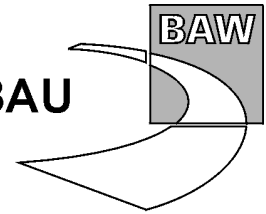
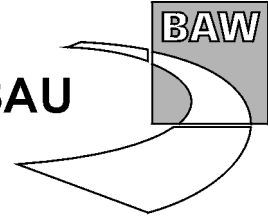




BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau



**Potenzialuntersuchung
zur Unter- und Außenelbe
1. Teilbericht
Ergänzender Bericht zur prinzipiellen
Vorabschätzung möglicher Auswirkungen
einer weiteren Fahrrinnenvertiefung**



Potenzialuntersuchung zur Unter- und Außenelbe
1. Teilbericht
Ergänzender Bericht zur prinzipiellen Vorabschätzung
möglicher Auswirkungen einer weiteren Fahrrinnenvertiefung

Auftraggeber: Freie und Hansestadt Hamburg
Strom- und Hafengebäude Hamburg, Dalmannstr. 1, 20457 H

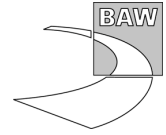
Auftrag vom: 1. Juni 2001, Az.: 241, Wass-Elbe

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. 5.03.10015

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dr. Ing. Flügge
Dr.-Ing. Heyer
Dipl.-Ozeanogr. Boehlich
Dr. rer. nat. Rudolph

Hamburg, 18. Juni 2002

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



Inhaltsverzeichnis

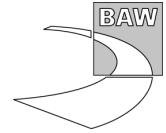
Seite

1	Veranlassung	1
2	Untersuchungskonzeption	2
3	Modelltopographie	4
4	Kennzeichnende Tidewasserstände	5
5	Flut- und Ebbedauer	9
6	Strömungen	12
7	Sturmflut	19

Bildverzeichnis

Seite

Bild 1: Ausdehnung und Tiefenverteilung des „Elbe-Modells“ der BAW	4
Bild 2: Topografischer Längsschnitt entlang der Fahrrinne	5
Bild 3: Längsschnitt der simulierten Thw- und Tnw-Stände (Simulation A1 und A2)	6
Bild 4: Ausbaubedingte Thw-Änderungen (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	7
Bild 5: Ausbaubedingte Tnw-Änderungen (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	8
Bild 6: Ausbaubedingte Thb-Änderungen (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	9
Bild 7: Längsschnitt der Flut- und Ebbedauer (Simulation A1 und A2)	10
Bild 8 Verhältnis von Flut- zu Ebbedauer in den deutschen Ästuarien (Simulation)	11
Bild 9 Änderung der Flutdauer durch Ausbau (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	12
Bild 10 Längsschnitt der Flut- und Ebbestromdauer (Simulation A1 und A2)	13
Bild 11: Längsschnitt mittlerer Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (A1 und A2)	14
Bild 12: Längsschnitt maximaler Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (A1 und A2)	15
Bild 13: Änderung mittlerer Flutstrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	17
Bild 14: Änderung mittlerer Ebbestrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	17
Bild 15: Änderung maximaler Flutstrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	18
Bild 16: Änderung maximaler Ebbestrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)	18
Bild 17: Längsschnitt Topographie und Sturmflutscheitel (Simulation A1 und D1)	20
Bild 18: Änderung Sturmflutscheitel durch Ausbau (D1 - A1)	21



1 Veranlassung

Die BAW hat im Juni 2001 einen ersten Teilbericht "Potenzialuntersuchung zur Unter- und Außenelbe" vorgelegt. Ziel war eine prinzipielle Vorabschätzung zu möglichen Auswirkungen einer weiteren Fahrrinnenvertiefung auf der Grundlage systematischer Variationen des Systems Elbeästuar, die absichtlich nicht auf konkrete Bemessungsschiffe und für diese angepasste Fahrrinntiefen und -breiten ausgerichtet wurden. Da derzeit noch keine vollständige Neuaufnahme der Topographie des Elbeästuars nach der Fahrrinnenanpassung im Jahre 1999 vorliegt, ist die Untersuchung konkreter Ausbauvarianten auch noch nicht sinnvoll. Im Rahmen der Vorabschätzung wurde im Gutachten auch eine Strategie zur hydraulischen Kompensation ausbaubedingter Veränderungen der kennzeichnenden Tidewasserstände durch Erläuterung der Wirkung einer Abdämmung der Medemrinne eingeführt. Auch das für die Abdämmung erforderliche Strombauwerk wurde bisher lediglich im Sinne einer prinzipiellen Systemvariation im Modell berücksichtigt. Fragen der Optimierung hinsichtlich Höhe und Durchlässigkeit des Bauwerks wurden aufgrund des prinzipiellen Charakters der Untersuchung noch nicht weiter bearbeitet.

Der grundsätzliche Charakter der durchgeführten Systemuntersuchungen wird in der mit dem Auftraggeber abgestimmten Untersuchungskonzeption deutlich: Es sollte das Systemverhalten der Unter- und Außenelbe durch schrittweise Vertiefungen um 1m, 2m und 3m (durchgängiges Abschälen der Fahrrinnensohle) für mittlere Tideverhältnisse simuliert und fachwissenschaftlich interpretiert werden. Dabei sollte auch die Wirkung der Rauheit der Gewässersohle, die sich aus den Sohlformen in der Fahrrinne ergeben, durch vergleichende Betrachtungen prinzipiell abgeschätzt werden. Die Veränderung der Sturmflutdynamik wurde auf Grundlage einer bekannten Sturmflut im Zusammenhang mit der Vertiefung um 3 m abgeschätzt.

Im Gutachten (1. Teilbericht - Potenzialuntersuchung zur Unter- und Außenelbe - prinzipielle Vorabschätzung) wurde im Kapitel 3 eine fachwissenschaftliche Interpretation der Simulationsergebnisse für eine Vertiefung um einen Meter im Sinne einer vergleichenden Analyse der verschiedenen Systemvariationen gegeben. Im hiermit vorgelegten Ergänzungsbericht werden die wesentlichen Einzelergebnisse zu diesem Gutachten zusammen gestellt und erläutert. Die Ergebnisse wurden mit einer unvollständigen (in weiten Bereichen veralteten) Topographie mit einem zweidimensionalen Modell des Elbeästuars ermittelt. Es handelt sich somit um eine grobe Betrachtung im Sinne einer Systemstudie, die zunächst grundlegende Erkenntnisse zur Fragen nach den Möglichkeiten und Wirkungen eines weiteren Ausbaus der Fahrrinne durch vergleichende Interpretation der Ergebnisse darstellt.

2 Untersuchungskonzeption

Die Untersuchungskonzeption gründet auf einer systematischen Variation der Topographie des Modells und des in der jeweiligen Modellsimulation verwendeten Reibungsansatzes.

Variation der Fahrrinntiefen im Modell:

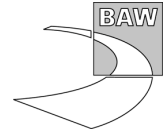
- A. Referenz-Zustand: Modelltopografie aus Peildaten der Jahre bis 1999 einschließlich Berücksichtigung der Verkehrssicherungspeilungen in der Fahrrinne aus dem Jahre 2000 - im folgenden als Ist-Zustand bezeichnet.
- B. Soll-Zustand 1: Vertiefung der durch die Peilungen aufgenommenen Fahrrinne um 1 m einschließlich aller Übertiefen im Abschnitt zwischen Altenwerder und Elbe Km 748
- C. Soll-Zustand 2: Vertiefung der Fahrrinne wie unter B jedoch um 2 m
- D. Soll-Zustand 3: Vertiefung der Fahrrinne wie unter B jedoch um 3 m (siehe auch Bild 17)

Analysen der Fächerlotungen, die vor der letzten Fahrrinnenanpassung als Nullmessung ausgeführt wurde, haben ergeben, dass sich zur Zeit der Peilungen insbesondere in der Fahrrinne Sohlformen (Dünen) auf einer aus Teilabschnitten gebildeten Gesamtstrecke von mehr als 70 km befinden, deren Höhen generell über einem Meter liegen und in bestimmten Bereichen 5 bis 6 Meter erreichen. Die Längen dieser Sohlformen lagen zur Zeit der Datenerfassung zwischen 30 und 175 m. Diese Transportkörper bilden wirksame Formrauheitselemente, die bei zukünftigen Untersuchungen zum Entwicklungspotenzial des Elbeästuras nicht vernachlässigt werden können. Im ersten Teilschritt der Untersuchungen wurde daher mit einem generalisierten Ansatz wie folgt verfahren:

Variation der Reibung:

1. Berücksichtigung der Sohlrauheit wie in den bisherigen Untersuchungen zur Fahrrinnenanpassung (einheitlicher Reibungsbeiwert im gesamten Untersuchungsgebiet von $1,85 \cdot 10^{-3}$, Formulierung nach Taylor)
2. Berücksichtigung des vierfachen Reibungsbeiwerts innerhalb der Fahrrinne im Ästuarabschnitt zwischen Altenwerder und Elbe Km 748 (analog zur Trasse der letzten Fahrrinnenvertiefung) und des 0,5 fachen Reibungswertes ausserhalb dieser Trasse.

Anmerkung: Die Bodenschubspannung ergibt sich nach dem quadratischen Reibungsgesetz aus dem Produkt aus der Wasserdichte, dem Schubspannungskoeffizienten und dem Quadrat der tiefengemittelten Geschwindigkeit: $\tau_0 = \rho C_D U^2$. Der Schubspannungskoeffizient $C_D = \alpha (z_0/h)^\beta$ ist abhängig von der Wassertiefe h und der sog. Rauheitslänge z_0 , wobei nach dem Manning-Strickler Gesetz $\beta = 1/3$ gesetzt wird. Für die hydraulische rauhe Sohle der Elbe kann $z_0 = k_S / 30$ gesetzt werden, wobei k_S die sogenannte äquivalente Sandrauheit nach Nikuradse bedeutet. Die äquivalente Sandrauheit dient hier als hydraulische Rauheitskenngröße, die als ein integrales Rauheitsmaß angesehen wird, welches in der Lage ist, die Wirkung der Rauheit der Sohle auf die Strömung zu quantifizieren. In den hier erläuterten Untersuchungen wurde für die Fahrrinne vorausgesetzt: $4 C_D^{\text{glatt}} = C_D^{\text{rauh}}$. In den glatten Bereichen der Fahrrinne kann alleinige Kornrauheit nach dem Ansatz $k_S^{\text{Korn}} = 3d_{90}$ angenommen werden. Aus den genannten Zusammenhängen ergibt sich damit: $4 \alpha (3 d_{90} / 30 h)^{1/3} = \alpha (k_S^{\text{Form}} / 30 h)^{1/3}$. Wenn nun z.B. angenommen wird, dass



das $d_{90} = 0,7$ mm und die Wassertiefe 18 m beträgt, ergibt sich aus vorstehender Gleichung für die äquivalente Sandrauheit $k_S^{\text{Form}} = 0,134$ m, ein Wert, der die natürlichen Verhältnisse an der Elbe überschätzt. Der im Rahmen der Untersuchung für die Fahrrinne angesetzte vierfache Reibungsbeiwert stellt somit eine extreme Systemvariation dar, die lediglich zur Interpretation der Ergebnisse aus der "glatten" Simulation herangezogen werden sollen.

In zukünftigen Untersuchungsschritten sollen realistische räumlich differenzierte Sohlreibungsbeiwerte funktional aus den Höhen und Längen der Sohlformen (ermittelt aus neuen Fächerlotpeilungen) abgeleitet werden. Im hier betrachteten Untersuchungsrahmen geht es zunächst allein um die Frage genereller Ausbauwirkungen.

