

# **Flächenherrichtung Steinwerder Süd**

## **Planfeststellungsunterlage**

### **Teil VII**

### **Wasserbauliche Systemanalyse BAW**

Juni 2022

Träger des Vorhabens

Realisierungsträger

---

**Hafenumstrukturierung Steinwerder Süd  
Wasserbauliche Systemanalyse**

**B3955.03.06.10010**



**Hafenumsstrukturierung Steinwerder Süd  
Wasserbauliche Systemanalyse**

**Gutachten zur  
ausbaubedingten Wirkung des Ausbaus  
Steinwerder Süd**

Auftraggeber: Hamburg Port Authority

Auftrag vom: 15.07.2020

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.06.10010

Aufgestellt von:	Abteilung:	Wasserbau im Küstenbereich
	Referat:	Ästuarsysteme II (K3)
	Bearbeiter:	Julia Benndorf M.Sc. Dipl. Ozeanogr. Markus Kreuz

Hamburg, 27.01.2021

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



## Zusammenfassung

Der Senat der Freien und Hansestadt Hamburg und die Hamburg Port Authority (HPA) haben beschlossen, die im Stadtteil Steinwerder gelegenen Flächen des Hansaterminals und des Roßterminals – zusammen als Steinwerder Süd bezeichnet – umzustrukturieren. Die im mittleren Freihafen liegenden Terminals sind renovierungsbedürftig und teilweise baufällig. Sie bieten mit ihren vorhandenen Flächenstrukturen nur noch wenig Potential für nach aktuellen Gesichtspunkten konzipierte Hafennutzungen.

Zur Herrichtung neuer, bedarfsgerechter und effizient nutzbarer Hafenflächen sollen die vorhandenen Kaizungen aus Gründen des Hochwasserschutzes auf ein Niveau von derzeit rd. +5,5m NHN auf rund +8m NHN aufgehöhht, die Höftspitzen Roßhöft und Oderhöft zurückgebaut und der dazwischenliegende Bereich des Oderhafens ebenfalls auf ein Niveau von rund +8m NHN aufgehöhht werden. Hierdurch wird im Rahmen einer sog. „Vorbereitungsmaßnahme“ eine rd. 27 ha große, zusammenhängende Fläche geschaffen, die nach Norden und Osten mit Uferböschungen abschließt, während im Westen die Bestandskaimauer erhalten bleibt. Die an die beabsichtigte Maßnahme heute angrenzenden Terminals und die geplanten Hafennutzungen geben die äußeren Grenzen der Fläche und den Abstand zu den benachbarten Hafenanlagen und Planungsprojekten vor.

Die neu entstehende Hafenfläche ist so konzipiert und bautechnisch ausgestaltet, dass sie entsprechend der konkreten Marktnachfrage zum Fertigstellungszeitpunkt für verschiedene und nach gegenwärtigem Stand prognostisch zu erwartende Hafennutzungen entwickelt werden kann (Endausbau). Das Projekt heißt „Steinwerder Süd“. In diesem Gutachten wird der die Tidedynamik und damit zusammenhängende Parameter betreffende Teil des Projektes „Ausbau Steinwerder Süd“ genannt.

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Standort Hamburg, wurde beauftragt, eine hydrologische Studie zu erstellen, in der die zu erwartenden Auswirkungen des Ausbaus Steinwerder Süd auf die Wasserstände, Strömungen, Schwebstoffe, Salzgehalte der Elbe sowie den Wasseraustausch innerhalb des Hamburger Hafens ermittelt und dargestellt werden.

In diesem Gutachten werden die Auswirkungen des Ausbaus Steinwerder Süd auf die Tidedynamik beschrieben.

Diese Untersuchung wird für zwei Szenarien durchgeführt:

- Spring-Nipp Zyklus mit niedrigem, häufigstem Oberwasserzufluss und großem Tidehub
- Spring-Nipp Zyklus mit niedrigem, häufigstem Oberwasserzufluss und kleinem Tidehub

Die hochaufgelöste Modelltopographie des planerischen Ist-Zustandes wird auf der Grundlage der Topographie von 2016 sowie den folgenden Maßnahmen erzeugt:

- die in Realisierung befindlichen Maßnahmen zur Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt
- Ausbauzustand der Westerweiterung CTH (Eurogate)
- Teilverfüllung des Steinwerder Hafens
- Rückbau Kaiser-Wilhelm-Höft

- Rückbau Ellerholzhöft
- Neubau Rethebrücke und Kattwykbrücke
- Sanierung Kaimauer Neumühlen
- Sanierung Steendiekkai
- Neubau Veddelkanalbrücken
- Neubau Reiherstiegsschleuse
- Süderelbquerung A26
- Süderelbquerung A1
- Norderelbquerung A1

Die Änderungen der Tidekennwerte in der Elbe ergeben sich aus der Differenz zwischen dem Ausbau Steinwerder Süd (SWS) und dem planerischen Ist-Zustand (PIZ) ohne diesen Ausbau. Im ausgebauten Zustand nimmt in Steinwerder Süd die Wasserfläche bezogen auf ein MThw (+2,10 m NHN) um ca. 6.000 m<sup>2</sup> (+0,7%) zu. Das Wasservolumen innerhalb des Tideprismas zwischen MThw und MTnw (-1,60 m NHN) verringert sich um ca. 4.000 m<sup>3</sup> (-0,1%).

Da die betroffenen Hafenflächen im Vergleich zum Hauptstrom der Tideelbe klein sind, und nur ein kleiner Teil der Tideenergie der Tideelbe als Tidewelle in diesen Hafenbereich einschwingt, hat dieser Ausbau keine signifikante Auswirkung auf die Tidedynamik.

Konkrete Ergebniswerte für ausbaubedingte Änderungen werden im Text nur benannt, wenn sie einen messtechnisch zu erfassenden Schwellenwert überschreiten.

Die ausbaubedingten Änderungen des Tidehoch- und Tideniedrigwassers liegen dem Betrage nach unterhalb des Schwellenwertes von 1 cm.

Ausbaubedingte Änderungen der Tideströmungen mit einem Betrag oberhalb des Schwellenwertes von 0,02 m/s gibt es nur im unmittelbaren Nahbereich des Ausbaus im Ellerholzhafen sowie im Travehafen. Die ausbaubedingte Zunahme oder Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit reicht lokal begrenzt im Maximum bis zu 0,3 m/s.

Der stromauf gerichtete advective Netto-Schwebstofftransport für dieses simulierte hydrologische Szenario wird ausbaubedingt nicht signifikant verändert.

Die Sedimentation im Bereich der Unterelbe wird durch den Ausbau Steinwerder Süd nicht signifikant verändert.

Für den Austausch des Wassers im Travehafen ist dessen nördlicher Anschluss an den Ellerholzhafen maßgeblich, der im Rahmen des Ausbaus eine deutlich größere Breite erhält. Dadurch ist die für den Austausch von 90 % des dort befindlichen Wassers benötigte Zeit im Ausbauzustand um bis zu 25 % kleiner als im planerischen Ist-Zustand, wobei die ausbaubedingte Veränderung stark vom Tideszenario („großer/kleiner Tidehub“) sowie der einwirkenden Wetterlage abhängt.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	3
2.1	Systemgeometrie des Ausbaus Steinwerder Süd	3
3	Bearbeitungskonzept	7
3.1	Prinzipielle Wirkung des Vorhabens	7
3.2	Mathematische Simulationsverfahren	7
3.3	Analyse und Bewertung	9
4	Ergebnisse für das Spring-Nipp Szenario vom 4.5. – 19.5.2016, „großer Tidehub“	13
4.1	Veränderungen des Wasserstandes	13
4.2	Veränderung der Strömungsverhältnisse	13
4.3	Veränderung der Salzgehaltsverhältnisse	15
4.4	Veränderung der Schwebstofftransportverhältnisse	15
4.5	Veränderung der Sedimentation	16
4.6	Auswirkungen auf den Wasseraustausch im Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Hafenbecken	16
5	Ergebnisse für das Spring-Nipp Szenario vom 29.9. – 13.10.2016, „kleiner Tidehub“	37
6	Auswirkungen auf Sturmflutscheitelwasserstände	39
7	Literaturverzeichnis	40



<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 1: Übersichtsplan der Umgebung des Oderhafens (Quelle: Seekarte 48, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2016)	2
Bild 2: Gebiet des verwendeten, um das östliche Niedersächsische Wattenmeer erweiterten Modell der Unter- und Außenelbe, hervorgehoben ist der Bereich des Hamburger Hafens	3
Bild 3: Maßnahmen der geplanten Westerweiterung des CTH	5
Bild 4: Modelltopographie des planerischen Ist-Zustandes des Hamburger Hafens. Tiefen in m NHN, positiv nach unten	6
Bild 5: Modelltopographie des Ausbauzustandes Steinwerder Süd. Tiefen in m NHN, positiv nach unten	6
Bild 6: Übersicht der Unter- und Außenelbe mit der Elbe-Kilometrierung	10
Bild 7: Häufigkeitsverteilung des Abflusses in Neu Darchau	11
Bild 8: Mittlerer Tidehub im Ist-Zustand für 24 Spring-Nipp Szenarien im Jahr 2016 entlang der Fahrrinnenmitte von der Mündung bis zum Wehr bei Geesthacht. In Rot für das Szenario „großer Tidehub“, in Grün für Szenario „kleiner Tidehub“.	11
Bild 9: Tidehochwasser für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das maximale, in Grün das minimale und in Schwarz das mittlere Tidehochwasser	19
Bild 10: Differenz des mittleren Tidehochwassers (SWS – PIZ).	19
Bild 11: Tideniedrigwasser für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das maximale, in Grün das minimale und in Schwarz das mittlere Tideniedrigwasser.	20
Bild 12: Differenz des mittleren Tideniedrigwassers (SWS – PIZ).	20
Bild 13: Tidehub für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot der maximale, in Grün der minimale und in Schwarz der mittlere Tidehub.	21
Bild 14: Differenz des mittleren Tidehubes (SWS – PIZ).	21
Bild 15: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit.	22
Bild 16: Differenz der Mittelwerte der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).	22
Bild 17: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der mittleren Flutstromgeschwindigkeit.	23
Bild 18: Differenz der Mittelwerte der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).	23
Bild 19: Maximale Ebbestromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit.	24

Bild 20: Differenz der Mittelwerte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).	24
Bild 21: Maximale Flutstromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der maximalen Flutstromgeschwindigkeit.	25
Bild 22: Differenz der Mittelwerte der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).	25
Bild 23: Mittelwert der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ).	26
Bild 24: Differenz der Mittelwerte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).	26
Bild 25: Mittelwert der maximalen Flutstromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ).	27
Bild 26: Differenz der Mittelwerte der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).	27
Bild 27: Maximaler Salzgehalt für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert des maximalen Salzgehalts.	28
Bild 28: Differenz der Mittelwerte des maximalen Salzgehalts (SWS – PIZ).	28
Bild 29: Minimaler Salzgehalt für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert des minimalen Salzgehalts.	29
Bild 30: Differenz der Mittelwerte des minimalen Salzgehalts (SWS – PIZ).	29
Bild 31: Mittlerer Salzgehalt für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert des mittleren Salzgehalts.	30
Bild 32: Differenz der Mittelwerte des mittleren Salzgehalts (SWS – PIZ).	30
Bild 33: Salzgehaltsvariation für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der Salzgehaltsvariation.	31
Bild 34: Differenz der Mittelwerte der Salzgehaltsvariation (SWS – PIZ).	31
Bild 35: Mittelwert des advektiven Rest-Schwebstofftransports für den planerischen Ist-Zustand (PIZ).	32
Bild 36: Mittelwert des advektiven Rest-Schwebstofftransports für den Ausbauzustand (SWS).	32
Bild 37: Sedimentation / Erosion im PIZ vom 4.5. – 19.5.2016	33
Bild 38: Veränderung der Sedimentation / Erosion durch die Maßnahmen des Ausbaus SWS zwischen 4.5. – 19.5.2016	33
Bild 39: Entwicklung der Tracerkonzentration im Vorhafen und in den angeschlossenen Häfen im PIZ in Blau und SWS in Rot für das Szenario „großer Tidehub“	34

Bild 40: Entwicklung der Tracerkonzentration im Ellerholzhafen und den angeschlossenen Häfen im PIZ in Blau und SWS in Rot für das Szenario „großer Tidehub“	35
Bild 41: Entwicklung der Tracerkonzentration im Travehafen im PIZ in Blau und SWS in Rot für das Szenario „großer Tidehub“	36
Bild 42: Entwicklung der Tracerkonzentration im Vorhafen und in den angeschlossenen Häfen im PIZ (blau) und SWS (rot) für das Szenario „kleiner Tidehub“	38
Bild 43: Entwicklung der Tracerkonzentration im Travehafen im PIZ (blau) und SWS (rot) für das Szenario „kleiner Tidehub“	39

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Gewählte Schwellenwerte der Tidekennwerte für die ausbaubedingten Änderungen	12
Tabelle 2: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Häfen für den PIZ und SWS	17
Tabelle 3: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Ellerholzhafens, des Oderhafens und des Travehafens für den PIZ und SWS	17
Tabelle 4: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Travehafens für den PIZ und SWS	18
Tabelle 5: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Häfen für den PIZ und SWS für das Szenario „kleiner Tidehub“	37
Tabelle 6: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Travehafens für den PIZ und SWS für das Szenario „kleiner Tidehub“	38

## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der Senat der Freien und Hansestadt Hamburg und die Hamburg Port Authority (HPA) haben beschlossen, die im Stadtteil Steinwerder gelegenen Flächen des Hansaterminals und des Roßterminals – zusammen als Steinwerder Süd bezeichnet – umzustrukturieren. Die im mittleren Freihafen liegenden Terminals sind renovierungsbedürftig und teilweise baufällig. Sie bieten mit ihren vorhandenen Flächenstrukturen nur noch wenig Potential für nach aktuellen Gesichtspunkten konzipierte Hafennutzungen.

Zur Herrichtung neuer, bedarfsgerechter und effizient nutzbarer Hafenflächen sollen die vorhandenen Kaizungen aus Gründen des Hochwasserschutzes von derzeit rd. +5,5 m NHN auf ein Niveau von rund +8 m NHN aufgehöhht, die Höftspitzen Roßhöft und Oderhöft zurückgebaut und der dazwischenliegende Bereich des Oderhafens ebenfalls auf ein Niveau von rund +8 m NHN aufgehöhht werden. Hierdurch wird im Rahmen einer sog. „Vorbereitungsmaßnahme“ eine rd. 27 ha große, zusammenhängende Fläche geschaffen, die nach Norden und Osten mit Uferböschungen abschließt, während im Westen die Bestandskaimauer erhalten bleibt. Die an die beabsichtigte Maßnahme heute angrenzenden Terminals und die geplanten Hafennutzungen geben die äußeren Grenzen der Fläche und den Abstand zu den benachbarten Hafenanlagen und Planungsprojekten vor.

Die neu entstehende Hafenfläche ist so konzipiert und bautechnisch ausgestaltet, dass sie entsprechend der konkreten Marktnachfrage zum Fertigstellungszeitpunkt für verschiedene und nach gegenwärtigem Stand prognostisch zu erwartende Hafennutzungen entwickelt werden kann (Endausbau).

Das Projekt heißt „Steinwerder Süd“. In diesem Gutachten wird der die Tidedynamik und damit zusammenhängende Parameter betreffende Teil des Projektes „Ausbau Steinwerder Süd“ (SWS) genannt.

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Standort Hamburg, wurde beauftragt, eine hydrologische Studie zu erstellen, in der die zu erwartenden Wirkungen des Ausbaus Steinwerder Süd auf die Wasserstände, Strömungen, Schwebstoffe, Salzgehalte der Elbe sowie den Wasseraustausch innerhalb des Hamburger Hafens ermittelt und dargestellt werden.

Die im Ausbau Steinwerder Süd enthaltenen Maßnahmen, die dieses Gutachten betreffen, sind:

- Teilverfüllung des Oderhafens und Aufhöhung der entstehenden Fläche auf rund +8,00 m NHN
- Teilrückbau des Roßhöfts
- Teilrückbau des Oderhöfts
- Bau von Böschungen an der Nordseite der neuen Fläche
- Herstellung der Solltiefe von -12,00 m NHN im Ellerholzhafen (Rückbaubereich der Höfte.)

Bild 1 zeigt den Ort des Ausbaus im Hamburger Hafen mit den Ortsbezeichnungen.

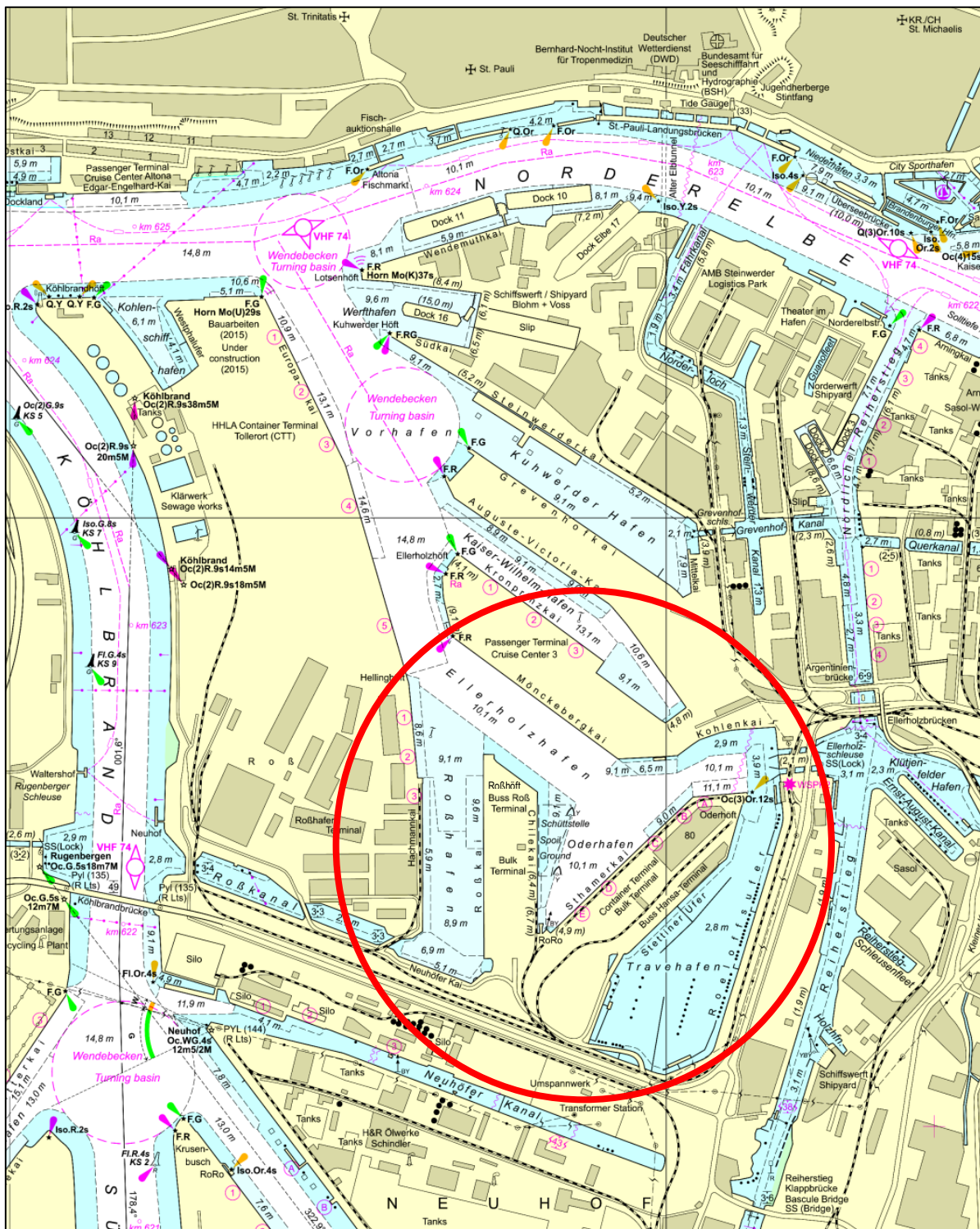


Bild 1: Übersichtsplan der Umgebung des Oderhafens  
(Quelle: Seekarte 48, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2016)



## 2 Unterlagen und Daten

### 2.1 Systemgeometrie des Ausbaus Steinwerder Süd

Zur besseren Verständlichkeit dieses Gutachtens werden die geplanten baulichen Maßnahmen im Hamburger Hafen in kurzer Form beschrieben. Einzelheiten zum Modellgebiet und zur Konstruktion der Systemgeometrien des „planerischen Ist-Zustandes“ (PIZ) sind im BAW-Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport für die Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Abschnitt 3, dort Ausbauzustand (Bundesanstalt für Wasserbau, 2006) enthalten.

Der „planerische Ist-Zustand“ (PIZ) basiert als Vergleichszustand auf der Topographie des Modellgebietes (siehe Bild 2) mit den Tiefen des Jahres 2016.

Um nur die Wirkungen des Ausbaus „Steinwerder Süd“ zu beurteilen, müssen auch alle kumulierenden Wirkungen von in räumlichem und zeitlichem Bezug zum o.g. Ausbau stehenden Vorhaben, die heute noch nicht vorhanden, aber bei Projektbeginn bekannt und bis zum Baubeginn mit hoher Wahrscheinlichkeit realisiert sein werden, sowohl im planerischen Ist-Zustand als auch im Ausbauzustand enthalten sein.

