

Zur Entwicklung der Düne Helgoland

VON ALFRED FÜHRBÖTER UND HANS HENNING DETTE

Zusammenfassung

Nach Baumaßnahmen für einen Kriegshafen in den Jahren 1937 bis 1941 blieb die Düne Helgoland bis 1952 weitgehend sich selbst überlassen. Nach der Rückgabe an die Bundesrepublik Deutschland wurde bald festgestellt, daß der Südstrand der Düne einem stetigen Abbruch unterliegt; durch Buhnenbauten konnte zwar der Abbruch verzögert, aber nicht aufgehalten werden.

Es wird aufgezeigt, daß der Abbruch des Südstrandes durch eine überwiegend östlich gerichtete Sedimentbewegung hervorgerufen wird. Dies ist darauf zurückzuführen, daß infolge von Wellendiffraktionen um die Hauptinsel, insbesondere bei Sturmfluten, der Seegang vorwiegend aus südwestlicher Richtung auf den Südstrand aufläuft und dadurch eine nach Osten gerichtete Brandungsströmung erzeugt wird. Es wird dargelegt, wie sich in den Jahren von 1952 bis 1984 das Abbruchgeschehen durch die vorgenannten Vorgänge und darüber hinaus durch zusätzliche Baumaßnahmen (z. B. Tetrapodendamm) eingestellt hat. Auf der Grundlage dieser Kenntnisse werden Vorschläge für bauliche Maßnahmen diskutiert, mit denen dem Abbruch entgegengetreten werden kann.

Summary

Subsequent to construction of a war port between 1937-1941, the dunes of Helgoland Island were essentially neglected until 1952. After the return of the island to the Federal Republic of Germany, it was determined that the dunes on the southern beach were undergoing continuous erosion. The construction of jetties could slow down the erosion but not stop it.

It was shown that the erosion of the southern beaches is due to a dominant eastward sediment movement. This results from the fact that wave diffraction around the main island, especially during storm surges, is generally associated with a south westerly sea state. This generates an eastward breaker current along the southern beaches. It is shown here how erosion due to this mechanism has progressed since 1952 and to what extent protective structures such as tetrapodes have been successful. Based on these results, recommendations are made for structures which can be used to reduce erosion.

Inhalt

1. Allgemeine Entwicklung der Düne bis 1982	48
1.1 Die Düne und ihre Umgebung	48
1.2 Die Entwicklung von 1721 bis 1937	52
1.3 Die Zeit von 1937 bis 1952	53
1.4 Die Entwicklung von 1952 bis 1982	56
1.5 Der Zustand von 1982	63
2. Die Düne in ihrer Wechselwirkung mit den angreifenden Kräften	64
2.1 Tide und tideerzeugte Strömungen	64
2.2 Wellen und wellenerzeugte Strömungen	69
2.3 Sturmfluten	74
2.4 Strandrückgang und Dünenabbruch	77
3. Die Entwicklung des Südstrandes von 1952 bis 1982	80
3.1 Morphologische und sedimentologische Verhältnisse	80
3.2 Verlagerungen des Strandbereiches und der Dünenkante	85
3.3 Menschliche Eingriffe seit 1952	92

4. Die Entwicklung der übrigen Strände (von 1952 bis 1982)	96
4.1 Oststrand	96
4.2 Nordstrand	97
4.3 Westseite und Dünenhafen	101
5. Vorschläge für den zukünftigen Schutz der Düne	105
5.1 Der Südstrand	105
5.1.1 Die weitere Entwicklung des Südstrandes (ohne Eingriffe)	105
5.1.2 Vorschläge zur Sicherung des Südstrandes (Lösungsvorschläge A bis D).	106
5.1.3 Allgemeine Bemerkungen zu den vorgesehenen Baumaßnahmen.	111
5.2 Ost- und Nordstrand	112
6. Zusammenfassung	112
7. Schriftenverzeichnis	113

1. Allgemeine Entwicklung der Düne bis 1982

1.1 Die Düne und ihre Umgebung

Der Felssockel, auf dem die Insel Helgoland und die Düne liegen, erhebt sich steil aus Wassertiefen über 40 m und weist Formationen auf, deren Schichten im Bereich der Düne bei steilem Fallen eine Streichrichtung von etwa NNW nach SSO zeigen; erst südlich der Düne, auf dem Aadebrunn, biegt die Streichrichtung nach Süden um, während sie im äußersten Nordwesten nach NW schwenkt. Aus Abb. 1 und 2 geht hervor, daß bei Winden aus dem Westsektor die Düne weitgehend im Wellenlee der Hauptinsel liegt; diese Schutzwirkung wird durch die nördliche Verlängerung der Hauptinsel als Nordmole und durch die an den südlichen Teil (Unterland) anschließenden Hafenanlagen noch verstärkt.

Die Düne weist über dem mittleren Spring-Tideniedrigwasser (MSP_{Tnw}) eine Fläche von 79 ha und über dem mittleren Spring-Tidehochwasser (MSP_{Thw}) eine Fläche von 61 ha auf; die auch bei Sturmfluten hochwasserfreie Fläche der sog. Hohen Düne beträgt gegenwärtig ungefähr 40 ha.

Der Untergrund der Düne und ihre nördlichen und südlichen Vorfelder bestehen aus Kalk-, Mergel- und Kreideschichten der Muschelkalk- und Kreidezeitformationen (vgl. z. B. GRUPE, 1929, und GUENTHER, 1969); stellenweise sind in der Kreide bituminöse Tonschiefer (auch „Töcke“, „Kreide-Töcke“ oder „Fischschiefer“ genannt) eingelagert. Die unterschiedliche Erosionsfestigkeit der einzelnen Schichten führt zu einem Wechsel von Graten und Rinnen, die sich als Groß- und Kleinformen entlang den Streichlinien der Schichten hinziehen und die das morphologische Bild des Seegrundes südlich und besonders nördlich und nordwestlich der Düne beherrschen. Dort tritt als besonders ausgeprägte und tiefe Rinne das Skittgatt hervor (Abb. 1). Die Düne selbst besteht aus holozänen Sanden und ist den Kreideformationen des ehemaligen Wittkliffes überlagert.

Die Düne stellt einen sehr wichtigen Faktor für den Fremdenverkehr dar; insbesondere der Südstrand und hier wiederum dessen sandiger und flacher Südwestteil sind als Badestrand sehr beliebt. Abb. 3 zeigt die Düne mit ihrer Bebauung im Zustand von 1983.

Besonders die Südseite der Insel aber ist seit der Rückgabe 1952 einem besorgniserregenden Abbruch unterworfen. Dies gilt sowohl für den Strandbereich als auch für die Kante der Hohen Düne. Alle bisherigen Baumaßnahmen, wie z. B. der mehrfach verlängerte und erhöhte Tetrapodendamm am Westteil des Südstrandes, konnten keine einschneidende Abhilfe schaffen. Auch großflächige Sandaufspülungen, wie die von rd. 240 000 m³ im Jahre 1974, wurden in kürzester Zeit (etwa 1 Jahr) wieder von den Erosionskräften der Wellen und der Strömungen davongetragen.

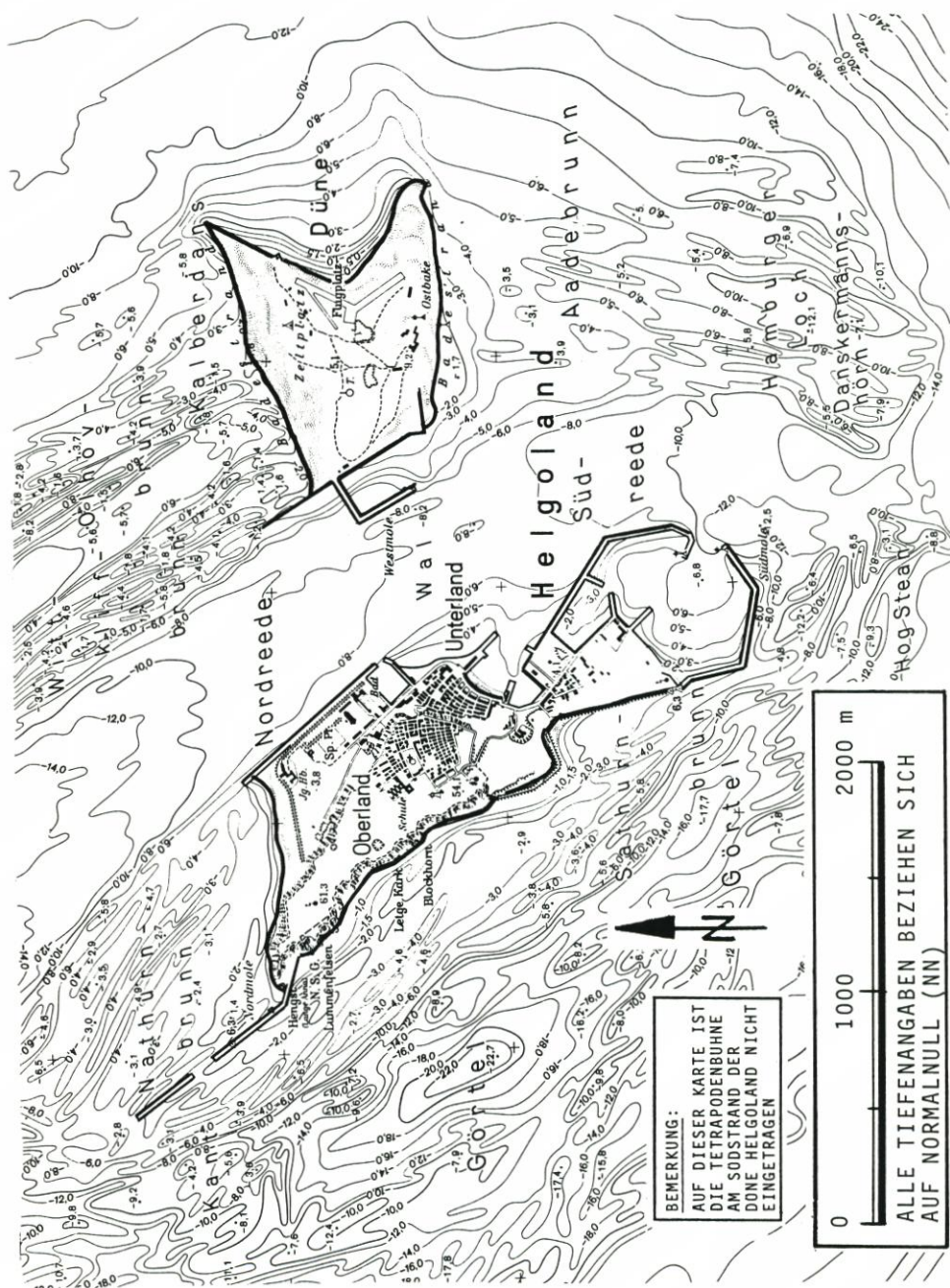


Abb. 2. Helgoland mit Düne

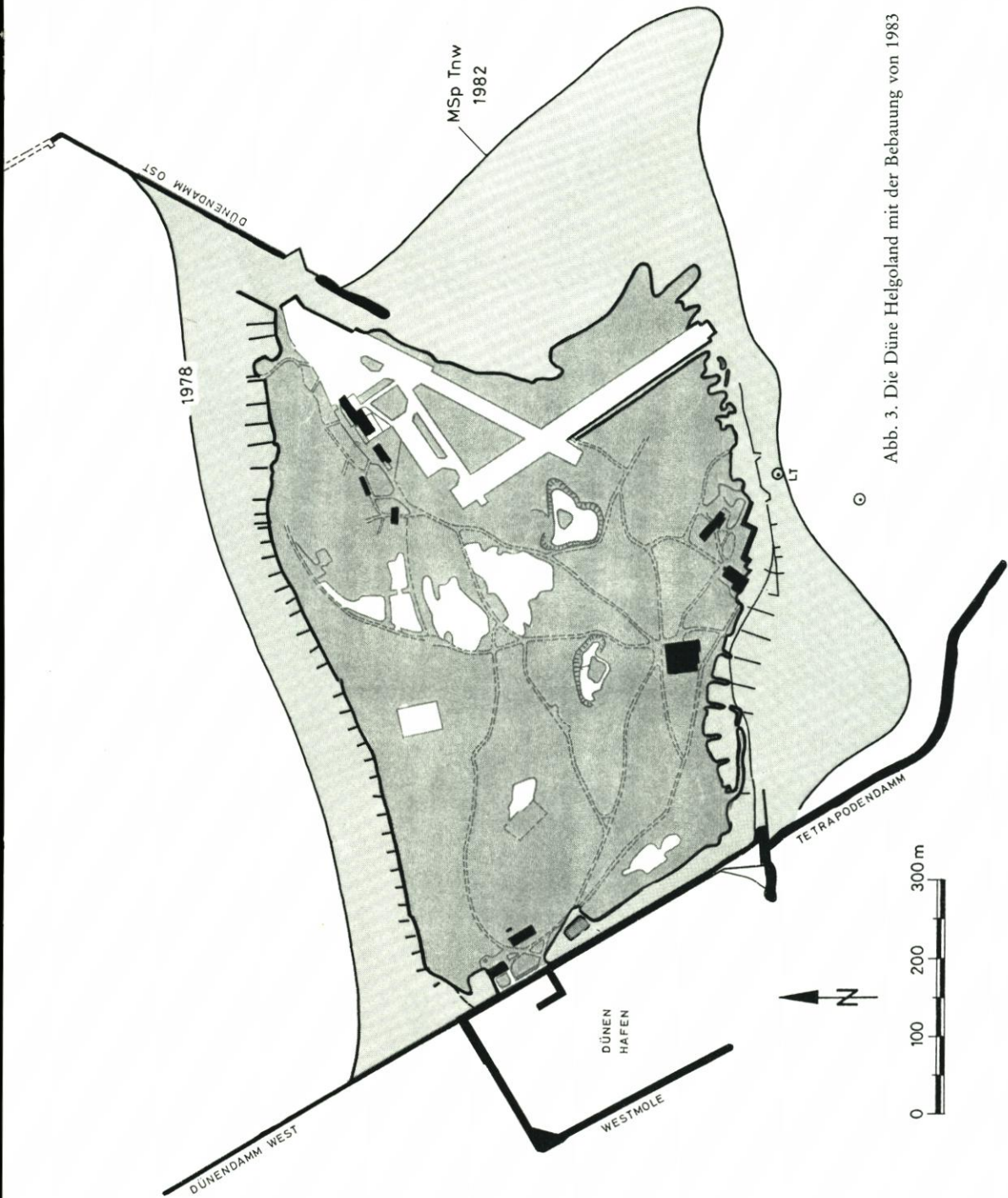


Abb. 3. Die Düne Helgoland mit der Bebauung von 1983

1.2 Die Entwicklung von 1721 bis 1937

Die Geschichte der Düne Helgoland als einer selbständigen Insel beginnt 1721 (nach anderen Quellen 1720) mit der endgültigen Trennung von Hauptinsel und Düne, nachdem es 1711 zum Einsturz des sog. Wittkliffes als dem Felskern der Düne kam (KRUMBEIN, 1975). Mit Sicherheit hat die extreme Sturmflut von 1717 den Durchbruch der als „Wal“ bezeichneten Verbindung – ein Geröllrücken zwischen der Hauptinsel und der Düne – vorbereitet. Nach dem vollzogenen Durchbruch konnten die täglichen Tideströmungen mit der Ausbildung der Rinne beginnen, die heute als Nord- und Südreede Hauptinsel und Düne trennt.

Eine eingehende Darstellung der weiteren Entwicklung der abgetrennten Düneninsel hat BAHR (1939) gegeben. Abb. 4 zeigt die verschiedenen Entwicklungsstadien, wobei die Höhenlinien des MSpTnw und des MSpThw von besonderem Interesse sind. Die sog. „Hohe

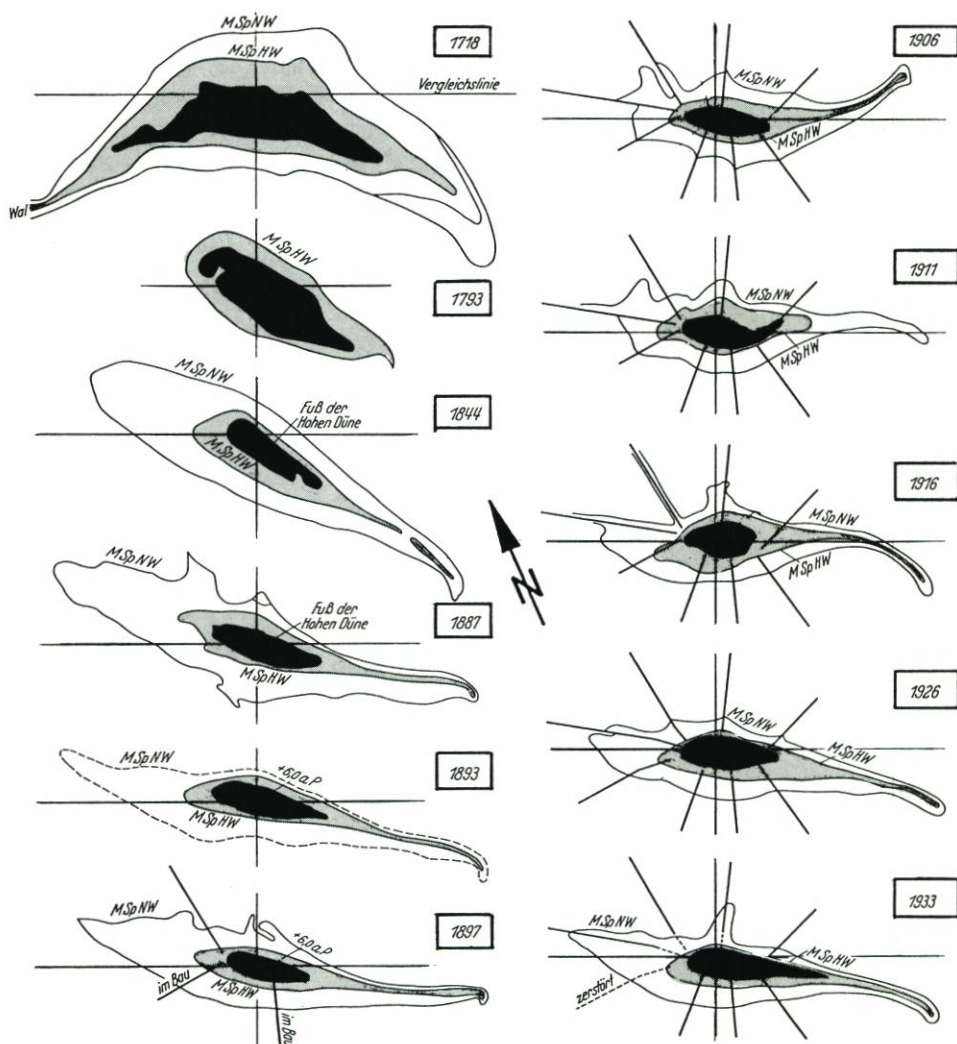


Abb. 4. Die Entwicklung der Düne von 1718 bis 1933 (aus BAHR, 1939)

Düne“ als Kern der Insel folgt in ihren Umrisen den Strandentwicklungen, die durch die Veränderungen der Höhenlinien von MSpTnw und MSpThw ausgedrückt werden. Aus Abb. 4 geht die bekannte Verminderung der Inselsubstanz über die Jahrhunderte hervor. Ebenso ist eine allmähliche Streckung der Insel in Richtung der vorherrschenden Strömungen aus Tide und Wellen festzustellen. Schon früh (1793) ist dabei die sog. „Aade“ als südöstliches Inselende zu erkennen, die sich als langgestreckter, flacher Sand- und Geröllhaken zu einer kennzeichnenden morphologischen Struktur der Düneninsel ausbildet und die sich – wenn auch mit starken Veränderungen – bis in die Gegenwart erhalten hat. Diese Aade kann als ein empfindlicher Richtungsanzeiger für die vorherrschenden Strömungen und als Folge deren Veränderungen durch die jeweiligen Windverhältnisse angesehen werden. Auffällig ist z. B. die fast genau ostwärtige Ausrichtung bei der Aufnahme von 1906, während fast alle anderen Darstellungen eine südöstliche Richtung mit einer kennzeichnenden Endkrümmung nach Süden zeigen (Abb. 4).

Die langzeitigen Verminderungen der Inselsubstanz auf den verschiedenen Höhenlinien sind ausführlich von BÄHR (1939) beschrieben worden und brauchen hier nicht wiederholt zu werden. Erwähnt werden sollte aber, daß auch durch die Buhnenbauten seit Ende des 19. Jahrhunderts, die bis 1906 zu einem sternähnlichen System führten, eine nennenswerte Verzögerung des Abbruchs nicht erreicht werden konnte, während nach dem Bau des ersten Marinehafens (1908 bis 1916) eine gewisse Zunahme vor allem am Südweststrand festgestellt wurde. Dieses ist vor allem auf den verbesserten Schutz gegen westliche Wellenrichtungen zurückzuführen. Dennoch beurteilte BÄHR die weitere Zukunft der Düne pessimistisch und sagte 1939 der sog. „Hohen Düne“ eine Lebenszeit von nur noch 20 bis 30 Jahren (also höchstens bis etwa 1970) voraus; danach würde der weitere Fortbestand nur noch der einer hohen Sandbank sein.

Bereits zu der Zeit, als BÄHR dieses niederschrieb, hatten aber in rascher Aufeinanderfolge von Planung und Ausführung Bauarbeiten begonnen, die nicht nur der Düne, sondern auch der Hauptinsel ein völlig neues Gepräge geben sollten. Hiervon soll im nächsten Abschnitt die Rede sein. Der Arbeit von BÄHR (1939) verbleibt aber der Wert als der einer der ausführlichsten Quellen zur Geschichte der Düneninsel. Für die Beurteilung der Wirkungen der angreifenden Kräfte ist sie auch heute noch von Bedeutung.

1.3 Die Zeit von 1937 bis 1952

Offenbar in der ehrgeizigen Absicht, dem britischen Naturhafen „Scapa Flow“ ein künstliches Gegenstück zur Seite zu stellen, wurden nach 1933 von der Kriegsmarine Pläne entwickelt, nach denen die Hauptinsel Helgoland einschließlich der Düne Kernstücke einer gigantischen künstlichen Insel- und Hafenanlage werden sollten. Abb. 5 zeigt eine Gesamtübersicht dieser auch als „Krebsschere“ oder „Hummerschere“ bezeichneten Anlage, deren Häfen und Reeden die gesamte deutsche Kriegsflotte aufnehmen sollten. Nach KRUMBEIN (1975) wurde bereits 1937 an verschiedenen Stellen mit den Bauarbeiten begonnen, die bis in die Kriegsjahre 1941/1942 mit großer Intensität fortgesetzt, dann aber abgebrochen wurden. Zur gleichen Zeit wurde versucht, den Felsen der Hauptinsel zu einer Seefestung umzugestalten, während auf dem z. T. planierten und durch Aufspülungen stark erweiterten Gelände der Hohen Düne ein Flughafen mit zwei einander kreuzenden Landebahnen gebaut wurde.

Da sowohl die Planungen als auch die Bauausführungen strengster Geheimhaltung unterlagen und zum Kriegsende die meisten Unterlagen verlorengingen oder vernichtet wurden, ist verständlicherweise über den zeitlichen Verlauf dieser einschneidenden Verände-

rungen wenig bekannt. Gleiches gilt für die Schäden durch Luftangriffe, die mit dem schweren Sprengbombenangriff am 18. 4. 1945, also kurz vor Kriegsende, ihren Höhepunkt erreichten. Unter englische Hoheitsaufsicht gestellt, erfolgte dann genau zwei Jahre später, am 18. 4. 1947, die bekannte Großsprengung auf der Hauptinsel. Auch in den folgenden Jahren dienten Insel und Düne als Übungsziel für die britische Luftwaffe. Als sie 1952 wieder der Bundesrepublik Deutschland zurückgegeben wurden, waren die Oberflächen beider Inseln, besonders aber die der Düne, in eindrucksvolle Kraterlandschaften verwandelt worden.

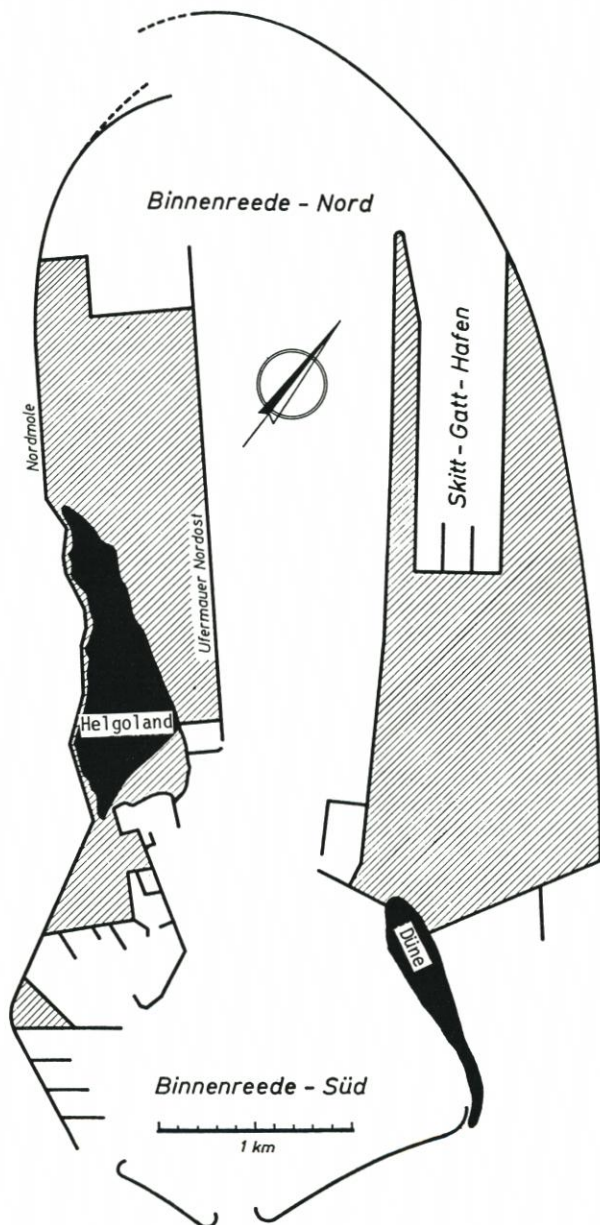


Abb. 5. Die Planungen der Kriegsmarine vor 1939 (aus KRUMBEIN, 1975)

Es kann davon ausgegangen werden, daß zwischen 1942 und 1952 keinerlei Unterhaltungsarbeiten mehr an den Uferschutzanlagen durchgeführt wurden; im Gegenteil wurde die Bausubstanz durch Bombenabwürfe und Sprengungen z. T. zerstört oder beschädigt. Daß von der Sprengung auf der Hauptinsel auch die Düne mittelbar betroffen war, berichtet SEIFERT (1953). Ein Luftbild zeigt zu einem Zeitpunkt 62 Sekunden nach der Zündung eine mehrere Meter hohe Flutwelle, die im spitzen Winkel auf die Aade zuläuft und die mit Sicherheit bleibende Schäden zumindestens an der Düne am Südstrand hinterlassen hat.

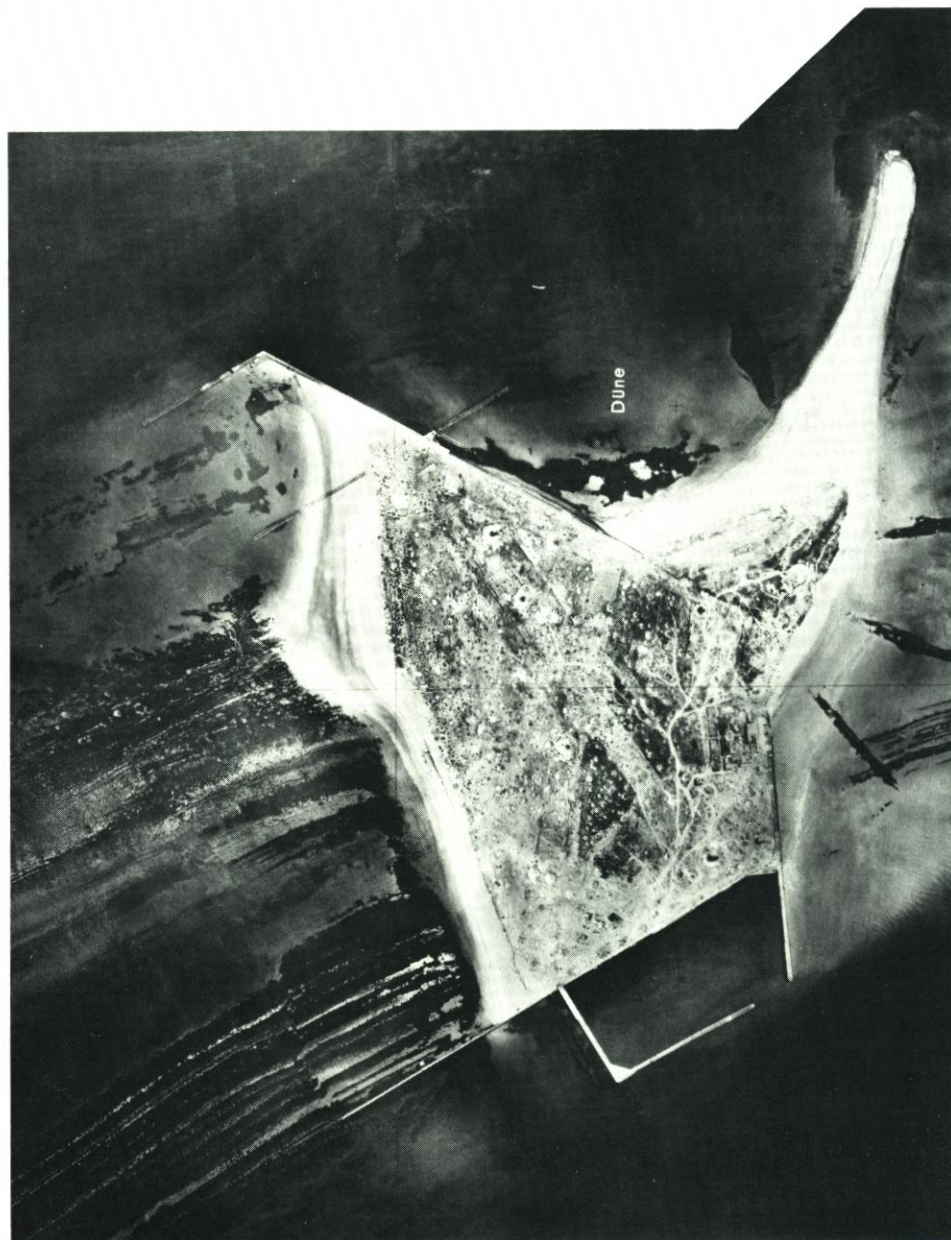


Abb. 6. Luftbild der Düne Helgoland vom 1. 7. 1952

Das Luftbild auf Abb. 6 zeigt die Düne in dem Zustand, wie sie sich kurz nach der Übergabe 1952 befand. Der Vergleich mit Abb. 5 veranschaulicht, wie weit die früheren Planungen verwirklicht werden konnten. Außerdem sind am Südstrand noch Reste des alten Buhnsystems zu erkennen. Ebenso sind noch die Reste der Landebahnen des Militärflughafens auf der erweiterten Hohen Düne sichtbar. Ausschnittsaufnahmen zeigen nicht nur die Dichte der Bombenkrater auf dem Dünengelände selbst, sondern auch Einschläge in den Wasserbereichen; dies gilt besonders für das Gebiet in und um den Dünenhafen. Nur dieser ist vollendet worden (vgl. Abb. 5). Die Dünendämme West und Ost als Grenzen des großflächig geplanten Aufspülungsgeländes nördlich der Düne sind nur in den Anfängen und z. T. lückenhaft vorhanden, desgleichen die anderen Ufersicherungsbauten (Abb. 6).

