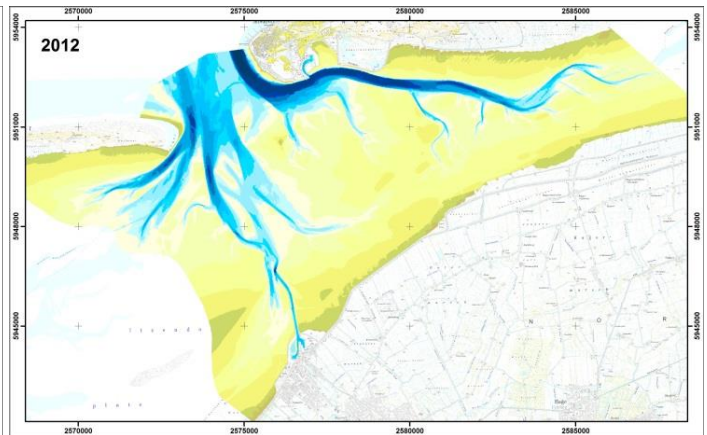
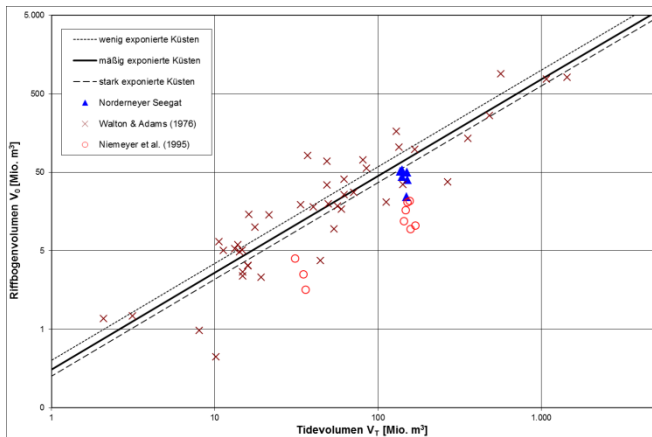




Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
- Forschungsstelle Küste -



Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich des Norderneyer Seegats und seines Einzugsgebietes



Niedersachsen

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
- Forschungsstelle Küste -
2014

Titelblatt: links: Rinnenquerschnitt als Funktion des Tidevolumens

rechts: Topographie des Tidebeckens von 2012

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

**Morphodynamische Analysen im Bereich des
Norderneyer Seegats und seines Einzugsgebietes**

Norderney, im Oktober 2014

Geschäftsbereichsleiter
Forschungsstelle Küste



Dr.-Ing. Andreas Wurpts

stellv. Aufgabenbereichsleiter
Morphologie des Küstengebietes



Dr. Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich des Norderneyer Seegats und seines Einzugsgebietes

Cornelius Meyer

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Das Untersuchungsgebiet	1
3 Datengrundlage und -aufbereitung	3
4 Norderneyer Seegat	4
4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens	4
4.2 Sedimentvolumen im Riffbogen.....	7
4.3 Funktionaler Zusammenhang zwischen Riffbogenvolumen und Tidevolumen	9
5 Tidebecken des Norderneyer Seegats	10
5.1 Morphologische Entwicklung	10
5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens.....	14
5.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen	16
5.3.1 Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Tidevolumen	16
5.3.2 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen	17
5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche	18
5.3.4 Funktionaler Zusammenhang von Tidevolumen und Rinnenquerschnitt	19
6 Zusammenfassung	20
7 Literaturverzeichnis	22

1 Einleitung und Zielsetzung

Entlang der südlichen Nordseeküste liegen zwischen Ems und Jade wenige Kilometer vor der Festlandküste die Ostfriesischen Inseln. Die als Seegaten bezeichneten Öffnungen zwischen den Inseln be- und entwässern die inselgeschützten Wattflächen. Seewärts der Seegaten bildet sich jeweils ein Ebbdelta, das wegen seiner gekrümmten Form im ostfriesischen Sprachgebrauch als Riffbogen bezeichnet wird.

Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und der Küste mittels eines umfangreichen Seegangsmessprogramms belegen die Schutzwirkung des Riffbogens für die Inselstrände (NIEMEYER 1979). Der von See her einlaufende Seegang trifft seewärts des Norderneyer Seegats und des Nordweststrandes von Norderney auf den Riffbogen, wo mit abnehmender Wassertiefe die Wellen brechen. NIEMEYER (1979: 63) beurteilt diese Schutzfunktion wie folgt: "Die Abnahme der Wellenhöhe im Bereich des Seegats ist von erheblicher Bedeutung für die Seegangsverhältnisse auf den Watten und die Wellenbelastung der Seedeiche in den leeseitigen Bereichen der Inseln und der Festlandsküste. Im Hinblick hierauf haben die Riffbögen der ostfriesischen Seegaten nicht nur eine wesentliche Schutzfunktion für die westlichen und südlichen Bereiche der Inseln, sondern gleichzeitig auch für die Festlandsküste."

Auf Grundlage von Vermessungsdaten aus dem Zeitraum 1992 bis 2008 für den Riffbogenbereich und den Jahren 1950 bis 2012 für das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats werden morphologische Veränderungen im Norderneyer Riffbogen sowohl qualitativ als auch quantitativ dargestellt.

2 Das Untersuchungsgebiet

Als eine der sieben ostfriesischen Inseln ist Norderney von der Insel Juist im Westen durch das Norderneyer Seegat und von Baltrum im Osten durch die Wichter Ee getrennt. Bei einer Länge von etwa 14 km und einer Breite von bis zu 2,5 km besitzt die Insel eine Gesamtfläche von etwa 25,3 km².

Der am Ostende Juists liegende Riffbogenbereich wird als Osterriff bezeichnet und durch das Spaniergat von der nordöstlich angrenzenden Robbenplate getrennt. Im Scheitelbereich des Riffbogens liegen die Nordwestgründe, die durch den Schluchter im Südwesten und durch das Dometief im Osten begrenzt werden. Östlich des Dometiefs schließen sich die Nordergründe an. Die tiefe Rinne vor dem Westkopf von Norderney wird als Norderneyer Seegat bezeichnet und geht südlich von Norderney in das Riffgat über. Hier trennt es das wenig strukturierte Norderneyer Inselwatt von den Wattflächen des Hohen Riffs, der Lütetsburger und Hilgenrieder Plate. Im Nordwesten schließt sich an das Hohe Riff die Steinplate an, die wiederum in die Hohe Plate übergeht (Abb. 1).

Das Busetief setzt sich nach Süden hin in die Westerriede fort und stellte lange Zeit die zentrale Rinne dar, die das westliche vom östlichen Wateinzugsgebiet trennte. Seit einigen Jahren hat sich aber die Osterriede, die ursprünglich ebenfalls in das Busetief mündete, als nahezu gleichberechtigte Rinne ausgebildet. Das westliche Einzugsgebiet wird durch die hoch gelegenen Wattflächen der Itzendorfplate bestimmt, an die sich nach Norden hin die Branderplate anschließt. Vom Juister Inselwatt ist die Branderplate durch die das Kalfamergat und Kalfamerriede abgegrenzt (Abb. 1).

Der Festlandsküste vorgelagert findet sich westlich und östlicher der Zufahrt zum Norddeicher Hafen das Norder Watt, an das sich nach Westen hin ohne klare Abgrenzung zunächst das Ostermarscher Watt – in Abbildung 1 durch die Übersichtskarte verdeckt –, das Hilgenrieder und

das Neßmer Watt anschließt. Östlich der Hafenzufahrt liegt zwischen Busetief und Osterriede die Jantjemoeplate.

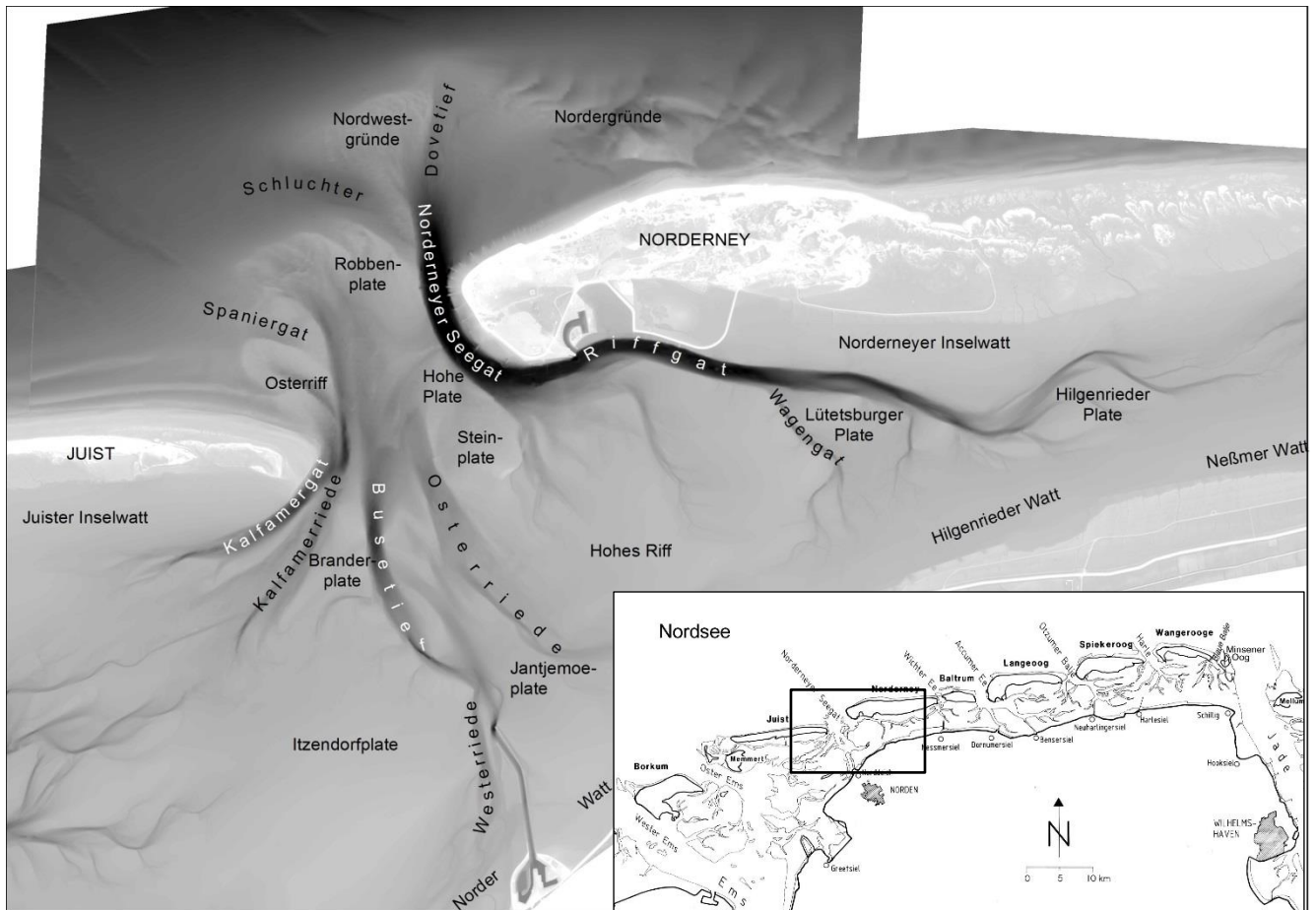


Abb. 1: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

Die Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht werden von den aus der nördlichen Nordsee und dem Ärmelkanal einschwingenden Tidewellen bestimmt, die unter dem Einfluss der Corioliskraft linksdrehend um die amphidromischen Punkte rotieren. Aus der Überlagerung beider Tidewellen resultiert an der ostfriesischen Küste eine ostwärts gerichtete Gezeitenwelle. Bei Norderney erreicht diese einen im mesotidalen Bereich liegenden Tidenhub von 2,4 m. Bei der Füllung und Entleerung des Wattenmeeres über das Seegat wird ein erhebliches Wasservolumen transportiert, welches zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten führt. Die mittlere Stromgeschwindigkeit beträgt im Norderneyer Seegat etwa 0,7 m/s, wobei Spitzenwerte von 1,5 m/s (Flutstrom) und 2,0 m/s (Ebbstrom) auftreten können (KOCH & NIEMEYER 1980).

Transport- und Sedimentationsvorgänge sind im Bereich der Inseln im Wesentlichen durch energiereichen Seegang und Brandungsströmung bestimmt (NIEMEYER 1992). Dabei erzeugen Winde aus westlicher bis nordnordöstlicher Richtung besonders hohen Seegang, da hier die längsten Windwirkungswege und verhältnismäßig große Wassertiefen vorhanden sind (NIEMEYER 1979). Im Jahresmittel erreichen die Wellen eine Höhe von 0,7 - 1,0 m (NIEMEYER 1992).

Neben den Tide- und Windverhältnissen wird das Strömungsmuster auch von der Morphologie des Seegats geprägt. Der Ebbeabfluss auf den periodisch trocken fallenden Wattflächen wird vor allem durch das Gefälle des Wattbodens bestimmt. Das Watteinzugsgebiet eines Seegats wird durch die Wattwasserscheiden begrenzt, die zwischen Insel und Festland dem Verlauf der höchsten Geländeerhebung folgen und somit bei Ebbe zuerst trocken fallen (LÜDERS & LUCK 1976). Allerdings können diese topographischen Wattwasserscheiden durch windinduzierte Strömungen überschritten werden, so dass diese nicht mit den Grenzen des tatsächlichen Wasserabflusses identisch sind. Sie werden als hydrologische Wattwasserscheiden bezeichnet.

