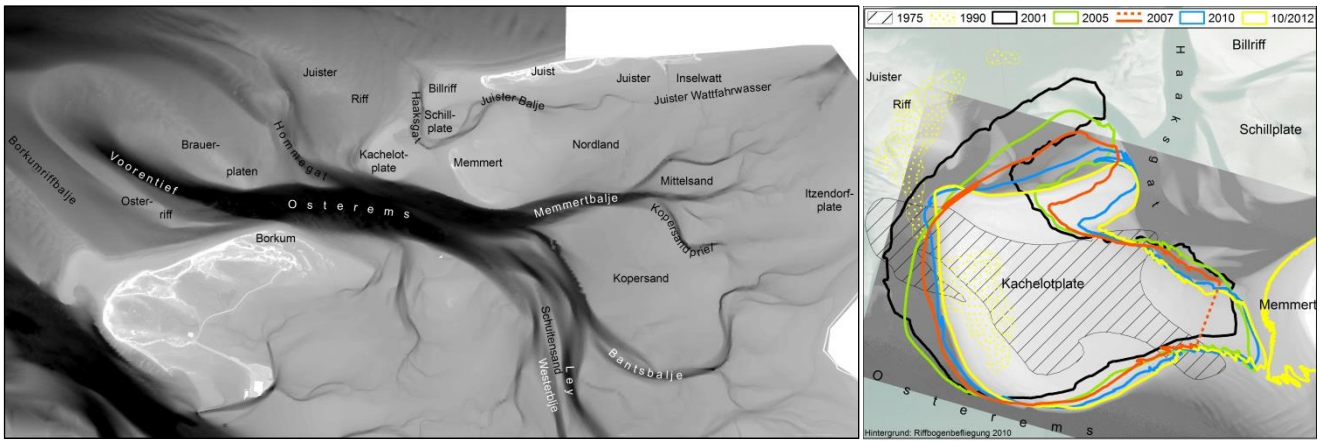
Untersuchungsbericht 3/2013

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



Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich von Juist

Niedersachsen

Herausgeber:
Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
- Forschungsstelle Küste -
2013
Titelblatt: links: Untersuchungsraum mit morphologischer Gliederung
rechts: Flächenentwicklung der Kachelotplate auf NN-Niveau
NLWKN - Forschungsstelle Küste
An der Mühle 5, 26548 Norderney
Tel.: 04932-916-0
Fax: 04932-1394
e-mail: Andreas.Wurpts@nlwkn-ny.niedersachsen.de

NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ
Betriebsstelle Norden-Norderney
- Forschungsstelle Küste -

Cornelius Meyer

Morphodynamische Analysen im Bereich von Juist

Norderney, im Dezember 2013

Geschäftsbereichsleiter
Forschungsstelle Küste

Aufgabenbereichsleiter i.V.
Morphologie des Küstengebietes

C. Meyer (2013): Morphodynamische Analysen im Bereich von Juist				
NLWKN-Forschungsstelle Küste	Untersuchungsbericht 3/2013	veröffentlicht	20 S.	Norderney

Morphodynamische Analysen im Bereich von Juist

Cornelius Meyer

Inhaltsverzeichnis:

Seite

1 Veranlassung und Zielsetzung 2

2 Das Untersuchungsgebiet 2

3 Datengrundlage und -aufbereitung 2

4 Morphologische Veränderungen 4

4.1 Seegebiet westlich von Juist/Memmert 5

4.2 Inselgeschützte Wattflächen 10

4.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen 14

5 Zusammenfassung 18

1 Veranlassung und Zielsetzung

Die Stabilität der Strände und Dünen auf den ostfriesischen Inseln wird durch das dynamische Gleichgewicht von Sedimentation und Erosion beeinflusst. Dabei kommt dem küstenparallelen, zumeist von West nach Ost gerichteten Sedimenttransport eine bedeutende Rolle zu. Seit den 1970er Jahren sind am westlichen Strandbereich der Insel Juist Dünenabbrüche zu beobachten, die sich insbesondere auf das Gebiet zwischen dem Westende der Insel und dem Hammersee konzentrieren. Diese ungünstige Entwicklung war in der Vergangenheit Anlass für Untersuchungen u.a. von LUCK & STEPHAN (1983), STEPHAN (1990, 1995) und zuletzt von LADAGE (2001).

Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse, die durch diese Untersuchungen gewonnen wurden, greift die vorliegende Arbeit die seit 1950 verfügbaren Vermessungsdaten erneut auf, ergänzt sie um die hochauflösenden Laserscanaufnahmen der Jahre 2005 und 2010 und dehnt den Betrachtungsraum bis ins Osterriff nordwestlich von Borkum aus. Im Bereich der inselgeschützten Wattflächen zwischen Juist und Festland sollen morphodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen Aussagen über funktionale Zusammenhänge zwischen Hydrodynamik und Morphologie geben. Aufbauend auf den so gewonnenen Erkenntnissen sollte dann letztlich eine Abschätzung der zukünftigen morphologischen Entwicklungstendenzen möglich sein.

2 Das Untersuchungsgebiet

Mit 17 km ist Juist die längste der sieben ostfriesischen Inseln und hat bei einer maximalen Breite von 900 m eine Gesamtfläche von gut 14 km². Im Osten ist Juist durch das Norderneyer Seegat von der Insel Norderney getrennt, im Westen geht die Insel nahtlos in das hochwasserfreie Billriff über, das sich nach Süden hin mit der Schillplatte zu einem ausgedehnten Platenkomplex zusammengeschlossen hat (Abb. 1). Über das Haaksgat zwischen Billriff/Schillplate und der Kachelotplate im Südwesten entwässert die Juister Balje, die nach Osten in das Juister Wattfahrwasser übergeht und gemeinsam die Grenze zwischen dem Nordland im Süden und dem Juister Inselwatt bilden. Das Nordland wird auf seiner südlichen Seite durch die Memmertbalje begrenzt, die sich nach Osten hin in drei Rinnen aufgliedert und mit ihren Rinnenausläufern bis weit in die Itzendorfplate reicht. Von diesen drei Rinnenausläufern trägt nur der südliche Arm einen Namen und trennt als Kopersandpriel die Itzendorfplate vom Kopersand. Die beiden weiter nördlich gelegenen Rinnen umschließen den Mittelsand.

Die dominante Rinne im Untersuchungsraum bildet die Osterems, die sich nach Osten in die bereits erwähnte Memmertbalje und nach Südosten in die Bantsbalje sowie in die Ley und – nur durch den schmalen Schuitensand getrennt – die Westerbalje fortsetzt. Die Osterems entwässert zu einem kleinen Teil über das Hommegat, welches das Juister Riff und die Brauerplaten trennt; im Wesentlichen erfolgt die Entwässerung über das Voorentief zwischen den Brauerplaten im Nordosten und dem Osterriff im Südwesten (Abb. 1).

Die aus der nördlichen Nordsee und dem Ärmelkanal einschwingende Tidewelle bestimmt die Gezeitenverhältnisse in der Deutschen Bucht. Unter dem Einfluss der Corioliskraft rotiert diese linksdrehend um die amphidromischen Punkte, so dass eine an der ostfriesischen Küste ostwärts gerichtete Gezeitenwelle entsteht. Im Bereich der ostfriesischen Inseln erreicht diese einen im mesotidalen Bereich liegenden Tidenhub von 2,4 m.

3 Datengrundlage und -aufbereitung

Die morphologischen Analysen stützen sich im Wesentlichen auf Vermessungsdaten aus den Jahren 1950 bis 2001, die überwiegend vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) erfasst wurden, im Bereich der Rinnen aber zeitweise durch Messdaten des Wasser- und Schifffahrtsamtes Emden verdichtet wurden. In den Jahren 2005 und 2010 erfolgte im Rahmen der topographischen Erfassung des gesamten Emsästuars eine Laserscanbefliegung des Untersu-

chungsraumes. Da mit dieser Technik nur die trockengefallenen Flächen höhenmäßig erfasst werden können, ist eine synoptische Peilung der Rinnen erforderlich. Beschränkt auf den Bereich der Kachelotplate liegt eine Laserscanaufnahme aus 2007 sowie je eine Messung im Frühjahr und im Herbst 2012 vor.

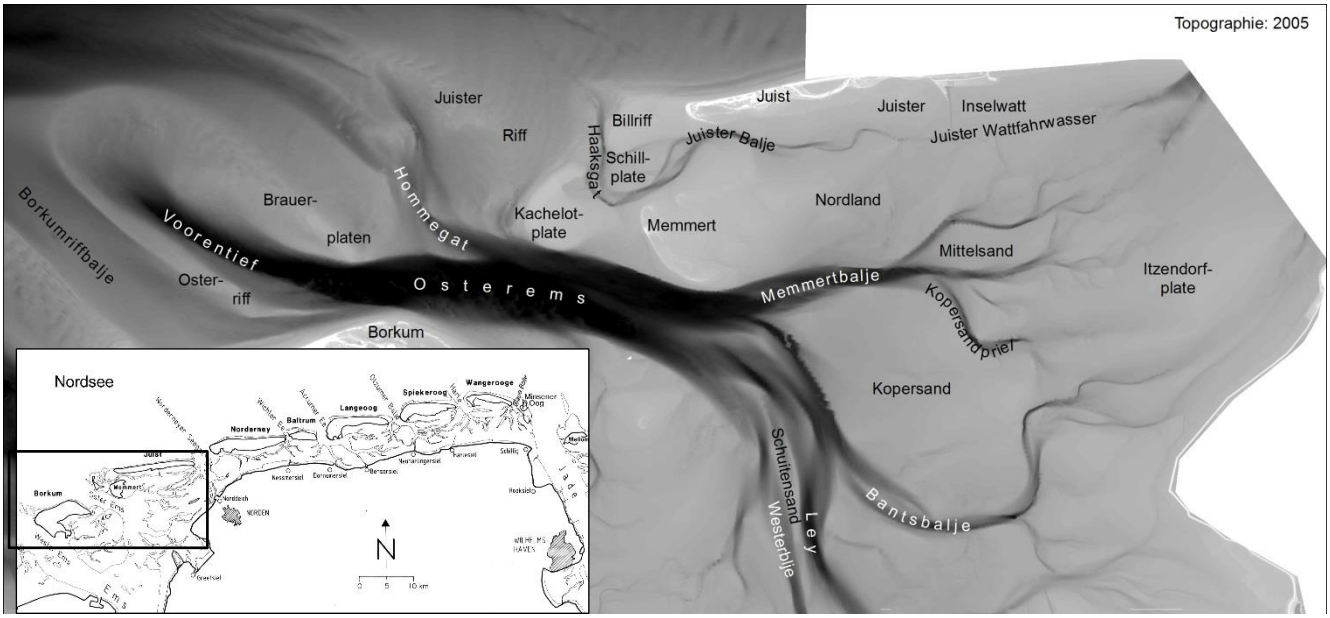


Abb. 1: Lage und morphologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

Ferner existiert für das Jahr 1960 eine der Topographischen Wattkarten der Forschungsstelle Küste. In diesem Kartenwerk wird - ebenso wie bei dem später aus Mitteln des Kuratoriums für Küsteningenieurwesen erstellten Kartenwerk aus dem Jahre 1975 - die Topographie des gesamten Untersuchungsraums einschließlich der Rinnen in Form von Isolinien im Maßstab 1:25000 abgebildet. Ansonsten liegen sämtliche Messdaten als digitale Punktdaten vor. Der einheitliche Höhenbezug für alle Peildaten und Kartenwerke ist Normalnull (NN).

Aus den Vermessungsdaten wurde durch unregelmäßige Dreiecksvermaschung (TIN = Triangulated Irregular Network) ein digitales Geländemodell erstellt. Dabei werden jeweils drei benachbarte Punktdaten zu einem Dreieck verbunden, so dass eine flächenhafte Darstellung in Form von planaren Dreiecken entsteht. Die digitalen Geländemodelle werden auf Qualität und Plausibilität geprüft und gegebenenfalls nach der Fehlerkorrektur der entsprechenden Punktdaten neu generiert.

