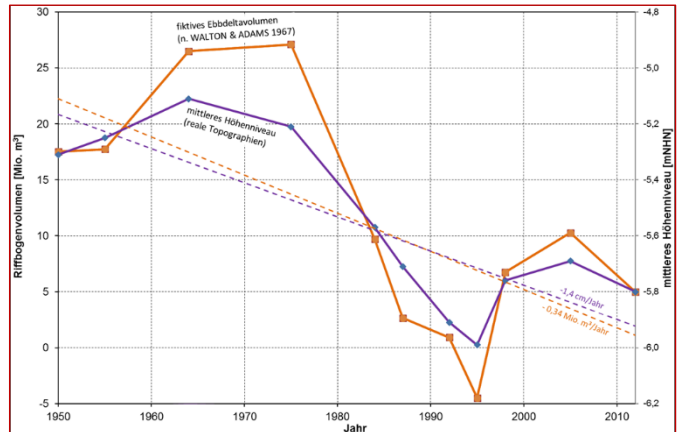
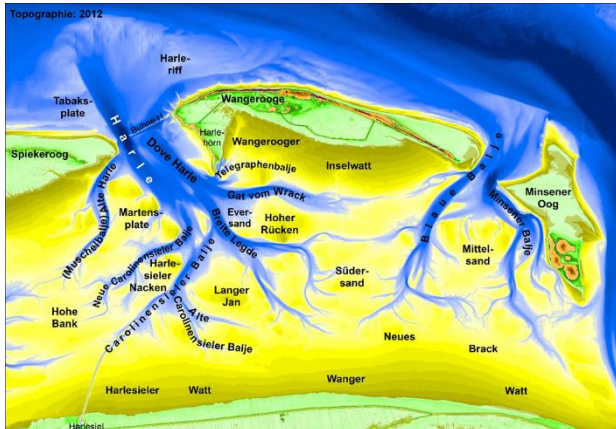


Untersuchungsbericht 2/2017



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



Cornelius Meyer & Andreas Wurpts

Morphodynamische Analysen im Bereich der Harle, der Blauen Balje und ihrer Einzugsgebiete



Niedersachsen

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
- Forschungsstelle Küste -
2017

Titelblatt: links: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

rechts: Zeitliche Entwicklung des fiktiven Riffbogenvolumens V_0 und des mittleren Höhenniveaus im Riffbogen

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 Harle, der Blauen
Balje und ihrer Einzugsgebiete**

Norderney, im Oktober 2017

Geschäftsbereichsleiter
Forschungsstelle Küste



Dr.-Ing. Andreas Wurpts

stellv. Aufgabenbereichsleiter
Morphologie des Küstengebietes



Dr. Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich der Harle, der Blauen Balje und ihrer Einzugsgebiete

Cornelius Meyer & Andreas Wurpts

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1 Einleitung und Zielsetzung	2
2 Das Untersuchungsgebiet	2
3 Datengrundlage und -aufbereitung	4
4 Harle und Dove Harle	5
4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens	5
4.2 Sedimentvolumen im Riffbogen	6
5 Tidebecken der Harle und Dove Harle	8
5.1 Morphologische Entwicklung	8
5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens	11
5.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen	12
5.3.1 Funktionaler Zusammenhang von Einzugsgebietsfläche und Tidevolumen	13
5.3.2 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Tidevolumen	14
5.3.3 Funktionaler Zusammenhang von Gezeitenfläche und Einzugsgebietsfläche	15
5.3.4 Funktionaler Zusammenhang von Tidevolumen und Rinnenquerschnitt	15
6 Blaue Balje	17
7 Zusammenfassung	18
8 Literaturverzeichnis	19

1 Einleitung und Zielsetzung

Als Teil des Projektes „Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz ostfriesische Inseln“ wurden von LADAGE & STEPHAN (2004) die morphologischen Gestaltungsvorgänge im Einzugsgebiet der Harle, im Seegat und im Riffbogen mit dem Ziel analysiert, zukünftige Entwicklungstendenzen aufzuzeigen. Insbesondere galt es, die dadurch zu erwartenden Auswirkungen auf das Harlehörn im Südwesten der Insel abzuschätzen, wo die künstlich aufgebauten Dünen durch anhaltende Abbrüche gefährdet sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stellten eine wesentliche Grundlage für die Ausarbeitung zukünftiger Schutzkonzepte auf Wangerooge dar.

Aufbauend auf diesen detaillierten Untersuchungsergebnissen werden in der nachfolgenden Arbeit neue Vermessungsdaten analysiert, die aktuellen morphologischen Veränderungen im Bereich der Harle und der Blauen Balje sowie der zugehörigen Einzugsgebiete 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 knapp 65 km² große Einzugsgebiet der Harle gliedert sich morphologisch in eine Vielzahl von Rinnen und bei Niedrigwasser trockenfallenden Wattflächen: Südlich von Wangerooge schließt sich das gleichnamige Inselwatt an, das durch das Gat vom Wrack vom Hohen Rücken getrennt wird. In Karten des BSH und des StAGN (Ständigen Ausschusses für geographische Namen) wird diese Rinne allerdings als Telegraphenbalje bezeichnet. Der genetischen Entwicklung von HOMEIER et al. (2010) folgend, der die morphologische Entwicklung entlang der niedersächsischen Küste für die letzten 400 Jahre abbildet, ist diese Bezeichnung allerdings nicht korrekt. Die Telegraphenbalje stellt nach HOMEIER et al. eine kleine Rinne dar, die auf Höhe des Hafens von Südwesten in das Wangerooger Inselwatt einschneidet.

Unstimmigkeit besteht scheinbar auch über die Lage des Eversands: In der Historischen Wattkarte von 1960 (HOMEIER et al. 2010) bildet sie die westliche Fortsetzung des Hohen Rückens. Diese Bezeichnung findet sich auch in der Karte des STAGN. In aktuellen Seekarten des BSH hingegen wird der Platenbereich im Westen des Hohen Rückens hingegen als Hullplate bezeichnet, während der Name Eversand auf den nordöstlichen Bereich des Harlesieler Nackens übergeht.

Die Carolinensieler Balje und die Breite Legde umschließen den Langen Jan und entwässern gemeinsam mit dem Gat vom Wrack in die Dove Harle. Ausläufer der Breiten Legde trennen nicht nur den Südersand vom Hohen Rücken, sondern zergliedern diesen auch und reichen bis in die hochgelegenen Wattgebiete des Neuen Bracks. Unmittelbar dem Festland vorgelagert findet sich das Wanger Watt, das nach Osten bis zur Jade reicht und gen Westen in das Harlesieler Watt übergeht. (Abb. 1).

Die Carolinensieler Balje stellt die Verbindung zwischen Harlesiel und der Breiten Legde dar; von ihr zweigt etwa auf halber Strecke zwischen Hafen und Mündungsbereich die Alte Carolinensieler Balje nach Süden hin ab. Die Neue Carolinensieler Balje trennt den Harlesieler Nacken und den Eversand von der Martensplate und mündet in die Harle. Die Alte Harle begrenzt die Martensplate im Westen. Ihre Ausläufer reichen, wie auch die der Neuen Carolinensieler Balje, bis in die Hohe Bank und tragen zuweilen die Bezeichnung Muschelbalje.

Im Zusammenspiel von Küstenlängs- und -quertransport hat sich ein Ebbdelta gebildet, dass die Harle im Mündungsbereich umspannt und nur von wenigen, namenlosen Rinnen durchzogen ist. Am Ostende von Spiekeroog akkumuliert Sand im Bereich der Tabaksplate, wird durch den Riffbogen transportiert und erreicht das Harleriff im Nordwesten von Wangerooge (Abb. 1).

Nicht nur das Seegat zwischen dem Ostende von Wangerooge und der künstlich aufgespülten Insel Minsener Oog trägt den Namen Blaue Balje, sondern auch die westliche Rinne, die weit nach Süden in das Neue Brack vordringt. Gemeinsam mit der Minsener Balje begrenzt sie die bisher namenlose Wattfläche, die sich nach Norden hin an das Neue Brack anschließen und nachfolgend als „Mittelsand“ bezeichnet wird; in Anlehnung an die in den letzten Jahren verlandete Mittelbalje.

