

Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen

VON HANZ DIETER NIEMEYER u. RALF KAISER

Zusammenfassung

An den Niederrückküsten der Nordsee hat sich vor den Seedeichen aufgrund menschlicher Aktivitäten eine Staffelung von Kunstbauwerken und Naturbereichen entwickelt, die charakteristischer Bestandteil dieser Kulturlandschaft geworden ist: im Übergangsbereich von den Watten zu den supratidalen Salzwiesen (Deichvorländer, Heller) werden in der Verlandungszone zur Stützung der Sedimentation Lahnungen errichtet, die dort den Anwachs zu Hellern fördern und beschleunigen sollen. Auf den Hellern sind wiederum vor den sturmflutkehrenden Seedeichen in einigen Gebieten Sommerdeiche errichtet worden, die in der Regel Schutz vor erhöhten Wasserständen außerhalb der von Herbst bis Winter andauernden Sturmflutzeit bieten. All diese Aktivitäten waren traditionell auf eine Verbesserung der landwirtschaftlichen Erträge ausgerichtet, in jüngster Zeit auch in wenigen Fällen bei den Sommerdeichen auf Fremdenverkehr.

Angesichts der rückläufigen Entwicklung des Bedarfs an landwirtschaftlichen Flächen und gleichzeitig wachsender Ansprüche zur Erhaltung und Schaffung besonderer Lebensräume zur Stärkung der natürlichen Vielfalt an der Küste ist die alleinige Begründung des Systems über die traditionelle landwirtschaftliche Zielsetzung vielfach unzureichend. In der Diskussion ist daher zunehmend der Gesichtspunkt eingebracht worden, dass Lahnungen, Heller und Sommerdeiche mittelbaren oder sogar unmittelbaren zusätzlichen Schutz für den Seedeich bieten. Insbesondere ist dies hinsichtlich einer merklichen Dämpfung des Sturmflutseegangs postuliert worden.

Die gestiegene Bedeutung dieser Fragestellung erfordert systematische Untersuchungen, wobei einerseits Daten hydraulischer Modellversuche und von Naturmessungen analysiert worden sind und andererseits mathematische Modelle eingesetzt wurden. Dabei konnte ein eindeutiges Ergebnis erzielt werden: Die seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen nimmt umso stärker ab, je höher die Sturmflut ist. Im Fall des für die Deichsicherheit anzusetzenden Bemessungswasserstands haben sie keine nennenswerte Wirkung mehr. Selbst die der Sommerdeiche ist vernachlässigbar und erlaubt keinesfalls eine Verringerung der Bestickhöhe von Seedeichen.

Summary

At coastlines in the Wadden Sea of the southern North Sea a system of man-made structures and natural landscape has evolved in the course of centuries: in the silt accretion zone where the tidal flats meet the dyke land-reclamation dams have been installed in order to support and accelerate sedimentation until supra-tidal salt marshes have developed. On existing salt marshes in some areas summer dykes have been built which shelter against lower surges during the summer, but will be flooded by higher storm surges occurring generally between autumn and spring. Primary goal of all these efforts was the improvement of agricultural production and, most recently, a desired increase of tourism.

While the need for agricultural capacity is generally decreasing, the demand for areas being dedicated to nature preservation is growing, particularly with respect to compensation for infrastructure projects in coastal areas. Therefore, in many cases agriculture is no longer a sufficiently legitimate excuse for the existence of a particular system. Moreover, summer dykes have been seriously questioned recently. However, probable benefits of these structures for coastal protection due to their wave-damping capability have been postulated instead.

In order to establish a sound basis for future decisions intensive investigations on the wave damping effects of land-reclamation dams, supra-tidal salt marshes and summer dykes have been carried out by analyzing both hydraulic model tests and field measurements as well as applying mathematical wave models. The result was obvious: with increasing storm surge levels the wave-

damping effect of these structures reduces to nil. Even summer dykes have generally no distinct effect on sea dyke design conditions due to wave attack. Their existence does not warrant any reduction of the main dyke design height.

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung.....	16
2. Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen	20
2.1 Zweck, Wirkungsweise und Bauarten von Lahnungen.....	20
2.1.1 Zweck und Wirkungsweise von Lahnungen	20
2.1.2 Bauarten von Lahnungen.....	22
2.2 Seegangsdämpfung durch Lahnungen	24
2.2.1 Datengrundlagen und bisherige Bewertungen	24
2.2.2 Analysemethoden, Untersuchungsergebnisse und Bewertung	26
3. Hydrodynamische Wirksamkeit von Hellern.....	29
3.1 Entwicklung von Hellern	29
3.2 Seegangsdämpfung durch Heller.....	31
3.2.1 Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden.....	31
3.2.2 Ergebnisse und Bewertung der Untersuchungen	32
3.2.2.1 Untersuchungen im Großen Wellenkanal	32
3.2.2.2 Untersuchungen im mathematischen Wellenkanal	35
4. Hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen	39
4.1 Funktion von Sommerdeichen	39
4.2 Seegangsdämpfung an Sommerdeichen	39
4.2.1 Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden.....	39
4.2.2 Untersuchungsergebnisse	42
4.2.2.1 Variation der Kronenhöhen	42
4.2.2.2 Variation der funktionalen Gestaltung	46
4.2.2.3 Auswirkungen schrägen Wellenangriffs	47
4.2.2.4 Einfluss örtlicher Windwirkung.....	50
4.3 Vergleich mit Daten aus der Natur und aus hydraulischen Modellen.....	52
4.3.1 Vergleich mit Daten aus der Natur	52
4.3.2 Vergleich mit hydraulischen Modellversuchen	55
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	57
6. Schriftenverzeichnis.....	58

1. Einleitung und Problemstellung

Die mittelalterlichen Katastrophenfluten vergrößerten und bildeten an der Friesischen Wattenküste eine Reihe von Buchten, die seither wieder erheblich an Ausdehnung verloren haben oder gar ganz verschwunden sind. Im Gebiet der heutigen niedersächsischen Küste gibt es noch Dollart, Leybucht und Jadebusen, während beispielsweise Accumer und Harlebucht verschwunden sind (WOEBCKEN, 1924, 1943; HOMEIER, 1953, 1969, 1979).

Insbesondere dort, wo die Sturmfluten nach Deichbrüchen auf nur geringfügig erosionsbeständige Bodenschichten wie beispielsweise Torf trafen, wurden große Landflächen zu Teilen der Küstengewässer. Die singuläre Wirksamkeit der Sturmfluten entsprach aber nicht einem mit den dafür maßgebenden mittleren hydrodynamischen Kraftwirkungen in Einklang stehenden morphodynamischen Gleichgewichtszustand: Die Flächen der Sturmflutbuchten waren vielfach im Vergleich zu den Tidevolumen zu groß; darüber hinaus war die Seegangintensität dort geringer als an der offenen Küste. Als Folge dieses Ungleichgewichtes setzten Sedimentation und Verlandung ein (NIEMEYER, 1984, 1991, 1995). Der

grundsätzliche Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen für die wachsende Bevölkerung und vor allem der auf den Böden gewonnenen Neulandes mögliche Ertragsreichtum motivierten die Küstenbewohner den natürlichen Prozess der Verlandung durch stützende Eingriffe zu beschleunigen. Die Landgewinnung wurde zunehmend systematisch und erfolgreich betrieben, wie das Beispiel der Einpolderungsgeschichte von Ley- und Harlebucht eindrucksvoll dokumentiert (Abb. 1 u. 2). Hierbei entwickelte sich folgende Sukzession: Bau von kleinen Dämmen aus Holzpfählen und Busch im aufschlickenden Watt zur Beschleunigung der Sedi-

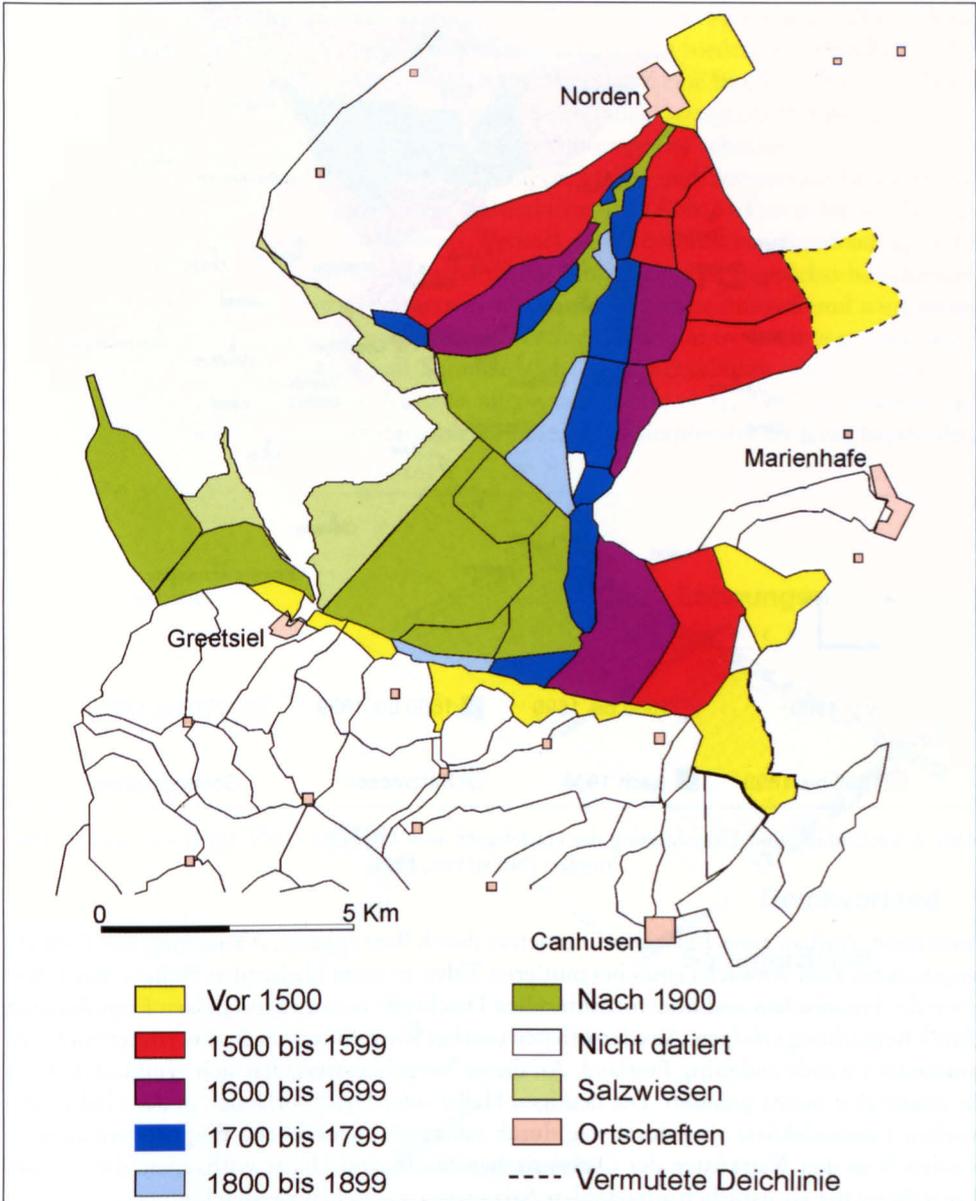


Abb. 1: Verlandung und Einpolderung der Leybucht nach HOMEIER (1955, 1969) seit dem 15. Jahrhundert (NIEMEYER, 1995)

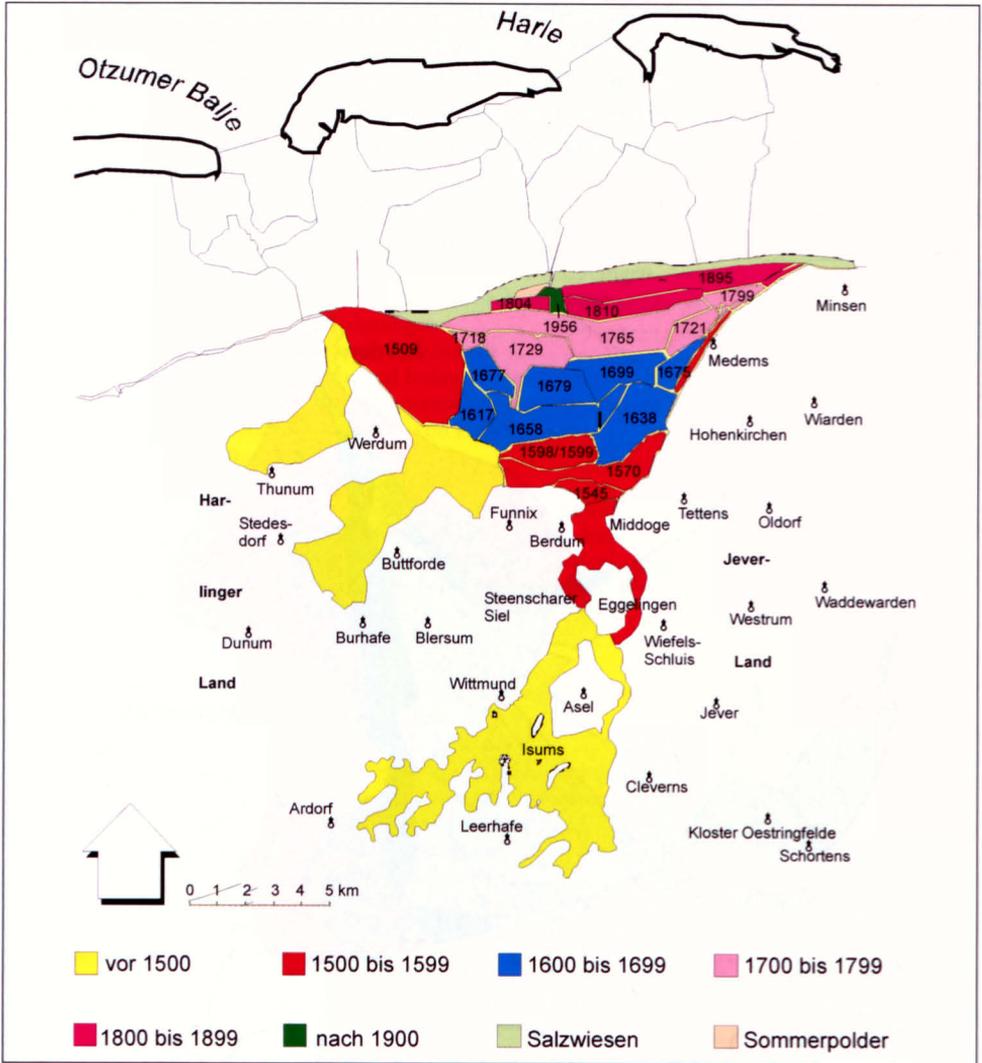


Abb. 2: Verlandung und Einpolderung der Harlebucht nach HOMEIER (1969, 1979) seit dem 15. Jahrhundert (NIEMEYER, 1995)

mentation, Aufbau eines Entwässerungsnetzes durch Begrüpfung, Ansiedlung von Pioniervegetation bis zum Anwachs eines bei mittleren Tiden trocken bleibenden Hellers. Bei Erreichen der botanischen und bodenstrukturellen Deichreife konnte dann dessen Einpolderung durch Bedeichung erfolgen. Aus den offenen und bei Sturmfluten wieder überfluteten Deichvorländern wurde endgültig Festland. An dieser Vorgehensweise hat sich grundsätzlich bis in unsere Zeit nichts geändert. Die heutigen Heller oder Deichvorländer an der niedersächsischen Festlandsküste sind durchweg durch stützende menschliche Eingriffe entstanden. Lediglich an den Wattküsten der Ostfriesischen Inseln sind Heller vorhanden, die von der Entstehung her als natürlich ausgebildete Salzwiesen angesehen werden können.

Mit fortschreitender Technik wurde Landgewinnung auch in geschützten Bereichen an der offenen Küste betrieben. Darüber hinaus wurden die für die Landgewinnung entwickel-

ten Bauwerke – teilweise in modifizierter Form – dazu herangezogen, den Deichfuß bei Scharlagen vor Strömungen und somit gegenüber Unterspülung zu schützen. Diese Situationen waren dann zu meistern, wenn das vor den – damals grundsätzlich auf Hellern errichteten – Deichen liegende Deichvorland so weitgehend abbrach, dass der Deichfuß bereits bei Normaltiden Seegang und Strömungen ausgesetzt wurde.

In späterer Zeit entstand ein weiteres Landgewinnungsbauwerk: der Sommerdeich, durch den ein Sommerpolder gegen Überflutung bei Windfluten geschützt wird. Bereits der Name deutet auf den eigentlichen begrenzten Zweck. Im späten Frühjahr und Sommer sind keine Sturm- oder Orkanfluten mit stark erhöhten Wasserständen zu erwarten. Die leichten Sommerdeiche hatten daher nur eine Kronenhöhe, um bei den niedrigeren Windfluten die Wasserstände zu kehren und dadurch in den Sommermonaten eine landwirtschaftliche Nutzung zu gestatten. In unserer Zeit werden Sommerdeiche auch dazu genutzt, außendeichs gelegene Campingplätze während der Saison vor Überflutungen zu schützen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Lahnungen, Heller und Sommerdeiche Elemente der anthropogenen Landgewinnung an der Wattenküste sind (Abb. 3). Erst in letzter Zeit hat ein Begriffswandel eingesetzt, der in einen Wechsel der ökonomischen Randbedingungen eingebettet ist. Die Gewinnung landwirtschaftlicher Nutzflächen ist angesichts bestehender Überkapazitäten in der Produktion volkswirtschaftlich nicht mehr sinnvoll und wird daher seit einigen Jahrzehnten nicht mehr betrieben. Im selben Zeitraum ist damit begonnen worden, Lahnungen, Deichvorländer und Sommerdeiche als Deichschutzwerke (ERCHINGER, 1976) oder sogar als Elemente des Küstenschutzsystems (MAI et al., 1997) zu bezeichnen. Diese Klassifizierung wird insbesondere mit deren seegangsdämpfender Wirkung begründet,

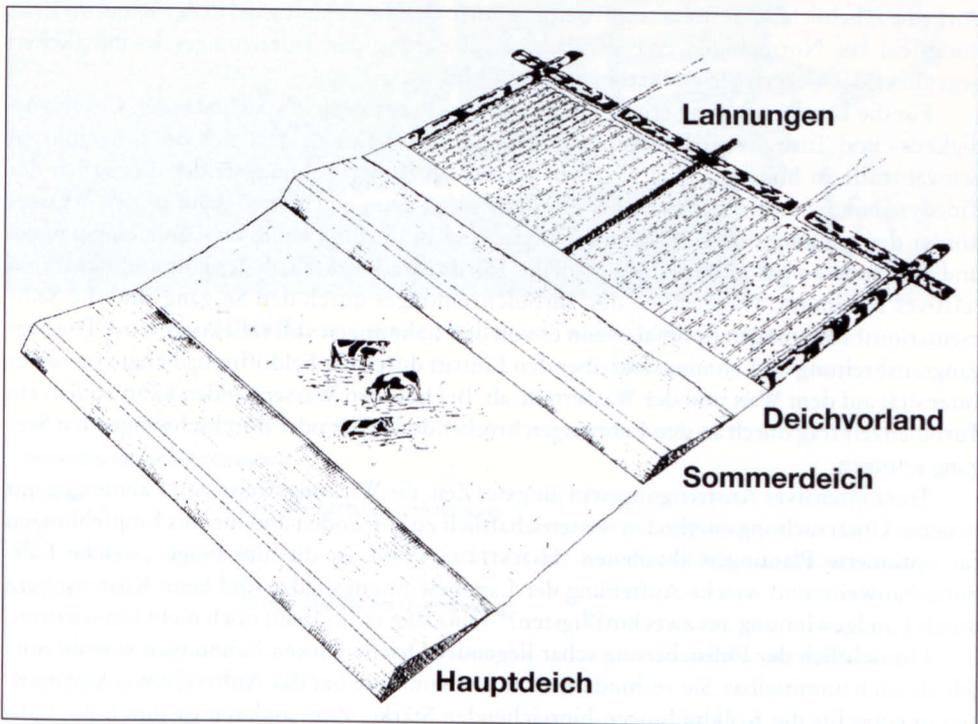


Abb. 3: Schema der Marschenküste am Watt mit Watt, Verlandungsfeld mit Lahnungen, Heller und (b) mit Sommerdeich und -polder, sowie Seedeich

durch die eine höhere Deichsicherheit erreicht werden könne. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Auffassungen haben Widerspruch erfahren (NIEMEYER, 1979a, 1979b, 1983, 1987, 1995; NIEMEYER u. KAISER, 1996, 1998; NIEMEYER et al., 1996).

Im Verlauf der letzten Jahre sind zu den daraus abzuleitenden Fragestellungen weitere Daten und Untersuchungsergebnisse verfügbar geworden, so dass eine wesentlich bessere Beurteilungsgrundlage als früher gegeben ist. Auf dieser Grundlage soll im Folgenden eine eingehende Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen erfolgen, wobei insbesondere deren seegangsdämpfende Wirkung im Hinblick auf die Deichsicherheit bewertet werden wird.

2. Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen

2.1 Zweck, Wirkungsweise und Bauarten von Lahnungen

2.1.1 Zweck und Wirkungsweise von Lahnungen

Lahnungen werden mit dem Ziel errichtet, den von ihnen eingeschlossenen Wasserkörper gegen dynamische Anregungen von außen abzuschirmen und seine Eigendynamik zum Abklingen zu bringen. Die Füllung und Entleerung erfolgt über eine im Vergleich zur Feldgröße- schmale Öffnung (Abb. 4). Die hier erzwungene Geschwindigkeitserhöhung wirkt kaum in das Lahnungsfeld hinein, da das ein- beziehungsweise ausströmende Tidevolumen dort eine erhebliche Querschnittsaufweitung vorfindet. Insgesamt wird in der Regel im Lahnungsfeld bei Normaltiden eine deutliche Reduzierung der Tidestromgeschwindigkeiten gegenüber den vorgelagerten Watten erreicht (Abb. 5).

