
**Das Reflexions- und Resonanzverhalten
Tide-dominierter Ästuarer (RefTide)**

**Eine Analyse des Antwortverhaltens der Tideelbe auf die
Gezeitenanregung**

- Teilprojekte: Reflexion und Resonanz -

Schlussbericht zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

- nach Anlage 2 Teil I + II -

SCHLUSSBERICHT

Das Reflexions- und Resonanzverhalten Tide-dominierter Ästuarer (RefTide)

**Eine Analyse des Antwortverhaltens der Tideelbe auf die
Gezeitenanregung**

- Teilprojekte: Reflexion und Resonanz -

Schlussbericht zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

- nach Anlage 2 Teil I + II -

SCHLUSSBERICHT

Projektleitung (HPA): Dipl.-Ing. Thomas Strotmann

Projektbearbeitung (HPA): Sebastian Hein, M.Sc.

Projektleitung (TUHH): Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle

Projektmanagement (TUHH): Dr.-Ing. Edgar Nehlsen

Projektbearbeitung (TUHH): Vanessa Sohr, M.Sc.

Hamburg Port Authority

Hydrologie

Neuer Wandrahm 4

D 20457 Hamburg

Technische Universität Hamburg

Institut für Wasserbau

Denickestraße 22

D 21073 Hamburg

Hamburg, 29. Juni 2022

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung	4
I.1	Aufgabenstellung	4
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den das Forschungsvorhaben angeknüpft wurde	8
I.4.1	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	10
I.4.2	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	11
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II.	Eingehende Darstellung	11
II.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	11
II.2	Verwendung der Zuwendung hinsichtlich der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	16
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	17
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	18

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Der gezeitenbeeinflusste Abschnitt der Elbe zwischen dem Wehr in Geesthacht und der Mündung bei Cuxhaven wird als Tideelbe bezeichnet. Die Tideelbe ist ein wertvoller und geschützter Naturraum sowie Heimat und Wirtschaftsraum für rund 3,6 Mio. Menschen. Der Hamburger Hafen, der rund 100 km stromauf der Mündung liegt, ist der größte und wichtigste Hafen Deutschlands; ca. 600.000 Arbeitsplätze sind direkt und indirekt bundesweit von ihm abhängig. Nicht nur die Bedingungen und Lebensräume der ästuartypischen Arten, sondern auch die wirtschaftliche Nutzbarkeit der Tideelbe als Zufahrt zum Hamburger Hafen wird dabei in hohem Maße von hydrologischen Merkmalen wie den Strömungen und dem Tidenhub bestimmt.

Seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts hat sich die Tideelbe stark verändert, sowohl durch menschliche Eingriffe als auch durch ihre natürliche Dynamik. Insbesondere die wiederholte Anpassung der Fahrrinne an den Schiffsverkehr, die großflächigen Eindeichungen und der Bau des Wehres in Geesthacht, aber auch Veränderungen der Rinnen im Bereich der Mündung sind hier zu nennen. In der Folge haben u.a. der Tidehub in Hamburg und die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Fahrrinne zugenommen. Diese Veränderungen haben nicht nur nachteilige Folgen für Bauwerke, den Hochwasserschutz oder die Natur, sondern auch für die Erreichbarkeit des Hamburger Hafens: zum einen aufgrund gestiegener nautischer Herausforderungen, zum anderen aufgrund höherer Sedimentationen und damit einer Zunahme der Baggerbedarfe.

An den Pegeln im oberen Abschnitt der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Wehr Geesthacht wird seit Jahrzehnten ein – mehr oder weniger – stetiger Anstieg des Tidehubs registriert. Während der Tidehub in Hamburg in den ersten 10 Jahren nach Fertigstellung der Fahrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe im Jahr 2000 mit durchschnittlich rd. 0,75 cm/a etwa in der gleichen Geschwindigkeit wie vor dem Ausbau anstieg, hat sich der jährliche Anstieg des Tidehubs zwischen 2010 und 2017 um den Faktor 4 auf rd. 3 cm/a beschleunigt (Abbildung 1). In diesem Zeitraum wurden keine nennenswerten Veränderungen am

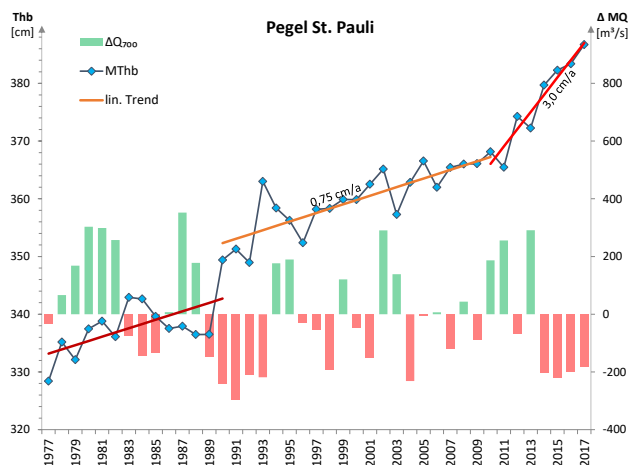


Abbildung 1: Entwicklung des Tidehubs (Thb) am Pegel St. Pauli sowie Abweichungen des jährlichen mittleren Oberwasserzuflusses in die Tideelbe gemessen bei Neu Darchau vom langjährigen Mittelwert (ΔMQ).

Gewässer vorgenommen, die als Ursache für die Entwicklung in Frage kommen könnten. Insgesamt wird an dieser Stelle deutlich, dass die komplexen Wirkzusammenhänge trotz des in den vergangenen Jahrzehnten deutlich erweiterten Systemverständnisses noch nicht in all ihren möglichen Wechselwirkungen verstanden sind.

Die Klärung der Ursachen für die insgesamt besorgniserregende Entwicklung des Tideregimes in der Elbe und daraus abzuleitende nachhaltige Ansätze, die einer weiteren Verschlechterung entgegenwirken können, sind sowohl volkswirtschaftlich als auch gesellschaftspolitisch von hohem Interesse.

Backhaus (2015) und Winterwerp (2013) legten nahe, dass als eine mögliche Ursache für die Entwicklung des Tideregimes ein verändertes Reflexions- und Resonanzverhalten des Elbeästuars in Frage käme. Die komplexen (Wechsel-)Wirkungen des Reflexions- und Resonanzverhaltens sind für das Elbeästuar noch weitgehend unerforscht. Hier knüpft das Forschungsvorhaben RefTide mit dem Ziel an, das Reflexions- und Resonanzverhalten in der Tideelbe grundlegend zu beschreiben und mögliche Auswirkungen von Veränderungen im System zu untersuchen.

Im Vorhaben wurden umfassende Analysen der Tidedynamik auf Grundlage von analytischen und numerischen Ansätzen sowie einer umfassenden Reflexionsanalyse der Partialtiden (Wasserspiegelauslenkung und Strömungsgeschwindigkeiten) entlang des Ästuars durchgeführt.

