

# Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens

DR.-ING. GÜNTHER LANG, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

## Vorbemerkungen

Die Jade (siehe Bild 1) unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von ihren ebenfalls tidebeeinflussten Nachbargewässern an der deutschen Nordseeküste. Neben einer andersartigen (relativ jungen) geologischen Entstehungsgeschichte weist sie im Gegensatz zu Elbe, Weser und Ems z. B. keinen nennenswerten Oberwasserzufluss auf. Sie wird daher zu Recht als eine *Bucht* des Meeres und nicht als ein *Ästuar* bezeichnet. Weitere Unterschiede kommen hinzu.

Bevor näher auf verschiedene Besonderheiten der Tidedynamik der Jade – speziell der Innenjade und des Jadebusens – eingegangen wird, hier einige Anmerkungen zu den geographischen Abgrenzungen (siehe auch Bild 1). Generell wird die Jade in Außenjade, Innenjade und Jadebusen untergliedert. Als Grenzlinie zwischen Außen- und Innenjade gilt allgemein die Linie Schillig–Alte Mellum, während der Übergang zwischen Innenjade und Jadebusen durch die Linie Wilhelmshaven–Eckwarderhörn (ein kleiner Ort östlich von Wilhelmshaven) markiert wird. Der Verlauf des zwischen Alte Mellum und Fedderwardsiel gelegenen Hohe Weg Watts kennzeichnet die Grenze zwischen der Außenweser im Osten und der Innenjade im Westen.

Innenjade und Jadebusen sind zusammen ca. 36 km lang. Die Breite variiert zwischen 4 und 15 km, während die Tiefe auf mehr als 20 m ansteigen kann. Die Fläche umfasst ca. 370 km<sup>2</sup>, wovon ungefähr 60 % zeitweise trockenfallen können (Wattgebiete) und annähernd 160 km<sup>2</sup> (46 %) auf den Jadebusen entfallen.

Wie schon eingangs angedeutet, unterscheidet sich die Tidedynamik der Jade-Bucht in verschiedenen Aspekten von derjenigen in den benachbarten Ästuaren von Elbe, Weser und Ems. Zu den charakteristischen Merkmalen der Jade zählen:

- Abnahme der Ebbedauer von See kommend zum Jadebusen hin;
- Mittlere Überströmung des Hohe Weg Watts von der Innenjade zur Außenweser;
- Mäandern des Flut- und Ebbestromes in der Innenjade;
- Reflexion der Tidewelle im Bereich des Jadebusens;
- Verstärkung des Tidehubs durch Resonanzerscheinungen.

Diesen Besonderheiten soll im Folgenden etwas ausführlicher nachgegangen werden.

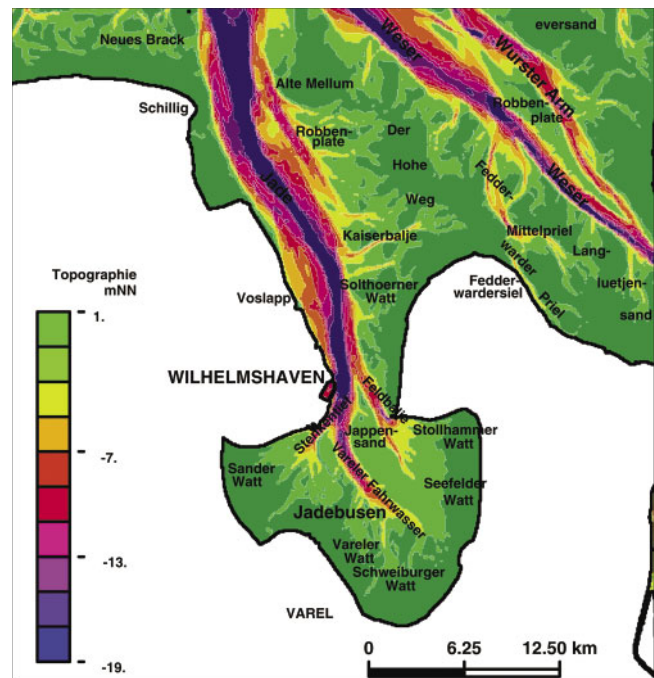


Bild 1: Topographie und geographische Bezeichnungen für das Gebiet der Innenjade, des Jadebusens sowie des Hohe Weg Watts. Die Innenjade erstreckt sich von der Linie Schillig–Alte Mellum im Norden bis an den Eingang des Jadebusens im Süden. Im Osten bildet der Hohe Weg mit dem gleichnamigen Watt die Grenze zur Außenweser.

## Dauer von Ebbe und Flut

Im Jahre 2003 jährt sich zum 150. Mal der Abschluss des *Jade-Vertrages* zwischen dem Großherzogtum Oldenburg und dem Königreich Preußen. Der am 20. Juli 1853 unterzeichnete Staatsvertrag schuf u. a. die rechtlichen Voraussetzungen für Planung und Bau eines Marinestützpunktes an der Jade und markiert zugleich den Beginn moderner Forschung und Gewässerkunde an der Jade. Der neue Hafen wurde schließlich am 17. Juni 1869 von König Wilhelm I von Preußen eingeweiht und die entstandene Siedlung erhielt gleichzeitig seinen Namen – Wilhelmshaven. Zeitweise wurde der Bau des Marinehafens von Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen geleitet, dem Entdecker des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes, welches 1849 von Poiseuille formuliert wurde. Unter der Leitung Hagens wurden einige bedeutsame Naturbeobachtungen durchgeführt und bemerkenswerte Beiträge zur Beschreibung und Charakterisierung der Tidedynamik der Jade geleistet. Verschiedene Ergebnisse wurden unter dem Titel „Über die Fluth- und Boden-Verhältnisse des Preußischen Jade-Gebietes“ im Jahre 1856 in einem Monatsbericht der Königlichen Akademie der Wissenschaften

zu Berlin veröffentlicht. Darin schreibt Hagen über seine Beobachtungen von Ebbe und Flut in der Nähe des heutigen Wilhelmshaven folgendes:

„Es ergibt sich hieraus, daß die Dauer der Fluth etwas länger, als die der Ebbe ist und zwar nach diesen Beobachtungen um 8,6 Minuten. Der Schenkel der Fluth ist von dem der Ebbe besonders in der Nähe des Scheitelpunktes merklich verschieden, indem die Fluth in gleichem Abstände von letzterem viel langsamer steigt, als die Ebbe fällt. Wahrscheinlich rührt dies von den ausgedehnten Wattgründen in dem Bassin der Jade her, die eine schnelle Ausgleichung des Wasserspiegels verhindern. Gegen Ende der Fluth ergießen sich deshalb noch große Wassermassen über diese Untiefen, während beim Beginne der Ebbe dieselben nicht schnell genug abfließen können, und es dadurch möglich machen, daß der Wasserstand vor dem Pegel anfangs stärker sinkt. Dieser Mangel an Symmetrie zeigt

sich ohne Ausnahme und zwar in gleichem Sinne in allen Beobachtungsreihen.“

Im Grundsatz ist diese Beschreibung auch heute noch zutreffend. Die Dauer der Flut übersteigt diejenige der Ebbe (siehe Bild 2). Dieses Verhalten stellt eine Besonderheit im Systemverhalten der Jade dar, die in den benachbarten Ästuaren von Elbe, Weser und Ems nicht beobachtet werden kann. Dort ist die Ebbedauer zumeist deutlich größer als die Flutdauer. Auch ist in dem vorgenannten Bild der verlangsamte Stieg vor Thw und der im Vergleich dazu raschere Abfall nach Thw gut zu erkennen (siehe z. B. Tidekurve „Eingang Jadebusen“), also genau so, wie es von Hagen vor ca. 150 Jahren beobachtet und beschrieben wurde. Bild 2 zeigt darüber hinaus auch, dass die dort dargestellten, aus einem HN-Modell ermittelten Tidekurven in Übereinstimmung mit den Beobachtungen sind.