In einem nächsten Schritt wurden aus den TINs gleichmäßige Raster (Grids) mit einem Rasterabstand von 5 m berechnet. Die gleichmäßige Flächenrasterung der Geländemodelle ermöglicht einerseits eine einheitliche Darstellung von Tiefenplänen und andererseits die flächenhafte Berechnungen von Höhenunterschieden als Differenzenpläne verschiedener Messepochen.

Zwar wird seit Mitte der 1990er Jahre der zentral im Untersuchungsgebiet gelegene Pegel Memmert betrieben, aber aufgrund diverser Messausfälle ist er als Referenzpegel für die Berechnung des mittleren fünfjährigen MThw´s bzw. MTnw´s nicht geeignet. Deshalb wurde auf die Messdaten vom außerhalb gelegenen Pegel Norderney Riffgat zurückgegriffen.

Die bei der Auswertung der topographischen Karten und Vermessungen auftretenden Fehlerquellen können generell in zwei Gruppen unterteilt werden:

1.) Ungenauigkeiten, die aus den topographischen Karten oder den Vermessungsdaten selber herrühren;

2.) Fehler, die aus der Umsetzung und anschließenden Bearbeitung im Geographischen Informationssystem resultieren.

Zur ersten Gruppe gehören beispielsweise bei Digitalisierungsarbeiten entstehende Fehler sowie mess- und verfahrenstechnische Ungenauigkeiten. Weiterhin ist zu bedenken, dass mit dem Voranschreiten der technischen Entwicklung auch die Messgenauigkeit variiert. Als Beispiel sei hier die erhebliche Höhen- und Lageverbesserung mit Umstellung vom Globalen Positionierungssystem (GPS) auf Differential-GPS (DGPS) genannt.

Bei Laserscanmessungen liegen die Abweichungen für die aus den Rohdaten berechneten Punkte des 1x1 m Rasters unterhalb von ±50 cm in der Lage und ±15 cm in der Höhe. Über den Abgleich mit terrestrisch vermessenen Referenzflächen wird der bei Laserscanbefliegungen auftretende Fehler erfahrungsgemäß aber auf unter 10 cm in der Höhe reduziert und verringert sich auf ebenen Flächen sogar auf wenige Zentimeter (DIRKS 2007).

Potenzielle Fehlerquellen in den Peildaten ergeben sich bei älteren Aufnahmen insbesondere bei der Beschickung der Tiefenwerte durch unterschiedliche Bezugspegel (Hochsee- oder Küstenpegel), durch meteorologische Einflüsse, die zu nicht vorhersehbaren Differenzen in den Wasserständen vor Ort und Pegel führen, durch Abweichungen von den mittleren Eintrittszeiten des Hoch- und Niedrigwassers sowie durch unterschiedliche Steig- und Falldauer der Tiden am Pegel und am Peilort (HÜTTEMEYER et al. 1999).

Bei der morphologischen Analyse und Bewertung ist auch zu beachten, dass Vermessungsdaten für die FSK- und KFKI-Karten über einen längeren Zeitraum erfasst wurden. Diese Karten geben also kein für einen bestimmten Zeitpunkt exaktes Abbild der tatsächlichen Morphologie wieder, sondern es wurden mögliche aus der asynchronen Erfassung herrührende Unterschiede bei der kartografischen Darstellung im Sinne einer morphologischen Plausibilität harmonisiert.

Methodische Fehler aus Umsetzung und Bearbeitung topographischer Daten im GIS beruhen im Falle älterer Datensätze 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 realen 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.

Die seit Mitte der letzten Dekade vorrangig eingesetzte flächige Laserscanerfassung weist diese letztgenannten Fehlerquellen nicht auf.

4 Morphologische Veränderungen

Die bereits genannten diversen Arbeiten der Forschungsstelle Küste zu den morphologischen Gestaltungsvorgängen im großräumigen Umfeld der Inseln Juist und Borkum haben zu folgenden wesentlichen Erkenntnissen der morphologischen Entwicklung im Untersuchungsraum geführt:

- Verschwenkung der Stromachse der Osterems um einen Drehpunkt südwestlich des Memmert aus einer Nordwest-Südost-Richtung in eine annähernd West-Ost-Lage (KUNZ & STEPHAN 1995)
- Ausdehnung des Voorentiefs um rund 2,5 km nach Westen zwischen 1859 und 1963 (KUNZ & STEPHAN 1995)
- Entwicklung des Voorentiefs zur Hauptrinne der Osterems bei gleichzeitiger Rückentwicklung des früher dominierenden Hommegats (ABELS & RAGUTZKI 1996)

- Erhebliche erosive Tendenzen im Juister Riff infolge einer Südverlagerung der Tiefenlinien und der Rückbildung des Hommegats (LADAGE 2001)
- Rückläufige Entwicklung von Einzugsgebiet und Tidevolumen der Juister Balje (LADAGE 2001)

Als ursächliche Einflussgröße benennen LUCK & STEPHAN (1983) den langjährigen globalen Meeresspiegelanstieg. STEPHAN (1995) weist darauf hin, dass auch die Verkleinerung der Leybucht in den zurückliegenden Jahrhunderten Auslöser für die beobachteten morphologischen Umgestaltungen ist.

Im Folgenden werden die aktuellen morphologischen Veränderungen beschrieben, die seit der letzten Untersuchung (LADAGE 2001) festzustellen sind, es erfolgt aber keine erneute Darstellung sämtlicher Veränderungen, die sich aus dem Vergleich der zahlreichen, seit 1950 verfügbaren, topographischen Aufnahmen ergeben. Vielmehr wird der Versuch unternommen, den Weg der Sandplaten vom Osterriff nordwestlich von Borkum bis nach Juist nachzuvollziehen. Im großräumigeren Kontext betrachtet, treten so die Faktoren in den Vordergrund, die Auslöser für die morphologischen Umgestaltungen, und damit auch für die veränderten Sedimenttransportwege sind, welche letztlich auch zur Unterversorgung der Strände im Nordwesten von Juist führen.

4.1 Seegebiet westlich von Juist/Memmert

Der Durchlass zwischen Borkum und Juist ist nicht nur wegen seiner räumlichen Ausdehnung, sondern auch aufgrund der Tatsache, dass mehr als nur eine einzelne tiefe Rinne ausgebildet ist, morphologisch deutlich komplexer strukturiert als die übrigen ostfriesischen Seegaten. So bildet sowohl das Voorentief, als auch das Hommegat ein eigenes Ebbdelta aus, gegenüber denen der Riffbogen der Juister Balje/Haaksgat zunehmend vernachlässigbar scheint.

Vom Osterriff aus wird Sediment durch den Riffbogen des Voorentiefs zu den Brauerplaten transportiert. Durch die Lageveränderung des Voorentiefs – Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn – und die Ausdehnung um gut vier Kilometer nach Westen, bezogen auf die NN-15 m-Linie, zwischen den Jahren 1950 und 2005, dehnen sich die Brauerplaten erheblich nach Nordwesten aus (Abb. 2 u. 3). Die Ausprägung der Brauerplaten wiederum wird maßgeblich durch die Rinnenentwicklung des Hommegats bestimmt und hat unmittelbaren Einfluss darauf, welchen Weg das Sediment nimmt: Die im Jahre 1950 noch dominante Ebbstromrinne des Hommegats verlagert sich nach Westen und schneidet unterschiedlich weit in die Brauerplaten ein (Abb. 2). Gleichzeitig entwickelt sich diese Rinne zurück, bis sie etwa um 1990 an der Westflanke der Brauerplaten völlig verschwunden ist. Durch diese Entwicklung werden die Brauerplaten zu einem Ebbdelta umgeformt, das je nach Lage und Ausdehnung der ehemaligen Ebbstromrinne unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Das Sediment wird somit im Bereich der Brauerplaten auf ihrer Bahn durch diesen temporär existierenden Riffbogen mehr oder weniger weit nach Nordwesten abgelenkt. Mit fortschreitender Westverlagerung und Rückbildung der Ebbstromrinne verbleibt wieder mehr Sediment im Bereich der Brauerplaten.

Erheblichen Einfluss auf die Ausdehnung und Sedimentakkumulation im Bereich der Brauerplaten hat aber auch die Rückentwicklung des Hommegats: Bei abnehmendem Stromarbeitsvermögen und zunehmendem Sedimenteintrag im Bereich der Brauerplaten verschwenkt das Hommegat aus der NW-SO- in Nordsüd-Richtung. Parallel dazu verlagert sich die Flutstromrinne des Hommegats um mehr als einen Kilometer nach Nordosten. Insgesamt erfahren die Brauerplaten so nicht nur einen erheblichen Flächenzuwachs, sondern sie wachsen auch deutlich in die Höhe: Im Jahr 2010 werden mit NN+1,4 m bereichsweise Höhen über dem MThw-Niveau erreicht (Abb. 3).

