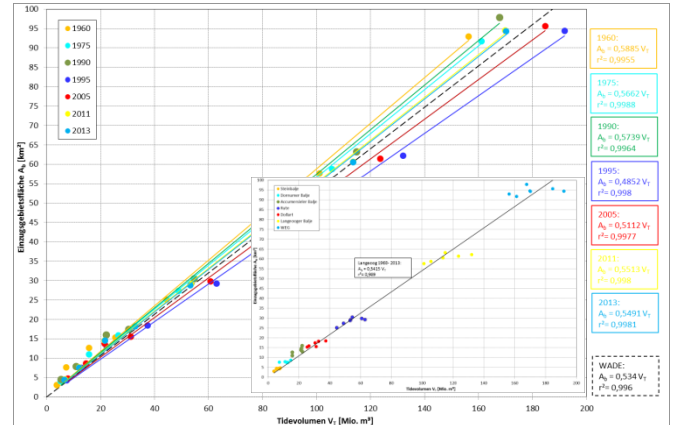
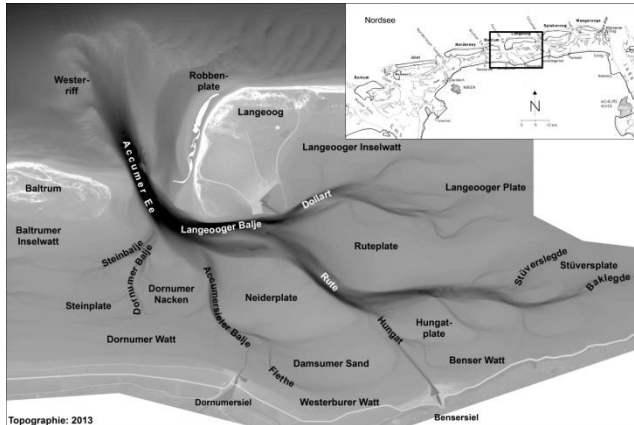


Untersuchungsbericht 2/2016



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



Cornelius Meyer & Andreas Wurpts

Morphodynamische Analysen im Bereich der Accumer Ee und ihres Einzugsgebietes



Niedersachsen

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
- Forschungsstelle Küste -
2016

Titelblatt: links: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes
rechts: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Accumer Ee
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 & Andreas Wurpts

**Morphodynamische Analysen im Bereich der Accumer Ee
und ihres Einzugsgebietes**

Norderney, im November 2016

Geschäftsbereichsleiter
Forschungsstelle Küste



Dr.-Ing. Andreas Wurpts

stellv. Aufgabenbereichsleiter
Morphologie des Küstengebietes



Dr. Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich der Accumer Ee und ihres Einzugsgebietes

Cornelius Meyer & Andreas Wurpts

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1 Einleitung und Zielsetzung	2
2 Das Untersuchungsgebiet	2
3 Datengrundlage und -aufbereitung	3
4 Accumer Ee.....	4
4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens.....	4
4.2 Sedimentvolumen im Riffbogen.....	6
5 Tidebecken der Accumer Ee	8
5.1 Morphologische Entwicklung.....	8
5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens	9
5.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen	11
5.3.1 Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Tidevolumen	12
5.3.2 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen.....	13
5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche	13
5.3.4 Funktionaler Zusammenhang von Tidevolumen und Rinnenquerschnitt	14
6 Zusammenfassung	15
7 Literaturverzeichnis	16

1 Einleitung und Zielsetzung

Als Teil des Projektes „Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz ostfriesische Inseln“ wurden von LADAGE (2002) die morphologischen Veränderungen im Watteinzugsgebiet der Accumer Ee und schwerpunktmäßig die Gestaltungsprozesse des Seegats und des vorgelagerten Riffbogens mit dem Ziel analysiert, zukünftige Entwicklungstendenzen und ihre Auswirkungen auf die Strände von Langeoog aufzuzeigen, da es insbesondere im Bereich des Pirolatals seit Ende der 1980er Jahre verstärkt zu Dünenabbrüchen kommt. Die Ergebnisse dieser detaillierten Untersuchungen sollten eine wesentliche Grundlage für Ausarbeitung zukünftiger Schutzkonzepte der Insel Langeoog bilden.

Aufbauend auf diesen Untersuchungsergebnissen werden in der nachfolgenden Arbeit neue Vermessungsdaten analysiert, die aktuellen morphologischen Veränderungen im Bereich der Accumer Ee und ihres Einzugsgebietes qualitativ und quantitativ beschrieben und in den Kontext der bisherigen Erkenntnisse über die morphologischen Prozesse gestellt. Ergänzt werden die Untersuchungen durch hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das rund 95 km² große Einzugsgebiet der Accumer Ee gliedert sich morphologisch in eine Vielzahl von Rinnen und bei Niedrigwasser trockenfallenden Wattflächen: Südlich von Baltrum schließt sich das gleichnamige Inselwatt an, das durch eine bisher namenlose Rinne - nachfolgend als Steinbalje bezeichnet - von der Steinplate getrennt wird. Die Dornumer Balje stellt die Abgrenzung der Steinplate im Westen und dem Dornumer Nacken im Osten dar. Ihre Ausläufer reichen bis in das dem Festland vorgelagerte Dornumer Watt. Die Accumersieler Balje verbindet Dornumersiel mit der Langeooger Balje und bildet die Grenze zur Neiderplate. Durch die Flethe vom Westerburer Watt getrennt, schließt sich der Damsumer Sand im Süden an die Neiderplate an. Über das Hungat entwässert Bensorsiel in die Rute und bildet die Grenze zum östlich gelegenen Benser Watt und zur Hungatplate. Die Rute als südöstliche Fortsetzung der Langeooger Balje umschließt zusammen mit der Dollart die Ruteplate und teilt sich in ihrem Wurzelbereich in die Stüverslegde und Baklegde auf, die wiederum die Stüversplate im Norden und Süden begrenzen. Die Dollart bildet die südliche Begrenzung des Langeooger Inselwatts und reicht mit ihren Ausläufern bis in die Langeooger Plate (Abb. 1).

Im Zusammenspiel von Küstenlängs- und -quertransport hat sich ein Ebbdelta gebildet, dass die Accumer Ee im Mündungsbereich umspannt und von mehreren Rinnen durchzogen ist. Namentlich benannt sind im Riffbogen nur das Westerriff und die Robbenplate (Abb. 1).

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 Pegel Langeoog 2,65 m und erhöht sich auf 2,93 m am Pegel Wangerooge-Ost, jeweils gemittelt über den Zeitraum 2009 bis 2013. Durch den Einfluss von Nipp- und Springtiden kann der Tidenhub jedoch um +/- 0,7 m variieren (GOLDENBOGEN et al. 1998). 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.

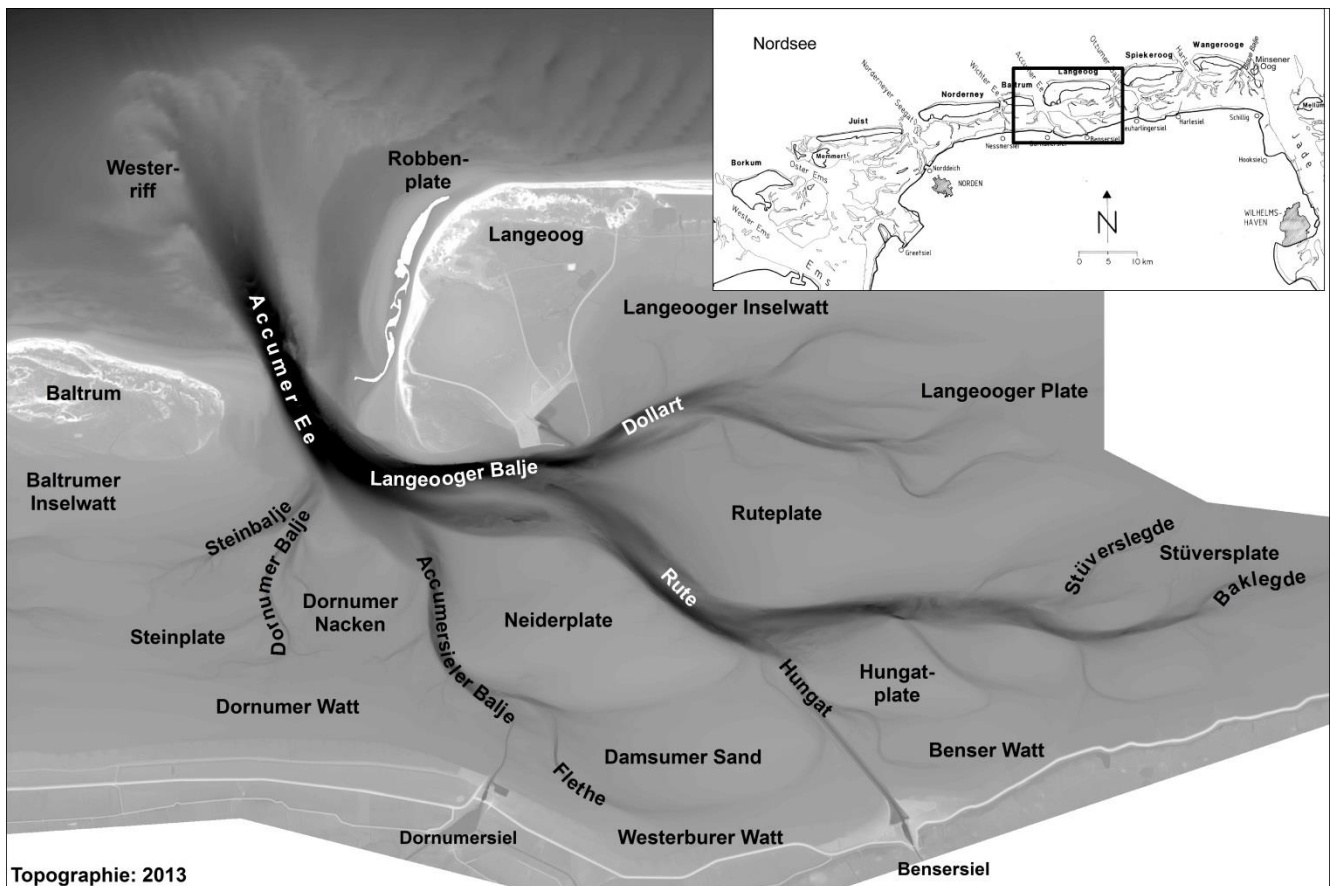


Abb. 1: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

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 Wattwasserscheiden im Bereich des ostfriesischen Wattenmeeres hydrologische Wattwasserscheiden darstellen.

