

**KONSTRUKTIVE MASSNAHMEN ZUR
STABILISIERUNG VON DEICHEN**

***DESIGN FEATURES FOR THE
STABILIZATION OF DAMS AND DIKES***

von
Nino OHLE
Sven DUNKER

ABSTRACT

The building of dams and dikes is based on the experiences of the last centuries and the investigations after the storm tides in 1953 (Netherlands) and 1962 (Germany). It is certain, that the stabilization of dam and dikes can be increased by decreasing the seaward slope, when classical building materials as clay, sand and grass were used.

Therefore the increase of the height of the dam or dike requires a greater floor space and more building materials. Moreover the necessary floor space is limited, because of other social claims on this area (e.g. nature conservation).

Within the framework of the project "Technical Systems in Coastal Protection - Design Features for the Stabilization of Dams and Dikes" geotechnical methods were used and tested. The aim was to develop construction methods for the stabilization of the sand core of the dike, so that higher loads on dams and dikes due to the increase of the seaward and landward slope can be diverted.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Bau von Deichen erfolgt heute auf der Grundlage von jahrhundertlanger Erfahrung und den Ergebnissen der Forschungstätigkeiten nach den Sturmfluten 1953 (Holland) und 1962 (Deutschland). Als gesichert gilt, unter Beibehaltung der klassischen Deichbaumaterialien Klei, Sand und Rasen, daß die Wehrhaftigkeit des Deiches mit flacher werdender Böschung zunimmt.

Die Erhöhung eines Deiches führt somit zu einem größeren Platz- und Materialbedarf. Es kann aber hierfür nicht immer der notwendige Raum zur Verfügung gestellt werden, weil bereits andere gesellschaftliche Ansprüche an die Erweiterungsfläche bestehen (z.B. Naturschutz).

Im Rahmen des Projektes "Technische Systeme im Küstenschutz - Veränderte Deichbautechniken als Denkmodelle" wurden verschiedene bautechnische Verfahren, z.B. Bewehrung eines Sandkerns, getestet, so dass bei einer Teilerstörung der Deckschicht der rückwärtige Raum weiterhin geschützt ist.

INHALT

1	ZIEL UND AUFGABENSTELLUNG	5
2	HOCHWASSER- UND KÜSTENSCHUTZ DURCH DEICHE	5
2.1	Deiche	5
2.2	Belastungen auf Deiche	5
2.3	Schäden und Schadensmechanismen an Deichen	7
3	KONSTRUKTIVE MAßNAHMEN UND MODELLÜBERLEGUNGEN	7
3.1	Möglichkeiten zur Stabilisierung von Deichen	7
3.2	Modellüberlegungen und Versuchsdurchführung im Wellenkanal	8
4	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN IM VERGLEICH	10
5	KOSTENANALYSE	13
5.1	Einführung	13
5.2	Kostenermittlung	13
5.3	Kostenvergleich	14
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSSICHT	14
7	SCHRIFTTUM	16

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1	Belastungen und Schadensursachen an Deichen (VRIJLING, 1994)	6
Abb. 3-1	Schadensabfolge beim Deichversagen infolge Infiltration und Erosion (RICHWIEN, 1995)	7
Abb. 3-2	Deichquerschnitte und Flächenbedarf	7
Abb. 3-3	Untersuchungsvarianten mit konstruktiven Verstärkungen, die nachträglich eingebaut werden können	8
Abb. 3-4	Untersuchungsvarianten mit konstruktiven Verstärkungen für Deichneubauten	8
Abb. 3-5	WELLENKANAL SCHNEIDERBERG mit Versuchsanordnung	9
Abb. 3-6	Kornverteilung des verwendeten Sandkernmaterials	9
Abb. 3-7	Versuchsaufbau mit Videoeinrichtung und Profilaufnahmetafel	10
Abb. 4-1	Mechanisches Abtastsystem zur Profilbestimmung (hier nach der Zerstörung der Injektionsvariante)	10
Abb. 4-2	Sickerlinien im Sandkern für einen Wasserstand von $d = 60$ cm ohne Wellenbelastung	11
Abb. 4-3	Sickerlinien im Sandkern für einen Wasserstand von $d = 80$ cm ohne Wellenbelastung	11
Abb. 4-4	Profile der Varianten nach Beendigung der Versuche für einen Wasserstand von $d = 60$ cm (Belastungszeit > 500 Wellen bzw. > 50 Wellen bei der Vergleichsvariante)	12
Abb. 4-5	Profile der Varianten nach Beendigung der Versuche für einen Wasserstand von $d = 80$ cm (Belastungszeit > 1000 Wellen bzw. > 100 Wellen bei der Vergleichsvariante)	12
Abb. 6-1	Kosten und Einsparungen der ausführungswürdigen Varianten	14
Abb. 6-2	Deichvolumen, Deichhöhe und Materialbedarf bei Deichen unterschiedlicher Neigungen	15

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 4-1	Anzahl der Wellen, Zeitdauer und Grad des Versagens der einzelnen Varianten	11
----------	---	----

1 Ziel und Aufgabenstellung

Ziel der Untersuchung war die Entwicklung von Alternativen für die Ausführung von Deichen, die einerseits so widerstandsfähig gegen Wellenangriff und Strömung sind wie die derzeit ausgeführten Deiche und andererseits steilere Böschungen ermöglichen und somit weniger Flächen und Materialien beanspruchen. Hierbei sollte vor allem der Sandkern in das Schutzsystem durch konstruktive Maßnahmen einbezogen werden, sodass sich die veränderten Ausführungsvarianten als grüne Deiche auch weiterhin in die Landschaft einfügen.

Durch eine konstruktiv erhöhte Stabilität des Sandkerns und damit des Deichkörpers wird eine Erhöhung der Gesamtstabilität und der Gesamtsicherheit des Deiches als Teil eines übergreifenden Küstenschutzsystems erwartet:

- Erhöhung des Erosionsschutzes bei Störungen in der Deckschicht
- Schaffung einer zweiten Sicherheitslinie im Deich (Redundanz)
- Reduzierung des Material- und Flächenbedarfs
- verbesserte Einbindung von Bauwerken und Strukturen in den Deich.

Für die Untersuchungen wurden fünf konstruktiv veränderte Deichbauvarianten mit einer Vergleichs- bzw. Ausgangsvariante verglichen:

- (a) Konventioneller Sandkern (Vergleichs-/ Ausgangsvariante)
- (b) Sandkern mit Spundwand
- (c) Verpackter Sandkern
- (d) Sandkern aus sandgefüllten Schläuchen
- (e) Sandkern mit Rahmen
- (f) Sandkern mit Injektion

In Grundsatzuntersuchungen¹ wurde das Widerstandsverhalten des Systems "Erdkörper - konstruktive Einbauten - Klei- und Rasenabdeckung" gegen Durchsickerung und Wellenangriff ermittelt und ein Kostenvergleich durchgeführt.

2 Hochwasser- und Küstenschutz durch Deiche

2.1 Deiche

Der Hochwasserschutz der niedersächsischen Küsten und des Hinterlandes ist durch ein sich wechselseitig beeinflussendes System von einzelnen Schutzelementen sichergestellt. Hauptbestandteile dieses Systems sind:

- Vorgelagerte Inseln, Watten, Vorländer, Sände, Buhnen, Lahnungen, Sperrwerke usw.
- Sie bewirken eine Verminderung der von See einlaufenden Wellen. Außen- oder Vordeiche (Sommerdeiche) schützen Teile des Vorlandes und den Hauptdeich gegen Wellen und Wasserstände, wenn bestimmte Hochwassermarken nicht überschritten werden. Sperrwerke dienen ausschließlich dem Schutz des Hinterlandes vor erhöhten bzw. extremen Wasserständen.
- Hauptdeiche (auch: Landesschutzdeiche, Winterdeiche oder Schaudeiche)
Sie sollen die Küste nicht nur vor Überflutungen bei den halbtägigen Tidehochwassern, sondern auch bei häufiger auftretenden Kantenfluten und insbesondere bei Sturmfluten schützen (z.B. § 2 (1) NIEDERSÄCHSISCHES DEICHGESETZ [NDG, 1998]). Sie werden je nach Lage und Aufgabe in
 - Seedeiche
 - Stromdeiche und
 - Flussdeiche

eingeteilt. Die Seedeiche bilden an der Küste die erste Deichlinie. Die Strom- und Flussdeiche erfüllen diese Aufgabe im Binnenland, sofern sie nicht durch die Anordnung eines Sperrwerkes bei Extremwasserständen in die zweite Deichlinie gerückt sind.

