

Florian LADAGE, Norderney  
Hans-Joachim STEPHAN, Norderney  
Hanz Dieter NIEMEYER, Norderney

## **Einfluss einer Unterwasserbuhne auf das Seegat Harle**

### **Summary**

The East Frisian tidal inlets tend to migrate with the prevailing eastward drift in the southern North Sea. For Harle inlet eastward migration was accelerated by the adaption of tidal basin and inlet to the resedimentation of a medieval storm surge bay. To prevent further migration a large-scale groyne was built in the eastern part of Harle inlet between 1938 and 1940. Nowadays this structure still keeps the main channel in position and restricts the extent of a secondary channel. But in the last two decades redistribution of tidal gullies in the catchment area significantly increased the tidal prism of the secondary channel and accordingly its cross-section started to expand. Investigation in light of empirical equilibrium conditions indicate that the partial cross-sections in Harle inlet show a retarded adjustment to the modified hydrodynamical conditions. But future adaptation of equilibrium conditions through further erosion of the secondary channel is anticipated.

### **1 Einleitung und Untersuchungsgebiet**

Die Füllung und Entleerung der Wateinzugsgebiete zwischen Düneninseln und der Festlandsküste erfolgt über enge, tiefe Rinnen, welche die Inseln voneinander trennen: die Seegaten (LÜDERS u. LUCK 1976). Das Seegat Harle liegt an der deutschen Nordseeküste zwischen den Ostfriesischen Inseln Spiekeroog und Wangerooge (Abb. 1). Wangerooge ist die östlichste der sieben bewohnten Ostfriesischen Inseln, die sich im Verlauf des postglazialen Meeresspiegelanstiegs aus hochwasserfreien Platen zu dünenbestandenen Inseln entwickelt haben (LÜDERS 1953; STREIF 1990). Die Insel Wangerooge liegt – bezogen auf die Hauptrichtung des küstenparallelen Sedimenttransports – auf der unterdriftigen Seite des Seegats Harle und besitzt bei einer maximalen Breite von etwa 1,5 km eine Länge von ungefähr 8 km. Wangerooge ist vom Festland durch eine 7 bis 8 km breite Wattfläche getrennt, die von Rinnen unterschiedlicher Größe unterteilt wird. Die Tidewassermenge aus dem Wattbereich landwärts der Insel strömt überwiegend durch das Seegat Harle westlich von Wangerooge ein und aus (Abb. 1). Obwohl die Harle mit ihrem etwa 65 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet nach der Wichter Ee das kleinste Tidebecken der Ostfriesischen Seegaten besitzt (NIEMEYER et al. 1995), ist sie mit lokalen Tiefen bis NN-35m das tiefste Seegat der Ostfriesischen Inselkette. Diese

Tatsache ist in erster Linie auf die Wirkung der Strombuhne H zurückzuführen, die die Breite des Seegats in ihrem Mittelteil künstlich reduziert (Abb. 3). Die Aufgabe von Strom- oder Unterwasserbuhnen, die in massiver Bauweise dammartig bis in größere Wassertiefen vorgebaut werden, besteht vor allem darin, erodierende Strömungen von der Gewässersohle und vom Ufer fernzuhalten (LÜDERS u. LUCK 1976).

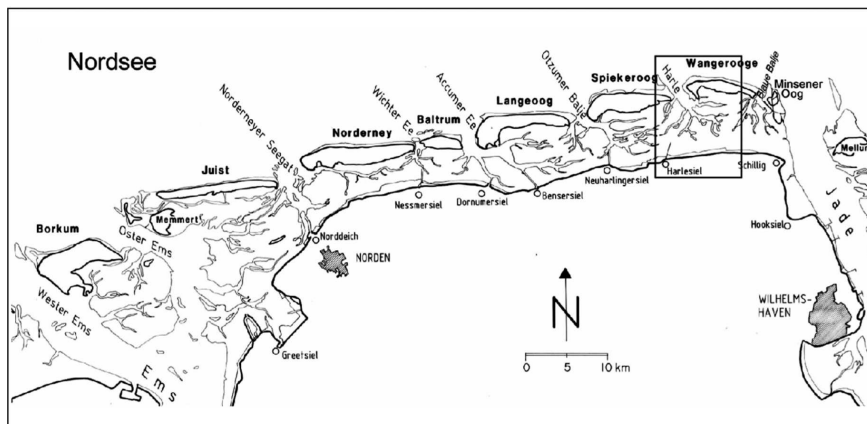


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes an der niedersächsischen Nordseeküste

Das Untersuchungsgebiet wird von einer halbtägigen Tidewelle durchlaufen. Der mittlere Tidehub beträgt am Pegel Wangerooge-West 2,88 m (1999–2003). Der Einfluss des Seegangs kann im Bereich der Ostfriesischen Inseln durch Jahresmittel der signifikanten Wellenhöhe von 0,7 bis 1,0 m charakterisiert werden (NIEMEYER 1992). Das Untersuchungsgebiet ist daher nach der hydrodynamischen Klassifikation von HAYES (1979) als tide- und seegangsgeprägt mit dominierendem Tideeinfluss einzuordnen. Windeffekte können auf die Tideströmung einen bedeutsamen Einfluss ausüben. Da die Hauptwindrichtung Südwest ist, verstärkt der Wind üblicherweise die Tidewelle, die von West nach Ost fortschreitet. Der resultierende küstenparallele Sedimenttransport ist somit nach Osten gerichtet, entsprechend verlagern sich die Seegaten überwiegend in östliche Richtung.

In den letzten Jahrhunderten war die Topographie im Umfeld des Seegats Harle erheblichen Veränderungen unterworfen. Sie wurden in erster Linie durch die Verlandung und Eindeichung der Harlebucht vorangetrieben, einer mittelalterlichen Sturmflutbucht an der Festlandsküste. Die morphologischen Auswirkungen dieser langfristigen Prozesse sind immer noch nicht abgeschlossen und erfordern eine besondere Berücksichtigung bei Planungen des Küstenschutzes für die benachbarte, unterdriftige Insel. Die jüngste Entwicklung ist hauptsächlich durch Umgestaltungen der Haupt- und Nebenrinne innerhalb des Seegats geprägt, die durch die Umstrukturierung des Wattenzugsgebietes seit den 1980er Jahren verursacht wird.

## 2 Datengrundlage und Methodik

Ziel der Untersuchungen war es, einen Einblick in die morphodynamischen Prozesse zu bekommen, die die Entwicklung im Seegat Harle seit der Errichtung der Unterwasserbuhne maßgeblich gesteuert haben. Die morphologische Analyse basierte auf Daten, die unter anderem graphisch rekonstruierte Karten von historisch-morphologischen Zuständen der letzten vier Jahrhunderte, digitalisierte topographische Karten und Echolotpeilungen aus den Jahren 1950 bis 2003 sowie jährliche Nivellements der Strände auf den benachbarten Inseln umfassten. Darüber hinaus waren georeferenzierte Luftbilder verfügbar, die einmal jährlich bei extremen Niedrigwasserständen aufgenommen worden waren. Aus den Aufzeichnungen am Pegel Wangerooge-West wurden 5-jährige mittlere Tidehoch- und -niedrigwasserstände ermittelt und zur Berechnung morphologischer Parameter verwendet. Sämtliche Vermessungsdaten wurden in ein Geographisches Informationssystem übernommen, um für jedes Messjahr ein digitales Geländemodell zu erstellen. Anschließend konnten, z.B. durch Differenzenpläne und Profilvergleiche, die relevanten morphologischen Veränderungen identifiziert werden.