3 Datengrundlage und -aufbereitung

Den morphologischen Analysen liegen Peildaten aus den Jahren 1950 bis 2008 zugrunde, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und der Forschungsstelle Küste (FSK) durchgeführt wurden. Darüber hinaus erfolgte in den Jahren 2010 – im Rahmen der topographischen Erfassung des gesamten Emsästuars - und 2012 eine Laserscanbefliegung des Einzugsgebietes des Norderneyer Seegats. Da durch die Laserscanabtastung nur trockengefallene Flächen höhenmäßig aufgenommen werden können, wurde das Rinnensystem zeitnah gepeilt.

In der Topographischen Wattkarte aus dem Jahr 1966 sind die Vermessungsergebnisse der Forschungsstelle Küste aus den Jahren 1959 bis 1966 zu einer morphologisch homogenen Darstellung der Topographie zusammengeführt. In diesem Kartenwerk 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 1:25000 abgebildet. Ansonsten liegen die Messdaten als digitale Punktdaten vor und beziehen sich auf Normalnull (NN).

Aus den Vermessungsdaten wurde mit der ArcMap-Erweiterung 3D-Analyst durch unregelmäßige Dreiecksvermaschung (TIN = Triangulated Irregular Network) ein digitales Geländemodell erstellt. Dabei werden jeweils drei benachbarte Punktdaten zu Dreiecken verbunden, so dass eine flächenhafte Darstellung in Form von planaren Dreiecken entsteht. 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. Die gleichmäßige Flächenrasterung der Geländemodelle ermöglicht einerseits eine einheitliche Darstellung von Tiefenplänen und andererseits die flächenhafte Berechnungen von Höhenunterschieden als Differenzenpläne verschiedener Messepochen.

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 Vorranschreiten 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 FSK- und 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.

4 Norderneyer Seegat

4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens

Die Analyse der morphologischen Entwicklung im Bereich des Riffbogens beschränkt sich auf den Zeitraum von 1992 bis 2008; Beschreibungen der Veränderungen vor 1992 finden sich bei MEYER & STEPHAN (2000).

Im Jahr 1992 zeigt das Osterriff eine relativ kompakte Struktur und ragt stellenweise bis über NN -1,5 m auf. Die Robbenplate erstreckt sich im Vergleich zu nachfolgenden Jahren weit nach Südosten bis zu einem Punkt, an dem sonst das Busetief in das Norderneyer Seegat entwässert. Ausläufer des Busetiefs und des Kalfamergats stoßen in Form von drei parallelen Rinnen zwischen Osterriff und Robbenplate weit nach Norden vor, wobei die mittlere den Riffbogen mit Tiefen von mehr als NN -3,5 m fast ganz durchdringt (Abb. 2). Der Schluchter erreicht über weite Strecken Tiefen von mehr als NN -7 m, flacht dann aber im Übergangsbereich von der Robbenplate zu den Nordwestgründen auf NN -4 m ab. Das Norderneyer Seegat entwässert breit gefächert und dehnt sich nach Nordwesten bis in die Nordwestgründe aus, die deshalb deutlich zergliedert sind und nur geringe Höhen aufweisen. Nach Osten hin schließen sich die Nordwestgründe fast nahtlos an die Nordergründe an, so dass sich das Dövetief nur undeutlich abzeichnet.

Der Einmündungsbereich vom Busetief in das Norderneyer Seegat verlagert sich bis 1995 weit nach Norden, so dass sich entsprechend auch die Hohe Plate ausdehnen kann. Damit verliert die Robbenplate erheblich an Ausdehnung. Das Kalfamergat verläuft fast geradlinig nach Norden und trennt als einzige Rinne das Osterriff von der Robbenplate. Das Spaniergat tritt, genauso wie bereits 1992, morphologisch nicht in Erscheinung. Das Busetief entwässert nun wieder fast vollständig über das Norderneyer Seegat; Ausläufer in den Platenbereich von Robbenplate sind nicht mehr erkennbar (Abb. 2). Mit der Verlagerung des nordwestlichen Ausläufers des Norderneyer Seegats nach Norden können sich im Bereich der Nordwestgründe wieder verstärkt Sedimente akkumulieren. Auch die Platen im Bereich der Nordergründe gewinnen an Volumen und verlagern sich deutlich nach Osten.

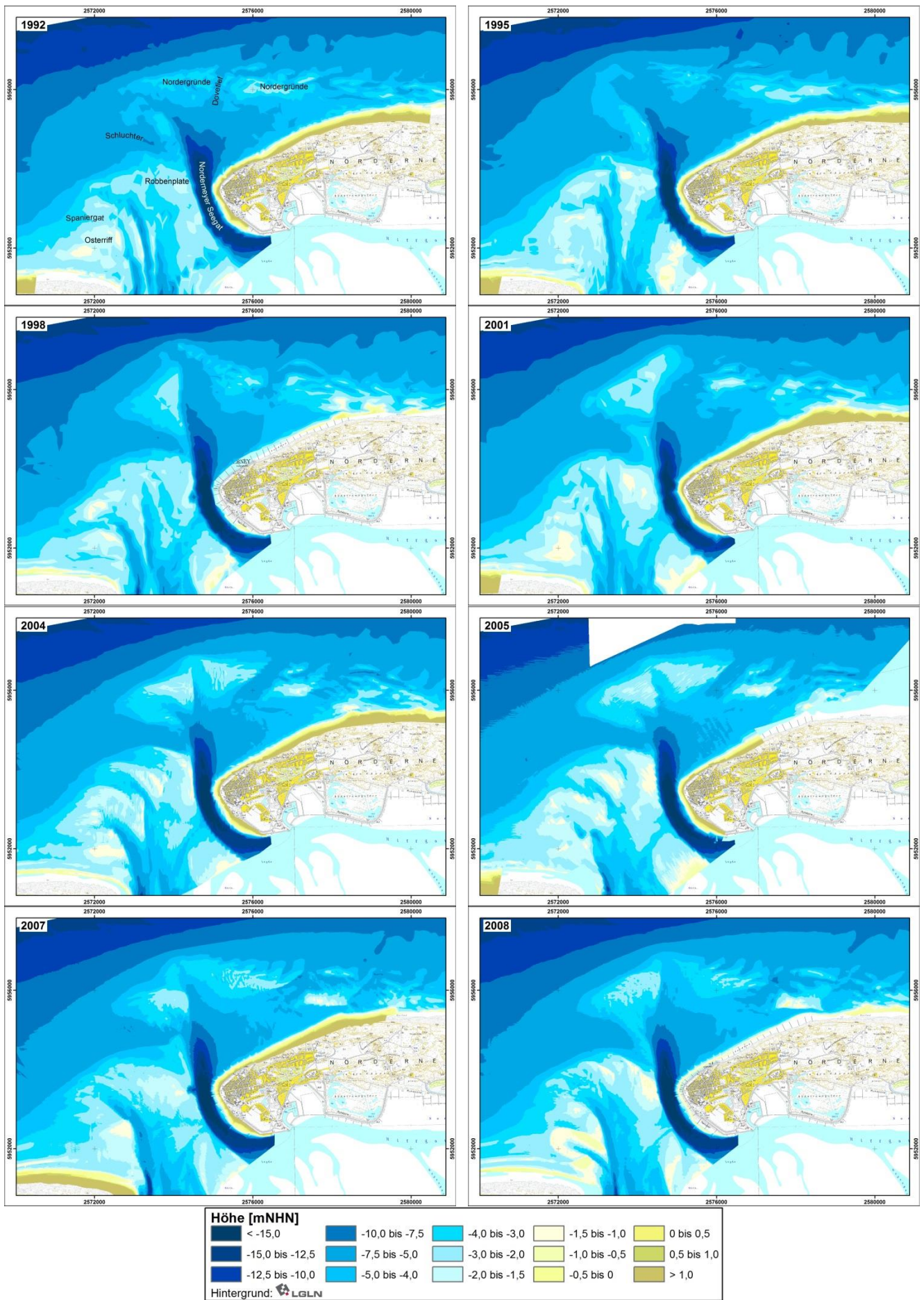


Abb. 2: Morphologische Ausprägung des Norderneyer Riffbogens in den Jahren 1992 bis 2008

Erneut stoßen im Zustand von 1998 Ausläufer von Kalfamergat und Busetief weit in das Osterriff und die Robbenplate vor und zergliedern diesen großräumigen Platenbereich deutlich (Abb. 2). Das Kalfamergat, das an Tiefe gewonnen hat, schwenkt im Bereich des Osterriffs rechtwinklig nach Westen um und schließt sich hier mit dem Spaniergat zu einer fast durchgängig erkennbaren Rinne zusammen. Das Norderneyer Seegat verläuft nun vor dem Westkopf von Norderney aus nahezu geradlinig nach Norden. Entsprechend werden auch die Platen auf ihrem Weg durch den Riffbogen weit nach Norden abgelenkt. Auf den Nordwestgründen lagern sich erhebliche Sandmassen ab und führen hier zu einer Höhenzunahme im Meterbereich (Abb. 24). Im Bereich der Nordergründe kommt es zur Platananlandung.

Im Jahr 2001 hat sich die gemeinsame Rinne von Kalfamergat und Spaniergat nach Norden verlagert, ist aber weniger deutlich ausgebildet als noch im Jahr 1998. Das Norderneyer Seegat verschwenkt weiter im Uhrzeigersinn, erstreckt sich aber nicht mehr so weit nach Norden. In dem Maße, wie sich der nördliche Ausläufer des Norderneyer Seegats nach Osten verlagert, können sich auch die Nordwestgründe ausdehnen (Abb. 2).

Die Verbindung des Spaniergats zum Kalfamergat ist 2004 mit Tiefen unterhalb von NN -3,5 m durchgängig vorhanden. Die Entwässerung des Kalfamergats konzentriert sich aber zunehmend auf den westlichen Arm, der tief in das Osterriff vordringt. Die Nordwestgründe zeigen immer stärker die Tendenz, wieder in kleinere Plateneinheiten zu zerfallen (Abb. 2).

In der Topographie aus dem Jahr 2005 treten im Übergangsbereich von Osterriff zur Robbenplate zwei größere Rinnenausläufer von Kalfamergat und Busetief auf (Abb. 2). Die westliche Rinne, die 2004 noch durchgängig ausgebildet ist, verliert an Tiefe. Der Platenkomplex, der zwischen den beiden Rinnen liegt, ist morphologisch wohl schon der Robbenplate zuzuordnen. In dem Maße, wie sich dieser Platenkomplex nach Nordosten verlagert, wird sich nicht nur die östliche Rinne schließen, sondern sich auch die Robbenplate zu einem großen Platenkomplex ausdehnen, der dann, wie die Vermessung aus dem Jahr 2005 zeigt, in zentralen Bereichen deutlich über NN -1 m aufragen dürfte (Abb. 2). Die Nordwestgründe haben sich nicht, wie auf Grundlage der beiden vorangegangenen Vermessungen zunächst vermutet, in einzelne Platen zerlegt, sondern zeigen wieder eine zusammenhängende Struktur.

Deutliche morphologische Veränderungen erfährt der Riffbogen zwischen den Jahren 2005 und 2007: Das Kalfamergat dehnt sich weit nach Nordwesten aus und durchdringt fast den Riffbogen mit Tiefen von über NN -5 m. Gleichzeitig vertieft es sich erheblich und erreicht vor der Ostspitze von Juist Werte von mehr als NN -12 m (Abb. 2). Eine solche Entwicklung setzt ein erhöhtes Stromarbeitsvermögen des Kalfamergats voraus und weist darauf hin, dass sich das zugehörige Teileinzugsgebiet vergrößert haben dürfte und damit auch die Wassermenge, die mit der Tide über das Kalfamergat ein- und ausströmt. Die im Jahr 2005 noch durch eine Rinne zergliederte Robbenplate weist wieder eine kompakte Struktur auf. Allerdings ist die Robbenplate nicht weiter aufgewachsen, wie aufgrund der Topographie aus dem Jahre 2005 zu vermuten gewesen wäre. Vielmehr kommt es hier, wie in weiten Bereichen des Norderneyer Riffbogens, aber auch in dem sich seewärts anschließenden und topographisch erfassten Küstenvorfeld, zu teilweise erheblichen Höhenabnahmen (Abb. 2). Das Dovetief tritt morphologisch wieder als Rinne in Erscheinung, verläuft in gestreckter Form nach Norden und teilt damit die Nordwestgründe in einzelne Platen. Die buchtenartige Einkerbung an der Ostseite der Robbenplate ist bedingt durch die Sandentnahme für die Strandaufspülung auf Norderney.

Zwischen den Jahren 2007 und 2008 sind die morphologischen Veränderungen weniger stark ausgeprägt: Auffällig sind die Höhenzunahmen im Bereich Osterriff, Robbenplate und Hohe Plate (Abb. 32). Das Kalfamergat verliert an Tiefe und dehnt sich auch nicht mehr so weit nach

Norden aus. Seewärts des Riffbogens sind keine gravierenden Höhenveränderungen feststellbar (Abb. 2).

Zusammengefasst sind die Vorgänge im Riffbogen während des Untersuchungszeitraums wie folgt zu beschreiben: Der östliche Bereich des Osterriffs und die Robbenplate werden wiederholt von Rinnenausläufern des Kalfamergats und Busetiefs zergliedert. Zwischenzeitlich bilden sich aber große Platen, die dann in weiten Bereichen bis über NN –2 m aufragen. Die Lage des Schluchters ändert sich im Untersuchungszeitraum nicht, die Lage des nördlichen Ausläufers des Norderneyer Seegats variiert hingegen deutlich. So erfolgt die Entwässerung mit wechselnder Intensität über den Schluchter, das Dometief oder breit gefächert im Bereich der Nordwestgründe, der dabei starken morphologischen Veränderungen unterliegt.

