

BUNDESMINISTERIUM FÜR
BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE
- Meerestechnik und Küsteningenieurwesen -

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0561

Bemessung auf Seegang

(KFKI Projekt Nr. 45)

Teil 4

Wellenauflauf:

Ergebnisse aus großmaßstäblichen Laborversuchen,
aus Messungen in der Natur und aus numerischer Simulation,
Bemessungsansatz für ingenieurpraktische Anwendungen

von

Joachim Grüne & Zeya Wang

Dezember 1998

Bundesanstalt für Wasserbau

KFKI – Bibliothek

Wedeler Landstraße 157 22559 Hamburg

Eingang:

45 ✓
02.02.2007

Signatur:

E 27914wb

FORSCHUNGSZENTRUM KÜSTE

Gemeinsame Zentrale Einrichtung der Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig



E 27914

45

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0561

Bemessung auf Seegang

(KFKI Projekt Nr. 45)

Teil 4

Wellenauflauf:

Ergebnisse aus großmaßstäblichen Laborversuchen,
aus Messungen in der Natur und aus numerischer Simulation,
Bemessungsansatz für ingenieurpraktische Anwendungen

von

Joachim Grüne & Zeya Wang

Dezember 1998

FORSCHUNGS**Z**ENTRUM **K**ÜSTE

Gemeinsame Zentrale Einrichtung der Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig



E 27 914

P 45

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung	5
2. Bemessungsansätze für den Wellenauflauf an Deichen	8
2.1 Allgemeine Vorbemerkung	8
2.2 Allgemeiner Bemessungsansatz nach HUNT	9
2.3 Allgemeine Anforderungen an den HUNT - Ansatz für die Anwendung an die Praxis	11
3. Versuche im Großen Wellenkanal	14
3.1 Vorbemerkungen	14
3.2 Versuche mit gleichförmig geneigten Außenböschungen	14
3.3 Versuche mit einer aus zwei gleichförmigen Neigungen zusammengesetzten Außenböschungen	16
3.4 Versuche mit einer an der Außenböschung vorgesetzten Berme	19
3.5 Versuche mit einer gleichförmigen Außenböschung und mit Vorland	21
4. Messungen in der Natur	23
4.1 Vorbemerkungen	23
4.2 Konfiguration und Lage der Messketten, ihre Küstenvorfelder und Deichquerschnitte	23
5. Messsysteme, Datenerfassung und Datenaufbereitung	31
5.1 Messsysteme	31
5.1.1 Wellenpegel im GWK	31
5.1.2 Wellenpegel in der Natur	31
5.1.3 Wellenauflaufpegel im GWK und in der Natur	33
5.1.3.1 Messprinzip und Gerätebeschreibung	33
5.1.3.2 Messsignalcharakteristik	35
5.1.3.3. Eichung des Pegels	36

5.2 Datenerfassung	38
5.2.1 Datenerfassung im GWK	38
5.2.2 Datenerfassung in der Natur	39
5.3 Datenaufbereitung	40
5.3.1 Aufbereitung der Daten der Wellenpegel im GWK	40
5.3.2 Aufbereitung der Daten der Wellenpegel in der Natur	40
5.3.2 Aufbereitung der Daten der Wellenauflaufpegel	42
6. Allgemeine Anmerkungen zur Charakteristik des Wellenaufbaus und Folgen für die Auswertung	46
6.1 Zur allgemeinen Charakteristik des Wellenaufbaus am Beispiel von Naturdaten	46
6.2 Vergleiche mit numerisch erzeugten Wellenaufbaudaten	52
6.3 Weitere Plausibilitätsüberprüfungen der Wellenaufbausignale	53
6.4 Anforderungen an die Auswertemethodik	56
6.4.1 Definitionen im Zeitbereich	57
6.4.2 Ergebnisparameter im Zeitbereich	60
6.4.3 Weitere Randbedingungen für die Auswertung	61
6.4.4 Trendanteile	63
7. Ergebnisse aus den Untersuchungen	68
7.1 Allgemeine Vorbemerkungen	68
7.2 Wahl des Periodenparameters für die Darstellung der Ergebnisse mit dem Ansatz von HUNT	68
7.3 Ergebnisse aus Untersuchungen im GWK	74
7.3.1 Untersuchungen an Deichen mit gleichförmig geneigten Außenböschungen	74
7.3.2 Untersuchungen an Deichen mit Außenböschungen aus zwei zusammengesetzten gleichförmigen Neigungen	78
7.3.3 Untersuchungen an Deichen mit Bermen	86
7.3.4 Untersuchungen an Deichen mit Vorland	91

7.4	Ergebnisse aus Untersuchungen in der Natur	94
7.5	Ergebnisse aus Untersuchungen zur seegangsdämpfenden Wirkung von Vorländern	101
8.	Zusammenhänge zwischen Wellenauflauf und Wellenüberlauf	106
9.	Vergleichsberechnungen des Wellenaufbaus und des Wellenüberbaus mit dem Numerischen Modell " ODIFLOCS "	108
10.	Anwendung der Ergebnisse für ingenieurpraktische Aufgaben	120
10.1	Verifizierter Berechnungsansatz für den Wellenaufbau	120
10.2	Erläuterungen der Einzelbeiwerte K_i	121
10.2.1	Beiwert K_0	121
10.2.2	Beiwert K_1	122
10.2.3	Beiwert K_2	122
10.2.4	Beiwert K_3	123
10.2.5	Beiwert K_4	124
10.2.6	Beiwert K_5	125
10.2.7	Beiwert K_6	126
10.2.8	Beiwert K_7	128
10.2.9	Beiwert K_8	130
10.2.10	Beiwert K_9	130
11.	Schrifttum	133

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung im KFKI- Forschungsvorhaben " Bemessung auf Seegang " sah eine kritische Bestandsaufnahme der Bemessungsansätze für den Wellenauflauf und den Wellenüberlauf hinsichtlich der natürlichen Gegebenheiten und Randbedingungen im deutschen Küstengebiet vor.

Auf die Vorhabensbeschreibung dieses Projektes soll im Folgenden nur insoweit kurz eingegangen werden, als es zum Verständnis der durch die Gemeinsame Zentrale Einrichtung GROSSER WELLENKANAL (GWK) (seit 1996 FORSCHUNGSZENTRUM KÜSTE (FZK)) durchgeführten Arbeiten im Rahmen dieses KFKI - Vorhabens notwendig ist.

Hinsichtlich der Untersuchungsinhalte und Untersuchungsmethoden waren folgende Teilaufgaben vorgesehen:

3.1 Erfassung der Struktur des Seegangs vor Deichen bei Sturmfluten (NLÖ)

Hierzu war vorgesehen, Ergebnisse aus vorhandenen und geplanten Naturmessungen sowie aus Messungen im GWK zu verwenden. Diese Messungen sind Eigenleistungen der beteiligten Institutionen.

3.2 Schräger Wellenangriff (NLÖ)

Für die Bearbeitung dieser Fragestellung sollten Daten außer aus den in Eigenleistungen durchgeführten Naturmessungen auch aus Modellversuchen niederländischer und dänischer Versuchsanstalten herangezogen werden.

3.3 Wirkung der Bauwerksgeometrie (GWK)

Auch hier sollten Daten verwendet werden, die aus Messungen in der Natur mit Instrumentendaten und mit Teek- (Treibsel-) einmessungen und aus Messungen im GWK vorliegen bzw. während der Bearbeitungsphase des KFKI - Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt werden konnten.

3.4 Zusammenhänge von Wellenauflauf- und -überlauf (GWK)

Zu dieser Fragestellung sollte das internationale Schrifttum ausgewertet werden.

3.5 Räumliche Verteilung von Seegang und Wellenauflauf (NLÖ)

Hierzu sollte zunächst ein Kataster von vorhandenen Teek- (Treibsel-) einmessungen an der deutschen Nordseeküste erstellt werden. Diese Teek- (Treibsel-) daten sollten dann mit Hilfe geeigneter, zu formulierender und an Naturmessungen zu verifizierender Übertragungsfunktionen Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung von Wellenauflauf und Seegang ermöglichen.

3.6 Hydrodynamische Wirksamkeit seegangsdämpfender Bauwerke (NLÖ und GWK)

Es sollten Ergebnisse aus Messungen an Vorländern im GWK und an Messungen in der Natur im Rahmen des KFKI- Forschungsvorhabens " Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Tidegebiet " verwendet werden.

3.7 Untersuchungen zur Fehlerfortpflanzung (NLÖ)

Es war eine Aufteilung der Arbeiten zwischen der Forschungsstelle Küste des NLÖ und der Gemeinsamen Zentralen Einrichtung GWK vorgesehen, die sich an das bei diesen beiden Partnern jeweils vorhandene Untersuchungsmaterial und an bestehende Forschungsschwerpunkte orientierten.

Die Teilaufgaben 3.1 , 3.2 , 3.5 und 3.7 sollten bei der Forschungsstelle Küste des NLÖ bearbeitet werden, die Teilaufgaben 3.3 und 3.4 bei der Gemeinsamen Zentralen Einrichtung GWK und die Teilaufgabe 3.6 sollte an beiden Standorten bearbeitet werden.

Der Gemeinsamen Zentralen Einrichtung GWK standen dafür aus Mitteln des KFKI - Forschungsvorhabens ein Wissenschaftler BAT Iia für einen Zeitraum von 23 Monaten (1.9.1994 bis 31.6.1996) sowie Beschäftigungsentgelte für studentische Hilfskräfte in Höhe von 34.500 DM zur Verfügung (etwa 27 % der 1993 insgesamt bewilligten Mittel). Insbesondere die Mittel für einen Wissenschaftler BAT Iia waren damit deutlich geringer als im Antrag vorgesehen.

Nach einer Einarbeitungsphase des wissenschaftlichen Mitarbeiters am Standort GWK erwies sich während der ersten Auswertungen des am GWK vorhandenen Datenmaterials die ursprünglich vorgesehene Aufteilung der Teilaufgaben als ungeeignet. Es wurde klar, dass die Auswertungsarbeiten auf die Art der vorhandenen Daten ausgerichtet werden mussten und nicht nach den Fragestellungen der Teilaufgaben, um Doppelauswertungen und damit Doppelarbeiten an beiden Standorten zu vermeiden. So kann z.B. die Wirkung der Bauwerksgeometrie (Teilaufgabe 3.3) nicht untersucht werden, ohne gleichzeitig auch die Struktur des Seegangs (Teilaufgabe 3.1) mit zu untersuchen oder bei bestimmten vorliegenden Daten die hydrodynamische Wirksamkeit seegangsdämpfender Bauwerke (Teilaufgabe 3.6) mit zu behandeln.

Bei den weiteren Auswertungen des am GWK vorhandenen Datenmaterials zum Seegang und Wellenauflauf wurden daher Fragestellungen aus allen Teilaufgaben mit berücksichtigt, soweit sie sich in Zusammenhang mit den Daten ergaben; dies waren die Teilaufgaben 3.1 bis 3.4 sowie 3.6. Die Teilaufgaben 3.5 und 3.7 blieben für das NLÖ vorgesehen.

Von den aus Mitteln dieses Forschungsvorhabens bezahlten wissenschaftlichen Mitarbeitern und studentischen Hilfskräften wurden im Wesentlichen die aus Versuchen im GWK gewonnenen Daten zum Wellenauflauf gesichtet, auf neue mit den vorhandenen Rechnern verwendbaren Datenträgern überspielt und gesichert, aufbereitet und ausgewertet. Wegen der Kürzung von ursprünglich vorgesehenen 30 Beschäftigungsmonaten auf 23 Monate (dies entspricht einer Kürzung auf 76 %) wurde die Teilaufgabe 3.4 (Zusammenhänge von Wellenauflauf und -überlauf) nur sehr verkürzt behandelt.

Ergebnisse aus den in der Vorhabensbeschreibung erwähnten Messungen des Wellenaufbaus mit Geräten in der Natur werden in diesem Bericht nur insoweit beschrieben, als sie im unmittelbaren thematischen Zusammenhang mit den GWK- Ergebnissen verglichen werden können (z.B. hinsichtlich der Struktur des Seegangs oder der seegangsdämpfenden Wirkung von Vorländern). Dies betrifft auch insbesondere übergeordnete Aspekte wie die Charakteristik des Wellenaufbaus sowie die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Auswertemethodik, die sowohl für die Auswertung von Natur- als auch von Labordaten vereinheitlicht wurde.

Es muss dazu ergänzend erwähnt werden, dass die Durchführung dieser Naturmessungen und die Auswertung der gemessenen Daten zwar in engem thematischen Zusammenhang, aber ohne Inanspruchnahme jeglicher Mittel aus diesem KFKI - Forschungsvorhaben erfolgt sind. Wie im Folgenden noch ausgeführt wird, sind aus der Bearbeitung dieses Projektes am GWK bereits einige Veröffentlichungen entstanden und noch einige in Vorbereitung. Weiterhin ist am FZK eine Dissertation in Vorbereitung, so dass viele Ergebnisse in diesem Bericht in zusammengefasster Form verkürzt wiedergegeben werden können. Ausführlicher als üblich werden dagegen allgemeine Anmerkungen zu den äußeren Einflüssen auf den physikalischen Prozess des Wellenaufbaus und zu Mess- und Auswertetechnik abgehandelt.

2. Bemessungsansätze für den Wellenaufbau an Deichen

2.1 Allgemeine Vorbemerkung

Die Bemessung von Deichen auf Wellenaufbau ist in jüngster Zeit wieder zum Schwerpunkt der Forschung im Küsteningenieurwesen geworden. Als Folge der Diskussionen über eine Zunahme der Sturmverhältnisse und über einen vermuteten Anstieg des Meeresspiegels gewinnt eine realistische Bestandsaufnahme der Berechnungsverfahren des Wellenaufbaus an Bedeutung. Dies ist leicht einsehbar, denn während für den maßgebenden Bemessungswasserstand in den zur Zeit vertretenen Szenarien ein Meeresspiegelanstieg in einer Größenordnung von Dezimetern diskutiert wird, spielt sich der Wellenaufbau meist in Größenordnungen von Metern ab.

Mit realistischen Berechnungsverfahren des Wellenaufbaus lassen sich für bestehende Deiche Szenarien eines möglichen Anstiegs des Bemessungswasserstandes durchrechnen. Mit den daraus erhaltenen Daten lässt sich dann abschätzen, bei welchen Anstiegswerten Überlegungen zur möglichen Verstärkung bestehender Küstenschutzbauwerke angemessen sind.

Für diese Berechnungen des Wellenaufbaus sind gleichermaßen realistische Parameter des örtlichen Seegangs erforderlich. Sowohl für Wattgebiete als auch für Ästuare stehen oft nur örtlich begrenzt abgesicherte Vorhersageverfahren zur Verfügung. Diese Problematik ist jedoch nicht Bestandteil dieser Untersuchungen.

2.2 Allgemeiner Bemessungsansatz nach HUNT

Im Folgenden soll ein kurzer Abriss über die Grundlagen des heute allgemein verwendeten Berechnungsansatzes gegeben werden. Auf Einzelheiten wird später bei der Diskussion der in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse eingegangen.

Die Grundlage für die heute allgemein verwendeten Berechnungsverfahren bildet der Ansatz von HUNT (1959). Die Grundform des Ansatzes von HUNT repräsentiert die generelle Tendenz von veröffentlichten Ergebnissen aus Messungen und Versuchen am besten und hat sich daher international durchgesetzt, zumal sich viele ältere Ansätze auf diese Grundform zurückführen lassen. Die auch in Deutschland gebräuchliche sogenannte "Delfter Formel" nach WASSING (1958) sollte dagegen grundsätzlich nicht mehr genutzt werden, da sie den Haupteinfluss der Wellenperiode nicht berücksichtigt und daher nur für einen eingeschränkten Bereich gültig ist (SPARBOOM, GRÜNE, GROSCHE & HAIDEKKER (1990)).

Der Ansatz von HUNT basiert auf einem analytisch - empirischen Ansatz, der in seiner ursprünglichen Form aus Modellversuchen an Deichen mit gleichförmigen, glatten Neigungen und mit regelmäßigen Wellen abgeleitet wurde. Dieser Ansatz in seiner verallgemeinerten einfachsten Form

$$R = C \sqrt{H} T \tan \alpha$$

mit R = Wellenauflauf
 C = allgemeiner empirischer Koeffizient
 H = Wellenhöhe
 T = Wellenperiode
 $\tan \alpha$ = Neigung der seeseitigen Böschung

gibt den generellen Einfluss der Parameter Wellenhöhe H und Wellenperiode T vom Trend richtig wieder und kann daher als Basis - Formel für die Entwicklung einer erweiterten Formel für komplexe Deichgeometrien und für den natürlichen Seegang verwendet werden.

Der Ansatz von HUNT kann unter Verwendung des Ansatzes für Tiefwasserwellen in verschiedene Varianten umgeformt werden. In neuesten Veröffentlichungen findet man meist die mit der sogenannten Brecherkennzahl ξ verknüpfte Form, die auf die Ermittlung einer kritischen Böschungsneigung für den Übergang von Sturzbrechern zu Reflexionsbrechern nach IRIBARREN und NOGALES zurückgeht und auch schon im Prinzip von HUNT alternativ angegeben wurde. Alle gebräuchlichen Formen des Ansatzes von HUNT sind in Abb. 1 dargestellt, wobei der allgemeine Koeffizient K bzw. C dem aus den Versuchen mit regelmäßigen Wellen von HUNT ermittelten Koeffizienten entspricht. Der Beiwert K bzw. C ist jeweils sowohl umgerechnet vom US- ins metrische Längenmaßsystem als auch von der Originalform in die jeweils dargestellte Form.

$$\begin{aligned}
 R &= K * \sqrt{H * L_0} * \tan \alpha & K &= 1,0 \\
 R &= K * \sqrt{H * g} * T * \tan \alpha & K &= 0,4 \\
 R &= K * \sqrt{H} * T * \tan \alpha & K &= 1,25 \\
 \frac{R}{H} &= C * \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} = C * \xi & C &= 1,0 \\
 \xi &= \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}
 \end{aligned}$$

Abb. 1 Beiwerte K bzw. C für verschiedene Formen des HUNT-Ansatzes

In der Darstellungsform des HUNT – Ansatzes mit der Brecherkennzahl ξ sind in Abb. 2 beispielhaft einige Ergebnisse aus Untersuchungen im GWK an einem gleichförmig geneigten Deichquerschnitt mit und ohne Berme dargestellt. Für die Versuchsreihen dieser dargestellten Ergebnisse wurden unregelmäßige Wellen nach einem Pierson-Moskowitsch-Spektrum (PM-Spektrum) verwendet. Es ergaben sich für den Koeffizienten C_ξ Werte von 1,7 (Brecherindex $\xi < 2,0$) bzw. $R/H = 3,0$ für den Bereich $\xi > 2,0$. Die Ergebnisse für die Versuchsreihen mit der Berme wurden nach einem modifizierten Ansatz von d. WAAL & v. d. MEER (1992) umgerechnet. Deren Empfehlung für den Koeffizienten C_ξ bezieht sich zwar auf die Verwendung des Periodenparameters T_p , die auf T_p bezogenen Ergebnisse weichen jedoch noch stärker von dem Empfehlungswert ab, worauf noch in Abschnitt 7.2 eingegangen wird.

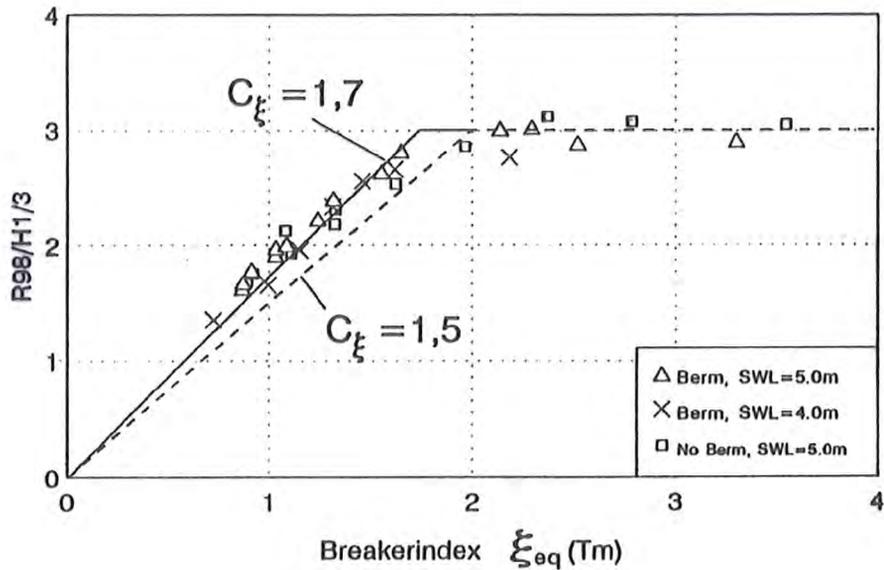


Abb. 2 Darstellung von Wellenaufufergebnissen aus Untersuchungen im GWK in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ

2.3 Allgemeine Anforderungen an den HUNT - Ansatz für die Anwendung in der Praxis

Für die Verhältnisse an den deutschen Küsten mit oft komplexen Deichquerschnittsformen und einer Belastung durch natürlichen Seegang muss diese verallgemeinerte Form sowohl hinsichtlich der Wellenaufparameter (z.B. R_{max} , R_{98}), der Parameter für Wellenhöhe (z.B. H_{max} , $H_{1/3}$) und für Wellenperiode (z.B. T_m , $T_{H1/3}$) und der weiteren Charakteristiken des natürlichen Seegangs als auch insbesondere hinsichtlich der oft komplexen Deichquerschnittsformen verifiziert werden. Aus allen diesen Verifikationen resultieren unterschiedliche Werte für die Koeffizienten in Abhängigkeit der verwendeten Parameter für den Wellenaufbau, den Seegang und der Deichgeometrie.

Es gibt eine Reihe von Veröffentlichungen mit entsprechenden Verifikationen, darunter auch einige wenige mit Messdaten aus der Natur und aus großmaßstäblichen Laboruntersuchungen (siehe dazu u.a. GRÜNE (1982;1996), FÜHRBÖTER et. al. (1989), SPARBOOM et. al. (1990), v. d. MEER & STAM (1992) und d. WAAL & v. d. MEER (1992)). Allerdings sind fast alle bisherigen Ansätze zu diesen Verifikationen im Hinblick auf ihre Anwendung für die Verhältnisse an deutschen Küsten noch nicht hinreichend überprüft.

Für unregelmäßige Wellen wird der Wellenauflaufparameter R meist als Auflaufparameter $R_{98\%}$ bzw. $R_{2\%}$ definiert. Diese Definition bedeutet, dass 2% der Wellenaufläufe diesen Wert überschreiten bzw. dass 98% unterhalb dieses Wertes bleiben. In einigen früheren Veröffentlichungen wird dieser Parameter auf die Anzahl der Wellen bezogen, aber niemals berichtet, wie dies erfolgte, wenn die Anzahl der Wellen nicht mit derjenigen der Aufläufe übereinstimmte, was bei unregelmäßigen Wellen fast immer der Fall ist. Weiterhin kann mit unregelmäßigen Wellen kein direkter Bezug zwischen jeder Einzelwelle vor dem Deich und jedem Einzelauflauf hergestellt werden. Ferner haben Untersuchungen in der Natur (GRÜNE, 1982; WANG & GRÜNE, 1995) gezeigt, dass das zahlenmäßige Verhältnis zwischen Einzelwellen und Einzelaufläufen von der Charakteristik des Seegangs und auch ein wenig von der Definition bzw. Auswertemethodik abhängen, insbesondere bei sehr flachen Außenböschungen.

Von den Wellenhöhenparametern unregelmäßigen Seegangs wird allgemein die signifikante Wellenhöhe H_s verwendet, aber in vielen Veröffentlichungen wird nicht genau definiert, ob H_s aus einer Auswertung im Zeitbereich ($H_{1/3}$) oder aus dem Frequenzbereich (H_{m0}) gewonnen wurde. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Unterschiede zwischen $H_{1/3}$ und H_{m0} gering sind und R nur mit dem Faktor \sqrt{H} zunimmt.

Die verschiedenen unregelmäßigen Wellenperiodenparameter unterscheiden sich, verglichen mit H_s , infolge ihrer Definitionen und ihrer Auswertemethoden im Zeit- und Frequenzbereich in viel stärkerem Maße untereinander. Ferner nimmt der Wellenauflauf nach dem HUNT - Ansatz direkt mit der Wellenperiode zu, daher beeinflusst die Wahl der verwendeten Periode die Auflaufergebnisse beträchtlich. Oft wird die mittlere Periode T_m aus der Zeitbereichsanalyse verwendet, die die größte Ähnlichkeit mit der regelmäßigen Periode T besitzt. Van OORSCHOT & d'ANGREMOND (1968) empfahlen die Verwendung der Peakperiode in Verbindung mit dem Spektralbreitenparameter ($\varepsilon * T_p$) mit ε = Spektralbreitenparameter. Der Einfluss der verschiedenen Periodenparameter aus dem Zeit- und Frequenzbereich (T_m , T_p) auf Wellenauflaufergebnisse aus Untersuchungen im großmaßstäblichen Labor und in der Natur wurde u.a. von SPARBOOM, GRÜNE, GROSCHE & HAIDEKKER (1990) beschrieben.

Es gibt einige Vorschläge für die Transformation des Böschungsneigungswinkels α bei nicht gleichförmigen Deichquerschnitten in einen äquivalenten Böschungswinkel α_{eq} .

SAVILLE (1958) schlug die Definition eines äquivalenten Böschungswinkels mit der Gradienten - Methode vor, bei der die Neigung zwischen dem Brechpunkt und dem maximalen Auflaufpunkt auf der Böschung linear interpoliert wird. GRÜNE (1982) berichtete anhand von Daten aus der Natur für zusammengesetzte Neigungen (1:4 und 1:6), dass der Übergang von den beiden Neigungen in etwa zwischen einem Abstand von $1.0 H_{1/3}$ unterhalb und $2.0 H_{1/3}$ oberhalb des Ruhewasserspiegels stattfindet. Ein ähnlicher Vorschlag wurde von d. WAAL & v. d. MEER (1992) gemacht mit der linearen Interpolation zwischen den Abständen $1.0 H_{1/3}$ unterhalb und $1.0 H_{1/3}$ oberhalb des Ruhewasserspiegels.

Über die Dämpfung des Wellenaufbaus durch Bermen berichten HERBICH et al. (1963), die eine lineare Verminderung des Aufbaus mit dem Bermenbreiten - Wellenlängen - Verhältnis fanden. BATTJES (1974) verwendete die gleichen Daten für seine Untersuchungen und schlug einen Dämpfungsfaktor in Abhängigkeit von dem Parameter B/\sqrt{HL} vor. Einen weiteren Vorschlag nach Ergebnissen aus kleinmaßstäblichen Untersuchungen machen d. WAAL & v. d. MEER (1992), in deren Methode die relative Bermenbreite B/H , eine mittlere Böschungsneigung α ohne Berme sowie die relative Wassertiefe über der Berme bis zu einer Höhe von etwa $1.5 H_{1/3}$ berücksichtigt wird.

In Abschnitt 10 erfolgt eine Zusammenstellung der Verifikationen für Verhältnisse in der Natur für ein Berechnungsverfahren auf der Grundlage des HUNT - Ansatzes mit verschiedenen Verifikationskoeffizienten für Seegangs- und Auflaufparameter, Seegangscharakteristik, Wellenanlaufriechung, relative Wassertiefenverhältnisse, Deichgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit.

3. Versuche im Großen Wellenkanal

3.1 Vorbemerkungen

Die großmaßstäblichen Laborversuche wurden im GROSSEN WELLENKANAL (GWK) in Hannover (GRÜNE & FÜHRBÖTER, 1976) im Rahmen des Forschungsprogramms des Teilprojekts A4 " Bemessungsansätze für Deiche und Deckwerke " des SONDERFORSCHUNGSBEREICHES 205 (Teilprojektleiter Prof. FÜHRBÖTER (†), Dr. DETTE) in den Jahren 1989 bis 1992 durchgeführt. Die aufgezeichneten Rohdaten wurden dem KFKI - Forschungsvorhaben zur Auswertung am Standort GWK zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden die Daten von sechs verschiedene Deichquerschnittsformen verwendet. Im Folgenden werden die Randbedingungen der Versuche mit diesen Deicheinbauten kurz erläutert.

3.2 Versuche mit gleichförmig geneigten Außenböschungen

Es wurden insgesamt zwei von der Sohle bis zur Deichkrone gleichförmig geneigte Außenböschungen untersucht: der erste Versuchseinbau besaß eine Neigung von 1 : 6 (Abb. 3), der zweite eine Neigung von 1 : 12 (Abb. 4). Der Deich bestand aus einem Sandkern, der mit Asphaltbeton abgedeckt war. Die Asphaltbetondecke wurde mit einem Straßenfertiger eingebaut. Die Genauigkeit der Oberfläche war vergleichsweise hoch, die messbaren Abweichungen von den Sollwerten überschritten den Wert +- 1 cm nicht. Die Oberfläche der Asphaltbetondecke kann als hydraulisch glatt klassifiziert werden. Der Wellenauflaufpegel (Beschreibung in Abschnitt 5.1.3) wurde unmittelbar auf die Asphaltbetondecke aufgeschraubt. Die Wellen (Oberflächenauslenkungen) wurden mit einigen Wellenpegeln (Beschreibung in Abschnitt 5.1.1) im Bereich vor dem Deich und auf dem Deich gemessen. Die Lage der Wellenpegel ist in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Es wurden regelmäßige Wellen und unregelmäßige Wellen (PM - Spektren) für die Versuche erzeugt. In Tabelle 1 sind für beide Neigungen die Anzahl der durchgeführten Versuche sowie deren Art und deren Bereiche für die Randbedingungen Wasserstand, Wellenhöhe und Wellenperiode zusammengestellt.

Versuche mit gleichförmig geneigten Außenböschungen					
		Wassertiefe D	Wellenhöhe H bzw. H1/3	Wellenperiode T bzw. T_p	Anzahl der Versuche
		[m]	[m]	[s]	
Böschung 1:6	Regelmäßige Wellen	4,80 und 4,90	0,50 bis 1,80	3 bis 15	48
	PM-Spektren	4,80 und 4,90	0,75 bis 1,20	5 bis 10	13
Böschung 1:12	Regelmäßige Wellen	4,80	0,30 bis 0,75	3 bis 17	36
	PM-Spektren	4,80	0,50 bis 1,20	5 bis 1,20	23

Tabelle 1 Zusammenstellung der Versuchsparameter an gleichförmigen Außenböschungen

3.3 Versuche mit einer aus zwei gleichförmigen Neigungen zusammengesetzten Außenböschungen

Diese Außenböschung setzte sich aus den Neigungen 1:3 und 1:6 zusammen. Der Knickpunkt (Schnittpunkt der beiden Neigungen) befand sich beim ersten Deicheinbau (Abb. 5) in einer Höhe von 3,3 m über der Kanalsohle und beim zweiten Deicheinbau (Abb. 6) in einer Höhe von 4,5 m über der Kanalsohle. Wie auch alle anderen hier beschriebenen Deicheinbauten bestanden diese aus einem Sandkern mit einer Abdeckung aus Asphaltbeton. Auch der Wellenauflaufpegel (Beschreibung in Abschnitt 5.1.3) wurde wie bei allen anderen Versuchsdeicheinbauten unmittelbar auf die Asphaltbetondecke aufgeschraubt, beim Querschnitt mit dem Knickpunkt in einer Höhe von 3,3 m über Kanalsohle nur auf der oberen Neigung von 1:6. Die Wellen (Oberflächenauslenkungen) wurden wie bei allen Einbauten mit einigen Wellenpegeln (Beschreibung in Abschnitt 5.1.1) im Bereich vor dem Deich und auf dem Deich gemessen. Die Lage der Wellenpegel ist in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Für die Versuche wurden regelmäßige Wellen und unregelmäßige Wellen erzeugt, wobei die unregelmäßigen Wellen als PM - Spektren (engbandiges Spektrum) und auch als Natur - Spektren (weitbandige Spektren) generiert wurden.

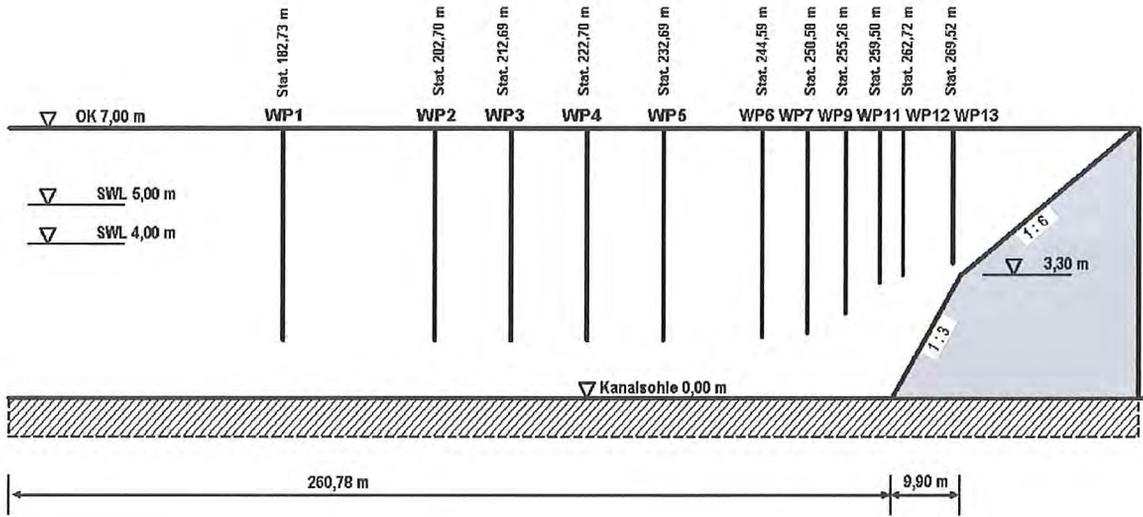


Abb. 5 Querschnitt des Versuchseinbaus im GWK für die Untersuchungen an einer zusammengesetzten Außenböschung mit den Neigungen 1:3 und 1:6

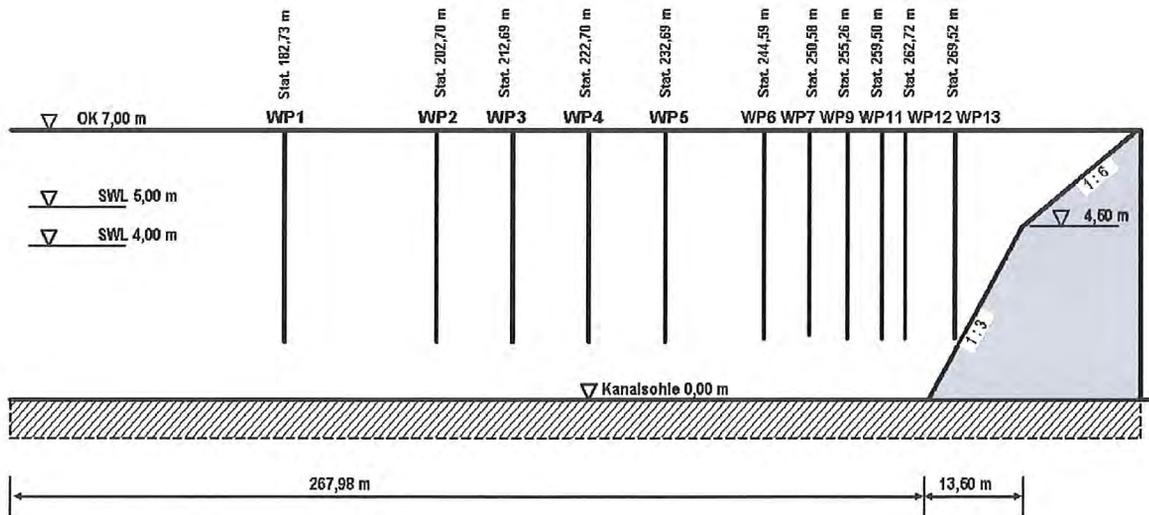


Abb. 6 Querschnitt des Versuchseinbaus im GWK für die Untersuchungen an einer zusammengesetzten Außenböschung mit den Neigungen 1:3 und 1:6

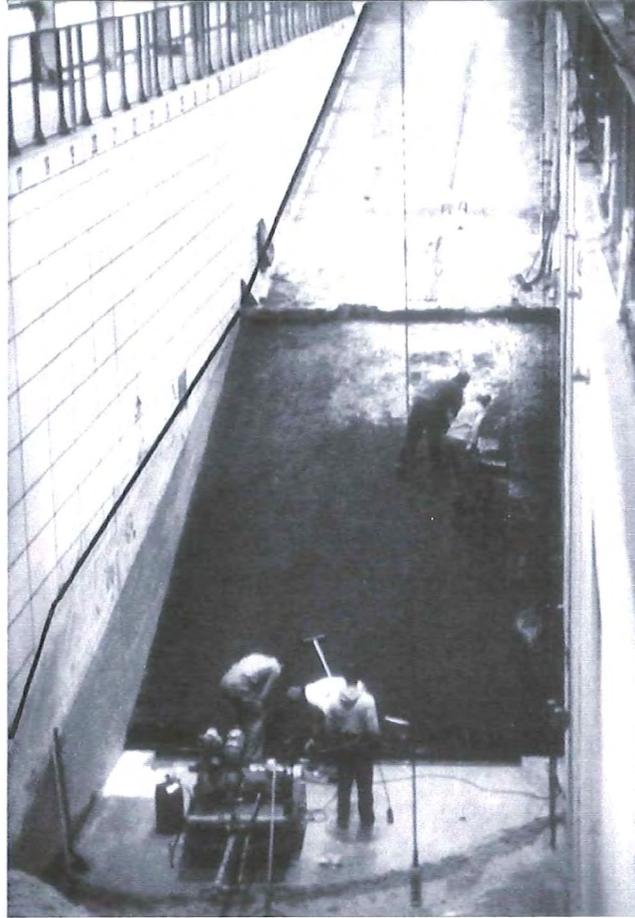


Abb. 7 Umbauarbeiten im GWK am Deich mit zusammengesetzten Böschungsneigungen

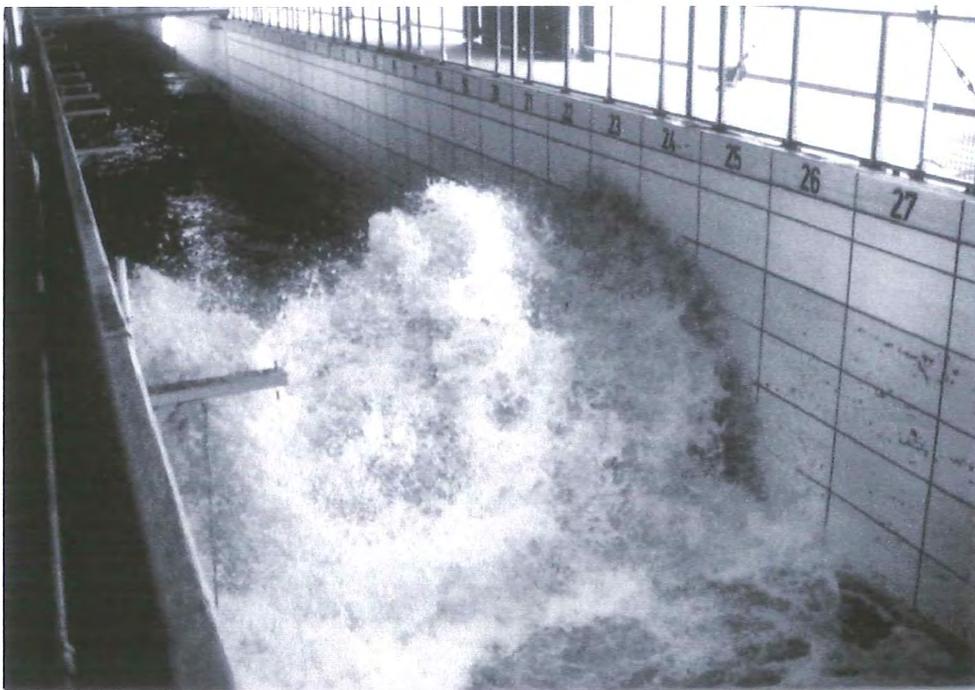


Abb. 8 Brechende Wellen an einem Deicheinbau im GWK

Die verwendeten Natur - Spektren wurden vor Deichen im Bereich des Wattenmeeres an der schleswig - holsteinischen Küste während schwerer Sturmfluten gemessen. Tabelle 2 enthält für beide Querschnitte die Anzahl der durchgeführten Versuche sowie deren Art und deren Bereiche für die Randbedingungen Wasserstand, Wellenhöhe und Wellenperiode. Durch die Verwendung von zwei Wasserständen (4,0 m und 5,0 m über Kanalsohle) ergaben sich insgesamt vier Versuchsvarianten hinsichtlich des relativen Abstandes des Ruhewasserspiegels SWL zum Knickpunkt.

Versuche an zusammengesetzten Außenböschungen 1:3 und 1:6					
		Wassertiefe	Wellenhöhe	Wellenperiode	Anzahl der
		D	H bzw. H1/3	T bzw. Tp	Versuche
		[m]	[m]	[s]	
Knickpunkt + 3,30 m	Regelmäßige Wellen	4,00 und 5,00	0,30 bis 1,75	3 bis 16	54
	PM-Spektren	4,00 und 5,00	0,50 bis 1,20	5 bis 16	24
	Natur- Spektren	4,00 und 5,00	0,90 bis 1,23	3,53 bis 11,62	25
Knickpunkt + 4,50 m	Regelmäßige Wellen	4,00 und 5,00	0,30 bis 1,75	3 bis 16	54
	PM-Spektren	4,00 und 5,00	0,50 bis 1,20	5 bis 16	26
	Natur- Spektren	4,00 und 5,00	0,90 bis 1,23	3,53 bis 11,62	25

Tabelle 2 Zusammenstellung der Versuchsparameter an zusammengesetzten Neigungen

3.4 Versuche mit einer an der Außenböschung vorgesetzten Berme

Abb. 9 zeigt den Einbauquerschnitt mit der Berme und die Anordnung der Wellenpegel. Ebenso wie bei den Versuchen an den Außenböschungen mit zusammengesetzten Neigungen wurden zwei Wasserstände sowie drei verschiedene Arten von Seegangscharakteristiken verwendet: regelmäßige Wellen, unregelmäßige Wellen als PM - Spektren (engbandiges Spektrum) und als Natur - Spektren (weitbandige Spektren).

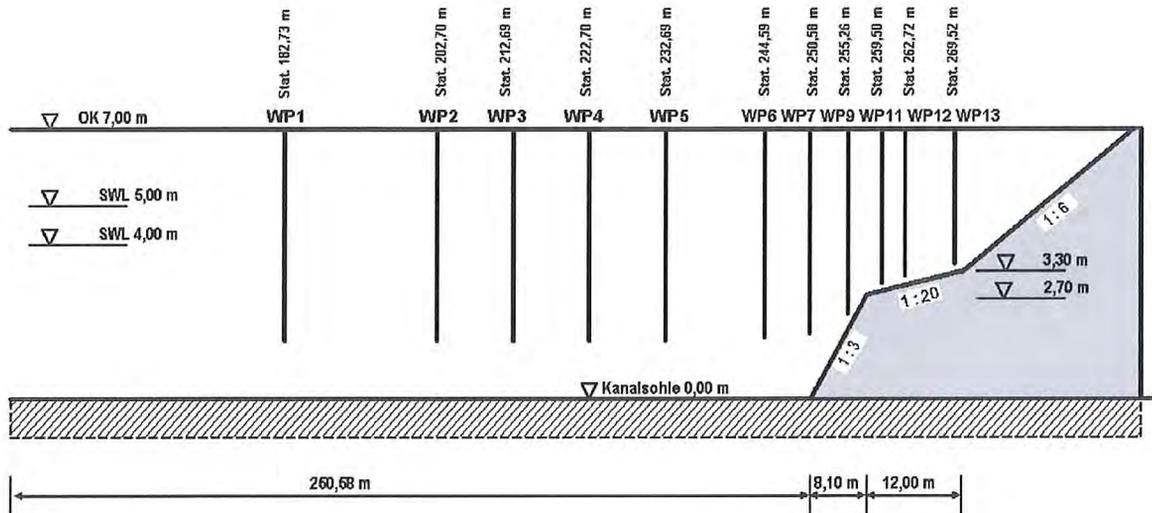


Abb. 9 Querschnitt des Versuchseinbaus im GWK für die Untersuchungen an einer gleichförmigen Außenböschung 1:6 mit vorgesetzter Berme

Die Anzahl der durchgeführten Versuche sowie deren Art und deren Bereiche für die Randbedingungen Wasserstand, Wellenhöhe und Wellenperiode ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

Versuche an einer Außenböschung 1:6 mit Berme				
	Wassertiefe	Wellenhöhe	Wellenperiode	Anzahl der Versuche
	D	H bzw. H1/3	T bzw. Tp	
	[m]	[m]	[s]	
Regelmäßige Wellen	4,00 und 5,00	0,30 bis 1,75	3 bis 16	60
PM-Spektren	4,00 und 5,00	0,50 bis 1,20	5 bis 16	29
Natur-Spektren	4,00 und 5,00	0,90 bis 1,23	3,53 bis 11,62	27

Tabelle 3 Zusammenstellung der Versuchsparameter für die Versuche mit Berme

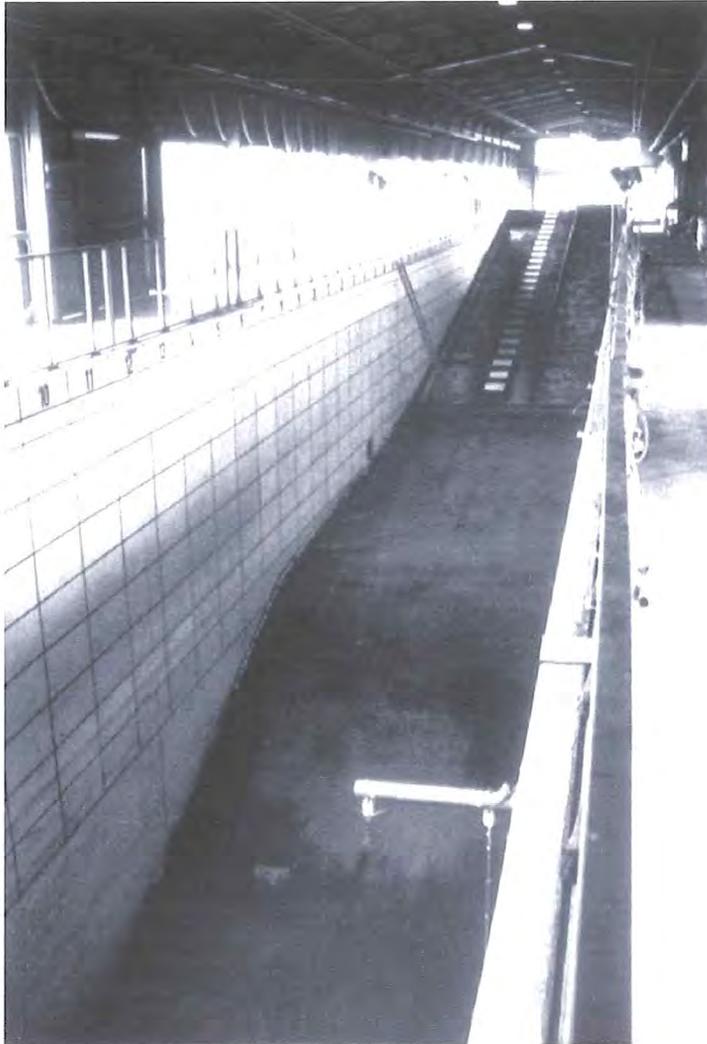


Abb. 10 Deich mit Berme im GWK

3.5 Versuche mit einer gleichförmigen Außenböschung und mit Vorland

Der Querschnitt des Einbaus für die Versuche mit Vorland ist in Abb. 11 dargestellt. Die Außenböschung des Deiches hat eine Neigung von 1 : 6. Das Vorland ist etwa 85 m breit und die Oberkante liegt 1,4 m über der Kanalsohle. Die Vorlandkante besitzt eine Neigung von 1 : 2 und ist damit relativ steil. Der Deich hat wie alle anderen Deicheinbauten einen Sandkern und ist mit einer Asphaltbetondecke abgedeckt. Das Vorland ist ebenfalls aus Sand aufgeschüttet. Die Oberfläche des Vorlandes ist jedoch nur mit einer Geotextilmatte abgedeckt und mit einer Betonstahlgewebematte und Betonstahleisenankern im Sand befestigt. Die Vorlandkante wurde mit Betonformsteinen aufgebaut. Die Versuche wurden mit insgesamt 10 verschiedenen Wasserständen im Bereich von 2,0 m bis 5,0 m über der Kanalsohle durchgeführt. Es wurden

regelmäßige Wellen und unregelmäßige Wellen als PM - Spektren verwendet. In Abb. 11 ist auch die Lage der Wellenpegel eingezeichnet. Für die Ermittlung der Wellenhöhen vor dem Vorland wurden die Werte der Pegel WP 5 bis WP 9 verwendet, für die Ermittlung der Wellenhöhen auf dem Vorland die Pegel WP 14 bis WP 19. Die weiteren Angaben zu den Versuchen sind in Tabelle 4 enthalten.

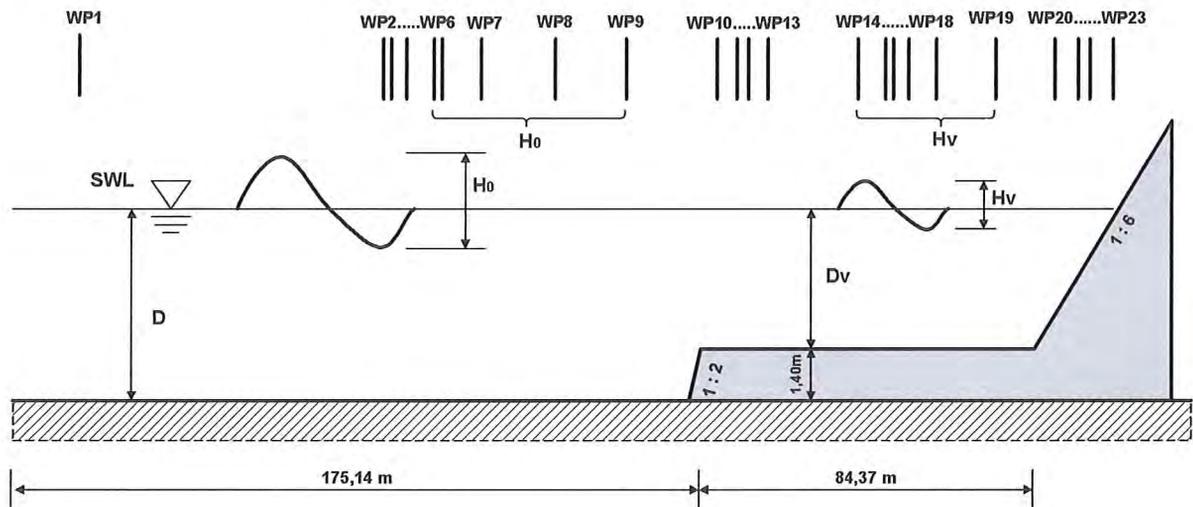


Abb. 11 Querschnitt des Versuchseinbaus im GWK für die Untersuchungen an einer gleichförmigen Außenböschung 1:6 mit Vorland

Versuche an einer Außenböschung 1:6 mit Vorland				
	Wassertiefe D	Wellenhöhe H bzw. H1/3	Wellenperiode T bzw. Tp	Anzahl der Versuche
	[m]	[m]	[s]	
Regelmäßige Wellen	2,00 bis 5,00	0,50 bis 1,80	4 bis 15	67
PM-Spektren	2,00 bis 5,00	0,50 bis 1,20	5 bis 13	64

Tabelle 4 Zusammenstellung der Versuchsparameter für die Versuche mit Vorland

4. Messungen in der Natur

4.1 Vorbemerkungen

Um einen Beitrag zur Verbesserung der hydrodynamischen Berechnungsgrundlagen für eine realistische Sicherheitsanalyse der bestehenden Deiche zu leisten, insbesondere unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse im Bereich der Dithmarscher Küste und der Elbe, wurde das " Seegangs- und Wellenaufnahmeprogramm Dithmarscher Küste und Elbe " konzipiert.