- Zweite Deichlinie (auch: Schlafdeiche)

Sie dient dazu, bei einem Bruch des Hauptdeiches oder Versagen eines Sperrwerkes die Überschwemmungen im geschützten Gebiet einzuschränken. So sollen sie z.B. nach dem GENERALPLAN KÜSTENSCHUTZ FÜR DEN REGIERUNGSBEZIRK WESER-EMS 1997 jedoch nur erhalten werden. Ziel ist, keine neuen zweiten Deichlinien zu errichten.

Nach dieser Einteilung bilden See- oder Hauptdeiche die letzte Barriere zwischen See und Hinterland. Sie müssen höchsten Sicherheitsanforderungen genügen, um den Schutz von Menschen, Landschaften, Verkehrswegen, Infrastrukturen und Wirtschaftsgütern auch unter extremen und langfristig veränderlichen Wasserstands- und Sturmflutbedingungen zu gewährleisten.

2.2 Belastungen auf Deiche

Für die Ausbildung des Deichquerschnittes und der Deichaußenböschung haben die Belastungsarten einen wesentlichen Einfluss. Maßgeblich sind hierbei vor allem die Höhe der auf dem Deich brechenden Wellen und deren Auflauf. Neben den extremen Sturmflutwasserständen und dem dann maßgebenden Wellenauflauf können auch Sturmfluten mit nicht extremen Wasserständen, aber langen Verweilzeiten die Deiche stark belasten.

¹ Diese Arbeit zur Untersuchung der Stabilität von veränderten Deichbautechniken bei erhöhten Wasserständen und unter Wellen wurde im FRANZIUS-Institut im Rahmen eines größeren Forschungsvorhabens durchgeführt.

Die Belastungen und hieraus mögliches Versagen lassen sich dabei in die drei folgenden Kategorien unterteilen:

- äußere Einflüsse
z.B. Seegang, Wasserstand, Eis, mechanische Belastungen
- innere Einflüsse
z.B. Untergrund, Deichmaterial, Erosion, Suffosion u.a.
- menschliche Einflüsse
z.B. Bemessung, Bauausführung, Unterhaltung, Nutzung, Fehlverhalten u.a.

Deiche müssen diesen Belastungen und den hieraus resultierenden Schäden für eine gewisse Dauer standhalten, ehe ein Versagen oder Teilversagen eintritt. Mit Teilversagen wären beispielsweise begrenzte Überströmungen des Deiches gemeint, welche nur zu begrenzten Zerstörungen oder lokalen Schäden am Deich führen. Möglicherweise

führen diese jedoch zu Stabilitätseinschränkungen und damit zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Versagens bei nachfolgenden Belastungen

Im Gegensatz hierzu steht der Deichbruch über einen größeren Deichabschnitt oder an örtlich begrenzter Stelle, also das Totalversagen des Deiches. Der örtliche Bruch des Deiches kann durch Seitenerosion und Auskolkungen zum Versagen breiterer Abschnitte mit allen Folgen für das Hinterland führen.

Bei allen Versagensmechanismen liegen in der Regel Verkettungen unterschiedlicher Belastungen mit variabler Höhe und Dauer der Einwirkung in Verbindung mit verschiedensten Schadensmechanismen zugrunde. VRIJLING (1994) hat die häufigsten Schadensursachen und Belastungen an Deichen zusammengestellt. Sie sind in Abb. 2-1 dargestellt.

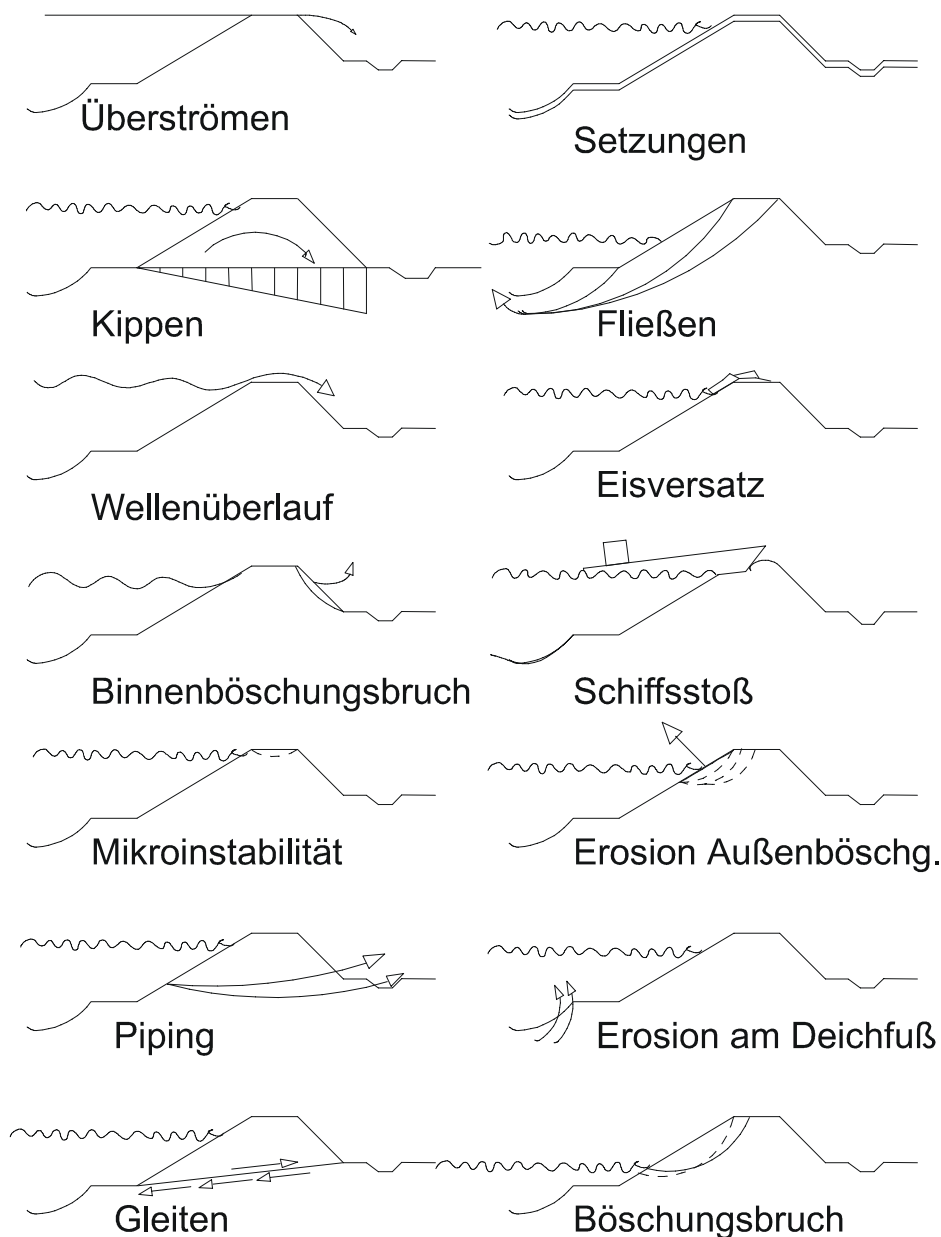


Abb. 2-1: Belastungen und Schadensursachen an Deichen (VRIJLING, 1994)

2.3 Schäden und Schadensmechanismen an Deichen

Nach Erkenntnissen der INGENIEURKOMMISSION (1962 UND 1976), welche aus den Folgen der Sturmfluten von 1962 und 1976 gezogen wurden, beruhen Deichschäden bis hin zum Deichversagen auf folgenden Ursachen:

- Erosionen der Binnenböschung
- Erosionen der Außenböschung
- inneren Erosionen und Umlagerungen

Die Erosionen der Binnenböschung werden vor allem durch Überströmung, Wellenüberschlag und/oder Abrutschen der Deckschichten verursacht, aber auch eine zu steile Böschung und/oder eine Strömung lotrecht zum Hang infolge von Sickerwasser kann vielfach Ursache des Abrutschens der Binnenböschung sein.