Aus den mit dem Auftraggeber vereinbarten Variationen der Fahrrinntiefen ergeben sich (mit den beiden Reibungsmodellen) insgesamt 8 Modellsimulationen für mittlere Tideverhältnisse. Die Berechnungen wurden mit dem bekannten mathematischen Modell des Elbeästuars der BAW für den Zeitraum vom 16. Juli 1997 12:00 Uhr bis zum 19. Juli 1997 0:00 Uhr durchgeführt:

- A1 Simulation Ist-Zustand (mittlere Tideverhältnisse) mit Reibungsansatz gemäß 1.
- A2 Simulation Ist-Zustand (mittlere Tideverhältnisse) mit Reibungsansatz gemäß 2.
- B1 Simulation Soll-Zustand 1 (Vertiefung um einen Meter - mittlere Tideverhältnisse) mit Reibungsansatz gemäß 1.
- B2 Simulation Soll-Zustand 1 mit Reibungsansatz gemäß 2.
- C1 Simulation Soll-Zustand 2 (Vertiefung um zwei Meter - mittlere Tideverhältnisse) mit Reibungsansatz gemäß 1.
- C2 Simulation Soll-Zustand 2 mit Reibungsansatz gemäß 2.
- D1 Simulation Soll-Zustand 3 (Vertiefung um drei Meter - mittlere Tideverhältnisse) mit Reibungsansatz gemäß 1.
- D2 Simulation Soll-Zustand 3 mit Reibungsansatz gemäß 2.

Alle Soll-Zustände wurden ohne Anpassungen der Böschungen und ohne morphologischen Nachlauf vorgegeben. Die Bezeichnungen A1 bis D2 werden im nachfolgenden Text weiter verwendet. Die in den Grafiken verwendeten Abkürzungen sind diesen wie folgt zuzuordnen:

IST ~ A1, IST_RAUH ~ A2,
V1 ~ B1, V1rauh ~ B2,
V2 ~ C1, V2rauh ~ C2,
V3 ~ D1, V3rauh ~ D2

Die Oberwasserführung betrug während der Simulationszeit 606 bis 707 m³/s.

Ein weiterer Simulationslauf wurde für die Bemessungsturmflut (mit Parametrisierung der Bodenreibung wie in den Sturmflutuntersuchungen zur letzten Fahrrinnenanpassung) durchgeführt.

Da die hiermit vorgelegten Untersuchungen noch keine konkreten Planungen für Strom- und Ausbaumaßnahmen behandeln, werden die Simulationsergebnisse lediglich auf einem Längsprofil ausgewertet, das sich an der Fahrrinnenmitte orientiert. Auf dieser Grundlage können die wesentlichen Ergebnisse der Tidekennwertanalyse in kompakter Form dargestellt und nachvollzogen werden.

3 Modelltopographie

Das Modellgebiet umfasst einen rechteckigen Bereich zwischen den Koordinaten 3454950,00 / 6007600,00 im Nordwesten (Deutsche Bucht westlich Büsum) und 3588600,00 / 5918450,00 im Südosten (südlich Wehr Geesthacht). Es ist in Bild 1 dargestellt. Die seeseitige Berandung ist durch die Verbindungslinie Sahlenburg – Neuwerk – Nigehörn (den höchsten Watrückten folgend) – Bake A – nach Norden bis Höhe nördlich Blauortsand – nach Osten bis an die Schleswig-Holsteinische Küste) festgelegt.

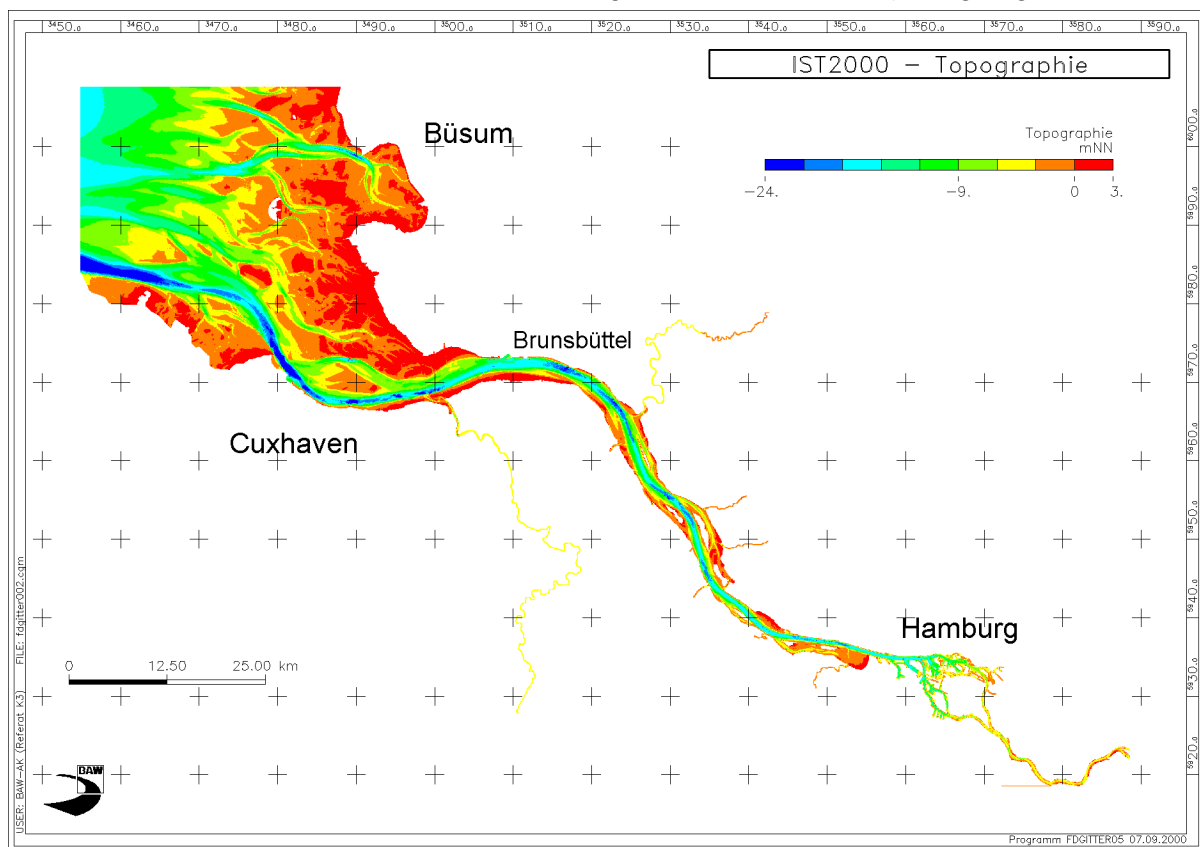


Bild 1: Ausdehnung und Tiefenverteilung des „Elbe-Modells“ der BAW

Das Gebiet ist mit einem quadratischen Raster von 25m Seitenlänge aufgelöst, so daß sich eine Matrix mit 5346 (West – Ost Ausdehnung) * 3566 (Nord – Süd Ausdehnung) Elementen ergibt, von denen 2.535.263 Elemente im Wasser liegen, d.h. sogenannte „feuchte Elemente“ sind. Diese „feuchten Elemente“ sind mit Tiefenwerten belegt worden, die aus den

digital vorliegenden Peildaten der Wasser- und Schifffahrtsämter, des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie und des Amtes für ländliche Räume Husum extrahiert worden sind. Soweit vorhanden wurden Peilungen bis zum Jahrgang 2000 benutzt. Das Sturmflutmodell basiert auf den selben Daten, ist nach Norden aber durch den Trischendamm begrenzt und nach Osten etwas weiter bis nach Bleckede ausgedehnt.

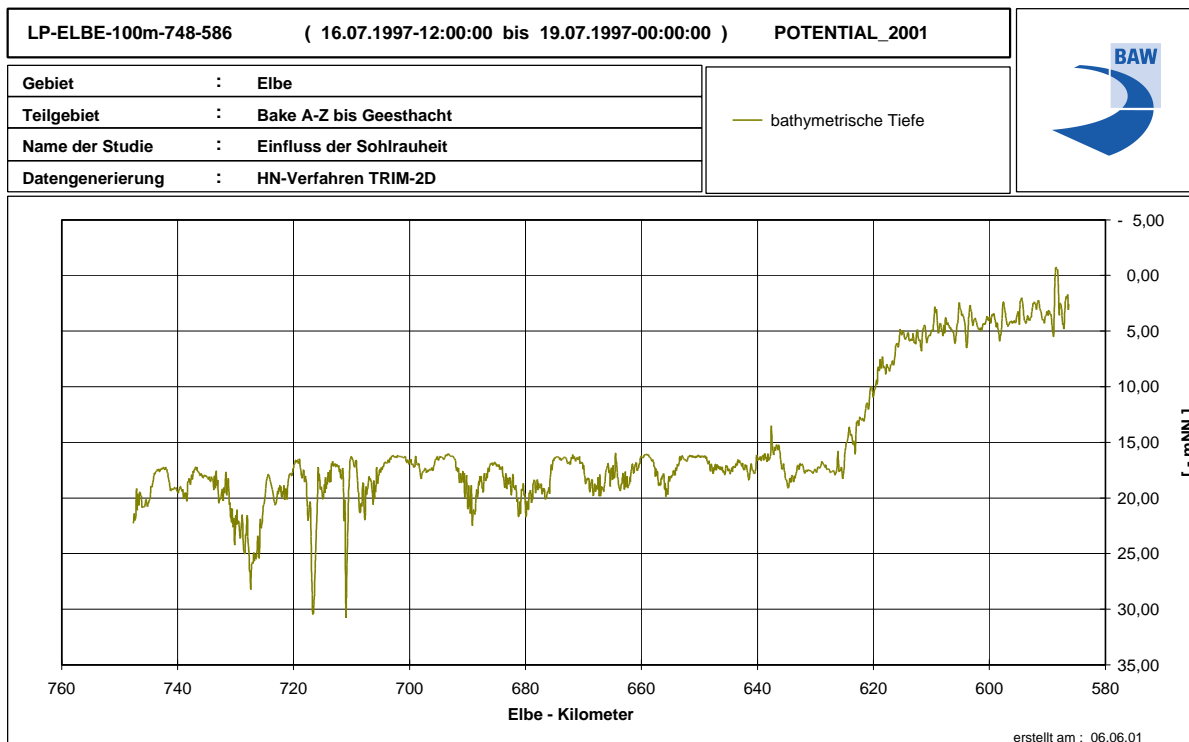


Bild 2: Topografischer Längsschnitt entlang der Fahrrinne

4 Kennzeichnende Tidewasserstände

Der entlang des Längsschnitts dokumentierte Verlauf des Tidehoch- und Tideniedrigwassers wurde zuerst mit den in früheren Untersuchungen verwendeten Reibungsparametern berechnet (siehe Linien in blau und ocker in Bild 3 - Simulation A1). Der Verlauf beider Linien ist durch das Minimum des Tidehubes zwischen km 680 und km 700 sowie die ausgeprägte Absenkung des Tnw bei Hamburg charakterisiert. Die angenommene starke Formrauheit an der Fahrrinnensole führt im wesentlichen zu den folgenden Phänomenen (Bild 3 - Linien in rot und grün - Simulation A2): das Tnw wird zwischen der Störmündung und der Seevemündung (am stärksten im Hamburger Bereich bei km 620) wirksam angehoben. Die Ausbildung großer Transportkörper (oder allgemein ausgedrückt hoher Reibung) ist daher insbesondere in der Unterelbe hydraulisch sehr wünschenswert. Unterhalb der Störmündung ergibt sich durch die hohe Reibung der parametrisierten Transportkörper nur eine sehr geringe Veränderung der Tnw-Stände. Beim Thw tritt hingegen ein gegenläufiger Effekt ein: Große Trans-

portkörper bewirken eine Verstärkung der Energiedissipation beim Einschwingen der Tide-
 welle, so daß es zu einer Erhöhung der Thw-Stände und damit zur Erhöhung des Tidehubes
 in der Außenelbe einschließlich der Untereibe bis etwa zur Schwingemündung kommt. Durch
 diese verstärkte Energiedissipation sinkt das Thw oberhalb der Schwingemündung, so dass
 sich insbesondere in der Delegationsstrecke eine Verminderung des Tidevolumens durch
 Verminderung des Tidehubes ergibt. In flutstromorientierten Systemen wie der Elbe (in den-
 nen die Flutdauer kleiner ist als die Ebbedauer) kann die Verminderung des Tidevolumens
 vorteilhaft sein, da diese den Stromauftransport von Feststoffen verlangsamen kann. Hier-
 aus kann der Schluß gezogen werden, dass bei weiteren Vertiefungen der Fahrrinne auch
 einer Verstärkung der Energiedissipation in der Außenelbe mehr Aufmerksamkeit geschenkt
 werden sollte.