Es ist u.a. auch nach den Erfahrungen und ersten Erkenntnissen aus dem KFKI - Forschungsprojekt " Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und in Ästuarien " für die besonderen Belange der Dithmarscher Küste und der Elbe konzipiert worden und baut teilweise auf das dort eingesetzte Wissen auf. Jeder Messstandort wurde so ausgewählt, dass jeder Standort sowohl charakteristisch für bestimmte Abschnitte der Dithmarscher Küste und der Elbe ist, als auch die Möglichkeit einer gewissen Verallgemeinerung der Messergebnisse für die Übertragung der Ergebnisse auf andere Küstenabschnitte bietet, und zwar sowohl im Hinblick auf die Seegangsverhältnisse in der Wechselwirkung mit den morphologischen Randbedingungen im unmittelbarem Vorfeld als auch im Hinblick auf die komplexen Querschnittsverhältnisse der Deiche.

Das gesamte Seegangs- und Wellenaufnahmeprogramm Dithmarscher Küste und Elbe wird unter der Federführung des Amtes für Land - und Wasserwirtschaft Heide (ALW Heide) in Zusammenarbeit mit der Gemeinsamen Zentralen Einrichtung Großer Wellenkanal (GWK) durchgeführt.

4.2 Konfiguration und Lage der Messketten, ihre Küstenvorfelder und Deichquerschnitte

Die Konfiguration der Messketten an den einzelnen ausgewählten Standorten erfolgt nach einem für alle Messketten gleichen Schema (siehe Abb. 12): An allen Standorten sollen sowohl die Oberflächenauslenkungen (Wellen) des Seegangs in Deichnähe als auch der Wellenauflauf auf der Deichoberfläche erfasst werden. Je nach der Charakteristik des Küstenvorfeldes werden

zusätzlich an weiteren Stationen in einem deichnormalen Profil die Oberflächenauslenkungen (Wellen) des anlaufenden Seegangs sowie an der jeweils äußeren Station die Anlaufrichtung des Seegangs gemessen. Die Oberflächenauslenkungen des Seegangs werden mit Druckaufnehmern und die Anlaufrichtungen mit elektromagnetischen Zwei-Komponenten-Strömungssensoren erfasst.

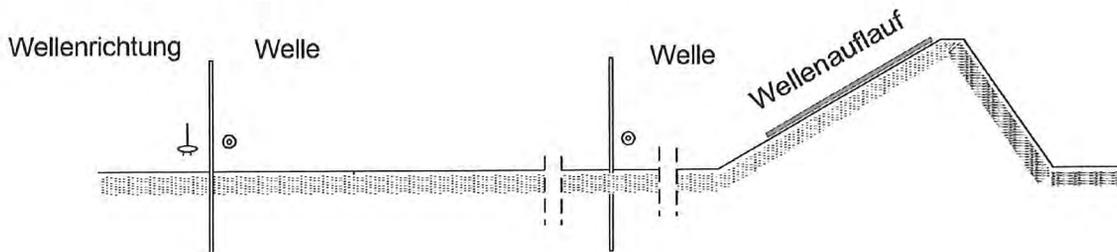


Abb. 12 : Schematische Darstellung der Konfiguration der Messketten

Es wurden insgesamt vier Messketten installiert. Die Messketten Heringsand und Stinteck (Abb. 13) wurden 1991 errichtet und seitdem betrieben. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Messketten Hermannshof und Neuendeich (Abb. 14) erfolgte 1993.

An den Messketten Heringsand und Stinteck tritt ein ausgeprägter Wattseegang infolge der ausgedehnten Wattgebiete auf. Der Eintrag von Seegangsenergie durch die Tiefs ist, verglichen mit dem Eintrag an der Messkette Stinteck, an der Messkette Heringsand geringer. Die Entfernung bis zur 10 m Tiefenlinie beträgt an der Messkette Heringsand etwa 7 km und an der Messkette Stinteck etwa 2 km. Während sich der sandige Wattboden an der Messkette Stinteck bis an den Deichfuß ausbreitet, befindet sich vor dem Deich an der Messkette Heringsand ein grünes Vorland (Salzwiesen) mit einer Breite von etwa 500 m (Abb. 15). Die Oberfläche dieses Vorlandes befindet sich auf einer Höhe von etwa NN + 2,0 m und liegt damit etwa 0,5 m über dem mittleren Tidehochwasser (MThw). Der Seegang wird am Messort Heringsand an den Stationen 1040 m, 470 m und 50 m vor dem Deichfuß gemessen, an der Messkette Stinteck an den Stationen 700 m und 50 m vor dem Deichfuß.



Abb. 13 Lage der Messketten Heringsand und Stinteck

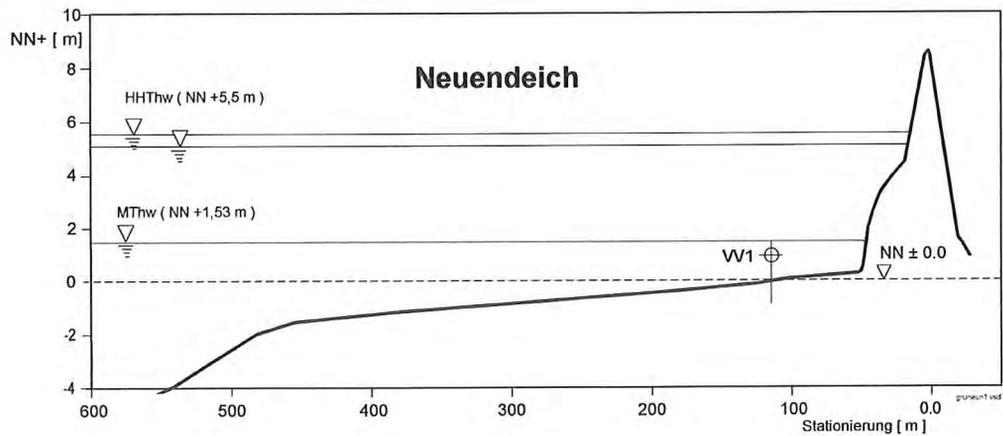
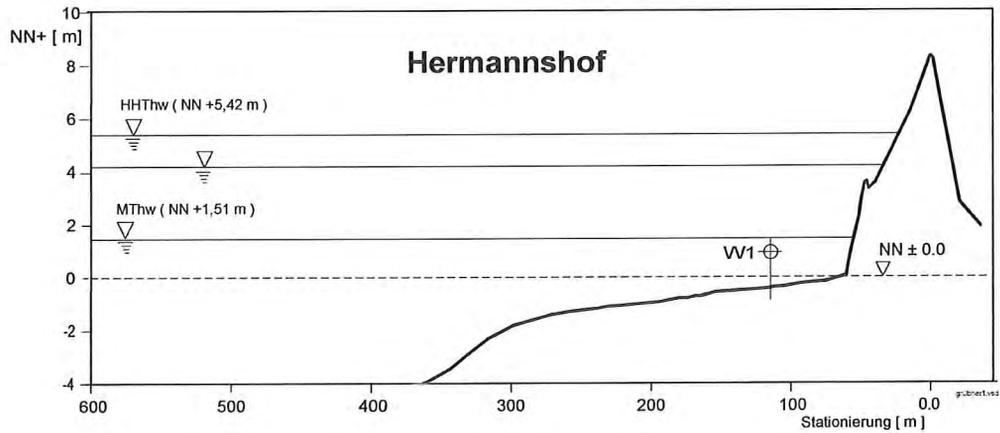
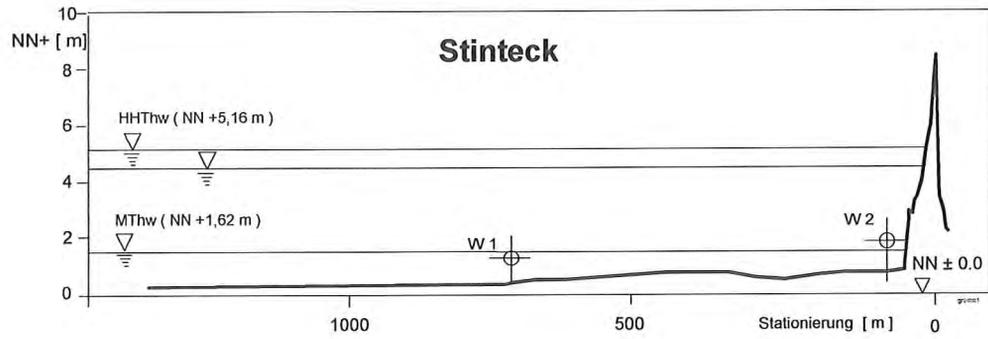
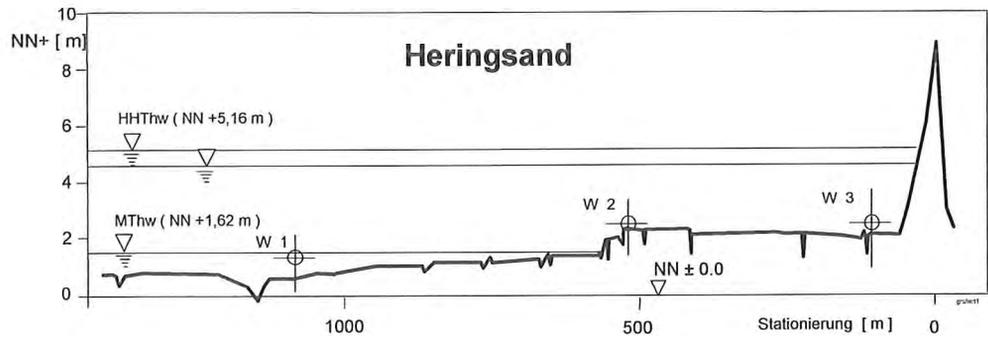


Abb.15 Querschnitte durch die Küstenvorfelder der Messketten

Der Deichquerschnitt der Messkette Heringssand ist ebenso wie die Deichquerschnitte der anderen Messketten in Abb. 16 aufgetragen. Infolge der vergleichsweise geringen Seegangbelastung besteht die gesamte Deichoberfläche aus grasbedecktem Kleiboden. Der Deichfuß geht nahtlos in das Vorland über. Alle Höhen in Abb. 16 sind auf Normalnull (NN) bezogen, der obere eingezeichnete Wasserspiegel ist der an den jeweiligen Messorten bisher höchste gemessene (HHThw), der untere ist das jeweilige Mittlere Tidehochwasser (MThw) und der zwischen HHThw und MThw liegende ist der an den jeweiligen Messorten höchste Wasserstand, für den Messungen am jeweiligen Messort vorliegen. Die Tragbleche der installierten Wellenauflaufpegel sind auf der Deichoberfläche mit einem durchgehenden Strich markiert.

Der Deich an der Messkette Stinteck besitzt eine Berme aus Natursteinen, die unregelmäßig eingebaut wurden (in Abb. 16 mit einer unterbrochenen Linie unter der Deichaußenböschung markiert). Die Außenböschung ist im Bereich der Bermenoberfläche mit glatten Betonformsteinen gepflastert und wird als Treibselabfuhrweg genutzt (in Abb. 16 mit einer durchgezogenen Linie unter der Deichaußenböschung markiert). In diesem Bereich ist die Außenböschung teilweise nach innen geneigt, wodurch bei Wasserständen in Höhe der Bermenoberkante ein ausgedehntes " Wasserbecken " entsteht. Oberhalb der Pflasterung besteht die Böschung aus grasbewachsenem Kleiboden. Abb. 17 zeigt eine Fotoaufnahme des Deiches, die während einer Sturmflut bei einer Höhe des Tidewasserstandes von etwa 2,0 m über MThw aufgenommen wurde.

Das Wellenklima an den Messketten Hermannshof und Neuendeich (Abb. 14) ist sowohl von den Tiefwasserbedingungen in der Elbe als auch von den begrenzten Wassertiefen auf den Wattflächen vor den Deichen (Abb. 15) beeinflusst. Die Wattflächen vor den Deichen sind in ihrer Ausdehnung allerdings sehr begrenzt, ihre Breite beträgt bei Hermannshof etwa 200 m, bei Neuendeich etwa 400 m. An beiden Messketten wird daher der anlaufende Seegang jeweils nur an einer Station 50 m vor dem Deichfuß gemessen.

Der Deich der Messkette Hermannshof (Abb. 16) hat ebenso wie derjenige der Messkette Stinteck eine Berme mit Natursteindeckwerk. Die Bermenbreite ist jedoch geringer und die Neigung der Bermenoberfläche verläuft nach außen. Sie ist mit Asphaltbeton bedeckt und dient

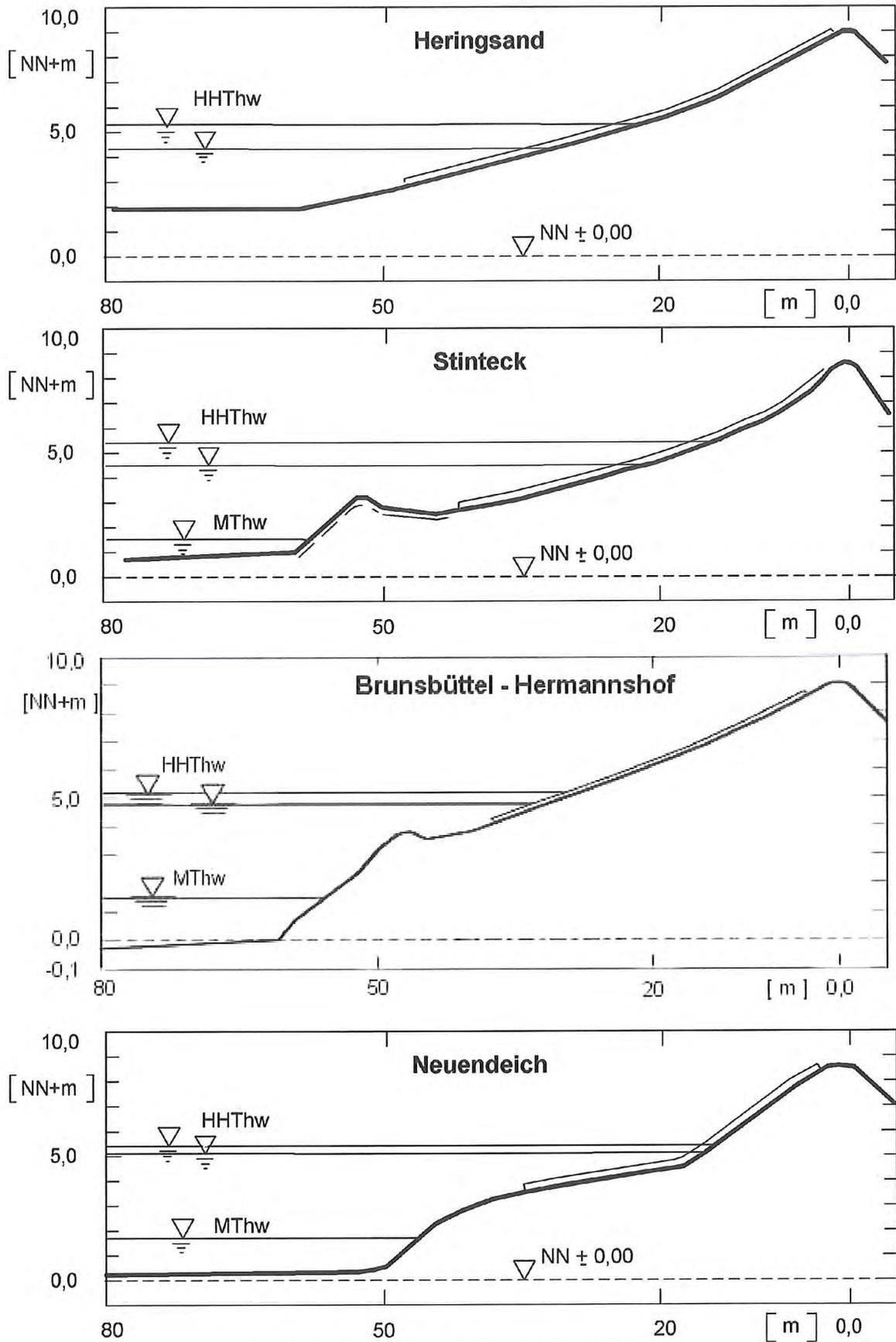


Abb. 16 Deichquerschnitte an den Messketten

als Treibselabfuhrweg. Oberhalb des Treibselabfuhrweges ist die Deichböschung nahezu gleichförmig geneigt und besteht aus grasbewachsenem Kleiboden.

Das Deichprofil der Messkette Neuendeich setzt sich aus drei Neigungsbereichen zusammen, von denen die unteren beiden zusammengefasst auch als Berme bezeichnet werden können. Der vordere Bereich der Berme ist mit glatten Betonformbausteinen gepflastert, der Bereich darüber besteht aus grasbewachsenem Kleiboden.

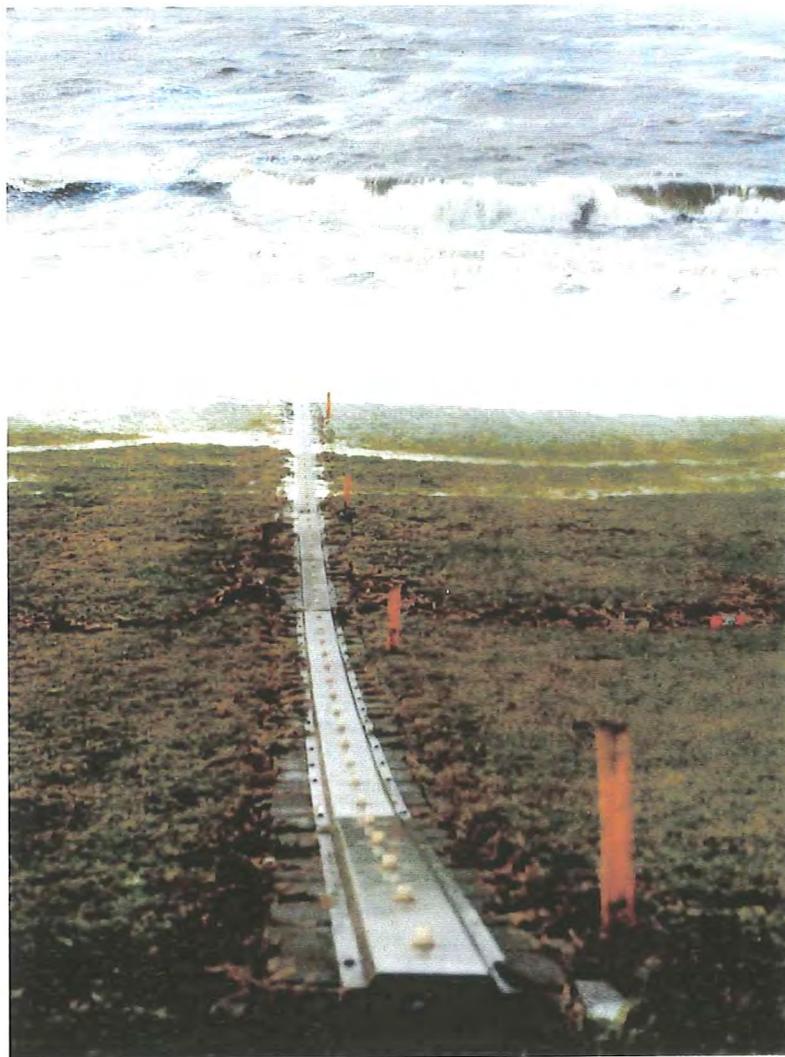


Abb. 17 Deich mit Wellenauflaufegel der Messkette Stinteck während einer Sturmflut

5. Messsysteme, Datenerfassung und Datenaufbereitung

5.1 Messsysteme

5.1.1 Wellenpegel im GWK

Die Wellenpegel sind als Drahtpegel ausgebildet und arbeiten nach dem Messprinzip, dass der Spannungsabfall des eingetauchten Messdrahtes proportional zur Eintauchtiefe ist, wobei die Eintauchtiefe hier durch die Oberflächenauslenkung bewirkt wird. Die Wellenoberfläche wird damit unmittelbar gemessen, eine Umrechnung entfällt. Die Pegelempfindlichkeit hängt von der Leitfähigkeit des Wassers im GWK ab, die wiederum stark vom Salzgehalt geprägt wird. Der GWK wird mit Wasser aus dem Mittellandkanal versorgt, deren Halterung durch Zupumpen von Weserwasser in Minden gewährleistet wird. Da das Weserwasser mit Kaliabraumsalzen aus der Werra belastet ist, kann die Leitfähigkeit jahreszeitlich schwanken. Deshalb wird nach jeder Neufüllung des GWKs eine Eichung der Wellendrähte in Stufen durchgeführt.

5.1.2 Wellenpegel in der Natur

Als Wellenpegel werden Druckaufnehmer verwendet (Typ NSW Drucksensor - Sonderausführung). Der Druckaufnehmer ist in ein wasserdichtes Gehäuse eingebaut. Die innen liegende Messmembran des Aufnehmers ist über eine Einlassöffnung mit dem äußeren Medium (Wasser) verbunden. Um einen möglichen Einfluss auf den Druck an der Membran infolge eingeschlossener Luft, eingetragenen Suspensionsmaterial sowie infolge des Staudruckes so gering wie möglich zu halten, wird das Gehäuse und damit die Einlassöffnung horizontal und quer zur Hauptwellenanlaufriechung angeordnet. Der Drucksensor kann über einen Anschraubadapter (die Einlassöffnung der Sensoren wurde auf Vorschlag des GWK mit einem Innengewinde versehen) mit Druckluft physikalisch vor Ort geeicht werden. Abb. 18 zeigt eine Photoaufnahme des Messgeräteträgers an der Station 50 m der Messkette Heringsand mit dem Wellenpegel WP 3 während einer Drucklufteichung. Die durch die Wasseroberflächenauslenkung erzeugten Druckmesssignale werden bei der Auswertung wieder in Oberflächenauslenkungen (Wellen) umgerechnet (siehe Abschnitt 5.3.2).

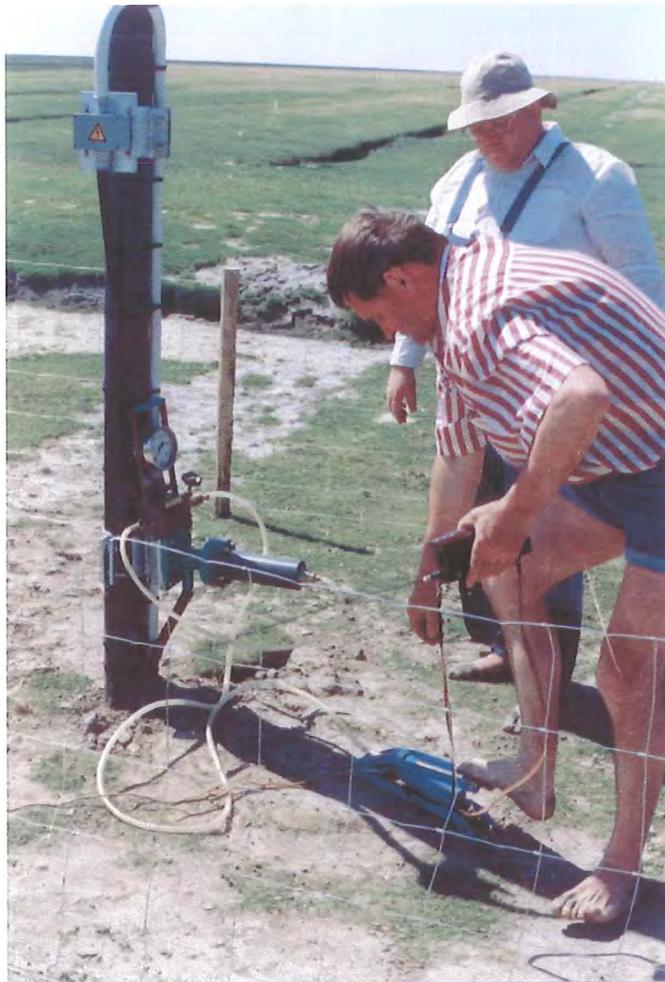


Abb. 18 Geräteträger an der Messstation 50 m der Messkette Heringsand mit der Wellensonde WP 3 während einer Druckluftreinigung

Der Sensor ist mit einem steckbaren Flansch versehen und kann daher z.B. bei Eisganggefahr kurzfristig entfernt werden. Er wird über Kabelanschlüsse von der Messzentrale hinter dem Deich mit Strom versorgt. Ebenso werden auch die Messsignale über diese Kabel zur Messzentrale hinter dem Deich übermittelt. Der Spannungsverlust bei größeren Kabellängen wird dadurch kompensiert, dass eine von der Messzentrale ausgehende Spannung von ± 24 V an der Messstation auf die erforderliche Sondenversorgungsspannung von ± 15 V heruntergespannt wird. Die Messsignale werden als Stromsignale (0 - 20 mA) übermittelt und sind daher von den Kabellängen unbeeinflusst.

5.1.3 Wellenauflaufpegel im GWK und in der Natur

5.1.3.1 Messprinzip und Gerätebeschreibung

Der Wellenauflaufpegel wurde als Stufenpegel für die besonderen Anforderungen bei Messungen in der Natur und in großmaßstäblichen Labormessungen (GWK) an die Linearität infolge der größeren Längen auf der Deichoberfläche und der meist ungleichförmigen Deichquerschnitte vom Sonderforschungsbereich 79 (Teilprojekt C4) konzipiert (Grüne, 1982). Die an den in Abschnitt 4 beschriebenen Messketten in der Natur eingesetzten Wellenauflaufpegel sind eine Weiterentwicklung des vom Sonderforschungsbereich 79 entwickelten Pegels. Beide Pegel unterscheiden sich in Teilen der Elektronik und darin, dass bei den weiterentwickelten Pegelversionen jede Stufe nur noch eine Elektrode besitzt, die widerstandsfähiger gegen mechanische Belastungen ist. Die zweite Elektrode (Masse) ist in den jeweiligen Halteblechen integriert. Dies war faktisch bei der älteren Bauart auch schon so. Das elektrische Messprinzip und die Eigenschaften des Auflaufpegels sind bei beiden Bauarten gleich.

Der auf der Deichaußenböschung installierte Wellenauflaufpegel ist in Abb. 19 dargestellt. Die Elektroden der einzelnen Stufen sind in 2 m langen Tragblechen aus Spezial-Aluminium eingebaut, deren Querschnitte so geformt sind, dass die Kabel und Verteilerdosen zu den Stufen darunter verlegt werden können. Die Anzahl der einzelnen Stufen betrug im GWK bis zu 60 (bei Kopplung mehrerer Elektronikeinheiten bis zu 120) und in der Natur jeweils insgesamt 70 Stück. Die Aluminium - Tragbleche wurden im GWK direkt auf die Asphaltbetonoberfläche aufgeschraubt, in der Natur an Grasdeichen wurden sie auf einen Streifen aus Betonformsteinen befestigt. Der Streifen aus Betonformsteinen wird bündig mit der Deichoberkante verlegt und seitlich mit Tiefborden eingefasst. Die Oberkanten der Elektroden befinden sich damit etwa 4,5 cm oberhalb der Deichoberfläche (im GWK und in der Natur). Die Kabelanschlüsse der Stufen werden unter den Halteblechen bis an die Elektronikeinheit geführt. Diese Elektronikeinheit befindet sich im GWK im Messcontainer und in der Natur in den jeweiligen Messstationen hinter dem Deich.



Abb. 19 Wellenauflaufpegel der Messkette Heringssand

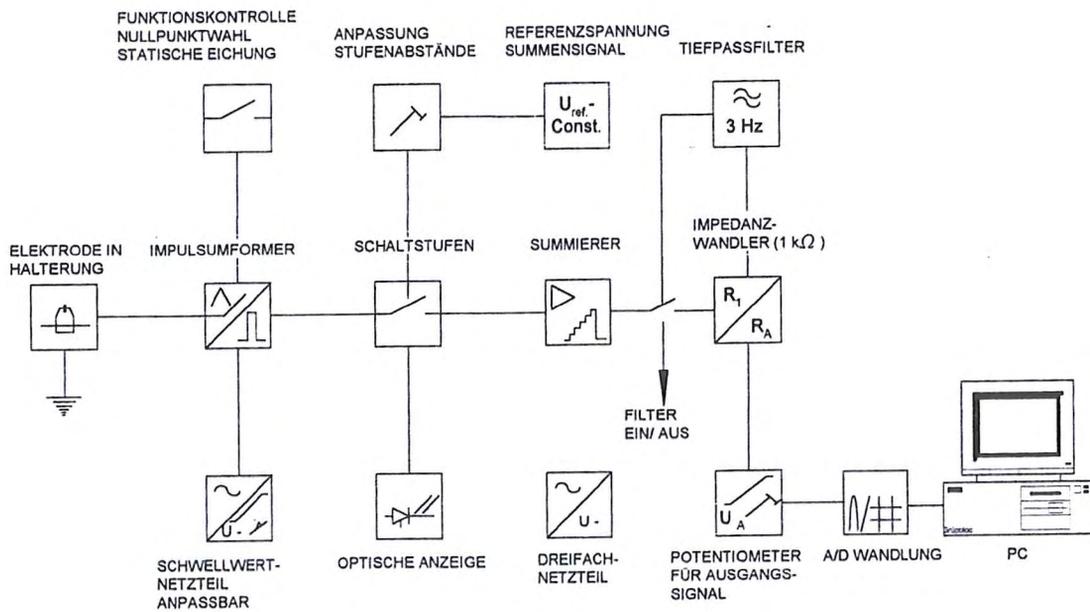


Abb. 20 Blockschaltbild des Wellenauflaufpegels

Ein Blockschaltbild des Wellenauflaufpegels ist in Abb. 20 schematisch dargestellt. Wird die Elektrode einer einzelnen Stufe von dem geschlossenen Wasserpolster der Wellenaufzunge bzw. des Wellenaufschwalls überströmt, so schließt sich ihr elektrischer Stromkreis. Dieser wiederum löst ein Relais aus, welches eine definierte Messspannung freigibt. Diese Messspannung wird für jede Stufe einzeln so geeicht, dass sie dem der Stufe zugehörigen vertikalen Höhenabschnitt auf der Deichaußenböschung entspricht. Diese so geeichten Messsignale aller jeweils durch den geschlossenen Auflauf- bzw. Ablaufkeil geschalteten Stufen des Pegels werden zu einem Gesamtsignal summiert. Dieses Stufensummensignal entspricht dann genau dem vertikalen Wellenauflauf und ist linear auf der sich ständig ändernden Neigung der Deichoberfläche.

5.1.3.2 Messsignalcharakteristik

Da der Wellenauflaufpegel als Stufenpegel konzipiert wurde, ist das Originalmesssignal folglich kein stetiges Signal, sondern wird bereits in analoger Form als Stufensignal erzeugt. Diese grundlegende Unterscheidung der Messsignale des Wellenauflaufpegels, verglichen mit denen der Wellenpegel (Druckaufnehmer) ist sowohl für die Aufbereitung der Signale als auch für deren Auswertung von Bedeutung.

In Abb. 21 ist das Stufensummensignal des Wellenauflaufpegels schematisch dargestellt. Der tatsächliche zeitliche Verlauf der Aufzunge ergibt sich als stetige Verbindungslinie zwischen den äußeren Eckpunkten des Stufensignals. Nur wenn die Böschungsneigungen steil (N etwa ≤ 6) und die Stufenabstände gering (etwa < 30 bis 40 cm auf der Böschung) sind sowie das Stufensummensignal tiefpassgefiltert wird, sieht das Messsignal zumindest an den Flanken des Aufbaus einem stetigen Verlauf ähnlich, aber auch dann bleibt es ein Stufensignal.

Für die Messungen in der Natur mit größeren Pegellängen infolge vielfach flacherer Neigungen als $1 : 6$ muss schon aus wirtschaftlichen Gründen eine deutliche Ausbildung der Stufigkeit des Messsignals in Kauf genommen werden. Andererseits bietet die Ausbildung der Stufigkeit aber auch zusätzliche Möglichkeiten zur Stufenidentifikation und Eichung bei nichtlinearer Einstellung der Elektronik.

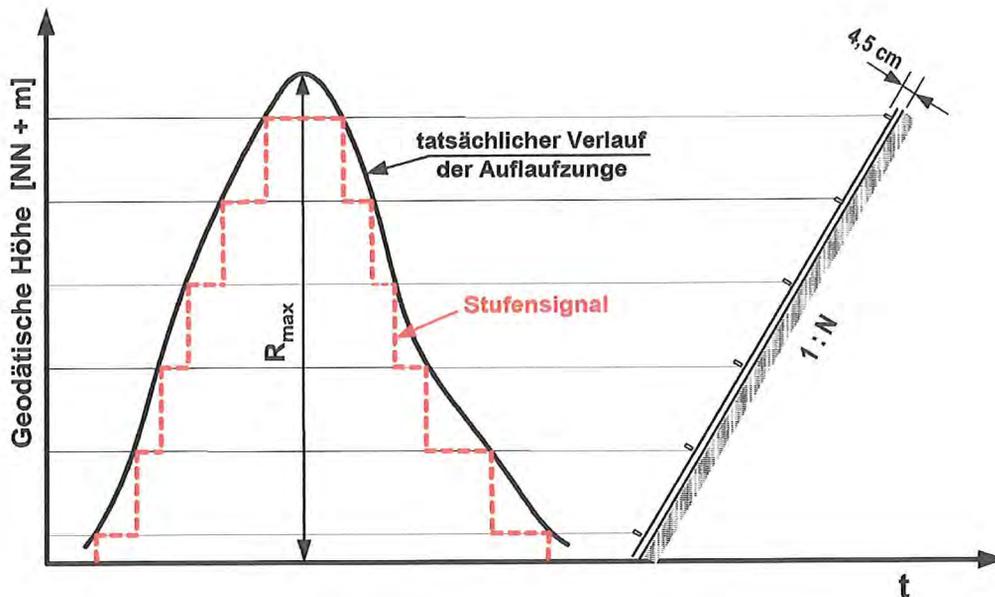


Abb. 21 Schematische Darstellung des Stufensummensignals des Wellenauflaufpegels

Die bereits vorstehend erwähnt, muss die Signalaufbereitung auf diese Messsignalcharakteristik abgestellt sein, worauf u.a. im Abschnitt 5.3.3 noch gesondert eingegangen wird.

5.1.3.3. Eichung des Pegels

Wie bereits vorstehend erläutert, wird die Einstellung des Stufensummensignals der Art vorgenommen, dass das Signal der linearen vertikalen Höhenänderung der Wasserzunge des Auf- und Ablaufschwalls entspricht. Dies wird dadurch erreicht, dass für jeden der einzelnen Stufen durch die Wasserzunge geschlossenen Stromkreis eine definierte Messspannung freigegeben wird, die dem Höhenabschnitt der jeweiligen Stufe entspricht. Die Oberkanten der Stufen - Elektroden werden nach der Installation der Haltebleche auf der Deichoberfläche aufgemessen. Aus den sich damit ergebenden vertikalen Höhenabständen zur jeweils darunter liegenden Stufe werden für jede Stufe getrennt die zugehörigen Messspannungen errechnet, bezogen auf eine vorgegebene Gesamtspannung für den gesamten vertikalen Pegelbereich. Diese zugehörigen Messspannungen werden an der Elektronikeinheit des Welleauflaufpegels für jede Stufe getrennt eingestellt. Damit bleibt das aus den einzelnen definierten Messspannungen zusammengesetzte Stufensummensignal vertikal linear unabhängig vom Stufenabstand und der Böschungsneigung.

Es muss zusätzlich angemerkt werden, dass mit den Elektroden des Wellenauflaufpegels die geschlossene Auflaufzunge in einer Höhe von 4,5 cm parallel zur Deichoberfläche erfasst wird. Damit kann sich im oberen Umkehrpunkt die tatsächliche Auflaufzunge etwas höher befinden als es durch das Messsignal erfasst wird, wie es in Abb. 22 schematisch dargestellt ist. Die Dicke der tatsächlichen Auflaufzunge an der Spitze hängt auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Deiches ab, sie dürfte nach visuellen Beobachtungen im GWK und in der Natur etwa 0,5 cm betragen. Für die Auswertung wird die geodätische Höhe der Stufenoberkante auf die Deichoberfläche projiziert, es bleibt jedoch noch eine Höhendifferenz, um die der tatsächliche Auflauf höher als der gemessene ist. Dies kann für praktische Belange zunächst unberücksichtigt bleiben, da dieser Wert für den Auflauf auf der sicheren Seite liegt und bei Erreichen der Kronenhöhe der entsprechende Überlauf von der Menge her vernachlässigt werden kann.

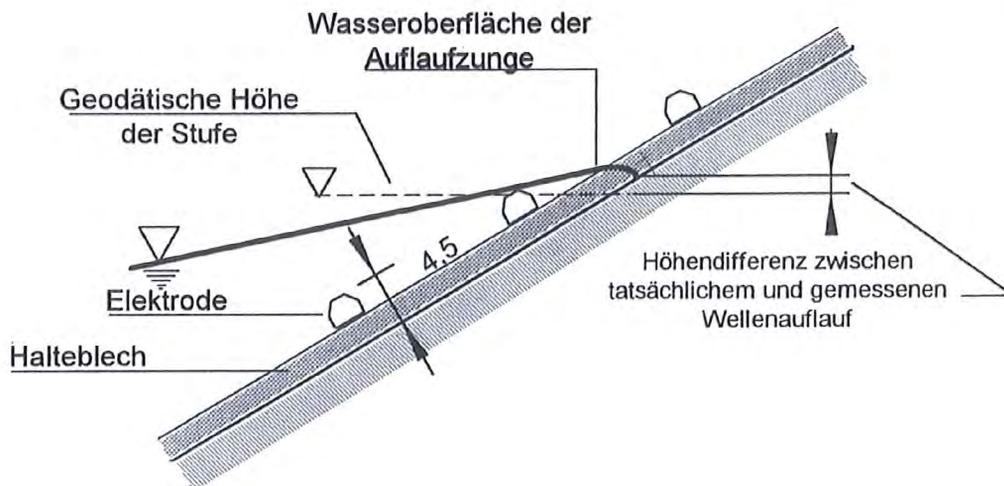


Abb. 22 Schematische Darstellung der geometrischen Verhältnisse bei der Erfassung der Wellenaufzunge mit den Elektrodenstufen des Auflaufpegels

Frühere vergleichende Untersuchungen im GWK haben gezeigt, dass diese pegelbauartbedingte Höhendifferenz nicht von den Wellenparametern (Höhen und Perioden) beeinflusst wird, sondern nur von der Böschungsneigung abhängt und damit für die jeweiligen Böschungsneigungen einen konstanten Wert bildet, der vertikal die Größenordnung von 1 dm nicht oder nur geringfügig übersteigt.

5.2 Datenerfassung

5.2.1 Datenerfassung im GWK

Die Datenerfassung im GWK erfolgte mit der Prozessrechenanlage HP - 1000 / A 900, deren Ausbauzustand von 1992 in Abb. 23 dargestellt ist. Die Messdaten wurden zunächst von einem Rechner im GWK (HP 2250) aufgenommen und über Glasfaserkabel dem Prozessrechner HP 100 / A 900 übermittelt, der eine Speicherung auf einem 1600 - bpi -

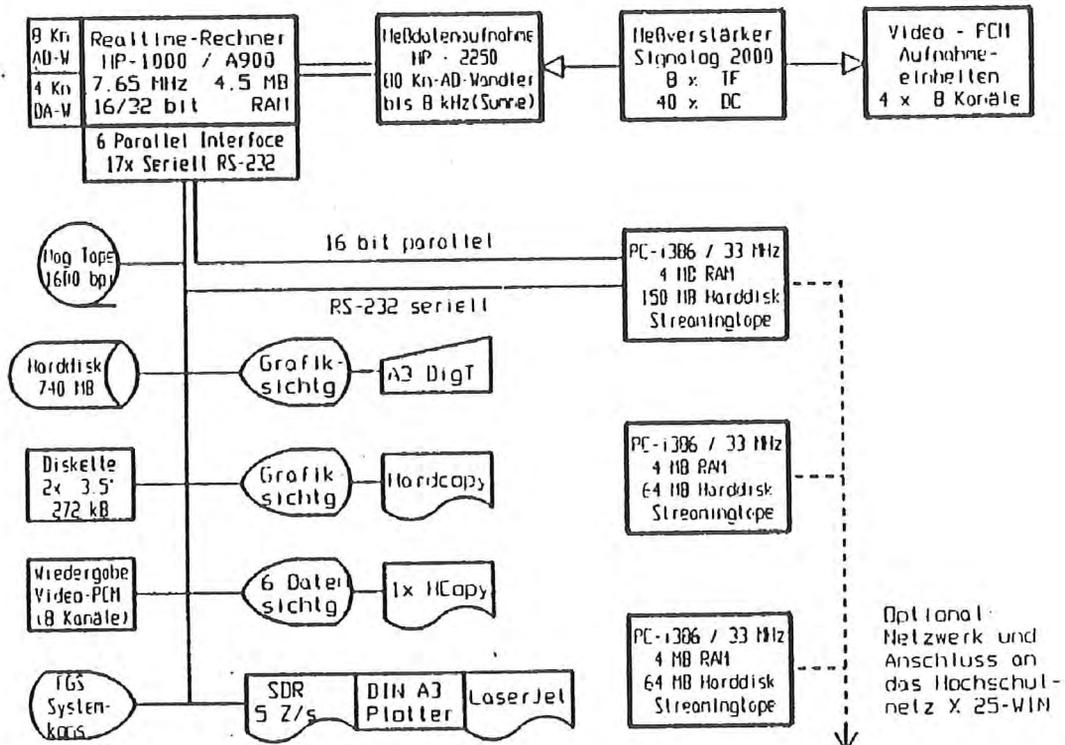


Abb. 23 Prozessrechnersystem mit Messdatenaufnahme des GWK (1992)

Digitalmagnetband vornahm. Zur weiteren Bearbeitung wurden die auf Digitalband gespeicherten Daten umformatiert und auf ein Bandlaufwerk eines PCs übertragen. Die Auswertung erfolgte auf einem PC.

5.2.2 Datenerfassung in der Natur

Die Datenerfassung in der Natur an den einzelnen Messketten erfolgt jeweils mit einem PC, der mit einer Zentraleinheit, einer Tastatur, einem Bildschirm, einer Festplatte, einem 3 1/2" Diskettenlaufwerk sowie einem 12-bit-A/D-Wandler zur Digitalisierung der analogen Messsignale ausgerüstet ist. Die Anwenderbetriebssoftware " Autodatenlauf ", die vom GWK entwickelt wurde und erstmalig im KFKI - Forschungsvorhaben " Seegang in Wattgebieten und in Ästuarien der Deutschen Bucht " erfolgreich eingesetzt wurde, ermöglicht die Datenerfassung im automatischen Rechnerbetrieb.

Das Anwendersoftwareprogramm " Autodatenlauf " steuert den Analog-Digital-Wandler und die Messbetriebsart, die hier in Abhängigkeit von der örtlichen Tidewasserganglinie erfolgte. Dazu wird die örtliche Tidewasserganglinie ständig in einminütigen Intervallen aus den Messsignalen einer Referenzmesssonde (Druckaufnehmer) ermittelt. Die digitale Messdatenspeicherung wurde dann durch Vergleich zwischen vorgegebenen und gemessenen Randbedingungen (Höhenwerte der Tidewasserganglinie) für diese Referenzsonde gestartet und beendet.

5.3 Datenaufbereitung

5.3.1 Aufbereitung der Daten der Wellenpegel im GWK

Die im GWK gemessenen und mit dem Zentralrechner digital gespeicherten Daten der Wellenpegel konnten direkt von PC - Rechnern ausgewertet werden, nachdem die Daten auf Digitalbänder umformatiert wurden.

5.3.2 Aufbereitung der Daten der Wellenpegel in der Natur

Die Oberflächenauslenkungen an den einzelnen Messstationen werden als Druckmesssignale mit Druckaufnehmern registriert. Diese Druckmesssignale werden mit zunehmender Wassertiefe der Sonde entsprechend eines Tiefpassfilters gedämpft, wie es schematisch in Abb. 24 dargestellt ist. Daher müssen diese gedämpften Signale wieder verstärkt werden, damit sie den tatsächlichen Oberflächenauslenkungen entsprechen. Dies erfolgt für die Amplituden (Wellenhöhen) mit der um Korrekturwerte erweiterten linearen Wellentheorie nach Airy-Laplace, deren Verifikation sowohl mit klein - maßstäblichen Modellversuchen mit unregelmäßigen Wellen als auch mit Messungen in der Natur erfolgte.

In Abb. 24 sind die Definitionen für die Rückrechnung und die Ergebnisse der Modellversuche für die Verifikation der Korrekturwerte dargestellt. Der Ansatz nach der linearen Wellentheorie

$$H = \Delta p \left(\cosh 2\pi \left(\frac{D}{L} \right) / \cosh 2\pi \left(\frac{a}{L} \right) \right)$$

wurde mit dem von der relativen Wassertiefe Z/D der Sonde abhängigen Korrekturfaktor

$$KH = 0,26 \left(\frac{Z}{D} \right)^{2,3} + 1,0$$

erweitert, wobei für die Berechnung der Wellenlänge L der Druckparameter $T_{\Delta p_{1/3}}$ und für Δp der Parameter $\Delta p_{1/3}$ verwendet werden. Beide Parameter $\Delta p_{1/3}$ und $T_{\Delta p_{1/3}}$ werden aus den Drucksignalen berechnet.

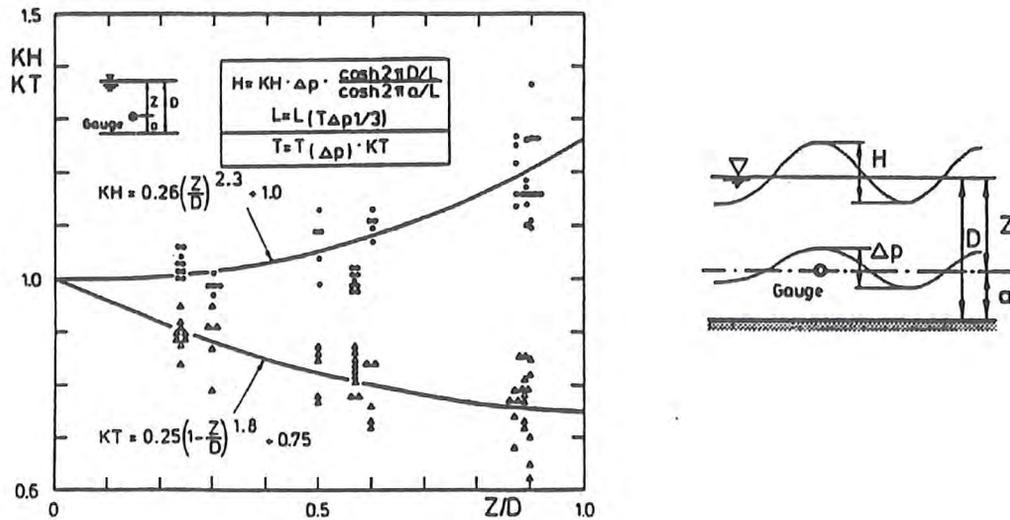


Abb. 24 Definitionen und Ergebnisse der Untersuchungen zur Wellenhöhdämpfung bei Messungen mit Drucksensoren

Die Perioden im Druckmesssignal werden mit zunehmender Wassertiefe ebenfalls tiefpassgefiltert und daher mit dem empirischen Ansatz

$$T = T_{\Delta p} * KT$$

in Oberflächenauslenkungen rückgerechnet. Der Korrekturfaktor

$$KT = 0,28 (1 - Z/D)^{1,8} + 0,75$$

hängt ebenfalls wie der Korrekturfaktor KH von der relativen Sondentiefe Z/D ab. Die mit der vorstehend erläuterten Methode ermittelten Rückrechnungsfaktoren werden linear auf alle Wellen- bzw. Periodenparameter oder auf den zeitlichen Verlauf angewendet.

5.3.3 Aufbereitung der Daten der Wellenauflaufpegel

Nach Sichtung der Charakteristik der Messsignale aus den verschiedenen Untersuchungen im GWK und in der Natur zeigte sich, dass bei bestimmten Randbedingungen eine Aufbereitung die Aussagefähigkeit der Messsignale optimiert. Dies betrifft insbesondere einerseits Messsignale von sehr flachen Neigungen und andererseits sehr geringe Gesamtsignale, die ein gewisses Grundrauschen aufweisen.

Dagegen ist eine weitergehende Aufbereitung nicht zwangsläufig erforderlich für die Messsignale von steileren Böschungen ($N \leq 6$) bei ausgeprägten Wellenauflauf mit einer gewissen Größenordnung der Amplituden (wenn etwa mehr als 10 bis 15 Stufen in Funktion sind).

Die Messsignalaufbereitung zur Optimierung der Aussagefähigkeit der Stufenmesssignale des Wellenauflaufpegels erfolgt mit einem Softwareprogramm, das drei verschiedene Funktionen erfüllt:

- 1.) Zunächst werden aus dem Messsignal die einzelnen Stufen nach einem ähnlichen Prinzip identifiziert, wie man mit der Jahresringmethode Altersbestimmungen von Bäumen bzw. in früheren Jahrhunderten verarbeiteten Hölzern vornimmt.
- 2.) Den einzelnen identifizierten Stufen werden dann die jeweiligen Eichwerte zugewiesen und damit ein Erhöhung des linearisierten Stufenmesssignals durch Eliminierung des Grundrauschens bewirkt.
- 3.) Schließlich wird aus diesen generiertem linearisierten Stufensignal mit der " Splines " - Methode ein geglättetes, stetiges Signal erzeugt, welches dem tatsächlichen zeitlichen Verlauf der Auflaufzunge auf der Deichböschung am nächsten kommt. Für die Ausbildung der Glättung nach der " Splines " - Methode können in Testreihen Eingabevariablen so optimiert werden, dass kein physikalisch unsinniges Überschwingen auftritt.

