

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Erchinger, Heie F.

Naturmessungen des Wellenaufbaus mit neuentwickelten Geräten

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101108>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Erchinger, Heie F. (1977): Naturmessungen des Wellenaufbaus mit neuentwickelten
Geräten. In: Die Küste 31. Heide, Holstein: Boyens. S. 59-71.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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



Naturmessungen des Wellenaufbaus mit neuentwickelten Geräten

Von Heie Focken Erchinger

Zusammenfassung

Deiche und Deckwerke müssen bei Wellenangriff so hoch gebaut werden, daß sie nicht durch den Wellenaufbau gefährdet werden. Der Wellenaufbau kann nach verschiedenen Formeln berechnet werden, die überwiegend nach Modellversuchen entwickelt worden sind. Dabei konnte der nicht ausreichend geklärte Einfluß der Maßstabeffekte und der natürlichen Windbedingungen nicht berücksichtigt werden. Daher sind weitere Untersuchungen und besonders Naturmessungen notwendig.

Durch die Einmessung der Teekgrenze (Treibselgrenze) konnte 1967 und 1973 an ostfriesischen Seedeichen der höchste Wellenaufbau der jeweiligen Sturmfluten festgestellt werden. Es zeigte sich, daß hinter einem Wattgebiet der Wellenaufbau weitgehend von der Wassertiefe abhängig ist und daß er insbesondere an Schardeichen wesentlich höher eintritt, als nach Modellversuchen zu erwarten.

Im Januar 1976 konnte der Wellenaufbau erstmals kontinuierlich während mehrerer Sturmfluten gemessen werden. Gleichzeitig konnten in einem zugeordneten Meßpunkt vor dem Deich die Wellen registriert werden. Die gemessenen Werte ergeben interessante Einblicke. Es zeigt sich, daß Wellenhöhe, Wellenperiode und im oberen Bereich auch der Wellenaufbau eine logarithmische Normalverteilung aufweisen. Nachdenklich stimmt, daß an dieser Schardeichmeßstelle bei einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 98 % der Wellenaufbau $R_{0,98}$ etwa das Doppelte der errechneten Größen ergibt. Zur Festlegung der zulässigen Unterschreitungswahrscheinlichkeit und zur Erforschung der Bewegung und Stärke des Einzelaufbaus bedarf es weiterer Untersuchungen, die in Anbetracht der Bedeutung des Wellenaufbaus für die Bemessung und Sicherheitsbetrachtung der Seedeiche mit Vorrang in Angriff genommen werden sollten.

Summary

The height of dikes and other coastal structures can be calculated only after determination of the wave run-up. As a rule, several formulas for the calculation of wave run-up are developed from model tests, but the influences of scale effects and natural wind conditions are practically unknown. To clarify these questions, further investigations and field measurements, especially, should be carried out.

The maximum wave run-up of four storm surges in 1967 and 1973 has been determined by measuring the markerline of floating trash on the slope of the sea dikes. In two graphs, it will be shown that, on the tidal flats, the run-up depends upon the water depth. The run-up was higher than could be expected after the model tests of 1954.

The run-up was measured in January, 1976, with a newly developed special echosounder. The waves and run-up were recorded synchronously during two severe storm surges. As shown in Fig. 9, a logarithmic distribution of the wave height, wave period, and the higher part of the wave run-up was found. The resulting wave run-up is considerably higher than was previously estimated, the 98 % run-up measured being about twice the computed value. This is an interesting and important result of the first simultaneous records of wave run-up on sea dikes.

I n h a l t

1. Einführung	60
2. Bisherige Naturmessungen	60
2.1 Allgemeines	60
2.2 Einmessung der Teekgrenze	61
3. Die Meßgeräte	63
4. Die Messungen im Januar 1976	65
4.1 Messung und Registrierung	65
4.2 Auswertung	67
4.3 Meßergebnisse	68
5. Schriftenverzeichnis	70

1. E i n f ü h r u n g

Für die Bemessung der Höhe von Seedeichen und anderen Küstenschutzbauwerken ist die Ermittlung des bei schweren Sturmfluten möglichen Wellenaufbaus eine Grundvoraussetzung. Der Technisch-Wissenschaftliche Beirat des Küstenausschusses Nord- und Ostsee hat 1969 dazu folgende Feststellung getroffen:

„Denn die Unsicherheiten in der Bestimmung des maßgebenden Wellenaufbaus sind derzeit wesentlich größer als die des Bemessungswasserstandes . . . Für die den Wellen ausgesetzten Seedeiche würde es aber sinnlos sein, eine Seedeichhöhe durch einen Bemessungswasserstand festzulegen, der auf wenige Zentimeter genau gesichert sein soll, wenn die Unsicherheit in der Ermittlung des Wellenaufbaus Meterbeträge erreichen kann.“

Der Wellenaufbau läßt sich nach verschiedenen Formeln berechnen, in denen die Wellenkennwerte, die Rauigkeit und Neigung der Böschung und die Lage zur Wellenfortschrittsrichtung eingehen. Diese Formeln sind vielfach nach Modellversuchen entwickelt. Aber bei diesen Versuchen konnten zwei für die Übertragbarkeit in die Natur wichtige Faktoren nicht berücksichtigt werden: Der Sturm konnte nicht naturgetreu mit Böigkeit und Wirbelbildung in das Modell übertragen werden, und der Effekt der Modellmaßstäbe ist hinsichtlich der quantitativen Übertragbarkeit praktisch nicht bekannt. Diese Einschränkungen gelten auch für den 1954 von Prof. HENSEN im Franzius-Institut in Modellversuchen ermittelten Wellenaufbau an Seedeichen.

