Die Küste, 23 (1972), 63-111

Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog

Von K. Lüders, A. Führböter und W. Rodloff

Summary

In the North West of the Island Langeoog before the Eastern North Sea coast of Germany, since 1940 heavy beach and dune erosion was observed, with strong acceleration after 1968. The loss of the whole barrier dune had to be feared at last.

By an expert team of the Küstenausschuss Nord- und Ostsee *(Coastal Board North and Baltic Sea) the different components of the erosion process were analysed, also in connection with the Coastal inlet between the islands. No longterm morphological trend in the behaviour of the coast line development could be detected, however.*

The reason of the strong erosion after 1960 was explained by a local change in the surf regime where the normal spilling breaking was approaching the dunes and causes reflection at the seaward slopes of the dunes which becoming formed into cliffs. An artificial beach nourishment together with a framework of sandfilled plastic hoses was recommandated; the experiences till today are verificating this concept because no further dune erosion ocurred in the winter 1971/72.

Inhalt

I. Vorbemerkung 65
II. Über die Schutzwürdigkeit des Pirolatales 66
III. Zur Mechanik des Dünenabbruchs 67
IV. Morphologische Untersuchungen 69
A. Dünen- und Strandentwicklung 69
B. Seegat Accumer Ee, Hauptstromrinne 70
C. Langeooger Balje, Wattgebiet 75
D. Barre des Seegats Accumer Ee, Platenwanderung, Platenanlandung 81
E. Vorstrand, Strand, Randdüne 85
V. Bauliche Sicherung des Pirolatales 92
A. Vorschläge des Wasser- und Schiffahrtsamtes Norden 92
B. Empfehlungen der Gutachter 95
C. Ablauf und Stand der Bauarbeiten bis März 1972 99
VI. Beurteilungen und Empfehlungen 102
A. Beurteilung der bisherigen Wirkung des Schlauchlängswerkes vor dem Pirolatal 102
B. Beurteilung der künftigen Dünen- und Strandentwicklung 107
C. Empfehlungen für weitere Sicherungsvorkehrungen 109
VII. Zusammenfassung 109
VIII. Schriftenverzeichnis 110

Anschriften der Verfasser:

Führböter, Alfred, Dr.-Ing., o. Professor an der TU Braunschweig, 33 Braunschweig, Spielmannstr. 12a
Lüders, Karl, Dr.-Ing., Regierungsdirektor a. D., 3 Hannover, Menschingstr. 7
Rodloff, Walter, Dr.-Ing., Regierungsbaudirektor a. D., 23 Kronshagen/Kiel, Birkenweg 8

Abb. 1. Langeoog, Übersichtsplan (Entwurf WSA Norden)

Die Küste, 23 (1972), 63-111

I. Vorbemerkung

Die zur ostfriesischen Inselkette gehörende Insel Langeoog wird im Westen durch das Seegat Accumer Ee und im Osten durch die Otzumer Balje begrenzt (Abb. 1). Die Insel ist bei mittlerem Tidehochwasser (MThw) 19,7 km² groß, rund 11 km lang und im Mittel 1,5 km breit. Massive Strand- und Dünenschutzwerke waren wegen der seit langer Zeit ausgeglichenen Sandbilanz (Abbruch, Anwachs) bisher nicht erforderlich gewesen.

Etwa seit 1940 sind im Bereich des Pirolatales, einem im Schutz der hohen Randdüne nordöstlich von der Ortslage Langeoog gelegenen Dünentales, Strand- und Dünenverluste eingetreten, die über die normalen Veränderungen früherer Zeiten hinausgingen. Seit 1968 verstärkten sich die Abbrüche und erweiterten sich auch in westlicher Richtung. Im Winter 1969/1970 entstand am seeseitigen Fuß der Randdüne eine bis 3 m hohe Steilkante (Abb. 2).

In der Folgezeit nahm der Strand- und Dünenabbruch Ausmaße an, die befürchten ließen, daß mit dem gänzlichen Verlust der Randdüne und damit mit der Überflutung des Pirolatales bei Sturmflut gerechnet werden mußte, wenn nicht schnellstens Sicherungsvorkehrungen getroffen würden. Vom Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) Norden waren Untersuchungsberichte und verschiedene Bauentwürfe zur Sicherung der Insel Langeoog (23, 24, 25) erarbeitet worden.

Abb. 2.
Steilkante der Randdüne vor dem Pirolatal auf Langeoog. (Photo: WSA Norden, 28. 3. 1970)

Auf Veranlassung des Niedersächsischen Ministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten wurde der Küstenausschuß Nord- und Ostsee gebeten, eine Gutachtergruppe für die Ausarbeitung einer Stellungnahme zu den Bauentwürfen einzusetzen. Der vom Küstenausschuß gebildeten Gutachtergruppe gehörten an:
o. Professor Dr.-Ing. A. Führböter, Braunschweig, Regierungsdirektor a. D. Dr.-Ing. K. Lüders, Hannover (zugleich Sprecher der Gutachtergruppe), und Regierungsbaudirektor a. D. Dr.-Ing. W. Rodloff, Kiel.

Das Gutachten wurde in zwei Teilen erstattet. Wegen der Gefahrenlage, in der sich seit 1970 die Randdüne vor dem Pirolatal befand, sollte die gutachtliche Beurteilung eines sofort

Die Küste, 23 (1972), 63-111

auszuführenden Schutzwerkes für die Randdüne vorrangig erstellt werden, damit diese Arbeiten noch im Laufe des Jahres 1971 ausgeführt werden konnten. Diese Beurteilung ist in der Hauptsache im 1. Teil des Gutachtens enthalten, der im April 1971 abgeschlossen wurde. Im 2. Teil, der im Juli 1972 fertiggestellt wurde, sind die grundlegenden Untersuchungen über das Naturgeschehen im Seegatgebiet der Accumer Ee behandelt, die Aufschluß über die Frage geben, ob in den letzten Jahrzehnten morphologische oder hydrodynamische Änderungen im Ablauf der Sandzuwanderung nach der Insel Langeoog erkennbar sind, die für die seit 1940 bereits zweimal eingetretenen starken Strand- und Dünenabbrüche im Nordwesten der Insel verantwortlich zu machen sind. Außerdem wurden die bisherige Wirkung des im 1. Teil des Gutachtens vorgeschlagenen und im Jahre 1971 ausgeführten neuartigen Sicherungswerkes vor der Randdüne des Pirolatales sowie die künftige Entwicklung des Nordwest-Strandes von Langeoog gutachtlich beurteilt.

Nachstehend sind die technischen Ausführungen der beiden Gutachtenteile zusammengefaßt dargestellt.

II. Über die Schutzwürdigkeit des Pirolatales

Wie die Untersuchungen des WSA Norden (23) zeigen, befindet sich der Dünengürtel nördlich des Pirolatales in den letzten Jahren in beschleunigtem Abbruch. Es hängt vor allem von den Sturmflut-Wetterlagen der nächsten Jahre ab, mit welcher Geschwindigkeit der Abbruch fortschreiten wird. Wenn die Tendenz der vergangenen Jahre anhält, ist in etwa 5 Jahren damit zu rechnen, daß die Randdüne bis auf Reste von der Brandung aufgearbeitet sein wird. Das Pirolatal läge dann offen zur See, seine tiefsten Stellen würden bei sehr hohen Sturmfluten (über NN + 3 m) überflutet werden. Die Größe der Überschwemmungsfläche ist für den Ruhespiegel NN + 4,0 m zu 27 ha ermittelt worden. Die in den Herrenhusdünen vorhandenen Trinkwasserbrunnen würden dadurch unbrauchbar werden, sonst aber befinden sich in dem betroffenen Gebiet keinerlei Bauten oder Anlagen, die unmittelbar bedroht sein würden. Auch für den Ort Langeoog ergäbe sich selbst dann noch keine Gefahr, wenn sich der hochwasserfreie Strand noch weiter in das Gebiet des heutigen Pirolatales verlagerte. Immerhin wurde der Ort zu einer Zeit zum Seebad, als das jetzige Pirolatal noch flacher trockener Strand war. Erst 1891 bildeten sich die ersten Vordünen auf diesem Gebiet.

Würde die jetzige Randdüne vor dem Pirolatal aufgegeben werden, so ließe sich der Inselschutz durch sturmflutsichere Sanddämme in geziemender Entfernung vom Strande mit geringem Aufwand herstellen, denn diese Dämme brauchten nur gegen Überflutung aber nicht gegen Wellenbelastung bemessen zu werden.

Mit diesem Verfahren wäre der Vorteil verbunden, daß der jetzt vorhandene Strand im natürlichen Zustand bliebe; seine landseitige Begrenzung würde dann ein flaches Kliff bilden. Es könnte sogar eintreten, daß hier bei geeigneten Wetterlagen wieder Dünen entstehen, während die jetzt vorhandene steile und hohe Abbruchswand eine neue Dünenbildung erschwert.

Ob und wann die gegenwärtig zurückweichende Strandlinie zum Stehen kommt oder ob, bei vermehrter Sandzufuhr vom Riffgebiet her, der Abbruchsprozeß von selbst wieder rückgängig wird, kann heute noch nicht beantwortet werden. Die Auswertung der historischen Karten läßt es aber unwahrscheinlich erscheinen, daß das gesamte Gebiet des Pirolatales zum tidebeeinflußten Gebiet wird und daß dann die Herrenhusdünen gefährdet werden (Abb. 1).

Es darf das Pirolatal in seiner jetzigen Gestalt nicht allein von kommerziellen Wertvorstellungen her gesehen werden. Es stellt mit seiner windgeschützten Lage in unmittelbarer Orts- und Seenähe und mit seinem reichhaltigen Pflanzenbewuchs einen Landschaftsteil der Insel

Die Küste, 23 (1972), 63-111

von hohem schutzwürdigem Umweltswert dar. Damit verändert sich die Aufgabe. Ein bebautes Pirolatal könnte nach seinem finanziellen Wert gemessen und die Schutzmaßnahmen diesem Wert angepaßt bzw. unterlassen werden. Hier aber geht es um die Aufgabe, ein Erholungsgebiet zu erhalten.

Daraus folgt, daß die noch vorhandenen Randdünen den Abbruchskräften entzogen werden müssen, und zwar durch Maßnahmen, die von der Seeseite auszugehen haben. Eine Anschüttung der Dünen von der Landseite her würde das Landschaftsbild stören und im übrigen so gut wie nutzlos sein, weil dem fortbestehenden Abbruch immer neue Sandmassen entgegengestellt werden müßten.

Es geht hier darum, in irgendeiner Weise das Kräftespiel am Fuß des Kliffs, d. h. in erster Linie die Auswirkungen der Brandung, so zu beeinflussen, daß der weitere Abbruch mit Sicherheit aufgehalten wird. Dabei sollte aber auch daran gedacht werden, daß der heute noch vorhandene Strand vor den Dünen, der wegen der Ortsnähe ebenfalls als Erholungsgebiet anzusehen ist, erhalten bleibt.

III. Zur Mechanik des Dünenabbruchs

Es muß zwischen „normaler Strandbrandung" und „Kliffbrandung" unterschieden werden.

Mit Strandbrandung ist eine Brandung gemeint, bei der nach dem Brechen der Welle die Rest-Energie in einem Auflaufschwall verbleibt, der als Wellenauflauf seine kinetische in potentielle Energie umsetzt, bis die Bewegung auf der Böschung zum Stillstand kommt und der Rücklauf des Wassers einsetzt. Ein Teil der Energie wird dann wieder als kinetische Energie reflektiert, während die restliche Energie durch Vermischungsturbulenz, Sohlreibung und Versickerung umgewandelt wird.

In der eigentlichen Brecherzone wird zwar der Großteil der ankommenden Wellenenergie umgewandelt, hier liegt aber die Sohle noch unter einem schützenden Wasserpolster, während in der Wellenauflaufzone hohe Schubspannungsgeschwindigkeiten erreicht werden. Die damit verbundenen Sandbewegungen halten sich im Auf- und Abwärtstransport etwa das Gleichgewicht, bei schrägem Auflauf tritt allerdings eine Längsversetzung hinzu. Immer aber verteilt sich die Rest-Energie auf die verhältnismäßig große Fläche, die von dem Wellenauflauf beansprucht wird.

Ganz anders werden die Verhältnisse, wenn der Auflaufschwall durch ein Kliff plötzlich gebremst wird. Es tritt hier eine Reflexion auf, bei der auf die Kliffwand nicht nur erhöhte Drücke ausgeübt werden, sondern bei der in der Zone zwischen der Brecherlinie und dem Kliff erheblich mehr Wellenenergie umgesetzt werden muß als bei der ungestörten Strandbrandung, bei der zur Energieumwandlung eine größere Fläche zur Verfügung steht. Höhere Turbulenz und damit ein höheres Transportvermögen sind die Folge. Bei schrägem Wellenangriff wird ein Teil der überschüssigen Energie in einen starken Längsstrom vor dem Kliff umgesetzt, der erhebliche Erosionen hervorruft.

Diese Konzentration der Energieumwandlung verstärkt sich um so mehr, je näher der Brechpunkt an den Kliffuß rückt.

Bei erhöhten Wasserständen kann es vorkommen, daß die Wellen unmittelbar am Kliffuß branden und mit Druckschlägen und Spritzwasser ihre ganze Energie unmittelbar am Kliff umsetzen. In diesem Falle erreicht die Erosion ihr Maximum.

Bei noch höheren Wasserständen dagegen kann es eintreten, daß die Wellen vor dem Kliff nicht mehr brechen, sondern daß sich vor dem Kliff eine stehende Welle *(Clapotis)* bildet. Hier wird dann die Wellenenergie nicht mehr in andere Energieformen umgesetzt, sondern seewärts

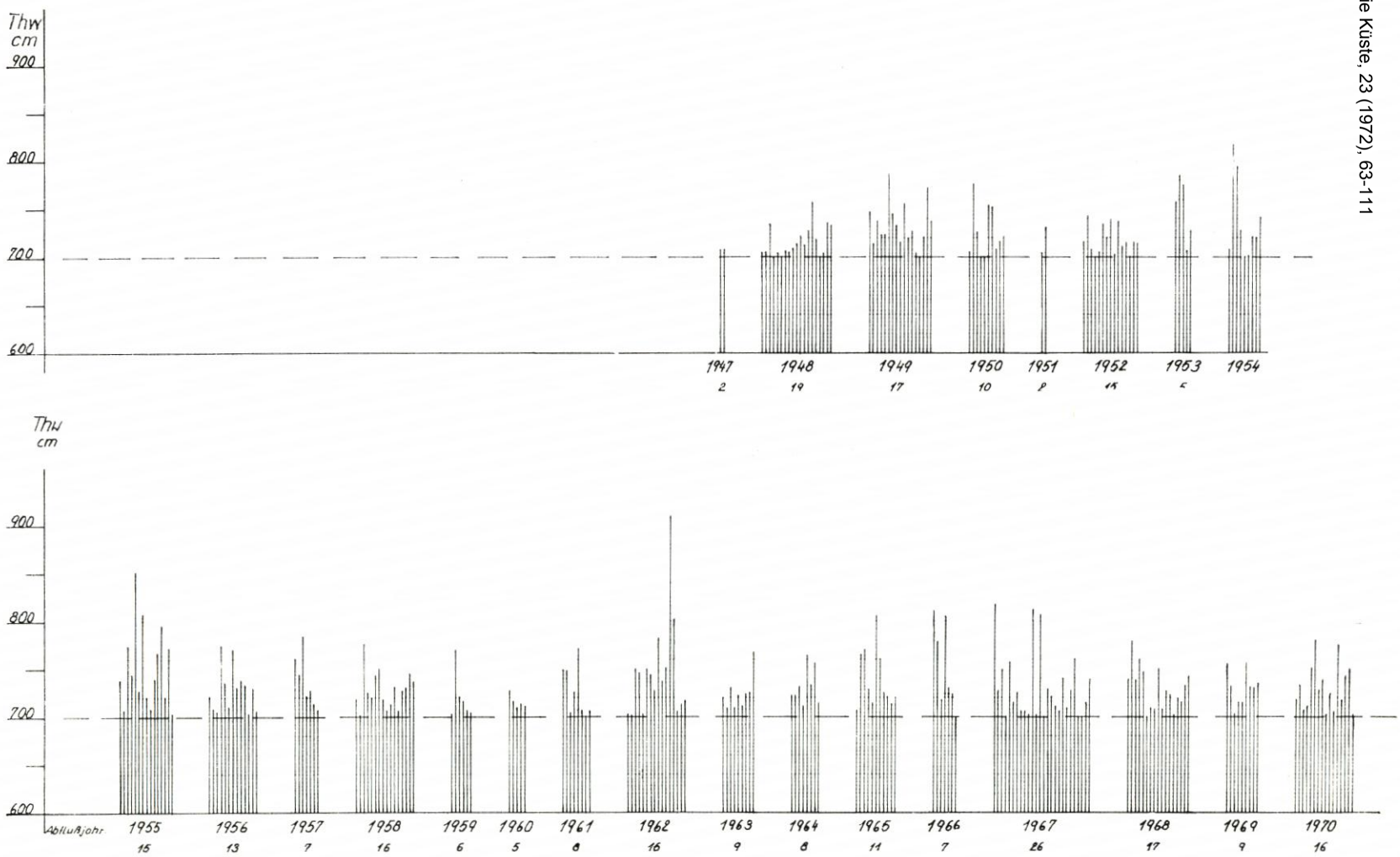


Abb. 3. Sturmflutstatistik (Thw $\geqq$ 700 cm) 1947/1970 am Pegel Norderney (Auswertung: WaWiAmt Aurich)

Die Küste, 23 (1972), 63-111

zurückgeworfen. Zwar treten auch hierbei starke Abbrüche am Kliff sowie in einer Zone von etwa einem Viertel der Wellenlänge vor dem Kliff auf, wo der erste Schwingungsknoten liegt, der mit hohen Orbitalgeschwindigkeiten verbunden ist, dennoch ist der Abbruch nicht so stark wie beim Brechen der Wellen am Kliff. So erklärt es sich, daß eine extrem hohe Sturmflut mit Vollreflexion an der Kliffwand nicht so abbruchwirksam ist wie eine Reihe mittlerer Sturmfluten, bei denen die Wellen unmittelbar am Kliff branden.

Wie aus der Zusammenstellung des Wasserwirtschaftsamtes Aurich auf Abbildung 3 hervorgeht, sind am Pegel Norderney, der annähernd auch die Verhältnisse für Langeoog wiedergibt, 68 Sturmfluten in den Jahren von 1967 bis 1970 mit Scheitelwasserständen von NN + 2,0 m und darüber verzeichnet worden. In dem gleichen Zeitraum von 1963 bis 1966 waren es dagegen nur 35 Sturmfluten. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die in den letzten Jahren festgestellte Beschleunigung des Abbruchs der Randdüne vor dem Pirolatal auch mit der erhöhten Häufigkeit mittlerer Sturmfluten zusammenhängt.

Auf jeden Fall ist aber – gleiche Seegangsverhältnisse vorausgesetzt – an einer Dünenkliffküste der strandparallele Sandtransport aus den genannten Gründen größer als bei einem Strand, auf dem die Wellen ungestört ausbranden können. Wenn erst einmal der erste Ansatz zu einer Kliffbildung vorhanden ist, wird der Abbruch stark beschleunigt.

Es ist die gleiche Erscheinung, die überall dort beobachtet wird, wo Längswerke den Wellenauflauf begrenzen; eine Strandabnahme findet selbst dort statt, wo die Vorstrandneigung unverändert bleibt. Die Strandabnahme vor dem Kliff hat aber wiederum zur Folge, daß höhere Wellen an das Kliff gelangen können, wodurch der Abbruch weiter verstärkt wird.

Abschließend ist zu bemerken, daß ein hohes und steiles Kliff auch bei trockenem Strand und geeigneter Windrichtung eine natürliche Regeneration der Düne vom Strand her erschwert, weil der Sand die hohe Wand nicht überwinden kann. Eine genügend flache Außenböschung, am besten mit Bewuchs, ist die günstigste Voraussetzung für den Anwachs.

IV. Morphologische Untersuchungen

A. Dünen- und Strandentwicklung

In den letzten 25 Jahren ist der Nordweststrand der Insel Langeoog zweimal von starken Abbruchserscheinungen betroffen worden. In den Jahren nach 1945 befand sich eine etwa 1 km lange Abbruchstrecke im Gebiet westlich des Langeooger Wasserturms (Abb. 4). Damals erreichte der Rückgang des Randdünenfußes in den 8 Jahren von 1947 bis 1955 bei Meßprofil 13 rund 150 m, d. s. im Jahresdurchschnitt fast 20 m (4). Die folgenden Jahre brachten dem Weststrand infolge Platenanlandungen jedoch wieder so starke Sandzufuhren, daß sich die Dünen schon bald regenerierten; auf ein seinerzeit in Aussicht genommenes massives Dünendeckwerk konnte verzichtet werden.

Die zweite Abbruchphase entwickelte sich nach dem Jahr 1960 auf einer Länge von mehr als 2 km vor der Randdüne des Pirolatales im Bereich der Meßprofile 20 bis 28 mit allmählicher Ausdehnung nach Südwest bis zum Profil 15 (9, 23). In den Jahren 1968 bis 1970 verstärkten sich die Strand- und Dünenabbrüche ständig und verursachten einen Rückgang des Randdünenfußes in den Profilen 23 bis 27 (Abb. 4) von mehr als 13 m im Jahresdurchschnitt. Der größte Dünenverlust trat beim Profil 25 mit 21,5 m im Jahresmittel ein. Er war also noch etwas größer als der vorerwähnte Abbruch bei Profil 13 in den Jahren 1947/1955.

Solche von Zeit zu Zeit wiederkehrenden Abbruchs- und Anlandungsperioden werden maßgeblich von dem Naturgeschehen im Gebiet des westlich der Insel gelegenen Seegats ge-

steuert. Es erhebt sich, besonders im Hinblick auf die außergewöhnlich starken Abbrüche vor dem Pirolatal seit 1960, die Frage, ob im Gebiet der Accumer Ee in den letzten Jahrzehnten Veränderungen der bisherigen morphologischen und hydrologischen Verhältnisse aufgetreten oder zu erwarten sind, die sich zu einer dauernden Gefährdung des Westens der Insel Langeoog entwickeln könnten.

Der besorgniserregende starke und schnell zunehmende Abbruch der Randdüne vor dem Pirolatal war, wie im Abschnitt III ausgeführt ist, durch eine sich seit 1967/68 herausgebildete Kliffbrandung verursacht worden, die, wenn kein Schutzwerk an dieser Strandstrecke erstellt würde, in kurzer Zeit die völlige Zerstörung der Randdüne herbeiführen müßte. Um dieser

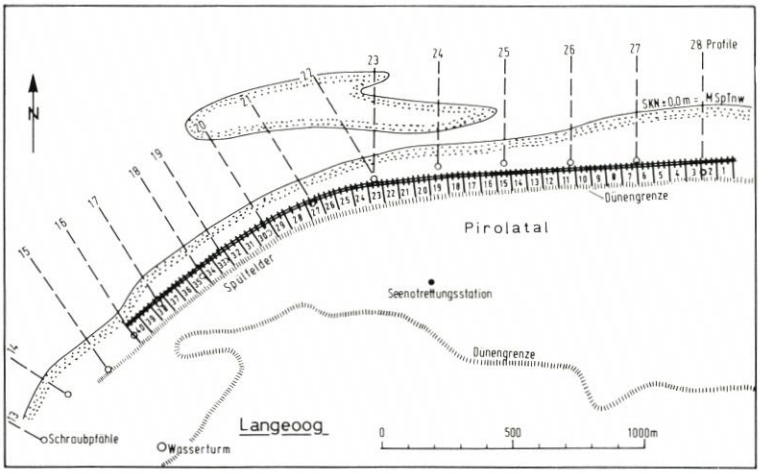


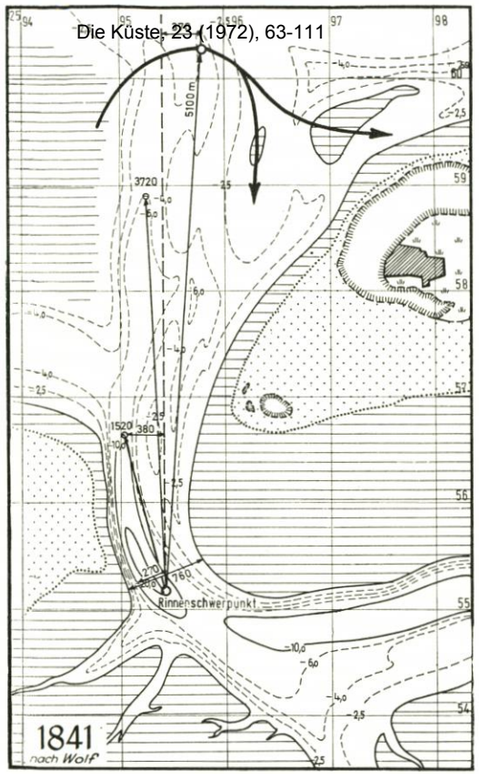
Abb. 4. Schlauchwerk auf dem Strand vor der Randdüne des Pirolatals auf Langeoog (Übersichtsplan)

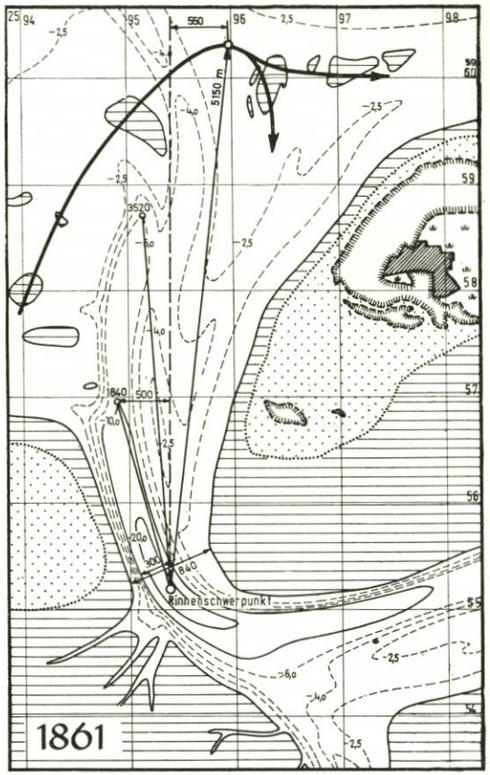
Gefahr zu begegnen, wurde als „aktiver Küstenschutz" der Bau eines Schlauchlängswerkes in 50 m Entfernung seewärts vom steilen Dünenfuß in Verbindung mit einer Aufhöhung der zwischen der Düne und dem Längswerk liegenden Strandfläche durch Sandaufspülung empfohlen. Hierdurch sollte künstlich ein naturähnlicher Strand vor der Randdüne gewonnen werden, auf dem auch bei erhöhten Tiden die Wellen ausbranden können (Strandbrandung), ohne den Dünenfuß zu erreichen oder ihn wesentlich anzugreifen. Die Sandaufspülungen sollten, falls notwendig, von Zeit zu Zeit wiederholt werden, bis die Sandzufuhr von Natur aus wieder „gesunde" Strand- und Dünenverhältnisse herbeigeführt hat. Ob sich die Erwartung einer Regeneration des Strandes und der Dünen erfüllen oder ob infolge einer Veränderung der die Sandzufuhr verursachenden Kräfte der Strand- und Dünenabbruch vor dem Pirolatal fortbestehen wird, wurde in einer Sonderuntersuchung geprüft, deren Ergebnisse nachstehend nur zusammengefaßt dargestellt werden können. Ein ausführlicherer Bericht hierüber soll in Kürze noch veröffentlicht werden (18).