Zur quantitativen Analyse der morphodynamischen Veränderungen wurden auf der Grundlage der digitalen Geländemodelle folgende Parameter berechnet:

- Einzugsgebietsfläche  $A_b$  [ $m^2$ ] unterhalb des mittleren Tidehochwassers (MThw). Als Grenzen wurden die MThw-Linien auf den Inseln und am Festland, die Wattwasserscheiden entlang der relativ höchsten Punkte des Wattgebietes zwischen Inseln und Festland und der Querschnitt durch die schmalste Stelle des Seegats verwendet.
- Tidevolumen  $V_T$  [ $m^3$ ] im Einzugsgebiet zwischen MThw und MTnw.
- Querschnittsfläche [ $m^2$ ] im Seegat unterhalb NN. Dazu wurde ein Profil senkrecht zu den Rinnenachsen landwärts der Unterwasserbuhne definiert. Ermittelt wurden sowohl der Gesamtquerschnitt als auch die Teilquerschnitte der Haupt- und Nebenrinne. Die Grenzlinie zwischen den Teilquerschnitten wurde über das relative Maximum der Sandplate definiert, die die Hauptrinne von der Nebenrinne des Seegats trennt.
- Seegatrichtung [ $^\circ$ ], der Winkel zwischen der Nordrichtung und der Linie vom Kopf der Unterwasserbuhne zum seewärtigsten Punkt der Tiefenlinien NN -8, -10 und -12 m.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden zunächst hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung analysiert und anschließend das Verhältnis bestimmter Parameter empirischen Gleichgewichtsbedingungen gegenübergestellt, die aus anderen Untersuchungen vergleichbarer Seegate bekannt waren.

## 3 Langfristige Entwicklung des Seegats Harle

Die langfristigen Prozesse, die die Entwicklung im Seegat Harle bestimmen, insbesondere die küstenparallele Drift mit der daraus folgenden Ostverlagerung des Seegats, sind überlagert von der Anpassung des Tidebeckens und des Seegats an die Verlandung der Harlebucht. Nach NIEMEYER (1995) ist die Verlandung dieser mittelalterlichen Sturmflutbucht an der Festlandsküste südlich des Seegats Harle der wesentliche Einflussfaktor für die morphodynamischen Prozesse im Umfeld der

Harle in den letzten Jahrhunderten gewesen. Infolgedessen reduzierte sich das Einzugsgebiet der Harle erheblich (Abb. 2): Die Fläche des Tidebeckens nahm zwischen 1650 und 1960 von 154 auf 63 km<sup>2</sup> ab (HOMEIER 1973). Gleichzeitig verlagerte sich das Seegat Harle ungefähr 4,3 km nach Osten (HOMEIER 1973; LUCK 1975).

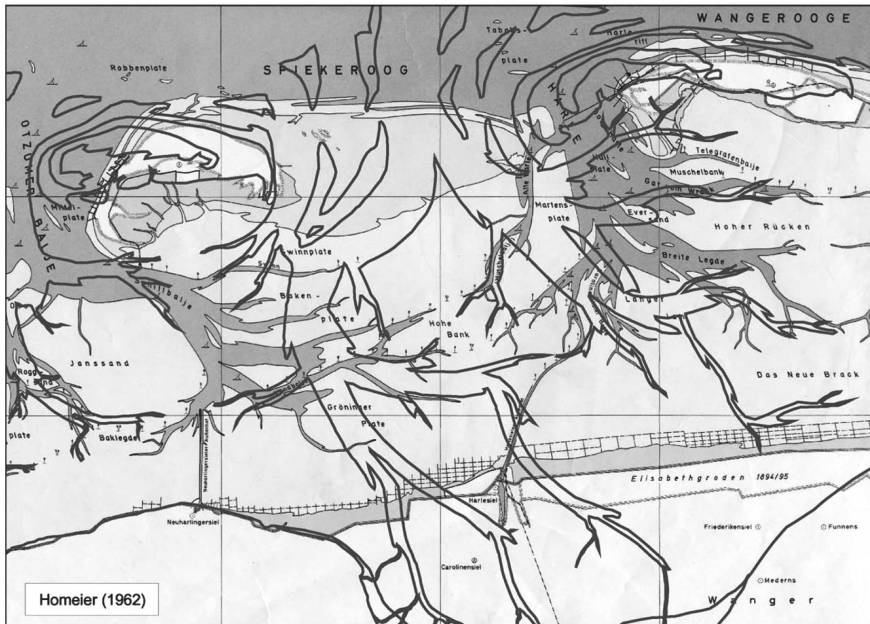


Abb. 2: Morphologische Entwicklung des Seegats Harle zwischen 1650 (schwarze Linien) und 1960 (Hintergrund)

Die Verlandung und nachfolgende Eindeichung der Harlebucht verlangsamt sich bis zum Ende des 19. Jahrhunderts. Nichtsdestotrotz setzte sich die Anpassung an ein morphodynamisches Gleichgewicht im verbliebenen Tidebecken fort und bewirkte eine weitere Verschiebung des Seegats selber: Zwischen 1859 und 1940 verlagerte sich die tiefe Rinne der Harle ungefähr 800 m ostwärts und sorgte dafür, dass der hochwasserfreie Strand im Westen Wangerooes nach Südosten herumschwenkte (Abb. 3). Darüber hinaus drehte der seewärtige Ausläufer der Harle seit 1889 von Nordwest nach Nord, wodurch eine seewärtige Verlagerung des Riffbogens einsetzte. Infolgedessen verschob sich der Anlandungsbereich der Platen aus dem Riffbogen ostwärts und bewirkte eine negative Sandbilanz an den oberdriftigen Stränden, so dass der Bau massiver Küstenschutzwerke notwendig wurde. Ab 1874 wurden Strandmauern, Deckwerke und Buhnen auf der Insel Wangerooge errichtet und mussten mehrfach verstärkt, erweitert oder erneuert werden.

Anfang des 20. Jahrhunderts bildete sich im Seegat Harle eine Nebenrinne heraus, die sogenannte Dove Harle (Abb. 3) (LÜDERS 1952). Um eine weitere Ostverlagerung des Seegats und die Entwicklung der Doven Harle zur Hauptrinne

zu verhindern, wurde von 1938 bis 1940 eine Unterwasserbuhne mit einer Länge von etwa 1.460 m im östlichen Teil des Seegats erbaut. Diese Strombuhne erstreckt sich senkrecht zur Rinnenachse bis zum östlichen Hang der tiefen Seegatrinne. Die Richtung, Länge und ursprünglich geplante Höhe der Unterwasserbuhne entsprachen in etwa dem Zustand des Südweststrandes aus der Zeit um 1859 (FÜHRBÖTER et al. 1973). Bis 1940 war die Buhne auf etwa MTnw aufgeschüttet; der Zweite Weltkrieg verhinderte allerdings den planmäßigen Ausbau auf MThw-Höhe.