Das Vorhaben gliederte sich in zwei Teilvorhaben:

Im Teilprojekt „Reflexion“ (TUHH) lag der Fokus auf den Prozessen Reflexion und Dissipation von Tidewellen in Ästuaren. Hierzu wurden verschiedene Methoden unterschiedlicher Komplexität verwendet, die von analytischen Ansätzen bis zu räumlich hochauflösenden numerischen Modellen reichen. Anhand der durchgeführten Systemstudien wurden detaillierte Erkenntnisse hinsichtlich der Ausbildung des Schwingungssystems gewonnen.

Das Teilprojekt „Resonanz“ (HPA) fokussierte auf die Erweiterung der Systemvorstellungen zur Entwicklung von Resonanz in tidedominierten Ästuaren. Hierzu wurde ein Tool zur Auswertung von Pegeldaten entwickelt, das die harmonische Analyse von Partialtiden mittels der HAMELS-Methode (Harmonic Analysis, Method of Least Squares) ermöglicht. Da die Ausbildung eines Schwingungssystems in einem Ästuar ein eher langfristiger Prozess ist, fokussierten sich die Systemstudien auf den ins Ästuar eingehenden Tidehub, morphologische Veränderungen, Tidemittelwasservariationen und Veränderungen des Oberwasserzuflusses als charakteristische Kenngrößen für das Schwingungsverhalten des Ästuars und seiner Dämpfung.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zu Beginn des Vorhabens lagen bereits umfangreiche Untersuchungen zur Veränderung der Tidedynamik in Ästuaren vor. Dies gilt insbesondere für die im Fokus der Untersuchungen stehende Tideelbe. Die bestehenden Untersuchungen basieren im Wesentlichen auf der Auswertung vorhandener Pegeldaten sowie numerischen Simulationen und liefern ein weitreichendes Systemverständnis. Wenngleich viele Beobachtungen in der Realität hiermit erklärbar sind, stößt das Wissen bei einigen Phänomenen an Grenzen und kann keine eindeutigen Erklärungen liefern. Das liegt im Wesentlichen an der Komplexität der interagierenden Prozesse innerhalb eines Ästuars, die zum einen von den Eigenschaften des Ästuars selbst (u.a. Reibung, Konvergenz, (Teil-)Reflektoren, Schwingungsraum) und zum anderen von mehreren sich überlagernden Tidewellen bestimmt werden, und eine eindeutige Beschreibung bzw. Abbildung bisher unmöglich machen.

Es ist Aufgabe der Forschung, die umrissene Lücke zu schließen und die Wirkungen der Prozesse isoliert und in Kombination qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Hier setzt das Forschungsvorhaben RefTide an, das von der Abteilung Hydrologie der Hamburg Port Authority (HPA) und dem Institut für Wasserbau (IWB) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) entwickelt und als KFKI (Kuratorium für Forschung im

Küsteningenieurwesen) Forschungsvorhaben bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beantragt wurde. Das Vorhaben wurde am 21.08.2018 zur Förderung durch das BMBF bewilligt. Das Projekt lief vom 01.10.2018 bis 30.09.2021 mit einer anschließenden kostenneutralen Projektverlängerung bis zum 31.12.2021. Projektträger war die Forschungszentrum Jülich GmbH.

Die Projektpartner haben in verschiedenen (Forschungs-)Vorhaben in der Vergangenheit umfassende Kenntnisse in den für das Projekt relevanten Bereichen gesammelt, wodurch das existierende Fachwissen, die verfügbaren Daten und die Methoden auf dem nationalen und internationalen Stand der Technik gebündelt zur Verfügung stehen.

Das Institut für Wasserbau der TUHH hat weitreichende Erfahrungen mit der Analyse und Bewertung von Wasserständen, Strömungen und morphologischen Bedingungen in Ästuaren und an Küsten (z. B. aus den Forschungsvorhaben EasyGSH-DB, AMSEL-Ostsee, PEARL, KAREL, Klee, HoRisK, KLIMZUG-NORD, RAdOst, ...). Zudem verfügt das Institut für Wasserbau der TUHH über weitreichende Erfahrungen mit der numerischen Modellierung hydrodynamischer und morphologischer Prozesse an Küsten und in Ästuaren. Für das Elbeästuar und für das Weserästuar wurden über die Jahre Modelle und Modellsysteme aufgebaut, die bisher unter anderem als Grundlage für die hydrodynamisch numerische (HN) Modellierung von mittleren Tideverhältnissen und Sturmfluten (Projekt PEARL und andere), real-time-Vorhersage von Wasserständen in Kooperation mit dem BSH (Projekt PEARL) sowie zur Bewertung morphologischer Veränderungen (Projekt MorphoWeser in Kooperation mit der BAW) herangezogen wurden. Prof. Fröhle hat mehrere Verfahren zur Reflexionsanalyse als Grundlage für die Bewertung von Bauwerken im Wellenkanal entwickelt und umgesetzt.

Die HPA hat sich bereits in der Vergangenheit als Partner in diversen Interreg Projekten, wie 'TIDE' (Tidal River Development, 2010 – 2013), DeltaNet (Network of European Deltas 2009 – 2012) und THESEUS (Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate, 2009 – 2013), als auch in KFKI - Projekten zuletzt innerhalb des Verbundprojektes OPTEL (D - Studien zur Stauentwicklung in der Tideelbe, 2008 – 2011) intensiv auf wissenschaftlichem Niveau mit verschiedenen Inhalten der Ästuarsystemforschung beschäftigt. Die Abteilung Hydrologie der HPA besitzt umfassende Expertise in der Analyse und Bewertung von Naturdaten sowie der Identifizierung von nicht natürlichen Veränderungen mit Hilfe empirisch-statistischer Modelle. Im Kontext der zuvor genannten Aufgabenstellung sind im Jahr 2016 zwei Arbeiten zum Resonanzphänomen in Ästuaren entstanden, die sich dem Thema einerseits durch Systemstudien in einem hydronumerischen Modell (Hartwig, 2016) und andererseits durch Spektralanalysen unter Verwendung verschiedener Verfahren (Michalzik, 2016) angenähert haben. Letztere hat dabei durch die vorausgelaufene umfangreiche Plausibilisierung eine wertvolle Datengrundlage mit 17 Jahren Wasserstandszeitreihen (1-Minuten-Werte) für eine Pegelkette mit 24 Stationen von Helgoland bis zum Wehr Geesthacht erzeugt, auf die ohne große Vorarbeiten angesetzt werden konnte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist in zwei Teilprojekte (RefTide-A – Reflexion, bearbeitet von der TUHH und RefTide-B – Resonanz, bearbeitet von der HPA) sowie in sechs Arbeitspakete geteilt. Eine Übersicht der Arbeitspakete ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Arbeitspakete wurden durch beide Partner in engem Austausch bearbeitet. Die Arbeitsteilung in den Arbeitspaketen ergab sich durch die inhaltlichen Schwerpunkte Resonanz (HPA) und Reflexion (TUHH).

