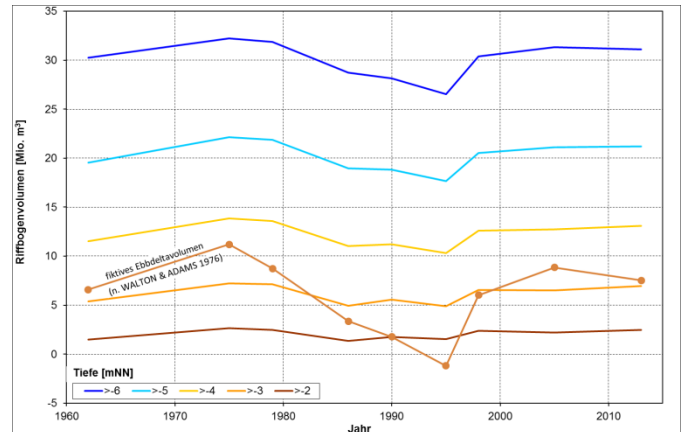
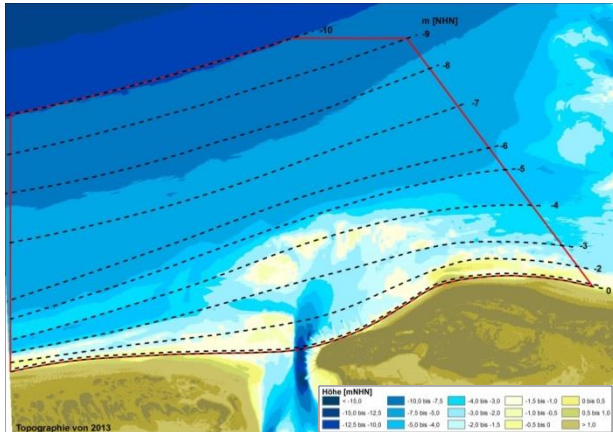


Untersuchungsbericht 3/2015



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



Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich der Wichter Ee und ihres Einzugsgebietes



Niedersachsen

Herausgeber:

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

2015; aktualisiert 09/2017 (Abb. 13 geändert)

Titelblatt: links: Riffbogen der Wichter Ee mit idealisierten Tiefenlinien einer fiktiven Topographie ohne Seegat
rechts: Zeitliche Entwicklung des Riffbogenvolumens oberhalb definierter Tiefenhorizonte und bezogen auf eine
fiktive Riffbogentopographie ohne Seegat nach WALTON & ADAMS (1976)

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 der Wichter Ee
und ihres Einzugsgebietes**

Norderney, im November 2015

Geschäftsbereichsleiter
Forschungsstelle Küste



Dr.-Ing. Andreas Wurpts

stellv. Aufgabenbereichsleiter
Morphologie des Küstengebietes



Dr. Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich der Wichter Ee und ihres Einzugsgebietes

Cornelius Meyer

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Das Untersuchungsgebiet	1
3 Datengrundlage und -aufbereitung	2
4 Wichter Ee	5
4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens	5
4.2 Sedimentvolumen im Riffbogen	5
4.3 Funktionaler Zusammenhang zwischen Riffbogenvolumen und Tidevolumen	7
5 Tidebecken der Wichter Ee.....	8
5.1 Morphologische Entwicklung.....	8
5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens	10
5.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen	10
5.3.1 Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Tidevolumen	12
5.3.2 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen	12
5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche	13
5.3.4 Funktionaler Zusammenhang von Tidevolumen und Rinnenquerschnitt	13
6 Zusammenfassung	14
7 Literaturverzeichnis	15

1 Einleitung und Zielsetzung

Als Teil des Projektes „Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselfchutz ostfriesische Inseln“ wurden von LADAGE & STEPHAN (2005) die Gestaltungsprozesse im Wateinzugsgebiet der Wichter Ee, dem Seegat selber und dem vorgelagerten Riffbogen mit dem Ziel analysiert, mögliche zukünftige Entwicklungstendenzen und ihre Auswirkungen auf die Strände von Baltrum aufzuzeigen. Die Ergebnisse dieser detaillierten Untersuchungen sollten eine wesentliche Grundlage für Ausarbeitung zukünftiger Schutzkonzepte der Insel Baltrum bilden.

Aufbauend auf diesen Untersuchungsergebnissen werden in der nachfolgenden Arbeit neue Vermessungsdaten analysiert, die aktuellen morphologischen Veränderungen im Bereich der Wichter Ee und ihres Einzugsgebietes qualitativ und quantitativ beschrieben und in den Kontext der bisherigen Erkenntnisse über die morphologischen Prozesse gestellt.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das knapp 21 km² große Wateinzugsgebiet (WEG) der Wichter Ee gliedert sich morphologisch von Westen nach Osten in den Neßmer Nacken, der nahtlos nach Süden in das Neßmer Watt und nach Westen in die Hilgenrieder Plate übergeht und im Osten durch die Neßmersieler Balje von der Neßmer Plate getrennt ist, in die Steinplate, die durch die Kleibalje von der Neßmer Plate abgegrenzt wird, sowie in das Baltrumer Inselwatt. Die Grenze zwischen Baltrumer Inselwatt und Steinplate bildet die Baltrumer Balje, in die von Südosten die Kleibalje mündet. Die Ostbalje stellt zusammen mit dem Norderneyer Wattfahrwasser die Grenze zum Norderneyer Inselwatt im Nordwesten des Untersuchungsgebietes dar (Abb. 1).

Ostbalje und Neßmersieler Balje bilden als gleichberechtigte Rinnen vor dem Ostende von Norderney eine gemeinsame Rinne, über die das westliche WEG auf Höhe des Westkopfes von Baltrum in die Wichter Ee entwässert. Be- und Entwässerung des östlichen WEG erfolgt über die Baltrumer Balje.

Im Zusammenspiel von Küstenlängs- und -quertransport hat sich ein Ebbdelta gebildet, dass die Wichter Ee im Mündungsbereich umspannt und von mehreren, namenlosen Rinnen durchzogen ist. Namentlich benannt sind die stark veränderlichen Platen und Platengruppen nur im Westen des Riffbogens – hier findet sich die Othelloplate – und im Nordosten, wo die Sandplatten das Norderriff bilden.

Die Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht werden von einer halbmondtägigen Tidewelle bestimmt, die von West nach Ost fortschreitet und einen gleichsinnig ansteigenden Tidehub bedingt. So beträgt der mittlere Tidehub am dem Untersuchungsgebiet nächstgelegenen Pegel Norderney Riffgat 2,48 m und erhöht sich auf 2,93 m am Pegel Wangeroog-Ost, jeweils gemittelt über den Zeitraum 2009 bis 2013. Der Einteilung von DAVIES (1964) bzw. HAYES (1975) folgend, ist das Gebiet somit als mesotidaler Küstenabschnitt einzuordnen.

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). Allerdings wird ein Großteil der Seegangsenergie bereits über den Riffbögen umgewandelt (NIEMEYER & KAISER 1997) und bei der Ausbreitung der Wellen über die Wattflächen weiter abgebaut (NIEMEYER 1983). Der hydrodynamischen Klassifikation von HAYES (1979) folgend ist das Untersuchungsgebiet als tide- und seegangsgeprägt mit dominierendem Tideeinfluss einzuordnen.