Nach den Feststellungen von Prof. FÜHRBÖTER, daß Modellversuche mit brechenden Wellen in den üblichen Modellmaßstäben nicht zu quantitativ übertragbaren Werten führen (FÜHRBÖTER, 1970), sind zur sicheren Abschätzung des Wellenaufbaus an Seedeichen weitere Untersuchungen notwendig. Da es vorläufig nicht möglich ist, diese in Modellen mit naturähnlichen Maßstäben und Windbedingungen durchzuführen, ist hierfür auf Naturmessungen zurückzugreifen.

2. B i s h e r i g e N a t u r m e s s u n g e n

2.1 A l l g e m e i n e s

Der Wellenaufbau an Seedeichen ist in der Natur bisher nach zwei Methoden festgestellt worden:

1. durch die Einmessung der Teek- oder Treibselgrenze nach einer Sturmflut,
2. durch die visuelle Abschätzung des Wellenaufbaus während des Sturmes vom Deich aus mit Hilfe von Orientierungsmarken auf der Böschung (Studiedienst Rijkswaterstaat Delfzijl).

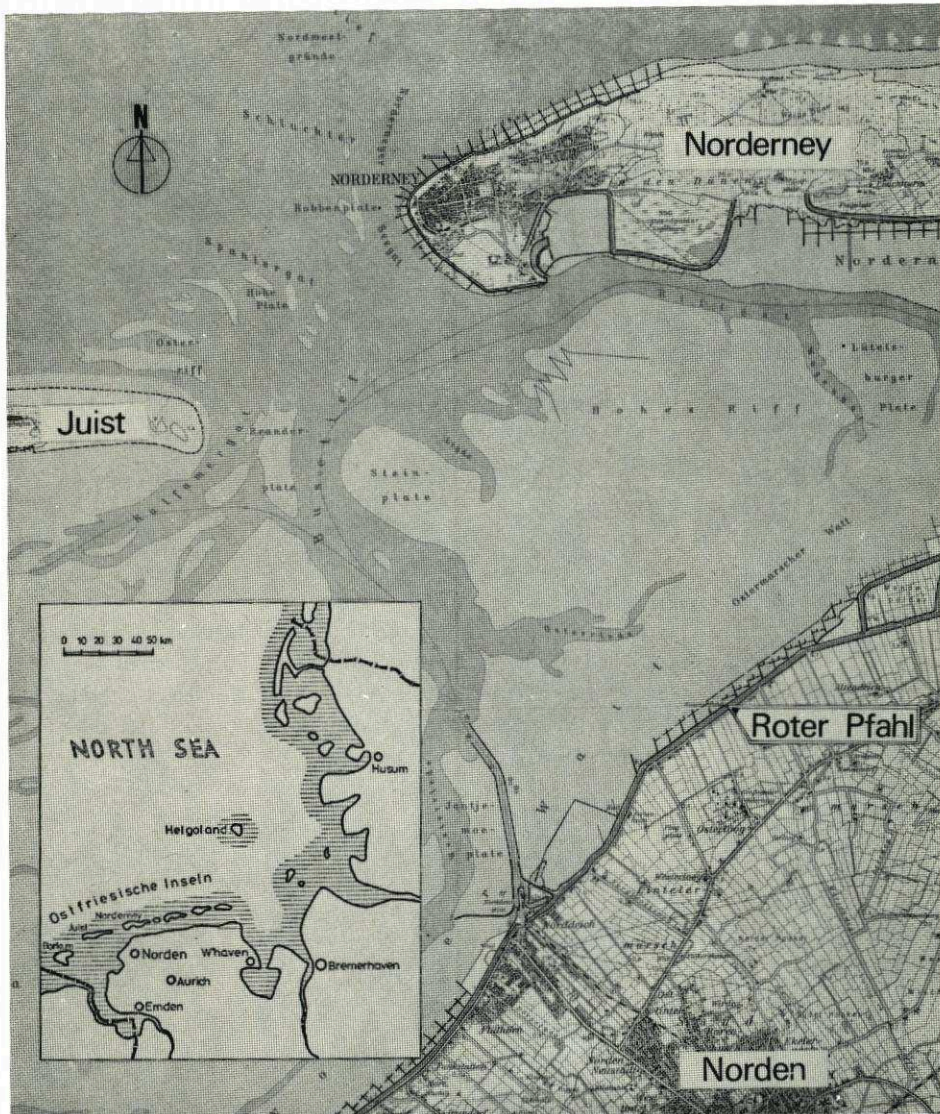


Abb. 1. Lageplan

2.2 Einmessung der Teekgrenze

An der ostfriesischen Küste wurde die Teekgrenze im Nov./Dez. 1973 an 37 Meßpunkten dreimal eingemessen. Zusammen mit einer bereits nach dem 23. 2. 1967 vorgenommenen Teekeinnmessung lagen für diese Meßpunkte an den Schardeichen und Vorlanddeichen in unterschiedlichen Lagen je vier Meßwerte vor (ERCHINGER, 1974).

Der höchste Wellenauflauf an einer Meßstelle in der jeweiligen Sturmflut konnte als Höhendifferenz zwischen der Teekgrenze und dem höchsten Sturmflutwasserstand ermittelt werden.