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP	Kurzbeschreibung	Ausführliche Beschreibung
1	Vorbetrachtungen	Systematische Vorbetrachtungen zum Reflexions- und Resonanzverhalten der Tidewelle in Ästuaren
2	Datengrundlage	Aufbereitung der Datengrundlage
3	Analysewerkzeuge	Theoretische Ableitung und Entwicklung der Analysewerkzeuge
4	Analyse und Bewertung	Analyse und Bewertung des Reflexions- und Resonanzverhaltens
5	Synthese	Synthese und Bewertung des systemischen Zustands der Elbe
6	Projektmanagement	Koordination und Kommunikation

In Arbeitspaket 1 erfolgten systematische Vorbetrachtungen zum Reflexions- und Resonanzverhalten der Tidewelle in Ästuaren. Hierzu wurde eine vertiefte Analyse des vorhandenen Schrifttums durchgeführt. Auf Grundlage der Erkenntnisse wurden generalisierte Systemvorstellungen zum Reflexions- und Resonanzverhalten von Ästuaren entwickelt, die schließlich auf das Elbeästuar übertragen wurden.

Das zweite Arbeitspaket sah die Plausibilisierung, Aufbereitung und Zusammenstellung von verfügbaren Mess- und Modelldaten zum Wasserstand, zu Strömungsgeschwindigkeiten und zu den Wassertiefenverhältnissen im Elbeästuar in einer gemeinsamen Datenbank vor. Das AP 2 wurde in engem Austausch von beiden Partnern bearbeitet.

In Arbeitspaket 3 erfolgte die theoretische Ableitung, Entwicklung und Verifikation von Analysewerkzeugen. Im Teilprojekt „Reflexion“ wurden von der TUHH Werkzeuge zur Reflexionsanalyse der Tidewelle und der erzeugten Obertiden auf Grundlage von analytischen und numerischen Methoden geschaffen. Im Teilprojekt „Resonanz“ wurden von der HPA Werkzeuge zur harmonischen Analyse der Partialtiden und zur Analyse des Resonanzverhaltens der unterschiedlichen Partialtiden geschaffen.

Im Rahmen vom Arbeitspaket 4 wurde das Reflexions- und Resonanzverhalten des Elbeästuars mit Hilfe der entwickelten Werkzeuge analysiert und bewertet. Hierzu wurden die entwickelten Analysewerkzeuge auf die verfügbaren Datensätze angewendet. Dabei wurden das Reflexionsverhalten und das Resonanzverhalten für das Elbeästuar analysiert und Einflussfaktoren, wie der ins Ästuar eingehende Tidehub, der Oberwasserzufluss, das Tidemittelwasser, Windstau und Windsunk sowie morphologische Veränderungen (natürlich und ausbaubedingt), identifiziert. Zudem wurden mit den Analysewerkzeugen Sensitivitätsanalysen zur Bewertung möglicher zukünftiger Veränderungen des Systems durchgeführt.

Das Arbeitspaket 5 umfasste die Synthese und Bewertung der entwickelten Verfahren und der Ergebnisse bezüglich des systemischen Zustands der Tideelbe. Neben Beschreibungen des Systemzustands im Hinblick auf i) das Reflexionsverhalten der Tidewelle und der Partialtiden und ii) den Resonanzzustand des Elbeästuars sowie mögliche Anzeichen eines Regime Shifts bzw. der Entwicklung von unumkehrbaren Entwicklungen (Tipping-Points) im Elbeästuar wurden die auf unterschiedlichen Ansätzen basierenden numerischen Modelle hinsichtlich der Abbildung des Reflexionsverhaltens und der Resonanz bewertet.

Das AP 6 bestand aus der Koordination des Vorhabens sowie der internen und externen Kommunikation. Die fachliche Koordination erfolgte durch die TUHH, die Kommunikation wurde von beiden Partnern übernommen.

Innerhalb der Projektlaufzeit fand neben den regelmäßigen Treffen zwischen den Projektpartnern ein Austausch mit Fachleuten aus der Praxis und der Wissenschaft statt. Geplant war hier eine Workshop-Reihe mit aufeinander aufbauenden Themen. Während der erste Workshop noch wie geplant in Präsenz stattfinden konnte, mussten die weiteren Workshops bedingt durch die vom Corona-Virus verursachte Pandemie und die hieraus resultierenden Einschränkungen entfallen. Stattdessen wurde der Austausch zwischen dem Projekt und den Fachleuten aus der Praxis und der Wissenschaft im weiteren Verlauf des Vorhabens in Form von bilateralen Treffen fortgesetzt.

Zudem fanden drei Treffen mit der projektbegleitenden Gruppe des KFKI statt, die sich wie folgt zusammensetzte:

Prof. Frank Thorenz - Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen KFKI c/o NLWKN-Betriebsstelle Norden-Norderney

Dipl.-Ing. Maria Blümel - Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH)

Dr. Ingo Entelmann - Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSV)

Dr. Andreas Boesch - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Insgesamt wurden die Ziele der Arbeitspakete erreicht, wenngleich der Zeitplan aufgrund der Corona-Pandemie angepasst werden musste. Die Verzögerungen in der Bearbeitung wurden im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 Monate ausgeglichen, so dass das Vorhaben am 31.12.2021 nach einer Bearbeitungszeit von 39 Monaten schließlich erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den das Forschungsvorhaben angeknüpft wurde

Der Stand von Wissenschaft und Technik an den angeknüpft wurde, ist im fachlichen Abschlussbericht der Projektpartner (Anlage) sowie in den aus dem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichungen ausführlich dargestellt.

An dieser Stelle wird eine kurze Zusammenfassung des Wissensstandes zu Projektbeginn gegeben.

Ästuare sind trichterförmige Flussmündungen, in denen das Wasservolumen durch gezeitenerzeugte periodische Wasserspiegelauslenkungen an der seeseitigen Öffnung zu eigenen longitudinalen Schwingungen angeregt wird. In natürlichen, schwach konvergierenden und mäandrierenden Ästuaren nimmt die Amplitude der Tidewelle mit fortschreitender Entfernung von der Mündung stetig ab, bis ihre Energie durch Sohlreibung vollkommen aufgezehrt ist. Auch in der Tideelbe war dies bis zur Mitte des vergangenen Jahrhunderts der Fall.

Heute ist die Tideelbe ein anthropogen stark überprägtes Ästuar. Unter anderem wurde der 130 km lange Abschnitt zwischen der Mündung und dem Hamburger Hafen wiederholt an die ständig wachsenden Schiffsgrößen der globalen Containerflotte angepasst, indem die Fahrrinne vertieft und verbreitert wurde. Die Tidegrenze ist seit den frühen 1960er-Jahren

durch ein Wehr rd. 35 km stromauf von Hamburg bei Geesthacht fixiert. Infolge der diversen Vertiefungen der Seeschiffahrtsstraße zwischen der Mündung und Hamburg ist darüber hinaus ein beträchtlicher Höhenversatz in der Sohle von rd. 10 m entstanden. Dieser Sohl sprung wirkt neben dem Wehr bei Geesthacht als Reflektor für die Gezeitenschwingungen. Im Ergebnis der Anpassungen ist der Tidenhub in Hamburg stetig angestiegen und beträgt derzeit im Mittel 3,75 m, womit er rd. 25 % größer ist als im Bereich der Mündung (vgl. Abbildung 2).

