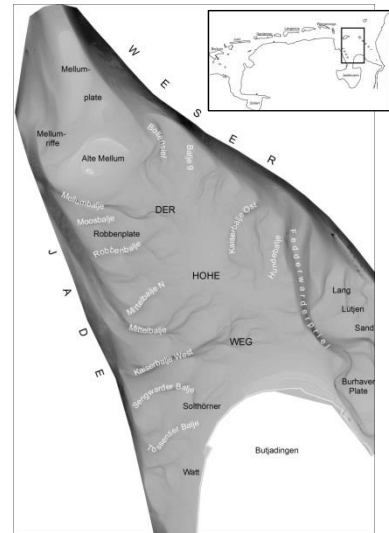
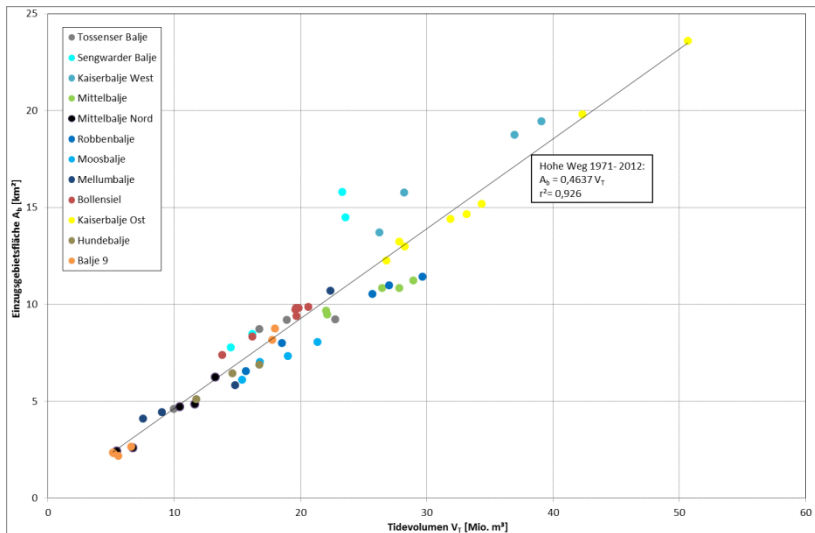


Untersuchungsbericht 5/2015



Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
- Forschungsstelle Küste -



Cornelius Meyer

Morphologische Entwicklung der Watten auf dem Hohen Weg



Niedersachsen

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
- Forschungsstelle Küste -
2015

Titelblatt: links: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsgröße
rechts: Übersicht des Untersuchungsgebietes mit seinen Rinnen und morphologischen Einheiten
NLWKN - Forschungsstelle Küste
An der Mühle 5, 26548 Norderney
Tel.: 04932-916-0
Fax: 04932-1394
e-mail: Andreas.Wurpts@nlwkn-ny.niedersachsen.de

**NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR
WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ
Betriebsstelle Norden-Norderney
- Forschungsstelle Küste -**

Cornelius Meyer

Morphologische Entwicklung der Watten auf dem Hohen Weg

Norderney, im Juni 2015

Geschäftsbereichsleiter
Forschungsstelle Küste



Dr.-Ing. Andreas Wurpts

Aufgabenbereichsleiter
Morphologie des Küstengebietes



Dr. Cornelius Meyer

Morphologische Entwicklung der Watten auf dem Hohen Weg

Cornelius Meyer

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Untersuchungsgebiet	1
2. Datengrundlage	1
2.1. Datenaufbereitung	3
2.2. Fehlerbetrachtung	4
3. Morphologische Veränderungen	5
3.1. Historische Entwicklung: 1650 bis 1960	5
3.2. Morphologische Entwicklung von 1971 bis 2012	6
4. Morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen	12
4.1. Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Tidevolumen	13
4.2. Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen	13
4.3. Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Gezeitenfläche	14
4.4. Funktionaler Zusammenhang von Sedimentvolumen und Tidevolumen	15
4.5. Funktionaler Zusammenhang von Rinnenquerschnitt und Tidevolumen	16
5. Zusammenfassung und Ausblick	17
6. Literatur	18

1. Einleitung

1.1 Veranlassung

Das Wattgebiet um den Hohen Weg unterliegt aufgrund seines natürlich vorherrschenden Strömungsregimes ständig morphologischen Veränderungen. Morphodynamische Prozesse im Wattenmeer sind ohne anthropogene Eingriffe selbstregulierend (KABAT et al., 2009). Für den Erhalt des Wattenmeeres und die Sicherheit der Küstengebiete ist jedoch von existenzieller Bedeutung inwieweit sich das bestehende morphodynamische Gleichgewicht nachhaltig an sich verändernden hydrodynamischen Randbedingungen, wie beispielsweise einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg oder einem veränderten Sturmklima, anpassen kann. Mit dieser Thematik befasste sich unter anderem das deutsch-niederländische Forschungsvorhaben "Wadden Sea morphodynamical development due to an accelerated relative sea-level rise" (WADE; NIEMEYER et al. 1995, GOLDENBOGEN et al. 1998). Offene Watten, zu denen auch das Gebiet zwischen Jade und Weser um den Hohen Weg gehört, wurden in diese Untersuchungen allerdings nicht mit einbezogen.

Der vorliegende Untersuchungsbericht beschreibt historische und aktuelle morphologische Veränderungen im Wattgebiet zwischen Jade und Weser. Zudem sollen morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen Aussagen über funktionale Zusammenhänge zwischen Hydrodynamik und Morphologie geben. Aufbauend auf den so gewonnenen Erkenntnissen soll letztlich eine Abschätzung der zukünftigen morphologischen Entwicklungstendenz möglich sein.

1.2 Untersuchungsgebiet

Eingeschlossen von der Jade im Westen und der Weser im Osten erstreckt sich das ca. 290 km² große Untersuchungsgebiet vor der Küste Niedersachsens über eine Länge von etwa 30 km in NW-SO-Richtung mit einer maximalen Breite von etwa 15 km (Abb. 1). Im Süden wird es durch die Küstenlinie Butjadingens, im Südosten durch den Fedderwarder Priel begrenzt.

Morphologisch gliedert es sich in das Solthörner Watt vor der Küste Butjadingens, den Hohen Weg, die Robbenplate sowie die Wattinsel Mellum und die nördlich davon gelegene Mellum Plate. Mit Höhen von 0,5 bis 1,5 m über NHN fällt ein Großteil der Fläche bei Niedrigwasser trocken. Von der Jade aus gliedern - von Süden nach Norden betrachtet – die Tossenser Balje, die Sengwarder Balje, die Kaiserbalje (Kaiserbalje West), die Mittelbalje, die Robbenbalje, die Moosbalje und die Mellumbalje die Wattflächen. Auf der Weserseite teilen Hunde- und Kaiserbalje (Kaiserbalje Ost), eine Balje nördlich der Kaiserbalje sowie Bollensiel das Untersuchungsgebiet.

Der mittlere Tidenhub liegt nach der Klassifikation von DAVIS (1964) im mesotidalen Bereich (2-4 m). Der Seegang hat nur einen geringen Einfluss auf die Gestaltung des tidendominierten Wattgebiets (HAYES 1979).

2. Datengrundlage

Zur Veranschaulichung der historischen Entwicklung wird auf das Historische Kartenwerk 1:50.000 der Forschungsstelle Küste (Kartenblätter Nr. 8, 9, 11, 12) zurückgegriffen. Diese Kartenblätter spiegeln die topographischen Zustände für die Jahre 1650, 1750, 1860 und 1960 wider und basieren auf zeitgenössischen Aufzeichnungen wie Deich- und Sielregister, Segelanweisungen und Kartenwerke (HOMEIER et al. 2010).

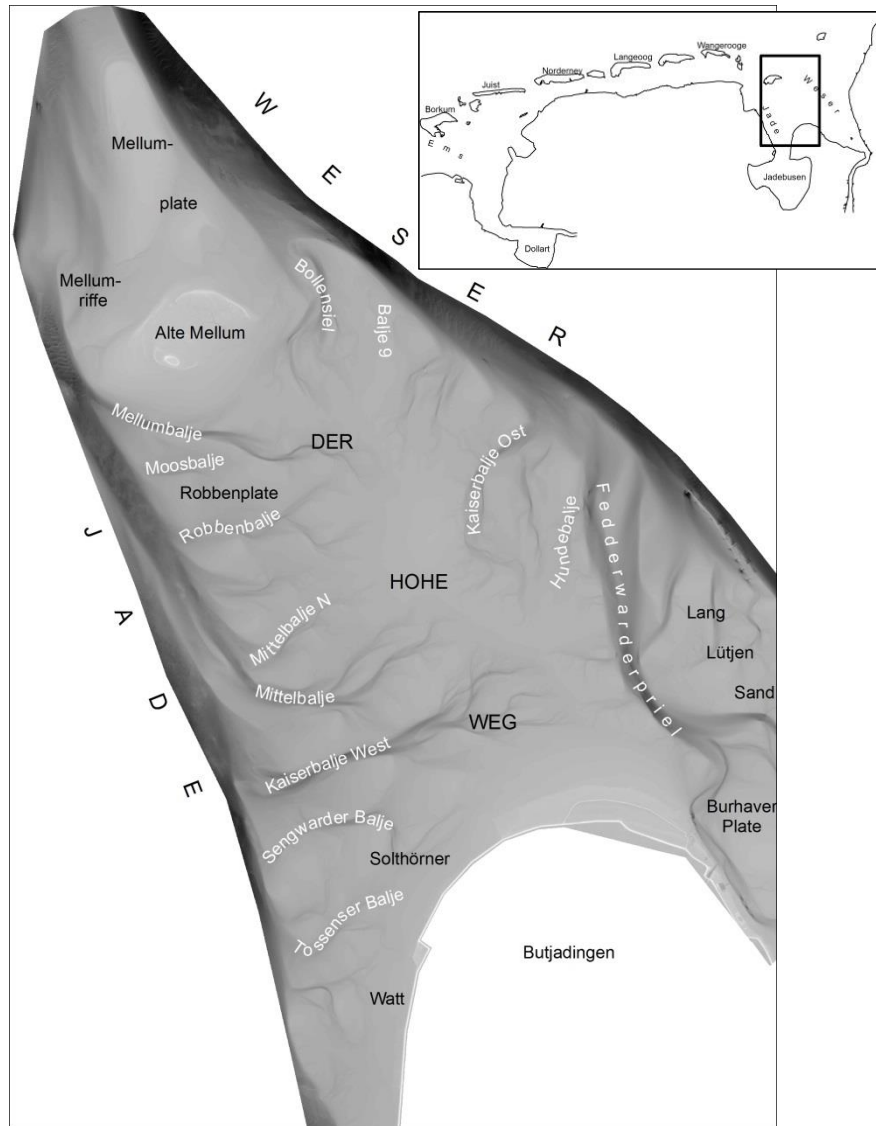


Abb. 1: Übersicht des Untersuchungsgebietes

Den morphologischen Analysen liegen Peildaten aus den Jahren 1971 bis 2012 zugrunde, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), dem Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) und der Forschungsstelle Küste (FSK) durchgeführt wurden. Seit 2005 erfolgt im Rahmen der Beweissicherung Weservertiefung im jährlichen Wechsel eine topographische Aufnahme des Gebiets westlich und östlich des Weserfahrwassers. Dabei werden die trockenfallenden Flächen durch Laserscanbefliegung erfasst und die Rinnenstrukturen zeitnah gepült. So wurde das Untersuchungsgebiet erstmalig im Jahr 2005, dann 2007 sowie 2009 und zuletzt 2012 in hoher Auflösung vermessen, allerdings jeweils nur bis zur Wattwasserscheide zwischen Jade und Weser. Zumindest aus 2012 existiert aber eine nach demselben Messverfahren erstellte topographische Aufnahme für das gesamte Jadegebiet, so dass für dieses Jahr der Untersuchungsraum topographisch vollständig abgedeckt ist.

