Die Küste, 84 (2016), 193-212

Das Schwingungsverhalten der Tideelbe hinsichtlich Resonanz

Finn Hartwig

Zusammenfassung

Das Schwingungsverhalten der Tideelbe wurde während der vergangenen Jahrzehnte im Zuge unterschiedlicher strombaulicher Maßnahmen verändert. Eine Folge dieser Veränderungen ist ein Anstieg der Tidenhübe. Eine beginnende Resonanz mit der M_2-Gezeit steht in Verdacht, einer der hierfür verantwortlichen Mechanismen zu sein. Diese Studie stellt eine modellgestützte Untersuchung des Schwingungsverhaltens der Tideelbe hinsichtlich dieser Resonanz dar. Die Tidenhübe und die Strömungen werden auf Veränderungen hin untersucht, die sich zeitlich parallel zu den Vertiefungen der Fahrrinne vollzogen haben. Auf diese Weise wird gezeigt, dass die Eigenperiode der Tideelbe durch die beiden letzten Fahrrinnenanpassungen um 5 Stunden auf 20,5 Stunden verringert wurde. Im Falle einer weiteren Verringerung um 8 Stunden wäre volle Resonanz zu erwarten. Gleichzeitig werden eine Verlängerung der Flutdauer sowie Veränderungen der Übergänge zwischen Flut- und Ebbströmung deutlich, die eine problematische Entwicklung der Sedimentdynamik der Tideelbe unterstützen könnten.

Schlagwörter

Resonanz, hydrodynamisch-numerisches Modell, Elbe, Tidenhübe, Strömungen, Beschleunigung, Vertiefung

Summary

During the last decades, the oscillation behavior of River Elbe was changed by several river-engineering measures. One consequence of these changes is the rise of tidal range. Commencing resonance of the M_2-tide is supposed to be one of the acting mechanisms. This study investigates the tidal oscillations of River Elbe with respect to this resonance. The tidal ranges and currents are examined for changes which coincide with the dredging of the main channel. Thereby, it is found that the eigenperiod of River Elbe was reduced by 5 hours to 20.5 hours during the last two dredgings. Fully developed resonance can be expected in the case of a further reduction of the eigenperiod by 8 hours. In addition, an increase in flood duration and a shift in the transition from ebb to flood currents are found as a result of the dredging. These changes can support a problematic evolution of the sediment dynamics of River Elbe.

Keywords

resonance, hydrodynamical numerical model, River Elbe, tidal ranges, currents, acceleration, dredging

Inhalt

1 Einleitung ... 194
2 Grundlagen ... 195
2.1 Gestalt und Bathymetrie des Elbeästuars ... 195
2.2 Tidedynamik der Elbe ... 196
2.3 Resonanz ... 197
3 Das numerische Modell ... 199
3.1 Aufbau und zu Grunde liegende Gleichungen ... 199
3.2 Anregung ... 200
3.3 Topographien ... 200
3.4 Kalibrierung ... 200
4 Resultate ... 201
4.1 Das Eigenspektrum der Tideelbe ... 201
4.2 Strömungen ... 203
4.3 Beschleunigungen ... 205
4.4 Reflektoren der Tidewelle ... 207
4.5 Weitere Annäherung an die Erfüllung des Resonanzkriteriums ... 209
5 Schlussfolgerungen ... 210
6 Schriftenverzeichnis ... 212

1 Einleitung

Seit beinahe 200 Jahren erfährt die Tideelbe anthropogene Vertiefungen, um für die immer größer werdenden Schiffe trotz ihres stetig zunehmenden Tiefgangs sicheren Zugang zum Hamburger Hafen zu gewährleisten. Hierdurch ist die durchgehend schiffbare Tiefe zwischen Hamburg und der Nordsee mittlerweile um über 10 m auf -15,8 m Normalnull (NN) angewachsen (WSV und WSA HAMBURG 1997). Im Zuge dieser und weiterer strombaulicher Maßnahmen wurde das Schwingungsverhalten der Tideelbe verändert. Ein Resultat dieser Veränderungen ist ein starker Anstieg der Tidenhübe. Im Bereich um St. Pauli (Stromkilometer 623,1) beträgt dieser Anstieg seit den 1950er Jahren mehr als 1 m (Abb. 1). Diese Veränderung stellt eine Herausforderung für den Hochwasserschutz, die Befestigung der Ufer und den Schiffsverkehr dar.

Es existiert die theoretische Möglichkeit, einen Gezeitenfluss durch Vertiefung in einen Zustand der Resonanz mit der ihn anregenden Gezeit zu versetzen, das heißt in einen Zustand eines verstärkten Mitschwingens. Eine beginnende Resonanz mit der halbtägigen M_2-Gezeit der Deutschen Bucht würde eine Erklärung für die heutige Verteilung der Tidenhübe entlang der Elbe liefern. Da die Tidenhübe stetig weiter zunehmen, besteht vor dem Hintergrund weiterer Vertiefungen und des ebenfalls vertiefend wirkenden Anstiegs des Meeresspiegels auch für andere tidebeeinflusste Ästuare ein Interesse, diese Zusammenhänge genauer zu verstehen.

Die Hauptaufgabe dieser Studie besteht darin, das Vorliegen einer Resonanz zu verifizieren sowie ihr Ausmaß zu ermitteln und ihre Entwicklung zu verdeutlichen. Zu diesem

Zweck werden die Eigenperioden der Tideelbe verschiedener Jahre bestimmt und mit ihrer Hilfe ein Resonanzkriterium auf Erfüllung überprüft. Um die Eigenperiode zu bestimmen, wird das Reaktionsverhalten der Tideelbe auf eine Variation der Anregungsperiode hin analysiert. Dies verdeutlicht zudem den Einfluss der natürlichen Schwankungen der Gezeitenperiode auf die Hydrologie. Darüber hinaus werden die Hydrologie und die Fahrrinnentiefe auf zeitlich parallel verlaufende Entwicklungen hin untersucht, um Zusammenhänge zu verdeutlichen bzw. auszuschließen. Um ein besseres Verständnis für die Tidedynamik zu schaffen, wird zudem der jeweilige Einfluss mehrerer potentieller Reflektoren der Tidewelle ermittelt. Abschließend folgt ein Blick in die Zukunft in Form zweier Szenarien, in denen die Resonanz auf verschiedenen Wegen verstärkt wird.

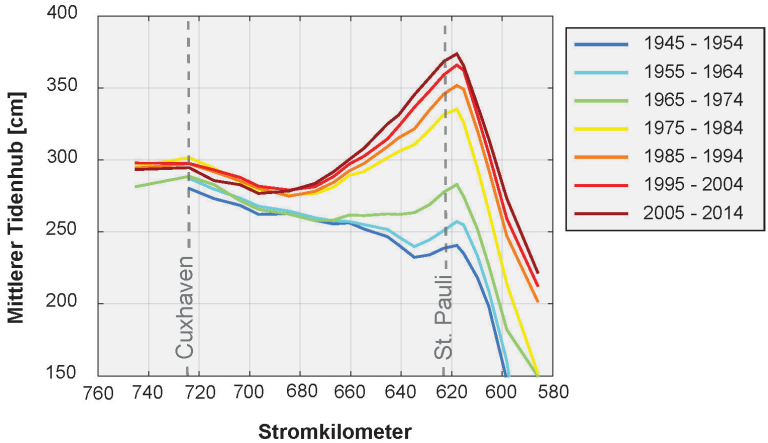

Abbildung 1: 10-Jahres-Mittel von Messdaten der Tidenhübe entlang der Tideelbe 1945–2014 (HPA et al. 2016).

2 Grundlagen

2.1 Gestalt und Bathymetrie des Elbeästuars

Das Ästuar der Elbe erstreckt sich aus hydrographischer Sicht vom Wehr Geesthacht, das eine künstliche Tidegrenze bildet, stromabwärts bis ins Wattenmeer hinein (ROHDE 1971) (Abb. 2). Dieser auch als Tideelbe bezeichnete Bereich wird seinerseits in mehrere Abschnitte unterteilt. Vom Wehr in Geesthacht bis nach Bunthaus (Stromkilometer 609,8) erstreckt sich die „obere Tideelbe“. Dieser Abschnitt ist typischerweise 300–500 m breit und -5 bis -6 m NN tief. Bei Bunthaus beginnt die „Unterelbe“, die zunächst in Form der „Norder- und Süderelbe“ das Hamburger Stromspaltungsgebiet umrandet. Beide Arme weisen im Bereich Hamburgs Sohlsprünge auf, durch die die Wassertiefe bis zu ihrer Vereinigung im Hamburger Hafen auf -17 m NN ansteigt (Stromkilometer 625). Von hier verläuft die Fahrrinne der Tideelbe mit einer Mindesttiefe von -15,8 m NN. Ab Brunsbüttel (Stromkilometer 695) weitet sich die Elbe und erreicht schließlich eine maximale Breite von 17,5 km (Cuxhaven-Trischendamm) bei Hoch- bzw. 1,5 km bei Niedrigwasser. Der letzte Abschnitt der Tideelbe ist die „Außenelbe“, welche sich von Cuxhaven

(Stromkilometer 724) bis in den Bereich der Großbaken A und Z (Stromkilometer 755,6 bzw. 756,2) nördlich des Scharhörn-Riffs erstreckt (BOEHLICH 2003).

