



Hydrodynamische Entwicklung der Tideelbe

Maja Fickert & Thomas Strotmann

Hamburg Port Authority – HPA

Abstract

The river bed of the Elbe below Geesthacht underlies a dynamic hydromorphological change. Unquestioned besides the natural processes also the anthropogenic impacts as fairway construction and coastal protection have a stake. To ensure the competitiveness of the Port of Hamburg it is necessary to adapt its seawards access to the shipbuilding developments on occasion. The last deepening of the fairway of the lower and outer Elbe to the requirements of the world wide container traffic was carried out in 1999/2000. The adaptation of the port access generally causes a significant interference to nature, by which not only the flora and fauna changes but also the dynamics of the tidal wave in the estuary. The modified water depths and fairway widths may influence the tidal water levels, and with it the tidal amplitude, the periods of the high and low water levels (shortening of the flood and corresponding lengthening of the ebb durations) as well as the flood and ebb flow velocities. To analyse these changes the impact monitoring report of the last fairway deepening established an extensive monitoring programme. The results of the monitoring will be integrated in long term statistical analyses of the development of the tidal dynamics of the Elbe since the beginning of its intensified use. Marginally also the issue of the dredging amounts in the whole estuary is addressed.

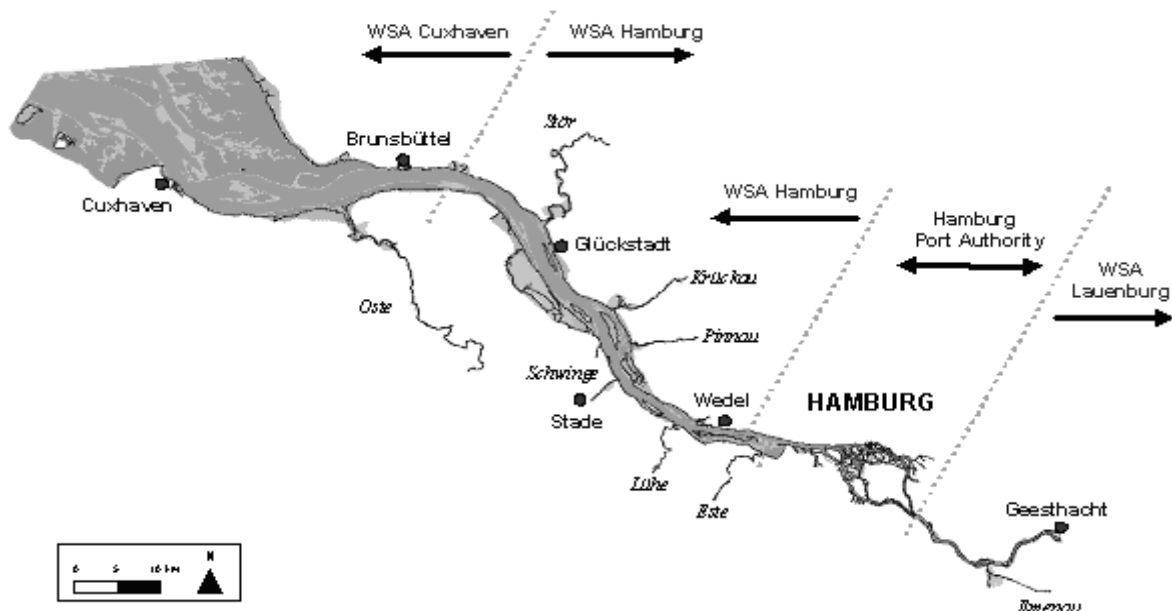


Abb. 1: Die Tideelbe vom Wehr in Geesthacht bis zur Nordsee

1 Einführung

Die Tideelbe – ein Ästuar

Die tidebeeinflusste Elbe ist ein seit Jahrhunderten stark anthropogen verändertes Ästuar. Die grundsätzlichen Wirkmechanismen und Zusammenhänge in einem Ästuar werden im Folgenden anhand eines natürlichen, unveränderten Ästuars erläutert (siehe Abb. 2).

Von einem Randmeer dringt die Tidewelle in das Ästuar ein, bis ihre Energie (ausgedrückt durch den Tidehub) infolge Reibungsverlusten aufgezehrt wird. Die Position, an der kein Tidehub mehr registriert wird, ist die Tidegrenze. Im Ästuar kommt es zu einem Zusammentreffen von frischem Oberwasserabfluss und dem salzhaltigen Meereswasser, so dass sich eine Brackwasserzone ausbildet. Aus dem Umland erfolgen weitere Frischwasserzuflüsse. Typisch für Ästuarie ist auch die Ausbildung von Nebenarmsystemen bzw. Mehrkanalsystemen. In einem breiten Flusstal hat der Fluss idealerweise genügend Raum um frei zu mäandrieren, wodurch jeweils auch ein erheblicher Teil der einschwingenden Tideenergie aufgezehrt wird. Natürlicherweise besitzt ein Ästuar in der Mitte des Querschnitts einen tieferen Bereich und an den Seiten auslaufende Vorländer.

