

Tidedynamik der Elbe

DIPL.-OZEANOGR. MARCUS J. BOEHLICH, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Viele Flüsse unseres Planeten sind von Gezeiten beeinflusst. Die durch die Gezeitenkräfte hervorgerufene Tidewelle wandert von der Mündung des Flusses hinauf bis zur Tidegrenze, wobei ihre Fortschritts-geschwindigkeit von der Wassertiefe abhängt. Im Gegen-satz zum tiefen Ozean ist die Wassertiefe im Tidefluss beinahe in der Größenordnung der Tidewellenamplitu-de, was dazu führt, dass bei Niedrigwasser der Fluss in einem signifikant anderen Bett verläuft, als bei Hoch-wasser. Als Ergebnis dieser Verhältnisse schreitet der Berg der Tidewelle (Hochwasser) schneller fort als das Wellental (Niedrigwasser), was zu einer Verformung der Tidekurve mit einer relativ langen Zeit zwischen Hochwasser und dem nachfolgenden Niedrigwasser (Tidefall) und einer entsprechend kürzeren Zeit zwis-chen Niedrigwasser und dem nächsten Hochwasser (Tidestieg) führt.

Im Ozean treten die maximalen durch die Gezeiten erzeugten Strömungen jeweils bei Hoch- und Nied- rigwasser auf. Je weiter man den Fluss hinaufgeht, desto mehr verschieben sich diese Strömungsmaxi- ma, bis im Falle von Totalreflexion der Tidewelle an ei- nem Wehr das Stauwasser bei Hoch- und Niedrigwas- ser eintritt.

Dabei wird die Ebbestromdauer einerseits durch die Asymmetrie der Tidekurve und andererseits durch den mehr oder weniger starken Oberwasserzufluss in das Ästuar gegenüber der Flutstromdauer verlängert.

Wie nun die Ausprägung und Entwicklung der Gezei- ten in dem jeweiligen Tidefluss ist, hängt von der To- pographie, der anregenden Gezeit, dem Oberwasser- zufluss und anderen äußeren Kräften, wie z. B. der ho- rizontalen und vertikalen Verteilung der Salinität und dem jeweils herrschenden Wind, ab.

Unter einigen der genannten Aspekte soll die Tideel- be in diesem Beitrag betrachtet werden.

Die obere Grenze des Tideästuars Elbe wird, solan- ge keine Sturmflutwasserstände herrschen, durch das Wehr Geesthacht gebildet. Hier gelangen die weiter oberhalb bei Neu Darchau gemessenen Wassermen- gen mit einem Zeitverzug von 1 – 2 Tagen als Ober- wasserzufluss in die Tideelbe (Tabelle 1).

Die Elbe ist vom Wehr bis zum ca. 20 km entfernten Bunthaus typischerweise 300 – 500 m breit. Dieser Be- reich heißt „obere Tideelbe“, wird von der Bevölkerung aber nur lax „Oberelbe“ genannt. Bei Bunthaus, wo die Unterelbe beginnt, teilt sich der Fluss in Norder- und Süderelbe auf, wobei jeder Arm anfangs nur noch ca. 200 m breit ist. Die Breiten nehmen jedoch nahezu

kontinuierlich zu, sodass beim Aufeinandertreffen der beiden Arme die Norderelbe ca. 400 m und die Süder- elbe ca. 300 m breit sind und die nun wieder vereinigte Elbe eine Breite von ca. 500 m hat. Weitere 7 km unter- halb verbreitert sich der Fluss mit der Elbbucht Mühlen- berger Loch abrupt auf 2,5 km. Von hier verläuft die Fahrrinne der Elbe in einem ständig Form und Brei- te ändernden Bett, wobei die Inseln Hans-Kalb-Sand/ Schweinsand/Neßsand, Lühesand, Drommel/Auberg/ Bishorster Sand, Pagensand, Schwarztonnensand und Rhinplatte Nebenelben entstehen lassen. Bei Nie- drigwasser treten als sichtbare formende Elemente ei- nige Sände wie Brammer Bank, Böschrücken und der Medem-Sand hinzu.

