

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Lieberman von, Nicole; Schwarze, Horst; Zimmermann, Claus Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen

Die Küste

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

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101409>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lieberman von, Nicole; Schwarze, Horst; Zimmermann, Claus (1998): Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen. In: Die Küste 60. Heide, Holstein: Boyens. S. 191-225.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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



Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen

Von NICOLE VON LIEBERMAN, HORST SCHWARZE u. CLAUD ZIMMERMANN

Zusammenfassung

In dem vom BMBF geförderten KFKI-Projekt MTK 0564 „Optimierung von Küstenschutzmaßnahmen im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ wurden im Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ neben einer Literaturstudie zu Aufgabe und Wirkungsweise von Lahnungen, in physikalischen Modellversuchen die Durchlässigkeit und das Transmissionsverhalten von Wellen an Buschlahnungen untersucht.

Im Rahmen der physikalischen Untersuchungen des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ wurde zunächst in einer Strömungsrinne das Durchströmungsverhalten einer Buschlahnung im Maßstab 1:1 untersucht. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde zu rd. 20 % bestimmt.

Des weiteren wurden Untersuchungen zum Transmissionsverhalten von Buschlahnungen im Wellenkanal des Franzius-Instituts am Schneiderberg unter Berücksichtigung ausgewerteter Seegangsdaten aus der Natur im Maßstab 1:1 durchgeführt. Die Untersuchungen wurden durch dreidimensionale Seegangsuntersuchungen im Wellenbecken ergänzt. Für variable Wasserstände und Seegangsbedingungen wurde der Einfluß der Bauwerksbreite B , der relativen Bauwerkshöhe h/d (h = Bauwerkshöhe, d = Wassertiefe) und der Grad der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom gewählten Füllmaterial bzw. einem seitlichen Anwurf auf das Transmissionsverhalten untersucht.

Prinzipiell zeigte sich, daß höhere Ausgangswellen besser als niedrigere gedämpft werden. Für Wassertiefen bis etwa zur Bauwerksoberkante zeichnet sich im wesentlichen eine lineare Zunahme der Transmissionskoeffizienten ab. Des weiteren konnte nachgewiesen werden, daß für Wasserstände bis zur Lahnungsoberkante Lahnungen mit größeren Breiten als 0,25 m als wirkungsvoller einzuschätzen sind. Ein effektiveres Dämpfungsverhalten des Seegangs zeichnet sich für bestimmte Wassertiefen für gedichtete Lahnungen im Vergleich zu den konventionellen ab.

Summary

At the German North Sea Coast forelands and salt marshes in front of sea dikes significantly contribute to the protection and safety of the artificial coastline. These forelands are an important element of the coastal protection system as a whole. The present knowledge about the management of forelands is essentially based on experience acquired over generations. Therefore research to determine the influence of the various parameters effecting accretion or erosion of forelands is essential. Within a research programme on the optimization of foreland management, which was sponsored by the German Federal Ministry of Education, Science, Research, and Technology (BMBF), field measurements, physical, and numerical simulations have been carried out to analyse the interaction of waves, currents, sedimentation processes, and maintenance techniques of forelands at the German North Sea Coast. This paper describes the basic technology and physical model tests.

Inhalt

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Einleitung | 192 |
| 2. Natürliche Vorlandbildung an einer Wattküste | 193 |
| 3. Künstliche Vorlandbildung durch Lahnungen | 197 |
| 4. Morphologie des Vorlandes | 206 |
| 5. Einflußgrößen bei Strömungs- und Sedimentationsvorgängen in Lahnungsfeldern | 207 |
| 6. Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Lahnungen | 208 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1 Methodik | 208 |
| 6.2 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes | 209 |
| 6.3 Versuchsergebnisse | 212 |
| 7. Untersuchungen zur Transmission von Wellen an Buschlahnungen | 213 |
| 7.1 Transmission von Wellen | 213 |
| 7.2 Bestimmung des Transmissionskoeffizienten im Wellenkanal | 214 |
| 7.3 Versuchsergebnisse | 216 |
| 7.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit Messungen in der Natur | 218 |
| 7.5 Untersuchungen zum Transmissionsverhalten im Wellenbecken | 219 |
| 8. Zusammenfassung | 222 |
| 9. Schriftenverzeichnis | 224 |

1. Einleitung

Ein bedeutendes Küstenschutzelement und ein ökologisch wertvoller Bereich des Küstenvorfeldes sind hohe und breite Vorländer mit einem flach geneigten Übergang zum Watt. Vorlandbildung kann durch die Anlage und Bewirtschaftung von Lahnungsfeldern beschleunigt werden. Für die Gestaltung von Lahnungsfeldern, für die Bemessung und den Aufbau der Lahnungen und für die Bearbeitung des Anwachsens in den Lahnungsfeldern werden seit rd. 200 Jahren an der deutschen Nordseeküste vor allem praktische, oft ortsspezifische Erfahrungen herangezogen. Für eine Optimierung der Vorlandbildung mit Lahnungen fehlt bisher eine wissenschaftliche Analyse der hydromechanisch-morphologischen Wechselwirkungen in den Lahnungsfeldern.

In einem Forschungsvorhaben des KFKI „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ sollten deshalb mit wissenschaftlichen Methoden Grundlagen für einen effektiven Einsatz von Lahnungen für die Vorlandbildung erarbeitet werden. Gefördert durch den BUNDESMINISTER FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF) koordinierte das LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU) das Forschungsvorhaben, das in zwei Teilprojekten durchgeführt wurde, und zwar durch das FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEZENTRUM (FTZ) WESTKÜSTE der CHRISTIAN-ALBRECHT-UNIVERSITÄT ZU KIEL (Teilprojekt „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“) und das FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der UNIVERSITÄT HANNOVER (Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“) (Abb. 1).

Aufgabe des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ des FRANZIUS-INSTITUTS war die Darstellung des Wissensstandes über „Lahnungen/Lahnungsfelder“ und die „hydrologisch-morphologischen Wechselwirkungen an kohäsiven Wattböden“. Zur Modellierung und Simulation der Vorgänge in Lahnungsfeldern waren die unter bestimmten Randbedingungen auftretenden Strömungs- und Seegangsbedingungen zu erfassen und die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen zu beurteilen. Hierzu wurden Detailuntersuchungen zum Verständnis der hydrodynamischen Wechselwirkungen am Bauwerk einer Lahnung in verschiedenen physikalischen Modellen durchgeführt. Die Ergebnisse dienten als eine Grundlage für die Simulation der Strömungs-, Seegangs- und Sedimentationsverhältnisse in einem hydrodynamisch-numerischen Modell.

In zwei eigens für das Forschungsvorhaben eingerichteten Testgebieten an der Westküste Schleswig-Holsteins (Testgebiet „Ockholm“ und Testgebiet „Speicherkoog Süd“, Abb. 2) wurden im Bereich der dort im Herbst 1993 bzw. Frühjahr 1995 angelegten Lahnungsfelder topographische Messungen sowie Seegangs- und Strömungsmessungen



Abb. 1: Struktur des KFKI-Forschungsvorhabens „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“

von den ÄMTERN FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ÄLW) HEIDE und HUSUM durchgeführt.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Untersuchungen in den Testgebieten wurden für die physikalischen und numerischen Untersuchungen Informationen durch das LANU sowie die ÄLW HEIDE und HUSUM verwendet, vorwiegend Pegelraten der Tidepegel „Schlütsiel“ und „Sommerkoog Steertloch“ sowie Winddaten der Windmeßstationen „Hallig Hooge“ bzw. „Büsum“ (vgl. Abb. 2).

Dieser Beitrag berichtet über die Entwicklung und Ausführung von Lahnungen an den Küsten der Nordsee sowie die wirksamen Parameter, deren Verhalten unter verschiedenen Randbedingungen in physikalischen Modellen untersucht wurde.

Über die Simulationen von Sedimentationsvorgängen in Lahnungsfeldern wird in einem weiteren Beitrag berichtet.

2. Natürliche Vorlandbildung an einer Wattküste

Das Wattenmeer vor der europäischen Festlandsküste hat eine Gesamtfläche von rd. 8000 km². Davon entfallen rd. 10 % auf Dänemark, 30 % auf die Niederlande und 60 % auf die Bundesrepublik Deutschland, wovon etwa die Hälfte zum schleswig-holsteinischen Bereich gehört. Diese weltweit einmalige Küstenlandschaft, bestehend aus Dünen- und Strand-

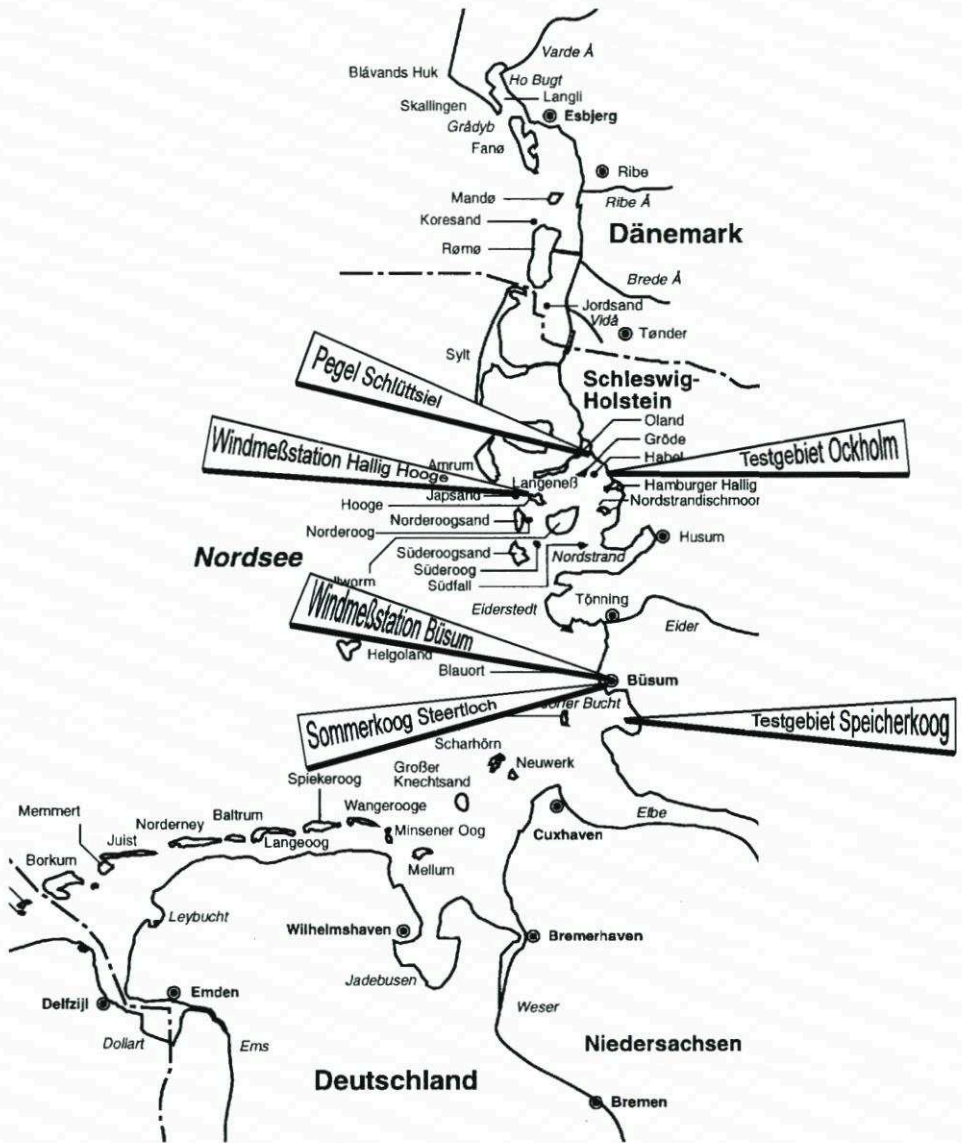


Abb. 2: Testgebiete „Ockholm“ und „Speicherkoog Süd“; Tidepegel „Schlüttsiel“ und „Sommerkoog Steertloch“, Windmeßstationen „Hallig Hooge“ und „Büsum“

inseln, Halligen, Buchten, Flußmündungen, offenen und brandungsgeschützten Wattflächen, Rinnen- und Prielsystemen, ist als Übergangszone zwischen Land und Meer der Dynamik des Meeres unterworfen. Seine Existenz beruht auf der halbtäglichen, von den Gezeiten abhängigen Überflutung und dem Trockenfallen der Wattflächen. Das Wattenmeer setzt sich aus den drei Teillebensräumen

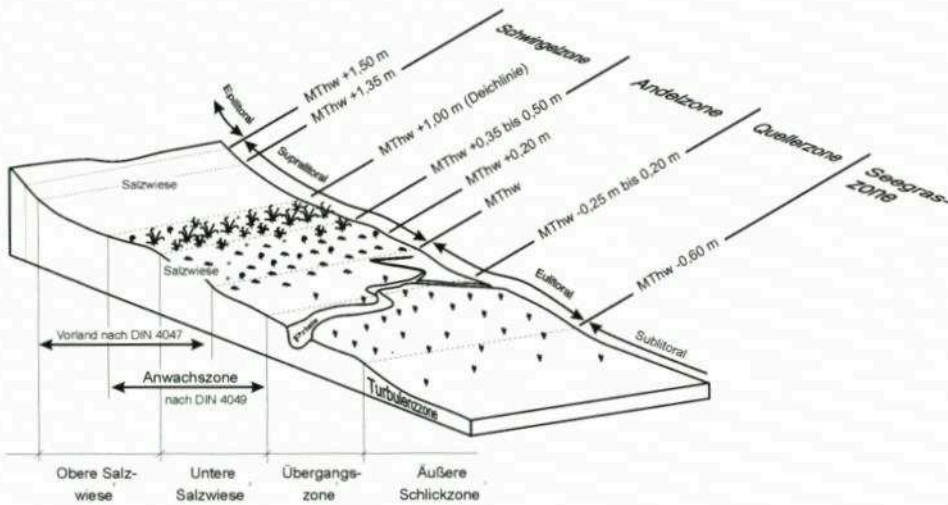
1. Watt
2. Inseln mit Strand und Dünen
3. Salzwiesen / Vorland

zusammen, die aufgrund ihrer Besonderheiten jeweils spezielle Funktionen des gesamten Ökosystems Wattenmeer wahrnehmen.

Das Watt wird in vier Bereiche unterteilt (Abb. 3):

Der untere Wattbereich (Sublitoral) umfasst die Gebiete unterhalb rd. MThw $-0,60$ m, die auch bei Tideniedrigwasser noch mit Wasser bedeckt bleiben. Dazu gehören Watttrinnen, Priele und Wattströme sowie zahlreichen Inseln seeseits vorgelagerte, sandige Flachwassergebiete. Prinzipiell zählt dieser Bereich nicht zum Watt, da die ökologischen Randbedingungen eher mit denen der offenen Nordsee übereinstimmen.

Das Eulitoral, der mittlere Wattbereich zwischen rd. MThw $-0,60$ m und MThw, ist zweimal täglich dem Wechsel von Ebbe und Flut unterworfen. Die Grenzen zum unteren sowie zum oberen Wattbereich sind fließend, da das Eulitoral sowohl vom Prielsystem durchzogen als auch gegen die Queller-Region und die Salzwiesen nicht klar abgegrenzt ist.



