

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Hofstede, Jacobus**

## **Morphologie des St. Peter-Ording-Sandes**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101400>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hofstede, Jacobus (1997): Morphologie des St. Peter-Ording-Sandes. In: Die Küste 59.

Heide, Holstein: Boyens. S. 143-171.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Morphologie des St. Peter-Ording-Sandes

Von JACOBUS L. A. HOFSTEDE

## Zusammenfassung

Wegen der großen Bedeutung des St. Peter-Ording-Sandes für den Küstenschutz, den Naturschutz und die Wirtschaft der Region wurden dessen morphologische Entwicklung und Dynamik im Zeitraum 1949 bis 1994 untersucht. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Analysen wurden Überlegungen zur künftigen morphologischen Stabilität angestellt. Als Grundlage für die morphologische Analyse dienten Wattgrundkarten im Maßstab 1:10 000.

Die morphologische Entwicklung des gesamten Sandes ist während des Beobachtungszeitraumes in vier Phasen abgelaufen. Von 1949 bis 1964 nahmen die mittlere Höhenlage und das Sedimentvolumen des Sandes ab, während die Westflanke sich nach Osten verlagerte. Diese erste erosive Phase wurde von einer Sedimentationsphase, die bis 1981 andauerte, abgelöst. Die Westflanke verlagerte sich seewärts, die mittlere Höhenlage nahm zu und das Sedimentvolumen wuchs. In Phase drei, zwischen 1981 und 1988, verlief die Entwicklung wieder wie in der ersten Phase. Die Wattgrundkarte 1994 scheint schließlich darauf hinzudeuten, daß seit 1988 die Entwicklung wieder durch Sedimentation gekennzeichnet wird. Insgesamt erhöhte sich der Sand im Zeitraum 1949 bis 1994 um durchschnittlich 33 cm als Folge einer Sedimentzufuhr von 3,7 Mio m<sup>3</sup>. Der gleichzeitig beobachtete MThw-Anstieg von etwa 19 cm wurde demnach mehr als ausgeglichen. Die Ursache für die phasenweise Entwicklung, zumindest zwischen 1949 und 1988, liegt wahrscheinlich in der Materialanlandung aus einer ehemaligen subtidalen Barre aus dem Ebb-Delta der Süderhever zwischen 1958 und 1981. Die künftige Entwicklung und Stabilität des Sandes würde demnach maßgeblich von periodischen Materialanlandungen aus solchen subtidalen Barren abhängen.

## Summary

*The sandy barrier St. Peter-Ording-Sand is located in the Wadden Sea of Schleswig-Holstein, Germany. It has a high coastal defence, economical and ecological significance. Therefore, its morphologic behaviour between 1949 and 1994 was investigated by map comparisons (map scale 1:10,000). On the basis of the morphological analysis some statements about the possible future stability of the barrier were made.*

*The morphological development of St. Peter-Ording-Sand between 1949 and 1994 occurred in four phases. From 1949 until 1964 the mean elevation as well as the sediment volume of the barrier decreased, and the upper beach retreated in a landward direction. Between 1964 and 1981 the upper beach prograded seaward and the mean elevation as well as the sediment volume increased. During phase three, a negative development once again prevailed. Finally, the 1994 map suggests that this negative phase turned into a positive development after 1988. In all, from 1949 until 1994 the mean elevation of the barrier increased by about 33 cm as a consequence of a sediment input into the area of 3.7 million m<sup>3</sup>. Hence, the observed MHW-rise of about 19 cm was (more than) balanced by an increase in height. The cause for this development in distinct phases might be the periodic migration of sandbanks into the area from the Hever tidal inlet. Hence, it is suggested that future stability of the barrier primarily depends on the persistence of this periodic process.*

## Inhalt

1. Einführung .....	144
2. Das Untersuchungsgebiet .....	145
2.1 Geographischer Überblick .....	145
2.2 Hydrologie .....	147
2.3 Historische Entwicklung des St. Peter-Ording-Sandes .....	151

3. Datengrundlage und Methoden.....	154
4. Ergebnisse .....	156
4.1 Morphologische Entwicklung des Außensandes .....	164
4.2 Parkplatzproblematik .....	164
4.3 Dünenentwicklung .....	164
5. Synthese und Ausblick.....	168
6. Danksagung.....	170
7. Schriftenverzeichnis .....	170

## 1. Einführung

Unmittelbar der südlichen Westküste von Eiderstedt vorgelagert liegt der St. Peter-Ording-Sand mit einer hochwasserfreien Fläche von derzeit etwa 7 km<sup>2</sup>. Dieser Sand hat wichtige Funktionen für den Küstenschutz, den Naturschutz und die Wirtschaft der Region.

Für den Küstenschutz liegt seine Bedeutung in der Sicherung des niedriggelegenen Hinterlandes, vor allem der Gemeinde St. Peter-Ording mit ihren über 4000 ständigen Einwohnern, gegen Überflutungen. Zum Teil wird das überflutungsgefährdete Hinterland durch Landesschutzdeiche vor den Angriffen des Meeres geschützt. Bei der Berechnung der notwendigen Deichhöhe und des Deichprofils wurde der vorgelagerte hochwasserfreie Außensand berücksichtigt, d. h., die Deiche wurden niedriger bemessen als es ohne Außensand der Fall gewesen wäre. Zwischen den Ortsteilen Ording und St. Peter-Bad wird der Küstenschutz „nur“ durch einen Dünengürtel und den vorgelagerten Außensand gewährleistet. Folglich ist die Sicherung der langfristigen Stabilität des Außensandes als wesentlicher Bestandteil des örtlichen Hochwasserschutzsystemes ein wichtiges Anliegen der Küstenschutzverwaltung.

Für den Naturschutz liegt die Bedeutung des St. Peter-Ording-Sandes vor allem in den hier vorkommenden Sandsalzwiesen mit ihren standorttypischen Floren und Faunen. Entgegen dem überwiegenden Teil der Salzwiesen im schleswig-holsteinischen Wattenmeer sind diese Salzwiesen auf natürliche Weise im Schutz des Außensandes entstanden und weisen auch heute noch natürliche geomorphologische Strukturen (Abbruchkanten, Prielsysteme) auf. Auch die höhergelegenen vegetationsfreien Bereiche des Sandes haben insbesondere wegen der hier vorkommenden Sandlückenfauna (in den Hohlräumen des Sandes lebende Fauna) einen hohen ökologischen Wert. Aus diesen Gründen wurde der St. Peter-Ording-Sand in den Nationalpark „Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer“ aufgenommen.

Schließlich ist der Sand für die Gemeinde St. Peter-Ording und nähere Umgebung die wichtigste Grundlage des Tourismus und damit indirekt die primäre Einnahmequelle. So konnten in der Badesaison 1992 bis zu 16 000 Gäste gleichzeitig auf dem Sand gezählt werden (KLUG u. KLUG, 1995), während die jährliche Gesamtübernachtungszahl in St. Peter-Ording sich auf rund 2,5 Millionen belaufen dürfte (KLUG u. KLUG, 1994b). Da diese Touristen in erster Linie wegen des Vorhandenseins eines breiten Sandstrandes unmittelbar an der Nordsee nach St. Peter-Ording kommen, hat der Außensand eine überragende wirtschaftliche Bedeutung für die Region.

Diese Ausführungen machen deutlich, wie wichtig quantitative Angaben über die Geomorphologie bzw. morphologische Stabilität des St. Peter-Ording-Sandes sind. Besonders dringend wird diese Fragestellung unter dem Aspekt der möglichen Zunahme der hydrologischen Belastungen (beschleunigter Meeresspiegelanstieg und Sturm­tätigkeit) in Folge von (anthropogen bedingten) Klimaänderungen (HOFSTEDE, 1994). Wichtiger Schritt zur Beantwortung dieser Frage ist die quantitative Ermittlung der bisherigen morphologischen Ent-



wicklung und Dynamik. Aufbauend auf diese Kenntnisse können dann Aussagen über die künftige Stabilität des Sandes unter geänderten hydrologischen Rahmenbedingungen getroffen werden.

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse einer im Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein durchgeführten morphologischen Analyse des St. Peter-Ording-Sandes über den Zeitraum 1949 bis 1994 mittels Auswertungen von Wattgrundkarten im Maßstab 1:10 000 (Aufnahmejahre 1949, 1958, 1964, 1971, 1975, 1981, 1984, 1985, 1988 und 1994).

## 2. Das Untersuchungsgebiet

### 2.1 Geographischer Überblick

In Abb. 1 ist die Lage des St. Peter-Ording-Sandes an der schleswig-holsteinischen Westküste dargestellt. Er erstreckt sich in Nord-Süd-Richtung über eine Entfernung von bis zu 8 km, während die maximale West-Ost-Ausdehnung vor St. Peter etwa 2,5 km erreicht. Das untersuchte Gebiet hat eine Gesamtfläche von etwa 10 km<sup>2</sup>. Im Westen wird der Sand von der Nordsee bzw. vom Ebb-Delta der Süderhever, im Süden vom Böhler Prielsystem und im Norden durch die Tümmmlauer Bucht begrenzt. Nach Osten erfolgt die Begrenzung durch den Landesschutzdeich und Dünengürtel von St. Peter-Ording. Die erfaßte hochwasserfreie Fläche (ohne Salzwiesen, s. u.) betrug zwischen 1949 und 1994 im Schnitt etwa 550 ha mit über diesen Zeitraum steigender Tendenz.

Der St. Peter-Ording-Sand weist folgende geomorphologische Elemente auf (Abb. 2): Vorstrand, nasser und trockener Strand, Düne (seit 1981), Sandsalzwiese mit Prielsystem, Sandhaken (1964–1984) und Strandpriel (1964–1984). Der eigentliche Außensand ist der vegetationslose, über MThw liegende Teil des St. Peter-Ording-Sandes und umfaßt i. e. S. nur den trockenen Strand und den über MThw herausragenden Teil des Sandhakens.

Der Vorstrand (Shoreface) ist der subtidale Teil des Strandprofils zwischen der Wellenbasis (wave base), d. h. die Tiefenlinie, wo bei mittleren Verhältnissen eine seegangsinduzierte Sedimentbewegung anfängt, und der mittleren Tideniedrigwasserlinie (MTnw). Im Untersuchungsgebiet ist nur der obere Bereich ausgebildet. Der untere Vorstrand wird vom Ebb-Delta des Süderhever-Seegats eingenommen. In der landwärtig anschließenden Zone, dem intertidalen nassen Strand (Foreshore), sind ein bis drei Brandungsbänke zu erkennen. Über mittlerem Tidehochwasser (MThw) bzw. der Uferlinie schließt sich der supratidale trockene Strand (Backshore) an, der Breiten bis etwa 1500 m aufweisen kann. Er wird nur noch bei Sturmhochwasser überflutet. In den 60er und 70er Jahren entstand durch südwärtsgerichtete Strandversetzung ein westlich von Ording am trockenen Strand angebundener Sandhaken, der nach Süden durch eine tiefe Rinne, den sog. Strand- bzw. Badepriel, vom trockenen Strand getrennt war. Anfang der 80er Jahre versandete diese Rinne jedoch und der Sandhaken schloß sich dem trockenen Strand an. Seit Anfang der 80er Jahre entwickelt sich auf dem Sand vom Ortsteil Ording ausgehend in südlicher Richtung ein schmaler langgestreckter Dünenzug, der im Jahre 1994 bereits Höhen von bis zu NN +8,7 m und über dem Niveau NN +2,0 m eine Fläche von 68 ha aufwies (Kap. 4.3). Zwischen diesem Dünenzug und einem älteren Dünenzug bzw. der Deichlinie erstreckt sich schließlich eine Sandsalzwiese, die noch relativ natürliche Strukturen aufweist. Diese Salzwiesen werden über ein südwärts orientiertes Prielsystem (der Böhler Priel) be- und entwässert. Dieses Prielsystem stellt in seinem südlichen Bereich gleichzeitig die Grenze des untersuchten Gebietes bzw. die Abgrenzung zum südlich anschließenden Hochsichtsand dar.



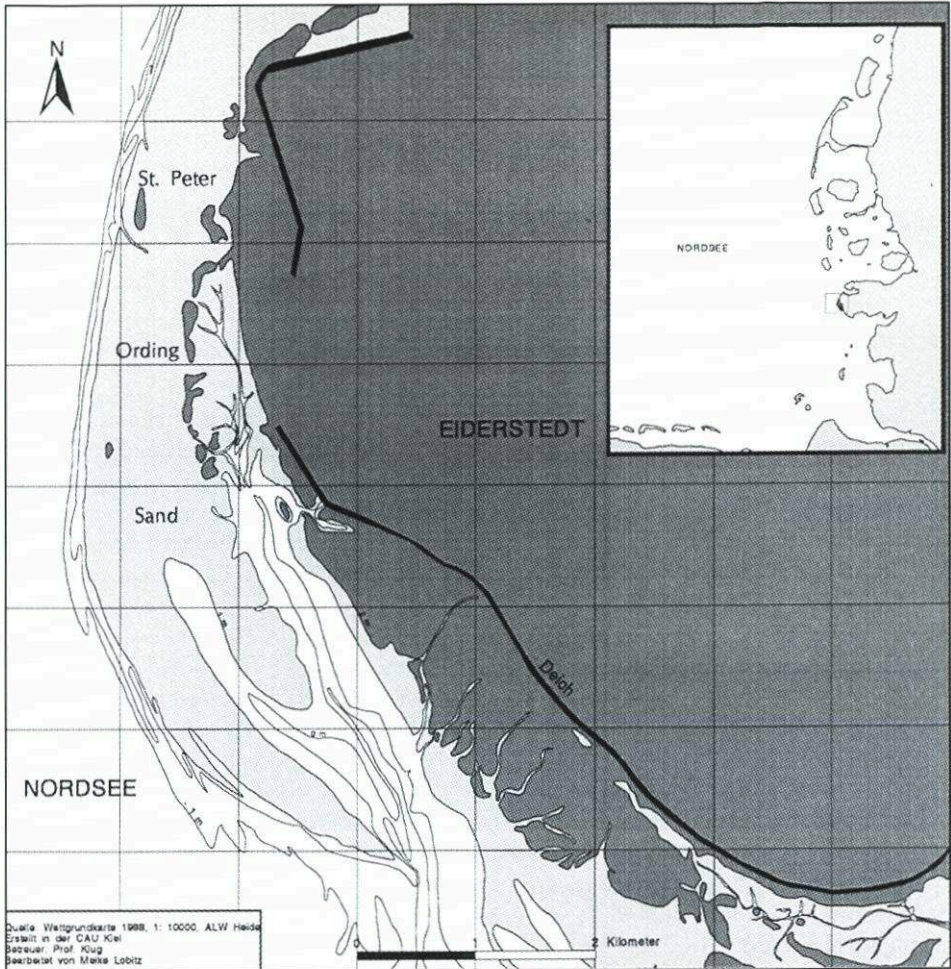


Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet in der Deutschen Bucht

In geomorphologischer Hinsicht ist der Außensand, wie zum Beispiel der Westerhever Sand (ebenfalls vor Eiderstedt), der Kniepsand (vor Amrum) und der Havsand (vor Römö), ein sog. küstenverbundener Außensand. Er ist nicht durch ein hinterliegendes Wattgebiet von der Festlandsküste (bzw. Barriere-Insel) getrennt, sondern dieser unmittelbar vorge- lagert (Abb. 1). Als Konsequenz dieser Lage ist er in seiner „Bewegungsfreiheit“ stark ein- geschränkt. Eine landwärtige Verlagerung (Rollover) als Reaktion auf einen rasch steigenden Meeresspiegel, wie dies z. B. bei den nordfriesischen Außensänden Süderoog-, Norderoog- und Japsand beobachtet wurde (TAUBERT, 1982; HOFSTEDE, 1993, 1997), würde langfristig zu einer Aufreibung gegen die Küste und damit im Endeffekt zum Verschwinden des Außensan- des führen. Diese negative Entwicklung läßt sich nur durch einen der Rückverlagerung ent- gegenwirkenden Materialimport verhindern. Die langfristige Lagestabilität der Uferlinie und damit des gesamten Außensandes bei einem ansteigenden Meeresspiegel hängt somit maß- geblich von der Sedimentverfügbarkeit ab.