In der Topographischen Wattkarte der FSK aus dem Jahr 1971 wird - ebenso wie bei dem später aus Mitteln des Kuratoriums für Küsteningenieurwesen erstellten Kartenwerk aus dem Jahre 1975 - die Topographie des gesamten Untersuchungsraums einschließlich der Rinnen in Form von Isolinien im Maßstab 1:25.000 abgebildet. Ansonsten liegen die Messdaten als digitale Punktdaten vor und beziehen sich auf Normalhöhennull (NHN).

In der Umgebung des Hohen Wegs sind drei Pegel in Betrieb, die zur Bestimmung der lokalen Tidewasserstände verwendet werden können: Hooksielplate, Robbensüdsteert und Wilhelms-haven Alter Vorhafen. Durch seine geographisch ideale Lage repräsentiert der Pegel Robbensüdsteert das Tidegeschehen auf der Weserseite des Untersuchungsgebiets am besten, auf der Jadeseite des Untersuchungsgebiets wird der Pegel Hooksielplate verwendet. Allerdings werden die Wasserstände an diesen beiden Pegel erst seit 1986 bzw. 1990 gemessen, weshalb der Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen als Referenzpegel herangezogen werden musste.

2.1. Datenaufbereitung

Die Datenverarbeitung erfolgte mit dem Geographischen Informationssystem ArcGis (ESRI). Für die Beschreibung der topographischen Zustände um 1971 und 1975 wurden die gescannten Karten der FSK und des KFKI georeferenziert und digitalisiert. Um möglichst flächendeckende Topographien zu erhalten, wurden Peil- und Laserscandaten nah aufeinanderfolgender Jahre zu Synopsen verschnitten. Die Kontinuität der Daten, vor allem an den Schnittstellen zwischen zwei Datensätzen, wurde durch eine optische Plausibilitätsanalyse überprüft.

Aus den Vermessungsdaten wurde mit der ArcMap-Erweiterung 3D-Analyst durch unregelmäßige Dreiecksvermaschung (TIN = Triangulated Irregular Network) ein digitales Geländemodell erstellt. Die digitalen Geländemodelle wurden auf Qualität und Plausibilität geprüft und gegebenenfalls nach der Fehlerkorrektur der entsprechenden Punktdaten neu generiert.

In einem nächsten Schritt wurden mit der Erweiterung Spatial-Analyst aus den TINs gleichmäßige Raster (Grids) mit einem Rasterabstand von 5 m berechnet, auch wenn die Peildaten zumeist eine wesentlich gröbere Auflösung aufweisen. Die gleichmäßige Flächenrasterung der Geländemodelle ermöglicht einerseits eine einheitliche Darstellung von Tiefenplänen und andererseits die flächenhafte Berechnungen von Höhenunterschieden als Differenzenpläne verschiedener Messperioden.

Mit Robbensüdsteert (Weser) und Hooksielplate (Jade) stehen in der Nähe des Untersuchungsgebiets zwei Messpegel zur Verfügung, die zur Berechnung der mittleren, fünfjährigen Tidewasserstände herangezogen werden können. Da die beiden Pegel aber erst 1986 bzw. 1990 errichtet wurden, musste das $MThw_{5j}$ - und $MTnw_{5j}$ für die Jahre 1971, 1975 und 1986 über Regression aus den Messwerten am benachbarten Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen abgeleitet werden, der seit 1935 in Betrieb ist (Tab. 1).

Die Festlegung der Grenzen zwischen den einzelnen Teileinzugsgebieten (TEG) erfolgte mit ArcMap unter Nutzung eines Werkzeugs („hydrology“), das eigentlich ausschließlich für terrestrische Einzugsgebiete von Flüssen entwickelt wurde. Durch geeignete Zwischenschritte - hierzu zählt insbesondere das Identifizieren und Auffüllen von Gebieten ohne Abfluss - kann dieses Werkzeug auch auf marine Bereiche übertragen werden. Eine sorgfältige Überprüfung der Lage der sekundären Wattwasserscheiden als Trennlinie zwischen benachbarten TEG ist natürlich erforderlich.

Tab. 1: Fünfjähriges Mittel für MThw, MTnw und den Tidehub an den Pegeln Robbensüdsteert und Hooksielplate

Berechnungszeitraum	Pegel Robbensüdsteert			Pegel Hooksielplate		
	MThw _{5J.} [m NHN]	MTnw _{5J.} [m NHN]	MT _{HB} [m]	MThw _{5J.} [m NHN]	MTnw _{5J.} [m NHN]	MT _{HB} [m]
1967 - 1971	+1,59	-1,85	3,43	+1,50	-1,76	3,26
1971 - 1975	+1,57	-1,86	3,43	+1,48	-1,77	3,26
1982 - 1986	+1,63	-1,85	3,48	+1,54	-1,77	3,30
1992 - 1996	+1,67	-1,87	3,54	+1,56	-1,80	3,36
1998 - 2002	+1,74	-1,82	3,56	+1,63	-1,73	3,37
2001 - 2005	+1,71	-1,83	3,54	+1,62	-1,74	3,35
2003 - 2007	+1,69	-1,84	3,53	+1,61	-1,72	3,33
2005 - 2009	+1,72	-1,81	3,53	+1,63	-1,70	3,33
2008 - 2012	+1,70	-1,82	3,52	+1,61	-1,72	3,33

2.2. Fehlerbetrachtung

Die bei der Auswertung der topographischen Karten und Vermessungen auftretenden Fehlerquellen können generell in zwei Gruppen unterteilt werden:

- 1.) Ungenauigkeiten, die aus den topographischen Karten oder den Vermessungsdaten selber herrühren;
- 2.) Fehler, die aus der Umsetzung und anschließenden Bearbeitung im Geographischen Informationssystem resultieren.

Zur ersten Gruppe gehören beispielsweise bei Digitalisierungsarbeiten entstehende Fehler sowie mess- und verfahrenstechnische Ungenauigkeiten. Weiterhin ist zu bedenken, dass mit dem Vorschreiten der technischen Entwicklung auch die Messgenauigkeit variiert. Als Beispiel sei hier die erhebliche Höhen- und Lageverbesserung mit Umstellung vom Globalen Positionierungssystem (GPS) auf Differential-GPS (DGPS) genannt.

Bei Laserscanmessungen liegen die Abweichungen für die aus den Rohdaten berechneten Punkte des 1x1 m Rasters unterhalb von ± 50 cm in der Lage und ± 15 cm in der Höhe. Über den Abgleich mit terrestrisch vermessenen Referenzflächen wird der bei Laserscanbefliegungen auftretende Fehler erfahrungsgemäß aber auf unter 10 cm in der Höhe reduziert und verringert sich auf ebenen Flächen sogar auf wenige Zentimeter (DIRKS 2007).

Potenzielle Fehlerquellen in den Peildaten ergeben sich bei der Beschickung der Tiefenwerte vor allem durch unterschiedliche Bezugspegel (Hochsee- oder Küstenpegel), durch meteorologische Einflüsse, die zu nicht vorhersehbaren Differenzen in den Wasserständen vor Ort und Pegel führen, durch Abweichungen von den mittleren Eintrittszeiten des Hoch- und Niedrigwassers sowie durch unterschiedliche Steig- und Falldauer der Tiden am Pegel und am Peilort (HÜTTEMEYER et al. 1999).

Bei der morphologischen Analyse und Bewertung ist auch zu beachten, dass Vermessungsdaten für die KFKI-Karten über einen längeren Zeitraum erfasst wurden. Diese Karten geben also kein für einen bestimmten Zeitpunkt exaktes Abbild der tatsächlichen Morphologie wieder, sondern es wurden mögliche aus der asynchronen Erfassung herrührende Unterschiede bei der kartografischen Darstellung im Sinne einer morphologischen Plausibilität harmonisiert.

Methodische Fehler aus Umsetzung und Bearbeitung topographischer Daten im GIS beruhen in erster Linie auf der Umrechnung digitaler Liniendaten in Geländemodelle. Die Vernetzung mittels Dreiecksvermaschung bedingt, dass in Bögen von Tiefenlinien ebene Flächen interpoliert und somit eine Über- oder Unterschätzung der wirklichen Tiefe auftritt. Die Größenordnung dieses Fehlers ist kaum quantifizierbar, da er in Abhängigkeit von Topographie und Abstufung dargestellter Isolinien schwankt (MEYER & STEPHAN 2000). Allerdings gibt es bisher keine Hinweise, dass dadurch der Trend morphologischer Analysen merklich beeinträchtigt werden kann.

3. Morphologische Veränderungen

3.1. Historische Entwicklung: 1650 bis 1960

Einzelheiten über die Entstehung des Hohen Wegs sind nicht bekannt. Vermutlich ist jedoch die Jade im Mittelalter etappenweise nach Süden vorgedrungen und hat dabei die ursprünglich bis zur Weser verlaufende Küste abgeschnitten (HOMEIER et al. 2010). Auf der historischen Karte von 1650 ist der Hohe Weg bereits verzeichnet, ebenso die Bereiche des heutigen Solthörner Watts und der Mellum Plate (Abb. 2). In diesem Zustand bezeichnet der Name Bollensiel noch einen Wattbereich, der durch die Breite Balje im Westen vom Hohen Weg und Schmidt's Steert östlich von Alte Mellum getrennt wird.

Die heutige Insel Mellum besteht 1650 noch aus zwei getrennten Inseln: Strand- und Wattinsel Alte Mellum, die noch etwa 2,4 km auseinander liegen. In den folgenden Jahrhunderten verringert sich dieser Abstand sukzessive bis zur Vereinigung beider Inseln im Zustand 1960, wobei sich der Schwerpunkt der alten Wattinsel in dieser Zeit um etwa 1,4 km nach Süden verlagert. Nördlich der Insel zeigen sich 1960 Ansätze neuer, bei MTnw freiliegender Platen und Riffe (HOMEIER et al. 2010).

Bis 1860 wandert Schmidts Steert nach Südosten, so dass die Breite Balje nun zwischen Alte Mellum und Schmidts Steert nach Nordwesten in die Weser mündet (Abb. 2). Der Wattbereich Bollensiel wird durch Stromangriffe der Weser so stark erodiert, dass bereits ab 1750 der Name Bollensiel nunmehr einen Wattstrom bezeichnet. Weiter südlich dringen die Landbalje und die Hohewegsbalje von der Weser aus in den Hohen Weg; 1860 kommt noch die Hundebalje dazu. Bis zum Zustand 1960 dehnt sich die Wattkante an der Weserseite des Hohen Weges um 700 bis 1100 m nach Nordosten aus und erfährt morphologisch erhebliche Umgestaltungen, weshalb die genetische Zuordnung der Rinnen kaum möglich ist: Die Breite Balje ist nicht mehr vorhanden. Stattdessen trägt die Rinne östlich von Alte Mellum nun den Namen Bollensiel. Auf der Ostseite wird der Hohe Weg im Zustand von 1960 nun von einer breiten, namenlosen Rinne, der Kaiserbalje, der Hundebalje und der Hohewegsbalje durchzogen (HOMEIER et al. 2010).