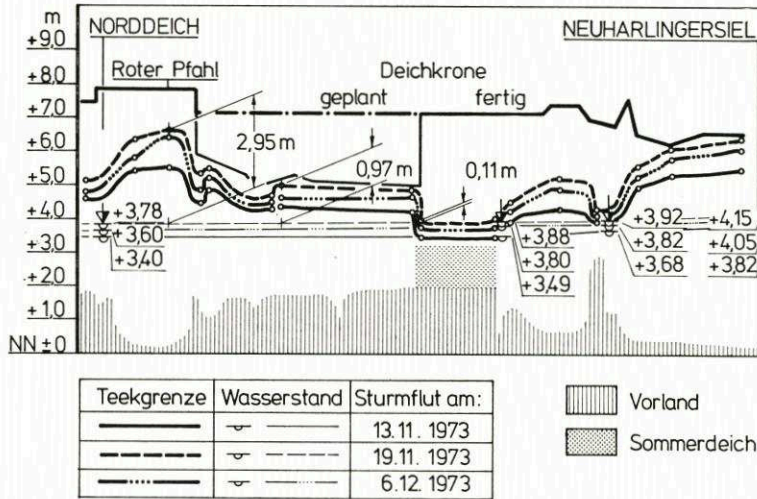


Abb. 2. Wellenauflauf durch Einmessung der Teekgrenze an der ostfriesischen Küste mit Längsschnitt durch Watt-, Vorland- und Deichkrone

In Abb. 2 sind die Teekgrenzen, die Sturmflutscheitelwasserstände und die Watt-, Vorland- bzw. Sommerdeichhöhen vor dem Seedeich an der Nordküste Ostfrieslands von Norddeich bis Neuharlingersiel eingetragen. Auffällig ist, daß der Höhenverlauf der Teekgrenze dem – wenn auch verzerrten – Spiegelbild des Längsschnittes durch das Gelände vor dem Deich entspricht.

Drei Werte verschiedener Deichtypen aus der höchsten dieser Sturmfluten, vom 19. November 1973, sind besonders gekennzeichnet:

	Wassertiefe vor dem Deich	Wellen- auflauf
1. Schardeich am „Roten Pfahl“	3,60 m	2,95 m
2. Vorlanddeich mit 250 m breitem Vorland	1,87 m	0,97 m
3. Deich mit 250 m breitem Vorland und Sommerdeich, 0,57 m Wassertiefe über dessen Krone	1,87 m	0,11 m

Diese Ergebnisse geben den Einfluß der Wassertiefe vor dem Deich wieder und unterstreichen die Bedeutung von Deichvorland und Sommerdeich für die beträchtliche Verringerung des Wellenaufbaus und der Wellenkräfte auf der Deichböschung.

Die durch die Teekeinnmessung gefundenen Maximalwerte des Wellenaufbaus konnten mangels entsprechender Messungen nicht zu Wellenkennwerten in Beziehung gesetzt werden. Da aber die Wellenkennwerte auf dem Watt durch die Wassertiefe maßgeblich begrenzt werden, wurden die Wellenaufbauwerte in Beziehung gesetzt zu der Wassertiefe vor dem Deich. Von ERCHINGER (1974) wurden diese Werte aufgetragen und Grenzkurven für den maßgebenden Aufbaubereich ermittelt. In Abb. 3 sind diese Meßwerte mit den dazugehörigen Grenzkurven wiedergegeben und ergänzt um weitere Daten von Teekeinnmessungen an den Seedeichen Niedersachsens östlich Ostfrieslands bis Cuxhaven (Nds. Min. f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1976). Drei Gruppen von Meßwerten heben sich deutlich voneinander ab, und zwar an Schardeichen, an Vorlanddeichen und hinter Sommerdeichen. Vor allem bei größerer Wassertiefe, also bei Schar-

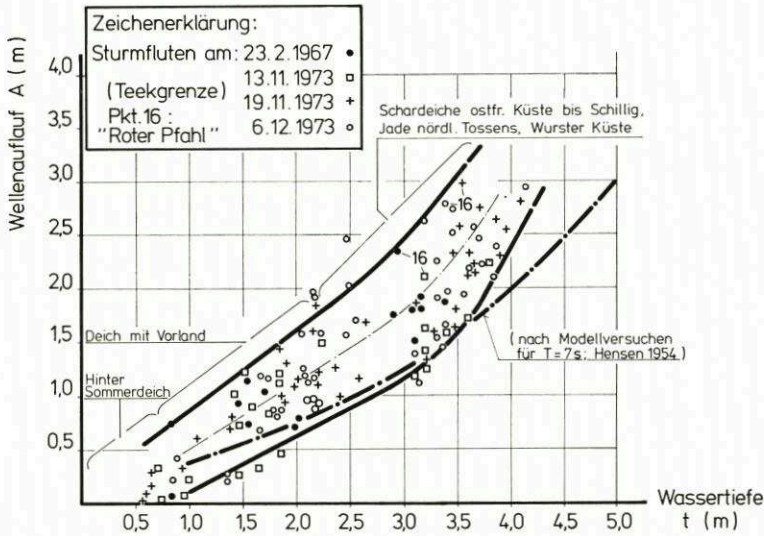


Abb. 3. Wellenauflauf durch Einmessung der Teekgrenze in Abhängigkeit von der Wassertiefe

deichen, liegt der Wellenauflauf deutlich höher als nach den Modellversuchen von 1954 (HENSEN, 1954). Diese mit monochromatischen Wellen im Maßstab 1:20 durchgeführten Versuche mit einer im oberen Bereich 1:2,8 geneigten Seedeichaußenböschung ergaben maximale Wellenhöhen auf dem Watt von 2,38 m in der Natur und für die Periode $T = 7$ s den in Abb. 3 dargestellten Wellenauflauf.

Die Einmessung der Treibselgrenze ergibt nur den Bereich des höchsten Wellenaufbaus während einer ganzen Sturmflut und zeigt nicht die Streuung. Streuung und Verteilung der Meßwerte sind aber wichtig für die Abschätzung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit bestimmter Werte. Außerdem ist es unbefriedigend, daß in sehr schweren Sturmfluten der Teek häufig auf die Deichkrone oder sogar auf die Binnenböschung geworfen wird und die besonders hohen Werte somit nicht gemessen werden können. Auch kann leichter Teek gelegentlich von Orkanböen umgelagert werden. Aus diesen Gründen sind kontinuierliche und gleichzeitige Naturmessungen des Wellenaufbaus und der Wellenkennwerte vor dem Deich wünschenswert.

