

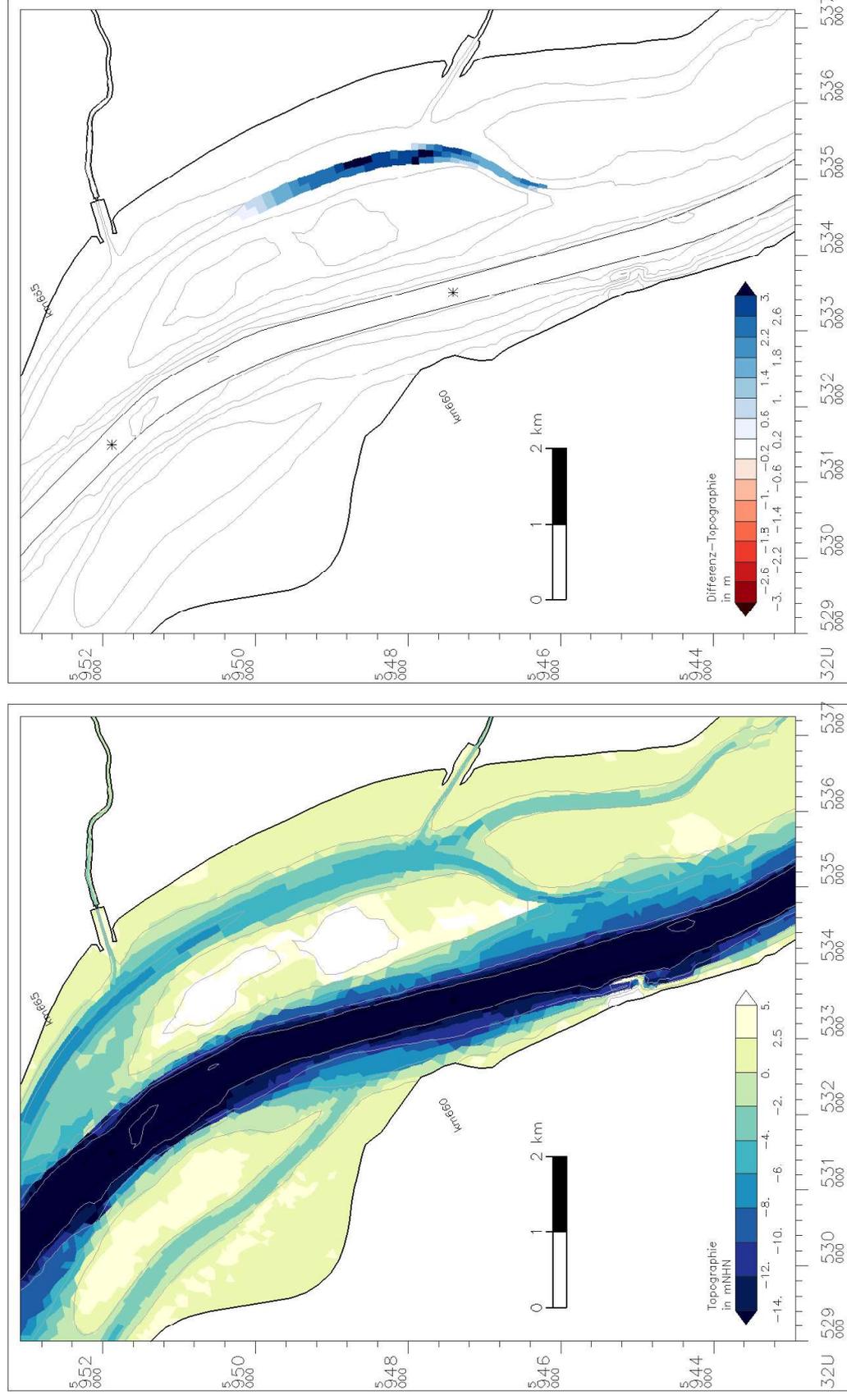
## 5 Ergebnisse

### 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 m<sup>3</sup> Sedimente per Wasserinjektion abgetragen. Für die vorliegende Studie wurde hingegen eine Maßnahme entwickelt, die mit ~1,5 Mio. m<sup>3</sup> 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. m<sup>3</sup> 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 Nebeneelbe. 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  $\pm 0.5$  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.

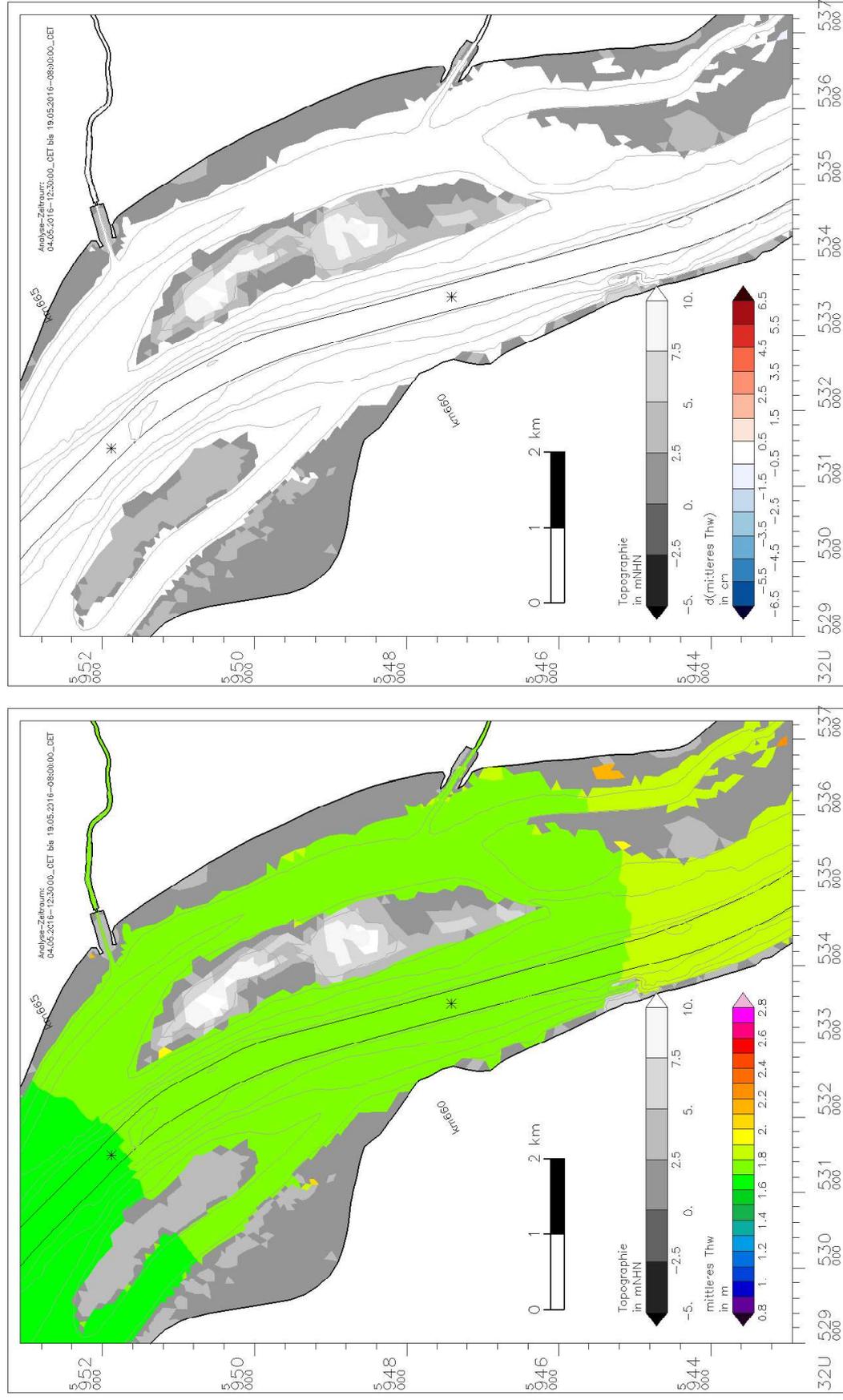


Bild 12: Mittleres Tidehochwasser. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