Von der Jade aus schneiden 1650 die Mellumbalje und Mittelbalje in den Hohen Weg und begrenzen damit die Robbenplate, während die Sengwarder Balje die Trennung zum Solthörner Watt bildet. Diese drei Baljen verlagern sich bis 1960 fortlaufend nach Süden. Zwischen 1860 und 1960 entstehen im Bereich des Solthörner Watts zwei neue Priele: neben der Tossenser Balje bildet sich in unmittelbarer Nähe zur Sengwarder Balje eine weitere Rinne, weshalb nun zwischen Sengwarder Nord- und Südbalje unterschieden wird (Abb. 2). Im Bereich des Solthörner Watt bildet sich bis 1960 die Tossenser Balje (HOMEIER et al. 2010).

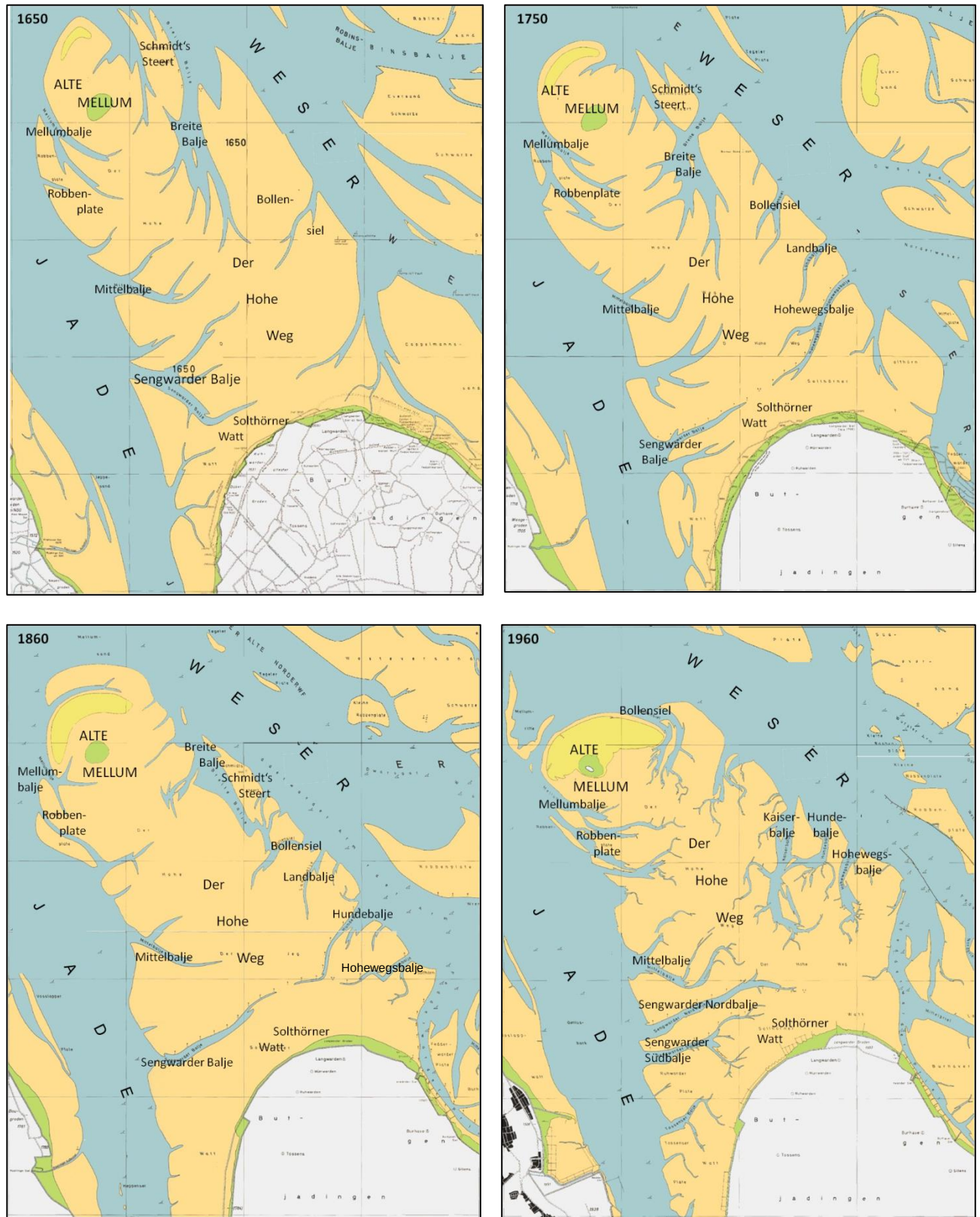


Abb. 2: Ausschnitte aus den historischen Karten Nr. 8, 9, 11 und 12 (verändert nach HOMEIER et al., 2010)

3.2. Morphologische Entwicklung von 1971 bis 2012

Mellum verliert durch Verluste an der Ostseite ihre ursprünglich leicht gestreckte Form und nimmt bis Ende der 1990er Jahre eine eher gedrungene Form an. Gleichzeitig gewinnt sie aber deutlich an Höhe. Nach Norden schließt sich an die Insel die Mellumplate und die Mellumriffe an, die nicht unmittelbar dem Untersuchungsraum zuzuordnen sind, aber mit dem Hohen Weg einen zusammenhängenden Komplex bilden. Während die Mellumriffe im Historischen Karten-

werk von HOMEIER et al. (2010) zumindest im Zustand von 1960 namentlich erwähnt und lagernmäßig eingezeichnet sind (Abb. 2), findet sich kein Hinweis auf die Mellumplate.

Innerhalb der nächsten elf Jahren wird dann aber soviel Sediment in das Gebiet nördlich von Mellum transportiert, dass in der Topographie von 1971 im Gebiet der heutigen Mellumplate Platen bis NHN aufgewachsen sind (Abb. 3). Diese Entwicklung setzt sich in den nachfolgenden Jahrzehnten unverändert fort: Im Jahr 1975 wird bereits ein Niveau oberhalb von $\text{NHN}+0,5\text{ m}$ erreicht und bis 2002 haben sich die Einzelplatten dann zur Mellumplate zusammengeschlossen, einem ausgedehnten Komplex, der in weiten Bereichen über $\text{NHN}+1,0\text{ m}$, punktuell mit $\text{NHN}+1,8\text{ m}$ sogar über das MThw aufragt. Weitere zehn Jahre später sind diese hochgelegenen Gebiete der Mellumplate nochmals um einen halben Meter aufgewachsen und erreichen stellenweise sogar Werte über $\text{NHN}+2,0\text{ m}$ (Abb. 3 u. 4). Es ist deshalb mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass sich die Mellumplate und die Insel Mellum zu einem hochwasserfreien Komplex zusammenschließen.

Erstreckt sich die Tossenser Balje im Südwesten des Untersuchungsgebietes im Jahr 1971 noch bis fast an die Vorlandkante und bildet einen nach Süden gerichteten Seitenarm, so zieht sie sich bis 2012 infolge der Auflandungstendenzen entlang der Butjadinger Küste deutlich aus ihrem Wurzelgebiet heraus und nimmt einen genähert geradlinigen Verlauf ein. Der Seitenarm ist nicht mehr erkennbar. Weiter nördlich verzweigt die Sengwarder Balje 1971 noch in zwei ähnlich große Rinnen, von denen sich die nördlichere zugunsten der tiefen Rinne der Kaiserbalje West, die sich bis 2012 ostwärts ausdehnt, nahezu vollständig zurückbildet (Abb. 3 u. 4). Bis auf eine leichte Verschwenkung des Mündungsbereiches nach Südwesten bleibt die Kaiserbalje West, die in den Historischen Wattkarten von HOMEIER et al. (2010) noch als Sengwarder Nordbalje bezeichnet wird, recht lagestabil.

Auch die Mittelbalje dehnt sich in den Jahren zwischen 1971 und 2012 etwas weiter in die zentralen Bereiche des Hohen Weges aus. Ein namenloser Priel, der 1971 mit der Mittelbalje noch gemeinsam in die Jade mündet, verlagert sich bis 2012 nordwärts. Der Platenbereich zwischen Kaiserbalje West und Mittelbalje wird an seiner Westflanke erodiert und verliert insgesamt an Höhe. Das abgetragene Material scheint insbesondere im Bereich der Hooksielplate zur Ablagerung zu kommen, die beständig anwächst und sich nordwärts ausdehnt (Abb. 3 u. 4).

Die Moosbalje verliert zwischen 1996 und 2002 nahezu ihr gesamtes Einzugsgebiet an die Mellumbalje, die somit erheblich an Bedeutung gewinnt. Da bis 1996 auch ein südwärts gerichteter Seitenarm verlandet, ist zu vermuten, dass sich die Moosbalje mittelfristig vollständig zurückbilden wird. Eine solche Entwicklung würde der Robbenplate zugute kommen, die sich dann natürlich ausdehnen und an Höhe gewinnen kann. Südlich der Robbenplate ist eine Rinne ausgebildet, die, obwohl sie während des gesamten Betrachtungszeitraumes vorhanden ist und sich nur geringfügig verändert hat, bisher namenlos geblieben ist (Abb. 3 u. 4). Sie wird nachfolgend als Robbenbalje bezeichnet, nicht zuletzt auch deshalb, weil sie aufgrund ihrer Ausdehnung, die vergleichbar ist mit der der Sengwarder Balje im Zustand 1971, auch in die morphodynamischen Gleichgewichtsbetrachtungen einbezogen wird.