Niedrigster beobachteter Zufluss	145 m³/s
Mittlerer niedrigster Zufluss	278 m³/s
Mittlerer Zufluss	711 m³/s
Mittlerer höchster Zufluss	1870 m³/s
Höchster beobachteter Zufluss	3620 m³/s

Tabelle 1: Oberwasserzufluss Neu Darchau 1926/1999
(Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahr- buch Elbegebiet, Teil III, 1999)

Unterhalb Brunsbüttel weitet sich die Elbe zum Mün- dungstrichter, der eine maximale Breite von ca. 17,5 km (Cuxhaven – Trischendam) erreicht. Bei Niedrigwasser bleiben davon gerade mal noch ca. 1,5 km übrig, da der größte Teil des Mündungstrichters der Elbe trocken fällt. Dass diese vom Wasserstand abhängige Form des Flussbettes nicht ohne Folgen auf das Tidegeschehen sein kann und daher andere Phänomene entstehen, als in Tideflüssen mit weniger großen Änderungen des Querschnittes, ist angesichts der oben erwähnten Zusammenhänge offenkundig.

Von Cuxhaven seewärts beginnt die Außenelbe (Bild 1), deren Nordsee-seitige Grenze etwa bei den Groß- bakken A und Z nördlich des Scharhörnriffs liegt.