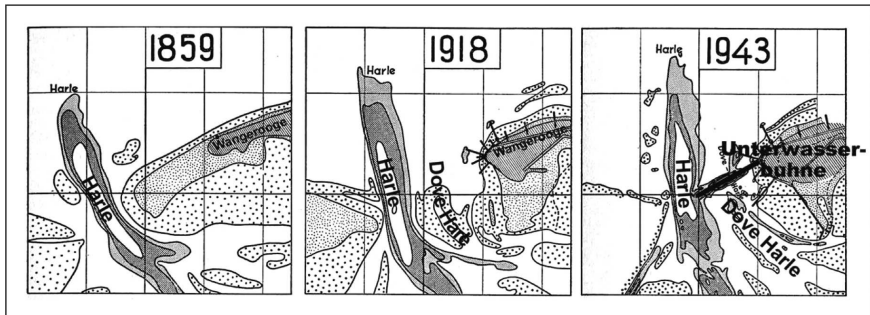


Abb. 3: Auswirkungen der Veränderungen im Seegat Harle auf die Insel Wangerooze zwischen 1859 und 1943 (nach LÜDERS 1952)

#### 4 Veränderungen nach dem Bau der Unterwasserbuhne

Bereits wenige Jahre nach ihrer Errichtung erzielte die Unterwasserbuhne – trotz ihres unvollständigen Ausbaus und der verringerten Kronenhöhe – zwei unmittelbare Effekte (LÜDERS 1952): Zum einen schwenkte die Hauptrinne der Harle in ihrem seewärtigen Teil nach Nordwesten zurück, wodurch die Form des Riffbogens verändert wurde und sich die Anlandungszone ihrer Platen deutlich nach Westen in den oberdriftigen Teil der Insel verlagern konnte. Außerdem wurde die weitere Ausdehnung der Nebenrinne Dove Harle gehemmt und auf den Bereich landwärts der Unterwasserbuhne beschränkt (Abb. 4).

1950 war die tributäre Wattrinne Breite Legde noch direkt mit der Hauptrinne im Seegat Harle verbunden. In den folgenden Jahrzehnten verschob sie sich jedoch erheblich nach Osten (Abb. 4): Die Verlagerung betrug mehr als 1.500 m in 53 Jahren. Die wesentlichste Auswirkung dieser Verlagerung war, dass die Breite Legde ins Einzugsgebiet der Nebenrinne Dove Harle überwechselte. Infolgedessen verschwenkte der nördliche, seewärtige Teil des Seegats Harle in nordwestliche Richtung (Abb. 4). Gleichzeitig vergrößerte sich aufgrund des zunehmenden Tidevolumens der Rinnenquerschnitt der Doven Harle, wodurch wiederum der hydrodynamische Einfluss auf den Südweststrand der Insel Wangerooze intensiviert wurde.

##### 4.1 Watteinzugsgebiet

Die Umgestaltung der Rinnen im Seegat Harle kann auf langfristige Veränderungen in seinem Einzugsgebiet, insbesondere auf die Verlagerung der Wattwasserscheiden

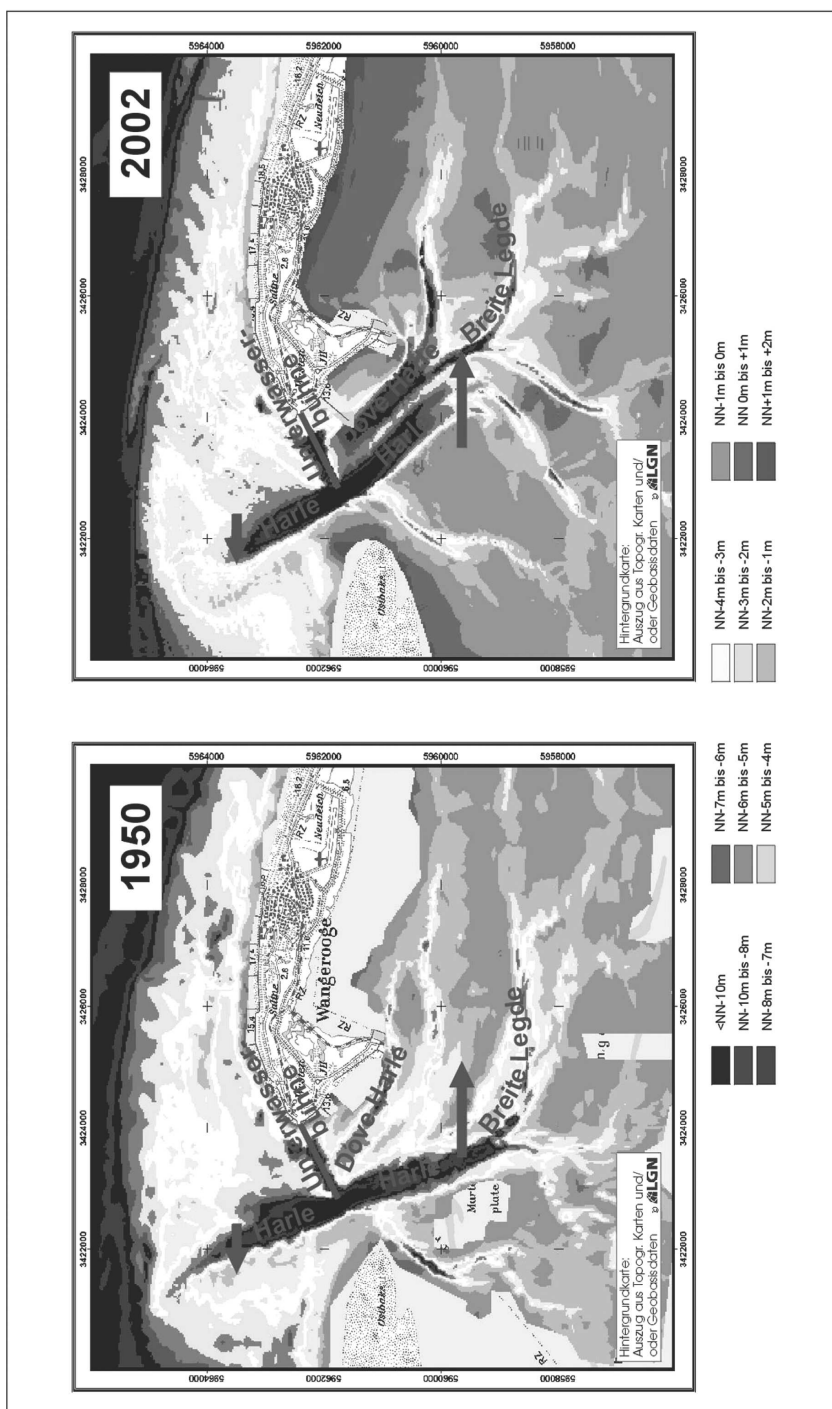


Abb. 4: Veränderungen im Seegat Harle zwischen 1950 und 2002

an den Grenzen des Tidebeckens, zurückgeführt werden: Seit 1650 verschob sich die westliche Wattwasserscheide bis 1960 einheitlich nach Osten, während an der östlichen Begrenzung des Tidebeckens nur verhältnismäßig kleine Schwankungen auftraten (Abb. 5). Nach 1960 zeigte die Verlagerung der Wattwasserscheiden ein deutlich anderes Verhalten: die westliche Wattwasserscheide erfuhr nur geringfügige Veränderungen, die östliche hingegen wies eine annähernde Drehung im Uhrzeigersinn auf, die zu einer erheblichen Ausdehnung im nordöstlichen Teil des Tidebeckens führte (Abb. 5).