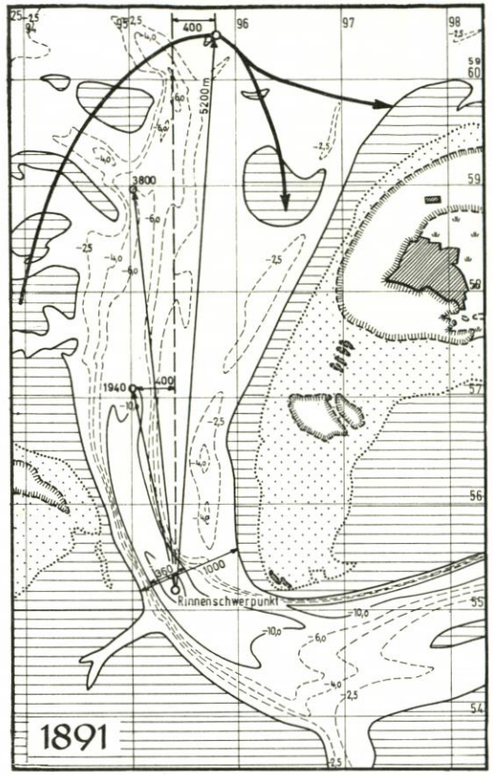
B. Seegat Accumer Ee, Hauptstromrinne

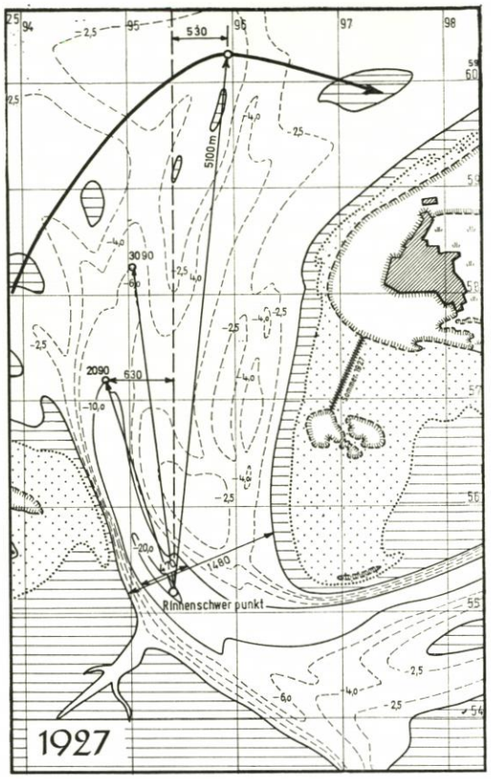
1. Seegat Accumer Ee

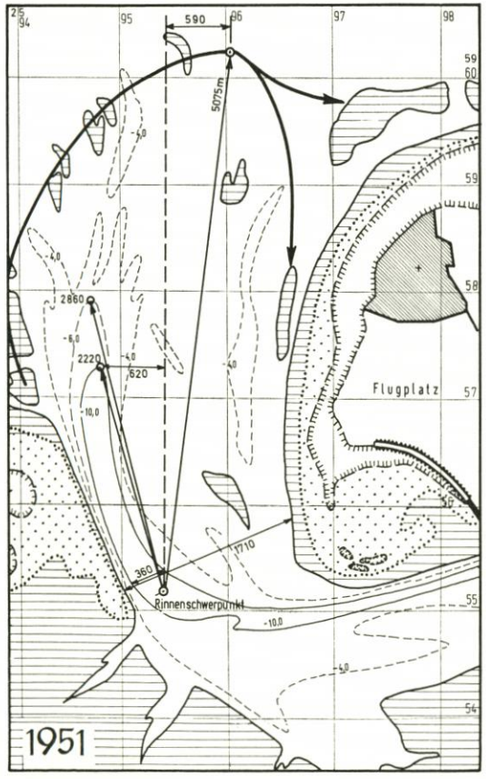
Wie die bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreichenden Vermessungen der Accumer Ee zeigen und wie aus Veröffentlichungen und Untersuchungsberichten bekannt ist, weist die

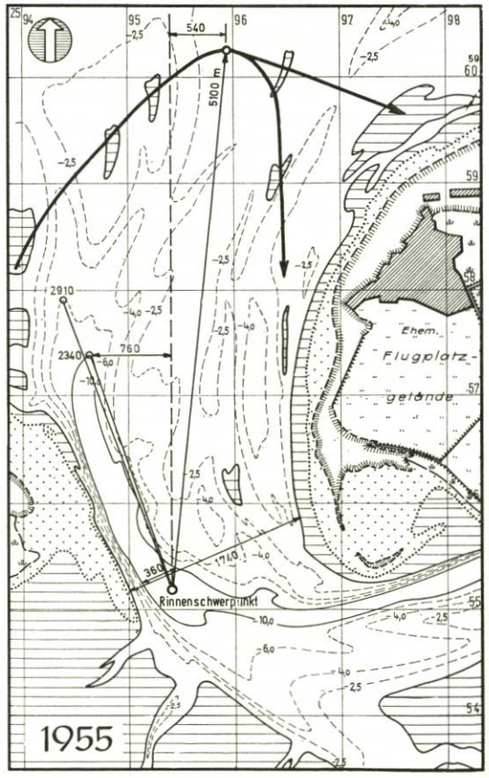


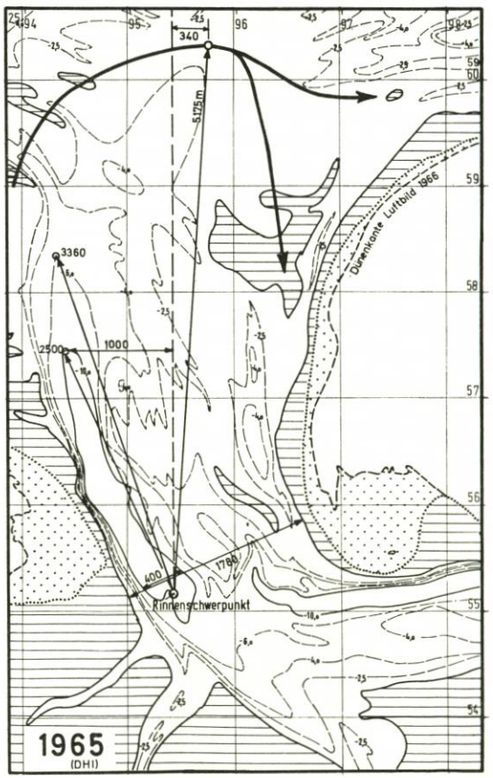












Erklärung:

- Ort
- Dünen
- Heller
- Deiche
- hochwasserfreier Strand
- Strand zwischen MTnw u. MThw

Tiefenlinien: Die Tiefen beziehen sich auf SKN ± 0,0 m = NN − 1,5 m

- +2,5 m (MThw)
- ± 0,0 m (MSpTnw)
- −2,5 m, −4,0 m, −6,0 m
- −10,0 m u. −20,0 m

Maßstab 0 — 1 km

Abb. 5. Entwicklung des Westteils von Langeoog: Vergleich der Tiefenpläne von 1841 bis 1965 (Entwurf: Forschungsstelle Norderney)

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Accumer Ee eine für die Seegaten der ostfriesischen Inselkette ungewöhnliche Lagebeständigkeit auf. Nach den heutigen Erkenntnissen ist diese Erscheinung auf das Größenverhältnis der Wattgebiete südöstlich und südwestlich des Seegats, auf die Länge der Insel Langeoog und die Staffelung der ostfriesischen Inselkette zurückzuführen (11).

Infolge der seit Jahrhunderten bestehenden stabilen Lage der Accumer Ee benötigte die Insel Langeoog zur Sicherung ihres Bestandes bisher keine massiven Dünen- und Strandschutzwerke, wenngleich auch hier, wie auf den anderen ostfriesischen Inseln, in mehrjährigen Abständen Dünen- und Strandverluste auftraten, die sich jedoch von Natur bald ausglichen, wenn der Insel durch Platenanlandungen wieder größere Sandmengen zugeführt wurden. In solchen Zeiten entstanden auf Langeoog nicht selten sogar beachtliche Gewinne an Strand- und Dünenflächen.

Daß sich die Accumer Ee, insbesondere seit der Mitte des 19. Jahrhunderts, trotz ihrer Lagebeständigkeit verändert, vor allem verbreitert hat, läßt schon ein Vergleich der in Abbildung 5 zusammengestellten Vermessungspläne des Seegats eindeutig erkennen. Besonders augenfällig tritt die Entstehung des Flinthörn-Gebietes am Südwestende der Insel Langeoog und dessen weiteres Anwachsen nach Süden in Verbindung mit einem Zurückweichen nach Osten in Erscheinung. Hierdurch hat das 1841 noch verhältnismäßig enge Seegat eine fortlaufende beträchtliche Erweiterung erfahren.

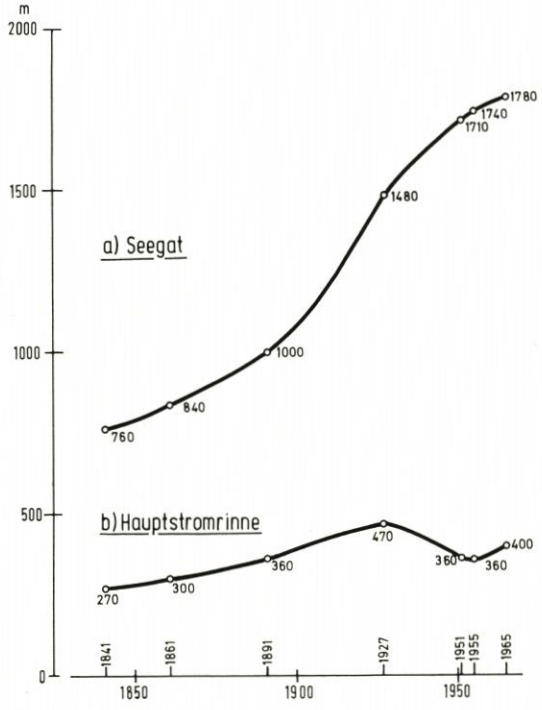


Abb. 6. Breitenentwicklung der Accumer Ee und der Hauptstromrinne (1841 bis 1965) an der engsten Stelle des Seegats (Lage des Profils s. Abb. 5)

Die Breitenentwicklung an der engsten Stelle des Seegats zwischen den SKN ± 0 m Tiefenlinien auf den westlichen (Baltrumer) und der östlichen (Langeooger) Seite von 1841 bis 1965 ist in die Vermessungspläne (Abb. 5) zahlenmäßig eingetragen und in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die engste Stelle des Seegats hatte im Jahre 1941 eine Breite von 760 m. Bis 1890 war die Breitenzunahme stetig, jedoch mit 4 bis 5 m/Jahr verhältnismäßig gering. Dann verstärkte sie sich zunehmend und erreichte zwischen 1910 und 1920 mit 15 m/Jahr ihr Maximum. Danach schwächte sie sich sehr schnell ab; seit 1960 liegt sie auf 3 m/Jahr.

Der Verlauf der Ganglinie läßt für die nahe Zukunft eine wesentliche Breitenzunahme des Seegates nicht erwarten. Es könnte u. U. ein Stillstand oder sogar eine rückläufige Entwicklung eintreten, wenn der Flinthörnhaken infolge stärkerer Sandzufuhren wieder nach Westen anwachsen sollte.

Infolge der außergewöhnlich starken Breitenzunahme der Accumer Ee von 1841 (760 m) bis 1965 (1780 m) um 1020 m = rd. 135 % ist die Möglichkeit einer Veränderung der Stromkraftverhältnisse des Seegats und damit einer Beeinflussung der Sandzufuhr nach der Insel

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Langeoog nicht auszuschließen. Nach allgemeiner Auffassung besteht zwischen der Seegatbreite und der Versorgung der östlich vom Seegat liegenden Insel mit Sand folgender Zusammenhang:

a) Breiterwerdendes Seegat

Schwächung der Ebbeströmung und damit der Hauptstromrinne des Seegats.
Schwächung der Stromkraftverhältnisse des Seegats und dadurch Abflachung des Platengürtels.
Verlagerung des Platenanlandegebietes auf der Insel nach Westen.
Im Nordwesten der Insel allgemein gesunde Strand- und Dünenverhältnisse.

b) Schmalerwerdendes Seegat

Verstärkung der Ebbeströmung und damit Vergrößerung der Hauptstromrinne des Seegats.
Zunahme der Stromkraftverhältnisse des Seegats und dadurch seewärtige Verlagerung des Platengürtels.
Verlagerung des Platenanlandegebietes auf der Insel nach Osten.
Strand und Dünen im Nordwesten der Insel leiden unter Sandmangel.

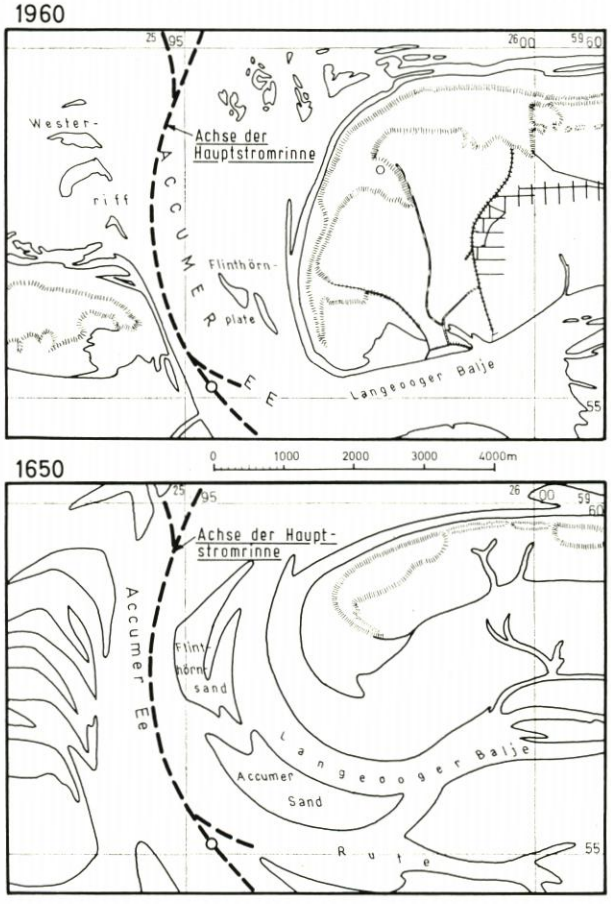


Abb. 7. Lage der Achse der Hauptstromrinne in der Accumer Ee 1960 und 1650

Inwieweit diese Folgenkette auf die Verhältnisse in der Accumer Ee zutrifft, ist in der oben erwähnten Untersuchung (18) mit den nachstehend beschriebenen Ergebnissen geprüft worden.

2. Hauptstromrinne

Lage und Form der Hauptstromrinne werden in erster Linie vom strömenden Wasser bestimmt. Wenn also die festgestellte starke Verbreiterung des Seegats Accumer Ee eine wesentliche Herabsetzung der Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge hat, dann müßte sich diese in der Lage des Bettes der Hauptstromrinne, in ihrer Breiten- und Längenentwicklung bemerkbar machen.

Zur *Lage des Rinnenbettes:* Bereits 1929 haben GAYE/WALTHER (22) festgestellt, daß die Hauptrinne der Accumer Ee ihre nach Norden gerichtete Lage seit langer Zeit nahezu unverändert beibehalten hat. Dies ist auch in späteren Veröffentlichungen und Untersuchungsberichten immer wieder bestätigt worden, so z. B. von BACKHAUS (1), KRAMER/HOMEIER (4), HOMEIER (8) und HOMEIER/LUCK (9).

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Neben der Lagebeständigkeit der Achse der Hauptstromrinne gibt es nach den Untersuchungen von KRAMER/HOMEIER (4) noch einen anderen ausgeprägt lagebeständigen Punkt in dieser Seegatrinne, den sogen. „Rinnenschwerpunkt". Dessen unveränderte Lage wurde für Zeit von 1840 bis 1956 nachgewiesen. Wie die Vermessungspläne ausweisen, sind auch in den Jahren *nach* 1956 nennenswerte Veränderungen der Lage der Achse der Hauptstromrinne und des Rinnenschwerpunktes nicht eingetreten.

Die beiden morphologischen Festpunkte (Lagebeständigkeit des Bettes und des Rinnenschwerpunktes der Hauptstromrinne) geben eine Handhabe für die Nachprüfung, ob die heutige Lage der Hauptstromrinne schon früher, also vor 1840, in ähnlicher Form bestanden hat. Für diese Betrachtung lassen sich die von der Forschungsstelle Norderney bearbeiteten „Topographische Karte 1 : 25 000" (7) und „Historische Karte" (8) verwenden. Die Achse der Hauptstromrinne nach der in der Topographischen Karte dargestellten Peilung aus dem Jahre 1958 und die Lage des Rinnenschwerpunktes sind in Abbildung 7 in die Kartenskizzen von 1960 und 1650 in gleicher geographischer Lage eingetragen. Die Darstellung zeigt, daß sich das Seegatgebiet der Accumer Ee schon 1650, also vor mehr als 300 Jahren, in fast der gleichen Lage wie heute befunden hat. Hieraus kann man schließen, daß die Seegatverbreitung auf die Lage der Hauptstromrinne keinen feststellbaren Einfluß ausgeübt hat.

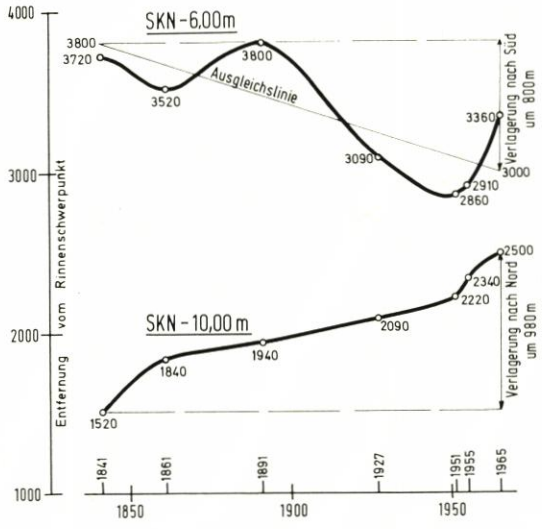


Abb. 8. Entfernung der Tiefenlinien SKN — 6 m und — 10 m (von 1841 bis 1965) am Nordende der Hauptstromrinne vom Rinnenschwerpunkt (vgl. Abb. 5)

Zur *Breitenentwicklung der Hauptstromrinne:* Die Rinnenbreite an der engsten Seegatstelle (Abb. 5) hat im Profil zwischen den Tiefenlinien SKN — 10 m von 1841 bis 1927 stetig zugenommen (Abb. 6, Ganglinie b), und zwar von 270 m Breite (1841) auf 470 m Breite (1927); d. i. eine mittlere Zunahme von 200 m = rund 75 %. In dieser Zeitspanne hatte sich die Seegatbreite fast verdoppelt (von 760 m auf 1480 = rund 95 %, Abb. 6, Ganglinie a). Nach 1927 trat vorübergehend eine Breitenabnahme der Stromrinne ein, die bis zum Jahre 1955 den Betrag von 110 m erreichte. Anschließend hat die Rinnenbreite abermals zugenommen; 1965 betrug sie bereits wieder 400 m, also Zunahme 48 % gegenüber 1841.

Ein Vergleich der in Abbildung 6 untereinander gezeichneten Ganglinien der Seegatbreite und Rinnenbreite zeigt, daß offensichtlich eine wechselseitige Beziehung zwischen Breitenzunahme des Seegats und Breitenabnahme der Stromrinne im Seegat Accumer Ee nicht besteht. Vielmehr haben sich in der betrachteten Zeitspanne von fast 125 Jahren Seegatbreite und Stromrinnenbreite unabhängig voneinander verändert.

Die *Längenentwicklung der Hauptstromrinne* in nördlicher Richtung ist anhand der Entfernung der nördlichen Scheitel der Tiefenlinien SKN — 6 m und — 10 m vom Rinnenschwerpunkt (Abb. 5) untersucht worden. Die gemessenen Entfernungen sind in Abbildung 8 graphisch aufgetragen. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, hat der nördliche Scheitel der SKN — 10 m Tiefenlinie seit 1841 eine beträchtliche Verlagerung nach Norden erfahren. In den

ersten 20 Jahren (1841–1861) hat sich die Entfernung um 320 m = 16 m/Jahr stark vergrößert. Anschließend ist sie bis etwa 1940 nur wenig (300 m in 80 Jahren = 3,75 m/Jahr), ab 1940 aber wieder verstärkt angewachsen. Die durchschnittliche Vergrößerung der Entfernung des Scheitels dieser Tiefenlinie vom Rinnenschwerpunkt errechnet sich von 1841 (1520 m) bis 1965 (2500 m) zu 980 m in 124 Jahren = 7,9 m/Jahr.

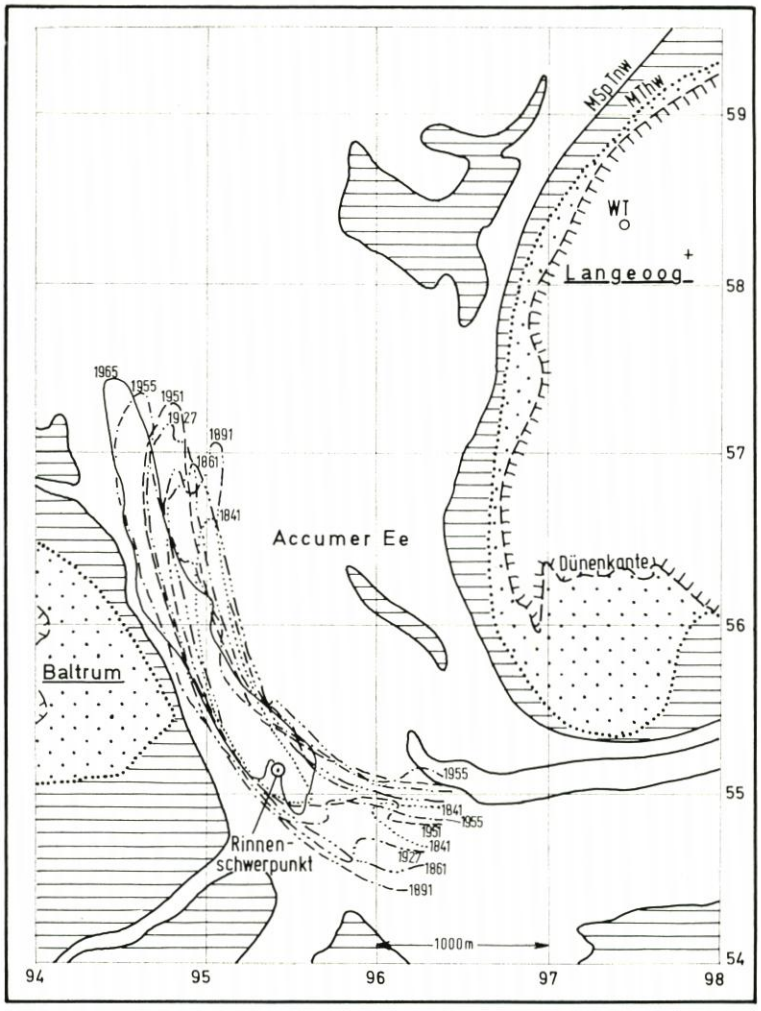


Abb. 9. Lageveränderungen der Tiefenlinie SKN — 10 m in der Hauptstromrinne der Accumer Ee von 1841 bis 1965

Im Vergleich hierzu hat die SKN — 6-m-Tiefenlinie eine völlig andere Entwicklung durchgemacht (Abb. 8, obere Kurve). Der Scheitel dieser Tiefenlinie liegt bereits im Einflußgebiet der Platen. Bei ihm wechseln Zeiten des Vorstoßes nach Norden mit Zeiten der Verlagerung nach Süden ab, offenbar je nach Lage des Wanderweges der Platen. Ab 1955 stößt die Linie wieder nordwärts vor und erreicht 1965 eine Lage wie etwa 1915. Es ist wahrscheinlich, daß die Nord-

Die Küste, 23 (1972), 63-111

verlagerung noch einige Zeit andauert. Im Durchschnitt hat sich die Tiefenlinie SKN — 6 m um rund 800 m nach Süden verschoben.