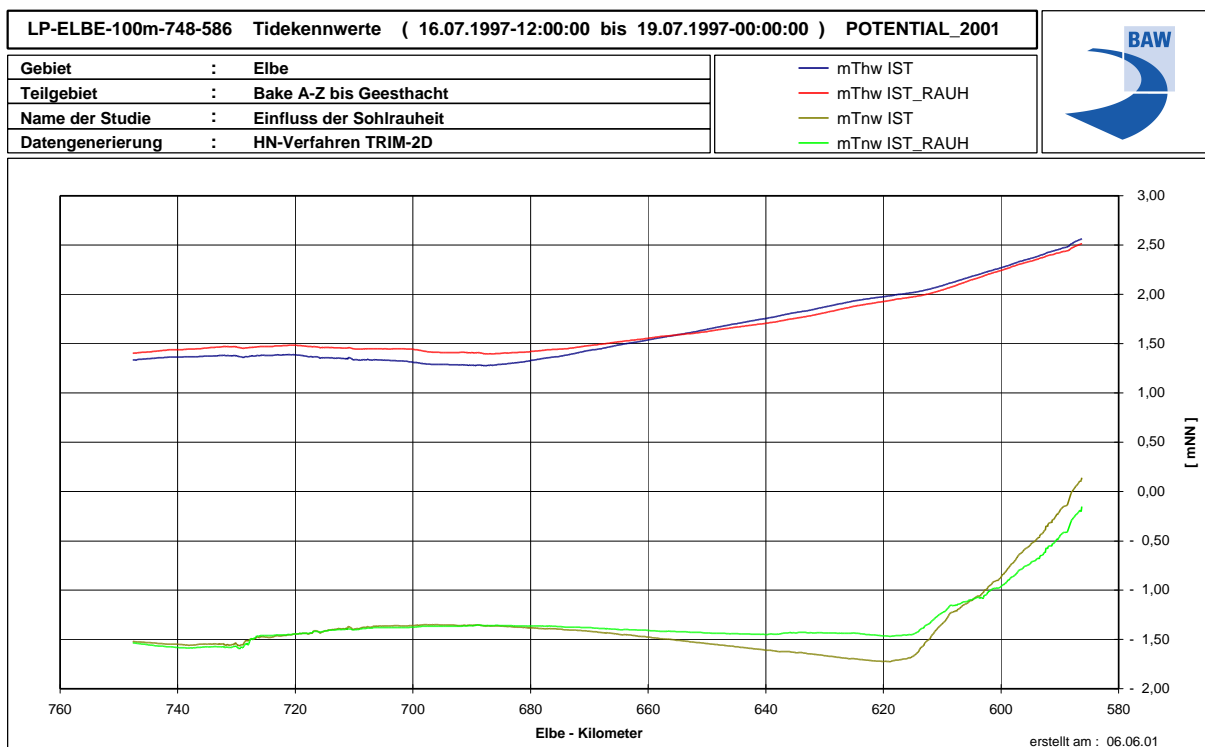


Bild 3: Längsschnitt der simulierten Thw- und Tnw-Stände (Simulation A1 und A2)

Wie verändern sich nun die mittleren Tidewasserstände, wenn die Fahrrinne mit dem Ziel einer vergleichenden Systemanalyse schrittweise vertieft wird? Diese Frage soll auf Grundlage der Simulationsergebnisse, aus denen Differenzdarstellungen (Ausbau-Zustand minus Ist-Zustand) gewonnen werden, diskutiert werden.

Bild 4 zeigt die simulierten ausbaubedingten Änderungen des Thw für die Vertiefungsstufen um einen Meter, zwei Meter und drei Meter, jeweils für eine angenommene glatte Fahrrinnensohle und eine angenommene sehr rauhe Fahrrinnensohle. Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Die Vertiefungen wirken sich in der Außenelbe bis etwa nach Brunsbüttel nur geringfügig auf das Thw aus, unabhängig davon, ob große Dünen an der Fahrrinnensohle vorhanden sind. In diesem Ästuarabschnitt besteht lediglich eine geringe Tendenz zu Absenkung des Thw infolge weiterer Ausbauten.
- Zwischen Brunsbüttel und St. Pauli ist die ausbaubedingte Wirkung auf das Thw bei glatter Sohle größer als bei der rauhen Sohle. Erst am oberstromigen Ende der Dünenstrecke gleichen sich die ausbaubedingten Veränderungen bezogen auf die jeweilige Vertiefungsstufe mit glatter und rauher Sohle wieder an.
- Die Vertiefung um drei Meter führt bei glatter Sohle am unterstromigen Ende der Delegationsstrecke zu einer maximalen Erhöhung von knapp 10 cm. Die Vertiefungen um ein und zwei Meter führen zu einer Erhöhung von etwa 1/3 bzw. 2/3 des genannten Anstiegs. Dies bedeutet, dass die Sohlreibung in der Impulsbilanz auch bei einem weiter ausgebauten Ästuar eine dominierende Größenordnung behält.
- Große Dünen in der Unterelbe können eine ausbaubedingte Erhöhung des Thw im Bereich des Hamburger Hafens nicht dämpfen. Diese Aussage steht nicht im Widerspruch zur oben ausgeführten Erkenntnis, dass bei großer Formrauheit das Thw bei Hamburg niedriger liegt, als bei glatter Sohle.

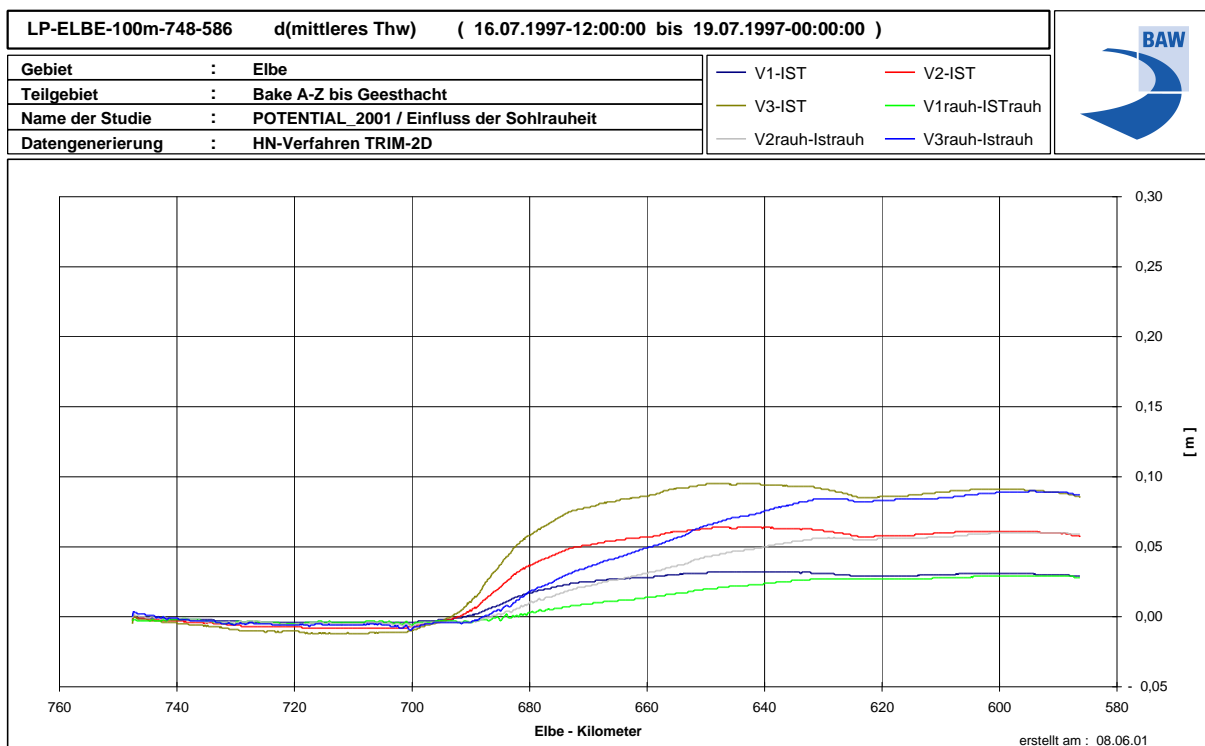


Bild 4: Ausbaubedingte Thw-Änderungen (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

Bild 5 zeigt die simulierten ausbaubedingten Änderungen des Tnw für die Vertiefungsstufen um einen Meter, zwei Meter und drei Meter, jeweils für die glatte Fahrrinnensohle und die sehr raue Fahrrinnensohle. Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Die größten Absenkungen des Tnw treten (für die glatte und die raue Sohle) bei km 620 auf. Die Auswirkungen der Vertiefungen machen sich nach Unterstrom etwa bis nach Altenbruch bemerkbar.
- Bei glatter Sohle beträgt die ausbaubedingte Absenkung des Tnw bei km 620 ca. 6 cm pro einem Meter Vertiefungsstufe, wobei sich das auf einen Meter Vertiefung bezogene Absenkungsmaß mit den Vertiefungen von einem auf zwei Meter und von zwei auf drei Meter geringfügig abschwächt, da die Reibung mit zunehmender Wassertiefe abnimmt. Bei einer Vertiefung um drei Meter liegt die Tnw-Absenkung somit bei ca. 18 cm.
- Im Fall der rauhen Sohle beträgt die Absenkung des Tnw ca. 16 cm (bezogen auf die Vertiefung um 3 m), so dass auf die einzelnen Vertiefungsstufen von je einem Meter eine Absenkung von mehr als 5 cm entfallen.

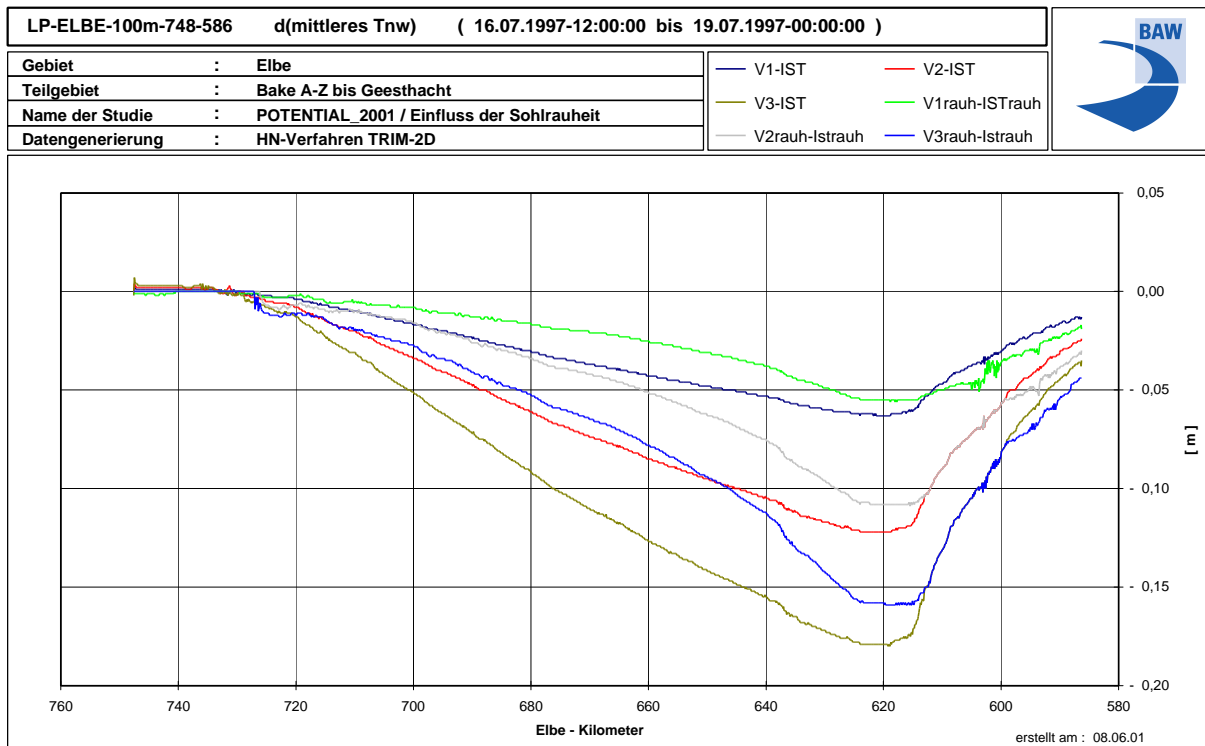


Bild 5: Ausbaubedingte Tnw-Änderungen (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