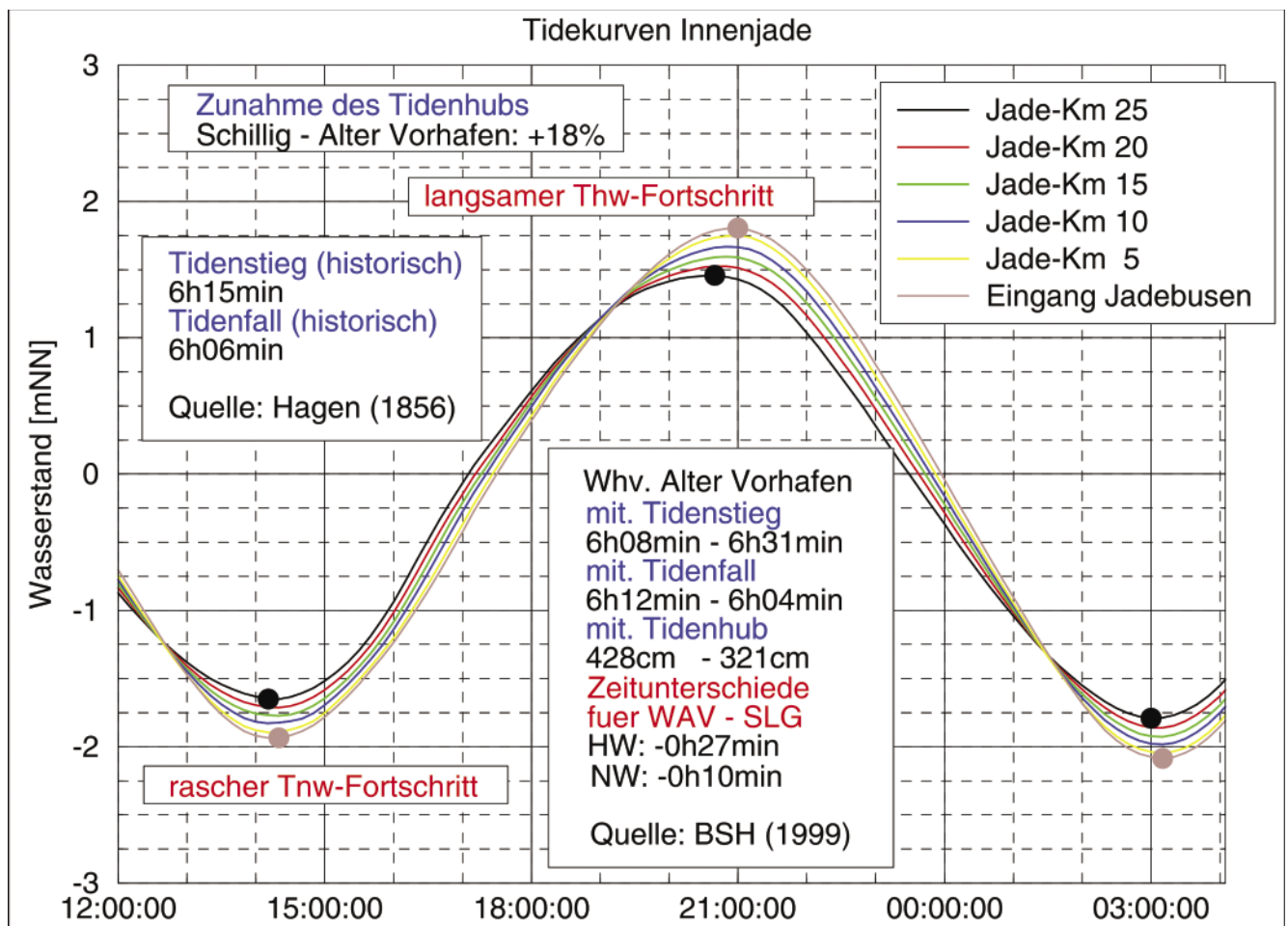


Bild 2: Mit einem HN-Modell des Jade-Weser-Systems berechnete Tidekurven für verschiedene Positionen entlang des Fahrwassers der Innenjade (Jade-km 25 bis Eingang Jadebusen). Die Tnw-Zeiten weichen in der Innenjade nur um wenige Minuten voneinander ab: Das Tnw tritt damit in der Innenjade fast zeitgleich ein (rascher Tnw-Fortschritt). Demgegenüber weisen die Thw-Zeiten größere Unterschiede auf (langsamer Thw-Fortschritt). Diese Kombination bewirkt, dass am südlichen Ende der Innenjade (Eingang Jadebusen) die Flutdauer größer als am nördlichen Anfang der Innenjade (Jade-km 25) und sogar größer als die Ebbedauer ist. Der Tidenstieg flacht daher bei Annäherung an den Jadebusen ab, während der Tidefall zunehmend steiler wird. In den zurückliegenden Jahrzehnten hat sich „dieser Mangel an Symmetrie“ im Vergleich zu Zeiten Hagens weiter verstärkt.

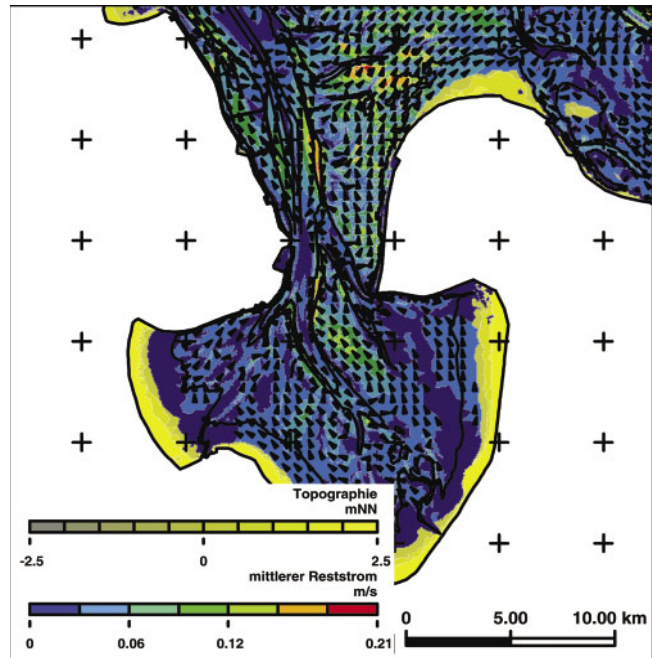
## Überströmen des Hohe Weg Watts

Der frühere Gewässerkundler G. Frels des Wasser- und Schifffahrtsamtes Wilhelmshaven schreibt in seiner „Sammlung gewässerkundlicher Daten aus der Jadebucht und angrenzenden Bereichen“ aus dem Jahre 1995: „... *Dauerstrommessungen auf dem Watt im Jahre 1986 [gemeint ist hier das Hohe Weg Watt] deckten die Überströmung einer beträchtlichen Wassermenge von der Jade zur Weser auf. ... Je Tide strömen rd. 20 Mio m<sup>3</sup> des Jadewassers in den Fedderwarder Priel und von hier in die dortigen Wattgebiete und die Weser. ... Sobald die Höhe der morphologischen Watscheide erreicht ist ... beginnt die Überströmung mit i.M. 10 cm/s ...*“

Diese Beobachtungen wurden mittlerweile sowohl qualitativ als auch quantitativ von verschiedenen HN-Modellen des Jade-Weser-Systems bestätigt. Bild 3 (für den Reststrom) und Bild 4 (für den Durchfluss) zeigen dieselben Phänomene anhand verschiedener Analyse- daten, die aus HN-Modell-Ergebnissen abgeleitet wurden.