Die Erosion der Außenböschung ist dabei abhängig vom Zustand der Deckschicht, da diese maßgeblichen Einfluss auf ihre Standsicherheit gegenüber Wellenschlag und Strömungserosion durch Wellenauflauf, bzw. -ablauf hat. Der Zustand der Deckschicht kann in Abhängigkeit von ihrer Dicke und ihrem Flächengewicht durch die Einwirkung von Eis, Ablagerungen (Teek), Treibgut, Viehtritt, Wühlgänge usw. beschädigt werden, sodass beschädigte Stellen als Angriffspunkt für Wellen ausgeweitet werden.

Innere Erosion von Deichen tritt bevorzugt in Hohlräumen des Deichkörpers auf, die durch tierische oder pflanzliche Einwirkungen (Wühltiere, Wurzeln) oder durch Konsolidierungen, Auswaschungen und Erweiterung eines bevorzugten Porenkanals entstanden sind. Dabei vollzieht sich die Erweiterung rückschreitend entgegen der Grundwasser- bzw. Sickerfließrichtung.

RICHWIEN (1995) gibt eine anschauliche Schadensabfolge bei der Belastung eines Deiches durch erhöhte Wasserstände und Seegang (Abb. 3-1).

3 Konstruktive Maßnahmen und Modellüberlegungen

3.1 Möglichkeiten zur Stabilisierung von Deichen

Ziel der Untersuchungen war ein reduzierter Deichquerschnitt mit äquivalenter oder höherer Sicherheit gegenüber

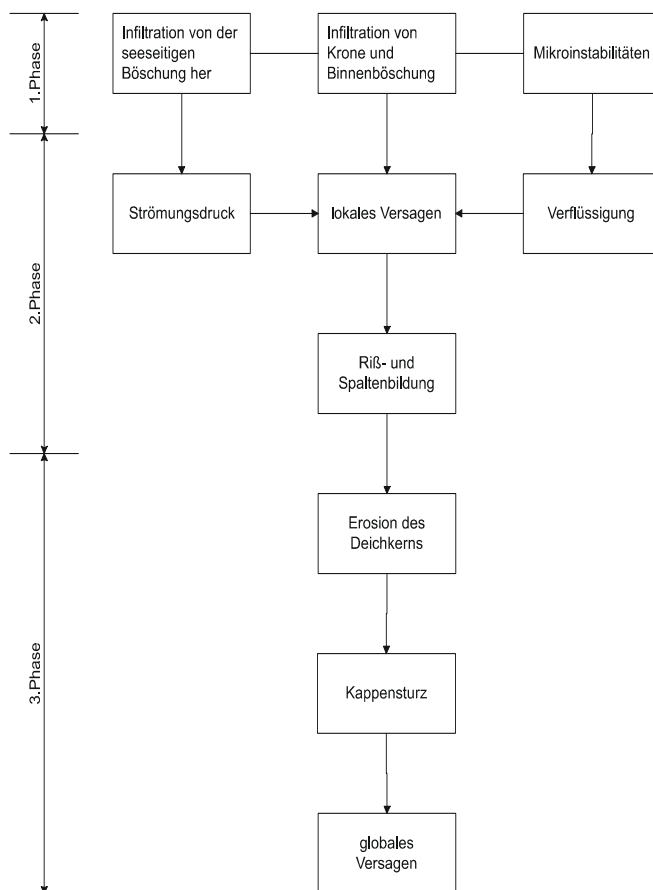


Abb. 3-1: Schadensabfolge beim Deichversagen infolge Infiltration und Erosion (RICHWIEN, 1995)

heutigen Ausführungen. Zur Reduzierung des Querschnitts und damit des Flächenbedarfs der Deiche verbleiben jedoch nur die Böschungsneigungen als Variable, da die Deichhöhe durch Bemessungswasserstand und Wellenhöhe bestimmt wird. In Abb. 3-2 ist der deutlich erhöhte Flächenbedarf eines Deiches mit einer Außenböschung 1:6, einer Binnenböschung 1:3 und einer Deichhöhe von 5 m über Deichgrund gegenüber einem konstruktiv verstärkten Deich mit gleicher Deichhöhe, aber stärker geneigter Binnenböschung 1:2 und Außenböschung 1:3 zu erkennen. Aus der Analyse eingetretener Deichschäden bei Sturmfluten ergibt sich, dass konstruktive Verstärkungen aus folgenden Gründen auf den Sandkern zu beschränken sind:

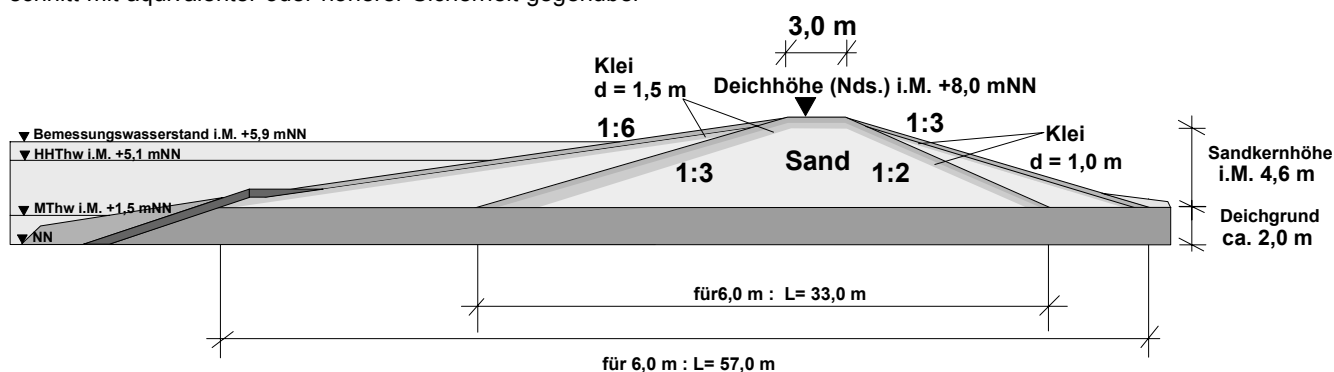


Abb. 3-2: Deichquerschnitte und Flächenbedarf

- Die Rasenabdeckung ist ein wichtiges landschaftsgestaltendes Element mit ökologischem Wert. Asphaltabdeckungen, wie sie in den sechziger Jahren an vielen Stellen anstelle der Rasenabdeckung gebaut wurden, sind zwar stabiler und als Schutz bewährt und werden für extreme Belastungen auch weiterhin eingesetzt, z.B. bei Schardeichen an Tiefwassern in den Niederlanden, sie widersprechen jedoch wesentlichen Kriterien einer umweltfreundlichen und naturnahen Bauweise. Rasenabdeckungen werden somit weiterhin als abschließendes Bauelement für Deiche angesehen. Sie schützen zudem die darunterliegende Kleischicht gegen Austrocknung und Erosion durch Wellenaufwurf und Niederschläge.
- Eine konstruktive Verstärkung der Kleischicht oder ein äquivalenter Ersatz ist denkbar, z.B. Geotextilien, Asphalt, Beton. Hiergegen sprechen jedoch hohe Kosten, geringe Flexibilität gegen Setzungen und Sackungen, mangelnde Rutschfestigkeit auf dem Sandkern und für die Rasenabdeckung, sowie die fehlende Wasserspeicherwirkung für den Rasen.

Konstruktive Verstärkungen bei einer Erhöhung der Böschungsneigung als Ausgleich für die reduzierte Sicherheit gegenüber einem Deich mit flachen Böschungen müssen somit auf den Sandkern beschränkt bleiben.

Lösungsansätze für konstruktive Verstärkungen im Sandkern bieten neben größeren Variationsmöglichkeiten für Erhöhungen oder Wiederaufbau, die Bereitstellung einer zusätzlichen Sicherheitslinie (Redundanz), die der bisherige Sandkern wegen seiner geringen Standfestigkeit und Erosionsanfälligkeit nicht aufweisen konnte. Im folgenden sind mögliche Lösungsansätze für konstruktiv verstärkte Deichbauvarianten dargestellt. Diese können in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Eine Gruppe sind konstruktive Verstärkungsmaßnahmen, die auch nachträglich an einem vorhandenen, eventuell beschädigten Deich ertüchtigen können (Abb. 3-3).