Ergebnis der erläuterten Verlagerungen der Wattwasserscheiden war eine signifikante Verkleinerung des westlichen Teils des Einzugsgebietes in den letzten Jahrhunderten und eine leichte Zunahme der östlichen Einzugsgebietsflächen seit 1960. Aufgrund dieser Veränderung in der äußeren Gestalt des Tidebeckens der Harle war auch die Unterteilung innerhalb des Einzugsgebietes deutlichen Umstrukturierungen unterworfen. Während die Gesamtgröße des Einzugsgebietes zwischen 1950 und 2003 nur geringfügige Schwankungen aufwies, fand eine erhebliche Umverteilung der Teileinzugsgebiete für die Hauptrinne Harle und die Nebenrinne Dove Harle statt (Abb. 6 u. 7).

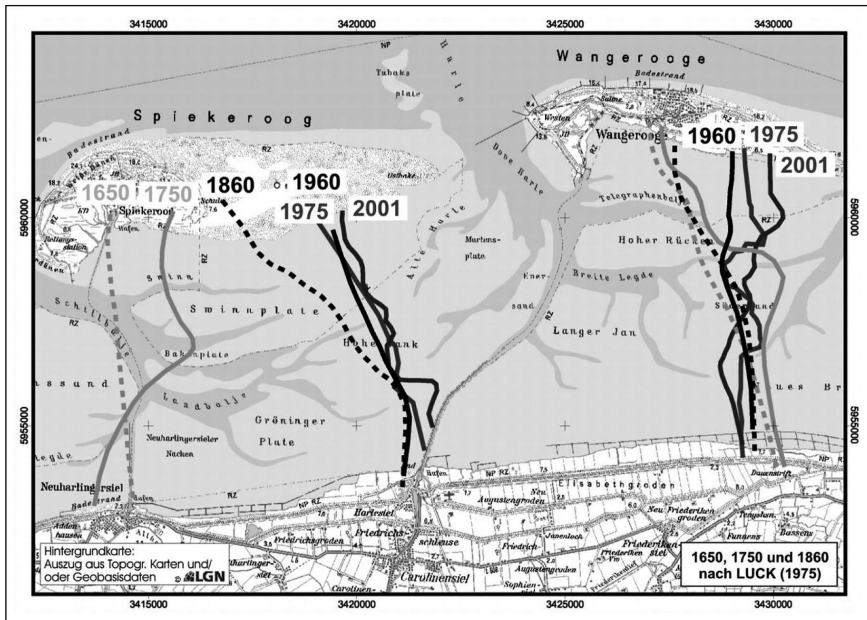


Abb. 5: Verlagerung der Wattwasserscheiden Spiekeroog und Wangeroog

Seit 1950 hat sich das Teileinzugsgebiet der Hauptrinne Harle signifikant auf ein Drittel der Ausgangsfläche verkleinert. Im Gegenzug hat sich das Teileinzugsgebiet der Nebenrinne Dove Harle erheblich von 6,3 auf 46,3 km<sup>2</sup> vergrößert (Abb. 7). Die zeitliche Entwicklung der Teileinzugsgebietsflächen verdeutlicht, dass die wesentlichen Umverteilungen in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre aufgetreten sind. Sie



spielten sich zeitgleich mit dem Verlagerungsprozess der tributären Watrinne Breite Legde ab, der zu diesem Zeitpunkt durch das Überwechseln von der Hauptrinne Harle zur Nebenrinne Dove Harle ebenfalls in seine entscheidende Phase eintrat.

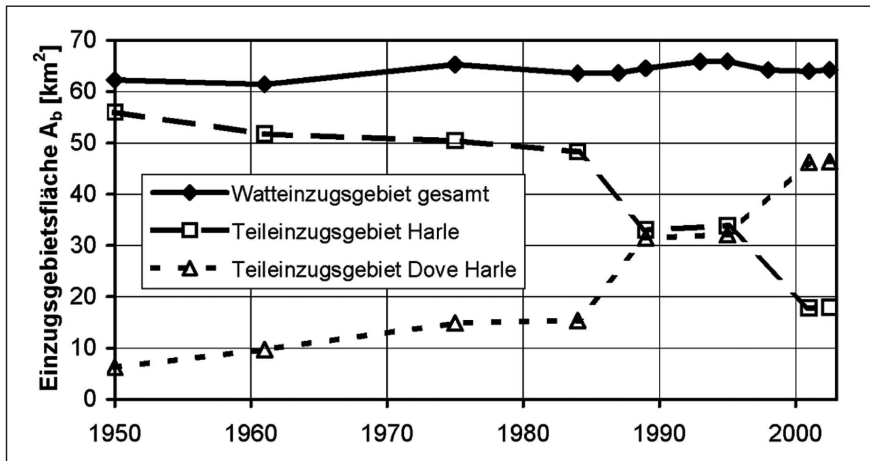


Abb. 7: Entwicklung der Einzugsgebietsflächen  $A_b$  zwischen 1950 und 2003

Eine ähnliche Entwicklung wie für die Einzugsgebietsfläche  $A_b$  ist für das mittlere Tidevolumen  $V_T$  zu verzeichnen (Abb. 8), wobei das Tidevolumen eine etwas größere Schwankungsbreite aufweist. Um Veränderungen des mittleren Tidehubs zu eliminieren, die annähernd unabhängig von den lokalen Prozessen sind, wurde ein relatives Tidevolumen als Quotient aus dem Tidevolumen  $V_T$  und dem mittleren Tidehub MThb berechnet. Offensichtlich sind die Entwicklungstendenzen für beide Parameter ähnlich (Abb. 8): Im Teileinzugsgebiet Dove Harle steigt das mittlere Tidevolumen um  $77 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  von 8% auf 69% zwischen 1950 und 2003 an. Entsprechend nimmt die Tidewassermenge, die direkt über die Hauptrinne Harle ein- und ausströmt, auf fast ein Drittel ab und entspricht damit 2003 nur noch 31% des Gesamttidevolumens.

#### 4.2 Seegat

Die morphologischen Veränderungen im Watteinzugsgebiet der Harle zogen auch Umformungen des Seegats selber nach sich. So änderte sich die Richtung der Hauptrinne im seewärtigen Teil des Seegats in mehreren, teilweise gegenläufigen Entwicklungsphasen (Abb. 9): Am Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts war die Ostverlagerung des Seegats Harle von einer Drehung der Rinnenachse im Uhrzeigersinn begleitet (Abb. 3). Dadurch verschwenkte der nördliche Teil des Seegats um ungefähr  $25^\circ$  in nördliche Richtung.