Bild 6 zeigt die simulierten Änderungen des Tidehubes für die Vertiefungsstufen um einen Meter, zwei Meter und drei Meter, jeweils für die glatte und die sehr raue Fahrrinnensohle. Die energiedissipierende Wirkung der rauhen Sohle hat im Bereich zwischen km 640 und km 680 den größten Einfluß auf die Tidehubänderungen: je größer die Vertiefung, desto wirksamer ist hier die Dämpfung der Tidehubänderung durch die raue Sohle (sie beträgt mehr als 8 cm bei der Vertiefung um drei Meter), so dass die Differenz der Tidehubänderungen, die sich aus der rauhen und glatten Sohle für eine Vertiefungsstufe ergibt, in diesem Abschnitt verhältnismäßig groß ist. Durch Breitenkonvergenz der Elbe und Reflexion der Tidewelle ist die zur jeweiligen Vertiefungsstufe gehörige Differenz der Tidehubänderungen

(jeweils bezogen auf rauhe und glatte Sohle) im Hamburger Bereich aber nur gering. Bei glatter Sohle und einer Vertiefung um einen Meter beträgt die simulierte Erhöhung des Tidehubes im Hamburger Bereich (km 620) ca. 9 cm (8cm bei rauher Sohle). Bei einer Vertiefung um 2 m wird die Tidehubzunahme von ca. 18 cm bei glatter Sohle auf ca. 16,5 cm bei rauher Sohle gedämpft und bei einer Vertiefung um 3 m wird die Tidehubzunahme von ca. 26,5 cm bei glatter Sohle auf ca. 24 cm bei rauher Sohle gedämpft.

Eine hohe Formrauheit an der Fahrrinnensohle führt damit infolge Fahrrinnenvertiefung nur zu einer geringen Dämpfung der Tidehuberhöhung in Hamburg.

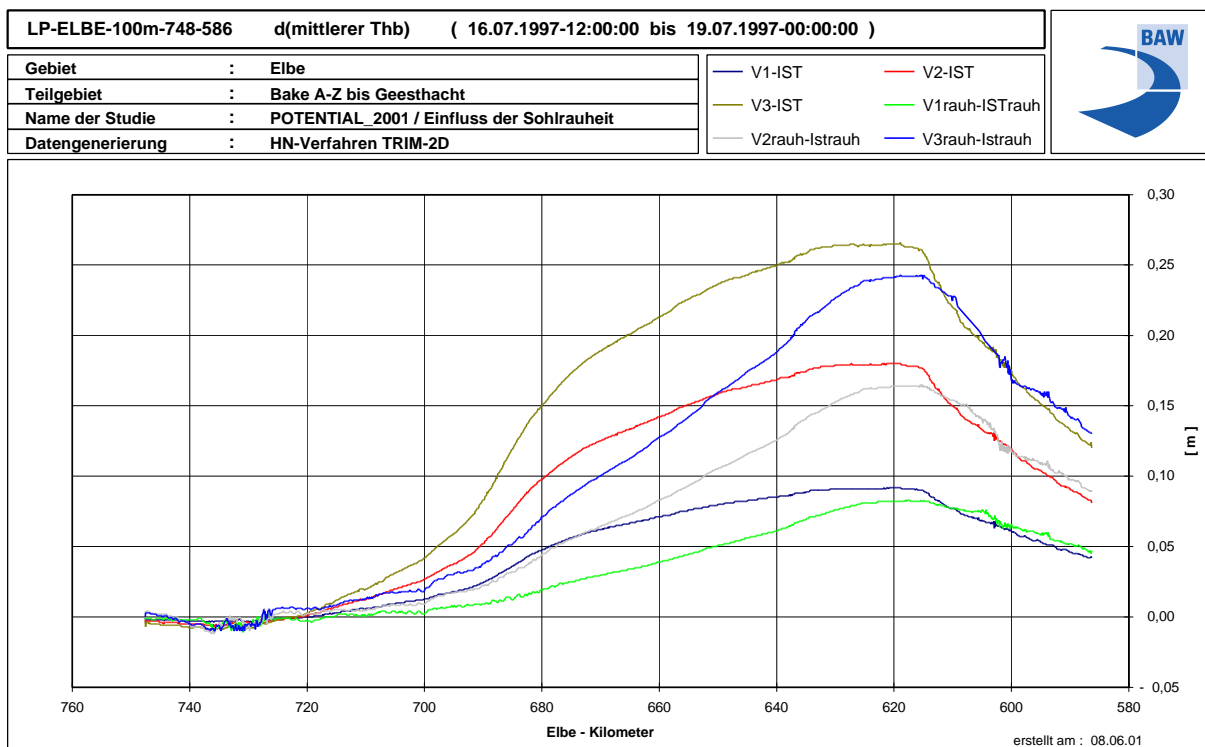


Bild 6: Ausbaubedingte Thb-Änderungen (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

5 Flut- und Ebbedauer

Die Form der Tidekurve gibt erste Hinweise auf das Systemverhalten eines Ästuars. Da die Periodendauer der Tidewelle im Bereich der Deutschen Bucht und den angrenzenden Ästuaren nahezu konstant 12 Stunden und 25 Minuten beträgt, gibt die örtlich ermittelte Flutdauer bereits ein Maß für die möglicherweise ausgeprägte Asymmetrie der Tidekurve. Aufgrund der konstanten Periodendauer der Tide ist die Ebbedauer eindeutig durch die Flutdauer bestimmt. Bild 7 zeigt den simulierten örtlichen Verlauf der Flutdauer für den Längsschnitt (Fahrrinnenmitte) des Elbeästuars im Ist-Zustand für die glatte und rauhe Fahr-

rinnensohle. Aus den Simulationsergebnissen können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Im gesamten Elbeästuar ist die Flutdauer kürzer als die Ebbedauer. Die sich daraus ergebende Asymmetrie ist am Wehr Geesthacht am größten und an der Kugelbake (~ km 729) am kleinsten.
- Eine erhöhte Rauheit vergrößert die Asymmetrie der Tidekurve, da sie zu einer Verkürzung der Flutdauer (sowie Anhebung des Thw im Bereich der Außenelbe) und damit zu einer Aufsteilung des Flutastes führt. Die durch erhöhte Rauheit (bei gleicher Fahrrinnetiefe) verursachten Änderungen sind im Bereich der Störmündung am größten. Große Dünen an der Fahrrinnensohle verstärken somit die Flutstromorientierung des Systems.

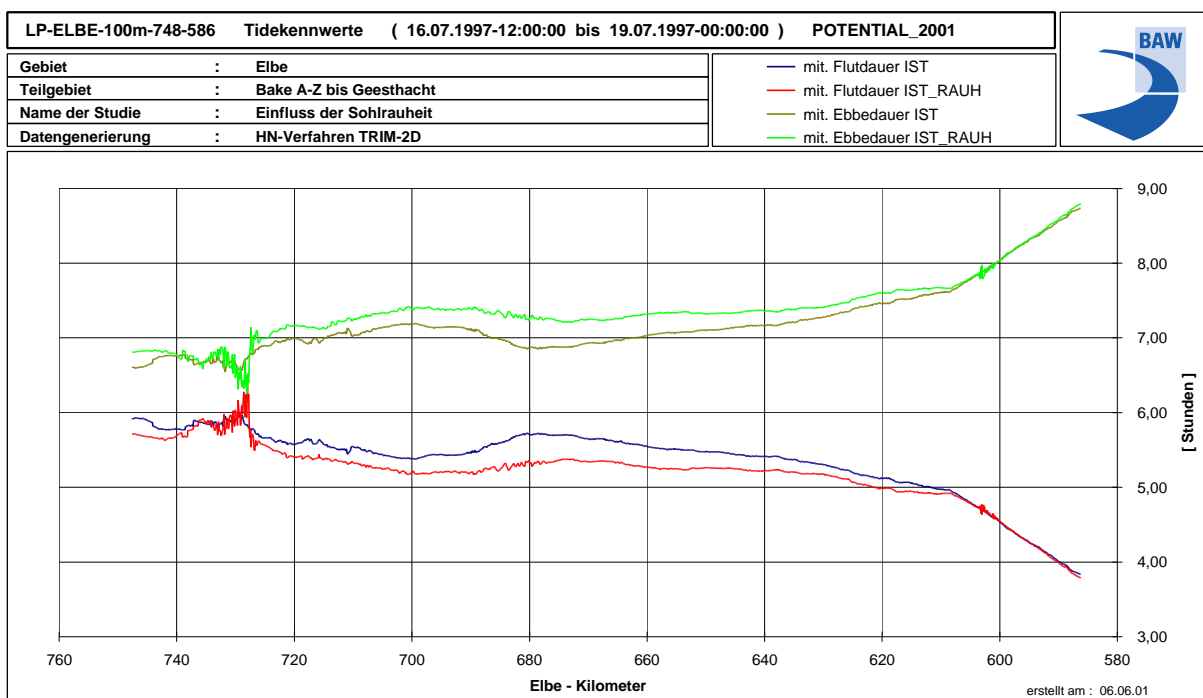


Bild 7: Längsschnitt der Flut- und Ebbedauer (Simulation A1 und A2)

Merkwürdig erscheint zunächst die Annäherung der Flutdauer an die Ebbedauer im Bereich der Kugelbake. Hier könnte man zunächst vermuten, dass es sich eventuell um numerisch bedingte Randeffekte handelt. Zur Erhellung dieses Sachverhalts wird in Bild 8 eine entsprechende Simulationsergebnis aus dem BAW-Modell der Deutschen Bucht wiedergegeben, das alle Ästuarie in hinreichender Auflösung berücksichtigt. Das dargestellte Verhältnis der Flutdauer zur Ebbedauer zeigt hier ebenfalls im Bereich der Kugelbake ein Minimum, so dass diese Erscheinung wohl auf physikalische Prozesse (die Tidedynamik im Übergangsbereich Hauptelbe - Klotzenloch und Hauptelbe - Medemrinne ist außerordentlich komplex) zurück zu führen ist.