Vermessungen (vom Lande her) und Peilungen (von See her) sind aus den Kriegsjahren und aus den Nachkriegsjahren bis 1952 nicht bekannt. Das Luftbild von 1952 (Abb. 6) muß daher als Ausgangszustand für die folgenden Entwicklungen angesehen werden.

1.4 Die Entwicklung von 1952 bis 1982

Nach der Übergabe 1952 wurde die erste umfassende Vermessung der Düne und 1954 eine entsprechende Peilung des Seegebietes durchgeführt. Auf Abb. 7 ist diese Aufnahme dargestellt. Eingetragen wurden außerdem diejenigen Flächen der Hohen Düne, die seit 1938 aufgespült worden waren. Es geht aus Abb. 7 hervor, daß nur noch ein geringer Teil dieser

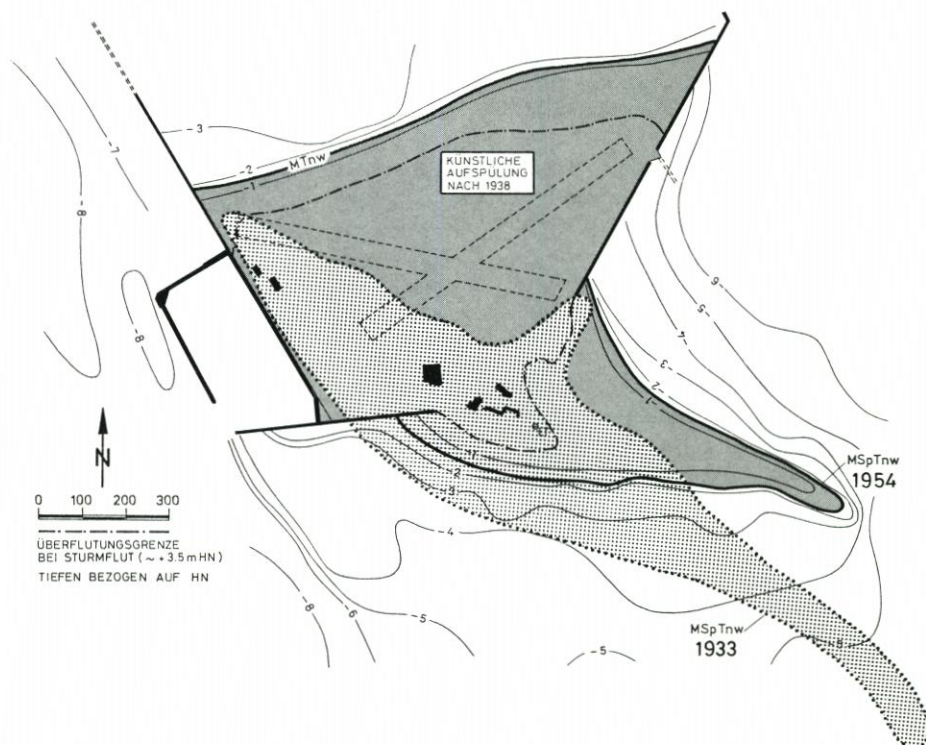


Abb. 7. Ausdehnung der Düne oberhalb MTnw im Sommer 1954 im Vergleich zum Zustand im Jahre 1933

Fläche von der ursprünglichen Düne aus der Vorkriegszeit stammt. Nach SEIFERT (1953) bestand die Düne nach einer ersten Aufmessung von 1952 aus Flächen von 70 ha über MTnw und 60 ha über MThw.

SEIFERT (1953) berichtet weiter, daß starke Rückgänge am Südweststrand schon während der Bauarbeiten am Dünenhafen beobachtet wurden; so soll bereits 1944 der Südweststrand etwa die Lage von 1952 aufgewiesen haben. Zur gleichen Zeit habe sich vor der Nordostmole ein „breiter Streifen Neuland“ aus „sehr geröllreichem Material“ gebildet.

Die Entwicklung von 1952 bis 1982 ist unter Verwendung verschiedener Quellen (Vermessung und Luftbilder) auf Abb. 8 für den Zeitraum 1952 bis 1965 und auf Abb. 9 für den Zeitraum von 1967 bis 1982 dargestellt, wobei der dunkel angelegte Teil der Düne jeweils den hochwasserfreien Bereich und der heller angelegte Teil jeweils den Strandbereich bis zur MTnw-Linie kennzeichnet. Um die Veränderungen der Düne zu veranschaulichen, sind die ehemaligen Landebahnen (Abb. 8) und die derzeitigen Landebahnen des Flughafens auf der Düne (Abb. 9) eingetragen.

Die Aufnahme von 1952 zeigt noch eine langgestreckte Aade und einen breiten Südweststrand. Bekannt ist zu diesem Zeitpunkt bereits hier eine Abbruchzone an der Hohen Düne unmittelbar am östlichen Ende der südlichen Schutzmauer. Der dortige Abbruch kann als beginnende Lee-Erosion gedeutet werden. Der Standort des heute noch vorhandenen Leuchtturmes (erst nach 1952 gebaut) liegt zu diesem Zeitpunkt noch auf der Hohen Düne; das Uferfeuer befindet sich in der Wasserwechselzone zwischen MSpTnw und MSpThw. Der größte Teil der neuen Landebahn (1952 ebenfalls nicht vorhanden) hätte sich etwa auf Höhe des MSpThw unmittelbar am Oststrand befunden (Abb. 8, oben links).

Bereits 1954 (Abb. 8, oben rechts) ist auch ein deutlicher Rückgang des Südstrandes festzustellen; der hier kleiner gewordene Abstand zwischen MSpTnw und MSpThw weist auf einen steileren Strand hin. Die Aufnahme von 1955 zeigt vor allem eine nennenswerte nördliche Verlagerung der Aade, deren Länge dabei aber noch annähernd gleich geblieben ist. Wie instabil dieser durch Tide- und Wellenwirkungen gleichermaßen geformte Haken aus Geröll und Sand ist, geht aus der Gegenüberstellung mit dem Jahr 1956 hervor, wo die Aade wieder beachtlich nach Süden gewandert ist. Weiterhin hat sich zu diesem Zeitpunkt eine ausgeprägte Lee-Erosion am östlichen Ende der Südmauer ausgebildet. Der Ort des Unterfeuers ist inzwischen von der MSpTnw-Linie erreicht worden. Die Verbreiterung des Oststrandes geht aus dieser Aufnahme ebenfalls hervor.

Fast vier Jahre später, im Jahre 1960, ist dieser Prozeß der Aade-Verlandung nach Süden weiter fortgeschritten; vor allem aber fällt dabei die extrem südliche Abknickung der Aade auf, die hier in der Jahresreihe 1952 bis 1982 ihre südlichste Lage erreicht. Nach dem Abbruch der Südmole des Dünenhafens (1954 bis 1955) hat sich oberhalb MTnw ein kleiner Sandhaken in den Dünenhafen geschoben. Im übrigen sind die Erosion des Südstrandes und die Verbreiterung des Oststrandes zwar weiter fortgeschritten, jedoch in geringerem Maße als in den vergleichbaren Zeiten vor 1956.

Zwischen der Aufnahme von 1960 und der von 1965 liegt die Februarsturmflut 1962, die vor allem an der Hohen Düne erhebliche Abbrüche hervorgerufen hat. Der Leuchtturm befindet sich jetzt auf dem Strand oberhalb der MThw-Linie (bei der Vermessung von 1965 nicht aufgenommen), das Unterfeuer liegt unterhalb der MSpTnw-Linie. Die Aade ist wieder nach Norden zurückgeschwenkt und hat dabei erheblich an Länge verloren. Die gleichzeitige Verbreiterung und Erhöhung des Oststrandes schreitet fort.

Bereits nach dem ersten Bauabschnitt der Tetrapodenbuhne (1965) an der Ecke zwischen dem Südweststrand und der landseitigen Kaje des Dünenhafens stellen sich erhebliche Veränderungen am Südstrand ein. Die Gegenüberstellung der Aufnahmen von 1965 (Abb. 8)

und 1967 (Abb. 9, oben) ergibt zwar eine Strandverbreiterung am Südweststrand in unmittelbarer Nähe der Buhne, aber auch einen kräftigen Rückgang des übrigen Südstrandes, der mit einer gleichzeitigen nördlichen Verlagerung der Aadespitze um etwa 100 m verbunden ist.

Die Tetrapodenbuhne wurde 1968 weiter ostwärts in die See hinaus verlängert. Die

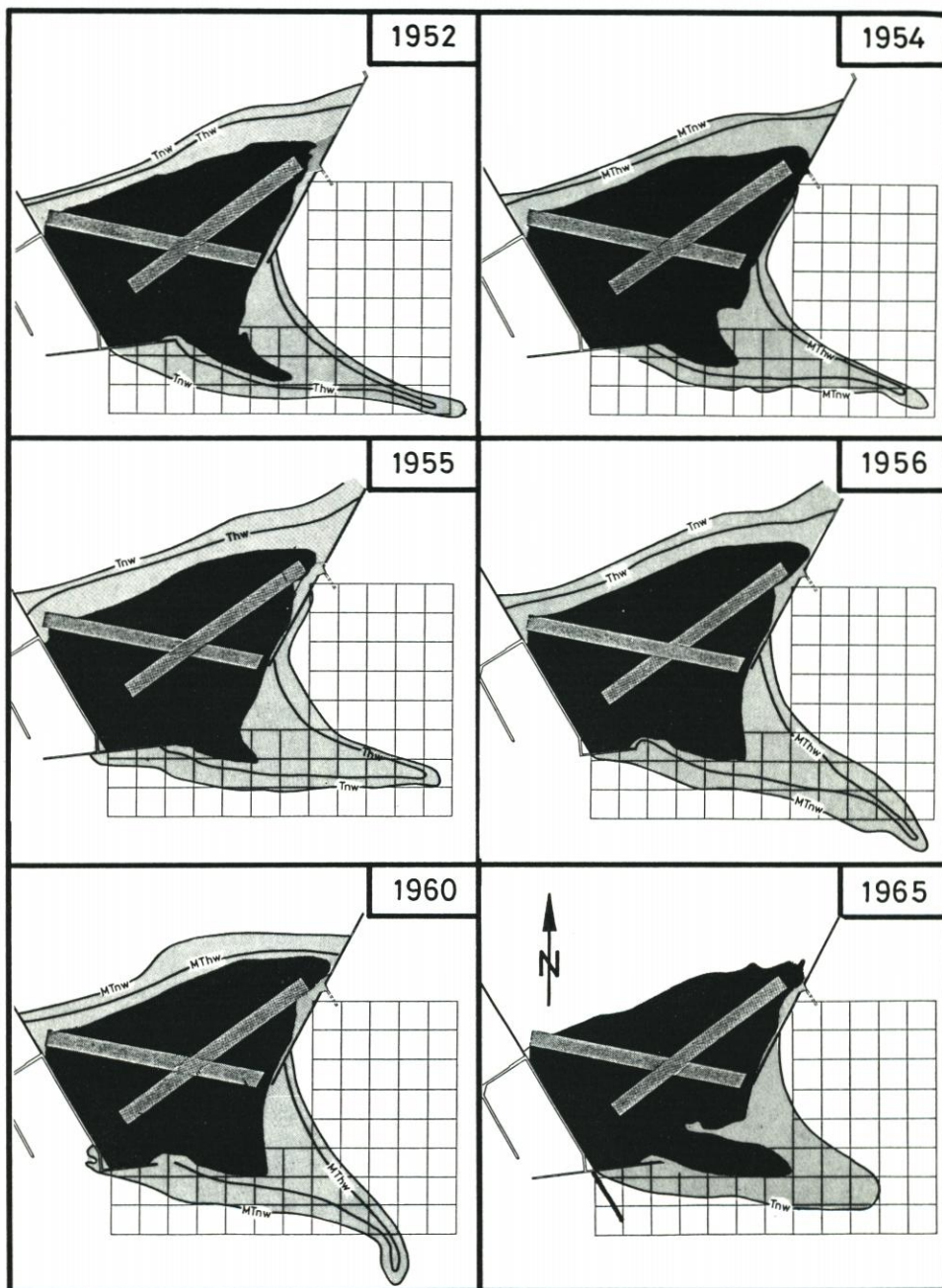


Abb. 8. Gesamtentwicklung der Düne in den Jahren 1952 bis 1965

Verbreiterung des Südweststrandes im unmittelbaren Bühnenbereich wird dadurch weiter begünstigt. Die Aufnahme von 1971 (Abb. 9) weist zwar gegenüber 1967 keine wesentliche Veränderung in der Lage und Größe der Aade auf, dagegen tritt aber sehr stark der Rückgang des Strandes im Bereich östlich des Dünenrestaurants hervor. Der Leuchtturm wurde nämlich

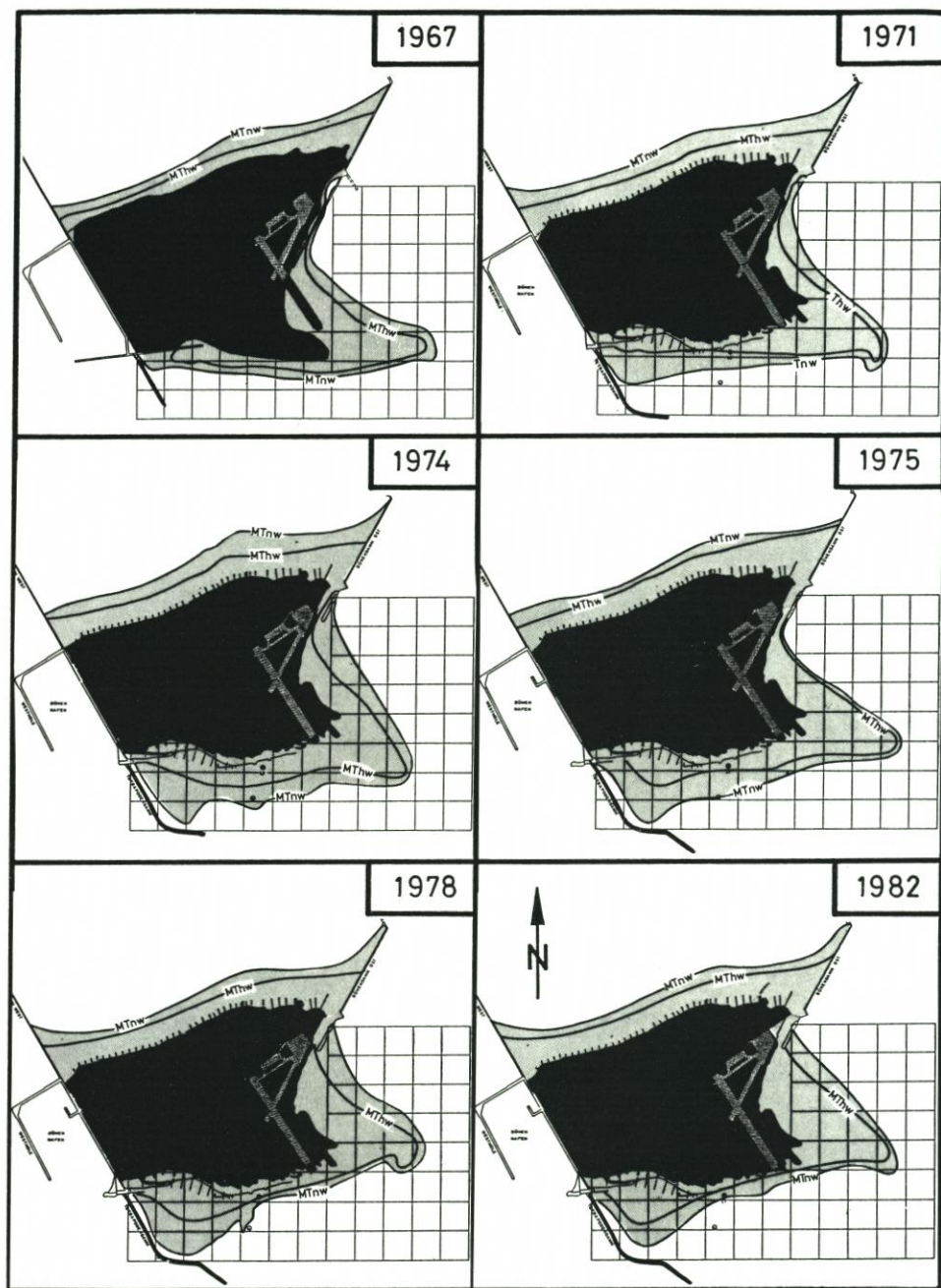


Abb. 9. Gesamtentwicklung der Düne in den Jahren 1967 bis 1982

inzwischen von der MSpThw-Linie im Unterwasserstrandbereich erreicht. Das Unterfeuer befindet sich mehr als 50 m von der MSpTnw-Linie entfernt. Auch das Ende der Landebahn rückt in die Nähe der MSpThw-Linie. Der Südstrand ist jetzt (1971) fast genau in die West-Ost-Richtung orientiert.

Die zahlreichen Herbststurmfluten 1973 brachten wiederum erhebliche Dünenabbrüche mit sich. Die kurz danach vorgenommene Aufnahme von Mai 1974 (Abb. 10, oben rechts) zeigt außer einem geringen Rückgang und einer starken Verformung der Aade (was aber durchaus im Rahmen einer normalen jahreszeitlichen Änderung liegen kann) jedoch keine wesentlichen Veränderungen der Strandlinien für MTnw und MThw auf. Die Niedrigwasserlinie war gegenüber 1971 sogar etwas seewärts zurückgeschwenkt. Besonders auffällig ist aber eine offensichtlich fortschreitende Verbreiterung des Oststrandes in den Jahren von 1971 bis 1974.

Im Sommer 1974 fand auf fast der ganzen Länge des Südstrandes eine Strandaufspülung mit rd. 240 000 m³ statt. Unmittelbar nach dieser Maßnahme wurde im August 1974 eine neue Vermessung durchgeführt, deren Ergebnis auf Abb. 9 und 10 (unten links) dargestellt ist. Besonders im Mittelbereich des Südstrandes vor dem Dünenrestaurant ist diese künstliche Strandverbreiterung erkennbar. Der Leuchtturm befindet sich wieder, wie zuletzt 1967, oberhalb der MThw-Linie.

Obwohl außerdem im Jahre 1974 die Tetrapodenbuhne weiter nach Südosten verlängert wurde (Abb. 11), war die Wirkung der Strandaufspülung nur von kurzer Dauer, wie aus der Aufnahme von Juli 1975 (Abb. 9) hervorgeht. Obwohl im Winter 1974/1975 keine nennenswerten Sturmfluten auftraten, sind im Mittelabschnitt des Südstrandes fast genau wieder die Strandlinien von Mai 1974, also wie vor der Aufspülung (Abb. 10, oben rechts), erreicht. Bei diesem Vergleich fällt aber außerdem auf, daß trotz der Aufspülung die Strandlinien östlich der Landebahn deutlich zwischen Mai 1974 und Juli 1975 zurückgegangen sind, was auf eine verstärkte Lee-Erosion infolge der verlängerten Tetrapodenbuhne hinweist.

Zwischen der Aufnahme von 1975 und der von 1978 (Abb. 9) liegen die schweren Januarsturmfluten 1976, die mit den Sturmfluten vom 3. 1. 1976 und vom 21. 1. 1976 die höchsten Wasserstände bei Helgoland nach 1962 erbrachten und entsprechende Dünenverluste verursachten. Es ist bedauerlich, daß keine Vermessung unmittelbar nach diesen Sturmfluten von 1976 zur Verfügung steht. Es kann daher nicht der Einfluß dieser Ereignisse von der langzeitigen Entwicklung zwischen 1975 und 1978 getrennt betrachtet werden. Für den östlichen Teil des Südstrandes gilt aber, daß sich der bereits zwischen 1974 und 1975 erkennbare Trend stetig fortgesetzt hat. Am Dünenrestaurant dagegen sind die MTnw- und die MThw-Linien bemerkenswert ortsfest geblieben; gleiches gilt für den unmittelbar an der Buhne anschließenden Südweststrand.

Auf eine Erscheinung soll an dieser Stelle besonders hingewiesen werden: Seit 1974 (Abb. 9) ist zwischen der Tetrapodenbuhne und der höftartig vorspringenden Niedrigwasserlinie eine sehr lagestabile Rinne festzustellen, deren Existenz auf örtliche, sich parallel zum Leehang der Buhne erstreckende Erosionswirkungen hinweist. Inwieweit diese vorwiegend durch die Durchlässigkeit der Tetrapodenpackungen und/oder durch Wellenüberschlag (hierauf wird noch einzugehen sein) bedingt sind, kann ohne eingehende Untersuchungen nicht gesagt werden. Jedenfalls ist die Rinne auch auf der letzten zur Verfügung stehenden Vermessung von 1982 (Abb. 9) in nahezu unveränderter Form und Lage erhalten geblieben.

Aus dieser letzten Vermessung von August 1982 geht hervor, daß sich in den vier Jahren nach 1978, in denen die sehr schwere Sturmflut vom 24. 11. 1981 mit ihren Folgen für die Düne liegt, die seit 1974 erkennbare Entwicklung konsequent fortgesetzt hat, besonders was den östlichen Teil des Südstrandes anbelangt. Von entscheidender Bedeutung ist aber, daß das

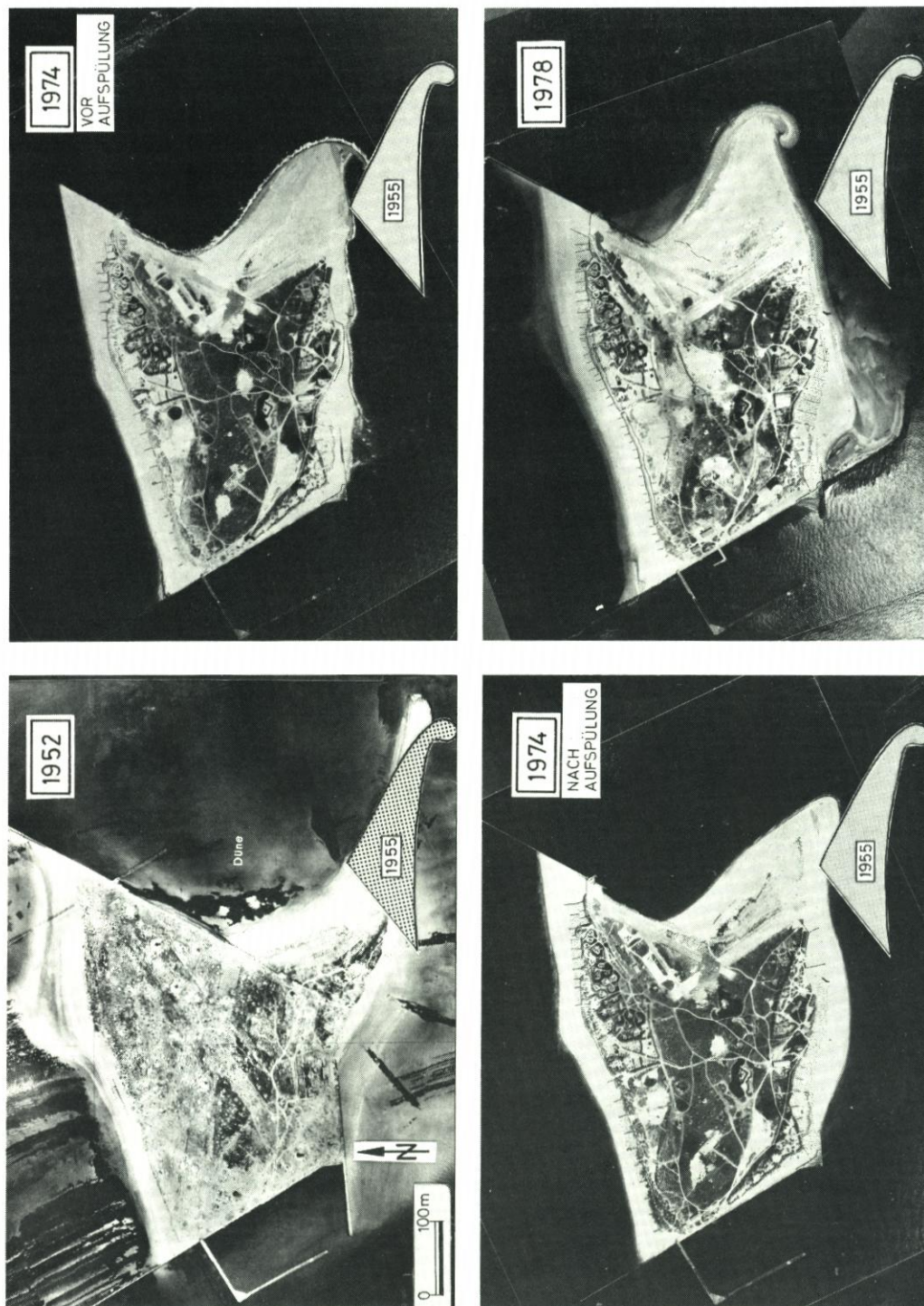


Abb. 10. Lage der Aade in den Jahren 1952, 1974 (vor und nach der Aufspülung) und 1978 im Vergleich zu dem Zustand von 1955

Südende der Landebahn bereits seit 1979 (beginnende Schäden durch Unterspülung des Landebahnkopfes) in die unmittelbare Nähe der MThw-Linie gerückt ist und damit bereits bei nur geringfügig erhöhten Wasserständen in der Art eines Bühnenkopfes wirkt. Seit dem Frühjahr 1983, wo zum Schutz des Südendes der Landebahn in deren Verlängerung eine etwa 60 m lange Tetrapodenbuhne errichtet wurde, gilt dieses natürlich um so mehr. Auf diese Veränderungen wird noch bei der speziellen Behandlung der Entwicklung des Südstrandes

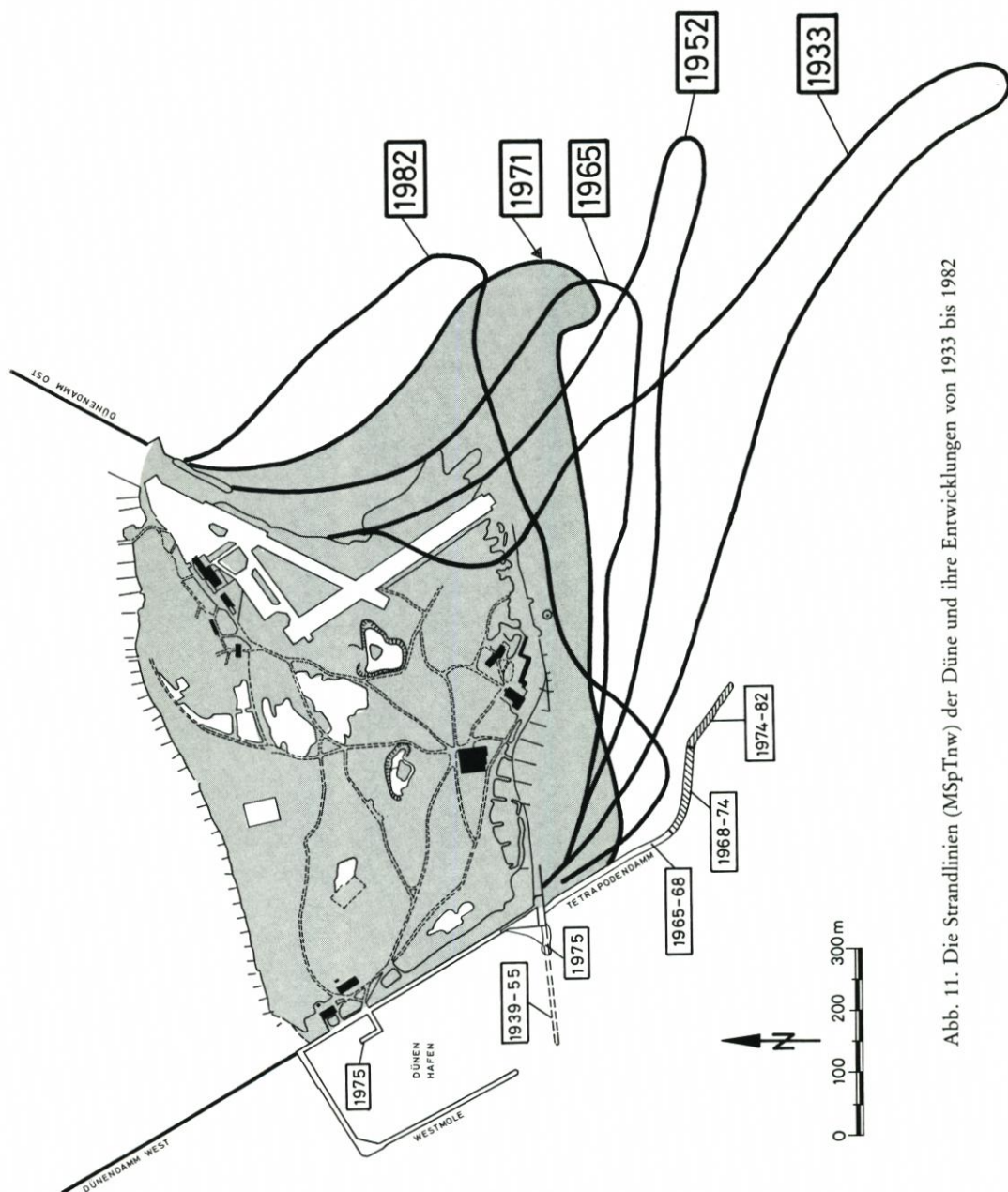


Abb. 11. Die Strandlinien (MSpTnw) der Düne und ihre Entwicklungen von 1933 bis 1982

eingegangen werden, ebenso auf die Folgen für die zukünftig zu erwartenden Veränderungen dieses Strandbereiches.

Der Strandrückgang ist auch in der Mitte des Südstrandes deutlich; der Leuchtturm befindet sich 1982 wieder nahe der MThw-Linie, das Unterfeuer ungefähr 100 m von der Niedrigwasserlinie entfernt.

Die Gesamtentwicklung der Düne von 1952 bis 1978 kann auch aus Luftbildern ersehen werden. So sind auf Abb. 10 die Zustände von 1952, 1974 (vor der Aufspülung), 1974 (nach der Aufspülung) und der von 1978 einander gegenübergestellt, wobei die Lage der Aade im Jahre 1955 zum Vergleich in alle Luftbilder eingetragen wurde.