Anhand von zwei unterschiedlichen exemplarischen Beispielen (mit Messsignalen der Messkette Stinteck) sollen im Folgenden die Ergebnisse einer Messsignalaufbereitung mit diesem Programmbaustein aufgezeigt werden.

Das erste Beispiel in Abb. 25 ist einem Zeitabschnitt mit einem stark ausgeprägten Wellenaufbau entnommen. Das lineare Originalmesssignal ist im oberen Teil (a) der Abb. 25 dargestellt, die Skalierung erfolgt in Digits. In dem mittleren oberen Teil (b) ist das generierte und linearisierte Stufensignal dargestellt, wobei die Skalierung bereits auf die geodätische Höhe $NN + mm$ bezogen ist. Der mittlere untere Teil (c) zeigt das mit der Splines - Methode geglättete Stufensignal. Im unteren Teil der Abbildung (d) ist das generierte Stufensignal mit dem auf die geodätische Höhenskalierung umgerechneten Originalmesssignal überlagert. Die generelle Übereinstimmung beider Signale ist sehr gut, beim Originalmesssignal wird die relativ geringe Schwebung (Grundrauschen) mit einer Schwankungsbreite in der Größenordnung von etwa einer Pegelstufe deutlich.

Das zweite Beispiel ist in Abb. 26 enthalten. Es zeigt einige Wellenaufläufe nur am Anfang, dann (mit sinkendem Ruhewasserspiegel SWL) wird der Pegel nicht mehr beaufschlagt und zeigt daher nur noch das Grundrauschen. In dem Vergleich zwischen den regenerierten und linearisierten Stufensignal und dem geodätisch skaliertem Originalmesssignal werden die Vorzüge des " Step " - Programms " besonders deutlich.

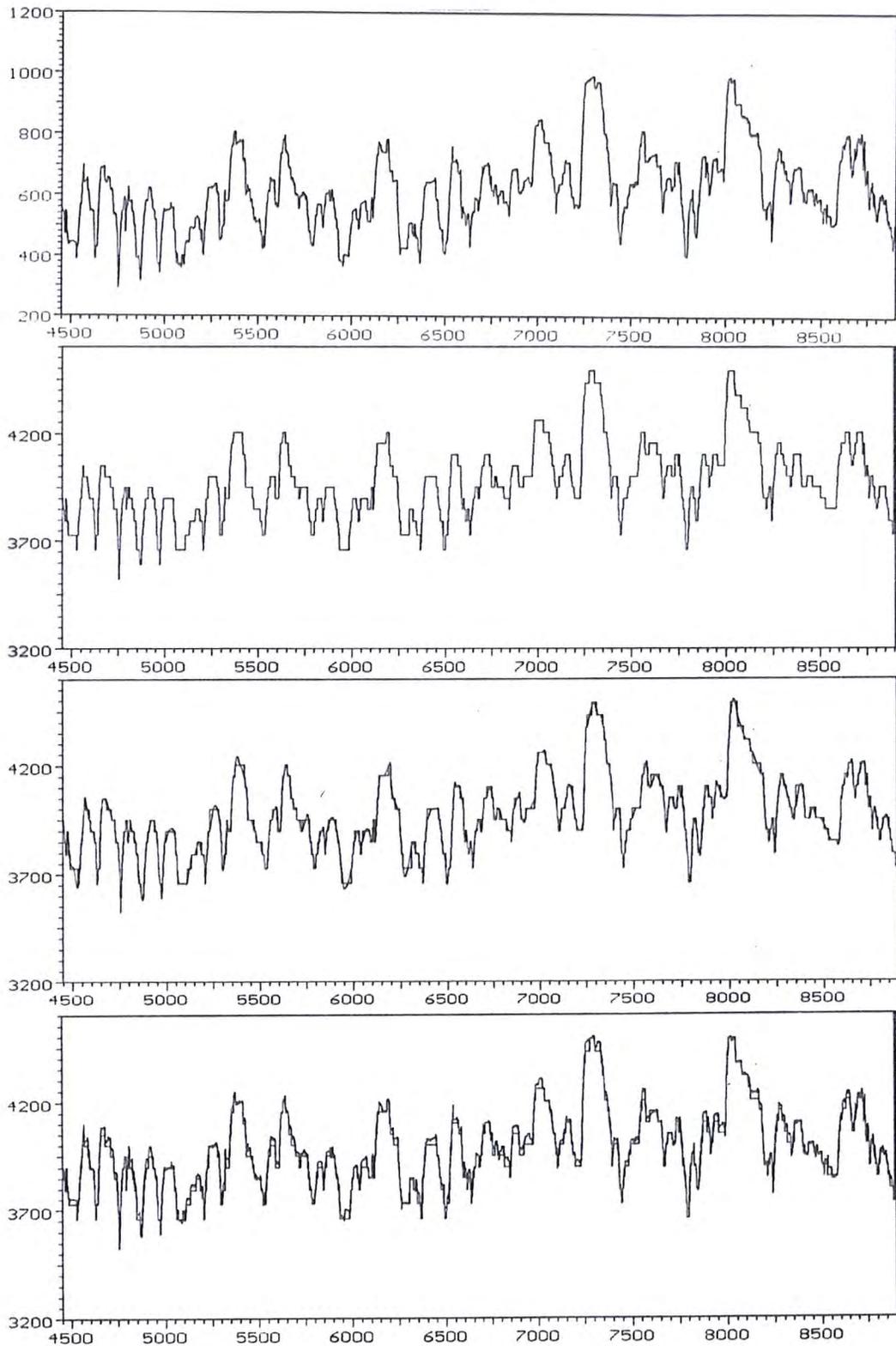


Abb. 25 Beispiel für die Optimierung von Meßsignalen des Wellenauflaufpegels
(a) : Originalmesssignal, (b) : generiertes Stufensignal, (c) : geglättetes
Stufensignal, (d) : Vergleich zwischen skaliertem Originalmesssignal und Stufensignal

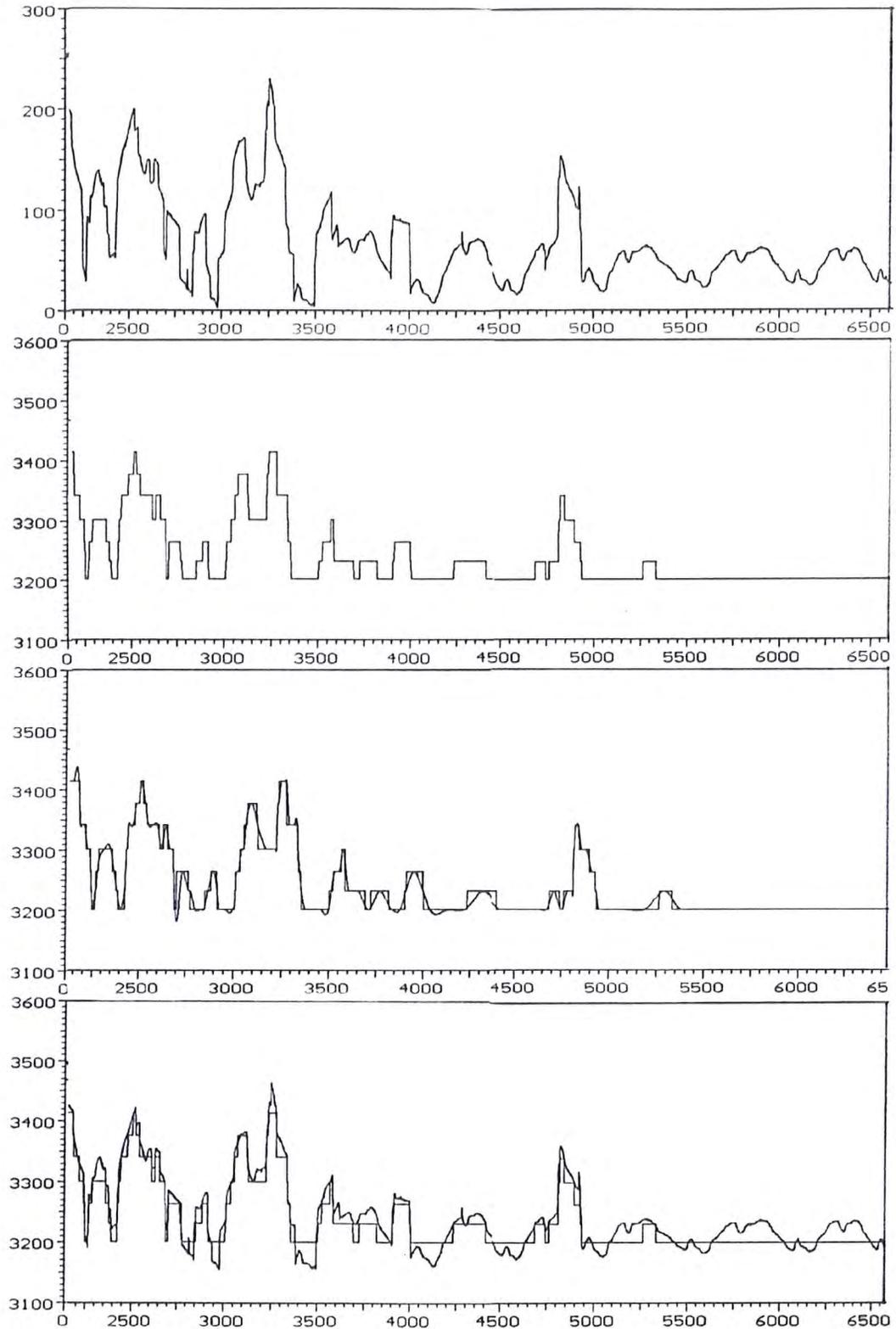


Abb. 26 Beispiel für die Optimierung von Meßsignalen des Wellenauflaufpegels
 (a) : Originalmesssignal, (b) : generiertes Stufensignal, (c) : geglättetes
 Stufensignal, (d) : Vergleich zwischen skaliertem Originalmesssignal und Stufensignal

6. Allgemeine Anmerkungen zur Charakteristik des Wellenaufbaus und Folgen für die Auswertung

6.1 Zur allgemeinen Charakteristik des Wellenaufbaus am Beispiel von Naturdaten

Zur Vorbereitung der Auswertungen insbesondere von Naturmessungen des Wellenaufbaus muss zunächst eine eingehende Betrachtung der allgemeinen Charakteristik der zeitlichen Verläufe des Wellenaufbaus infolge der physikalischen Randbedingungen vorgenommen werden. Dies umso mehr, als es ein Ziel der Untersuchungen ist, die Ergebnisse mit denjenigen der bisherigen Untersuchungen an gleichförmigen Deichprofilen in der Natur und im GWK zu vergleichen und in Bezug auf die in der Natur gegebenen Verhältnisse zu überprüfen, was signifikant anders ist.

Dass die Verhältnisse an einigen der Messorte in der Natur von den aus der Literatur bisher bekannten und meist aus Laboruntersuchungen abgeleiteten gängigen Vorstellungen zum Teil beträchtlich abweichen, konnte bereits in zweierlei Hinsicht erwartet werden:

1. in Bezug auf die viel komplexeren Seegangsverhältnisse, hier in erster Linie infolge der Dreidimensionalität.
2. in Bezug auf die zusammengesetzten und ungleichförmigen Deichquerschnitte.

In Abbildung 27 sind beispielhaft für einen willkürlich ausgewählten Zeitabschnitt mit einer Länge von 15 Minuten die an der Station WP 2 (50 m vor dem Deichfuß) der Messkette Stinteck synchron gemessenen zeitlichen Verläufe der Oberflächenauslenkung und des Wellenaufbaus dargestellt. Ein Vergleich der Verläufe zeigt deutlich, dass es kaum möglich ist, jeder einzelnen Welle einen einzelnen Aufbau zuzuordnen, wie dies bei Modellversuchen mit regelmäßigen Wellen üblich ist. Vielmehr ist auf den ersten Blick die Anzahl der Einzelaufläufe wesentlich geringer als die Anzahl der Einzelwellen. Signifikante Unterschiede in der Charakteristik des Wellenaufbaus gegenüber denjenigen aus Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen überraschen nicht, sondern waren naturgemäß zu erwarten. Es zeigen sich aber auch deutliche Unterschiede zu denjenigen Wellenaufläufen, die in der Natur und im GWK an gleichförmigen Neigungen im Bereich 1 : 4 bis 1 : 6 gemessen wurden.

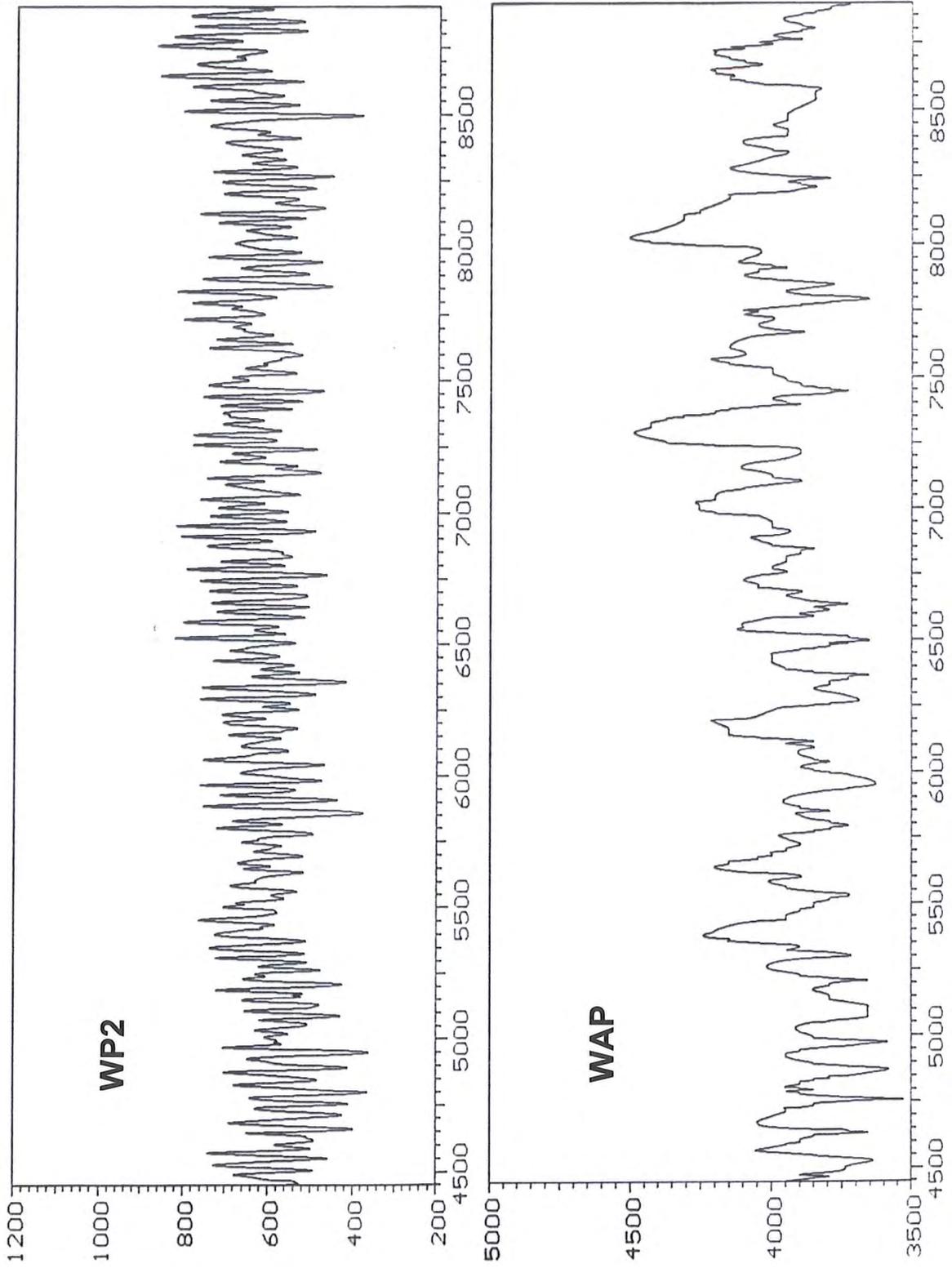


Abb. 27 Synchron gemessene zeitliche Verläufe der Wellen (WP2) und des Wellenaufbaus (WAP)

Dies ist nur auf den ersten Blick verwunderlich, bei genauerem Vergleich der geometrischen Deichverhältnisse und der jeweiligen Seegangscharakteristik unmittelbar vor dem Deich jedoch zwangsläufig überzeugend einzuordnen, wie im Folgenden angeführt. Es muss beachtet werden, dass eine einzelne direkte Zuordnung der Wellen- und Auflaufereignisse schon wegen der Dreidimensionalität des Seegangs in der Natur äußerst problematisch, wenn nicht sogar unmöglich ist.

Der Deichquerschnitt der Messkette Stinteck (Abb. 28) besitzt eine Berme mit einer etwa 1 : 2 geneigten Außenböschung und einer sich daran anschließenden Innenneigung zum Deichprofil hin, an die sich wiederum eine flache, zur Deichkrone zunehmende Neigung anschließt. Damit ergibt sich, bezogen auf die vordere obere Kante der Berme, über der nach innen geneigten Bermenkrone ein Wasserbecken mit einer minimalen Breite von etwa 15 m und einer minimalen Tiefe von etwa 0,75 m.

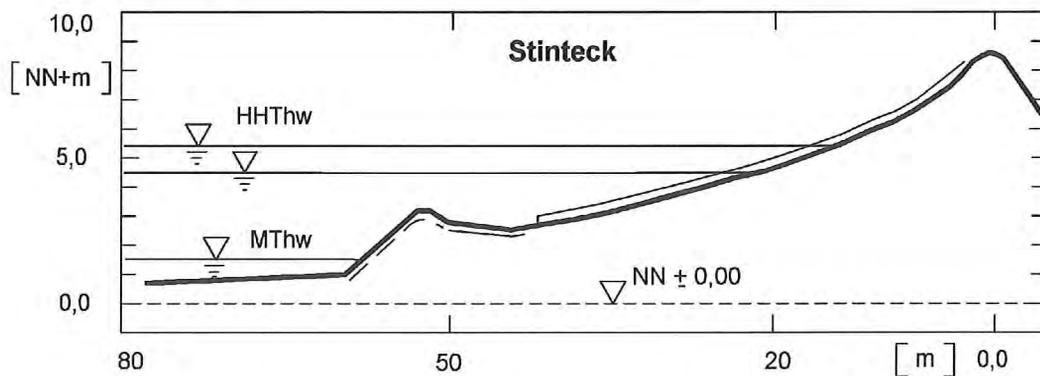


Abb. 28 Deichquerschnitt an der Messkette Stinteck (verzerrt)

In Abb. 29 sind, bezogen auf den Ruhewasserspiegel SWL, der maximale Wellenauflauf R_{\max} und die über der Bermenkrone vorhandenen Wassertiefe Db (SWL -3,14 m) dargestellt. Die Wassertiefe Db ist dabei auf den statistischen Wellenhöhenparameter $H_{1/3}$ bezogen. Die theoretische Brechtiefe (Wassertiefe am Brechpunkt) liegt nach Mc Cowen bei $0,78 H$ (für regelmäßige Wellen). Bezogen auf den Wellenhöhenparameter $H_{1/3}$ ergibt sich aus den Messergebnissen, dass bis zu einem Ruhewasserspiegel SWL von etwa NN + 4,5 m der Brechpunkt an der Bermenaußenböschung liegt (d.h. bei allen bisher durchgeführten Messungen).

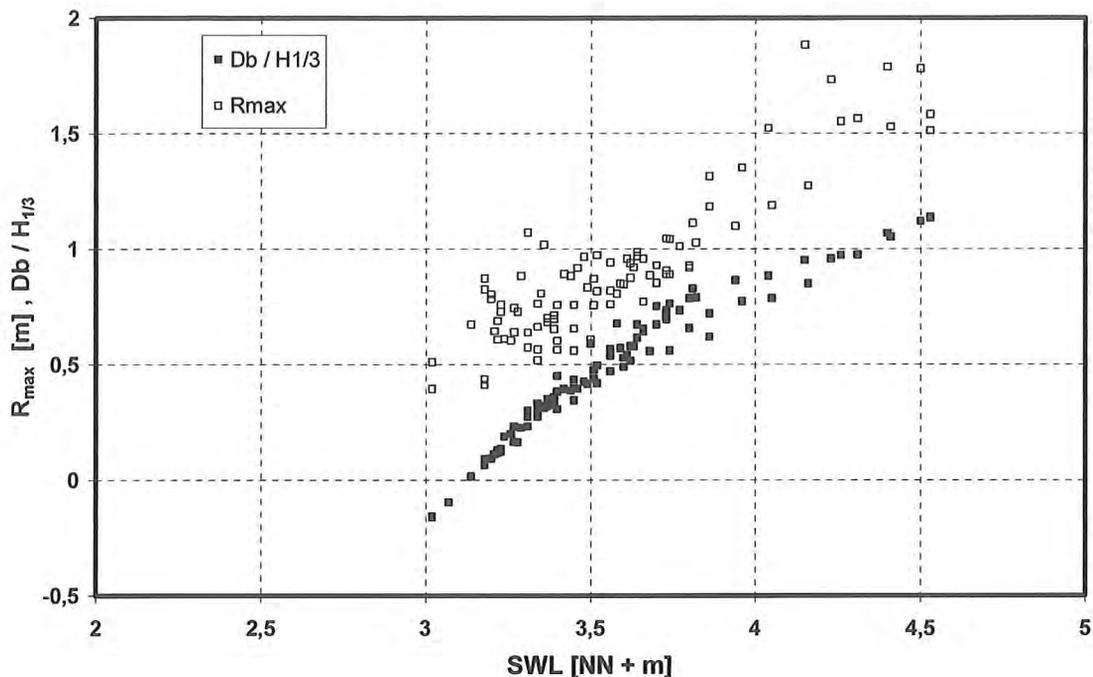


Abb. 29 Wellenaufbau R_{\max} und Wassertiefe $Db / H_{1/3}$ in Abhängigkeit von SWL

Daraus folgt, dass zwischen dem Brechpunkt der Wellen an der Bermenaußenböschung und der Deichböschung eine beträchtliche Länge liegt (bei SWL auf NN + 4,50 m etwa 27 m) und daher die an der Bermenaußenböschung gebrochenen Wellen nicht als Sturzbrecher, sondern als Schwallwellen bzw. als Schwallbrecher auf die Böschungsneigung auftreffen. Diese Schwallwellen unterliegen einer zusätzlichen Energieminderung infolge des Durchlaufens des fiktiven Wasserbeckens zwischen Bermenkrone und Deichböschung. Dieser Effekt wird auf der Fotoaufnahme in Abb. 17 (Abschnitt 4) eindrucksvoll bestätigt.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass bei allen Messungen die maßgebenden Böschungsneigungen (zwischen Ruhewasserspiegel SWL und R_{\max}) im Bereich von 1:10 bis 1:7,5 lagen. Dies wird auch in Abb. 30 deutlich, in der für alle ausgewerteten Zeitabschnitte die auf den jeweiligen maximalen Auflaufwert $R_{u,\max}$ bezogenen Neigungen $N_{r,\max}$ in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL aufgetragen sind. Die Neigung $N_{r,\max}$ ist als mittlere Neigung im Bereich der Außenböschung zwischen dem Ruhewasserspiegel SWL und dem Auflaufwert $R_{u,\max}$ definiert, deckt also nach oben den gesamten durch Einzelaufläufe überströmten Bereich ab.

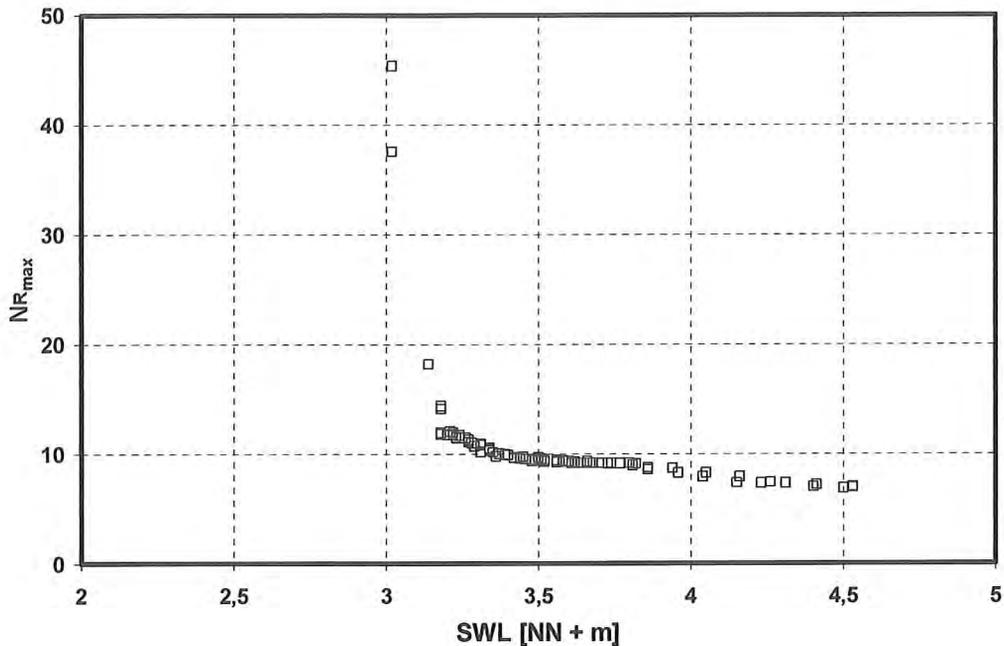


Abb. 30 Mittlere Neigungen Nr_{\max} für die ausgewerteten Messungen

Dies führt, wie aus der Literatur über Wellenaufbau an natürlichen flachen Stränden bekannt, zu Überlagerungen des Aufbaus mit dem Set-up und damit zu einer kräftigen Anhebung des mittleren Wasserspiegels und damit der Run-down Werte in geodätischer Hinsicht. Dies wird auch in Abb. 31 deutlich sichtbar, in der die gemessenen Maximalwerte für Run-up und Run-down in Abhängigkeit des Ruhewasserstandes SWL dargestellt sind. Im Bereich von SWL = 3,0 bis 4,0 m befinden sich die Run-down Werte überwiegend oberhalb des Ruhewasserspiegels. Die Schwalle der brechenden Einzelwellen werden stark " tiefpassgefiltert " und überlappen sich beträchtlich, so dass auf den ersten Blick nur einzelne ausgeprägte Aufläufe übrig bleiben, die eine auch nur teilweise Zuordnung von einzelnen Wellen zu einzelnen Aufläufen fast unmöglich machen.

In Abb. 32 sind die Verhältnisse der mittleren Wellenhöhenperioden zu den mittleren Auflaufperioden T_{Hm} / T_{Rm} in Abhängigkeit vom Wasserspiegel aufgetragen. Trat schon bei früheren Messungen in der Natur an Neigungen von 1 : 4 bis 1 : 6 eine Verminderung des Verhältnisses Aufläufe zu Wellen auf, so vermindert sich, wenn man Abb. 30 und Abb. 32 vergleicht, auch hier das Verhältnis in gewisser Abhängigkeit von der mittleren Neigung.

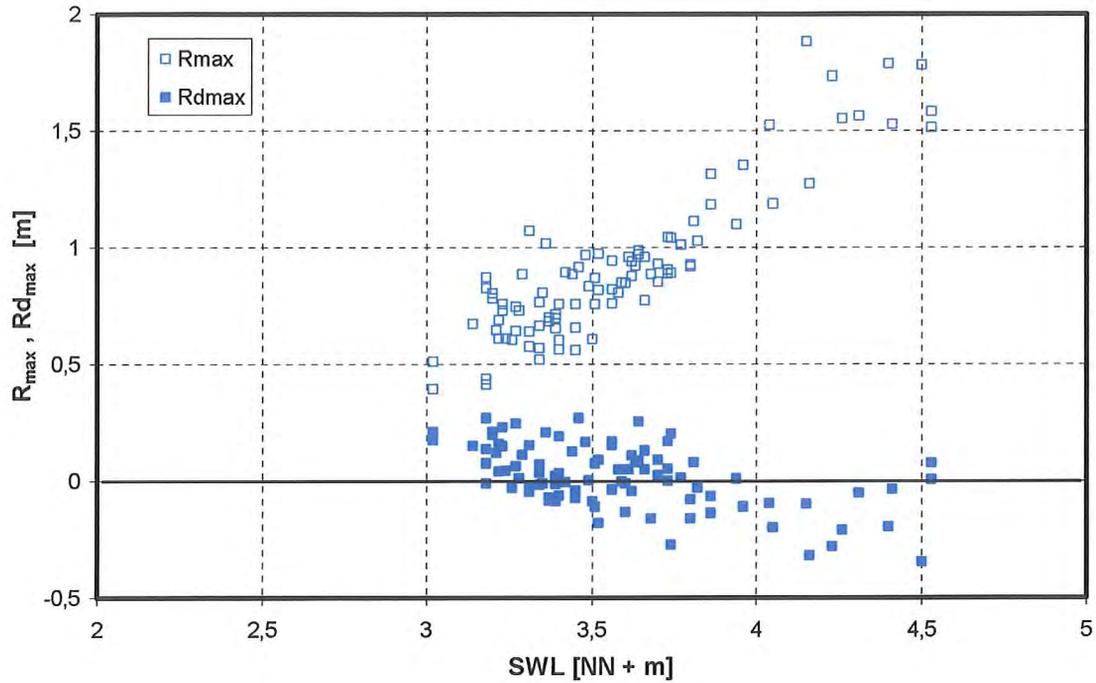


Abb. 31 $R_{u\max}$ und $R_{d\max}$ in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL

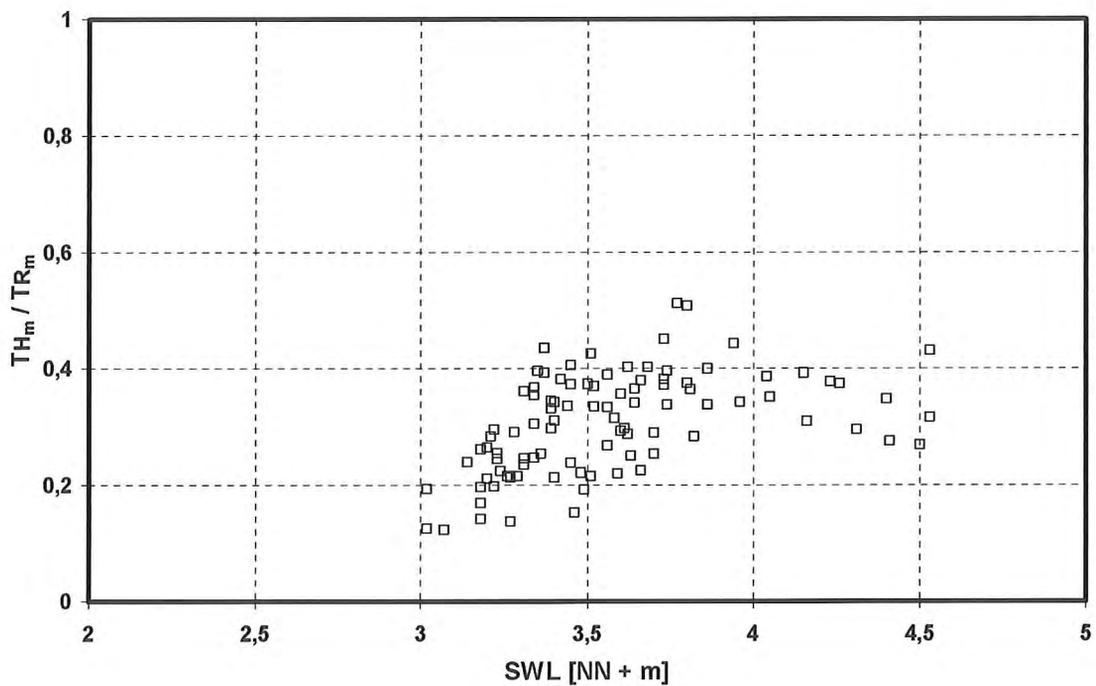


Abb. 32 Verhältnis der mittleren Wellenperioden T_{Hm} zu den mittleren Auflaufperioden T_{Rm} in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL

6.2 Vergleiche mit numerisch erzeugten Wellenauflaufdaten

Um die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Charakteristiken des Wellenaufbaus zu überprüfen, wurden numerische Simulationen des Wellenaufbaus mit dem numerischen Modell "ODIFLOCS" vorgenommen. Das Modell "ODIFLOCS" wird in Abschnitt 9 noch etwas näher beschrieben, weshalb in diesem Abschnitt nicht weiter auf Einzelheiten eingegangen wird. Die Simulationen wurden mit zwei verschiedenen Arten von Seegang an gleichförmig geneigten Böschungen ohne Wellenüberlauf durchgeführt. Die gleichförmig geneigten Deichaußenböschungen wurden im Bereich von $N = 3$ bis $N = 12$ variiert ($N = 3, 4, 5, 6, 8, 10$ und 12). Für jede Neigung wurden jeweils zwei TMA - Spektren und zwei Spektren aus der Natur verwendet. Alle Seegangsspektren wurden für alle Neigungen als jeweils identische Zeitreihen im Modell simuliert. Die beiden Naturspektren und TMA - Spektren unterscheiden sich untereinander nur in der Wellenhöhe (Amplitudenskalierung). Somit war insgesamt eine gute Vergleichbarkeit gewährleistet. In Abb. 33 sind die mit den vier verschiedenen Spektren für die verschiedenen Neigungen ermittelten Aufbauparameter $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex $\xi (T_m)$ dargestellt. Die in Abschnitt 6.1 beschriebene Anhebung der Werte für $R_{98} / H_{1/3}$ bis über den Ruhewasserspiegel SWL hinaus bei flachen Böschungsneigungen wird damit eindeutig bestätigt.

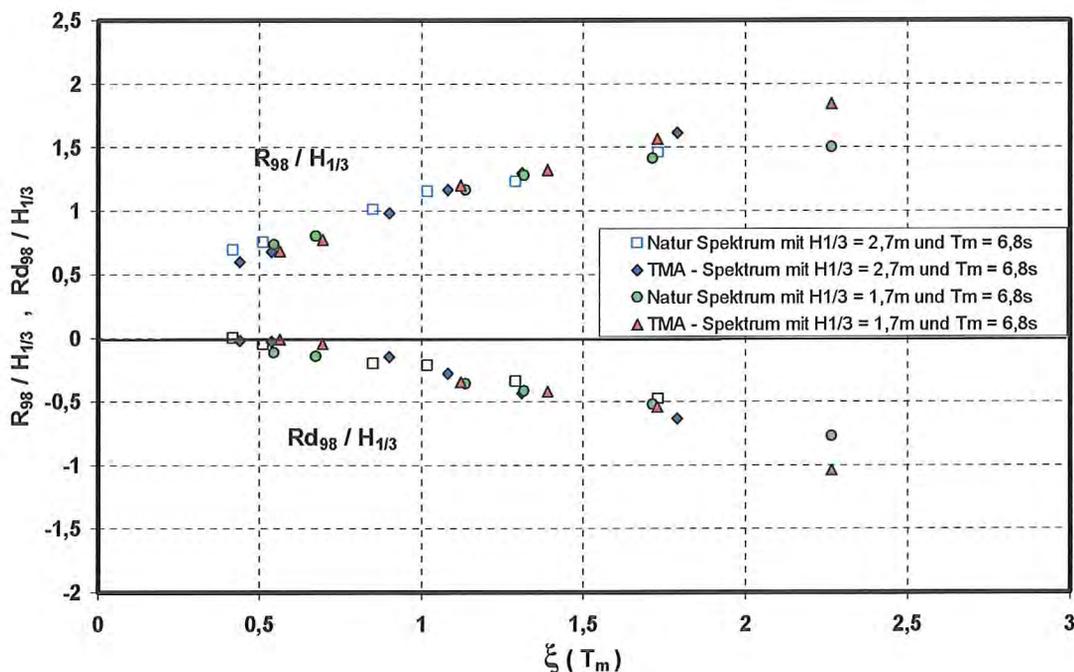


Abb. 33 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex $\xi (T_m)$

In Abb. 34 sind die für die verschiedenen Neigungen ermittelten Verhältnisse der mittleren Perioden zwischen Wellen und Wellenauflauf ebenfalls wie in Abb. 33 in Abhängigkeit vom Brecherindex $\xi (T_m)$ dargestellt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen in Abb. 33 ergeben sich hier Unterschiede der Ergebnisse zwischen den TMA - Spektren und den Natur - Spektren. Die Verhältnisse T_{Hm} / T_{Rm} nehmen für die TMA - Spektren mit abnehmender Brecherkennzahl stärker ab als für die Natur - Spektren, dafür bleibt der Wert für die Obergrenze mit den Natur - Spektren kleiner.

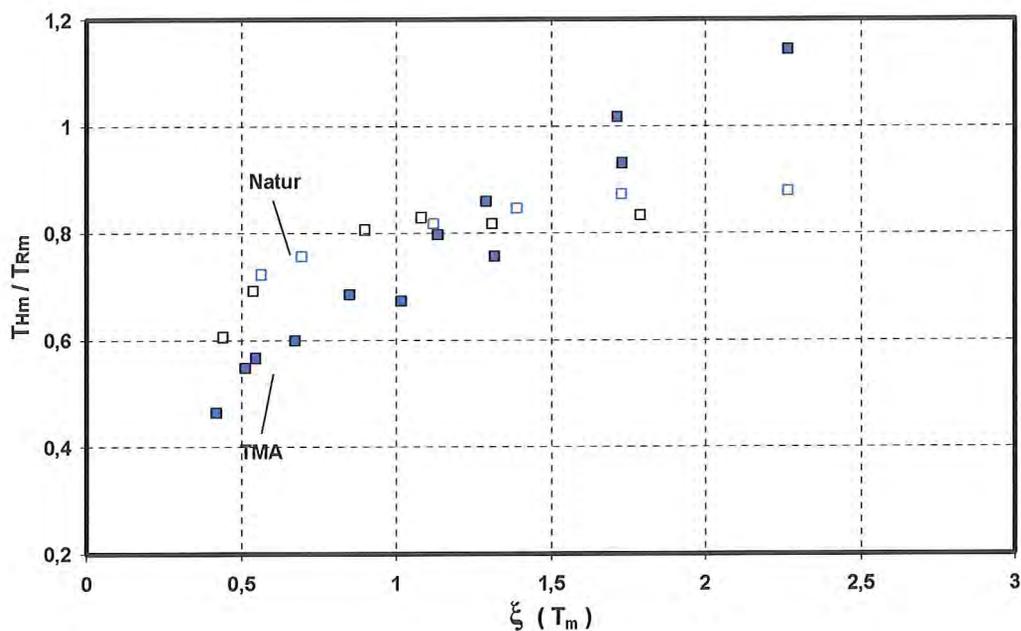


Abb. 34 Verhältnisse der mittleren Perioden zwischen Wellen und Wellenauflauf in Abhängigkeit vom Brecherindex $\xi (T_m)$

6.3 Weitere Plausibilitätsüberprüfungen der Wellenauflaufsignale

Um einen Einfluss des Wellenauflaufpegels und seiner gerätespezifischen Eigenschaften auf die allgemeine Charakteristik des Wellenaufbaus ausschließen zu können, werden im Folgenden die zeitlichen Verläufe des an verschiedenen Messorten synchron gemessenen Seegangs (Oberflächenauslenkungen) und Wellenaufbaus an unterschiedlichen Neigungsbereichen beispielhaft verglichen. Abb. 35 enthält Verläufe, die an der Messkette Neuendeich gemessen wurden. Der zu diesem Beispiel zugehörige Neigungsbereich beträgt etwa 1 : 4. Im rechten Teil der Verläufe ist ein Ausschnitt aus dem linken Teil der Abbildung zeitlich gedehnt.

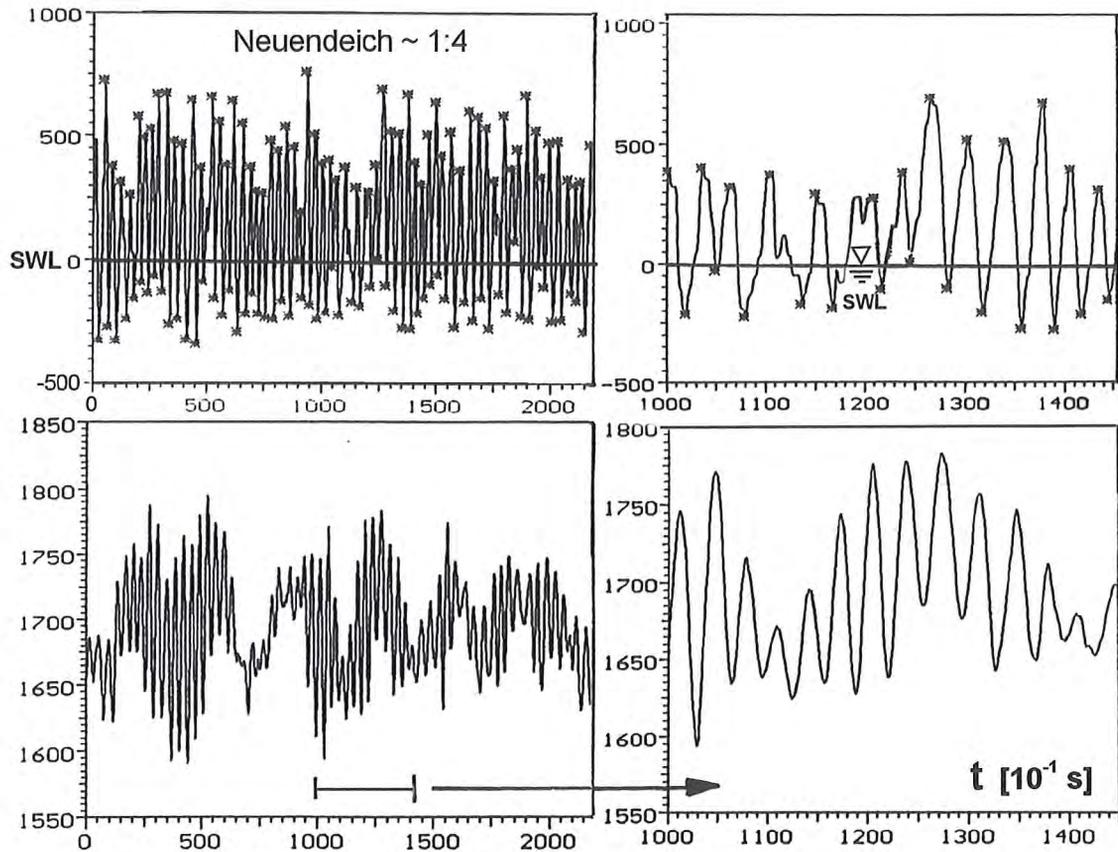


Abb. 35 Zeitliche Verläufe der Oberflächenauslenkungen und der Wellenaufläufe, gemessen an der Messkette Neuendeich im Neigungsbereich von etwa 1:4

Dieser Verlauf des Wellenaufbaus und der zugehörigen Oberflächenauslenkungen entspricht den allgemeinen Vorstellungen aus Veröffentlichungen über Messungen und Untersuchungen solcher relativ steilen Böschungen. Fast jede Welle erzeugt einen Wellenaufbau.

In Abb. 36 werden zeitliche Verläufe der Messkette Neuendeich mit solchen an der Messkette Stinteck gemessenen Verläufen verglichen. Hier beträgt der Neigungsbereich der Verläufe der Messkette Neuendeich etwa 1 : 12 und derjenige der Messkette Stinteck etwa 1 : 10. In beiden Beispielen ist das Verhältnis zwischen Anzahl der Wellen und Anzahl der Wellenaufäufe wesentlich geringer als in Abb. 35. Dies ist eindeutig auf die flachere Neigung zurückzuführen. Ein genereller Unterschied zwischen den an beiden Messketten gemessenen Verläufen für etwa gleiche Neigungsbereiche ist nicht zu erkennen.

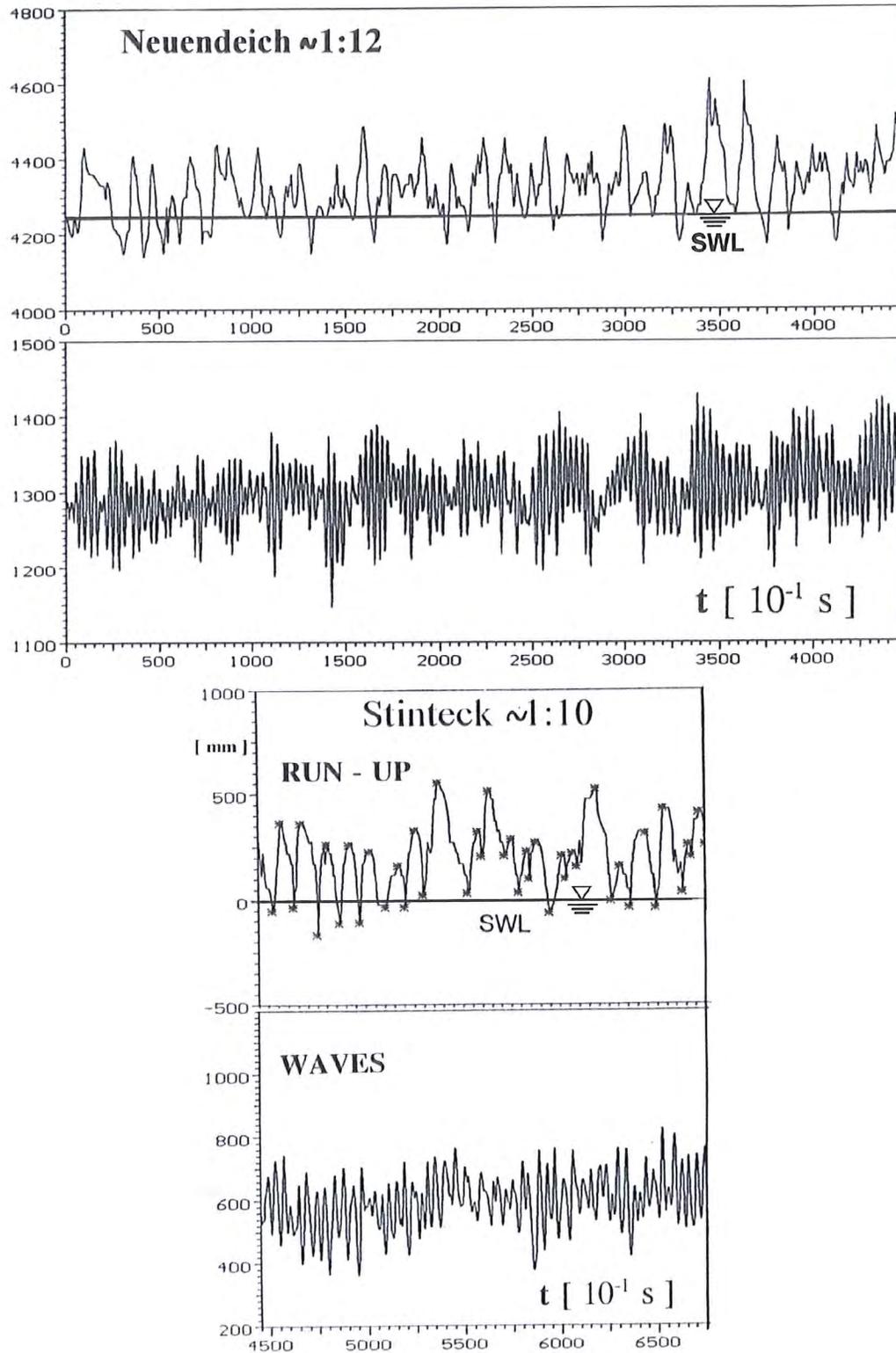


Abb. 36 Zeitlicher Verlauf von Oberflächenauslenkung und Wellenauflauf, gemessen an den Messketten Neuendeich und Stinteck im Neigungsbereich von etwa 1 : 10 / 1 : 12

Die an der Messkette Neuendeich aufgezeichneten Verläufe an beiden Neigungsbereichen sind mit einem Gerät während derselben Sturmflut erfolgt. Daher kann ein gerätespezifischer Einfluss auf die in der Natur festgestellte Charakteristik der Wellenauflaufsignale z.B. an der Messkette Stinteck definitiv ausgeschlossen werden.

Im Zusammenhang mit Plausibilitätsbetrachtungen der Wellenaufaufmesssignale kann auch auf die in Abschnitt 7.4 dargestellten Ergebnisse verwiesen werden. In den Darstellungen der Ergebnisse für die unterschiedlichen Deichgeometrien der verschiedenen Messketten gibt es keine prinzipiellen Abweichungen gegenüber den in diesem Abschnitt gemachten Ausführungen über die allgemeine Charakteristik des Wellenaufaufs, vielmehr werden im Vergleich der Ergebnisse die Güte der Messsignale und ihre Genauigkeit bestätigt. So wird die Genauigkeit der Daten beispielhaft in Abb. 72 plausibel bestätigt, in der der Verlauf der gemessenen Daten im Hinblick auf ihre höhenmäßige Zuordnung zur Bermenhöhe dem entspricht, was darüber im internationalen Schrifttum beschrieben ist.

6.4 Anforderungen an die Auswertemethodik

Die einzelnen Programmbausteine müssen erfahrungsgemäß an die jeweilige Charakteristik der Messsignale angepasst werden, wodurch sich auch unterschiedliche Modifikationen der Auswerteprogramme für einzelne Messketten ergeben können. Insofern kann die Auswertemethodik, von den wesentlichen Grundlagen abgesehen, nicht immer eine vorher absolut feststehende Prozedur sein, sondern muss den physikalisch bedingten Eigenarten entsprechend angepasst werden. Oft stellt sich dies erst nach der wissenschaftlichen Bewertung von ersten Auswertungen heraus und es bedarf mehrfach wiederholter Auswertetests, um physikalisch überzeugende Randbedingungen für die endgültigen Auswerteprozeduren festzulegen.

Um auch solche Auflaufsignale wie in Abb. 36 beispielhaft dargestellt, in ähnlicher Art wie solche, die an stärker geneigten Böschungen auftreten, auswerten zu können, wurde das im Rahmen dieser Untersuchungen verwendete Auswerteprogramm derart weiterentwickelt, dass es auch die einzelnen stark überlagerten Aufläufe erkennen und analysieren kann. Infolge der starken Hebung des mittleren Wasserspiegels mit oft geringfügig über dem Ruhewasserspiegel

SWL liegenden Run-down Werten wurde für die Erkennung der einzelnen Aufläufe eine gleitende Fenstermethode (window) verwendet. Erkennungsverfahren, die auf der Nulldurchgangsmethode basieren, versagen hier. Auf die für das Verständnis der physikalischen Prozesse notwendigen Einzelheiten und angewendete Modifikationen der verwendeten Auswerteprozeduren mit den entsprechenden Definitionen der verwendeten physikalischen Parameter wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

6.4.1 Definitionen im Zeitbereich

Das Messsignal des Wellenauflaufpegels zeichnet die Auf- und Abbewegung der Wellenauflaufzunge (bedingt durch die Bauart des Pegels mit einer Mindest-wasserpolsterdicke von 4,5 bis 5 cm) auf der Deichoberfläche auf (s. auch Abschnitt 5.1.3).