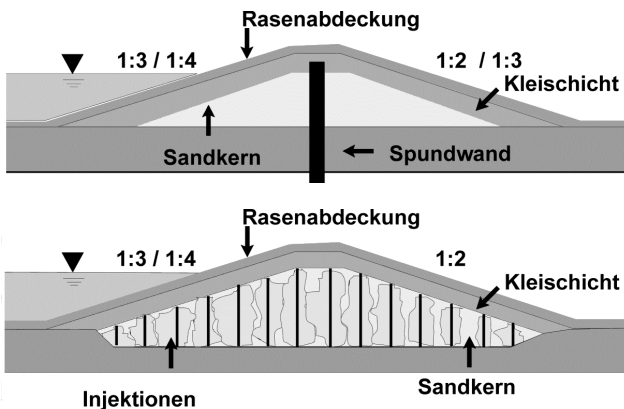


Abb. 3-3: Untersuchungsvarianten mit konstruktiven Verstärkungen, die nachträglich eingebaut werden können

Die zweite Gruppe sind Verstärkungen und konstruktiven Maßnahmen, die nur bei einem Deichneubau angewendet

werden können. Dies würde einen eventuellen Abtrag des beschädigten Deiches bedeuten. Die Untersuchungsvarianten dieser Gruppe sind in Abb. 3-4 dargestellt.

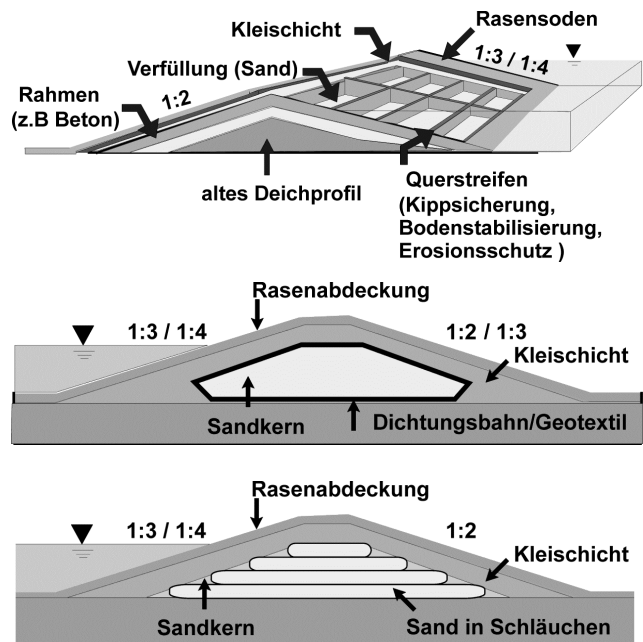


Abb. 3-4: Untersuchungsvarianten mit konstruktiven Verstärkungen für Deichneubauten

3.2 Modellüberlegungen und Versuchsdurchführung im Wellenkanal

Vor weiteren Überlegungen zu Einsatzmöglichkeiten, bautechnischen und materialtechnischen Optimierungen sowie Kostenüberlegungen steht die Frage nach der Stabilität der verschiedenen Denkmodelle konstruktiv verstärkter Deiche unter Seegangbelastungen als maßgebende Betrachtungskomponente.

Die Einhaltung und systematische Veränderung von hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen und Parametern zur Untersuchung einzelner Einflüsse und Wechselwirkungen (z.B. zwischen Seegang und Deich) hinsichtlich örtlicher und zeitlicher Stabilität, kann nur unter Laborbedingungen erfolgen. Grundsätzlich sind solche Untersuchungen unter naturgemäßen Bedingungen durchzuführen. Die Abmessungen von Bauwerken, wie hier der Deiche, und die Seegangsbedingungen erfordern einen für den Naturzustand nur begrenzt möglichen technischen und organisatorischen Aufwand. Dieser kann z.B. im GROßEN WELLENKANAL DES FORSCHUNGSZENTRUM KÜSTE (GWK) mit Deichhöhen bis 6 m und Wellenhöhen bis 2,5 m erbracht werden. Aus Kosten- und Zeitgründen wurden die Vergleiche der Varianten zunächst im Maßstab 1:5 im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG (WKS) des FRANZIUS-INSTITUTS (Deichhöhe ca. 1 m, Wellenhöhe bis zu 0,5 m) durchgeführt.

Diese Ergebnisse können nur qualitativ bewertet und verglichen werden, da für die hydraulischen Bedingungen zwar Maßstabs- und Modellgesetze, z.B. FROUDE'sches Ähnlichkeitsgesetz, anwendbar sind, für die bodenmechanischen Strukturen und Kennwerte jedoch keine Modellgesetze existieren.

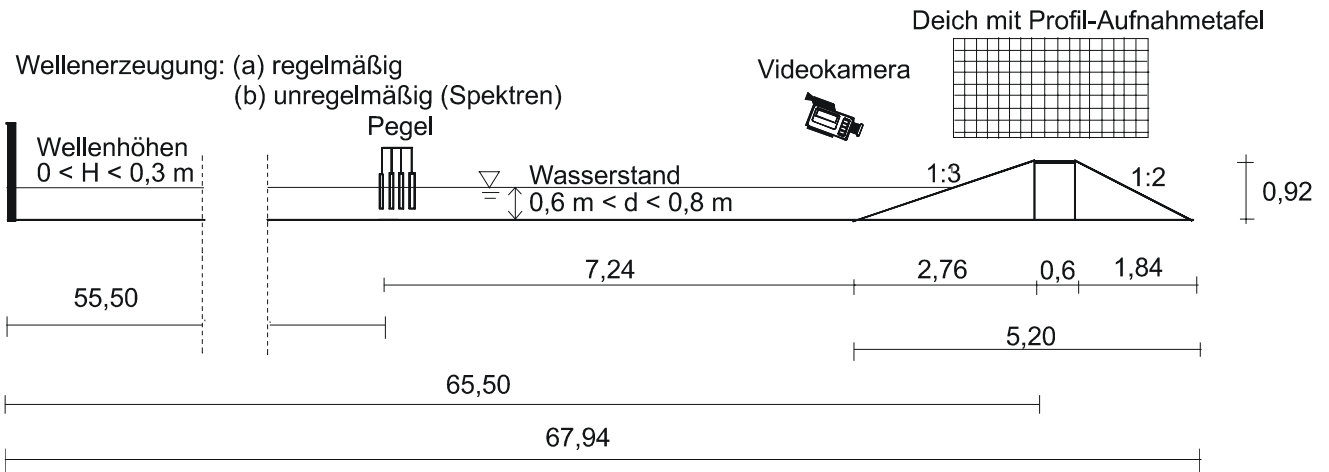


Abb. 3-5: WELLENKANAL SCHNEIDERBERG mit Versuchsanordnung

Im WKS wurde daher mit vergleichenden Untersuchungen der verschiedenen Varianten von konstruktiv verstärkten Deichmodellen begonnen. Der Maßstab 1:5 wurde aufgrund der Abmessungen und der erzeugbaren Wellenhöhen gewählt. Abb. 3-5 zeigt die grundsätzlich gewählte Versuchsanordnung im Wellenkanal.

Für die einzubauenden Deichvarianten wurde die Außenböschung mit einer Neigung von 1:3 und die Binnenböschung mit einer Neigung von 1:2 gewählt. Dies sind die technisch möglichen Neigungen hinsichtlich Ausführung und Unterhaltung, sowie der bodenmechanischen Stabilität des Deichbaumaterials. Die steile Außenböschung erhält durch die brechenden und nicht brechenden Wellen eine maximale Wellenbelastung, welche durch die konstruktiven Maßnahmen aufgefangen und abgeleitet werden muss,

im Gegensatz zu den heute ausgeführten flachen Außenböschungen mit Neigungen 1:6 und flacher, die eine reduzierte Wellenbelastung aufweisen.

Die Untersuchungen erfolgten mit regelmäßigen und unregelmäßigen Wellen (Spektralen), wobei die Wellenhöhen im Modell zwischen 20 cm und 30 cm signifikanter Wellenhöhe betragen. Dies entspricht 1,0 m bis 1,5 m signifikanter Wellenhöhe in der Natur. Die Höhe des Sandkerns wurde auf 0,92 m im Modell festgelegt, dies entspricht etwa 4,6 m Sandkernhöhe in der Natur, wie sie an der niedersächsischen Küste an vorlandgeschützten Deichen auftreten. Für den Aufbau des Sandkerns wurde ein Mittelsand mit einer Körnung von $d_{10} = 0,17 \text{ mm}$ bis $d_{90} = 0,57 \text{ mm}$ und einer Ungleichförmigkeitszahl U von 2,8 eingebaut (Abb. 3-6). Der verwendete Sand wies einen Wassergehalt von rund 5 % im eingebauten Zustand auf.