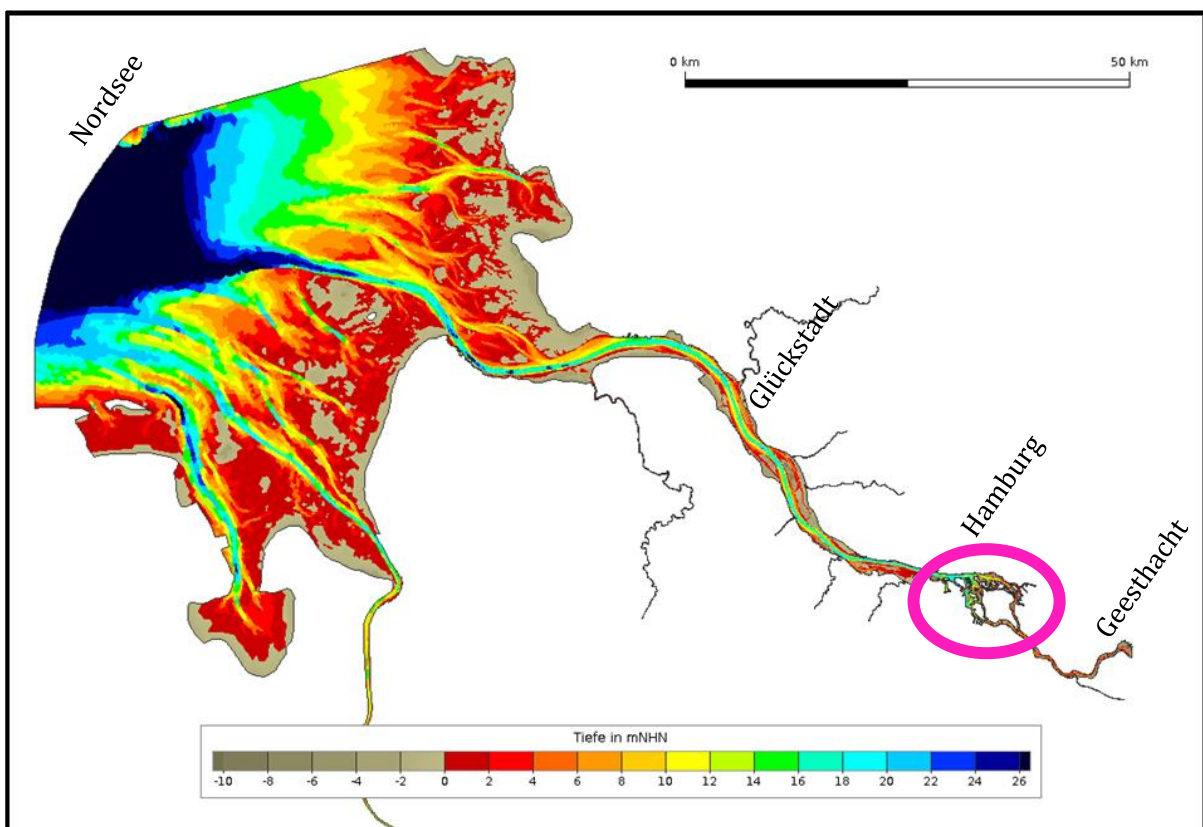
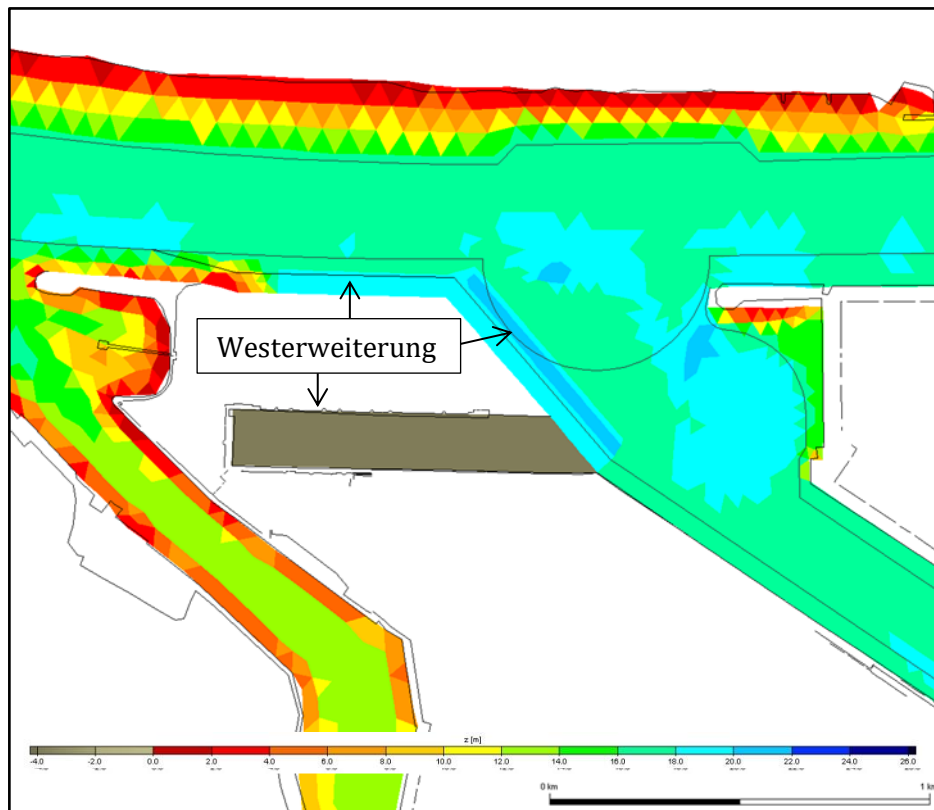


Bild 2: Gebiet des verwendeten, um das östliche Niedersächsische Wattenmeer erweiterten Modell der Unter- und Außenelbe, hervorgehoben ist der Bereich des Hamburger Hafens

Folgende, heute noch nicht oder erst teilweise realisierte Maßnahmen sind in den planerischen Ist-Zustand (PIZ) aufgenommen worden:

1. die Solltiefen des Ausbauzustandes der derzeit in Realisierung befindlichen Vertiefung von Unter- und Außenelbe mit allen geplanten Unterwasserablagerungsflächen und Ufervorspülungen, Zustand Planänderung III (Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg 2010). Dabei werden die Solltiefen an solchen Positionen in der Fahrrinne eingebaut, an denen die durch die verwendeten Peilungen entstandene Tiefe geringer als die Solltiefe ist. Das genaue Vorgehen dazu ist im Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport (Bundesanstalt für Wasserbau, 2006) beschrieben.
2. die Maßnahmen der geplanten Westerweiterung des CTH (Bundesanstalt für Wasserbau, 2008a) (siehe Bild 3).
3. Teilverfüllung des Steinwerder Hafens (siehe Bild 4)
4. Rückbau des Kaiser-Wilhelm-Höfts (siehe Bild 4)
5. Rückbau des Ellerholzhöfts (siehe Bild 4)
6. Neubau der Rethebrücke und der Kattwykbrücke
7. Sanierung der Kaimauer Neumühlen
8. Sanierung Steendiekkai
9. Neubau der Veddelkanalbrücken
10. Neubau der Reiherstiegsschleuse
11. Neubau der Süderelbquerung der Autobahn A26
12. Neubau der Süderelbquerung der Autobahn A1
13. Neubau der Norderelbquerung der Autobahn A1



*Bild 3: Maßnahmen der geplanten Westerweiterung des CTH*

Dieser planerische Ist-Zustand (PIZ) bildet die Grundlage für den Ausbauzustand, in dem zusätzlich die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen des Ausbaus Steinwerder Süd berücksichtigt sind:

- Teilverfüllung des Oderhafens und Aufhöhung der entstehenden Fläche auf rund +8,00 m NHN
- Teilrückbau des Roßhöfts
- Teilrückbau des Oderhöfts
- Bau von Böschungen an der Nordseite der neuen Fläche
- Bau einer Unterwasserböschung zwischen Oderhafen und Travehafen
- Herstellung der Solttiefe von -12,00 m NHN im Ellerholzhafen (Rückbaubereich der Höfte.)

Insgesamt führt dies im Projektgebiet Steinwerder Süd zu einer Zunahme der Wasserfläche um ca. 6.000 m<sup>2</sup> (+0,7 %) bezogen auf ein MThw (+2,10 m NHN) sowie eine Abnahme des Wasservolumens innerhalb des Tideprismas zwischen MThw und MTnw (-1,60 m NHN) um ca. 4.000 m<sup>3</sup> (-0,1 %). Da die Verluste an Wasserfläche und Wasservolumen, die durch das Verfüllen des Oderhafens entstehen, durch neu entstandene Wasserflächen resultierend aus dem Rückbau der Höfte ausgeglichen werden, ist die resultierende Änderung der Wasserfläche und des Wasservolumens sehr gering. Die unterschiedlichen Vorzeichen entstehen durch die Veränderungen unterhalb des MThw.



Die Überlagerung der genannten Maßnahmen mit dem planerischen Ist-Zustand (Bild 4) ergibt die Topographie des Ausbauzustandes des Ausbaus Steinwerder Süd (Bild 5).

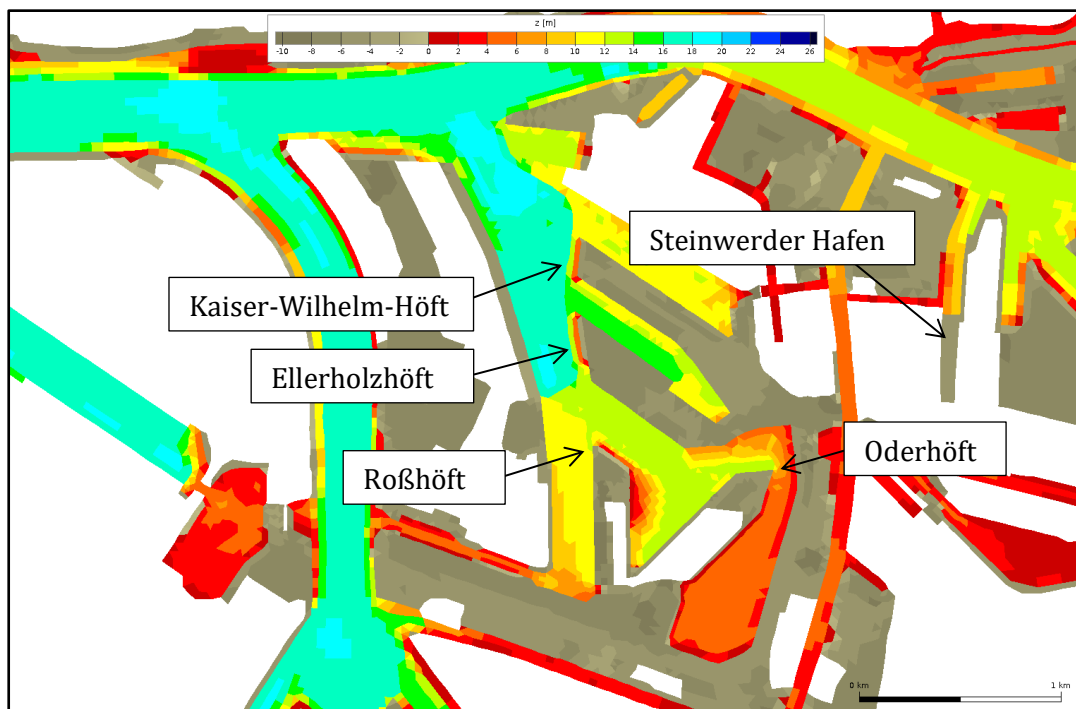


Bild 4: Modelltopographie des planerischen Ist-Zustandes des Hamburger Hafens. Tiefen in m NHN, positiv nach unten

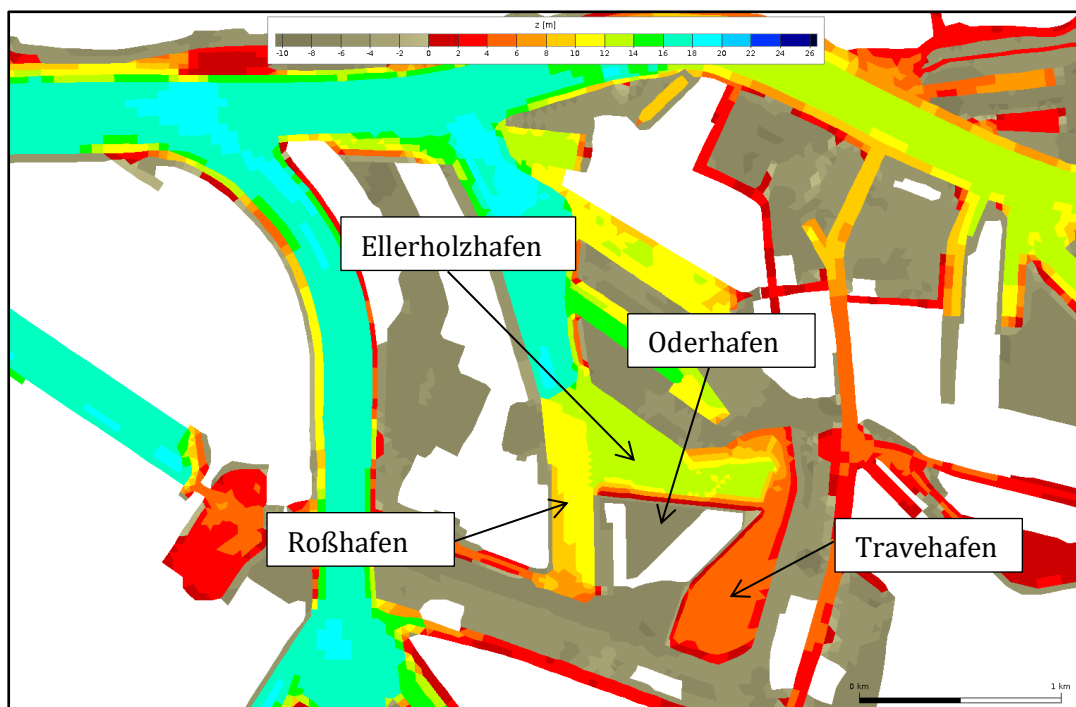


Bild 5: Modelltopographie des Ausbauzustandes Steinwerder Süd. Tiefen in m NHN, positiv nach unten

### 3 Bearbeitungskonzept

#### 3.1 Prinzipielle Wirkung des Vorhabens

Die von See in die Elbe einlaufende Tidewelle wird durch die Geometrie des Ästuars beeinflusst. Zusätzlich können sich lokale Einflüsse auf das Schwingungsverhalten der Tidewelle auswirken, sodass diese sich weit nach oberstrom bzw. unterstrom fortpflanzen. Deshalb können Veränderungen durch z. B. Baumaßnahmen nicht nur lokale Auswirkungen haben. Diese hängen sowohl von Art und Umfang der Maßnahme ab, als auch vom Ort.

Der Ausbau von Steinwerder Süd im Hamburger Hafen führt zu einer geometrischen Veränderung am stromauf gelegenen Abschnitt der tidebeeinflussten Elbe. Durch den Ausbau werden lokale Bereiche vertieft, abgebaggert oder verfüllt. Dadurch wird das Wasservolumen bzw. die Wasserfläche des Hafen Steinwerder Süd verändert (siehe Kapitel 2). Da die Veränderungen der Wassertiefe (Zu- und Abnahmen) auf einen kleinen Raum lokal beschränkt sind, werden ausbaubedingte Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit (Zu- und Abnahmen) auch nur lokal erwartet, sodass sich das Strömungsklima im Hafen Steinwerder Süd grundsätzlich nicht ändern wird. Deshalb kann weiter angenommen werden, dass sich das MThw und das MTnw ausbaubedingt nicht ändern wird. Das bedeutet unter Berücksichtigung einer nur minimal vergrößerten Wasserfläche (s.o.), dass sich das in diesen Bereich ein- und aus ihm herauslaufende Tideprisma ausbaubedingt auch nur sehr gering ändert. Da sich nur eine geringe Veränderung des zwischen dem Hafen Steinwerder Süd und der Norderelbe ausgetauschten Wasservolumens einstellen wird, werden auch die ausbaubedingten Änderungen in der Tidedynamik für den Hauptstrom sehr klein sein.

Um die ausbaubedingten Änderungen genauer zu lokalisieren und zu quantifizieren, sollen Untersuchungen mit dem HN-Modell durchgeführt werden

#### 3.2 Mathematische Simulationsverfahren

In dem vorliegenden Gutachten sollen nicht nur die Wirkungen des Ausbaus Steinwerder Süd auf die Tidedynamik ermittelt und beschrieben werden, sondern auch die auf den Salztransport, die Sedimentation / Erosion, die Wasseraufenthaltszeit und den Schwebstofftransport, um damit eine Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen des geplanten Ausbaus zu schaffen. Die Prognose solcher Auswirkungen ist nach dem Stand von Technik und Wissenschaft mit wasserbaulichen Systemanalysen unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung möglich. Das verwendete 3D HN-Modell bildet die physikalischen Prozesse im Elbe-Ästuar mit Hilfe des numerischen Verfahrens *UnTRIM* dreidimensional ab.

Bei dem mathematischen Verfahren *UnTRIM* handelt es sich um eine Entwicklung, die von Prof. Vincenzo Casulli (Universität Trient, Italien) durchgeführt wurde. *UnTRIM* ist ein semi-implizites Finite-Differenzen (-Volumen) Verfahren zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme, Schwebstoffe sowie suspendierte Sedimente. *UnTRIM* arbeitet auf einem unstrukturierten, orthogonalen Gitter (UOG). Hierbei wird das Lösungsgebiet von einer endlichen Anzahl konvexer Polygone (Dreiecke, Vierecke) überlappungsfrei überdeckt.

### **Physikalische Prozesse**

Die folgenden physikalischen Prozesse werden in dem mathematischen Modell zur Berechnung der Hydrodynamik und des Transports gelöster Stoffe berücksichtigt:

- reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichung (RANSE)
- lokale Beschleunigung (Massenträgheit)
- advektive Beschleunigung
- Coriolisbeschleunigung
- barotroper Druckgradient
- barokliner Druckgradient
- hydrostatische oder nicht-hydrostatische Druckverteilung
- horizontale turbulente Viskosität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Viskosität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- Bodenreibung
- Impulseintrag durch den Wind
- Quellen und Senken (Zu- und Abflüsse)
- Transport konservativer Tracer
- advektiver Transport durch die Strömung
- optionaler flux limiter: Minmod, van Leer oder Superbee
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- vertikale turbulente Diffusivität unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung

### **Berechnungsergebnisse**

Folgende Ergebnisse werden durch das mathematische Modell an den diskreten Berechnungspunkten ausgegeben:

- Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche
- Strömungsgeschwindigkeit
- Tracerkonzentration (z.B. Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoff)
- hydrodynamischer Druck

Dabei liegen die skalaren Größen (Wasserstand, Konzentration usw.) in den Zentrumsunkten und die vektoriellen Größen (Geschwindigkeit) in den Mitten der Polygonränder vor. Den Veröffentlichungen Casulli et. al. 1998 bis 2005 können Details zu dem mathematischen Modellverfahren *UnTRIM* entnommen werden (Casulli und Walters 2000; Casulli und Zanolli 2002; Casulli 1999; Casulli, V. and Zanolli, P. 1998; Casulli und Zanolli 2005).

### **Vorgehensweise**

Die örtliche Auflösung des Rechengitters und die zeitliche Auflösung der Simulation sind so gewählt worden, dass alle charakteristischen, d.h. das Gewässer prägenden physikalischen Prozesse berücksichtigt und die durch die Baumaßnahmen des Ausbaus Steinwerder Süd vorzunehmenden Änderungen der Topographie aufgelöst werden. Das Modell ist zunächst an Naturmessungen für

das Jahr 2016 (Wasserstands-, Strömungs- und Salzgehaltsmessungen) kalibriert und validiert worden, so dass es den „Ist-Zustand“ der Gewässer- und Tideverhältnisse beschreibt.

Die durch den Ausbau Steinwerder Süd bedingten Änderungen werden nicht auf den „Ist-Zustand“ sondern auf den „planerischen Ist-Zustand“ bezogen. Dieser unterscheidet sich vom Ist-Zustand dadurch, dass weitere bauliche Maßnahmen berücksichtigt werden, die zum Zeitpunkt der Ausführung der zu untersuchenden Maßnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit realisiert sein werden und die zu Beginn der Arbeit an diesem Gutachten bekannt waren (siehe Kapitel 2.1). Dabei bleiben die Kalibrierungseinstellungen unverändert. In die Modelltopographie des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) werden schließlich die Maßnahmen des Ausbaus Steinwerder Süd eingebaut, so dass ein HN-Modell der Tideelbe mit dem Ausbau Steinwerder Süd (SWS) entsteht.

Die mit dem HN-Modell unter Verwendung identischer Modellparameter und see- sowie landseitiger Steuerung ermittelten Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalts- und Schwebstoffverteilungen ergeben die Rechenwerte für den Ausbau Steinwerder Süd. Durch Differenzbildung der berechneten Tide-, Strömungs- und Transportkennwerte für den Ausbau Steinwerder Süd inklusive der vorsorglich einbezogenen Herstellung der geplanten Solltiefen und des planerischen Ist-Zustandes werden für das gesamte Modellgebiet ausbaubedingte Änderungen der Kennwerte ermittelt. Durch diese Vorgehensweise können Änderungen eindeutig dem Ausbau Steinwerder Süd zugeordnet werden

### **3.3 Analyse und Bewertung**

Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen werden die Tidekennwerte der Wasserstände, der Strömung, des Salzgehalts und der Schwebstoffverteilung errechnet, um die Wirkungen des Ausbaus Steinwerder Süd zu quantifizieren. Die Analyseverfahren und –parameter sind ausführlich auf den Internetseiten der BAW dokumentiert, siehe:

[http://wiki.baw.de/de/index.php5/Analyse\\_der\\_Berechnungsergebnisse](http://wiki.baw.de/de/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse)

Die Berechnungsergebnisse aus Modellsimulation und –analyse bedürfen der fachwissenschaftlichen Interpretation, um fundierte Prognosen über die Ausbauwirkungen abzugeben. Die Berechnungsergebnisse sind somit nicht die alleinige Grundlage der gutachterlichen Aussagen, weil sowohl die gewässerkundlichen Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet als auch die revier- und methodenspezifischen Erfahrungen des Gutachters in der wasserbaulichen Systemanalyse mit in die Bewertung einfließen müssen.

Die Analysen der Tidekennwerte werden einerseits auf der gesamten Fläche des Untersuchungsgebietes, andererseits entlang der Mitte der Fahrrinne der Elbe an dicht aufeinander folgenden Positionen (Abstand = 100 m, im Stromspaltungsgebiet entlang der Norderelbe) für den planerischen-Ist-Zustand (PIZ) und den Ausbauzustand Steinwerder Süd durchgeführt. Die durch den Ausbau Steinwerder Süd bedingten Änderungen ergeben sich durch Differenzbildung des Ausbauzustandes Steinwerder Süd inklusive der vorsorglich einbezogenen Herstellung der geplanten Solltiefen mit dem planerischen-Ist-Zustand. Erhöhungen infolge des Ausbaus Steinwerder Süd

ergeben sich so zu positiven Werten. Die Analyseergebnisse des dreidimensionalen Elbmodells werden vertikal integriert und dann auf einem Linienprofil mit Bezug auf die Kilometrierung der Elbe (vgl. Bild 6) dargestellt. Wo diese Darstellungen nicht ausreichen, weil die ausbaubedingten Änderungen außerhalb des Längsprofils, z.B. in Hafenbecken, stattfinden, werden die flächenhaften Darstellungen der Analyseergebnisse gezeigt.

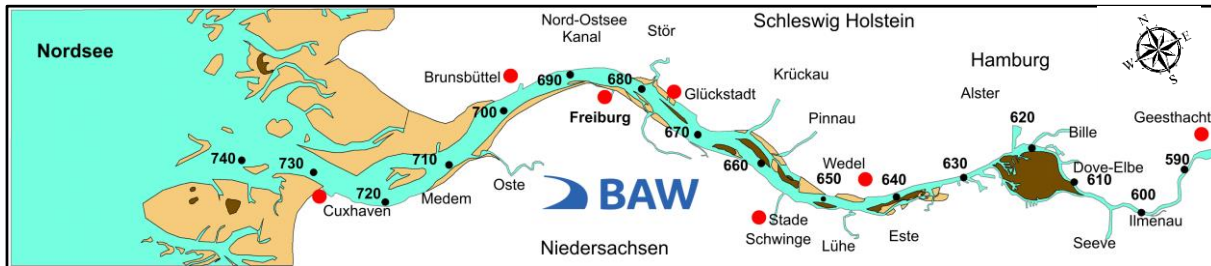


Bild 6: Übersicht der Unter- und Außenelbe mit der Elbe-Kilometrierung

Untersuchungen der BAW von unterschiedlichsten Ausbaumaßnahmen (geometrische Veränderungen) in der Unterelbe und im Hamburger Hafen haben ergeben, dass die ausbaubedingte Änderung des Wasserstandes und der Strömungsgeschwindigkeiten dann am größten werden, wenn der Analysezeitraum besonders energiereiche Tiden aufweist. Für eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen muss deshalb ein Analysezeitraum gewählt werden, der dieses Kriterium möglichst gut erfüllt.