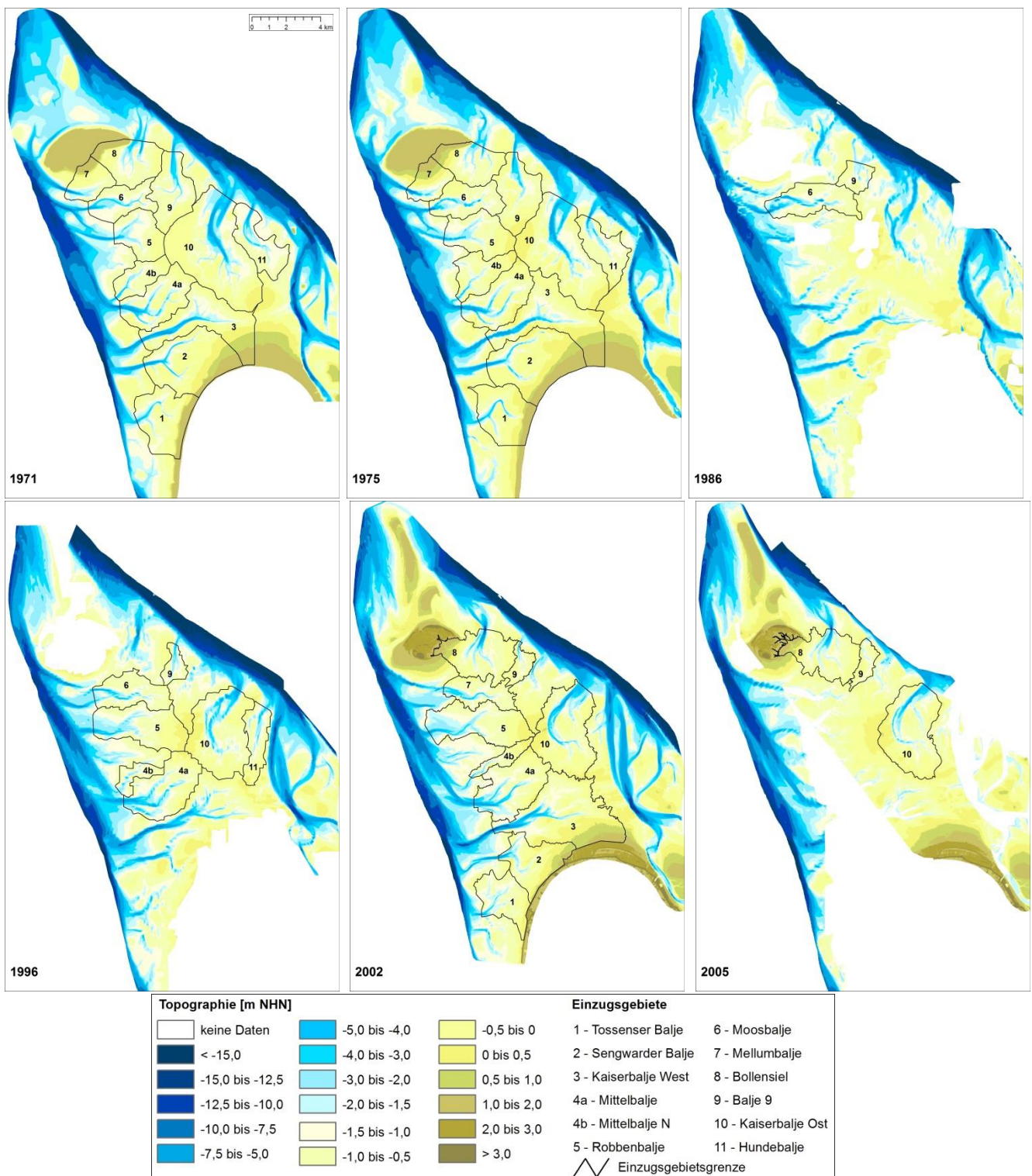


Abb. 3: Morphologische Ausprägung des Hohen Watts zwischen den Jahren 1971 und 2005

Auf der Weserseite des Hohen Weg Watts ist die Verlagerung des Fedderwarder Priels sehr auffällig: Im Zeitraum zwischen den Jahren 1971 und 2012 verlagert sich der Mündungsbereich beständig um gut 3,5 km westwärts. Dadurch verliert der Platenkomplex zwischen Fedderwarder Priel und Kaiserbalje Ost ca. 10 km² an den Lang Lütjen Sand (Abb. 3 u. 4). Die Hundebalje, die 1971 noch relativ weit in diesen Platenbereich einschneidet, verlagert sich ebenfalls nach Westen, bis sie zwischen 1986 und 1996 in der Kaiserbalje aufgeht. Nur kurzen Bestand hat eine namenlose Rinne, die sich etwa 1986 westlich des Fedderwarder Priels bildet, 1996 deutlich ausgebildet, aber bereits 2002 der Verlagerung des Fedderwarder Priels zum Opfer gefallen ist.

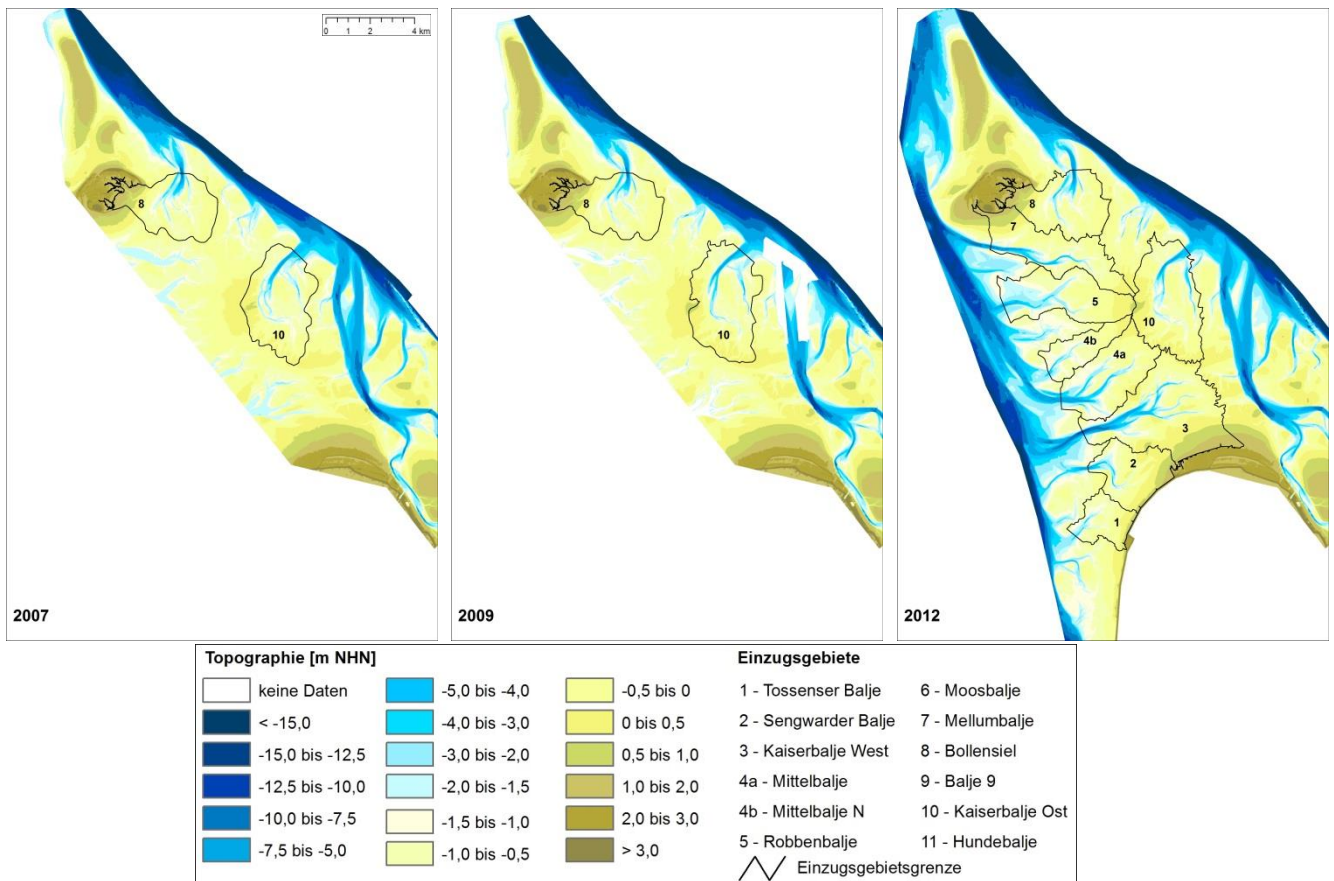


Abb. 4: Morphologische Ausprägung des Hohen Watts in den Jahren 2007, 2009 und 2012

Anhaltende Sedimentation in den zentralen Gebieten des Hohen Weges (Abb. 5) bedingt eine deutliche Rückentwicklung der Kaiserbalje Ost, die bis 2002 besonders ausgeprägt ist. Erstmals in dem Jahr ist auch erkennbar, dass sich eine Rinne von der Kaiserbalje Ost abspaltet, die sich nachfolgend bis 2012 vertieft und südwärts ausdehnt, während sich ihre Mündung westwärts zur Weser hin verlagert.

Das Wattgebiet zwischen der Kaiserbalje Ost und Bollensiel wird 1971 und 1975 von einer tiefen, namenlosen Rinne in Nord-Süd-Richtung durchzogen, die sich bis zum Jahr 2007 vollständig zurück entwickelt. Diese Rinne wird bei den Berechnungen der Parameter für morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen aufgrund der Nummerierung der Teileinzugsgebiete als Balje 9 bezeichnet. Südöstlich der Balje 9 entwickelt sich Mitte der 1980er Jahre eine neue Rinne, die aber bereits 1996 ihre maximale Ausdehnung erreicht hat und seitdem wieder rückläufig ist. Bollensiel, östlich von Mellum gelegen, verlagert sich zwar in geringem Umfang nach Osten, behält aber insgesamt seine Ausdehnung in den zurückliegenden Jahrzehnten in etwa bei (Abb. 3 u. 4).

Insgesamt bedingt die Ausdehnung der Kaiserbalje West und der Mittelbalje einerseits, und die Rückentwicklung der Kaiserbalje Ost andererseits zusammen mit der Sedimentakkumulation in den zentralen Bereichen des Hohen Weg Watts in den Jahren 1971 bis 2012 eine Verschiebung der Wattwasserscheide zwischen Jade und Weser im Mittel um etwa 700 m nach Osten.

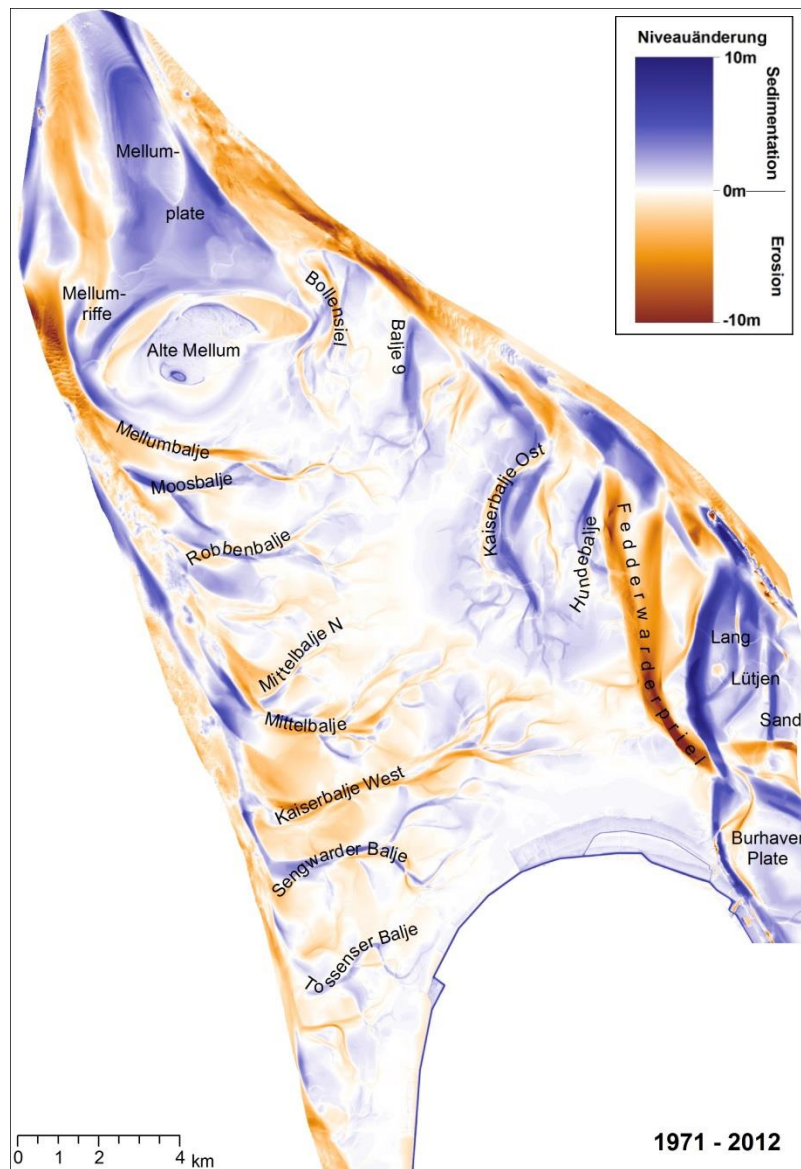


Abb. 5: Niveauänderungen im Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 1971 und 2012

Die beschriebenen morphologischen Veränderungen spiegeln sich auch in den Höhendifferenzen zwischen den Jahren 1971 und 2012 wider (Abb. 5): Erwartungsgemäß treten die durch Rinnenverlagerungen hervorgerufenen Niveauschwankungen besonders deutlich hervor, denn ehemalige Rinnenbereiche füllen sich mit Sediment auf, während sich die Rinne ein neues Bett gräbt. Besonders ausgeprägt ist dieser Prozess im Bereich des Fedderwarder Priels festzustellen, dessen ehemalige (1971) und aktuelle Lage (2012) durch den intensiven Farbwechsel klar hervortritt. Gut zu erkennen ist zudem die Aufspaltung des Fedderwarder Priels in seinem Mündungsbe- reich.