3. Meßgeräte

Im Dezember 1975 wurde eine Meßstelle am Roten Pfahl, 4 km nordöstlich von Norddeich, mit der Auflaufmeßstrecke auf dem Schardeich und dem Wellenmeßgerät 50 m vor dem Deich auf dem Watt (Pkt. 16 der Teekeinnmessung) eingerichtet. Die Meßstelle liegt hinter einem niedrigen Watt, 8 km südöstlich des Norderneyer Seegats, und weist einen relativ starken deichnahen Seegang auf. Der Deich kehrt etwa gegen Nordwest. Das rauhe, 1:3 geneigte Fußdeckwerk des Schardeiches reicht bis NN+3,0 m, d. i. 1,8 m ü. MThw; daran schließt die glatte, zunächst 1:10 und nach einer Fahrspurbreite 1:6 geneigte Asphaltbetondecke bis NN+4,5 m an. Oberhalb befindet sich die begrünte, 1:6 geneigte Kleidecke. Die Deichkrone liegt kurz nach dem Ausbau des Deiches im Jahre 1975 auf NN+8,80 m.

Das Meßgerät der Fa. Dr. FAHRENTHOLZ besteht aus einer wasserdichten Druckkammer mit Knallsender und Empfänger auf der Deichaußenböschung mit böschungsabwärts angeschlossenen, rostfreien Stahlrohr, Durchmesser 1 Zoll, mit 4- bis 8-mm-Bohrungen im Abstand von 2 m. Das Registriergerät ist in einer Bude am binnenseitigen Deichfuß aufgestellt und durch Kabel mit den Meßeinheiten verbunden. Da die Stahlrohrlänge auf 12 m begrenzt ist, waren drei Meßeinheiten auf der Außenböschung hintereinander anzuordnen.

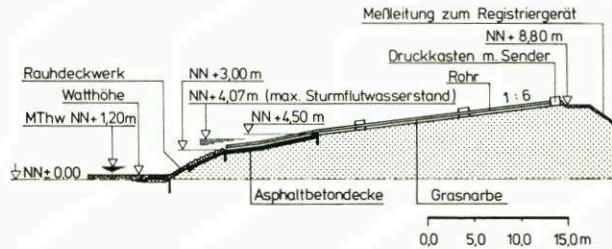


Abb. 4. Deichaußenböschung am Roten Pfahl mit Wellenauflaufmeßgerät

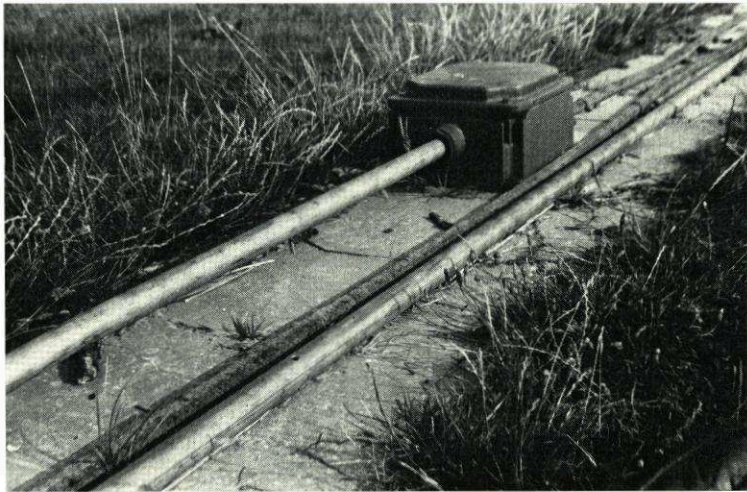


Abb. 5. Druckkammer mit Sender/Empfänger und Stahlrohr mit Bohrung

Der Knallsender sendet je Sekunde drei schwache Knallimpulse in das am unteren Ende offene Rohr. Die Impulse werden an den nicht bedeckten Bohrungen reflektiert. Die empfangenen Echos werden registriert, und zwar ergibt sich entsprechend den unterschiedlichen Laufwegen für jede Bohrung eine geschriebene Linie als Echogramm. Wenn eine Bohrung vom Wasser des Auflaufschwalls bedeckt ist, gibt sie kein Echo, und die Registrierung wird unterbrochen. Die höchste Unterbrechung der aufgezeichneten Linien gibt den höchsten Auflauf der jeweiligen Welle an.

Dem Wellenauflaufmeßgerät ist für die Wellenmessungen ein Wellenmeßgerät zugeordnet. Der ebenfalls von der Firma Dr. FAHRENTHOLZ, Kiel, entwickelte und gelieferte Wellenschreiber arbeitet nach dem Prinzip des Echographen. Hochfrequente Ultraschallimpulse werden von einem auf einem Grundgestell montierten Kristallschwinger scharf

gerichtet 15mal je Sekunde zur Wasseroberfläche abgestrahlt, als Echos wieder empfangen und auf einem Echographen registriert (FÜHRBÖTER et al., 1972; FAHRENTHOLZ, 1973). Der Echograph ist ebenfalls in der Bude binnendeichs aufgestellt und durch Kabel mit dem Grundgestell verbunden.