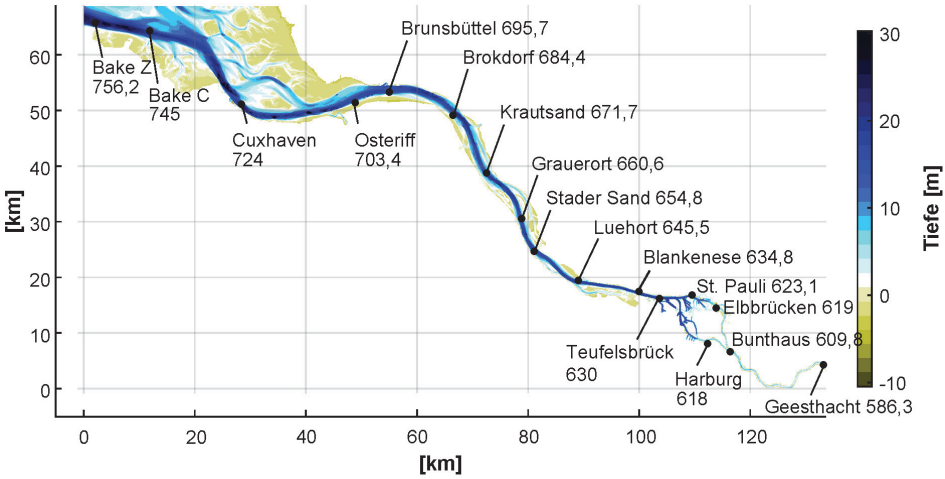

Abbildung 2: Topographie des Elbeästuars von 2010 mit Namen und Stromkilometern der hier relevanten Pegel.

Die Fahrrinne stromabwärts des Hamburger Hafens wurde in der Vergangenheit mehrfach vertieft. Die für die hier vorliegende Untersuchung relevanten Baumaßnahmen sind die der Jahre 1974–1978 um 1,5 m auf -13,50 m Seekartennull (SKN) sowie 1999/2000 um 0,9 m auf -14,40 m SKN (BAW 2006).

2.2 Tidedynamik der Elbe

Die Tideelbe ist ein Oszillator, der an seinem offenen Rand durch die Gezeiten der Nordsee zum Schwingen angeregt wird. Die Gezeitenkräfte des Mondes und der Sonne erzeugen im Nordatlantik Tidewellen, die über die offenen Ränder in die Nordsee und schließlich in die Elbe eindringen, wobei die halbtägige Hauptmondtide (M_2) die dominante Partialtide darstellt. Die unterschiedlichen Amplituden und Perioden weiterer Partialtiden (S_2, N_2, K_2, O_1, P_1, K_1) führen jedoch dazu, dass die gemessene Tide schwankende Amplituden und Perioden aufweist.

Auf ihrem Weg stromaufwärts wird die Gezeitenwelle zum einen durch Dissipation, Mündungskonvergenz, variable Wassertiefe und den Oberwasserzufluss verformt, zum anderen erfährt sie partielle Reflexionen (BOEHLICH 2003; MALCHAREK 2010). Die beobachtete Verteilung von Tidenhüben resultiert aus der Interferenz der verformten einfallenden mit partiell reflektierten Gezeitenwellen. Vom seeseitigen Rand des Ästuars stromaufwärts blickend steigt der heutige mittlere Tidenhub bis etwa zum Pegel Cuxhaven (Stromkilometer 724) zunächst um wenige Zentimeter, gefolgt von einer Abnahme um etwa 20 cm bis zum Pegel Brokdorf (Stromkilometer 684,4). Von Brokdorf bis St. Pauli (Stromkilometer 623,1) in der Norderelbe bzw. bis Harburg (Stromkilometer 615) in der Süderelbe steigt der mittlere Tidenhub um etwa 1m. Stromaufwärts dieser

beiden Pegel sinkt der mittlere Tidenhub mit zunehmender Nähe zum Wehr Geesthacht (Stromkilometer 586,3) bis um etwa 2 m in unmittelbarer Nähe zum Wehr (siehe Abb. 1).

Die Maxima im Bereich Hamburgs begannen sich erst zu Beginn der 1960er Jahre auszubilden und wachsen bis heute an (PROJEKTGRUPPE STROMBAU 2007). Seit Beginn der 1970er Jahre übertreffen diese Maxima die Amplitude der in die Außenelbe einfallenden Gezeitenwelle. Diese Verstärkung ist indikativ für ein Wirken von Resonanz.

2.3 Resonanz

Resonanz beschreibt in der Physik das verstärkte Mitschwingen eines schwingfähigen Systems. Weist ein Ästuar eine Geometrie auf, die eine einfallende Welle in einer Entfernung von einem Viertel ihrer Wellenlänge von der Mündung reflektiert, so addieren sich am geschlossenen Ende des Ästuars Oberflächenauslenkungen gleichen Vorzeichens, wohingegen sich an der Mündung Oberflächenauslenkungen unterschiedlichen Vorzeichens gegenseitig aufheben. Die Amplitude innerhalb des Ästuars wird folglich gegenüber jener an seiner Mündung im Rhythmus der Periode der Anregung verstärkt, das Ästuar befindet sich in Resonanz mit der Anregung (PROJEKTGRUPPE STROMBAU 2007). Das Kriterium für Resonanz ist demnach das „Quarter Wavelength"-Kriterium (QWL):

$$L = \lambda/4\,, \tag{1}$$

mit L der Länge des Ästuars und λ der Länge der anregenden Welle (PROUDMAN 1953; DEFANT 1961; GODIN 1993). Schreibt man die Wellenlänge der anregenden Welle als Produkt aus ihrer Phasengeschwindigkeit und ihrer Periode:

$$L = \frac{1}{4} \cdot \lambda = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{gh} \cdot \tau_{Anr}, \tag{2}$$

mit g der Gravitationsbeschleunigung, h der Tiefe und τ_{Anr} der Periode der Anregung, und setzt dies in die Periode der Eigenschwingung eines einseitig offenen Ästuars ein:

$$\tau_{Seiche} = 4L/\sqrt{gh} = \tau_{Anr}, \tag{3}$$

mit τ_{Seiche} der Eigenperiode des Ästuars, so ergibt sich, dass für ein Wirken von Resonanz die Eigenperiode des Ästuars τ_{Seiche} mit der Periode der Anregung τ_{Anr} übereinstimmen muss.

Dissipation wirkt verlängernd auf die Eigenperiode eines Oszillators (DIETRICH et al. 1975). Dies vermag der Erfüllung der Resonanzbedingung der Periodengleichheit entgegenzuwirken. Darüber hinaus bewirkt Reibung jedoch auch eine Ausdehnung des Periodenbereiches, in dem eine Verstärkung auftritt (BACKHAUS 2015). Folglich kann Resonanz in einer latenten Form bereits unter Ungleichheit beider Perioden $\tau_{Seiche} \neq \tau_{Anr}$ auftreten und durch eine weitere Annäherung beider Perioden verstärkt werden.

Um diesen Sachverhalt darzustellen, wird sich im Folgenden eines analytischen eindimensionalen Modells bedient. Dieses wird durch eine Lösung der horizontalen Bewegungsgleichungen und der Kontinuitätsgleichung für eine harmonische Oszillation eines einseitig offenen Beckens gebildet (PROUDMAN 1953):

$$\eta(x,t) = A_L \cdot \frac{cos(k \cdot x)}{cos(k \cdot L)} \cdot cos(\omega \cdot t), \tag{4}$$

mit $\eta(x,t)$ der Oberflächenauslenkung in der Entfernung x zum geschlossenen Ende ($x = 0$) zum Zeitpunkt t, A_L der Amplitude am offenen Rand in der Entfernung L zum geschlossenen Ende, $k = 2\pi/\lambda$ der Wellenzahl und $\omega = 2\pi/\tau$ der Kreisfrequenz.

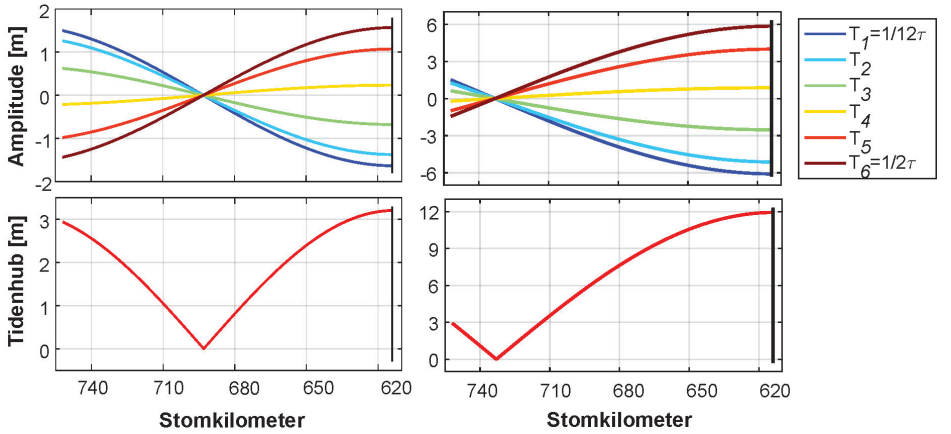

Abbildung 3: Ergebnisse von Glg. (4) für $\lambda/4 \ll L \approx \lambda/2$ (λ = 320km, L = 139 km ~ Bake Z – Stromkilometer 617) (links) und $\lambda/4 \approx L \ll \lambda/2$ (λ = 480km, L = 139km) (rechts) während der Dauer einer halben Periode bei A_L = 1,5 m.

