

**Auswirkung der Schaffung von Flutraum
im Bereich der Tideelbe - Wasserbauliche
Systemstudien der vom Forum Tideelbe
konzipierten Maßnahmen**

B3955030610005

**Auswirkung der Schaffung von Flutraum im
Bereich der Tideelbe - Wasserbauliche Sys-
temstudien der vom Forum Tideelbe konzi-
pierten Maßnahmen**

B3955030610005

Auswirkung der Schaffung von Flutraum im Bereich der Tideelbe - Wasserbauliche Systemstudien der vom Forum Tideelbe konzipierten Maßnahmen

Auftraggeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Auftrag vom:

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955030610005

Aufgestellt von:	Abteilung:	Wasserbau im Küstenbereich
	Referat:	K3
	Bearbeiter:	Dr. Ing. H. Weilbeer
		Dipl. Ing (FH) I. Uliczka
		M.Sc. V. Ortiz
		Dr. sc. ETHZ A. Hammrich

Hamburg, September 2020

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

Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Wasserbau wurde im Rahmen des Forum Tideelbe von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) beauftragt, verschiedene Varianten zur Anbindung von zusätzlichem Flutraum an die Tideelbe hinsichtlich ihrer hydrologischen Wirksamkeit zu prüfen und zu vergleichen. Aus wasserbaulicher Sicht ist die Wirksamkeit von neu angebundenem Flutraum vor allem von drei Faktoren abhängig: dem Tidevolumen, der Leistungsfähigkeit des Anbindungsquerschnitts und der Lage im Ästuar. Je größer das neu angebundene Tidevolumen ist, desto wirksamer kann der Tidehub, sowie das Flut- zu Ebbstromverhältnis in der Tideelbe gesenkt werden. Darüber hinaus ist die Lage der Maßnahme wichtig: Die Schaffung von Flutraum zeigt sich im Bereich Hamburg als besonders wirksam, da hier das Tideprisma im Vergleich zu weiter stromab gelegenen Elbabschnitten geringer ist, und eine Anbindung von Flutraum somit prozentual den größten Einfluss entfalten kann.

In der vorliegenden Untersuchung wird die (Wieder-)Anschluss der Dove Elbe, der Alten Süderelbe und der Haseldorfer Marsch untersucht. Das Maßnahmenlayout und die Art des Anschlusses der Varianten unterscheiden sich stark. Alle zusätzlichen Fluträume werden über Sperrwerke angeschlossen. Die an der Norderelbe oberhalb der Ausbaustrecke gelegene Dove Elbe wird über ein Sperrwerk angeschlossen, mit dem die Tide so gesteuert wird, dass die Wasserstände in der Dove Elbe nur zwischen -1,20 m NHN und +0,90 m NHN liegen. In die Alte Süderelbe kann die Tide ungedrosselt einschwingen. Hier ist der Zustrom über den Köhlfleet erwähnenswert, da aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Köhlfleet bereits dort ein Großteil der Schwebstoffe sedimentieren und somit keinen Sedimenteintrag in die Alte Süderelbe verursachen. Der Anschluss der Haseldorfer Marsch erfolgt über die Haseldorfer Binnenelbe und über das Dwarsloch, d.h. über relativ flache Nebenelben, durch die das zusätzliche Tidevolumen strömen muss. Das zusätzliche Tidevolumen ergibt sich aus einem verzweigten Prielsystem in einem Marschgebiet, und nicht aus einem großen kompakten voluminösen Wasserkörper. Zusätzlich wird ein Vorschlag des WSA Hamburg untersucht, der eine Vertiefung im stromauf gelegenen Teil der Pagensander Nebenelbe vorsieht, wobei anzumerken ist, dass diese Maßnahme keinen zusätzlichen Flutraum schafft.

Die drei erstgenannten, tideraumschaffenden, Maßnahmen bewirken eine Verminderung des Tidehubs, wobei die Anbindung der Dove Elbe eine sehr starke (etwa 10 cm) aber überwiegend lokale Absenkung in der Norderelbe bewirkt. Für die anderen Anbindungen ergeben sich Absenkungen des mittleren Tidehubs von etwa 3,5 cm (Alte Süderelbe) und 2,5 cm (Haseldorfer Marsch), die jeweils über einen sehr weiten Bereich der Tideelbe wirken.

Der stromaufgerichtete Sedimenttransport wird durch alle hier untersuchten Maßnahmen beeinflusst. Die größte Wirkung wird mit der Maßnahme „Alte Süderelbe“ erreicht. Stromab von Schulau bis unterhalb von Brunsbüttel nimmt der stromaufgerichtete Rest-Schwebstofftransport großräumig um bis zu 1000 t/Tide ab. Eine ähnlich starke Wirkung entfaltet die Maßnahme „Haseldorfer Marsch“, deren positive Wirkung zwar erst bei Elbe-Km 670 einsetzt, dafür aber weit in den Mündungstrichter hineinwirkt. Bei Anschluss der Dove Elbe ergibt sich für den untersuchten Analysezeitraum eine Verminderung des stromaufgerichteten Transports um ca. 200 bis 300 t/Tide. Der Wert ist als Indiz einer positiven Wirkung auf das Sedimenttransportregime zu sehen, darf jedoch nicht hinsichtlich einer Einsparung von Baggermengen interpretiert werden, da sich die absoluten Sedimentmengen in der Tideelbe nicht verändern. Dies gilt auch für alle anderen untersuchten Maßnahmen.

Auf die Salzintrusion wirken sich die untersuchten Maßnahmen im betrachteten Analysezeitraum nicht wesentlich aus. Die Änderungen in den Salzgehaltsverhältnissen liegen bei allen untersuchten Maßnahmen in der Größenordnung von kleiner 0,1 PSU.

Zu beachten ist, dass die vorliegende Untersuchung anhand eines Spring-Nipp-Zyklus aus dem Jahr 2016 im Rahmen einer Machbarkeitsstudie durchgeführt wurde. Die Ergebnisse unterstützen den Planungsprozess, sie können jedoch keine tiefgreifende Untersuchung im Sinne einer Ausführungsplanung ersetzen.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2 Untersuchungsmethode	3
2.1 Untersuchungskonzept	3
2.2 Mathematische Simulationsverfahren	4
2.3 Analyse der Ergebnisse	7
3 Verwendete Unterlagen und Daten	8
3.1 Topographie	8
3.2 Randwerte	8
3.2.1 Seeseitiger Rand	8
3.2.2 Oberwasserzufluss	8
3.2.3 Meteorologische Daten	9
3.3 Anfangswerte des Sedimentinventars	9
4 Hinweise zu grundsätzlichen Prozesse in der Elbe	11
4.1 Anmerkungen zur Tidedynamik der Elbe	11
4.2 Grundsätzliche Wirkungsweise von zusätzlichem Tidevolumen	18
5 Ergebnisse	21
5.1 Vertiefung der Pagensander Nebelbe	21
5.1.1 Gestaltung der Maßnahme	21
5.1.2 Auswirkung im Nahbereich der Maßnahme	23
5.1.3 Großräumige Auswirkung der Maßnahme	38
5.2 Tideanschluss Haseldorfer Marsch	41
5.2.1 Gestaltung der Maßnahme	41
5.2.2 Auswirkung im Nahbereich der Maßnahme	43
5.2.3 Großräumige Auswirkung der Maßnahme	59
5.3 Tideanschluss Alte Süderelbe	62
5.3.1 Frühere Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau	62
5.3.2 Gestaltung der Anbindungsvariante 1	63
5.3.3 Auswirkung im Nahbereich der Anbindungsvariante 1	64
5.3.4 Großräumige Auswirkung der Anbindungsvariante 1	82
5.3.5 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 1a	86
5.3.6 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 2	86
5.3.7 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 3	87
5.3.8 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 3a	87
5.3.9 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 4	87
5.3.10 Beurteilung der verschiedenen Varianten	88
5.4 Tideanschluss Dove Elbe	89
5.4.1 Gestaltung der Maßnahme	89

5.4.2	Auswirkung im Nahbereich der Maßnahme	92
5.4.3	Großräumige Auswirkung der Maßnahme	106
6	Relativer Vergleich der großräumigen Wirkung aller Maßnahmen	110
7	Schlussfolgerung und Empfehlung	116
8	Literaturverzeichnis	118

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Methode der wasserbaulichen Systemanalyse	4
Bild 2: Natürliche Prozesse in einem Ästuar	6
Bild 3: Topographie (Wassertiefen in m NHN) und Lage der untersuchten Maßnahmen.	8
Bild 4: Tageswerte des Abflusses und des Salzgehaltes der Elbe in Neu Darchau für das Jahr 2016.	9
Bild 5: Anfängliches Sedimentinventar im Modellgebiet, dargestellt anhand des mittleren Korndurchmessers.	10
Bild 6: Minimale (blau), mittlere (grün) und maximale (rot) Werte des MThw, MTnw und MThb für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus (Modell, Mai 2016) im Vergleich mit den gemessenen Werten an ausgewählten Pegelstationen für das Jahr 2016.	13
Bild 7: Minimale (rot), mittlere (grün) und maximale (blau) Werte der mittleren Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeit und des F:E-Verhältnisses für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus (Mai 2016) im Vergleich zu den Werten für allen Tiden des Jahres 2016 (Modellergebnis).	15
Bild 8: Minimales (rot), mittlere (grün) und maximale (blau) Werte des Flut- und Ebbestromvolumens (resp. Tideprisma) für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus (Mai 2016) im Vergleich zu den Werten für allen Tiden des Jahres 2016 (Modellergebnis).	16
Bild 9: Maximaler Salzgehalt entlang der Tideelbe (Modellergebnis für das Jahr 2016), dargestellt für zwei unterschiedliche Farbverläufe, um die Abhängigkeit der Lage von der Historie des Oberwasserzuflusses zu verdeutlichen.	17
Bild 10: Mittlerer Schwebstoffgehalt und Rest-Schwebstofftransport entlang der Tideelbe (Referenzmodell).	18
Bild 11: Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Pagensander Nebenelbe. Bild links: Wassertiefen der vertieften Variante in m NHN. Bild rechts: Differenz der Wassertiefe (Variante minus Referenz)	22
Bild 12: Mittleres Tidehochwasser. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	24
Bild 13: Mittleres Tideniedrigwasser Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	25
Bild 14: Mittlerer Tidehub Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	26
Bild 15: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	27
Bild 16: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	28

Bild 17: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	29
Bild 18: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	30
Bild 19: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	31
Bild 20: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	33
Bild 21: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	34
Bild 22: Mittlere Sedimentmenge/Tide (Summe aller Fraktionen), links Flut, rechts Ebbe. Die Flutstromdominanz ist erkennbar	35
Bild 23: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	36
Bild 24: Änderung der Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit (Variante minus Referenz)	37
Bild 25: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)	39
Bild 26: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)	40
Bild 27: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)	40
Bild 28: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)	41
Bild 29: Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Haseldorfer Marsch	42
Bild 30: Detailansicht im Bereich der Haseldorfer Marsch mit Anschluss an die Tideelbe	42
Bild 31: Zusätzliches Tidevolumen durch den Anschluss der Haseldorfer Marsch	43
Bild 32: Mittleres Tidehochwasser. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	45
Bild 33: Mittleres Tideniedrigwasser. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	46
Bild 34: Mittlerer Tidehub. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	47

Bild 35: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	49
Bild 36: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	50
Bild 37: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	51
Bild 38: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	52
Bild 39: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	53
Bild 40: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	55
Bild 41: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	56
Bild 42: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)	57
Bild 43: Änderung der Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit (Variante minus Referenz)	58
Bild 44: Anfänglicher Schwebstoffeintrag in das Gebiet während der 4 wöchigen Simulation	58
Bild 45: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)	60
Bild 46: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)	61
Bild 47: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz). Die gestrichelte Linie zeigt die Wirkung ohne die Vertiefung der Pagensander Nebenelbe (Variante – Variante Pagensand).	61
Bild 48: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)	62
Bild 49: Einseitige Anbindung der Alten Süderelbe (Anbindungsvariante 1)	64
Bild 50: Zusätzliches Tidevolumen durch die Anbindungsvariante 1	65
Bild 51: Mittleres Tidehochwasser. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	66

Bild 52: Mittleres Tideniedrigwasser. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	67
Bild 53: Mittlerer Tidehub. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	68
Bild 54: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	70
Bild 55: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	71
Bild 56: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	72
Bild 57: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	74
Bild 58: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	75
Bild 59: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	77
Bild 60: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	78
Bild 61: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	79
Bild 62: Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	81
Bild 63: Anfänglicher Schwebstoffeintrag in das Gebiet während der 4 wöchigen Simulation	82
Bild 64: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	83
Bild 65: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand)	84
Bild 66: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	85

Bild 67: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)	85
Bild 68: Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Dove Elbe	89
Bild 69: Entkoppelte Tidedynamik am Sperrwerk: Tidewasserstände auf der See- und Binnenseite des Sperrwerks	91
Bild 70: Ebb- und Flutstromvolumen (linke Achse) und das Gesamtwasservolumen in der Dove Elbe (rechte Achse) während des Analysezeitraumes	91
Bild 71: Mittleres Tidehochwasser. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	93
Bild 72: Mittleres Tideniedrigwasser. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	94
Bild 73: Mittlerer Tidehub. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	95
Bild 74: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	97
Bild 75: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	98
Bild 76: Differenz des Verhältnis Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	99
Bild 77: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	99
Bild 78: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)	100
Bild 79: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut). Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	102
Bild 80: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe). Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	103
Bild 81: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe	104

Bild 82: Akkumulation an der Gewässersohle nach 4 Wochen Simulationszeit. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe (in cm)	105
Bild 83: Schwebstoffeintrag in das Gebiet während der Simulation	106
Bild 84: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)	107
Bild 85: Mittleres Flut- zu Ebbstromverhältnis im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand)	108
Bild 86: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand)	109
Bild 87: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)	109
Bild 88: Differenzen des mittleren Tidehochwassers (oben), des mittleren Tideniedrigwassers (Mitte) und des mittleren Tidehubs (unten) im Längsverlauf der Tideelbe während des Untersuchungszeitraums, jeweils Variante minus Referenzzustand. Blaue Linie: Pagensander Nebelbe, grüne Linie: Haseldorfer Marsch, rote Linie: Alte Süderelbe, Anbindungsvariante 1, schwarze Linie: Dove Elbe	111
Bild 89: Differenzen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (oben), der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit (Mitte) und des Verhältnisses der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (Variante - Referenzzustand) für alle Varianten entlang der Tideelbe.	113
Bild 90: Differenzen des mittleren Rest-Schwebstofftransportes im Längsverlauf der Tideelbe während des Untersuchungszeitraums, jeweils Variante minus Referenzzustand. Blaue Linie: Pagensander Nebelbe, grüne Linie: Haseldorfer Marsch, rote Linie: Alte Süderelbe, Anbindungsvariante 1, schwarze Linie: Dove Elbe	115
Bild 91: Differenzen des mittleren Salzgehaltes im Längsverlauf der Tideelbe während des Untersuchungszeitraums, jeweils Variante minus Referenzzustand. Blaue Linie: Pagensander Nebelbe, grüne Linie: Haseldorfer Marsch, rote Linie: Alte Süderelbe, Anbindungsvariante 1, schwarze Linie: Dove Elbe	115

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1 Ergebnisse der BAW Untersuchung aus 2014 für Varianten die als Vergleich genutzt werden	63
---	----

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Für das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung der Tideelbe soll die Zusammenarbeit der drei Länder Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und des Bundes sowie der Austausch mit den Kreisen, Kommunen, Verbänden und Organisationen aus der Region institutionalisiert werden. Dazu haben sich die Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie der Bund auf den Aufbau einer neuen Kooperationsstruktur unter dem Titel „Forum Tideelbe“ verständigt.

Das bereits im Rahmen des Vorläuferprozesses, des Forums „Strombau und Sedimentmanagement Tideelbe“, zwischen den relevanten Interessengruppen aus der Region erworbene Vertrauen soll im Forum Tideelbe nach Möglichkeit gefestigt und ausgebaut werden. Auf dieser Basis soll ein strukturierter und fachlich orientierter Dialog zu Fragen des Ästuarmanagements geführt werden, der die berechtigten Ansprüche der verschiedenen Elbnutzer anerkennt und die Tideelbe als Ganzes in den Blick nimmt. Vorrangiges Ziel ist es, Strombaumaßnahmen zu identifizieren und zu priorisieren, die eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe fördern. Insbesondere unter Beachtung von hydromorphologischen, gewässerschutz- und naturschutzfachlichen Gesichtspunkten sowie regionaler Betroffenheit.

Im gemeinsamen Auftrag der Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation und der Behörde für Umwelt und Energie sowie der Geschäftsführung der Hamburg Port Authority wurde das Projekt „Forum Tideelbe“ im November 2016 eingesetzt. Mit der Federführung des Projektes wurde die Behörde für Umwelt und Energie beauftragt. Das Projekt wird gefördert von der Stiftung Lebensraum Elbe.

Die Konkretisierung strombaulicher Maßnahmen durch verschiedene Arbeitsgruppen und deren Bewertung durch einen Lenkungskreis und fand in mehreren Phasen statt:

- Phase 1: Vorauswahl von Maßnahmen auf Basis von Experteneinschätzungen nach einem eher groben Betrachtungsmaßstab, orientiert an den drei Hauptkriterien
 - hydrologische Wirksamkeit
 - ökologisches Verbesserungspotenzial
 - Realisierbarkeit
- Phase 2: Vertiefte Betrachtung der Erfolg versprechenden Maßnahmenvorschläge inkl. Machbarkeitsbetrachtungen, Bewertung, und Priorisierung.
- Phase 3: Abstimmung und Verabschiedung eines Ergebnisberichts einschließlich einer Rangliste.

Das vorliegende Gutachten beschreibt die wasserbaulichen Systemstudien der Bundesanstalt für Wasserbau als Grundlage für die Machbarkeitsstudien der vom Forum Tideelbe in der Phase 2 konzipierten Maßnahmen. Mit diesen Systemstudien wird die Auswirkung der Schaffung von Flutraum im Bereich der Tideelbe auf wichtige Kenngrößen der Tidedynamik vergleichbar ermittelt und dargestellt. Konkret geht es um die Auswirkungen eines Anschlusses der Haseldorfer Marsch, der Alten Süderelbe und der Dove-Elbe an die Tideelbe in einem vom Forum

Tideelbe festgelegtem Maßnahmenlayout. Zusätzlich wird in gleicher Weise eine Vertiefung des stromauf gelegenen Abschnittes der Pagensander Nebelbe untersucht, eine Maßnahme, die ergänzend von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung vorgeschlagen wurde.

2 Untersuchungsmethode

2.1 Untersuchungskonzept

Das Vorgehen ist für alle hier untersuchten Maßnahmen identisch. In ein bewährtes dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell, das die Tidedynamik und den Stofftransport in der Tideelbe für das Jahr 2016 modelliert, werden die jeweils zu untersuchenden Maßnahmen (im Folgenden auch „Varianten“ genannt) eingebaut und in gleicher Weise wie der Referenzzustand simuliert. Der Simulationszeitraum umfasst stets zwei Sping-Nipp-Zyklen (19.04.-20.05.2016), wobei der zweite Zyklus (04.05.-19.05.2016) für die Analyse der Ergebnisse verwendet wird. Zur Modellsteuerung dienen die realen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen. Die Simulation ist morphostatisch. Als Referenz dient das Elbmodell mit der Topographie des Jahres 2016 unter Berücksichtigung der des Sollzustandes der Fahrrinnenanpassung und der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahme Schwarztonnensand. Das hat seinen Grund in der Tatsache, dass die Fahrrinnenanpassung zu einem Zeitpunkt, an dem für eine der hier untersuchten Maßnahmen weitere Planungen durchgeführt werden würde, vollzogen sein wird und dann zum sogenannten „Planerischen-Ist-Zustand“ gehört.

In der Analyse der Modellergebnisse werden für ausgewählte, signifikante Kenngrößen die Differenzen zum Referenzzustand berechnet und so der Einfluss der jeweiligen Maßnahme auf die Tidedynamik ermittelt. Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen können neben synoptischen Darstellungen grundsätzlich eine Vielzahl tideabhängiger und tideunabhängiger Kennwerte der Wasserstände, der Strömung, des Salzgehaltes und der Schwebstoffverteilung errechnet werden, um das System zu beschreiben und die Wirkung einer Maßnahme zu quantifizieren. Die Rechenwerte aus der Modellsimulation und -analyse bedürfen grundsätzlich der fachwissenschaftlichen Interpretation, um fundierte Prognosen über die Wirkungen der untersuchten Maßnahme 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. In Bild 1 sind die Komponenten dargestellt, die zur Erstellung einer wasserbaulichen Systemanalyse benötigt werden. Außerdem können für bestimmte Bilanzräume während der Simulation in jedem (Sub-) Zeitschritt an jeder Stelle der Topologie die exakten Sedimentmengen für eine Bilanzierung berechnet werden. Das ist ein signifikanter Unterschied zu dem Vorgehen bei einer Tidekennwertanalyse, bei dem z.B. alle 10 Minuten ein synoptischer Datensatz geschrieben wird, der im Post-Processing entsprechend ausgewertet wird. Bei einem synoptischen Datensatz ist der Systemzustand nur zu genau diesem Zeitpunkt bekannt.

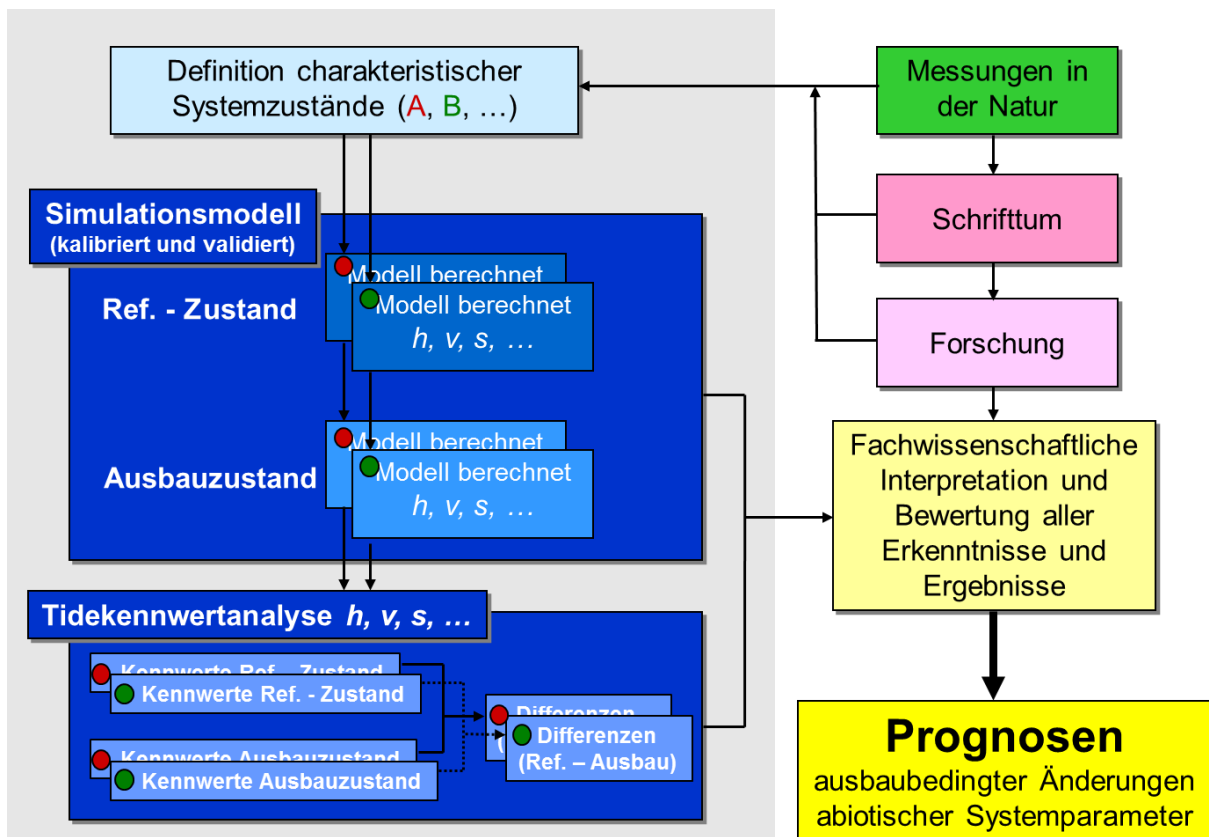


Bild 1: Methode der wasserbaulichen Systemanalyse

2.2 Mathematische Simulationsverfahren

Die Prognose der Wirkung baulicher Veränderungen auf die Tidedynamik und den Stofftransport 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 mit der Kombination der numerischen Verfahren *UnTRIM* für den Wasserkörper und *SediMorph* für die Gewässersohle dreidimensional ab. Bei dem mathematischen Verfahren *UnTRIM* handelt es sich um eine Entwicklung, die von Prof. Vincenzo Casulli (Universität Trient, Italien) durchgeführt wurde (Casulli, Walters, 2000; Casulli, Zanolli, 2002; Casulli, 1999; Casulli, Zanolli, 1998; Casulli, Zanolli, 2005). *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. Hierbei wird das Lösungsgebiet von einer endlichen Anzahl konvexer Polygone (Dreiecke, Vierecke) überlappungsfrei überdeckt.

Das Verfahren *SediMorph* ist eine Entwicklung der Bundesanstalt für Wasserbau in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr München zur Simulation von dreidimensionalen sedimentologischen Prozessen an der Gewässersohle. Hierzu werden Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Suspensionstransport der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Aus diesen Sedimentströmen werden Sohlhöhenveränderungen bilanziert. Die

Beschreibung des Aufbaus und der Veränderung des Bodens, d.h. die Verwaltung des Sedimentinventars, die Genese von Transportkörpern und deren Rauheitswirkung etc. ist ebenfalls in *SediMorph* realisiert. Auch das Verfahren *SediMorph* arbeitet auf unstrukturierten orthogonalen Gittern.

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

- reynoldsgemittelte Navier - Stokes - Gleichung (RANS)
- lokale Beschleunigung (Massenträgheit)
- advective 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
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Diffusivität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- rheologische Viskosität

Bild 2 zeigt in grafischer Form wichtige natürliche Prozesse in einem Ästuar, von denen die Wesentlichen in den Modellverfahren berücksichtigt sind.

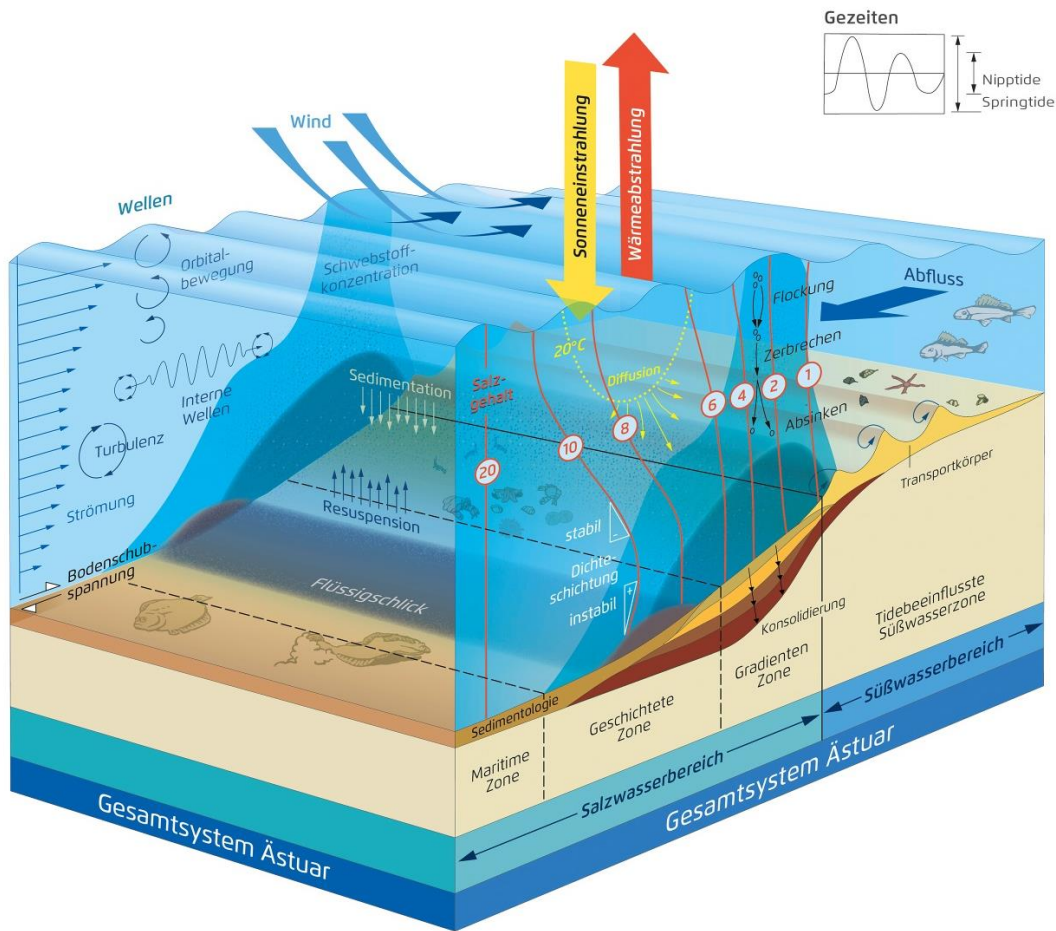


Bild 2: Natürliche Prozesse in einem Ästuar

Folgende Berechnungsergebnisse werden durch das mathematische Modell an den diskreten Berechnungspunkten geliefert:

- Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche
- Strömungsgeschwindigkeit
- Tracerkonzentration (Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoff, ...)
- Turbulenz
- Dichte
- Ggfls. hydrodynamischer Druck

Dabei liegen die skalaren Größen (Wasserstand, Konzentration usw.) in den Polygonzentren und die vektoriellen Größen (Geschwindigkeit) auf den Mitten der Polygonränder vor.

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 werden.

2.3 Analyse der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in Form charakteristischer Tidekennwerte dargestellt und erläutert, um den Planungsprozess mit wichtigen Ergebnissen zu unterstützen. Die vorliegende Untersuchung stellt daher eine grundlegende Machbarkeitsstudie für die Planungen des Forums Tideelbe dar. Für die Analyse der Ergebnisse wurde ausschließlich der zweite der beiden gerechneten Spring-Nipp-Zyklen (04.05.2016 – 19.05.2016) ausgewertet, um Vorlaufeffekte des Modells zu vermeiden. Die maßnahmenbedingten Änderungen werden anhand folgender Tidekennwerte untersucht:

- Mittleres Tidehochwasser
- Mittleres Tideniedrigwasser
- Mittlerer Tidehub
- Mittlere Flutstromgeschwindigkeit
- Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit
- Verhältnis von Flut zu Ebbstrom
- Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung
- Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung
- Advektiver Rest-Schwebstofftransport
- Änderung der Tiefenerosion an der Gewässersohle

Diese Tidekennwerte werden aus tiefengemittelten Werten der 3D-Modellergebnisse flächenhaft und im Längsschnitt dargestellt. Die Darstellung des advektiven Rest-Schwebstofftransports im Längsschnitt erfasst den Schwebstofftransport über den gesamten Fließquerschnitt.

Die Untersuchung liefert damit wichtige Indikatoren für einen weiteren Entscheidungsprozess, dies kann keine tiefgreifende Untersuchung im Rahmen einer konkreten Planung für eine bestimmte Maßnahme ersetzen.

3 Verwendete Unterlagen und Daten

3.1 Topographie

Die räumliche Ausdehnung des Modellgebietes mit der zu Grunde liegenden Topographie, sowie die Lage der hier untersuchten Maßnahmen, sind in Bild 3 zu sehen. Die Bathymetrie beruht auf dem DGMW-W 2016 (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2016). Die Topographie der verschiedenen Maßnahmen wird jeweils in den Ergebniskapiteln dargestellt (5.1.1 (Pagensander Nebeneibe), 5.2.1 (Haseldorfer Marsch), 5.3.2 (Alte Süderelbe), 5.4.1 (Dove Elbe)).

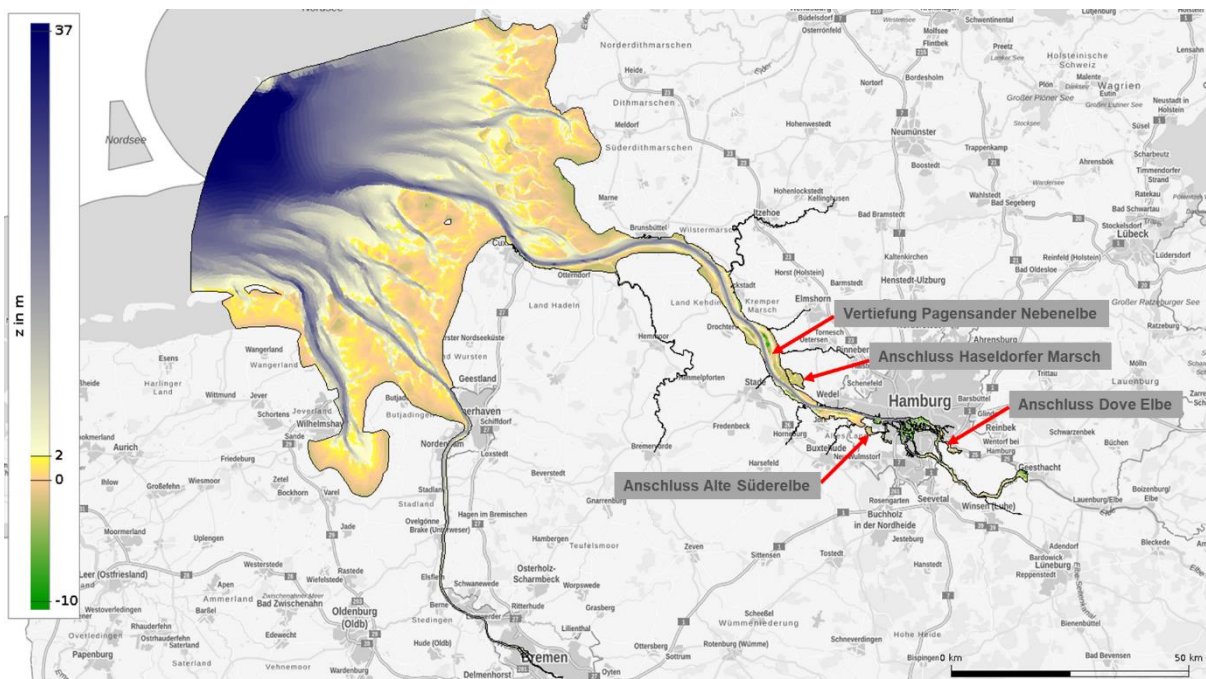


Bild 3: Topographie (Wassertiefen in m NHN) und Lage der untersuchten Maßnahmen.

3.2 Randwerte

3.2.1 Seeseitiger Rand

Am seeseitigen Rand werden Daten für Wasserstand, Salz und Temperatur aus einem übergeordneten BAW Modell der Nordsee (R. Hagen et al., 2020) extrahiert und für das vorliegende Modell verwendet.

3.2.2 Oberwasserzufluss

Am oberen Modellrand werden für den Abfluss Messungen der Station Neu Darchau mit einem Zeitversatz von einem Tag verwendet. Salzkonzentrationen werden aus der Leitfähigkeit berechnet (M. Bergemann, 2005). Bild 4 zeigt die Tageswerte des Abflusses der Elbe in Neu Darchau. Während des Simulationszeitraumes (19.04.-20.05.2016), fällt der Oberwasserzufluss von 609

m^3/s auf $320 \text{ m}^3/\text{s}$. Es herrschen damit Bedingungen, die das Tidal Pumping, also den Transport von Sedimenten stromauf, begünstigen.

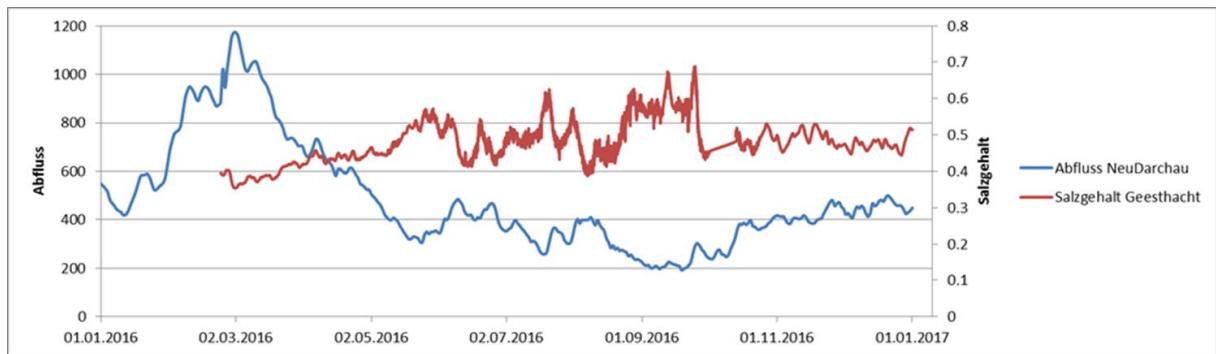


Bild 4: Tageswerte des Abflusses und des Salzgehaltes der Elbe in Neu Darchau für das Jahr 2016.

3.2.3 Meteorologische Daten

Als meteorologische Randbedingung für Wind, Luftdruck und Temperatur werden Daten aus dem Globalmodell ICON des Deutschen Wetterdienstes (D. Reinert et al., 2020) verwendet.

3.3 Anfangswerte des Sedimentinventars

Das anfänglich im Modell vorhandene Sedimentinventar wurde aus dem funktionalen Bodenmodell generiert, ein Produkt des KFKI-Projektes „AufMod“ (H. Heyer, K. Schrottke, 2013). Es werden zehn Fraktionen zur Beschreibung der räumlichen Verteilung der oberflächensedimente des Bodenmodells verwendet. Die Korngrößenklassen werden nach der Udden-Wentworth-Skala beschrieben und erfassen Sedimente von „Very_Fine_Silt“ bis „Gravel“ in ihren jeweiligen Anteilen. Die größeren (sandigen) sechs Fraktionen werden als Geschiebefracht transportiert, die kleineren (schluffigen) vier Fraktionen in Suspension.

Das Sedimentinventar ist in Bild 5 anhand des mittleren Korndurchmessers dargestellt. Das feinkörnigere Sedimentinventar (Darstellung: blau-grün-gelb) im Schlickfallgebiet in der Nordsee und in den Nebenbereichen der Tideelbe ist ebenso wie das sandigere Sedimentinventar in der Fahrrinne deutlich zu erkennen. Die zusätzlichen Fluträume werden mangels Daten nicht mit einer Sedimentverteilung initialisiert. Das hat den Vorteil, dass die berechneten Schwebstoffgehalte und die morphologische Entwicklung, insbesondere im Nahbereich des Anschlusses, nicht durch anfängliche Sedimentausträge aus den zusätzlichen Gebieten beeinflusst werden und somit der Einfluss der Tideanbindung auf dem Sedimenttransport im Bereich des Anschlusses vergleichbar in allen Maßnahmen bewertet werden kann.

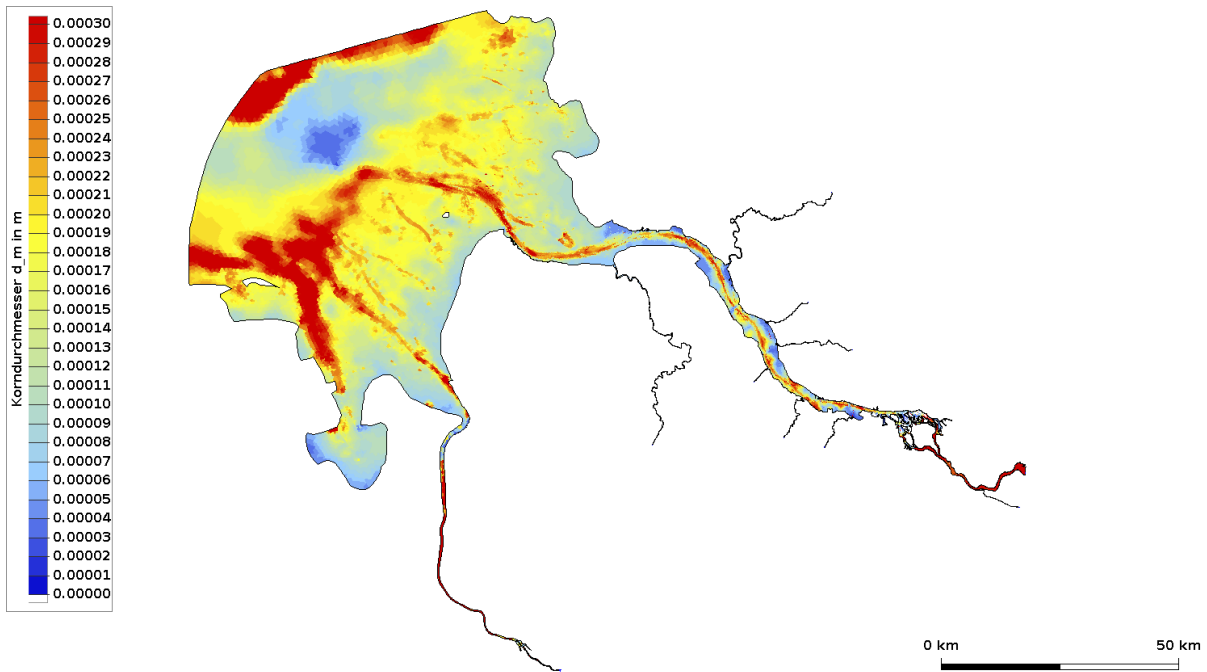


Bild 5: Anfängliches Sedimentinventar im Modellgebiet, dargestellt anhand des mittleren Korndurchmessers.

4 Hinweise zu grundsätzlichen Prozesse in der Elbe

4.1 Anmerkungen zur Tidedynamik der Elbe

Die durch die Gezeitenkräfte hervorgerufene Tidewelle wandert vom Atlantik, durch die Nordsee und weiter durch die Elbmündung hinauf bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht. Dabei unterliegt sie einer Reihe von Einflüssen, die zu einer Veränderung der Form und Intensität der Tidewelle führen. Beispielsweise variiert die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit im Tideverlauf zeitlich. Durch die geringere Wassertiefe unter dem Wellental (Niedrigwasser) schreitet der Berg der Tidewelle (Hochwasser) schneller fort als das Wellental. Außerdem führt die zeitlich variierende Wassertiefe zu einer zeitlichen Variation der Energiedissipation. Diese Prozesse erzeugen eine Asymmetrie der Tidekurve, die sich durch einen steileren Flut- und flacheren Ebbeast auszeichnet und die auch bereits in einem naturbelassenen Ästuar vorzufinden ist. Die Asymmetrie der Tidekurve der Elbe nimmt auf ihrem Weg von der Nordsee nach Oberstrom zu. Hierbei spielen auch der nach Oberstrom zunehmende Einfluss des Oberwassers sowie die Breitenkonvergenz (Abnahme der Gewässerbreite) eine Rolle. Trotz der fortlaufenden Dämpfung der Tidewelle infolge von Energieverlusten durch Reibung an der Sohle und den Ufern steigt die Gezeitenamplitude Richtung Oberstrom an. Dies ist auch auf die Reflexion der Tidewelle an der Gewässertopographie und dem Wehr Geesthacht zurückzuführen. Unterhalb eines reflektierenden Querschnitts setzt sich die resultierende Tidewelle aus den Anteilen der einlaufenden und reflektierten Tidewelle zusammen. Durch die Überlagerung zweier gegenläufiger Wellen erhöht sich die Tideamplitude und verschieben sich die Kenterpunkte der Tideströmung in Bezug auf das Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Die Verringerung der Gewässerbreite Richtung Oberstrom trägt ebenfalls zu einem Anstieg des Tidehubs bei, da sich die eingetragene Energie auf einen kleineren Querschnitt konzentriert.

Einen vertieften Einblick in die Tidedynamik der Elbe und deren Folgen gewähren aktuelle Fachartikel, die auch die Entwicklung und den aktuellen Zustand der Tideelbe beschreiben. Boehlich & Strotmann (2008, 2020) dokumentieren die historische Entwicklung der hydrologischen Parameter wie Oberwasserzufluss, Tidewasserstände, Strömungen, Salzgehalte sowie Schwebstofffrachten. Sie benennen bedeutende Baumaßnahmen zur Anpassung der Wasserstraße an die wachsenden Schiffsgößen einschließlich des damit verbundenen steigenden Aufwands der Fahrwasserunterhaltung und der Probleme im Umgang mit den zunehmenden Baggermengen. Weilbeer et al. (2020) analysieren verschiedene auffällige hydrologische und morphologische Entwicklungen in der Tideelbe für den Zeitraum 2013-2018.

Bei einer wasserbaulichen Systemanalyse auf Basis von Simulationsrechnungen mit einem mathematischen Modell müssen diese Prozesse und Phänomene von dem mathematischen Modell (auch hydrodynamisch-numerisches Modell, kurz: HN-Modell) abgebildet werden. In diesem Gutachten wird ein dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell verwendet, das die Tidedynamik und den Stofftransport in der Tideelbe für das Jahr 2016 modelliert. Die Analyse der Modellergebnisse wird für den zweiten simulierten Spring-Nipp- Zyklus (04.05.-19.05.2016) durchgeführt und schließlich werden ausgewählte, signifikante Kenngrößen dargestellt (Kapitel 5). Nachfolgend soll gezeigt werden, dass man mit der Simulation eines Spring-Nipp-Zyklus eine Vielzahl möglicher Systemzustände erfasst. Dazu werden die wichtigsten aus dem

Kalibrierungslauf des Modells berechneten Kenngrößen für den in diesem Gutachten verwendeten Spring-Nipp-Zyklus im Vergleich mit den Werten für allen Tiden des Jahres 2016 dargestellt. In Bild 6 sind die minimalen, mittleren und maximalen Werte des MThw, MTnw und MThb für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus aus dem Kalibrierungslauf des Modells dargestellt. Das MThw variiert ebenso wie der MThb in einer Bandbreite von ca. 1 m, das MTnw variiert mit einer Bandbreite von ca. 1,25 m noch etwas stärker. Der für die Tideelbe charakteristische Verlauf mit dem höchsten Tidehub in Hamburg wird gut vom Modell abgebildet. Im Vergleich mit den gemessenen Werten an ausgewählten Pegelstationen für das Jahr 2016 zeigt sich, dass im Jahresverlauf zwar auch höhere und niedrigere Wasserstände auftreten, der gewählte Spring-Nipp-Zyklus aber den Großteil des normalen Tidegeschehens repräsentiert. Tatsächlich treten im Mai eines Jahres i.d.R. die höchsten Tiden auf, so dass bei einer wasserbaulichen Systemstudie auch die Systemreaktionen auf eine Maßnahme bei der Simulation dieses Zeitraums am deutlichsten sichtbar werden. Für die Simulation extremerer Systemzustände, wie sie z.B. bei Sturmfluten (besonders hohe Wasserstände) oder starken Ostwinden (besonders niedrige Wasserstände) auftreten, müssen andere Zeiträume gewählt werden.

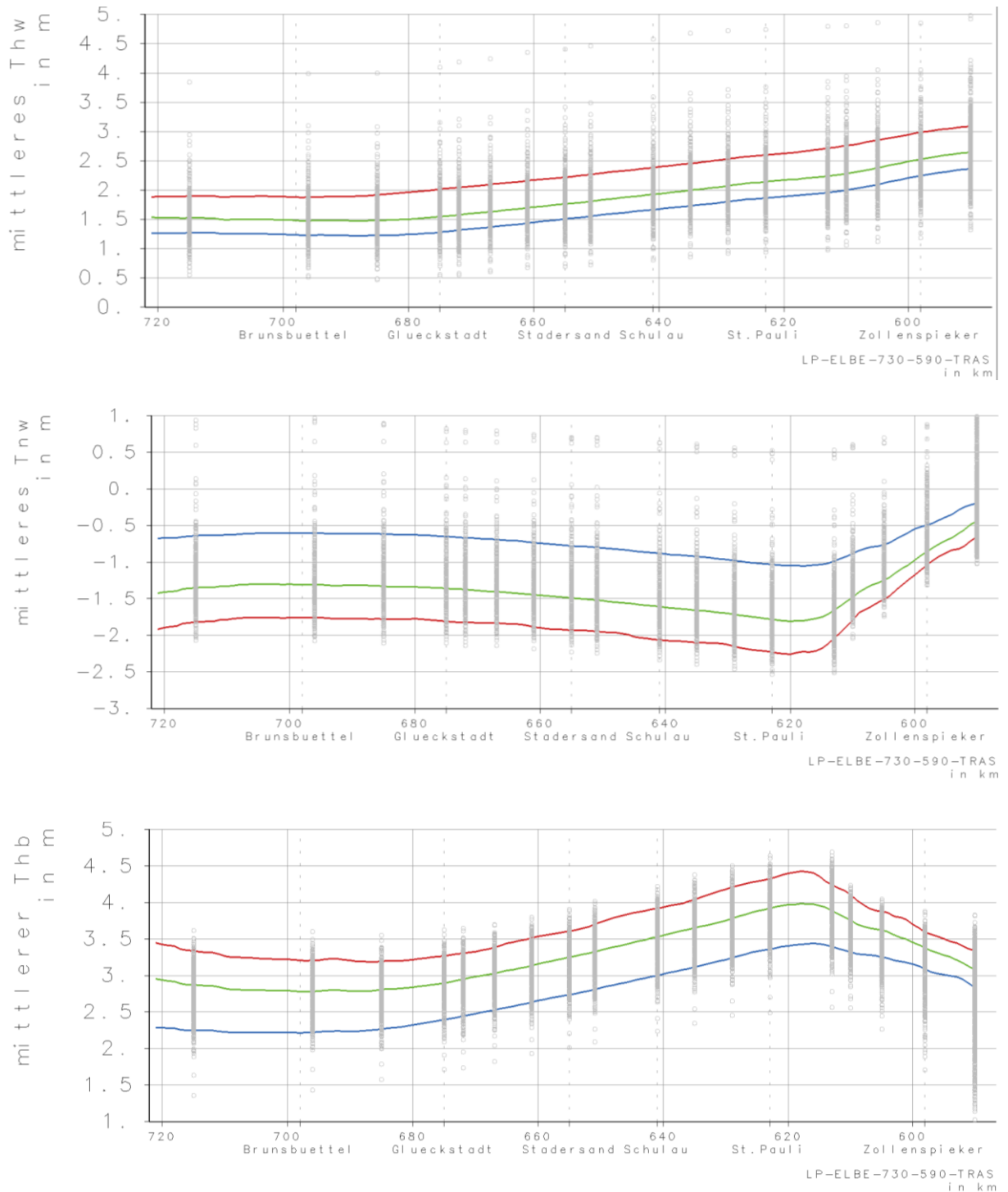


Bild 6: Minimale (blau), mittlere (grün) und maximale (rot) Werte des MThw, MTnw und MThb für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus (Modell, Mai 2016) im Vergleich mit den gemessenen Werten an ausgewählten Pegelstationen für das Jahr 2016.

Entsprechend sind in Bild 7 die minimalen, mittleren und maximalen Werte der mittleren Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeit und des Verhältnisses Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (im Folgenden auch F:E-Verhältnis genannt) für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus dargestellt. Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit variiert ebenso wie die mittlere Flutstromgeschwindigkeit um 0,20-0,40 m/s, wobei die mittlere Flutstromgeschwindigkeit über die gesamte Flusslänge etwas stärker variiert. Auch das F:E-Verhältnis ist veränderlich, es gibt z.B. auch einige Tiden, die trotz des geringen Oberwasserzuflusses durchgängig Werte <1 aufweisen, also ebbstromdominant sind. Die überwiegende Anzahl der Tiden ist jedoch eher flutstromdominant. Im Vergleich zu den Kennwerten des Spring-Nipp-Zyklus sind die Werte für allen Tiden des Jahres 2016 hinterlegt. Dadurch wird erkennbar, dass es im Jahresverlauf nur wenige Tiden gibt, deren Strömungsverhältnisse außerhalb des Bereiches liegen, der von dem verwendeten Spring-Nipp-Zyklus abgedeckt wird.

Aus den Wasserständen und den Strömungsgeschwindigkeiten lassen sich die Wasservolumina berechnen, die durch einen Querschnitt bzw. durch ein Kontrollvolumen transportiert werden. In Bild 8 sind die minimalen, mittleren und maximalen Werte des Flut- und Ebbestromvolumens für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus zu sehen. Im Bereich des Stromspaltungsgebietes in Hamburg verläuft das Längsprofil durch die Norderelbe, der durch die Süderelbe fließende Anteil fehlt daher in dieser Darstellung. Das Ebbestromvolumen entspricht einer verbreiteten Definition des Tideprismas, d.i. das Wasservolumen, das in einer Tide in der Lamelle zwischen dem MThw und dem MTnw transportiert wird. Das Tideprisma ist ein geeigneter Wert, um eine erste Abschätzung der Wirksamkeit einer flutraumschaffenden Maßnahme zu geben: Je größer das durch die Maßnahme angeschlossene Tidevolumen im Vergleich zu dem Tideprisma am Ort des Anschlusses ist, umso größer kann die großräumige hydrologische Wirkung der Maßnahme sein. Die Flut- und Ebbestromvolumen steigen zur Mündung streng monoton an, im Mündungstrichter bei Elbe-Km 720 liegt der Mittelwert bei ca. 700 Mio. m³. Im Vergleich zu den Werten für allen Tiden des Jahres 2016 ist zu erkennen, dass der verwendete Spring-Nipp-Zyklus im Mittel repräsentativ ist, es aber zahlreiche Tiden gibt, die ein größeres oder ein kleineres Ebbe- bzw. Flutvolumen aufweisen.

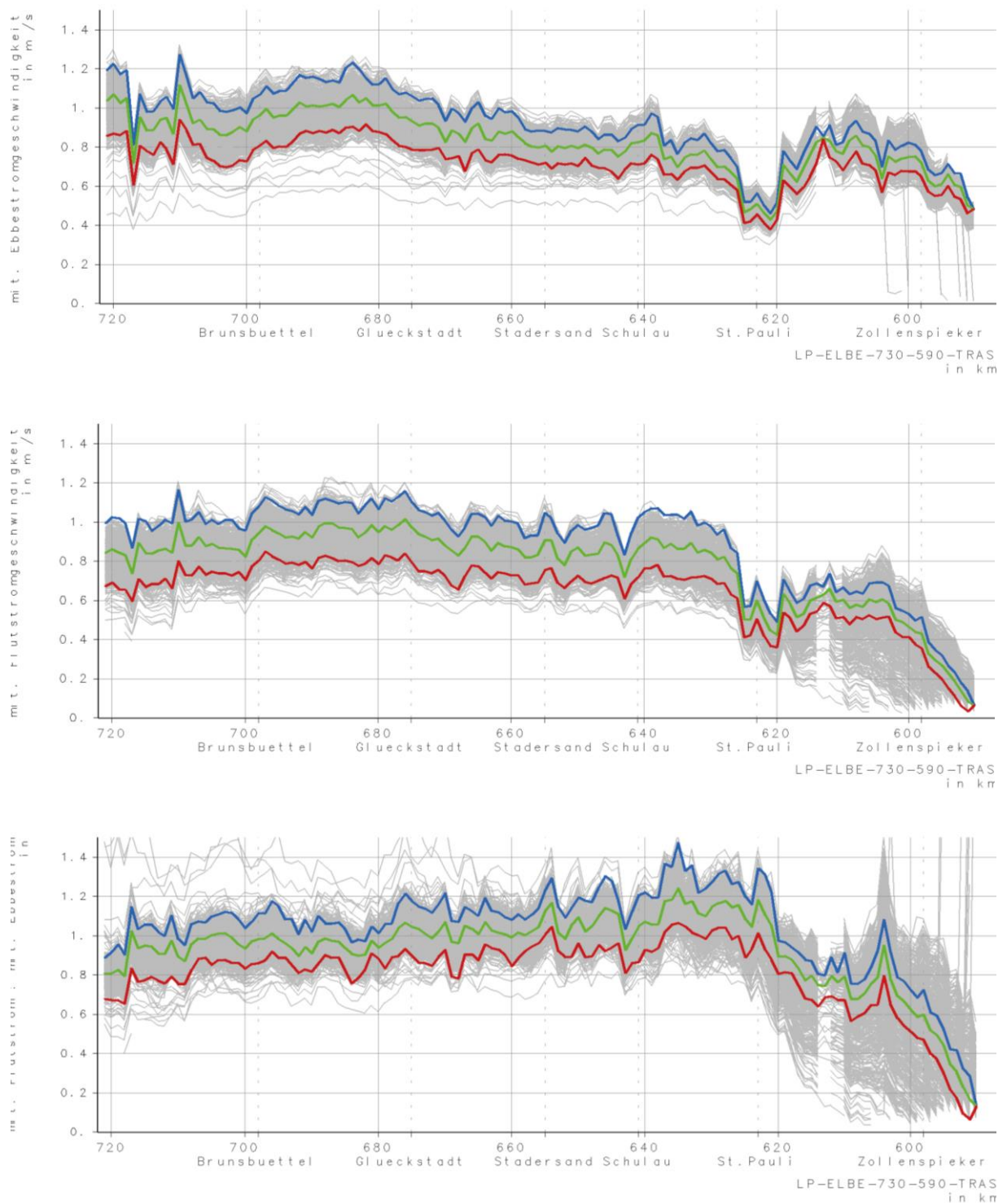


Bild 7: Minimale (rot), mittlere (grün) und maximale (blau) Werte der mittleren Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeit und des F:E-Verhältnisses für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus (Mai 2016) im Vergleich zu den Werten für allen Tiden des Jahres 2016 (Modellergebnis).

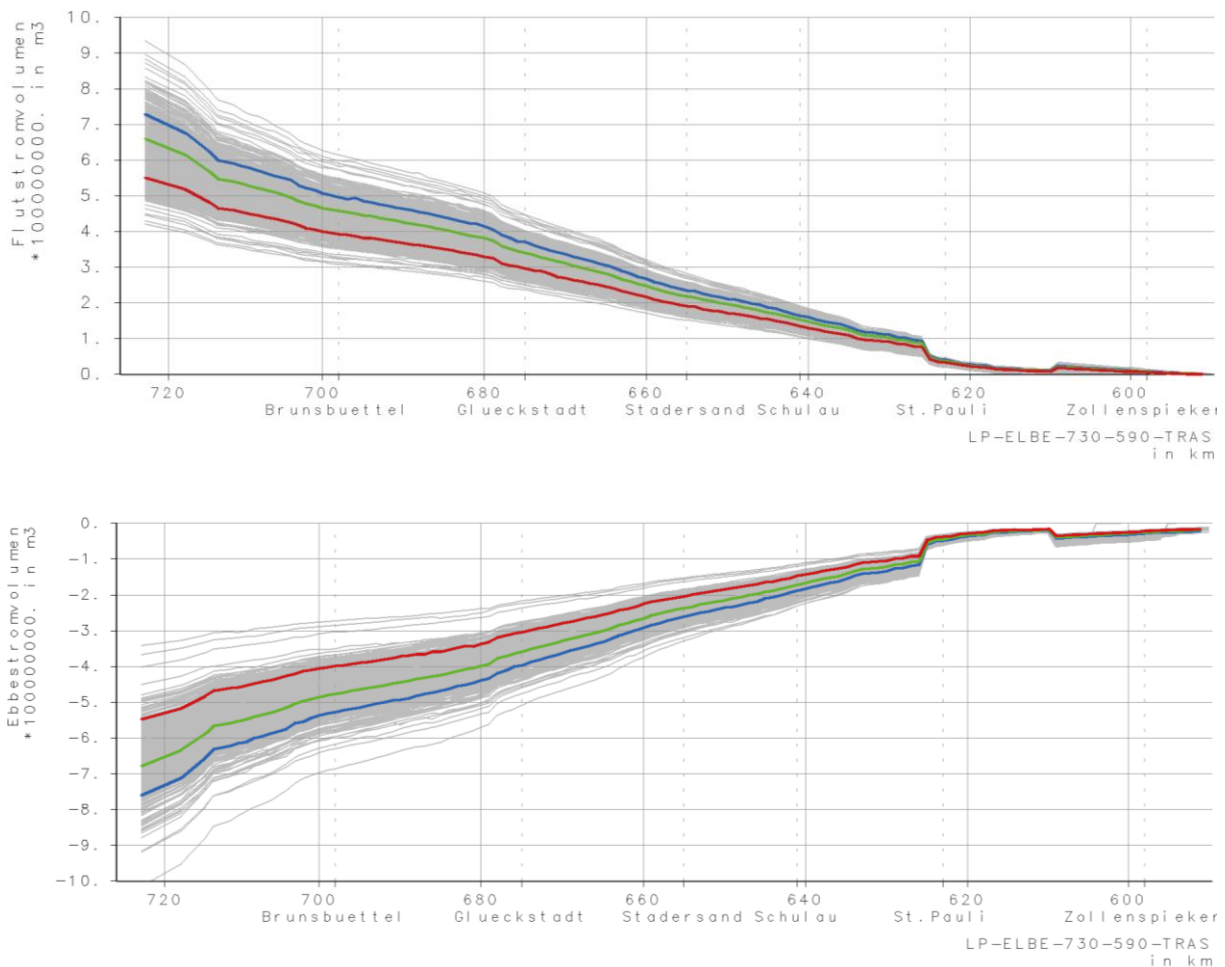


Bild 8: Minimales (rot), mittlere (grün) und maximale (blau) Werte des Flut- und Ebbestromvolumens (resp. Tideprisma) für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus (Mai 2016) im Vergleich zu den Werten für allen Tiden des Jahres 2016 (Modellergebnis).

Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten reagieren unmittelbar auf die veränderlichen Randbedingungen. Eine wesentlich trägere Systemreaktion zeigen hingegen Substanzen, die mit der Strömung transportiert werden. Hier spielt die hydrologische Vorgeschichte eine tragende Rolle. In Bild 9 ist der maximale Salzgehalt für alle Tiden des Jahres 2016 entlang der Tideelbe dargestellt (Modellergebnis). In diesem Hovmöller-Diagramm beschreibt die x-Achse die Flusskilometer und die y-Achse die Zeit. Der maximale Salzgehalt ist farblich codiert als Linie eingetragen, so dass letztlich das Geschehen des ganzen Jahres in einem Bild dargestellt werden kann. Es werden zwei unterschiedliche Farbverläufe verwendet, um die Abhängigkeit der Lage von der Historie des Oberwasserzuflusses (Bild 4) zu verdeutlichen. Während des Jahres 2016 fällt der Oberwasserzufluss von einem Maximum von knapp $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ im Anfang März auf einen Wert von ca. $200 \text{ m}^3/\text{s}$, der ungefähr im September erreicht wird.

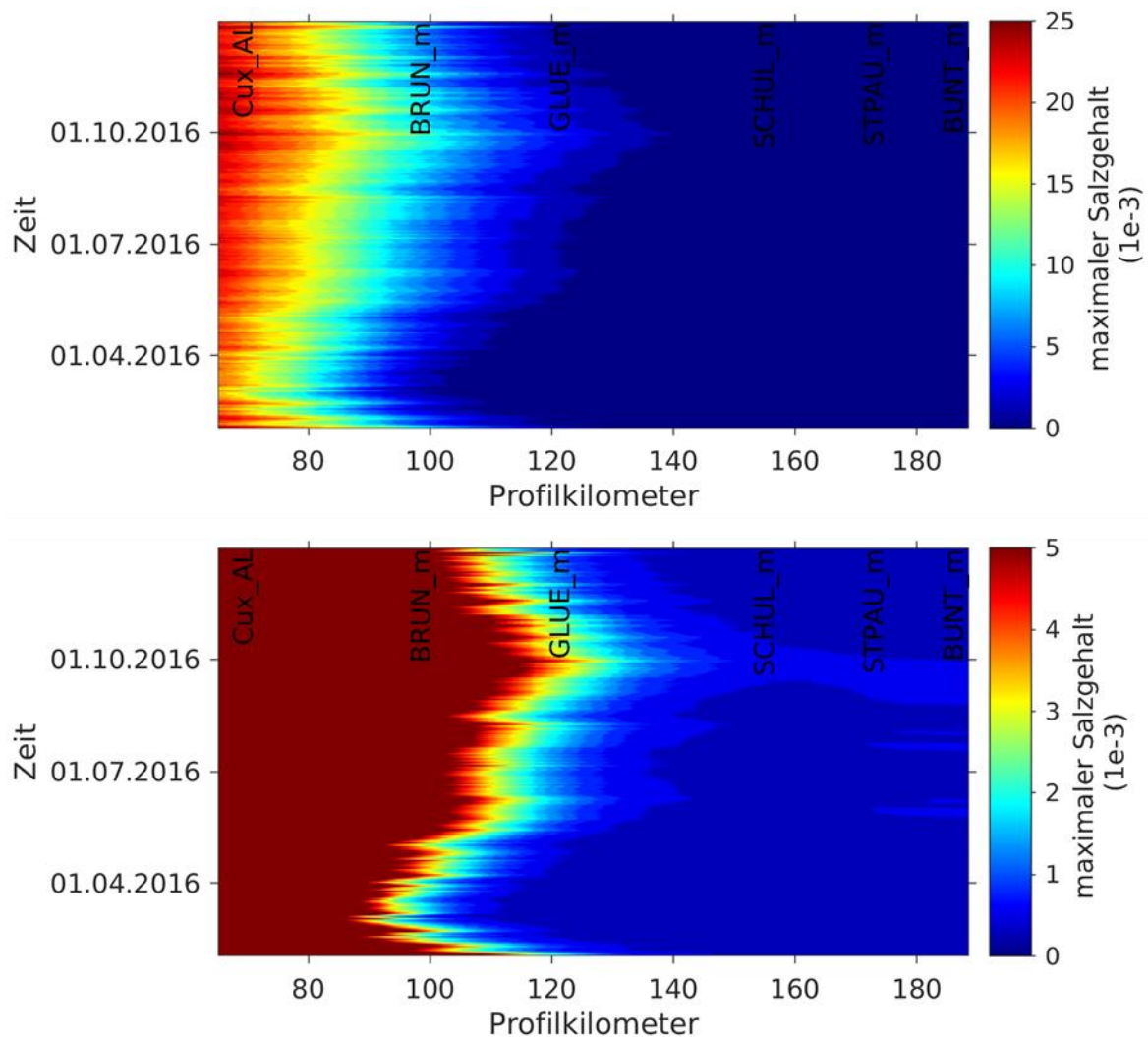


Bild 9: Maximaler Salzgehalt entlang der Tideelbe (Modellergebnis für das Jahr 2016), dargestellt für zwei unterschiedliche Farbverläufe, um die Abhängigkeit der Lage von der Historie des Oberwasserzuflusses zu verdeutlichen.

Dadurch dringt das Salz ab März immer weiter in das Ästuar vor, so dass z.B. in der Fahrrinne in Höhe Glückstadt im Oktober ein um ca. 5 ‰ höherer maximaler Salzgehalt vorherrscht. Der Salzgehalt im Bereich der Tideanschlüsse der in diesem Gutachten untersuchten zusätzlichen Fluträume ist sehr klein und wird im Bereich Hamburg durch den Eintrag mit dem Oberwasserzufluss (Bild 4) bestimmt. Im Anschlussbereich der Haseldorfer Marsch (ca. Profilkilometer 140) können z.B. bei einem lang anhaltenden niedrigen Oberwasserzufluss 1 ‰ auch überschritten werden.

Der Schwebstofftransport unterliegt wiederum einer anderen Charakteristik als der Salztransport. Beim Schwebstofftransport ist ebenfalls die hydrologische Vorgeschichte relevant (Wo befindet sich die Trübungszone? Welche Sedimentfraktionen stehen an welchem Ort zum Transport zur Verfügung?), das Transportverhalten wird aber von den aktuell vorherrschenden Strömungsverhältnissen bestimmt, es erfolgt also auch eine unmittelbare Reaktion auf geänderte Randbedingungen. Diese äußerst variablen Anfangsbedingungen können nur annähernd durch

Messungen oder vorhergehende Simulationen erfüllt werden. Konsistenz und Vergleichbarkeit in einer Systemstudie erreicht man nur durch ein identisches Vorgehen für alle Varianten. Exemplarisch ist in Bild 10 der mittlere Schwebstoffgehalt und der Rest-Schwebstofftransport entlang der Tideelbe dargestellt, wie er sich aus den verwendeten Anfangsbedingungen (siehe z.B. Bild 5) für das Referenzmodell dieses Gutachtens für den verwendeten Spring-Nipp-Zyklus ergibt. Es ist eine Trübungszone mit Maximalwerten um $0,7 \text{ kg/m}^3$ erkennbar. Durch den geringen Oberwasserzufluss bei diesem für das Jahr 2016 durchaus repräsentativen Szenario (Bild 4) herrscht in der gesamten Unterelbe ein Transport stromauf vor.

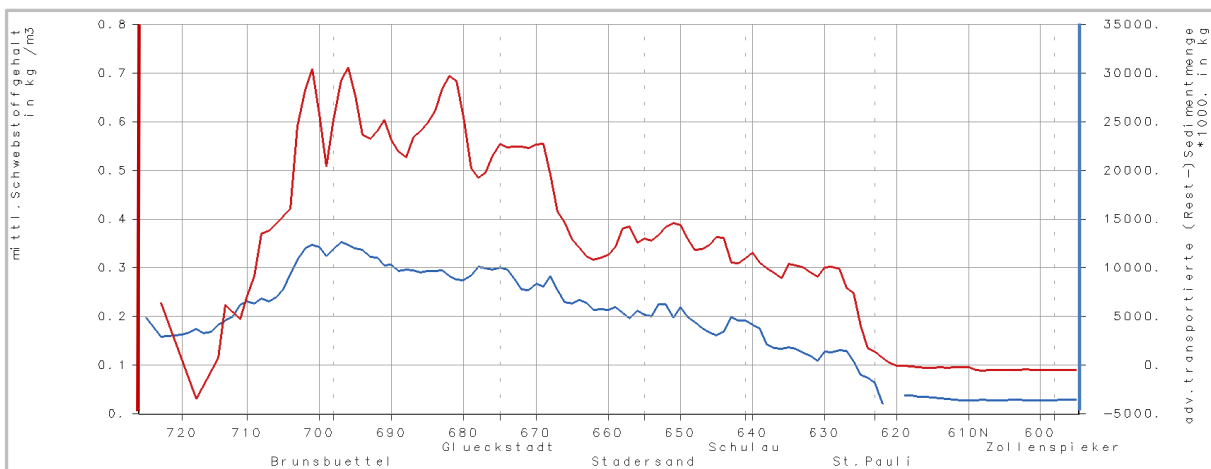


Bild 10: Mittlerer Schwebstoffgehalt (rote Linie) und Rest-Schwebstofftransport (blaue Linie) entlang der Tideelbe (Referenzmodell).

4.2 Grundsätzliche Wirkungsweise von zusätzlichem Tidevolumen

Die Reflexions- und Dämpfungseigenschaften eines Ästuars sind durch seine Hydromorphologie geprägt (siehe auch Kapitel 4.1). In seitlichen Abzweigen eines Ästuars wie beispielsweise Nebenflüssen, Hafenbecken oder Altarmen wird ein Teil der Tideenergie reflektiert, ein anderer Teil wird beim Füllen und Leeren der Becken dissipiert. Dadurch wird der Tidewelle Energie entzogen und der Tidehub gedämpft. Dieser Effekt kommt auch bei dem hier untersuchten Anschluss von zusätzlichem Flutraum zum Tragen. Neben dem Tidehub werden dabei auch die Strömungsverhältnisse im Ästuar verändert, was sich wiederum auf die advektiven Transportprozesse auswirkt. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt stromab eines angeschlossenen Flutraums, da das Tidevolumen in diesem Bereich durch den zusätzlichen Flutraum steigt, gleichzeitig die Dauer einer astronomischen Tide und der Fließquerschnitt aber konstant ist. Dem gegenüber steht die Reduktion des Tidehubs. Ein geringerer Tidehub reduziert das Tidevolumen. Diese Reduktion des Tidevolumens nimmt mit steigendem räumlichem Abstand vom angeschlossenen Flutraum in Richtung stromab zu. Eine Abnahme des Tidevolumens bewirkt eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit. Diese beiden Effekte überlagern sich im Ästuar. Nahe dem angeschlossenen Flutraum überwiegt der Anstieg des Tidevolumens durch den Anschluss des Flutraums. Direkt stromab des Flutraums steigt die Strömungsgeschwindigkeit daher an. Je weiter man sich stromab des Flutraumes befindet, desto stärker wirkt die Abnahme des Tidevolumens infolge der

Tidehubreduktion. Daher sinkt die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmendem räumlichem Abstand vom angeschlossenen Flutraum Richtung stromab. Wenn die Abnahme des Tidevolumens durch die Reduktion des Tidehubs gegenüber der Zunahme des Tidevolumens infolge des angeschlossenen Flutraums überwiegt, tritt eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit auf. Stromauf des angeschlossenen Flutraums sinkt das Tidevolumen durch die Tidehubreduktion. Dadurch sinkt die Strömungsgeschwindigkeit stromauf des angeschlossenen Flutraums. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt zu einer verstärkten Mobilisierung von Sedimenten, was zu einer verstärkten, gezeiteninduzierten Materialumverteilung innerhalb des Systems führt. Hinsichtlich der Bewertung der Maßnahme ist dabei weniger relevant wie stark sich die Materialumverteilung erhöht, als vielmehr wie stark und in welche Richtung sich der Netto-Schwebstofftransport verschiebt.

Die BAW hat in der Vergangenheit in verschiedenen Untersuchungen die Wirkungsweise von zusätzlichem Tidevolumen in der Tideelbe analysiert (Bundesanstalt für Wasserbau, 2007, 2014a, 2014b). Die Untersuchungen zeigen, dass sich zusätzliches Tidevolumen in der Tideelbe dämpfend auf den Tidehub und auf den stromauf gerichteten Sedimenttransport auswirkt.

Die Wirkung von zusätzlichem Tidevolumen auf die Hydrodynamik der Tideelbe ist dabei hauptsächlich von drei Faktoren abhängig:

- Lage des zusätzlichen Flutraums
- Größe des zusätzlichen Flutraums
- dem Fließquerschnitt im Anschlussbereich der Maßnahmen.

Die Wirksamkeit einer Maßnahme ist von der Lage des zusätzlichen Flutraums und dem dort vorherrschenden Tideprisma abhängig. Das Tideprisma, also das Wasservolumen zwischen Tidehoch- und Tideniedrigwasser, ist im Hamburger Bereich mit weniger als 100 Mio. m³ deutlich kleiner als weiter stromab. Eine Maßnahme, die das Tideprisma durch Schaffung von zusätzlichem Flutraum erhöht, beeinflusst die Tidedynamik daher prozentual stärker im Hamburger Bereich als weiter stromab. So beträgt das Tideprisma im Bereich der Haseldorfer Marsch z.B. bereits ca. 200 Mio. m³, in der Mündung ca. 700 Mio m³. Je größer das Tidevolumen eines Flutraums ist, desto größer ist auch die Wirkung der Maßnahme. Dies gilt allerdings nur, solange der Fließquerschnitt im Anschlussbereich des Flutraums an die Elbe sowie innerhalb des Flutraums groß genug ist, um den Gradienten des Wasserstandes, d.h. dem Wasserspiegelgefälle, zwischen dem angeschlossene Flutraum und der Elbe innerhalb einer Tide auszugleichen. Andernfalls wird der angeschlossene Flutraum nicht vollständig genutzt. Ein zu großer Fließquerschnitt im Anschlussbereich des Flutraums zur Elbe kann die Strömungsverhältnisse (z.B. das Verhältnis von Flut- zu Ebbstrom) im Sinne der Zielsetzung ungünstig beeinflussen. Daher ist der Anschluss eines Flutraums unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten in jedem Einzelfall festzulegen, und ggf. zu optimieren. Die Energiedissipation im Bereich der Fluträume, z.B. infolge des Fließweges oder der Sohlrauheit innerhalb eines Flutraumes spielt gegenüber den drei Faktoren Größe, Lage und Anschlusssituation des Flutraums nur eine untergeordnete Rolle, bzw. ihr Einfluss ist lokal begrenzt (Bundesanstalt für Wasserbau, 2014b).

Beim gleichzeitigen Anschluss mehrerer Fluträume treten keine grundlegend anderen Systemreaktionen auf. Auch die Kombination von verschiedenen Maßnahmen ist daher geeignet, den

Tidehub zu reduzieren und den stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports zu verringern. Die Kombination von Maßnahmen ist dementsprechend ein geeignetes Mittel, um die zu erzielende Wirkung auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport zu vergrößern (Bundesanstalt für Wasserbau, 2014b).

Eine wichtige Tidekenngröße zur Beurteilung der Wirksamkeit einer strombaulichen Maßnahme ist der Tidehub bzw. dessen Veränderung. Aus den bisherigen Untersuchungen der BAW ist bekannt, dass eine große Maßnahme, die ein zusätzliches Tidevolumen von $\sim 5 \text{ Mio. m}^3$ schafft, im Raum Hamburg den mittleren Tidehub in der Unterelbe um ca. 5 cm verringern kann. Um besser bewerten zu können, ob die in Kapitel 5 vorgestellten Veränderung der hier untersuchten Maßnahmen als mehr oder weniger wirksam einzuordnen sind, sei der Hinweis gegeben, dass die methodisch in gleicher Weise berechneten Analysen zu der derzeit durchgeführten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe eine Erhöhung des MThw im Bereich Hamburg um ca. 5 cm ergaben (Bundesanstalt für Wasserbau, 2006).

Gegenüber dem Anschluss von zusätzlichem Flutraum unterscheidet sich die Wirkungskette bei einer Vertiefung der Fahrrinne, so dass ein Vergleich der Wirkungen nur eingeschränkt möglich ist:

- In der vertieften Fahrrinne nimmt das Volumen und somit die Masse des strömenden Wasserkörpers zu.
- Dadurch verringert sich die Wirkung der Bodenreibung auf die strömende Wassermasse, so dass die einlaufende Tidewelle weniger gedämpft wird, folglich mehr Tideenergie nach stromauf vordringt und dort den Tidehub vergrößert.
- Mit Zunahme des Tidehubes verstärken sich die Strömungsgeschwindigkeiten insbesondere in Fahrrinnenabschnitten, in denen keine oder nur geringfügige Vertiefungen realisiert werden.
- Eine Vertiefung verkürzt die Laufzeit der Tidewelle, da die Flachwasserwellengeschwindigkeit größer wird. Dieser Effekt verstärkt die Asymmetrie der Tidekurve.
- Der barokline Gradient wird größer, das Salz dringt in der tieferen Rinne weiter in das Ästuar vor.

Mit der Vertiefung einer Nebelbe, wie sie in Kapitel 5.1 am Beispiel der Pagensander Nebelbe untersucht wird, versucht man hingegen einem unaufhaltsamen Trend entgegenzuwirken, der primär durch die unterschiedlichen Laufzeiten der Tidewelle in der tiefen Fahrrinne und in der flacheren Nebelbe verursacht wird: Die Flutwelle im Hauptstrom erreicht den stromauf gelegenen Ausgang der Nebelbe eher als die in der Nebelbe. Dadurch steigt die Flutströmung über beide Eingänge in die Nebelbe ein und es kommt im stromauf gelegenen Teil zu langen Stauwasserdauern, die ihrerseits zu einer verstärkten Sedimentation führen, wodurch dieser Prozess wiederum verstärkt wird. Eine Vertiefung wirkt dem prinzipiell entgegen, hat jedoch im Wesentlichen nur lokale, aber keine großräumigen Auswirkungen auf Wasserstände und Strömungen.

5 Ergebnisse

5.1 Vertiefung der Pagensander Nebelbe

5.1.1 Gestaltung der Maßnahme

Die Tendenz zur Sedimentation ist in den Nebelben stets im stromauf gelegenen Teil stärker ausgeprägt (Kapitel 4.2). In der Pagensander Nebelbe wird dieser Tendenz durch regelmäßig vom WSA Hamburg durchgeführte Baggermaßnahmen im südlichen Übergang zum Hauptstrom entgegengewirkt. Im Mittel werden dabei jährlich ca. 300.000 m³ Sedimente per Wasserinjektion abgetragen. Für die vorliegende Studie wurde hingegen eine Maßnahme entwickelt, die mit ~1.5 Mio. m³ ein wesentlich größeres Baggervolumen erfordert. Mögliche Auswirkungen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport können so deutlicher herausgearbeitet werden.

Bild 11 zeigt einen Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Pagensander Nebelbe. Links im Bild sind die Wassertiefen der vertieften Variante zu sehen, rechts die Differenz der Wassertiefe (Variante minus Referenz). Der tiefere Bereich der südlichen Pagensander Nebelbe wird in dieser Studie auf -5,9 m NHN vertieft. Lateral wird eine Böschungsneigung von 1:10 angenommen, wodurch sich insgesamt eine Volumenänderung von ~1.5 Mio. m³ ergibt. Diese Maßnahme generiert jedoch kein zusätzliches Tidevolumen, da es sich um eine Vertiefung unterhalb des MTnw handelt.

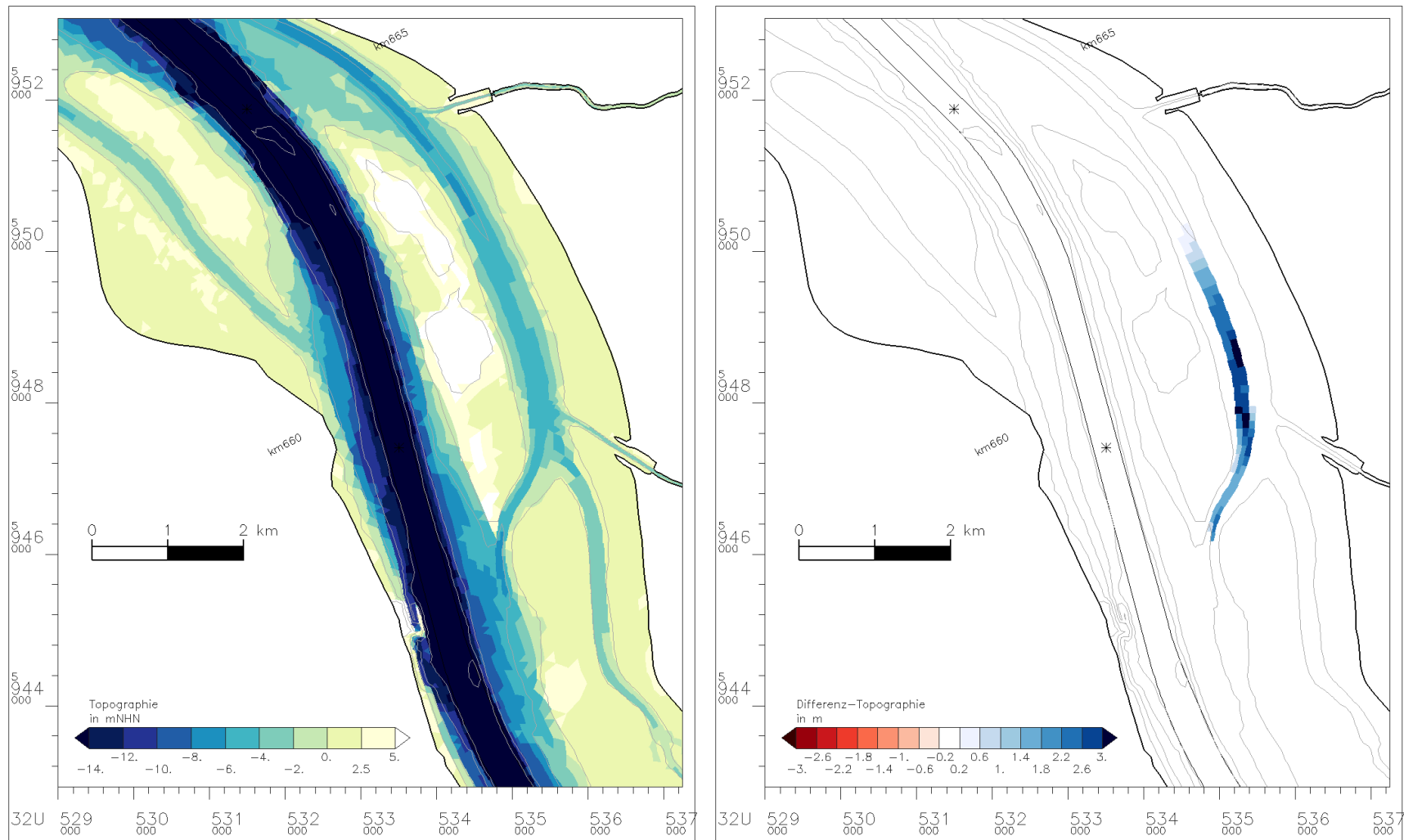


Bild 11: Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Pagensander Nebel Elbe. Bild links: Wassertiefen der vertieften Variante in m NHN. Bild rechts: Differenz der Wassertiefe (Variante minus Referenz)

5.1.2 Auswirkung im Nahbereich der Maßnahme

Die Analysen zeigen, dass durch eine Vertiefung des stromauf gelegenen Teils der Pagensander Nebelbe die Hydrodynamik und der Schwebstofftransport in der Tideelbe im Wesentlichen lokal beeinflusst wird. Eine Vertiefung unterhalb des Tideniedrigwassers wirkt sich auf die Wasserstände nur schwach aus. Das mittlere Tidehochwasser, in Bild 12 links dargestellt, erreicht in der Pagensander Nebelbe im Analysezeitraum etwa 1,80 m NHN. In der Darstellung der Differenz rechts im Bild sind keine Änderung zu erkennen, bzw. sind sie kleiner als ± 0.5 cm und somit in weiß dargestellt. Das mittlere Tideniedrigwasser, das bei diesem Szenario bei -1,60 m NHN liegt, wird durch die Vertiefung um +1,0 cm angehoben (Bild 13). Infolgedessen wird der mittlere Tidehub lokal um -1 cm reduziert (Bild 14). Die entlang der Böschung im vertieften Bereich dunkel dargestellten Differenzen liegen außerhalb des gewählten Wertebereiches, da dieser Streifen im Referenzzustand im Rahmen der Tidekennwertanalyse häufig trockenfällt und daher keine Differenzen gebildet werden können. Die Änderungen des mittleren Tideniedrigwassers und des mittleren Tidehubs sind auch in der angrenzenden Haseldorfer Binnenelbe feststellbar.

Durch die Vertiefung wird die Durchströmung der Pagensander Nebelbe gestärkt. Änderungen der Strömungsverhältnisse sind im Wesentlichen im Nahfeld der Vertiefung und in den unmittelbar angrenzenden Bereichen stromauf und stromab in der Pagensander Nebelbe sichtbar. Es ergeben sich grundsätzlich für die Flut- wie für die Ebbströmung ähnliche Muster. Unmittelbar nördlich und südlich des vertieften Bereichs nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu. Im Böschungsbereich seitlich der vertieften Rinne nimmt die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des vergrößerten Fließquerschnittes dagegen ab. Im vertieften Bereich verringert sich die Rauheitswirkung der Sohle, demzufolge nimmt die Ebbstromgeschwindigkeit gegenüber dem Referenzzustand am südlichen und nördlichen Ende geringfügig zu. (Bild 15 und Bild 16). Insgesamt nimmt die Flutstromdominanz an der östlichen Böschung des vertieften Abschnitts etwas zu. In den anderen Bereichen der Vertiefung nimmt die Flutstromdominanz geringfügig ab, bzw. ändert sich nicht (Bild 17).

Aufgrund der kürzeren Laufzeit der Flachwasserwelle im vertieften Bereich der Pagensander Nebelbe ändert sich auch die Stauwasserdauer (Bild 18 und Bild 19). Die Stauwasserdauer ist sowohl im Hauptstrom wie auch in der nördlichen Hälfte der Pagensander Nebelbe bei der Flutstromkenterung mit ca. 60 Minuten deutlich länger als bei der Ebbstromkenterung mit ca. 20 Minuten. Mit der Vertiefung nehmen die Stauwasserdauern sowohl bei Ebbstromkenterung wie auch bei Flutstromkenterung vor allem in den Böschungsbereichen östlich und westlich der vertieften Rinne deutlich zu. Am südlichen Ende der Vertiefung zum Hauptstrom hin nimmt die Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung hingegen ab. Dadurch werden zwar die Sedimentationszeiten im tieferen Bereich verkürzt, doch bereits an diesem Analyseergebnis ist zu erkennen, dass nach wie vor in der Pagensander Nebelbe ein Trend zur Sedimentation vorherrschen wird.

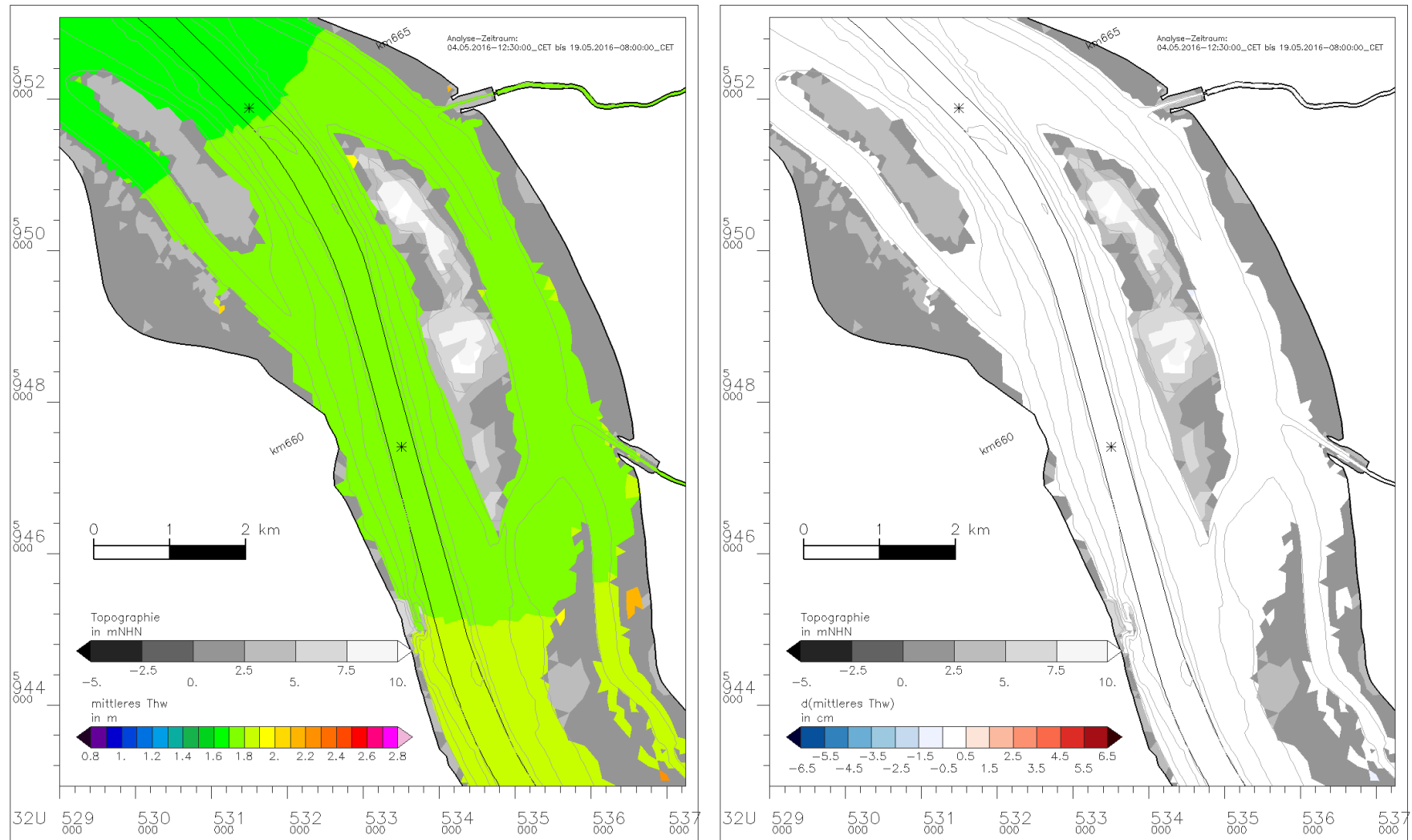


Bild 12: Mittleres Tidehochwasser. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

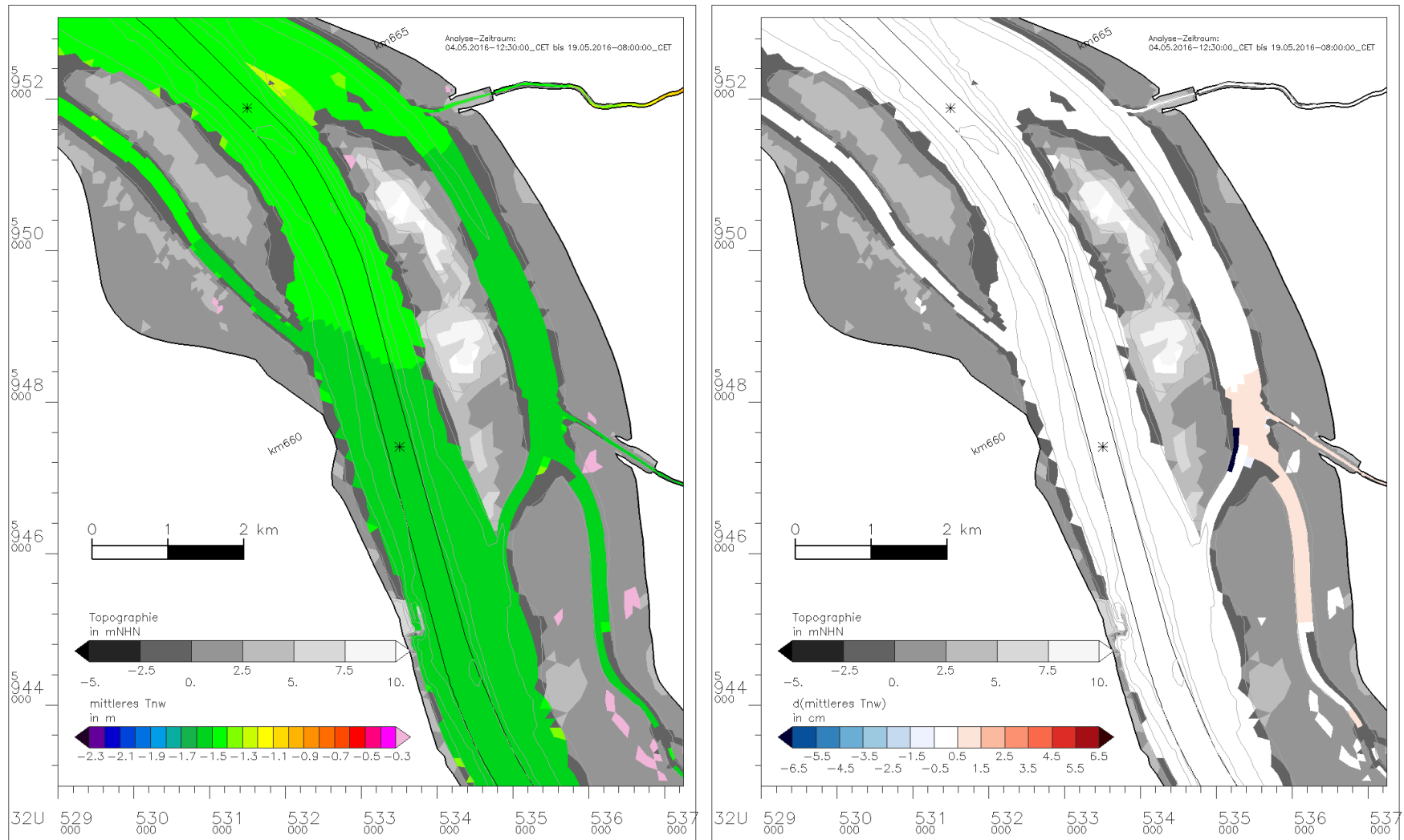


Bild 13: Mittleres Tideniedrigwasser Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

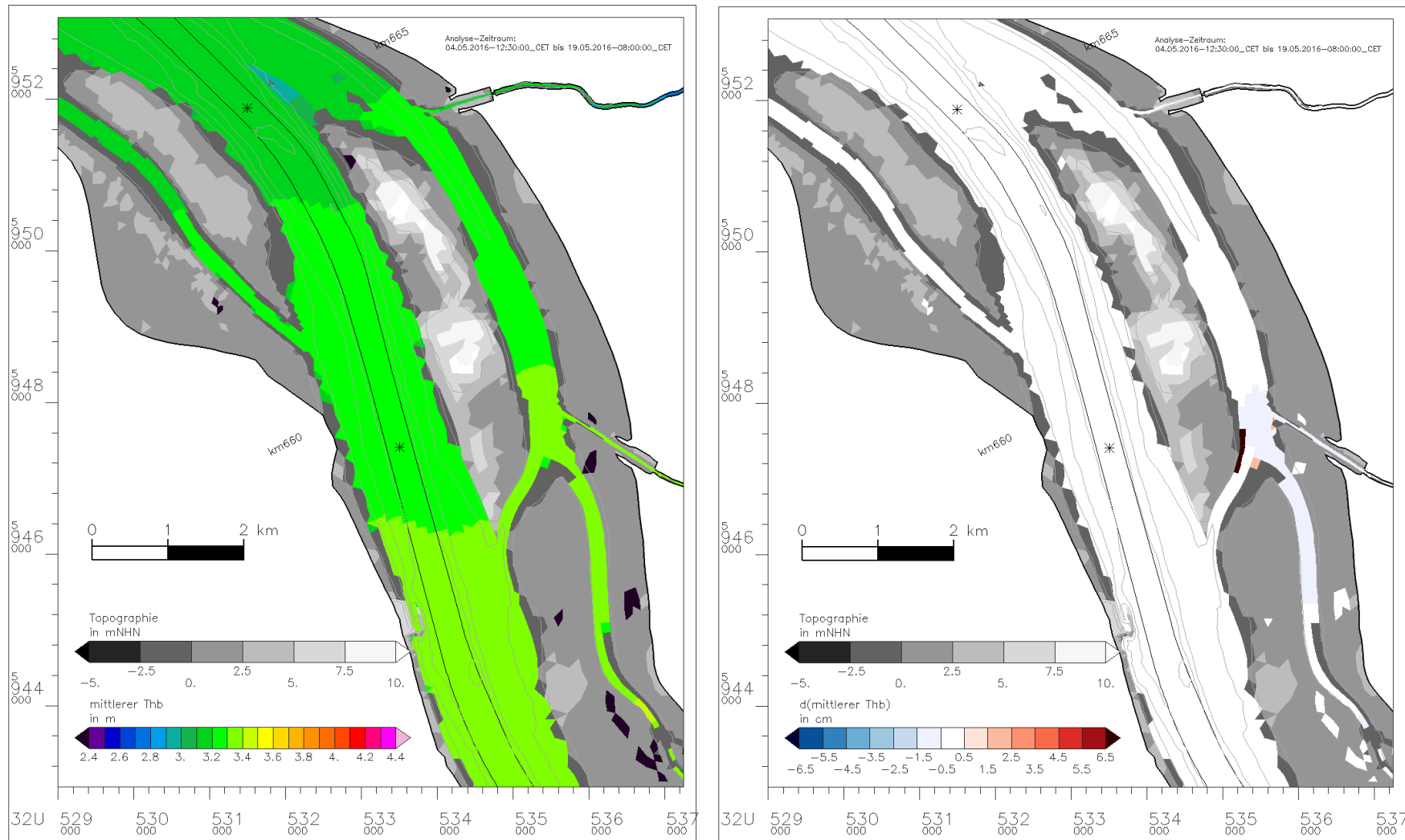


Bild 14: Mittlerer Tidehub Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

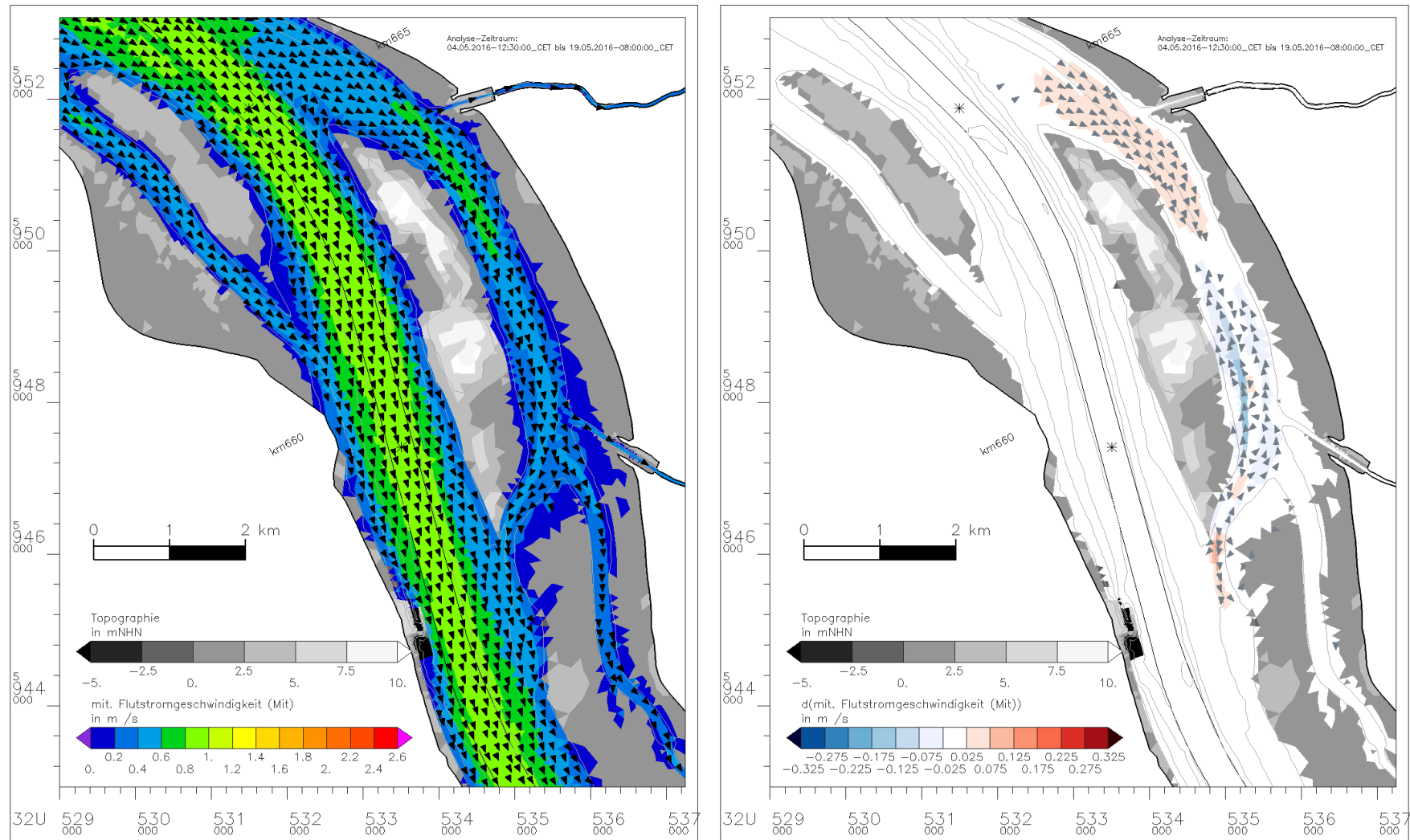


Bild 15: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

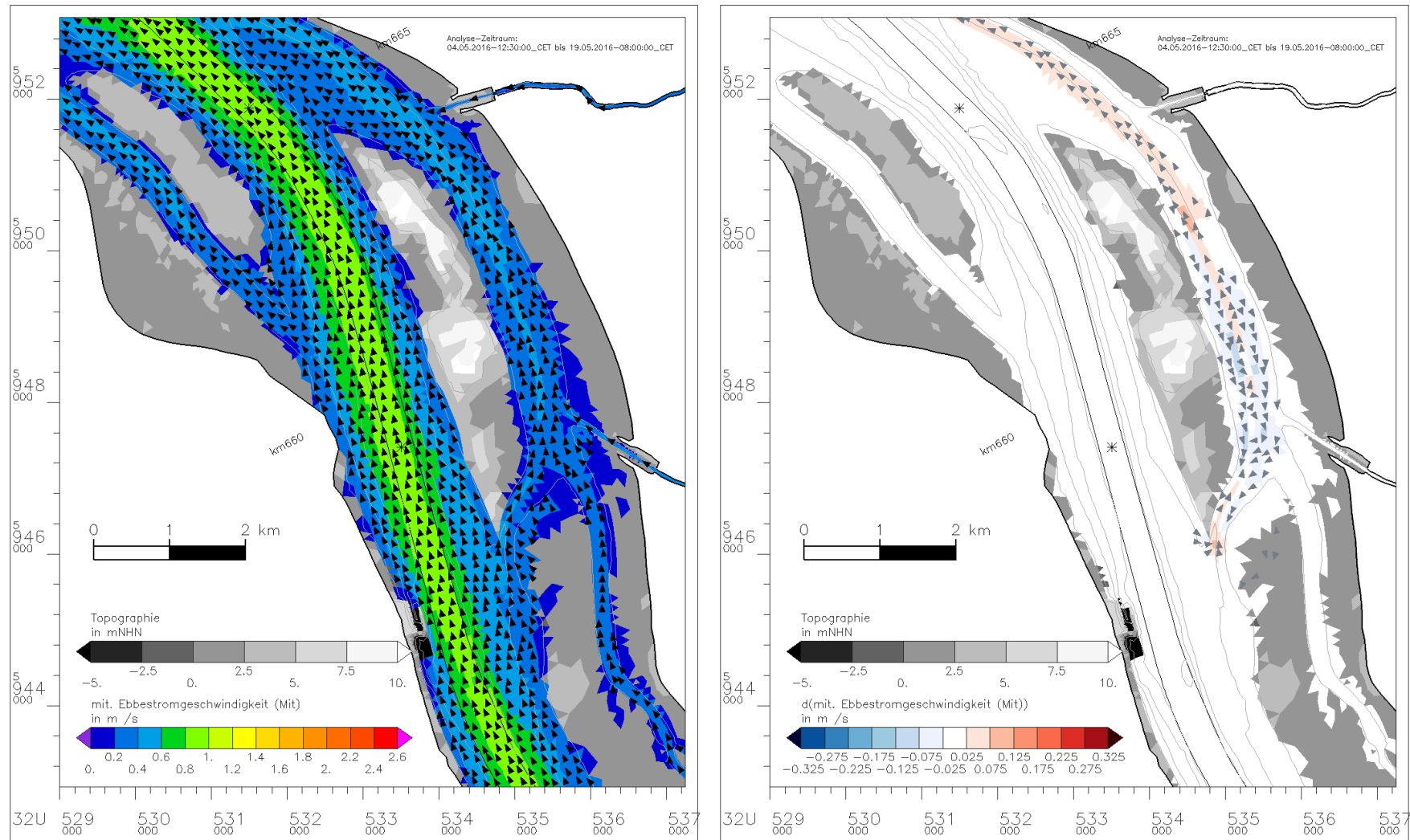


Bild 16: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

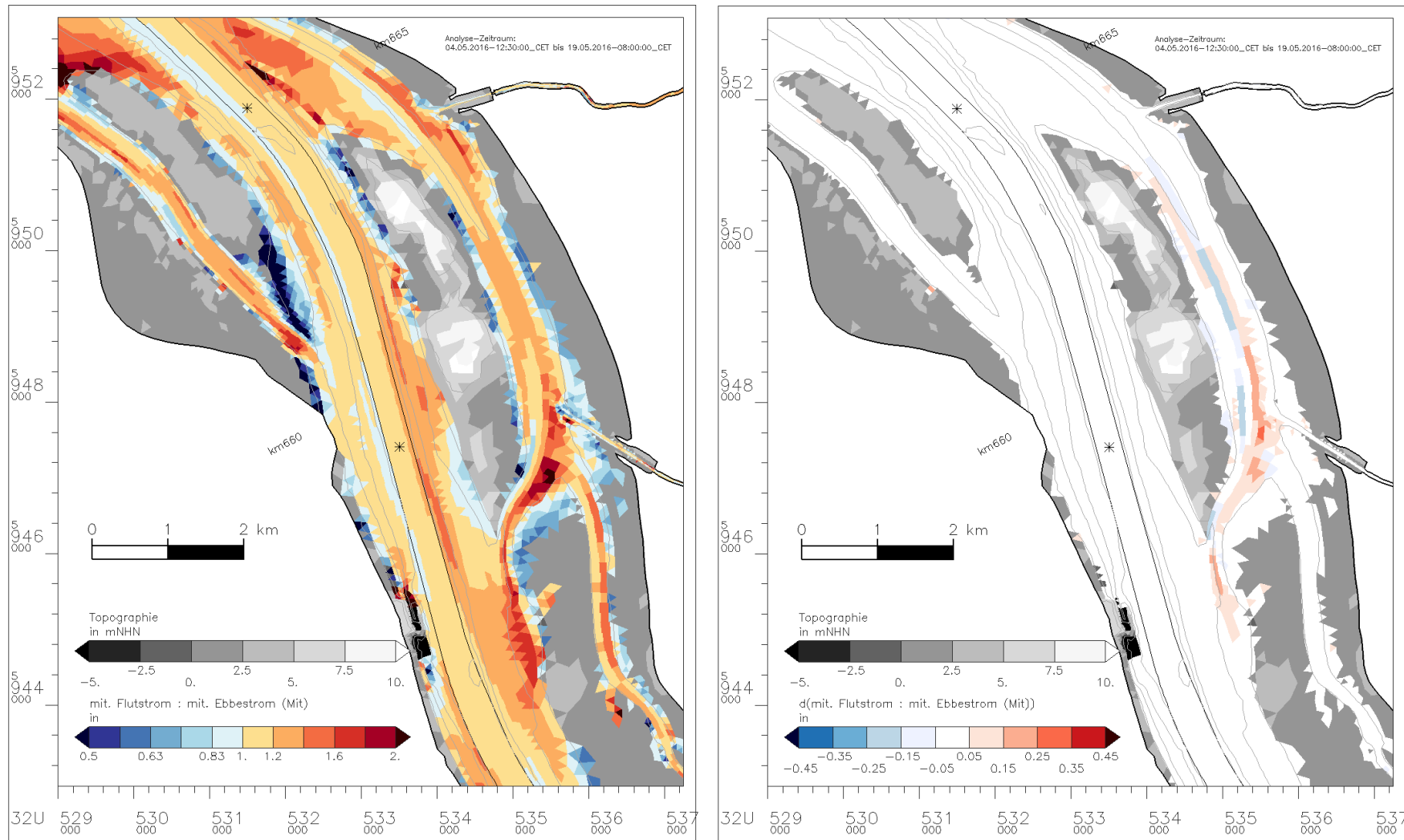


Bild 17: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

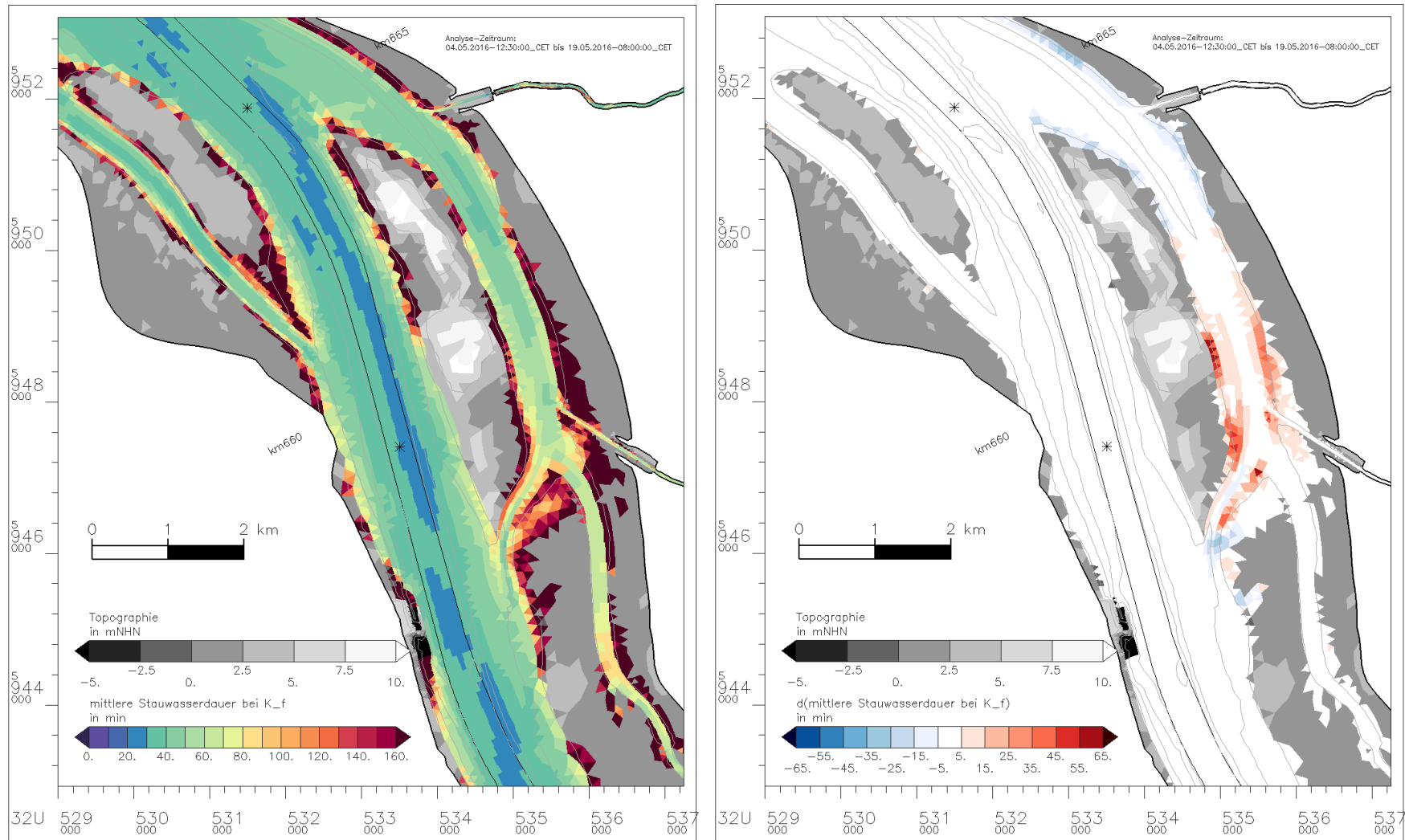


Bild 18: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

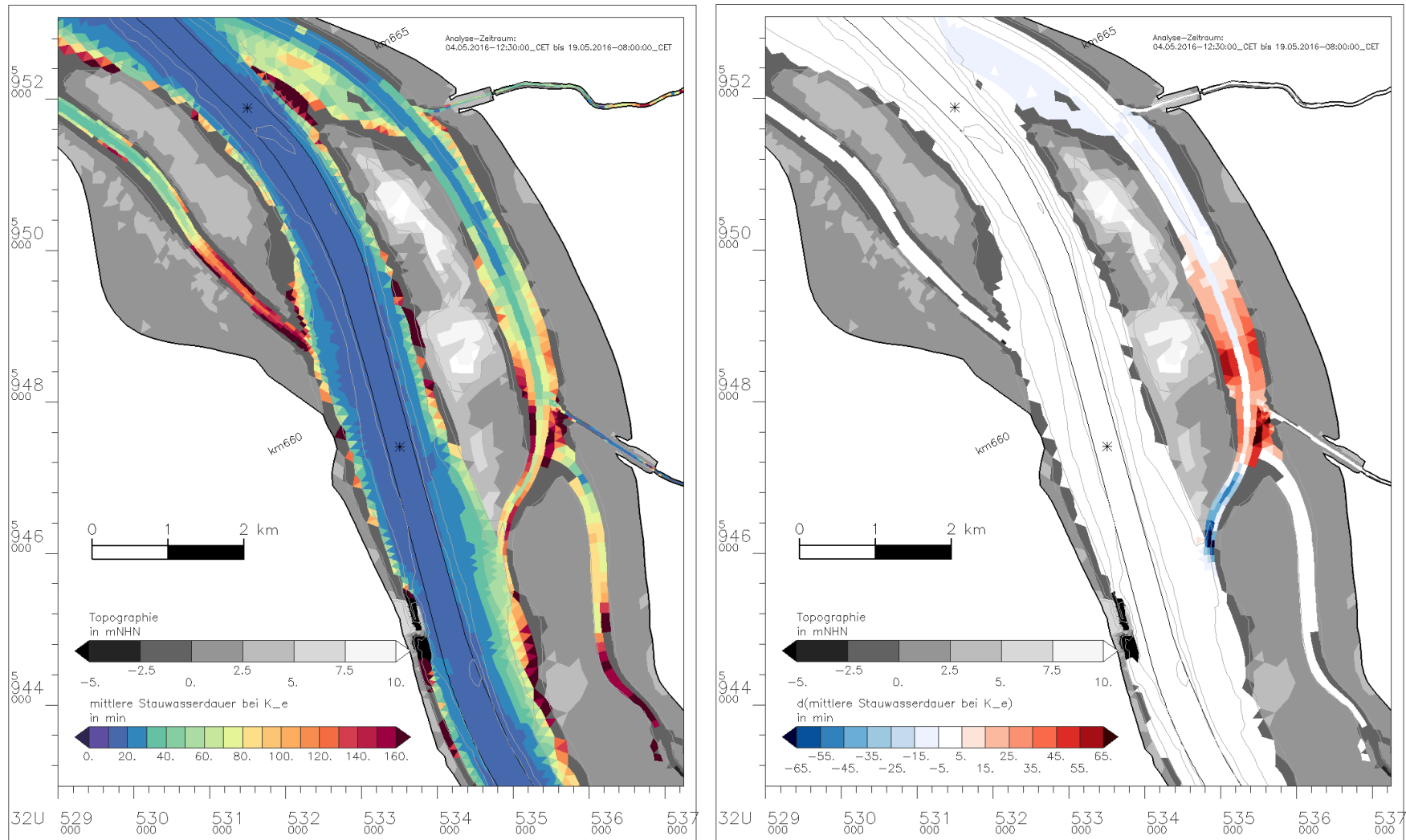


Bild 19: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

Die Veränderungen der Hydrodynamik wirken sich auch auf den Schwebstofftransport aus. Der mittlere Schwebstoffgehalt in der Pagensander Nebelbe ($0,10\text{--}0,20\text{ kg/m}^3$) ist sowohl im Ebbstrom als auch im Flutstrom geringer als im Hauptstrom ($0,20\text{--}0,35\text{ kg/m}^3$). Im Verlauf der Pagensander Nebelbe nimmt der mittlere Schwebstoffgehalt von Norden nach Süden leicht ab, wobei dieser Gradient während der Flutströmung etwas stärker ausgeprägt ist (Bild 20 und Bild 21). Infolge der Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten zeigen die Differenzen der mittleren Schwebstoffgehalte im nördlichen Teil der Pagensander Nebelbe eine Zunahme. Im südlichen Teil, vor allem im Bereich der Vertiefung, nimmt der mittlere Schwebstoffgehalt dagegen im Vergleich mit dem Referenzszenario ab. Die Abnahme des Schwebstoffgehaltes liegt zum einen an der größeren Wassertiefe in der Variante (bei gleicher Sedimentmenge ist dadurch der mittlere Schwebstoffgehalt geringer) und zum anderen an der sogleich wiedereinsetzenden Sedimentation im vertieften Bereich (geringerer Schwebstoffgehalt durch stärkere Sedimentation).

Die mittlere Sedimentmenge pro Tide ist links in Bild 22 für den Flutstrom und rechts für den Ebbestrom dargestellt. Die weitaus größten Mengen mit mehr als 20 t/m/Tide werden während der Flutströmung im Bereich der Fahrrinne stromauf transportiert. Dieser Wert wird während der Ebephase nicht erreicht, die Flutstromdominanz ist also bereits an dieser vergleichenden Darstellung erkennbar. Die in der Pagensander Nebelbe transportierten Sedimentmengen sind um mindestens eine Größenordnung geringer als im Hauptstrom.