- 1) Bezeichnung z. B. nach Kroeze et al., 1992
2) Bezeichnung z. B. nach Wilkens et al., 1983

Abb. 3: Zonierung der Wattbereiche

Der obere Wattbereich (Supralitoral) umfasst einen Teil der Verlandungszone (Anwachszone), Bereiche der Salzwiesen sowie den unteren Bereich der Süßwiese, der durch Akkumulationsvorgänge infolge reduzierter Strömungsgeschwindigkeiten über die Linie des mittleren Hochwassers (bis rd. MThw $+1,50$ m) hinausgewachsen ist. Das Supralitoral wird nur noch unregelmäßig überflutet.

Der höchste Wattbereich oberhalb rd. MThw $+1,50$ m, das Epilitoral, wird außer während Sturmfluten nicht mehr überflutet, ist jedoch durch das salzhaltige Grundwasser und durch vom Wind herangetragenen Wasserstaub immer noch den maritimen Einflüssen unterworfen (LÜDERS u. LUCK, 1976; DOLDER u. DOLDER, 1988; JANKE u. KREMER 1990; WIELAND, 1990).

Der ostfriesischen Küste vorgelagert ist ein Gürtel aus sieben größeren und einigen kleineren Düneninseln. Sie sind aus einem von seewärts durchbrochenen Strandwall entstanden. Die nordfriesischen Inseln vor der schleswig-holsteinischen Westküste hingegen sind überwiegend Reste des ehemaligen Festlandes (NMELF, 1985; NATIONALPARKVERWALTUNG „NIE-

DERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992). Der Strandbereich erstreckt sich von der mittleren Tideniedrigwasserlinie bis zum seeseitigen Dünenfuß bzw. am Festland bis zum Deich. Der sogenannte trockene Strand wird im Vergleich zum nassen Strand von den mittleren Tiden nicht erreicht.

Salzmarschen oder -wiesen sind die über der mittleren Hochwasserlinie gelegenen Flächen, die nur noch selten, insbesondere im Winterhalbjahr während Wind- oder Sturmfluten, mit Salzwasser bedeckt werden (LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992).

Der Bereich des Supralitorals von der Linie des mittleren Tidehochwassers bis zum Deichfuß wird als Vorland, bestehend aus Anwachszone und Salzwiese, bezeichnet (Abb.3). Die Salzwiesen des Vorlands werden im Laufe eines Jahres bei höheren Tiden 40- bis 250mal überflutet und durch die innerhalb des Eulitorals liegenden zahlreichen verästelten Prielsysteme auf natürliche Weise be- und entwässert. Durch die Überflutungen werden diese Bereiche mit Salzwasser bedeckt, das auch für einen stetigen Nachschub an nährstoffreichen Sedimenten sorgt und dieses Teilsystem des Wattenmeeres im Gebiet zwischen Esbjerg in Dänemark und Den Helder in den Niederlanden zu einem der produktionsreichsten Lebensräume der Erde macht (ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER BEAUFTRAGTER FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE, 1980; HEYDEMANN u. MÜLLER-KARCH, 1980; ABRAHAMSE et al., 1984; DIECKMANN, 1985).

Im Ökosystem des Vorlandes können nur besonders angepaßte Organismen der Flora und Fauna existieren. Die Salzwiesen sind mit zahlreichen Halophyten bedeckt und mit etwa 250 kleineren Tierarten besiedelt. Entsprechend den Tideverhältnissen tritt in der Anwachszone und im Salzwiesenbereich eine gesetzmäßige Zonierung und Sukzession von Pflanzengesellschaften auf, die primär aus salztragenden und salzresistenten Arten bestehen. Sobald das Watt auf rd. 0,50 m unter MThw angewachsen ist, beginnt der natürliche Pflanzenwuchs mit den Pionierpflanzen Queller (*Salicornia herbacea* L.) und Schlickgras (*Spartina Townsendii*) sowie ab einer Vorlandhöhe von rd. 0,25 m unter MThw dem Andel (*Puccinellia maritima* Parl.) (HEYDEMANN u. MÜLLER-KARCH, 1980; KAMBECK, 1980; STADELMANN, 1981; ERCHINGER, 1982; JANKE u. KREMER, 1990; KRAMER, 1990; DIJKEMA et al., 1990).

Mit jeder Tide werden im Wattenmeer und insbesondere während Sturmflutereignissen Sedimente transportiert, vorwiegend organische und anorganische Schwebstoffe, die im Mittel 5 mg/l bis 150 mg/l betragen, während Sturmfluten im Durchschnitt über 2500 mg/l (WOHLENBERG, 1954; DIECKMANN, 1985; SÖNNICHSEN u. MOSEBERG, 1994). Je nach Örtlichkeit bestehen daher unterschiedliche Tendenzen zur natürlichen Anlandung.

Die Wattsedimente bestehen aus den Hauptkomponenten:

1. anorganischer Anteil (Sand, Schluff, Ton)
2. organischer Anteil (Kohlenstoffverbindungen, Karbonate)

Zusammen mit Wasser bilden sie das allgemein als Schlick bezeichnete Sediment (Tab. 1), dessen prozentuale Zusammensetzung regional sehr unterschiedlich ist.

Tab. 1: Klassifizierung der Korngrößen nach DIN 4022 und Bezeichnung der Sedimenttypen nach dem Anteil der Kornfraktion < 0,063 mm nach DIN 4022

| Korngröße | Bezeichnung | Anteil der Kornfraktion < 0,063 mm | Sedimenttyp |
|-----------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
| 2 mm bis 0,063 mm | Sand | < 10 % | Wattsand |
| 0,063 mm bis 0,002 mm | Schluff | 10 % bis 50 % | Schlickwatt |
| < 0,002 mm | Ton | > 50 % | Schlick |

Die Erosionsstabilität der Wattsedimente gegen Strömungs- und Wellenangriff ist nicht nur durch deren physikalische Parameter bestimmt. Eine ausgeprägte, nicht immer sichtbare Besiedlung beeinflusst die Erosionsstabilität der Sedimente maßgeblich. Verschiedene Tierarten können die feinen organischen Bestandteile und die Tonmineralien durch die Bildung kleiner schlickartiger Kotklümpchen aneinanderheften. Hierdurch wird die Ablagerung eines an Ton und organischer Substanz reichen Sediments bewirkt, das für den Anwachs des Vorlandes von großer Bedeutung ist. Entscheidend sind daran Miesmuscheln (*Mytilus edulis* L.), Herzmuscheln (*Cerastoderma edule*) und Sandklaffmuscheln (*Mya arenaria* L.) beteiligt (z. B. MANZENRIEDER, 1983).

3. Künstliche Vorlandbildung durch Lahnungen

Mit der Tidewelle, die von seegangserzeugten Strömungen überlagert wird, werden Sedimente (Sinkstoffe), die im wesentlichen aus Umlagerungen des Watts stammen (KAMBECK, 1980; MUUSS u. PETERSEN, 1974), in das Küstenvorfeld transportiert und abgelagert, sobald die Turbulenz der Strömung reduziert und ihr Transportvermögen kleiner wird. Dieser Vorgang erfolgt auf natürlichem Wege in Buchten, Hafenbecken oder an den geschützten Leeseiten von Inseln, Halligen, Dämmen und sogenannten Höften.

Mit Hilfe planmäßiger Eingriffe in die Strömungsabläufe kann die Ablagerung von Sedimenten künstlich gefördert werden. So wurde in weiten Bereichen der Nordseeküste durch schachbrettartig neben- und voreinandergereihte Felder ein ausgedehntes Netz von beruhigten Wasserbereichen geschaffen. Die noch turbulente Brandung und Strömung wird von den, die sogenannten Lahnungsfelder umgebenden, in der Regel permeablen zaunartigen Bauwerken (den sogenannten Lahnungen) weitgehend ferngehalten und die natürliche Ablagerung der feinen Sinkstoffe aus dem Meerwasser beschleunigt.

Im weitesten Sinne ist das Jahr 1362 als Geburtsjahr der künstlichen Vorlandbildung, der „Landgewinnung“, zu bezeichnen. Vorangegangene, schwere Sturmfluten riefen gravierende Landeinbrüche an der Nordseeküste hervor. Die „Zweite Marcellusflut“ vom 16. Januar 1362 veranlaßte die Küstenbewohner deshalb, das für ihren Lebensraum und auch für die Landwirtschaft verlorene Land zurückzugewinnen; zunächst als Vorarbeiten für Eindeichungen durch Anlage von Höftern oder Lahnungen und/oder Gruppen (PROBST, 1996). Eine Dokumentation der ersten Arbeiten ist bei HAGEN (1878), HINRICHS (1931) oder MÜLLER u. FISCHER (1955) zu finden.

Die ersten Lahnungsfelder zur systematischen Vorlandbildung wurden im Jahr 1847 von der dänischen Regierung im heutigen Schleswig-Holstein angelegt (PROBST, 1996). Das Ziel der Anlage der künstlichen, buhnenartigen Lahnungsbauwerke, die je nach Örtlichkeit 100 m × 100 m bis 400 m × 400 m große Felder umfassen (Abb. 4), war und ist es, durch gedämpfte Strömungen und Wellenbewegungen die Anlandung von Sedimenten im Vorlandbereich zu begünstigen. In der parallel zum Deich verlaufenden Lahnung (auch als Querlahnung bezeichnet) befindet sich in der Regel eine Öffnung, so daß bei steigendem Tidewasserstand die Sedimentationsfelder überflutet und bei fallenden Wasserständen wieder entwässert werden. In der Stillwasserzeit um die Kenterung der Tide nach Hochwasser lagern sich die Schweb- und Sinkstoffe am Boden ab. Aufgabe der senkrecht zum Deich verlaufenden Hauptlahnungen der Lahnungsfelder (auch als Längslahnungen bezeichnet) ist es, die parallel zur Küste verlaufende Längsströmung zu unterbinden, während die Querlahnungen für eine Strömungs- und Seegangsberuhigung in den Lahnungsfeldern sorgen. An der oldenburgischen Küste sind Lahnungen meistens geschlossen (KRAMER, 1990), so daß das

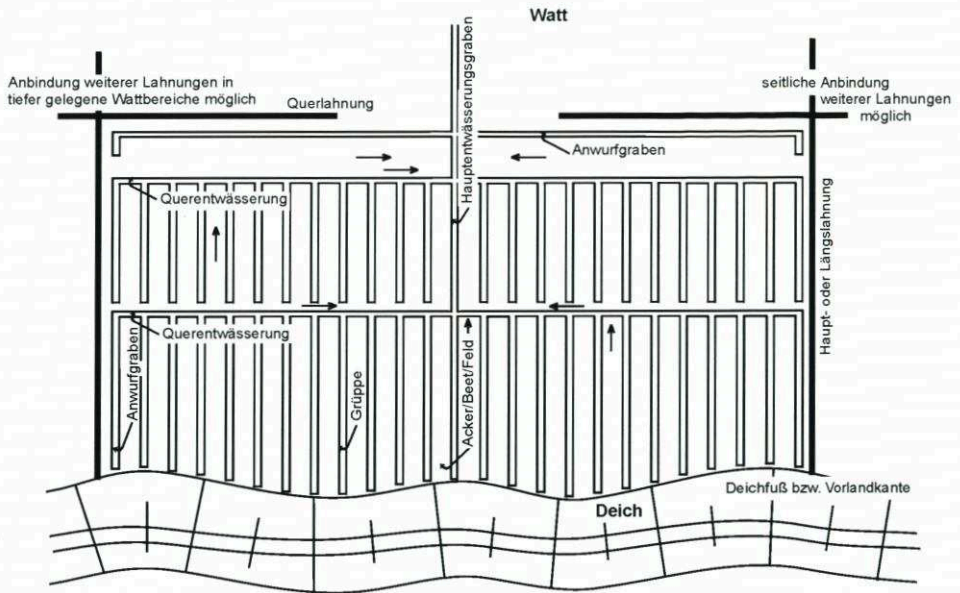


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Lahnungsfeldes mit Entwässerungssystem

Wasser nur über, bzw. je nach dem Grad der Porosität, durch die äußere, deichparallele Lahnung ein- und ausströmen kann.

Bis Mitte des 20. Jahrhundert war das Ziel der „künstlichen Landgewinnung“, neue fruchtbare Flächen für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zu gewinnen. Erst seit rd. 30 Jahren ist es – abgesehen von der ökologischen Bedeutung – vorwiegend der Küstenschutz, der sich die positiven Eigenschaften des Vorlandes, d. h. die wellendämpfende und wellenbrechende Wirkung zum Nutzen macht. Die als „Vorwärts-Verteidigung“ bezeichnete Vorlandbildung ist als eine aktive Küstenschutzmaßnahme zu sehen, die als „Energiewandler-System“ den Angriffsbereich der wirkenden Kräfte weiter seawärts verschiebt.

Heute werden Lahnungen in der Regel als sogenannte Buschlahnungen ausgeführt, die aus zwei in den Wattboden gerammten Holzpfahlreihen mit versetzt angeordneten Pfählen bestehen. In den Zwischenraum der Pfahlreihen werden Faschinen gepackt und mit einem verzinkten Draht kreuzweise zwischen den Pfählen verschnürt (Abb. 5). Die Lahnungen werden, insbesondere zum Schutz gegen Eisgang, mit Boden angeworfen. Üblicherweise liegt die Oberkante der Lahnungen auf Höhe des MThw oder $MThw + 30$ cm. In Abhängigkeit von der Wathöhe und nach Möglichkeit nicht tiefer als $MThw - 0,70$ m bis $MThw - 0,80$ m wird in der Regel zunächst ein Lahnungsfeld vor dem Deich als Beruhigungszone errichtet, bevor mit fortschreitender Verlandung weitere Sedimentationsfelder angelegt werden (Tab. 2).

An der ostfriesischen Küste (Tab. 3b) sind, anders als die Buschlahnungen in Schleswig-Holstein (Tab. 3a), die Lahnungen nahezu dicht, d. h. sie werden vom Seewasser nicht durchströmt, und sogar schwere, bühnenartige Konstruktionen wurden eingesetzt. Innovative, von der Tradition gelöste Baukonzepte entstanden in den sechziger und siebziger Jahren. Mit dem Ziel, effektivere Bauformen zu etablieren sowie den Arbeits- und Unterhaltungsaufwand zu minimieren, wurden vermehrt auch Kunststoffe im Lahnungsbau eingesetzt (Tab. 4).

