

Ein Vorschlag zur Analyse eines Wellenklimas

Von Hans Henning Dette

Zusammenfassung

In den kommenden Jahren sind noch hohe Aufwendungen erforderlich, um allen Küstenabschnitten an Nord- und Ostsee die gleiche Sicherheit gegen Sturmfluten zu geben. Damit See- und Küstenschutzbauten so bemessen und erstellt werden können, daß mit einem Minimum an Aufwand und Unterhaltung ein Maximum an Schutzwirkung erzielt wird, ist die Kenntnis der angreifenden Seegangskräfte eine wichtige Voraussetzung. Ermöglicht durch die Fortschritte in der Meßwerterfassung und -verarbeitung wurden in den letzten Jahren umfangreiche Wellenmeßprogramme begonnen. Auf der Grundlage eines relativ kurzzeitigen Wellenmeßprogrammes vor Westerland/Sylt in den Jahren 1971 bis 1974 werden Möglichkeiten aufgezeigt, über weitergehende statistische Betrachtungen, z. B. Wind-Wellen-Korrelationen, Wellenenergieabgabe etc., zu möglichst umfassenden Kenntnissen des örtlichen Langzeit-Wellenklimas zu gelangen und dem Ingenieur die Bemessung von Bauwerken und die Analyse von Küstenprozessen zu erleichtern.

Summary

During the coming years, along the German North Sea and Baltic coastlines, high expenses will still be necessary in order to obtain an equal degree of safety – for all places – against extreme storm floods. In order that the offshore and coastal defence structure can be designed and constructed so that, with a minimum of expense and maintenance, a maximum of protection may be attained, the knowledge of local wave climate is absolutely essential. On the basis of a relatively short-term wave measurement programme off the Island of Sylt during the years 1971 to 1974, possibilities were revealed of being able to gain the most comprehensive knowledge of the long-term wave climate by means of more extensive statistical considerations (e.g. wind-wave correlations, extreme wave parameters, wave energy loads), and thereby facilitate the future design of structures and the evaluation of coastal processes.

Inhalt

1. Einleitung	166
2. Anwendungsbeispiele für die Analyse eines Wellenklimas	167
3. Einige Ergebnisse der Wellenmessungen vor Sylt	168
4. Wind-Wellen-Korrelationen	170
5. Bemerkungen zur Energieabgabe der Wellen	175
6. Schriftenverzeichnis	180

1. Einleitung

Seit der Februarsturmflut im Jahre 1962 haben Bund und Länder bislang 3,2 Milliarden DM für den Küstenschutz ausgegeben (GALLUS, 1977); in den folgenden sieben bis zehn Jahren sind nach derzeitigem Stand noch Aufwendungen von rd. 1,75 Milliarden DM notwendig, um allen Küstenabschnitten an der Nord- und Ostseeküste die gleiche Sicherheit gegen Sturmfluten zu geben. An die Erfüllung der noch anstehenden Aufgaben haben die Sturmfluten im Januar 1976 eindrucksvoll erinnert, indem sie schwache Stellen der verschiedenen Schutzwerke aufdeckten.

Voraussetzung für einen wirksamen Küstenschutz ist die Kenntnis der angreifenden Seegangskräfte; quantitativ können sie aus Erfahrung nur in der Natur selbst erfaßt werden, dort, wo der Angriff der Wellen und der Widerstand des Küstenmaterials in einer kontinuierlichen Wechselbeziehung stehen und letztlich auch nur in dem Gebiet, wo gebaut und geschützt werden soll.

Eine Aufzeichnung der Wellen einschließlich der bei extremen Seegangsverhältnissen wurde erst in den letzten Jahren durch die Entwicklung von robusten und seewasserfesten elektronischen Meßwertaufnehmern, die nicht nur bei „Schönwetterlagen“ arbeiten, möglich; hinzu kommen noch neueste Registriereinheiten einschließlich Analog- und Magnetbandaufzeichnung, wodurch in der Folge die elektronische Datenverarbeitung erforderlich wird, um das aus Naturmessungen anfallende, umfangreiche Datenmaterial in kürzester Zeit aufzuarbeiten und über die Analyse der einzelnen Einflußparameter im Seegangsgeschehen hinaus Korrelationsuntersuchungen, z. B. mit meteorologischen Daten, anstellen zu können.

Hauptaufgabe der Küstenforschung muß es sein, dem verantwortlichen Ingenieur die Bemessungsgrundlagen für Baumaßnahmen in der See und an der Küste zu liefern, damit diese so bemessen und erstellt werden können, daß bei geringen Unterhaltungskosten mit einem Minimum an Aufwand ein Maximum an Schutzwirkung bzw. Sicherheit erzielt wird. Unter diesen Gesichtspunkten, ermöglicht durch den derzeitigen Stand der Meßtechnik und der Datenverarbeitung, wurden nach ersten umfangreichen Wellenmessungen vor Sylt in den Jahren von 1971 bis 1974 (FÜHRBÖTER et al., 1972 und 1976; DETTE, 1974a) weitere Wellenmeßprogramme (u. a. ERCHINGER, 1976 sowie LUCK und NIEMEYER, 1976) vorwiegend im Rahmen des angelaufenen langjährigen Forschungsprogramms des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begonnen, mit dem Ziel, für repräsentative Abschnitte an der Küste Bemessungsgrundlagen für künftige Bauvorhaben in Form von realistischen Wellenkennwerten zu liefern.

2. Anwendungsbeispiele für die Analyse eines Wellenklimas

Für die Bemessung von Küstenschutzbauten und Seebauwerken ist die Kenntnis des örtlichen Wellenklimas eine wesentliche Entscheidungshilfe; hierzu zählt die Ermittlung der höchsten Wellen sowie die Überschreitungshäufigkeit von maximalen oder signifikanten Wellenhöhen.

An dieser Stelle ist auf die Problematik von Naturmessungen hinzuweisen, die scherzhaft wohl am eindrucksvollsten charakterisiert werden kann mit dem „Gerücht“, daß das Auslegen von Sensoren zur Messung von Extremwerten den besten Küstenschutz darstellt, da gewöhnlich dann, wenn man auf ein Ereignis wartet, dieses sich nicht wunschgemäß einstellt. Aber auch hier gibt es die berühmten Ausnahmen; denn innerhalb kürzester Zeit wurde die deutsche Nordseeküste nach der Sturmflutkette im Winter 1973/74 bereits im Januar 1976 von der zweiten „Jahrhundertsturmflut“ nach 1962 betroffen; in diesem Zeitraum konnten bereits wertvolle Meßdaten gewonnen werden (vgl. z. B. CHRISTIANSEN, 1976; ERCHINGER, 1973 und 1976; DETTE, 1974b).

Allgemein muß davon ausgegangen werden, daß Meßzeiträume von einigen Jahren bis hin zu zehn Jahren und mehr nicht ausreichen, um tatsächlich auch alle denkbaren Extremwerte des Seeganges und seiner Auswirkungen (z. B. Druckschlag, Wellenauflauf und -überlauf) im Naturgeschehen zu erfassen. Daher sollten auf der Grundlage eines umfassenden Datenmaterials, das in einem sinnvoll erscheinenden Zeitraum von drei bis fünf

Jahren gesammelt und analysiert wird, statistische Betrachtungen angestellt werden, um z. B. abzuschätzen, welche maximalen und/oder signifikanten Wellenhöhen einmal in 10, 50 oder 100 Jahren zu erwarten sind. Weiterhin können im Falle von ausreichenden Korrelationen zwischen Windgeschwindigkeiten und Wellen für die ausgewählten Windsektoren die Wellenhöhen überschlägig ermittelt werden, die zu erwarten sind, wenn Windgeschwindigkeiten auftreten, die bislang noch nicht registriert wurden.