Im Gegensatz zu der erst spät erkannten residuellen Überströmung des Hohen Weges, war das mit jeder Tide in den Jadebusen hinein und wieder heraus strömende Wasservolumen schon früh mit erstaunlicher Präzision bekannt. Diese Größe war und ist von entscheidender Bedeutung für Bestand und Unterhalt des Jadefahrwassers. So schreibt z. B. schon Hagen in seinem 1856 erstellten, oben genannten Gutachten: „*Der Jade-Busen, soweit er bei gewöhnlichen Fluthen mit Wasser angefüllt wird, nimmt gegenwärtig eine Fläche von 3<sup>1</sup>/<sub>8</sub> preußischen Quadratmeilen ein. Das gewöhnliche niedrige Wasser bedeckt in ihm dagegen noch nicht einmal eine halbe Quadratmeile. Am Ende der Ebbe ist eine Fläche nahe 2<sup>3</sup>/<sub>4</sub> Meilen groß, ein unzugänglicher Sumpf, der aus weichem Schlamm besteht. Indem der Fluthwechsel über 11 Fuß beträgt, so läßt sich übersehen, welch große Wassermasse bei jeder Fluth aus dem Meere diesem Busen zuströmt, und bei jeder Ebbe wieder zurückfließt. Hieraus erklärt es sich, daß der Schlauch der äußern Jade, in welchem diese Strömung erfolgt, wenn derselbe auch nicht regelmäßig begrenzt und sogar über 5 Meilen lang ist, dennoch in einer großen Breite und Tiefe sich dauernd erhält.*“

In seinem „Gutachten über die Erhaltung des Fahrwassers der Jade“ aus dem Jahre 1899 gibt H. Lentz für dieses Volumen als präzisen Wert 413.850.000 m<sup>3</sup> an. Aus den Ergebnissen moderner HN-Modelle ergeben sich folgende vergleichbaren Werte: Für den in Bild 4 dargestellten Zeitraum liegt der Mittelwert für das Tidevolumen des Jadebusens bei 416.790.000 m<sup>3</sup>, wobei minimal 359 Mio m<sup>3</sup> und maximal 495 Mio m<sup>3</sup> hin-



**Bild 3:** Aus den Ergebnissen eines HN-Modells für mehrere Tiden ermittelter Eulerscher Reststrom. Über dem Hohe Weg Watt ist die mittlere Überströmung von der Jade zur Weser zu erkennen. Die Größe des Reststroms stimmt mit den von Frels (1995) aus Messungen abgeleiteten Werten (ca. 10 cm/s) überein.

und herströmen. Diese Übereinstimmung mit der von H. Lentz angegebenen Zahl zeigt, dass das Tidevolumen des Jadebusens in den vergangenen 100 Jahren praktisch unverändert geblieben ist (Hinweis: Die Lage der Querprofile ist in Bild 5 dargestellt).

## Mäandern der Strömung

„In Innenjade und Jadebusen folgen Flut- und Ebbestrom streckenweise getrennten Trassen. Der Flutstrom prägt in 1. Linie die Mäanderung ...“ So schreibt G. Frels in seiner schon zuvor zitierten Arbeit aus dem Jahre 1995. Und weiter heißt es dort: „Für die Aufdeckung der unterschiedlichen Fließwege von Ebbe und Flut wurden Dauerstrom-Meßgeräte eingesetzt.“ Die Beobachtungsergebnisse erklären sich aus dem Zusammenwirken verschiedener physikalischer Effekte (Massenträgheit, Coriolis-Beschleunigung) in Wechselwirkung mit der Jade-Topographie. Als Folge stellt sich eine von Ort zu Ort variierende Ungleichheit zwischen dem Flut- und dem Ebbestrom ein. Dieses Phänomen kann durch eine geeignete Analyse von HN-Modell-Ergebnissen sichtbar gemacht werden (siehe Bild 6). Die Analyseergebnisse bestätigen die von G. Frels in dessen Anlage 20 festgehaltenen Grundzüge des Mäanderns der Strömung, zeigen aber bezüglich der Ungleichheit zwischen Flut- und Ebbestrom weit mehr Details.