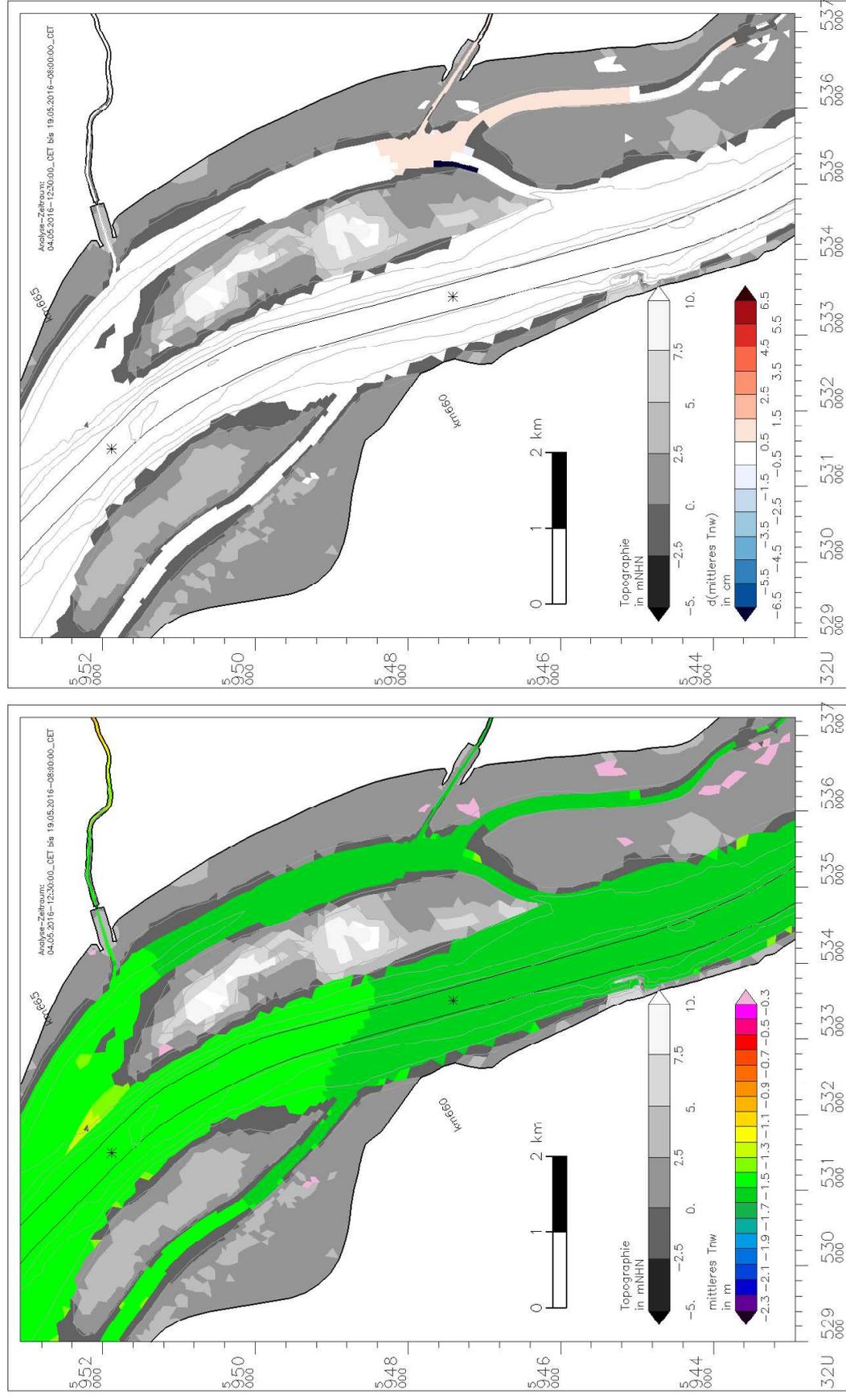


Bild 13: Mittleres Tideniedrigwasser Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