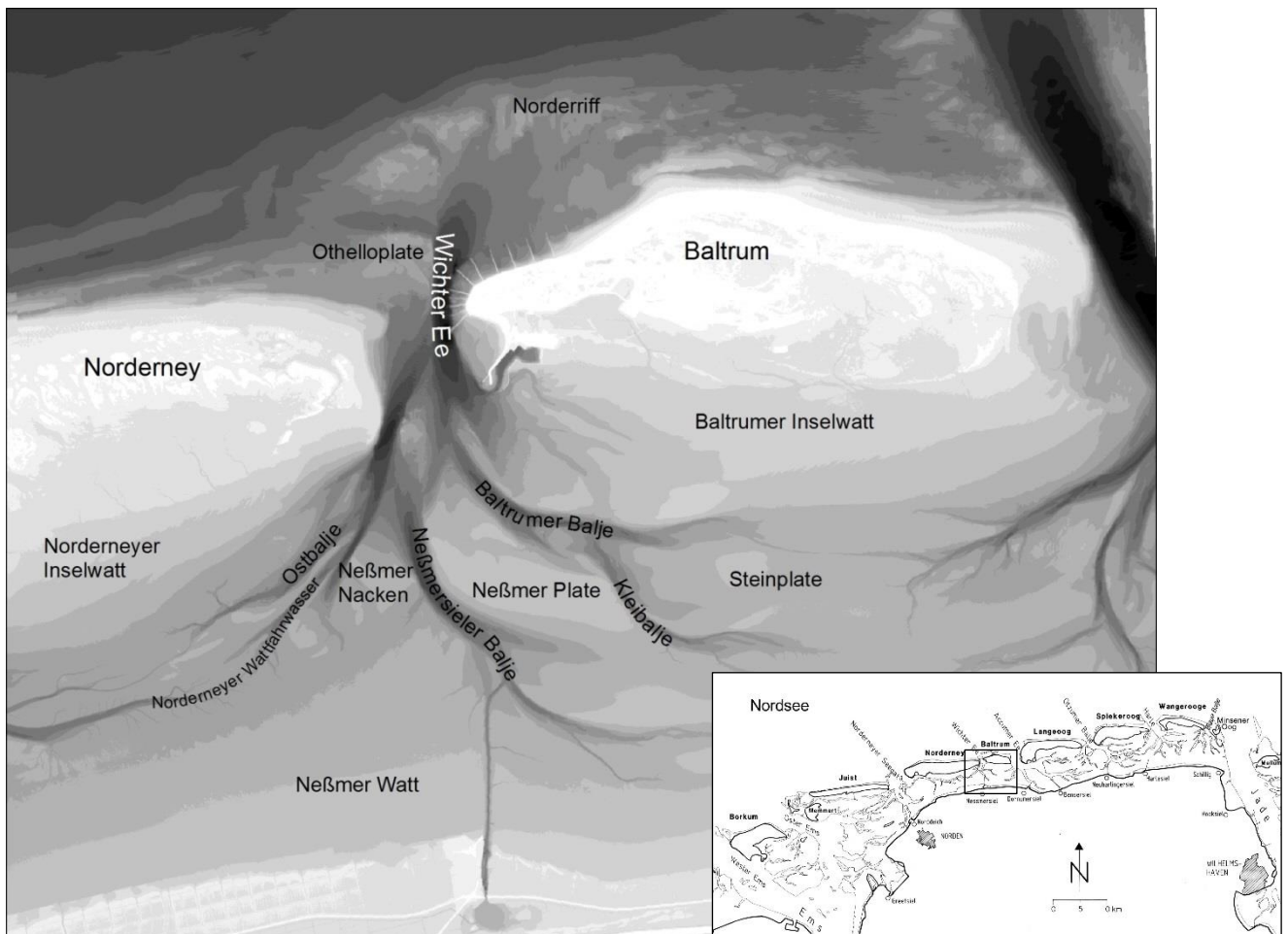


Abb. 1: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

Neben den Tide- und Windverhältnissen wird das Strömungsmuster auch von der Morphologie des Seegats geprägt. Der Ebbeabfluss auf den periodisch trockenfallenden Wattflächen wird vor allem durch das Gefälle des Wattbodens bestimmt. Das Wateinzugsgebiet eines Seegats wird durch die Wattwasserscheiden begrenzt, die zwischen Insel und Festland dem Verlauf der höchsten Geländeerhebung folgen und somit bei Ebbe zuerst trockenfallen (LÜDERS & LUCK 1976). Allerdings können diese topographischen Wattwasserscheiden sowohl durch windinduzierte Strömungen als auch durch die Kinematik der Tidewelle im übergeordneten Gebiet überschritten werden, so dass diese nicht mit den Grenzen des tatsächlichen Wasserabflusses identisch sind. Sie werden als hydrologische Wattwasserscheiden bezeichnet. HERRLING & WINTER (2015) bestätigen durch hydrodynamisch numerische Modellrechnungen, dass die Baltrumer Wattwasserscheide eine hydrologische Wattwasserscheide darstellt. Dies bestätigt frühe Reststrommessungen der Forschungsstelle Küste (KOCH & NIEMEYER 1979).

3 Datengrundlage und -aufbereitung

Die Analysen stützen sich auf Vermessungsdaten aus den Jahren 1962 bis 2013. Es handelt sich dabei überwiegend um Peildaten, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) erfasst wurden. Zwar liegen jährliche Vermessungen der Wasser- und Schifffahrtsämter vor, diese konzentrieren sich aber allein auf die tiefen Fahrwasserrinnen.

In der Topographischen Wattkarte aus dem Jahr 1962 und 1990 sind die Vermessungsergebnisse der Forschungsstelle Küste aus den Jahren 1952 bis 1962 bzw. der Jahre 1988 und 1990 jeweils zu einer morphologisch homogenen Darstellung der Topographie zusammengeführt. In diesen Kartenwerken 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.

det. Eine detaillierte Übersicht der verwendeten Messdaten aus den Jahren 1950 bis 2004 findet sich bei LADAGE & STEPHAN (2005).

Während sich die Topographie von 2005 ebenfalls auf die nautische Vermessung des BSH stützt, basieren die morphologischen Darstellungen aus den Jahren 2011 und 2013 auf hochaufgelösten Laserscanaufnahmen. Da durch die Laserscanabtastung aber nur trockengefallene Flächen höhenmäßig erfasst werden, muss das Rinnensystem zeitnah gepeilt werden. Der Höhenbezug auf NHN ist für alle Kartendarstellungen einheitlich gewählt.

Aus den Vermessungsdaten wurde 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 aus den TINs gleichmäßige Raster (Grids) mit einem Rasterabstand von 5 m berechnet. Die gleichmäßige Flächenrasterung der Geländemodelle ermöglicht 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: Ungenauigkeiten, die aus den topographischen Karten oder den Vermessungsdaten selber herrühren oder Fehler, die aus der Umsetzung und anschließenden Bearbeitung im Geographischen Informationssystem resultieren.

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 den älteren BSH-Daten 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 am 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. Bei der

Berechnung von Rinnenquerschnitten ist diesem Umstand allerdings Rechnung zu tragen, da durch eine plane Rinnensohle die rechnerisch ermittelte Querschnittsfläche zu gering ausfällt.

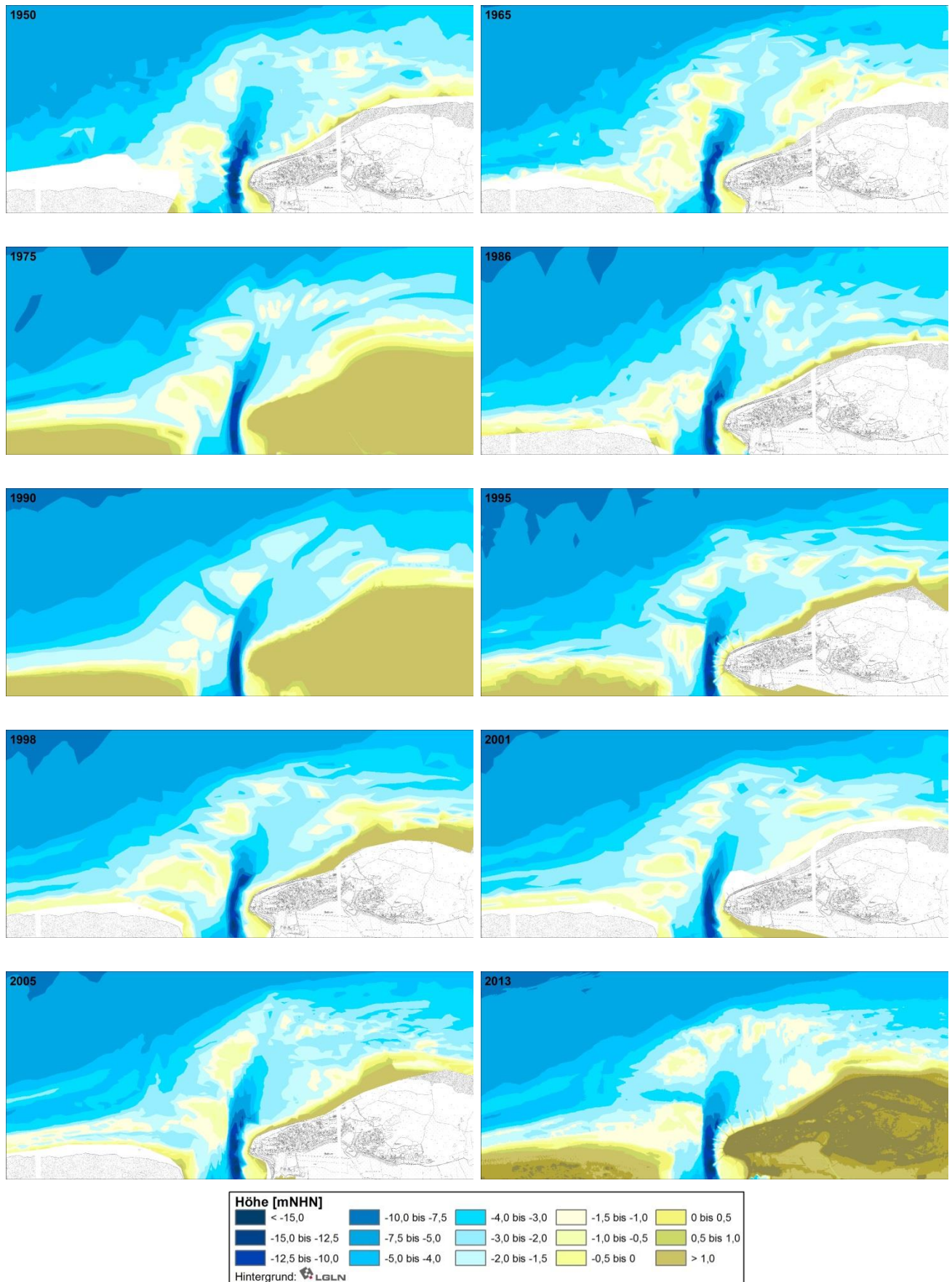


Abb. 2: Morphologische Ausprägung der Wichter Ee in den Jahren 1950 bis 2013

4 Wichter Ee

4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens

Die chronologische Abfolge der topographischen Ausprägungen seit Mitte des letzten Jahrhunderts (Abb. 2) verdeutlicht, dass sich die morphologischen Veränderungen im Rahmen der üblichen Dynamik von Riffbögen bewegen, wo Sand im Zusammenspiel von Litoraldrift und Tideströmung durch einen Riffbogen transportiert wird. LADAGE & STEPHAN (2005) weisen darauf hin, dass deutlich ausgeprägte Rinnen nur zeitweise ausgebildet sind und dann auch nur eine geringe Lagestabilität aufweisen. Auffällig ist die temporär auftretende Bildung einer Rinne innerhalb bzw. nördlich der Othelloplate, die in der Vergangenheit immer wieder festzustellen, und auch in der Topographie aus dem Jahr 2013 deutlich erkennbar ist. Hinweise auf grundsätzliche morphologische Umgestaltungen im Bereich des Riffbogens sind allerdings nicht erkennbar.