MEYER & STEPHAN (2000) haben auf der Grundlage von Vermessungsdaten aus den Jahren 1932 bis 1998 die morphologische Entwicklung im Norderneyer Seegat und seinem Einzugsgebiet untersucht und Prognosen der weiteren großräumigen Entwicklung formuliert: Die Annahme, dass sich insbesondere das Kalfamergat weiter nach Norden ausdehnen und zunehmend den NNW verlaufenden Strukturen des Spaniergats folgen wird, kann durch die aktuellen Untersuchungen bestätigt werden. MEYER & STEPHAN (2000) stellen fest, dass die Entwässerung des Busetiefs zeitweise zum Norderneyer Seegat, zeitweise aber auch verstärkt nach Nordwesten über den Riffbogen erfolgt. Dieser wiederholt auftretende Wechsel der vorherrschenden Entwässerungsrichtung des Busetiefs setzt sich aktuell fort. Die Vermutung von MEYER & STEPHAN (2000), Busetief und Kalfamergat würden gemeinsam in die Strukturen des Spaniergats einmünden, scheint sich durch die morphologische Entwicklung der letzten Jahre zu bestätigen. Keine Bestätigung hingegen findet die Annahme, der Riffbogen würde mehr und mehr seine kompakte Form verlieren und im Scheitelsbereich an Höhe verlieren. Auch scheint sich der Anlandungsbereich der Platen vor Norderney nicht weiter nach Osten zu verlagern, wie von MEYER & STEPHAN (2000) prognostiziert.

4.2 Sedimentvolumen im Riffbogen

Einem methodischen Ansatz von WALTOM & ADAMS (1976) folgend wurde das Sedimentvolumen im Riffbogen als Differenz zwischen der realen und einer idealisierten Topographie V_0 ohne Seegat ermittelt (Abb. 3). Entlang der Küstenlinie ist die Abgrenzung des Untersuchungsraumes dabei so zu wählen, dass der Einfluss des Norderneyer Seegats nicht mehr erkennbar ist. Diese Bedingung ist westlich der Platenablösungszone einerseits, und östlich der Platenanlandungszone andererseits in einer Entfernung von jeweils rund sechs Kilometern vom Stromstrich der tiefen Rinne erfüllt. Seewärts sollte sich der Referenzraum soweit erstrecken, dass der Verlauf der tatsächlichen und fiktiven Tiefenlinien übereinstimmen. Diese Voraussetzung wird entlang der NN-10m-Linie erfüllt. Die tangentielle Verlängerung der MThw-Linien zwischen Juist und Norderney über das Norderneyer Seegat hinweg stellt die Begrenzung zum Tidebecken dar. Auf Grundlage der fiktiven Tiefenlinien wurde ein DGM erstellt, welches die Basistopographie für die Berechnung des Riffbogenvolumens V_0 bildet (Abb. 4).

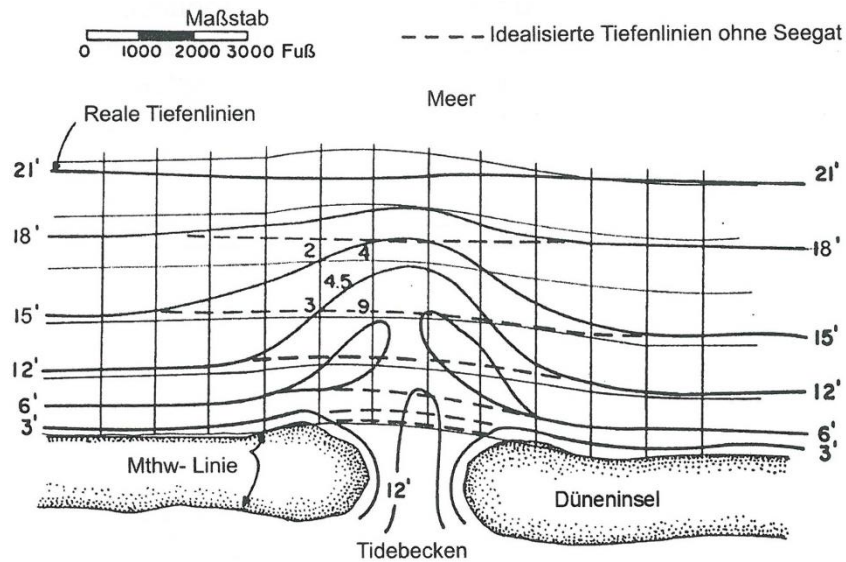


Abb. 3: Definition des Ebbdeltavolumens V_0 nach WALTON & ADAMS (1976)

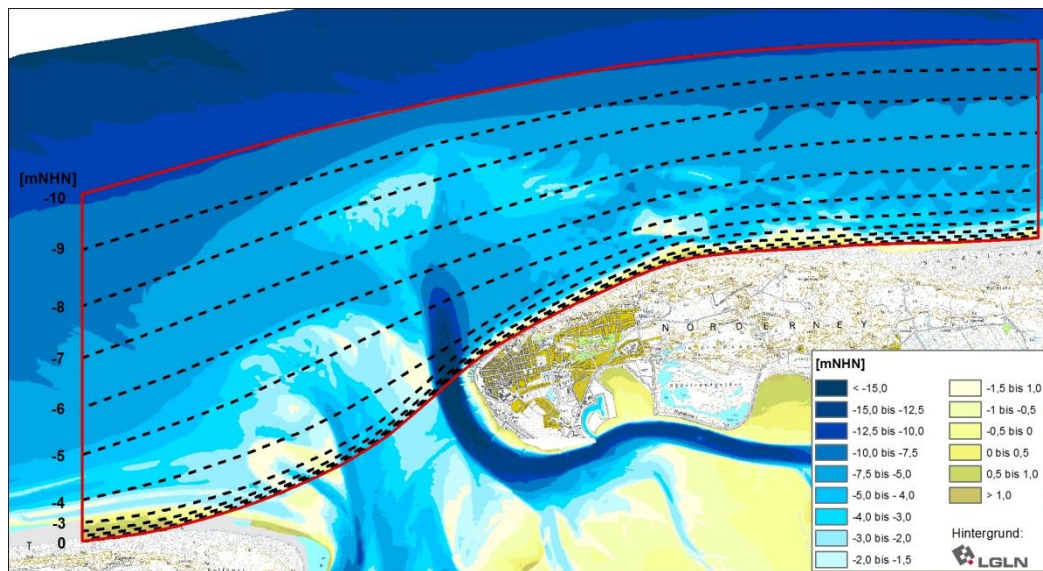


Abb. 4: Riffbogen des Norderneyer Seegats mit idealisierten Tiefenlinien einer fiktiven Topographie ohne Seegat

Zur quantitativen Beurteilung des Sedimenthaushaltes im Riffbogen wurden Volumenberechnungen nach dem Ansatz von WALTON & ADAMS (1976) durchgeführt und mit dem Sedimentvolumen oberhalb definierter Tiefenhorizonte verglichen (Abb. 5). Die zeitliche Entwicklung des fiktiven Riffbogenvolumens nach WALTON & ADAMS zeigt ähnliche Entwicklungsphasen wie das Volumen oberhalb der Tiefenstufen NN-6m und NN-5m: Zwischen den Jahren 1936 und 1995 ist – von kurzen positiven Phasen abgesehen – ein rückläufiges Volumen charakteristisch, dass sich ab 1975 verstärkt und insbesondere zwischen den Jahren 1990 und 1995 sehr ausgeprägt ist. Insgesamt verliert der Riffbogen in dieser Zeit knapp ein Viertel seines Sedimentvolumens oberhalb dieser beiden Tiefenstufen. Bezogen auf das Ebbdeltavolumen V_0 von WALTON & ADAMS (1976) ist der rechnerische Verlust sogar mehr als doppelt so hoch, denn bei einem Ausgangsvolumen von rund 60 Mio. m^3 Sediment im Jahr 1936 ist bis 1995 ein Rückgang um gut 56 % auf 24 Mio. m^3 festzustellen. Nach 1995 werden zwar wieder erhebliche Sedimentmassen in den Riffbogen eingetragen; diese vermögen aber die Verluste der vorangegangenen Jahre nicht zu kompensieren. Zudem ist das Sedimentvolumen nach 2004 zumindest oberhalb der dieser beiden Tiefenstufen erneut rückläufig, so dass während des gesamten Zeitraumes von 1936 bis 2008 ein Volumenverlust von rund 10 % ergibt.

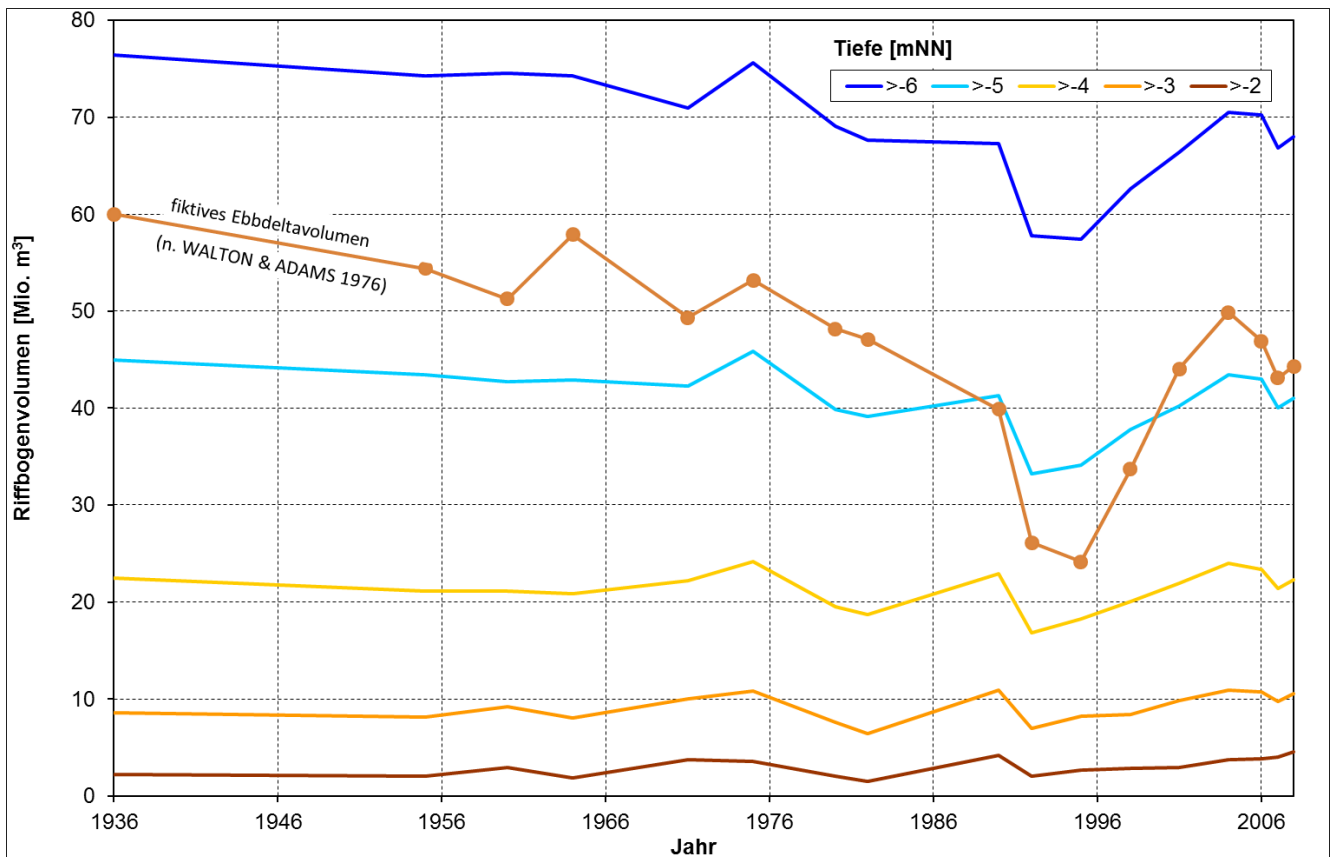


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des Riffbogenvolumens oberhalb definierter Tiefenhorizonte und bezogen auf eine fiktive Riffbogentopographie ohne Seegat nach WALTON & ADAMS (1976)

Keine oder nur eine geringe Übereinstimmung in der zeitlichen Entwicklung ist festzustellen, wenn V_0 mit dem Sedimentvolumen oberhalb der Tiefenstufen NN-4 m bis NN-2 m verglichen wird (Abb. 5): Über den gesamten Zeitraum betrachtet ist – von kurzfristigen Schwankungen abgesehen – die Entwicklung des Riffbogenvolumens entweder ausgeglichen, bis 1995 tendenziell negativ ($> \text{NN-4 m}$), oder aber leicht ($> \text{NN-3 m}$) bzw. deutlich positiv ($> \text{NN-2 m}$).

4.3 Funktionaler Zusammenhang zwischen Riffbogenvolumen und Tidevolumen

Nach WALTON & ADAMS (1976) besteht in Abhängigkeit von der Exponiertheit gegenüber dem Seegang ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Riffbogenvolumen V_0 und dem Tidevolumen V_T im Einzugsgebiet des zugehörigen Seegats, der durch folgende Korrelationsgleichung wiedergegeben wird:

$$V_0 = a \cdot V_T^{1,23}$$

mit $a = \begin{cases} 0,00533 \\ 0,00644 \\ 0,00846 \end{cases}$ für $\begin{cases} \text{stark exponierte} \\ \text{mäßig exponierte} \\ \text{wenig exponierte} \end{cases}$ Küstenabschnitte

Nach gleicher Methodik durchgeführte Berechnungen für einige Riffbögen der ostfriesischen Seegaten im Rahmen des WADE-Projekts lassen NIEMEYER et al. (1995) schlussfolgern, dass die Ansätze von WALTON & ADAMS (1976) wohl grundsätzlich qualitativ zutreffen, quantitativ hingegen nicht übertragbar seien. Auch weisen NIEMEYER et al. darauf hin, dass eine Differenzierung nach der Exponiertheit weder für die Originaldaten noch für west- oder ostfriesische Riffbögen plausibel seien.