Neben den augenfälligen Rinnenverlagerungen wird aber auch sehr deutlich, dass sich in weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes das Wattniveau nicht wesentlich verändert hat. Hierzu gehören vor allem die zentralen Flächen des Hohen Wegs, aber auch ein gut ein Kilometer breiter Streifen vor der Butjadinger Küste. Auf den peripheren Wattgebieten dominieren westerseitig Sedimentationsprozesse, entlang der Jade hingegen erosive Tendenzen.

Mit Blick auf die Entwicklung des Tidevolumen in Zeit und Raum ist festzustellen, dass im Westen des Untersuchungsgebietes V_T im TEG der Kaiserbalje West erwartungsgemäß zwischen den Jahren 1971 und 2002 um gut 40 % von 26 Mio. m³ auf 39 Mio. m³ ansteigt (Abb. 6), da sich

die Kaiserbalje West in diesem Zeitraum vor allem in Bereiche ausdehnt, die ursprünglich über die Sengwarder Balje entwässerten. Nachfolgend nimmt V_T in diesem TEG dann bis 2012 aber wieder geringfügig ab (37 Mio. m^3). Im TEG der Sengwarder Balje ist erwartungsgemäß die entgegen gesetzte Entwicklung festzustellen: das Tidevolumen nimmt um rund 40 % auf aktuell etwa 14 Mio. m^3 ab (1971: 23,5 Mio. m^3). Noch ausgeprägter ist die Entwicklung im TEG der Mellumbalje, die bis zum Jahr 2012 die Moosbalje fast völlig verdrängt hat, wodurch sich V_T um das 1,5-fache von neun Mio. m^3 (1971) auf gut 22 Mio. m^3 erhöht. Die leicht rückläufige Niveauentwicklung des Hohen Weg Watts entlang der Jade bedingt dann auch einen leichten Anstieg im Tidevolumen im TEG von Mittelbalje und Robbenbalje um etwa 30 % zwischen 1971 und 2002. Seitdem ist V_T wieder leicht rückläufig.

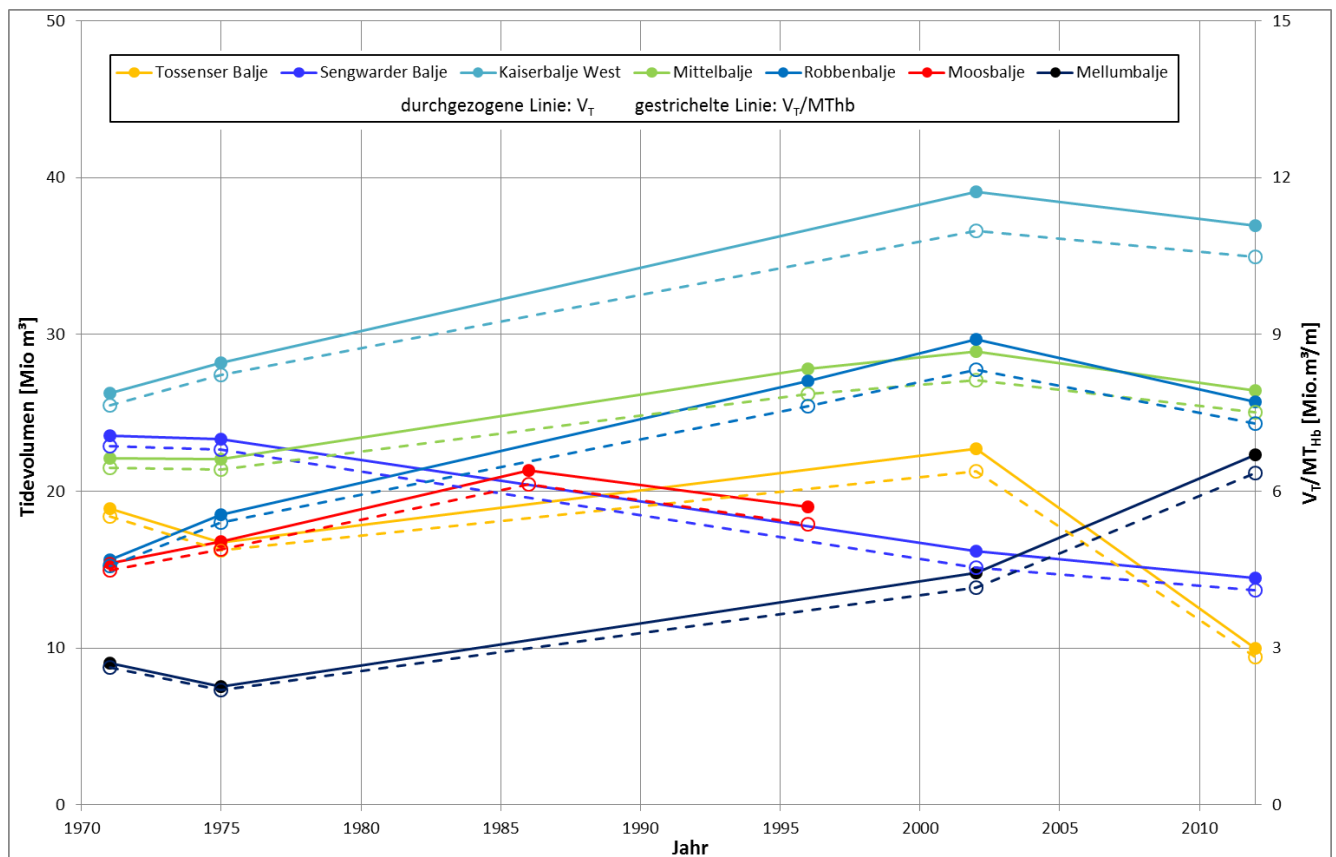


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung des Tidevolumens im Westen des Hohen Weg Watts in den Jahren 1971 bis 2012

Andererseits zeichnet sich die allgemein positive Niveauentwicklung auf der Weserseite in einer Abnahme von V_T im TEG der Kaiserbalje Ost um knapp 46 % von 55 Mio. m^3 auf 29 Mio. m^3 , im TEG der Hundebalje – sie ist ab dem Jahr 2001 kaum noch ausgebildet – um 30 % zwischen 1971 und 1996 und im TEG der Balje 9 ab, die bis 2005 gut 70 % ihres ursprünglichen 19,3 Mio. m^3 Tidevolumen verliert und in den nachfolgenden vier Jahren dann vollständig verschwindet. Allein im TEG der Rinne Bollensiel nimmt V_T bis zum Jahr 2002 um 20 % auf rund sechs Mio. m^3 zu und variiert bis 2012 dann auch nicht mehr wesentlich (Abb. 7).

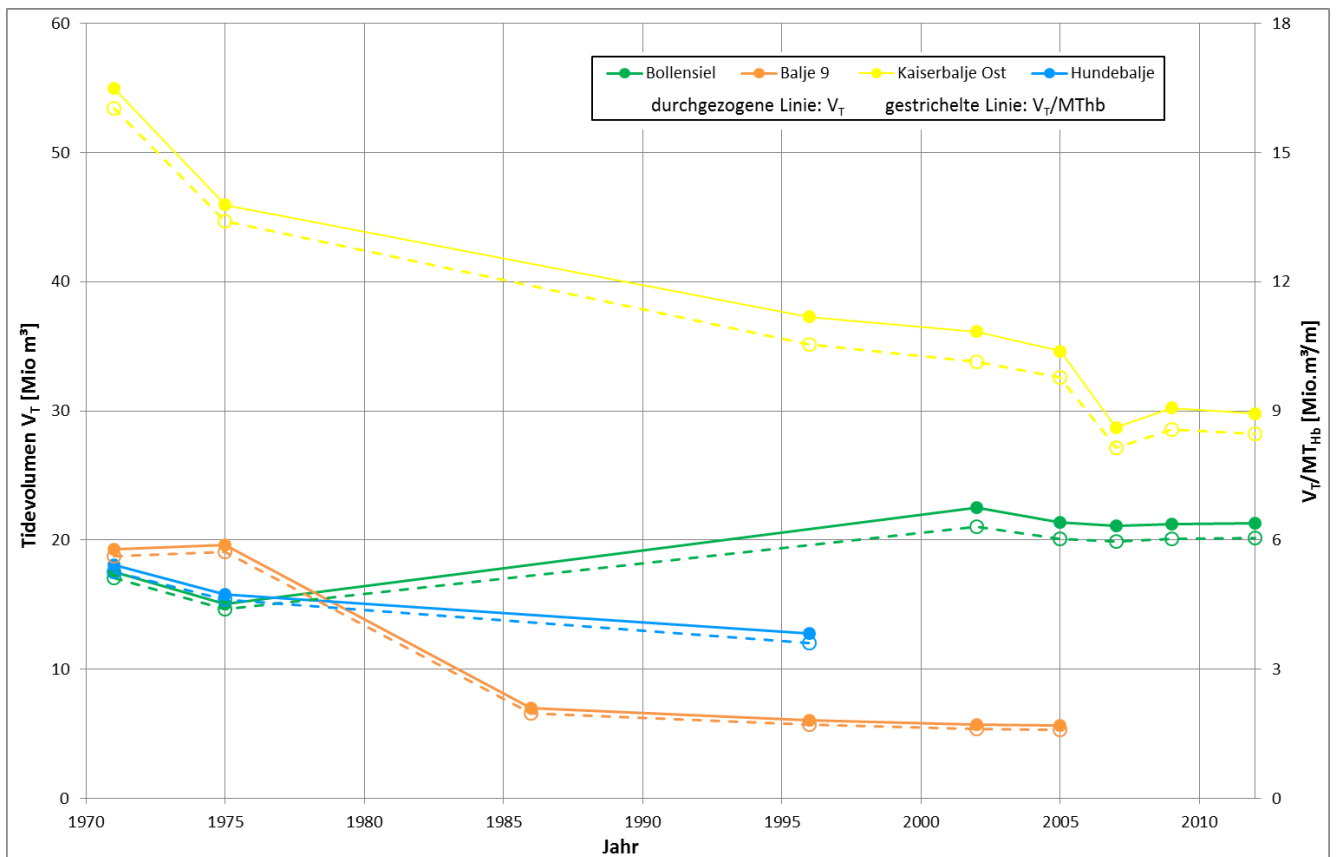


Abb. 7: Zeitliche Entwicklung des Tidevolumens im Osten des Hohen Weg Watts in den Jahren 1971 bis 2012

4. Morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen

Die Berechnung hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtszustände stellt einen Ansatz dar, die komplexen Vorgänge der Morphodynamik auf solche Parameter zu reduzieren, welche die (mittelfristig) prägenden Prozesse beschreiben. Eine solche Parametrisierung erlaubt eine methodische Reproduzierbarkeit und den Vergleich mit anderen Untersuchungsergebnissen aus Gebieten mit vergleichbaren morphodynamischen Randbedingungen. Vor allem aber stellt es einen Ansatz dar, die Reaktion des Systems bei Veränderungen einzelner Parameter tendenziell zu prognostizieren:

- Mittleres Tidevolumen (V_T): mittleres Wasservolumen zwischen MThw- und MTnw-Niveau
- Sedimentvolumen (V_i): Sedimentvolumen zwischen der MThw- und MTnw-Niveau (basierend auf WIELAND et al. 1987)
- Einzugsgebietsfläche (A_b): Wasserspiegelfläche des (Teil-)Einzugsgebiets bei MThw
- Gezeitenfläche (A_i): Differenz der bei MThw und MTnw benetzten Fläche
- Durchflussquerschnitt (A_c): Querschnittsfläche der Rinnen rechtwinklig zur Hauptströmungsrichtung an der engsten seewärtigen Stelle

Während im Projekt WADE die Obergrenze für die Berechnung der Querschnittsfläche A_c durch NHN definiert ist, wurde in den vorliegenden Untersuchungen der Bezugshorizont durch das jeweilige MTnw_{5J} festgelegt. Erforderlich wurde diese Verfahrensweise, weil das Niveau von NHN in der Regel im Bereich der gewählten Rinnenquerschnitte nicht erreicht wurde.

Die zwischen den einzelnen Parametern bestehenden funktionalen Zusammenhänge sind im Schrifttum bekannt (O'BRIEN 1931 & 1967, WALTHER 1934 & 1972, RODLOFF 1970, RENGGER 1976, EYSINK 1979 & 1991 und DIEKMANN 1985), allerdings variieren die jeweiligen Koeffizienten gebietsabhängig. Im Projekt WADE wurde für das Ostfriesische Wattenmeer und die Dith-

marscher Bucht der Beweis geführt, dass hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände nicht allein auf vollständige Einzugsgebiete von Seegaten, sondern auch auf dessen Teileinzugsgebiete angewendet werden können (SCHRÖDER et al. 1994, NIEMEYER et al. 1995, KUNZ et al. 1998, NIEMEYER 2000).

4.1. Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Tidevolumen

An Küsten mit tidedominanten Seegaten besteht zwischen der Einzugsgebietsfläche A_b und dem Tidevolumen V_T bei Vorhandensein eines morphologischen Gleichgewichtszustandes ein enger funktionaler Zusammenhang. Nachgewiesen wurde dieser Zusammenhang von WALTHER (1934, 1972) und NIEMEYER et al. (1995) für die ostfriesischen Seegaten und von EYSINK (1991) für die Seegaten des westfriesischen Wattenmeeres.

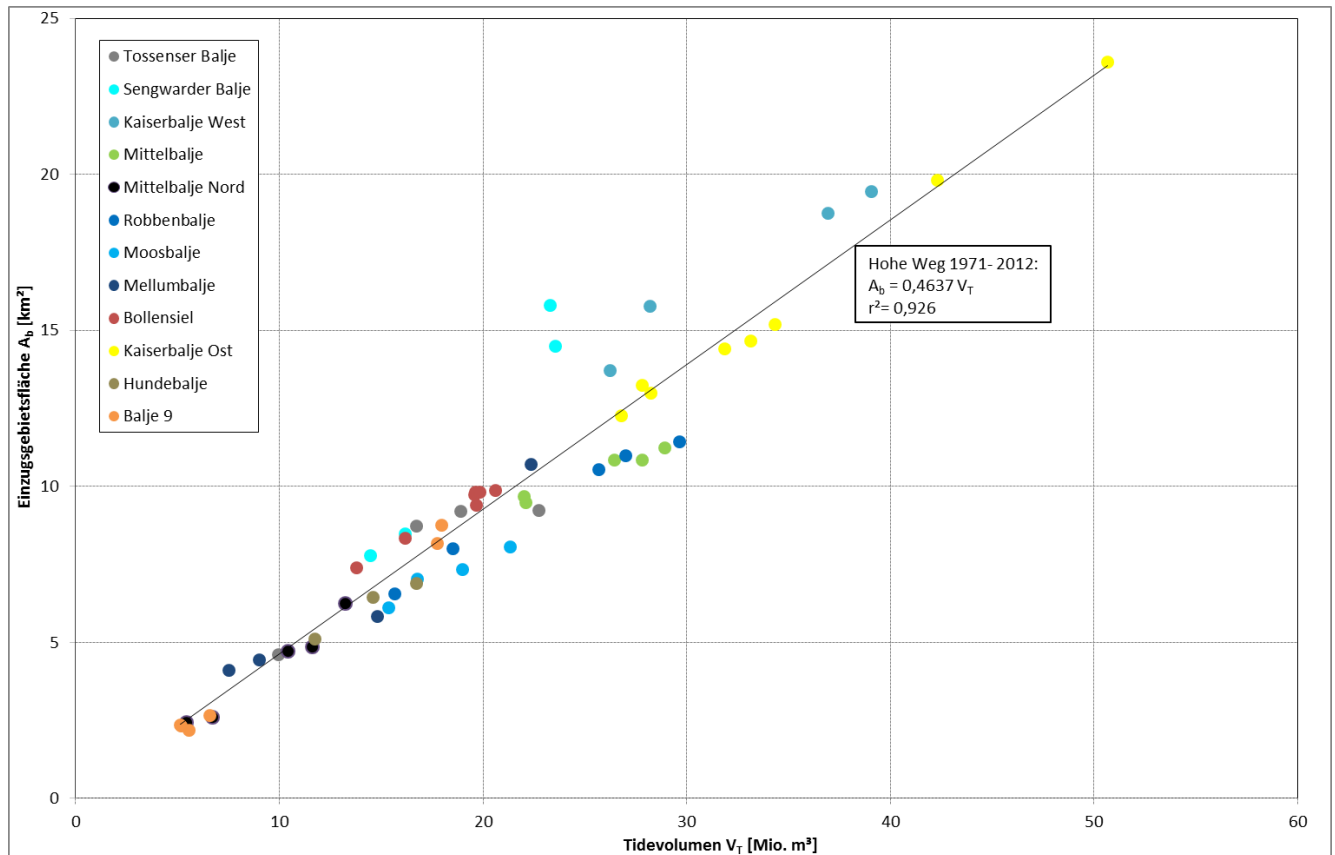


Abb. 8: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen

Mit einer Steigung von 0,446 hat die Ausgleichsgerade, die den Zusammenhang zwischen V_T und A_b im Untersuchungsgebiet wiedergibt, einen deutlich geringeren Wert als die von NIEMEYER et al. (1995) in WADE für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste ermittelte (Abb. 8).

Insgesamt streuen die Werte zumeist nur gering um die Ausgleichsgerade; ein Hinweis darauf, dass sich grundsätzlich ein morphodynamisches Gleichgewicht zwischen diesen beiden Parametern eingestellt hat. Größere Schwankungen der Messpunkte um die Ausgleichsgerade treten im TEG der Kaiserbalje West und der Sengwarder Balje auf, da sich erstere auf Kosten des TEG der Sengwarder Balje erheblich ausgedehnt hat (vgl. Kap. 4) und hierdurch temporäre Störungen des Gleichgewichtes bedingt.

4.2. Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen

NIEMEYER et al. (1995) folgern aus der Tatsache, dass nach EYSINK (1991), RENGGER (1974) und HAYES (1975, 1979) die Größe der Gezeitenflächen nicht nur von der Größe des Einzugsgebietes

tes, sondern auch durch den Tidenhub und das mittlere Gefälle der Sohle beeinflusst wird, auch einen engen statistischen Zusammenhang zwischen Gezeitenfläche A_i und Tidevolumen V_T , der durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird.

Die Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen ist im Untersuchungsgebiet zu erkennen, auch wenn die Messwerte teilweise so stark um die Ausgleichsgerade streuen, dass der statistische Zusammenhang nicht signifikant ist (Abb. 9). Erwartungsgemäß treten die größten Abweichungen erneut im TEG der Sengwarder Balje und Kaiserbalje West auf, in denen sich aufgrund der genannten morphologischen Umgestaltungen noch kein Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

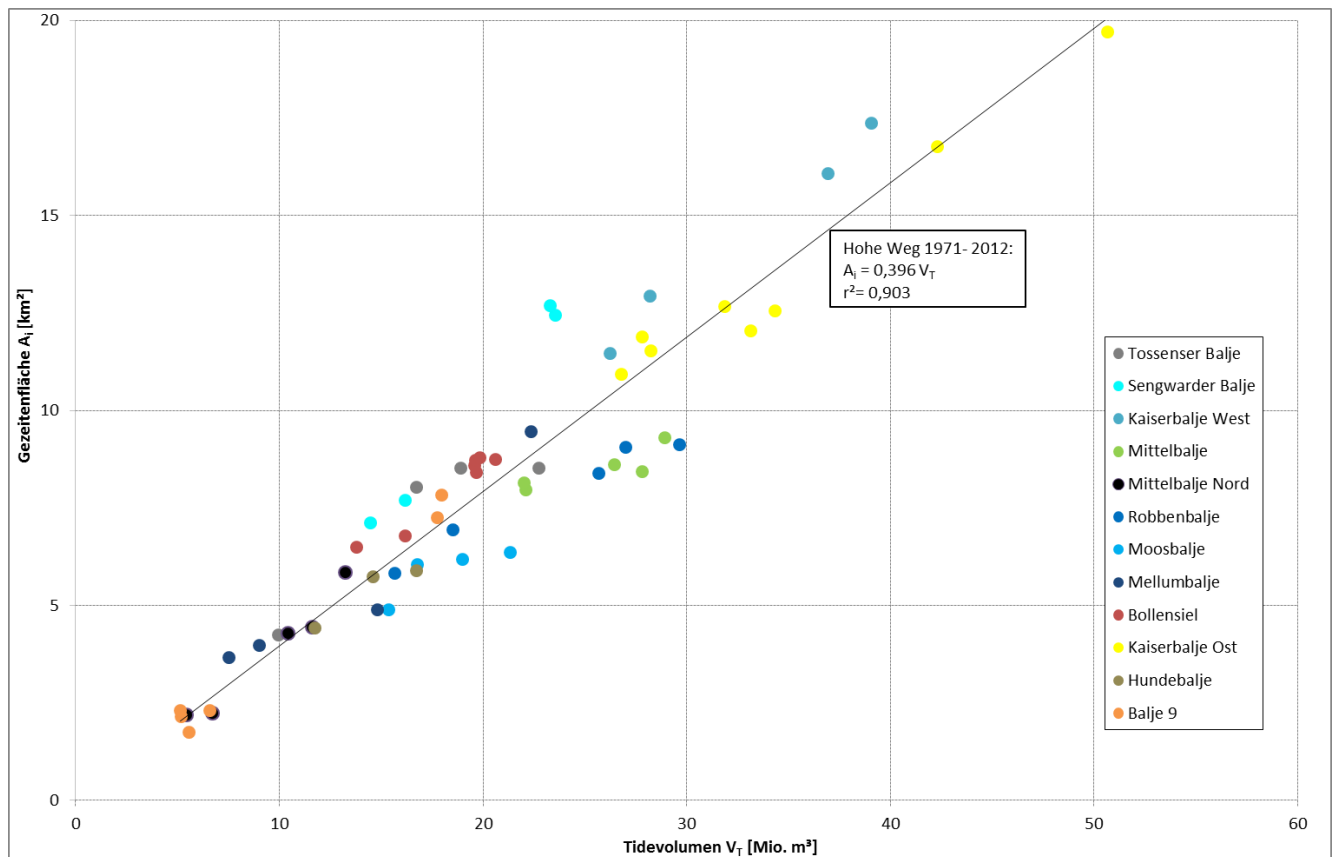


Abb. 9: Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen

4.3. Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Gezeitenfläche

Die Abhängigkeit der Größe der Gezeitenfläche A_i von der Größe des Einzugsgebietes A_b haben RENGGER (1974) und EYSINK (1991) für ihre Untersuchungsgebiete durch funktionale Zusammenhänge mit unterschiedlichen Ansätzen dargestellt. Während diese Daten allerdings erheblich um die gewählten Funktionen streuen, können NIEMEYER et al. (1995) für den Bereich der ostfriesischen Inseln einen engen Zusammenhang zwischen den beiden Parametern nachweisen, der ebenfalls durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird.