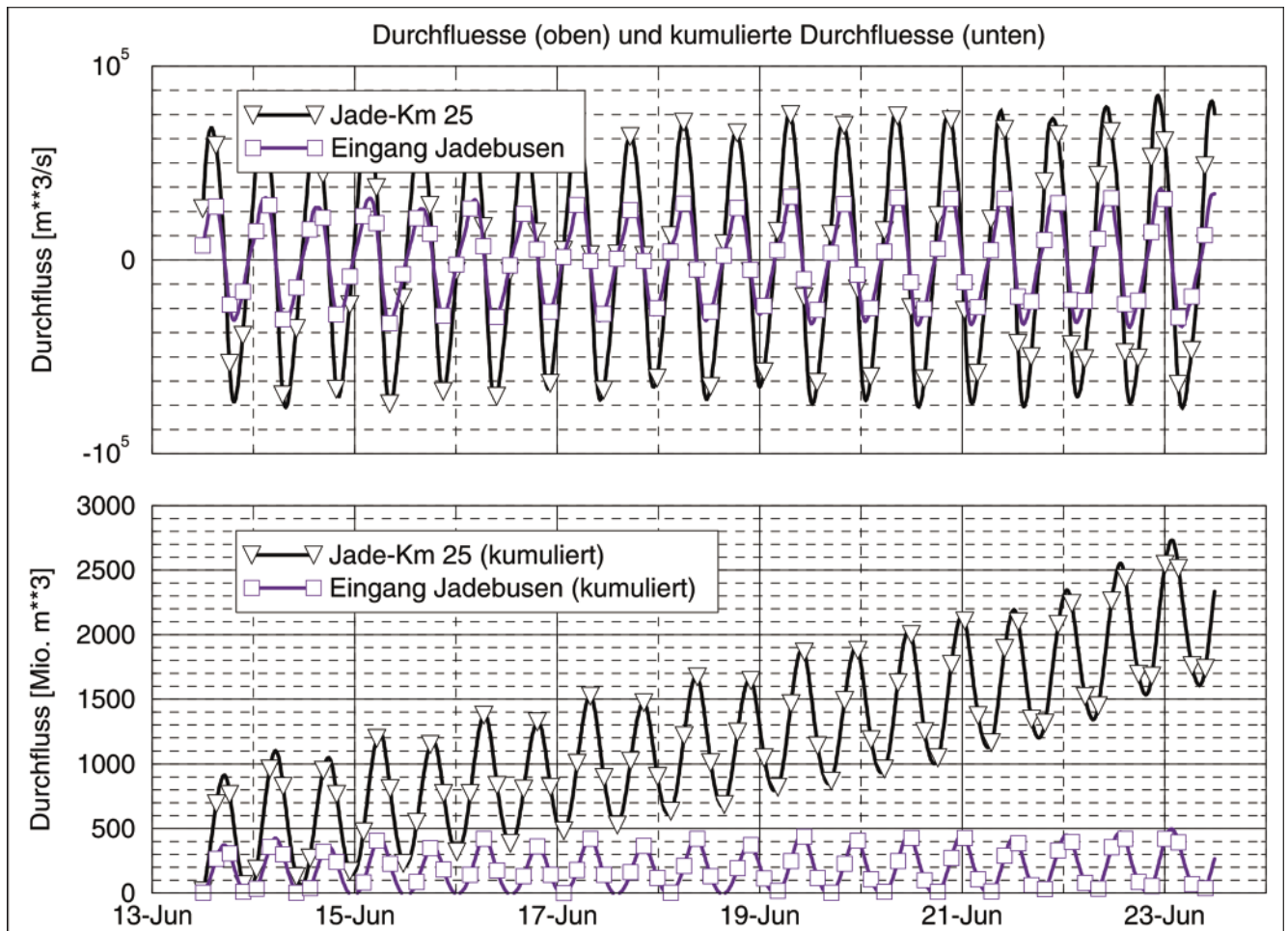


Bild 4: Die dargestellten Kurven wurden aus den Ergebnissen eines HN-Modells des Jade-Weser-Systems abgeleitet. Der Einfluss des Windes auf Wasserstand und Strömung wird darin nicht berücksichtigt. Oben: Durchfluss am nördlichen (Jade-km 25) und südlichen Ende (Eingang Jadebusen) der Innenjade. Man erkennt u. a., dass am Eingang zum Jadebusen noch ca. 50 % der durch den Querschnitt Schillig–Alte Mellum (Jade-km 25) strömenden Wassermenge zur Verfügung steht. Ein sehr großer Anteil, insbesondere wenn man bedenkt, dass es von dort nur noch ca. 15 km bis zum Ende der Jade (Küstenlinie des Jadebusens) sind. Unten: Kumulierte Durchflüsse auf den beiden zuvor genannten Querschnitten. Es ist ersichtlich, dass durch den Eingang zum Jadebusen in jeder Tide im Mittel etwas mehr als 400 Mio m<sup>3</sup> hinein und auch wieder hinaus strömen (416.790.000 m<sup>3</sup>). Dies ist in sehr guter Übereinstimmung mit dem schon von H. Lentz (1899) angegebenen Wert von 413.850.000 m<sup>3</sup>. Da alles in den Jadebusen hinein strömende Wasser auch wieder heraus fließt, weisen die kumulierten Durchflussmengen für diesen Querschnitt keinen Trend auf. Im Gegensatz dazu wächst das über einen Zeitraum von mehreren Tiden kumulierte Wasservolumen auf dem Querschnitt Schillig–Alte Mellum kontinuierlich an. Dies ist ein Ausdruck für die resultierende Überströmung des Hohen Weges von der Innenjade zur Weser hin. In jeder Tide gehen der Innenjade auf diesem Wege ca. 50 Mio m<sup>3</sup> verloren. Dieser Wert ist damit etwas größer als der von G. Frels aus Messungen abgeleitete Wert von 20 Mio m<sup>3</sup>/Tide.

## Reflexion der Tidewelle

Neben den aus der Nordsee einlaufenden Gezeiten, Oberwasser und Wind sowie der Dissipation der vorhandenen Energie, ist die Reflexion der einlaufenden Gezeitenwelle einer der Prozesse, der den Tidecharakter eines Ästuars oder einer Bucht wie der Jade entscheidend beeinflussen. Im einfachsten Fall haben wir es mit einer einlaufenden und einer zweiten, am Ende des Ästuars total reflektierten, auslaufenden Welle zu tun. In der Realität ist die Situation natürlich deutlich komplizierter, da sich in der Regel verschiedene Teilwellen überlagern. Verallgemeinert gilt, dass die in einem Querschnitt vorhandene Energiedichte (potenzielle und kinetische Energie  $E_k$  und  $E_p$ ) sich aus der Summe

aller ein- und auslaufenden Wellen zusammensetzt. Der ehemalige Leiter der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, H. Krey, hat dies in den 1926 erschienenen Mitteilungen dieser Vorläuferinstitution der BAW in seinem Beitrag „Die Flutwelle in Flussmündungen und Meeresbuchten“ in folgender Weise formuliert: „In den beiden Werten  $E_k$  und  $E_p$  haben wir das ganze Arbeitsvermögen der Flutwelle, wie es in der Flutkurve eines Ortes in die Erscheinung tritt. ... In der frei und ungehindert einseitig verlaufenden Welle [eine harmonische Welle mit kleiner Amplitude (lineare Wellentheorie)] sind die beiden Energiewerte, der Arbeitsvorrat der Lage  $E_p$  und der Arbeitsvorrat der Bewegung  $E_k$  einander (ungefähr) gleich. Bei den natürlichen Flutwellen an unseren Küsten ist das aber durchaus nicht

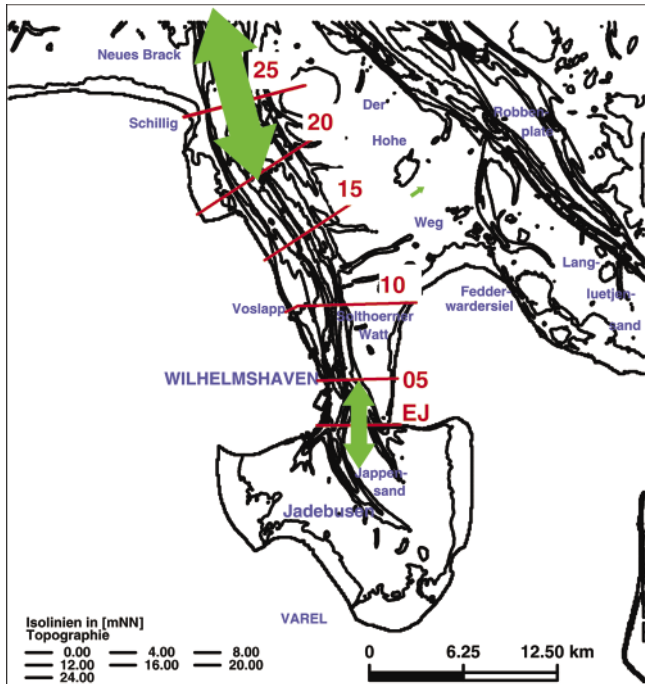


Bild 5: Lage verschiedener Querprofile zwischen Jade-km 25 und Jade-km 5 sowie am Eingang zum Jadebusen (EJ). Zusätzliche schematische Darstellung des Tidestromvolumens am Eingang zur Innenjade bzw. zum Jadebusen. Ferner die Überströmung des Hohe Weg Watts (sehr kleiner grüner Pfeil). Annähernd 50 % des durch den Querschnitt bei Jade-km 25 hindurch tretenden Tidestromvolumens ( $900\text{--}1000\text{ Mio m}^3$ ) ist auch noch am Eingang zum Jadebusen vorhanden (ca.  $400\text{ Mio m}^3$ ), während etwa 5 % (ca.  $50\text{ Mio m}^3$ ) über den Hohen Weg zur Außenweser abgezweigt werden.

der Fall, weil sie hier infolge des Durcheinanderlaufens sehr vieler durch Teilung und Rückprall (Reflektion) usw. entstandener Wellen so verändert sind, daß bald die eine, bald die andere Arbeitsform überwiegt.“ Die von der Tidewelle in einem Querschnitt übertragene Energie wird als Übertragungsleistung bzw. –arbeit  $E_A$  bezeichnet. Sie ist daher insbesondere von der Art der Überlagerung der ein- und auslaufenden Welle(n) abhängig. Zunächst sollen die beiden einfachsten Konstellationen zweier harmonischer, gegenläufiger Wellen betrachtet werden: Bild 7 zeigt den Verlauf von Wasserstand, Strömung und Übertragungsleistung im reibungsfreien Fall, während in Bild 8 die reibungsbehaftete Situation dargestellt wird. Zur praktischen Bewertung der in einem Querschnitt vorhandenen Situation kann daraus folgende (altbekannte) Aussage abgeleitet werden: je näher die Strömungskenterung bei Thw oder Tnw liegt, um so größer ist der Anteil der Energie der reflektierten Welle an der Gesamtenergie im jeweiligen Querschnitt.

