

Untersuchung der Veränderungen des Tideregimes in den Ästuaren von Ems-Dollart und Unterweser mittels mathematischer Modellierung

Gerald Herrling, Johanna Elsebach und Anne Ritzmann

Zusammenfassung

In den Ästuaren von Ems-Dollart und Unterweser wurden Untersuchungen zum Vergleich der historischen und aktuellen Zustände des hydrodynamischen Regimes durchgeführt. Auf der Basis historischer und aktueller Topographien wurden für beide Ästuar prozessbasierte, numerische Modelle erstellt, um die räumliche und zeitliche hydrodynamische Entwicklung auszuwerten. Für das Ems-Dollart-Ästuar dient dafür als Referenzzustand das Jahr 1937, welches den Zustand vor den umfassenden anthropogenen Eingriffen wie Begradigung und Vertiefung darstellt. Den Vergleich mit dem aktuellen Zustand ermöglicht eine Modelltopographie des Jahres 2005. Der natürliche, historische Zustand der Unterweser wurde aus Topographiedaten des Jahres 1887 rekonstruiert, unmittelbar vor der Weserkorrektur nach Ludwig Franzius. Topographische Daten von 2000 repräsentieren den aktuellen Zustand. Die Modellergebnisse ermöglichen einen Vergleich hydrodynamischer Parameter und somit die Quantifizierung der Veränderungen von Wasserständen, Strömungsgeschwindigkeiten, Tidevolumen, Tidedurchfluss und Dauer der Tidephasen.

An der Unterems wurden hydrodynamische Parameter als Zeitreihen an einer Position für einen Tidezyklus ausgewertet und als zeitlich gemittelte Werte längs des Fahrwassers. Tidedurchfluss, Tidevolumen und Strömungsgeschwindigkeiten sind im Zeitraum 1937 bis 2005 signifikant angestiegen, während die Dauer der Tidephasen zumindest im Abschnitt zwischen Leerort und Pogum annähernd gleich geblieben ist. In Längsrichtung betrachtet hat die Differenz zwischen mittlerem Flut- und Ebbsdurchfluss seit 1937 zugenommen. Für die Außenems zeigt ein räumlicher Vergleich der Tideströmungsgeschwindigkeiten die Unterschiede von Strömungsmuster und -intensität. Die Strömungsgeschwindigkeiten haben seit 1937 leicht zugenommen bei einer Konzentration auf die vertiefte Flussmündung und die tiefen Rinnen. Die räumliche Diversität der Strömungsgeschwindigkeiten und strömungsberuhigte Flachwasserbereiche im Mündungsbereich sind seit 1937 signifikant vermindert.

Für das Ems-Dollart-Ästuar und insbesondere die Unterems ist eine dramatische Veränderung des Tideregimes aufgrund anthropogener Faktoren festzustellen. Die Vertiefung und Begradigung des Ästuars stromauf des Dollarts hat langfristige morphodynamische Prozesse geschaffen, die noch immer von Bedeutung sind. Die natürlichen und anthropogenen Eingriffe der letzten Jahrhunderte im Dollart führten zu einer starken Reduzierung des Tideprismas, das für die Veränderungen des Tideregimes im äußeren Ems-Dollart-Ästuar verantwortlich ist.

Für das Weserästuar verdeutlicht die Auswertung hydrodynamischer Parameter in Längsrichtung zwischen Bremen und Bremerhaven einen signifikanten Anstieg des mittleren Tidedurchflusses und des mittleren Tidevolumens seit 1887. Aufgrund der Verlagerung

der natürlichen Flutstromgrenze von Vegesack nach Bremen zeigen die Tidephasendauern in diesem Bereich heutzutage einen steilen Gradienten, was eine plötzliche Verkürzung der Ebbstromdauer bzw. Verlängerung der Flutstromdauer bedeutet. Die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen beiden Modellzuständen 1887 und 2000 zeigt die massiven Auswirkungen von Flussbegradigung und Abtrennung von Nebenarmen. Der starke anthropogene Einfluss hat Flachwasserbereiche und Rinnen mit geringer Strömung in ein begradigtes Fahrwasser mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten verwandelt.

Schlagwörter

Ems-Dollart-Ästuar, HARBASINS, Korrektur Unterweser, Flussbegradigung und Fahrwasservertiefung, Delft3D, prozessbasiertes Modell, Ästuardynamik, Nachhersage (hindcast), Regime Veränderung, Vergleich historischer und aktueller Zustand

Summary

Investigations for the Ems-Dollard and the Lower Weser estuaries have been done to compare the hydrodynamic regimes for historical and recent states. The research incorporates the identification of long-term spatial developments on the basis of historical and recent bathymetrical data and the application of process-based numerical modelling in order to hindcast the hydrodynamic regime. For the Ems-Dollard estuary the bathymetrical state of 1937 was reconstructed. This reference state represents the estuary prior to the main anthropogenic impacts of channel streamlining and deepening. A model bathymetry of the year 2005 was applied for comparison. For the Lower Weser estuary a historical state of 1887 was reconstructed and compared to the situation of the year 2000. Here, 1887 represents the situation prior to the "Weser correction" by Ludwig Franzius. Model results enable the comparison of hydrodynamic parameters and thus allow the quantification of changes in water levels, current velocities, tidal volumes, tidal discharges and the duration of tidal phases.

In the Lower Ems, the comparison of hydrodynamic parameters is assessed in the time domain at one specific location during one tidal cycle and for time-averaged values at a longitudinal section. Tidal discharges, volumes and current velocities have significantly increased between 1937 and 2005, whereas the duration of the tidal phases has remained almost constant in time for at least the section between Leerort and Pogum. For the aforementioned longitudinal section, the difference between mean flood and mean ebb discharges has increased from 1937 until now. In the outer Ems, a spatial comparison of tidal current velocities shows the differences in flow pattern and magnitudes. Comparing the present to the historical model state, tidal current velocities have slightly increased and the current patterns are more concentrated on the deepened tidal inlet and channels. The diversification of current magnitudes on a spatial scale has been significantly reduced with respect to 1937. Shallow water areas with reduced current velocities have almost disappeared in the tidal inlet.

The Ems-Dollard estuary and particularly the Lower Ems experienced a dramatic change of its tidal regime due to human interferences. The estuarine deepening and streamlining upstream of the Dollard Bay created long-term morphodynamical processes being still of importance. In the last centuries, natural and anthropogenic interferences in the Dollard Bay resulted in a strong reduction of tidal prism being responsible for changes to the tidal regime in the outer Ems-Dollard estuary.

For the Lower Weser estuary, the evaluation of hydrodynamic parameters along a longitudinal section between Bremen and Bremerhaven reveals a significant increase in mean tidal discharges and mean tidal

volumes since 1887. Due to the shift of the natural flood current limit from Veegesack to Bremen, the duration of tidal phases nowadays feature a steep gradient in exactly this area, which means a sudden decrease in ebb duration and thus increase in flood duration. The spatial distribution of depth-averaged current velocities for the model states of 1887 and 2000 shows the enormous effect of streamlining the waterway and cutting-off of secondary channels since 1888. The strong anthropogenic impacts changed shallow water areas and secondary channels of relatively low current conditions into one straightened waterway characterized by high current magnitudes.