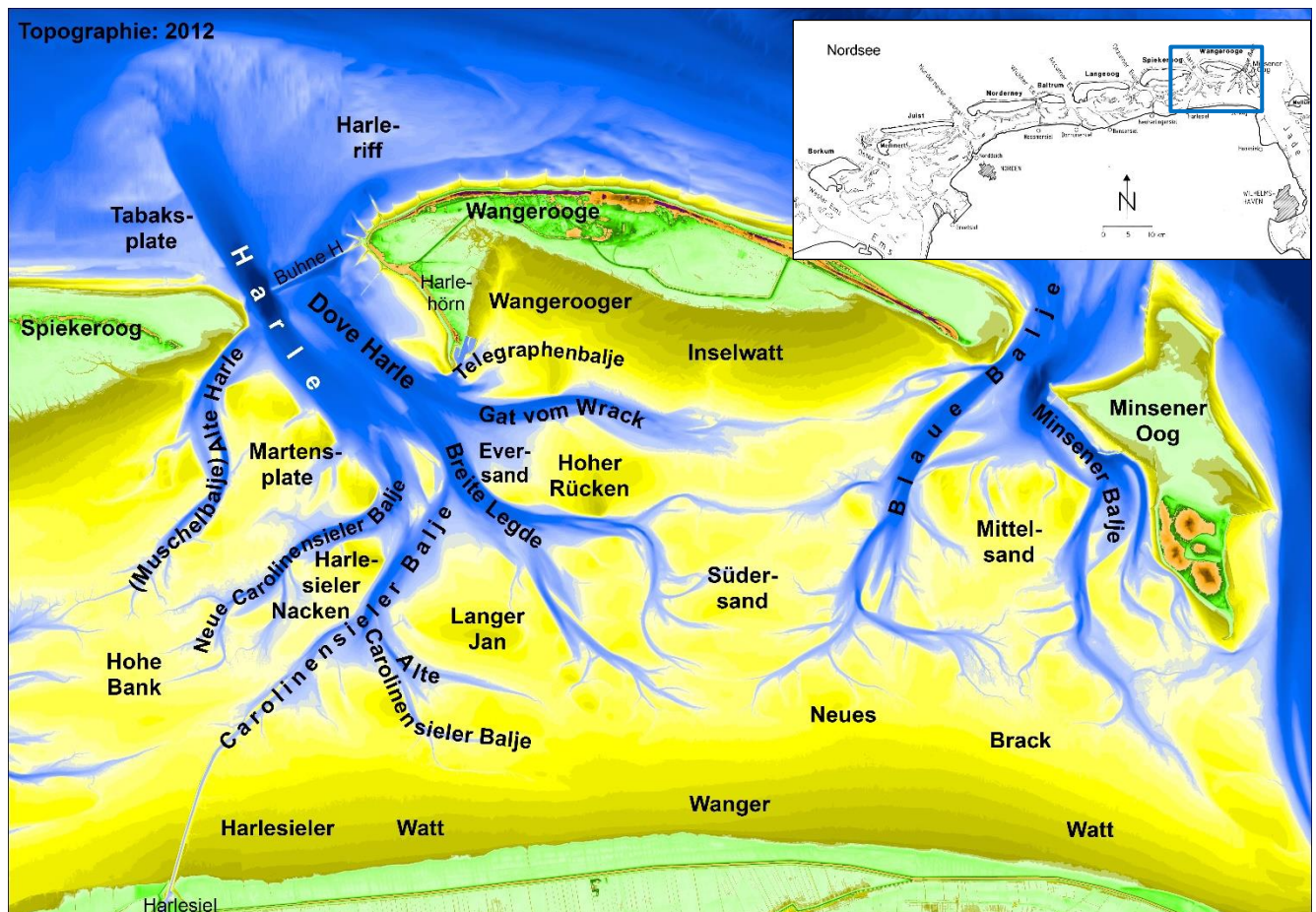


Abb. 1: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

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 Spiekeroog 2,70 m und erhöht sich auf 2,95 m am Pegel Wangerooge-Ost, jeweils gemittelt über den Zeitraum 2012 bis 2016. Durch den Einfluss von Nipp- und Springtiden kann der Tidehub jedoch um $\pm 0,7$ 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.

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 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 2012. Es handelt sich dabei größtenteils 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 1958 bis 1963 bzw. der Jahre 1987 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. Eine detaillierte Übersicht verfügbarer Messdaten aus den Jahren 1950 bis 2003 findet sich bei LADAGE (2004).

Während sich die Topographie der Jahre 2005/06 ebenfalls auf die nautische Vermessung des BSH stützt, basieren die morphologische Darstellung aus dem Jahr 2012 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.

Mangels aktueller Vermessungsdaten wurden Luftbildaufnahmen eines von Hansa Luftbild im Auftrage der FSK durchgeführten Küstenfluges aus dem Jahre 2016 mit in die Auswertung aufgenommen, aus denen sich zumindest tendenziell die morphologische Entwicklung seit der letzten topographischen Aufnahme aus dem Jahre 2012 ableiten lässt.

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 Flächenrasterung der Geländemodelle ermöglicht die flächenhafte Berechnung von Höhenunterschieden als Differenzpläne verschiedener Messperioden.

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 Harle und Dove Harle

4.1 Morphologische Entwicklung des Riffbogens

Mit Ausnahme einer Verschwenkung des nördlichen Rinnenausläufers der Harle entgegen dem Uhrzeigersinn zwischen den Jahren 1975 und 1984, die nach LADAGE & STEPHAN (2004) auf morphologische Umgestaltungen im Einzugsgebiet zurückzuführen sind (s. Kap. 5.1), bewegen sich die morphologischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte im Rahmen der üblichen Dynamik von Riffbögen, wenn Sand im Zusammenspiel von Litoraldrift und Tidenströmung durch einen Riffbogen transportiert wird (Abb. 2). Hinweise auf grundsätzliche morphologische Umgestaltungen im Bereich des Riffbogens sind nicht erkennbar.

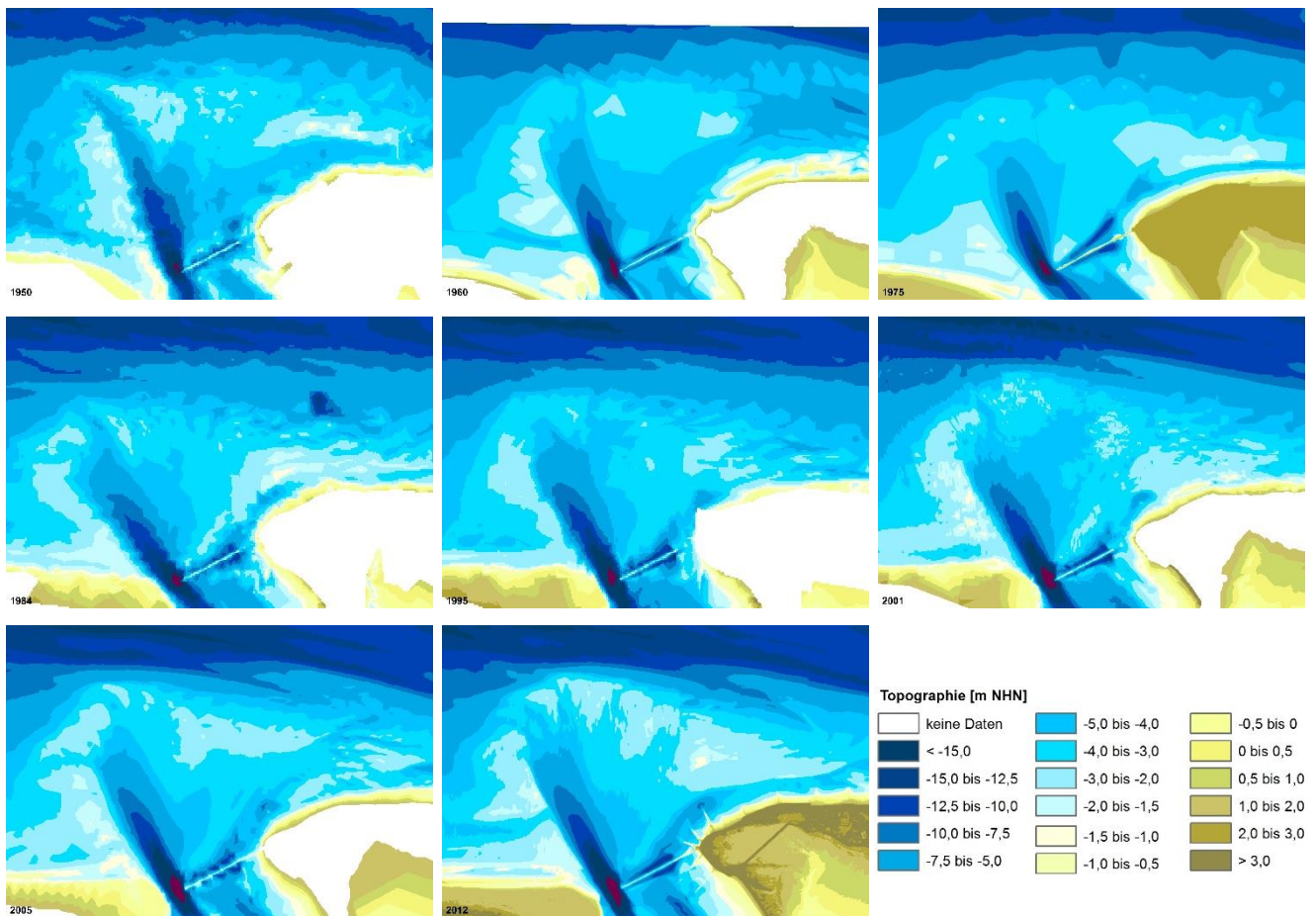


Abb. 2: Morphologische Ausprägung des Harle Ebbdeltas in den Jahren 1950 bis 2012

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 des Seegats nicht mehr erkennbar ist. Aufgrund der deutlich größeren Ausdehnung des Riffbogens im Zustand von 1950 wurde diese Topographie als Basis für die Abgrenzung gewählt. Im Gegensatz dazu wurde in vergleichbaren Untersuchungen der Riffbögen des Norderneyer Seegats (MEYER 2014), der Wichter Ee (MEYER 2015) und der Accumer Ee (MEYER 2016) die jeweils aktuellste Topographie zugrunde gelegt. In der Topographie aus dem Jahr 1950 ist der Einfluss des Seegats östlich der Platananlandungszone im Nordwesten von Wangerooge in einer Entfernung von rund 7,5 km vom Stromstrich der Harle nicht mehr erkennbar, westlich des Stromstrichs in einem Abstand von 3,8 km.

Seewärts erstreckt sich der Referenzraum soweit, dass der Verlauf der tatsächlichen und fiktiven Tiefenlinien näherungsweise übereinstimmt. Diese Voraussetzung wird entlang der NHN-12m-Linie erfüllt. Die tangentielle Verlängerung der MThw-Linien zwischen Spiekeroog und Wangerooge über die Harle 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.