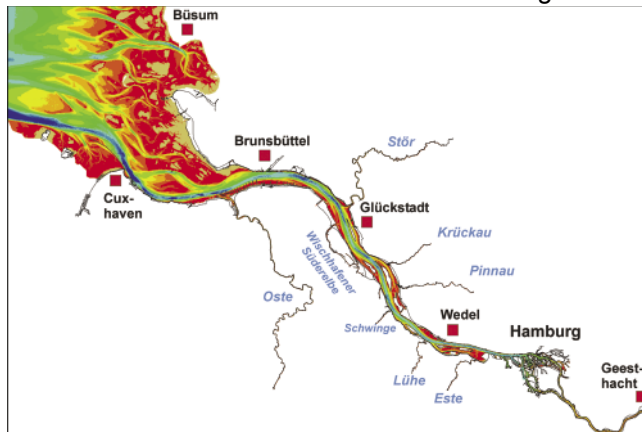


Bild 1: Übersicht der Unter- und Außenelbe

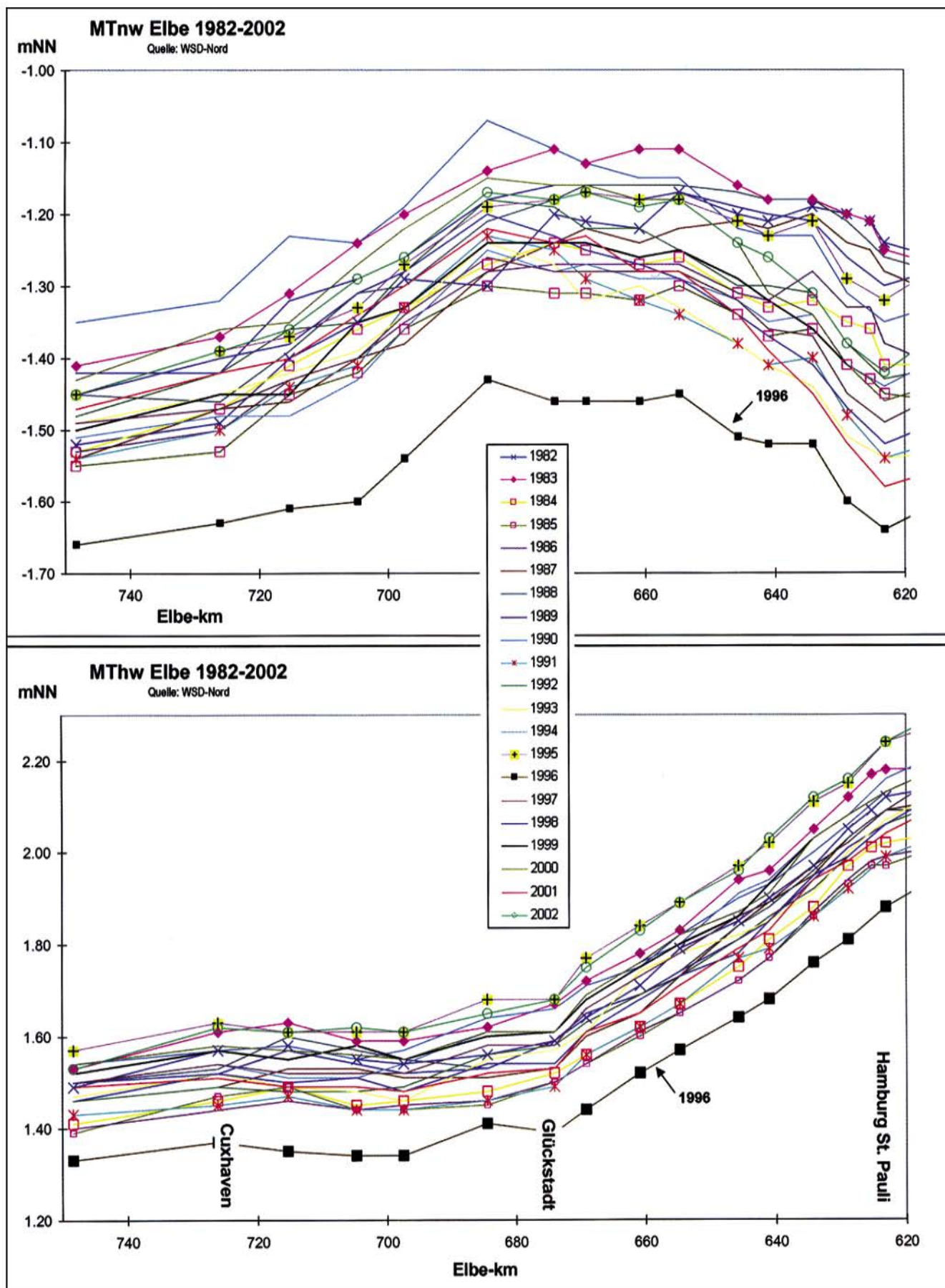


Bild 2: Längsprofile der Jahresmittelwerte des mittleren Tidehoch- und -niedrigwassers entlang der Elbe

In die Tideelbe münden folgende Nebenflüsse: Ilmenau, Este, Wedeler Au, Lühe, Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör und Oste deren Vorhandensein für die Tidedynamik der Elbe von untergeordneter Bedeutung ist.

Wasserstände

Das Bild 2 zeigt den Bereich, den die über ein Jahr gemittelten Tidehoch- (MThw) und -niedrigwasserstände (MTnw) zwischen Hamburg und der Außenelbe eingenommen haben. Auffällig ist hier das Jahr 1996, in dem sowohl das MThw als auch das MTnw deutlich niedriger liegt als die Kurven der anderen Jahre. Dies liegt an einem überproportional großen Anteil an Ost- und Südostwind, der in Bild 3 dokumentiert ist. Wind aus diesem Sektor wirkt erniedrigend auf den mittleren Wasserstand und dämpfend auf das Tidegeschehen. Trotzdem zeigt auch dieses Jahr die gleichen Strukturen wie die anderen Jahre: Von See kommend, steigt das MTnw bis Glückstadt um ca. 25 cm an, um dann in Richtung Hamburg wieder abzusinken. Dabei ist die Differenz zwischen dem MTnw in Cuxhaven und dem in Hamburg im Laufe der letzten 30 Jahre ständig kleiner geworden und beträgt heute fast 0 m. Das MThw zeigt entlang des Flusses eine andere Entwicklung: Von See kommend bis ca. Glückstadt steigt das MThw nur gering an und steigt von dort bis Hamburg um ca. 0,5 m an. Dieser Anstieg ist in den letzten 30 Jahren um ca. 0,25 m größer geworden. Diese Entwicklung ist eine Folge der Veränderung des Flussbettes der Elbe auf die später noch eingegangen wird.

Das Bild 4 zeigt Tidewellenlinien bei Spring- und Nippzeit. Sie geben Auskunft über die in der Elbe anzutreffenden Gradienten und die Steig- und Fallgeschwindigkeiten des Wasserstandes (bei Normaltiden) und zeigen deutlich, dass es sich bei der Tide um eine Wellenbewegung handelt. Liegen die Tidewellenlinien eng beieinander, so sind die Steig- bzw. Fallgeschwindigkeiten klein, liegen sie weiter auseinander, so sind diese Geschwindigkeiten groß. Allein aus dem Gradienten des Wasserstandes lässt sich, anders als im Binnenbereich, noch nichts über die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten aussagen. Obwohl die Gradienten sowohl bei Flut als auch bei Ebbe von See bis Hamburg nahezu gleich groß sind, werden die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser von Hamburg Richtung See fast kontinuierlich größer, wobei hier die Ebbestromgeschwindigkeiten stärker ansteigen als die Flutstromgeschwindigkeiten.