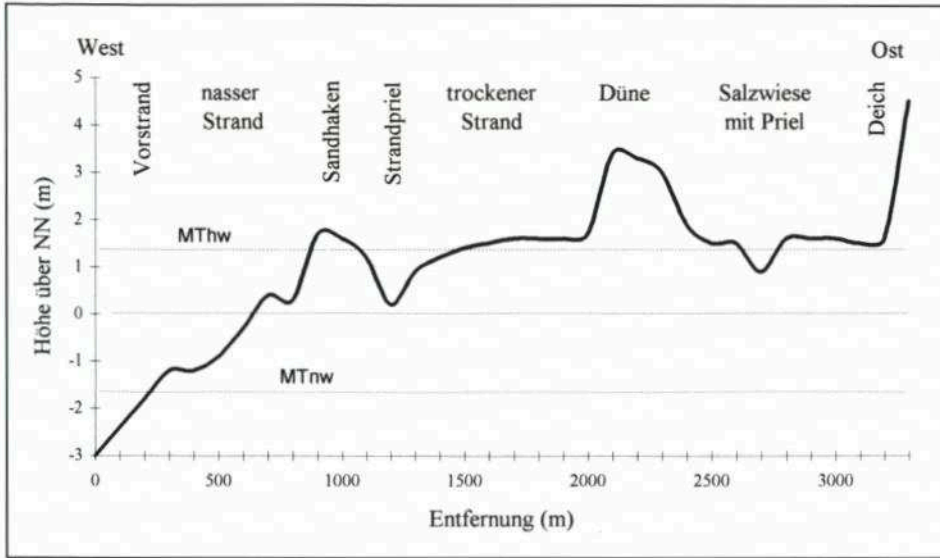


Abb. 2: Profil über den St. Peter-Ording-Sand (schematisch)

## 2.2 Hydrologie

Die aktuelle Morphodynamik des exponierten St. Peter-Ording-Sandes wird durch astronomisch bedingte (periodische) Tidebewegungen sowie durch meteorologisch bedingte (aperiodische) Trift-, Orbital- und Brandungsströmungen geprägt. Die geomorphologische Entwicklung wird von langfristigen Schwankungen des Meeresspiegels sowie von trendmäßigen Änderungen im Kräfteverhältnis zwischen den periodischen und aperiodischen Strömungskomponenten gesteuert. Auf den höheren Bereichen des Sandes können auch äolische Prozesse die morphologische Entwicklung und Dynamik wesentlich mitprägen (Sandflug und Dünenbildung).

Da in der unmittelbaren Nähe des St. Peter-Ording-Sandes kein Langzeitpegel installiert ist, ist in Abb. 3 die MThw-Entwicklung der drei nächstgelegenen Pegel Wittdün auf Amrum, Husum und Büsum seit 1949 dargestellt. Obwohl die einzelnen Jahreswerte starke Schwankungen aufweisen, kann ein deutlicher Trend erkannt werden. Mit den einzelnen Jahreswerten errechnete lineare Regressionen ergaben, daß sich das MThw-Niveau an diesen drei Pegeln zwischen 1949 und 1993 jährlich um 0,41 bis 0,44 cm bzw. insgesamt um 18,1 bis 19,4 cm erhöht hat. Nach BRUUN (1962, 1988) bewirkt dieser langfristige MThw-Anstieg eine Instabilität des Vorstrandes, die während Sturmereignissen zu Erosionen im Bereich des oberen Vorstrandes und nassen Strandes führt. In Analogie zur Entwicklung der nordfriesischen Außensände (HOFSTEDE, 1993, 1997) könnte ein Großteil dieses erodierten Materials zur Oberfläche und zu den Spitzen des St. Peter-Ording-Sandes transportiert und dort abgelagert werden. Ohne gleichzeitige Sedimentzufuhr von außen würde diese Entwicklung (landwärtige Verlagerung der Uferlinie) langfristig zur Aufreibung des Sandes führen (s. o.).

In Abb. 4 ist beispielhaft die Entwicklung des MThw, MTnw und des MThb (mittlerer Tidehub) seit 1949 am Pegel Wittdün auf Amrum dargestellt. Obwohl die jährlichen MTnw-Werte noch stärker schwanken als die MThw-Werte, zeichnet sich insgesamt eine leichte Ab-



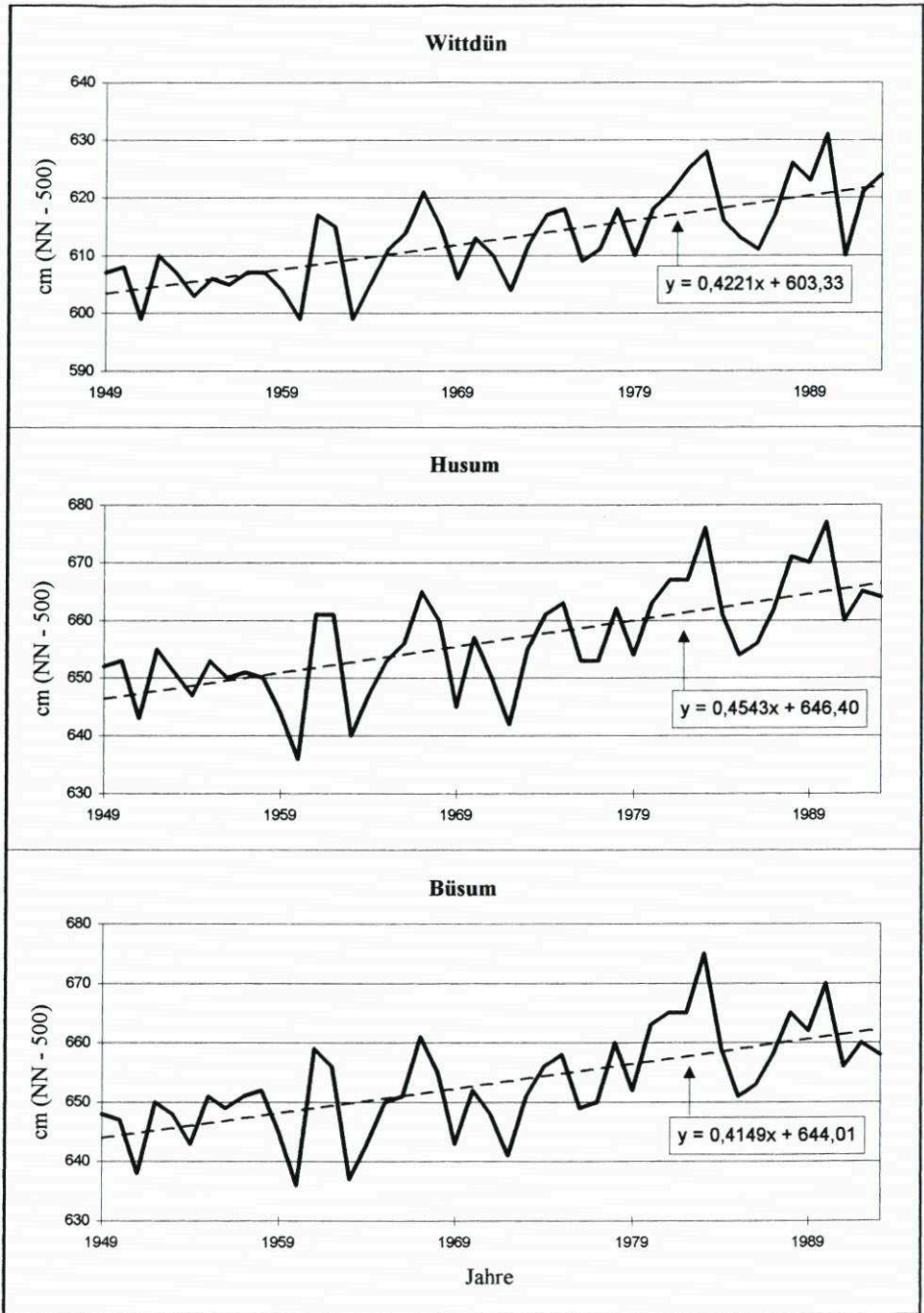


Abb. 3: MThw-Entwicklung an den Pegeln Wittdün, Husum und Büsum von 1949 bis 1993

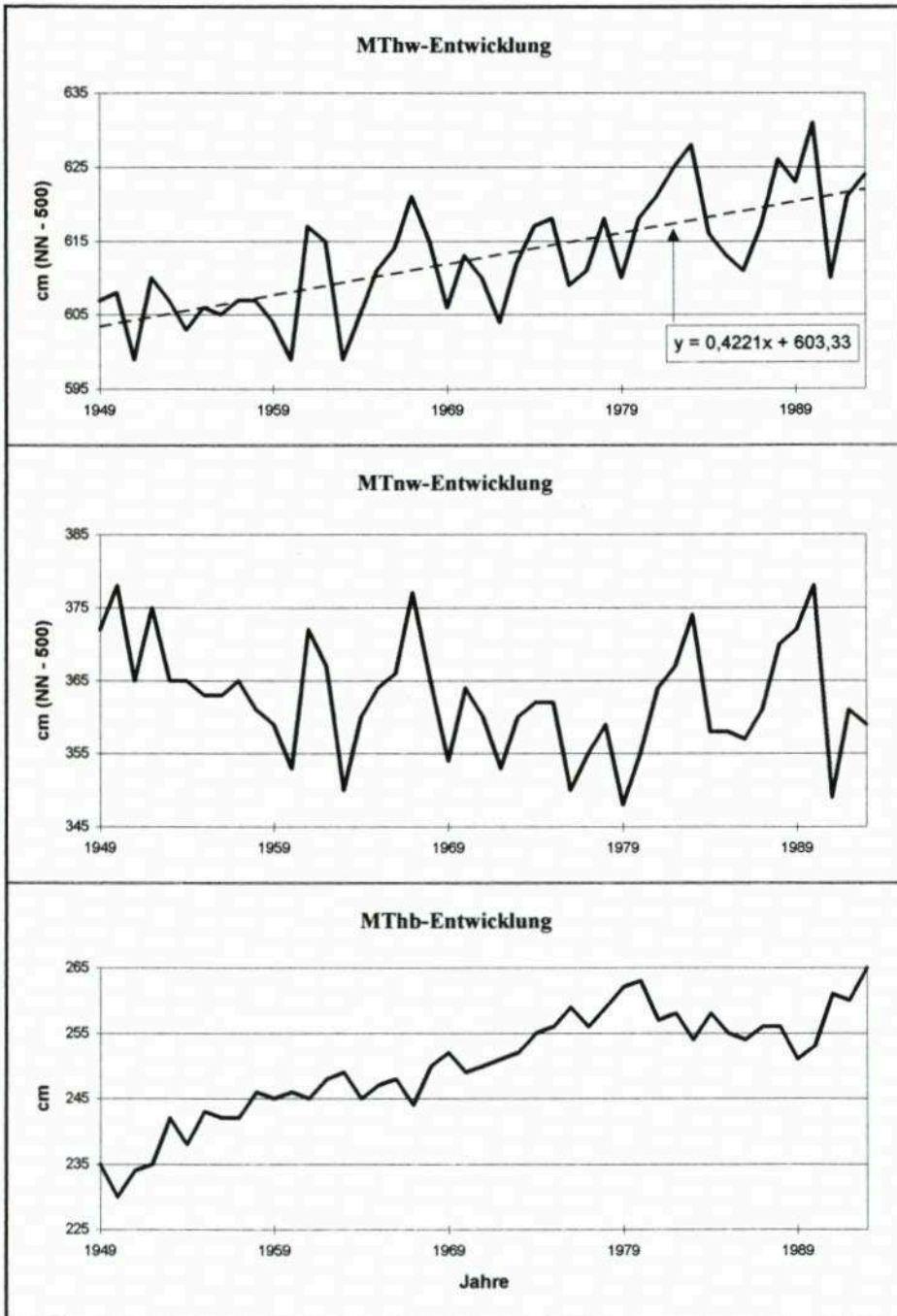


Abb. 4: MThw-, MTnw- und MThb-Entwicklung am Pegel Wittdün von 1949 bis 1993



senkung des MTnw-Niveaus ab. Eine lineare Regression ergab eine jährliche Absenkung um 0,14 cm bzw. insgesamt eine Absenkung des MTnw-Niveaus von 6 cm. Als Folge dieser unterschiedlichen MThw- und MTnw-Entwicklung nahm der MThb zwischen 1949 und 1980 um etwa 25 cm zu, nach 1980 stabilisierte er sich. Bei gleichbleibendem Strandgradient wird diese Entwicklung zu einer Verbreiterung des nassen Strandes bzw. der Brandungszone geführt haben.

SCHMIDT u. VON STORCH (1993) haben die Windentwicklung in der Deutschen Bucht seit 1876 durch Auswertungen von täglichen Luftdruckmessungen ermittelt. Trotz Schwankungen konnte weder für die mittleren noch für die Extremwinde eine trendmäßige Entwicklung festgestellt werden. Auch eine Analyse der jährlichen Häufigkeiten der geostrophischen Winde über 15 m/s aus dem sturmfluteffektiven NW-Sektor ( $240^{\circ}$ – $340^{\circ}$ ) ergab für den Zeitraum 1930–1992, trotz erheblicher Schwankungen, keinen langfristigen Trend (Abb. 5). Von einem Maximum in den 50er Jahren nahm der Anteil geostrophischer Winde über 15 m/s aus NW bis Anfang der 70er Jahre um etwa 10 % ab, seitdem steigt er wieder an. Anfang der 90er Jahre lag der Anteil mit etwa 17 % wieder fast gleich hoch wie in den 50er Jahren. Demnach wird auch die Seegangsbelastung bei Stürmen mit Windgeschwindigkeiten über 15 m/s insgesamt nicht zugenommen haben. Relativ hoch war die Belastung in den 50er und 90er Jahren, während die Belastung in den 60er und 70er Jahren relativ gering war.