Die Kenntnis des örtlichen Wellenklimas wird es auch ermöglichen, über die Untersuchung von langjährigen statistischen Angaben, z. B. für einen bestimmten Monat oder eine Jahreszeit, das Risiko für eine im langjährigen Mittel zu erwartende Wellenunruhe während der Ausführung einer zeitgebundenen Tätigkeit abzuschätzen oder für die Festlegung der Bauzeit die ruhigste Seegangsperiode heranzuziehen, z. B. die Durchführung von Strandauffüllungen.

In letzter Zeit ist eine zunehmende Abwendung von starren Küstenschutzbauten sowie in der Folge damit zusammenhängender Reparatur- und Unterhaltungsarbeiten – dem sogenannten *passiven Küstenschutz* – und eine Hinwendung zum *aktiven Küstenschutz* festzustellen (FÜHRBÖTER, 1974). Dabei wird, ermöglicht durch die Leistungsfähigkeit der modernen Naßbaggertechnik, Sand in großen Mengen als Baustoff verwendet. Bei diesem Konzept wird z. B. der Vorstrand vor Längswerken (Norderney, Langeoog, Wangeroog, Föhr, Sylt etc.) künstlich wieder erhöht, um die Fußsicherung der Längswerke wiederherzustellen. Durch die Erhöhung des Strandes tritt ein vorzeitiges Ausbränden der Wellen ein, und die ankommende Seegangsenergie wird so von den Uferbauten ferngehalten (FÜHRBÖTER, 1973).

Im Hinblick auf diese Entwicklung eröffnet sich mit der Analyse des Wellenklimas ein weiterer Anwendungsbereich. Da bei einer Strandauffüllung davon auszugehen ist, daß sie von Zeit zu Zeit wiederholt werden muß, ist es nun wichtig, rechtzeitig den Zeitpunkt zu bestimmen, wann eine Wiederholungsmaßnahme einzuleiten ist und zum anderen, auch ein halbwegs objektives Maß für die „Haltbarkeit“ einer derartigen Maßnahme zu finden. Dies ist die Voraussetzung für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen über eine Strandauffüllung im Vergleich zum Bau eines starren Küstenschutzbauwerkes und/oder ihrer laufenden Unterhaltungs- und Reparaturkosten. Hier bietet sich statt eines linearen Zeitmaßstabes das fortlaufende Integral der tatsächlichen Wellenintensität eines Monats oder eines Jahres – also ein verzerrter Zeitmaßstab – als Bezugsparameter für die Beurteilung der Sandverluststraten nach der Durchführung der Strandauffüllung an. Dieser Vorschlag kann z. B. dadurch belegt werden, daß die während der Sturmflutkette 1973 (6. 11. bis 17. 12. 1973) vor Sylt ermittelte Wellenenergie höher lag als die Summe der Energie, die in der übrigen Zeit des Jahres zu verzeichnen war (FÜHRBÖTER et al., 1976).

Aufgabe der nachfolgenden Untersuchungen zum Wellenklima vor der Insel Sylt soll es sein, an einem konkreten Beispiel die praktischen Anwendungsmöglichkeiten, die sich aus der Seegangsanalyse ergeben, zu veranschaulichen.

3. Einige Ergebnisse der Wellenmessungen vor Sylt

Begleitend zu der im Jahre 1972 vor Westerland/Sylt durchgeführten Sandvorspülung (FÜHRBÖTER et al., 1972 und 1976) wurden in den Jahren von 1971 bis 1974 in enger Zusammenarbeit zwischen dem Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum und dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig u. a. umfangreiche Wellenmessungen an 4 Meßstationen (W_1 bis W_4 auf Abb. 1) im Küsten-

vorfeld vor der Insel Sylt durchgeführt (WENZEL 1974, DETTE 1974a + b, FÜHRBÖTER et al., 1972).

Die Wellenmessungen wurden mit Echolot-Wellenpegeln nach dem Ultraschallprinzip (FAHRENTHOLZ, 1973) durchgeführt. Jede Einzelmessung dauerte 15 Minuten, um sicherzustellen, daß jeweils mindestens eine Folge von 100 Wellen für die Auswertung zur Verfü-

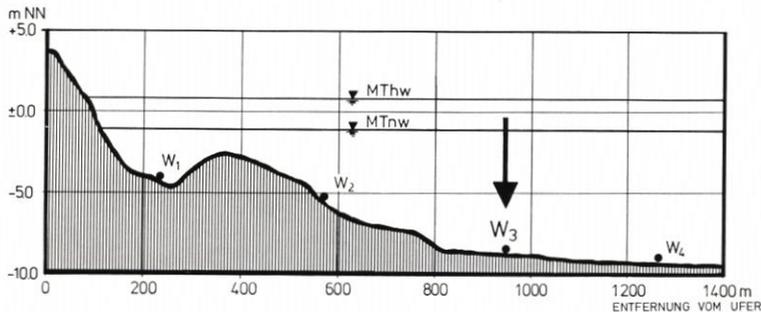


Abb. 1. Lage der Ultraschall-Wellenschreiber W_1 bis W_4 vor der Insel Sylt

gung stand. Alle Messungen wurden gleichzeitig an den 4 Stationen durchgeführt. Für die Ermittlung der für Ingenieurbelange charakteristischen Wellenkennwerte

- H_{max} = maximale Wellenhöhe
- H_s = signifikante Wellenhöhe (=Mittel des höchsten Drittels in der Wellenregistrierung)
- H_m = mittlere Wellenhöhe
- T_m = mittlere Wellenperiode

in einer Folge von 100 Wellen wurde das Nulldurchgangsverfahren (DRAPER, 1966) zugrunde gelegt.

Aus einer Anzahl von etwa 400 Einzelwellenmessungen im Zeitraum 1971 bis 1974 wurden folgende statistischen Verhältniswerte für die seewärts des Rifles gelegene Meßstation W_3 (Abb. 1) ermittelt

$$\begin{aligned} H_{max}/H_s &= 1,44 \\ H_s/H_m &= 1,44 \\ H_{max}/H_m &= 2,07 \end{aligned}$$

Diese Angaben stimmen auffallend gut mit ähnlichen Untersuchungen für andere Seegebiete überein (vgl. z. B. WIEGEL, 1964). Für die genannten 400 Einzelmessungen, mit denen nahezu alle im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Wetterlagen mit Wellenhöhen ab etwa 1 m bis hin zu schweren Sturmfluten (Sturmflutkette im November und Dezember 1973) erfaßt wurden, zeigt Abb. 2 die prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhen H_s in Stufen von je 0,5 m sowie Abb. 3 die Verteilung der mittleren Wellenperioden T_m in Intervallen von je 1 Sekunde.