In der Jade liegen die Kenterpunkte der Strömung nahe bei Thw bzw. Tnw, sodass schon von daher auf einen hohen Anteil der reflektierten Welle an der Gesamtenergie geschlossen werden muss. Durch die aus

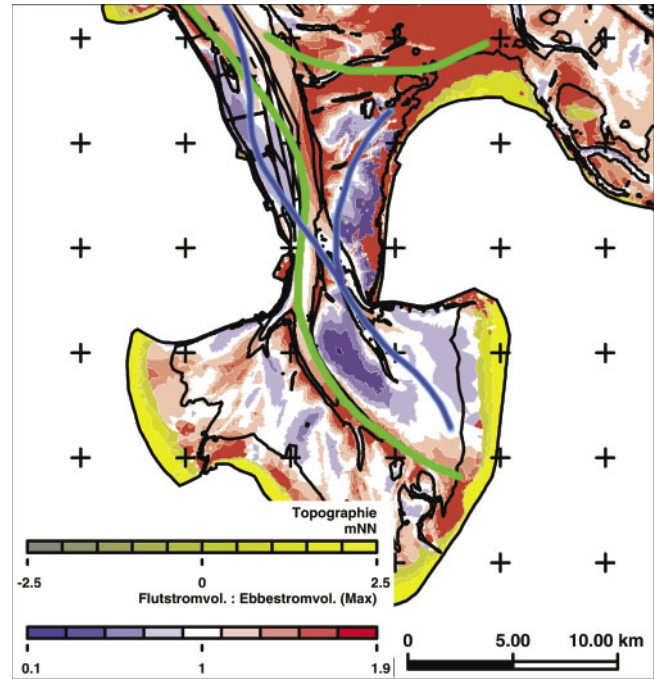


Bild 6: Mäandern von Flut- und Ebbestrom in der Innenjade. Dargestellt wird der aus den Ergebnissen eines HN-Modells abgeleitete Verhältniswert zwischen dem Flutstrom- und dem Ebbestromvolumen. Rot kennzeichnet eine Asymmetrie zu Gunsten des Flutstroms, blau zu Gunsten des Ebbestroms. Entlang der überlagerten, mäandertförmig in Nord-Süd-Richtung verlaufenden grünen Linie dominiert der Flutstrom. Entlang der eher geradlinig von Südsüdost nach Nordnordwest ziehenden blauen Linie dominiert hingegen der Ebbestrom. Beides bestätigt die im Text zitierten Beobachtungen G. Frels (1995), dass Flut- und Ebbestrom einen teilweise unterschiedlichen Verlauf nehmen. Des weiteren tritt das Hohe Weg Watts markant als flutstromdominiertes Gebiet hervor. Die dort erkennbare Flutdominanz ist ein Ausdruck der von der Innenjade zur Außenweser gerichteten Überströmung (siehe nochmals Bild 3). Bemerkenswert ist zusätzlich die Dominanz des Ebbestroms auf dem Solthorner Watt (gegenüber von Wilhelmshaven), über das größere Teile des aus dem Jadebusen abfließenden Wassers abgeführt werden.

HN-Ergebnissen abgeleiteten Daten für die Übertragungsleistung der Tidewelle kann diese Aussage für die Innenjade und den Jadebusen bestätigt werden (siehe Bild 9). Es ist ersichtlich, dass in allen Querschnitten, also auch noch bei Jade-km 25, der Anteil der rücklaufenden Energie hoch ist. Zum Jadebusen hin nimmt dieser Anteil (erwartungsgemäß) zu. Auffällige Diskontinuitäten sind nicht zu erkennen. Der hohe Anteil rücklaufender (reflektierter) Energie ist gleichbedeutend damit, dass in Innenjade und Jadebusen insgesamt wenig Energie dissipiert wird. Insbesondere stellt der Jadebusen ein Gebiet geringer Energiedissipation dar.

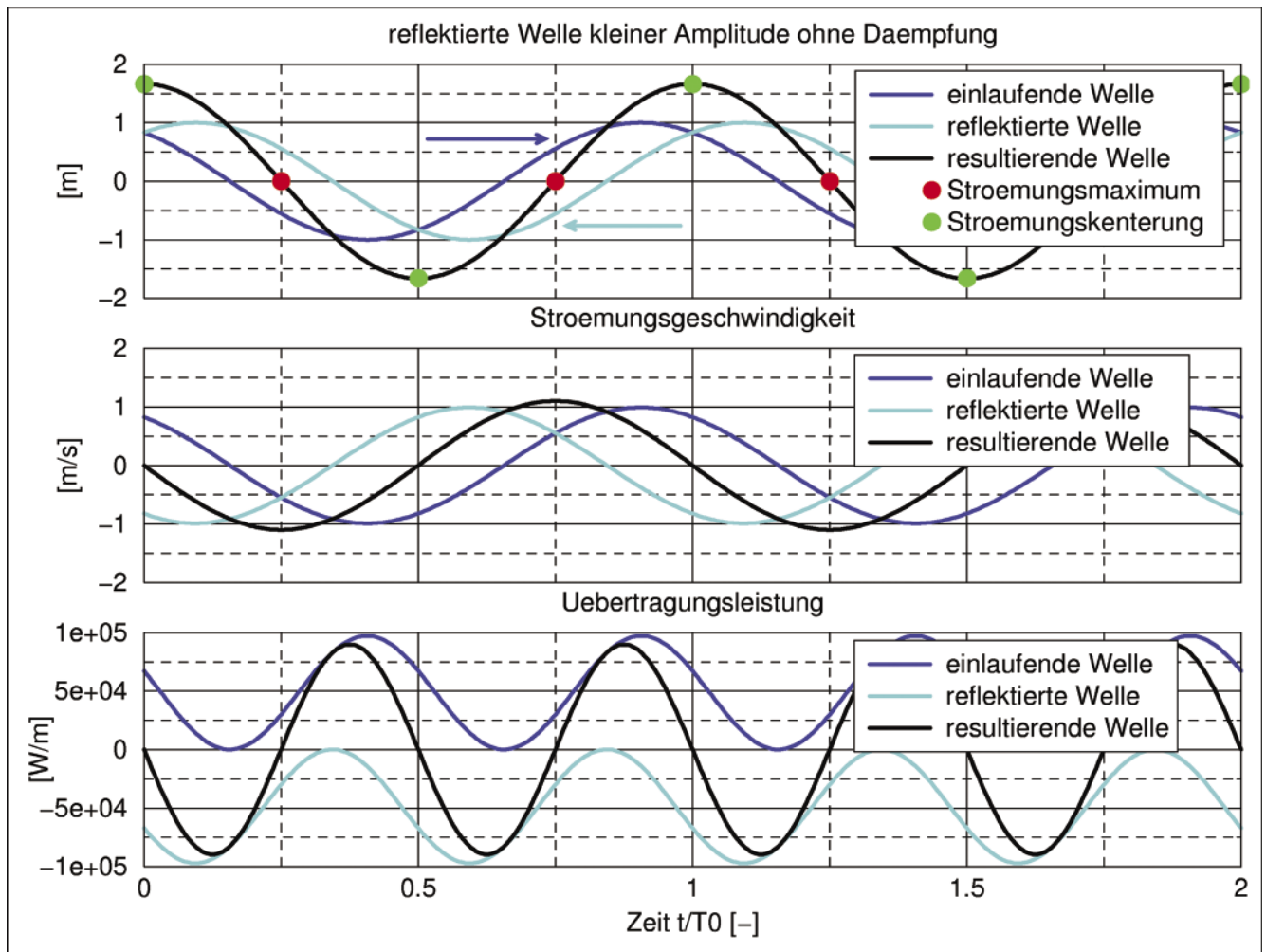


Bild 7: Zeitlicher Verlauf von Wasserstand, Strömung und Übertragungsleistung in einem reibungsfreien System an einem Ort. Einlaufende und reflektierte Welle besitzen dieselbe Amplitude. Die resultierende Übertragungsleistung ist Null, da beide Wellen dieselbe Energie, allerdings in verschiedene Richtungen, übertragen. Die Stromkenterpunkte stimmen mit  $T_{hw}$  und  $T_{nw}$  überein, während die Strömungsmaxima bei Mittelwasser liegen.