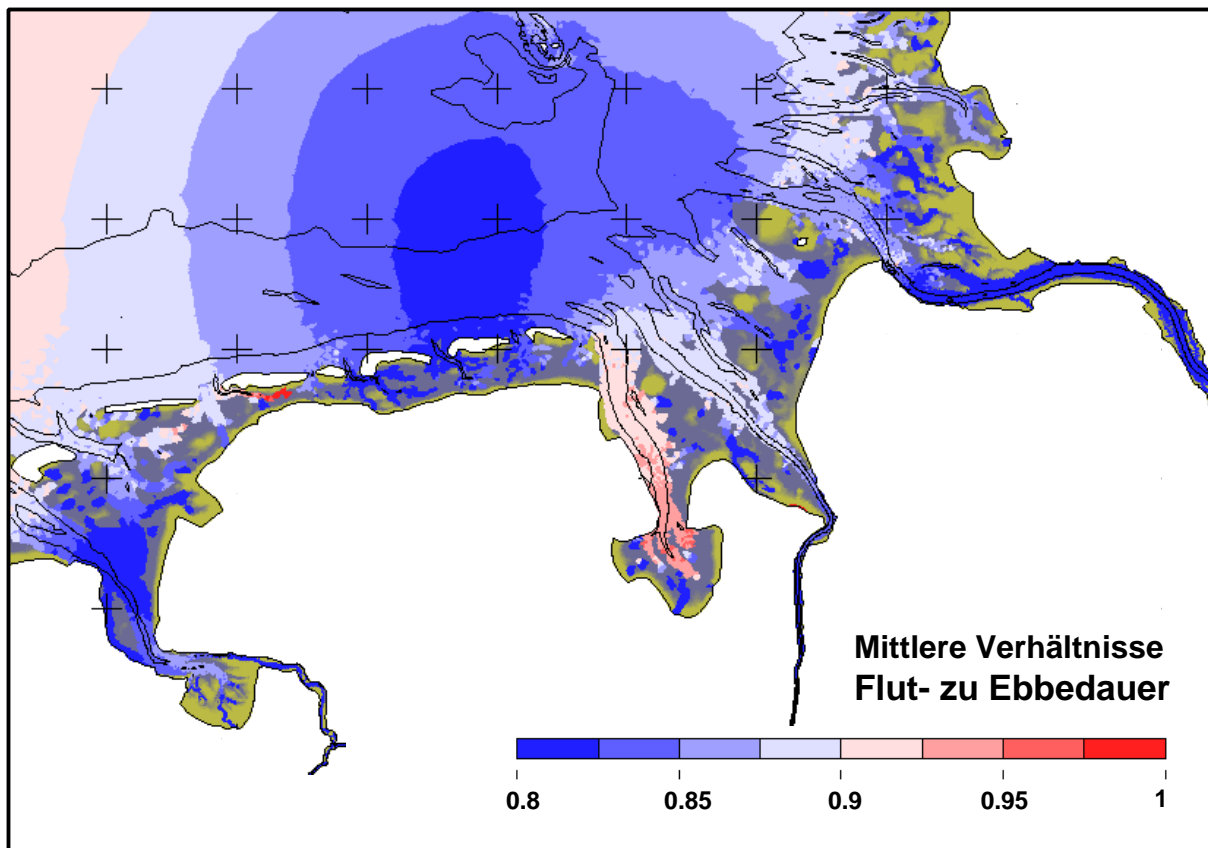


Bild 8: Verhältnis von Flut- zu Ebbedauer in den deutschen Ästuarien (Simulation)

Bild 8 dokumentiert darüber hinaus, dass die Tide in den Außenbereichen von Ems, Jade, Weser und Elbe nicht gleichartig verläuft, da die Asymmetrie der Tidekurven unterschiedlich ist. Dabei entsprechen die Verhältnisse an der Außenelbe näherungsweise denen an der Außenems, während sie sich von denen an der Außenweser oder gar der Jade unterscheiden. Die Dynamik von Außen- und Unterems führt immer wieder zu nachhaltigen Sedimententrägen in das Emders Fahrwasser und je nach Oberwasser weiter nach Oberstrom, insbesondere nach Vertiefungsbaggerungen für die Überführung von Schiffen. Das bestehende Transportregime der Ems dient daher auch als Ausgangspunkt zur Entwicklung möglicher Konzeptionen mit denen nachteilige Verschlechterungen der Feststofftransportprozesse im Elbeästuar vermieden werden sollen. Diese Problematik ist Ausgangspunkt für eine Reihe von Fragestellungen, die im Rahmen der Potenzialuntersuchung für das Elbeästuar zu bearbeiten sind.

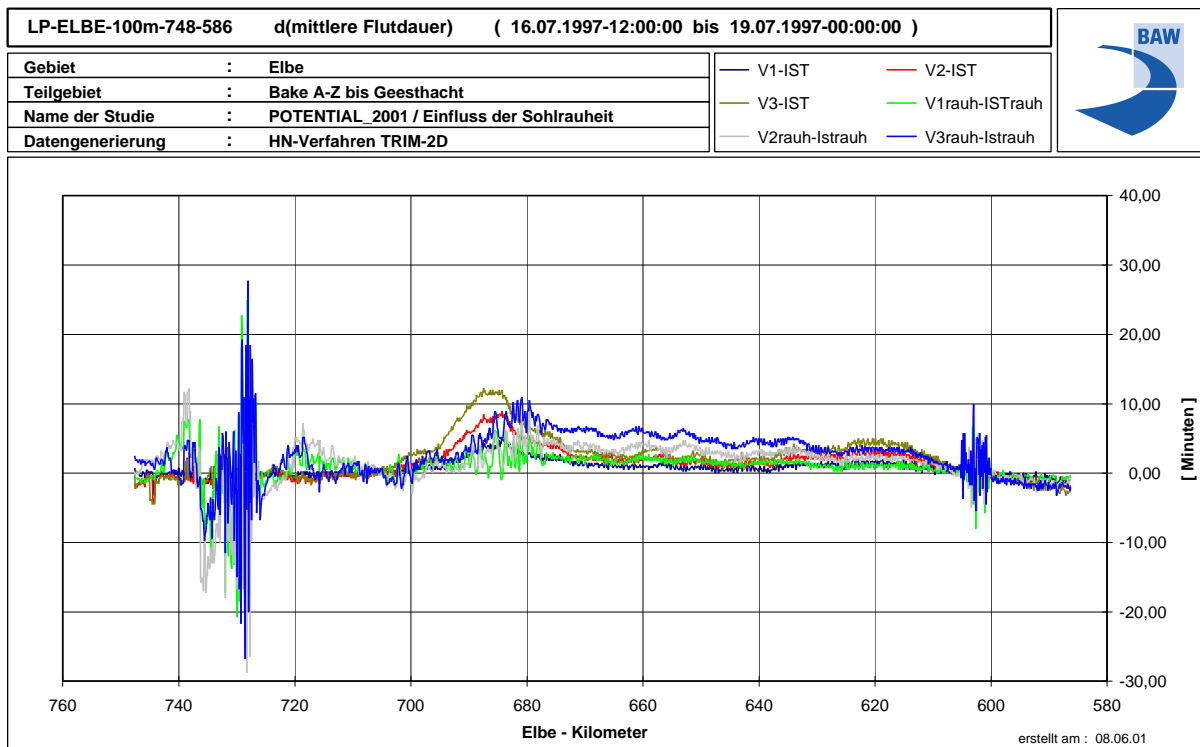


Bild 9: Änderung der Flutdauer durch Ausbau (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

Bild 9 zeigt die Veränderung der Flutdauer infolge der Vertiefungsbaggerungen entlang des Elbeästuars wiederum für die glatte und die raue Sohle. Die ausgeprägten Oszillationen bei km 730 und unterhalb km 600 ergeben sich aus den im Rahmen der Simulation vorgegebenen abrupten Übergängen zwischen der glatten und rauhen Fahrrinnensohle. (Es sei daran erinnert, dass die Fahrrinnensohle nicht über den gesamten Ästuarverlauf als durchgängig rau angesetzt wurde.) Diese Oszillationen sind unerheblich im Rahmen einer Beurteilung der grundsätzlichen Phänomene. Weitere Fahrrinnenvertiefungen führen insbesondere im Abschnitt zwischen km 610 und km 690 zu einer Verlängerung der Flutdauer um wenige Minuten. Diese Aussage ist aber nicht als Abflachung (bzw. als abnehmende Asymmetrie) der Tidekurve zu interpretieren, da sich in diesem Abschnitt infolge Vertiefung der Tidehub erhöht.

6 Strömungen

Die Kennwerte der Flut- und Ebbestromdauer sind hinsichtlich einer Beurteilung der Tidedynamik von herausragender Bedeutung. Da die Strömungen in der Fahrinne primär alternierende Zwangsströmungen sind, d.h. durch reibungsbedingte Strömungsführung in geraden Stromabschnitten nur über untergeordnete Querkomponenten verfügen, lassen sich aus den Strömungskenngrößen Rückschlüsse auf den Feststofftransport ziehen.

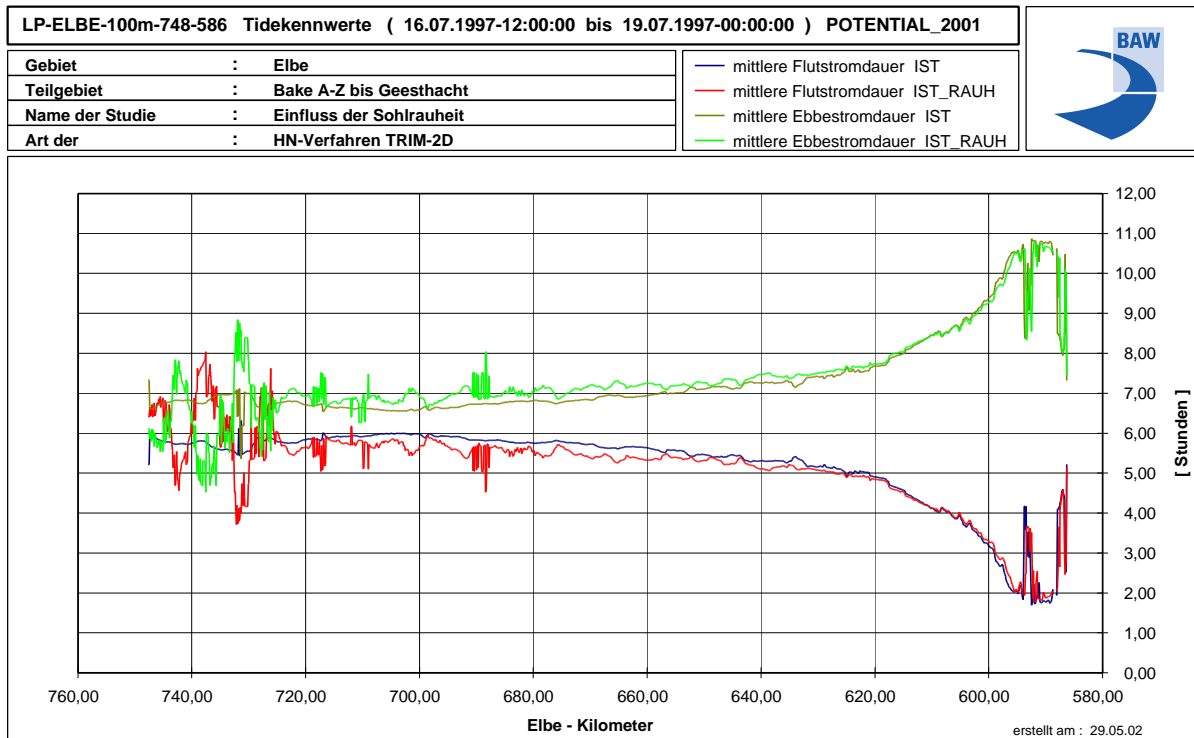


Bild 10: Längsschnitt der Flut- und Ebbestromdauer (Simulation A1 und A2)

Bild 10 gibt somit eine weitere wichtige Information zur Beurteilung der Asymmetrie der Tideerscheinungen im Ist-Zustand des Systems Elbe. Bei glatter Sohle ist im Stromabschnitt von km 675 bis etwa km 725 die Ebbestromdauer ca. eine Stunde länger als die Flutstromdauer. Stromauf von km 675 wächst diese Differenz nach Oberstrom bis etwa km 635 auf zwei Stunden und oberhalb von km 615 dann auf drei Stunden. Bei geringer Oberwasserführung könnte man aus diesem Sachverhalt vorschnell schlussfolgern, dass die Flutstromgeschwindigkeiten unterhalb des Hamburger Hafens generell größer als die Ebbestromgeschwindigkeiten sein müssen. Weiter ist zu bemerken, dass die Flutstromdauer unterhalb km 630 durch die rauhe Fahrrinnensohle weiter verkürzt wird.