Mit der stetigen Ausdehnung der Tiefenlinie SKN — 10 m nach Norden ist gleichzeitig eine Drehung des tiefen Stromrinnenbettes nördlich vom Rinnenschwerpunkt nach Westen eingetreten, wie die in Abbildung 9 übereinandergezeichneten Rinnenlagen in den Jahren seit 1841 zeigen. Das Maß der Westverlagerung und der Gang dieser Erscheinung sind auf Abbildung 10 graphisch dargestellt. Von 1841 bis etwa 1900 hat sich die Lage des Scheitels der — 10-m-Linie im Durchschnitt kaum verändert; dann aber setzt die Westverlagerung mit ständig zunehmender Stärke ein. Insgesamt beträgt sie seit 1841 rund 620 m.

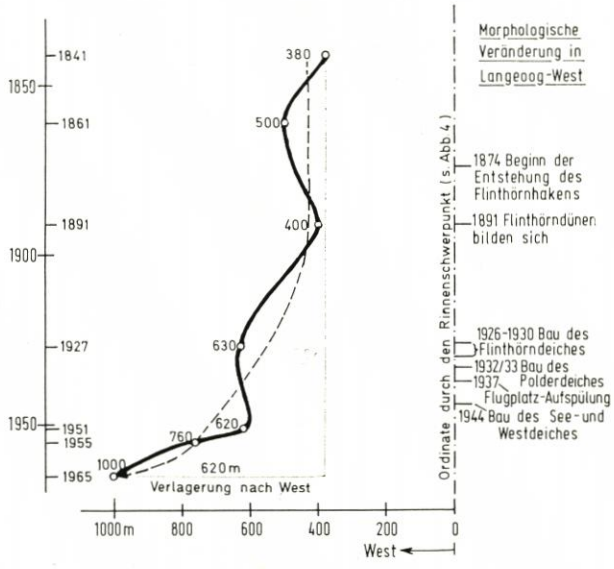


Abb. 10. Entfernung der Tiefenlinie SKN — 10 m (von 1841 bis 1965) am Nordende der Hauptstromrinne von der Ordinate durch den Rinnenschwerpunkt (vgl. Abb. 5) und Hinweise auf die morphologischen Veränderungen im Westen der Insel Langeoog

Die Ursachen dieser Entwicklung sind den morphologischen Veränderungen im Westen und Südwesten der Insel zuzuschreiben. Die einschneidendste Auswirkung hat die Entstehung des Flinthörn-Hakens ausgeübt, die zu Anfang des 19. Jahrhunderts begann und sich mit der Bildung der Flinthörndünen seit 1891 wirksam fortsetzte. Aber auch die seit 1926 ausgeführten Bauanlagen im Flinthörngebiet (Bau des Flinthörndeiches 1926/1930, Bau des Polderdeiches 1932/1933, Aufspülung des Flugplatzgeländes 1937 sowie andere Deichbauten) haben die Auswirkung des Flinthörn-Hakens auf die Seegatrinne der Accumer Ee unterstützt und verstärkt. Den Zusammenhang zwischen Flinthörn-Entstehung und Seegatrinnen-Veränderung veranschaulicht die Übereinanderzeichnung der Karten von 1841 und 1965 (Abb. 11). Diese Darstellung zeigt ferner, daß im südlichen Gebiet der Accumer Ee Veränderungen eingetreten sind, die insbesondere die Langeooger Balje betreffen (s. Abschnitt IV C).

C. Langeooger Balje, Wattgebiet

1. Langeooger Balje

Die Langeooger Balje weist nicht die Lagebeständigkeit auf wie die Hauptstromrinne der Accumer Ee. Ihre Achse hat sich südwärts vom Flinthörnhaken seit 1841 um rund 300 m nach Norden verlegt (Abb. 11). Wo 1965 die südliche SKN — 10-m-Tiefenlinie der Balje verläuft, lag 1841 etwa ihre nördliche — 10-m-Linie; das bedeutet, daß sie sich um ihre volle Breite an den Flinthörnhaken herangeschoben hat. Wenngleich sich aus dieser Veränderung zunächst noch

keine nachteilige Wirkung auf das Seegat Accumer Ee erkennen läßt, ist es doch geboten, diesen Vorgang durch Vermessung unter Kontrolle zu halten.

Das gleiche gilt für den Übergangsbereich zwischen der Langeooger Balje und der Hauptstromrinne der Accumer Ee. In diesem Gebiet kommt es von Zeit zu Zeit zu einer Barrenbildung, wie die in Abbildung12 zusammengestellten Tiefenkarten zeigen. Derartige Barren sind

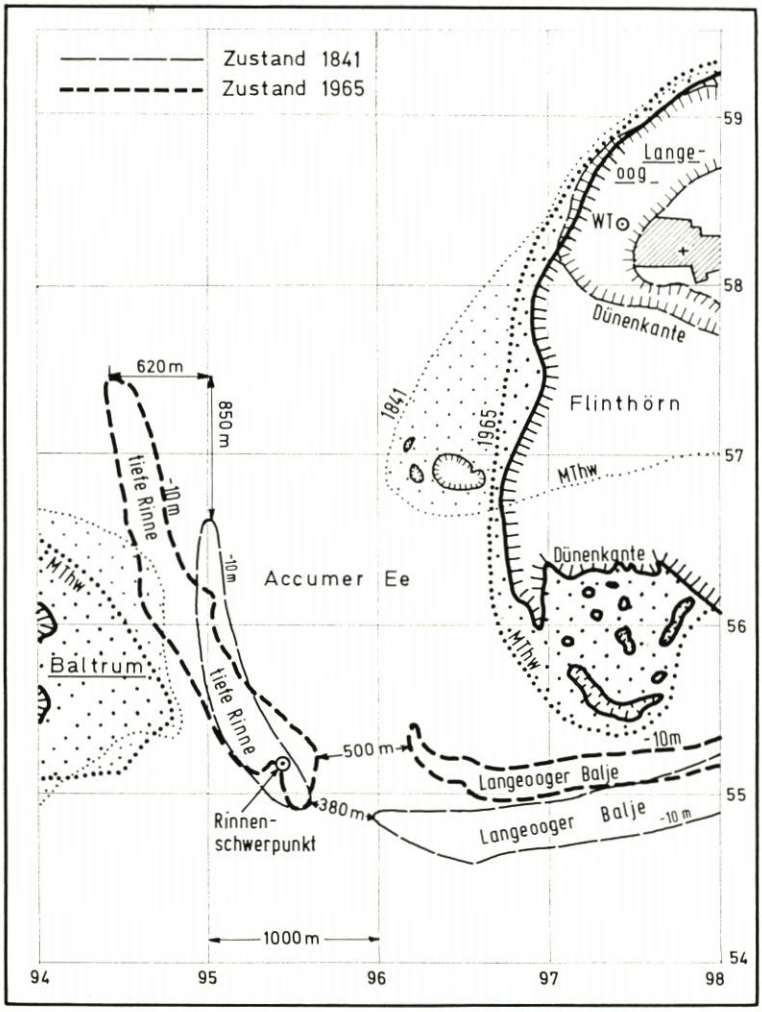


Abb. 11. Lageveränderung der Tiefenlinie SKN — 10 m in der Hauptstromrinne der Accumer Ee und in der Langeooger Balje 1841 und 1965 als Folge der Flinthörn-Entstehung

im Laufe der Zeit von der Strömung stets wieder durchbrochen worden. Eine ähnliche Entwicklung deutet die Peilung von 1972 an, indem die Breite der Barre, die 1965 noch rund 500 m betrug, im Jahre 1972 bereits auf 200 m zurückgegangen ist. Es steht zu erwarten, daß die SKN — 10-m-Tiefenlinie zwischen der Hauptstromrinne und der Langeooger Balje in einiger Zeit wie früher ohne Unterbrechung wieder durchläuft. Die Befürchtung von Luck/Homeier (9),

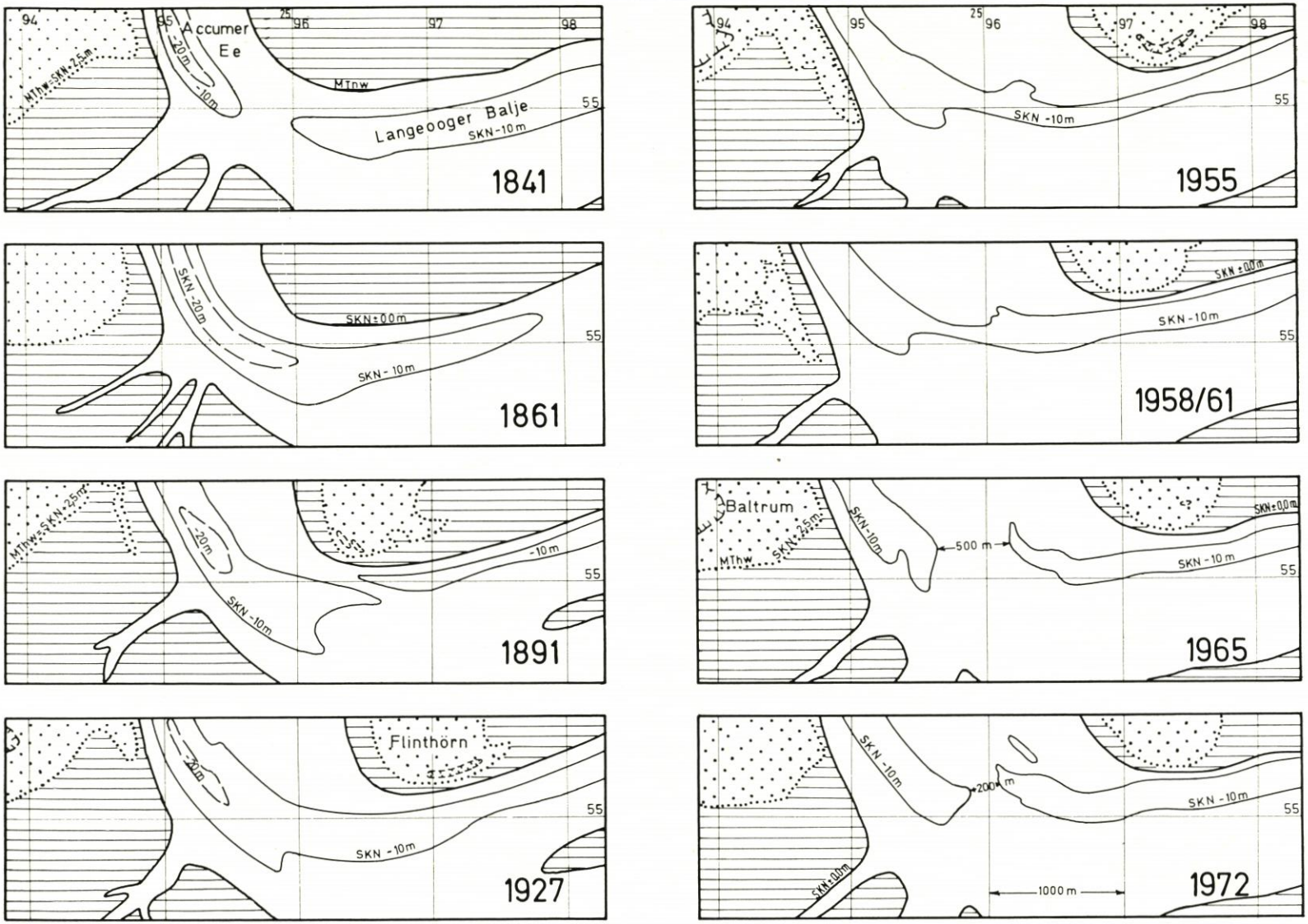


Abb. 12. Entwicklung des Barrengebietes zwischen der Hauptstromrinne der Accumer Ee und der Langeooger Balje von 1841 bis 1972

daß sich hier seit 1955 eine Entwicklung abzeichne, die auf eine Spaltung der Hauptstromrinne und damit auf eine Schwächung des Ebbestromes im Seegat hinausläuft, kann nicht geteilt werden.

Die Hauptstromrinne in der Accumer Ee ist im Tideablauf überwiegend dem Ebbestrom zugeordnet, während der Flutstrom neben der Hauptstromrinne noch eine, in manchen Jahren auch zwei Nebenrinnen benutzt. Ein Überspringen der Ebbeströmung aus der jetzigen Hauptstromrinne in eine ostwärts gelegene Nebenrinne ist bei den seit Jahrhunderten stabilen morphologischen Verhältnissen nicht zu erwarten. Dennoch sollte aber die Entwicklung durch Terminvermessungen und Luftaufnahmen, wie bisher, weiter beobachtet werden.

2. Wattgebiet

Für die Morphologie eines Seegats sind in erster Linie das ihm zugehörige Wattgebiet und sein Wasserraum von entscheidender Bedeutung. Der Wattwasserraum kann sich durch natürliche und künstliche Verlagerungen der Grenzen des Watteinzugsgebietes und durch andere natürliche Einflüsse ändern, wie Aufhöhung des Watts durch Sand und Schlick, säkulare Wasserstandsbewegungen und meteorologisch bedingte Einflüsse auf die Tidewasserstände.

Zu den *natürlichen* Veränderungen der Grenzen des der Accumer Ee zugeordneten Wattgebietes ist festzustellen, daß die zwischen Baltrum und dem Festland etwa in nordsüdlicher Richtung verlaufende geographische Wasserscheide sich nach der bereits zitierten „Historischen Karte" von 1650 bis 1860 um rund 2,5 km ostwärts verlagert hat. In der gleichen Zeitspanne hat auch die zwischen Langeoog und dem Festland in nord-südlicher Richtung verlaufende Wasserscheide eine Verlagerung nach Osten von 1,2 km erfahren. Diese Maßangaben können, da die historischen Karten bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts einen quantitativen Aussagewert nur eingeschränkt besitzen, lediglich die Entwicklungstendenz aufzeigen.

Die aus den Karten nach 1860 festzustellenden Veränderungen sind dagegen zuverlässig. Hiernach ist bei der Wasserscheide südlich von Baltrum seit 1860 eine rückläufige, d. h. westwärts gerichtete Verlegung eingetreten, deren Maß bis 1960 rund 400 m beträgt. Die Langeooger Wasserscheide hat sich von 1860 bis 1960 jedoch praktisch kaum noch verändert.

Über die Größe der Watteinzugsgebiete hat die Forschungsstelle Norderney auf Anfrage mitgeteilt, daß das Einzugsgebiet der Accumer Ee von 86 $\pm$ 2 km² (1860) auf 88,6 $\pm$ 0,2 km² (1960) angewachsen sei. Diese an sich geringfügige Vergrößerung ist wohl infolge der Westverlagerung der Baltrumer Wasserscheide dem Baltrumer Watteinzugsgebiet zuzuschreiben.

Die geographische Wattwasserscheide ist keine feste Grenze. Bei Westwinden findet ein Wasseraustausch über diese Scheide hinweg in das östlich gelegene Watt statt. Dadurch wird die Größe des Wasserraums dieser Wattgebiete im allgemeinen aber kaum beeinflußt, weil über die westlich gelegene Wattwasserscheide ein entsprechender Ausgleich angenommen werden kann.

Nach Backhaus (1) haben sich seit 1800 die Inseln Baltrum um 850 m und Langeoog um 1100 m verlängert; verbreitert haben sie sich nur an wenigen Stellen. Die größte Breitenzunahme hat Langeoog durch die Bildung des Flinthörnhakens erhalten.

Dieser Fluthaken im Westen Langeoogs hat sich aus einer in Höhe des MThw rund 500 m breiten, um 1800 entstandenen Anlandung durch Schwenken nach Süden bei gleichzeitigem Abbruch im Nordwesten allmählich entwickelt (Anl. 6b in [4]). Seine südlichste Lage hatte der Flinthörnhaken 1891 erreicht; seine westliche Begrenzung ist bis zu diesem Zeitpunkt gegenüber dem Jahre 1800 nur unwesentlich ostwärts verlagert. Von 1891 bis 1955 ist sie um rund 500 m nach Osten zurückgewichen, wobei die von der MThw-Linie umgrenzte Fläche etwa

Die Küste, 23 (1972), 63-111

gleich groß geblieben ist. Der Flächenzuwachs der Insel Langeoog gegenüber dem Jahre 1700 und damit die Verkleinerung des Watteinzugsgebietes ergibt sich nach dem Stande von 1891 zu rund 2 km².

Zu den *künstlichen* Veränderungen der Grenzen des Watteinzugsgebietes ist folgendes festzuhalten:

An der Festlandküste befinden sich vor den Hauptdeichen mehr oder weniger breite, im allgemeinen auf NN + 1,5 m bis NN + 2,0 m aufgelandete Vorländer. Bei mittleren und gering erhöhten Tiden (z. B. MThw + 0,4 m) tragen diese Flächen nicht zur Vergrößerung des Watteinzugsgebietes bei, weil die Vorlandkante meist als Steilkante ausgebildet ist. Sie sind jedoch im Laufe der Zeit durch Landgewinnung verbreitert und zum Teil durch Sommerbedeichung oder durch Vorziehen der Hauptdeichlinie der Überstauung bei hohen Tiden teilweise oder ganz entzogen worden.

Auf Langeoog sind 1937 der mittlere und südöstliche Teil des Flinthörnhakens sowie die östlich davon gelegene Wattfläche für den Bau eines Flugplatzes und Hafens künstlich durch Aufspülung verändert worden. Hiervon waren rund 570000 m² normaler Wattflächen betroffen. Die übrigen vom Flugplatz in Anspruch genommenen Flächen lagen schon vor der Aufspülung so hoch, daß der Wattwasserraum durch die Aufspülung kaum nachteilig beeinträchtigt wurde.

Aus dem gleichen Grunde hatten auch die künstlich geförderten Dünen zwischen dem Ort Langeoog und den Flinthörndünen keinen Einfluß mehr auf die Größe des Wattwasserraumes.

Nach Angaben der Forschungsstelle Norderney hat sich das etwa 90 km² große Watteinzugsgebiet des Seegats Accumer Ee als Folge der natürlichen und künstlichen Veränderungen in der Zeit von 1750 bis 1860 um im Mittel 13 km² verkleinert, in der Zeit von 1860 bis 1960 um im Mittel 2,2 km² vergrößert.

Alle natürlichen und künstlich geförderten Veränderungen spielen sich auf dem „hohen", über NN gelegenen Watt und auf dem in Ufernähe auf MThw auslaufenden nassen Strande ab. Bei normalen Tiden wirken sich die Veränderungen des Wattwasserraumes nur gering aus. Das gilt auch allgemein für den Flinthörnhaken.

Für den Abfluß des Tidewassers aus dem Watt ist der Flinthörnhaken dagegen von besonderer Bedeutung. Seit 1891 ist der Abfluß über das rund 2 km breite Watt bei normalen Tiden in ganzer Breite und, soweit es auf dem Flinthörnhaken zu Dünenbildungen gekommen war, auch bei Sturmfluten zum Teil eingeengt gewesen. Durch die erwähnten, im Jahre 1937 ausgeführten künstlichen Veränderungen ist der Abfluß bei Sturmflut nun in voller Ausdehnung des Flinthörnhakens unterbunden worden. Infolgedessen wird unter den heutigen Verhältnissen der Ebbestrom aus dem Watt der Hauptseegatrinne stärker gebündelt zugeführt als früher. Auf diese Weise ist einer Spaltung der Hauptstromrinne, auch wenn sie sich hätte ausbilden wollen, entgegengewirkt worden.

Zu den Änderungen des Wasserraumes durch verschiedene andere natürliche Einflüsse wird folgendes ausgeführt: L. VAN BENDEGOM (3) hat festgestellt, daß für das Vorhandensein von Watten ein Meeresspiegelanstieg (säkulare Wasserstandshebung) und eine materialtransportierende Tideströmung Voraussetzung seien.

Für den Jadebusen hat LÜDERS (17) auf Grund von Messungen für die Zeitspanne von 1887 bis 1934 (47 Jahre) gefunden, daß die Aufhöhung des Watts in dieser Zeit 14 cm, d. s. im Mittel rund 3 mm/Jahr, betragen hat; dagegen hat sich das MThw nur 10 cm, d. s. im Mittel rund 2,1 mm/Jahr, angehoben. Für den Jadebusen zeichnete sich demnach die Tendenz einer zunehmenden Verlandung ab.

Nimmt man an, daß ähnliche Verhältnisse auch für das landwärts von Langeoog und Baltrum gelegene Watt zutreffen, dann würden die Auflandungen durch Wattsedimente die

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Vergrößerung des Wattwasserraumes als Folge säkularer Wasserstandshebungen überwiegen. Diese Veränderungen sind jedoch unbedeutend, zumal sie sich über sehr lange Zeiten erstrecken; kurzfristig eintretende Querschnittsveränderungen können sie also nicht bewirken.

Der im Verlauf dieser Entwicklung durch den Flutstrom auf das Watt beförderte Sand kann entweder aus den Platen unmittelbar in die Flutströmung der Accumer Ee gelangen oder er kann auf der Westseite Langeoogs durch hier anlandende Platen gewissermaßen auf Depot gelagert und von hier allmählich abgetragen und auf die Wattflächen transportiert werden. Solche Platenanlandungen sind, abgesehen von der bereits erwähnten großen Anlandung um das Jahr 1800, nach dem Untersuchungsbericht der Forschungsstelle Norderney aus den Platengruppen „B" 1956 und „D" 1970 entstanden (Anl. 5 und 7 in [9]).

Bezüglich der meteorologisch bedingten Veränderungen des Wattwasserraumes ist zu bemerken, daß längere Westwindwetterlagen eine Anhebung der Wasserstände von entsprechender Dauer und umgekehrt länger dauernde Ostwindwetterlagen entsprechende Perioden niedriger Wasserstände bewirken können. Bei angehobenen Wasserständen etwa bis 0,6 m über MThw, die verhältnismäßig häufig eintreten, wird der Wattwasserraum merkbar vergrößert.

Nach Luck/Homeier (9) hat sich das Watteinzugsgebiet der Accumer Ee in der Zeit von 1950 bis 1965 um rund 4 km² (gemssen in Höhe des MThw) vergrößert. In der gleichen Zeit vergrößerte sich der Querschnitt des Seegats Accumer Ee unter MTnw um 2900 m² bei insgesamt 13 200 m².

Die Wattoberfläche liegt bei den Wattwasserscheiden im allgemeinen nicht höher als Normal Null. Bei MThw (NN + 1,24 m) ist die darüber befindliche Wasserschicht also 1,24 m dick. Eine Überschlagsrechnung ergibt: Für ein etwa 90 km² großes Watteinzugsgebiet ist der Wattwasserraum 138 Mio. m³ groß. Die Vergrößerung des Watteinzugsgebietes um 4 km² bringt einen Zuwachs an Wattwasserraum um rd. 5. Mio. m³, d. s. 3,6 %. Die Querschnittsvergrößerung der Accumer Ee kann durch diese geringe Erhöhung der Wassermenge kaum verursacht worden sein.

Demgegenüber ergeben sich bei angehobenen Wasserständen als Folge meteorologischer Einflüsse zusätzliche Wassermengen:

bei 0,2 m Anhebung über MThw: 18 Mio. m³, d. s. zusätzlich 13 %
bei 0,4 m Anhebung über MThw: 36 Mio. m³, d. s. zusätzlich 26 %

Um eine Beziehung zwischen den Querschnittsveränderungen der Accumer Ee und den unterschiedlichen Wasserräumen herzustellen, bedarf es eines Maßstabes für die Häufigkeit und Dauer überhöhter Wasserstände; dieser aber fehlt. Jedoch zeigt schon eine Überschlagsrechnung, daß die durch meteorologische Einflüsse bedingte Veränderung des Wattwasserraumes wesentlich wirkungsvoller ist als alle vorher betrachteten im Watt möglichen Veränderungen. Die meteorologisch bedingten Veränderungen können dabei eine Größenordnung erreichen, die ausreicht, um wirksame Veränderungen am Seegatquerschnitt und in der Lage der Hauptstromrinne der Accumer Ee herbeizuführen.

Wie die „Historische Karte" erkennen läßt, hatte die Accumer Ee in Höhe des Rinnenschwerpunktes (Abb. 13) bis zum Jahre 1750 eine große Breite, die durch das Vorrücken der Uferlinie der Insel Baltrum nach Osten und die Ausdehnung des Flinthörnhakens nach Süden sowie vorübergehend nach Westen stark verkleinert worden ist (vgl. Abschnitt IV B 1). Im Jahre 1965 hat sie ihre ursprüngliche Breite (1780 m) fast wieder erreicht (Abb. 5 und 6). Diese Verbreiterung ist auf das Zurückweichen des Flinthörnhakens nach Osten und die Ausräumung des westlich vorgelagerten Watts zurückzuführen. Die Veränderungen im Querschnitt des Seegats von 1841 bis 1955 sind in Anlage 10, Profil 3, des Berichtes der Forschungsstelle Norderney (4) dargestellt.