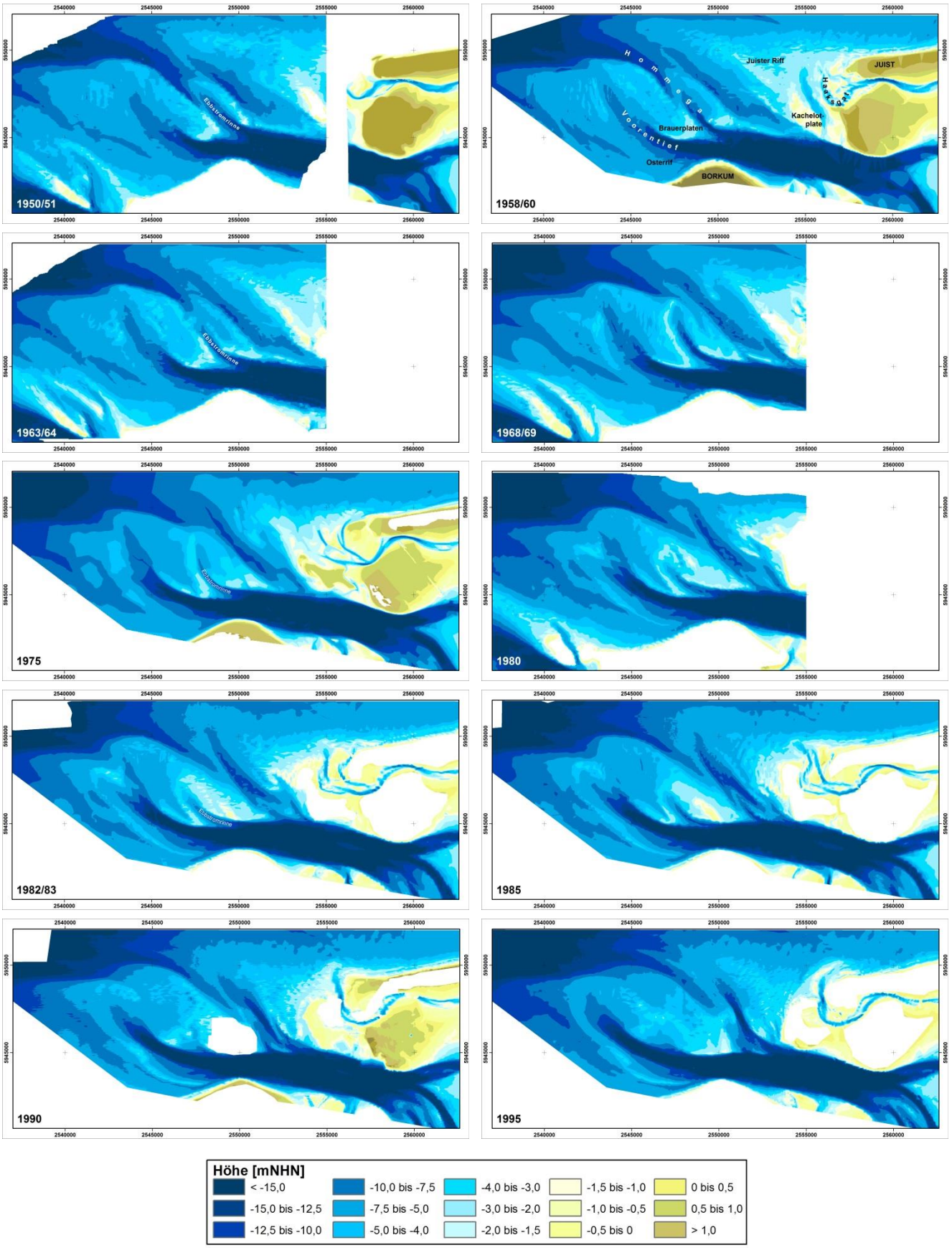


Abb. 2: Morphologische Ausprägung westlich von Juist in den Jahren 1950 bis 1995

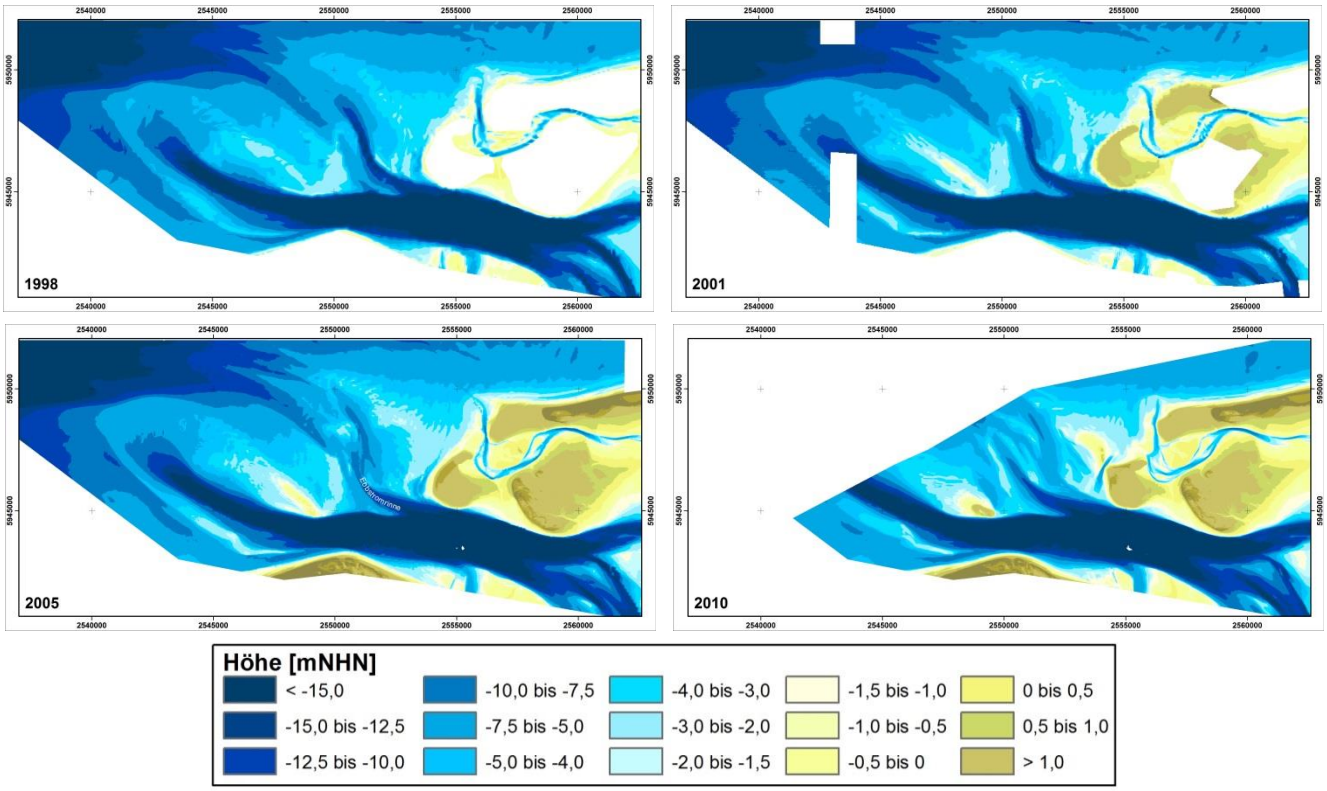


Abb. 3: Morphologische Ausprägung westlich von Juist in den Jahren 1998 bis 2010

Während sich die alte Ebbstromrinne im Bereich der Brauerplaten zurückbildet, entwickelt sich eine Senke östlich des Hommegats zur neuen Ebbstromrinne. Zwischen 1990 und 2001 erstreckt sie sich weit nach Norden und beeinflusst hier die Ausdehnung des Juister Riffs erheblich (Abb. 2 u. 3). Bereits im Jahr 2005 deutet sich dann aber an, dass sich auch die neue Ebbstromrinne des Hommegats erneut westwärts verlagert, was die aktuellste Topographie aus 2010 dann auch bestätigt. Östlich des Hommegats verbleibt abermals eine rinnenförmige Vertiefung.

Die bisherigen morphologischen Gestaltungsvorgänge weisen eine zyklische Entwicklung auf, in deren Verlauf sich etwa alle 40 bis 50 Jahre eine südwestlich des Juister Riffs entstandene, neue Ebbstromrinne des Hommegats westwärts verlagert und dabei die Brauerplaten zergliedert. Der Zyklus findet seinen Abschluss, wenn die Rinne verschwunden ist, weil sie sich entweder vollständig zurückgebildet oder mit dem Voorentief vereinigt hat. Gegen Ende des Zyklus gewinnen die Brauerplaten jeweils ihre kompakte Form zurück. Davon ausgehend, dass sich das Hommegat weiterhin zugunsten des Voorentiefs zurück entwickelt, würden die Auswirkungen dieser Rinnenverlagerung auf die Morphologie allerdings mit dem nächsten Zyklus geringer ausfallen.

Da in einer Phase des vorgenannten Zyklus nur eine einzelne und damit tiefe Ebbstromrinne existiert, die sich weit nach Norden erstreckt, wird Sediment entsprechend weit transportiert und gelangt somit zumindest partiell bis in den nordwestlichen Bereich des Juister Riffs, wo es zur Versorgung des Westkopfes der Insel verfügbar ist. Dieser Zustand ist in den Topographien der Jahre 1995 bis 2001 erkennbar (Abb. 2 u. 3). Mit der Westverlagerung der Ebbstromrinne trennt sich der nördliche Teil ab (Topographie 2005) und verbleibt als rinnenartige Struktur entlang der Südwestflanke des Juister Riffs (Topographie 2010). Aus ihr entwickelt sich dann im Verlauf des Zyklus wieder eine neue Ebbstromrinne. Ab dieser Phase wird Sediment wieder auf einer weiter südlich gelegenen Bahn durch das Ebbdelta des Hommegats in Richtung Kachelotplate transportiert.

Grundsätzlich bedingt die langanhaltende Rückentwicklung des Hommegats natürlich, dass das dortige Stromarbeitsvermögen abnimmt. Als Folge kommt vermehrt Sediment im Bereich des Hommegats zur Ablagerung. Auch ist zu erwarten, dass sich mit dem nächsten Zyklus der Riff-

bogen der neuen Ebbstromrinne weniger weit nach Norden ausdehnt. Unabhängig von einer zyklischen Entwicklung werden Sedimente deshalb in immer geringerem Umfang in Richtung Juister Riff verlagert und stärken so den Bereich Kachelotplate und vorgelagerter Sand. Folglich dürfte sich die Unterversorgung der Strände im Nordwesten von Juist sogar langfristig verstärken.

Nicht allein die veränderten Transportwege des Sedimentes begünstigen die Entwicklung der Kachelotplate, auch die Rückbildung der Juister Balje aufgrund einer veränderten Entwässerung des Nordlandes – diese dringt nicht mehr nach Westen bis in das Juister Riff vor, sondern entwässert über das Haaksgat nach Norden (s. Kap. 4.2) – bestimmt Größe und Ausprägung der Kachelotplate mit. Im Resultat hat sich die Kachelotplate zwischen 1951 und 2001 von einem langgestreckten, von Nordwest nach Südost verlaufenden Sand zunächst zu einem sichelförmigen Platenkomplex entwickelt, der dann bis 2012 zunehmend die heutige, kompaktere Form einnimmt (Abb. 2 u. 3).

Eine Prognose der weiteren morphologischen Entwicklung der Kachelotplate gestaltet sich aufgrund verschiedener Einflussfaktoren schwierig: Die Rückentwicklung des Juister Riffs bedingt eine geringere Seegangsdämpfung und wird als Grund dafür gesehen, dass die Kachelotplate an ihrer Nordseite erodiert wird, obwohl die Verlagerung des Haaksgat hier die Sedimentation begünstigt. Sollte das Haaksgat im Mündungsbereich wieder nach Nordwesten verschwenken, wie sich in der Topographie aus dem Jahr 2010 andeutet (Abb. 3), dürften sich die erosiven Tendenzen hier sogar noch verstärken. Auch die die Verlagerung des Prallhanges des Haaksgats südlich der Schillplate führt zu Abbrüchen im Norden der Kachelotplate. Andererseits ist in der topographischen Aufnahme von 2010 ein ausgedehnter Platenkomplex im Nordwesten der Kachelotplate erkennbar, der durch Sedimenteintrag aus dem Juister Riff genährt wird und zumindest mittelfristig die Entwicklung der Kachelotplate positiv beeinflussen dürfte. Während sich die Kachelotplate etwa seit 2001 ostwärts in Richtung Memmert verlagert, bildet sich im Nordwesten durch die Sandzufuhr aus dem anlandenden Platenkomplex seit 2010 ein hornförmiger Vorsprung. Begünstigt durch die Ostverlagerung wächst der Übergang von der Kachelotplate zur Insel Memmert beschleunigt auf und es ist zu vermuten, dass der Bereich durchgängig auf NHN-Niveau anwachsen wird: In der topographischen Aufnahme von Herbst 2012 ist erkennbar, dass die Kachelotplate und Memmert bereichsweise auf diesem Niveau miteinander verbunden sind (Abb. 4).

Die Ausdehnung der Kachelotplate variiert im Laufe der Zeit erwartungsgemäß deutlich (Tab. 1): Zunächst ist zwischen den Jahren 1958 und 1975 - bezogen auf das NN-2 m-Niveau - eine rasche Flächenzunahme von 2,24 km² auf 8,32 km² festzustellen, die bis 1986 mit weiteren 0,5 km² nahezu zum Stillstand kommt. Nachfolgend ist bis zum Jahr 2005 sogar eine Abnahme zu beobachten. Erst mit der Annäherung eines großen Platenkomplexes ist 2010 wieder ein sprunghafter Anstieg festzustellen. Es wird davon ausgegangen, dass die Kachelotplate auch schon vor Mitte der 1970er Jahre Höhen oberhalb von NN erreichte. Dieser Bereich ist seinerzeit durch Peilung nicht erfasst worden.

Im Laufe der Zeit wird das Sediment durch Strömung und Seegang in höhere Bereiche der Kachelotplate transportiert, so dass diese weiter aufwächst. Nachdem die Kachelotplate zu Beginn der Jahrhundertwende bis auf das MThw-Niveau aufgewachsen ist, wird nun auch durch Wind der Sand weiter angehäuft. Primärvegetation vermag durch ihre sedimentfangenden und –stabilisierenden Eigenschaften den Bildungsprozess von Primärdünen zu beschleunigen (LIEBEZEIT et al. 2013). So wurden durch die Laserscanaufnahme im Herbst 2012 maximale Höhen von mehr als drei Metern über NHN erfasst.