Im Untersuchungszeitraum 1971 bis 1974 wurde als Maximum ein $H_s = 5,2$ m mit einer Wellenperiode $T_m = 9,5$ s an der Station W_3 (Abb. 1) ermittelt; im Mittel traten Wellenhöhen von $H_s = 2,2$ m und einer mittleren Wellenperiode $T_m = 6$ s auf.

Anschaulicher noch als die getrennte Darstellung der Häufigkeit von Wellenhöhe und -periode (Abb. 2 und 3) zeigt Abb. 4 die Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen H_s und der zugehörigen Wellenperioden T_m ; ergänzend sind die Wellensteilheiten H/L für eine

mittlere Wassertiefe von $d = 10$ m an Station W_3 nach der linearen Wellentheorie von AIRY eingetragen (vgl. u. a. POWERS et al., 1968).

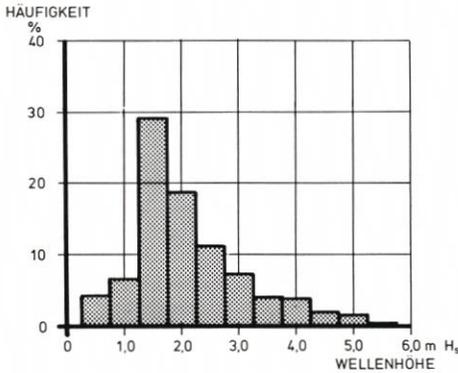


Abb. 2. Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhen H_s in einem Kollektiv von 400 Einzelmessungen

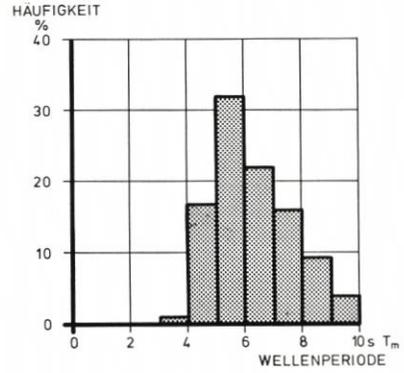


Abb. 3. Prozentuale Häufigkeitsverteilung der mittleren Wellenperioden T_m in einem Kollektiv von 400 Einzelmessungen

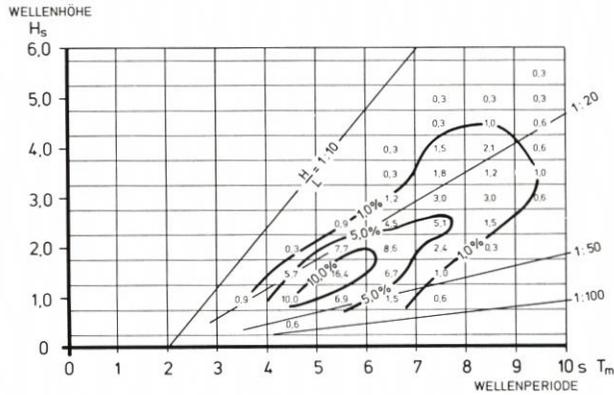


Abb. 4. Prozentuale Häufigkeitsverteilung von signifikanter Wellenhöhe H_s und zugehöriger Wellenperiode T_m in einem Kollektiv von 400 Einzelmessungen (= 100 Prozent), eingetragen in ein Rasternetz, mit zusätzlicher Darstellung der Wellensteilheiten H/L für eine Wassertiefe von $d = 10$ m bei Station W_3

4. Wind-Wellen-Korrelationen

Seit 1965 werden u. a. von der Aerosol-Meßstelle des Umweltbundesamtes nördlich der Stadt Westerland kontinuierliche Windregistrierungen vorgenommen. Der Windmesser ist auf einer freiliegenden Randdüne, rd. 10 m über dem mittleren Meeresspiegel, aufgestellt. Für die nachfolgenden Untersuchungen zum Wellenklima vor Sylt konnte auf die mittleren stündlichen Windgeschwindigkeiten und -richtungen der letzten 12 Jahre, beginnend am 1. 1. 1965, zurückgegriffen werden.

Am Beispiel einer kontinuierlichen Wellenmessung über die Dauer einer Sturmwe-
terlage mit Böen bis Bft 10 aus Südwest sollen zunächst offensichtliche Zusammenhänge, zu-

mindest ab einer bestimmten Wellenhöhe ($H_{\max} > 2$ m), zwischen den örtlichen Windverhältnissen und dem Seegang veranschaulicht werden. Abb. 5 zeigt für die genannte Sturmweatherlage die Auftragung der aus je einer Folge von 100 Wellen ermittelten Wellenkennwerte H_{\max} , H_s und H_m sowie die mittleren und die maximalen Windgeschwindigkeiten (U_m bzw. $U_{\max} =$ Böigkeit) sowie die zugehörigen Windrichtungen.

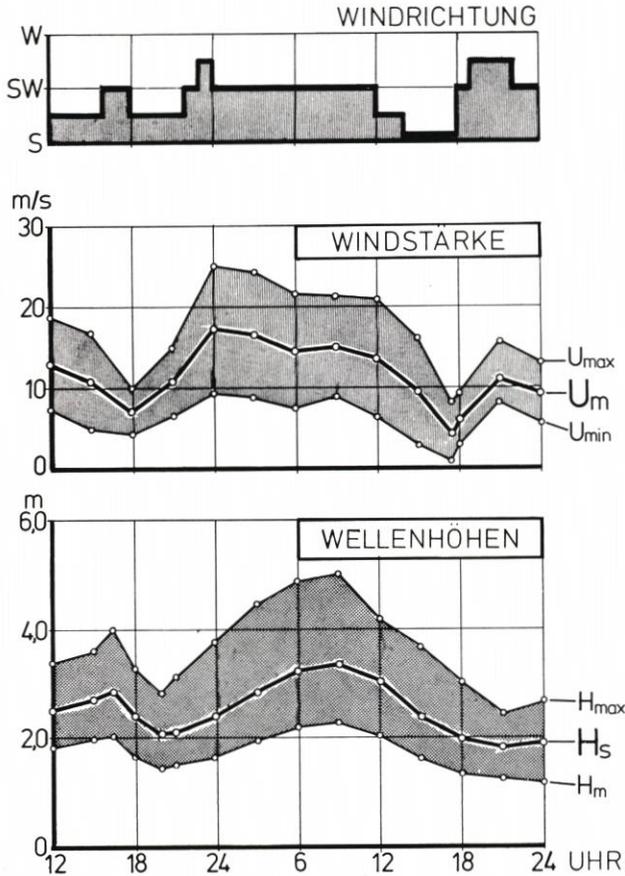


Abb. 5. Wind- und Wellenkennwerte über die Dauer einer Sturmweatherlage im Februar 1973

Ein Vergleich der Maxima und Minima von Windstärken und Wellenhöhen läßt erkennen, daß der Seegang mit einer Phasenverschiebung entsprechend den Windverhältnissen zunimmt bzw. abfällt. Daraufhin wurden, ermöglicht durch die elektronische Datenverarbeitung, systematische Untersuchungen über Wind-Wellen-Korrelationen am Beispiel des küstennahen Seegebietes vor Sylt (seewärts des Riffgürtels) angestellt.