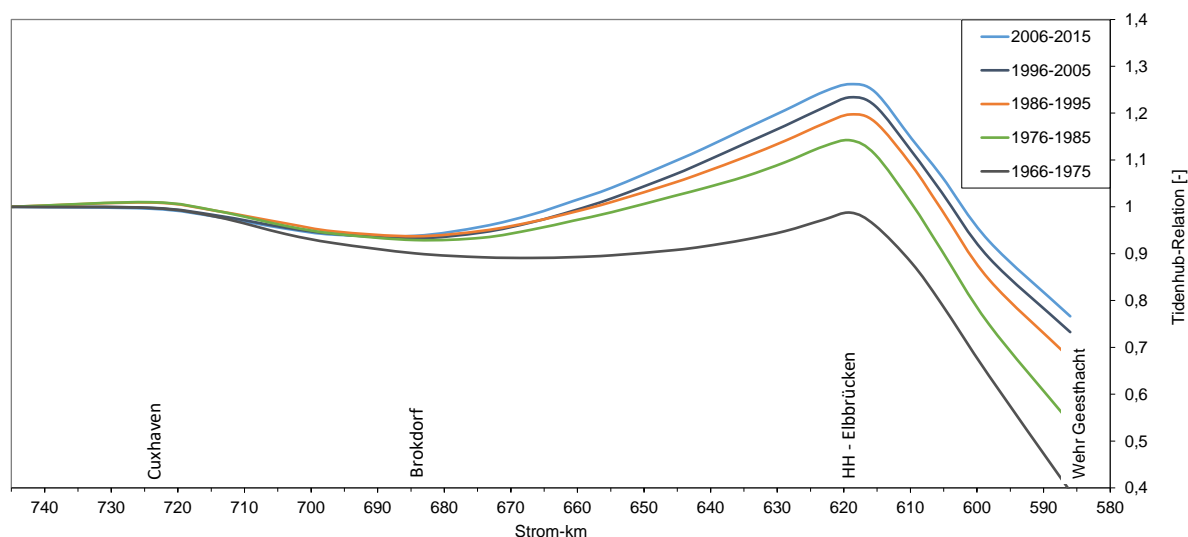


Abbildung 2: Entwicklung des Tidehubs im Elbeästuar in Relation zur Eingangswellenhöhe an der Mündung, Station Bake C

Der Verlauf des Tidehubs entlang der Tideelbe mit dem ausgeprägten Maximum im Abschnitt bei Hamburg weist auf eine signifikante Teilreflexion der M_2 -Gezeit an dieser Stelle hin. Die progressive Entwicklung des Tidehubs über die Zeit kann auf eine Verstärkung des Reflexionsgrades oder eine sich entwickelnde Resonanz hindeuten.

Resonanz ist das verstärkte Mitschwingen eines schwingfähigen Systems, wenn es einer zeitlich veränderlichen Einwirkung unterliegt. Dabei kann das System um ein Vielfaches stärker ausschlagen als bei einem konstanten Einwirken der Anregung mit ihrer maximalen Stärke. Bei periodischer Anregung muss die Erregerfrequenz in der Nähe der systemeigenen Eigenfrequenz oder einer ihrer ungeraden Harmonischen liegen. Die Eigenfrequenz eines Ästuars wird maßgeblich von seiner Länge, der Wassertiefe und seiner Hydromorphologie, also den Dämpfungseigenschaften bestimmt.

Die Bildung von Schwingungen durch Resonanz in einseitig offenen Systemen ist seit langem in der Ozeanographie bekannt (Dietrich et al. 1975) und funktioniert analog zu den in der Musik verwendeten einseitig offenen Schwingungssystemen (Aebi 1970). Nach dem Quarter-Wavelength Kriterium von Proudman (1953) tritt in einem Becken volle Resonanz ein, wenn seine Länge einem Viertel der Wellenlänge der Gezeit entspricht. Ein bekanntes Beispiel für Gezeitenresonanz ist die Bay of Fundy mit einem Tidehub von 16 m bei Springtide.

Bakker (1998) hat einen Prozess beschrieben, der unter bestimmten Voraussetzungen sogar zur Instabilität eines Ästuars führen kann. Bei Vorliegen der o.g. Voraussetzungen stellt sich eine „optimale Resonanz“ der in das System passenden Frequenzkomponente ein, die dann eine stehende Welle ausbildet. Bei Systemen, die sich in der Nähe der

optimalen Längenverhältnisse befinden, ist es möglich, dass morphologische Änderungen zu einer Veränderung der Wellengeschwindigkeit hin zu optimalen Resonanzverhältnissen führen. Stellt sich durch die Nähe zwischen Eigenschwingungsfrequenz und anregender Gezeit eine Resonanz ein, kann sich die Amplitude durch Verringerung der Dissipation eigenständig verstärken, der Querschnitt weitet sich auf und der Tidehub nimmt zu. Beide Vorgänge werden als selbstorganisierte Resonanz bezeichnet. Sie kann zur Instabilität des Systems in dem Sinne führen, als dass sie durch kleine Veränderungen (Eingriffe) ausgelöst wird und eine Entwicklung mit gravierenden Folgen in Gang setzt, deren Ende zunächst nicht absehbar ist.

Da die Wellenlänge bei einer Flachwasserwelle eine Funktion der Wassertiefe und der Periode ist, dürfte sich die Eigenfrequenz der Tideelbe im Laufe der vergangenen Jahrzehnte infolge der verschiedenen Vertiefungen der Fahrrinne verschoben haben. Bedingt durch den Meeresspiegelanstieg, der sich nach derzeitigem Wissensstand infolge des voranschreitenden Klimawandels beschleunigt, wird sich die Wassertiefe im Ästuar zukünftig auch ohne weitere anthropogene Vertiefungen tendenziell vergrößern. Auch dies kann zu einer Veränderung der Eigenfrequenz des Systems hin zur anregenden Frequenz führen.

Digitale Wasserstandszeitreihen an den rd. 25 Pegeln der Tideelbe von Bake A in der Außenelbe bis zum Wehr bei Geesthacht liegen flächendeckend seit etwa dem Jahr 2000 vor. Die Herausforderung besteht in der Bestimmung der Phasengeschwindigkeit und Amplituden entlang der Pegelkette für die maßgebenden Partialtiden durch eine harmonische Analyse. Die Entwicklung dieser beiden kennzeichnenden Wellenparameter beim Durchlaufen des Ästuars ist für unterschiedliche hydrologische Randbedingungen hinsichtlich des Tidemittelwasserstands und der Oberwassermenge sowie morphologischer Zustände zu differenzieren und empirisch zu beschreiben. Idealerweise sollte die Kombination von unterschiedlichen Randbedingungen und Erregerfrequenzen ein mehrdimensionales Antwortspektrum des Systems Tideelbe ergeben, aus dem sich die Resonanzfrequenz ableiten lässt.