Für die Landgewinnung ergibt sich aus den im Lahnungsfeld stattfindenden Geschwindigkeits- und Turbulenzreduzierungen als vorteilhafter Effekt, dass sich die mitgeführten Schwebstoffe in höherem Maß absetzen als außerhalb der Lahnungsfelder. Bezüglich der Tidedynamik ist er am stärksten bei Flutkenterung: Zum einen wird dann in den Wasserkörper des Lahnungsfeldes durch die Füllung und Entleerung keine Dynamik eingetragen, und zum anderen hat zu dieser Zeit auch die Tidedynamik außerhalb des Lahnungsfeldes ein relatives Minimum. Hinsichtlich des Turbulenzeintrages durch den Seegang sind die Sedimentationsbedingungen optimal, wenn er von den Lahnungen voll reflektiert wird. Die Seegangsausbreitung im Lahnungsfeld über den Eintritt durch die Feldöffnung hängt von seiner Intensität auf dem Watt und der Wassertiefe ab. Bei höheren Wasserständen kann zudem ein Turbulenzeintrag durch an den Lahnungen brechende Wellen oder durchschwingenden Seegang erfolgen.

Trotz intensiver Anstrengungen in jüngster Zeit, die Wirkungsweise von Lahnungen mit neueren Untersuchungsmethoden wissenschaftlich zu ergründen und hieraus Empfehlungen für optimierte Planungen abzuleiten (HOFSTEDE, 1998), ist die alte Frage „welche Lahnungsbauweise und welche Aufteilung der Landgewinnungsfelder sind beim Küstenschutz durch Landgewinnung am zweckmäßigsten?“ (KRAMER et al., 1960) noch nicht beantwortet.

Hinsichtlich der Fußsicherung schar liegender Deiche wirken Lahnungen sowohl mittel- als auch unmittelbar. Sie verhindern zum einen unmittelbar das Auftreten von Strömungen in einer für die Kolkbildungen hinreichenden Stärke. Zum anderen ist durch die Lahnungen mäandernden Prielen eine Bewegung zum Deich hin versperrt; mittelbar verhindern Lahnungen somit eine Gefährdung der Fußsicherung.

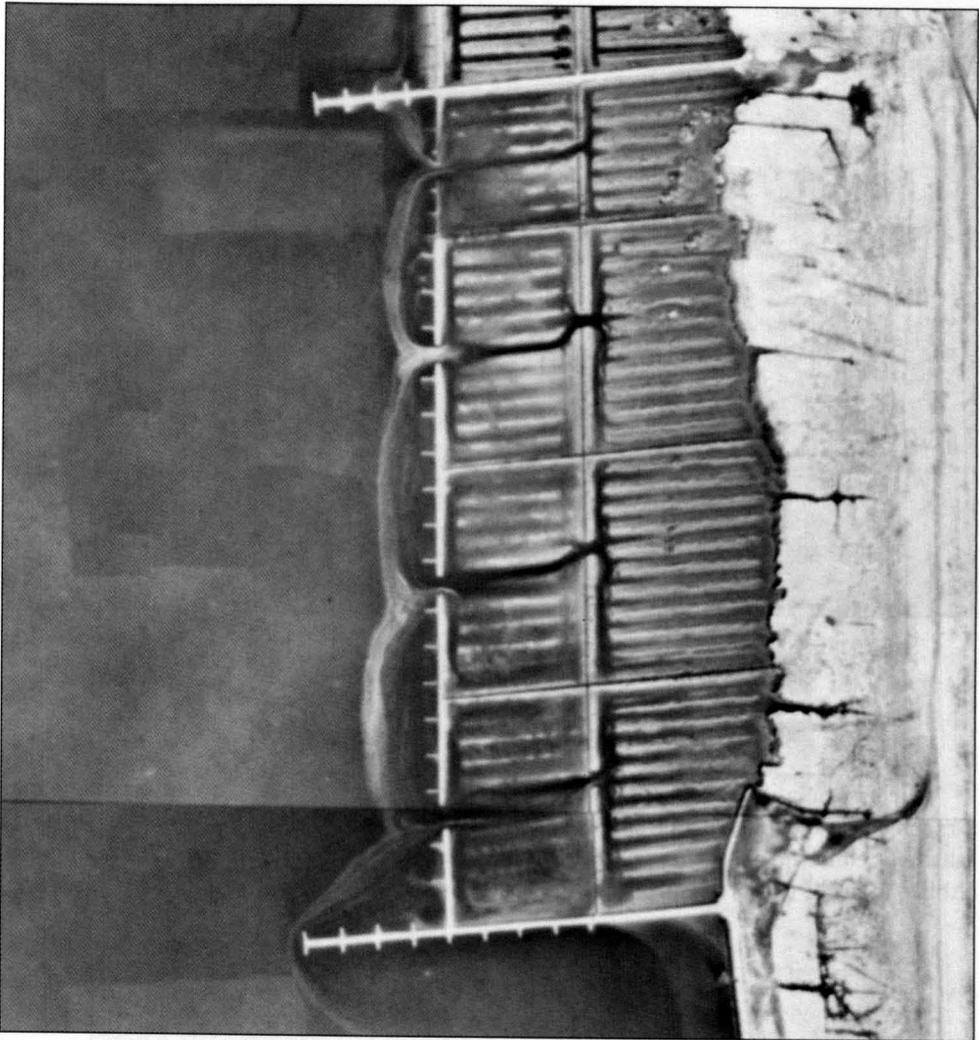


Abb. 4: Luftbild von Lahnungsfeldern bei Paddingbüttel, Wurster Küste

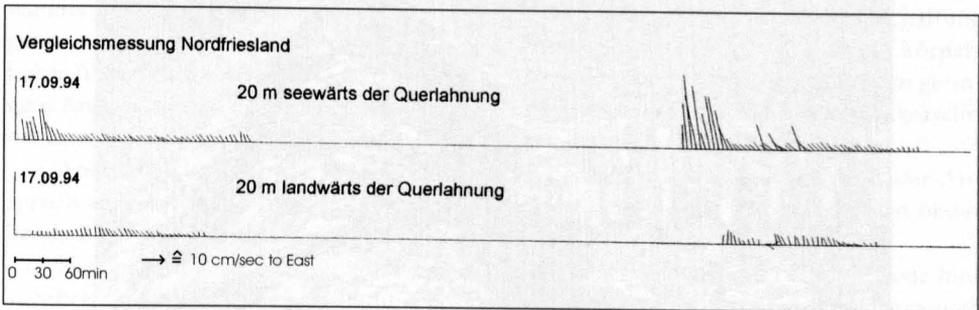


Abb. 5: Vektoren der Tideströmung außer- und innerhalb eines Lahnungsfeldes; Naturmessungen im Testfeld Ockholm/Nordfriesische Küste (REIMERS et al., 1998)



Abb. 6: Buschlahnungen bei Padingbüttel, Wurster Küste (RAGUTZKI u. STEPHAN, 1996)

2.1.2 Bauarten von Lahnungen

Die ursprünglichen Lahnungsbauten wurden als Kombinationen von Holzpfählen und Strauchwerkbündeln errichtet. Diese traditionelle Bauweise der Buschlahnung ist bis heute erhalten geblieben (Abb. 6), wengleich zwischenzeitlich massive Baustoffe dominierten (Abb. 6 u. 7). Sie hatten sich zwar – zumindest teilweise – als weniger empfindlich gegen See-



Abb. 7: Geschüttete Steinlahnung an der ostfriesischen Küste (ERCHINGER, 1970)



Abb. 8: Lahnung aus Betonfertigteilen an der ostfriesischen Küste (ERCHINGER, 1970)

gangswirkung und Verwitterung gezeigt. Die Rückkehr zur traditionellen Bauweise hat zwei wesentliche Gründe: Einerseits werden Lahnungsbauten heute – wie auch bei den sogenannten Notstandsprogrammen der Weimarer Republik – als Mittel zur Arbeitsbeschaffung genutzt. Der Bau von Buschlahnungen ermöglicht wegen des höheren Anteils an körperlicher Arbeit zum einen den Einsatz von mehr Arbeitskräften und stellt zum anderen geringere Anforderungen an den Ausbildungsstand der Einzusetzenden, als der stärker maschinenorientierte Bau von massiven Lahnungsbauwerken.

Andererseits ist mit der Einrichtung der Nationalparke im Wattenmeer auch der Anspruch einer stärkeren Naturbelassenheit verbunden, dem die aus Naturbaustoffen bestehende Buschlahnung eher gerecht wird.

Hinsichtlich der Funktion von Lahnungen sind keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der konstruktiven Ausbildung bekannt und aufgrund der Physik der Vorgänge auch nicht zu erwarten. Die Wirkung der Lahnungen ist hinsichtlich des einschwingenden Seegangs primär die eines Linienbauwerks. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der seegangs-

dämpfenden Wirkung bei höheren Wasserständen, da die Wechselwirkungen zwischen Welle und dem wasserüberdeckten Lahnungskörper immer geringer werden.

2.2 Seegangsdämpfung durch Lahnungen

2.2.1 Datengrundlagen und bisherige Bewertungen

Es sind verschiedentlich Naturmessungen zur seegangsdämpfenden Wirkung von Lahnungen vorgenommen und analysiert worden (ERCHINGER et al., 1996; REIMERS et al., 1998). Hierbei war Lahnungen eine seegangsdämpfende Wirkung in Größenordnungen von 25 % bis 50 % zugeschrieben worden. Allerdings wurden diese Ergebnisse über die Regressionsanalyse aller Messungen erzielt (Abb. 9 u. 10).

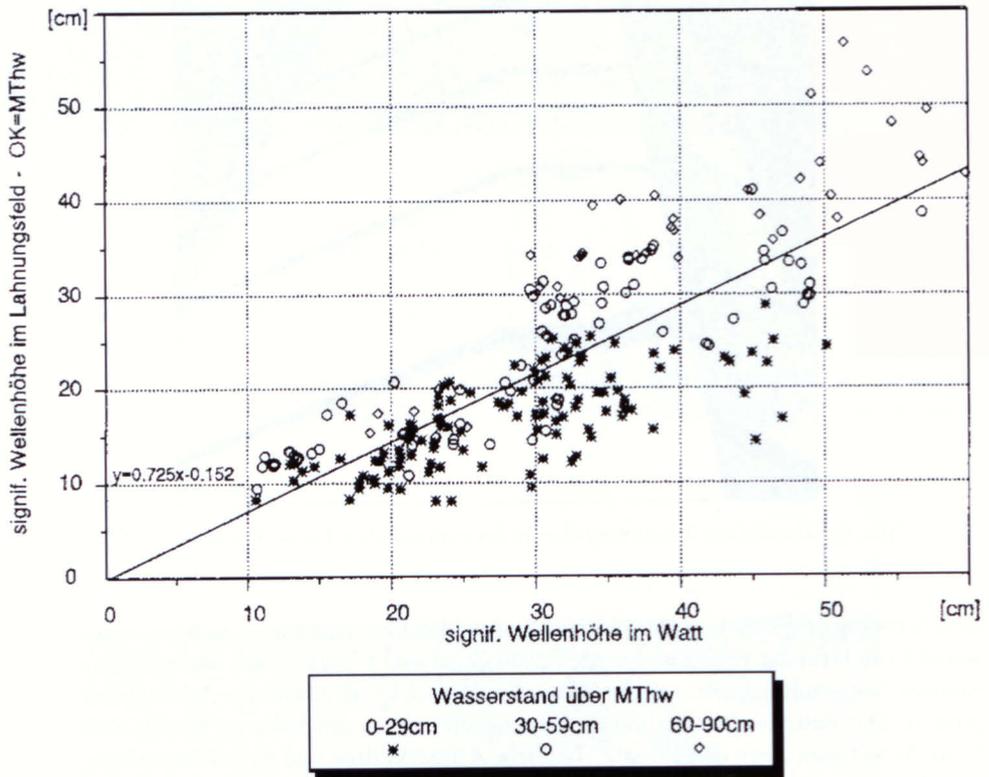


Abb. 9: Analyse von Naturmessungen zur seegangsdämpfenden Wirkung von Lahnungen an der ostfriesischen Küste (ERCHINGER et al., 1996)

Aus dem KFKI-Forschungsvorhaben „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten“ standen die Daten der vom Amt für ländliche Räume Husum vorgenommenen Naturmessungen von Seegang außer- und innerhalb von Lahnungsfeldern (Abb. 11) zur Verfügung (ALBERTS et al., 1995), die auch von REIMERS et al. (1998) genutzt worden waren.

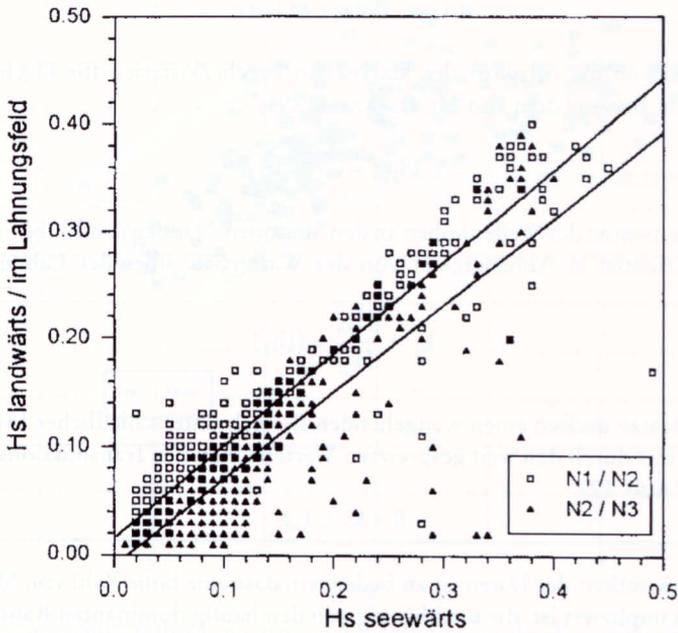


Abb. 10: Analyse von Naturmessungen zur seegangsdämpfenden Wirkung von Lahnungen an der ostfriesischen Küste (ERCHINGER et al., 1996)

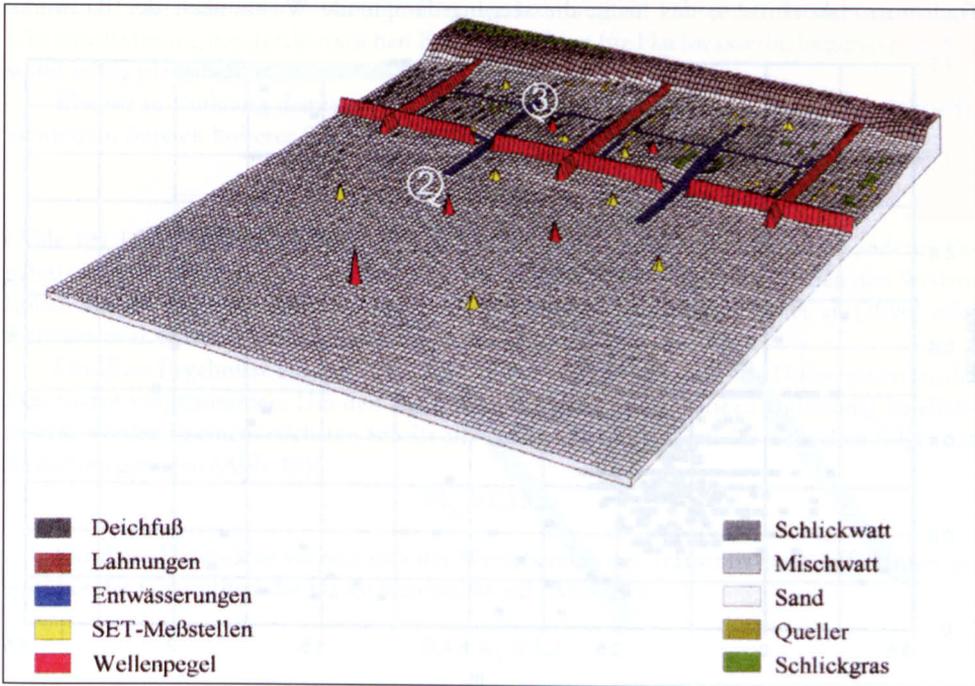


Abb. 11: Topographie und Struktur der Lahnungsfelder bei Ockholm, Nordfriesische Küste mit Wellenpegeln (Vertikal- gegen Horizontalmaßstab 20-fach überhöht); Testfeld (REIMERS et al., 1998)

2.2.2 Analysemethoden, Untersuchungsergebnisse und Bewertung

Ausgehend von der Struktur der klassischen Brecherkriterien für Flachwasserbedingungen wie zum Beispiel dem von MC COWAN (1894)

$$H_{\text{krit}} = 0,78 \cdot h$$

werden die Quotienten der Wellenhöhen an den Stationen 2 (außen) und 3 (innen) als Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wassertiefe über der Lahnung analysiert (Abb. 12):

$$k_T = \frac{H_{\text{Sb}}}{H_{\text{Sa}}} = f(h_L)$$

Die Datensätze decken einen weitgehenden Bereich unterschiedlicher Dämpfungskarakteristik ab, was durch den weit gespreizten Wertebereich des Transmissionskoeffizienten deutlich wird (Abb. 12):

$$0 < k_T \leq 1,2$$

Bei der Gesamtheit der Daten ist zu bedenken, dass eine hohe Zahl von Messungen mit kleinen Wellen impliziert ist, die unabhängig von den häufig dominanten Randbedingungen sind und somit einen Zufallscharakter aufweisen. Setzt man das Gros der Daten in einen Korridor (Abb. 12), so werden zum einen Daten mit Zufallscharakter eliminiert und zum anderen Strukturen erkennbar: Mit zunehmender Wassertiefe über der Lahnung wächst der Transmissionskoeffizient, das heißt, die seegangsdämpfende Wirksamkeit des Bauwerks

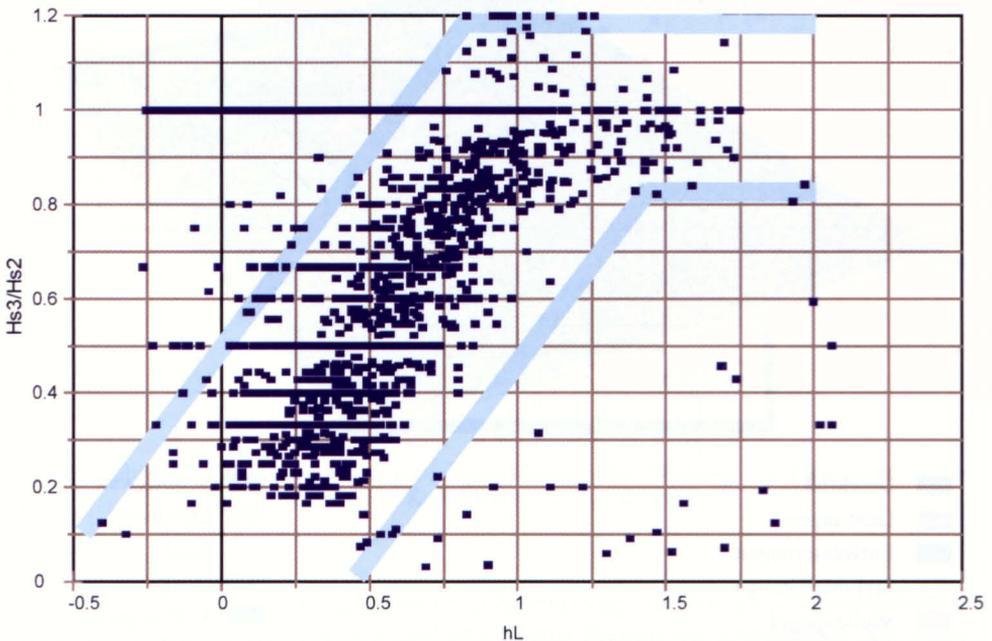


Abb. 12: Seegangstransmission über Lahnungen in Abhängigkeit von der Wassertiefe oberhalb der Lahnung (Ockholm/Nordfriesland, alle Daten)

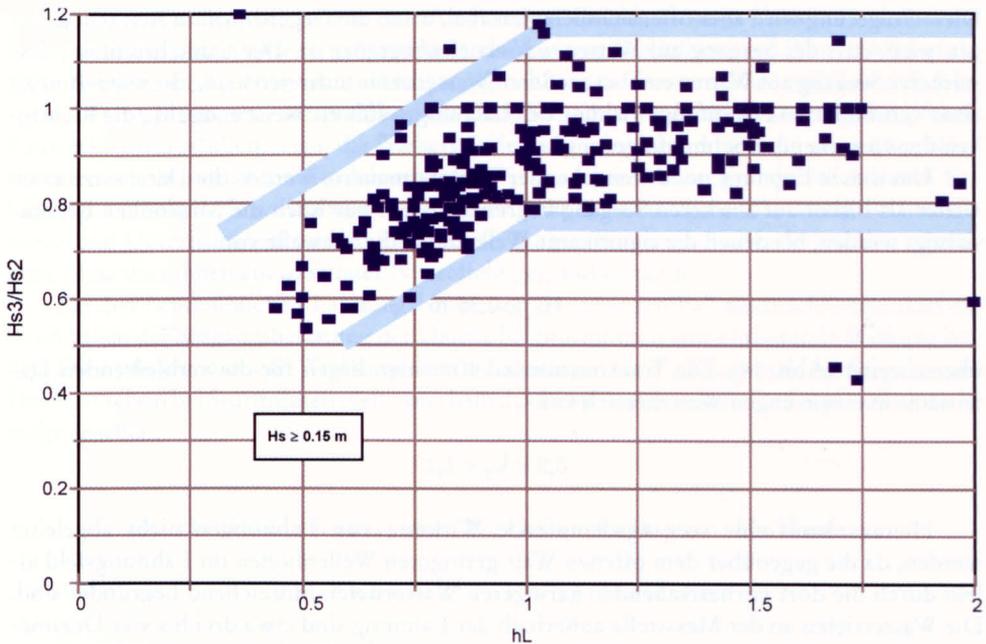


Abb. 13: Seegangstransmission über Lahnungen in Abhängigkeit von der Wassertiefe oberhalb der Lahnung (Ockholm/Nordfriesland, reduzierte Datenrate $H_s \geq 0,15$ m)

nimmt mit zunehmender Wassertiefe über der Lahnung ab. Dieser Effekt steht in völliger Übereinstimmung mit den klassischen Brecherkriterien für Flachwasserbedingungen und ist somit völlig plausibel.