Da die Topographie des Riffbogens und Tidebeckens des Norderneyer Seegats nicht immer zeitgleich oder vollständig erfasst wurde, stehen für die Überprüfung des funktionalen Zusammenhangs zwischen V_0 und V_T nur insgesamt sechs Datensätze zur Verfügung, wobei dem Riffbo-

genvolumen von 1995 das Tidevolumen von 1994 gegenüber gestellt wurde (Abb. 6). Zum einen wird deutlich, dass die Werte für das Norderneyer Seegat stets unterhalb der von WALTON & ADAMS (1976) bestimmten Ausgleichsgeraden liegen, zum anderen weist die tendenzielle Anordnung der Werte übereinander darauf hin, dass für eine quantitative Übertragbarkeit des Verfahrens auf die ostfriesischen Seegaten weitere Parameter Berücksichtigung finden müssen, wie von NIEMEYER et al. (1995) vermutet.

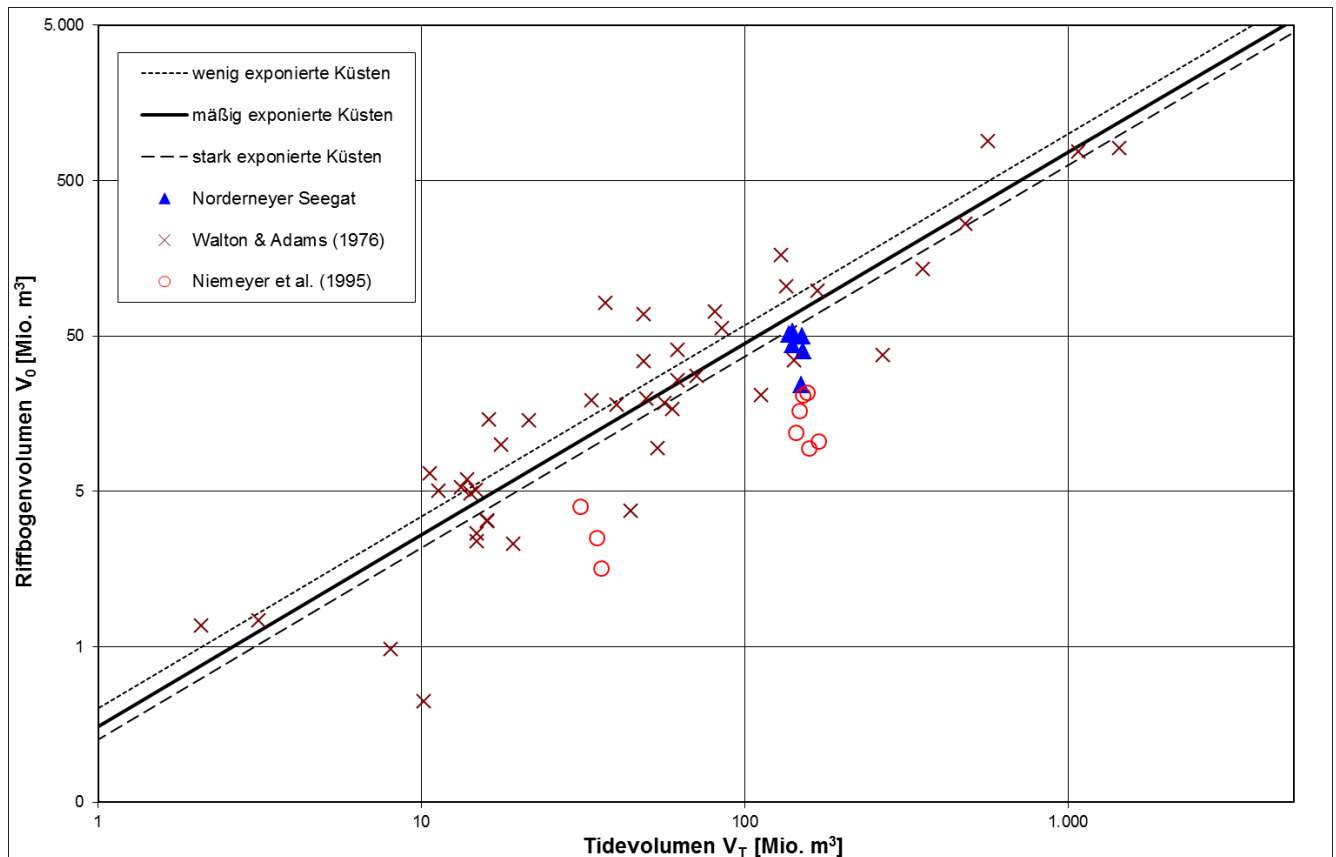


Abb. 6: Riffbogenvolumen V_0 als Funktion des Tidevolumens V_T

Weniger wahrscheinlich ist, dass das Riffbogenvolumen sehr empfindlich auf Änderungen des Tidevolumens reagiert und deshalb geringe Schwankungen von V_0 bereits erhebliche Volumenänderungen im Riffbogen bedingen. Somit können keine belastbaren Aussagen bezüglich zukünftiger Entwicklungstendenzen oder bezüglich dem Erreichen eines morphologischen Gleichgewichtszustandes aus dem von WALTON & ADAMS (1976) postulierten funktionalen Abhängigkeiten zwischen Tide- und Riffbogenvolumen abgeleitet werden.

5 Tidebecken des Norderneyer Seegats

5.1 Morphologische Entwicklung

Die Darstellung der morphologischen Veränderungen im Watteinzugsgebiet des Norderneyer Seegats beschränken sich auf das Gebiet westlich des Hohen Riffs, da hier teilweise erhebliche Umgestaltungen festzustellen sind. Dem gegenüber weist sich der im Schutz der Insel Norderney gelegene Wattbereich – hierzu gehören weite Teile des Hohen Riffs, das Norderneyer Inselwatt, die Lütetsburger und Hilgenrieder Plate sowie das Ostermarscher wie auch das Hilgenrieder Watt – durch hohe Stabilität aus.

Das Busetief zeigt im Zustand von 1950 einen deutlich bogenförmigen Verlauf und weist zwischen der Einmündung der Osterriede bis Höhe der Hohen Plate durchgängig Tiefen von mindestens NN-8 m auf, wobei Maximalwerte von NN-13 m erreicht werden. Auf Höhe des Norderneyer Hafens mündet das Busetief direkt in das Norderneyer Seegat.

Vom Busetief im Osten durch mehrere Platen getrennt entwässert das Kalfamergat breitgefächert nach Norden und zergliedert das Osterriff. Mit maximal NN-6 m erreicht die Rinne 1950 die geringsten Tiefen während des rund 60 jährigen Betrachtungszeitraumes (Abb. 7 u. 8).

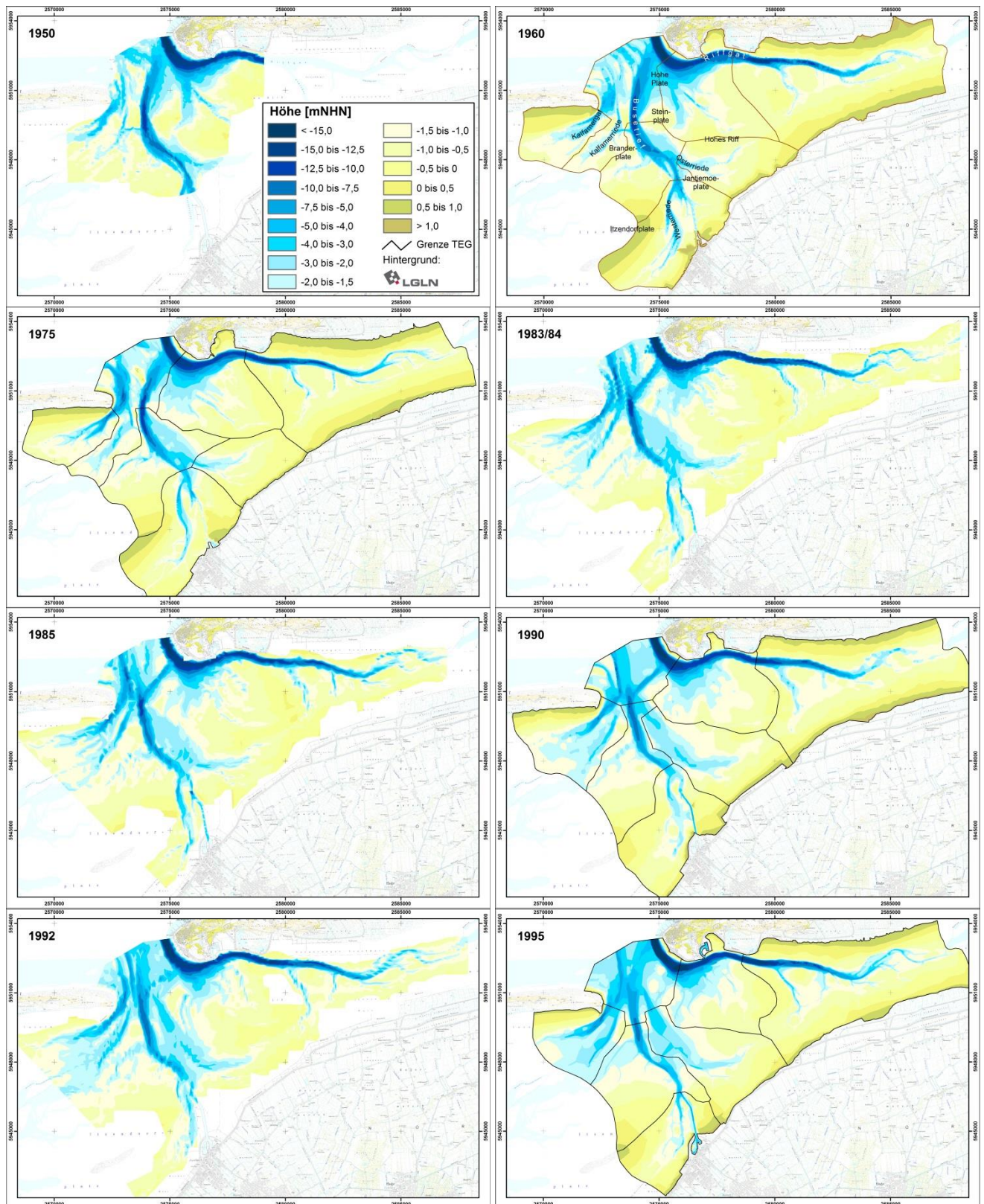


Abb. 7: Morphologische Veränderungen im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats zwischen 1950 und 1995

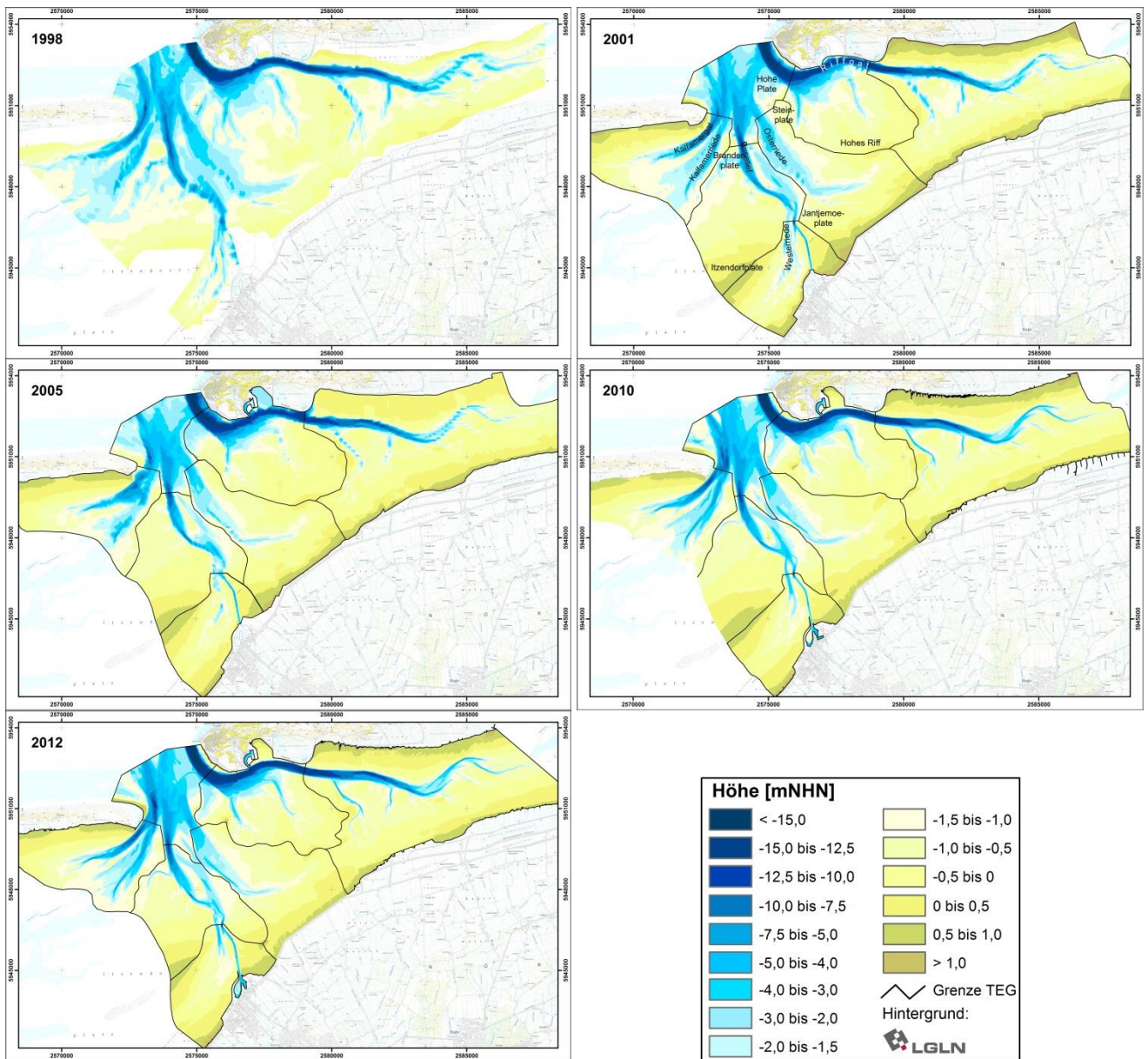


Abb. 8: Morphologische Veränderungen im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats zwischen 1998 und 2012

Das Kalfamergat wird im Süden durch einen hohen Platenzug von einer Rinne getrennt, die etwa zu gleichen Teilen in Richtung Busetief und Kalfamergat entwässert. Indem sich diese Rinne in den nächsten Jahrzehnten weiter ausdehnt und vertieft nimmt sie zunehmend Einfluss auf die morphologische Entwicklung im Mündungsbereich von Kalfamergat und Busetief. Aufgrund dessen wird diese bisher namenlose Rinne nachfolgend als Kalfamerriede bezeichnet, wobei die unmittelbare Nachbarschaft zum Kalfamergat und die Tatsache, dass beiden Rinnen aktuell im Mündungsbereich eine gemeinsame Rinne bilden für die Wahl des Namens ausschlaggebend war (Abb. 7 u.8).