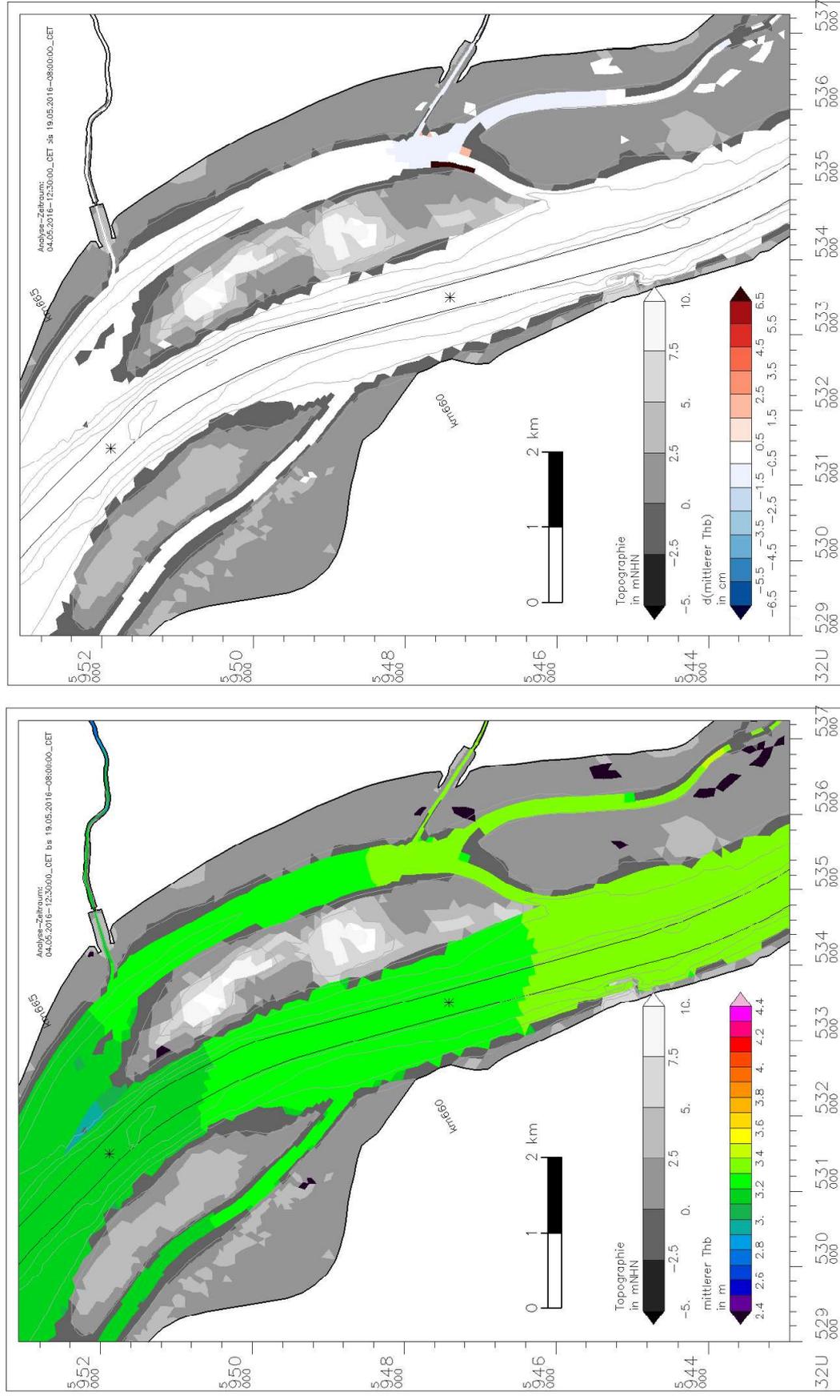


Bild 14: Mittlerer Tidehub Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

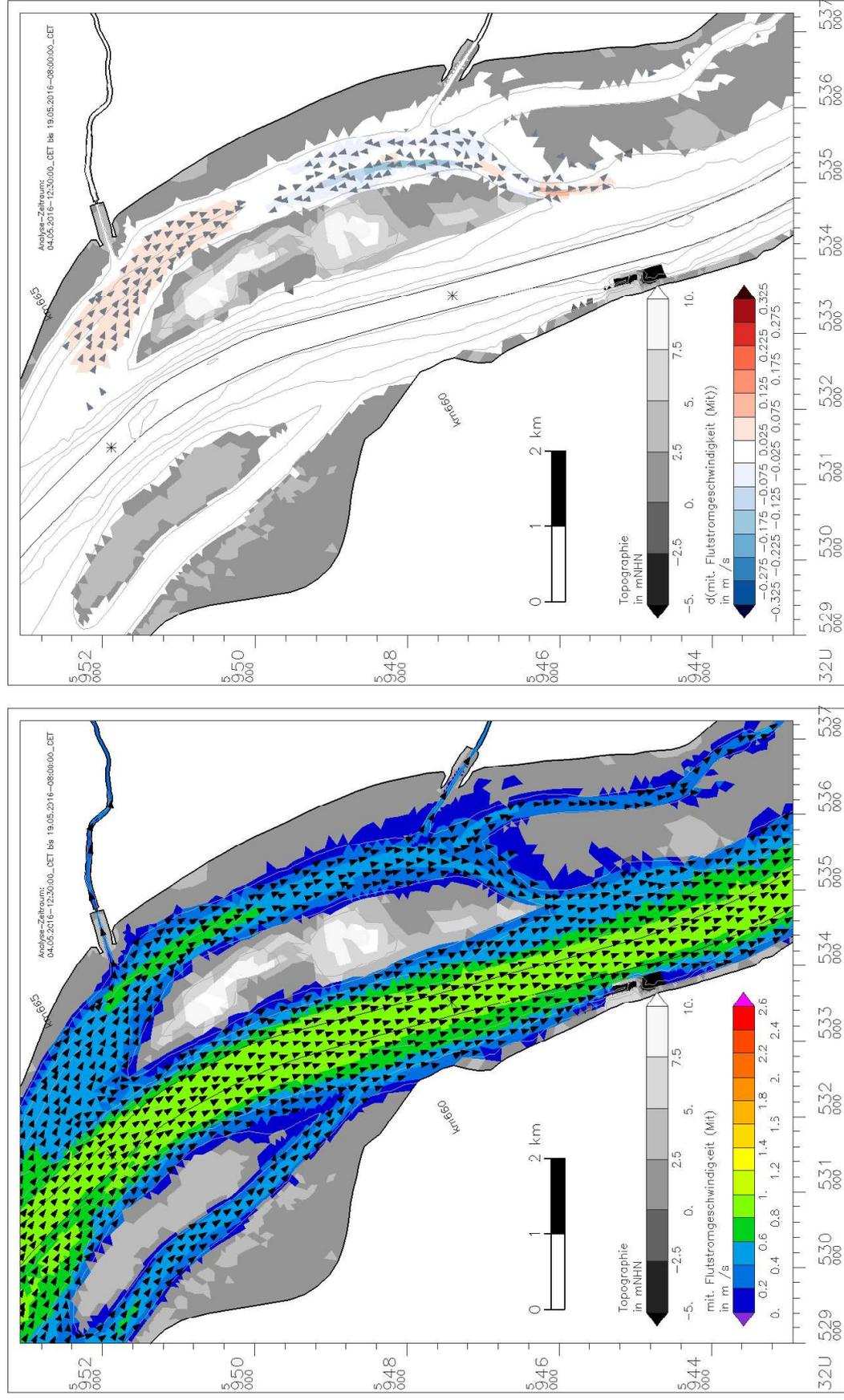


Bild 15: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

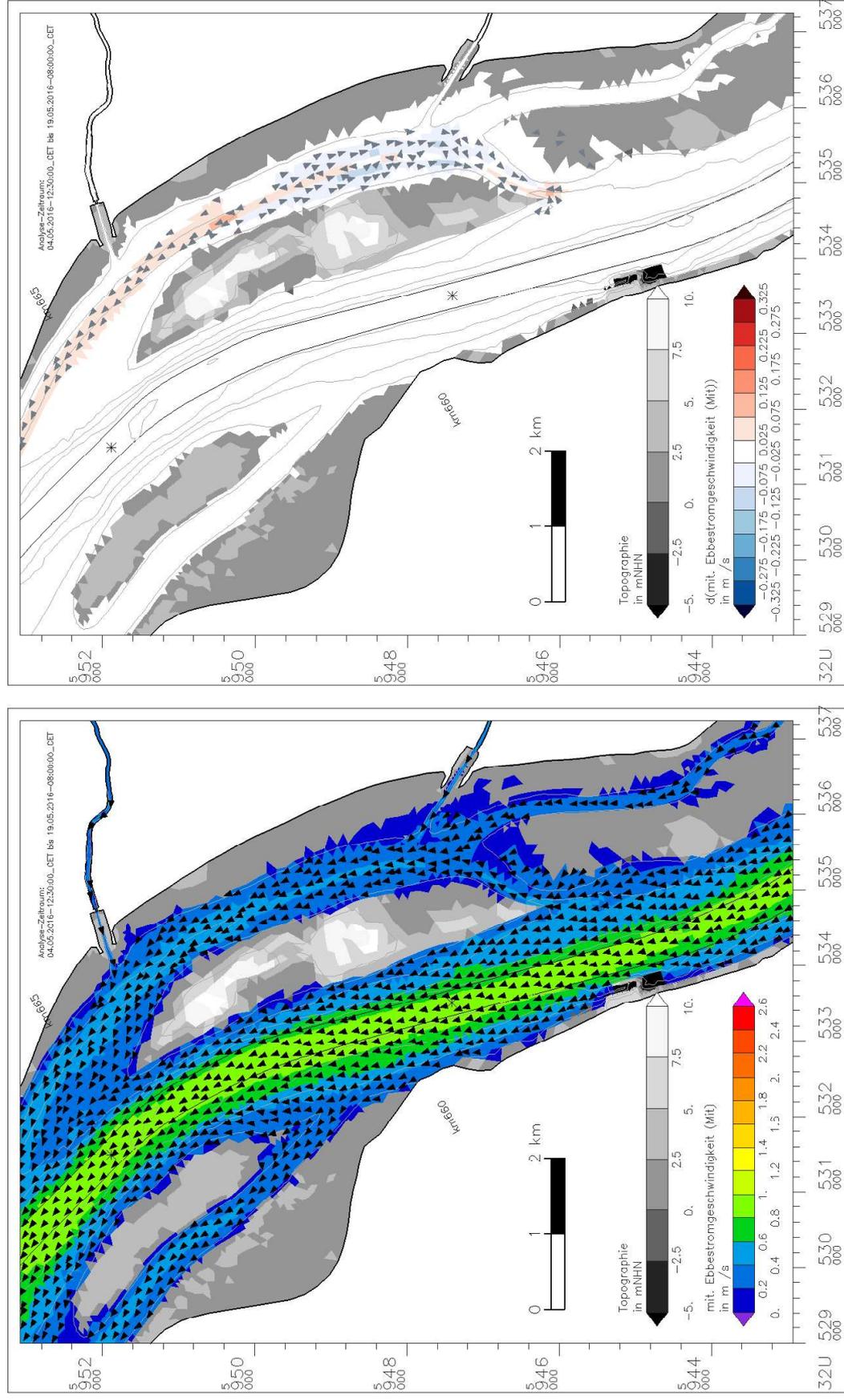


Bild 16: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