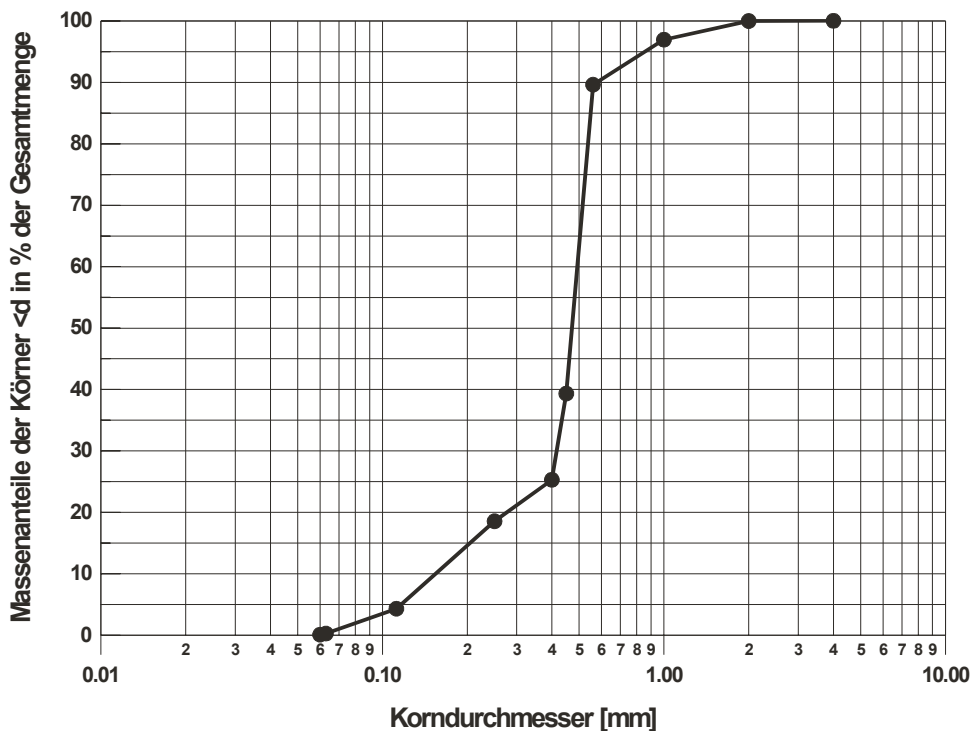


Abb. 3-6: Kornverteilung des verwendeten Sandkernmaterials

Während der Versuche wurden Wasserstände von $d = 60$ cm, $d = 70$ cm und $d = 80$ cm eingestaut und der Sandkern zunächst mit regelmäßigen Wellen der Wellenhöhe $H = 20$ cm und anschließend mit unregelmäßigen Wellen der signifikanten Wellenhöhe $H = 20$ cm belastet. Die Versuche wurden bei gleichbleibendem Wasserstand mit Wellen der signifikanten Wellenhöhe $H = 30$ cm wiederholt. Danach wurde der Wasserstand erhöht und die Versuche mit den verschiedenen Wellenformen und -höhen wiederholt, sodass sich pro Wasserstand 4 Versuche und insgesamt 12 Einzelversuche pro Untersuchungsvariante ergaben. Die Wellenbelastungen wurden so lange durchgeführt, bis der Sandkern seiner Schutzfunktion nicht mehr genügte und zerstört wurde (Versagen).

Der Ablauf der Versuche unter Wellenbelastung wurde mit einer Videokamera aufgezeichnet und dokumentiert. Abb. 3-7 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau mit Videokamera und Profilaufnahmetafel.

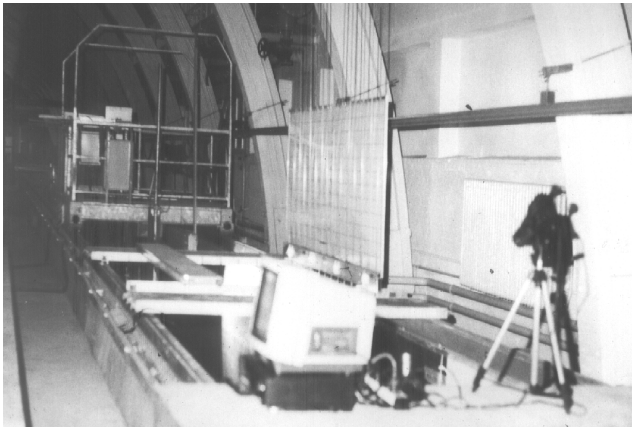


Abb. 3-7: Versuchsaufbau mit Videoeinrichtung und Profilaufnahmetafel

Das mechanische Abtastsystem der Profilaufnahmetafel (Abb. 4-1) dient dazu, die oberflächlichen Veränderungen des Deichprofils in einem 10 cm x 10 cm großen Messraster aufzunehmen.



Abb. 4-1: Mechanisches Abtastsystem zur Profilbestimmung (hier nach der Zerstörung der Spundwandvariante)

4 Ergebnisse der Untersuchungen im Vergleich

Im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG des FRANZIUS-INSTITUTS wurden 6 Varianten mit veränderten Deichbautechniken und Deichprofilen von einer Neigung $1:3$ seeseitig und $1:2$ binnenseitig im Maßstab $1:5$ untersucht und analysiert. Dabei bestätigte sich bei der Vergleichsvariante, dass der eigentliche Sandkern ohne Verstärkungen praktisch keine Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Wellenbelastung aufweist.

Die Durchströmungen der Profile bei anhaltend hohen Wasserständen führte bei der sog. Vergleichsvariante schon zu ersten Schäden in Form von Rutschungen an der Binnenböschung. Unter Seegangbelastung kam es schnell zum totalen Versagen des Sandkerns.

Mit Hilfe der konstruktiven Einbauten konnte für die verschiedenen Varianten die Sickerlinie so beeinflusst oder sogar unterbrochen werden, dass es zu keiner Durchfeuchtung des Deichfußes und damit zu möglichen Sackungen und Rutschungen vor allem im Binnenbereich kommen konnte. Abb. 4-2 zeigt die Sickerlinien im Sandkern für einen Außenwasserstand für $d = 60$ cm.

Je nach ausgeführter Variante kann so auch eine Stabilisierung der Binnenböschung für höhere Wasserstände bis hin zum Überströmen erreicht werden, ohne dass es zu Durchfeuchtungen des binnenseitigen Deichfußes oder zu Rutschungen der Böschung kommt, wie anhand Abb. 4-3 zu erkennen ist.

Neben dem Verhalten des Sandkerns gegen Durchsickern und Durchströmen spielt vor allem auch seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Wellen und Seegang eine große Rolle. Tab. 4-1 zeigt wie lange die einzelnen Varianten einer kontinuierlichen Wellenbelastung standgehalten haben, bis sie versagten.

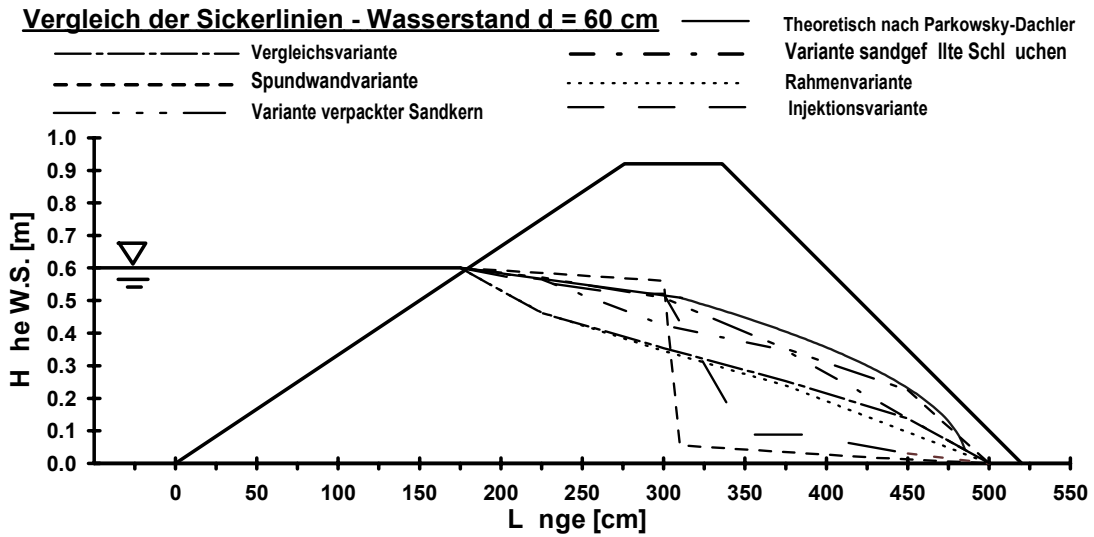


Abb. 4-2: Sickerlinien im Sandkern für einen Wasserstand von d = 60 cm ohne Wellenbelastung