Ebenso in Einklang damit steht das Einpendeln der gemessenen Transmissionskoeffizienten im Bereich höherer Wasserstände innerhalb eines Wertebereichs von

$$0,8 \leq k_T \leq 1,2$$

(Abb. 12). Die hier gewählte differenzierende Betrachtungsweise führt somit zu anderen Ergebnissen als die einheitliche Analyse aller Daten über die Regression zwischen den Wellenhöhen außer- und innerhalb des Lahnungsfeldes, wie von ERCHINGER et al. (1996) oder REIMERS et al. (1998) vorgenommen.

Um diese Ergebnisse einordnen zu können, wird eine weitergehende Differenzierung der Datensätze vorgenommen. Um den Zufallscharakter der Daten nahezu vollständig zu eliminieren, werden in einem nächsten Schritt alle Datensätze eliminiert, die nicht dem folgenden Kriterium genügen (Abb. 13):

$$H_{sa} \geq 0,15 \text{ m}$$

Für diese Datensätze verengt sich der Wertebereich des Transmissionskoeffizienten gegenüber der Gesamtheit der Daten signifikant auf (Abb. 13):

$$0,4 \leq k_T \leq 1,2$$

Hieraus ist – der dem ersten Anschein nach – paradoxe Schluss zu ziehen, dass mit zunehmender Intensität des Seegangs die wellendämpfende Wirkung von Lahnungen abnimmt.

Diese Folgerung wird aber offensichtlich plausibel, wenn die Gegebenheit in Betracht gezogen wird, dass der Seegang auf Watten wassertiefenbegrenzt ist. Der Umkehrschluss, dass stärkerer Seegang auf Watten erst bei größeren Wassertiefen auftreten kann, die wiederum zu einer verminderten Dämpfungswirkung der Lahnungen führen, weist endgültig die Richtigkeit der vorstehenden Schlussfolgerung aus.

Um dieses Ergebnis noch weitgehender zu untermauern, werden die Datensätze noch weiter als bisher auf stärkeren Seegang begrenzt, indem nur noch die Messreihen berücksichtigt werden, bei denen die signifikante Wellenhöhe die Schwelle von

$$H_{sa} \geq 0,35 \text{ m}$$

überschreitet (Abb. 14). Die Transmissionskoeffizienten liegen für die verbleibenden Datensätze in einem engen Wertebereich von

$$0,8 < k_T < 1,1$$

Hieraus kann eine seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungen nicht abgeleitet werden, da die gegenüber dem offenen Watt geringeren Wellenhöhen im Lahnungsfeld allein durch die dort vorherrschenden geringeren Wassertiefen hinreichend begründet sind. Die Wassertiefen an der Messstelle außerhalb der Lahnung sind etwa drei bis vier Dezimeter größer als an der im Lahnungsfeld (REIMERS et al., 1998). Wie seit längerem bekannt, stehen Wellenhöhen mit Wattwassertiefen und respektive den geodätischen Wathöhen in einem linearen dynamischen Gleichgewicht (NIEMEYER, 1983, 1987, 1991; NIEMEYER et al., 1996).

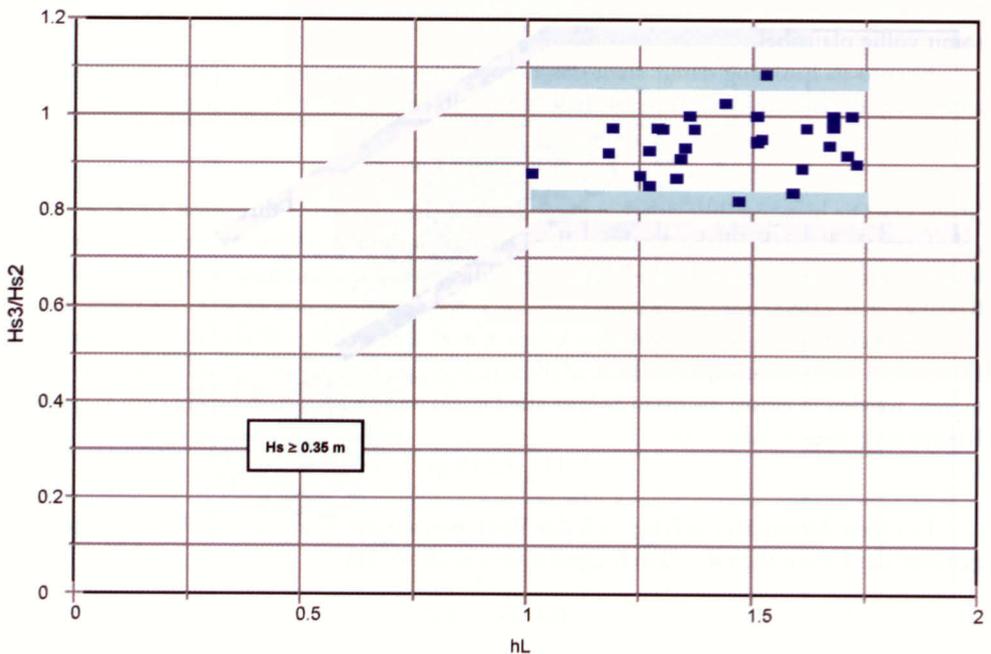


Abb. 14: Seegangstransmission über Lahnungen in Abhängigkeit von der Wassertiefe oberhalb der Lahnung (Ockholm/Nordfriesland), reduzierte Datenrate $H_s \geq 0,35 \text{ m}$

Die hier gewählte differenzierende Analyse der Naturdaten weist plausibel aus, dass die bisher pauschal unterstellte seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungen (ERCHINGER et al., 1996; REIMERS et al., 1998) nicht durchgängig haltbar ist. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Lahnungen – entsprechend der Bauhöhe – ihre Funktion als seegangsdämpfende Bauwerke dann erfüllen, wenn die Wasserstände nicht oder nur geringfügig gegenüber Normaltiden erhöht sind. Eine Ausdehnung des Wirkungsbereichs ist grundsätzlich durch Erhöhungen möglich; sie wird aber aus wirtschaftlicher Sicht zunehmend unattraktiv: Investitions- und Unterhaltungskosten des stärker seegangsexponierten Bauwerks würden zunehmen, ohne dass ihnen ein adäquater Nutzeffekt gegenüberstände.

Bei den heute üblichen Lahnungsbauweisen ist auf jeden Fall auszuschließen, dass sie hinsichtlich der Seegangbelastung der Deiche bei Sturmfluten eine entlastende Wirkung haben. Die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen für die Dämpfung des Seegangs am Deich ist schon bei Sturmfluten weit unterhalb des Bemessungswasserstandes praktisch nicht mehr gegeben.

3. Hydrodynamische Wirksamkeit von Hellern

3.1 Entwicklung von Hellern

Es ist bereits ausgeführt worden, dass die aktive Landgewinnung durch den Menschen gerade in den im Mittelalter entstandenen Sturmflutbuchten ihren Ursprung nahm, da die naturgegebenen morphodynamischen Randbedingungen in diesen Gebieten dem „Anwachs“ förderlich waren. Die Entwicklung von Hellern im Tidegebiet ist dementsprechend an für die Verlandung günstige Bedingungen gebunden.

Soweit bekannt, hat KRÜGER (1911) erstmals diese Zusammenhänge erläutert: Er weist auf Unterschiede in der Breite der Watten vor der Küste im Zusammenhang mit dem „Land bilden“ hin:

„Die Breite des Wattes, das ist die Entfernung der Hochwasserlinie von der eigentlichen See, hängt vom Angriff der Wellen und von der durch den Wind verursachten Strömung ab; wo diese Kräfte klein genug sind, kann sich Land bilden. Diese Kräfte hängen aber wieder ab von der Lage zur See und zur ganzen Küste.“

Hieran wird deutlich, dass die Ausbildung von Hellern als supratidale Bereiche des Deichvorfeldes von der hinreichenden Dämpfung des von See einschwingenden Seegangs abhängt. Eine weitere eindrucksvolle Dokumentation von den Wechselwirkungen des Seegangs mit Hellerbildung und -abbruch konnte auf der Grundlage der von HOMEIER (1962) vorgenommenen Rekonstruktionen historischer morphologischer Zustände für den Küstenabschnitt bei Norddeich vorgenommen werden (NIEMEYER, 1990, 1995):

Vor Festlegung der Seegaten durch stabilisierende Kunstbauwerke kam es infolge von deren Umlagerungen zu örtlich wechselnder Seegangintensität an der benachbarten Festlandsküste. Hiermit verbunden war sowohl ein Verschwinden von Hellern und sogar Poldern als auch eine Neubildung von Hellern (Abb. 15): Das allmähliche Verschwinden der früheren Insel Buisse nach 1650 ermöglichte die Vereinigung der beiden Seegaten Buissegat und Norderneyer Gat zu einem. Der Riffbogen des neuen Seegats mit dem vereinigten großen Tidevolumen erhielt ein größeres Bogenmaß mit entsprechend weiterer Staffelung der Platen. Gleichzeitig vergrößerte sich der relative Anteil sublitoraler Flächen im Tidebecken in der Nähe der Seegatrinne. Hierdurch und aufgrund der größeren Breite der Hauptrinne des Seegats war das Einschwingen weniger gedämpften Seegangs auf den benachbarten Abschnitt

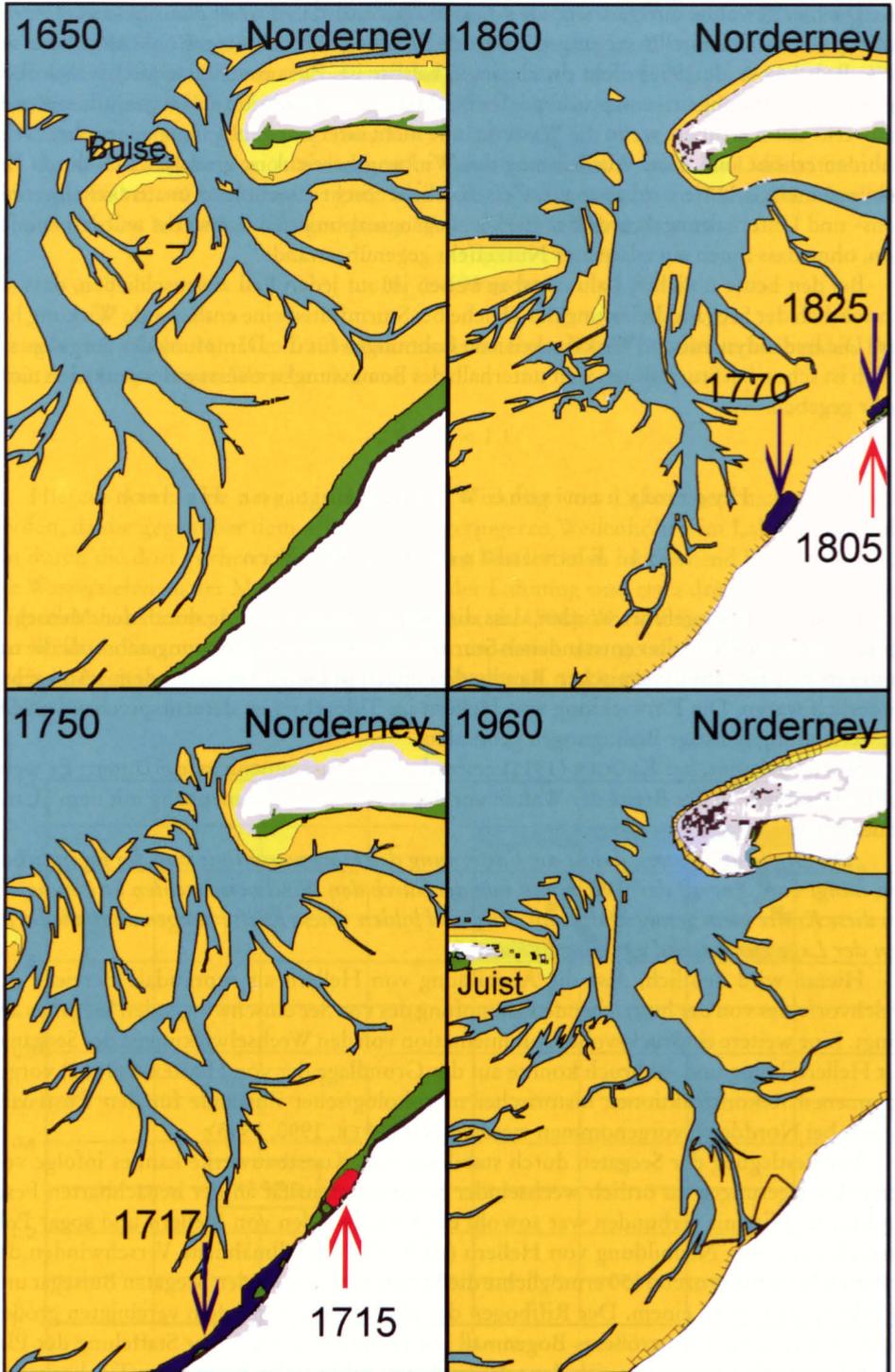


Abb. 15: Vorlandentwicklung, Poldergewinne (rote Pfeile) und -verluste (blaue Pfeile) durch veränderten Seegangseintrag nach Seegatumlagerung (Auszug aus Hist. Karte Nr. 5) (NIEMEYER, 1995)

der Festlandsküste als vordem möglich. Der 1650 – noch vorhandene – nach Osten sich verbreiternde Saum von Hellerflächen ist 1750 bereits vor dem Westermarscher Deich verschwunden. Nach den Deichbrüchen der Katastrophenflut von 1717 musste hier die Deichlinie zurückgenommen werden. In diesem Bereich wirkte sich aus, dass mittlerweile die abschirmende Wirkung der ehemaligen Düneninsel Buise weitgehend verloren gegangen war und zudem Überlagerungen von Seegangssystemen aus beiden Seegatritten über einen ausgeprägten Wurzelbereich auf diesen Küstenabschnitt gelenkt wurden. Der Heller vor dem östlich anschließenden Lintelmarscher Deich muss innerhalb dieses Zeitabschnitts noch so stabil erschienen sein, dass dort der Poppe-Janssen-Polder errichtet wurde. Bis 1860 hat sich dann – infolge der endgültigen Vereinigung der ehemals zwei Seegaten – der relative Anteil sublitoraler Flächen zwischen den Inseln Juist und Norderney weiter vergrößert, wodurch der einschwingende Seegang weniger Dämpfung erfährt. Auch der Lintelmarscher Küstenbereich ist nunmehr einer intensiveren Seegangsbelastung als früher ausgesetzt, so dass jetzt auch hier die Heller vollständig erodiert sind. Weiterhin musste dort auch um 1770 der Poppe-Janssen-Polder ebenso aufgegeben werden wie in der Ostermarsch nach der Orkanflut von 1825 der erst 1805 eingerichtete Vinckepolder. An der Stelle des ehemaligen Poppe-Janssen-Polders ist 1960 nur noch Watt, vom einstigen Vinckepolder ist noch ein schmaler Keil supratidalen Deichvorlandes übrig geblieben: der Vinckenheller.

An der Deutung der langfristigen morphodynamischen Entwicklung des ostfriesischen Küstengebietes bei Norddeich wird deutlich, in welchem hohem Maße die Entwicklung und der Bestand von Hellern durch das örtliche Seegangsklima bestimmt werden. Heller können nur in den Küstenabschnitten ent- und bestehen, in denen eine dafür kritische Seegangsintensität nicht überschritten wird.

Diese Folgerung wird auch durch die mittlerweile verfügbaren Kenntnisse über das regionale Seegangsklima gestützt. Am Beispiel des Einzugsgebietes des Norderneyer Seegats konnte sowohl durch umfangreiche Naturmessungen (NIEMEYER, 1983) als auch durch mathematische Modellierungen (NIEMEYER et al., 1995) derselbe Zusammenhang nachgewiesen werden. Heller haben sich erst in großer Entfernung vom Seegat ausgebildet, durch das intensiver Seegang von der Nordsee einschwingt. Zwischen der Entfernung zum Seegat und Abnahme der Seegangsintensität besteht ein eindeutiger Zusammenhang (Abb. 16).

3.2 Seegangsdämpfung durch Heller

3.2.1 Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden

Daten zum Seegang auf Hellern liegen aus Naturmessungen sowie von hydraulischen und mathematischen Modellen vor. Die Naturmessungen sind zum einen mittelbare Messungen über die Einmessung von Teekgrenzen nach Sturmfluten (ERCHINGER 1974; NIEMEYER 1976; INGENIEURKOMMISSION, 1979) sowie unmittelbare mittels Wellenpegeln (NIEMEYER, 1977a, 1983; NIEMEYER et al., 1996). Im Rahmen des seinerzeitigen Teilprojektes A5 (Leitung: Professor Dr.-Ing. Führböter †; Dr.-Ing. Dette) des Sonderforschungsbereichs 205 an der Universität Hannover sind 1989 und 1990 hydraulische Modellversuche im Großen Wellenkanal vorgenommen worden; deren Daten wurden zur Verfügung gestellt.

In diesem Forschungsvorhaben wurde der Seegangsverlauf bei Sturmfluten systematisch für eine weite Bandbreite von Wasserstandszenarien mit dem mathematischen Seegangsmo- dell HISWA (HOLTHUIJSEN u. BOOIJ, 1987; BOOIJ u. HOLTHUIJSEN, 1992) vorgenommen. Vorab wurde anhand der Versuchsdaten aus dem Großen Wellenkanal die Plausibilität mit

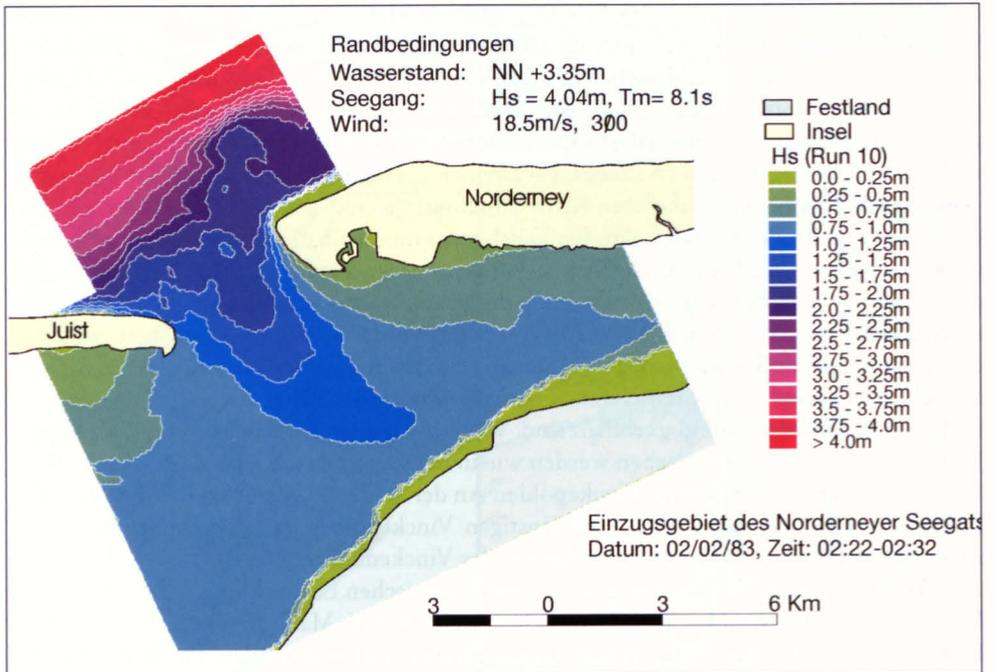


Abb. 16: Ausbreitung des Seegangs im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegangs, Abnahme der signifikanten Wellenhöhen und Lage der Heller an der Festlandsküste (NIEMEYER et al., 1995)

HISWA erzielbarer Ergebnisse überprüft. Grundsätzlich kann aufgrund der im Modell implementierten Module für die relevanten physikalischen Prozesse davon ausgegangen werden, dass die damit für Vorlandwirkung auf Seegang erzielten Ergebnisse naturähnlich sind. Die Verfügbarkeit von Daten im quasi-Naturmaßstab-Modell soll jedoch dazu genutzt werden, die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse für diejenigen transparent zu machen, die über keine hinreichenden Informationen über die maßgeblichen physikalischen Prozesse sowie deren mathematische Formulierung und Modellierung verfügen.

3.2.2 Ergebnisse und Bewertung der Untersuchungen

3.2.2.1 Untersuchungen im Großen Wellenkanal

Das im Großen Wellenkanal eingebaute Deichvorland weist einen gegenüber Naturbedingungen abrupten und starken Geländesprung von 1,5 m auf (Abb. 17). Hiermit kann hinsichtlich der Seegangsdämpfung ein Optimum unterstellt werden, wengleich die Naturähnlichkeit nur bedingt gegeben ist. In dieser Form tritt in der Natur ein solch abrupter Übergang nur dann auf, wenn Heller sich im Abbruch befinden. Bei Anwachs und Stabilität ist hingegen ein allmählicherer Übergang vom Watt zum Heller gegeben. Selbst bei Abbruchkanten ist diese Höhe des Geländesprungs als ein – wenn überhaupt – in sehr seltenen Ausnahmefällen auftretendes Maximum anzusehen. Die morphodynamischen Randbedingungen auf den Wattten der Nordseeküste stehen den Ausbildungen derart hoher Geländesprünge entgegen.