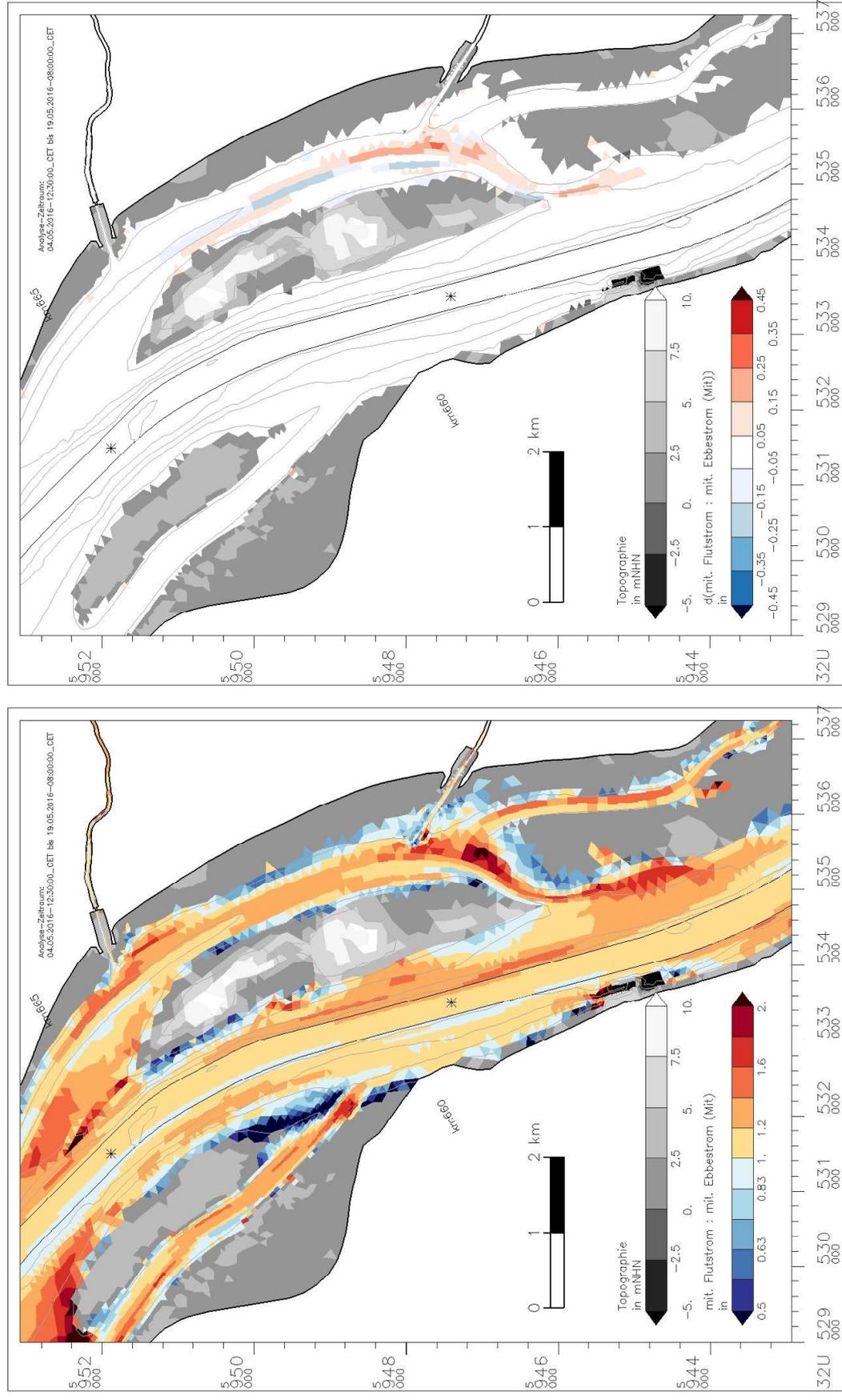


Bild 17: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

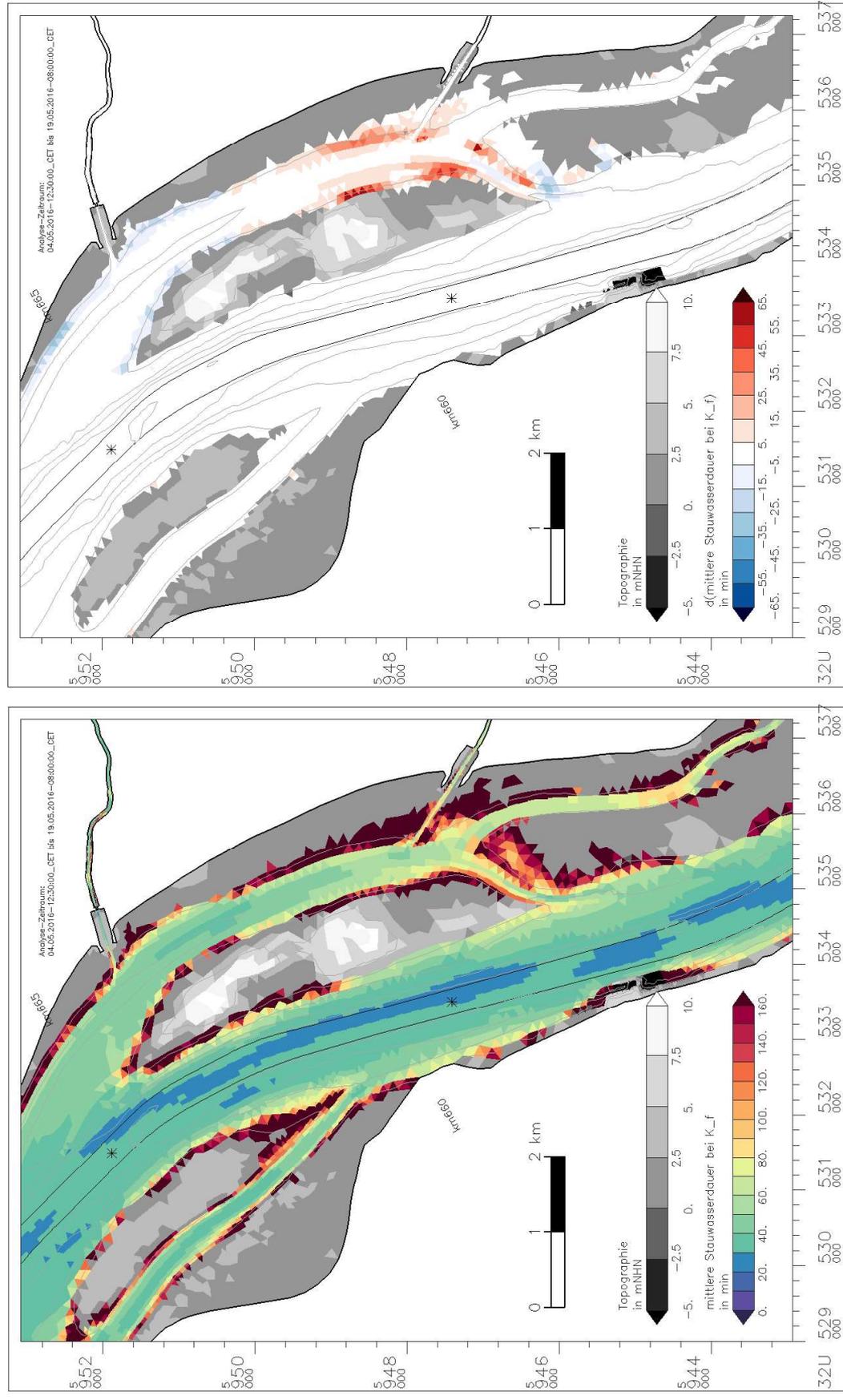


Bild 18: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung. Bild links: Variante; Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