Deutlich ist auch die durch den abrupten Wandel der Breite und Tiefe der Topographie bei Bunthaus und das Wehr in Geesthacht ausgelöste Änderung des Tideregimes zu erkennen: Während unterhalb Hamburgs die Tidewellenlinien bei Flut und bei Ebbe nahezu den gleichen Betrag der Neigung haben, sind die Linien oberhalb Bunthaus bei Flut sehr viel weniger geneigt als bei Ebbe, was durch die starke Verformung der Tidewelle auf diesem Weg ausgelöst wird.

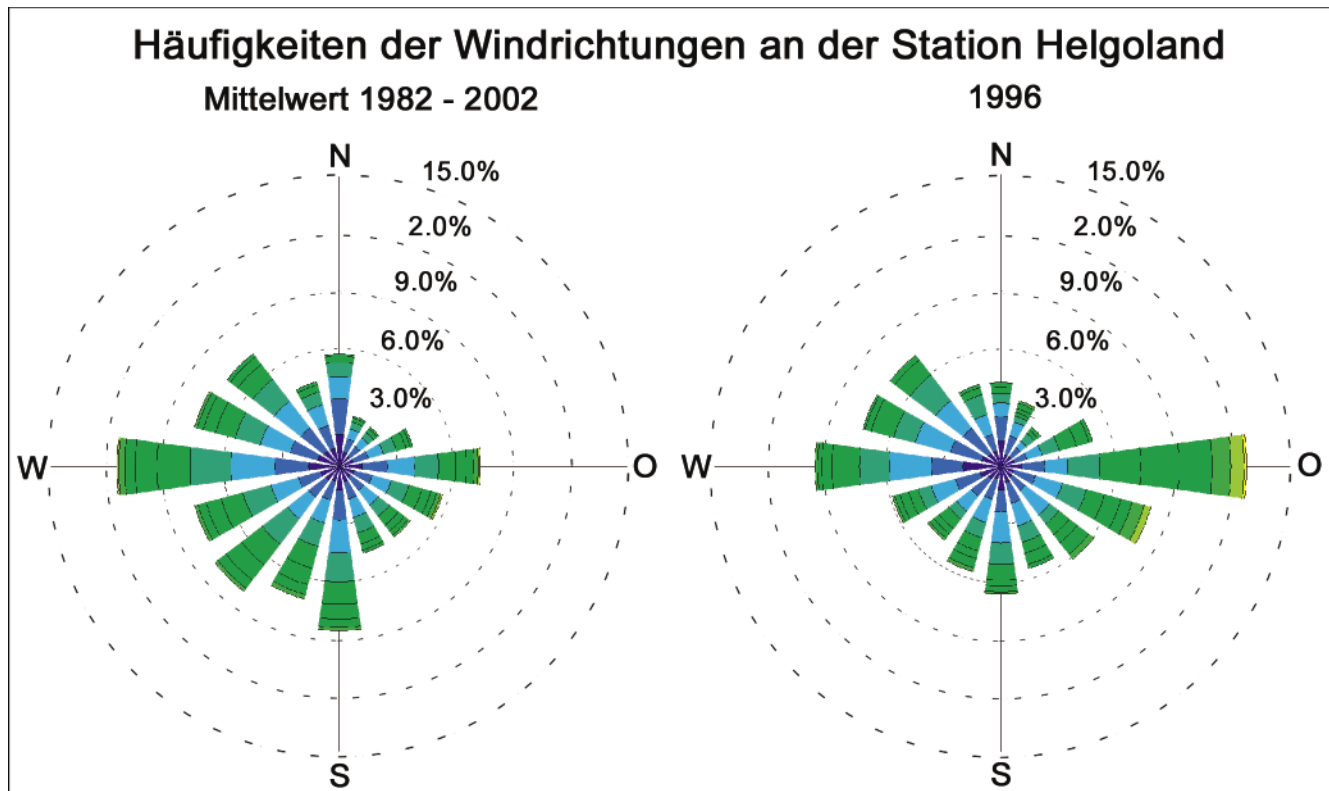


Bild 3: Häufigkeit der Windrichtungen an der Station Helgoland