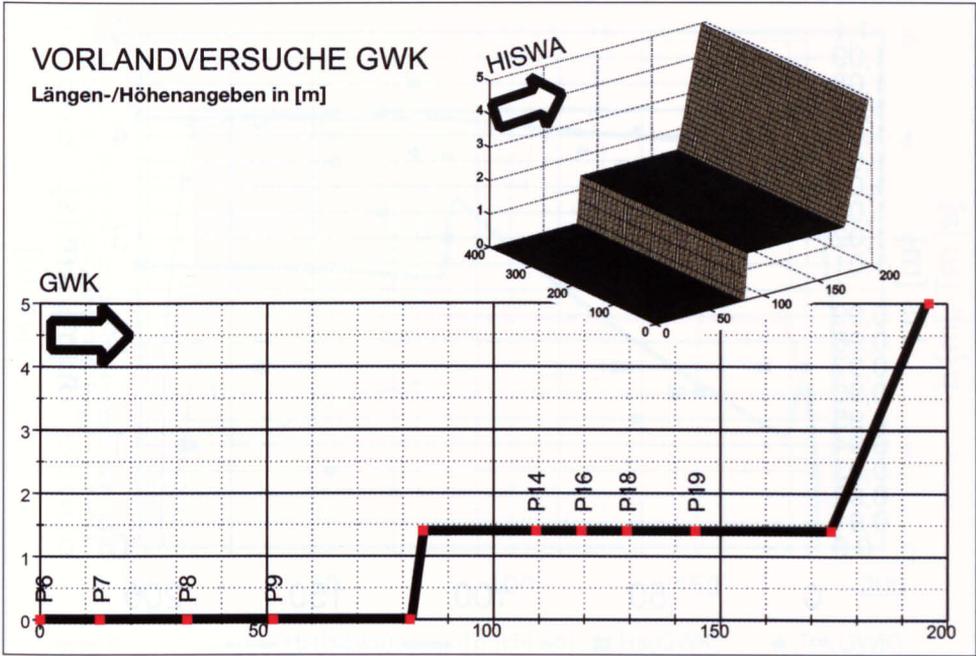


Abb. 17: Lage der Wellenpegel im Längsschnitt des Großen Wellenkanals und Topographie des entsprechenden mathematischen Wellenkanals für HISWA

Dennoch zeigt sich selbst für diese Randbedingungen im Großen Wellenkanal keine nennenswerte Seegangsdämpfung, wie hier beispielhaft anhand der Ergebnisse von zwei Testreihen mit Naturspektren dokumentiert wird (Abb. 18 u. 19). Die Messdaten werden hier unabhängig von der Problematik der Messgenauigkeit erörtert. Es ist aber bei der Bewertung der Ergebnisse zu bedenken, dass besonders geringe Änderungen möglicherweise ganz oder teilweise auf Grenzen der Messgenauigkeit zurückzuführen sind. Dieser Fragestellung ist hier aber nur dann nachzugehen, wenn die Plausibilität der Ergebnisse in Frage zu stellen sein wird.

Bei einer Wassertiefe von 4,9 m, die auf dem Vorland auf 3,5 m reduziert wird, verändern sich die kennzeichnenden Seegangparameter wie folgt: Die signifikante Wellenhöhe beträgt am ersten Pegel P6: $H_S = 0,97$ m; sie nimmt bereits vor dem Erreichen des Deichvorlandes leicht ab. Dort erfolgt erst eine Erhöhung und dann letztendlich am letzten Pegel P19 (Abb. 17) eine Abnahme auf $H_S = 0,93$ m. Der Transmissionskoeffizient als Maß der Dämpfung beträgt somit:

$$k_T = \frac{H_{SH}}{H_{SW}} = \frac{0,93}{0,97} = 0,959$$

Die Dämpfung des Seegangs beträgt somit auf diesem etwa 100 m breiten Vorland bezogen auf seine signifikante Wellenhöhe 4,1 %; sie liegt auch für die mittleren Perioden mit 5,7% in gleicher Größenordnung (Abb. 18). Die relative Wellenhöhe betrug eingangs $H_S/h = 0,20$ und fiel nach vorübergehender stärkerer Erhöhung auf dem Vorland auf $H_S/h = 0,27$ zurück.

Ein tendenziell ähnliches Ergebnis stellt sich selbst dann ein, wenn für die gleiche Modelltopographie im Wellenkanal die Wassertiefen reduziert werden. Bei einer Wassertiefe von

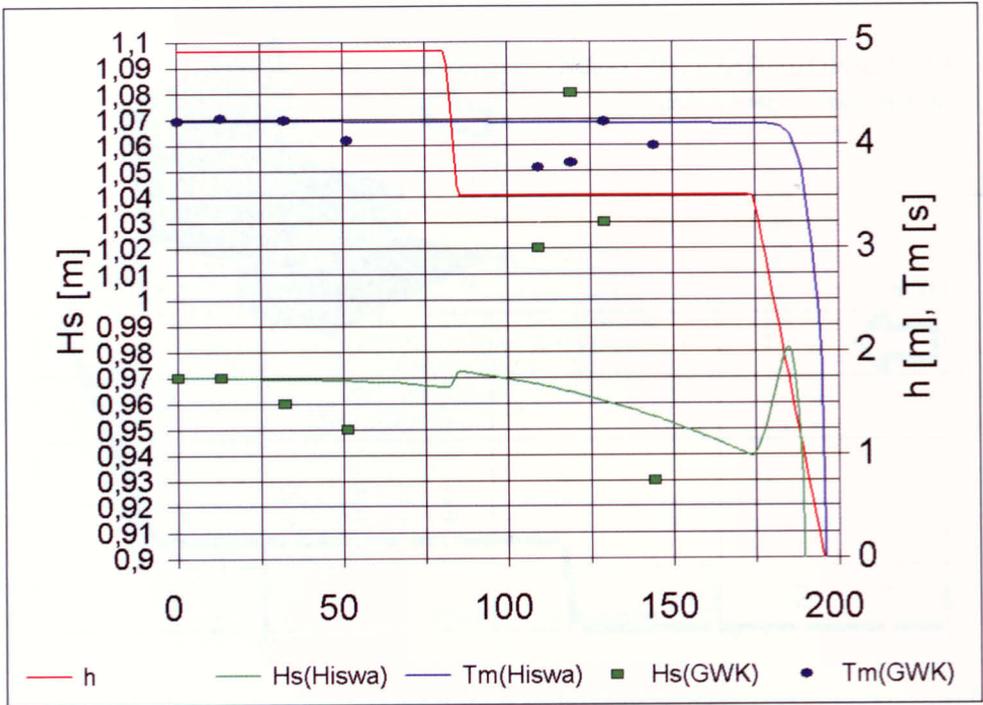


Abb. 18: Ergebnisse von Untersuchungen zur Seegangsdämpfung durch Deichvorländer im Großen Wellenkanal und Vergleichstest mit dem mathematischen Modell HISWA (Wassertiefen: $h_w = 4,9$ m; $h_H = 3,5$ m)

3,6 m und einem Ausgangswert für die signifikante Wellenhöhe von $H_S = 0,86$ m wird auf dem Vorland in einer Wassertiefe von 2,2 m erst eine geringfügig höhere signifikante Wellenhöhe gemessen, die dann allmählich bis auf einen Wert von $H_S = 0,81$ m abnimmt. Dies entspricht einem Transmissionskoeffizienten von

$$k_T = \frac{H_{SH}}{H_{SW}} = \frac{0,81}{0,86} = 0,941$$

Die Dämpfung der Wellenhöhen beträgt somit unter den gegebenen Randbedingungen 5,8 %. Stärker ist hingegen die Abnahme der mittleren Periode mit etwa 17,2 % (Abb. 19). In diesem Fall sind die relativen Wellenhöhen mit $H_S/h = 0,24$ am Ausgangspegel und $H_S/h = 0,37$ vor dem Deich deutlich höher als beim anderen Versuch und liegen damit wesentlich näher an den in der Natur auf Watten gemessenen Werten (NIEMEYER, 1983; NIEMEYER et al., 1996). Dennoch verbleibt die Abnahme bei den Wellenhöhen in gleicher Größenordnung, während sie bei den Perioden ausgeprägt ist.

Diese Ergebnisse erscheinen auf den ersten Blick verblüffend, wenn man sie den Postulaten von FÜHRBÖTER (1974) oder ERCHINGER (1974) gegenüberstellt. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass beide ihre Folgerungen – wie bereits frühere Autoren – eher empirisch abgeleitet haben und nicht auf einer von den Randbedingungen her so eindeutig nachvollziehbaren Datengrundlage wie die hier beispielhaft dokumentierten Ergebnisse aus Versuchen im Großen Wellenkanal.

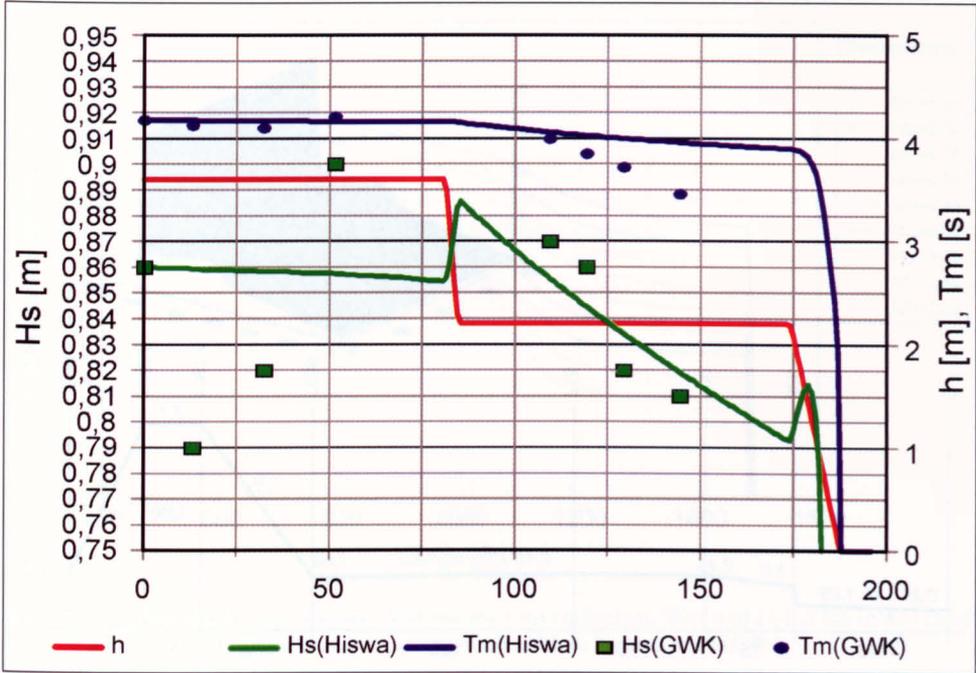


Abb. 19: Ergebnisse von Untersuchungen zur Seegangsdämpfung durch Deichvorländer im Großen Wellenkanal und Vergleichstest mit dem mathematischen Modell HISWA (Wassertiefen: $h_w = 3,6$ m; $h_H = 2,2$ m)

3.2.2.2 Untersuchungen im mathematischen Wellenkanal

Wie aus der Physik der Vorgänge und ihrer mathematischen Formulierung und Modellierung im Modell HISWA zu erwarten, weisen die Ergebnisse im quasi-Naturmaßstab des Großen Wellenkanals und die des mit HISWA betriebenen mathematischen Wellenkanals sowohl von der Tendenz als auch von der Größenordnung her Übereinstimmung auf (Abb. 18 u. 19). Dies gilt auch dann in vollem Umfang, wenn die mögliche Toleranz der Messgeräte in Betracht gezogen wird. Aus diesem Grund erscheint es völlig angebracht, die seegangsdämpfende Wirkung von Hellern mit dem mathematischen Modell HISWA für eine naturähnliche Modelltopographie zu untersuchen (NIEMEYER u. KAISER, 1996, 1998).

Die Untersuchungen wurden für ein typisches Profil der ostfriesischen Küste vorgenommen, das in eine Modelltopographie umgesetzt wurde (Abb. 20): Am seeseitigen Rand liegt das Watt mit NN +0,25 m knapp oberhalb des mittleren Meeresspiegels und steigt landwärts bis auf NN +1,25 m an. Nach einem schmalen Übergangsbereich mit Höhen um NN +1,5 m beginnt der Heller mit einer Höhe von NN +2,15 m, die zum Deich hin auf NN +1,68 m abnimmt.

Für die Wasserstände wird ein Bereich von

$$\text{NN} + 3,00 \leq \text{Thw} \leq \text{NN} + 5,25 \text{ m}$$

in Schritten von 0,25 m in das Modell eingegeben, womit der Bereich hoher Sturmfluten bis etwa zum Bemessungswasserstand abgedeckt wird. Hierbei ist der säkulare Anstieg nicht

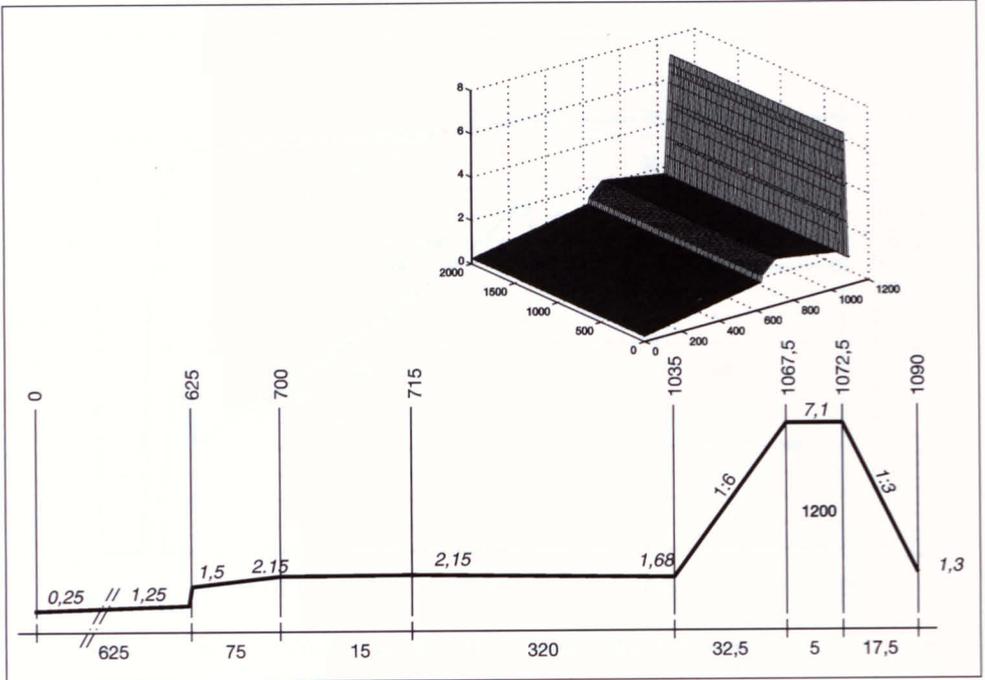


Abb. 20: Profil von Watt, Heller und Deich und die daraus abgeleitete Modelltopographie

berücksichtigt, da bei einem Mitwachsen der Heller die wirksamen Wassertiefen erhalten bleiben. Diese Annahme liegt hinsichtlich der seegangsdämpfenden Wirkung von Hellern auf der sicheren Seite. Der Seegang wird nach Ergebnissen aus Naturuntersuchungen im Watt (NIEMEYER, 1983) im Watt am seeseitigen Rand des Modells in Abhängigkeit von der Wassertiefe eingegeben:

$$H = 0,28 \cdot h$$

$$T_m = \sqrt{28,6 \cdot \frac{h}{g}}$$

Für die signifikanten Wellenhöhen besteht eine enge Korrelation mit der Wassertiefe; bei den Wellenperioden ist der statistische Zusammenhang nicht in gleichem Maß gegeben, aber immer noch hinreichend (NIEMEYER, 1983; NIEMEYER et al., 1996). Auf jeden Fall ist hiermit die Naturähnlichkeit gewährleistet. Es wird auch deutlich, dass die hier gewählten Ausgangsgrößen eine größere relative Wellenhöhe beinhalten als bei den Versuchen im Großen Wellenkanal.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Seegang bereits auf seiner Laufstrecke im Watt – unabhängig von den Wasserständen – eine deutliche Dämpfung erfährt, die für die signifikanten Wellenhöhen tendenziell etwas stärker ist als für die mittleren Perioden (Abb. 21 u. 22). Im Übergang vom Watt zum Heller verstärkt sich die Dämpfung bei den niedrigeren Wasserständen sowohl für die signifikanten Wellenhöhen als auch für die mittleren Perioden. Hier würde der Seegang bei niedrigeren Wasserständen sogar brechen. Da Beobachtungen nur bei derartigen Verhältnissen möglich sind, ist hierin auch eine Erklärung für die oft be-

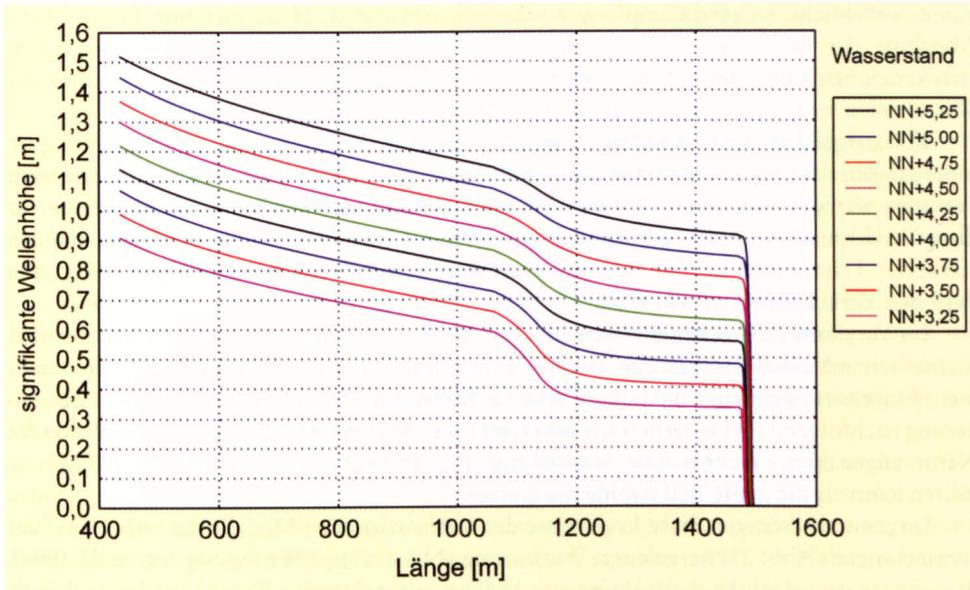


Abb. 21: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen auf landnahem Watt und Heller bis an den Deich – Ergebnisse einer mathematischen Modellierung mit HISWA

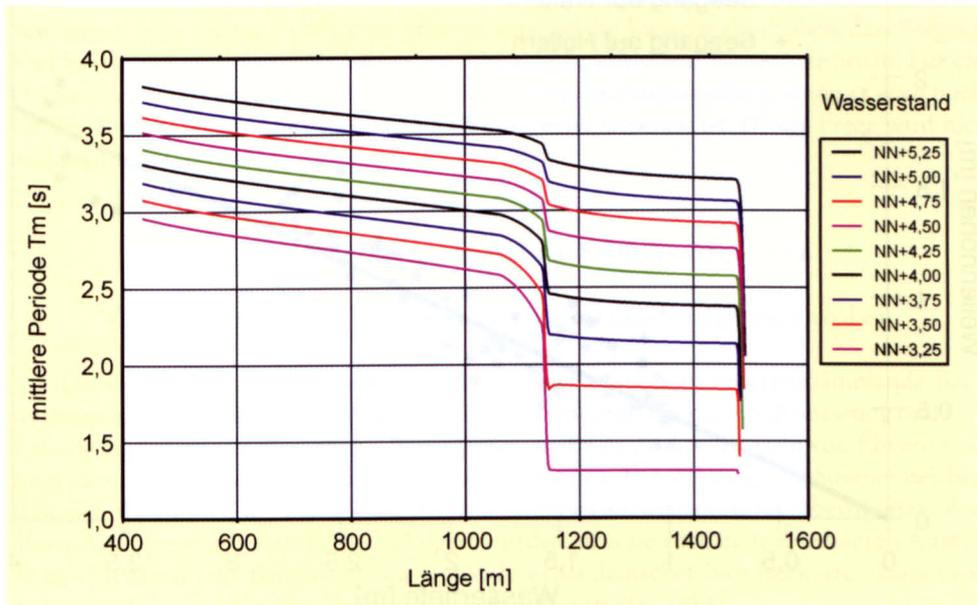


Abb. 22: Veränderung der mittleren Wellenperioden auf landnahem Watt und Heller bis an den Deich – Ergebnisse einer mathematischen Modellierung mit HISWA

nannte erhebliche Seegangsdämpfung zu vermuten. Auf dem Heller bis zum Deich ist die Abnahme der Wellenhöhen und Perioden dann nur noch gering und liegt pro Laufstreckeneinheit unter der auf dem Watt. Ursache hierfür ist wahrscheinlich, dass dort die Wassertiefen wegen der Neigungsumkehr nicht mehr abnehmen.

Mit steigenden Wasserständen verändern sich dann die Tendenzen: Die Dämpfung im Übergangsbereich ist – sowohl für die signifikanten Wellenhöhen als auch für die mittleren Perioden weniger ausgeprägt. Auf dem Heller bis zum Deich erfährt der Seegang aber für diese Verhältnisse eine zwar geringe – aber im Vergleich zu den niedrigeren Wasserständen stärkere – Dämpfung, die wahrscheinlich auf dort zunehmende relative Wellenhöhen und Perioden zurückzuführen sein wird.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Großen Wellenkanal ergibt sich aus den mathematischen Modellierungen eine stärkere Dämpfung. Als Ursachen sind hierfür anzunehmen: Einerseits begünstigt die höhere relative Wellenhöhe bei der mathematischen Modellierung nachfolgend im Hellerbereich die Dämpfung. Andererseits ist in dem Modell eine der Natur angenäherte rechnerische Sohlreibung implementiert, die zu höherer Dämpfung führen kann als die glatte Betonsohle des Kanals.

Insgesamt bestätigen diese Ergebnisse des mathematischen Modells die bisher aus Naturmessungen (Abb. 23) hergeleitete Auffassung (NIEMEYER, 1983; NIEMEYER et al., 1996), dass die seegangsdämpfende Wirkung von Hellern mit steigenden Wasserständen nachlässt. Die – insbesondere im Übergang von Watt zum Heller – vermutete Brandung (FÜHRBÖTER, 1974) kann nach den Brecherkriterien nicht stattfinden. Es ist offenbar, dass die Wassertiefe der Heller analog zu der auf Watten wirkt, was daran deutlich wird, dass für beide Bereiche gleich hohe relative Wellenhöhen festzustellen sind (Abb. 23).