Die Entwicklung der Düne von 1952 bis 1982 kann für die einzelnen Strandbereiche wie folgt zusammengefaßt werden:

Südstrand:

- ständige Verschwenkung der Strandlinien von einer südöstlichen (1952) in eine nach Nordosten neigende Richtung (1982)
- ständige Verkürzung und Abflachung der Aade bei stetiger Verlagerung nach Norden
- Dünenabbrüche bei Sturmfluten als Folge der Strandverlagerungen

Oststrand:

- ständige Verbreiterung durch Anwachs in nordöstlicher Richtung
- auffallende Richtungsstabilität der Strandlinie in Richtung Nordwest-Südost

Nordstrand:

- weitgehende Lagestabilität der Strandlinien
- Dünenabbrüche nur bei Sturmfluten

Westseite:

- Uferlinie durch Bauwerke festgelegt, Veränderungen nur durch künstliche Eingriffe

Die Besonderheiten der Entwicklungen dieser einzelnen Strand- bzw. Uferabschnitte werden noch im einzelnen behandelt werden. Als abschließende Übersicht sind auf Abb. 11 noch einmal die Umriss der Düne auf der MSpTnw-Linie für den Zeitraum von 1933 bis 1982 mit kennzeichnenden Zwischenzuständen (von 1952, 1965 und 1971) einander überlagert worden. Deutlich ist hieraus zu erkennen, daß mit dem Abbruch am Südstrand der Anwachs am Oststrand einhergeht. Wie eingehende Vermessungen und Auswertungen der *Bundesanstalt für Wasserbau* (ROHDE u. FAHSE, 1972) gezeigt haben, sind die Flächenverluste am Südstrand den Flächengewinnen am Oststrand ungefähr gleich.

1.5 Der Zustand von 1982

Der Zustand der Düne im Jahre 1982 ist keinesfalls als Endzustand der beschriebenen Entwicklung zu werten. Er wird hier nur deshalb besonders hervorgehoben, weil die Aufmaße von 1982 als Ausgangspunkt für zukünftige Planungen anzusehen sind.

Für den Südstrand stellt diese Bestandsaufnahme allerdings einen Zeitpunkt dar, in dem die bisherige Entwicklung durch das Eintreten neuer Umstände verändert wird. Dieses wird dadurch bewirkt, daß, wie bereits erwähnt, die Hochwasserlinie inzwischen den Kopf der Landebahn erreicht hat. Zwar war bereits bei früheren Sturmfluten (besonders 1979 und 1981, als auch entsprechende Schäden eintraten) das südliche Ende der Landebahn von dem Wellenangriff erfaßt worden, im täglichen Tidegeschehen trat die Landebahn aber noch nicht in Erscheinung. Dieses ist aber etwa seit 1982 der Fall.

Abb. 12 zeigt eine Luftaufnahme der Düne vom Sommer 1982, Abb. 13 das Ergebnis einer umfassenden Vermessung und Peilung der Düne und des vorgelagerten Seegrundes, die

ebenfalls im August 1982 vorgenommen wurden. Aus beiden Abbildungen geht hervor, daß der Kopf der Landebahn im Begriff ist, wie ein breiter Bühnenkopf in das Strandgeschehen einzugreifen, wie es auch deutlich aus den Höhenlinien auf Abb. 13 zu ersehen ist.

Die Folgen waren zunächst am Landebahnkopf selbst zu merken. Die Schäden von 1979 und 1981 wurden bereits erwähnt, sie wurden jeweils lokal behoben. Bereits 1982 war jedoch zu erkennen, daß eine nur örtliche Verteidigung des Landebahnkopfes gegen die mit dem Strandrückgang immer mehr zunehmende Kraft der Wellen auf längere Sicht keine Lösung sein konnte. Dies führte als erste Sofortmaßnahme zum Bau einer rd. 60 m langen Tetrapodenbühne in Verlängerung der Landebahn in den Jahren 1982 und 1983.

Durch diese Maßnahme ist aber die bereits bestehende Störung in der Strandentwicklung drastisch vergrößert worden. Zu diesem Zeitpunkt wurde deutlich, daß weitere Maßnahmen nur von einem Konzept ausgehen können, das sowohl das Problem der Landebahn als auch die Probleme der weiteren Entwicklung des Südstrandes gleichermaßen berücksichtigt.

2. Die Düne in ihrer Wechselwirkung mit den angreifenden Kräften

2.1 Tide und tideerzeugte Strömungen

Der Pegel Helgoland, der noch nicht geodätisch an das Festland angeschlossen ist und der daher einen eigenen Bezugshorizont hat (dessen Pegelnulld als HN - 5,0 m etwa NN - 4,70 m entspricht), weist für die Jahresreihe 1971/1980 folgende Hauptwerte auf (nach: DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, 1981):

$$M_{SpTnw} = HN - 1,75 \text{ m}$$

$$M_{Tnw} = HN - 1,57 \text{ m}$$

$$M_{Thw} = HN + 0,78 \text{ m}$$

$$M_{SpThw} = HN + 0,87 \text{ m}$$

Der mittlere Tidehub beträgt damit 2,35 m. Es ist weiter zu ersehen, daß die Unterschiede von M_{SpTnw} und M_{Tnw} bzw. M_{SpThw} und M_{Thw} nur gering sind, so daß bei der Auftragung von Tiefenlinien diese Unterschiede meist von untergeordneter Bedeutung bleiben.

Die höchste bisher gemessene Sturmflut war die vom 16. 2. 1962, die am Pegel Helgoland einen Wasserstand von HN + 3,60 m erzeugte. Es folgen die Januarsturmfluten 1976 mit HN + 3,44 m (21. 1. 1976) und HN + 3,40 m (3. 1. 1976); auf weitere Sturmfluten wird noch in einem besonderen Abschnitt (2.3) eingegangen.

Die vorherrschenden Tideströmungen verlaufen zwischen der Hauptinsel und der Düne (Nord- und Südreede) in südöstlicher Richtung als Flutstrom und in nordwestlicher Richtung als Ebbstrom, wobei der Flutstrom stärker als der Ebbstrom ist. Dauerstrommessungen, die 1956 von der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt wurden, ergaben maximale Flutstromgeschwindigkeiten von 0,83 m/s und maximale Ebbstromgeschwindigkeiten von 0,74 m/s; die mittleren Werte liegen entsprechend niedriger.

Diese Strömungsgeschwindigkeiten reichen aus, um eine Sandbewegung auszulösen, deren resultierende Richtung entsprechend der größeren Flutstromgeschwindigkeit nach Südosten gerichtet ist. Diese Sandbewegung ist schon von BAHR (1939) erwähnt worden; sie ist für die Düne vor den Marinebauten des Zweiten Weltkrieges von ungleich größerer Bedeutung gewesen als danach. Die Entwicklung der Düne nach BAHR (vgl. Abb. 4) zeigt deutlich eine Angleichung der Längsachse und der Uferlinien an die vorherrschenden Strömungsrichtungen.



Abb. 12. Luftbild der Düne Helgoland vom Sommer 1982

Es ist aber nicht zulässig, einen stetigen Sandstrom durch die Reeden anzunehmen. Abgesehen davon, daß die genaue Herkunft des Sandes aus den nordwestlichen Klippenfeldern noch nicht geklärt ist, weisen diese Bereiche durch die steilfallenden Schichtungen und die dadurch bewirkten Systeme von Graten und Rinnen in meist nordwestlicher Richtung (vgl. Abb. 1) Besonderheiten dadurch auf, daß sich bei normalen Wetterverhältnissen die beweglichen Feststoffe in den Rinnen sammeln, in denen sich dann ein Gemisch aus Geröll (oft mit Fossilien), rezentem Molluskenschill sowie aus Sand und Kies befindet. Diese Rinnen wirken bei normalen Strömungsverhältnissen wie Sedimentfallen. Hinzu kommt, daß sich auf dem Felsuntergrund ein z. T. reicher Bewuchs, z. B. in Form von Tangfeldern, befindet, der ebenfalls Ablagerungen begünstigt. Zu einem wesentlichen Sedimenttransport kann es nur dann kommen, wenn sich den normalen Tidenströmungen die Orbitalströmungen höherer Wellen überlagern; begünstigt durch die Richtung der Rinnen, ist dieses besonders bei Wellen aus Nordwest der Fall. So wird vorwiegend bei Starkwind- und Sturmweatherlagen aus Nordwest das Sediment aus den Klippenfeldern ausgetragen und kann dann bei Flutstrom in den Bereich der Düne gelangen. Quantitative Untersuchungen über diesen Feststofftransport sind bisher noch nicht durchgeführt worden und dürften auch sehr schwierig sein.

Durch die Bauten der Kriegsmarine vor und während des Zweiten Weltkrieges sind die Tideverhältnisse einschneidend verändert worden. Trotz des sternförmigen Buhnsystems (Abb. 4) ist anzunehmen, daß vorher der Sedimentstrom – wenn auch in unterschiedlicher Stärke – zu beiden Seiten der Düne deren Ufern folgte. Untersuchungen über die Geröllwanderungen von VOELCKER (1936) sprechen dafür. Durch die Dünendämme West und Ost wurde aber der Nordstrand den Tidenströmungen weitgehend entzogen. Die Entwicklung des Oststrandes (vgl. Abb. 8 und 9) zeigt, daß von den Tidenströmungen hier nur noch der Ebbstrom wirksam ist. Durch die Süd- und Nordreede können zwar noch Flut- und Ebbstrom weiterhin fließen, doch wurde der Durchflußquerschnitt durch den Bau des

Dünenhafens eingengt. Von weitaus größerer Bedeutung für den Sedimenttransport ist aber die Tatsache, daß durch den Dünenhafen der mit dem Flutstrom nach Südosten treibende Sedimentstrom in tieferes Wasser abgelenkt wird und damit der Düne weitgehend verlorengeht. Dies führte nach 1952 zu dem Plan, den Dünenhafen gänzlich abzureißen (vgl. Sonderentwurf Nr. 13 vom 25. 3. 1954 der Hafenbauabteilung Helgoland des WSA Tönning).

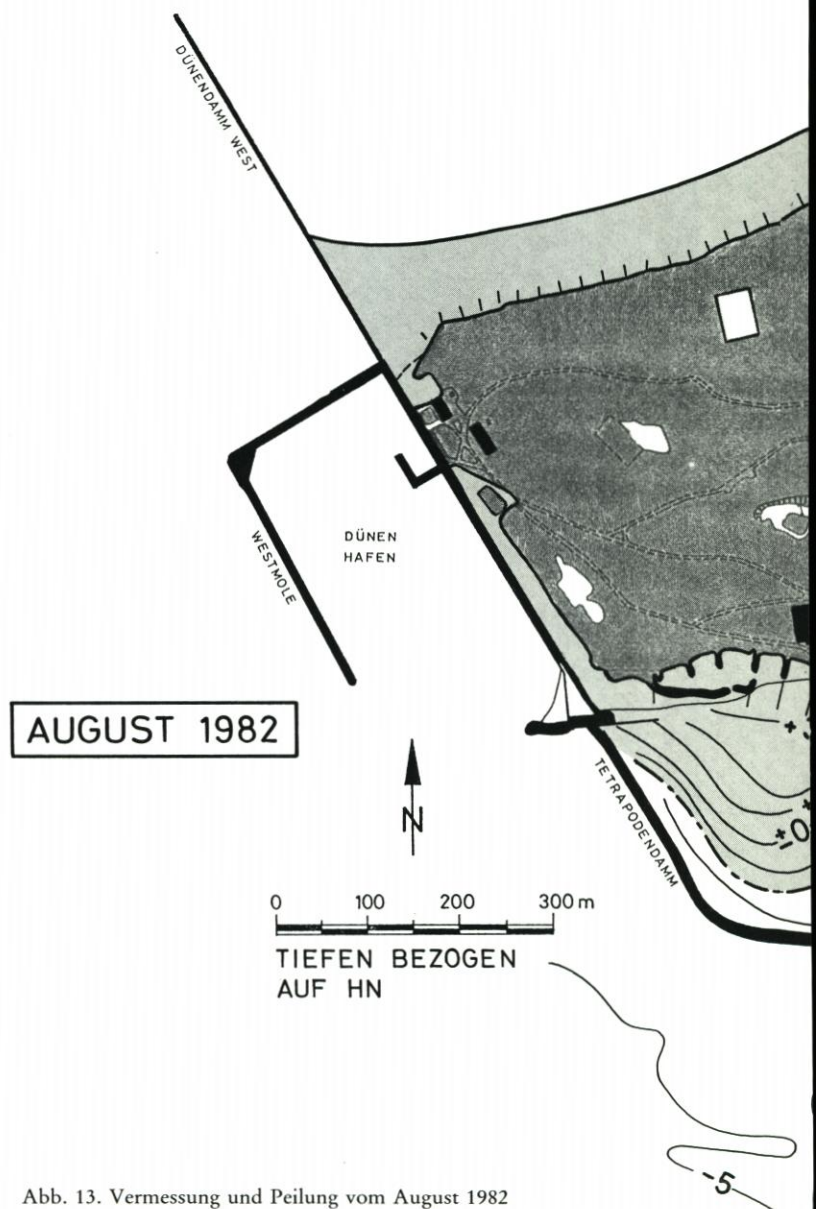


Abb. 13. Vermessung und Peilung vom August 1982

Es wurde aber anschließend nur die Südmole abgebrochen, wodurch jedoch die Tideverhältnisse nicht entscheidend verändert wurden.

Daß 1952 noch ein gewisser Sandstrom aus der Südreede in südöstlicher Richtung zum Aadebrunn vor dem Südstrand vorhanden war, zeigen die Großriffelfelder auf Abb. 14 (Ausschnitt aus Abb. 6). Nach Entfernung der Südmole traten dann auch Sandeintreibungen



im Dünenhafen auf, wie es aus einer Luftaufnahme aus dem Jahre 1963 zu erkennen ist (Abb. 15). Hier sind südlich des Dünenhafens langgestreckte Sandablagerungen zu erkennen, die bei Ebbstrom und bei geeigneten Wellenangriffsrichtungen dann teilweise in den Hafen gelangen.

Ob und in welchem Maße der durch die Reede schubweise auftretende Sedimenttransport auch über den Aadebrunn auf den Südstrand gelangt ist, kann nachträglich nicht mehr festgestellt werden. Die Entwicklung des Südstrandes nach 1952 läßt aber erkennen, daß es sich nicht um Beträge gehandelt haben kann, die eine wirksame Ernährung dieses Strandgebietes gewährleisten konnten. Deshalb wurde der Bau der Tetrapodenbuhne (ab 1965, s. Abb. 11) begonnen. Durch diese Buhne wurde natürlich eine mögliche Sandzufuhr aus der Südreede noch weitgehender unterbunden.

Die Tideströmungen vor dem Südstrand sind komplizierter als die an anderen Strandabschnitten. Messungen des WSA Tönning ergaben Strömungsgeschwindigkeiten bis 0,6 m/s (nach ROHDE u. FAHSE, 1973). Dieses wurde durch neuere Messungen von PRACK (1982)

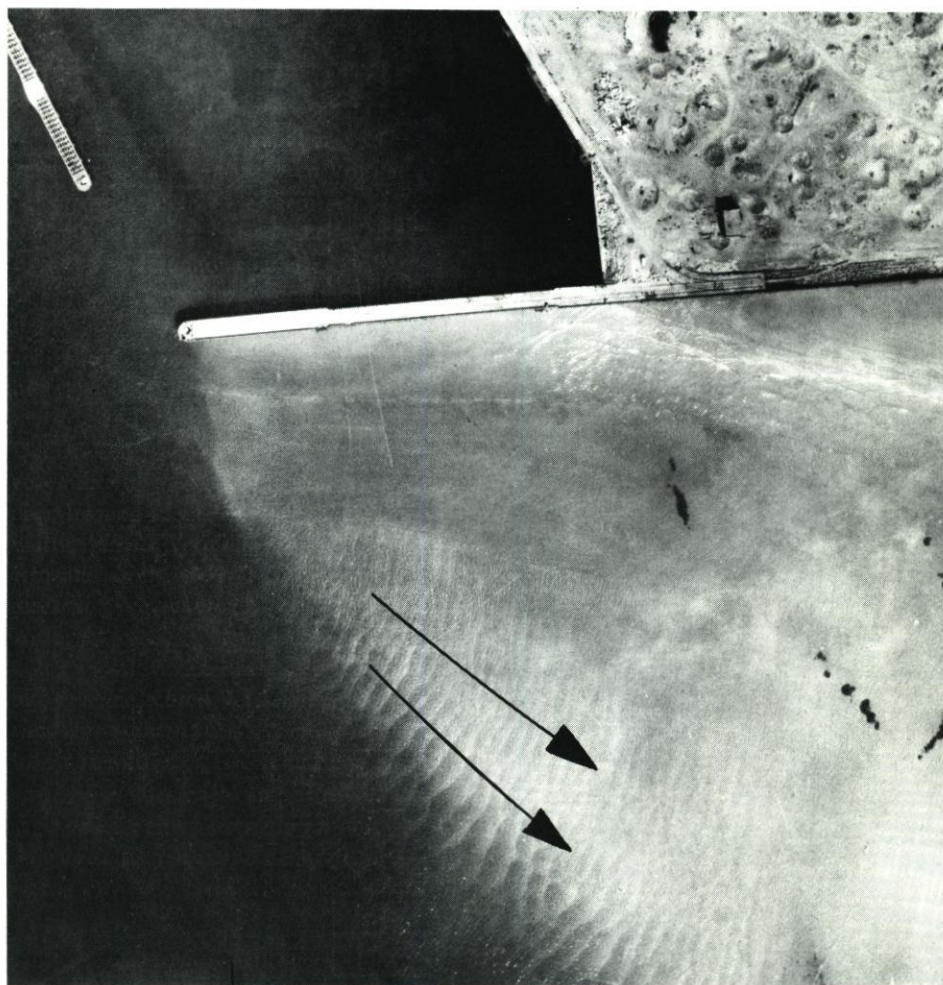


Abb. 14. Sandwanderung in Großriffeln südlich der Südmoles des Binnenhafens

bestätigt, die maximale Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten von 0,65 m/s erbrachten. Wichtig ist dabei das Ergebnis, daß sowohl Flut- als auch Ebbstrom am Südstrand in westlicher Richtung verlaufen, was durch eine großräumige Walzenströmung bei Flutstrom erklärt wird.

2.2 Wellen und wellenerzeugte Strömungen

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, liegt die Düne Helgoland bei den vorherrschenden Starkwindlagen aus westlichen Richtungen im Lee der Hauptinsel und ihrer künstlichen Fortsetzungen im Norden (Nordmole) und Süden (Hafenanlagen). Dennoch wird auch bei diesen Windlagen die Düne von Wellen angegriffen, die durch Diffraktion (Wellenbeugung in kreisförmigen Bahnen um ein Hindernis) um die Hauptinsel gelangen und auf ansteigendem Seegrund außerdem noch der Refraktion (Wellenbeugung durch abnehmende Wassertiefe) unterworfen sind. Bei nordwestlichen Winden wird dagegen der Nordstrand unmittelbar vom anlaufenden Seegang getroffen. Bei dieser Windlage verläuft auch ein beachtlicher Seegang durch die Nord- und Südreede und gelangt danach durch Diffraktion wieder an den Südstrand der Düne, so daß sich komplizierte Überlagerungsbilder ergeben können. Wo auf den Klippenfeldern die Wassertiefen so gering werden, daß sie in die Größenordnung der Wellenhöhen gelangen, treten außerdem noch Brandungszonen auf.

Diffraktionen und Refraktionen lassen sich zwar mit den modernen Hilfsmitteln der heutigen Elektronenrechner durchaus berechnen, doch ist gerade der Seegrund um Helgoland denkbar schlecht für die Anwendung solcher Rechenverfahren geeignet, weil er eine außeror-



Abb. 15. Verlandung des Zufahrtbereiches zum Dünenhafen im Jahre 1963 (Foto: Deutsche Luftbild GmbH, Hamburg)

dentlich reichgegliederte Morphologie aus Rinnen und Graten aufweist und daher für die Eingabe der Randbedingungen erhebliche Programmierarbeit und Speicherkapazität verlangt. Die bekannten graphischen Verfahren müssen dagegen mit vereinfachenden Annahmen auskommen.

Die Anwendung dieser Verfahren liefert aber schon für den Südstrand der Düne ein Ergebnis, das auch aus Beobachtungen bestätigt wird; es wird nämlich bei allen ankommenden Wellen aus Südwest bis Nordwest der Seegang im Süden der Hauptinsel beim Durchlaufen der Südreede durch Diffraktionen derart eingebeugt, daß seine Anlaufrichtung auf den Südstrand immer nahezu Südwest ist. Ähnliches gilt für den Seegang, der aus der Nordreede bei Nordwestwind an die Südseite der Düne gelangt. Im unmittelbaren Bereich der Tetrapodenbühne wird zwar durch weitere Diffraktionen der Seegang so eingebeugt, daß er dort nahezu senkrecht auf den Strand trifft, die Wirksamkeit der bestehenden Bühne ist aber, wie noch gezeigt wird, beschränkt und läßt bei höheren Wasserständen schnell nach.

Dieser sogenannte „Gleichrichtereffekt“ wird aus der Luftaufnahme auf Abb. 16 deutlich, die während einer Sturmflut am 19. 11. 1982 bei einer Windrichtung aus West aufgenommen wurde. Auf dem unteren Foto sind die Wellenkämme nachgezeichnet, aus denen die Wellenangriffsrichtung aus Südwest für den größten Teil des Südstrandes, besonders für den Ostteil, hervorgeht. Die anschließend gewonnene Aufnahme auf Abb. 17 zeigt, wie im weiteren Verlauf der Wellenbewegung durch nachfolgende Diffraktionen die Wellen kreisförmig die Aade umlaufen und dann in nördliche Richtung abgelenkt werden.

Wenn Wellen mit schräger Angriffsrichtung auf einen Strand treffen, so entsteht in der Zone zwischen dem Brechpunkt und dem Wellenauflauf auf dem Strand in der Brandungszone die Brandungsströmung, die von der küstenparallelen Komponente der Wellenbewegung



Abb. 16. Wellenanlauf am Südstrand bei westlichen Winden und einem Wasserstand von MThw + 1,0 m am 19. 11. 1982 (Foto: Singer, Helgoland)

erzeugt wird. In der Brandungszone wird der größte Teil der Wellenenergie in Turbulenz und Wärme umgesetzt (vgl. FÜHRBÖTER, 1974). Hier findet auch der größte Sedimenttransport statt, der sowohl senkrecht zum Strand als auch strandparallel auftritt. Während der Materialtransport senkrecht zum Strand nur eine örtliche Strandumlagerung bewirkt, ist der strandparallele Transport die Ursache für ständige Erosionen, wenn kein genügender Materialnachschub vorhanden ist. Die größte Intensität des strandparallelen Transportes wird erreicht, wenn die Wellenangriffsrichtung mit der Brecherlinie einen Winkel von etwa 40° bildet (vgl. DETTE, 1974). Gerade um diesen Winkel aber schwanken die Wellenangriffsrichtungen am Südstrand der Düne. Die Verhältnisse sind hier im Laufe der Entwicklung von 1952 bis 1982 immer ungünstiger geworden, denn durch das Umschwenken der Strandrichtungen im Bereich der Aade (vgl. Abb. 11) ist bei sonst gleichen Wellenverhältnissen der küstenparallele Transport immer intensiver geworden. Hierauf wiesen bereits ROHDE und FAHSE (1972) hin.

Zwar kann ein Teil des verfrachteten Materiales um die Aade herum (vgl. Abb. 17) an den Oststrand gelangen, der größte Teil wird aber durch die Brandungsströmung von der Aade weg in die Gebiete mit größerer Wassertiefe östlich der Düne geführt und geht damit dem Sandhaushalt der Düne verloren. Dies ist besonders bei Sturmfluten der Fall. Nach der Sturmflut vom 24. 11. 1981 wurden östlich der Düne in Wassertiefen über 10 m Großriffel aufgenommen, bei deren Untersuchung festgestellt werden konnte, daß sie aus den Sandverlusten der Düne bei dieser Sturmflut aufgebaut worden waren (ZIEGLER, 1983). Aus den Sandfeldern östlich der Düne wurden übrigens auch die Sandmengen für die Aufspülungen nach 1938 entnommen (SEIFERT, 1953).

Den wellenerzeugten Strömungen sind außerdem die Tideströmungen überlagert. Dabei wirken die Brandungsströmungen nur im Strandbereich unmittelbar unter dem jeweiligen



Abb. 17. Wellenrefraktion und -diffraktion am Südstrand (mit Tetrapodendamm im Hintergrund) und an der Aade am 19. 11. 1982 (Foto: Singer, Helgoland)

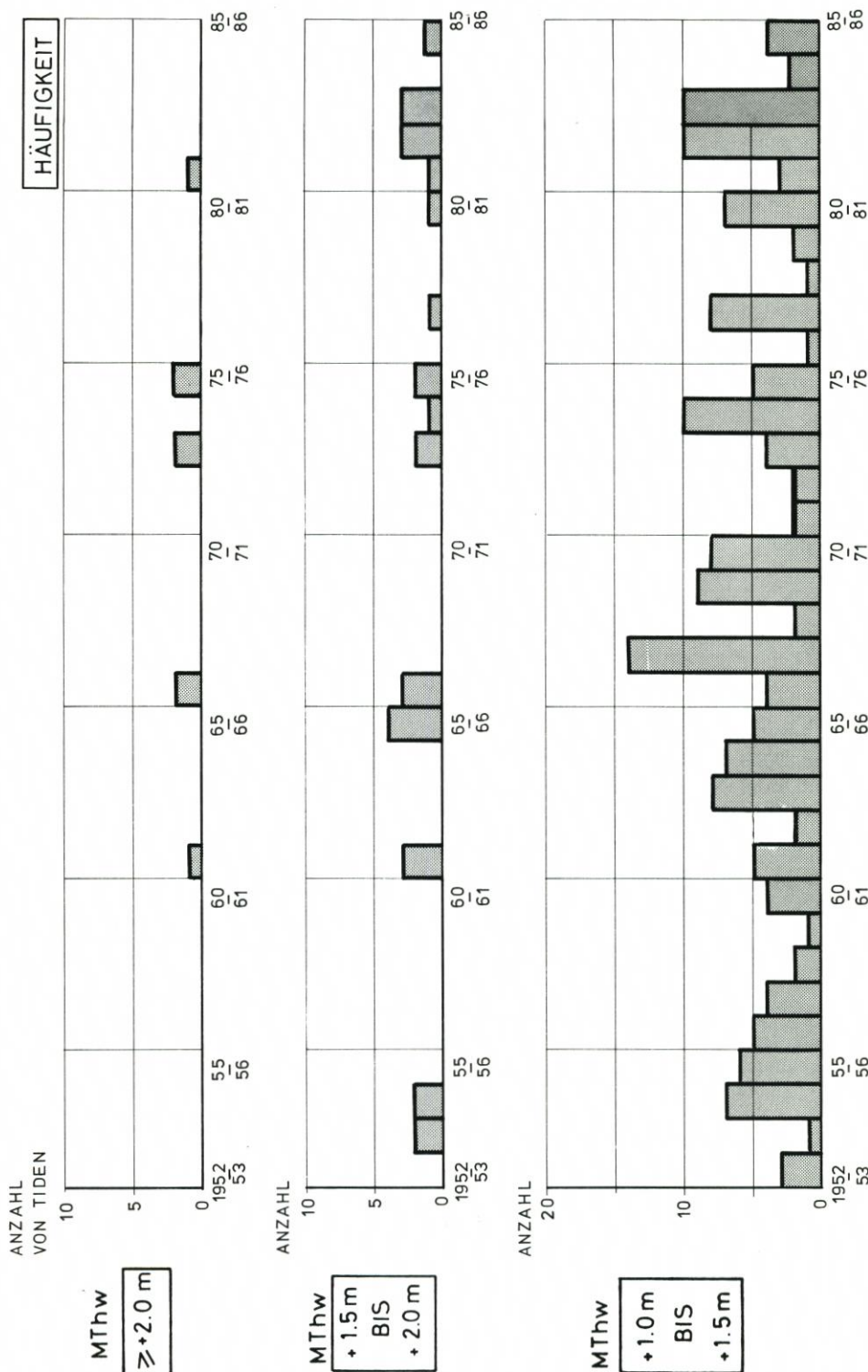


Abb. 18. Jährliche Anzahl (Häufigkeit) von Sturmfluten am Pegel Helgoland in verschiedenen Höhenbereichen im Zeitraum 1952/53 bis 1985/86

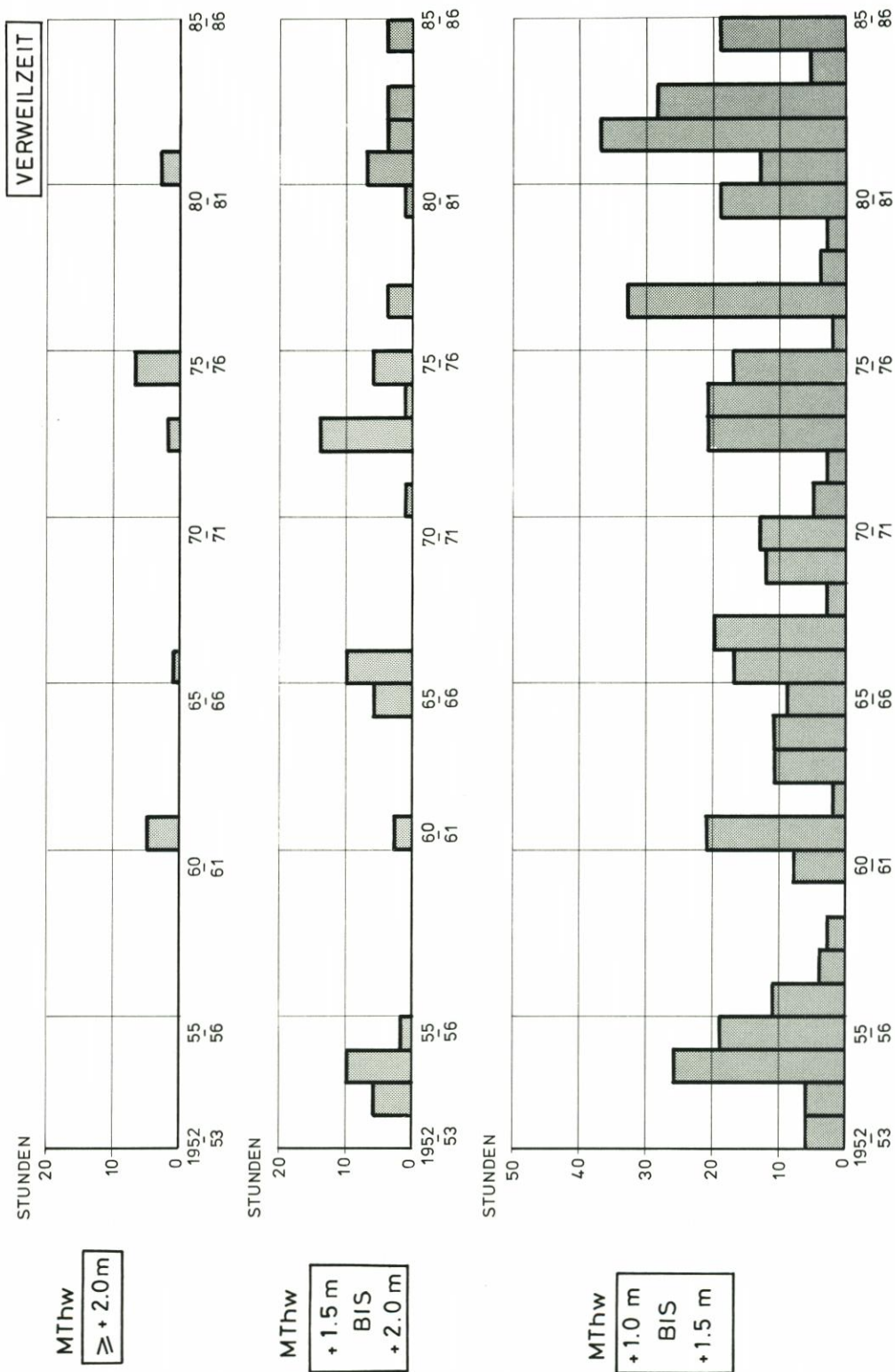


Abb. 19. Jährliche Verweilzeiten (in Stunden) von Sturmflurwasserständen am Pegel Helgoland in verschiedenen Höhenbereichen im Zeitraum 1952/53 bis 1985/86

Ruhewasserspiegel, während die Tideströmungen dort unbedeutend sind und erst mit größerer Tiefe zunehmen. Dort sind auch noch die Orbitalströmungen der Wellen als periodische Schwankungen den Tideströmungen überlagert; bei Wassertiefen über 10 m werden aber die Einflüsse dieser Orbitalgeschwindigkeiten auf den Sedimenttransport vernachlässigbar klein.