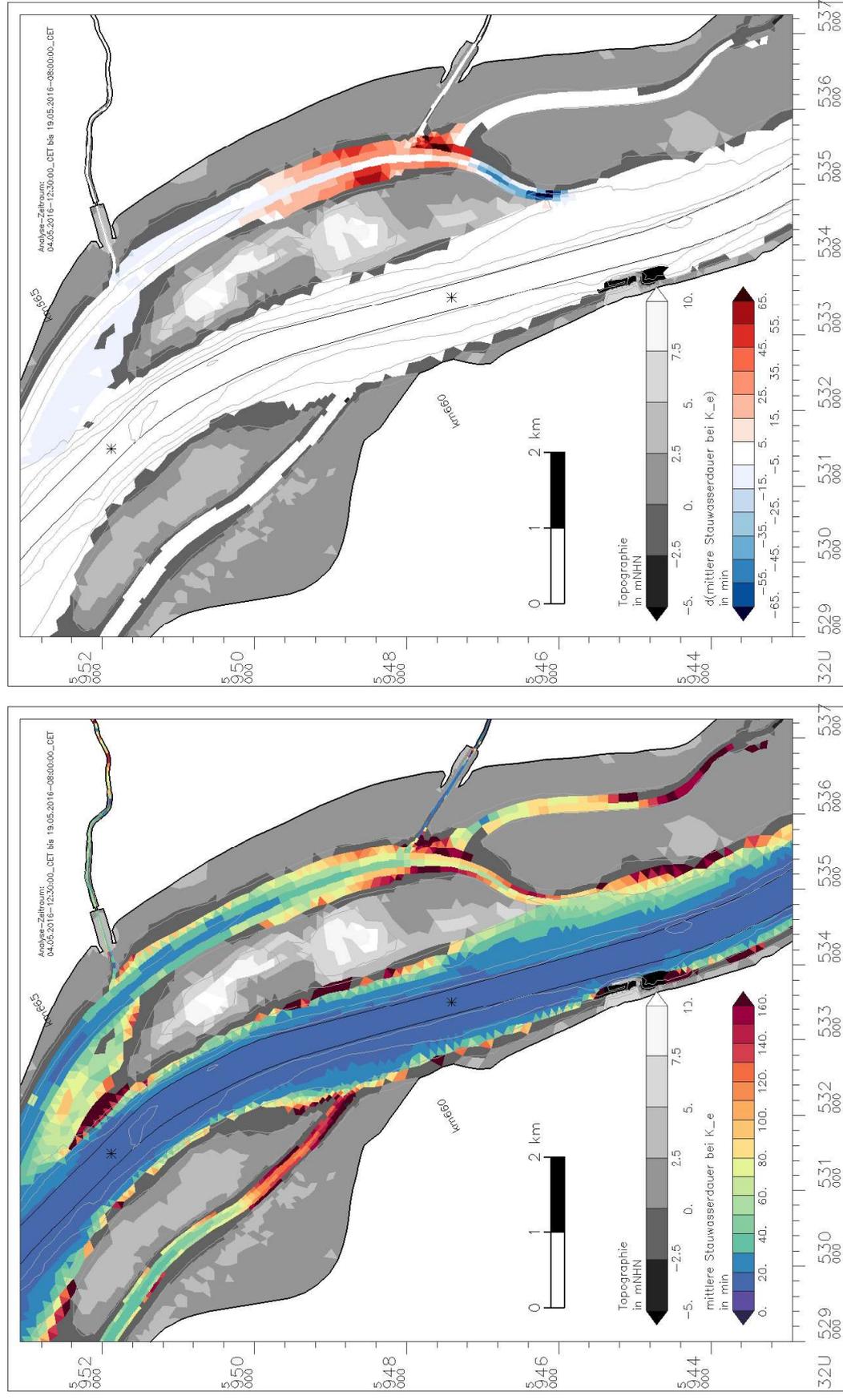


Bild 19: Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung. Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

Die Veränderungen der Hydrodynamik wirken sich auch auf den Schwebstofftransport aus. Der mittlere Schwebstoffgehalt in der Pagensander Nebanelbe ( $0,10-0,20 \text{ kg/m}^3$ ) ist sowohl im Ebbstrom als auch im Flutstrom geringer als im Hauptstrom ( $0,20-0,35 \text{ kg/m}^3$ ). Im Verlauf der Pagensander Nebanelbe 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 Nebanelbe 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  $20 \text{ t/m/Tide}$  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 Nebanelbe 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 Nebanelbe 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 Nebanelbe 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.

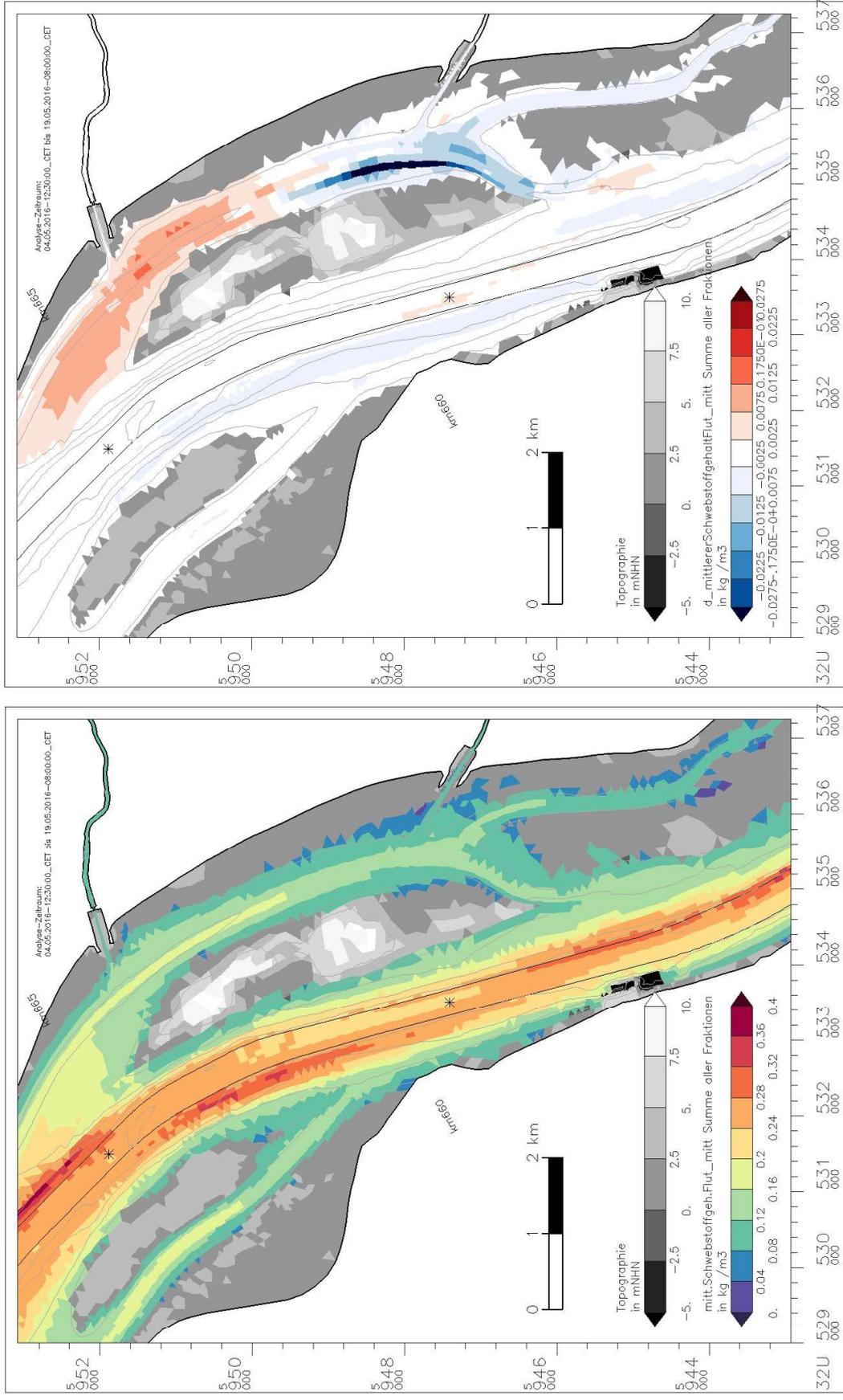


Bild 20: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Flut) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante (Summe aller Fraktionen). Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