Aus der Differenz dieser beiden Größen errechnet sich die advektiv transportierte Rest-Schwebstoffmenge, also quasi der Nettotransport pro Tide (Bild 23). Auch bei dieser Darstellung gibt der Pfeil die Richtung an und die Farbe den Betrag. Verhältnismäßig geringe Transportmengen werden der Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellt. Die bereits oben erkannte Flutstromdominanz im Hauptstrom der Elbe herrscht fast überall vor. Auch ein Nettoeintrag in die Pagensander Nebelbe wird sichtbar. In der Abbildung der Differenzen sind die veränderten Transportmuster gut zu erkennen. Auch der Schwebstofftransport im Hauptstrom wird beeinflusst, jedoch nicht einheitlich in eine Richtung. Stromab und entlang Pagensand steigt der Transport zunächst an, im Bereich der Südspitze von Pagensand und weiter stromauf wird er geringer. Die grundsätzliche Flutstromdominanz bei diesem Szenario bleibt erhalten.

Durch die gleichmäßigere Verteilung des flutstromorientierten Nettotransportes über den gesamten Querschnitt der Elbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand wird der Längsgradient des Netto-Schwebstofftransportes entlang der Fahrrinne so verändert, dass Baggerstellen in diesem Bereich verlagert bzw. tendenziell verstärkt werden, denn der Transport in der Fahrrinne stromauf dieses Bereiches wird maßnahmenbedingt tendenziell verringert. Möglicherweise entsteht im Zusammenwirken mit der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahme Schwarztonnensand ein Gebiet erhöhter Sedimentakkumulation im Bereich der Fahrrinne. Die leicht veränderten Muster der Tiefenänderung nach 4 Wochen Simulationszeit in Bild 24 bestätigen diese Ausführungen. In dieser Darstellung bedeutet „blau“ die Schwächung der Tendenz in dem Referenzlauf und „rot“ eine Verstärkung. Das bedeutet z.B., dass sich im nördlichen Teil der Pagensander Nebelbe eine geringere Tendenz zur Deposition ergibt. Im Bereich der Vertiefung ist der Trend zur Verlandung deutlich stärker ausgeprägt, d.h. insbesondere in dem vertieften Abschnitt sedimentieren mehr Schwebstoffe als zuvor. Eine solche Maßnahme ist also nicht selbsterhaltend. Als erste Einschätzung kann aufgrund der Erfahrungen in diesem Bereich je nach Baggerstrategie ein Pflegeintervall von 1-3 Jahren angenommen werden.

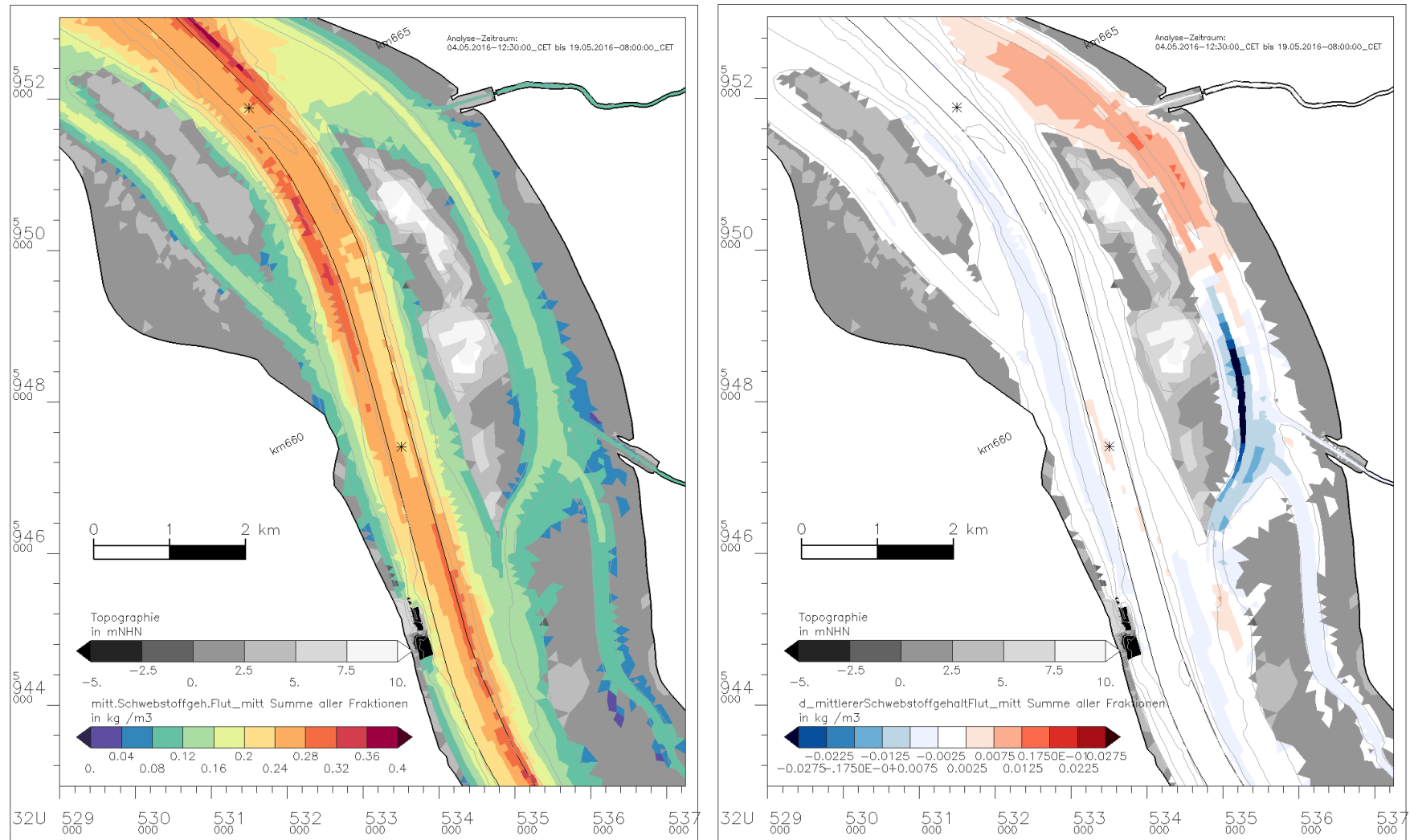


Bild 20: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

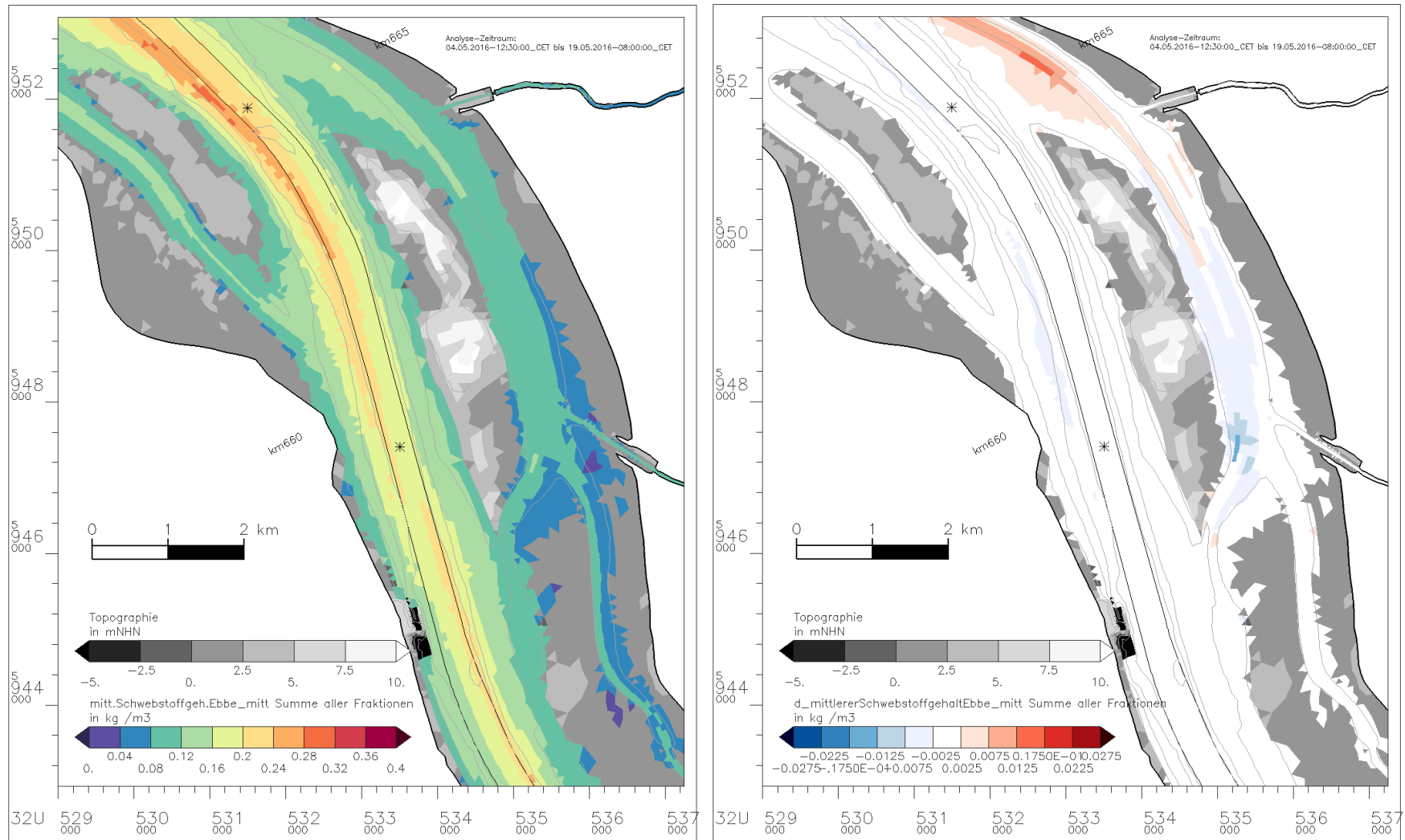


Bild 21: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

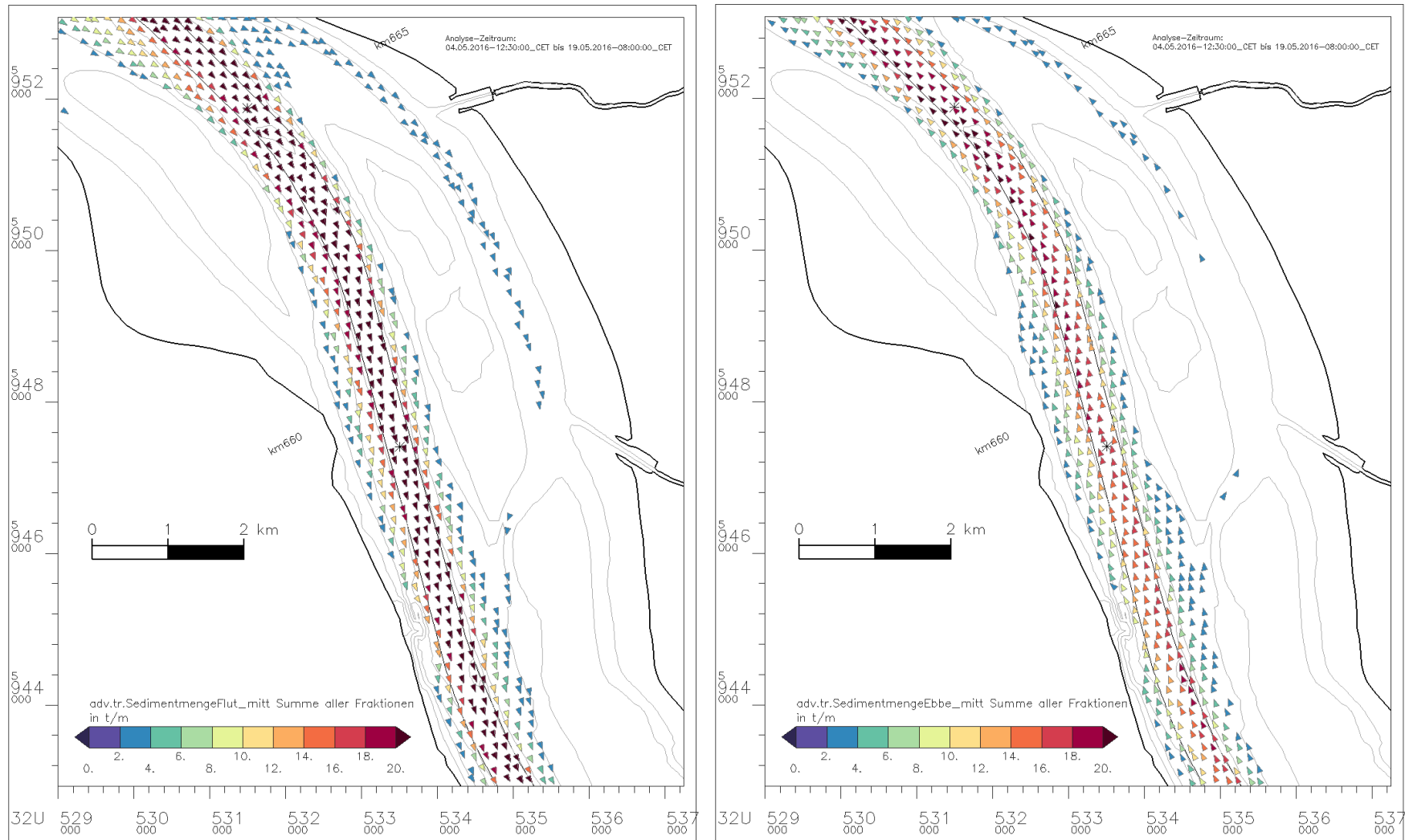


Bild 22: Mittlere Sedimentmenge/Tide (Summe aller Fraktionen), links Flut, rechts Ebbe. Die Flutstromdominanz ist erkennbar

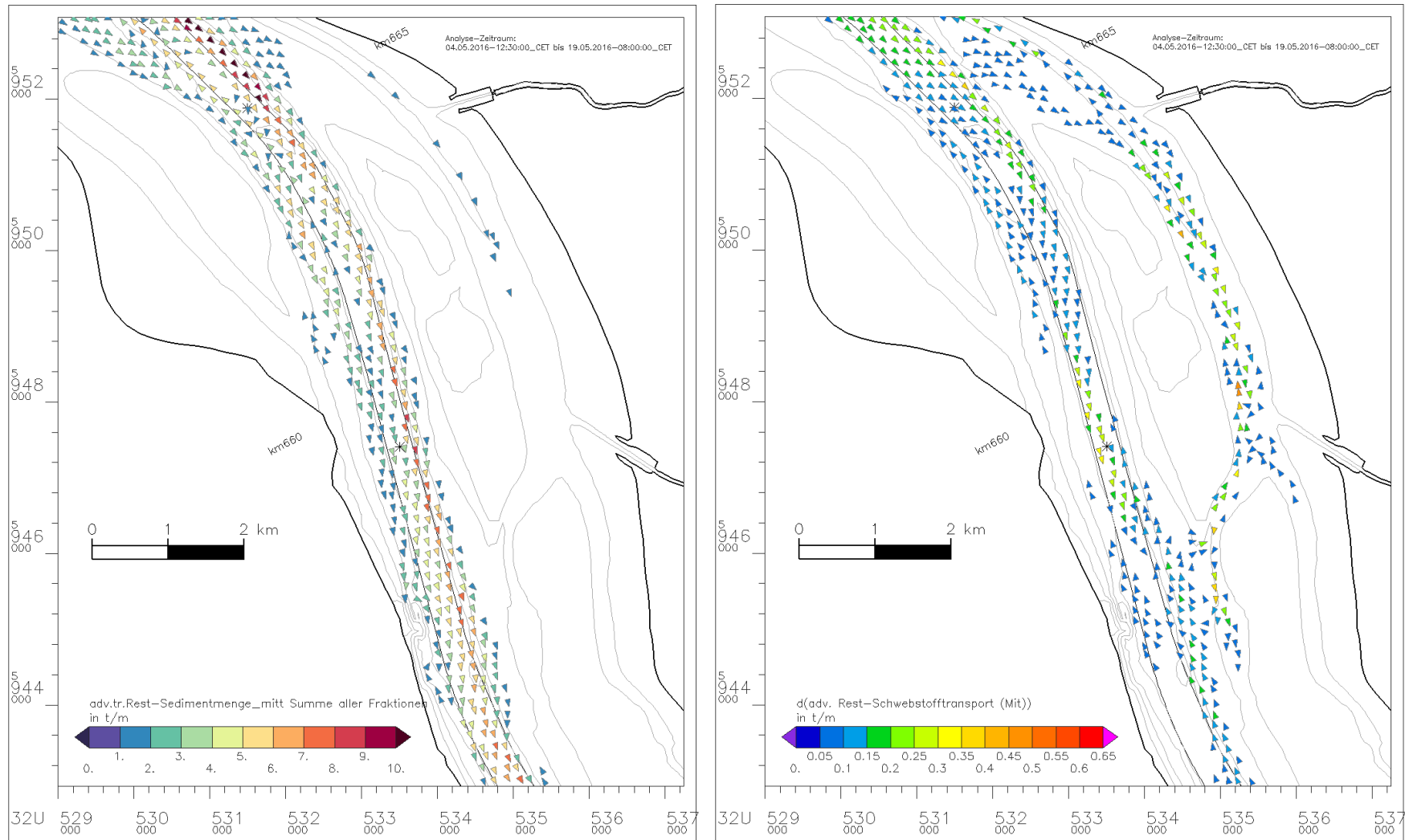


Bild 23: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

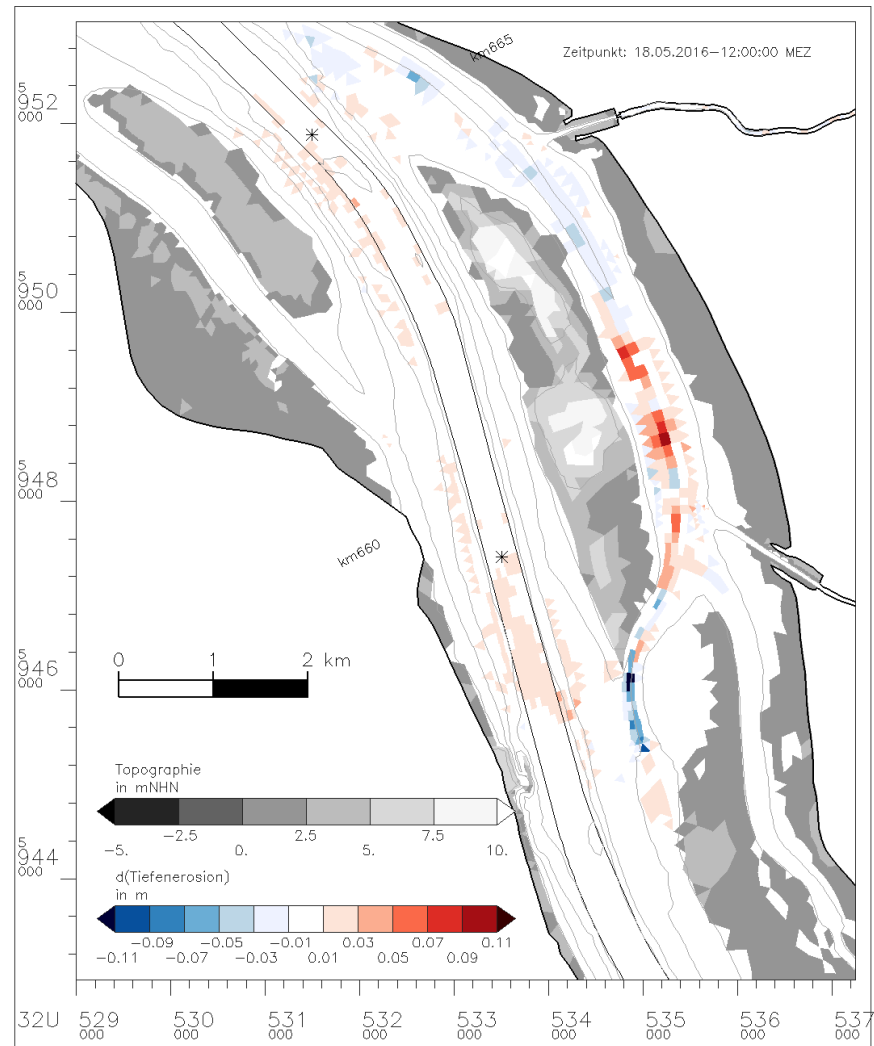


Bild 24: Änderung der Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit (Variante minus Referenz)

5.1.3 Großräumige Auswirkung der Maßnahme

Zu Einschätzung der großräumigen Auswirkung der Maßnahme auf die Tideelbe werden im Folgenden die Tidekennwerte im Längsschnitt der Elbe dargestellt. In der Abbildung des Längsverlaufs bestätigen sich die bereits in Kapitel 5.1.2 gezeigten geringen Auswirkungen einer Vertiefung der Pagensander Nebanelbe unterhalb des Tideniedrigwassers auf Tidehoch-, Tideniedrigwasser und Tidehub (Bild 25). Die Differenzen der entsprechenden Parameter sind praktisch durchgehend Null.

Auch bei dem in Bild 26 dargestellten Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit entlang der Tideelbe sind in der Differenz (Variante - Referenzzustand) nur sehr kleine (Größenordnung mm/s) Änderungen erkennbar, die großräumig aber keinen bestimmten Trend aufzeigen, sondern aufgrund der örtlich veränderten Strömungsverteilung mal positiv und mal negativ sind.

Für den Schwebstofftransport zeigen sich dagegen durch eine Vertiefung der Pagensander Nebanelbe auch großräumig nennenswerte Veränderungen im Vergleich zum Referenzszenario. Der in Bild 27 dargestellte (Rest-)Schwebstofftransport zeigt bei der Differenz (Variante - Referenzzustand) eine Zunahme um bis zu 400 t/Tide über eine Strecke von ca. 20 km stromab der Maßnahme (zwischen Strom-km 660 und 680) und eine Abnahme um bis zu 200 t/Tide stromauf der Maßnahme (zwischen Strom-km 640 und 660). Dies ist das Resultat der in Kapitel 5.1.2 detaillierter beschriebenen lokalen Veränderungen. Die verbesserte Durchströmung der Pagensander Nebanelbe führt zu einer Verringerung der Ebb- und Flutstromgeschwindigkeit im Bereich der Fahrrinne (Strom-km 660 - 665), wodurch Sedimentationsprozesse begünstigt werden. Insbesondere die Zunahme der Sedimentation im Bereich der Vertiefung reduziert weiter stromaufwärts zwischen Strom-km 640 und 660 den Stromauftransport der Schwebstoffe. Daher wird die strombauliche Maßnahme grundsätzlich als Ergänzung zur bisherigen Unterhaltungsstrategie für sinnvoll erachtet, da der Schwebstofftransport in Richtung Hamburg reduziert wird.

Analog zu den Wasserständen zeigt auch der mittlere Salzgehalt im Analysezeitraum keine nennenswerten maßnahmenbedingten Veränderungen im Längsverlauf im Vergleich zum Referenzszenario (Bild 28).

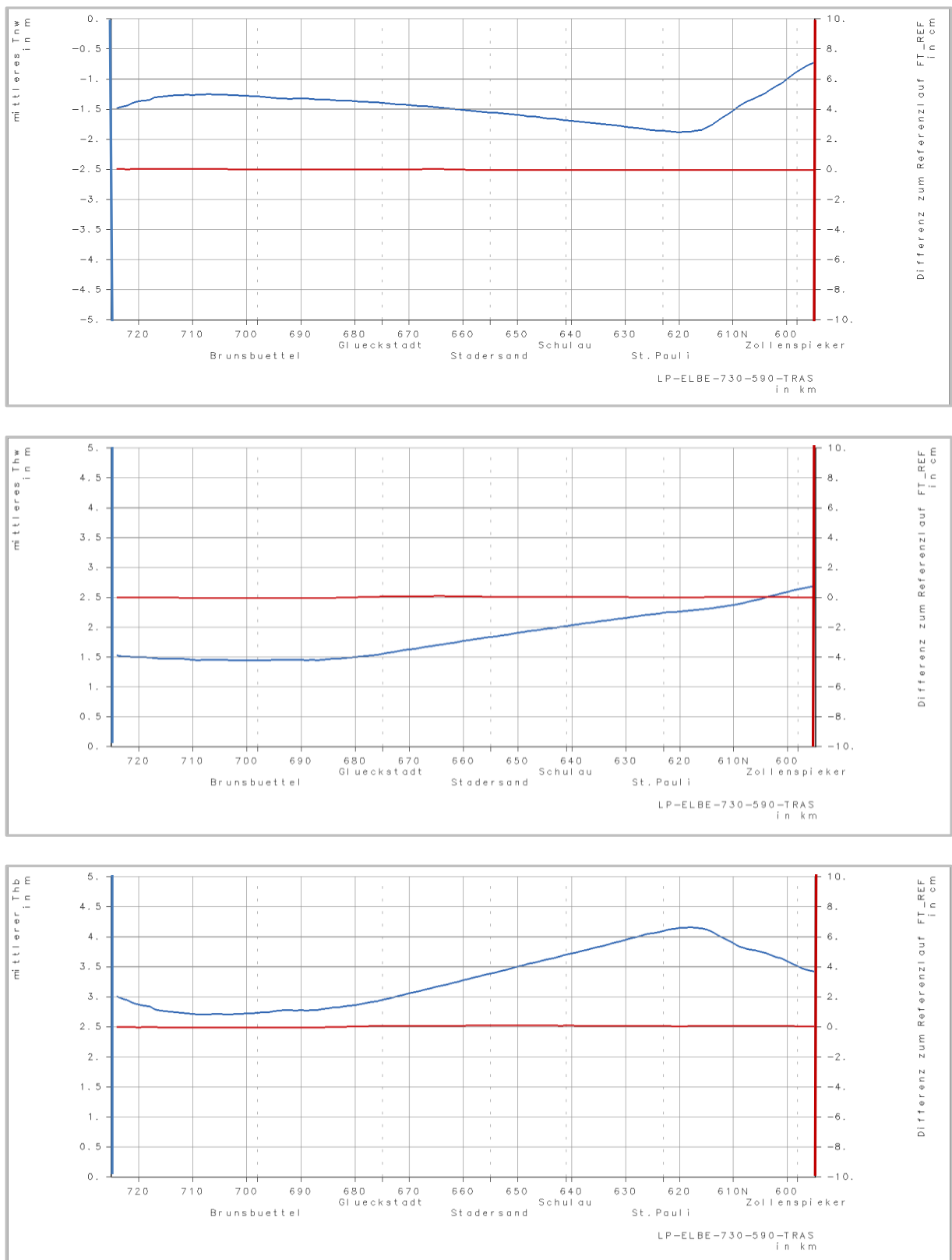


Bild 25: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)

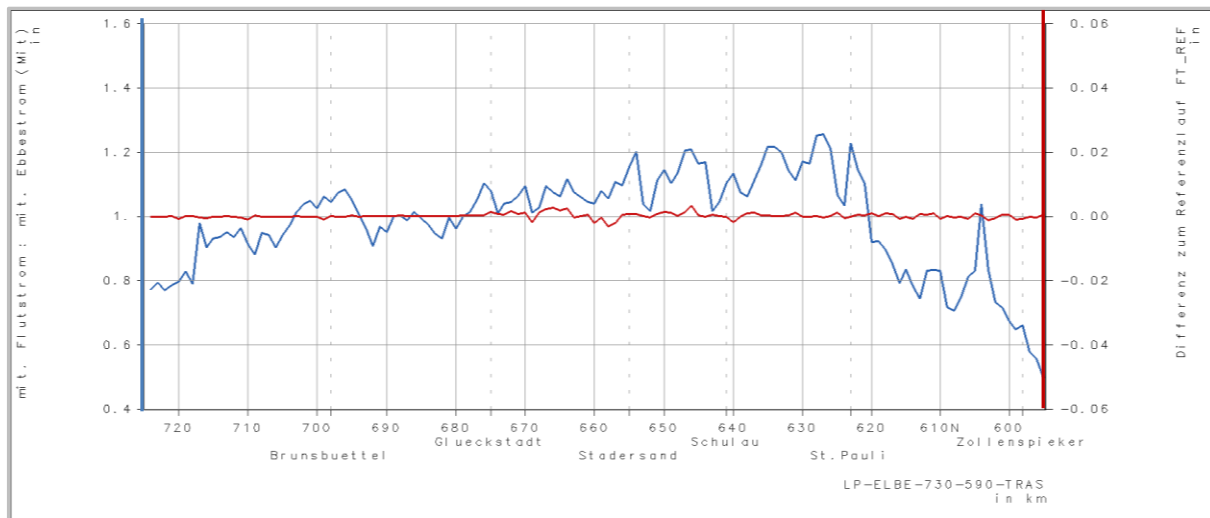


Bild 26: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)

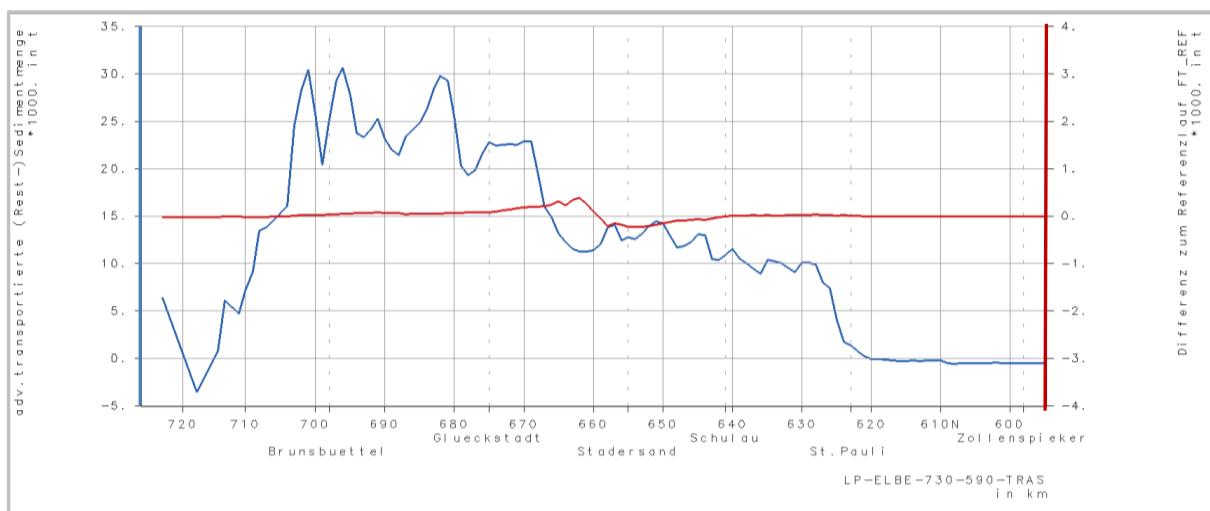


Bild 27: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)

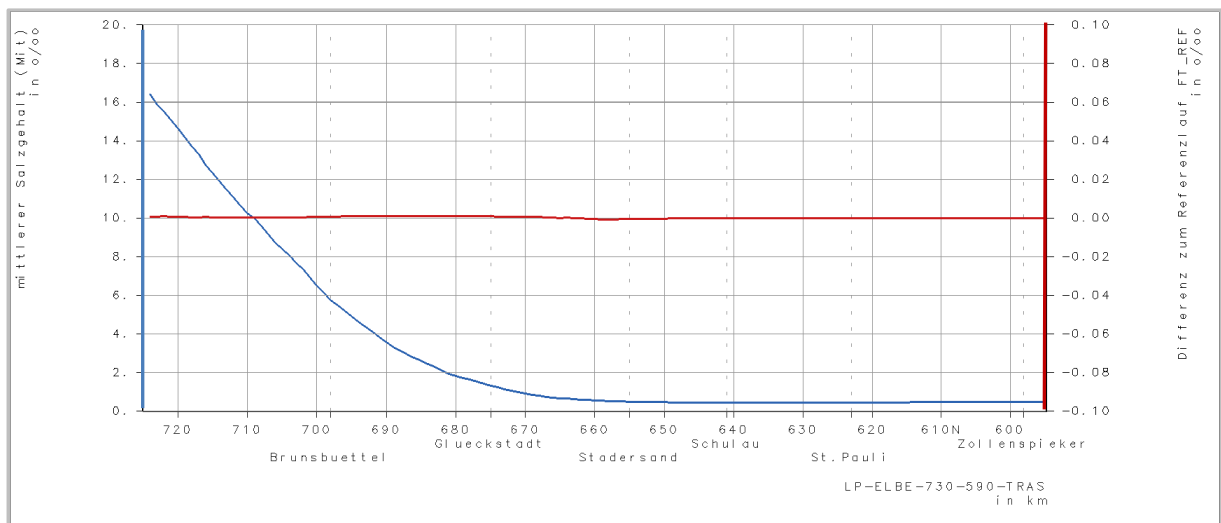


Bild 28: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)

5.2 Tideanschluss Haseldorfer Marsch

5.2.1 Gestaltung der Maßnahme

Der Anschluss der Haseldorfer Marsch erfolgt über die Haseldorfer Binnenelbe und über das Dwarsloch, d.h. über relativ flache Nebenelben, durch die das zusätzliche Tidevolumen strömen muss. Das zusätzliche Tidevolumen ergibt sich aus einem verzweigten Prielsystem in einem Marschgebiet, und nicht aus einem großen kompakten voluminösen Wasserkörper. Der Anschluss, die Tidedynamik und die Energiedissipation innerhalb dieses Gebietes sind daher sehr komplex.

Bild 29 zeigt den Anschluss der Haseldorfer Marsch an die Tideelbe in der verwendeten Modelltopographie. Der Anschluss erfolgt über eine 60 m breite Hauptöffnung und zusätzlich eine 25 m breite Nebenöffnung (Bauernloch) unter Beibehaltung des Siels im Sportboothafen. Detaillierter und anders farblich kodiert sind die Verhältnisse in Bild 30 dargestellt. Permanent mit Wasser bedeckte Bereiche sind in blau, regelmäßig trockenfallende Wattgebiete in Grautönen und hoch liegende Gebiete, die nur von hohen Tiden überströmt werden können, sind in schwarz bzw. rot dargestellt. Die Haseldorfer Marsch wird in dem zugrunde gelegten digitalen Geländemodell dargestellt, um die Feinheit der topographischen Strukturen mit den Prielen, den Gräben und den Wällen besser erkennen zu können. Diese Strukturen bestimmen die Tidedynamik und damit auch die wasserwirtschaftlichen und die ökologischen Bedingungen (z.B. Überflutungsdauer) in dem Gebiet.

Die Planung für das hier vorgestellte Szenario sieht eine initiale Baggerung für den Übergang zwischen den Sperrwerken und den vor dem Landesschutzdeich liegenden Nebenelben vor, damit das zusätzliche Tidevolumen weitgehend ungedrosselt die Haseldorfer Marsch erreichen kann. Zusätzlich zur Initialbaggerung ist die Vertiefung der Pagensander Nebenelbe (siehe 5.1) in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls implementiert. Dadurch können auch Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Maßnahmen analysiert werden.

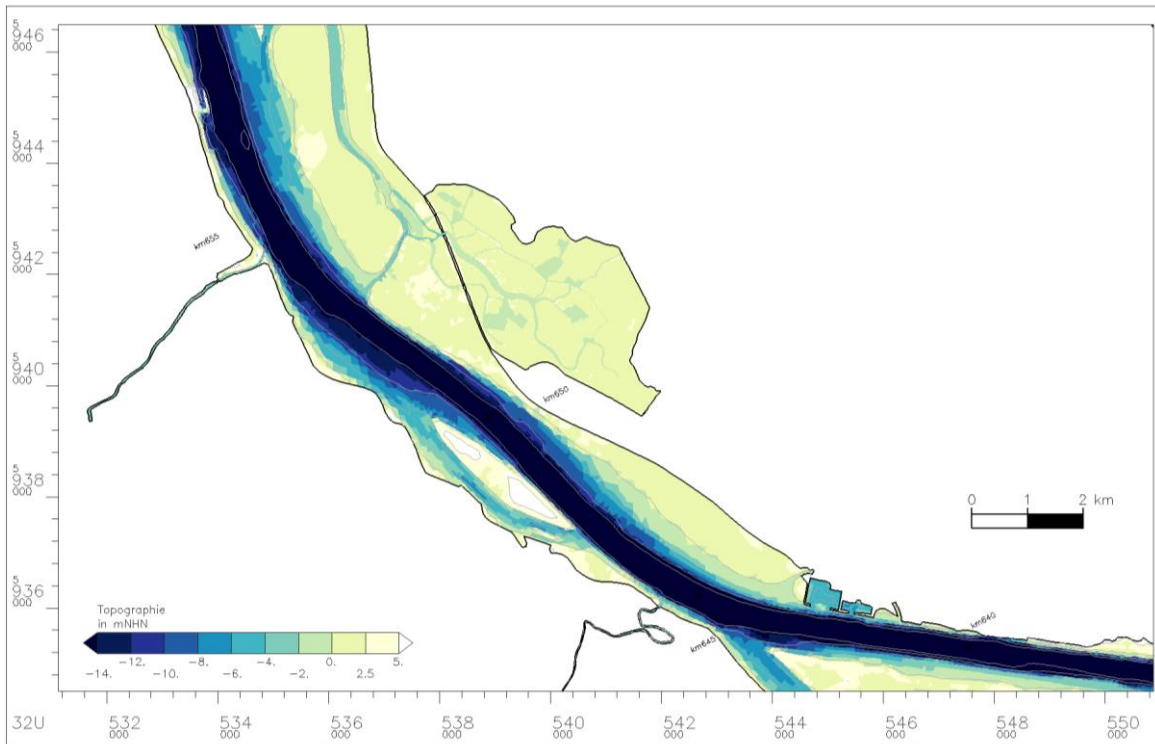


Bild 29: Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Haseldorfer Marsch

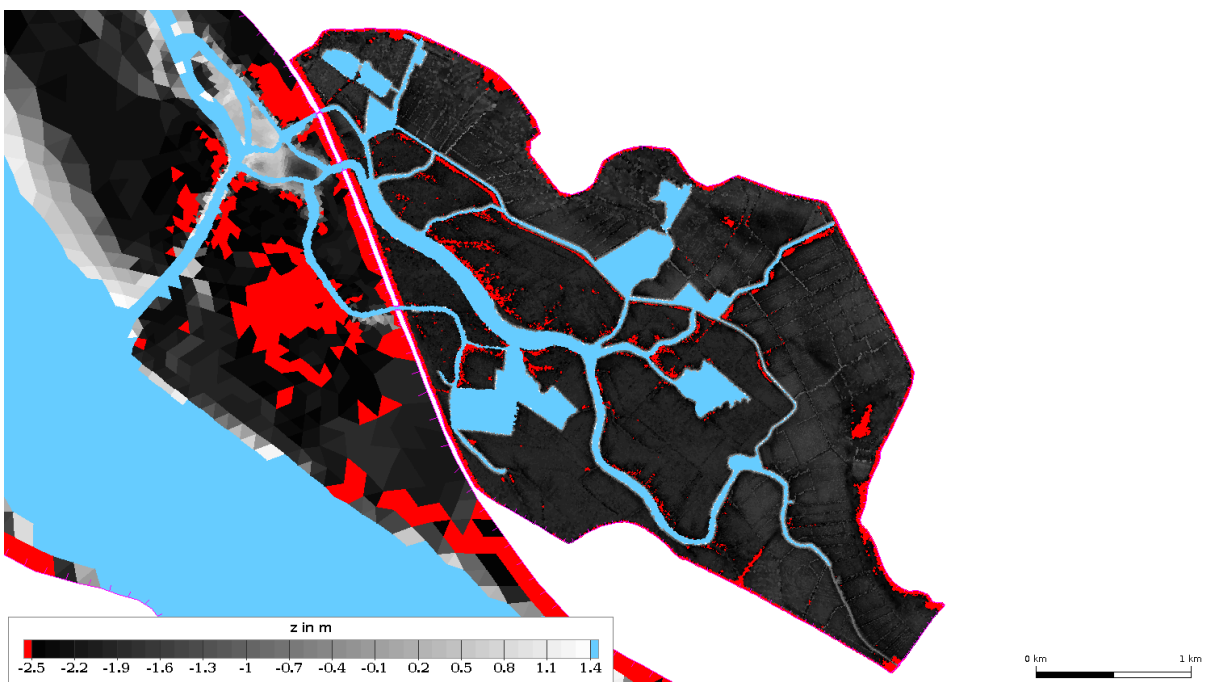


Bild 30: Detailansicht im Bereich der Haseldorfer Marsch mit Anschluss an die Tideelbe

5.2.2 Auswirkung im Nahbereich der Maßnahme

Durch den Wiederanschluss der Haseldorfer Marsch ergibt sich während des Simulationszeitraumes in Abhängigkeit der unterschiedlichen Tiden ein zusätzliches Tidevolumen von ca. 3-5 Mio. m³ (Bild 31), das über die Haseldorfer Binnenelbe und über das Dwarsloch Einfluss auf die Tidedynamik der Elbe nimmt. Ca. 80 % des Wasseraustausches mit der Marsch erfolgt durch die breite Hauptöffnung.

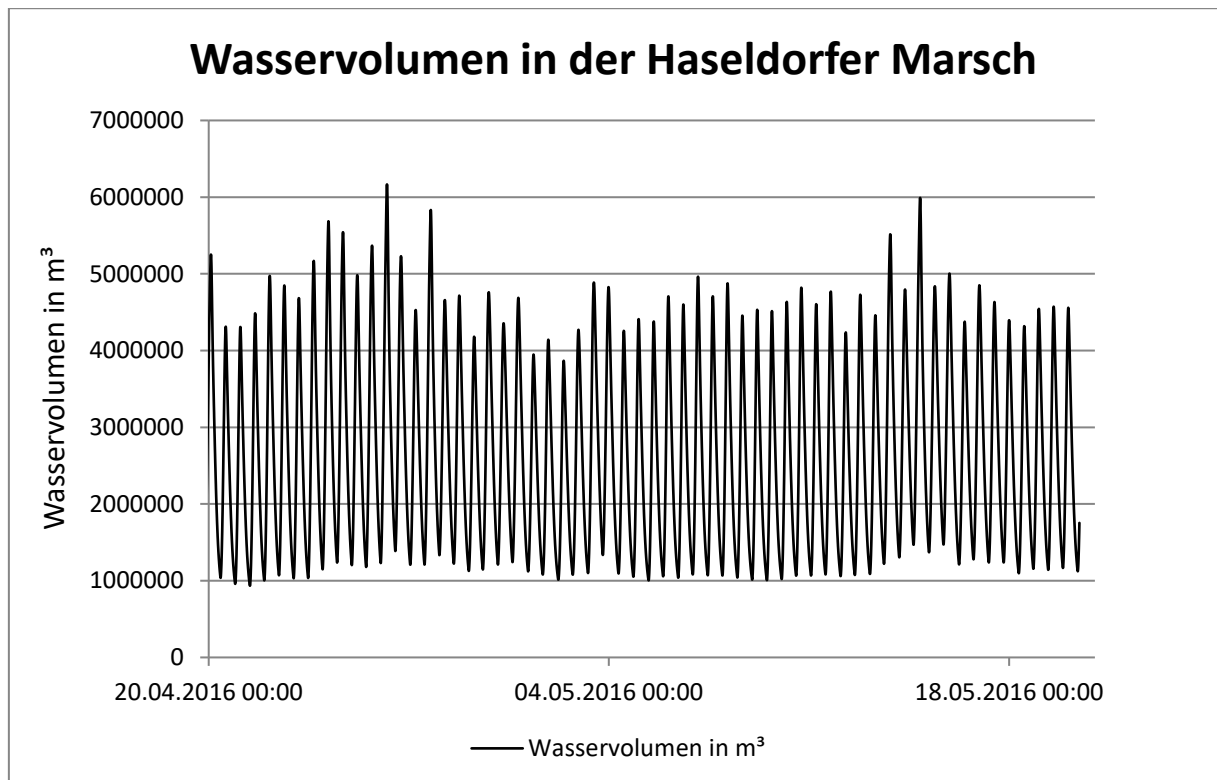


Bild 31: Zusätzliches Tidevolumen durch den Anschluss der Haseldorfer Marsch

Das MThw erreicht in der Haseldorfer Marsch im betrachteten Analysezeitraum mit ca. 1,80 m NHN ein ähnliches Niveau wie in den Nebanelben, da eine Steuerung des Zu- und Ablaufes (z.B. durch eine Kappung des Thw bei 1,81 m NHN im Maßnahmengebiet) noch nicht berücksichtigt wurde. Es treten daher auch höhere Wasserstände auf, so dass die hochliegenden Gebiete bei hohen Tiden phasenweise überflutet und dadurch in der Analyse sichtbar werden. Die Differenz (Variante minus Referenz) zeigt eine lokale Absenkung des MThw von ~ 1 cm im Hauptstrom der Elbe (Bild 32).

Das MTnw (Bild 33) liegt mit ca. -0,90 m NHN in den Prielen der Haseldorfer Marsch deutlich höher als in den angrenzenden Nebanelben (-1,10 m NHN) und im Hauptstrom (-1,50 m NHN). Da die Öffnungsweiten der Sperrwerke mit 25 m und 60 m für das zusätzliche Tidevolumen ausreichend dimensioniert sind, wird die Ursache hierfür hauptsächlich an der „Trägheit“ der Tidewelle in der Haseldorfer Marsch liegen, die durch die Rauheitswirkung in den kleinen, verzweigten Prielen bedingt ist. Die Differenz (Variante minus Referenz) zeigt eine lokale Erhöhung des MTnw von ~ 1 cm im Hauptstrom der Elbe. Deutlich größer mit mindestens + 4 cm ist die Anhebung des

MTnw in der Haseldorfer Binnenelbe. Demzufolge ist auch der berechnete mittlere Tidehub (Bild 34) in der Haseldorfer Marsch mit ca. 2,80 m deutlich kleiner als in der im Hauptstrom (MThb ca. 3,40 m). Das bedeutet, dass aus hydraulischer Sicht das Potential der Maßnahmen nicht voll ausgeschöpft wird. Die dunklen Farben weisen die Bereiche aus, die nur gelegentlich überflutet werden. Auch in dem Übergangsbereich zu den Nebanelben ist der MThb noch 10-20 cm geringer als im Hauptstrom. In der Differenzdarstellung (Variante minus Referenz) ist eine Absenkung des MThb um ~ 2 cm im Hauptstrom zu erkennen (entspricht $< 1\%$), in den angrenzenden Nebanelben wird der Tidehub in der Nähe der Sperrwerke um mehr als 6,5 cm reduziert.

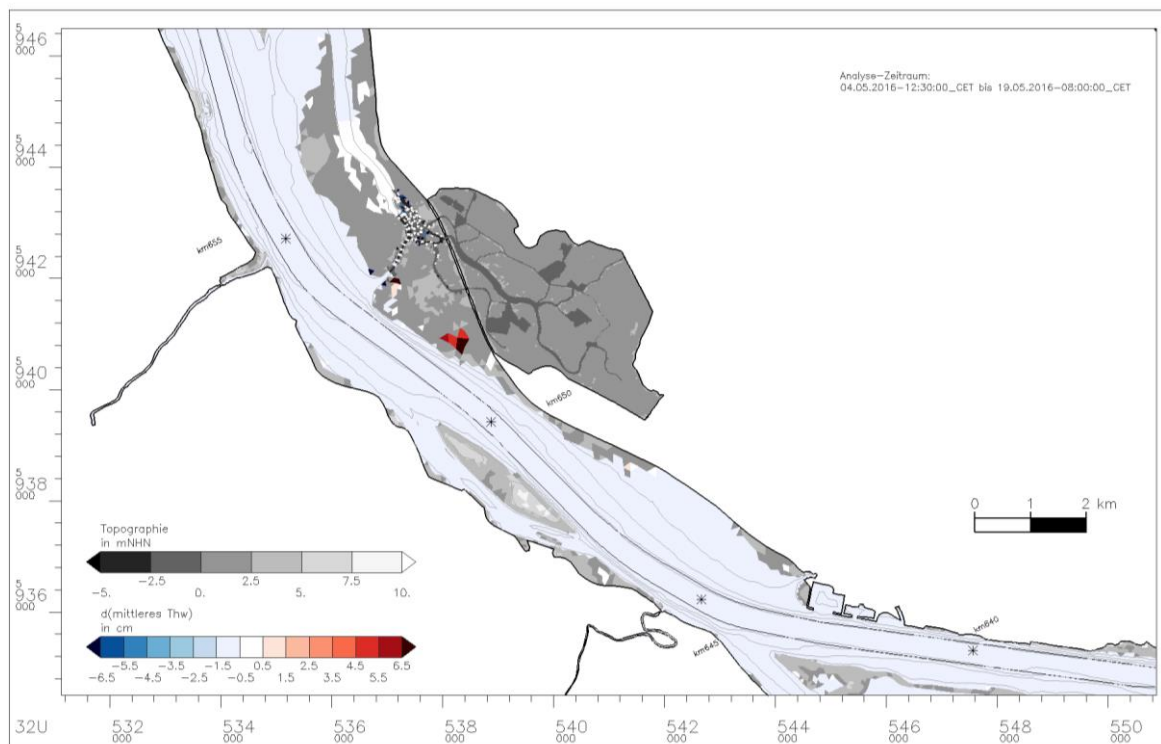
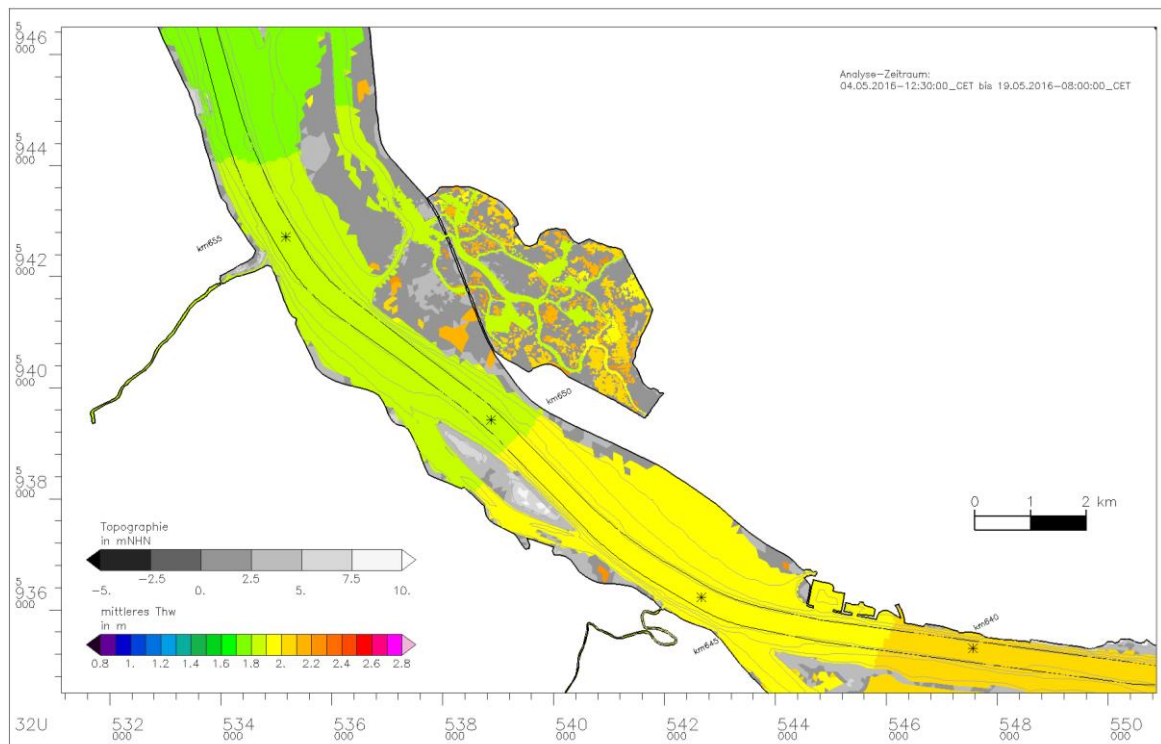


Bild 32: Mittleres Tidehochwasser. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

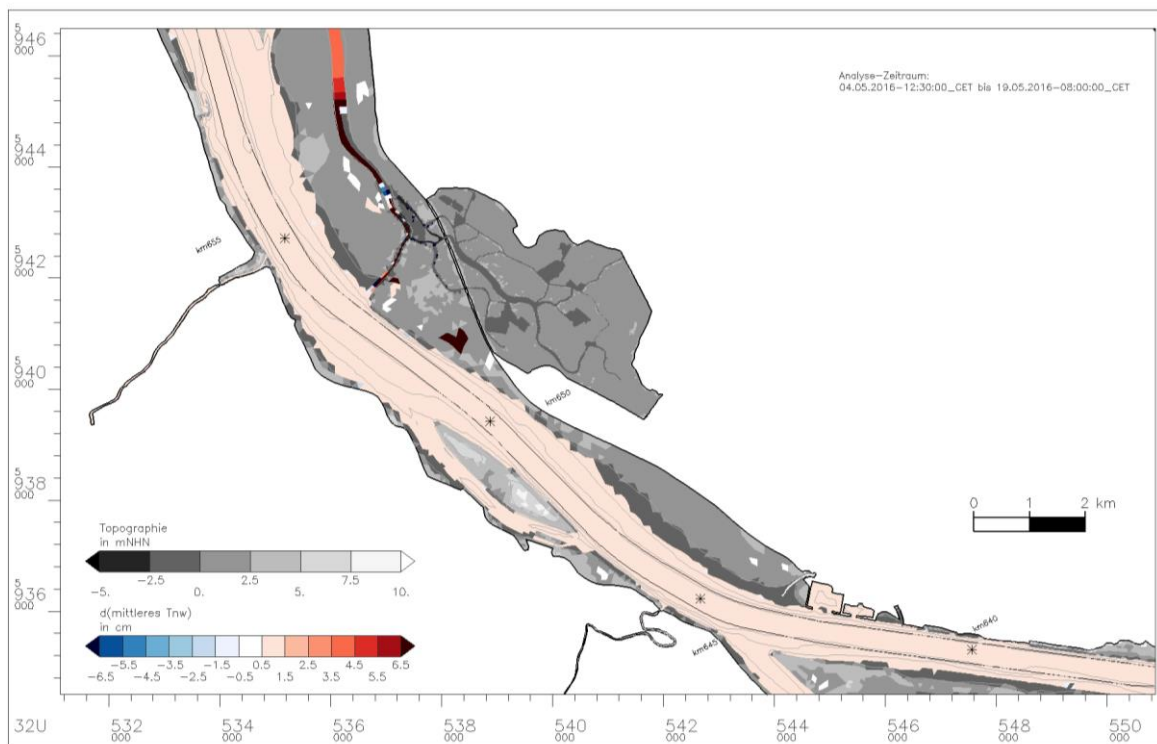
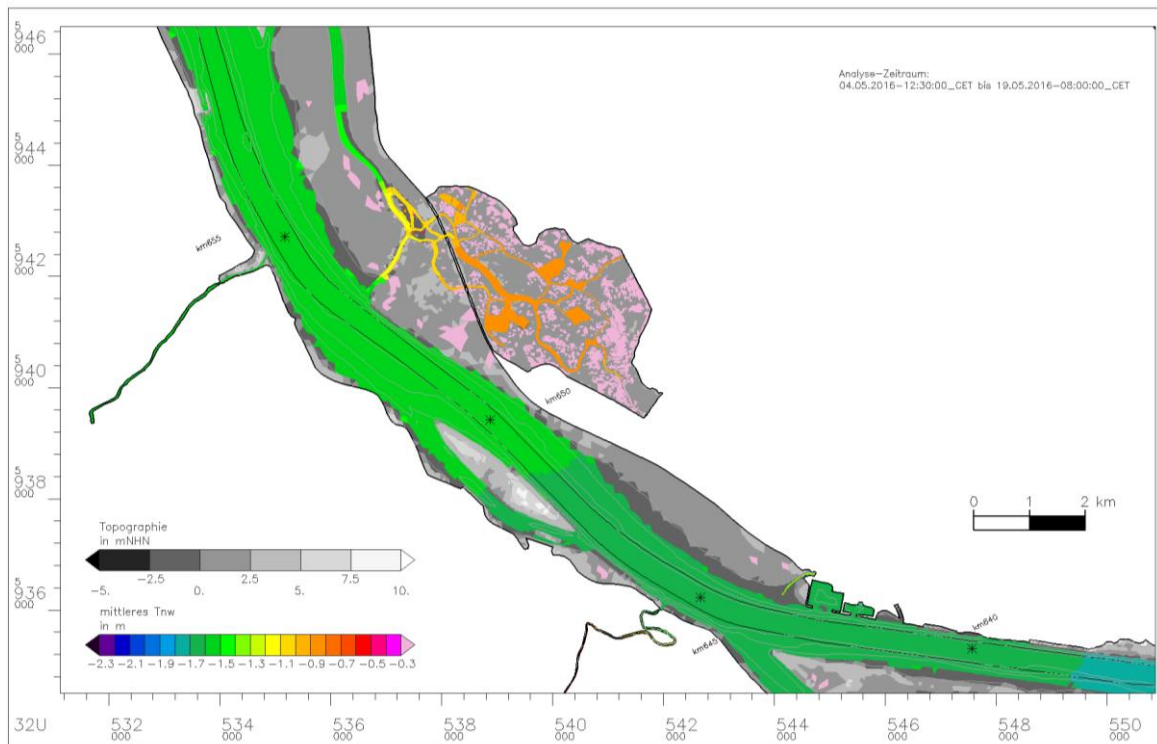


Bild 33: Mittleres Tideniedrigwasser. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

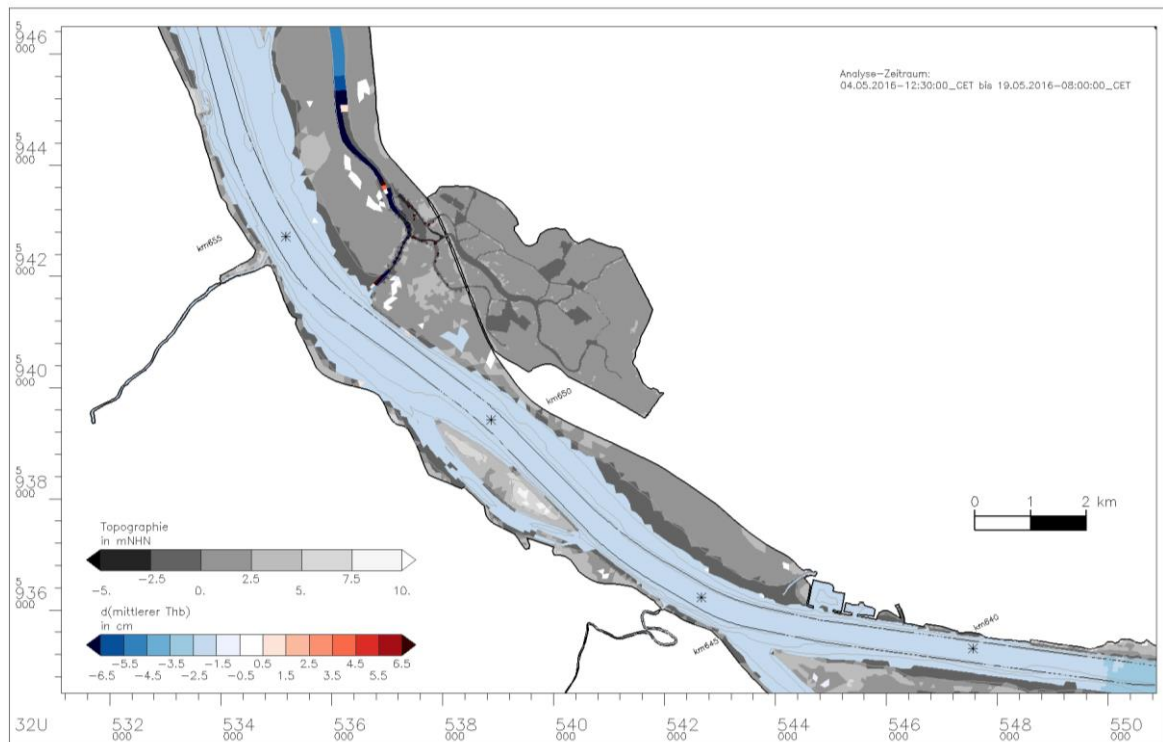
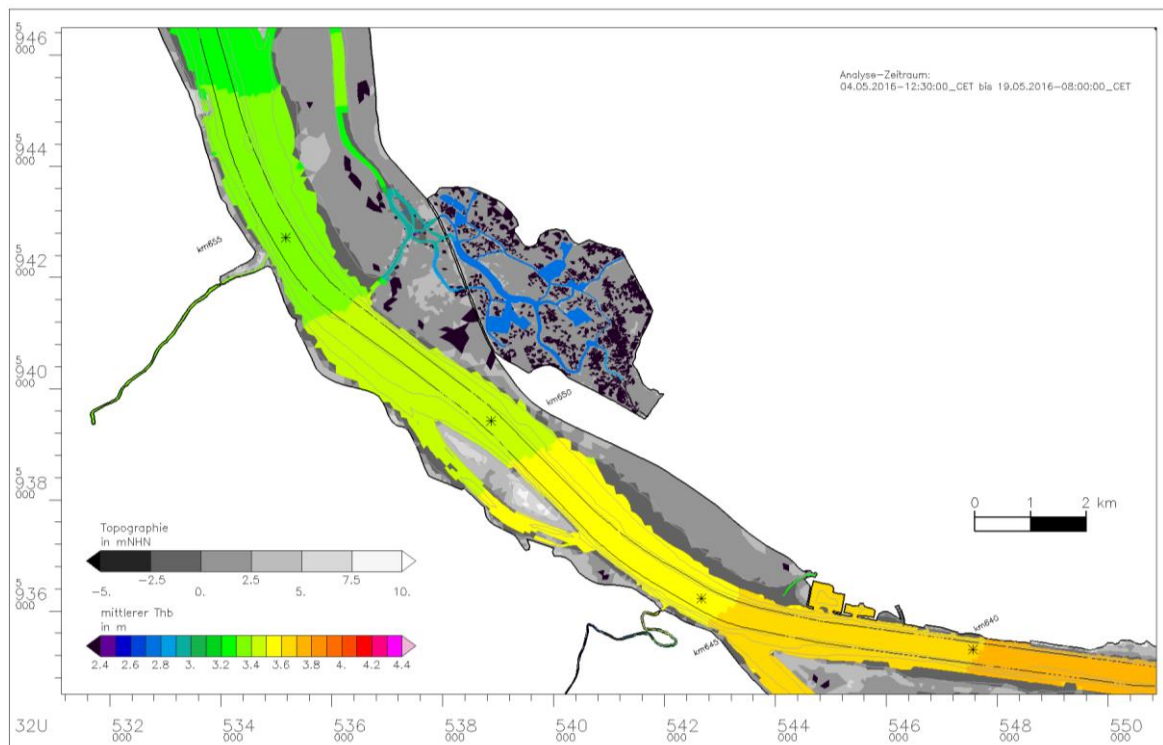


Bild 34: Mittlerer Tidehub. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten sind in den angrenzenden Nebeneiben auch mit dem Anschluss der Haseldorfer Marsch deutlich geringer als im Hauptstrom (Bild 35 und Bild 36). Im Anschlussbereich sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten während der Flutphase mit ca.

