

Morphogenese und -dynamik im Seegat und Ebb-Delta des Hörnum Tiefs

Von JACOBUS L. A. HOFSTEDE und VERENA SPITTA

Zusammenfassung

Seegat und Ebb-Delta des Hörnum Tiefs liegen im nordfriesischen Wattenmeer zwischen den Inseln Sylt und Amrum. Auf der Basis von sieben bathymetrischen Aufnahmen dieses Gebietes wurde die morphologische Entwicklung und Dynamik über den Zeitraum 1939 bis 1994 nachvollzogen. Anschließend wurde der Versuch gemacht, die morphologischen Beobachtungen anhand hydrologischer Daten von zwei nahegelegenen Tidepegeln ursächlich zu deuten. Hierzu wurden die morphologischen Parameter V_{ebd} (Sedimentvolumen im Ebb-Delta), A_c (Querschnittsfläche in der Seegat-Kehle unterhalb von NN) sowie die Flächen/Höhen-Verteilung (hypsographische Kurve) des Untersuchungsgebietes berechnet. Anschließend wurden V_{ebd} und A_c mit der hydrologischen Zustandsvariable V_f (Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels während Ebbe) am Pegel Hörnum korreliert.

Zwischen 1939 und 1994 nahm A_c um insgesamt 32% zu, während V_{ebd} sich von 1968 bis 1994 um 18% verringerte. Frühere Untersuchungen von u.a. O'BRIEN (1931), WALTON u. ADAMS (1976) und EYSINK & BIEGEL (1992) dokumentierten eine starke positive Korrelation zwischen diesen beiden morphologischen Kennwerten und tidalen Parametern. Entsprechend zeigt A_c des Hörnum Tiefs eine positive Korrelation von $r = 0,89$ mit dem tidalen Parameter V_f (als direkter Indikator für die Ebbe-Strömungsgeschwindigkeiten) am Pegel Hörnum. Andererseits ist V_{ebd} im Untersuchungsgebiet anscheinend schwach negativ ($r = -0,74$) mit V_f korreliert. Demnach müssen andere Prozesse für die Abnahme von V_{ebd} verantwortlich sein. Zumindest teilweise kann die seit etwa 1960 zunehmende Sturmstätigkeit in der Region eine Erklärung bieten. Folglich nahm die Intensität des Sturmseeganges im Bereich des Ebb-Deltas zu. Wahrscheinlich als morphologische Reaktion auf diesen Trend nahmen Fläche und Volumen der Riffplatten von 1959 bis 1994 stark ab. Da V_f von 1939 bis 1994 insgesamt um 19% zunahm, nahm die Sandzufuhr aus dem Seegat zum Deltasockel vermutlich ebenfalls zu, wodurch der Sedimentverlust infolge verstärkten Sturmseeganges hier ausgeglichen wurde.

Summary

The Hörnum tidal inlet is located in the German Wadden Sea between the barrier islands Sylt and Amrum. On the basis of seven bathymetric surveys of the tidal inlet (including the ebb-tidal delta) covering a 55-year period from 1939 to 1994 and long-term records from two tidal gauges, a process-response analysis for the inlet was carried out. Following the method described by DEAN & WALTON (1975), the volume of sediment stored in the ebb-tidal delta (V_{ebd}) was calculated for each survey. Furthermore, the cross-sectional area of the tidal inlet throat (A_c), and the area-height distribution (hypsographic curve) of the study area were established.

Between 1939 and 1994, A_c increased by about 32%, whereas V_{ebd} decreased by about 18% from 1968 to 1994. Earlier investigations by, e.g., O'BRIEN (1931), WALTON & ADAMS (1976) and EYSINK & BIEGEL (1992) documented a strong positive correlation between these two morphological variables and tidal parameters in the inlet. In conformity with the literature, regression of the values of A_c with the corresponding fall velocities of the water level in the inlet (V_f , as a direct indication of ebb-tidal currents) produced a correlation coefficient (r) of 0.89. However, V_{ebd} apparently shows a weak negative correlation ($r = -0.74$) with V_f . Therefore, other factors than changes in ebb-tidal currents must have been responsible for the decrease in V_{ebd} . It is suggested that one factor might be the observed strong increase in storm activity in the region since approximately 1960. Consequently, storm wave-action at the ebb-tidal delta intensified and initiated erosion here. As a result, the swash bars of the ebb-tidal delta, in particular, were strongly

reduced in size between 1959 and 1994. As the ebb-tidal currents increased by about 19% from 1939 to 1994, sand supply to the terminal lobe of the ebb-tidal delta probably increased as well, thereby balancing the loss of sediment from the terminal lobe caused by the increasing storm activity.

Inhalt

1. Einführung	142
1.1 Das Untersuchungsgebiet	143
2. Daten und Methoden	145
2.1 Hydrologische Entwicklung	147
2.2 Morphologische Änderungen	151
3. Diskussion	154
4. Schlussfolgerungen	155
5. Danksagung	156
6. Schriftenverzeichnis	156

1. Einführung

Seegats und ihre vorgelagerten Ebb-Deltas stellen zwei wichtige Elemente eines tidalen Geosystemes im Wattenmeer dar. Einerseits kann ein Seegat direkt als Sedimentquelle funktionieren, andererseits bietet es einen Transportweg für Sediment austausch zwischen der Nordsee (bzw. dem Ebb-Delta) und dem Wattenmeeresgebiet. Ebb-Deltas funktionieren in erster Linie als Zwischenspeicher für Sedimente, die, zum Beispiel im Falle eines Meeresspiegelanstieges, von großer Bedeutung für die künftige Stabilität des Wattenmeeres werden könnten (NIEMEYER *et al.*, 1998). Außerdem wirken die Riffplatten des Ebb-Deltas als natürliche Wellenbrecher. Da ein Großteil der von der Nordsee einlaufenden Wellenenergie hier umgewandelt wird (NIEMEYER, 1986), schützen sie die dahinter liegenden Strände und Wattenmeeresgebiete (FITZGERALD, 1988). Anhand von Natur- und Modelluntersuchungen im Bereich des Norderneyer Seegats konnten NIEMEYER u. KAYSER (1997) nachweisen, dass, in Folge einer Abschwächung der Plattenstruktur im östlichen Riffbogen, der nordwestliche Vorstrand- und Strandbereich der Insel Norderney durch energiereicheren Seegang beaufschlagt wurde.

Auch aus diesen Gründen werden Seegats mit ihren vorgelagerten Ebb-Deltas bereits seit längerem intensiv erforscht (u. a. O'BRIEN, 1931; WALTON u. ADAMS, 1976; BRUUN, 1978; DEAN, 1988; FITZGERALD, 1988; OERTEL, 1988; SHA, 1990; OOST, 1995; NIEMEYER *et al.*, 1998). Diese Untersuchungen haben u. a. gezeigt, dass die Morphodynamik von Seegats maßgeblich durch Tidenströmungen geprägt wird, während der Seegang für die Ebb-Deltas einen zusätzlichen wichtigen Steuerungsfaktor darstellt (DEAN, 1988; OOST, 1995).

Unter der Annahme, dass sich die untersuchten Systeme in einem stabilen Zustand bzw. dynamischen Gleichgewicht befanden, wurden empirische Relationen zwischen hydro- und morphologischen Zustandsvariablen ermittelt. O'BRIEN (1931) fand eine positive Abhängigkeit der Querschnittsfläche eines Seegats (A_c) von tidalen Parametern, wie das Tideprisma P . Diese Abhängigkeit liegt darin begründet, dass Tidenströmungen Rinnen proportional zum jeweiligen Tideprisma einschneiden (OERTEL, 1988). Eine Zunahme von P wird, in Folge verstärkter Tidenströmungen bzw. Schubspannungen an der Sohle, zu Erosionen in den Tideninnen bzw. einer Zunahme von A_c führen. Umgekehrt wird eine Reduktion von P durch Sedimentationen in den Rinnen eine Abnahme von A_c verursachen. Weiterhin haben WALTON u.

ADAMS (1976) eine empirische Relation zwischen dem Sedimentvolumen eines Ebb-Deltas (V_{ebd}) und P vorgeschlagen, wobei V_{ebd} mit zunehmender Seegangsintensität abnimmt (DEAN, 1988). Diese Relation wurde mit folgendem Prozess-Reaktionsmechanismus erklärt: Am seeseitigen Ende der Tiderinnen eines Seegats nehmen die Ebbe-Strömungsgeschwindigkeiten infolge der plötzlichen Vergrößerung des Durchflußquerschnittes schnell ab. Das von den Ebbeströmungen transportierte Material wird sich hier absetzen und zum Aufbau eines Ebb-Deltas beitragen (OERTEL, 1988). Erosion in den Tiderinnen durch verstärkte Ebbeströmungen (z. B. als Folge einer Zunahme vom mittleren Tidehub $MThb$ oder P) resultiert in einem größeren Sedimenttransport zum Deltasockel, wo es sich bei abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten wieder absetzen und damit eine Zunahme von V_{ebd} bewirken kann. Nach DEAN (1988) und OOST (1995) wird bei einer Abnahme der Ebbe-Strömungsgeschwindigkeiten die relative Bedeutung des Seeganges zunehmen. Die Folge wäre ein netto Sandabtrag vom Ebb-Delta und damit eine Abnahme von V_{ebd} .