Die Steinplate ragt gut erkennbar über MTnw-Niveau auf, behält bis 1966 ihre kompakte Struktur bei und geht ohne erkennbare Abgrenzung nach Norden hin in die dauerhaft wasserbedeckte Hohe Plate über.

In den Jahren bis 1975 verliert das Busetief stromaufwärts an Tiefe, vertieft hingegen im Mündungsbereich. Parallel dazu verlagert sich die Einmündung des Busetiefs in das Norderneyer Seegat um einige Hundert Meter nach Süden, so dass die Rinne insgesamt einen noch stärker gekrümmten Verlauf annimmt. Nördlich der Einmündung der Osterriede in das Busetief deuten

erste Platenbildungen darauf hin, dass sich in diesem Abschnitt der Verlauf der Osterriede in den nächsten Jahren verändern wird (Abb. 7 u. 8).

Die Steinplate weist in der Topographie aus dem Jahr 1975 nicht mehr die bisherige kompakte Form auf, sondern stellt sich als eine von Nordwest nach Südost gestreckte Struktur dar, die um rund einen halben Meter erodiert wurde. Die Legde, die bisher die Steinplate vom Hohen Riff im Osten trennt, bildet sich so weit zurück, dass beide morphologischen Einheiten zu einem zusammenhängenden Komplex verschmelzen. Erosionen an der Westflanke des Hohen Riffs und eine leichte Verlagerung der Steinplate nach Norden bewirken, dass sich das Busetief im Abschnitt zwischen Jantjemoeplate und Steinplate aufweitet; eine Entwicklung, die sich auch in den folgenden zehn Jahren bis 1985 fortsetzt.

Vor dem Ostende von Juist konzentriert sich das Kalfamergat im Jahr 1975 zunehmend auf eine einzelne Rinne, in die auch verstärkt die Kalfamerriede entwässert. Die Platen, die das Kalfamergat gegen das Busetief bisher abgegrenzt haben, fangen an sich aufzulösen oder verlagern sich südwärts und verbinden sich mit der Branderplate. Infolge dieser Entwicklung beginnt sich auch die direkte Verbindung der Kalfamerriede zum Busetief zu schließen.

Die Westerriede weist seit 1966 bis heute anhaltende Verlandungstendenzen im Wurzelbereich auf. Zunächst nur langsam voranschreitend entwickelt sich die Rinne insbesondere zwischen den Jahren 2001 und 2012 stark zurück. Eine Fortsetzung dieser Entwicklung ist auch in den nächsten Jahren zu erwarten (Abb. 7 u. 8).

Die Topographie aus dem Jahr 1985 verdeutlicht nicht nur, dass die Kalfamerriede nun überwiegend nach Norden in eine gemeinsame Rinne mit dem Kalfamergat mündet, sondern verdeutlicht auch eine Abnahme des Wattniveaus im Einzugsgebiet beider Rinnen, die sich bis Mitte der 1990er Jahre fortsetzt und zu einem erheblich ansteigenden Tidevolumen im Teileinzugsgebiet des Kalfamergats führt (s. Kap. 5.2; Abb. 10). In der Summe führt die Zunahme des Stromarbeitsvermögens dazu, dass die Platen zwischen Busetief und Kalfamergat sowie das Osterriff an seiner Südseite erodieren. Anteil an dieser Entwicklung dürfte aber auch das Busetief gehabt haben, das sich 1985 auf Höhe von Juist aufspaltet und eine Nebenrinne nach Norden ausbildet. Die tiefe Rinne ist aber zunächst noch weiterhin nach Nordosten zum Seegat gerichtet, entwickelt sich aber bis zum Jahr 2012 zugunsten der neuen Rinne immer weiter zurück (Abb. 7 u. 8).

Die beschriebenen erosiven Tendenzen beschränken sich nicht allein auf das Einzugsgebiet von Kalfamergat und Kalfamerriede, sondern schließen den Bereich der Branderplate und den südlichen Teil der Itzendorfplate ein. Zwischen den Jahren 1994 und 2005 lagern sich dann aber im Übergangsbereich von der Branderplate zur Itzendorfplate wieder so viele Sedimente ab, dass beide Platen auf einem Niveau oberhalb von NN-1 m zu einem Komplex verschmelzen. In den Topographien der Jahre 2010 und 2012 zeigen sich auf der Branderplate, die durch eine schmale Rinne auch wieder morphologisch von der Itzendorfplate abgegrenzt ist, erneut leicht erosive Tendenzen (Abb. 8).

Im Mündungsbereich der Osterriede bauen sich die Platen zwischen den Jahren 1975 und 1985 nur zögerlich auf und ragen deshalb auch nur punktuell über MTnw-Niveau auf. Dennoch ist erkennbar, dass der Ebb- und Flutstrom bereits jetzt teilweise einer noch wenig ausgeprägten Rinne östlich der Platen folgen. Bis zum Jahr 2005 wachsen diese Platen dann durchgängig auf einer Länge von rund drei Kilometer bis zu einem Niveau oberhalb von MTnw auf. Seit etwa dem Jahr 2001 entwässert die Osterriede deshalb nicht mehr unmittelbar nördlich der Jantjemoeplate, sondern erst etwa 3,5 km weiter nördlich auf Höhe der Hohen Plate in das Busetief (Abb. 7 u. 8).

Durch diese morphologische Umgestaltung verliert der südliche Abschnitt des Busetiefs einen wesentlichen Teil seines Einzugsgebietes. Als Nebenrinne verbleibt hier allein die Westerriede, die wiederum die beschriebenen anhaltenden Verlandungstendenzen aufweist. Mit dem erheblich reduzierten Tidevolumen geht nicht nur eine Querschnittsabnahme im diesem Teil des Busetiefs einher, sondern das rückläufige Stromarbeitsvermögen begünstigt auch die Bildung von Platen. So lässt die morphologische Entwicklung bis zum Jahr 2012 vermuten, dass die Bildung einer Mittelplate im südlichen Teil des Busetiefs zu einer Stromspaltung führt. Dies würde sich ungünstig auf die Fahrwasserverhältnisse auswirken. Aufgrund der morphologischen Entwicklung der letzten Jahre wäre sogar ein Szenario denkbar, bei dem das Busetief nach Osten verschwenkt und dem neuen Rinnenverlauf der Osterriede folgt.

Im Mündungsbereich des Busetiefs entwickelt sich zwischen den Jahren 1995 und 2001 die nach Norden gerichtete Nebenrinne zur Hauptrinne des Busetiefs. Die ehemals tiefe Rinne zum Norderneyer Seegat verliert nachfolgend bis zum Jahr 2012 erheblich an Tiefe. Während sich von Norden her die Robbenplate weiter nach Süden ausdehnt, dringt von Süden her der Platenkomplex Steinplate und Hohe Plate nach Norden in den Bereich vor, in dem bis Mitte der 1990er Jahre noch die Hauptrinne des Busetiefs in das Norderneyer Seegat mündete. Gegenüber der Topographie von 1950 hat sich somit Steinplate und Hohe Plate um ca. 1,5 km nach Norden verlagert (Abb. 7 u.8). Insgesamt bedingt diese Entwicklung die Sedimentakkumulation im Übergangsbereich vom Busetief zum Norderneyer Seegat, wodurch sich auch die Fahrwasserbedingungen nach Norderney verschlechtern. In Verbindung mit der zunehmenden Seegangsexposition des nord-östlichen Endes des Busetiefs sind zukünftig verstärkt Unterhaltungsmaßnahmen in diesem Fahrwasserabschnitt zu erwarten.

5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens

Ausgehend von einer Größe von 100 km² für das gesamte Tidebecken im Jahr 1966, kommt es bis 1975 zu einer Zunahme um knapp fünf Prozent auf die maximale, im Untersuchungszeitraum erreichte Ausdehnung von 104,6 km² (Abb. 9). Nachdem bis 1994 zunächst eine Abnahme in gleicher Größenordnung festzustellen ist, dehnt sich das Tidebecken bis 2001 erneut um gut drei Quadratkilometer aus. Seitdem ist die Größe des Tidebeckens wieder leicht rückläufig. Die Laserscanmessung aus dem Jahr 2012 erfasst das Untersuchungsgebiet im Bereich der östlichen Wattwasserscheide zwar nicht vollständig, die Größe des Wateinzugsgebietes dürfte aber nicht wesentlich von der aus dem Jahr 2010 abweichen und liegt somit über dem in Abb. 9 angegebenen Wert.

Den prozentual größten Zuwachs erfährt das TEG des Kalfamergats, das sich um 80 % von gut 7 km² im Jahr 1966 auf aktuell 13 km² vergrößert hat. Dem gegenüber steht das TEG der Westerriede, in dem im gleichen Zeitraum ein Flächenverlust von etwa 40 % zu verzeichnen ist. Absolut gesehen verliert das TEG 6 km² seiner ursprünglichen 15 km².

Während in den TEG die gleichsinnigen Entwicklungstrends von Tidevolumen und Gebietsgröße auf den engen funktionalen Zusammenhang zwischen V_T und A_b hinweisen (s. Kap. 5.3), weichen die Entwicklung des Tidevolumens und der Einzugsgebietsgröße im WEG des Norderneyer Seegats durchaus voneinander ab (Abb. 9 u. 10): Im Gegensatz zur Einzugsgebietsgröße wird das maximale Tidevolumen mit ca. 195 Mio. m³ erst im Jahr 1990 erreicht, was gegenüber 1966 mit 170 Mio. m³ einem Zuwachs von gut 14 % entspricht. Da bei der Normierung über den mittleren Tidehub ($MThb_{5J}$ für das jeweilige Jahr) der prozentuale Volumenzuwachs auf gleichem Niveau bleibt, kann geschlussfolgert werden, dass die Zunahme des Tidevolumens in diesem Zeitabschnitt im Wesentlichen auf morphologische Veränderungen im Untersuchungsgebiet zurückzuführen ist. Zwischen 1990 und 2012 sinkt das Tidevolumen dann wieder auf 176 Mio. m³, womit sich über den gesamten Zeitraum von gut 50 Jahren nur ein Volumenzuwachs von

drei Prozent ergibt. Normiert über den mittleren Tidehub liegt das Tidevolumen der Jahre 2010 und 2012 sogar minimal unter dem von 1966.