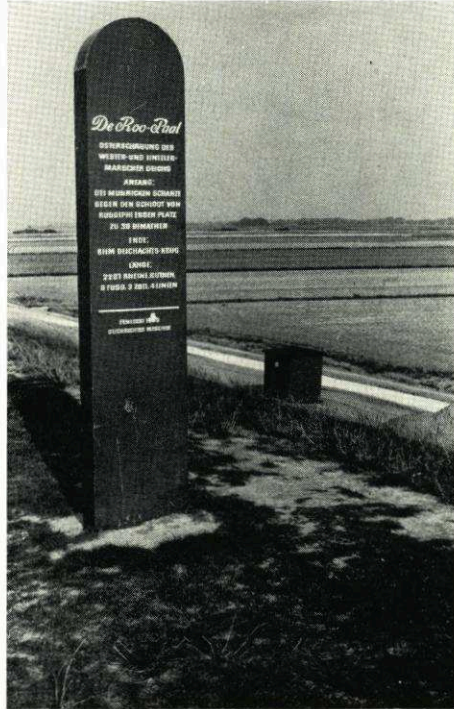
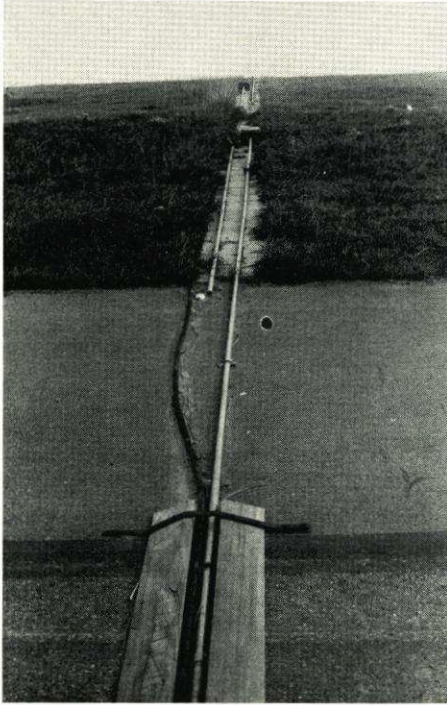


Abb. 6. Stahlrohr und Druckkästen auf der Böschung, im Vordergrund Überfahrstelle und Kabel vom Wellenmeßgerät

Abb. 7. Roter Pfahl (De Roo-Paal = Ruten Pfahl) und Bude mit Registriergeräten

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, daß inzwischen auch von der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg, ein Wellenauflaufmeßgerät entwickelt worden ist. An der Unterseite eines quadratischen Stahlrohrs sind induktive Annäherungsschalter montiert, die bei Wasserberührung durch den Aufschwung einen Impuls geben, der registriert wird.

4. Die Messungen im Januar 1976

4.1 Messung und Registrierung

Am 3. und 21. Januar 1976 suchten zwei sehr schwere Sturmfluten die deutsche Nordseeküste heim. Der Sturmflutwasserstand stieg bei Norddeich/Ostfriesland in beiden Fluten auf etwa 3 m über MThw an. Die Nachtide des Mittagshochwassers vom 3. Januar stieg in den ersten Stunden des 4. Januar auf etwa 2,30 m über MThw. In diesen drei Sturmfluten konnte am Roten Pfahl der Wellenauflauf gemessen werden. Hervor-

zuheben ist, daß damit erstmalig der Wellenauflauf in Sturmfluten kontinuierlich jeweils mehrere Stunden lang gemessen und registriert werden konnte. Am 4. 1. und 21. 1. konnten ebenfalls die Wellenhöhen und -perioden gemessen werden.

Der Ausfall der Wellenmessung am 3. 1. 76 ist durch zwei Fehlerquellen verursacht worden:

1. Der in der Nähe stationierte Sender Radio Norddeich störte mit seinem starken Langwellensender die Elektronik.
2. Die starke Turbulenz des durch den böigen, schweren Sturm aufgepeitschten Wassers führte offenbar zu einer zuvor auch in Sturmfluten nicht beobachteten großen Schwebstofffracht. Die aufgewirbelten Sedimente ließen die Schallimpulse nur zum Teil zur Wasseroberfläche vordringen. Die stark reflektierenden „Sedimentwolken“ wurden aufgezeichnet, während das schwache Oberflächenecho nicht mitregistriert wurde.

Auf Grund dieser „Kinderkrankheiten“ konnten auch am 21. 1. 76 um den Scheitelwasserstand nur 40 % der Wellen aufgezeichnet werden. Bei der Registrierung des Wellenaufbaus wurde jedoch kein Ausfall verzeichnet.

Es hat sich bewährt, daß eine örtlich ansässige Ortsbaudienststelle die Messungen kontrollieren konnte, denn eine schnelle Reaktion auf die Sturmflutentwicklung und eine ständige Betreuung während der Messung ist notwendig. Wie im Binnenland die Erfassung von Hochwasserabflußwerten durch die örtlichen Fachdienststellen seit langem wertvolle hydrologische Daten liefert, so sollte an der Küste den dort tätigen Stellen die Messung der Grundwerte der Küstenhydraulik, wie Wellenklima und Wellenaufbau, obliegen. Die wissenschaftliche Auswertung der gesammelten Daten kann dann in entsprechenden Fachinstituten und Forschungsstellen durchgeführt werden.