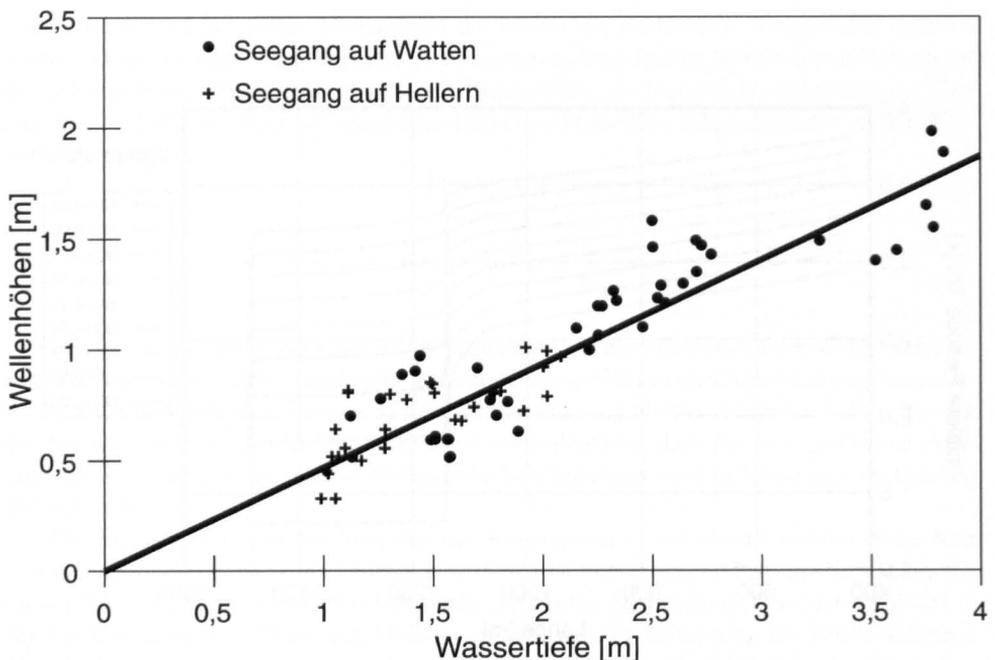


Abb. 23: Zusammenhang von maximalen Wellenhöhen und Wassertiefen auf Watten und Hellern (NIEMEYER, 1983)

4. Hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen

4.1 Funktion von Sommerdeichen

Ein großer Teil der heutigen Sommerpolder ist in den zwanziger und dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts entstanden. Ebenso wie bei dem damals massierten Bau von Lahnungen spielten auch bei ihrer Errichtung arbeitsmarktpolitische Zielsetzungen der Regierungen der Weimarer Republik eine Rolle: Die Arbeiten erfolgten vielfach im Rahmen der damaligen Notstandsprogramme zur Arbeitsbeschaffung.

Zielsetzung bei der Errichtung war es, die landwirtschaftliche Produktivität von Hellerbereichen dadurch zu erhöhen, dass ihre Überflutung während der Sommermonate mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden konnte. Die Bauhöhen der Sommerdeiche orientierten sich daher an den Höhenbereichen von Wind- und niedrigen Sturmfluten, wie sie erfahrungsgemäß auch im Sommer auftreten können.

Mit ihrem Bau wurde bei Beweidung eine größere Sicherheit für das aufgetriebene Vieh erreicht; gleichzeitig wurde auch der Unterhaltungsbedarf des Hauptdeiches gesenkt, an dem bei Hellerüberflutung das flüchtende Vieh Trittschäden hinterließ. Ebenfalls konnte in Sommerpoldern mit geringem Risiko geheut werden; das Wegschwemmen der Mahd nach Überflutungen wurde durch die Sommerdeiche nahezu ausgeschlossen. Zu diesen landwirtschaftlichen Nutzungsaspekten ist in den sechziger und siebziger Jahren dieses Jahrhunderts ein weiterer gekommen: der Fremdenverkehr. Innerhalb von Sommerpoldern können für die Sommermonate außendeichs gelegene Campingplätze eingerichtet werden, für die ein erträglich geringes Überflutungsrisiko besteht.

In jüngerer Zeit ist Sommerdeichen eine weitere Funktion zugesprochen worden: die eines dem Seedeich vorgelagerten Wellenbrechers, der für dessen Sicherheit bedeutsam sei (StAIK, 1995). Es ist zu vermuten, dass hierin die Ursache für die im Verhältnis zur Wasserstandsentwicklung überproportionalen Zunahme der Kronenhöhen von Sommerdeichen in den letzten Jahrzehnten zu sehen ist. Hierbei wird auf die Tatsache abgehoben, dass Seegang bei Unterschreiten einer im Verhältnis zur Wellenhöhe kritischen Wassertiefe bricht. Für die Deichsicherheit ist dieser Prozess aber nur dann berücksichtigungsfähig, wenn er auch noch bei Eintritt des Bemessungswasserstandes hinreichend wirksam ist. Dieser Frage wird hier nachgegangen.

4.2 Seegangsdämpfung an Sommerdeichen

4.2.1 Datengrundlagen und Untersuchungsmethoden

Da Sommerdeichen bis vor kurzer Zeit keine Funktion als seegangsdämpfende Bauwerke zugewiesen wurde, liegen hierzu keine – für eine zweckgerichtete Bemessung und Gestaltung eigentlich erforderlichen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln vor. Ebenso sind auch kaum Daten und Untersuchungen dazu vorhanden. Die Wirkung von Sommerdeichen lässt sich theoretisch in Analogie zu der von Unterwasserwellenbrechern bestimmen. Aus dieser Analogie war bereits früher gefolgert worden, dass sie auch in ihrer erhöhten Ausbildung – bei Eintritt der Bemessungswasserstände an der deutschen Nordseeküste – keine nennenswerte Seegangsdämpfung bewirken würden (NIEMEYER, 1983).

Als Beleg für die seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen sind wiederholt Einmessungen von Teekgrenzen nach Sturmfluten benannt worden (ERCHINGER, 1974;

StAIK, 1995). Daher sollen diese Daten auch hier genutzt werden, allerdings unter Hinzuziehung weiterer Datensätze, wie beispielsweise die der INGENIEURKOMMISSION (1979). Die Zahl und Struktur dieser Daten erlaubt aber keine darauf aufbauende eigenständige grundsätzliche Untersuchung mit dem Ziel allgemein gültiger Ergebnisse. Sie lassen sich dennoch nutzen, indem sie zur Plausibilisierung anderer Untersuchungsergebnisse herangezogen werden.

Die guten Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen mathematischer Modellierungen mit HISWA und denen hydraulischer Modellversuche im Großen Wellenkanal zur Seegangsdämpfung auf Hellern gaben Anlass dazu, die seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen systematisch mit mathematischen Modellen zu untersuchen (NIEMEYER u. KAISER, 1996, 1998). Die Vorgehensweise erfolgte dabei analog zu der bei Hellerwirkung, was die Festlegung der hydrodynamischen Randbedingungen angeht.

Hinsichtlich der Morphologie und Bauwerksstruktur wurden drei Fälle unterschieden, die vom ehemaligen Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz für Grundsatzuntersuchungen vorgeschlagen worden waren (Abb. 24–26). In den daraus entwickelten Modelltopographien waren folgende morphologische und konstruktive Elemente enthalten: Watt, Heller, Sommerpolder, Sommer- und Hauptdeich. Die Versuche wurden parallel für beide Alternativen vorgenommen: Unbedeichter Heller vor dem Hauptdeich und teilweise Einpolderung des Hellers durch einen Sommerdeich. Um die Auswirkungen konstruktiver Randbedingungen erfassen zu können, wurden beim Profil 0 (Abb. 24) die Kronenhöhen des Sommerdeiches wie folgt variiert: NN +2,5 m, NN +3,0 m und NN + 3,5 m. In den Profilen 1

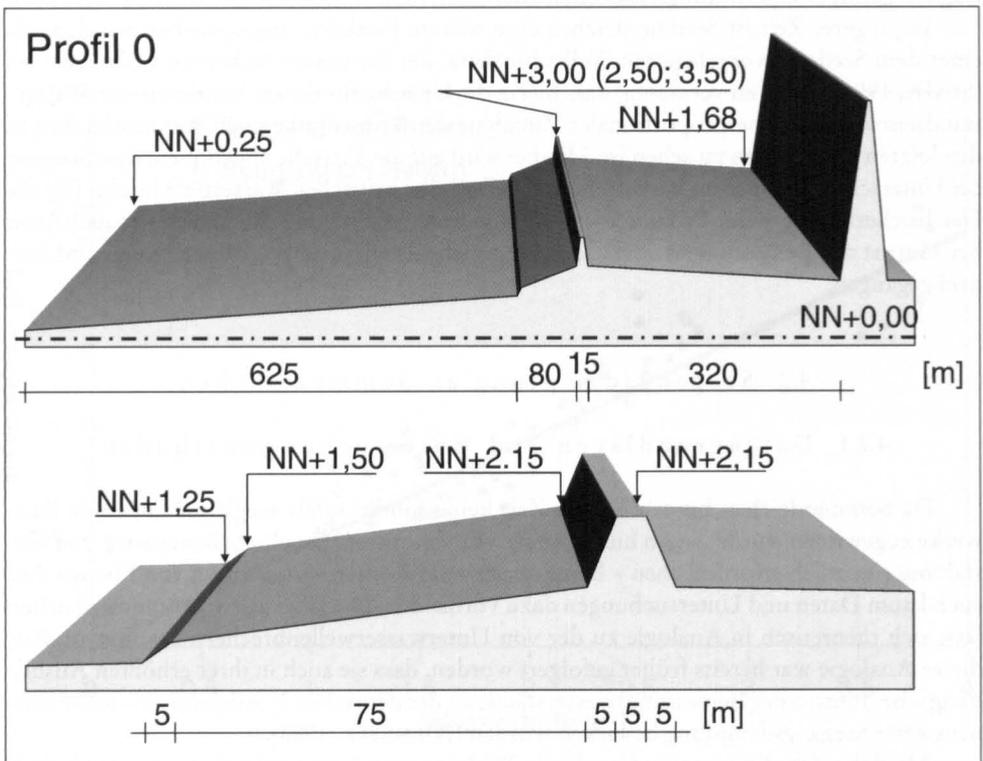


Abb. 24: Schema des Testprofils 0

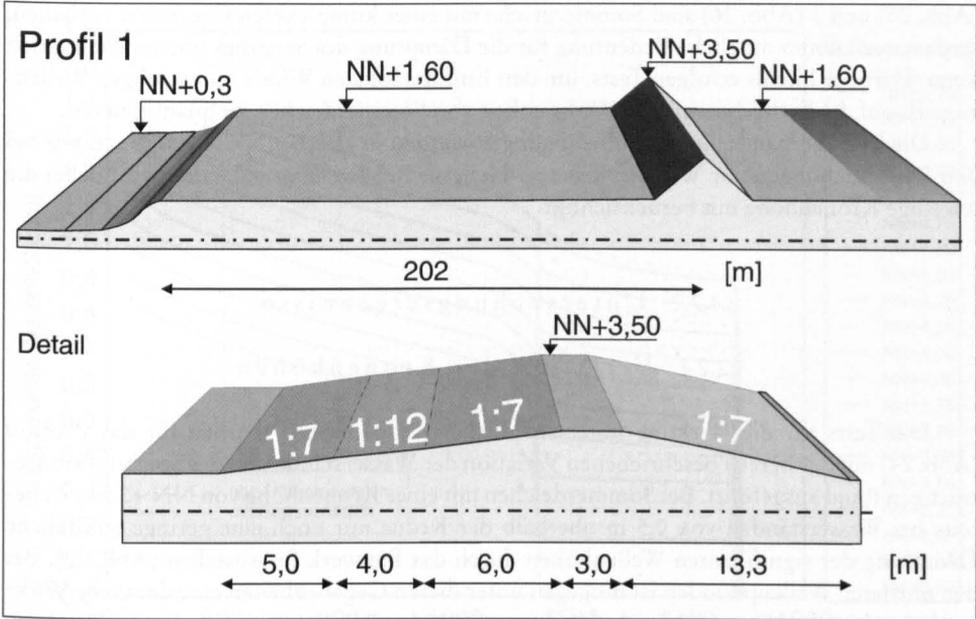


Abb. 25: Schema des Testprofils 1

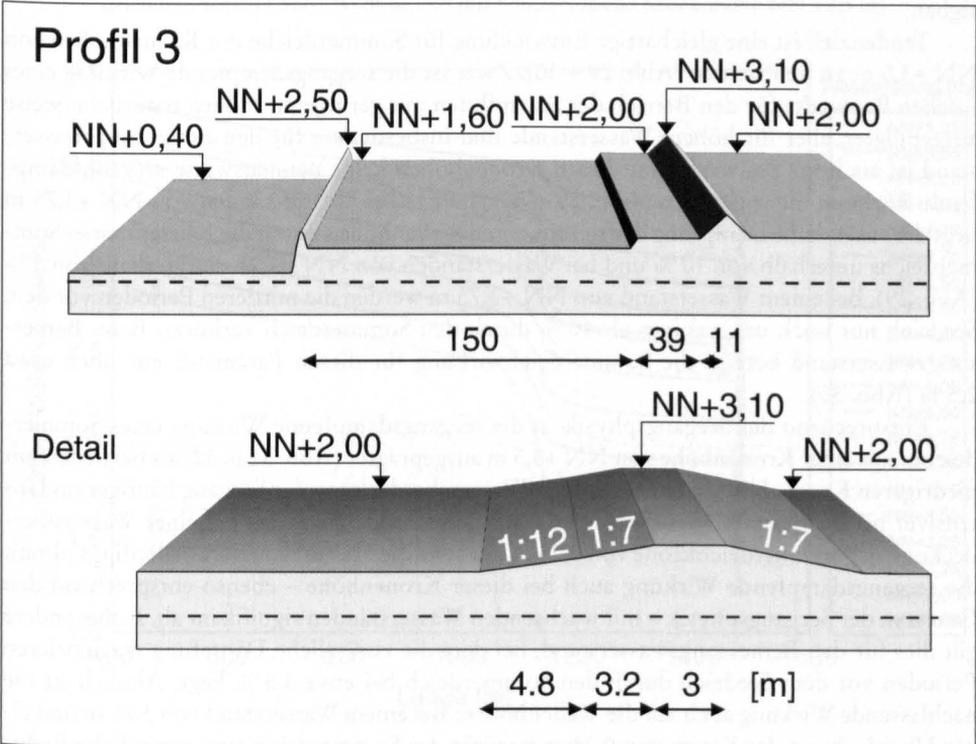


Abb. 26: Schema des Testprofils 3

(Abb. 25) und 3 (Abb. 26) sind Sommerdeiche mit einer komplexeren Geometrie enthalten, so dass auch deren mögliche Bedeutung für die Dämpfung des Seegangs untersucht werden kann. Darüber hinaus erfolgen Tests, um den Einfluss lokalen Winds und schrägen Wellenangriffs auf die hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen zu quantifizieren.

Die hydrodynamischen Randbedingungen werden in gleicher Weise festgelegt, wie bei den Untersuchungen zur Wirksamkeit von Hellern. Bei den Wasserständen wird dabei die jeweilige Kronenhöhe mit berücksichtigt.

4.2.2 Untersuchungsergebnisse

4.2.2.1 Variation der Kronenhöhen

Die Tests für die Wirkung unterschiedlicher Kronenhöhen wurden für das Profil 0 (Abb. 24) mit der bereits beschriebenen Variation der Wasserstände und des Seegangs am seawärtigen Rand ausgeführt. Bei Sommerdeichen mit einer Kronenhöhe von NN +2,5 m ist bereits bei Wasserständen von 0,5 m oberhalb der Krone nur noch eine geringe zusätzliche Dämpfung der signifikanten Wellenhöhen durch das Bauwerk festzustellen (Abb. 27). Bei den mittleren Wellenperioden ist hingegen unter diesen Gegebenheiten eine deutliche Wirksamkeit erkennbar. Sie verliert sich aber mit wachsenden Wasserständen und ist bereits deutlich unterhalb des Niveaus des Bemessungswasserstandes nur noch marginal (Abb. 28). Da Gleiches auch für die signifikanten Wellenhöhen gilt (Abb. 27), ist eine seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen mit diesen Kronenhöhen bei hohen Sturmfluten vernachlässigbar.

Tendenziell ist eine gleichartige Entwicklung für Sommerdeiche mit Kronenhöhen von NN +3,0 m zu beobachten (Abb. 29 + 30). Zwar ist die seegangsdämpfende Wirkung eines solchen Bauwerks für den Bereich der Sturmfluten mit geringeren Höhen natürlicherweise ausgeprägter, aber für höhere Wasserstände und insbesondere für den Bemessungswasserstand ist auch für Bauwerke mit diesen Kronenhöhen keine nennenswerte seegangsdämpfende Wirkung mehr gegeben (Abb. 29 + 30). Bereits bei Wasserständen von NN +3,75 m liegt die zusätzliche Dämpfung der signifikanten Wellenhöhen durch die Existenz eines Sommerdeichs unterhalb von 10 % und bei Wasserständen von NN +4,25 m unterhalb von 5 % (Abb. 29). Bei einem Wasserstand von NN +3,75 m werden die mittleren Perioden vor dem Seedeich nur noch um weniger als 10 % durch den Sommerdeich verkürzt. Beim Bemessungswasserstand beträgt die Sommerdeichwirkung für diesen Parameter nur noch etwa 2,5 % (Abb. 30).

Entsprechend der Seegangsphysik ist die seegangsdämpfende Wirkung eines Sommerdeiches mit einer Kronenhöhe von NN +3,5 m ausgeprägter (Abb. 31 u. 32) als bei denen mit niedrigeren Kronenhöhen, da bei geringer Wasserüberdeckung der Seegang häufiger und intensiver bricht. Beispielsweise werden die mittleren Wellenperioden bei einer Wasserüberdeckung der Sommerdeichkrone von 0,25 m um etwa die Hälfte reduziert. Allerdings nimmt die seegangsdämpfende Wirkung auch bei dieser Kronenhöhe – ebenso entsprechend den Gesetzen der Seegangsphysik – mit wachsenden Wasserständen signifikant ab. Insbesondere gilt dies für den Bemessungswasserstand, bei dem die zusätzliche Dämpfung der mittleren Perioden vor dem Seedeich durch den Sommerdeich bei etwa 4,5 % liegt. Ähnlich ist die nachlassende Wirkung auch auf die Wellenhöhen: Bei einem Wasserstand von 3,75 m und einer Überdeckung der Krone von 0,25 m bewirkt der Sommerdeich eine zusätzliche Reduzierung der signifikanten Wellenhöhe vor dem Deich gegenüber der Hellerwirkung von

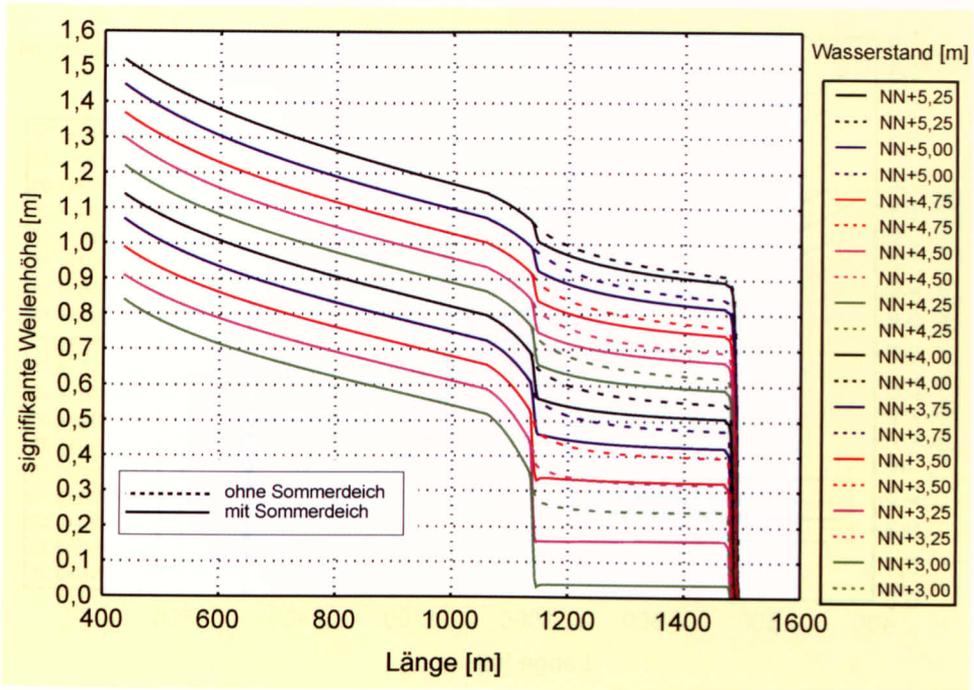


Abb. 27: Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen H_s über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 0 (Abb. 24) ohne und mit Sommerdeich (Kronenhöhe NN +2,5 m)

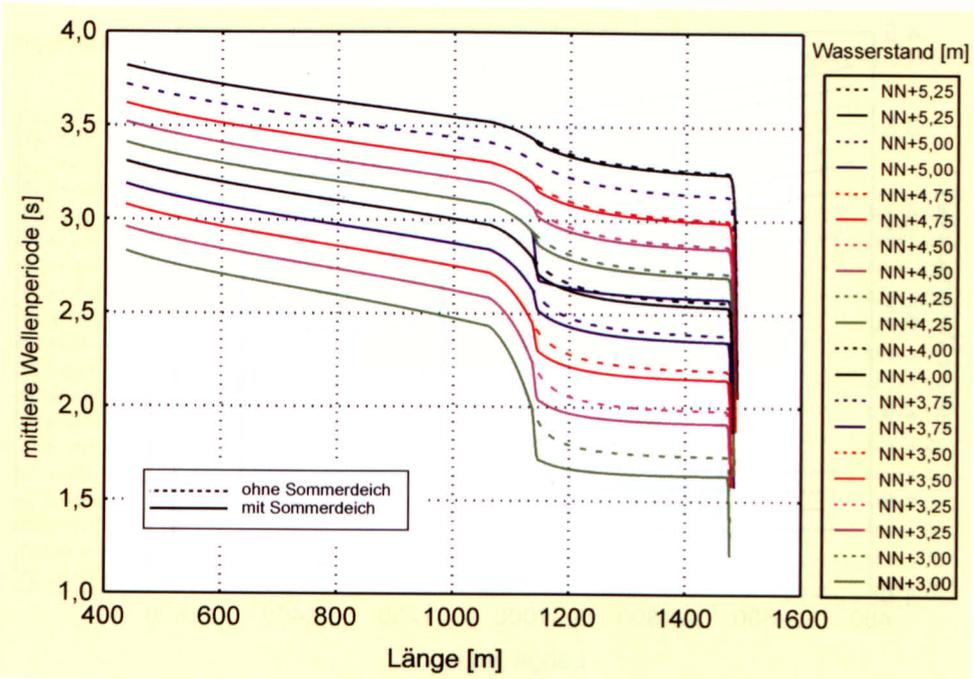


Abb. 28: Veränderungen der mittleren Wellenperiode T_m über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 0 (Abb. 24) ohne und mit Sommerdeich (Kronenhöhe NN +2,5 m)