I.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

- Die verwendeten Pegeldata sowie die bathymetrischen Daten (digitale Geländehöhenmodelle des Wasserlaufes, kurz: DGM-W aus den Jahren 2010 & 2016) stammen aus dem Portal Küstendaten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, aufgerufen über www.kuestendaten.de. Durch die entsprechende Lizenzierung der Daten sind diese für Forschungstätigkeiten von den Datenerhebern freigegeben und konnten somit im Projekt verwendet werden. Zudem stellte die WSV den Projektpartnern bathymetrische Daten aus Verkehrssicherungspeilungen zur Verfügung.
- Für die hydrodynamisch numerischen Simulationen wurde das open source Modellierungssystem Telemac (<http://www.opentelemac.org/>, (Hervouet 2000), (Hervouet 2007)) verwendet, mit dem bereits eine Grundversion eines Modells vom Untersuchungsgebiet erstellt wurde (Shaikh et al. 2016)
- Für das Preprocessing der Telemac-Simulationsmodelle wurde die am IWB entwickelte Modellierungsumgebung Kalypso verwendet.

Die im Rahmen des Vorhabens erzeugten und veröffentlichten Datenprodukte enthalten keine Originaldaten und sind somit frei von Rechten Dritter.

I.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die verwendete Fachliteratur ist im fachlichen Abschlussbericht der Projektpartner (Anlage) und in den im Rahmen des Projekts hervorgegangenen Veröffentlichungen detailliert dargestellt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Einbindung der Expertise von externen Experten in die Untersuchungen des Vorhabens zum Reflexions- und Resonanzverhalten der Tidewelle in Ästuaren wurden ein Experten-Workshop und diverse bilaterale Treffen mit Experten aus der Wissenschaft (Universitäten) und Praxis (Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee, Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) durchgeführt.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der wesentliche Teil der Zuwendung wurde für die Finanzierung des wissenschaftlichen Personals zur Bearbeitung des Projekts aufgewendet. Die beantragten Reisemittel wurden für die Teilnahme an Fachkonferenzen verwendet, bei denen die (Zwischen-)Ergebnisse mit der wissenschaftlichen Community diskutiert wurden.

Die vorgegebenen Ziele des Vorhabens sind in Kapitel I.1, die einzelnen Ziele der Arbeitspakete in Kapitel I.3 dargestellt, welche insgesamt erreicht wurden.

Beide Partner haben intensiv zusammengearbeitet, so dass eine scharfe Zuordnung der Ergebnisse zu einem einzelnen Partner schwerfällt.

Im Folgenden sind die erzielten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und soweit möglich dem Projektpartner zugeordnet, der den größeren Anteil der Arbeiten durchgeführt hat. Eine detaillierte Beschreibung der Forschungsergebnisse ist dem beigefügten fachlichen Abschlussbericht zu entnehmen.

Folgende Ergebnisse wurden in **AP1** und **AP2** gemeinsam erarbeitet:

- Recherche und Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen zu folgenden Themen: Definitionen und Klassifizierungen von Ästuaren, Wellentheorien/-gleichungen, spektrale Analyse mit harmonischen Verfahren, Partialtiden(-analyse), Reflexion und Resonanz (HPA und TUHH)
- Entwicklung von Systemvorstellungen für Ästuare und Anwendung auf die Elbe mit dem Fokus auf die Reflexionspunkte im Elbeästuar (HPA und TUHH)
- Die Datengrundlage (Strömungen, Wasserstände und Bathymetrie) wurde zusammengetragen, analysiert und plausibilisiert (HPA).
- Die Daten wurden in eine am Institut für Wasserbau entwickelte Datenbank „KueDaDe“ eingepflegt, sodass im Vorhaben eine konsistente Datenbasis genutzt wurde. Neben gemessenen Daten wurden auch Simulationsdaten, d.h. Ergebnisse hydrodynamisch-numerischer Modelle, zusammengetragen, analysiert und aufbereitet (TUHH).

Zur Analyse des Reflexionsverhaltens der Tidewelle wurden vom Projektpartner **TUHH** im Rahmen von **AP 3** folgende Analysewerkzeuge entwickelt:

- Tool zur spektralen Analyse von Wasserstandsdaten auf Grundlage des harmonischen Analyseverfahrens der Fast Fourier Transformation
- Verfahren zur pegeldatenbasierten Reflexionsanalyse (Pegelmethode): Dieses Analysewerkzeug basiert auf mathematischen Mehrpegel-Analyseansätzen, welche die einlaufenden und reflektierten Wellensignale aus den Aufzeichnungen zusammengesetzter Wellen extrahieren.
 - Die pegeldatenbasierten Reflexionsanalysen wurden theoretisch hergeleitet sowie programmtechnisch umgesetzt.
 - Bei systematischen Tests der Methode mit synthetischen Daten (Amplitude, Periode und Wellenlänge bekannt) wurden die erwarteten Ergebnisse reproduziert, womit die Anwendung der Pegelmethode für ein einfaches System möglich ist.
- Analytisches Modell: Dieses Modell beruht auf einer Bilanzierung der Wellenenergien, welche bei langperiodischen Wellen über die Wassertiefen- und -breitenverhältnisse berechnet werden können.
 - Das entwickelte analytische Modell beinhaltet i) Querschnittskonvergenz, ii) mehrfache Re-Reflexionen an mehreren Reflektoren und iii) Dissipation.
 - Das entwickelte analytische Modell wurde im Projektverlauf für verschiedene Systemzustände (z.B. Ausbildung einer Clapotis, Berücksichtigung der Dissipation, Abbildung von Teilreflexionen, Ausbildung des Resonanzzustandes) verifiziert.
- 2-D hydrodynamisch-numerisches (HN) Prinzipmodell: Das HN Prinzipmodell dient der Untersuchung einzelner Reflektoren und der Dissipation. Das Modell weist aufgrund der eindeutigen Separation der einlaufenden, reflektierten und transmittierten Tidewellen mit sehr langen Wellenlängen eine entsprechend lange Modellausdehnung auf.
- 2-D hydrodynamisch-numerisches (HN) Modell des Elbeästuars: Für das Untersuchungsgebiet des Elbeästuars wurde ein HN Elbe-Modell aufgebaut, kalibriert und validiert.

Zur empirischen Analyse des Schwingungs- bzw. Resonanzverhaltens der Tidewelle und deren Einflussfaktoren wurden vom Projektpartner **HPA** im Rahmen von **AP 3** folgende Analysewerkzeuge entwickelt:

- Weiterentwickeltes HAMELS-Tool zur Spektralanalyse von Wasserstands- und Strömungsdaten:
 - Durch die genaue Berechnung der Winkelpositionen der Partialtiden und deren nodale Amplituden- und Phasenmodulationen für jeden Messzeitpunkt, wird die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht und es kann erstmals zwischen Hauptpartialtiden und Flachwasserverbundtiden auf gemeinsamen mittleren Frequenzen differenziert werden.
 - Das Tool eignet sich besonders zur Analyse von Einflussfaktoren, da lückenhafte Zeitreihen definierter Bedingungen selektiv analysiert werden können.
 - Zur Verifikation wurden ausgewählte Zeitreihen analysiert und mit den Ergebnissen anderer harmonischer Analysewerkzeuge abgeglichen. Zudem wurden Tests an synthetischen Datenreihen mit bekannten

Wellenparametern durchgeführt, welche mit dem HAMELS-Tool korrekt bestimmt wurden.