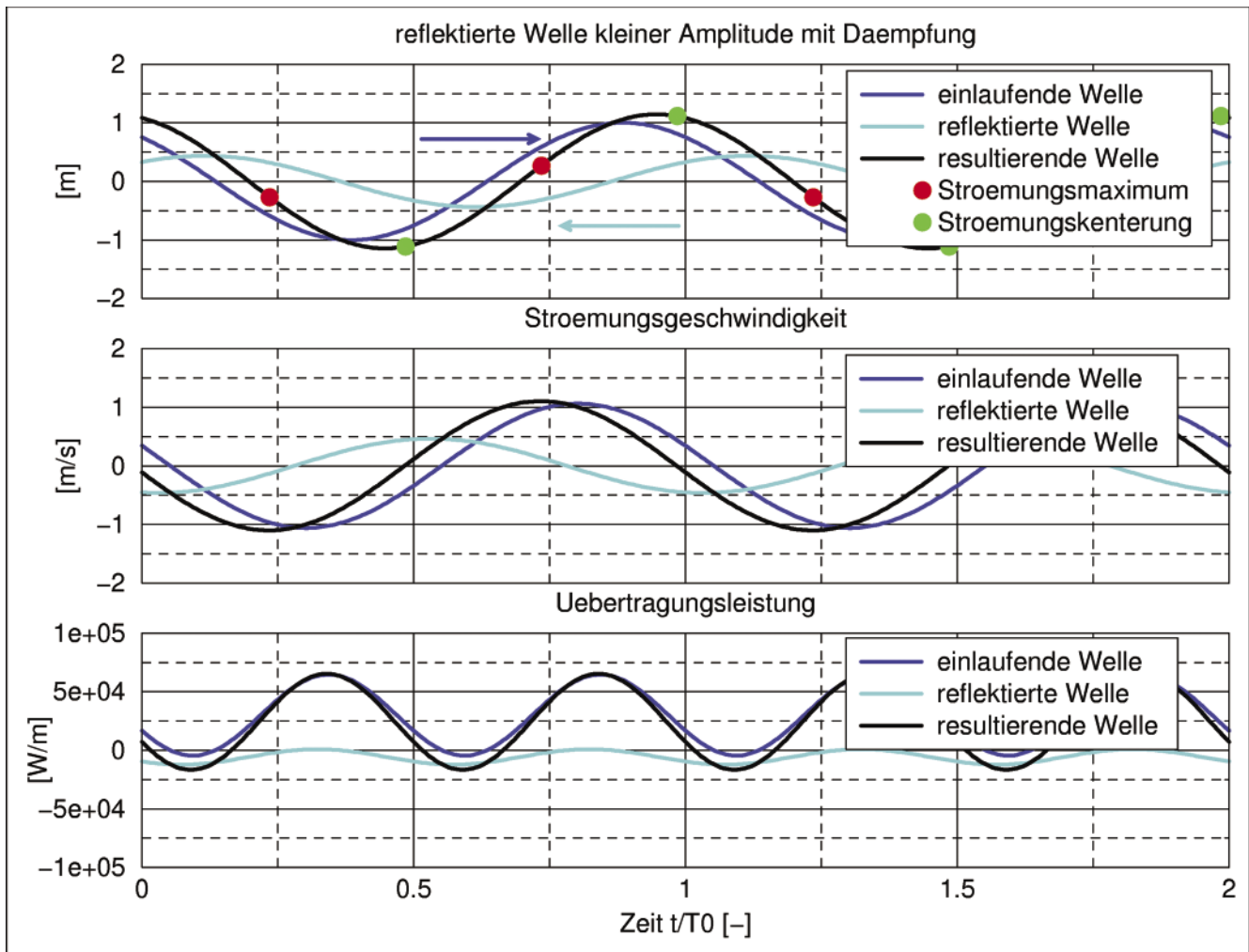


Bild 8: Zeitlicher Verlauf von Wasserstand, Strömung und Übertragungsleistung in einem reibungsbehafteten System an einem Ort. Die Amplitude der einlaufende Welle ist größer als diejenige der reflektierten Welle (Reibungseinfluss). Daher übersteigt die Übertragungsleistung der einlaufenden die der auslaufenden Welle. Im zeitlichen Mittel wird also Energie in Richtung der einlaufenden Welle übertragen. Die Strömungskenterung erfolgt zeitlich jeweils nach dem Thw bzw. nach dem Tnw. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit tritt jeweils in der zweiten Hälfte der Ebbe- bzw. Flutphase, also jeweils nach Mittelwasser auf.

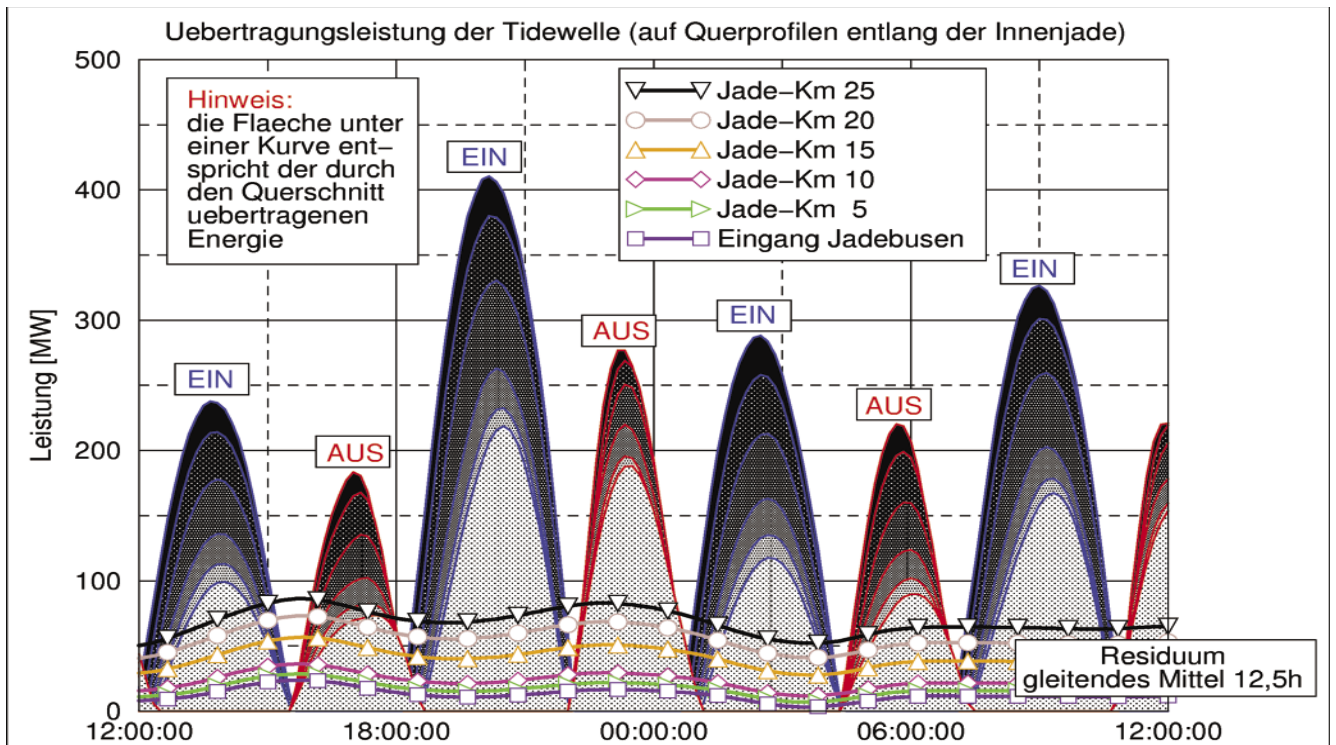


Bild 9: Aus den Ergebnissen eines HN-Modells abgeleitete aktuelle und mittlere Übertragungsleistung der Tidewelle für mehrere Querschnitte (siehe Bild 5) entlang der Innenjade. Bei Jade-km 25 erreicht die auslaufende Energie in etwa 50 % des Wertes der einlaufenden Energie. Dieser Anteil steigt bis zum Eingang des Jadebusens auf 75 % an. Die im Mittel (Residuum) in das System übertragene Leistung beträgt am Querschnitt Jade-km 25 ca. 70 MW und am Eingang zum Jadebusen noch ca. 15 MW. Daraus berechnet sich für den Bereich der Innenjade (200 km<sup>2</sup>) eine mittlere Energiedissipation von ca. 0,27 W/m<sup>2</sup> und für den Jadebusen (160 km<sup>2</sup>) 0,09 W/m<sup>2</sup>. Dies zeigt, dass im Jadebusen verhältnismäßig wenig Energie dissipiert wird. Obwohl der Jadebusen einen Anteil von ca. 46 % an der Gesamtfläche aufweist, werden in ihm nur ca. 20 % der im Mittel am Querschnitt Schillig–Alte Mellum vorhandenen Übertragungsleistung dissipiert.