Keywords

Ems-Dollard-estuary, HARBASINS, Weser correction, waterway streamlining and deepening, Delft3D, process-based model, estuarine hydrodynamics, regime shift, comparison historical and present state, hindcast

Inhalt

1 Einleitung.....383

2 Methodik und Daten.....385

3 Ergebnisse.....386

 3.1 Ergebnisse einer bestimmten Stelle in der Unterems.....386

 3.2 Ergebnisse längs des Fahrwassers in der Unterems388

 3.3 Räumliche Ergebnisse für die Außenems.....392

 3.4 Ergebnisse längs des Fahrwassers in der Unterweser394

 3.5 Räumliche Ergebnisse für die Unterweser396

4 Schriftenverzeichnis397

1 Einleitung

In den letzten Jahrhunderten haben natürliche Prozesse aber zunehmend auch anthropogene Eingriffe zu bedeutenden Veränderungen in den Küstengebieten und Küstengewässern im Bereich der europäischen Flussmündungen geführt. Für die Ästuar- und deren Lebensräume erwachsen anthropogene Belastungen unter anderem aus folgenden Aktivitäten: Landgewinnung durch die Errichtung von Deichen auf supratidalem Marsch- und Vorland, Hafenausbau, Errichtung von Buhnen und Leitwerken, Vertiefung und Begrädigung von Wasserstraßen. Derartige anthropogene Eingriffe verändern insbesondere sowohl die Hydrodynamik als auch die Topographie der Ästuar-.

Im Rahmen des EU-Projekts Interreg IIIb HARBASINS („Harmonised River Basins Strategies North Sea“) war es Ziel des Arbeitspakets „Hydro- and Morphological Pressures and Impacts“, mittels hochauflösender mathematischer Modelle prozessbasierte Erkenntnisse über die Auswirkungen solcher Eingriffe zu gewinnen. Dazu wurden Untersuchungen für das Ems-Dollart-Ästuar und die Unterweser durchgeführt. Gegenstand der Untersuchung waren ein Vergleich historischer und aktueller Zustände des hydrodynamischen Regimes und die Bewertung der langfristigen räumlichen Entwicklung der Ästuar-.

Der vorliegende Beitrag basiert auf den Ergebnissen und der Interpretation

früher gewonnener Forschungsarbeiten (HERRLING und NIEMEYER 2007a, b, c; HERRLING und NIEMEYER 2008a, b, c; HERRLING und ELSEBACH 2008).

Die Untersuchungsgebiete liegen in der südlichen Nordsee (Abb. 1) und verfügen über die charakteristischen geomorphologischen Eigenschaften für diese Art von Küstengebiet: tiefe Rinnensysteme der Ästuararmündung, ausgedehnte Wattflächen und das flussartige, innere Ästuar. Die untersuchten Ästuar sind als mesotidal einzustufen, wobei der Tidenhub oberstromig zunimmt. Die Tidegrenze bilden Tidewehe - beim Ems-Dollart 50 km stromaup der Mündung, bei der Unterweser 70 km stromaup der Mündung.

Beide Ästuar blicken auf eine lange Geschichte bedeutender anthropogener Eingriffe zurück. Schon im Zeitraum zwischen dem 17. und 20. Jahrhundert wurden in der Dollartbucht zahlreiche Einpolderungen zur Landgewinnung vorgenommen (HERRLING und NIEMEYER 2007a). Ende des 19. Jahrhunderts waren bereits Bühnen, Häfen und Leitwerke an der Unterems und zur Stützung des Emders Fahrwassers entstanden. Seit den 1950er Jahren sind Unterhaltungsbaggerungen zur Optimierung des Fahrwassers in der Unterems die Regel. Für das Unterweserästuar stellten die Flussbegradigung und die Abtrennung von Nebenarmen zwischen 1888 und 1895 – heute bekannt unter der Bezeichnung „Weserkorrektur“ nach dem Plan von Ludwig Franzius – die markantesten menschgemachten Eingriffe dar. Ein weiterer bedeutender anthropogener Eingriff war die Fahrwasservertiefung auf SKN-9m nach 1972.

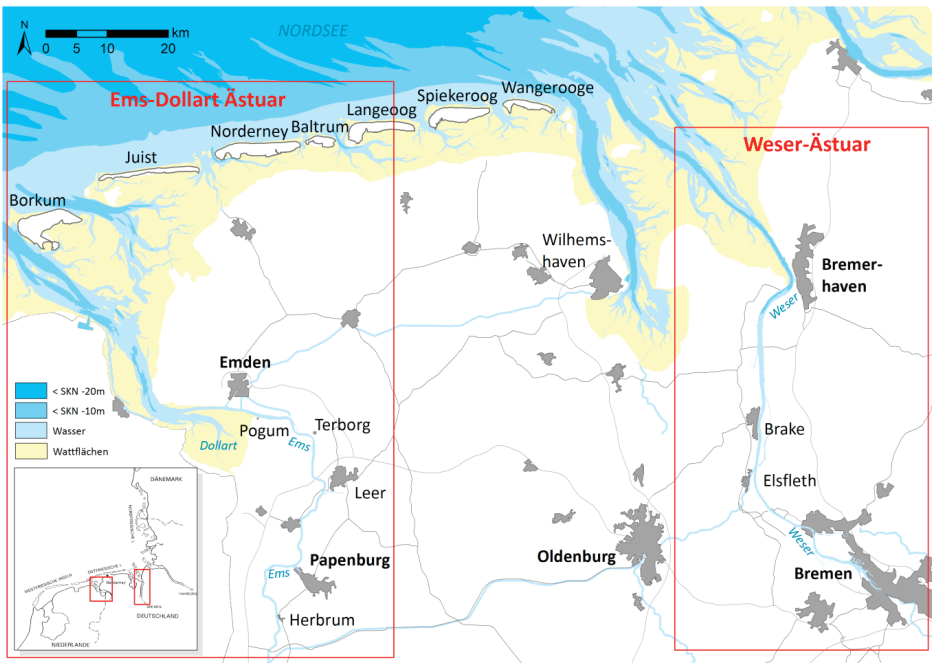


Abbildung 1: Untersuchungsgebiete Ems-Dollart-Ästuar und Weser-Ästuar.

2 Methodik und Daten

Zur Untersuchung bedeutender anthropogen bedingter Veränderungen des Tideregimes bietet sich ein Vergleich aktueller hydrodynamischer Parameter mit historischen Zuständen an. Kontinuierliche historische Messungen sind jedoch kaum verfügbar beziehungsweise in den meisten Fällen zeitlich und räumlich begrenzt. Für einen gewählten Referenzzustand kann die unzureichende Datenlage alternativ durch hydrodynamisch-numerische Modelle ausgeglichen werden, wenn hierfür ausreichende bathymetrische Daten zur Verfügung stehen. Der historische Modellaufbau dient dem hydrodynamischen Hindcasting, also der Reproduktion des hydrodynamischen Regimes im Zustand vor den großen menschlichen Eingriffen wie Fahrwasserbegradigung und -vertiefung. Ziel ist der Vergleich der nachgerechneten hydrodynamischen Parameter, wie etwa Strömungsgeschwindigkeiten und Tidevolumen mit dem Ergebnis eines aktuellen Modellzustands, der auf Daten aktueller bathymetrischer Vermessung beruht. Die hydrodynamischen Modelle des Ems-Dollart und des Unterweserästuars wurden unter Anwendung der vertikal gemittelten Version des Modellsystems Delft3D (DELTAres 2006) erstellt. Die Auflösung der numerischen gekrümmten Gitter liegt an den seeseitigen Rändern im Bereich von 800 Metern und verfeinert sich an den oberstromigen Flussabschnitten auf 15 Meter.