Betrachten wir vor dem Hintergrund der erläuterten Zusammenhänge nun die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten: Bild 11 zeigt für den Fall der glatten Sohle, dass die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten unterhalb von Glückstadt kleiner sind, als die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten. Dies resultiert aus der Tatsache, dass der Flutstrom hier (aufgrund der zeitlichen Lage der Kenterpunkte zu den Extremwerten des Wasserstandes) bei im Mittel größeren Wassertiefen läuft, als der Ebbestrom. Bei rauher Sohle ist die mittlere Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit etwa gleich groß. In diesem Fall werden die Seitenbereiche mit größeren Strömungen beaufschlagt, in denen keine Formrauheit vorhanden ist. Die im vorigen Absatz angesprochene Schlußfolgerung trifft in diesem Stromabschnitt also weder für die glatte noch für die rauhe Sohle zu.

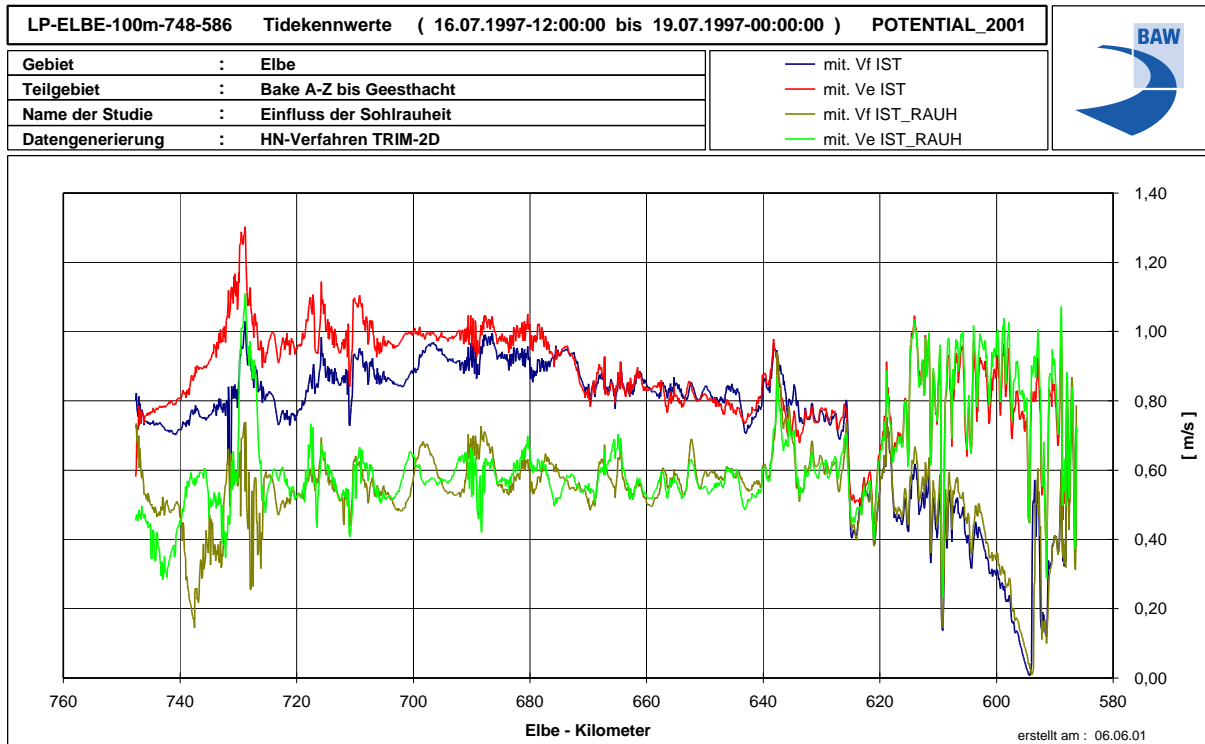


Bild 11: Längsschnitt mittlerer Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (A1 und A2)

Das Verhältnis der Flut- zu den Ebbestromgeschwindigkeiten liefert einen ersten Ausgangspunkt zur Abschätzung des Transportregimes: ein stark überwiegender Ebbestrom kann prinzipiell nicht zum Stromauftransport von Feststoffen führen. Um sich hier aber ein vollständigeres Bild zu verschaffen, muß man zunächst auch auf die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten achten, die sich im Verlauf der Flut- und Ebbephase einstellen. Diese sind in Bild 12 dargestellt. Im Vergleich zu Bild 11 ist unmittelbar erkennbar, dass der maximale Flutstrom den maximalen Ebbestrom im Abschnitt zwischen Rhinplatte Süd und den westlichen Hafenbecken Hamburgs bei glatter Sohle (und in geringerem Maße auch bei rauher Sohle) überwiegt. Dieser Effekt (der sich aus der oben angesprochenen Asymmetrie der Tide ergibt) führt zum Stromauftransport von Feststoffen.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang noch, daß ein zweidimensionales Modell die dreidimensionale dichteinduzierte (barokline) Zirkulation nicht berücksichtigt. Diese kann auch im Außenbereich der Elbe zu einem sohnahen Stromauftransport von Feststoffen führen. Diese Prozesse müssen im Rahmen der weitergehenden Potenzialanalyse mit aktuellen Modelleingangsdaten näher untersucht werden.

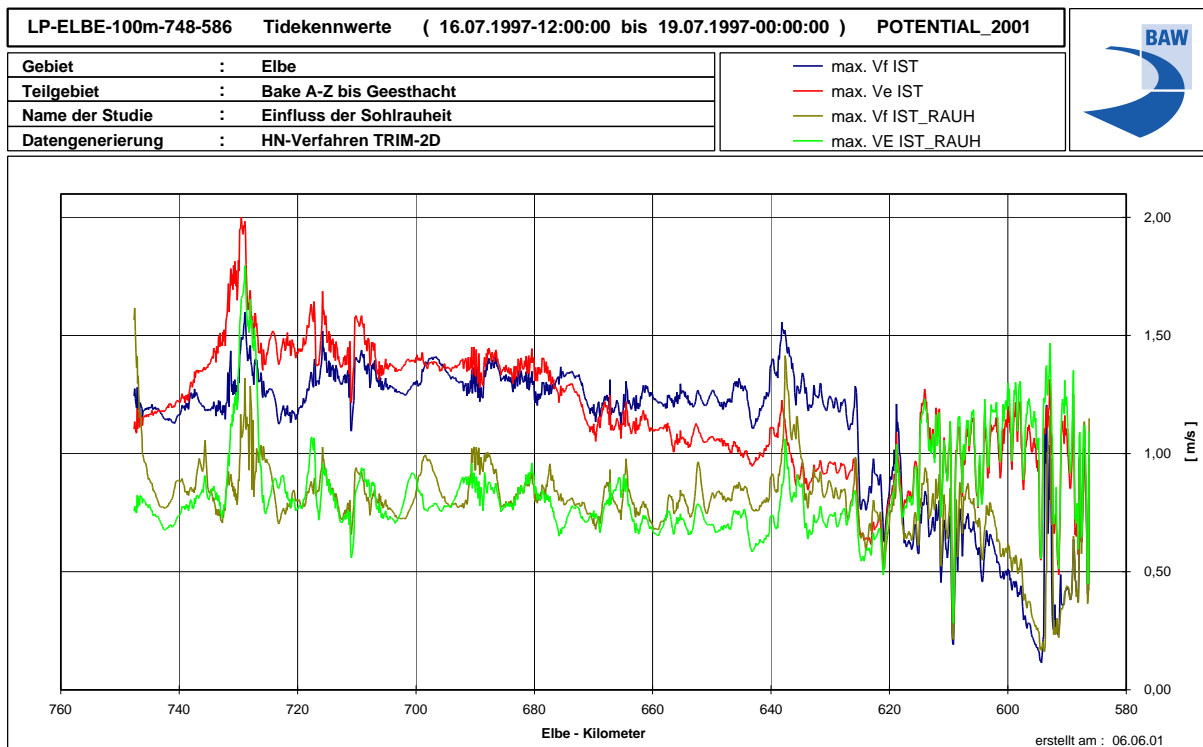
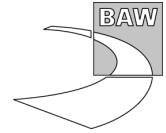


Bild 12: Längsschnitt maximaler Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (A1 und A2)

Wie verändern sich nun die mittleren und maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten wenn die Fahrrinne schrittweise vertieft wird? Zur Diskussion dieser Frage wird auf die Bilder 13 bis 16 verwiesen, die wie folgt interpretiert werden:

- Auf dem gesamten Längsschnitt von Unter- und Außenelbe erhöhen sich die mittleren und die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in derselben Größenordnung, wobei die Erhöhung der Flutstromgrößen in einzelnen Stromabschnitten geringfügig über den Erhöhungen der Ebbestromgrößen liegt. Anmerkung: Die starken Fluktuationen in den Differenzgrößen für die raue Sohle werden an dieser Stelle nicht interpretiert, da sich in diesem Falle die Analyse auf einen flächenhaften Vergleich stützen müsste, weil eine örtlich große Rauheit zur Verlagerung der Strömungen im Querschnitt führt.
- Wie oben ausgeführt sind oberhalb von Rhinplatte Süd im Ist-Zustand die maximalen Flutströmungen größer als die maximalen Ebbeströmungen. Weil der Feststofftransport in erster Näherung von der vierten Potenz der Strömungsgeschwindigkeiten **abhängig ist**, lassen sich mehrere Schlußfolgerungen ableiten. Ein Beispiel: Im Ist-Zustand beträgt das Verhältnis des maximalen Flutstroms zum maximalen Ebbestrom bei glatter Sohle (etwa bei km 650) $1,3 \text{ m/s} : 1,1 \text{ m/s}$ gleich $1,182$; entsprechend $(1,3)^4 : (1,1)^4$ gleich $1,95$ für das Verhältnis der Transportkapazitäten während Flut- und Ebbestrom, das als eine Kennzahl für den Stromauftransport genommen werden kann. Diese ist größer als das Verhältnis der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten. Die Transportkapazität drückt das empirisch bestimmte Vermögen einer Strömung aus, eine bestimmte Sedimentmenge zu transportieren. Die Transportkapazität wird häufig proportional zur vierten Potenz der



Strömungsgeschwindigkeit gesetzt. Wenn nun durch Vertiefung die maximalen Strömungen während der Flut- und Ebbeströmungen um identische Beträge zunehmen, wird hierdurch der Stromauftransport nicht verstärkt. Eine vertiefungsbedingte Erhöhung der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten um jeweils 0,05 m/s ergibt für das genannte Beispiel $1,35 \text{ m/s} : 1,15 \text{ m/s}$ gleich 1,174 für das Verhältnis der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und $(1,35)^4 : (1,15)^4$ gleich 1,90 für das Verhältnis der Transportkapazitäten. Wenn sich aber der Flutstrom um nur geringfügig größere Beträge als der Ebbestrom erhöht wird das Verhältnis der Transportkapazitäten im Sinne einer weiteren Verstärkung des Stromauftransports ungünstiger (z.B. Flutstromerhöhung 0,07 m/s, Ebbestromerhöhung 0,05 m/s: $(1,37)^4 : (1,15)^4$ gleich 2,01). Diese Zusammenhänge machen klar, dass bei einem weiteren Ausbau der Fahrrinne der Gefahr einer überproportionalen Zunahme des Flutstroms (auch wenn es sich nur um kleine Beträge handelt) im Stromabschnitt zwischen Rhinplatte und Hamburger Hafen entgegengewirkt werden muß. Im Rahmen der weitergehenden Potenzialanalyse heißt dies, daß mögliche Maßnahmen zur Dämpfung der Tidedynamik insbesondere im Hinblick auf das Verhältnis der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und vor allem das Verhältnis der Feststofftransporte während der Flut- und Ebbeperiode untersucht werden müssen. Dies bedingt den Aufbau und Betrieb eines Modells zur Abschätzung der Sedimenttransporte im Wasserkörper und an der Sohle.

- Interessant ist die Abnahme der Strömungskennwerte in der Fahrrinne oberhalb des Mühlenberger Lochs bis etwa km 625. Hier führen weitere Vertiefungen bereits zu einer Abnahme der Strömungen, weil die Steigerung des Tidevolumens (bedingt durch Zunahme des Tidehubes) offensichtlich nicht ausreicht, den Strom im vertiefungsbedingt aufgeweiteten Querschnitt zu verstärken.