Zunächst wurden die Winddaten der Jahre 1965 bis 1976 von der Wetterstation Westerland, die nach der sechzehnteiligen Windrose (Sektoren von je $22,5^\circ$) ausgewertet sind, im Hinblick auf die prozentuale Häufigkeit des Vorherrschens von einzelnen Windrichtungen analysiert. Die Unterscheidung nach Windstärkegruppen zwischen Geschwindigkeiten von 0 bis 10 m/s sowie über 10 m/s läßt auf Abb. 6 die seegangserzeugenden Windrichtungen, hier von SSW bis NW, für die Westküste der Insel Sylt erkennen. Für diese Windrichtungen sind zufriedenstellende Korrelationskoeffizienten zwischen Wind und

Wellen Voraussetzung für weitergehende Betrachtungen. Diese wurden an Hand der vorliegenden, bereits erwähnten Einzelwellenmessungen (z. B. Abb. 4) aus den Jahren 1971 bis 1974 und den zugehörigen stündlichen Winddaten bis zu 6 Stunden vor der jeweiligen Wellenmessung untersucht. Für die Korrelation von signifikanter Wellenhöhe H_s und

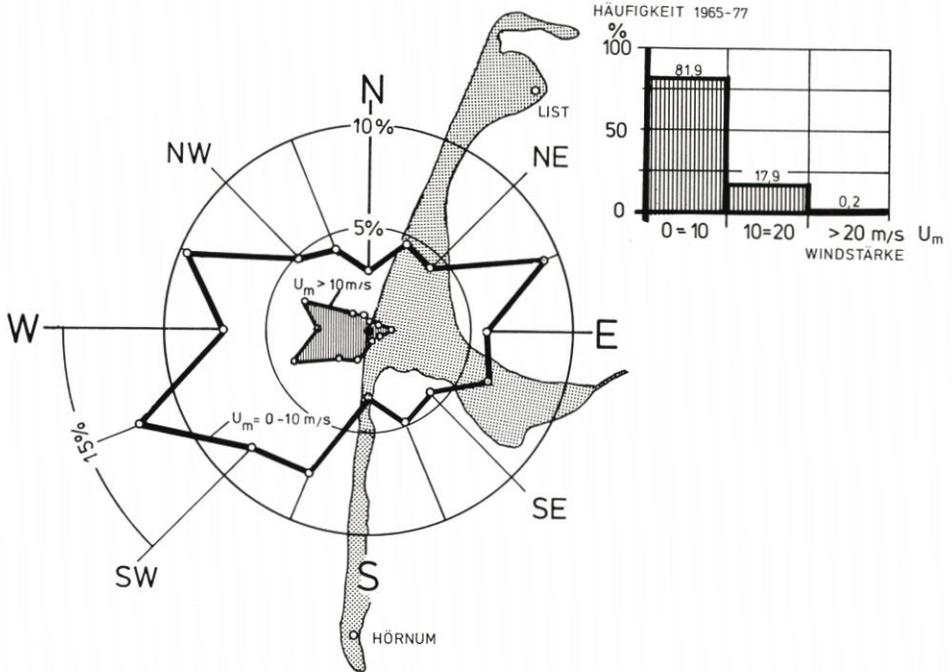


Abb. 6. Prozentuale Häufigkeit des Vorherrschens von einzelnen Windrichtungen vor Westerland/Sylt in den Jahren von 1965 bis 1976

mittlerer Windgeschwindigkeit, die zwischen der vierten bis zweiten Stunde vor der Wellenmessung herrscht, wurden die höchsten nachfolgend zugeführten Koeffizienten aus dem bereits genannten Kollektiv von 400 Einzelmessungen ermittelt.

Windrichtung	Korrelationskoeffizient R
S	0,55
SSW	0,80
SW	0,79
WSW	0,91*)
W	0,96*)
WNW	0,88*)

*) Vorherrschende Windrichtungen bei Sturmfluten.

Abb. 7 zeigt – getrennt nach den Windrichtungen – die gemessenen Wellenhöhen H_s in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit U_m (vier bis zwei Stunden vor jeder Wellenmessung). Innerhalb des Untersuchungszeitraumes 1971 bis 1974 wurden einschließlich der Sturmflutkette im November und Dezember 1973 folgende höchste mittlere Windgeschwindigkeiten über 3 Stunden und höchste signifikante Wellenhöhen für die einzelnen seegangserzeugenden Windrichtungen ermittelt (Abb. 8).

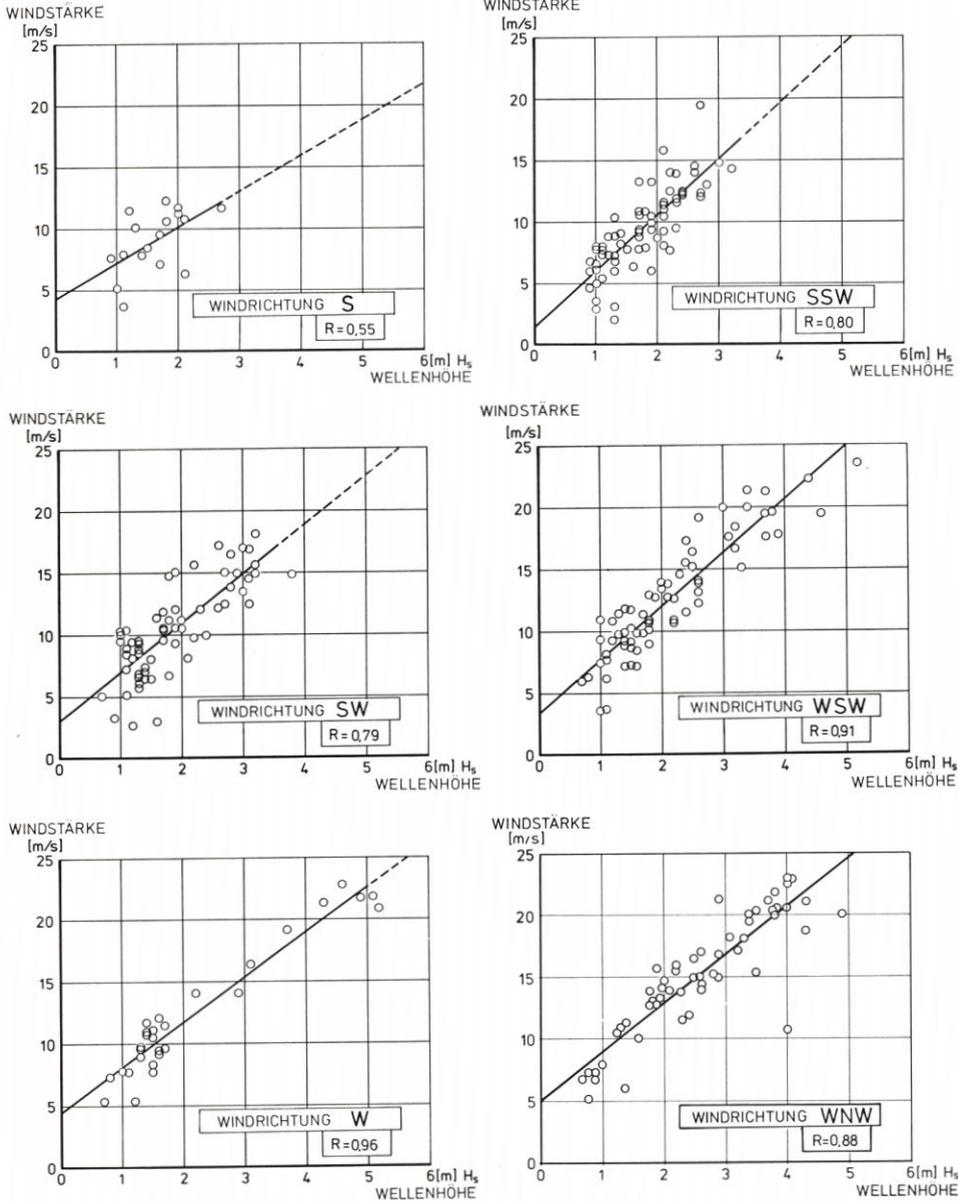


Abb. 7. Wellenhöhe H_s in Abhängigkeit vom Mittelwert der Windstärke vier bis zwei Stunden vor der Wellenmessung (Windrichtungen S bis WNW)