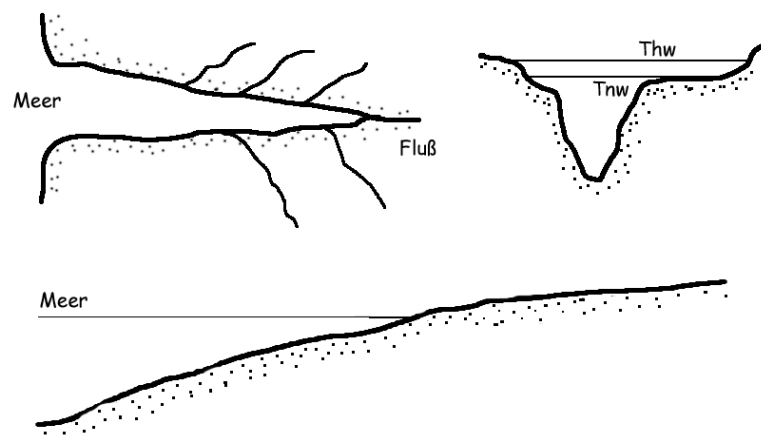


Abb. 2: Draufsicht, Querschnitt und Längsschnitt eines natürlichen Ästuars

Im Gegensatz zu einem natürlichen Ästuar, welches zur Tidegrenze gleichmäßig ansteigt, ist die Elbe mittlerweile stark anthropogen überprägt. Die Fahrrinne wurde bisher auf eine Tiefe von -16,70 mNN ausgebaut, wobei ein Sockel zwischen Wedel und Otterndorf in einer Höhe von -15,80 mNN belassen wurde. Im Raum Hamburg nimmt die Tiefe erst auf -11,40 mNN ab, in Höhe der Elbbrücken ist die Elbe dann nur noch ca. -6,40 mNN tief. An diesen beiden „Stufen“ wird die einlaufende Tidewelle teilreflektiert.

Des Weiteren wurde 1960 das Wehr Geesthacht in Betrieb genommen. Somit hat die Elbe hier außer im Sturmflutfall eine künstliche Tidegrenze. Im Sturmflutfall wird das Wehr gelegt und die Tide kann weiter vordringen. Mit der Errichtung des Wehres hat sich die Tidedynamik auch durch veränderte Reflexionsbedingungen gewandelt.

Tidekurve

Die Tide der Elbe ist halbtägig, wobei eine Tide im Schnitt 12 Stunden 25 Minuten dauert. Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Welle ist primär von der Wassertiefe abhängig. Bereits durch Reflexion in der Deutschen Bucht ist die in das Ästuar einlaufende Welle verformt. Die Flutdauer (DF) ist kürzer als die Ebbedauer (DE), die Welle steilt sich beim Einlaufen ins Ästuar aufgrund der schnelleren Fortschrittsgeschwindigkeit des Wellenberges im Vergleich zum Wellental weiter auf. Dargestellt sind in Abb. 3 neben den bekannten Parametern der Tidekurve wie Tideniedrig- (Tnw) und

Tidehochwasser (Thw) zusätzlich das Tidemittelwasser (Tmw), also der Schwerpunkt der Tidekurve. Zur Berechnung des Tidemittelwassers wird die gesamte Ganglinie der Tidekurve benötigt.

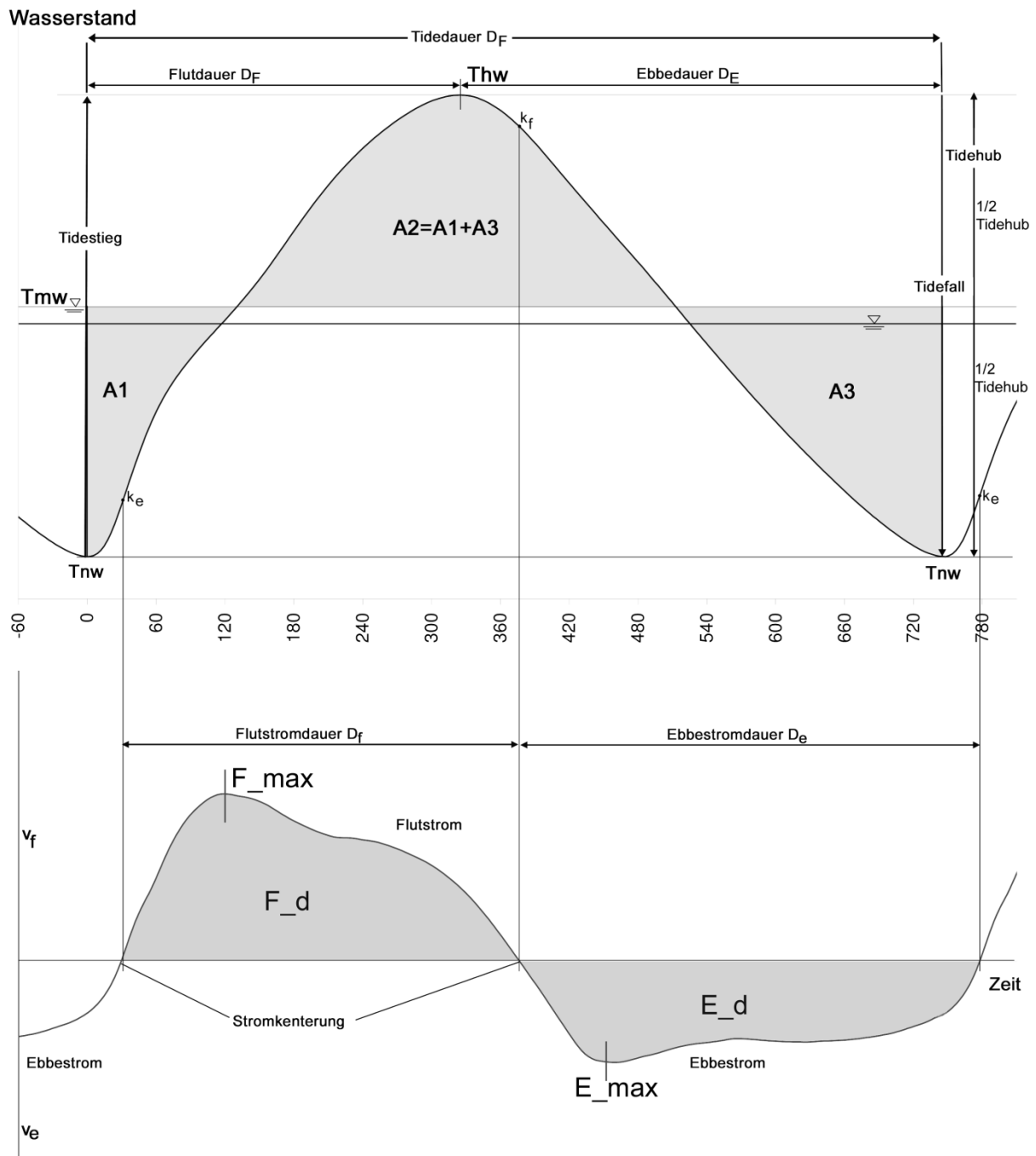


Abb. 3: Tidekurve mit Strömungsgeschwindigkeiten (über drei Monate gemittelte Werte des Pegels Lühort und Dauermessstation Hanskalbsand; nach Zanke 2002)