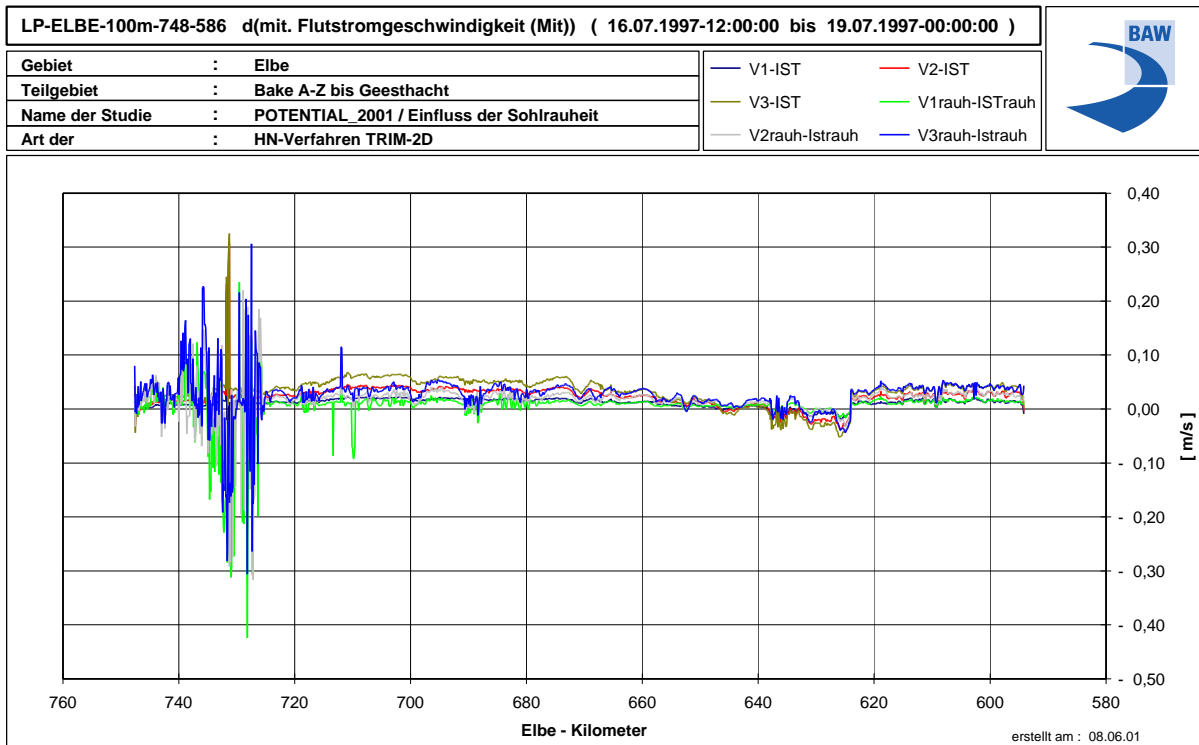
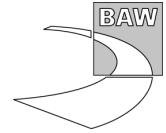


Bild 13: Änderung mittlerer Flutstrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

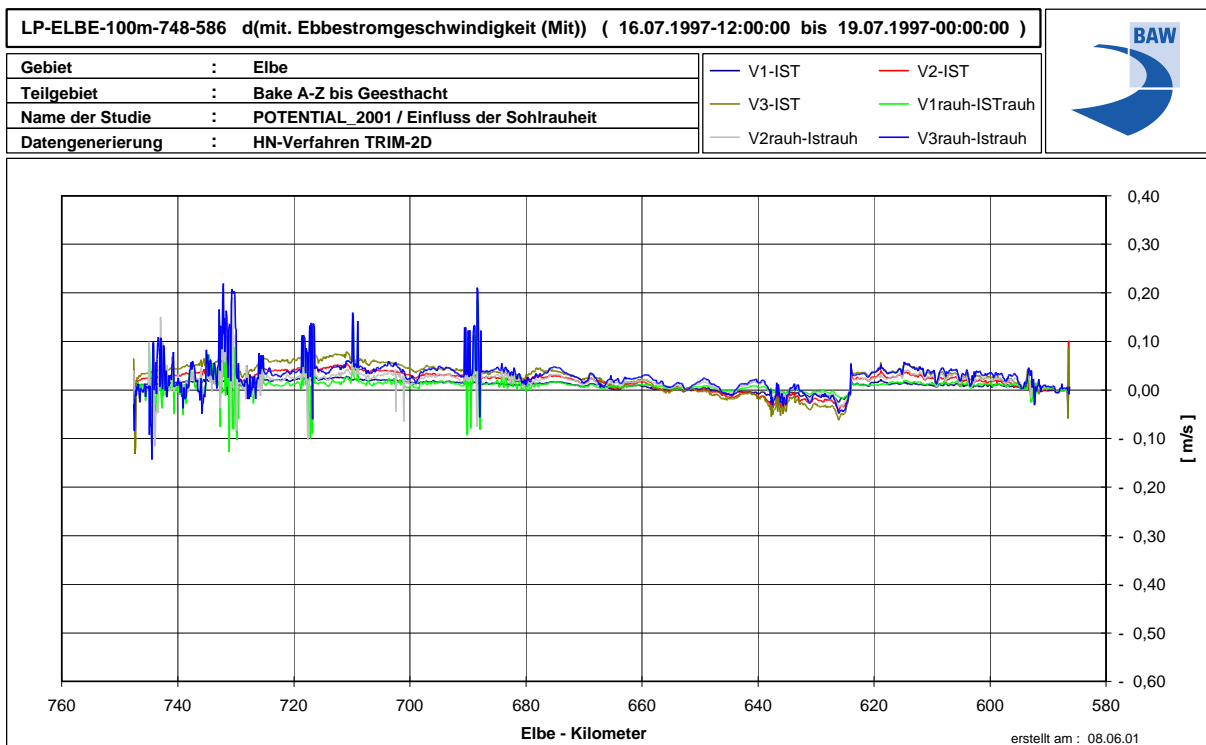


Bild 14: Änderung mittlerer Ebbestrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

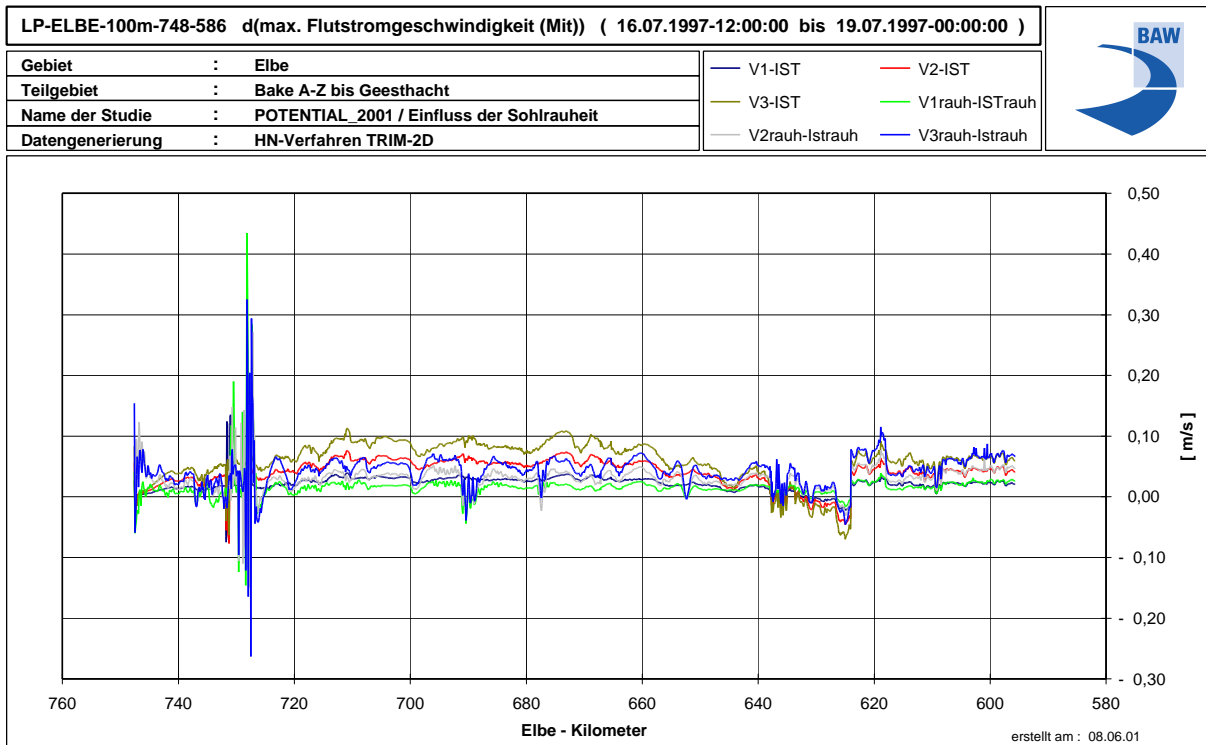
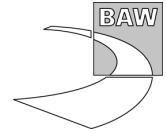


Bild 15: Änderung maximaler Flutstrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

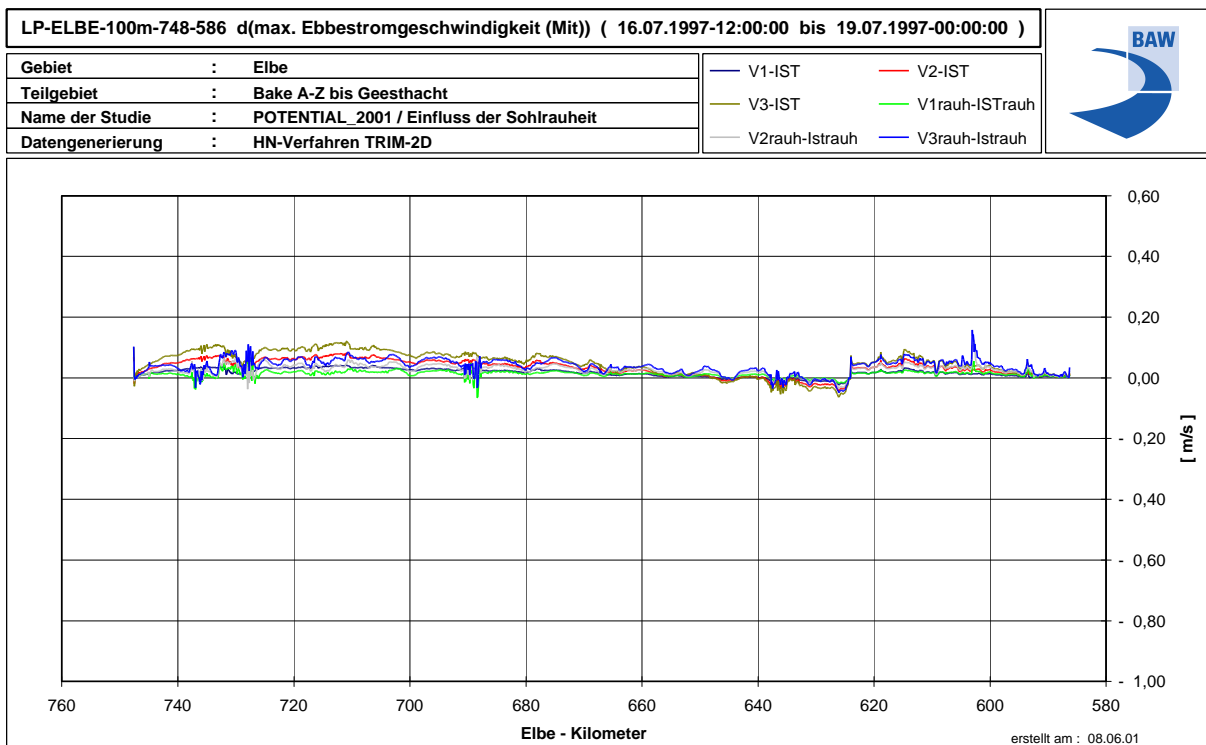


Bild 16: Änderung maximaler Ebbestrom (B1, C1, D1 zu A1; B2, C2, D2 zu A2)

7 Sturmflut

Zur Abschätzung der zu erwartenden Wasserstandsänderungen im Sturmflutfall wird als Sturmflutszenario die sogenannte Bemessungssturmflut 2085 A für die Elbe gewählt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Bemessungssturmflut gibt der „Bericht einer Länder-Arbeitsgruppe – Bemessungswasserstände entlang der Elbe“ (Die Küste, Heft 47, 1988).