Durch Extrapolation der auf Abb. 7 für die einzelnen Windrichtungen eingetragenen Ausgleichsgeraden können die Wellenhöhen H_s für höhere, noch nicht registrierte Windgeschwindigkeiten abgeschätzt werden. Die zugehörige maximale Wellenhöhe H_{max} kann über das statistische Verhältnis

$$H_{max} = 1,44 \cdot H_s$$

ermittelt werden.

Windrichtung	Höchste mittlere Windgeschwindigkeit über 3 Stunden	Höchste gemessene Wellenhöhe H_s
	m/s	m
—	12,0	2,7
S	14,5	3,2
SSW	15,0	3,8
SW	23,5	5,2
WSW	22,0	5,2
W	20,5	4,9
WNW		

Abb. 8. Höchste mittlere Windgeschwindigkeiten über 3 Stunden und höchste gemessene Wellenhöhen H_s (Station W₃, Abb. 1) im Untersuchungszeitraum 1971 bis 1974

Die Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen bestätigen, daß ein Untersuchungszeitraum von 3 bis 5 Jahren durchaus ausreicht, um zu grundlegenden Kenntnissen über ein örtliches Wellenklima zu gelangen. Im folgenden können nun die Korrelationen zu Rückkopplungsbetrachtungen für Ereignisse herangezogen werden, von denen nur Windaufzeichnungen vorliegen. So können z. B. die Wellenhöhen abgeschätzt werden, die bei früheren Sturmfluten (1953, 1962 etc.) aufgetreten sind. An dieser Stelle sollen die kontinuierlichen Windaufzeichnungen von 1965 bis 1976 verwendet werden, um rückkoppelnd eine Bilanz der Wellenintensität in dem genannten Zeitraum aufzustellen. Für Intervalle von je drei Stunden wurden über die mittlere Windgeschwindigkeit und Windrichtung die einzelnen Wellenhöhen ($8 \times 365 \times 12 = \text{rd. } 33\,000$ Wellenkennwerte) bestimmt. Abb. 9 zeigt die prozentuale Häufigkeit, mit der eine bestimmte Wellenhöhe, getrennt nach H_{\max} und H_s in den Jahren 1965 bis 1976 überschritten wurde. Während eines Drittels des Untersuchungszeitraumes wurde z. B. die Wellenhöhe $H_s = 1,0$ m überschritten.

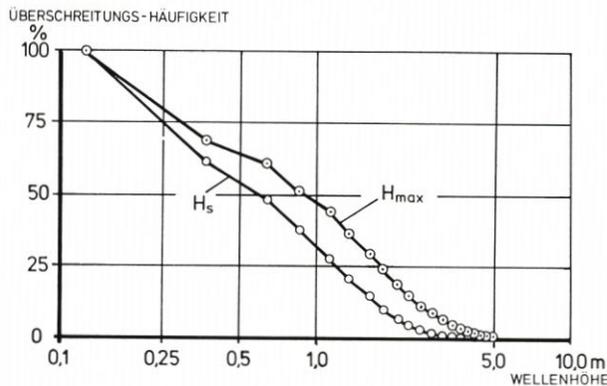


Abb. 9. Prozentuale Häufigkeit, mit der eine bestimmte Wellenhöhe (H_{\max} und H_s) im Untersuchungszeitraum 1965 bis 1976 überschritten wurde

Die ermittelten Einzelwellenhöhen in Intervallen von je 3 Stunden können neben einer Rückkopplung oder Bestandsaufnahme weiterhin auch dazu herangezogen werden, über die Häufigkeitsverteilung der Überschreitung von einzelnen Wellenhöhen in den letzten 12 Jahren (z. B. einmal in 12 Jahren) und durch Extrapolation einer Ausgleichskurve über den untersuchten Zeitraum hinaus eine Aussage darüber zu ermöglichen, welche Wellenhöhe in einem bestimmten Zeitraum – etwa 50 oder 100 Jahre – im Mittel einmal

zu erwarten ist. Abb. 10 zeigt im halblogarithmischen Netz die Überschreitungshäufigkeit je Jahr von einzelnen Wellenhöhen im Zeitraum 1965 bis 1976 sowie eine als Gerade gewählte Ausgleichskurve für eine Extrapolation. Danach ist damit zu rechnen, daß im Mittel einmal in 100 Jahren eine maximale Wellenhöhe $H_{\max} = 10$ m und eine signifikante Wellenhöhe $H_s = 7,2$ m seawärts des Riffes zu erwarten ist.

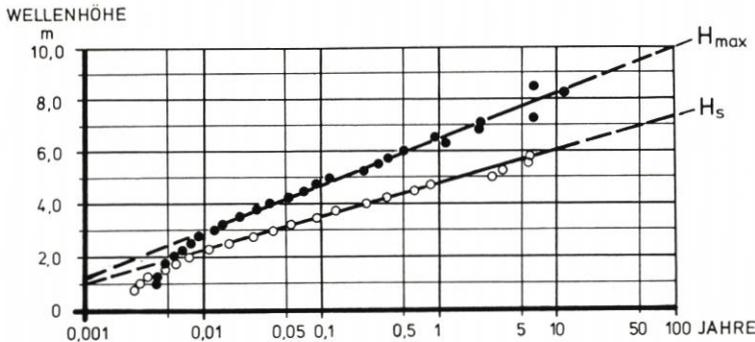


Abb. 10. Jährliche Überschreitungshäufigkeit von maximalen und signifikanten Wellenhöhen im Untersuchungszeitraum 1965 bis 1976