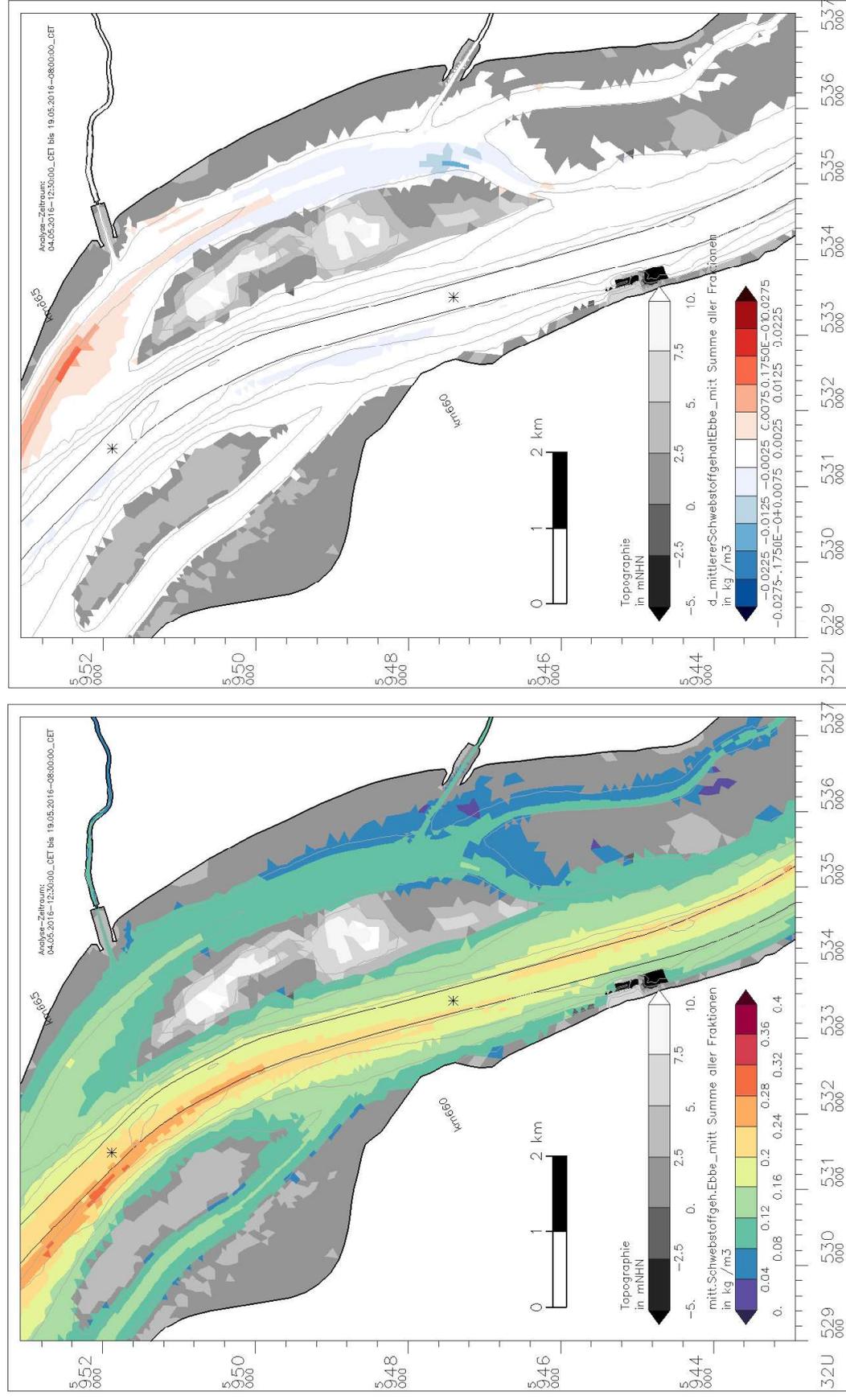


Bild 21: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Ebbe) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante, Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

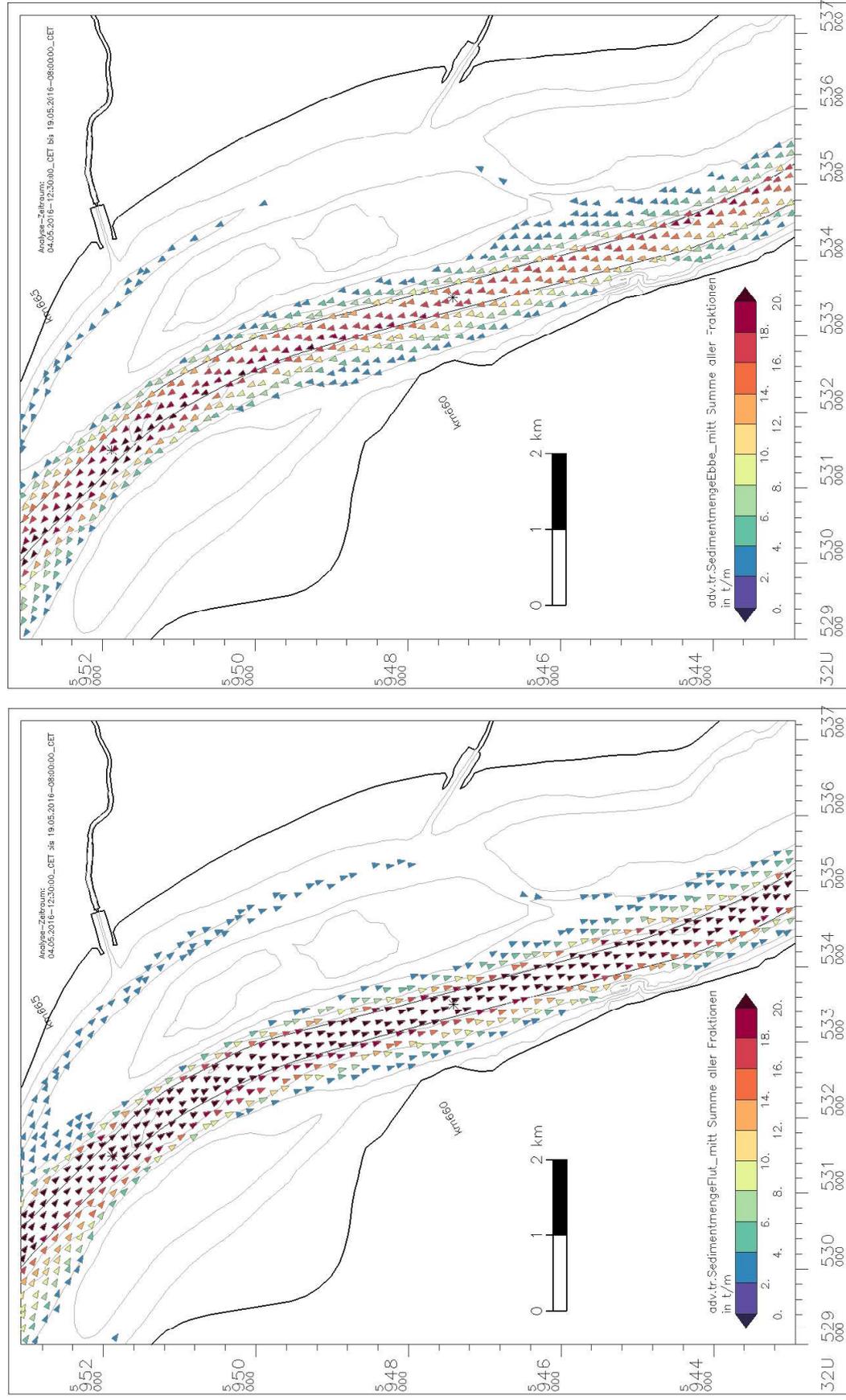


Bild 22: Mittlere Sedimentmenge/Tide (Summe aller Fraktionen), links Flut, rechts Ebbe. Die Flutstromdominanz ist erkennbar