4.2 Sedimentvolumen im Riffbogen

Einem methodischen Ansatz von WALTON & ADAMS (1976) folgend wurde das Sedimentvolumen V_0 im Riffbogen als Differenz zwischen der realen und einer idealisierten Topographie ohne Seegat ermittelt (Abb. 3). Entlang der Küstenlinie ist die Abgrenzung des Untersuchungsraumes dabei so gewählt, dass der Einfluss der Wichter Ee nicht mehr erkennbar ist. Diese Bedingung ist westlich der Platenablösungszone einerseits, und östlich der Platananlandungszone andererseits in einer Entfernung von jeweils rund 3,5 km vom Stromstrich der Wichter Ee erfüllt. Durch den fließenden Übergang in den Riffbogen der Accumer Ee ist eine Abgrenzung im Osten durch einen küstennormalen Schnitt nicht möglich. Hier wurde die Grenze deshalb so gewählt, dass sie nach Nordwesten etwa parallel zu dem Teil des Ebbdeltas verläuft, der den Mündungsbereich der Accumer Ee im Westen umschließt.

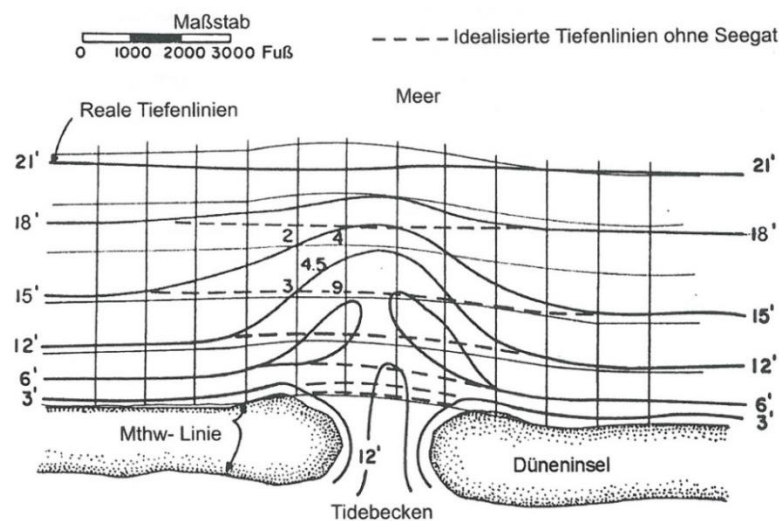


Abb. 3: Definition des Ebbdeltavolumens V_0 nach WALTON & ADAMS (1976)

Seewärts erstreckt sich der Referenzraum soweit, dass der Verlauf der tatsächlichen und fiktiven Tiefenlinien übereinstimmt. Diese Voraussetzung wird entlang der NHN-10m-Linie erfüllt. Die tangentielle Verlängerung der MThw-Linien zwischen Norderney und Baltrum über die Wichter Ee hinweg stellt die Begrenzung zum Tidebecken dar (Abb. 4). Auf Grundlage der fiktiven Tiefenlinien wurde ein DGM erstellt, welches die Basistopographie für die Berechnung des Riffbogensvolumens V_0 bildet.

Zur quantitativen Beurteilung des Sedimenthaushaltes im Riffbogen wurde V_0 mit dem Sedimentvolumen oberhalb definierter Tiefenhorizonte verglichen (Abb. 5). Absolut gesehen treten bei V_0 erwartungsgemäß die größten Volumenänderungen auf, da sich hier die Bezugstopogra-

phie bis zu einer Tiefe von NHN-10 m erstreckt. Entsprechend nehmen auch bei den realen Topographien die maximalen Volumendifferenzen mit steigendem Bezugshorizont ab.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich die Entwicklung von V_0 und realem Sedimentvolumen über die Zeit umso mehr ähnelt, je tiefer der Referenzhorizont gewählt wird: Zunächst ist zwischen den Jahren 1962 und 1975 ein Anstieg im Sedimentvolumen festzustellen, der im Bereich oberhalb von NHN-2 m mit 1,15 Mio. m^3 zwar am geringsten ausfällt, bei einem Ausgangsvolumen von 1,5 Mio. m^3 (1962) aber einen prozentualen Anstieg von gut 75 % bedeutet. Hingegen steigt das Sedimentvolumen oberhalb NHN-6 m absolut um 3,7 Mio. m^3 , was bei einem ursprünglichen Sedimentvolumen von fast 60 Mio. m^3 allerdings gerade einmal eine Volumenzunahme von 6 % darstellt. In der gleichen Zeitspanne steigt V_0 von ursprünglich 6,57 Mio. m^3 auf über 11 Mio. m^3 (70 %).

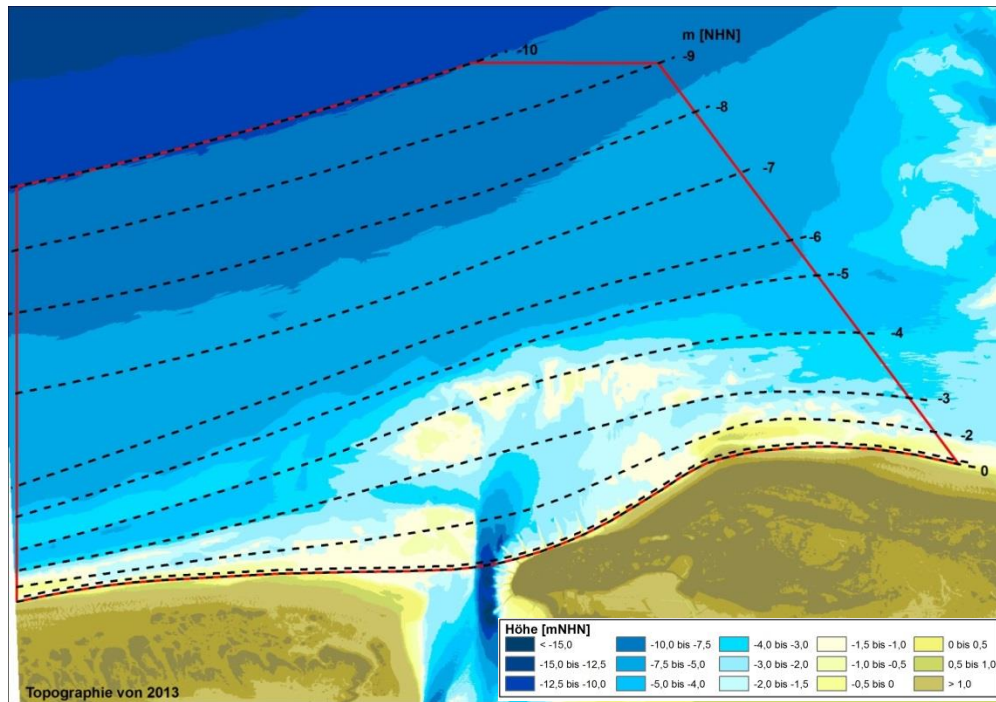


Abb. 4: Riffbogen der Wichter Ee mit idealisierten Tiefenlinien einer fiktiven Topographie ohne Seegat

Während der nachfolgenden 20 Jahre nimmt V_0 dann fast stetig so weit ab, dass 1995 sogar unter den Bedingungen einer Topographie ohne Seegat ein Sedimentverlust von knapp 1,2 Mio. m^3 festzustellen ist. Weniger stetig, aber ebenfalls mit abnehmender Tendenz zeigt sich die Entwicklung des Sedimentvolumens oberhalb der Tiefenhorizonte NHN-6 m und NHN-5 m im selben Zeitraum. Für den Bereich oberhalb von NHN-2 m wird bereits 1986 das geringste Volumen (1,38 Mio. m^3) gemessen, welches dann aber bis zum Jahr 2013 auf fast 2,5 Mio. m^3 ansteigt. Gegenüber dem Jahr 1962 stellt das einen Anstieg von über 60 % dar. Bezogen auf den Bereich oberhalb von NHN-3 m und NHN-4 m ist bis 1986 ebenfalls der stärkste Volumenrückgang festzustellen, während nachfolgend bis 1995 nur noch eine geringe Abnahme zu beobachten ist (NHN-4 m) oder das Sedimentvolumen recht stabil bleibt.