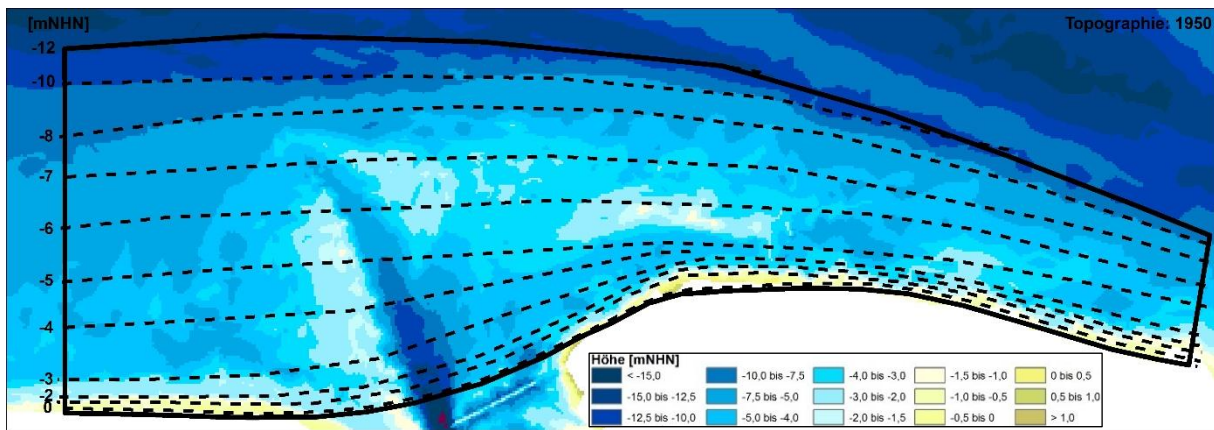


Abb. 3: Riffbogen der Harle von 1950 mit idealisierten Tiefenlinien einer fiktiven Topographie ohne Seegat

Das Sedimentvolumen V_0 schwankt über den Betrachtungszeitraum erheblich (Abb. 4): Ausgehend von einem Volumen von 17,5 Mio. m^3 im Jahre 1950, ändert sich dieses in den nächsten fünf Jahren fast gar nicht, um dann bis 1964 auf 26,5 Mio. m^3 anzusteigen; ein Sedimentvolumen, das in den nachfolgenden neun Jahren bis 1975 nur noch geringfügig auf den Maximalwert innerhalb des über 60-jährigen Gesamtzeitraums von etwas über 27 Mio. m^3 ansteigt. Zwischen den Jahren 1975 und 1995 ist ein so starker Massenverlust im Riffbogen festzustellen, dass V_0 mit - 4,5 Mio. m^3 ein negatives Vorzeichen erhält. Das Riffbogenvolumen liegt 1995 somit unterhalb des Sedimentvolumens einer fiktiven Topographie ohne Seegat. Abgesehen von der Zeitspanne zwischen den Jahren 1987 bis 1992, in der der Massenverlust weniger stark ausgeprägt war, erfolgte der Sedimentaustrag mit knapp 2,5 Mio. m^3 pro Jahr innerhalb des zwanzigjährigen Zeitraumes recht stetig.

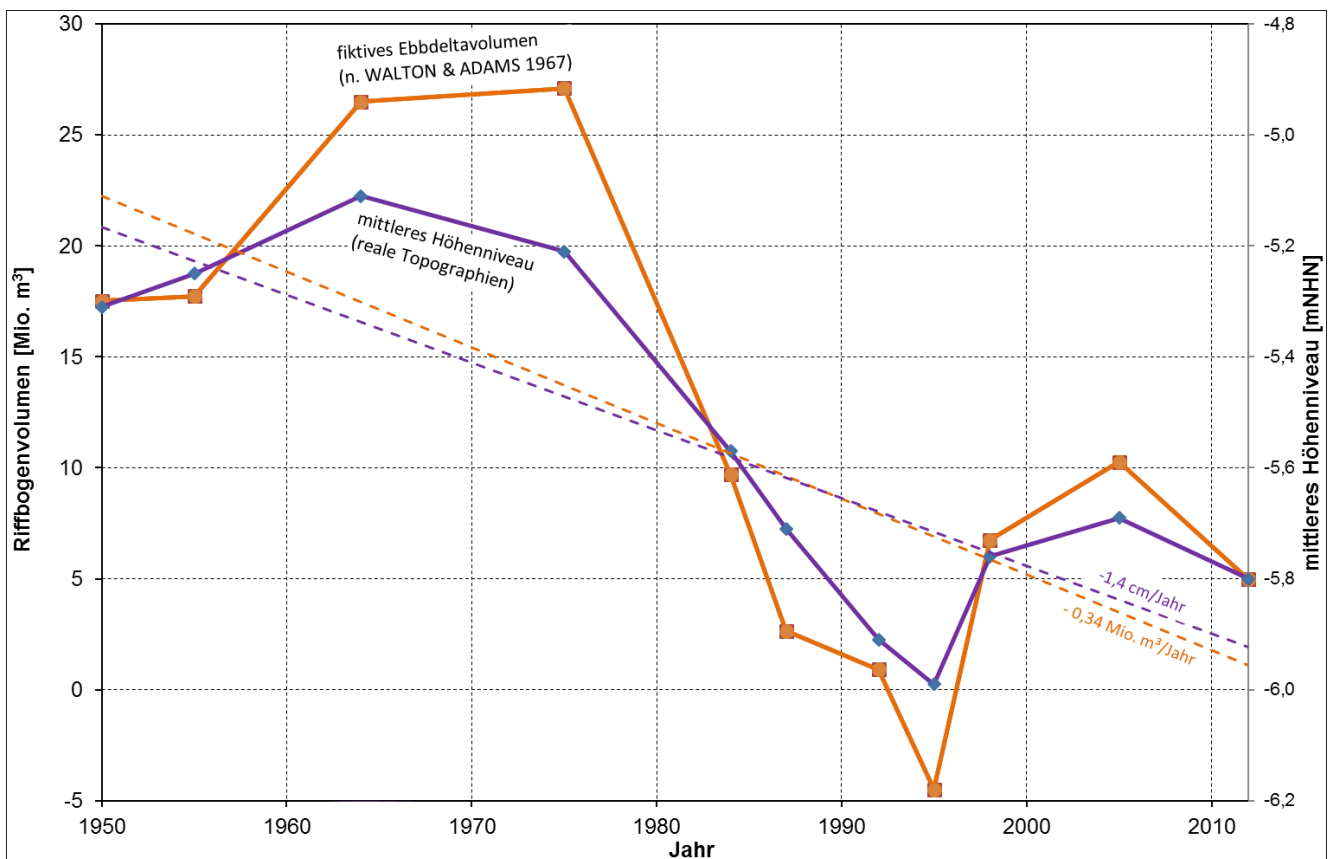


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung des fiktiven Riffbogenvolumens V_0 (nach WALTON & ADAMS 1976) und des mittleren Höhenniveaus im Riffbogen

Es schließt sich nach 1995 eine Zeitspanne an, in der innerhalb von drei Jahren über zehn Mio. m^3 Sediment in den Riffbogen transportiert wird, so dass V_0 im Jahr 1998 mit etwas weniger als sieben

Mio. m³ wieder positive Werte einnimmt. Während bis 2005 weitere 3,5 Mio. m³ Sediment hinzukommen, ist die nachfolgende Entwicklung bis zur letztverfügbaren Vermessung aus dem Jahr 2012 erneut rückläufig. Über den Gesamtzeitraum betrachtet liegt der gemittelte Verlust für das fiktive Ebbdeltavolumen bei 0,34 Mio. m³. Bezogen auf das über den Riffbogen gemittelte Höhenniveau entspricht dies einer Abnahme von 1,4 cm/Jahr (Abb. 4).

Mit Blick auf das Sedimentvolumen innerhalb definierter Tiefenstufen für reale Topographien ist festzustellen, dass über den Gesamtzeitraum betrachtet, die Volumenentwicklung innerhalb des Tiefenhorizontes NHN-5 bis -6 m in den Tendenzen dem zeitlichen Verlauf für V_0 folgt. Zwar weisen die Volumenänderungen in den beiden darüber liegenden Stufen ebenfalls ähnliche Schwankungen auf, weichen aber insbesondere zu Beginn und gegen Ende des Betrachtungszeitraumes vom Verlauf für V_0 ab. Insgesamt weisen diese drei Tiefenhorizonte zwischen NHN-3 und -6 m die größten Volumenschwankungen auf, also ein Bereich, der welleninduziert vorrangig bei entsprechenden Extremereignissen (Sturm, Orkan) umgelagert wird.

Das Sedimentvolumen in den beiden Tiefenstufen unterhalb von NHN-6 m zeigt keine so ausgeprägten Schwankungen über die Zeit, sondern eher einen insgesamt negativen Trend, der sich nicht zuletzt dadurch ausdrückt, dass das Volumen in der Topographie von 2012 unterhalb des Wertes für das Jahr 1995 liegt.