Historische See- und Schifffahrtskarten basierend auf bathymetrischen Vermessungen wurden von Behörden und lokalen Schifffahrtsämtern zur Verfügung gestellt. Zur Rekonstruktion der historischen Modellbathymetrie des Außenbereichs des Ems-Dollart-Ästuars und der Dollartbucht werden Seekarten der Jahre 1923, 1926, 1941 und 1952 herangezogen. Für den Flussabschnitt der Unterems sind für die Jahre 1927-1933 Querschnittsdaten aus Vermessungen im Abstand von 300-400 Metern verfügbar. Der Bereich zwischen den verfügbaren Querschnitten lässt sich durch lineare Interpolation entlang der in Fließrichtung verlaufenden Gitterlinien rekonstruieren. Diese Daten können als ausreichend für die Modellierung des hydrodynamischen Zustandes vor den bedeutenden wasserbaulichen Eingriffen gelten. Im Folgenden bezieht sich der historische Aufbau des Ems-Dollart-Modells auf das Jahr 1937, da die ältesten verfügbaren Wasserstandsbeobachtungen, die für die Modellkalibrierung benötigt werden, aus dem Jahr 1937 stammen. Die Bathymetrie des aktuellen Modells basiert auf neuesten durch bathymetrische Vermessungen mittels Echolotpeilung (2004) und Laserscanbefliegung mit hoher Auflösung (2005) gewonnenen Daten.

Für die Modellierung der Unterweser werden bathymetrische Daten aus historischen Karten des Jahres 1887 herangezogen, die den Zustand vor der Korrektur im Jahre 1888 darstellen. Die Daten für den aktuellen Zustand basieren auf Daten aus Laserscanbefliegungen und Echolotpeilungen, die zwischen 1996 und 2000 durchgeführt wurden. Mithilfe von GIS-Techniken wurden zwei digitale Geländemodelle aufgebaut. Sie liefern die Eingangsgrößen für die Modellkonfigurationen für 1887 und 2000 und decken das Gebiet der Unterweser von Bremerhaven (Km 65) bis Bremen (Km 0) ab.

Die offenen Randbedingungen des Modells werden so gewählt, dass mittlere hydrodynamische Strömungsbedingungen erzeugt werden, die einen Vergleich der modellierten Tideregime der beiden genannten Modellzustände zulassen. Ziel ist die Modellierung einer repräsentativen Tide mit einem mittleren Tidehochwasser (MThw) und mittleren Tideniedrigwasser (MTnw), die den Beobachtungen der mittleren Scheitelwasserstände jeweils des historischen und aktuellen Zustands entsprechen. Die seewärtigen

Randbedingungen werden über eine Einbettung (Nesting) in das übergreifende Modell der Deutschen Bucht (VERBOOM et al. 1992) generiert, mit Ausnahme der historischen Konfiguration des Modells der Unterweser. Hier wurde die Aufzeichnung einer mittleren Tide von 1887 (FRANZIUS 1888) angepasst und am seeseitigen Rand eingesetzt, der nahe Bremerhaven an der Mündung des Ästuars verläuft. Die Art der gewählten Randbedingungen bedeutet, dass lediglich die astronomische Tide ohne meteorologische Einflüsse repräsentiert ist. Abgesehen von der Steuerung mit mittleren Springnippiden am seeseitigen Rand wird der Abfluss am flussseitigen Rand stromaufwärts so eingestellt, dass er dem langjährig gemittelten Oberwasserabfluss entspricht. Der Oberwasserabfluss wird für den aktuellen und den historischen Modellzustand als identisch angenommen und liegt bei $82 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Ems und $327 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Weser. Die historischen und aktuellen Modelle des Ems-Dollart und des Unterweserästuars werden über eine Feineinstellung numerischer und physikalischer Parameter, wie z. B. der Sohlrauheit, kalibriert. Die Modellqualität wird durch den Vergleich berechneter und beobachteter Wasserstände an Pegeln entlang der Ästuarare verifiziert.

3 Ergebnisse

Die Modellergebnisse für das Ems-Dollart-Ästuar mit den Konfigurationen für 1937 und 2005 ermöglichen einen quantitativen Vergleich der hydrodynamischen Regime. An der Unterems wurden hydrodynamische Parameter als Zeitreihen an einer repräsentativen Stelle sowie in Längsrichtung eines Fahrwasserabschnitts zwischen dem Tidewehr Herbrum und der Dollartbucht ausgewertet. Für die Außenems zeigt ein räumlicher Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten die Unterschiede im Strömungsregime. Für die Unterweser werden hydrodynamische Parameter für einen Abschnitt vom Tidewehr in Bremen stromabwärts bis Bremerhaven ausgewertet. Ein Beispiel bedeutender Veränderungen der Strömungsverhältnisse ist für einen ausgewählten Abschnitt zwischen Brake und Elsfleth dargestellt.

3.1 Ergebnisse einer bestimmten Stelle in der Unterems

Der modellierte Tidedurchfluss und das Tidevolumen werden an Querschnitten entlang des genannten Ästuarabschnitts im Abstand von je einem Kilometer ausgegeben und bewertet. Die modellierten hydrodynamischen Parameter werden beispielhaft bei Flusskilometer 35 der Unterems für den Zeitraum eines für die mittleren Tidebedingungen der Jahre 1937 und 2005 repräsentativen Tidezyklus ausgewertet. Der Vergleich offenbart die Veränderungen des Tideregimes über die Zeit. Der Beobachtungspunkt liegt circa 5 Kilometer stromauf von Terborg an einem geraden Flussabschnitt, um Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit auf Grund von Sekundärströmungen und plötzlichen Verengungen auszuschließen. Zeitreihen von Wasserständen bezogen auf die deutsche Bezugshöhe (m ü. NN), also etwa mittlerer Meeresspiegel, und Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] werden für die mittleren Strömungsbedingungen zwischen 1937 und 2005 verglichen (Abb. 2).

Generell lässt sich eine Erhöhung des Tidenhubs und der Strömungsgeschwindigkeiten im Modellzustand von 2005 im Vergleich zur Situation 1937 feststellen. Die Tidekurve bei Tidehochwasser ist heute bedeutend breiter, mit jeweils steileren Gradienten in den

Flut- und Ebbephasen. Die Flutstromgeschwindigkeit ist im ersten Teil der Flutphase deutlich erhöht. Am gegebenen Querschnitt und allgemein in der Unterems zeigt sich die generelle Tendenz zu einer flutdominierten Gezeitenströmung.

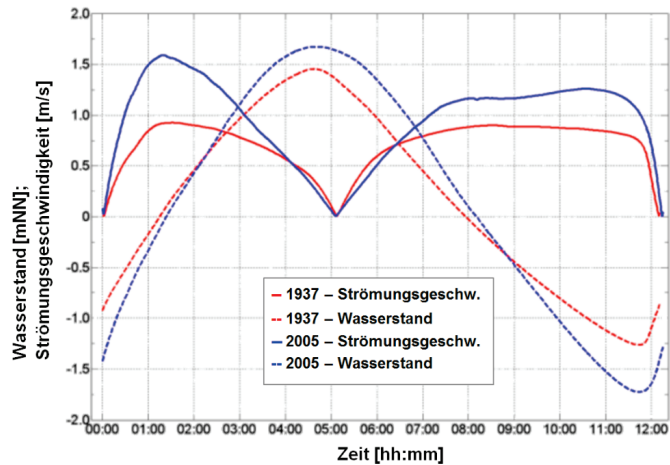


Abbildung 2: Modelliertes Tidemittelwasser und mittlere Strömungsgeschwindigkeit am Querschnitt bei Flusskilometer 35 stromab des Tidewehrs bei Herbrum in der Unterems.