1,4 m/s am höchsten. Binnenseitig des Sperrwerkes der Hauptöffnung werden für den Analysezeitraum während der Flutströmung maximale Strömungsgeschwindigkeiten von 1,8 m/s ermittelt (hier nicht dargestellt). Im binnenseitig liegenden Prielsystem nehmen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten schnell ab auf unter 0,2 m/s. In der Haseldorfer Binnenelbe und insbesondere im Dwarsloch bewirkt der Wiederanschluss der Haseldorfer Marsch eine starke Erhöhung der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten um bis zu 0,30 m/s, die nur geringfügig durch die in dieser Variante enthaltene Vertiefung der Pagensander Nebenelbe beeinflusst ist. Hinsichtlich des potentiellen Sedimenteintrags in die Haseldorfer Marsch ist die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten zunächst nachteilhaft, hinsichtlich der anhaltenden Verschlickung der Nebenelben ist die stärkere Durchströmung hingegen von Vorteil.

Generell ist die Strömung bei Ebbe geringer als bei Flut. Dies zeigt auch Bild 37, in dem anhand des Verhältnisses der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit die Flutstromdominanz in der Haseldorfer Marsch zu erkennen ist. Auch in den angrenzenden Nebenelben dominiert nach wie vor die Flutströmung, wenn auch in der Differenzdarstellung bereichsweise eine Abnahme des F:E-Verhältnisses zu sehen ist.

Durch die veränderten Strömungsverhältnisse werden auch die Stauwasserdauern beeinflusst, ein wichtiger Indikator für potentielle Depositionszonen. In der Haseldorfer Binnenelbe ergeben sich zu den Kenterzeitpunkten ähnliche Stauwasserdauern (ca. 60 Minuten bei Flutstromkenterung (Bild 38), ca. 20 Minuten bei Ebbstromkenterung (Bild 39) wie im Hauptstrom. Maßnahmenbedingt ändern sich die Stauwasserdauern jedoch deutlich. Die Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung verkürzt sich in der Haseldorfer Binnenelbe um etwa 45 Minuten (Bild 38), bei Ebbstromkenterung verkürzt sich die Stauwasserdauer sogar um über 60 Minuten (Bild 39). Im Dwarsloch ergibt sich nur bei Ebbkenterung eine kürzere Stauwasserdauer, bei der Flutkenterung hingegen verlängert sich die Phase geringer Strömungsgeschwindigkeit. In den schmalen Prielen der Haseldorfer Marsch erkennt man sowohl bei der Flutstromkenterung, als auch bei der Ebbstromkenterung rotbraun dargestellte Bereiche mit langer Stauwasserdauer (>120 Min). Das liegt an den dort vorherrschenden geringen Strömungsgeschwindigkeiten, die im Mittel schon unter der zur Berechnung der Stauwasserdauer verwendeten Grenzggeschwindigkeit von 0,20 m/s liegen.

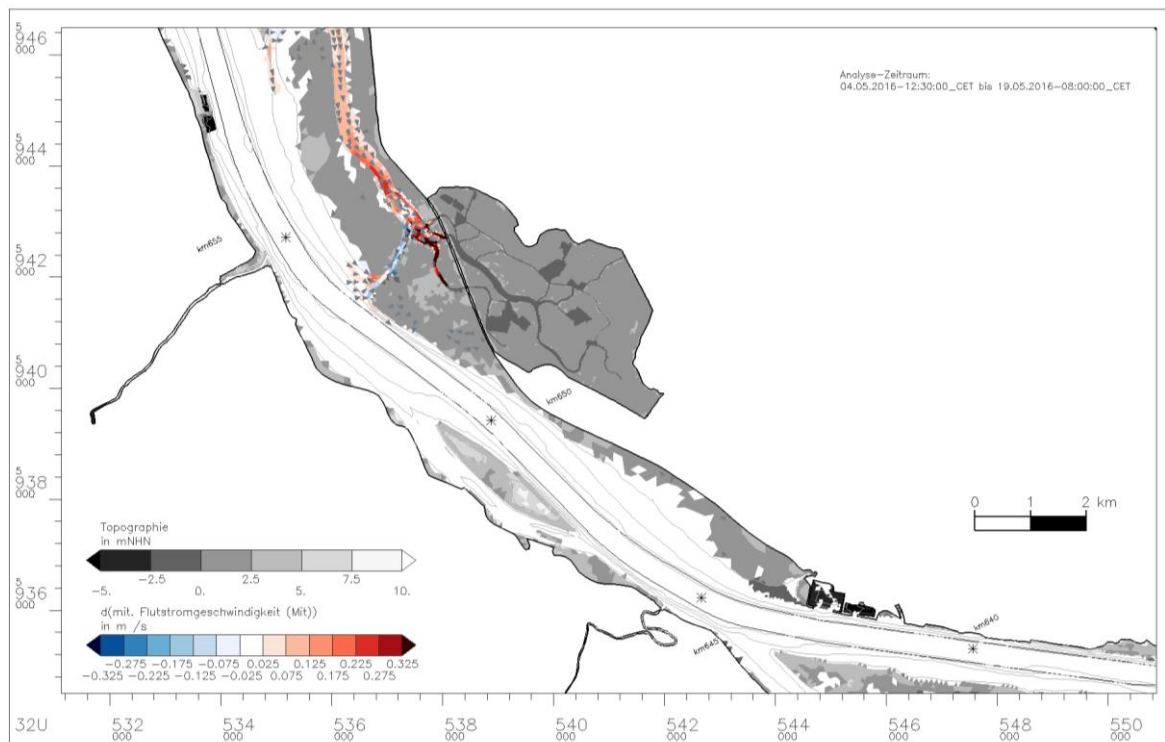
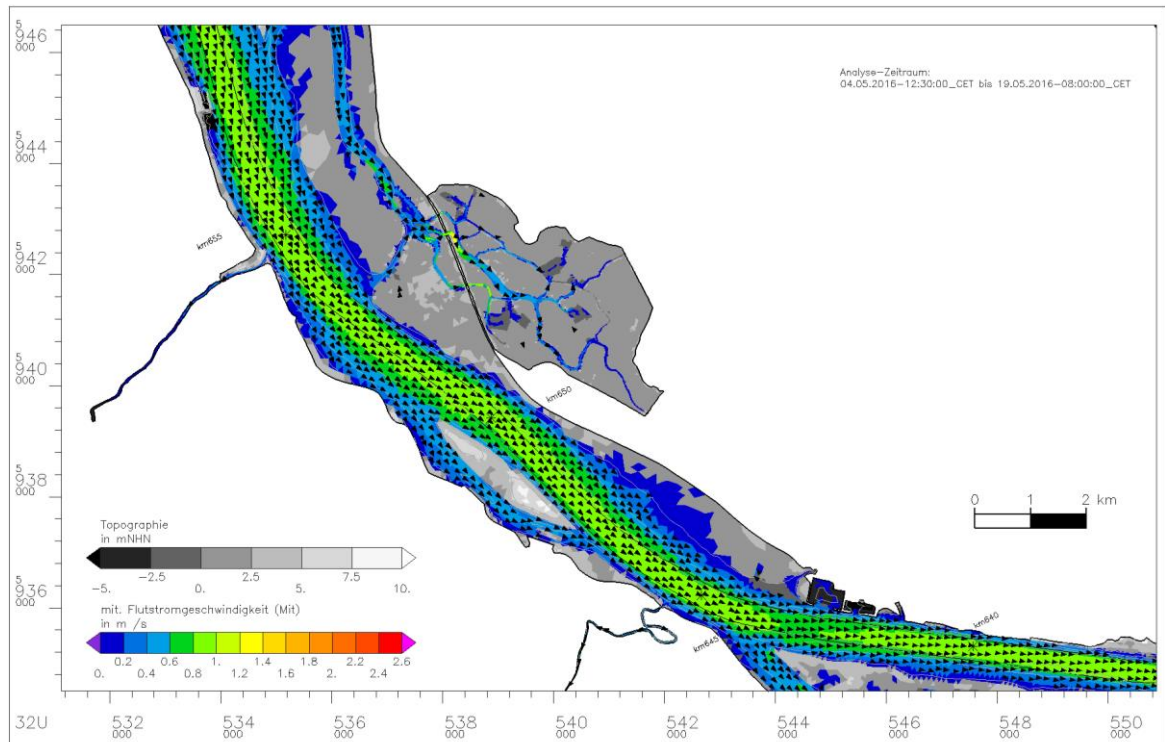


Bild 35: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

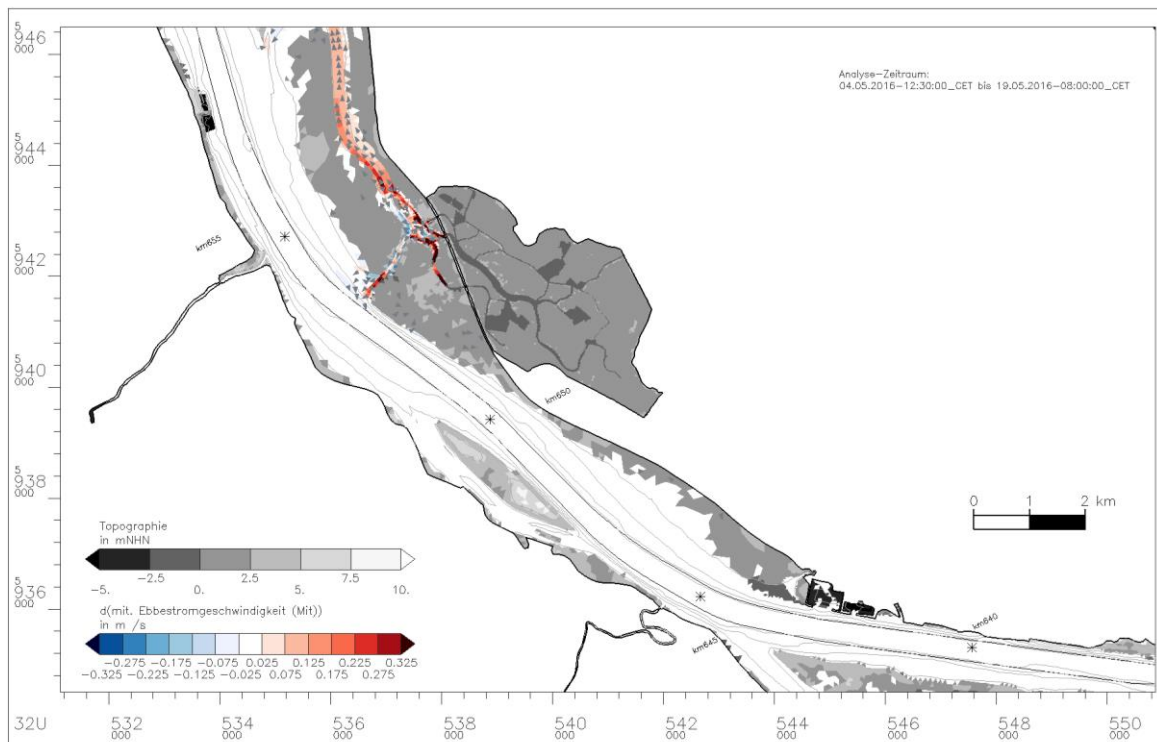
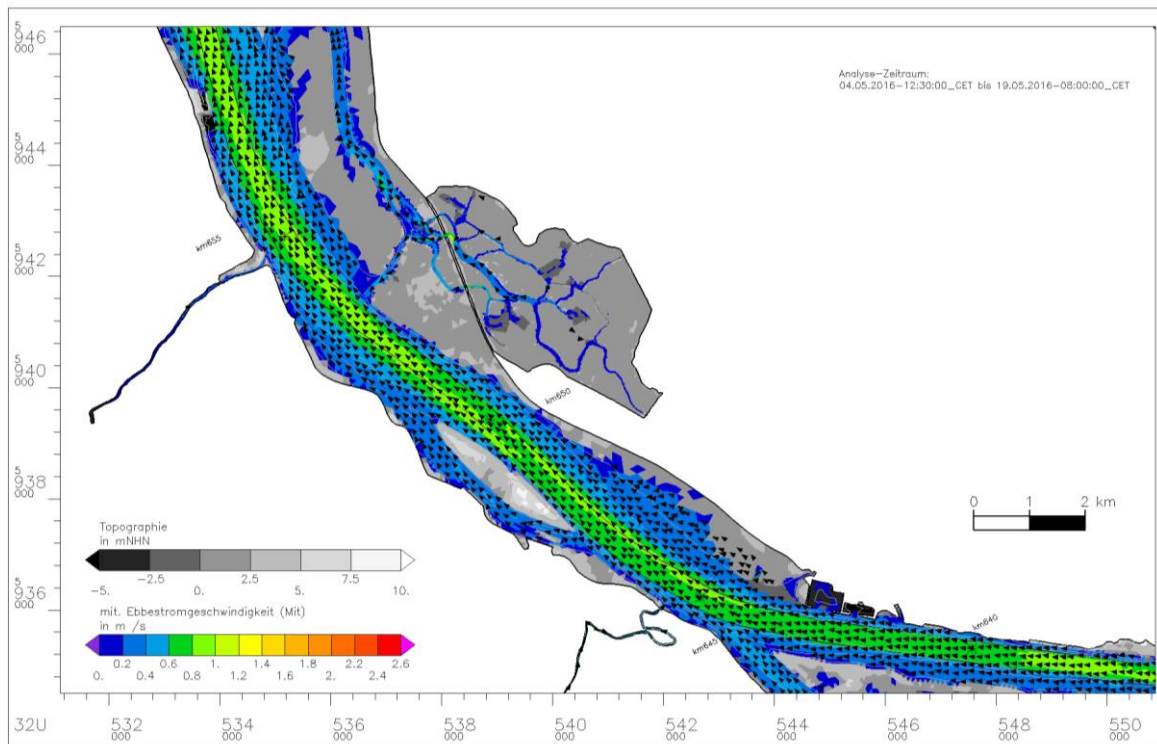


Bild 36: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

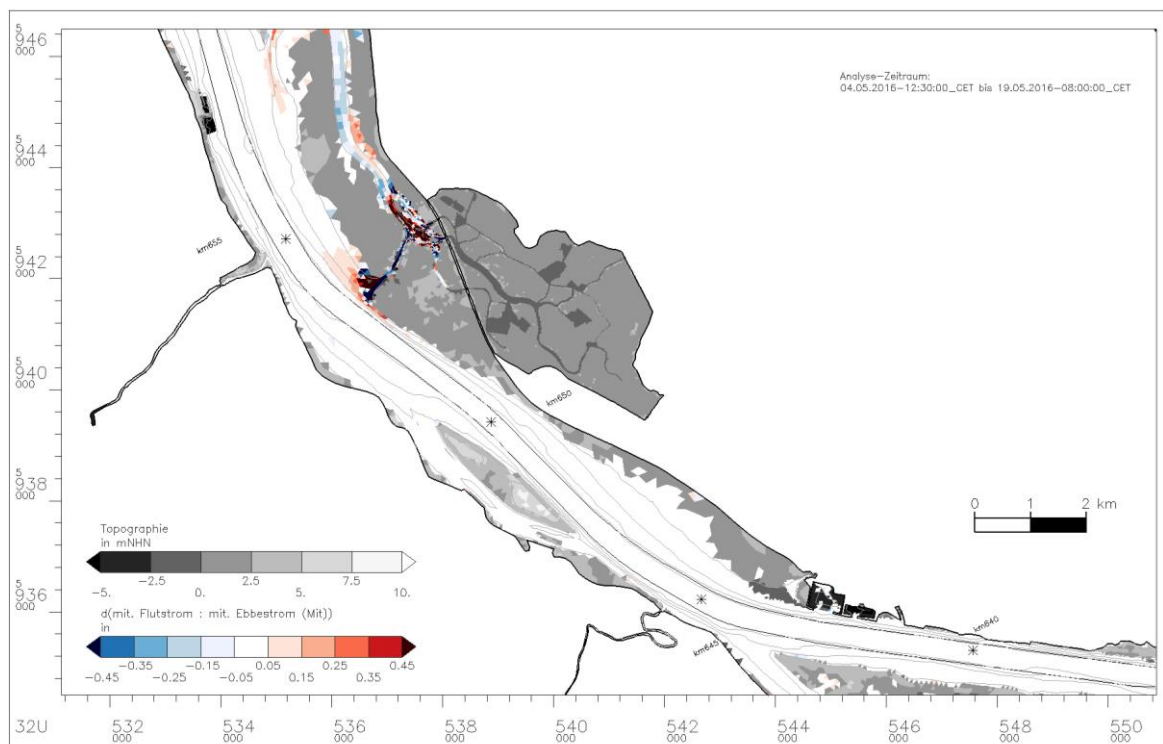
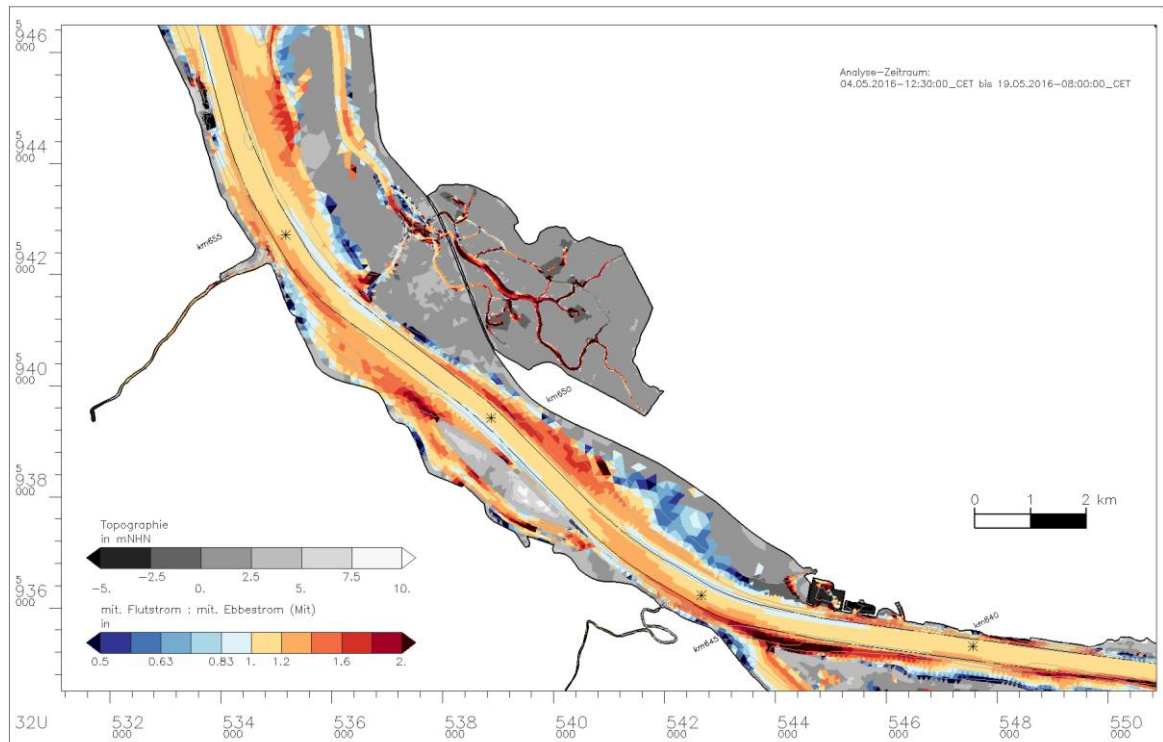


Bild 37: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

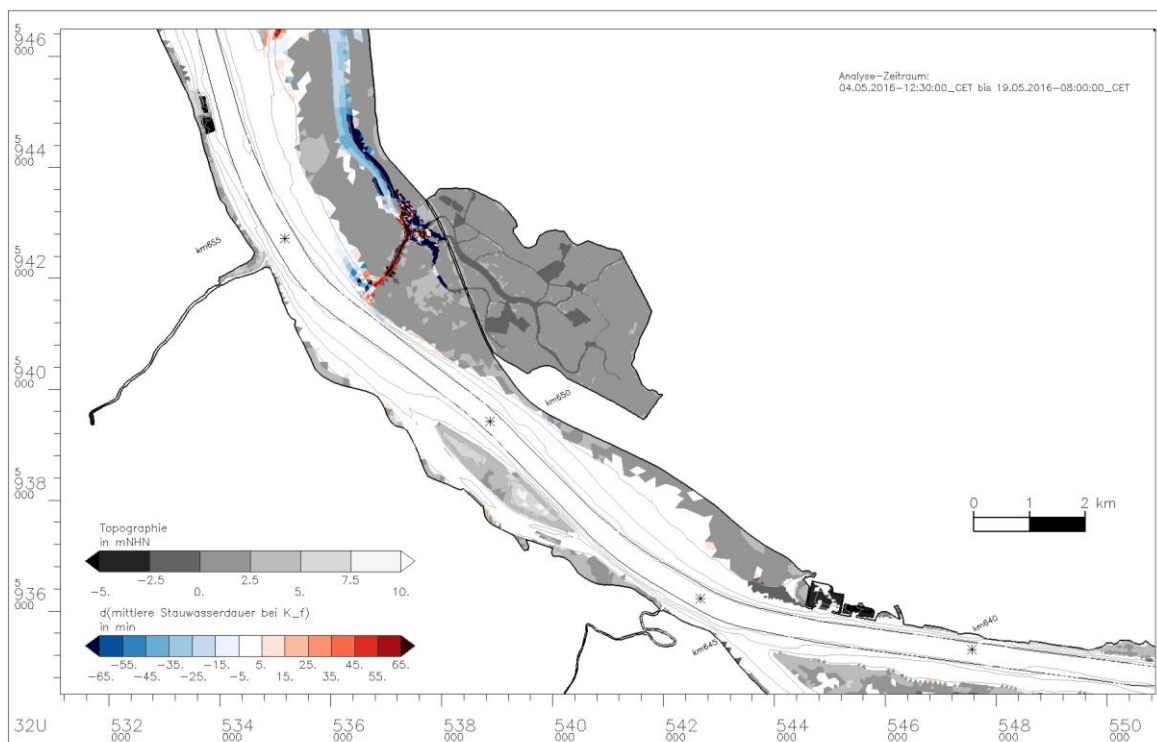
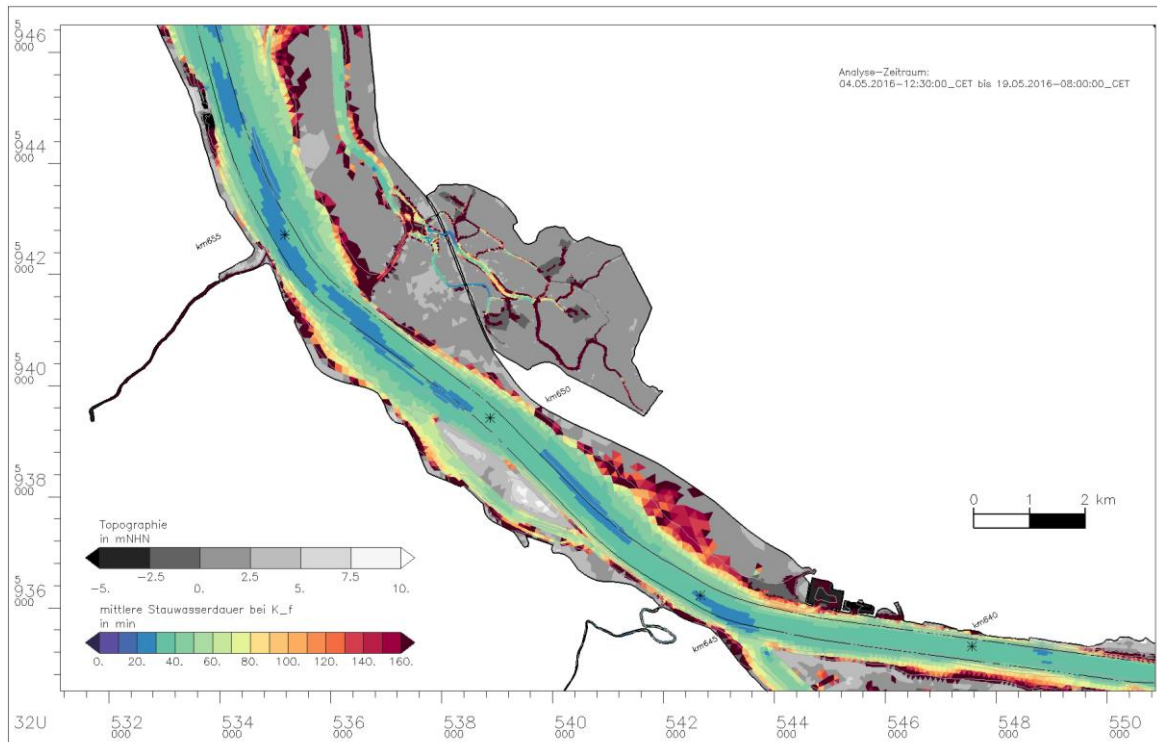


Bild 38: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

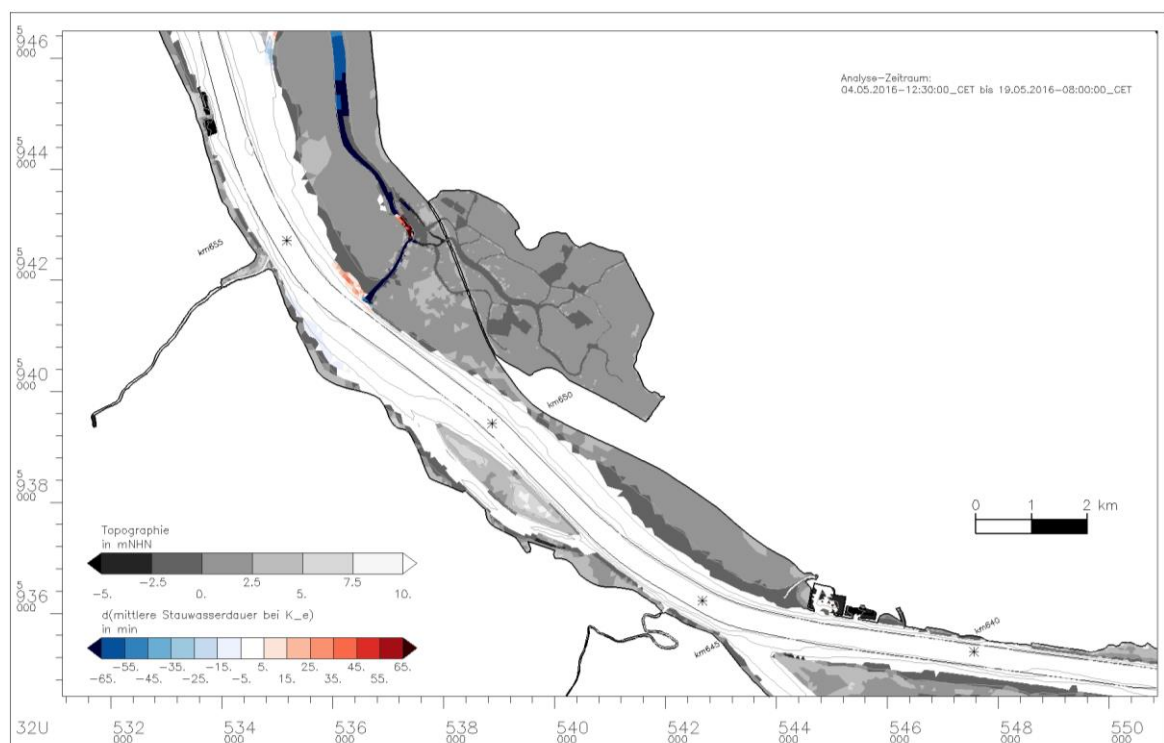
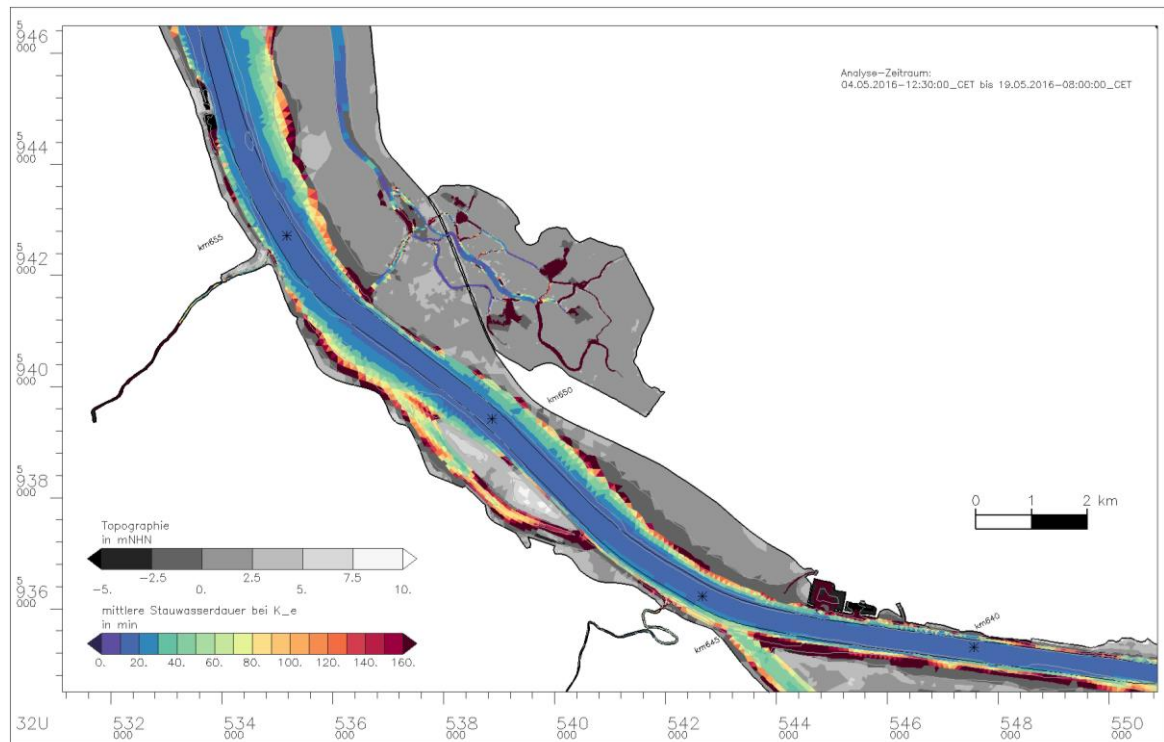


Bild 39: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und des Verhältnisses von Flut- zu Ebbstrom (F:E - Verhältnis) wirken sich besonders deutlich auf den Sedimenttransport aus. Die höheren Strömungsgeschwindigkeiten in den Nebanelben führen durch die Erosion des dort vorhandenen Sedimentinventars zu einer Zunahme des mittleren Schwebstoffgehaltes um ca. $0,02 \text{ kg/m}^3$ (Bild 40). Der Schwebstoffgehalt in der Haseldorfer Marsch liegt daher im Zulaufbereich auf dem gleichen Niveau wie in den Nebanelben. Im Hauptstrom ist der Schwebstoffgehalt bei Flutstrom mit $0,3\text{-}0,4 \text{ kg/m}^3$ zwei- bis dreimal so groß wie in den Nebanelben. Durch den Anschluss der Haseldorfer Marsch ergibt sich eine geringe Reduktion. Ein vergleichbares Bild ergibt sich bei Ebbstrom (Bild 41), jedoch ist der mittlere Schwebstoffgehalt geringer als bei Flutstrom.

Die daraus resultierenden Veränderungen des Schwebstofftransports sind in Bild 42 durch den advektiven Rest-Schwebstofftransport und dessen Differenz zum Referenzlauf dargestellt. Markant ist die Erhöhung des Transportes stromauf im Bereich Dwarsloch. Die berechnete Erosion in den Nebanelben ist als anfängliche morphologische Anpassungsreaktion der Nebanelben zu bewerten. Das ausgetragene Sediment gerät temporär für die Dauer des morphologischen Anpassungsprozesses in das nach wie vor flutstromorientierte Transportregime im Fahrwasser.

Die deutlich erhöhte Flut- und Ebbströmung im Bereich Dwarsloch und in der Haseldorfer Binnenelbe führt aufgrund morphologischer Anpassungsprozesse anfänglich zu einer Erosion des dort vorhandenen Sedimentinventars und einem anfänglich auch vergleichsweise starken Sedi-
menteintrag in die Haseldorfer Marsch. In der Haseldorfer Marsch findet eine hydraulische Sortierung der Sedimente statt, d.h. die gröberen Sedimente mit der höheren Sinkgeschwindigkeit sedimentieren zuerst. Der Hauptsedimentationsbereich liegt daher in dem großen Priel hinter dem Sperrwerk der Hauptöffnung. In der Differenzdarstellung der Tiefenerosion sieht man die anfänglichen Erosionsbereiche in den Nebanelben und die anfänglichen Depositionsbereiche im Fahrwasser (Bild 43).

Innerhalb des Simulationszeitraumes von 4 Wochen werden fast 30000 t Schwebstoffe in die Haseldorfer Marsch eingetragen und akkumulieren dort überwiegend. Der Großteil der eingetragenen Schwebstoffe besteht aus sehr feinem Sand, aber auch aus schluffigen Sedimenten (Bild 44). Das ist eine anfängliche morphologische Reaktion auf die örtlich veränderten Strömungsverhältnisse, die mittelfristig abklingen wird. Initialbaggerungen in der Haseldorfer Binnenelbe und im Dwarsloch würden die starke anfängliche morphologische Reaktion verringern. Zudem verringert die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten durch den Tideanschluss der Haseldorfer Marsch die derzeitige Verschlickung dieser beiden Nebanelben. Eine Aktivierung der Pagensander Nebanelbe, wie in dieser Simulation enthalten, ist für den Anschluss nicht zwingend erforderlich, aber ein hilfreicher Baustein. Langfristig hängt der Sedimenteintrag in die Haseldorfer Marsch von der Entwicklung des Schwebstoffinventars in der Unterelbe ab. Gelingt es, die derzeit hohen Schwebstoffgehalte z.B. durch ein optimiertes Sedimentmanagement zu reduzieren, wird auch der Eintrag in die Nebanelben und in die Haseldorfer Marsch geringer.

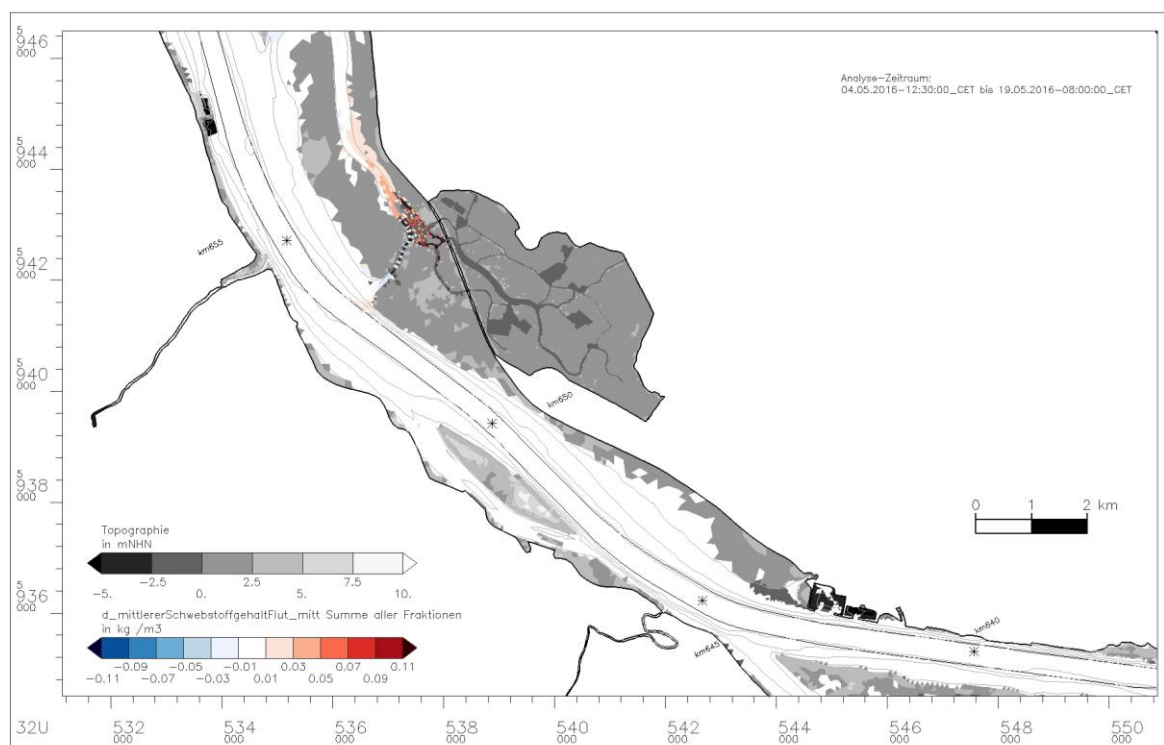
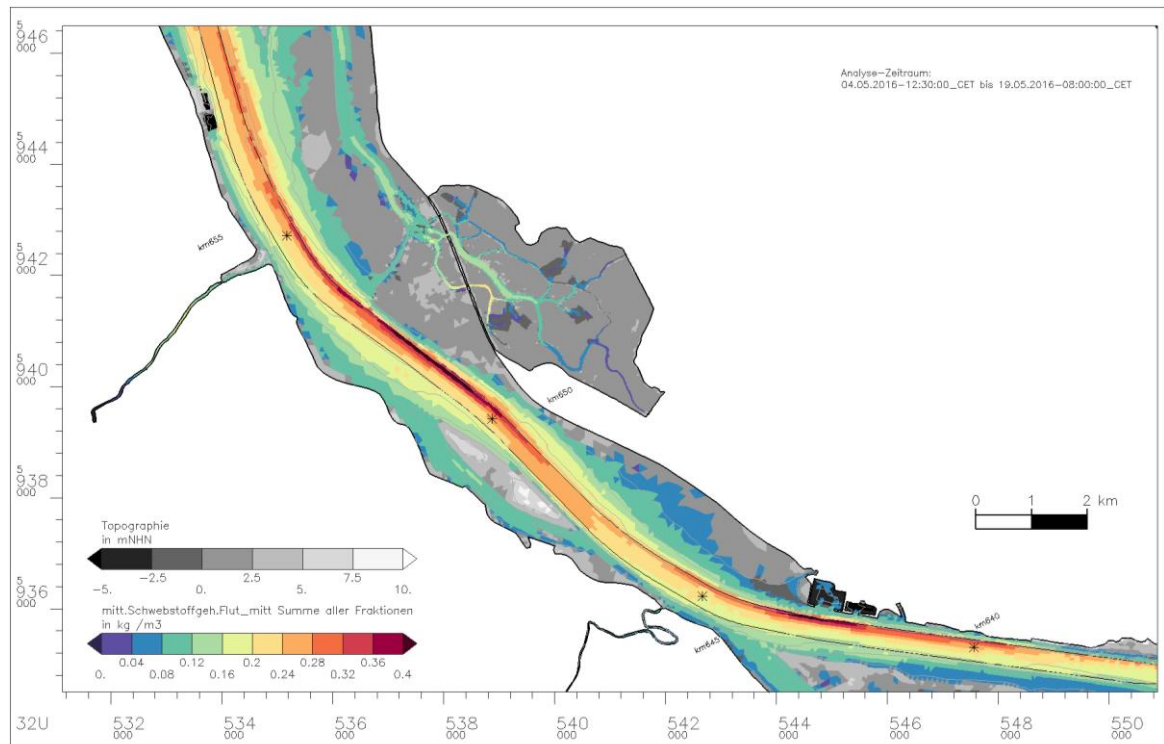


Bild 40: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

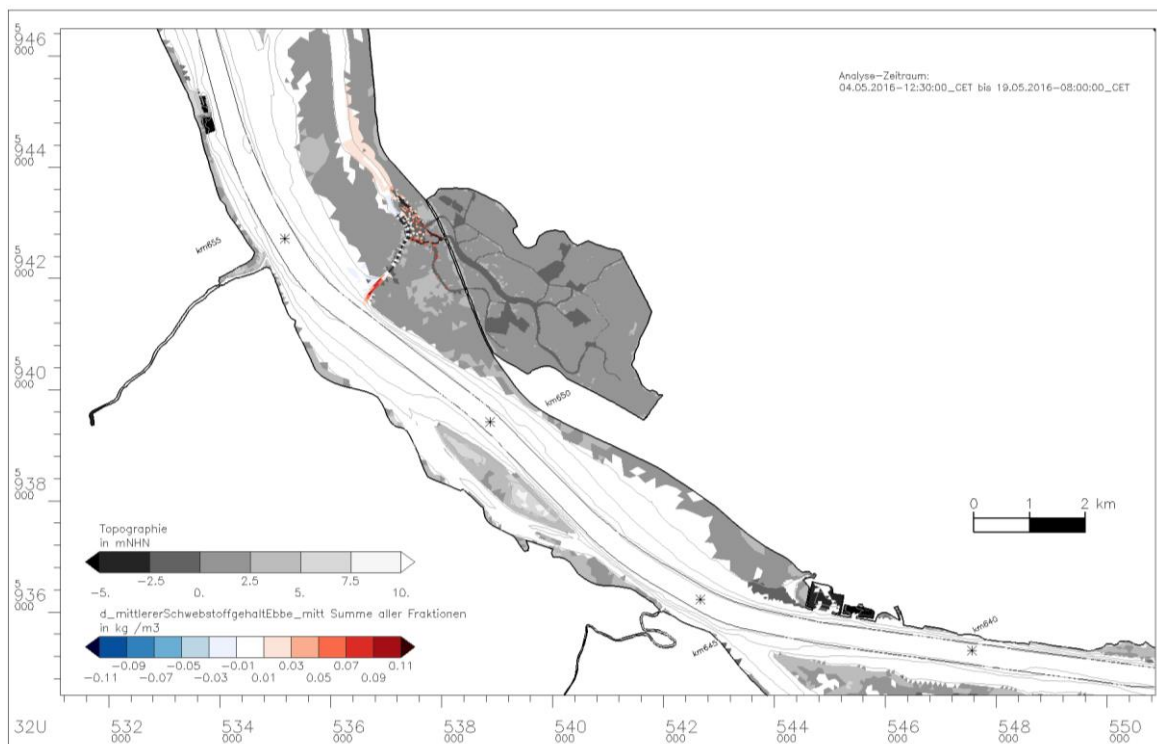
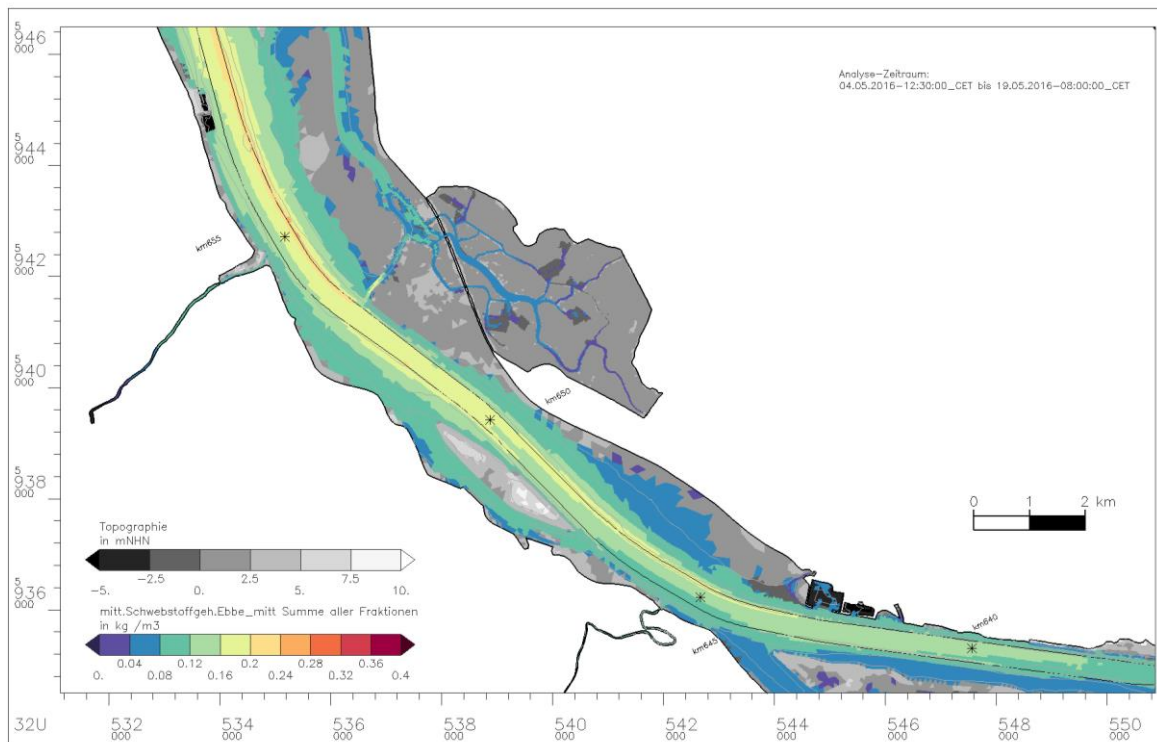


Bild 41: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

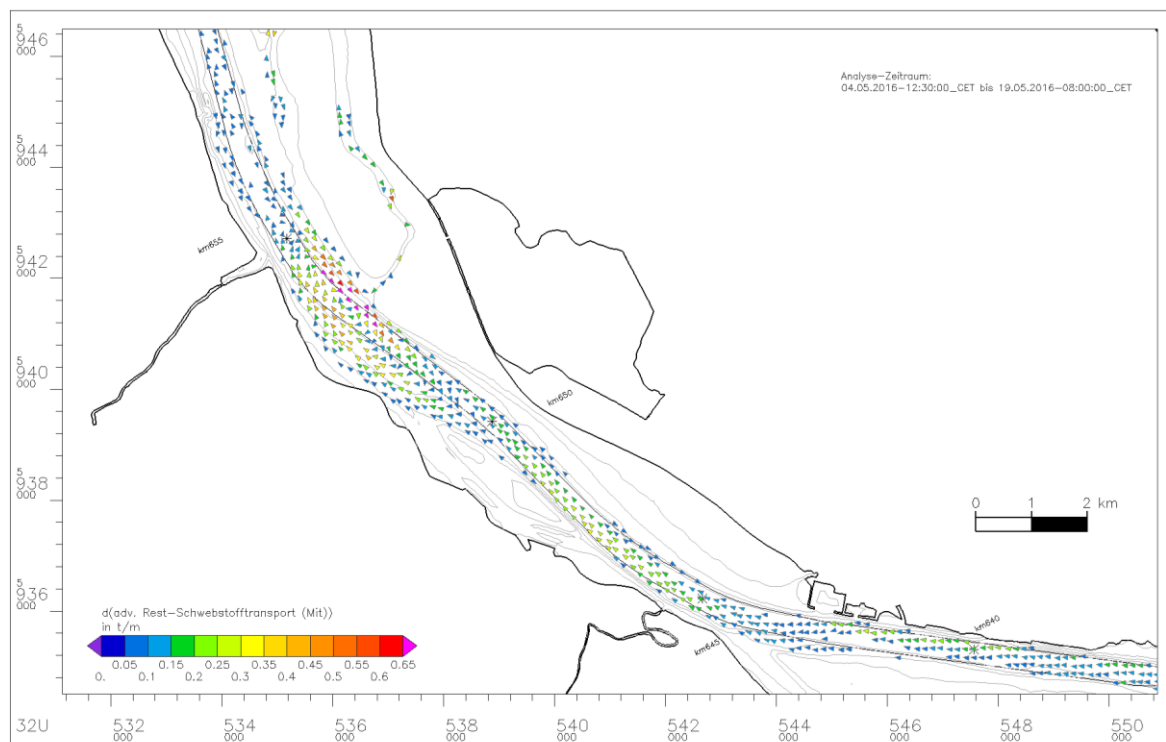
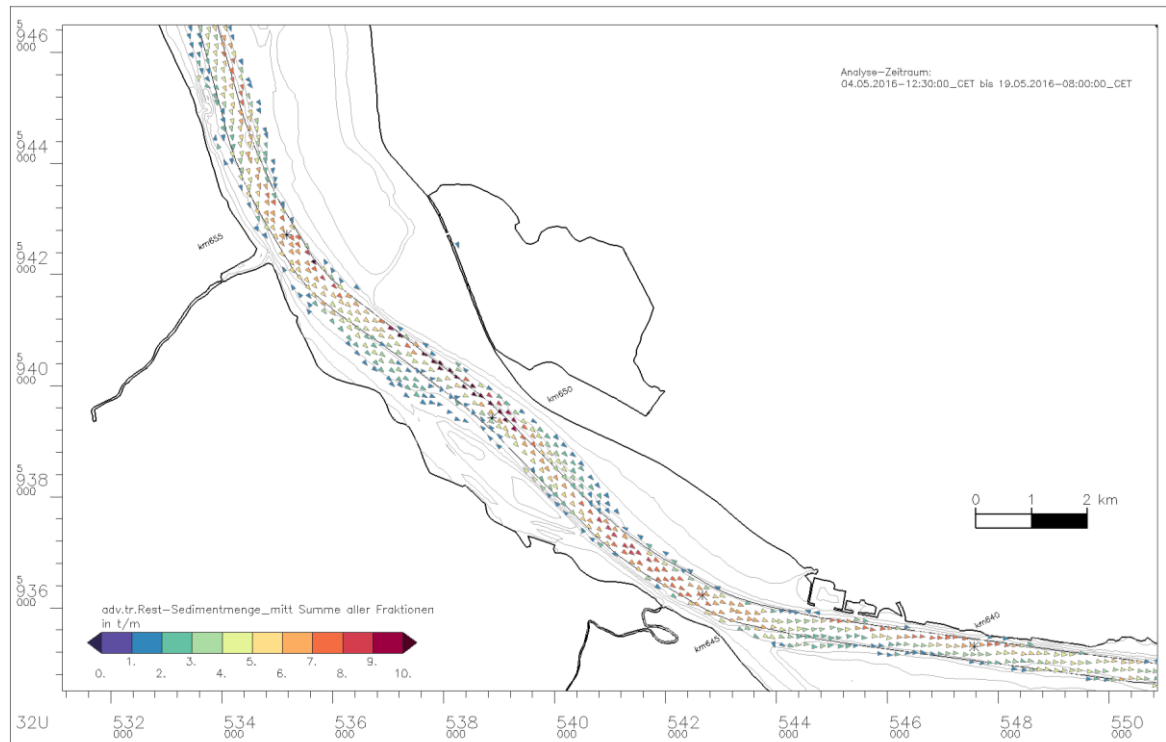


Bild 42: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Variante, Bild unten: Differenz (Variante minus Referenz)

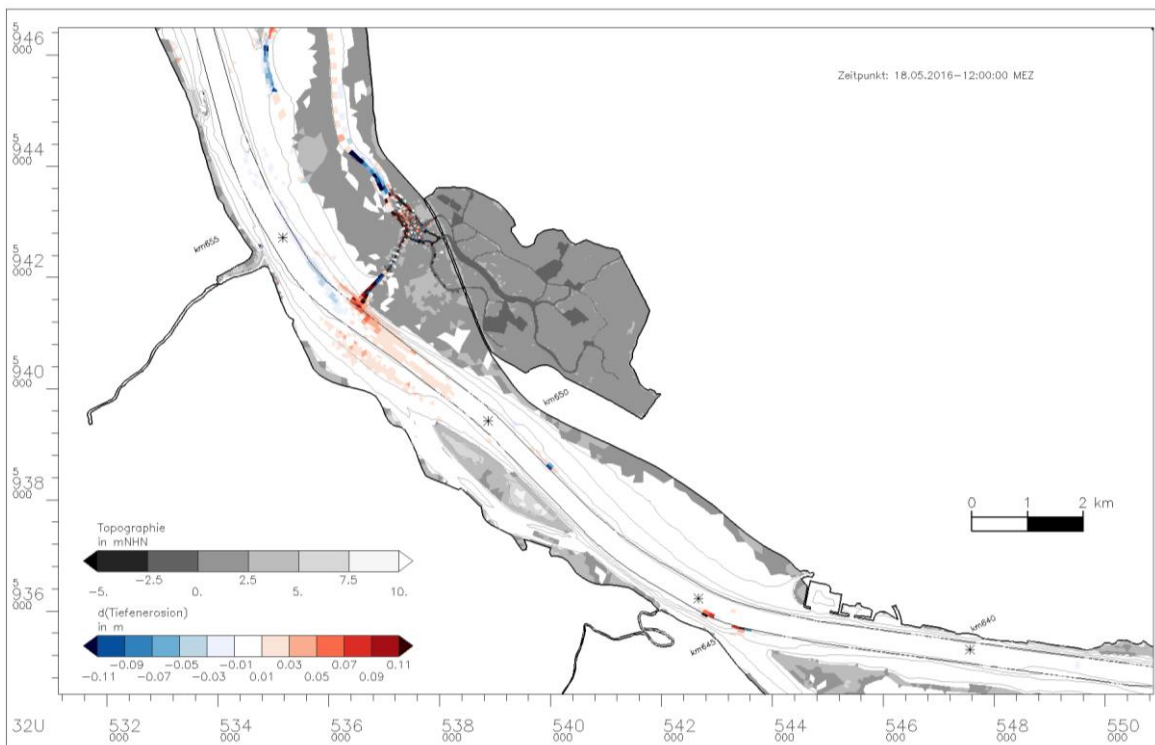


Bild 43: Änderung der Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit (Variante minus Referenz)

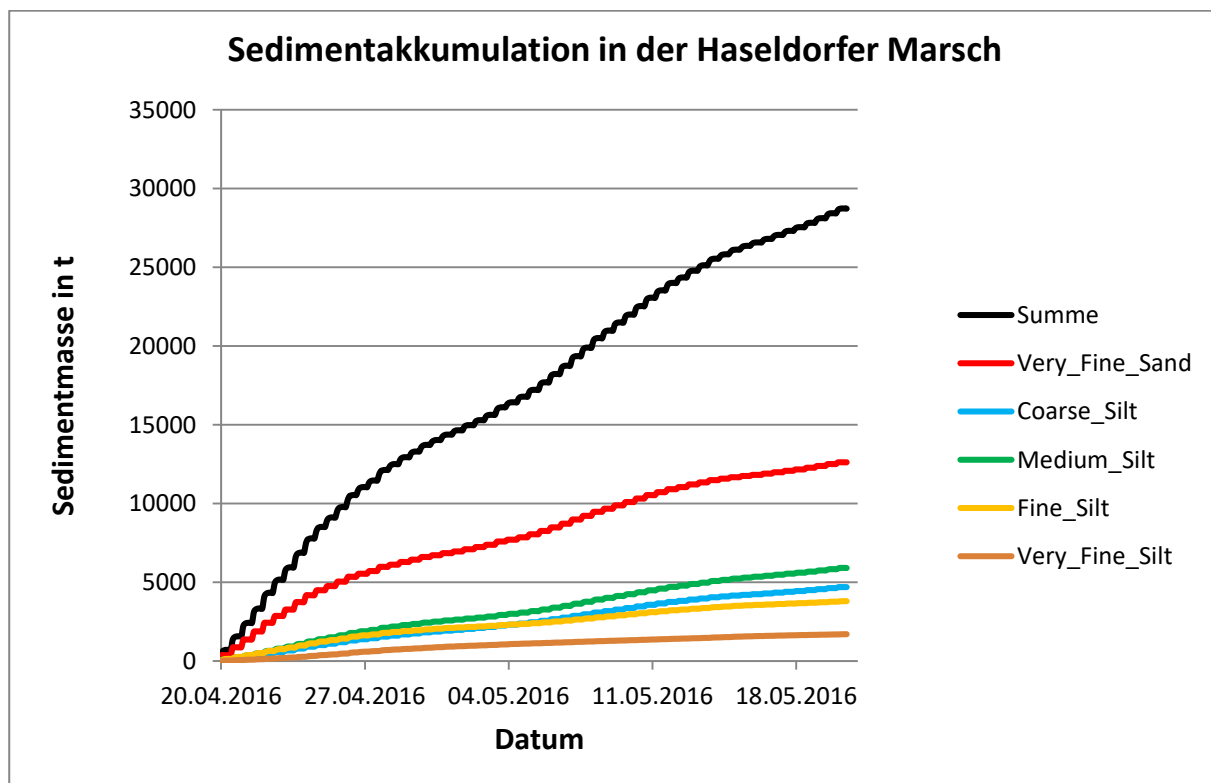


Bild 44: Anfänglicher Schwebstoffeintrag in das Gebiet während der 4 wöchigen Simulation

5.2.3 Großräumige Auswirkung der Maßnahme

Die Differenz (Variante minus Referenz) des MThb zeigt eine großräumige, gleichmäßige Verringerung um ca. 2,5 cm zwischen Hamburg und Glückstadt. Die Reduktion des Tidehubs ist in Relation zum mittleren Tidehub somit weniger $< 1\%$ und erfolgt zu etwa gleichen Anteilen aus der Stützung des Tideniedrigwassers wie der Dämpfung des Tidehochwassers. Weiter stromab wird die Wirkung geringer, und ist bei etwa Elbe-Km 720 abgeklungen (Bild 45).

Großräumig ergibt sich auch bei dem Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeiten tendenziell eine Verminderung der Flutstromdominanz, lediglich örtlich im Bereich Dwarsloch bei Elbe-Km 653 gibt es eine Erhöhung (Bild 46). Wenn auch eine Änderung dieses Verhältniswertes um weniger als 0.01 gering zu sein scheint, er ist doch ein starker Indikator, der signifikante Auswirkungen für den Sedimenttransport vermuten lässt, da es sich um einen Wert handelt, der für die mittleren Strömungsverhältnisse in der Mitte der Fahrrinne ermittelt wird.