Die Bemessungssturmflut 2085 A ist eine synthetische Sturmflut, die sich in ihrem Verlauf an die Sturmflut vom 3.1.1976 anlehnt. Die Bemessungswasserstände entlang der Tideelbe werden entsprechend der im oben genannten Bericht festgelegten Tide-, Wind- und Stauwerte für Cuxhaven sowie des Oberwasserzuflusses bei Neu Darchau durch von der Länder-Arbeitsgruppe in Auftrag gegebene Modellrechnungen bestimmt. Diese Bemessungswasserstände werden regelmässig alle 10 Jahre überprüft, zuletzt 1998 (Bemessungswasserstände 2085 A entlang der Elbe – Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länder-Arbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/1996), Die Küste, Heft 60, 1998). Die Arbeitsgruppe sah keine Veranlassung die Bemessungssturmflut 2085 A zu verändern.

Die Bemessungssturmflut (SFB) kann zusammenfassend wie folgt charakterisiert werden:

- Wasserstandsverlauf Cuxhaven vergleichbar zu 3.1.1976, jedoch mit um 0,5 m erhöhtem Windstau,
- Oberwasserzufluss 2200 m³/s ($\approx 2/3$ HHQ) und
- Windentwicklung über der Elbe vergleichbar zu 3.1.1976, jedoch mit um 10 % erhöhten Windgeschwindigkeit.

Zur Bestimmung des Einflusses einer Fahrrinnenvertiefung auf den Sturmflutscheitelwasserstand wird die Bemessungssturmflut sowohl mit der Topographie des IST-Zustandes (IST 2000) als auch mit dem Soll-Zustand 3 – Vertiefung um drei Meter (VAR3 2000) modelliert. Bild 17 zeigt den Verlauf der Sturmflutscheitelwasserstände (höchster während des Sturmflutzeitraums aufgetretener Wasserstand) zwischen Elbe km 748 und Elbe km 585 (Wehr Geesthacht) für beide Topographievarianten. Er beträgt bei Cuxhaven ca. NN + 5,65 m und bei Hamburg St.Pauli ca. NN + 7,30 m. Zusätzlich ist die Topographie der Fahrrinne entlang der Kilometrierung eingetragen. Man erkennt deutlich das Ende der Ausbaustrecke bei Hamburg St.Pauli und die deutlich flachere Elbe stromauf des Hamburger Hafens.

Die Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe aufgrund der um 3 m vertieften Fahrrinne ist in Bild 18 dargestellt. Man erkennt zwischen Cuxhaven und St.Pauli eine Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände um bis zu 3 cm. Lediglich im Bereich des nun deutlich verstärkten Sohlprungs am Ende der Ausbaustrecke im Hamburger Hafen werden bis zu 5 cm erreicht.

Ein Vergleich dieser Ergebnisse (bis zu 5 cm) mit den in Bild 4 gezeigten ausbaubedingten Änderungen des Thw für V3 – IST (bis zu 10 cm) zeigt, dass die zu erwartenden Zunahmen

im Wasserstand bei Sturmfluten deutlich geringer sind. Zur Erläuterung sei noch einmal an die für die Tidedynamik eines Ästuars relevanten Prozesse erinnert: Die Tidedynamik eines Ästuars wird durch die Topographie, die von See einschwingende Tidewelle, die herrschenden meteorologischen Verhältnisse und den Oberwasserzufluss bestimmt. Ausbaubedingt wird die Topographie bzw. die Tiefe der Fahrrinne verändert. Eine Vertiefung der Fahrrinne führt zu einer Vergrößerung des Querschnittes. Der Einfluss der Sohlrauhheit nimmt mit zunehmendem Abstand zur Sohle ab. Eine Vertiefung bewirkt somit eine hydraulisch glattere Fahrrinne. Die von See einschwingende Tidewelle unterliegt somit einer verringerten Dämpfung und Reflexion, so dass mehr Tideenergie stromauf gelangt. Dies führt zu einer Zunahme des Tidehubs. Die durch die Vertiefung der Fahrrinne bedingten größeren Wassertiefen führen zu einer erhöhten Phasengeschwindigkeit der Tidewelle, d.h. die Laufzeiten der Hoch- und Niedrigwasserscheitel bzw. die Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände verändern sich.

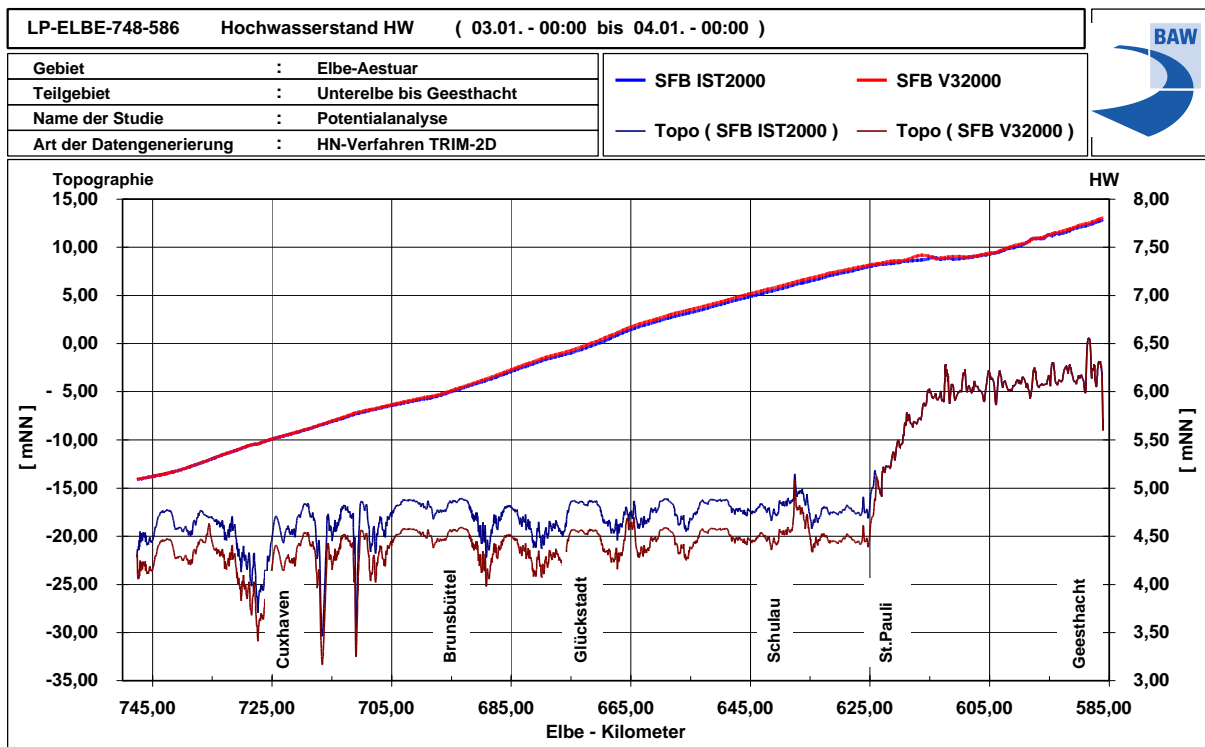


Bild 17: Längsschnitt Topographie und Sturmflutscheitel (Simulation A1 und D1)

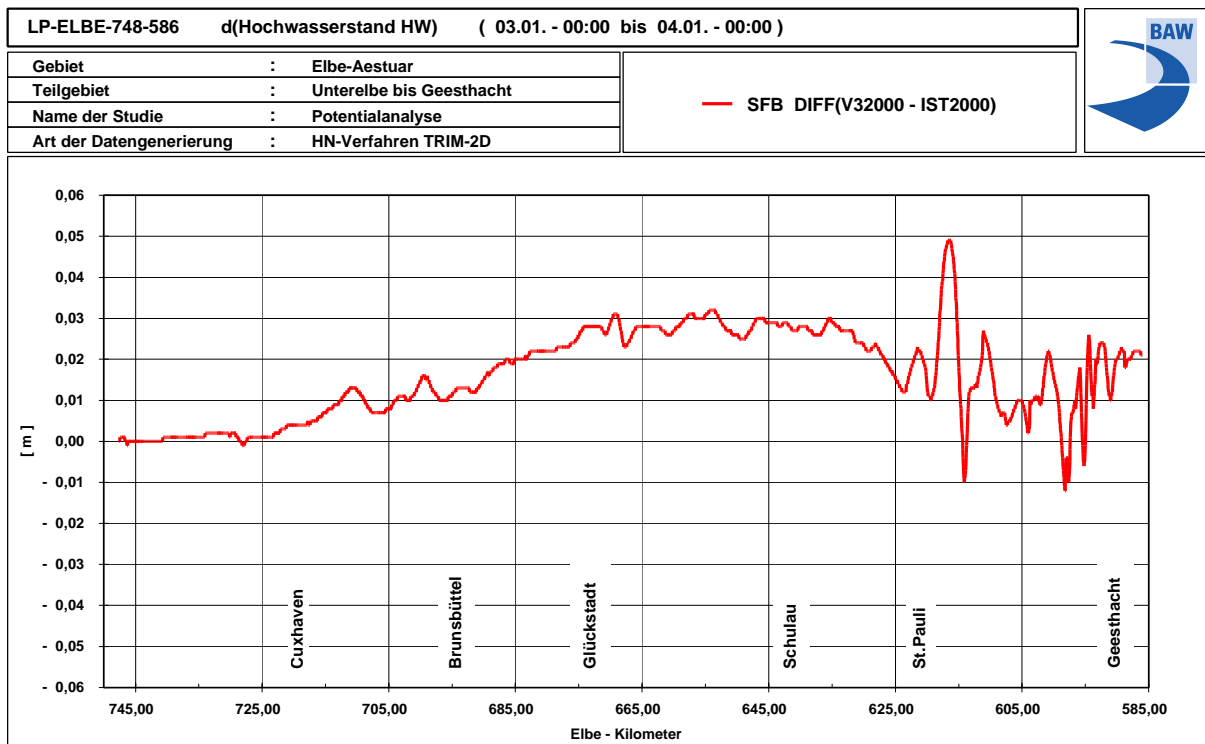


Bild 18: Änderung Sturmflutscheitel durch Ausbau (D1 - A1)

Die mit einer Sturmflut verbundenen hohen Wasserstände bewirken, dass das Tidegeschehen bei deutlich höheren Wasserspiegellagen in der Elbe stattfindet, d.h. die Tidewelle schwingt auf einem höheren Wasserspiegelniveau in das Ästuar ein. Der hydraulisch wirksame Querschnitt ist im Vergleich zu mittleren Wasserständen nicht nur wegen der höheren Wasserstände sondern auch wegen der am Sturmflutgeschehen beteiligten überfluteten Vorlandflächen erheblich größer. Eine Vertiefung der - relativ schmalen – Fahrrinne vergrößert somit den hydraulisch wirksamen Querschnitt bei mittleren Tiden stärker als bei Sturmfluten. Dieser „relative“ Unterschied im Ausbau ist bei der Interpretation der deutlichen Unterschiede in den ausbaubedingten Änderungen nicht ausser Acht zu lassen. In der öffentlichen Diskussion um Fragen des Hochwasserschutzes wird im Gegensatz zu diesem Sachverhalt oft die Meinung vertreten, dass Vertiefungen der Fahrrinne zu Erhöhungen der Sturmflutscheitelwasserstände führen würden, die größer sein sollen, als die ausbaubedingten Erhöhungen des Tidehubes bei mittleren Verhältnissen.

Hamburg, 24. Mai 2002

Unterzeichner

Bearbeiter

LBDiR Dr.-Ing. Flügge

RDiR Dr.-Ing. H. Heyer