Sowohl für V_0 als auch für das Volumen oberhalb der fünf betrachteten Tiefenstufen ist zwischen 1995 und 1998 zunächst ein erheblicher Anstieg festzustellen, an die sich bis zum Jahr 2013 eine Phase anschließt, in der sich das Volumen nur noch geringfügig verändert. Insgesamt führt der seit 1995 festzustellende Sedimenteintrag dazu, dass 2013 das Volumen oberhalb definierter Tiefenhorizonte wie auch für V_0 stets über der Ausgangssituation von 1962 liegt.

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

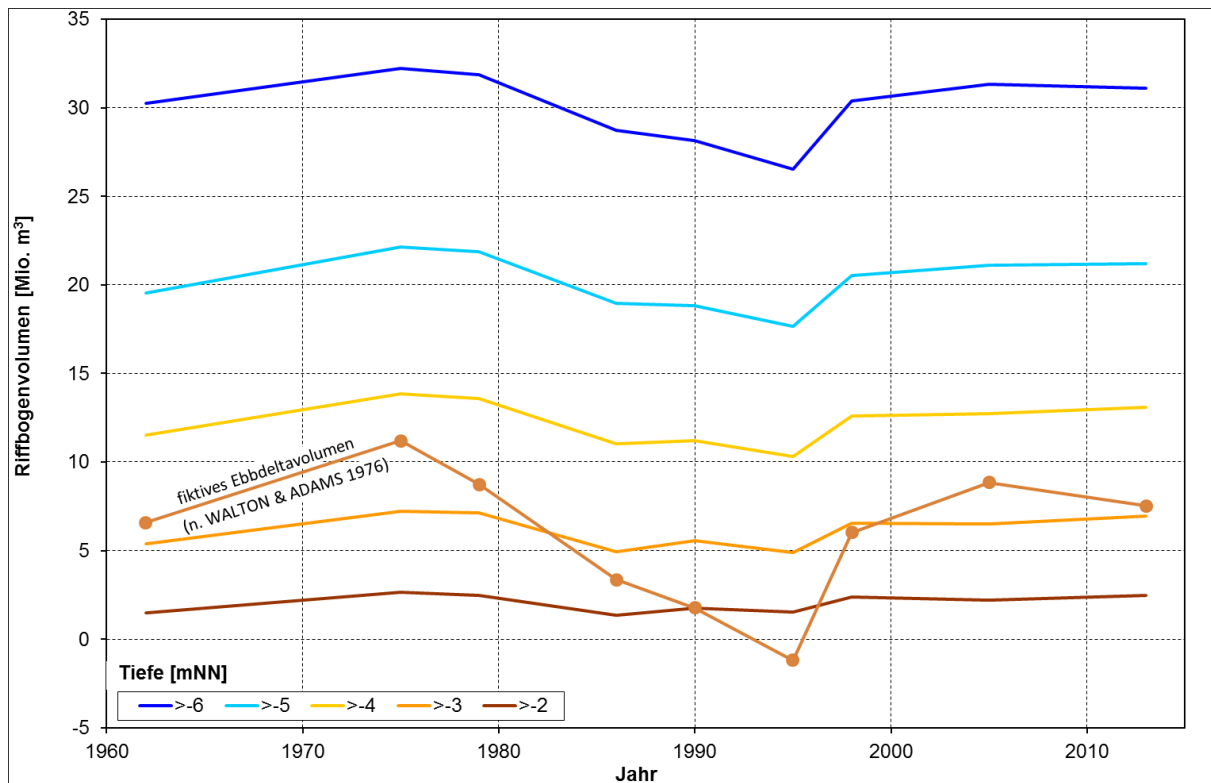


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des Riffbogenvolumens oberhalb definierter Tiefenhorizonte und bezogen auf eine fiktive Riffbogentopographie ohne Seegat nach WALTON & ADAMS (1976)

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 der Wichter Ee nicht immer zeitgleich oder vollständig erfasst wurde, stehen für die Überprüfung des funktionalen Zusammenhangs zwischen V_0 und V_T nur insgesamt fünf Datensätze zur Verfügung (Abb. 6). Zum einen wird deutlich, dass die Werte für die Wichter Ee stets unterhalb der von WALTON & ADAMS (1976) bestimmten Ausgleichsgeraden liegen, zum anderen weist die, auch bei den Untersuchungen im Bereich des Norderneyer Seegats festgestellte (MEYER 2014), 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) bereits vermutet.

Belastbare Aussagen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungstendenzen oder hinsichtlich des Erreichens eines morphologischen Gleichgewichtszustandes sind aus der von WALTON & ADAMS

(1976) postulierten funktionalen Abhängigkeit zwischen Tide- und Riffbogenvolumen deshalb nicht ableitbar.

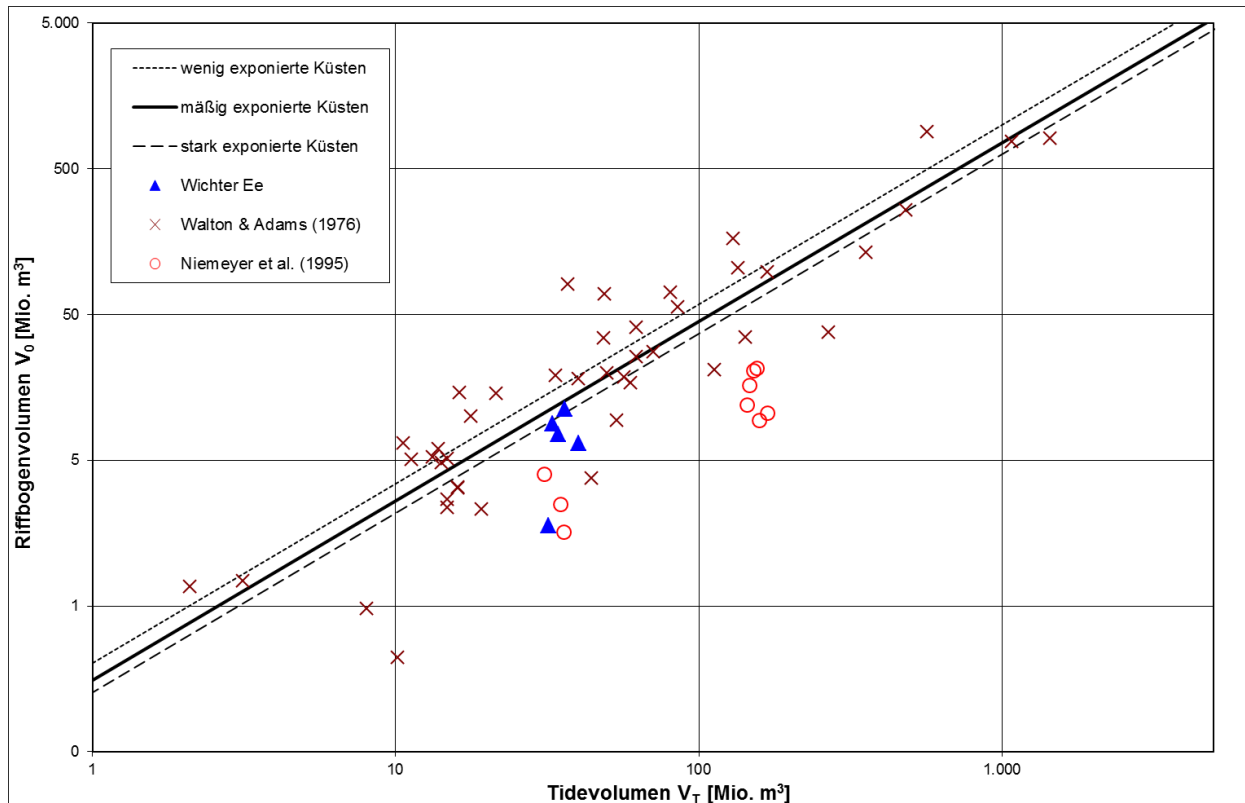


Abb. 6: Riffbogenvolumen V_0 als Funktion des Tidevolumens V_T

5 Tidebecken der Wichter Ee

5.1 Morphologische Entwicklung

Dem Historischen Kartenwerk von HOMEIER et al. (2010) zufolge hat sich die Neßmersieler Balje aus der ehemaligen Landbalje entwickelt, die unmittelbar in die Wichter Ee entwässert, und stellt somit keine der Ostbalje hierarchisch untergeordnete Rinne dar, wie es von LADAGE & STEPHAN (2005) beschrieben wird. Entsprechend ergeben sich insbesondere bei den nachfolgenden Kapiteln 5.2 und 5.3 gegenüber den Untersuchungen von LADAGE & STEPHAN auch andere Abgrenzungen der Teileinzugsgebiete im Westen des Untersuchungsgebietes. Ostbalje und Neßmersieler Balje sind somit gleichberechtigte Rinnen, die gemeinsam in die Wichter Ee münden.

In der Topographie von 1962 bildet die Ostbalje eine Rinne, die dicht unterhalb von Norderney das östliche Inselwatt begrenzt. Während sich die Ostbalje in den nächsten Jahrzehnten erheblich zurückbildet, vertieft sich parallel dazu eine weiter südlich gelegene, namenlose Rinne so weit, dass sie ab dem Jahr 2001 den Namen der Ostbalje übernimmt. Nachfolgend spaltet sich die Ostbalje auf und bildet aktuell drei Ausläufer.