Für den Querschnittsdurchfluss bei Flusskilometer 35 werden für einen mittleren Tidezyklus die Zeitreihen des momentanen Tidedurchflusses und der zugehörigen hydrodynamischen Parameter für 1937 und 2005 berechnet (Abb. 3). Während der mittlere Tidedurchfluss und das mittlere Tidevolumen von 1937 bis 2005 angestiegen sind, sind die mittleren Tidephasen sowohl für Ebbe als auch für Flut zeitlich nahezu gleich geblieben. Der mittlere Tidedurchfluss berechnet als arithmetisches Mittel über eine Tidephase stieg von 811 auf 1394 m^3/s (72 %) bei Flut und von 717 auf 1114 m^3/s (55 %) bei Ebbe. Das mittlere Flutvolumen V_f erhöhte sich um circa 73 % von 14,8 auf 25,6 Mill. m^3 , während das mittlere Ebbvolumen V_e um rund 55 % von 18,4 auf 28,5 Mill. m^3 stieg.

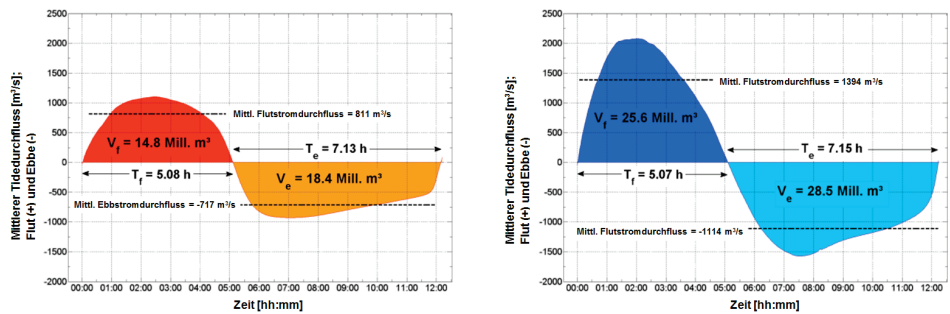


Abbildung 3: Mittlerer Tidedurchfluss, mittleres Tidevolumen V und mittlere Tidedauer T im Querschnitt bei Flusskilometer 35 stromab des Tidewehrs in der Unterems für die Modellzustände 1937 (links) und 2005 (rechts).

3.2 Ergebnisse längs des Fahrwassers in der Unterems

Die modellierten Ergebnisse für den Zustand von 1937 beziehungsweise 2005 längs des Fahrwasserabschnitts stromabwärts vom Tidewehr Herbrum bis zur Dollartbucht verdeutlichen die Unterschiede für die hydrodynamischen Parameter mittlere Scheitelwasserstände, Mittel und Maximum des Tidedurchflusses, mittleres Tidevolumen, mittlere Tidedestromphasen sowie Mittel und Maximum der Strömungsgeschwindigkeiten.

Der modellierte Tidedurchfluss und das modellierte Tidevolumen werden über Querschnitte entlang des genannten Abschnitts im Abstand von je einem Kilometer ausgegeben. Scheitelwasserstände und tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten werden an Beobachtungspunkten im Abstand von je einem Kilometer entlang der Mittelachse des Fahrwassers berechnet, das heißt, jeweils an der tiefsten Stelle der oben beschriebenen Querschnitte. Tidedurchfluss und Tidevolumen können nur bis Pogum sachgerecht ermittelt werden. Weiter stromabwärts, im Mündungsbereich der Unterems in die Dollartbucht, ist die Breite des Querschnitts nicht mehr klar zu bestimmen, weil die Wassermassen auch seitlich über den Geise-Leitdamm ins Emdrer Fahrwasser strömen und umgekehrt. Das resultierende beinahe kreisförmige Strömungsmuster unterscheidet sich von der gerichteten Strömung im Kanal und ist daher mit den für die Unterems ermittelten Parametern nicht vergleichbar. Es kommt zu einer bedeutenden Erhöhung des Tidedurchflusses und des Tidevolumens bei Leerort, die auf den Oberwasserzufluss aus dem Nebenfluss Leda zurückzuführen ist.

Mittlere Scheitelwasserstände

Die beobachteten und berechneten mittleren Scheitelwasserstände (MThw und MTnw) werden längs des Abschnitts vom Tidewehr Herbrum bis zur Messstelle Knock etwa 67 km stromabwärts verglichen (Abb. 4). MThw und MTnw werden für den Zustand 1937 (rot) dargestellt im Vergleich zu 2005 (blau). Die berechneten Werte stammen aus der Simulation einer für 1937 bzw. 2005 repräsentativen mittleren Tide. Die Beobachtungen basieren jeweils auf Zeitreihen eines 5-Jahreszeitraums: 1933 bis 1937 und 2001 bis 2005 mit der Ausnahme, dass historische Beobachtungen an der Messstelle Herbrum nur für den Zeitraum 1936 bis 1940 verfügbar sind. Die Differenzen zwischen den modellierten und beobachteten Werten liegen im Bereich von 5 bis 10 cm. Somit wird die Amplitude und die Ausbreitung der Tidewelle für beide Modellzustände naturnah reproduziert.

Bei Emden liegen die beobachteten MTnw-Werte sowohl für den aktuellen als auch für den historischen Zustand genau bei -1,74 mNN (das rote Kreuz liegt genau auf dem blauen Kreuz). Es besteht Grund zur Annahme, dass sich bei Emden ein Ausgleich zwischen dem aus der Fahrwasservertiefung und -begradigung resultierenden Absinken des MTnw und dem auf Grund des säkularen Meeresspiegelanstiegs erhöhten MTnw ergibt. Dieses Phänomen wird durch die Modelle sehr gut nachgebildet; die MTnw-Kurven beider Modellzustände schneiden sich bei Emden.

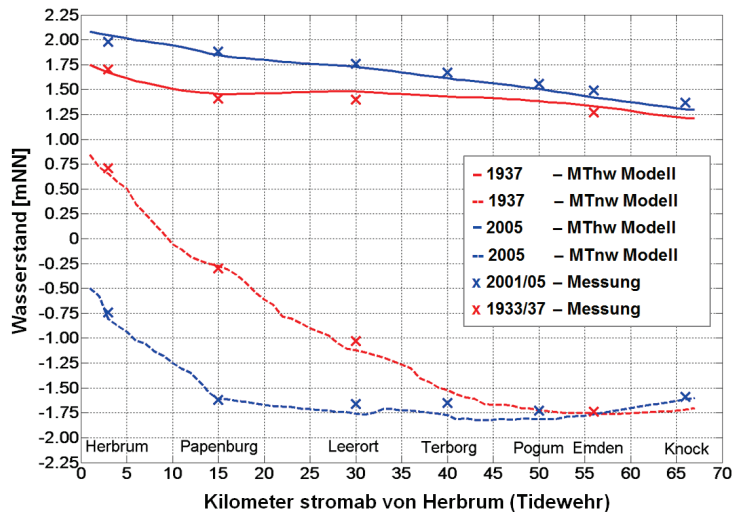


Abbildung 4: Modelliertes und beobachtetes MThw und MTnw längs eines Abschnitts zwischen Herbrum und Knock für die Modellzustände von 1937 und 2005.