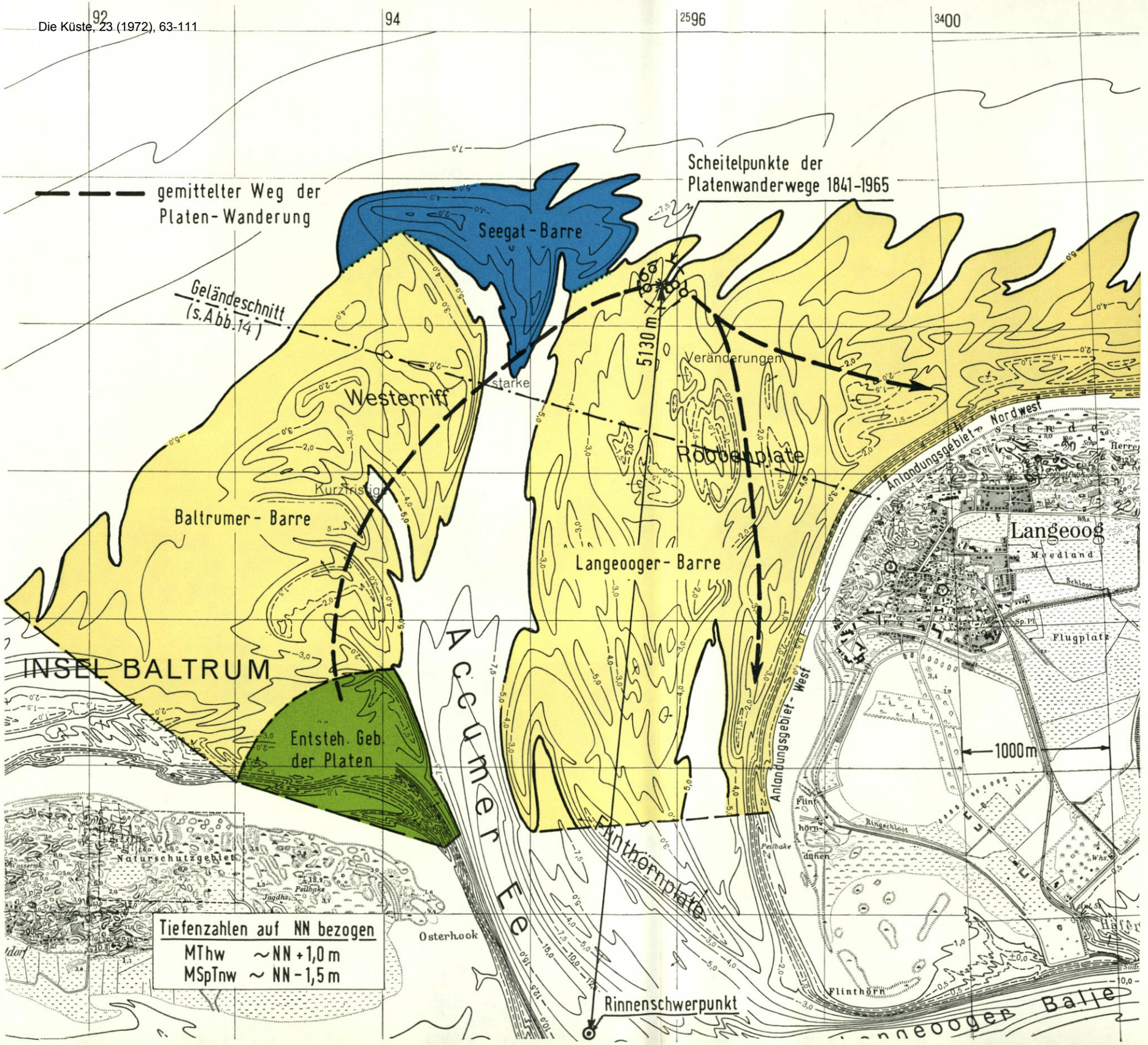


Abb. 13. Gliederung der Barre des Seegats Accumer Ee (Unterlage: „Topographische Wattkarte" N. 6 der Forschungsstelle Norderney)

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Die vorübergehend starke Einengung der Accumer Ee wurde durch eine große Platenanlandung auf der Westseite von Langeoog verursacht. Aus der weiteren Entwicklung kann der Schluß gezogen werden, daß das Watteinzugsgebiet der Accumer Ee noch groß genug und so gestaltet ist, daß sich ihr Querschnitt immer wieder auf das ursprüngliche und ausreichende Maß einstellt.

WALTHER (21) hat für die Seegaten der Ostfriesischen Inseln die zugehörigen Watteinzugsgebiete angegeben (Abb. 23 in [21]). Für den Bestand eines Seegats und seine Lage ist die Größe des jeweils östlich des Seegats befindlichen Teiles des Watteinzugsgebietes von maßgebender Bedeutung (vgl. Tabelle).

Seegat	mittlere Wasserflächen der Watteinzugsgebiete	
	gesamt	östlicher Teil
Norderneyer Seegat (Juist/Norderney)	65,68 km²	21,18 km² = 32,3 %
Wichter Ehe (Norderney/Baltrum)	16,86 km²	6,25 km² = 37,0 %
Accumer Ee (Baltrum/Langeoog)	51,70 km²	44,15 km² = 85,4 %
Otzumer Balje (Langeoog/Spiekeroog)	42,20 km²	28,75 km² = 68,1 %

Dieser Vergleich zeigt, daß die Accumer Ee von den aufgeführten Seegaten hinsichtlich der Größe des östlichen Watteinzugsgebietes für die Inselerhaltung am günstigsten ausgestattet ist. Solange sich an diesen Verhältnissen nichts Wesentliches ändert, werden sich auch die morphologischen Verhältnisse im Seegat Accumer Ee nicht nachteilig für die Insel Langeoog entwickeln.

D. Barre des Seegats Accumer Ee, Platenwanderung, Platenanlandung

1. Barre des Seegats Accumer Ee

Die seewärtige Begrenzung der Accumer Ee wird — wie bei allen ostfriesischen Seegaten – von einer Sandbarre gebildet, die sich, seeseitig ausbuchtend, vom Ostende der Insel Baltrum nach dem Nordweststrand der Insel Langeoog erstreckt. Die Barre (in Verbindung mit der Platenwanderung auch Riffbogen oder Riffgürtel genannt) ist nach Ausweis der Tiefenvermessungen seit der Mitte des 19. Jahrhunderts weitgehend festliegend.

Das Barrengebiet der Accumer Ee kann in drei Abschnitte gegliedert werden (Abb. 13). Ihr westlicher Abschnitt, die „Baltrumer Barre", erstreckt sich von Baltrum Ost in Richtung Nord-Ost etwa 4 km seewärts bei einer mittleren Breite von rund 2 km, gemessen zwischen den Tiefenlinien NN — 5 m (= SKN — 3,5 m). Den nördlichen Abschnitt bildet die „Seegat-Barre", deren größte Breite in West-Ost-Richtung 2 km beträgt; in Nord-Süd-Richtung ist sie maximal 1,5 km lang. Die östliche Begrenzung der Accumer Ee bildet die den Nordweststrand der Insel Langeoog bogenförmig umfassende „Langeooger Barre". Sie geht in den Inselsockel über. Ihre Breite, senkrecht zum Strand gemessen, beträgt 2 bis 2,5 km.

Im Querschnitt hat die Barre der Accumer Ee zwischen den Tiefenlinien NN — 5 m eine

fast ebene Krone. Auf dieser vollzieht sich die durch Strömung und Brandung verursachte, entlang der niedersächsischen Küste von West nach Ost gerichtete Sandverfrachtung, die für den Bestand der Inselkette von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Zur Beurteilung der Frage, ob die seit etwa 1960 vor dem Pirolatal eingetretenen Strand- und Dünenabbrüche mit einer Änderung der Sandzuführung nach der Insel Langeoog zusammenhängen, ist die westlich von Langeoog im Gebiet der Accumer Ee seit 1841 durch Peilpläne belegte Wanderung und Anlandung der Platen mit nachstehenden Ergebnissen untersucht worden (18).

2. Platenwanderung

Im Gebiet der Accumer Ee geht die Sandwanderung, wie auch bei den anderen ostfriesischen Seegaten, in Form von „Platen" vor sich. Diese entstehen am Ostende der Insel Baltrum aus den im Verlauf der allgemeinen West-Ost-Sandverfrachtung sich dort stauenden Sandmassen (Abb. 13). Wenn die Sandansammlung in diesem „Platenentstehungsgebiet" so groß geworden ist, daß ein seewärtiger Vorsprung entsteht, dann werden Teile davon durch Tideströmung und Brandungswirkung vom Inselstrand abgetrennt. Die losgelösten Sandmassen wandern unter der Wirkung der Wasserkräfte in geschlossener Form als Einzelplaten oder auch Platengruppen auf der Krone der seeseitig ausbuchtenden Barre entlang, so das Seegatgebiet mit seinen starken Strömungen und großen Wassertiefen umgehend.

Die Höhen der wandernden Platen erreichen über der Krone der Sandbarre auf der „Baltrumer" und „Langeooger Barre" in der Regel 3 bis 3,5 m (Abb. 14), sie erreichen und überschreiten zum Teil mit ihrer Oberfläche die Höhe des MSpTnw (= Seekartennull). Auf der exponiert liegenden „Seegat-Barre" sind die Platen flacher; ihre Kronen liegen dort etwa 0,5 m unter SKN.

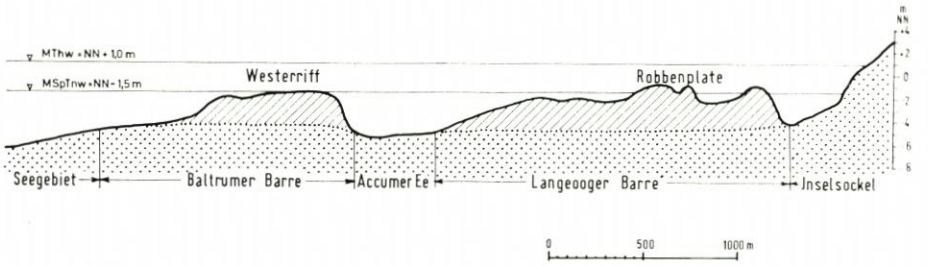


Abb. 14. Geländeschnitt durch das Barrengebiet der Accumer Ee (Lage des Schnittes s. Abb. 13)

Um eine Vorstellung von der Größe der wandernden Sandmengen zu ermitteln, wurde der Inhalt einer auf dem Westerriff (Abb. 13) liegenden Plate überschläglich ermittelt. Bei einem Querschnitt von rund 2000 m² errechnet sich ihr Sandinhalt zu etwa 1 Mio. m³.

Auf der Barre wandern die Platen zunächst in Richtung Nord. Im Gebiet des Westerriffs im nördlichen Teil der „Baltrumer Barre" schwenken sie allmählich nach Nord-Ost und überwandern die „Seegat-Barre" in östlicher Richtung. Nach Überquerung des Mündungsgebietes der Accumer Ee in die See gabelt sich fast regelmäßig der Wanderweg in einen östlichen und einen südlichen Ast, die nach den Langeooger Anlandungsgebieten am Nordwest- bzw. Südstrand führen (Abb. 13).

Die aus den Peilungen der Jahre 1841 bis 1965 festgestellten mittleren Wanderwege der Platen, deren Kronenhöhe auf SKN oder höher liegt, sind in Abbildung 5 im einzelnen und in

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Abbildung 15 übereinandergezeichnet dargestellt. Auffällig in dieser Abbildung ist zunächst die gebündelte Lage der gemittelten Wanderwege. Auf der „Baltrumer Barre" beträgt die Wegbreite etwa 600 m. Im weiteren Verlauf wird sie geringer und erreicht im Nordwesten der

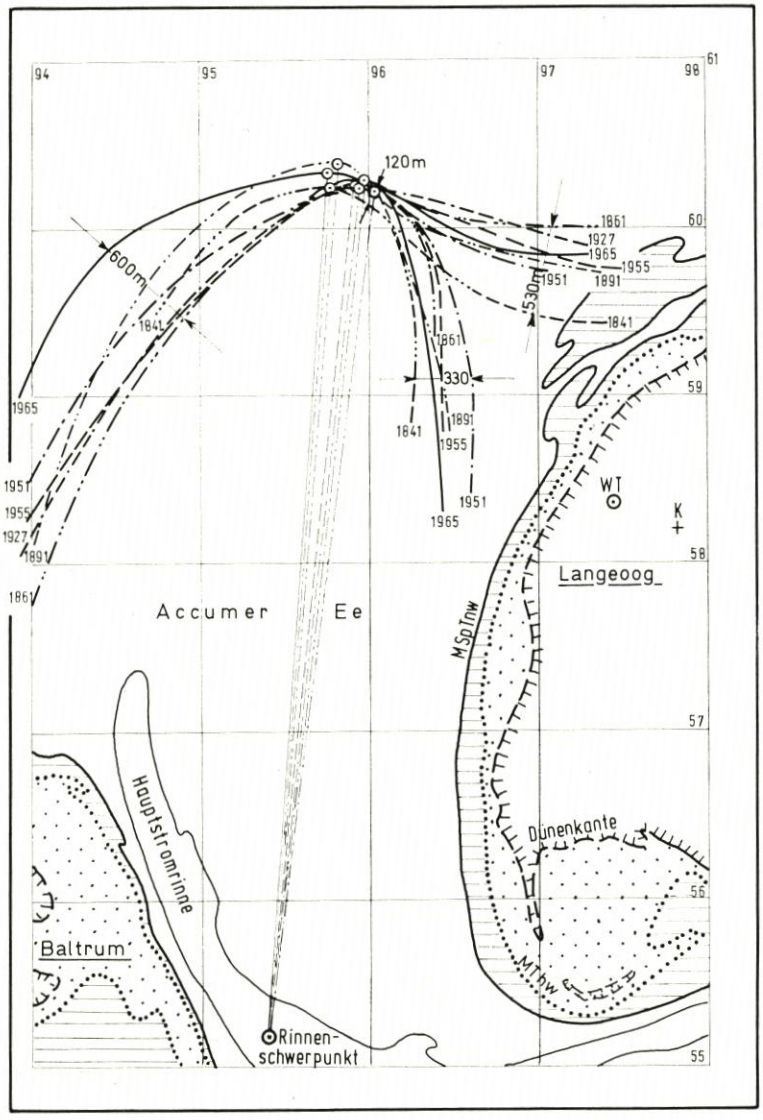


Abb. 15. Mittlere Lage der Platenwanderwege im Gebiet der Accumer Ee von 1841 bis 1965

„Langeooger-Barre" mit 120 m ihren kleinsten Wert. Unmittelbar südöstlich dieser Stelle liegt die erwähnte Gabelung der Wanderwege. Der nach Osten abzweigende Wegeast ist etwa 530 m, der nach Süden verlaufende etwa 330 m breit.

In den betrachteten 120 Jahren (1841 bis 1965) sind die mittleren Wanderwege innerhalb der genannten Wegebreiten in den einzelnen Jahren zwar unterschiedlich verlaufen, indem sie

sich teilweise kreuzen, parallel verlaufen oder sich überdecken, sie lassen aber keine systematische Veränderung der Platenwanderung erkennen. Der zu beobachtende unterschiedliche Verlauf der einzelnen Wanderwege wird wahrscheinlich in erster Linie durch wechselnde meteorologische Einwirkungen (Wellenrichtung, Brandungsstärke) bestimmt.

Eine zweite auffällige Erscheinung ist die gebündelte Lage der Scheitelpunkte der Platenwanderwege auf einer nur etwa 6 ha großen Fläche im nordwestlichen Zipfel der „Langeooger Barre" (Abb. 13 und 15). Die graphische Auftragung der Entfernungen der Wegescheitel vom Rinnenschwerpunkt sowie ihre Verlagerungen in West-Ost-Richtung, bezogen auf die Ordinate durch den Rinnenschwerpunkt (Abb. 16) ergibt, daß die Scheitelpunkte geringfügig um eine Mittellage pendeln. Von der gemittelten Entfernung vom Rinnenschwerpunkt (5130 m) sind die maximalen Abweichungen nordwärts 70 m (i. J. 1891) und südwärts 55 m (i. J. 1951). In der West-Ost-Richtung weichen die Lagen der Scheitelpunkte maximal 115 m nach Osten (i. J. 1951) und 135 m nach Westen (i. J. 1965) von der gemittelten Entfernung (475 m) ab.

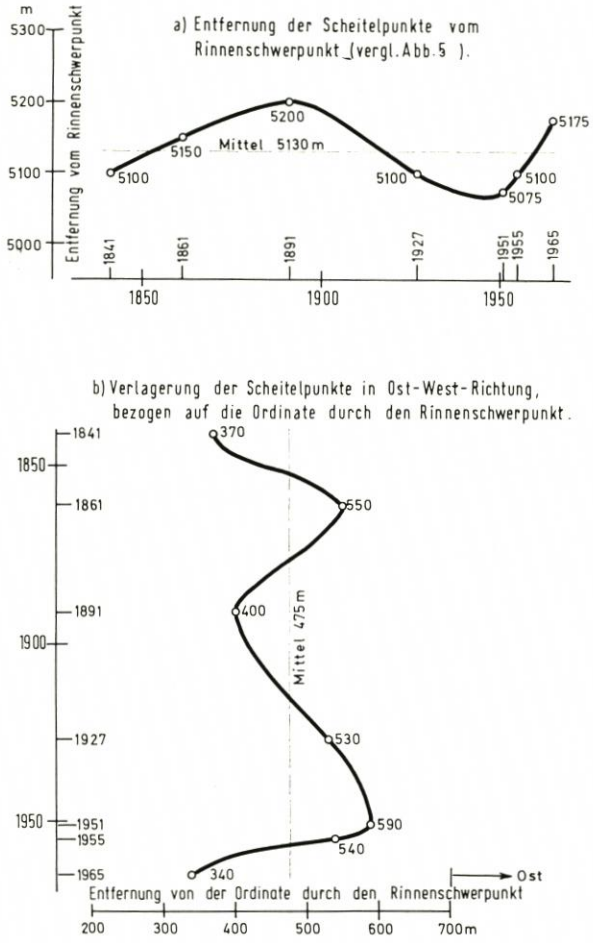


Abb. 16. Lageveränderung der Scheitelpunkte der Platenbögen von 1841 bis 1965

Diese Untersuchungen zeigen, daß die Scheitelpunkte der Platenwanderwege ebenso wie die mittleren Platenwanderwege im Gesamtmittel in der betrachteten 120jährigen Zeitspanne grundsätzlich unverändert geblieben sind. Hieraus kann gefolgert werden, daß auch die Sandverfrachtung allgemein im Gebiet der Accumer Ee keinen Wandel erfahren hat.

3. Platenanlandung

Ist eine Plate oder Platengruppe auf ihrer Wanderung in den Bereich der Gabelung des mittleren Wanderweges im Nordwesten der „Langeooger Barre" gelangt, dann wird ihr weiterer Weg je nach den Auswirkungen der gerade zu dieser Zeit vorherrschenden Witterungsverhältnisse, also nach der Größe der Tidebewegung und Strömungsstärke sowie der Wellenrichtung und Riffbrandung, unterschiedlich beeinflußt. Unter normalen Witterungsbedingungen wird die Plate erfahrungsgemäß zum größten Teil dem Anlandegebiet am Nordweststrand von Langeoog zugeführt (Abb 13). Es kann aber auch bei geänderten Wetterlagen eine Spal-

Die Küste, 23 (1972), 63-111

tung der Plate eintreten, so daß ein Teil des Sandes in südlicher Richtung auf die Robbenplate zu weiterverfrachtet wird. Andererseits kann sogar fast die gesamte Plate nach dem Anlandungsgebiet-West wandern und dem Flinthörnhaken eine starke Sandzufuhr bringen.

Ob die hier skizzierten Vorgänge allein von den wetterbeeinflußten Wasserkräften gesteuert werden oder ob noch andere Kräfte (Stau, Reflexion) wirksam sind, ist nicht bekannt. Diese z. B. für die Planung des baulichen Schutzes einer Insel wichtige Frage müßte durch weitere Forschungen erkundet werden.

Aus der Beschreibung der Platenwanderung nach der Insel Langeoog hin ergibt sich, daß es auch bei an sich günstigen Sandanlandungsverhältnissen, wie sie für Langeoog bestehen, an den verschiedenen Strandstrecken immer wieder zu Sandmangelzeiten kommen kann, deren Folge Strand- und Dünenabbrüche sind, die, wie bereits erwähnt, sogar zur teilweisen oder völligen Zerstörung von Randdünen führen können, besonders dann, wenn infolge einer stärkeren Strandabnahme und Aufsteilung des Strandes die bisher auf der Strandebene auslaufende Strandbrandung sich in eine Kliffbrandung umwandelt.

Die bei der Annäherung und Anlandung einer größeren Plate an den Strand vor sich gehenden morphologischen Umgestaltungen sind im Abschnitt IV E 1 an Hand von Strandpeilungen näher untersucht worden.

E. Vorstrand, Strand, Randdüne

1. Vorstrand und Strand

Die Entwicklung des Vorstrandes und des Strandes ist im Bericht des WSA Norden (23) für die Meßprofile Nr. 15 bis 28 (Abb. 4) dargestellt. Hierfür sind die Messungen der Jahre 1950, 1968 und 1970 verwendet worden. Sie vermitteln nur ein Augenblicksbild des Vorstrandes (Meeresboden) und des Strandes. Lage und Form der Riffe sind bei jeder Peilung verändert. Entsprechend der Verlagerung des Strandes in Richtung Land verschieben sich die Riffe im allgemeinen im gleichen Sinne und umgekehrt. Strandwälle, die von der Brandung auf dem Strand aufgeworfen werden, sind von Messung zu Messung unterschiedlich geformt und höher oder niedriger angeordnet.

Nach dem Untersuchungsbericht (23) sind die Verhältnisse östlich Profil 28 normal, d. h. Strand und Düne sind hier „gesund". Um die im Abbruch befindliche Strecke mit der „gesunden" vergleichen zu können, wurden zusätzlich die Profile Nr. 29, 30 und 31 untersucht. Sie sind mit den Meßergebnissen aus den Jahren 1954, 1961 und 1969 dargestellt worden und daher nicht unmittelbar mit den Profilen 15 bis 28 vergleichbar. Dennoch können sie für die hier vorzunehmende Auswertung verwendet werden, weil sie innerhalb des gleichen Zeitraumes von 1950 bis 1970 aufgemessen wurden.

Die Profile 28, 29, 30 und 31 erfassen einen Küstenabschnitt von rd. 3000 m Länge. Er ist ebenso lang wie der Küstenabschnitt zwischen Profil 15 und 28. Der gegenseitige Abstand der Profile 28 bis 31 beträgt rd. 1000 m. Alle Profile sind von einer am Strand mit Schraubpfählen vermarkten Standlinie aus eingemessen und aufgetragen worden. Die Station 300 befindet sich etwa dort, wo die MTnw-Linie den Meeresboden schneidet. Seewärts dieser Station liegt der Vorstrand; er ist auf 500 m Länge bis zur Station 800 dargestellt. Landwärts befinden sich der nasse und der trockene Strand, der von der Randdüne begrenzt wird. Der Dünenfuß, die Grenze zwischen Strand und Randdüne, liegt für die Profile 19 bis 28 des Meßjahres 1970 im Mittel auf der Höhe NN + 2,0 m. Es sei hier erwähnt, daß er inzwischen als Auswirkung des

Längsschlauchwerkes in Verbindung mit der Sandaufspülung auf NN + 3,0 m angewachsen ist (Mitt. des WSA Norden).

Auf eine rechnerische Auswertung der Peilergebnisse wird hier aus folgenden Gründen verzichtet: Für die Beurteilung von Entwicklungstendenzen sind die aus älteren und neueren Peilplänen entwickelten Zeit/Weg-Pläne nicht geeignet, weil die Peilpläne auf wenig vergleichbaren Grundlagen beruhen (ältere: Handlotungen, jüngere: Echolotungen), weil sie nur ein Augenblicksbild zur Zeit der Aufnahme vermitteln und weil die Peilungen allein aus der Beschickung der Wasserstände auf Bezugspegel Fehler in der Größenordnung ± 0,5 m aufweisen.

Die Richtigkeit dieser Auffassung bestätigt die 1971 erschienene Arbeit von Wetzel und Lucht (28). Danach streuen die Einzelwerte der Tiefenangaben älterer mit dem Handlot vermessener Karten zwischen + 4 dm und — 5 dm. Nach Einführung des Echolotes im Jahre 1937/38 änderte sich die Höhenlage der Gewässersohle sprunghaft um 2 dm. Bei Messungen mit dem Handlot erhielt man verständlicherweise nur Einzelpunkte. Das Zeichnen der Tiefenlinien läßt dabei den Vorstellungen des Kartographen meist einen weiten Spielraum. Der Vergleich älterer mit jüngeren, mit dem Echolot aufgenommener Karten liefert, insbesondere bei flachgeneigtem Grund, keine brauchbaren Werte.

Wetzel und Lucht empfehlen außerdem, die Lotungen auf keinen Bezugspegel zu beschicken, der einen größeren Abstand als 5 km, im Watt 4 km, von den Peilpunkten hat. Nur dann kann der Meßfehler kleiner als 1 dm gehalten werden.

Vom Pegel Langeoog bis zur 10-m-Tiefenlinie außerhalb der Seegatbarre ist eine Entfernung von 12 km zu überbrücken. Zwischen den genannten Punkten befindet sich die Accumer Ee und die Barre. Die sich hier ergebenden Tidewellenlinien werden für die Höhenbestimmung der Meßpunkte gebraucht. Das gleiche gilt für alle Peilungen außerhalb der Barre. Es werden daher zusätzliche Pegel aufzustellen sein, wenn die Messungen vergleichbar sein sollen (vgl. hierzu die von Rodloff [20] für die Eider, die Norderhever und die Piep gemachten Ausführungen).

Wegen der Ungenauigkeiten, die den Peilergebnissen anhaften, sollen hier die Entwicklungstendenzen des Strandgebietes nach morphologischen Gesichtspunkten untersucht werden.