3 Datengrundlage und -aufbereitung

Die Analysen stützen sich auf Vermessungsdaten aus den Jahren 1950 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 1960 und 1990 sind die Vermessungsergebnisse der Forschungsstelle Küste aus den Jahren 1952 bis 1961 bzw. der Jahre 1988 und 1991 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. Eine detaillierte Übersicht verfügbarer Messdaten aus den Jahren 1950 bis 2002 findet sich bei LADAGE (2002).

Während sich die Topographie der Jahre 2004 bis 2006 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 trockenengefallene 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 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 (DGM) wurden auf Qualität und Plausibilität geprüft und gegebenenfalls nach der Fehlerkorrektur der entsprechenden Punktdaten neu generiert.

In einem nächsten Schritt wurden aus diesen DGM's gleichmäßige Raster (Grids) mit einem Rasterabstand von 5 m berechnet. Die gleichmäßige Flächenraasterung der Geländemodelle ermöglicht die flächenhafte Berechnung 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 Beschilderung 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.

4 Accumer Ee

4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens

Die chronologische Abfolge der topographischen Ausprägungen seit Mitte des letzten Jahrhunderts (Abb. 2 u. 3) verdeutlicht, dass sich die von LADAGE (2002) beschriebene Verschwenkung

der Rinnenachse der Accumer Ee entgegen dem Uhrzeigersinn, die seit Mitte der 1970er Jahre festzustellen ist, auch in den letzten gut zehn Jahren bis 2013 in abgeschwächter Intensität fortsetzt: Diese seit nunmehr vier Jahrzehnten anhaltende Entwicklung führt nicht nur dazu, dass die Accumer Ee einen geradlinigeren Verlauf erhält, womit eine Ostverlagerung der tiefen Rinne auf Höhe des Flinthörns einher geht, sondern sie führt auch zu einer Ausdehnung der Hauptstromrinne nach Nordwesten. Damit verändert sich auch Form und Lage des Riffbogens, der sich weiter nach Norden ausdehnt, während sich der Scheitelpunkt nordwestwärts verlagert.

Auffällig ist in den letzten Jahren die Entwicklung im Gebiet der Robbenplatte (Abb.2): Hier akkumulieren zwischen 2001 und 2006 erhebliche Sedimentmassen, die nachfolgend Richtung Langeoog transportiert werden und bis 2013 unmittelbar vor dem Nordweststrand bis zum Flinthörn eine ausgedehnte, in weiten Bereichen über MThw aufragende Sandbank bilden. Damit hat diese Plate zunächst eine seegangsdämpfende Wirkung und wird sich, wenn sie sich vollständig mit dem Strand verbunden hat, positiv auf das Strandniveau auswirken. Die Topographie aus dem Jahr 2013 verdeutlicht aber auch, dass seewärts dieser ausgedehnten Sandbank zunächst keine weiteren Platen erkennbar sind.