Nach dem Bau der Unterwasserbuhne (1938–1940) begann eine dynamische Rückdrehung in die entgegengesetzte Richtung, die sich bis etwa 1984 fortsetzte (Abb. 9). Durch diesen Prozess richtete sich die Hauptrinne des Seegats noch weiter

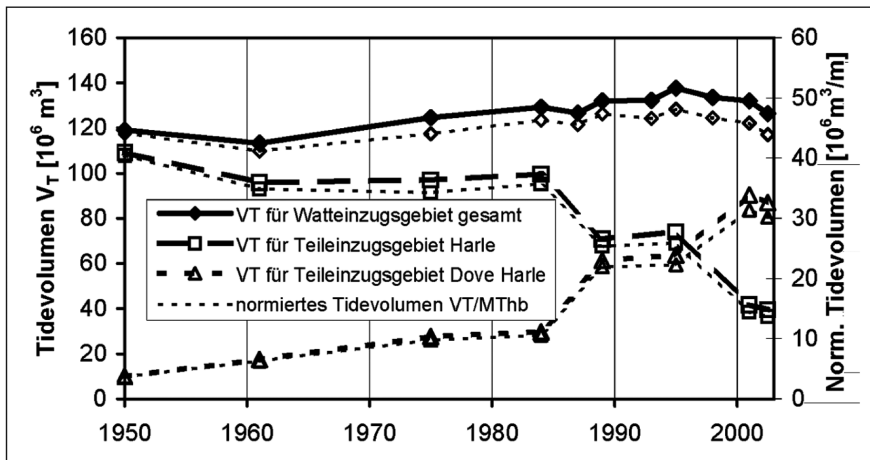


Abb. 8: Tidevolumen  $V_T$  1950–2003

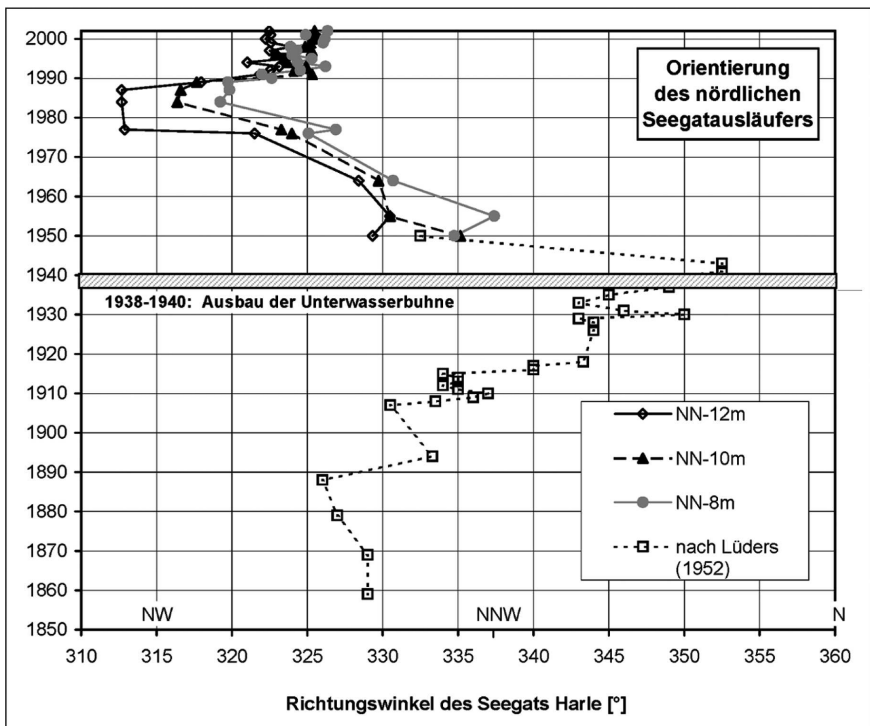


Abb. 9: Richtungsänderung im seewärtigen Teil des Seegats Harle

nach Nordwesten aus als im 19. Jahrhundert. Insofern erfüllte die Unterwasserbuhne trotz ihres unvollendeten Ausbaus hinsichtlich der Anpassung der Seegatrichtung gänzlich die in sie gesetzten Erwartungen. Aufgrund der Umstrukturierungen im Watteinzugsgebiet (Abb. 7 u. 8) erfuhr der seewärtige Teil des Seegats zwischen 1987 und 1993 eine kurzfristige Gegenbewegung. Seitdem ist die Richtung des nördlichen Seegatausläufers annähernd unverändert geblieben, was darauf zurückzuführen ist, dass die wesentlichen Umstrukturierungen der tributären Wattrinnen, insbesondere das Überwechseln der Breiten Legde von der Hauptrinne Harle zur Nebenrinne Dove Harle, abgeschlossen sind.

Die Umverteilung der Teileinzugsgebiete im Zufluss zum Seegat Harle führte zu einer entsprechenden Anpassung der Rinnenquerschnitte im Seegat (Abb. 10). Die zeitliche Entwicklung des Gesamtquerschnitts kann in den letzten Jahrzehnten in drei Phasen unterteilt werden: Einer leichten Querschnittsabnahme zwischen 1950 und 1975 folgte eine deutliche Aufweitung um 24% bis 1989 und eine Phase mit annähernd unverändertem Seegatquerschnitt bis 2003.

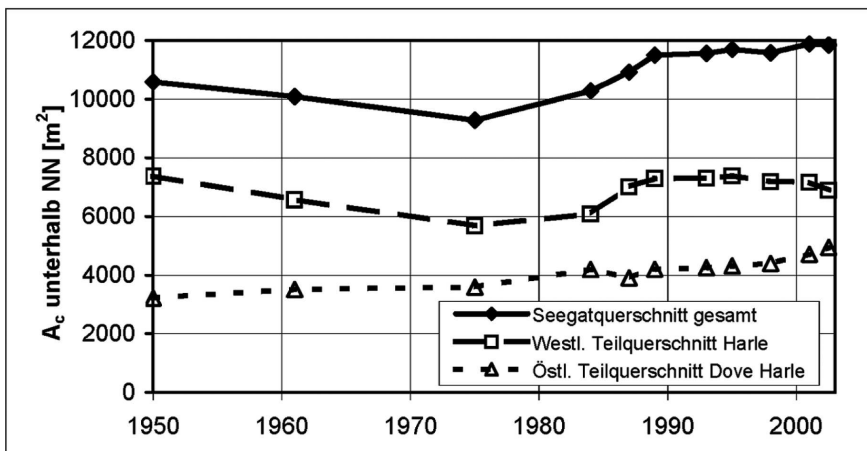


Abb. 10: Entwicklung des Seegatquerschnitts  $A_c$

Der Teilquerschnitt der Hauptrinne Harle zeigte ähnliche Entwicklungsphasen wie der Gesamtquerschnitt des Seegats. Seit 1987 blieb die Querschnittsfläche annähernd unverändert und verkleinerte sich im Untersuchungszeitraum insgesamt um lediglich 7%. Im Gegensatz dazu dehnte sich der Teilquerschnitt der Nebenrinne Dove Harle kontinuierlich aus und vergrößerte sich zwischen 1950 und 2003 deutlich um etwa 54%. Hierbei trat die bedeutendste Aufweitung mit über 1000 m² nach 1987 auf.