Mittlerer und maximaler Tidedurchfluss

Der Tidedurchfluss ist definiert als der mit einem Intervall von einer Minute aufgezeichnete momentane Durchfluss [m^3/s] durch die Querschnitte im Abstand von jeweils einem Kilometer längs des Abschnitts zwischen Herbrum und Pogum. Der mittlere Tidedurchfluss ist das arithmetische Mittel der aufgezeichneten momentanen Durchflüsse über einen Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kenterpunkten, jeweils für Strömungen in Ebb- und Flutrichtung (Abb. 5a).

Das Maximum des Tidedurchflusses wird für die Ebb- bzw. Flutstromphase zum Zeitpunkt des höchsten Durchflusses ausgewertet (Abb. 5b). Im gesamten Abschnitt haben sich sowohl die Ebb- als auch die Flutstromdurchflüsse seit 1937 signifikant erhöht. Obwohl der Oberwasserabfluss der Tideströmung während der Flut entgegenwirkt, ist für den historischen Zustand im Abschnitt zwischen Leerort und Pogum und für den Zustand 2005 zwischen Kilometer 17 und Pogum der mittlere Tidedurchfluss bei Flut höher als der mittlere Tidedurchfluss bei Ebbe. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Flutstromphase bedeutend kürzer ausfällt als die Ebbestromphase und so das Gleichgewicht zwischen Zu- und Abflüssen im Ästuar gewahrt bleibt.

Im Abschnitt zwischen Leerort und Pogum beträgt die Nettodifferenz zwischen dem mittleren Durchfluss bei Ebbe und bei Flut rund $100 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Zustand 1937 verglichen mit $300 \text{ m}^3/\text{s}$ für das Jahr 2005, wobei sich die Länge der Tidephasen zwischen den beiden Modellzuständen nicht signifikant verändert hat. Dieser Umstand lässt auf eine wachsende Ausprägung der Gezeitenasymmetrie im Vergleich zum Zustand von 1937 schließen.

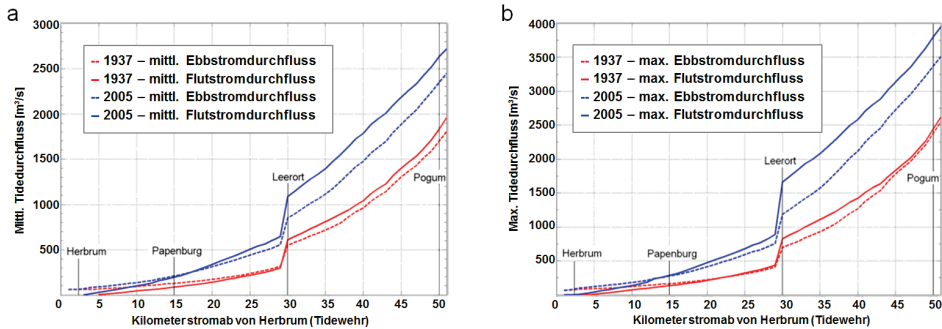


Abbildung 5: Vergleich des mittleren (a) und maximalen (b) Tidedurchflusses in der Unterems zwischen den Modellzuständen 1937 und 2005 für Flut und Ebbe.

Mittleres Tidevolumen

Der Oberwasserzufluss und somit die Differenz zwischen dem mittleren Ebb- und Flutstromvolumen ist in beiden Modellzuständen identisch (Abb. 6a). Das berechnete mittlere Tidevolumen unter den aktuellen mittleren hydrodynamischen Bedingungen ist durchgängig signifikant höher als der Vergleichswert im Jahr 1937, was auf den verringerten hydraulischen Widerstand infolge anthropogener Eingriffe wie Begradigungen und Vertiefungen der Kanalquerschnitte zurückzuführen ist.

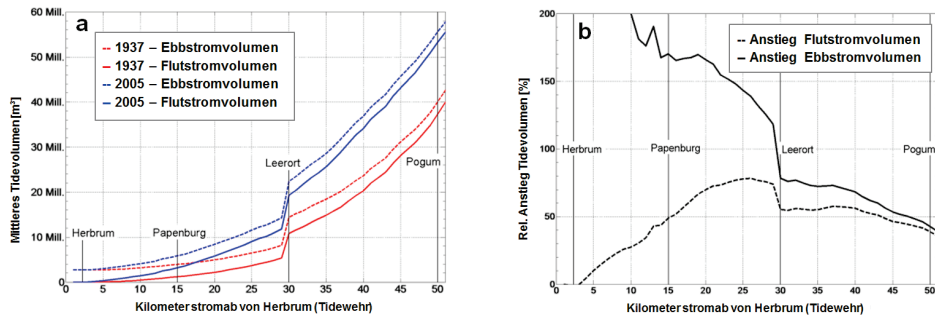


Abbildung 6: Vergleich der mittleren Tidevolumina im Längsschnitt Unterems für die Modellzustände 1937 und 2005 (a); relativer Anstieg [%] des mittleren Flut- und Ebbstromvolumens zwischen 1937 und 2005 im Vergleich zum mittleren Tidevolumen des Jahres 1937 (b).

Der prozentuale Anstieg des mittleren Tidevolumens wird im Vergleich zum mittleren Tidevolumen des Jahres 1937 dargestellt (Abb. 6b). Der relative Anstieg bewegt sich zwischen 100 % bei Papenburg und bis zu 600 % bei Herbrum. 1937 war der hydraulische Widerstand des Gewässerbetts höher, sodass sich die Tidewelle damals nicht so weit wie heute in das obere Ästuar ausbreiten konnte. Im Ergebnis war der Tidenhub im oberen Bereich des Ästuars viel geringer, was den beträchtlichen Anstieg des Tidevolumens erklärt. Weiter stromabwärts liegt der relative Anstieg des Flutstromvolumens seit 1937 im Bereich von 70 % bei Leerort, von wo aus er sich stromabwärts bis Pogum allmählich auf 40 % verringert. Der relative Anstieg des mittleren Ebbstromvolumens in der Größenordnung von 75 % fällt im Abschnitt zwischen Papenburg und Leerort am höchsten aus.

Bei Pogum beträgt der Anstieg beinahe 40 % und ist somit ähnlich ausgeprägt wie der Anstieg des mittleren Flutstromvolumens.

Mittlere Tidestromphase

Die mittleren Tidestromphasen werden als Zeitdauer [h] zwischen zwei Kenterpunkten jeweils für Ebbe und Flut (Abb. 7) beschrieben. Die mittlere Flutstromphase ist im Allgemeinen kürzer als die mittlere Ebbstromphase mit abnehmender Tendenz in Richtung des oberen Ästuarbereichs. An der Tidegrenze nahe Herbrum beträgt die Dauer der Flutstromphase null, während die Ebbstromphase eine Dauer von 12,4 Stunden aufweist - also einen vollständigen Tidezyklus. Im Abschnitt zwischen Herbrum und Leerort ist die Zeitdauer der mittleren Flutstromphase im aktuellen Zustand signifikant länger als im Zustand 1937 (zum Beispiel etwa 45 min. bei Papenburg). Da die Dauer einer vollständigen Tide unveränderlich 12,4 Stunden beträgt, muss demnach die mittlere Ebbstromphase entsprechend verkürzt sein. Stromab von Leerort differiert die aktuelle Dauer der mittleren Tidestromphasen kaum von der Dauer im historischen Zustand.