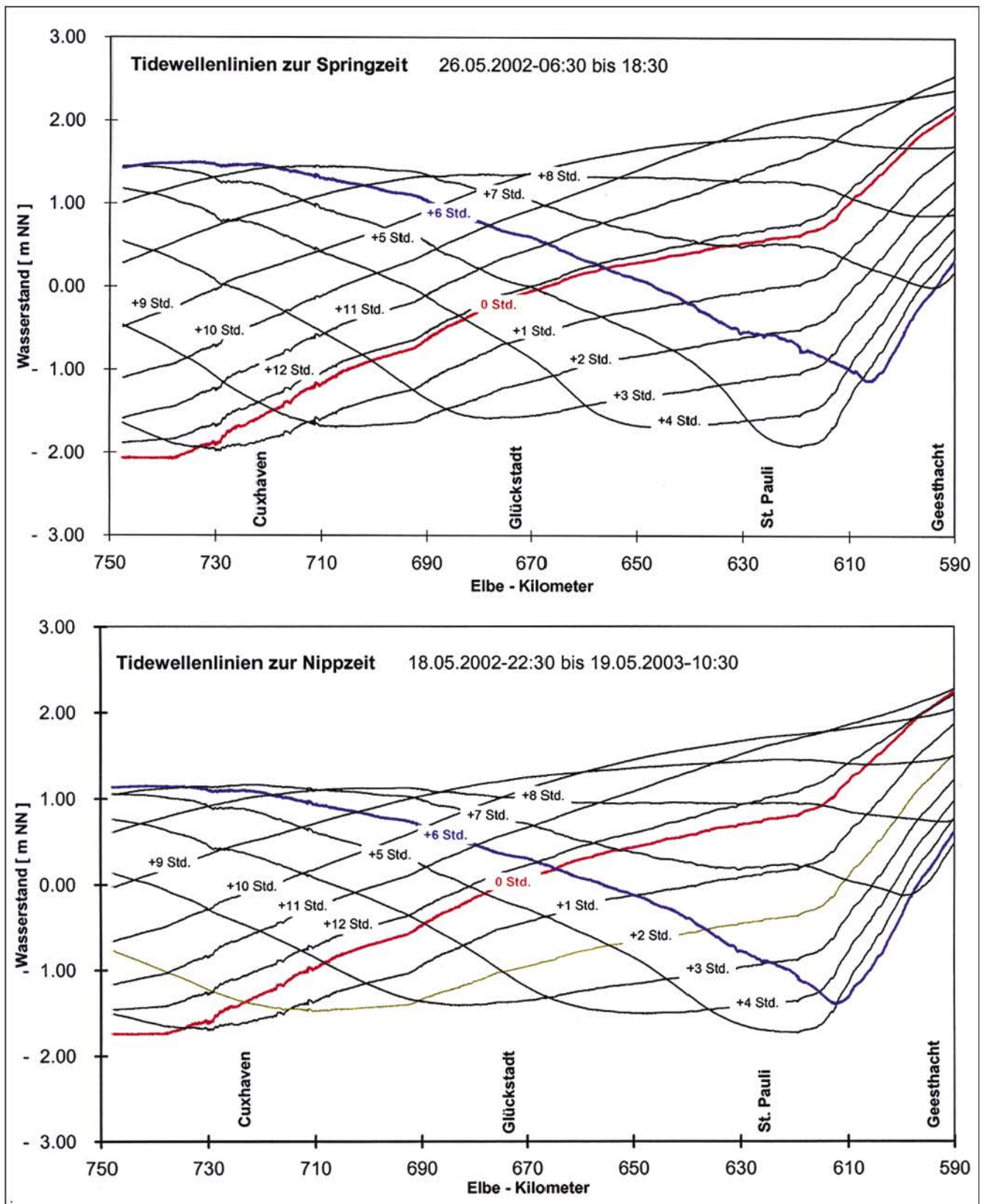


Bild 4: Tidewellenlinien zu Spring- und Nippzeit entlang der Elbe

Verformung der Tidewelle

In Bild 5 ist zu sehen, wie die Tidewelle auf ihrem Weg von der Nordsee nach Oberstrom verformt wird. Die ursprünglich nahezu sinusförmige Welle wird durch die

unterschiedliche Fortschrittsgeschwindigkeit des Wellenberges und des Wellentales so verformt, dass der Flutast steiler und der Ebbeast flacher wird. Die auf die Strömung wirkende Bodenreibung und der Oberwasserzufluss tragen ebenfalls zu diesem Phänomen