BIEGEL u. HOEKSTRA (1995) und OOST (1995) untersuchten in einer Fallstudie die morphologischen Reaktionen eines Seegat/Ebb-Delta-Systems nach einer plötzlichen Reduktion von P . Im Jahre 1969 wurde die Lauwerszee im niederländischen Wattenmeer abgedämmt, wodurch das Tideprisma des Zoutkamperlaag Seegats von 305 Mio. auf 200 Mio. m^3 abnahm. In Übereinstimmung mit den obigen Relationen führte diese Reduktion nach einer bestimmten Anpassungszeit zu Abnahmen von A_c und V_{ebd} . Der Nettoabtrag im Ebb-Delta konzentrierte sich dabei zwischen NAP -4 und NAP -12 m (NAP = Nieuw Amsterdams Peil \approx NN), d. h. im Bereich des Deltasockels.

Im nordfriesischen Wattenmeer wird die hydro- und morphologische Entwicklung des Hörnum Tiefs seit 1939 intensiv überwacht. Resultate von Kartenauswertungen deuten darauf hin, dass die Riffplatten des Ebb-Deltas signifikant an Fläche und Volumen verlieren. Wie bereits von FITZGERALD (1988) angedeutet, kann dies zu einer Zunahme der Seegangsbelastung und damit zu Erosionen an den dahinter liegenden Inselstränden von Amrum führen. Vorläufige Resultate von Kartenauswertungen scheinen diese Befürchtung für den nordwestlichen Strandbereich auf Amrum zu bestätigen. Um genauere Kenntnisse über die Entwicklung, Dynamik und Stabilität des Seegats und Ebb-Deltas des Hörnum Tiefs zu erhalten, wurde eine Fallstudie durchgeführt. Die spezifischen Ziele dieser Studie waren (1) die Ermittlung der hydrologischen Entwicklung über den Zeitraum 1939 bis 1994, (2) das Quantifizieren der morphologischen Entwicklung für den gleichen Zeitraum, und (3) die Deutung der beobachteten hydro- und morphologischen Entwicklungen im Kontext der oben beschriebenen Relationen.

1.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Seegat Hörnum Tief mit seinem vorgelagerten Ebb-Delta liegt am seeseitigen Rand des nordfriesischen Wattenmeeres zwischen den Barriereinseln Sylt und Amrum (Abb. 1). Zur Nordsee hin wird dieses etwa 111 km^2 große Gebiet durch die NN -10 m Linie begrenzt. Bis zu dieser Tiefenlinie lässt sich die Struktur des Ebb-Deltas nachweisen. Nach Osten wird die Grenze durch die Inseln Sylt und Amrum sowie durch die kürzeste Verbindung zwischen diesen beiden Inseln, die sog. Seegat-Kehle („inlet throat“, OERTEL, 1988), dargestellt. Da die morphologische Struktur des Ebb-Deltas nach Norden und Süden fließend in den Sylter Vorstrand bzw. in das Ebb-Delta des südlich anschließenden Seegats der Aue übergeht, konnten hier keine morphologisch eindeutig begründeten Grenzen gezogen werden. Deshalb wurden hier die Grenzen entlang von Gauß-Krüger-Gitterpunkten gelegt.

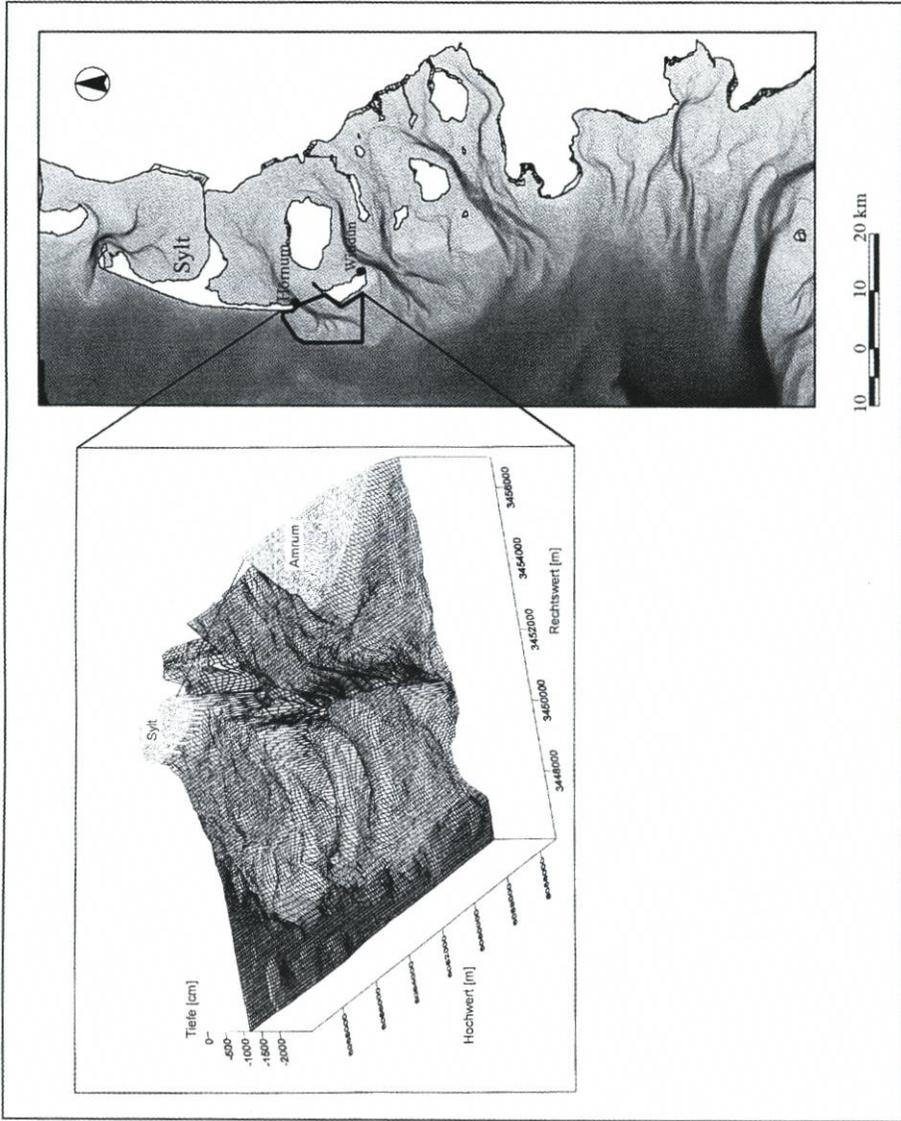


Abb. 1: Übersichtskarte vom Untersuchungsgebiet an der Westküste von Schleswig-Holstein mit Angabe der benutzten Pegelstationen sowie 3-D-Darstellung vom Seegat und Ebb-Delta des Hörnum Tiefs (Zustand 1974)

Das Untersuchungsgebiet setzt sich aus den Systemelementen Seegat und Ebb-Delta zusammen, die sich morphologisch in folgende Subelemente bzw. Strukturen untergliedern lassen: Haupt-Ebberinne, Neben-Ebberinnen, laterale Flutrinne, Deltasockel und Riffbogen (Abb. 2). Der Riffbogen setzt sich aus mehreren durch die Neben-Ebberinnen voneinander getrennten Riffplatten zusammen. Die Riffplatten und der Deltasockel bilden den Akkumulationskörper des Ebb-Deltas, in den sich die Tiderinnen des Seegats einschneiden. Im Jahre 1994 betrug die Fläche der Tiderinnen (unterhalb von NN -10 m) 13,4 km², die des Akkumulationskörpers 97,7 km².