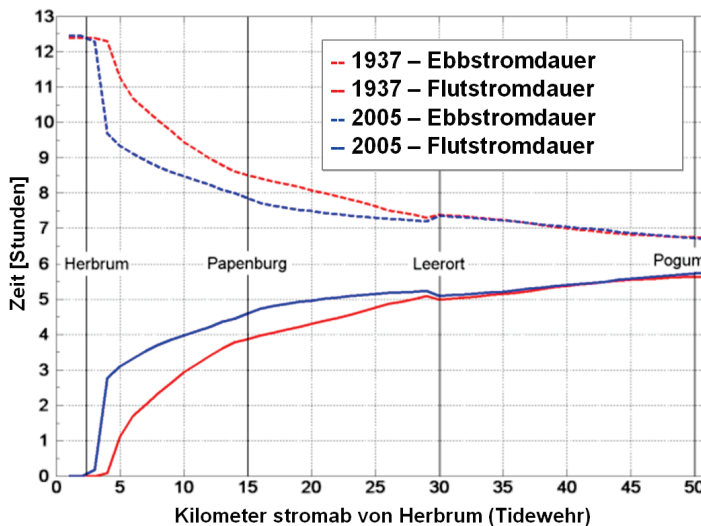


Abbildung 7: Vergleich der mittleren Tidestromphasen der Unterems zwischen den Modellzuständen 1937 und 2005 für Flut und Ebbe.

Mittlere und maximale Strömungsgeschwindigkeit

Mittel und Maximum der Strömungsgeschwindigkeiten werden für mittlere hydrodynamische Strömungsbedingungen längs des Abschnitts zwischen Herbrum und Knock ermittelt. Die Strömungsgeschwindigkeiten werden an Fahrwasserquerschnitten im Abstand von je einem Kilometer an etwa der tiefsten Stelle des Querschnitts ermittelt. Hohe Schwankungen in den Größenordnungen zwischen aufeinanderfolgenden Beobachtungspunkten ergeben sich durch Veränderungen in der Gewässerbetttiefe, plötzliche Verengungen oder Sekundärströmungseffekte. Im Folgenden liegt der Schwerpunkt darauf,

einen qualitativen Trend in der Relation zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten aufzuzeigen. Die Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten in der Mitte des Fahrwassers gilt als relevanter Parameter zur Bewertung der qualitativen Sedimentfracht, weil hohe Sohl Schubkräfte in der Mitte des Querschnitts den Sedimenttransport initiieren.

Im Allgemeinen sind die mittleren und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sowohl in der Ebb- als auch in der Flutstromphase im aktuellen Modellzustand höher als im historischen Modellzustand. Stromauf von Leerort (Km 30) vergrößert sich die Differenz der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Ebbe und Flut einerseits und zwischen dem Modellzustand von 1937 und 2005 andererseits. Bei Betrachtung des aktuellen Modellzustands im Abschnitt zwischen Kilometer 25 und Kilometer 40 ergeben sich maximale Strömungsgeschwindigkeiten, die bei Flut signifikant höher sind als bei Ebbe. Im historischen Zustand sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in demselben Abschnitt für Ebbe und Flut dagegen ähnlich. Stromab von Terborg (Km 40) sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe höher als bei Flut, während die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe und Flut in beiden Modellzuständen im Allgemeinen eher ähnlich sind.

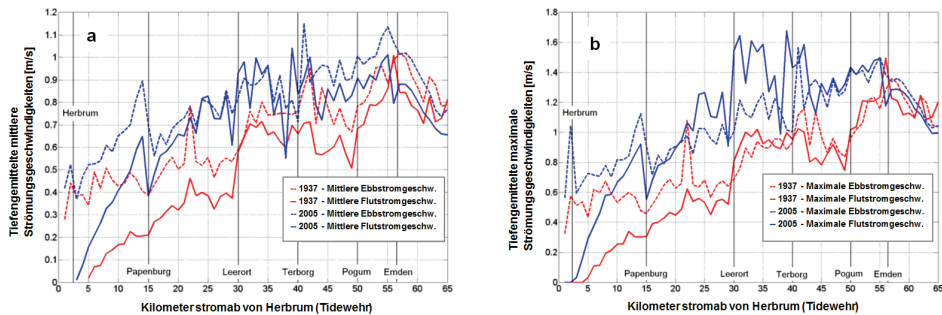


Abbildung 8: Vergleich der mittleren (a) und maximalen (b) Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterems zwischen den Modellzuständen 1937 und 2005 für Flut und Ebbe.

3.3 Räumliche Ergebnisse für die Außenems

Der Einsatz mathematischer Modelle erlaubt die Bewertung hydrodynamischer Parameter nicht nur für vordefinierte Punkte oder Querschnitte, sondern auch in einem räumlich breiteren Umfang. Auch eine Betrachtung der Migration von Gezeitenrinnen und tide-dominierten Strömungsmuster ist möglich.

Im Bereich des Übergangsgewässers Ems-Dollart werden die maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten für den Zeitpunkt dargestellt, an dem die maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten bei der Messstelle Knock erreicht werden (Abb. 9 und 10). An der Mündung und im seewärtigen Bereich zeigt sich im Zustand 1937 ein breit angelegtes Strömungsmuster mit räumlich variierenden Strömungsintensitäten, während sich für den Zustand 2005 das Strömungsmuster signifikant auf das vertiefte Fahrwasser konzentriert. Für den Zustand 1937 gilt, dass ein signifikanter Teil des Tidevolumens über die Bucht von Watum ausgetauscht wird, den kleineren westlichen Gezeitenstrom in der Ästuarmündung. Heute ist diese Gezeitenrinne nahezu vollständig verlandet und die

Tideströmungen konzentrieren sich auf die Hauptmündung mit entsprechend höherer Intensität.

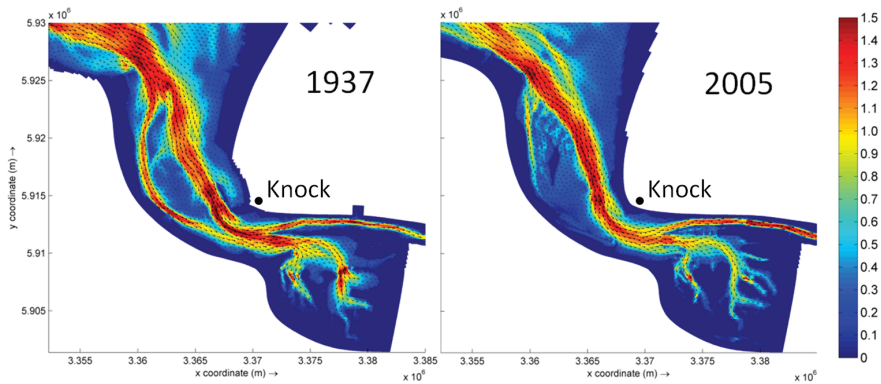


Abbildung 9: Vergleich der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten [m/s] im Übergangsgewässer der Ems in Bezug auf die Messstelle Knock für die Modellzustände 1937 (a) und 2005 (b).