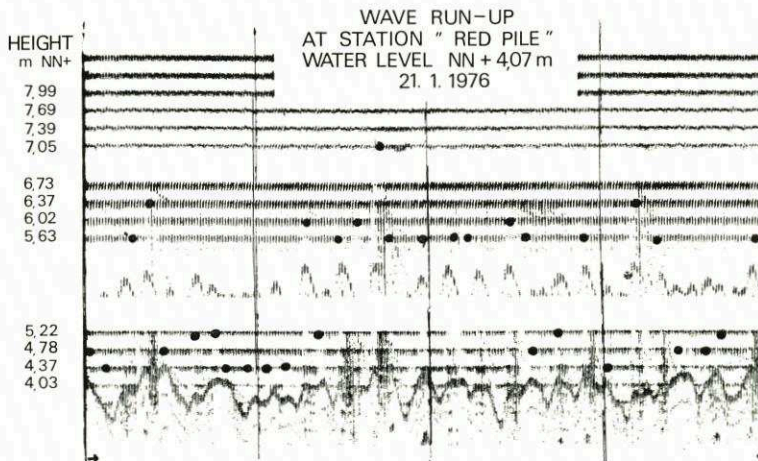


Abb. 8. Registrierstreifen (4 Minuten) der Wellenaufbaumessung

Abb. 8 zeigt einen 4-Minuten-Ausschnitt des Schreibstreifens der Wellenaufbaumessung. Drei Meßeinheiten mit den geschriebenen Linien, die den Bohrungen im Meßrohr entsprechen, sind zu erkennen. Die Unterbrechungen dieser Linien geben an, daß die Bohrung jeweils vom Auflaufschwall bedeckt war und keine Echos hervorrufen konnte. Die oberste bedeckte Bohrung wurde bei der Auswertung mit einem roten Punkt markiert. Die von unten in die offene Meßrohre schwingende Wassersäule wurde ebenfalls registriert, da sie Echos ergab.

4.2 Auswertung

Die Meßwerte des Wellenklimas und des Wellenaufbaus unterliegen Zufallsprozessen, die nach den Verfahren der Wahrscheinlichkeitsrechnung ausgewertet werden. Nach der Auftragsmethode von WEIBULL wird die Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines Meßbereichs ermittelt. Die Ergebnisse werden in ein Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen, in dem die Abszisse logarithmisch und die Ordinate nach dem GAUSSSchen Integral geteilt ist. Diese Art der Auftragung hat den Vorteil, daß sämtliche Meßwerte erfaßt werden.

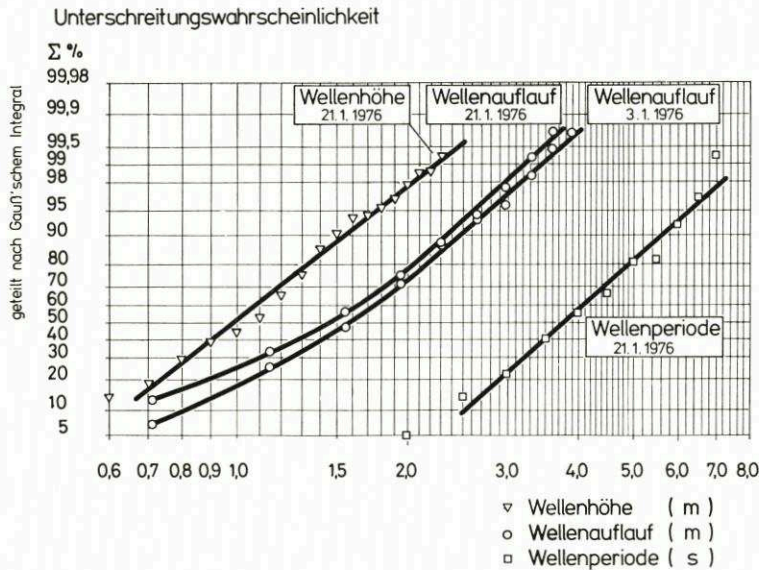


Abb. 9. Wellenaufbau- und Wellenkennwerte vom 3. 1. und 21. 1. zur Zeit der Scheitelwasserstände – aufgetragen auf Wahrscheinlichkeitspapier –

In Abb. 9 ist die Auswertung der Messungen zur Zeit der Scheitelwasserstände am 3. 1. und 21. 1. aufgetragen. Sie zeigt, daß Wellenhöhe und -periode als Funktionsbild näherungsweise eine Gerade ergeben, ebenso der Wellenaufbau oberhalb 50 % Unterschreitungswahrscheinlichkeit, d. h., daß die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte näherungsweise durch eine logarithmische Normalverteilung dargestellt werden kann.

Aus dem Diagramm läßt sich die Unterschreitungswahrscheinlichkeit des Wellenaufbaus für 98 %, 90 %, 50 % usw. ablesen. Zur Bemessung von Küstenschutzbauwerken ist es beispielsweise in den Niederlanden üblich, beim Wellenaufbau eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 98 % zugrunde zu legen. Das ergibt den maßgebenden Wellenaufbau $R_{0,98}$; 2 % der Aufbauschwelle würden dabei überlaufen.

Der Technisch-Wissenschaftliche Beirat des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (1969) empfiehlt, als Bemessungsaufbauhöhe die Höhe zu wählen, die von hundert Wellen nur dreimal überschritten wird, oder die Höhe, bei der in einer bestimmten Zeitspanne nur eine bestimmte Überlaufmenge über die Deichkrone tritt. Diese Überlegungen zeigen, daß nicht nur die Häufigkeit des Überlaufens, sondern auch die Überlaufmenge bzw. die jeweilige Stärke der Aufbauschwällungen von Bedeutung sind. Das FAHRENTHOLZ-Meßgerät registriert eine Aufbauschwällstärke von etwa 3 cm. Bei derartig dünnen

Schwallungen könnte unter Umständen $R_{0,90}$ bei entsprechender Querschnittsgestaltung des Deiches für den Extremfall als maßgebend zugelassen werden. Das würde bedeuten, daß 10 % der Auflaufschwalle bzw. alle 1,5 bis 2 Minuten eine Schwallspitze überlaufen. Die Abnahme der Schwallstärke während des Auflaufs ist für diese Abschätzung der Überlaufmenge von Bedeutung. Sie sollte unter Naturbedingungen besonders untersucht werden.