5. Bemerkungen zur Energieabgabe der Wellen

Das örtliche Seegangsgeschehen und die damit verbundene Wirksamkeit innerhalb eines Zeitraumes sind von Jahr zu Jahr unterschiedlich. Es sei hier nur an die Häufigkeit von Extremsturmfluten (FÜHRBÖTER, 1976) und an die wechselnde Häufigkeit des Vorherrschens einzelner Windrichtungen sowie die damit zusammenhängenden Windstärken erinnert. Das unterschiedliche Geschehen wird allgemein auch dadurch veranschaulicht, daß z. B. von einem „ruhigen“ Sommer, von einem mehr oder weniger „stürmischen“ Winterhalbjahr oder von einer anhaltenden bzw. ausgebliebenen ablandigen (Ost-) Windlage, gewöhnlich in den Monaten Februar und März vorherrschend, berichtet wird. Derartige Aussagen sind jedoch nicht dazu geeignet, die tatsächliche Wirksamkeit des Seanges und die damit verbundene Bauwerksbeanspruchung im Küstengebiet zu erfassen; ebensowenig ist daher auch die Beurteilung der Standfestigkeit eines Bauwerkes in Abhängigkeit von einem linearen Zeitmaßstab sinnvoll, weil dabei das tatsächliche Seegangsgeschehen unberücksichtigt bleibt. Es wird daher vorgeschlagen, die Seangangsleistung zu berechnen, die z. B. auf 1 m Uferlänge oder Wellenfront abgegeben wird. Die Integration der Leistungsbeträge über einen Monat oder ein Jahr ergibt dann die Energieabgabe des Seanges in kWh/m in dieser Zeit an einem gewählten Ort. Mit diesem Vorgehen, der Wahl eines verzerrten Zeitmaßstabes, wird es möglich sein, die wellenerzeugte Wirksamkeit eines jeden Jahres zu klassifizieren und eine realistische Beurteilungsgrundlage zu schaffen.

Dieser Vorschlag soll nachfolgend am Beispiel der vorliegenden Untersuchungsergebnisse über die Wellenhöhen in den 12 Jahren von 1965/66 bis 1976/77 (gerechnet vom 1. 4. bis 31. 3. des darauffolgenden Jahres) veranschaulicht werden.

Getrennt für die einzelnen Monate sowie zusammengefaßt nach Jahren wird aus den Wellenhöhen H_s , die über die Wind-Wellen-Korrelationen bestimmt werden, nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE die Seangangsleistung berechnet, die auf 1 m

Wellenfront, hier an der Station W_3 seewärts des Riffes vor Westerland/Sylt (Abb. 1), abgegeben wurde.

Als Maß für den mittleren Leistungsdurchgang \bar{N} je lfdm. Wellenfront durch eine Station während einer Wellenperiode wird von FÜHRBÖTER (1974) angesetzt:

$$\bar{N} = \frac{1}{8} \cdot \zeta \cdot g \cdot H^2 \cdot L/T \quad \left[\text{Mp} \frac{\text{m}}{\text{s}} / \text{m} \right]$$

Mit der Annahme $c = L/T$ und bezogen auf die elektrische Leistungseinheit kW lautet der Ansatz:

$$\bar{N} = \frac{1}{0,102} \cdot \frac{1}{8} \cdot \zeta \cdot g \cdot H^2 \cdot c = 1,225 \cdot \zeta \cdot g \cdot H^2 \cdot c \quad [\text{kW/m}]$$

Für die Berechnung der jährlichen Wellenenergieabgabe \bar{W} in Ws/m bzw. in kWh/m Wellenfront an Station W_3 wird der vorgenannte Ansatz zugrunde gelegt:

$$\bar{W} = \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^{365} 1,225 \cdot \zeta \cdot g \cdot H_{s(j,i)}^2 \cdot c \cdot \Delta t \quad [\text{Ws/m} \cdot \text{Jahr}]$$

Es werden dazu folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

$H_{s(j,i)}$ = signifikante Wellenhöhe H_s ermittelt aus dem jeweiligen 3-Stundenmittel der Windregistrierung im Zeitraum j (z.B. von 9 Uhr bis 12 Uhr) am Tage i des lfd. Jahres.

$\zeta = 1000 \text{ kg/m}^3$ = Dichte des Wassers

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ = Erdbeschleunigung

$c = \sqrt{g \cdot d}$ = Wellenschnelligkeit an Station W_3 mit der Annahme einer mittleren Wassertiefe von $d = 10 \text{ m}$

$\Delta t = 10\,800 \text{ s}$ = Zeitintervall von je 3 Stunden

Zusammengefaßt ergibt sich:

$$\bar{W} = 1,298 \cdot 10^9 \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^{365} H_{s(j,i)}^2 \quad [\text{Ws/m} \cdot \text{Jahr}]$$

$$\bar{W} = \frac{1,298 \cdot 10^9}{2,78 \cdot 10^7} \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^{365} H_{s(j,i)}^2 \quad [\text{kWh/m} \cdot \text{Jahr}]$$

$$\bar{W} = 46,7 \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^{365} H_{s(j,i)}^2 \quad [\text{kWh/m} \cdot \text{Jahr}]$$

Ohne Zweifel enthalten die vorgenannten Annahmen Unsicherheiten im Hinblick auf eine quantitative Aussage. Aus diesem Grunde sollte dieser Gesichtspunkt auch nicht überbewertet und das beschriebene Verfahren vielmehr als ein brauchbarer Indikator angesehen werden, um das irreguläre monatliche oder jährliche Seegangsgeschehen auf einer Grundlage, mit der der tatsächliche Seegang erfaßt wird, zu veranschaulichen.

Abb. 11 zeigt zum Beispiel die monatliche Energieabgabe in dem Zeitraum von 1965 bis 1977.

Mit Bezug auf eine anzustrebende Klassifikation der jährlichen Wellenenergieabgabe wird auf Grund der vereinfachenden Annahmen bei der Berechnung vorgeschlagen, diese nicht in Klassen von bestimmten erreichten Energieraten vorzunehmen, sondern vielmehr für den Untersuchungszeitraum, hier 12 Jahre, den jährlichen Mittelwert der Energieab-

gabe zu ermitteln und diesen mit 100 % anzusetzen. Prozentuale Abweichungen von diesem Mittelwert in den einzelnen Jahren eignen sich dann zu Aussagen, ob es sich um ein Jahr mit normalem, über- oder unterdurchschnittlichem Seegang gehandelt hat. Wie Abb. 12 zeigt, weist das Jahr 1968/69 mit etwa 65 % den schwächsten Seegang im Untersuchungszeitraum auf, während in den 3 Jahren von 1973/74 bis 1975/76 (mit zwei Sturmflutperioden) die höchste Seegangsintensität mit jeweils über 120 % zu verzeichnen war. Das vergangene Jahr 1976/77 war wiederum „seegangsarm“ und ist fast mit dem Jahr 1968/69 zu vergleichen.