Die großräumige Wirkung auf den Schwebstofftransport ist in Bild 47 zu erkennen. Es zeigt sich, dass der mittlere Rest-Schwebstofftransport um maximal ~ 1000 t/Tide bei Elbe-Km 695 reduziert wird. Die Erhöhung des Rest-Schwebstofftransport/Tide zwischen Elbe-Km 652-668 wird durch die in dieser Variante enthaltenen Vertiefung der Pagensander Nebelbe und den oben erwähnten lokalen und temporären morphologischen Anpassungsprozessen in den Nebelben erklärt. Weiter stromauf des Anschlusses ergibt sich ebenfalls eine Reduktion des Schwebstofftransportes stromauf, die mit ca. 200 t/Tide geringer ausfällt, aber bis in den Hamburger Hafen wirkt.

Die gestrichelte Linie zeigt die Wirkung des Tideanschlusses der Haseldorfer Marsch ohne die Vertiefung der Pagensander Nebelbe. Diese Werte wurden berechnet, indem die Differenz nicht zu dem Referenzlauf, sondern zu der Variante „Pagensander Nebelbe“ gebildet wurde. Die in Kapitel 5.1 beschriebene Wirkung einer Vertiefung der Pagensander Nebelbe entfällt somit. In diesem Fall würde sich zwischen Elbe-Km 650-660 eine Erhöhung des Schwebstofftransportes stromauf ergeben, die großräumige Reduktion im Bereich der Trübungszone und vor dem Hamburger Hafen bleibt aber erhalten.

Die Schaffung von zusätzlichem Flutraum wirkt sich auch auf die Salzgehaltsverhältnisse aus. Am Beispiel des mittleren Salzgehalts ist ersichtlich, dass das Salz weiter in das Ästuar hineindringt. Die Erhöhung des mittleren Salzgehalts ist mit $0,02\text{ ‰}$ für den betrachteten Analysezeitraum als gering anzusehen und wird sich auch bei anderen, hinsichtlich der Salzgehalte pessimistischeren, Oberwasserabflüssen nicht grundsätzlich in der Größenordnung ändern. (Bild 48).

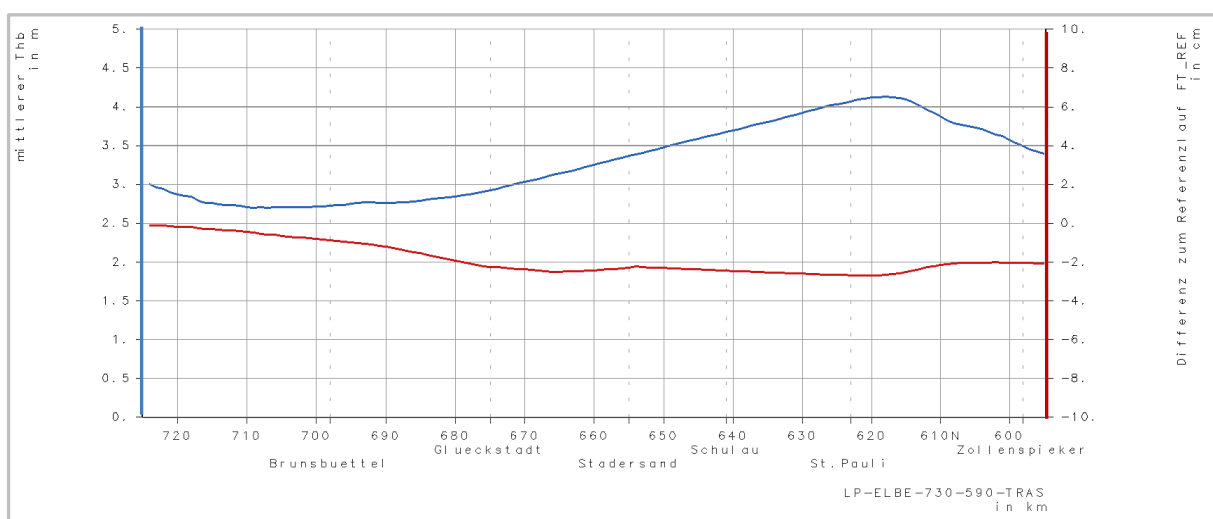
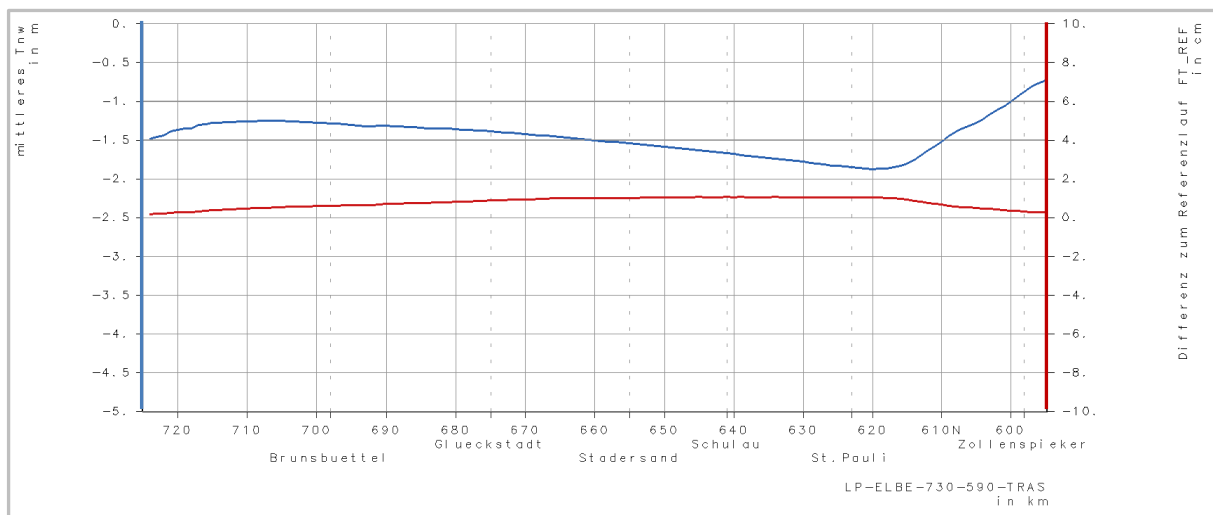
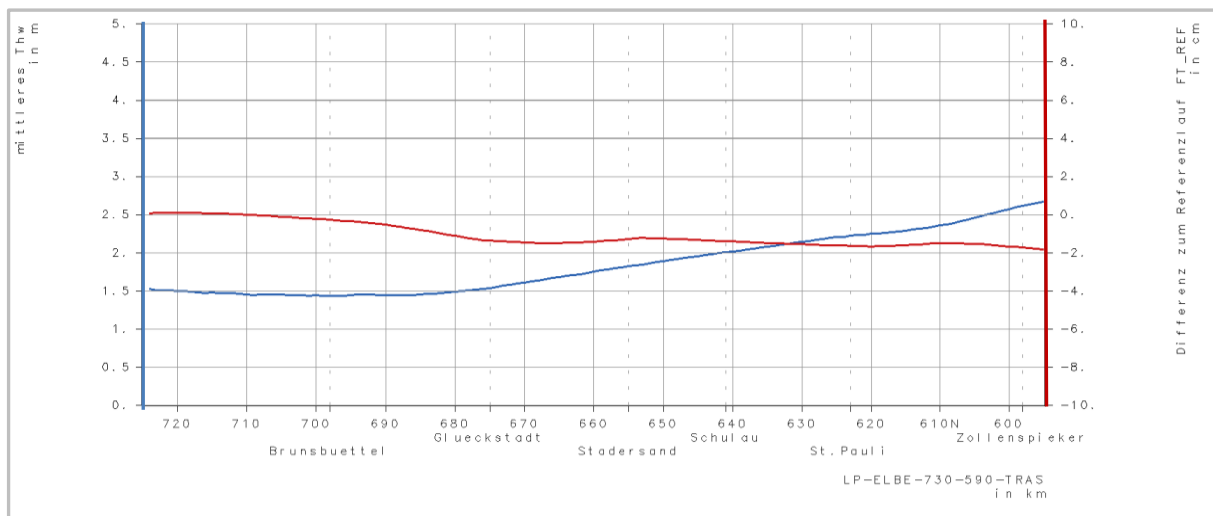


Bild 45: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)

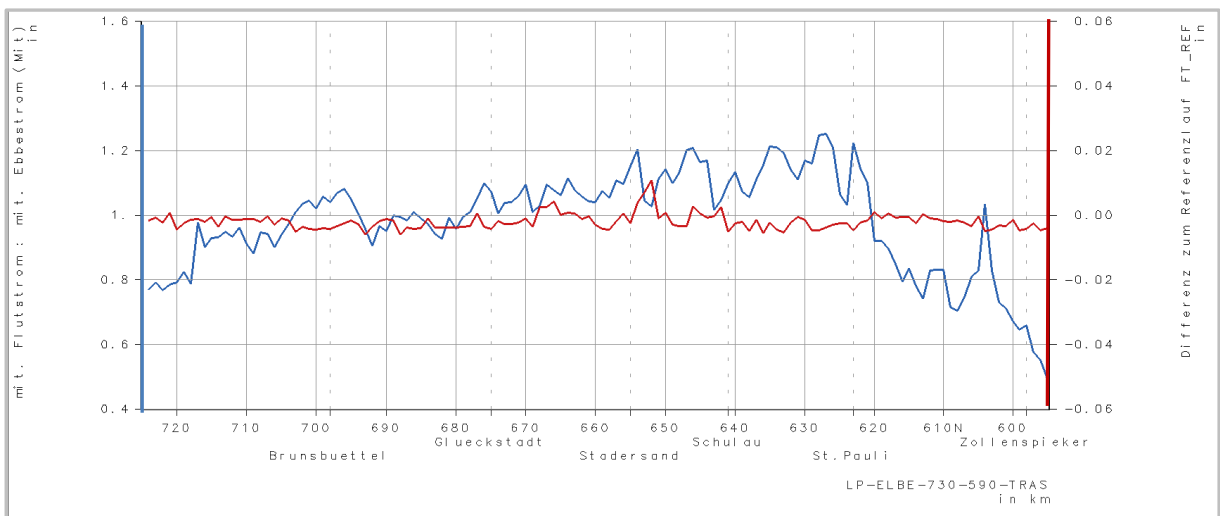


Bild 46: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)

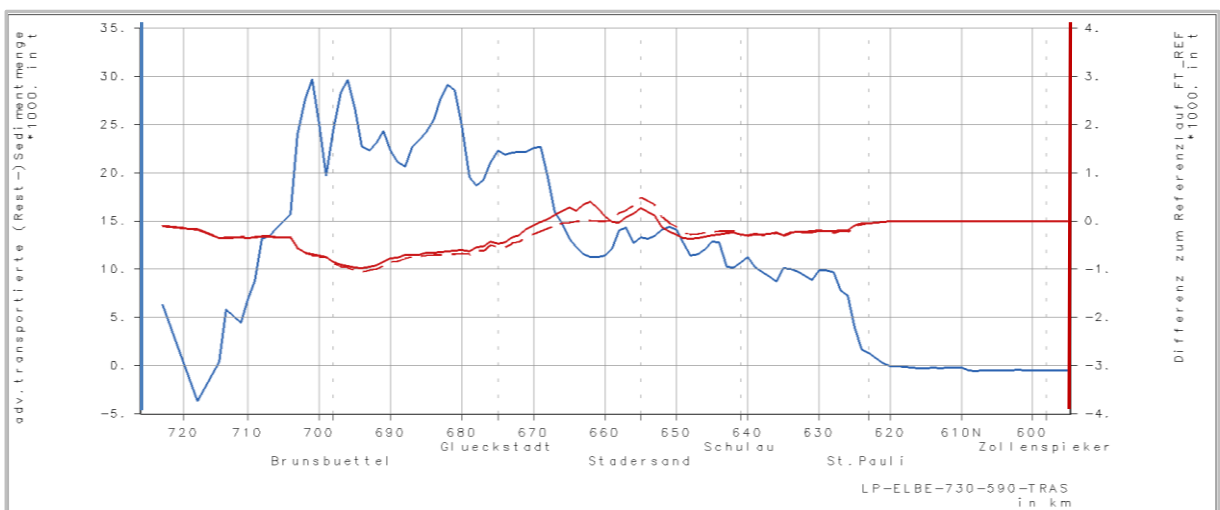


Bild 47: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz). Die gestrichelte Linie zeigt die Wirkung ohne die Vertiefung der Pagensander Nebenelbe (Variante - Variante Pagensand).

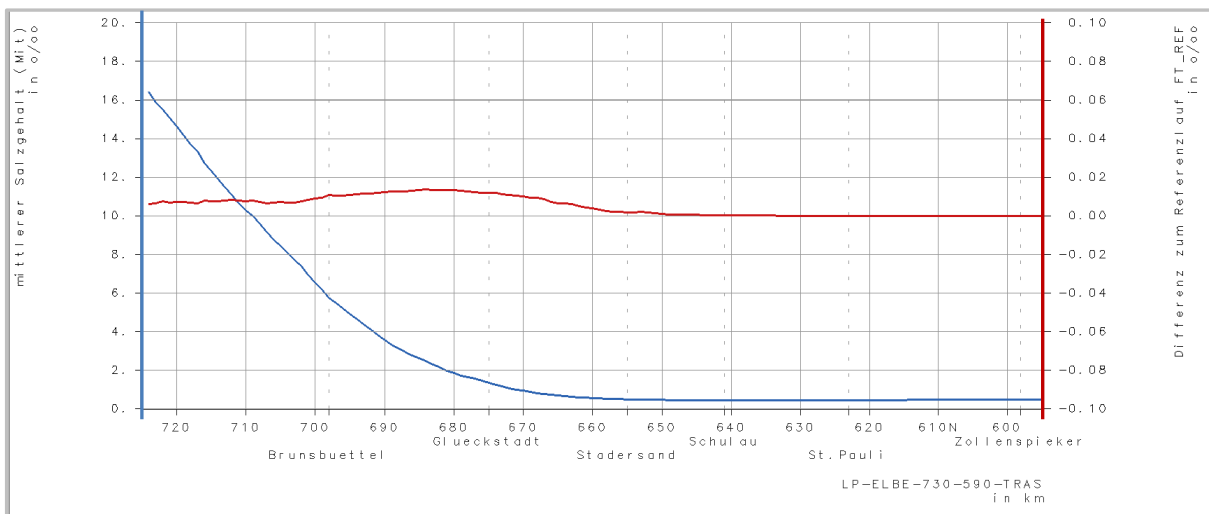


Bild 48: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)

5.3 Tideanschluss Alte Süderelbe

5.3.1 Frühere Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau

Im Rahmen des Forums Tideelbe stehen derzeit 6 verschiedene Varianten für die Anbindung der Alten Süderelbe an das Tidegeschehen zur Diskussion. Für die aktuell vorliegende Untersuchung wurde seitens der BAW ausschließlich die Anbindungsvariante 1 (einseitige Anbindung an das Köhlfleet) untersucht. In älteren Untersuchungen wurden jedoch auch andere Anbindungsvarianten untersucht (Bundesanstalt für Wasserbau, 2014a), die den aktuellen Varianten ähnlich, jedoch nicht gleich sind. Anhand dieser Untersuchung aus dem Jahr 2014 wurde die grundsätzliche Wirkungsweise der einzelnen Varianten abgeschätzt und verbal argumentiert. Die Tabelle 1 zeigt zur Orientierung die wichtigsten Ergebnisse der damaligen Anbindungsvarianten aus 2014, die im Folgenden zum Vergleich mit den aktuellen Varianten 1a bis 4 herangezogen werden.

Tabelle 1 Ergebnisse der BAW Untersuchung aus 2014 für Varianten die als Vergleich genutzt werden

	ASE 1	ASE 5	NASE 2
Tidevolumen [Mio. m ³]	4,9	5,3	9,3
Max. Verminderung des Tidehubs im Längsschnitt der Tideelbe [cm]	-4,0 (bei Elbe-Km ~650)	-4,0 (bei Elbe-Km ~650)	-7,0 (bei Elbe-Km ~620)
Max. Verminderung Flut-Ebbstromgeschwindigkeit im Längsschnitt der Tideelbe	-0,04 (bei Elbe-Km ~632)	-0,02 (bei Elbe-Km ~635)	-0,04 (bei Elbe-Km ~620)
Max Verminderung des Schwebstofftransportes im Längsschnitt der Tideelbe [t/Tide]	-800 (bei Elbe-Km ~670)	-1000 (bei Elbe-Km ~670)	-1500 (bei Elbe-Km ~670)
Max. Zunahme des Salzgehaltes im Längsschnitt der Tideelbe	< 0,1	< 0,1	< 0,1

5.3.2 Gestaltung der Anbindungsvariante 1

Die Anbindungsvariante 1 sieht einen einseitigen Anschluss der Alten Süderelbe an das Köhlfleet vor. Die Anbindung soll über das Storchennestsiehl realisiert werden, das dazu auf eine Sohlbreite von 65 m ausgebaut werden soll (Bild 49). Die Sohltiefe der Anbindung sowie des überwiegenden Teils des bisherigen Stillgewässers beträgt -3,5 m NHN. Lediglich das westliche Ende des Stillgewässers wird flacher mit -2 m NHN geplant. Der südliche, bzw. östliche Teil des Gewässers bleibt unverändert.

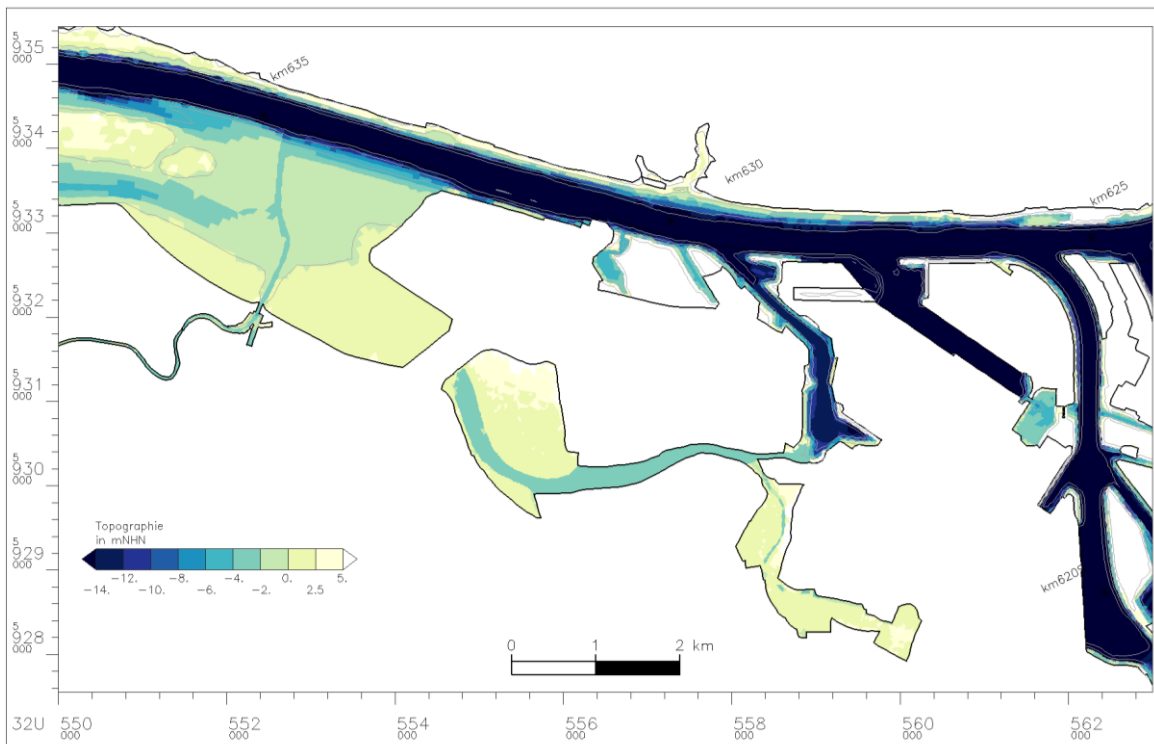


Bild 49: Einseitige Anbindung der Alten Süderelbe (Anbindungsvariante 1)

5.3.3 Auswirkung im Nahbereich der Anbindungsvariante 1

Durch die Anbindung der Alten Süderelbe ergibt sich im ausgewerteten Simulationszeitraum ein zusätzliches Tidevolumen zwischen etwa 1,1 – 7,2 Mio. m³ (Bild 50). Die Zunahme des Tidevolumens durch den Anschluss der Alten Süderelbe führt zu einer weitreichenden Veränderung von verschiedenen hydraulischen Parametern in der Tideelbe. Nach der Anbindung der Alten Süderelbe steigt das mittlere Tidehochwasser gleichmäßig im Köhlfleet, den angrenzenden Elbbereichen und der Alten Süderelbe auf etwa 2,1 m (Bild 51 oben). Für das Tideniedrigwasser (Bild 52 oben) stellt sich ein weniger gleichmäßiges Bild ein. Für den südlichen bzw. östlichen Teil der Alten Süderelbe ergibt sich für den Analysezeitraum mittleres Tideniedrigwasser > -0,4 m NHN, der restliche Teil der Alten Süderelbe, sowie der Köhlfleet zeigen dagegen ein deutlich geringeres mittleres Tideniedrigwasser von etwa -1,5 m NHN auf. Insgesamt ist der Anbindungsquerschnitt der Alten Süderelbe also leistungsfähig genug, um das Gewässer bei Flut zu füllen und anschließend -mit Ausnahme des südöstlichen Teils- auch wieder zu leeren. Lediglich im Bereich der METHA-Brücke ist der Querschnitt zu eng um den erwähnten südöstlichen Teil bei Niedrigwasser vollständig zu entleeren.

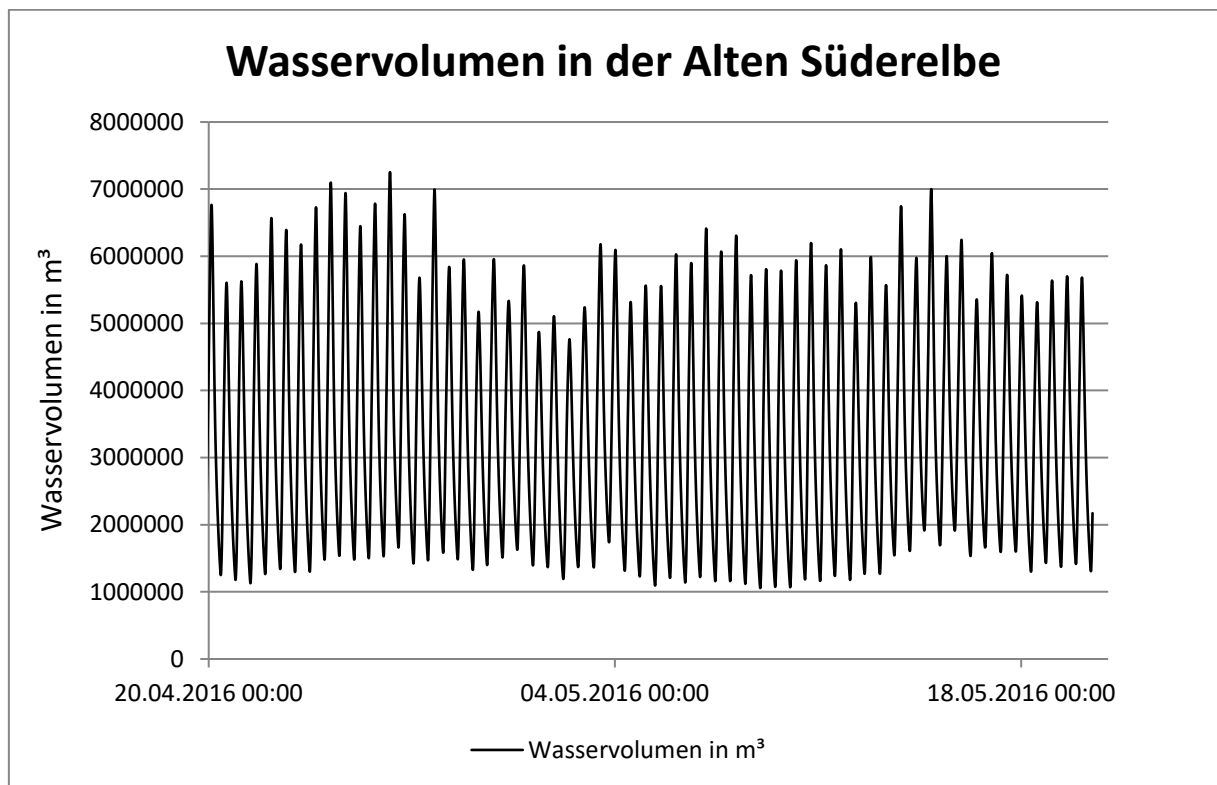


Bild 50: Zusätzliches Tidevolumen durch die Anbindungsvariante 1

Insgesamt senkt sich das mittlere Tidehochwasser im Nahbereich durch die Anbindung der Alten Süderelbe um etwa 1,5 cm (Bild 51 unten). Das mittlere Tideniedrigwasser wird dagegen gestützt und steigt etwa um 1,5 cm, stromauf Elbe-km 630 um etwa 2,5 cm gegenüber dem Referenzszenario an (Bild 52 unten). Durch die Anhebung des mittleren Tideniedrigwassers und die Absenkung des mittleren Tidehochwassers sinkt der mittlere Tidehub im Nahbereich um etwa 3,0 cm, stromab von Elbe-km 635 um etwa 3,5 cm (Bild 53 unten).

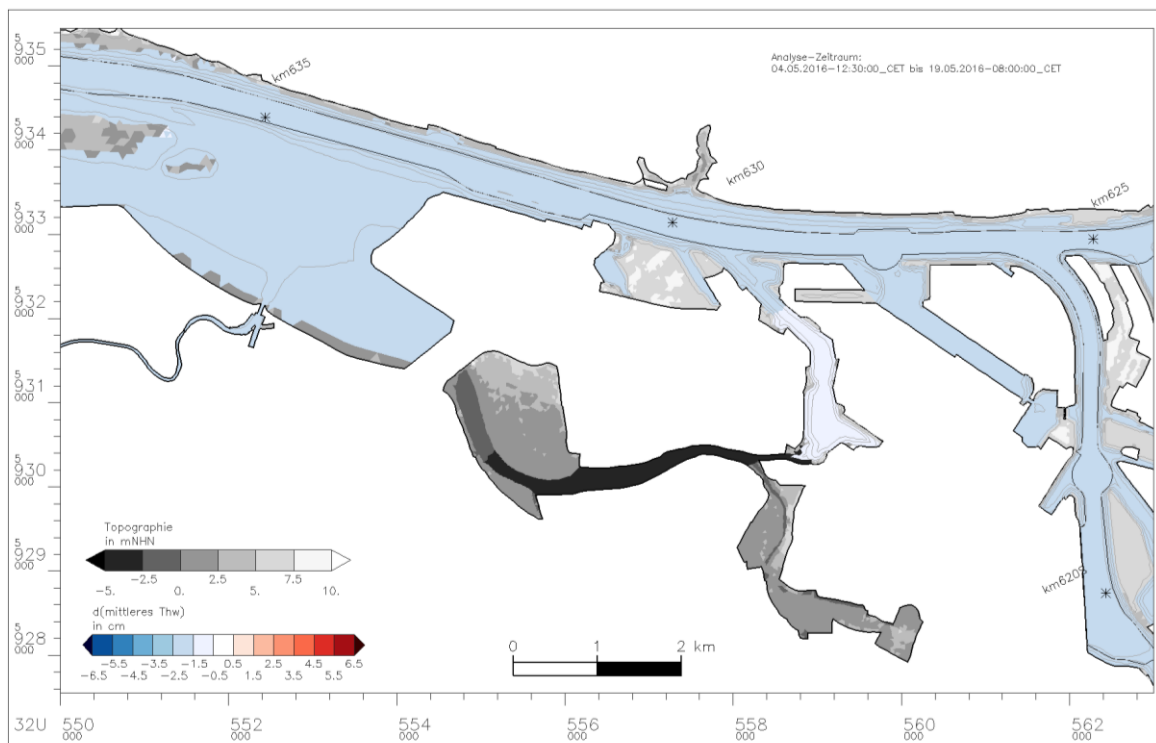
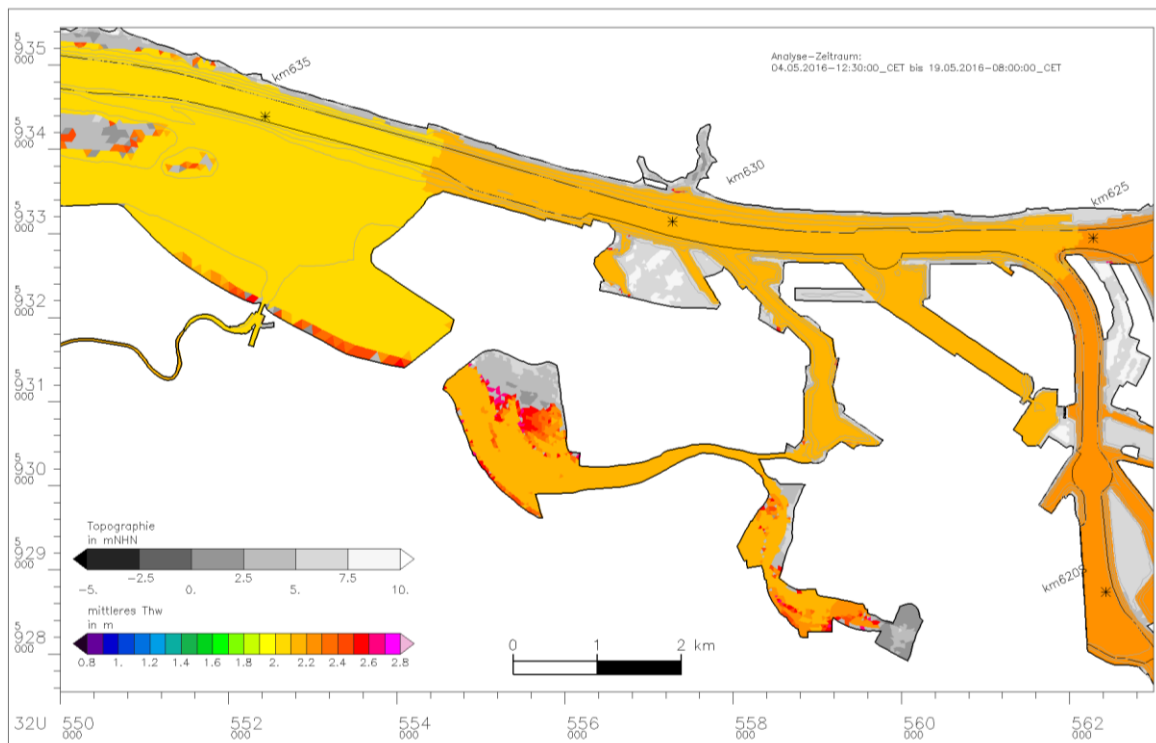


Bild 51: Mittleres Tidehochwasser. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

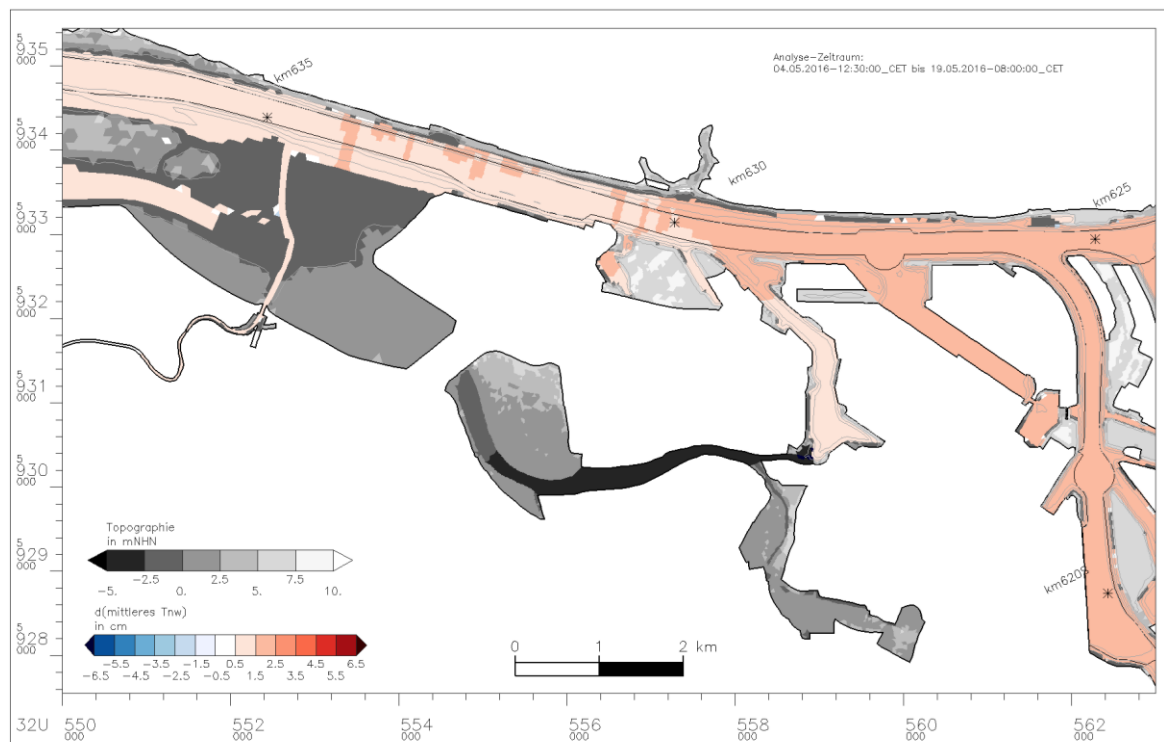
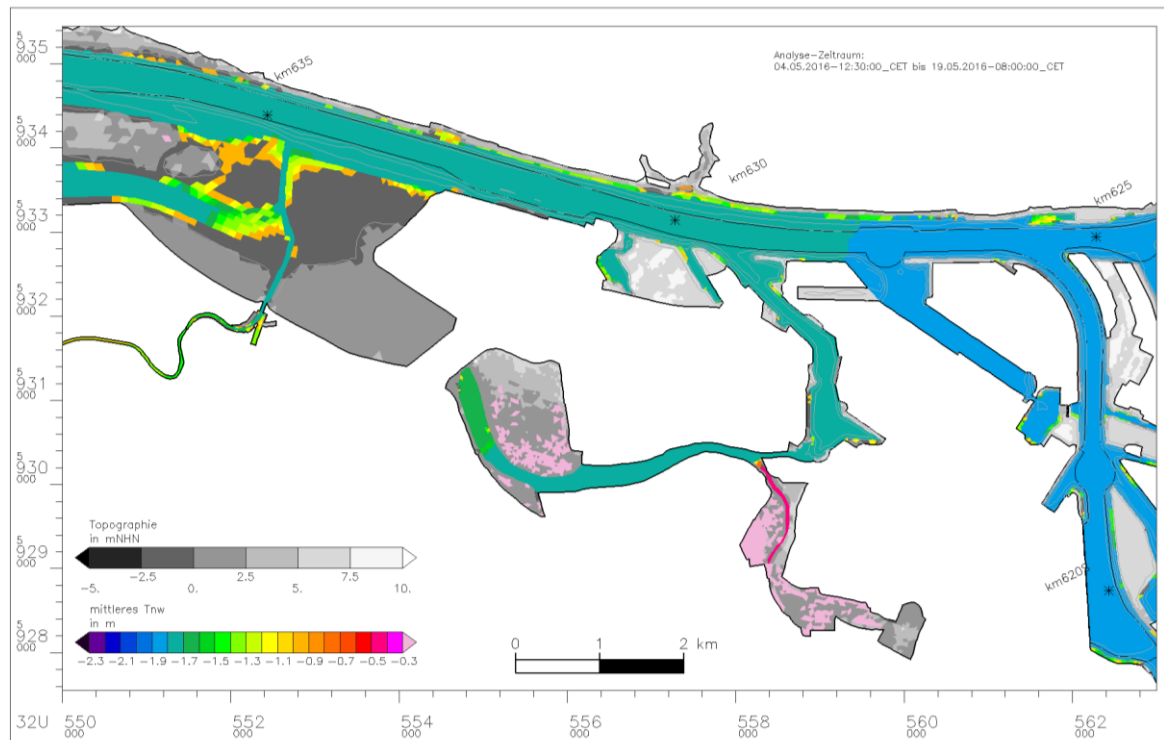


Bild 52: Mittleres Tideniedrigwasser. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

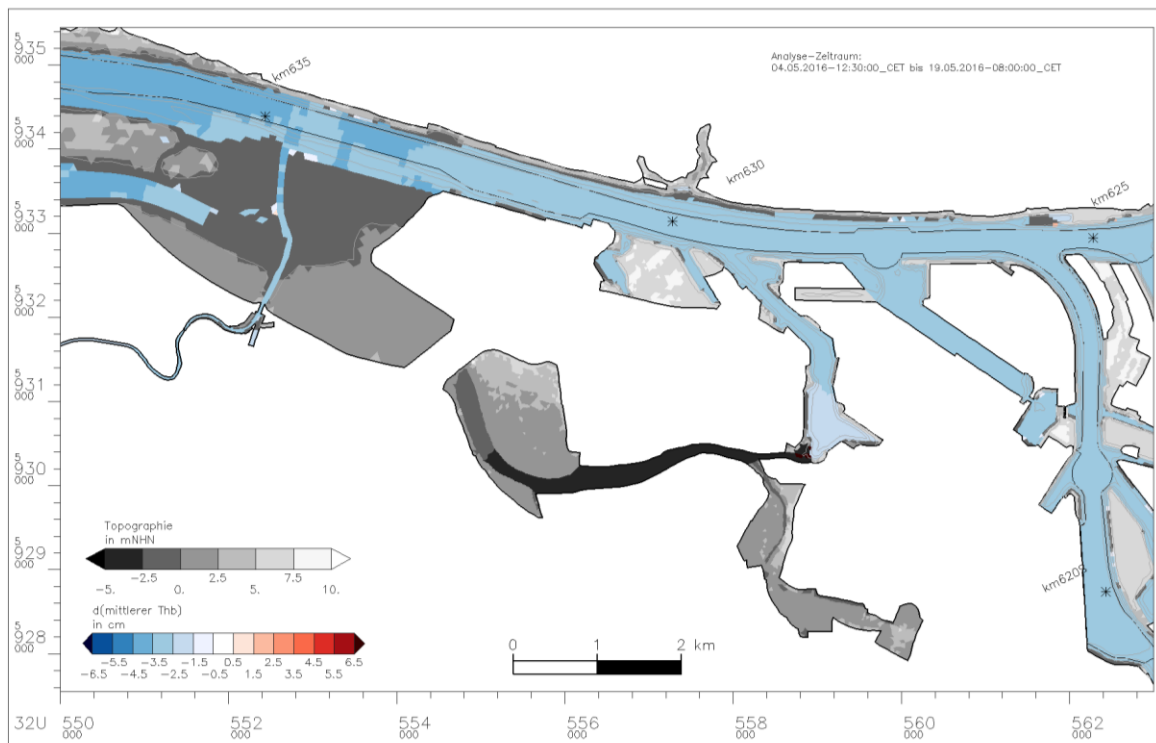
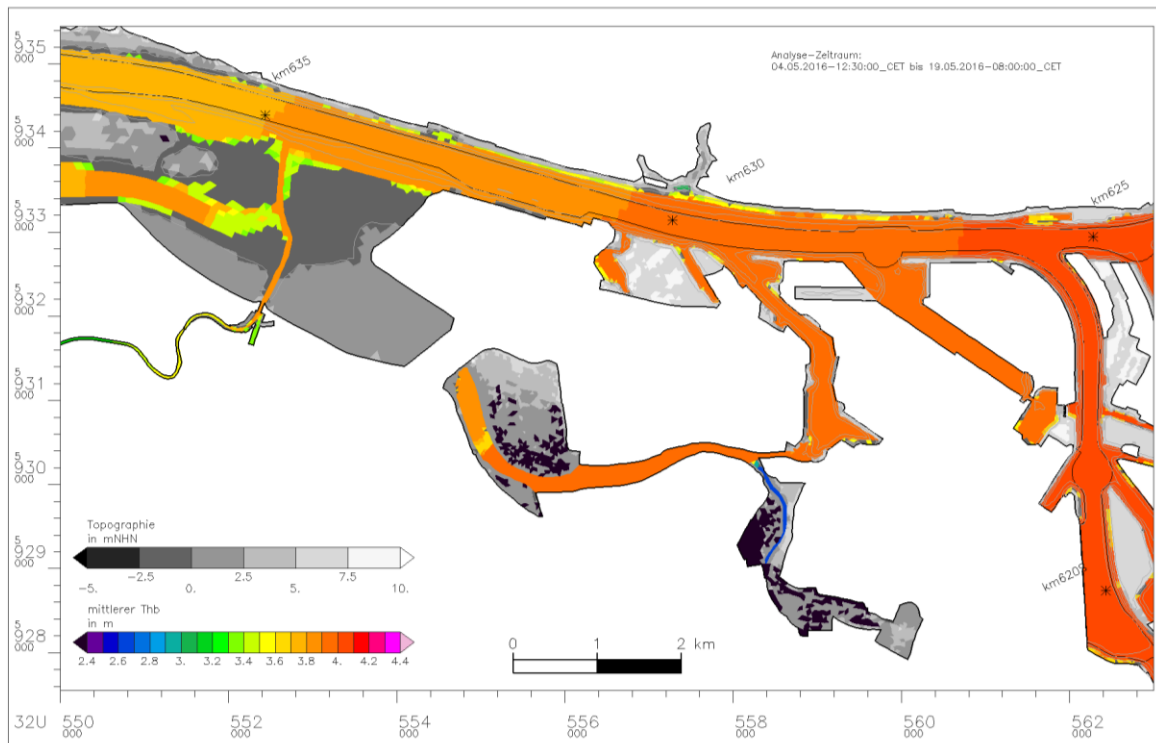


Bild 53: Mittlerer Tidehub. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

Nach der Anbindung der Alten Süderelbe läuft ein Teil des Flutstroms über das Köhlfleet in die Alte Süderelbe (Bild 54 oben). In der Fahrrinne der Elbe steigt die mittlere Flutstromgeschwindigkeit auf Werte um 1,0 m/s, das entspricht einer Erhöhung um etwa 0,025 m/s. Im Köhlfleet bilden sich aufgrund des großen Fließquerschnitts im Verhältnis zum Tidevolumen mit etwa 0,2 m/s deutlich geringere mittlere Flutstromgeschwindigkeiten aus. Aufgrund des geringeren Fließquerschnitts steigt die Flutstromgeschwindigkeit im Anbindungsbereich der Aue auf Werte von etwa 1,5 m/s. Im weiteren Fließverlauf weitet sich dann wieder der Querschnitt, was in kontinuierlich, bis auf etwa 0,2 m/s, abnehmenden mittleren Flutstromgeschwindigkeiten resultiert. Für den Ebbstrom bildet sich ein vergleichbares Bild mit entsprechenden mittleren Ebbstromgeschwindigkeiten aus (Bild 55 oben).

Die Auswertung der Differenzen der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (Bild 54 unten: Differenz mittlere Flutstromgeschwindigkeiten, Bild 55 unten: Differenz mittlere Ebbstromgeschwindigkeiten) zeigt eine Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit stromab des Köhlfleets, sowie am südlichen Ufer der Elbe zwischen Köhlfleet und Waltershofer Hafen um bis zu etwa 0,06 m/s. Stromauf des Köhlfleets nimmt die mittlere Flutstromgeschwindigkeit um etwa 0,02 m/s ab. Im Köhlfleet steigt die mittlere Flutstromgeschwindigkeit auf fast der gesamten Länge bis auf Höhe des Dradenauhafens um etwa 0,6 m/s. Im Ebbstrom nehmen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im und stromab des Köhlfleets ebenfalls um bis zu etwa 0,06 m/s zu. Stromauf des Köhlfleets treten kaum Veränderungen der mittleren Ebbstromgeschwindigkeiten auf.

Das Flut- zu Ebbstromverhältnis (F:E – Verhältnis) zeigt, dass die Tideelbe auch nach Anschluss der Alten Süderelbe flutstromdominant bleibt (Bild 56 oben). Die Auswertung der Differenzen (Bild 56 unten) zeigt jedoch, dass das F:E – Verhältnis in weiten Teilen des Hauptstroms abnimmt. Am südlichen Ufer der Elbe, zwischen Köhlfleet und dem Waltershofer Hafen, nimmt das F:E – Verhältnis aufgrund der strömungsverlagerungsbedingten höheren Flutstromgeschwindigkeiten (s. o.) jedoch zu.

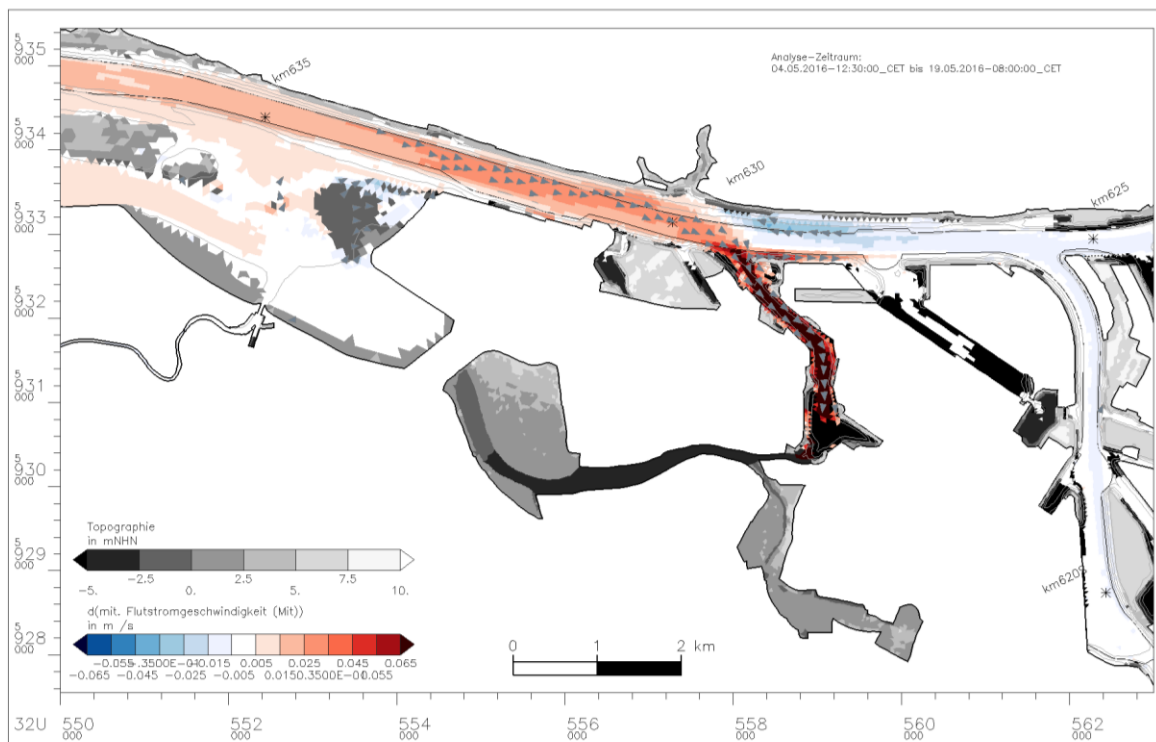
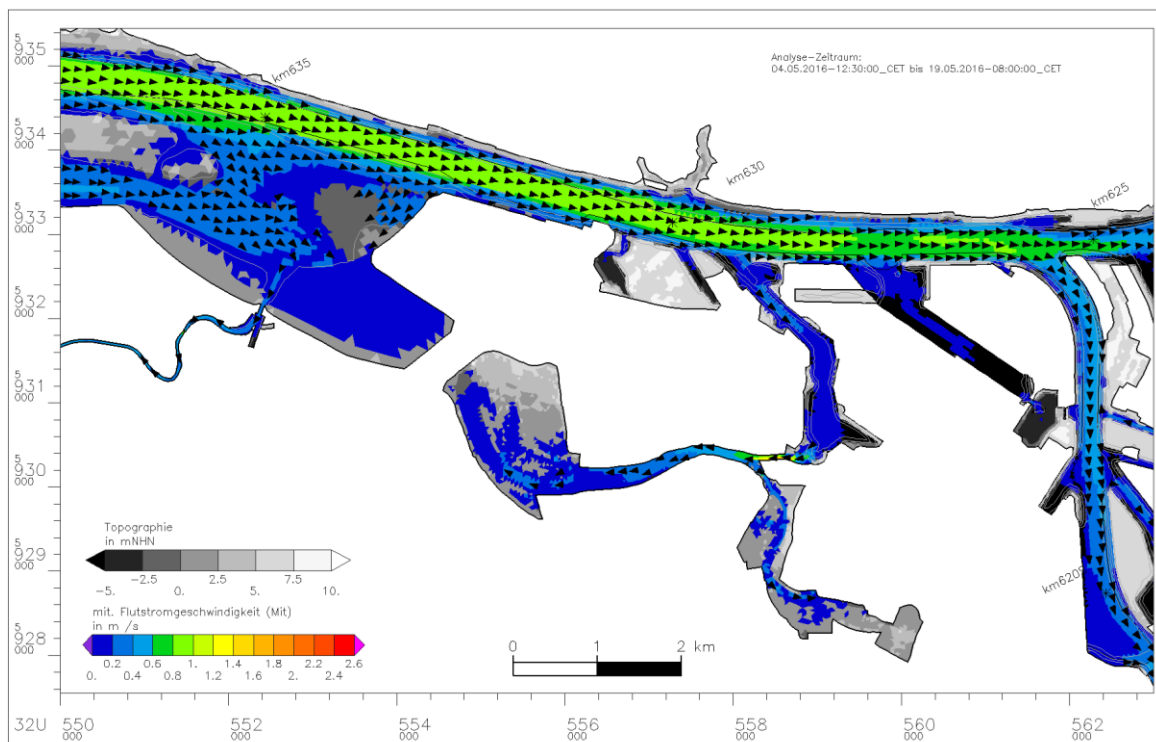


Bild 54: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

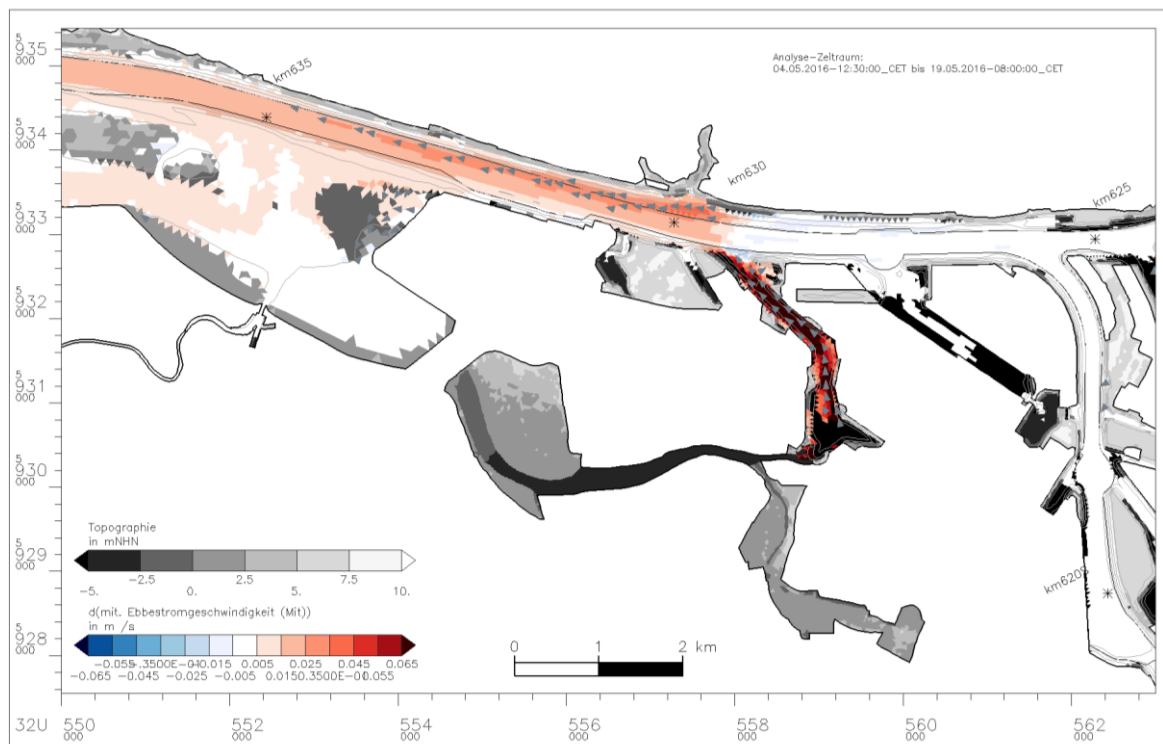
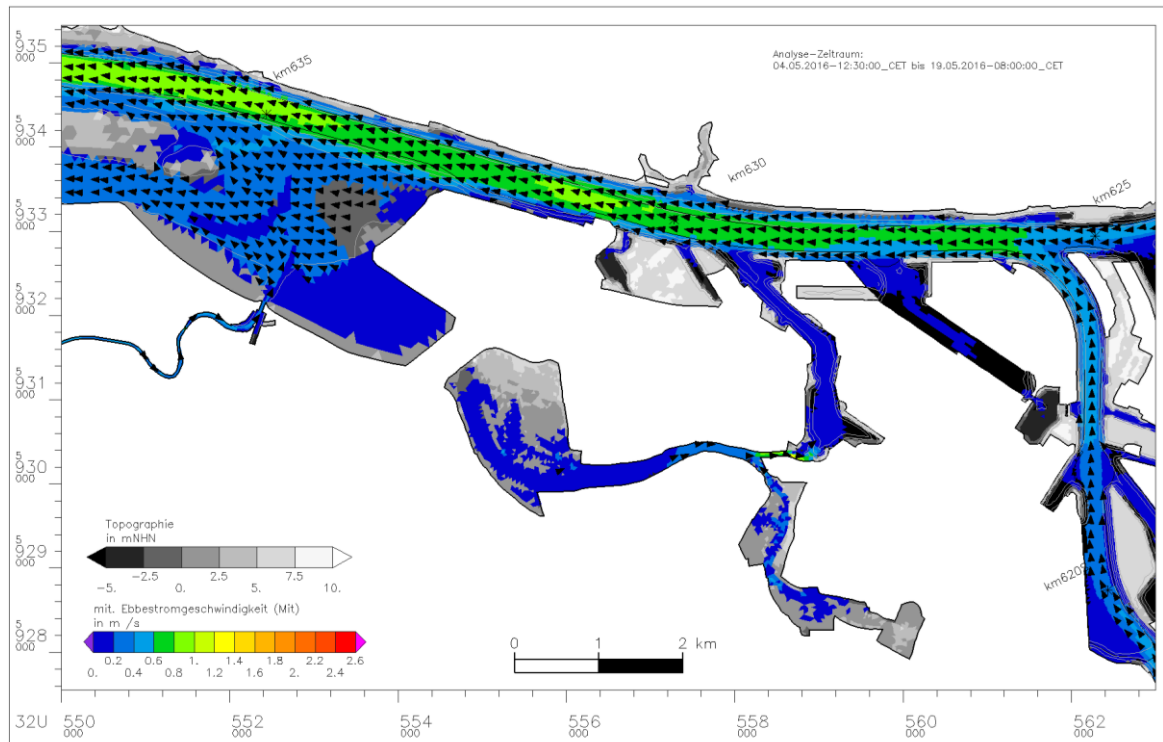


Bild 55: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

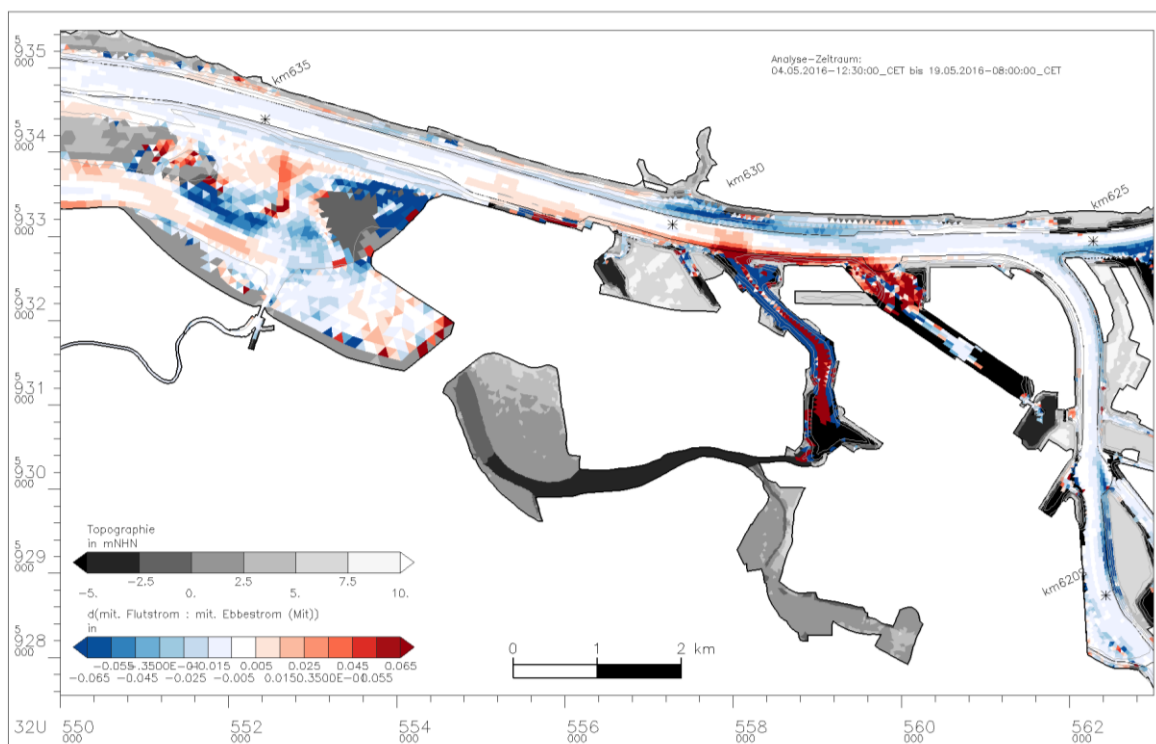
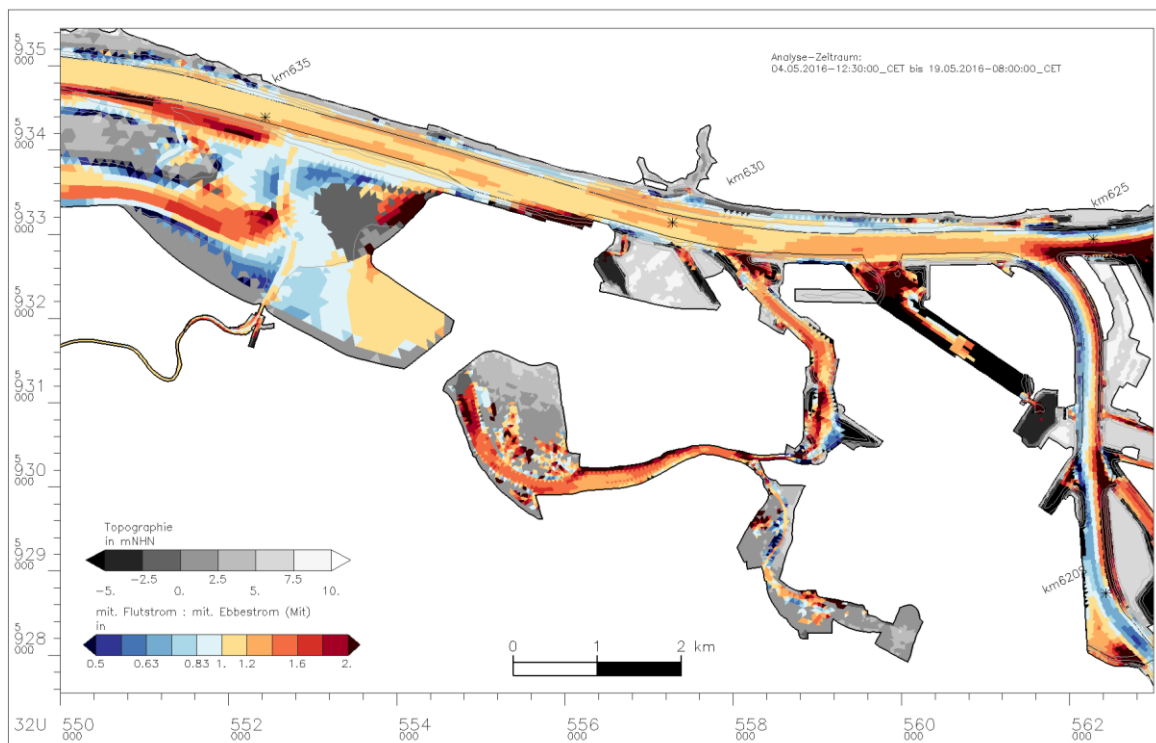


Bild 56: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

Die Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Bild 57, oben) und bei Ebbstromkenterung (Bild 58, oben) zeigen erwartungsgemäß die höchsten Werte (> 160 Minuten) in den strömungsberuhigten Bereichen, wie zum Beispiel dem Köhlfleet oder dem Waltershofer Hafen. Auch in der Alten Süderelbe bilden sich überwiegend ähnlich lange Stauwasserdauern aus. Lediglich im Anbindungsbereich und dem Mittelteil, der Alten Süderelbe, etwa auf Höhe METHA, bilden sich entsprechend der hohen Strömungsgeschwindigkeiten (s. o.) kürzere Verweilzeiten zwischen etwa 20 – 60 Minuten bei Flutstromkenterung und etwa 20 Minuten bei Ebbstromkenterung aus.