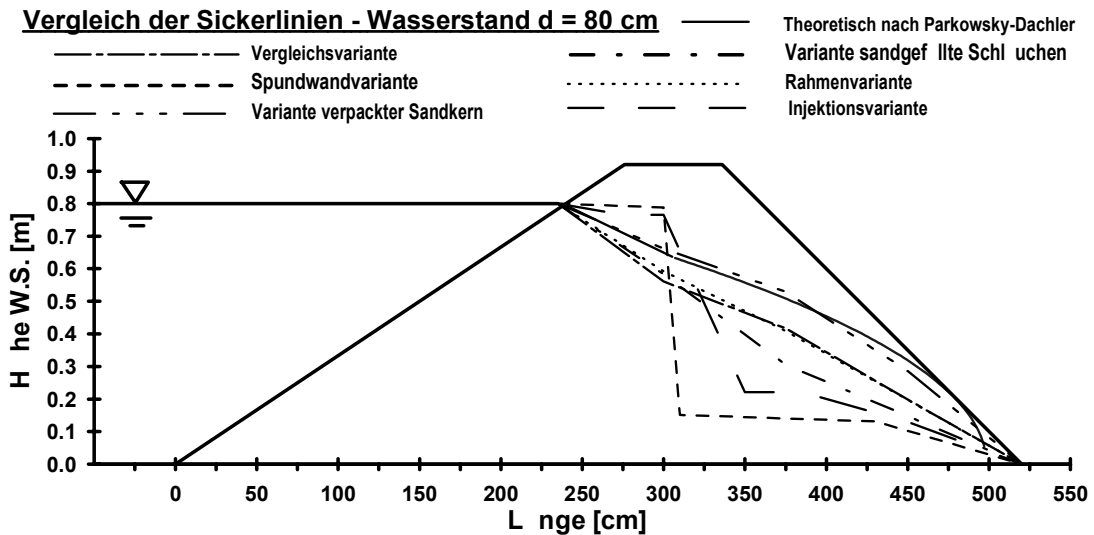


Abb. 4-3: Sickerlinien im Sandkern für einen Wasserstand von d = 80 cm ohne Wellenbelastung

Variante	Anzahl der Wellen bis zum Belastungsende	Modellzeit bis zum Belastungsende	Bemerkungen
	[-]	[min]	
(a) Vergleichsvariante, bzw. konventioneller Sandkern	100	11,9	Totalversagen
(b) Sandkern mit Spundwand	> 3500	> 280,9	Restbauwerk
(c) Verpackter Sandkern	1100	63,1	Totalversagen
(d) Sandkern aus sandgefüllten Schläuchen	> 5900	> 295,0	Restbauwerk, kaum Verformung
(e) Sandkern mit Rahmen	1730	93,4	Totalversagen
(f) Sandkern mit Injektion	3330	286,3	Teilversagen

Tab. 4-1: Anzahl der Wellen, Zeitdauer und Grad des Versagens der einzelnen Varianten

Entscheidend ist hierbei auch welche Höhe das Restprofil behält, welches nach Beendigung der Belastung verbleibt, um nachfolgende Sturmfluten abhalten zu können. Hier zeigt sich, dass sowohl die Spundwandvariante, wie auch die Variante „sandgefüllte Schläuche“ keine Veränderungen in der Kronenhöhe nach der Belastung aufweisen. Abb. 4-4 verdeutlicht die veränderten Sandkernprofile aller Varianten nach einer Belastung von mehr als 500 Wellen bzw. 50 Wellen bei der Vergleichsvariante im Vergleich.

Abb. 4-5 zeigt die entsprechenden Restprofile aller Varianten nach Beendigung der Belastungen. Es ist anzumerken, dass die Varianten „Sandkern mit Spundwand“ und „Sandkern aus sandgefüllten Schläuchen“ auch nach sehr langen Belastungszeiten nicht gebrochen sind.

Die bis hierher ermittelten Ergebnisse lassen eine erste

Bewertung der Varianten in Bezug auf ihre Tauglichkeit gegen Wellen- bzw. Seegangbelastung zu. So können zwei Varianten aufgrund ihres zu geringen Widerstandes verworfen werden. Für die übrigen Varianten muss eine Kostenanalyse in die Beurteilung einfließen, um die Varianten bewerten zu können.

Als ungeeignet erwiesen sich in diesem Zusammenhang die folgenden Varianten:

- Verpackter Sandkern
- Sandkern mit Rahmen

Die Variante „Verpackter Sandkern“ entspricht nicht den Anforderungen die an sie gestellt wurden. Es verbleibt kein redundantes Bauwerk, da der verpackte Sandkern seine Form verliert und auseinander rutscht.

Vergleich der Profile - Wasserstand d = 60 cm Nach > 500 Wellen (Nullvariante > 50 Wellen)

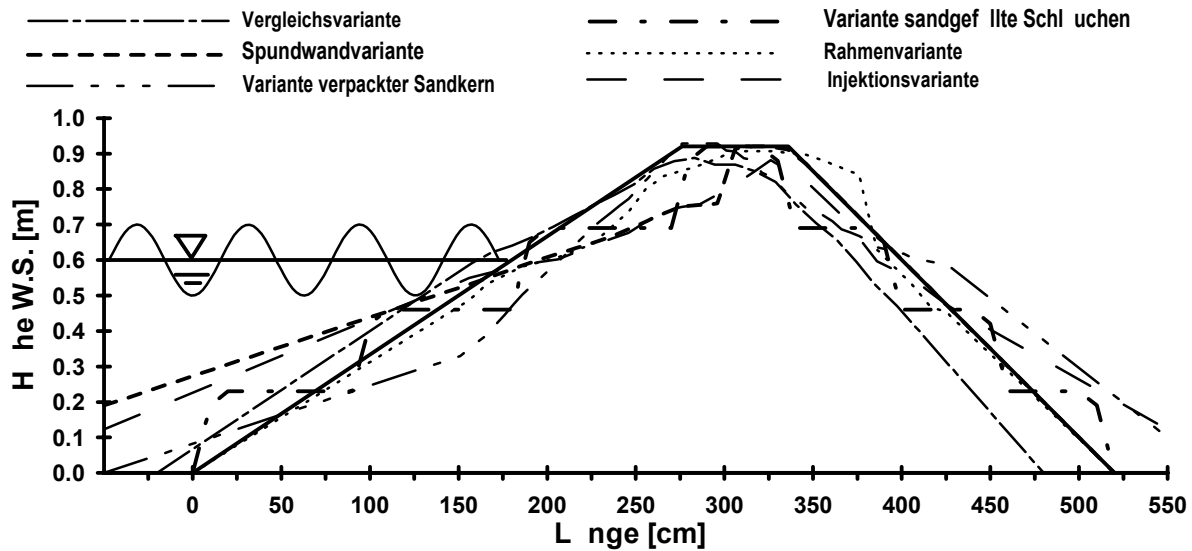


Abb. 4-4: Profile der Varianten nach Beendigung der Versuche für einen Wasserstand von d = 60 cm (Belastungszeit > 500 Wellen bzw. > 50 Wellen bei der Vergleichsvariante)

Vergleich der Profile - Wasserstand d = 80 cm Nach > 1000 Wellen (Nullvariante > 100 Wellen)