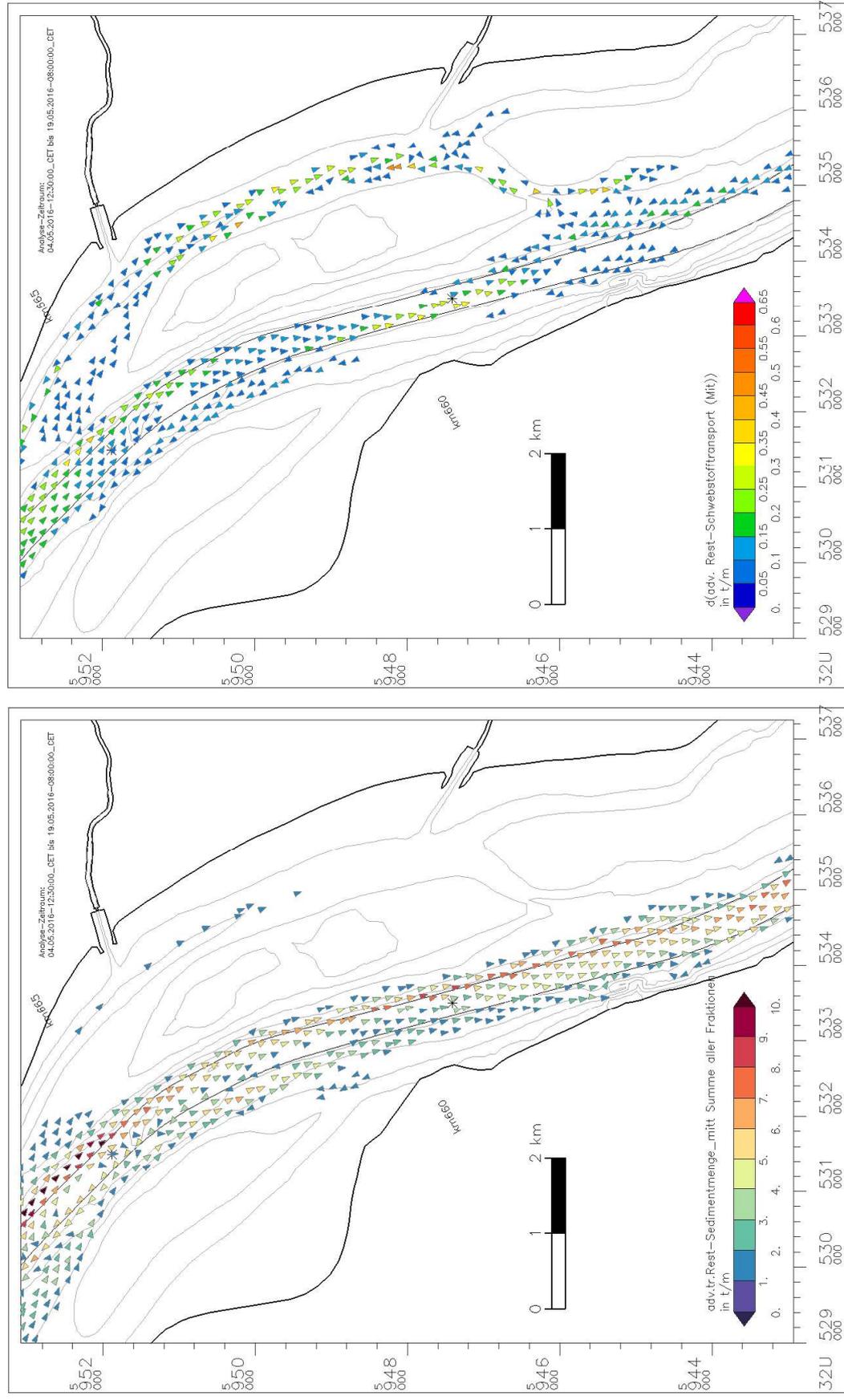


Bild 23: Rest-Schwebstofftransport (adv.) (Summe aller Fraktionen). Bild links: Variante (Summe aller Fraktionen). Bild rechts: Differenz (Variante minus Referenz)

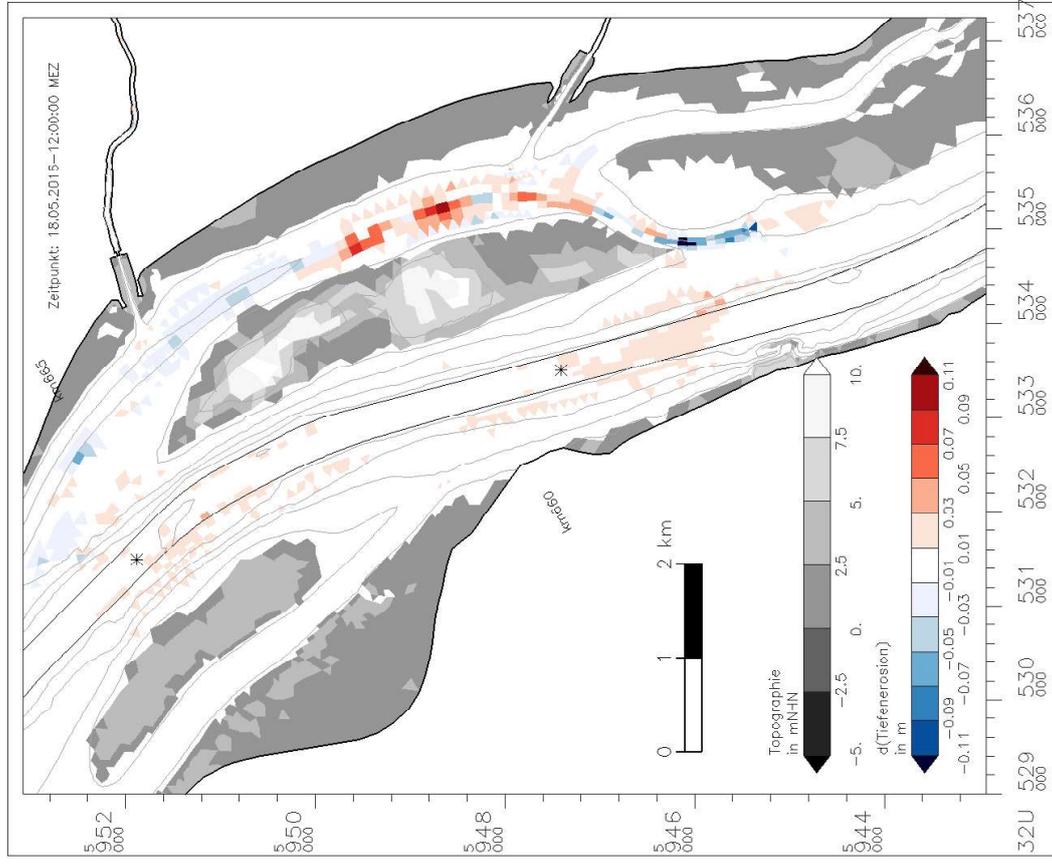


Bild 24: Änderung der Sedimentation nach 4 Wochen Simulationszeit (Variante minus Referenz)