- Drei-Parameter-Lorentz-Funktion zur Bestimmung der Eigenfrequenz:
 - Diese Methode nutzt das Phänomen der zunehmenden Amplifizierung von Partialtiden mit Nähe zur Eigenfrequenz des Schwingungssystems. Die Frequenz des Maximums der Kurvenanpassung repräsentiert die Eigenfrequenz des Systems.
 - Die Methode wurde systematisch getestet durch Variationen der zugrunde liegenden Zeitintervalle und ausgewählter Partialtiden, und das Ergebnis zusätzlich durch einen Abgleich mit Literaturwerten verifiziert.
- Werkzeuge zur Analyse der Resonanzentwicklung:
 - Via Drei-Parameter-Lorentz-Funktion werden die Eigenfrequenzen über zeitlich versetzte Teilintervalle des Untersuchungszeitraums ermittelt.
 - In Anlehnung an das Quarter-Wavelength Kriterium werden die Schwingungsknotenpositionen im Elbeästuar für die gewässerkundlichen Jahre mittels Fourier-Fittings 4. Grades über die M_2 -Amplituden bzw. Tidehübe der Messtationen ermittelt.

Die Anwendung der Analysewerkzeuge auf die verfügbaren Datenreihen Wasserstände (**AP4**) lieferten seitens der **TUHH** zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Die Reflexionsanalyse mit der Pegelmethode anhand gemessener Wasserstandszeitreihen an Pegeln entlang der Tideelbe führte zu keinen klaren Ergebnissen. Ursächlich ist die Komplexität des Elbeästuars, die mit den zugrundeliegenden Annahmen der Pegelmethode (konstante Wellenlänge, einzelner Reflektor, keine Dissipation) nicht ausreichend genau abgebildet werden kann. In den Messwerten sind mehrere Signale (teilreflektierte, totalreflektierte) überlagert, so dass keine eindeutige Zuordnung der einzelnen Signale mit der Methode erfolgen kann. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde entschieden, die Anwendung und Weiterentwicklung des Ansatzes zugunsten anderer aussichtsreicherer Ansätze zu verwerfen.
- Das analytische Modell wurde auf das Elbeästuar angewendet und anhand von Messwerten erfolgreich kalibriert. Schließlich wurde es dazu genutzt, um die Reflexionsgrade von Teilreflektoren in der Tideelbe zu bestimmen.
- Mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell wurde das Reflexionsverhalten und mögliche Resonanz untersucht.
 - Mit Hilfe des HN Prinzipmodells wurden für verschiedene Systemänderungen (geometrische Änderungen, Inseln, ...) und Einflussfaktoren (Oberwasserzufluss, Reibung, ...) sowie der systematischen Variation der Modellparameter die Reflexionsgrade und Dissipationsgrade untersucht.
 - Es wurden Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, um die Einflussfaktoren auf die Reflexion und der Dissipation im Elbeästuar zu ermitteln.
- Die Ergebnisse der Reflexionsuntersuchungen mit dem HN Prinzipmodell für abrupte geometrische Änderungen stimmen mit den Ergebnissen aus dem analytischen Modell überein.
- Die verwendeten HN Modelle sind in der Lage, den Reflexionsprozess, Resonanz und die Erzeugung von höherharmonischen Partialtiden abzubilden.

- Aus einer Kombination von Reflexion und Re-Reflexion im numerischen Modell (ohne Dämpfung der Tidewelle) konnte nachgewiesen werden, dass eine Amplifikation der Tidewelle über die in einer Totalreflexion begründete Amplifizierung von einem Faktor 2 hinaus erfolgen kann.
- Ähnliche Ergebnisse wurden mit dem analytischen Modell erzielt, welches ein recheneffizientes Werkzeug ist, um die Überlagerung der Signale darzustellen und so die Reflexions- und Resonanzprozesse zur Verbesserung des Verständnisses zu visualisieren.
- Die entwickelten Modelle ermöglichen qualitative sowie quantitative Aussagen über das Schwingungsverhalten von Tidewellen bei Veränderungen des Systems (z.B. Veränderungen der Geometrie des Ästuarquerschnitts oder steigender Wasserstand als Folge des Klimawandels).

Die Anwendung der Analysewerkzeuge auf die verfügbaren Datenreihen Wasserstände/Strömung (**AP4**) lieferten seitens der **HPA** zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Partialtidenspezifische partiell stehende Wellen wurden nachgewiesen, die das gesamte Ästuar signifikant beeinflussen.
- Die Strömungsganglinien in der mittleren Tideelbe weisen eine höhere Asymmetrie auf als die Wasserstandsganglinien. Der Anteil an Wellenenergie auf höherfrequenten Flachwasserpartialtiden nimmt mit der Asymmetrie stromauf des Ästuars und mit zunehmendem Oberwasserzufluss zu.
- Signifikante Unterschiede in der Amplifizierung von Partialtiden ähnlicher Frequenzen wurden festgestellt. Flachwasserverbundtiden tragen zu diesen unterschiedlichen Verstärkungsgraden bei. Dies hat direkte Auswirkungen auf den Tidenhub im Ästuar.
- Es wurden diverse äußere und innere Einflussfaktoren auf die Amplifizierung des Tidehubs im Hamburger Hafen (Tidehub bei St. Pauli / ins Ästuar eingehender Tidehub) untersucht: Es zeigt sich eine
 - negative Abhängigkeit vom ins Ästuar eingehenden Tidehub, vom Oberwasserzufluss und einem aus der Fahrrinnenbathymetrie abgeleiteten Sohlrauheitsindikator.
 - positive Abhängigkeit vom Tidemittelwasser und dem Wasservolumen der mittleren und unteren Tideelbe.
- Das Quarter-Wavelength Kriterium ist für das Elbeästuar nicht erfüllt. Die mittels einer Drei-Parameter-Lorentz-Kurvenanpassung bestimmten Eigenfrequenz des Elbeästuars beträgt 1,56 cpd. Dies entspricht einer Eigenperiode von 15,37 h.
- Eine Zunahme der Resonanzfrequenz und eine seewärtige Schwingungsknotenmigration wurden detektiert. Die beobachtete Erhöhung der Wassertiefe, hervorgerufen durch die Vergrößerung des Wasservolumens der mittleren und unteren Tideelbe und dem Anstieg des jährlichen mittleren Tidemittelwassers wurden als Ursachen ermittelt.

Die vorgenannten Erkenntnisse wurden genutzt, um den aktuellen systemischen Zustand im tidebeeinflussten Abschnitt der Elbe zu analysieren und zu beschreiben (**AP 5**).

- Basierend auf den Erkenntnissen wird deutlich, dass die Überlagerung der Signale, welche an mehreren Reflektoren reflektieren und transmittieren und infolge der Dissipation und Konvergenz verändert werden, zu einem äußerst komplexen Schwingungssystem führt.