Durch das Seegat wird das landwärtige etwa 291 km² große Watteinzugsgebiet etwa zweimal täglich be- und entwässert. Auf der Basis zweier digitaler Geländemodelle (DGM) vom Einzugsgebiet konnte das Tideprisma P für das Jahr 1952 mit 509,9 Mio. m³ und für das Jahr 1974 mit 527,5 Mio. m³ errechnet werden (WITEZ, BOCK u. HOFSTEDE, 1998). Dies entspricht einem mittleren Abfluss im Seegat von etwa 21 000 m³/s. Zum Vergleich: der mittlere Abfluss der Donau mit einem Einzugsgebiet von fast 900 000 km² beträgt an seiner Mündung rd. 9000 m³/s (PANNEKOEK, 1976). Im Jahre 1994 lag der Durchflussquerschnitt in der Seegat-Kehle um 44 300 m² (Breite rd. 5300 m, tiefster Punkt rd. NN -31 m).

Wie aus Abb. 2 hervorgeht, biegt die Haupt-Ebberinne westlich der Seegat-Kehle scharf nach Süden ab und nimmt einen fast nord-südlichen Verlauf. Diese Ablenkung wird von der seegangsbedingten Küstenparallelströmung und der Ebbeströmung, die in diesem Bereich beide nach Süden orientiert sind, verursacht. Dadurch wird die gesamte Struktur des Untersuchungsgebietes in eine südwärtige Asymmetrie gezwungen (SHA, 1989). Von der Haupt-Ebberinne ausgehend schnitten sich im Jahre 1994 insgesamt drei Neben-Ebberinnen westwärts in den Deltasockel ein. Durch diese Neben-Ebberinnen voneinander getrennt existierten in diesem Jahr dem Deltasockel aufgelagert vier größere Riffplatten, wovon nur die südliche bis über NN auftauchte. Schließlich verläuft unmittelbar westlich von Amrum eine laterale Flutrinne, die durch eine Untiefe von der Haupt-Ebberinne getrennt ist.

Nach der morphologischen Klassifikation von NUMMEDAL u. FISCHER (1978) ist das Hörnum Tief ein „mixed energy, high tidal range“ Seegat. Der über den Zeitraum 1986–1995 gemittelte Tidenhub am Pegel Hörnum betrug 2,02 m, während die mittlere Wellenhöhe in der Nordsee vor Sylt im Zeitraum 1986 bis 1993 zwischen 1,0 und 1,25 m lag (HINRICHSSEN u. BEISMANN, 1998). Schließlich ist die vorherrschende Wind- und Wellenrichtung im Untersuchungsgebiet Süd- bis Nordwest.

2. Daten und Methoden

Die benutzten Karten im Maßstab 1:20 000 bzw. 1:25 000 der Jahrgänge 1939, 1949, 1959, 1968, 1978, 1987 und 1994 basieren überwiegend auf bathymetrischen Vermessungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. Die Höhengenaugkeit dieser Vermessungen wird mit etwa ± 0,4 m angegeben, während die Lagegenauigkeit ca. ± 5 m beträgt. Die Analysen der hydrologischen Entwicklung wurden anhand von Wasserstandszeitreihen der Tidepegel Hörnum und Wittdün durchgeführt. Pegel Hörnum liegt unmittelbar nördlich des Untersuchungsgebietes am Hafeneingang von Hörnum auf der Insel Sylt, während Pegel Wittdün in der Einfahrt zum Hafen von Wittdün auf der Insel Amrum etwa 10 km südöstlich des Untersuchungsgebietes situiert ist.

Die Aufbereitung der morphologischen Daten erfolgte mit einem GIS (SPITTA, 1998). Für jede Karte wurden die folgenden Isolinien digitalisiert: NN +1, 0, -1, -2, -3, -4, -5, -7, -10, -15, -20, -25, -30 und (falls vorhanden) -35 m. Unter Annahme eines linearen Anstie-

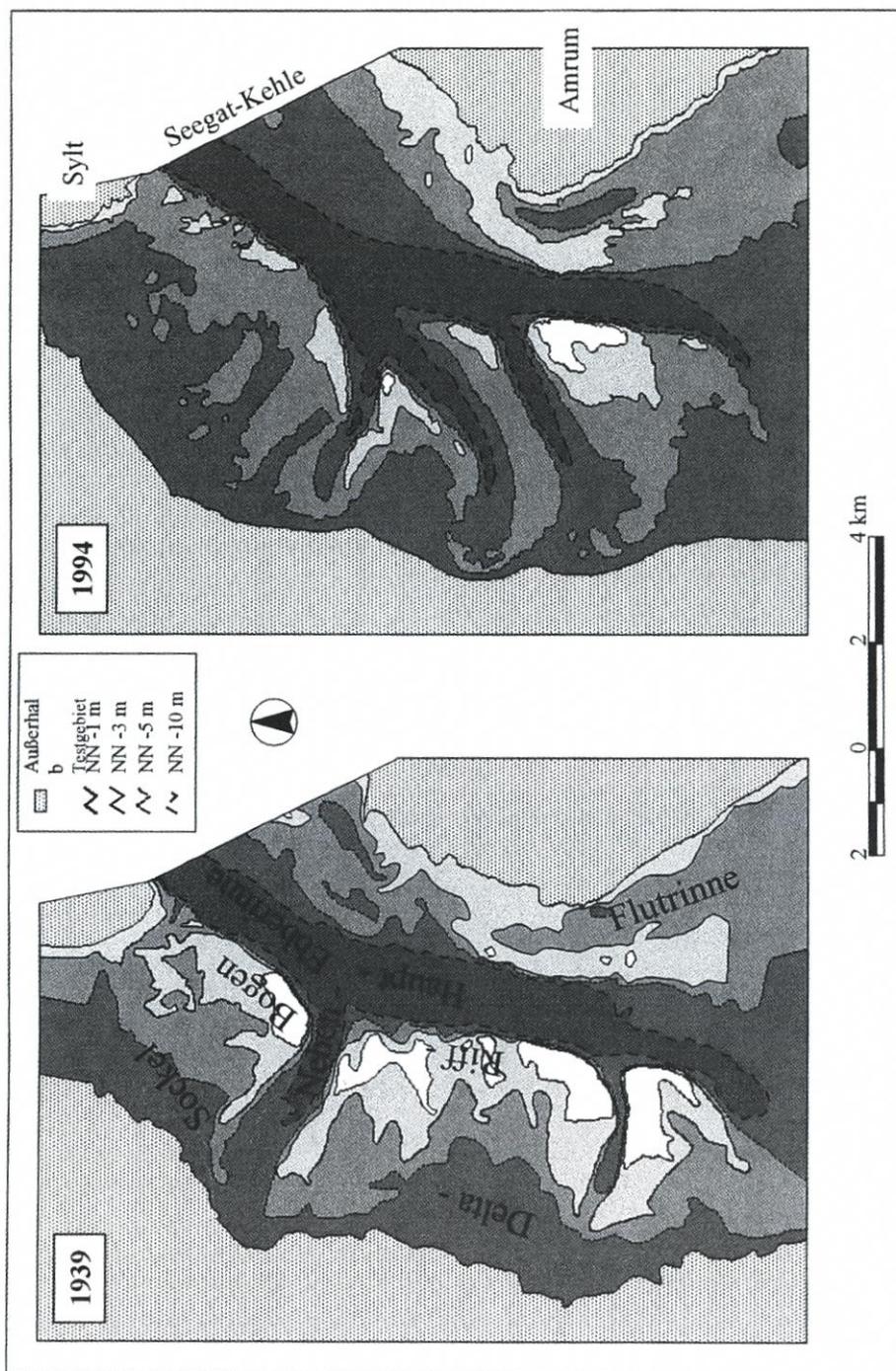


Abb. 2: Vergleichende Darstellung des Untersuchungsgebietes für die Jahre 1939 und 1994

ges der Geländeoberfläche zwischen jedem Paar Isolinien wurden die Flächen zwischen den Isolinien mit einem mittleren Höhen- bzw. Tiefenwert belegt (NN +0,5, -0,5, usw.), und es wurde ein Höhenschichtenmodell erstellt. Anschließend wurde auf der Basis dieser Modelle für jede Kartenaufnahme eine Flächen/Höhenverteilung (hypsographische Kurve) erstellt. Neben diesen realen hypsographischen Kurven wurde eine fiktive Kurve erstellt, die die Situation im Untersuchungsgebiet ohne Seegat und Ebb-Delta darstellt. Hierzu wurden die Tiefenlinien der Vorstrände von Sylt und Amrum direkt miteinander verbunden.