Die Differenzen der Stauwasserdauern zeigen sowohl bei Flutstromkenterung (Bild 57, unten), als auch bei Ebbstromkenterung (Bild 58, unten) ein Abnahme der Stauwasserdauer von über 20 Minuten auf den ersten 1,5 km des Köhlfleets, bis etwa zu der Stelle, an dem Köhlfleet nach Süden abknickt. Ein zweiter, kleinerer Bereich mit vergleichbaren Abnahmen der Stauwasserdauern bildet sich nördlich des Dradenauhafens aus. Im Hauptstrom zwischen Köhlfleet und Waltershofer Hafen nehmen, entsprechend den Flutstromgeschwindigkeiten, am südlichen Ufer die Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung ab, am nördlichen Ufer kommt es dagegen zu einer Zunahme.

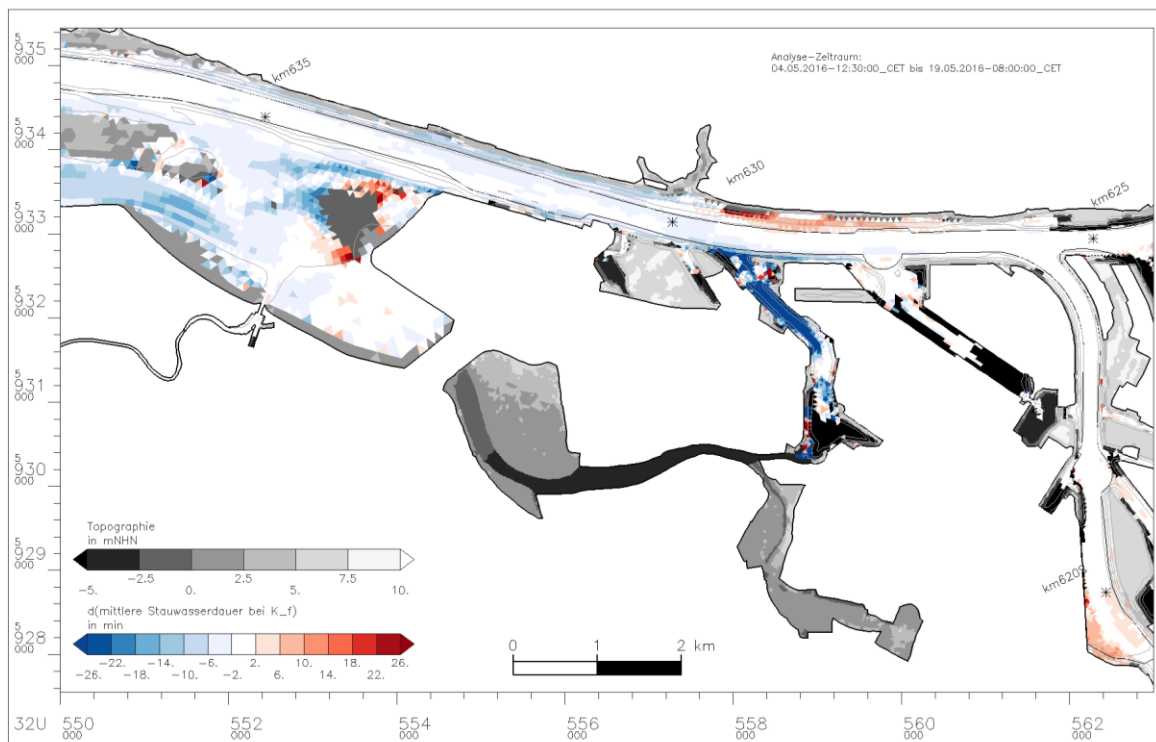
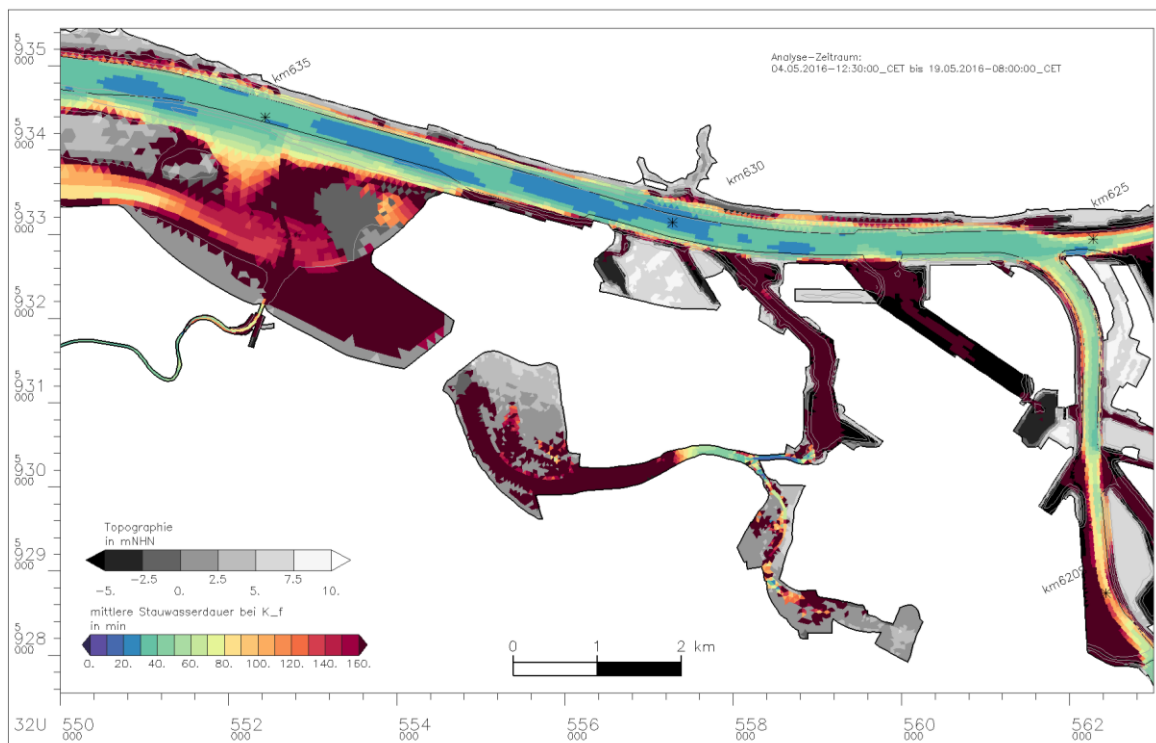


Bild 57: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

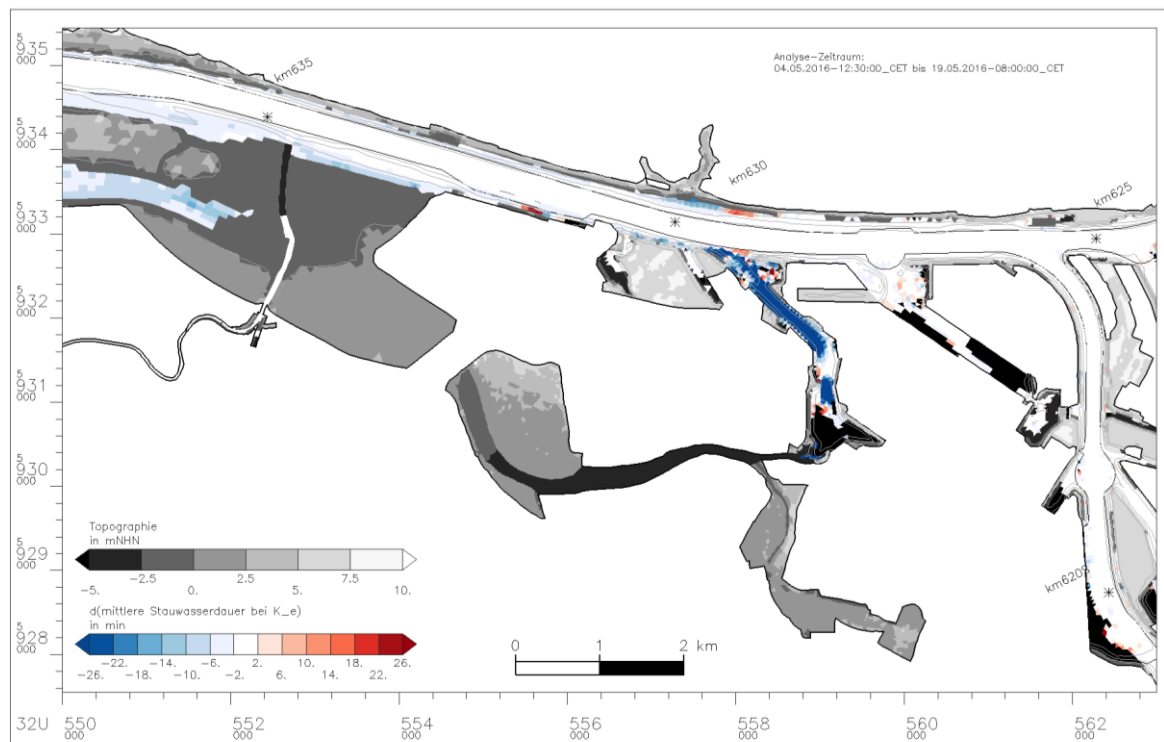
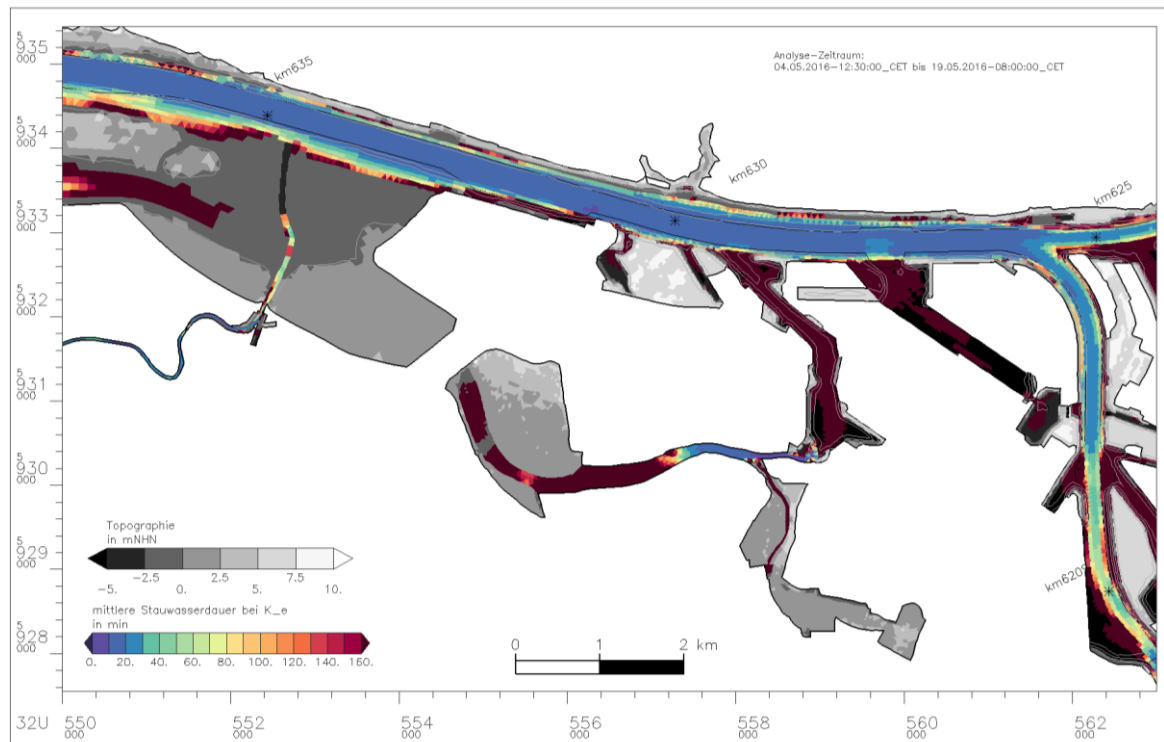


Bild 58: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

Der mittlere Schwebstoffgehalt im Hauptstrom zwischen Köhlfleet und Waltershofer Hafen beträgt (Summe aller Fraktionen) in dem betrachteten Analysezeitraum etwa $0,2 \text{ kg/m}^3$ im Flutstrom und etwa $0,1 \text{ kg/m}^3$ im Ebbstrom, wobei die höchsten Schwebstoffgehalte jeweils auf der nördlichen Seite der Fahrrinne auftreten (Bild 59 oben: mittlerer Schwebstoffgehalt im Flutstrom, Bild 60 oben: mittlerer Schwebstoffgehalt im Ebbstrom). Im Köhlfleet sinkt der Schwebstoffgehalt aufgrund der abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit und der damit verbundenen Sedimentation, kontinuierlich von Norden nach Süden bis unter $0,02 \text{ kg/m}^3$ an der Anbindung zur Alten Süderelbe. In der Süderelbe selbst bleibt der mittlere Schwebstoffgehalt während des gesamten Untersuchungszeitraums $< 0,02 \text{ kg/m}^3$.

Die Auswertung der Differenzen des mittleren Schwebstoffgehaltes zeigen fast im gesamten Köhlfleet aufgrund der maßnahmenbedingten höheren Durchströmung eine Zunahme im Flutstrom um etwa $0,01 \text{ kg/m}^3$, lediglich das südliche Ende des Köhlfleets zeigt keine auswertbare Zunahme des mittleren Schwebstoffgehaltes (Bild 59 unten). Im Ebbstrom zeigt sich lediglich in einem kleinen Abschnitt nördlich des Dradenauhafens eine Zunahme von etwa $0,01 \text{ kg/m}^3$ (Bild 60 unten). Entsprechend der höheren Schwebstoffgehalte an der Nordseite der Fahrrinne (s. o.), zeigen sich hier auch die höchsten Rest-Schwebstofftransporte (Bild 61 oben). Die Auswertung der Differenzen im Nahbereich zeigt im Hauptstrom stromauf des Köhlfleets eine Abnahme des Rest-Schwebstofftransportes (Bild 61 unten). Direkt stromab und im Köhlfleet nehmen die Rest-Schwebstofftransporte dagegen zu.

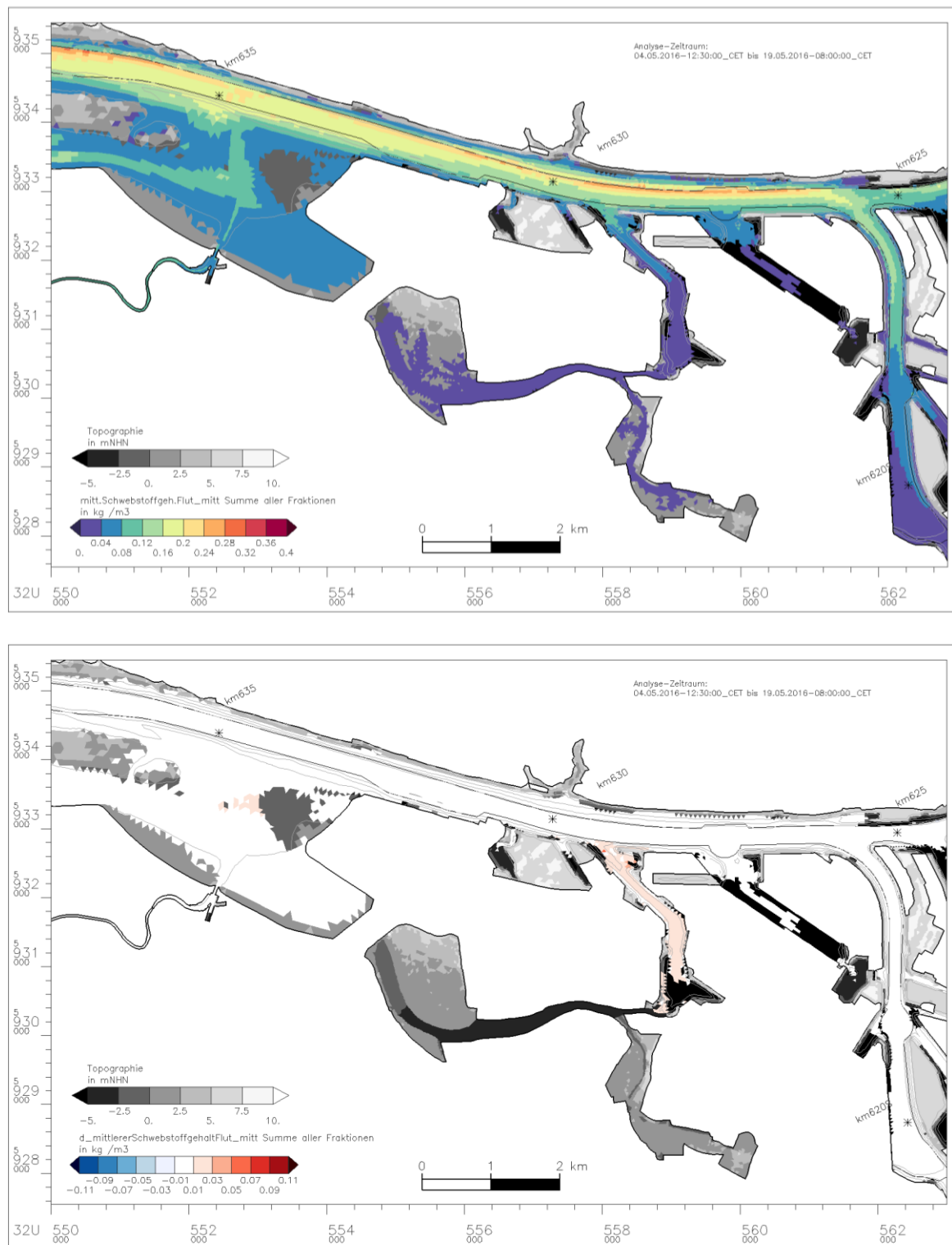


Bild 59: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

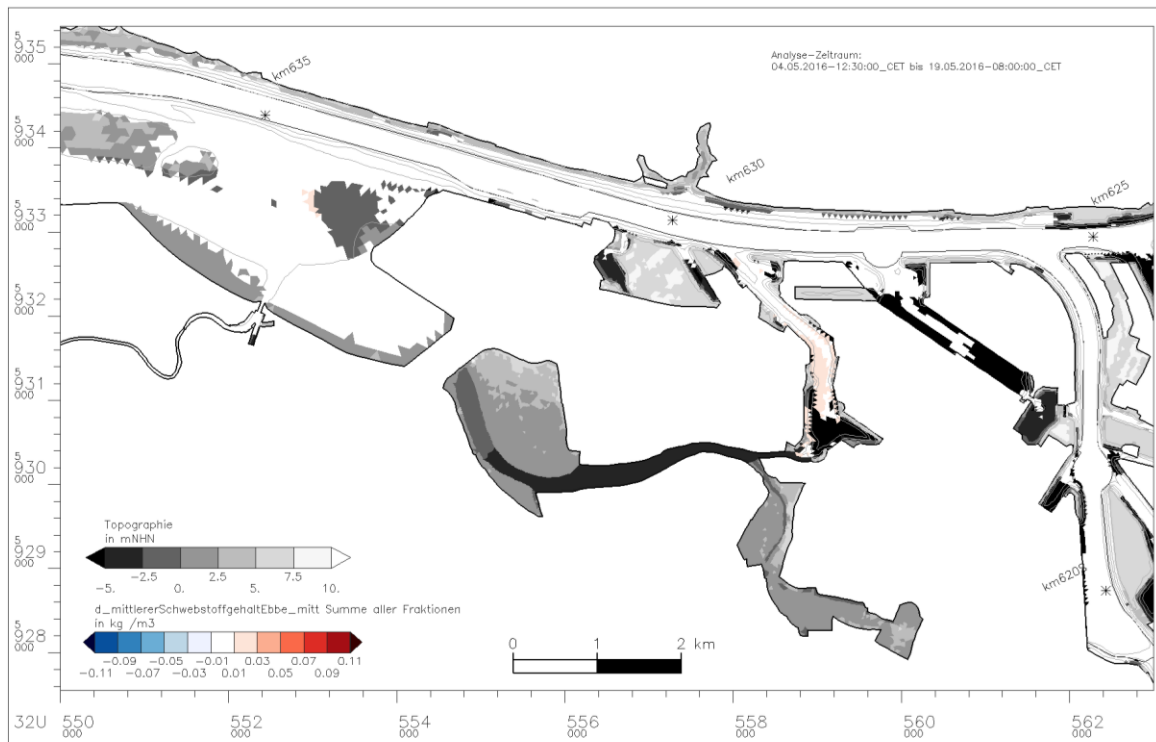
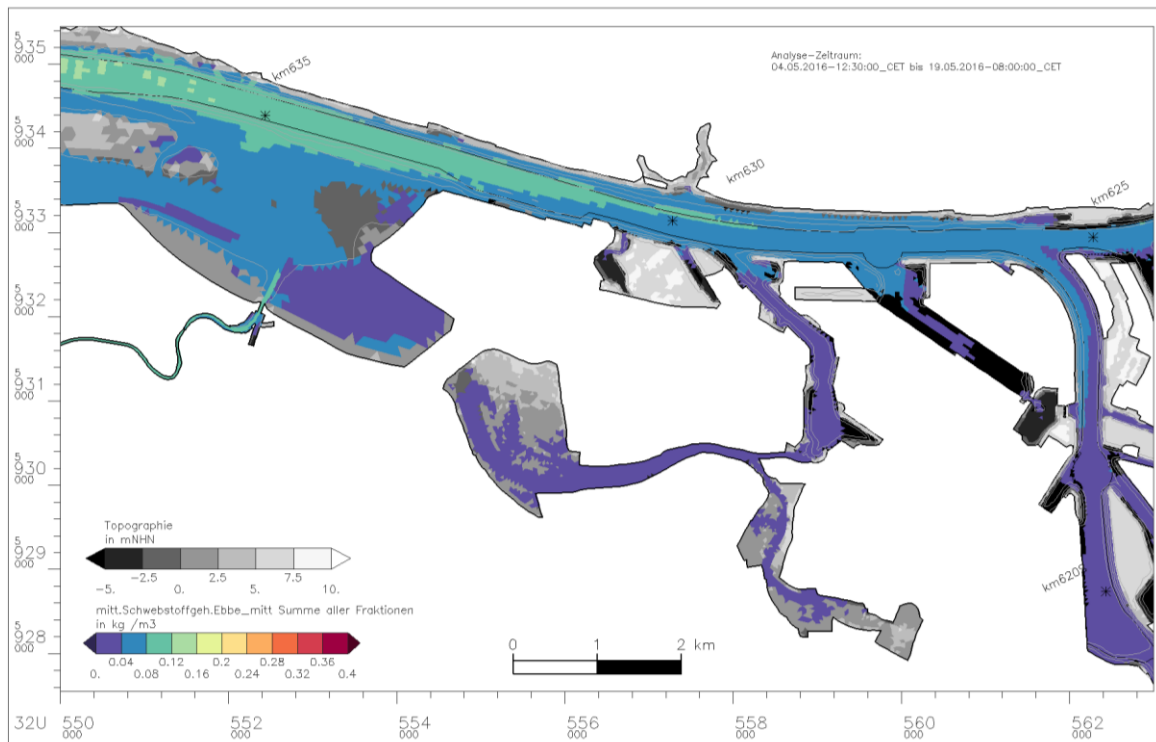


Bild 60: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

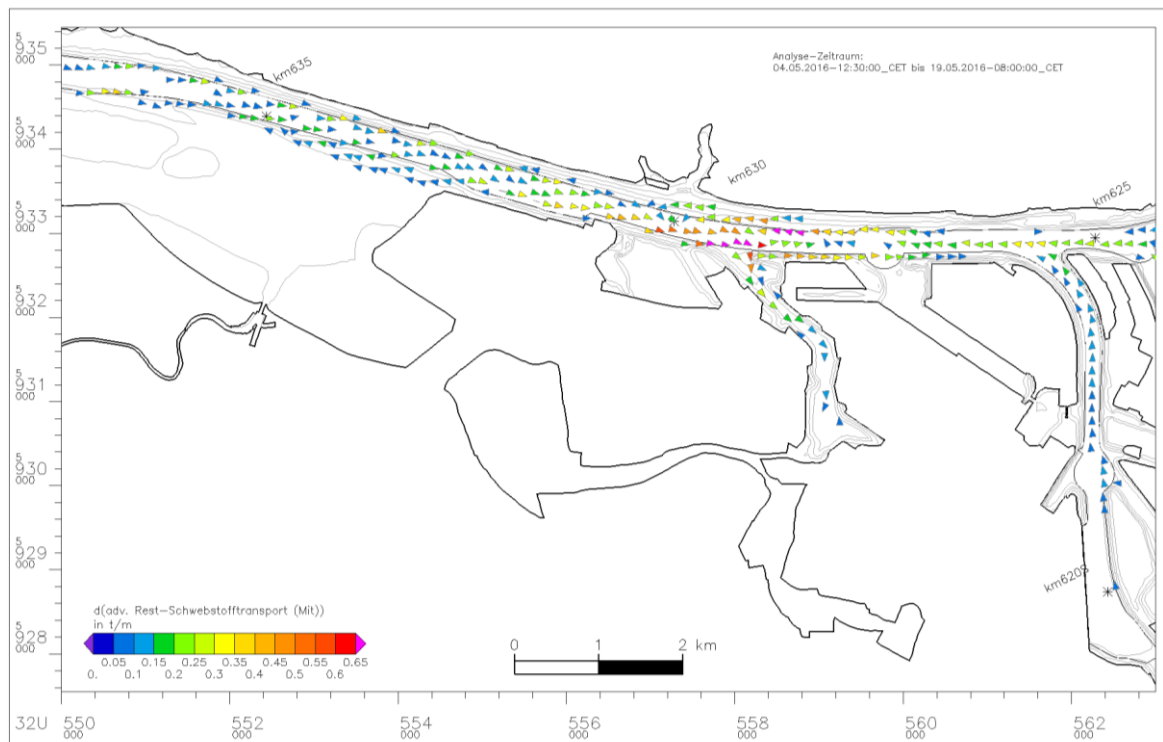
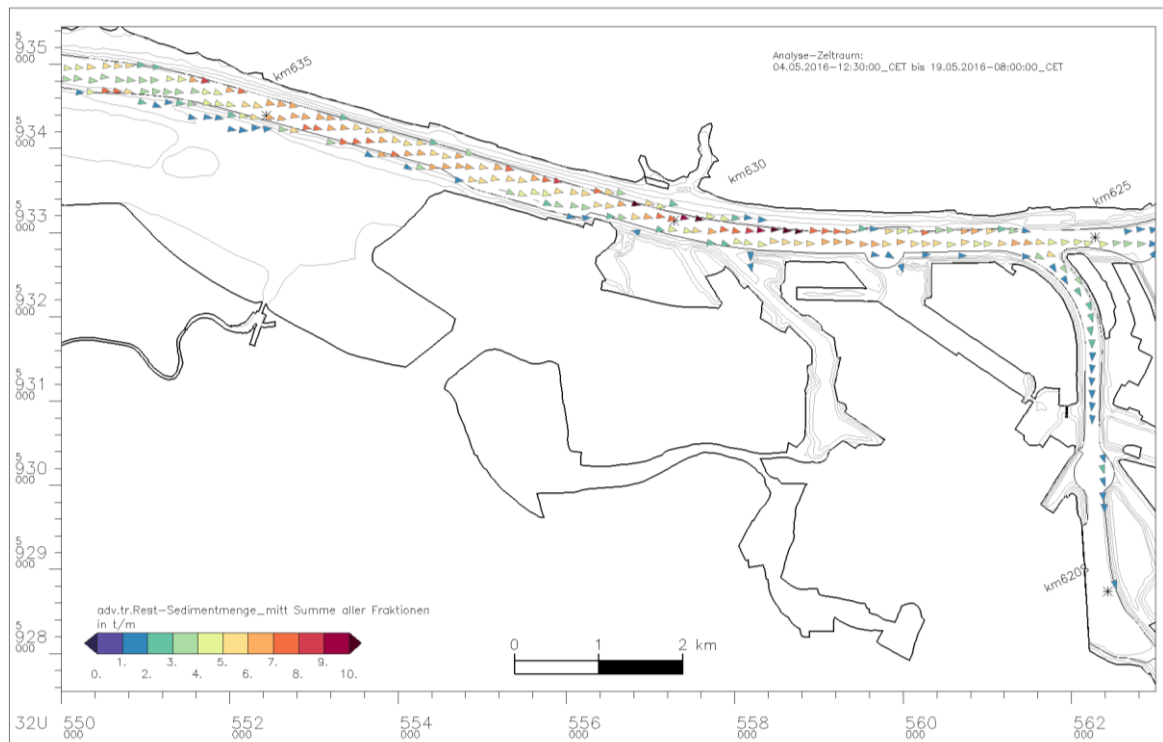


Bild 61: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

Nach vier Wochen Simulationszeit zeigt sich eine flächendeckende Sedimentakkumulation an der Sohle im Hauptstrom und den angrenzenden Hafenbecken (Bild 62 oben). Entlang des Köhlfleets nimmt die Akkumulation von Norden nach Süden hin deutlich ab. An der südlichen Spitze des Köhlfleets ist die Akkumulation nach vier Wochen Simulationszeit $< 0,05$ cm. In der Alten Süderelbe lagert sich ebenfalls nur wenig Sediment an der Sohle ab. Nach vier Wochen Simulationszeit bilden sich am westlichen Ende und im Bereich des Zehnfußgrabens zwei Sedimentationsschwerpunkte mit Auflagen von etwa 0,05 cm aus.

Die Auswertung der Differenzen zeigt, dass die Zunahme der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten stromab des Köhlfleets zu einer Verminderung der Akkumulation von etwa 0,05 m führen. Zwischen dem Köhlfleet und dem Köhlbrand lagert sich dagegen mehr Sediment an der Sohle ab, was auf die Verminderung der Flutstromgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Nach vier Wochen beträgt die Differenz in diesem Bereich punktuell bis zu +0,07 m. Auch im Köhlfleet nimmt die Sedimentation zu. In der nördlichen Hälfte, insbesondere im Bereich des Köhlfleet-Hafens lagert sich bis zu etwa 0,07 m mehr Sediment an der Sohle ab.

Bild 63 zeigt als Zeitreihe die Sedimentation in der Alten Süderelbe aufgeteilt nach den 5 im Modell berücksichtigten Schwebstofffraktionen zeigt, dass ausschließlich sehr feines Material bis die Alte Süderelbe gelangt. Im Untersuchungszeitraum sedimentieren fast 600 t Schwebstoffe in der Alten Süderelbe, von denen allein 316 t aus sehr feinem Schluff bestehen.

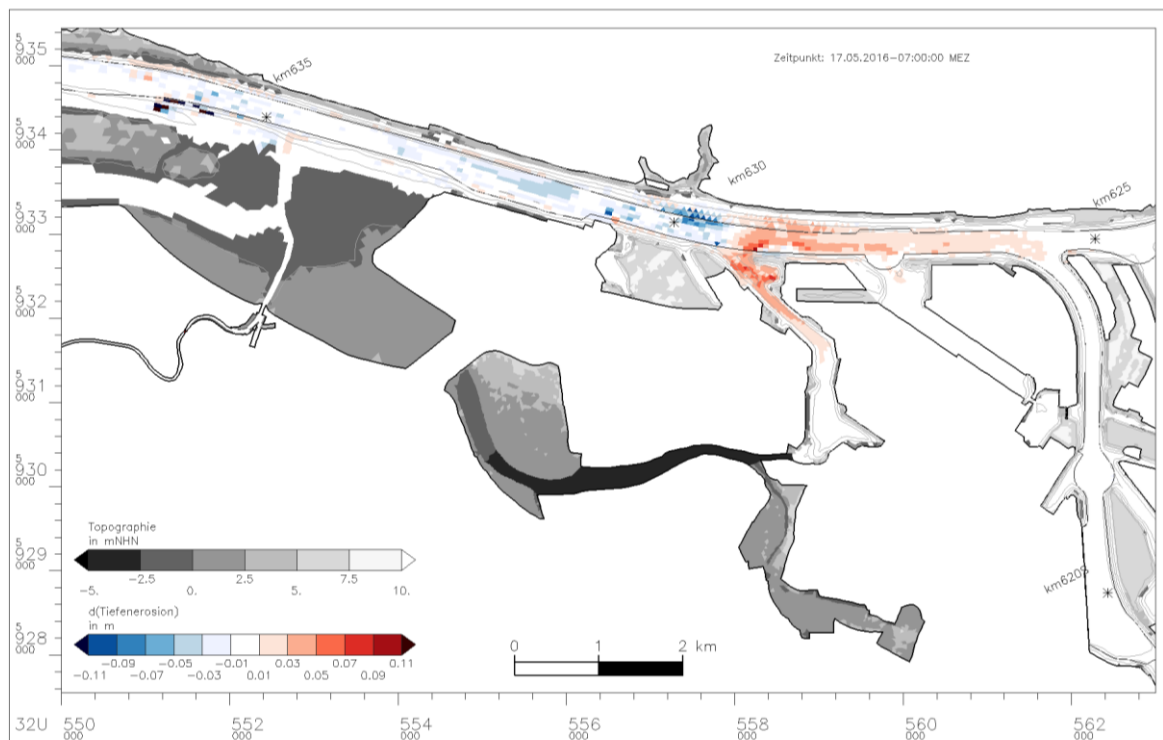
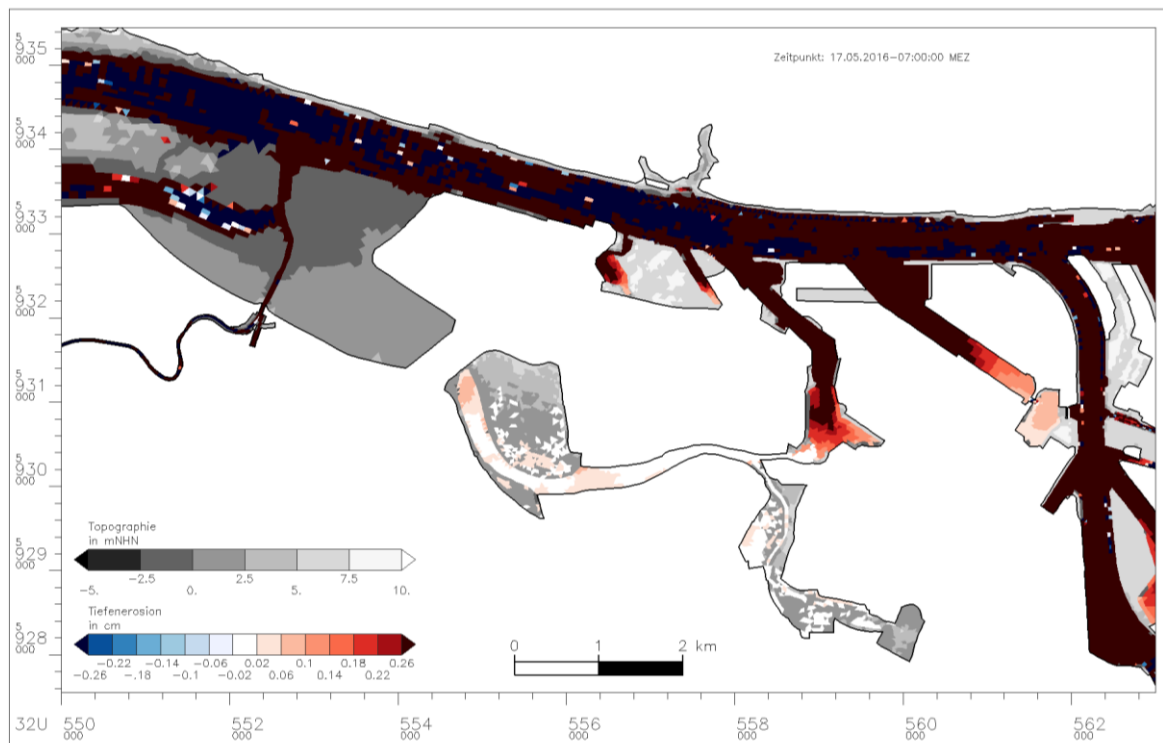


Bild 62: Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit. Bild oben: Anbindungsvariante 1, Bild unten: Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

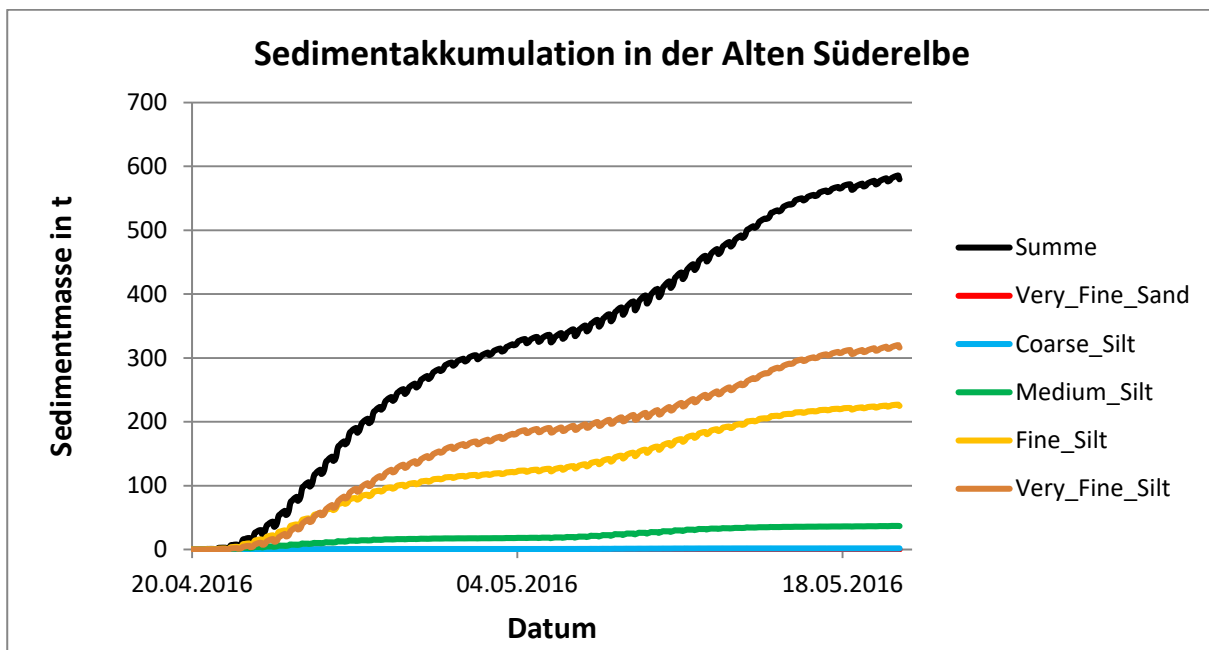


Bild 63: Anfänglicher Schwebstoffeintrag in das Gebiet während der 4 wöchigen Simulation

5.3.4 Großräumige Auswirkung der Anbindungsvariante 1

Die Absenkung des mittleren Tidehochwassers reicht weit über das Hamburger Gebiet hinaus (Bild 64, oben). Insgesamt sinkt das mittlere Tidehochwasser stromab bis etwa Elbe-Km 690, weiter stromab nimmt das mittlere Tidehochwasser geringfügig zu. Die größte Absenkung stellt sich mit etwa -1,7 cm im Bereich Schulau ein. Die größte Anhebung des mittleren Tideniedrigwassers (Bild 64, Mitte) prägt sich im Bereich St. Pauli mit etwa +1,5 cm aus, und reicht bis etwa Elbe-Km 725.

Durch die Absenkung des Tidehochwassers und die Anhebung des Tideniedrigwassers vermindert sich großräumig der mittlere Tidehub gegenüber dem Referenzzustand (Bild 64, unten). Im Bereich der Anbindung am Köhlfleet (Elbe-Km 628) beträgt die Absenkung im Mittel etwa 3,2 cm. Mit im Mittel etwa 3,5 cm zeigt sich im Bereich Schulau (Elbe-Km 640) die größte Absenkung des Tidehubs gegenüber dem Referenzzustand.

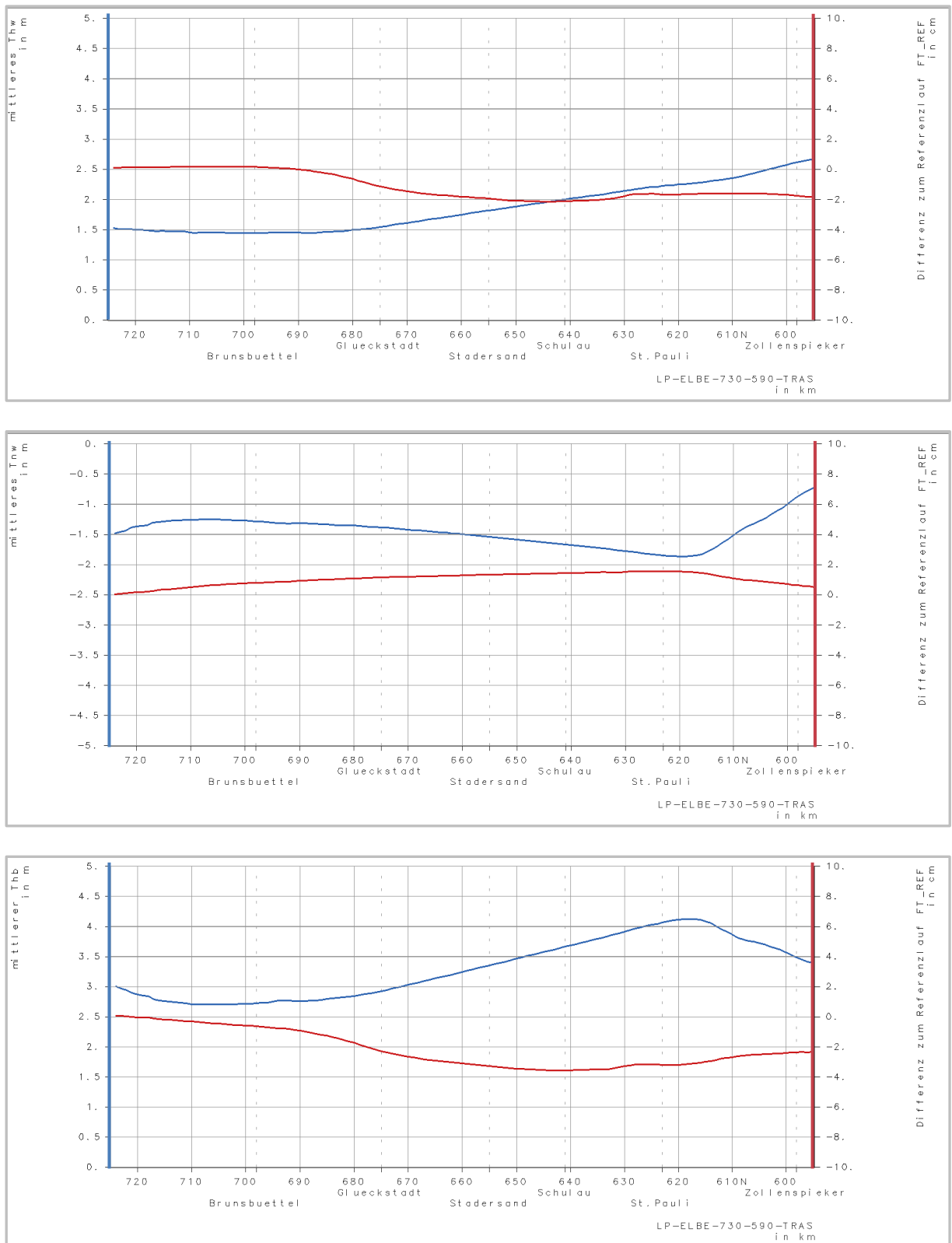


Bild 64: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

Das Flut- zu Ebbstromverhältnis ergibt sich aus der Tidekennwertanalyse und ist das Verhältnis der mittleren Fließgeschwindigkeiten bei Flut- bzw. bei Ebbstrom, und dient als Maß für die Ungleichheit der Tide. Bei einem Verhältnis > 1 dominiert der Flutstrom, was zu einem stromauf gerichteten Sedimenttransport führen kann. Bild 56 zeigt die Veränderung des F:E-Verhältnis entlang der Tideelbe durch die einseitige Anbindung der Alten Süderelbe. Gegenüber dem Referenzzustand nimmt durch die Anbindung der Alten Süderelbe großräumig die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit stärker zu als die mittlere Flutstromgeschwindigkeit, was eine Verminderung des F:E Verhältnisses bewirkt (jeweils stromab und stromauf des Köhlfleets). Im Nahbereich des Köhlfleets (um km 628) unterliegt das F:E Verhältnis aufgrund der komplexen lokalen Strömungen sehr starken Schwankungen (größte lokale Abnahme 0,025). Großräumig nimmt das mittlere F:E-Verhältnis etwa zwischen Schulau und Brunsbüttel um bis zu 0,012 ab.

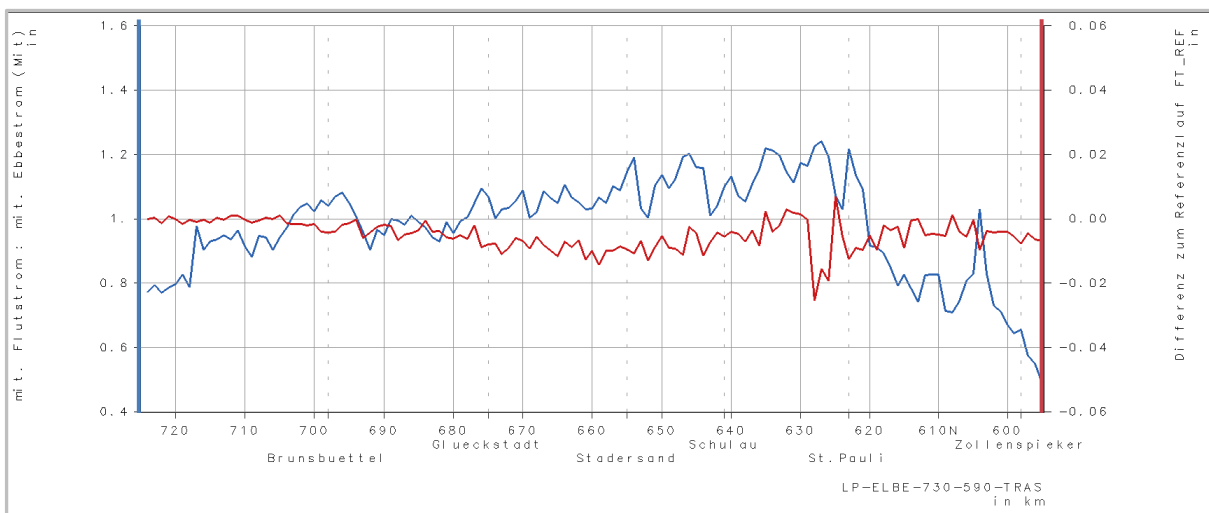


Bild 65: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand)

Die Veränderung des F:E-Verhältnis bewirkt auch eine Veränderung des Restschwebstofftransports (Bild 66). Stromab von Schulau bis unterhalb von Brunsbüttel nimmt der Restschwebstofftransport großräumig ab. Im Vergleich zum Referenzzustand ist zwischen Stadersand und Glückstadt mit etwa 1000 t pro Tide die größte Abnahme im Analysezeitraum zu beobachten, d.h. der stromaufgerichtete Transport suspendierter Sedimente verringert sich um etwa 1000 t pro Tide.

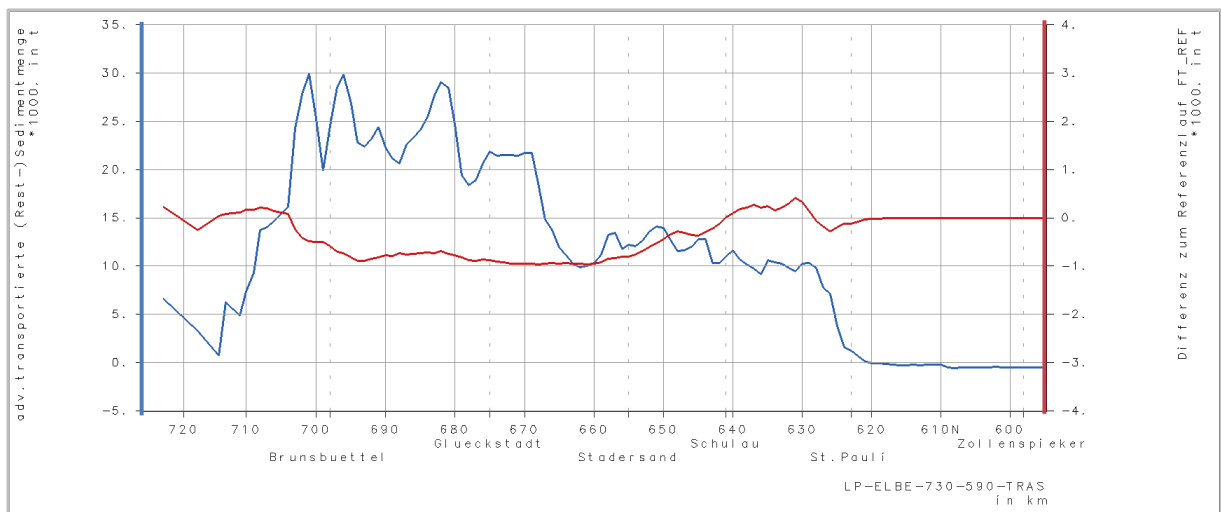


Bild 66: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand (Anbindungsvariante 1 minus Referenz))

Bild 67 zeigt die Veränderung des mittleren Salzgehalts entlang der Tideelbe. Hierbei ist zu beachten, dass im Modell lediglich der Salzgehalt von aus der Nordsee stammendem Salz berechnet wird. Unterschiede durch Leitfähigkeitsänderungen, die nicht auf einen Salztransport vom seeseitigen Rand zurückzuführen sind, werden daher nicht berücksichtigt. Die größten Veränderungen treten zwischen Brunsbüttel und Glückstadt (etwa km 690) auf. Die Veränderungen im Vergleich zum Referenzzustand bleiben jedoch $< 0,1 \text{ ‰}$, was als kleinste noch sinnvoll auswertbare Konzentration angesehen wird.

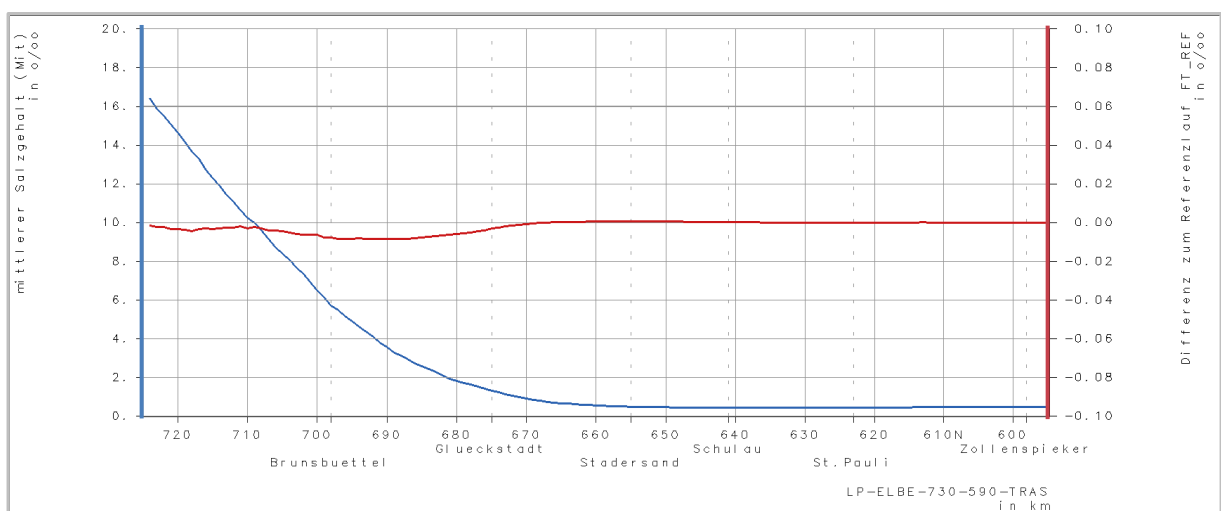


Bild 67: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Anbindungsvariante 1 minus Referenz)

5.3.5 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 1a

Die Anbindungsvariante 1a erweitert die Anbindungsvariante 1 um eine zusätzliche Anbindung an das Mühlenberger Loch über das Verbindungsgewässer und das Neuenfelder Schleusenfleet. Durch diese Erweiterung vergrößert sich das neu angebundene Tidevolumen auf etwa 5,0 Mio. m³. Die frühere Variante ASE 5 war mit 5,3 Mio. m³ vergleichbar groß. Die Anbindung an das Mühlenberger Loch wurde in der Untersuchung 2014 jedoch über einen 65 m breiten und 3,5 m tiefen Kanal quer durch die Airbus Start- und Landebahn verwirklicht. Die geplante Anbindungsvariante 1a sieht dagegen den Ausbau des Verbindungsgewässers auf 10 m Breite mit einer Sohltiefe von NHN -2,5 m vor, welches südlich um die Start- und Landebahn herumgeführt wird. In beiden Planungen ist zum Mühlenberger Loch nur eine stromab gerichtete Strömung vorgesehen.

Die Untersuchung der BAW aus dem Jahr 2014 zeigte, dass die Änderung der Strömungsrichtung an der Anbindung zum Mühlenberger Loch von einer unregelmäßigen zweiseitigen Strömung hin zu einer ausschließlich stromab gerichteten Strömung (ASE 5), zu einer geringeren Sedimentation in der Alten Süderelbe führt, da durch die ausschließlich in Richtung Mühlenberger Loch gerichtete Strömung der Schwebstofftransport aus der Alten Süderelbe gestärkt wird. Ein Vergleich zu einer einseitig angebundenen Variante wurde seinerzeit nicht gemacht. Grundsätzlich ist jedoch aufgrund der verminderten Stauwasserdauern bei einem zweiseitigen Anschluss anzunehmen, dass auch in diesem Fall, zumindest im westlichen Teil der Alten Süderelbe, die Sedimentation durch die Anbindung an das Mühlenberger Loch abnimmt. Die geringere Stauwasserdauer bewirkt, dass weniger suspendiertes Material in der Alten Süderelbe sedimentieren kann und stattdessen in Richtung Mühlenberger Loch abfließt, was dann auch eine geringere Sedimentation in der Alten Süderelbe bedeutet. Im Prinzip ist dies auch für die Anbindungsvariante 1a zu erwarten, aufgrund der deutlich geringeren hydraulischen Leistungsfähigkeit des Verbindungsgewässers, dürfte dieser Effekt jedoch kaum ins Gewicht fallen.

5.3.6 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 2

Die in der Machbarkeitsstudie geplante Anbindungsvariante 2 ist der Variante ASE 5 sehr ähnlich. Beide Varianten sind über das Storchennest an das Tidegeschehen angebunden. Zusätzlich wird die Alte Süderelbe bei Ebbstrom durch ein Bauwerk quer durch die Airbus Start- und Landebahn entwässert. Bei der aktuellen Anbindungsvariante 2 ist eine Unterquerung in Form von vier Dückern unter der Airbus-Landebahn vorgesehen. Die Variante ASE 5 sieht dagegen einen offenen Kanal mit 65 m Breite und 3,5 m Tiefe vor.

Das angeschlossene Tidevolumen ist bei beiden Varianten nahezu gleich (aktuelle Anbindungsvariante 2: 5,2 Mio. m³, frühere Variante ASE 5: 5,3 Mio. m³). Da das Tidevolumen und die Anbindung fast identisch sind, wird die Wirksamkeit der beiden Maßnahmen als sehr ähnlich eingeschätzt. Die für die Anbindungsvariante 1a beschriebene geringere Sedimentation in der Alten Süderelbe (west) wird aufgrund des hydraulisch leistungsfähigeren Anschlusses an das Mühlenberger Loch hier deutlicher ausfallen. Insgesamt bleibt der Effekt aber kleiner als in der früheren Planung ASE 5.

5.3.7 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 3

Die in der Machbarkeitsstudie geplante Anbindungsvariante 3 sieht einen dreiseitigen Anschluss der Alten Süderelbe vor. Die Anbindung an das Mühlenberger Loch entspricht hierbei der Unterquerung der Start- und Landebahn gemäß Anbindungsvariante 2. Die Anbindung zur Süderelbe verläuft südlich vom Container Terminal Altenwerder über einen neu herzustellenden Gewässerabschnitt mit einer Sohltiefe von -3,5 m NHN und Sohlbreiten von 25 m.

In der Untersuchung 2014 der BAW war die Variante NASE 2 die einzige Variante mit drei Anbindungen. Der Verlauf der damaligen Variante ist zwar mit der aktuellen Anbindungsvariante 3 vergleichbar, jedoch sind die Dimensionen des Tidevolumens und der Anbindung zur Süderelbe völlig unterschiedlich. Die aktuelle Anbindungsvariante 3 sieht ein Tidevolumen von etwa 5,6 Mio. m³ vor, die Variante NASE 2 wurde jedoch mit 9,3 Mio. m³ Tidevolumen geplant. Die Anbindung an die Süderelbe im Bereich des Erdwalls Altenwerder wurde 2014 mit einer Breite von 115 m und einer Sohltiefe von NHN -3,0 m geplant. Die Anbindungsvariante 3 sieht an dieser Stelle eine Gewässerbreite von 20 m und eine Tiefe von 3 m vor. Aufgrund dieser großen Unterschiede in den Anschlussrinnen lassen sich die beiden Varianten nur sehr bedingt miteinander vergleichen. Hinsichtlich der Wirksamkeit auf den Tidehub, das F:E-Verhältnis und den großräumigen Sedimenttransport ist bei der Anbindungsvariante 3 im Vergleich zur NASE 2 mit einer deutlich geringeren Wirksamkeit zu rechnen. Auch die Anbindung südlich des Container Terminals Altenwerder fällt in der aktuellen Planung deutlich weniger leistungsfähig gegenüber der Variante NASE 2 aus.

Für die Variante NASE 2 wurde seinerzeit nicht untersucht, wie sich der Anschluss an die Süderelbe auf die Sedimentation in dem neu angebundenen Flutraum auswirkt. Eine Prognose zur Sedimentation in der Alten Süderelbe ist daher nur sehr eingeschränkt möglich. Da die mittlere Schwebstoffkonzentration im Bereich des Wendekreises in der Süderelbe jedoch höher ist als am südlichen Ende des Köhlfleets, ist davon auszugehen, dass über die Anbindung zur Süderelbe mehr Sedimente in die Alte Süderelbe gelangen, die dort, zumindest teilweise, auch sedimentieren werden. Im Gegensatz zur Anbindungsvariante 1 ist daher in der Anbindungsvariante 3 von einem höheren Unterhaltungsaufwand auszugehen.