An der Lage der Kenterpunkte (k_e und k_f) lässt sich die Reflexionseigenschaft des Ästuars ablesen. Liegen in freien Ozeanen die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in den Scheitelpunkten und die Kenterpunkte auf der Tidemittelwasserlinie, verschieben sich oberstrom die Kenterpunkte – wie hier eingezeichnet – Richtung Scheitelpunkte. Die Strömungsmaxima hingegen verschieben sich in Richtung des Tidemittelwassers. Der Flutstrom weist einen gut erkennbaren Peak auf (F_{max}), der gegenüber dem maximalen Gradienten des Wasserstandes zeitversetzt auftritt.

2 Langzeitstatistische Untersuchungen

Wasserstände Pegel Cuxhaven

Betrachtet man zunächst die Entwicklung der mittleren Scheitelwasserstände an einem küstennahen Pegel im Mündungsgebiet der Elbe, hier bei Cuxhaven, so lässt sich für diese Position über einen Zeitraum von 100 Jahren ein relativ gleichmäßiger Anstieg der aufgetragenen Wasserstandsparameter beobachten. Aufgetragen sind in der Abb. 4 das MThw und das MTnw. Der verhaltene Anstieg der mittleren Scheitelwasserstände spiegelt sich auch in der Entwicklung des mittleren Tidehalbwassers MT1/2w wieder.

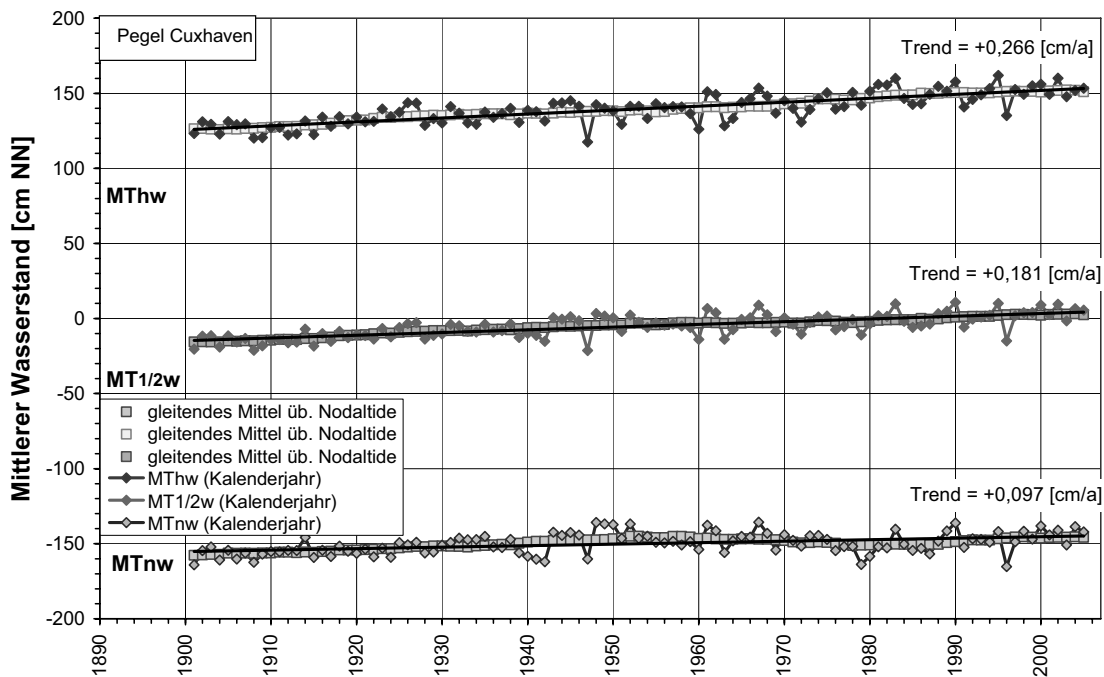


Abb. 4: Wasserstände am Pegel Cuxhaven von 1900-2006

Der Meeresspiegelanstieg und der gleichzeitig gestiegene Tidehub verursachen, dass die linearen Trends unterschiedliche Steigungen aufweisen, wobei der stärkere Anstieg des MThw mit 26,6 cm/Jh. gegenüber dem MTnw mit knapp 10 cm/Jh. schon sehr deutlich ausfällt. Im Mittel resultiert daraus ein Anstieg von rd. 18 cm/Jh. für das MT1/2w. Es kann davon ausgegangen werden, dass das MT1/2w dem über Flächenermittlung berechneten Tidemittelwasser folgt und dieser Anstieg tendenziell auch auf den mittleren Meeresspiegel übertragen werden kann, da bei Bemessungsfragen im Hochwasserschutz bekanntlich mit einem so genannten säkularen Meeresspiegelanstieg von 25-30 cm/Jh. gerechnet wird.