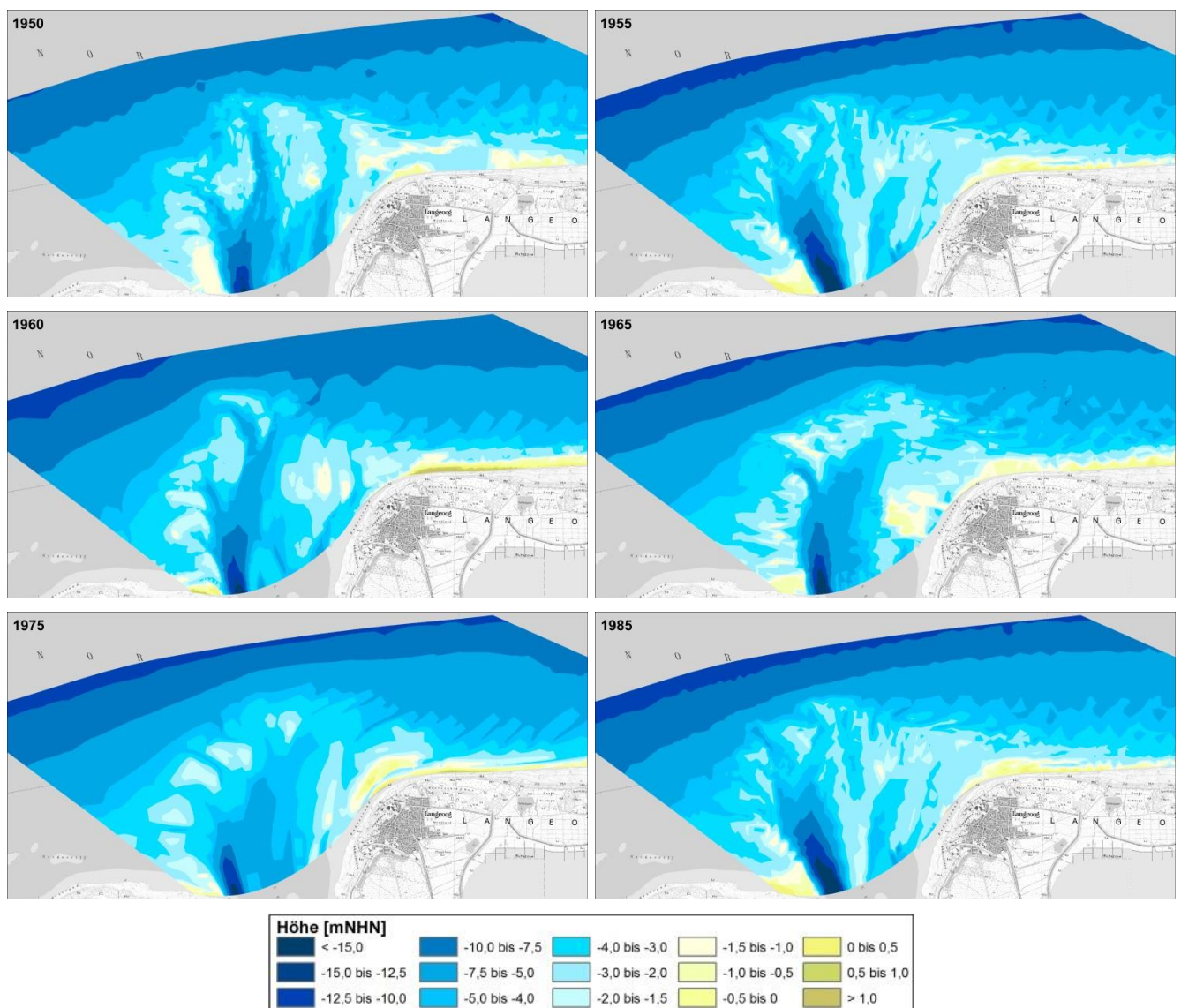


Abb. 2: Morphologische Ausprägung der Accumer Ee in den Jahren 1950 bis 1985

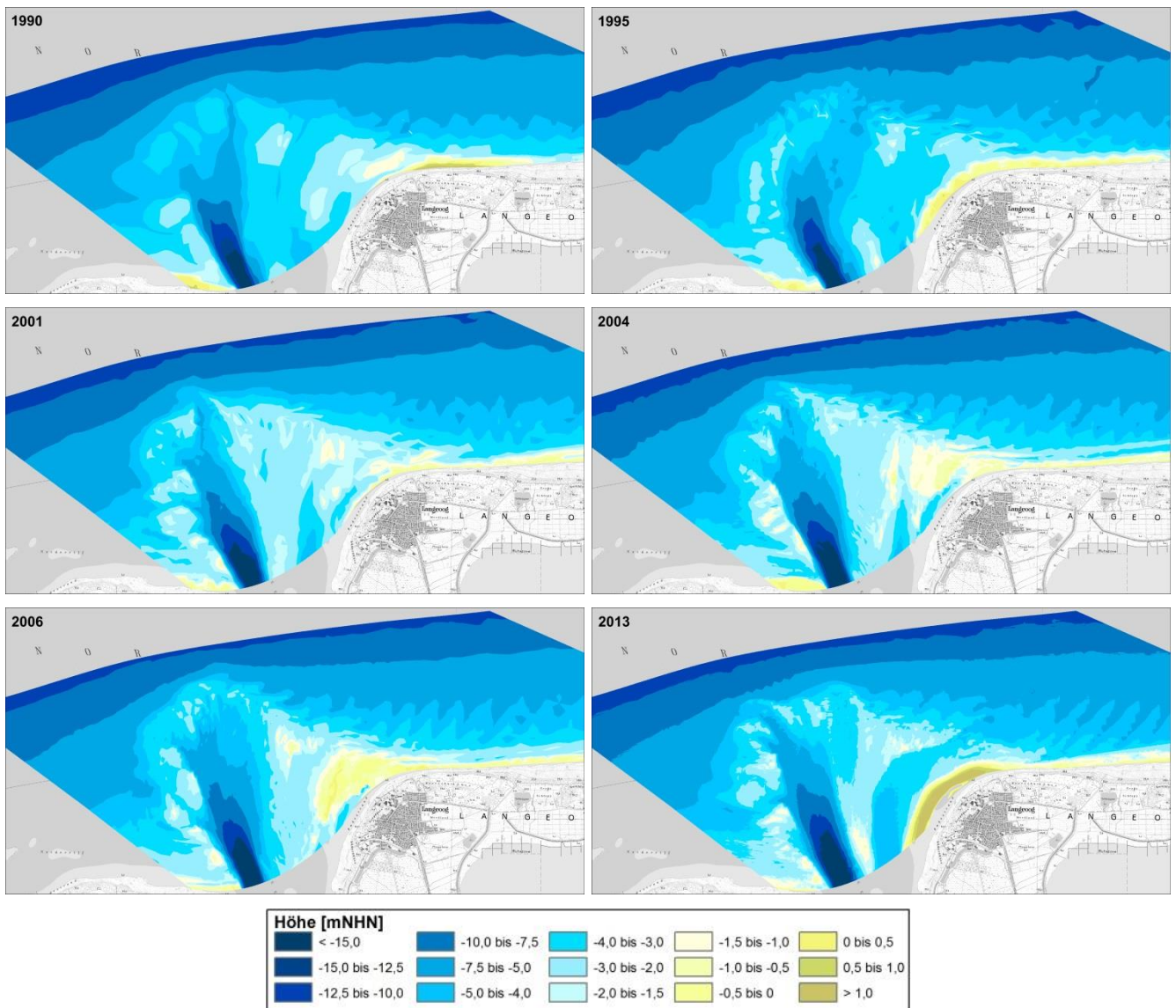


Abb. 3: Morphologische Ausprägung der Accumer Ee in den Jahren 1990 bis 2013

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 Accumer Ee nicht mehr erkennbar ist. Diese Bedingung ist östlich der Platananlandungszone in einer Entfernung von rund 5,5 km vom Stromstrich der Wichter Ee erfüllt. Im Westen ist durch den fließenden Übergang zwischen den Riffbögen von Wichter Ee und Accumer Ee ein küstennormaler 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.

Seewärts erstreckt sich der Referenzraum soweit, dass der Verlauf der tatsächlichen und fiktiven Tiefenlinien übereinstimmt. Diese Voraussetzung wird entlang der NHN-11m-Linie erfüllt. Die tangentielle Verlängerung der MThw-Linien zwischen Baltrum und Langeoog über die Accumer 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 Riffbogenvolumens V_0 bildet.

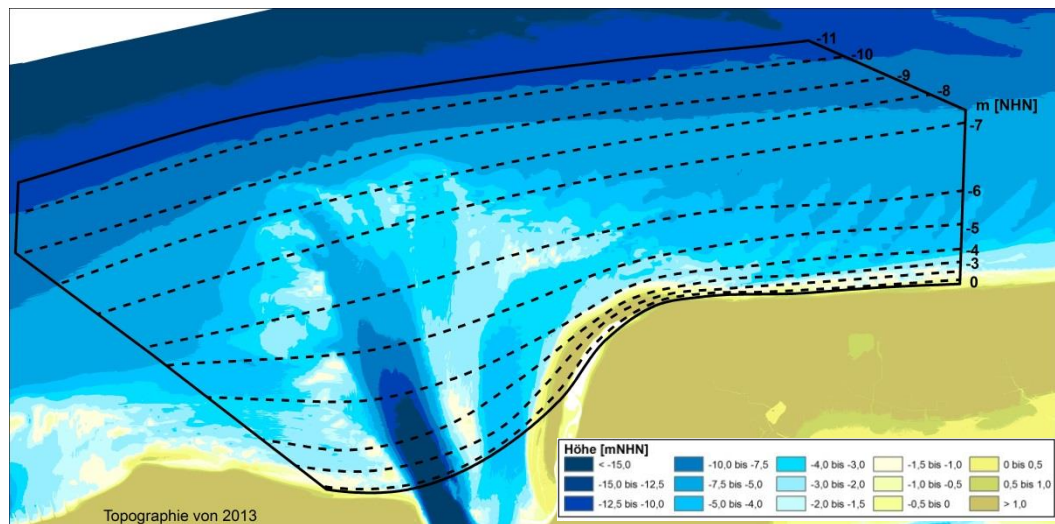


Abb. 4: Riffbogen der Accumer Ee mit idealisierten Tiefenlinien einer fiktiven Topographie ohne Seegat

Ausgehend von einem fiktiven Volumen von fast 57 Mio. m³ im Jahr 1950 (Abb. 5) ist innerhalb der nächsten fünf Jahre ein Rückgang um gut 11 Mio. m³ festzustellen, was einem Verlust für V_0 von fast 20 % entspricht. Bis zum Jahr 1985 schwankt das Riffbogenvolumen in der fiktiven Topographie ohne Riffgat nur um maximal fünf Prozent, um dann bis zum Jahr 1995 auf rund 28 Mio. m³ zurück zu gehen, was gegenüber 1985 eine Abnahme um 30 %, gegenüber der Ausgangssituation im Jahr 1950 aber von über 50 % darstellt. Dabei ist mit 13 Mio. m³ der stärkste Massenverlust zwischen 1985 und 1990 festzustellen, während bis 1995 dann mit weiteren 4 Mio. m³ die Volumenabnahme deutlich geringer ausfällt. Zwischen 1995 und 2001 erhöht sich das fiktive Ebbdeltavolumen V_0 wieder auf gut 47 Mio. m³, erreicht damit aber bei weitem nicht den Ausgangswert von fast 57 Mio. m³ im Jahre 1950. Es schließt sich bis 2013 erneut eine rückläufige Phase an, in der V_0 auf knapp 40 Mio. m³ abfällt. Über den Gesamtzeitraum betrachtet liegt der gemittelte Verlust für das fiktive Ebbdeltavolumen bei 0,16 Mio. m³. Bezogen auf das über den Riffbogen gemittelte Höhenniveau entspricht dies einer Abnahme von vier Millimeter pro Jahr (Abb. 5).

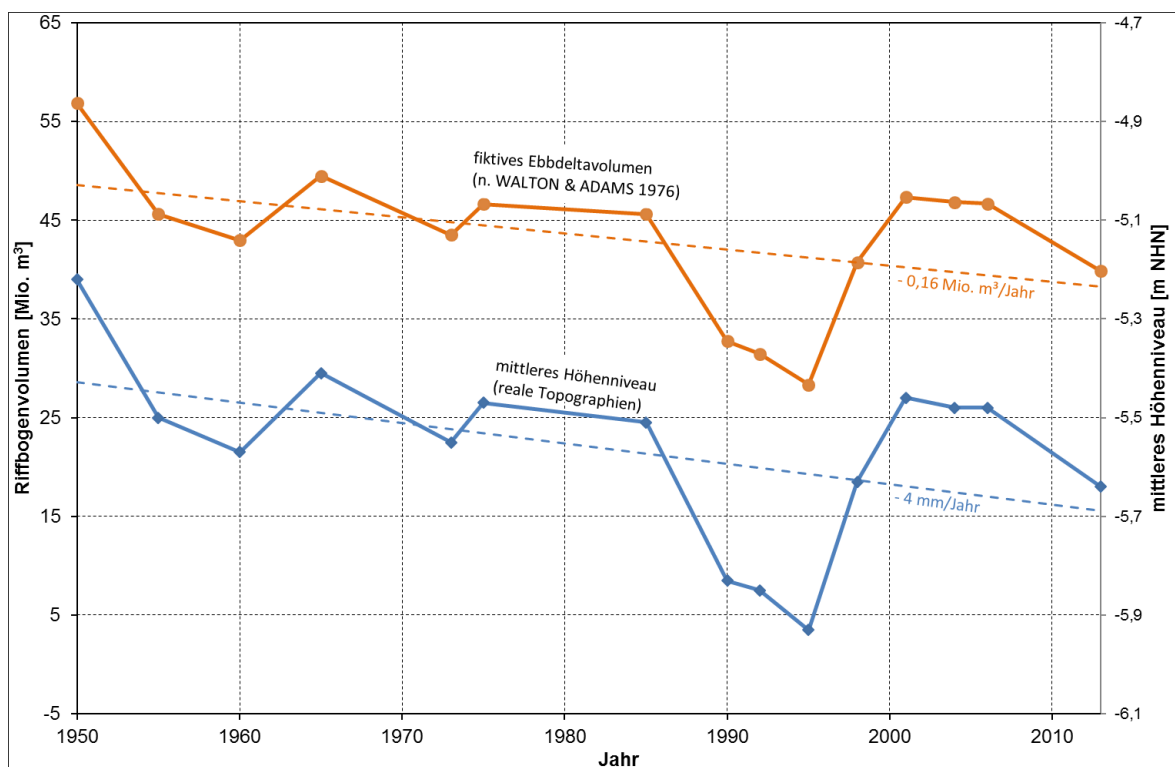


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des fiktiven Riffbogenvolumens V_0 (nach WALTON & ADAMS 1976) und des mittleren Höhenniveaus im Riffbogen

Mit Blick auf das Sedimentvolumen innerhalb definierter Tiefenstufen für reale Topographien ist festzustellen, dass die für V_0 festgestellte Volumenabnahme im Zeitraum 1950 bis 1960 vorwiegend durch Sedimentverluste in den Tiefenhorizonten unterhalb von NHN-6m verursacht wurden, während die negative Entwicklung in den Jahren 1985 bis 1995 im Wesentlichen auf Sedimentaustrag im Tiefenbereich von NHN-3m bis -5m zurück zu führen ist (Abb. 6). Insgesamt sind also Tiefenbereiche betroffen, die welleninduziert vorrangig bei entsprechenden Extremereignissen (Sturm, Orkan) umgelagert werden.