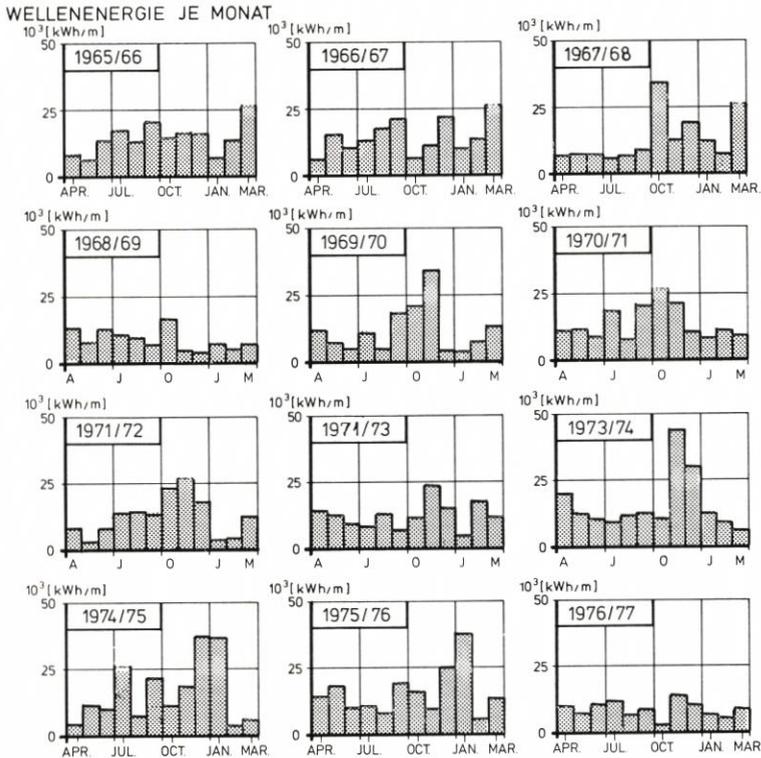


Abb. 11. Monatliche Energieabgabe der Wellen an der Station W_3 (Abb. 1) vor Westerland/Sylt in der Zeit vom 1. 4. 1965 bis zum 31. 3. 1977

Entsprechend einer Klassifikation der Wellenenergieabgabe nach Jahren, die zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer Baumaßnahme geeignet ist, bietet sich die Zusammenstellung nach Monaten (Abb. 13) als Entscheidungshilfe dafür an, entweder das Risiko der Seegangswirkung für eine festgelegte Ausführungszeit von Seebaumaßnahmen abzuschätzen oder die im Mittel ruhigste Jahreszeit zu bestimmen (Abb. 14).

Schließlich ist eine Wellenenergiestatistik noch besser als eine Windstatistik als Entscheidungshilfe für die Beurteilung des küstenparallelen Längstransportes in einem bestimmten Zeitraum geeignet. Abb. 15 zeigt, geordnet nach den einzelnen Windrichtungen, die prozentuale Häufigkeit der Gesamtenergieabgabe im Untersuchungszeitraum 1965 bis 1977. Die energiereichsten Windrichtungen sind danach die Richtungen SSW bis WNW, und die Resultierende fällt etwa mit der Richtung WSW zusammen. Bezogen auf die Lage

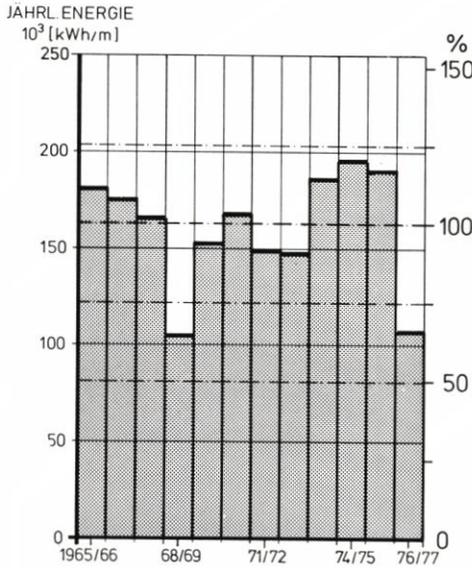


Abb. 12. Jährliche Wellenenergieabgabe im Untersuchungszeitraum 1965 bis 1977

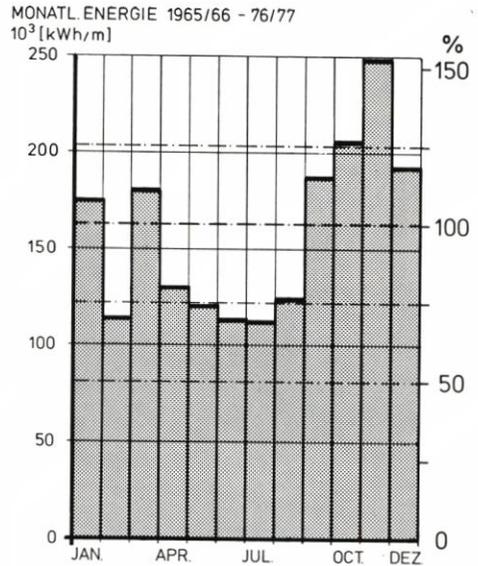


Abb. 13. Wellenenergieabgabe in den Monaten des Jahres im Untersuchungszeitraum 1965 bis 1977

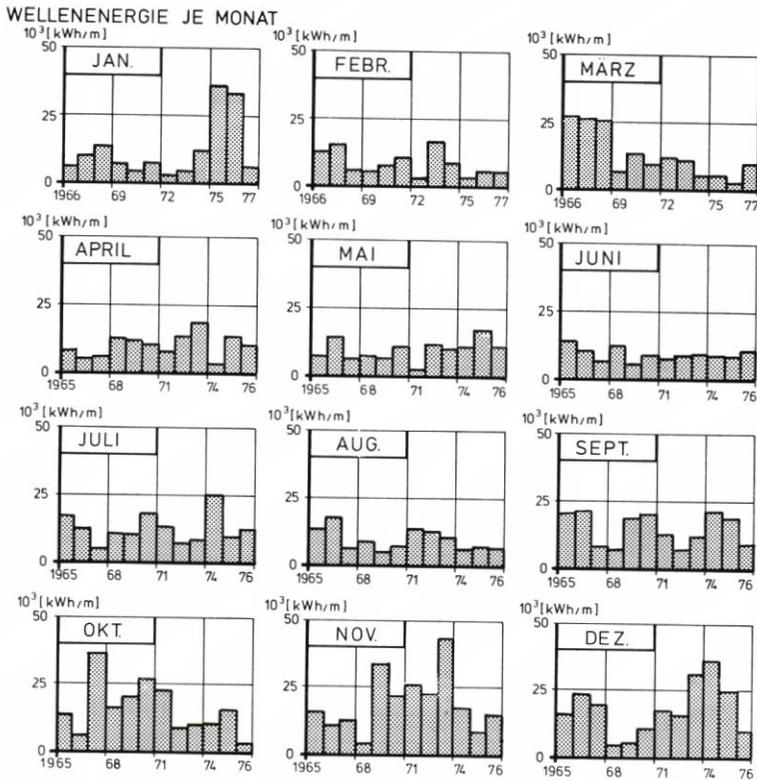


Abb. 14. Monatliche Wellenenergieabgabe in den Jahren 1965 bis 1976, geordnet nach den einzelnen Monaten des Jahres

der Insel Sylt im Bereich Westerland kann daraus entnommen werden, daß zwischen 1965 und 1977 die küstenparallele Brandungsströmung überwiegend von Süd nach Nord verlaufen ist und entsprechend auch ein resultierender Transport von Sedimenten in diese Richtung erfolgte.