Für die Auswahl eines geeigneten Spring-Nipp Szenarios wird daher wie folgt vorgegangen:

- Das Jahr 2016 (Ist-Zustand) wird in 24 Spring-Nipp Zeiträume mit jeweils 28 Tiden zerlegt.
- Aus diesen 24 Zeiträumen wird derjenige als geeignet ausgesucht, der energiereiche Tiden, also mit großem Tidehub aufweist.
- Für das in Bild 8 in Rot dargestellte Spring-Nipp Szenario vom 4.5. – 19.5.2016 (snz09) ist dies der Fall.

Diese Untersuchung wird daher zunächst für das Szenario des Spring-Nipp Zyklus vom 4.5. – 19.5.2016 (Analysezeitraum) mit einem Abfluss von  $350 \text{ m}^3/\text{s}$  durchgeführt, wobei der Simulationszeitraum bereits am 1.1.2016 (Einschwingzeit vom 1.1. – 4.5.2016) beginnt (Szenario „großer Tidehub“).

Der gewählte Abfluss ist der in dem betrachteten Zeitraum von 1995 bis 2019 am Pegel Neu Darchau am häufigsten eingetretene Wert (Klasse  $325 - 375 \text{ m}^3/\text{s}$ , dargestellt in Bild 7). Gleichzeitig kann dies als niedriger Abfluss angesehen werden, da in dem betrachteten Zeitraum nur ca. 15 % der Ereignisse darunter liegen. Dieses Vorgehen stellt die Vergleichbarkeit zu früheren Untersuchungen, z.B. Bundesanstalt für Wasserbau (2006), sicher.

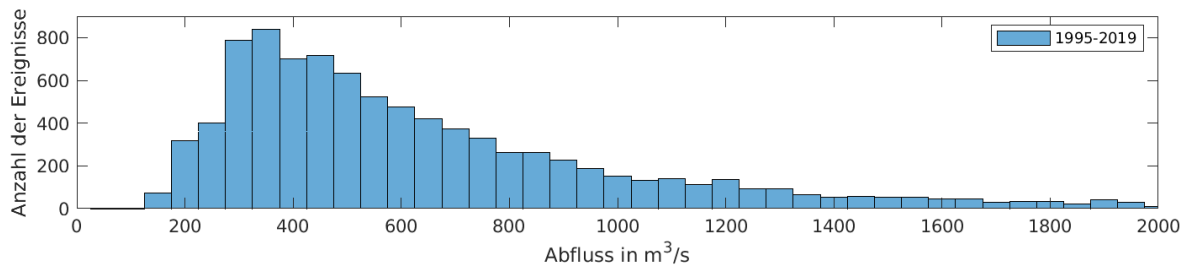


Bild 7: Häufigkeitsverteilung des Abflusses in Neu Darchau

Ältere Untersuchungen haben gezeigt, dass die ausbaubedingten Änderungen der Tidedynamik bei einem kleinen Tidehub geringer sind als bei einem großen Tidehub. Dies gilt jedoch nicht für die Dauern, die für den Wasseraustausch in einem Hafenbecken benötigt werden. Um die Forderung nach einer auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen sicher zu erfüllen, wird noch ein zweites Szenario mit einem erheblich kleineren Tidehub analysiert. Dieses Szenario ist der Spring-Nipp Zyklus vom 29.9. – 13.10.2016 (snz19), im Bild 8 in Grün dargestellt (Szenario „kleiner Tidehub“), welches nur hinsichtlich des Wasseraustausches in den betroffenen Hafenbecken untersucht wird.

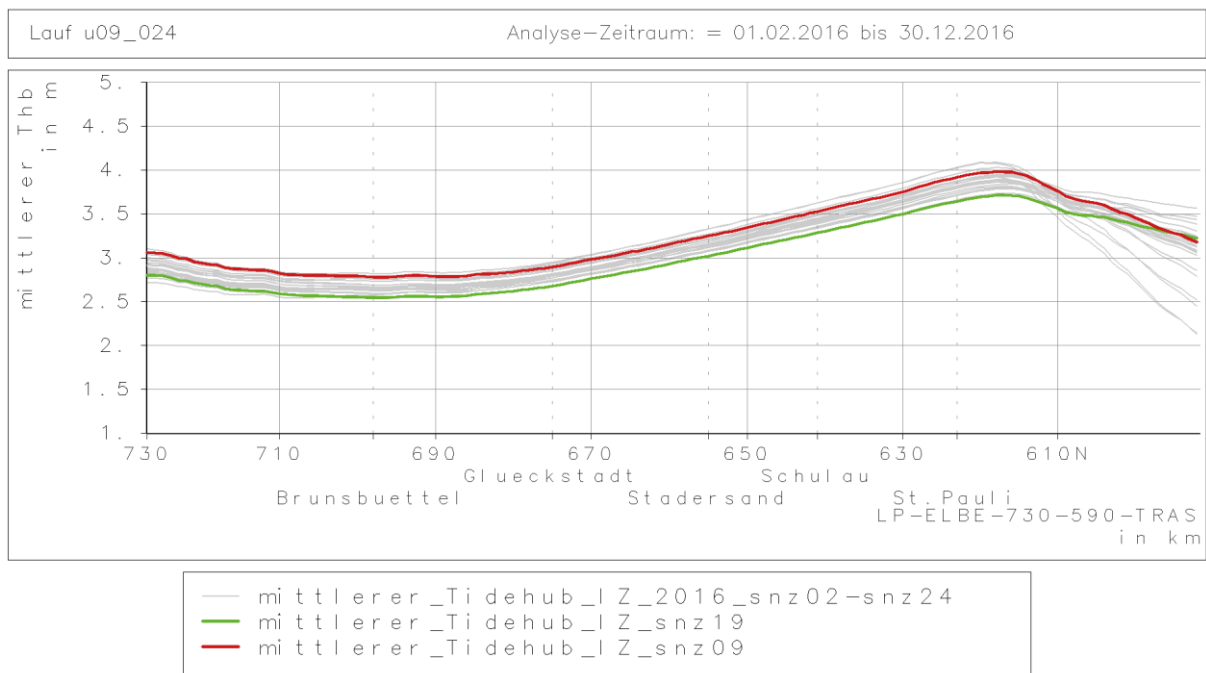


Bild 8: Mittlerer Tidehub im Ist-Zustand für 24 Spring-Nipp Szenarien im Jahr 2016 entlang der Fahrrinnenmitte von der Mündung bis zum Wehr bei Geesthacht. In Rot für das Szenario „großer Tidehub“, in Grün für Szenario „kleiner Tidehub“.

Im Folgenden werden ausgewählte Tidekennwerte (Mittelwerte über den Analysezeitraum) zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht als Liniengrafiken für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) und die Differenzen (SWS - PIZ) zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Ist-Zustand dargestellt. Die Profile verlaufen entlang der Mitte der Fahrwassertrasse und im Stromspaltungsgebiet durch die Norderelbe.

Konkrete Ergebniswerte für ausbaubedingte Änderungen werden im Text nur benannt, wenn sie einen messtechnisch zu erfassenden Schwellenwert überschreiten. Die gewählten Schwellenwerte sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

<b>Kenngröße</b>	<b>Schwellenwert</b>
$\Delta$ Wasserstand	1,0 cm
$\Delta$ Strömungsgeschwindigkeit	2,5 cm/s
$\Delta$ Salzgehaltskonzentration	0,2

*Tabelle 1: Gewählte Schwellenwerte der Tidekennwerte für die ausbaubedingten Änderungen*



## 4 Ergebnisse für das Spring-Nipp Szenario vom 4.5. – 19.5.2016, „großer Tidehub“

Im Folgenden ist häufig von Mittelwerten die Rede. Diese werden wie folgt gebildet: Das Spring-Nipp Szenario vom 4.5. bis zum 19.5.2016 führte an jedem Ort im Modellgebiet zu 28 vollständigen Tiden. Mit der Tidekennwertanalyse der BAW lässt sich an jedem Ort, für jede Tide und für jeden Parameter ein Wert berechnen (z.B. Tidehub oder maximale/mittlere/minimale Ebbestromgeschwindigkeit), mit dem danach für alle Tiden des Szenarios ein Mittelwert berechnet werden kann. Dementsprechend beinhaltet zum Beispiel die mittlere maximale Ebbestromgeschwindigkeit die über alle betrachteten Tiden gemittelten Werte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit jeder Tide. Die für diesen Zweck verwendeten Methoden sind in [http://wiki.baw.de/de/index.php5/Analyse der Berechnungsergebnisse](http://wiki.baw.de/de/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse) ausführlich beschrieben. Diese Kennwerte sind im Folgenden beschrieben und dargestellt.

### 4.1 Veränderungen des Wasserstandes

- **Tidehochwasser:** Das Tidehochwasser (Bild 9) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen ca. 1,1 m NHN und ca. 3,1 m NHN. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 1,45 m NHN und knapp über 2,6 m NHN. Die ausbaubedingte Änderung des mittleren Tidehochwassers (Bild 10) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Tideniedrigwasser:** Das Tideniedrigwasser (Bild 11) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen ca. -2,2 m NHN und ca. -0,1 m NHN. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. -1,8 m NHN und -0,4 m NHN. Die ausbaubedingte Änderung des mittleren Tideniedrigwassers (Bild 12) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Tidehub:** Der Tidehub (Bild 13) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen ca. 2,2 m und ca. 4,4 m. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 2,7 m und 4,0 m. Die ausbaubedingte Änderung des mittleren Tidehubes (Bild 14: Differenz des mittleren Tidehubes (SWS – PIZ).) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.

### 4.2 Veränderung der Strömungsverhältnisse

Im Folgenden werden Strömungsgeschwindigkeiten auf dem Längsprofil der Elbe dargestellt und beschrieben. Da diese Betrachtungsweise für den unmittelbaren Bereich des Ausbaus Steinwerder Süd nicht ausreichend ist, wird dieser Nahbereich auch flächenhaft dargestellt und beschrieben. Die ausbaubedingten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich haben ihre Ursache im Wesentlichen in der Vertiefung des Roßhafens und des Ellerholzhafens. Diese führt dazu, dass der durchströmte Querschnitt in den genannten Häfen größer wird und, da die einwirkende Tide nahezu unverändert ist, die Strömungsgeschwindigkeiten geringer werden. Am nördlichen Rand des im Ausbauzustand nicht mehr existierenden Oderhafens nimmt die Strömung zu. Gleichzeitig nimmt die Strömungsgeschwindigkeit im Ausbauzustand im Bereich des Ellerholzhafens zwischen dem Oderhafen und dem Vorhafen ab.



- **Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit:** Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 15) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen ca. 0,2 m/s und ca. 1,4 m/s. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 0,4 m/s und ca. 1,2 m/s. Die ausbaubedingte Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 16) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Mittlere Flutstromgeschwindigkeit:** Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Bild 17) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen 0,0 m/s (an der Flutstromgrenze) und ca. 1,2 m/s. Der Mittelwert bewegt sich zwischen 0,0 m/s und ca. 1,1 m/s. Die ausbaubedingte Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (Bild 18) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Maximale Ebbestromgeschwindigkeit:** Die mittlere maximale Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 19) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen ca. 0,4 m/s und ca. 2,2 m/s. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 0,5 m/s und ca. 1,9 m/s. Die ausbaubedingte Änderung der mittleren maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 20) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.

Die für die mittlere und mittlere maximale Ebbestromgeschwindigkeit im Vorangegangenen getroffenen Aussagen betreffen nur die Werte auf dem Längsprofil entlang der Elbe. Ausbaubedingte Änderungen mit einem Betrag oberhalb des Schwellenwertes gibt es jedoch im Bereich des Ellerholzhafens und im Übergangsbereich Ellerholzhafen zum Travehafen.

In Bild 23 ist der Mittelwert der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich des Ausbaus SWS flächenhaft für den PIZ dargestellt. Im Bereich des Vorhafens sowie seiner angrenzenden Hafenbecken liegt dieser Wert unter 0,2 m/s. Die ausbaubedingten Änderungen zu diesem Parameter sind in Bild 24 dargestellt. Sie betragen im Ellerholzhafen bis zu -0,05 m/s. Nördlich des Oderhöfts wird eine Abnahme von bis zu 0,1 m/s erreicht. Im Travehafen gibt es lokale Zu- und Abnahmen von bis zu 0,07 m/s. Im Bereich nördlich des im Ausbauzustand nicht mehr existierenden Oderhafens nimmt die maximale Ebbestromung um bis zu 0,07 m/s zu.

Die Ausdehnung der ausbaubedingten Änderungen der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit ist lokal stark begrenzt und ihr Betrag nur geringfügig oberhalb des Schwellenwertes.

- **Maximale Flutstromgeschwindigkeit:** Die mittlere maximale Flutstromgeschwindigkeit (Bild 21) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und dem Wehr bei Geesthacht während des Analysezeitraumes zwischen 0,0 m/s (an der Flutstromgrenze) und ca. 1,9 m/s. Der Mittelwert bewegt sich zwischen 0,0 m/s und ca. 1,6 m/s. Die ausbaubedingte Änderung der mittleren maximalen Flutstromgeschwindigkeit (Bild 22) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.

Die für die mittlere und mittlere maximale Flutstromgeschwindigkeit im Vorangegangenen getroffenen Aussagen betreffen nur die Werte auf dem Längsprofil entlang der Elbe. Ausbaubedingte Änderungen mit einem Betrag oberhalb des Schwellenwertes gibt es jedoch im Bereich des Roßhafens, des Ellerholzhafens und im Übergangsbereich Ellerholzhafen zum Travehafen.

In Bild 25 ist der Mittelwert der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im Bereich des Ausbaus SWS flächenhaft für den PIZ dargestellt. Im Bereich des Vorhafens sowie seiner angrenzenden Hafenbecken liegt dieser Wert großflächig unter 0,2 m/s, nur am Eingang zum Travehafen treten Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 0,4 m/s auf. Die ausbaubedingten Änderungen zu diesem Parameter sind in Bild 26 dargestellt. Sie bleiben im Roßhafen unter 0,03 m/s, im Ellerholzhafen betragen sie bis zu 0,1 m/s. Im Übergangsbereich vom Ellerholzhafen zum Travehafen wird eine Abnahme von bis zu 0,3 m/s erreicht. Im Travehafen gibt es lokale Zu- und Abnahmen von bis zu 0,1 m/s. Im Bereich nördlich des im Ausbauzustand nicht mehr existierenden Oderhafens nimmt die maximale Flutströmung um bis zu 0,07 m/s zu.

Der Betrag der ausbaubedingten Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit ist geringer als der der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten und deren räumliche Ausdehnung ist kleiner. Sie bleiben im Roßhafen und Ellerholzhafen unter 0,03 m/s. Im Übergangsbereich vom Ellerholzhafen zum Travehafen treten lokale Änderungen von bis zu 0,13 m/s auf. Im übrigen Bereich des Travehafens gibt es lokale Zu- und Abnahmen von bis zu 0,03 m/s. Im Bereich nördlich des im Ausbauzustand nicht mehr existierenden Oderhafens nimmt die maximale Flutströmung um bis zu 0,03 m/s zu.

#### 4.3 Veränderung der Salzgehaltsverhältnisse

- **Maximaler Salzgehalt:** Der mittlere maximale Salzgehalt (Bild 27) schwankt zwischen Elbe-Km 756 und ca. 640 während des Analysezeitraumes zwischen 30 und 0,4. Der Mittelwert bewegt sich zwischen 29 und 0,4. Die ausbaubedingte Änderung des mittleren maximalen Salzgehalts (Bild 28) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Minimaler Salzgehalt:** Der minimale Salzgehalt (Bild 29) schwankt zwischen den Elbe-Km 756 und ca. 660 während des Analysezeitraumes zwischen ca. 27 und 0,4. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 26 und 0,4. Die ausbaubedingte Änderung des mittleren minimalen Salzgehalts zwischen den Elbe-Km 756 und Elbe-Km 660 (Bild 30) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Mittlerer Salzgehalt:** Der mittlere Salzgehalt (Bild 31) schwankt zwischen den Elbe-Km 756 und ca. 650 während des Analysezeitraumes zwischen ca. 29 und 0,4. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 28 und 0,4. Die ausbaubedingte Änderung des gemittelten mittleren Salzgehalts zwischen den Elbe-Km 756 und Elbe-Km 650 (Bild 32) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.
- **Salzgehaltsvariation:** Die Salzgehaltsvariation (Bild 33) schwankt zwischen den Elbe-Km 756 und ca. 640 während des Analysezeitraumes zwischen ca. 12 und 0. Der Mittelwert bewegt sich zwischen ca. 10 und 0. Die ausbaubedingte Änderung der mittleren Salzgehaltsvariation zwischen den Elbe-Km 756 und 640 (Bild 34) ist dem Betrage nach kleiner als der Schwellenwert.

#### 4.4 Veränderung der Schwebstofftransportverhältnisse

Die hier relevante Größe des Schwebstofftransports ist dessen mittlerer advektiver Rest-Transport. Dieser ist für das berechnete Szenario in der gesamten Unterelbe stromauf gerichtet

(zwischen Elbe-Km 756 und 620). Seine räumliche Divergenz macht sich teilweise im Entstehen von Mindertiefen bemerkbar. Seine Größe ist für das gewählte Spring-Nipp-Szenario im Bereich des Vorhafens in Bild 35 dargestellt.

Ausbaubedingt wird der mittlere advektive Rest-Transport nicht signifikant verändert (Bild 36).

#### **4.5 Veränderung der Sedimentation**

Die in der Elbe auftretende Sedimentation / Erosion ist zeitlich und räumlich sehr variabel, wobei insbesondere der Oberwasserzufluss für den Bereich des Hamburger Hafens eine sehr wirksame Einflussgröße ist.

Das Vorgehen hinsichtlich der Untersuchung der Sedimentation / Erosion in der durchgeführten Simulation war folgendermaßen:

Die Berechnung des PIZ und des SWS startete jeweils am 1.1.2016 und endete am 31.12.2016.

In Analogie zum Auswertezeitraum der bisher beschriebenen Tidekennwerte erstreckt sich der Auswertezeitraum in Bezug auf die ausbaubedingten Änderungen der Sedimentation / Erosion.

Die für den PIZ dargestellte Sedimentation / Erosion bezieht sich entsprechend auf die Zeitspanne vom 4.5. bis zum 19.5.2016.

Der in Bild 37 dargestellte Zustand der Sedimentation / Erosion im Bereich des Stromspaltungsgebietes zeigt in roter Farbe die bekannten Sedimentationsgebiete im Köhlbrand sowie vor und im Vorhafen, wo im Auswertezeitraum bis zu 7,5 cm sedimentiert sind.

Bild 38 zeigt keine signifikanten ausbaubedingten Veränderungen der Sedimentation im Untersuchungsgebiet. Insgesamt werden die Maßnahmen des Ausbaus SWS nicht zu einem erhöhten Unterhaltungsaufwand in der Unterelbe führen.

#### **4.6 Auswirkungen auf den Wasseraustausch im Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Hafenbecken**

Der Travehafen, der Oderhafen, der Ellerholzhafen, der Roßhafen und der nördlich davon gelegene Vorhafen sind einerseits nördlich mit der Norderelbe, als auch über den Roßkanal und den Köhlbrand mit der Unterelbe verbunden. Durch den Ausbau Steinwerder Süd werden die Wassertiefen und das Volumen nur geringfügig verändert. Aufgrund der breiteren Anbindung des Travehafens an den Ellerholzhafen hat der Umbau Auswirkungen auf den Austausch des in den genannten Häfen befindlichen Wassers, der dadurch weniger lange als im PIZ dauert. Das bewirkt, dass die Aufenthaltszeit des Wassers in den genannten Hafenbecken kürzer wird.

Die BAW hat diese Auswirkung untersucht, indem in jeweils abgegrenzten Bereichen (in Bild 39 bis Bild 41 rot markiert) das dort vorhandene Wasser mit einem künstlichen passiven Tracer mit einer Konzentration von 100 % markiert wurde. Der Rest des Simulationsgebietes ist nicht markiert und hat daher die Konzentration von 0 %. Nach Simulationsbeginn vermischt sich das markierte mit dem unmarkierten Wasser, so dass die Konzentration des markierten Wassers in dem untersuchten Bereich geringer wird, während sich das markierte Wasser gleichzeitig auf einen größeren Bereich verteilt. Die Simulation wird, wie für alle anderen Parameter auch, auf dem hochaufgelösten Gitternetz des Hamburger Hafens und der angrenzenden Gebiete vorgenommen. Für die Auswertung dieses Parameters wird jedoch mit NCAGGREGATE

(<http://wiki.baw.de/de/index.php/NCAGGREGATE>) für den jeweils abgegrenzten Bereich ein räumlicher Mittelwert gebildet, so dass eine qualifizierte Aussage für die einzelnen Hafenbecken möglich wurde. Ein Vergleich zwischen PIZ und SWS ergibt dann die Veränderung des Wasseraustausches in den jeweiligen Gebieten.

In Bild 39 ist die Entwicklung der Tracerkonzentration für den planerischen Ist-Zustand sowie für den Ausbau Steinwerder Süd wie oben beschrieben für das Szenario „großer Tidehub“ dargestellt. Die für die Verdünnung (50 %, 20 %, 10 %) der anfangs vorhandenen Tracerkonzentration (100 %) notwendige Dauer (in Stunden) ist in Tabelle 2 für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) und für den Ausbau Steinwerder Süd (SWS) eingetragen. In der 4. Spalte der Tabelle kann die ausbaubedingte Veränderung abgelesen werden.

Tracerkonzentration	PIZ [h]	SWS [h]	Veränderung [h]
50%	41,33	41,00	-0,33
20%	116,50	112,00	-4,50
10%	171,67	161,67	-10,00

*Tabelle 2: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Häfen für den PIZ und SWS*

Die Dauer des Wasseraustausches für den Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Häfen, nach der 90 % des Wassers ausgetauscht worden sind, wird also durch den Ausbau SWS für das Szenario „großer Tidehub“ um ca. 6 % verkürzt.

Um die Wirkung des Ausbaus Steinwerder Süd auf den Wasseraustausch des Ellerholzhafens, des Oderhafens und des Travehafens zu ermitteln, wird dafür das Wasser nur in diesem Gebiet markiert und die Simulation unter den oben beschriebenen Bedingungen durchgeführt. Die Entwicklung dieser Untersuchung ist in Bild 40 dargestellt. Die für die Verdünnung (50 %, 20 %, 10 %) der anfangs vorhandenen Tracerkonzentration (100 %) notwendige Dauer (in Stunden) ist in Tabelle 3 für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) und für den Ausbau Steinwerder Süd (SWS) eingetragen. In der 4. Spalte der Tabelle kann die ausbaubedingte Veränderung abgelesen werden.

Tracerkonzentration	PIZ [h]	SWS [h]	Veränderung [h]
50%	57,50	46,83	-10,67
20%	133,33	116,00	-17,33
10%	184,17	153,17	-31,00

*Tabelle 3: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Ellerholzhafens, des Oderhafens und des Travehafens für den PIZ und SWS*

Die Dauer des Wasseraustausches für den Bereich des Ellerholzhafens, des Oderhafens und des Travehafens, bei der 90 % des Wassers ausgetauscht worden sind, wird also durch den Ausbau SWS für das Szenario „großer Tidehub“ um ca. 17 % verkürzt.