Mit zunehmender Annäherung des Platenkomplexes nordwestlich der Kachelotplate steht ein deutlich erhöhtes Sedimentangebot zur Verfügung. Es wird erwartet, dass in der Folge die Fläche der Kachelotplate sukzessive auch in den höheren Niveaus zulegen wird. Schließlich wird durch äolischen Sedimenttransport die Kachelotplate weiter in die Höhe wachsen. Diese hochgelegenen Flächen werden aber durch erhöhte Tiden und Sturmfluten abgetragen, während die mittleren Strömungs- und Seegangsverhältnisse die Plate aufbauen. Damit ist die weitere Entwicklung der Kachelotplate also stark von der Häufigkeit und Stärke zukünftiger Sturmfluten abhängig, während Form und Ausdehnung der Plate hiervon weniger stark beeinflusst werden.

LIEBEZEIT et al. (2013) weisen darauf hin, dass durch Extremereignisse zwar die Primärdünen erodiert werden, dass aber das freigelegte Wurzelwerk der Primärvegetation an der Basis der Dünen in der Lage ist, sich rasch zu regenerieren. Damit können sich bereits kurz nach solchen Ereignissen Primärdünen wieder aufbauen.

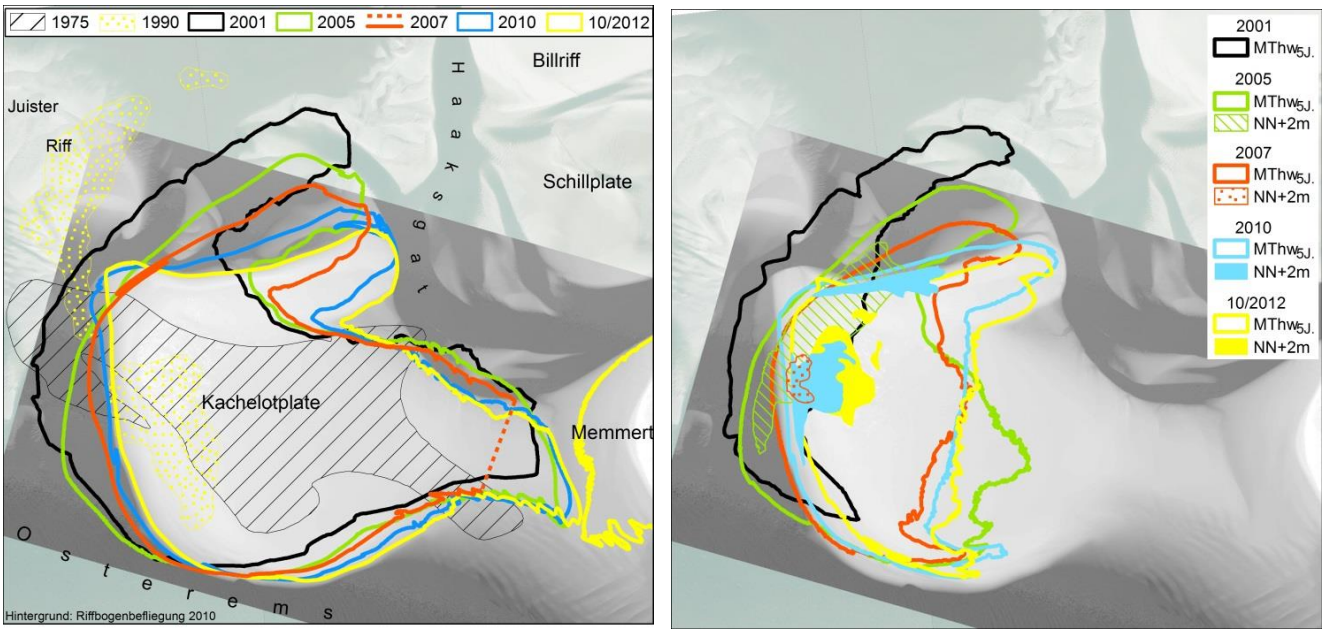


Abb. 4: Ausdehnung der Kachelotplate auf NN-Niveau (links) und oberhalb $MThw_{5J.}$ (rechts)

NIEMEYER (1995) benennt als Ursache für die beschriebenen morphologischen Entwicklungen westlich von Juist die anhaltende Verlandung der Leybucht nach dem 15. Jahrhundert. In der Folge komme es im Einzugsgebiet der Osterems zu einer Verlagerung des Schwerpunktes der Tidevolumen vom Teileinzugsgebiet der Ley in die der Bantsbalje und vor allem der Memmertbalje, da die im Bereich der Leybucht entstandenen Flächenverluste auf Kosten des Einzugsgebietes des Norderneyer Seegats kompensiert wurden. In der Folge schwenke die tiefe Rinne der Osterems entgegen dem Uhrzeigersinn und damit entgegen der von West nach Ost gerichteten Küstenlängsdrift. Unter Bezug auf den Anstieg des Meeresspiegels, der nach LUCK & STEPHAN (1983) maßgeblich verantwortlich ist für die Veränderungen nördlich von Borkum, ist hier die sich gegenseitig verstärkende Wirkung der überlagerten Vorgänge hervorzuheben.

Bedeutung kommt dem Meeresspiegelanstieg in Hinblick auf das Aufsteilen der Vorstrände nördlich von Juist zu (LADAGE 2001), wodurch die Seegangsbelastung für Strand und Düne zunimmt. Insgesamt handelt es sich um großräumige, strukturelle Veränderungen, die durch Prozesse ausgelöst wurden, die irreversibel sind. Für den Nordweststrand von Juist bedeutet dies, dass sich die erosiven Tendenzen nicht nur fortsetzen, sondern vermutlich sogar zukünftig verstärken werden.

Tab. 1: Flächenentwicklung der Kachelotplate oberhalb definierter Horizonte

	NN+2m	$MThw_{SJ.}$	NN+1m	NN	NN-1m	NN-2m	max. Höhe
	[km²]						[mNN]
1951					1,17	2,24	
1963					1,53	5,21	
1969					2,82	6,83	
1975			1,18	2,15	4,06	8,32	
1986			1,73	3,83	5,38	8,82	
1997/98			2,15	4,24	6,04	7,50	
2001		1,16	2,02	3,90	5,70	6,97	1,9
2005	0,345	2,15	2,52	3,78	5,30	6,83	2,5
2007	0,028	1,52	2,10	(>3,31)[1]			2,2
2010	0,177	1,67	2,34	3,48	4,13	8,32	2,7
06/12	0,130	1,48	2,15	3,34	(>3,89)[1]		2,6
10/12	0,153	1,50	2,21	3,33	(>3,88)[1]		3,1

Anm.: Die Daten 1958 – 1998 wurden aus LADAGE (2001) übernommen. [1] durch Vermessung nicht vollständig erfasst

4.2 Inselgeschützte Wattflächen

Im Vergleich zu den deutlichen Gestaltungsvorgängen im Bereich westlich von Juist/Memmert fallen die morphologischen Veränderungen auf den inselgeschützten Wattflächen südlich von Juist gering aus: Der südliche Ausläufer der Memmertbalje, der Kopersandpriel, dehnt sich zwischen den Jahren 1950 und 2010 mehr oder weniger kontinuierlich um insgesamt etwa drei Kilometer – bezogen auf die NN-2 m-Linie – ostwärts in Bereiche aus, die ursprünglich von der Itzendorfplate eingenommen wurden (Abb. 6 u. 7). Von Bedeutung könnte die weitere Entwicklung eines vom Kopersandpriel nach Süden zur Bantsbalje abzweigenden Arms werden, der sich zumindest in den letzten Jahren zu vertiefen scheint. Wenn dieser Seitenarm sich weiter ausdehnt und Anschluss an die Bantsbalje bekommt, wäre es möglich, dass die Bantsbalje langfristig Teile ihres Einzugsgebietes an die Memmertbalje verliert.

Der Kopersand gewinnt an seiner Nordwestspitze deutlich an Höhe und dehnt sich gleichzeitig leicht nach Nordwesten aus, weil hier Platen anlanden, die sich vom Schuitensand (Lage s. Abb. 1) gelöst haben.

Die auffälligsten Veränderungen sind aber im Bereich der Juister Balje festzustellen, die sich zwischen den Jahren 1959 und 2010 um rund drei Kilometer aus ihrem Wurzelbereich zurückgezogen hat. Entwässerte die Juister Balje bis Mitte der 1980er Jahre noch breitgefächert nach Nordwesten zum Juister Riff, findet nachfolgend eine Konzentration auf eine einzelne, nach Norden gerichtete Rinne statt. Diese Entwicklung dürfte weniger auf das nachlassende Stromarbeitsvermögen der Juister Balje zurückzuführen, sondern vielmehr dem verstärkt in Richtung Kachelotplate erfolgenden Sedimenttransport (s. Kap. 4.1) geschuldet sein. Grund für diese Annahme ist die Erkenntnis, dass sich in aktuellen Luftbildern eine Entwicklung abzeichnet, wonach sich die Juister Balje im Mündungsbereich wieder zurück nach Nordwesten zu verlagern scheint (Abb. 5), obwohl das Tidevolumen im Einzugsgebiet der Juister Balje unverändert rückläufig ist.

Das nachlassende Stromarbeitsvermögen der Juister Balje bedingt zum einen die Bildung von mehreren (Mittel-) Platen im Bereich des südlich der Schillplate gelegenen Prielbogens, zum anderen nimmt die Geschwindigkeit, mit der sich der Prallhang südwärts verlagernd zwischen Memmert und Kachelotplate drängt, aber auch ab. Eine zumindest temporäre Unterbrechung dieser Rinnenverlagerung ist zu erwarten, wenn die im Luftbild 2013 (Abb. 5) gut erkennbare Mittelplate mit dem Prallhang verschmilzt.

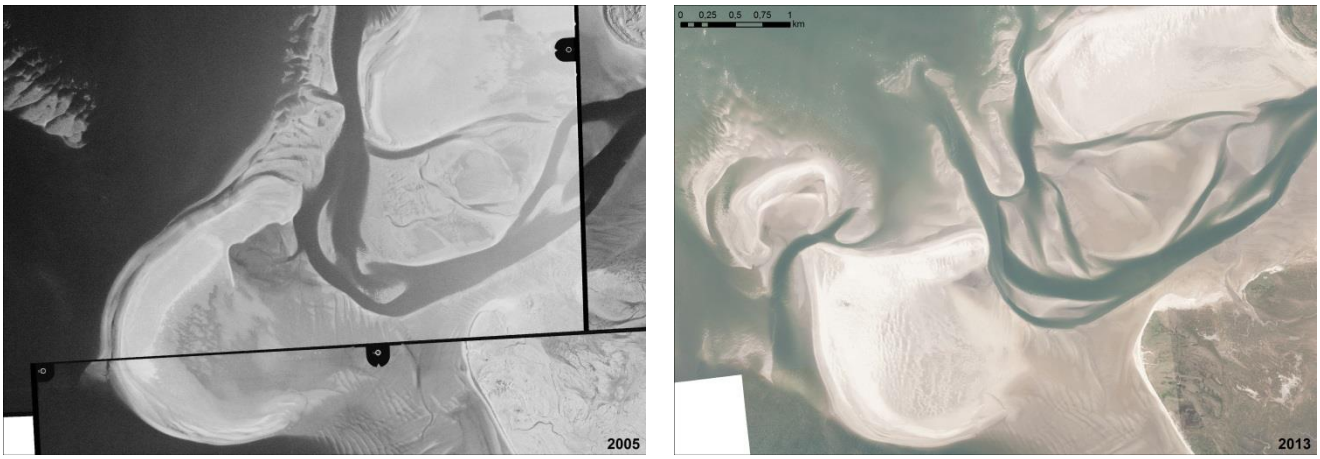


Abb. 5: Morphologische Ausprägung im Übergangsbereich von der Juister Balje zum Haaksgat

Erstmals in der Topographie 2010 erkennbar (Abb. 7), erfolgt die Entwässerung des Juister Hafens nicht mehr westwärts über die Juister Balje, sondern über eine neue, Nord-Süd verlaufende Rinne östlich der Hafenzufahrt, die sich erst in der Topographie des Jahres 2005 deutlich abzeichnet und nach Süden Anschluss an die Memmertbalje findet. Gut drei Kilometer weiter westlich stellt eine zweite Rinne, die zwar bereits im Jahr 2001 ansatzweise erkennbar ist, aber ebenfalls erst in der Topographie 2010 deutlicher in Erscheinung tritt, eine weitere Verbindung zur Memmertbalje her. Setzt sich diese Entwicklung fort, dürfte die Juister Balje wohl schon kurzfristig weitere Teile ihres Einzugsgebietes an die Memmertbalje verlieren.