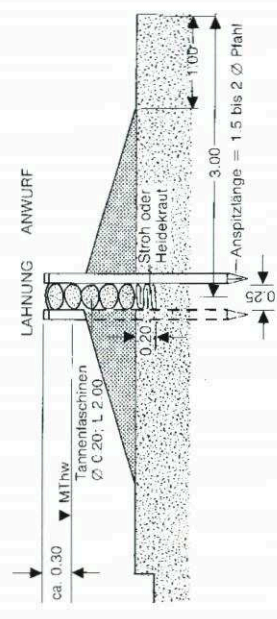
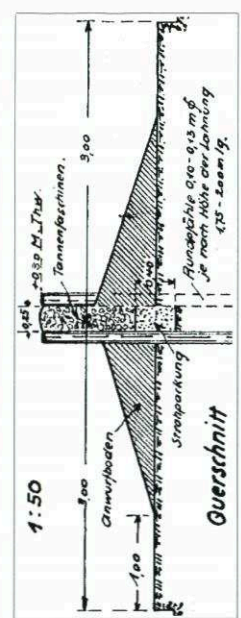
Tab. 2: Ausführung von Lahnungsfeldern für ein „Vorland im Aufbau“ (MELFF, 1995; STOCK et al., 1996)


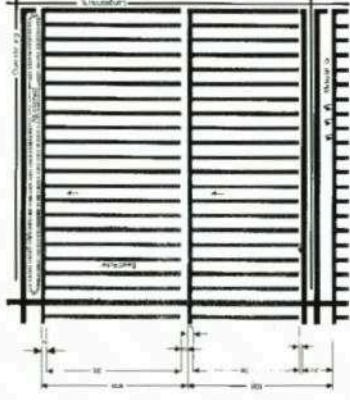
| Phase | Bereich | Bezeichnung | Zweck | Arbeiten im Lahnungsfeld | Vorlandarbeiten Entwässerung | Transportdämme | Beweidung |
|----------|-----------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|-----------|
| 1. Phase | 1. Lahnungsfeld | Turbulenzzone | Wellendämpfung Strömungsberuhigung | Unterhaltung Anwurf | Hauptentwässerung | - | - |
| 2. Phase | 1. Lahnungsfeld | Anwachszone | Aufbau und Erhaltung von Watt- und Anwachsflächen | Unterhaltung Anwurf Begrüpfung | Hauptentwässerung Begrüpfung | (X) | |
| | 2. Lahnungsfeld | Turbulenzzone | Wellendämpfung Strömungsberuhigung | Unterhaltung Anwurf | Hauptentwässerung | - | - |
| 3. Phase | 1. Lahnungsfeld | Vorlandzone im Aufbau | Förderung einer geschlossenen Vegetationsdecke | Unterhaltung Anwurf Begrüpfung* | Deichfußentwässerung Hauptentwässerung | X | (X) |
| | 2. Lahnungsfeld | Anwachszone | Aufbau und Erhaltung von Watt- und Anwachsflächen | Unterhaltung Anwurf Begrüpfung* | Hauptentwässerung Begrüpfung* | - | - |
| | 3. Lahnungsfeld | Turbulenzzone | Wellendämpfung Strömungsberuhigung | Unterhaltung Anwurf | Hauptentwässerung | - | - |

* Einzelfallentscheidung im Rahmen der Jahrespläne

† Transportdämme schaffen Zugangsmöglichkeiten in das Vorland und an die Vorlandkante z. B. für Unterhaltungsarbeiten oder Katastropheneinsätze

Tab. 3a: Ausführung von Lahnungsarbeiten an der schleswig-holsteinischen Küste

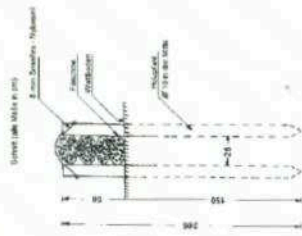
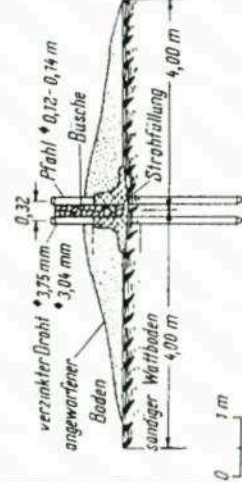
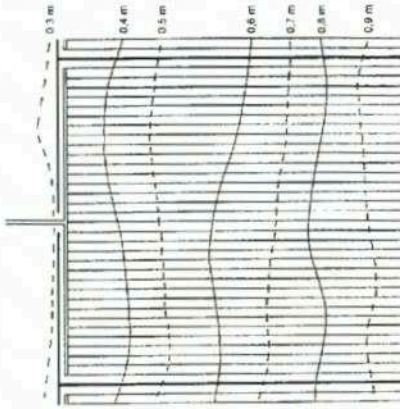
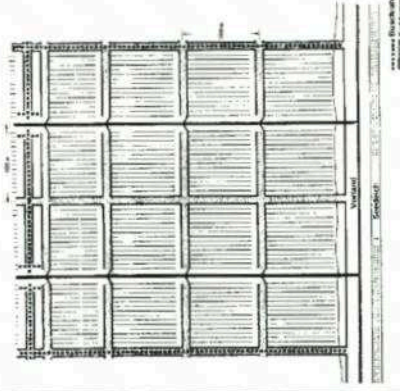
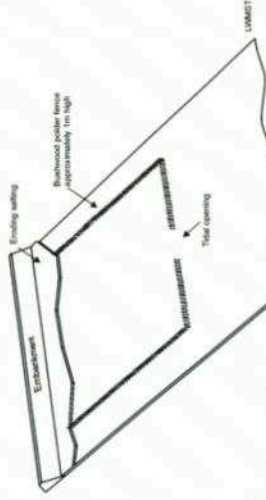
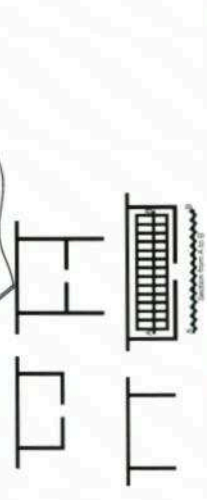
| | DEUTSCHLAND / SCHLESWIG-HOLSTEIN | Nordfriesland |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Dithmarschen | |
| <p>Lahnungs-konstruktion</p> | <p>Pfahldurchmesser: 10 bis 15 cm / Pfahlänge: 1,75 m bis 3,00 m / Pfahlabstand in Längsrichtung: 40 cm / Lichte Weite der Nadelholzpfahlreihen: 25 cm Auf den relativ tief liegenden Wattgebieten (in Senken) werden sog. verstärkte Buschlahnungen gebaut. Nach Verlandung der Buschlahnungen werden Erdämme aufgeworfen. Grundsätzlich sind die Buschlahnungen durchlässig, ihre Faschinenfüllung besteht aus Nadelholz. Die untere Lage der Faschinenfüllung besteht aus einer 10 cm starken in den Wattboden eingegrabenen Heidekrautschicht. Unter dem Anwurf wird ein Deckwerk aus Nadelbuschmatten zur Lagesicherung angeordnet.</p>  | <p>Kronenhöhe i. d. R. 0,30 m, max. 0,5 m ü. M.Thw bzw. 1,00 m bis 1,50 m über Wattboden; optimale Kronenhöhe über Wattboden = 0,80 m Die rd. 20 cm tief in den Wattboden einbindende untere Schicht der Faschinenfüllung wird i. d. R. in den Boden eingetreten, in festere Böden eingegraben und besteht aus herkömmlichem Faschinenmaterial.</p>  |

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Abmessungen und Anordnung der Lahnungsfelder mit zugehörigen Entwässerungssystemen</p> | <p>Der Hauptlahnungsabstand beträgt i. d. R. 200 m bis 400 m Auf sandigen Wattflächen beträgt die Feldgröße i. d. R. 200 m × 100 m.</p>  | <p>In Gebieten mit sehr günstigen Anlandungsbedingungen beträgt die Feldgröße 400 m × 400 m.</p>  |
| <p>Gruppen- querschnitte</p> | <p>Hauptentwässerungsgräben: 3,00 m × 0,40 m Quergräben: 2,00 m oder 3,00 m × 0,40 m Anwurfgruppe: 2,00 m oder 3,00 m × 0,20 m</p> | <p>Flächengruppe: 2,25 m × 0,20 m Bedarfsentwässerungsgraben: 0,40 m × 0,20 m</p> |
| <p>Boden- verhältnisse</p> | <p>häufig sandig</p> | <p>häufig schllickig</p> |
| <p>Form / Lage der Küste</p> | <p>Die Küste verläuft überwiegend in Nord-Süd-Richtung</p> | |

Tab. 3b: Ausführung von Lahnungsarbeiten an der niedersächsischen Küste

| Lahnungs-konstruktion | Ostfriesland | DEUTSCHLAND/NIEDERSACHSEN Büdjadengen | Wurster Küste |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abmes-sungen und Anordnung der Lahnungsfelder mit zugehörigen Entwässerungssystemen | <p>Neben Buschlahnungen werden auch Betonfertigteilahnungen eingesetzt.</p> | <p>I. d. R. werden buhnenförmliche Lahnungsfelder (250 m parallel und 250 m bis 300 m senkrecht zur Küste) angelegt. Gegen drohende Salzwasserverluste werden Parallelwerke angeordnet. Buschlahnungen werden nur an geschützten Stellen eingesetzt.</p> | <p>Es werden Lahnungsfelder aus Buschlahnungen der Größe 200 m senkrecht, 400 m parallel zur Küste angelegt. Am nördlichen Küstenabschnitt werden bevorzugt Lahnungsfelder aus schweren Lahnungen der Größe 400 m x 300 m, am mittleren vorwiegend leichte angelegt. Am südlichen, von der Weser beeinflussten Küstenabschnitt befinden sich keine Lahnungsfelder, sondern Bühnen</p> |
| Gruppen-querschnitte | <p>Es werden Trapez-, Rechteck- oder halbelliptische Profile ausgeführt.</p> | <p>Die Querschnitte entsprechen, mit Ausnahme im tiefen Watt (Trapezprofile), denen in Ostfriesland.</p> | <p>Es werden Rechteckprofile ausgeführt.</p> |
| Bodenver-hältnisse | Mischwatt | Mischwatt | Mischwatt |
| Form/Lage der Küste | <p>Die Küste verläuft in Ost-West-Richtung.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Küste mit vorgelagerten Barriereinseln - Meeresbuchten | <p>Die Küste verläuft in Ost-West-Richtung.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Küste ohne Barriereinseln - Die Breite des Wats nimmt nach Süden hin ab. - Abschnittsweise erfolgt ein Energieeintrag durch auf die Küste gerichtete Wattströme. | <p>Die Küste verläuft in Nord-Süd-Richtung.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Küste ohne Barriereinseln - Die Breite des Wats nimmt nach Süden hin ab. - Abschnittsweise erfolgt ein Energieeintrag durch auf die Küste gerichtete Wattströme. |

Tab. 3c: Ausführung von Lahnungsarbeiten an der dänischen, niederländischen und britischen Küste, Teil I

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Lahnungs-konstruktion</p> | <p>Dänemark</p>  | <p>Niederlande</p> <p>Die Kronenlänge der verstärkten Buschlahnung liegt i. d. R. 0,30 m über MTHw.</p>  | <p>Großbritannien (beispielhaft für die südliche Ostküste)</p> <p>Die Ausführung entspricht der „Schleswig-Holstein-Methode“. Die Kronenlänge liegt i. a. 1,00 m über dem Wattboden.</p> |
| <p>Abmessungen und Anordnung der Lahnungsfelder mit zugehörigen Entwässerungssystemen</p> | <p>Der Hauptlahnungsabstand beträgt i. d. R. 200 m, der Querlahnungsabstand variiert von 50 m bis 200 m. Die Standardabmessungen am Komodamm betragen 200 m × 200 m. I. d. R. wird nur ein Feld angelegt, selten zwei hintereinanderliegende Felder.</p>  | <p>Die seeseitigen Öffnungen sind 20 m bis 25 m breit. Typisch ist die seeseitige Erweiterung der Längslahnung mit sog. Streckdämmen in Abständen von ca. 1200 bis 1600 m voneinander und bis ca. 500 m vor der äußersten Querlahnung</p>  | <p>Der Abstand der Lahnungen ist lokal sehr unterschiedlich; in Essex wurden beispielsweise Abstände von 50 m bis 400 m realisiert.</p>   |

Tab. 3c: Ausführung von Lahnungsarbeiten an der dänischen, niederländischen und britischen Küste, Teil II

| Gruppenquerschnitte | Dänemark | Niederlande | Großbritannien (beispielhaft für die südliche Ostküste) |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <p>Standardabmessungen: Tiefe: 0,25 m Breite: 0,30 m bis 0,35 m Gruppenabstand: 6,00 m Beetbreite: 5,65 m bis 5,70 m Die maximale Gruppenlänge beträgt 200 m. Es existiert kein durchgehender Hauptgraben.</p> | <p>Die Gruppenquerschnitte entsprechen den ostfriesischen Querschnitten.</p> | <p>Ähnlich wie in den Niederlanden erfolgt eine Orientierung an der „Schleswig-Holstein-Methode“. Auf die Herstellung von Entwässerungssystemen wird i. d. R. verzichtet.</p> |
| Bodenverhältnisse | häufig sandig | vielerorts sandig | |
| Form / Lage der Küste | Die Küste verläuft i. w. in Nord-Süd-Richtung | Die Küste verläuft in den Bereichen mit Lahnungsbauwerken – ähnlich wie in Ostfriesland – vorwiegend von West nach Ost. | <i>Hier beispielhaft für die südliche Ostküste Englands.</i> |

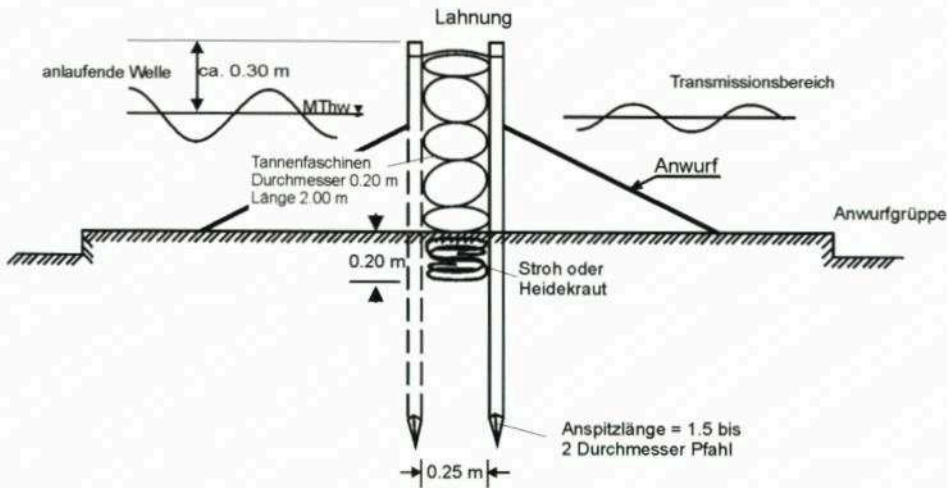


Abb. 5: Aufbau und Abmessungen einer im nördlichen Teil Schleswig-Holsteins typischen Buschlahnung

Tab. 4: Lahnungsbauweisen in Ostfriesland (ERCHINGER, 1976)

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Leichte Lahnungen | <ul style="list-style-type: none"> • Buschlahnungen • Lahnungen mit geschlitzter oder gelochter Kunststoffplatte |
| Niedrige, schwere Lahnungen | <ul style="list-style-type: none"> • Beton-Fertigteillahnung • Schlauchlahnung |
| Hohe, schwere Lahnungen | <ul style="list-style-type: none"> • Steindamm aus Natursteinen, ältere Bauweise • Steindamm aus Natursteinen, neuere Bauweise • Schwere Lahnung mit Betonsteinbedeckung • Schwere Lahnung mit Beton- oder Schüttsteinbedeckung und einem Kern aus Hüttenrückständen • Schwere Beton-Fertigteillahnung mit Schüttsteinvorlage • Schüttsteindamm ohne Kern auf breiter Filtermatte |

Hat das Vorland eine gewisse Höhe (rd. MThw – 0,50 m bis MThw – 0,30 m) erreicht und sich durch Aufschlickung ein Gefälle zum Außenwatt eingestellt, wird traditionellerweise zur Entwässerung ein künstliches Grabensystem, bestehend aus Hauptentwässerungsgräben, Querentwässerungsgräben, mitunter Ableitern und kleinen Gräben in das Vorland gezogen (BOTHMANN, 1941; ERCHINGER, 1982). Diese kleinen Gräben werden an der schleswig-holsteinischen Küste als „Grüppen“ bzw. „Grüppel“, in Niedersachsen häufig als „Schlote“ bezeichnet.