Zwischen 1962 und 1990 kommt es entlang der Wattwasserscheide zwischen dem WEG der Wichter Ee und dem Norderneyer Seegat zu einer deutlichen Ostverlagerung im südlichen Teil der primären Wattwasserscheide, weil sich hier Ausläufer des (Norderneyer) Riffgats ostwärts ausdehnen. Zu erwähnen ist schließlich noch, dass die Neßmersieler Balje zwischen 1990 und 2001 in Bereiche vordringt, die bis dahin über Kleibalje entwässerten. Weitere bemerkenswerte morphologische Veränderungen treten im Weg der Wichter Ee nicht auf.

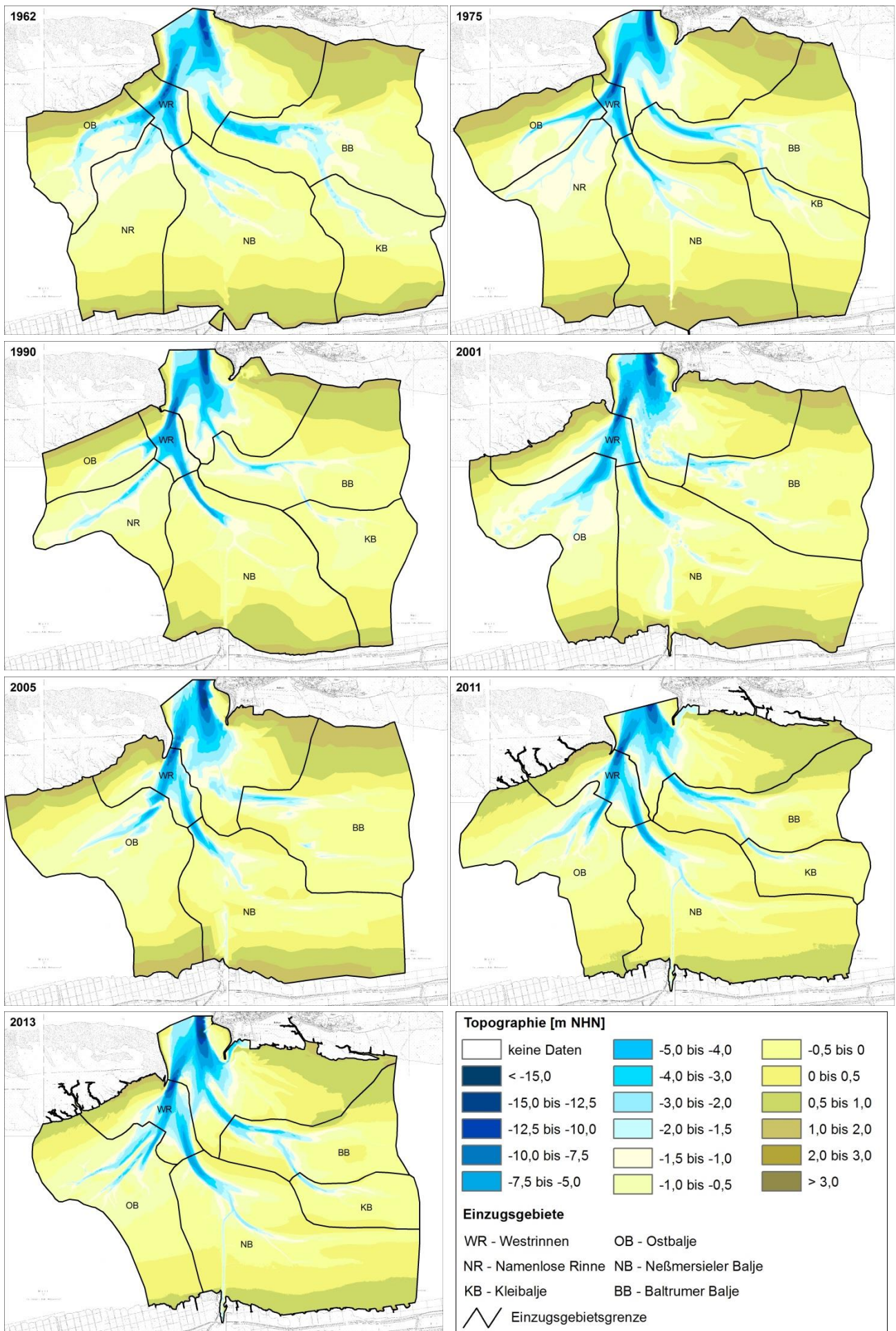


Abb. 7: Morphologische Veränderungen im Einzugsgebiet der Wichter Ee zwischen 1962 und 2013

5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens

Zwischen den Jahren 1962 und 1990 reduziert sich die Einzugsgebietsfläche A_b der Wichter Ee von ursprünglich gut 26 km² um knapp 20 % auf etwa 21 km²; einem Wert, der sich nachfolgend bis 2013 dann aber nicht mehr wesentlich ändert. In gleicher Größenordnung geht diese Entwicklung mit der prozentualen Abnahme des Tidevolumens V_T einher, welche sich von 1962 bis 1990 von rund 40 Mio. m³ auf 32 Mio. m³ reduziert. Normiert über den Tidehub ist der prozentuale Rückgang von V_T mit 19,6 % sogar exakt genauso groß wie für A_b . Verantwortlich für diese Flächenabnahme ist nicht nur die bereits im letzten Kapitel erwähnte ostwärts gerichtete Verlagerung der Wattwasserscheide zwischen Norderneyer Seegat und Wichter Ee, sondern auch die gegenläufig gerichtete, leichte Verschiebung der Wattwasserscheide zwischen Wichter und Accumer Ee. Auch die weiteren Größen- bzw. Volumenschwankungen bis 2005 sind fast ausschließlich auf Verlagerungen der beiden primären Wattwasserscheiden zurückzuführen.

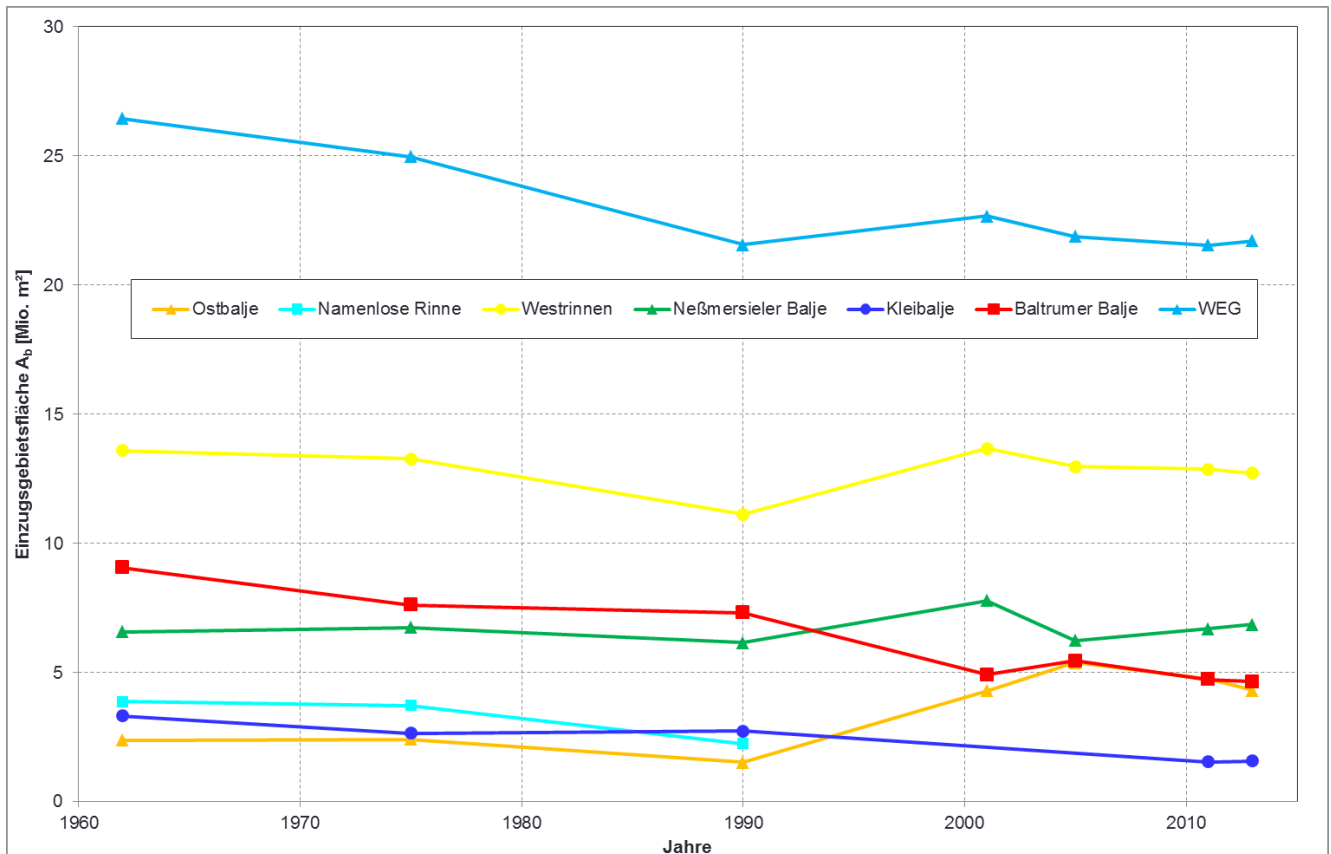


Abb. 8: Entwicklung der Einzugsgebietsgröße A_b

Die sprunghafte Zunahme von V_T und A_b im Teileinzugsgebiet (TEG) der Ostbalje wird vor allem durch den Umstand hervorgerufen, dass sich das ursprüngliche TEG der Ostbalje stark zurück entwickelt und der Name schließlich auf das TEG der ursprünglich namenlosen Rinne übergeht (s. Kap. 5.1).