Die beschriebenen morphologischen Umgestaltungen spiegeln sich in entsprechenden Größenveränderungen der Teileinzugsgebiete (TEG) der Juister Balje und Memmertbalje bzw. ihrer drei Arme wider (Tab. 2): Ausgehend von einer Größe von knapp 10 km² im Jahr 1960 nimmt das TEG des nördliche Armes der Memmertbalje bis 1975 um fast 50 % auf 14,6 km² vor allem auf Kosten des TEGs des mittleren Armes zu. Bis 1990 bleibt diese Wert nahezu unverändert erhalten, um dann innerhalb der nächsten 15 Jahre um weitere 7 km² auf über 22 km² anzusteigen. Dies entspricht gegenüber 1960 einer Flächenverdoppelung. Der erneute Zuwachs ist ganz überwiegend auf die Rückentwicklung der Juister Balje zurück zu führen, die innerhalb dieser Zeit wesentliche Teile ihres TEGs an den nördlichen Arm der Memmertbalje verliert. Das TEG der Juister Balje schrumpft von ursprünglich fast 21 km² bis zum Jahr 2010 um fast die Hälfte auf knapp 12 km². Die Entwicklung des Tidevolumens (V_T) in den beiden TEG korrespondiert gut mit den Größenveränderungen der TEGs: über den nördlichen Arm der Memmertbalje entwässern 1960 rund 19 Mio. m³ Wasser, 1975 sind es mit 29 Mio.m³ ebenfalls 50 % mehr, und bis 2010 hat sich V_T mit knapp 40 Mio. m³ dann verdoppelt.

Der mittlere Ausläufer der Memmertbalje verliert zwischen den Jahren 1960 (21,8 km²) und 2010 (11,4 km²) nahezu die Hälfte seines Einzugsgebietes, wobei der größte Teil innerhalb der ersten fünfzehn Jahre an den nördlichen Arm verloren geht. Der Rückgang von V_T fällt innerhalb dieser Zeitspanne mit gut 35 % von rund 31 Mio. m³ auf etwas mehr als 20 Mio. m³ dagegen deutlich geringer aus.

Durch die nach Süden gerichtete Verlagerung der Wattwasserscheide zwischen Memmertbalje und Bantsbalje in den Jahren bis 1975 erfährt das TEG des Kopersandpriels zunächst einen Flächenzuwachs um zwei Quadratkilometer auf 9,4 km², nachfolgend bis 1990 durch Aufweitung nach Norden und Osten eine weitere Zunahme auf 13 km². Nach einer leichten Rückentwicklung bis 2005 entspricht die Größe des TEGs des Kopersandpriels aktuell der von 1990. Auch hier korrespondiert die zeitliche Entwicklung von V_T mit der Größe des TEGs: zwischen 1960 (14 Mio. m³) und 2010 (22,6 Mio. m³) ist insgesamt einen Volumenzuwachs von gut 60 % festzustellen.

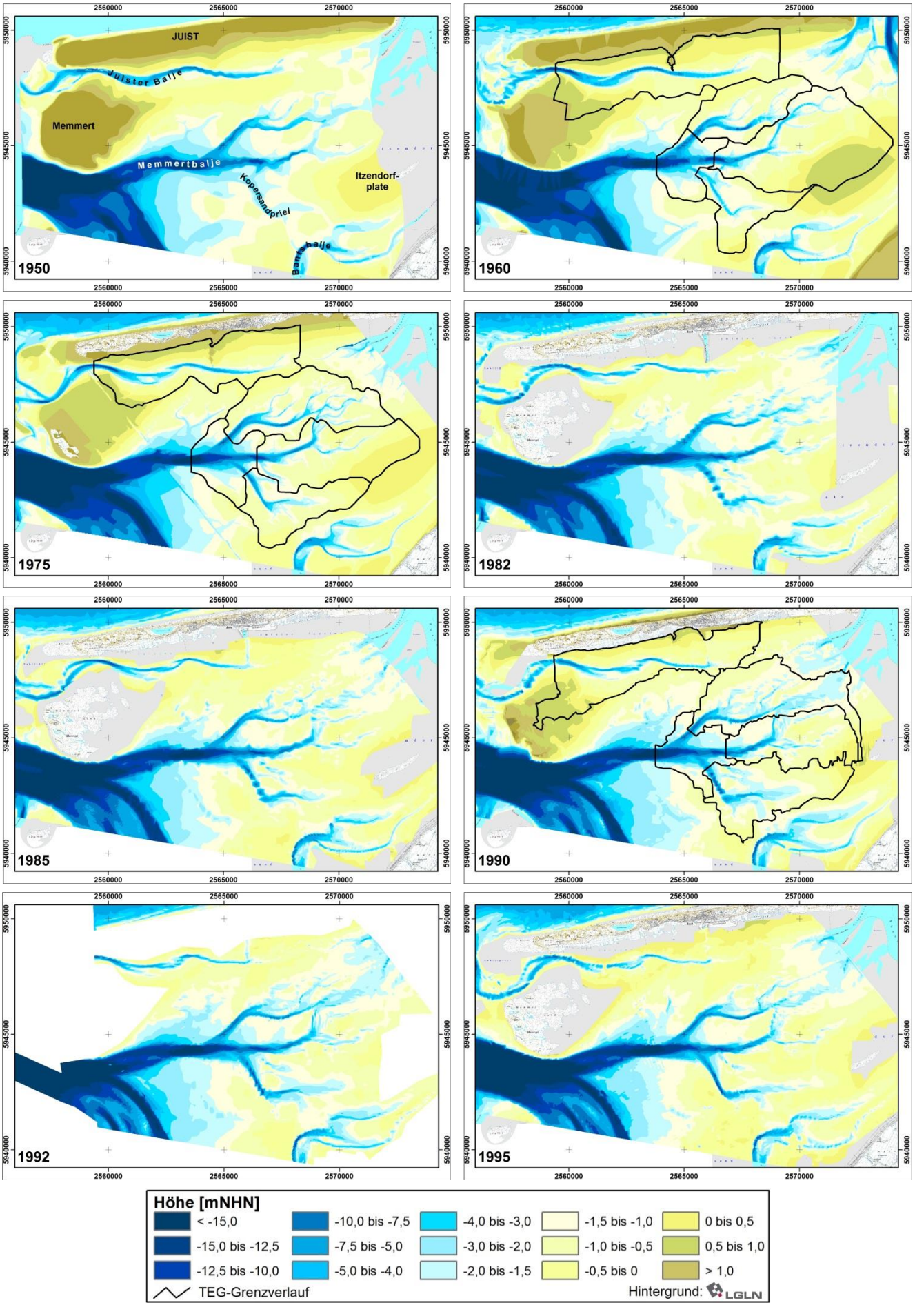


Abb. 6: Morphologische Ausprägung der inselgeschützten Watten südlich von Juist in den Jahren 1950 bis 1995

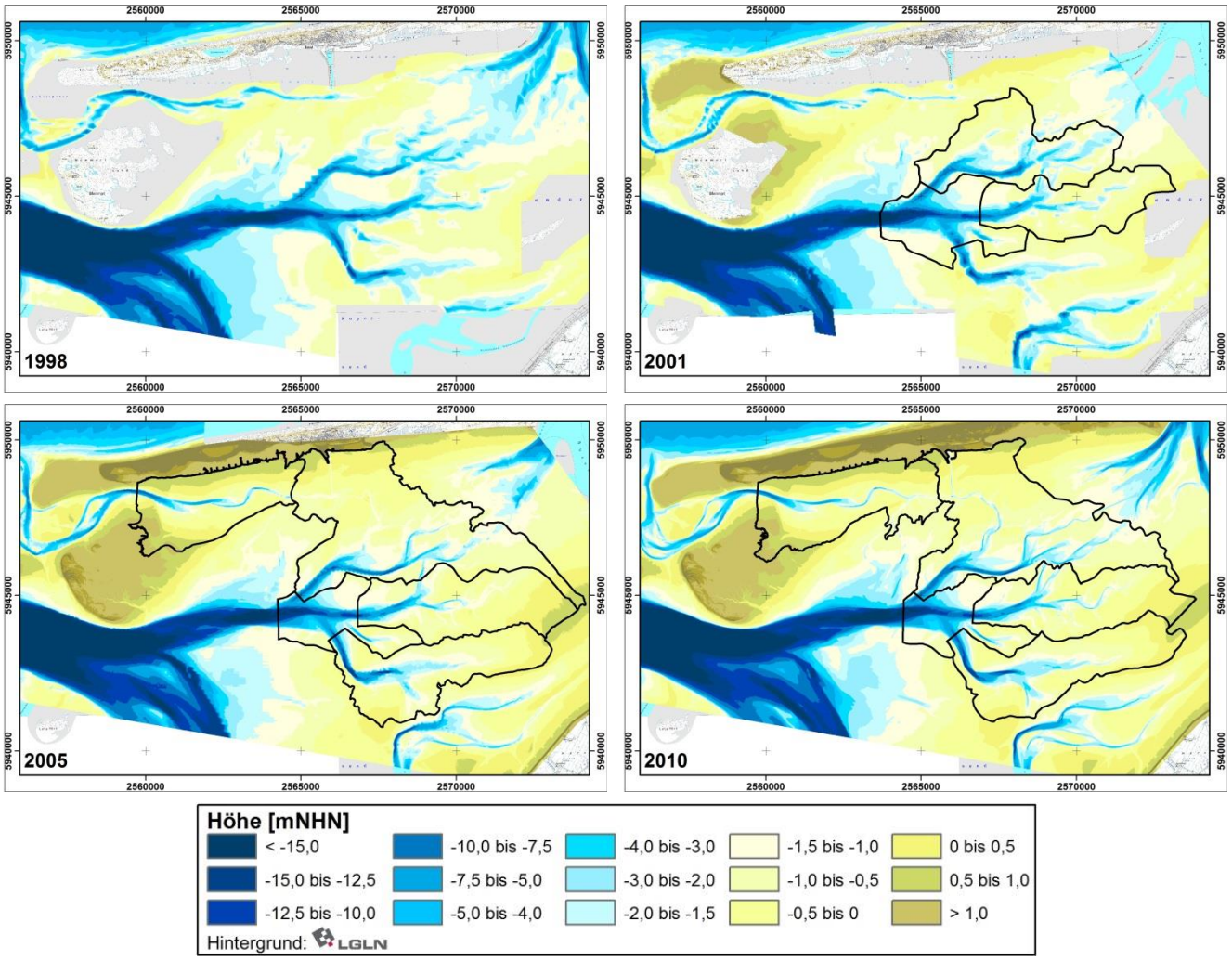


Abb. 7: Morphologische Ausprägung der inselgeschützten Watten südlich von Juist in den Jahren 1998 bis 2010

Das Einzugsgebiet der gesamten Memmertbalje erfährt innerhalb des Betrachtungszeitraumes einen Flächenzuwachs um ziemlich genau 15 % von ehemals 44,2 km² auf aktuell 50,8 km². Dieser Zuwachs erfolgt teilweise auf Kosten des TEGs der Juister Balje; auch die Aufweitung im Süden durch Verlagerung der Wattwasserscheide zur Bantsbalje hin hat hier erheblichen Anteil. Entscheidender ist aber vielmehr die Feststellung, dass das Tidevolumen in dieser Zeit um über 26 % zugenommen hat. Da nur ein Teil dieses Anstieges von 75,8 Mio. m³ (1960) auf 95,7 Mio. m³ (2010) durch die säkulare Zunahme des Tidehubs zu erklären ist, muss das mittlere Höhenniveau im TEG der Memmertbalje abgenommen haben.