Um den Abfluß in den Grüppen zu gewährleisten, wird in regional unterschiedlichen Intervallen der Boden erneut ausgehoben; es wird gegrüppt. Traditionell wird der Aushub aus den Grüppen auf die Mitte des sogenannten Ackers (auch: Beet oder Feld) plaziert, so daß ein gleichmäßig hoher Wall entsteht. Der Aushubwall kann während der Tiden überflutet werden, wird jedoch im wesentlichen nicht abgetragen, so daß von einer beschleunigten Aufhöhung der Vorlandbereiche ausgegangen wird (z. B. KAMBECK, 1980; ERCHINGER et al., 1994). Ursprünglich wurde die Begrüppung nur von Hand vorgenommen. Seit etwa 1950 werden Spezialgeräte wie Grüppenbagger und Fräßrad eingesetzt.

Um eine schnellere Aufschlickung zu erzielen, wurde mit Beginn der 30er Jahre die natürliche Entwicklung einer Vegetation beschleunigt, indem Queller- und Schlickgraspflanzen ausgesät wurden. Eigens für die Quellerpflanzungen wurde in den 40er Jahren sogar ein spezieller, von zwei Personen zu bedienender Watt-Drillschlitten entwickelt, der in den 50er Jahren im Rahmen von Neulandgewinnungsmaßnahmen (Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog) noch eingesetzt wurde.

Überblick über die heute üblichen bzw. zuletzt angewandten Methoden der Vorlandbildung in Deutschland, Dänemark, den Niederlanden und Großbritanniens gibt Tab. 3.

Die historische Entwicklung der Arbeiten zur Vorlandbildung, die Ausführung der Lahnungsarbeiten und Grüppenprofile und die Begrüppungsmethoden, -maschinen und Grüppenfrequenzen entlang der deutschen Nordseeküste sind regional sehr unterschiedlich. Ihre Wirksamkeit im Vergleich wurde bisher nicht nachgewiesen, weshalb sich im ingenieurtechnischen Sinne keine standardisierten Bemessungsgrößen bzw. Empfehlungen für eine Auslegung ableiten lassen.

4. Morphologie des Vorlandes




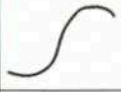

Die Inselgruppen an der Ost- und Nordfriesischen Küste halten den Seegang von der hinter ihnen liegenden Festlandsküste fern. Die an der schleswig-holsteinischen Westküste zu den Inseln und Halligen führenden und als künstliche Wattwasserscheiden wirkenden Verbindungsdämme erhöhen zusätzlich die Schutzwirkung. Demnach ist dort die natürliche Tendenz des Absetzens von Sedimenten positiv (HEISER, 1933). Dieser Effekt wird an den hohen, sturmflutfreien Dämmen wie dem Hindenburgdamm und dem Nordstrander Damm deutlich. DIJKEMA et al. (1990) schreiben dem Schutz durch Barriere-Inseln aber auch eine negative Wirkung zu: Der Schwebstoffgehalt des Wassers ist auf der Rückseite der Inseln geringer als im Bereich ungeschützter Watten.

Der relative Einfluß der täglichen Tiden gegenüber Sturmfluten auf die vorlandbildenden Prozesse ist derzeit noch nicht quantifizierbar. Sicher erscheint jedoch, daß für die morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld weniger extreme Ereignisse als das tägliche Tide- und Seegangsgeschehen maßgebend sind, obwohl augenfällige Schäden meist durch Sturmbedingungen in Verbindung mit extremen Wasserständen hervorgerufen werden (EAK, 1993). So wurde im KFKI-Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ für mittlere Tiden, die die Hellerkante beanspruchen, eine besonders starke Erosion des Vorlandes festgestellt, während die Wirkung einer schweren Sturmflut mit hohem Wasserstand über dem Heller den Bestand der Salzwiesen weniger gefährdet (ERCHINGER et al., 1994).

Für ausgewählte Vorlandgebiete an der deutschen Nordseeküste wurden von OSTERTHUN (z. B. 1993b) Profile der Sedimentation ermittelt. Die sehr verschiedenen Profile zeigen, daß unterhalb MThw $-0,60$ m Akkumulationsraten von bis zu $0,20$ m/a auftreten können, die jedoch in den nachfolgenden Jahren durch geringere Sedimentationsraten oder Erosionen wieder ausgeglichen werden. „Langfristig stellen sich Akkumulationsraten mit normaler stetiger Abnahme über die Untersuchungsgebietstiefe ein, so daß ein gleichmäßiger Gesamtveränderungsprozeß entsteht. Die Größe der Akkumulations- oder Erosionsraten ist von der vorhandenen Geländeneigung abhängig. Zwischen MT $1/2w$ und MThw bleibt in Abhängigkeit von der während des Entwicklungsprozesses erreichten Geländehöhe die im Untersuchungsgebiet für diese Höhe typische Geländeneigung langfristig erhalten (Tab. 5), so daß es zu einer Parallelverschiebung des mittleren Geländeprofiles kommt“ (OSTERTHUN, 1993a). Am Übergang vom Vorland zum hohen Watt stellt sich ein Gefällewechsel ein, der

durch abnehmende Akkumulationsraten oberhalb des MThw infolge geringerer Überflutungshäufigkeiten bei zunehmender Geländehöhe bedingt ist. Die landseitige Vorlandhöhe überschreitet bei Tidehuben $> 3,00$ m eine Grenzhöhe von $MThw + 0,54$ m nicht (OSTERTHUN, 1993a). Daher verflacht das mittlere Profil im Vorlandbereich.

Tab. 5: Klassifizierung des hohen Watts oberhalb $MT1/2w$ (OSTERTHUN u. PARTENSKY, 1991)

| Typ | Form | Tidehub [m] | | Akkumulationsraten bzw. -verlauf zwischen MThw und $MT1/2w$ | Stabilität |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | | min | max | | |
| 1 |  | 2,30 | 3,30 | im landnahen Bereich überwiegend gleichmäßig und positiv | stabilster und häufigster Formtyp |
| 2 |  | 2,13 | 3,40 | unregelmäßig, nur bei kleinem Tidehub gleichmäßig | im unteren High-Mesotidal-Bereich stabil |
| 3 |  | 3,15 | 3,30 | unregelmäßig, teilweise sehr hoch, bereichsweise wechselnd | nicht sehr stabil |
| 4 |  | 2,80 | 3,55 | unregelmäßig, über die Vorlandtiefe | häufig nur Zwischenstadium in der Entwicklung, selten stabil |
| 5 |  | 3,40 | | stark wechselnd zwischen Erosionen und Akkumulationen | tritt nur als Zwischenstadium in der Entwicklung auf |

5. Einflußgrößen bei Strömungs- und Sedimentationsvorgängen in Lahnungsfeldern

Die Wirksamkeit oder die Fähigkeit von Lahnungen, Schwebstoffe und Sedimente im Wasser zur Ablagerung zu bringen, sie am Boden zu halten, zu konsolidieren und so zu einer Auflandung von Wattflächen zu führen, hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, die in enger Wechselwirkung zueinander stehen (Abb. 6):

- Tide und Seegang und die daraus resultierenden Strömungen
- morphologische/sedimentologische Bedingungen
- Lahnungscharakteristika Geometrie, Anordnung, relative Höhe und Durchlässigkeit der Lahnung
- biologische, chemische und physikalische Einflüsse durch Flora und Fauna des Wattbodens
- Eisgang
- Vorlandmanagement, u. a. Begrüppung, Unterhaltung von Lahnungen, Beweidung

In einem Tidemodell des FRANZIUS-INSTITUTS (ROSE, 1955; ENGEL, 1963) wurden in den Jahren 1952 bis 1955 die Anordnung von Lahnungsbauwerken im Watt und ihre Wirkung sowie der Tideverlauf in einem Priel mit zugehöriger Wattfläche untersucht.

Die Untersuchungen zeigten, daß bei mittleren Tiden der Priel (ohne angrenzende Wattfläche) auf seiner ganzen Länge bis zur Höhe des mittleren Tidehochwassers verlandet.

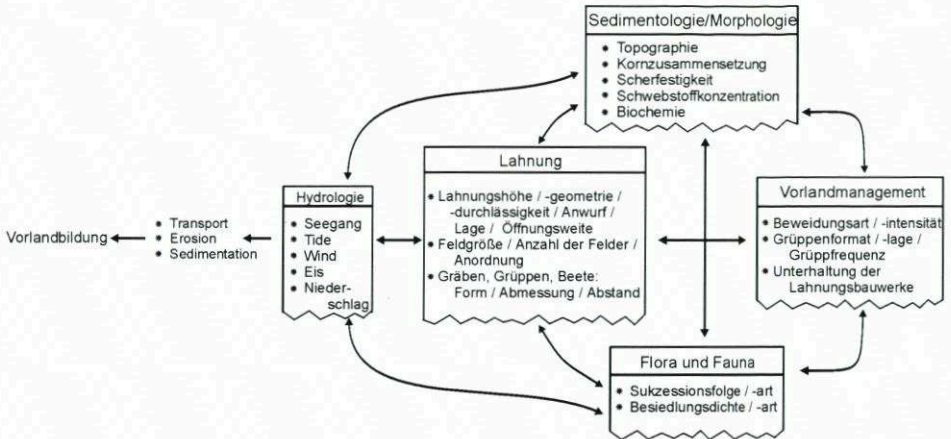


Abb. 6: Parameter der Vorlandbildung und Wechselwirkungen im Küstenvorfeld

Eine weitere Untersuchung mit fächerförmig angeordneten Sedimentationsfeldern zeigte keine günstigere Auflandung als in vergleichbaren rechteckigen Lahnungsfeldern. Die Versuche können wegen der Verzerrung der Maßstäbe und der nicht maßstäblichen Simulation der Sedimentationsvorgänge nur begrenzte und qualitative Aussagen geben. Sonstige Erkenntnisse aus Untersuchungen über die optimalen Abmessungen von Lahnungsfeldern liegen nicht vor.

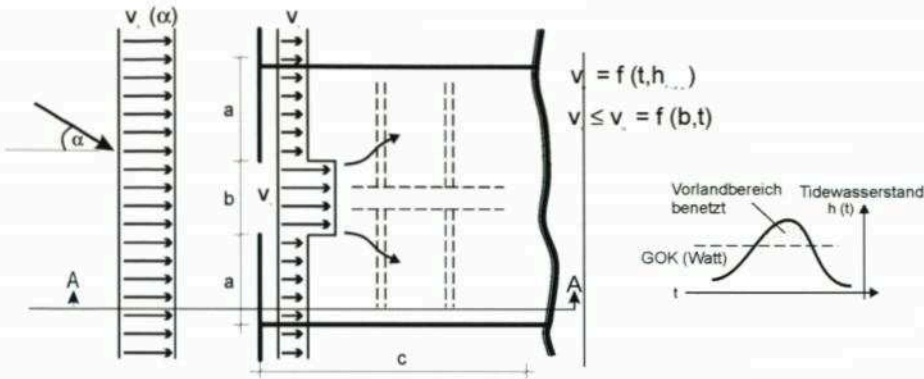
Im KFKI-Teilprojekt „Wattseegang“ (NIEMEYER et al., 1995) zeigte sich, daß bei erhöhten Wasserständen Wellenhöhen in einem Lahnungsfeld sowohl höher als auch niedriger als auf den vorgelagerten Wattflächen sein können. Ähnliche Beobachtungen werden von DIJKEMA et al. (1990) beschrieben, die eine maximale Lahnungsfeldgröße von 200 m × 200 m zur Eingrenzung der Fetchlänge empfehlen, weil anderenfalls die durch das Lahnungsbauwerk gedämpften Wellen im Lahnungsfeld wieder angefacht werden können. Im ostfriesischen Wattenmeerraum wurden die Abmessungen daher auf 100 m × 100 m reduziert (STAIK, 1994, mdl.).

6. Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Lahnungen

6.1 Methodik

Um eine Grundlage für eine Beurteilung einzelner Elemente und Parameter einer Lahnung hinsichtlich ihrer Wirkung auf Wellen, Strömung und Sedimentation zu erhalten, die später auch in Empfehlungen für Bemessungen und Anordnungen einfließen können, wurden zwei Untersuchungslinien verfolgt (Abb. 7; Tab. 6).

Alle hydromechanischen Einflußgrößen beeinflussen das Absetzverhalten. In diesem Beitrag wird daher nur hierauf näher eingegangen und der Strömungswiderstand der Buschlahnungen und die Wellendämpfung durch Buschlahnungen in Laboruntersuchungen bestimmt sowie mit Messungen in der Natur verglichen. Mit diesen Kenntnissen lassen sich in einem zweiten Schritt die Strömungsfelder und daraus resultierende Sedimentationen bzw. Erosionen im numerischen Modell simulieren.



Schnitt A - A

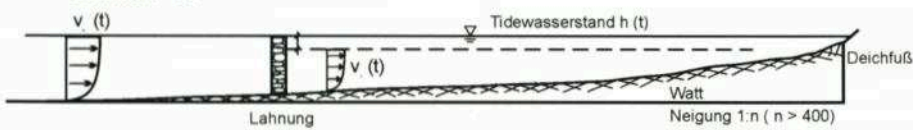


Abb. 7: Topographie, Geometrie und Wasserstände in einem Lahnungsfeld

Tab. 6: Einflußgrößen bei Strömungs- und Sedimentationsvorgängen in Lahnungen

| Hydromechanische Einflüsse in Lahnungen | Sedimentation / Absetzverhalten |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Topographie Wasserstand $h(t)$ | |
| - Wellen / Wellendämpfung - Strömungsgeschwindigkeit $v(t), w(t)$ - Feldgröße / Fetch - Öffnungsweite - Lahnungshöhe - Lahnungsdurchlässigkeit - Gräben | - Konzentration - Kornzusammensetzung - Kornverteilung - Flockung - Salzgehalt |

6.2 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes

Der Widerstand bzw. die Durchlässigkeit eines porösen Bauwerkes lassen sich durch die Messung der Energiedifferenzen beim Durchströmen anhand der Wasserspiegellagen vor und hinter den Bauwerken bestimmen (Abb. 8).