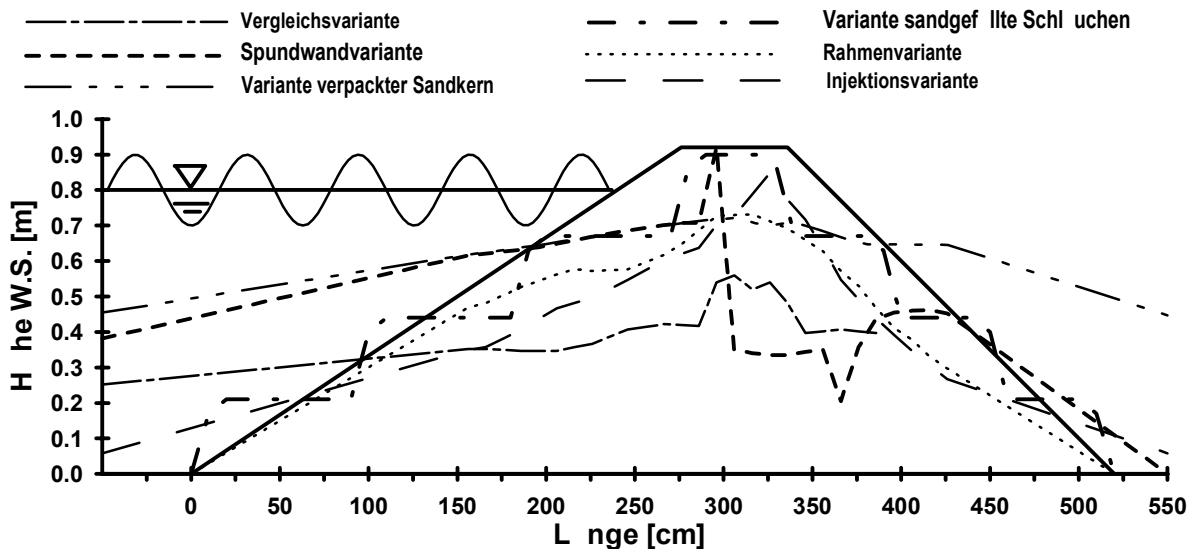


Abb. 4-5: Profile der Varianten nach Beendigung der Versuche für einen Wasserstand von d = 80 cm (Belastungszeit > 1000 Wellen bzw. > 100 Wellen bei der Vergleichsvariante)

Da Feinanteile des Sandes ausgewaschen werden können, kann die Geotextilumhüllung den Sandkern nicht stabilisieren und versagt. Aus diesen Gründen wird diese Variante hier nicht weiterverfolgt. Ein ähnliches Versagensbild zeigt die Rahmenvariante. Auch hier werden Feinstanteile des Sandes ausgewaschen. Zwar kann die Rahmenkonstruktion den Sandkern in Form halten, jedoch kommt es zu starken Auswaschungen, Erosionen und Rutschungen in den Feldern zwischen den Längs- und Querstreben, so dass auch diese Variante für weitere Betrachtungen ausscheidet. Entsprechend wird für die folgenden Varianten eine Kostenanalyse durchgeführt, um eine abschließende Beurteilung der Varianten zu erlangen:

- Sandkern mit Spundwand
- Sandkern mit Injektionen
- Sandkern aus sandgefüllten Schläuchen

Alle o.g. Varianten verändern ihr Profil auch bei längerer Wellenbelastung kaum und erhalten eine zweite Sicherheitslinie im Bauwerk. Eine Durchfeuchtung des binnenseitigen Deichfußes wird bei allen Varianten ausgeschlossen. Der Vorteil der Varianten „Sandkern mit Spundwand“ und „Injektion“ liegt darin, dass sie auch nachträglich in einen abzudichtenden oder zu erhöhenden Deich eingebaut werden können, während der Einbau eines Sandkerns aus sandgefüllten Schläuchen den generellen Neuaufbau eines Deichs einschließt.

5 Kostenanalyse

5.1 Einführung

In diesem Kapitel wird eine Kostenanalyse der zielführenden Varianten durchgeführt, um ein weiteres Entscheidungskriterium zur Bewertung der Varianten zu erlangen:

- Spundwand im Sandkern
- Injektionen im Sandkern
- Sandgefüllte Geotextilschläuche

Die Kosten dieser alternativen Deichbautechniken wurden mit den Kosten für einen Neubau bzw. die Erhöhung und Instandhaltung eines

- konventionellen Deichs

verglichen und bewertet.

Hier sind nur die Kostenvergleichsrechnungen als einfachste Bewertungsmethode einer Nutzen-Kosten-Untersuchung dargestellt. Die Kostenvergleichsrechnung dient dazu, aus der Anzahl der vorgegeben vier Alternativen die zur Erreichung einer bestimmten Leistung kostengünstigste Lösung zu ermitteln. Eine Vergleichsrechnung mit Folgekosten, beispielsweise eines Deichbruches, erfolgt nicht. Auch auf eine Empfindlichkeitsprüfung und der Ermittlung kritischer Werte wird hier verzichtet.

5.2 Kostenermittlung

Die Ermittlung der Kosten beschränkt sich auf die reinen Investitions-, bzw. Reinvestitionskosten der einzelnen Vari-

anten und berücksichtigt nicht die entschädigende Kostenwirkung auf Dritte. An Investitionskosten (Anlage- oder Herstellkosten) wurden die zur Erstellung, zum Erwerb und zur Erneuerung von Anlagen erforderlichen einmalig aufzuwendenden Kosten angesetzt:

- Kosten für Vorarbeiten
- Bauleitungs-, Baustelleneinrichtungskosten
- Kosten für Grunderwerb
- Bau- und Erschließungskosten
- Risiko- und Gemeinkosten

Die der Kostenermittlung zugrunde liegenden Einheitspreise wurden dem RAHMENENTWURF (1993), sowie aus Unterlagen des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft und Küstenschutz NLWK (1993) entnommen.

Die Kosten für Vorarbeiten, Baustelleneinrichtung, sowie die Risiko- und Gemeinkosten werden für alle vier Varianten als gleich groß angenommen, da der Deich als grundlegendgleich anzusehen ist. Die Kosten für Grunderwerb, Erschließung und Bau variieren je nach auszuführendem Bauwerk.

Die Baukosten sind für alle Varianten unterschiedlich und können in die folgende Titel unterteilt werden:

- Erdarbeiten für den Sandkern
- Erdarbeiten für die Kleischicht
- Rasenflächenarbeiten
- Deichüberfahrten
- Deckwerke und Pflasterungen

Bei der Kostenermittlung muss zwischen dem Neubau sowohl der konventionellen als auch der Deiche nach neuer Deichbautechnik und einer Ertüchtigung von vorhandenen Deichen unterschieden werden. In einer Vielzahl von Fällen wird es heute jedoch nur darum gehen, vorhandene Deiche zu ertüchtigen, d. h. auf einen erhöhten Sicherheitsstandard zu bringen, ggf. noch zu erhöhen.

In diesen Fällen entfällt ein Grunderwerb, der bei einem Bau nach konventioneller Technik nur mit Sandkern und flacher Deichböschungen in jedem Fall erforderlich ist.

Die Bauzeiten verkürzen sich, was neben Kostenersparnissen auch Vorteile bei der Überbrückung kritischer Bauzeiten ergibt, z.B. ein vollständiger Deichabschnitt während eines Sommers.

Weitere Vorteile liegen im Einsparen von Deichbaumaterialien. Dies kann im Extremfall dazu führen, dass nur Kosten für die konstruktiven Einbauten und eventuellen Reparaturen anfallen. Dies dürfte besonders bei kurzfristig zu erbringenden Erhöhungen der Deichsicherheit - vor allem auch an Flusssdeichen - von großem Interesse sein.

Für Ertüchtigungen vorhandener Deiche eignen sich von den hier untersuchten Techniken nur die

- Ertüchtigung mit Spundwand
- Ertüchtigung mit Injektion

5.3 Kostenvergleich

Eine wesentliche Voraussetzung für den kostenmäßigen Vergleich der Projektalternativen ist, dass die vorgesehene Leistungen über die gleiche Zeitspanne erbracht werden. Sie sind hier als erfüllt angenommen. In diesem Fall können die Projektkostenbarwerte der einzelnen Varianten direkt gegenübergestellt werden (Abb. 6-1).

Zu beachten ist, dass die durchschnittlichen Kosten für die Deichbauvarianten für die im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG eingebauten Varianten ermittelt wurden. Die Kosten können daher nur bedingt verallgemeinert werden, da sie durch eingesetzte Spundwandtypen, Injektionsmaterialien aber auch durch örtlich vorkommende Sand- und Kleivorkommen stark unterschiedlich sein können.

Für die Analyse war der Preisstand für die Kostenermittlungen das Jahr 1993. Es wurde mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 100 Jahren für den Hauptdeich kalkuliert und ein jährlicher Zinssatz von 2% angenommen. Weiterhin wurden keine Annahmen über eventuelle Preissteigerungen getroffen (LAWA, 1993).