Im Zeitbereich wird dieser zeitliche Verlauf nach bestimmten festzulegenden Kriterien in eine Folge von Einzelaufläufe zerlegt. Jede dieser Einzelwellenaufläufe des natürlichen Seegangs besitzt jeweils einen von den benachbarten Einzelaufläufen unterschiedlichen Auflaufbereich (unterer und oberer Wendepunkt) auf der Deichoberfläche und eine unterschiedliche Dauer (Periode). In Abb. 37 ist beispielhaft ein kurzer Ausschnitt eines zeitlichen Verlaufs dargestellt. Ein Einzelauflauf aus dieser Folge ist in Abb. 38 enthalten.

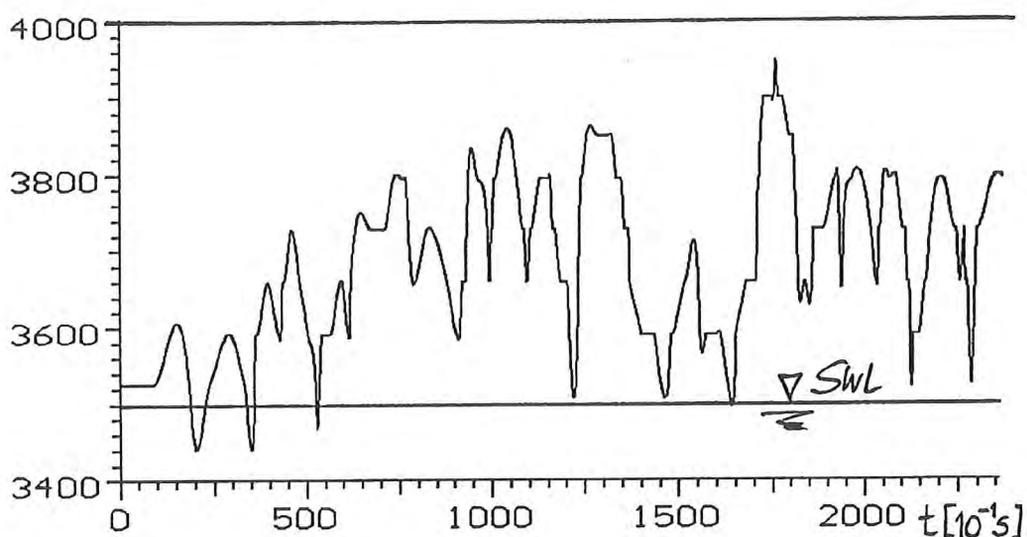


Abb. 37 Beispiel eines zeitlichen Verlaufs des Wellenaufbaus

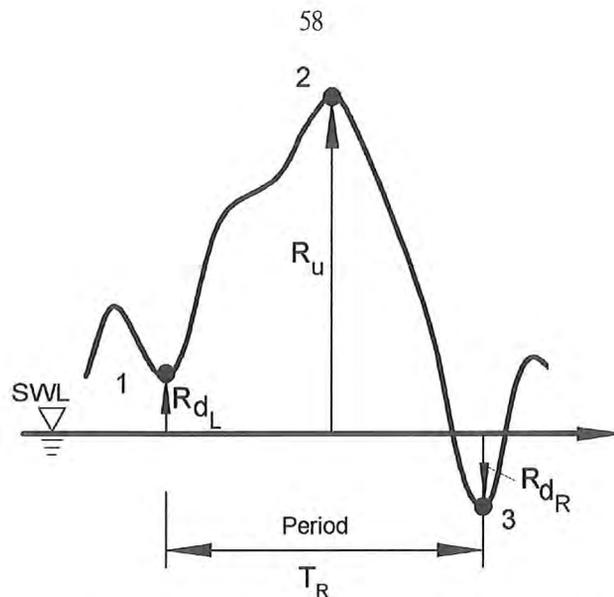


Abb. 38 Definition eines einzelnen Wellenaufbaus

Für die Definition eines Einzelwellenaufbaus gibt es keine einheitlichen Empfehlungen von einer internationalen Arbeitsgruppe wie für Wellen (IAHR) z. B. nach der "Nulldurchgangsmethode, Down - crossing Methode". Lediglich die größte Höhe des Aufbaus (im englischen Run-up (R_u)) (in Abb. 38 mit (2) markiert), wird im internationalen Schrifttum nahezu einheitlich als vertikaler Abstand vom Ruhewasserspiegel SWL definiert. Von den beiden unteren Wendepunkten (in Abb. 38 mit 1 und 3 markiert), die im englischen als Run-down (R_d) bezeichnet werden, liegt einer oberhalb und der andere unterhalb des Ruhewasserspiegels SWL.

Als zugehöriger Run-down Wert wurde hier der Wendepunkt 1 definiert, der zeitlich vor dem maximalen Anlauf R_u (2) auftritt und daher durch die anlaufende Flanke der brechenden Welle geprägt wird. Die Lage der unteren Wendepunkte in Bezug zum Ruhewasserspiegel SWL hängt von den geometrischen Verhältnissen des Deichprofils und von der Brecherart ab, wobei für beide auch direkte Wechselwirkungen bestehen. Allgemein steigen die Wendepunkte mit flacherer Deichneigung und zunehmender Brecherzahl (Schwallbrecher) auf ein höheres Niveau und fallen mit steilerer Neigung und abnehmender Brecherzahl (Sturzbrecher) ab.

Infolge der Charakteristik der Wellenaufbausignale kann die Periode eines Einzelaufbaus ganz allgemein durch die zeitliche Dauer zwischen den Wendepunkten beschrieben werden.

Als Bezugspunkte für die Definition der Einzelaufläufe wird oft, ausgehend von zeitlichen Verläufen infolge regelmäßigen Wellen mit Run-down Werten unterhalb des Ruhewasserspiegels SWL, der Durchgangspunkt durch den Ruhewasserspiegel (Nulldurchgang) definiert. Für die Definition der Einzelperioden ist diese Methode nicht geeignet, denn die Summe der Einzelperioden würde damit größer oder kleiner als die Gesamtzeit des untersuchten Zeitabschnitts sein, je nachdem ob die Wendepunkte oberhalb oder unterhalb des Ruhewasserspiegels liegen. Wie in Abb. 39 schematisch dargestellt, müssten bei oberhalb des Ruhewasserspiegels SWL liegenden Wendepunkten dazu die Flanken bis zum SWL verlängert werden. Insofern eignet sich eine dem Nulldurchgangsverfahren ähnliche Definition für die Wellenauflaufperioden nicht; vielmehr muss hier eine Methode ähnlich der "Trough to Crest – Methode" für die Wellenauflaufperioden angewendet werden, womit sich die teilweise sehr stark überlappenden Einzelaufläufe besser identifizieren lassen.

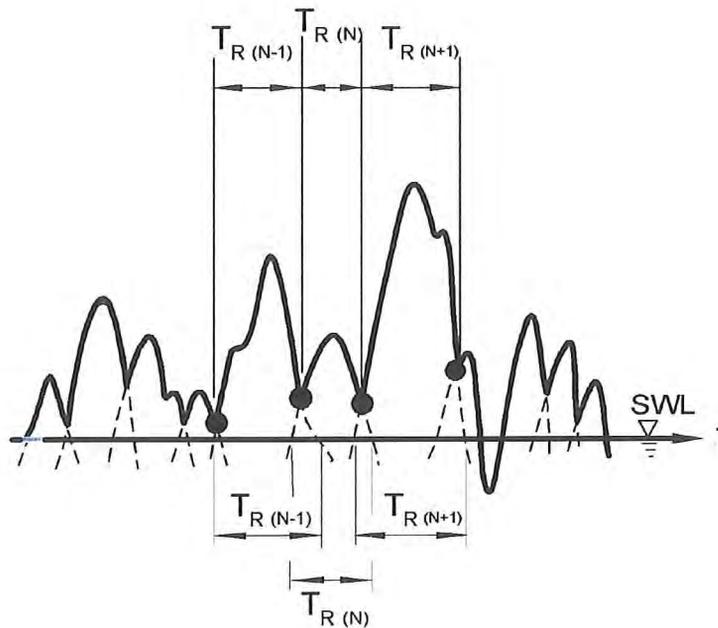


Abb. 39 Überlappung der Einzelauflaufperioden bei Bezug auf den Ruhewasserspiegel SWL

Andererseits ist es infolge des teilweise starken Überlappens besonders wichtig, die einzelnen Wendepunkte so zu ermitteln, dass eine optimale realistische Aufteilung in Einzelaufläufe erfolgen kann.

6.4.2 Ergebnisparameter im Zeitbereich

Im Allgemeinen werden die Werte für die Parameter der Einzelaufläufe jeweils getrennt statistisch sortiert und daraus nach bestimmten Vorgaben statistische Parameter ermittelt. Diese Parameter bilden aus physikalischer Sicht gemittelte repräsentative Einzelaufläufe aus der jeweils verwendeten Zeitreihe nach. Die Ergebnisparameter für die Wellenaufläufe sind in drei Hauptgruppen geteilt: in Einzelwerte, in Mittelwerte und in Unterschreitungs- bzw. Überschreitungswerte.

Einzelwert ist z. B. der maximale Wellenauflauf R_{\max} . Die Mittelwerte sind definiert als mittlere Werte eines nach Größe sortierten Teils aller aus einem Auswertefile analysierten Wellenaufläufe, z. B. ist R_m der Mittelwert aller Aufläufe und z. B. $R_{1/10}$ der Mittelwert der 10% höchsten Aufläufe (Run - up).

Jedem Ergebnisparameter ist ein zugehöriger Auflaufhöhen- bzw. Auflaufperiodenparameter zugeordnet. Z.B. ist der $R_{1/10}$ zugehörige Periodenparameter $T_{R1/10}$ als Mittelwert aller Perioden der 10 % höchsten Aufläufe definiert oder wenn $T_{R1/10}$ der Mittelwert der 10% höchsten Auflaufperioden ist, so ist $R_{TR1/10}$ der zugehörige Mittelwert der Wellenaufläufe aller 10% höchsten Auflaufperioden.

Die Unterschreitungswerte sind definiert als %-Satz der Aufläufe, die diesen Wert unterschreiten, z.B. ist $R_{98\%}$ die Auflaufhöhe, die von 98% aller Aufläufe unterschritten wird. Der entsprechende Überschreitungswert wäre $R_{2\%}$, hierbei würden 2% der Aufläufe diesen Wert überschreiten. $R_{98\%}$ und $R_{2\%}$ sind theoretisch gleich, mögliche Abweichungen ergeben sich durch die Rechenverfahren.

Die oberen Werte der Einzelaufläufe erhalten den Index u (Run - up) und die unteren Werte den Index d (Run - down). Auf weitere Einzelheiten wird hier nicht weiter eingegangen. Die weiteren Ausführungen bleiben im Wesentlichen auf die vorstehend erläuterten Parameter beschränkt.

6.4.3 Weitere Randbedingungen für die Auswertung

In den Abschnitten 6.1 und 6.2 wurde bereits mehrmals auf zwei wesentliche Merkmale der Charakteristik der Wellenaufläufe hingewiesen:

- auf das teilweise starke Überlappen der Aufläufe.
- auf die teilweise über dem Ruhewasserspiegel liegenden unteren Wendepunkte (Run-down) der Einzelaufläufe.

Es wurde auch eingehend erläutert, dass als Konsequenz dieser Merkmale die Auswertemethode auf diese Charakteristik abgestimmt sein muss. Hinsichtlich der Erfassung und Festlegung der unteren (für Run - down) und der oberen (für Run - up) Wendepunkte und damit der Aufteilung in Einzelaufläufe wurde bereits darauf hingewiesen, dass die "Trough to Crest – Methode" am besten geeignet ist.

In das Auswerteprogramm wurden daher zwei Parameter eingefügt, mit denen man die Einzelaufauffindung den jeweiligen Charakteristiken der Wellenauflaufsignale anpassen kann:

- der erste Parameter ist die Breite des Fensters,
- der zweite Parameter ist das Verhältnis der Wendepunkte zueinander.

Innerhalb der vorgegebenen Breite des Fensters T_w in Sekunden, das über den gesamten zeitlichen Verlauf der Messsignale gleitet, werden alle Wendepunkte des zeitlichen Verlaufs erfasst und daraus nach der Größtwert - Methode der jeweilige untere Wendepunkt (für Run-down) und der obere Wendepunkt (für Run - up) festgelegt.

Die Überlappung von mehreren Einzelaufläufen wird durch das Verhältnis der Wendepunkte zueinander beschrieben (siehe Abb. 40). Bezogen auf den Einzelverlauf N mit dem absoluten Maximalwert wird die Identifikation für den Einzelverlauf N-1 nach dem Verhältnis der relativen Auflaufhöhen a und b wie folgt vorgenommen:

Überschreitet das Verhältnis a/b einen vorgegebenen Grenzwert G, so wird der Einzelauflauf N-1 ignoriert und somit Bestandteil des Auflaufes N (schematisch dargestellt in Abb. 40 unten links). Unterhalb des Grenzwertes G wird der Bereich N - 1 als separater Einzelauflauf

identifiziert (schematisch dargestellt in Abb. 40 unten rechts). Dies ist gleichbedeutend damit, dass die relative Auflaufhöhe b einen auf a bezogenen Mindestwert besitzen muss.

Für den Bereich $N + 1$ gelten die Bedingungen entsprechend.

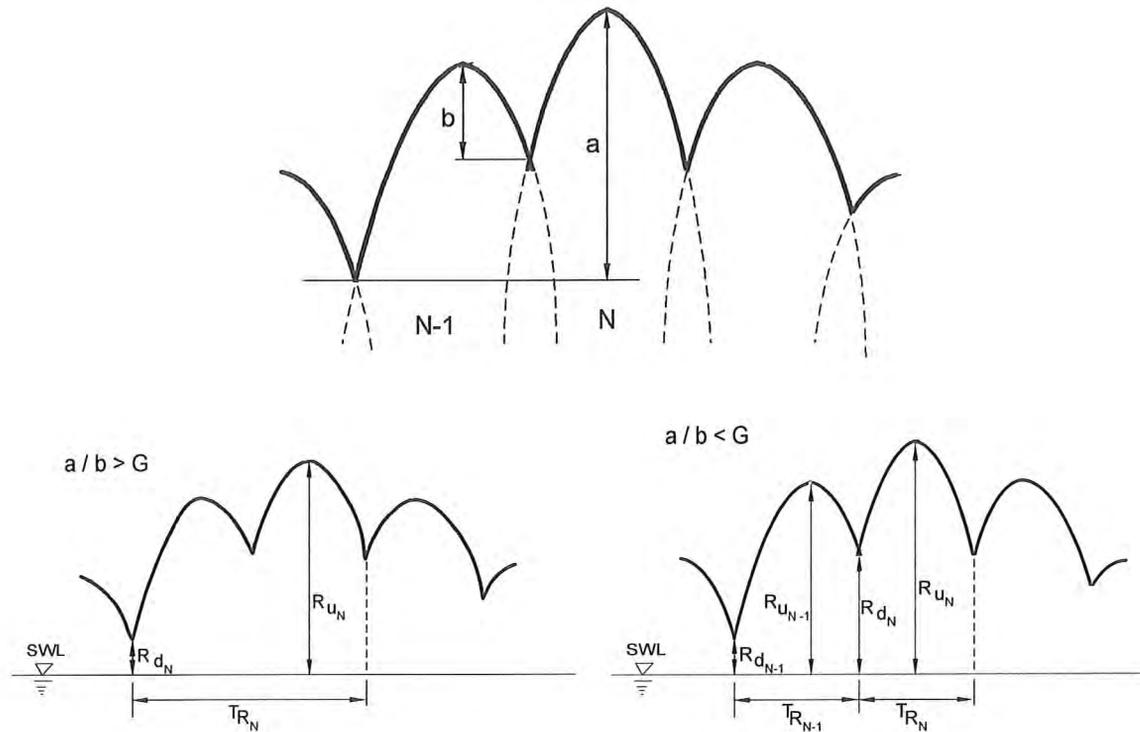


Abb. 40 Definitionen für das Überlappungsmaß

Durch umfangreiche Testauswertungen wurden die Einflüsse der beiden Parameter Fensterbreite T_w und Überlappungsmaß a/b auf die Ergebnisse untersucht. Generell können die Einflüsse wie folgt beschrieben werden:

- mit zunehmendem Wert T_w für das Zeitfenster nimmt die Anzahl der Einzelaufläufe deutlich ab und damit die Wellenauflaufperiode T_R deutlich zu, während die statistischen Auflaufhöhenparameter nur sehr gering zunehmen.
- mit zunehmendem Grenzwert G für das Überlappungsmaß a/b nimmt die Anzahl der Einzelaufläufe zu und damit die Auflaufperiode T_R ab, während sich die statistischen Auflaufhöhenparameter fast nur noch vernachlässigbar verändern. Ab einem Wert G von etwa 10 ergeben sich nur noch geringfügige Änderungen.

Beispielhafte Ergebnisse für zwei ausgewählte Zeitabschnitte aus den Tests für die Messkette Stinteck enthalten die Abbildungen 41 und 42. In Abbildung 41 sind Ergebnisse zum Einfluss der Fenstergröße T_w dargestellt. Der obere Teil der Abb. 41 zeigt die Anzahl der Einzelaufläufe N_a und die mittlere Auflaufperiode T_{Rm} in Abhängigkeit von der Fenstergröße T_w in Sekunden. Der untere Teil der Abbildung 41 enthält die Auflaufhöhenparameter R_{max} , $R_{1/3}$, R_{97} und R_m , ebenfalls in Abhängigkeit von der Fenstergröße. Ergebnisse zum Einfluss des Überlappungsmaßes sind in Abbildung 42 dargestellt. Wie in Abbildung 41, jedoch jeweils in Abhängigkeit vom Überlappungsmaß a/b , sind in Abb. 42 im oberen Teil die Anzahl der Aufläufe N_a und die mittlere Auflaufperioden T_{Rm} und im unteren Teil die Auflaufhöhenparameter aufgetragen. Für die einzelnen Testauswertungen ist der andere Parameter jeweils konstant gehalten.

Für die Festlegung der Werte dieser beiden Parameter für die Auswertung wurden noch die folgenden Überlegungen berücksichtigt: Wenn auch nicht alle Wellen einen separaten Einzelverlauf verursachen, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass zwei oder mehrere Wellen in Folge solche Aufläufe erzeugen. Daher dürfte zur Identifikation die Fensterbreite T_w einen gewissen Anteil der Wellenperiode (etwa 70%) nicht überschreiten. Für das Überlappungsmaß a/b wurde ein hoher Wert angestrebt, um alle möglicherweise aufgetretenen Einzelaufläufe zu erfassen, andererseits sollte eine Abgrenzung gegen eine Überinterpretation erfolgen. Für die Auswertung der Messsignale wurde für T_w der Wert $2s$ und für a/b der Wert 15 gewählt.

Ein exemplarisches Beispiel für die Identifikation der Wendepunkte nach dieser Methode ist in Abb. 43 enthalten.

6.4.4 Trendanteile

Betrachtet man als Seegang die Gesamtheit der Oberflächenauslenkungen, so ist darin auch das gesamte Gemenge der höher- und niederfrequenten Anteile enthalten. Diese Anteile können verschiedene physikalische Ursachen haben, die wiederum auch nicht immer eindeutig voneinander zu unterscheiden sind.

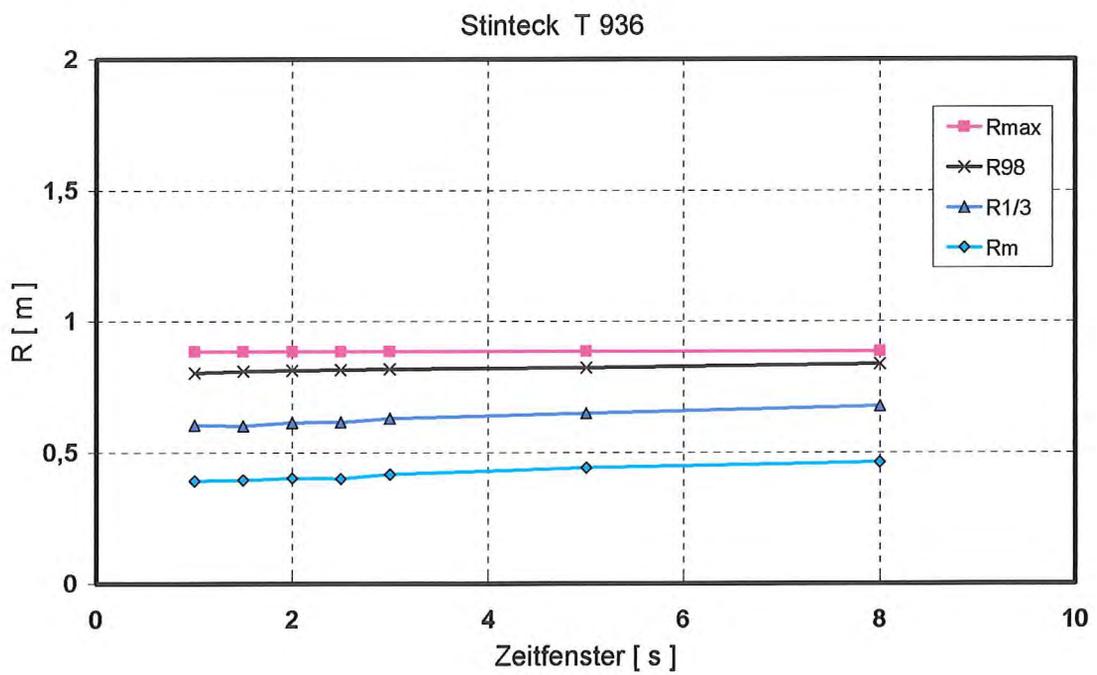
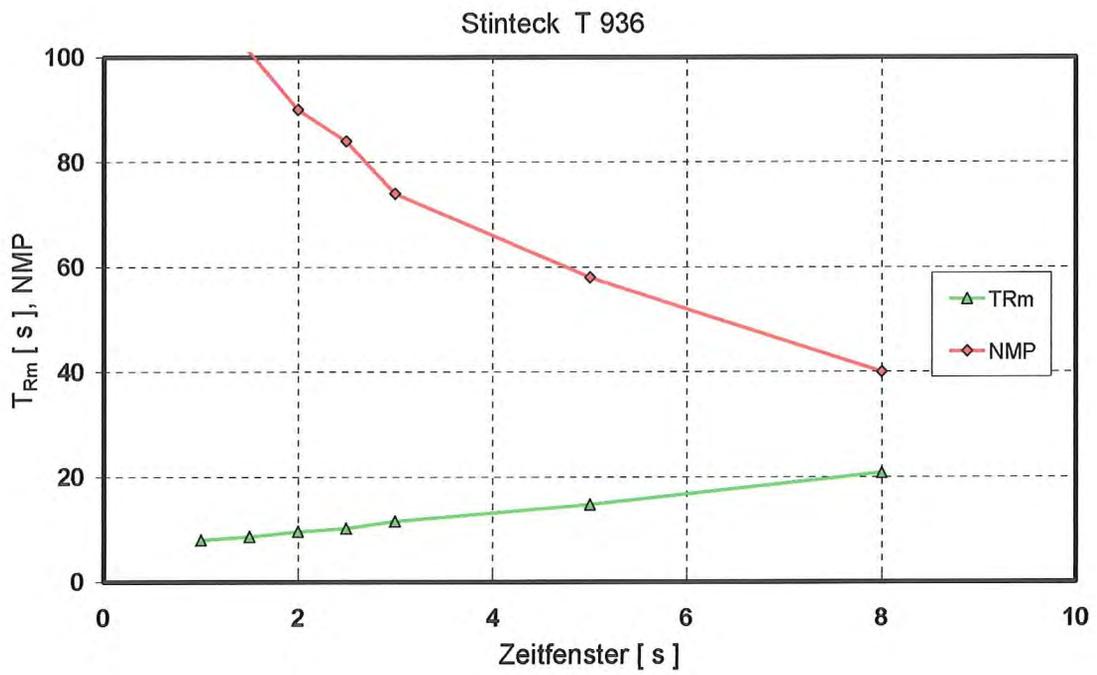


Abb. 41 Einfluss der Größe T_w des Fensters auf die Ergebnisparameter

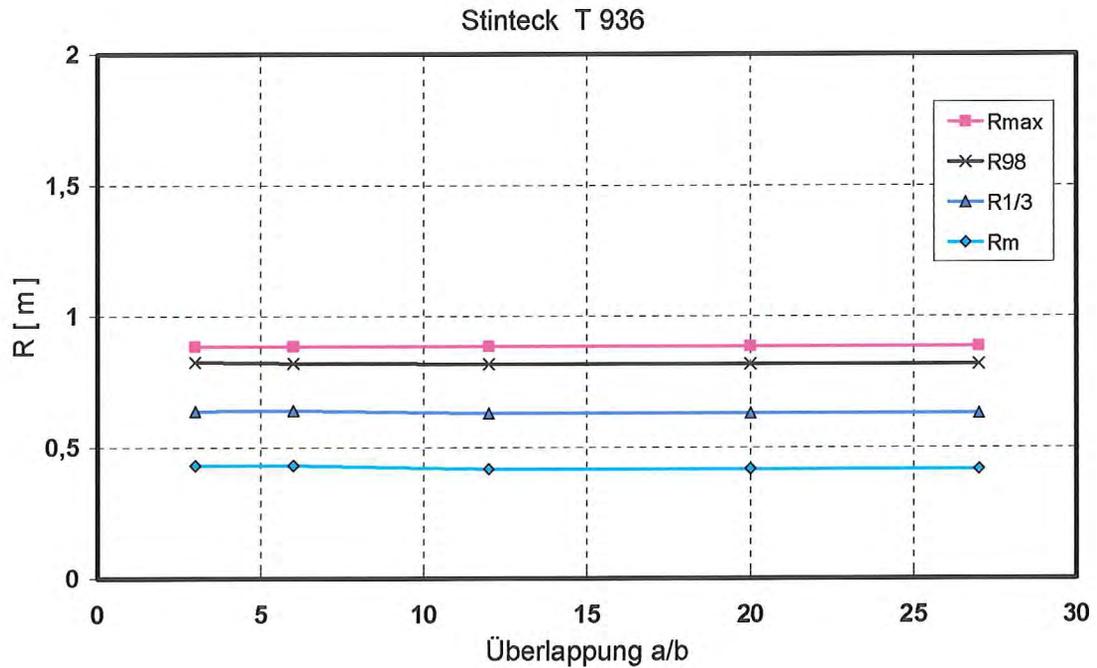
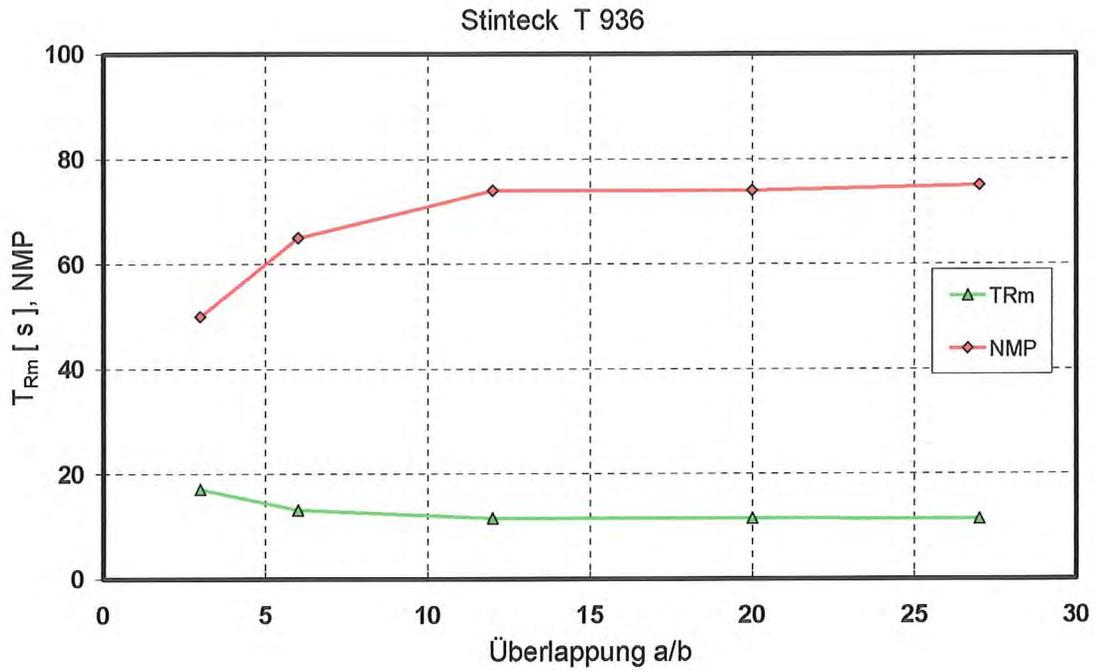


Abb. 42 Einfluss des Überlappungsmaßes a/b auf die Ergebnisparameter

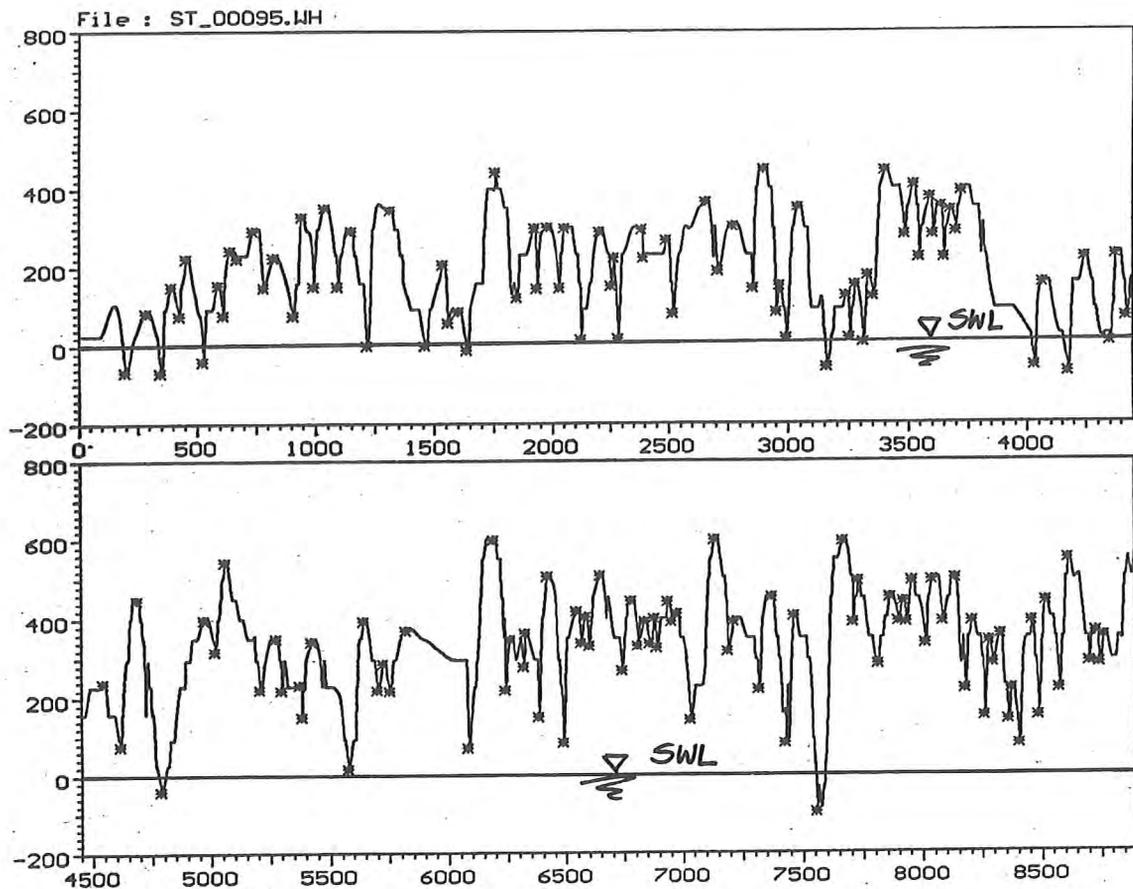


Abb. 43 Beispiel für eine Identifikation der Wendepunkte
aus einem in der Natur gemessenen zeitlichen Verlauf des Wellenaufbaus

So sind die Wellenformen in der Natur grundsätzlich nicht exakt sinusförmig, dadurch ergeben sich harmonische Oberwellen, die nicht immer leicht von den eigentlichen Wellen zu unterscheiden sind. Andererseits werden insbesondere niederfrequente Anteile durch äußere Randbedingungen erzeugt, wie z. B. durch (Mehrfach-) Reflexionen oder durch stark instationären Windschub. Insbesondere niederfrequente Anteile sind oft auch schon im Zeitbereich visuell erkennbar und werden daher oft als Trend bezeichnet. Trendanteile können oftmals höhere Amplituden enthalten als die restlichen Anteile und ohne Berücksichtigung bei der Auswertung dann zur bestimmenden Größe für die physikalischen Beziehungen werden.

Die Trendanteile des Seegangs haben selbstverständlich auch einen Einfluss auf den Wellenaufbau. Im Gegensatz zu den Oberflächenauslenkungen gibt es für den Wellenaufbau, der nicht von vornherein einen stetig harmonischen zeitlichen Verlauf aufweist, keine einfache

physikalisch begründete Definition bzw. Methode zur Eliminierung des Trendanteils.

Weiterhin ist nicht von vornherein klar, ob der Einfluss als reine lineare Überlagerung auftritt oder ob nicht durch den vorangegangenen Brechprozess der Welle eine stochastische Überlagerung Gaußscher Art stattfindet. Andererseits deuten manche zeitlichen Verläufe der Wellenaufmesssignale visuell auf Trendanteile hin, eine Zuordnung zu synchronen Trends des Wellenmesssignals ist infolge der Dreidimensionalität des Seegangs und der Entfernung von über 50 m vom Wellenpegel bis zum Brechpunkt der Wellen nahezu unmöglich. Wegen dieser grundsätzlich noch ungelösten Problematik wurde eine Eliminierung von möglichen Trendanteilen des Wellenaufsignals noch nicht vorgenommen. Dieses Problem soll im Rahmen der vertieften wissenschaftlichen Bearbeitung wieder aufgegriffen werden.

Andererseits muss man für die Anwendung der mit den Trendanteilen behafteten Ergebnisse für den Wellenaufbau aus der Natur berücksichtigen, dass gewöhnlich diese Trendanteile, die ja eine Überlagerung der Tideganglinie bedeuten, bei der Festlegung des Bemessungswasserstandes unberücksichtigt bleiben. Durch die Verwendung der Wellenaufbaugerichte mit den nichteliminierten Trendanteilen werden daher die Verhältnisse in der Natur durchaus richtig repräsentiert.

In Bezug auf die Zuordnung der Aufläufe zu einzelnen Wellen muss bei Vergleichen mit großmaßstäblichen Messungen aus Wellenkanälen jedoch immer auf den Einfluss der Dreidimensionalität des Seegangs geachtet werden. Bei der Analyse der Wasserteilchenbewegung wird deutlich, wie stark der Energieaustausch seitlich zur Hauptwellenanlaufichtung ist, so dass eine Zuordnung ohne Berücksichtigung der Dreidimensionalität schon aus physikalischen Gründen stark eingeschränkt ist oder von vornherein ausscheidet.

7. Ergebnisse aus den Untersuchungen

7.1 Allgemeine Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die wesentlichen Aussagen gegeben werden, die sich aus den Ergebnissen der einzelnen Untersuchungen ableiten lassen. In Bezug auf weitergehende Details kann teilweise bereits auf einige seit 1995 angefertigte Veröffentlichungen verwiesen werden, sowie darauf, dass am FZK zur Zeit eine Dissertation in Vorbereitung ist bzw. angefertigt wird, in der alle weitergehenden Details abgehandelt werden.

7.2 Wahl des Periodenparameters für die Darstellung der Ergebnisse mit dem Ansatz von HUNT

Bereits in Abschnitt 2.3 wurde erläutert, dass für die Verifikation des HUNT - Ansatzes die Wahl des Wellenperiodenparameters eine wesentliche Bedeutung für die praktische Anwendung unter natürlichen Verhältnissen hat. WANG & GRÜNE (1995) haben diese Problematik beispielhaft für die Verwendung der verschiedenen Periodenparameter abgehandelt. Die wesentlichen Aussagen daraus sollen im Folgenden kurz wiedergegeben werden.

Für die Vergleiche wurden großmaßstäbliche Labor - Untersuchungen an zusammengesetzten Neigungen und an gleichförmigen Neigungen mit Berme verwendet, die jeweils mit PM - Spektren und mit Naturspektren durchgeführt wurden sowie Messungen in der Natur an der Messkette Stinteck. Für die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse wurden Wellenperiodenparameter aus dem Zeit - und Frequenzbereich verwendet. Ihre Definitionen sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit PM - Spektren sind in Abb. 44 und die aus den Untersuchungen mit Natur - Spektren in Abb. 45 dargestellt. In Abb. 46 befinden sich die Ergebnisse aus den Untersuchungen in der Natur an der Messkette Stinteck.

	Parameter	Definition
Zeitbereich	T_m	mittlere Periode
	$TH_{1/3}$	mittlere Periode der 33,3% höchsten Wellen
Frequenzbereich	T_{m01}	mittlere Periode definiert durch m_0/m_1
	T_{m02}	mittlere Periode definiert durch $\sqrt{m_0/m_2}$
	T_p	Peakperiode aus der Energiedichteverteilung

Tabelle 5 Definition der verwendeten Welleperiodenparameter

Die Auflaufdaten $R_{98}/H_{1/3}$ wurden in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ aufgetragen. Die Wellenhöhe $H_{1/3}$ wurde im Zeitbereich ermittelt. Der Brecherindex ξ_{eq} wurde mit dem Wellenhöhenparameter $H_{1/3}$ und jeweils mit einem der Periodenparameter aus Tabelle 2 berechnet und beinhaltet den Ansatz von v. d. MEER & STAM (1992) zur Berücksichtigung von zusammengesetzten Neigungen und von Bermen (für die Daten aus den Testserien ohne Berme ist ξ_{eq} gleich ξ). In jeder Abbildung sind die Brecherkennzahlen jeweils im linken Bereich mit Perioden aus dem Zeitbereich berechnet, mit T_m (oberer Plot) und $TH_{1/3}$ (unterer Plot), und im rechten Bereich mit Perioden aus dem Frequenzbereich, mit T_{m01} (oberer Plot), T_{m02} (mittlerer Plot) und T_p (unterer Plot). Die gestrichelten Linien in den Einzeldarstellungen geben den Verlauf des von v. d. MEER & STAM empfohlenen Berechnungsansatzes unter Verwendung der Peakperiode T_p wieder.

Ein Vergleich aller Ergebnisse in den Abbildungen 44 bis 46 zeigt, dass die Übereinstimmung der Daten mit der linearen Regression $R_{98}/H_{1/3} = 1.5 \cdot \xi_{eq}$ (gestrichelte Linie im Bereich $\xi_{eq} < 2$) in vielen Fällen mäßig bis schlecht ist, wenn auch die Mittelwerte C_ξ meist nicht so stark von dem Wert $C_\xi = 1,5$ abweichen. In Tabelle 6 sind die für alle Daten in den Abbildungen 44 bis 46 ermittelten Werte für die Koeffizienten C_ξ in Abhängigkeit der verwendeten Periodenparameter und der Seegangsspektren aufgelistet sowie einige Verhältniswerte der Koeffizienten C_ξ untereinander verglichen.

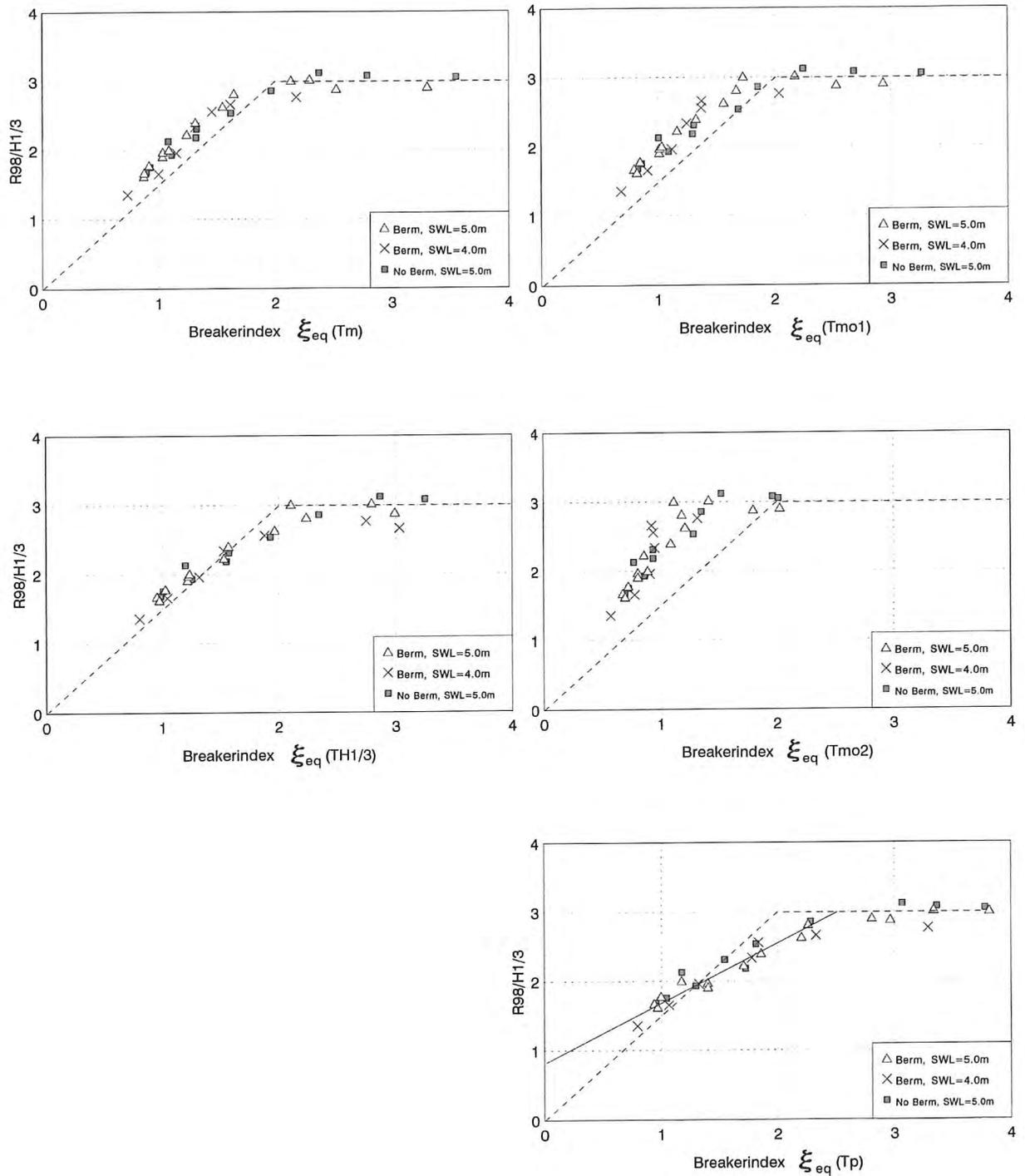


Abb. 44 : $R_{98}/H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ_{eq} ,
bezogen auf verschiedene Wellenperiodenparameter,
aus Untersuchungen im GWK mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren)

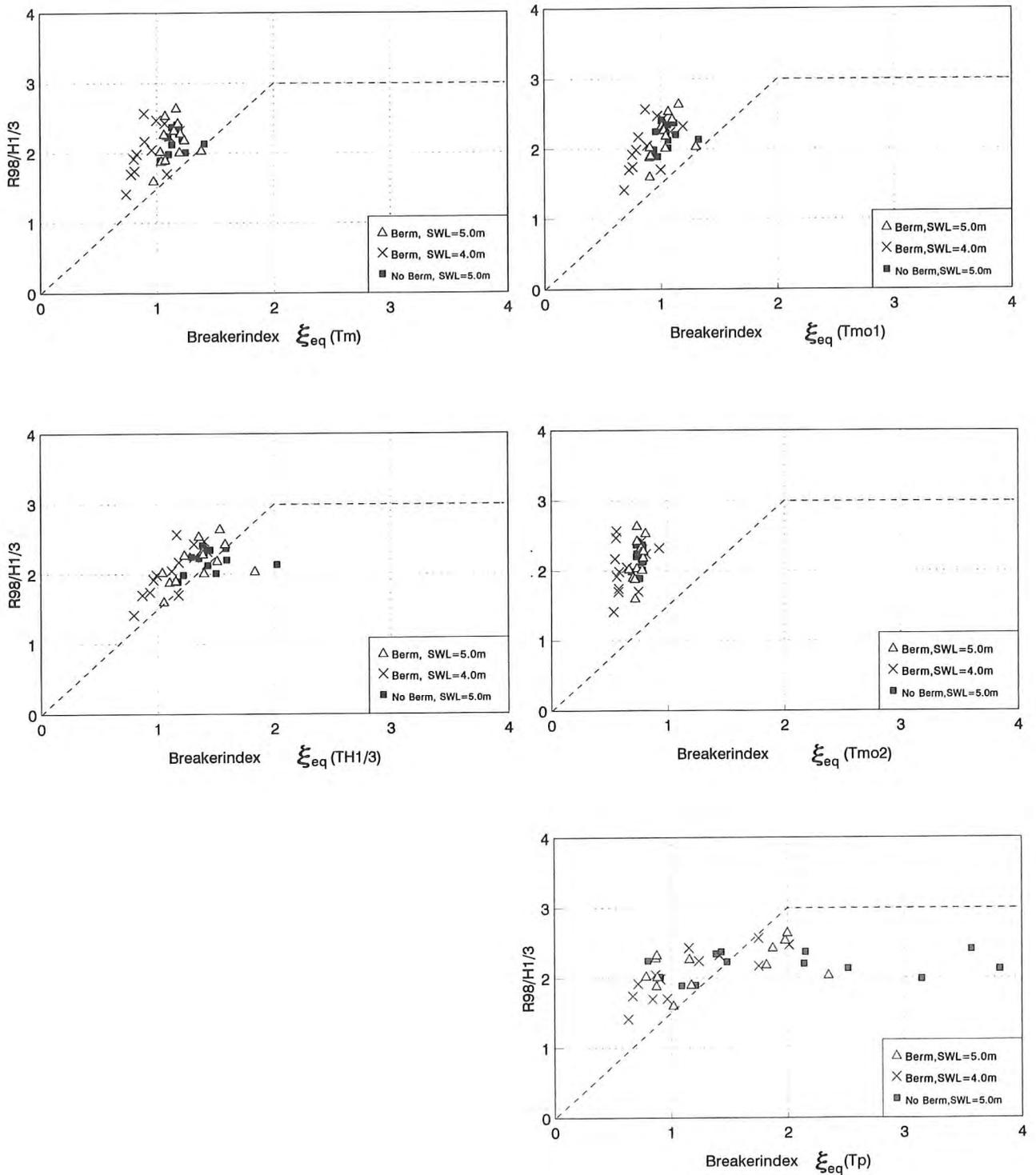


Abb. 45 : $R_{98}/H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ_{eq} ,
bezogen auf verschiedene Wellenperiodenparameter,
aus Untersuchungen im GWK mit unregelmäßigen Wellen (Natur - Spektren)

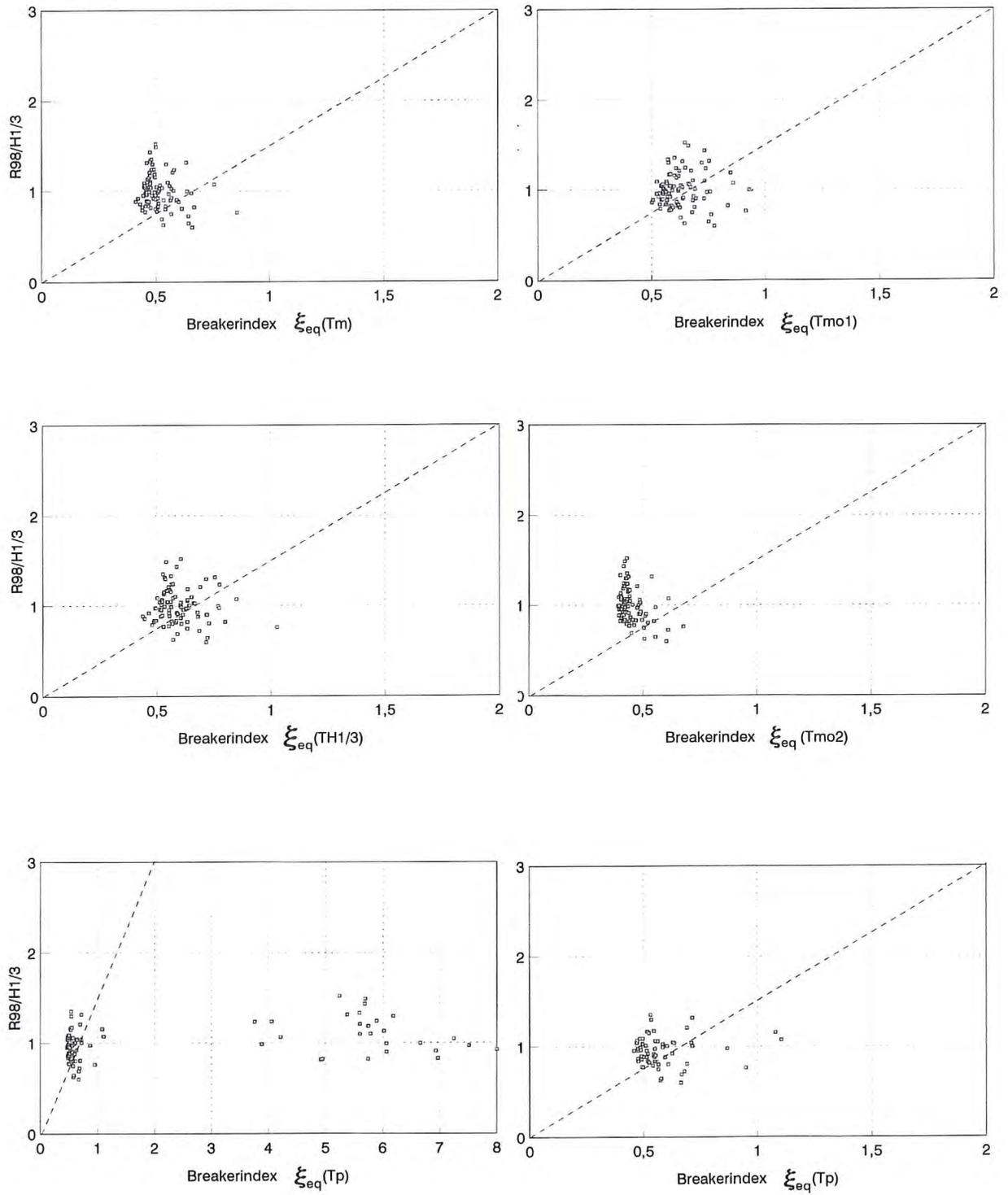


Abb. 46 : $R_{98}/H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ_{eq} ,
bezogen auf verschiedene Wellenperiodenparameter,
aus Untersuchungen in der Natur

			Zeitbereich		Frequenzbereich		
			T_m [s]	$T_{H1/3}$ [s]	T_{m01} [s]	T_{m02} [s]	T_p [s]
1	PM-Spektren GWK:	$C_{Lab PM}$	1,71	1,54	1,86	2,40	1,42
2	Natur-Spektren GWK:	$C_{Lab F}$	2,04	1,74	2,12	3,00	2,08
3	$C_{Lab F} / C_{Lab PM}$		1,19	1,13	1,14	1,25	1,46
4	Naturmessungen Stinteck:	C_{Feld}	1,89	1,50	1,59	2,00	1,50
5	$C_{Feld} / C_{Lab F}$		0,93	0,86	0,75	0,67	0,72

Tabelle 6 Mittelwerte für den Koeffizienten C_ξ aus Untersuchungen im GWK und in der Natur sowie Verhältniswerte der Koeffizienten untereinander

Weiterhin ist für die Daten aus den Untersuchungen im Labor eine gewisse abnehmende Tendenz der Übereinstimmung der Ergebnisse für die unterschiedlichen Periodenparameter untereinander bei Verwendung von Natur - Spektren zu erkennen. Die beste Übereinstimmung für alle Untersuchungen besteht für den Periodenparameter $T_{H1/3}$ aus dem Zeitbereich. Eine recht gute Übereinstimmung ist auch für die mittleren Perioden T_m aus dem Zeitbereich und T_{m01} aus dem Frequenzbereich festzustellen, sowohl im Vergleich untereinander als auch im Hinblick auf eine gute Korrelation.