#### 4.3 Unterwasserbuhne

Die Ausweitung der Doven Harle ist als direkte Folge des zunehmenden Wasseraustauschs über den östlichen Teil des Seegats zu deuten. Veränderte Strömungsverhältnisse im Seegat könnten sich möglicherweise auch auf die Stabilität der

Unterwasserbuhne ausgewirkt haben. Andererseits könnten umgekehrt mögliche Schwachstellen in dem Buhnenbauwerk die morphologischen Umgestaltungen im Seegat Harle beeinflusst haben. Um diese Fragen zu untersuchen, wurden zunächst Echolotpeilungen der Buhnenachse aus den vergangenen Jahrzehnten miteinander verglichen (Abb. 11). Die früheste verfügbare Vermessung liegt aus dem Jahr 1960 vor. Eine weitere von 1972 weist eine größere Kronenhöhe auf, was auf Unterhaltungsarbeiten an der Buhne nach der schweren Sturmflut von 1962 zurückzuführen ist. In den folgenden Jahren nimmt die Kronenhöhe jedoch bis 2002 um ungefähr 40 cm ab. Mit einer mittleren Kronenhöhe von etwa 2 m unter NN ist die Unterwasserbuhne heutzutage nur geringfügig höher als 1960.

Darüberhinaus verursacht eine tiefe Buhnenlücke, die sich nach 1972 um Position 1050 m herausbildet, verstärkte Erosion im Nahbereich, insbesondere nördlich der Unterwasserbuhne (Abb. 12). Dies verdeutlicht einerseits den direkten Zusammenhang zwischen der Buhnendurchlässigkeit und der morphologischen Entwicklung im Umfeld des Bauwerks. Andererseits zeigt das Kolkmuster auch, dass Buhnenlücken eigenständig keine großräumige morphologische Wirkung entfalten können, da nördlich der Buhne liegende Platengruppen überwiegend unverändert bleiben (Abb. 12). Obwohl die Kronenhöhe der Unterwasserbuhne in den letzten Jahrzehnten definitiv geringer geworden ist, kann die nachlassende Wirkung der Unterwasserbuhne allein nicht für die beträchtliche Verstärkung der Nebenrinne Dove Harle verantwortlich gemacht werden. Als Hauptursache für diesen Prozess ist vielmehr die Umstrukturierung der Teileinzugsgebiete im Tidebecken des Seegats Harle anzusehen.

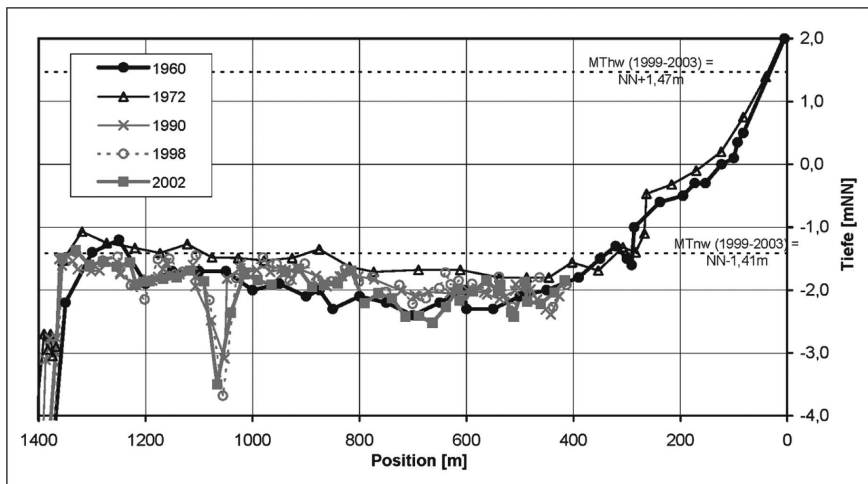


Abb. 11: Veränderungen im Längsschnitt der Unterwasserbuhne

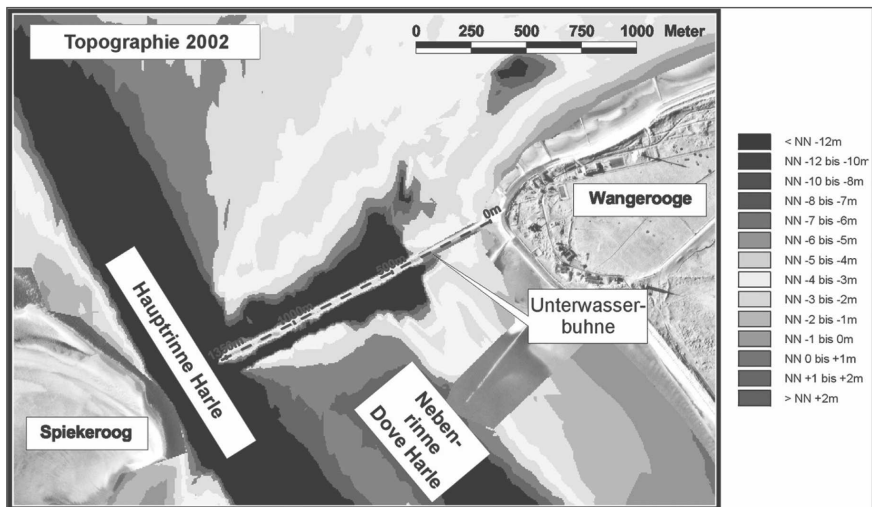


Abb. 12: Kolkmuster im Umfeld der Unterwasserbuhne

## 5 Vergleich mit morphodynamischen Gleichgewichtsbedingungen

Nach der Analyse der aufgetretenen Veränderungen stellt sich die Frage, ob für die gegenwärtige Situation im Seegat Harle bereits ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht worden ist bzw. welche zukünftigen Entwicklungen hier noch zu erwarten sind. Um dies zu klären, wurde der Zusammenhang zwischen einigen der berechneten morphologischen Parametern im Untersuchungsgebiet mit bekannten empirischen Funktionsgleichungen überprüft. Befindet sich ein Tidebecken im morphodynamischen Gleichgewicht, so besteht zwischen der Größe des Einzugsgebietes  $A_b$  und dem Tidevolumen  $V_T$  ein direkter Zusammenhang. WALTHER (1972) untersuchte das Verhältnis von  $A_b$  und  $V_T$  für Tidebecken im Bereich der Ostfriesischen Inseln, EYSINK (1979 u. 1991) für das Gebiet der Westfriesischen Inseln. NIEMEYER et al. (1995) stellten erweiterte Funktionsgleichungen für die Einzugsgebiete der ostfriesischen Seegaten unter Verwendung von Vermessungen aus den Jahren 1960, 1975 und 1990 auf und wiesen die Gültigkeit des funktionalen Zusammenhangs zwischen  $A_b$  und  $V_T$  nicht nur für die Watteinzugsgebiete insgesamt nach, sondern auch für deren Teileinzugsgebiete.

Die aktuellen Untersuchungen für das Seegat Harle zeigen eine gute Übereinstimmung des Zusammenhangs zwischen  $A_b$  und  $V_T$  mit den regional typischen Verhältniswerten (Abb. 13), die für die Gesamtheit der ostfriesischen Seegaten bestimmt wurden (NIEMEYER et al. 1995). Trotz großer Schwankungsbreite besteht eine feste Beziehung zwischen den Parameterwerten mit Korrelationskoeffizienten  $r^2 > 0,95$  sowohl für das Teileinzugsgebiet der Hauptrinne Harle als auch für das der Nebenrinne Dove Harle. Offensichtlich ist die Anpassung der morphologischen Parameter an die erheblichen Umgestaltungen im Watteinzugsgebiet des Seegats Harle in enger Übereinstimmung mit den morphodynamischen Gleichgewichtsbedingungen erfolgt.