Das Verhalten des „gesunden" Vorstrandes und Strandes soll zuerst betrachtet werden. Aus den Unterlagen des WSA Norden ergibt sich, daß der Vorstrand etwa 1 : 400 bis 1 : 500 geneigt ist. Bei Station 800 liegen die größten Wassertiefen bis 2,5 m unter MTnw. Bei Profil 31 steigt der Meeresboden im Bereich der Station 600 noch einmal bis zur MTnw-Linie auf. Die Neigungen des Vorstrandes sind daher in diesem Bereich steiler als oben angegeben.

Der nasse und der trockene Strand sind stark bewegt; Anwachs und Abtrag wechseln miteinander ab. Die Werte jüngerer Messungen liegen vielfach über denen älterer. Die Uferlinie im Profil 29 hat sich in der Zeit von 1954 bis 1961 um 40 m seewärts, in der Zeit von 1961 bis 1969 um 80 m bzw. um 55 m landwärts verlagert.

Mit nach dem Augenmaß eingetragenen Ausgleichslinien kann die Strandneigung auf 1 : 80 bis 1 : 100 abgeschätzt werden. Auf der Höhe NN + 1,8 m bis NN + 2,1 m geht der so geneigte Strand in eine fast waagerechte Strandebene über, die etwa 230 m bis 275 m breit ist. Der Dünenfuß liegt im Mittel auch hier auf NN + 2,0 m.

Die „gesunden" Profile 29 bis 31 sind dadurch gekennzeichnet, daß auch ihre Uferlinie im Laufe der Zeit großen Veränderungen unterliegt. Alle künftigen Beobachtungen und Messungen sollten darauf gerichtet sein, diesen Schwankungsbereich zu erfassen.

Der Vorstrand der Profile 15 bis 28 ist stark bewegt. Er weist im Bereich der Stationen 600 bis 800, aber auch teilweise 500 bis 700, Riffe auf, die sich zum Teil über die MTnw-Linie erheben. In manchen Jahren fehlen aber die Riffe in diesem Strandbereich. Größere Wassertiefen

Die Küste, 23 (1972), 63-111

als 2,5 m unter MTnw werden nirgends erreicht. Im allgemeinen ist die Wassertiefe geringer als bei den „gesunden" Profilen 29 und 30. Mit einer landwärtigen Verlagerung des Strandes wandern die Riffe in gleichem Sinne. Zeichnet man nach Augenmaß Ausgleichslinien ein, dann ergeben sich Neigungen von 1 : 600 bis 1 : 1000. Eine Ausräumung des Vorstrandes ist nirgends zu erkennen.

Um eine Aussage über die Veränderungen im Bereich des nassen und des trockenen Strandes machen zu können, sind in die Profile 15 bis 28 nach Augenmaß Ausgleichslinien eingezeichnet worden. Die nachstehende Tabelle 1 gibt einen Überblick.

Tabelle 1

Übersicht über die Neigungen des trockenen und des nassen Strandes

Profil Nr.	Profilmessungen 1950	1968	1970
15	1 : 40	1 : 50	1 : 60
16	1 : 50	1 : 60	1 : 50
17	1 : 60	1 : 45	1 : 45
18	1 : 70	1 : 45	1 : 45
19	1 : 80	1 : 50	1 : 50
20	1 : 80	1 : 45	1 : 50
21	1 : 55	1 : 50	1 : 50
22	1 : 50	1 : 45	1 : 45
23	1 : 50	1 : 50	1 : 50
24	1 : 50	1 : 50	1 : 50
25	1 : 55	1 : 50	1 : 50
26	1 : 60	1 : 55	1 : 55
27	1 : 80	1 : 55	1 : 55
28	1 : 80	1 : 60	1 : 60

Die Profile 27 und 28 können als Übergangsprofile bezeichnet werden. Alle übrigen Profile haben Strandneigungen von etwa 1 : 50. Eine Ausnahme bilden die Profile 20, 19 und 18, die für das Jahr 1950 geringere Strandneigungen erkennen lassen.

Aus der vorliegenden neuesten Peilung vom 6. 7. 1971 geht hervor, daß der Abstand der MTnw-Linie (NN —1,35 m) von der MThw-Linie (NN + 1,25 m) maximal 150 m (bei Geerk sin Spoor und bei Profil 27) und minimal 100 m (bei Profil 22/23) beträgt. Dem entsprechen bei dem Tidehub von 2,6 m Strandneigungen zwischen 1 : 60 und 1 : 40. Als Mittelwert kann für die Tidewechselzone des Untersuchungsgebietes eine Strandneigung von 1 : 50 angenommen werden. Dies stimmt gut überein mit Messungen an der amerikanischen Ost- und Westküste, die im Technical Report No 4, Shore Protection, Planning and Design durch die U.S. Army CERG 1966 veröffentlicht sind. Dort wurde die mittlere Strandneigung bei einer mittleren Korngröße von 0,2 mm zu 1 : 50 festgestellt.

Die Profile 16 und 17 sowie die Profile 20 bis 27 lassen für das Jahr 1970, zum Teil bereits für das Jahr 1968, an ihrem landseitigen Ende Ausräumungen von 0,2 m bis 0,5 m Tiefe bei 50 m bis 80 m Länge erkennen. Diese Vertiefungen liegen für die Profilreihe 16 bis 23 oberhalb des Tidehalbwassers, bei der Profilreihe 24 bis 27 reichen sie sogar noch 0,5 m tiefer. Über die Entstehung derartiger Ausräumungen vgl. Abschnitt III. In diesen Ausräumungen bestehen die gegenüber früheren Zeitabschnitten größeren Rückgangswerte des Strandes.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Größe des Rückganges, wie sie aus den Profilen ermittelt wurde. Da die Profile jedoch nur ein Bild zum Zeitpunkt der Messung vermitteln, stellen die Werte keine absoluten Größen dar.

Daß derartige Verschiebungen nicht ungewöhnlich sind, zeigen Vermessungen aus den Jahren 1921 bis 1928 aus dem Gebiet des Hauptbadestrandes (Blatt 11 in [22]). Nach diesen Vermessungen schwankte von 1921 bis 1925 im damaligen Profil 3 die Uferlinie (= MHW-Linie) um rd. 150 m, im Profil 14 von 1925 bis 1927 um rd. 100 m. Bemerkenswert ist, daß auch der Dünenfuß diesen Bewegungen folgte, und zwar im Profil 3 mit maximal 70 m und im Profil 14 mit maximal 60 m.

Tabelle 2

Übersicht über die Verlagerung der Uferlinie

Profil Nr.	Verlagerung der Uferlinie 1950–1968	1968–1970	Bemerkungen
15	+ 10 m	— 10 m	+ = Verlagerung seewärts
16	+ 30 m	— 60 m	
17	— 25 m	— 30 m	— = Verlagerung landwärts
18	— 60 m	— 10 m	
19	— 20 m	+ 25 m	
20	— 25 m	— 25 m	
21	— 30 m	— 40 m	
22	— 65 m	— 35 m	
23	— 55 m	— 35 m	
24	— 100 m	— 6 m	
25	— 90 m	— 45 m	
26	— 50 m	— 40 m	
27	— 85 m	— 40 m	
28	— 70 m	0 m	

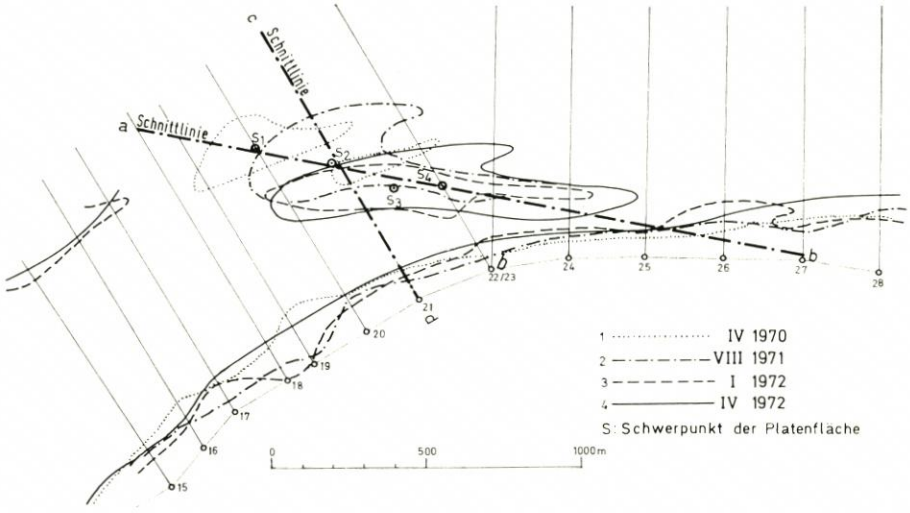


Abb. 17. Platenanlandungsvorgang: Veränderungen der Tiefenlinie SKN ± 0 m einer anlandenden Plate und am Inselstrand (Unterlage: Strandpeilungen des WSA Norden am Langeooger Nordwest-Strand)

Die Möglichkeit einer baldigen Änderung dieser ungünstigen Verhältnisse von Natur aus, die z. B. durch Anlandung einer größeren Plate hätte eintreten können, war zu Beginn des Jahres 1970 noch nicht sicher erkennbar gewesen. Zwar lagen nach der Strandpeilung vom

Die Küste, 23 (1972), 63-111

April 1970 (Abb. 17) nordwestlich vom Profilpfahl 21 in rund 350 bis 500 m Entfernung von der Inselstrandlinie zwei kleinere Platen, von denen aber nicht vorhergesehen werden konnte, wann und vor allem an welchem Strandabschnitt sie anlanden würden, da dies von den jeweilig herrschenden Witterungsverhältnissen abhängig ist.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung sind diese Platen auf den Strand vor dem Pirolatal zugewandert und befinden sich inzwischen im Stadium ihrer Anlandung. Dieser Vorgang ist durch vier in kurzzeitigen Abständen ausgeführte Strandpeilungen des WSA Norden festgehalten und verfolgt worden. Die sich hierbei vor dem neuen Längsschlauchwerk abspielenden Auswirkungen auf die Strandentwicklung werden nachstehend im einzelnen beschrieben.

In Abbildung 17 sind die Umrisse der über SKN sich erhebenden Fläche der anlandenden Plate und die entsprechenden SKN-Linien am Strande (Strandlinien) nach den Strandpeilungen vom April 1970, August 1971, Januar und April 1972 übereinandergezeichnet dargestellt. Für jede Platenfläche ist nach dem Augenmaß deren Schwerpunkt festgestellt worden (S 1 bis S 4 in Abb. 17).

Die Veränderungen der Plate und des Strandes während des Anlandungsvorganges wurden anhand von Längs- und Querschnitten untersucht.

Die *Längsschnitte* durch das Anlandungsgebiet sind in der Schnittlinie a—b als Ausgleichslinie der Flächenschwerpunkte in der Hauptwanderrichtung der Plate aufgezeichnet (Abb. 18). Diese Linie bildet mit der Inselstrandlinie einen Winkel von 15°, d. h. die Plate landet sehr flach an den Strand an.

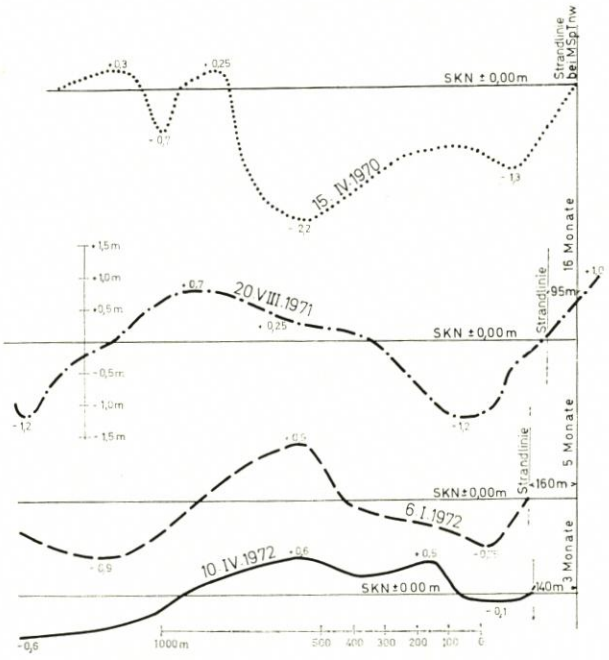


Abb. 18. Längsschnitte in der Schnittlinie a–b in Abb. 17

Die *Querschnitte* werden in der Schnittlinie c–d (Abb. 17), die in der Meßlinie durch den Profilpfahl 21 liegt, genommen. Diese Schnittlinie verläuft quer zum Inselstrand und ebenfalls im Bereich der oben genannten Flächenschwerpunkte. Die Querschnitte sind in Abbildung 19 aufgetragen.

Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, daß die in Wanderrichtung landwärts von der Plate liegende Strandbalje gegen den Inselstrand geschoben und hierbei immer mehr verflacht und zugeschüttet wird. Die größte Rinnentiefe hat von 1970 bis 1972 von SKN — 2,2 m auf SKN — 0,1 m, die Rinnenbreite bei MSpTnw in derselben Zeit von rund 1100 m auf 225 m abgenommen. Die über SKN liegende Platenfläche ist höher und gleichzeitig erheblich größer geworden. Am Inselstrand hat sich die Strandlinie im Verlauf der Platenanlandung um 160 m seewärts verlagert; das Ufer hat also an dieser Stelle, soweit die Aufzeichnungen ausgewertet werden konnten, einen stetigen Anwachs erfahren.

Die Flächenschwerpunkte S 1 bis S 4 der in Richtung der Längsschnittlinie a–b wandernden

Plate bewegen sich mit fast gleichbleibender Geschwindigkeit auf den Instelstrand zu (Abb. 17); ihre mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit beträgt rund 600 m in 2 Jahren, d. s. 25 m/Monat. Ähnliche Geschwindigkeiten weisen auch die Scheitelpunkte der wandernden Plate auf (Abb. 18).

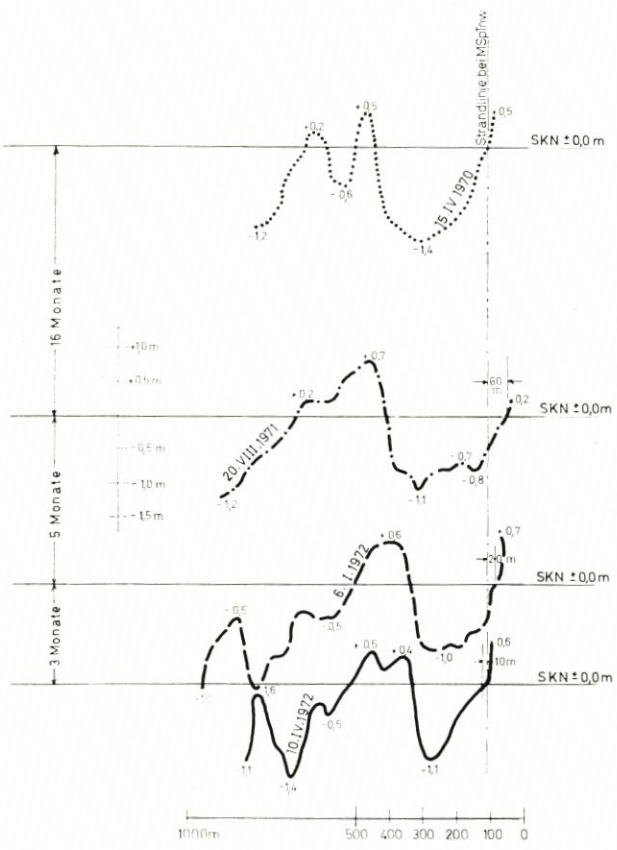


Abb. 19. Querschnitte in der Schnittlinie c–d in Abb. 17

Abbildung 19 zeigt die Veränderungen der Plate, Strandbalje und Inselstrandlinie auf der quer zum Strand liegenden Schnittlinie c–d. Die auf diese Linie projizierten Flächenschwerpunkte der Plate S 1 bis S 4 haben sich in den zwei Jahren von 1970 bis 1972 um 400 m der Insel geähert. Dabei hat die Breite der parallel zum Inselstrand verlaufenden Strandbalje von 340 m (1970) auf 200 m (1972) abgenommen, ohne jedoch wesentlich an Tiefe zu verlieren (Abb. 19). Die Inselstrandline hat sich gegenüber der ersten Peilung vom August 1971 um 40 m landwärts verlagert (Strandabbruch; Lee-Erosionswirkung der anlandenden Plate). Bis zur nächsten Peilung (Januar 1972) ist der Abbruch jedoch schon wieder bis auf 20 m ausgeglichen. Dieser Prozeß der Anlandung geht ständig weiter. Bei der Peilung vom April 1972 kann man bereits erkennen, daß sich die Strandlinie etwa 10 m seewärts verlagert hat (Anwachs) gegenüber der Peilung von 1970. Hieraus kann gefolgert werden, daß von nun an das uferparallele Gebiet der Strandbalje flacher werden wird.

Nach den Peilungen vom Januar und April 1972 (Abb. 19) hat die Masse der Plate den Schnitt c–d bereits durchwandert. Andererseits läßt die Abbildung 17 erkennen, daß sich zu dieser Zeit nordwestlich der Profile 15 bis 17 bereits das Herankommen einer neuen Plate abzeichnet.

2. Randdüne vor dem Pirolatal

Bei den im Abbruch befindlichen Randdünen nördlich des Pirolatales handelt es sich um verhältnismäßig junge Bildungen, die erst im Laufe des 20. Jahrhunderts entstanden sind. Dies geht aus dem Vergleich der historischen Karten hervor. Die Herrenhusdünen sind bereits in der Karte von Horst 1738 angegeben (Abb. 20), während die nördlich davon gelegenen Gebiete nur mit „Der Strandt“ bezeichnet sind.

Die Küste, 23 (1972), 63-111

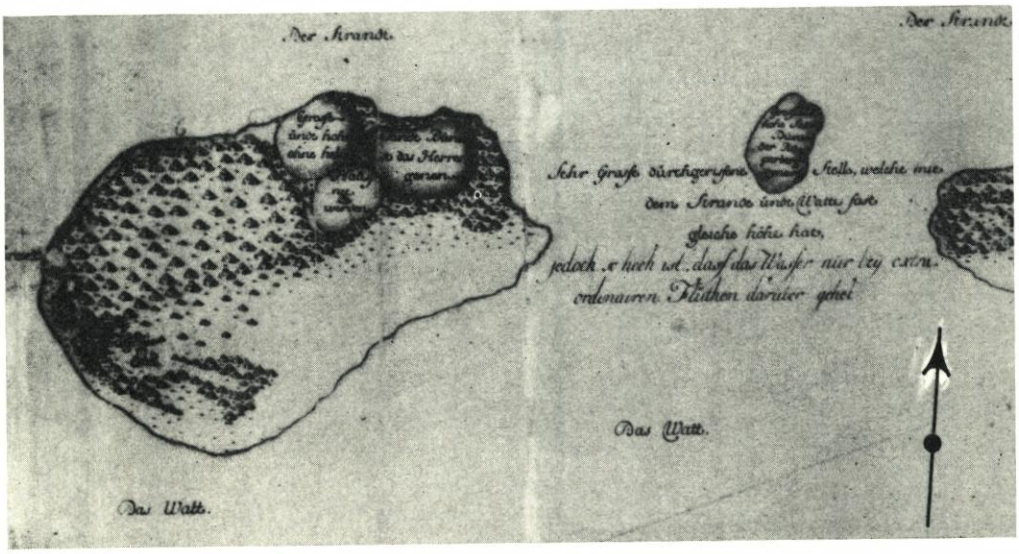


Abb. 20. J. HORST: Langeoog-West im Jahre 1738 (Reproduktion: Forschungsstelle Norderney)

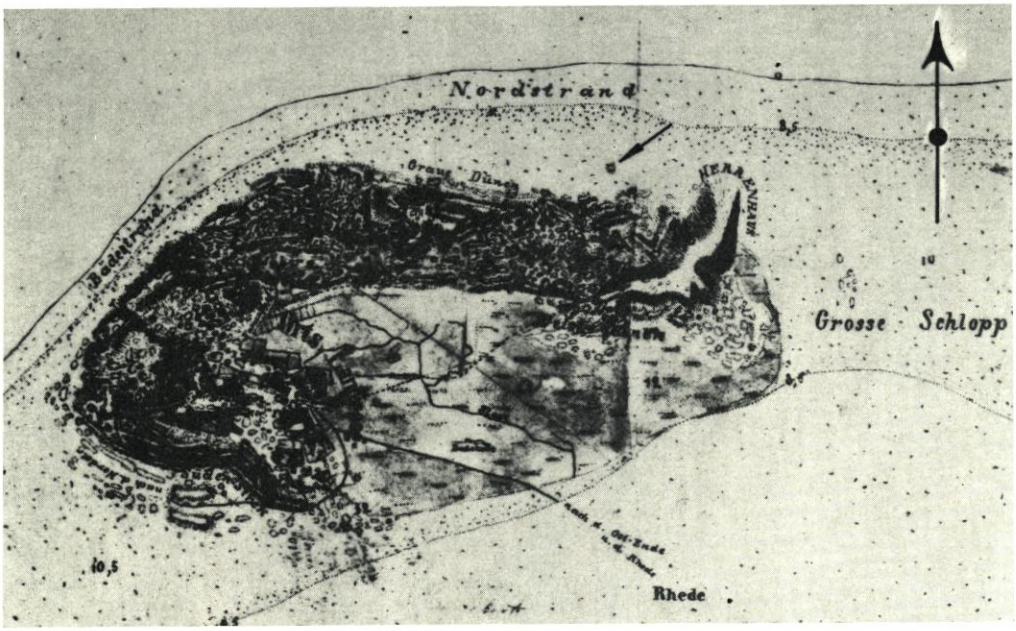


Abb. 21. Der Westteil der Insel Langeoog im Jahre 1860 (Reproduktion der Forschungsstelle Norderney)

Die Vermessung von 1860 (Abb. 21) zeigt für dieses Gebiet noch keine wesentlichen Änderungen gegenüber dem Zustand von 1738. Es mag an der wesentlich genaueren Aufnahme der Dünenmorphologie liegen (bei HORST sind die Dünen nur stilisiert wiedergegeben), daß auf der Karte von 1860 eine einzelne Vordüne (Pfeil auf Abb. 21) eingezeichnet ist. Sonst aber geht aus der Karte von 1860 nur hervor, daß das Gebiet des heutigen Pirolatales hochwasserfrei

gelegen hat, denn die punktierte Linie auf Kote 8,5 (Fuß) wird an einer anderen Stelle der Karte mit „mittlerer höchster Wasserstand" bezeichnet. Die Fläche zwischen der punktierten und der ausgezogenen Linie stellt den nassen Strand dar.

Die preußische Landesaufnahme von 1891 (Abb. 22) bringt einen weiteren wesentlichen Fortschritt in der Kartographie mit sich; entsprechend genauer werden Einzelheiten des heutigen Pirolatales mitgeteilt, das 1891 mit zahlreichen mehr oder weniger hohen Vordünen bedeckt ist. Es muß dahingestellt bleiben, ob sich diese Dünen erst in den 31 Jahren nach der Aufnahme von 1860 gebildet haben oder ob sie in Ansätzen schon damals vorhanden waren, ihrer geringen Höhe wegen aber nicht eingezeichnet worden sind. Auf jeden Fall geht aus der Aufnahme von 1891 hervor, daß die höchsten Kuppen innerhalb des Pirolatales auf NN + 3,8 m und NN + 5,0 m lagen. Am nördlichen Rand des Pirolatals, wo sich jetzt die Randdünenkette befindet, ist nur ein flacher Hang oberhalb der MThw-Linie angedeutet.

Ein Vergleich mit dem heutigen Zustand, der durch die Höhenschicht-Linien auf Blatt 5 des Entwurfs zur Sicherung der Insel Langeoog des WSA Norden (24) beschrieben wird, zeigt, daß von den morphologischen Formen von 1891 so gut wie nichts wiedererkannt werden kann. Insgesamt gesehen hat sich das Pirolatal durch Sandflug auf etwa NN + 3,0 m in der Talsohle aufgehöht und ist mit zahlreichen Einzeldünen bedeckt. Am deutlichsten ist aber die starke Veränderlichkeit der Morphologie in dem hohen Randdünengürtel ausgedrückt, der sich in der Zeit nach 1891 gebildet hat und der jetzt wieder seit rund 20 Jahren im Abbruch liegt (23). In dem o. g. Höhenschichtlinien-Plane werden für die Kuppen dieser nördlichen Randdünen Höhen zwischen 10 m und 15 m angegeben, die Breite des Dünengürtels beträgt z. Z. noch rund 50 m.

Dieser Dünengürtel hat sich in einer Zeitspanne aufgebaut, in der ein breiter trockener Strand vorhanden war (Blatt 5, 6, 7 in [22]), der einen landwärtigen äolischen Transport ermöglichte. Mit dem Rückgang dieses trockenen Strandes verminderte sich auch die Sandzufuhr und damit der Dünenanwachs.

Die Auswertung der historischen Karten zeigt also, daß von 1738 bis 1860 die Fläche des Pirolatales trockener Strand war, wobei sich die Lage der MThw-Linie von 1860 nicht wesentlich verändert hat. Von 1860 bis 1891 haben sich dann auf der ganzen Fläche des Pirolatales Vordünen gebildet, während die heutige Randdüne auch 1891 noch nicht bestand. Diese ist erst im Laufe des 20. Jahrhunderts gebildet worden.