In einer Strömungsrinne mit fester Sohle wurden daher zur Analyse des Durchströmungsverhaltens von Buschlahnungen Ausschnitte verschiedener Lahnungsbauweisen im Maßstab 1:1 naturgetreu nachgebildet (Tab. 7). Für verschiedene tideabhängige – im Modell stationäre – Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten wurden Messungen der Wasserstände und der Geschwindigkeiten vor und hinter dem Lahnungsbauwerk durchgeführt (Abb. 9).

Die Lahnung wurde aus den in der Natur eingesetzten Materialien (Buschwerk, Pfähle, Draht) so eingebaut, daß sie den Ausführungsvorschriften des AMTES FÜR LAND- UND WAS-

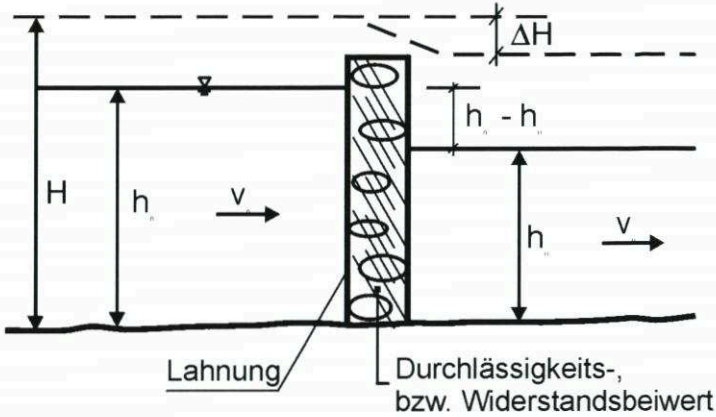


Abb. 8: Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes

SERWIRTSCHAFT (ALW) HUSUM entsprach. Es ist anzumerken, daß dieser Einbauzustand dem in der Natur nur unmittelbar nach dem Einbau entspricht. In der Natur setzen sich saisonal und regional variabel im Verlauf weniger Wochen nach Herstellung und Anwurf der Lahnungen Sedimente sowie organische und anorganische Materialien zwischen das Buschwerk und verringern durch diese Verdichtung den Grad der Porosität.

Um die laborteknischen Schwierigkeiten mit Buschwerk bei Serienversuchen zu umgehen, wurden die Nadelholzfaschinen im Zwischenraum der Buschlahnung durch den Einbau von äquivalenten Filterplatten schematisiert (Tab. 7). Die Wahl fiel auf einen Langloch-

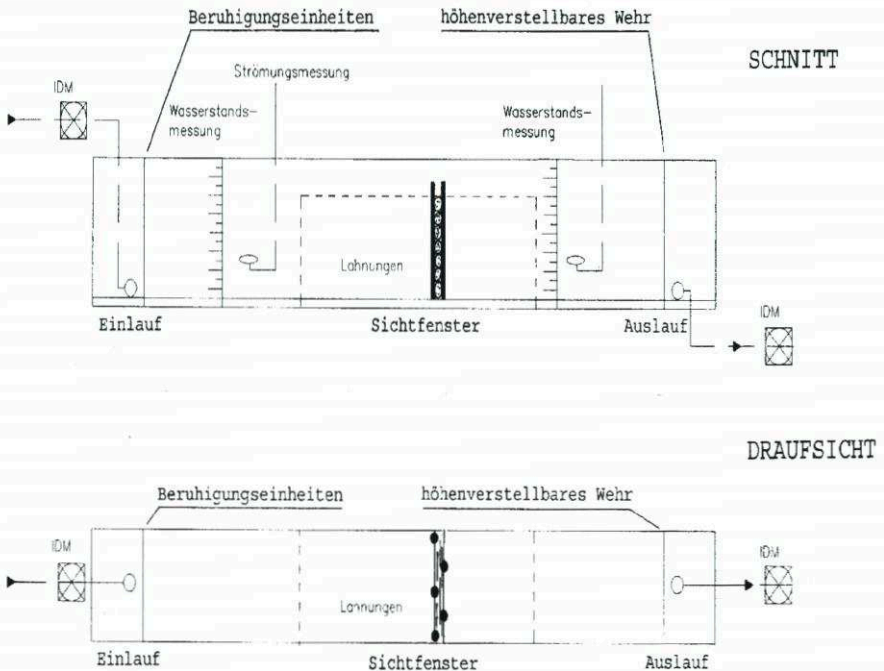
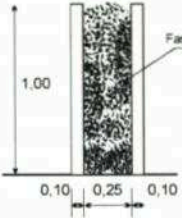
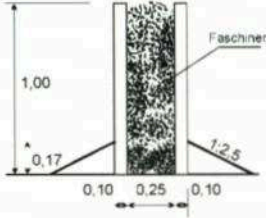
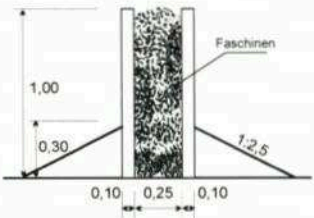
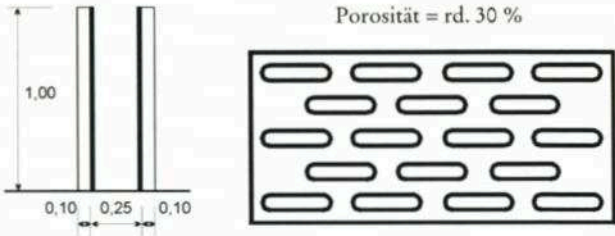
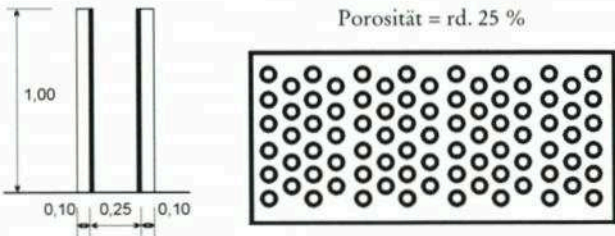


Abb. 9: Strömungsrinne mit Betriebseinrichtungen und Lahnungseinbauten

Tab. 7: In der Strömungsrinne untersuchte Lahnungsvarianten und Filter mit äquivalenten Durchlässigkeiten

| Variante | Aufbau der Lahnung im Modell |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>S-1 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf</p> |  <p>Faschinen</p> |
| <p>S-2 Buschlahnung mit 1:2,5 geneigten seitlichem Anwurf und einer Höhe von 0,17 m</p> |  <p>Faschinen</p> |
| <p>S-3 Buschlahnung mit 1:2,5 geneigtem seitlichen Anwurf und einer Höhe von 0,30 m</p> |  <p>Faschinen</p> |
| <p>S-4 Mit Langlochfiltern simulierte Lahnung</p> |  <p>Porosität = rd. 30 %</p> |
| <p>S-5 Mit Rundlochfiltern simulierte Lahnung</p> |  <p>Porosität = rd. 25 %</p> |

und einen Rundlochfilter, da bislang unklar ist, ob die durch natürliche Faschinen vorhandenen offenen Zwischenräume einer Buschlahnung eher schlitzartigen oder aber annähernd gleichmäßig verteilten punktförmigen Öffnungen entsprechen.

6.3 Versuchsergebnisse

Ein Vergleich der Wasserstände im Ober- und Unterwasser der Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf (Variante S-1), mit einem seitlichen Anwurf von 0,17 m Höhe (Variante S-2) und einem Anwurf von 0,30 m Höhe (Variante S-3) in Abhängigkeit vom Durchfluß zeigt, daß für die Lahnung mit einem Anwurf von 0,17 m Höhe im Vergleich zur Lahnung ohne Anwurf nur geringfügige Abweichungen des Wasserstandes im Unterwasser eintreten. Der Anwurf von 0,30 m Höhe hingegen erhöht den Durchströmungswiderstand der Lahnung in der Art, daß der Wasserstand im Unterwasser reduziert wird (Abb. 10) und die Strömungsgeschwindigkeit zunimmt.

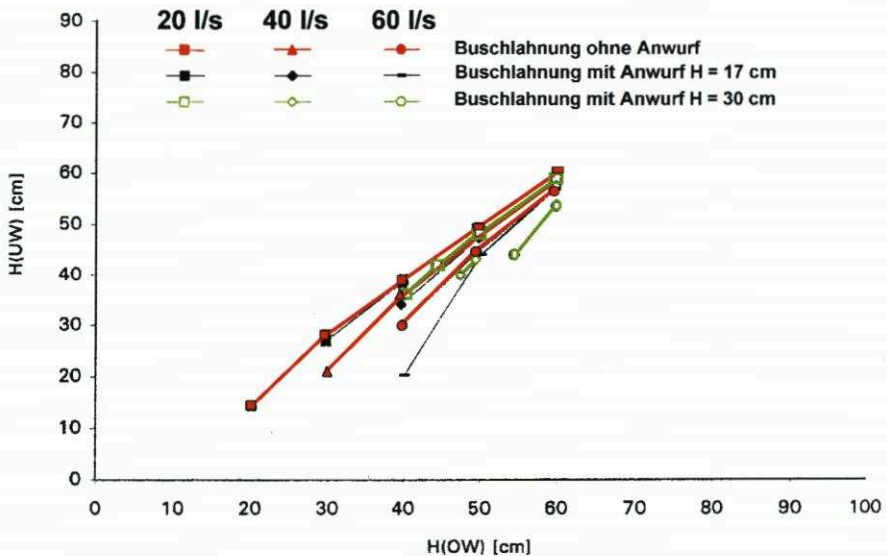


Abb. 10: Abhängigkeit des Wasserstandes vor der Lahnung (HOW) vom Wasserstand hinter der Lahnung (HUW) für verschiedene Durchflüsse ($Q = 20 \text{ l/s}$, 40 l/s bzw. 60 l/s) für Lahnungen mit und ohne seitlichen Anwurf

Von den bei den Versuchen verwendeten Einbauten als Buschlahnung (Var. S-1) und als durch Filter schematisierte Lahnungen zeigte sich, daß der Langlochfilter (Var. S-4) im Vergleich zum Rundlochfilter (Var. S-5) das Systemverhalten einer Buschlahnung weniger gut abbilden kann. Durch systematisches Verstopfen von Öffnungen des Rundlochfilters konnte der Verbauungsgrad bzw. die Porosität der Buschlahnung erreicht werden. Sind 79,5 % des Querschnittes durch den Rundlochfilter verbaut, d. h. 20,5 % des Querschnittes durchlässig, stellt sich für variable Durchflüsse ein nahezu gleiches hydraulisches Verhalten wie bei der Buschlahnung ein (Abb. 11). Die Durchlässigkeit (Porosität) der Buschlahnung wurde deshalb zu 20 % festgelegt.

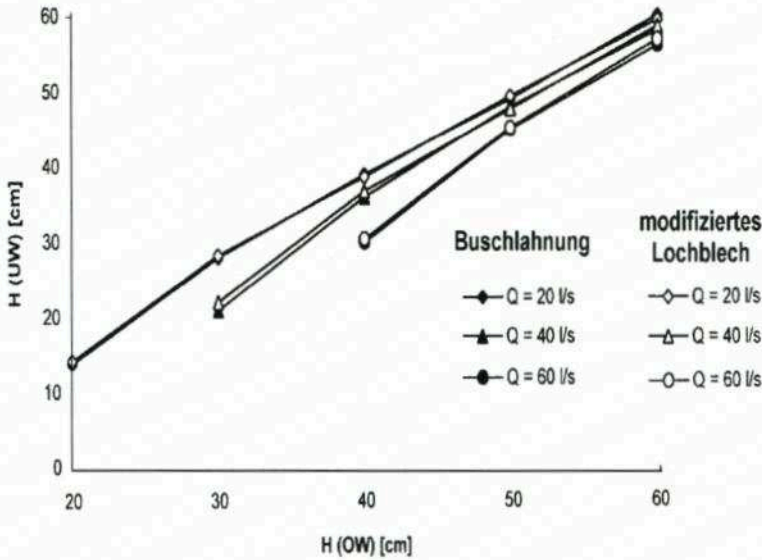


Abb. 11: Vergleich der Wasserstände $H(OW)$ und $H(UW)$ für die Buschlahnung und das modifizierte Lochblech

7. Untersuchungen zur Transmission von Wellen an Buschlahnungen

7.1 Transmission von Wellen

Die Transmission von Wellen in den Schutzbereich eines permeablen Bauwerks ist das Ergebnis von Reflexionen der Wellen und von Energieumwandlungsvorgängen im Bauwerksbereich. Der Transmissionskoeffizient k_T ist definiert als das Verhältnis von Wellenhöhe im Transmissionsbereich H_T zur Ausgangswellenhöhe H_i (vgl. Abb. 12):

$$k_T = H_T / H_i \quad (7-1)$$

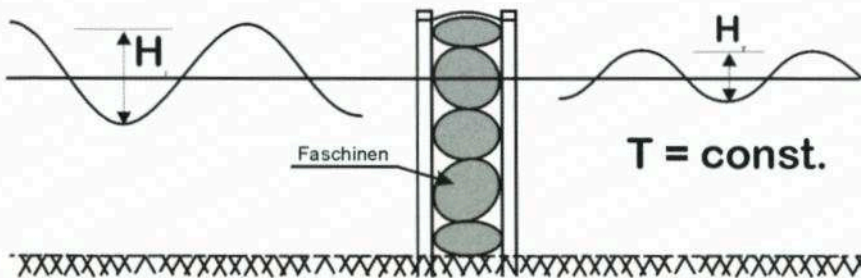


Abb. 12: Transmissionsverhalten einer Welle der Höhe H_i an einer Buschlahnung

7.2 Bestimmung des Transmissionskoeffizienten im Wellenkanal

Zum Transmissionsverhalten von Buschlahnungen wurden Untersuchungen in einem Wellenkanal durchgeführt (Abb. 13).

In den Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS am Schneiderberg ($L = 118$ m, $B = 2,2$ m, $T = 1,2$ m) wurden Ausschnitte einer 0,40 m bis 1,00 m hohen und 0,25 m bis 0,75 m breiten Buschlahnung im Maßstab 1:1 eingebaut.

Für verschiedene Lahnungsvarianten wurden Transmissionskoeffizienten bei variablen Wasserständen und Seegangsbedingungen in Abhängigkeit folgender Parameter ermittelt:

- Bauwerksbreite B
- Relative Bauwerkshöhe h/d (h = Bauwerkshöhe, d = Wassertiefe) am Bauwerk,
- Grad der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom gewählten Füllmaterial bzw. einem seitlichen Anwurf

Folgende Lahnungsvarianten wurden untersucht:

- W-1: Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 1,00$ m und Breite $B = 0,25$ m
- W-2: Buschlahnung mit 1:3,33 geneigtem und 0,60 m hohem seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 1,00$ m und Breite $B = 0,25$ m
- W-3: Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 0,70$ m und Breite $B = 0,25$ m
- W-4: Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 0,70$ m und Breite $B = 0,50$ m
- W-5: Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 0,70$ m und Breite $B = 0,75$ m
- W-6: Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 0,40$ m und Breite $B = 0,25$ m
- W-7: Mit Rauhpunddielen gedichtete Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf mit Höhe $h = 0,40$ m und Breite $B = 0,25$ m wie sie den Ausführungsvorschriften des STAATLICHEN AMTES FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ (STAİK) NORDEN entspricht. Mit der Annahme, daß an der Buschlahnung bereits eine Sedimentation erfolgte, wurde die Höhe der Varianten W-6 und W-7 auf 0,40 m reduziert.