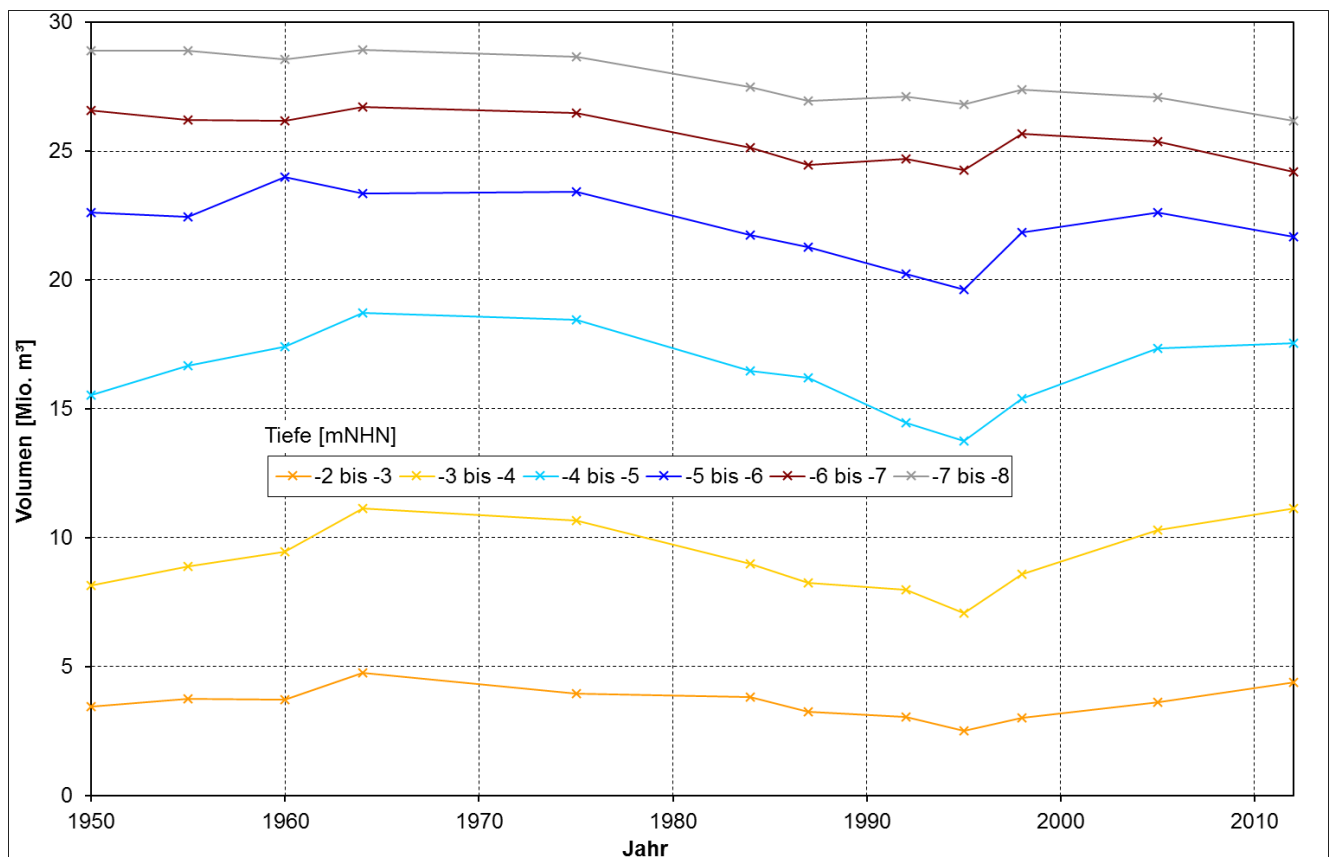


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des Riffbogensvolumens innerhalb definierter Tiefenhorizonte

5 Tidebecken der Harle und Dove Harle

5.1 Morphologische Entwicklung

Die wesentlichen morphologischen Umgestaltungen im Einzugsgebiet der Harle sind zwischen den Jahren 1960 und 1995 festzustellen und lassen sich nach LADAGE & STEPHAN (2004) wie folgt zusammenfassen: Durch die ostwärts gerichtete Verlagerung des Mündungsbereiches der Breiten

Legde und das Umschwenken des Gat von Wracks verliert die Harle insgesamt vier nachgeordnete Rinnen an die Dove Harle. In der Folge vergrößert sich das Einzugsgebiet der Dove Harle um den Faktor 7, während der Harle nur noch ca. ein Drittel ihres ursprünglichen Einzugsgebietes verbleibt. Bezogen auf das Tidevolumen steigt der Anteil der Dove Harle von 10 % auf 66 % an, während der Anteil des Teileinzugsgebietes der Harle entsprechend sinkt.

Infolge der geänderten Rinnenhierarchie konzentriert sich der Wasseraustausch verstärkt auf den östlichen Teil des Seegats, wodurch die Dove Harle erheblich an Bedeutung gewinnt und zwischen den Jahren 1960 und 2003 eine Querschnittszunahme um gut 50 % erfährt. Diese Umgestaltungen begünstigen auch die Sedimentablagerungen im Westen des Wateinzugsgebietes, so dass sich die Martensplate und der Harlesieler Nacken ostwärts ausdehnen können.

Als Auslöser für die genannten morphologischen Umgestaltungen nennen LADAGE & STEPHAN die ostwärts gerichtete Verlagerung vor allem der östlichen, aber auch der westlichen Wattwasserscheide. Die entgegen dem Uhrzeigersinn gerichtete Verschwenkung der Harle im Bereich des Riffbogens, die zwischen den Jahren 1975 und 1984 besonders ausgeprägt ist, dürfte ebenfalls den hierarchischen Umstrukturierungen geschuldet sein, und weniger auf den Bau der Bühne H zurückzuführen sein, wie von LADAGE & STEPHAN angenommen.

Die Dove Harle erhält erst mit dem Umschwenken und Einmünden der Breite Legde Mitte der 1990er Jahre eine rinnenförmige Struktur, die sich nachfolgend weiter ausbaut und durch die Ausbildung einer Sandbank zwischen Kopf der Bühne H und den östlichen Ausläufern des Harlesieler Nackens klar von der Harle getrennt ist. Während sich die tiefe Rinne der Dove Harle in der Topographie des Jahres 1995 in die Breite Legde fortsetzt, schwenkt der südliche Teil nachfolgend zunehmend nach Osten und bildet im Jahr 2012 mit dem Gat von Wrack eine nahezu durchgängige Rinne. Gleichzeitig vertieft sie sich an ihrem nördlichen Ende. Die sich seit Jahrzehnten zurückbildende Telegraphenbalje ist im Jahr 2012 nur noch rudimentär erkennbar.

In der Topographie 2012 ist die Ablösung einer größeren Plate vom Harlesieler Nacken erkennbar, die sich der Luftbilddaufnahme aus dem Jahre 2016 zufolge in den nachfolgenden vier Jahren leicht ostwärts verlagert und an Umfang zulegt. Bei Fortsetzung dieses Entwicklungstrends ist in näherer Zukunft zu erwarten, dass sich die Plate mit dem Langen Jan verbindet, mit der Folge einer erneuten Umstrukturierung der Rinnenhierarchie: Die Carolinensieler Balje würde wieder direkt in die Harle entwässern.

Eine neue Vermessung des Untersuchungsraumes wird klären, ob sich die Mündung der Doven Harle, die 2012 noch direkt auf die Bühne H gerichtet ist, westwärts verlagert hat und südlich des Bühnenkopfes in die Harle mündet, wie es sich auf dem Luftbild von 2016 darstellt. Eine solche Entwicklung dürfte sich in erheblichen Maße positiv auf die Strandentwicklung vor den Harlehörndünen auswirken.

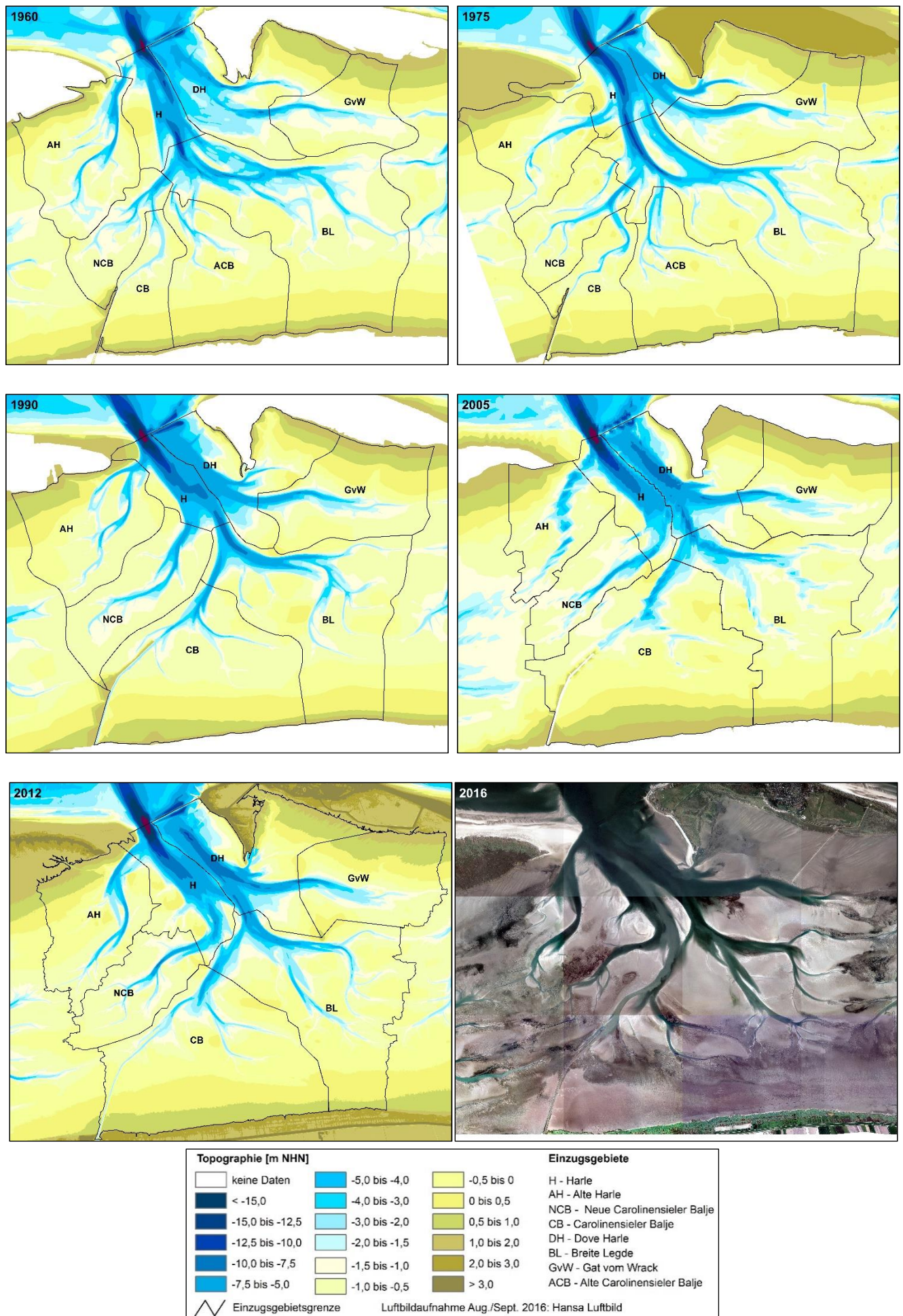


Abb. 6: Morphologische Veränderungen im Einzugsgebiet der Harle zwischen 1960 und 2016

5.2 Entwicklung der Einzugsgebietsgröße und des Tidevolumens

Die Fläche des gesamten Watteinzugsgebietes (WEG) schwankt über den Beobachtungszeitraum von gut fünfzig Jahren nur um einige wenige Prozentpunkte und liegt im Jahr 2012 bei 64,5 km² (Abb. 7). Aufgrund der eingangs beschriebenen erheblichen Umstrukturierungen in der Rinnenhierarchie ergeben sich zwangsläufig deutliche Größenvariationen innerhalb der Teileinzugsgebiete (TEG), maßgeblich für die TEG von Harle und Dove Harle. Bei einer Ausgangsgröße des WEG von gut 62 km² entwässern 1960 etwas mehr als 76 % (47,5 km²) über die Harle, die restlichen 14,6 km² über die Dove Harle. Im Jahre 2005 haben sich die Verhältnisse nahezu exakt umgekehrt: knapp 77 % des Gesamteinzugsgebietes be- und entwässern über die Dove Harle (48,3 km²), der verbleibende Anteil (14,6 km²) über die Harle. In den nachfolgenden sieben Jahren bis 2012 verliert die Dove Harle durch die weiterhin anhaltende Ostverlagerung der Breiten Legde etwa vier Prozent ihres Einzugsgebietes (1,8 km²) an die Harle. Zusammen mit einer leichten Westverlagerung der östlichen Wattwasserscheide erhöht sich damit der Flächenanteil, der über die Harle entwässert, bis 2012 um mehr als 20 % auf fast 18 km².