Ein weiteres Ergebnis der Auswertung der Karten aus den Jahren 1738, 1841 und 1961 zeigt die Abbildung 23, in der die Dünengebiete übereinandergezeichnet dargestellt sind. Für die hier zu untersuchende Strecke beim Pirolatal (Profile 21 bis 27) ergibt sich, daß der Dünenfuß in der Zeit von 1738 bis 1841 auf großer Länge maximal um 180 m landwärts verlegt worden ist (Abbruch). In den Jahren von 1841 bis 1961 ist dieser Dünenabbruch mehr als wettgemacht worden. Zu diesem Ergebnis kommt man, wenn man die Karte von Horst (1738) in der in Abbildung 23 dargestellten Weise mit den neueren Karten kombiniert. Abbruch und Anwachs nicht nur des Strandes, sondern auch der Düne gleichen sich, über lange Zeiträume gesehen, aus. Für Befürchtungen, daß sich die jüngsten Abbrüche nicht wieder ausgleichen werden, besteht nach den vorstehenden Ausführungen also kein Grund.

V. Bauliche Sicherung des Pirolatales

A. Vorschläge des Wasser- und Schiffahrtsamtes Norden

Seit einigen Jahren werden Versuche unternommen, sandgefüllte Kunststoffgewebe in den Küsten- und Inselschutz einzuführen. Es handelt sich meist um schlauchartige Gebilde mit

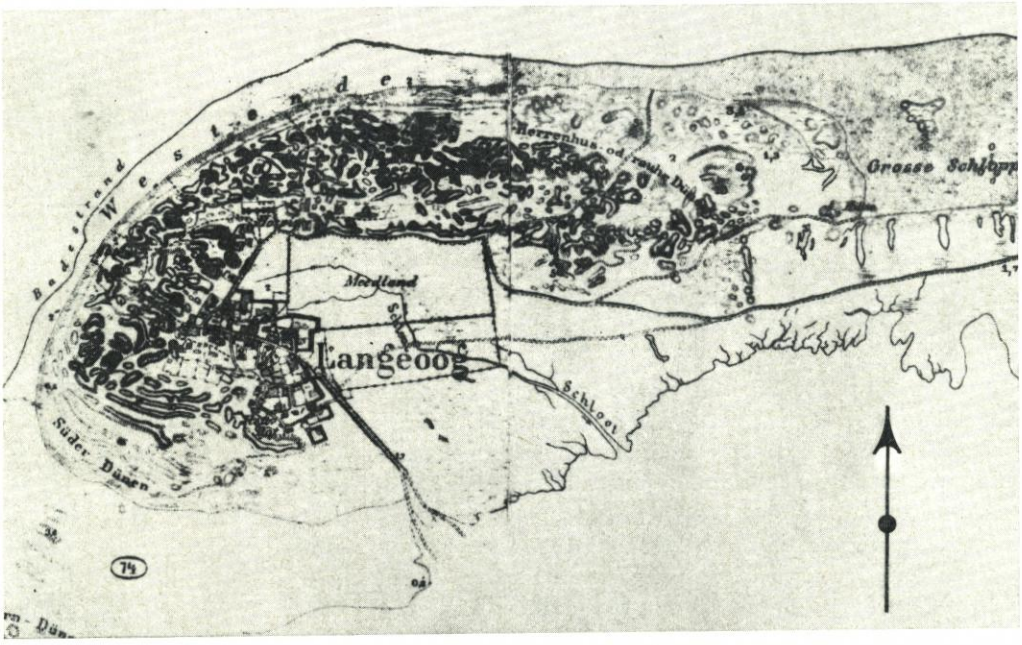


Abb. 22. Kgl. Preußische Landesaufnahme: Der Westteil der Insel Langeoog im Jahre 1891 (Reproduktion der Forschungsstelle Norderney)

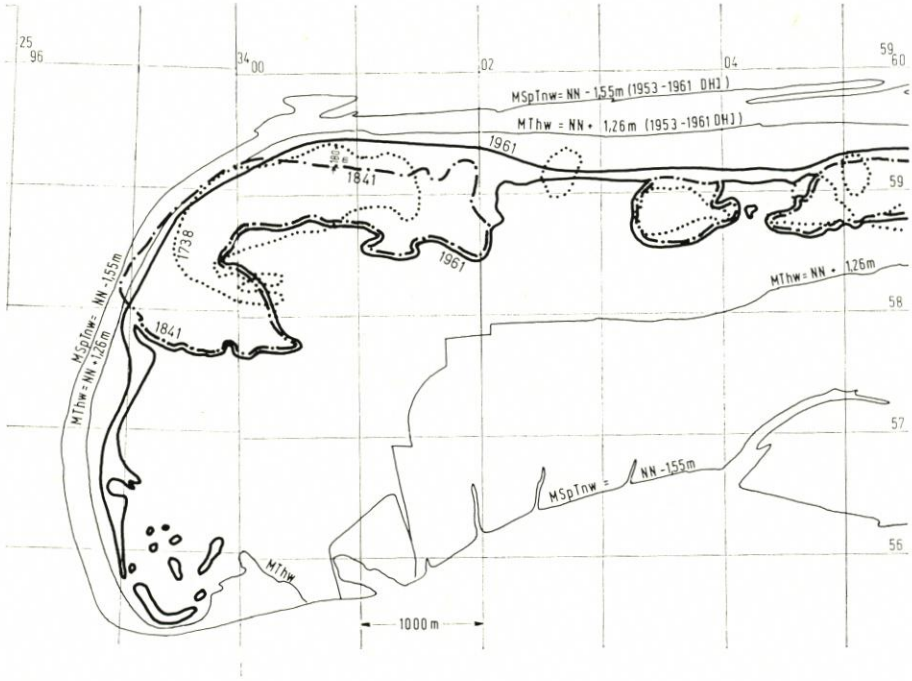


Abb. 23. Dünengebiete auf Langeoog-West nach Karten aus den Jahren 1738 (Horst), 1841 u. 1961 [7])

Durchmessern von einem Meter und darüber, die entweder mechanisch oder hydraulisch mit einem Sand-Wasser-Gemisch von einer Rohrleitung her gefüllt werden. Die Wirkungsweise dieser Strukturen ist einfach und folgt dem Prinzip einer Strandbauweise: Das Füllmaterial (Sand oder Kies) liefert die nötige träge Masse, die den Wellenangriffen entgegenzuhalten ist, während das (leichte und damit sonst wirkungslose) Kunststoffgewebe dieses Füllmaterial zusammenhält und es gegen die wellenerzeugten Strömungen schützt.

Zwischen dem Füllmaterial und der Kunststoffumhüllung muß eine gegenseitige Anpassung vorhanden sein, in der Art, daß die Maschenweite des Kunststoffgewebes so gewählt werden muß, daß das Füllmaterial auch bei Porenwasser-Überdruck nicht durch das Gewebe austreten kann. Übertriebene Forderungen brauchen hier nicht gestellt zu werden, weil ein mit rolligem Material (Sand oder Kies) gefülltes Kunststoffgewebe immer durch den Erddruck auf Zug beansprucht sein sollte – es liegt an der Wahl des optimalen Füllungsgrades (etwa 70 bis 80 % des geometrischen Inhalts), daß diese Bedingung eingehalten wird. Wichtiger als die Wasserdurchlässigkeit ist die Reißfestigkeit des Kunststoffgewebes. Gerade bei Sturmfluten kann durch Treibholz, das oft Nägel enthält, eine erhebliche örtliche Rißbelastung auftreten, die um Größenordnungen die Belastung übertrifft, die Wellendruck und wellenerzeugte Strömungen aufbringen können.

Abgesehen von der Funktion dieses Längswerkes, worauf anschließend eingegangen wird, ist von dieser speziellen Belastungsart ein Entwurf nach Blatt 8 in (24) dem Entwurf (25) vorzuziehen. Der erstgenannte Entwurf sieht zwischen dem 1,5 m hohen Längswerk aus fünf Kunststoffgewebe-Schläuchen und dem Kliffuß (Dünenfuß) einen 2 m breiten Zwischenraum vor, in dem sich bei Sturmflutbedingungen (die Längswerkkrone liegt auf NN + 3,0 m) Treibzeug ansammeln kann, ohne längere Zeit das Kunststofflängswerk zu belasten. Der Entwurf vom Februar 1971 (25), wo das ebenfalls aus fünf Kunststoffgewebe-Schläuchen bestehende Deckwerk mit einer Kunststoffgewebe-Plane unmittelbar an den Dünenfuß angeschlossen werden soll, würde dagegen eine dauernde Belastung aller Kunststoffgewebeflächen durch dieses Treibzeug bedeuten, das bei jedem Wellenauf- und -ablauf über das Gewebe scheuern würde.

Deshalb sollte grundsätzlich ein Kunststofflängswerk so gebaut werden, daß das Treibzeug nach einmaligem Überwurf durch die Wellen zur Ruhe kommt. Die Erfahrungen mit den Tetrapoden-Längswerken auf Sylt haben gezeigt, welche Treibzeugmengen sich während nur einer Sturmflut ansammeln können. Bei einem Kunststoffgewebewerk ist mit einer baldigen Zerstörung zu rechnen, wenn solches nagelbewehrte Treibzeug die empfindlichen Kunststoffhäute mit jedem Wellenauflauf neu angreift. Besser ist es, wenn es einmal über das Längswerk geworfen wird und dann, schwimmend oder anlandend, zwischen dem Längswerk und dem Kliff den Wellenkräften entzogen wird.

Die Funktion eines Längswerkes besteht darin, daß die Umwandlung der Wellenenergie vor dem Kliffuß seewärts verlagert wird. Das bedeutet aber auch, daß die Erosionserscheinungen, die sich gegenwärtig vor dem Kliff abspielen, dann auf den Bereich vor dem Längswerk verlagert werden, aber mit dem wichtigen Unterschied, daß das Längswerk im Gegensatz zu dem Kliff den Brandungsströmungen kein neues Abbruchmaterial liefern kann. Der Strand vor dem Längswerk muß also schmaler und tiefer werden, das um so mehr, je stärker das Längswerk in das Brandungsgeschehen eingreift, d. h. je öfter es vom Wellenauflauf erreicht wird. Buhnen können diesen Vorgang nur verzögern, aber nicht aufhalten.

Bei der Anlage eines Längswerkes – ob mit oder ohne Buhnen – muß also in Rechnung gestellt werden, daß die Strandverhältnisse v o r dem Längswerk verschlechtert werden. Dies ist in um so größerem Maße der Fall, je mehr durch das Längswerk die Brandungs- und die Wellenauflaufzone eingeengt werden und um so mehr das Längswerk Reflexion erzeugt.

Deshalb ist auf einer guten Fußsicherung des Längswerkes zu bestehen. Diese müßte sich

Die Küste, 23 (1972), 63-111

(vgl. Abschn. III) auf mindestens 0,5 der Wellenlänge erstrecken und flexibel genug sein, um den Strandumlagerungen folgen zu können. Diese können Beträge um mehrere Meter erreichen. Wenn diese Fußsicherung, wie in den beiden Entwürfen (24 und 25) aus Kunststoffgewebematten bestehen sollen, so muß darauf geachtet werden, daß diese genügend wasserdurchlässig sind, um beim Wellenablauf Porenwasser-Überdruck unter der Matte zu vermeiden. Für eine ausreichende Beschwerung muß gesorgt werden, die auf ganzer Fläche wirksam ist. Wo unbeschwertes Gewebe den Wellenangriffen ausgesetzt wird, besteht immer die Gefahr, daß die Bahnen in Flatterschwingungen geraten.

Wenn diese Gesichtspunkte beachtet werden, die die Standfestigkeit des Längswerkes selbst betreffen, so kann mit Sicherheit erwartet werden, daß die Entwürfe des WSA Norden einen wirksamen Schutz des Dünenfußes bewirken werden. Da es sich um eine Übergangslösung handeln soll, ist die zu erwartende begrenzte Lebensdauer nicht von Nachteil, im Gegenteil könnten dabei wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die für weitere Anwendungen solcher neuen Bauweisen von Bedeutung sein können.

Nachteilig ist, daß durch ein Längswerk unmittelbar am Dünenfuß das gegenwärtige Brandungsgeschehen, also die Kliffbrandung mit ihrer strandvermindernden Wirkung, nicht verändert wird; eher ist mit einer noch stärkeren Strandabnahme vor dem Längswerk zu rechnen, weil kein Abbruchsmaterial von der Düne mehr zugeführt wird. Es ist zweifelhaft, ob die vorgesehenen Buhnen eine entscheidende Abwehr gegen die Strandabnahme bieten können. Die Folge wäre, daß schon bei normalen Tiden der Deckwerksfuß die meiste Zeit von der Brandung erreicht wird. Da ein Durchwandern der reflexionsüberlagerten Wellenauflaufzone lästig und bei höheren Wasserständen und bei örtlichen Kolken auch gefährlich ist, würden Strandwanderer gezwungen, den Strandweg zu verlassen und den Dünenweg zu wählen. Der Schutz der Randdüne und damit des Pirolatales würde mit dem Verlust einer natürlichen Strandstrecke bezahlt werden.

Bevor eine solche Entscheidung gefällt wird, sollte zunächst nach Mitteln gesucht werden, die einen Schutz der Randdüne mit weniger nachteiligen Nebenwirkungen erreichen können.

B. Empfehlungen der Gutachter

Es soll davon ausgegangen werden, daß im gegenwärtigen Zustand der Dünenfuß im Mittel auf NN + 2,0 m liegt und daß der davorliegende Strand eine mittlere Neigung von 1 : 50 aufweist (vgl. Abschn. IV E 1).

Wie die festgestellten Abbruchserscheinungen zeigen, ist der Dünenfuß zu niedrig und der Strand zu steil. Schon bei wenig erhöhten Wasserständen geht die normale Strandbrandung in die Kliffbrandung mit ihren nachteiligen Wirkungen über. Um dieses zu vermeiden, müßte der Strand vor dem Dünenfuß soweit erhöht und verbreitert werden, daß auch bei Sturmflut eine natürliche Strandbrandung vor dem Dünenfuß besteht, die Wellenenergie also wieder auf großer Fläche abgebaut wird und nicht auf dem schmalen Streifen am Kliffuß (vgl. Abschn. III).

Eine solche Strandaufhöhung kann im Spülverfahren hergestellt werden. Selbstverständlich ist bei dem festgestellten derzeitigen Sandmangel damit zu rechnen, daß ein Teil des aufgespülten Sandes wieder mit den Wellen ostwärts vertriftet wird. Daß trotzdem eine ständige Vorspülung, bei der diese Verluste durch stetige Zuführung neuen Materials ausgeglichen werden müssen, wirtschaftlich sein kann, soll folgende Überschlagsrechnung zeigen.

Im Bericht des WSA Norden (23) wurde für die letzten Jahre eine Erosionsrate von 77 m³/lfd.m für den Strand des Abbruchsgebietes ermittelt. Für den Vorschlag einer ständigen

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Vorspülung soll der ungünstigere Betrag von 100 m³/lfd. m für die rund 2000 m lange Abbruchsstrecke in Rechnung gestellt werden.

Angenommen werde zunächst, daß diese 100 m³/lfd. m auf ganzer Strecke so eingebracht werden, daß der Strand auf etwa 100 m Breite um ungefähr 1 m aufgehöht wird. Auf diesem künstlichen Strand wird sich eine annähernd natürliche Brandung ausbilden, die aber, auch bei Windfluten, den Kliffuß nicht mehr erreichen kann.

Als ungünstigste Annahme werde weiterhin angenommen, daß der jetzt bestehende Sandverlust von 100 m³/lfd. m in den folgenden Jahren durch die Aufspülung neu gedeckt werden muß. Dies ergibt eine jährliche Spülmenge von

$$100 \cdot 2000 = 200\,000 \text{ m}^3/\text{Jahr}.$$

Geht man davon aus, daß diese Spülungen außerhalb der Badesaison vorgenommen werden, dann stehen überschläglich 200 Arbeitstage jährlich zur Verfügung. Das gibt eine Tagesleistung von

$$200\,000 : 200 = 1000 \text{ m}^3/\text{Tag}.$$

Bei achtstündiger Arbeitszeit würde das für den Spüler eine Stundenleistung von

125 m³/Std. an Sand

erfordern.

Die Bohrungen der Forschungsstelle Norderney zeigen, daß unmittelbar am östlichen Ende der Abbruchsstrecke im nördlichen Teil des Niederungsgebietes des Großen Schlopps bis zu etwa 15 m Tiefe Feinsande anstehen, die dem Strandmaterial in der Korngröße entsprechen. Es müßte allerdings noch geprüft werden, ob dieses Material mit einem Grundsauger gewonnen werden kann; da aber in dem Bohrbericht nur wenige sehr dünne Kleieinlagen erwähnt werden, scheint dieses wahrscheinlich. Somit könnte dieses Material mit einer maximalen Spülentfernung von

rd. 2000 m

dem westlichen Ende der Abbruchsstrecke zugeführt werden, von wo her durch den östlich gerichteten Küstenlängstransport eine Verfrachtung über die gesamte Abbruchsstrecke gewährleistet ist.

Überschlagsrechnungen zeigen, daß die Förderung von 125 m³ je Stunde über 2000 m Spülentfernung (Feinsand mit einer mittleren Korngröße von rd. 0,2 mm) wirtschaftlich mit einer Rohrleitung von

rd. 250 mm Lichtweite

durchgeführt werden kann, wobei mit einem Mischungsverhältnis Sand : Wasser von 1 : 4 (das durch einen Grundsauger ohne weiteres erreicht werden kann) ein Energieaufwand von

rd. 2 kWh/m³

erforderlich ist, bei 0,12 DM/kWh also

rd. 0,24 DM/m³

vom Energieaufwand her. Mit Lohnkosten, Reparaturen, Verlegung der Rohrleitung usw. kann also an Betriebskosten mit

rd. 0,5 DM/m³

gerechnet werden, bei 200 000 m³/Jahr demnach mit

rd. 100 000 DM/Jahr für 200 000 m³ Spülmenge.

Es wird sich dabei um einen einfachen Grundsauger handeln, der, in Pontonform zerlegbar,

Die Küste, 23 (1972), 63-111

von nur einem Mann (Baggerführer) betrieben wird. Dieser Grundsauger wird zwei in Reihe geschaltete Pumpen aufweisen müssen (H_{man} = rd. 90 m WS), seine Anschaffungskosten werden z. Z. 250 000 DM nicht überschreiten, während die (schwimmende und auf Land liegende) Rohrleitung auf etwa 200 000 DM zu veranschlagen ist, so daß insgesamt für die Anschaffungskosten einer solchen ständigen Spülanlage rd. 500 000 DM vorzusehen wären.

Mit einem Betrag von 1 000 000 DM ließe sich also die Spülanlage beschaffen und 5 Jahre lang betreiben, wobei in diesem Zeitabschnitt jedem lfd. m der 2000 m langen Abbruchstrecke 500 m³ Sand zugeführt würden. Diese verhältnismäßig geringen Kosten erklären sich daraus, daß die Spülanlage und der Spülbetrieb ganz an die vorliegenden Verhältnisse angepaßt werden. Bei größeren maximalen Spülentfernungen als 2000 m würden die Kosten für Anschaffung und Betrieb annähernd linear zunehmen; bei 4000 m Spülleitung wären also rd. 2 000 000 DM für die Anlage und einen fünfjährigen Betrieb erforderlich.

Von den Kosten her ist also eine ständige Vorspülung wirtschaftlich durchaus zu vertreten.

Die Funktion der Aufspülung soll eine Dünenfuß-Erhöhung sein, nicht eine Strandaufspülung. Es ist also darauf zu achten, daß das Material unmittelbar am Dünenfuß bleibt und nicht seewärts verteilt wird. Hierzu kann ein Längswerk aus sandgefüllten Kunststoffgewebeschläuchen (ähnlich den Entwürfen des WSA Norden) verwendet werden, das der Aufspülung als Fußsicherung dient. Dieses Längswerk würde aber nicht am Kliffuß liegen, sondern in einem so weiten Abstande davor, daß auf den aufgespülten Flächen eine natürliche Strandbrandung auch bei erhöhten Wasserständen herrscht. Es wird eine Entfernung von 50 m vor dem Kliffuß vorgeschlagen.

Bei einer mittleren Kliffußhöhe von NN + 2,0 m und einer Strandneigung von 1 : 50 liegt der Strand in dieser Entfernung auf etwa NN + 1,0 m, wird also bei MThw noch überflutet. Wenn ein Schlauchwerk von 1 m Höhe (Durchmesser) verwendet wird, liegt seine Kronenhöhe etwa auf NN + 2,0 m, also bereits auf der Höhe des jetzigen Kliffußes. Verwendet man für die Aufspülung eine ähnliche Körnung wie die des vorhandenen Strandmaterials (Feinsand), so stellt sich der Spülstrand bei ungehindertem Spülwasserabfluß ebenfalls auf etwa 1 : 50 ein. Wird vom Dünenfuß her aufgespült, entsteht zwischen dem Kliffuß und dem Längswerk eine 50 m breite flache Berme, die zur Düne hin auf NN + 3,0 m ansteigt. Auf dieser Berme können bei Sturmflut die Wellen ungestört ausbranden, nur bei sehr hohen Sturmflutwasserständen wird der Kliffuß von dem Wellenauflauf erreicht. Während aber im derzeitigen Zustand eine Sturmflut mit einem Wasserstand von NN + 3,0 m vor dem Kliffuß 1 m tiefes Wasser mit den entsprechenden Wellenhöhen und Strömungen erzeugt, wird nach dem Bau dieser Berme bei diesem Wasserstand gerade noch der Kliffuß von den ausbrandenden Wellen erreicht. Wie Abbildung 3 zeigt, sind Sturmfluten mit höheren Scheitelwerten als NN + 3,0 m verhältnismäßig selten. Es kann erwartet werden, daß mit einer Bermenhöhe auf NN + 3,0 m der Abbruch der Dünenkante zum Stehen kommt.

Da die Berme nur bei Sturmfluten vom Wasser erreicht wird, in der übrigen Zeit aber trockenliegt, ist mit Sandflug bei geeigneten Winden zu rechnen. Es sollte versucht werden, durch Sandfangzäune auf der Berme Vordünen zu gewinnen, die zwar bei Sturmflut zum Teil wieder zerstört werden, jedoch den Sandhaushalt günstig beeinflussen werden.

Die Rohrleitung muß unmittelbar im Kliffuß in einer Höhe von NN + 4,0 m oder NN + 4,5 m verlegt werden; sie kann aufgeständert werden. Es besteht dann die Möglichkeit, vor dem Dünenfuß gegebenenfalls noch höher als NN + 3,0 m aufzuspülen. In bestimmten Abständen sind in der Rohrleitung Abzweigstücke vorzusehen, von wo aus mit leichten Zweigleitungen der Sand an jede erwünschte Stelle gebracht werden kann. Da diese Endleitungen keinem großen Druck mehr ausgesetzt sind, können dünnwandige Rohre mit Schnellschlußkupplungen verwendet werden.

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Die Rohrleitung wird zweckmäßigerweise mit dem Längswerk vorgestreckt werden. Zum Aufspülen der Berme werden

$$1 \cdot 50 \cdot 2000 = 100\,000 \text{ m}^3$$

Sand benötigt, also die Hälfte der vorgesehenen Jahresmenge.

Obwohl bei diesem Vorschlag das Längswerk nur einen Geländevorsprung von 1 m Höhe auf dem Strand darstellt, ist auch hier damit zu rechnen, daß durch Reflexionen der Strand vor dem Längswerk ausgeräumt und das Längswerk durch Unterspülung gefährdet wird. Daher wird vorgeschlagen, auch vor dem Längswerk so weit aufzuspülen, daß der Strand auf der Höhe der Oberkante dieses Längswerkes zu liegen kommt. Es ist zwar damit zu rechnen, daß die Einspülverluste hier größer als auf der Berme werden, es kann dann aber nach Errichtung der Berme die ganze jährliche Spülmenge von 200 000 m³ für diesen Zweck verwendet werden. Da dieses mehr als die mittlere jährliche Erosionsrate ist, muß es möglich sein, einen solchen Strand vor dem Längswerk zu erhalten. Das Längswerk würde dann nur bei Sturmflut in Funktion treten und den Bermenfuß halten, wenn der Strand vor dem Längswerk ausgeräumt wird.

Wenn das Längswerk erst einmal in Sand eingebunden liegt, wird die Gefahr sowohl der Beschädigung durch Treibzeug als auch der mutwilligen oder fahrlässigen Beschädigung vermindert.

Das Längswerk kann aus zwei nebeneinanderliegenden und miteinander verbundenen Schläuchen bestehen, die auf einer Gewebematte verlegt werden. Diese sollte landseitig etwa 5 m verlängert und seeseitig noch etwa 1 m tief eingegraben werden, um auch bei starken Strandhöhenänderungen eine Unterspülung zu verhindern.

Es muß damit gerechnet werden, daß bei freiliegendem Längswerk und bei schrägem Wellenauflauf Längsströmungen entstehen, die Erosionsrinnen sowohl vor dem Längswerk als auch auf der Berme hinter dem Längswerk erzeugen können. Gegen diese Längsströmungen können kurze Abweiser aus Schläuchen oder Säcken vorgesehen werden. Solche Querwerke von etwa 10 m Länge in rund 20 m Abstand sollten auch vom Längswerk her in das Bermenfeld reichen. Ihre Höhe sollte die gleiche wie die des Längswerkes sein.

Es kann aber auch daran gedacht werden, auf Querwerke ganz zu verzichten und die Fußsicherung des Längswerkes durch immerwährende neue Vorspülungen zu bewerkstelligen. Ein Versuch könnte zeigen, ob dies möglich ist. Es brauchten dann Querwerke nur an den Stellen angelegt zu werden, wo große örtliche Erosionen dies notwendig erscheinen lassen.