Das analytische Modell verdeutlicht die Bedeutung der Geometrie für das Ausmaß einer Resonanz (Abb. 3). Das geschlossene Ende des Elbeästuars bildet in diesem Modell der Stromkilometer 617, da in dessen Bereich der maximale Tidenhub auftritt (siehe Kap. 4.4). Das Modell liefert für L = 139 km (Bake Z bis Stromkilometer 617) unter einer Anregung der Amplitude A_L = 1,5 m sowie der Wellenlänge λ = 320 km, also $L \approx \lambda/2$ = 160 km und $L \gg \lambda/4$ = 80 km, eine Verstärkung der Schwingung von 20 cm im Inneren des Ästuars (Abb. 3 links). Dabei besteht ein ortsfester Knotenpunkt bei Stromkilometer 694, etwa auf halber Länge des Ästuars. Für λ = 480 km, also $L \approx \lambda/4$ = 120 km und $L \ll \lambda/2$ = 240 km, folglich für eine weitreichendere Erfüllung des Resonanzkriteriums Glg. (1), erfährt der Tidenhub im Inneren des Ästuars eine Verstärkung auf den vierfachen Wert des Tidenhubs an der Mündung, wobei sich der Knotenpunkt der Mündung bis auf 20 km annähert (Abb. 3 rechts). Die hier simulierte Erhöhung der Wellenlänge λ der Anregung ist nach Glg. (2) äquivalent zu einer Steigerung der Tiefe h, wie sie die Tideelbe in der Vergangenheit mehrfach erfahren hat.

Glg. (4) beschreibt die Überlagerung zweier entgegengesetzt strebender Partialwellen identischer Amplitude (HARTWIG 2016). In der Tideelbe treten jedoch zwei entgegengesetzt strebende Partialwellen unterschiedlicher Amplitude auf, wobei die Amplitude der zweiten Welle derjenigen der ersten Welle minus dem Verlust durch Reflexion und Dissipation entspricht. Um dies zu berücksichtigen, werden im Folgenden beide Partialwellen mit einer konstanten Dämpfung c_{damp} sowie die nach links laufende Welle mit einem Reflexionskoeffizienten c_{refl} multipliziert, die den dissipativen Energieverlust bzw. den Grad der Reflexion angeben. Hieraus resultiert eine Oberflächenauslenkung $\eta \neq 0$ am Knotenpunkt. Abschließend berücksichtigt die Anwendung einer Phasenverschiebung φ auf die nach links laufende Partialwelle einen bei der Reflexion auftretenden

Phasensprung. Mittels dieser Ergänzungen und eines Additionstheorems für den Kosinus folgt aus Glg. (4)

$$\eta(x,t) = c_{damp} \cdot \frac{A}{2} \cdot \left[cos(k \cdot x - \omega \cdot t) + c_{refl} \cdot \cos(k \cdot (x + \varphi) + \omega \cdot t)\right], \quad (5)$$

mit $A = A_L / \cos(k \cdot L)$. Um realistische Oberflächenauslenkungen η zu generieren, bedarf Glg. (5) einer Amplitude $A_L \gg \eta$, da die Dämpfung c_{damp} die Amplituden reduziert und da sich die Auslenkungen beider entgegengesetzt propagierender Partialwellen teilweise aufheben. Die im Folgenden gewählten Werte der Dämpfung c_{damp}, der Amplitude A_L, des Reflexionskoeffizienten c_{refl} und der Wellenlänge λ entstammen experimentellen Abschätzungen. Nach Wahl von L entsprechend der Tideelbe, τ entsprechend der M_2-Gezeit und φ entsprechend einer experimentellen Identifikation (siehe Kap. 4.4) gibt das analytische Modell trotz der zu Grunde liegenden Approximation die Verteilung der im Jahr 2008 gemessenen mittleren Tidenhübe im Wesentlichen wieder (Abb. 4).

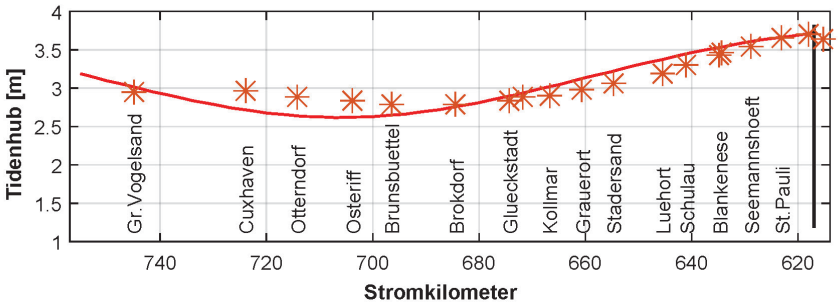

Abbildung 4: Ergebnisse des analytischen Modells für $L = 139$ km ~ Bake Z –Stromkilometer 617, $\lambda = 420$ km, $\tau = 44712$ s $= \tau_{M2}$, $A_L = 8{,}7$ m , $c_{refl} = 0{,}18$, $c_{damp} = 0{,}18$, $\varphi = 30{,}0$ km: Tidenhub der errechneten partiell stehenden Welle (Linie) und Messwerte von 2008 (Sterne).

3 Das numerische Modell

3.1 Aufbau und zu Grunde liegende Gleichungen

Das Modell VOM-SW2D („Vector-Ocean Model Shallow Water 2-dimensional") wurde am Institut für Meereskunde der Universität Hamburg entwickelt. Es beruht auf den nicht-linearen primitiven Gleichungen und berechnet Oberflächenauslenkungen und tiefengemittelte Strömungen auf einem horizontalen Gitter. Das Modell besitzt einen offenen Rand und eine freie Oberfläche. Die Bodenreibung wird mit Hilfe eines semi-impliziten Ansatzes berücksichtigt, der auch bei geringen Tiefen und hohen Strömungsgeschwindigkeiten numerische Stabilität gewährleistet (BACKHAUS 2012). Das Modell dissipiert lateralen Impuls mit Hilfe des skalenselektiven Laplace-Operators SAL (Spatially Averaged Laplace). Hierbei wird ein klassischer 5-Punkt-Laplace-Operator auf alle 5 Gitterpunkte angewendet, die er selbst abdeckt, wodurch er insgesamt 16 Gitterpunkte miteinbezieht. Für Reibung an der Küste ist in jeden der sich daraus ergebenden fünf Laplace-Operatoren eine variable Slip-Bedingung implementiert. Der SAL enthält ein skalenselektiv wirkendes Element, das bevorzugt Wellen der Länge $2 \cdot \Delta d - 4 \cdot \Delta d$ (d = Gitterschrittweite) dissipiert, wie sie z. B. durch den beweglichen Rand entstehen

können (BACKHAUS persönl. Komm.). Der SAL-Operator operiert mit einem positiven Diffusionskoeffizienten, während der üblicherweise verwendete bi-harmonische Operator Δ^2 zwar die gewünschten skalenselektiv dämpfenden Eigenschaften besitzt, dafür jedoch mit einem negativen Diffusionskoeffizienten arbeitet, für den es keine physikalische Begründung gibt (BACKHAUS 2012). Die Modellgleichungen sind auf ein Arakawa C-Gitter diskretisiert (ARAKAWA und LAMB 1977). Jede Zelle des Gitters kann geflutet werden und trockenfallen, was durch die Implementierung eines Algorithmus für einen beweglichen Rand ermöglicht wird. Zudem ist dieses Gitter in VOM anpassungsfähig: Eine prozessorientierte Erhöhung der Auflösung an topographischen Abhängen ermöglicht eine detaillierte Berücksichtigung der hier stattfindenden Prozesse (BACKHAUS et al. 2016). Da das Wattenmeer eine nur geringe Tiefe aufweist und während jeder Gezeit zu großen Teilen trockenfällt, hat die Bodentopographie hier einen besonders großen Einfluss auf die Dynamik. Aus diesem Grund stellt VOM das geeignete Instrument dar, um die Dynamik des Elbeästuars zu untersuchen.

3.2 Anregung

In das Modell wurde eine asymmetrische Sinusschwingung mit steilerem Flut- und flacherem Ebbast sowie einer Amplitude $A = 1{,}5$ m implementiert. Diese gleicht in ihrer Form der realen Ganglinie des Pegels Bake Z und in ihrer Wellenhöhe dem mittleren Tidenhub der Außenelbe. Mit dieser Schwingung wurde das Modell an jedem Punkt des offenen Westrandes mit Perioden von 3 bis 26 Stunden zur Erstellung von Periodogrammen bzw. von 12,42 Stunden zur Simulation der M_2-Gezeit angetrieben, jeweils über 5 bis 6 Perioden, bis das System eingeschwungen war. Die südlichen Randpunkte zum Watt wurden als Land behandelt. Der nördliche Rand wurde mit einer von-Neumann-Bedingung versehen, die jede ihn erreichende Oberflächenauslenkung zurückspiegelt.

3.3 Topographien

Das hydrodynamisch-numerische Modell wurde auf Topographien der Tideelbe aus den Jahren 1970, 1990, 2003 und 2010 angewendet. Diese bilden mit einer horizontalen Auflösung von 50 Metern und einer vertikalen Auflösung von 10 cm (1970 und 1990) bis 1 cm (2003 und 2010) die Bathymetrie des Elbeästuars von der Bake Z im Westen und Friedrichskoog im Norden bis zum Wehr Geesthacht im Südosten ab (siehe Abb. 2).

3.4 Kalibrierung

Unter Verwendung der Topographie von 2010 wurden die Amplitude der Anregung, der Oberwasserzulauf und die räumlich variablen Dissipationsparameter dahingehend variiert, dass sich die modellierten Niedrigwasser- und Hochwasserstände den entsprechenden Messwerten von 2010 annäherten. Die Variation der Dissipationsparameter dient der Berücksichtigung der räumlich variablen Verteilung Energie dissipierender kleinskaliger Unebenheiten, die in der Topographie aufgrund ihrer Rastergröße nicht aufgelöst sind.