Die Bedeutung der wellenerzeugten Strömungen wird bei der Beschreibung der einzelnen Strandabschnitte noch weiter behandelt werden. Auf jeden Fall nehmen sie mit dem Seegang zu und erreichen ihre größten Werte bei den Sturmfluten, weil sie nicht nur den höher gelegenen Strand, sondern auch die Hohe Düne erreichen und dann die bekannten Abbrüche erzeugen.

2.3 Sturmfluten

Als man 1962 die Sturmflut vom 16./17. Februar als „Jahrhundertsturmflut“ für die deutsche Nordseeküste bezeichnete, war noch nicht vorauszusehen, daß sie nur einen Auftakt zu einer Reihe von meteorologischen Extremereignissen bilden würde, die bis in die Gegenwart anhält. Dazu gehört der „Adolph-Berm-pohl-Orkan“ von 1967 mit mittleren Windge-

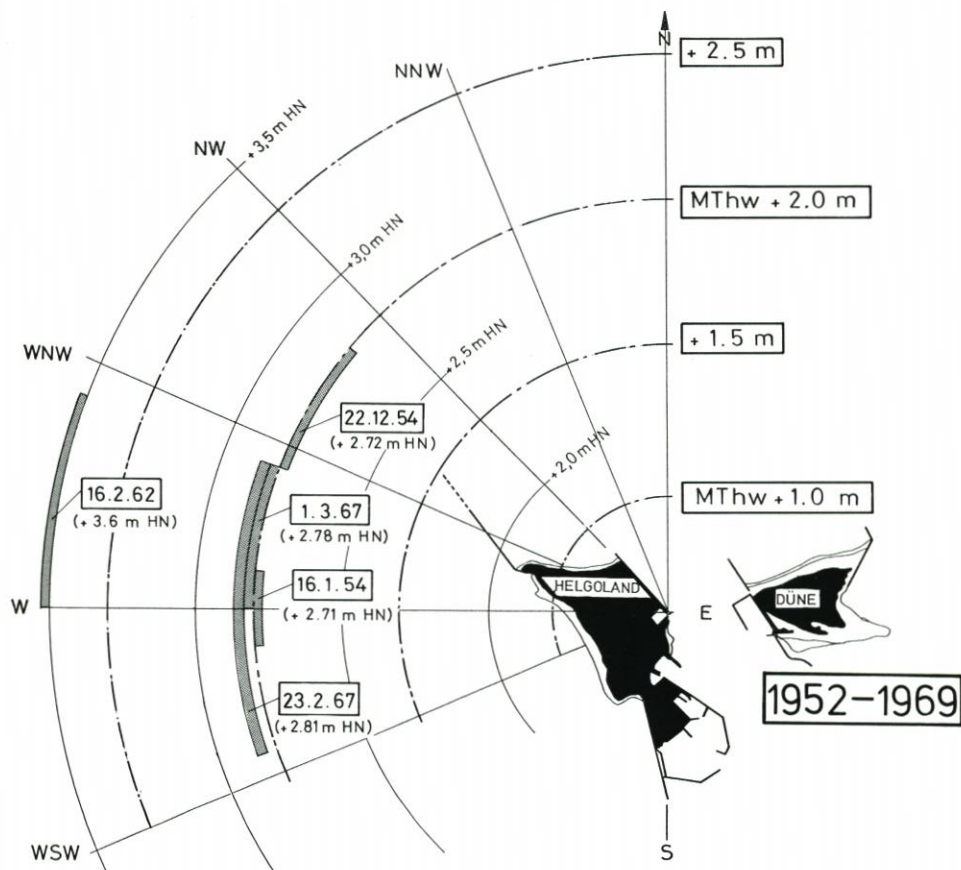


Abb. 20. Windrichtungen der letzten 10 Stunden vor dem Scheitelwasserstand und Scheitelwerte der höchsten Sturmfluten im Zeitraum 1952 bis 1969

schwindigkeiten von 37 m/s über fünf Stunden auf der offenen Nordsee, dessen Seegang den Seenotkreuzer, dessen Namen dieser Orkan erhielt, zum Durchkern brachte. Es entstand nur deshalb keine Extremsturmflut, weil das Maximum des Windstaus zur Niedrigwasserzeit auftrat. Weiterhin gehören dazu der Orkan vom 11. November 1972, der bei extrem südlicher Zugbahn auf dem Festland Verwüstungen von Nordfrankreich bis Polen anrichtete, die Kette schwerer Sturmfluten im Herbst 1973, die Januarfluten von 1976, die für viele Festlandspegel nochmals höhere Wasserstände als 1962 erbrachten, und die Sturmflut vom 24. 11. 1981, die an den nördlichsten Pegeln Schleswig-Holsteins erneut höhere Wasserstände als 1976 lieferte. Auch der äußerst sturmflutreiche Winter 1982/1983 ist zu erwähnen. Die Häufigkeit extremer Sturmfluten hat also in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen (FÜHRBÖTER, 1976 u. 1979a, sowie JENSEN, 1985), ohne daß dabei vorausgesagt werden kann, wie diese Entwicklung in der Zukunft weitergehen wird. Ferner ist die Veränderung des Säkularanstieges der mittleren Wasserstandsverhältnisse zu beachten; die MThw steigen schneller, während das MTnw eine leicht fallende Tendenz aufweist (FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985, sowie FÜHRBÖTER, 1986).

Für den Pegel Helgoland sind auf Abb. 18 ab 1952 die Häufigkeiten derjenigen Sturmfluten aufgetragen, die die Höhenstufen MThw + 1,0 m bis + 1,5 m sowie von + 1,5 m bis +

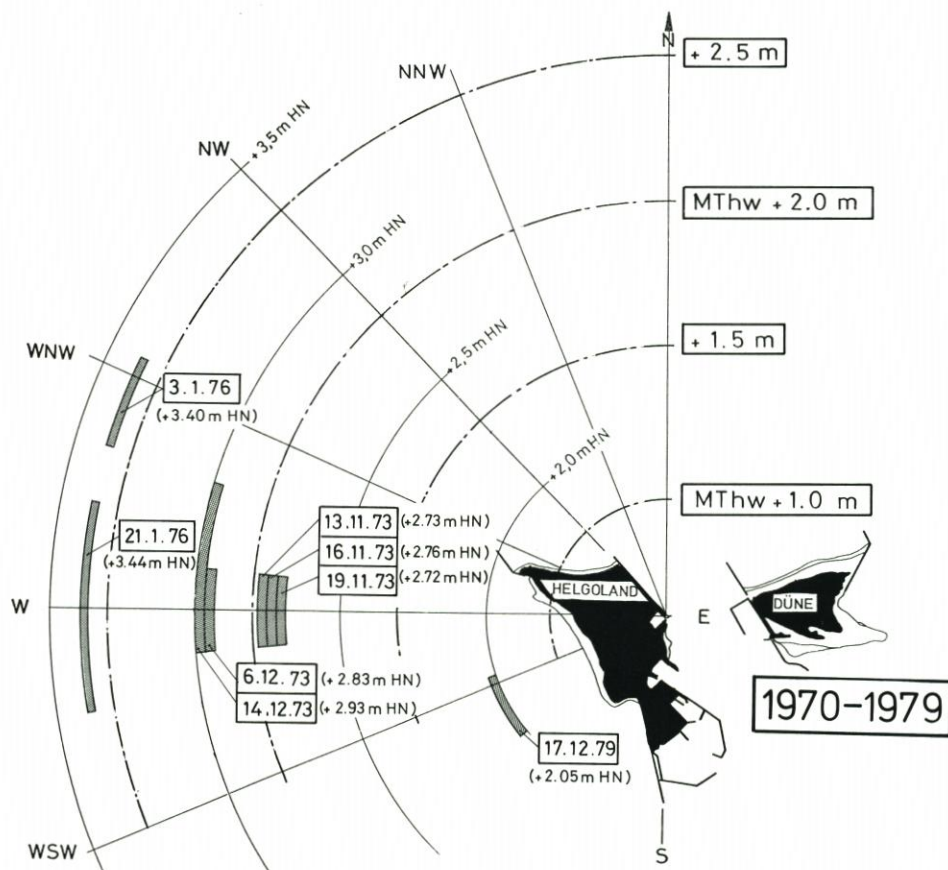


Abb. 21. Windrichtungen der letzten 10 Stunden vor dem Scheitelwasserstand und Scheitelwerte der höchsten Sturmfluten im Zeitraum 1970 bis 1979

2 m und über MThw + 2 m erreichten. Auf Abb. 19 sind zu den genannten Stufenbereichen die entsprechenden Verweilzeiten des Wasserstandes aufgetragen. Dies sind diejenigen Zeiten, in denen sich der Wasserstand zwischen diesen Stufen aufgehalten hat. Es ist nämlich für die Schadenswirkung einer Sturmflut nicht allein die Höhe des Scheitelwasserstandes maßgebend, sondern auch die Zeit, die sich der Wasserstand um diesen Scheitelwert aufgehalten hat (FÜHRBÖTER, 1979b). Beispielsweise hatte die Sturmflut von Februar 1962 eine erheblich höhere Verweilzeit unterhalb des Scheitelwasserstandes (gleiches gilt übrigens auch für die Sturmflut vom 24. 11. 1981) als die Sturmflut vom 3. 1. 1976, bei der sie relativ kurz war.

Die Sturmfluten wurden dabei nicht für die Kalenderjahre, sondern für Jahreszeiträume um den 1. Januar (Juli bis Juni) ausgewertet. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß Sturmfluten vor allem in den Wintermonaten auftreten und daß daher das Sturmflutgeschehen besser auf die Wintermonate als auf ein Kalenderjahr bezogen werden sollte.

Aus Abb. 19 geht beispielsweise hervor, daß die größten Verweilzeiten für Wasserstände über MThw + 2,0 m in den Wintern 1961/1962 und 1975/1976 auftraten, während sie in dem Stufenbereich von MThw + 1,5 m bis + 2,0 m vor allem 1973/1974 am höchsten waren. In dem Stufenbereich von MThw + 1,0 m bis + 1,5 m dagegen treten die Winter 1977/1978 und 1982/1983 besonders hervor. Entsprechend den Verweilzeiten sind auch die Schadenswirkun-

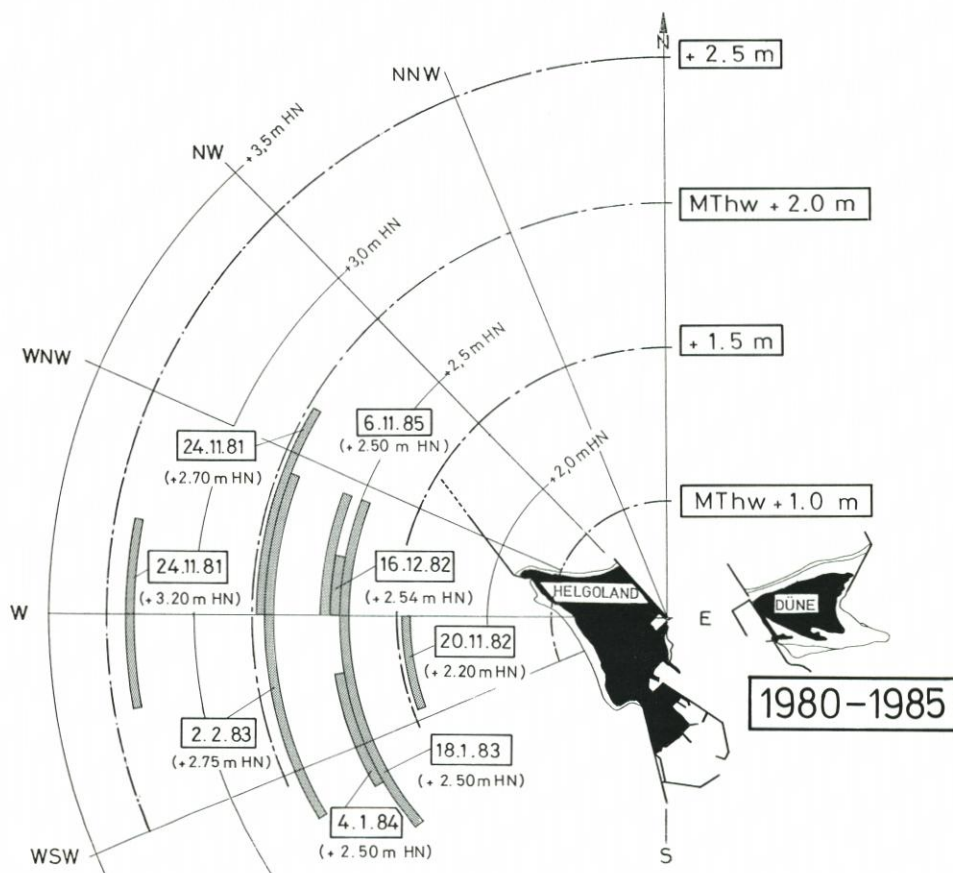


Abb. 22. Windrichtungen der letzten 10 Stunden vor dem Scheitelwasserstand und Scheitelwerte der höchsten Sturmfluten im Zeitraum 1980 bis 1985

gen in den jeweiligen Höhenstufen zu erwarten (FÜHRBÖTER, 1979b). Die hohen Fluten sind dabei besonders an den Dünenabbrüchen beteiligt.

Aus Abb. 18 geht weiterhin hervor, daß nur für die Jahre nach 1954 eine vorübergehende Abnahme der Sturmfluthäufigkeit festzustellen ist. Nach 1962 hält die Häufigkeit der Sturmfluten wieder nahezu unverändert an, was sich insbesondere auch in den Verweilzeiten (Abb. 19) ausdrückt.

Die Sturmflutstatistiken nach Abb. 18 und 19 sind für die Beurteilung der einzelnen Strandentwicklungen von größter Bedeutung. Die Lage der MSpTnw- und MSpThw-Linien wird dabei von einzelnen hohen Sturmfluten nur wenig verändert, während große Verweilzeiten bei niedrigeren Sturmflutwasserständen infolge der damit verbundenen längeren Wirkdauer von Brandungsströmungen weitaus größeren Einfluß auf die Strandlinien haben.

Trotz des beschriebenen „Gleichrichtereffekts“ ist die Hauptwindrichtung bei den einzelnen Sturmfluten nicht unwichtig; gerade an Punkten instabilen Wellenangriffes, wie z. B. am Dünenrestaurant, kann auch die Windrichtung von Bedeutung sein. In den grafischen Darstellungen auf Abb. 20, 21 und 22 sind daher für die höchsten Sturmfluten der Jahre nach 1952 als Kreisbogen diejenigen Windrichtungen aufgetragen, die in den letzten 10 Stunden vor Erreichen des Scheitelwertes der jeweiligen Sturmflut aufgetreten sind (wobei i. a. der Wind von SW nach NW dreht). Damit wird der Seegang besonders in der Zeit vom letzten Niedrigwasser bis zum Sturmflutscheitel erfaßt.

Aus Abb. 20 (für die Jahre 1952 bis 1969) geht hervor, daß hier die vorherrschenden Windrichtungen während der Sturmfluten mit nur einer Ausnahme (23. 2. 1967) zwischen West und Nordwest lagen. Anders ist es dagegen bei den Sturmfluten im Zeitraum von 1970 bis 1979 (Abb. 21); hier kommen die Windrichtungen vorwiegend aus West, wobei bei den Herbststurmfluten 1973 die hohe Konstanz der Windrichtungen aus einem relativ engen Sektor auffällt. Eine Ausnahme machen nur die Sturmflut vom 3. 1. 1976 mit der vorherrschenden Richtung aus NNW und vom 17. 12. 1979, die zwar nicht besonders hoch war, aber eine gegenüber den anderen Sturmfluten stark nach Süden hin abweichende Windrichtung (WSW) mit hoher Konstanz über 10 Stunden aufwies. Es ist daher kein Zufall, daß gerade diese Flut bedeutende Schäden am Südstrand der Düne hinterließ (vgl. Abschnitt 1.5).

Die Sturmfluten der letzten Jahre zeigen stark wechselnde Richtungskomponenten, wobei die südliche Richtung besonders bei den Fluten vom 18. 1. 1983 und vom 4. 1. 1984 überwiegt (Abb. 22).

Nur im Zusammenhang mit der Auswertung von Sturmflutdaten, wie sie auf Abb. 18 bis 22 dargestellt sind, dürfen morphologische Entwicklungen, wie z. B. die der Düne (Abb. 8 und 9), gesehen und gedeutet werden. Die Lagestabilität eines Strandes ist nur eine scheinbare, wenn sie in eine wenig sturmflutaktive Zeit, wie in die z. B. nach 1954, fällt; umgekehrt können in einem sturmflutreichen Winter mehr Veränderungen auftreten als in Jahren davor.

2.4 Strandrückgang und Dünenabbruch

Die Entwicklung eines Dünenstrandes in Abhängigkeit von den angreifenden Kräften ist auf Abb. 23 und 24 in allgemeiner Form schematisch dargestellt.

Abb. 23 zeigt einen Dünenstrand mit der Wasserwechselzone zwischen den Höhen des MSpTnw und MSpThw. Darüber liegt der sog. trockene Strand, der nur bei erhöhten Wasserständen (Wind- und Sturmfluten) vom Wellenaufbau und von Brandungsströmungen erreicht wird. Daran schließt sich der Dünenfuß (bei einem Steilufer: „Kliffuß“) an, dessen Höhenlage an jedem Strand eine kennzeichnende Größe für den Strandzustand im Zusam-

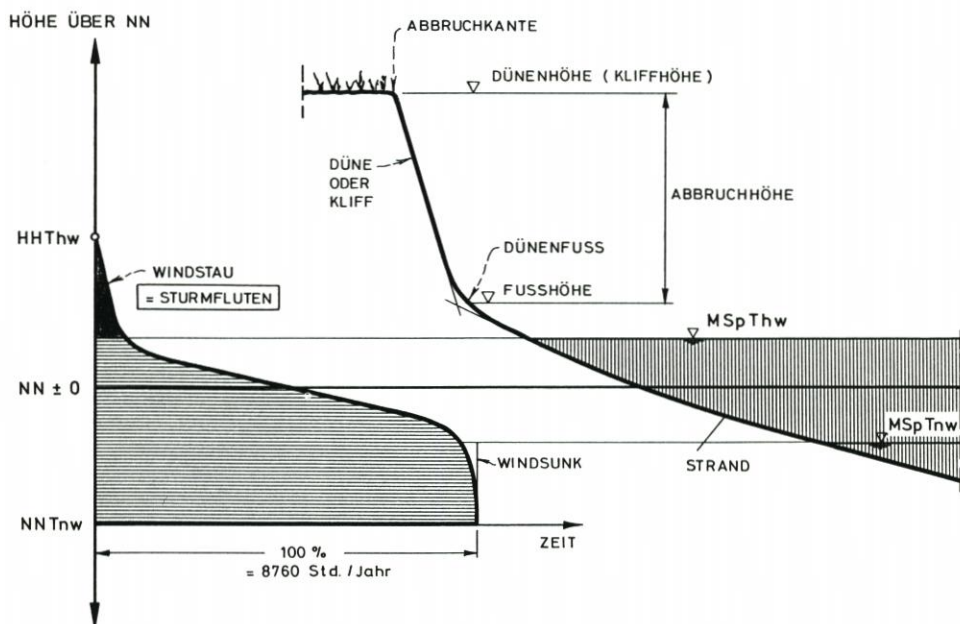


Abb. 23. Beziehungen zwischen Wasserstandsdauerlinie und Strandprofil (als allgemeines Beispiel; schematisch!)

menhang mit dem vorherrschenden Wellenangriff ist. Die Lage des Dünenfußes ist bei Übersandungen durch Windflug (bei Steilufern durch Schlamm- oder Geröllüberlagerung) oft nicht deutlich auszumachen; nach Sturmfluten ist der Dünenfuß aber klar zu erkennen. Schließlich gibt die Abbruchkante (die bei stark gegliederten Dünen oft einen unregelmäßigen Grundriß hat) diejenige Grenze an, bis zu der das Abbruchgeschehen vorgedrungen ist.

Diesem idealisierten Strandprofil ist auf Abb. 23 eine mittlere Wasserstandsdauerlinie gegenübergestellt, die zu den einzelnen Höhenlagen des Strandes angibt, wieviel Stunden im Jahr (oder in % eines größeren Zeitraumes) diese unter dem Ruhewasserspiegel liegen und während dieser Zeit von Wellen und wellenerzeugten Strömungen (Orbital- und Brandungsströmungen) mit ihren entsprechenden Turbulenzen und den damit verbundenen Materialverfrachtungen betroffen werden können. Diese Kurve geht in Annäherung an eine umgedrehte Sinusfunktion von Werten bei 100 % = 8760 Std./Jahr (nur die Zeiten mit Windsunk oder extremen Springtiden sind hier abzuziehen), von der Höhe der MSpTnw-Linie aus, nimmt den Wert 50 % auf der Höhe des Tidehalbwassers (etwa bei $NN \pm 0$ m) an und fällt dann steil ab auf die Werte von wenigen Prozenten auf Höhe der MSpThw-Linie, wo der Strand nur durch Wind- oder Sturmfluten oberhalb dieses Horizontes von den Wellen erreicht wird.

Es hängt jetzt ganz von der Höhenlage des Dünen- oder Kliffußes (und auch von der Breite und Höhe des vorgelagerten Strandes) ab, wann es infolge von Wellenangriff zum Dünenabbruch kommt. Die Wasserstandsdauerlinie (Abb. 23) gibt somit an, in wieviel Stunden innerhalb des betrachteten Zeitraumes dieses der Fall sein kann. Aus der Form der Wasserstandsdauerlinie geht hervor, daß es sich hier nur um Zeitdauern von wenigen Stunden handeln kann. Dieses kann aber für jedes Jahr je nach der Sturmfluthäufigkeit sehr verschieden sein (vgl. Abb. 18 und 19).

In der schematischen Darstellung auf Abb. 24 wird in einer weiteren, allgemein-schematischen Darstellung mit dem Wasserstand HThw (1 Jahr) derjenige Wasserstand einer

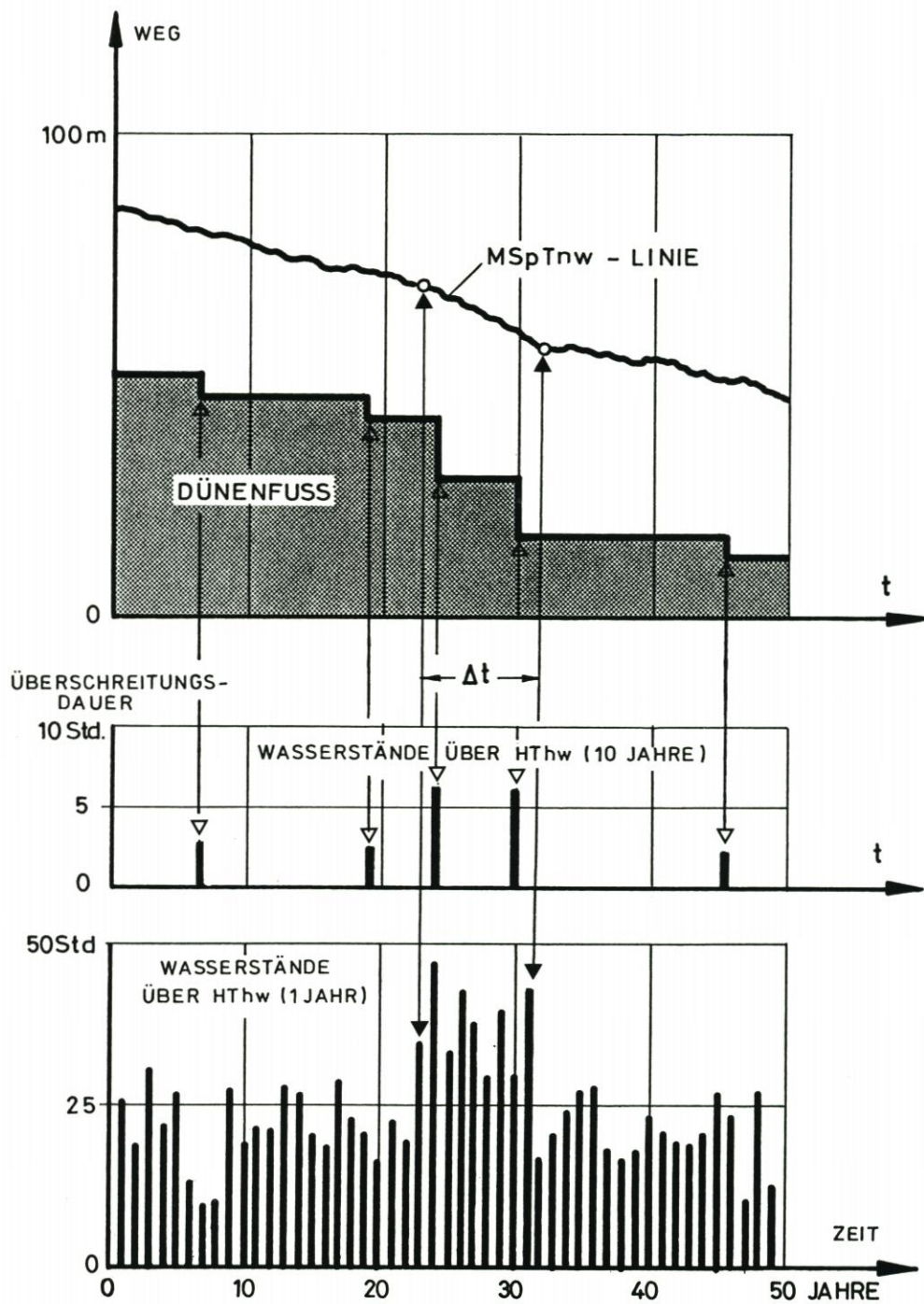


Abb. 24. Rückgang einer Strandlinie (hier: MSpTnw) und Dünenabbruch in ihren Beziehungen zum Sturmflutgeschehen (als allgemeines Beispiel; schematisch!)

Reihe von Jahren bezeichnet, der in jedem dieser Jahre erreicht oder überschritten wird. Die Überschreitungsdauer als diejenige Stundenanzahl je Jahr, während der sich ein Wasserstand infolge von Wind- oder Sturmfluten oberhalb dieses Wasserstandes aufhält, kann hier als ein Maß für die angreifenden Kräfte auf den gesamten Strand gewertet werden.

Weiterhin wird für das schematische Beispiel auf Abb. 24 angenommen, daß hier ein Dünenabbruch nur dann stattfindet, wenn der Ruhewasserspiegel über einen Wert steigt, der – im Mittel gesehen – nur alle 10 Jahre einmal erreicht oder überschritten wird. Dieser Wasserstand wird mit HThw (10 Jahre) bezeichnet. Die Zahl der Stunden, in denen in einem Jahr dieser Wasserstand überschritten wird, kann dann als Maß für die Intensität des Dünenabbruchs angesehen werden.

Auf Abb. 24 ist zusätzlich beispielhaft angegeben, wie Strand und Düne auf das Sturmflutgeschehen eines längeren Zeitraumes reagieren. Die MSPTnw-Linie und ihr Rückgang (Weg) werden dabei stellvertretend für die Entwicklung des Strandes, die landseitige Verlagerung des Dünenfußes für das Maß des Dünenabbruchs angesehen.

Der wichtige Unterschied zwischen dem Strandrückgang und dem Dünenabbruch geht jetzt aus dem Zeit-Weg-Diagramm auf Abb. 24 hervor. Der Rückgang des Strandes folgt dem normalen Wellenklima und vollzieht sich mehr oder weniger kontinuierlich, wobei durchaus in Zeiten einer starken Sturmfluthäufigkeit (so im Zeitabschnitt Δt auf Abb. 24) auch ein größerer Strandrückgang auftreten kann. Der Dünenrückgang vollzieht sich aber nur in den wenigen Stunden, in denen der Wellenangriff den Kliffuß erreicht. Er folgt dann sprunghaft und kann in den wenigen Stunden einer einzigen Sturmflut einen Betrag erreichen (vgl. VELLINGA, 1982), wie ihn die Strandlinien nur in einer Reihe von Jahren zurückgelegt haben. Dies ist eine Folge dessen, daß in den Jahren ohne Extremsturmfluten der Strandrückgang weitergeht, der Kliffuß aber lagebeständig bleibt. Dadurch wird der Strand immer schmaler, so daß die nachfolgende Extremsturmflut einen entsprechend verringerten Widerstand auf dem der Düne vorgelagerten Strand vorfindet.

Die auf Abb. 23 und 24 angegebenen Wasserstandsstufen und Jahresreihen können nicht unmittelbar mit der Düne Helgoland in Verbindung gebracht werden; sie sind nur als eine allgemein-schematische Darstellung zu verstehen und veranschaulichen die Mechanik des Abbruchgeschehens eines Dünenstrandes (und ebenso eines Steilufers).

Ob und in welchem Maße das Abbruchmaterial einer Düne dem vorgelagerten Strand zunächst zugute kommt, ob es ganz oder teilweise schon während der Sturmflut durch die Brandungsströmungen verfrachtet wird, hängt ganz von den örtlichen Gegebenheiten im Zusammenhang mit den angreifenden Wellen ab. Wichtig ist die Kenntnis, daß der Strand von den 705 Tiden eines Jahres geformt und verändert wird, während die Düne dagegen nur über wenige Stunden bei extremen Sturmfluten unmittelbar beansprucht wird.

Es wurde hier (Abb. 24) ein Strand angenommen, der langfristig einer Erosion unterliegt, wie es z. B. auch für die meisten Strandabschnitte des Südstrandes zutrifft. Daß es dennoch unter bestimmten Umständen auch zu Dünenabbrüchen bei stabiler Lage der Strandlinien kommen kann, wird noch am Beispiel des Nordstrandes der Düne gezeigt werden.