5.3.8 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 3a

Die in der Machbarkeitsstudie geplante Anbindungsvariante 3a, unterscheidet sich von der Anbindungsvariante 3 durch eine deutlich breitere Anbindung zur Süderelbe von bis zu 110 m Breite. Durch die Aufweitung vergrößert sich das Tidevolumen auf etwa 6,0 Mio. m³, was immer noch deutlich weniger ist als in der 2014 untersuchten Variante NASE 2 (9,3 Mio. m³). Wie für die Anbindungsvariante 3 gilt auch hier, dass die Wirkung aufgrund des kleineren Tidevolumens geringer ausfallen wird, als bei der Variante NASE 2. Aufgrund der zusätzlichen Anbindung zur Süderelbe ist mit einem höheren Sedimenteintrag zu rechnen (siehe Anbindungsvariante 3).

5.3.9 Gestaltung und Auswirkung der Anbindungsvariante 4

Die in der Machbarkeitsstudie geplante Anbindungsvariante 4 sieht ebenfalls einen dreiseitigen Anschluss vor. Die westliche Anbindung soll analog Anbindungsvariante 1a über das Verbindungsgewässer/Neuenfelder Schleusenfleet realisiert werden. Im Osten wird die Alte Süderelbe

nördlich des Container Terminals Altenwerder über die Bullerrinne an die Süderelbe angebunden. Das Tidevolumen ist mit 5,1 Mio. m³ in der aktuellen Planung deutlich geringer als in der früher betrachteten Variante NASE 2 (9,3 Mio. m³). Auch hier gilt, analog zu den Anbindungsvarianten 3 und 3a, dass das neu angebundene Tidevolumen deutlich geringer ist als bei der Variante NASE 2, was eine entsprechend geringere Wirksamkeit der Maßnahme zur Folge hat. Ein großer Nachteil der Anbindungsvariante 4 sind die wenig leistungsfähigen Anbindungen im Westen und Osten. Insbesondere die Bullerrinne mit ihrem geringen Querschnitt und dem langen verwinkelten Fließverlauf erscheint aus hydraulischer Sicht wenig wirkungsvoll.

5.3.10 Beurteilung der verschiedenen Varianten

Die hier näher untersuchte Anbindungsvariante 1 führt zu einer großflächigen Abnahme des mittleren Tidehubs (bis zu 3,5 cm), die stromab bis etwa Elbe-Km 680 reicht. Damit einhergehend sinkt das F:E – Verhältnis und der stromaufgerichtete Transport suspendierter Sedimente verringert sich um bis 1000 t pro Tide. Für die Varianten 1a bis 4 sind vergleichbare Wirkungen anzunehmen. Rein nominell sollte die Variante 3a aufgrund ihres großen Tidevolumens (5,9 Mio. m³) auch die größte Wirkung erzielen. Ein Vergleich der Varianten ASE 1 (4,9 Mio. m³ Tidevolumen) und ASE 5 (5,3 Mio. m³ Tidevolumen) aus der Untersuchung 2014 (Bundesanstalt für Wasserbau, 2014a) zeigt jedoch, dass die Unterschiede hinsichtlich der Wirkung auf den Tidehub und das F:E – Verhältnis gering sind.

Die Anbindungsvariante 1 zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sich die einseitige Anbindung über das Köhlfleet sehr günstig auf den Sedimenteintrag in die Alte Süderelbe auswirkt. Aufgrund der relativ niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten sedimentiert ein großer Teil der Schwebstoffe im Köhlfleet. Ausschließlich sehr feines Material, was entsprechend langsam sedimentiert, gelangt bis in die Alte Süderelbe. Die Untersuchung der BAW aus dem Jahr 2014 hat gezeigt, dass eine Anbindung zum Mühlenberger Loch die Sedimentation in der Alten Süderelbe weiter verringern kann, allerdings nur dann, wenn diese Anbindung technisch so gesteuert wird, dass ausschließlich eine Strömung aus der Alten Süderelbe in Richtung Mühlenberger Loch zugelassen wird. Dieser positive Einfluss sollte grundsätzlich auch für die Anbindungsvarianten 1a – 4 zu erwarten sein. Hier muss jedoch einschränkend erwähnt werden, dass in der Untersuchung 2014 ein 65 m breiter Kanal quer durch das Airbusgelände zugrunde gelegt wurde, der aufgrund seines großen Querschnitts sehr leistungsfähig ist. Die aktuell angedachte Unterdükerung der Landebahn (Anbindungsvarianten 2, 3 und 3a) und insbesondere das Verbindungsgewässer südlich des Airbusgeländes (Anbindungsvarianten 1a und 4) sind als deutlich weniger leistungsfähig einzuschätzen. Es ist daher nicht zu erwarten, dass diese Anbindungen eine großräumigere Räumkraft in der Alten Süderelbe entwickeln.

In der Untersuchung 2014 wurde für die dreiseitige Anbindung NASE 2 nicht untersucht, wie sich die Anbindung an die Süderelbe auf die Sedimentation in dem neu angebundenen Flutraum auswirkt. Eine Prognose zur Sedimentation in der Alten Süderelbe durch eine Anbindung zur Süderelbe, ist daher nur sehr eingeschränkt möglich. Da die mittlere Schwebstoffkonzentration im Bereich des Wendekreises in der Süderelbe jedoch höher ist als am südlichen Ende des Köhlfleets, ist davon auszugehen, dass über die Anbindung zur Süderelbe mehr Sedimente in die Alte Süderelbe gelangen, die dort, zumindest teilweise, auch sedimentieren werden. Hinsichtlich der geringen Unterschiede ihrer wasserbaulichen Wirksamkeit, lassen sich die z. T. erheblichen

Mehrkosten der Anbindungsvarianten 1a bis 4 kaum rechtfertigen. Inwieweit andere mögliche Wirkungen, z. B. die longitudinale Passierbarkeit für Fische, höhere Kosten rechtfertigen können, wurde in der vorliegenden Untersuchung seitens der BAW nicht berücksichtigt. Aus Sicht der BAW ist die Anbindungsvariante 1 daher als Vorzugsvariante anzusehen.

5.4 Tideanschluss Dove Elbe

5.4.1 Gestaltung der Maßnahme

In der Phase der Vorauswahl möglicher Strombaumaßnahmen ist der Tideanschluss der Dove Elbe hinsichtlich der hydrologischen Wirksamkeit aufgrund des rechnerisch möglichen Tidevolumens von ca. 5 Mio. m³ bei frei einschwingender Tide als eine der vielversprechendsten Maßnahmen identifiziert worden. Das in der Arbeitsgruppe Hamburg des Forum Tideelbe unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen entwickelte Maßnahmenlayout sieht jedoch aufgrund einer Tidesperrwerksteuerung nur noch ein nutzbares Tidevolumen von ca. 2,69 Mio. m³ vor.

Die Wiederanbindung der Dove Elbe an die Nordereibe bei Elbe-Km 615N ist nach dem vorgegebenen Maßnahmenlayout des Forum Tideelbe mit Stand vom 13.02.2020 („Optimierte Variante“) durch ein 32 m breites Tidesperrwerk am Tatenberger Siel zwei Kilometer westlich der Nordereibe vorgesehen. Die anzubindende Flusslänge der Dove Elbe an das Tidegeschehen umfasst in dieser Variante 6,3 km (von 18 km Gesamtlänge), die Topographie und Lage des zu untersuchenden Maßnahmenlayouts ist Bild 68 zu entnehmen.

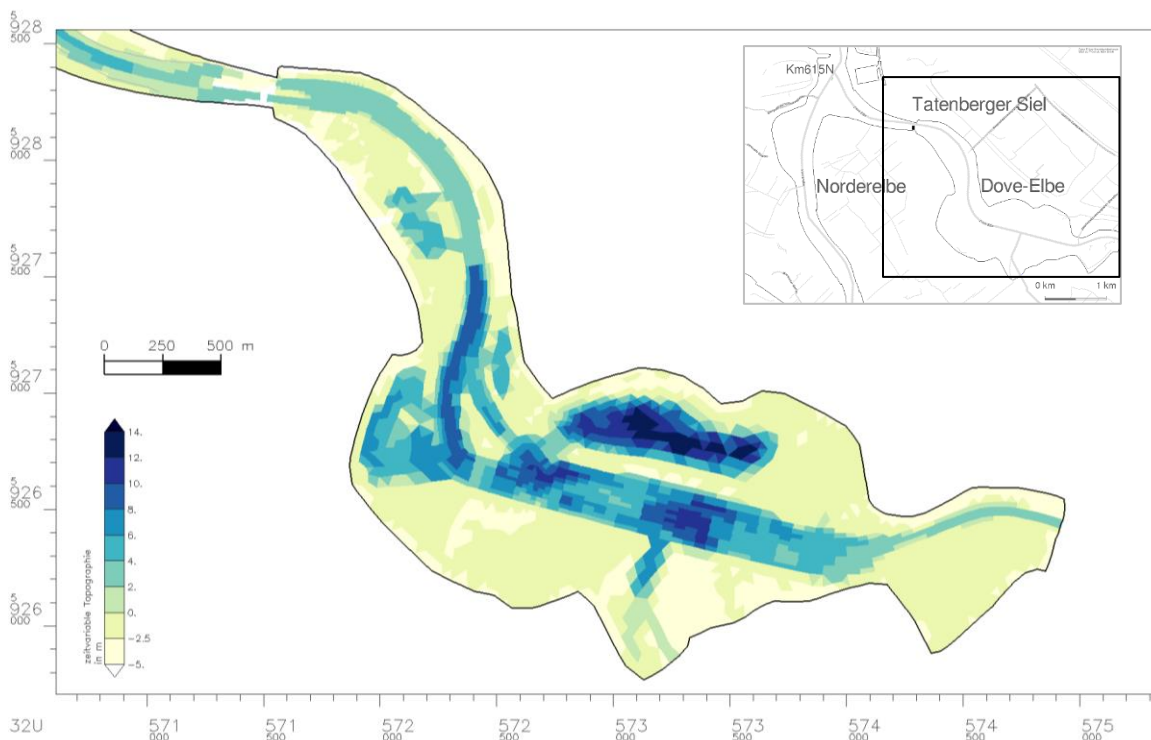


Bild 68: Ausschnitt aus dem Modellgebiet im Bereich der Dove Elbe

Zudem beinhaltet die Maßnahmenlayout:

- Die Vertiefung von ausgewählten Bereichen in der Dove Elbe bis -3,5 m NHN. Die Topographie des Modellgebiets im Ausbauzustand in der Dove Elbe wurde von der Geschäftsstelle Forum Tideelbe zur Verfügung gestellt.
- Abgrabungen von Uferzonierungen in der Dove Elbe.
- Ausbau einer Schleuse 6,3 km stromauf des Tatenberger Siels (im Weiteren „Mittelschleuse“ genannt).

Die geplante Mittelschleuse begrenzt die östliche Ausdehnung des Modells im Ausbauzustand der Dove Elbe. An dieser Stelle wird als binnenseitiger Randwert ein Zufluss von $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ berücksichtigt. Die Oberwasserzuflüsse Gose-Elbe, Allermöhe und Eichbaum werden mit insgesamt $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ in das Modell eingespeist.

Die Verbindung zur Tideelbe am Sperrwerk wird im Simulationsmodell mit einer Sperrwerksteuerung umgesetzt, die eine „ideale“ Tide in die Dove Elbe ein- und ausströmen lässt, d.h. innerhalb der Dove Elbe wird eine symmetrische Tidekurve mit gleicher Auf- und Ablaufdauer (jeweils 6,2 Stunden) generiert. Die ideale Tide wird mit einer Amplitude von 2,1 m in die Dove Elbe eingesteuert, um die planerischen Bedingungen des Hochwasserschutzes und der Schiffbarkeit im Binnengewässer einzuhalten. Der Wasserstand wird so reguliert, dass in der Dove Elbe maximal die heutige Betriebshöhe +0,9 m NHN und minimal -1,2 m NHN erreicht wird. Aus den vorgegebenen Wasserständen ergeben sich im Planungsraum 2,69 Mio. m^3 rechnerisch mögliches zusätzliches Tidevolumen in der Dove Elbe. Dieses wird durch die beschriebene Steuerung bei jeder Tide in dem Modell vollständig ausgenutzt; während des Analysezeitraumes wird ein zusätzliches Tidevolumen von 2,67 Mio. m^3 (Ebbstromvolumen) ermittelt.

Durch die im Simulationsmodell umgesetzte Sperrwerksteuerung wird somit die maximale großräumige Wirkung aus dem zur Verfügung stehenden Tidevolumen des Maßnahmenlayouts erreicht und zugleich der Sedimenteintrag in die Dove Elbe minimiert, da sie zu einer Entkopplung der Tidedynamik in der Dove Elbe von der in der oberen Tideelbe führt (Bild 69). Dadurch werden hohe Strömungsgeschwindigkeiten und längere Stauwasserdauern im Bereich der Dove Elbe vermieden. Diese würden sich einstellen, wenn die Tidedynamik und die Schließzeiten des Sperrwerkes durch die Ganglinie des Tidewasserstands in der Tideelbe bestimmt würden. Zudem wird dadurch ein regelmäßiges Trockenfallen und Überfluten der Wattgebiete im Bereich der Dove Elbe sichergestellt. Infolge der Entkopplung der Tidedynamik stellen sich der Wasserstand und die Kenterung in der Dove Elbe nach dem idealen Sinusverlauf der Tidekurve am Sperrwerk und nicht direkt nach der Wasserspiegeldifferenz bzw. der Kenterung in der Tideelbe ein (Bild 69).

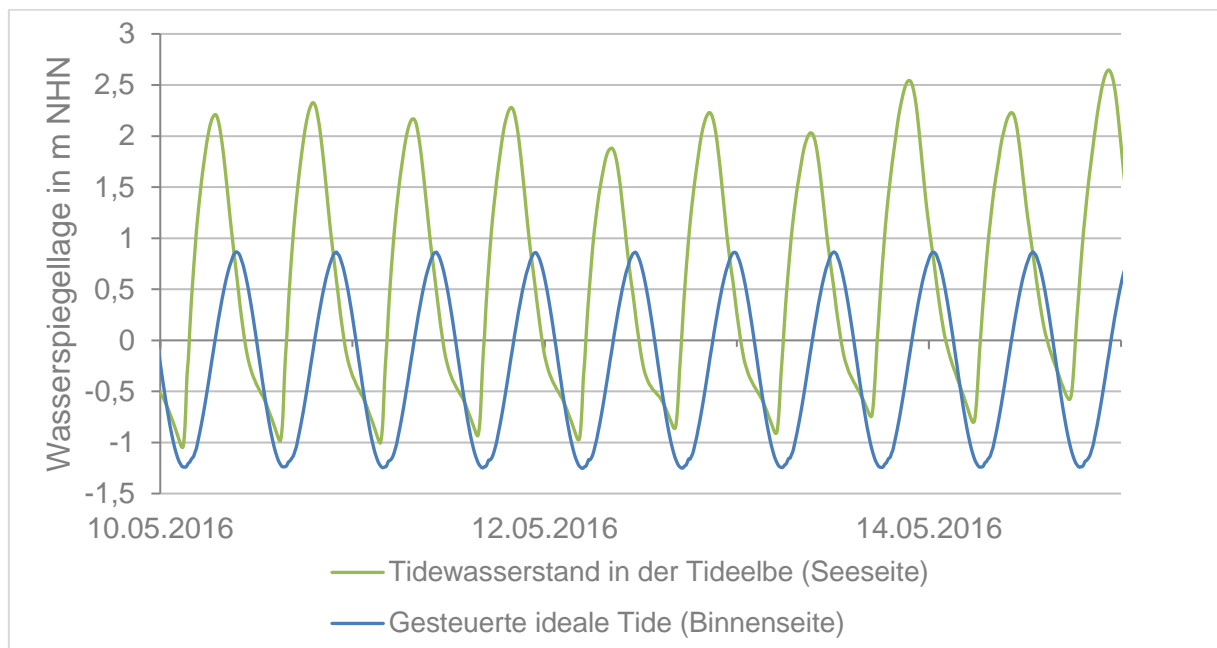


Bild 69: Entkoppelte Tidedynamik am Sperrwerk: Tidewasserstände auf der See- und Binnenseite des Sperrwerks

Durch die Anbindung der Dove Elbe in der hier untersuchten „optimierten Variante“ variiert das Gesamtwasservolumen regelmäßig zwischen 5,5 und 8,0 Mio. m³. Es ergibt sich ein zusätzliches Tidevolumen in der Ebbphase im Mittel von 2,67 Mio. m³ (Ebbstromvolumen) und in der Flutphase im Mittel von 2,5 Mio. m³ (Flutstromvolumen) (Bild 70).

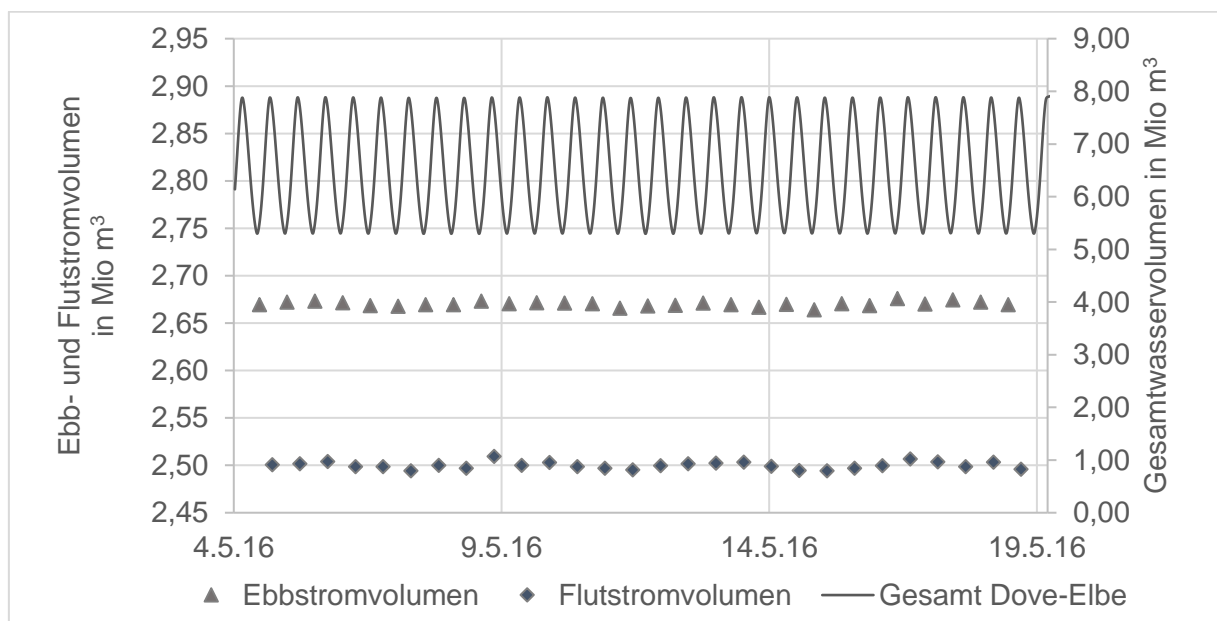


Bild 70: Ebb- und Flutstromvolumen (linke Achse) und das Gesamtwasservolumen in der Dove Elbe (rechte Achse) während des Analysezeitraumes

5.4.2 Auswirkung im Nahbereich der Maßnahme

Die flächenhafte Auswertung erfolgt für die einzelnen Tidekennwerte der Dove Elbe anhand von drei Abbildungen. Da die Tidedynamik in der Dove Elbe von der Tideelbe im Modell getrennt ist (siehe 5.4.1) wird die Tidekennwerteanalyse stromauf des Sperrwerks auch getrennt berechnet und ausgewertet. Diese sind jeweils der unteren Abbildung zu entnehmen. Die beiden oberen Abbildungen zeigen, wie auch in den anderen Kapiteln, die Absolutwerte und die Differenz des jeweiligen Parameters im Hamburger Hafen.

Im Bereich der Dove Elbe entsprechen das mittlere Tidehochwasser mit + 0,9 m NHN, das mittlere Tideniedrigwasser mit -1,2 m NHN und der mittlere Tidehub mit 2,1 m den planerischen Vorgaben (Bild 71, Bild 72, Bild 73 jeweils untere Abbildung).

Die Anbindung der Dove Elbe wirkt sich auch in der Tideelbe aus und verändert das Tidegeschehen weiträumig. Die größten Veränderungen treten im Bereich der Anbindung und unmittelbar stromauf davon auf. Das mittlere Tidehochwasser wird in der Norderelbe in diesem Bereich im Untersuchungszeitraum im Vergleich zum Referenzszenario im Mittel um etwa 2 cm abgesenkt, das Tideniedrigwassers wird dagegen im Mittel über 6 cm erhöht. Diese starken lokalen Änderungen schwächen sich schnell ab, sodass im übrigen Bereich des Stromspaltungsgebietes eine Thw-Absenkung von etwa 1 cm und eine Tnw-Anhebung von etwa 2 cm vorherrschen (Bild 71, Bild 72). Der mittlere Tidehub wird im Untersuchungszeitraum im Gegensatz zum Referenzszenario im Bereich der Anbindung um über 6 cm abgesenkt. Auch diese lokale starke Änderung schwächt sich schnell ab, im Hafengebiet beträgt die mittlere Absenkung des Tidehubs etwa 2-3 cm (Bild 73).

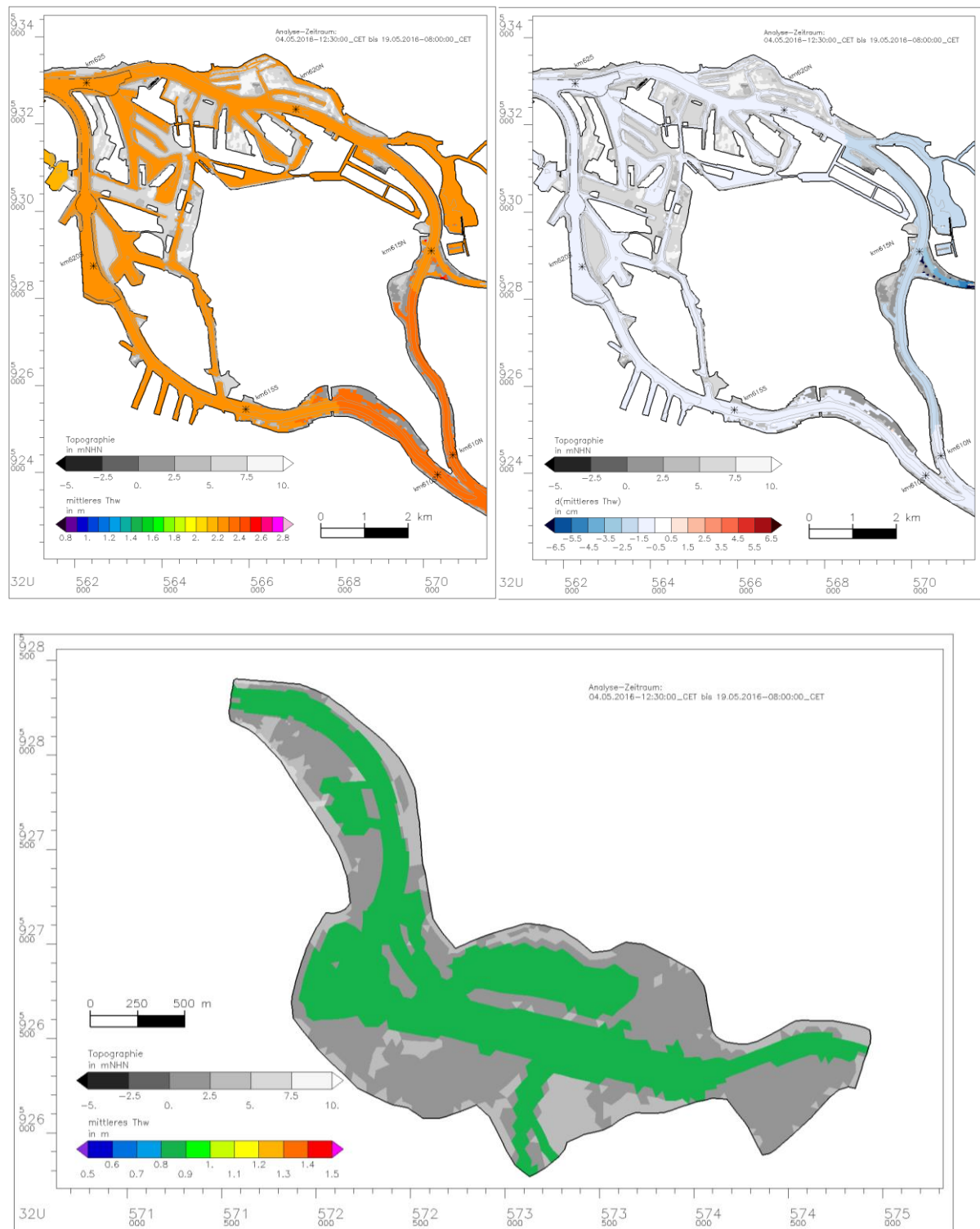


Bild 71: Mittleres Tidehochwasser. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

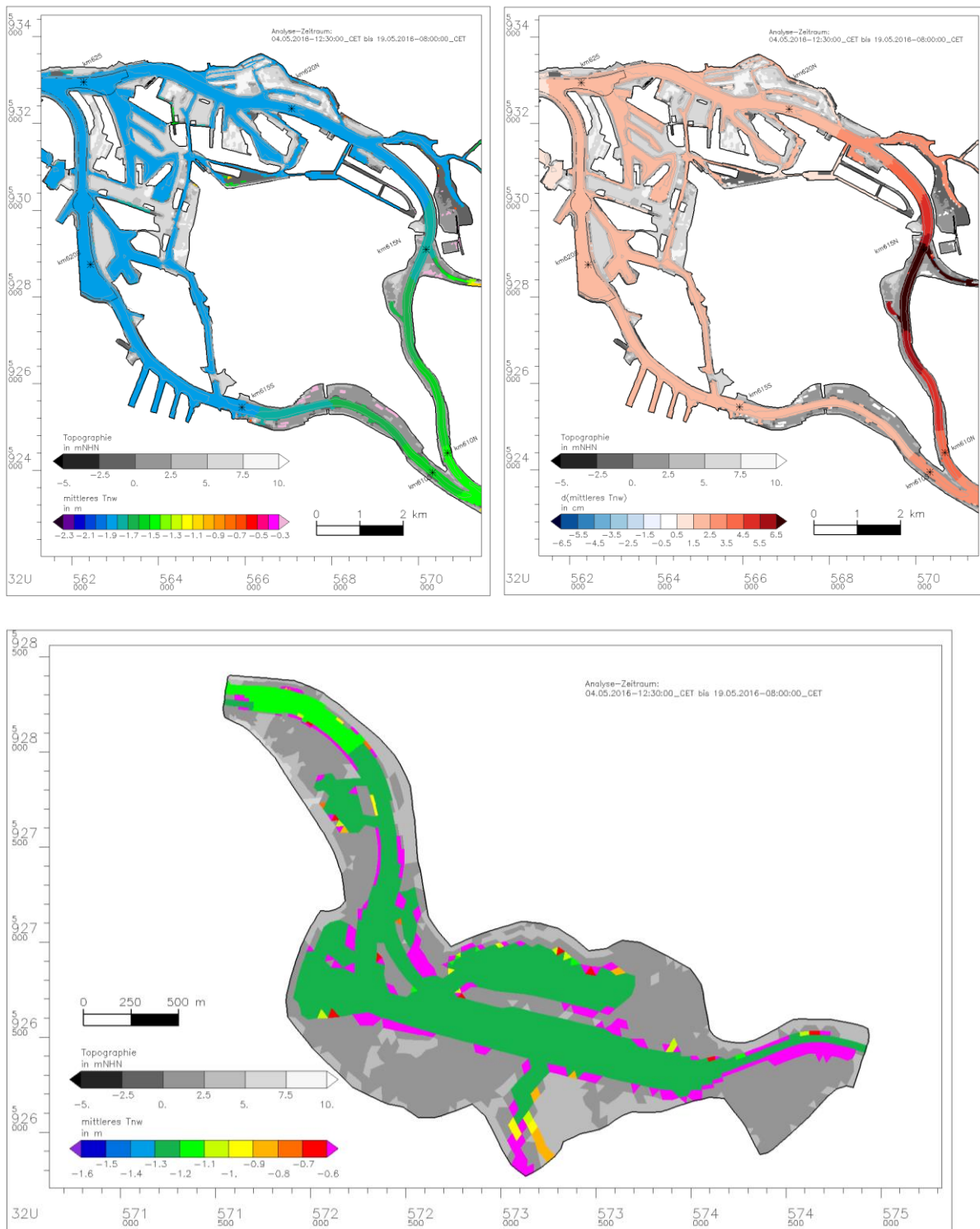


Bild 72: Mittleres Tideniedrigwasser. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

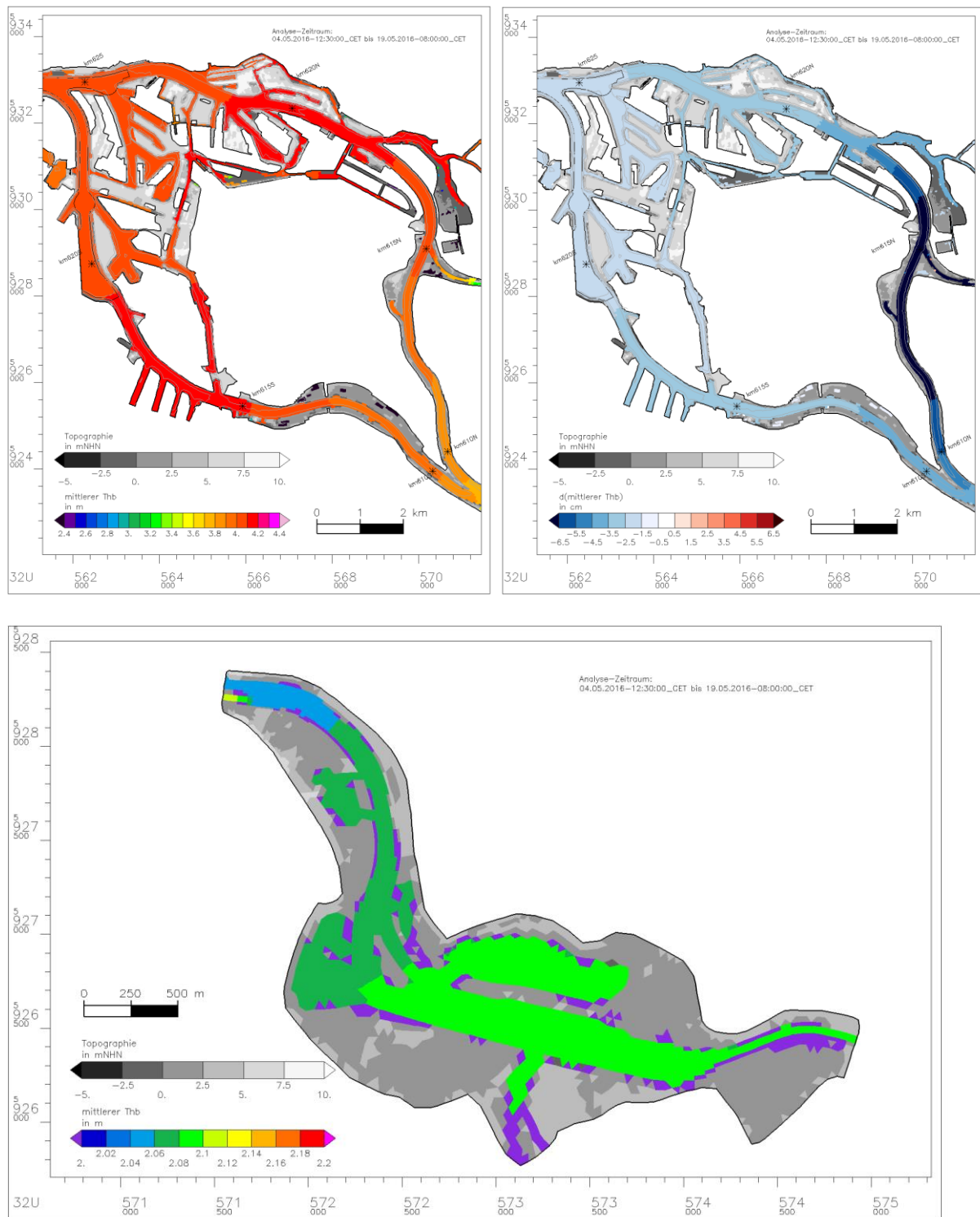


Bild 73: Mittlerer Tidehub. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

Durch die Anbindung der Dove Elbe verändern sich auch die Strömungsgeschwindigkeiten, wobei im Bereich des Sperrwerks die größten Veränderungen auftreten (Bild 74 und Bild 75). Unmittelbar binnenseitig des Sperrwerks steigen die mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten bis auf 1,4 m/s (die höchsten während des Analysezeitraums ermittelten Strömungen traten mit 1,8 m/s im Flutstrom auf). In der binnenseitigen Krümmung der Dove Elbe nehmen im weiteren Verlauf die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten von ca. 1,3 m/s auf ca. 0,7 m/s ab. Die Ebbstromgeschwindigkeiten sind im Mittel mit ca. 0,4 m/s etwas geringer. Weiter stromauf in der Dove Elbe liegen die mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten unterhalb von 0,2 m/s. Auf der Außenseite des Sperrwerks steigen aufgrund der Wiederanbindung die im Ist-Zustand geringen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten des Altarms um über 0,06 m/s. In der Norderelbe erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten stromab der Mündung der Dove Elbe in der Flutphase um ca. 0,015 m/s und in der Ebbphase um ca. 0,035 m/s. Stromauf der Anbindung vermindern sich die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten. Auch hier ist die Veränderung im Ebbstrom (etwa 0,025 m/s) stärker als im Flutstrom (etwa 0,05 m/s).

Die stärkere Erhöhung der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit gegenüber der mittleren Flutstromgeschwindigkeit bewirkt eine Reduktion der Flutstromdominanz stromab der Dove Elbe bis zum Köhlbrand um etwa 0,025 (Bild 76). Stromauf der Dove Elbe nimmt das mittlere Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Vergleich zum Referenzszenario leicht zu.

Die Stauwasserdauern in der Stromelbe ändern sich aufgrund der Anbindung der Dove Elbe nur geringfügig. Die Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung verkürzt sich zwischen Dove Elbe und Billwerder Bucht im Mittel um ca. 4 min (Bild 77). Bei Ebbstromkenterung verkürzen sich die Stauwasserdauern vor allem zwischen Köhlfleet und dem Hansahafen (Bild 78). Aufgrund der vorliegenden Tidesymmetrie im Simulationsmodell binnenseitig des Sperrwerks (eingesteuerte Tidekurve mit gleicher Auf- und Ablaufdauer) werden die Tidekennwerte Stauwasserdauer sowie das Verhältnis Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit in diesem Bereich nicht dargestellt.

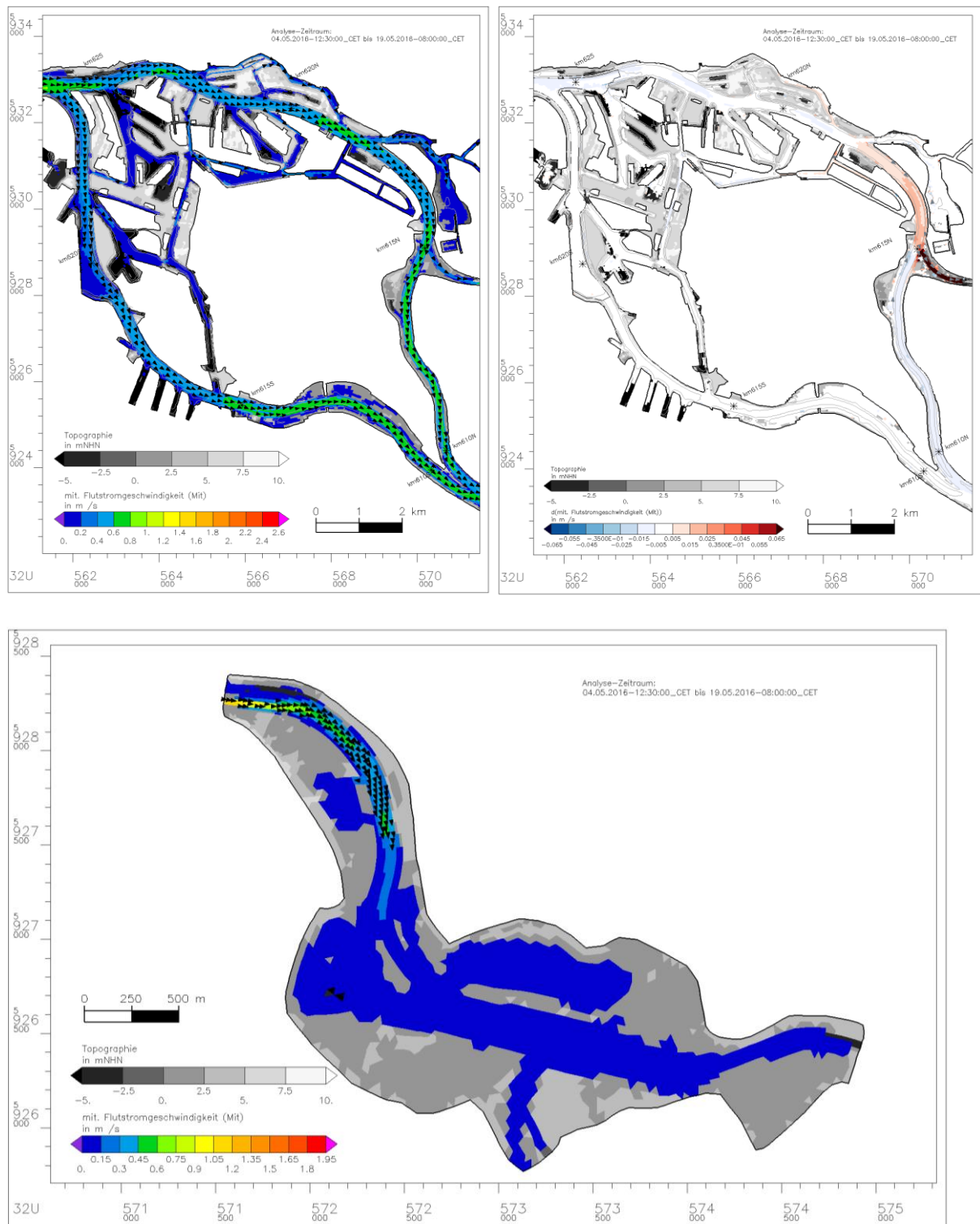


Bild 74: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

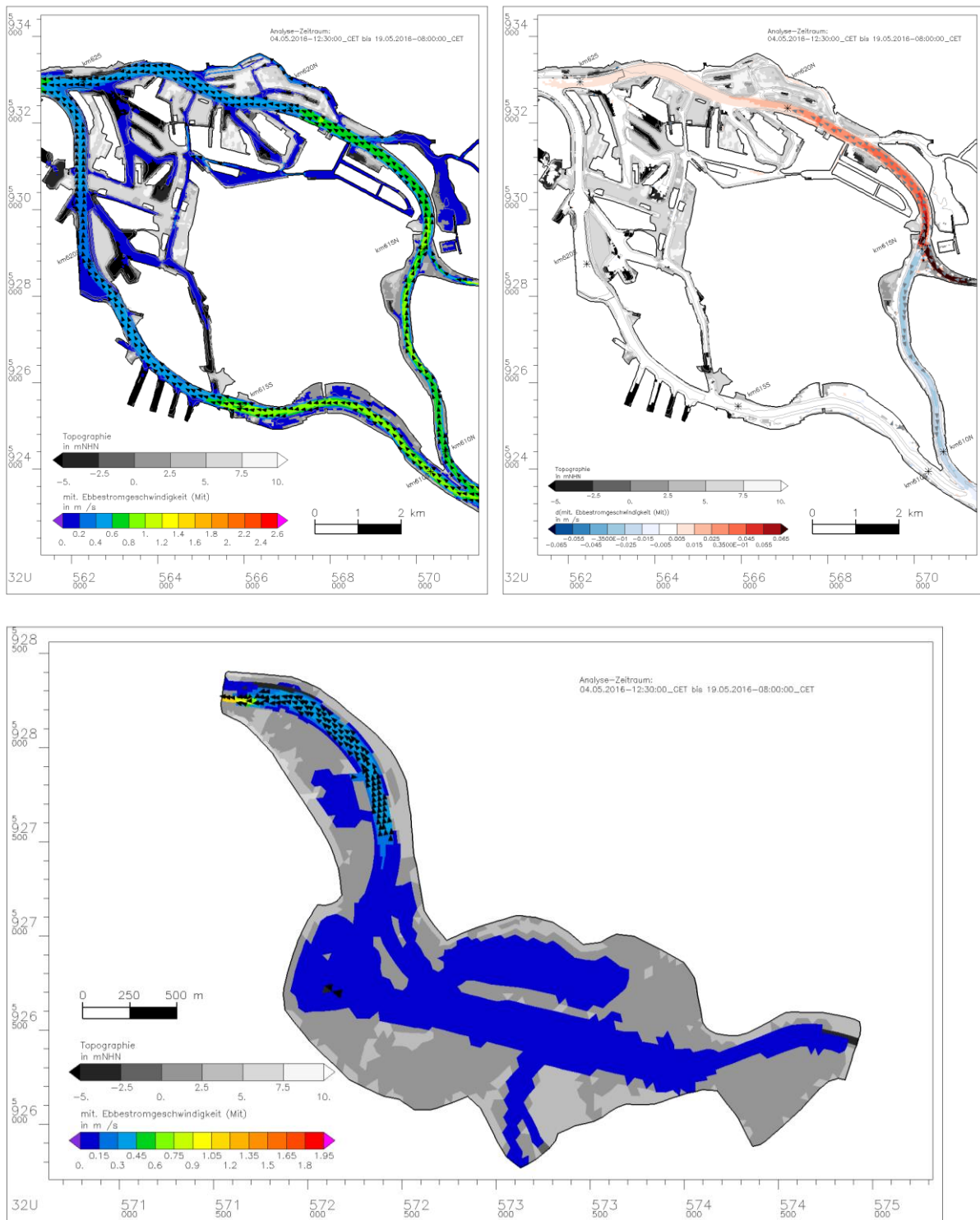


Bild 75: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

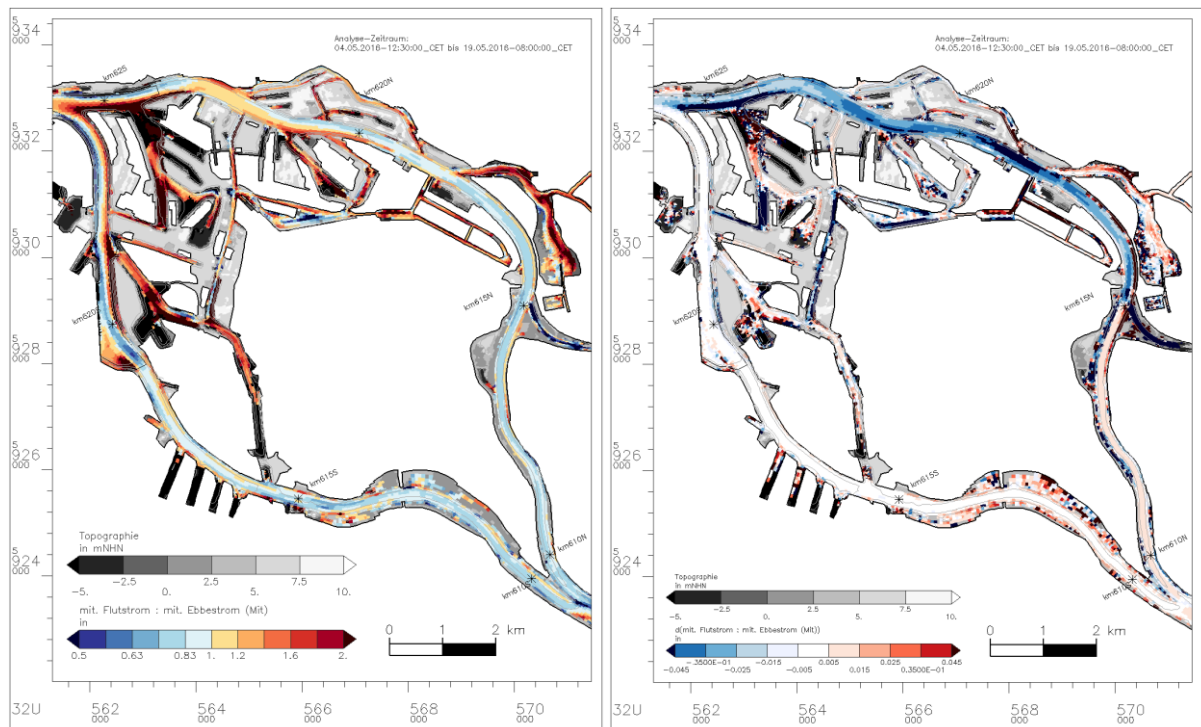


Bild 76: Differenz des Verhältnis Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

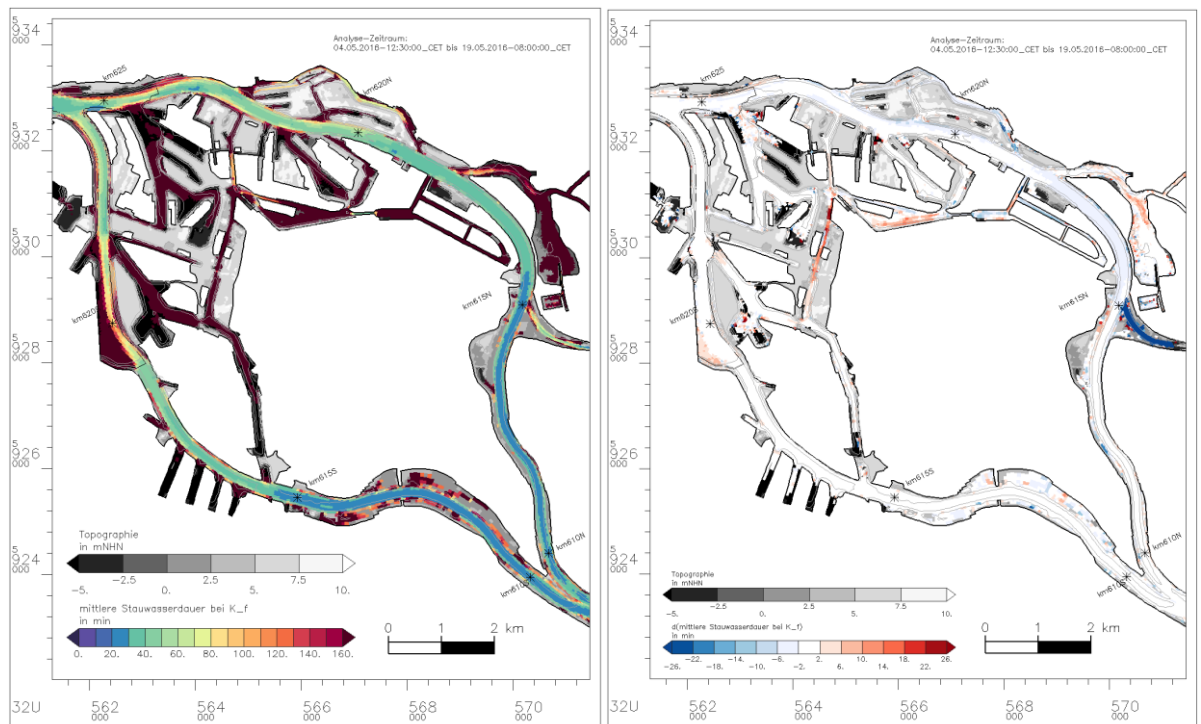


Bild 77: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

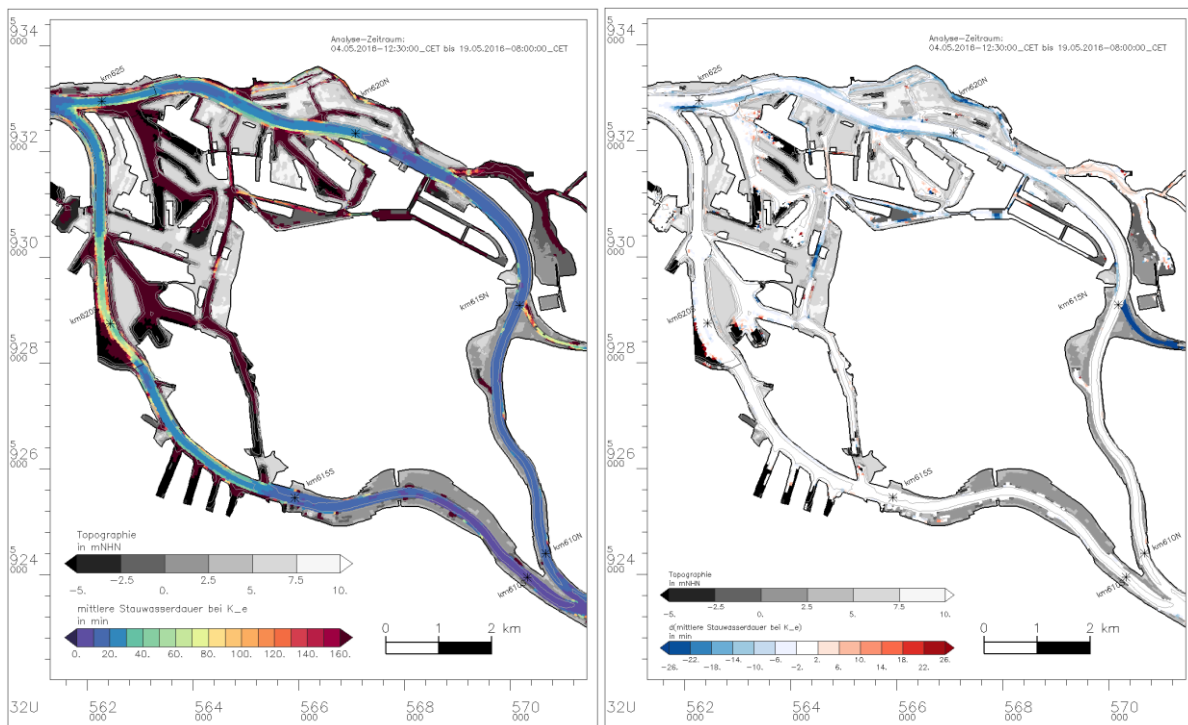


Bild 78: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

Im Bereich der Dove Elbe tritt der höchste Schwebstoffgehalt direkt entlang der Zulaufkurve stromaup des Sperrwerks auf. Hier beträgt der Schwebstoffgehalt im Mittel ca. $0,016 \text{ kg/m}^3$. Weiter stromaup nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Dove Elbe ab und somit auch das Vermögen der Strömung, die Feinsedimente in Suspension halten. In der östlichen Hälfte der Dove Elbe ist der Schwebstoffgehalt und der stromaufgerichtete Schwebstofftransport während der Simulationszeit nahezu null (Bild 79 und Bild 80).

In der Norderelbe stromaup des Sohlsprungs ca. bei Elbe-Km 620N nimmt der mittlere Schwebstoffgehalt infolge der maßnahmenbedingt erhöhten Durchströmung leicht zu (ca. $0,004 \text{ kg/m}^3$). Wesentlich stärker tritt dieser Effekt im Verbindungsstück zwischen Norderelbe und Dove Elbe auf. Aufgrund örtlicher Erosion der Gewässersohle (die Gewässersohle ist im Modell nicht speziell befestigt) steigt der Schwebstoffgehalt im Mittel um ca. $0,050 \text{ kg/m}^3$ (oberhalb des Grenzwerts der dargestellten Farbskala). Stromab von St. Pauli ab ca. Elbe-Km 623N nimmt der Schwebstoffgehalt im Flutstrom leicht ab (Bild 79). Hier zeigt sich die Wirkung der verminderten Flutstromdominanz, wodurch sich auch eine Reduktion des advektiven Rest-Schwebstofftransports im Wesentlichen stromab von St. Pauli ergibt (Bild 81).

Innerhalb des Simulationszeitraumes von vier Wochen werden ca. 1300 t Sedimente in die Dove Elbe eingetragen (Bild 83). Der Großteil des eingetragenen Schwebstoffeintrags besteht aus schluffigen Sedimenten. In der Dove Elbe findet eine hydraulische Sortierung der Sedimente statt, d.h. die größeren Sedimente mit der höheren Sinkgeschwindigkeit sedimentieren zuerst. Je geringer die Strömungsgeschwindigkeit ist, umso stärker ist die Deposition. Der Hauptsedimentationsbereich liegt am Ende der Zulaufkurve noch vor der Regattastrecke (Bild 82). Im flacheren Bereich

der Norderelbe wird der Geschiebetransport verstärkt. Hier und vor allem im Verbindungsstück zwischen der Norderelbe und der Dove Elbe erodieren im Simulationsmodell auch mehr Feinsedimente aus der Gewässersohle als zuvor im Referenzszenario. Diese erhöhen den Schwebstoffgehalt im Wasserkörper und werden teilweise in die Dove Elbe eingetragen (Bild 82). Dies ist eine anfängliche morphologische Reaktion auf die örtlich veränderten Strömungsverhältnisse, die mittelfristig abklingen würde. Langfristig ist zu erwarten, dass der Sedimenteintrag in die Dove Elbe geringer wird, da er im Wesentlichen von den Schwebstoffen gebildet werden wird, die mit dem Oberwasserzufluss über das Wehr Geesthacht in die Tideelbe eingetragen werden. Weiträumig zeigt sich die veränderte Transportcharakteristik auch in einer etwas geringeren Deposition im Bereich des Köhlbrands.