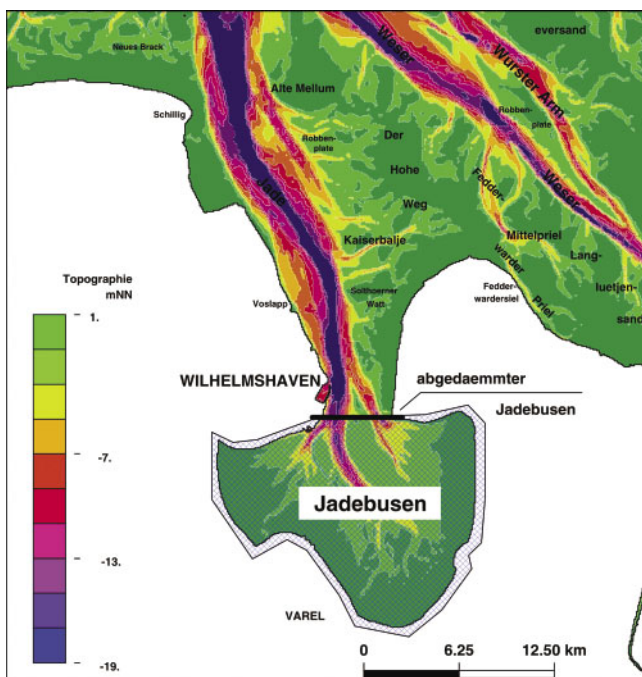


Bild 10: Szenario mit abgedämmtem Jadebusen. Dargestellt ist ein Teil des Modellgebietes für das Jade-Weser-System. Der Jadebusen wurde in diesem Fall durch eine senkrechte Wand von der Innenjade vollständig abgetrennt. Die Topographie in den anderen Bereichen entspricht hingegen den natürlichen Verhältnissen.

### Jade ohne Jadebusen

Mit HN-Modellen können Szenarien untersucht werden, die einem Experiment in der Natur nicht zugänglich sind. So wurde z. B. durch Abtrennen des gesamten Jadebusens von der Innenjade (siehe Bild 10) der Einfluss desselben auf die Tiden der Jade untersucht.

In Bild 11 ist das Ergebnis dieses Szenarios für verschiedene Positionen entlang der Innenjade dargestellt (vergleiche nochmals mit Bild 2). Die Tidekurven werden fülliger und symmetrischer, Thw und Tnw treten früher als bisher ein und, trotz vollständiger Reflexion der Tidewelle an der künstlichen Abdämmung zum Jadebusen, sinkt der Tidehub im gesamten Verlauf der Innenjade, insbesondere aber im südlichen, vor Wilhelmshaven gelegenen Teil, stark ab.

### Interpretation Mangel an Symmetrie

Zur Ursache des in Bild 2 dargestellten, von G. Hagen erstmals formulierten *Mangels an Symmetrie der Tidekurven*, bestätigt das vorgenannte, mit einem HN-Modell untersuchte Szenario die Vermutung Hagens: „Wahrscheinlich rührt dies von den ausgedehnten Wattgründen in dem Bassin der Jade her, die eine schnelle Ausgleichung des Wasserspiegels verhin-