Um die Wirkung des Ausbaus Steinwerder Süd auf den Wasseraustausch des Travehafens zu ermitteln, wird dafür das Wasser nur in diesem Gebiet markiert und die Simulation unter den oben beschriebenen Bedingungen durchgeführt. Die Entwicklung dieser Untersuchung ist in Bild 41 dargestellt. Die für die Verdünnung (50 %, 20 %, 10 %) der anfangs vorhandenen Tracerkonzentration (100 %) notwendige Dauer (in Stunden) ist in Tabelle 4 für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) und für den Ausbau Steinwerder Süd (SWS) eingetragen. In der 4. Spalte der Tabelle kann die ausbaubedingte Veränderung abgelesen werden.

Tracerkonzentration	PIZ [h]	SWS [h]	Veränderung [h]
50%	22,50	18,50	-4,00
20%	102,83	70,83	-32,00
10%	156,50	117,83	-38,67

*Tabelle 4: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Travehafens für den PIZ und SWS*

Die Dauer des Wasseraustausches für den Bereich des Travehafens, bei der 90% des Wassers ausgetauscht worden sind, wird also durch den Ausbau SWS für das Szenario „großer Tidehub“ um ca. 25 % verkürzt.

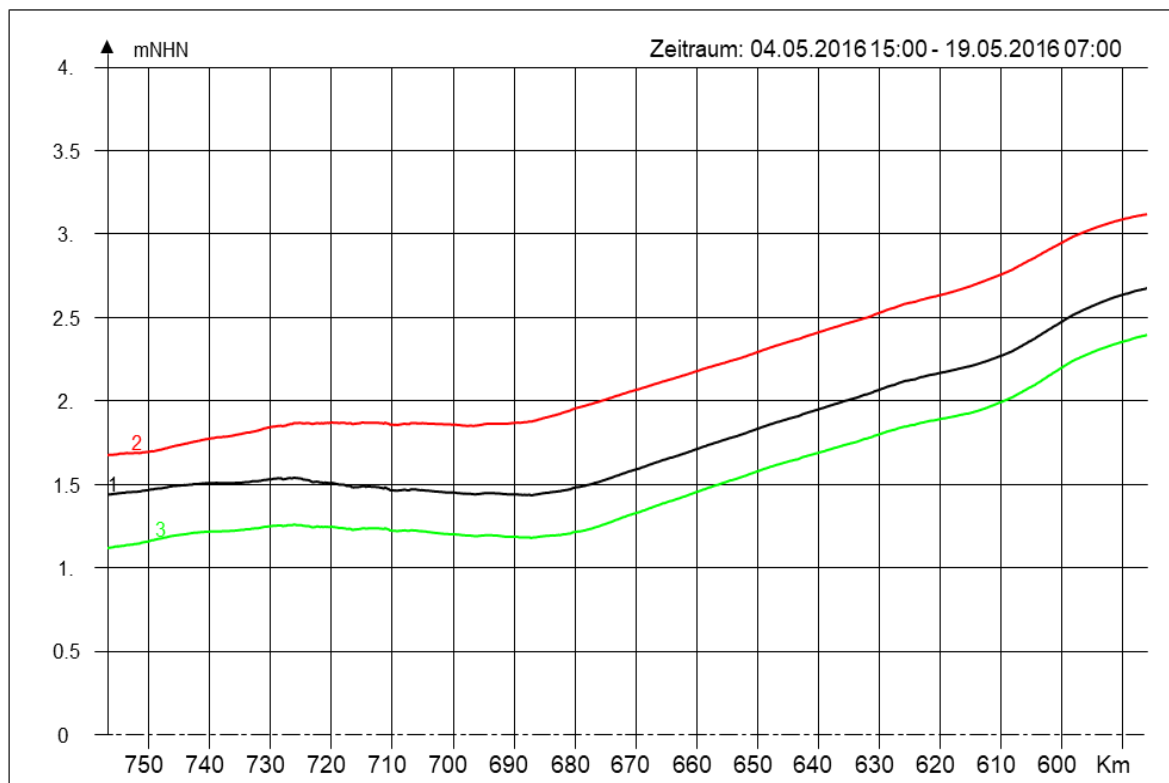


Bild 9: Tidehochwasser für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das maximale, in Grün das minimale und in Schwarz das mittlere Tidehochwasser

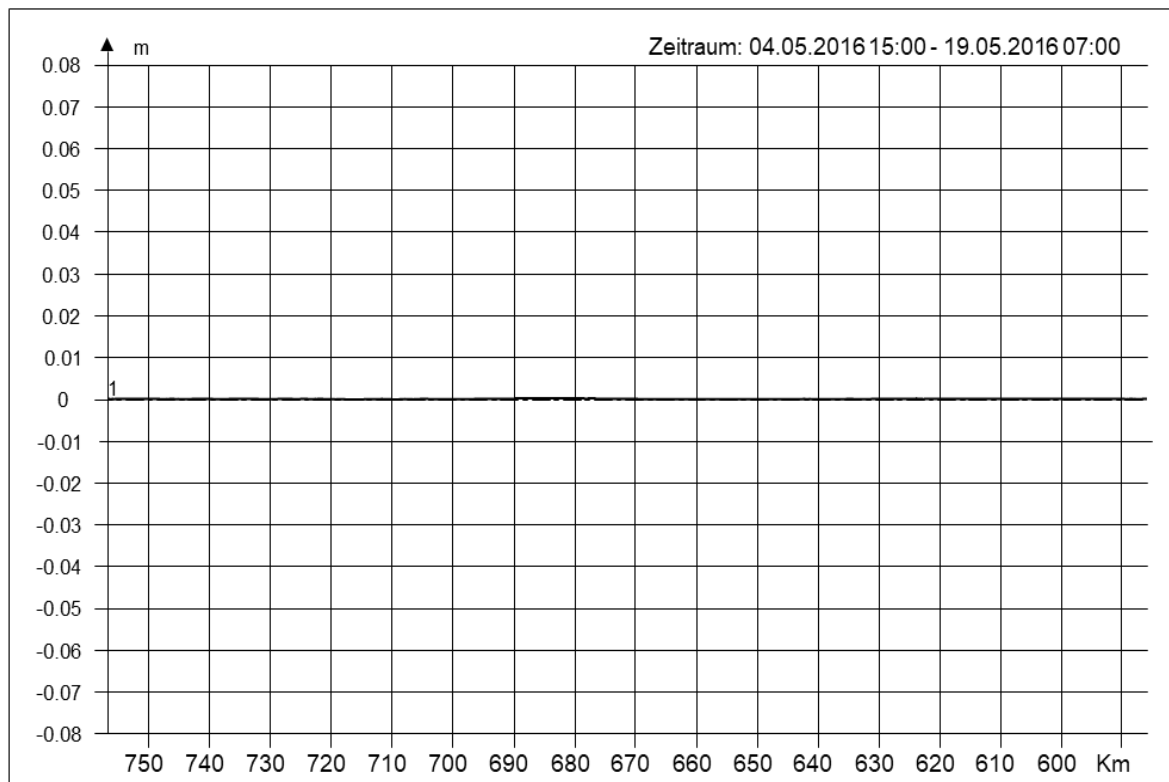


Bild 10: Differenz des mittleren Tidehochwassers (SWS – PIZ).

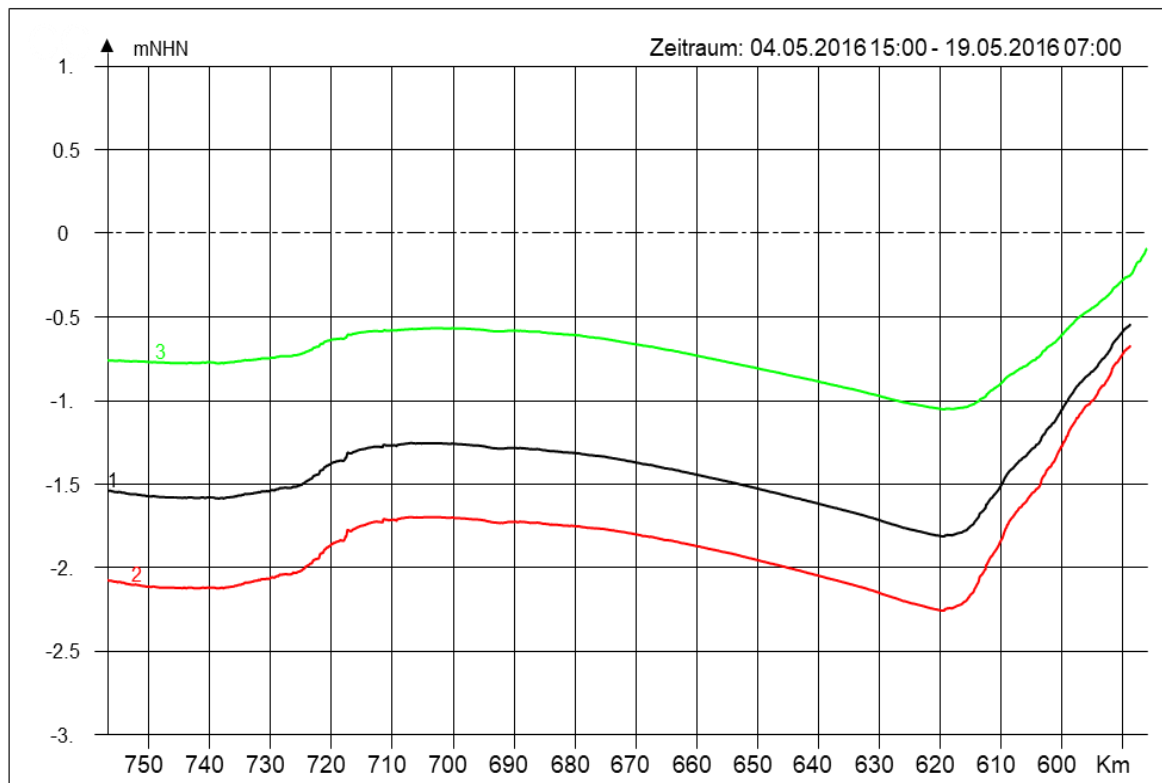


Bild 11: Tideniedrigwasser für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das maximale, in Grün das minimale und in Schwarz das mittlere Tideniedrigwasser.

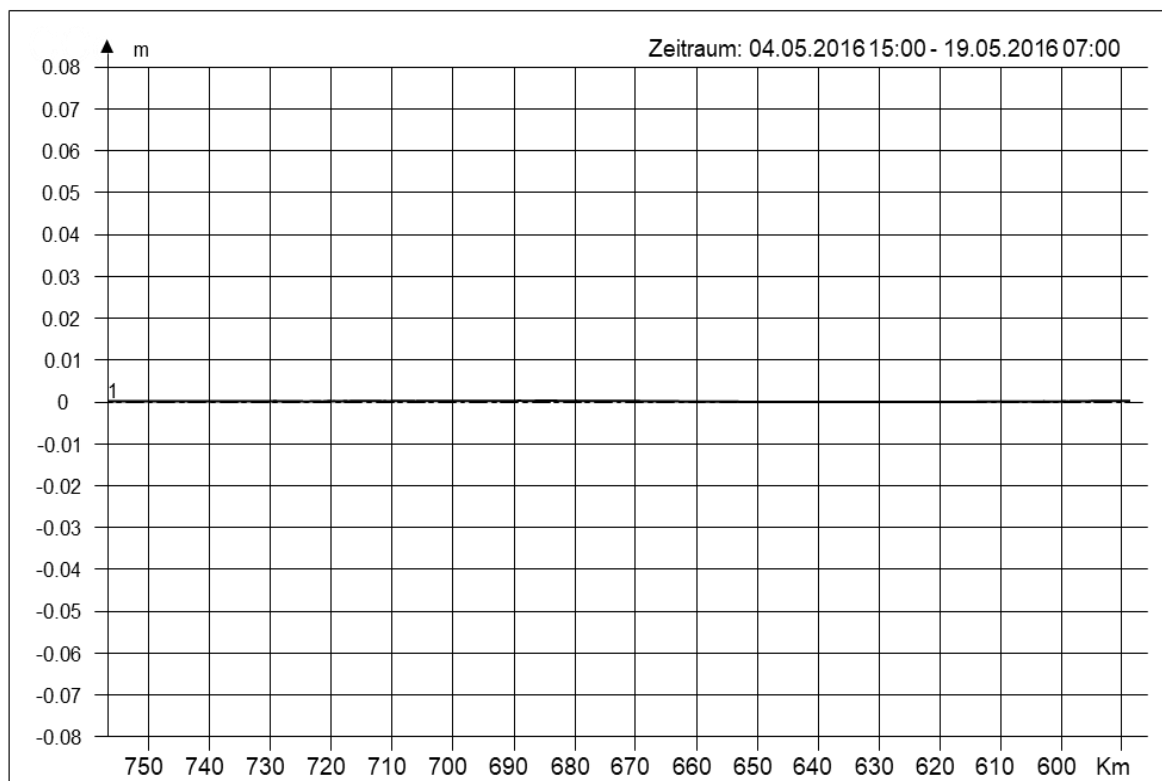


Bild 12: Differenz des mittleren Tideniedrigwassers (SWS – PIZ).

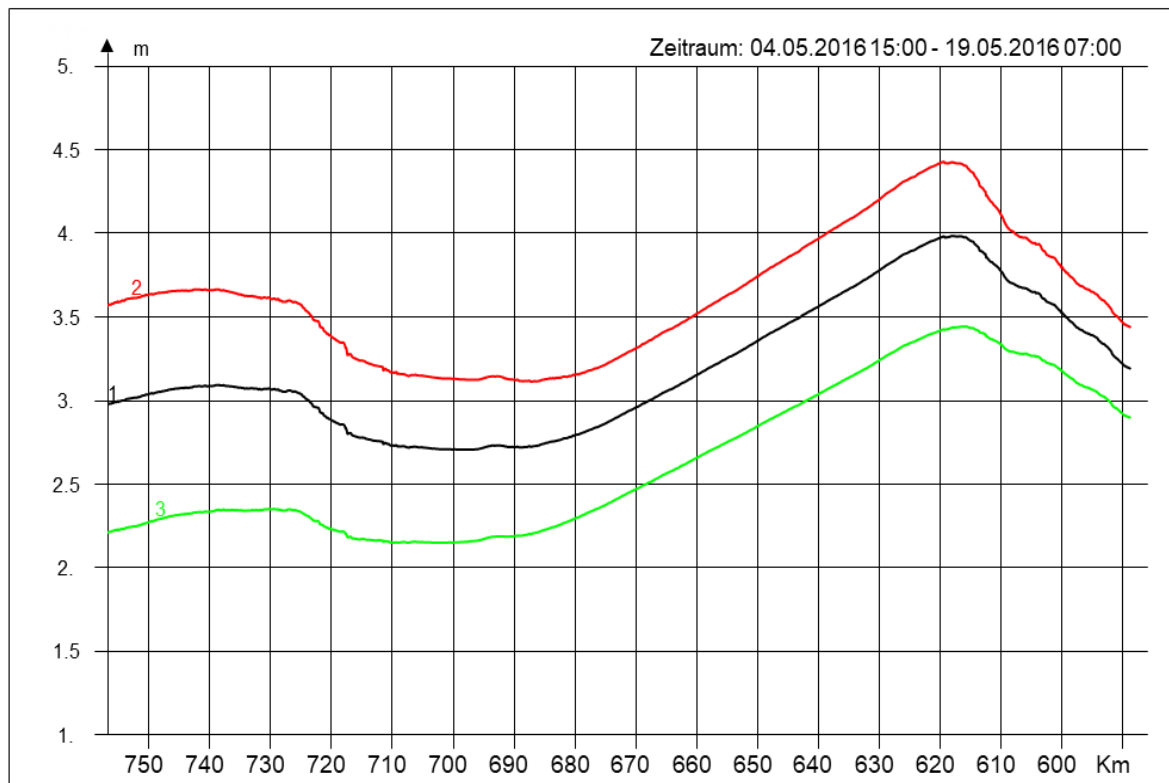


Bild 13: Tidehub für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot der maximale, in Grün der minimale und in Schwarz der mittlere Tidehub.

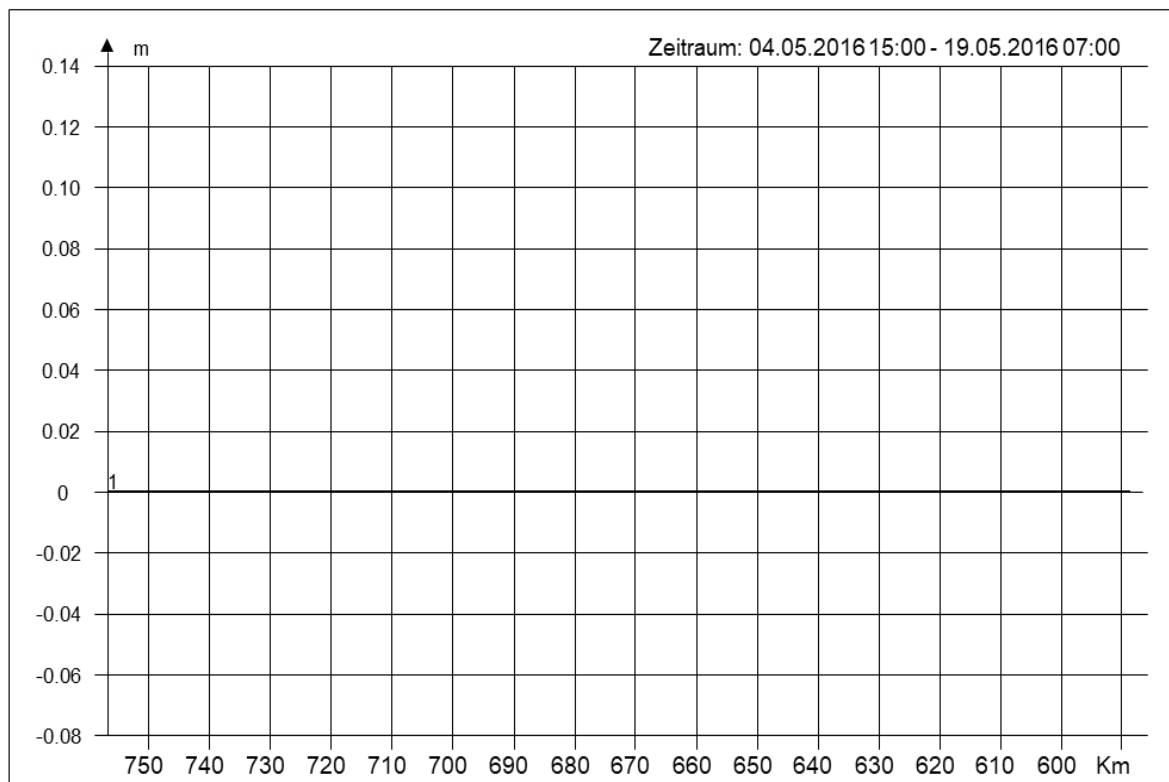


Bild 14: Differenz des mittleren Tidehubes (SWS – PIZ).



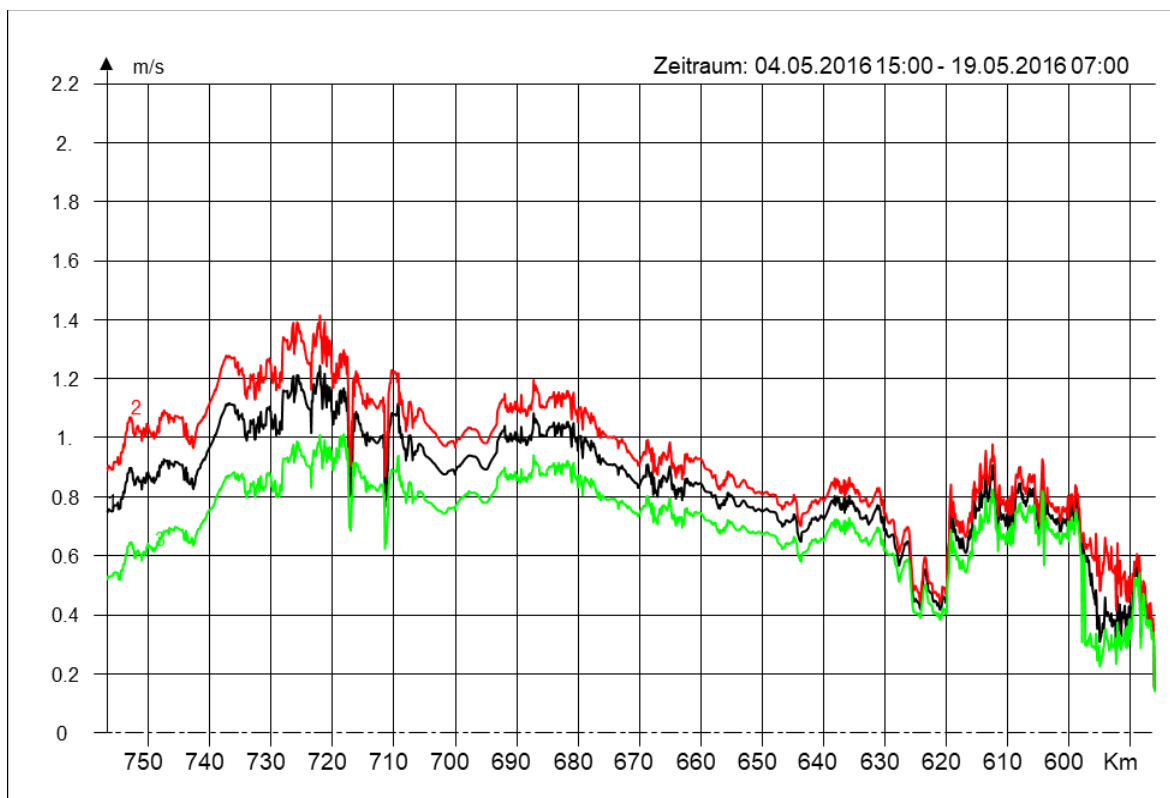


Bild 15: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit.

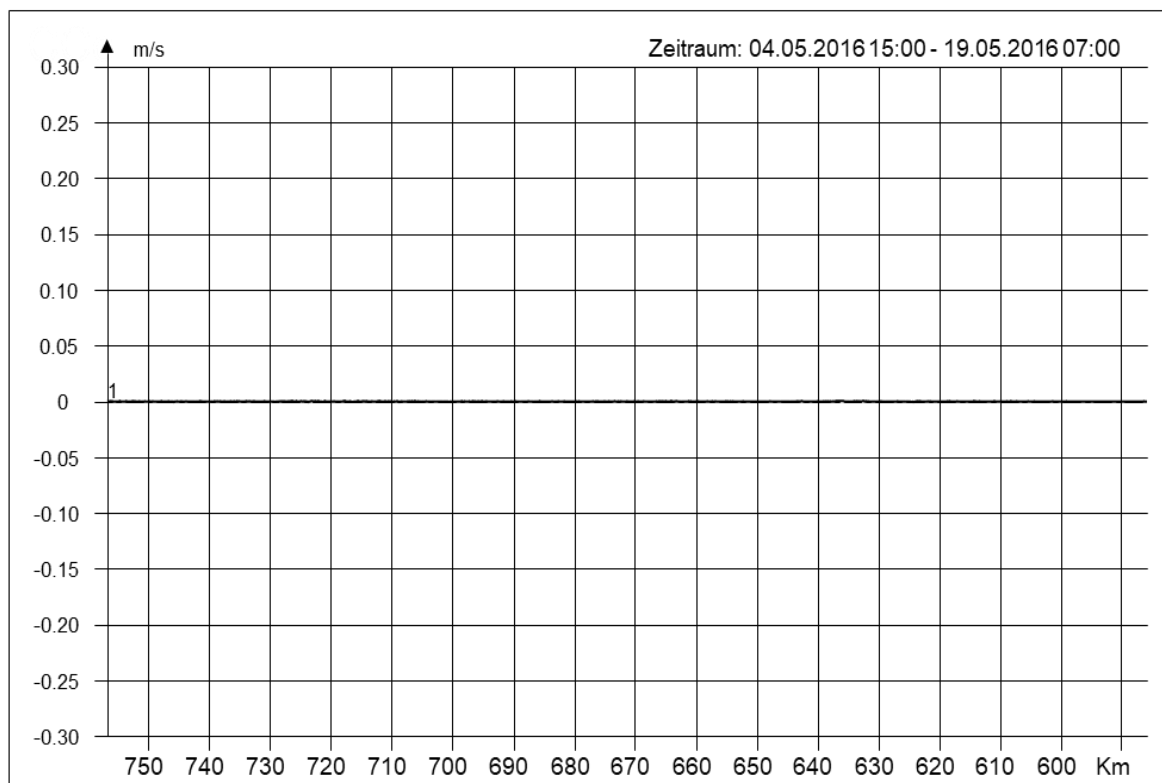


Bild 16: Differenz der Mittelwerte der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (SWS - PIZ).