Diese Beobachtungen und Analysen decken sich tendenziell und von der Größenordnung her auch mit den Ergebnissen, die Jensen & Mudersbach, 2004 für die Jahressangreihe von 1843 bis 2001 für den Pegel Cuxhaven herausgefunden haben (MThw-Anstieg = 25,8 cm/Jh. MTnw-Anstieg = 16 cm/Jh.). Die Differenzen, insbesondere beim MTnw, sind in der unterschiedlich langen Datengrundlage begründet.

Die über die Periode einer Nodaltide (18,6 Jahre) gleitenden Mittelwerte (gleichwertig zur Anwendung eines Tiefpassfilters) weisen nur geringfügige Abweichungen vom linearen Trend auf. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass diese langfristige und stetige Entwicklung im

Wesentlichen durch den Anstieg des globalen Meeresspiegels verursacht wird. Diese eustatischen Veränderungen sind dabei von Veränderungen der Trennlinie Meer-Land zu unterscheiden, die durch tektonische Bewegungen aus geologischen Prozessen entstehen. Diese tektonischen Effekte sind in den Pegelaufzeichnungen enthalten.

Trotz der gegebenen natürlichen Variabilität im Jahrgang infolge meteorologischer Einflüsse (z. B. infolge außergewöhnlicher Wetterlagen wie in den extremen Eiswintern in 1946/47 und 1995/96) streuen die Jahresmittelwerte um die lineare Trendlinie nur gering. Es sind keine Indizien dafür zu erkennen, dass die Scheitelwasserstände am Pegel Cuxhaven auch nur gering beeinflusst werden durch die vielfältigen anthropogenen Eingriffe in das hydrologische System der Unter- und Außenelbe der vergangenen 100 Jahre. Vielmehr bewegen sich die Scheitelwasserstände in der Größenordnung der natürlichen Schwankungen.

Wasserstände Pegel St. Pauli

Erwartungsgemäß weist die Entwicklung der Wasserstände am Pegel St. Pauli über die vergangenen 136 Jahre betrachtet (Abb. 5) wesentlich größere Veränderungen als der Pegel Cuxhaven auf. Hier im Stromspaltungsgebiet spiegelt sich die Überlagerung der externen natürlichen Einflüsse wie die Entwicklung der Wasserstände in der Nordsee und die Variabilität des Oberwasserabflusses mit den anthropogenen Eingriffen unterschiedlichster Art in das natürliche Gleichgewichtssystem der Tideelbe unterhalb und oberhalb Hamburgs sowie im Hafen selbst besonders deutlich wider.

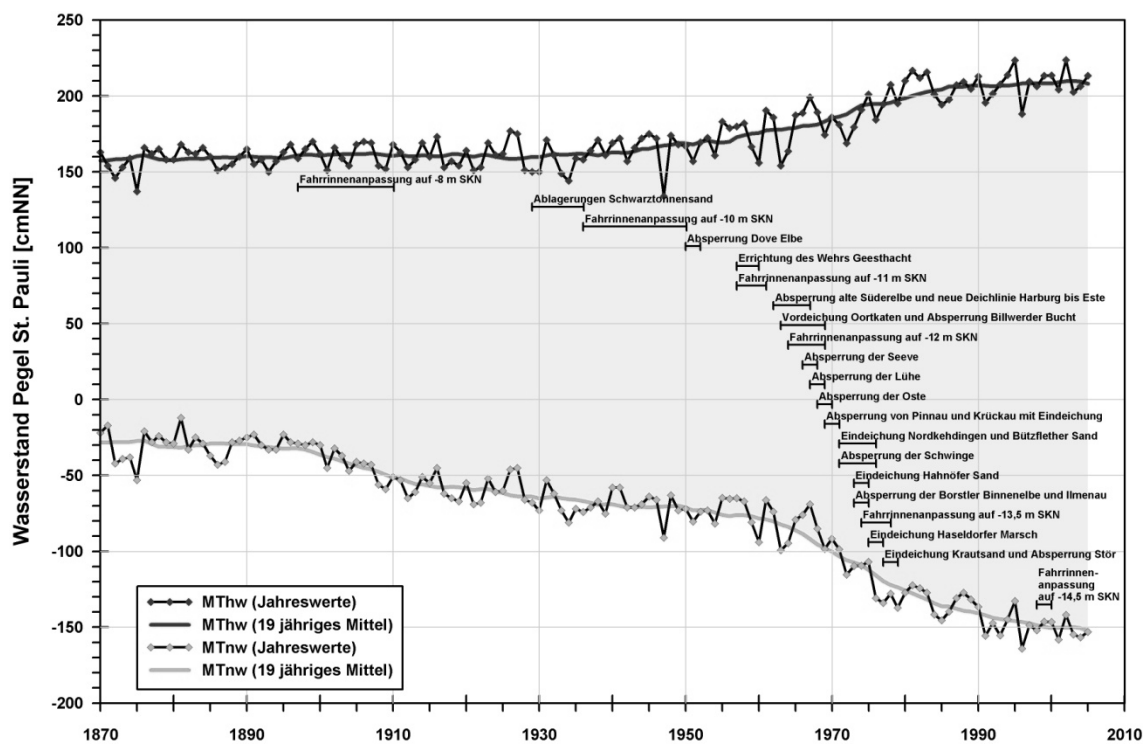


Abb. 5: Wasserstände am Pegel St. Pauli von 1870-2006

Betrachtet man zunächst die Entwicklung des MTnw, so ist bereits Anfang des vergangenen Jahrhunderts, korrespondierend zu den ersten größeren Vertiefungsbaggerungen zur Beseitigung der großen Barren zwischen Blankenese und Wedel, ein signifikantes Absinken des MTnw von rd. 20 cm zu registrieren.