Dagegen bestehen die schlechtesten Übereinstimmungen mit jeweils unbefriedigenden Korrelationen für die Verwendung der Peakperiode T_p . Wenn auch alle Korrelationen der in der Natur gemessenen Auflaufdaten nur mäßig infolge des immer in der Natur örtlich auftretenden engen Bereiches der Brecherkennzahl ausgeprägt sind, so fällt doch der weite Bereich der mit der Peakperiode T_p berechneten Brecherkennzahlen auf. Dies überrascht nicht und liegt daran, dass sich die Energiedichteverteilungen von natürlichem Seegang in Wattgebieten von dem im Tiefwasserbereich beträchtlich unterscheiden. Die Energiedichteverteilung von Seegang in Wattgebieten ist stark ungleichförmig (zerruft) und weist oft hohe langperiodische Anteile auf. Die Ermittlung der Peakperiode ist daher problematisch und sie hängt in wesentlich stärkerem Maße von der Auswertemethodik und der Manipulation ihrer Randbedingungen ab als bei den

anderen Periodenparametern. Weiterhin hat die Peakperiode eigentlich keinen realen Bezug auf das Brechen der Wellen und auf den Wellenaufbau, denn der physikalische Prozess bezieht sich auf die Folge der am Deich brechenden und auflaufenden Einzelwellen eines Wellenzuges und nicht auf die Komponenten der Fourier - Transformation.

Als Ergebnis aller Vergleiche erscheint daher die Verwendung der Peakperiode T_p im HUNT - Ansatz für die Anwendung in Wattgebieten völlig ungeeignet. Im Folgenden wird deshalb nur noch der Periodenparameter T_m aus dem Zeitbereich verwendet.

7.3 Ergebnisse aus Untersuchungen im GWK

7.3.1 Untersuchungen an Deichen mit gleichförmig geneigten Außenböschungen

Die Untersuchungen an gleichförmig geneigten Deichen wurden mit den beiden Neigungen 1 : 6 und 1 : 12 durchgeführt, die in Abschnitt 3.2 beschrieben wurden. In Abb. 47 sind die an der Neigung 1 : 6 mit regelmäßigen Wellen gemessenen Werte für den Parameter R_{98} / H in Abhängigkeit vom Brecherindex und in Abb. 48 sind diejenigen an der Neigung 1 : 12 gemessenen Werte aufgetragen. Ein Vergleich der Gradienten der Regressionsgeraden beider Neigungen, deren Korrelationen für Messungen des Wellenaufbaus jeweils außergewöhnlich gut sind, ergibt tendenziell größere Werte für den Auflaufparameter R_{98} / H an der steileren Neigung 1 : 6. Bezogen auf den HUNT - Ansatz sind die Werte für die steilere Neigung 1 : 6 etwa 14 % größer und für die flachere Neigung 1 : 12 etwa 14 % kleiner. Diese Abweichungen lassen auf einen infolge der großmaßstäblichen Untersuchungen im GWK relativ größeren Einfluss des an beiden Neigungen unterschiedlichen Brechverhaltens der Wellen auf den Wellenaufbauprozess schließen, der infolge von Maßstabseffekten in kleinmaßstäblichen Untersuchungen nicht oder nicht so ausgeprägt auftritt.

Die an der Neigung 1 : 6 mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren) gemessenen Werte für den Parameter $R_{98} / H_{1/3}$ sind in Abhängigkeit vom Brecherindex in Abb. 49 und diejenigen an der Neigung 1 : 12 gemessenen Werte sind in Abb. 50 aufgetragen.

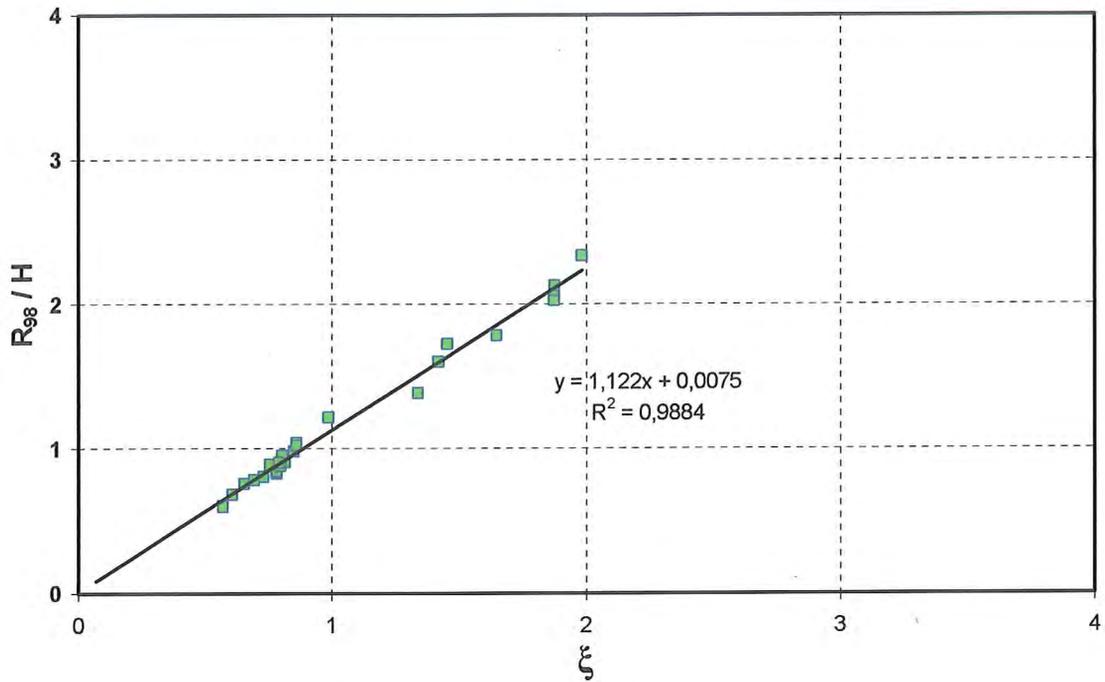


Abb. 47 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex für Tests im GWK mit regelmäßigen Wellen an einer Außenböschung mit der Neigung 1:6

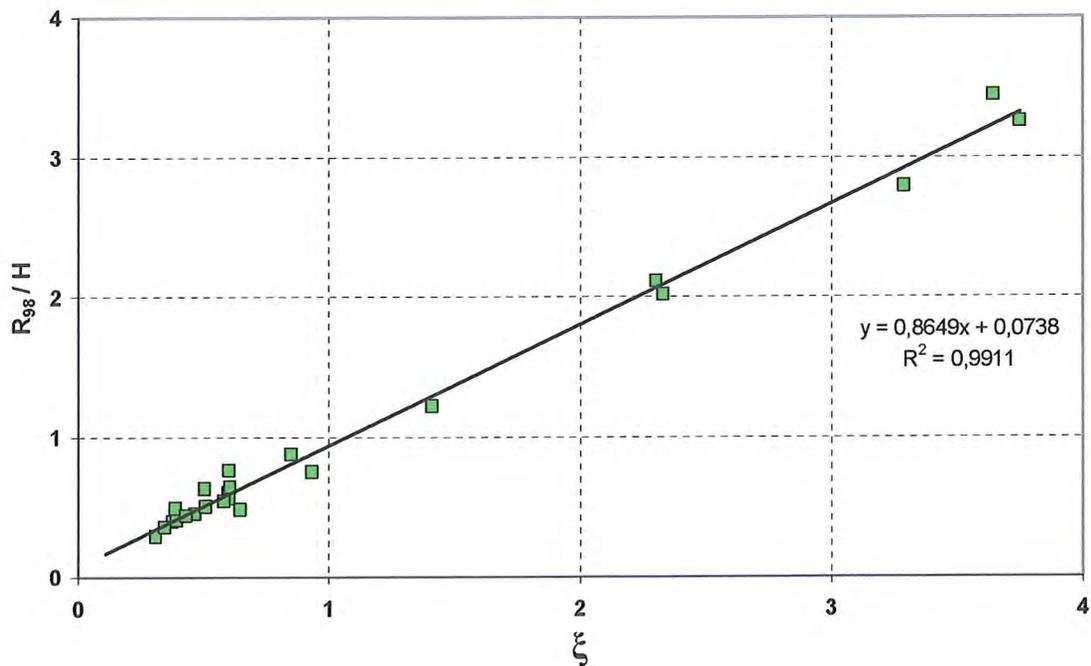


Abb. 48 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex für Tests im GWK mit regelmäßigen Wellen an einer Außenböschung mit der Neigung 1:12

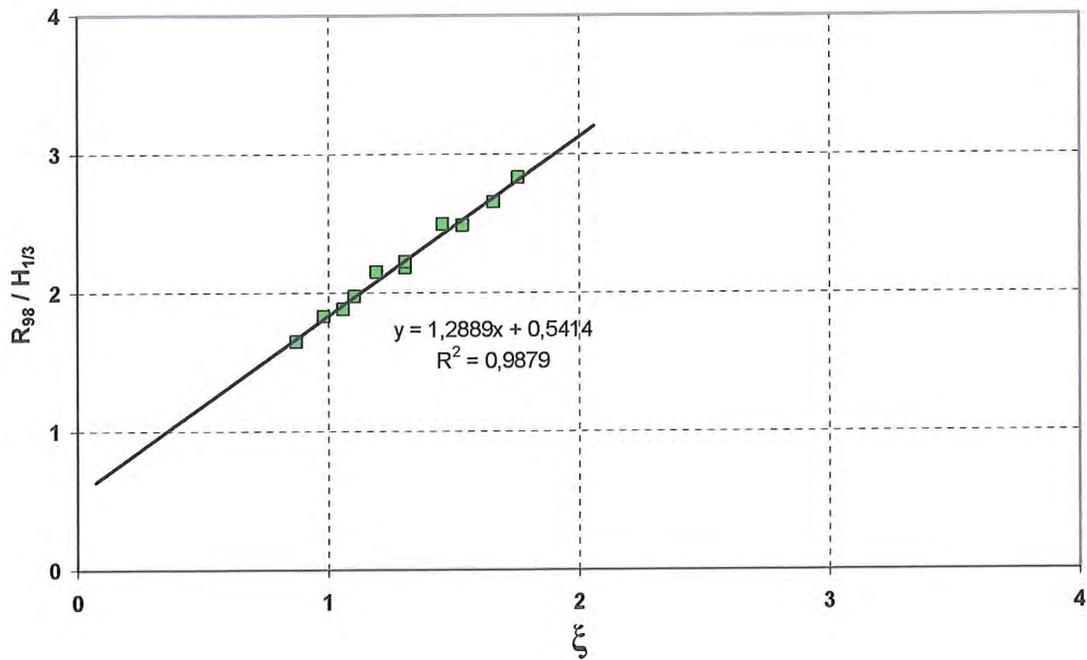


Abb. 49 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex für Tests im GWK mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren) an einer Außenböschung mit der Neigung 1:6

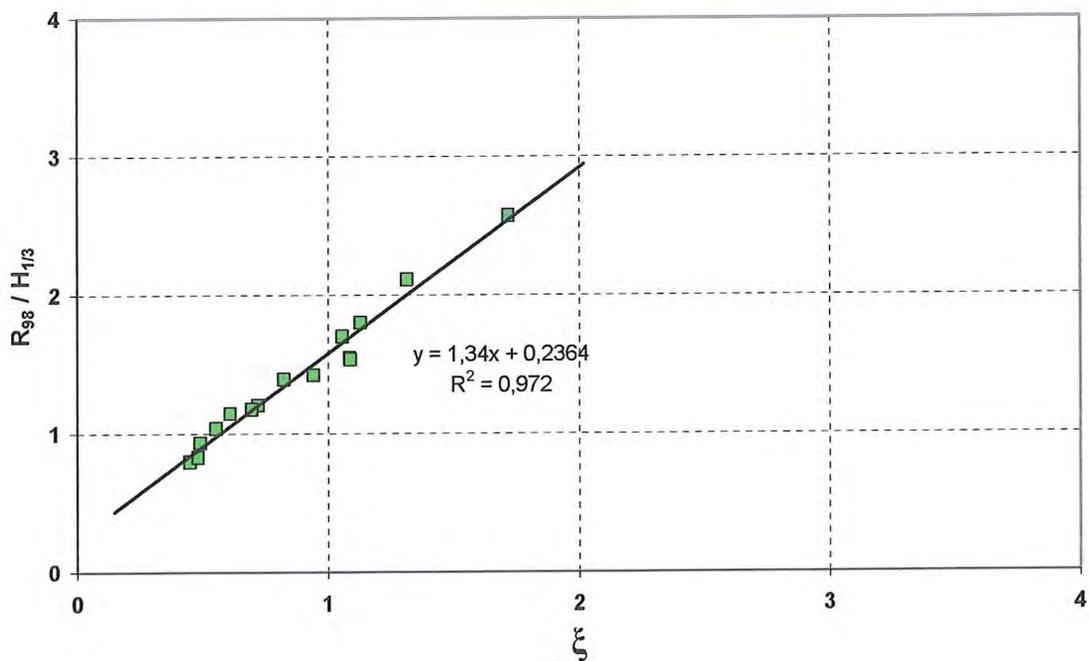


Abb. 50 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex für Tests im GWK mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren) an einer Außenböschung mit der Neigung 1:12

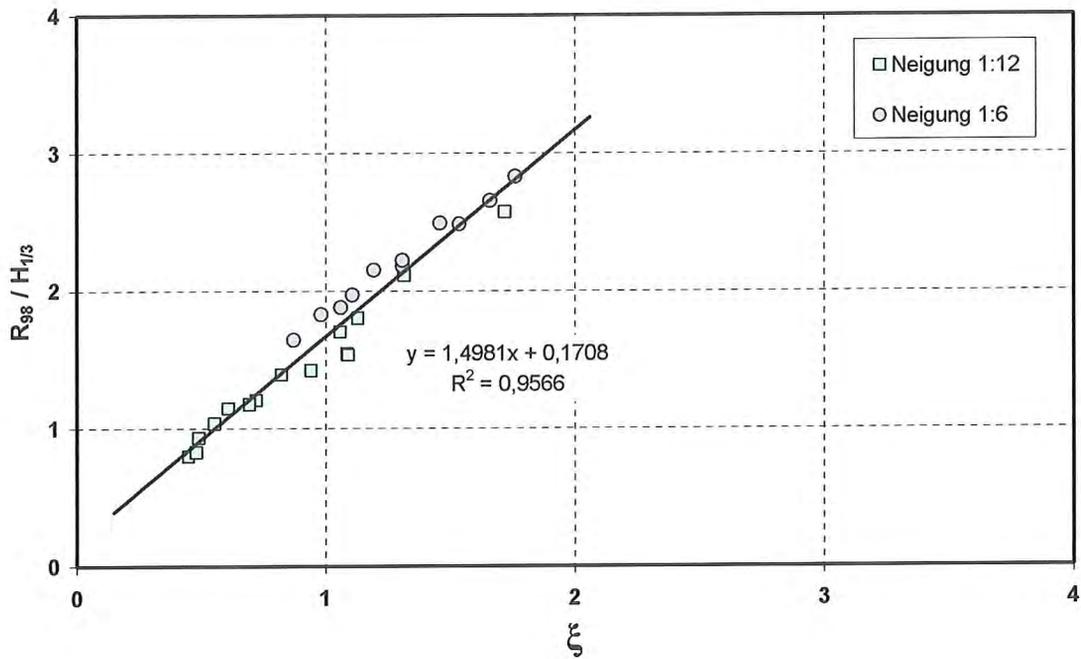


Abb. 51 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex für Tests im GWK mit unregelmäßigen Wellen (PM-Spektren) an Böschungsneigungen 1 : 6 und 1 : 12

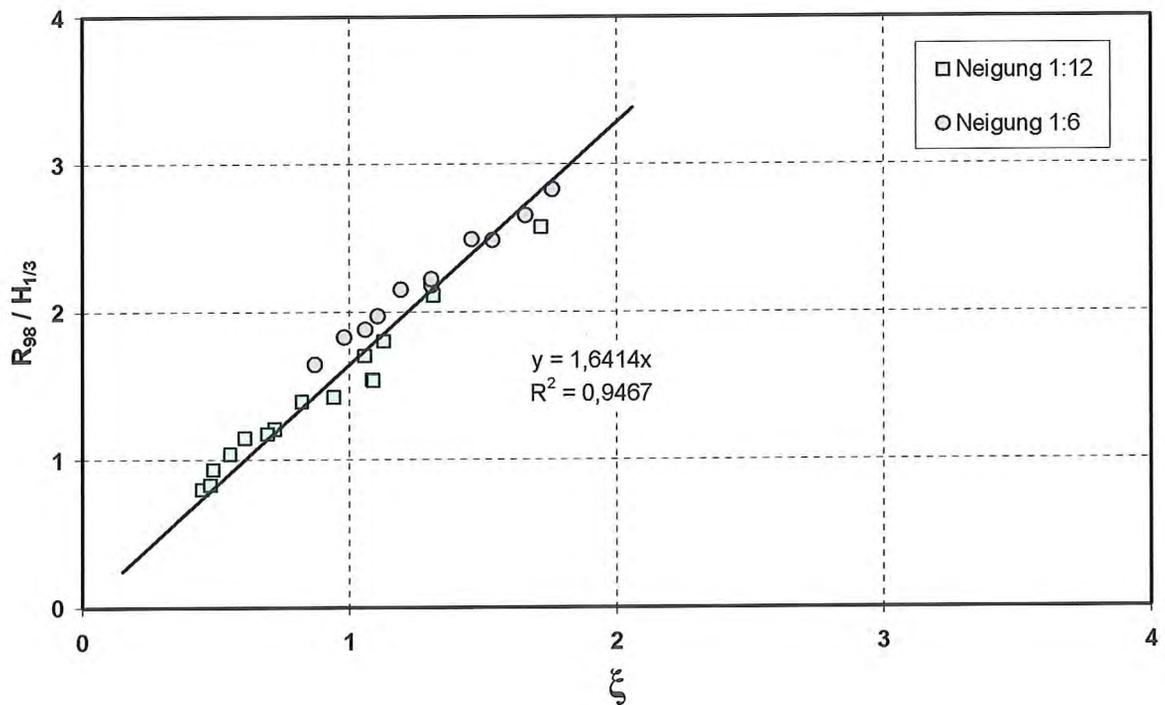


Abb. 52 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex für Tests im GWK mit unregelmäßigen Wellen (PM-Spektren) an Böschungsneigungen 1 : 6 und 1 : 12 (mit Korrelation durch Nullpunkt)

Ein Vergleich der jeweiligen linearen Regressionsgeraden, deren Korrelationen jeweils genauso außergewöhnlich gut sind wie für die Daten aus den Tests mit regelmäßigen Wellen, zeigt für die Ergebnisse der Neigung 1 : 6 in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Tests mit regelmäßigen Wellen größere Werte, jedoch nicht tendenziell, sondern mit einem geringen nahezu konstanten Wert für R / H .

Werden die Ergebnisse für beide Neigungen zusammengeführt, wie es in Abb. 51 erfolgt ist, fallen diese Unterschiede kaum auf. In Abb. 52 ist die Regressionsgerade der zusammengeführten Daten beider Neigungen 1 : 6 und 1 : 12 zwangsweise durch den Nullpunkt geführt, ihr Gradient hat den Wert 1,64.

In Tabelle 7 sind für alle Testserien die Mittelwerte der Verhältnisse zwischen den auf die Wellenhöhen bezogenen Wellenaufläufe und Brecherindex $(R_{98} / H) / \xi$ enthalten.

Gleichförmige Neigungen	1:N = 1:6	1:N = 1:12
Regelmäßige Wellen	1,13	0,89
PM-Spektren	1,69	1,57

Tabelle 7 Mittelwerte der Verhältnisse $(R_{98} / H) / \xi$

7.3.2 Untersuchungen an Deichen mit Außenböschungen aus zwei zusammengesetzten gleichförmigen Neigungen

Über Ergebnisse dieser Untersuchungen berichten WANG & GRÜNE (1996), wesentliche Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben. Die bei den Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen für drei Testserien mit unterschiedlichen Wasserständen gemessenen Wellenaufläufe sind in Abb. 53 in Abhängigkeit vom Brecherindex dargestellt. Entsprechend der Definition in Abb. 54 für den Abstand zwischen Ruhewasserspiegel und dem Schnittpunkt der beiden Böschungsneigungen (Knickpunkt) ergeben sich für die einzelnen Testserien Werte für $D_c = +1.7$ m, $+0.5$ m, und -0.5 m.

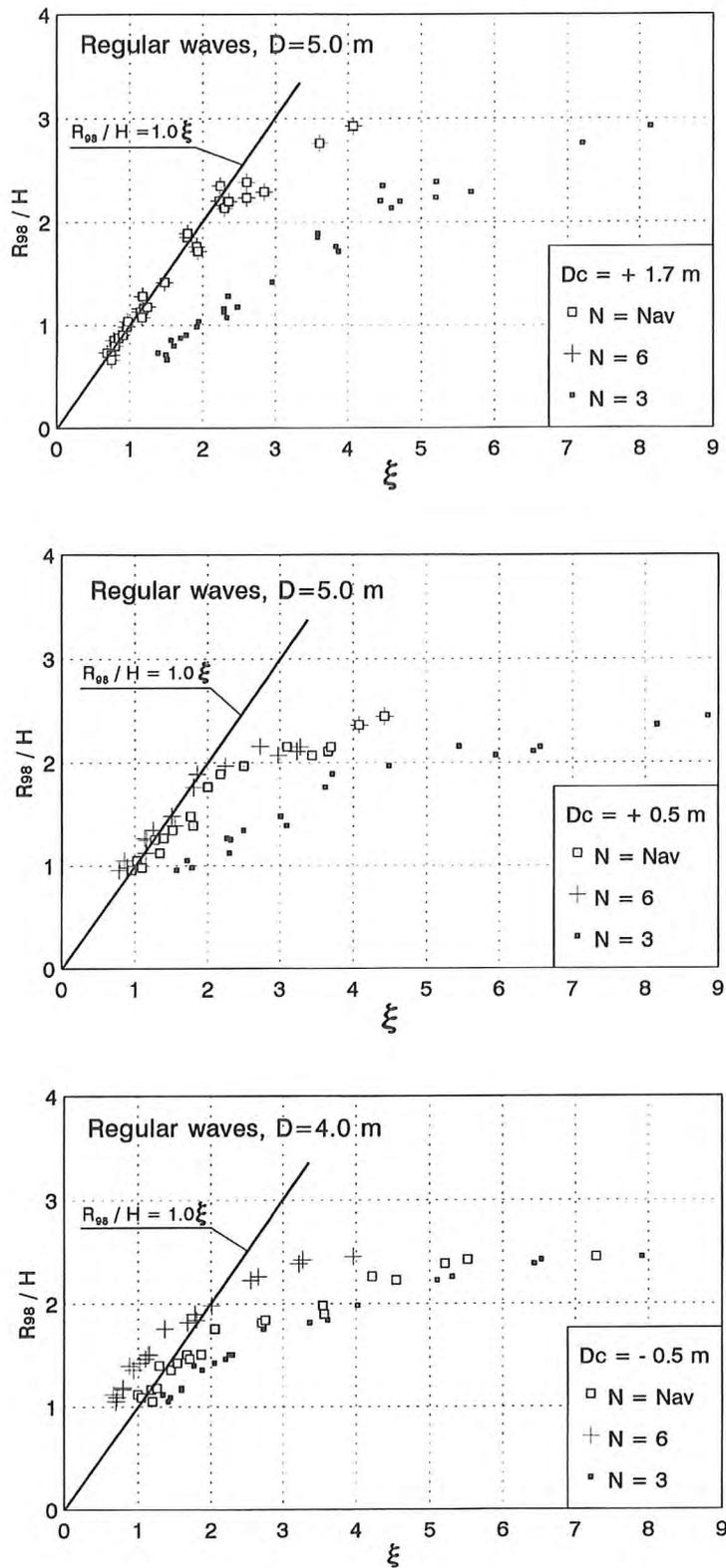


Abb. 53 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ für Tests mit regelmäßigen Wellen

Alle Daten sind auf den Brecherindex bezogen, wobei dieser jeweils mit drei unterschiedlichen Neigungsansätzen berechnet wurde:

- mit der oberen Neigung 1 : 6,
- mit der unteren Neigung 1 : 3 und
- mit dem Neigungsansatz für die mittlere Neigung N_{av} von d. WAAL & v. d. MEER (1992), deren Definition in Abb. 55 enthalten ist.

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass für den Wert $D_c = +1.7$ m (dies bedeutet eine Wassertiefe von 1,7 m über dem Knickpunkt) Unterschiede zwischen dem Ansatz mit N_{av} und mit $N = 6$ auftreten, was bedeutet, dass bei dieser Wasserüberdeckung des Knickpunktes die untere Neigung keinen Einfluss mehr auf den Wellenauflauf hat. Für den Wert $D_c = +0,5$ m im mittleren Graph von Abb. 53 sind die Unterschiede gering und damit bleibt auch der Einfluss der unteren Neigung gering, obwohl die Wasserüberdeckung hier nur 0,5 m beträgt.

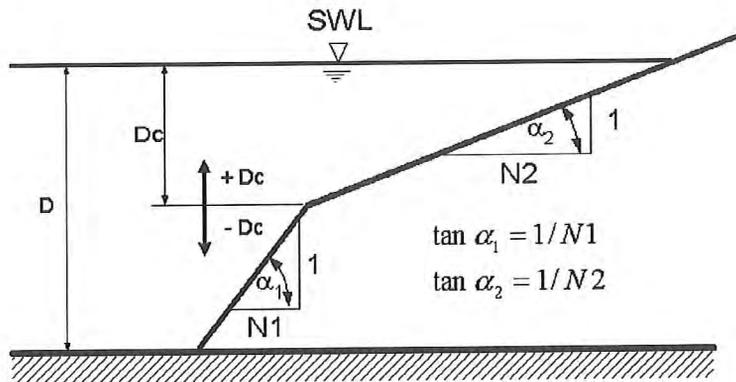


Abb. 54 Definition des Abstandes D_c zwischen Ruhewasserspiegel SWL und Knickpunkt

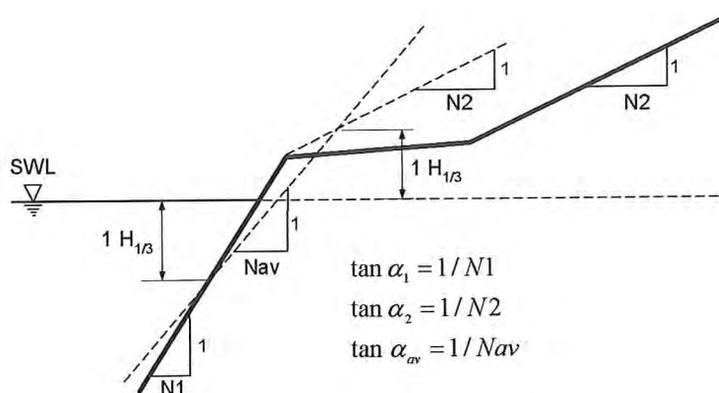


Abb. 55 Definition der mittleren Neigung N_{av}

Erst wenn der Knickpunkt 0,5 m über dem Ruhewasserspiegel liegt, treten deutliche Unterschiede auf und damit ein deutlicher Einfluss der unteren Neigung 1 : 3. Weiterhin muss festgestellt werden, dass sich keine befriedigenden linearen Korrelationen ergeben.

Daher wurde ein neuer Ansatz für die mittlere Neigung auf der Grundlage eines schon alten Ansatzes von DROGOSZ-WAWRZYNIAK (1965) entwickelt. Dieser Ansatz lautete entsprechend den in Abb. 54 und 55 dargestellten Definitionen

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_1} + 2 * \frac{Dc}{L_0} * \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right)$$

und wurde wie folgt modifiziert: Der Faktor $2 * Dc / L_0$, der eine Funktion der Lage des Knickpunktes Dc und der Wellenlänge L_0 ist, wurde erweitert. Dieser modifizierte Faktor besteht aus einer Funktion der Deichgeometrie Dc / D und einer Funktion der Tiefwasserwellensteilheit H / L_0 :

$$2 * \frac{Dc}{L_0} \Rightarrow f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H}{L_0} \right)$$

Damit ergibt sich der modifizierte Ansatz wie folgt:

$$\frac{1}{N_{SU}} = \frac{1}{N_1} + f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H}{L_0} \right) * \left(\frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_2} \right)$$

mit dem modifizierten Faktor

- für regelmäßige Wellen:

$$f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H}{L_0} \right) = \left(0,5 - \frac{Dc}{D} \right) * \left(7 * \left(\frac{H}{L_0} \right)^{0,1} - 4,43 - \frac{Dc}{D} \right)$$

- für unregelmäßige Wellen (PM - Spektren):

$$f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H_{1/3}}{L_0} \right) = 2 * e^{\frac{Dc}{D}} * \left(3 * \left(\frac{H_{1/3}}{L_0} \right)^{0,2} - 1 \right)$$

mit D_c = Abstand zwischen Ruhewasserspiegel und Knickpunkt
 D = Wassertiefe am Deichfuß
 H = Wellenhöhe
 L_o = Wellenlänge im Tiefwasser = $g \cdot T_m^2 / 2\pi$

Die Güte der Korrelationen mit dem modifizierten Ansatz wird in den folgenden Abbildungen 56 bis 58 deutlich. Die Brecherkennzahlen in diesen Abbildungen sind für sowohl auf den Ansatz für N_{av} von d. WAAL & v. d. Meer (1992) als auch auf den modifizierten Ansatz für N_{su} bezogen. Die mit dem modifizierten Ansatz für N_{su} dargestellten Messdaten stimmen mit dem Ansatz von HUNT ($R/H = 1,0 \xi$) ausgezeichnet überein (Abb. 56).

Ähnliche Ergebnisse wurden für die Untersuchungen mit unregelmäßigen Wellen gefunden. In Abb. 57 sind die bei den Tests mit PM - Spektren gemessenen Aufläufe dargestellt und in Abb. 58 diejenigen Aufläufe, die bei den Tests mit Natur - Spektren gemessen wurden. Auch mit diesen Daten für unregelmäßigen Seegang ergeben sich gute Übereinstimmungen mit dem ursprünglichen Ansatz von HUNT.

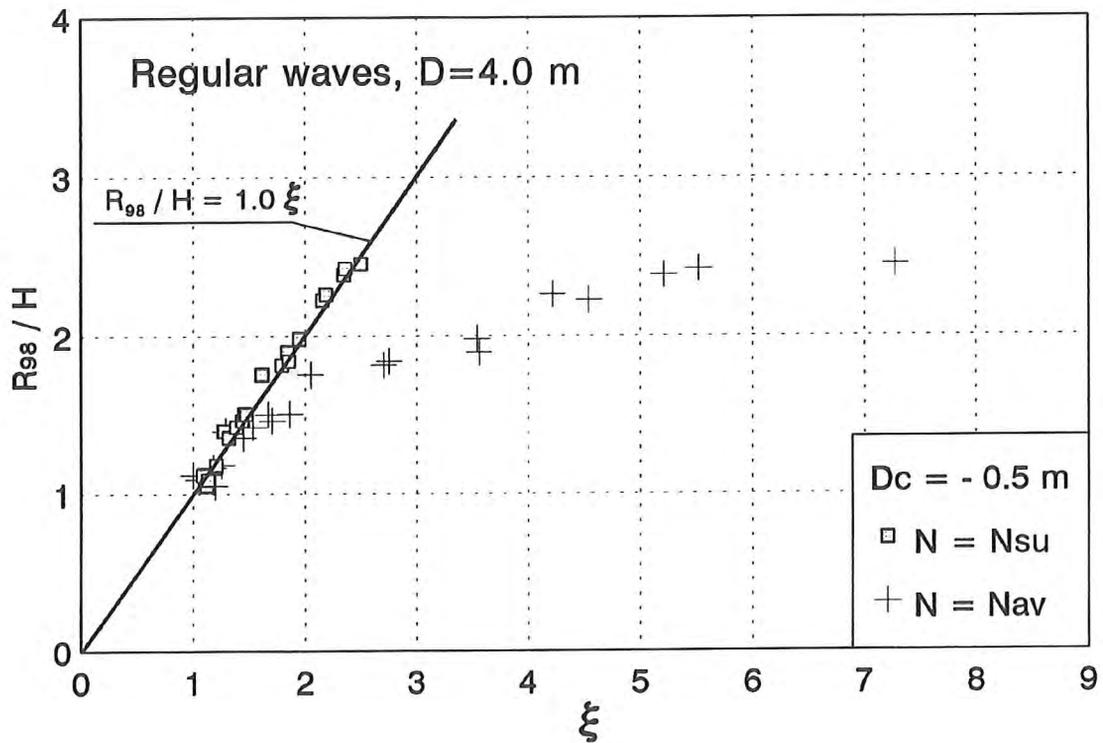
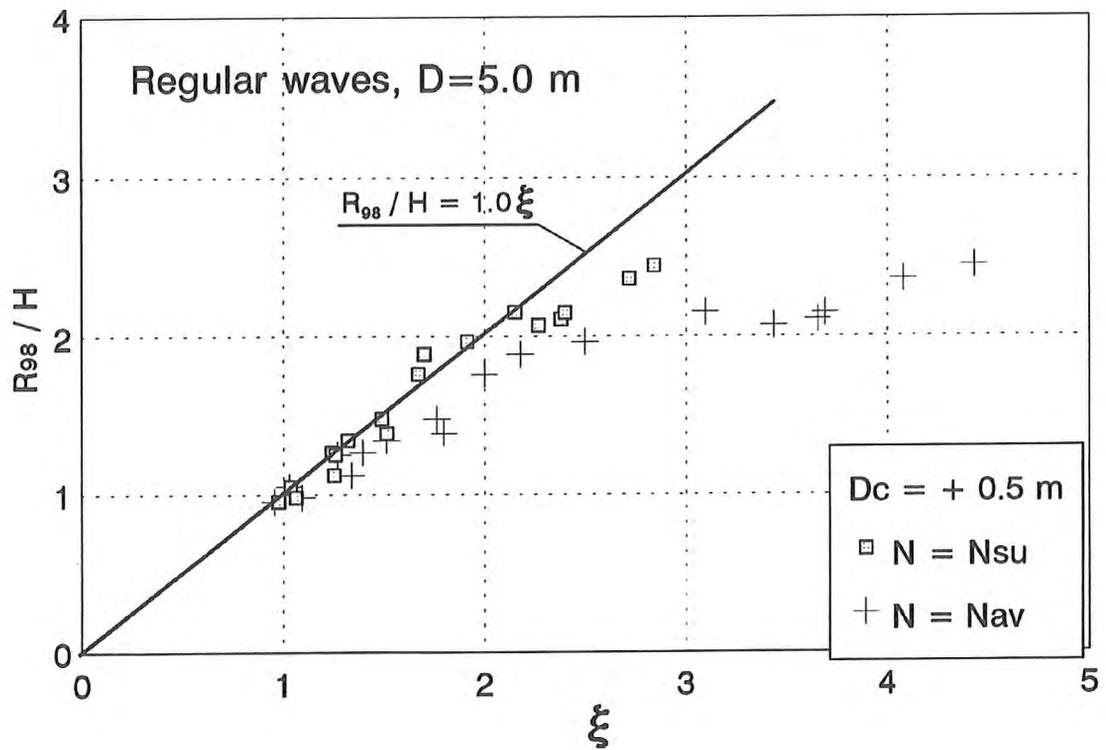


Abb. 56 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ
für Tests mit regelmäßigen Wellen

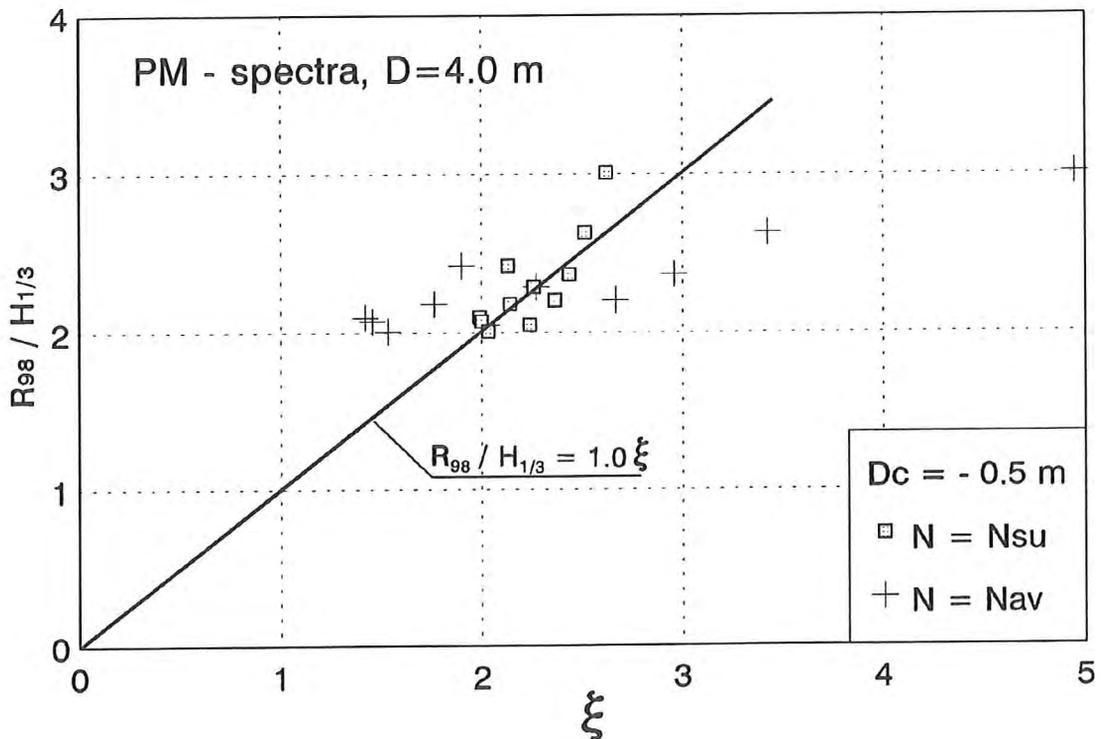
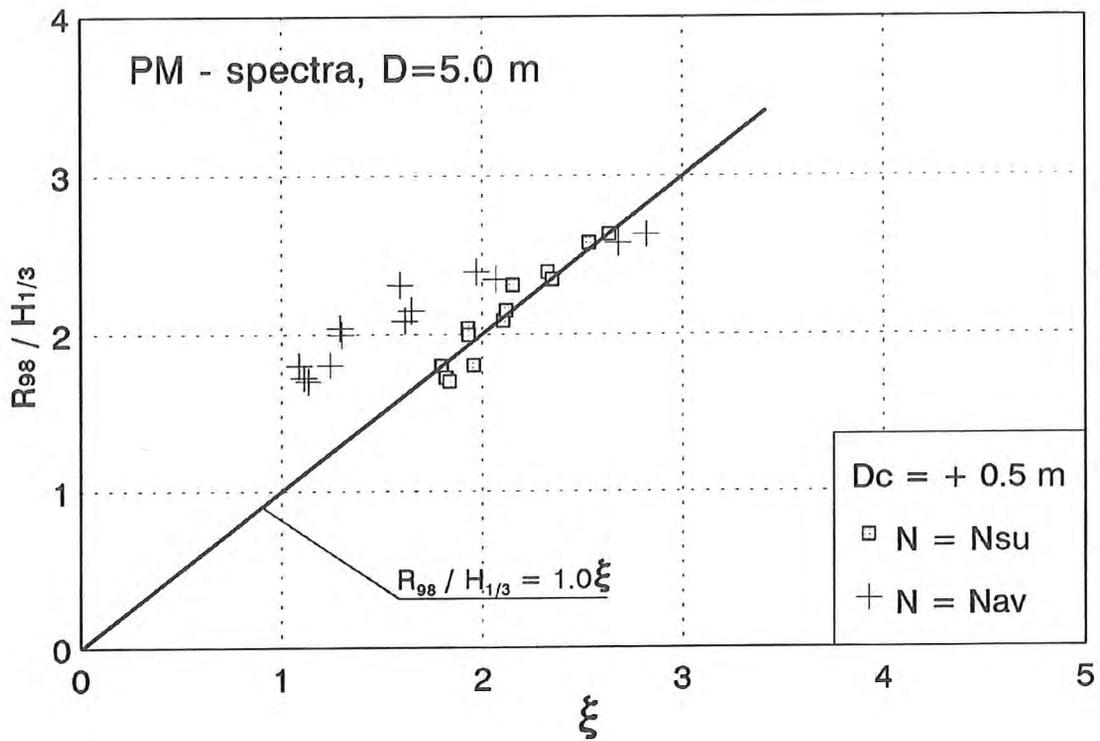


Abb. 57 R_{98} / H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ
für Tests mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren)

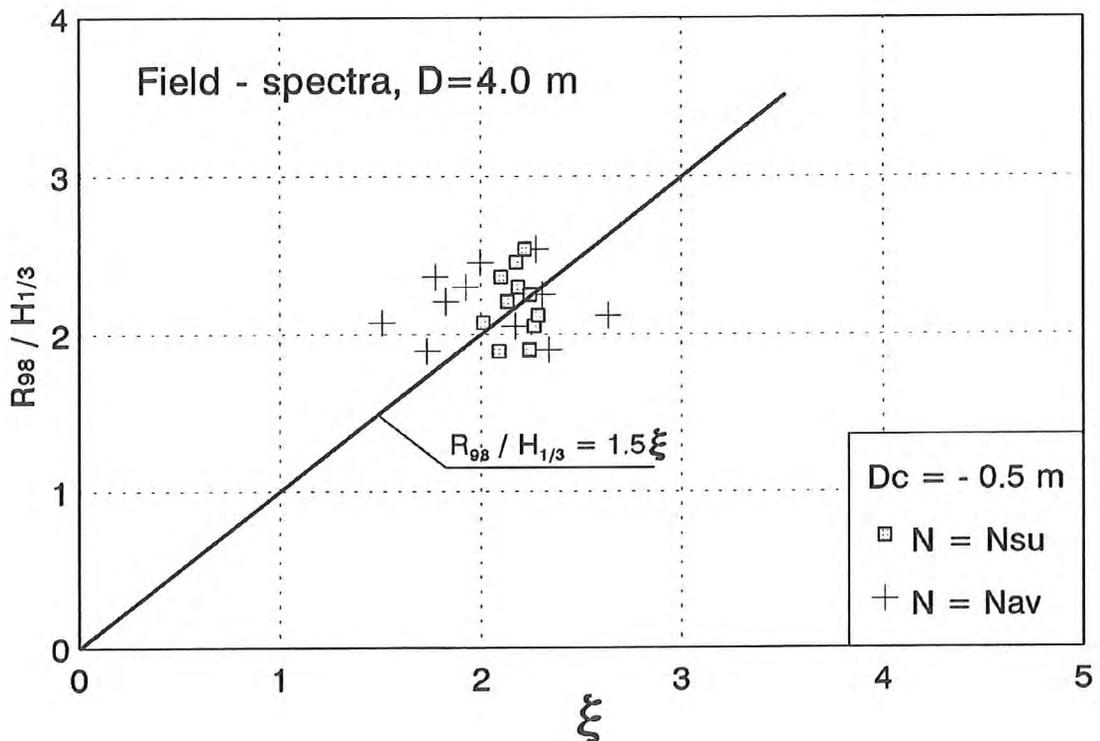
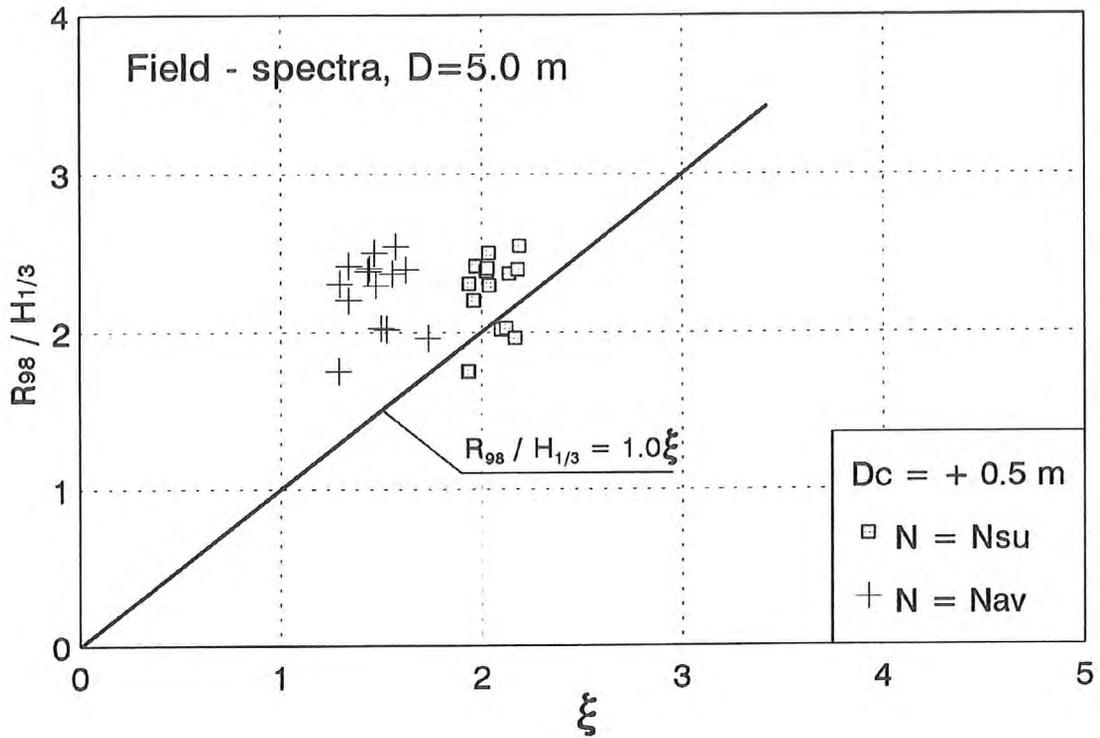


Abb. 58 R_{98} / H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ
 für Tests mit unregelmäßigen Wellen (Natur - Spektren)

7.3.3 Untersuchungen an Deichen mit Bermen

Der Einfluss von Bermen auf den Wellenauflauf wurde bereits von HUNT (1959) mit Ergebnissen aus Modelluntersuchungen aufgezeigt. Spätere Veröffentlichungen haben die Reduzierung des Aufbaus durch Bermen bestätigt. Wegen der Vielzahl der möglichen Kombinationen der geometrischen Komponenten von Bermen waren alle bisherigen Ansätze zur Berechnung der Aufbaureduzierung für die Anwendung in der Praxis oft nur begrenzt anwendbar. Auch der Einfluss des Brechverhaltens der Wellen an der Bermenkrone kann bisher insbesondere wegen der Problematik der Übertragbarkeit kleinmaßstäblicher Untersuchungsergebnisse noch nicht genau beschrieben werden. Erste Ergebnisse aus den Untersuchungen mit Bermen im GWK wurden von WANG & GRÜNE (1995) mitgeteilt und mit Ergebnissen aus Messungen in der Natur verglichen. Einige wesentliche Ergebnisse daraus sollen im Folgenden wiedergegeben werden.

Für die Darstellung der Ergebnisse aus den Untersuchungen im GWK wurde der Ansatz von d. WAAL & v. d. MEER (1992) verwendet und modifiziert. Der Originalansatz in Abhängigkeit vom Brecherindex lautet wie folgt:

$$R_{98} / H_{1/3} = C_{\xi} * \xi_{eq} \quad \text{mit} \quad \xi_{eq} = \gamma_b * \xi$$

der Faktor γ_b für eine Berme ist darin wie folgt definiert:

$$\gamma_b = 1 - r_B (1 - r_{dB}) , \quad 0.6 \leq \gamma_b \leq 1.0$$

mit:

$$r_B = \frac{B/H_{1/3}}{2 \cot \alpha + B/H_{1/3}} \quad \text{und} \quad r_{dB} = 0,5 * \left(\frac{dB}{H_{1/3}} \right)^2$$

Darin sind B die Breite der Berme, dB die Wassertiefe über der Berme und α der mittlere Neigungswinkel ohne Berme. Der Faktor r_{dB} ist begrenzt auf den Bereich $0 \leq r_{dB} \leq 1.0$.