Mit diesem digitalen Datensatz wurden für jede Karte drei morphologische Parameter berechnet: (1) Fläche zwischen jedem Isolinienpaar, (2) Sedimentvolumen des Ebb-Deltas (V_{ebd}) und (3) Querschnittsfläche der Seegat-Kehle unterhalb von NN (A_c). Da die Karte des Jahres 1949 nicht das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckt, konnte für diesen Jahrgang nur A_c berechnet werden. Zur Berechnung von V_{ebd} (m^3) wurde das von DEAN u. WALTON (1975) beschriebene Verfahren benutzt. Demnach wird die Differenz zwischen der tatsächlich vorhandenen Geometrie seewärts der Seegat-Kehle und einer fiktiven Geometrie für den gleichen Bereich ohne Seegat (s. o.) berechnet. Statistische Analysen über die Wahl des Bezugshorizontes (MTnw, NN oder MThw) für die Berechnung von A_c haben ergeben, dass NN für morphologische Gleichgewichtsbetrachtungen am besten geeignet ist (GOLDENBOGEN *et al.*, 1994). Da dieser Bezugshorizont in der Fachliteratur am häufigsten benutzt wird, ist somit auch die Vergleichbarkeit gewährleistet.

2.1 Hydrologische Entwicklung

In Abb. 3 ist die zeitliche Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw), mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) und mittleren Tidehubes (MThb) am Pegel Hörnum für den Zeitraum 1936 bis 1997 dargestellt. Eine lineare Regression durch die MThw-Werte für die Periode 1939 bis 1994 erbrachte einen Anstieg von 0,38 cm/J ($r = 0,74$) bzw. von insgesamt 21 cm. Die MTnw-Entwicklung über den gleichen Zeitraum zeigt dagegen keinen signifikanten Trend. Das mittlere Tidehalbwasser MT1/2w (hier nicht graphisch dargestellt) stieg von 1939 bis 1994 um durchschnittlich 0,15 cm/J bzw. insgesamt um 8 cm an. Der geringe Korrelationskoeffizient von $r = 0,39$ deutet allerdings auf eine schwache statistische Relevanz bzw. eine große Streuung der Einzelwerte hin. Der MThb schließlich stieg zwischen 1939 und 1994 im Schnitt jährlich um 0,45 cm ($r = 0,92$) bzw. insgesamt um 25 cm (oder 14 %) an.

In der Einführung wurde bereits auf die Bedeutung der Tideströmungen für die Morphodynamik von Seegats und Ebb-Deltas hingewiesen. Da Langzeitmessungen von Tideströmungen meist fehlen, werden an deren Stelle oft die hydrographischen Parameter P und/oder MThb benutzt. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind aber nicht nur von P und/oder MThb, sondern auch von dem Zeitraum, über den das Tidevolumen durch das Seegat fließt (die Ebbe- bzw. Flutdauer), abhängig. Die Abb. 4A zeigt die zeitliche Entwicklung der mittleren Ebbedauer von 1937 bis 1996. Deutlich wird, dass die Ebbedauer über diesen Zeitraum kontinuierlich abgenommen hat. Der hydrographische Parameter „mittlere Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels“ (V_f) kombiniert die beiden Kennwerte „mittlere Ebbedauer“ und MThb. Er entspricht der Geschwindigkeit, mit der das Tidewasser aus dem Wateinzugsgebiet hinaus fließt und ist somit ein direkter Indikator für die mittleren Ebbe-Strömungsgeschwindigkeiten im Seegat. Die Abb. 4B stellt die Langzeitentwicklung dieses Parameters am Pegel Hörnum dar. Für die Periode 1939 bis 1994 ergibt eine lineare Regression durch die jährlichen V_f -Werte einen signifikanten Anstieg von insgesamt 0,09 cm/min. bzw. 19 % ($r = 0,95$). Die Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels während Flut (V_s , hier

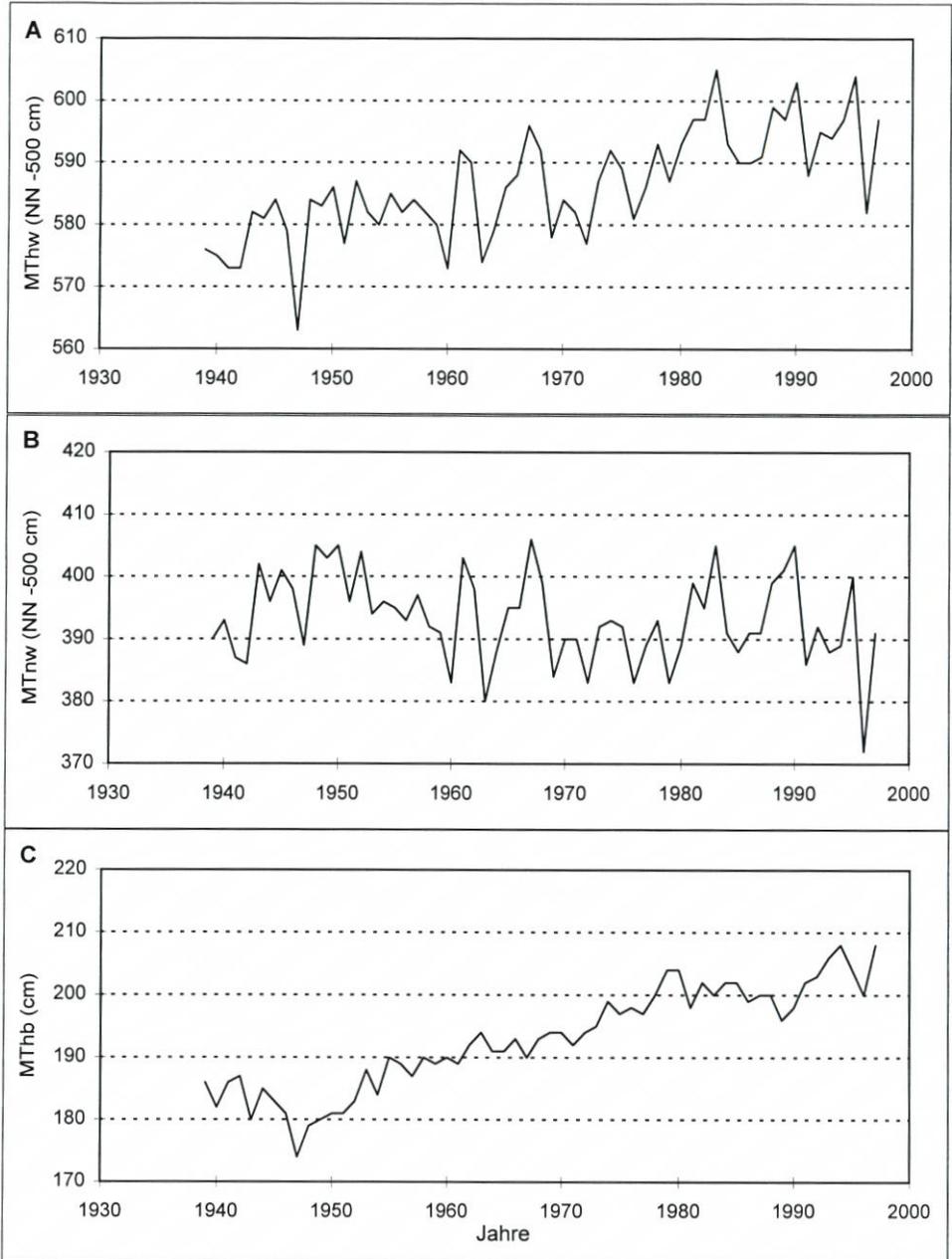


Abb. 3: Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw: Abb. 3A), des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw: Abb. 3B) und des mittleren Tidehubes (MThb: Abb. 3C) am Pegel Hörnum für den Zeitraum 1937 bis 1996