Für den Bereich der Außenelbe ergab sich ein optimaler Bodenreibungsparameter von $17{,}5 \cdot 10^{-4}$ m²/s in Kombination mit einem Slip-Wert von 0,8 (1 = full, -1 = no-slip). Für

die Unterelbe bis Hamburg lieferten die Werte $7{\cdot}10^{-4}$ m²/s und 0,85 die besten Ergebnisse. Aufgrund der Abwesenheit ausgedehnter Watten nehmen die Flachwasserbereiche an diesem Flussabschnitt einen im Verhältnis geringeren Anteil des Gewässerquerschnittes ein. Dadurch fällt hier der hydraulische Radius $r_{hy} = A/L_U$, das Verhältnis des Querschnitts A zum benetzten Umfang L_U, größer aus als in der Außenelbe, was den geringeren Einfluss von Reibung erklärt. Für den Hafen und den Abschnitt zwischen Hamburg und Geesthacht wurden Reibungsparameter von $20{\cdot}10^{-4}$ m²/s bzw. $55{\cdot}10^{-4}$ m²/s gewählt. Für diese beiden Abschnitte ist keine separate Slip-Funktion für die laterale Reibung in das Modell implementiert, es wirkt der Wert der Unterelbe. Der hohe Wert des zuletzt genannten Flussabschnittes kompensiert den Reibungsbeitrag zahlreicher Buhnen. Neben diesen Parametern wurde ein Oberwasserzulauf von 500 m³/s implementiert, was einem häufigen Mittelwert vieler vergangener hydrologischer Jahrgänge entspricht und eine realistische Verteilung von Oberflächenauslenkungen unterstützt.

Diese Einstellungen wurden für alle Simulationen beibehalten. Eine separate Kalibrierung jedes einzelnen simulierten Jahres hätte das Modell zwar insgesamt realistischere Wasserstände erzeugen lassen, die angestrebte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Ausbaustufen hätte jedoch darunter gelitten.

4 Resultate

4.1 Das Eigenspektrum der Tideelbe

Die Ergebnisse der Modellläufe unter Benutzung der Topographie von 2010 sind in Form eines Periodogramms dargestellt (Abb. 5). Die Tidenhübe unterliegen einer deutlichen Frequenzabhängigkeit.

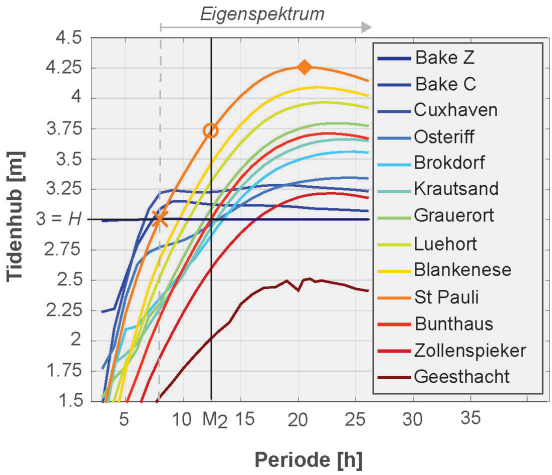

Abbildung 5: Periodogramm der Tideelbe 2010 mit Markierungen des maximalen Tidenhubs (Raute), des maximalen M_2-Tidenhubs (Kreis) und des St. Pauli-Tidenhubs gleich $H = 3\text{m}$ (Kreuz).

Der maximale Tidenhub tritt am Pegel St. Pauli unter einer Periode von 20,5 Stunden auf (Abb. 5, Raute). Dies stellt somit die Eigenperiode der Tideelbe dar. Die Menge aller

Perioden, aus denen am Ort der größten Oszillation (St. Pauli) Tidenhübe größer gleich der Wellenhöhe der Anregung $H = 2 \cdot A = 3$ m resultieren (Abb. 5, Kreuz), bildet das Eigenspektrum. Dieses erstreckt sich über alle simulierten Perioden größer gleich 8 Stunden. Sowohl die halbtägigen als auch die ganztägigen Gezeiten sind Element des Eigenspektrums. Aus der Eigenperiode kann mit Hilfe der Formel der Eigenschwingung eines einseitig offenen Beckens Glg. (3) dessen integrale Tiefe, die Laufzeittiefe berechnet werden (BACKHAUS 2015). Diese betrug 2010 5,8 m.

Die Ergebnisse der Modellläufe unter Benutzung der Topographien von 1970, 1990 und 2003 zeigen eine Zunahme des maximalen M_2-Tidenhubs in St. Pauli von 3,06 m über 3,60 m auf 3,78 m (Abb. 6, Kreise). Dies geht einher mit einer Verringerung der Eigenperiode von 25,55 Stunden über 22,5 Stunden hin zu 20,4 Stunden. Daraus folgen Laufzeittiefen von 3,7 m, 4,8 m und 5,8 m. Die untere Grenze des Eigenspektrums verschiebt sich von 12 Stunden über 9 Stunden hin zu 8 Stunden (Abb. 6, Kreuze). St. Pauli stellt in allen Periodogrammen den Pegel des größten Tidenhubs dar. Die Pegel stromauf davon werden zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht abgebildet.

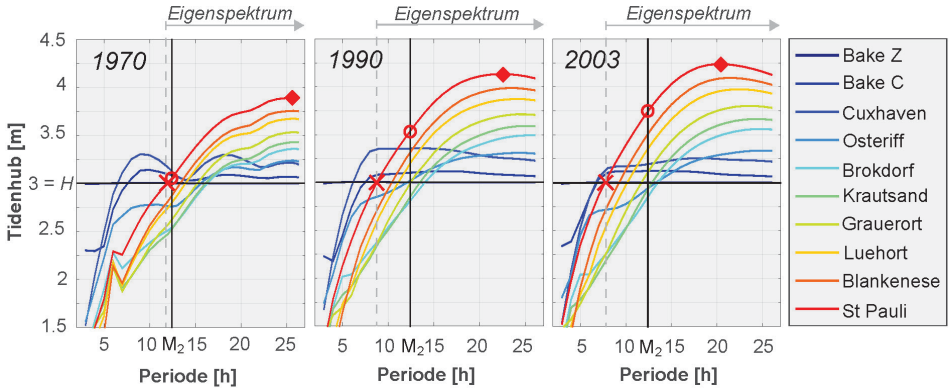

Abbildung 6: Periodogramme der Tideelbe zwischen Bake Z und St. Pauli für die Jahre 1970, 1990 und 2003 mit Markierungen der maximalen Tidenhübe (Rauten), der maximalen M_2-Tidenhübe (Kreise) und der St. Pauli-Tidenhübe gleich $H = 3\text{m}$ (Kreuze).

Die Zunahme der maximalen und der M_2-Tidenhübe sowie die Verringerung der Eigenperiode waren zwischen 1970 und 1990 am stärksten ausgeprägt, also in genau demjenigen Zeitraum, in dem die Fahrrinne ihre größte Vertiefung erfuhr. Innerhalb des Zeitraums 1990 bis 2003 wurde die Fahrrinne in geringerem Maße vertieft und sowohl die Zunahme der Tidenhübe als auch die Verringerung der Eigenperiode waren geringer ausgeprägt. Zwischen 2003 und 2010 schließlich wurde die Fahrrinne nicht vertieft und sowohl die Tidenhübe als auch die Eigenperiode blieben nahezu konstant. Dies verdeutlicht, dass zwischen den Vertiefungen der Fahrrinne auf der einen Seite und dem Anstieg der Tidenhübe und der Verringerung der Eigenperiode auf der anderen Seite ein Wirkzusammenhang besteht.

4.2 Strömungen

So wie die Tidenhübe sind auch die Strömungen entlang der Tideelbe Funktionen des Abstandes zur Mündung und der Periode der Anregung (Abb. 7).

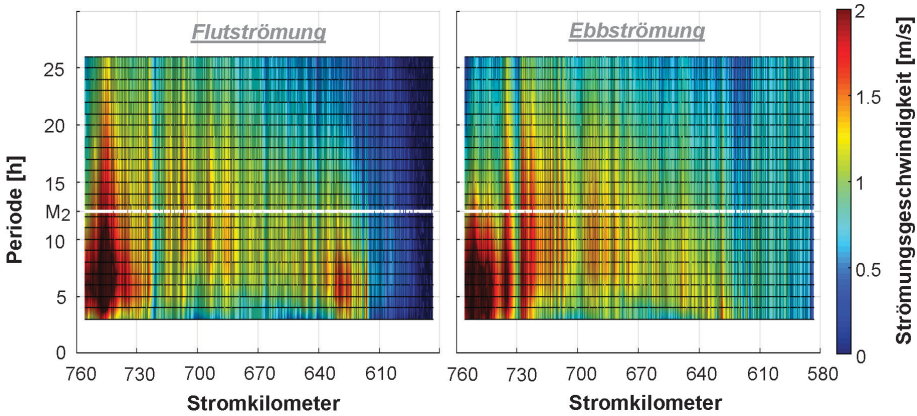

Abbildung 7: Simulierte Maxima der Geschwindigkeiten der Flutströmung (links) und der Ebbströmung (rechts) entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 durch die Norderelbe in Abhängigkeit von der Periode der Anregung mit Markierung der M_2-Periode (weiße Linie).