- Reflexion tritt dann auf, wenn eine Welle auf ein Hindernis trifft. Für die langperiodischen Tidewellen sind Reflektoren zum einen Wasserbauwerke, auf die die Tidewelle frontal trifft, und zum anderen abrupte Querschnittsänderungen, die durch Veränderungen in der Sohlbathymetrie oder der Gewässerbreite beispielsweise bei Inseln oder Häfen auftreten können.
- Unter Resonanz wird das maximal verstärkte Mitschwingen eines schwingfähigen Systems bei einer periodischen Anregung gleich der Eigenperiode (oder einer ihrer ungeraden Harmonischen) verstanden. Im Resonanzfall (Systemlänge gleich ein Viertel der Tidewellenlänge, bzw. Eigenperiode gleich Erregerperiode) überlagern sich alle einlaufende und (re-)reflektierte Wellen maximal konstruktiv am Reflektor.
- Latente Resonanz bezeichnet das bereits verstärkte Mitschwingen eines Systems, deren Eigenperiode nicht genau, aber ähnlich der Erregerperiode ist: Mit Nähe zum Resonanzfall nimmt das Maß konstruktiver Überlagerung im Schwingungsbauch und somit auch die resultierende Amplitude zu.
- Die Reflexionsgrade in dem analytischen Modell RT-A liegen bei ca. 15 bis 20 % für den Teilreflektor im Mündungsbereich, ca. 20 bis 25 % für den Teilreflektor im Hamburger Hafengebiet und 100 % beim Wehr in Geesthacht. In dem hydrodynamisch-numerischen Elbe-Modell liegen die Reflexionsgrade bei ca. 45 % im Mündungsbereich, über 75 % im Hamburger Hafengebiet und 100 % beim Wehr in Geesthacht. Für die Reflexionsgrade der Teilreflektoren wird eine Bandbreite angegeben, da sich im Laufe des Untersuchungszeitraumes von 2000 bis 2019 veränderte Wassertiefenverhältnisse eingestellt haben.
- Das Elbeästuar befindet sich nicht in Resonanz: die Eigenfrequenz liegt zwischen den ganztägigen und halbtägigen Partialtidenfrequenzen.
 - Im Frequenzband der achteltägigen Partialtiden befindet sich eine ungerade Harmonische der Eigenfrequenz. Die achteltägigen Partialtiden sind somit anfällig für Resonanz, deren Amplituden betragen jedoch maximal 54 mm ($3MS_8$).
- Analysen der zeitlichen Entwicklung der Eigenfrequenz, der Knotenmigration und der Einflussfaktoren signalisieren eine zunehmende latente Resonanz, also eine Annäherung an den Resonanzfall.
- Mit einer Annäherung an den Resonanzfall nimmt auch die Amplifizierung der Tidewellen an den Reflektoren zu.
 - Auch bei voll etablierter Resonanz ohne Dissipation ist die maximale Amplitude finit und beträgt am Totalreflektor $a_{max} = 2 \cdot a_i \cdot \sum_{n=0}^{\infty} C_r^n$, während a_i die Amplitude der einlaufenden Welle und C_r der Reflexionsgrad am Teilreflektor ist. Die Amplituden der mehrfach reflektierten Anteile nähern sich asymptotisch an Null an mit zunehmender Anzahl an Re-Reflexionen.
 - Außerdem tritt zum einen Dissipation auf und zum anderen nimmt mit erhöhter Amplitude auch die Dämpfung zu, was sowohl die maximalen Amplituden als auch das Maß der Amplifizierung im System begrenzt.
- Die beschleunigte Tidehubzunahme zwischen 2010 und 2017 hatte folgende simultan wirkenden Ursachen:
 - Abnahme der oberwasserzufluss- und transportkörperbedingten Dissipation,
 - Wassertiefenzunahme, durch die Vergrößerung des Wasservolumens unter NHN und dem Anstieg des jährlichen mittleren Tidemittelwassers,
 - Erhöhung des Reflexionsgrades infolge der Wassertiefenzunahme,
 - Anstieg des Nodalfaktors der dominanten halbtägigen M_2 -Partialtide,
 - Annäherung des Schwingungssystems an den Resonanzfall.

II.2 Verwendung der Zuwendung hinsichtlich der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde für jedes Vorhaben separat übermittelt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten liefern einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des System- und Prozessverständnisses für das Schwingungssystem des Elbeästuars. Mit dem Vorliegen des Abschlussberichtes werden Antworten auf Fragestellungen zum Systemverhalten des Elbeästuars hinsichtlich der Gezeitenschwingungen gegeben:

- Reflexion von Partialtiden und hierdurch bedingte Ausformung stehender Wellen
- Resonanz und Entwicklung latenter Resonanz im Elbeästuar
- Charakteristische Einflussfaktoren für den Schwingungsraum

Die im Arbeitsplan des Projektantrages definierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet, sodass die geplanten Ziele erreicht und die resultierenden Produkte erstellt wurden. Die bereitgestellten Ressourcen wurden wirtschaftlich und dem bewilligten Finanzierungsplan entsprechend eingesetzt, wobei das geplante Budget eingehalten wurde.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die geplanten Ressourcen erforderlich und angemessen waren, um die in den Teilvorhaben geplanten Forschungsarbeiten durchzuführen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Vorhabens RefTide wurden und werden auf Konferenzen und in Veröffentlichungen dargestellt. Eine Auflistung ist Abschnitt II.6 zu entnehmen.

Die Projektbearbeitenden werden die Ergebnisse im Rahmen ihrer Promotion verwerten. Zudem wurden und werden Teilergebnisse in studentischen Arbeiten verwertet. Bisher wurden folgende Arbeiten angefertigt:

- Florian Bajrami (Bachelorarbeit): Ein Beitrag zur Analyse des Reflexionsverhaltes der Gezeitenwelle in dem Elbeästuar mit Hilfe eines analytischen Modells
- Sophia Gad (Projektarbeit): Harmonische Analyse von simulierten Wasserstandsdaten aus dem Elbeästuar-Modell
- Peter Martens (Projektarbeit): Vergleich ausgewählter Verfahren zur harmonischen Analyse von Wasserstandszeitreihen am Beispiel der Tideverhältnisse im Elbeästuar
- Fadi Abdalftah Shehdeh Jradat (Bachelorarbeit): Ein Beitrag zur Analyse des Dissipationsverhaltens von Tidewellen in Ästuaren
- Jan Hendrik Frisch (Masterarbeit): Dissipative Wirkungen von Riffel- und Dünenstrukturen auf Tidewellen am Beispiel des Elbeästuars
- Sophie Windeler (Studienarbeit): Analytische Untersuchung der Wirkung des Oberwasserzuflusses auf Tidewellen am Beispiel des Elbeästuars
- Christoph Michalzik (Masterarbeit): Harmonische Analysen von gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Tideelbe

Anschlussfähigkeit

Das Vorhaben liefert weitergehende Erkenntnisse über die Auswirkungen von aktuellen und zukünftigen Nutzungen von Ästuaren sowie auf die hydrodynamischen Verhältnisse in Ästuaren. Eine Erkenntnis des Vorhabens ist, dass mit dem Resonanzzustand zwar eine unendliche Amplifizierung verbunden ist, da der Verhältniswert zwischen dem Schwingungsbauch und dem Schwingungsknoten betrachtet wird, während die Amplitude der Gesamtwelle im Schwingungsknoten gleich null ist, dennoch ist mit dem Resonanzzustand keine unendliche Amplitude verbunden. Details zur Ausbildung der Resonanz können dem Kapitel 2.2.2 sowie Kapitel 5.3.5 des fachlichen Abschlussberichtes entnommen werden. Weiterhin wurden Resonanzanalysen anhand der Messwerte im Elbeästuar durchgeführt, welche bestätigen, dass sich das Schwingungssystem der Tidewellen im Elbeästuar nicht in Resonanz befindet, sich jedoch einem Resonanzzustand annähert (vgl. Kapitel 4.4 im fachlichen Abschlussbericht).