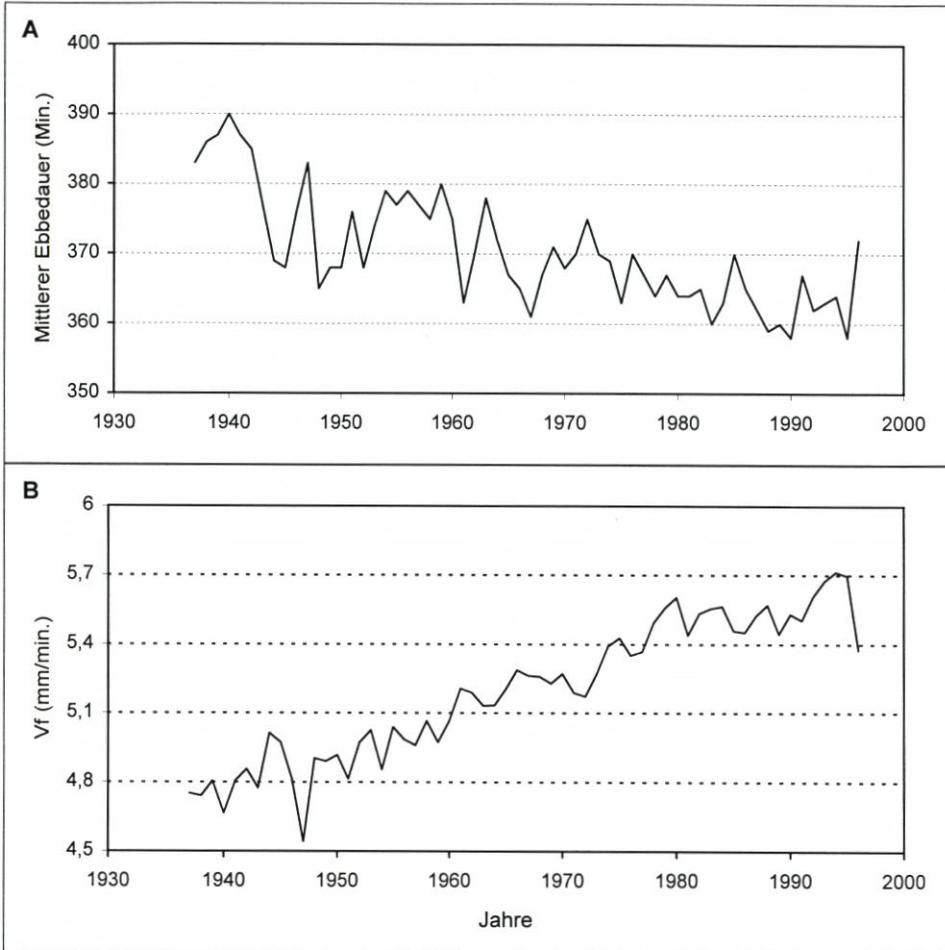


Abb. 4: Entwicklung der mittleren Ebbedauer (Abb. 4A) und der mittleren Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels während Ebbe (Vf: Abb. 4B) am Pegel Hörnum für den Zeitraum 1937 bis 1996

nicht graphisch dargestellt) am Pegel Hörnum hat sich über den gleichen Zeitraum leicht um 0,04 cm/min. bzw. 8 % ($r = 0,68$) erhöht. Obwohl die Flutdauer entsprechend der Reduktion der Ebbedauer zugenommen hat, wurde die hierdurch erzeugte Abnahme der V_s -Werte durch die gleichzeitige MThb-Erhöhung (Abb. 3C) mehr als ausgeglichen.

Nach SIEFERT (1984) haben die Höhe und Häufigkeit von Sturmfluten entlang der südlichen Nordseeküste seit etwa 1960 signifikant zugenommen. Am Pegel List auf Sylt wurden beispielsweise 17 der 20 höchsten Wasserstände zwischen 1900 und 1998 erst nach 1960 registriert (HINRICHSSEN u. BEISMANN, 1998). In der Abb. 5A werden die Verweilzeiten von Wasserständen oberhalb von MThw + 1,5 m für den Zeitraum 1920/21 bis 1993/94 am Pegel Wittdün pro Jahr (vom 1.7. bis zum 30.6 des darauf folgenden Jahres) gezeigt. Dieser Parameter ist ein Indikator für lokale Änderungen im Windstau, der wiederum kausal mit Fluktuationen in der Sturmtätigkeit zusammenhängt. Indirekt werden somit auch Änderungen im Sturmseeang aufgezeigt. Es wird klar, dass die Werte von Jahr zu Jahr sehr starken

Schwankungen unterliegen. In der Wintersaison 1989/90 wurde der Wasserstand MThw +1,5 m insgesamt 23 Stunden und 12 Minuten überschritten, während er im Winter 1991/92 erst gar nicht erreicht wurde. Mittelfristige Tendenzen in den Verweilzeiten werden in Abb. 5B mittels einer Darstellung der 10-jährigen übergreifenden Mittelwerte sowie der 10-jährigen Mittelwerte deutlich. Hohe Werte in den Vierzigern wurden von einem Tiefstand in den Fünfzigern abgelöst. Anschließend fingen die Werte an zu steigen, und das bisherige Maximum wurde zu Beginn der neunziger Jahre erreicht. Analysen von HINRICHSSEN u. BEISMANN (1998) am Pegel List zeigen, dass diese für den Grenzwasserstand MThw +1,5 m beobachtete Entwicklung im Prinzip auch für andere Grenzwasserstände zutrifft.

Resümierend deuten die hydrographischen Beobachtungen auf eine Zunahme der energetischen Einwirkungen aus Tidenströmungen und Sturmseeang im Untersuchungsgebiet hin, wobei die über das Jahr gemittelten Werte sehr große Streubreiten aufweisen. Die Tidehalbwasserstände (und damit die über der Tide gemittelten Wassertiefen bei konstanter Topographie) nahmen dagegen bei großer Streuung der einzelnen Jahreswerte nur geringfügig zu.

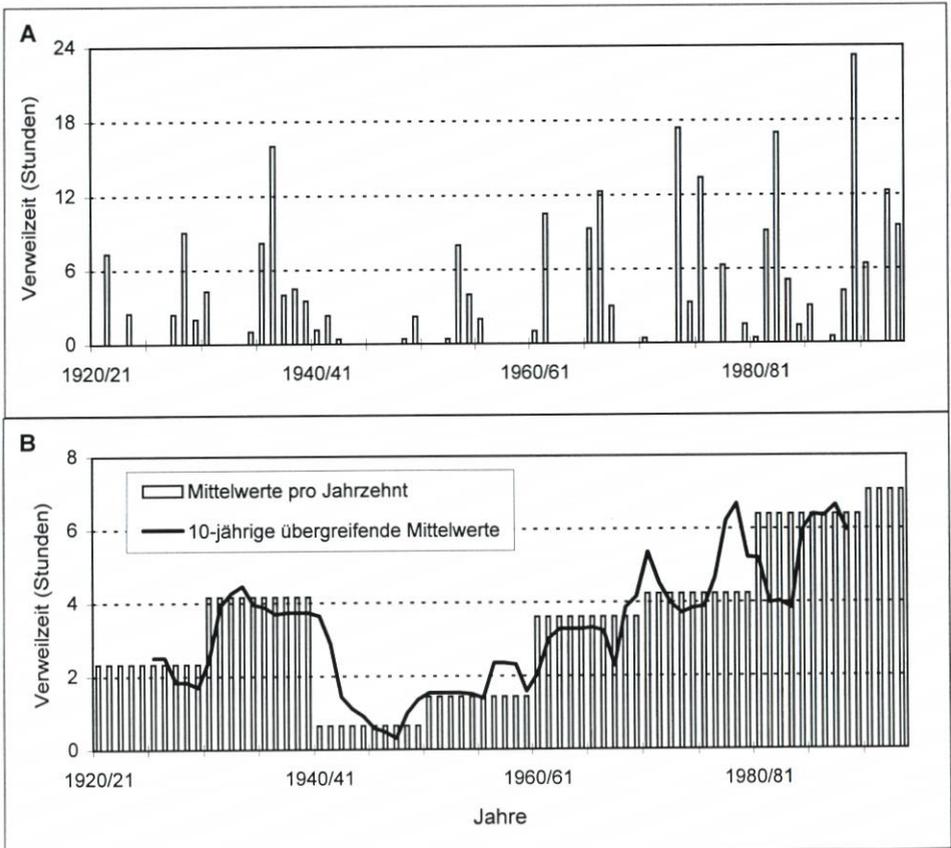


Abb. 5: Entwicklung der Verweilzeiten (vom 1. Juli des Vorjahres bis zum 30. Juni des nachfolgenden Jahres) oberhalb von MThw +1,5 m am Pegel Wittdün für den Zeitraum 1920/21 bis 1993/94: (5A) jährliche Verweilzeiten; (5B) 10-Jahresmittelwerte sowie 10-jährige übergreifende Mittelwerte

2.2 Morphologische Änderungen

Der Verlauf der Haupt-Ebberinne und der lateralen Flutrinne sowie die Lage der NN -10 m Isolinie änderten sich von 1939 bis 1994 nur unwesentlich. Die Neben-Ebberinnen unterlagen dagegen größeren Änderungen. Im Jahre 1939 existierten zwei solcher Rinnen. Bis 1949 versandete eine davon, während sich gleichzeitig zwei neue in den Deltasockel einschneiden. Insgesamt verlagerten sich die Neben-Ebberinnen über den gesamten Vergleichszeitraum leicht nach Süden (SPITTA, 1998). Parallel dazu drifteten auch die dazwischen liegenden Riffplatten bzw. deren Strukturen generell nach Süden. Nach FITZGERALD (1988) repräsentiert das Untersuchungsgebiet somit ein stabiles Seegat, wo der nach Süden gerichtete küstenparallele Sedimenttransport („littoral drift“) durch die Bildung, süd- bzw. landwärtige Migration und Anlandung von größeren Sandbankkomplexen am südlichen Strand (Amrum) stattfindet. Eine ähnliche Verlagerungstendenz der Strukturen im weiter südlich liegenden Seegat der Hever wurde von EHLERS (1988) dokumentiert. HOFSTEDE (1997, 1999) hat die landwärtige Migration und Anlandung einer solchen Sandbank aus der Hever an St. Peter-Ording-Sand detailliert nachvollzogen.