Die Zunahme der Einzugsgebietsfläche für die Carolinensieler Balje zwischen den Jahren 1975 und 1990 um den Faktor 3 von 5,7 km² auf 14,7 km² ist im Wesentlichen dem Umstand geschuldet, dass die Alte Carolinensieler Balje bis Mitte der 1980er Jahre noch direkt in die Breite Legde entwässerte, nachfolgend dann in die Carolinensieler Balje mündet und somit deren Einzugsgebiet entsprechend vergrößert (s. Abb. 6). Ein Teil des Flächenzuwachses erfolgt aber auch zu Lasten der Neuen Carolinensieler Balje.

Ebenfalls zwischen den Jahren 1975 und 1990 verliert die Breite Legde die Neue Carolinensieler Balje als Zufluss, die nunmehr unmittelbar in die Harle mündet. Es kommt zu einem entsprechenden Rückgang der Einzugsgebietsfläche und des über den mittleren Tidenhub normierten Tidevolumens innerhalb des Einzugsgebietes der Breiten Legde (Abb. 7 u. 8).

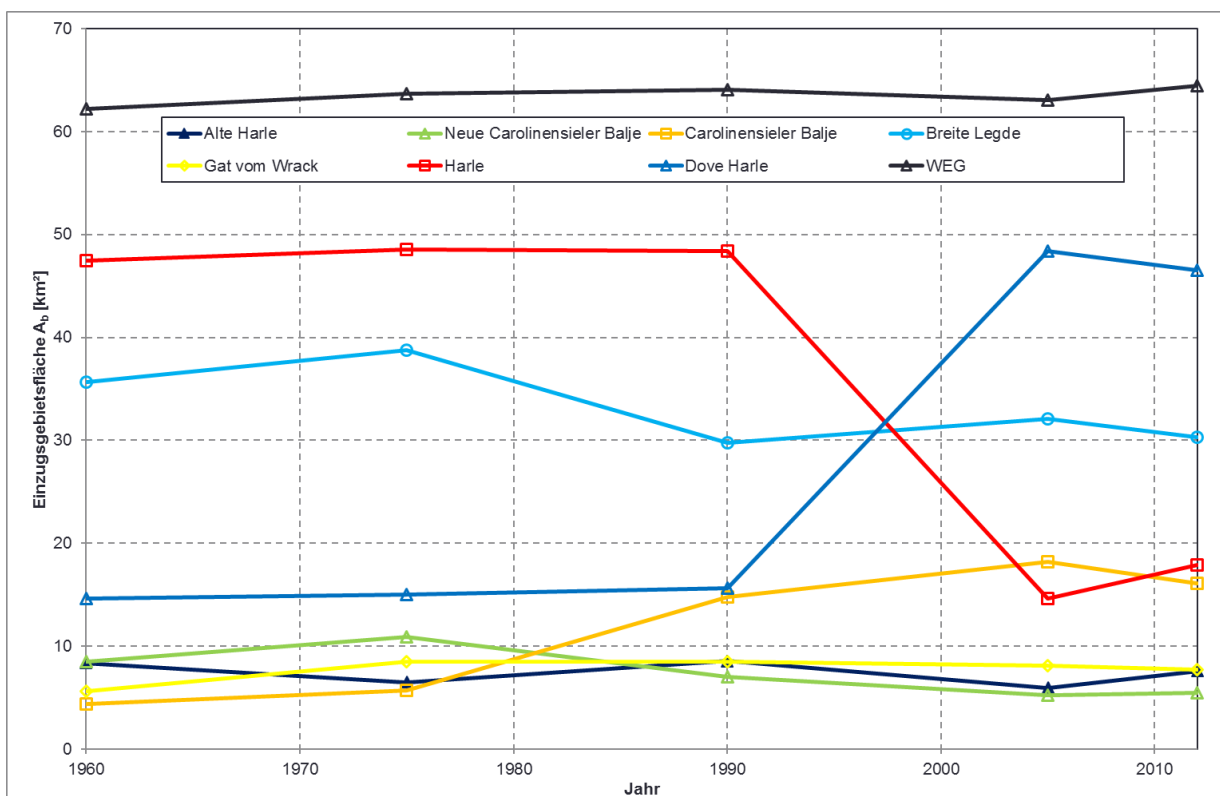


Abb. 7: Entwicklung der Einzugsgebietsgröße A_b

Zwischen den Jahren 1960 und 2012 steigt das über den mittleren Tidehub normierte Tidevolumen kontinuierlich von ursprünglich 42 Mio. m³/m um etwas mehr als vier Prozent auf gut 44 Mio. m³/m an. Die oben beschriebenen Umstrukturierungen in der Rinnenhierarchie bedingen natürlich auch entsprechende Größenveränderungen des normierten Tidevolumens (Abb. 8).

Mit dem Faktor 3 kommt es in den Teilgebieten von Harle und Dove Harle absolut zu den größten Änderungen im normierten Tidevolumen. Relativ betrachtet treten die größten Veränderungen für V_T hingegen im Einzugsgebiet der Carolinensieler Balje auf. Hier hat sich das über den mittleren Tidehub normierte Tidevolumen von 2,4 Mio. m³/m im Jahre 1960 auf 10,5 Mio. m³/m in 2012 fast vervierfacht.

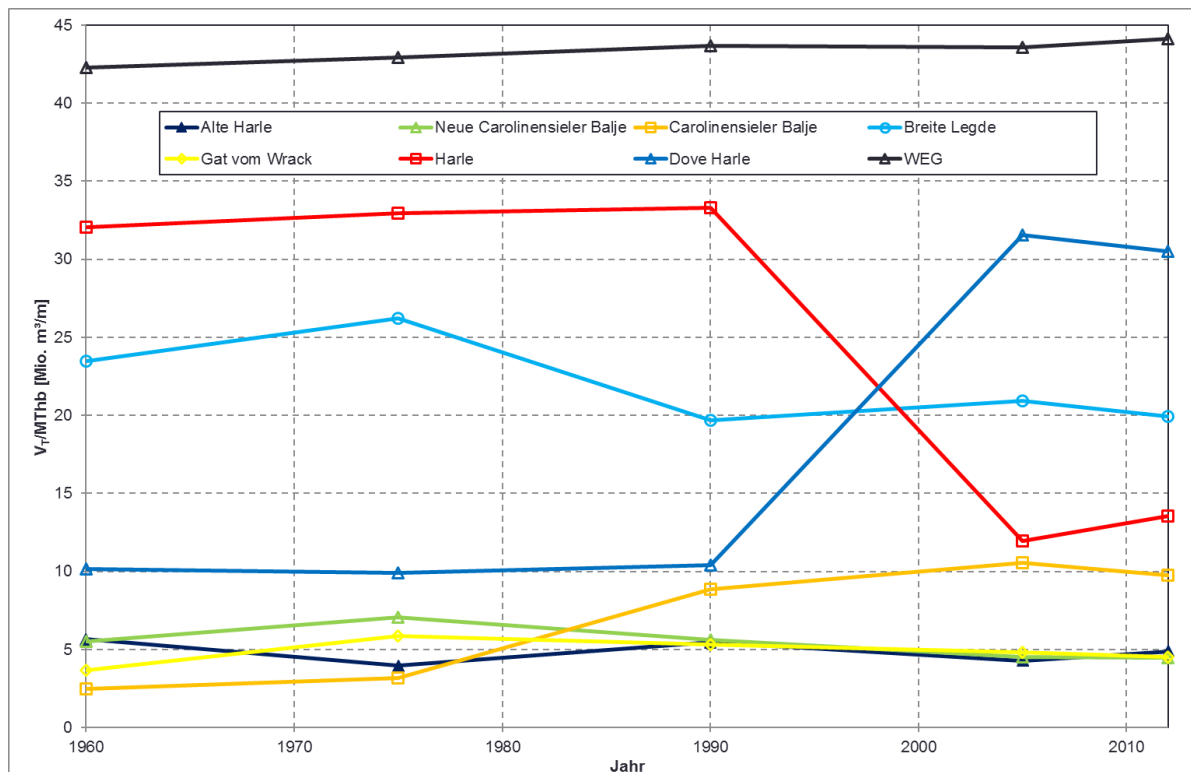


Abb. 8: Entwicklung des über den mittleren Tidehub normierten Tidevolumens

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. Vor allem aber stellt es 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, 2016) in den Einzugsgebieten einiger ostfriesischer Seegaten bestätigen erwartungsgemäß die funktionalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern. Allerdings weichen diese 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 teilweise 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 für andere Einzugsgebiete (MEYER 2013, 2014, 2015, 2016) werden auch für den hier betrachteten Untersuchungsraum Harle die empirischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern stets 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 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.