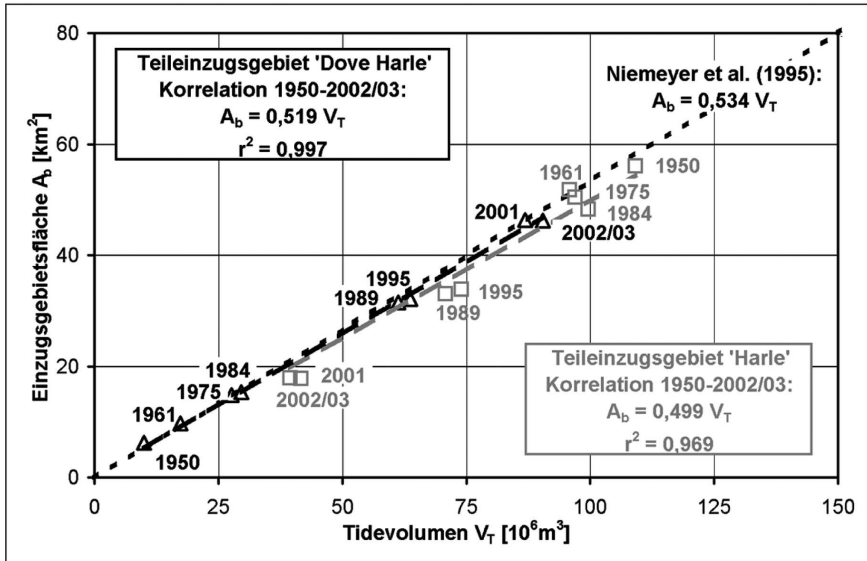


Abb. 13: Funktionaler Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsfläche  $A_b$  und Tidevolumen  $V_T$

Eine weitere bedeutende Funktionsgleichung zur Beschreibung morphodynamischer Gleichgewichtszustände ist das Verhältnis zwischen dem Seegatquerschnitt  $A_c$  und dem Tidevolumen  $V_T$ , das bereits von O'BRIEN (1931 u. 1967) eingehend analysiert wurde. In jüngerer Zeit wies JARRETT (1976) diesen funktionalen Zusammenhang für eine große Anzahl US-amerikanischer Seegaten nach. WALTHER (1972), DIECKMANN et al. (1989) und NIEMEYER et al. (1995) übertrugen diesen Ansatz auf die Seegaten der Ostfriesischen Inseln bzw. der gesamten Deutschen Bucht.

Für den Gesamtquerschnitt des Seegats Harle stimmt das Verhältnis zwischen  $A_c$  und  $V_T$  größenordnungsmäßig gut mit den aus früheren Untersuchungen bekannten Funktionsgleichungen (NIEMEYER et al. 1995) überein (Abb. 14). Im Gegensatz dazu weichen die Ergebnisse für die Teileinzugsgebiete und die entsprechenden Rinnenquerschnitte teilweise deutlich von den für das Gesamteinzugsgebiet berechneten Verhältniswerten ab. Die Fläche des Teilquerschnitts der Hauptrinne Harle bleibt trotz deutlicher Reduzierung des zugehörigen Tidevolumens überwiegend unverändert. Gleichzeitig ist für die Nebenrinne Dove Harle im Vergleich zur erheblichen Zunahme des zugehörigen Tidevolumens nur eine relativ geringe Vergrößerung der Querschnittsfläche zu verzeichnen.

Anscheinend erfolgt eine verzögerte Anpassung der Teilquerschnitte an die veränderten Strömungsverhältnisse im Seegat Harle. Der Anpassungsprozess an einen neuen Gleichgewichtszustand wird vermutlich durch das Vorhandensein der Unterwasserbuhne verlangsamt. Sie verhindert eine weitere Ostverlagerung der Hauptrinne Harle, was ansonsten wahrscheinlich eine direkte Folge der Verschiebung der Wattrinne Breite Legde nach Osten gewesen wäre. Insofern unterstützt die

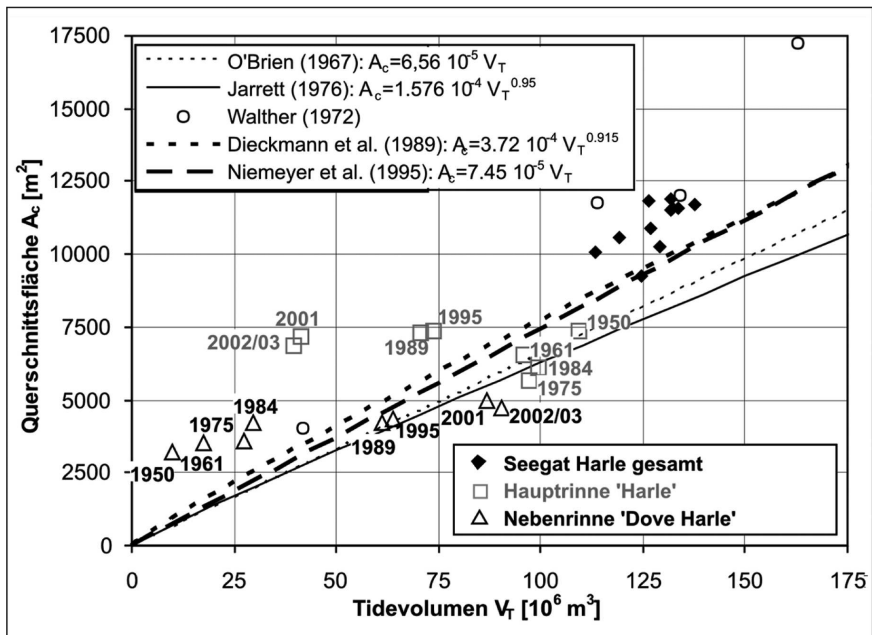


Abb. 14: Funktionaler Zusammenhang zwischen Seegatquerschnitt  $A_c$  und Tidevolumen  $V_T$

Unterwasserbuhne, insbesondere während des letzten Jahrzehnts, die Aufrechterhaltung eines Zwei-Rinnen-Systems im Seegat Harle, welches langfristig von der Existenz der Unterwasserbuhne abhängen wird. Die Dynamik der Tideströmung in der Nebenrinne Dove Harle wird durch die senkrecht zur Strömungsrichtung wirkende Unterwasserbuhne ebenfalls herabgesetzt. Daher ist der Teilquerschnitt der Nebenrinne in der gegenwärtigen Situation zu klein verglichen mit den regionaltypischen Werten für das Verhältnis von  $A_c$  und  $V_T$ . Nichtsdestotrotz ist zukünftig höchstwahrscheinlich mit einer Annäherung an einen morphodynamischen Gleichgewichtszustand zu rechnen, da sich die hydrodynamischen Randbedingungen im Watteinzugsgebiet des Seegats Harle seit dem Ende der 1980er Jahre maßgeblich verändert haben. Eine – wenn auch verzögerte – Anpassung wird voraussichtlich zu einer leichten Aufweitung des Rinnenquerschnitts Dove Harle führen und gleichzeitig eine Verkleinerung der Querschnittsfläche in der Hauptrinne Harle nach sich ziehen. Diese morphologischen Entwicklungstendenzen könnten unter Umständen noch verstärkt werden, wenn die Wirksamkeit der Unterwasserbuhne weiter abnimmt.