Zwischen den Jahren 1995 und 2001 regeneriert sich das Sedimentvolumen in den betrachteten Tiefenstufen wieder so weit, dass es etwa wieder auf dem Niveau vor dem von 1985 liegt. Damit sind die in den vorangegangenen zehn Jahren aufgetretenen Verluste innerhalb von nur sechs Jahren weitgehend wieder ausgeglichen. Auffällig ist der hohe Volumenzuwachs im Bereich von NHN-3m bis -4m, aber auch in der darüber liegenden Tiefenstufe.

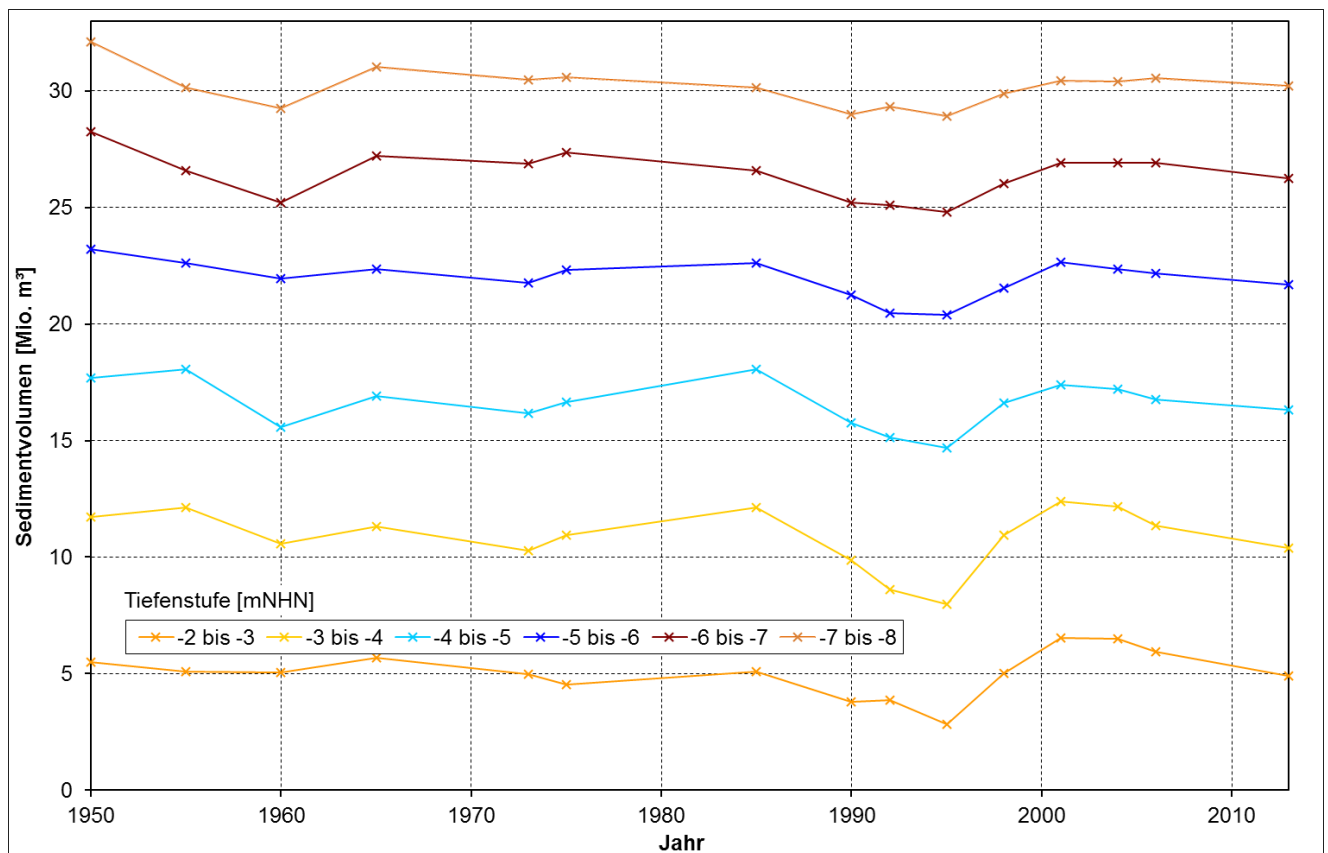


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung des Riffbogenvolumens innerhalb definierter Tiefenhorizonte

5 Tidebecken der Accumer Ee

5.1 Morphologische Entwicklung

Die auffälligste morphologische Entwicklung im Einzugsgebiet der Accumer Ee ist die bereits von LADAGE (2002) beschriebene Ostverschiebung der Langeooger Wattwasserscheide. Betroffen davon ist insbesondere der südliche Abschnitt, so dass sich das Teileinzugsgebiet (TEG) der Rute vor allem zwischen den Jahren 1960 und 1990 um 1,2 km weiter nach Osten ausdehnt. Damit verläuft die Wattwasserscheide im südlichen Bereich weiter östlich als der Westkopf von Spiekeroog (Abb. 7).

In dieser Verlagerung der Wattwasserscheide sieht LADAGE (2002) eine mögliche Ursache für die Verschwenkung der Accumer Ee entgegen dem Uhrzeigersinn, weil es hier entsprechend zu einer

Volumenzunahme des Flutraumes kommt (s. Kap.5.2). Da diese Verschwenkung auch eine Rinnenverlagerung der Accumer Ee bedingt, ist nicht nur ein Anwachsen im Osten von Baltrum, sondern auch der Wattflächen zwischen der Insel Baltrum und dem Festland festzustellen, also im Bereich des Baltrumer Inselwatts, der Steinplate und dem Dornumer Nacken. Diese Entwicklung bedingt wiederum eine Verlagerung des Mündungsbereiches der Accumersieler Balje, wodurch diese einen stärker gekrümmten Verlauf einnimmt (Abb. 7).

Insgesamt sind die morphologischen Umgestaltungen in den letzten Jahrzehnten aber im Vergleich mit den Wateinzugsgebieten anderer Seegaten wenig spektakulär und führen zu keinen grundlegenden Umstrukturierungen der Rinnenhierarchie, wie sie beispielsweise für das Einzugsgebiet der Harle (LADAGE & STEPHAN 2004) nachgewiesen wurde, oder sich aktuell im Wateinzugsgebiet des Norderneyer Seegats vollziehen (MEYER 2014).