Die Definitionen für diesen Ansatz sind in Abb. 59 enthalten. Verschiedene Tests zur Auswertung haben gezeigt, dass die Ergebnisse mit einer Modifikation des Faktors r_{dB} besser korrelieren:

- für regelmäßige Wellen:

mit $r_{dB} = 0.45 \text{ dB/H}$ an Stelle von $r_{dB} = 0.5 \text{ (dB/H)}^2$

- für unregelmäßige Wellen:

mit $r_{dB} = 0.50 \text{ dB/H}_{1/3}$ an Stelle von $r_{dB} = 0.5 \text{ (dB/H}_{1/3})^2$

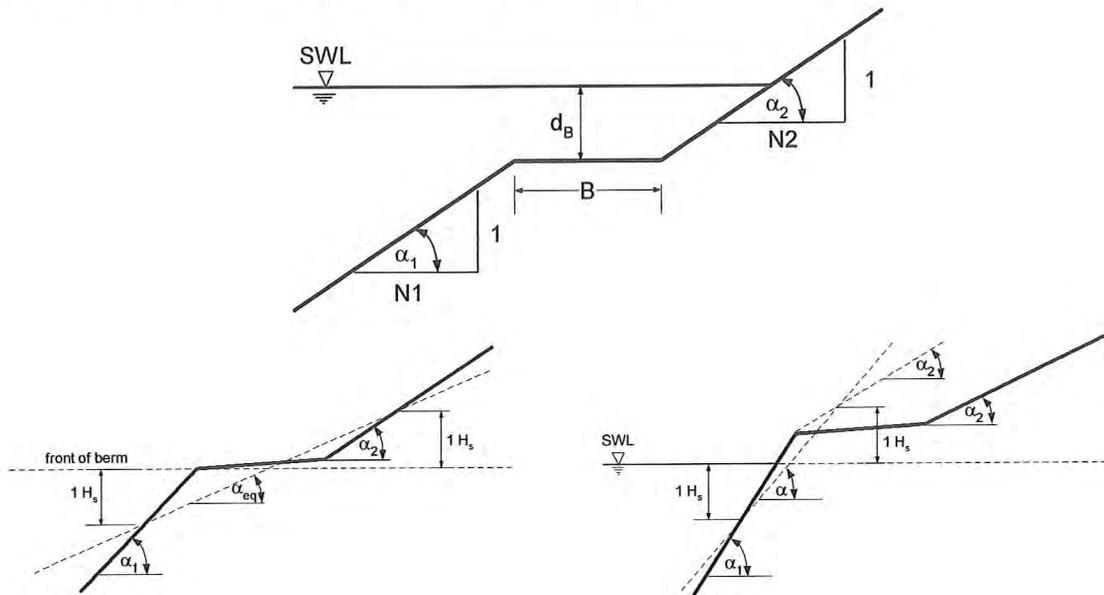


Abb. 59 Definitionen für die Berechnung der Wellenaufreduzierung durch Bermen

Diese Modifikation bedeutet in geometrischer Hinsicht, dass die Wellenaufreduzierung in einem von $1.5 H_{1/3}$ auf $2.0 H_{1/3}$ oberhalb des Ruhewasserspiegels erweiterten Bereich stattfindet.

In Abb. 60 werden die Ergebnisse für die Testreihen mit regelmäßigen Wellen dargestellt und verglichen. Die gemessenen Daten im oberen Teil sind alle auf den mit dem Neigungsansatz $N = 6$ ohne Berücksichtigung der Berme berechneten Brecherindex ξ bezogen. Die Brecherkennzahlen ξ_{eq} für die im unteren Teil der Abbildung dargestellten Messdaten wurden dagegen mit dem vorstehend beschriebenen modifizierten Ansatz berechnet (für die Daten ohne Berme ist ξ_{eq} gleich ξ ($\gamma_b = 1.0$)). Die Übereinstimmungen der Werte mit und ohne Berme sind recht gut, wenn auch die Werte mit Berme tendenziell für den Wasserstand $D = 5 \text{ m}$ etwas höher und für den Wasserstand $D = 4 \text{ m}$ etwas niedriger sind.

Die Ergebnisse für die Testreihen mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren) sind in Abb. 61 enthalten. Die Brecherkennzahlen sind auf die mittlere Periode T_m des Zeitbereichs und auf den

Neigungswinkel ξ_{eq} bezogen (für die Daten ohne Berme ist ξ_{eq} gleich ξ ($\gamma_b = 1.0$)). Die Übereinstimmung der Daten für die drei Testreihen untereinander ist recht gut.

Eine etwas weniger gute Übereinstimmung ergibt sich für die Daten aus den Testreihen mit den aus Natur - Spektren generierten unregelmäßigen Wellen, die in Abb. 62 dargestellt sind. Die Streuung der Daten ist etwas größer und der Bereich der Brecherkennzahlen ist kleiner, verglichen mit den Verhältnissen bei PM - Spektren, dies tritt jedoch bei Natur - Spektren häufig auf, ebenso wie bei Daten aus Messungen aus der Natur.

Bei den Vergleichen mit Ergebnissen aus Messungen in der Natur konnte aufgezeigt werden, dass neben den Abmessungen auch die Form der Berme einen Einfluss auf die Reduzierung des Wellenaufbaus hat. Es ergaben sich beträchtliche Unterschiede zwischen Bermenkronen mit nach außen und nach innen geneigten Kronenböschungen. Insgesamt muss festgestellt werden, dass für viele in der Praxis vorkommenden Bermenformen eine Berechnung der Reduzierung des Wellenaufbaus nur unbefriedigend vorgenommen werden kann und daher noch Forschungsbedarf besteht.

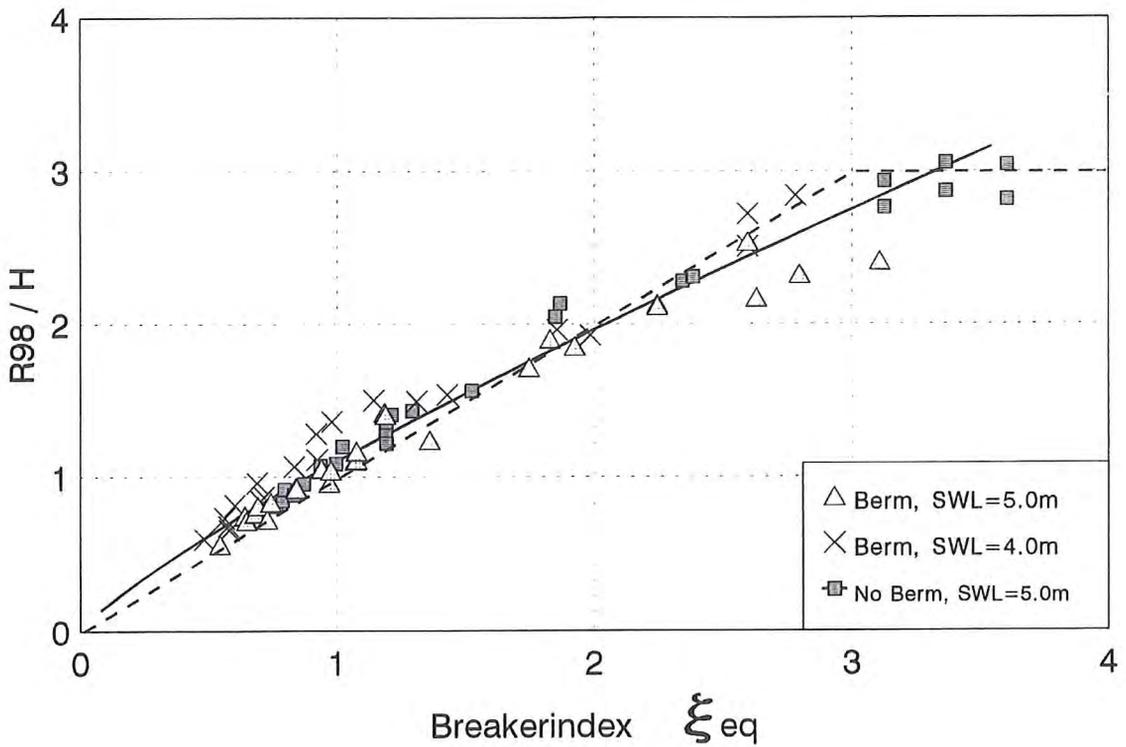
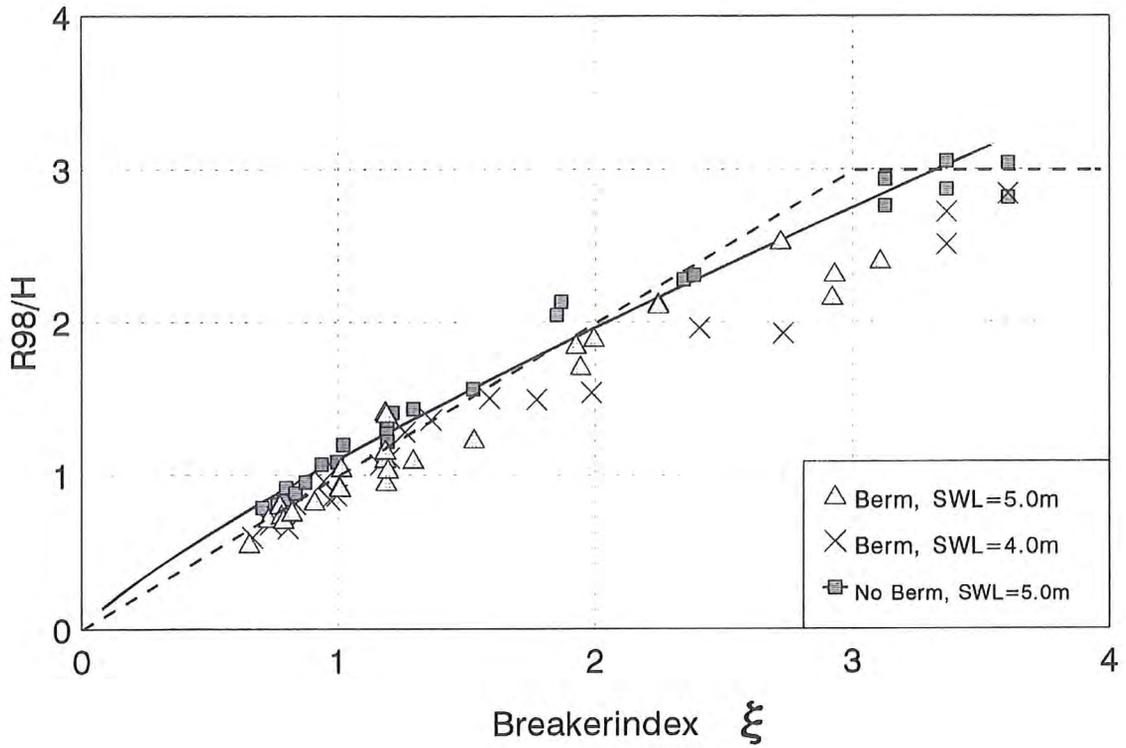


Abb. 60 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ (obere Darstellung)

bzw. vom Brecherindex ξ_{eq} (untere Darstellung)

für Tests im GWK mit und ohne Berme und mit regelmäßigen Wellen

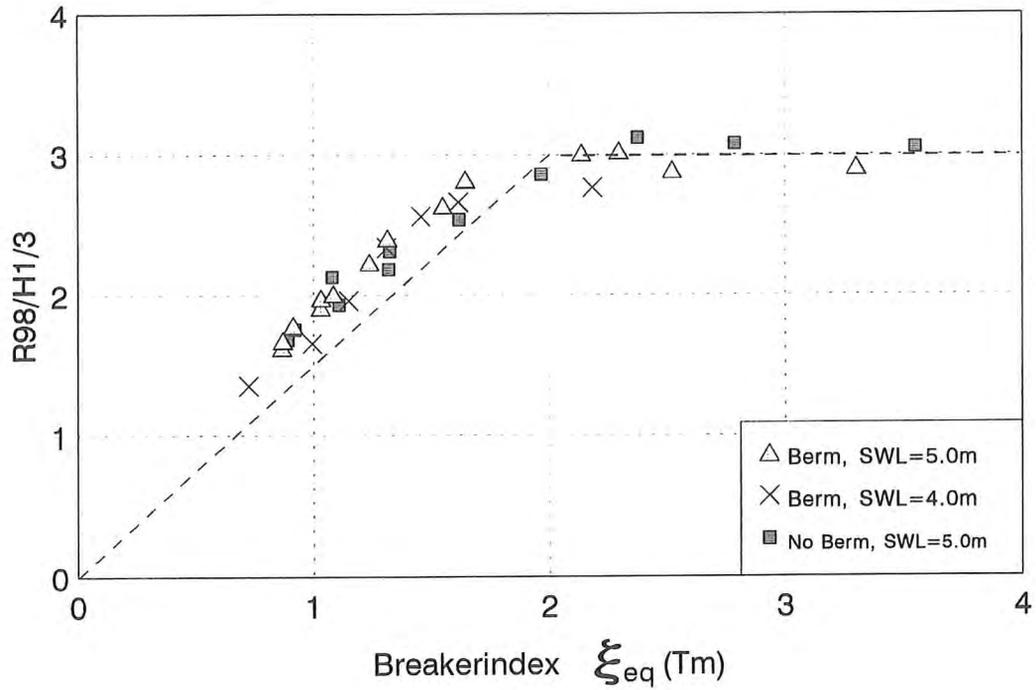


Abb. 61 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ_{eq} für Tests im GWK mit und ohne Berme und mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren)

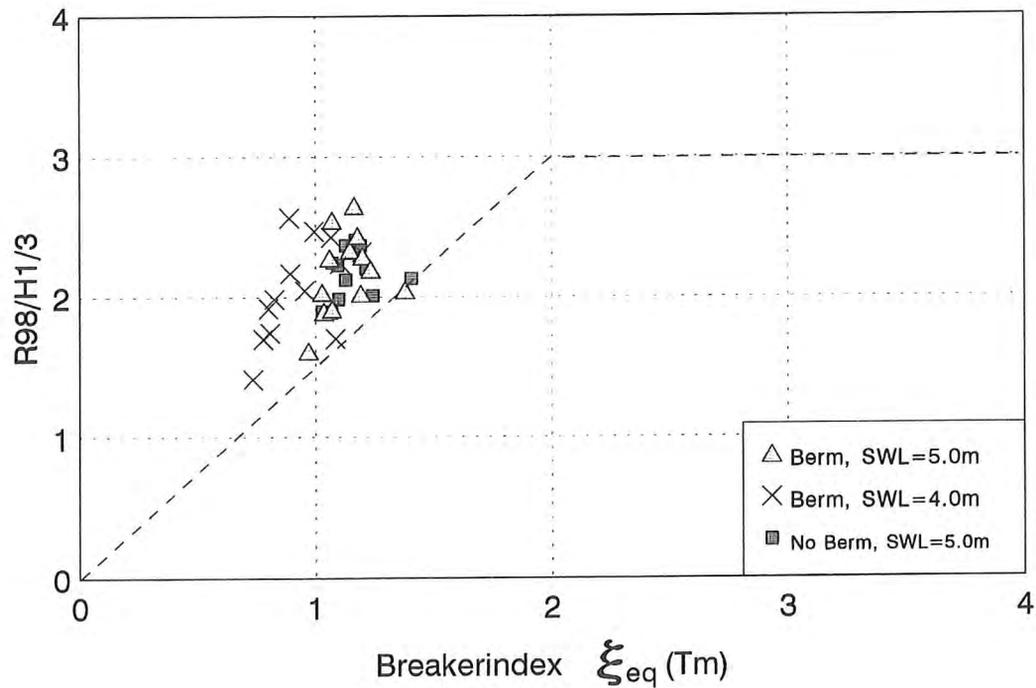


Abb. 62 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ_{eq} für Tests im GWK mit und ohne Berme und mit unregelmäßigen Wellen (Natur - Spektren)

7.3.4 Untersuchungen an Deichen mit Vorland

Über die Wirkung eines Vorlandes auf den Seegang und den Wellenauflauf am Deich sind bisher, wenn überhaupt, nur sehr wenige völlig unbefriedigende Kenntnisse vorhanden und meist bestehen die Fachkenntnisse nur aus unabgesicherten Vermutungen oder theoretischen Berechnungen. Dies erstaunt um so mehr, als bei Sturmfluten die seegangsdämpfende Wirkung von Vorländern optisch oft eindrucksvoll erkennbar ist. Es muss allerdings eingeschränkt werden, dass mit steigendem Wasserstand eine zunehmende Verringerung der Dämpfung zu erwarten ist und daher oft die Ansicht geäußert wird, dass bei den Bemessungswasserständen eine Dämpfung nicht mehr auftritt. Dies ist von der Tendenz her richtig, doch für realistische Sicherheitsanalysen der Küstenschutzbauwerke sind abgesicherte Daten aus großmaßstäblichen Tests oder aus Messungen in der Natur wünschenswert.

Ergebnisse aus Untersuchungen im GWK mit einem etwa 90 m langen Vorland an einer gleichförmig 1 : 6 geneigten Deichaußenböschung (Abb. 11) hinsichtlich der Wellendämpfung auf dem Vorland werden in Abschnitt 7.5 dargestellt. In diesem Abschnitt werden nur die Ergebnisse für den Wellenauflauf an der Deichaußenböschung behandelt.

In Abb. 63 sind die Werte für den Auflaufparameter R_{98} / H_0 in Abhängigkeit vom Brecherindex aus den Tests mit regelmäßigen Wellen aufgetragen, wobei der Brecherindex auf die Wellenparameter vor dem Vorland bezogen sind. Nur im Bereich bis $\xi < 1,5$ stimmen die Daten tendenziell mit dem Verlauf des HUNT - Ansatzes überein, bei größeren Brecherkennzahlen treten starke Streuungen auf. Die Auflaufdaten und der Brecherindex in Abb. 64 sind im Gegensatz zu denen in Abb. 63 auf die Wellenparameter auf dem Vorland bezogen. Die Daten zeigen eine befriedigende Übereinstimmung mit dem Verlauf des HUNT - Ansatzes bis zum konstanten Größtwert von $R_{98} / H_v = 2,0$.

Die Ergebnisse der Tests mit unregelmäßigen Wellen (PM - Spektren) sind in den Abb. 65 und Abb. 66 enthalten. Die Daten und die Brecherkennzahlen in Abb. 65 sind ebenso wie in Abb. 63 auf die Wellenparameter vor dem Vorland bezogen, diejenigen in Abb. 66 auf die Wellenparameter auf dem Vorland.

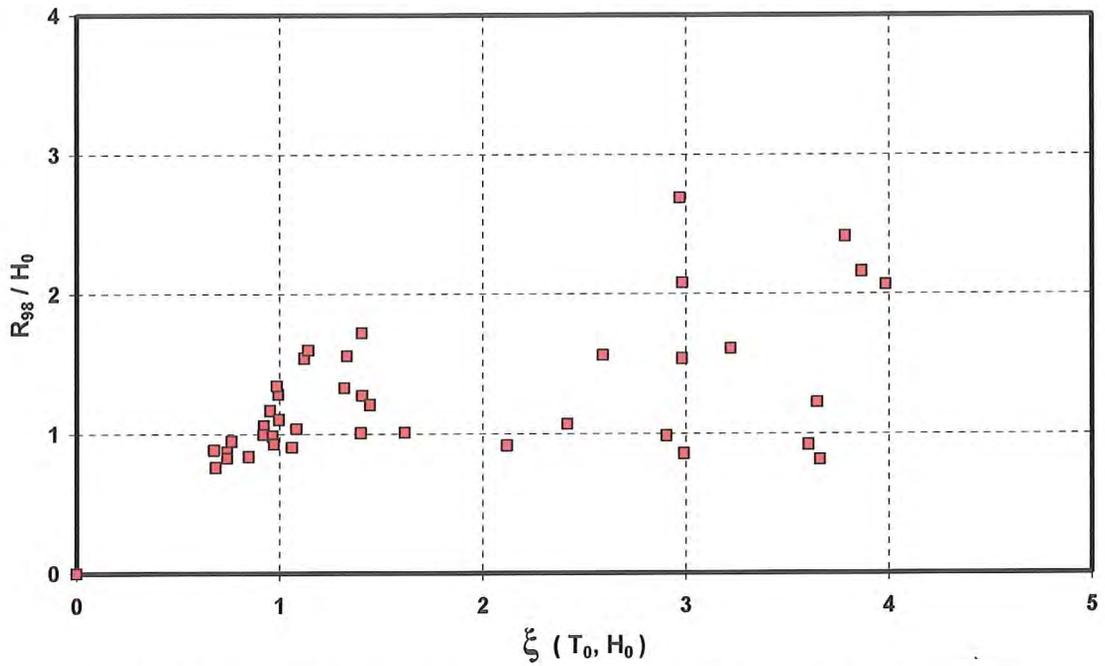


Abb. 63 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ aus den Tests im GWK mit regelmäßigen Wellen, bezogen auf die Wellenparameter vor dem Vorland

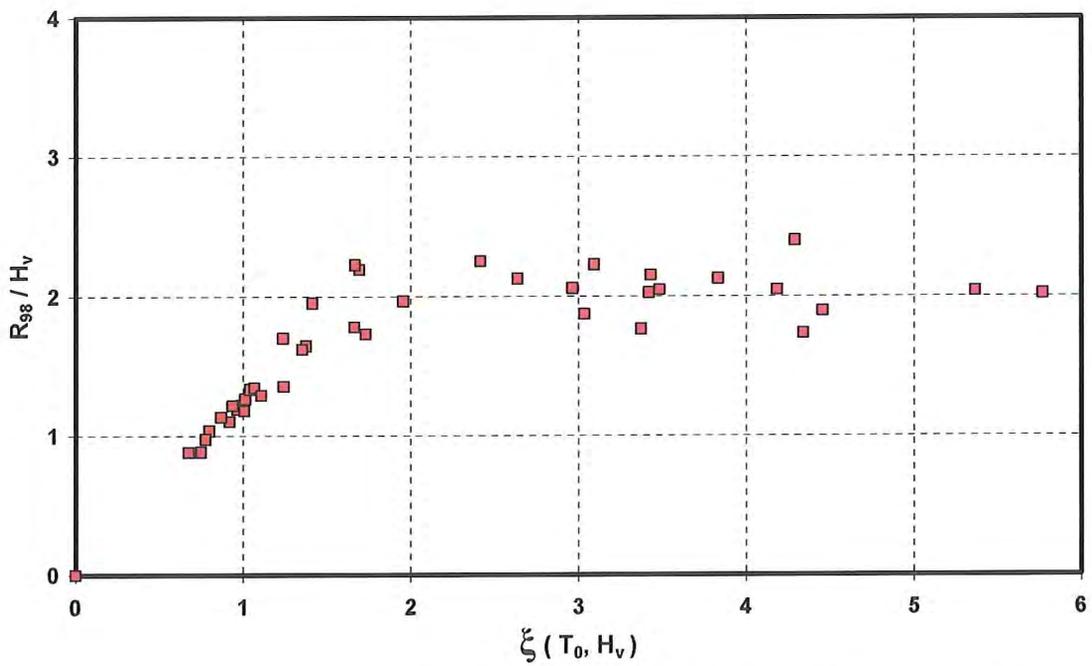


Abb. 64 R_{98}/H in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ aus den Tests im GWK mit regelmäßigen Wellen, bezogen auf die Wellenparameter auf dem Vorland

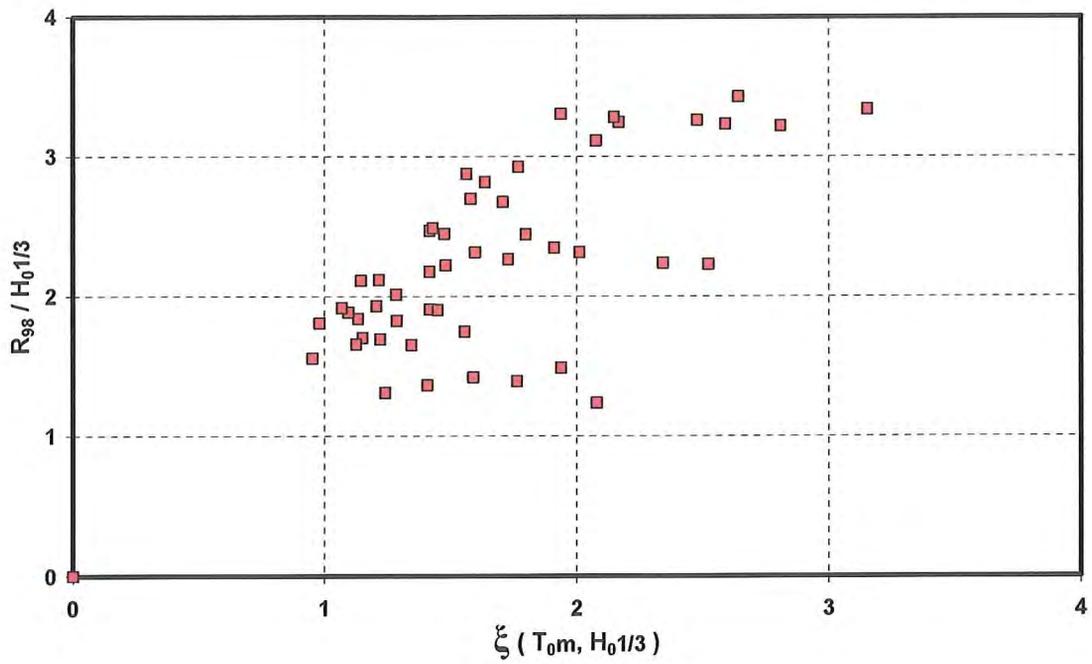


Abb. 65 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ aus den Tests im GWK mit unregelmäßigen Wellen, bezogen auf die Wellenparameter vor dem Vorland

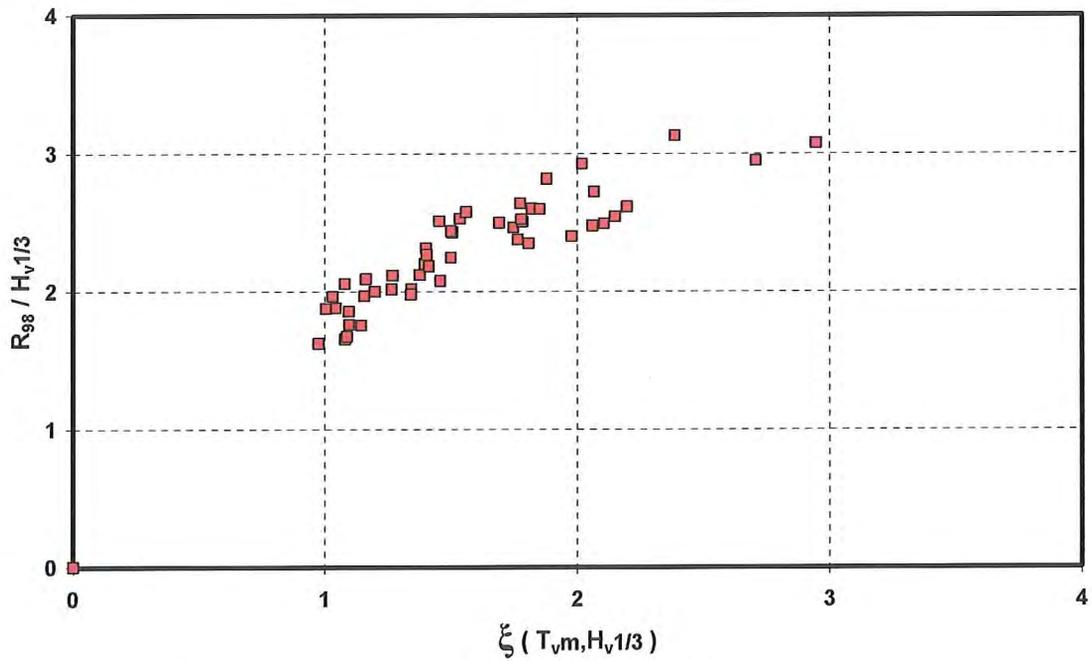


Abb. 66 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ aus den Tests im GWK mit unregelmäßigen Wellen, bezogen auf die Wellenparameter auf dem Vorland

Wie für die Ergebnisse mit den regelmäßigen Wellen streuen die auf die Wellenparameter vor dem Vorland bezogenen Daten stark, während die auf die Vorlandparameter bezogenen Daten gut mit dem HUNT - Ansatz übereinstimmen. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich, was auch erwartet werden konnte, dass der Wellenaufbau an Deichen mit Vorland mit dem HUNT - Ansatz genauso wie für Deiche ohne Vorland berechnet werden kann, wenn die Werte für die Wellenparameter auf dem Vorland verwendet werden.

7.4 Ergebnisse aus Untersuchungen in der Natur

Erste Ergebnisse zum Wellenaufbau aus den Untersuchungen mit den in Abschnitt 4 beschriebenen Messketten in der Natur wurden von GRÜNE (1996) veröffentlicht. Diese Ergebnisse sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Die an den verschiedenen Messorten gemessenen maximalen Wellenauf- ($R_{u_{max}}$) und abläufe ($R_{d_{max}}$) sind in Abb. 67 enthalten, wobei diese Werte auf den jeweiligen zugehörigen Ruhewasserspiegel SWL aufaddiert und in Abhängigkeit dieses Ruhewasserspiegels SWL dargestellt sind. Die durchgezogenen Linien entsprechen dem Ruhewasserspiegel. Auffällig werden damit die bereichsweise hohen Werte für die Wellenabläufe $R_{d_{max}}$ infolge der bereichsweise sehr flachen Böschungsneigungen, worauf bereits in Abschnitt 6 eingegangen wurde.

In Abb. 68 sind die Wellenauf- und abläufe R_{98u} und R_{98d} auf die signifikante Wellenhöhe $H_{1/3}$ bezogen und ebenfalls in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL aufgetragen. Auffällig sind die hohen Werte für R_{98d} für niedrige Wasserstände. Dies überrascht zunächst, allerdings ergeben sich dafür bei näherer Betrachtung einfache Gründe, auf die bereits in Abschnitt 6.1 eingegangen wurde.

Ähnliche auf den ersten Blick unerwartete Ergebnisse ergeben sich aus den Darstellungen der Verhältnisse zwischen der mittleren Wellenperiode T_{Hm} und der mittleren Auflaufperiode T_{Rm} , die in Abb. 69 in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL aufgetragen sind. Dieses Verhältnis kann auch als Verhältnis der Anzahl der Wellenaufläufe zur Anzahl der Wellen betrachtet werden.

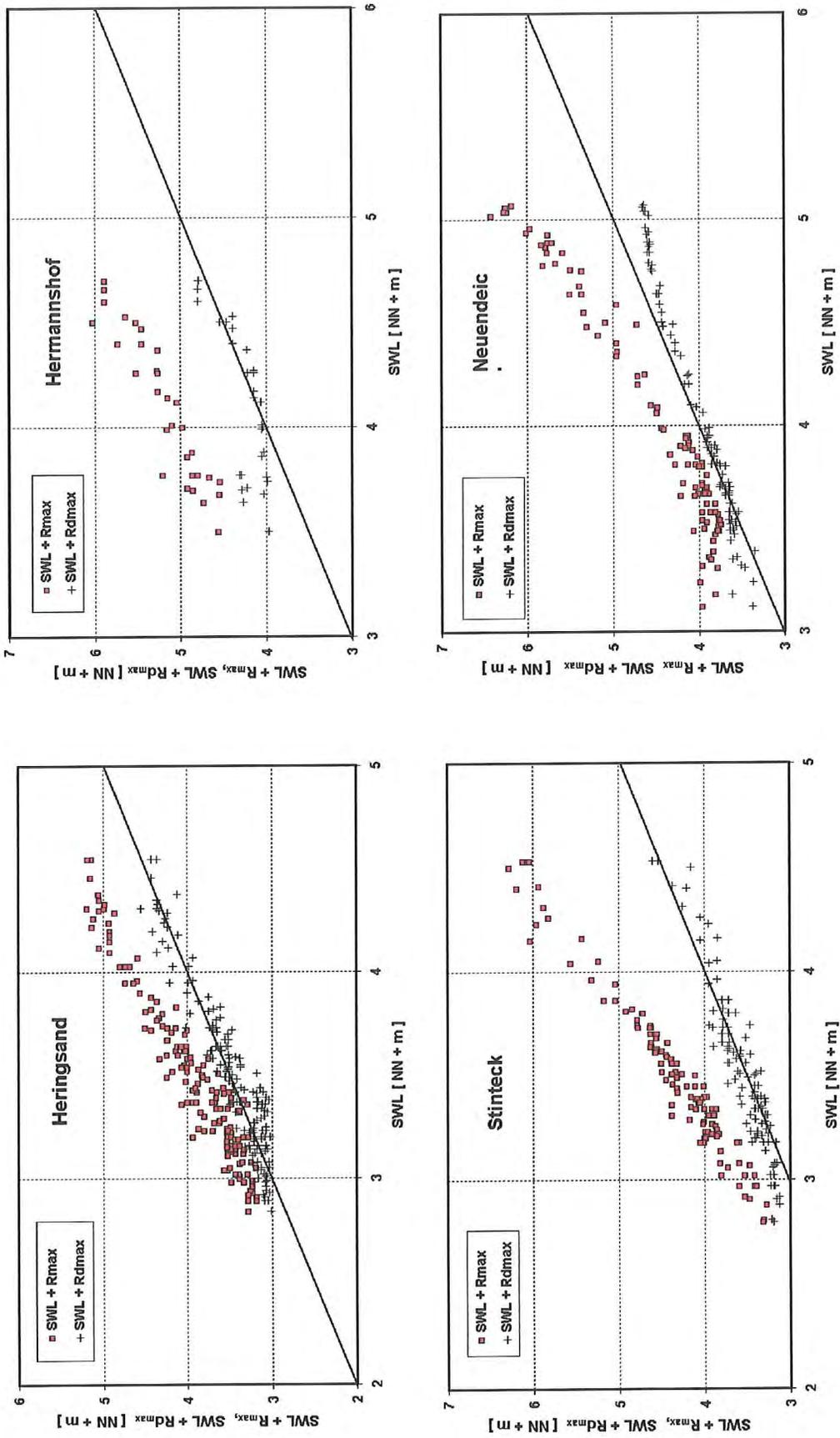


Abb. 67 Maximale Wellenaufläufe R_{max} in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL

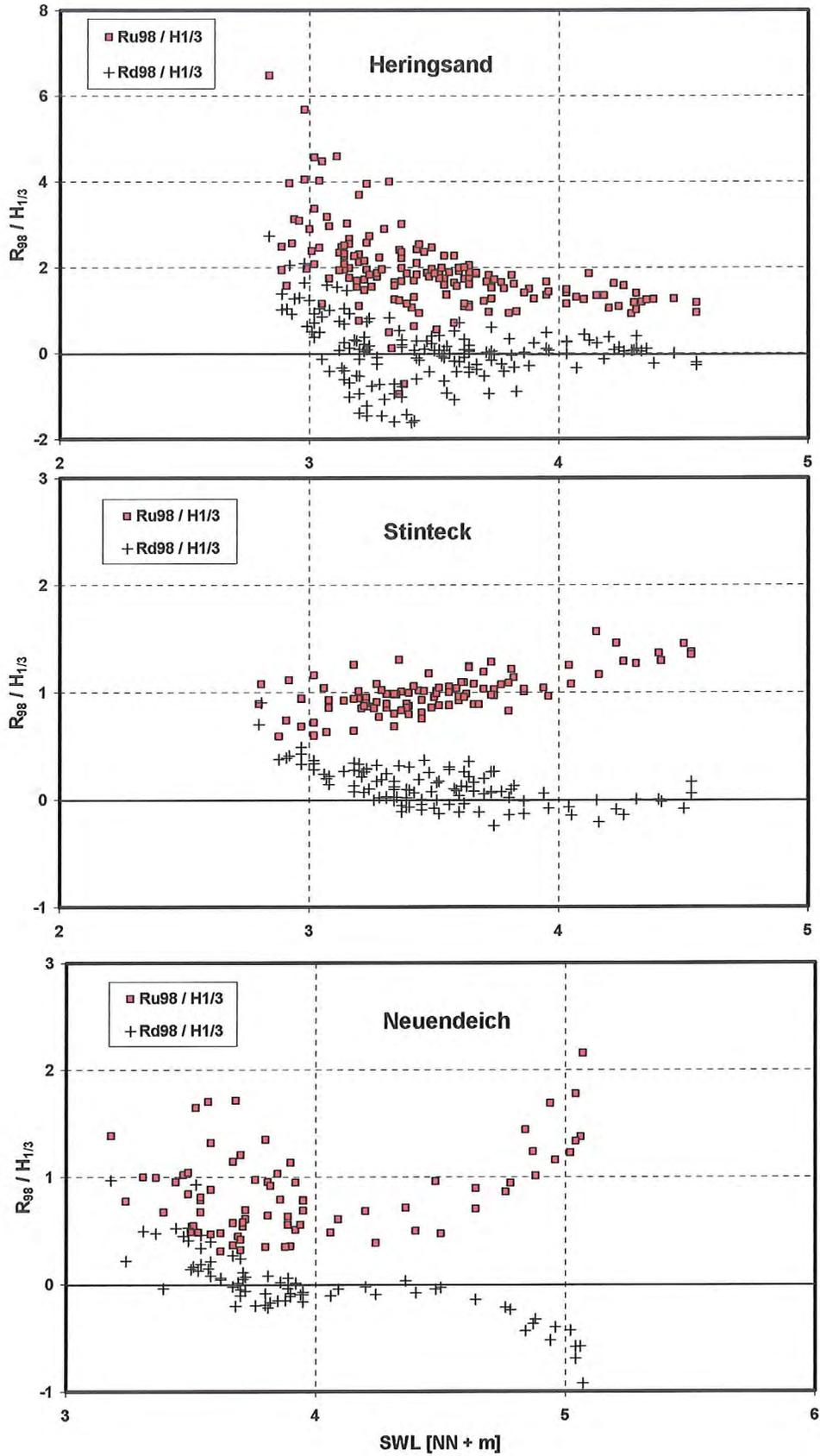


Abb. 68 Relative Wellenaufläufe $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL

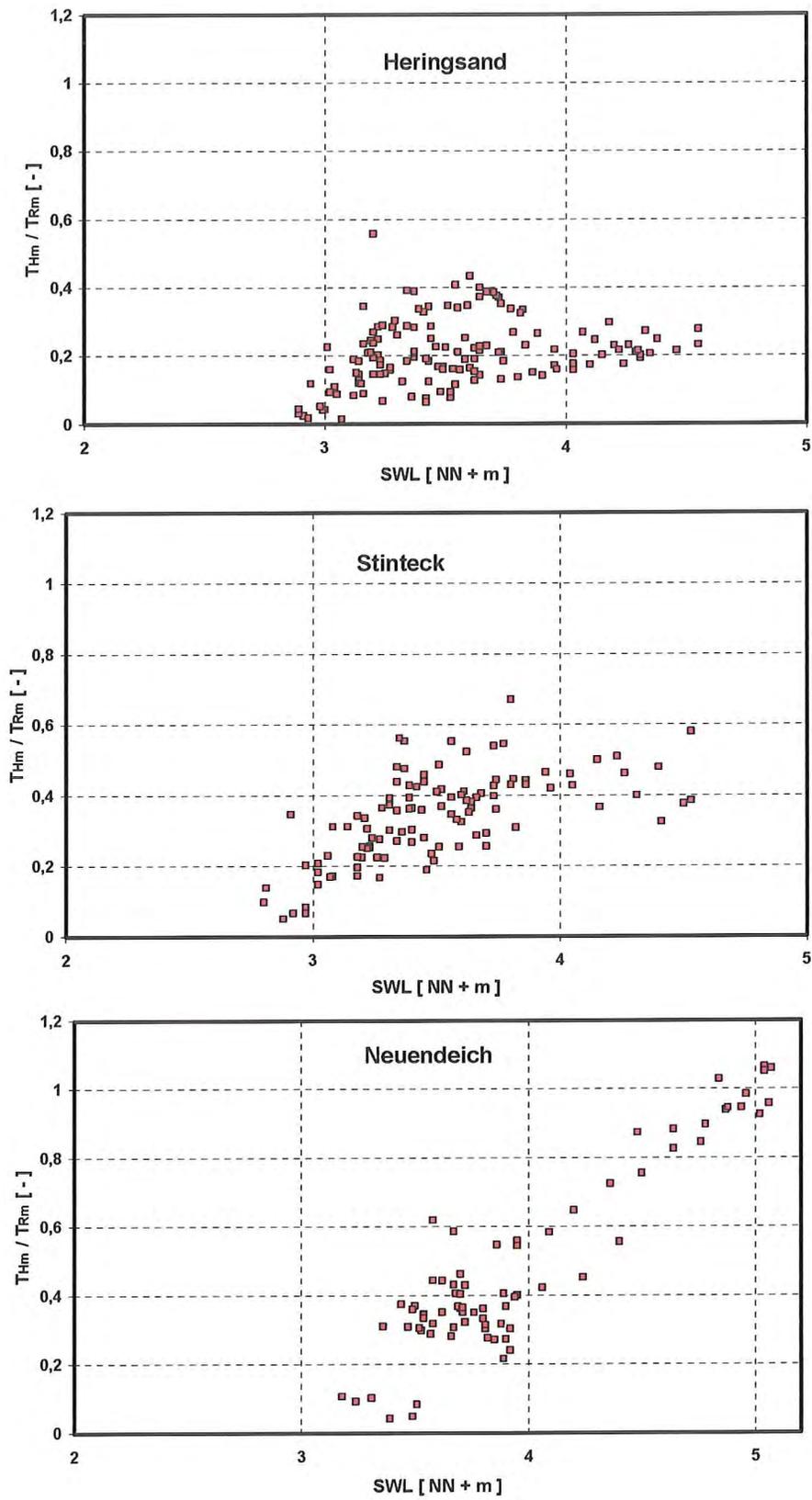


Abb. 69 T_{HM} / T_{RM} in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL

Während an der Messkette Heringsand bei einem Ruhewasserspiegel oberhalb von NN + 4,0 m nur etwa 20 % der Wellen einen Wellenauflauf erzeugen, beträgt dieser Anteil an der Messkette Stinteck etwa 40 % und an der Messkette Neuendeich etwa 50 bis 100 %.

Auch die in Abb. 70 dargestellten Ergebnisse für die relativen Wellenauf- und abläufe $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit des Brecherindex ξ zeigen im Vergleich zu entsprechenden Darstellungen von Daten für gleichförmige Böschungsneigungen unerwartete Trends, die zunächst nicht erklärbar erscheinen. Aber alle diese Trends haben ihre einfachen Erklärungen durch die geometrischen Randbedingungen an den verschiedenen Messketten, die sich meist zusätzlich in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL ändern.

So konnten beispielsweise die hohen Werte für $R_{98} / H_{1/3}$ an der Messkette Heringsand (Abb. 68) durch die dort auftretenden langperiodischen Schwebungen des Ruhewasserspiegels erklärt werden, die sich im Bereich kleiner Wellen mit Wellenhöhen bis zu etwa 0,3 m besonders stark auswirken.

Ein weiteres Beispiel sind die Ergebnisse der Messkette Neuendeich. In Abb. 68 und in Abb. 70 können zwei Gruppen von Daten unterschieden werden, jede jeweils mit einem mehr oder weniger ausgeprägtem Trend. In Abb. 71 sind für diese Daten die relativen auf die signifikanten Wellenhöhen $H_{1/3}$ bezogenen Wassertiefen über der Berme $d_{BE} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL (links) und Brecherindex ξ (rechts) aufgetragen. Im Vergleich mit den Auftragungen in Abb. 68 und Abb. 70 wird klar, dass von diesen beiden Datengruppen eine einen Wasserspiegel unterhalb und die andere einen Wasserspiegel oberhalb der Bermenkrone besitzt. Dies wird noch deutlicher in der Abb. 72, in der die relativen Wellenaufläufe $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit der relativen Wassertiefe $d_{BE} / H_{1/3}$ dargestellt sind. Diese Darstellung unterstreicht den bekannten Dämpfungseffekt von Bermen bei einem Ruhewasserspiegel in Höhe der Bermenkrone und bestätigt zusätzlich die Güte der gemessenen Daten eindrucksvoll. Die vorstehenden Beispiele erster Ergebnisse aus der Natur unterstreichen, dass die Analyse solcher Daten mit komplexen Deichformen und mit weiteren komplexen Randbedingungen sehr sorgfältig und seriös erfolgen muss, um alle Einzeleinflüsse einzeln erfassen und beschreiben zu können. Über die Ergebnisse dieser Analysen wird in späteren Veröffentlichungen berichtet.

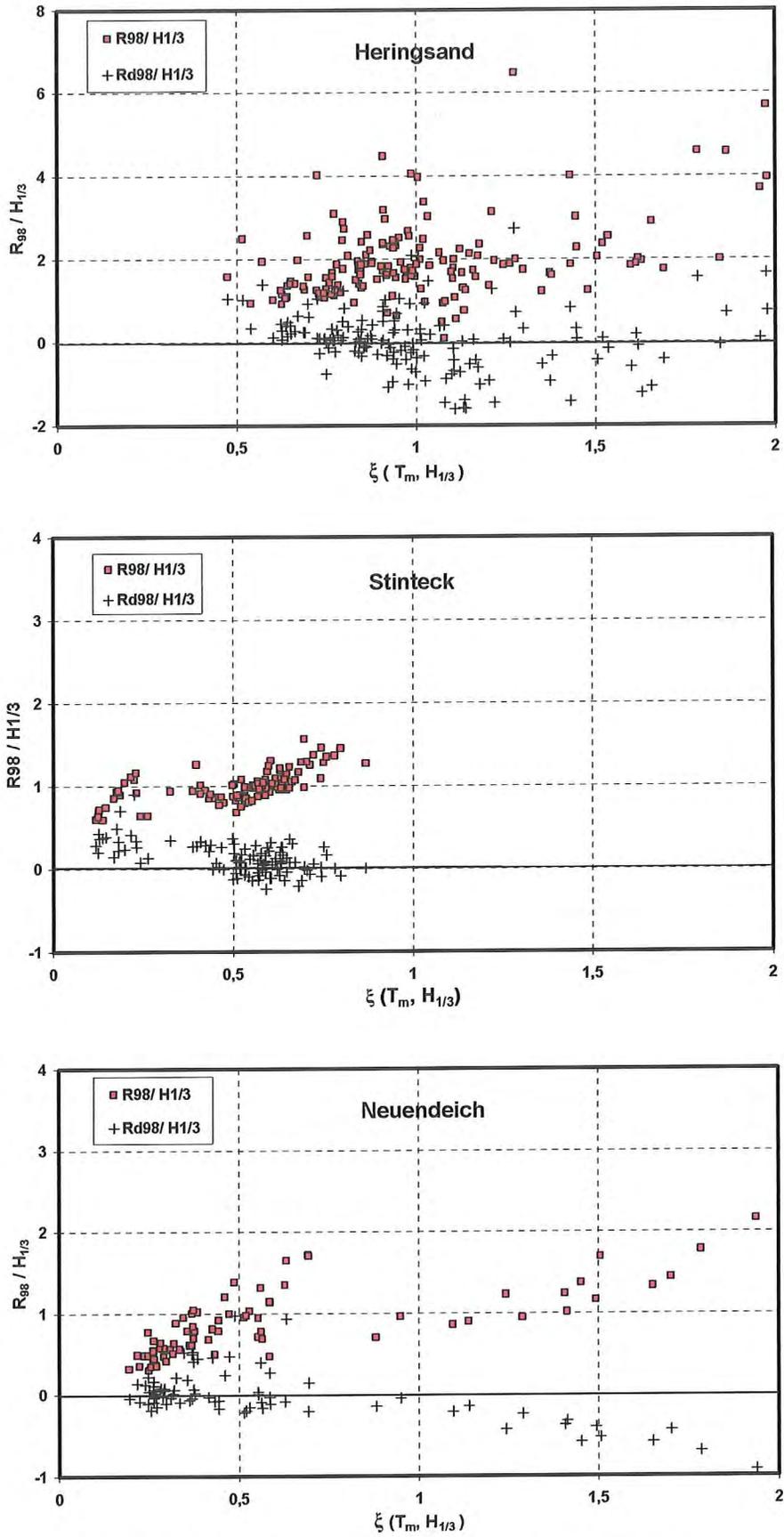


Abb. 70 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Brecherindex ξ

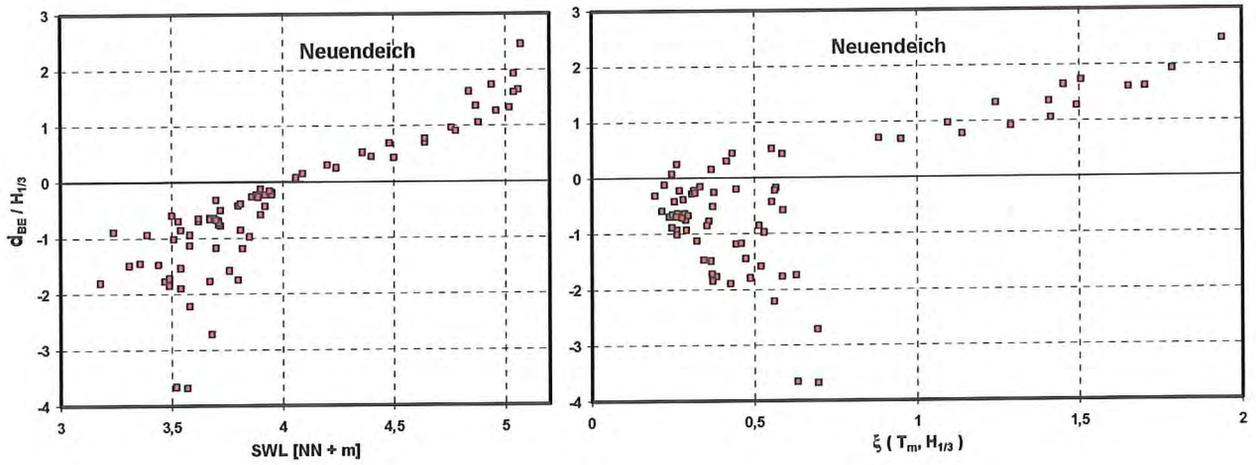


Abb. 71 $d_{BE} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL und Brecherindex ξ

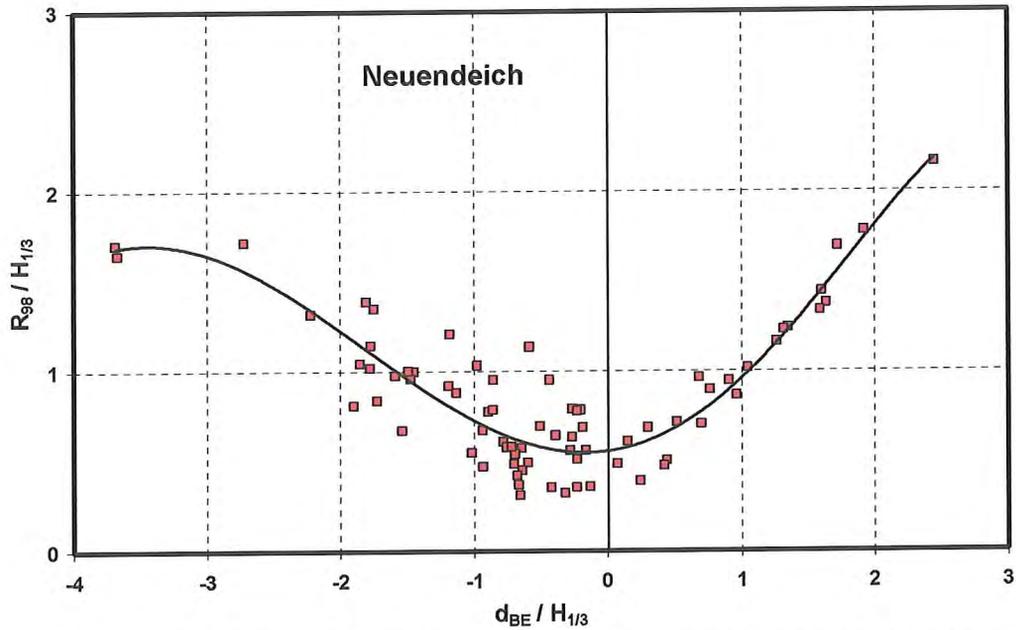


Abb. 72 $R_{98} / H_{1/3}$ in Abhängigkeit von der relativen Wassertiefe $d_{BE} / H_{1/3}$

7.5 Ergebnisse aus Untersuchungen zur seegangsdämpfenden Wirkung von Vorländern

Über den Einfluss von Vorländern auf die Reduzierung der Wellenhöhen und damit automatisch auf die Reduzierung des Wellenaufbaus wurde bereits in Abschnitt 7.3.4 hingewiesen und ausgeführt, dass die Reduzierung des Wellenaufbaus nur von der Änderung der Wellenparameter infolge des Vorlandes abhängt. Die Ergebnisse der Untersuchungen im GWK und in der Natur über die Änderung des Seegangs durch Vorländer haben WANG & GRÜNE (1997) zusammengefasst. Die wesentlichen Ergebnisse aus dieser Veröffentlichung sollen im Folgenden beschrieben werden.