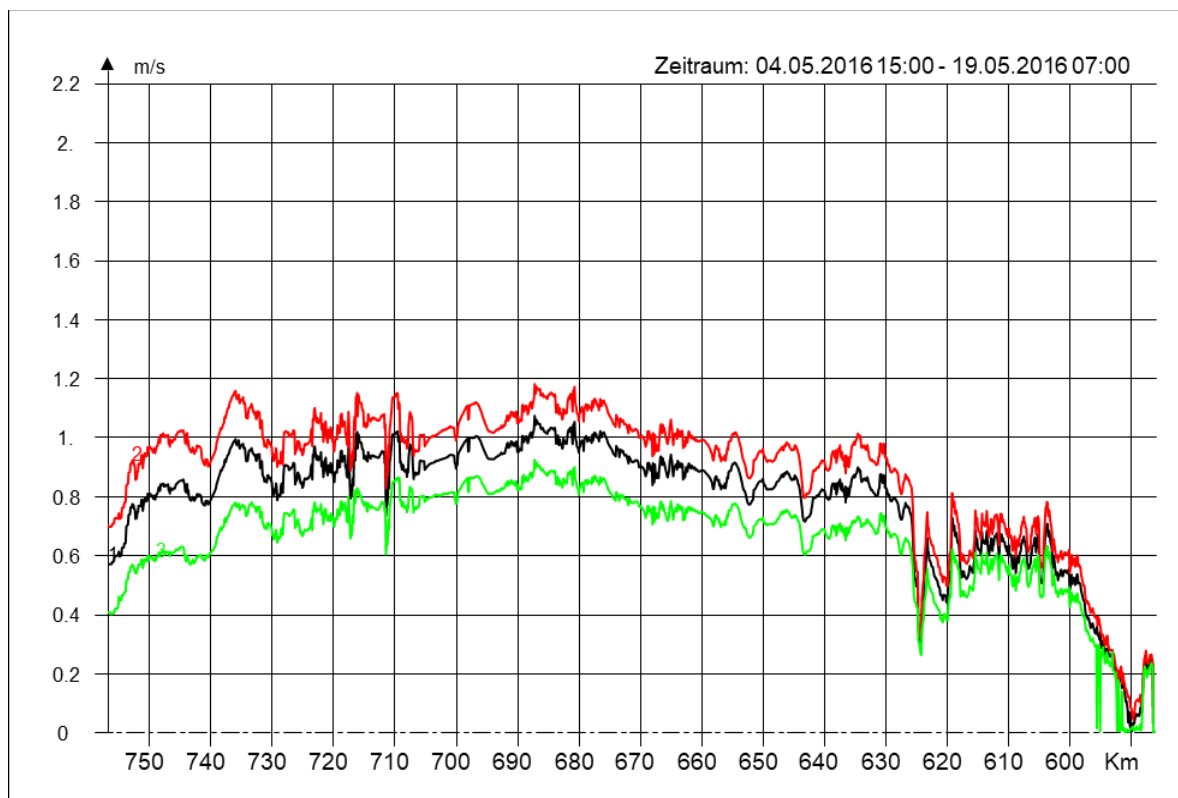


Bild 17: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der mittleren Flutstromgeschwindigkeit.

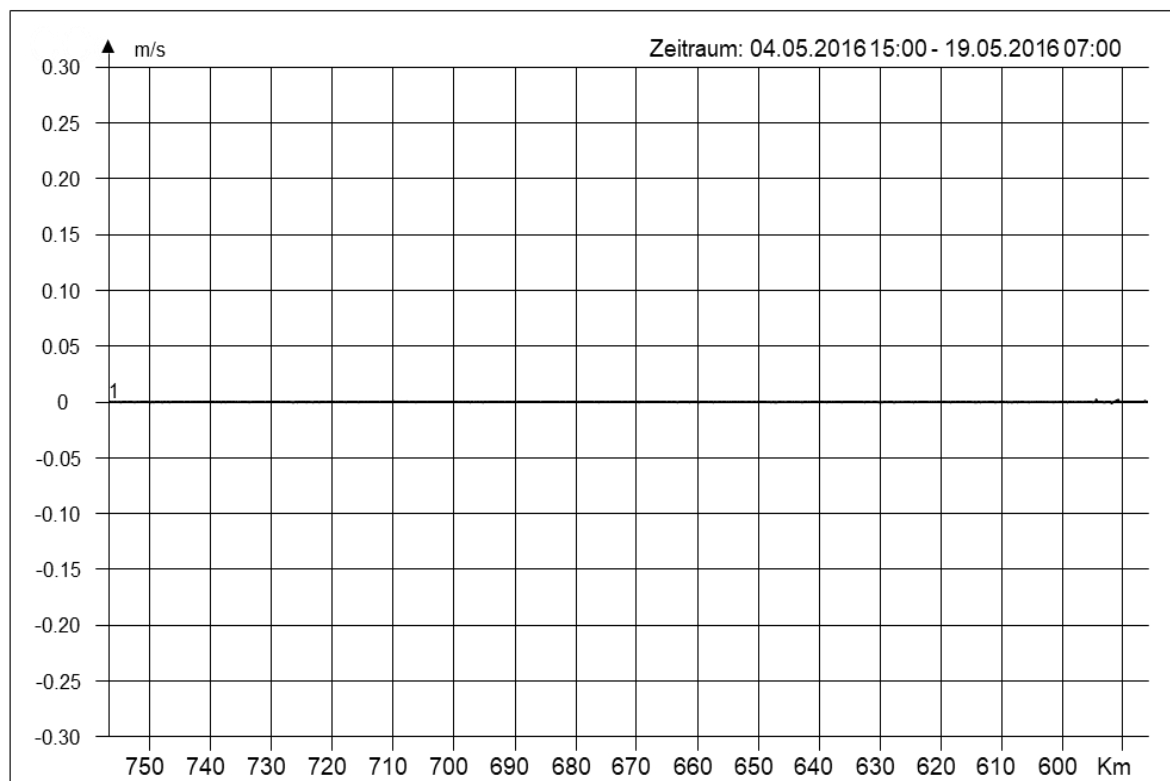


Bild 18: Differenz der Mittelwerte der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).

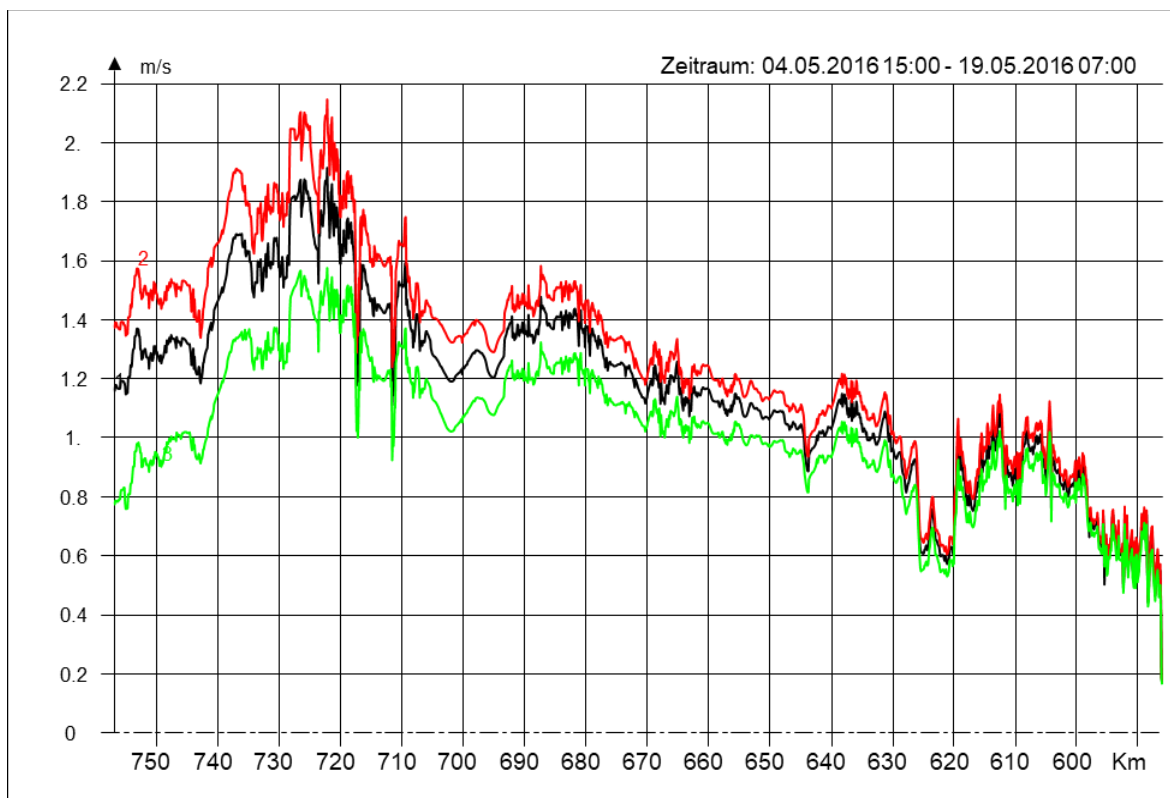


Bild 19: Maximale Ebbestromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit.

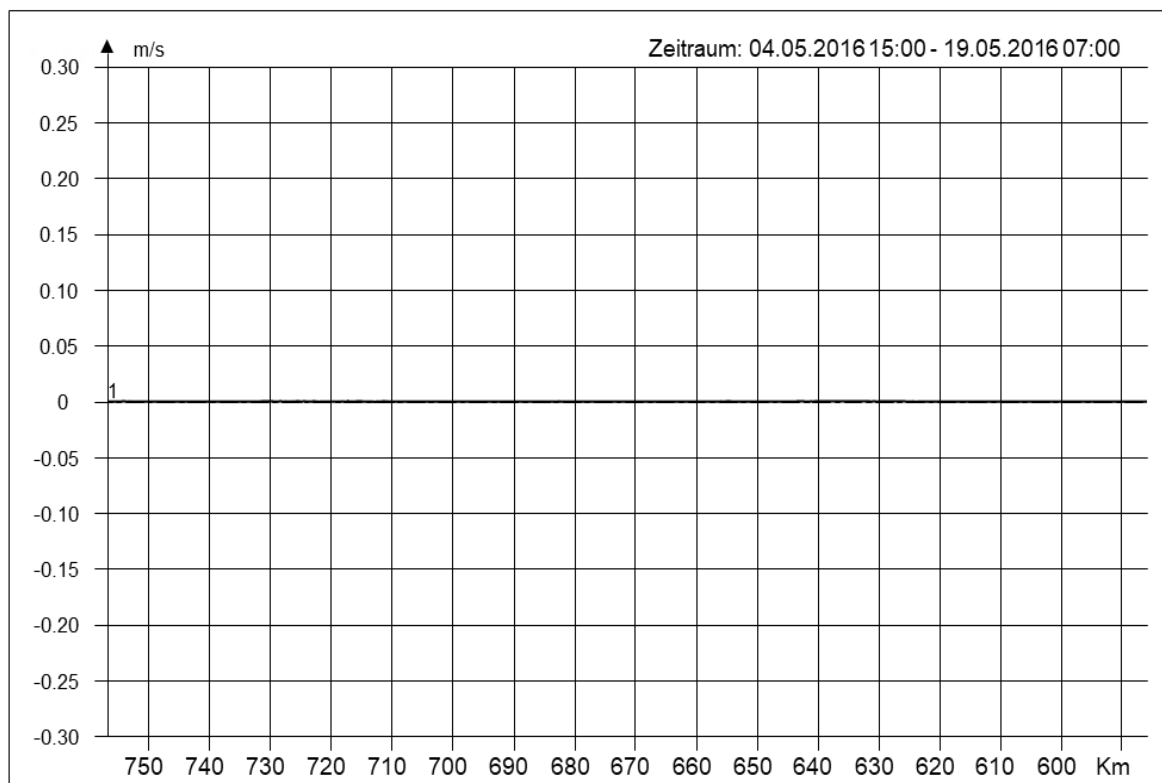


Bild 20: Differenz der Mittelwerte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).

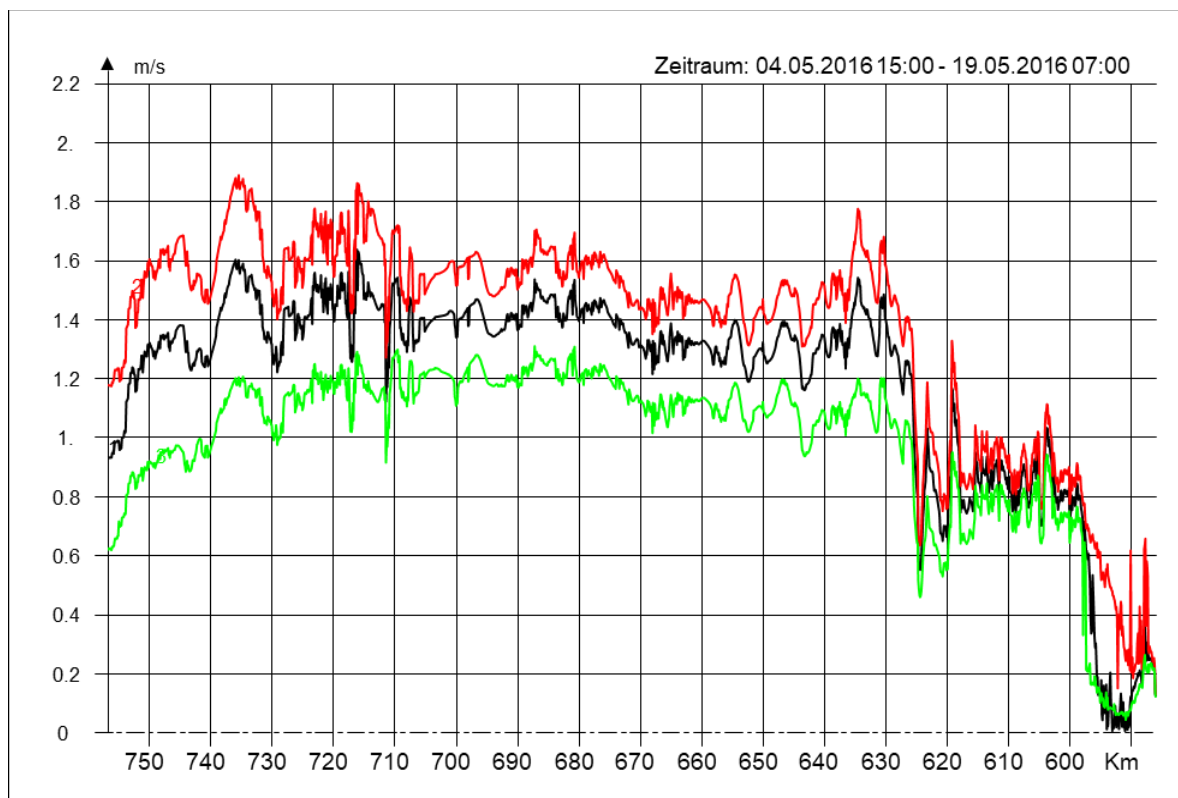


Bild 21: Maximale Flutstromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der maximalen Flutstromgeschwindigkeit.

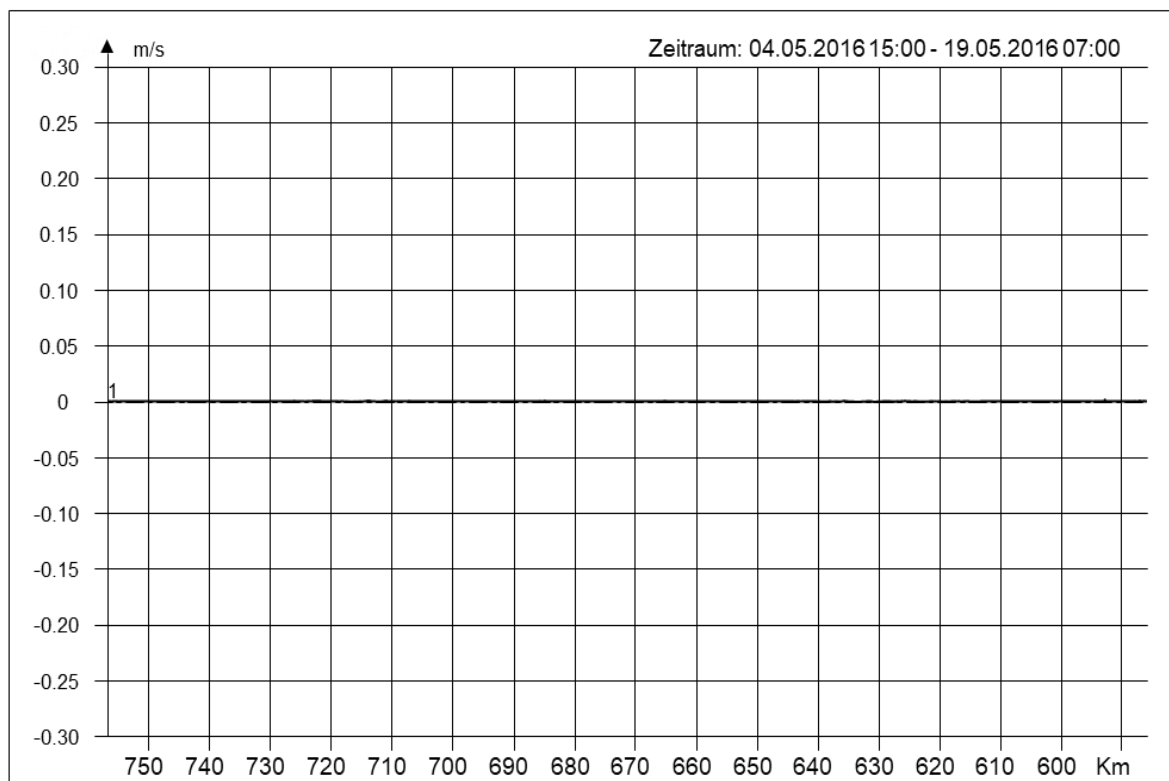


Bild 22: Differenz der Mittelwerte der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).

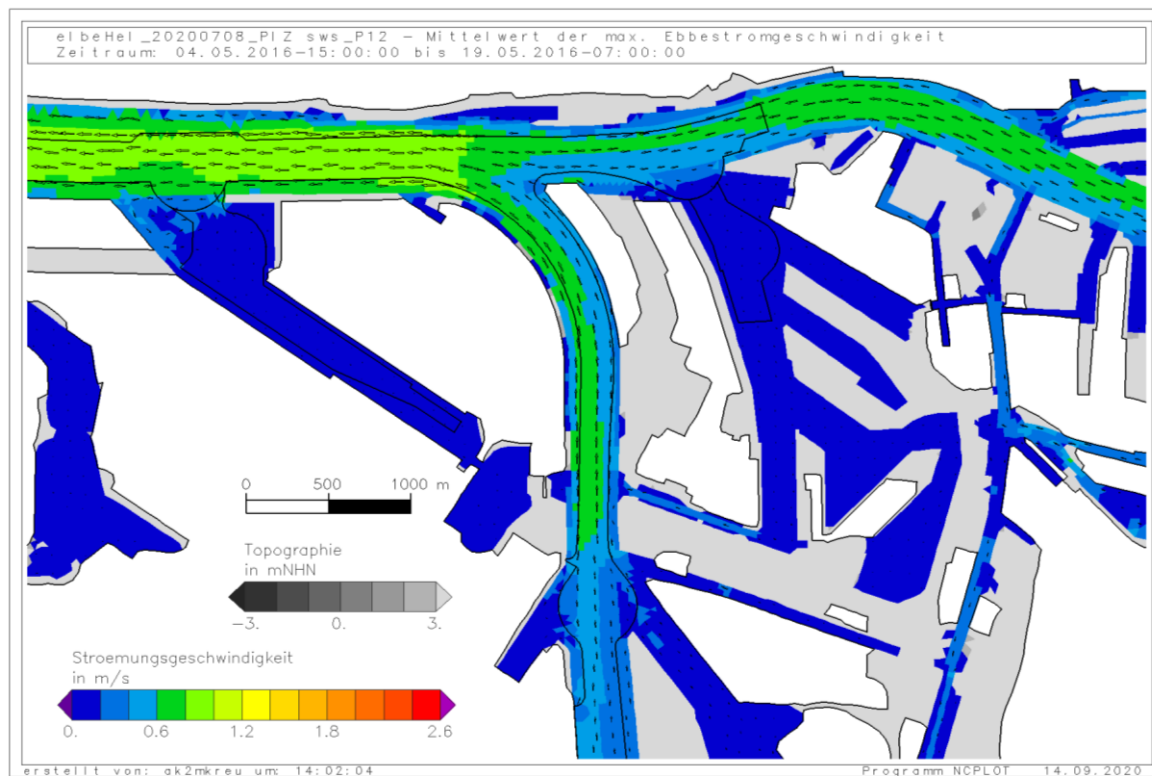


Bild 23: Mittelwert der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ).