Die Untersuchungen wurden mit regelmäßigen Wellen und mit Spektren ($0,10 \text{ m} \leq H_s \leq 0,30 \text{ m}$; $1 \text{ s} \leq T_p \leq 3 \text{ s}$) durchgeführt (vgl. Abb. 14). Die Kombinationen der Zeitbereichs- bzw. Frequenzbereichsparameter für die Untersuchungen wurden anhand der in der Natur gemessenen und analysierten Seegangsdaten ausgewählt. Aus Untersuchungen mit Wellen unterschiedlicher Angriffsrichtungen ergab der senkrechte Wellenangriff den ungünstigsten Lastfall (GRÜNE u. KOHLHASE, 1975), der auch für die Transmission an Lahnungen angenommen wurde.

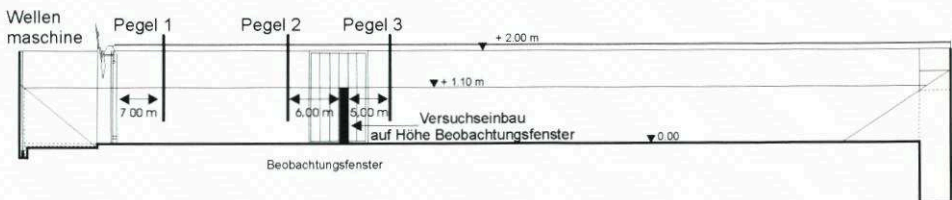


Abb. 13: Versuchsanordnung im Wellenkanal am Schneiderberg

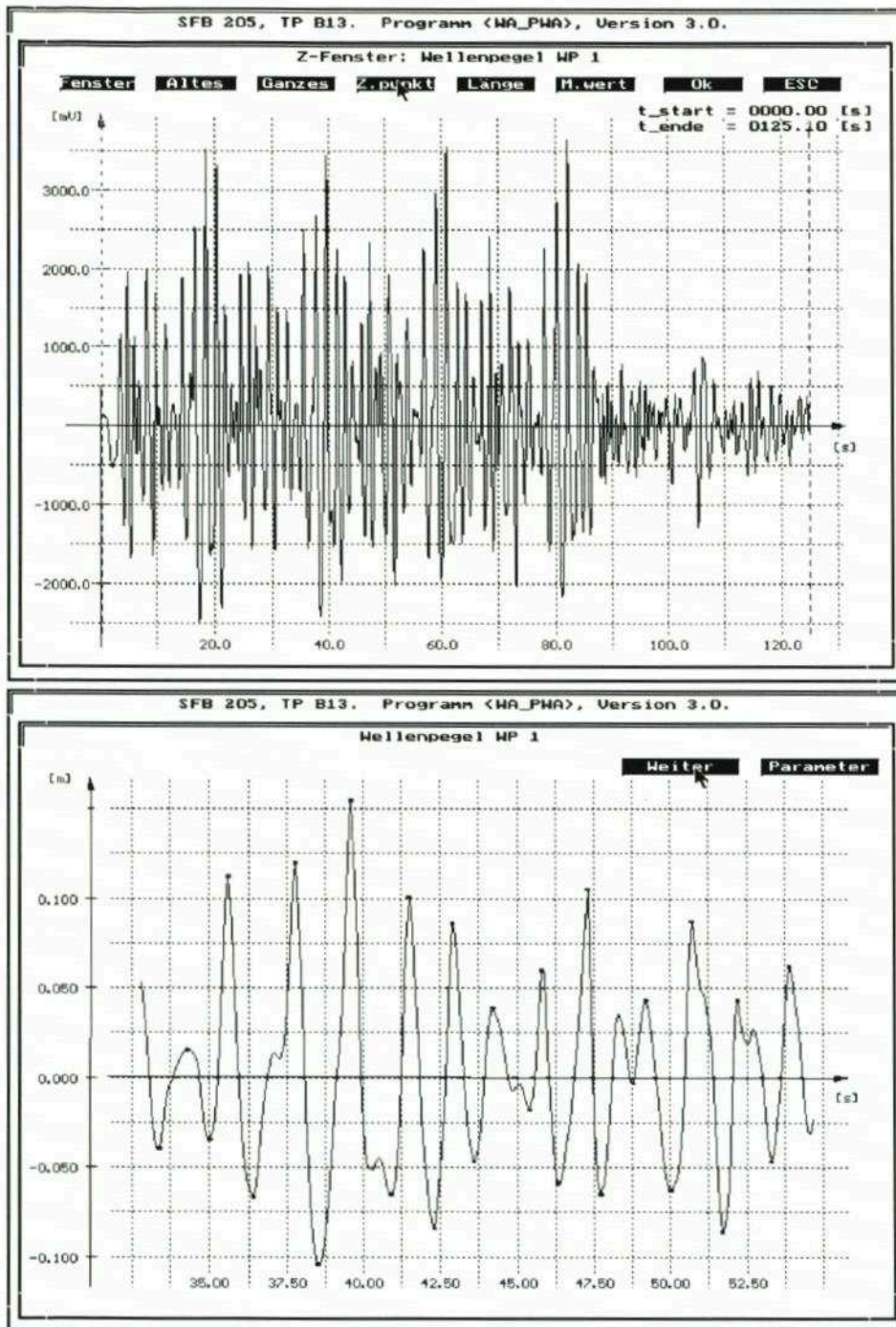


Abb. 14: Beispiel eingesteuerter Spektren (oben) und Auswahl eines Spektrums der Welleneingangs-
höhe (unten)

Die Auswertung der Versuche erfolgt anhand der Reflexionsanalyse nach MANSARD u. FUNKE (1980) unter Anwendung der FAST FOURIER TRANSFORMATION, ausgehend vom ZERO-DOWN-CROSSING-Verfahren.

7.3 Versuchsergebnisse

Ein Vergleich der Untersuchungen mit Variante W-1 und Variante W-2 zeigt verschiedene Ergebnisse. Während der Transmissionskoeffizient k_T bei einer Buschlagung ohne Anwurf (Var. W-1) sowohl von der Wellenhöhe als auch von der Wellenperiode abhängig ist, weisen die Ergebnisse der Versuche mit einer Buschlagung mit seitlichem Anwurf (Var. W-2) nahezu keine Abhängigkeit von der Ausgangswellenhöhe bzw. -periode auf. Für die untersuchten Wasserstände ist die Buschlagung mit seitlichem Anwurf (Var. W-2) im Vergleich zur Buschlagung ohne seitlichen Anwurf (Var. W-1) als wirkungsvoller einzuschätzen (Abb. 15).

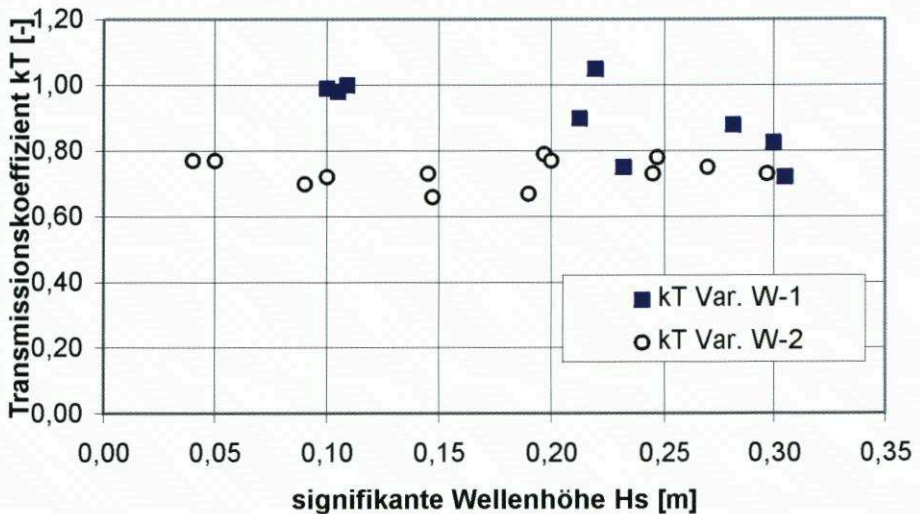
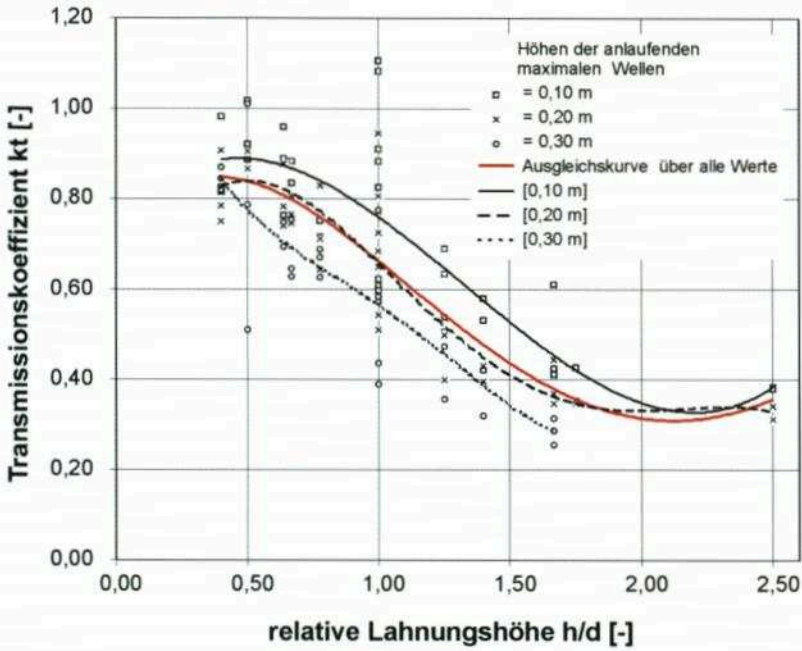


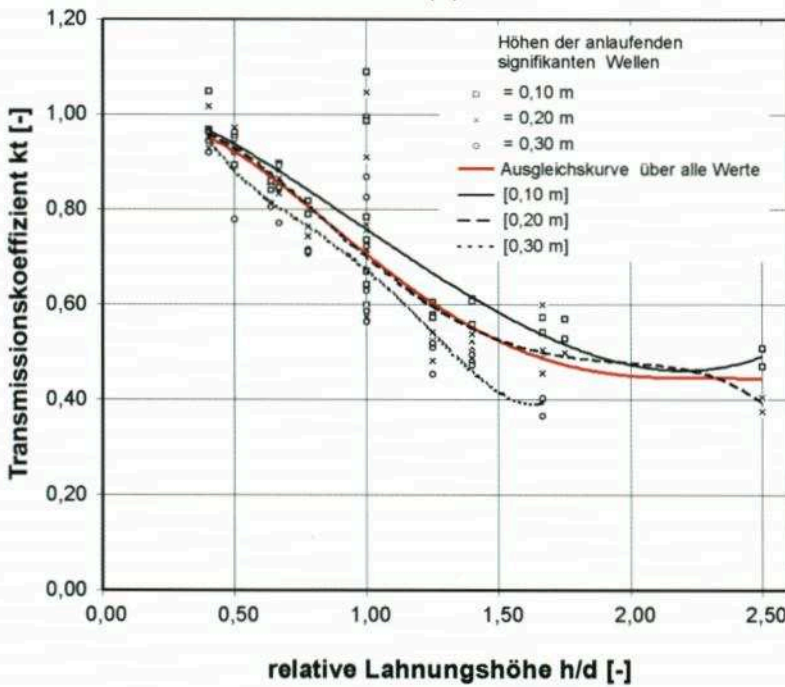
Abb. 15: Vergleich der Transmissionskoeffizienten k_T der Varianten W-1 (Lahnung ohne Anwurf) und W-2 (Lahnung mit Anwurf) in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe für eine Wassertiefe von 1,00 m

Die Untersuchungsergebnisse der Varianten W-1, W-3 und W-6 (Buschlagungen ohne seitlichen Anwurf, Höhen = 1,00 m, 0,70 m bzw. 0,40 m) sind in Abb. 16 zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß höhere Ausgangswellen (Abb. 16a) besser als niedrigere (Abb. 16b) gedämpft werden. Für Wassertiefen bis etwa zur Bauwerksoberkante ($h/d > 1,75$ bis $h/d > 1,00$ m) zeichnet sich eine im wesentlichen lineare Zunahme der Transmissionskoeffizienten ab. Mit zunehmender Wassertiefe über dem Bauwerk nähert sich der Koeffizient einem Grenzwert an.

Ein Vergleich der Ergebnisse für die schmale Buschlagung W-1 ($B = 0,25$ m) mit den Ergebnissen der Varianten W-4 ($B = 0,50$ m) und W-5 ($B = 0,75$ m) zeigt mit zunehmender Bauwerksbreite abnehmende Transmissionskoeffizienten (Abb. 17). Dies gilt insbesondere für Wasserstände bis etwa zur Lahnungsoberkante ($h = d$). Bei Wasserständen oberhalb der



(a)



(b)

Abb. 16: Transmissionskoeffizienten der maximalen (a) und signifikanten Wellenhöhen (b) in Abhängigkeit von der relativen Bauwerkshöhe h/d für die Varianten W-1, W-3 und W-6

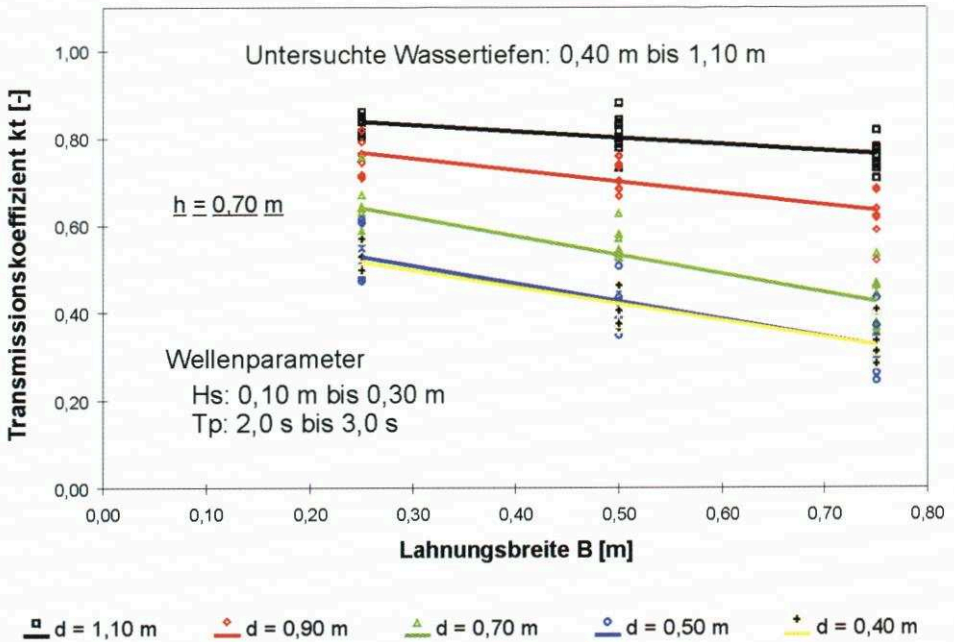


Abb. 17: Vergleich der Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen für Lahnungsbreiten von B = 0,25 m, 0,50 m und 0,75 m

Lahnungsoberkante konzentrieren sich die Transmissionskoeffizienten stärker und nähern sich einem „gemeinsamen Grenzwert“ von ca. 0,80 an.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse der Varianten W-6 (Buschlahnung, h = 0,40 m, B = 0,25 m) und W-7 (gedichtete Buschlahnung, h = 0,40 m, B = 0,25 m) weist auf eine effektivere Dämpfung des Seegangs im Bereich von Wasserständen bis zu rd. 0,40 m über der Lahnungsoberkante (d = 0,80 m) durch die Lahnungsvariante W-7 hin. Für höhere Wasserstände können wesentliche Unterschiede zwischen den Varianten W-6 und W-7 nicht ermittelt werden; der Transmissionskoeffizient nähert sich für beide Varianten einem Grenzwert von rd. 0,95 an (Abb. 18).