Die Vorspülungen seeseitig des Längswerkes brauchen nicht gleichmäßig auf ganzer Länge ausgeführt zu werden, es genügt, wenn in bestimmten Abständen das Material eingebracht wird, dessen Verteilung dann die Wellen vornehmen. Bei dem überwiegenden östlichen Transport wird besonders das westliche Ende des Abbruchsgebietes mit Sand zu versorgen sein. Es ist möglich, daß wenige Eingabestellen auf dieser Strecke zur Versorgung der ganzen Abbruchsstrecke ausreichen.

Die Aufspülung seewärts des Längswerkes wird sich in ihrer Neigung den angreifenden Wellen anpassen. Sie stellt eine weitere Sicherung des Dünenfußes durch die verringerte Wassertiefe und die damit verbundene seeseitige Verschiebung der Brandungszone dar. Jedoch kann bei Sturmflut und bei ausgeräumtem Strand vor dem Längswerk die Berme allein den Schutz des Dünenfußes übernehmen.

An der Entnahmestelle ist darauf zu achten, daß die Süßwasserlinse der Insel möglichst ungestört bleibt. Deshalb sollte die Entnahme so dicht wie möglich an die Randdüne gelegt werden, wo ohnehin schon die Süßwasserlinse geringe Mächtigkeit hat. Zur wirtschaftlichen Forderung ist eine Entnahmetiefe von 10 bis 15 m vorzusehen. Wenn nicht genügend Seewasser als Grundwasser zuläuft, muß eine zusätzliche Pumpstation Seewasser anliefern.

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Der entstehende Baggersee sollte von Anfang an so geplant und angelegt werden, daß er später als Badesee o. ä. genutzt werden kann. Wegen seiner großen Tiefe wird er ein Salzwassersee bleiben, der aber nach Beendigung der Baggerarbeiten sehr klares Wasser aufweisen wird, weil Wellenbewegungen nicht bis zur Sohle reichen können. Der Wasserspiegel wird sich etwa auf der Höhe des Tidehalbwassers einstellen.

Mit der ständigen Vorspülung kann eine sehr flexible Küstenverteidigung erreicht werden, bei der das Material gezielt dort eingebracht wird, wo es gerade benötigt wird. Wenn günstige Wetterlagen den Strand stabil bleiben lassen, kann die Vorspülung vorübergehend eingestellt werden. Dagegen kann nach lebhafter Sturmfluttätigkeit durch Zwei- oder sogar Dreischichtenbetrieb die Leistung verdoppelt oder verdreifacht werden.

Wenn wider Erwarten die Berme auf NN + 3,0 m nicht ausreichen sollte, um den Dünenfuß gegen weiteren Abbruch zu schützen, so könnte durch ein weiteres Längswerk auf der Berme oberhalb des ersten Längswerkes die Berme auf NN + 4,0 m am Dünenfuß erhöht werden, wodurch mit Sicherheit der Dünenfuß geschützt wird. Außerdem könnte empfohlen werden, eine 1 : 6 geneigte Böschung durch eine Verbindung von Kunststoff- und Faserwerkbauweise zu erstellen. Eine ähnliche Bauweise (verankerte Strohballen) wurde auf Langeoog bereits 1944 zum Schutz einer Randdüne am Flinthörn angewandt. Mit einer solchen flachen durch Strohballen geschützten Böschung werden die schädlichen Reflexionen auf ein Mindestmaß herabgesetzt.

Wenn späterhin doch noch ein massives Deckwerk errichtet werden müßte, kann mit der Spülleitung das erforderliche Material für den Unterbau des Deckwerkes herangeschafft werden, ohne daß die Düne angegriffen wird.

Zunächst aber sollte die Wirkung der längswerkgeschützten Berme abgewartet werden.

C. Ablauf und Stand der Bauarbeiten bis März 1972

1. Das Kunststoffgewebe-Schlauchwerk

Das aus sandgefüllten Kunststoffgewebe-Schläuchen bestehende Werk hat den Zweck, die zur Sicherung des Dünenfußes vor der Randdüne des Pirolatales aufzuspülende Sandfläche besonders an ihrer Seeseite zu stabilisieren (s. S. 97).

Mit dem Bau des Längswerkes wurde am 7. Juli 1971 am östlichen Ende der insgesamt 2500 m langen Baustrecke begonnen (Abb. 4). Das etwa 50 m vor dem Dünenfuß verlegte Längswerk aus Zwillingsschläuchen (1 m ∅, Abstand von Schlauchmitte bis Schlauchmitte 1,30 m) ist in Abständen von durchschnittlich 60 m durch insgesamt 41 Riegel (60 m lang) an den Dünenfuß angeschlossen. Zur Abweisung möglicherweise auftretender Längsströmungen am Schlauchwerk selbst sind außerdem 80 Querwerke von 10 m Länge in Abständen von 20 m angeordnet. Einen fertiggestellten noch nicht mit Sand überspülten Teil dieses Schlauch-Längswerkes am östlichen Beginn der Baustrecke zeigt Abbildung 24.

Die für das Längswerk insgesamt benötigten Schlauchlängen betragen nach Angabe des WSA Norden:

Zwillingsschläuche	2500 lfd. m
Einzelschläuche	900 lfd. m
Riegel (60 m lang)	2460 lfd. m
Querwerke (10 m lang)	1600 lfd. m
zusammen	7460 lfd. m

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Hiervon waren bis Anfang März 1972 eingebaut:

Zwillingsschläuche	1900 lfd. m
Einzelschläuche	900 lfd. m
Riegel (60 m lang)	2300 lfd. m
Querwerke (10 m lang)	1460 lfd. m
zusammen	6560 lfd. m

Abb. 24.
Das Schlauchwerk auf dem Strande vor der Randdüne des Pirolatales auf Langeoog bei Riegel 10, s. Abb. 4 (Photo: WSA Norden, 28. 9. 1971)

2. Sandeinspülung

Von der Gutachtergruppe war empfohlen worden, die Rohrleitung für das Einspülen des Sandes entsprechend dem Baufortschritt des Schlauchwerkes vorzustrecken, damit das Schlauchwerk möglichst schnell mit Sand überdeckt werden konnte, um es vor Beschädigung durch Wasser- und Wellenangriff zu schützen. Dementsprechend war vom WSA Norden als Termin für den Abschluß der Sandeinspülungsarbeiten der 11. 12. 1971 festgesetzt worden, also etwa 2 Wochen nach dem geforderten Abschluß der Schlauchverlegungsarbeiten, deren Fertigstellungstermin der 30. 11. 1971 war.

Schon vor Beginn der eigentlichen Spülarbeiten verursachten die Baustelleneinrichtung, der Transport des Baggers nach der Sandentnahmestelle im Großen Schlopp im Osten des Pirolatales (Abb. 25) sowie das Aufstellen der vom Baggerort bis zum Westende der Baustelle 3300 m langen Spülrohrleitung mit Einbau einer Zwischenpumpstation beträchtliche Zeitaufwendung, so daß mit der Sandeinspülung erst am 7. 10. 1971 begonnen werden konnte. So waren Teile des Schlauchwerkes wegen der fehlenden Sandeinbettung längere Zeit den Wasserkräften unmittelbar ausgesetzt. Die hierauf zurückzuführenden Beeinträchtigungen werden in Abschnitt XVI noch behandelt.

Der Sand wird in 40 etwa 50 × 60 m große Felder eingespült, die auf der Strandfläche zwischen Dünenfuß und Schlauchlängswerk von den 41 Riegeln gebildet werden (Abb. 4). Als erste wurden die im Gebiet der tiefsten Strandlage befindlichen Spülfelder 12 bis 16 mit Sand überspült, um hier für die Randdüne möglichst schnell einen Schutz zu schaffen. Daß diese Überlegung richtig war, haben die Windfluten im Oktober und November 1971 gezeigt. An-

Die Küste, 23 (1972), 63-111

schließend wurden dann die Spülfelder westlich (Nr. 17 bis 20) und östlich (Nr. 12 bis 6) beschickt.

Bei den leichten Sturmfluten am 16./17. November 1971 mit Wasserständen von 1,59 m und 1,43 m über MThw brach die Spülrohrleitung. Bis zur Beseitigung des Bruches wurden die östlich liegenden Felder Nr. 1 bis 7 aufgespült. Ab 9. Dezember 1971 konnte der Spülbetrieb wieder weiter nach Westen verlegt werden; dort wurde in die Felder 19 und 20 (zum zweitenmal) und weiterhin in die Felder 21 und 22 eingespült.

Ab 23. Dezember 1971 wurde der Spülbetrieb durch eine Winterpause unterbrochen, die sich wegen des inzwischen eingetretenen Frostwetters bis zum 24. Februar 1972 ausdehnte. Mit

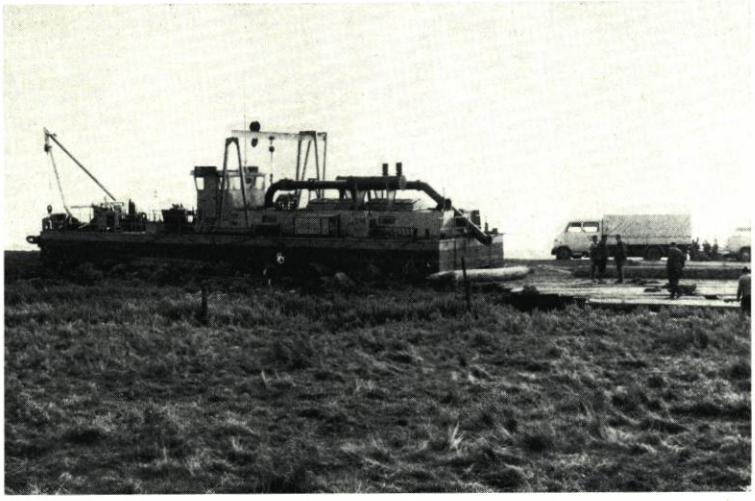


Abb. 25.
Transport des Spülbaggers über Land auf luftgefüllten Gummischläuchen nach der Sandentnahmestelle im Großen Schlopp im Nordosten des Pirolatales (Photos: WSA Norden, 28. 9. 1971)

Wiederbeginn der Spülarbeiten am 25. Februar 1972 wurde der Sand in die westlichen Felder 22 bis 26 gepumpt. Die nachstehende Tabelle 3 gibt eine Übersicht über den Spülbetrieb vom 7. 10. 1971 bis zum 10. 3. 1972.

Tabelle 3

Monat	Zahl der Spültage	beschickte Spülfelder Nr.:	Zahl der beschickten Spülfelder
Oktober 71	19	12, 13, 14, 15, 16	5
November 71	22	1, 2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20	13
Dezember 71	16	3, 4, 5, 6, 7, 9, 19, 20, 21, 22	10
Januar 72	—	kein Spülbetrieb	
Februar 72	3	22, 23	2
März 72	7	24, 25, 26	3
	67 Spültage		33

In der Zeitspanne vom 7. 10. 1971 (Beginn des Spülbetriebes) bis zum 10. 3. 1972 (Ende der Berichtszeit) ist an 67 Tagen gespült worden. Die eingespülte Sandmenge gibt das WSA

Norden mit rund 270 000 m³ einschließlich Spülverluste an, das sind im Durchschnitt 4000 m³ je Spültag.

Bis Anfang März 1972 sind von den insgesamt 40 Spülfeldern 17 Felder einmal und 8 Felder zweimal mit Sand überspült worden, 15 Felder haben noch keine Sandeinspülung erhalten.

Nachtrag betr. Beendigung der Bauarbeiten:

Der Bau des Schlauchwerkes wurde am 14. 6. 1972 fertiggestellt; die Aufspülarbeiten sind am 15. 7. 1972 für dieses Jahr abgeschlossen worden. Nach Mitteilung des WSA Norden wurden insgesamt rd. 550 000 m³ Sand an den Strand gespült, wovon schätzungsweise 50 000 bis 80 000 m³ bei Windfluten verdriftet worden sind.

VI. Beurteilungen und Empfehlungen

A. Beurteilung der bisherigen Wirkung des Schlauchlängswerkes vor dem Pirolatal

Die in West-Ost-Richtung verlaufende Sandwanderung auf dem etwa 1 : 500 geneigten Vorstrand von Langeoog wird durch das Dünensicherungswerk (durch Schläuche stabilisierte Aufspülung einer Brandungsberme) nicht beeinflußt. Auch ist es keineswegs so, daß der Abbruch der Randdüne für den Sandhaushalt der im Angriff liegenden Strandstrecke eine nennenswerte Rolle spielt; die Abbruchmenge ist um Zehnerpotenzen geringer als die in der Brandungszone in Bewegung befindliche Sandmenge. Dabei ist die Brandung auf dem Vorstrand im wesentlichen durch die Morphologie (Lage und Höhe) der Riffkörper bedingt, die sich am Westende der Insel aus den anlandenden Platen aufbauen. Die Riffplaten und Riffkörper können die Wellenenergie durch Refraktion und Diffraktion am Strand sowohl verstärken als auch vermindern sowie die Wellenrichtung stark beeinflussen.

Da die Wellenhöhe stärker mit der Windgeschwindigkeit zunimmt als der Windstau auf dem Ruhewasserspiegel, kann hinter Riffkörpern, die die Höhe des MTnw erreichen oder überschreiten, das bekannte Paradoxon auftreten, daß bei schweren Sturmfluten die Wellenhöhen in der Strandbrandung geringer sind als bei leichten Sturmfluten, weil die hohen, aus der offenen See einlaufenden Wellen einen erheblichen Teil ihrer Energie durch die Riffbrandung verlieren.

Immerhin haben die Wellenbeobachtungen des WSA Norden gezeigt, daß am Strande von Langeoog schon bei leichten Sturmfluten (Windfluten) Wellen bis zu 2 m Höhe auftreten können:

Datum	Wind	Wasserstand über MThw	Wellenhöhe
16. 11. 71	W 8	1,59 m	1,7 m
17. 11. 71	W 9	1,43 m	2,0 m

Nach dem Längsnivellement vom 8. 3. 1972 des WSA Norden weist die Oberkante des Schlauchwerkes im Mittel Höhen zwischen NN + 1,5 m und NN + 2,0 m auf. An einzelnen Stellen (so zwischen den Riegeln 23 und 24, s. Abb. 4) liegt sie sogar unter NN + 1,0 m, also noch unter dem MThw = NN + 1,24 m. Der Zwillingsschlauch liegt somit bei fast jeder normalen Tide schon im Bereich der Brandung.

Bei der Erstellung des Gutachtens war davon ausgegangen worden, daß das Schlauchwerk

Die Küste, 23 (1972), 63-111

(Höhe = 1,0 m) auf dem NN + 1,0 m hohen Strande errichtet wird, also eine Kronenhöhe von NN + 2,0 m hat. Mit einer Neigung der aufzuspülenden Berme inselwärts des Schlauchwerkes von 1 : 50 wurde erstrebt, daß der zu schützende Dünenfuß auf mindestens NN + 3,0 m liegen sollte. Obwohl wegen des tiefliegenden Strandes die Kronenhöhe des Schlauchwerkes streckenweise niedriger als NN + 2,0 m war, hat sich bei den allerdings extrem wenigen und leichten Sturmfluten des Winters 1971/72 gezeigt, daß schon eine geringe Anhebung der Strandhöhe, bedingt sowohl durch das Schlauchwerk wie auch durch die Sandaufspülung, eine beachtliche Verminderung des Dünenabbruches herbeiführte.

Bereits nach Fertigstellung einiger Abschnitte des Längswerkes zeichnete sich an diesen Strecken eine Zunahme des Sandvolumens auf dem Strande ab. Wie erwartet, ergab sich auch landwärts des Schlauchwerkes eine Zunahme des Sandbestandes, in dem der durch überschlagende Wellen in die Felder zwischen Längswerk und Randdüne transportierte Sand nicht mehr mit dem Wellenrücklauf auf den Vorstrand zurückgelangen konnte. Dieser hinter dem Längswerk abgelagerte Sand weist zunächst ein großes Porenvolumen auf, das sich z. B. auch in einer schlechten Begehbarkeit äußert. Bei der Besichtigung der Baustelle durch die Gutachter im November 1971 blieb es unklar, wieweit dieser Sand durch äolischen oder hydraulischen Transport in diese als Spülfelder vorgesehenen Flächen gelangt war.

Als überraschendes Ergebnis ist die Tatsache zu verzeichnen, daß das Reflexionsverhalten des nahezu kreisförmigen Profils des seewärtigen Zwillingsschlauches erheblich von dem einer senkrechten Wand abweicht. Gerade dadurch, daß sich die aufgetretenen Hochwasser höhenmäßig nur wenig vom MThw unterschieden, kam die Außenseite des Zwillingsschlauchwerkes im Mittel zweimal am Tage unmittelbar mit den brechenden, wenn auch nicht sonderlich hohen Wellen in Berührung. Bei einer vergleichbaren senkrechten Wand wären mit Sicherheit starke Erosionen vor diesem Geländesprung die Folge gewesen, wie aus zahlreichen Modell- und Naturuntersuchungen bekannt ist; dies läßt sich auch theoretisch (durch das Strömungsfeld der stehenden Welle vor einer senkrechten Wand) begründen.

Da das Schlauchwerk in den wellenaktiven Monaten November und Dezember zum größten Teil noch keine Vorspülung besaß, konnte der bemerkenswerte Effekt beobachtet werden, daß sich vor dem etwa 1 m hohen abrupten Geländesprung, der durch den Zwillingsschlauch gebildet wird, im allgemeinen eher Ablagerungen als Erosionen einstellten (von den gleich zu behandelnden Kolken abgesehen). Wieweit dies durch die gerade in diesen Monaten vorherrschenden Wasserstände, Wellenhöhen und -perioden begünstigt wurde, läßt sich z. Z. noch nicht beurteilen. Sicher scheint aber zu sein, daß das Reflexionsverhalten einer halbkreisförmigen Wand oder zumindest das damit verbundene Verhalten von Feststoffbewegungen vor einer solchen Wand aus bisher noch nicht genügend bekannten hydromechanischen Gründen wesentlich günstiger als das einer senkrechten Wand ist. Es muß aber hier vor Verallgemeinerungen und zu großem Optimismus auch in bezug auf zukünftige Anwendungen gewarnt werden; so sind Bedingungen vom Wellenangriff und den damit verbundenen Wasserständen her denkbar, bei denen diese Einflüsse von stärkeren, in negativer Richtung (Erosion vor dem Schlauchwerk) wirkenden Faktoren überlagert werden können.

Unklar bleibt nach den wenigen Erfahrungen des extrem milden Winters 1971/72, ob die 10 m langen Querwerke notwendig waren. Dies wird sich erst beurteilen lassen, wenn eine schwere Sturmflut das Längswerk belastet, bei der sich der Brechpunkt der Strandbrandung unmittelbar über dem Schlauchwerk befindet. Auch die Wellenrichtung spielt hier eine wichtige Rolle. Manches deutet darauf hin, daß die Querwerke entbehrlich sind, weil das Halbkreisprofil des Schlauchwerkes nicht das Reflexionsverhalten einer senkrechten Wand zeigt. Bei Seegang zur Tidehochwasserzeit haben sich (zumindest bei dem Wellenklima des Winters 1971/72) sogar negative Effekte (örtliche Kolkungen) ergeben.

Auf jeden Fall hat der Winter 1971/72 mit seiner geringen Sturmfluthäufigkeit den Beweis erbracht, daß ein freiliegendes, noch nicht eingespültes Längswerk aus Kunststoffschläuchen unter den Bedingungen der deutschen Nordseeküste erheblichen, z. T. nicht vorhersehbaren Einflüssen aus den Naturverhältnissen ausgesetzt ist. Als positiv für die neuartige Bauweise – mindestens neuartig auf einem brandungsbedingten Strand wie dem Nordweststrand von Langeoog – soll hier nur verzeichnet werden, daß die Eis- und Frostzeiten, auch der Eisgürtel vor und am Längswerk, keine erwähnenswerten Beschädigungen der Kunststoffschläuche ergaben. Auch die befürchteten Beschädigungen durch Treibzeug usw. traten nicht auf, was allerdings mit der Einschränkung versehen werden muß, daß es sich bei dem Winter 1971/72 um einen sehr milden Winter bezüglich der Sturmfluthäufigkeit gehandelt hat.

Auch die im wesentlichen in der Sommersaison an den völlig freiliegenden Schlauchwerken erwarteten Schäden durch mutwillige oder fahrlässige Beschädigungen haben sich als gering erwiesen, woran wahrscheinlich die Informations-Druckschrift der Gemeinde Langeoog, die vom WSA Norden angeregt und gestaltet wurde (26), tatkräftigen Anteil hatte.

Als ausgesprochen gefährlich haben sich die hydrostatischen Druckunterschiede erwiesen, die unter natürlichen Bedingungen dann auftreten, wenn das zur Flutzeit sich in den noch nicht aufgespülten Feldern zwischen Längsschlauch und Düne angesammelte Wasser bei Ebbe wegen der wasserundurchlässigen Schlauchumrandung nicht schnell genug wieder ablaufen kann. Zwischen diesem zurückgehaltenen Wasser und dem Außenwasser kann der Wasserstandsunterschied solche Beträge annehmen, daß unter dem Längswerk ein hydraulischer Grundbruch eintritt.

Dies entsteht nach den Gesetzen der Darcyschen Filterströmung einfach dadurch, daß der (durch Durchlässigkeit = k-Wert, Druckunterschied und Sickerweg bedingte) Strömungsdruck größer als das auftriebsgeminderte Gewicht der seeseitigen Sandschicht wird.

Wahrscheinlicher und mit den Erfahrungen besser übereinstimmend ist aber die Erklärung der Entstehung solcher örtlichen Kolke dadurch, daß es sich um sog. „Fox-Channel-Erosions" handelt, bei denen eine durchlässige Schicht (Kiesablagerung o. ä.) den Anlaß zu einer Durchströmung, damit einer starken Erosion ergibt, bis es zu einem turbulent durchströmten Kanal unter dem Längswerk kommt, in den das Längswerk einbricht. Diese Fälle sind im Winter 1971/72 mehrfach aufgetreten (Abb. 26).

Eine Vorhersage solcher Grundbrüche ist unmöglich, da sie die Kenntnis der Bodenschichtung Punkt für Punkt unter dem Längsschlauchwerk voraussetzen würde.

Allein aus der Tatsache, daß diese örtlichen Kolke (Unterspülungen) nicht nur naturbedingt durch erhöhte Tiden, sondern auch bei den Aufspülarbeiten auftraten (so beobachtet von der Gutachtergruppe bei der Ortsbesichtigung am 2. 3. 1972), geht hervor, daß bereits bei einem Geländevorsprung von 1 m Höhe und bei der hier vorhandenen Korngröße (im Mittel 0,2 mm) und Lagerungsdichte des Strandmaterials vor dem Nordweststrand von Langeoog diese Gefahr des örtlichen Grundbruches gegeben ist. Diese Gefahr des örtlichen Grunddbruches (Fox-Channal-Erosion) ist aber in dem Augenblick im wesentlichen gebannt, wenn die Fläche landwärts des Schlauchwerkes aufgespült ist, weil dann die Sickerströmung durch den aufgespülten und im allgemeinen dadurch festgelagerten Boden nicht den „Nachschub" liefern kann, den die turbulente Strömung in einem örtlich erweiterten Erosionskanal verlangt, im Gegensatz zu der großen Wasserreserve in einem nicht sandgefüllten Feld.

Nach Abschluß der Spülarbeiten sollte daher aufmerksam geprüft werden, ob auch dann bei erhöhten Tiden oder bei ablaufenden Sturmfluten Grundbrüche der bisher beobachteten Form auftreten. Besondere Berücksichtigung verlangt dabei die Feststellung, ob in den einzelnen Feldern zwischen Schlauchlängswerk und Düne durch eventuelle Erosion „Wasserreserven" in Form von nicht porengebundenen freien Wassermassen vorhanden sind, die zu einem örtlichen Grundbruch führen können.

Die Küste, 23 (1972), 63-111

Positiv kann vermerkt werden, welche erstaunlichen Verformungen die sandgefüllten Kunststoffschläuche bei diesen örtlichen Grundbrüchen aufgenommen haben (Abb. 27). In dieser extremen Flexibilität wird einer der Hauptvorteile der neuen Kunststoffbauweisen gesehen.

Aus dem bisher Ausgeführten geht hervor, daß an einer Brandungsküste bereits ein durch einen 1 m hohen Schlauch gebildeter Geländesprung erhebliche Probleme in bezug auf seine

Abb. 26.
Versackung des Längsschlauches infolge Kolkbildung beim Spülfeld 14, s. Abb. 4

Abb. 27.
Verformung eines Schlauches, der durch Brandung vom Zwillingsschlauch heruntergeschlagen wurde (Photo: Teget, Hannover, 19. 11. 1971)

Erhaltung (nicht auf seine Funktion) aufwirft. Da im Mittelabschnitt der zu schützenden etwa 2,5 km langen Uferstrecke die Strandhöhen so niedrig waren, daß die Sollhöhe von NN + 2,0 m am Längswerk durch den verlegten Zwillingsschlauch allein nicht erreicht werden konnte, wurde auf diesen noch ein Einzelschlauch von ebenfalls 1 m Durchmesser gelegt, wodurch in diesem Bereich ein künstlicher Geländesprung von sogar 2 m Höhe entstand. Diese Strecke war nicht nur bei erhöhten Tiden in vermehrtem Maße örtlichen Grundbrüchen aus-

gesetzt, sondern es wurde bei den Herbststurmfluten des Jahres 1971, besonders aber bei der Windflut vom 16./17. 11. 1971, der aufgelegte dritte Schlauch teils seewärts, teils landwärts von seiner aus dem Zwillingsschlauch gebildeten Unterlage geworfen (Abb. 27), wobei es wiederum für die Flexibilität des Kunststoffmaterials spricht, daß die z. T. erheblichen Verformungen dieses Schlauches von dem Schlauchmantel aufgenommen wurden. Die durch die doppelte Höhe des Geländesprunges bedingte Häufigkeit von örtlichen Grundbrüchen ist aus dem Vorstehenden leicht zu erklären.