Der Zusammenhang zwischen den Parametern A_i und A_b ist in allen TEG des Hohen Weg Watts mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,989$ sehr deutlich ausgebildet (Abb. 10). Hier reagiert das System also empfindlich, so dass sich bei Änderungen der Einzugsgebietsgröße durch entsprechende Größenanpassung der Gezeitenfläche zeitnah wieder ein neues Gleichgewicht zwischen A_i und A_b einstellen kann.

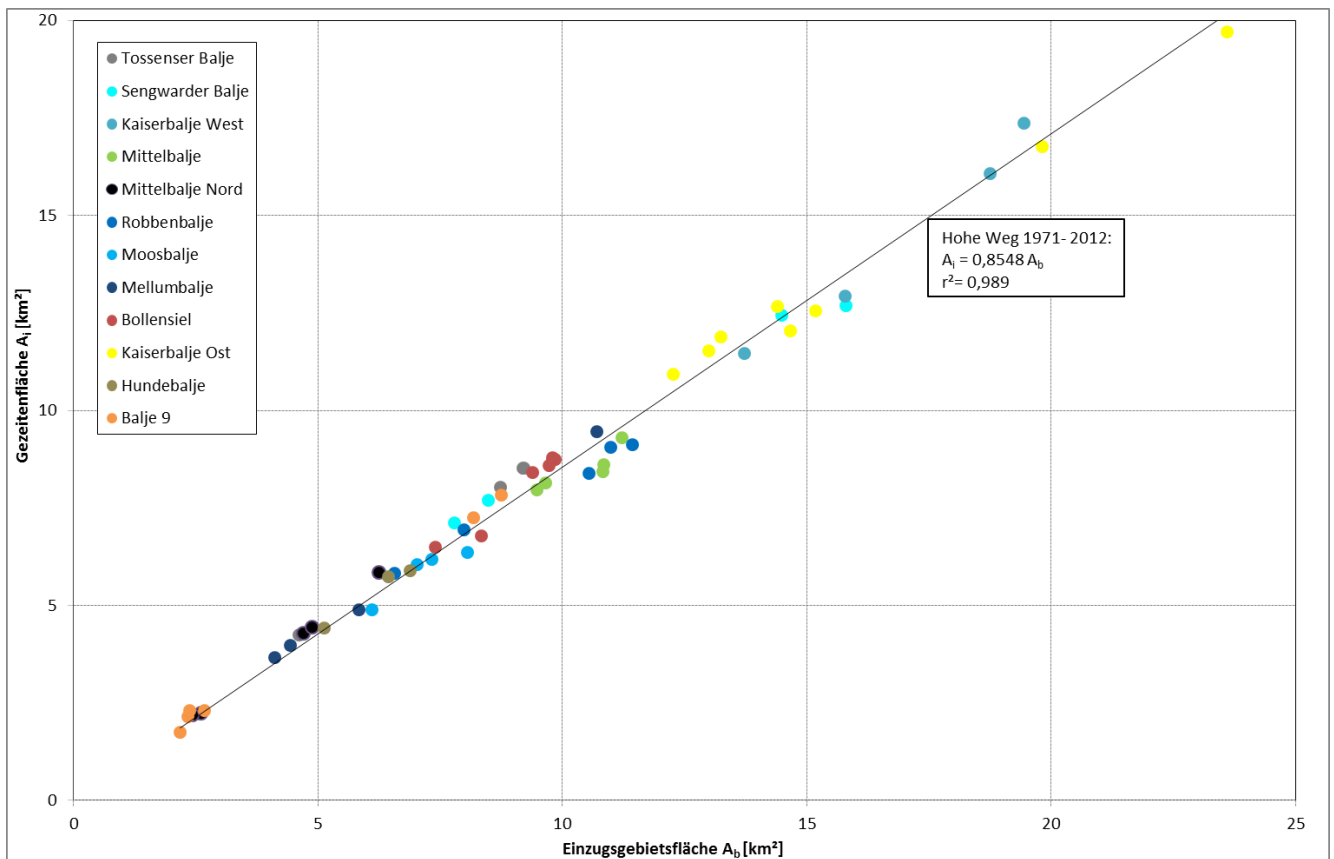


Abb. 10: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Größe des Einzugsgebietes

4.4. Funktionaler Zusammenhang von Sedimentvolumen und Tidevolumen

Das Sedimentvolumen V_i wird im Wesentlichen durch die Gezeitenfläche, den Tidenhub und somit auch durch das an diese beiden Parameter gekoppelte, mittlere Tidevolumen bestimmt (WIELANDT et al. 1987; NIEMEYER et al. 1995).

Die Abhängigkeit des Sedimentvolumens im Gezeitenbereich vom Tidevolumen ist zwar grundsätzlich erkennbar, die Werte streuen aber erheblich um die Ausgleichsgerade (Abb. 11): So erhöht sich im TEG der Sengwarder Balje bei unverändertem Tidevolumen das Sedimentvolumen um mehr als fünf Mio. m³ zwischen den Jahren 1971 und 1975, im TEG der Robbenbalje und Mittelbalje stagniert V_i trotz steigendem V_T und im Bereich der Moosbalje kommt es bei abnehmendem Tidevolumen auch zu einem Rückgang im Sedimentvolumen. Im TEG der Moosbalje wird diese Entwicklung den morphologischen Umstrukturierungen zugeordnet, die dazu geführt haben, dass die Moosbalje nach 1996 fast ihr gesamtes TEG an die Mellumbalje verloren hat (vgl. Kap. 4).

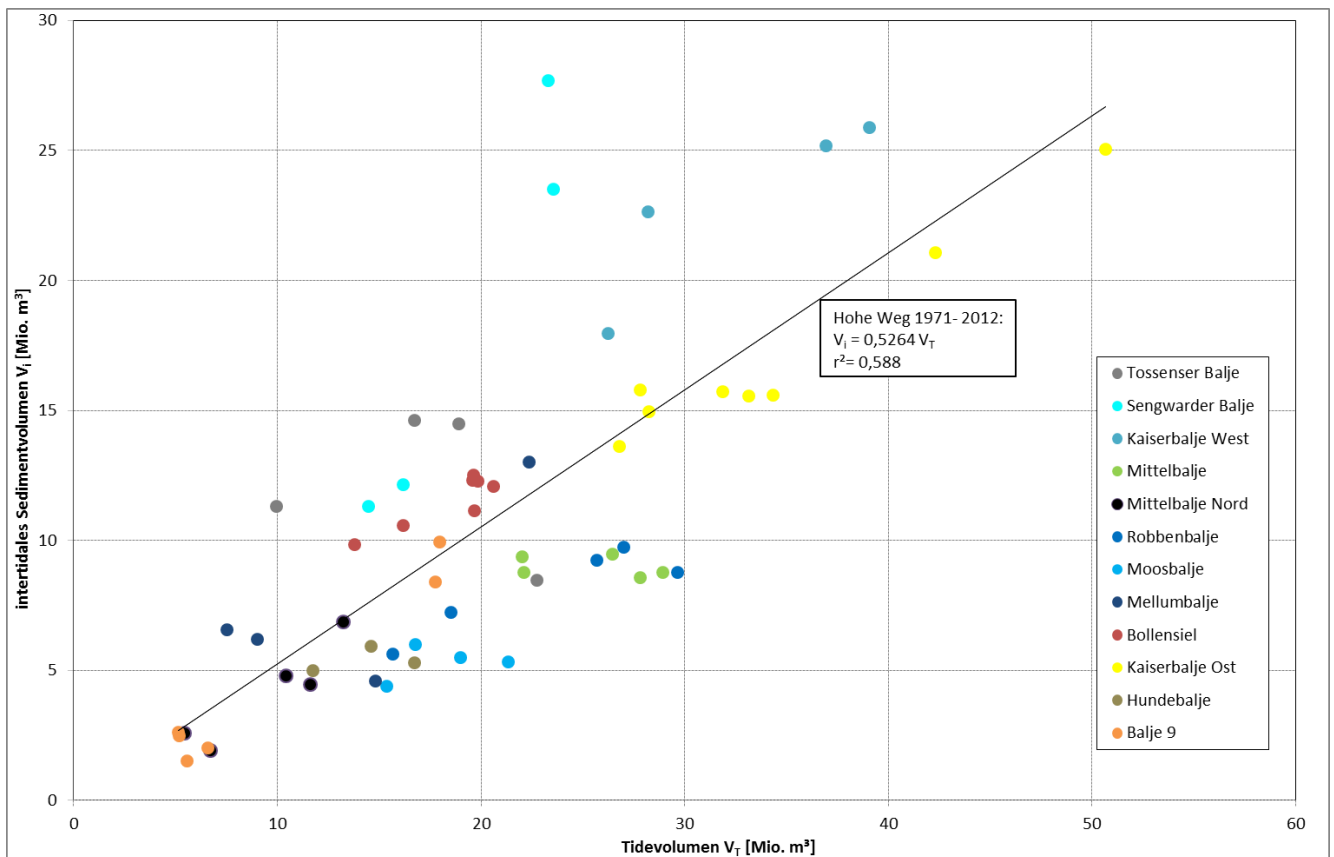


Abb. 11: Abhängigkeit des Sedimentvolumens im Gezeitenbereich vom Tidevolumen

4.5. Funktionaler Zusammenhang von Rinnenquerschnitt und Tidevolumen

Aufgrund der Erkenntnis, dass für die Ausprägung eines Seegats das Tidevolumen seines Einzugsgebietes einen maßgeblichen Einflussfaktor darstellt, entwickelte O'BRIEN (1931, 1969) empirische Formeln, die den funktionalen Zusammenhang zwischen Rinnenquerschnitt A_c und Tidevolumen V_T beschreiben. Eine Überprüfung dieses Ansatzes erfolgte durch WALTHER (1943, 1972) für die ostfriesischen, und von DIECKMANN et al. (1989) für die übrigen Seegaten der deutschen Bucht.