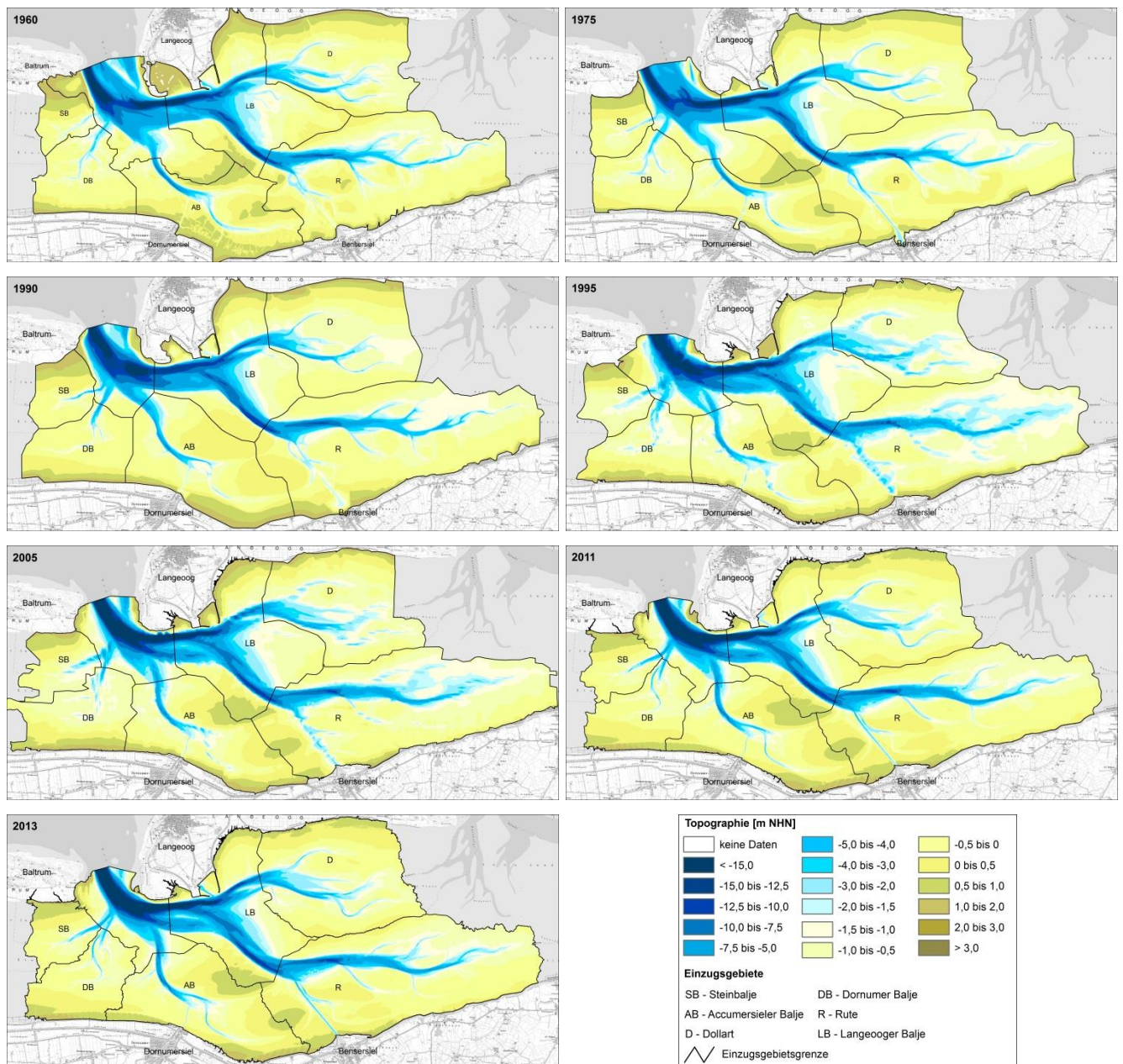


Abb. 7: Morphologische Veränderungen im Einzugsgebiet der Accumer Ee zwischen 1960 und 2013

5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens

Die Fläche des Wateinzugsgebietes (WEG) erhöht sich bis zum Jahr 1990 von knapp 93 km² um gut fünf Prozent auf fast 98 km²; eine Entwicklung, die vor allem auf die Ostverlagerung der primären Wattwasserscheide zurückzuführen ist und deshalb insbesondere dem TEG der Rute einen Flächenzuwachs von über 20 % auf gut 30 km² beschert (Abb. 8). Nach einem Flächenrückgang

innerhalb des WEG's von etwa 3,5 km² zwischen 1990 und 1995 verändert sich die Einzugsgebietsfläche A_b bis zum Jahr 2013 nicht mehr wesentlich und liegt damit geringfügig über dem Ausgangswert aus dem Jahr 1960. Der deutliche Flächenzuwachs für das TEG der Dollart zwischen den Jahren 2005 und 2011 beruht im Wesentlichen auf der Tatsache, dass auf der Ruteplate leichte Wathöhenzunahmen zu größeren Westverlagerungen der sekundären Wattwasserscheiden geführt haben.

In den westlichen TEG's stehen den über den Betrachtungszeitraum vergleichsweise stabilen Einzugsgebietsgrößen der Steinbalje und Dornumer Balje größere Schwankungen im TEG der Accumersieler Balje gegenüber: durch die Verlagerung und Umgestaltung des Mündungstrichters der Accumersieler Balje (s. Kap. 5.1) variiert die Position, an der die Einzugsgebietsgrenze die Rinne quert, zwischen zwei aufeinander folgenden Topographien in größerem Maße und damit auch die Größe des TEG's.

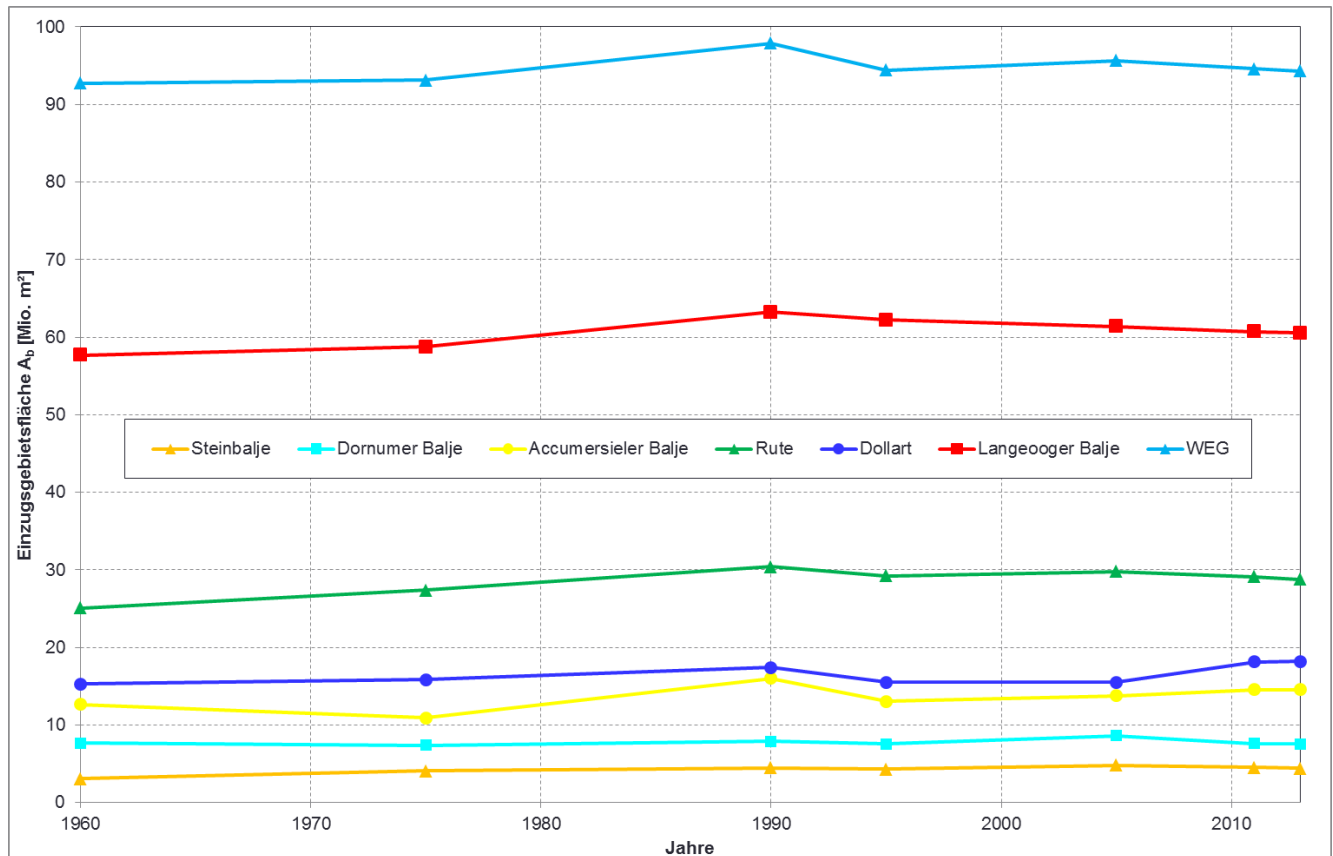


Abb. 8: Entwicklung der Einzugsgebietsgröße A_b

Mit gut sieben Prozent zwischen 1960 und 1990 nimmt das über den mittleren Tidehub $MThb_{5J}$ normierte Tidevolumen V_T im WEG der Accumer Ee von ursprünglich knapp 60 Mio. m² auf 64 Mio. m² zunächst noch mäßig stark zu, erhöht sich bis 1995 dann aber innerhalb von nur fünf Jahren auf fast 72 Mio. m²; gegenüber 1960 stellt das einen Anstieg um 20 % dar (Abb. 9). Bis zum Jahr 2013 fällt das Tidevolumen dann wieder um rund 12 % auf 64 Mio. m², was in etwa wieder dem Wert aus dem Jahr 1990 entspricht. Im Einzugsgebiet der Langeooger Balje und ihren hierarchisch untergeordneten TEG's sind grundsätzlich über den Untersuchungszeitraum hinweg die gleichen Entwicklungstendenzen festzustellen, die absolut gesehen deutlich geringer, prozentual aber höher ausfallen

Im Westen des Untersuchungsgebietes fallen die absoluten Volumenänderungen wegen der kleineren TEG's geringer aus, prozentual gesehen kommt es aber zwischen 1960 und 1995 zu Volumenzunahmen von rund 100 % im TEG der Steinbalje und Dornumer Balje und gut 40 % im TEG der Accumersieler Balje (Abb. 9).