Gingen die frühen Ausbaumaßnahmen zunächst noch einher mit der Anlage neuer Hafenbecken im Hamburger Hafen, die zu einer teilweisen Kompensation der Auswirkungen auf den Tidenhub führten,

so folgten zwei weitere Ausbaustufen nach dem 2. Weltkrieg bis auf -11 m SKN, die von einem kontinuierlichen Absinken des MTnw in der Größenordnung von 0,45 cm/a begleitet wurden.

Die Fahrrinnenanpassungen bis zur Anpassung auf -11 m SKN betrafen hauptsächlich den Bereich oberhalb Glückstadt (siehe Abb. 1). Am Ende dieser Periode steht schließlich die Errichtung einer Tidebarriere durch das 1960 in Betrieb genommene Wehr in Geesthacht.

Die Beurteilung der in den '60er und '70er Jahren folgenden Maßnahmen sind daher zwingend auch im Zusammenwirken mit dieser das Schwingungsverhalten der Gezeitenwelle im gesamten Ästuars nachhaltig verändernden Tidebarriere zu betrachten. Überlagert wird dieser nachhaltige Eingriff insbesondere auch durch die unzähligen Hochwasserschutzmaßnahmen nach der '62er-Sturmflutkatastrophe. Die damit verbundene drastische Verringerung von Fluträumen durch Eindeichung großer Marschenflächen und Abriegelung der Nebenflüsse durch Sperrwerke hat in Verbindung mit der aus heutiger Sicht zweifelhaften Entnahme von mehr als 30 Mio. m³ Sand im Zuge des KN -13,5 m-Ausbaus für den Deich- und Straßenbau ohne Zweifel zu der kontinuierlichen Veränderung des Tideregimes der Elbe beigetragen.

Die Schaffung von Landflächen im Hamburger Hafen (ca. 190 ha) durch die seit Mitte der '80er Jahre wiederholt vorgenommene Verfüllung verschiedener Hafenbecken hat sicherlich zur weiteren Entwicklung der Wasserstände im Stromspaltungsgebiet beigetragen.

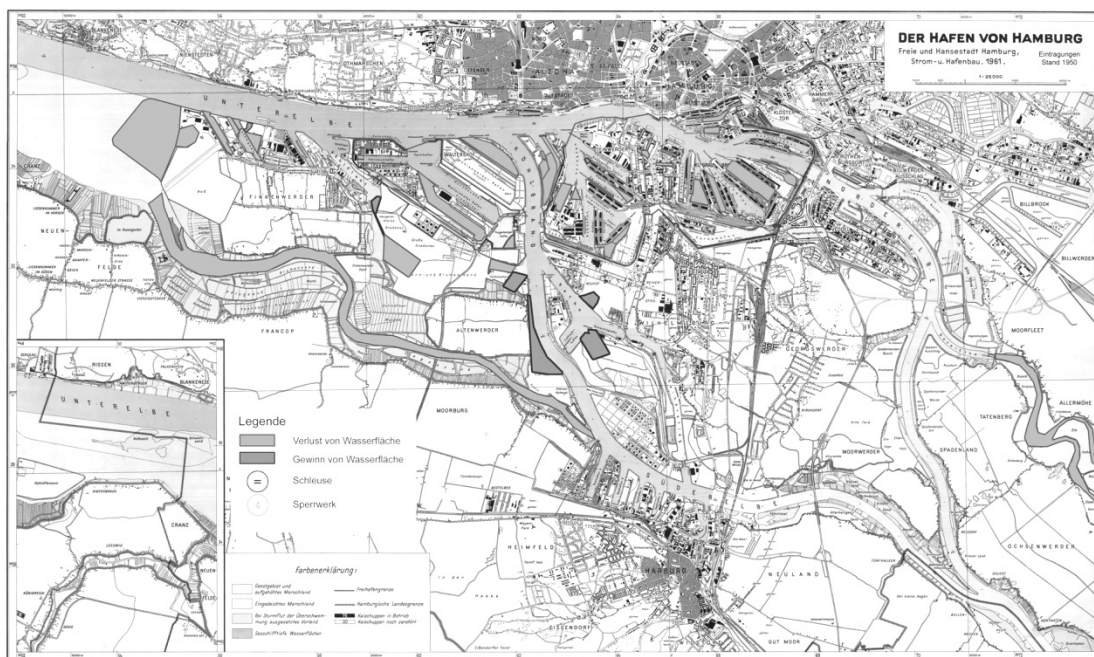


Abb. 6: Reduzierung des Tidepotentials in Hamburg (seit ca. 1950)

Die einzelnen Wirkungen der anthropogenen Eingriffe lassen sich aufgrund der Überlagerung mit dem durch die jeweils vorausgegangenen Maßnahmen initiierten morphologischen Nachlauf quantitativ nur schwer zuordnen. Es ist jedoch offensichtlich, dass ein vergleichbar signifikanter Anstieg des mittleren Hochwasserscheitels (MThw) wie er in den '60er und '70er Jahren registriert wurde, bei den vorangegangenen Ausbauten des Fahrwassers zwischen 1900 und 1950 und bei der Fahrrinnenanpassung 1999/2000, die mit der bereits angesprochenen Sockellösung ausgeführt wurde, nicht zu beobachten ist.

Insgesamt kann bei der Entwicklung des MThw am Pegel St. Pauli seit Beginn des vergangenen Jahrhunderts eine Zunahme von rd. 50 cm verzeichnet werden, wovon gute 80 % auf den Anstieg in den '60er und '70er Jahren entfallen. In den '80er Jahren hat sich dieser Trend bzgl. des MThw

erfreulicherweise abgeschwächt und seit Anfang der '90er kann man für das mittlere Hochwasser wieder von relativ konstanten Verhältnissen ($dh/dt = 0,1 \text{ cm/a}$) sprechen.