Die Differenzendarstellungen verdeutlichen, dass zwischen den Jahren 1960 und 1990 erosive Tendenzen vorherrschten, während nachfolgend bis 2010 wieder Sediment in die Watten eingetragen wird, wobei der wesentliche Sedimenteintrag bis 2005 erfolgt, während bis 2010 kaum noch Niveauänderungen im Eulitoral festzustellen sind (Abb. 8). Im Einzugsgebiet der Memmertbalje beträgt der Nettohöhenverlust von 1960 bis 2010 etwas mehr als vierzig Zentimeter.

Tab. 2: Variabilität des Tidevolumens und der Einzugsgebietsfläche in den verschiedenen Teileinzugsgebieten

	Tidevolumen [Mio. m³]					Einzugsgebietsfläche [km³]				
	1960	1975	1990	2005	2010	1960	1975	1990	2005	2010
Memmertbalje Nord	19,14	29,28	31,79	41,72	39,63	9,84	14,65	14,29	22,38	20,89
Memmertbalje Mitte	31,29	24,52	22,60	20,75	20,42	21,76	14,67	11,14	11,98	11,44
Kopersandpriel	13,97	17,02	26,78	21,64	22,65	7,65	9,35	13,04	11,93	12,81
Memmertbalje ges.	75,83	87,07	95,83	97,23	95,67	44,22	45,46	44,67	52,10	50,83
Juister Balje	25,53	22,99	25,89	11,94	14,66	20,76	17,50	17,78	10,08	11,71

4.3 Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen

Die Berechnung hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtszustände stellt einen Ansatz dar, die komplexen Vorgänge der Morphodynamik auf Parameter zu reduzieren, welche die (mittelfristig) prägenden Prozesse beschreiben. Eine solche Parametrisierung erlaubt eine methodische Reproduzierbarkeit und stellt einen Ansatz dar, bei Abweichungen vom morphologischen Gleichgewicht wahrscheinliche morphologische Reaktion des Systems besser abschätzen zu können.

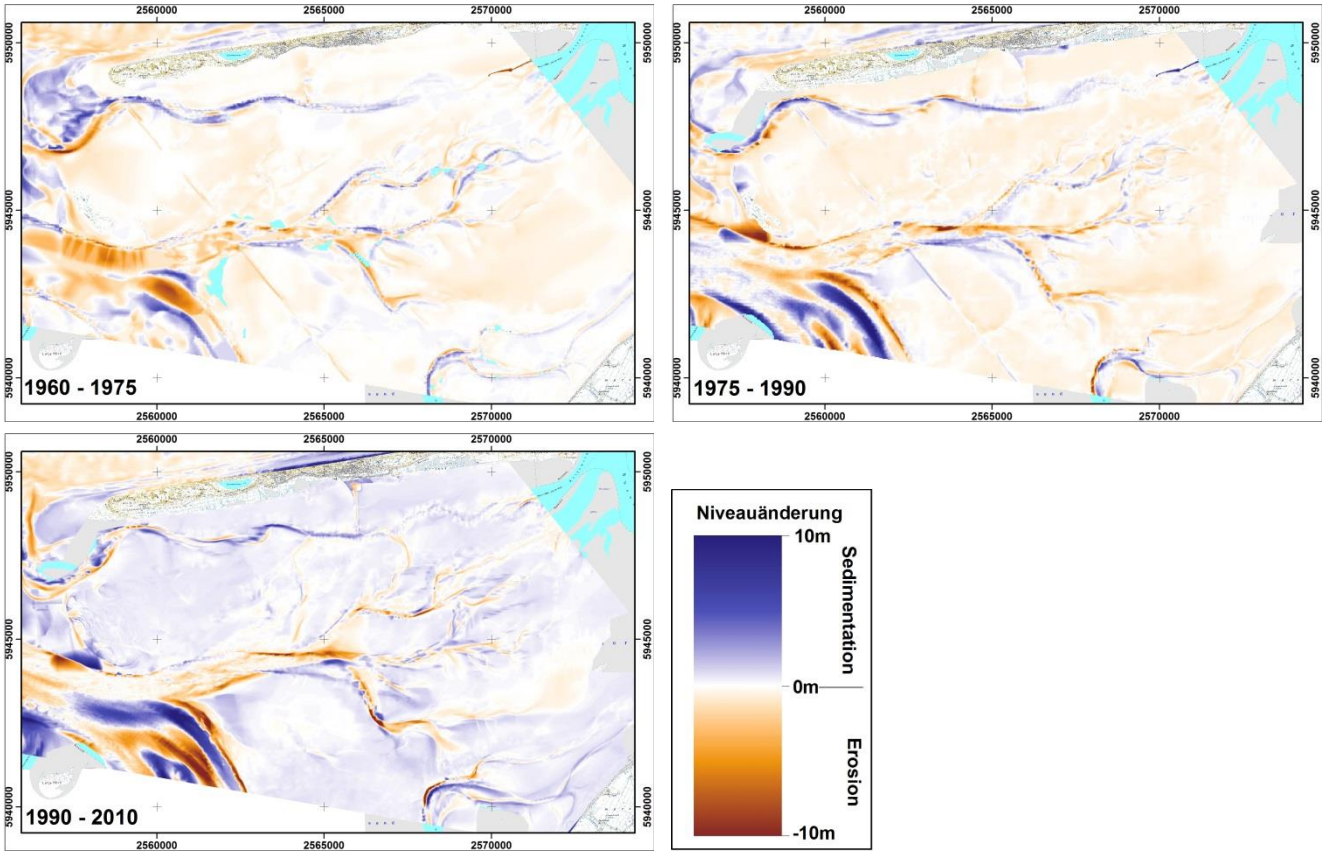


Abb. 8: Niveauänderungen innerhalb verschiedener Zeiträume zwischen den Jahren 1960 und 2010

An Küsten mit tidedominanten Seegaten bildet sich 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) sowie NIEMEYER et al. (1995) für die ostfriesischen Seegaten und von EYSINK (1991) für die Seegaten des westfriesischen Wattenmeeres.

Der funktionale Zusammenhang zwischen V_T und A_b wird im Untersuchungsraum durch eine Ausgleichsgerade wiedergegeben, die mit dem Koeffizienten 0,533 nahezu identisch ist mit der, die NIEMEYER et al. (1995) im Projekt „WADE" für die Gesamtheit der ostfriesischen Küste ermittelt haben (Abb. 9). Während die Messwerte für die TEGs der drei Rinnenausläufer der Memmertbalje nahe der Trendlinie liegen, treten größere Abweichungen im TEG der Juister Balje auf, da hier die Einzugsgebietsfläche stets relativ zu groß ist im Verhältnis zum Tidevolumen. Aufgrund der Verlandungstendenzen im Einzugsbereich der Juister Balje ist davon auszugehen, dass sich das morphologische Gleichgewicht hier durch entsprechende Abnahme des Tidevolumen wieder einstellt.

Im Einzugsgebiet der gesamten Memmertbalje ist zwischen den Jahren 1960 und 1990 bei wenig veränderter Einzugsgebietsgröße ein erheblicher Anstieg des Tidevolumens festzustellen. Eine solche Entwicklung ist nur möglich, wenn die eulitoralen Flächen erodieren, worauf bereits in Kap. 4.2 hingewiesen wurde. Bis 2005 dehnt sich das TEG der Memmertbalje deutlich aus, während sich das Tidevolumen nur unwesentlich verändert. In den nächsten fünf Jahren bis 2010

lassen die geringfügigen Größenschwankungen von V_T und A_b auf eine temporäre Stabilisierung der Verhältnisse im gesamten Einzugsgebiet der Memmertbalje schließen.

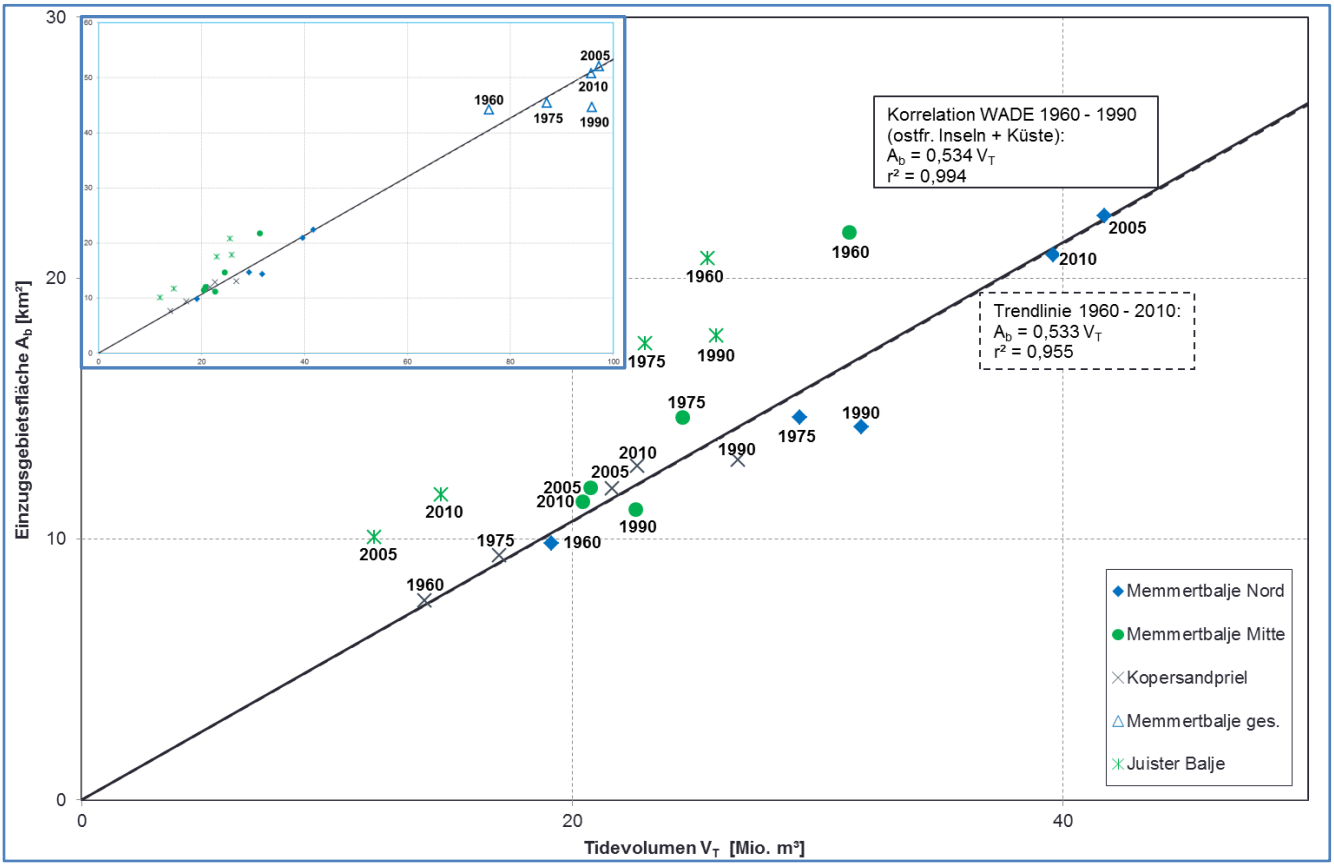


Abb. 9: Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche vom Tidevolumen

Die Abhängigkeit der Größe der Gezeitenfläche A_i von der Größe des Einzugsgebietes A_b haben RENGER (1974) und EYSINK (1991) für ihre Untersuchungsgebiete durch funktionale Zusammenhänge mit unterschiedlichen Ansätzen dargestellt. Während diese Daten allerdings erheblich um die empirisch ermittelte Ausgleichsfunktion streuen, weisen NIEMEYER et al. (1995) für den Bereich der ostfriesischen Inseln einen engen Zusammenhang zwischen den beiden Parametern nach.

