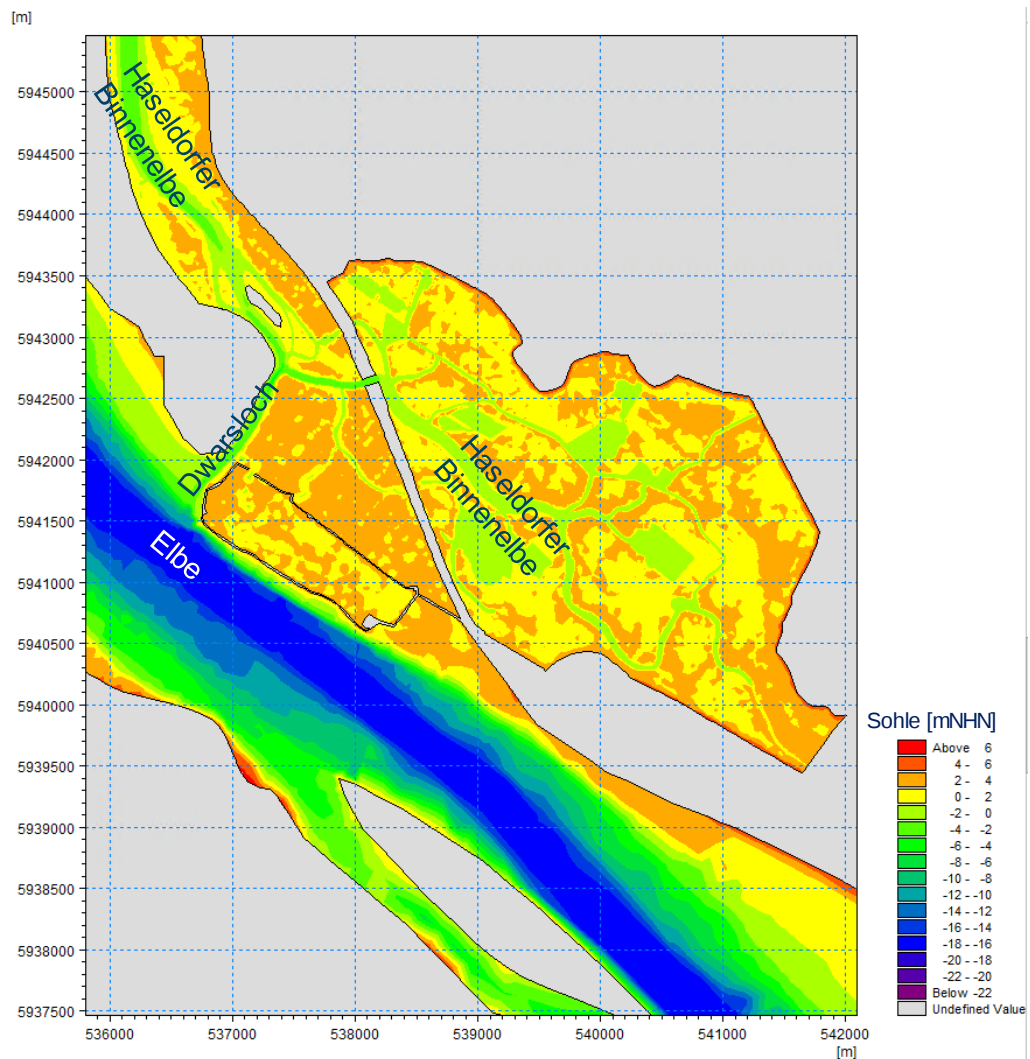


Abbildung 8.1: Modellraum Haseldorfer Marsch mit Anschluss über das Dwarsloch bzw. die äußere Haseldorfer Binnenelbe

Mit Blick auf die vorgelegten Untersuchungsergebnisse empfiehlt sich die Umsetzung eines Flutraumanschlusses der Haseldorfer Marsch im Zusammenspiel mit anderen stützenden Maßnahmen (z.B. zusätzlichen Fluträumen). Als alleinige Maßnahme wird die Wirkung auf die Tideelbe gering bleiben.

## 9 Literatur

AG Hochwasser (2007): Hochwasserstudie Haseldorfer Marsch, Abschlussbericht der Arbeitsgruppe Hochwasser, Abruf unter: [https://www.kreis-pinneberg.de/pinneberg\\_media/Dokumente/Fachdienst+26/AG+Hochwasserschutz+%28AB%29.pdf](https://www.kreis-pinneberg.de/pinneberg_media/Dokumente/Fachdienst+26/AG+Hochwasserschutz+%28AB%29.pdf)

BAW (2011): Strombaumaßnahmen Tideelbe: Tidepolder Alte Süderelbe und Dove Elbe, Präsentation der BAW Hamburg, BAW-DH

BAW (2014): FuE Abschlussbericht, KLIMZUG-NORD - Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg, A39550370163

BWS, BSS & Klütz (2006): Landschaftspflegerische Ausführungsplanung Hetlingen/ Giesensand, LAP-HM/ 05.P.14, im Auftrag der WSD-Nord und der WSA-HH, Abruf unter: [https://www.portaltideelbe.de/Projekte/FRA1999/Kompensationsmassnahmen/LAP/Haseldorfer\\_Wedeler\\_Marsch/index.html](https://www.portaltideelbe.de/Projekte/FRA1999/Kompensationsmassnahmen/LAP/Haseldorfer_Wedeler_Marsch/index.html)

DIN 4049-3: Hydrologie – Begriffe der quantitativen Hydrologie, Stand Oktober 1994

DHI (1999): Haseldorfer Marsch II – Hydrodynamische Untersuchung für die Freie und Hansestadt Hamburg Wirtschaftsbehörde und Amt für Strom- und Hafenbau

DHI - "MIKE 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography, Hydrodynamic Module, User Guide ", Horsholm, Dänemark, 2013

DHI "MIKE 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography, Scientific Documentation", Horsholm, Dänemark, 2009a

Dronkers, J.: Tidal Asymmetry and estuarine morphology, Netherlands Journal of Sea Research 20 (2/3), 117-131, 1986.

Kappenberg, Jens; Fanger, Hans-Ulrich (2007): Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee. Als Ms. vervielfältigt. Geesthacht: GKSS-Forschungszentrum (GKSS, 2007,20).

Natura2000-Untere Elbe (2011): Arbeitsgruppe Elbeästuar: Integrierter Bewirtschaftungsplan Elbeästuar

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