3. Die Entwicklung des Südstrandes von 1952 bis 1982

3.1 Morphologische und sedimentologische Verhältnisse

Ergänzend zu Abb. 8 bis 11, auf denen die morphologische Entwicklung des Südstrandes zusammen mit der der gesamten Düne dargestellt ist, sind auf Abb. 25 und 26 kennzeichnende

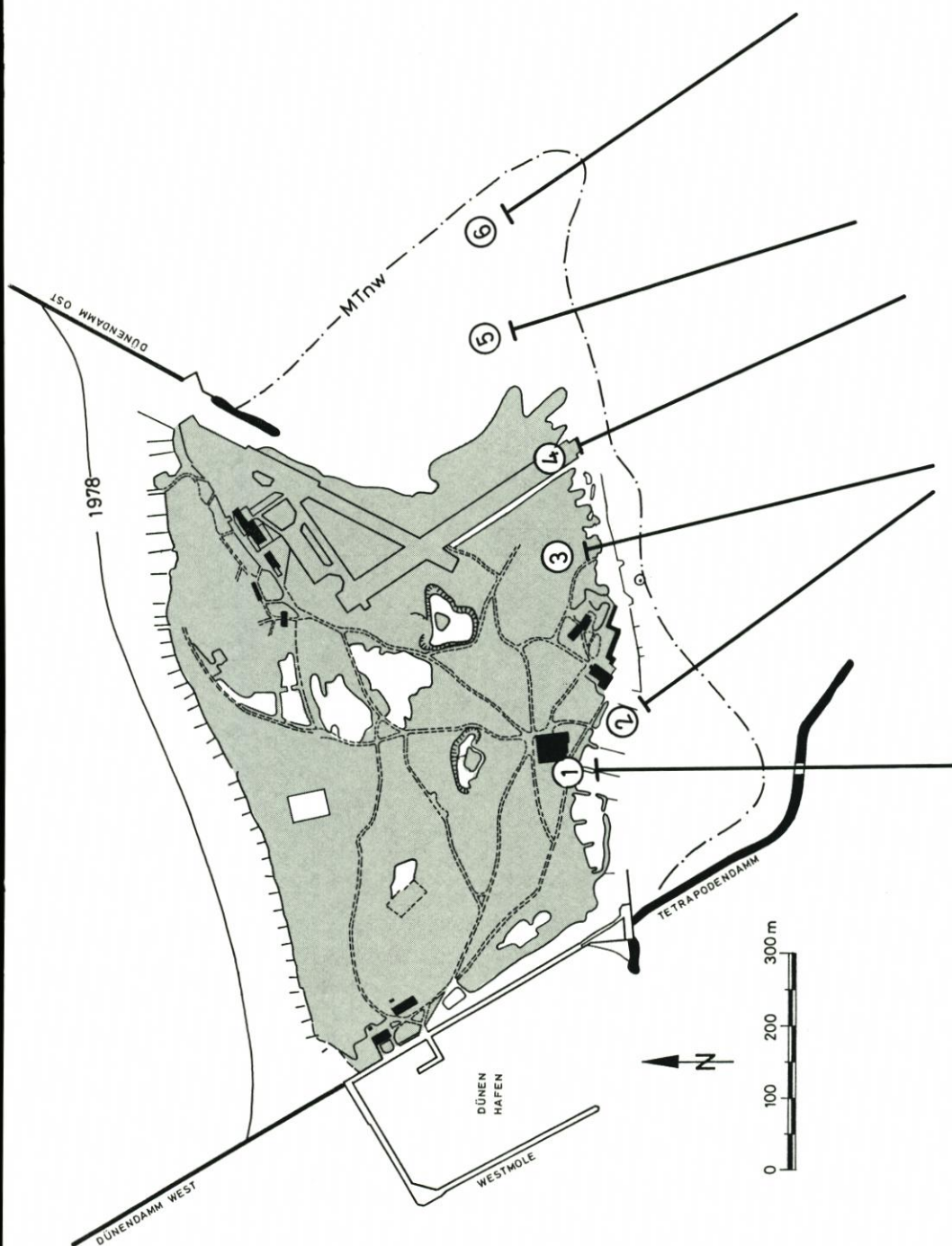


Abb. 25. Lage der Strandquerschnitte am Südstrand (Zustand 1982)

Strandquerschnitte des Zustandes von 1982 (Abb. 13) aufgetragen; Abb. 25 zeigt die Lage dieser Profile, die auf Abb. 26 dargestellt sind. Sie wurden senkrecht zu den jeweiligen Strandlinien gelegt (Abb. 25).

Profil 1 befindet sich im Schutze der Tetrapodenbuhne und weist einen flachen Strand zwischen MTnw und MThw auf; es stellt einen Schnitt durch den höftartigen Strandvorsprung in diesem Bereich dar. Das mehr südöstlich gerichtete Profil 2 unterscheidet sich nur wenig von dem südlich gerichteten Profil 3. Beide zeigen in der Wasserwechselzone bereits steilere Neigungen. Profil 4 am Ende der Landebahn enthält bei ähnlichen Neigungen im oberen Strandbereich eine Berme auf der MTnw-Linie. Zum Osten hin wird der Strand zunehmend steiler (Profil 5), um dann an der Aade unterhalb der MThw-Linie mit einer Böschungsneigung, die mit etwa 1 : 2 nahezu der natürlichen Böschung eines Schüttmaterials entspricht, in das tiefere Wasser abzufallen (Profil 6) (Abb. 25 und 26).

Auf dem Südstrand wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau (ROHDE u. FAHSE, 1973) Bodenproben entnommen und untersucht. Die dabei gewonnenen Kornverteilungen wurden bezüglich der Siebdurchgänge von 10 % (d_{10}), 50 % (d_{50}) und 90 % (d_{90}) ausgewertet. Die Ergebnisse sind zusammen mit der Lage der Entnahmestellen auf Abb. 27 aufgetragen. Die Entnahmestellen 1 bis 12 (von West nach Ost) liegen dabei in oder an der Wasserwechselzone zwischen MSpTnw und MSpThw, während die Proben I bis VIII aus tieferen Bereichen gewonnen wurden (vgl. Abb. 27). Auffällig ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Proben 1 bis 12 und I bis VIII; in der Wasserwechselzone bleibt nur die Kornfraktion d_{10} annähernd über den gesamten Strandbereich gleich, während die Fraktion d_{50} eine unregelmäßige und die von d_{90} eine stetige Zunahme von West nach Ost aufweist. Dagegen zeigen die Proben I bis VIII ein sehr gleichförmiges Material mit nur leicht ansteigendem Korndurchmesser von West nach Ost; bei d_{50} liegen die Werte zwischen 0,3 mm (Probe I) und 0,4 mm (Probe VIII) (Abb. 27).

Die starke Ungleichförmigkeit des Materials in der Wasserwechselzone (Probe 1 bis 12 auf Abb. 27) erklärt sich dadurch, daß dem vorherrschenden Mittel- bis Grobsand des Strandmaterials Gerölle beigemischt sind. Diese Gerölle aus Buntsandstein und besonders aus Feuerstein (Flint) aus den Kreideformationen der angrenzenden Klippenfelder finden sich zwar an allen Stränden der Düneninsel, treten aber am Süd- und Oststrand besonders stark im Bereich der Aade in Erscheinung, die in ihrer Hauptsubstanz fast völlig aus diesen Geröllen aufgebaut ist. Ihre Durchmesser liegen im Bereich mehrerer Zentimeter und ihre Besonderheit besteht darin, daß sie durchweg sehr stark abgerundet sind und daher auf glatter Sandunterlage bereits rollend durch solche Strömungsgeschwindigkeiten in Bewegung gesetzt werden, die für den Sandtransport noch zu gering sind. Am Südstrand ist der Geröllanteil im westlichen Teil (zwischen der Tetrapodenbuhne und dem Dünenrestaurant) im allgemeinen gering und nimmt dann allmählich zur Landebahn hin zu. Von der Landebahn bis zur Aade hin erhält der Strand dann den Charakter eines reinen Geröllstrandes, was sich auch in den steilen Unterwasserböschungen ausdrückt (vgl. Abb. 26). Entsprechend der hohen Mobilität dieser Gerölle können diese zwar nach bestimmten Wetterlagen auf größeren Strandbereichen verteilt liegen, im Mittel gesehen herrscht aber eine Verteilung entsprechend einer stetigen Zunahme der Geröllanteile von West nach Ost vor (Abb. 27).

Im Hinblick auf künftige Aufspülungen ist dieser Geröllanteil zu vernachlässigen. Bei der Wahl der Kornverteilung eines geeigneten Materials sollte ein Kornband angestrebt werden, das gleich oder etwas gröber als das der Proben I bis VIII (Abb. 27) ist.

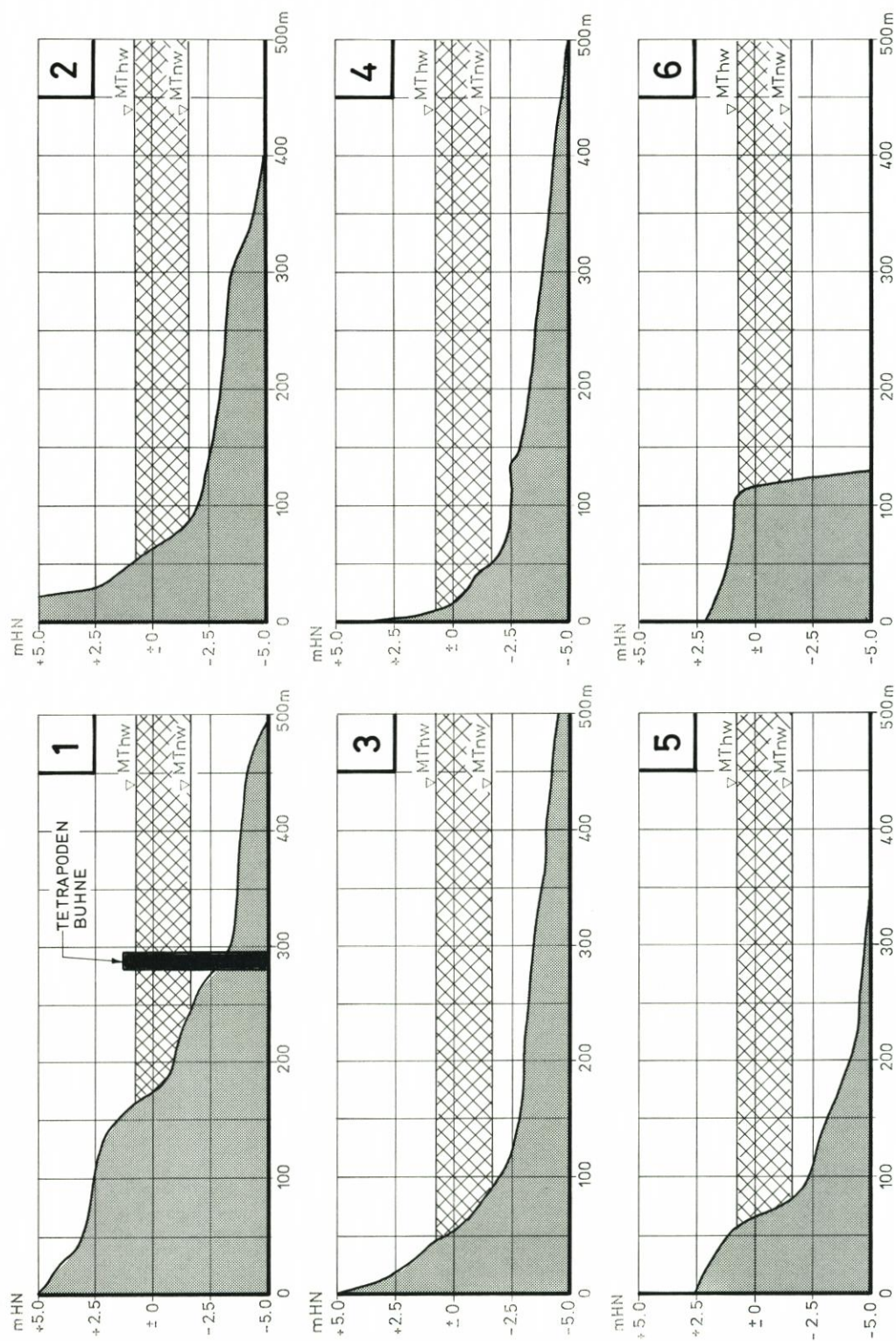


Abb. 26. Strandquerschnitte des Südstrandes (Zustand 1982)

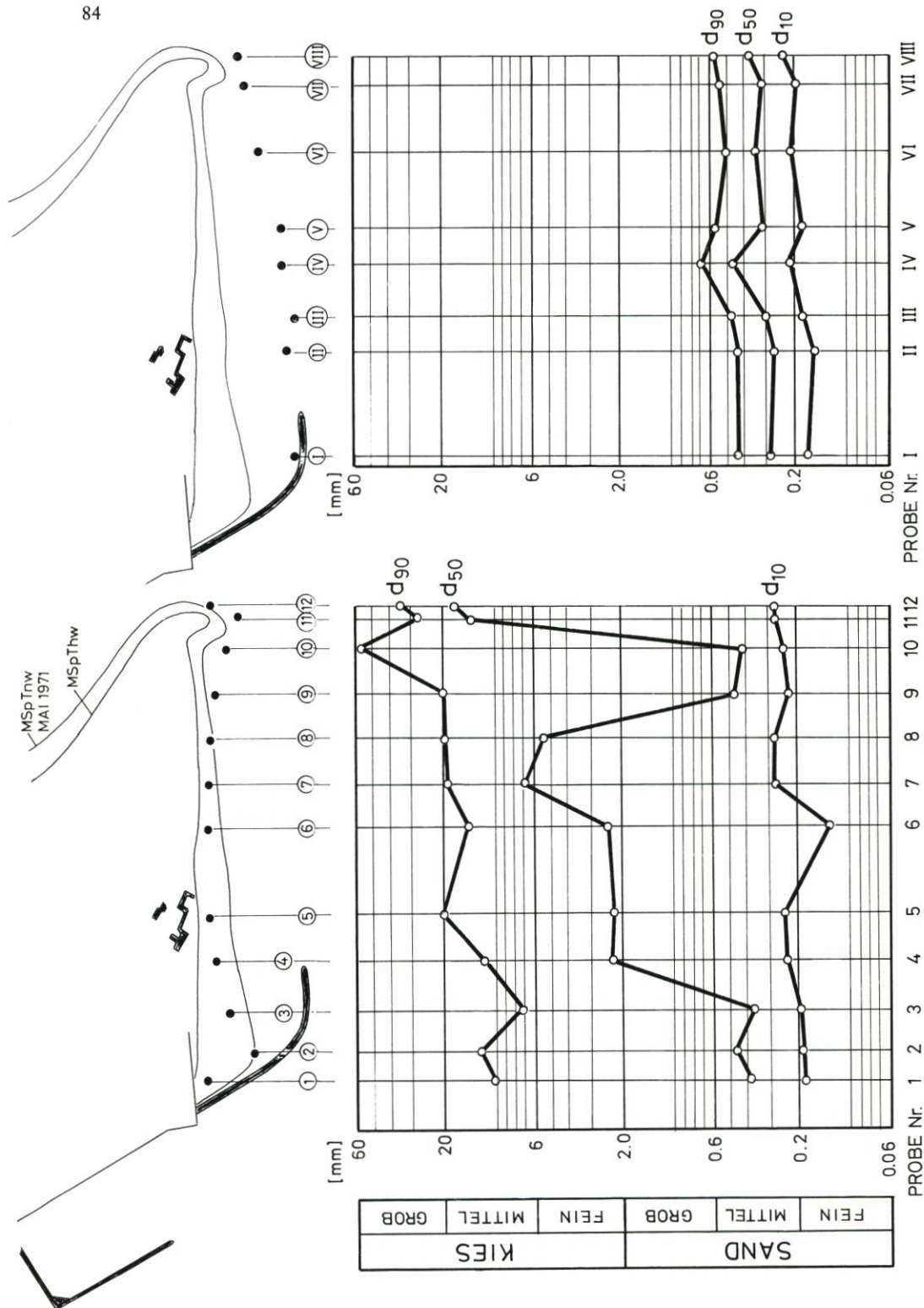


Abb. 27. Kornverteilungen am Südstrand (Zustand 1973)

3.2 Verlagerungen des Strandbereiches und der Dünenkante

Die allgemeinen Veränderungen des Südstrandes gehen aus Abb. 8 bis 11 hervor. Besonders sei hier auf Abb. 11 hingewiesen, aus der die Abnahme des Südstrandes bei gleichzeitiger Verschwenkung der Strandlinie nach Nordost deutlich hervorgeht.

Für die Erfassung der Verschwenkungen im Strandbereich sind die Höhenlinien des MSpTnw (HN -1,78 m) und des MSpThw (HN + 0,87 m) besonders geeignet, einmal, weil sie die Grenzen der Wasserwechselzone bei normalen Wetterlagen kennzeichnen, zum anderen, weil sie im Zeitraum 1952 bis 1982 wesentlich häufiger als die übrigen Tiefenlinien vermessen wurden.

Die zeitlichen Entwicklungen dieser Strandlinien für MSpTnw und MSpThw werden im folgenden auf ein Koordinatensystem bezogen, das sich auf die Achse der heutigen Hauptlandebahn ausrichtet (Abb. 28). Parallel zur Achse der Landebahn sind die Profile $S \pm 0$ m bis $S + 700$ m ausgerichtet, deren zeitliche Entwicklungen in Abb. 29 bis 31 aufgetragen sind.

Unabhängig von der jeweiligen Quelle – und damit von der Genauigkeit der Messung – muß hier auf eine allgemeine Schwierigkeit hingewiesen werden, die bei Auswertungen von Strandvermessungen zu berücksichtigen ist: Besonders in den Sommermonaten treten oberhalb der Niedrigwasserlinie relativ häufig Änderungen der Strandhöhe auf, die z. T. sehr kurzzeitig sein können, weil sie mit dem jeweiligen Wellenklima zusammenhängen („Sommerstrand“; hierzu gehören z. B. Strandwallbildungen an der MThw-Linie und dgl.). So wurden bei Messungen am Südstrand der Düne Helgoland der Bundesanstalt für Wasserbau (ROHDE u. FAHSE, 1972) vom 13. bis 17. Juli 1958 in diesem Bereich Höhenabnahmen bis 40 cm, vom 17. bis 27. Oktober 1959 solche bis 60 cm festgestellt. In den Wintermonaten ist das Strandprofil dagegen als Folge der stetigen und stärkeren Welleneinwirkungen wesentlich ausgeglichener in dem Sinne, daß kurzzeitige Veränderungen, besonders im Bereich der Hochwasserlinie, nicht in dem Maße wie im Sommer auftreten („Winterstrand“).

Da bei den in Abb. 29 bis 31 dargestellten Auswertungen auf Vermessungen zurückgegriffen werden mußte, die zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt wurden, dürfen die Einzelwerte dieser Auftragungen nicht überbewertet werden; entsprechend den Strandhöhen können sich auch die Tiefenlinien verschieben.

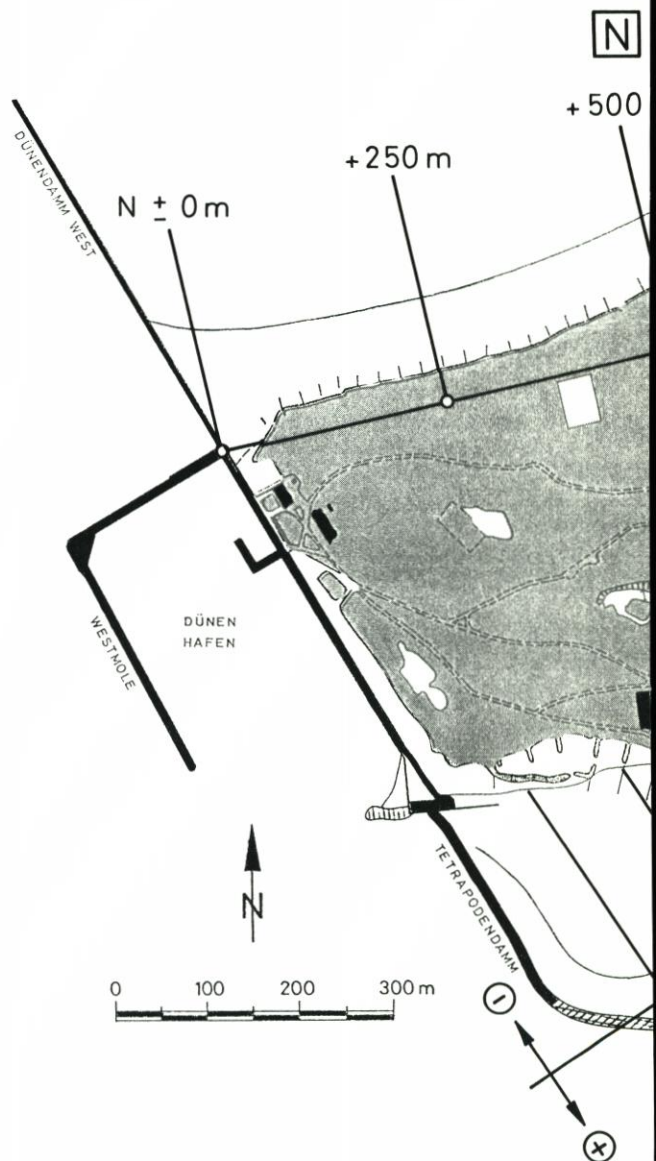
Daß sich dennoch auf Abb. 29 bis 31 eindeutig zeitliche Veränderungen erkennen lassen, liegt daran, daß hier der langzeitige Trend doch stärker als die zufälligen jahreszeitlichen und jährlichen Schwankungen wirksam sind. Dem Verlauf der MSpTnw-Linie ist dabei eine größere Bedeutung als dem der MSpThw-Linie zuzumessen, weil sie weniger von den jahreszeitlichen Veränderungen betroffen ist und auch deshalb, weil sie häufiger als die MSpThw-Linie bei den einzelnen Vermessungen aufgenommen wurde.

Die Profile $S \pm 0$ m, $S + 100$ m und $S + 200$ m umfassen den westlichen Abschnitt des Südstrandes und damit den bevorzugten Badestrand von der Wurzel der Tetrapodenbuhne bis zum Dünenrestaurant. Hier zeigt das äußerst westliche Profil ($S \pm 0$) einen deutlichen Anwachs um rd. 250 m, der eng mit dem Bau der Tetrapodenbuhne (ab 1965) zusammenhängt. Dieser Anwachs ist aber bereits im Profil $S + 100$ m nur noch schwach ausgeprägt. Im Profil $S + 300$ m (auf der Höhe des Dünenrestaurants) ist dagegen eine schwach abnehmende Tendenz für die Jahre 1952 bis 1982 zu erkennen (Abb. 30).

Im Mittelteil des Südstrandes überwiegt dagegen der Strandrückgang, wie er auch auf Abb. 8 und 9 und besonders auf Abb. 11 zu erkennen ist. Darüber hinaus fällt ab 1965 eine Abnahme auf, die bis 1982 im Profil $S + 300$ m rd. 150 m, im Profil $S + 400$ m rd. 200 m und im Profil $S + 500$ m rd. 250 m ausmacht. Dieses Profil liegt unmittelbar in der Verlängerung der Achse der Landebahn (Abb. 30).

Dieser Rückgang nimmt im östlichen Abschnitt des Südstrandes entsprechend der stetigen Verschwenkung der Aade noch weiter zu (vgl. Abb. 11); er beträgt hier im Profil S + 600 m von 1965 bis 1982 rd. 400 m. Weiter östlich beginnt dann schon der Einfluß der Aade, deren kurzzeitige Änderungen den langfristigen Trend undeutlich machen. Das in östliche Richtung verlaufende Profil E \pm 0 m zeigt dagegen schon den stetigen Anwachs am Oststrand, der hier in den Jahren von 1965 bis 1980 rd. 300 m beträgt (Abb. 31).

Zu beachten ist bei allen Profilen von S + 200 m bis S + 700 m (Abb. 28 bis 31) die



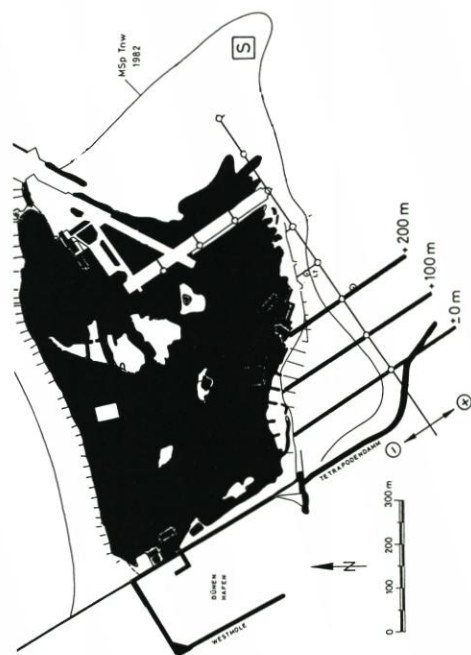
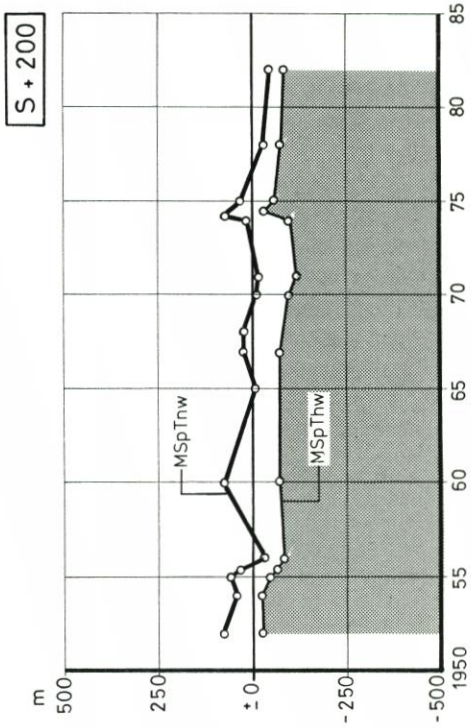
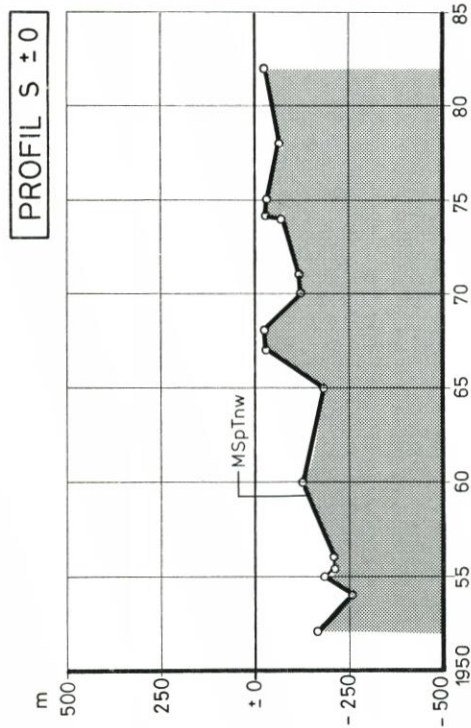
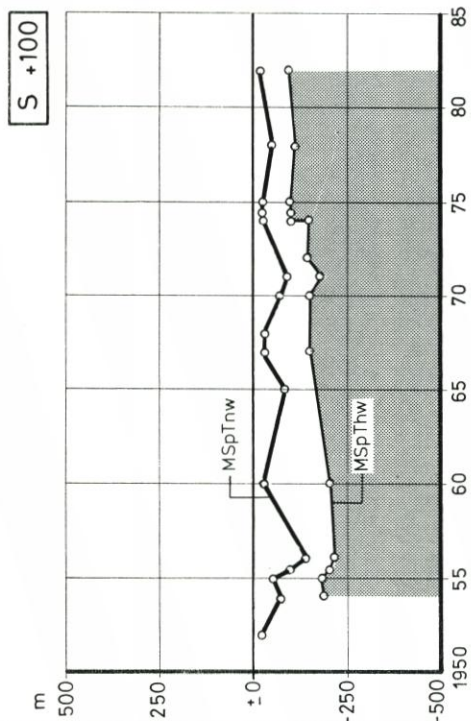


Abb. 29. Westteil des Südstrandes; Verlagerungen der Strandlinien von 1952 bis 1982

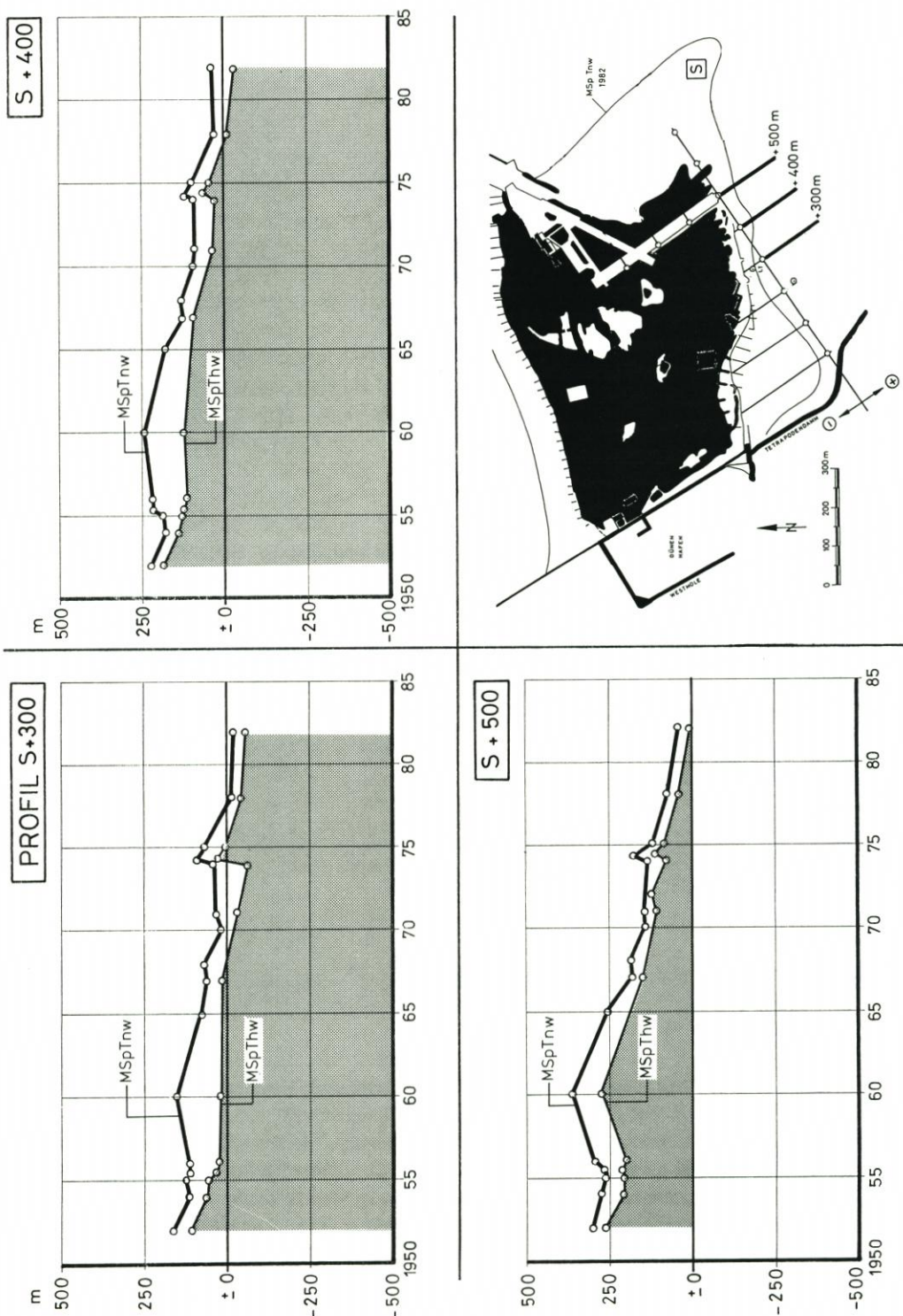


Abb. 30. Mittelteil des Südstrandes; Verlagerungen der Strandlinien von 1952 bis 1982