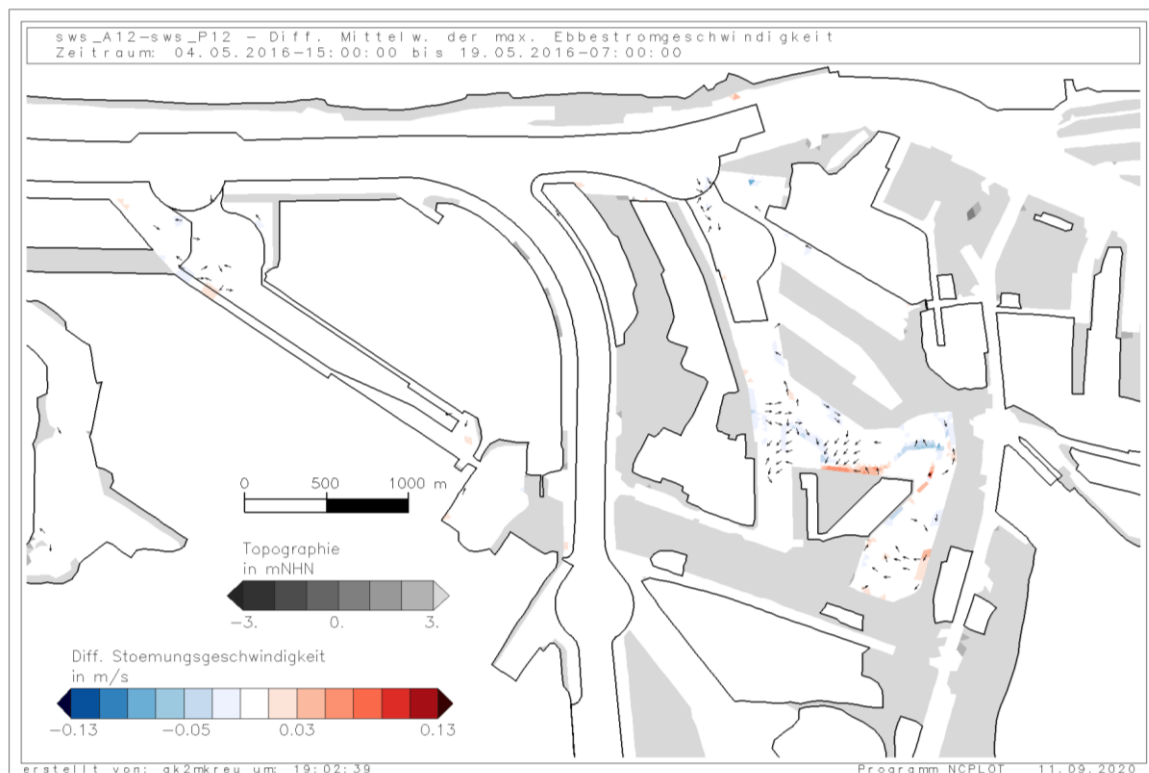


Bild 24: Differenz der Mittelwerte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).

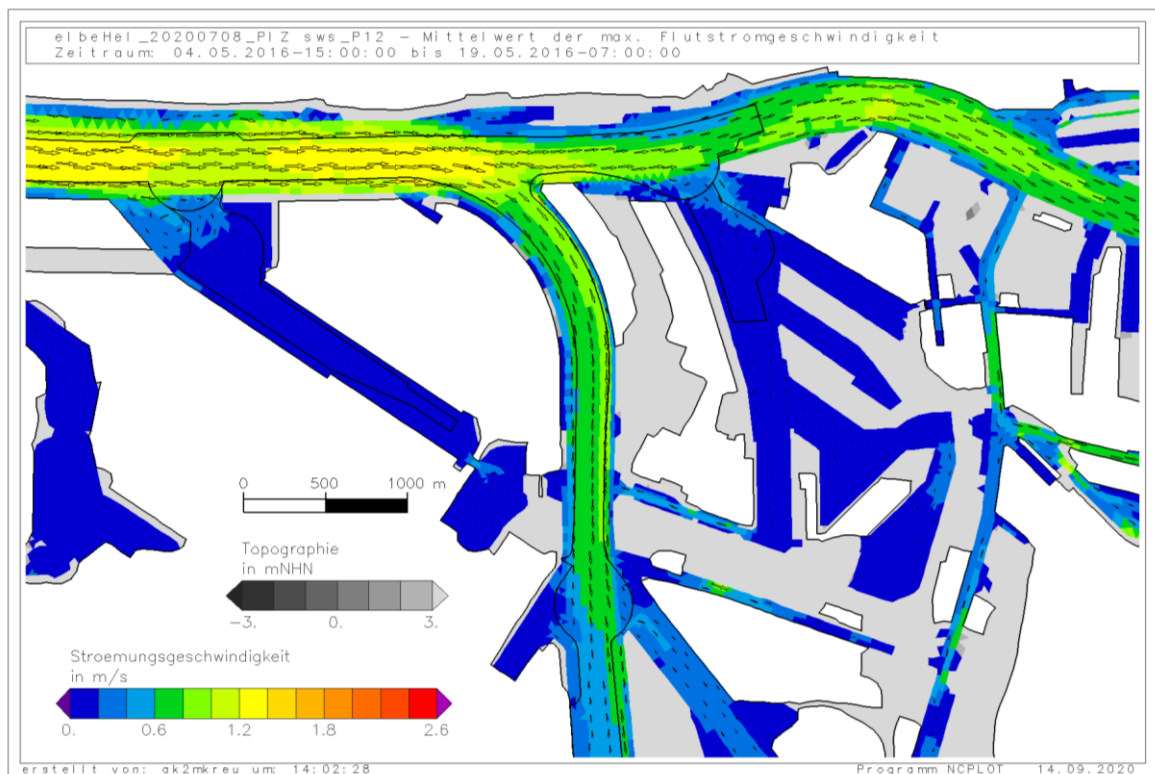


Bild 25: Mittelwert der maximalen Flutstromgeschwindigkeit für den planerischen Ist-Zustand (PIZ).

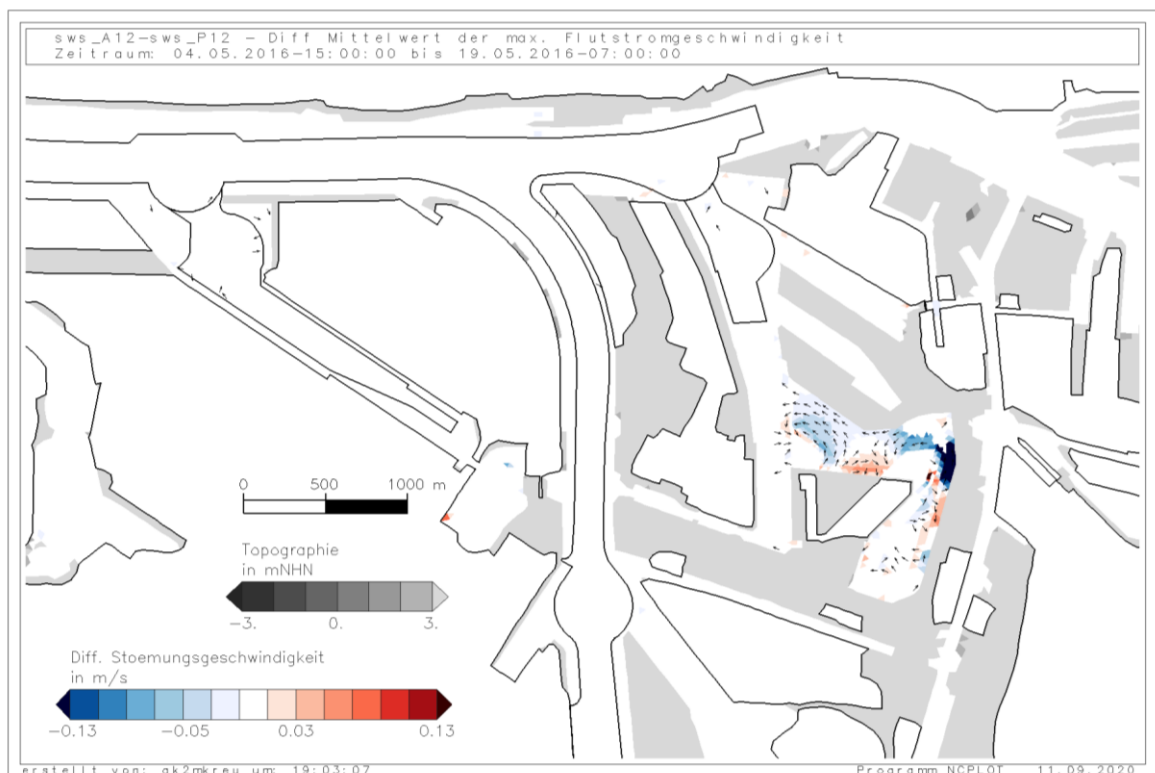


Bild 26: Differenz der Mittelwerte der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (SWS – PIZ).

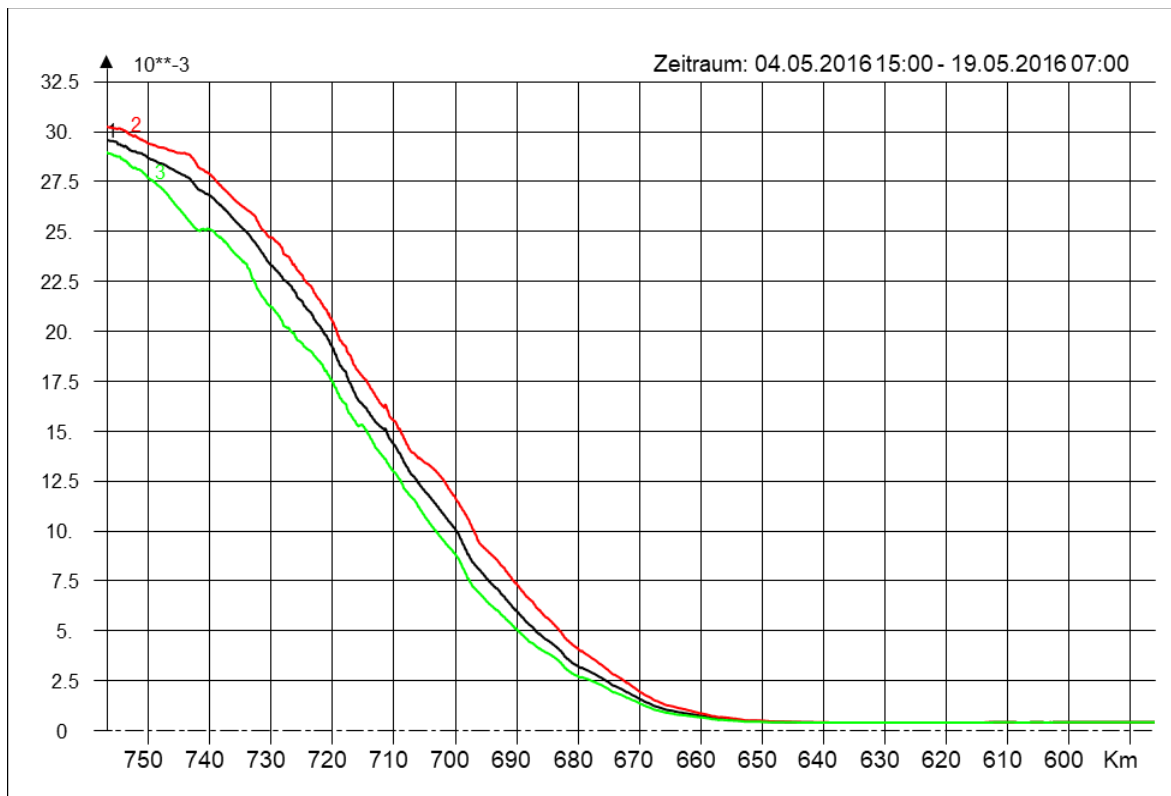


Bild 27: Maximaler Salzgehalt für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert des maximalen Salzgehalts.

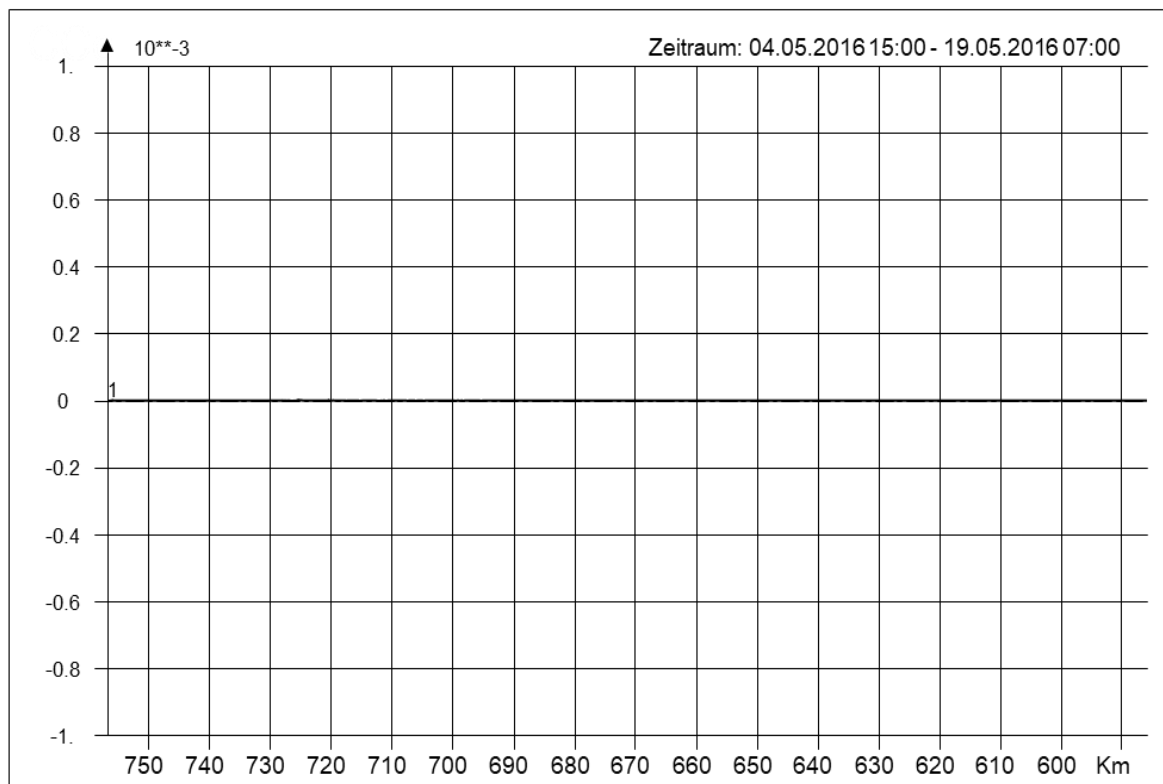


Bild 28: Differenz der Mittelwerte des maximalen Salzgehalts (SWS – PIZ).

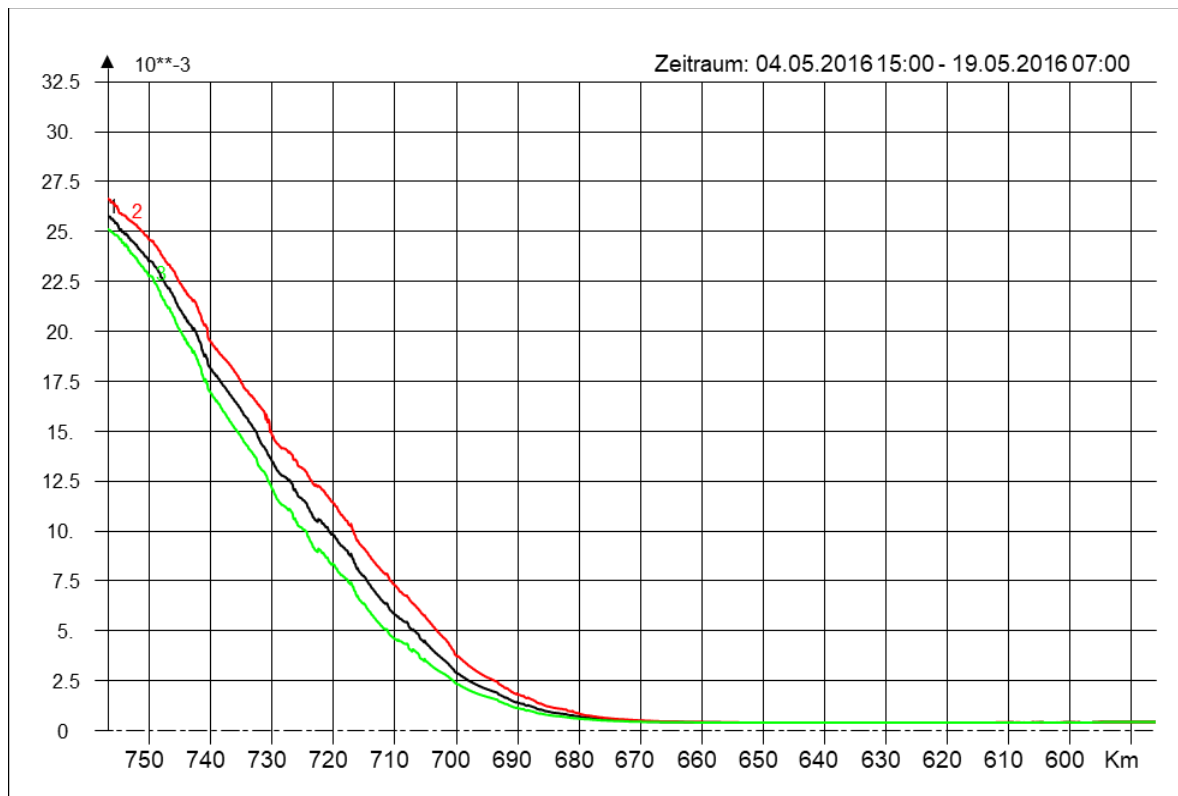


Bild 29: Minimaler Salzgehalt für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert des minimalen Salzgehalts.

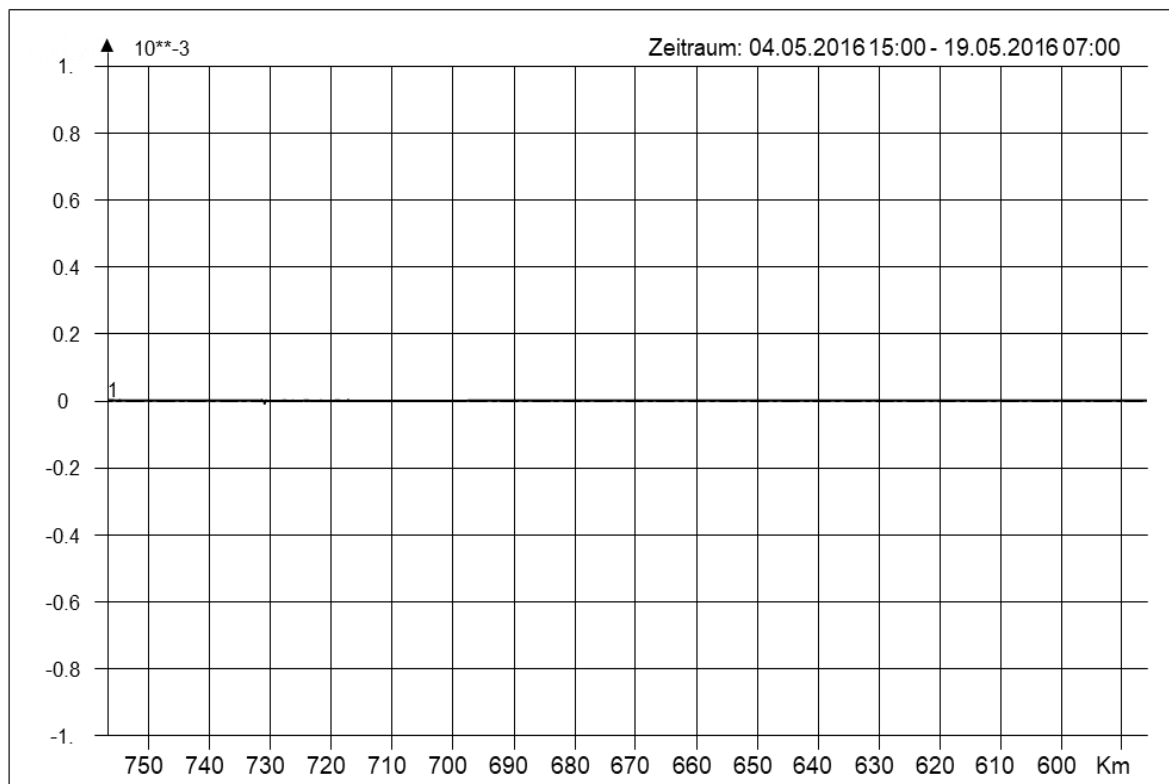


Bild 30: Differenz der Mittelwerte des minimalen Salzgehalts (SWS – PIZ).



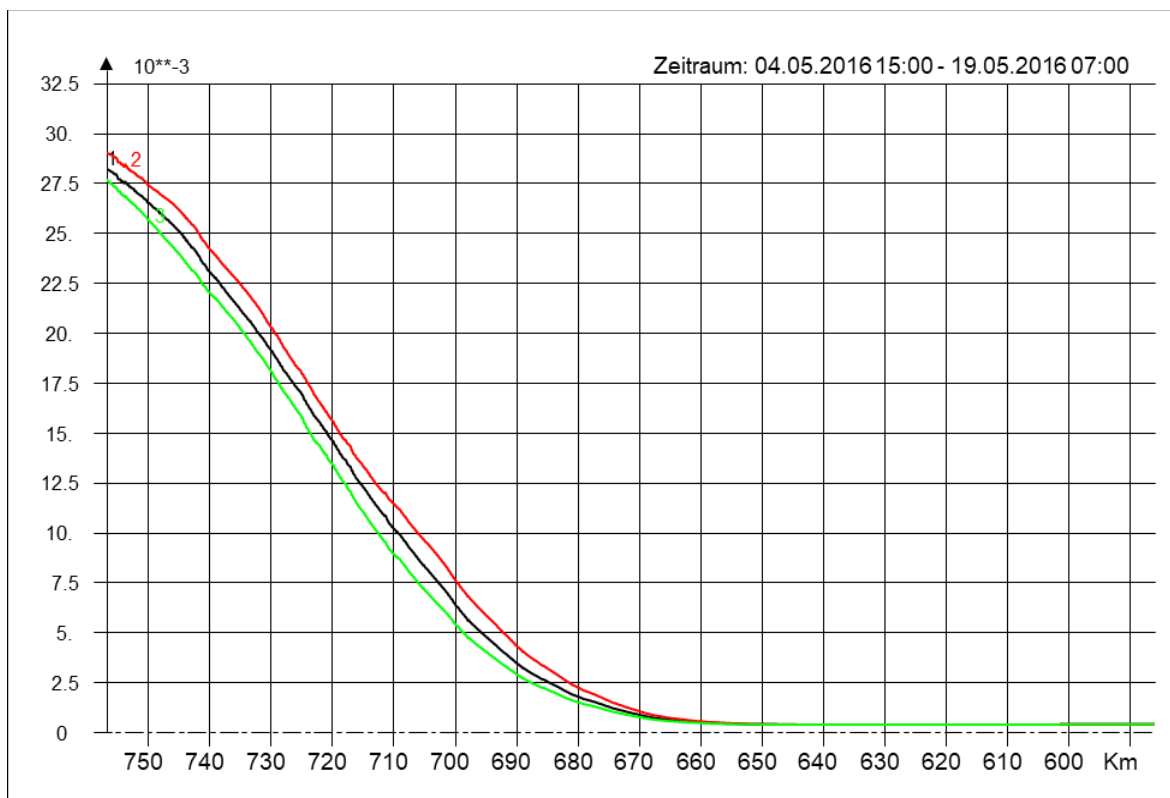


Bild 31: Mittlerer Salzgehalt für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert des mittleren Salzgehalts.