4.3 Meßergebnisse

Während der Sturmflutcheitel am 3. 1. und 21. 1. 1976 wurden folgende Meßwerte registriert bzw. ermittelt:

1. örtliche Gegebenheiten

	3. 1.	21. 1.
Wasserstand i. M.	NN + 4,07 m	NN + 4,07 m
Wassertiefe vor dem Deich	rd. 3,7 m	rd. 3,7 m
Wellenanlaufwinkel β	rd. 30°	rd. 30°
Windstärke (Beaufort)	W 10-11	W 9-10
Deichneigung 1 : n	$\cong 1 : 6$	$\cong 1 : 6$

2. Wellenauflauf

a) gemessen	max.	3,80 m	3,50 m
	$R_{0,98}$	3,20 m	2,95 m
b) umgerechnet auf rechtwinkligen Anlauf [Werte nach a) geteilt durch $\cos \beta$]	max.	4,35 m	4,05 m
	$R_{0,98}$	3,70 m	3,40 m

Der Wellenauflauf ist bezogen auf die Tidewasserstände am Pegel Norddeich; etwa vorhandener Brandungstau ist in den Werten enthalten.

3. Wellenhöhe 21. 1. $H_s = 1,44$ m
($H_m = 1,07$ m, $H_{max} = 2,3$ m)

4. Wellenperiode 21. 1. $T_{Hs} = 4,9$ s ($T_m = 3,9$ s).

Der auf senkrechten Anlauf umgerechnete Wellenauflauf vom 21. 1. ($R_{0,98} = 3,4$ m) beträgt etwa das Doppelte der nach folgenden Formeln errechneten Werte:

$$\text{HUNT-VINJE: } R = 1,56 \cdot \sqrt{H_s} \cdot T_{Hs} \cdot \frac{1}{n} = 1,53 \text{ m}$$

$$\text{BATTJES: } R_{0,98} = 2,3 \sqrt{H_s} \cdot T_m \cdot \frac{1}{n} = 1,79 \text{ m}$$

$$\text{DELFT: } R = 8 H_s \cdot \frac{1}{n} = 1,92 \text{ m}$$

Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Stärke des Auflaufschwalls bei den vom Sturm hochgepeitschten Schwallspitzen zu erforschen und die zulässige Unterschreitungswahrscheinlichkeit festzulegen. Trotz dieser Einschränkungen geben die Naturwerte im Vergleich zu den Formelwerten zu denken.

Die Wirkung einzelner Einflußgrößen läßt sich an Hand der Abb. 10 deutlich machen. Sie zeigt die Meßergebnisse der Wellenhöhe, des Wellenaufbaus und der Wellenperiode in der Nachtide am 4. 1. um etwa 1.00 und 2.00 Uhr für unterschiedliche Wassertiefen von etwa 2,6 m und 3,0 m. Die Windgeschwindigkeit betrug während dieser Zeit i. M.

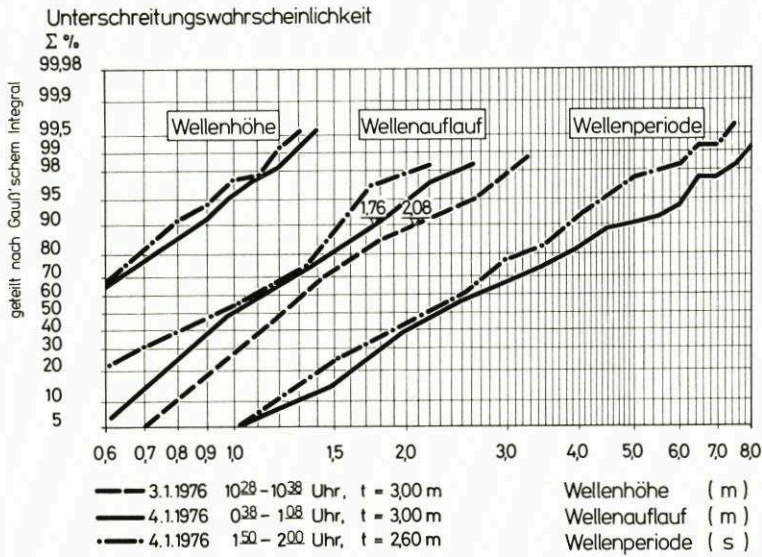


Abb. 10. Wellenauflauf- und Wellenkennwerte ausgewählter Zeitabschnitte mit unterschiedlichen Wassertiefen bzw. Windverhältnissen

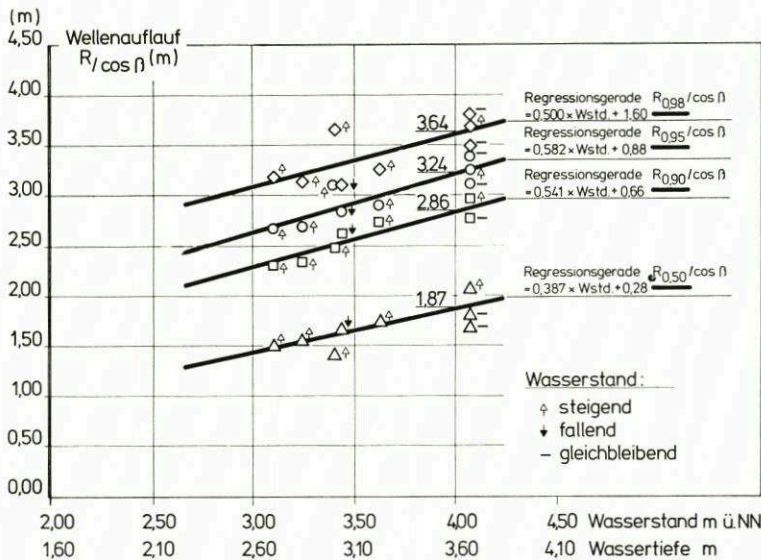


Abb. 11. Wellenauflauf - umgerechnet auf senkrechten Anlauf in Abhängigkeit von der Wassertiefe mit errechneten Regressionsgraden für die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten 98, 95, 90 und 50 %