Die Erkenntnisse sind Grundlage für zukünftige Planungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung aber auch der Hafenerbetreiber in Ästuaren. So zeigt sich, dass die beobachteten Variationen der Rahmenbedingungen (mittlerer Wasserstand, Oberwasserzufluss, Ästuar-geometrie, Rauheitselemente, etc.) das Gezeitschwingungssystem im Elbeästuar signifikant beeinflussen, sich bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen allerdings ein stabiles Schwingungssystem einstellt (vgl. Kapitel 4.3 und 5.4.2 des fachlichen Abschlussberichtes). Abrupte Veränderungen des Schwingungssystems, wie die Fahrinnenanpassungen bis zum Jahr 2000, können dennoch potentiell auch nach Fertigstellung andauernde Veränderungen der Morphologie mit sich bringen. Auch die Beeinflussung des Abflussgeschehens (z.B. durch Wasserentnahme) hat Auswirkungen auf das Schwingungssystem der Tidewellen im Elbeästuar (Kapitel 4.3.3). Auswirkungsprognosen für zukünftige Maßnahmen müssen daher auch mögliche Entwicklungen über längerfristige Zeithorizonte und komplexere Systemzusammenhänge bei der Planung von Eingriffen in das Schwingungssystem berücksichtigen und im Anschluss durch dies berücksichtigende langzeitige Monitorings überprüft werden.

Es ist von den Partnern vorgesehen, die Zusammenarbeit auf Grundlage der Ergebnisse des Vorhabens RefTide bilateral oder mit weiteren Partnern fortzusetzen.

Zusätzlich werden die Forschungsergebnisse in das TUHH-Forschungsvorhaben TideelbeKlima (Tideelbe im Klimawandel - Klimawandel und Hochwasserschutz) einfließen. In diesem Projekt wird vor dem Hintergrund der Auswirkungen des Klimawandels das Ziel verfolgt, denkbare Optionen für den Hochwasserschutz der Zukunft im tidebeeinflussten Bereich der Elbe dem Grunde nach zu identifizieren und zu analysieren sowie diese aus wasserbaulicher, wasserwirtschaftlicher, ökologischer und ökonomischer Sicht vergleichend zu bewerten und hieraus dann Handlungsoptionen für die Zukunft abzuleiten.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit von RefTide erfolgte ein stetiger Austausch mit Experten in dem Fachgebiet. Zudem wurden Fachkonferenzen besucht und Veröffentlichungen mit thematischem Bezug zum Vorhaben verfolgt.

Nach Kenntnis der Forschergruppe wurden keine Projekte mit ähnlichem Inhalt an anderen Forschungseinrichtungen bearbeitet.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die wissenschaftlich relevanten Ergebnisse des Vorhabens sind bereits teilweise veröffentlicht und präsentiert worden. Weitere Teile befinden sich in Vorbereitung zur Veröffentlichung.

Veröffentlichungen

- Sohrt, V.; Hein, S.S.V.; Nehlsen, E.; Strotmann, T.; Fröhle, P. Model Based Assessment of the Reflection Behavior of Tidal Waves at Bathymetric Changes in Estuaries. *Water* **2021**, *13*, 489. <https://doi.org/10.3390/w13040489>
- Hein, S.S.V.; Sohrt, V.; Nehlsen, E.; Strotmann, T.; Fröhle, P. Tidal Oscillation and Resonance in Semi-Closed Estuaries — Empirical Analyses from the Elbe Estuary, North Sea. *Water* **2021**, *13*, 848. <https://doi.org/10.3390/w13060848>

Vorträge

- Strotmann, T.; Fröhle, P.; Sohrt, V.; Hein, S.: Projekt RefTide.1. RefTide Expertenworkshop, Hamburg, 06.05.2019
- Sohrt, V.: Reflexionsanalyse eines Tide-dominierten Ästuars unter Verwendung von hydrodynamisch-numerischer Modellierung. 9. CoastDoc-Workshop, Aachen, 07.11.2019
- Hein, S.: RefTide – Reflexions- und Resonanzverhalten Tide-dominierter Ästuar. 9. CoastDoc-Workshop, Aachen, 07.11.2019
- Strotmann, T.; Fröhle, P.: RefTide - Motivation und Überblick über das Vorhaben und die Teilvorhaben. 25. KFKI Seminar, online, 24.03.2021
- Sohrt, V.: Erste Ergebnisse Teilvorhaben Reflexion (RefTide A). 25. KFKI Seminar, online, 24.03.2021
- Hein, S.: Erste Ergebnisse Teilvorhaben Resonanz (RefTide B). 25. KFKI Seminar, online, 24.03.2021
- Hein, S.: The reflection and resonance behaviour of tidal dominated estuaries – An analysis of the response of the Tidal Elbe to tidal excitation. 10. CoastDoc-Workshop, Hamburg, 07.10.2021
- Hein, S.: Tidal amplification in reflection influenced estuaries – partial tide differentiated examinations. ECSA 58 - EMECS 13: Estuaries and coastal seas in the Anthropocene – Structure, functions, services and management, online, 07.09.-11.09.2021
- Sohrt, V.: Model based assessment of the reflection behavior of tidal waves at abrupt bathymetric changes in estuaries. ECSA 58 - EMECS 13: Estuaries and coastal seas in the Anthropocene – Structure, functions, services and management, online, 07.09.-11.09.2021
- Sohrt, V.: Reflexionsverhalten der Tidewelle im Ästuar der Elbe. Forschungsinitiative Bauwerke im und am Wasser, online, 28.01.2022
- Sohrt, V.: Zum Reflexions- und Resonanzverhalten der Elbe – das Projekt RefTide. Kongress der Hafentechnischen Gesellschaft e.V., Düsseldorf, 02.06.2022

Geplante Vorträge

- Vorträge im Rahmen des 26. KFKI Seminars

Geplante Dissertationen

- Sohr, V. (in Bearbeitung): Das Reflexionsverhalten von Tidewellen in Ästuaren (Arbeitstitel). Dissertation, Technische Universität Hamburg.
- Hein, S. (in Bearbeitung): Reflexions- und Resonanzverhalten Tide-dominierter Ästuare - Eine Analyse des Antwortverhaltens der Tideelbe auf die Gezeitenanregung (Arbeitstitel). Dissertation, Technische Universität Hamburg.

Geplante Veröffentlichungen

Es ist geplant, den fachlichen Schlussbericht in gekürzter Form in der Schriftenreihe DIE KÜSTE zu veröffentlichen. Ein Manuskript ist in Vorbereitung.