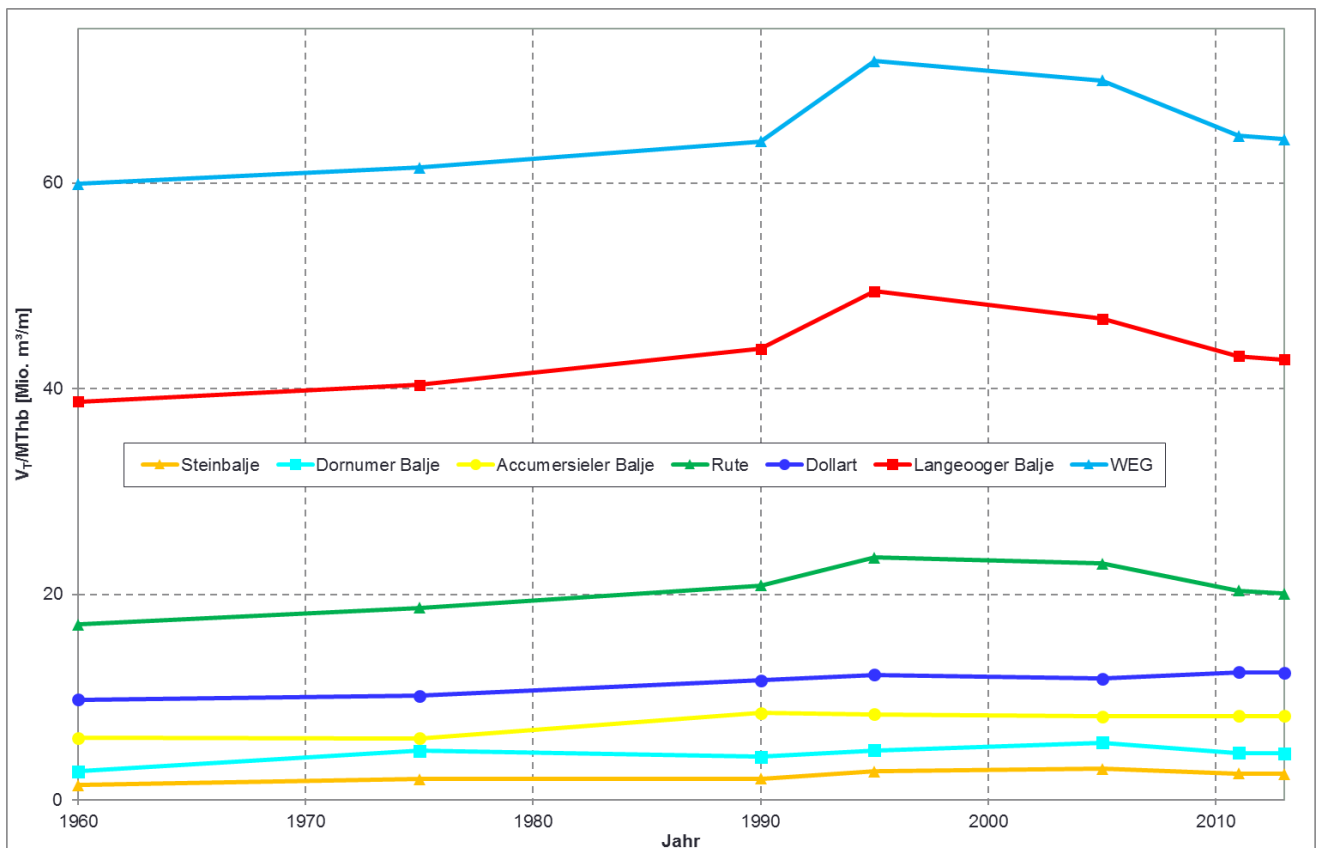


Abb. 9: Entwicklung des über den mittleren Tidehub normierten Tidevolumens

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. Es stellt aber auch den Versuch dar, die Reaktion des Systems bei Veränderungen einzelner Parameter zu prognostizieren.

Die Beschreibung verschiedener hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtszustände findet sich u.a. bei O'BRIEN (1931, 1967), WALTHER (1934, 1972), WALTON & ADAMS (1976), RINGER (1974), EYSINK (1991) und DIECKMANN et al. (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).

Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen von LADAGE & STEPHAN (2004, 2005), LADAGE et al. (2006) und MEYER (2013, 2014, 2015) 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, interpolierte Isoliniendarstellung. Da bereits im WADE-Projekt die Datenerfassung

und –analyse GIS-gestützt erfolgte, werden Abweichungen durch Fehler bei der Flächen- und Volumenbestimmung als vernachlässigbar eingestuft.

Entsprechend der Untersuchungsergebnisse für andere Einzugsgebiete (MEYER 2013, 2014, 2015) werden auch für den hier betrachteten Untersuchungsraum Accumer Ee die empirischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern am besten durch einen linearen Trend wiedergegeben.

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. 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.

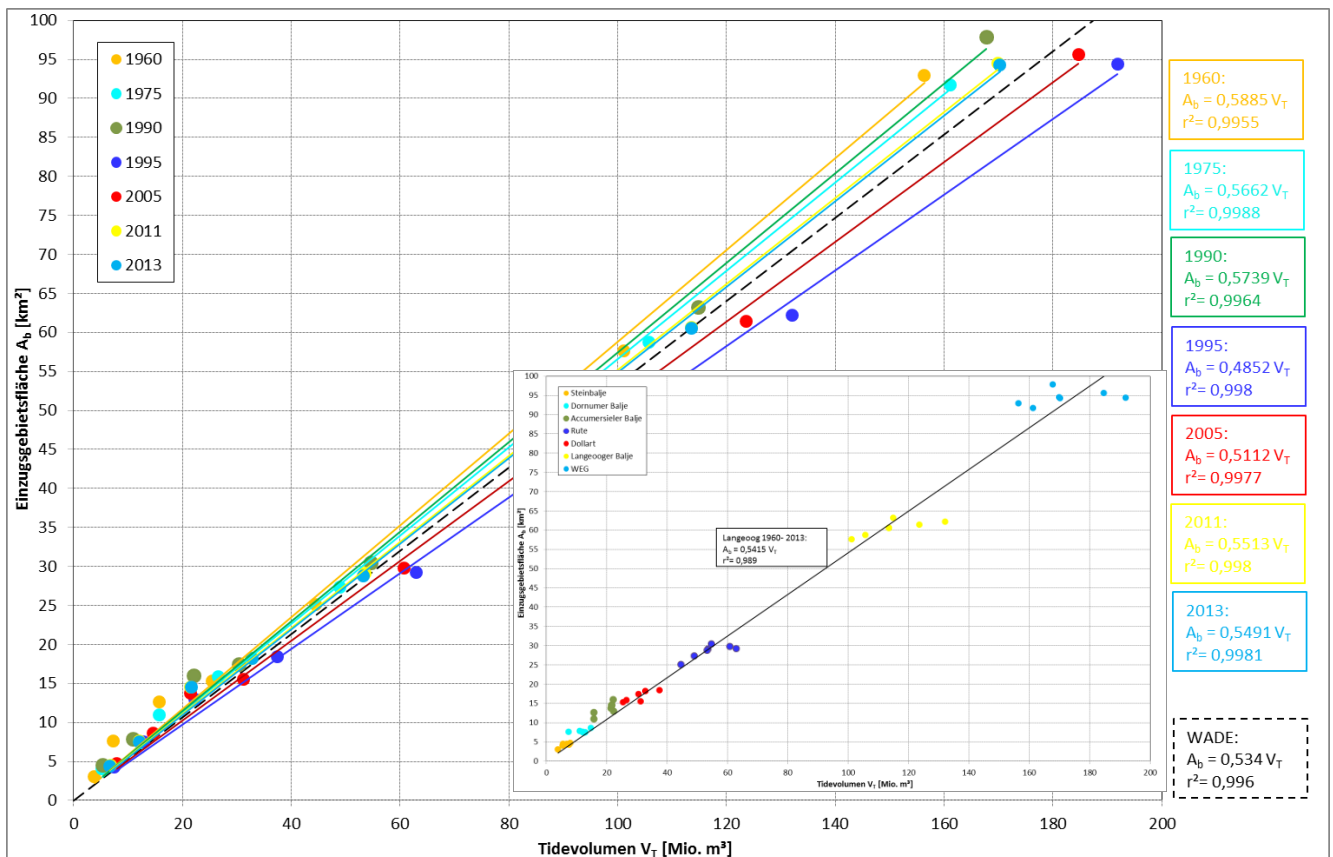


Abb. 10: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Accumer Ee

Der Zusammenhang zwischen V_T und A_b für alle Messwerte aus den Jahren 1960 bis 2013 ist sehr signifikant und wird durch eine Ausgleichsgerade wiedergegeben, die mit dem Koeffizienten 0,541 nur eine geringfügig größere Steigung aufweist, als die in WADE für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste ermittelte (Abb. 10, kleine Grafik). Wird für jeden der sieben topographischen Aufnahmen eine solche Ausgleichsgerade berechnet, ergeben sich zwar größere Abweichungen vom WADE-Koeffizienten, diese weisen aber, mit Ausnahme des Jahre 1960, ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß auf (Abb. 10). Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die beiden Parameter V_T und A_b recht kurzfristig auf Störungen des dynamischen Gleichgewichts durch entsprechende Anpassung reagieren. Eine solche Differenzierung nach Vermessungsjahren verdeutlicht aber auch, dass es nach erheblichen Veränderungen der verschiedenen Parameter, wie es für die Zeitspanne zwischen den Jahren 1990 und 1995 entlang der ostfriesischen Küste zu beobachten ist, wieder zu einer Anpassung zumindest an den für das Tidebecken typischen Koeffizienten kommt, oder eben auch an den von NIEMEYER et al. (1995) ermittelten, sofern dieser Koeffizient überhaupt als regionaltypisch anzusehen ist.