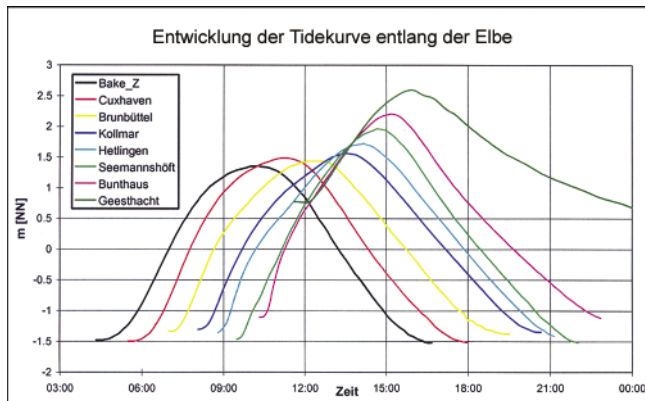


Bild 5: Entwicklung der Tidekurve entlang der Elbe

bei. Gleichzeitig ist aber auch eine Erhöhung der Gezeitenamplitude zu beobachten, die dadurch ausgelöst wird, dass die Tidewelle sowohl an Schwellen der Topographie als auch am Wehr Geesthacht reflektiert wird. Deutlich zeigt Tabelle 2 den Effekt.

Pegel	Mittlere Flutdauer (Min.)	Mittlere Ebbedauer (Min.)
Helgoland	341	404
Cuxhaven	337	408
Glückstadt	327	418
Schulau	322	423
Blankenese	314	431
St. Pauli	303	442
Zollenspieker	265	480

Tabelle 2: Flut- und Ebbedauern

Man erkennt, dass sogar die Tidekurve am Pegel Helgoland bereits durch Flachwassereffekte verformt ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Ebbedauer zu Lasten der Flutdauer zunimmt, je weiter die Tidewelle den Fluss hinaufläuft.

Einfluss des Oberwassers auf die Tidewelle

Der Tideverlauf wird darüber hinaus auch wesentlich von der Menge des Oberwasserzuflusses verändert. Dies zeigt Bild 6, in der die Ebbe- und Flutdauern in der Elbe bei einem Oberwasserzufluss von 300 m³/s und bei einem von 2000 m³/s dargestellt sind. Je größer der Oberwasserzufluss ist, desto länger wird die Ebbedauer und um so kürzer wird die Flutdauer, wobei der Effekt nach unterstrom hin abnimmt. Dass das Phänomen nicht einfach nur mit der Wassermenge zu erklären ist, sondern mit Resonanz und Reflexion zu tun hat, mag das Minimum des Effektes bei Glückstadt zeigen. Hier ergibt sich auf Grund der Änderung des Oberwasserzuflusses nahezu keine Änderung der Flut- und Ebbedauern.