Obwohl es somit keine Hinweise auf eine langfristige Zunahme der Windgeschwindigkeiten gibt, lassen folgende Indizien eine Zunahme der Intensität (Höhe und Häufigkeit) von Sturmfluten entlang der s.-h. Westküste über den Beobachtungszeitraum 1949 bis 1994 vermuten. Zum einen traten nach FÜHRBÖTER u. DETTE (1992) an den Pegeln List auf Sylt und Cuxhaven von den 25 höchsten Sturmfluten im Zeitraum 1900 bis 1992 allein 16 nach 1960 auf. Als Maß für die Häufigkeit von Sturmfluten können nach FÜHRBÖTER u. DETTE (1992) die Verweilzeiten angesehen werden, in denen sich im Jahr bzw. in der Wintersaison (vom 1. 7. des Vorjahres bis 30. 6. des nachfolgenden Jahres) der Wasserstand oberhalb eines bestimmten Indikatorhorizonts aufhält. Für Pegel Wittdün wurde die Entwicklung der Verweilzeiten oberhalb des Indikatorhorizontes MThw + 1,5 m pro Wintersaison von 1920/21 bis 1993/94 aufgetragen (Abb. 6). Die aus den Pegelbögen ermittelten auf NN bezogenen Sturmwasserstände wurden dabei für einen MThw-Anstieg von 0,4 cm/J korrigiert. In Abb. 6a sind die Werte pro Wintersaison aufgetragen. Es wird deutlich, daß in den einzelnen Jahreswerten sehr starke Schwankungen auftreten. So wurde der Wasserstand MThw + 1,5 m während des Winters 1989/90 insgesamt 23 Stunden und 12 Minuten überschritten, während er im Winter 1991/92 überhaupt nicht erreicht wurde. In Abb. 6b ist der Verlauf der 18jährigen gleitenden Mittelwerte dargestellt. Von 1937/38 bis 1959/60 nimmt die mittlere Verweilzeit pro Winter von 3 Stunden und 10 Minuten beständig auf etwa 1 Stunde ab, d. h. im Zeitraum 1942/43 bis 1959/60 wurde der Wasserstand MThw + 1,5 m im Schnitt nur um eine Stunde pro Wintersaison überschritten. Danach nimmt er bis 1993/94 mit Schwankungen wieder zu. Über den Zeitraum 1976/77 bis 1993/94 wurde der Wasserstand MThw + 1,5 m im Schnitt um 5 Stunden und 33 Minuten pro Wintersaison überschritten. Diese Ergebnisse lassen vermuten, daß die Sturmflutbelastung am St. Peter-Ording-Sand über den Zeitraum, für den Wattgrundkarten vorliegen (1949–1994), insgesamt deutlich zugenommen hat. Dies wird zu einer Intensivierung der aktuellen Morphodynamik geführt haben. Ein langfristiger (säkularer) Trend läßt sich auch aus dieser Datenreihe statistisch nicht feststellen (s. o).

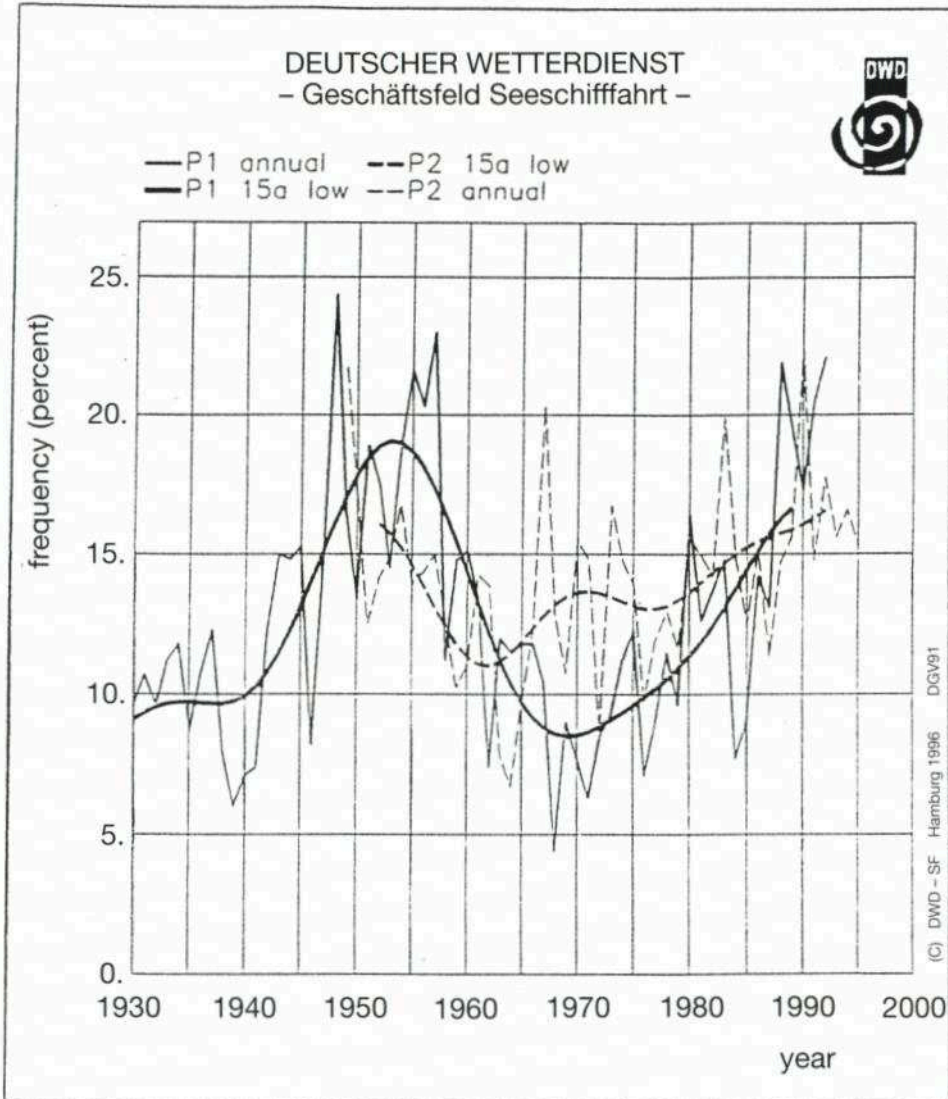


Abb. 5: Entwicklung der Häufigkeit geostrophischer Windgeschwindigkeiten  $> 15$  m/s aus dem Richtungssektor NW im Zeitraum 1930-1992 (Quelle: SCHMIDT u. BEHRENS, Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Seeschifffahrt, Hamburg, Veröff. in Vorb.)

### 2.3 Historische Entwicklung des St. Peter-Ording-Sandes

Wann genau sich westlich von St. Peter-Ording ein Dünengürtel mit vorgelagertem Außensandsystem eingestellt hat, läßt sich aus den verfügbaren Unterlagen nicht rekonstruieren. Nach EHLERS (1988) kann die Dünenbildung hier frühestens nach der Sturmflut von 1362, als die hier vorhandenen Deiche durchbrochen wurden, angefangen haben. Nach PRANGE (1986) existierte spätestens zu Anfang des 16ten Jahrhunderts im Raum St. Peter-

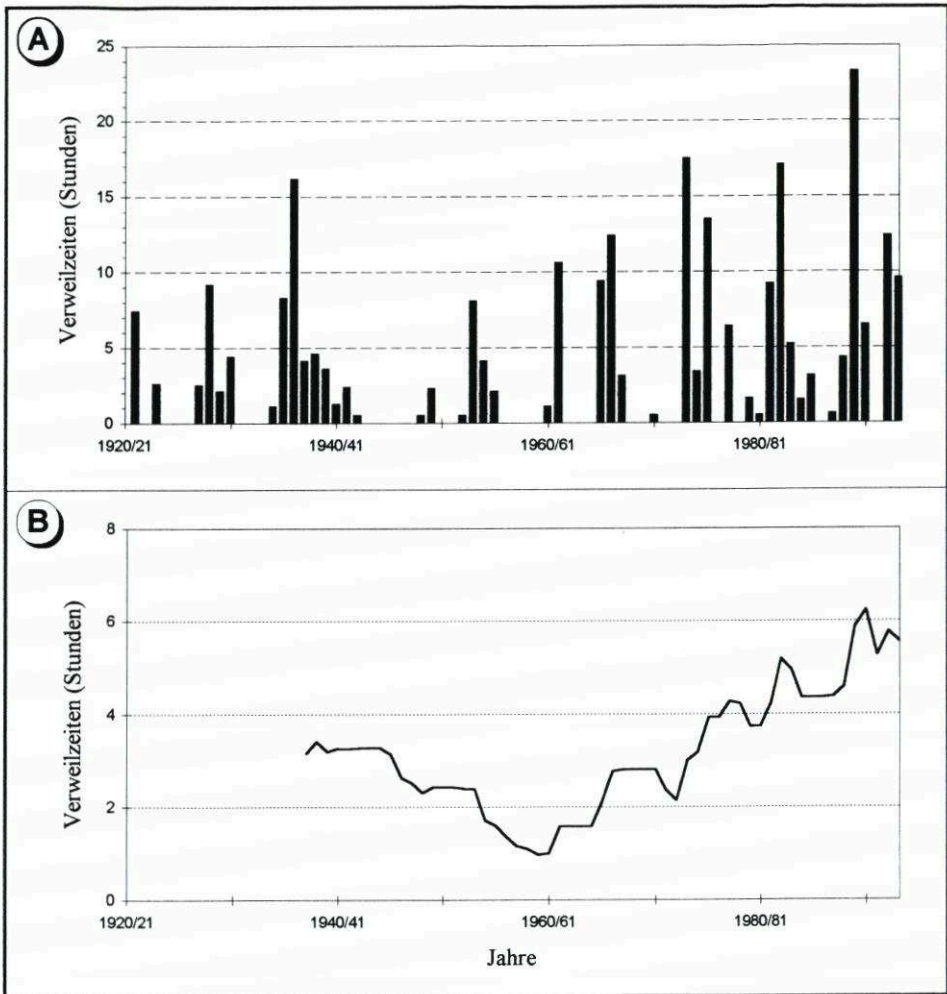


Abb. 6: Entwicklung der Verweilzeiten (vom 1. Juli des Vorjahres bis zum 30. Juni des nachfolgenden Jahres) oberhalb von MThw +1,5 m am Pegel Wittdün für den Zeitraum 1920/21 bis 1993/94: (a) jährliche Verweilzeiten; (b) 18jährige gleitende Mittelwerte

Ording ein Dünengürtel, der 1532 in St. Peter zu Schäden durch Übersandung (Flugsand) führte. Der Anfang der Dünenbildung liegt demnach zwischen 1362 und 1532. Bei den Sturmfluten von 1717 und 1720 gab es größere Dünendurchbrüche, die zu starker Übersandung (Overwash) in der Marsch führten. In 1725 mußte die Kirche in Ording wegen windbedingter Übersandung aufgegeben werden und über 1 km nach Osten neu aufgebaut werden (EHLERS, 1988). Ab 1864 wurden die Dünen durch Halmpflanzungen und Aufforstungen weitgehend in ihrer Lage festgelegt (PRANGE, 1986).

Eine Generalkarte aus dem Jahre 1858 vom Hauptman F. Geertz zeigt, daß sich im südlichen Bereich von St. Peter-Ording spätestens zu dieser Zeit vor dem Dünengürtel (die Hitzbank) ein Außensandsystem (der Holter Sand) eingestellt hat. Aus Abb. 7 wird ersichtlich, wie sich die Topographie des Sandes seit 1878 geändert hat. Zwischen 1878 und 1928 findet



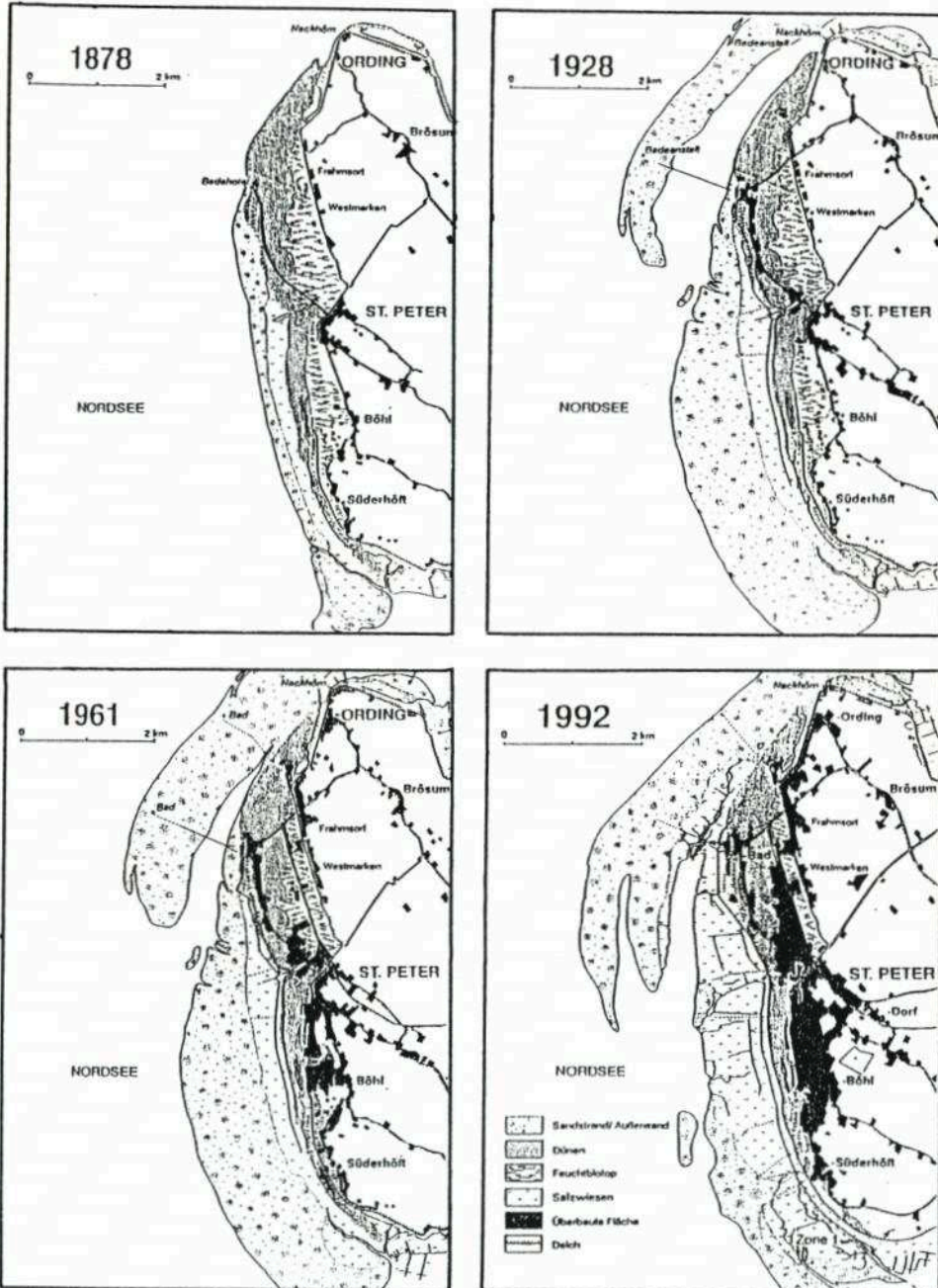


Abb. 7: Historische Entwicklung des St. Peter-Ording-Sandes (Quelle: KLUG u. KLUG 1994a, nach der Topographischen Karte 1:25 000)