Der Querschnitt durch das Vorland bei den Untersuchungen im GWK ist in Abschnitt 3.5 (Abb. 11) beschrieben und der Querschnitt durch das Küstenvorfeld und das Vorland an der Messkette Heringsand (Abb. 15) in Abschnitt 4.3. Einige Beispiele der im GWK bei unterschiedlichen Wasserständen vor und auf dem Vorland gemessenen Wellenhöhen aus Tests mit regelmäßigen Wellen sind in Abb. 73 dargestellt und aus Tests mit PM - Spektren in Abb. 74.

Deutlich erkennbar ist die Erhöhung der Werte im Übergangsbereich an der Vorlandkante. Eine wesentliche Dämpfung der Wellenhöhen wurde bei einem Wassertiefenverhältnis D_v / D_0 von mehr als 0,6 oder einem Wassertiefen - Wellenhöhenverhältnis D_v / H_0 von mehr als 1,6 nicht mehr gemessen. Die Daten der Tests mit regelmäßigen und mit unregelmäßigen Wellen stimmen tendenziell überein, die Dämpfung für regelmäßige Wellen ist etwas ausgeprägter.

In Abb. 75 sind die Wellenhöhenverhältnisse H_v / H_0 in Abhängigkeit von den Wassertiefenverhältnissen D_v / D_0 und in Abb. 76 in Abhängigkeit vom Wassertiefen-Wellenhöhenverhältnis D_v / H_0 aufgetragen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse für regelmäßige Wellen und unregelmäßigen Seegang ist in Abhängigkeit von D_v / H_0 deutlich besser. Bis zu einem Wert für $D_v / H_0 = 2$ tritt für beide Wellenarten eine linear abnehmende Dämpfung der Wellenhöhen auf. Zwischen Werten für D_v / H_0 von 2 bis 3 ergibt sich dann eine Erhöhung von bis zu 30 % und oberhalb $D_v / H_0 > 3$ ist kein Einfluss mehr erkennbar.

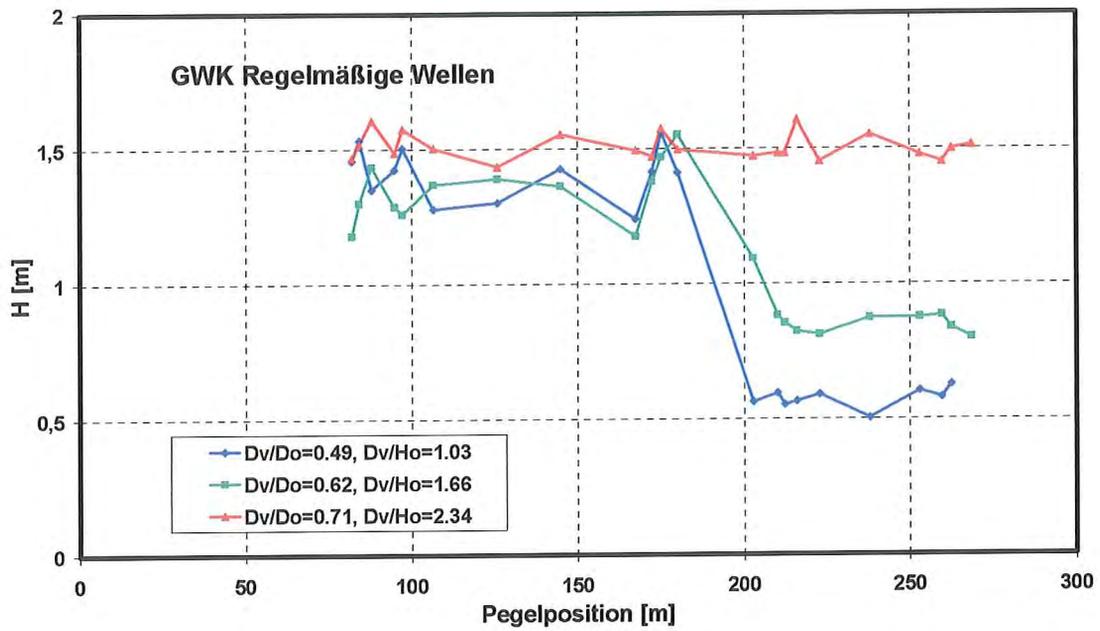


Abb. 73 Verteilung der entlang des GWK gemessenen Wellenhöhen H für einen Versuch mit regelmäßigen Wellen

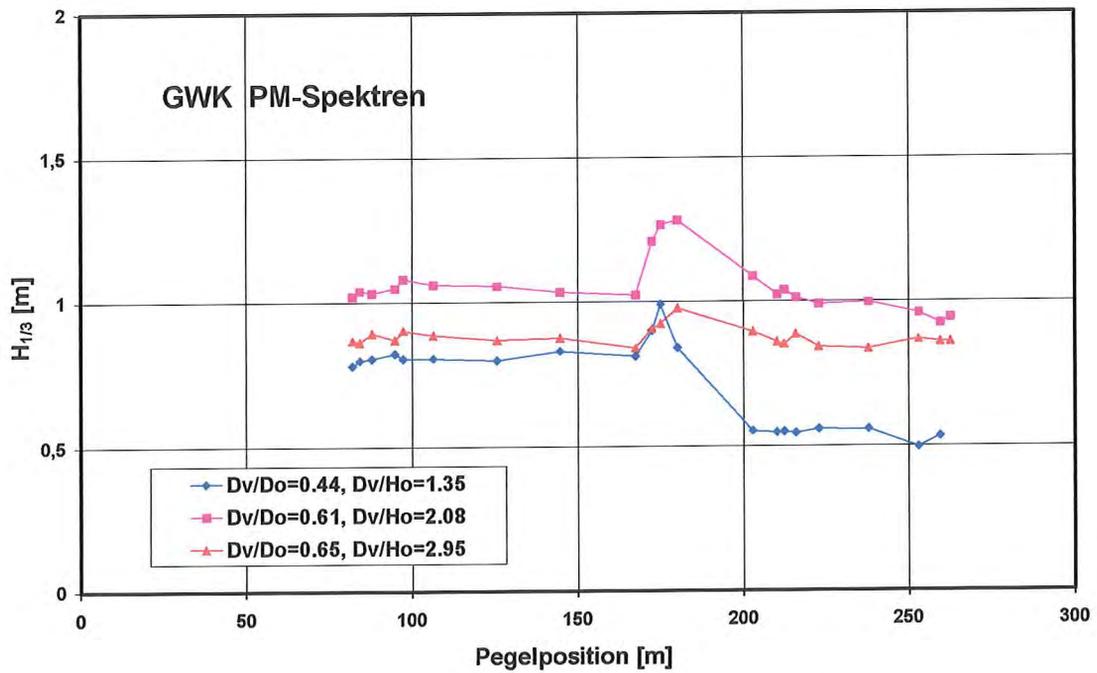


Abb. 74 Verteilung der entlang des GWK gemessenen Wellenhöhen $H_{1/3}$ für einen Versuch mit unregelmäßigen Wellen

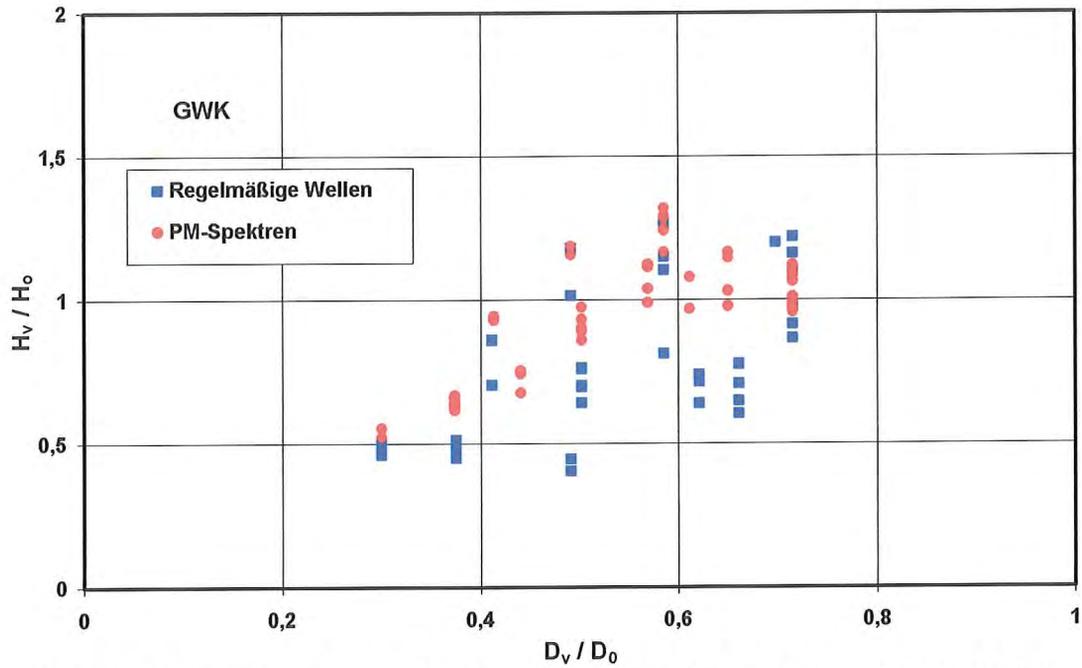


Abb. 75 Wellenhöhen H_v / H_0 in Abhängigkeit vom Wassertiefenverhältnis D_v / D_0

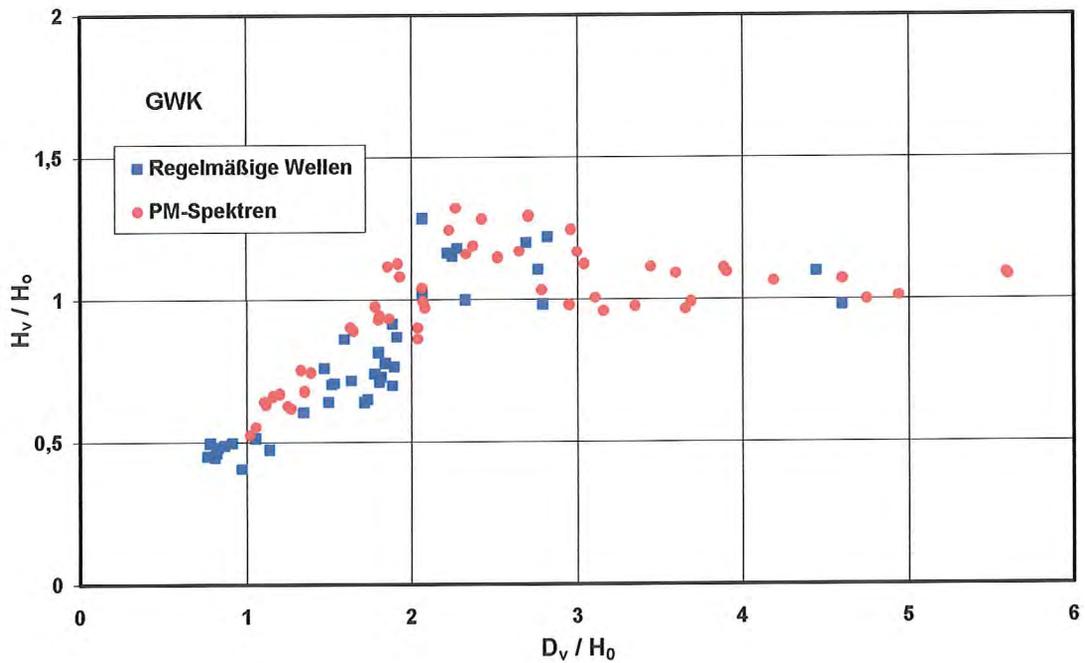


Abb. 76 Wellenhöhen H_v / H_0 in Abhängigkeit vom Verhältnis D_v / H_0

In den nächsten Abbildungen werden einige Ergebnisse aus den Untersuchungen in der Natur dargestellt. In Abb. 77 sind die Verhältnisse der Wellenhöhen an den verschiedenen Stationen vor (W1) und auf dem Vorland (W2 und W3) in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel SWL aufgetragen.

Für die Station W2, die hinter der Vorlandkante liegt, zeigt der Trend des Wellenhöhenverhältnisses etwa gleiche Werte wie für W1, wenn der Ruhewasserspiegel etwa NN + 5,0 m übersteigt. Anders dagegen zeigt der entsprechende Trend für das Verhältnis W3 / W1, dass bei diesem Wasserspiegel an der Station W3 noch eine Dämpfung der Wellenhöhen von etwa 40% erreicht wird.

Die entsprechenden Verhältnisse für die mittlere Wellenperiode T_m sind in Abb. 78 aufgetragen und zeigen verglichen mit denen der Wellenhöhen ganz andere Trends. Während die Perioden an der Station W2 in etwa gleich bleiben, verglichen mit denjenigen an der Station W1, ändern die Perioden an der Station W3 ihre relative Größenordnung in Abhängigkeit vom Ruhewasserspiegel beträchtlich. Mit steigendem Ruhewasserspiegel nehmen die Perioden von etwa 50% derjenigen an der Station W1 auf etwa 150% bis zu 200% zu, um dann mit höherem SWL ab NN + 4,0 m auf etwa 100% wieder abzunehmen.

Die Ergebnisse für die Verhältnisse der Wellenhöhen auf dem Vorland verglichen mit denjenigen vor dem Vorland H_v / H_o aus den Untersuchungen im GWK und den Messungen in der Natur werden in Abb. 79 verglichen. In bezug auf die absoluten Breiten der Vorländer im GWK und in der Natur müssen die Ergebnisse im GWK eher mit den Werten für W2 in der Natur verglichen werden. Danach ergeben sich in der Natur stärkere Dämpfungen der Wellenhöhen als im GWK gemessen wurden. Dies ist möglicherweise auf dreidimensionale Einflüsse oder auf die unterschiedliche Neigung der Vorlandkante zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen einen weiteren Forschungsbedarf auf.

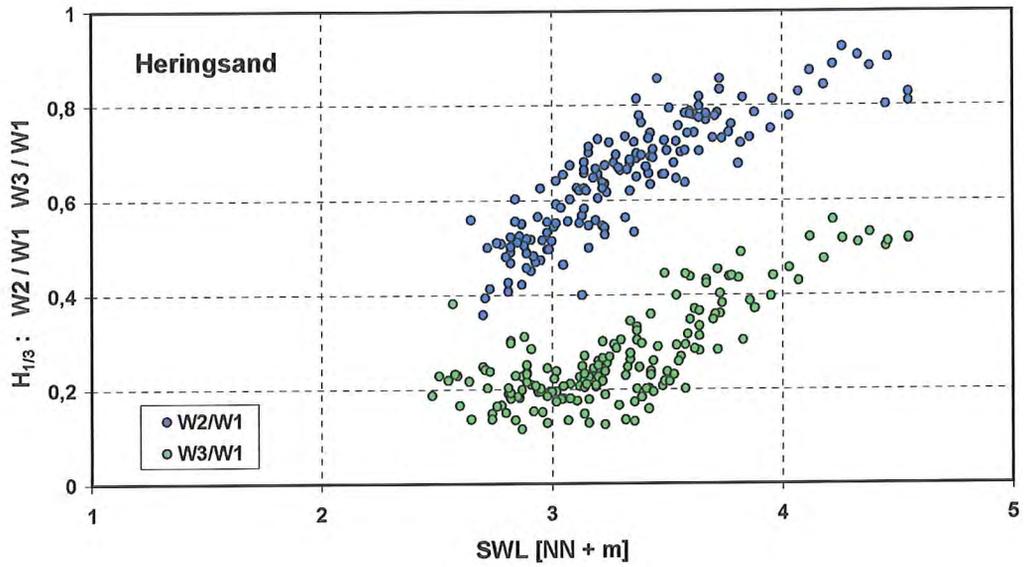


Abb. 77 Vergleich der Verhältnisse $W2/W1$ und $W3/W1$ für die Wellenhöhe $H_{1/3}$

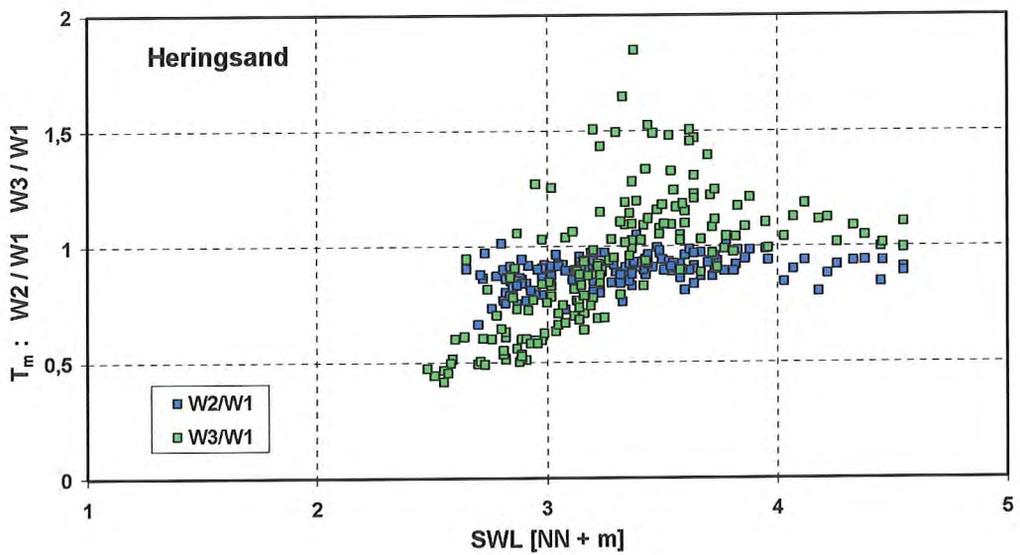


Abb. 78 Vergleich der Verhältnisse $W2/W1$ und $W3/W1$ für die Wellenperiode T_m

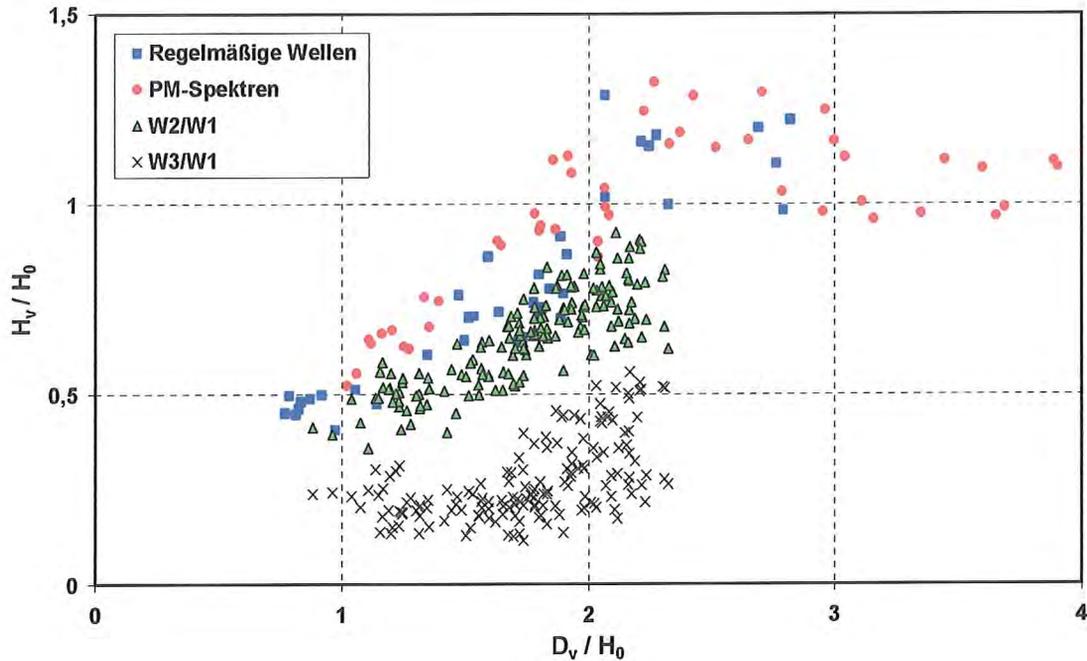


Abb. 79 Vergleich von Ergebnissen aus Untersuchungen im GWK
und Messungen in der Natur

8. Zusammenhänge zwischen Wellenauflauf und Wellenüberlauf

Wie bereits in Abschnitt 1 begründet, wird hier nur kurz der Vollständigkeit halber auf den Wellenüberlauf eingegangen. Es gibt eine Reihe von Formeln verschiedener Verfasser zur Berechnung des Wellenüberlaufs, die mehr oder weniger auf einen gleichen grundsätzlichen Ansatz zurückgeführt werden können, und von denen eine im Folgenden erläutert wird:

Die möglichen Wellenüberlaufmengen können nach den Empfehlungen von v. d. Meer & Janssen (1994) wie folgt berechnet werden:

$$q = Q_b * R_q \text{ [m}^3 \text{ / s*m Deichlänge]}$$

mit

$$R_q = g * H_{1/3} * T_p * 1 / \sqrt{2\pi N}$$

und

$$Q_b = 0,06 * \exp(-5,2 R_b)$$

mit

$$R_b = R_c / R_o$$

mit

$$R_o = \sqrt{g/2\pi} * 1/N * T_p * \sqrt{H_{1/3}} * \gamma_i$$

Darin sind:

- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- H_{1/3} Signifikante Wellenhöhe [m]
- T_p Peakperiode [s]
- R_c Vertikaler Abstand zwischen Ruhewasserspiegel und Deichkronenhöhe [m]
- N Neigung der Deichaußenböschung (tan α = 1 / N)
- γ_i Abminderungsfaktoren

Der Ansatz soll für brechende Wellen mit einem Brecherindex von $\xi < 2$ gelten. In die Berechnungen gehen die Seegangparameter H_{1/3} und T_p sowie die Deichaußenneigung und der vertikale Abstand zwischen dem Ruhewasserspiegel und der Deichkronenhöhe direkt ein. Ein Wellenaufbauparameter für eine nach oben unbegrenzte Kronenhöhe (ohne Überlauf) wird nicht berechnet.

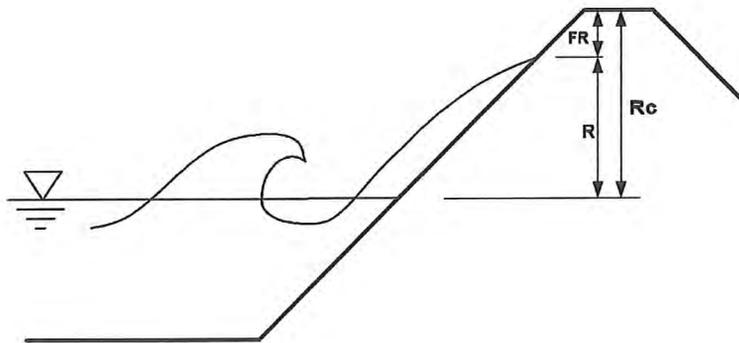


Abb. 80 Prinzipskizze zu den Definitionen

In dem vorstehend beschriebenen Ansatz entsprechen die Abminderungsfaktoren $\gamma_i = \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta$ den Einzelbeiwerten K8 (Einfluss einer Berme), K5 (Einfluss eines flachen Vorstrandes), K9 (Einfluss der Rauigkeit der Deichaußenböschung) und K6 (Einfluss der Wellenanlaufung). Diese Einzelbeiwerte sind in Abschnitt 10 beschrieben.

Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass diese Art der Berechnungen nur mittlere Überlaufsraten ergeben. Eine Berechnung einzelner Überlaufschwalle, ihrer Geschwindigkeiten und ihrer Einzelmengen ist nicht möglich, von Einblicken in die Struktur der Überlaufschwalle ganz abgesehen. Für detaillierte Untersuchungen z. B. bodenmechanischer Aspekte sind aber solche Kenntnisse unabdingbar, daher besteht hierfür noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

In Abschnitt 9 wird auf diese Problematik mit Beispielen aus numerischen Vergleichsberechnungen eingegangen.

9. Vergleichsberechnungen des Wellenaufbaus und Wellenüberlaufs mit dem Numerischen Modell " ODIFLOCS "

Das numerische Modell ODIFLOCS (v. GENT, 1994) kann für die Simulation der hydrodynamischen Prozesse von wellenbelasteten Küstenschutzbauwerken angewendet werden. Das Modell basiert auf der eindimensionalen Beschreibung der Strömungen in Form der Gleichung für lange Wellen mit über die Tiefe gemittelter Strömungsgeschwindigkeiten. Die Oberflächenauslenkungen der Wellen und der Wellenaufbau und Wellenüberlauf werden in Abhängigkeit von der Stationierung beschrieben (zweidimensional).

Nachteile des Modells sind neben der Eindimensionalität die Verifikationsprobleme, wie sie bei allen numerischen Modellen bestehen (Eichung des Modells). Wegen der Zweidimensionalität in Bezug auf die Oberflächenauslenkung der Wellen und auf den Wellenauf- und überlauf lässt das Modell vom Grundsatz her eine unmittelbare Nachbildung der in der Natur auftretenden dreidimensionalen Wechselwirkungen zwischen anlaufendem Seegang und Bauwerk nicht zu, aber auch im analytischen Modell (z.B. Ansatz nach HUNT) wird im Grunde zweidimensional vorgegangen.

Dagegen ist das Modell sehr gut für Vergleichsberechnungen geeignet, wobei sowohl die Querschnittsverhältnisse als auch die Seegangparameter und die Seegangcharakteristik variiert werden können. Durch die vom Verfasser entwickelten Zusatzprogramme können die Seegangparameter auch variiert werden, ohne die Seegangcharakteristik ändern zu müssen (der Wellenzug bleibt geometrisch ähnlich). Für die Vergleichsberechnungen müssen auch

keine exakten oder bestimmten Absolutwerte erreicht werden. Die Ergebnisse werden als Relativwerte interpretiert. Trotzdem ist jedoch auch vorgesehen, das Modell mit den Ergebnissen aus dem Seegangs- und Wellenaufnahmeprogramm Dithmarscher Küste und Elbe und den Untersuchungen im GWK zu eichen.

Die Anwendung des numerischen Modells ODIFLOCS erfolgt entsprechend dem Schema in Abb. 81. Wie aus diesem Schema ersichtlich, wurden (vom Verfasser) zwei Peripherie - Programme entwickelt, die folgende zusätzliche Möglichkeiten für ODIFLOCS eröffnen:

* Es können aus vorliegenden Messungen des Seegangs (Oberflächenauslenkungen) in der Natur (originale Wellenzüge), aus den GWK (Wellenzüge aus generierten verschiedenartigen Spektren) oder von ODIFLOCS generierte Wellenzüge (TMA - Spektren) neue Wellenzüge für die Einspeisung in ODIFLOCS generiert werden. Diese Wellenzüge bleiben geometrisch ähnlich, auch wenn die Parameter Wellenhöhe und Wellenperiode beliebig variiert werden (z. B. für Hochrechnungen auf andere Wasserstände oder für Vergleichsrechnungen verschiedenartiger Spektren mit gleichen Werten für $H_{1/3}$ und T_m).

* Die von ODIFLOCS gespeicherten Zeitreihen werden so extrahiert und aufbereitet, dass sie mit externen Auswerteprogrammen bearbeitet werden können. Dies ist insbesondere dann unbedingt erforderlich, wenn Vergleichsberechnungen mit Naturmessungen wie hier mit den Ergebnissen aus dem Seegangs- und Wellenaufnahmeprogramm Dithmarscher Küste und Elbe vorgesehen sind. Auch für alle Eichberechnungen ist die Verwendung identischer externer Auswerteprogramme erforderlich.

Die Eichung des numerischen Modells ODIFLOCS erfolgt über einen Reibungsbeiwert für die von den Wellen überströmten Oberflächen des Vorlandes und des Deiches. Infolge der grundsätzlichen Eigenschaften des Modells muss der Reibungsbeiwert begrenzt werden, andernfalls wird das Modell instabil und versagt während der Berechnung.

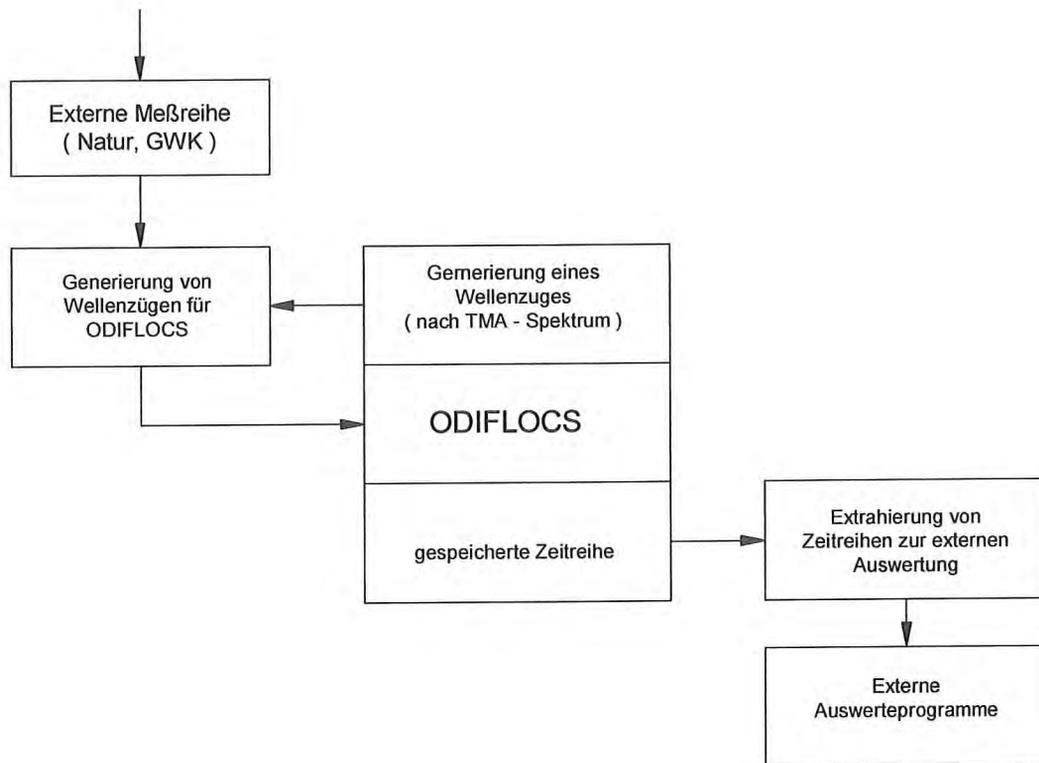


Abb. 81 Peripherie - Programme für das Numerische Modell ODIFLOCS

Diese untere Begrenzung, die eine glatte Oberfläche mit geringster Reibung im Modell darstellt, kann nach mündlichen Aussagen des Modellentwicklers, Herrn van Gent, gegenüber dem Verfasser aus diesen grundsätzlichen Gründen auch nicht angepasst (verringert) werden.

Erste Untersuchungen zur Eichung des Modells haben gezeigt, dass der kritische Wert für den Reibungsbeiwert, ab dem infolge Instabilität mit einem Versagen des Modells zu rechnen ist, auch von der Querschnittsgeometrie und den Seegangparametern beeinflusst wird. Daher sollte für den Reibungsbeiwert ein Wert oberhalb des kritischen Werts angesetzt und die dadurch bedingten möglichen geringeren Werte für den Wellenauflauf mit Eichansätzen auf realistische Werte hochgerechnet werden, wie es beispielhaft im Folgenden aufgezeigt wird:

In Abb. 82 sind Ergebnisse für den Auflauf R_{98} aus Berechnungen mit dem numerischen Modell ODIFLOCS in Abhängigkeit vom jeweils verwendeten Reibungsbeiwert dargestellt. Es wurden 4 Versuchsreihen mit jeweils unterschiedlichen Seegangparametern und Seegangcharakteristiken durchgeführt (siehe Tabelle in Abb. 82).

Für alle Berechnungen wurde eine gleichförmige Neigung von 1:8 für die Deichaußenneigung sowie eine Wassertiefe von 8,0 m und eine Kronenhöhe von 12,0 m gewählt. Damit traten keine Beeinflussungen durch Wellenüberlauf auf.

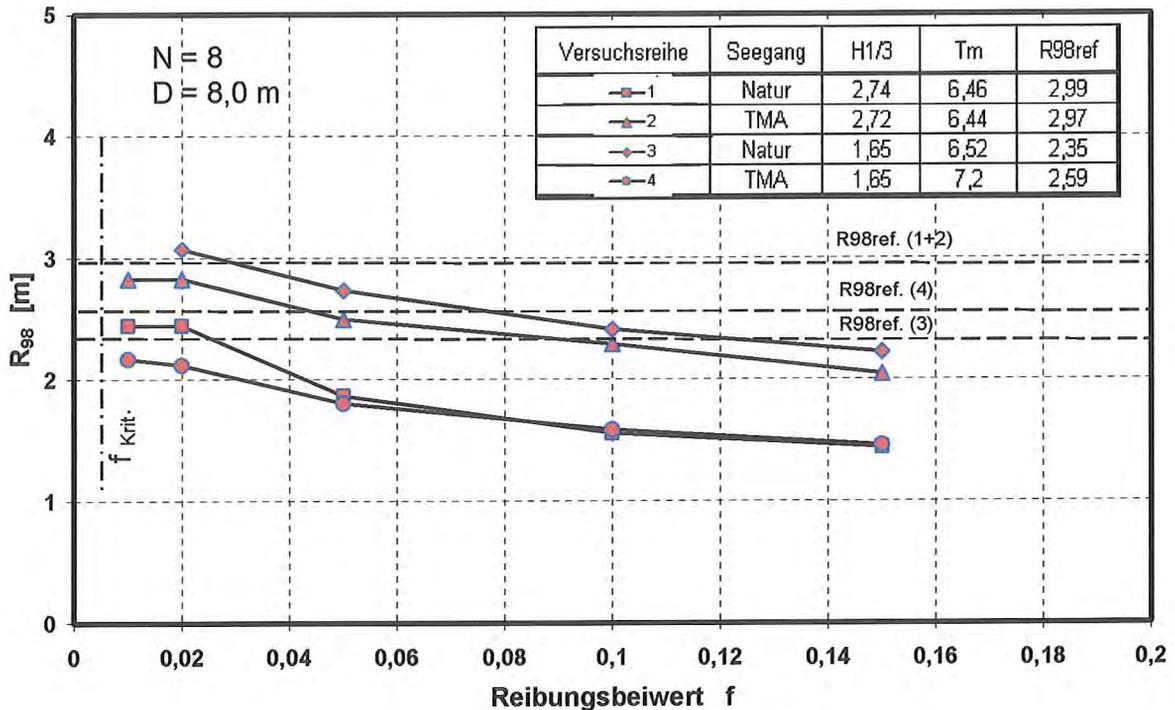


Abb. 82 Ergebnisse für R_{98} in Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes f aus Berechnungen mit dem numerischen Modell ODIFLOCS

Der Referenzwert für den tatsächlichen Auflauf R_{98} ref. (in Abb. 82 gestrichelt dargestellt) wurde ermittelt unter Verwendung der folgenden Einzelbeiwerte :

$K_0 = 1,25$, $K_2 = 1,8$ und $K_7 = 0,125$ (1:8).

Damit ergibt sich R_{98} ref. zu

$$R_{98 \text{ ref.}} = 1,25 * 1,8 * 0,125 * T_m * \sqrt{H_{1/3}}$$

Die Ergebnisse in Abb. 82 zeigen folgendes auf:

1. Mit dem vom Modellentwickler angegebenen kritischen Reibungsbeiwert $f_{\text{krit}} = 0,005$ (in Abb. 82 strichpunktiert eingetragen) versagt das Modell bei allen drei Versuchsreihen, bei der Versuchsreihe 1 versagt es auch mit dem Wert $f = 0,01$.

2. Für die Versuchsreihen 1 und 3 mit einem in der Natur gemessenem Wellenzug wurde der Referenzwert $R_{98 \text{ ref}}$ mit einem Reibungsbeiwert von etwa 0,03 bis 0,02 erreicht, während für die Versuchsreihen 2 und 4 mit dem von ODIFLOCS selbst generierten TMA - Spektrum der Referenzwert um etwa 5% unterschritten blieb. Anzumerken ist, dass geringere Reibungsbeiwerte als $f = 0,02$ nicht zu größeren Auflaufwerten führten.

3. Die in der Natur gemessenen Wellenzüge erzeugten relativ größere Auflaufhöhen als die von ODIFLOCS erzeugten TMA - Spektren; dieser Trend wurde auch bereits bei den großmaßstäblichen Untersuchungen im GWK beobachtet.

4. Zusammenfassend ergibt sich, dass für die Wahl des Reibungsbeiwertes f ein gewisser Abstand zum kritischen Wert eingehalten werden sollte, damit die Berechnung im stabilen Bereich sicher durchgeführt werden kann. Die damit ermittelten Ergebnisse für die Auflaufhöhen, die möglicherweise geringer sind als die tatsächlich auftretenden, müssen dann mit entsprechenden Referenzwerten auf die tatsächlichen Werte hochgerechnet werden.

Aus den Ergebnissen in Abb. 82 ergibt sich beispielhaft für den Reibungsbeiwert $f = 0,1$ und die Versuchsreihen 1 und 2 eine Unterschreitung des mit ODIFLOCS berechneten Wellenaufbaus von etwa 20% bezogen auf den Referenzwert (d.h. es wurde vom Modell ODIFLOCS ein Wellenaufbau erreicht von etwa 80% des Referenzwertes $R_{98 \text{ ref}}$). Daraus folgt, dass die mit dem Faktor $1 / 0,80 = 1,25$ multiplizierten Ergebnisse aus dem Modell ODIFLOCS (bei gleichem Reibungsbeiwert) den tatsächlichen Werten entsprechen. Für die Versuchsreihen 3 und 4 ergibt sich eine Unterschreitung von etwa 27 % bzw. ein Umrechnungsfaktor von etwa 1,58.

Im Folgenden soll ergänzend zu den bisherigen Erläuterungen zum ODIFLOCS - Modell kurz auf die Ermittlung der Überlaufmengen eingegangen werden. Die Überlaufmenge wird aus den einzelnen Überlaufschwällen ermittelt, die das numerische Modell wie in einem physikalischen Modell nachbildet. In Abb. 83 ist der Überlaufschwall im Deichquerschnitt und im zeitlichen Verlauf des Wellenaufbaus (Schrieb) schematisch dargestellt. Weiterhin enthält diese Abbildung die einzelnen Definitionen zum Wellenauf- und -überlauf.

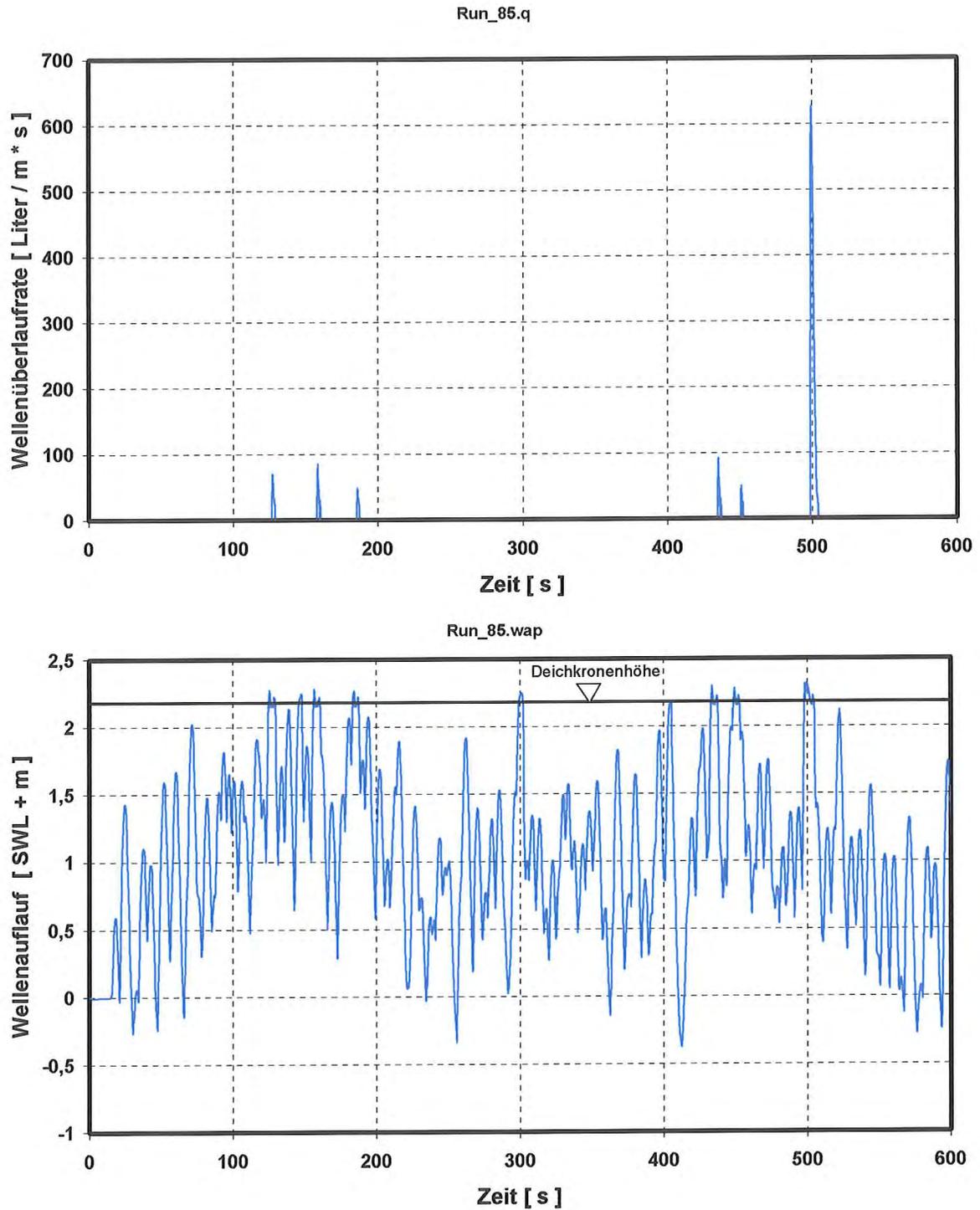


Abb. 84a Beispiel für eine Zeitreihe des Wellenaufbaus (im unteren Teil)
mit geringem Wellenüberlauf (im oberen Teil)

(SWL = NN + 5,8 m, Spektrum aus der Natur, $q_m = 3,25 \text{ l/m} \cdot \text{s}$)

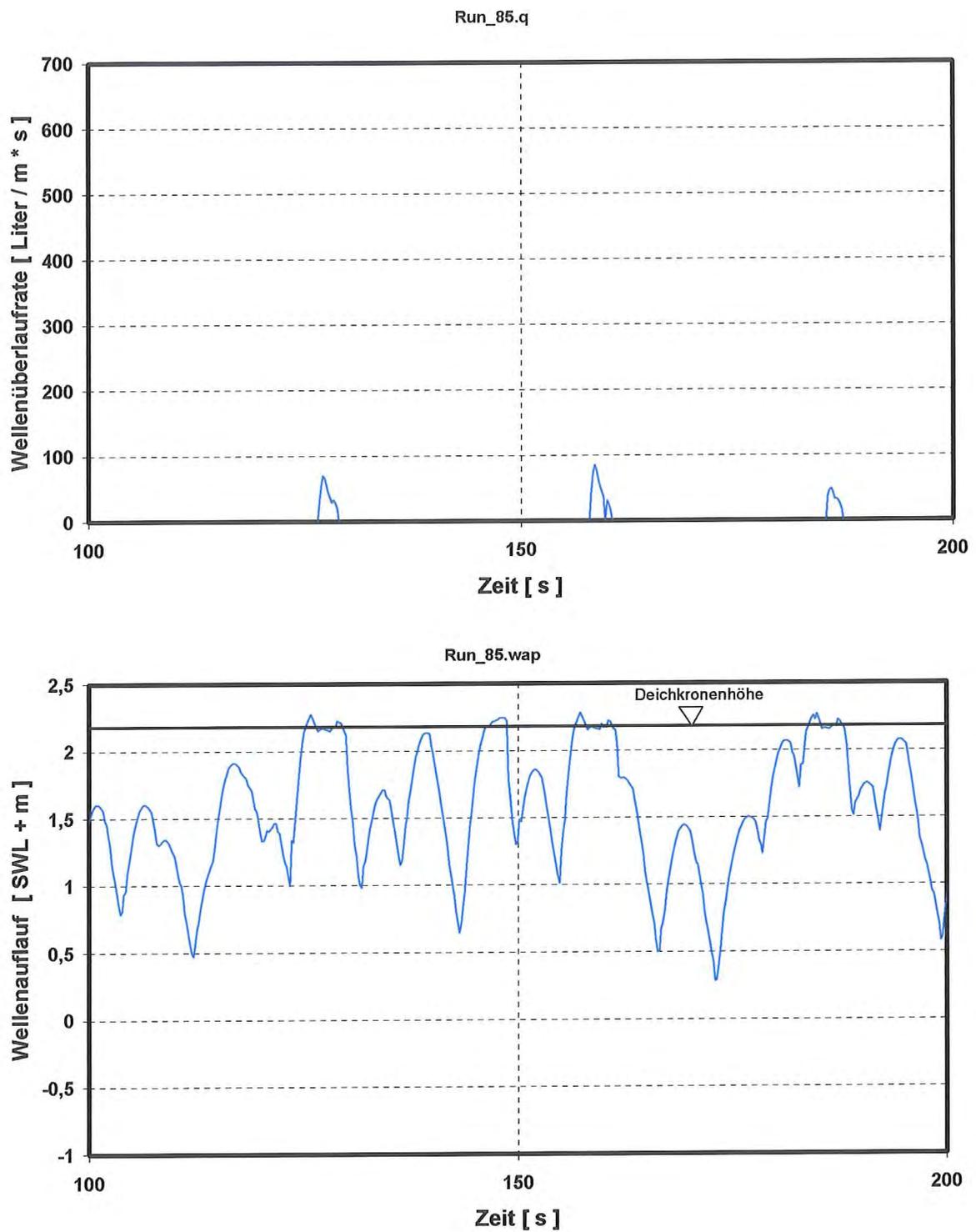


Abb. 84b Ausschnitt aus den Zeitreihen in Abb. 84a für Wellenauflauf
 (im unteren Teil) mit geringem Wellenüberlauf (im oberen Teil)
 (SWL = NN + 5,8 m, Spektrum aus der Natur, $q_m = 3,25 \text{ l/m}^2\text{s}$)

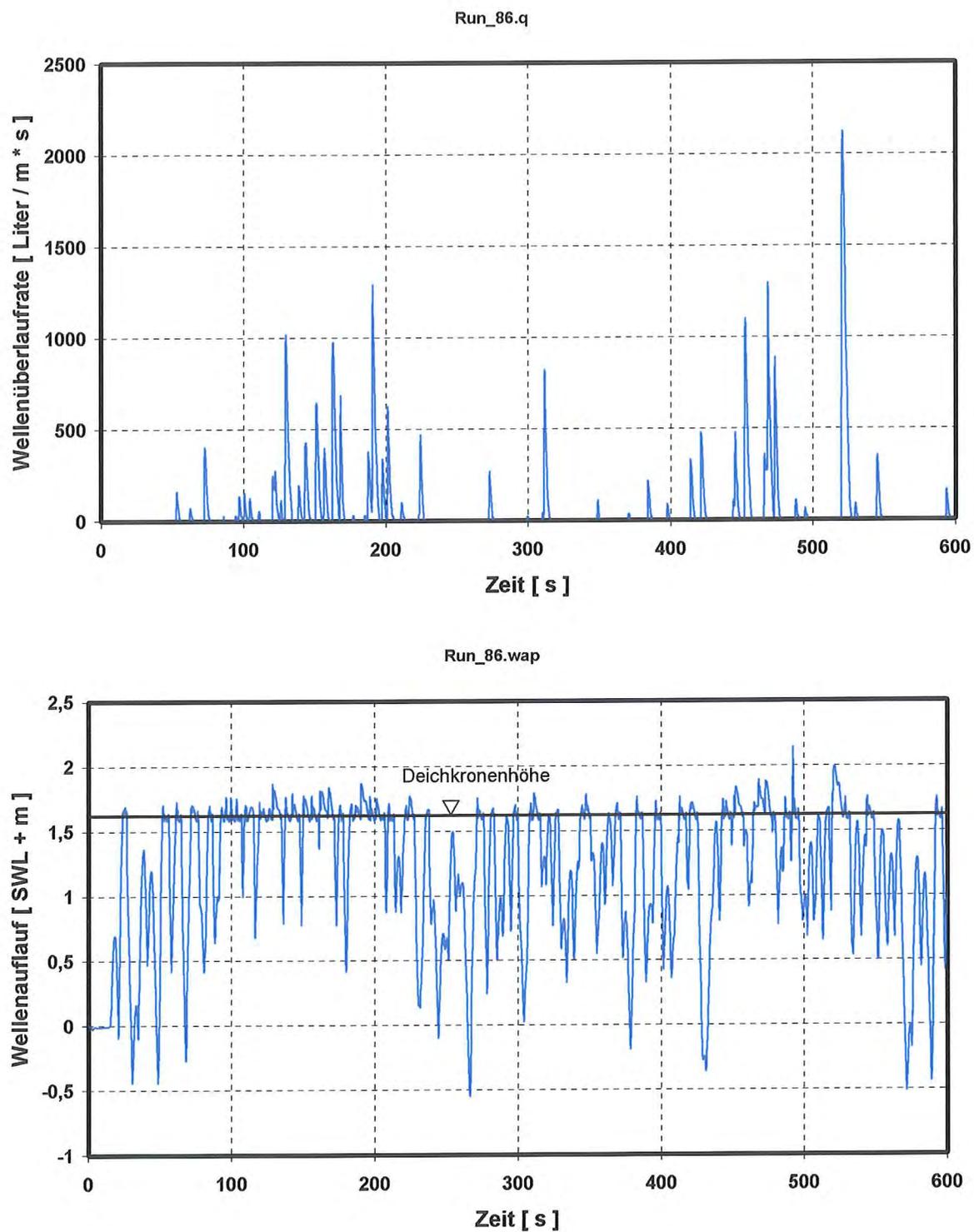


Abb. 85a Beispiel für eine Zeitreihe des Wellenaufbaus (im unteren Teil)
mit stark ausgeprägtem Wellenüberlauf (im oberen Teil)
(SWL = NN + 6,3 m, Spektrum aus der Natur, $q_m = 59,3 \text{ l/m*s}$)