Erwartungsgemäß bedingen die die für den Zeitraum 1960 bis 1990 nachgewiesenen erosiven Tendenzen im Einzugsgebiet der gesamten Memmertbalje eine entsprechende Abnahme der Gezeitenfläche bei wenig veränderter Einzugsgebietsgröße (Abb. 10). Besonders stark ausgeprägt ist diese Entwicklung zwischen den Jahren 1975 und 1990, wobei das TEG des nördlichen Armes der Memmertbalje maßgeblichen Anteil daran hat. Rückläufig ist A_i zwar ebenfalls im TEG des mittleren Ausläufers, hier ist aber auch eine deutliche Abnahme von A_b festzustellen. Für das Jahr 1990 ist im Bereich der Memmertbalje eine deutlich Abweichung im Verhältnis A_b/A_i festzustellen, die auf eine temporäre Störung des hydrologisch-morphodynamischen Gleichgewichts hinweist. Die Rückentwicklung der Juister Balje führt zu einem erhöhten Sedimenteintrag in ihr TEG, wodurch A_i überproportional zu A_b ansteigt. Hier besteht also noch ein morphologisches Ungleichgewicht zwischen A_b/A_i, das auch nicht dadurch ausgeglichen wird, wenn die Juister Balje weitere Teile ihres TEG mittelfristig an den nördlichen Ausläufer der Memmertbalje verliert würde (s. Kap. 4.2).

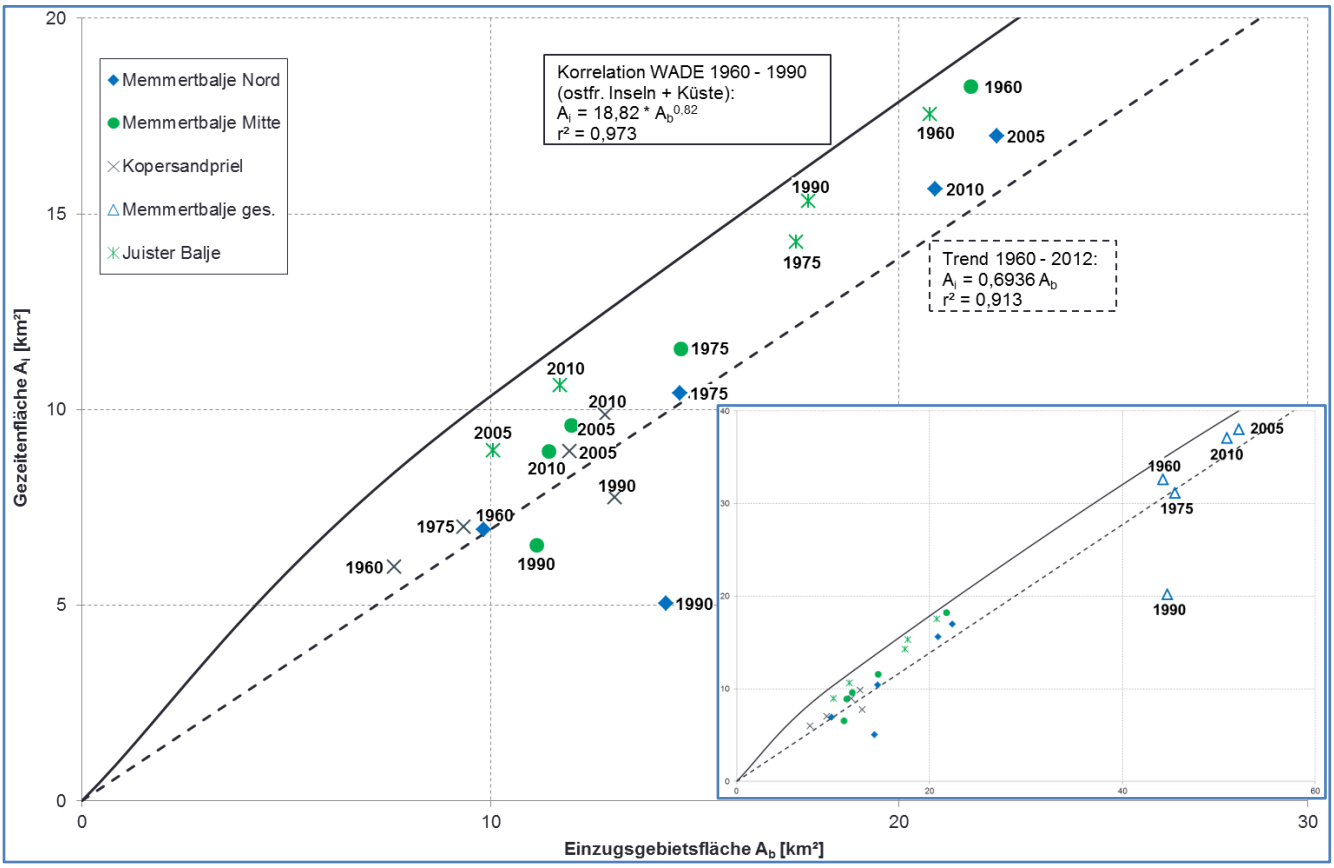


Abb. 10: Abhängigkeit der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsfläche

Werden die Messwerte für das Jahr 1990 ausgeklammert, schwanken die Messwerte im Einzugsgebiet der Memmertbalje und Juister Balje nur geringfügig (r^2=0,99) um den Wert 0,74 für das Verhältnis von A_b/A_i.

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. Somit besteht auch ein statistischer Zusammenhang zwischen A_i und Tidevolumen V_T. Dieser wird im Untersuchungsgebiet ebenfalls durch eine lineare Ausgleichsfunktion wiedergegeben, wenngleich die Messwerte deutlich stärker um die Trendlinie streuen als es für das Verhältnis von A_b/A_i. der Fall ist (Abb. 11). Festzustellen ist, dass die Gezeitenfläche im TEG der gesamten Memmertbalje zwischen den Jahren 1975 und 1990 zunächst um etwa 35% abnimmt, ohne dass das Tidevolumen entsprechend zurückgeht. Dies wird auf die insgesamt niedrige Höhenlage, insbesondere der östlichen Teile des TEG zurückgeführt. Das morphodynamische Gleichgewicht stellt sich bis 2005 durch den erneuten Sedimenteintrag wieder ein, bei wenig veränderten Werten für V_T.

Für das TEG der Juister Balje ist im Vergleich zum TEG der Memmertbalje, aber auch im Vergleich zu den von NIEMEYER et al. (1995) ermittelten Verhältnissen für die Gesamtheit der ostfriesischen Watten, die Gezeitenfläche über den gesamten Betrachtungszeitraum stets zu groß im Verhältnis zum Tidevolumen, was der seit Jahrzenten rückläufigen Größe des TEG zugeschrieben wird.

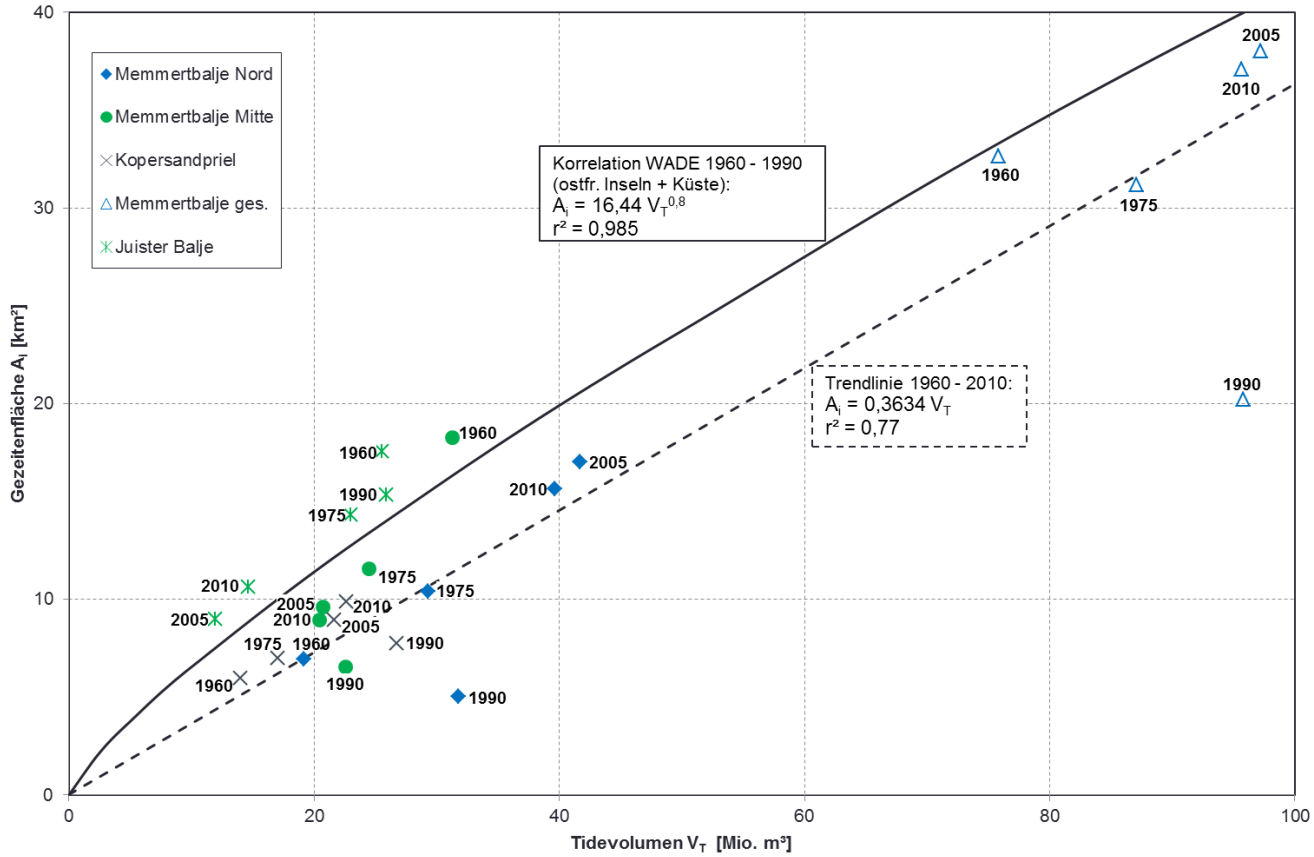


Abb. 11: Abhängigkeit der Gezeitenfläche vom Tidevolumen

Die Geometrie eines Seegats und somit auch dessen Rinnenquerschnitt werden maßgeblich durch das Tidevolumen des zugehörigen Einzugsgebietes bestimmt. O´Brien (1931, 1969) 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. Von NIEMEYER et al. (1995) wurde die Gültigkeit des Ansatzes auch auf Teileinzugsgebiete mit zugehörigen Rinnenquerschnitten nachgewiesen.

Die Abhängigkeit des Rinnenquerschnitts vom Tidevolumen ist im TEG des Kopersandpriels am deutlichsten ausgeprägt, weist aber im Vergleich mit der Gesamtheit der ostfriesischen Watten (NIEMEYER et al. 1995) ein im Verhältnis zu V_T zu hohen Rinnenquerschnitt auf. Abgesehen vom Messwert aus dem Jahr 1960 gilt dies noch ausgeprägter für das TEG der Memmertbalje Mitte (Abb. 12). Im TEG der Juister Balje streut das Verhältnis A_C/V_T stärker und A_C ist im Vergleich zur Trendlinie von NIEMEYER et al. (1995) tendenziell etwas zu klein, im Vergleich zur Ausgleichsgerade für die TEG im Untersuchungsraum sogar deutlich zu klein im Verhältnis zu V_T.