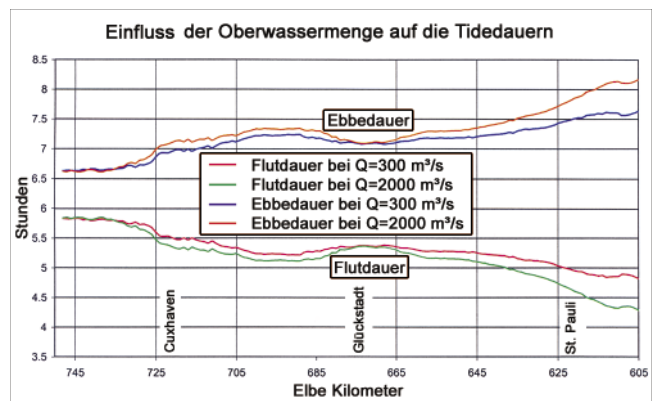


Bild 6: Einfluss der Oberwassermenge auf die Tidedauern

Die Menge des Oberwasserzuflusses beeinflusst wie in einem Binnenfluss die mittlere Wasserspiegellage in Abhängigkeit von der Flussbreite. Zusätzlich bewirkt eine Zunahme der Oberwassermenge oberhalb von St. Pauli eine Dämpfung des Tidehubes. Diese beträgt bis zu 2 m, wenn der Zufluss von 300 m³/s auf 2000 m³/s beim Wehr Geesthacht zunimmt! Wegen des dadurch veränderten mittleren Wasserstandes und auch der dadurch veränderten Strömung werden die Tidelauftzeiten beeinflusst. Wie komplex dieses Phänomen ist zeigt Bild 7: Bei großem Oberwasserzufluss wird die Laufzeit des Tideniedrigwassers gegenüber der bei kleinem Oberwasserzufluss verlängert. Die Laufzeit des Tidehochwassers wird jedoch verkürzt, was ebenfalls durch die bereits erwähnte Verformung der Tidekurve verursacht wird.

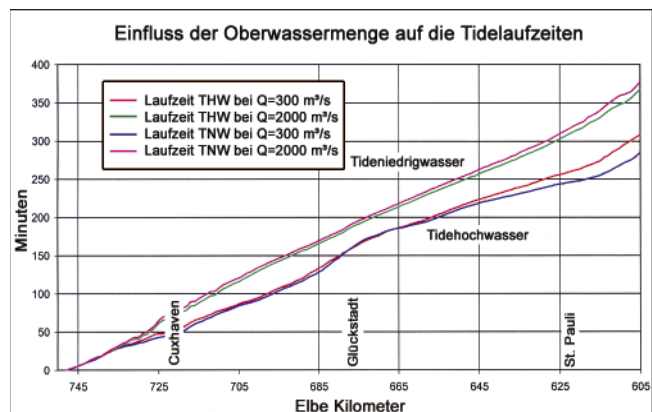


Bild 7: Einfluss der Oberwassermenge auf die Tidelauftzeiten

Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle

Aus demselben Bild ist auch die absolute Laufzeit der Tide abzulesen. Bei einem Oberwasserzufluss von 450 m³/s benötigt der Hochwasserscheitelpunkt ca. 3,5 Stunden um von Cuxhaven nach Hamburg zu gelangen, der Niedrigwasserscheitelpunkt hingegen rund 0,5 Stunden länger. Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle ist in erster Näherung nur von der Wassertiefe abhängig und, da diese bei Hochwasser größer ist als bei Niedrigwasser, kommt es zu den beschriebenen Unterschieden in der Laufzeit.

Windeinfluss auf die Tide

Der Einfluss des Windes bei Sturm aus Richtungen um Nordwest führt zu kräftigen Erhöhungen der Tidehochwasserstände entlang der Elbe, oft auch zu Sturmfluten, über die an anderer Stelle in diesem Heft berichtet wird. Dass Starkwind und Sturm aus Richtungen um Südost ebenfalls zu signifikanten Änderungen der Wasserstände führt, ist für die Bevölkerung weniger spektakulär, für die Schifffahrt aber eventuell viel dramatischer. Bild 8 zeigt, was ein Starkwind der Stärke 7, der über mehrere Tage weht, bewirkt: Gegenüber den vorausberechneten Wasserständen sinkt das Tidehochwasser um bis zu 1 m ab, das Tideniedrigwasser wird immerhin noch um ca. 0,5 m erniedrigt. Diese Wirkung des Windes ergibt sich wie bei einer Sturmflut nahezu ohne Zeitverzögerung und lässt ebenso schnell wieder nach.