im Süden eine erhebliche Verbreiterung des Holter Sandes statt. Im gleichen Zeitraum entsteht auch vor dem Ortsteil Ording im Norden ein Außensand (der Rochelsand). Ab 1928 wird somit ganz St. Peter-Ording durch ein Außensandsystem von der offenen Nordsee abgeschirmt. Obwohl die genaue Lage der MThw- bzw. Uferlinie auch danach sicherlich starken Schwankungen unterworfen war, kann die Gesamtsituation seitdem als stabil betrachtet werden. Auch PARTENSKY (1983) kam anhand von Untersuchungen an einem Langzeitprofil (Aufnahmen aus den Jahren 1904, 1918, 1936, 1957, 1966 und 1979) im Vorstrandbereich westlich des St. Peter-Ording-Sandes zu diesem Schluß. Demnach bewegte sich die NN -2,0 m Tiefenlinie in diesem Profil in einem Band von etwa 500 m um den Ausgangszustand von 1904 (Abb. 8). Er vermutet die Ursache hierfür in Schwankungen in der Intensität des küstenparallelen Sedimentstromes vor der schleswig-holsteinischen Westküste.

### 3. Datengrundlagen und Methoden

Zur Erfassung der morphologischen Entwicklung und Dynamik sind auf der Grundlage von Wattgrundkarten im Maßstab 1:10 000 aus den Jahren 1949, 1958, 1964, 1971, 1975, 1981, 1984, 1985, 1988 und 1994 Profil- und Isolinienvergleiche sowie Bilanzierungen durchgeführt worden. Die Wattgrundkarten beruhen zum größten Teil auf terrestrischen Vermessungen, d. h. sie enden tidebedingt an der Seeseite bei etwa NN -1 bis NN -2 m. Nur wenn

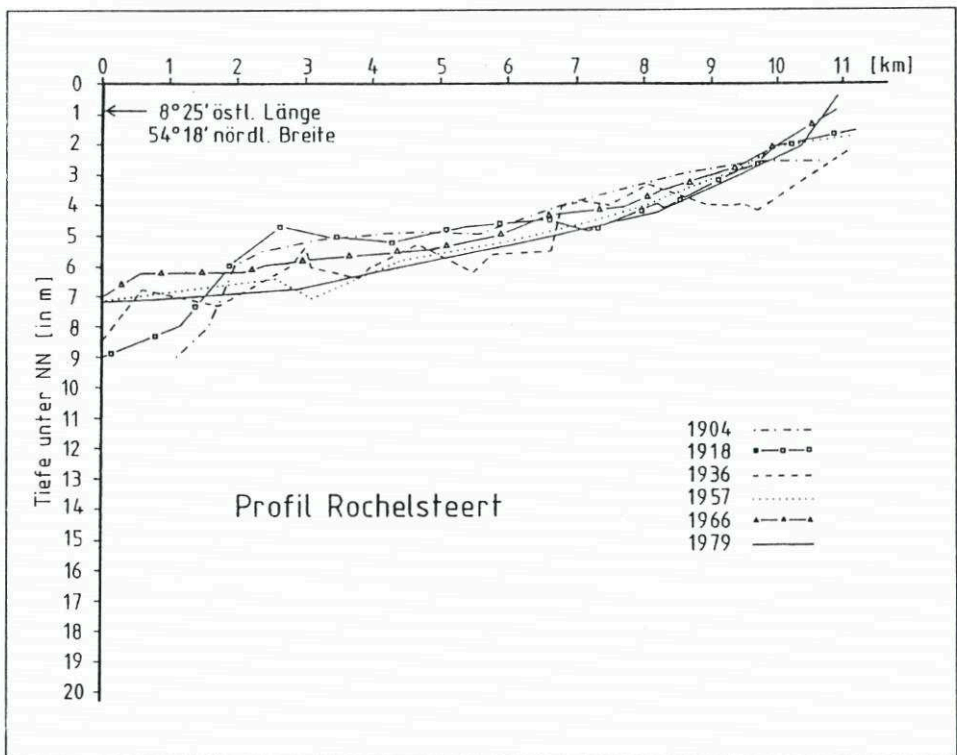


Abb. 8: West-Ost-Profil im Vorstrand des St. Peter-Ording-Sandes (Quelle: PARTENSKY, 1983)

etwa zeitgleich eine Echolot-Vermessung des Vorstrandes durchgeführt worden ist (1964 und 1988), sind bathymetrische Vermessungsdaten in die Wattgrundkarten mit aufgenommen. Die vertikale Ungenauigkeit der terrestrischen Vermessungen wird mit etwa  $\pm 3$  cm angegeben, die der bathymetrischen Vermessungen liegt deutlich höher. Insgesamt nimmt die Genauigkeit der Vermessungen durch die Anwendung neuerer Geräte und Verfahren bis zur Aufnahme 1988 zu. Die 1994er Wattgrundkarte schließlich ist auf der Basis photogrammetrischer Auswertungen von Luftbildern erstellt worden. Bedingt durch diese Technik können in weniger strukturierten Bereichen vertikale Ungenauigkeiten von ein bis zwei Dezimetern auftreten. Die auf der Basis dieser Wattgrundkarte gemachten Aussagen sind daher mit Vorsicht zu betrachten.

Zur Erfassung der Morphologie wurden mit Hilfe des im Rahmen eines KFKI-Projektes entwickelten Computerprogrammes MORAN: „Morphologische Analysen Nordseeküste“ Bilanz- und Umsatzanalysen durchgeführt. Nach Eingabe von manuell aus den Wattgrundkarten ermittelten Höhenwerten pro Flächeneinheit (z. B. pro ha) können mit diesem Programm Massenbilanzierungen durchgeführt sowie Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik ermittelt werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik wird nach SIEFERT (1987) und HOFSTEDE (1989, 1991) verwiesen. Nach einer entsprechenden Konvertierung wurden die MORAN-Datensätze zusätzlich in EXCEL eingelesen. Somit wurde es möglich, das über bestimmten Höhenniveaus gespeicherte Sedimentvolumen für unterschiedliche Jahrgänge EDV-gestützt zu berechnen und miteinander zu vergleichen.

Weiterhin wurden in regelmäßigem Abstand von 500 m insgesamt 15 West-Ost-Profile über den Sand gelegt. Die Länge der Profile liegt zwischen 4000 m im Süden und fast 2000 m im Norden. Die Entfernung zwischen den aus den Wattgrundkarten ermittelten Tiefen- bzw. Höhenwerten auf diesen Profillinien beträgt je nach Relief 10 bis 100 m. Für die weitere Analyse und Darstellung sind die Höhendaten anschließend in das Tabellenkalkulationsprogramm MS-EXCEL eingegeben worden (Abb. 9).

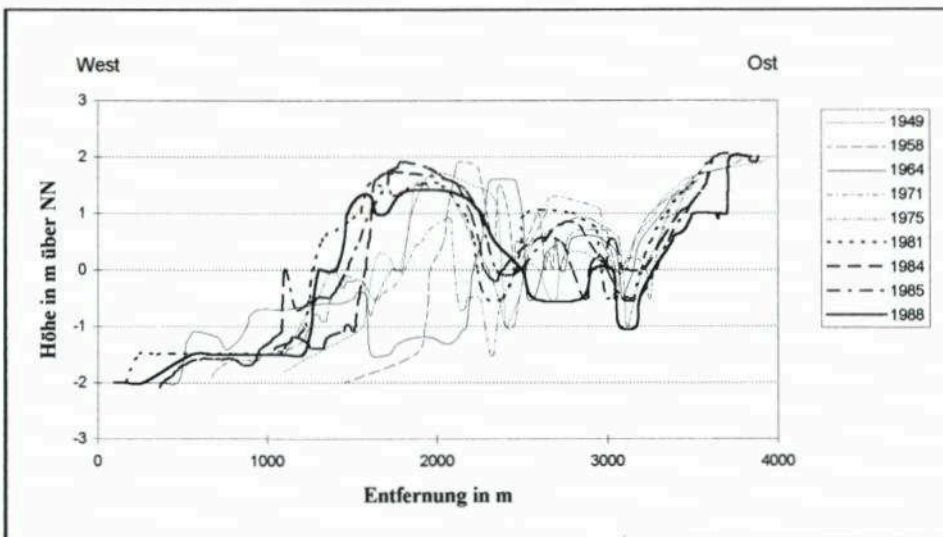


Abb. 9: Beispiel eines West-Ost-Profils über den St. Peter-Ording-Sand



Zur Erfassung der Verlagerung bzw. Entwicklung verschiedener geomorphologischer Strukturen, wie beispielsweise der Sandhaken oder das Böhler Prielsystem, wurden schließlich bestimmte Isolinien (zumeist die NN-Höhenlinie) der unterschiedlichen Jahrgänge in einer Karte dargestellt (Abb. 12).

#### 4. Ergebnisse

Wie sich der gesamte etwa 1000 ha große St. Peter-Ording-Sand im Zeitraum 1949 bis 1994 entwickelte, ist in Abb. 10 dargestellt. Zunächst fällt auf, daß die beiden dargestellten morphologischen Parameter sich fast identisch entwickeln (Korrelationskoeff. = 0,998). Von 1949 bis 1964 nahm die mittlere Höhenlage des Sandes um etwa 9 cm, das Sedimentvolumen um etwa 0,7 Mio. m<sup>3</sup> ab. Anschließend erhöhte sich der Sand bis 1981 um durchschnittlich

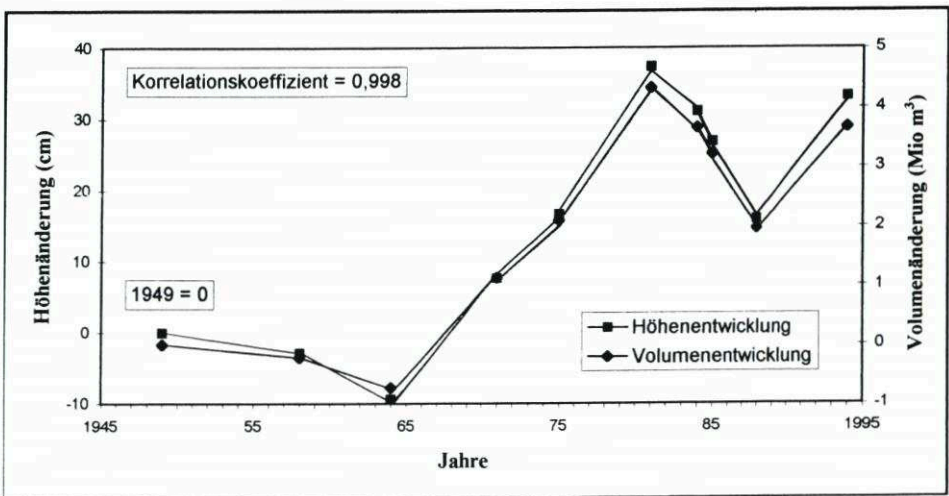


Abb. 10: Bilanzentwicklung des St. Peter-Ording-Sandes von 1949 bis 1994

46 cm, wobei 5,0 Mio. m<sup>3</sup> Sediment abgelagert wurde. Diese Sedimentationsphase wurde wiederum durch eine erosive Phase abgelöst, die bis 1988 andauerte. Dabei nahm die mittlere Höhenlage um 21 cm ab und wurde 2,3 Mio. m<sup>3</sup> Sediment erodiert. Zwischen 1988 und 1994 nahm die mittlere Höhenlage schließlich wieder um 17 cm zu, wobei 1,7 Mio. m<sup>3</sup> Sediment zur Ablagerung kam. Bezüglich dieser Sedimentation im Zeitraum 1988–1994 muß allerdings nochmals auf die relative Ungenauigkeit der 1994er Kartenaufnahme hingewiesen werden (siehe Kap. 3). Obwohl die o. g. Aussagen für diesen Zeitraum somit in ihrer Quantität mit Vorsicht zu betrachten sind, scheint die regional sehr unterschiedliche Verteilung der Akkumulation und Erosion während dieser Periode darauf hinzudeuten, daß sie qualitativ richtig sind. Insgesamt erhöhte sich der Sand somit von 1949 bis 1994 um 33 cm als Folge einer Sedimentzufuhr von insgesamt 3,7 Mio. m<sup>3</sup>. Der gleichzeitig stattfindende MThw-Anstieg von etwa 0,43 cm/J bzw. insgesamt etwa 19 cm (Abb. 3) wurde demnach mehr als ausgeglichen.

Über den Zeitraum 1949 bis 1994 läßt sich die Entwicklung folglich in vier Phasen: 1949–1964 (Erosion), 1964–1981 (Sedimentation), 1981–1988 (Erosion) und 1988–1994 (Sedimentation) untergliedern. Wie von BRUUN (1962) postuliert und von HOFSTEDÉ (1993,

1997) für die nordfriesischen Außensände Süderoog-, Norderoog- und Japsand nachgewiesen, reagiert eine Küsten- bzw. Uferlinie normalerweise durch Zurückweichen auf einen ansteigenden Meeresspiegel. Im Falle des St. Peter-Ording-Sandes wurde diese morphologische Reaktion auf den beobachteten MThw-Anstieg (Abb. 3) zwischen 1949 und 1994 zweimal unterbrochen. Die Ursache hierfür muß in einer überproportionalen Sedimentzufuhr aus dem Küstenvorfeld, die die landwärtige Verlagerung der Uferlinie ausglich, gesucht werden.