## 6 Schlussfolgerungen

Auch nach dem Bau einer Unterwasserbuhne in den Jahren 1938 bis 1940 traten im Seegat Harle an der südlichen Nordseeküste weiterhin morphologische Veränderungen auf, die durch Umgestaltungen im Watteinzugsgebiet der Harle hervorgerufen

werden; in erster Linie eine Verschiebung der unterdriftigen Wattwasserscheide und eine Ostverlagerung der Wattrinnen. Diese Prozesse stehen in direktem Zusammenhang mit einer Aufweitung der Nebenrinne im Seegat Harle, die durch eine Vergrößerung des zugehörigen Tidevolumens verursacht wird.

Die senkrecht zur Strömungsrichtung wirkende Unterwasserbuhne verringert offensichtlich das Ausmaß der morphologischen Veränderungen im Seegat Harle: Die Existenz der Nebenrinne Dove Harle bleibt auf den landwärtigen Teil des Seegats begrenzt; der seewärtige Teil des Seegats dreht nach dem Bau der Unterwasserbuhne nach Nordwesten zurück und bleibt in jüngster Zeit annähernd unverändert in dieser Position, so dass Platen aus dem Riffbogen der Harle weiter westlich anlanden können als früher. Somit wirkt die Unterwasserbuhne durch die Stabilisierung des Seegats auch positiv auf die Sandversorgung der Insel Wangerooge.

Der funktionale Zusammenhang zwischen den Querschnittsflächen der Haupt- und Nebenrinne im Seegat und den zugehörigen Tidevolumina weist deutliche Unterschiede zu den regionaltypischen Verhältnissen auf, wohingegen dieser Zusammenhang für das Gesamtsystem der Harle und sein Einzugsgebiet mit den bekannten empirischen Funktionsgleichungen übereinstimmt. Offenbar passen sich die Rinnenquerschnitte landwärts der Unterwasserbuhne zeitlich verzögert an die veränderten hydrodynamischen Randbedingungen im Tidebecken an. Nichtsdestotrotz ist eine langfristige Annäherung an die regionaltypischen Gleichgewichtsbedingungen für die Querschnittsflächen der Seegatrinnen zu erwarten, soweit dies nicht durch das Entgegenwirken der Unterwasserbuhne verhindert wird. Diese Anpassung wird wahrscheinlich zu einer Aufweitung der Nebenrinne Dove Harle und einer Verkleinerung der Querschnittsfläche in der Hauptrinne Harle führen. Dann könnten sich durch den intensivierten Wasseraustausch über den östlichen Teil des Seegats Harle auch negative Auswirkungen auf die Stabilität der Unterwasserbuhne ergeben. Außerdem dürfte eine zukünftige Erweiterung der östlichen Nebenrinne im Seegat vermutlich die Erosion an Strand und Vorstrand im Südwesten der Insel Wangerooge verstärken.

## Literatur

- DIECKMANN, R., M. OSTERTHUN u. H.W. PARTSCHENSKY 1989: A comparison between German and North American tidal inlets. In: EDGE, B.L. (Hrsg.): Proceedings 21st International Conference on Coastal Engineering. Malaga, 1988, ASCE. New York, S. 2681–2691.
- EYSINK, W.D. 1979: Morphology of the Wadden Sea – Consequences of sand and shell mining. Delft Hydraulics. Report on literature survey R1336. Delft.
- EYSINK, W.D. 1991: Morphologic response of tidal basins to changes. In: EDGE, B.L. (Hrsg.): Proceedings 22nd International Conference on Coastal Engineering. Delft, 1990, ASCE. New York, S. 1948–1961.
- FÜHRBÖTER, A., G. LUCK u. K. LÜDERS 1973: Gutachten über die Dünen- und Strandentwicklung im Westen der Insel Wangerooge. Hannover (unveröff.; Bibliothek der NLWKN-Forschungsstelle Küste).
- HAYES, M.O. 1979: Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LETHERMAN, S.P. (Hrsg.): Barrier Islands: From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico. New York: Academic Press, S. 1–27.
- HOMEIER, H. 1962: Historisches Kartenwerk 1:50.000 der niedersächsischen Küste. In: Jahresberichte der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, 1961. Norderney, 13, S. 11–29.

- HOMEIER, H. 1973: Die morphologische Entwicklung im Bereich der Harle und ihre Auswirkungen auf das Westende von Wangerooge. In: Jahresberichte der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz. Norderney, 1972, 24, S. 15–44.
- JARRETT, J.T. 1976: Tidal Prism-Inlet Area Relationships. GITI Report 3, U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. Fort Belvoir, Virginia.
- LUCK, G. 1975: Der Einfluß der Schutzwerke der Ostfriesischen Inseln auf die morphologischen Vorgänge im Bereich der Seegaten und ihrer Einzugsgebiete. In: Mitteilungen des Leichtweiss-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, 47, S. 1–120.
- LÜDERS, K. 1952: Die Wirkung der Buhne H in Wangerooge-West auf das Seegat Harle. In: Die Küste, 1, S. 21–26.
- LÜDERS, K. 1953: Die Entstehung der Ostfriesischen Inseln und der Einfluß der Dünenbildung auf den geologischen Aufbau der ostfriesischen Küste. In: Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet, 5, S. 5–14.
- LÜDERS, K. u. G. LUCK 1976: Kleines Küstenlexikon. Hildesheim.
- NIEMEYER, H.D. 1992: Zur Systematik hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen im Einzugsgebiet der Otzumer Balje. In: Berichte zur Ökosystemforschung, Hydrographie – Nr. 5, Teil F, NLWA – Forschungsstelle Küste. Norderney (unveröff.).
- NIEMEYER, H.D. 1995: Long-term morphodynamical development of the East Frisian Islands and coast. In: EDGE, B.L. (Hrsg.): Proceedings 24th International Conference on Coastal Engineering. Kobe/Japan, 1994, ASCE. New York, S. 2417–2433.
- NIEMEYER, H.D., R. GOLDENBOGEN, E. SCHROEDER u. H. KUNZ 1995: Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. In: Die Küste, 57, S. 65–94.
- O'BRIEN, M.P. 1931: Estuary tidal prisms to entrance areas. In: Civil Engineering, Vol. 1, No. 8 (hrsg. v. ASCE, New York), S. 738–739.
- O'BRIEN, M.P. 1967: Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts. Proceedings 10th International Conference on Coastal Engineering, 1966, ASCE. New York, S. 676–686.
- STREIF, H. 1990: Das ostfriesische Küstengebiet. Inseln, Watten und Marschen. Berlin, Stuttgart (= Sammlung geologischer Führer, 57).
- WALTHER, F. 1972: Zusammenhänge zwischen der Größe der Ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie den Gezeiten und Strömungen. In: Jahresberichte der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, 1971. Norderney, 23, S. 7–32.