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), WALTON & ADAMS (1976), RENGGER (1974), EYSINK (1991) und DIEKMANN (1989). Im Projekt WADE („Wadden Sea morphological development due to an accelerated relative sea-level-rise“) wurde u.a. für das Ostfriesische Wattenmeer 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).

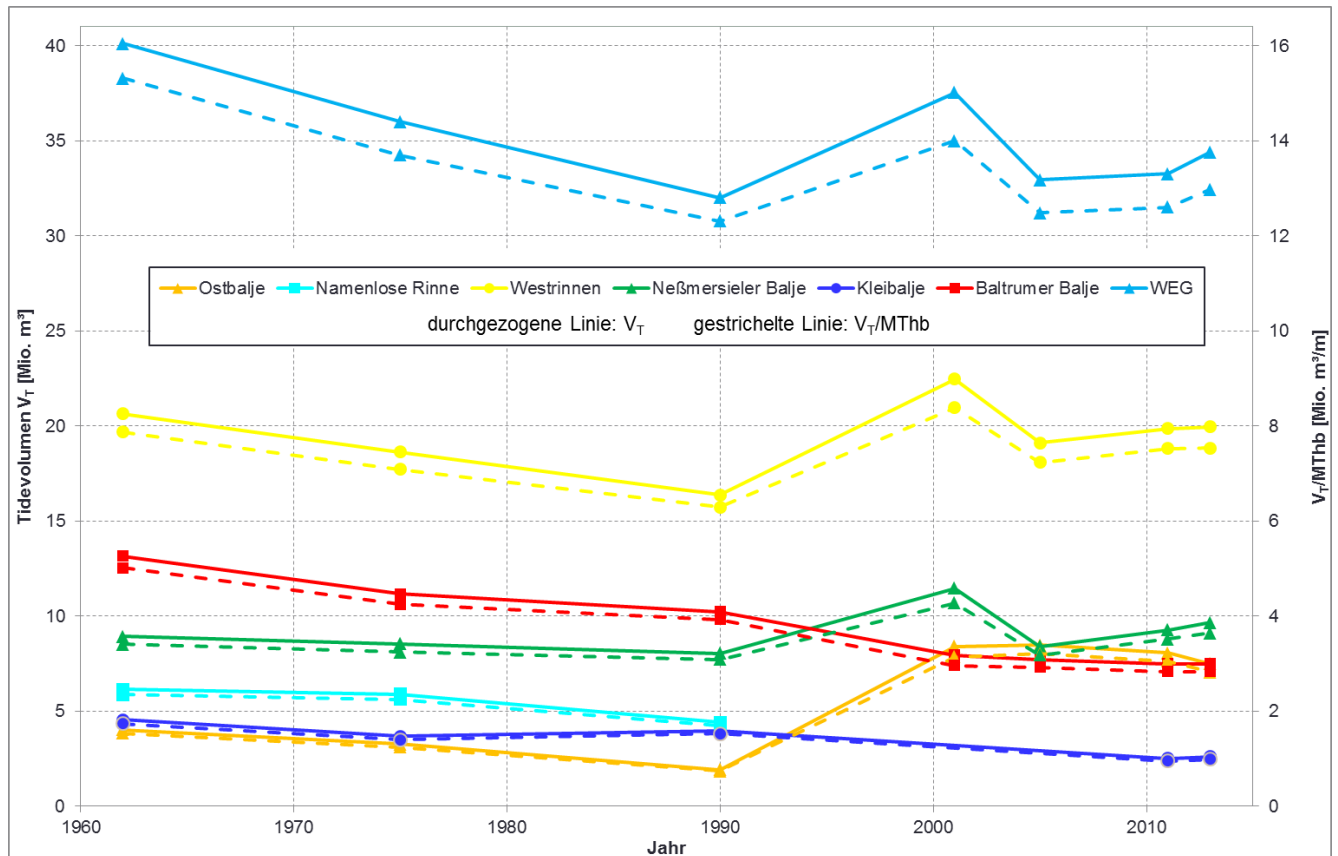


Abb. 9: Entwicklung des Tidevolumens und des über den mittleren Tidehub normierten Tidevolumens

Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen von LADAGE & STEPHAN (2004, 2005), LADAGE et al. (2006) und MEYER (2014) in den Einzugsgebieten einiger ostfriesischer Seegaten bestätigen erwartungsgemäß die funktionalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern. Allerdings weichen diese aber unterschiedlich stark von den in WADE ermittelten ab, wofür eine Vielzahl von Faktoren verantwortlich sein kann: Insbesondere ist 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 neueren Analysen und der vorliegenden Arbeit deutlich mehr topographische Zustände zugrunde liegen. Im Projekt WADE wurden für die Topographie 1990 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, dürften Abweichungen durch Fehler bei der Flächen- und Volumenbestimmung ausgeschlossen sein.

Entsprechend der Untersuchungsergebnisse im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats (MEYER 2014) werden auch für den hier betrachteten Untersuchungsraum Wichter Ee die empirischen Zusammenhänge zwischen den Parametern stets am besten durch einen linearen Trend wiedergegeben. Dies steht im Gegensatz zu den Analyseergebnissen im Projekt WADE, wo die Abhängigkeit der verschiedenen Parameter teilweise besser durch eine Potenzfunktion dargestellt wird.

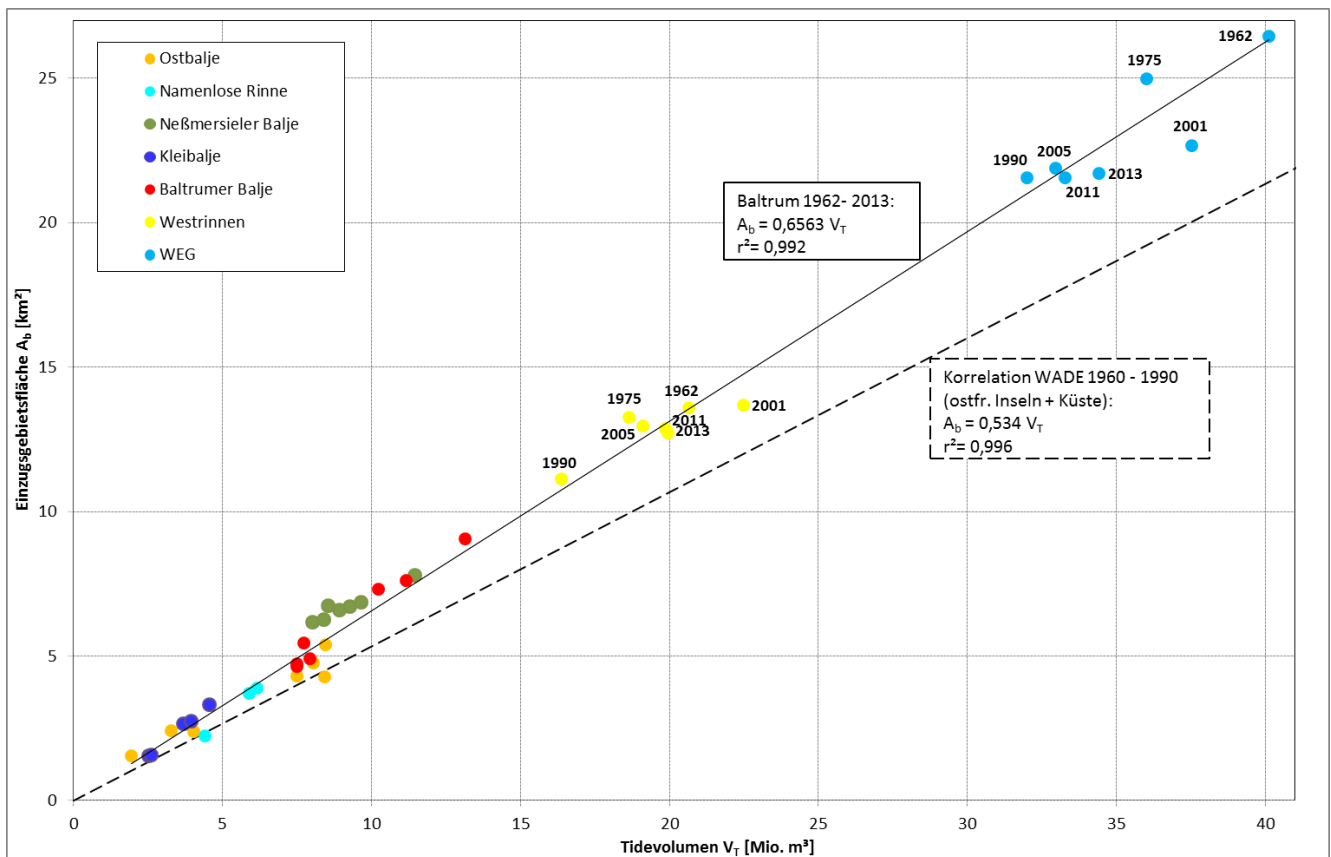


Abb. 10: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Wichter Ee

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 0,656 eine größere Steigung aufweist, als die in WADE für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste ermittelte (s. Abb. xx). Sofern dieser von NIEMEYER et al. (1995) ermittelte Koeffizient überhaupt als regionaltypisch anzusehen ist, dürfte aufgrund des engen statistischen Zusammenhangs zwischen V_T und A_b im WEG der Wichter Ee kaum zu erwarten sein, dass eine Anpassung an die im Projekt WADE ermittelte Ausgleichsgerade erfolgt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sich zwischen den beiden Parametern ein dynamisches Gleichgewicht eingestellt hat, das kurzfristige Störungen vor allem durch Verlagerungen der primären Wattwasserscheiden erfährt.