Der Ablauf dieses Materialimports bis 1988 wird in Abb. 11, in der die Entwicklung des Sandes an einem repräsentativen West-Ost-Profil über den Sand dargestellt ist, ersichtlich. Entsprechend den obigen Ausführungen ist die Profilentwicklung in Teildiagrammen (oben: Phase I; mitte: Phase II und unten: Phase III) dargestellt. Die Entwicklung während Phase IV wird bisher nur durch eine (relativ ungenaue) Kartenaufnahme angedeutet und konnte noch nicht ursächlich geklärt werden. Sie ist daher nicht in der Abbildung dargestellt. Während der Phase I, von 1949 bis 1964, weicht die Westflanke des Sandes an dieser Stelle um etwa 250 m nach Osten zurück. In der Profillinie aus dem Jahre 1964 ist westlich der Westflanke erstmals eine breite Sandbank erkennbar. Diese zunächst subtidale Sandbank verlagert sich schnell nach Osten, erhöht sich und verbindet sich während der Phase II bis 1981 mit der Westflanke des St. Peter-Ording-Sandes. Bedingt durch diese Anlandung „springt“ die Westflanke des Sandes um etwa 1000 m nach Westen. In der dritten Phase setzt die normale Entwicklung, nämlich die einer nach Osten zurückweichenden Westflanke, wieder ein.

In Abb. 12 ist die Entwicklung der Sandbank dargestellt. Westlich einer sog. Basisuferlinie, die in etwa der NN-Höhenlinie des Jahres 1949 entspricht, taucht im Jahre 1958 erstmals eine bis dahin subtidale Sandbank über NN auf. Bis 1964 verbindet sie sich mit der Basisuferlinie. Unmittelbar nach Auftauchen setzt ein südwärtsgerichteter küstenparalleler Sedimenttransport ein, wobei sich ein der Basisuferlinie vorgelagerter Sandhaken ausbildet. Dieser Haken ist im südlichen Bereich zunächst durch eine tiefe Rinne, den sog. Badeprriel, vom Rest des trockenen Strandes abgetrennt. Anfang der 80er Jahre versandet dieser Badeprriel zunehmend und der Sandhaken verbindet sich mit dem trockenen Strand. Es wird darauf hingewiesen, daß die in der Abb. 12 dargestellten „Uferlinien“ die tatsächlichen NN-Höhenlinien aus Gründen der Übersichtlichkeit nur schematisch wiedergeben.

Es stellt sich die Frage nach dem Ursprung der Sandbank. Wie bereits erwähnt, schließt sich westlich des St. Peter-Ording-Sandes die Mündung bzw. das Ebb-Delta der Süderhever an. EHLERS (1988) hat ausführlich die Morphodynamik des Süderhever-Seegats, insbesondere die süd- bis südostgerichtete Verlagerung der Tiderinnen und die dazwischenliegenden subtidalen Barren im Ebb-Delta, beschrieben. Demnach bewegen sich die bis etwa NN -4 m aufragenden, bis zu einigen Kilometer langen Barren im Ebb-Delta der Süderhever mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 20 m/J nach Süden bzw. Südosten in Richtung auf den St. Peter-Ording-Sand (EHLERS 1988, Abb. 100). Auch PARTENSKY (1983) beschreibt das Hin- und Herpendeln der Süderhever-Mündung. Er gibt für diesen Vorgang eine Periode von 350 Jahren an. Eine solche Periode beginnt mit der Entstehung einer neuen Tiderinne an der Nordseite des Seegats (südwestlich von Süderoogsand). Anschließend verlagert diese Tiderinne sich nach Süden, bis sie nach etwa 350 Jahren an der Südseite des Seegats angelangt und zunehmend an Bedeutung verliert. An der Nordseite kann nun mit der Entstehung einer neuen Tiderinne der Zyklus von Neuem beginnen. Die zwischen den Tiderinnen gelegenen Barren verlagern sich konsequenterweise als Struktur in der gleichen Weise. Es liegt somit nahe, den Ursprung der Ende der 50er Jahre aufgetauchten Sandbank in einer subtidalen Barre des Süderhever-Seegats zu suchen. Diese Hypothese konnte allerdings nicht durch entsprechende bathymetrische Vermessungsunterlagen untermauert werden.



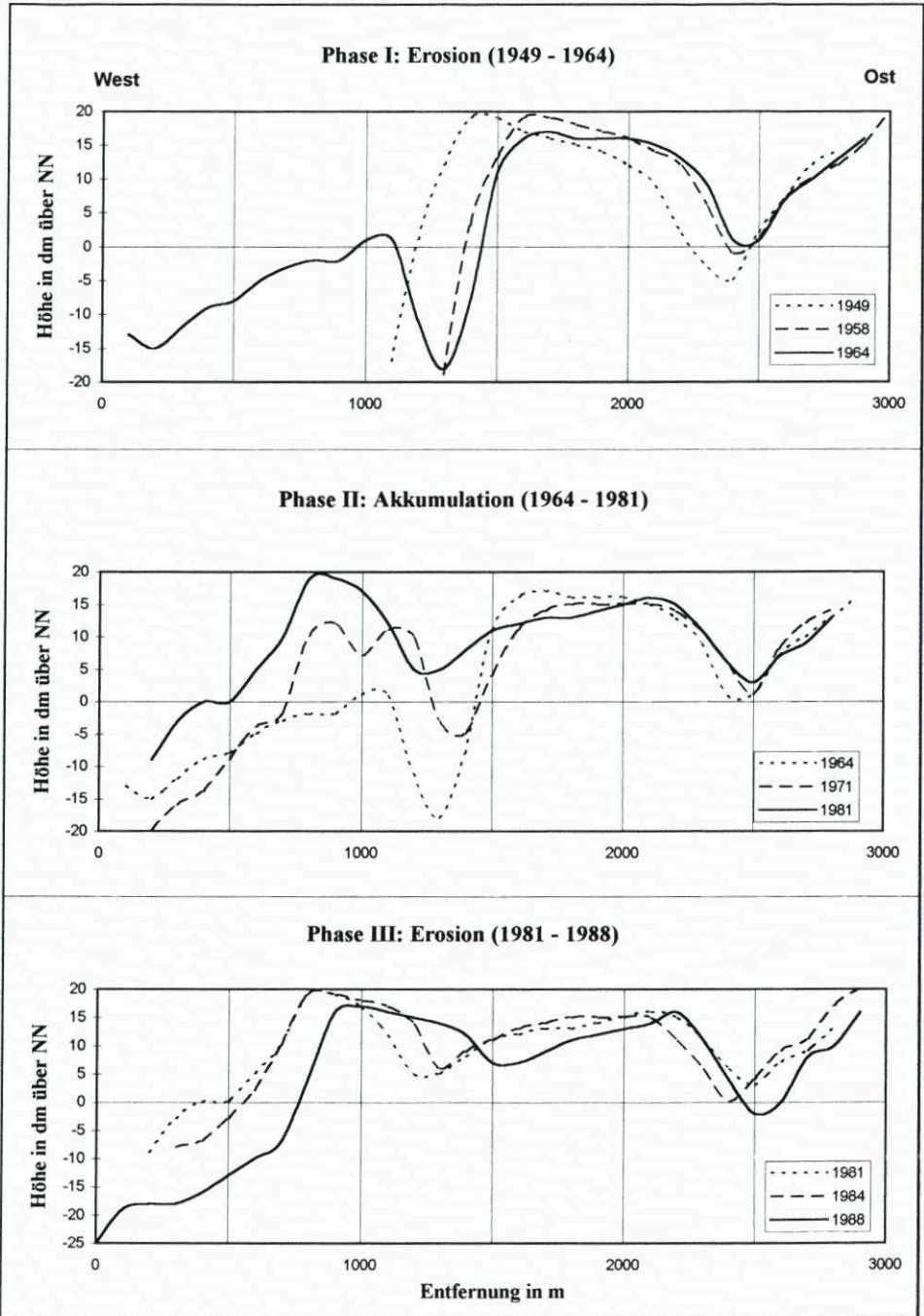


Abb. 11: In drei Phasen gegliederte Entwicklung eines West-Ost-Profiles über den St. Peter-Ording-Sand von 1949 bis 1988



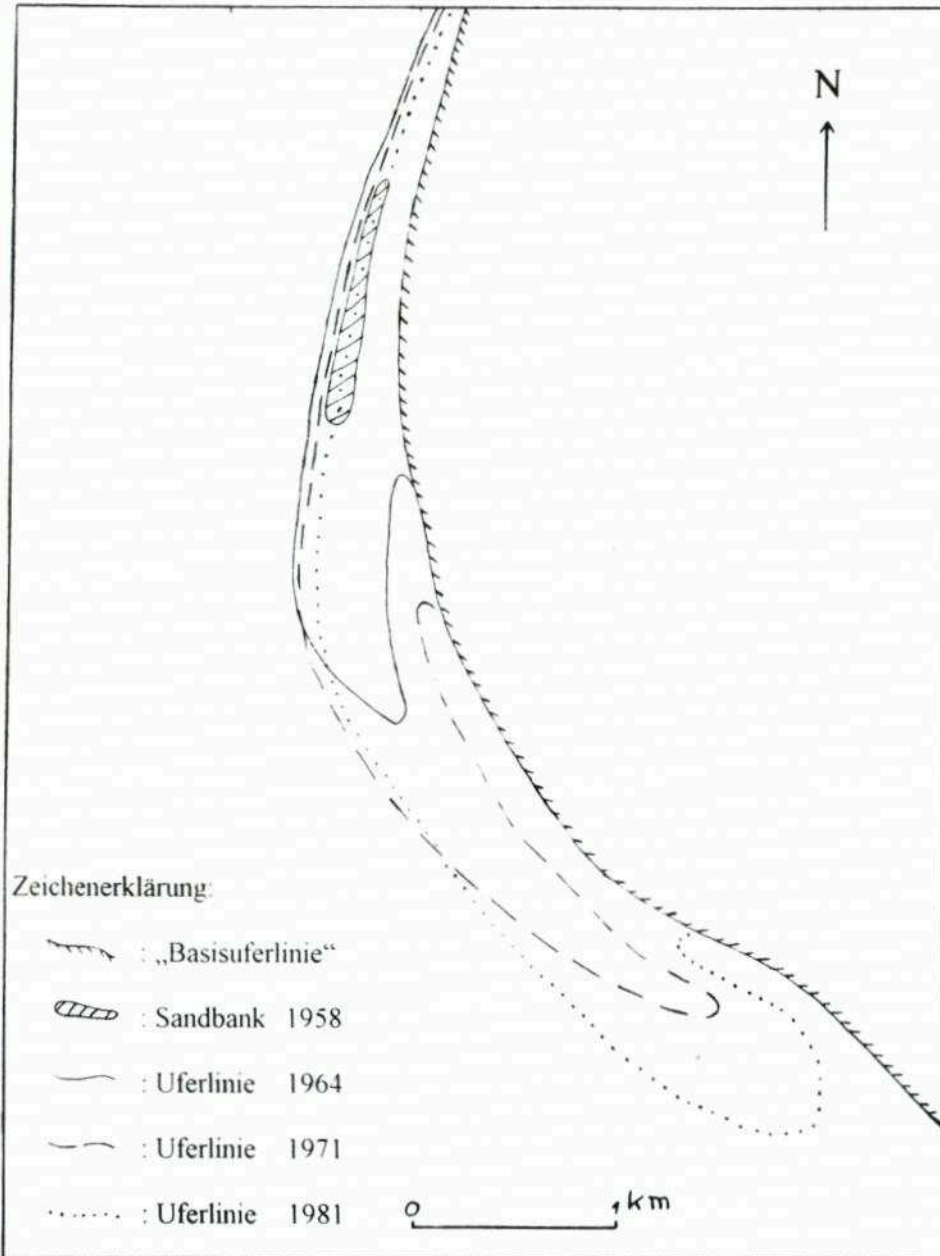


Abb. 12: Entwicklung der Westflanke des St. Peter-Ording-Sandes von 1949 bis 1981 (schematisch)

Wie sich die Sedimentationsschwerpunkte im Laufe der Zeit über den St. Peter-Ording-Sand verteilt haben, ist in Abb. 13 aufgezeigt. Zunächst fällt auf, daß die maximale Sedimentation für alle Vergleichszeiträume entlang einer küstenparallelen nord-süd-gerichteten Linie stattfand. Im Vergleichszeitraum 1949–1958 lag der Sedimentationsschwerpunkt relativ küstennah auf dem Sand. Der Verlauf der Linie entspricht dem des sich zu dieser Zeit stark verflachenden Böhler Prielsystemes. Im nächsten Zeitraum, von 1958 bis 1971, verlagerte sich die Schwerlinie zur Westflanke des Außensandes. Die Ursache hierfür ist das Auftauchen und die Anlandung der Sandbank. Anschließend verlagerte sich der Sedimentationsschwerpunkt nach Südosten, was unmittelbar mit der Bildung des Sandhakens und der Verlandung des Badepriels zusammenhängt. Während des letzten Vergleichszeitraumes, von 1988 bis 1994, liegen die Schwerpunkte der Sedimentation wieder etwa in der gleichen Linie wie im Zeitraum 1949–1958. Die Ursache hierfür liegt im nördlichen Bereich in der Entstehung des neuen Düngürtels (siehe Kap. 4.3), im südlichen Teil in der erneuten Verlandung des Prielsystemes.

Um zu verdeutlichen, daß die Bilanzentwicklung nur den Netto-Effekt der tatsächlich über den Vergleichszeitraum abgelaufenen Materialumlagerungen aufzeigt, sind in Abb. 14 die Entwicklungen der Absolutbeträge der Akkumulation und Erosion sowie die der Bilanz dargestellt. Aus dieser Gegenüberstellung wird klar, daß die Absolutbeträge der Erosion und Akkumulation (zusammen etwa 58 Mio. m<sup>3</sup> für den Zeitraum 1949–1994) viel höher liegen als die der resultierenden Bilanz (+3,7 Mio. m<sup>3</sup>). Dies entspricht den Ergebnissen des KFKI-Projektes MORAN (SIEFERT, 1987; HOFSTEDE, 1991; SCHÜLLER, 1991), wonach der Umsatz normalerweise um ein vielfaches höher liegt als die Bilanz. Folglich lassen sich anhand von Bilanzwerten grundsätzlich keine direkten Aussagen über die Morphodynamik machen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des MORAN-Projektes ein Verfahren zur Ermittlung der aktuellen Dynamik bzw. Umlagerungsintensität entwickelt. Anhand dieser Methode lassen sich für Teilbereiche des Wattenmeeres drei Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik aus der sog. Umsatzkurve ermitteln (HOFSTEDE, 1989):

- die asymptotische Umsatzhöhe ( $h_{ua}$ ) erlaubt eine Aussage über die maximalen mittleren Höhenänderungen, die auftreten können;
- die morphologische Varianz ( $\beta$ ) als reziproker Wert von  $a_0$  erlaubt eine Aussage über die Dauer der gleichbleibenden Tendenzen: Erosion oder Sedimentation;
- die Umlagerungsrate ( $h_{ua} \cdot \beta$ ) erlaubt eine indikative Aussage über die Intensität der Morphodynamik und läßt sich mit der Hydrodynamik korrelieren.