Interessant ist ferner, dass die Messwerte und Ausgleichsgeraden für die Jahre 2011 und 2013 quasi deckungsgleich sind, was auch für die funktionalen Zusammenhänge von V_T und A_b (Abb. 11) sowie A_b und A_i (Abb. 12) gilt. Dies mag einerseits in der vergleichsweise kurzen Zeitspanne begründet sein, die zwischen den beiden Vermessungen liegen, andererseits dürfte aber die Tatsache bedeutsam sein, dass diesen beiden Topographien hochauflösende Laserscanaufnahmen zu Grunde liegen. Dadurch ist eine genauere Volumenberechnung, eine exaktere Festlegung der TEG-Grenzen und der Lage der Rinnenprofillage möglich.

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, 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 .

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 (Abb. 11). Dies dürfte im Wesentlichen darin begründet sein, dass bereits geringe Watthöhenänderungen zu deutlichen Größenschwankungen in der Gezeitenfläche führen können, sich aber nur in geringem Maße auf das Tidevolumen auswirken.

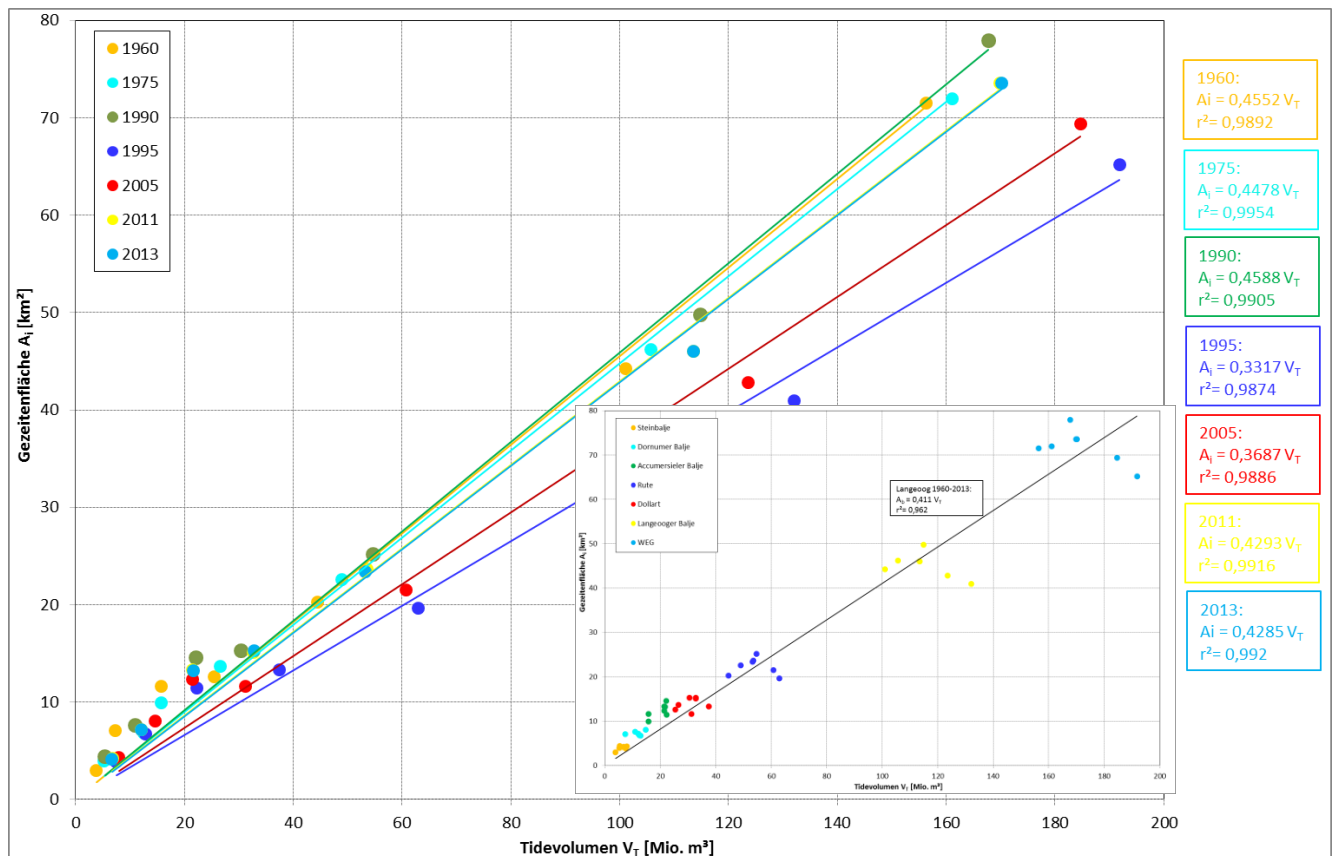


Abb. 11: Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Accumer Ee

5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche

Die Abhängigkeit der Größe der Gezeitenfläche von der Größe des Einzugsgebietes haben RENGIER (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.

Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen A_b und A_i aller Messwerte aus den Jahren 1960 bis 2013 (Abb. 12, kleine Grafik) ist sehr signifikant, fällt mit $r^2 = 0,992$ aber etwas geringer aus als die Werte, die für jeweils nur ein Vermessungsjahr ermittelt wurden (Abb. 12). Davon ausgehend, dass es zumindest für das Tidebecken der Accumer Ee, wenn nicht sogar gemeinsam für alle Tidebecken entlang der ostfriesischen Küste, einen typischen Koeffizienten für die Beziehung zwischen A_b und A_i gibt, bedingt die dann als Störung der langfristig bestehenden Verhältnisse zu interpretierenden Abweichungen im Jahr 1995 eine größere Streuung der Messwerte.

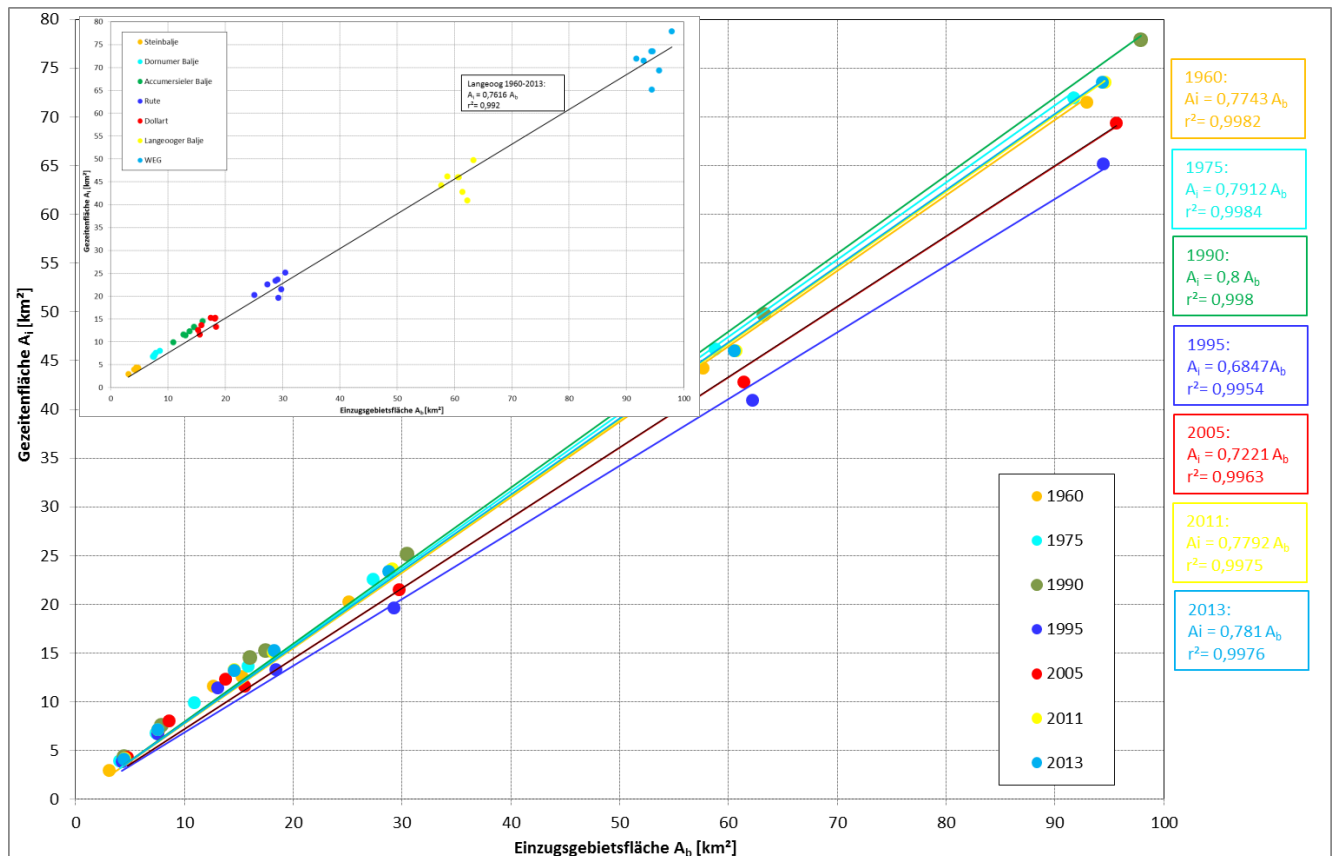


Abb. 12: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsfläche im Tidebecken der Accumer Ee

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

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).