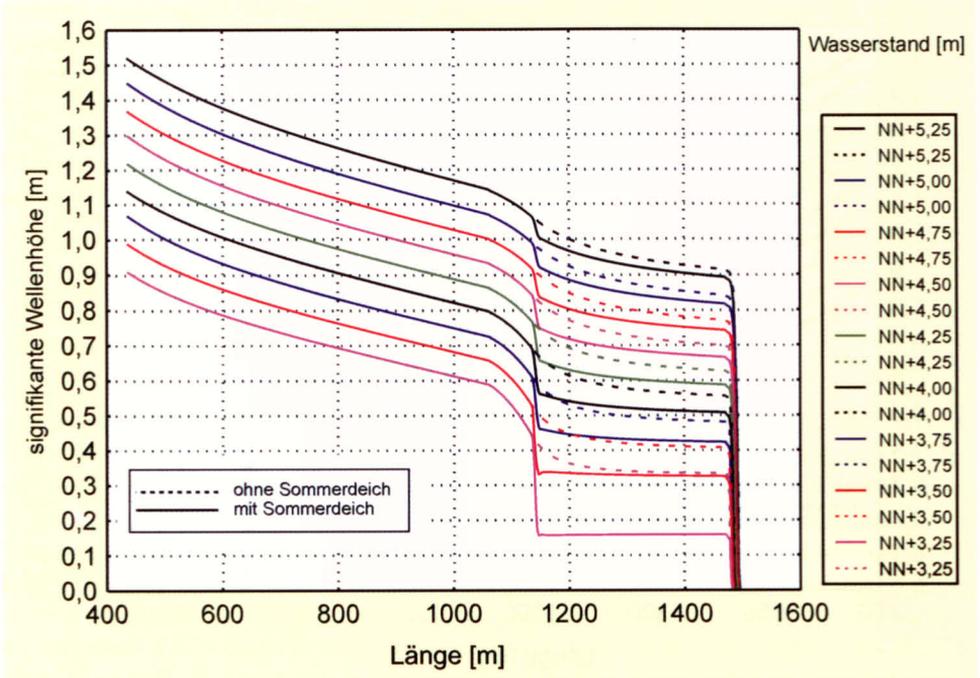


Abb. 29: Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen H_s über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 0 (Abb. 24) ohne und mit Sommerdeich (Kronenhöhe NN +3,0 m)

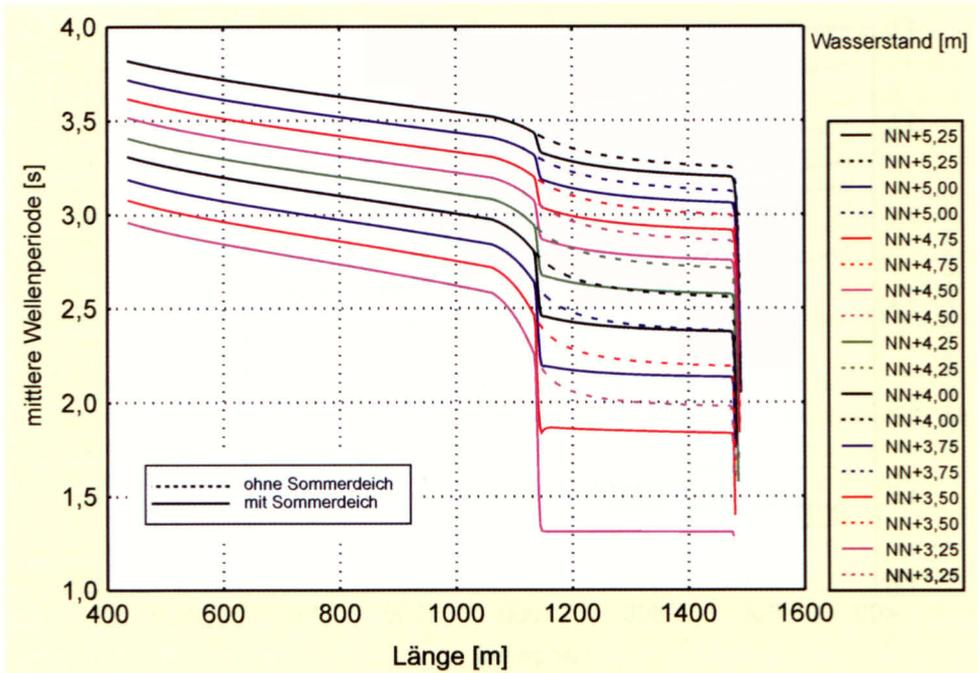


Abb. 30: Veränderungen der mittleren Wellenperiode T_m über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 0 (Abb. 24) ohne und mit Sommerdeich (Kronenhöhe NN +3,0 m)

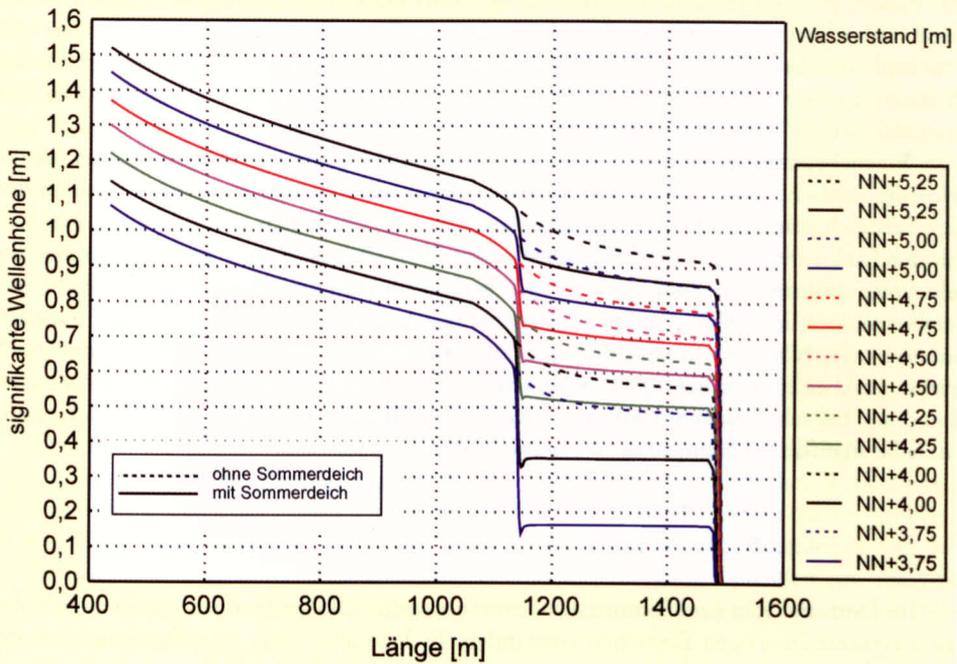


Abb. 31: Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen H_s über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 0 (Abb. 24) ohne und mit Sommerdeich (Kronenhöhe NN +3,5 m)

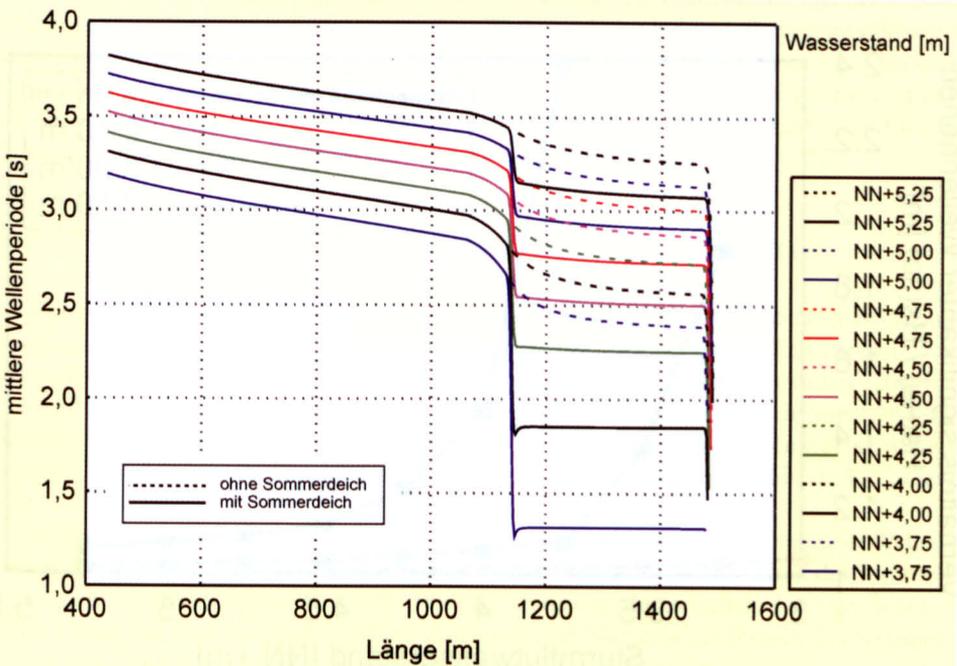


Abb. 32: Veränderungen der mittleren Wellenperiode T_m über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 0 (Abb. 24) ohne und mit Sommerdeich (Kronenhöhe NN +3,5 m)

mehr als 60 % von 0,48 m auf 0,17 m (Abb. 31). Aber mit wachsenden Wasserständen nimmt diese hydrodynamische Wirksamkeit stark ab; beim Bemessungswasserstand sind die Unterschiede deutlich geringer: Ohne Sommerdeich würde vor dem Seedeich eine signifikante Wellenhöhe von 1,02 m auftreten, mit Sommerdeich eine von 0,95 m (Abb. 31). Die seegangsdämpfende Wirkung des Sommerdeiches beträgt somit noch 6,9 %.

Wie nicht anders zu erwarten, zeigen die Untersuchungen, dass die Kronenhöhen für die hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen als seegangsdämpfendes Element vor dem Seedeich von hoher Bedeutung sind. An diesem Vergleich lässt sich feststellen, dass sich mit den früher üblichen Sommerdeichhöhen von NN +2,5 m bis NN +3,0 m bei hohen bis sehr hohen Sturmfluten keine oder nur sehr geringe zusätzliche Seegangsdämpfung am Seedeich erreichen ließ (Abb. 33). Die in jüngerer Zeit errichteten Sommerdeiche mit Kronenhöhen bis zu NN +3,5 m sind hingegen auch bei höheren Sturmflutwasserständen noch wirksam. Aber hinsichtlich des Brecherkriteriums sind selbst diese Höhen noch unzureichend, um bei sehr hohen Sturmfluten oder gar beim Bemessungswasserstand noch eine zusätzliche signifikante Dämpfung zu bewirken (Abb. 31–33).

4.2.2.2 Variation der funktionalen Gestaltung

Im Laufe der Zeit sind Sommerdeiche mit unterschiedlichen Profilen und in morphologisch verschiedenartigen Bereichen entstanden. Es lag daher nahe zu untersuchen, ob die verschiedenartige funktionale Gestaltung von Sommerdeichen von Bedeutung für deren seegangsdämpfende Wirkung ist. Im Vergleich zu den bereits dargestellten Ergebnissen (Abb. 27–33) für das Profil 0 (Abb. 24) werden daher hier zwei weitere Profile untersucht (Abb. 25 u. 26), die ebenfalls typisch für die ostfriesische Küste sind.

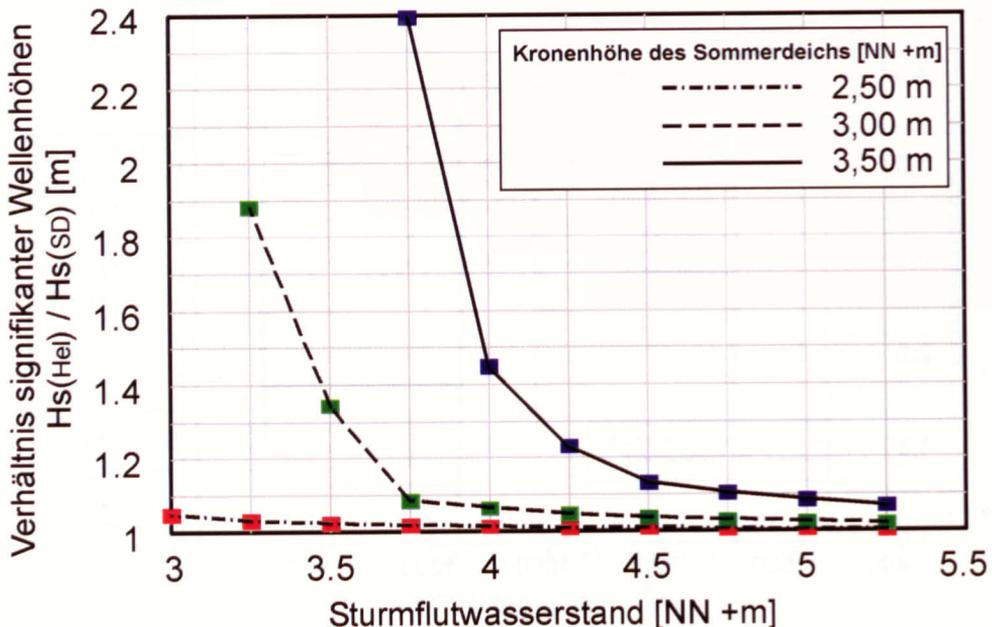


Abb. 33: Seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen mit unterschiedlichen Kronenhöhen in Abhängigkeit von Sturmflutwasserständen

Im Profil 1 (Abb. 25) ist dem Sommerdeich mit einer Kronenhöhe von NN +3,5 m ein etwa 200 m breiter Heller vorgelagert. Das Watt vor dem Heller liegt im Vergleich zum Profil 0 erheblich niedriger. Auch die Geländehöhe im Sommerpolder ist deutlich niedriger. Die Außenböschung des Sommerdeiches ist mit 1:7 im oberen, 1:12 im mittleren und 1:7 im unteren Bereich sehr flach ausgebildet.

Insgesamt lassen sich – trotz der veränderten morphologischen und strukturellen Randbedingungen keine signifikanten Unterschiede zu den Ergebnissen für das Profil 0 (Abb. 31 u. 32) erkennen (Abb. 34 u. 35). Für die Sommerdeichwirkung ist dies naheliegend, da seine primäre hydrodynamische Wirksamkeit über die Kronenhöhe erfolgt, die für das Brechen oder Nichtbrechen von Wellen bestimmend ist. Der größere Höhenunterschied zwischen Watt und Vorland führt zwar zu einem stärkeren Gradienten für die Höhen- und Periodenabnahmen, aber insgesamt liegen die Parameter vor dem Seegang in vergleichbarer Größenordnung wie beim Profil 0. Auch hinsichtlich der zusätzlichen Dämpfung durch den Sommerdeich ergeben sich für dieses Profil keine signifikanten Unterschiede.

Das Profil 3 enthält einen Sommerdeich mit einer Kronenhöhe von NN +3,1 m (Abb. 26); es wird als hinnehmbar angesehen, ihn in seiner hydrodynamischen Wirksamkeit mit dem Sommerdeich des Profils 0 mit einer Kronenhöhe von NN +3,0 m näherungsweise zu vergleichen. Die Außenböschung des Sommerdeiches weist zwei Neigungen auf: 1:7 im oberen und 1:12 im unteren Bereich. Zudem sind am Übergang zum Watt eine massive Lahnung mit einer Höhe von NN +2,5 m und vor dem Sommerdeich ein 39 m breiter Hellerstreifen angeordnet.

Die markanten Differenzen des morphologischen Umfelds, insbesondere das ebenfalls sehr niedrige Wattniveau und die ungewöhnlich hohe Lahnung, führen auch bei diesem Profil zu keinen Unterschieden, die hinsichtlich der hydrodynamischen Wirksamkeit andere Schlussfolgerungen erfordern würden. Zwar sind – insbesondere bei den niedrigeren der untersuchten Sturmflutwasserstände – besondere Wirkungen der hohen Lahnung zu erkennen (Abb. 36 u. 37), da einerseits dort der Höhenunterschied zum Watt hoch ist und andererseits dessen niedriges Niveau relativ hohen Seegang zulässt. Hinsichtlich der seegangsdämpfenden Wirksamkeit des Sommerdeiches haben diese Unterschiede ohnehin keine signifikante Wirkung; mit wachsenden Wasserständen tendiert sie gegen Null (Abb. 36 u. 37).

4.2.2.3 Auswirkungen schrägen Wellenangriffs

Es bestanden vor diesen Untersuchungen keine konkreten Erkenntnisse darüber, ob und wie die seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen durch schrägen Wellenangriff verstärkt oder gemindert werden würde. Zur näheren Erhellung des Problems wurden daher für das Profil 0 (Abb. 24) Grundsatzuntersuchungen vorgenommen, bei denen ein Sommerdeich mit einer Kronenhöhe von NN +3,0 m eingebaut war. Es wurden neben senkrechtem Wellenangriff verschiedene Anlaufrichtungen mit einer Abweichungen von bis zu 30° untersucht.

Es zeigt sich, dass bei niedrigeren Sturmflutwasserständen die Abweichung der Wellenlaufrichtung von der Deichnormalen für die hydrodynamische Wirksamkeit des Sommerdeiches nicht vernachlässigbar ist (Abb. 38): Die Unterschiede zwischen den signifikanten Wellenhöhen vor dem Seedeich bei Vorhandensein und Nichtvorhandensein des Sommerdeiches sind bei senkrechtem Wellenangriff auf den Sommerdeich am größten. Sie werden umso geringer, je stärker die Wellenlaufrichtung von der Deichnormalen abweicht.

Allerdings zeigen die Ergebnisse aber auch, dass diese Unterschiede mit steigenden Was-

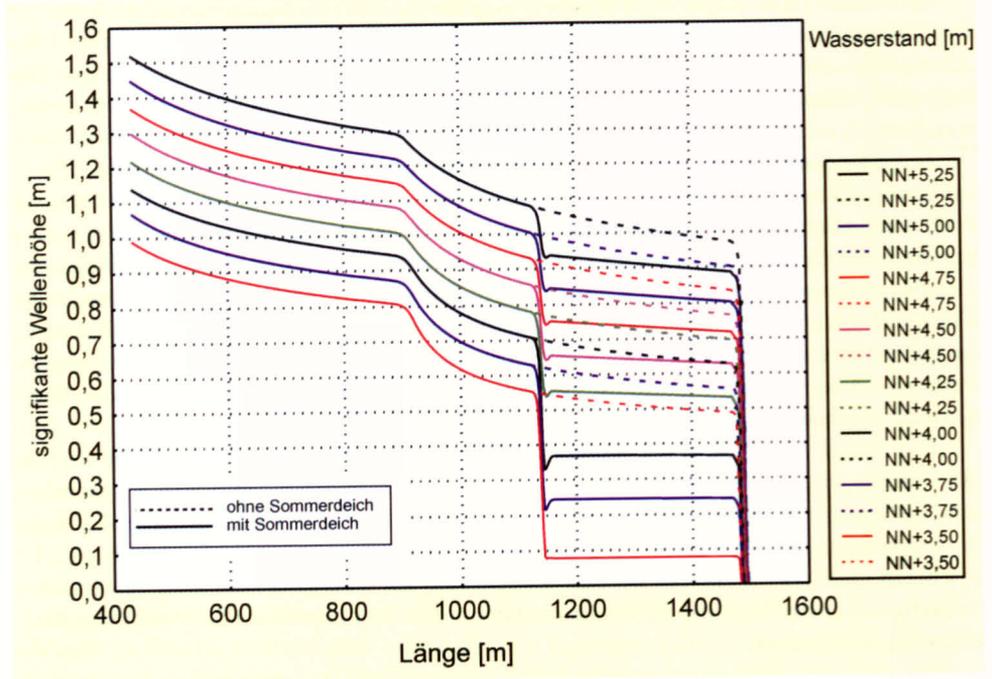


Abb. 34: Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen H_s über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 1 (Abb. 25) ohne und mit Sommerdeich

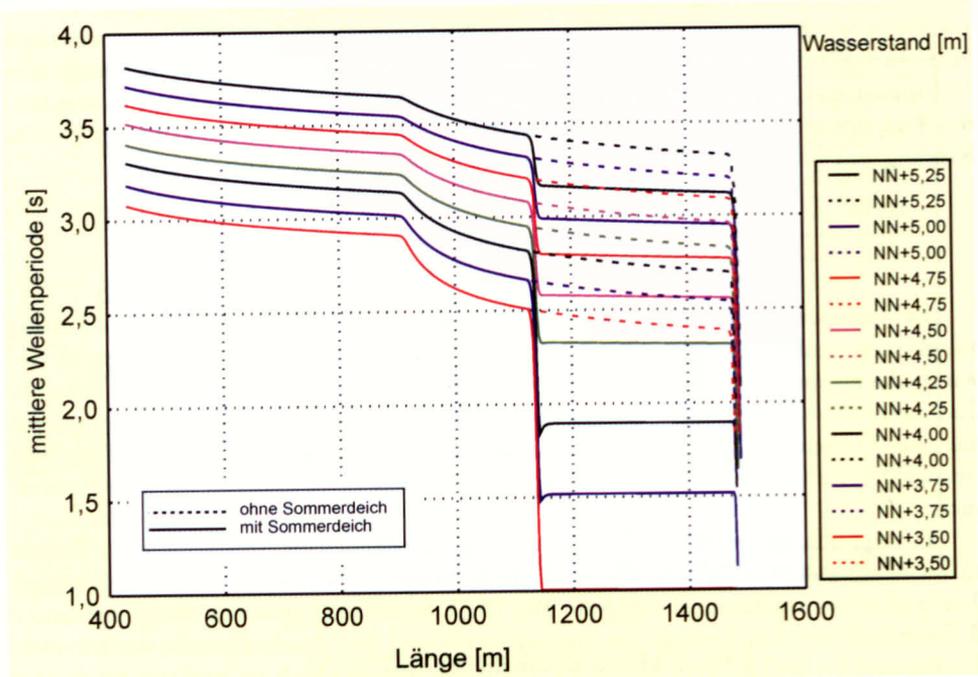


Abb. 35: Veränderungen der mittleren Wellenperiode T_m über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 1 (Abb. 25) ohne und mit Sommerdeich