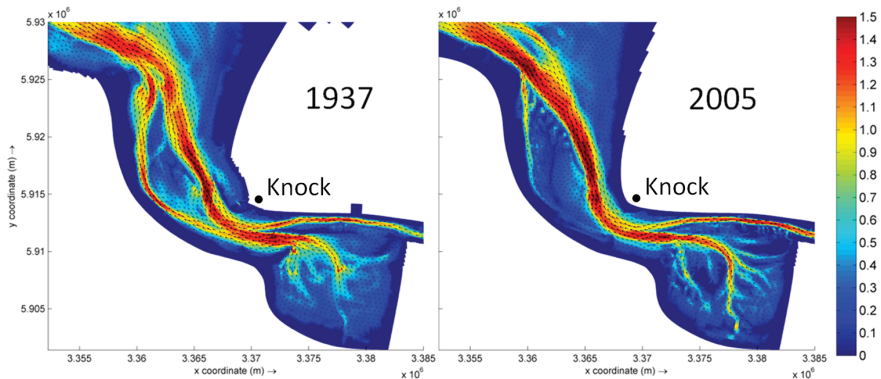


Abbildung 10: Vergleich der maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten [m/s] im Übergangsgewässer der Ems in Bezug auf die Messstelle Knock für die Modellzustände 1937 (a) und 2005 (b).

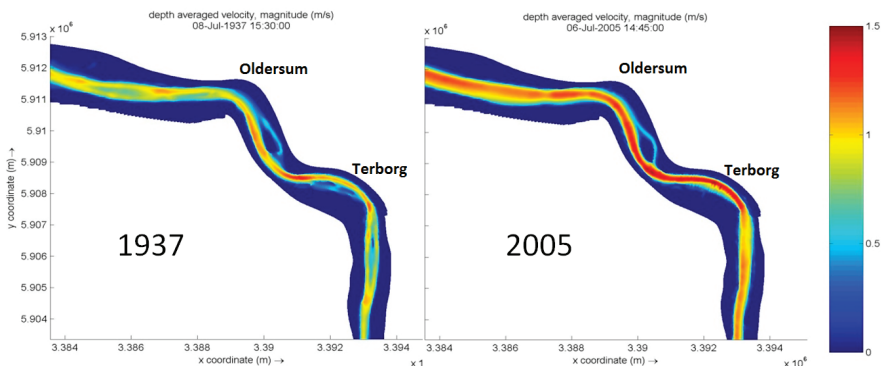


Abbildung 11: Vergleich der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten [m/s] in der Unterems im Abschnitt zwischen Terborg und Oldersum für die Modellzustände 1937 (a) und 2005 (b).

In der Unterems sind die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Abschnitt zwischen Terborg und Oldersum am höchsten (Abb. 11). Ein allgemeiner Anstieg der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten zwischen 1937 und 2005 lässt sich vor allem in Flussbiegungen feststellen. Für den historischen Zustand existieren in den geraden Abschnitten stromauf von Terborg und stromab von Oldersum Nebenarme, wohingegen sich die Tideströmungen 2005 in einer einzigen Rinne konzentrieren.

3.4 Ergebnisse längs des Fahrwassers in der Unterweser

Die Ergebnisse für die Zustände der Jahre 1887 und 2000 längs des Fahrwasserabschnitts stromabwärts vom Tidewehr Bremen bis Bremerhaven verdeutlichen die Unterschiede für die hydrodynamischen Parameter mittlerer Tidedurchfluss, mittleres Tidevolumen und mittlere Tidedromphasen.

Mittlerer Tidedurchfluss

Der mittlere Tidedurchfluss im Abschnitt zwischen Bremen und Bremerhaven wird für die mittleren Ebb- und Flutstromphasen ausgewertet (Abb. 12). Im gesamten Abschnitt haben sich sowohl die Ebb- als auch die Flutstromdurchflüsse seit 1887 signifikant erhöht. Bei Betrachtung des aktuellen Zustands zeigt der Bereich zwischen Bremerhaven und Vegesack zwischen Ebbe und Flut kaum Unterschiede im mittleren Durchfluss, während der Fluss weiter stromauf von höheren mittleren Durchflüssen bei Ebbe im Gegensatz zu den Flutstromdurchflüssen gekennzeichnet ist. Ursache hierfür ist das Aufeinandertreffen von Flussströmung und Tideströmung sowie die Glättung des Gewässerbetts durch anthropogene Eingriffe (LECHER et al. 2001). Im Jahr 1887 war der mittlere Flutstromdurchfluss stromabwärts von Elsfleth höher als in dem von einem gegenteiligen Muster geprägten Abschnitt stromauf von Elsfleth bis zur natürlichen Flutstromgrenze bei Vegesack.

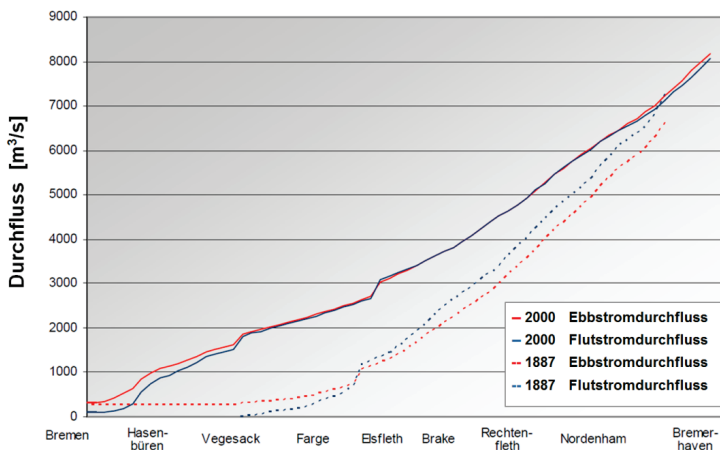


Abbildung 12: Mittlere Ebb- und Flutstromdurchflüsse im Unterweserästuar für die Modellzustände 1887 und 2000.

Mittleres Tidevolumen

Der Oberwasserzufluss und somit die Differenz zwischen dem mittleren Ebb- und Flutstromvolumen wird als in beiden Modellzuständen identisch angenommen. Das mittlere Tidevolumen für den aktuellen Zustand ist signifikant höher im Vergleich zum berechneten Vergleichswert von 1887 (Abb. 13), wobei anzunehmen ist, dass dies auf die Weserkorrektur zurückzuführen ist. Das aktuelle mittlere Tidevolumen zeigt einen linearen Trend über den gesamten Abschnitt, wohingegen der Zustand von 1887 zwei klare Trends aufweist: einen steilen Anstieg für den Abschnitt Elsfleth-Bremerhaven und ein nahezu konstantes mittleres Tidevolumen für den oberstromigen Bereich, bedingt durch die frühere natürliche Flutstromgrenze bei Vegesack bis zur Tidegrenze bei Bremen (ZANKE 2002).