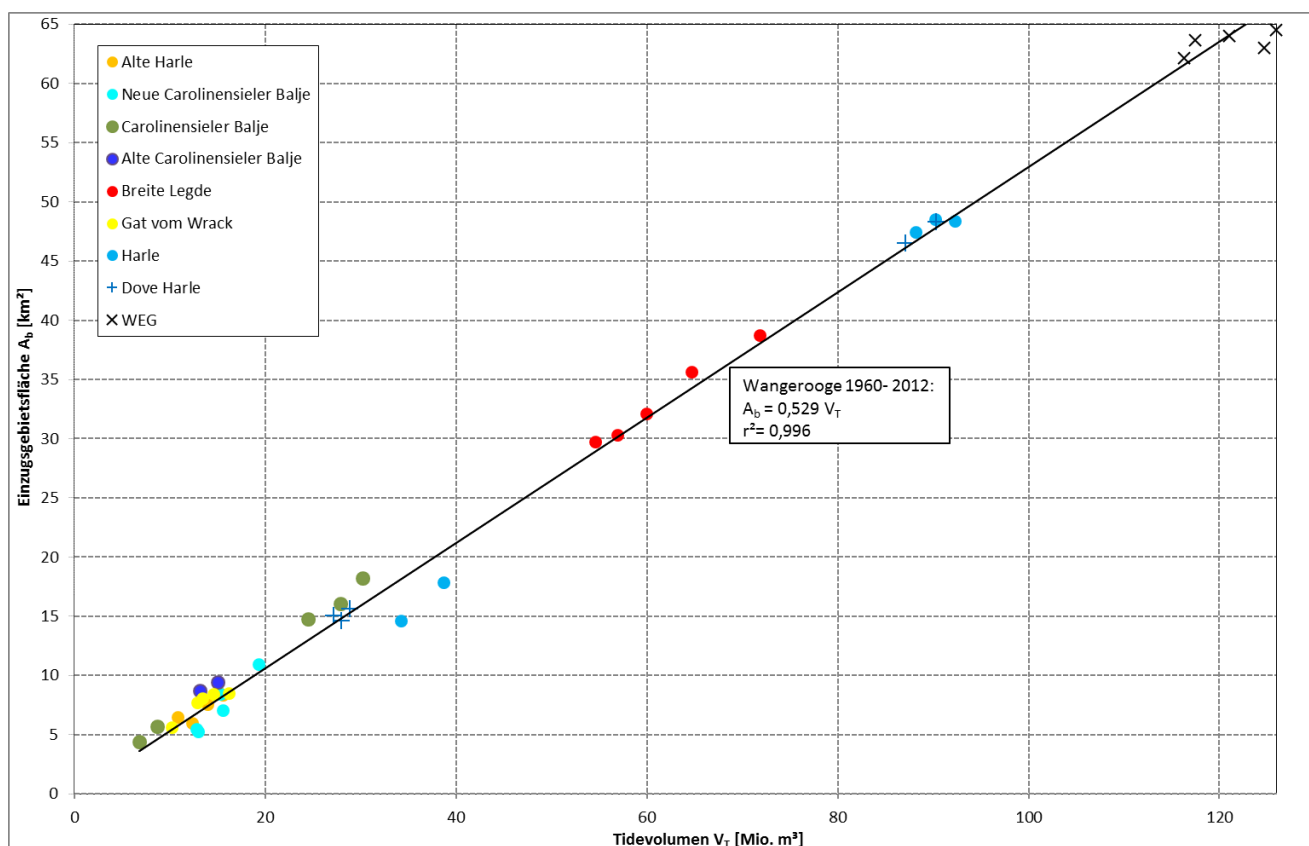


Abb. 9: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Harle

Der Zusammenhang zwischen V_T und A_b für alle Messwerte aus den Jahren 1960 bis 2012 ist sehr signifikant ($r^2=0,996$) und wird durch eine Ausgleichsgerade wiedergegeben, die mit dem Koeffizienten 0,529 nur eine minimal geringere Steigung aufweist als die in WADE für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste mit 0,534 ermittelte (s. Abb. 9). Auf eine Darstellung der Ausgleichsgeraden für jede der fünf topographischen Aufnahmen wurde verzichtet, da sie mit Steigungen zwischen 0,514 und 0,541 so eng beisammen liegen, dass sie sich grafisch überlagern. Sie weisen aber gegenüber der Ausgleichsgerade für alle Jahrgänge mit Werten zwischen 0,997 und 0,999 ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß. Insgesamt kann aber geschlussfolgert werden, dass die beiden Parameter V_T und A_b recht kurzfristig auf Störungen des dynamischen Gleichgewichts durch eine entsprechende Anpassung reagieren.

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 , der von NIEMEYER et al. (1995) für die ostfriesischen Seegaten abermals durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird.

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. 10). Dies wird im Wesentlichen damit begründet, dass bereits geringe Watthöhenänderungen zu deutlichen Größenschwankungen in der Gezeitenfläche führen können, sich aber nur in geringem Maße auf das Tidevolumen auswirken.

Die Dove Harle scheint hierbei schneller ein dynamisches Gleichgewicht gefunden zu haben als die Harle.

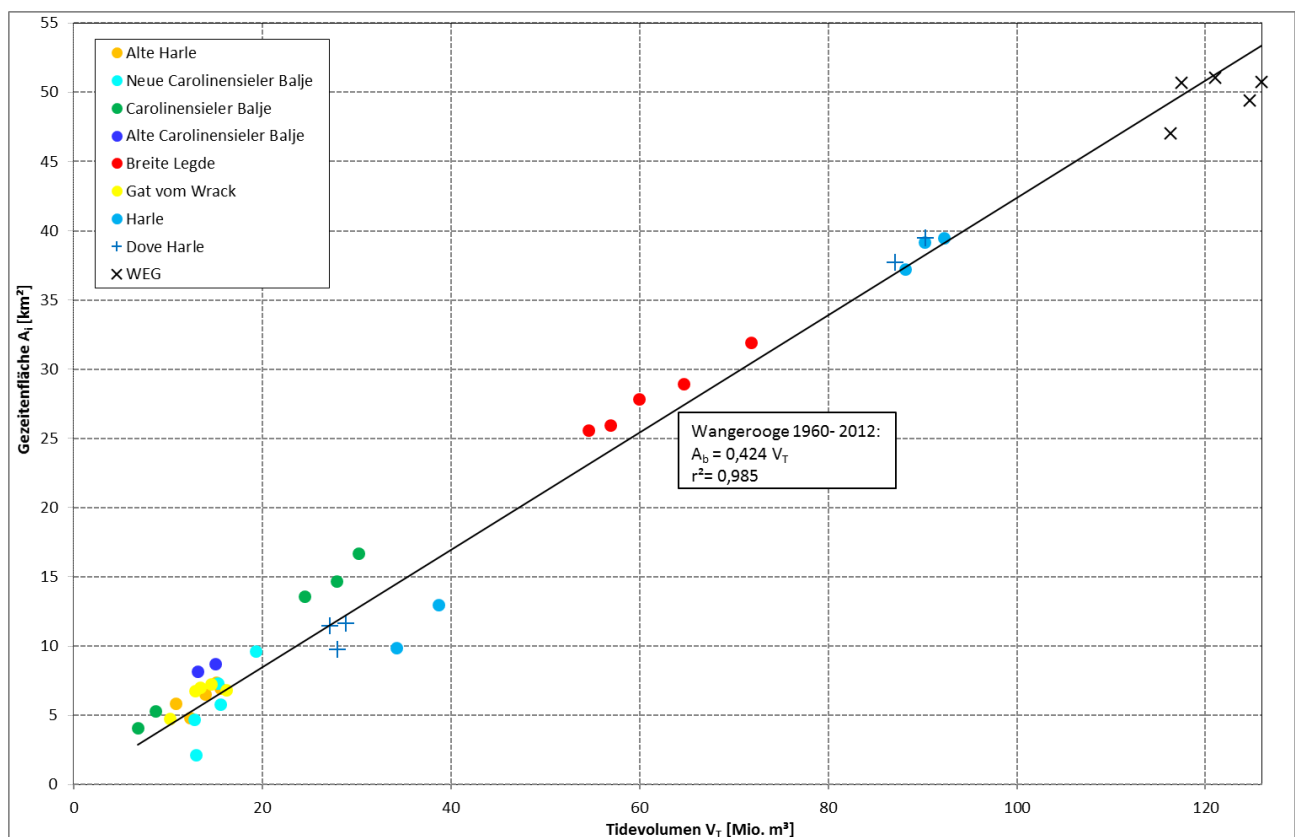


Abb. 10: Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen im Gezeitenbecken der Harle

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 ist mit $r^2 = 0,996$ ebenfalls hoch signifikant. Auffällig sind die Abweichungen von der Ausgleichsgeraden im Bereich des TEG der Carolinensieler Balje, die auch bei den Abhängigkeiten der Einzugsgebietsfläche und Gezeitenfläche vom Tidevolumen festzustellen sind. Diese dürften aus der Umstrukturierung der Rinnenhierarchie resultieren, in deren Folge die Carolinensieler Balje bis Mitte der 1980er Jahre in die Neue Carolinensieler Balje, nachfolgend in die Breite Legde entwässert und zeitgleich die Alte Carolinensieler Balje als Zufluss gewinnt (Abb. 11).