### 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).

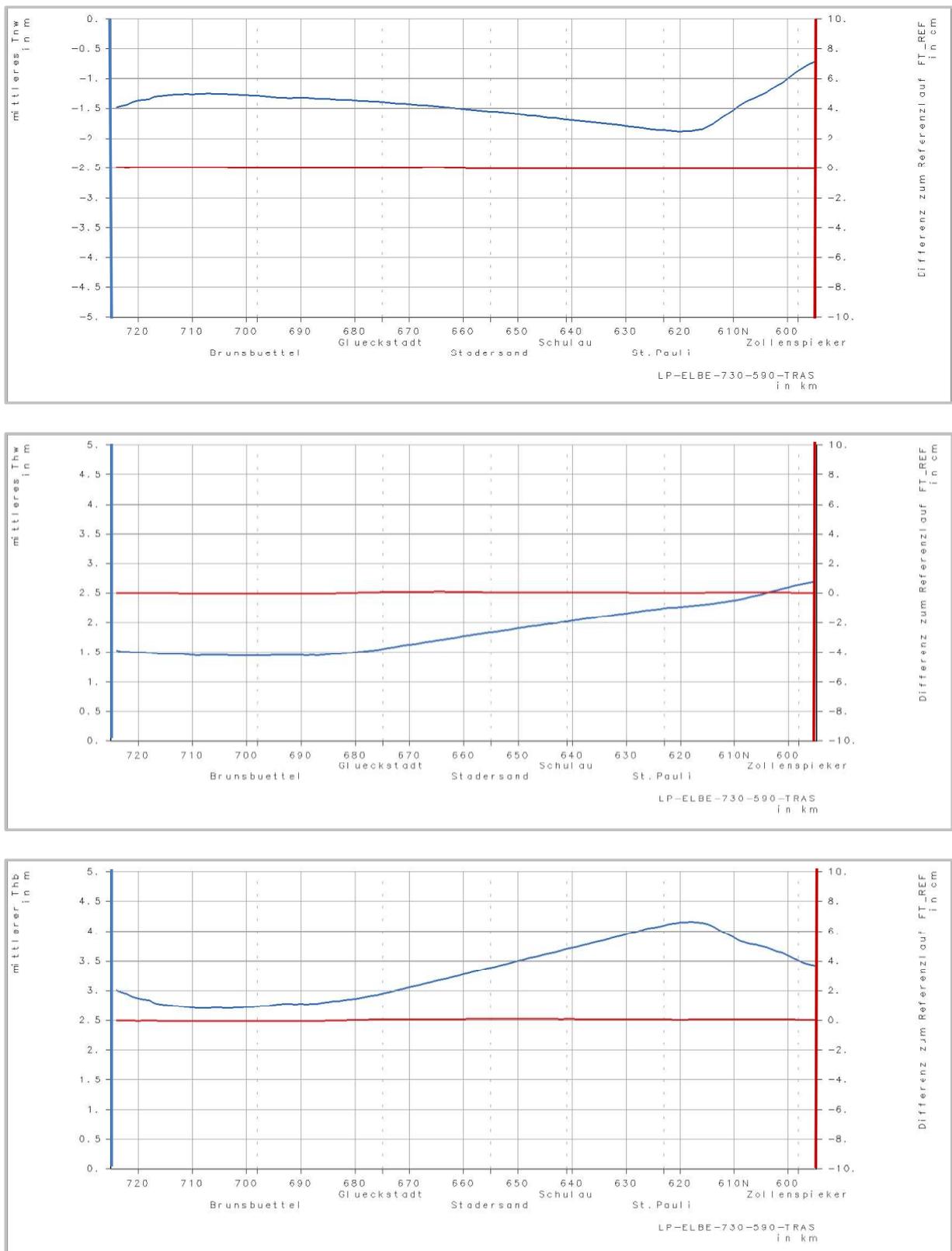


Bild 25: Mittleres Tidehochwasser (oben), mittleres Tideniedrigwasser (Mitte) und mittlerer Tidehub (unten) im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linien) während des Untersuchungszeitraums. Die roten Linien zeigen jeweils die Differenz (Variante minus Referenz)

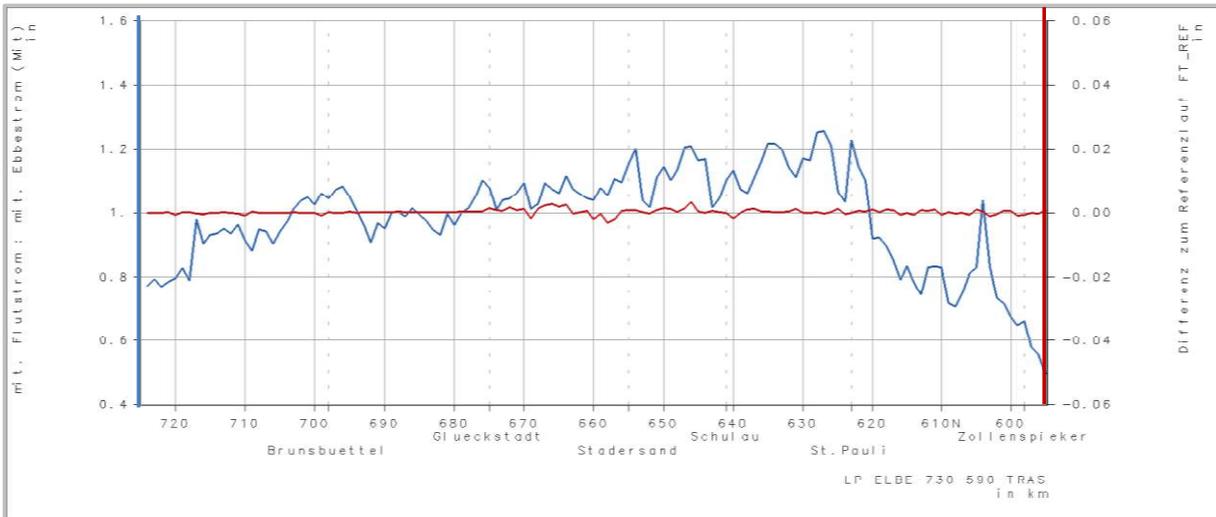


Bild 26: Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)

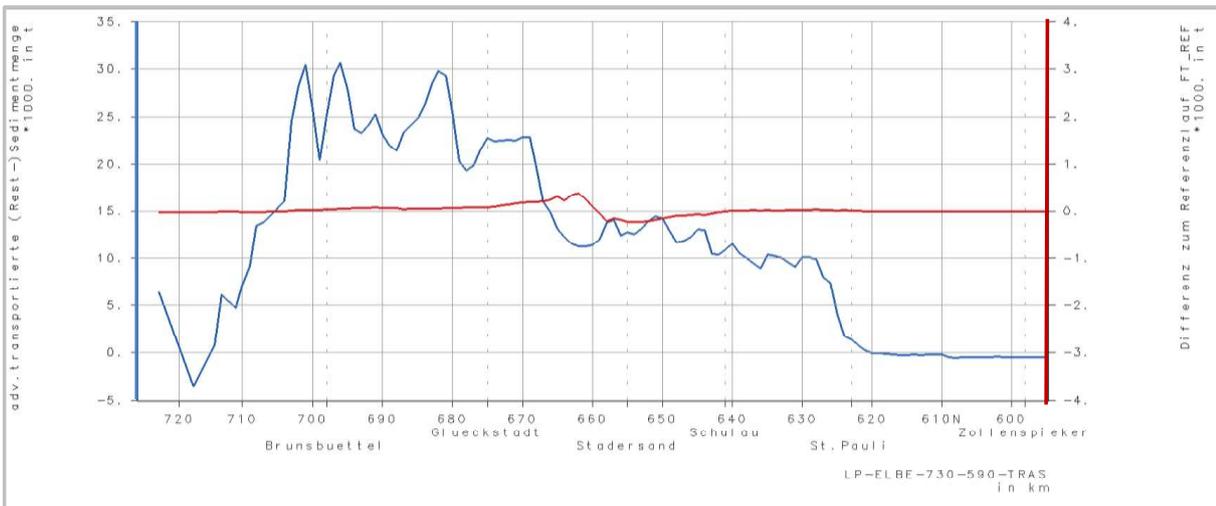


Bild 27: Mittlerer Rest-Schwefstofftransport/Tide im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante - Referenz)

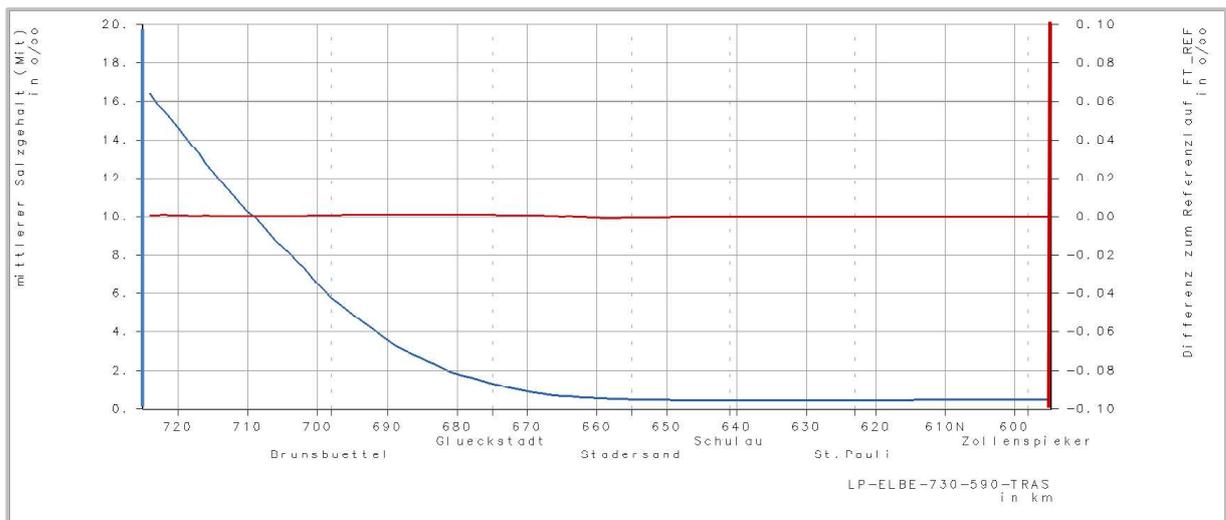


Bild 28: Mittlerer Salzgehalt im Längsverlauf der Tideelbe (blaue Linie) während des Untersuchungszeitraums. Die rote Linie zeigt Differenz (Variante minus Referenz)

## 5.2 Tideanschluss Haseldorfer Marsch

### 5.2.1 Gestaltung der Maßnahme

Der Anschluss der Haseldorfer Marsch erfolgt über die Haseldorfer Binnenelbe und über das Dwarssloch, 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.