Das Abwerfen des oberen Schlauches ist mit Sicherheit auf Wellenkräfte zurückzuführen. In einer neueren Arbeit von JEN und LIN (13) werden die Wellenkräfte beschrieben, die sich aus Versuchen auf ein Längswerk mit Halbkreisquerschnitt ergeben. Die Böschungsneigung betrug bei den Versuchen 1 : 15. Die Ergebnisse können zwar nicht unmittelbar auf die Belastung des oberen Schlauches des hier betrachteten Drillingslängswerkes übertragen werden, auch ist die Böschungsneigung aus i. M. 1 : 50 bei Langeoog von der in den o. a. Untersuchungen verschieden. Von der Größenordnung her aber ist doch von Interesse, daß bei der Wellenauflaufströmung Drücke auf den Halbkreisquerschnitt gemessen wurden, die in der Größenordnung von $2 \cdot H\gamma$ je lfd. m lagen, also 4 m WS bei 2,0 m Wellenhöhe wie am 17. 11. 1971. Beim Wellenrücklauf wurden Unterdrücke an der Oberfläche und seewärts gerichtete resultierende Kräfte festgestellt.

Diese Ergebnisse vermitteln eine Vorstellung von der Größenordnung der angreifenden Wellenkräfte. Die je nach Wellenphase landwärts (Wellenauflauf) wie auch seewärts (Wellenrücklauf) wirkenden Kräfte werden außer durch die Trägheit nur durch die Reibung der Schläuche mit ihrer Unterlage aufgenommen. Die statistischen Verhältnisse für die parallel verlegten und miteinander verbundenen Zwillingsschläuche liegen dabei wesentlich günstiger als für den dritten Schlauch, der ohne Verbindung auf dem Zwillingsschlauch liegt. Auch mit der Filterunterlage ist die Reibung Kunststoff/Sand wesentlich größer anzusetzen als die von Kunststoff gegen Kunststoff. Hierzu kommt der Einfluß des Hebelarmes. So zeigen die Erfahrungen des Herbstes 1971 in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von JEN und LIN, daß ein Drillingsschlauchwerk von 2 m Höhe bei einem Brandungsangriff von 2 m hohen Wellen nicht stabil sein kann, wenn nicht besondere konstruktive Vorkehrungen getroffen werden können.

Abschließend sei noch auf Strandhöhenmessungen kurz eingegangen, die vom WSA Norden an vier Stellen (Profil 17, 21, 25 und 27; s. Abb. 4) vor dem Längswerk täglich ausgeführt worden sind. Die Deutung dieser Messungen ist dadurch erschwert, daß sich das Längswerk noch im Bau befand und Einflüsse der Aufspülung in benachbarten Feldern nicht auszuschließen sind. Die Frost- und Ostwindlagen im Januar und Februar 1972 ließen ebenfalls keine Aufschlüsse über das Verhalten des Schlauchwerkes und der bereits ausgeführten Vorspülungen zu.

Als auffallendes Ergebnis haben die Strandhöhenmessungen gezeigt, daß die einzige nennenswerte Windflut dieses Winters an allen Profilen gleiche Strandhöhen (auf etwa NN + 1,25 m) erzeugt hat, und zwar unabhängig davon, ob ein Längswerk bereits vorhanden war oder nicht. Es ist bekannt, daß Sturmfluten eine solche nivellierende Wirkung auf Strände ausüben, während stärkere örtliche Profilierungen eher bei wenig erhöhten Sturmtiden mit kurzer und steiler Brandung auftreten (30). So sind die starken Strandveränderungen, die Ende März 1972 beobachtet wurden, nichts Ungewöhnliches; es kann die natürliche Strandentwicklung auf dem Vorstrand durch das Längswerk nicht beeinflußt werden, wie sie z. B. als Lee-Erosion einer anlandenden Plate auftritt (vgl. Abschnitt IV E 1).

Die Küste, 23 (1972), 63-111

B. Beurteilung der künftigen Dünen- und Strandentwicklung

Wie auf Seite 97 ausgeführt, sollte das empfohlene Schlauchwerk in Verbindung mit einer Sandaufspülung vor dem Fuß der Randdüne dem Zwecke dienen, die beschriebene Kliffbrandung von der gefährdeten Düne auszuschalten und die Brandung dafür auf einer etwa 50 m breiten erhöhten Berme zwischen dem Längswerk und dem Dünenfuß als natürliche Strandbrandung auslaufen zu lassen. Dabei sollte die Oberkante des 1 m hohen Längswerkes auf NN + 2,0 m gelegt werden, so daß bei einer aufgespülten Neigung der Brandungsberme von 1 : 50 der Dünenfuß auf NN + 3,0 m liegen würde.

Obwohl das inzwischen fertiggestellte Schlauchwerk im Mittel nur eine Oberkante auf NN + 2,0 m bis 1,5 m oder noch niedriger aufweist, haben die Erfahrungen des Winters 1971/72 gezeigt, daß auch die niedrige Berme bisher ihre Funktion erfüllen konnte, denn an

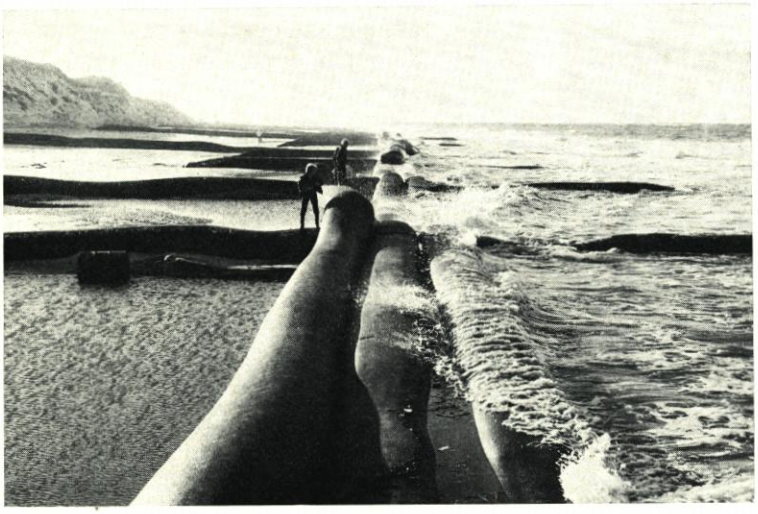


Abb. 28.
Brandung zur Tidehochwasserzeit am Schlauchlängswerk. Der Fuß der Randdüne (im Hintergrund) wird von den Brandungswellen nicht erreicht (Photo: WSA Norden, 26. 10. 1971)

den Stellen, wo die Längsschläuche bereits eingebaut waren, wurden selbst beim Fehlen der Sandeinspülung keine Dünenabbrüche mehr festgestellt, im Gegensatz zu den noch völlig ungeschützten Stellen (Abb. 28).

Selbstverständlich wird es – wie auf allen Nordseeinseln – bei sehr hohen Sturmfluten auch bei einer solchen Brandungsberme noch zu Dünenabbrüchen kommen können. Diesen kurzzeitigen Abbrüchen steht aber die natürliche Regeneration durch Sandwehen und Platenanlandungen entgegen. Ob die gegenwärtige Höhe der Brandungsberme ausreichend ist, um dieses Gleichgewicht zu erhalten oder sogar zur positiven Seite hin zu verschieben, kann z. Z. noch nicht sicher gesagt werden, viele Anzeichen sprechen jedoch dafür. Es wird daher empfohlen, das Längswerk zunächst in seiner jetzigen Höhe und Lage zu belassen und zumindest einen weiteren Winter abzuwarten. Ferner wird empfohlen, den Dünenfuß auf ganzer Länge sorgfältig einzumessen und in wenigstens 120 m Abstand durch Schraubpfähle zu vermarken. An diesen Pfählen sollten Strandhöhenmessungen ausgeführt werden. Diese brauchten nicht täglich (wie die bisherigen Messungen) vorgenommen zu werden, sondern in größeren Zeitabständen, vor allem aber unmittelbar nach Sturmfluten, deren Wellenauflauf den Fuß der Randdüne erreichten. Der Vergleich mit den früher ausgeführten Messungen der Geschwindigkeit des Dünenrückganges (Anl. 2 in [23]) kann die schon jetzt feststellbare Wirkung des Schlauchwerks in Verbindung mit der Aufspülung der Brandungsberme überzeugend zeigen.

Mit der Frage der notwendigen Höhe der Brandungsberme ist die Frage ihrer Stabilität gegen Wellen- und Strömungsangriff verbunden. Auch hierzu wird empfohlen, das Verhalten des 1971/72 eingespülten Sandes im nächsten Winter zu verfolgen. Dazu müßte nach Ende der Badesaison, auf jeden Fall jedoch vor den ersten Herbststurmfluten 1972, der Sandkörper auf der Aufspülstrecke genau aufgemessen werden. Zweckmäßig wäre das Aufmaß feldweise auszuführen, und zwar so, daß der Sandkörper v o r dem Längswerk getrennt von dem zwischen Längswerk und Dünenfuß vermessen wird. Als Bezugshorizont wäre NN $\pm$ 0 m zu wählen. Dieses Aufmaß wäre nach Sturmfluten, spätestens aber zu Ende des Winters 1972/73 zu wiederholen. Im Gegensatz zu den Sandstandsmessungen, die nur örtliche Vorgänge wiedergeben können, kann der Vergleich dieser Flächenaufmaße besser das Gesamtverhalten des Spülkörpers wiedergeben.

Auf dem vor dem Längswerk liegenden Strande mit seinen wechselnden Seegangsverhältnissen treten stärkere Umlagerungen auf als in den durch das Schlauchwerk geschützten Spülfeldern. Diese Strandveränderungen sind ungefährlich, solange das Schlauchwerk nicht unterspült wird und absackt, womit Brandungsberme und Düne ihre Fußsicherungen verlieren würden. Nach den bisherigen Erfahrungen besteht diese Gefahr nicht; sie kann bei wenig erhöhten Tiden mit kurzem Seegang eher auftreten als bei hohen Sturmfluten, die den Strand etwa auf der Höhe des MThw ausgleichen.

Nach der auf Seite 89 ff. dargestellten Entwicklung scheint in naher Zukunft eine reichliche Sandzufuhr aus Platenanlandungen bevorzustehen, die vor allem eine Verbesserung der Sandverhältnisse seewärts des Längswerks erwarten läßt. Dabei kann es, wie die regelmäßig eintretenden Lee-Erosionserscheinungen östlich der anlandenden Platen zeigen, durchaus auch vorübergehend zu einer kurzzeitigen Verschlechterung der Strandverhältnisse kommen.

Für den Sandkörper zwischen Längswerk und Düne, der die Brandungsberme bildet und den eigentlichen Schutz des Dünenfußes darstellt, wird der Vergleich der Aufmaße vor und nach dem kommenden Winter zeigen, ob und in welchem Ausmaß Sand verlorengegangen ist. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten:

1. es tritt eine Sandabnahme ein, die besonders in örtlichen Erosionen bestehen kann, aber die Funktion der Brandungsberme wird davon nicht betroffen, d. h. der Dünenfuß wird nicht angegriffen, oder
2. durch die Sandabnahme setzt auch der Dünenabbruch wieder ein.

Im ersten Falle braucht zunächst nichts unternommen zu werden, weil anzunehmen ist, daß sich in den Spülfeldern wieder ein Gleichgewichtszustand einstellt, der von selbst stabil bleibt. Nur dann, wenn Unterspülungen des Längswerkes auftreten sollten, müßten dagegen sofort bauliche Vorkehrungen getroffen werden.

Für den zweiten Fall würde das Aufmaß eine Sandmenge ergeben, die ersetzt werden muß; hierzu wird auf die Ausführungen Seite 96 verwiesen. Es wäre dann an eine ständige weitere Aufspülung zu denken, wobei aber die dazu erforderliche stationäre Spülanlage wesentlich kleinere Leistungen, Maschinensätze und Rohrleitungslichtweiten als die jetzige haben kann. An der jährlich zu spülenden Sandmenge kann die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens geprüft werden. Dabei sollte nur der Sandvorrat in den Feldern zwischen Düne und Längswerk ergänzt werden; eine seeseitige Vorspülung ist wegen der hohen Spülverluste nicht zu empfehlen.

Sollte sich aber eine weitergehende Sicherung des Dünenfußes als notwendig herausstellen, so wird im Zusammenhang mit der Aufspülung ein weiteres Längswerk vorgeschlagen, das etwa in der Mitte zwischen dem jetzigen Zwillingsschlauch und der Düne liegen sollte (s. S. 99). Damit soll einmal eine zweite Brandungsberme vor der Düne geschaffen, zum anderen ein zu hoher Geländesprung verhindert werden (s. Abschnitt VI A, S. 106).

Ein solches Längswerk sollte ebenfalls eine Höhe von etwa 1 m aufweisen und könnte

Die Küste, 23 (1972), 63-111

z. B. aus der auf Seite 99 beschriebenen Böschung aus Strohballen, aber auch aus einem Zwillingsschlauch mit entsprechender Unterlage bestehen. Auf Querwerke und Riegel kann hier verzichtet werden. Bei der Höhe des jetzigen Längswerkes und bei der Neigung der (davor dann zu wiederholenden) Aufspülung von 1 : 50 liegt die Unterkante dieses Längswerkes auf etwa NN + 2,5 m, so daß die zweite Brandungsberme dann die Höhe NN + 3,5 m haben würde; sie kommt also nur bei hohen Sturmfluten unter Wasser. Hiermit wird mit Sicherheit eine weitere fortlaufende Zerstörung der Düne zu verhindern sein. An zusätzlichem Spülsand für diese zweite Berme würden nur 25 · 2000 = 50 000 m³ benötigt.

Diese weiteren Sicherungsmöglichkeiten sollten aber nur dann erwogen werden, wenn die Notwendigkeit dazu besteht.

C. Empfehlungen für weitere Sicherungsvorkehrungen

Um das weitere Verhalten des Schlauchwerks in Verbindung mit der Aufspülung der Brandungsberme zu verfolgen, wird empfohlen, das auf Seiten 107/108 beschriebene Ausmaß des Sandkörpers auf der Aufspülfläche auszuführen. Außerdem sollten die Veränderungen der Lage sowie das Verhalten des Fußes der Randdüne mit Hilfe eingemessener Markierungspfähle verfolgt werden.

Veränderungen der Morphologie des Seegatgebietes der Accumer Ee und des ihm zugeordneten Watteinzugsgebietes sollten weiterhin durch Terminvermessungen (Peilungen) und Luftaufnahmen überwacht werden.

Auf der Fläche der Brandungsberme sollte schon jetzt Dünengewinnungsarbeiten ausgeführt werden, um die Randdüne möglichst bald wieder in ihren früheren Zustand zu bringen.

VII. Zusammenfassung

A. Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchung der verschiedenen Komponenten des Naturgeschehens im Gebiet des Seegats Accumer Ee unter Benutzung morphologischer Deutungsmethoden hat keine Anhaltspunkte für eine grundsätzliche Änderung der bisher bestehenden Verhältnisse einschließlich der Sandzuführung nach der Insel Langeoog ergeben.

Als Ursache des etwa seit 1960 eingetretenen beschleunigten Abbruchs der Randdüne vor dem Pirolatal konnte die Umbildung der normalen Strandbrandung in eine Kliffbrandung, also eine örtlich bedingte und begrenzte Erscheinung, herausgestellt werden. Die inzwischen mit dem Schlauchwerk in Verbindung mit der Aufspülung einer 50 m breiten Berme vor der Randdüne gewonnenen Erkenntnisse haben dies bisher voll bestätigt.

B. Bauliche Bemerkungen über die neuartige Bauweise: Schlauchwerk als Stabilisierung einer mit Sand aufgespülten Brandungsberme.

Auf Seite 98 wurde auf die Möglichkeit hingewiesen, daß der Strand vor dem Längswerk infolge von Reflexionserscheinungen vertieft und das Bauwerk dann bei Unterspülung (Kolkbildung) gefährdet werden könnte. Daher war empfohlen worden, auch seeseitig des Längswerkes Sand aufzuspülen, und zwar bis Oberkante Schlauchwerk. Nach den jetzt vorliegenden Erfahrungen ist eine gefahrbringende Erosion des Strandes unmittelbar entlang der Außenseite der halbkreisförmigen Schläuche überraschenderweise nicht eingetreten, wobei allerdings darauf hinzuweisen ist, daß der sturmarme Winter 1971/72 keine starke Brandungsbelastung für das

Schlauchwerk gebracht hatte. Sollten sich auch künftig bei stärkerer Brandung an der seeseitigen Schlauchseite keine Erosionserscheinungen einstellen, dann könnte bei den weiteren Unterhaltungsarbeiten (Sandnachspülungen) auf eine Sandaufspülung vor dem Längswerk verzichtet werden.

Wenngleich die vorstehend beschriebene Kolkbildung infolge Erosion des seeseitig vom Schlauchwerk gelegenen Strandes bisher an keiner Stelle eingetreten ist, haben sich dennoch aus anderer Ursache an verschiedenen Stellen des Längswerks zum Teil erhebliche Kolke gebildet, die zur Versackung der Schläuche und zu größeren Sandverlusten der Fläche zwischen Längswerk und Dünenfuß geführt haben. Der Ausgangspunkt dieser Kolkbildungen war stets das bei fallendem Tidewasser hinter dem Längswerk in den Spülfeldern stehengebliebene Wasser gewesen, das sich infolge des hydrostatischen Druckunterschiedes eine Vorflut unter den Schläuchen nach See zu suchte. Die hierdurch entstandenen Schäden wären wahrscheinlich weitgehend vermieden worden, wenn die Spülfelder mit dem Baufortschritt des Längswerkes rechtzeitig mit Sand aufgespült worden wären.

Die auf Seite 98 empfohlenen 10 m langen und in etwa 20 m Abstand angeordneten Abweiser (Querwerke) am Längsschlauch haben bisher nur eine unbedeutende Schutzwirkung gezeigt. Offenbar sind die 60 m langen Spülfelder zwischen den Riegelwerken für das Entstehen von Erosionsrinnen durch strömendes Wasser zu kurz. Sollten weitere Beobachtungen dies bestätigen, könnte bei Anwendung der Schlauchbauweise an anderen Küstenstellen auf Querwerke teilweise oder ganz verzichtet werden.

Zur grundsätzlichen Anordnung des Sicherungswerkes vor dem Pirolatal, wie sie auf Seite 97/98 vorgeschlagen und später auch ausgeführt wurde, sei noch bemerkt, daß die gewählten Lage- und Höhenabmessungen nach den bisherigen Erfahrungen mit diesem Bauwerk die beabsichtigte Wirkung haben. Bereits nach Fertigstellung der ersten Strecken des Schlauchwerkes hörte an diesen Stellen der bis dahin stetig fortschreitende Abbruch des Fußes der Randdüne auf. Die aufgespülte Brandungsberme hat, soweit entsprechender Wellenauflauf eingetreten war, die Kliffbrandung in eine Strandbrandung umgewandelt. Zu irgendwelchen Änderungsvorschlägen in der Gesamtanordnung dieses Sicherungswerkes besteht daher zur Zeit kein Anlaß.

Der zum Schutz der Randdüne und des Pirolatales zunächst geplante Bau eines massiven Deckwerkes, dessen negative Auswirkungen (z. B. Lee-Erosion) erwiesen sind, braucht unter Berücksichtigung der seit langer Zeit unverändert bestehenden morphologischen Verhältnisse der Insel, des Seegats Accumer Ee und seines Watteinzugsgebietes sowie der gegenwärtig günstigen Entwicklung der Strandverhältnisse im Nordwesten der Insel Langeoog nicht weiter verfolgt zu werden, so daß auf die seinerzeit in Aussicht genommene gutachtliche Beurteilung eines solchen Bauwerkes verzichtet wird.

VI. Schriftenverzeichnis

1. Backhaus, H.: Die ostfriesischen Inseln und ihre Entwicklung. – Schriften der Wirtschaftswissenschaftlichen Gesellschaft zum Studium Niedersachsen, N. F. Bd. 12, Oldenburg 1943.
2. Bahr, M.: Die Entwicklung des Vorfeldes zwischen Hever und Elbe seit dem Ende des 16. Jahrhunderts. – Dienstberichte des Wasser- und Schiffahrtsamtes Tönning, 1961 und 1963 (unveröffentlicht).
3. Bendegom, L. van: Einige Betrachtungen über die Bildung und Umbildung von Watten. – Tijdschrift Konigglijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Mai 1950.
4. Forschungsstelle Norderney: Die Strandentwicklung im Westteil von Langeoog seit Beginn des 18. Jahrhunderts. – Dienstbericht vom Sept. 1956, Bearbeiter: Kramer und Homeier.

Die Küste, 23 (1972), 63-111

5. Forschungsstelle Norderney: Stellungnahme zur Strandentwicklung im Westteil von Langeoog. – Dienstbericht vom 29. März 1956, Bearbeiter: Kramer.
6. Forschungsstelle Norderney: Strommessungen zur Frage des Schutzes der Inseln Langeoog und Spiekeroog in der Accumer Ee und Otzumer Balje. – Dienstbericht 1961, Bearbeiter: Homeier.
7. Forschungsstelle Norderney: Topographische Wattkarte 1 : 25 000 Nr. 6, Norderney 1962.
8. Forschungsstelle Norderney: Historische Karte 1 : 50 000 Nr. 6 mit Beiheft. – Bearbeiter: Homeier, Norderney 1963.
9. Forschungsstelle Norderney: Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge im Bereich der Accumer Ee als Grundlage für die Beurteilung der Strand und Dünenentwicklung im Westen und Nordwesten Langeoogs. – Jahresbericht 1970 (Bd. XXII) der Forschungsstelle Norderney, Norderney 1971, Homeier, H., und Luck, G.
10. Gaye, J.: Entwicklung und Erhaltung der ostfriesischen Inseln. – Zentralblatt der Bauverw. 1934.
11. Gaye, J., und Walther, Fr.: Die Wanderung der Sandriffe vor den ostfriesischen Inseln. – Die Bautechnik 1935.
12. Homeier, H.: Die Entwicklung des Westteils von Langeoog seit Beginn des 18. Jahrhunderts. – Jahresbericht 1956 (Bd. VII) der Forschungsstelle Norderney, Norderney 1956.
13. Jen, Y., und Lin, P.-H.: Plunging Wave Forces an a Semi-Circular Cylinder. – XII. Coastal Engineering Conferences Washington 1970, Proceedings Vol. III.
14. Kattenbusch, E., und Luck, G.: Serienbefliegung der Riffbögen vor den ostfriesischen Inseln. – Deutsche Gewässerkundl. Mitt., H. 6, 1968.
15. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arb.-Gruppe Küstenschutz: Der Inselschutz auf den ostfriesischen Inseln Memmert, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog und Spiekeroog. – Bilanzbericht vom 29. 11. 1953, Bearbeiter: Thilo.
16. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Gutachtergruppe Langeoog, Führböter, Lüders und Rodloff: Gutachten über die Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog (1. Teil). – 1971, nicht veröffentlicht.
17. Lüders, K.: Der Jadebusen und seine Bedeutung für Wilhelmshaven. – Werft Reederei Hafen, 18 (1937), H. 10.
18. Lüders, K.: Über rezente morphologische Entwicklungen im westlich der Insel Langeoog gelegenen Seegat „Accumer Ee". – Zur Veröffentlichung in Vorbereitung.
19. Poppen, H.: Die Sandbänke an der Küste der Deutschen Bucht der Nordsee. – Ann. der Hydrographie 40 (1912), H. VI bis VIII, Hamburg 1912.
20. Rodloff, W.: Über Wattwasserläufe. – Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 34, Hannover 1970.
21. Walther, Fr.: Die Gezeiten und Meeresströmungen ins Norderneyer Seegat. – Die Bautechnik 1934.
22. Wasserbauamt Norden: Schutzbauten zur Erhaltung der ostfriesischen Inseln in den Jahren 1900 bis 1928. – Dienstbericht 1929, Bearbeiter: Gaye und Walther.
23. Wasser- und Schiffahrtsamt Norden: Untersuchung über die Strand- und Dünenabbrüche auf Langeoog. – Dienstbericht 1970, Bearbeiter: Schwitters; nicht veröffentlicht.
24. Wasser- und Schiffahrtsamt Norden: Entwurf zur Sicherung der Insel Langeoog. – Dienstbericht 1971, Bearbeiter: Franzius; nicht veröffentlicht.
25. Wasser- und Schiffahrtsamt Norden: Sicherung des Vorstrandes und der Randdüne auf der Insel Langeoog mit Kunststoffgewebe-Schläuchen. – Dienstbericht 1971, Bearbeiter Franzius; nicht veröffentlicht.
26. Wasser- und Schiffahrtsamt Norden: Informationsdruckschrift über die Arbeiten zur Dünensicherung vor dem Pirolatal auf Langeoog. – Gemeinde und Kurverwaltung Langeoog und Wasser- und Schiffahrtsamt Norden, Norden 1971.
27. Wasser- und Schiffahrtsamt Norden: Erfahrungsbericht über die Strand- und Dünensicherungsarbeiten auf Langeoog. – Dienstbericht 1971, Bearbeiter: Franzius.
28. Wetzel, G. und Lucht, F.: Vergleichende Untersuchung der angewendeten Beschickungsverfahren in den Küstengewässern der Deutschen Bucht und im Wattenmeer. – Zwischenbericht DFG „Sandbewegung im Küstenraum", 1971.
29. Witte, H.-H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. – Die Küste, H. 19, 1970.
30. Zenkowich, V. P.: Processes of Coastal Development. – Engl. Ausg. Oliver and Boyd, London 1967.