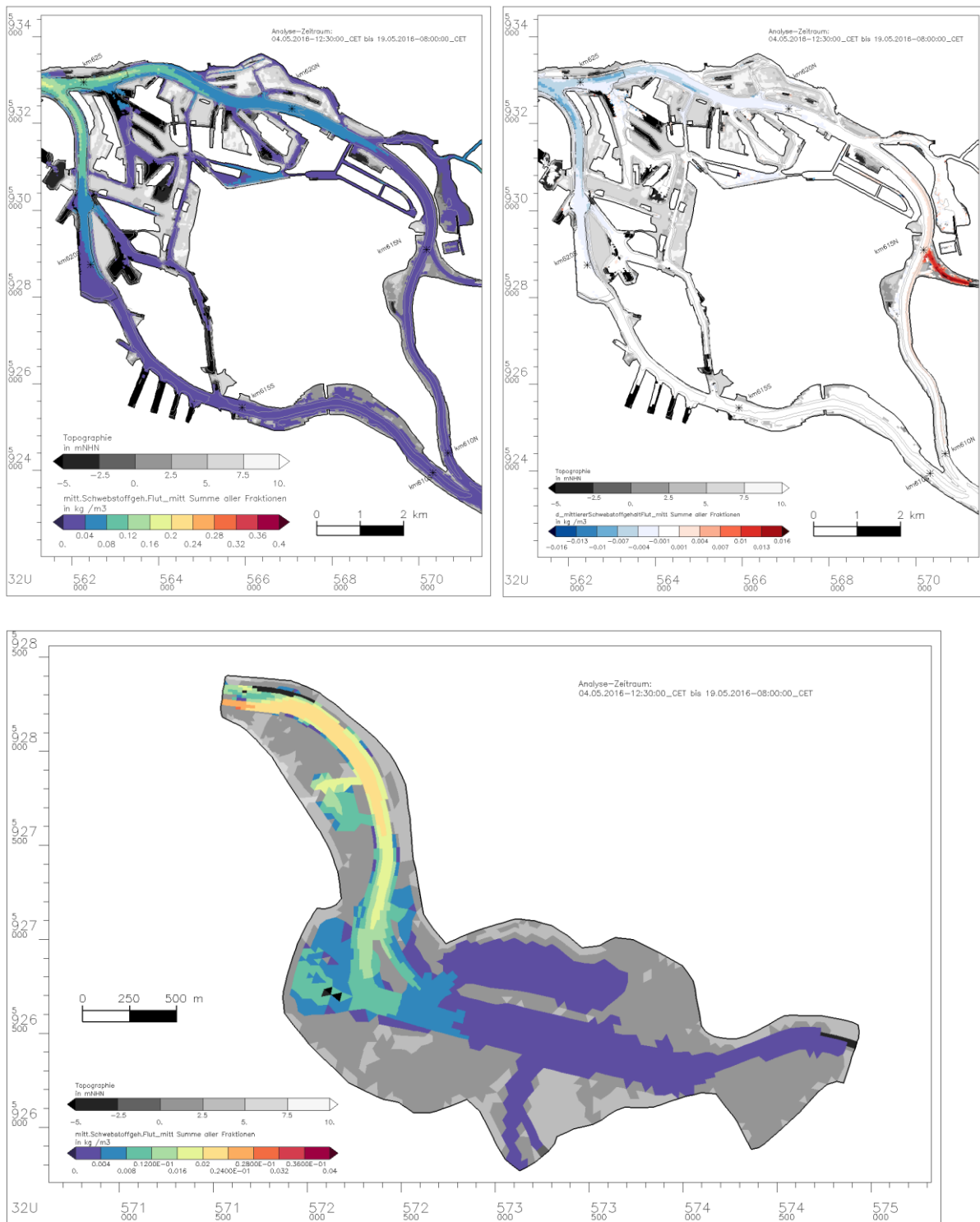


Bild 79: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut). Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

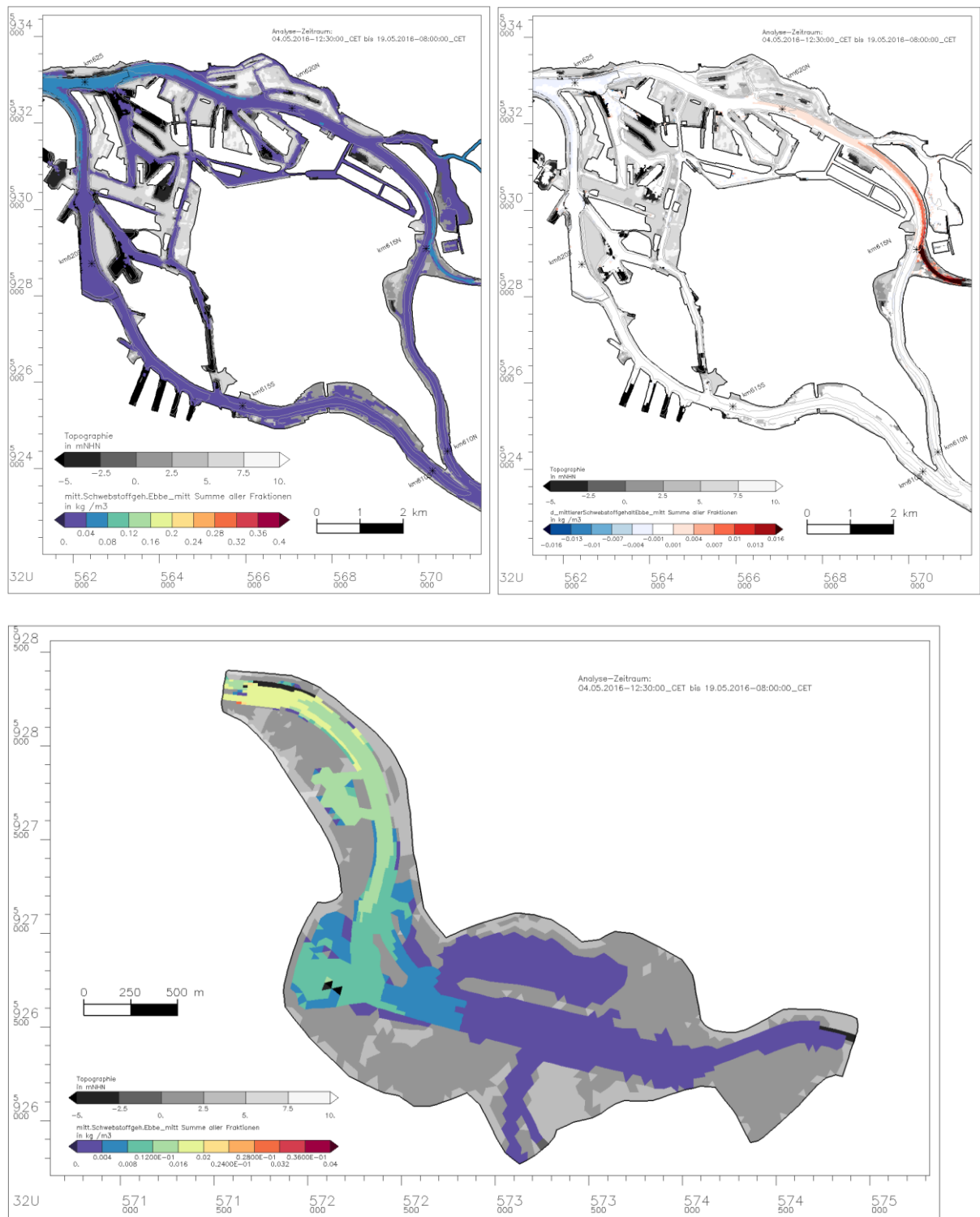


Bild 80: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe). Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

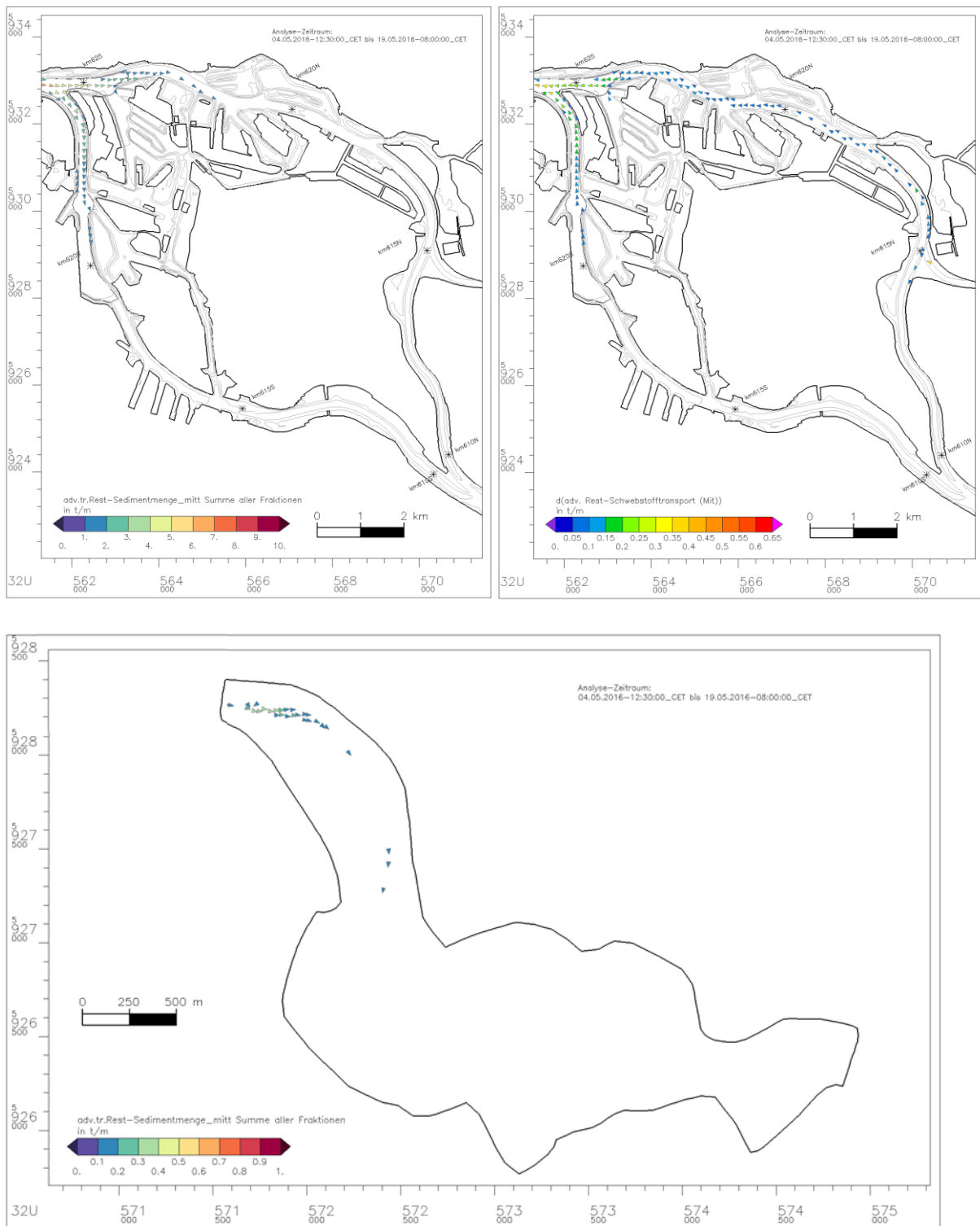


Bild 81: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe

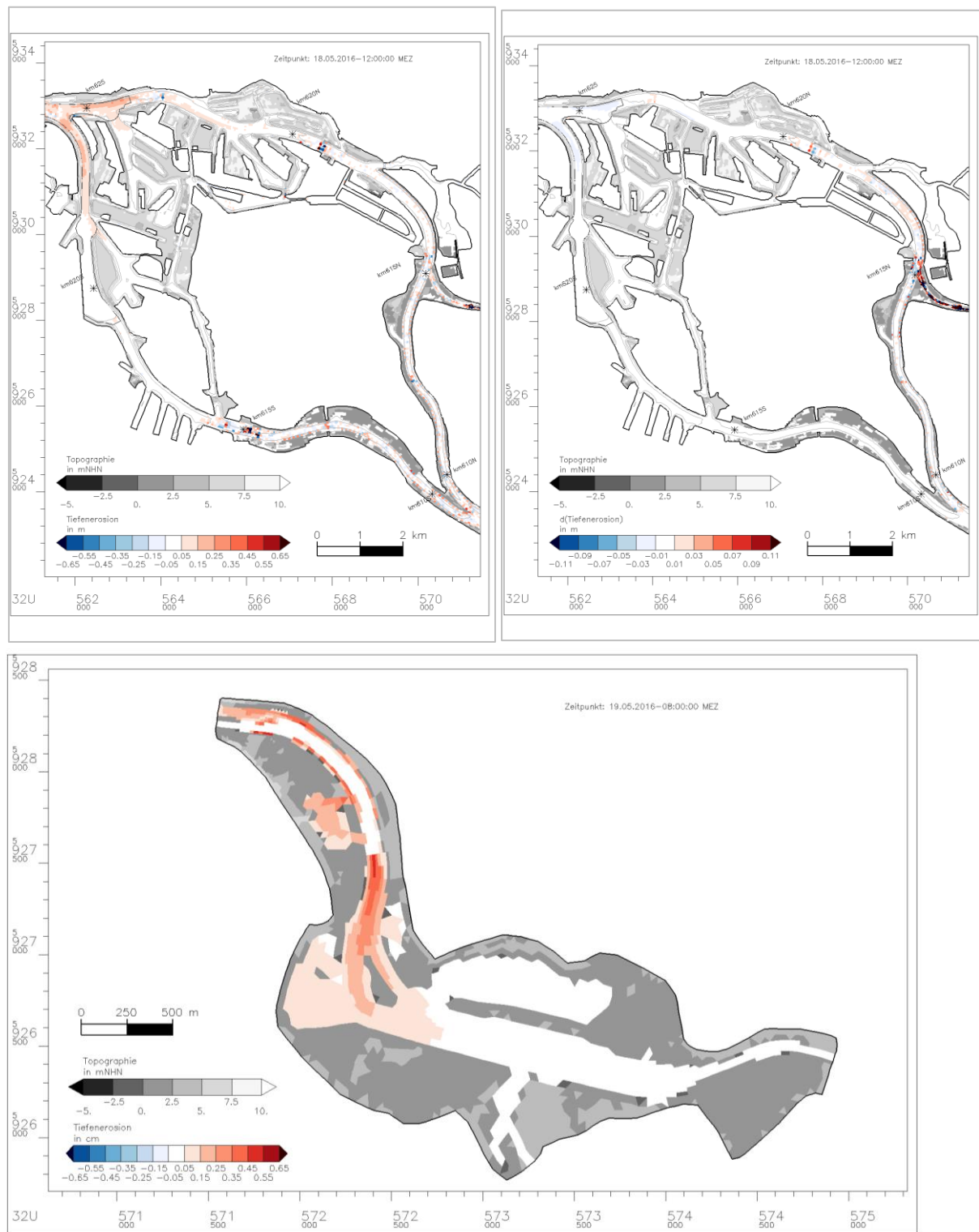


Bild 82: Akkumulation an der Gewässersohle nach 4 Wochen Simulationszeit. Bild oben links: Variante, Bild oben rechts: Differenz (Variante minus Referenz). Das Bild unten zeigt die Absolutwerte für den Bereich Dove Elbe (in cm)

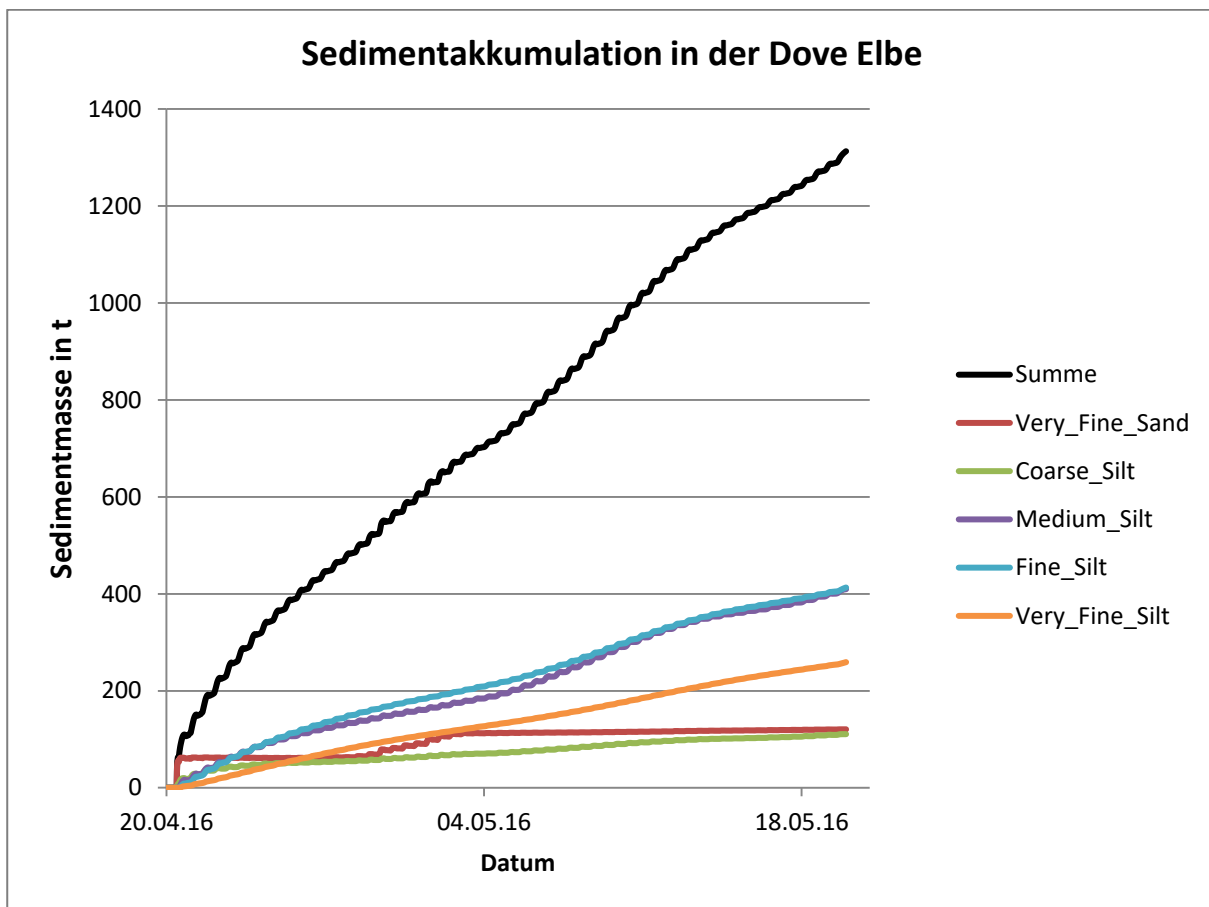


Bild 83: Schwebstoffeintrag in das Gebiet während der Simulation

5.4.3 Großräumige Auswirkung der Maßnahme

Die Wirkung des zusätzlichen Flutraumes auf die Wasserstände ist wegen der geringen Wassertiefen und des kleineren Tidevolumens in der Norderelbe örtlich an der Mündung der Dove Elbe deutlich größer als weiter stromab (Bild 84). Die Reduzierung des mittleren Tidehubs wirkt bis ca. Elbe-Km 660. Weiter stromab zeigt sich eine leichte Erhöhung des mittleren Tidehubs in der Größenordnung von ca. 1 cm im Bereich Brunsbüttel (Bild 84).

Die Darstellung des mittleren Verhältnis Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit auf dem Längsprofil (Bild 85) bestätigt den überwiegend örtlichen Einfluss. Eine Dämpfung der Flutstromdominanz ist bis Schulau (ca. Elbe-Km 640) zu erkennen. Stromauf der Mündung der Dove Elbe wird in der Norderelbe eine Erhöhung des mittleren Verhältnis Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit berechnet, die nach 5 km abgeklungen ist. Die in der oberen Tideelbe vorhandene Ebbstromdominanz wird dort also etwas reduziert.

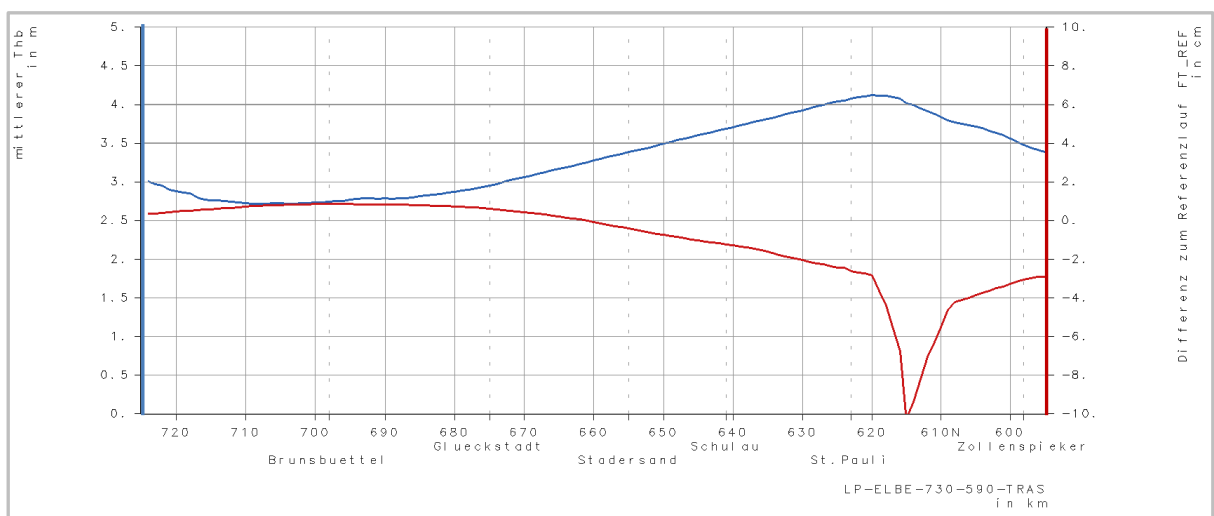
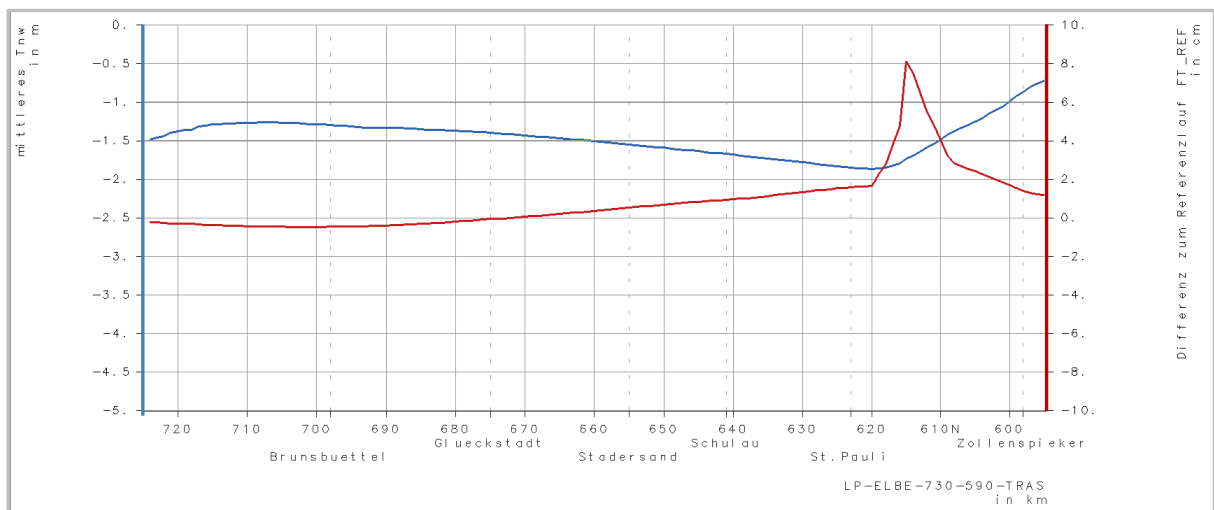
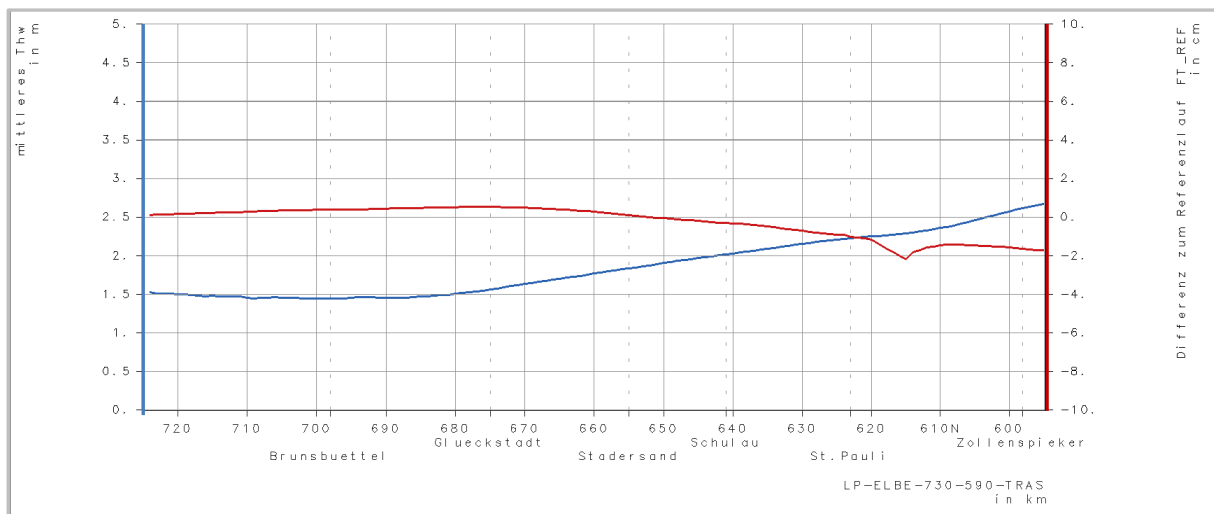


Bild 84: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)

Die Anbindung der Dove Elbe führt durch die Veränderungen der Strömungen auch zu einer großräumigen Reduktion des stromaufgerichteten Schwebstofftransports in der Unterelbe. Der advektive Rest-Schwebstofftransport verringert sich bis ca. Elbe-km 705 im Mittel um ca. 200 bis 300 t/Tide (Bild 86).

Der Salzgehalt zeigt infolge des Anschlusses eine geringe Verminderung im Hamburger Bereich (Bild 87), was auf die Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Dove Elbe zurückzuführen ist. Diese speisen die Dove Elbe kontinuierlich mit Frischwasser und gelangen durch die Wiederanbindung über die Dove Elbe in die Norderelbe. Stromab von Brunsbüttel, bei Elbe-km 705 nimmt der Salzgehalt um etwa 0,04 ‰ ab. Die Veränderungen im Vergleich zum Referenzzustand bleiben jedoch deutlich < 0,1 ‰, was als kleinste noch sinnvoll auswertbare Konzentration angesehen wird.

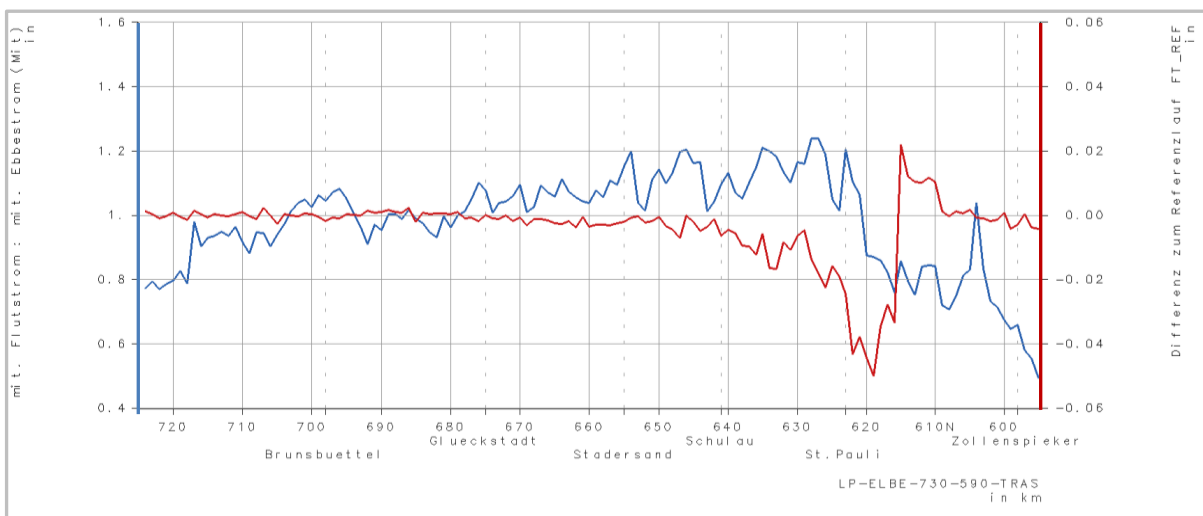


Bild 85: Mittleres Flut- zu Ebbstromverhältnis im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand)

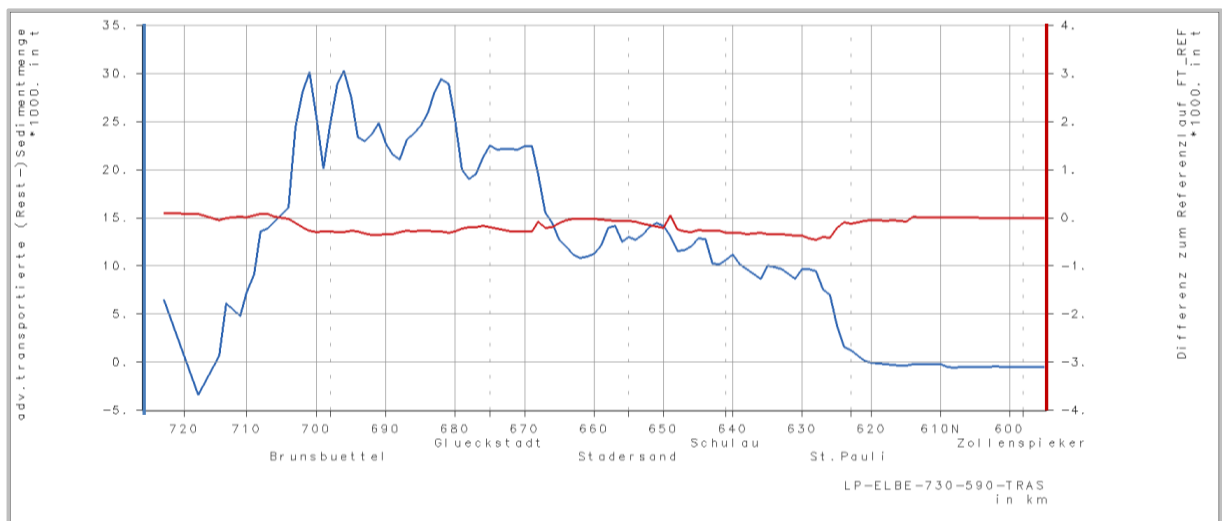


Bild 86: Mittlerer Rest-Schwebstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenzzustand)

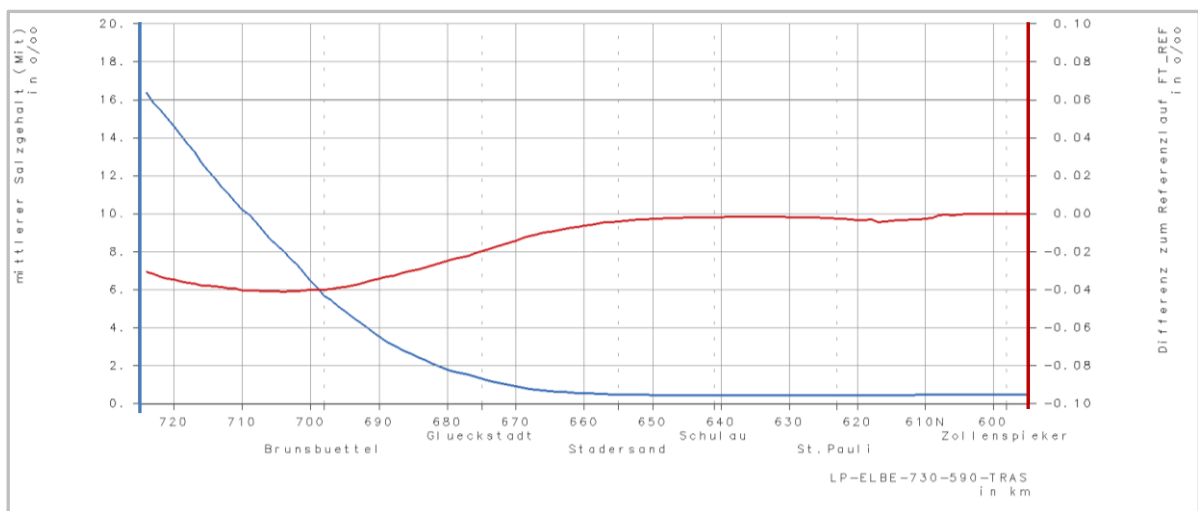


Bild 87: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)

6 Relativer Vergleich der großräumigen Wirkung aller Maßnahmen

Um die untersuchten Maßnahmen hinsichtlich Ihrer hydrologischen Wirksamkeit an der Tideelbe einordnen und bewerten zu können, werden die wichtigsten Ergebnisse der großräumigen Wirkung vergleichbar zusammengestellt. In den folgenden Abbildungen wird das Analyseergebnis für die Maßnahme Pagensander Nebelbe mit einer blauen Linie dargestellt, und entsprechend in Rot für die Alte Süderelbe, in Grün für die Haseldorfer Marsch und in Schwarz für die Dove-Elbe. In Bild 88 sind die Differenzen des MThw, des MTnw und des MThb (Variante - Referenzzustand) für alle Varianten entlang der Tideelbe zu sehen. Die Veränderungen der Tidekennwerte des Wasserstandes durch den zusätzlichen Flutraum wirken sich in der Tideelbe bei allen Varianten über eine Strecke von mindestens 100 Flusskilometern aus. Die ergänzende Maßnahme Pagensander Nebelbe hat hingegen keine erkennbare Auswirkung auf diese Analysegrößen, da sie nur eine Vertiefung des stromauf gelegenen Abschnittes der Pagensander Nebelbe darstellt und keinen zusätzlichen Flutraum schafft.

- Die Differenz des MThw für die drei flutraumschaffenden Maßnahmen ergibt eine maximale Absenkung um ca. 2 cm, die bis an die Tidegrenze am Wehr Geesthacht reicht. Der Tideanschluss der Dove-Elbe bewirkt einen kleinen Peak im Bereich des Anschlusses, die Wirkung weiter stromab lässt dann aber im Bereich der Ausbaustrecke schnell nach. Im Gegensatz dazu wirken die Maßnahmen „Alte Süderelbe“ und „Haseldorfer Marsch“ bis in das Mündungsgebiet unterhalb von Brunsbüttel. Die Maßnahme „Alte Süderelbe“ hat zwischen Elbe-Km 630-660 eine etwas größere Wirkung auf das MThw, die Maßnahme „Haseldorfer Marsch“ dagegen zwischen Elbe-Km 675-700.
- Beim MTnw tritt die größte Differenz mit einer Anhebung von 1-2 cm im Hamburger Raum auf. Besonders auffällig ist die deutliche Anhebung des MTnw um 8 cm im Bereich des Anschlusses der Dove-Elbe, ebenso wie die stark nachlassende Wirkung in der weiter stromab gelegenen Ausbaustrecke. Auch beim MTnw ist die Wirkung der Maßnahme „Alte Süderelbe“ um einige Millimeter größer als die der „Haseldorfer Marsch“. Beide Maßnahmen stützen das MTnw großräumig um mindestens 1 cm.
- Infolgedessen ergibt sich eine Änderung des MThb, die mit einer Reduzierung von mehr als 10 cm im Bereich des Anschlusses der Dove-Elbe den höchsten Wert aufweist. Der Anschluss der Dove-Elbe bewirkt jedoch nur in der oberen Tideelbe eine so deutliche Änderung. In der Ausbaustrecke lässt die Wirkung schnell nach und im Mündungsbereich wird der MThb leicht erhöht. Die Maßnahmen „Alte Süderelbe“ und „Haseldorfer Marsch“ bewirken hingegen bis in das Mündungsgebiet unterhalb von Brunsbüttel eine Reduktion des MThb. Die Maßnahme „Alte Süderelbe“ hat zwischen Elbe-Km 630-660 mit fast 4 cm eine größere Wirkung als die Maßnahme „Haseldorfer Marsch“ mit ca. 2,5 cm. Weiter stromab zwischen Elbe-Km 675-700 dämpft die Maßnahme „Haseldorfer Marsch“ hingegen den MThb um wenige Millimeter mehr.

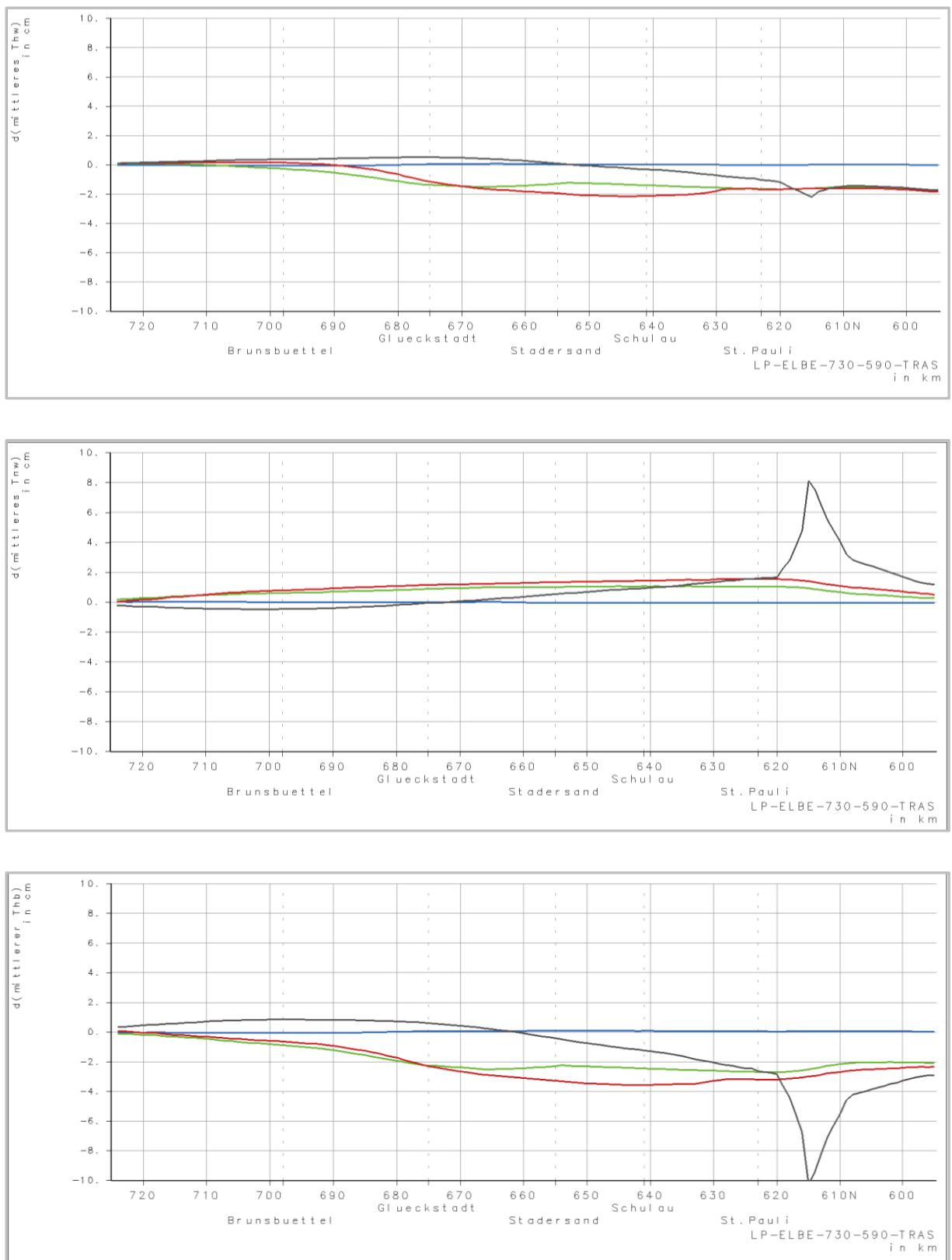


Bild 88: Differenzen des mittleren Tidehochwassers (oben), des mittleren Tideniedrigwassers (Mitte) und des mittleren Tidehubs (unten) im Längsverlauf der Tideelbe während des Untersuchungszeitraums, jeweils Variante minus Referenzzustand. Blaue Linie: Pagensander Nebenelbe, grüne Linie: Haseldorfer Marsch, rote Linie: Alte Süderelbe, Anbindungsvariante 1, schwarze Linie: Dove Elbe

Strömungen werden durch Gradienten in der Wasserspiegellage angetrieben. Verändert man diese Gradienten (z.B. durch eine Anhebung des Tnw) so ändern sich auch die Strömungsgeschwindigkeiten. In Bild 89 sind in gleicher Weise wie für die Tidewasserstände die Differenzen der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit, der mittleren Flutstromgeschwindigkeit und des Verhältnisses der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (Variante - Referenzzustand) für alle Varianten entlang der Tideelbe dargestellt.

- Die größte Änderung der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit ist jeweils im Anschlussbereich der zusätzlichen Tidevolumen zu beobachten, dort nimmt sie zu: durch den Anschluss der Dove-Elbe wird sie um 5 cm/s erhöht, durch die Anbindung der Alten Süderelbe um 2 cm/s und durch den Anschluss der Haseldorfer Marsch um weniger als 1 cm/s. Weiter stromab in der Unterelbe lässt die Erhöhung nach, ab ca. Elbe-Km 700 wird die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit um weniger als 1 cm/s reduziert. Stromauf der Maßnahmen wird die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit stets etwas reduziert.
- Auch die Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit folgt diesem Muster. Durch den Anschluss der Dove-Elbe wird die mittlere Flutstromgeschwindigkeit um 1,5 cm/s erhöht, die größte Änderung findet man bei der Alten Süderelbe mit ca. 3 cm/s und bei der Haseldorfer Marsch beträgt die Erhöhung wiederum weniger als 1 cm/s. Weiter stromab in der Unterelbe lässt die Erhöhung nach. Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit wird überwiegend um weniger als 1 cm/s, aber stärker als die mittlere Ebbstromgeschwindigkeit, reduziert. Stromauf der Maßnahme wird auch die mittlere Flutstromgeschwindigkeit stets etwas reduziert.
- Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit wirkt sich über den Nahbereich der Anschlüsse hinaus und sinkt das Verhältnis von mittlerer Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit weiter stromab des angeschlossenen Flutraums. Die flutstromdämpfende Wirkung durch den Anschluss der Alte Süderelbe hält entlang der Unterelbe am weitesten, mit einer Verringerung des mittleren F:E Verhältnisses um mehr als 0,01. Wenn auch eine Änderung dieses Verhältniswertes um weniger als 0,01 gering zu sein scheint, er ist doch ein starker Indikator, der signifikante Auswirkungen für den Sedimenttransport vermuten lässt, da es sich um einen Wert handelt, der für die mittleren Strömungsverhältnisse in der Mitte der Fahrrinne ermittelt wird.

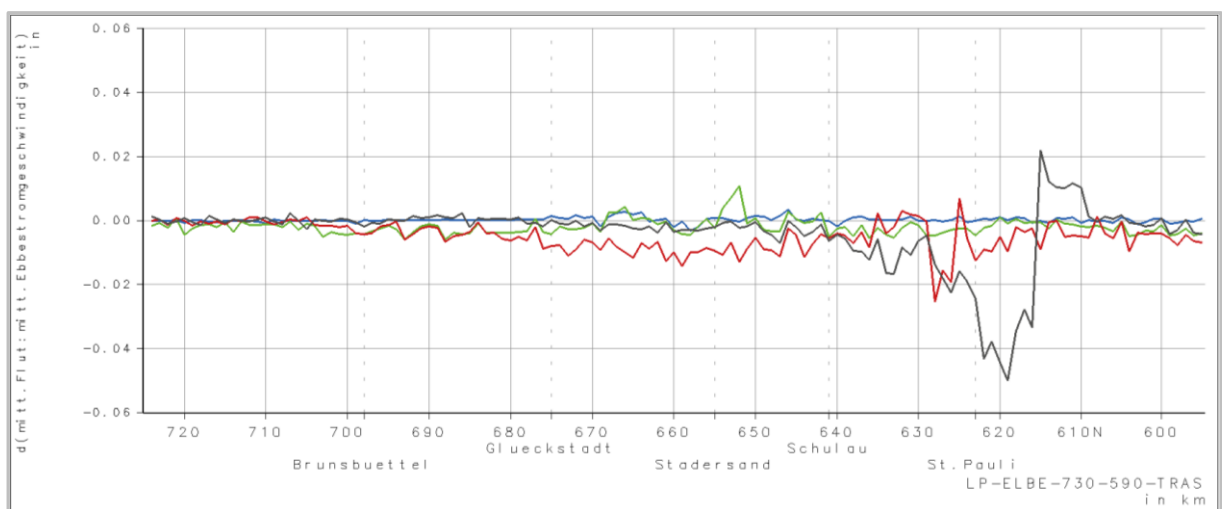
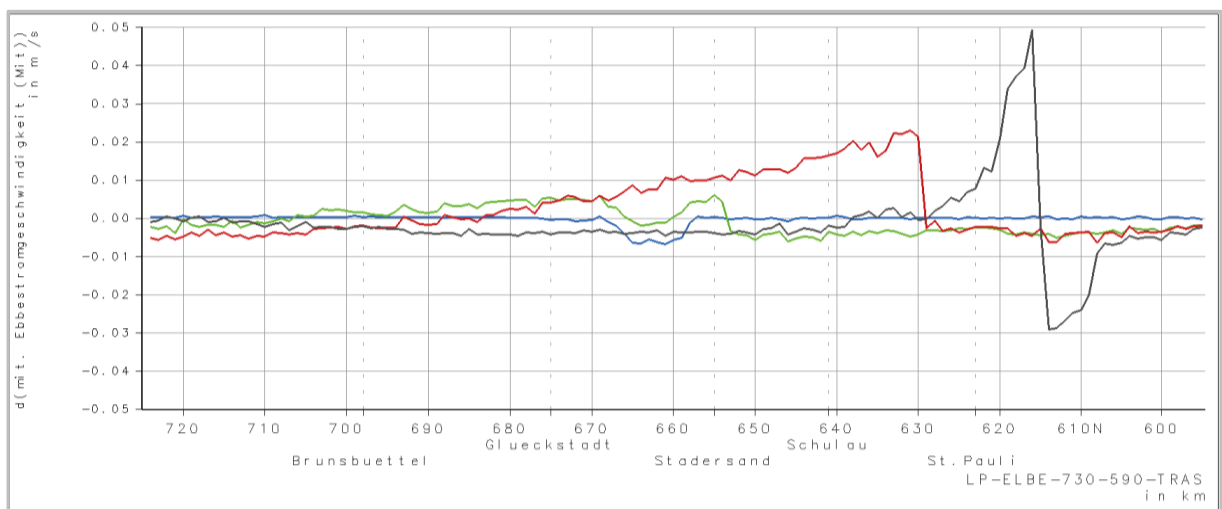
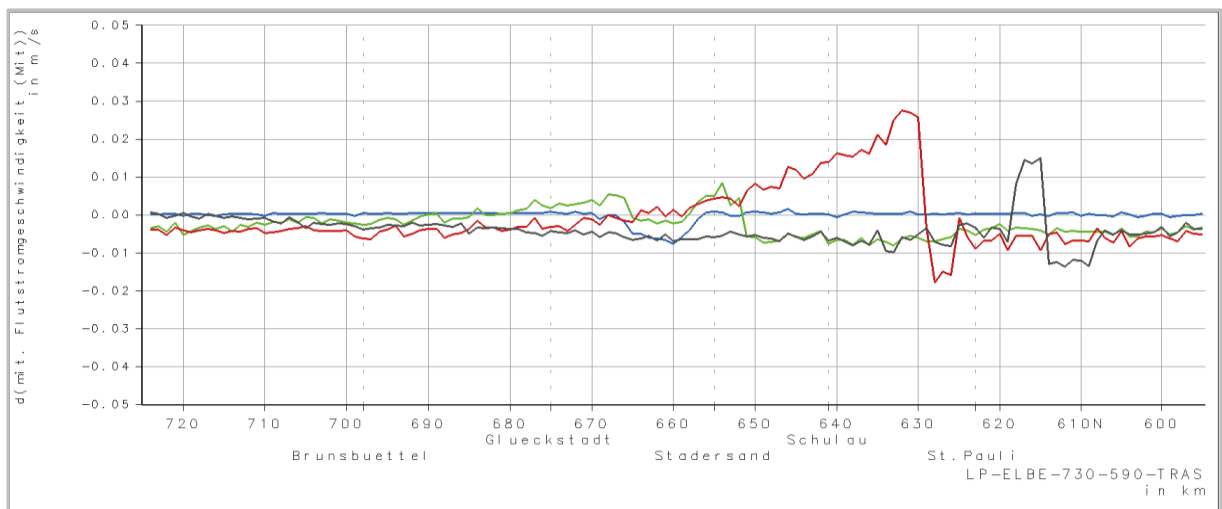


Bild 89: Differenzen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (oben), der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit (mitte) und des Verhältnisses der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (Variante - Referenzzustand) für alle Varianten entlang der Tideelbe.

Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit fördert die Mobilisierung und den Transport von Sedimenten. Ergibt sich aber eine Reduktion des Verhältnisses von Flut- zu Ebbstrom-geschwindigkeit, dann hat sich der Ebbstrom dem Flutstrom gegenüber verstärkt und damit den stromabgerichteten Sedimenttransport begünstigt. So kann trotz des höheren Sedimenttransportes bei Flut- und Ebbstrom eine Reduktion des Netto-Schwebstofftransportes erreicht werden. Dies ist in Bild 90 zu erkennen. Es zeigt sich, dass der „Nettotransport“/Tide um maximal ~ 1000 t/Tide bis in den Mündungsbereich reduziert wird. Die größte Wirkung wird mit der Maßnahme „Alte Süderelbe“ erreicht. Stromab von Schulau bis unterhalb von Brunsbüttel nimmt der Restschwebstofftransport großräumig ab, stromauf von Schulau bis zum Anschluss über den Köhlfleet wird jedoch der flutstromorientierte Transport um ca. 250 t/Tide erhöht. Eine ähnlich starke Wirkung entfaltet die Maßnahme „Haseldorfer Marsch“, deren positive Wirkung zwar erst bei Elbe-Km 670 einsetzt, dafür aber weit in den Mündungstrichter hineinwirkt. Die Erhöhung des „Nettotransport“/Tide zwischen Elbe-Km 668-652 wird durch die in dieser Variante enthaltenen Vertiefung der Pagensander Nebelbe und den in Kapitel 5.2.2 beschriebenen morphologischen Anpassungsprozessen in den Nebelben erklärt. Weiter stromauf des Anschlusses ergibt sich ebenfalls eine Reduktion des Schwebstofftransportes stromauf, die mit ca. 200 t/Tide geringer ausfällt, aber bis in den Hamburger Hafen wirkt. Ähnlich wirksam ist der Wiederanschluss der Dove Elbe, wodurch der „Nettotransport“/Tide in der Unterelbe bis ca. Elbe-km 705 im Mittel um ca. 200 bis 300 t/Tide reduziert wird, im Hamburger Hafen ist die Reduktion der Maßnahme „Dove Elbe“ am wirksamsten.

Bezogen auf den Transport im Referenzlauf entspricht die Differenz von ~ 1000 t/Tide einer Reduktion von maximal ~ 4 % an demselben Ort, wo die Abnahme auftritt. Diese Zahl kann als Anhaltspunkt dienen, in welchem Maße der Sedimenttransport beeinflusst wird. Es ist jedoch nicht zulässig, daraus eine entsprechende Reduktion der Baggermengen bzw. der Baggerkosten abzuleiten, da diese von vielen weiteren teilweise nicht modellierbaren Faktoren abhängen.

Schließlich sind in Bild 91 noch die Differenzen des mittleren Salzgehaltes (Variante - Referenzzustand) für alle Varianten dargestellt. Die unterschiedlichen Muster ergeben sich aus den leicht veränderten Strömungsverhältnissen und der sich den veränderten Verhältnissen nur langsam anpassenden Salzverteilung. Am auffälligsten ist noch die Maßnahme „Dove-Elbe“: Die Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Dove Elbe machen sich hier geringfügig bemerkbar, denn diese speisen die Dove Elbe kontinuierlich mit Frischwasser und gelangen durch die Wiederanbindung über die Dove Elbe in die Norderelbe. Die anfängliche Salzintrusion in der Brackzone, die beim Anbinden des Flutraums sowohl an der Alte Süderelbe als auch an der Dove Elbe in geringem Ausmaß erfolgt, wird durch die Dämpfung des stromaufgerichteten Transportes entgegengewirkt. Das Vordringen der Tide sowie den damit verbundenen advektiven Salztransport wird dadurch verlangsamt. Für alle Varianten sind die Änderungen im Vergleich zum Referenzzustand $< 0,1$, was als kleinste noch sinnvoll auswertbare Konzentration angesehen wird.

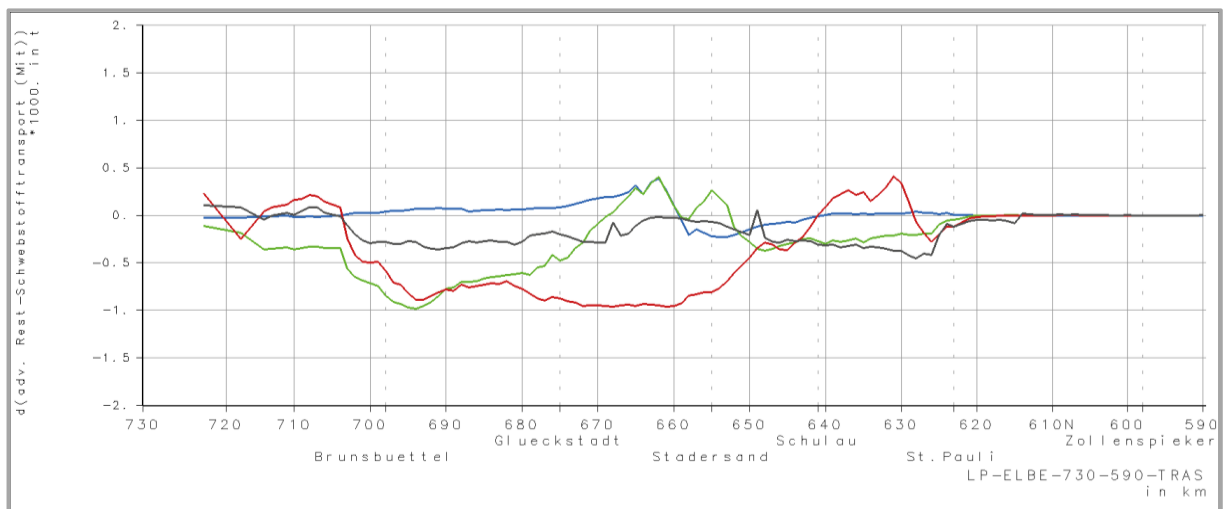


Bild 90: Differenzen des mittleren Rest-Schwebstofftransportes im Längsverlauf der Tideelbe während des Untersuchungszeitraums, jeweils Variante minus Referenzzustand. Blaue Linie: Pagensander Nebelbe, grüne Linie: Haseldorfer Marsch, rote Linie: Alte Süderelbe, Anbindungsvariante 1, schwarze Linie: Dove Elbe

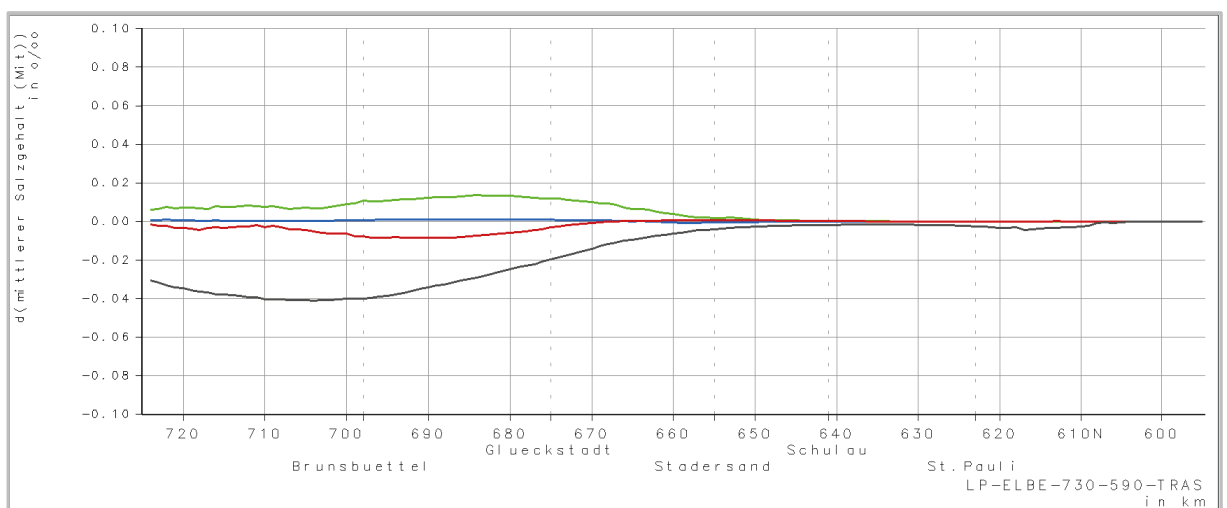


Bild 91: Differenzen des mittleren Salzgehaltes im Längsverlauf der Tideelbe während des Untersuchungszeitraums, jeweils Variante minus Referenzzustand. Blaue Linie: Pagensander Nebelbe, grüne Linie: Haseldorfer Marsch, rote Linie: Alte Süderelbe, Anbindungsvariante 1, schwarze Linie: Dove Elbe

7 Schlussfolgerung und Empfehlung

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse dienen als Grundlage für die Machbarkeitsstudien der vom Forum Tideelbe in der Phase 2 konzipierten Maßnahmen zum Wiederanschluss zusätzlichen Tidevolumens. Die Bewertung der Simulationsergebnisse zeigt:

- Alle untersuchten Maßnahmen zum Wiederanschluss zusätzlichen Tidevolumens sind geeignet das formulierte Ziel einer Tidehubreduktion in der Elbe und einer Abnahme des stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports zu erreichen.
- Die Wirkung der Maßnahmen ist in Abhängigkeit von Lage, zusätzlichem Tidevolumen und Zuflussquerschnitt unterschiedlich intensiv. Eine Reduktion des großräumigen Tidehubs tritt in der Größenordnung von wenigen cm auf und entspricht in Relation zum heutigen Tidehub einer Größenordnung von kleiner einem Prozent ($< 1\%$).
- Auf die Salzintrusion wirken sich die untersuchten Maßnahmen im betrachteten Analysezeitraum nicht wesentlich aus. Die Änderungen der Salzgehaltsverhältnisse liegen bei allen untersuchten Maßnahmen in der Größenordnung von kleiner $0,1\text{ ‰}$.
- Das Maß der großräumigen Reduktion des Tidehubs ist ein zuverlässiger Indikator für das Potential der Maßnahme auch den Stromauftransport von Sediment zu reduzieren.
- Im betrachteten Analysezeitraum entspricht eine Reduktion des adv. Restschwebstofftransports von beispielhaft $\sim 1000\text{ t/Tide}$ für die Maßnahme „Alte Süderelbe“ einer Reduktion von maximal $\sim 4\%$. Diese Zahl kann aufgrund der vorliegenden Untersuchungstiefe als Anhaltspunkt dienen, in welcher Größenordnung der Sedimenttransport beeinflusst wird. Es ist jedoch nicht zulässig, daraus eine entsprechende Reduktion der Baggermengen bzw. der Baggerkosten abzuleiten, da diese von vielen weiteren teilweise hier nicht modellierten Faktoren, wie z.B. das zukünftige Sedimentmanagement nach der Fahrrinnenanpassung, abhängen.
- Innerhalb der wieder angeschlossenen Fluträume ist mit Eintrag von Sedimenten zu rechnen, da die Durchströmung der Flächen gering und die Stillwasserzeiten hoch sind. Die dargestellten Sedimenteinträge müssen als Indiz betrachtet werden, dass die morphologische Entwicklung eines zusätzlichen Flutraumes von den örtlichen Verhältnissen bestimmt wird, die bei den drei Maßnahmen große Unterschiede aufweisen. Nach einer anfänglichen morphologischen Reaktion auf die örtlich veränderten Strömungsverhältnisse wird der Sedimenteintrag in die Dove Elbe im Wesentlichen von den Schwebstoffen gebildet werden, die mit dem Oberwasserzufluss über das Wehr Geesthacht in die Tideelbe eingetragen werden. Der Sedimenteintrag in die Alte Süderelbe ist gering wegen der Sedimentation der Schwebstoffe im Köhlfleet. Der Sedimenteintrag in die Haseldorfer Marsch ist im Modell höher wegen des Zuflusses über die flachen und derzeit verschlickten Nebenelben. Langfristig hängt der Sedimenteintrag von der Entwicklung des Schwebstoffinventars in der Unterelbe ab. Gelingt es, die derzeit hohen Schwebstoffgehalte z.B. durch ein optimiertes Sedimentmanagement zu reduzieren, wird auch der Eintrag in die Nebenelben und in die Haseldorfer Marsch geringer.

Die von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung ergänzend vorgeschlagene Vertiefung des stromauf gelegenen Abschnittes der Pagensander Nebelbe zeigt keine wesentliche großräumige Wirkung auf die Tidekennwerte des Wasserstands der Elbe. Die verbesserte Durchströmung der Pagensander Nebelbe führt zu einer Verringerung der Ebb- und Flutstromgeschwindigkeit im Bereich der Fahrrinne (Strom-km 660 - 665), wodurch Sedimentationsprozesse begünstigt werden. Insbesondere die Zunahme der Sedimentation im Bereich der Vertiefung reduziert weiter stromaufwärts zwischen Strom-km 640 und 660 den Stromauftransport der Schwebstoffe. Daher wird die strombauliche Maßnahme grundsätzlich als Ergänzung zur bisherigen Unterhaltungsstrategie für sinnvoll erachtet, da der Schwebstofftransport in Richtung Hamburg reduziert wird.

Für einen relativen Vergleich der maßnahmenbezogenen Wirkungen der Varianten ist die unterschiedliche Planungstiefe und Beteiligung der Stakeholder des Maßnahmenlayouts zu beachten. Durch die unterschiedlich starke Berücksichtigung der naturschutzfachlichen Belange und aktive Beteiligung der Bevölkerung sind aus wasserbaulicher Sicht Kompromisslösungen entstanden, die das rein wasserbauliche Potential der Maßnahme unterschiedlich stark eingeschränkt haben. Bei einer vertieften Betrachtung optimierter Maßnahmenvarianten wird empfohlen, auch die Kombination von verschiedenen Maßnahmen zu prüfen, da auch mehrere kleinere Maßnahmen in der Summe geeignet sein können, den Tidehub zu reduzieren und den stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports zu verringern.

Die untersuchten Maßnahmen können die Tideelbe nicht wieder in ein Gleichgewicht bringen. Das war auch nicht zu erwarten, denn der heutige hydromorphologische Zustand der Elbe ist das Ergebnis von 150 Jahren wasserbaulicher Maßnahmen aus Hafenbau, Fahrrinnenanpassungen und Küstenschutz. Gleichzeitig wirken sich heute auch großräumige Entwicklungen wie z.B. der Klimawandel negativ auf das Salzgehalts- und Sedimenttransportregime aus. Die Maßnahmen tragen aber aus wasserbaulicher Sicht ein Stück dazu bei, die bisherigen historischen Entwicklungen zu reduzieren. Eine signifikante Reduktion der Baggermengen kann dadurch allerdings nicht erreicht werden. Dazu sind Maßnahmen im Sedimentmanagement notwendig und wirkungsvoller, z.B. ein dauerhafter Austrag von Feinsedimenten und ein adaptives Sediment-/Ästuarmanagement.

Aus wasserbaulicher Sicht wird für weitergehende Untersuchungen empfohlen, neben einer vertieften Betrachtung optimierter Maßnahmenvarianten auch den Einfluss eines adaptiven Sedimentmanagement zu berücksichtigen.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, September 2020

8 Literaturverzeichnis

Boehlich, Marcus J.; Strotmann, Thomas (2020): Das Elbeästuar. Die Küste Nr. 87, DOI <https://doi.org/10.18171/1.087106>

Bergemann, M. (2005): Berechnung des Salzgehaltes der Elbe. Hg. v. Wassergütestelle Elbe.
Bundesanstalt für Wasserbau (2006). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Tidedynamik und Salzgehalt (BAW-Gutachten A39550310062)

Bundesanstalt für Wasserbau (2007): Mittel- und langfristiges Strombaukonzept für die durch Tide beeinflusste Elbe, Systemstudie zur Auswirkung der Schaffung von Fluträumen im Bereich der „Doveelbe“ (BAW-Gutachten A39550310069)

Bundesanstalt für Wasserbau (2007): Mittel- und langfristiges Strombaukonzept für die Tideelbe, Systemstudie zur Auswirkung der Schaffung von Flutraum im Bereich der „Alten Süderelbe“ (BAW-Gutachten, A39550310069)

Bundesanstalt für Wasserbau (2014a): Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des Tideelbekonzeptes. Bericht zur Wirkung der Maßnahmen Alte Süderelbe (BAW-Gutachten, B39550310172-5)

Bundesanstalt für Wasserbau (2014b): Untersuchungen des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des „Tideelbekonzeptes“. Abschlussbericht (BAW-Gutachten, A39550310172-6)

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.

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, V. and 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, V. and 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, V. and Zanolli, P. (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.

Hagen, R. et al. (2020): Validierungsdokument EasyGSH-DB. Teil: UnTRIM2 - SediMorph - UnK. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

H. Heyer, K. Schrottke (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht: AufMod ; gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. Hg. v. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) [u.a.].

Reinert, D. et al. (2020): DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System. Hg. v. Deutscher Wetterdienst.

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2016): Digitales Geländemodell des Wasserlaufes. DGM-W 2016 der Unter- und Außenelbe. Online verfügbar unter www.kuestenden.de.

Weilbeer, H., Winterscheid, A., Entelmann, I., Strotmann, T., Shaikh, S., Vaessen, B. (2020): Analyse der hydrologischen und morphologischen Entwicklungen in der Tideelbe für den Zeitraum 2013-2018. Zur Veröffentlichung eingereicht in "Die Küste".

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, September 2020

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Winkel

gez. Weilbeer

Dr. N. Winkel

Dr. H. Weilbeer

gez. Uliczka

Dipl. Ing (FH) I. Uliczka

gez. Ortiz

V. Ortiz

gez. Hammrich

Dr. A. Hammrich