Auch für das MTnw hat sich der beschleunigte Abwärtstrend der '60er und '70er Jahre seit Mitte der '80er Jahre zusehends verlangsamt. Gleichwohl deutet der unvermittelt anhaltende Abwärtstrend des MTnw darauf hin, dass das Tideregime der Elbe den angestrebten dynamischen Gleichgewichtszustand vor dem Beginn der Fahrrinnenanpassung 1999/2000 noch nicht wieder erreicht hatte.

Betrachtet man die Veränderung der Wasserstände zunächst unabhängig von der Entwicklung der äußeren Einflussgrößen, so ist für den Pegel St. Pauli über das vergangene Jahrhundert hinweg ein Anstieg des mittleren Tidenhubs um 160 cm auf heute 360 cm zu verzeichnen

Nicht nur die Wasserstände veränderten sich in den vergangenen Jahrzehnten, sondern auch andere hydrologische Parameter. Im Rahmen dieses Beitrags wird im folgenden Kapitel auf die Änderungen der Tidedauern eingegangen.

Langzeitstatistische Untersuchungen Tidedauern Cuxhaven/ St. Pauli

Für eine Einordnung der aktuellen Variabilität der mittleren Tidekurve ist eine langzeitstatistische Betrachtung der für die Form kennzeichnenden Kenngrößen Flut- und Ebbedauer sowie die Entwicklung der Tidelaufzeiten ein geeignetes Mittel. Die Analyse dieser Tidekenngrößen erlaubt in Verbindung mit den Wasserständen möglicherweise ergänzende Rückschlüsse auf die Ursachen eines sich fortgesetzt ändernden Tidegeschehens.

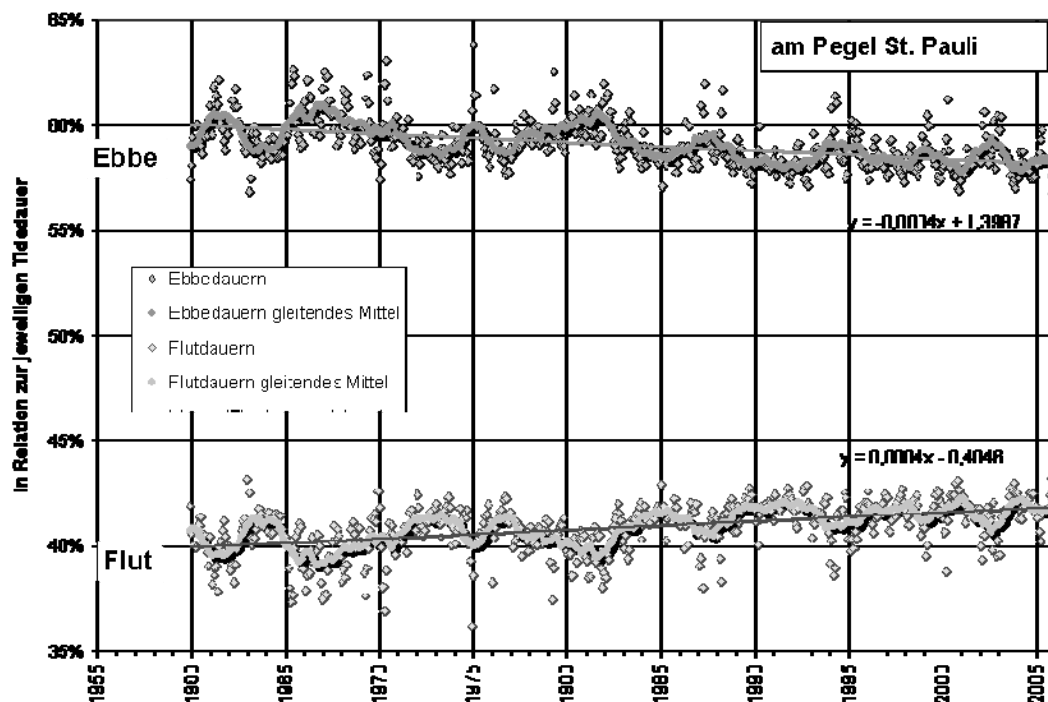


Abb. 7: Entwicklung der Tidedauern am Pegel St. Pauli seit 1960

Während das Verhältnis von Flut- zu Ebbedauer seit Beginn des berücksichtigten Zeitraumes von 1960-2005 am Pegel Helgoland mit 45,5 % zu 54,5 % der Tidedauer auf eine leichte Asymmetrie hinweist (hier nicht dargestellt), verkürzt sich die Dauer der Flutphase stromaufwärts immer weiter bis zu einem Verhältnis von 40 % zu 60 % am Pegel St. Pauli (vgl. Abb. 7). Dabei hat die Dauer der Flutphase im Revier in den letzten 45 Jahren zu Lasten der Ebbedauer spürbar zugenommen. So hat die Dauer einer mittleren Flutphase am Pegel St. Pauli von 298 auf 311 Min. um rd. 13 Min.

zugenommen, während die Dauer der Ebbephase in gleichem Maße von 447 auf 434 Minuten abgenommen hat. Ähnliche Verhältnisse in Bezug auf die Entwicklung der Dauer von Flut- und Ebbephassen werden auch an den anderen Pegeln im Revier beobachtet, während die Verhältnisse in Helgoland eher gleich geblieben sind.

Demgegenüber steht das Aufsteilen der Welle, d.h. dass der Anstieg des Wasserstandes an einem Pegel immer schneller geschieht. Dieses auf den ersten Blick widersprüchliche Phänomen lässt sich wie folgt erklären: Die Zunahme des Tidehubs am Pegel überwiegt im Gegensatz zu der längeren Flutphase, in anderen Worten: trotz der längeren Flutphase kommt es aufgrund des erhöhten Tidehubs zu einem Aufsteilen der Welle. Dieses kann vor allem in Bezug auf Sedimenttransportvorgänge im Elbeästuar von besonderer Bedeutung sein. Die Bundesanstalt für Wasserbau (2001) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass "durch eine Fahrrinnenvertiefung grundsätzlich der Flutast aufgesteilt und damit der Stromauf-Transport der Sedimente (Sedimenttransport und suspendierter Transport) verstärkt wird. Die Folge kann ein drastischer Anstieg der Unterhaltungsbaggermengen in der Fahrrinne aber auch im Hamburger Hafen (Senke) sein" (BAW/DH, 2001).