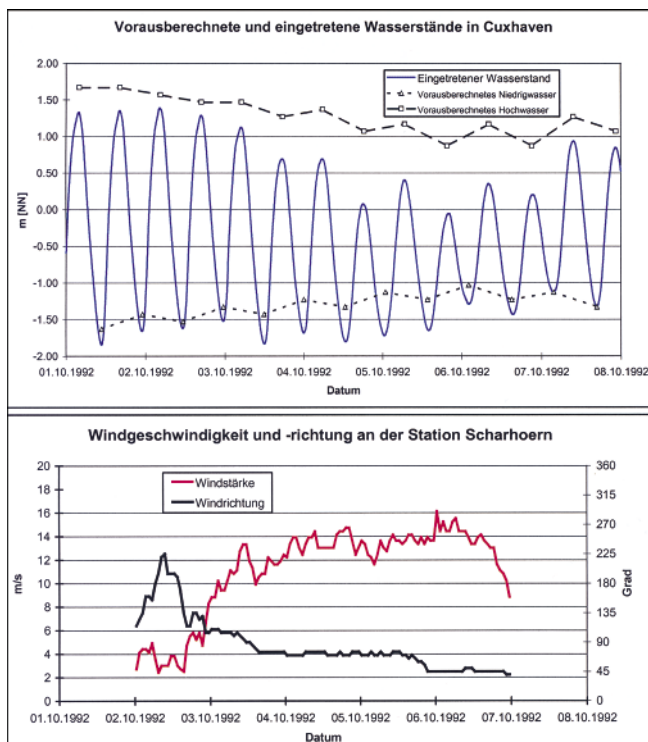


Bild 8: Einfluss eines Ostwindes auf die Wasserstände in der Elbe

Entwicklung der mittleren Wasserstände 1950 – 2000

Das Bild 9 zeigt die Entwicklung der Monatswerte der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasserstände am Pegel Cuxhaven Steubenhöft und in St. Pauli. Während am Pegel Cuxhaven nur ein geringer positiver Trend des Tidehochwassers zu beobachten ist und das Tideniedrigwasser keinen Trend zeigt, sieht diese Entwicklung am Pegel St. Pauli deutlich anders aus. In den vergangenen 50 Jahren ist dort das MTnw um ca. 1 m abgesunken und das MThw um ca. 0,5 m angestiegen. An dieser Entwicklung haben die stattgefunde-

nen Vertiefungen des Fahrwassers der Elbe einen Anteil, der jedoch von der Art der Vertiefung abhängt. So ist z. B. die Reaktion auf durchgehende Vertiefung des Fahrwassers auf 13,6 m KN im Jahre 1976 sowohl im Tnw als auch im Thw deutlich sichtbar, eine Reaktion auf die Vertiefung im Jahre 1999 ist bisher jedoch nicht erkennbar. Im Unterschied zur durchgehenden Vertiefung 1976 ist die Vertiefung 1999 als sog. Sockellösung gebaut worden, bei der die Strecke zwischen Brunsbüttel und Wedel geringer vertieft wurde als die Bereiche in und unterhalb Hamburg und von Brunsbüttel Richtung See.

Untersuchungen der BAW haben aber auch gezeigt, dass die ohne Zutun des Menschen stattfindenden Umlagerungen im Bereich der Außen- und Unterelbe ähnlich große Effekte im Wasserstandsgeschehen hervorrufen wie Vertiefungsmaßnahmen. Als Beispiel seien hier nur die Verlagerung der Medemrinne und die Öffnung des Lüchterloches in den letzten 20 Jahren genannt.

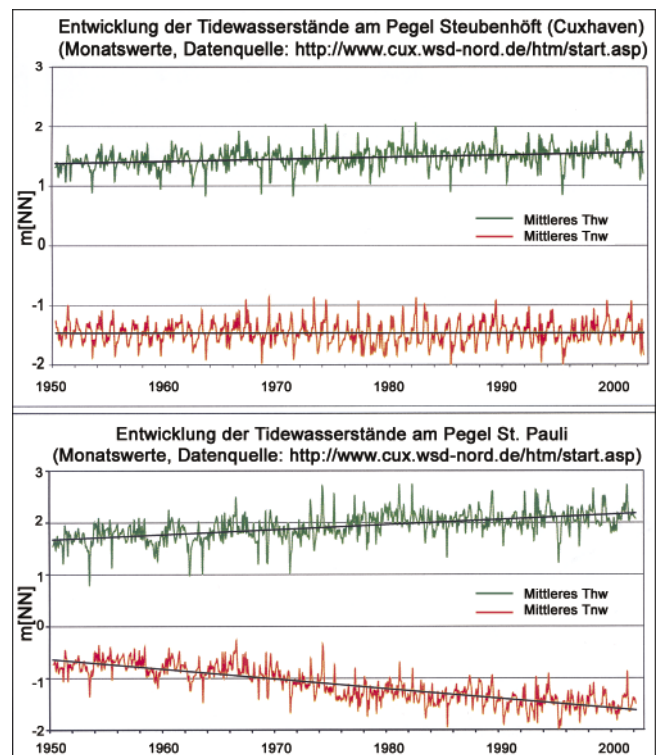


Bild 9: Entwicklung der Tidewasserstände an den Pegeln Steubenhöft (Cuxhaven) und St. Pauli