Dieser funktionale Zusammenhang kann zwar grundsätzlich für die TEG des Hohen Weg Watts bestätigt werden, die Messwerte streuen allerdings abermals deutlich um die Ausgleichsgerade (Abb. 12). Abweichend von NIEMEYER et al. (1995), die im Projekt WADE die Querschnittsfläche einer Rinne unterhalb von NHN ermittelt haben, wurde im Untersuchungsgebiet Hohe Weg Watt das jeweilige, über die Jahre variable $MTnw_{51}$ -Niveau als Bezugshorizont gewählt. Die unterschiedliche Wahl des Bezugshorizontes könnte ein Grund für die Streuung der Messwerte sein. Ein weiterer Grund ist die Annahme, dass die Tide zeitweise weniger gerichtet über die tiefe Rinne, als vielmehr breitgefächert über die niedrig gelegenen Wattbereiche ein- und ausströmt. Änderungen im Tidevolumen würden dann keine entsprechende Zu- oder Abnahmen des Stromarbeitsvermögens in der Rinne bedingen. Maßgeblich vom Stromarbeitsvermögen bestimmt, würde sich der Rinnenquerschnitt trotz verändertem Tidevolumen dann auch nicht wesentlich oder nur stark verzögert verändern. Schließlich ist aufgrund der unterschiedlichen Eintrittszeiten und Höhe der Wasserstände zwischen Weser und Jade auch mit einem Zufluss über die primäre Wattwasserscheide zu rechnen.

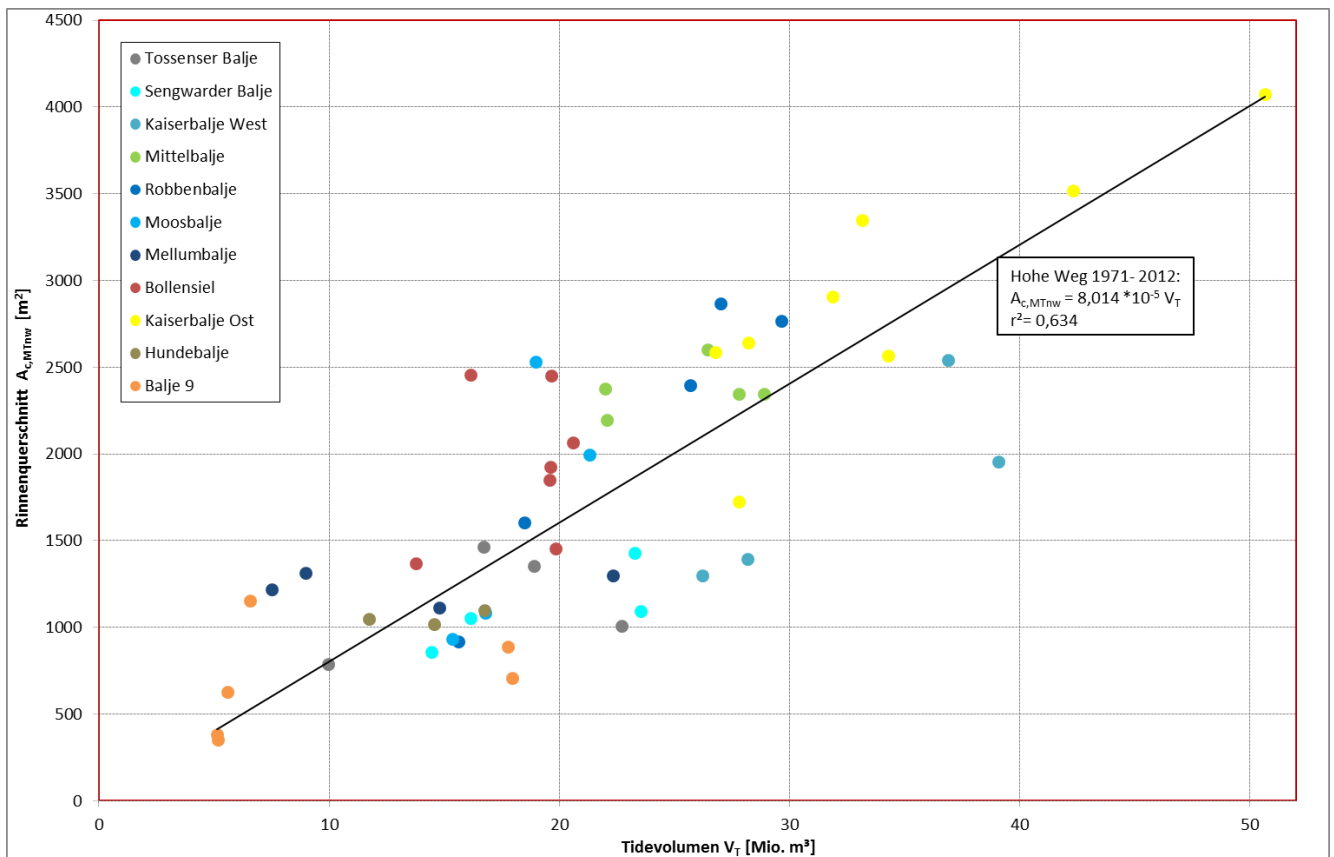


Abb. 12: Der Rinnenquerschnitt als Funktion des Tidevolumens

5. Zusammenfassung

Auf Basis von Peildaten, Laserscanaufnahmen und analogen Karten für den Zeitraum von 1971 bis 2012 wurde die morphologische Entwicklung der Wattflächen im Gebiet um den Hohen Weg analysiert. Ferner wurden Differenzenkarten generiert, um flächendeckend Erosions- und Sedimentationsgebiete zu visualisieren. In Anlehnung an die Arbeiten von NIEMEYER et al. (1995) wurden kennzeichnende morphologische und hydrologische Parameter ermittelt und morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen durchgeführt.

Erosive Tendenzen im Westen des Hohen Weg Watts bedingen nicht nur Höhenverluste auf den Wattflächen entlang der Jade, sondern auch leichte strukturelle Umgestaltungen, indem sich die Kaiserbalje West und die Mellumbalje auf Kosten anderer Rinnen ausweiten und mit ihren Rinnenausläufern in zentrale Bereiche des Hohen Weges vordringen. Dem stehen Sedimentationsprozesse im Osten des Untersuchungsgebietes gegenüber, so dass weserseitig die Ausdehnung der Rinnen rückläufig ist. In der Summe verschiebt sich aufgrund dieser gegensätzlichen Entwicklung im westlichen und östlichen Teil des Hohen Wegs die zentrale Wattwasserscheide um rund 700 m nach Osten. Zudem erfährt das Watt im Südosten einen deutlichen Flächenverlust durch die Verlagerung des Fedderwarder Priels um gut 3,5 km nach Westen.

Die Regressionsanalysen bestätigen zwar insgesamt die quantitativ-funktionalen Zusammenhänge zwischen Einzugsgebietsfläche, Rinnenquerschnitt, Gezeitenfläche, Sedimentvolumen und Tidevolumen, zeigen aber durch die teilweise starke Streuung der Messwerte um die jeweilige Ausgleichsgerade keine so ausgeprägte Abhängigkeit der Parameter voneinander, wie sie von NIEMEYER et al. (1995) für andere Bereiche des ostfriesischen Wattenmeeres festgestellt wurde. Ob der wesentlich größere Abflussrand des Gebietes durch Entwässerung sowohl zur Weser als auch zur Jade und möglicherweise auch der Wasseraustausch über die primäre Wattwasser-

scheide durch unterschiedliche Eintrittszeiten der Tidewasserstände in Jade und Weser hierfür verantwortlich sind, müssten weitere Untersuchungen zeigen.

6. Literatur

- DAVIES, J.L. (1964):** A morphogenetic approach to world shorelines. In: Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Ergänzungsband.
- EYSINK, W.D. (1991):** Morphologic response of tidal basins to changes. In: Proc. of 22nd Int. Conf. on Coast. Eng., Delft. ASCE, New York, 1948-1961.
- GERRITSEN, F. (1990):** Morphological stability of inlets and channels of the Western Wadden Sea. In: Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Rap. GWA0-90.019, Den Haag.
- GOLDENBOGEN, R., KUNZ, H., NIEMEYER, H.D. & SCHROEDER, E. (1998):** Forschungsvorhaben WADE - Abschlussbericht. BMBF-Forschungsvorhaben MTK 0508, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste, Norderney
- HAYES, M.O. (1979):** Barrier islands morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S.P. (Hrsg.): Barrier Islands. Academic Press Inc., New York.
- HOMEIER, H., STEPHAN, H.-J. & NIEMEYER, H.D. (2010):** Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. Berichte der Forschungsstelle Küste 43/2010.
- JETZES, U. & H.-J. STEPHAN (1999):** Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln - Morphologische Entwicklung des Norderneyer Seegats (Zwischenbericht). Dienstbericht 15/1999, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste, Norderney.
- KABAT, P., J. BAZELMANS, J. VAN DIJK, P.M.J. HERMAN, H. SPEELMAN, N.R.J. DEEN & R.W.A. HUTJES (Hrsg.) (2009):** Knowledge for a sustainable future of the Wadden – integrated research agenda of the Wadden Academy-KNAW. Waddenacademy, The Netherlands, 33-38.
- MEYER, C. & H.-J. STEPHAN (2000):** Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln - Morphologische Entwicklung im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats. - Dienstber. Forschungsstelle Küste 4/2000.
- MEYER, C. & H.-J. STEPHAN (2004):** Morphologische Untersuchungen zur Fahrwasserbaggerung Fedderwarder Priel. Forschungsstelle Küste 3/2004.
- NIEMEYER, H.D., R. GOLDENBOGEN, E. SCHROEDER & H. KUNZ (1995):** Untersuchung zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. Die Küste, H. 57, 65-94.
- NIEMEYER, H.-D., & R. KAISER (1995):** Variationen im lokalen Seegangsklima infolge morphologischer Änderungen im Riffbogen. Berichte Forschungsstelle Küste Norderney, 41.
- O'BRIEN, M.P. (1931):** Estuary and tidal prisms related to entrance areas. Civil Engineering, Vol. 1, No. 8.
- O'BRIEN, M.P. (1967):** Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts. Proc. 10th Conf. Coastal Eng., ASCE, Chap. 39.
- RENGER, E. (1974):** Untersuchungen von Watteinzugsgebieten. In: Mitt. d. Franzius-Inst. f. Wasserbau u. Küsteningenieurwesen d. Univ. Hannover, H. 40.
- SCHROEDER, E. (1994):** Parametrisierungen morphodynamischer Strukturen von Watteinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen. Die Küste, H. 56: 151-169
- WALTHER, F. (1934):** Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Bautechnik, H. 13.
- WALTHER, F. (1972):** Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie mit Watten und Strömungen. Jahresber. 1971 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Bd. 23.

WESTPHAL, H. (2012): Analyse morphodynamischer Gleichgewichtsparameter im Jadebusen zu den Zeitpunkten 1969, 1999, 2009. Forschungsbericht, Forschungsstelle Küste Norderney, 2012.

WIELAND, P., E. THIES & V. BERGHEIM (1987): Bilanz Hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. In: Büsumer Gewässerkundl. Ber., H. 54, ALW Heide, Dez. Gewässerkunde, Büsum.

WIENBERG, C. (2002): Korrigiert und ausgebaggert - Die Außenweser im Wandel der Zeit.