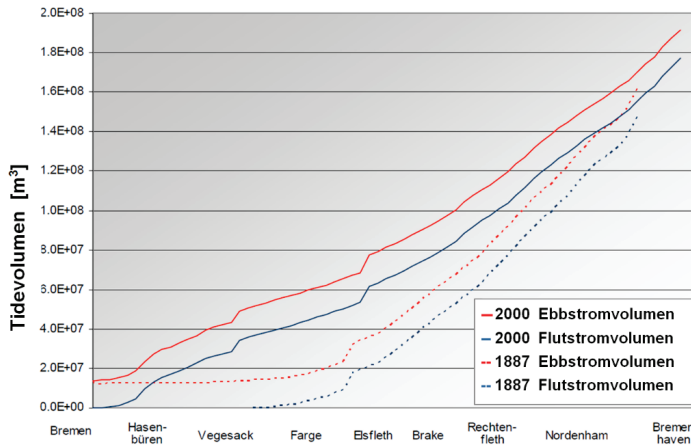


Abbildung 13: Mittleres Tidevolumen längs eines Abschnitts des Unterweserästuars für die Modellzustände 1887 und 2000.

Mittlere Tidestromphase

Für beide Modellzustände gilt, dass die mittlere Flutstromphase im Allgemeinen kürzer als die mittlere Ebbestromphase ausfällt, mit abnehmender Tendenz in Richtung des unteren Teils des Ästuars. Über den gesamten Abschnitt ist die Zeitdauer der mittleren Flutstromphase für den aktuellen Zustand signifikant länger als für den Zustand 1887, entsprechend kürzer fällt die mittlere Ebbestromphase aus. Am Tidewehr bei Bremen beträgt die Dauer der Flutstromphase nahezu null, während die Ebbestromphase eine Dauer von 12,4 Stunden aufweist - also einen vollständigen Tidezyklus (Abb. 14). Der steile Rückgang der Ebbedauer zwischen Bremen und der Messstelle Hasenbüren (und die entsprechend verlängerte Flutdauer) ist auf die Auswirkungen des Tidewehrs und die veränderte Rauheit des Gewässerbetts auf Grund der Weserkorrekturen zurückzuführen. Der historische Zustand zeigt einen gleichmäßigen, kontinuierlichen Rückgang in Richtung stromab der früheren natürlichen Flutstromgrenze bei Vegesack. Für den aktuellen Zustand nähern sich Ebbe und Flut in dem kurzen Abschnitt zwischen Bremen und Hasenbüren sehr rasch an und weiter stromabwärts sind die Phasenlängen nahezu konstant.

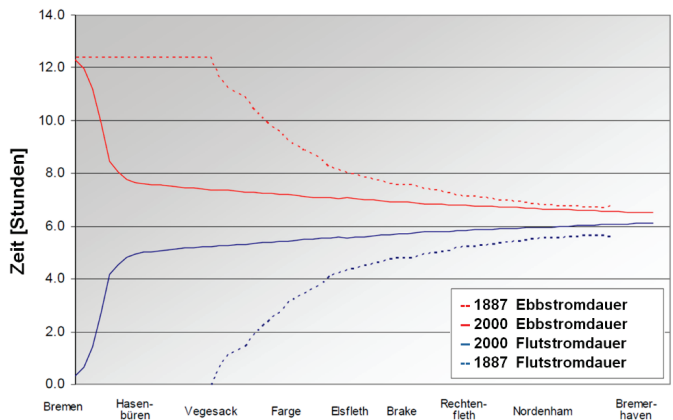


Abbildung 14: Mittlere Tidestromphasen im Unterweserästuar für die Modellzustände 1887 und 2000.

3.5 Räumliche Ergebnisse für die Unterweser

Ein weiteres Beispiel bedeutender Veränderungen der Strömungsverhältnisse ist für die Weser im Gebiet um Brake dargestellt (Abb. 15). Der Zustand 1887 wird als natürlicher Referenzzustand vor der Korrektur angenommen, die 1888 begann. Das Jahr 2000 repräsentiert den aktuellen Zustand.

Die räumliche Verteilung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten für die beiden Modellzustände 1887 und 2000 zeigt die massiven Auswirkungen von Flussbegradigung und Abtrennung von Nebenarmen. Der starke anthropogene Einfluss hat Flachwasserbereiche und Mehrrinnensysteme mit verhältnismäßig geringer Strömung in ein begradigtes Fahrwasser mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten verwandelt. In der Hauptfahrrinne bei Brake erhöhten sich die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten von 0,7 m/s auf 0,9 m/s (etwa 30 %). Darüber hinaus liegt auf Grund der Vertiefung und Befestigung des Kanals keinerlei räumliche Verteilung unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten über die Breite des Flusses mehr vor.

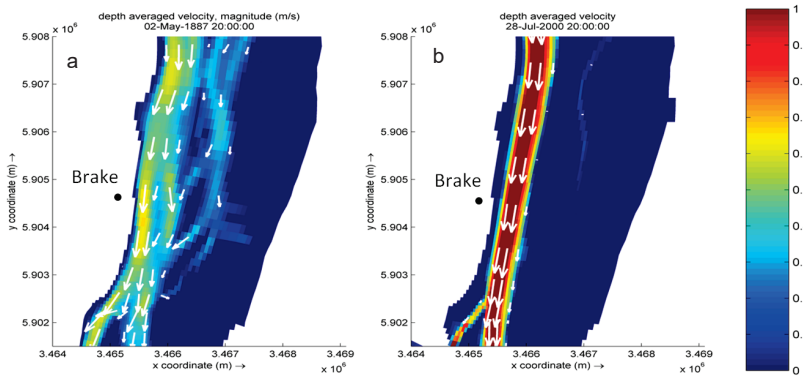


Abbildung 15: Vergleich der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten [m/s] in der Unterweser im Gebiet bei Brake für die Modellzustände 1887 (a) und 2000 (b).

4 Schriftenverzeichnis

- DELTARES: User Manual Delft3D-Flow. Delft, 2006.
- FRANZIUS, L.: Die Korrektur der Unterweser. Bremen, 1888 reprint, Die Küste, 51, 1991.
- HERRLING, G. and ELSEBACH, J.: Assessment criteria for the Identification of human impacts on water bodies by morphodynamic investigations. Proceedings of the 31st ICCE, Vol. 5: 4620-4632, 2008.
- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Long-term Spatial Development of Habitats in the Ems-Dollard estuary, report of the European project HARBASINS, 2007a.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70709>
- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Set-up of a hydrodynamic model for the Ems-Dollard estuary, report of the European project HARBASINS, 2007b.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70707>
- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Reconstruction of the historical tidal regime of the Ems-Dollard estuary prior to significant human changes by applying mathematical modeling, report of the European project HARBASINS, 2007c.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70706>
- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Comparison of the hydrodynamic regime of 1937 and 2005 in the Ems-Dollard estuary by applying mathematical modeling, report of the European project HARBASINS, 2008a.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70703>
- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Set-up of a Morphodynamic Model for the Ems-Dollard estuary, report of the European project HARBASINS, 2008b.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70708>
- HERRLING, G. and NIEMEYER, H. D.: Identification of the spatial effect of solid structures on the hydro- and morphodynamics in the Ems-Dollard estuary, report of the European project HARBASINS, 2008c.
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70704>
- LECHER, K.; LÜHR, H. P. und ZANKE, U. C. E.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Berlin, 2001.
- VERBOOM, G. K.; DE RONDE, J. G. and VAN DIJK, R. P.: A Fine Grid Tidal Flow and Storm Surge Model of the North Sea. Parey Verlag, Cont. Shelf Res., Vol. 12, 213-233, 1992.
- ZANKE, U. C. E.: Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer. Berlin, 2002.