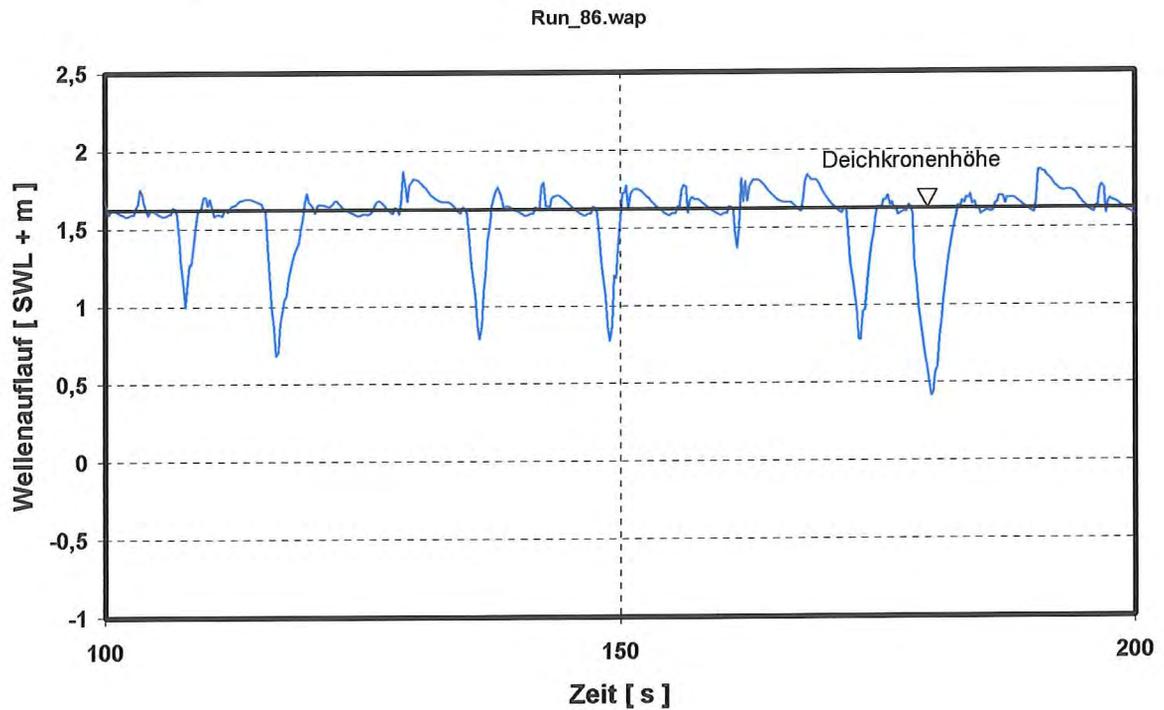
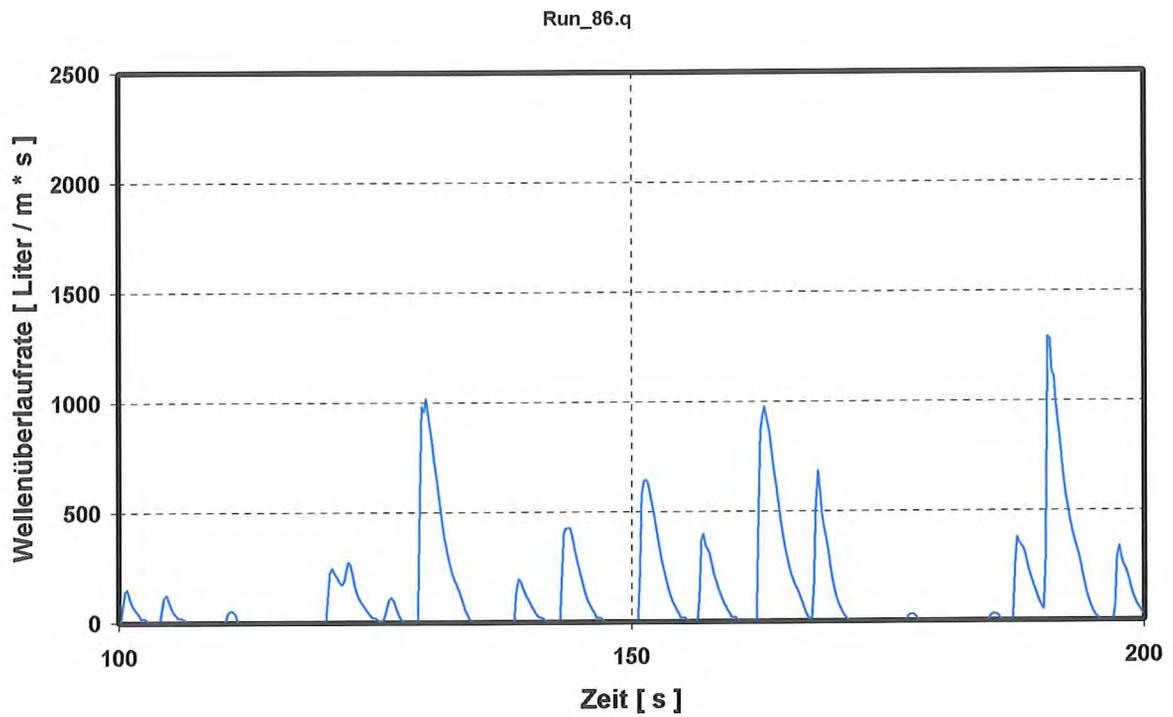


Abb. 85b Ausschnitt aus den Zeitreihen in Abb. 85a für Wellenauflauf
 (im unteren Teil) mit stark ausgeprägtem Wellenüberlauf (im oberen Teil)
 (SWL = NN + 6,3 m, Spektrum aus der Natur, $q_m = 59,3 \text{ l/m}^2\text{s}$)

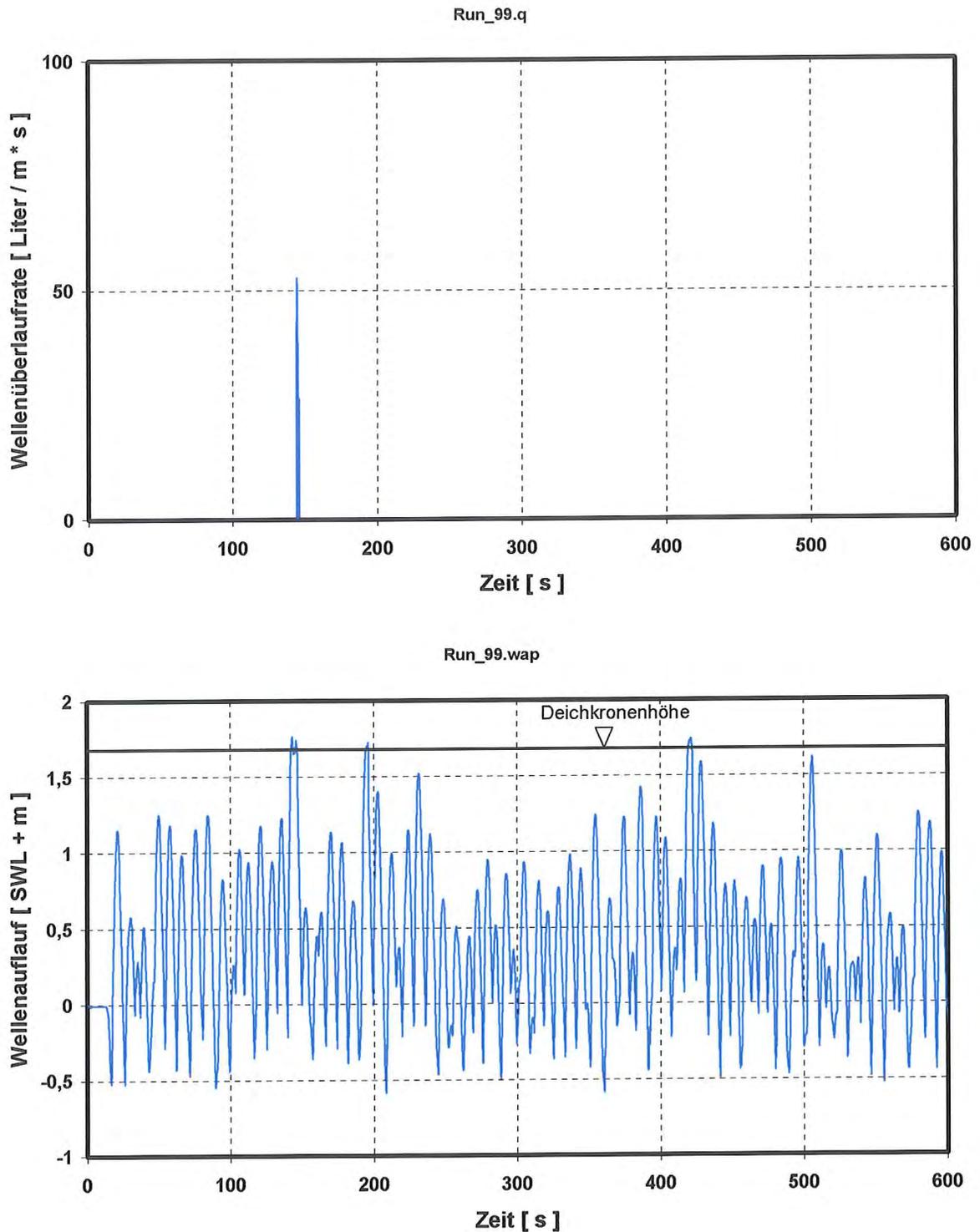


Abb. 86 Beispiel für eine Zeitreihe des Wellenaufbaus (im unteren Teil)
mit geringfügigem Wellenüberlauf (im oberen Teil)

(SWL = NN + 6,3 m, TMA - Spektrum, $f = 0,1$, $q_m = 0,11 \text{ l/m}^2\text{s}$)

Die Überlaufdaten in diesen Zeitreihen sind für jeden Zeitschritt der numerischen Berechnung ermittelt worden und sind als Liter pro Einheitsbreite [m Deichkronenlänge] und pro Zeiteinheit [s] definiert. Diese Überlaufmengen werden für die gesamte Laufzeit des numerischen Modells (im Zeitmaßstab der Wellen) aufsummiert und als Gesamtmenge pro Einheitsbreite [m Deichkronenlänge] im Protokoll ausgegeben. Diese Gesamtmenge kann über die Laufzeit im numerischen Modell (bei den vorstehend erläuterten Ergebnissen 500 bzw. 600 Sekunden) in eine durchschnittliche Menge pro Einheitsbreite und pro Zeiteinheit q_m umgerechnet werden. Alle Überlaufmengen in diesem Bericht sind als q_m in [Liter / m * s] angegeben. Weitergehende Details sind in den Quellcodes enthalten, die nicht allgemein zugänglich sind.

Vergleicht man die Überlaufdaten der Einzelschwalle mit den mittleren Überlaufdaten q_m , so werden die beträchtlichen Unterschiede deutlich. In Abb. 84a beträgt z.B. die größte Überlaufdaten eines Einzelschwalls etwa 630 l pro s und m Deichkronenlänge und liegt damit etwa 200 mal höher als die mittlere Überlaufdaten $q_m = 3,25 \text{ l} / \text{s} \cdot \text{m}$. In dem Beispiel mit stark ausgeprägtem Wellenüberlauf in Abb. 85a erreicht der Maximalwert mit etwa 2200 l / s*m nur das 37 - fache des Durchschnittswertes von $q_m = 59,3 \text{ l} / \text{s} \cdot \text{m}$.

Alle Beispiele verdeutlichen eindrucksvoll die Notwendigkeit, den physikalischen Prozess des Wellenüberlaufs im Detail zu erforschen.

10. Anwendung der Ergebnisse für ingenieurpraktische Aufgaben

10.1 Verifizierter Berechnungsansatz für den Wellenauflauf

Wie bereits in den Abschnitten 2.2 und 2.3 erläutert, resultieren in Abhängigkeit der verwendeten Parameter für den Wellenauflauf und den Seegang, von der Deichgeometrie und weiteren Einflüssen wie z.B. Oberflächenbeschaffenheit des Deiches oder Wellenanlaufrichtung jeweils unterschiedliche Werte für den Koeffizienten C_{ξ} z. B. entsprechend den vorstehend beschriebenen Verifikationen. Um alle verschiedenen Einflüsse getrennt behandeln zu können und damit eine für die an der deutschen Küste tatsächlich vorhandene Deichquerschnittsform und einen für den natürlichen Seegang geeigneten Berechnungsansatz für den Wellenauflauf ermitteln zu können, kann die verallgemeinerte HUNT - Formel (siehe auch Abschnitt 2.2) wie folgt geschrieben werden, wobei der bisherige Koeffizient C durch das Produkt aus den Einzelbeiwerten K_i ersetzt wird:

$$R = K * \sqrt{H} * T$$

mit $K = K_0 * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5 * K_6 * K_7 * K_8 * K_9$

Mit diesen Einzelbeiwerten K_i werden nun die jeweiligen Einflüsse auf den Wellenauflauf getrennt erfasst und zwar sowohl in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Parametern für den Wellenauflauf (K_1) und für den Seegang (K_3 und K_4), als auch in Abhängigkeit von der komplexen Deichgeometrie (K_7 und K_8) sowie sonstiger Randbedingungen (K_0 , K_2 , K_5 , K_6 und K_9). Im einzelnen sind folgende Beiwerte vorgesehen:

- K_0 : Beiwert für die dimensionsfreie Darstellung der Formel
- K_1 : Beiwert für den zu berechnenden statistischen Auflaufparameter (z.B. R_{97})
- K_2 : Beiwert für die allgemeine Charakteristik des Seegangs (z.B. natürlicher Seegang)
- K_3 : Beiwert für den verwendeten statistischen Wellenhöhenparameter des natürlichen Seegangs (z.B. $H_{1/3}$)

- K4 : Beiwert für den verwendeten statistischen Wellenperiodenparameter des natürlichen Seegangs (z.B. $TH_{1/3}$)
- K5 : Beiwert für die Seegangscharakteristik infolge der relativen Wassertiefenverhältnisse unmittelbar vor dem Deich
- K6 : Beiwert für die Wellenanaufrichtung
- K7 : Beiwert für Bauwerksgeometrie (zusammengesetzte Neigungen)
- K8 : Beiwert für Bauwerksgeometrie (zusätzliche Berme)
- K9 : Beiwert für die Deichoberflächenrauigkeit

Die Ermittlung der einzelnen Beiwerte K_i erfolgt durch schrittweise Verifikation des Basisansatzes unter Verwendung der Ergebnisse aus allen zur Zeit ausgewerteten Messungen zum Wellenaufbau im großmaßstäblichen Labor (GWK) und in der Natur. Dazu werden die Ergebnisse jeweils getrennt für die einzelnen Einflüsse bzw. Randbedingungen des jeweiligen Einzelbeiwertes schrittweise in den Basisansatz rückgerechnet und die dabei auftretenden Abweichungen durch entsprechende Einzelbeiwerte K_i beschrieben. Die einzelnen Beiwerte müssen dabei keine Konstanten sein, sondern können auch Funktionen mit mehreren Variablen enthalten (zum Beispiel siehe Beiwert für eine Berme K8). Das Verfahren kann infolge seiner Komplexibilität und seines Umfangs hier nicht ausführlich beschrieben werden. Die zu den Beiwerten folgenden Ausführungen beschränken sich daher darauf, alle Einzelbeiwerte K_i zu erläutern und jeweils einen kurzen Überblick über den Stand der Wissenschaft zu geben. Hierzu muss angemerkt werden, dass noch nicht alle Ergebnisse aus den Messungen in der Natur vollständig für die Verifikation verwendet wurden.

10.2 Erläuterungen der Einzelbeiwerte K_i

10.2.1 Beiwert K_0

Wie bereits in Abschnitt 2.2. erläutert, bildet der Ansatz von HUNT (1959) die Grundlage für den verifizierten Berechnungsansatz. Der Umrechnungsfaktor für diese Form des Ansatzes von HUNT beträgt entsprechend Abschnitt 2.2 $K_0 = 1,25$.

10.2.2 Beiwert K1

Der Einzelbeiwert K1 wird für den zu berechnenden statistischen Auflaufparameter verwendet. Als Basiswert wurde der Parameter R_{98} gewählt, der im internationalen Schrifttum überwiegend verwendet wird. Sollen sich nun die Berechnungen statt auf den Parameter R_{98} auf einen anderen beziehen, so erfolgt die Umrechnung mit den in Tabelle 8 angegebenen Beiwerten K1. Diese Beiwerte wurden aus den im oberen Teil der Tabelle angegebenen Verhältniswerten der Auflaufparameter ermittelt.

Ort	$\frac{R_{max}}{R_m}$	$\frac{R_{98}}{R_m}$	$\frac{R_{95}}{R_m}$	$\frac{R_{90}}{R_m}$	$\frac{R_{1/10}}{R_m}$	$\frac{R_{1/3}}{R_m}$
Wangerooge N = 4	2,06	1,75	1,60	1,46	1,66	1,39
Neuendeich N = 4	2,06	1,73	1,58	1,44	1,63	1,39
Eiderdamm N = 4	1,97	1,69	1,60	1,43	1,63	1,38
Eiderdamm N = 6	1,90	1,69	1,57	1,40	1,58	1,34
Stiteck N = 8 - 10	1,85	1,70	1,57	1,44	1,62	1,38
Heringsand N = 11	1,56	1,50	1,42	1,34	1,46	1,30
	R_{max}	R_{98}	R_{95}	R_{90}	$R_{1/10}$	$R_{1/3}$
K1	1,18	1,00	0,94	0,84	0,96	0,81

Tabelle 8 Verhältnisse der gemessenen Auflaufparameter und Beiwerte K1

10.2.3 Beiwert K2

Dieser Einzelbeiwert erfasst den Einfluss der allgemeinen Seegangscharakteristik. Die Unterschiede zwischen dem Wellenaufbau von regelmäßigen Wellen und unregelmäßigen Wellen sind hinreichend bekannt, der Einfluss von natürlichem Seegang dagegen weniger. Neueste Untersuchungen im GWK haben gezeigt, dass auch im Labor beträchtliche Unterschiede zwischen verschiedenen Arten unregelmäßigen Seegangs auftreten können. In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die Verhältniswerte dargestellt, bezogen auf Ergebnisse mit regelmäßigen Wellen (1,0) für den HUNT - Ansatz mit der Brecherkennzahl ξ . Diese Werte entsprechen dem Beiwert C_ξ bei Verwendung der mittleren Periode T_m (bei d. WAAL & v. d. MEER, 1992, ist C_ξ auf die Peakperiode T_p bezogen!). Die Beiwerte K2 ergeben sich durch lineare Umrechnung.

Autor	Regelmäßige Wellen		Unregelmäßige Wellen				
	Labormessungen		allgemein	Labormessungen			Natur- messungen
	klein- maßstäblich	groß- maßstäblich		PM-Spektren		Natur- Spektren	
				klein- maßstäblich	groß- maßstäblich	groß- maßstäblich	
Hunt (59)	1,0						
van Orschot/ d'Angremont (68)				1,50 ~ 1,93			
Vinje (72)			1,25				
Battjes (74)			1,49 ~ 1,87				
Tautenhain (81)				1,33 ~ 2,86 N = 6			
Grüne (82)							1,33 ~ 2,86 2,3 (N = 4) 1,77 (H/D)
Föhrböter (89)				1,45 ~ 1,89 N = 6 $\xi \geq 1,0$			
Schulz (92)	1,1 ~ 1,0 N = 12 ~ 4						
v.d. Meer (92...95)				1,66	1,66		
Wang / Grüne (95)		1,0 N = 6			1,71 N = 6	2,04 N = 6	1,89 (Berme) (N = 8 ~ 10)
Meßstation: Stinteck							~ 2,20 (N = 7 ~ 8)
Meßstation: Heringsand							1,88 (N = 11) Vorland

Tabelle 9 Verhältniswerte für die Ermittlung des Beiwertes K2

10.2.4 Beiwert K3

Dieser Einzelbeiwert wird für den statistischen Wellenhöhenparameter verwendet. Als Basiswert ($K3 = 1$) wurde $H_{1/3}$ gewählt. Bei Verwendung eines anderen Wellenhöhenparameters muss für K3 der entsprechende Wert aus Tabelle 10 verwendet werden. Diese Werte sind durch Umrechnung gemessener Verhältniswerte im oberen Teil der Tabelle ermittelt worden.

Ort Verhältnis	Heringsand	Stinteck	Hermannshof	Neuendeich	
$H_m / H_{1/3}$	0,69	0,7	0,67	0,68	
$H_{\max} / H_{1/3}$	1,63	1,56	1,57	1,64	
$H_{1/10} / H_{1/3}$	1,23	1,21	1,25	1,24	
$H_{1/100} / H_{1/3}$	1,54	1,49	1,58	1,55	
$H_{\text{rms}} / H_{1/3}$	0,74	0,75	0,73	0,73	
	H_m	H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/100}$	H_{rms}
K3	1,19	0,77	0,90	0,80	1,16

Tabelle 10 Verhältniswerte gemessener Wellenhöhenparameter und Beiwerte K3

10.2.5 Beiwert K4

Der Einzelbeiwert K4 gibt den Einfluss des verwendeten Wellenperiodenparameters wieder. Die verschiedenen Periodenparameter unterscheiden sich untereinander wesentlich stärker als z.B. die signifikanten Wellenhöhen aus Zeit- und Frequenzbereich, außerdem geht die Periode linear in den HUNT - Ansatz ein. Damit beeinflusst die Wahl des Periodenparameters stark die Größenordnung der Koeffizienten.

Ausgehend von den früher üblichen Versuchen mit regelmäßigen Wellen wird oft die mittlere Periode T_m verwendet. In letzter Zeit wurde der Peakperiodenparameter T_p aus der Frequenzanalyse vorgeschlagen (d. WAAL & v. d. Meer, 1992). Solange die Werte von T_m und T_p gut korrelieren, was bei engbandigen Spektren (Tiefwasserbedingungen) meist der Fall ist, ergibt sich daraus nur eine Größenänderung des Koeffizienten.

Für natürlichen Seegang in Flachwassergebieten wie auf Wattgebieten trifft dies aber nicht zu, denn die Energiedichteverteilungen des Seegangs auf Wattgebieten unterscheiden sich von den klassischen Formen wie z.B. von der PM - Verteilung beträchtlich. Die Energiedichte ist meist stark unregelmäßig verteilt und hat oft ausgeprägte langperiodische Anteile. Die Ermittlung der Peakperiode T_p aus solchen Verteilungen ist daher sehr problematisch.

Weiterhin hat die Peakperiode eigentlich gar keinen direkten physikalischen Bezug auf den Prozess des Wellenbrechens und des Auflaufs, denn dieser ist bezogen auf einzelne

aufeinanderfolgende Wellen in einem Wellenzug und nicht auf Komponenten aus einer Fourier-Transformation. Die Untersuchungen im GWK und in der Natur (WANG & GRÜNE, 1995) haben gezeigt, dass der Peakperiodenparameter für die Anwendung im Bereich von Wattgebieten völlig ungeeignet ist. Wesentlich bessere Korrelationen ergeben sich mit den mittleren Perioden sowohl aus der Zeit- als auch aus der Frequenzanalyse.

Die Ermittlung der entsprechenden Einzelbeiwerte K_4 in Abhängigkeit der verwendeten Periodenparameter erfolgt durch Umrechnung z.B. von Mittel- und Verhältniswerten des Koeffizienten C_ξ .

10.2.6 Beiwert K_5

Der Beiwert K_5 erfasst den Einfluss der Seegangscharakteristik infolge der relativen Wassertiefenverhältnisse im Bereich vor dem Deichfuß. Allgemein bekannt ist, dass bei abnehmender Wassertiefe zunächst die höheren Wellen eines unregelmäßigen Wellenzuges teilweise durch Schaumkronenbrechen Energie abgeben und damit ihre Höhe reduzieren. Dadurch ändert sich die Wellenhöhenverteilung des Seegangs und dies hat Auswirkungen auf die wellenerzeugten Belastungen der Außenböschungen von Deichen und Deckwerken.

Für den Wellenauflauf ergibt sich durch Teilbranden vor dem Deichfuß eine Verringerung der Wellenauflaufhöhen. Schon HUNT hat diesen Einfluss beschrieben und gibt den Grenzbereich mit $D/H = 3,0$ an. Dies konnte auch sehr deutlich an Hand der Ergebnisse der Messungen in der Natur am Eiderdamm und auf Wangerooge (GRÜNE, 1982) aufgezeigt werden. Es traten Verringerungen des Wellenaufbaus von etwa 20% bis 25% bei einer relativen Wassertiefe von etwa $D/H = 2,0$ auf. Dieser Wert D/H kann in der Natur als absolute Grenztiefe bei nahezu ebenem oder sehr gering geneigtem Vorstrand angesehen werden.

Die niederländischen Empfehlungen (v. d. MEER & JANSSEN, 1994, für den Beiwert γ_h) enthalten geringere Reduzierungswerte von etwa 10% bei einem Grenzwert von $D/H = 4$, die aus kleinmaßstäblichen Untersuchungen ermittelt wurden. In Abb. 87 sind die unterschiedlichen Ansätze für den Einzelbeiwert K_5 graphisch dargestellt.

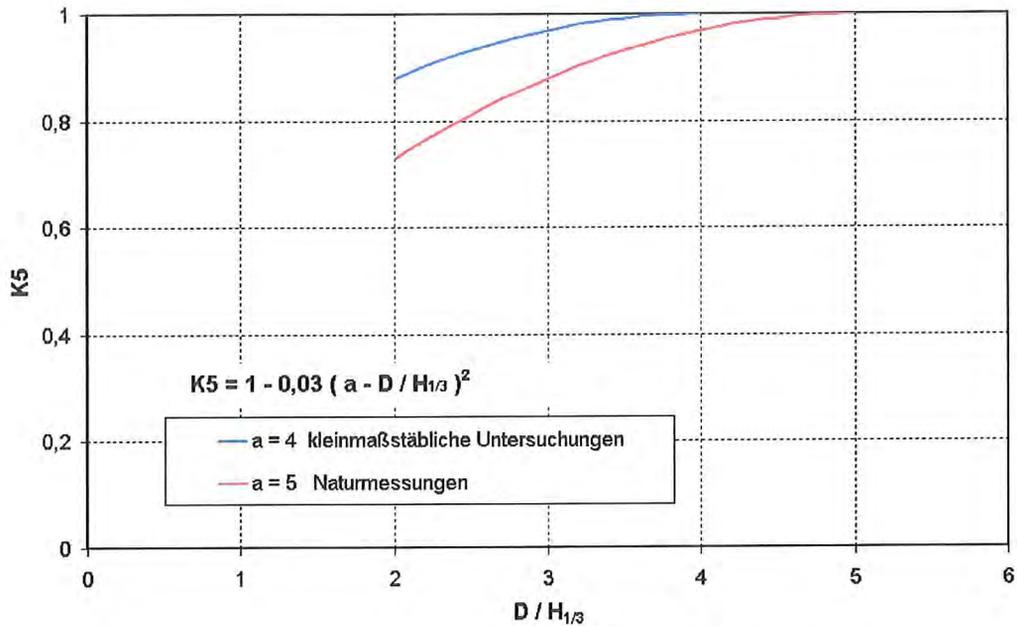


Abb. 87 Beiwerte $K5$ in Abhängigkeit der relativen Wassertiefe $D / H_{1/3}$

10.2.7 Beiwert $K6$

Der Beiwert $K6$ soll den Einfluss der Wellenanlaufrichtung auf die Höhe des Wellenauflaufes erfassen. Die Wellenanlaufrichtung ist üblicherweise so definiert, dass die senkrechte Anlaufrichtung β auf den Deich den Wert Null ($\beta=0$) aufweist (siehe Abb. 88).

Fast alle Untersuchungen in Laboratorien wurden mit senkrechten Anlaufrichtungen durchgeführt. Die wenigen zur Ermittlung des Einflusses von schrägem Wellenangriff wurden überwiegend mit regelmäßigen Wellen durchgeführt (beispielhaft sind in Abb. 88 einige unterschiedliche Ergebnisse gestrichelt dargestellt). Die meisten Ergebnisse aus solchen Untersuchungen ergaben eine Verminderung des Aufbaus in Abhängigkeit vom Anlaufwinkel β mit einem Verlauf ähnlich der Cosinusfunktion, wobei im Bereich von etwa 30° keine nennenswerte Reduzierung des Aufbaus auftrat.

Es gibt auch Untersuchungen, bei denen in diesem Bereich eine Vergrößerung des Aufbaus auftrat. Dieser Effekt wird durch Phasenverschiebungen des Auf- und Ablaufprozesses infolge der langkämmigen regelmäßigen Wellen erzeugt. Ein solcher Prozess tritt bei dem kurzkämmigen Seegang in der Natur nicht auf, dort sind die Aufläufe nicht langkämmig, auch nicht bei senkrechtem Angriff, sondern parabelähnlich in der Draufsicht.

Daher sind diese Ergebnisse für die Anwendung in der Natur auch nicht relevant.

V. d. MEER & JANSSEN (1994) geben für den Beiwert γ_β an, dass bei kurzkämmigem Seegang die Reduzierung des Wellenaufbaus geringer als bei langkämmigem Seegang ist und empfehlen eine lineare Reduzierung bis $\beta=90^\circ$ um insgesamt 20% (in Abb. 88 durchgezogene Linie). Diese geringere Reduzierung lässt sich leicht durch die Schwankungsbreiten der Einzelwellen bezogen auf die Mittelwerte eines längeren Zeitabschnitts erklären. Bei den Untersuchungen der Wellenanlafrichtungen in der Natur (Messprogramm Dithmarscher Küste und Elbe) ergaben erste Ergebnisse eine Variationsbreite von etwa 140° bis 180° und Standardabweichungen von etwa 25° (siehe Beispiel in Abb. 88). Nach eigenen derzeitigen Erkenntnissen aus den Messungen in der Natur sollte bis zu etwa $\beta=40^\circ$ jedoch eine Reduzierung ganz außer Betracht bleiben.

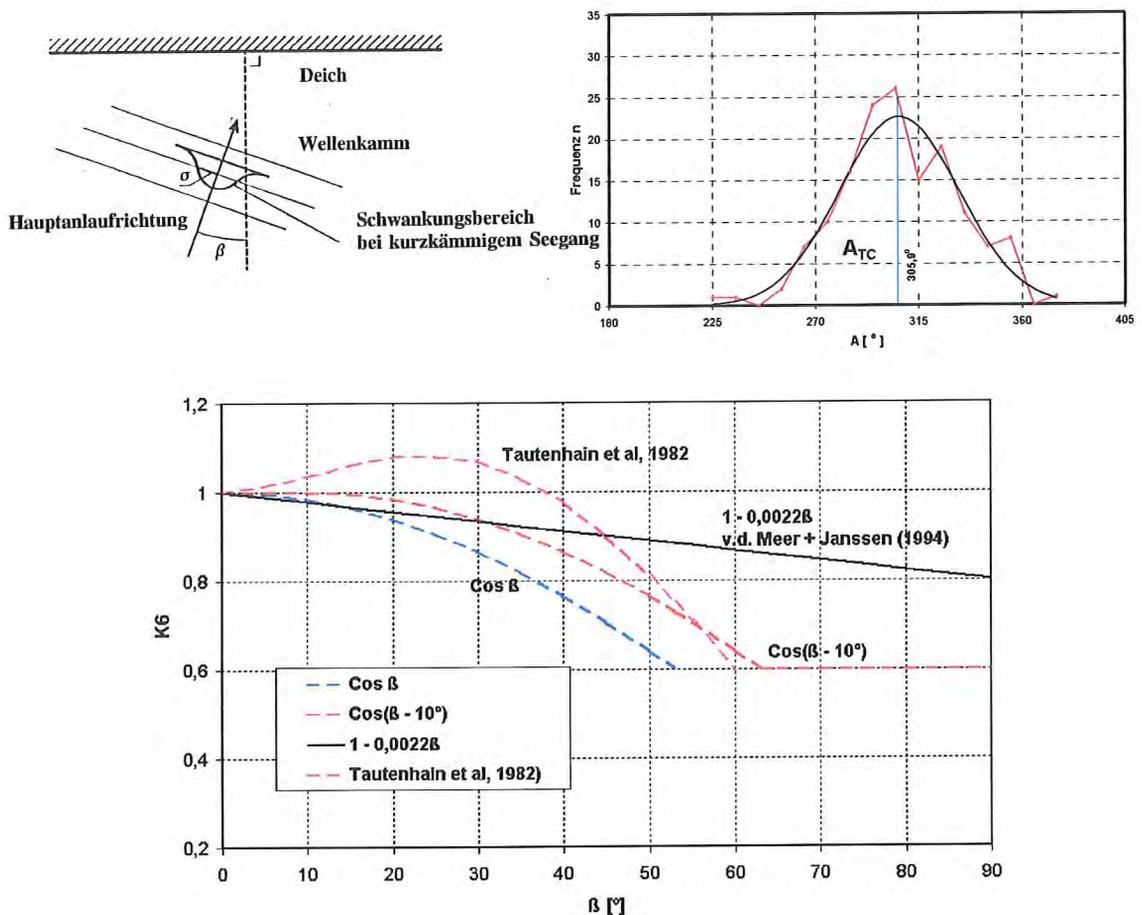


Abb. 88 Einzelbeiwert K_6 in Abhängigkeit von der Wellenanlafrichtung

10.2.8 Beiwert K7

Der Einzelbeiwert K7 gilt für die Neigung der Deichaußenböschung. Dieser Beiwert drückt in der Grundform des HUNT - Ansatzes den Term $\tan \alpha = 1/N$ aus, womit sich der Beiwert für gleichförmige Neigungen zu $K7 = \tan \alpha = 1/N$ ergibt (Abb. 89 oberer Teil).

Für ungleichförmige Neigungen gibt es den Ansatz von SAVILLE, der in späteren Veröffentlichungen auch immer wieder etwas modifiziert wurde, in seiner Grundform aber bis heute angewendet wird (Abb. 89 mittlerer Teil).

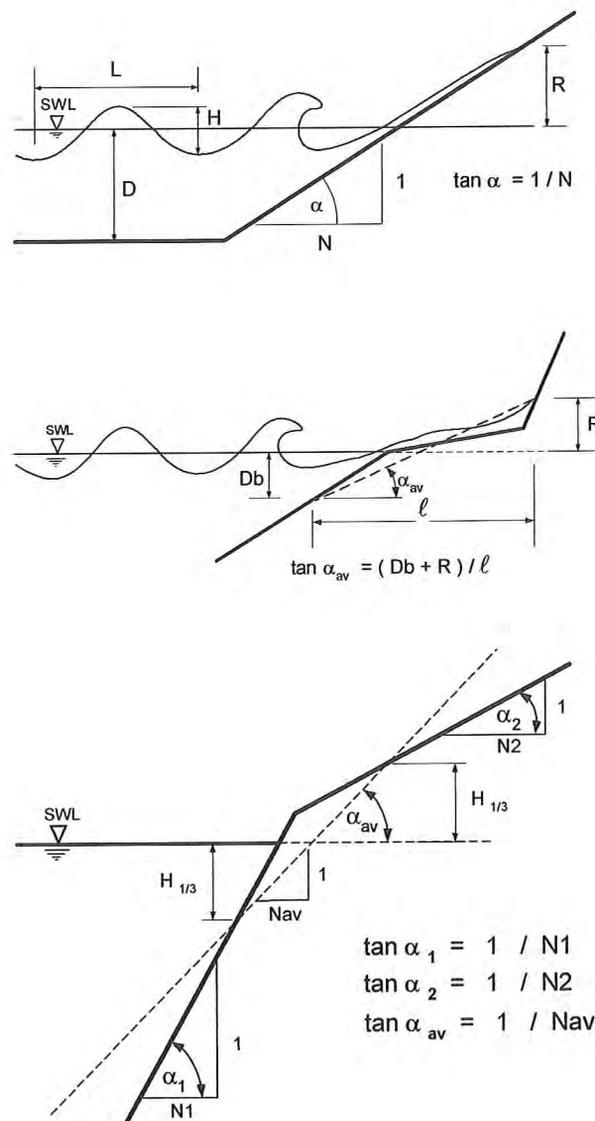
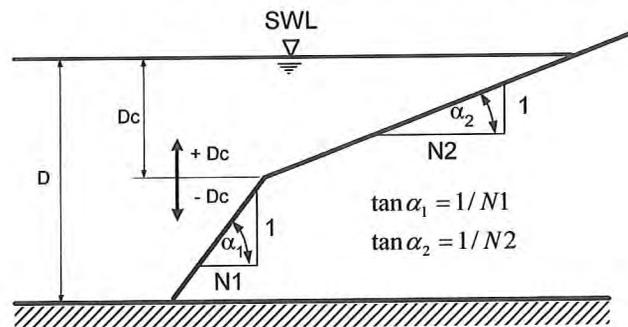


Abb. 89 Verschiedene Definitionen der Deichaußenneigung

Für zwei zusammengesetzte gleichförmige Neigungen gibt es verschiedene Ansätze: HUNT setzte für den Sonderfall, dass sich der Ruhewasserspiegel in Höhe des Knickpunktes befindet, als äquivalente Neigung den Mittelwert beider Neigungen ein. Einen ähnlichen Ansatz schlagen d. WAAL und v. d. MEER (1992), im Zusammenhang mit einer Berme vor, wobei der Neigungsgradient zwischen den Höhen im Abstand von jeweils einer Wellenhöhe $H_{1/3}$ unter- und oberhalb des Ruhewasserstandes SWL ermittelt wird (Abb. 89 unterer Teil). Naturmessungen am Eiderdamm (GRÜNE, 1982) deuten auf einen Bereich zwischen einer Wellenhöhe unterhalb und zwei Wellenhöhen oberhalb des Ruhewasserstandes hin. Auf den stärkeren Einfluss des Gradienten oberhalb des Ruhewasserstandes hatte bereits HENSEN beim Vergleich von Ergebnissen für konvexe und konkave Profile hingewiesen.

Ein weiterer brauchbarer Ansatz wurde von DROGOSZ - WAWRZY尼亚K aufgestellt, der zusätzlich zu den geometrischen Randbedingungen die Tiefwasserwellenlänge enthält (Abb. 90).



DROGOSZ-WAWRZY尼亚K:

$$K7 = \frac{1}{N} = \frac{1}{N_1} + 2 * \frac{Dc}{L_0} * \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right)$$

Modifikation WANG & GRÜNE:

$$2 * \frac{Dc}{L_0} \Rightarrow f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H}{L_0} \right)$$

$$K7 = \frac{1}{N_{su}} = \frac{1}{N_1} + f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H}{L_0} \right) * \left(\frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_2} \right)$$

$$f \left(\frac{Dc}{D}, \frac{H_{1/3}}{L_0} \right) = 2 * e^{-\frac{Dc}{D}} * \left(3 * \left(\frac{H_{1/3}}{L_0} \right)^{0,2} - 1 \right)$$

mit Dc = Abstand zwischen Ruhewasserspiegel und Knickpunkt
 D = Wassertiefe am Deichfuß
 H = Wellenhöhe
 L_0 = Wellenlänge im Tiefwasser = $g * T_m^2 / 2\pi$

Abb. 93 Definition der Neigung für zusammengesetzte Deichaußenböschungen

Dieser Ansatz wurde von WANG & GRÜNE (1996) modifiziert, indem der Term D_c / L_0 geteilt und erweitert wurde in den geometrischen Term D_c / D und die Tiefwassersteilheit H/L_0 . Mit diesem Ansatz ergaben sich sehr gute Korrelationen.

10.2.9 Beiwert K8

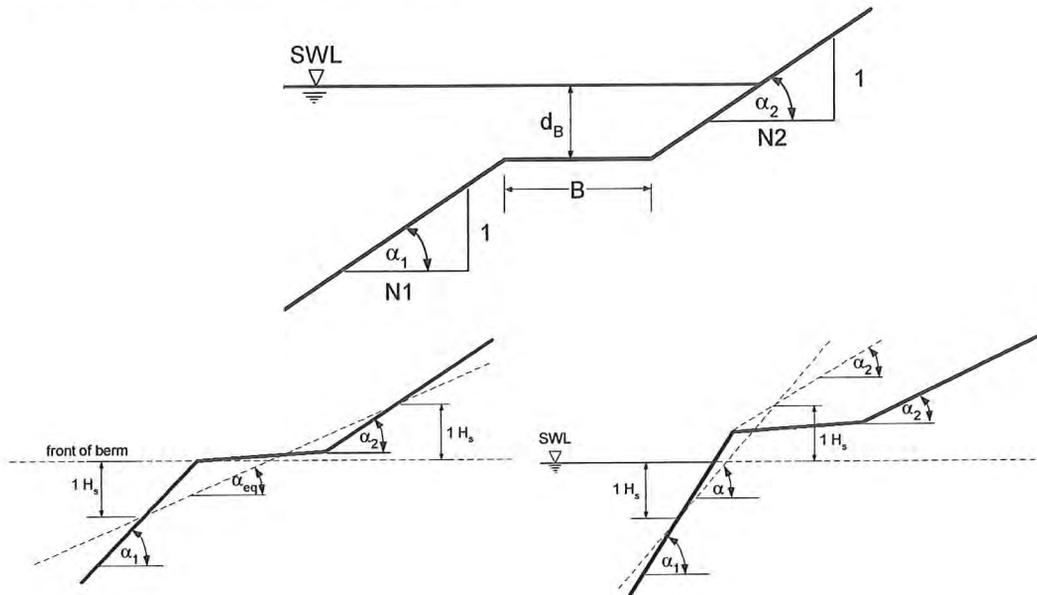
Der Einzelbeiwert K8 beschreibt den Einfluss von Bermen im Bereich der Außenböschung. Über die Verringerung des Wellenaufbaus durch Bermen berichtete bereits HUNT (1959) und beschrieb die größte Verringerung des Wellenaufbaus, wenn der Ruhewasserspiegel sich in Bermenhöhe befindet. HERBICH et al. (1963) untersuchte den Einfluss der Bermenbreite und fand eine Verringerung des Aufbaus linear mit dem Verhältnis Bermenbreite zu Wellenlänge. BATTJES (1974) modifizierte diesen Ansatz in Abhängigkeit von der Wellensteilheit.

Die neuesten niederländischen Ansätze (d. WAAL & v. d. MEER, 1992) basieren auf den Ergebnissen aus kleinmaßstäblichen Modelluntersuchungen mit relativ kurzen Bermenbreiten (Abb. 91 oberer Teil). Dieser Ansatz wurde in Bezug auf die wirksame Wassertiefe auf der Berme nach Untersuchungen im GWK und in der Natur modifiziert (WANG & GRÜNE, 1995, siehe Abb. 91 unterer Teil). Vergleichsberechnungen nach diesem Ansatz mit Naturdaten, die an Querschnitten mit relativ breiten Bermenbreiten gemessen wurden, zeigten ferner, dass dieser Ansatz offensichtlich nicht für alle Bermen verallgemeinert werden kann (GRÜNE, 1996). Dies gilt insbesondere für sehr breite Bermen und Bermen mit nach innen geneigten Neigungen, bei denen ein sogenannter Tosbeckeneffekt auftritt (WANG & GRÜNE, 1995). Zum Einfluss der Bermen auf den Wellenaufbauprozess besteht noch Forschungsbedarf, hierzu wird auf die Ausführungen im zweiten Abschnitt zur Verifikation mit den durchgeführten Messungen in der Natur verwiesen.

10.2.10 Beiwert K9

Mit dem Einzelbeiwert K9 wird der Einfluss der Rauigkeit der Deichoberfläche erfasst. Die Werte für die unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten in Abhängigkeit der Bauweisen der Deiche und Deckwerke werden als lineare Verhältniswerte zum Basiswert ($K9 = 1,0$) für glatte Oberflächen ausgedrückt. In Tabelle 11 sind beispielhaft für einige Bauweisen der Oberflächen

die jeweiligen Beiwerte K9 aufgelistet.



$$K8 = 1 - r_B (1 - r_{dB}), \quad 0.6 \leq \gamma_b \leq 1.0$$

$$r_B = \frac{B/H_{1/3}}{2 \cot \alpha + B/H_{1/3}} \quad r_{dB} = 0,5 * \left(\frac{dB}{H_{1/3}} \right)^2$$

Modifikation:

$$r_{dB} = 0,5 * \left(\frac{dB}{H_{1/3}} \right)^2 \quad \text{ersetzt durch} \quad r_{dB} = 0,5 * \frac{dB}{H_{1/3}}$$

Abb. 91 Definition der Neigung (Beiwert K8) bei Deichquerschnitten mit Bermen

Als glatt können bei den Deichen und Deckwerken Oberflächen mit Asphaltbeton oder mit glatten Steinen betrachtet werden, aber auch vermörteltes, relativ glattes Steindeckwerk. Auch bei der Einschätzung von grasbewachsenen Kleidecken wird entsprechend niederländischen großmaßstäblichen Laboruntersuchungen zunehmend zu Werten wie für glatte Oberflächen tendiert. Diese Ansicht wird durch Beobachtungen während Sturmfluten an der schleswig-holsteinischen Küste bestätigt, wonach sich die Gräser flach an die Oberfläche schmiegen und die Grasdecke glatt wie mit Schmierseife eingerieben wirkt. Nach den bisherigen Erkenntnissen aus den Ergebnissen der Wellenaufmessungen des Messprogramms Dithmarscher Küste und Elbe kann ebenfalls gefolgert werden, dass für grasbedeckte Kleideiche der Beiwert K9 = 1

gewählt werden sollte, andernfalls müsste ggf. im Rahmen der Verifikation der Ergebnisse der Beiwert K2 alternativ erhöht werden.

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen mit künstlichen Rauigkeiten wie z.B. mit Betonklötzen. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse steht wegen der Vielzahl der Formen und Anordnungsmöglichkeiten noch aus. Bei den Ergebnissen aus kleinmaßstäblichen Untersuchungen sind dabei die Maßstabeffekte zu beachten.

Oberflächenbeschaffenheit	K9
glatt, Asphaltbeton	1,0
Klei, grasbedeckt	(0,9) ~ 1,0
Steinpflaster, glatt	1,0
Steindeckwerk glatt, mit Mörtel verschlossen	0,95 ~ 1,0
Steindeckwerk rau, offen	0,5 ~ 0,7
künstliche Rauigkeiten mit Betonblöcken	0,6 ~ 0,95

Tabelle 11 Tabelle mit Beiwerten K9 für einige Bauweisen von Oberflächen

11. Schrifttum

BATTJES, J.A.: Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, Dept. of Civil Engineering, Delft University of Technology, Report Nr. 74-2, 1974

DE WAAL, J.P.; VAN DER MEER, J.W.: Wave run-up and overtopping on coastal structures. Proc. 23rd Intern. Conf. on Coast. Eng. (ICCE ' 92), Venice, 1992

DROGOSZ-WAWRZYNIAK, L.: in "Wave run-up and overtopping", Technical advisory committee on protection against inundation, Government publishing office - The Hague 1974, The Netherlands

FÜHRBÖTER, A.; SPARBOOM, U.; WITTE, H.-H.: Großer Wellenkanal Hannover: Versuchsergebnisse über den Wellenaufbau auf glatten und rauhen Deichböschungen mit der Neigung 1:6. Die Küste, Heft 50, 1989

GRÜNE, J.: Wave run-up caused by natural storm surge waves. Proc. 18th Intern. Conf. on Coast. Eng. (ICCE ' 80), Kapstadt, 1982

GRÜNE, J.: Nearshore wave climate under real sea state conditions, Proc. 3rd. Intern. Conf. on Coast. & Port Eng. in Develop. Countr. (COPEDEC III), Mombasa, Kenia, 1991

GRÜNE, J.: Atlas von Seegangsmessungen im Bereich der deutschen Nordseeküste. BMFT, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben MTK 464 B - Teil II, 1992

GRÜNE, J.: Field study on wave run-up on seadykes. Proc. 25th Intern. Conf. on Coast. Eng., Orlando (ICCE ' 96), 1996

GRÜNE J.: Field study on wave climate in wadden seas and in estuaries. Proc. of 3rd. Intern. Symp. on Ocean Wave Meas. and Analysis (WAVES'97), Virginia Beach, USA, 1997.

GRÜNE, J.: Wave propagation directions under real sea state conditions. Proc. 25th Intern. Conf. on Coast. Eng., Copenhagen (ICCE ' 98), 1998

GRÜNE, J.; BERGMANN, H.: Wave loads on seadykes with composite slopes and berms. Proc. 24th Intern. Conf. on Coast. Eng. (ICCE ' 94), Kobe, 1994

GRÜNE, J.; FÜHRBÖTER, A.: Large Wave Channel for "full-scale modelling" of wave dynamics in surf zones. Proc. of Symp. on Modelling Techniques, San Francisco, 1976

HERBICH, J.B.; SORENSEN, R.M.; WILLENBROCK, J.H.: Effect of berm on wave run-up on composite beaches. Journal of the Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE, Vol. 89, WW2, 1963

HUNT, I.A. jr.: Design of seawalls and breakwaters. Journal of the Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, 1959

NIEMEYER, H.; GÄRTNER, J.; GRÜNE, J.: Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. BMFT, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben MTK 464 B – Teil I, 1992

SAVILLE, T. jr.: Wave run-up on composite slopes. Proc. 6th Conf. on Coast. Eng., 1958

SPARBOOM, U.; GRÜNE, J.; GROSCHE, S.; HAIDEKKER, M.: Full-scale measurements of wave run-up at sea dykes. Proc. 22nd Intern. Conf. on Coast. Eng. (ICCE ' 90), Delft, 1990

V. D. MEER, J.W.; STAM, C.J.M.: Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, Proc. ASCE, Vol. 118, WW4, 1992

V.D.MEER, J.W.; JANSSEN, J.P.F.M.: Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Publikation No.485 , Delft Hydraulics, 1994

V.GENT, M.R.A.: The modelling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Engineering* 22, 1994

V. OORSCHOT, J.H.; D'ANGREMOND, K.: The effect of wave energy spectra on wave run-up. Proc. 11th Intern. Conf. on Coast. Eng., London, 1968

WANG, Z.Y.; GRÜNE, J.: Influence of berms on wave run-up on sloping seadykes, Proc. 4th Intern. Conf. on Coast. and Port Eng. in developing countries (COPEDEC IV), Rio de Janeiro, Brazil, 1995

WANG, Z.Y.; GRÜNE, J.: Wave run-up on revetments with composite slopes. Proc. 25th Intern. Conf. on Coast. Eng. (ICCE ' 96), Orlando, 1996

WANG, Z.Y.; GRÜNE, J.: The effect of foreland on wave climate changes. Proc. 3rd. Intern. Symposium on Ocean Wave Meas. and Analysis (WAVES '97), Virginia Beach, 1997

WASSING, F.: Model investigation on wave run-up carried out in the Netherlands during the past twenty years. Proc. 6th Intern. Conf. on Coast. Eng. (ICCE ` 58), Gainesville, USA, 1958