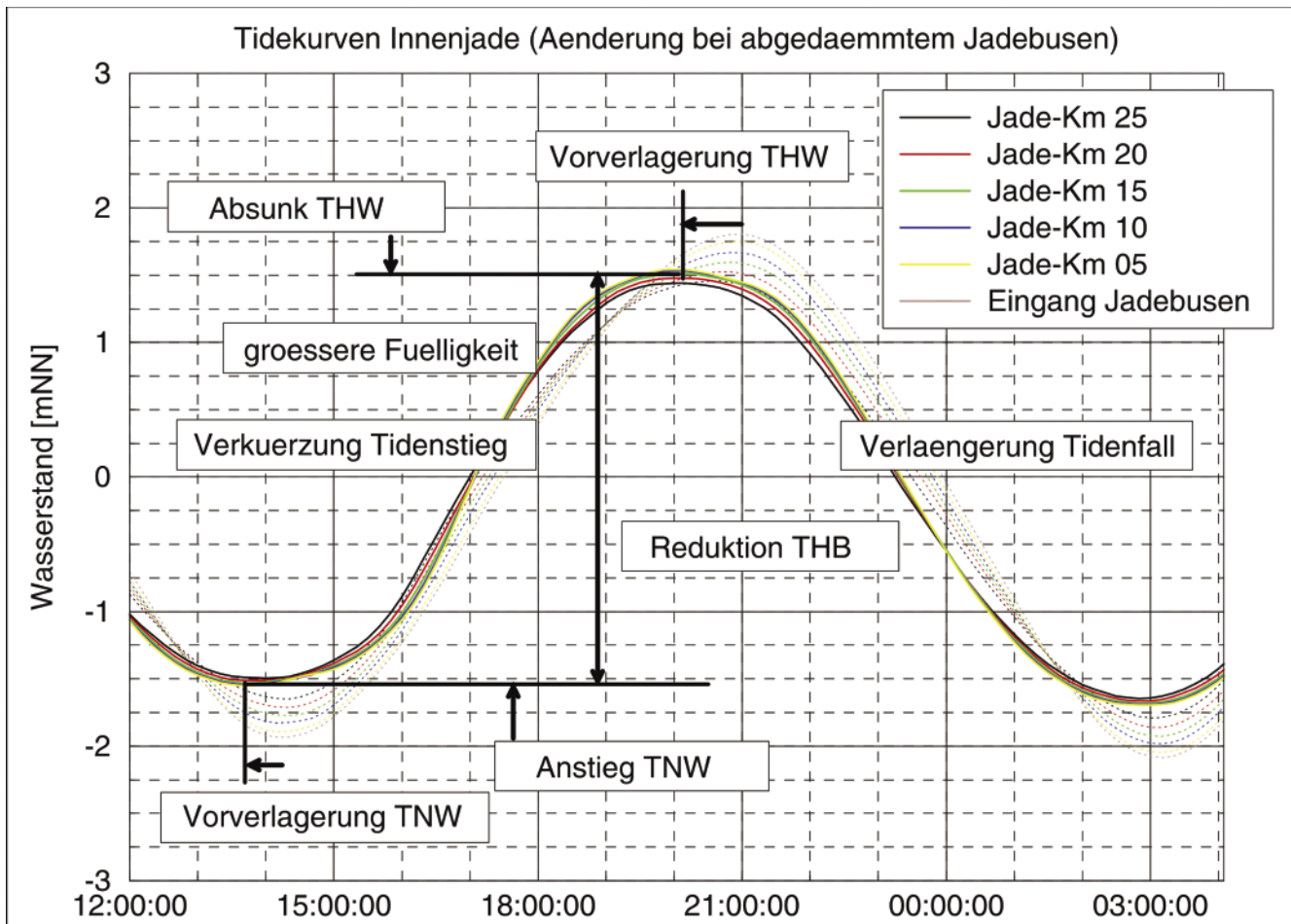


Bild 11: Einfluss einer Abdämmung des Jadebusens vom Einfluss der Gezeiten auf die Tidekurven in der Innenjade (siehe Bild 10). Mit einem HN-Modell des Jade-Weser-Systems berechnete Tidekurven für verschiedene Positionen entlang des Fahrwassers der Innenjade (Jade-km 25 bis Eingang Jadebusen). Gestrichelt dargestellt sind die Tidekurven für den Naturzustand mit Jadebusen (siehe nochmals Bild 2). Bei Abdämmung des Jadebusens nehmen Fülligkeit und Symmetrie der Tidekurven zu. Als Folge dessen gleichen sich Flutdauer und Ebbedauer an. Der von Hagen beobachtete „Mangel an Symmetrie“ verschwindet. Ferner sinkt das Thw während das Tnw steigt und der Thb somit kleiner wird. Die Eintrittszeiten des Thw wie auch die des Tnw erfolgen an allen dargestellten Positionen nahezu zeitgleich. Dies ist auf die vollständige Reflexion der Tidewelle an der künstlichen Abdämmung zum Jadebusen zurückzuführen.

dem.“ Ein Vergleich der in Bild 2 mit den in Bild 11 dargestellten Tidekurven beweist, dass diese Vermutung richtig war und auch heute richtig ist. Der Jadebusen trägt maßgeblich zu einem verlangsamten Anstieg des Wasserstandes am Ende der Flut bei und verzögert dadurch den Eintritt des Thw.

## Tidehub

Die Entwicklung des Tidehubs bei Abdämmung des Jadebusens ist zunächst überraschend, da trotz vollständiger Reflexion der Tidewelle an der Abdämmung der Tidehub kleiner wird. Nun spielt bei Systemen wie der Jade allerdings noch ein weiteres Phänomen, nämlich das der *Resonanz*, eine Rolle. Die Jade besitzt, wie jedes schwingungsfähige System, die Fähigkeit, Energie zu speichern, die ihr von Außen durch die Gezeiten mit einer Periode von ca. 12:25 h zugeführt wird. Ein solches System kann um so mehr Energie aufnehmen, je näher die von außen aufgezwungene, anre-

gende Frequenz in der Nähe einer Resonanzfrequenz des Systems liegt. Bei Buchten oder Ästuaren mit einem offenen und einem abgeschlossenen Ende ist die Resonanzbedingung dann (näherungsweise) erfüllt, wenn die Länge des Systems ein Viertel der Länge der Tidewelle beträgt. Für die in der Jade charakteristischen Wassertiefen beträgt diese kritische Länge ca. 135 km. Ab Wangerooge beläuft sich die aktuelle Länge der Jade allerdings nur auf etwa 40 % dieses Wertes, und ab Schillig sogar nur auf 27 %. Die Jade ist somit deutlich kürzer als dies für das Erfüllen der Resonanzbedingung der Fall sein müsste. Unter den für die Jade gültigen Randbedingungen geringer Energiedissipation ist dennoch eine resonanzbedingte Verstärkung der Tiden, die bei ca. 15 – 25 % liegen sollte, zu erwarten (siehe Bild 12). Dies erklärt, weshalb der Tidehub bei einer Abdämmung des Jadebusens im Vergleich mit dem natürlichen Zustand kleiner wird: Bei um ca. 15 km verkürzter Länge bewegt sich die Jade von der Resonanzbedingung fort (siehe nochmals Bild

12). Außerdem wird mit dem Jadebusen ein Gebiet geringer Dissipation aus dem System entfernt (siehe nochmals Bild 9). Dies führt zu einer höheren mittleren Energiedissipation in dem verbleibenden Restsystem. Kürzere Länge und größere (mittlere) Dämpfung führen aber zu einer Reduktion der Energiespeicherfähigkeit des Systems (siehe Bild 12).

Das Ergebnis des Szenarios unterstreicht damit noch einmal die herausragende Bedeutung des Jadebusens für den Tidecharakter in der Jade-Bucht: Erhöhen der verfügbaren Energie in der Innenjade durch größere Energiespeicherfähigkeit des Systems (geringe Dissipation im Jadebusen und Verlängern der Systemlänge zur Resonanzlänge hin). Der Erhalt dieses „funktionierenden“ Gesamtsystems Innenjade–Jadebusen bleibt daher von bekannt großer Bedeutung für die Offenhaltung des tiefen Jadefahrwassers.

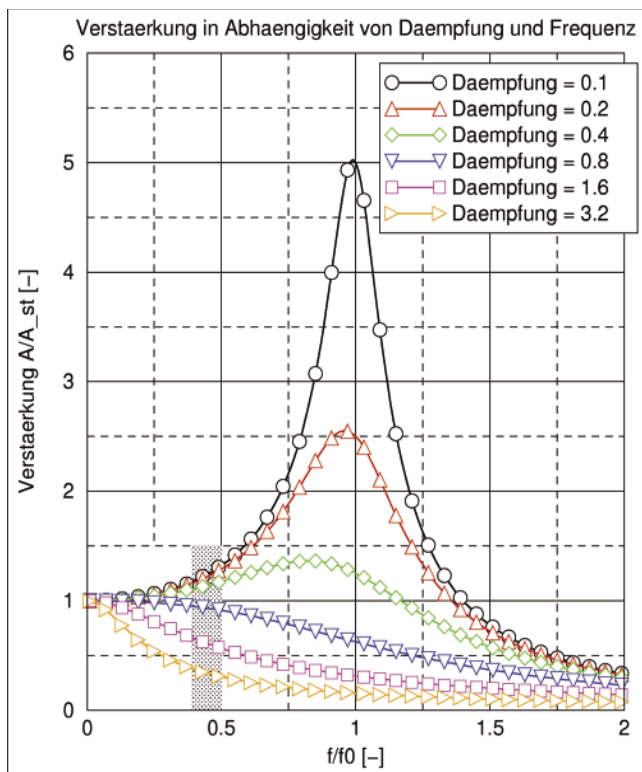


Bild 12: Verstärkung in einem linearen, schwingungsfähigen System in Abhängigkeit von Frequenz und Dämpfung (Dissipation). Das Verhalten für die Jade kann aus dem grau unterlegten Bereich abgeschätzt werden. Bei starker Dissipation müsste der Tidehub im Vergleich zu demjenigen in der Nordsee kleiner werden. Dies ist definitiv nicht der Fall. Bei geringer Dissipation ist hingegen eine Verstärkung um etwa 10–25 % zu erwarten. Wäre die Jade länger als sie es heute ist, so müsste der Tidehub resonanzbedingt rasch zunehmen. Eine Verkürzung bewirkt hingegen in jedem Fall eine resonanzbedingte Verkleinerung des Tidehubs.

## Schlussbemerkungen

In diesem Beitrag wurden einerseits die Besonderheiten der Tidedynamik der Jade-Bucht näher beleuchtet und andererseits die spezielle Bedeutung des Jadebusens für das Systemverhalten unter verschiedenen Gesichtspunkten erörtert. Die Ergebnisse verschiedener Methoden (Beobachtungen in der Natur, theoretische Überlegungen, Ergebnisse von HN-Modellen und darauf aufbauende Analysen) führen zu einer konsistenten Sichtweise des Geschehens. Dies unterstreicht die gleichberechtigte und notwendige Ko-Existenz der verschiedenen Möglichkeiten, Erkenntnisse über in der Natur ablaufende Prozesse zu gewinnen.

Die Bedeutung des Jadebusens für die Offenhaltung des Jadefahrwassers wurde schon früh erkannt und trug maßgeblich zur Wahl Wilhelmshavens als Marinestützpunkt bei. Dies gilt auch heute noch, z. B. in Zusammenhang mit den aktuellen Planungen für den JadeWeserPort.