Einschränkend sei anzumerken, daß mit diesem Verfahren nur Mittelwerte für den gesamten Betrachtungszeitraum (1949 bis 1994) berechnet werden können, d. h. zwischenzeitliche Änderungen in der Morphodynamik werden nicht erfaßt.

In Abb. 15 sind die berechneten Umsatzkurven für den St. Peter-Ording-Sand dargestellt. Im oberen Teildiagramm sind alle Daten des etwa 1000 ha großen Sandes berücksichtigt. Aus der eingefügten Funktion läßt sich für den gesamten Sand eine mittlere Umsatzrate von 10,8 cm/J errechnen. Ein Vergleich mit den für den 275 km<sup>2</sup> großen Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex südlich der Elb-Mündung ermittelten Kennwerten (HOFSTEDE, 1991) zeigt, daß sich die drei morphologischen Parameter mit keinem der morphodynamischen Teilgebiete dieses Wattkomplexes vergleichen lassen. Dies hängt damit zusammen, daß es sich bei den für St. Peter-Ording-Sand ermittelten Kennwerten um Mittelwerte für den gesamten Sand handelt. Es sind somit mehrere morphodynamisch unterschiedliche Teilbereiche zusammengefaßt. Aus diesem Grund wurden für den St. Peter-Ording-Sand die Bereiche Westflanke (Abb. 15, Mitte) und trockener Strand (Abb. 15, unten) auch gesondert betrachtet.

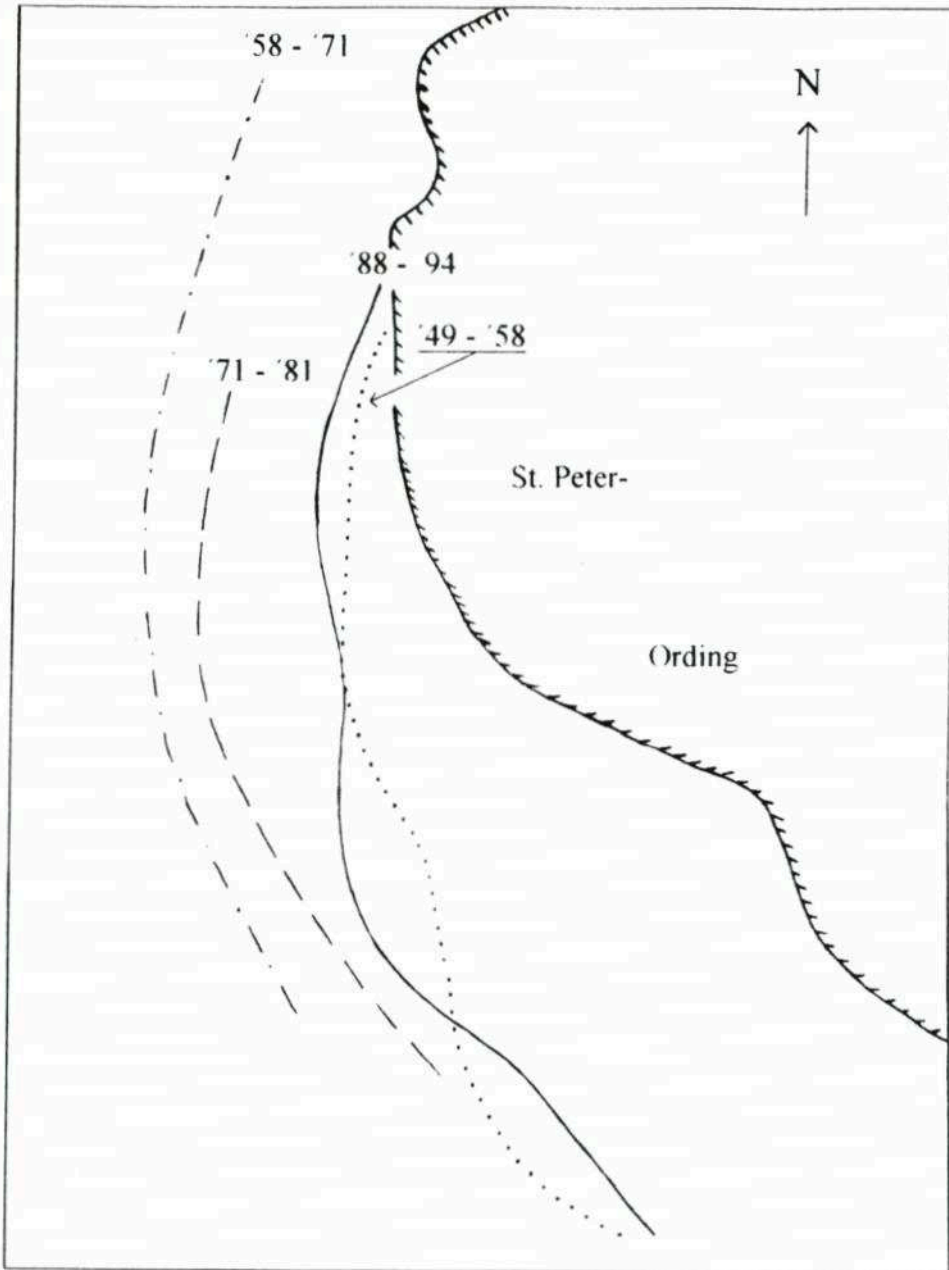


Abb. 13: Entwicklung der Sedimentationsschwerpunkte auf dem St. Peter-Ording-Sand



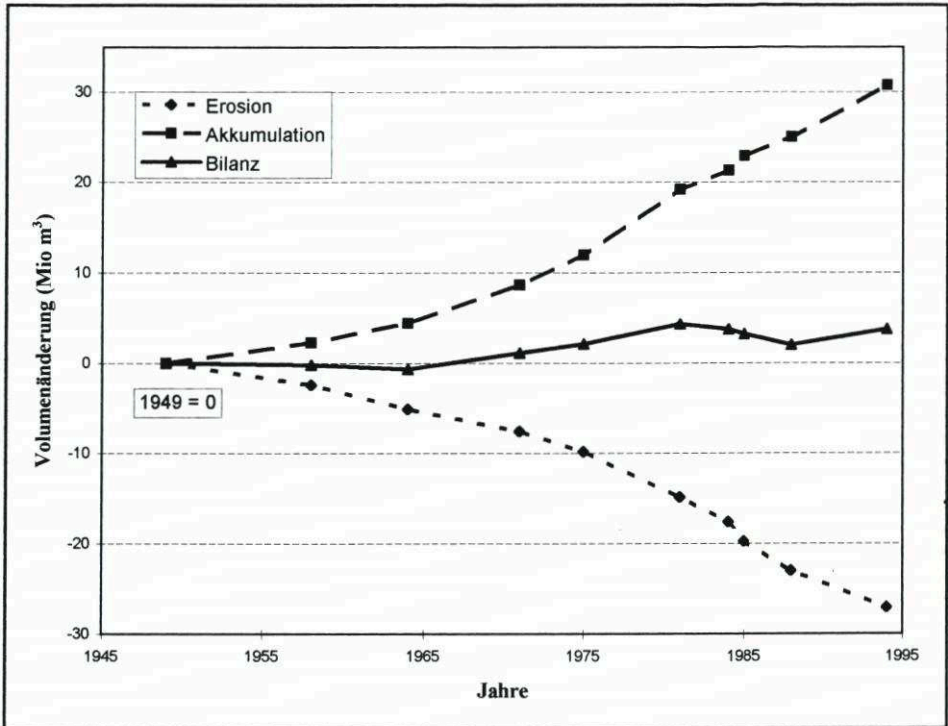


Abb. 14: Akkumulations-, Erosions- und Bilanzentwicklung des St. Peter-Ording-Sandes von 1949 bis 1994

Mit 110 cm weist die relativ reliefreiche Westflanke, die sich aus dem Vorstrand und nassem Strand zusammensetzt, die höchste asymptotische Umsatzhöhe auf. Dies hängt offenbar mit der Vor- und Rückverlagerung der Westflanke, die sich über dem gesamten Profil abspielt (Abb. 11), zusammen. Die relativ geringe morphologische Varianz von 0,16 deutet auf relativ langfristig gleichbleibende Tendenzen hin. Dies stimmt gut mit der oben beschriebenen phasenweisen morphologischen Entwicklung der Westflanke des Sandes überein. Die Umsatzrate entlang der Westflanke ist mit 18,0 cm/J relativ hoch, was auf eine intensivere Morphodynamik hindeutet. Allerdings liegt diese Umsatzrate noch deutlich unter den von HOFSTEDE (1991) für Teilgebiete des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex ermittelten Werten. Hier wurden beispielsweise für die exponiert liegenden Bereiche des Seegats der Till Umsatzraten von etwa 44 cm/J festgestellt, was kausal mit einem sehr hohen Energieeintrag aus Seegang und Tideströmung in diesem Raum in Verbindung gebracht werden konnte.

Auf dem trockenen Strand werden dagegen die geringsten Werte für die asymptotische Umsatzhöhe, die morphologische Varianz und die Umsatzrate erzielt. Die sehr geringe Umsatzrate von 3,5 cm/J liegt in der gleichen Größenordnung wie die des hohen Wattes im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex (5,3 cm/J). Dies läßt sich unmittelbar mit dem sehr geringen Energieeintrag bzw. der Hydrodynamik in diesen Bereichen korrelieren. Die sehr geringe morphologische Varianz von 0,10 ist ein Indiz dafür, daß die morphologische Entwicklung auf dem trockenen Strand einem langfristigen Trend unterliegt (siehe auch Kap. 4.1).

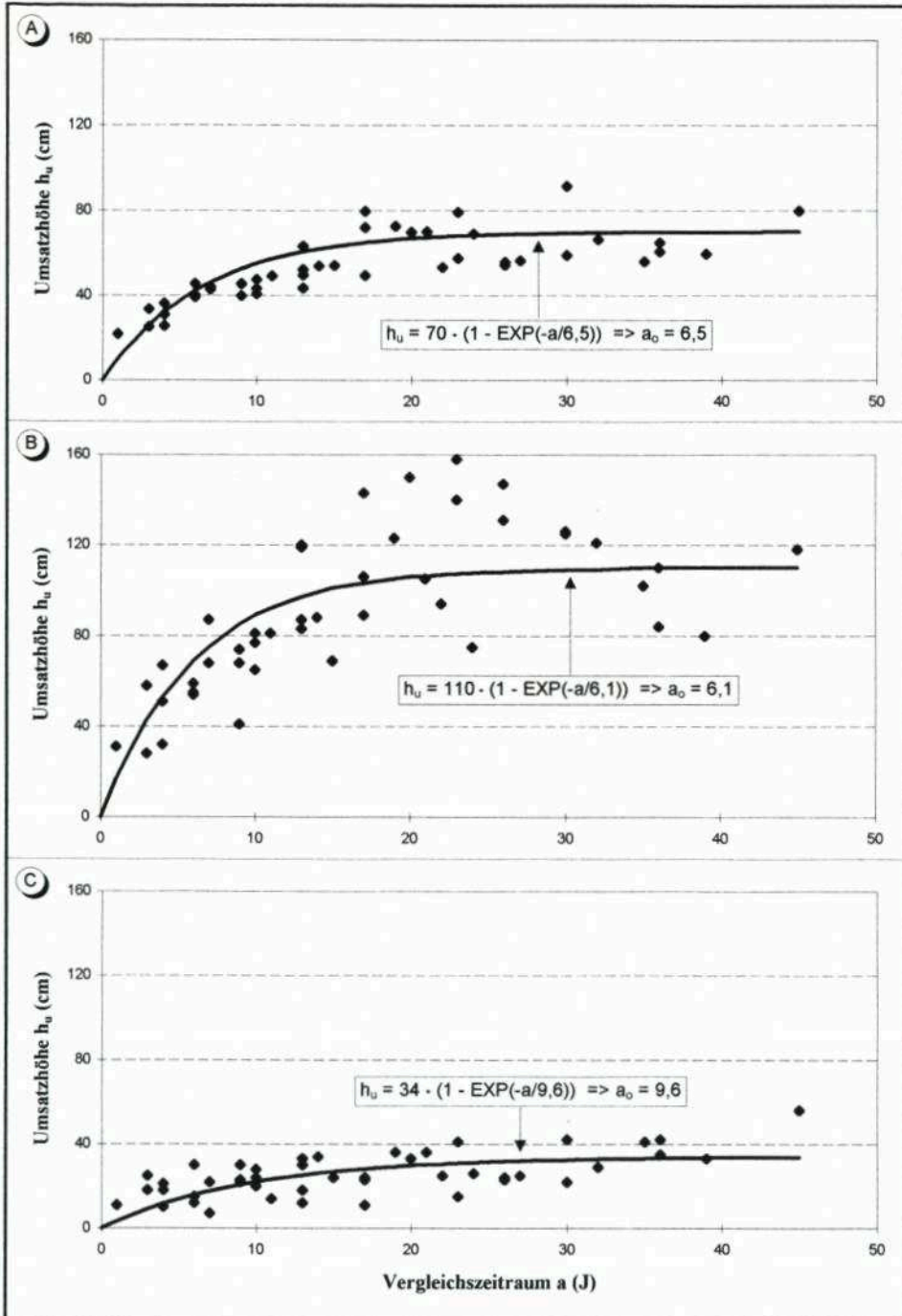


Abb. 15: Umsatzkurven des St. Peter-Ording-Sandes: (a) Gesamt; (b) Westflanke; (c) trockener Strand

#### 4.1 Morphologische Entwicklung des Außensandes

Ein Schwerpunkt dieser Studie lag auf der Ermittlung der Entwicklung, Dynamik und Stabilität des über MThw herausragenden Außensandes. Wie bereits erwähnt, setzt sich dieser Bereich aus dem trockenen Strand und dem über MThw herausragenden Teil des Sandhakens zusammen. Weiterhin wurde aus Vergleichsgründen der ab 1981 entstehende Dünenzug mit berücksichtigt, die Sandsalzwiesen dagegen nicht. Wie aus der Abb. 3 ersichtlich, stieg das MThw-Niveau zwischen 1949 und 1994 signifikant an. Zur Berücksichtigung dieses Anstieges wurde das MThw-Niveau für den Zeitraum 1949 bis 1975 auf NN +1,1 m, danach (ab 1981) auf NN +1,2 m festgesetzt.