7.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit Messungen in der Natur

Die im Wellenkanal durchgeführten Versuche wurden so konzipiert, daß ein Vergleich mit den für das Testgebiet „Ockholm“ ausgewerteten Seegangsmessungen möglich ist. Abb. 19 zeigt Modelldaten der Variante W-3 (Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf, h = 0,70 m, B = 0,25 m) sowie Meßdaten des Testgebietes „Ockholm“ im Januar 1995. Sowohl für die Transmissionskoeffizienten der signifikanten als auch der maximalen Wellenhöhen stimmen die Modelldaten in ihrem Verlauf mit dem Trend der Meßdaten aus der Natur überein.

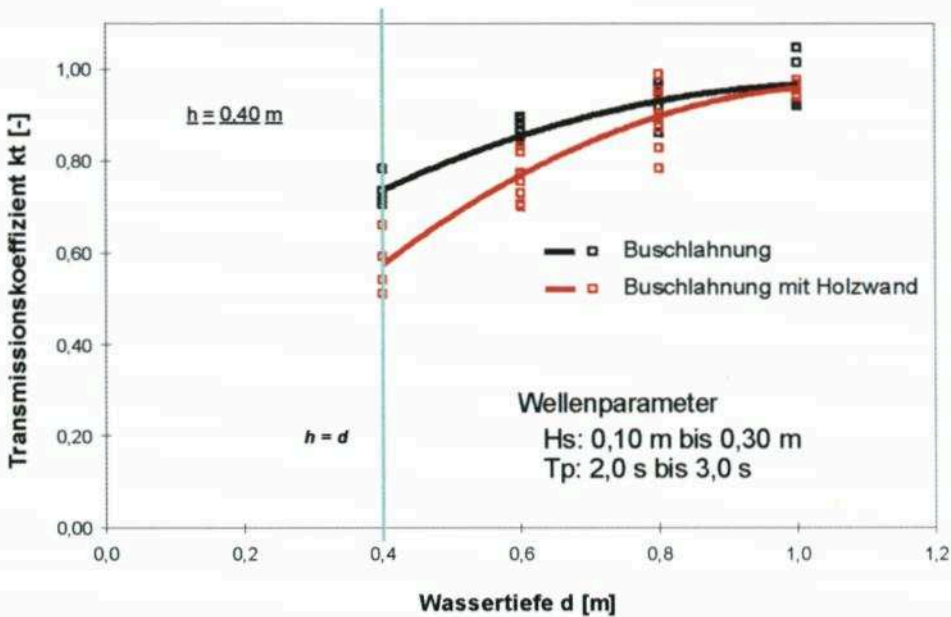


Abb. 18: Vergleich der Transmissionskoeffizienten K_T der Varianten W-6 (Buschlahnung) und W-7 (gedichtete Lahnung) in Abhängigkeit von der Wassertiefe

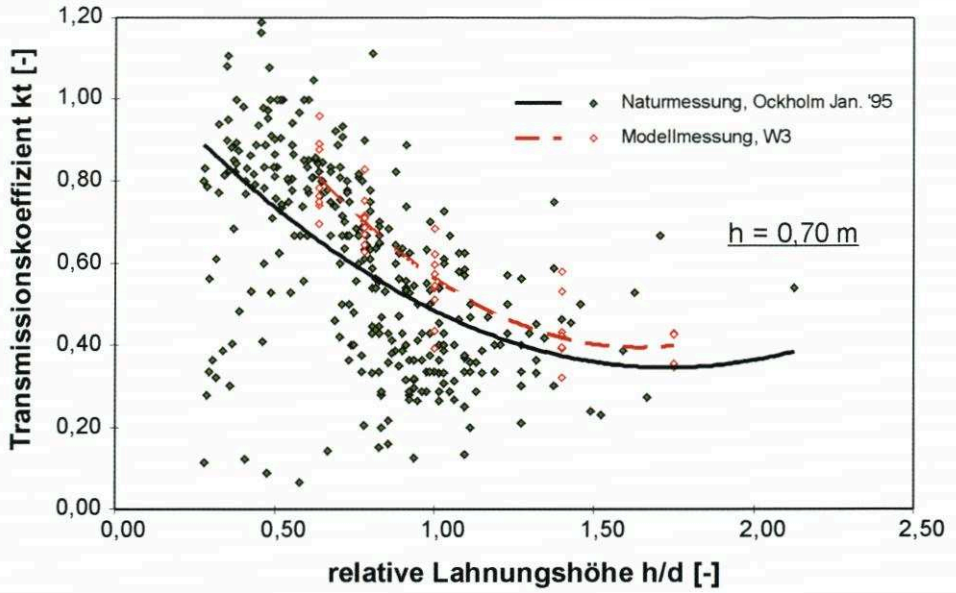
7.5 Untersuchungen zum Transmissionsverhalten im Wellenbecken

Die Untersuchungen im Wellenbecken, die insbesondere der Verifikation der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen dienen, wurden in enger Abstimmung mit diesen durchgeführt. Im dreidimensionalen, rd. 18 m \times 40 m großen Wellenbecken des FRANZIUS-INSTITUTS wurde die Veränderung von Seegang und das daraus resultierende Strömungsbild bei schrittweise veränderten Wasserständen in einem Ausschnitt eines Lahnungsfeldes mit fester, ebener Sohle im Naturmaßstab untersucht. Die eingebaute Lahnung entspricht im Querschnitt den Varianten S-1 (Tab. 7) bzw. W-1 und wurde, wie in den Abb. 20 u. 21 dargestellt, mit einer Länge von 10 m in das Wellenbecken eingebaut. Der im Wellenbecken betrachtete Ausschnitt stellt einen Bereich eines realen Lahnungsfeldes dar. Auf eine maßstabsbehaftete Untersuchung wurde verzichtet, um die Analogie zu den in der Strömungsrinne (Kap. 6) und dem Wellenkanal (Kap. 7.1 bis 7.4) durchgeführten Versuchen zu wahren. Ferner wurde bei senkrechtem Wellenangriff ein spiegelsymmetrisches Verhalten des Seegangs und der resultierenden Strömungen im Lahnungsfeld vorausgesetzt.

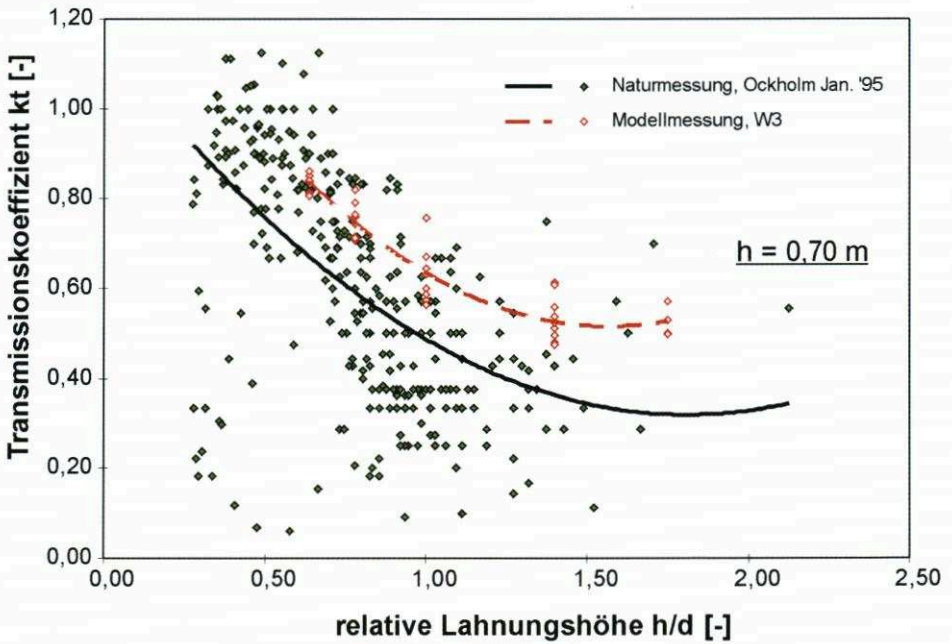
Analog den Untersuchungen im Wellenkanal wurden die Seegangparameter und Wassertiefen variiert. Die betriebstechnisch bedingte maximale Wassertiefe beträgt 0,60 m.

Die auf das Lahnungsbauwerk laufenden Wellen wurden durch eine Plattenwellenmaschine erzeugt und als Wasserspiegelauslenkung über die Zeit mit „Delfter Pegeln“ kontrolliert. Der Grad der Wellendämpfung wurde punktuell im Lahnungsfeld gemessen (Abb. 20).

Parallel zu den Seegangsmessungen wurde das Verhalten von in das Becken eingebrach-



(a)



(b)

Abb. 19: Vergleich der Transmissionskoeffizienten der maximalen (a) und signifikanten Wellenhöhen (b) in Abhängigkeit von der Wassertiefe der Variante W-3 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen im Testgebiet „Ockholm“ im Monat Januar 1995 (Datenbasis: NLO-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

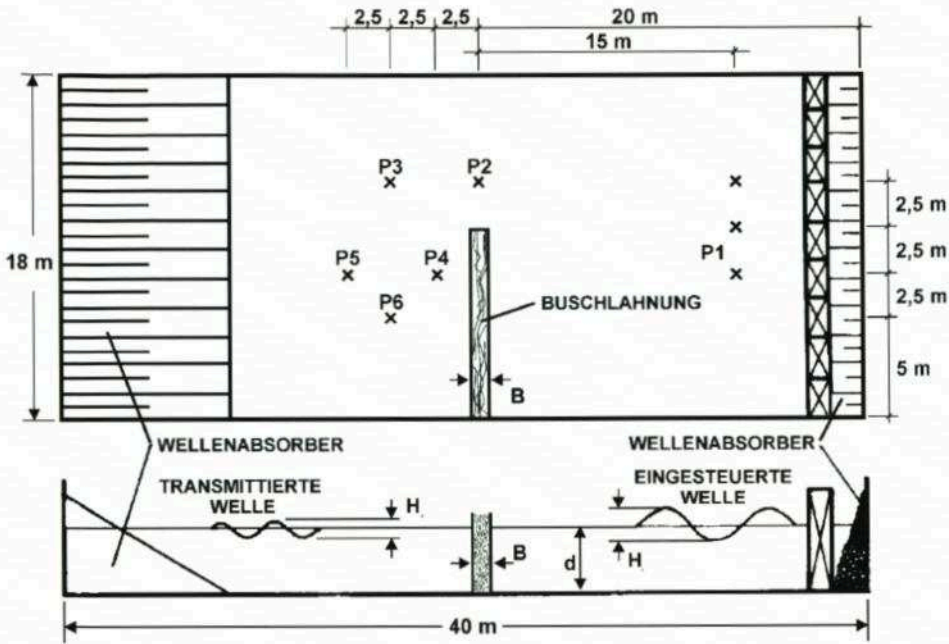


Abb. 20: Einbau einer Buschlahnung in das Wellenbecken und Positionen der Wellenpegel

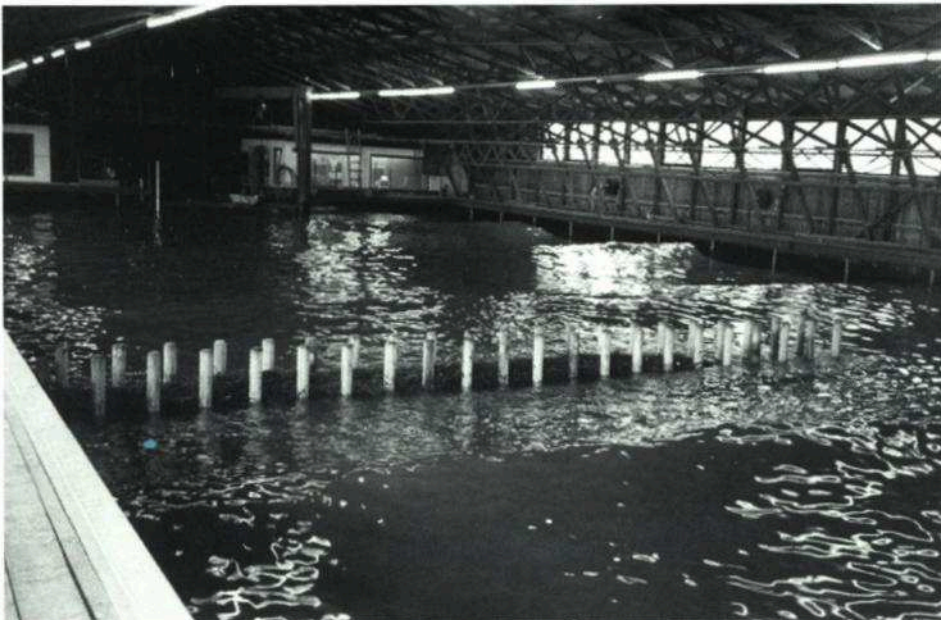


Abb. 21: Seegangsverhalten für einen regelmäßigen Seegang ($H_s = 0,20$ m, $T_{Hs} = 3,00$ s, $d = 0,50$ m) im Ausschnitt eines Lahnungsfeldes

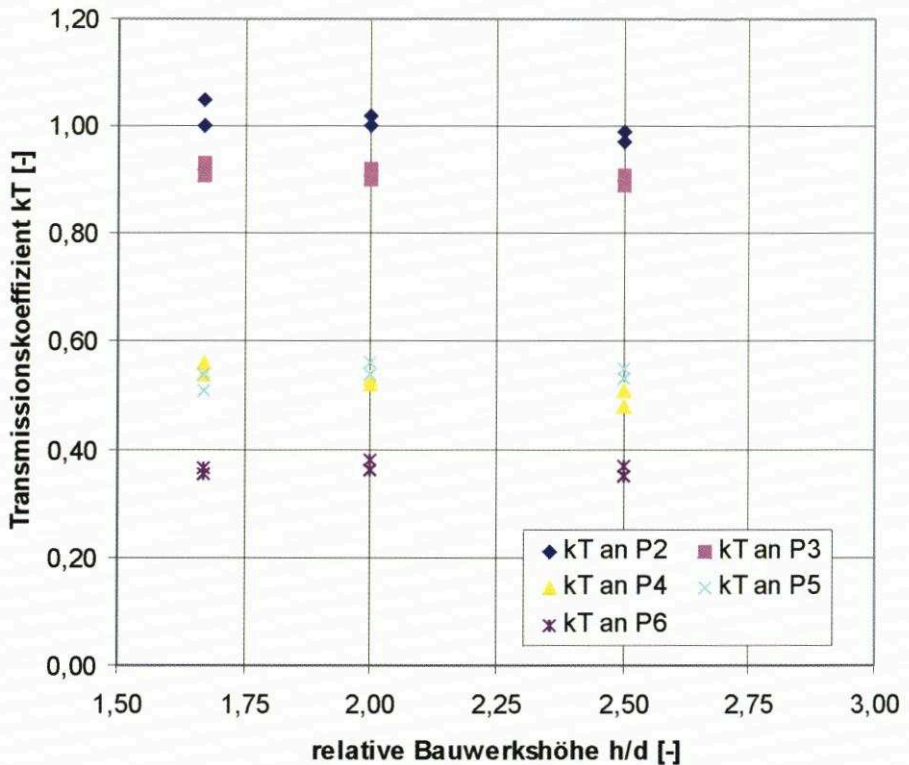


Abb. 22a: Darstellung des Transmissionsverhaltens an einer Buschlammung im Wellenbecken für eine signifikante Wellenhöhe von $H = 0,10$ m

ten Schwimmern (u. a. im Zeitrasterverfahren) per Video aufgenommen und somit Strömungsvorgänge an der Wasseroberfläche erfaßt. Charakteristische Schwimmerbahnen wurden aus den Videoaufnahmen ausgewählt und Strömungsvektoren ermittelt.