Generell nehmen die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten mit wachsendem Abstand zur Mündung ab. Darüber hinaus hängen die Geschwindigkeiten von der Periode der Anregung, der Strömungsrichtung und der Bathymetrie ab.

Neben der Stärke der Strömungen ist v. a. die Differenz der maximalen Flut- und Ebbströmungsgeschwindigkeiten, die resultierende Strömungsgeschwindigkeit, eines jeden Ortes von Interesse, denn diese prägt den Residualtransport gröberer Sedimente in Suspension (DRONKERS 1986). Eine positive resultierende Strömungsgeschwindigkeit charakterisiert den jeweiligen Flussabschnitt als flutströmungsdominiert während eine negative resultierende Strömungsgeschwindigkeit Ebbströmungsdominanz indiziert (Abb. 8).

Die Außenelbe ist zwischen den Stromkilometern 735 und 750 unabhängig von der Periode der Anregung klar flut- sowie zwischen den Stromkilometern 715 und 725 ebbströmungsdominiert. Darüber hinaus wird eine deutliche Flutströmungsdominanz der Stromkilometer 615 bis 640 ersichtlich. Dieser wird der Transport großer Mengen Sedimentes in den Hamburger Hafen zugeschrieben. Sie fällt unter Perioden kürzer derer der M_2 maximal aus. Dieser Bereich unterliegt also stets einer Flutströmungsdominanz, deren Ausprägung jedoch je nach Mondphase variiert. Die Stromkilometer 580 bis 615 stromauf der Sohlsprünge des Hamburger Hafens weisen einen kleineren Querschnitt auf, wodurch der Oberwasserzufluss hier einen größeren Einfluss auf die Strömungen ausübt. Der Großteil der Gezeitenenergie wird bereits vor Erreichen dieses Flussabschnittes dissipiert bzw. reflektiert, so dass die maximalen Beträge der hier auftretenden Flut- und Ebbströmungsgeschwindigkeiten gering sind. Zu deren geringer Differenz addiert sich die negative Strömungsgeschwindigkeit des Oberwasserzuflusses, weshalb dieser Flussabschnitt eine deutlich negative resultierende Strömungsgeschwindigkeit aufweist.

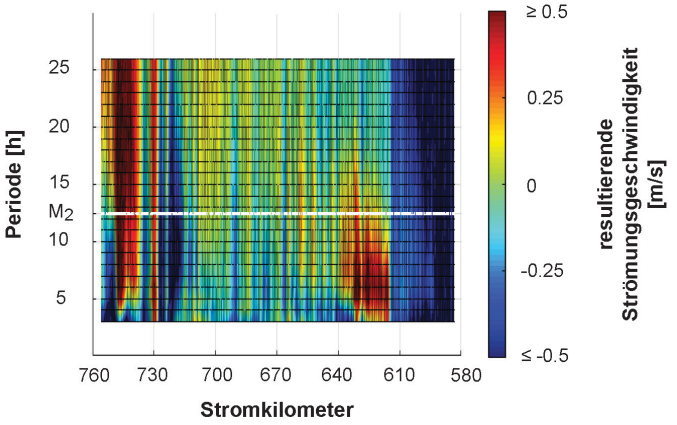

Abbildung 8: Simulierte resultierende Strömungsgeschwindigkeit der Tideelbe 2010 entlang des Fahrwassers durch die Norderelbe mit Markierung der Periode der M_2-Gezeit (weiße Linie).

Weder die Periodogramme der Strömungsgeschwindigkeiten noch jenes der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit weisen eine besondere Ausprägung unter der zuvor ermittelten Eigenperiode von 20,5 Stunden auf (siehe Kap. 4.1). Vergleiche der vier zur Verfügung stehenden Jahre zeigen, dass beide Parameter Veränderungen erfahren haben, die sich jedoch unstetig und daher ohne Analogie zu der Entwicklung der Fahrrinnentiefe vollzogen haben (HARTWIG 2016). Auf die Abbildung dieser Vergleiche wird hier aus Platzgründen verzichtet.

Parallel zur Zunahme der Fahrrinnentiefe vollzog sich im Gegensatz zu den Strömungsgeschwindigkeiten eine Veränderung der Strömungsdauern (Abb. 9).

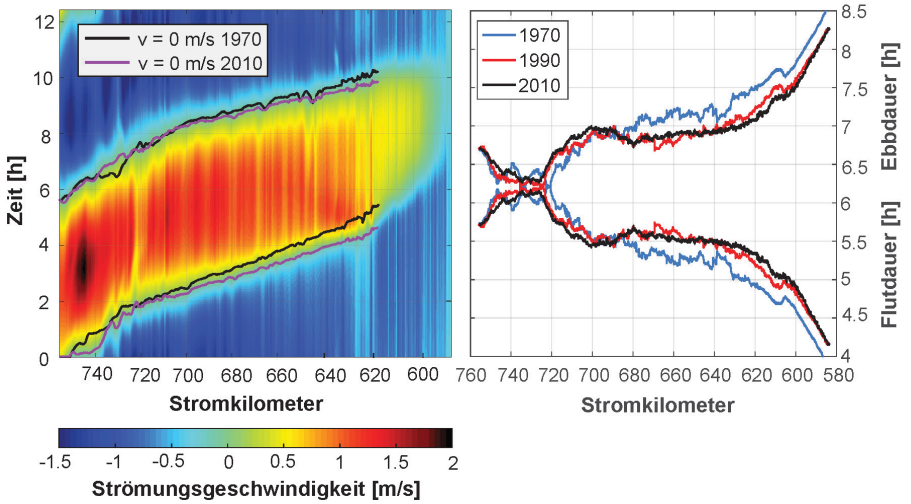

Abbildung 9: Simulierte Strömungsgeschwindigkeit entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 während einer M_2-Periode mit den Kenterpunkten von 1970 und 2010 (links) und simulierte Flut- und Ebbdauern entlang des Fahrwassers der Tideelbe 1970, 1990 und 2010 (rechts).

Die Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten in Form eines Hovmöller-Diagrammes offenbart eine Verlagerung der Kenterpunkte zwischen 1970 und 2010 (Abb. 9 links). Entlang der unteren Tideelbe findet 2010 die Kenterung der Strömungsrichtung mit wachsender Entfernung von der Außenelbe gegenüber 1970 zunehmend früher statt. Vor allem die Flutströmung setzt hier früher ein. Es resultiert eine Zunahme der Flutdauer. Eine genauere Bezifferung der Flut- und Ebbdauern der Modellergebnisse (Abb. 9 rechts) zeigt eine während der Jahre 1970, 1990 und 2010 fortwährende Zunahme der Flutdauer von bis zu 30 min in und stromabwärts von Hamburg sowie eine entsprechende Verkürzung der Ebbdauer. Um den Pegel Krautsand (Stromkilometer 670) betrug die Verlängerung der Flutdauer zwischen 1970 und 1990 ebenfalls bis zu 30 min, erfuhr bis 2010 jedoch wieder eine Verkürzung um bis zu 10 min. Messdaten bestätigen diese Aussagen generell (HARTWIG 2016). Die Kurven von 2003 ähneln denen von 2010 und werden hier zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht abgebildet.

Die Flutdauer im Bereich von Hamburg erfuhr zwischen 1970 und 1990 eine deutliche sowie zwischen 1990 und 2003 eine geringe Zunahme und blieb zwischen 2003 und 2010 konstant. Die Veränderungen verliefen somit in einem Verhältnis zueinander, analog zu jenem der Entwicklung der Fahrinnentiefe.

4.3 Beschleunigungen

Die Strömungen entlang der Tideelbe unterliegen kontinuierlichen Veränderungen im Takt der Gezeiten. Die Veränderung einer Bewegung entspricht physikalisch einer Beschleunigung. Die Darstellung der Strömung in Richtung des Fahrwassers und der resultierenden Beschleunigung in Form von Hovmöller-Diagrammen ermöglicht ein genaueres Verständnis der zeitlichen Abläufe (Abb. 10).

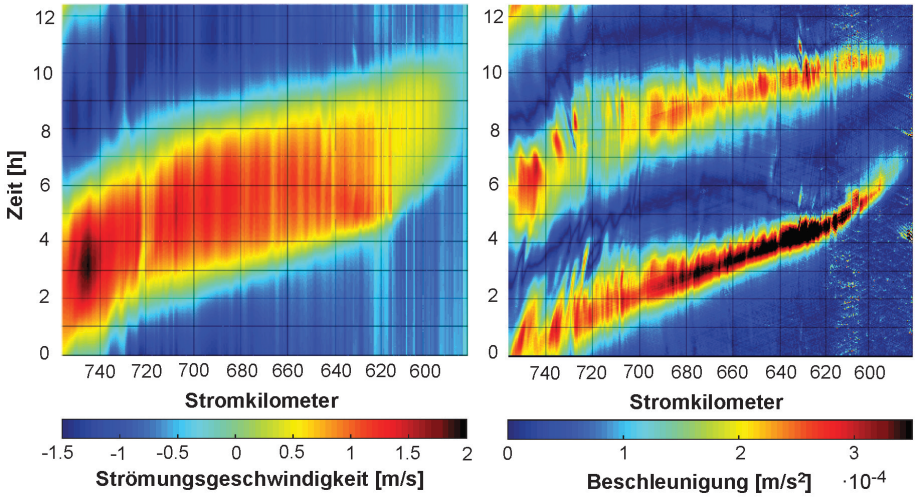

Abbildung 10: Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten (links) und resultierende Beschleunigungen (rechts) entlang und in Richtung des Fahrwassers der Tideelbe 2010 durch die Norderelbe während einer M_2-Periode.