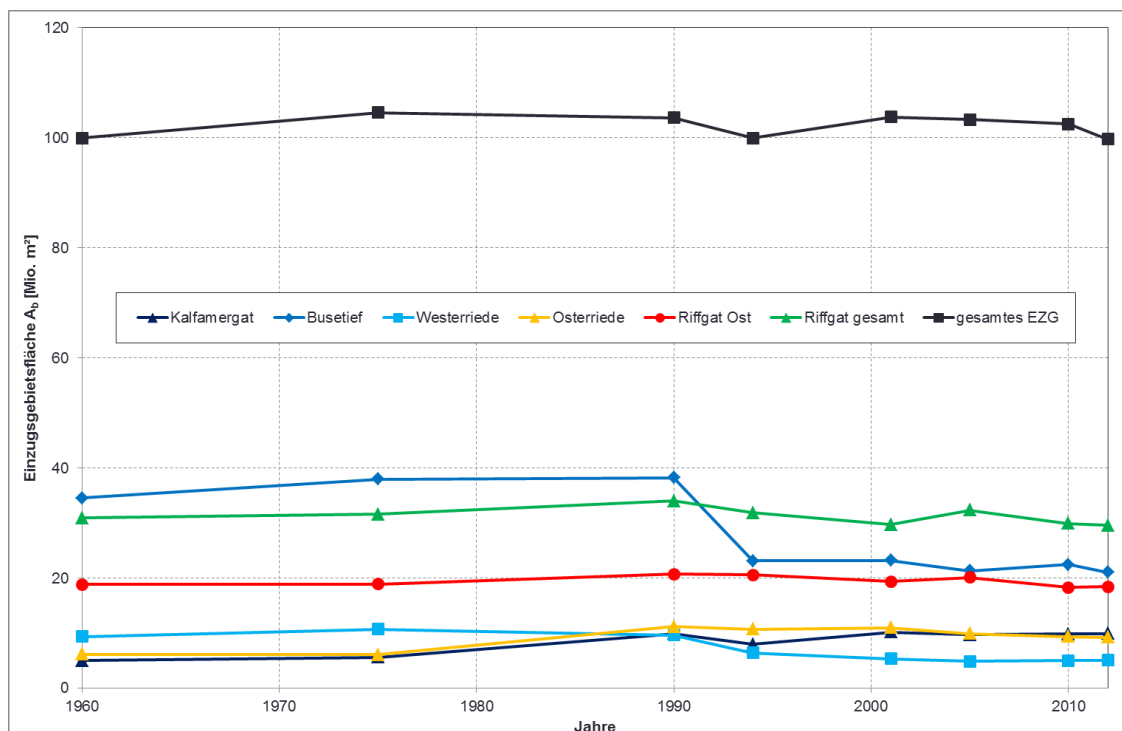


Abb. 9: Entwicklung der Einzugsgebietsgröße A_E

Die größte Zunahme des Tidevolumens zwischen 1966 und 2012 erfährt das TEG des Kalfamergats mit knapp 110 %, gefolgt von der Osterriede mit 56 %. Die Westerriede verliert im gleichen Zeitraum fast die Hälfte ihres Tidevolumens. Diese Werte reduzieren sich um fünf bis sieben Prozent, wenn über den mittleren Tidehub normiert wird (Abb. 10).

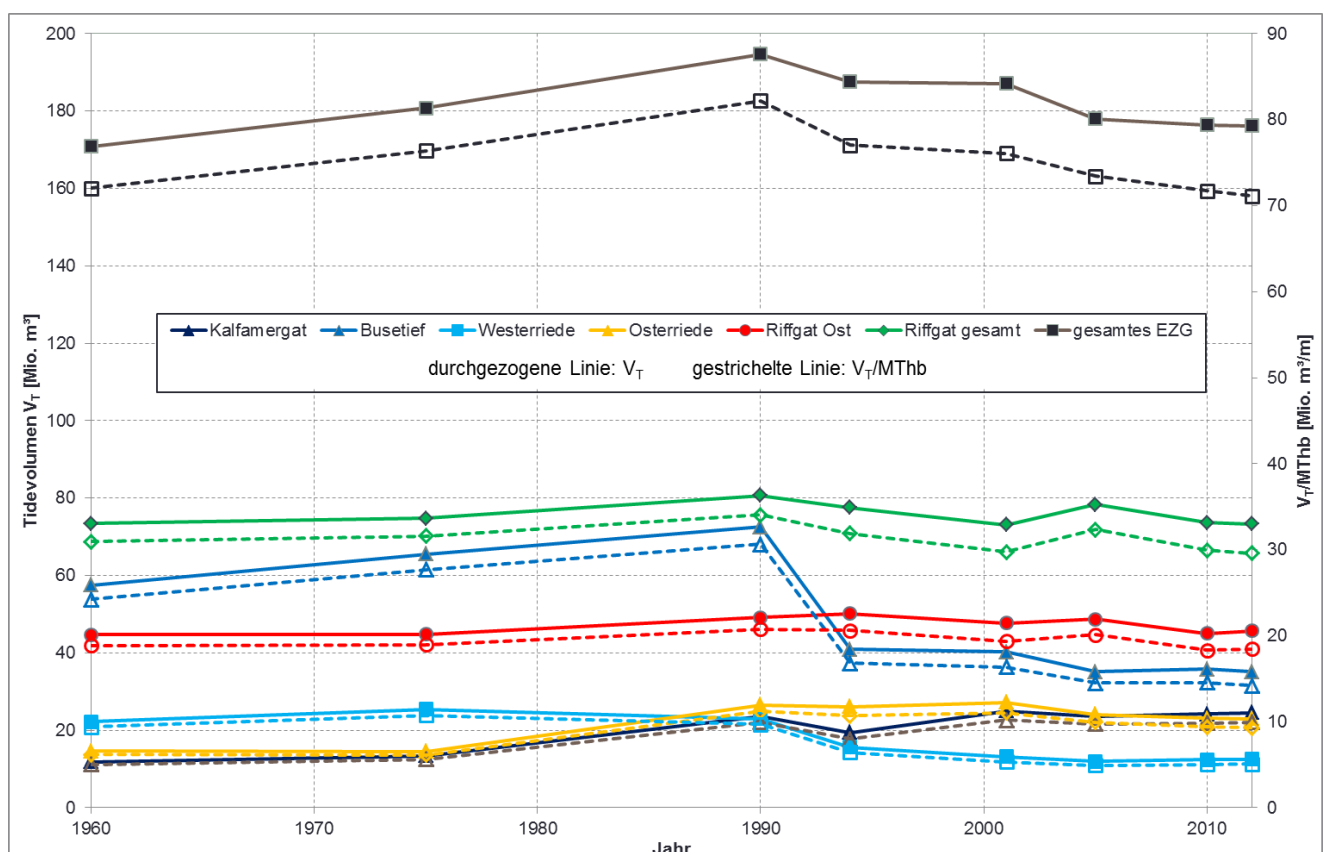


Abb. 10: Entwicklung des Tidevolumens und des über den mittleren Tidehub normierten Tidevolumens

5.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen

Die Berechnung hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtszustände stellt einen Ansatz dar, die komplexen Vorgänge der Morphodynamik auf solche Parameter zu reduzieren, die 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 zu prognostizieren.

Die Beschreibung verschiedener hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtszustände findet sich u.a. bei O'BRIAN (1931, 1967), WALTHER (1934, 1972); RODLOFF (1970), WALTON & ADAMS (1976), RENGIER (1976), EYSINK (1979, 1991) und DIEKMANN (1985). Im Projekt WADE („Wadden Sea morphological development due to an accelerated relative sea-level-rise“) wurde für das Ostfriesische Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht der Beweis geführt, dass hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände nicht allein auf vollständige Einzugsgebiete von Seegaten, sondern auch auf dessen Teileinzugsgebiete angewendet werden können (NIEMEYER et al. 1995, KUNZ et al. 1998).

Im Rahmen des Projektes „Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln“ wurden ebenfalls hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen für die Seegaten der Harle (LADAGE & STEPHAN 2004), der Wichter Ee (LADAGE & STEPHAN 2005) und der Otzumer Balje (LADAGE et al. 2006) sowie der zugehörigen Tidebecken durchgeführt und mit Ergebnissen aus dem WADE-Projekt verglichen. Demnach werden die funktionalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern erwartungsgemäß bestätigt, die Korrelationskoeffizienten weichen aber unterschiedlich stark von den in WADE ermittelten ab. Hierfür kann eine Vielzahl von Faktoren verantwortlich sein. Insbesondere sind hier die unterschiedliche Unterteilung der TEG und ihre Abgrenzung zueinander zu nennen, was wiederum unmittelbaren Einfluss auf die Lage der zugehörigen Rinnenquerschnitte hat. Auch sind in die WADE-Untersuchungen nur die Topographien der Jahre 1966, 1975 und 1990 eingeflossen, während den Analysen im Rahmen der Sonderuntersuchungen und der aktuellen Untersuchung des Norderneyer Seegats deutlich mehr topographische Zustände zugrunde liegen. Im Projekt WADE wurden für die Topographie 1990 auch nicht die originären Punktdaten herangezogen, sondern eine durch TASH (Topographisches Auswertesystem Hannover) generierte Isoliniendarstellung. Da bereits im WADE-Projekt die Datenerfassung und -analyse GIS-gestützt erfolgte, können Abweichungen durch Fehler bei der Flächen- und Volumenbestimmung ausgeschlossen werden.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass für den hier betrachteten Untersuchungsraum des Norderneyer Seegats mit seinem Einzugsgebiet alle empirischen Zusammenhänge zwischen den Parametern am besten durch einen linearen Trend wiedergegeben werden. Im Gegensatz dazu stehen die Analyseergebnisse aus dem Projekt WADE, wo die Abhängigkeit der verschiedenen Parameter zumeist besser durch eine Potenzfunktion dargestellt wird. Vorläufige Berechnungen, in die Messwerte aus den Seegaten Wichter Ee, Otzumer Balje, Harle und natürlich Norderneyer Seegat einfließen, scheinen die Annahme einer linearen Abhängigkeit der Parameter untereinander zu bestätigen. Diese Hypothese gilt es aber durch entsprechende Detailuntersuchungen noch zu verifizieren. Grundsätzlich steht für einen Vergleich mit den Ergebnissen aus dem WADE-Projekt eine ausreichend große Anzahl von Messdaten aus dem Bereich der ostfriesischen Seegaten zur Verfügung.

5.3.1 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 aus. Nachgewiesen wurde dieser Zusammenhang von WALTHER (1934, 1972) und NIEMEYER (1995) für die ostfriesischen Seegaten und von EYSINK (1991) für die Seegaten des westfriesischen Wattenmeeres.

Der Zusammenhang zwischen V_T und A_b wird durch eine Ausgleichsgerade wiedergegeben, die mit dem Koeffizienten 0,575 aber eine etwas größere Steigung hat, als die in WADE für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste ermittelte (s. Abb. 12). Weder die Entwicklung des Tidevolumens, noch die der Einzugsgebietsfläche seit 1960 (Abb. 9 u. 10) erlauben einen Rückschluss, ob nun V_T verhältnismäßig zu groß ist, oder aber A_b zu klein ausfällt. Festzustellen ist aber, dass die beschriebenen Größenänderungen in den TEG von Osterriede und Kalfamerгат in den Jahren 1990 und 1994 temporäre Störungen des dynamischen Gleichgewichtes zwischen den Parametern V_T und A_b bedingen.

Erwartungsgemäß nimmt A_b und V_T im TEG des Busetiefs zwischen den Jahren 1990 und 1994 aufgrund der veränderten Rinnenhierarchie – die Osterriede entwässert nicht mehr Richtung Busetief – größenordnungsmäßig in dem Maße ab, wie diese im TEG der Osterriede zunehmen. Wesentlichen Anteil an der Zunahme von V_T im WEG des Norderneyer Seegats zwischen 1975 und 1990 von 180 auf 196 Mio. m³ hat das TEG des Kalfamerгats, dessen Tidevolumen sich in diesem Zeitraum um gut 10 Mio. m³ nahezu verdoppelt (Abb. 12).

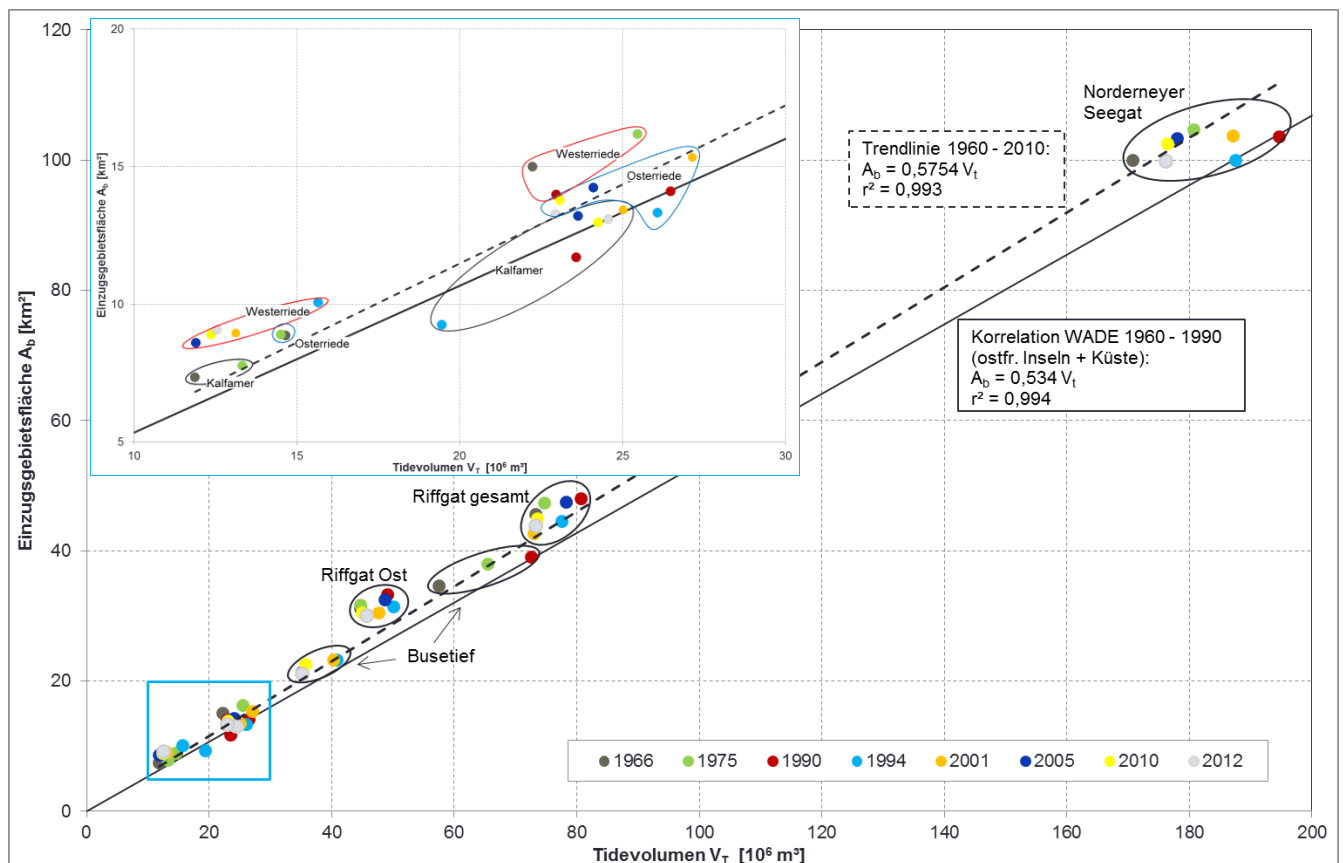


Abb. 11: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken des Norderneyer Seegat

5.3.2 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen

Die Größe der Gezeitenfläche A_i wird nicht allein durch die Größe des Gesamteinzugsgebiets A_b bestimmt (s. Kap. 5.5), sondern ist in erheblichen Umfang auch vom Tidehub abhängig, wie HAYES (1975, 1979) exemplarisch nachgewiesen hat. Damit besteht ein statistischer Zusammenhang zwischen A_i und Tidevolumen V_T , der für die ostfriesischen Seegaten von (NIEMEYER et al. 1995) durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird. Deren Ausprägung wird maßgeblich durch Messpunkte aus dem WEG der Osterems bestimmt. Ohne diese Messwerte - V_T liegt hier

über 200 Mio. m³ - scheint sich A_i eher linear mit V_T zu verändern. Dies ist auch aufgrund der geometrischen bzw. topografischen Selbstähnlichkeit der Gezeitenflächen zueinander zu erwarten.