Durch die Messung der Wellenhöhen an den Meßpunkten P1 (Referenzpunkt für einlaufende Welle) bis P6 (vgl. Abb. 20) konnten Transmissionskoeffizienten für den Bereich hinter der Lahnung ermittelt werden.

Aus der Darstellung der Ergebnisse in Abb. 22 ist der sich einstellende Effekt der Diffraktion (vergleichbar an einem halboneindlichen Wellenbrecher) und hier durch das Phänomen der Transmission überlagert, zu erkennen.

Während die Wellenhöhen im Bereich der Lahnungsöffnung (P2 und P3) nahezu unbeeinträchtigt bleiben (ca. $K_T = 1,00$), sind die Wellen im geschützten Bereich der Lahnung deutlich reduziert (Pegel P4 bis P6).

8. Zusammenfassung

Ein bedeutendes Küstenschutzelement und ein ökologisch wertvoller Bereich des Küstenvorfeldes sind hohe und breite Vorländer mit einem flach geneigten Übergang zum Watt. Vorlandbildung kann durch die Anlage und Bewirtschaftung von Lahnungsfeldern be-

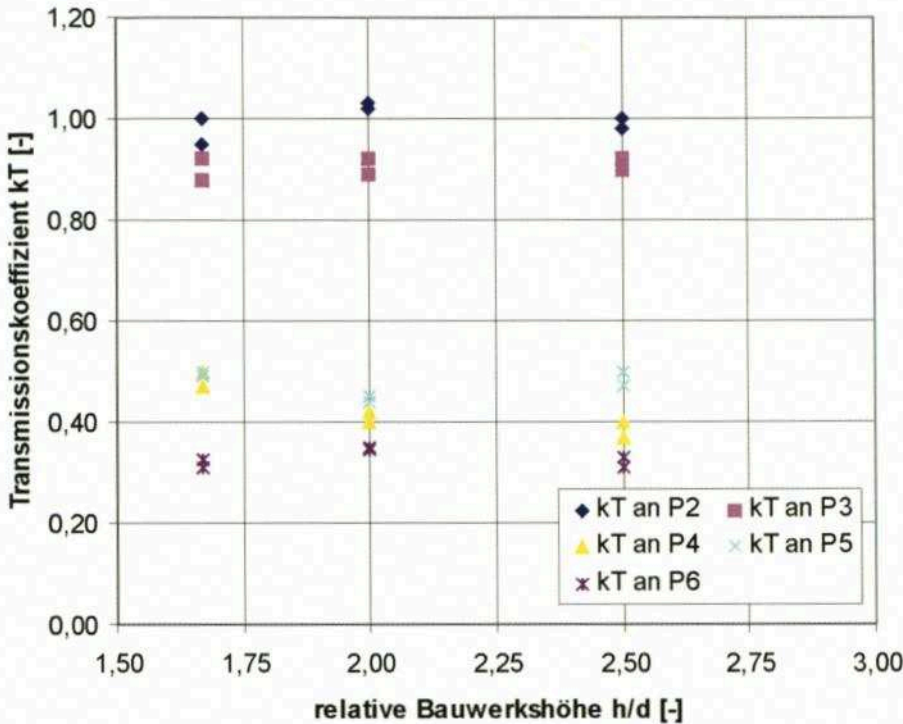


Abb. 22b: Darstellung des Transmissionsverhaltens an einer Buschlahnung im Wellenbecken für eine signifikante Wellenhöhe von $H = 0,20$ m

schleunigt werden. Für die Gestaltung von Lahnungsfeldern, für die Bemessung und den Aufbau der Lahnungen und für die Bearbeitung des Anwachsens in den Lahnungsfeldern werden seit rd. 200 Jahren an der deutschen Nordseeküste vor allem praktische, oft ortsspezifische Erfahrungen herangezogen. Für eine Optimierung der Vorlandgewinnung mit Lahnungen fehlt bisher eine wissenschaftliche Analyse der hydromechanisch-morphologischen Wechselwirkungen in den Lahnungsfeldern. Im Rahmen des Forschungsvorhabens des KFKI „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ sollten deshalb mit wissenschaftlichen Methoden Grundlagen für einen effektiven Einsatz von Lahnungen für die Vorlandbildung erarbeitet werden.

In physikalischen Untersuchungen des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ wurde zunächst in einer Strömungsrinne das Durchströmungsverhalten einer Buschlahnung mit und ohne seitlichen Anwurf im Maßstab 1:1 untersucht. In einem weiteren Schritt wurden die Nadelholzfaschinen im Zwischenraum der Buschlahnung durch den Einbau von definierten Filtern mit einer Lang- bzw. Rundlochung schematisiert, so daß in Abhängigkeit vom Wasserstand (bzw. vom Durchfluß) vor der Lahnung eine Ermittlung der Größenordnung des Durchlässigkeitsbeiwertes als Eingangsparameter für die numerischen Simulationen möglich wurde. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde zu rd. 20 % bestimmt, d. h. rd. 20 % des Querschnittes ist durchlässig.

Untersuchungen zum Transmissionsverhalten von Buschlahnungen wurden im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS am Schneiderberg analog zu den Durchströmungsversuchen in der Strömungsrinne und unter Berücksichtigung der ausgewerteten Seegangsdaten im

Maßstab 1:1 durchgeführt. Bei variablen Wasserständen und Seegangsbedingungen wurden die Parameter

- Bauwerksbreite B
- Relative Bauwerkshöhe h/d (h = Bauwerkshöhe, d = Wassertiefe)
- Grad der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom gewählten Füllmaterial bzw. einem seitlichen Anwurf

variiert.

Hier zeigte sich, daß höhere Ausgangswellen besser als niedrigere gedämpft werden. Für Wassertiefen bis etwa zur Bauwerksoberkante zeichnet sich im wesentlichen eine lineare Zunahme der Transmissionskoeffizienten ab. Des weiteren konnte nachgewiesen werden, daß für Wasserstände bis zur Lahnungsoberkante Lahnungen mit größeren Breiten als 0,25 m als wirkungsvoller einzuschätzen sind. Ein effektiveres Dämpfungsverhalten des Seegangs zeichnet sich auch für gedichtete Lahnungen im Vergleich zu den konventionellen ab. Dies gilt jedoch ausschließlich für Wasserstände bis rd. 0,40 m oberhalb der Bauwerksoberkante.

Die im Wellenkanal ermittelten, insbesondere von Wassertiefe und Wellenhöhe abhängigen Transmissionskoeffizienten konnten anhand der dreidimensionalen Seegangsuntersuchungen an einem Ausschnitt einer im Originalmaßstab eingebauten Buschlahnung im Wellenbecken bestätigt werden.

9. Schriftenverzeichnis

- ABRAHAMSE, J. et al.: Wattenmeer. Ein Naturraum der Niederlande, Deutschlands und Dänemarks. 4. Aufl., Wachholtz Verlag, Neumünster, 1984.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER BEAUFTRAGTER FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE (Hrsg.): Grundlagen für den Artenschutz. Jahrbuch für Naturschutz und Landschaftspflege, Bd. 30, 1980.
- BOTHMANN, W.: Die Bedeutung der Landgewinnungsarbeiten für den Küstenschutz an der Nordsee. Landwirtschaftlicher Wasserbau, H. 6, 7 und 8, Beilage der Zeitschrift Deutsche Wasserwirtschaft 46, 1941.
- DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Watteinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Hannover, H. 60, 1985, S. 133-361.
- DIJKEMA, K. S. et al.: Possibilities for the Wadden Sea Marshes to Survive Future Sea-Level Rise. In: Ovesen, C.H.: Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region, Rømø, Denmark, 10.-13. October 1989, Ministry of the Environment. The National Forest and Nature Agency, 1990, S. 125-145.
- DOLDER, W. u. DOLDER, U.: Nordseeküste und Wattenmeer Naturparadiese Europas 2. Lingen Verlag, Köln, 1988.
- ENGEL, H.: Über die Landgewinnung im Wattengebiet. Dissertation. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Hannover, H. 22, 1963, S. 1-93.
- ERCHINGER, H. F.: Vorlandsicherung. In: Brößkamp, K. H.: Seedeichbau in Theorie und Praxis. Vereinigung der Naßbaggerunternehmen e.V., Hamburg, 1976, S. 446-473.
- ERCHINGER, H. F.: Vorlandgewinnung und Sicherung. In: Bretschneider, H. et al.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 6. Aufl., Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1982, S. 699-701.
- ERCHINGER, H. F. et al.: Erosionsfestigkeit von Hellern. Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473, Norden, 1994. (unveröffentlicht)
- GRÜNE, J. u. KOHLHASE, S.: Wellentransmission an Schlitzwänden. Die Küste, H. 27, 1975, S. 74-82.
- HAGEN, G.: Handbuch der Wasserbaukunst. 2. Aufl., Bd. 1, Teil 3, Berlin, 1878.
- HEISER: Landerhaltung und Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste. Bautechnik, Jg. 11, H. 13 und Jg. 11, H. 27, Berlin, 1933.
- HEYDEMANN, B. u. MÜLLER-KARCH, J.: Biologischer Atlas Schleswig-Holstein. Wachholtz, Neumünster, 1980.

- HINRICHS, W.: Nordsee-Deiche, Küstenschutz und Landgewinnung. Husum, 1931.
- JANKE, K. u. KREMER, B. P.: Das Watt. Kosmos Naturführer, Franckh-Kosmos-Verlag, Stuttgart, 1990.
- KAMBECK, W.: Küstenschutz der Marschen in Nordfriesland. Sonderdruck aus „Allgemeine Bauzeitung“, Ausgaben 37, 40 und 42, Patzer Verlag, Hannover, 1980.
- KRAMER, J.: Sturmfluten. Küstenschutz zwischen Ems und Weser. 6. überarb. Aufl., Verlag Soltau GmbH (Ostfriesischer Kurier), Norden, 1990.
- KROEZE, T. A. G. et al.: Experiment natuurbeheer rijkslandanwinningswerken. Jaarverlag medio 1990 – medio 1991, RWS, Directie Groningen, Dienskring, Delfzijl, 1992.
- LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER (Hrsg.): Nationalpark schleswig-holsteinisches Wattenmeer. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Tönning, 1992.
- LÜDERS, K. u. LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon. Natur und Technik an der deutschen Nordseeküste. 3. Aufl., Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim, 1976.
- MANSARD, E. P. D. u. FUNKE, E. R.: The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method. Proc. 17th Intern. Conf. on Coastal Eng., Italien, 1980, S. 154–172.
- MANZENRIEDER, H.: Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, H. 79, 1983.
- MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, FISCHEREI UND FORSTEN (MELFF, Hrsg.): Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein. Endbericht der MELFF/MNU-Arbeitsgruppe „Vorland“, Kiel, 1995.
- MÜLLER, F. u. FISCHER, O.: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Teil III: Das Festland, Bd. 4., Nordstrand, 1955.
- MUUSS, U. u. PETERSEN, M.: Die Küsten Schleswig-Holsteins. 2. Verbesserte Auflage, Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1974.
- NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“ (Hrsg.): Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Broschüre, 4. Aufl., 1992.
- NIEDERSÄCHSISCHER MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (NMELF, Hrsg.): Dünen, Watt und Salzwiesen. Schutz und Erhaltung von Küste und Inseln, Tier- und Pflanzenwelt. Verlag Soltau-Kurier, Norden, 1985.
- NIEMEYER, H. D. et al.: Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. Berichte der Forschungsstelle Küste, Bd. 40, Norderney, 1995, S. 145–186.
- OSTERTHUN, M.: Veränderungen der Morphologie des Küstenvorfeldes der deutschen Nordseeküste – Quantifizierung und Analyse. Hansa, Jg. 130, H. 11, 1993a.
- OSTERTHUN, M.: Veränderungen der Morphologie des Küstenvorfeldes der deutschen Nordseeküste – Möglichkeiten der Quantifizierung und Analyse. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, Bd. 48, Hamburg, 1993b.
- OSTERTHUN, M. u. PARTENSKY, H. W.: Changing Salt-marshes along the Southern North Sea Coast. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries (COPEDEC III), Vol. II, Kenya, Mombasa, 1991, S. 1093–1109.
- O. V.: Empfehlungen für Küstenschutzwerke (EAK) 1993. Die Küste, H. 55, 1993.
- PROBST, B.: Deichvorlandbewirtschaftung im Wandel der Zeit. Die Küste, H. 58, 1996, S. 47–60.
- ROSE, D.: Bericht über den Modellversuch zur Landgewinnung. Technische Hochschule Hannover, Hannover, 1955. (unveröffentlicht)
- SÖNNICHSEN, U. u. MOSEBERG, J.: Wenn die Deiche brechen. Sturmfluten und Küstenschutz an der schleswig-holsteinischen Westküste und in Hamburg. Husum Druck- und Verlagsgesellschaft, Husum, 1994.
- STADELMANN, R.: Meer – Deiche – Land. Küstenschutz und Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1981.
- STOCK, M. et al.: Ökosystemforschung Wattenmeer – Synthesebericht: Grundlagen für einen Nationalparkplan. Schriftenreihe des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, H. 8, 1996.
- WIELAND, P.: Küstenfibel. Ein Abc der Nordseeküste. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1990.
- WILKENS, H. et al.: Ökologische Analyse der Leybucht. Arb. Forsch. Norderney, H. 8, 1983.
- WOHLENBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste, Jg. 2, H. 2, 1954, S. 33–94.