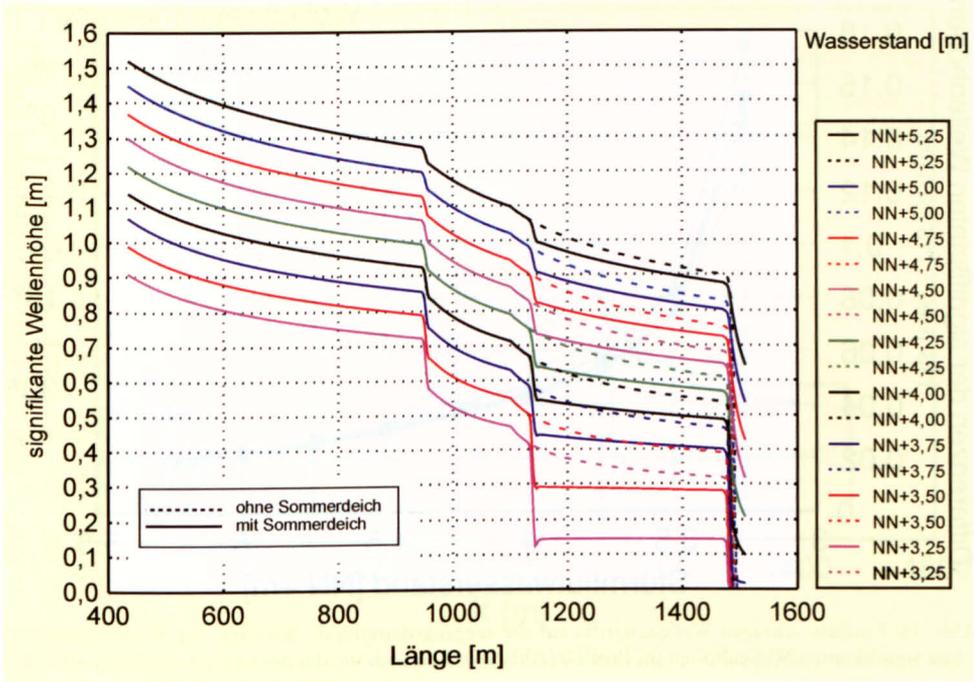


Abb. 36: Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen H_s über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 3 (Abb. 26) ohne und mit Sommerdeich

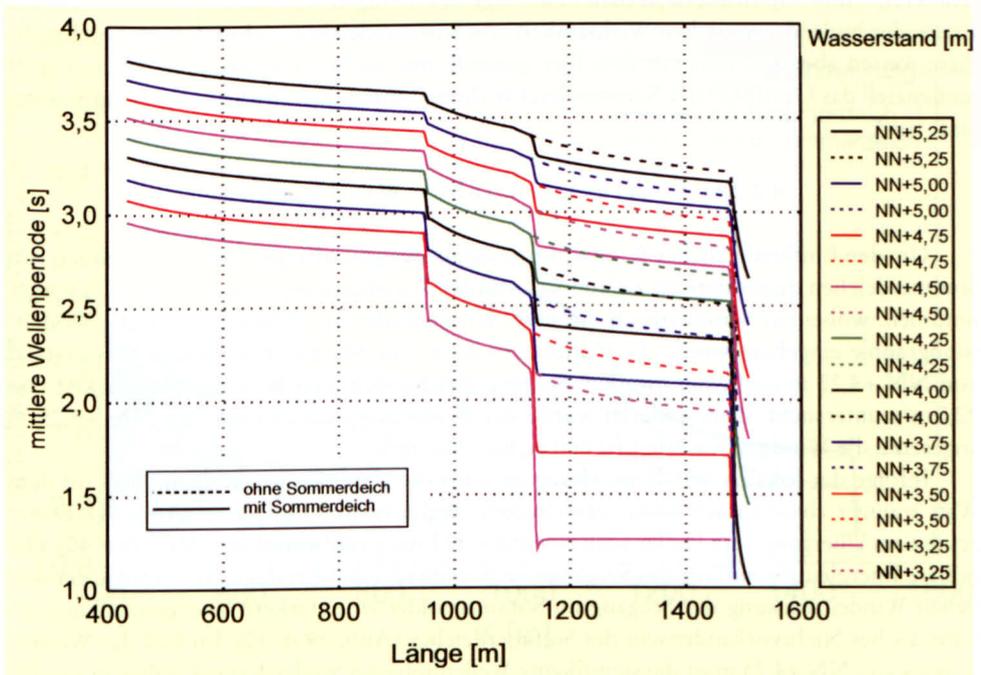


Abb. 37: Veränderungen der mittleren Wellenperiode T_m über die Laufstrecke vom Watt zum Hauptdeich im Profil 3 (Abb. 26) ohne und mit Sommerdeich

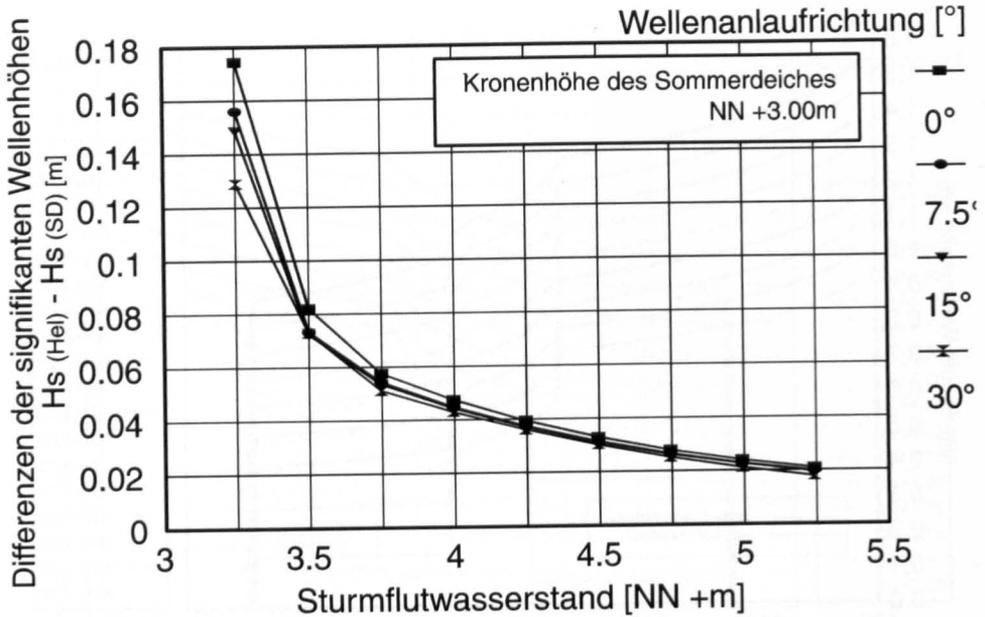


Abb. 38: Einfluss schrägen Wellenangriffs auf die seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen; hier signifikanten Wellenhöhen im Profil 0 (Abb. 24). Kronenhöhe des Sommerdeiches: NN +3,0 m

serständen und damit nachlassender Wirkung des Sommerdeichs nachlassen und gegen Null tendieren (Abb. 38). Insofern ist damit die Frage des schrägen Wellenangriffs für die zentrale Frage, der hydrodynamischen Wirksamkeit von Sommerdeichen nicht relevant. Die Ergebnisse weisen aber aus, dass mit dem hier generell untersuchtem senkrechten Wellenangriff tendenziell das Optimum der Sommerdeichwirkung hinsichtlich der Seegangsdämpfung erfasst wird.

4.2.2.4 Einfluss örtlicher Windwirkung

Um den Einfluss örtlicher Windwirkung auf die seegangsdämpfende Untersuchung von Sommerdeichen quantifizieren zu können, wurden Untersuchungen für das Profil 0 vorgenommen, wobei ein Sommerdeich mit einer Kronenhöhe von NN +3,5 m in die Modelltopographie eingebaut wurde. Es wurde zum einen eine Sturmflut mit einem Wasserstand von NN +4,25 m und einer mit dem Seegang gleichgerichteten Windgeschwindigkeit von 22,5 m/s untersucht. Zum anderen wurde der Bemessungswasserstand von NN +5,25 m angesetzt; die Windgeschwindigkeit betrug hier 30,0 m/s.

Infolge der lokalen Windeinwirkung nehmen die signifikanten Wellenhöhen auf dem Watt weniger ab als in den bisher gerechneten vergleichbaren Beispielen (Abb. 31). Daher erfolgt am Übergang zum Heller auch eine stärkere Energieumwandlung (Abb. 39 u. 40). Die höhere Energieumwandlung des Seegangs am Sommerdeich führt dazu, dass infolge der örtlichen Windeinwirkung der Seegang im Sommerpolder eine stärkere Wiederanfächerung erfährt als bei Nichtvorhandensein des Sommerdeiches (Abb. 39 u. 40). Im Fall des Wasserstandes von NN +4,25 m ist die signifikante Wellenhöhe am Seedeich sogar höher als unmittelbar in Lee des Sommerdeiches. Insgesamt sind die Auswirkungen des örtlichen Windes aber so gering, dass sie für Zwecke der praktischen Bemessung als vernachlässigbar anzuse-

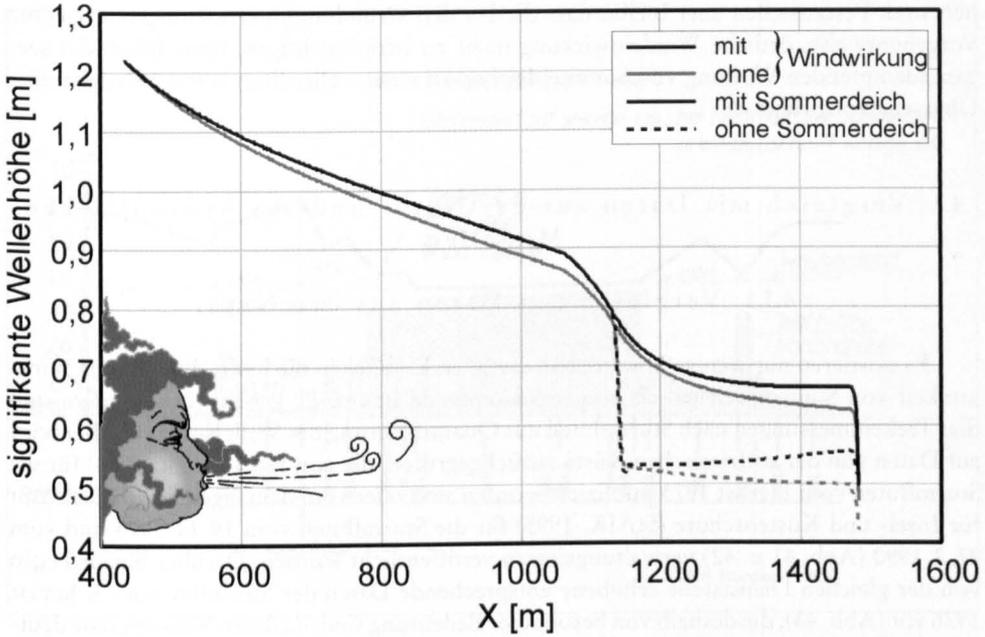


Abb. 39: Einfluss lokaler Windeinwirkung auf die hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen; Ergebnisse für die signifikante Wellenhöhe (Profil 0; Kronenhöhe: NN +3,5 m; Wasserstand: NN +4,25 m; Windgeschwindigkeit: 22,5 m/s)

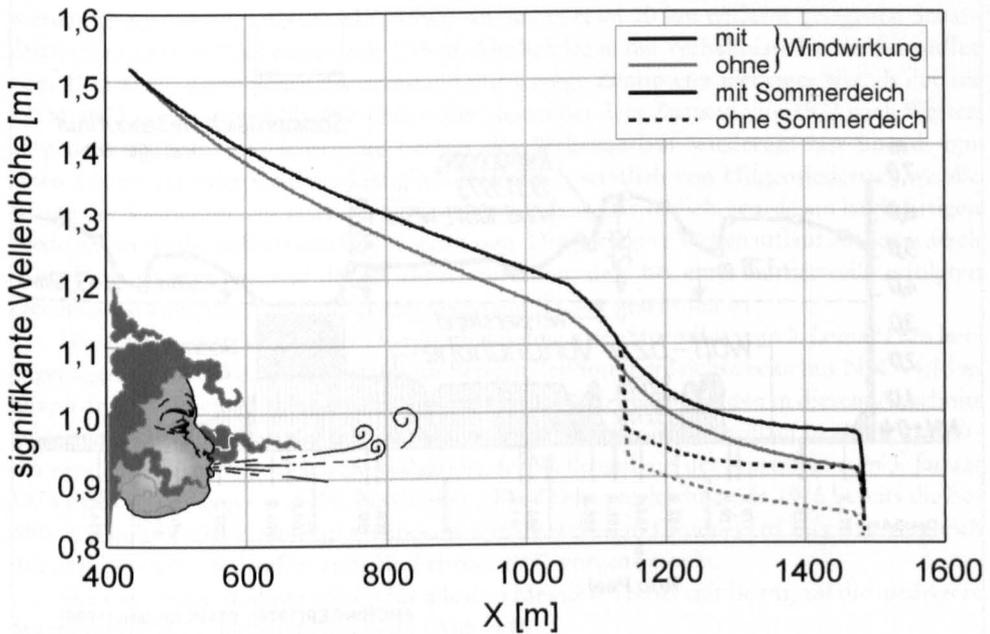


Abb. 40: Einfluss lokaler Windeinwirkung auf die hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen; Ergebnisse für die signifikante Wellenhöhe (Profil 0; Kronenhöhe: NN +3,5 m; Wasserstand: NN +5,25 m; Windgeschwindigkeit: 30,0 m/s)

hen sind. Festzustellen aber bleibt, dass die bei den Grundsatzuntersuchungen ausgeübte Vorgehensweise, örtliche Windeinwirkung nicht zu berücksichtigen, hinsichtlich der seegangsdämpfenden Wirkung von Sommerdeichen zu einer – allerdings vernachlässigbaren – Überschätzung führt.

4.3 Vergleich mit Daten aus der Natur und aus hydraulischen Modellen

4.3.1 Vergleich mit Daten aus der Natur

Es existieren nur wenige Naturdaten, die einen Einblick in die hydrodynamische Wirksamkeit von Sommerdeichen als seegangsdämpfende Bauwerke geben. Insbesondere sind dies Teekleinmessungen nach Sturmfluten zur Quantifizierung des Wellenaufbaus. Hier wird auf Daten von der ostfriesischen Küste zurückgegriffen, die von ERCHINGER (1974) für die Sturmfluten vom Herbst 1973 publiziert worden sind oder vom damaligen Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz (StAIK, 1995) für die Sturmfluten vom 19. 11. 1973 und vom 27. 2. 1990 (Abb. 41 u. 42) verwaltungsintern veröffentlicht wurden. Darüber hinaus liegen von der gleichen Dienststelle erhobene entsprechende Daten der Sturmflut vom 3. Januar 1976 vor (Abb. 43), die deshalb von besonderer Bedeutung sind, da deren Wasserstände deutlich höher sind als die derjenigen von 1973 und 1990.

Bei der Sturmflut vom 19. 11. 1973 (Abb. 41) war bei einem Scheitelwasserstand von NN +3,88 m, der etwa einem Stau von 2,6 m entspricht, in Lee eines Sommerdeiches west-

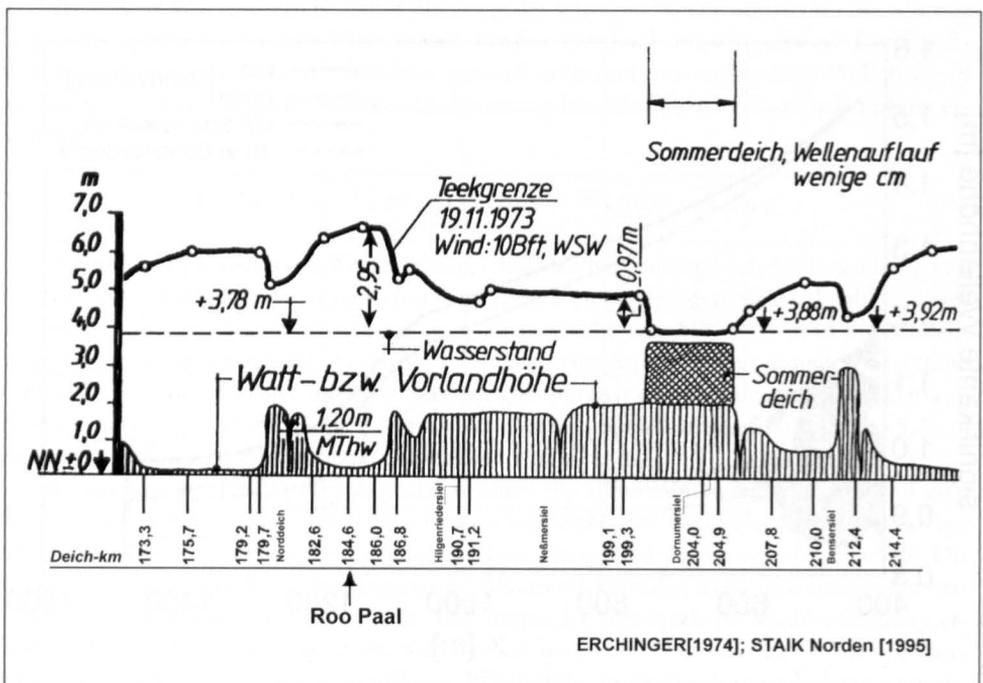


Abb. 41: Teekgrenzen der Sturmflut vom 19. 11. 1973 an der ostfriesischen Küste zwischen Utlandshörn und Ostbense (ERCHINGER, 1974; StAIK, 1995)

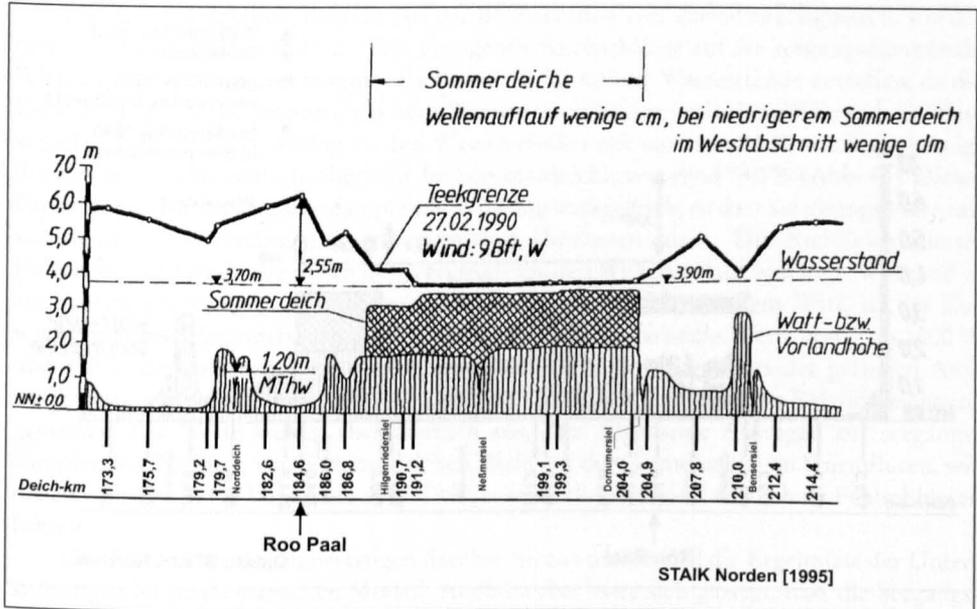


Abb. 42: Teekgrenzen der Sturmflut vom 27. 2. 1990 an der ostfriesischen Küste zwischen Utlandshörn und Ostbense (ERCHINGER, 1974; STAIK, 1995)

lich von Dornumersiel am Seedeich lediglich ein Wellenauflauf von etwa 0,1 m gemessen worden (ERCHINGER, 1974; STAIK, 1995), an einem etwa 20 km entfernt gelegenen Schardeich (Station Roo Paal) einem von 2,95 m. Ähnlich lagen die Verhältnisse bei der Sturmflut vom 27. 2. 1990, deren Scheitelwasserstand nur wenige Zentimeter niedriger war als der am 19. 11. 1973 gemessene (Abb. 42): Hinter der gegenüber dem Zustand von 1973 nach Westen ausgedehnten Sommerdeichstrecke beträgt der Wellenauflauf wiederum fast überall nur einen Dezimeter oder weniger. Lediglich im Bereich westlich von Hilgenriedersiel, wo die Krone des Sommerdeichs etwa 0,5 m niedriger ist als weiter östlich, wurde am landwärtigen Seedeich ein Wellenauflauf von 0,47 m gemessen. Der geringere Wellenauflauf am Schardeich (Roo Paal) ist überwiegend darauf zurückzuführen, dass bei einer mittlerweile erfolgten Deichverstärkung die Außenböschung insgesamt flacher geworden ist.

Diese Daten werden zu einem Vergleich mit denen der Sturmflut vom 3. Januar 1976 herangezogen, deren Scheitelwasserstand im Bereich der Sommerdeichstrecke mit NN +4,15 m knapp drei Dezimeter höher war als der vom 19. 11. 1973. Für die beiden in diesem Abschnitt gelegenen Messpunkte an der Sommerdeichstrecke wird der Wellenauflauf beider Sturmfluten verglichen. Am Schardeich (Roo Paal) ist der Wellenauflauf der Sturmflut vom 3. Januar 1976 nicht mit dem der vom 19. November 1973 direkt vergleichbar, da 1976 bereits die bereits erwähnte Deichverstärkung wirksam war. Aus diesem Grund wird hier der Vergleich mit den Daten der Sturmflut vom 27. Februar 1990 vorgenommen.