Es zeigt sich, dass das Auftreten von Beschleunigungen in Richtung des Fahrwassers auf kurze Intervalle beschränkt ist. Während die meiste Zeit Beträge der Größenordnung 10^{-5} m/s² vorherrschen, steigen diese während des Wechsels von Ebbe zu Flut um eine und vereinzelt auch um zwei Größenordnungen an. Die simulierten Beschleunigungen um den Kenterpunkt von der Ebb- zur Flutströmung beschränken sich mit wachsendem Abstand zur Mündung bei steigenden Beträgen auf immer kürzere Intervalle und nehmen kurz vor Hamburg ihr Maximum von $2{,}6 \cdot 10^{-3}$m/s² an. Im Folgenden wird ihre Entwicklung auf Analogien mit den Vertiefungen der Fahrrinne hin untersucht (Abb. 11).

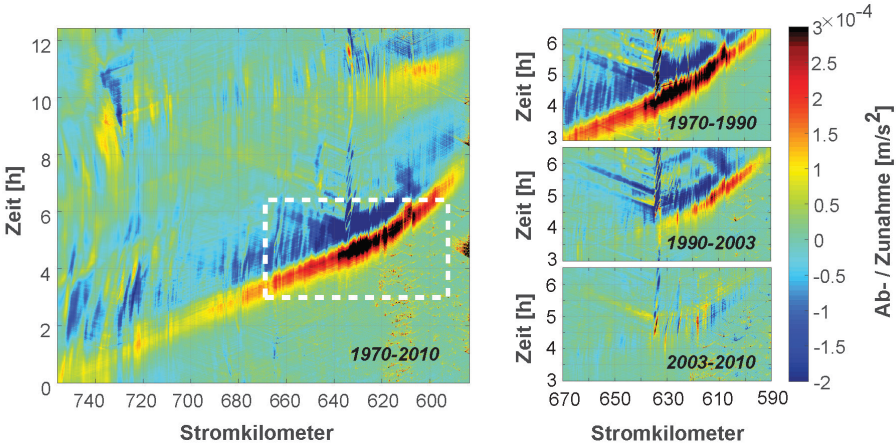

Abbildung 11: Entwicklung der Beschleunigungen entlang des Fahrwassers der Tideelbe von 1970 bis 2010 mit Markierung der maximalen Veränderungen (links) und Entwicklung des markierten Bereiches von 1970 bis 1990, 1990 bis 2003 und 2003 bis 2010 (rechts).

Der sich über etwa 3,5 Stunden zwischen den Stromkilometern 590 und 670 erstreckende Dipol aus Zunahme und Abnahme der Beschleunigung (Abb. 11 links, Markierung) hat seine Ursache in dem zunehmend früheren Einsetzen der Flutströmung (siehe Abb. 9). Die durchschnittliche Beschleunigung pro Gitterpunkt dieses Bereichs weist eine Zunahme auf, jedoch verläuft diese nicht kontinuierlich. Von 1970 bis 1990 zeigt sich eine deutliche Zunahme der durchschnittlichen Beschleunigung von $1{,}02 \cdot 10^{-4}$m/s² auf $1{,}17 \cdot 10^{-4}$m/s² (Abb. 11 rechts). Diese resultiert aus einer Verstärkung des Maximums bei gleichzeitiger Verlagerung hin zu einem früheren Einsetzen. Eine Auffälligkeit ist dabei die Entstehung mehrerer zeitlich nacheinander auftretender lokal beschränkter extremer Beschleunigungen von kurzer Dauer, die im Bereich von Blankenese bei Stromkilometer 633 auftreten. Bis 2003 setzt sich die Verlagerung des Beschleunigungsmaximums fort, wobei ebenfalls eine zusätzliche Verstärkung auftritt. Da jedoch die sich zeitlich wiederholenden Extrema bei Stromkilometer 633 wieder vollständig verschwunden sind, sinkt der Durchschnittswert des betrachteten Bereiches auf $1{,}07 \cdot 10^{-4}$m/s². Zwischen 2003 und 2010 schließlich ist keine deutliche zeitliche Verlagerung des Maximums mehr zu erkennen. Der Durchschnittswert steigt jedoch auf $1{,}12 \cdot 10^{-4}$ m/s².

Eine exakte Bezifferung der Beschleunigungen ist problematisch. Die Durchschnittswerte werden dadurch verzerrt, dass zum einen die Extremwerte ein bis zwei Größenordnungen höher ausfallen und zum anderen variable lang andauernde lokale Extrema auftreten. Bezieht man die im Jahr 1990 im Bereich des Stromkilometers 633

auftretenden lokalen Extrema nicht mit ein, so ist eine fortwährende Zunahme der durchschnittlichen Beschleunigung zu erwarten. Anhand der Diagramme (Abb. 11 rechts) lässt sich abschätzen, dass sich diese Verstärkung größtenteils zwischen 1970 und 1990 und zu einem geringeren Teil zwischen 1990 und 2003 vollzog, während sich zwischen 2003 und 2010 nur minimale Veränderungen ergaben. Demnach verliefen die Verstärkungen der Beschleunigungen im gleichen Verhältnis zueinander wie die Vertiefungen der Fahrrinne.

Die gezeigten Beschleunigungen sind gleichbedeutend mit Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit und sie treten um die Kenterpunkte der Strömungsrichtung auf. Besteht eine Asymmetrie zwischen beiden Kenterpunkten, so dass die Geschwindigkeitsveränderung von der Flut- zur Ebbströmung langsamer stattfindet als von der Ebb- zur Flutströmung, begünstigt dies einen landeinwärts gerichteten Residualtransport feiner Sedimente in Suspension (DRONKERS 1986). Eine eben solche Asymmetrie wurde hier nachgewiesen (Abb. 10 rechts). Ihre ebenfalls gezeigte Verstärkung (Abb. 11) erklärt folglich eine Zunahme des landeinwärts gerichteten Residualtransportes.

4.4 Reflektoren der Tidewelle

Ein integraler geometrischer Aspekt eines jeden Oszillators sind seine reflektierenden Enden. Im Falle der Tideelbe lassen sich mehrere potentielle Reflektoren der Tidewelle im Bereich Hamburgs identifizieren. Um ihren jeweiligen Einfluss auf die Resonanz abschätzen zu können, wurden sie schrittweise aus der Topographie entfernt und das Modell auf die so reduzierte Topographie angewendet (Abb. 12).

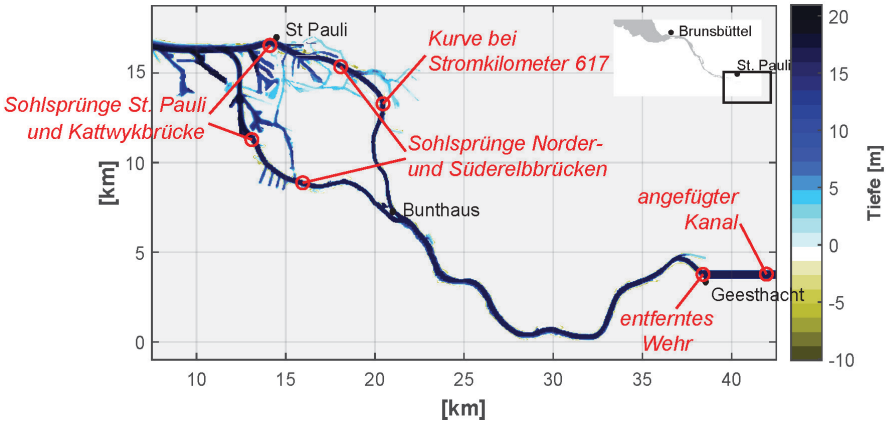

Abbildung 12: Ausschnitt der Modelltopographie nach Entfernung aller Sohlsprünge, Entfernung des Wehres Geesthacht und Anfügen eines Kanals abnehmender Tiefe mit Markierungen der potentiellen Reflektoren der Tidewelle.

Zuerst wurden die Sohlsprünge Norder- und Süderelbbrücken sowie das Wehr Geesthacht aus der Topographie entfernt. Dies geschah durch eine konstante Vertiefung von stromabwärts der Sohlsprünge bis nach Geesthacht auf diejenige Tiefe, die stromabwärts der Sohlsprünge vorliegt sowie das Anfügen eines 200 km langen nach Osten verlaufenden Kanals abnehmender Tiefe. Dieser diente zur Dissipation der Wellenenergie. In der

zweiten Simulation folgte die zusätzliche Entfernung der Sohlsprünge St. Pauli und Kattwyk-Brücke wiederum auf die Tiefe, die stromabwärts dieser Sohlsprünge zu finden ist. In einer dritten Simulation wurde die zusätzliche Entfernung der Flussbiegungen von Norder- und Süderelbe simuliert. Hierzu wurde die Süderelbe entfernt und die Norderelbe ab St. Pauli durch den nach Osten verlaufenden Kanal abnehmender Tiefe ersetzt.