In Abb. 16 ist die Entwicklung der Flächen, des Volumens und der mittleren Höhe über MThw dargestellt. Auf den ersten Blick zeigen alle drei Parameter einen ähnlichen Verlauf über die Zeit. Vor allem die Flächen- und Volumenentwicklung hängen eng miteinander zusammen (Korrelationskoeff. = 0,924), während die Entwicklung der Fläche und mittleren Höhe über MThw nur einen geringen Korrelationskoeffizienten (0,612) aufweist. Der Korrelationskoeffizient zwischen Volumen und mittlerer Höhe über MThw beträgt 0,862. Von 1949 bis 1994 hat sich das über MThw gespeicherte Sedimentvolumen von 1,372 Mio. m<sup>3</sup> auf 2,999 Mio. m<sup>3</sup> mehr als verdoppelt. Gleichzeitig hat sich die Fläche des Außensandes um durchschnittlich 6,5 ha pro Jahr von 394 auf 685 ha vergrößert. Die Entwicklung der mittleren Höhenlage über MThw ist weniger eindeutig. Insgesamt deutet sich eine geringe Anhebung an. Da allerdings gleichzeitig Höhe und Verweilzeit (Abb. 6) der Sturmhochwasser über MThw zugenommen haben, kann hieraus nicht geschlossen werden, daß die Häufigkeit und/oder Dauer der Überflutungen des Außensandes abgenommen haben.

Insgesamt unterliegt der über MThw liegende Außensand über den Beobachtungszeitraum einem positiven Trend, bedingt durch eine kontinuierliche Sedimentzufuhr von der Westflanke des Sandes. Die sehr geringe morphologische Varianz unterstreicht diese Feststellung.

#### 4.2 Parkplatzproblematik

Wie aus der Presse hinlänglich bekannt, sollen die Parkplätze auf dem St. Peter-Ording-Sand aus ökologischen Gründen geschlossen werden. Um der Frage nachzugehen, welche morphologischen Auswirkungen der bisherige Parkplatzbetrieb hatte, wurde in Abb. 17 die Höhen- und Volumenentwicklung über MThw des gesamten Außensandes der des nördlichen Parkplatzes vor Ording gegenübergestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, daß die Höhen- und Volumenentwicklung des Parkplatzes und des gesamten Außensandes sehr ähnlich verlaufen. Dies wird durch die Korrelationskoeffizienten zwischen den Datenreihen von 0,855 resp. 0,932 untermauert. Es kann somit gefolgert werden, daß der Parkplatzbetrieb zumindest im geomorphologischen Sinne keine unmittelbaren Folgen für die Stabilität des Außensandes hat.

#### 4.3 Dünenentwicklung

Wie in Kap. 2.2 beschrieben, entwickelten sich bereits zwischen 1362 und 1532 Dünen im Bereich St. Peter-Ording. Dieser östlich des heutigen St. Peter-Ording-Sandes gelegene Dünengürtel wurde ab 1864 durch Halmpflanzungen und Aufforstungen zunehmend in seiner Lage festgelegt. Auf dem eigentlichen Sand gab es bis Anfang der 80er Jahre keine nennenswerten Dünenbildungen. Dies änderte sich um 1981, als sich vom Ortsteil Ording



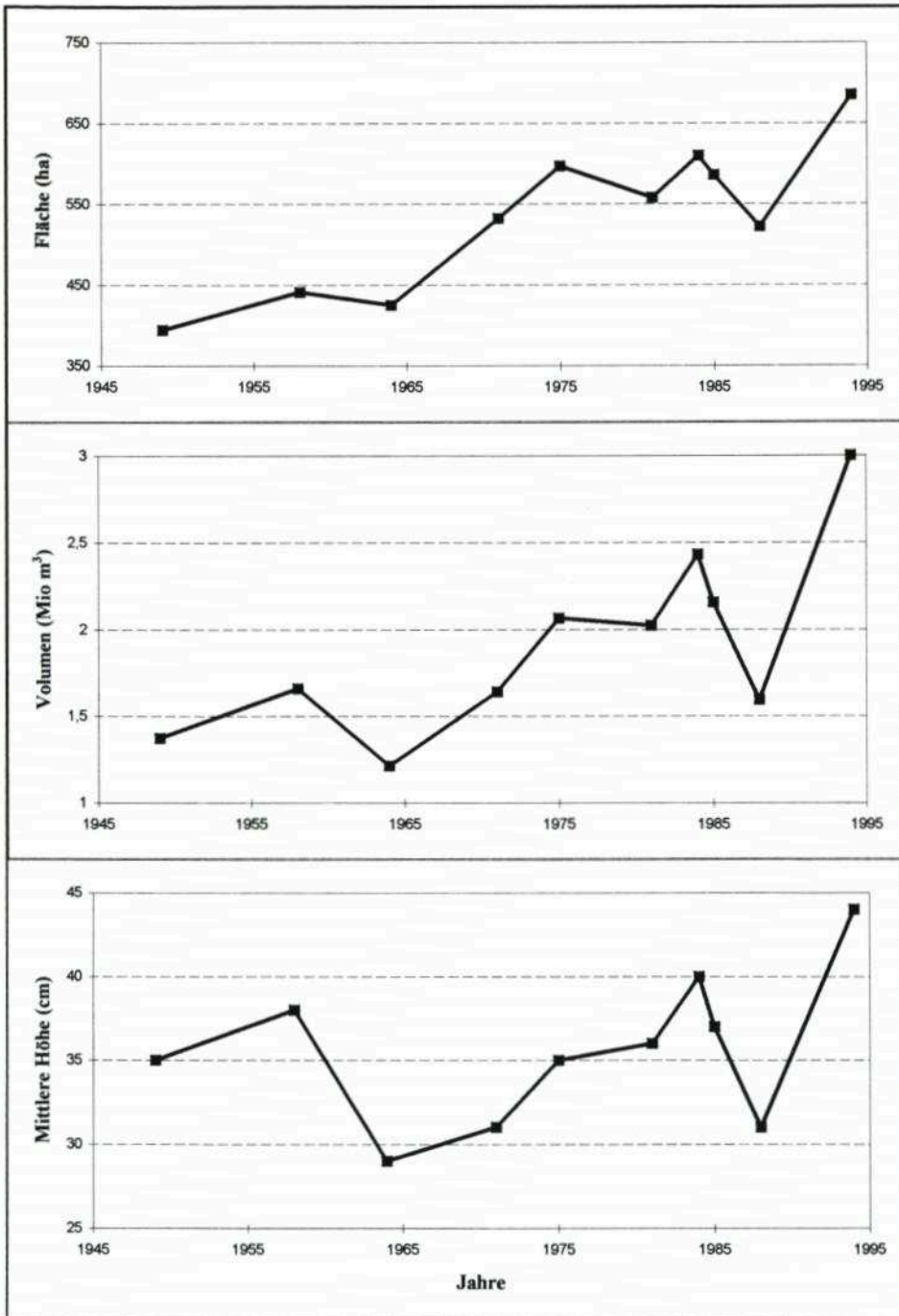


Abb. 16: Flächen-, Volumen- und Höhenentwicklung des St. Peter-Ording-Sandes über MThw (NN +1,1 m bis 1975; NN +1,2 m ab 1981) von 1949 bis 1994

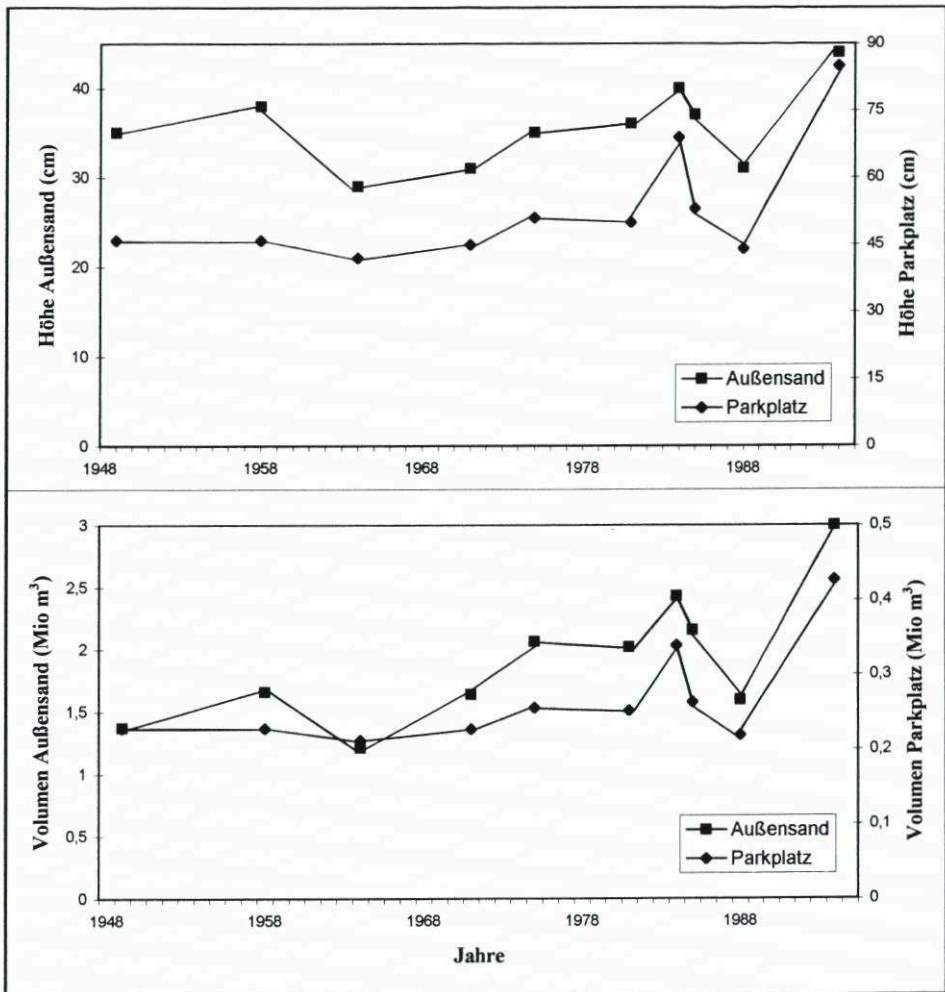


Abb. 17: Vergleich der Höhen- und Volumenentwicklung über MThw (NN +1,1 m bis 1975; NN +1,2 m ab 1981) des nördlichen Parkplatzes mit der des gesamten Sandes von 1949 bis 1994

ausgehend in südlicher Richtung ein schmaler Dünenzug zu entwickeln begann. Im Jahre 1994 erreichten einige Dünen vor Ording bereits eine maximale Höhe von NN +8,7 m. Zu dieser Zeit erstreckte der Dünen Gürtel sich über eine Länge von 4 km von Ording im Norden bis Böhl im Süden und bedeckte eine Fläche von 68 ha. In seinem Verlauf folgt der Dünenzug genau der Grenze zwischen dem Außensand und der Sandsalzwiese.

In Abb. 18 ist die Volumen- und Flächenentwicklung (über NN + 2,0 m) der Düne aufgezeigt. Im Jahre 1981 existierte westlich des alten Dünen gürtels keine nennenswerte bzw. stabile Düne. Im Jahre 1984 wurden dann westlich vom Ortsteil Ording neue Dünen in der Wattgrundkarte dargestellt. Wie aus der Abb. 18 hervorgeht, findet seit dieser Zeit eine ziemlich lineare Zunahme des Sandvolumens und der Fläche der Dünen statt. Eine durch die Volumenwerte errechnete lineare Regression ergab eine jährliche Zunahme von 36 000 m<sup>3</sup> seit 1982.

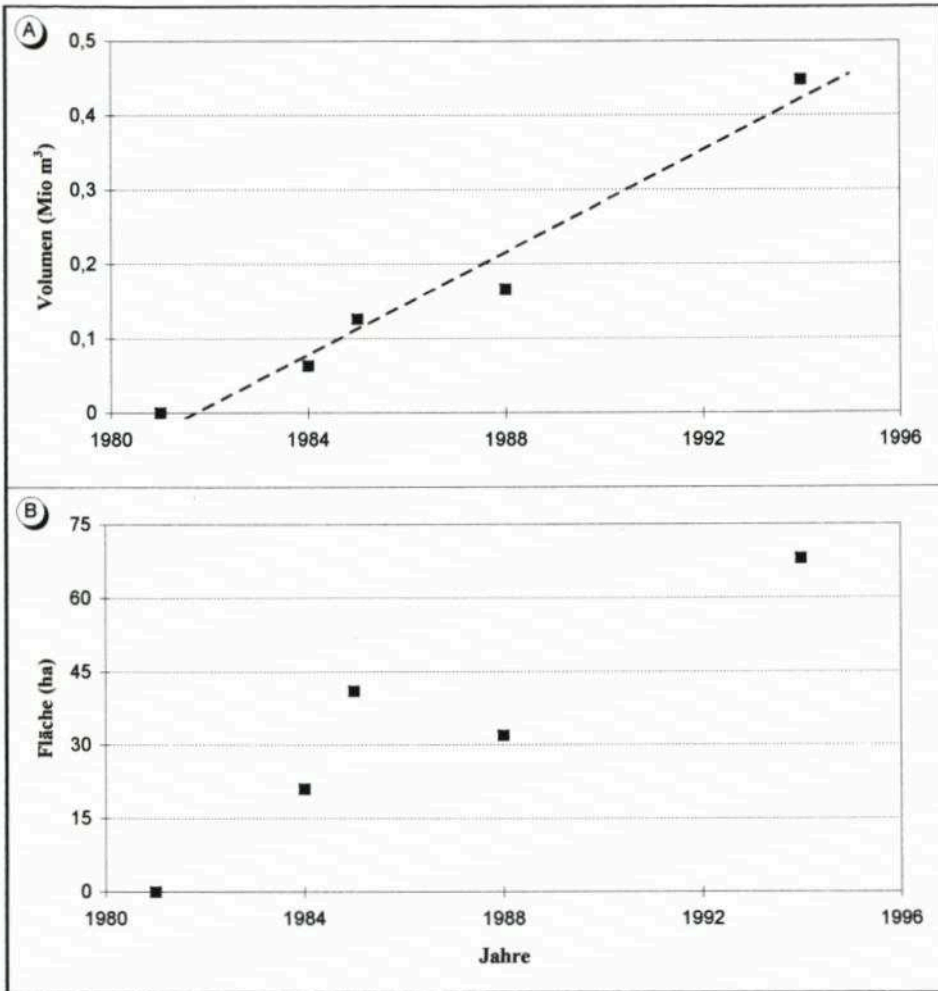


Abb. 18: Volumen- und Flächenentwicklung der Düne (über NN +2,0 m) auf dem St. Peter-Ording-Sand von 1981 bis 1994