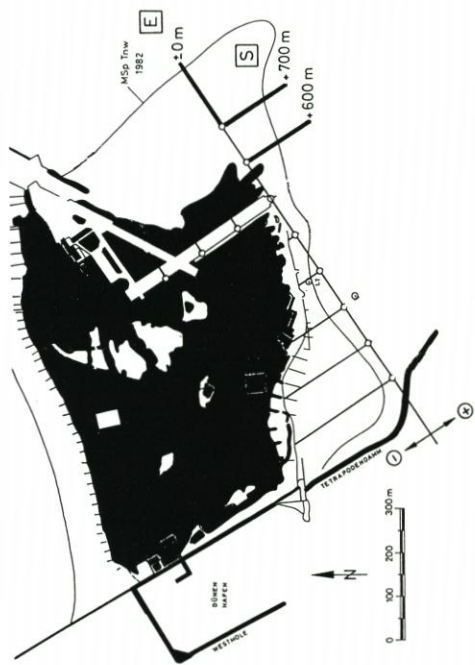
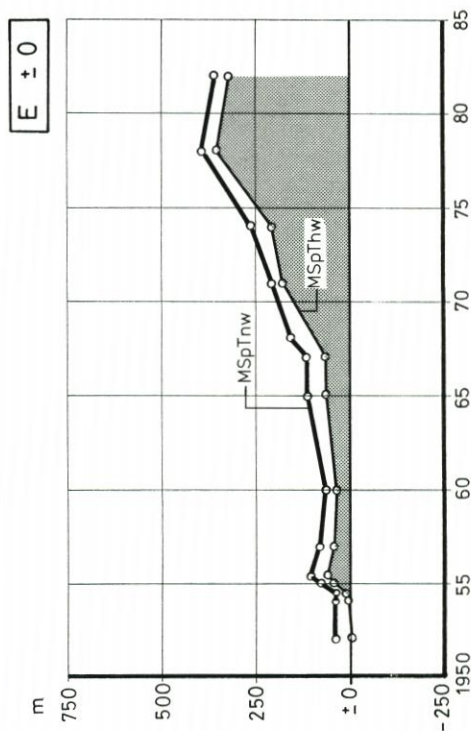
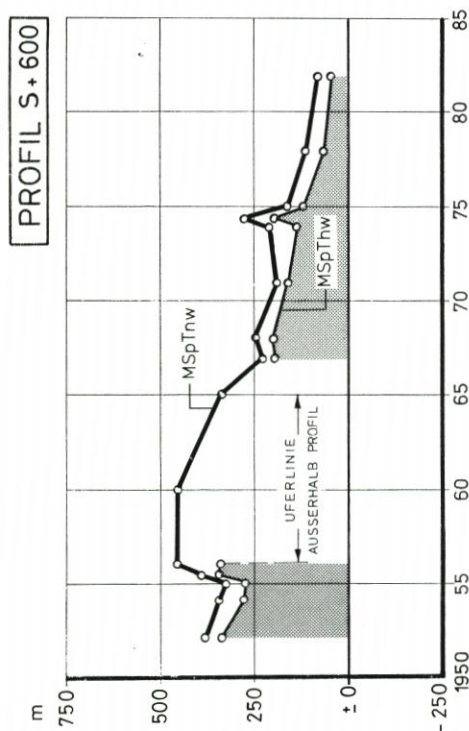
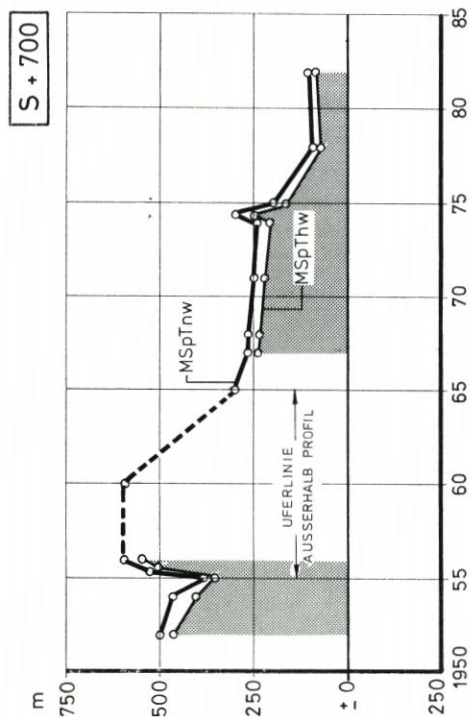


Abb. 31. Ostteil des Südstrandes; Verlagerungen der Strandlinien von 1952 bis 1982

Der Südstrand kann allgemein in drei Abschnitte gegliedert werden:

- der Abschnitt von der Wurzel der Tetrapodenbuhne bis zum Dünenrestaurant, der einen flachen Sandstrand aufweist und der weitgehend lagestabil ist (Abb. 29);
- der Abschnitt vom Dünenrestaurant bis zum Kopf der Landebahn, der bei deutlich von Westen nach Osten zunehmender Strandneigung ebenfalls einem zunehmenden Rückgang ausgesetzt ist (Abb. 30) und
- der Abschnitt vom Kopf der Landebahn bis zur Aade, der neben starkem Abbruch auch eine deutliche Verschwenkung der Strandlinien nach Nordosten aufweist (Abb. 31; Abb. 11).

Diese Charakteristik ist eindeutig auf den vorherrschenden Materialtransport von Westen nach Osten zurückzuführen, der durch die Diffraktion und Refraktion der Wellen in eine vorwiegende Angriffsrichtung der Wellen aus Südwest und die damit verbundenen Brandungsströmungen bedingt ist. Wie bereits erwähnt (Abschnitt 2.2), wird durch die nordöstliche Verschwenkung der Strandlinien im Bereich der Aade der Angriffswinkel der Wellen immer ungünstiger. Die Strandentwicklung zeigt weiterhin, daß die Schutzwirkung der Tetrapodenbuhne im gegenwärtigen Ausbauzustand nur etwa bis zum Dünenrestaurant reicht. Die Entwicklung auf den davon östlich gelegenen Strandabschnitten kann als eine großräumige Lee-Erosion verstanden werden, die sich dem ohnehin vorhandenen Abbruchgeschehen überlagert. Da sich die sturmflutreichen Jahre nach 1962 mit den Zeiten überlagern, in denen die Buhne abschnittsweise bis auf den heutigen Zustand vorgetrieben wurde (von 1965 bis 1974), ist eine Trennung beider Einflüsse nicht möglich. Wichtig ist nur, daß, wie Abb. 29 bis 31 bei fast allen Profilen zeigen, dieser Prozeß noch keinesfalls abgeschlossen ist. Hierauf wird noch abschließend eingegangen werden.

Erwähnt werden muß noch der Einfluß östlicher Windlagen. Hierzu ist zu sagen, daß infolge der geringeren Streichlängen vom Festland her und auch infolge der im Mittel geringeren Windgeschwindigkeiten und -häufigkeiten der Wellenangriff allgemein geringer ist als der aus den westlichen Richtungen. Hinzu kommt, daß bei Stark- und Sturmwindlagen aus östlichen Richtungen die Wasserstände infolge des Windsunkes (Abb. 23) fallen, so daß der Wellenangriff nicht in den höheren Strandabschnitten wirksam werden kann, sondern im wesentlichen auf die Wasserwechselzone beschränkt bleibt. Hier werden jetzt im Bereich des Südstrandes Brandungsströmungen erzeugt, die, bei größeren Wassertiefen auch von der Tideströmung unterstützt, Material von Osten nach Westen transportieren und auf diese Weise eine gewisse Rücklaufwirkung haben, die sich jedoch nur auf die Bereiche unterhalb der MThw-Linie erstreckt. Der beobachtete Anwachs im Flachwassergebiet unmittelbar östlich der Tetrapodenbuhne steht mit Sicherheit mit dieser Sandwanderung in Verbindung. Einen entscheidenden Einfluß auf das allgemeine Abbruchgeschehen haben aber diese sekundären Materialtransporte nicht.

Unzweifelhaft ist der erhebliche Einfluß von Ostwindlagen auf die jeweilige Ausrichtung und Form der Aade. Wie aber bereits erwähnt, handelt es sich hier nur um morphologisch kurzfristige Vorgänge.

Als Folge des Strandrückganges findet bei Sturmfluten der Dünenabbruch statt, der z. T. bereits aus Abb. 8 und 9 ersichtlich ist. Wie aus Abb. 24 hervorgeht, folgt er sprunghaft der Entwicklung des Strandes. Der Dünenrückgang ist dabei vermessungstechnisch wesentlich schwieriger zu erfassen als der Rückgang der Strandlinien, weil sowohl die Lage des Dünenfußes als auch bei stark gegliederter Oberfläche der Düne die mittlere Lage der Abbruchkante oft schwer zu definieren sind. Beim Vergleich verschiedener Vermessungen kommt hinzu, daß durch künstliche Aufschüttungen als Sofortmaßnahmen (vgl. den folgenden Abschnitt) das Bild des natürlichen Abbruchgeschehens verändert wird. Die Ermittlungen von PRACK (1982)

ergeben folgende Informationen über die Dünenabbrüche am Südstrand (hinsichtlich einer Zuordnung zu den jeweils vorherrschenden Wetterlagen und den Verweilzeiten der Sturmflutwasserstände wird auf Abb. 18 bis 22 verwiesen):

Sturmflutkette im November/Dezember 1973:

- am Dünenrestaurant Verlagerung des Dünenfußes um 5 bis 10 m
- vor Kopf der Landebahn Verlagerung des Dünenfußes 30 bis 40 m
- Einsturz des Molenkörpers in unmittelbarer Nähe der Wurzel der Tetrapodenbuhne

Januarsturmfluten 1976:

- im Strandbereich vom Dünenrestaurant bis zum Kopf der Landebahn „relativ geringe Sandverluste“
- vor dem Kopf der Landebahn Verlagerung des Dünenfußes um 30 m

Wintersturmflut Dezember 1979¹⁾:

- an der Westseite des Landebahnkopfes Unterspülung auf etwa 18 m Länge
- an der Ostseite des Landebahnkopfes Unterspülung auf einer Länge von etwa 22 m

Sturmflut Januar 1981:

- westlich der Landebahn Sandabtrag mit Höhen um 5 m bis 35 m düneneinwärts
- an der alten Südmole hinter der Tetrapodenbuhne Hinterspülungen

Sturmflut November 1981:

- Sandabtrag bis 25 m düneneinwärts

Selbst wenn hiermit nicht alle Sturmfluten und die dadurch hervorgerufenen Schäden erfaßt sein sollten, geht doch aus der vorstehenden Aufzählung das sprunghafte Verhalten des Abbruchgeschehens hervor, das auf Abb. 24 schematisch dargestellt und begründet wurde.

Insgesamt können die Ergebnisse für den Südstrand dahingehend zusammengefaßt werden, daß der Strandrückgang und damit bei höheren Sturmfluten auch die Dünenverluste weitergehen werden, wenn nicht durch geeignete Maßnahmen in diese Entwicklung eingegriffen wird.

3.3 Menschliche Eingriffe seit 1952

Als künstliche Eingriffe wurden bereits die Sandaufschüttungen erwähnt, die meist nach Sturmfluten oder auch vor Beginn der Badesaison als örtliche Maßnahmen durchgeführt werden. Eine solche Strandaufhöhung größeren Ausmaßes (rd. 85 000 m³) wurde 1954 vor dem Dünenrestaurant bis auf Dünenhöhe vorgenommen. Wie aber Abb. 32 zeigt, war bereits im Oktober 1956 nach den Sturmfluten in den Wintern 1954/55 und 1955/56 (vgl. Abb. 18 und 19) diese Substanz weitgehend wieder aufgezehrt. Derartige Maßnahmen können daher nur als örtliche Notbehelfe angesehen werden; für die allgemeine Strandentwicklung sind sie ohne Bedeutung.

Eine Maßnahme von größerer Dimension stellte die Strandvorspülung im Sommer 1974 dar, bei der rd. 240 000 m³ großflächig auf dem Südstrand aufgebracht wurden. Die Gegenüberstellung der Zustände vom Mai 1974 und vom August 1974 auf Abb. 10 zeigt das Ausmaß der Strandveränderung durch diesen künstlichen Eingriff. Bereits Abb. 9 (Juli 1975) macht jedoch deutlich, wie schnell sich der vorherige Strandzustand wieder eingestellt hat. Noch überzeugender geht dieses aus den Zeit-Weg-Diagrammen auf Abb. 29 bis 31 hervor, in dem

¹⁾ Bei der nicht besonders hohen Sturmflut im Dez. 1979 (HN + 2,05 m) spielte außer der ungewöhnlich starken Südwestkomponente des Windes (Abb. 21) wahrscheinlich auch der Umstand eine Rolle, daß der Landebahnkopf inzwischen in die Nähe der Hochwasserlinie gerückt war und bei der Sturmflut erstmalig als Hindernis für die Wellenbewegung in Erscheinung trat.

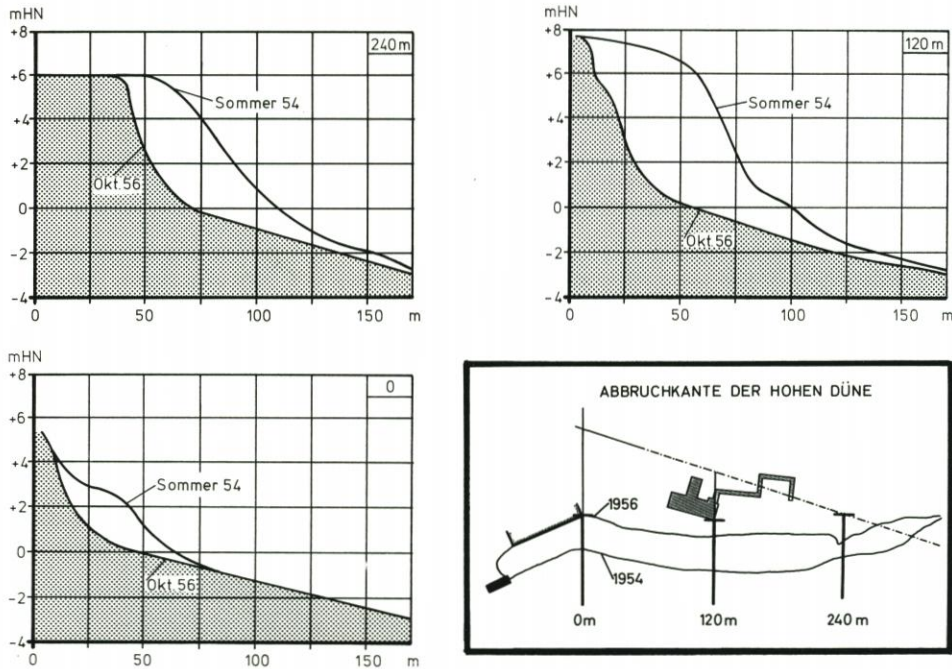


Abb. 32. Verhalten einer Strandauffüllung im Mittelteil des Südstrandes im Jahre 1954

die Sandaufspülung nur als eine singuläre Spitze auf einer sonst nahezu kontinuierlich verlaufenden Entwicklungsfunktion erscheint. Der Winter 1974/75 war verhältnismäßig reich an mittleren Sturmfluten (Abb. 18 und 19). Sie reichten aus, um fast den gesamten Sandvorrat durch die Brandungsströmungen aus dem Südstrand in östliche Richtung zu verlagern.

Es geht hieraus hervor, daß durch Sandvorspülungen auch größeren Ausmaßes hier keine bleibende Stabilisierung des Südstrandes erreicht werden kann, solange nicht dafür gesorgt wird, daß dieser Sand nicht in kürzester Zeit nach Osten verlagert wird und damit dem Südstrand wieder verlorengeht.

Der Abbruch der Südmole des Dünenhafens 1954/55 hat offensichtlich keine nachhaltigen Veränderungen am Südstrand bewirkt; zumindestens blieben die positiven Veränderungen hinter den Erwartungen zurück. Im Bereich der Südmole waren eher Schäden an der Düne die Folge. So kam es zum Bau der Tetrapodenbuhne, die sich in drei Abschnitten von 1965 bis 1974 vollzog. Abbildung 33 zeigt den Verlauf der einzelnen Bauabschnitte und die Veränderungen in der Höhenlage der Buhne als Folge des Wellenangriffes.

Der erste Bauabschnitt (1965) umfaßte eine Länge von rd. 250 m in etwa südöstlicher Richtung; die Krone wurde etwa auf HN + 1,75 m, also rd. 1 m über MThw (HN + 0,78 m), gelegt. Diese Buhne wurde 1968 in gleicher Höhe um rd. 150 m in östlicher Richtung verlängert (Abb. 33).

Ein Aufmaß im Jahre 1974 (nach den Herbststurmfluten 1973) ergab, daß die Kronenhöhe fast auf ganzer Länge unter die Höhe des MThw abgesunken war. Zugleich mit einer weiteren Verlängerung um rd. 100 m wieder in ungefähr südöstlicher Richtung wurde daher die alte Kronenhöhe auf ganzer Länge wiederhergestellt. Bei einem Aufmaß im Jahre 1982 wurden aber bereits wieder Absenkungen der Kronenhöhe festgestellt, die im Bereich der letzten Verlängerung von 1974 Beträge über 1 m erreicht hatten (Abb. 33).

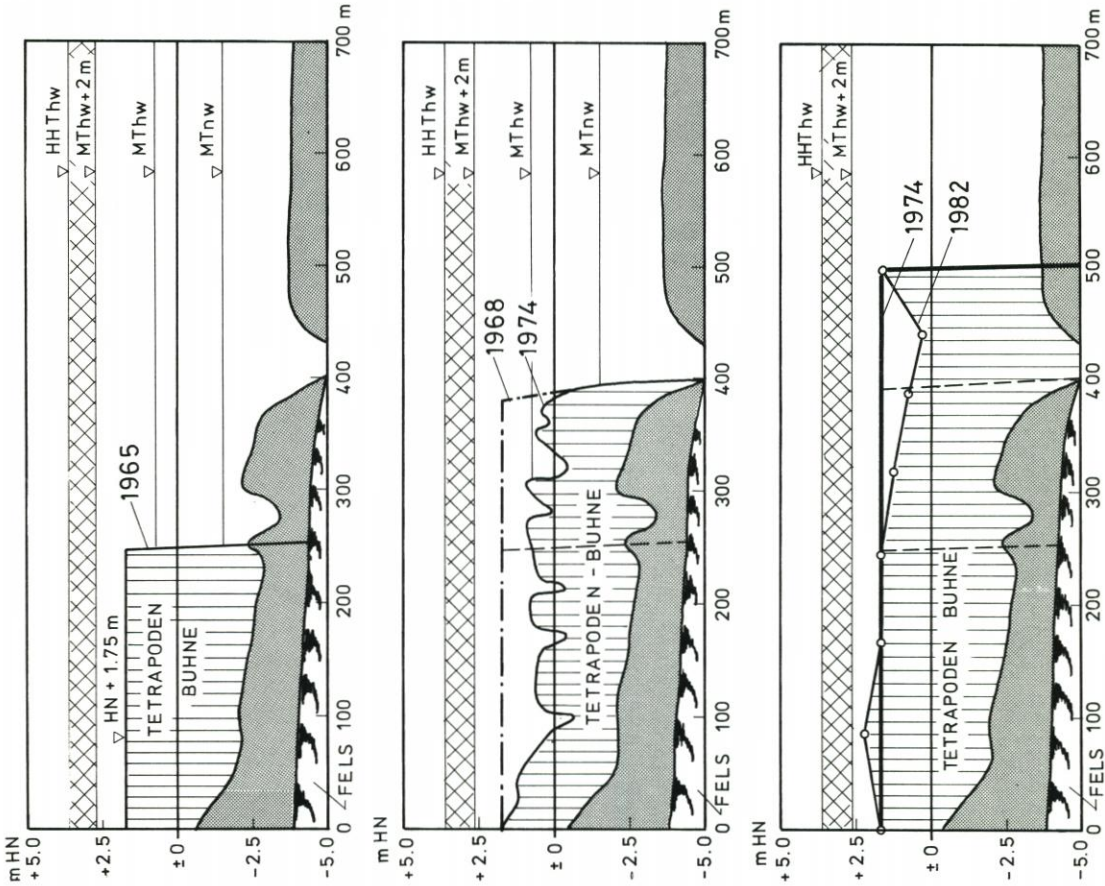


Abb. 33. Bau und Entwicklung der Tetrapodenbühne 1965 bis 1982

Ob die Linienführung der bestehenden Tetrapodenbuhne in allen Einzelheiten optimal ist, kann ohne weitere eingehende Untersuchungen nicht beurteilt werden. Als eine positive Wirkung kann aber unbedingt festgestellt werden, daß die Ausbildung des Strandbereiches zwischen der Buhnenwurzel und dem Dünenrestaurant (also des jetzigen Hauptbadestrandes) dieser Buhne zu verdanken ist. Dies geht aus allen morphologischen Entwicklungsaufnahmen (Abb. 8 und 9) und besonders deutlich aus den Zeit-Weg-Diagrammen auf Abb. 29 hervor.

Die morphologischen Entwicklungen auf Abb. 8 und 9 und die Auftragungen der Veränderungen der Strandlinien auf Abb. 29 bis 31 zeigen aber ebenfalls, daß sich die Schutzwirkung der Buhne für den Strand (unter dem Einfluß der vorherrschenden Wellenangriffsrichtung einschließlich der Diffraktionen und Refraktionen „Gleichrichtereffekt“) nur bis zur Höhe des Dünenrestaurants erstreckt. Von hier aus setzen dann nach Osten hin Rückgangerscheinungen ein, die zumindestens teilweise auf die großräumige Lee-Erosion der Buhne zurückgeführt werden müssen. In diesen Bereichen bietet die Buhne auch der Düne keinen Schutz mehr.

Es scheint im Widerspruch mit der Schutzwirkung der Buhne für den Strandbereich zwischen der Buhnenwurzel und dem Dünenrestaurant zu stehen, daß auch nach ihrem Bau in diesem Strandbereich Dünenabbrüche auftraten. Er kann wie folgt erklärt werden: Bei Wasserständen unterhalb der Kronenhöhe findet u. U. ein Wellenüberschlag statt, der aber in Lee an der Buhne keinen nennenswerten Seegang erzeugen kann. Steigt der Wasserstand weiter bis etwa zur Höhe der Buhnenkrone, so gewinnt der sog. Transmissionskoeffizient an Bedeutung, der angibt, wieviel Prozent der ankommenden Wellenhöhe über die Buhne hinweggehen. Steigt der Wasserstand noch weiter über die Höhe der Buhnenkrone hinaus, so nimmt dieser Transmissionskoeffizient schnell zu, und zwar in Abhängigkeit von der Breite und der Form der Buhnenkrone. Es kann aber als Faustregel gelten, daß dann, wenn der Wasserstand über der Buhnenkrone in die Größenordnung der ankommenden Wellenhöhen gelangt, dieser Koeffizient sich dem Werte 1 oder 100 % nähert. Das bedeutet, daß die Wellen mit nur geringem Energieverlust über die Buhnenkrone gelangen, die Buhne also praktisch wirkungslos wird.

Aus Abb. 33 geht hervor, bei welchen Wasserständen und bei welchen Wellenhöhen dies bei den jeweiligen Zuständen der Tetrapodenbuhne der Fall ist bzw. war. Immerhin gelangt bei höheren Sturmfluten ein wesentlicher Anteil der Seegangsenergie über die Buhne in deren Leebereich und kann dort entsprechende Schäden in den höheren Strandbereichen, am Dünenfuß und an der Düne selbst erzeugen, während der eigentliche Strandbereich zwischen der MTnw- und MThw-Linie bei diesen Wasserständen durch ein entsprechendes „Wasserpölster“ geschützt ist.

Daß bei Wasserständen etwa ab 1 m über MThw die Buhne so gut wie keine Auswirkungen mehr auf die Wellenausbreitung hat, geht auch aus verschiedenen Luftbildern hervor. Ihre Schutzwirkung ist also auf Wasserstände beschränkt, die deutlich unterhalb dieser Höhe liegen. So erklärt sich, daß die Buhne zwar den Strand, aber nicht die Düne schützen kann. Eine Abhilfe kann hier nur eine Erhöhung der Buhnenkrone bringen.

Es wurde auch die Frage angeschnitten, ob durch den Bau der Tetrapodenbuhne eine mögliche Sandzufuhr von der Südreede her unterbrochen wurde. Wenn diese vor ihrem Bau wirklich vorhanden war, so reichte sie auf jeden Fall nicht aus, um einen stabilen Südstrand zu erzeugen. Der Einfluß des Dünenhafens auf die Sandbewegung in und südlich der Südreede ist jedenfalls von wesentlich größerer Bedeutung.

Als letzte Baumaßnahme (nach 1982) muß die neue Buhne aus Tetrapoden genannt werden, die im Winter 1982/83 in Verlängerung der Landebahn vor allem zum Schutze des Landebahnkopfes errichtet wurde. Wie bereits bemerkt, führte schon die Tatsache, daß zu



Abb. 34. Blick über die Aade auf das Ende der Landebahn mit Tetrapodenbuhne (Aufnahme vom 24. 2. 1984, 10.00 h)

diesem Zeitpunkt das Südennde der Landebahn von der MThw-Linie bereits erreicht war, eine neue Komponente in die weitere Strandentwicklung ein, die durch den Bau der rd. 60 m langen Buhne weiter verstärkt wurde. Es stehen zwar neue Vermessungen nach dem Winter 1983/84 noch aus. Die nach den Januarsturmfluten 1984 am 24. 2. 1984 aufgenommenen Luftbilder (Abb. 34 und 35) deuten aber an, daß bisher zwar eine gewisse Anlandungstendenz auf der Luvseite der Buhne festzustellen ist, zugleich sich aber auf der Leeseite der Beginn einer neuen Lee-Erosionszone abzeichnet. Auf diese Fragen wird noch abschließend im Hinblick auf die künftige Entwicklung des Südstrandes einzugehen sein.

4. Die Entwicklung der übrigen Strände (von 1952 bis 1982)

4.1 Oststrand

Der Oststrand (von der Aade bis zum Dünendamm Ost) kann als der problemloseste Strandabschnitt der Düne angesehen werden. Er hat sich bereits vor 1944 als „Neuland“ (SEIFERT, 1953) gebildet und unter stetiger Verbreiterung nach Nordosten ständig vergrößert, wie es aus den morphologischen Aufnahmen auf Abb. 8 und 9 sowie besonders aus Abb. 11 zu ersehen ist. Die Richtung der Strandlinie von Nordwest nach Südost ist dabei bemerkenswert konstant geblieben.

Auch die Entwicklung der Strandlinien MSpTnw und MSpThw zeigt diesen Anwachs (Abb. 36), der sich nach 1968 deutlich verstärkt (Folge der Lee-Erosion als Tetrapodenbuhne?).

Das Gebiet des hohen Vorstrandes östlich der Landebahn ist unbebaut (und sollte es auch bleiben!). Der Strand selbst ist wegen seines hohen Geröllanteiles als Badestrand ungeeignet.



Abb. 35. Beginnende Lee-Erosion östlich des Endes der Landebahn (Aufnahme vom 24. 2. 1984, 10.00 h, bei MTnw)

Seine Bedeutung besteht darin, daß er einen natürlichen Schutz der Landebahn gegen Osten bietet. Hier können Probleme dadurch entstehen, daß bei der fortwährenden Nordverlagerung der Aade der Oststrand am Süden der Landebahn schwindet. Diese Gefahr besteht weniger durch Seegangsangriff aus Osten als vielmehr durch Lee-Erosion östlich der Landebahn bei westlichen Winden (Abb. 17). Aus diesem Grunde ist eine Stabilisierung dieses Bereiches – der unmittelbar mit der Aade in Verbindung steht – anzustreben.

4.2 Nordstrand

Wie Abb. 1 und 2 zeigen, ist der „Umweg“ durch Diffraktion für den Seegang aus Westen zum Nordstrand wesentlich kürzer als der zum Südstrand. Bei Winden aus nordwestlichen Richtungen liegt der Nordstrand sogar völlig außerhalb der schützenden Hauptinsel. Zwar sind dem Nordstrand die Klippenfelder des Wittekliffbrunns, des Olhövbrunns und der Kalberdans mit ihren z. T. geringen Wassertiefen vorgelagert, die einen Teil der Seegangsenergie durch die Bildung von Brandungszonen dem Nordstrand fernhalten, dieser Einfluß läßt jedoch bei erhöhten Wasserständen, also gerade bei den Sturmfluten, nach, so daß der Nordstrand als ein ausgesprochen seegangsexponierter Strand angesehen werden muß.

Um so erstaunlicher ist der Befund aus den morphologischen Unterlagen (Abb. 8 und 9), daß sich die Strandlinien (nicht die Dünenkante!) von 1952 bis 1982 im Gegensatz zu dem – scheinbar! – mehr geschützten Südstrand so gut wie nicht verändert haben. Dies wird durch die Zeit-Weg-Diagramme der Strandlinien bestätigt (Lage der Profile vgl. Abb. 28), die für alle Strandbereiche zwar geringfügige Schwankungen der Linien für MSpTnw und MSpThw ergeben, aber doch nahezu gleichbleibende Mittelwerte aufweisen (Abb. 37).