Die Ergebnisse der Simulationen (Abb. 13 links) schreiben der Reflexion allein in den Kurven von Norder- und Süderelbe rund 1 m des Hamburger Tidenhubs zu. Die Reflexionen an den Sohlsprüngen St. Pauli und Kattwyk-Brücke erhöhen den Tidenhub um 20 cm sowie diejenige an den Sohlsprüngen Elbrücken und dem Wehr um weitere 30 cm. Das Maximum des Tidenhubs entlang der Norderelbe liegt mit wie auch ohne Sohlsprünge bei Stromkilometer 617, was für eine Dominanz dieser Reflexionsstelle gegenüber allen anderen spricht. Hier weist der Verlauf der Norderelbe eine Biegung von geringem Radius auf, in der der Großteil der kurvenbedingten Reflexion stattfindet. Der mündungsnahe Schwingungsbauch bleibt während aller Simulationen erhalten. Die Kurve der letztgenannten Simulation endet auf Höhe von St. Pauli, da der reale Verlauf der Norderelbe von hier an durch den Kanal abnehmender Tiefe ersetzt wurde. Aus der unveränderten Lage des Knotenpunktes am Stromkilometer 684 lässt sich schließen, dass an keinem dieser Reflektoren ein nennenswerter Phasensprung stattfindet. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer zweiten Reihe von Simulationen verifiziert, während derer die Modifikationen in anderer Reihenfolge vorgenommen wurden (HARTWIG 2016).

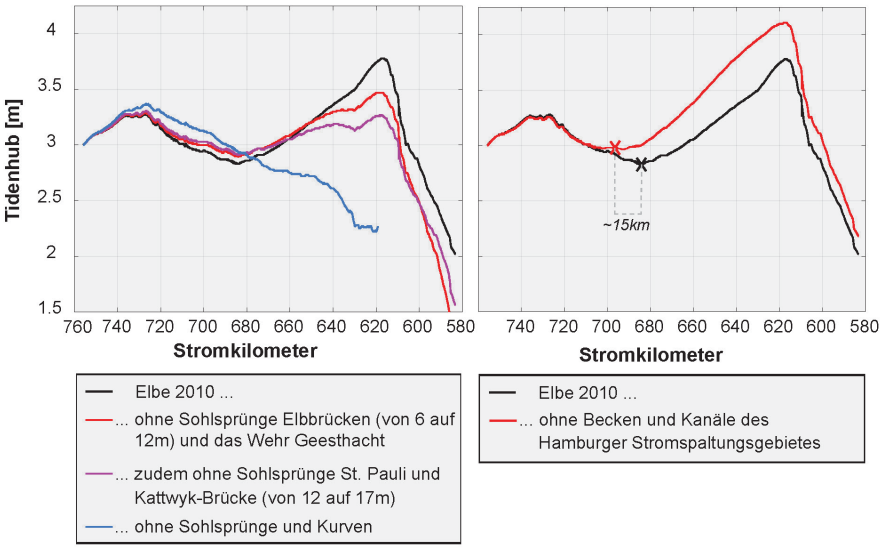

Abbildung 13: Simulierte Tidenhübe der Elbe 2010, ohne Sohlsprünge Elbbrücken, ohne Sohlsprünge des Hamburger Hafens, ohne Sohlsprünge und Flussbiegungen des Bereichs Hamburg (links) und der Elbe 2010 sowie ohne Kanäle und Becken des Hamburger Hafens (rechts) mit Markierung der Knotenpunkte (Kreuze), jeweils entlang der Fahrrinne durch die Norderelbe.

Zuletzt folgt die Betrachtung des Einflusses der Hafenbecken und Kanäle auf das Tidegeschehen (Abb. 13 rechts). Hierzu wurden diese aus der Topographie entfernt, unter Beibehaltung aller Sohlsprünge und Flussbiegungen. Es zeigt sich, dass die Becken und Kanäle des Hamburger Hafens keinerlei Reflexion bewirken, sondern im Gegenteil einen

erheblichen Teil der Gezeitenenergie dissipieren. Sie dämpfen den Tidenhub um 33 cm. Zudem wandert der Knotenpunkt ohne ihr Wirken um etwa 15 km in Richtung der Mündung, folglich verursachen sie eine Phasenverschiebung. Tritt bei der Reflexion einer einfallenden Welle eine Phasenverschiebung φ auf, so ist die aus der einfallenden und der verschobenen reflektierten Welle resultierende stehende Welle phasenverschoben um $\varphi/2$. Die Verschiebung des Knotenpunktes um etwa 15 km bedeutet folglich, dass eine Phasenverschiebung der reflektierten Welle von etwa 30 km auftritt, bzw. ein Phasensprung von 32° bezüglich der errechneten Wellenlänge $\lambda_{M2} = \tau_{M2} \cdot \sqrt{gh} =$ 337 km, was mittels der Laufzeittiefe $h =$ 5,8 m (s. Kap. 4.1) aus Glg. (3) folgt. Nimmt man den Ort der größten Reflexion, den Stromkilometer 617, als Ende des Oszillators, liegt der Knotenpunkt ohne den Einfluss der Becken und Kanäle des Hamburger Hafens bei Stromkilometer 700 gerade in einem Abstand von 83 km $\approx \lambda_{M2}/4 =$ 84,25 km zu diesem Ende, stimmt also nach Glg. (1) sehr gut mit der Theorie eines resonanten Ästuars überein.

4.5 Weitere Annäherung an die Erfüllung des Resonanzkriteriums

Volle Resonanz mit der M_2-Gezeit läge nach Glg. (3) genau dann vor, wenn die Eigenperiode der Tideelbe 12,42 Stunden betrüge. Eine beginnende Resonanz tritt jedoch schon vor der vollen Erfüllung des Resonanzkriteriums auf (siehe Kap. 2.3). Seit 1970 geht eine Verringerung der Eigenperiode in Richtung der M_2-Periode mit einem Anstieg der Tidenhübe einher. Ist dieser Anstieg durch eine Zunahme der Resonanz bedingt, muss eine weitere Verringerung der Eigenperiode, also eine zunehmende Erfüllung des Resonanzkriteriums, die Resonanz und somit die Tidenhübe weiter verstärken. Ein Weg, die Eigenperiode zu verringern, besteht in der Erhöhung der integralen Tiefe, z. B. durch eine Erhöhung des Wasserstandes im Zuge eines meteorologischen Ereignisses. Die Auswirkungen solcher Änderungen von $\pm$ 0,35 m wurden unter Verwendung des hydrodynamisch-numerischen Modells mit der Topographie von 2010 ermittelt (Abb. 14).

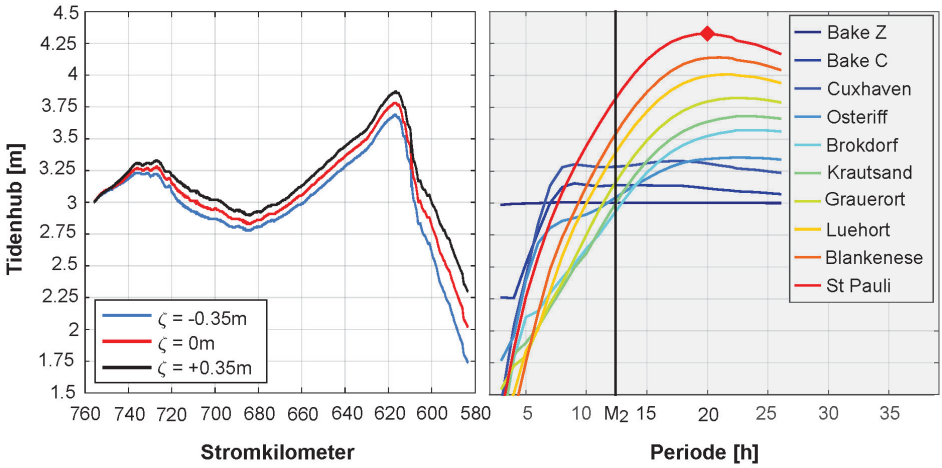

Abbildung 14: Simulierter Tidenhub entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 sowie für Wasserstandsänderungen von $\pm$ 0,35 m (links) und Periodogramm der Tideelbe 2010 mit Wasserstandserhöhung von 0,35 m (rechts).

Aus der Zunahme der integralen Tiefe um 0,35 m resultieren sowohl Anstiege der Tidenhübe um 5 cm auf Höhe von Cuxhaven und 9 cm bei Stromkilometer 617 (Abb. 14 links) als auch eine Verringerung der Eigenperiode um weitere 0,5 Stunden (Abb. 14 rechts). Also geht eine weitere Annäherung an die Erfüllung des Resonanzkriteriums mit einem weiteren Anstieg der Tidenhübe einher. Im Gegenschluss muss eine Verringerung des mittleren Wasserstandes das Resonanzkriterium von seiner Erfüllung entfernen. In Übereinstimmung mit dieser Annahme produziert das Modell unter diesen Voraussetzungen eine Verringerung der Tidenhübe.

Auch der Bau einer Tidebarriere kann die Eigenperiode verringern, bedingt durch die Reduzierung der Länge des Oszillators und deren Proportionalität zur Eigenperiode (siehe Glg. (3)) (Abb. 15). Die Modellergebnisse der Simulation einer Tidebarriere auf Höhe von Teufelsbrück (Stromkilometer 630) zeigen, dass ein solches Bauwerk die Tidenhübe um 70 cm steigen lässt und den Knotenpunkt in Richtung der Mündung versetzt (Abb. 15 links) sowie die Eigenperiode um 4,5 auf 16 Stunden reduziert (Abb. 15 rechts).