Mit Fokus auf das Tidebecken des Norderneyer Seegats ist festzustellen, dass die stärksten Schwankungen für das Verhältnis von V_T zu A_i zwischen den Jahren 1975 und 2001 auftreten (Abb. 14). Bei nur geringfügig veränderter Einzugsgebietsgröße ist eine Zunahme des über den Tidehub normierten Tidevolumens um knapp 15 % zwischen 1975 und 1990 (s. Kap. 5.2) nur möglich, wenn sich die mittlere Tiefe im WEG im Bereich der Gezeitenfläche erhöht. Bis zum Jahr 2001 stellt sich dann ein neues Gleichgewicht ein, welches, in Anbetracht der Tatsache, dass der Koeffizient A_i/V_T empfindlich auf Veränderungen einer der Parameter reagiert, in den nachfolgenden Jahren bis 2012 im WEG und in den TEG recht stabil bleibt.

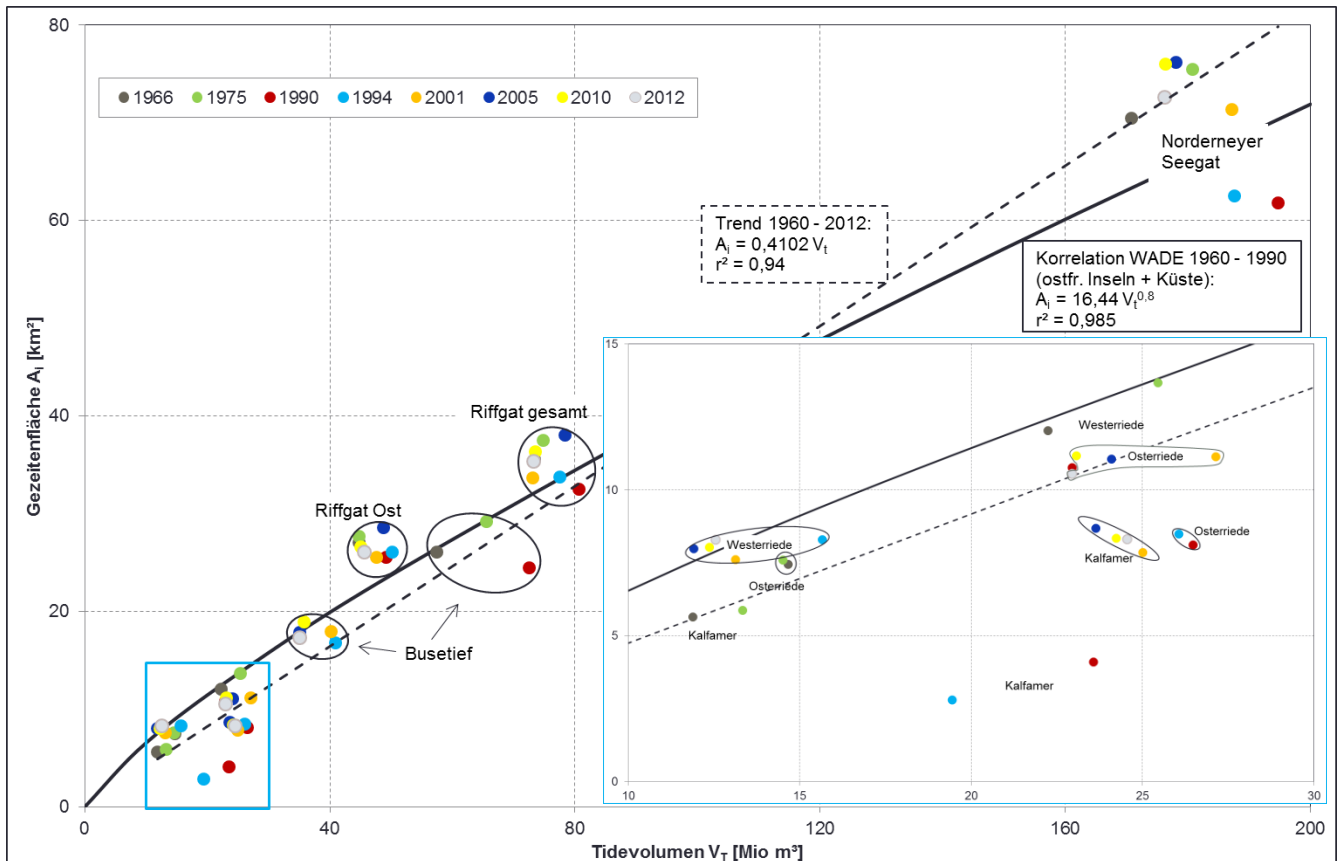


Abb. 12: Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken des Norderneyer Seegat

Für die TEG der Westerriede und des Busetiefs wird die Beziehung A_i/V_T durch die in WADE ermittelte Potenzfunktion gut wiedergegeben. Die morphologischen Umgestaltungen, aus denen eine veränderte Rinnenhierarchie von Busetief und Osterriede resultiert, führen aber im TEG des Busetiefs erwartungsgemäß zu größeren Abweichungen von der Ausgleichskurve. Im TEG des Riffgats (gesamt und Ost) sowie im WEG des Norderneyer Seegats ist A_i zu groß, in den kleineren TEG des Kalfamer Gats und der Osterriede hingegen zu klein im Verhältnis zu V_T (Abb. 14).

5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche

Die Abhängigkeit der Größe der Gezeitenfläche A_i von der Größe des Einzugsgebietes A_b haben RINGER (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 ost-

friesischen Inseln einen engen Zusammenhang zwischen den beiden Parametern nachweisen, der durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird (Abb. 15).

Im Vergleich zur Gesamtheit der ostfriesischen Gaten (NIEMEYER et al. 1995) ist in den TEG der Westerriede, Osterriede und des Kalfamergats A_i zu klein, im gesamten Watteinzugsgebiet tendenziell etwas zu groß im Verhältnis zu A_b . Wie bereits bei der Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche (Abb. 11) bzw. der Gezeitenfläche (Abb. 12) vom Tidevolumen wird deutlich, dass die Messwerte für das TEG Riffgat gesamt und ausgeprägter noch für TEG Riffgat Ost eine dichte Punktwolke bilden, was als ein Indiz für das Bestehen eines morphodynamischen Gleichgewichtes gewertet werden kann. Zudem entsprechen die in diesen beiden TEG berechneten Werte für A_i/A_b recht gut den Verhältnissen, die nach NIEMEYER et al. (1995) als regionaltypisch für die ostfriesischen Seegaten gelten.

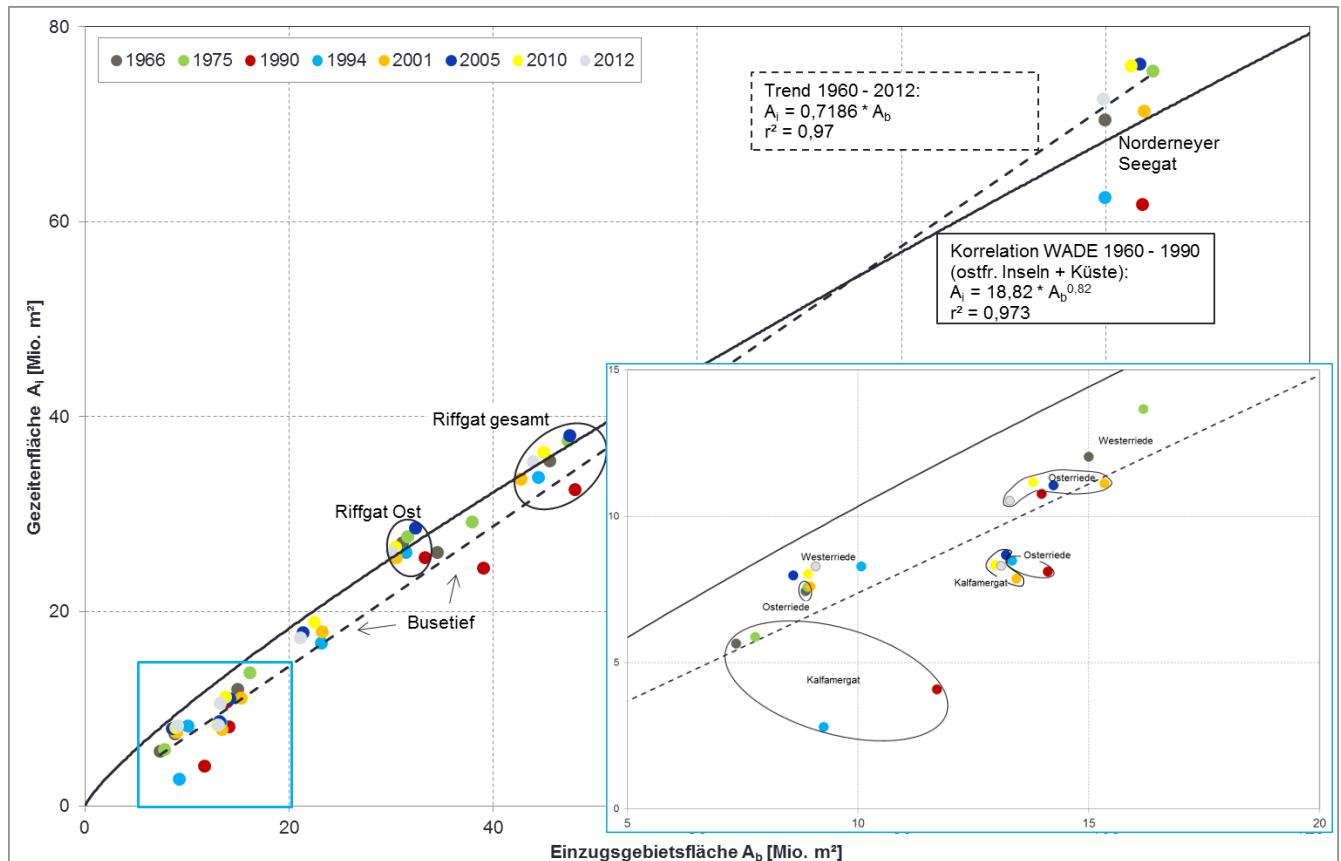


Abb. 13: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsfläche im Tidebecken des Norderneyer Seegats

5.3.4 Funktionaler Zusammenhang von Tidevolumen und Rinnenquerschnitt

Die Geometrie eines Seegats und somit auch dessen Rinnenquerschnitt werden maßgeblich durch das Tidevolumen des zugehörigen Einzugsgebietes bestimmt. O'Brien (1931, 1967) entwickelte aufgrund dieser funktionalen Abhängigkeit empirische Formeln, die das Verhältnis zwischen dem Seegatquerschnitt A_c und dem Tidevolumen V_T beschreiben:

$$A_c = C_b * V_T^n$$

mit C_b = Koeffizient der Regression empirischer Daten und n = Exponent

WALTHER (1934, 1972) überprüfte diesen Ansatz für die ostfriesischen Seegaten und DIECKMANN et al. (1989) konnte die Anwendbarkeit der Formel auch auf die übrigen Seegaten in der deutschen Bucht übertragen. Im Projekt WADE wurde die Gültigkeit des Ansatzes auch auf Teileinzugsgebiete von Seegaten und die jeweils zugehörigen Rinnenquerschnitten nachgewiesen (NIEMEYER et al. 1995).

Wie im Projekt WADE wird der funktionale Zusammenhang zwischen A_c und V_T durch eine lineare Funktion wiedergegeben. Allerdings ist die Steigung der Ausgleichsgerade mit $C_b = 8,6$ größer als bei der von NIEMEYER et al. (1995) berechneten Geraden ($C_b = 7,45$, Abb.14). Im Verhältnis zum Tidevolumen sind die Rinnenquerschnitte im Untersuchungsgebiet somit durchschnittlich knapp 15 % größer im Vergleich zu den im Projekt WADE ermittelten regionaltypischen Werten.