Anscheinend haben sich die Bedingungen am Anfang der 80er Jahre derart verbessert, daß eine erneute Dünenbildung initiiert wurde. Es stellt sich die Frage nach den Ursachen. In Abb. 12 (mittleres Diagramm) ist dargestellt, wie die Anlandung der Sandbank sowie die Verlandung des Badeprieles zu einer Verbreiterung des trockenen Strandes bis zum Jahre 1981 um gut 1000 m auf über 1500 m führte. Diese Verbreiterung war gerade westlich von Ording besonders ausgeprägt. Somit wurden hier anfang der 80er Jahre ausgedehnte, deutlich über MThw herausragende (trockene) Flächen der Windeinwirkung bzw. äolischen Prozessen ausgesetzt. Der Sandflug wird hierdurch bei entsprechenden Winden sicherlich stark zugenommen haben. Aus der Abb. 5 wird ersichtlich, daß der Anteil dieser zur Initiierung von Sandflug benötigten Winde aus dem NW-Sektor nach einem Minimum Anfang der 70er Jahre kontinuierlich zunimmt. Ein dritter wichtiger Punkt ist die Tatsache, daß der Außensand zwischen den Ortsteilen Ording und St. Peter direkt (ohne dazwischenliegenden



Landesschutzdeich) an die alte Dünenkette grenzt. Die für die Dünenbildung erforderliche Flora war hier also schon in unmittelbarer Nähe vorhanden. Diese Faktoren gemeinsam werden die Initialzündung einer neuen Dünenbildung auf dem Außensand ermöglicht haben. Vom Nukleus bei Ording ausgehend konnten sich dann auch weiter nach Süden Dünen entwickeln. Die Lage an der Grenze zwischen Außensand und Sandsalzwiese hängt mit der „sandfangenden“ Wirkung der Salzwiesenvegetation zusammen. Das auf dem Außensand im Flug befindliche Material wurde durch die Vegetationsdecke eingefangen und kam in deren Randbereichen zur Ablagerung. Bedingt durch die zunehmende Versandung des Substrats setzte hier anschließend eine Vegetationssukzession ein. Diese Hypothese wird durch das Vorhandensein eines ausgeprägten Salzwiesen-Vegetationshorizontes unter dem südlichen Teil des Dünenzuges erhärtet.

## 5. Synthese und Ausblick

Auslöser für die Sedimentbewegungen bzw. die Morphodynamik an sandigen Küsten sind die energetischen Einwirkungen aus Seegang, Tide- und Triftströmung auf die Sohle. Vorrangig in der Brandungszone (Vorstrand und nasser Strand) wird Material aufgewirbelt, das bei schräg zur Küste anlaufenden Wellen durch die küstenparallele Strömungskomponente entlang der Küste verfrachtet wird, der sog. Küstenlängstransport oder Longshore Drift. Wenn durch diesen Prozeß mehr Material stromabwärts aus einem Küstenabschnitt exportiert wird als stromaufwärts ins Gebiet eingetragen wird, weicht die Uferlinie zurück. Nur wenn die Erosionen bzw. die Rückverlagerung durch entsprechende Sedimentationen ausgeglichen werden, befindet sich der Küstenabschnitt in einem morphologisch stabilen Zustand. Entlang der schleswig-holsteinischen Westküste existiert südlich von Westerland ein durch das vorherrschende Windklima bedingter südwärtsgerichteter Küstenlängstransport (PARTENSKY, 1983).

Im Bereich des Süderhever-Seegats wird dieser seegangsbedingte Longshore Drift von der Tidedynamik überlagert. Während der (für die Morphologie des Ebb-Deltas bestimmenden) Ebbphase wird das aus dem Hever-Watteinzugsgebiet ausströmende Tidewasser durch die zu dieser Zeit südwärtsgerichtete Tideströmung im Küstenvorfeld nach Süden abgelenkt. Dies zwingt die Tiderinnen und die dazwischen gelegenen subtidalen Barren im Mündungsbereich, sich ebenfalls südwärts zu drehen bzw. zu verlagern. Das mit dem Küstenparalleltransport in Bewegung befindliche Material wird an der Nordflanke des Deltas teilweise in den subtidalen Barren gebunden und als Resultat eines komplexen Transportmechanismus (EHLERS, 1988) weiter nach Süden transportiert.

Neben den küstenparallelen Sandbewegungen finden im Bereich St. Peter-Ording-Sand auch signifikante quer zur Küste gerichtete Umlagerungen statt. Bei stürmischen Wetterlagen mit erhöhten Wasserständen wird ein Teil des in der Brandungszone aufgewirbelten Materials durch sog. Overwash-Prozesse (u. a. CARTER, 1988) direkt zum trockenen Strand verfrachtet. Ein weiterer Teil des Materials kann auch in entgegengesetzter Richtung zum tieferen Wasser transportiert und dort abgelagert werden (BRUUN, 1962, 1988).

In der Konsequenz ergibt sich folgendes Prozeß-Reaktions-Modell des St. Peter-Ording-Sandes:

Von 1949 bis Anfang der 60er Jahre wich die Westflanke des Sandes durch Brandungseinwirkung bei einem ansteigenden MThw-Niveau in landwärtiger Richtung zurück. Das in der Brandungszone erodierte Material wurde teilweise durch tide- und seegangsbedingte Küstenlängstransporte in das Böhler Prielsystem hinein- und aus dem Untersuchungsgebiet

heraustransportiert. Ein weiterer Teil wurde während Sturmhochwasser durch „overwashing“ küstenwärts zur Oberfläche und zur Leeseite des Außensandes verfrachtet, wo es nach Abklingen der Sturmflut zur Ablagerung kommen konnte. Diese landwärtige Verlagerung des Sandes als Reaktion auf einen Meeresspiegelanstieg wird mit „Rollover“ bezeichnet und stimmt gut mit den Beobachtungen an den nordfriesischen Außensänden überein (TAUBERT, 1982; HOFSTEDE, 1993, 1997).

Ab Ende der 50er Jahre wurde diese ostwärts gerichtete Entwicklung im Bereich des St. Peter-Ording-Sandes durch die Materialanlandung aus einer ehemaligen subtidalen Barre aus dem Süderhever-Seegat überlagert. Die im Ebb-Delta der Süderhever von der Tidedynamik verursachte süd- bis südostgerichtete Verlagerung der Barre wurde mit Annäherung an die Westflanke des St. Peter-Ording-Sandes zunehmend durch Seegangseinwirkung beeinflusst. Unter Einfluß dieser Einwirkung verlagerte die Barre sich bei gleichzeitiger Erhöhung nach Osten in Richtung St. Peter-Ording-Sand. Unmittelbar nachdem die Sandbank aufgetaucht war setzte durch südwärts gerichteten Küstenparalleltransport die Bildung eines Sandhakens ein. Zwischen dem südlichen Teil dieses Hakens und dem Außensand verblieb zunächst eine Rinne, der sog. Badepriel. Da der Meeresspiegel auch während dieser akkumulativen Phase unvermindert anstieg, verlagerte sich die Westflanke des neugebildeten Sandhakens nach Osten und wurde der Badepriel durch „overwashing“ zunehmend zugeschüttet (Rollover, s. o.). Bedingt durch diese Verlandung verwischte die Grenze zwischen Sandhaken und trockenem Strand zunehmend, d. h. der Sandhaken verschmolz mit dem trockenen Strand. Die Anlandung des Sandkörpers an der Westflanke des Außensandes war um 1981 abgeschlossen, wobei er vier Stadien in seiner Entwicklung durchlief. Als subtidale Barre im Ebb-Delta der Süderhever angefangen evolvierte er zur Brandungsbank im Vorstrandbereich des Sandes. Anschließend entwickelte er sich zu einem dem Sand vorgelagerten Sandhaken um schließlich als Teil des trockenen Strandes zu enden.

Ab dem Jahre 1981 wurde die morphologische Entwicklung des St. Peter-Ording-Sandes als Reaktion auf das stetig steigende MThw-Niveau wieder durch Rollover-Prozesse bzw. landwärtige Verlagerung der Westflanke bei gleichzeitiger Sedimentation auf dem Außensand dominiert. Insgesamt wurde die Bilanz wieder negativ. Trotz negativer Gesamtbilanz begann, begünstigt durch die große Breite des trockenen Strandes, an der Leeseite des Außensandes die Bildung eines neuen Dünenzuges.

Auch nach 1988 hielten die landwärtige Verlagerung der Westflanke im mittleren und nördlichen Bereich sowie die Dünenbildung an der Leeseite an. Im südöstlichen Bereich dagegen fand erneut ein großer Materialimport statt, dessen Herkunft bisher durch fehlende Kartengrundlagen nicht geklärt werden konnte.

Schlußfolgernd ist festzuhalten, daß die bisherige Stabilität des Sandes im Beobachtungszeitraum durch eine Materialanlandung von etwa 5 Mio. m<sup>3</sup> aus einer ehemaligen subtidalen Barre zwischen 1964 und 1981 gewährleistet wurde. Diese Anlandung konnte dank umfassender und detaillierter Kartengrundlagen des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide quantitativ nachvollzogen und ursächlich gedeutet werden. Die älteren Kartenaufnahmen deuten daraufhin, daß ähnliche Materialanlandungen auch im Zeitraum 1878 bis 1928 stattgefunden haben. Während die bisherige morphologische Entwicklung des gesamten Sandes somit phasenweise positiv und negativ verlief, unterlag der über MThw herausragende Außensand während des Untersuchungszeitraumes einem positiven Trend. Für den gesamten Sand gemittelt wurde während des Beobachtungszeitraumes eine relativ geringe Intensität der Materialumlagerungen festgestellt, in Randbereichen war die Morphodynamik jedoch wesentlich intensiver.

Die künftige Stabilität des Außensandes wird maßgeblich davon abhängen, ob die durch



den MThw-Anstieg verursachte Rückverlagerung der Westflanke auch künftig durch entsprechende Anlandungen großer Sedimentmassen aus der Nordsee ausgeglichen werden kann. Diese Frage gewinnt noch mehr an Bedeutung unter dem Aspekt der erwarteten Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges (WARRICK et al., 1995). In deren Folge würden die Rückverlagerungsraten der Westflanke wahrscheinlich noch zunehmen.

Die periodischen Materialanlandungen sind die Folge des großräumigen südwärtsgerichteten Küstenparalleltransportes (Longshore Drift) und der südwärtsgerichtete Barrenverlagerung im Ebb-Delta des Hever Seegats. Eine Verringerung des Küstenparalleltransportes könnte durch Änderungen im Windklima (Süddrehung der transportwirksamen Windrichtungen und/oder Abnahme der Windgeschwindigkeiten) verursacht werden. Es ist derzeit jedoch nicht möglich, wissenschaftlich fundierte Aussagen zum künftigen Windklima zu treffen. Eine wesentliche Änderung in der südwärtsgerichteten Barrenverlagerung erscheint eher unwahrscheinlich.

## 6. Danksagung

Dank gelten Frau Meike Lobitz und Herrn Carsten Vogt, die im Rahmen eines Praktikums im Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein die morphologischen Rohdaten aufbereitet und im MORAN eingegeben haben. Die Wattgrundkarten wurden vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde zur Verfügung gestellt.

## 7. Schriftenverzeichnis

- BRUUN, P.: Sea-level rise as a cause of shore erosion. Amer. Soc. Civil Eng. Proc., Journal of the Waterway and Harbours Division, H. 88: 117–130, 1962.
- BRUUN, P.: The BRUUN-Rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages. Journal of Coastal Research H. 4(4): 627–648, 1988.
- CARTER, R. W. G.: Coastal Environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Acad. Press, London, S. 617, 1988.
- EHLERS, J.: The morphodynamics of the Wadden Sea. A. A. Balkema Publ.: S. 397, 1988.
- FÜHRBÖTER, A. u. H.-H. DETTE: Strandvorspülungen vor der Westküste von Sylt. Die Küste, H. 53: 51–126, 1992.
- HOFSTEDE, J. L. A.: Morphologische Entwicklung der nordfriesischen Außensände. Berichte des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel, H. K1: S. 29, 1993.
- HOFSTEDE, J. L. A.: Meeresspiegelanstieg und Auswirkungen im Bereich des Wattenmeeres. In: LOZAN, J. L. et al. (Hrsgb.). Warnsignale aus dem Wattenmeer: 17–22. Blackwell Wiss. Verlag, Berlin, 1994.
- HOFSTEDE, J. L. A.: Process-response Analysis for the North Frisian Supratidal Sands (Germany). Journal of Coastal Research 13/1: 1–7, 1997.
- KLUG, H. u. A.-C. KLUG: Tourismus als Belastungsfaktor an der Küste. In: LOZAN, J. L. et al. (Hrsgb.). Warnsignale aus dem Wattenmeer: 66–74. Blackwell Wiss. Verlag, Berlin, 1994a.
- KLUG, H. u. A.-C. KLUG: Der Fremdenverkehr als Belastungsfaktor an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste – Raumbeispiele aus Sylt und Eiderstedt. Greifswalder Geogr. Arbeiten, Bd. 10: 157–171, 1994b.
- KLUG, A.-C. u. H. KLUG: Untersuchungen zur touristischen Aufnahmekapazität schleswig-holsteinischer Nordseestrände. Jahresbericht 1994 des FTZ Westküste, Büsum, 69–71, 1995.
- PARTENSCKY, H.-W.: Untersuchungen über die Herkunft der Sedimente infolge von flutraumverändernden Baumaßnahmen in Watt-Priel-Systemen und morphologischen Untersuchungen im Außeneider-Bereich. Gutachten für das Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Kiel, 143 S. (unveröff.), 1983.



- PRANGE, W.: Die Bedeichungsgeschichte der Marschen in Schleswig-Holstein. Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet, Bd. 16: 1-53, 1986.
- SCHMIDT, H. u. H. VON STORCH: German Bight storms analysed. *Nature*, H. 365: 791, 1993.
- SCHÜLLER, A.: Zur Morphodynamik des Küstenvorfeldes – Innere Deutsche Bucht. Umsatz- und Bilanzanalysen. *Berliner Geogr. Studien*, H. 35, 1991.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen (Teil 1 der Ergebnisse eines KFKI-Projektes). *Die Küste*, H. 45, 1-57, 1987.
- TAUBERT, A.: Wohin wandern die Außensände? *Nordfriesland*, H. 16/1 u. 2.: 37-48, 1982.
- WARRICK, R. A., C. LE PROVOST, M. F. MEIER, J. OERLEMANS u. P. L. WOODWORTH: Changes in Sea Level. In: J. HOUGHTON, J. T. (Eds.). *Climate Change 1995, the science of climate change*. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, 1995.