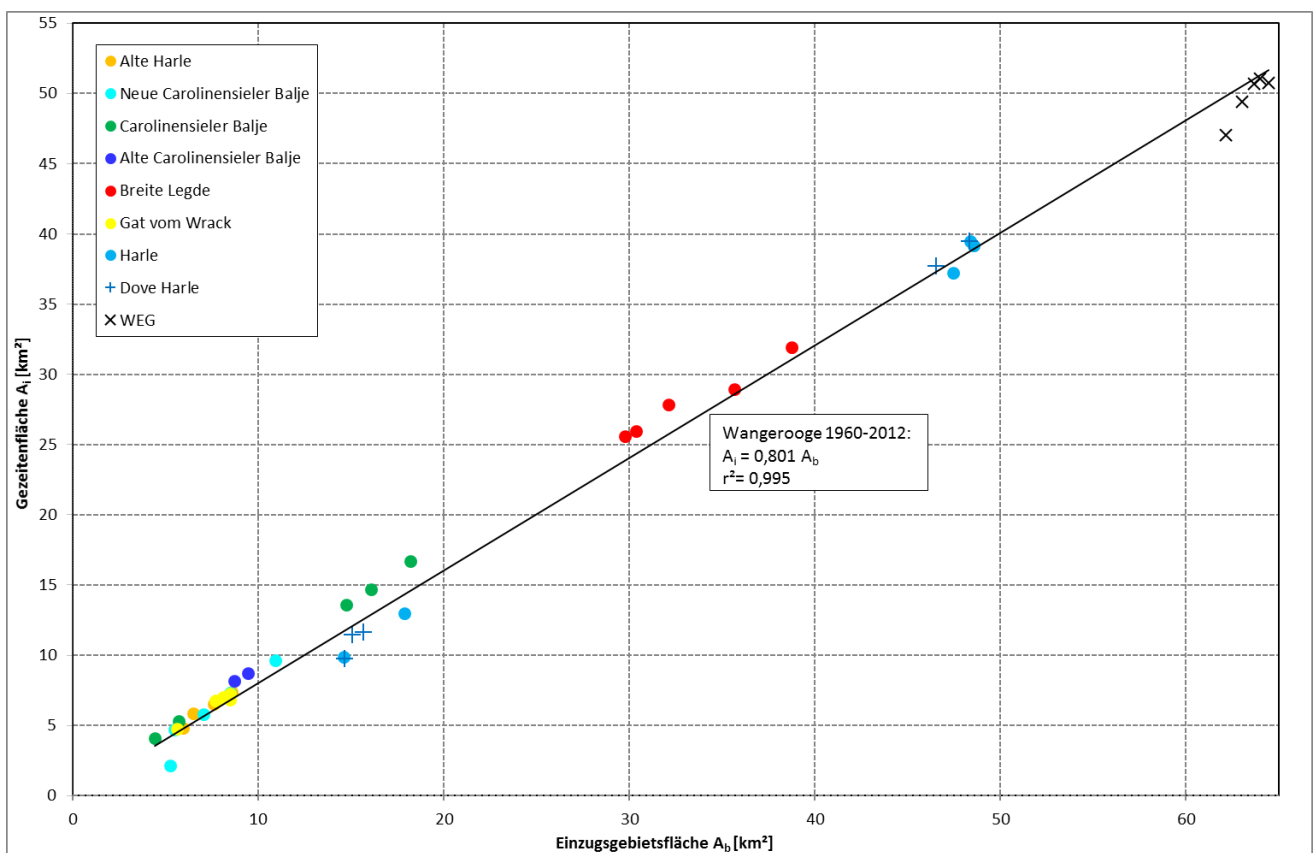


Abb. 11: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsfläche im Tidebecken der Accumer Ee

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:

$$A_c = C_b * V_T^n$$

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 Harle mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2=0,946$ als deutlich weniger signifikant zu bezeichnen (Abb. 12). Insbesondere fällt auf, dass der Rinnenquerschnitt der Harle über die Zeit erheblichen Schwankungen unterliegt, ohne dass sich das Tidevolumen entsprechend verändert. Dies steht im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus Untersuchungen anderer ostfriesischer Seegaten, wo insbesondere der Zusammenhang zwischen A_c und V_T für den Seegatquerschnitt sehr ausgeprägt ist: Bedingt durch die Tatsache, dass hier die Rinne beidseitig durch Inseln begrenzt werden, ist ein Überströmen der Wattflächen außerhalb des Rinnenquerschnitts nicht möglich. Als ursächlich verantwortlich für die Abweichungen im Querschnitt Harle wird die Buhne H gesehen, die zwischen 1938 und 1940 bis zur Hauptrinne der Harle mit dem Ziel verlängert wurde, die Ausbildung der Doven Harle zur Hauptrinne des Seegats zu unterbinden (s. LADAGE & STEPHAN 2004). Allerdings wurde sie nur bis etwa 25 cm über MTnw aufgeschüttet, bevor der Krieg eine Fertigstellung der Buhne verhinderte. Ausgeprägte Kolkbildungen beidseits der Buhne weisen zudem auf stärkere Durchströmungen infolge baulicher Schäden am Bühnenkörper hin. Zudem kommt der eingangs beschriebenen Situation der lediglich hydrologischen Wattwasserscheide hier eine besondere Bedeutung zu, da das Harle WEG über die Blaue Balje und die Jade mehr oder minder zeitgleich durch drei Rinnen bzw. von zwei Seiten befüllt und entleert wird.

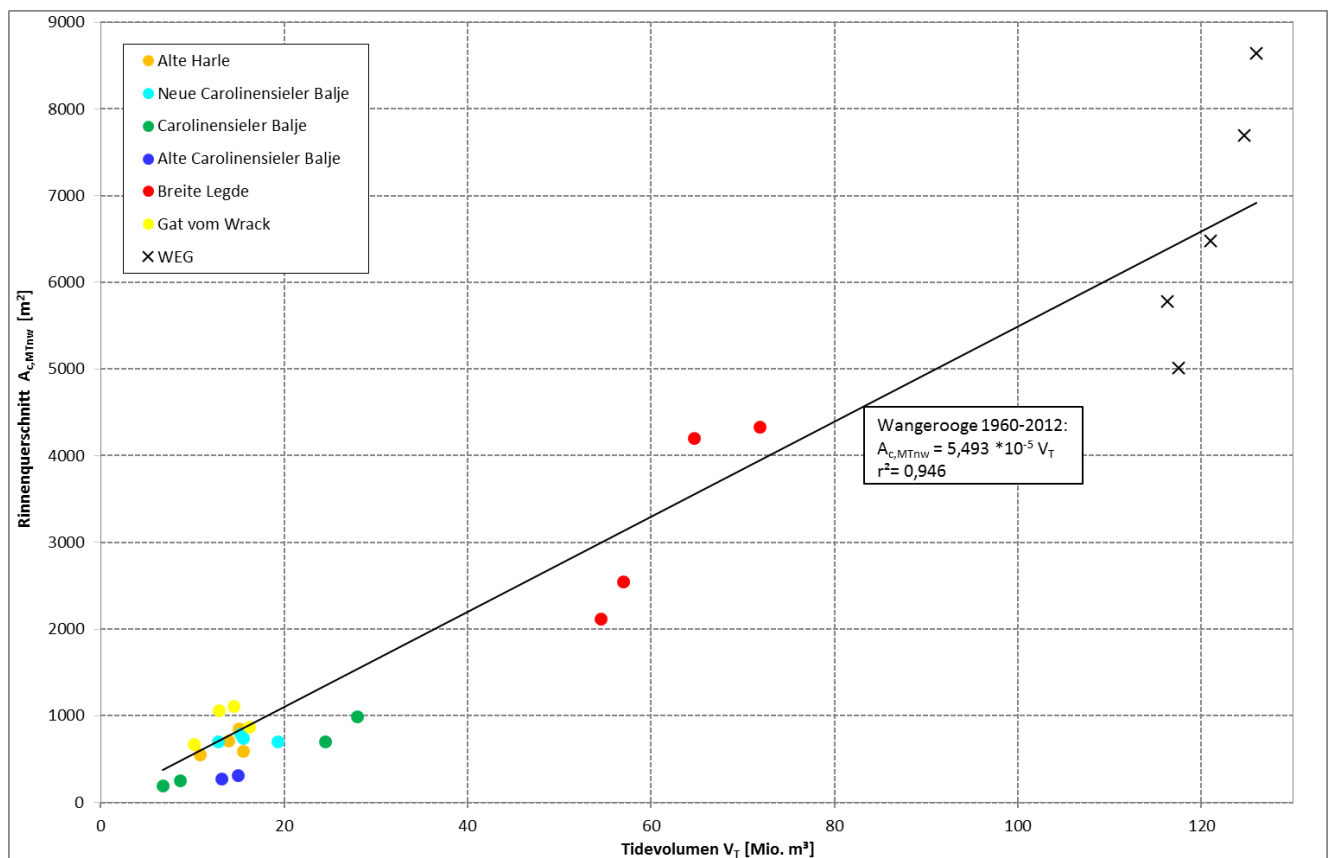


Abb. 12: Rinnenquerschnitt der Harle und ihrer Nebenrinnen als Funktion des Tidevolumens

Um den Anforderungen für die Lage des Rinnenprofils quer zur Strömung an der engsten und tiefsten Stelle gerecht zu werden, wurde das Profil in Verlängerung der Buhne H gewählt. Die Kronenhöhe wurde in den Geländemodellen einheitlich mit NHN-1,2 m an den Ausbauzustand zu

Kriegsbeginn angenähert, weil der unmittelbare Bühnenbereich aus naheliegenden Gründen nicht gepeilt wurde. Ausnahme bildet die Laserscanmessung aus dem Jahr 2012, in der auch die Bühne erfasst wurde. Mit Höhenlagen zwischen NHN-2,2 m und NHN-2,8 m weist diese Messung die Krone der Bühne allerdings auf einem wesentlich niedrigeren Niveau aus. Allein schon deswegen fällt der Rinnenquerschnitt für das Jahr 2012 bei einer Bühnenlänge von ca. 1,7 km erheblich größerer aus.

6 Blaue Balje

Im Jahre 1964 dominieren die drei Rinnen Blaue Balje, Mittelbalje und Minsener Balje als etwa gleichmächtig ausgeprägte Rinnen die Topographie im Einzugsgebiet der Blauen Balje. In diesem Zustand münden die Blaue Balje und die Mittelbalje gemeinsam in eine tiefe Rinne unmittelbar vor dem Ostende von Wangerooge. Südöstlich davon hat sich im Rinnenverlauf der Minsener Balje vor dem Bühnenkopf des Längswerkes auf Minsener Oog ein Kolk gebildet, der sich in den nachfolgenden Jahren zur dominierenden Rinne im Riffgat entwickelt (Abb. 13).