3 Baggermengen

Gesamtbaggermengen in der Tideelbe

Die jährlichen Unterhaltungsbaggermengen liegen seit 1995 im Bereich der gesamten Tideelbe zwischen 17 und 19 Mio. m³. Den Baggermengen überlagert ist in der Abb. 8 das Jahresmittel des Oberwassers bei Neu-Darchau aufgetragen. Grundsätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen Oberwasser und Baggermengen, der sich in den einzelnen Unterhaltungsabschnitten wie folgt darstellt: Im Bereich des WSA Cuxhaven fördert ein hoher mittlerer jährlicher Oberwasserabfluss im Zusammenwirken mit anderen Parametern die Bildung von Untiefen infolge Sedimentation. Durch den Spülstoß der Oberwasserwelle gelangen die Feststoffe von Oberstrom bis in den Mündungsbereich und erhöhen dort das Sedimentangebot. Ein niedriges jährliches Oberwasser verringert dagegen das Sedimentangebot im Mündungsbereich, da das Sediment von Oberstrom nur bis in den Bereich des WSA Hamburg gelangt. Deshalb fördert ein niedriger Oberwasserabfluss die Sedimentation im Bereich des WSA Hamburg und der Delegationsstrecke. Dazu kommen noch Einträge aus dem sedimentangereicherten Nordseewasser bei Flutstrom und die Verlagerung der Trübungszone nach Oberstrom bei niedrigen Abflüssen. Ein hohes Oberwasser verlagert die Trübungszone dagegen weiter in Richtung Mündung.

Für den Amtsbereich des WSA Cuxhaven kann keine Abnahme der Unterhaltungsbaggermengen bedingt durch den Fahrrinnenausbau nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den drei Jahren vor dem eigentlichen Ausbau 1999 haben sie hier sogar zugenommen, obwohl der Oberwasserabfluss ungefähr gleich groß gewesen ist. Es ist jedoch dabei zu beachten, dass die Baggermengen nicht nur vom Oberwasser abhängen, sondern auch von anderen Ereignissen, wie z. B. dem strengen Winter 1996 mit starkem Eisgang, währenddessen kaum Baggerungen durchgeführt werden konnten. Für den Amtsbereich des WSA Hamburg sind bei niedrigem Oberwasser die Unterhaltungsbaggermengen prinzipiell hoch, bei hohem Oberwasser dagegen klein. Unter Berücksichtigung des Oberwassereffektes sind die Baggermengen im Bereich des WSA Hamburg, verglichen mit den Mengen in den neunziger Jahren, etwas zurückgegangen. Die Mengen 2000 und 2001 waren bei niedrigem Oberwasserabfluss etwa so groß wie 1995 und 1996 bei höherem Oberwasserabfluss. Das extreme Hochwasser im Sommer 2002 im Bereich der Mittel- und Oberelbe bildet mit seinen Auswirkungen eine Ausnahmeerscheinung und kann daher für vergleichende Betrachtungen nicht herangezogen werden.

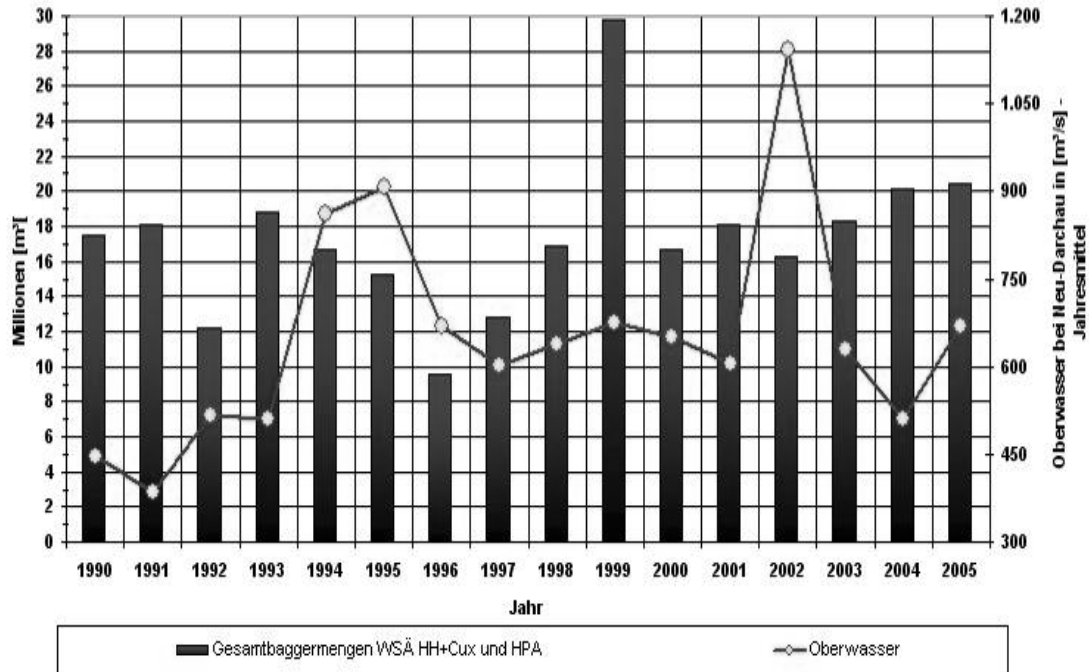


Abb. 8: Baggermengen im Bereich der gesamten Tideelbe - Baggermengen seit 1990 und Oberwasserabfluss

In Abb. 8 ist zu erkennen, dass die Unterhaltungsbaggermengen nach dem Fahrrinnenausbau im gesamten Untersuchungsraum weitgehend konstant geblieben sind. Im Elbabschnitt oberhalb von Hamburg fielen keine Unterhaltungsbaggerungen an, und innerhalb der Reviere der Ämter Cuxhaven, Hamburg und Hamburg Port Authority hat es Verschiebungen gegeben. Zusätzliche Mengen, die einen morphologischen Nachlauf erkennen ließen, sind aus den bis dato vorliegenden Daten nicht zu erkennen.