Der Grund für diese Lagestabilität ist darin zu suchen, daß sich der Nordstrand nahezu

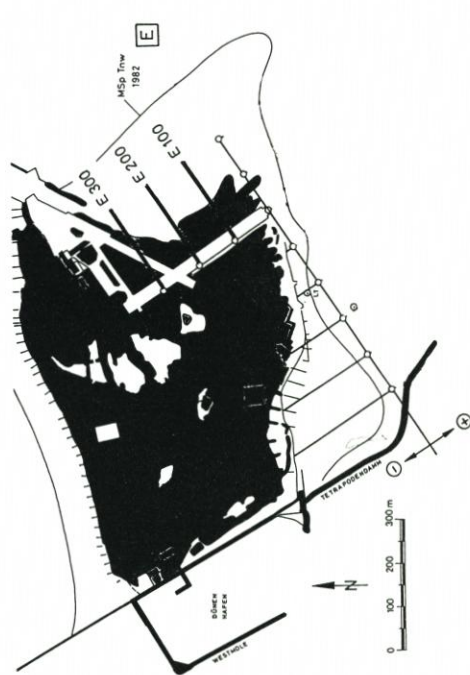
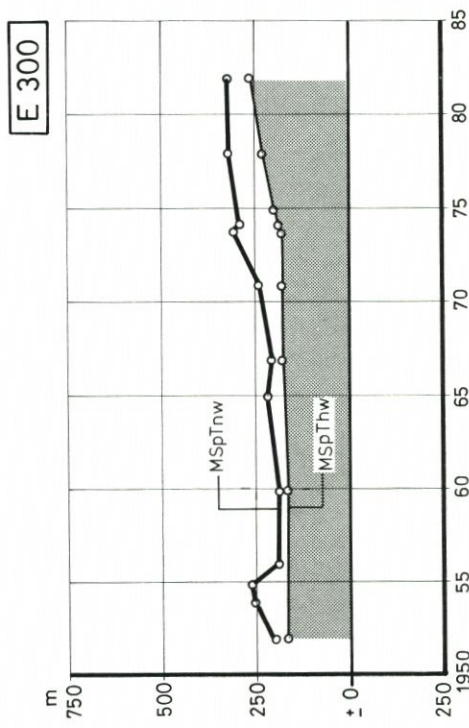
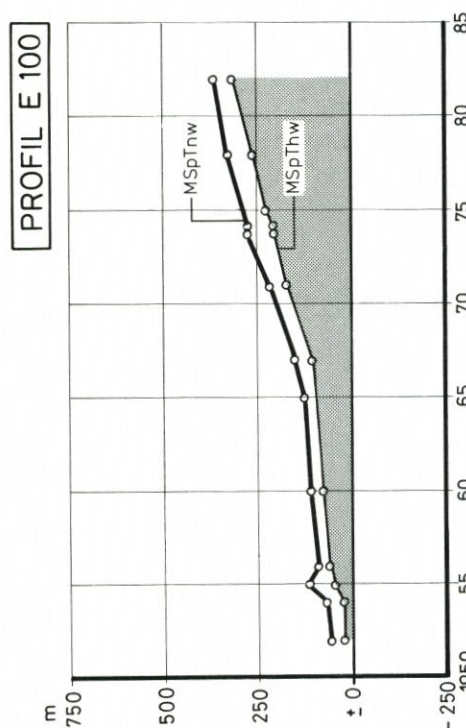
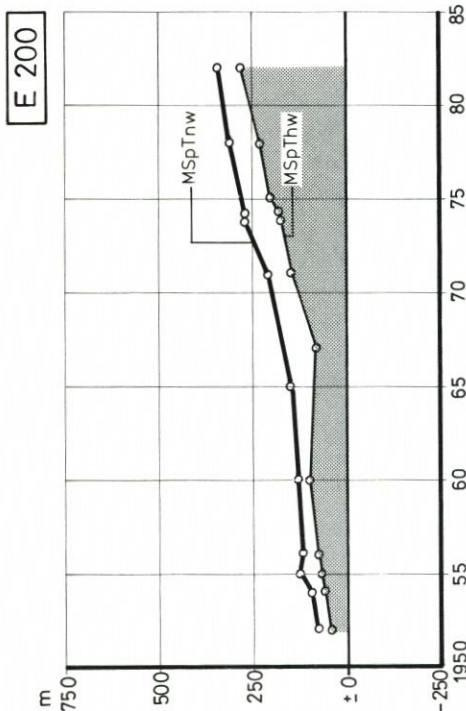


Abb. 36. Verlagerung der Strandlinien des Oststrandes von 1952 bis 1982

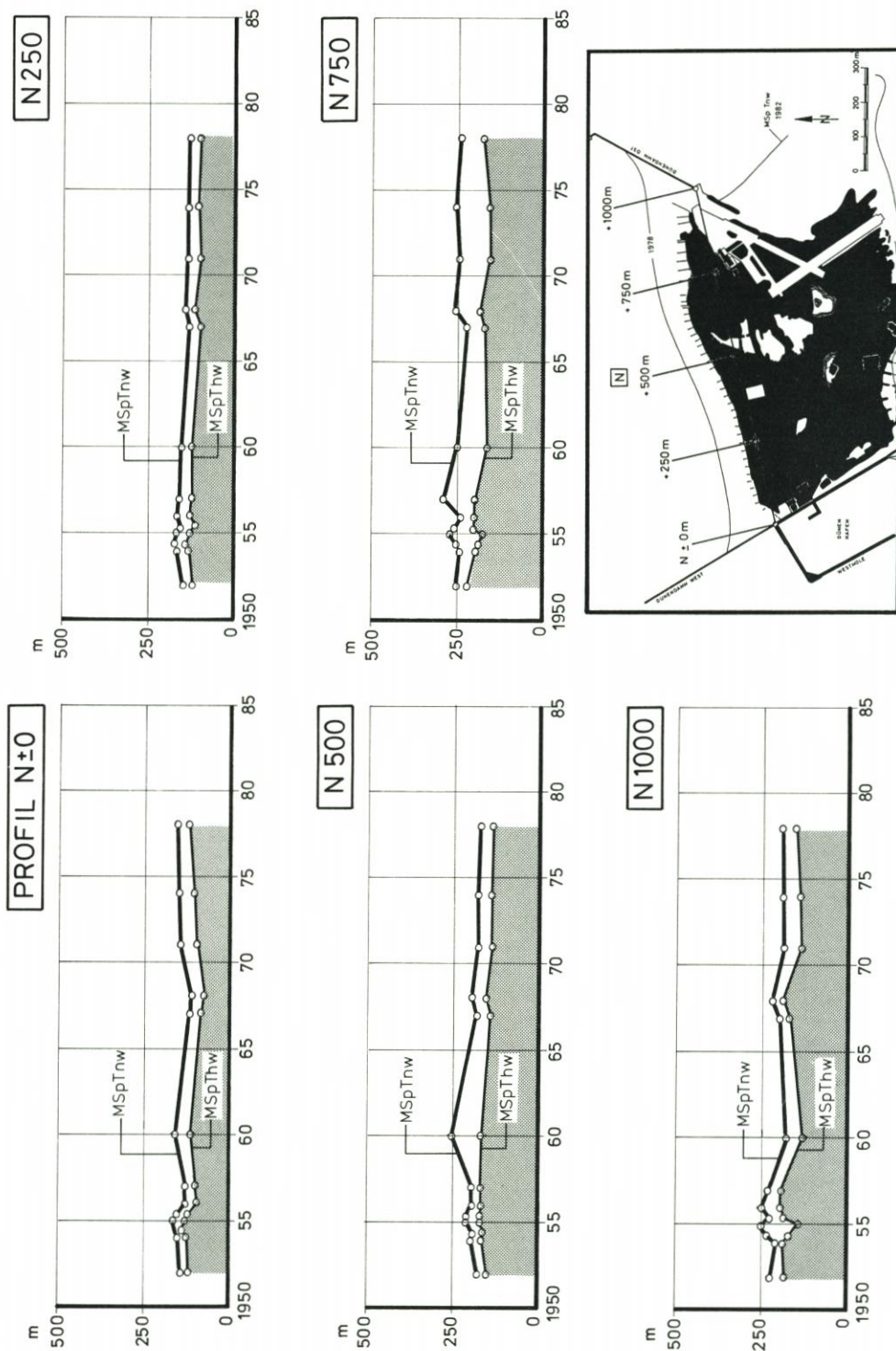


Abb. 37. Verlagerung der Strandlinien des Nordstrandes von 1952 bis 1982

senkrecht zu den vorherrschenden Wellenangriffsrichtungen ausgebildet hat und daß daher im Strandbereich keine nennenswerten strandparallelen Brandungsströmungen auftreten können. Eine geringe Störung in dem sonst ausgeglichenen Strandbogen liegt bei Profil N + 750 m und ist auf fast allen Aufnahmen zu erkennen (vgl. Abb. 8 und 9). Die flache Höftbildung ist dadurch bedingt, daß sie auf einem sehr widerstandsfähigen Felsuntergrund aufliegt.

Daß sich dieser lagestabile Strandbogen ausbilden konnte, liegt daran, daß er auf beiden Seiten von den Düendämmen West und Ost eingefast wird, die so ausgerichtet sind, daß sie die vorherrschende Wellenangriffsrichtung am Strand zwischen sich einschließen (vgl. Abb. 3).

Das Foto auf Abb. 38 zeigt, daß bei Sturmfluten an den Düendämmen schwere Wellenbelastungen mit Brandungen und Wellenüberschlag auftreten. Auch ohne Beschädigung an den Molen dieser Düenkämme kommt es dabei zu Sandverlusten, die jedoch nur örtlich bleiben und sich im Laufe der Zeit wieder ausgleichen. Es hat den Anschein, daß hier am Nordstrand auch eine gewisse Sandzufuhr von den Klippenfeldern her stattfindet.

Ein Widerspruch scheint am Nordstrand darin zu liegen, daß trotz der stabilen Lage der Strandlinien (Abb. 37) Dünenabbrüche bei Sturmfluten auftreten. Dieser Widerspruch erklärt sich dadurch, daß es sich bei den sog. Dünen am Nordstrand gar nicht um natürliche Bildungen handelt, sondern daß, wie es Abb. 7 deutlich zeigt, der Nordstrand auf ganzer Länge landseitig von der künstlichen Aufspülfläche begrenzt ist, die nach 1938 zum Bau des Militärflughafens angelegt wurde. Diese wurde damals zum Schutze gegen Sandverwehungen mit einer 0,2 bis 0,5 m starken Schicht aus Buntsandsteinschutt bedeckt (nach SEIFERT, 1953). Sowohl diese Steindecke als auch Reste der alten Landebahn (am Westende des Nordstrandes) werden an frischen Abbruchkanten nach Sturmfluten sichtbar. Nur infolge nachfolgender

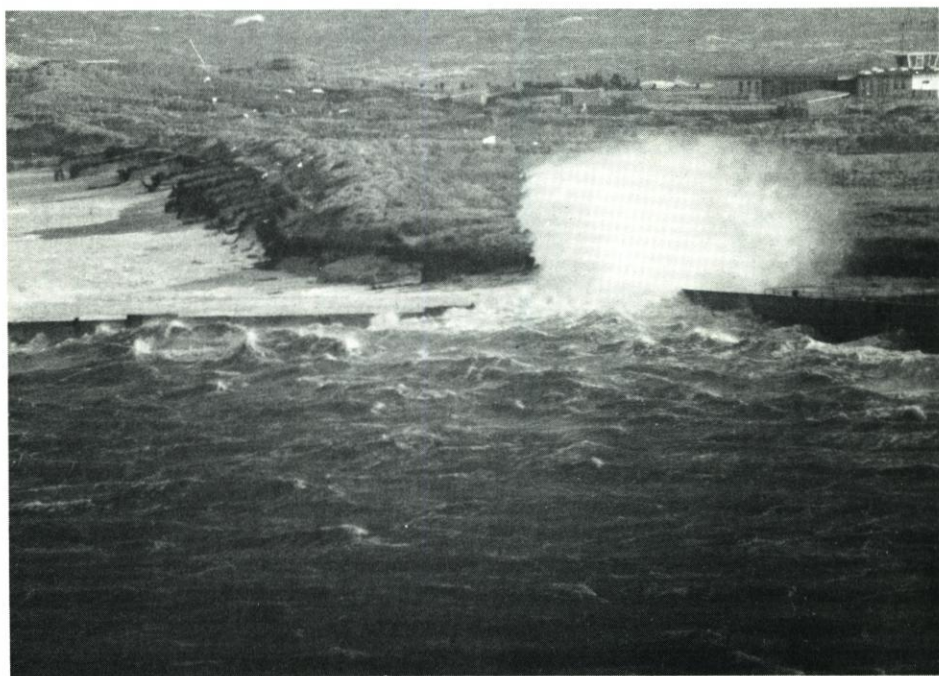


Abb. 38. Überschlagende Wellen am Düendamm-West (Aufnahme vom 19. 11. 1982; Foto: Singer, Helgoland)

Überwehungen durch Sandflug und durch anschließenden Bewuchs ist es dazu gekommen, daß diese künstliche Aufspülfläche heute wie ein natürliches Düengelände wirkt.

Bei hohen Sturmfluten und entsprechenden Seegangswirkungen kommt es auch heute noch zu Abbrüchen der Aufspülflächen. Der wichtigste Unterschied zu einem natürlichen, unter Erosion stehenden Strand nach Abb. 24 besteht darin, daß sich bei fortschreitendem Abbruch der „Dünenkante“ hier die Abstände zwischen den Strandlinien MTnw und MThw und dem „Dünenfuß“ fortwährend vergrößern und auf diese Weise ein immer breiter werdender trockener Strand oberhalb MThw entsteht, auf dem – wie auf dem Nordstrand festgestellt werden kann – nach längeren Sturmflutpausen bereits Primärdünen und Bewuchs auftreten. Dieser zunehmende breite Strand bedeutet dann auch einen zunehmenden Schutz für die Abbruchkante.

Zusammenfassend kann zur Entwicklung des Nordstrandes gesagt werden, daß sich dessen Strandlinien nach dem Bau der Düendämme West und Ost in kurzer Zeit (bereits vor 1952) auf die heutige Lage stabilisiert haben. Die Abbruchkante des künstlichen Aufspülgeländes hat aber bis heute einen Gleichgewichtszustand noch nicht erreicht.

4.3 Westseite und Dünenhafen

Die gesamte Westseite der Düne wurde durch die Arbeiten der Marinebauverwaltung in der Vorkriegs- und Kriegszeit befestigt und hat keinen natürlichen Strand mehr. Der nördliche Teil dieser Uferbefestigung wird von dem bereits erwähnten Düendamm-West gebildet, während im südlichen Teil die landseitige Kaje des Dünenhafens den Abschluß der Düne bildet. Als Fortsetzung dieser Befestigungen kann der Tetrapodendamm angesehen werden, der unmittelbar an diese Kaje anschließt.

Abbildung 39 (Ausschnittsvergrößerung aus Abb. 6) zeigt den Dünenhafen im Zustand von 1952. Der Bau fand 1939 bis 1941 statt. Von Interesse ist, daß danach noch der Nordmole C-B ein Wellenbrecher vorgelagert war, dessen Kronenhöhe auf MThw + 0,74 m angegeben wurde (nach Sonderentwurf Nr. 13 vom 25. 3. 1954 der HAFENBAUABTEILUNG HELGOLAND des WSA TÖNNING).

Reste dieses Wellenbrechers sind auf Abb. 6 noch zu erkennen. Er wurde offenbar beim Abbruch der Südmole F-G im Jahre 1954 mit entfernt. Wie bereits erwähnt, bestand damals die Absicht, den gesamten Dünenhafen abzubrechen, um wieder eine Sandzufuhr zum Südweststrand zu erhalten. Dieser Plan wurde später aufgegeben.

Geen Sandeintrieb und auch zum Schutze des Südendes der Dünenkaje wurde 1975 eine Stummelbühne aus Tetrapoden mit einem versenkten Betonschiff als Kern gebaut; außerdem wurde 1975 der bestehende Anleger für die Fährboote errichtet. Die verschiedenen Zustände des Dünenhafens von 1952 bis 1982 (bzw. 1984) sind auf Abb. 40 zusammenfassend dargestellt.

Die Düne ist zwar durch die Befestigungsmauern an der Westseite festgelegt, doch weisen diese Schwachstellen auf, von denen eine sich am südlichen Ende der Dünenkaje befindet (zwischen den Punkten A und G auf Abb. 39; die Punktbezeichnungen wurden aus Plänen der Marinebauverwaltung übernommen). Dabei ist zu bedenken, daß die Kaje von B bis G nicht als eine Uferschutzmauer, sondern als eine wellengeschützte Kaje berechnet und gebaut wurde. Erst durch den Abbruch der Südmole F-G wurde diese Strecke dem unmittelbaren Wellenangriff preisgegeben. Bei südwestlichen Wellenrichtungen gelangt danach der Seegang unmittelbar an die Kaje; bei nordwestlicher Wellenrichtung werden die Wellen durch Diffraction um den Molenkopf D auf die Kaje und hier besonders auf den Abschnitt A-G gelenkt.

Abbildung 41 zeigt die schwere Seegangsbelastung der Kaje (reflektierte und brechende Wellen) schon zu Beginn einer mittleren Sturmflut am 3. 1. 1984 um 10.30 Uhr bei einem Wasserstand von $HN + 1,2\text{ m}$ ($= MThw + 0,5\text{ m}$). Abbildung 42 veranschaulicht den Zustand der Kaje von der Düne her gesehen am 4. 1. 1984. Ein Einsturz der Kaje an dieser Stelle kann die Gefahr eines Wurzeldurchbruches der Tetrapodenbuhne mit seinen bedenklichen Folgen für den Südweststrand bedeuten.

Schwach- und Schadstellen befinden sich auf der gesamten Befestigungsstrecke der Westseite; sie werden teilweise durch seeseitige Stein- oder Tetrapodenschüttungen geschützt. Abgesehen von der Kaje am Dünenhafen, die nicht auf unmittelbare Wellenbelastung berech-

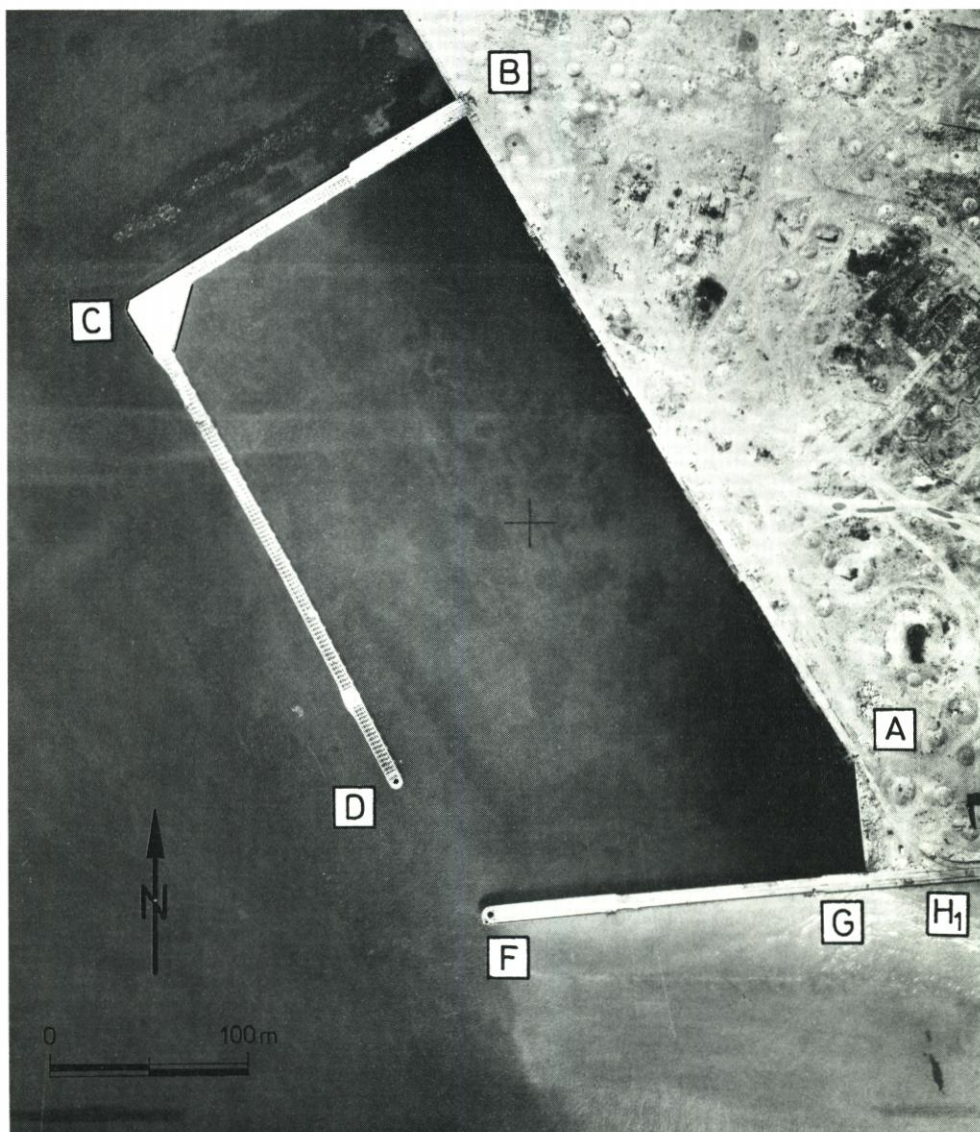


Abb. 39. Der Dünenhafen im Zustand von 1952

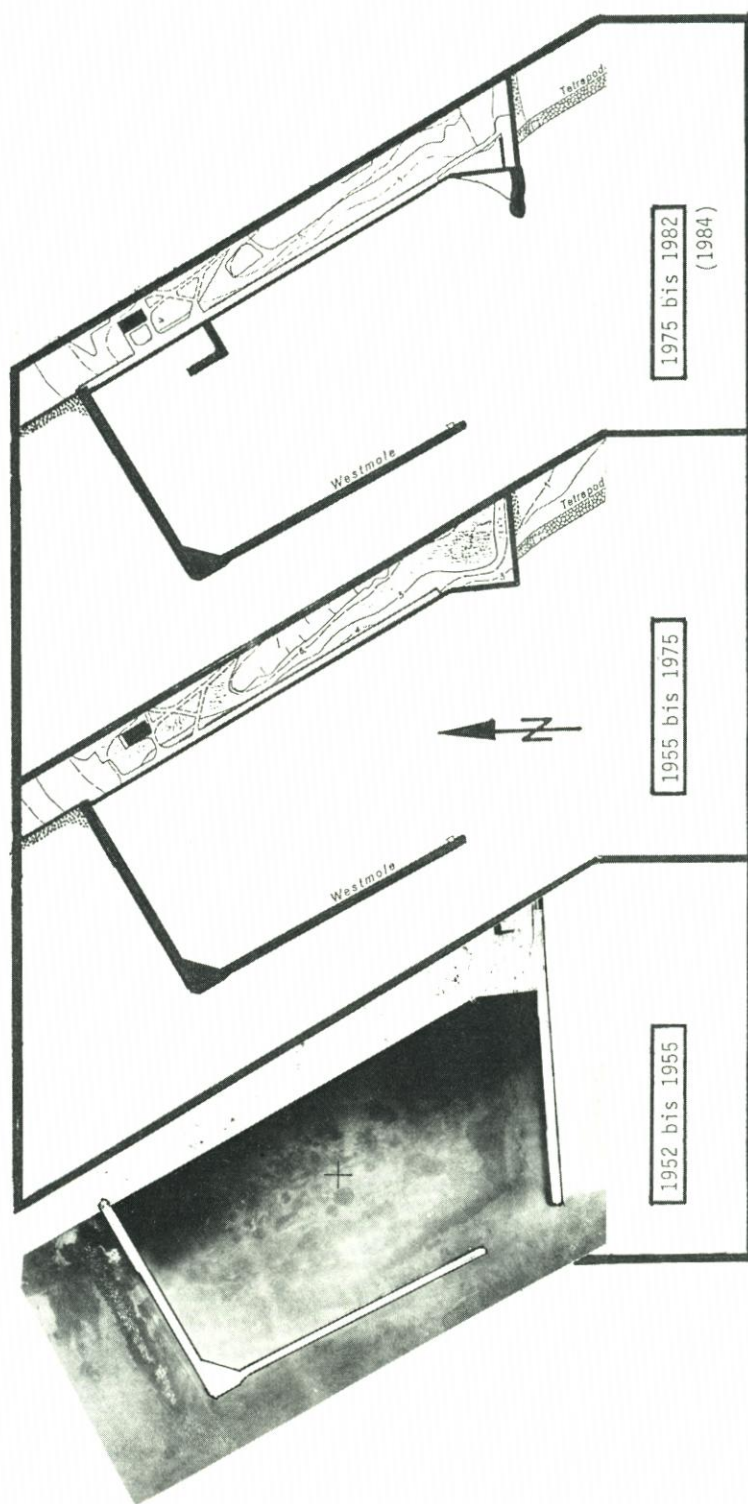


Abb. 40. Entwicklung des Dünenhafens 1952 bis 1982 (1984)



Abb. 41. Schwere Brandung (reflektierte und brechende Wellen) an der Kaje des Dünenhafens bei erhöhtem Wasserstand. Aufnahme vom 3. 1. 1984 (Foto: Singer, Helgoland)



Abb. 42. Blick auf die Kaje von der Düne her. Aufnahme vom 4. 1. 1984 (Foto: Singer, Helgoland)

net war, sind diese Schäden mit Sicherheit als Spätfolgen der Bombeneinschläge der Kriegs- und Nachkriegszeit zu werten. Auf Abb. 39 ist noch zu erkennen, wie dicht die Bombenkrater nicht nur auf der Düne, sondern auch im Dünenhafen und an seinen Molen liegen. Bei der Nordmole (C-B) kommt noch hinzu, daß sie ursprünglich in Verbindung mit dem vorgelagerten Wellenbrecher entworfen war.

Zur Sicherung der Düne ist es unumgänglich, die Schutzfunktion der bestehenden Uferbefestigungen zu erhalten. Außerdem erweist es sich im zunehmenden Maße als notwendig, die Situation des Dünenhafens zu verbessern. Es ist bekannt, welche Schwierigkeiten dem Fährverkehr bereits bei nur mäßigem Seegang aus Südwest entstehen. Das ist durch die weite Öffnung nach Südwesten bedingt, durch die auch die bereits erwähnten Sandeintreibungen in den Hafen gelangen.

5. Vorschläge für den zukünftigen Schutz der Düne

5.1 Der Südstrand

5.1.1 Die weitere Entwicklung des Südstrandes (ohne Eingriffe)

Aus den morphologischen Untersuchungen (vgl. Abb. 8, 9, 11 sowie Abb. 29 bis 31) geht hervor, daß es sich bei dem Rückgang und der gleichzeitigen Verschwenkung des Ostteiles des Südstrandes um Vorgänge handelt, die sich, bedingt durch die Tide und vor allem durch die vorherrschenden Wellenangriffsrichtungen, auch in Zukunft fortsetzen werden. Insbesondere für den Ostteil kann festgestellt werden, daß sich die Aade immer weiter nordwärts verlagern und dabei ihre bisherige Gestalt verlieren wird. Wie insbesondere aus der Auftragung auf Abb. 11 hervorgeht, ist damit zu rechnen, daß sich in etwa 20 Jahren aus der seit Jahrhunderten bestehenden Form der Aade als eines Geröllhakens eine mehr oder weniger flache, höftartige Strandform am Oststrand bilden wird. Dieser Prozeß wurde durch die Bauten der Kriegsmarine Ende der 30er Jahre eingeleitet und hat sich langfristig in den letzten Jahrzehnten fortgesetzt; durch den Bau der Tetrapodenbuhne ist er möglicherweise noch beschleunigt worden.

Mit dem langfristigen Strandrückgang sind bei Sturmfluten sprunghafte Verluste an der Südseite der Düne verbunden. Auf diese Weise folgt die Dünenkante im langzeitigen Geschehen den zurückgehenden Strandlinien. Die zukünftige Entwicklung hängt hier vor allem vom weiteren Auftreten schwerer oder sehr schwerer Sturmfluten ab. Dies sind natürliche Ereignisse, die nicht vorausgesagt werden können.

Von großer Bedeutung ist, daß das Ende der Landebahn mit ihrer Sicherung durch die rd. 60 m lange Tetrapodenbuhne (seit 1983) jetzt in die Entwicklung der Strandlinien eingreift, womit in die bisherige langzeitige Entwicklung (vgl. Abb. 11) eine neue Komponente gebracht worden ist. Während im Luv der Buhne durch die vorherrschende Sandwanderungsrichtung Anlandungen zu erwarten sind, wird in Lee der Buhne eine zunehmende Lee-Erosion die Folge sein, die sich zusätzlich den schon bestehenden Entwicklungstendenzen überlagern wird. Wie schnell und in welchem Maße sich diese Veränderungen im Osten des Südstrandes vollziehen werden, hängt wiederum von den vorherrschenden Wetterlagen der nächsten Jahre ab.

Wieweit eine weitere Veränderung des östlichen Abschnittes vom Südstrand hingenommen werden kann, muß von anderer Seite entschieden werden. Bedenklich kann die Entwicklung dann werden, wenn die Lee-Erosion die Ostseite des Landebahnkopfes erreicht und dann

sowohl bei Ostwinden als auch vor allem durch Diffraktionen bei westlichen Windlagen die Gefahr einer Beschädigung oder Zerstörung des Landebahnkopfes besteht.

Abschließend soll als ein Strandabschnitt von besonderer Eigenart und Bedeutung der westliche Abschnitt (von der Wurzel der Tetrapodenbuhne bis zum Dünenrestaurant) erwähnt werden. Wie die morphologischen Untersuchungen gezeigt haben, handelt es sich hier um den einzigen Strandteil, der im letzten Jahrzehnt bemerkenswert stabil geblieben ist, was zweifellos auf die Wirkung der Tetrapodenbuhne zurückzuführen ist. Es hat den Anschein, daß dieser Strand in seiner bestehenden Form als flaches Sandhöft von den Badegästen geschätzt und gern genutzt wird, so daß kein Grund zu bestehen scheint, an diesem Strandabschnitt durch Baumaßnahmen größere Änderungen hervorzurufen. Hier ist allein ein wirksamer Schutz der Dünenkante erstrebenswert, die bei Sturmfluten abbricht, weil durch die zu niedrige Kronenhöhe der Tetrapodenbuhne bei hohen Wasserständen der Seegang nahezu ungehindert über die Buhne an die Dünenkante gelangt. Von diesen einzelnen Sturmflutereignissen abgesehen, wird aber die langzeitige Strandstabilität nicht nennenswert betroffen.

Vorschläge für die Sicherung des Südstrandes sollten sich deshalb vor allem auf einen nachhaltigen Schutz des Mittelabschnittes mit dem Landebahnkopf und gegebenenfalls des Ostteiles bis zur Aade konzentrieren.

5.1.2 Vorschläge zur Sicherung des Südstrandes (Lösungsvorschläge A bis D)

Alle Lösungsvorschläge für die Sicherung des Südstrandes müssen von der Einsicht ausgehen, daß der beste und natürlichste Schutz einer Düne in einem lagestabilen hohen Vorstrand besteht. Aus der morphologischen Entwicklung des Südstrandes geht hervor, daß allein mit Sandersatz auf Dauer hier kein stabiler Strand erreicht werden kann. Die Erfahrungen mit Aufspülungen, besonders mit der von 1974, haben gezeigt, daß auch ein noch so großer Sandvorrat in kurzer Zeit nach Osten verfrachtet wird und damit dem Strand wieder verlorengeht. Daraus folgt zwangsläufig, daß beim Südstrand Aufspülungen nur dann sinnvoll sind, wenn durch feste Bauwerke dafür gesorgt wird, daß sie eine angemessene Stabilität und Lebensdauer erhalten. In den folgenden Vorschlägen A bis D (Abb. 43 bis 46) werden vier grundsätzliche Möglichkeiten für die Lage und Abmessungen solcher Bauwerke aufgezeigt.

Vorschlag A (Abb. 43) lehnt sich den Vorschlägen der BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (ROHDE u. FAHSE, 1973) an und sieht eine östliche Verlängerung der bestehenden Tetrapodenbuhne in etwa strandparalleler Richtung vor. Für die Lage eines solchen Längswerkes bzw. vorgelagerten Wellenbrechers gibt es mehrere Möglichkeiten. Mit einem solchen Bauwerk kann erreicht werden, daß die Schutzwirkung der bestehenden Tetrapodenbuhne, die heute etwa bis zum Dünenrestaurant reicht, bis zu einem Punkt östlich der Landebahn erweitert wird. Als Folge muß jedoch eine weitere Erosion des Ostteiles und der Aade hingenommen werden, da dieser Bereich nicht mehr durch das Längswerk nach Abb. 43 geschützt wird. Durch eine noch weitere Verlängerung der Baumaßnahme über die Punkte B oder B' hinaus wäre grundsätzlich auch ein Schutz dieser Bereiche möglich.