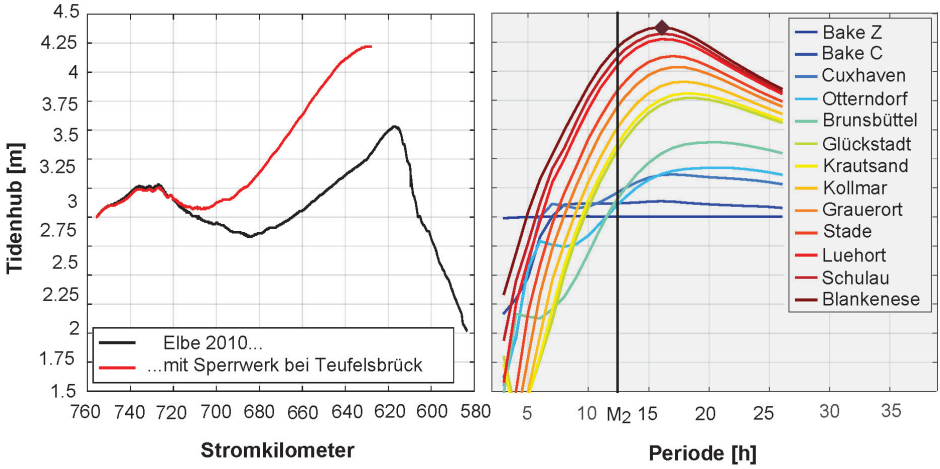

Abbildung 15: Simulierter Tidenhub entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 sowie mit Tidebarriere auf Höhe von Teufelsbrück (links) und Periodogramm der Tideelbe 2010 mit Tidebarriere auf Höhe von Teufelsbrück (rechts).

Beide Simulationen zeigen übereinstimmend, dass eine zunehmende Erfüllung des Resonanzkriteriums mit einer Verstärkung der resonanten Charakteristika einhergeht.

5 Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass die Tideelbe seit 1970 im Zuge zweier Fahrrinnenanpassungen einen Anstieg der Tidenhübe und eine Verringerung ihrer Eigenperiode von 25,55 auf 20,50 Stunden erfahren hat. Die Theorie besagt, dass sich im Falle einer weiteren Verringerung um 8 Stunden die Tideelbe in voller Resonanz mit der M_2-Gezeit befände, was maximale Tidenhübe zur Folge hätte. Die Frage, ob die heutige Tidedynamik bereits in beginnender Art und Weise von dieser Resonanz beeinflusst wird, ist ein Streitpunkt.

Dass seit den 1970er Jahren jede zunehmende Erfüllung des Resonanzkriteriums mit einer weiteren Verstärkung der anregenden Gezeit einhergeht, deutet jedoch darauf hin.

Für den Nachweis einer Resonanz wurden Vertiefungen und Verkürzungen der Tideelbe von 2010 simuliert, die das Resonanzkriterium der Erfüllung näherbringen. Die Ergebnisse dieser Simulationen weisen eine Verstärkung der bereits vorhandenen resonanten Charakteristika auf. Dies lässt den Schluss zu, dass durch die Modifikationen tatsächlich eine Resonanz verstärkt wurde. Die Verstärkung einer Resonanz impliziert, dass bereits eine zumindest latente Resonanz vorliegt. Die Ausdehnung des Eigenspektrums von 2010 deutet darauf hin, dass sich die Tideelbe tatsächlich in latenter Resonanz sowohl mit den halbtägigen als auch mit den ganztägigen Gezeiten befindet.

Die Simulation einer Tidebarriere stromab des Hamburg Hafens führt sowohl zu einer deutlichen Erhöhung der Tidenhübe als auch zu einer Verlagerung des Knotenpunktes in Richtung der Außenelbe. Beides bedeutet eine Verstärkung resonanter Charakteristika (siehe Abb. 2). Folglich dämpft der Hamburger Hafen die Resonanz. Die Simulation der Schließung der Becken und Kanäle des Hamburger Stromspaltungsgebietes zeigt, dass eben diese die Dämpfung der Resonanz hervorrufen.

Eine Untersuchung der Strömungen zeigt eine allgemeine Frequenzabhängigkeit sowie eine starke räumliche Variabilität mit einer Aufteilung in flut- und ebbströmungsdominierte Bereiche. Es wurde keine besondere Ausprägung unter einer Anregung der Eigenperiode und folglich kein Zusammenhang mit der Resonanz ersichtlich. Auch konnte keine Entwicklung aufgezeigt werden, die zeitlich parallel zu den Vertiefungen verlief.

Gemeinsam mit den Fahrrinnenanpassungen verlief hingegen eine Verlängerung der Flut- und Verkürzung der Ebbdauer vom Knotenpunkt bei Brokdorf bis nach Hamburg. Die Verlängerung der Flutdauer von bis zu 30 Minuten kann einen stromaufwärtigen Residualtransport von Schwebstoffen begünstigen. In der Tat stiegen die Mengen der Unterhaltungsbaggerungen entlang der gesamten Unterelbe während der 1970er Jahre an, wobei sich ein Schwerpunkt dieser Maßnahmen seit dem letzten Ausbau der Fahrrinne 1999/2000 in den Hamburger Hafen verschoben hat (HPA und WSV 2008), was sich mit den gewonnenen Erkenntnissen deckt (siehe Abb. 9 rechts).

Ein weiterer Zusammenhang zu den Vertiefungen wurde bezüglich einer Veränderung in der Periodizität der Strömungsverläufe entlang des Fahrwassers offenbar. Der Wechsel zwischen den Strömungsrichtungen stellt physikalisch eine Beschleunigung dar. Diese überwiegt deutlich um den Kenterpunkt von der Ebb- zur Flutströmung und nimmt von der Mündung in Richtung Hamburg stetig zu. Die Asymmetrie zwischen den Beschleunigungen beider Kenterpunkte begünstigt einen landeinwärts gerichteten Residualtransport feiner Sedimente in Suspension (DRONKERS 1986). Die Beschleunigung erfuhr im Zuge der Fahrrinnenanpassungen eine Verstärkung, was folglich eine mögliche Erklärung für die Zunahme des stromaufwärtigen Residualtransportes darstellt.

Zusammengefasst vollzogen sich parallel zu den Vertiefungen der Fahrrinne eine weitere Annäherung an das Resonanzkriterium durch eine Verringerung der Eigenperiode, Anstiege der Tidenhübe, Verkürzungen der Ebb- und Verlängerungen der Flutdauer sowie eine Beschleunigung der Kenterung von der Ebb- zur Flutströmung.

Wie gezeigt wurde, ist die Tiefe der Tideelbe eng verknüpft mit ihrer Eigenperiode. Diese wiederum ist gemeinsam mit den unveränderlichen Perioden der anregenden Gezeiten ausschlaggebend für das Ausmaß der Resonanz. Weitere Vertiefungen der Fahrrinne werden die Eigenperiode weiter verringern. Dies bedeutet eine weitere Annäherung

an das Resonanzkriterium. Es muss damit gerechnet werden, dass sich die Prozesse, die hiermit in Verbindung gebracht werden konnten, in Folge dessen ebenfalls verstärken.

6 Schriftenverzeichnis

ARAKAWA, A. and LAMB, V.R.: Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Models of the Atmosphere, 1977.

BACKHAUS, J.O.: Introduction to Modelling of Ocean Physics, Script of a two-hourly Lecture with exercises, ZMAW, University of Hamburg, Wintersemester, 2012.

BACKHAUS, J.O.: Latent Resonance on Tidal Rivers – With applications to River Elbe. Journal of Marine Systems (accepted with minor revisions), 2015.

BACKHAUS, J.O.; HÜBNER, U. und PÄTSCH, J.: Dynamik und Ökologie von Schelfmeersystemen – HAMSON und ECOHAM.
Stand 30.05.2016: https://www.ifm.uni-hamburg.de/research/shelf-dynamic.html

BAW: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse: Fahrrinnenanpassungen Unter- und Außenelbe – Transportprozesse und Morphodynamik, BAW-Nr. A3955 03 10062, Seite VI – H1 c, August 2006.

BOEHLICH, M.J.: Tidedynamik der Elbe, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86, S. 55–60, 2003.

DEFANT, A.: Physical oceanography. Pergamon Press, New York, 1961.

DIETRICH, G.; KALLE, K.; KRAUSS W. und SIEDLER, G.: Allgemeine Meereskunde, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 1975.

DRONKERS, J.: Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology, Netherlands Journal of Sea Research, Heft 20 (2/3), 117–131, 1986.

GODIN, G.: On tidal resonance. Continental Shelf Research 13, 89–107, 1993.

HARTWIG, F.: Resonanz in Tideflüssen mit Anwendung auf die Elbe. Diplomarbeit. Institut für Meereskunde der Universität Hamburg, 2016.

HPA und WSV: Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe, 2008.

HPA; WSA HAMBURG; WSA CUXHAVEN und WSA LAUENBURG: Tidehochwasser-, Tideniedrigwasser- und Tidenhubdaten der Pegel Bake A, Bake C, Blankenese, Brokdorf, Brunsbüttel Mole 4, Bunthaus, Cuxhaven-Steubenhöft, Glückstadt, Grauerort, Harburg, Kollmar, Krautsand, Lühort, Osteriff, Otterndorf, Over, Schöpfstelle, Schulau, Seemannshöft, Stadersand, St. Pauli, Wehr Geesthacht UP, Zollenspieker.
Stand 22.02.2016: http://www.portal-tideelbe.de/

MALCHAREK, A.: Gezeiten und Wellen. Vieweg+Teubner, 2010.

PROJEKTGRUPPE STROMBAU: Bericht zum ganzheitlichen Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Unter- und Außenelbe (unveröffentlicht), 2007.

PROUDMAN, J.: Dynamical Oceanography. Pergamon, 1953.

ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße; Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- u. Wasserbau, Technische Universität Hannover, Heft 36, 17–241, 1971.

WSV und WSA HAMBURG: Umweltverträglichkeitsuntersuchung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt, Abschnitt 8.2.5 Grundwasser, 1997.