Die Gegenüberstellung erfolgt für alle drei Messorte relativ mit Bezug auf die niedrigere Sturmflut für die folgenden Parameter (Abb. 44):

1. Wassertiefen auf dem vorgelagerten Watt,
2. Wassertiefen oberhalb der Sommerdeichkrone,
3. Wellenauflauf am Seedeich.

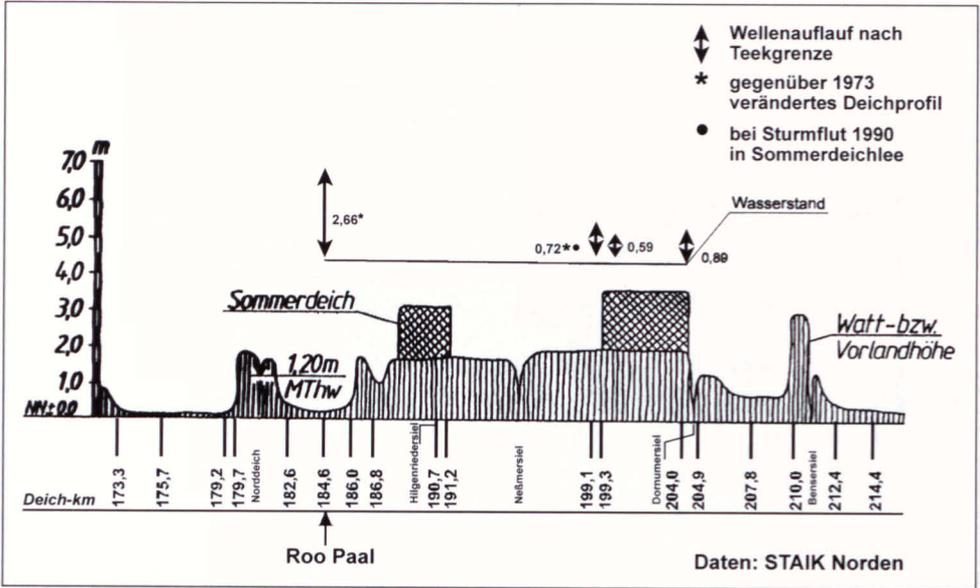


Abb. 43: Teekgrenzen der Sturmflut vom 3. 1. 1976 an der ostfriesischen Küste zwischen Utlandshörn und Ostbense; Daten des StAIK Norden (INGENIEURKOMMISSION, 1979)

Wassertiefen und Wellenaufbaurelationen Sturmflut 03.01.1976

bezogen auf Werte der Sturmfluten vom 19.11.1993 und 27.01.1990
(=100%)

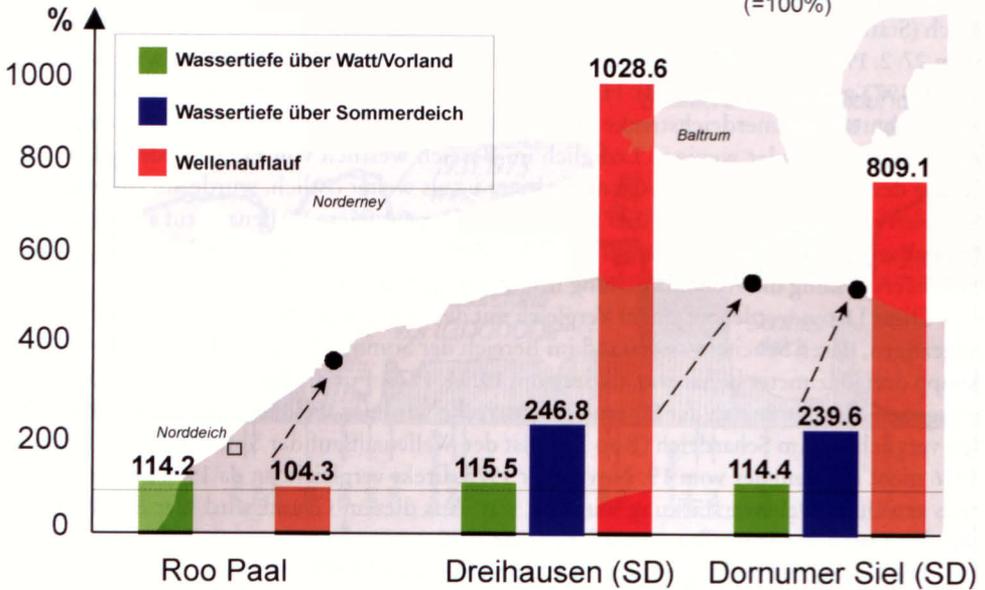


Abb. 44: Vergleich der Wassertiefen auf dem Watt, der Wassertiefen auf der Sommerdeichkrone und des Wellenaufbaus am Seedeich für den Schardeich beim Roo Paal (Sturmfluten vom 27.2.1990 und 3. 1. 1976) sowie für die Seedeiche in Lee von Sommerdeichen bei Dreihäusen und Dornumersiel (Sturmfluten vom 19. 11. 1973 und 3. 1. 1976)

Hieran wird deutlich, dass die aus der Beobachtung von Sturmflutereignissen, wie denen vom 19. 11. 1973 und 27. 2. 1990, gezogenen Rückschlüsse auf die seegangsdämpfende Wirkung von Hellern und Sommerdeichen nicht für höhere Wasserstände zutreffen, da die Entwicklungen nicht proportional zum Wasserstandsanstieg verlaufen: Während die Wassertiefen auf dem Watt, analog zu den Wasserständen nur um etwa 15 % wachsen, beträgt der Zuwachs an Wassertiefe oberhalb der Sommerdeichkrone rund 140 % (Abb. 44). Dieser Parameter ist für die seegangsdämpfende Wirkung maßgeblich, so dass sie zwangsweise mit wachsenden Wasserständen überproportional abnehmen muss. Die Richtigkeit dieser Folgerung wird eindeutig durch den Vergleich für den Wellenauflauf bestätigt. Während er am Schardeich weniger zugenommen hat als die Wassertiefe auf dem Watt, ist der Zuwachs in Lee der Sommerdeiche außerordentlich groß und erreicht Werte von etwa 1000 % und 800 % desjenigen bei der niedrigeren Flut (Abb. 44). Angesichts der geringen Ausgangswerte wäre eine Überbewertung der darauf fußenden prozentualen Relation nicht angemessen. Die Werte weisen aber deutlich aus, dass allgemeine Aussagen zur seegangsdämpfenden Wirkung von Sommerdeichen allein auf der Grundlagen von Sturmfluten, wie denen vom 19. 11. 1973 und vom 27. 2. 1990, sowohl illegitim sind als auch zu Fehlschlüssen führen.

Die Teekleinmessungen bestätigen darüber hinaus tendenziell die Ergebnisse der Untersuchungen im mathematischen Modell. Auch hierbei hatte sich gezeigt, dass die Seegangsdämpfung nach der Überstauung der Sommerdeiche mit wachsenden Wassertiefen auf den Kronen überproportional zum Wasserstandsanstieg abnimmt.

Die für die Sturmflut vom 3. Januar 1976 vorliegenden Einmessungen des Wellenaufbaus an einen in Lee eines Sommerdeichs liegenden Seedeichs durch den Teek werden hier zu einem weiteren Vergleich mit den Modellergebnissen genutzt. Mit Hilfe des Extrapolationsverfahrens (NIEMEYER, 1976, 1977b) wird aus dem Wellenaufbau der zugehörige Seegang ermittelt und mit entsprechenden Ergebnissen für das Modell HISWA verglichen (Abb. 31): Es zeigt sich, dass bei den mit HISWA ermittelten Ergebnissen für die seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen die signifikante Wellenhöhe vor dem Seedeich zwar von ähnlicher Größenordnung, aber niedriger ist als nach der Rückrechnung über das Extrapolationsverfahren (Abb. 45). Hieraus kann natürlich keine Verifikation hergeleitet werden, aber doch Indizien dafür abgeleitet werden, dass die hier mit dem mathematischen Seegangmodell HISWA ermittelten Ergebnisse

1. zutreffende Größenordnungen widerspiegeln,
2. die seegangsdämpfende Wirkung von Sommerdeichen eher über- als unterschätzen.

4.3.2 Vergleich mit hydraulischen Modellversuchen

Nach früheren Präsentationen und Veröffentlichungen der mit dem mathematischen Seegangmodell HISWA durchgeführten Untersuchungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Sommerdeichen (NIEMEYER u. KAISER, 1996, 1998) waren Zweifel an deren Naturähnlichkeit aufgekommen. Das Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover hat zur Klärung dieser Fragen Untersuchungen im Großen Wellenkanal vorgenommen: Es wurde ein Sommerdeich in den Kanal eingebaut, seine seegangsdämpfende Wirkung gemessen (Abb. 46) und die Daten den Ergebnissen von Modellrechnungen mit HISWA gegenübergestellt (MAI et al., 1998).

Die Vergleiche der Daten aus mathematischem und hydraulischen Modell unterstreichen eindrucksvoll die Eignung von HISWA für diese Fragestellung (Abb. 47): Entlang der

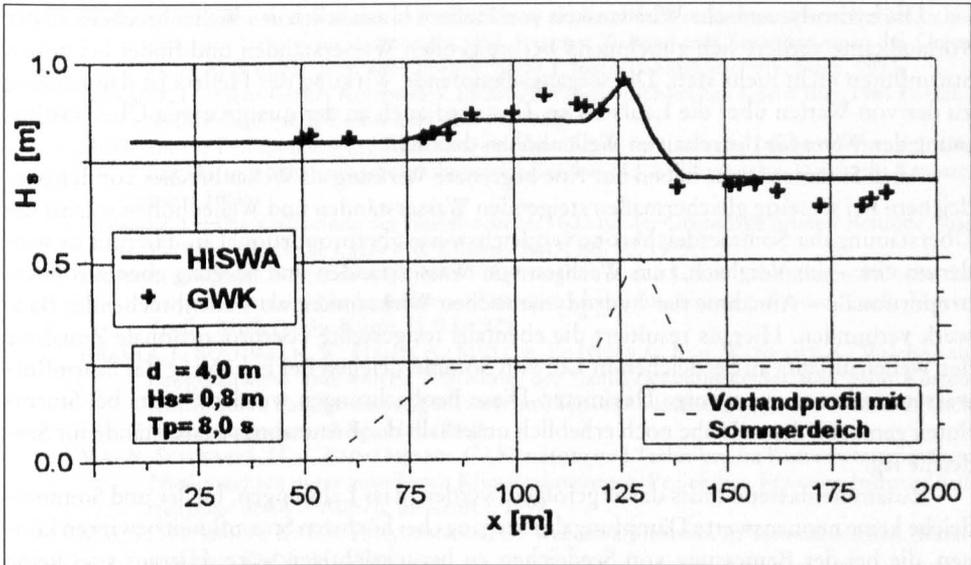


Abb. 47: Vergleich von Versuchsdaten aus dem Großen Wellenkanal mit Ergebnissen des mathematischen Seegangmodells HISWA zur Untersuchung der seegangsdämpfenden Wirkung von Sommerdeichen (MAI et al., 1998)

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen hinsichtlich ihrer Seegangsdämpfung ist mit Daten von Naturmessungen sowie mit hydraulischen und mathematischen Modellen untersucht worden. Ein Schwerpunkt war dabei auch, das sowohl flexible als auch ökonomische Werkzeug „mathematisches Seegangmodell“ auf seine Naturähnlichkeit und damit Tauglichkeit für die Zwecke realer Planung im Küsteningenieurwesen zu prüfen. Diese Tests waren ausgesprochen erfolgreich und führten zu einer Reihe von Einblicken, die anderweitig nicht möglich gewesen wären.

Das morphodynamische Gleichgewicht von einschwingendem Seegang und Watten ist auch für die Wechselwirkungen von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen mit dem Seegang bestimmend. Auf den Watten wird das für Wellenbrechen kritische Verhältnis von Wellenhöhen und Wassertiefen auch bei Sturm deutlich unterschritten. Bei wachsenden Wasserständen und Wellenhöhen nehmen die Überstauungshöhen von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen überproportional zu, bis in Abhängigkeit von Bauwerks- oder Hellerhöhe auch dort das für Brechen kritische Wellenhöhen-/Wassertiefen-Verhältnis unterschritten wird und der Seegang durchschwingt.

Die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen ist daher – in Übereinstimmung mit der ursprünglichen Zielsetzung – auf normale oder leicht erhöhte Tiden beschränkt. Diese Wirkung geht – in Abhängigkeit von den jeweiligen Watt- und Bauwerkshöhen – bereits bei höheren Windfluten verloren; bei Sturmfluten haben Lahnungen keine merkliche Wirkung mehr. Die letztgenannte Schlussfolgerung stellt die Wirksamkeit von Lahnungen als Gegenmittel gegen die Erosion von Hellerkanten nicht in Frage. Bei hohen Wind- und bei Sturmfluten sind die Heller bereits überstaut, so dass die besonders erosionswirksame Kliffbrandung dort nicht mehr stattfindet.

Die hydrodynamische Wirksamkeit von Hellern hinsichtlich des Wellenbrechens an der Vorlandkante verliert sich zunehmend bei steigenden Wasserständen und findet bei hohen Sturmfluten nicht mehr statt. Die seegangsdämpfende Wirkung des Hellers ist dann analog zu der von Watten über die Laufstrecke. Das wird auch an der quantitativen Übereinstimmung der Werte für die relativen Wellenhöhen deutlich.

Auch Sommerdeiche haben nur eine begrenzte Wirkung als Wellenbrecher vor den See- deichen. Bei seeseitig gleichermaßen steigenden Wasserständen und Wellenhöhen wächst die Überstauung der Sommerdeichkrone vergleichsweise überproportional an. Hiermit ist wiederum eine – im Vergleich zum Wachsen von Wasserständen und Seegang ebenfalls über- proportionale – Abnahme der hydrodynamischen Wirksamkeit als wellenbrechendes Bau- werk verbunden. Hieraus resultiert die ebenfalls festgestellte überproportionale Zunahme des Wellenaufbaus an Seedeichen in Lee von Sommerdeichen bei Erhöhung der Sturmflut- wasserstände um nur wenige Dezimeter. Diese Beobachtungen wurden bereits bei Sturmflut- en gemacht, deren Höhe noch erheblich unterhalb der Bemessungswasserstände für See- deiche lag.

Zusammenfassend muss daher gefolgert werden, dass Lahnungen, Heller und Sommer- deiche keine nennenswerte Dämpfung des Seegangs bei höchsten Sturmfluten bewirken kön- nen, die bei der Bemessung von Seedeichen zu berücksichtigen wäre. Hieraus sind keine Schlussfolgerungen für die Bemessungspraxis zu ziehen, da diese Vorgehensweise bisher nicht ausgeübt wurde. Entsprechende in Zusammenhang mit dem Erhalt von Sommerdei- chen geäußerte Auffassungen entbehren belastbarer Grundlagen.

6. Schriftenverzeichnis

- ADEL, J. D. DEN; NIEMEYER, H. D.; FRANKEN, A. F.; BOOIJ, N.; DEKKER, J. u. VOGEL, J. A.: Wave model application in a Wadden Sea area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft/ The Netherlands, ASCE, New York, 1991.
- ALBERTS, H.; FLESSNER, J.; GLASER, D.; HARTKENS, T.; KAISER, R.; MÜNKEWAF, G. u. NIE- MEYER, H. D.: Dokumentation von Seegangsmessungen bei Ockholm/Nordfriesland. NLO-Forschungsst. Küste-Ber. z. KFKI-FV Optimierung von Küstensicherungsarbei- ten, Nr. 1, 1995.
- BOOIJ, N. u. HOLTHUIJSEN, L.: HISWA user manual. Prediction of short-crested, stationary waves with ambient currents. TU Delft, Facult. Civ. Techn., 1992.
- BRAHMS, A.: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasserbaukunst, Verl. H. Tapper, Aurich, 1754.
- BRAHMS, A.: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasserbaukunst, Anderer Theil. Verl. H. Tapper, Aurich, 1757.
- ERCHINGER, H. F.: Küstenschutz durch Vorlandgewinnung, Deichbau und Deichunterhaltung in Ostfriesland. Die Küste, H. 19, 1970.
- ERCHINGER, H. F.: Wellenaufbau an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 41, 1974.
- ERCHINGER, H. F.: Deichschutzwerke. in: Brößkamp, K. H.: Seedeichbau-Theorie und Praxis. Verein. d. Naßbaggerunternehmen, Hamburg, 1976.
- ERCHINGER, H. F.; COLDEWEY, H.-G. u. MEYER, C.: Interdisziplinäre Erforschung des Deich- vorlandes im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“. Die Küste, H. 58, 1996.
- FÜHRBÖTER, A.: Küstenschutz auf neuen Wegen. VDI-Zeitschr. 116, H. 8, 1974.
- HOFSTEDÉ, J. L. A.: Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nord- seeküste – Projektüberblick und Synthese. Schlußber. BMBF-Forschungsvorh. MTK 0564-Teil 1, 1998.
- HOLTHUIJSEN, L. H. u. BOOIJ, N.: A grid model for shallow water waves. Proc. 20th Int. Conf. Coast. Eng. Taipei/RoC Taiwan, ASCE, New York, 1987.

- HOMEIER, H.: Die morphologische Entwicklung der Leybucht unter besonderer Berücksichtigung des Greetzieler Außentiefs. in: J. Kramer: Zustand und Veränderungen des Greetzieler Außentiefs. Jber. 1954 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 6, 1955.
- HOMEIER, H.: Historisches Kartenwerk 1:50000 der niedersächsischen Küste. Jber. 1961 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 13, 1962.
- HOMEIER, H.: Der Gestaltwandel der ostfriesischen Küste im Laufe der Jahrhunderte. in: J. Ohling (Hrsg.): Ostfriesland im Schutze des Deiches, Bd. 2. Eigenverlag, Deichacht Krummhörn, 1969.
- HOMEIER, H.: Die Verlandung der Harlebucht bis 1600 auf der Grundlage neuerer Befunde. Jber. 1978 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 30, 1979.
- INGENIEURKOMMISSION: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. (Autoren: Heinsohn, Kramer, Krause, Luck, Meyer-Toelle, Müller). Die Küste, H. 33, 1979.
- KRAMER, J.; BOTHMANN, W.; HAHN, A.; MÜLLER, E.; NICOLAI, K. u. WENHOLT, K.: Welche Lahnungsbauweise und welche Aufteilung der Landgewinnungsfelder sind beim Küstenschutz durch Landgewinnung am zweckmäßigsten? Das Fachgespräch am Runden Tisch, Wasser & Boden, 12. Jg., H. 9, 1960.
- MAI, S.; SCHWARZE, H. u. ZIMMERMANN, C.: Konzepte und Techniken im Küstenschutz im Land Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen. Projektber. Franzius-Institut (Auftraggeber StAWA Aurich; unveröff.), 1997.
- MAI, S.; DAEMRICH, K.-F. u. ZIMMERMANN, C.: Wellentransmission an Sommerdeichen. Wasser u. Boden 50, Nr. 11, 1998.
- MC COWAN, J.: On the highest wave of permanent type. Phil. Mag., Vol 5, 38, 1894.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 29, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen auf Deichvorländern. Jber. 1976 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 28, 1977a.
- NIEMEYER, H. D.: The estimation of design wave run-up on sea dykes under consideration of overtopping security. Proc. 17th IAHR-Congress, Baden-Baden/Germany, 1977b.
- NIEMEYER, H. D.: Wave climate study in the region of the East Frisian Islands and Coast. Proc. 16th Intern. Conf. Coastal Eng. Hamburg/Germany, ASCE, New York, 1979a.
- NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. Die Küste, H. 34, 1979b.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsber. MF 0203, 1983.
- NIEMEYER, H. D.: Hydrographische Untersuchungen in der Leybucht zum Bauvorhaben Leyhörn. Jber. 1983 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 35, 1984.
- NIEMEYER, H. D.: Seegang und Biotopzonierung in Wattgebieten. in: Niedersächsischer Umweltminister (Hrsg.): Umweltvorsorge Nordsee. Hildesheim, 1987.
- NIEMEYER, H. D.: Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. – Progr. o. Contin. Educat. 1990) Delft Univ. o. Techn. Intern. – Intern. Civ. Eng., 1990.
- NIEMEYER, H. D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. Coast & Port Eng. i. Devel. Countr., Mombasa/Kenya, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Long-term morphodynamical development of the East Frisian Islands and Coast. Proc. 24th Intern. Conf. Coast. Eng. Kobe/Japan, ASCE, New York, 1995.
- NIEMEYER, H. D.; BRANDT, G.; GÄRTNER, J.; GLASER, D.; GRÜNE, J.; JENSEN, F. u. KAISER, R.: Naturmessungen von Wattleegang an der deutschen Nordseeküste. Ber. Forsch.-Stelle Küste, Bd. 40, 1996.
- NIEMEYER, H. D.; GÄRTNER, J.; KAISER, R.; PETERS, K.-H. u. SCHNEIDER, O.: Estimation of design wave run-up on sea dykes under consideration of overtopping security by using benchmarks of flotsam. Proc. 4th Conf. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Rio de Janeiro/Brazil, 1995.
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R. u. DEN ADEL, J. D.: Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche. Die Küste, H. 57, 1995.
- NIEMEYER, H. D. u. KAISER, R.: Modeling of effectiveness of wave damping structures in Wadden Sea areas. Abstr. 25th Int. Conf. Coast. Eng. Orlando/FL, USA, 1996.
- NIEMEYER, H. D. u. KAISER, R.: Modeling of effectiveness of wave damping structures in Wadden Sea areas. Proc. 5th Int. Worksh. Wave Hindcast. & Wave Forecast., Melbourne/FL, USA, 1998.

- RAGUTZKI, G. u. STEPHAN, H. J.: Vorlanduntersuchungen Land Wursten (Stand: Herbst 1996). Dienstber. NLÖ-Forschungst. Küste 06/96 (unveröff.), 1996.
- StAIK: Bericht zum Erhalt der Sommerdeiche; Schutzwirkung der Sommerdeiche bei Sturmfluten. Dienstber. an Bez.-Reg. Weser-Ems (unveröff.), 1995.
- REIMERS, H. C.; RICKLEFS, K.; THOMAS, B. u. GRENZER, E.: Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. Schlußber. BMBF-Forschungsvorh. MTK 0564-Teil 2, 1998.
- WOEBCKEN, C.: Deiche und Sturmfluten an der Nordseeküste. Friesen-Verl, Bremen-Wilhelms-
haven, 1924.
- WOEBCKEN, C.: Die Meeresbuchten der deutschen Nordseeküste. Arch. Landes- u. Volksh.
Nds., H. 18, 1943.