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.

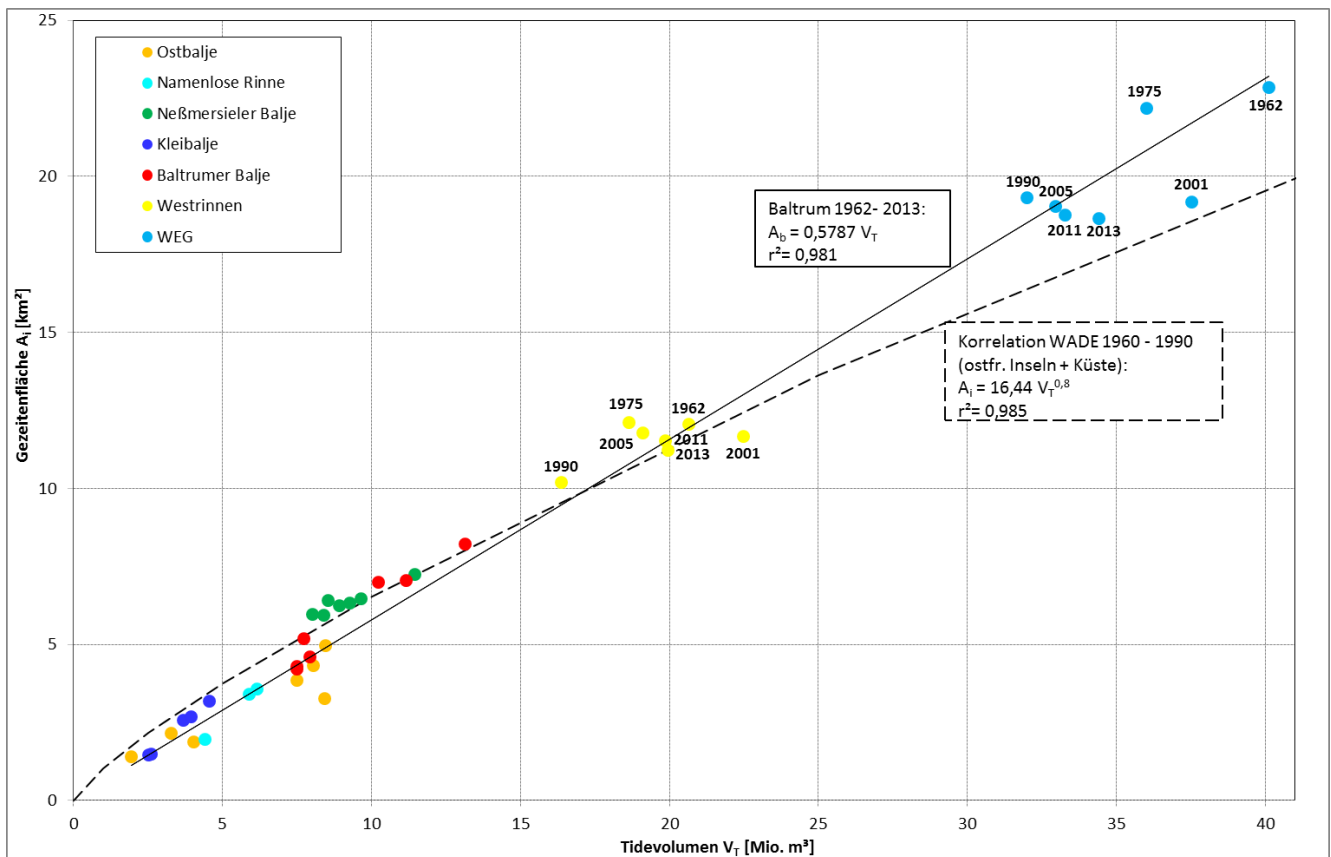


Abb. 11: Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Wichter Ee

Die Streuung der Messpunkte um die Ausgleichsgerade verdeutlicht, dass die Abhängigkeit der Gezeitenfläche A_i vom Tidevolumen im Untersuchungsgebiet nicht ganz so deutlich ausgeprägt ist wie die der Einzugsgebietsfläche von V_T . Dies dürfte im Wesentlichen darin begründet sein, dass die Lageveränderungen der primären Wattwasserscheiden ganz überwiegend in Bereichen stattfinden, die deutlich über der MTnw-Linie liegen. Somit kommt es zu deutlichen Größenschwankungen bei der Gezeitenfläche, während das Tidevolumen weniger stark variiert.

5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche

Die Abhängigkeit der Größe der Gezeitenfläche von der Größe des Einzugsgebietes 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 durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird (Abb. 15).

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,997 besteht eine hochsignifikante, lineare Abhängigkeit der Gezeitenfläche A_i von der Einzugsgebietsfläche A_b . Auf Größenänderungen von A_b – hervorgerufen durch Verlagerungen gemeinsamer TEG-Grenzen - reagiert A_i scheinbar recht zeitnah, wie insbesondere die perlschnurartig aufgereihten Messwerte für die TEG der Neßmersieler und Baltrumer Balje sowie die Kleibalje verdeutlichen.

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:

$A_c = C_b \cdot V_T^n$
mit C_b = Koeffizient der Regression empirischer Daten und n = Exponent

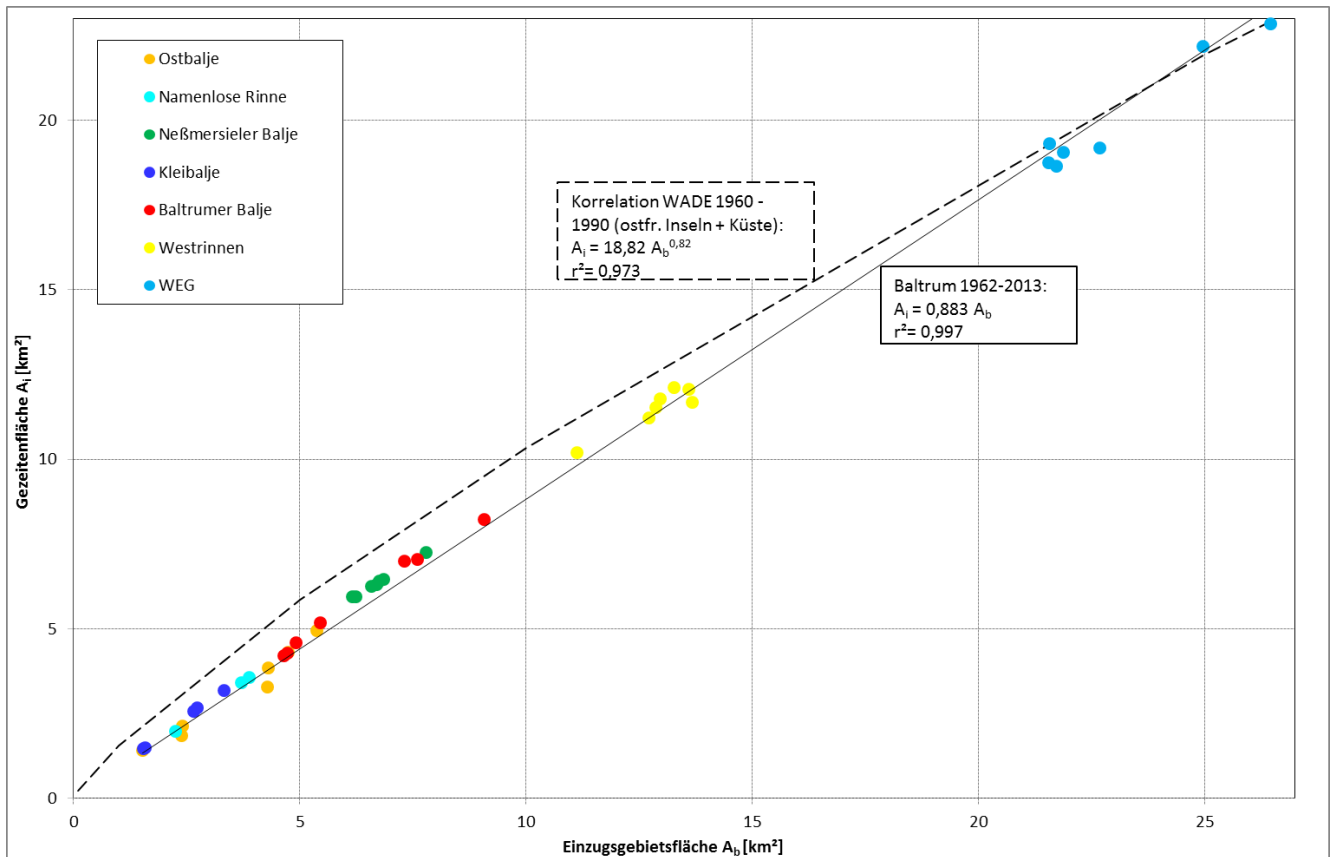


Abb. 12: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsfläche im Tidebecken der Wichter Ee

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).