15 m/s = Bft. 7. Bei den miteingetragenen Werten für den Wellenauflauf vom 3. 1. bei einer Wassertiefe von ebenfalls 3,0 m, aber einer größeren Windstärke von 30 m/s = Bft. 11, ergibt sich ein wesentlich höherer Wellenauflauf. Der Wellenauflauf $R_{0,90}$ beträgt 2,08 m bei Wst. 11 im Vergleich zu 1,76 m bei Wst. 7. Auffällig ist auch die für den Flachwasserbereich des Watts beträchtliche Wellenperiode am 4. 1. bis zu über 8 s, die von einer durch das Seegat auf das Watt schwingenden Dünung zeugt.

In Abb. 11 ist der Wellenauflauf am 3. 1. und 21. 1. in Abhängigkeit vom Wasserstand für verschiedene Unterschreitungshäufigkeiten $R_{0,98}$; $R_{0,95}$; $R_{0,90}$ und $R_{0,50}$ aufgetragen. Für diese vier Unterschreitungshäufigkeiten sind die Regressionsgeraden errechnet und dargestellt. Sie ermöglichen die Extrapolation auf andere Wasserstände. Diese Graphik macht deutlich, daß die Ermittlung des maßgebenden Wellenaufbaus stark beeinflusst wird von der Festlegung der zulässigen Unterschreitungshäufigkeit. Für den ausgewiesenen Wasserstand von NN + 4,00 m beträgt der auf senkrechten Anlauf umgerechnete Wellenaufbau $R/\cos \beta$ bei einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 98 % 3,64 m und von 90 % 2,86 m; die Werte differieren also um 78 cm.

Die Auswertung der ersten kontinuierlichen Wellenaufbauregistrierung an Seedeichen aus drei Sturmfluten hat neben interessanten Einzelwerten allgemein bestätigt, daß an Schardeichen mit höheren Wellenaufbauwerten als bisher üblich zu rechnen ist. In weiteren Messungen auch bei anderen örtlichen Gegebenheiten und mit einer Untersuchung der Einzelaufbauschwalle wird der Fragestellung nach einer zutreffenden Abschätzung des maßgebenden Wellenaufbaus nachgegangen werden müssen. Für die Bemessung und Sicherheitsbetrachtung der Seedeiche ist die Lösung dieser Fragen von großem Wert.

5. Schriftenverzeichnis

- BAUAMT FÜR KÜSTENSCHUTZ NORDEN: Bericht über die ersten kontinuierlichen Wellenaufbaumessungen und die Wellenmessungen am Roten Pfahl im Januar 1976 (unveröff.). Norden, 1976.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, Braunschweig, 1974.
- ERCHINGER, H. F.: Küstenschutz durch Vorlandgewinnung, Deichbau und Deicherhaltung in Ostfriesland. Die Küste, H. 19, 1970.
- ERCHINGER, H. F.: Wellenaufbau an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 41, Braunschweig, 1974.
- ERCHINGER, H. F.: Wave Run-up in Field Measurements with Newly Developed Instruments. Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng., Honolulu, 1976.
- ERCHINGER, H. F.: Deichschutzwerke in „Seedeichbau – Theorie und Praxis –“. Hrsg. Vereinigung der Naßbaggerunternehmen e.V., Hamburg, 1976.
- FAHRENTHOLZ, S. R.: Wellen- und Wasserstandsmessungen in freier See mit Hilfe des akustischen Echolotverfahrens. 2. Internat. Kongreß „INTEROCEAN '73“, Meeresforschung und Meerestechnik, 1973.
- FÜHRBÖTER, A.: Air Entrainment and Energy Dissipation in Breakers. Proc. 12th Int. Conf. on Coastal Eng., Washington, 1970.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufteinschlages für die Energieumwandlung in Brandungszonen. Die Küste, H. 21, 1971 und Mitt. Franzius-Inst., H. 36, Hannover, 1971.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, Braunschweig, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Äußere Belastung der Seedeiche in „Seedeichbau – Theorie und Praxis –“. Hrsg. Vereinigung der Naßbaggerunternehmen e.V., Hamburg, 1976.
- FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J., SCHWITTERS, J. u. SINDERN, J.: Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung. Die Küste, H. 23, 1972.
- HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenaufbau an Seedeichen im Wattengebiet. Mitt. Franzius-Inst., H. 5, Hannover, 1954.
- HUNDT, C.: Der maßgebende Sturmflutseegegang und Wellenaufbau für das Deichbestick der deutschen Nordseeküste aufgrund der Sturmflut vom 16. Februar 1962. Die Küste, Jg. 10, H. 2, 1962.
- LÜDERS, K.: Bericht der Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste, Jg. 14, H. 1, 1966.

- NIEDERS. MIN. F. ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN: Erfahrungen aus den Sturmfluten vom November/Dezember 1973 und Folgerungen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke. Die Küste, H. 29, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 29, 1976.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, Braunschweig, 1974.
- TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE ON PROTECTION AGAINST INUNDATION: Wave Run-up and Overtopping. Government Publishing Office, The Hague, Netherlands, 1974.
- TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DES KÜSTENAUSSCHUSSES NORD- U. OSTSEE: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und Empfehlungen für ihre Nutzanwendung beim Seedeichbau. Die Küste, H. 17, 1969.
- ZITSCHER, Fr. F.: Analyse zur Bemessung von Außenböschungen scharliegender Seedeiche gegen Wellenbeanspruchung. Wasser u. Boden, H. 10, 1962.