Tab. 1 enthält die errechneten Flächen pro Höhenschicht (zwischen zwei Isolinien). Danach nahm die Fläche zwischen NN +1 m und NN -3 m von etwa 31 km² im Jahre 1959 bis auf 13 km² im Jahre 1994 bzw. um 18 km² (58 %) besonders stark ab (Abb. 6). Dieser Höhenbereich wird von den auf dem Deltasockel superponierten Riffplatten eingenommen. Ein Kartenvergleich für die Jahre 1939 und 1994 (Abb. 2) zeigte, dass nur die südlichste Plate (der Jungnamensand) in etwa ihre Höhe und Ausdehnung behielt. Die mittlere Höhenlage der übrigen Riffplatten nahm um ca. 2 bis 3 m ab. Dagegen nahm die Fläche zwischen NN -5 m und NN -10 m (der Deltasockel) zwischen 1959 und 1994 um ca. 15 km² oder 47 % zu

Tab. 1: Fläche zwischen zwei Isolinien (pro Höhenintervall) für die Jahre 1939, 1949, 1959, 1968, 1978, 1987 und 1994.

Höhenschicht (NN + m)	Mittlere Höhe (NN + m)	Fläche (km ²)					
		1939	1959	1968	1978	1987	1994
+1 bis 0	+0,5	1,065	1,028	0,484	1,219	0	0,070
0 bis -1	-0,5	8,984	7,502	5,335	2,820	0,806	0,957
-1 bis -2	-1,5	8,734	8,866	7,260	5,033	4,922	3,265
-2 bis -3	-2,5	12,477	13,648	14,754	13,867	11,525	8,182
-3 bis -4	-3,5	14,885	18,781	15,540	17,886	14,330	15,507
-4 bis -5	-4,5	18,558	11,937	21,871	20,427	17,993	21,331
-5 bis -7	-6	17,051	19,175	19,746	26,082	31,866	31,151
-7 bis -10	-8,5	14,570	13,367	14,380	11,507	15,888	16,625
+1 bis -10	-5,5	96,324	94,351	99,570	98,841	97,330	97,716
-10 bis -15	-12,5	7,426	5,740	6,410	7,630	8,375	8,720
-15 bis -20	-17,5	5,793	6,301	4,555	4,229	4,290	4,340
-20 bis -25	-22,5	0,328	0,728	0,654	0,626	0,758	0,746
-25 bis -30	-27,5	0	0,053	0,072	0,030	0,050	0,162
-30 bis -35	-32,5	0	0	0,019	0,014	0,016	0,015
-35 bis -40	-37,5	0	0	0,009	0	0	0
Insgesamt		109,871	107,126	111,089	111,370	110,819	111,071

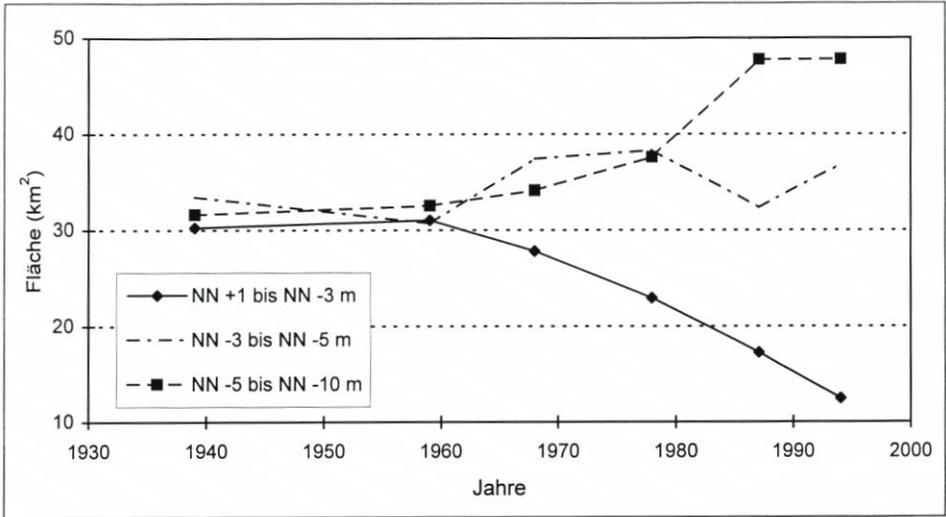


Abb. 6: Entwicklung der Flächen ausgewählter Höhenintervalle im Ebb-Delta des Hörnum Tiefs für den Zeitraum 1939 bis 1994

(Abb. 6). Offenbar funktionierte der Prozessmechanismus, der die starken Netto-Ausräumungen im Bereich der Platen verursachte, in dieser Tiefe nicht mehr. Folglich nahm die Fläche dieses Höhenintervalles entsprechend der Verluste in den höheren Bereichen zu. Diese Resultate stimmen nicht mit denen von OOST (1995) für das Ebb-Delta der Zoutkamperlaag überein. Hier konzentrierte sich der Netto-Abtrag im Höhenintervall NN -4 bis NN -12 m, d. h. im Bereich des Deltasockels.

Wie erwähnt, setzt sich der eigentliche Akkumulationskörper des Ebb-Deltas aus den Riffplatten und dem Deltasockel zusammen. Diese Struktur entspricht in etwa dem Höhenbereich oberhalb von NN -10 m. Die Gesamtfläche dieses Körpers blieb von 1939 bis 1994 mit $97 \pm 2 \text{ km}^2$ (Tab. 1) trotz starker morphologischer Änderungen in seinen Teilbereichen (Abb. 6) bemerkenswert stabil.

In der Tab. 2 sind für jede Kartenaufnahme die morphologischen Parameter A_c und V_{ebd} gemeinsam mit den entsprechenden Werten für V_f am Pegel Hörnum aufgelistet. Von 1939 bis 1968 unterlag der Wert von A_c keinem signifikanten Trend. Danach jedoch nahm er kontinuierlich zu, bis er im Jahre 1994 mit $44\,318 \text{ m}^2$ sein bisheriges Maximum erreichte (Abb. 7A). Diese Zunahme der Querschnittsfläche seit 1968 beschränkte sich nicht nur auf die Seegat-Kehle, sondern wurde von ähnlichen Ausräumungstendenzen im weiteren Verlauf der Tiderinnen begleitet. Zwischen den beiden Zustandsvariablen A_c und V_f wurde eine statistisch signifikante positive Korrelation von $r = 0,89$ errechnet, d. h. mit zunehmender Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels während Ebbe am Pegel Hörnum nahm die Querschnittsfläche in der Seegat-Kehle unter NN zu.

Wie aus der Tab. 2 zu entnehmen ist, erreichte V_{ebd} im Jahre 1968 ein Maximum mit etwa 487 Mio. m^3 (Abb. 7B). Anschließend nahm der Wert bis 1994 um ca. 90 Mio. m^3 (18%) ab. Zwischen V_{ebd} und V_f wurde eine schwache negative Korrelation von $r = -0,74$ errechnet. Demnach nimmt mit zunehmender Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels während Ebbe am Pegel Hörnum das Sedimentvolumen des Ebb-Deltas (berechnet mit dem Verfahren DEAN u. WALTON, 1975) ab. Diese Ergebnisse widersprechen den Resultaten anderer Studien (u. a. WALTON u. ADAMS, 1976; DEAN, 1988; OERTEL, 1988; EYSINK u. BIEGEL, 1992).

Tab. 2: Querschnittsfläche in der Seegat-Kehle unter NN (A_c), Sedimentvolumen im Ebb-Delta (V_{ebd}) und Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels während Ebbe am Pegel Hörnum für die Jahre 1939, 1949 (nur A_c und V_f), 1959, 1968, 1978, 1987 und 1994.