Als nicht signifikant ($r^2=0,834$) ist die Abhängigkeit des Rinnenquerschnitts vom Tidevolumen einzustufen. So bleibt der Rinnenquerschnitt trotz steigendem Tidevolumen konstant (Kleibalje), nimmt zeitweise sogar ab (Baltrumer Balje) oder zeigt keine erkennbare Abhängigkeit (WEG). Zu den Faktoren, die diesen wenig ausgeprägten Zusammenhang zwischen den beiden Parametern bedingen, dürften u.a. die unterschiedliche Genauigkeit und Auflösung der Vermessungsdaten, die Lage des Rinnenprofils und die Wahl des Bezugshorizontes gehören, unterhalb dem der Rinnenquerschnitt ermittelt wird. Auch darf nicht außer Acht gelassen werden, 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.

6 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Untersuchungen von LADAGE & STEPHAN (2004) werden neuere Vermessungsdaten ausgewertet und - getrennt für den Riffbogen der Wichter Ee und für dessen Einzugsgebiet - aktuelle morphologische Veränderungen aufgezeigt sowie in Anlehnung an die Arbeiten von NIEMEYER et al. (1995) hydrologisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen durchgeführt.

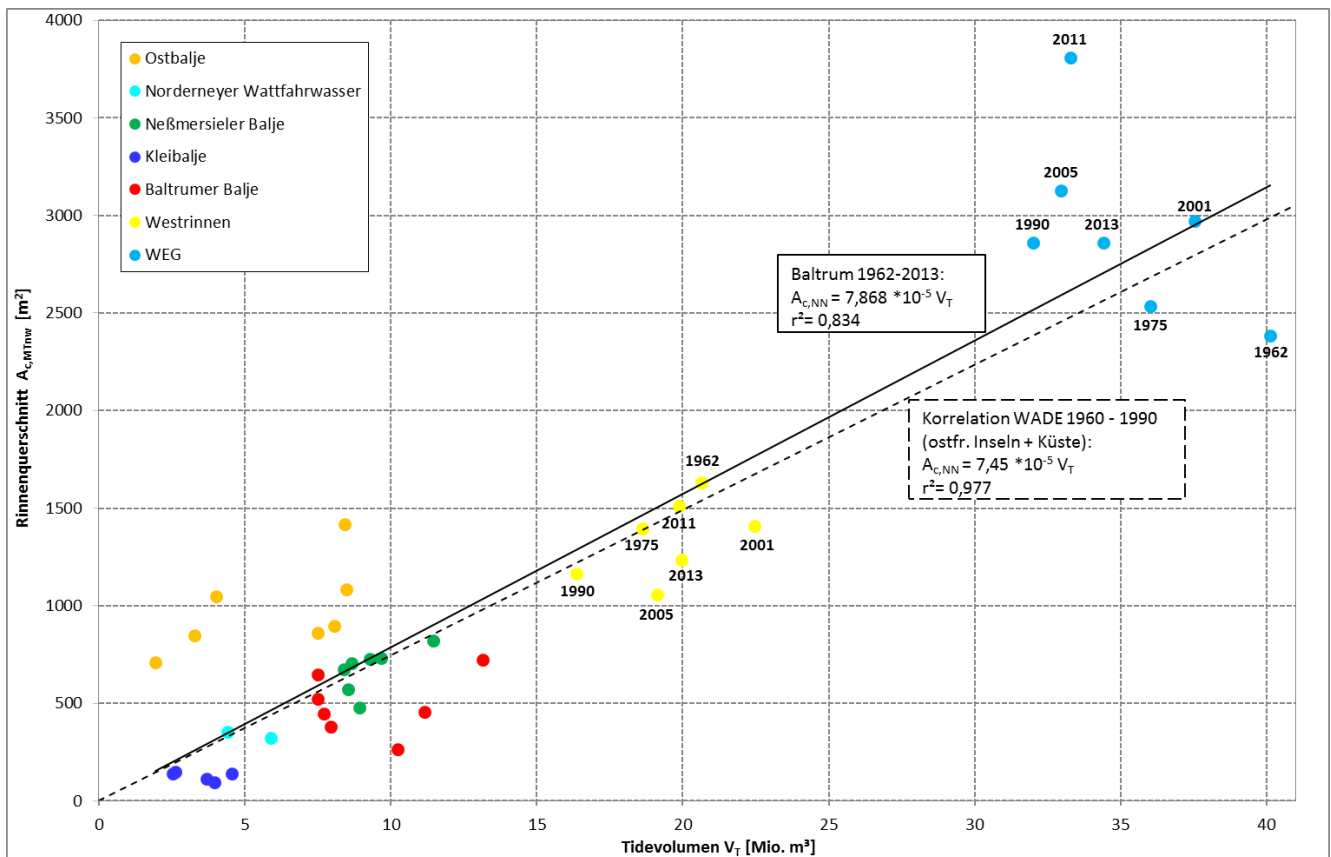


Abb. 13: Rinnenquerschnitt der Wichter Ee und seiner Nebenrinnen als Funktion des Tidevolumens

Erwartungsgemäß unterliegt das Ebbdelta morphologischen Veränderungen, die ihre Ursache darin haben, dass Sediment in Form von Platen durch den Riffbogen transportiert und durch Strömung und Seegang ständig umgeformt werden. Es sind aber keine Anzeichen für eine grundsätzliche, strukturell bedingte Umgestaltung erkennbar.

Als wesentliche Veränderung im Einzugsgebiet der Wichter Ee ist die durch Verlagerung der östlichen, primären Wattwasserscheide bedingte Abnahme der Einzugsgebietsgröße zu nennen, sowie die Ausdehnung der Neßmersieler Balje in Bereiche, die vormals über die Kleibalje entwässerten. Diese Veränderungen treten in den 1990er Jahren auf und sind daher bereits von LADAGE & STEPHAN (2005) beschrieben. Die Ostbalje bildet sich zurück, während eine sich unmittelbar südlich davon gelegene Rinne ausdehnt. Ab dem Jahr 2001 geht der Name Ostbalje auf diese namenlose Rinne über, während die alte Rinnenstruktur fast völlig verschwindet.

Für das Einzugsgebiet der Wichter Ee sowie für die Teileinzugsgebiete hierarchisch nachgeordneter Rinnen werden auf Basis der verfügbaren Topographien jeweils die Einzugsgebietsgröße, Gezeitenfläche, Rinnenquerschnitt und mittleres Tidevolumen bestimmt. Bis auf die Abhängigkeit des Rinnenquerschnitts vom Tidevolumen stehen die Parameter in signifikanten bis hochsignifikanten Zusammenhang, der stets am besten durch eine lineare Ausgleichsfunktion wiedergegeben wird. Es ist davon auszugehen, dass sich das zwischen diesen Parametern weitgehend ein morphodynamisches Gleichgewicht eingestellt hat.

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

DAVIES, J.L. (1964): A morphogenetic approach to world shorelines. – Zeitschrift für Geomorphologie, Sonderheft zum 70. Geburtstag von Prof. H. Mortensen

- 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.
- HERRLING, G. & C. WINTER (2015):** Tidally- and wind-driven residual circulation at the multiple-inlet system East Frisian Wadden Sea. Cont. Shelf Res. 106: 45-59.
- HOMEIER, H., STEPHAN, H.-J. & NIEMEYER, H.D. (2010):** Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. – Ber. der Forschungsstelle Küste 43/2010.
- 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 (1979): Strömungsmessungen im Bereich der Wattwasserscheiden von Norderney und Baltrum sowie im Seegat Wichter Ee. - Jber. Forschungsstelle Insel- und Küstenschutz Norderney, 1980, 31
- 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.; Stephan, H.-J. (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
- C. Meyer (2014):** Morphodynamische Analysen im Bereich des Norderneyer Seegats und seines Einzugsgebietes. – Untersuchungsber. NLWKN-Forschungsstelle Küste 1/2014
- NIEMEYER, H.D. (1979):** Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. - Die Küste, 34
- NIEMEYER, H.D. (1983):** Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. – BMFT-Forschungsbericht MF 203
- 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
- NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. (1997):** Variationen im lokalen Seegangsklima infolge von Änderungen im Riffbogen. – Ber. Forschungsstelle Küste Norderney, 41
- O'BRIEN, M.P. (1931):** Estuary tidal prisms to entrance areas. - ASCE Civ. Eng., Vol. 1, No. 8
- O'BRIEN, M.P. (1967):** Equilibrium flow areas and inlets on sandy coasts. In: Journal of Waterways and Harbours Division: 43-52.

- RENGER, E. (1974):** Untersuchungen von Watteinzugsgebieten. - 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
- WALTON, T.L. & W.D. ADAMS (1976):** Capacity of inlet outer bars to store sand. - Proc. 15th Int. Conf. Coast. Eng., Vol. 2