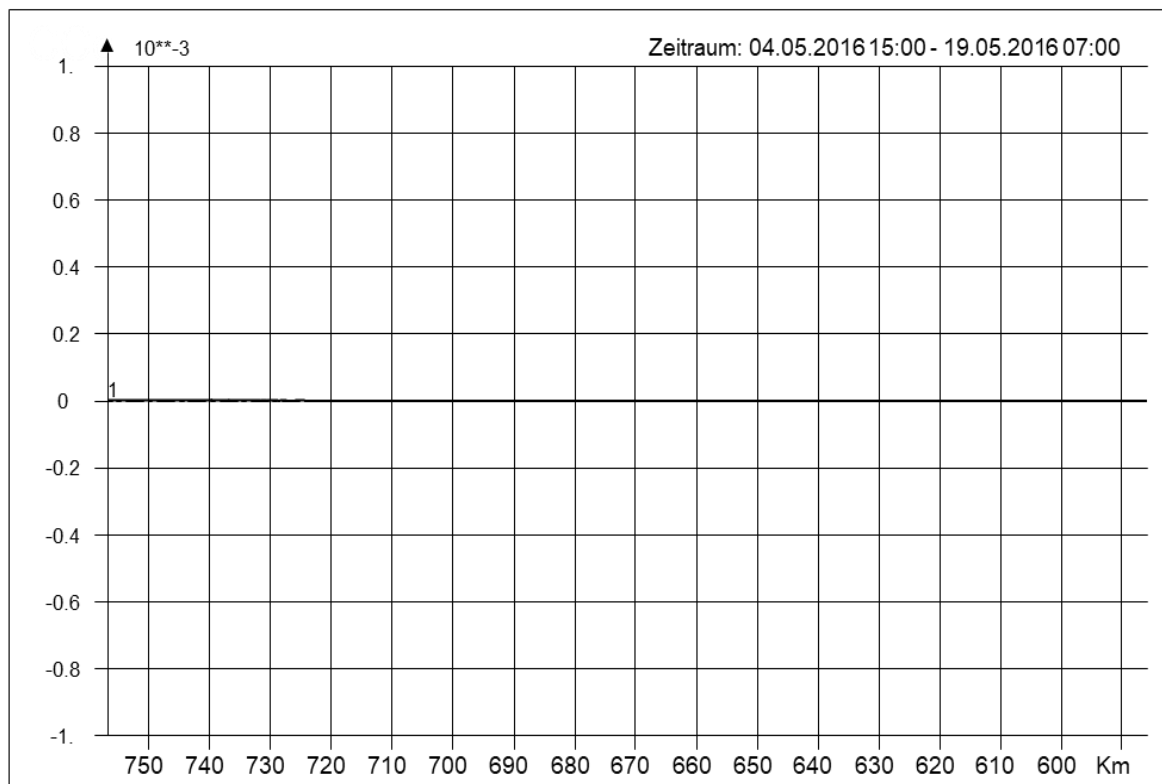


Bild 32: Differenz der Mittelwerte des mittleren Salzgehalts (SWS – PIZ).

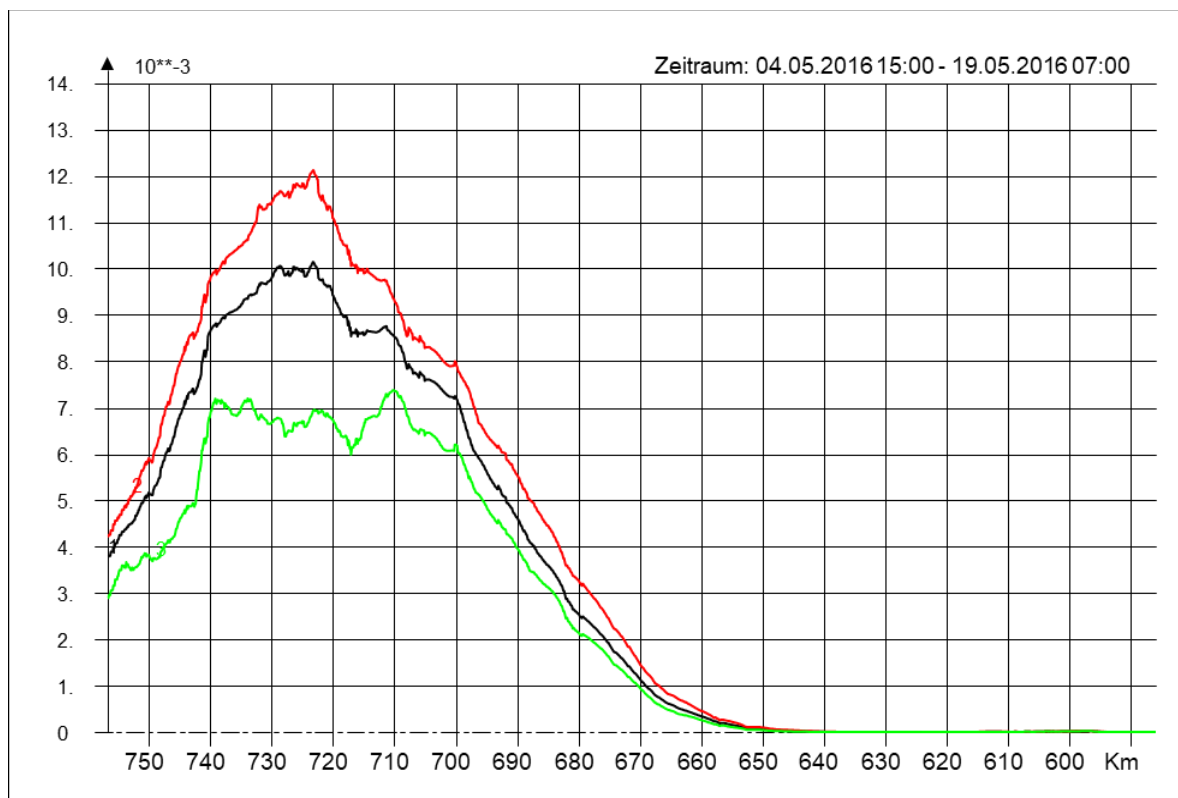


Bild 33: Salzgehaltsvariation für den planerischen Ist-Zustand (PIZ). In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der Salzgehaltsvariation.

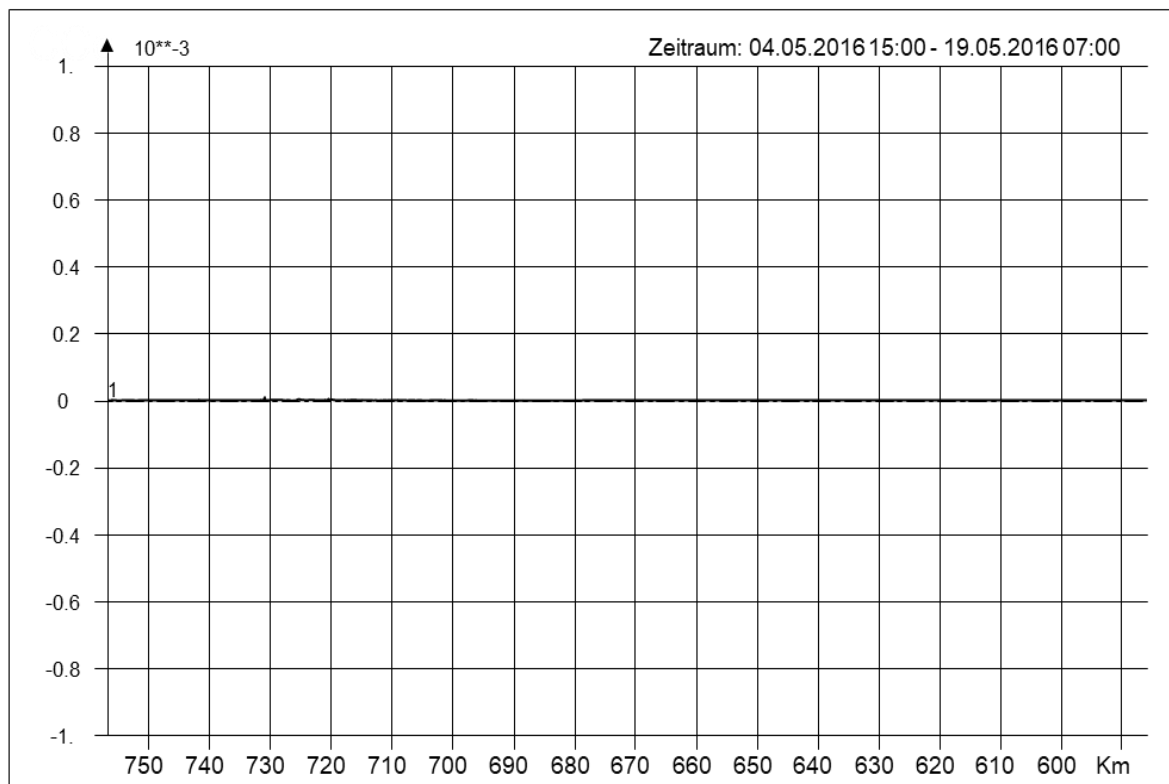


Bild 34: Differenz der Mittelwerte der Salzgehaltsvariation (SWS – PIZ).

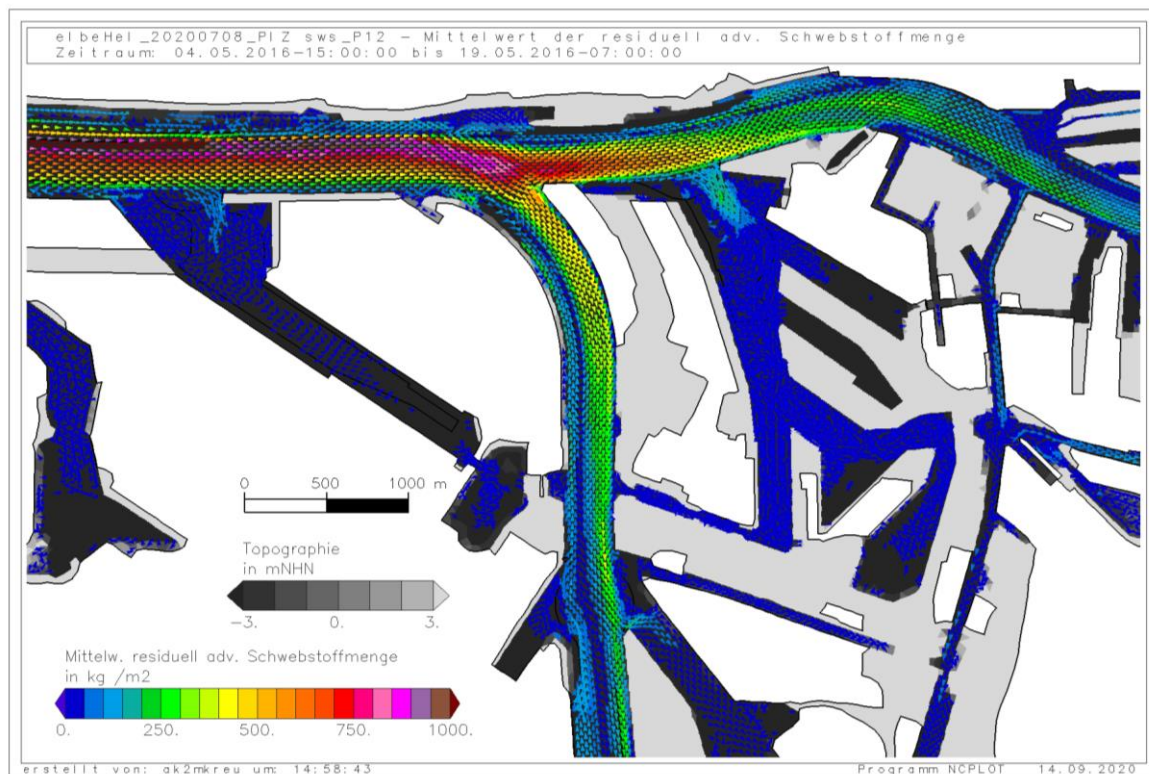


Bild 35: Mittelwert des advektiven Rest-Schwebstofftransports für den planerischen Ist-Zustand (PIZ).

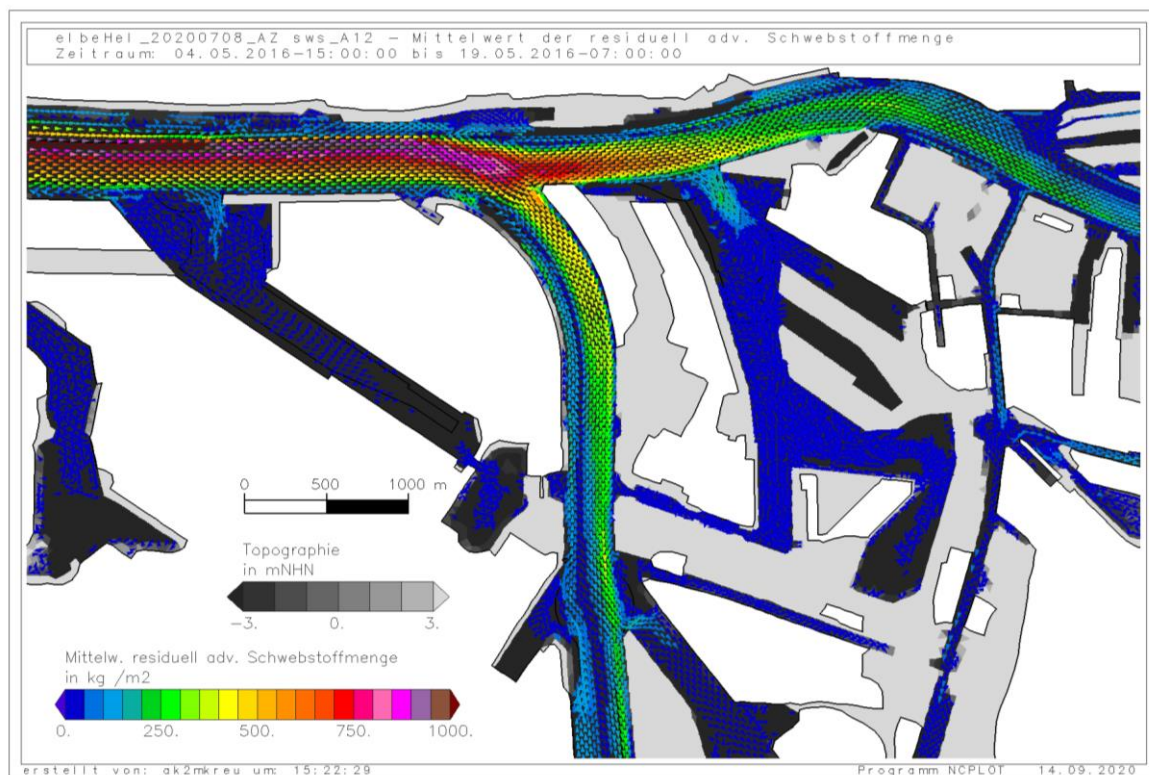


Bild 36: Mittelwert des advektiven Rest-Schwebstofftransports für den Ausbauzustand (SWS).

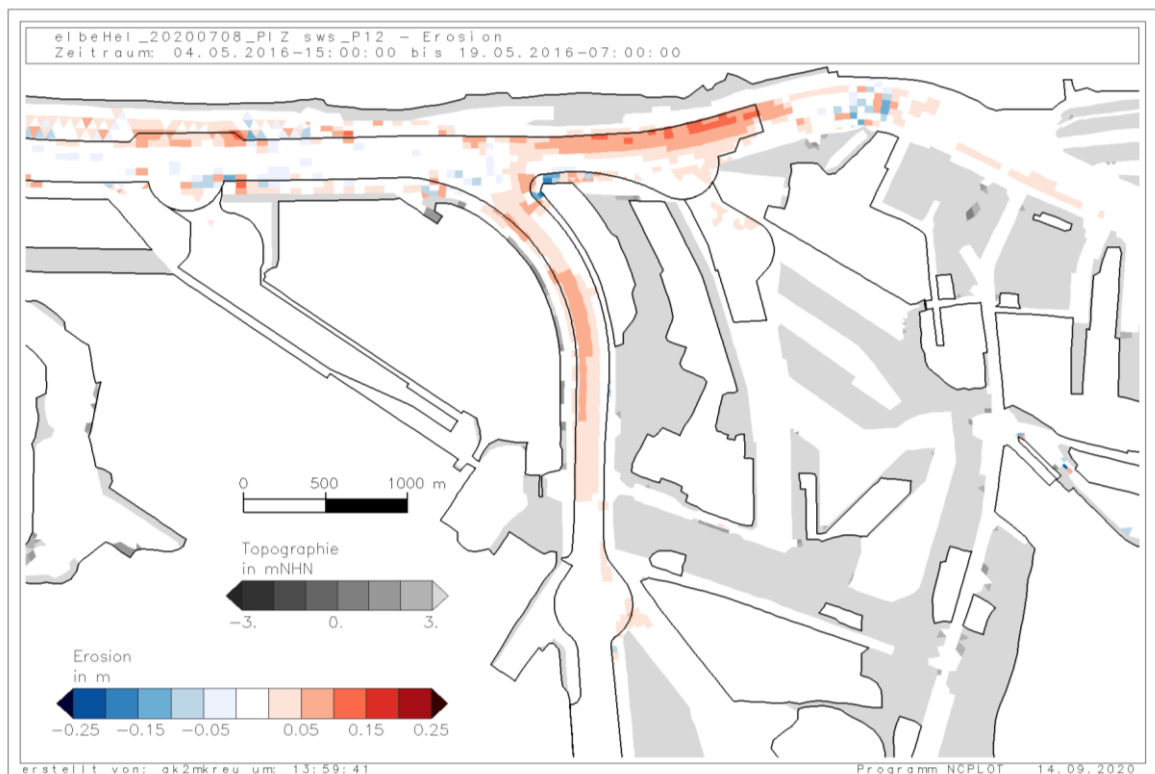


Bild 37: Sedimentation / Erosion im PIZ vom 4.5. – 19.5.2016

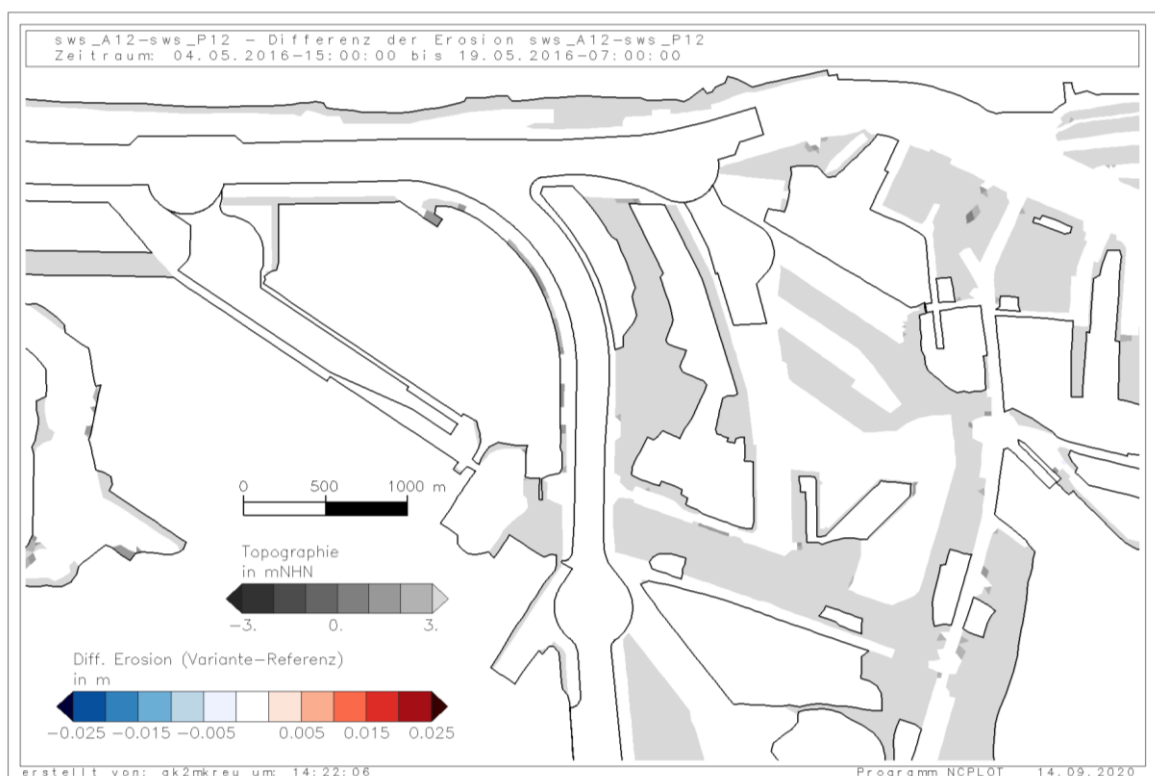


Bild 38: Veränderung der Sedimentation / Erosion durch die Maßnahmen des Ausbaus SWS zwischen 4.5. – 19.5.2016

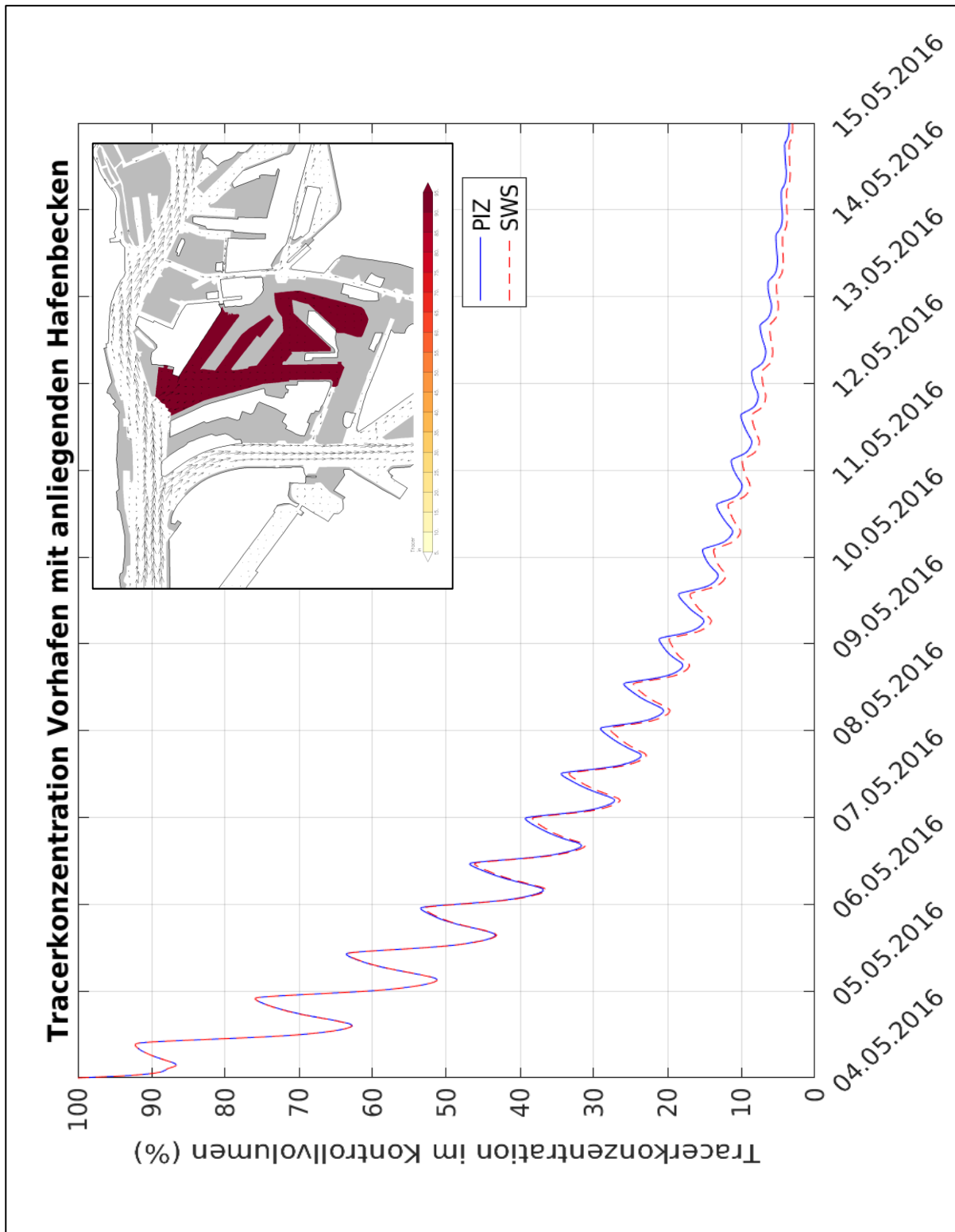


Bild 39: Entwicklung der Tracerkonzentration im Vorhafen und in den angeschlossenen Häfen im PIZ in Blau und SWS in Rot für das Szenario „großer Tidehub“