Die Abhängigkeit des Rinnenquerschnitts vom Tidevolumen ist im Einzugsgebiet der Accumer Ee stets signifikant, sei es nun für alle Messwerte aus den Jahren 1960 bis 2013 oder nur für Messwerte eines Vermessungsjahres (Abb. 13). Wurde in den bisher untersuchten Tidebecken (MEYER 2013, 2014, 2015) der Querschnitt in Anlehnung an die WADE-Untersuchungen unterhalb von

NHN ermittelt, wird in den vorliegenden Untersuchungen mit MTnw_{5J} ein geänderter Bezugshorizont gewählt. Begründet ist diese Änderung in der Tatsache, dass das NHN-Niveau in der Regel nicht einmal ansatzweise erreicht wird. Somit wird der verbleibende Rinnenquerschnitt im Bereich zwischen MThw_{5J} und NHN allein durch die Profilbreite bestimmt und somit tiefe, schmale Rinnen unter-, breite, flache Rinnen hingegen überschätzt.

Aus dem geänderten Bezugshorizont resultiert unmittelbar, dass die Ausgleichsgeraden stets eine deutlich geringere Steigung aufweisen, als die in WADE für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste ermittelte (Abb. 13, kleine Grafik). Entsprechend ergeben sich auch deutliche Abweichungen zu den Ergebnissen aus den Untersuchungen im Bereich der geschützten Wattflächen südlich von Juist (MEYER 2013) und in den Tidebecken des Norderneyer Seegats (MEYER 2014) und der Wichter Ee (MEYER 2015): In diesen drei Gebieten weisen die Ausgleichsgeraden immer eine größere Steigung auf als die in WADE berechnete.

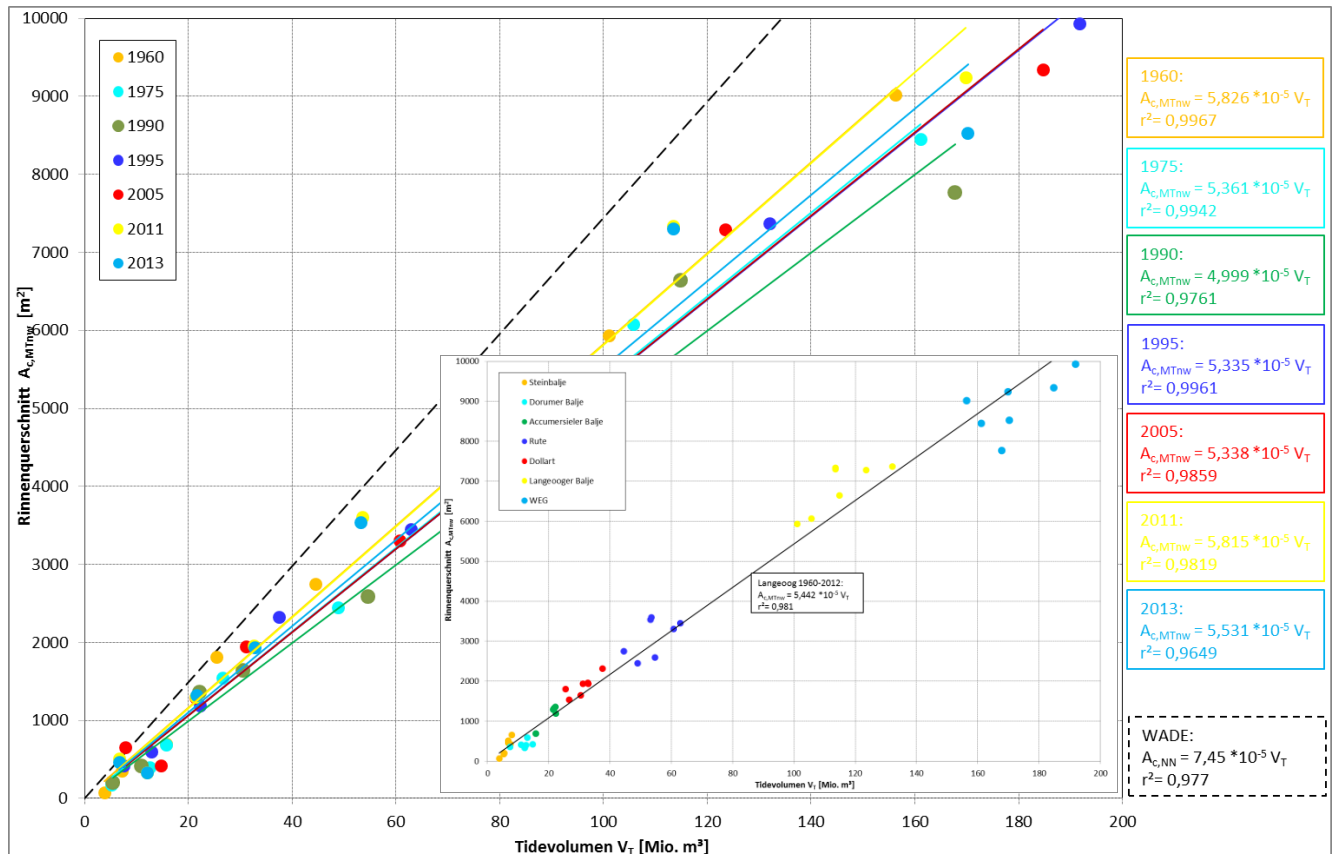


Abb. 13: Rinnenquerschnitt der Accumer Ee und seiner Nebenrinnen als Funktion des Tidevolumens

6 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Untersuchungen von LADAGE (2002) werden neuere Vermessungsdaten ausgewertet und - getrennt für den Riffbogen der Accumer Ee und für dessen Einzugsgebiet - aktuelle morphologische Veränderungen aufgezeigt sowie in Anlehnung an die Arbeiten von NIEMEYER et al. (1995) hydrologisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen durchgeführt.

Die bereits von LADAGE beschriebene Drehung der Rinnenachse der Accumer Ee entgegen dem Uhrzeigersinn seit Mitte der 1970er Jahre setzt sich mit geringer Intensität auch in den letzten Jahren fort. Diese Entwicklung bewirkt, dass die Accumer Ee insgesamt einen geradlinigeren Verlauf erhält und sich dabei auf Höhe des Flinthörn mehrere hundert Meter ostwärts verlagert. Eine Zunahme des Stromarbeitsvermögens führt parallel dazu nicht nur zu einer Aufweitung des Rinnenquerschnitts, sondern auch dazu, dass sich die Rinne nach Norden ausdehnt. Dadurch werden die Platen im Riffbogen auf eine weiter nordwestlich gelegene Bahn gezwungen, was zur Folge hat, dass sich das Anlandungsgebiet von Platen auf Langeoog nach Westen verlagert. Diese seit

langem bekannte Entwicklung führt zu einer Sandunterversorgung der Strände im Norden der Insel und bedingt dort weiterhin Abbrüche an den Dünen. Daran wird auch die Tatsache wenig ändern, dass sich im Gebiet der Robbenplatte zwischen den Jahren 2001 und 2006 erhebliche Sedimentmassen angesammelt haben und bis 2013 unmittelbar vor dem Nordweststrand von Langeoog eine ausgedehnte und hoch aufragende Sandbank bilden.

Für das Einzugsgebiet der Accumer Ee sowie für die Teileinzugsgebiete hierarchisch nachgeordneter Rinnen werden auf Basis der verfügbaren Topographien jeweils die Einzugsgebietsgröße, die Gezeitenfläche, der Rinnenquerschnitt und das mittlere Tidevolumen bestimmt und funktionale Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern aufgezeigt. Werden in die Analyse die Messwerte aller Topographien einbezogen, so sind deren Abhängigkeiten zumindest signifikant, im Falle der Gezeiten-, von der Einzugsgebietsfläche sogar sehr signifikant. Ein noch höheres Bestimmtheitsmaß wird erzielt, wenn die Abhängigkeit der verschiedenen Parameter getrennt nach Vermessungsjahr berechnet wird. Eine solche Differenzierung nach Vermessungsjahren verdeutlicht, dass es nach deutlichen Änderungen einzelner Parameter, wie es für die Zeitspanne zwischen den Jahren 1990 und 1995 entlang der ostfriesischen Küste zu beobachten ist, wieder zu einer Anpassung zumindest an den für das Tidebecken typischen Koeffizienten kommt.

7 Literaturverzeichnis

DIECKMANN, R., M. OSTERHUN & H.W. PARTENSKY (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.

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

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. (2002): Vorarbeiten zu Schutzkonzepten für die Ostfriesischen Inseln - Morphologische Entwicklung um Langeoog im Hinblick auf die verstärkten Dünenabbrüche vor dem Pirolatal – Dienstber. Forschungsstelle Küste 10/2002

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
- MEYER, C. (2013):** Morphodynamische Analysen im Bereich von Juist. – Untersuchungsber. NLWKN-Forschungsstelle Küste 3/2013
- MEYER, C. (2014):** Morphodynamische Analysen im Bereich des Norderneyer Seegats und seines Einzugsgebietes. – Untersuchungsber. NLWKN-Forschungsstelle Küste 1/2014
- MEYER, C. (2015):** Morphodynamische Analysen im Bereich der Wichter Ee und ihres Einzugsgebietes. – Untersuchungsber. NLWKN-Forschungsstelle Küste 3/2015
- 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 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
- WALTON, T.L. & W.D. ADAMS (1976):** Capacity of inlet outer bars to store sand. - Proc. 15th Int. Conf. Coast. Eng., Vol. 2