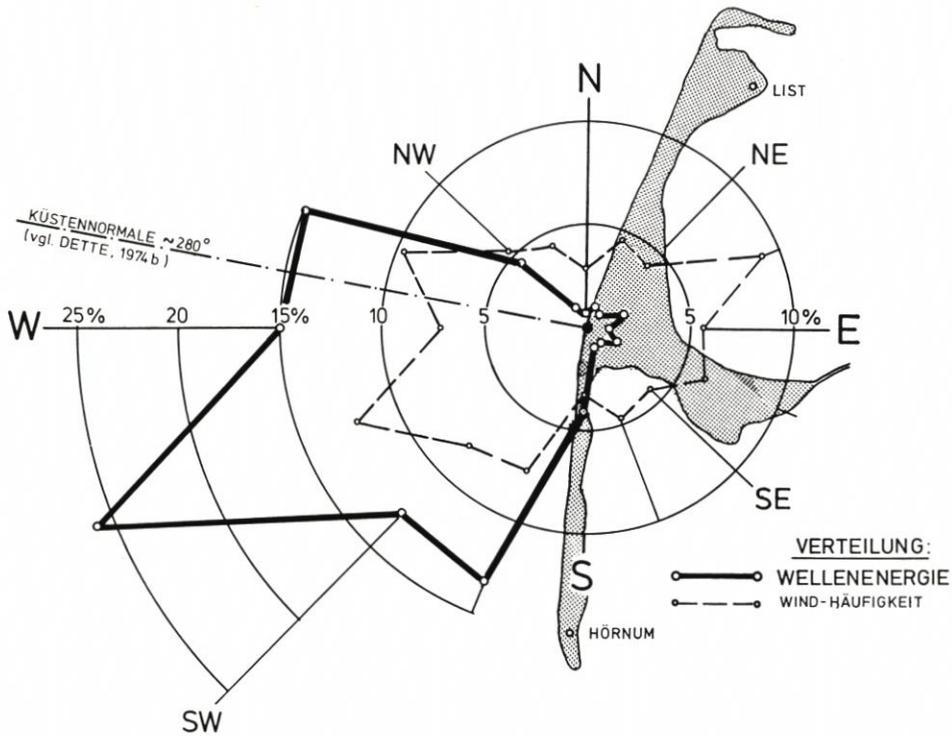


Abb. 15. Prozentuale Häufigkeit der Gesamtenergieabgabe, geordnet nach den einzelnen Windrichtungen in den Jahren 1965 bis 1977

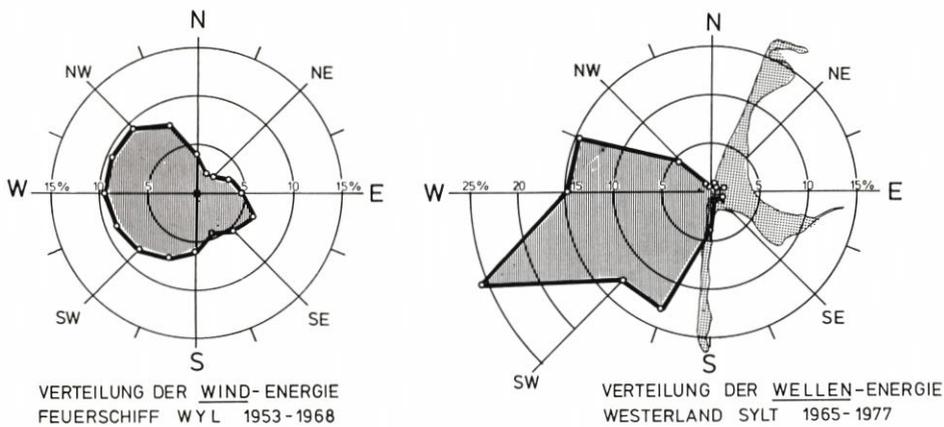


Abb. 16. Gegenüberstellung der Windenergieverteilung in den Jahren 1953 bis 1968 am FS „Wyl“ (VOLLBRECHT, 1973) und der Wellenenergieverteilung vor Westerland/Sylt in den Jahren 1965 bis 1977

Bislang wurde für den Bereich vor Westerland davon ausgegangen, daß das alternde Brandungsgeschehen als „neutral“ bezeichnet wurde; d. h., daß der Wellenangriff aus einem Sektor nicht einseitig überwiegt. Diese Aussagen wurden zum Teil auch auf die Untersuchungen von VOLLBRECHT (1973) über die Häufigkeits- und Energieverteilung des Windes für die Jahre 1953 bis 1968 beim Feuerschiff „Wyl“ gestützt. Abb. 16 zeigt eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit den hier dargestellten Untersuchungen für die Wetterstation Westerland/Sylt in den Jahren 1965 bis 1977. Es fällt auf, daß sich die resultierende Energierichtung in den Jahren 1953 bis 1968 aus etwa West, gleichbedeutend einem im Mittel neutralem Brandungsgeschehen, in die Richtung WSW in den Jahren 1965 bis 1977 mit einer überwiegenden Transportrichtung nach Norden verlagert hat.

6. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H.: Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten. *Hamburger Küstenforschung*, H. 35, 1976.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. *Mitt. Leichtweiß-Inst.*, H. 40, 1974a.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen. *Mitt. Leichtweiß-Inst.*, H. 41, 1974b.
- DRAPER, L.: The Analysis and Presentation of Wave Data – a plea for uniformity. *Proc. 10th Intern. Conf. on Coastal Eng., Tokyo, Japan, 1966.*
- ERCHINGER, H. F.: Wellenauflauf an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. *Mitt. Leichtweiß-Inst.*, H. 41, 1974.
- ERCHINGER, H. F.: Wave Run-up in Field Measurements with newly developed Instrument. *Proc. 15th Intern. Conf. on Coastal Eng., Honolulu, 1976.*
- FAHRENTHOLZ, S. R.: Wellen- und Wasserstandsmessungen in freier See mit Hilfe des akustischen Echolotverfahrens. 2. Int. Kongreß „Interocean“, Düsseldorf, 1973.
- FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J., SCHWITTERS, J. u. SINDERN, J.: Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung. *Die Küste*, H. 23, 1972.
- FÜHRBÖTER, A.: Eine Refraktionsbuhne aus Sand vor Sylt. *Wasser und Boden*, Jg. 25, H. 12, 1973.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. *Mitt. Leichtweiß-Inst.*, H. 40, 1974a.
- FÜHRBÖTER, A.: Küstenschutz auf neuen Wegen. *VDI-Zeitschr.*, 116, Nr. 8, 1974b.
- FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J., SCHWITTERS, J. u. SINDERN, J.: Beurteilung der Sandvorspülung 1972 und Empfehlungen für die künftige Stranderhaltung am Weststrand der Insel Sylt. *Die Küste*, H. 29, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. *Mitt. Leichtweiß-Inst.*, H. 51, 1976.
- GALLUS, G.: Aufwendungen des Bundes und der Länder für den Küstenschutz. Angabe des Staatssekretärs vor dem landwirtsch. Hauptverein für Ostfriesland, März 1977.
- LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen im Bereich der ostfriesischen Inseln und Watten. *Meerestechnik*, Nr. 4, Bd. 7, 1976.
- POWERS, W. H., DRAPER, L. u. BRIGGS, P. M.: Waves at Camp Pendleton, California. *Proc. 11th Intern. Conf. on Coastal Eng., Vol. I, London, 1968.*
- VOLLBRECHT, K.: Der Küstenrückgang an der Insel Sylt. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschr.*, Bd. 26, H. 4, 1973.
- WENZEL, D.: Ultraschall-Wellenschreibanlage vor Sylt. *Die Wasserwirtschaft*, 64, 1974.
- WIEGEL, R. L.: *Oceanographical Engineering*. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1964.