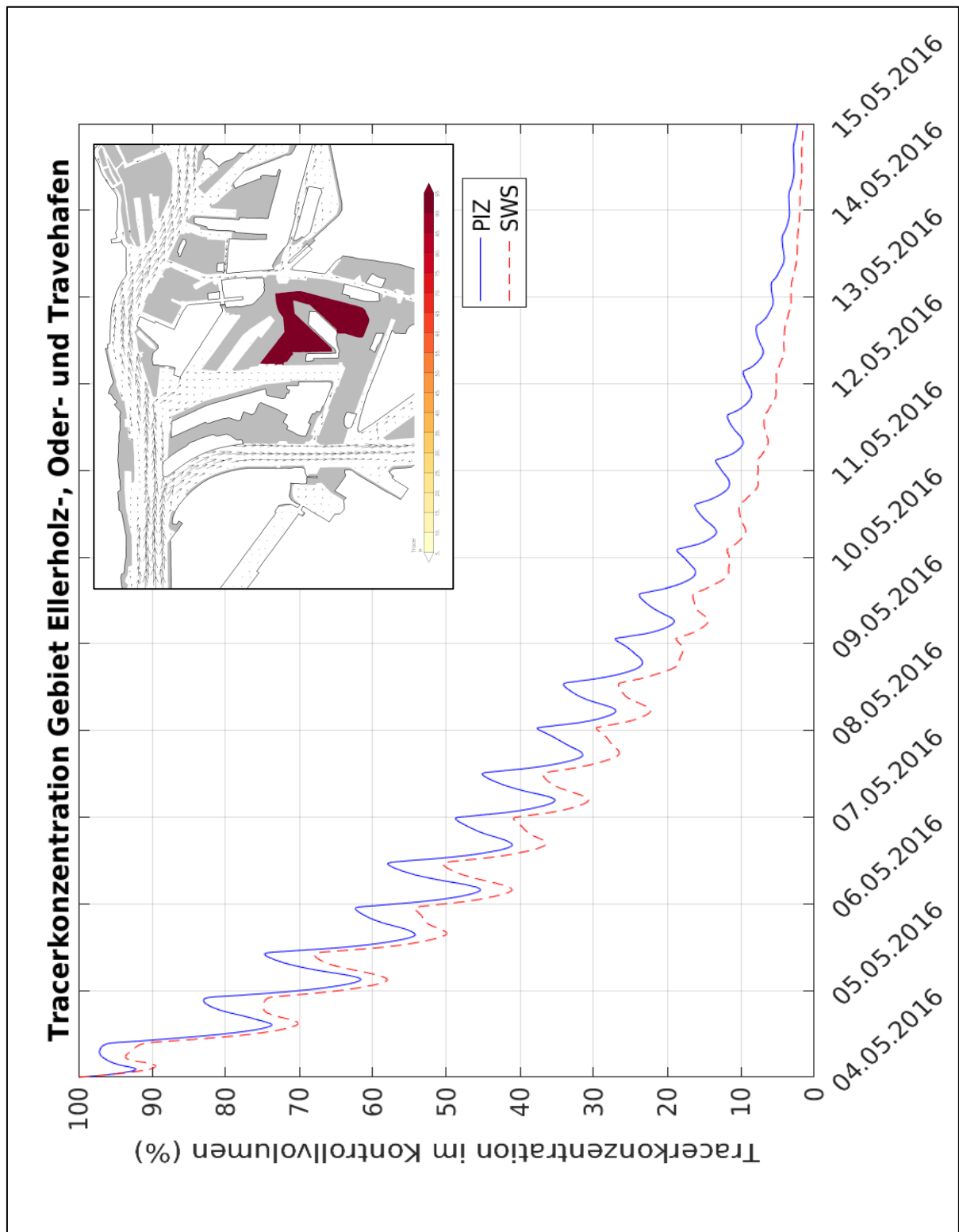


Bild 40: Entwicklung der Tracerkonzentration im Ellerholzhafen und den angeschlossenen Häfen im PIZ in Blau und SWS in Rot für das Szenario „großer Tidehub“



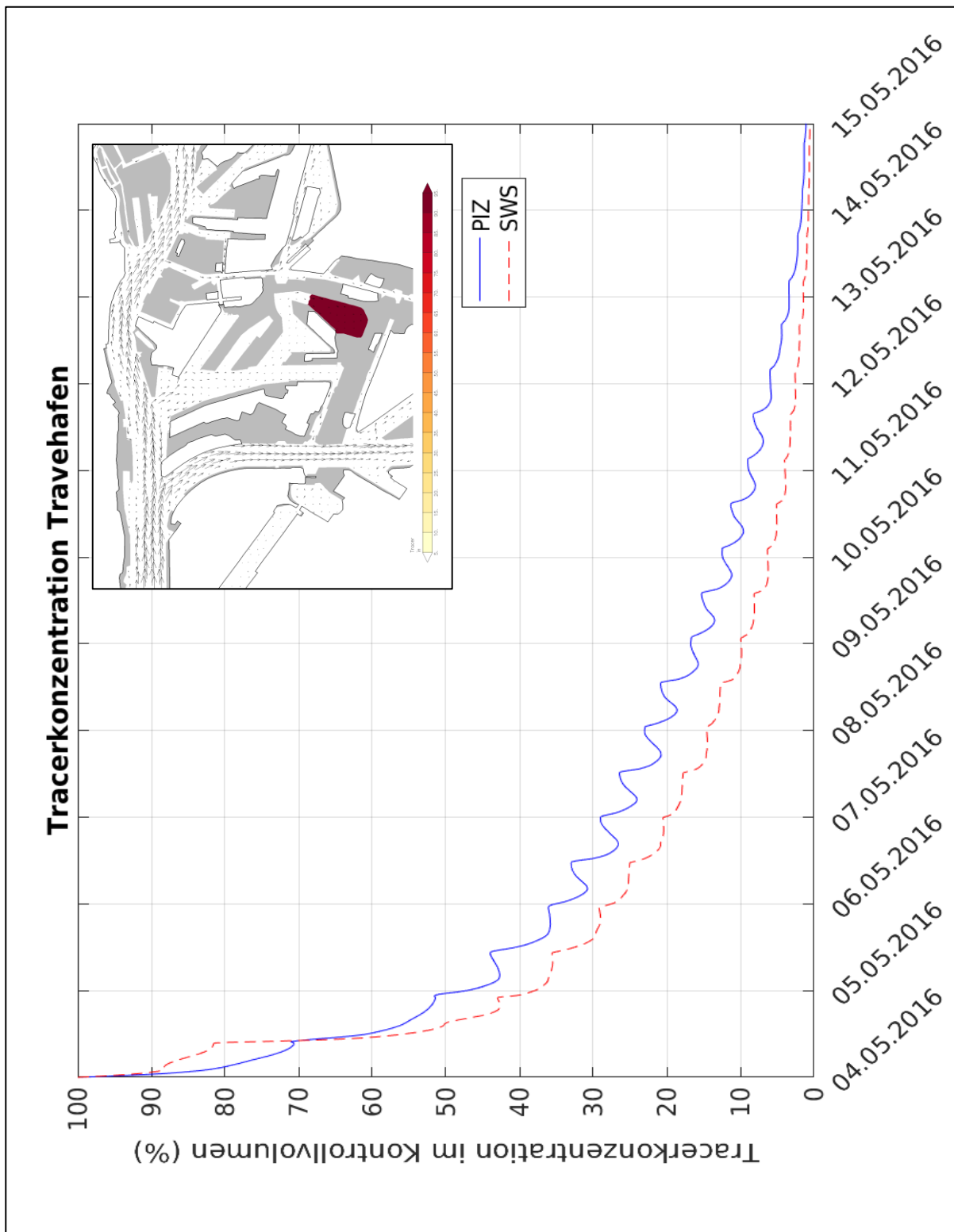


Bild 41: Entwicklung der Tracerkonzentration im Travehafen im PIZ in Blau und SWS in Rot für das Szenario „großer Tidehub“

## 5 Ergebnisse für das Spring-Nipp Szenario vom 29.9. –13.10.2016, „kleiner Tidehub“

Die Untersuchungen der BAW im Zusammenhang mit Ausbauten an Ästuaren haben gezeigt, dass die ausbaubedingten Änderungen der Tidekennwerte des Wasserstandes, der Strömungen, des Salzgehalts, des Schwebstoffes, und der Sedimentation bei energiereichen Tiden am größten sind. Dies gilt jedoch nicht für den Wasseraustausch im Bereich des Ellerholzhafens und der angrenzenden Hafenbecken. Bevor dieser dargestellt wird, sollen hier einige Überlegungen angestellt werden, die den Wasseraustausch in einem, an einen Tidestrom angeschlossenes, Hafenbecken betreffen. Dieser wird allein durch den Tidehub als antreibende Kraft bestimmt. Daher ist in dem Szenario „kleiner Tidehub“ der Wasseraustausch gegenüber dem Szenario „großer Tidehub“ verlangsamt, was gleichbedeutend mit einer verlängerten Wasseraufenthaltszeit im Bereich des Ellerholzhafens und der angrenzenden Hafenbecken ist. Damit die beiden Untersuchungen vergleichbar sind, erfolgt die Bearbeitung nach demselben in Kapitel 4.6 beschriebenen Konzept. Der einzige Unterschied sind die am seeseitigen Rand eingesteuerte Tiden und die einwirkenden meteorologischen Randwerte, welche sich aus dem jeweils betrachteten Zeitraum ergeben (s. Kapitel 4).

In Bild 42 ist die Entwicklung der Tracerkonzentration für den planerischen Ist-Zustand sowie für den Ausbau Steinwerder Süd wie oben beschrieben für das Szenario „kleiner Tidehub“ dargestellt. Die für die Verdünnung (50 %, 20 %, 10 %) der anfangs vorhandenen Tracerkonzentration (100 %) notwendige Dauer (in Stunden) ist in Tabelle 5 für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) und für den Ausbau Steinwerder Süd (SWS) eingetragen. In der 4. Spalte der Tabelle kann die ausbaubedingte Veränderung abgelesen werden.

Tracerkonzentration	PIZ [h]	SWS [h]	Veränderung [h]
50%	47,33	47,00	-0,33
20%	149,00	145,83	-3,17
10%	218,83	204,33	-14,50

*Tabelle 5: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Häfen für den PIZ und SWS für das Szenario „kleiner Tidehub“*

Die Dauer des Wasseraustausches für den Bereich des Vorhafens und der angrenzenden Häfen, bei der 90% des Wassers ausgetauscht worden sind, wird also durch die Maßnahme SWS für das Szenario „kleiner Tidehub“ gegenüber dem PIZ um ca. 7 % verkürzt.



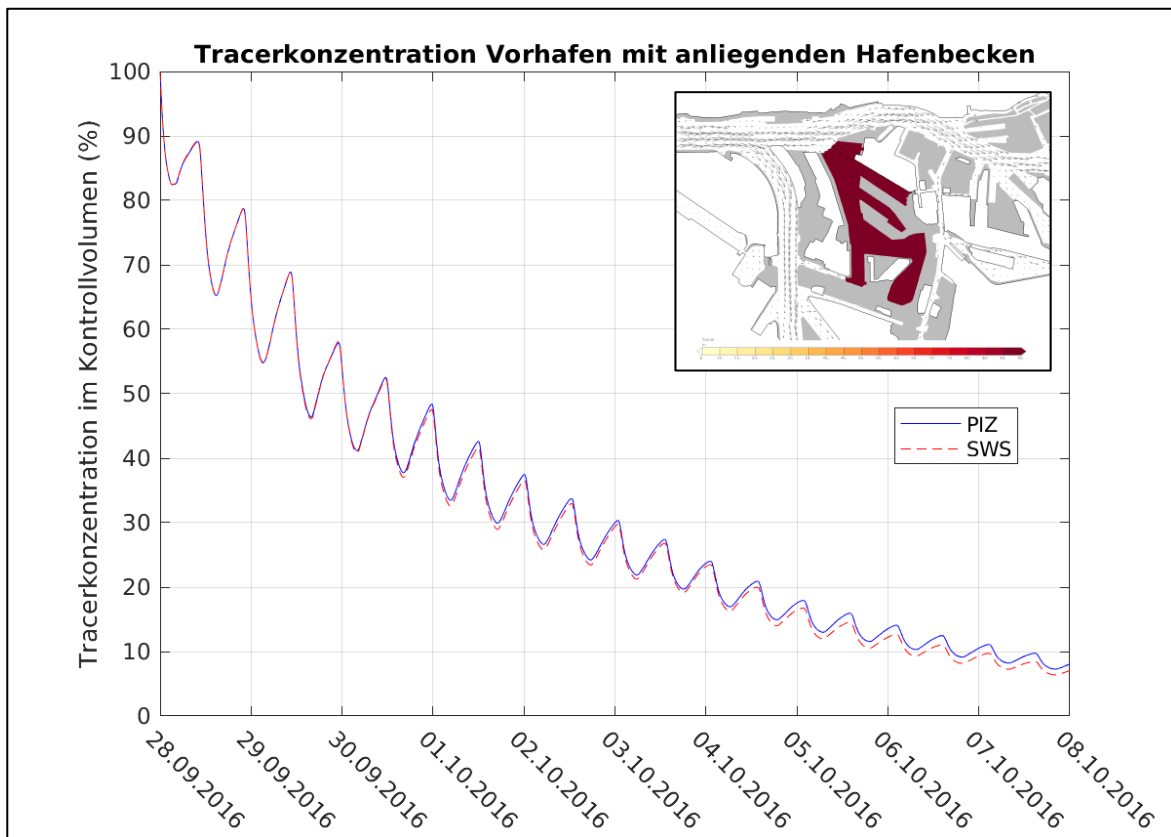


Bild 42: Entwicklung der Tracerkonzentration im Vorhafen und in den angeschlossenen Häfen im PIZ (blau) und SWS (rot) für das Szenario „kleiner Tidehub“

Um die Wirkung des Ausbaus Steinwerder Süd auf den Wasseraustausch des Travehafens zu ermitteln, wird dafür das Wasser nur in diesem Gebiet markiert und die Simulation unter den oben beschriebenen Bedingungen durchgeführt. Die Entwicklung dieser Untersuchung ist in Bild 43 dargestellt. Die für die Verdünnung (50 %, 20 %, 10 %) der anfangs vorhandenen Tracerkonzentration (100 %) notwendige Dauer (in Stunden) ist in Tabelle 6 für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) und für den Ausbau Steinwerder Süd (SWS) eingetragen. In der 4. Spalte der Tabelle kann die ausbaubedingte Veränderung abgelesen werden.

Tracerkonzentration	PIZ [h]	SWS [h]	Veränderung [h]
50%	59,00	34,17	-24,83
20%	147,83	134,67	-13,16
10%	193,33	162,17	-31,16

Tabelle 6: Dauer der Verdünnung der Tracerkonzentration für den Bereich des Travehafens für den PIZ und SWS für das Szenario „kleiner Tidehub“

Die Dauer des Wasseraustausches für den Bereich des Travehafens, bei der 90% des Wassers ausgetauscht worden sind, wird also durch die Maßnahme des Ausbaus SWS für das Szenario „kleiner Tidehub“ um ca. 16 % verkürzt.

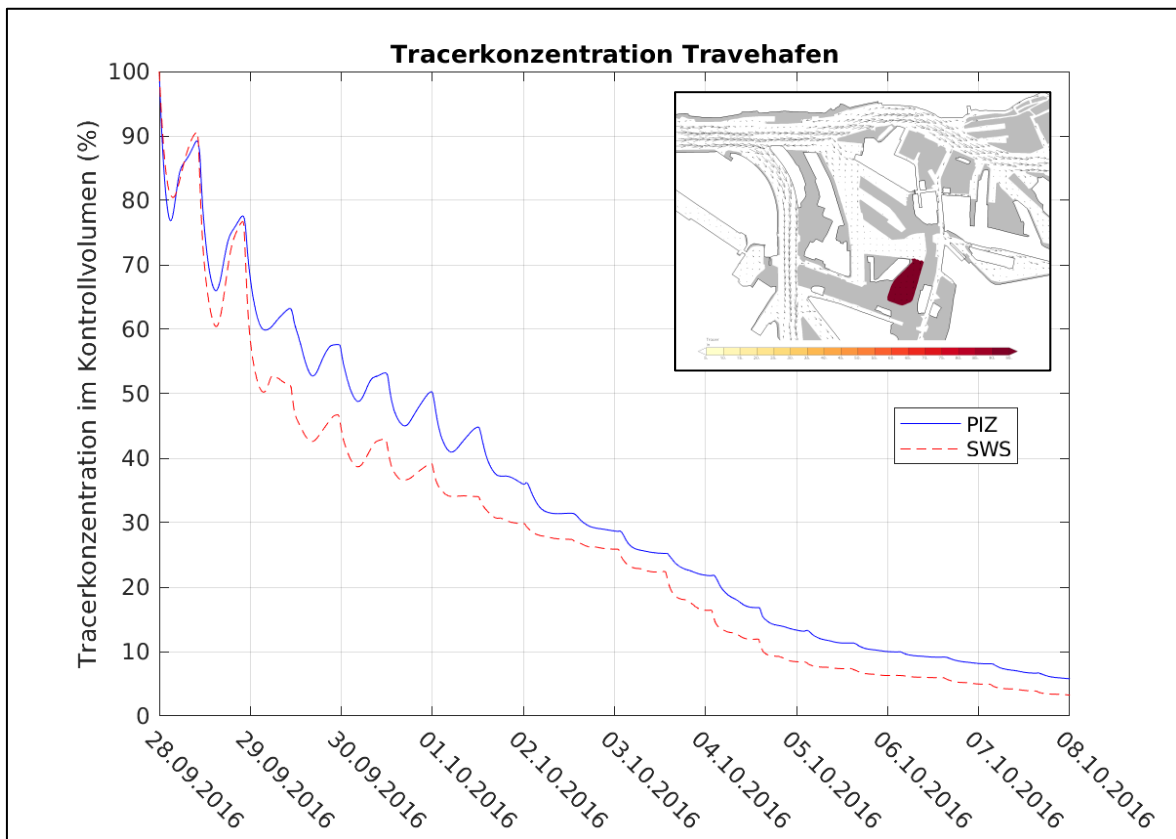


Bild 43: Entwicklung der Tracerkonzentration im Travehafen im PIZ (blau) und SWS (rot) für das Szenario „kleiner Tidehub“

## 6 Auswirkungen auf Sturmflutscheitelwasserstände

Hinsichtlich der Auswirkungen des Ausbaus SWS auf die Scheitelwasserstände bei Sturmfluten können die für das Spring-Nipp Szenario genannten Veränderungen des Tidehochwassers als auf der sicheren Seite liegende Abschätzungen genutzt werden.

Die BAW-DH hat in ihrem Gutachten (Bundesanstalt für Wasserbau 2008b) eine Variante, die sich von der hier untersuchten durch wesentlich größere Wasserflächen/-volumenverluste unterscheidet, untersucht, die daher auch zu etwas größeren ausbaubedingten Änderungen des Wasserstandes bei normalen Wasserständen führte. Diese Variante wurde im Gutachten (Bundesanstalt für Wasserbau 2008c) auch im Hinblick auf Sturmfluten untersucht. Aus der Tatsache, dass die ausbaubedingten Änderungen der Wasserstände bei normalen Wasserständen und bei Sturmflut nahezu gleich waren, kann geschlossen werden, dass auch die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände für die in diesem Gutachten untersuchte Variante in der gleichen Größe sein werden, wie die oben beschriebenen ausbaubedingten Änderungen des mittleren Tidehochwassers. Damit liegen die durch den Ausbau SWS verursachten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände unter dem Schwellenwert von 1 cm.

## 7 Literaturverzeichnis

Bundesanstalt für Wasserbau (2006): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe. Gutachten zu Ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik und Salztransport. Gutachten BAW-Nr. A39550310062-H.1a. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter [https://www.kuestendaten.de/media/zdm/portaltideelbe/Projekte/FRA20XX/Planfeststellungsverfahren/Antragsunterlagen/Antrag/Unterlagen/Hydrodynamik\\_und\\_Salztransport.pdf](https://www.kuestendaten.de/media/zdm/portaltideelbe/Projekte/FRA20XX/Planfeststellungsverfahren/Antragsunterlagen/Antrag/Unterlagen/Hydrodynamik_und_Salztransport.pdf) , zuletzt geprüft am 13.01.2021

Bundesanstalt für Wasserbau (2008a): Westerweiterung des CTH. Wasserbauliche Systemanalyse. BAW-Nr. A39550310115. Gutachten zur Auswirkung der Westerweiterung des CTH. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Unveröffentlicht.

Bundesanstalt für Wasserbau (2008b): Umstrukturierung Mittlerer Freihafen. Wasserbauliche Systemanalyse, BAW-Nr. A39550310141. Gutachten zur Auswirkung der Baumaßnahme Container Terminal Steinwerder. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Unveröffentlicht.

Bundesanstalt für Wasserbau (2008c): Umstrukturierung Mittlerer Freihafen, CT Tollerort Süd und Steinwerder. Gutachten zu Ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen. BAW-Nr. A39550310141. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Unveröffentlicht.

Casulli, V. (1999): A Semi-Implicit Finite Difference Method for Non-Hydrostatic, Free-Surface Flows. In: *International Journal of Numerical Methods in Fluids* (30), S. 425–440.

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

Casulli, Vincenzo; Zanolli, P. (2002): Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems. In: *Mathematical and Computer Modelling* 36 (9-10), S. 1131–1149. DOI: 10.1016/S0895-7177(02)00264-9.

Casulli, Vincenzo; Zanolli, Paola (2005): High resolution methods for multidimensional advection–diffusion problems in free-surface hydrodynamics. In: *Ocean Modelling* 10 (1-2), S. 137–151. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.06.007.

Casulli, V. and Zanolli, P. (1998): A Three - Dimensional Semi - Implicit Algorithm for Environmental Flows on Unstructured Grids. In: *Proc. of Conf. on Num. Methods for Fluid Dynamics, University of Oxford*.

Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (2010): Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe. Die Planänderung III im Überblick. Eine Information der Vorhabensträger. Hg. v. Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg. Online verfügbar unter [https://fahrrinnenanpassung.de/files/projekt/download/Faltblatt\\_Planeaenderung3.pdf](https://fahrrinnenanpassung.de/files/projekt/download/Faltblatt_Planeaenderung3.pdf) , zuletzt geprüft am 13.01.2021 .

Bundesanstalt für Wasserbau  
Hamburg, Januar 2021

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Winkel

gez. Benndorf

Dr. rer. nat. Winkel

Benndorf





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

[www.baw.de](http://www.baw.de)

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