Entgegen dem erwarteten funktionalen Zusammenhang zwischen den beiden Faktoren A_C und V_T bleibt der Rinnenquerschnitt im TEG der Memmertbalje Nord näherungsweise konstant, im TEG der gesamten Memmertbalje wird der Rinnenquerschnitt sogar kleiner, obwohl das Tidevolumen deutlich ansteigt. Eine gewisse Messungenauigkeit ist dadurch gegeben, dass der Rinnenquerschnitt unterhalb von NN berechnet wird, dieses Niveau aber häufig entlang des gewählten Profils nicht erreicht wird. Auch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Tide in diesen TEG insbesondere zu Beginn von Ebbe und Flut breitflächig über die Watten strömt und

nicht gerichtet über die tiefen Rinnen. Zudem findet Nettowasseraustausch über die Wattwasserscheide zwischen dem Osterems Tidebecken und dem Norderneyer Einzugsgebiet statt.

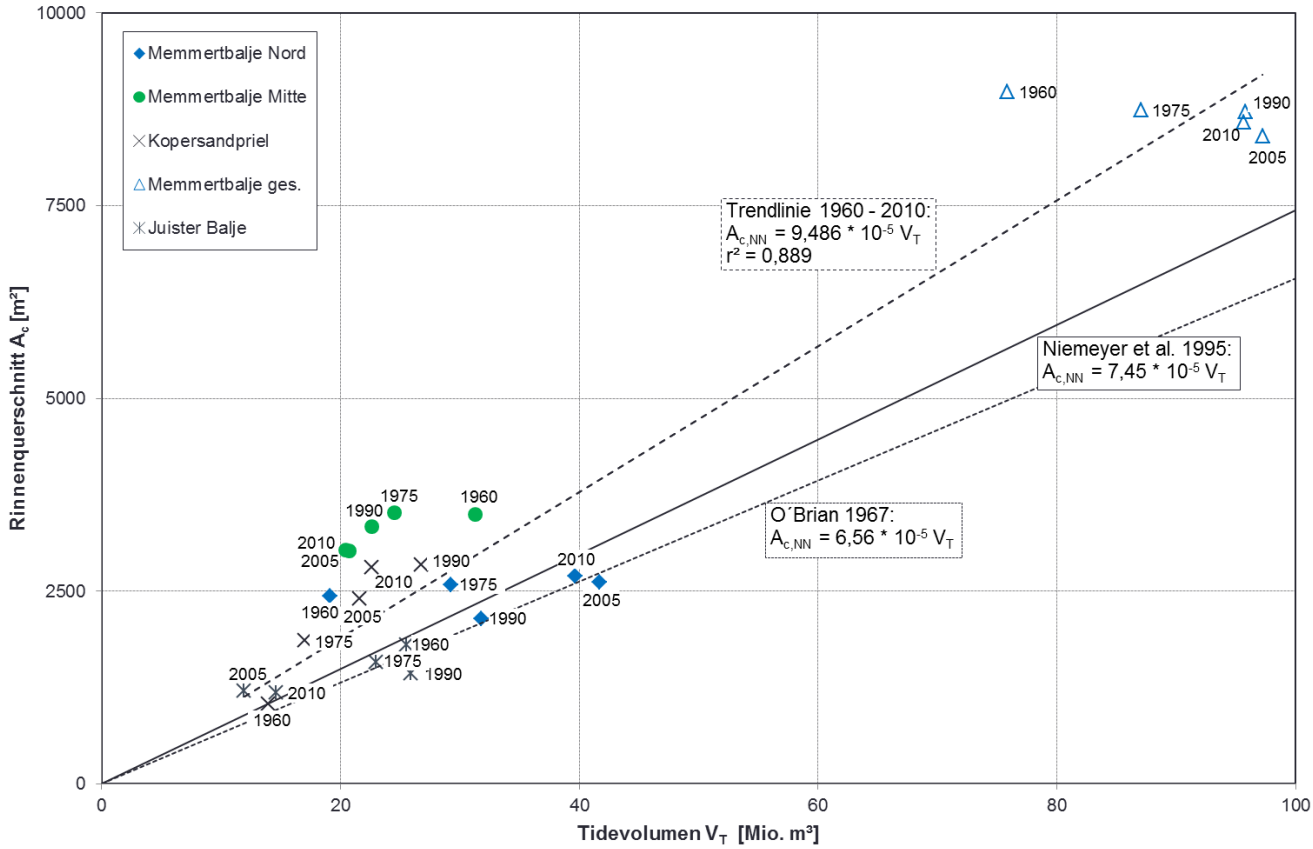


Abb. 12: Rinnenquerschnitt als Funktion des Tidevolumens

5 Zusammenfassung

Getrennt für das Seegebiet westlich von Juist/Memmert und für die Wattflächen südlich von Juist wird die morphologische Entwicklung im Untersuchungsraum auf der Basis von Peildaten und Laserscanaufnahmen aus den Jahren 1950 bis 2010 beschrieben und hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen durchgeführt.

Aufgrund der anhaltenden Verlandung der Leybucht nach dem 15. Jahrhundert verlagert sich im Einzugsgebiet der Osterems der Schwerpunkt der Tidevolumen vor allem in das Einzugsgebiet der Memmertbalje. In der Folge kommt es zu einer Verschwenkung der Osterems entgegen dem Uhrzeigersinn, wobei sich das Voorentief zur Hauptinne der Osterems entwickelt und sich um mehrere Kilometer westwärts ausdehnt, während sich das früher dominierende Hommegat zurück entwickelt.

Im Bereich des Hommegats wird eine zyklische Entwicklung postuliert, in deren Verlauf eine sich nordwestlich der Kachelotplate gelegene Rinne zur neuen Ebbstromrinne des Hommegats entwickelt, die westwärts verlagernd die kompakten Strukturen der Brauerplaten zergliedert, um schließlich zum Ende des Zyklus nach etwa fünfzig Jahren im Voorentief aufzugehen. Im Verlauf eines solchen Zyklus wird Sediment auf immer weiter südlich gelegenen Bahnen durch das Ebbdelta des Hommegats in Richtung der Kachelotplate, und damit in immer geringerem Umfang in das Juister Riff transportiert.

Diese strukturellen Umgestaltungen führen einerseits dazu, dass die Kachelotplate weiter an- und aufwachsen kann, bedingt aber auch, dass die für den Erhalt der Strände von Juist erforderliche Sandzufuhr aus dem Juister Riff rückläufig ist. Somit dürfte sich die negative Entwicklung

der Strände und Dünen im Nordwesten der Insel noch verstärken, zumal durch das Aufsteilen der Vorstrände (LADAGE 2001) mit einer Zunahme der Wellenbelastung zu rechnen ist.

Auf den inselgeschützten Wattflächen südlich von Juist dehnt sich die Memmertbalje ostwärts in Bereiche aus, die vormals zentrale Teile der Itzendorfplate bildeten. Weiteren Flächenzuwachs bekommt das Einzugsgebiet der Memmertbalje aktuell nicht nur im Norden durch die anhaltende Rückentwicklung der Juister Balje, sondern auch im Süden, wo sich die Wattwasserscheide auf Kosten des Einzugsgebietes der Bantsbalje verschiebt.

In Anlehnung an die Untersuchungen von NIEMEYR et al. (1995) im Projekt WADE wurden empirische Formeln ermittelt, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den Parametern Einzugsgebietsgröße A_b, Gezeitenfläche A_i, Sedimentvolumen im Gezeitenbereich V_i, Tidevolumen V_T und Rinnenquerschnitt A_c darstellen.

Während die Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße vom Tidevolumen sowie der Gezeitenfläche von der Einzugsgebietsgröße gut erkennbar ist und die Messwerte vergleichsweise wenig um die Ausgleichsgeraden streuen, sind weitere funktionale Zusammenhänge zwischen den fünf Parametern wesentlich weniger deutlich ausgeprägt oder sogar zeitweise gegenläufig zum Trend: Auffällig ist diese Entwicklung insbesondere im Einzugsgebiet der gesamten Memmertbalje zwischen den Jahren 1960 und 1990 für das Verhältnis von Gezeitenfläche und Sedimentvolumen zum Tidevolumen. Innerhalb dieser Zeitspanne wird das Watt zwischen Juist und Festland stark erodiert, was zu deutlichen, temporären Störungen des morphodynamischen Gleichgewichts führt. Eine Kompensation dieses Ungleichgewichts erfolgt bis zum Jahr 2005 durch den erheblichen Eintrag von Sedimenten.

6 Literaturverzeichnis

ABELS U. & G. RAGUTZKI (1996): Schutz des Nordteils der Insel Borkum – Generelle Untersuchungen. Teil2: Großräumige und langfristige morphologische Gestaltungsvorgänge im Bereich Osterems/Borkumriff. – Dienstber. Forschungsstelle Küste Norderney, 4/1996

DIECKMANN, R., M. OSTERTHUN & H.W. PARTENSCKY (1989): A comparison between German and North American tidal inlets. - Proc. 21st Int. Conf. Coast. Eng. 1988, Malaga, ASCE, New York, 32681-2691

DIRKS, H. (2007): Luftgestützte Laserscan-Erfassung der Deichvorländer von Arensch und Cuxhaven - Dokumentation der Laserscan-Befliegung vom Frühjahr 2007. - Untersuchungsber. Forschungsstelle Küste 11/2007

EYSINK, W.D. (1991): Morphologic response of tidal basins to changes. – Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 2: 1948-1961

HAYES, M. O. (1975): Morphology of sand accumulation in estuaries. - In: CRONIN, L.E. (ed.): Estuarine Research, Geology and Engineering, Academic Press, New York, Vol. 2

HAYES, M. O. (1979): Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S.P.: Barrier Islands: From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico. (Academic Press) New York: 1-27.

HÜTTEMEYER, P., A. KOOPMANN, H. KUNZ & M. PUSCHMANN (1999): KFKI Forschungsvorhaben. Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht: Datendokumentation und Untersuchungen zur Verwendung von Seemessungen des DHI/BSH für morphologische Fragestellungen. - Dienstber. Forschungsstelle Küste, 18/1999

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. (2001): Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln – Morphologische Entwicklung im Bereich Juist/Memmert.- Dienstber. Forschungsstelle Küste 10/2001

LIEBEZEIT; G., A. WEHRMANN, N.HECKER & R. CZECK (2013): Die Kachelotplate – Einblicke in die Entstehung von Barriereinseln. – Natur- und Umweltschutz (Zeitschrift Mellumrat), 12/1
LUCK, G. & H.-J. STEPHAN (1983): Verlagerung morphologischer Großformen nördlich der Osterems und deren Einfluss auf das Westende von Juist, - Jber. Forschungsstelle Küste Norderney, H 34: 11-29
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
NIEMEYER, H.D. (1995): Long-term morphodynamical development of the East Frisian Islands and coast. – Proc. 24th ICCE, Kobe/Japan, ASCE, New York
NIEMEYER, H.D., E. Goldenbogen, E. Schröder & H. Kunz (1995): Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. – Die Küste, H 57
O´BRIEN, M.P. (1931): Estuary tidal prisms to entrance areas. - ASCE Civ. Eng., Vol. 1, No. 8
O'BRIEN, M.P. (1969): Equilibrium flow areas and inlets on sandy coasts. In: Journal of Waterways and Harbours Division: 43-52.
RENGER, E. (1974): Untersuchungen von Watteinzugsgebieten. - Mitt. Franzius-Institut d. Univ. Hannover, H 40
STEPHAN, H.-J. (1990): Untersuchungen zur großräumigen morphologischen Entwicklung im Bereich Memmert / Juister Riff. – Jber. Forschungsstelle Küste Norderney, H 39: 121-149
STEPHAN, H.-J. (1995): Morphologische Entwicklung im Bereich Juist/Memmert.- Jber. Forschungsstelle Küste Norderney, h 40: 101-118
WALTHER, F. (1934): Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. - Die Bautechnik, 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