Jahre	A_c (m^2)	V_{ebd} (Mio. m^3)	V_f ($cm/min.$)
1939	33.671	483,233	0,48
1949	35.834	-	0,49
1959	32.827	466,392	0,50
1968	34.420	487,060	0,53
1978	38.981	474,719	0,54
1987	41.188	412,578	0,55
1994	44.318	397,078	0,57

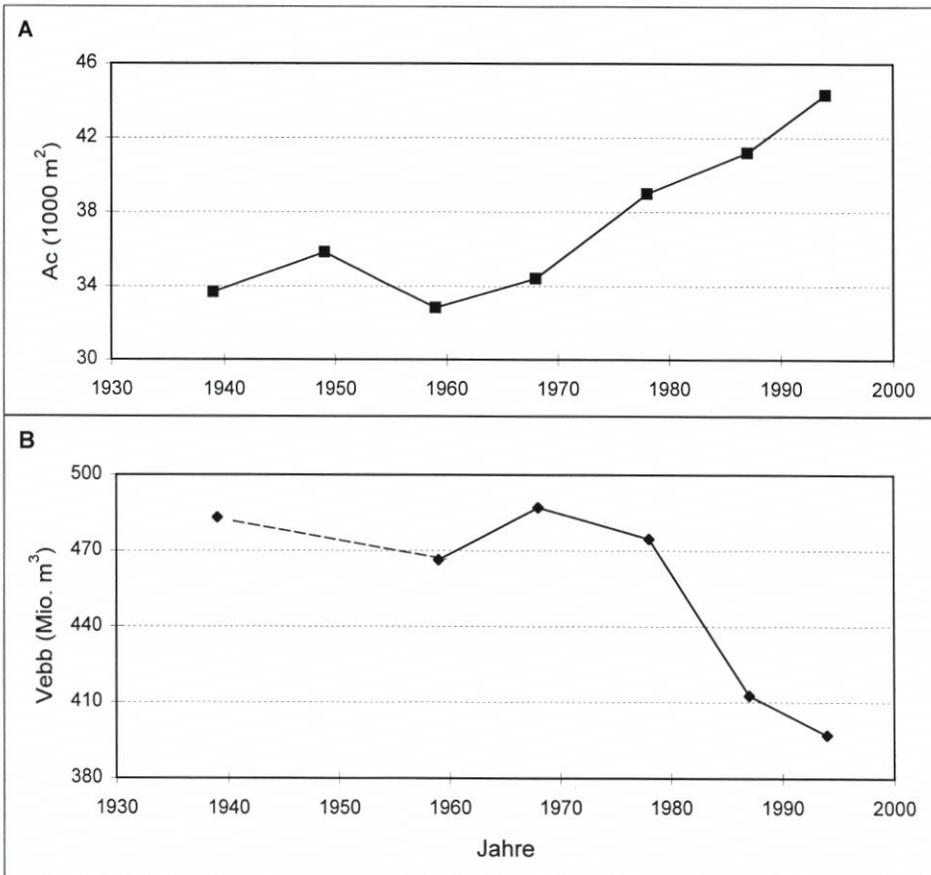


Abb. 7: Entwicklung der Querschnittsfläche in der Seegat-Kehle unter NN (A_c ; Abb. 7A) und des Sedimentvolumens im Ebb-Delta (V_{ebd} ; Abb. 7B) des Hörnum Tiefs für den Zeitraum 1939 bis 1994

3. Diskussion

Wie in der Einführung bereits beschrieben wurde, führen höhere Strömungsgeschwindigkeiten in den Tiderinnen eines Seegats durch vermehrte Schubspannung an der Sohle zu Erosionen, wodurch sich die Durchflussquerschnitte der Rinnen letztendlich vergrößern (OERTEL, 1988). Die Beobachtungen im Seegat des Hörnum Tiefs, dargestellt anhand der (zeitlichen Entwicklung der) Zustandsvariablen A_c und V_f , stehen in enger Übereinstimmung mit dieser Hypothese.

Weiterhin postuliert OERTEL (1988), dass eine Verstärkung der Ebbeströmungen im Seegat einen vermehrten Sedimenttransport zum Ebb-Delta induziert, wo es am Ende der Tiderinnen zur Ablagerung kommt. Eine Zunahme der Ebbe-Strömungsgeschwindigkeiten, z. B. als Folge eines vergrößerten Tideprismas, resultiert demnach in einem Anstieg des im Ebb-Delta gespeicherten Sedimentvolumens (WALTON u. ADAMS, 1976). Umgekehrt wird im Falle einer Reduktion der Ebbeströmungen der relative Einfluss des Seeganges zunehmen, was zu einem Netto-Abtrag des Ebb-Deltas führt (OOST, 1995). Die Resultate für das Ebb-Delta des Hörnum Tiefs können diese Hypothese scheinbar nicht bestätigen. Trotz ständig zunehmender V_f -Werte haben sich die Werte für V_{ebd} seit 1968 stark reduziert.

An dieser Stelle ist eine kritische Diskussion des von DEAN u. WALTON (1975) entwickelten Verfahrens für die Berechnung des im Ebb-Delta gespeicherten Sedimentvolumens angebracht. Danach wird die volumetrische Differenz zwischen einer realen Geometrie bzw. Zustand seewärts der Seegat-Kehle und einem hypothetischen Zustand (Null-Geometrie) ohne Seegat ermittelt. Das Material, das oberhalb dieser Null-Geometrie liegt (der Akkumulationskörper), fließt als positiver Wert in die Berechnung ein. Allerdings befindet sich ein signifikanter Teil der realen Geometrie seewärts der Seegat-Kehle unterhalb dieser Null-Geometrie, und zwar die tieferen Tiderinnen. Dieses (Wasser-)Volumen wird konsequenterweise bei der Berechnung von V_{ebd} vom Akkumulationskörper abgezogen. Wenn nun das Wasservolumen der Tiderinnen (in Folge von Erosionen durch zunehmende Ebbe-Strömungsgeschwindigkeiten) zunimmt, bewirkt dies automatisch eine Reduktion der V_{ebd} -Werte, ohne dass das im Systemelement Ebb-Delta gespeicherte Sedimentvolumen abnehmen muss. Die morphologischen Beobachtungen im Systemelement Seegat des Hörnum Tief Seegats zeigen tatsächlich starke Ausräumungen in den Tiderinnen.

Die starken Ausräumungen in den Tiderinnen des Hörnum Tiefs wurden begleitet von signifikanten Erosionen im Bereich der Riffplatten, während der Deltasockel über den gesamten Vergleichszeitraum relativ stabil blieb. Diese komplexe morphologische Reaktion hängt möglicherweise damit zusammen, dass im Untersuchungsgebiet sowohl die Ebbeströmungen wie auch der Sturmseegang seit etwa 1960 zugenommen haben. Die zunehmenden Ebbeströmungen haben Erosionen in den Tiderinnen und einen vermehrten Sedimenttransport in Richtung Deltasockel verursacht. Gleichzeitig resultierte die Intensivierung des Sturmseeganges in Erosionen im Bereich der Riffplatten und des Deltasockels. Möglicherweise konnten die tidebedingten Sedimentationen am Deltasockel die seegangsbedingten Erosionen hier ausgleichen, während die Rinnen tidebedingt und die Riffplatten seegangsbedingt einem Netto-Abtrag unterlagen. Dieser Prozess-Reaktions-Mechanismus würde auch die unterschiedlichen morphologischen Reaktionen im Bereich des Zoutkamperlaag Ebb-Deltas erklären (OOST, 1995). Als Folge des stark abgenommenen Tideprismas verschob sich hier das morphologische Gleichgewicht zwischen tidebedingten Sedimentationen und seegangsbedingten Erosionen am Deltasockel zugunsten Letzterer, wodurch hier jetzt Ausräumungstendenzen vorherrschen. Im Bereich der seegangsdominierten Riffplatten ändert sich dagegen wenig, während die Tiderinnen durch Akkumulation gekennzeichnet werden.

Zwei weitere Faktoren können möglicherweise kausal mit der beobachteten morphologischen Entwicklung im Untersuchungsgebiet in Beziehung gebracht werden: (1) die (zeitliche Entwicklung der) sog. Insel-Umströmung östlich von Föhr und (wesentlich geringer) Amrum sowie (2) das Tetrapodenwerk am Weststrand vor Hörnum.

In Folge unterschiedlicher Tidewasserstände in den Watteinzugsgebieten der Norderaue und des Hörnum Tiefs (das Einzugsgebiet der Norderaue füllt sich früher und schneller) existiert östlich von Föhr und Amrum ein Reststrom über die Wattwasserscheiden von Süd nach Nord in der Größenordnung von ca. 3 km pro Tide (SIEFERT *et al.*, 1980). In der Konsequenz fließt mit Ebbe wesentlich mehr Wasser durch das Hörnum Tief Seegat in die Nordsee hinaus als während Flut hinein gelangt. Falls sich die Intensität dieser Insel-Umströmung während des Beobachtungszeitraumes signifikant geändert hat, wird dies sicherlich auch morphologische Reaktionen im Untersuchungsgebiet verursacht haben. Dieser Frage konnte im Rahmen dieser Studie jedoch nicht nachgegangen werden.