Baggermengen auf Hamburger Delegationsgebiet

Die bereits angesprochene Verlagerung der Unterhaltungsschwerpunkte hat sich besonders für die Baggerei in der Delegationsstrecke negativ ausgewirkt. In Abb. 9 ist zu erkennen, dass es zu einem extremen Anstieg der Baggermengen im Bereich der Hamburger Delegationsstrecke gekommen ist. Der hohe Wert für das Jahr 2001 lässt sich durch die Baggerungen für die Liegeplätze vor dem neuen Containerterminal Altenwerder erklären.

In einem vom Senat beauftragten Gutachten (Burt 2006) kommt der Autor zu dem Schluss, dass verschiedene Ursachen für die Verlagerung der Baggerschwerpunkte eine Rolle spielen. Zu nennen sind hier unter anderem ein Unterwasserleitdamm bei Glückstadt, den mit bei Flutstrom einlaufenden Schiffen aufgewirbelten Sedimenten und großräumige Erosionen im Mündungsbereich (so z.B. die Verlagerung der Medemrinne). Hinzu kommt, dass während der Investitionsbaggerungen leicht erodierbares Material freigesetzt wurde.

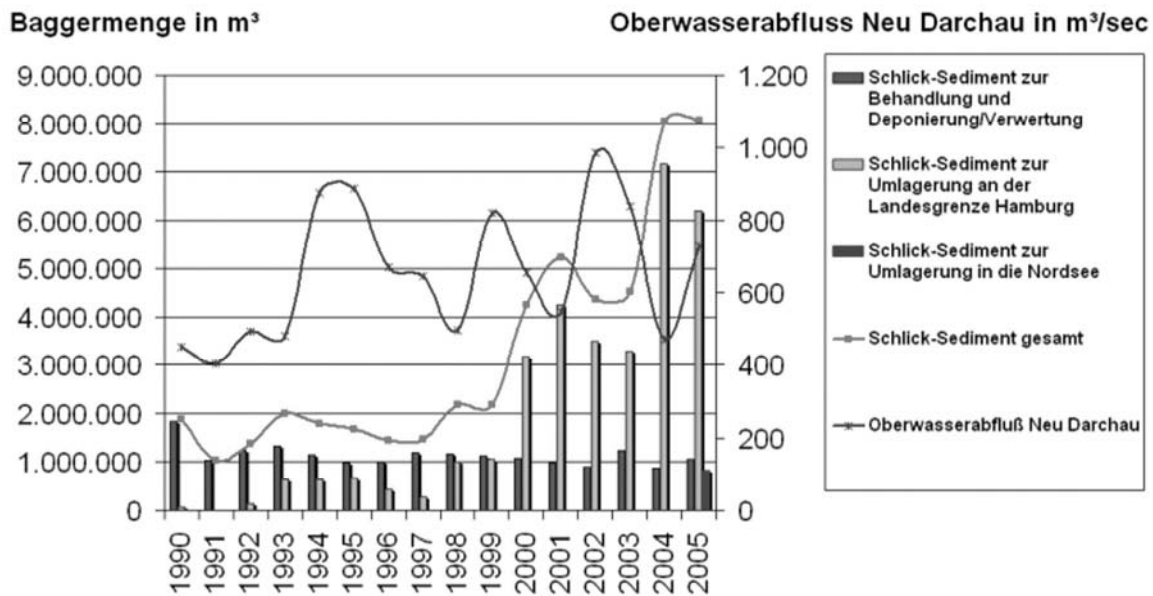


Abb. 9: Baggermengen im Bereich der Delegationsstrecke – Baggermengen seit 1990 und Oberwasserabfluss [Beweissicherungsbericht 2005]

Das umfangreiche Monitoring zum letzten Fahrrinnenausbau hat Daten erzeugt, die das Prozessverständnis für die Tideelbe vertieft und die bestehenden Modellvorstellungen erweitert haben. Darüber hinaus wurden jedoch auch viele Fragen aufgeworfen, deren Beantwortung in der Zukunft weitere Untersuchungen und Auswertungen benötigen.

Literatur

- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Dienststelle Hamburg (2001): Potentialuntersuchung zur Außen- und Unterelbe. 1. Teilbericht: Prinzipielle Vorabschätzungen zu möglichen Auswirkungen einer weiteren Fahrrinnenvertiefung. Hamburg.
- Burt, N. (2006): Sediment Management Strategies in the Elbe Estuary. Hamburg.
- Gönnert, G. et al. (2004): Charakterisierung der Tidekurve. Die Küste 2004.
- Jensen, J. & C. Mudersbach (2004): Zeitliche Änderung in den Wasserstandszeiten an den Deutschen Küsten. Tagungsband Workshop Klimaänderung und Küstenschutz, TU Harburg.
- Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (2006): Beweissicherungsbericht 2005.
- Zanke, U.C.E. (2002): Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer. Parey, Berlin.

Adresse

Dipl.-Ing., M. Sc. Maja Fickert
Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
D-20457 Hamburg

maja.fickert@hpa.hamburg.de