Insbesondere im TEG des Kalfamergats, aber auch des Riffgats (gesamt) variiert der Rinnenquerschnitt zeitweise erheblich, ohne dass vergleichbar starke Schwankungen im Tidevolumen festzustellen wären. Im Falle des Riffgats verwundert dies umso mehr, als dass der Zusammenhang zwischen den bisher betrachteten Gleichgewichtsparameter darauf schließen ließ, dass sich dieses TEG mehr oder weniger in einem morphodynamischen Gleichgewicht befindet. Ein Blick auf die topographische Ausprägung des TEG in den Abbildungen 7 und 8 legt die Vermutung nah, 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.

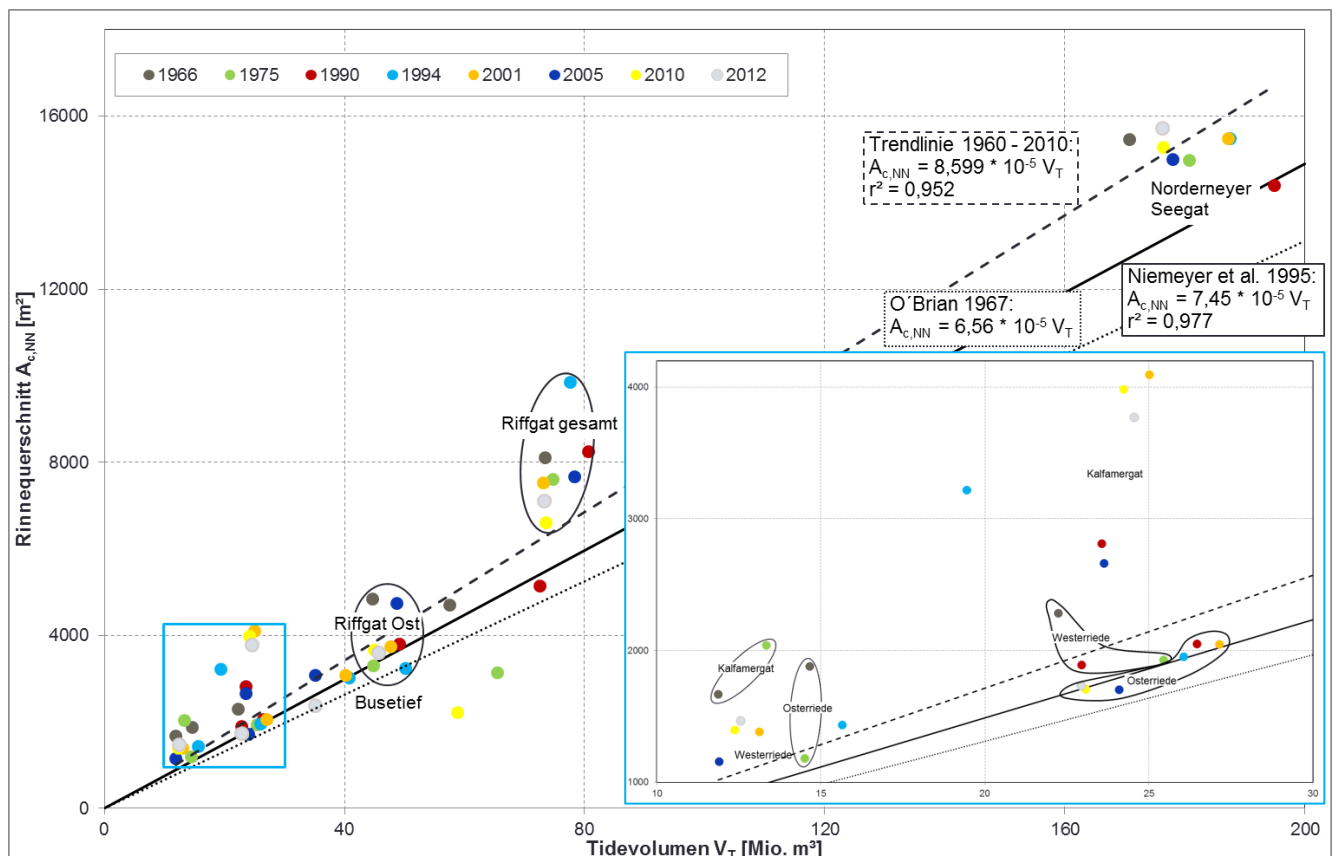


Abb. 14: Rinnenquerschnitt des Norderneyer Seegats und seiner Nebenrinnen als Funktion des Tidevolumens

6 Zusammenfassung

Getrennt für den Riffbogen des Norderneyer Seegats und für dessen Einzugsgebiet wird die morphologische Entwicklung im Untersuchungsraum auf der Basis von Peildaten und Laserscanaufnahmen aus den Jahren 1950 bis 2012 ausgewertet und in Anlehnung an die Arbeiten von NIEMEYER et al. (1995) morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen durchgeführt.

Die morphologische Ausprägung des Riffbogens und der Platenkomplexe wird maßgeblich durch Lage und Ausdehnung der großen Rinnen bestimmt. Der im Jahr 1992 nach Nordwesten gericht-

tete Ausläufer des Norderneyer Seegats verschwenkt bis zum Jahr 2001 um etwa 50° nach Osten, verlagert sich nachfolgend aber wieder etwas zurück. Entwässert das Seegat anfänglich noch relativ breit gefächert über den nördlichen Riffbogen, konzentriert sich die Strömung zunehmend auf eine dann im Jahr 1998 weit nach Norden vorstoßende Rinne. Dadurch werden auch die Platen auf einer entsprechend weiter seewärts gelegenen Bahn um das Seegat verlagert. Aufgrund dieser Entwicklung vermuteten MEYER & STEPHAN (2000), dass Platen auf ihrem nun längeren Weg durch den Riffbogen stärker aufgearbeitet werden und an Volumen verlieren. Insgesamt wäre nach MEYER & STEPHAN mit einer Höhenabnahme im Mündungsbereich des Norderneyer Seegats zu rechnen. Tatsächlich akkumulieren sich aber nach Abschluss der Untersuchungen von MEYER & STEPHAN (2000) zwischen den Jahren 1998 und 2008 wieder erhebliche Sedimentmengen auf den Nordwestgründen. Das Norderneyer Seegat verbindet sich – anders als es sich aus den Daten mit Stand 2001 abzuzeichnen schien – nicht mit dem Dovetief (MEYER & STEPHAN 2000).

Der Riffbogenbereich im Übergang vom Osterriff zur Robbenplate wird in unterschiedlicher Intensität von Ausläufern des zunehmend nach Norden vorstoßenden Kalfamergats zergliedert. Die Entwässerungsrichtung des Busetiefs wechselt wiederholt. Sie ist zeitweise nach Nordosten zum Norderneyer Riffgat, zeitweise aber auch nach Nordwesten zum Spaniergat gerichtet. Ein lang gestreckter Sandrücken, der in der Topographie des Jahres 1992 die Rinnen von Kalfamergat und Busetief trennt, verliert bis zum Jahr 2008 deutlich an Höhe. Damit wird die Vermutung von MEYER & STEPHAN (2000) gestützt, dass sich die beiden Rinnen verstärkt auf die NNW verlaufenden Strukturen des Spaniergats konzentrieren.

Im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats sind langanhaltende morphologische Umgestaltungen erkennbar, die sich auch zukünftig noch fortsetzen dürften: Über den gesamten 60 jährigen Betrachtungszeitraum vertieft sich das Kalfamergat und dehnt sich dabei nach Westen aus. Eine weiter südlich gelegene, parallel verlaufende Rinne entwickelt sich über die Jahrzehnte zu einer dem Kalfamergat nahezu gleichwertigen Rinne. Das zunehmende Tidevolumen im Einzugsgebiet dieser als Kalfamerriede bezeichnete Rinne und des Kalfamergats bedingt, dass die nördlichen Rinnenausläufer zunehmend weiter in den Riffbogen vorstoßen.

Mündete die Osterriede bis 1975 noch direkt nördlich des Leitdammkopfes in das Busetief, bilden sich hier nachfolgend Platen aus, die sich weiter aufbauen und nach Norden ausdehnen. Infolge dieser Entwicklung entwässert die Osterriede seit den 1980er Jahren rund 3,5 km weiter nördlich auf Höhe der Hohen Plate in das Busetief. Als Nebenrinne verbleibt dem Busetief somit nur noch die Westerriede, die wiederum lang anhaltende Verlandungstendenzen aufweist. Infolge des rückläufigen Stromarbeitsvermögens nimmt der Rinnenquerschnitt im südlichen Teil des Busetiefs ab. Dies würde die Bildung einer Mittelplate und damit die Entstehung eines Stromspaltungsgebietes begünstigen. Denkbar wäre sogar ein Szenario, bei dem das Busetief in seinem südlichen Abschnitt nach Osten verschwenkt und damit dem sich vertiefenden neuen Rinnenverlauf der Osterriede folgt. Die morphologischen Umgestaltungen im südlichen Abschnitt des Busetiefs dürften sich zukünftig ungünstig auf die Fahrwasserverhältnisse auswirken. Im Mündungsbereich des Busetiefs entwickelt sich zwischen den Jahren 1995 und 2001 die nach Norden gerichtete Nebenrinne zur Hauptrinne des Busetiefs. Die ehemals tiefe Rinne zum Norderneyer Seegat verliert bis 2012 erheblich an Tiefe. Diese Entwicklung wird sich voraussichtlich in den kommenden Jahren noch fortsetzen.

In Anlehnung an die Untersuchungen von NIEMEYER et al. (1995) im Projekt WADE wurden empirische Formeln ermittelt, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den Parametern Einzugsgebietsgröße A_b , Gezeitenfläche A_i , Tidevolumen V_T und Rinnenquerschnitt A_c darstellen. Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die Anpassung stets am besten durch eine lineare Ausgleichsgerade erfolgt, während nach NIEMEYER et al. zumindest die Abhängigkeit der Gezei-

tenfläche sowohl von der Einzugsgebietsfläche als auch vom Tidevolumen besser durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird.

7 Literaturverzeichnis

- DIECKMANN, R., M. OSTERTHUN & H.W. PARTENSCKY (1989):** A comparison between German and North American tidal inlets. - Proc. 21st Int. Conf. Coast. Eng. 1988, Malaga, ASCE, New York, 32681-2691
- DIRKS, H. (2007):** Luftgestützte Laserscan-Erfassung der Deichvorländer von Arensch und Cuxhaven - Dokumentation der Laserscan-Befliegung vom Frühjahr 2007. - Untersuchungsber. Forschungsstelle Küste 11/2007
- EYSINK, W.D. (1991):** Morphologic response of tidal basins to changes. - Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 2: 1948-1961
- HAYES, M. O. (1975):** Morphology of sand accumulation in estuaries. - In: CRONIN, L.E. (ed.): Estuarine Research, Geology and Engineering, Academic Press, New York, Vol. 2
- HAYES, M. O. (1979):** Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S.P.: Barrier Islands: From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico. (Academic Press) New York: 1-27.
- HÜTTEMEYER, P., A. KOOPMANN, H. KUNZ & M. PUSCHMANN (1999):** KFKI Forschungsvorhaben. Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht: Datendokumentation und Untersuchungen zur Verwendung von Seemessungen des DHI/BSH für morphologische Fragestellungen. - Dienstber. Forschungsstelle Küste, 18/1999
- KOCH, M. & H.D. NIEMEYER (1980):** Strömungsmessungen im Bereich der Wattwasserscheiden von Norderney und Baltrum sowie im Seegat Wichter Ee. - Jber. Forschungsstelle Insel- und Küstenschutz, 1979
- KUNZ, H., H.D. NIEMEYER, R. GOLDENBOGEN & E. SCHRÖDER (1998):** Forschungsvorhaben WADE - Abschlussbericht. - BMBF-Forschungsvorhaben MTK 0508, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste (unveröff.)
- LADAGE, F. & H.-J. STEPHAN (2004):** Morphologische Entwicklung im Seegat Harle und seinem Einzugsgebiet.- Dienstber. Forschungsstelle Küste 5/2004
- LADAGE, F. & H.-J. STEPHAN (2005):** Morphologische Analysen für das Seegat Wichter Ee und sein Einzugsgebiet.- Dienstber. Forschungsstelle Küste 1/2005
- LADAGE, F., C. MEYER, H.-J. STEPHAN & H.D. NIEMEYER (2006):** Morphologische Entwicklung im Seegat Otzumer Balje und seinem Einzugsgebiet.- Dienstber. Forschungsstelle Küste 2/2006
- LÜDERS, K. & G. LUCK (1976):** Kleines Küstenlexikon. - Hildesheim: August. Lax, 2. erw. und neu bearb. Aufl.
- MEYER, C. & H.-J. STEPHAN (2000):** Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselchutz Ostfriesische Inseln. Morphologische Entwicklung im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats. - Dienstber. Forschungsstelle Küste, 4/2000
- NIEMEYER, H.D. (1979):** Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. - Die Küste, 34
- NIEMEYER, H.D. (1992):** Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. - Die Küste, 54
- NIEMEYER, H.D., E. Goldenbogen, E. Schröder & H. Kunz (1995):** Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. - Die Küste, H 57
- O'BRIEN, M.P. (1931):** Estuary tidal prisms to entrance areas. - ASCE Civ. Eng., Vol. 1, No. 8
- O'BRIEN, M.P. (1969):** Equilibrium flow areas and inlets on sandy coasts. In: Journal of Waterways and Harbours Division: 43-52.
- RENGER, E. (1974):** Untersuchungen von Wateinzugsgebieten. - Mitt. Franzius-Institut d. Univ. Hannover, H 40

WALTHER, F. (1934): Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. - Die Bau-technik, Berlin, Jg. 12, H. 13

WALTHER, F. (1972): Zusammenhänge zwischen der Größe der Ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie den Gezeiten und Strömungen. - Jber. Forschungsstelle Insel- und Küstenschutz Norderney, 1971, 23