Zwischen 1964 und 1990 entwickelt sich die Blaue Balje erheblich zurück, während die Mittelbalje an Bedeutung gewinnt und sich dann in ihrem Wurzelgebiet in zwei Rinnen spaltet. In dem Maße, in dem sich die Blaue Balje am Südrand des Wangerooger Inselwatts zurückbildet, dehnt sich der westliche Arm der Mittelbalje aus und übernimmt Anfang der 1990er Jahre die Bezeichnung Blaue Balje. Als Mittelbalje verbleibt somit der östliche Arm, der nachfolgend rasch degeneriert und in der Topographie 2012 nur noch rudimentär erkennbar ist. Damit bestimmen ab dem Jahr 2012 nur noch zwei große Rinnen – die Blaue Balje und die Minsener Balje – die Topographie im Einzugsgebiet der Blauen Balje und umschließen den ausgedehnten Komplex des Mittelsandes. Soweit die Luftbildaufnahme erkennen lässt, bleibt diese morphologische Ausprägung bis 2016 nahezu unverändert bestehen (Abb. 14).

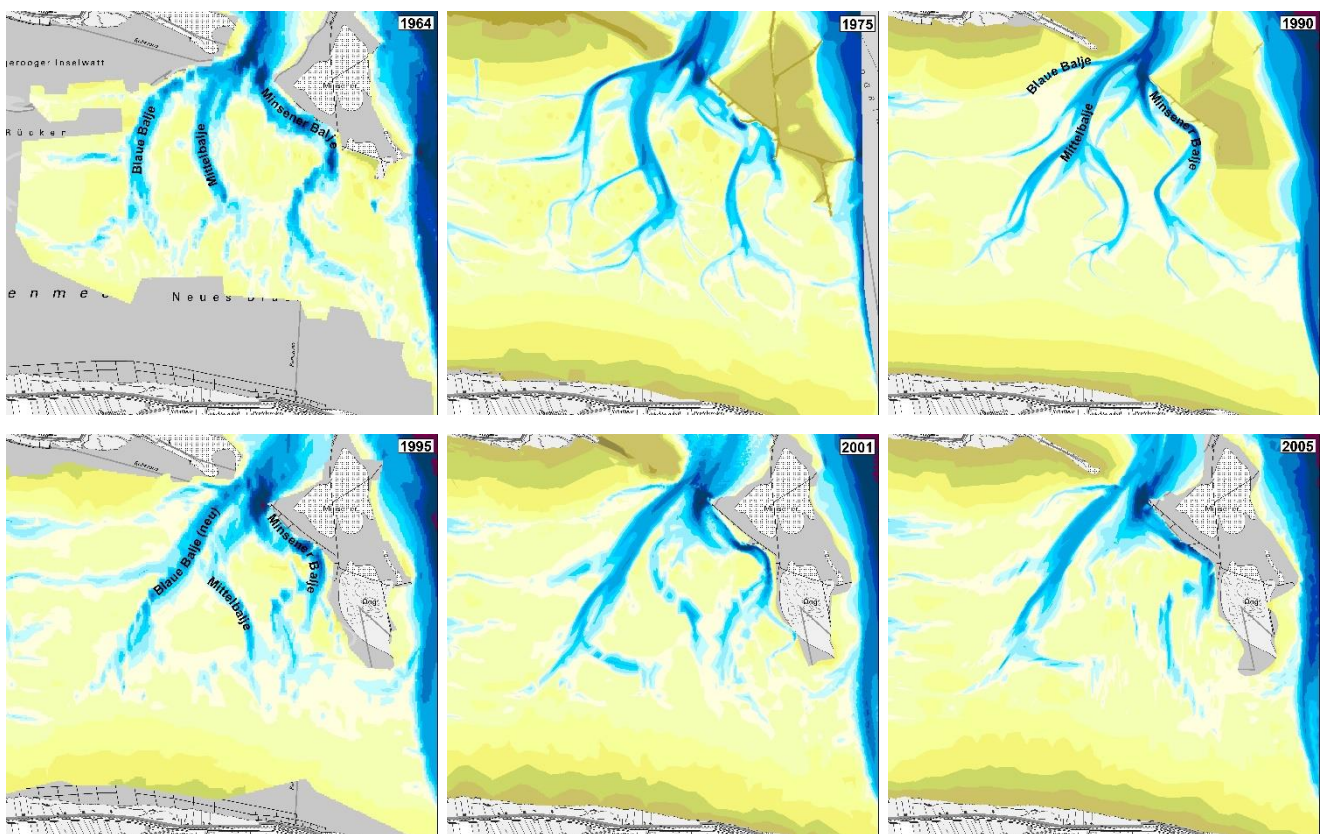


Abb. 13: Morphologische Veränderungen im Einzugsgebiet der Blauen Balje zwischen 1964 und 2005 (Legende s. Abb. 14)

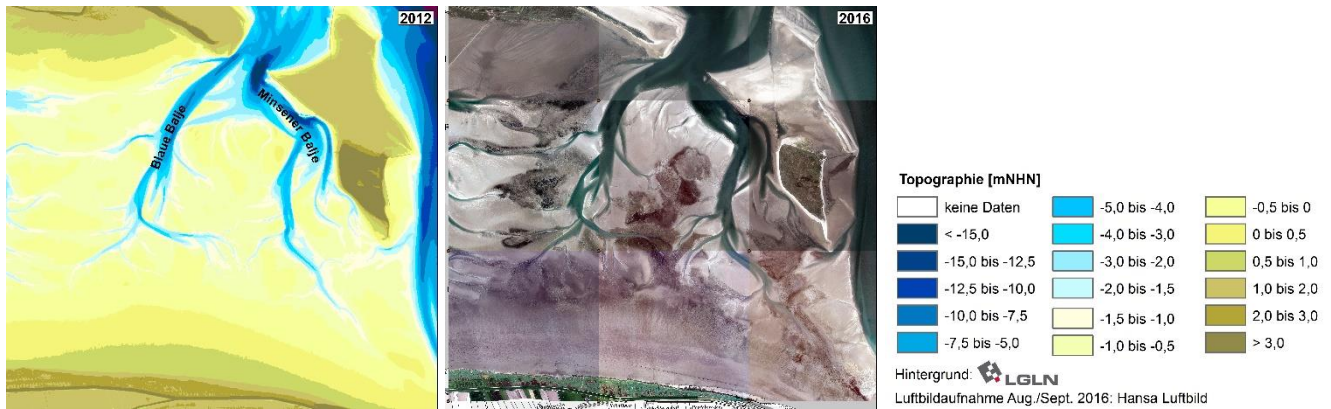


Abb. 14: Morphologische Ausprägung des Einzugsgebietes der Blauen Balje in den Jahren 2012 und 2016

7 Zusammenfassung

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

Sowohl im Einzugsgebiet der Harle als auch in dem der blauen Balje kommt es zwischen den Jahren 1960 und 2012 zu deutlichen morphologischen Umgestaltungen: Die Harle verliert durch Verlagerung der Mündung der Breiten Legde und Umschwenken des Gats vom Wrack bis Anfang der 1990er Jahre vier hierarchisch nachgeordnete Rinnen an die Dove Harle. Damit verbleibt der Harle nur noch rund ein Drittel ihres ursprünglichen Einzugsgebietes. Durch die geänderte Rinnenhierarchie konzentriert sich der Wasseraustausch stärker auf den östlichen Teil des Seegats und begünstigt die Sedimentablagerungen im Westen des Einzugsgebietes.

Die tiefe Rinne der Dove Harle, die sich bis 1995 mit ihrem südlichen Ausläufer noch in die Breite Legde fortsetzt, schwenkt nachfolgend nach Osten und bildet im Jahr 2012 mit dem Gat von Wrack eine nahezu durchgängige Rinne. Eine Entwicklung, die vermutlich auch dazu geführt hat, dass sich der Mündungsbereich der Dove Harle westwärts zu verlagern scheint, wie Luftbilder aus dem Jahre 2016 vermuten lassen, und die sich positiv auf die morphologische Ausprägung des Harlehörns auswirken dürfte. Die Luftbilder lassen auch eine erneute Änderung in der Rinnenhierarchie erwarten, in deren Folge die Carolinensieler Balje wieder direkt in die Harle mündet.

Für das Einzugsgebiet der Harle 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. Ein noch höheres Bestimmtheitsmaß wird erzielt, wenn die Abhängigkeit der verschiedenen Parameter getrennt nach Vermessungsjahr berechnet wird. Ausnahme bildet allerdings die Abhängigkeit des Rinnenquerschnitts vom Tidevolumen, der als nicht signifikant einzustufen ist, bedingt durch die Lage des Rinnenquerschnitts durch die Harle in Verlängerung der Buhne H und die komplexe Befüllung und Entleerung des Wateinzugsgebietes.

Auch das Einzugsgebiet der Blauen Balje, dem Seegat zwischen Wangerooge und Minsener Oog unterliegt deutlichen morphologischen Umgestaltungen: Von den drei ursprünglich etwa gleichbedeutenden Rinnen Blaue Balje, Mittelbalje und Minsener Balje entwickelt sich die westliche Rinne fast vollständig zurück. Dabei handelt es sich um die Blaue Balje, deren Namen aber auf den westlichen Arm der Mittelbalje übergeht. Der östliche Arm der Mittelbalje bildet sich zurück, wodurch sich zwischen der (neuen) Blauen Balje und der Minsener Balje ein ausgedehntes, hochgelegenes Wattgebiet entwickeln kann, dass den Namen Mittelsand erhält.

8 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. & 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 Inselschutz 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

- MEYER, C. (2016):** Morphodynamische Analysen im Bereich der Accumer Ee und ihres Einzugsgebietes. – Untersuchungsber. NLWKN-Forschungsstelle Küste 2/2016
- 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