Im Jahre 1968 wurde am Weststrand vor Hörnum ein Tetrapodenquer- und -längswerk errichtet, um weiteren Erosionen in diesem stark gefährdeten Strand- und Dünenbereich entgegen zu wirken. Durch dieses Bauwerk wurde der südwärts gerichtete Küstenparalleltransport nach Außen umgelenkt, was südlich des etwa 250 m langen Querwerkes zu einem Materialdefizit im Strandbereich und einem Zurückweichen der Küstenlinie führte (Lee-Effekt). Es ist nicht auszuschließen, dass sich dieses Materialdefizit auch auf das südlich anschließende Ebb-Delta ausgedehnt hat und hier eine gewisse Verstärkung der Erosionen im (nördlichen) Riffbogen induziert hat. In Anbetracht der sehr intensiven Materialumlagerungen und der Tatsache, dass das am relativ kurzen Tetrapodenquerwerk nach außen gedrängte Material weiter südlich wieder zur Küste verfrachtet wird, wird das Querwerk vermutlich einen eher untergeordneten Einfluss auf die Morphodynamik im Ebb-Delta haben.

4. Schlussfolgerungen

Zwischen 1939 und 1994 traten mehrere hydrologischen Änderungen im Untersuchungsgebiet auf. Am Pegel Hörnum stieg das MThw um ca. 0,38 cm/J an, während sich das MTnw-Niveau nicht signifikant änderte. Das MT1/2w nahm geringfügig um etwa 8 cm zu. Der MThb erhöhte sich um 0,45 cm/J bzw. insgesamt um 25 cm oder 14 %. Die Ebbedauer nahm über den Untersuchungszeitraum insgesamt um 19 Minuten bzw. 5 % ab, während die Flutdauer entsprechend zunahm. Durch die Abnahme der Ebbedauer und die Zunahme des MThb erhöhte sich V_f am Pegel Hörnum um insgesamt 19 %. Schließlich gibt es mehrere Indizien dafür, dass die Sturmtätigkeit (und damit auch der Sturmseeegang) in der Region seit Anfang der 60er Jahre stark zunimmt.

Diese Intensivierung der Hydrodynamik hat im Untersuchungsgebiet signifikante morphologische Reaktionen hervorgerufen. Wahrscheinlich als Folge der stärkeren Ebberströmungen vergrößerte sich A_c um etwa 10 650 m² bzw. 32 % über den gesamten Vergleichszeitraum. Die starke Zunahme der Sturmtätigkeit bzw. des Sturmseeanges seit Anfang der 60er Jahre bewirkte vermutlich signifikante Erosionen an den Riffplatten. Folglich verringerte sich deren Fläche von etwa 31 km² im Jahre 1959 um 18 km² bzw. 58 % auf nur noch 13 km² in 1994, wobei die mittlere Höhenlage von drei der vier größeren Platten um 2 bis 3 m abnahm. Als Konsequenz dieser Entwicklung wird die in der Einführung erwähnte Schutzfunktion der Riffplatten (FITZGERALD, 1988) als Wellenbrecher für den dahinter liegenden Nordstrand von Amrum in den letzten Jahrzehnten stark reduziert sein. Schließlich

nahmen auch die Werte von V_{ebd} durch Erosionen in den Tiderinnen und auf den Riffplatten von 1968 bis 1994 um etwa 90 Mio. m^3 (18 %) ab.

Letztendlich bestätigt diese Fallstudie die in der Einführung gemachte Aussage, wonach die Morphodynamik von Seegats maßgeblich durch Tideströmungen geprägt wird, während der (Sturm-)Seegang für die Ebb-Deltas einen zusätzlichen wichtigen Steuerungsfaktor darstellt (DEAN, 1988; OOST, 1995).

5. Danksagung

Dieses Manuskript ist ein Beitrag zum IGCP-Projekt 367, „Late quaternary coastal records of rapid change: application to present and future conditions“. Die Kartengrundlagen sowie die hydrologischen Daten vom Pegel Hörnum wurden vom Amt für ländliche Räume Husum freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

6. Schriftenverzeichnis

- BIEGEL, E. u. HOEKSTRA, P.: Morphological response characteristics of the Zoutkamperlaag, Frisian inlet (The Netherlands), to a sudden reduction in basin area. In: FLEMMING, B.W. AND BARTHOLOMÄ, A. (eds.), Tidal signatures in modern and ancient sediments. *Spec. Publ. of the Int. Ass. of Sedimentologists*, 24, 85–99, 1995.
- BRUUN, P.: Stability of tidal inlets, theory and engineering. *Developments in geotechnical engineering*, 23, 510 pp., 1978.
- DEAN, R. G.: Sediment interaction at modified coastal inlets: processes and policies. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, 29, 412–439, 1988.
- DEAN, R. G. u. WALTON, T. L.: Sediment transport processes in the vicinity of inlets with special reference to sand trapping. In: CRONIN, J.L., (ed.), *Estuarine Research*, 2, Geology and Engineering, Academic Press, New York, pp. 129–149, 1975.
- EHLERS, J.: *The Morphodynamics of the Wadden Sea*. Rotterdam: Balkema, 397 p., 1988.
- EYSINK, W. D. u. BIEGEL, E. J.: Impact of sea-level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function. Investigations on empirical morphological relations. Rijkswaterstaat, dienst getijdewateren, ISO*2 Projekt, Phase 2, 73 pp., 1992.
- FITZGERALD, D. M.: Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, 29, Ch. III, 187–225, 1988.
- GOLDENBOGEN, R.; SCHROEDER, E.; KUNZ, H. u. NIEMEYER, H. D.: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „WADE“ (Wadden Sea morphological Development). Niedersächsisches Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste, Zwischenbericht zum BMBF-Forschungsprojekt MTK 0508 (unveröff.), 1994.
- HINRICHSEN, A. u. BEISSMANN, P.: Fachplan Küstenschutz Sylt, Fortschreibung. Amt für ländliche Räume, Husum: 109 S. (unveröff.), 1998.
- HOFSTEDTE, J. L. A.: Morphologie des St. Peter-Ording-Sandes. *Die Küste*, H. 59, 143–172, 1997.
- HOFSTEDTE, J. L. A.: Regional differences in the morphologic behaviour of four German wadden sea barriers. *Journal of Quaternary International*, 56: 99–106, 1999.
- KUNZ, H.; NIEMEYER, H. D.; GOLDENBOGEN, R. u. SCHROEDER, E.: Forschungsvorhaben WADE. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste, Abschlußbericht zum BMBF-Forschungsprojekt MTK 0508: 78 S. (unveröff.), 1988.
- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderey. *Jahresbericht 1985 der Forschungsstelle Küste*, 37: 49–95, 1985.
- NIEMEYER, H. D. u. KAYSER, R.: Variationen im lokalen Seegangsklima infolge morphologischer Änderungen im Riffbogen. *Berichte der Forschungsstelle Küste*, 41: 107–117, 1997.
- NUMMEDAL, D. u. FISCHER, I. A.: Process-response models for depositional shorelines: the German and the Georgia Bights. *Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 1215–1231, 1978.

- O'BRIEN, M. P.: Estuary tidal prisms related to entrance areas. *Transactions of ASCE*, 1, 738–739, 1931.
- OERTEL, G. F.: Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, 29, Ch. IV, 297–318, 1988.
- OOST, A. P.: Dynamics and sedimentary development of the Dutch wadden sea with emphasis on the Frisian inlet. *Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen Universiteit Utrecht*, 126, 455 p., 1995.
- PANNEKOEK, A. J. (Hrsg.): *Algemene Geologie*. Tjeenk Willink bv, Groningen: 533 S., 1976.
- SHA, L. P.: Variations in ebb-delta morphologies along the West and East Frisian islands, the Netherlands and Germany. *Marine Geology*, 89, 11–28, 1989.
- SHA, L. P.: Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian islands, the Netherlands. *Geologica Ultraiectina*, 64, 160 pp., 1990.
- SIEFERT, W.: North Sea tide and storm surge investigation. *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 1749–1764, 1984.
- SIEFERT, W.; FAHSE, H.; MIESSNER, F.; RICHTER, H.-H.; TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. *Die Küste*, H. 35: 147–186, 1980.
- SPITTA, V.: Das Rätsel der Sandbank. Diplomarbeit am Geographischen Institut der CAU Kiel: 61 S. (unveröff.), 1998.
- WALTON, T. L. u. ADAMS, W. D.: Capacity of inlet outer bars to store sand. *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 1919–1937, 1976.
- WITEZ, P.; BOCK, S. u. HOFSTEDE, J. L. A.: Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg. Schlußbericht zum BMBF Forschungsvorhaben MTK 0569: 117 S. (unveröff.), 1998.