Im Schutze des Längswerkes könnte dann eine Aufspülung ähnlich der von 1974 durchgeführt werden, mit der eine anzustrebende Strandlinie und -neigung bei gleichzeitiger Schutzwirkung für die Düne erzeugt werden könnte. Allerdings hängt es von der Kronenhöhe dieses Längswerkes ab, bis zu welchen Wasserständen die Schutzwirkung für die Düne reicht. Wie das Beispiel der bestehenden Tetrapodenbuhne zeigt, ist eine Kronenhöhe von MThw

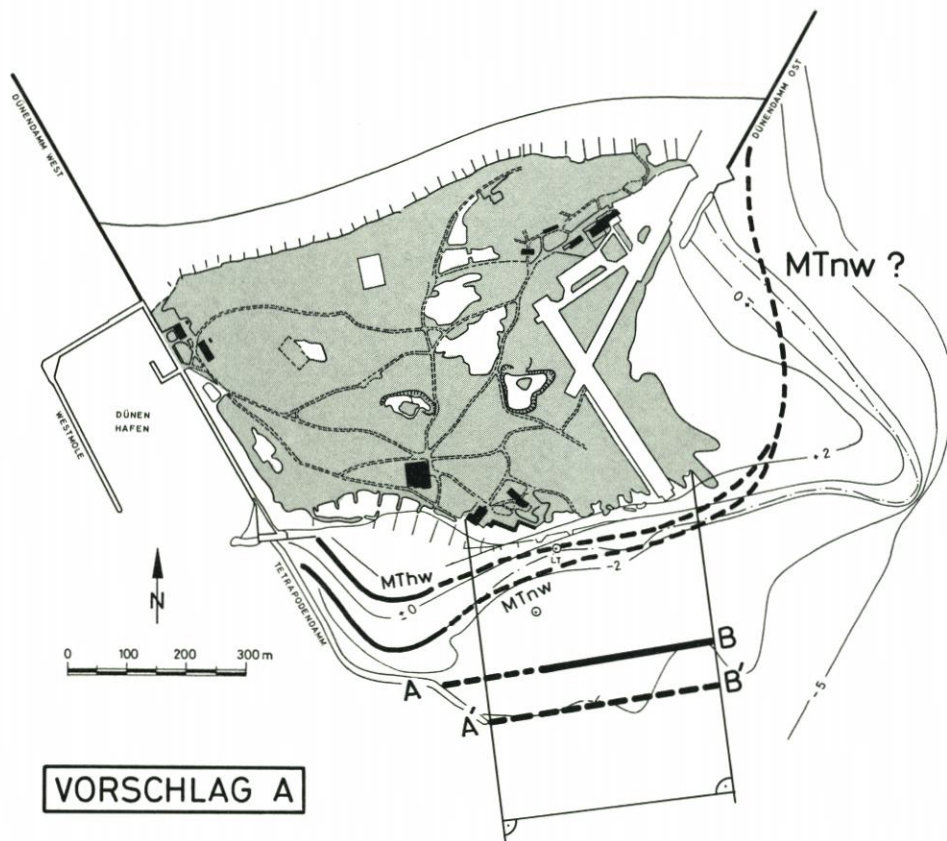


Abb. 43. Lösungsvorschlag A: Längswerk, von der Tetrapodenbühne ausgehend

+ ~ 1 m (HN + 1,75 m) dafür nicht ausreichend. Bereits bei einer Kronenhöhe von HN + 1,75 m werden durch Maßnahmen nach Abb. 43 eher Nebeneffekte erzeugt, die schon ROHDE und FAHSE (1973) als sehr unerwünscht und bedenklich für die Nutzung des Strandes, besonders als Badestrand, aufführten. Es wird nämlich im Schutze dieser Hakenbühne eine derartige Wellendämpfung im Bereich der Wurzelfläche erreicht, daß die Ansammlung von Schwemmzeug und Unrat unvermeidlich wird. Zusätzlich wird es in dieser Beruhigungszone zu einem vermehrten Bewuchs durch Algen und Tang kommen, der den Wert als Badestrand weiter herabsetzen würde. Schließlich wird durch solche Längswerke die Sicht vom Strand auf die offene See unterbunden. Eine gewisse Abhilfe könnte dadurch geschaffen werden, daß das Längswerk nicht unmittelbar an die Tetrapodenbühne angeschlossen, sondern mit einer Lücke von etwa 100 bis 200 m Länge als freistehender strandparalleler Wellenbrecher errichtet wird. Damit ist aber wieder eine Verminderung der Schutzwirkung verbunden. Aber auch bei einem Anschluß an die Tetrapodenbühne kann nicht verhindert werden, daß bei hohen Sturmfluten an dem offenen östlichen Ende Sand verlorengeht.

Nach Abb. 43 würden Längswerke Längen zwischen 400 und 500 m in Wassertiefen zwischen HN - 3 m bis HN - 4 m erhalten. Bei Kronenhöhen oberhalb HN + 1,75 m sind auch die Kosten einer solchen Lösung erheblich. Insgesamt dürften beim Vorschlag A die Nachteile die Vorteile überwiegen.

Vorschlag B (Abb. 44) wurde ebenfalls bei ROHDE und FAHSE (1973) angedeutet, aber nicht weiter verfolgt. Hier soll im genauen Gegensatz zu dem Vorschlag A erreicht werden, daß die östlich gerichtete Sandwanderung unterbrochen wird und daß dadurch mit einer entsprechenden Aufspülung ein im Mittel lagestabiler Strandbogen aufgebaut werden kann, wie er auf Abb. 44 schematisch dargestellt ist. Je nach den Wellenangriffsrichtungen wird zwar dieser Strandbogen „pendeln“, indem er immer bestrebt sein wird, sich senkrecht auf diese Richtung einzustellen, bei einer entsprechenden Länge der nach Südwesten ausgerichteten Buhne kann aber weitgehend verhindert werden, daß der Strandsand um den Bühnenkopf (Punkt A auf Abb. 44) herum aus diesem Strandbogen austritt. Der Strand oberhalb MThw kann dann so angelegt werden, daß auch ein optimaler Schutz der Düne erreicht wird.

Die Buhne nach Abb. 44 weist eine Länge von rd. 500 m auf; davon liegen rd. 400 m in Tiefenbereichen zwischen HN - 3 m und HN - 4 m. Die Länge ist von der Wahl des Anschlußpunktes C an der Südseite der Aade abhängig und damit von der Frage, wieweit die Aade, wenn es zum Bau einer solchen Buhne kommen sollte, bis dahin zurückgeschnitten ist. Hiermit ist auch die Frage verbunden, welche Aufspülmengen benötigt werden. Im Zustand wie auf Abb. 44 sind es annähernd 500 000 bis 600 000 m³ Sand, mit dem der Raum zwischen der Buhne und dem Strand auf etwa HN + 2 m aufgehöhrt werden müßte (einschließlich der Dünenverstärkungen, vgl. Abschn. 5.1.3). Am Punkt C ist durch einen entsprechenden Anschluß an den höheren Strand dafür zu sorgen, daß es hier nicht bei einer Extremsturmflut zu einem Wurzeldurchbruch kommt.

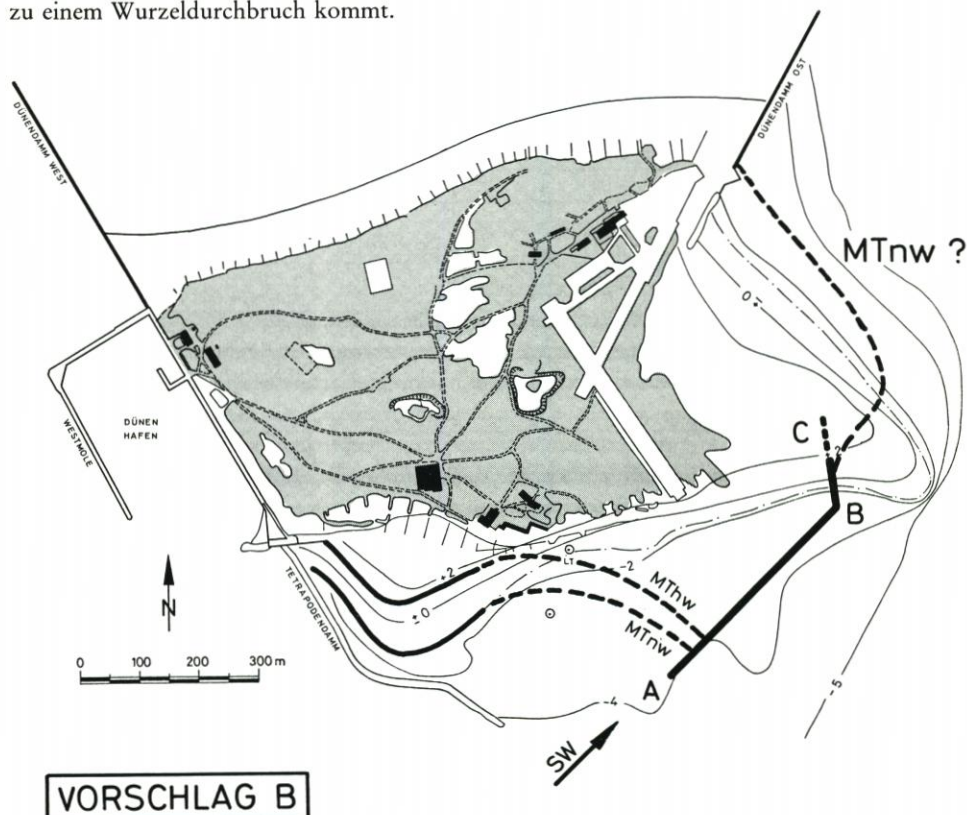
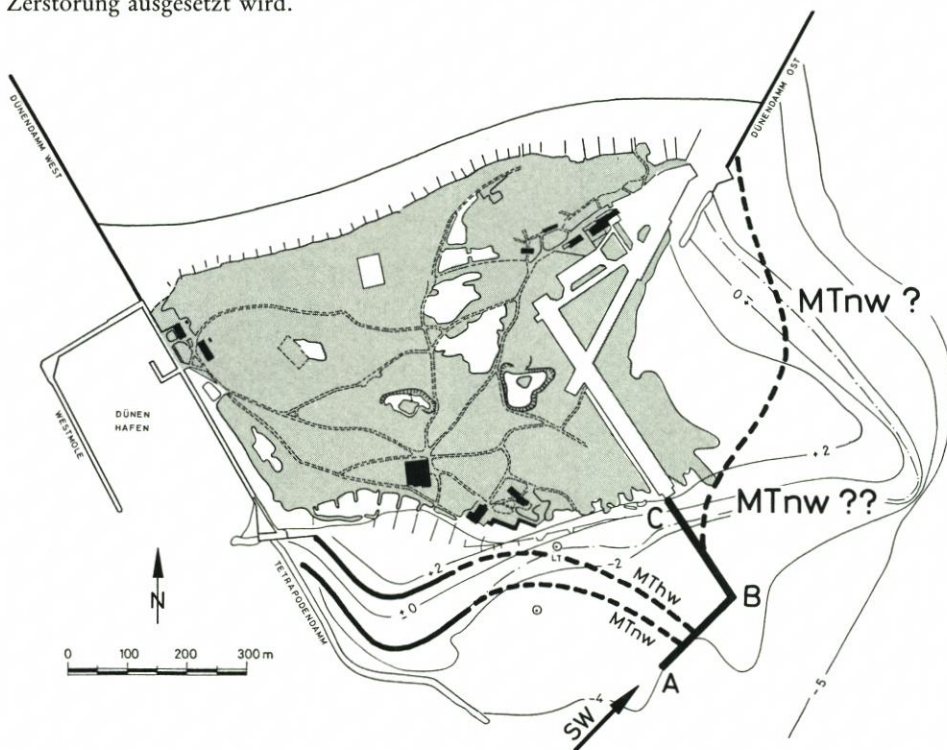


Abb. 44. Lösungsvorschlag B: Gegenbühne, von der Aade ausgehend

Der wesentliche Vorteil dieser Lösung besteht darin, daß einmal ein wirksamer Schutz des Südes der Landebahn auf beiden Seiten (westlich und östlich) erreicht, zum anderen der Aade und damit auch dem bestehenden Oststrand ein gewisser Festpunkt gegeben wird („künstliche Aade“ nach ROHDE u. FAHSE, 1973). Nachteile dürften vor allem durch die Kosten entstehen, die aber durch die Wahl des Anschlußpunktes C beeinflusst werden können.

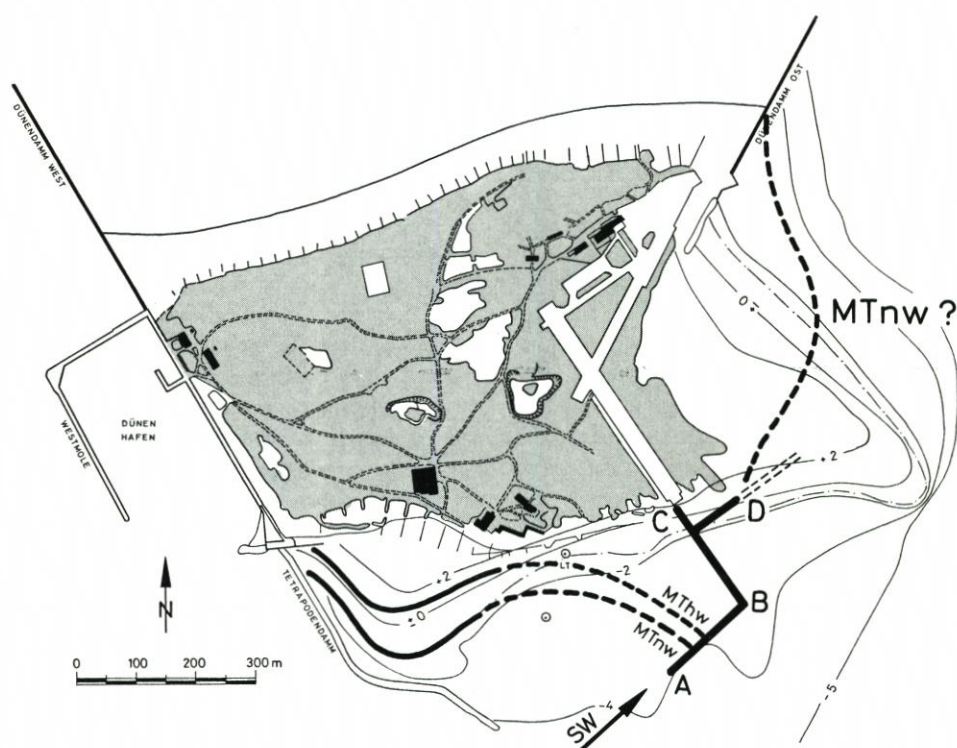
Vorschlag C (Abb. 45) geht von der Erstellung eines gleichen Strandbogens wie bei Vorschlag B aus; auch bleiben die Lage des Bühnenkopfes A und die nachfolgende Bühnensicherung nach Südwesten erhalten. Nur wird hier die Hakenbuhne mit dem Punkt C an die Landebahn angeschlossen, wo sich bereits die 60 m lange Tetrapodenbuhne befindet. Die Vorteile sind also für den Strand westlich der Landebahn die gleichen. Dafür weist die Buhne nach Abb. 45 einschließlich der neuen Buhne nur eine Länge von rd. 380 m mit rd. 200 m unter HN – 3 m auf. Die Aufspülung verringert sich hier auf etwa 300 000 m³ einschließlich der Dünenverstärkungen. Damit ist auf jeden Fall eine Kostenersparnis gegenüber Vorschlag B (Abb. 44) verbunden.

Nachteilig ist jedoch bei Vorschlag C gegenüber dem Vorschlag B, daß hier der Ostteil des Südstrandes nicht nur ungeschützt bleibt, sondern zusätzlich in den großräumigen Lee-Erosionsbereich der Buhne gelangt. Damit würden die im Abschnitt 5.1.1 erwähnten Prozesse weiter beschleunigt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß bei dem weiteren Rückgang der Aade die Ostseite des Landebahnkopfes in den unmittelbaren Strandbereich gelangt und damit den beschriebenen Wellenangriffen mit der Gefahr der Beschädigung oder sogar der Zerstörung ausgesetzt wird.



VORSCHLAG C

Abb. 45. Lösungsvorschlag C: Gegenbuhne, von der Landebahn ausgehend



VORSCHLAG D

Abb. 46. Lösungsvorschlag D: Gegenbuhne, von der Landebahn ausgehend; zusätzlich mit Sporn zum Schutz der Landebahn und des Ostteiles

Mit Vorschlag D (Abb. 46) wird daher versucht, die Vorteile der Vorschläge B und C zu vereinen, ohne zugleich deren Nachteile zu übernehmen. Vorschlag D geht von der gleichen Hakenbuhne wie bei Vorschlag C (Abb. 45) und den Aufspülungen zu gleichen Strandbögen wie bei Vorschlag B und C (Abb. 44 und 45) aus, sieht aber etwa 50 m vor dem Anschluß der Hakenbuhne an die Landebahn einen senkrecht gerichteten Sporn vor, der den Schutz des Landebahnkopfes übernehmen soll. Außer der unmittelbaren Sicherung des Landebahnkopfes wird durch diesen Sporn auch die Möglichkeit eröffnet, durch eine spätere Verlängerung aktiv in das morphologische Geschehen an der Aade einzugreifen, wenn dieses aus irgendwelchen Gründen als wünschenswert erscheint. Die Flexibilität dieser Lösung mit den Anpassungsmöglichkeiten an die zukünftigen Entwicklungen wird als ein wesentlicher Vorteil dieser Lösung gewertet.

Es ist auch denkbar, zunächst nur den Vorschlag C zu verwirklichen und dann zunächst die Entwicklungen am Kopf der Landebahn abzuwarten. Es ist allerdings nicht auszuschließen, daß diese, wie es aus der Erfahrung bekannt ist, sich sehr schnell, u. U. in einer einzigen Sturmflut oder während einer Sturmflutkette, einstellen können.

5.1.3 Allgemeine Bemerkungen zu den vorgesehenen Baumaßnahmen

Unabhängig von den konstruktiven Ausbildungen und den Bemessungen der vorgeschlagenen Baumaßnahmen – wozu vor allem deren Bemessung gegen die zu erwartenden Angriffe durch Wellen und Strömungen gehört – werden nachfolgend Empfehlungen aufgeführt, die in unmittelbarer Beziehung zu den Funktionen der Lösungsvorschläge stehen, die jedoch durch die Baumaßnahmen unbedingt zu erfüllen sind.

Bei den vorgeschlagenen festen Bauwerken können die in Vorschlag A (Abb. 43) enthaltenen Längswerke in reiner Schüttsteinbauweise (Natursteine, Tetrapoden o. ä.) ausgeführt werden. Ein dichter Kern ist hier nicht notwendig; im Gegenteil kann eine gewisse Durchlässigkeit im Hinblick auf einen Wasseraustausch sogar als wünschenswert angesehen werden. Dies gilt aber nicht für die Gegenbuhnen der Vorschläge B, C und D (Abb. 44 bis 46), die als notwendige Stützen für einen nachfolgend aufzuspülenden Strandkörper angesehen werden und daher bis zur angestrebten Strandhöhe, besser noch darüber, undurchlässig sein müssen. Ist dies nicht der Fall, so sind bei jeder Sturmflut empfindliche Sandverluste zu erwarten, die dann irgendwann durch weitere Nachspülungen wieder ergänzt werden müssen. Gleiches gilt bei zu niedrigen Kronenhöhen der Bauwerksvorschläge; sie könnten jedoch abschnittsweise so abgestuft werden, daß sie lediglich im Strandbereich so hoch über der angestrebten Strandfläche liegen, daß sich Sandverluste durch überschlagende Wellen in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen halten.

Hierzu und auch zu den endgültigen Linienführungen und Längen der Buhnen empfiehlt es sich, noch spezielle Untersuchungen durchzuführen, wenn ein bestimmter Lösungsvorschlag für die Ausführung vorgesehen wird. Dazu ist ein Modellversuch geeignet, der auch zugleich Hinweise dafür geben kann, in welchem Maße die bestehende Tetrapodenbuhne erhöht werden muß, damit die Düne in diesem Bereich und bei hohen Sturmfluten geschützt bleibt. Ebenso kann dadurch die Frage beantwortet werden, ob nach Durchführung einer der Baumaßnahmen nach den Vorschlägen B bis D der äußere Teil der Tetrapodenbuhne (z. B. die letzte Verlängerung um 100 m von 1974, vgl. Abb. 33) ohne Gefahr für den Südweststrand wieder aufgenommen und anderweitig verwendet werden kann.

Zur Einspültechnik ist zu bemerken, daß das Spülfeld ungefähr der Form des Strandbogens nach den Vorschlägen B bis D (Abb. 44 bis 46) folgen sollte, wobei es von den Seegangsbedingungen während der Einspülzeit abhängig sein wird, wie schnell sich eine stabile Strandneigung in der Wasserwechselzone zwischen MThw und MTnw und in dem Bereich darunter einstellt. Günstig wäre eine Aufspülung im Herbst, weil erwartet werden kann, daß bis zur Badesaison des nächsten Jahres die Strandentwicklung abgeschlossen ist.

Oberhalb der MThw-Linie könnte eine Aufspülung mit der natürlichen Neigung des vorhandenen trockenen Strandes bis auf etwa $HN + 2,0$ m ansteigen. Darüber empfiehlt es sich, die Strandneigung so auszubilden, daß unmittelbar am Dünenfuß eine Höhe von mindestens $HN + 3,0$ m erreicht wird. Zusätzlich sollte vor der bestehenden Dünenkante ein Streifen von etwa 30 m Breite oder mehr (je nach den örtlichen Erfordernissen) wieder auf die bestehende Dünenhöhe aufgeschoben und danach so gestaltet bzw. bepflanzt werden, daß dieser Streifen sich optisch der bestehenden Dünenoberfläche anpaßt. Bei extremen Sturmfluten wird es jedoch nicht zu vermeiden sein, daß auch an diesem Streifen Abbruchkanten auftreten. Bei einem vorgelagerten breiten Vorstrand mit einer Höhe von $HN + 3,0$ m am Dünenfuß werden dann aber die Verluste geringer sein, die u. U. mit den üblichen Maßnahmen, wie z. B. Sandfangzäunen, wieder ausgeglichen werden können.

Als Vorspülmaterial ist nur ein Material geeignet, das etwa das gleiche oder ein etwas gröberes Kornband als der bestehende Strand aufweist; dies gilt jedoch nicht für den Geröllanteil (vgl. Abb. 27).

5.2 Ost- und Nordstrand

Die Entwicklung des Oststrandes hängt, wie gezeigt, eng mit den Entwicklungen des östlichen Abschnittes des Südstrandes und der Aade zusammen und ist in diesem Zusammenhang bereits behandelt worden. Bei der Verwirklichung der Vorschläge A (Abb. 43) oder C (Abb. 45) erhält der Oststrand keinen zusätzlichen Schutz und nimmt weiter die Entwicklung, die aus Abb. 11 hervorgeht. Nur bei den Vorschlägen B (Abb. 44) oder D (Abb. 46) ist eine gewisse Stabilisierung auch dieses Strandabschnittes zu erwarten.

Das an den Dünendamm Ost anschließende nördliche Ende des Oststrandes wird sich weiter nördlich der Mole entlang verlängern und dieser Mole auf der Ostseite einen zusätzlichen Schutz liefern.

Kritisch kann die Entwicklung am Oststrand dann werden, wenn die östliche Seite des Landebahnkopfes von den Strandlinien MThw und MTnw erreicht wird.

Die festgestellte Stabilität der Strandlinien des Nordstrandes (vgl. Abb. 37) wird so lange erhalten bleiben, wie die Dünendämme Ost und West als sog. Strandstützen wirksam bleiben. Wenn auch in der Vergangenheit bei schweren Sturmfluten hier örtliche Sandverluste durch Wellenüberschlag aufgetreten sind, so haben diese doch die Gesamtbilanz dieses Strandabschnittes bisher kaum beeinflussen können.

Für die Dünenkante am Nordstrand muß jedoch gesagt werden, daß sie bei schweren Sturmfluten weiter abbrechen wird, und zwar so lange, bis der Strand zwischen der MThw-Linie und der Dünenkante so breit geworden ist, daß ein natürliches Gleichgewicht erreicht wird; dies ist gegenwärtig noch nicht der Fall. Auf jeden Fall wirken sich die bisher getroffenen Maßnahmen mit Sandfangzäunen positiv aus, auch wenn Abbrüche dadurch nicht vollständig vermieden werden können.

Im ganzen gesehen droht vom Nordstrand her derzeit der Düne keine Gefahr; örtliche Gefahrenpunkte sind nur dort vorhanden, wo eine Bebauung zu dicht an die Dünenkante gelegt wird.

6. Zusammenfassung

Die Entwicklung der Düne Helgoland wurde entscheidend durch die Bauten der Kriegsmarine von 1937 bis 1942 beeinflusst, die aus einer vorwiegend durch die wellen- und tidebedingten Strömungen geformten Sandinsel im Wellenlee der Hauptinsel eine Inselstruktur erzeugten. Sie mußte sich in der Folge auf diejenigen Uferbefestigungen ausrichten, die bis 1942 fertiggestellt worden waren. Auch Kriegs- und Nachkriegsereignisse hatte ihre Folgen; eine systematische Übersicht über die morphologischen Entwicklungen der Düneninsel ist erst ab 1952 (Rückgabe an die Bundesrepublik Deutschland) möglich. Sie zeigt bei hoher Stabilität der Strandlinien MTnw und MThw am Nordstrand und einem Anwachs des Oststrandes vor allem einschneidende Veränderungen am Südstrand, die im wesentlichen auf die veränderten Uferbedingungen am Weststrand zurückzuführen sind. Dieser wurde völlig durch die Uferbefestigung des Dünendamms West und die Anlage des Dünenhafens 1939 bis 1941 verändert. Statt eines Strandes sind hier nur noch senkrechte Uferneigungen als Betonbauwerke vorhanden.

Als Folge dieser Veränderungen zeigt der Südstrand nach den Vermessungen ab 1952 einen fortwährenden Rückgang, der auch durch die schrittweise Anlage einer Tetrapodenbuhne (1965 bis 1974) nur am westlichen Teil (von der Wurzel der Tetrapodenbuhne bis etwa zum Dünenrestaurant) erfolgreich bekämpft werden konnte. Der östlich davon gelegene Teil brach weiter ab, wobei die Richtungen der Strandlinien von Nordwest nach Südost in die Richtungen von Südwest nach Nordost schwenkten. Dadurch wird die Abbruchwirkung des vorherrschenden Wellenangriffs stetig verstärkt.

Dem allmählichen Rückgang der Strandlinien auf MTnw und MThw folgt bei schweren Sturmfluten in plötzlichen Sprüngen der Abbruch der Dünenkante. Bei hohen Sturmflutwasserständen stellt auch die Tetrapodenbuhne mit ihrer derzeitigen Kronenhöhe kein Hindernis für die Wellen dar. Dünenabbrüche werden daher auch in den Abschnitten die Folge sein, wo der Strandbereich durch die Tetrapodenbuhnen geschützt wird.

Wesentlich stärker als die Tideströmungen, die in den tieferen Wasserbereichen sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom westwärts gerichtet sind und dort einen gewissen Sandstrom erzeugen, sind im Bereich der Wasserwechselzone zwischen MTnw und MThw und in den Strandbereichen oberhalb MThw die Brandungsströmungen durch Wellen bei westlichen Windrichtungen wirksam, die eine ständige Sandwanderung („Gleichrichtereffekt“) von Westen nach Osten in dem Bereich der Aade erzeugen. Dort geht dieser Sand fast völlig durch die Abwanderung in größere Wassertiefen dem Inselhaushalt verloren. Diese Prozesse wurden im Laufe des Beobachtungszeitraumes in dem Bereich östlich der Tetrapodenbuhne eher verstärkt (großräumige Lee-Erosion) als abgeschwächt. Als neueste Entwicklung kommt hinzu, daß die Strandlinien inzwischen das Süden der Landebahn erreicht haben. Durch die dadurch erforderlichen Sicherungen (Tetrapodenbuhne in Verlängerung der Landebahn, 1983) sind weitere Lee-Erosionen ostwärts des Landebahnkopfes zu erwarten.

Hinzu kommt, daß sich seit 1962 die Sturmflutaktivität sowohl in der Höhe extremer Sturmfluten (z.B. 1962, 1973, 1976 und 1981) als auch in der Häufigkeit mittlerer Sturmfluten bedeutend erhöht hat.

Zur Abwehr dieser besonders für den Südstrand und dessen Dünenkante bedrohlichen Entwicklung werden vier Vorschläge A bis D vorgelegt und mit ihren Vor- und Nachteilen bewertet.

A n m e r k u n g : Die vorliegende Forschungsarbeit wurde über den Landrat des Kreises Pinneberg durch die Gemeinde Helgoland ermöglicht. Hierfür sei stellvertretend für alle beteiligten Angehörigen der Gemeinde Helgoland Herrn Bürgermeister Degenhardt gedankt; für die Hilfe zahlreicher Dienststellen des Landes Schleswig-Holstein und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes bei der Beschaffung des Datenmaterials sei an dieser Stelle ebenfalls herzlich gedankt.

7. Schriftenverzeichnis

- BAHR, M.: Die Veränderung der Helgoländer Düne und des umliegenden Seegebiets. Jahrbuch der HTG, Bd. 17, 1939.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 41, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeiten von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 51, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten von Extremsturmfluten. Die Küste, H. 34, 1979.

- FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergien bei Sturmfluten. a) Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979. b) Jahrbuch der HTG, Bd. 38, 1981.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- GRUPE, O.: Muschelkalk und Kreide und ihre Lagerungsverhältnisse im Untergrunde der Düne von Helgoland. Jahrbuch Preuss. Geol. Bundesanstalt, 50, 1929.
- GUENTHER, E. W.: Eine neue zusammengestellte Karte der Insel Helgoland. Schriften Naturwiss. Verein Schleswig-Holstein, Kiel, 1969.
- HAFENBAUABTEILUNG HELGOLAND des WSA TÖNNING: Wiederaufbau der Anlagen auf Helgoland. Sonderentwurf Nr. 13 vom 25. 3. 1954.
- JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 88, 1985.
- KRUMBEIN, W. E.: Verwitterung, Abtragung und Küstenschutz auf der Insel Helgoland. Abb. Verh. naturwiss. Ver. Hamburg 18/19, 1975.
- PRACK, H. R.: Gutachterliche Stellungnahme für die Sicherung der Südseite der Düne auf Helgoland. Heide, 1982.
- ROHDE, H. u. FAHSE, H.: Hydrologische Untersuchungen im Gebiet der Düne Helgoland. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Mai 1972.
- ROHDE, H. u. FAHSE, H.: Hydrologische Untersuchungen im Gebiet der Düne Helgoland. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, August 1973.
- SEIFERT, A.: Die jüngste Entwicklung der Helgoländer Düne. Natur und Volk, H. 9, 1953.
- VELLINGA, P.: Beach and Dune Erosion during Storm Surges. Delfts Hydr. Labr. Publ. No. 276, 1982.
- VOELCKER, J.: Geröllwanderung auf der Düne von Helgoland. Kieler Meeresforschungen, H. 1, 1936.
- ZIEGLER, W.: Bericht des Direktors für das Jahr 1982. Natur und Museum, Bd. 113, H. 8/9, 1983.