6 Zusammenfassung und Aussicht

Zur Erhöhung der Sicherheit des Hinterlandes gegen Sturmfluten, d.h. Wellenangriff und Hochwasserstände, wurden in den vergangenen Jahrzehnten die Deiche der niedersächsischen Nordseeküste erhöht. Verbunden mit dieser Erhöhung war eine Verminderung der Böschungsneigung auf heute 1:3 zur Binnenseite und 1:4 bis 1:6 auf der Seeseite. Gründe für eine flachere Böschungsneigung waren erstens die Reduzierung der Wellenbelastung der seeseitigen Deichböschung durch Verlagerung des Wellenbrechens an dem gesicherten Deichfuß und die Verminderung des Druckschlages durch das Auftreffen der nachfolgenden Wellen auf die zurücklaufende Wasserschicht der vorausgegangenen Wellen. Der zweite Grund war die Erhöhung der Standsicherheit des flacher geneigten und breiter aufstehenden Erdkörpers aufgrund der erhöhten Massen und verbreiteten Aufstandsflächen. Diese fülligeren Deichquerschnitte bieten zudem eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen erosionsbedingte Erweiterungen einer Deichlücke im Falle eines Deichbruchs während einer Sturmflut.

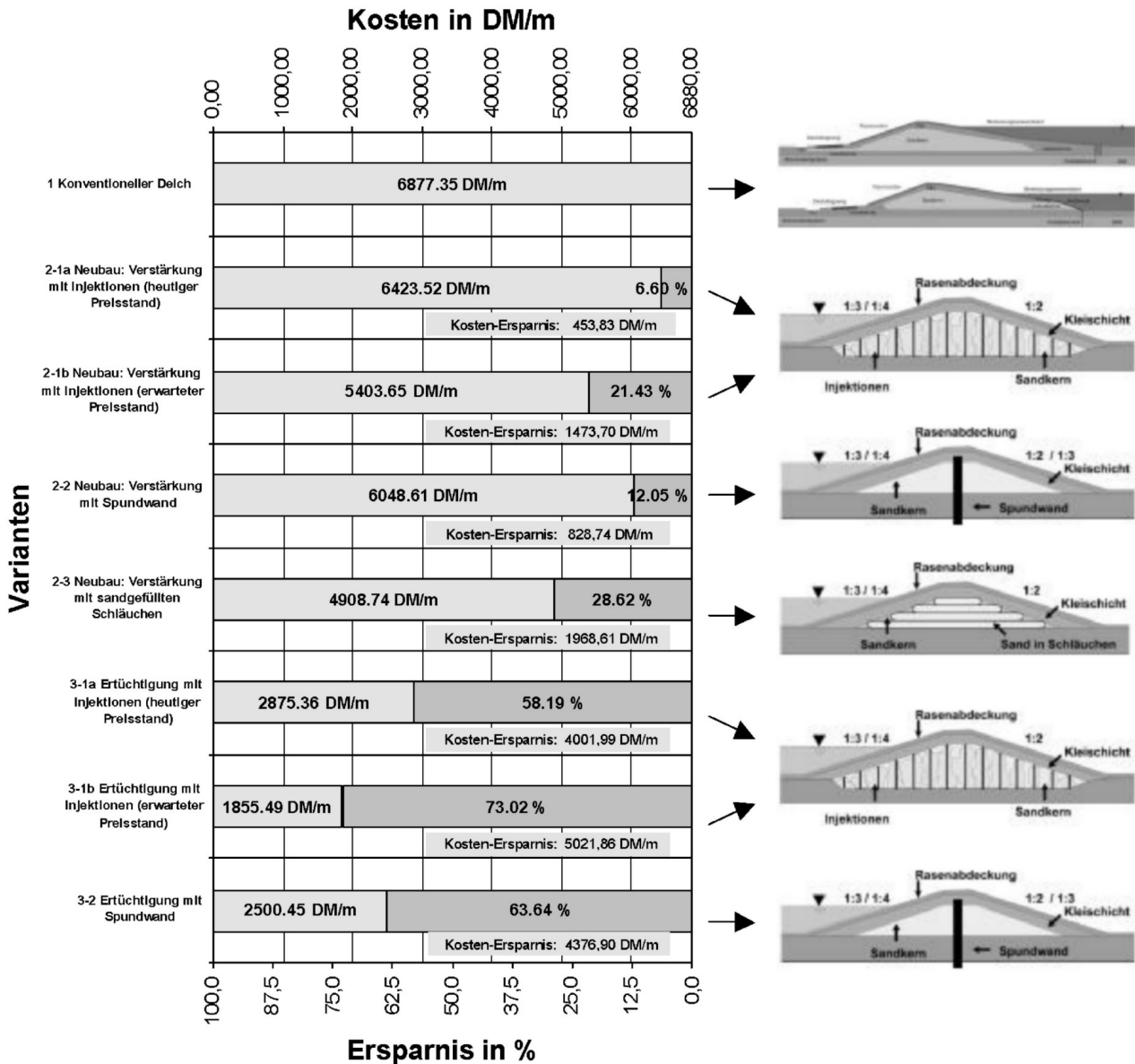


Abb. 6-1: Kosten und Einsparungen der ausführungswürdigen Varianten

Die heute vorhandenen Querschnitte mit ihren Neigungen, Materialien (Klei, Sand), Abdeckungen aus Rasen, Sicherungen und Entwässerungen sind eine Fortführung der über Jahrhunderte gewachsenen Methoden und Erfahrungen im Deichbau. Sie basieren auch auf den vor Ort verfügbaren Materialien und bisher ausreichend vorhandenen Flächen am Übergang vom Watt zum Festland. Die Deiche haben sich auch bei schweren Sturmfluten und Sturmflutketten in der jüngsten Vergangenheit bewährt. Es sind bei den so gebauten Deichen keine gravierenden Schadensfälle bekannt geworden, womit dieses Konzept und die Sicherheit des Küstenschutzes als bestätigt gelten kann.

Gleichwohl ist der Aufwand für diese Deichbauweisen erheblich. Der Flächenbedarf hat sich gegenüber früheren Lösungen mit steileren Böschungen nahezu verdoppelt, der Materialbedarf um über 40 % erhöht. Die Stabilität und Erosionssicherheit sind entsprechend dem nur äußerlich und oberflächlich gesicherten Erdkörper aus Sand relativ gering. Bei örtlichen Beschädigungen vor und während einer Sturmflut ist die Gefahr des erosiven Abtrages durch Wellen und Strömung und der nachfolgenden Deichschädigung nach wie vor sehr groß. Die Befestigung von Sanddeichen mit Kleiabdeckung lässt sich jedoch strukturell erhöhen wenn der Kern durch konstruktive Maßnahmen, wie z.B. durch Einziehen eines Skelettes aus Fertigteilen, Spundwänden, Geotextilien oder Injektionen, stabilisiert wird.

Mit der konstruktiv so erhöhten Stabilität des Deichkörpers besteht wiederum die Möglichkeit zu einer Erhöhung der Deichneigung bei gleichzeitiger höherer Gesamtstabilität und Gesamtsicherheit gegen Wellenangriff und Strömung.

Damit ergeben sich wiederum Vorteile, wie

- erhöhte Systemstabilität,
- erhöhter Erosionsschutz im Schadensfall,
- reduzierter Materialbedarf,
- reduzierter Flächenbedarf,
- verbesserte Anbindung von Bauwerken und Strukturen und damit eine Erhöhung der Gesamtstabilität des Deichsystems als Ganzes.

Die Beurteilung eines solchen Systems erfordert neben bautechnischen Aspekten, Sicherheitsüberlegungen und umweltrelevanten Betrachtungen auch die Kosten im Vergleich zu heutigen Bauweisen. Die Untersuchungen zur hydraulischen Stabilität des Deiches, d.h. die Widerstandsfähigkeit gegen erhöhte Wasserstände und gleichzeitigen Wellenangriff wurden im Wellenkanal Schneiderberg des FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der UNIVERSITÄT HANNOVER durchgeführt. In Voruntersuchungen waren anhand bisheriger Erkenntnisse im Deichbau und aus Laboruntersuchungen die minimale Neigung der Innen- und Außenböschung eines Deiches bei Erhaltung der Stand- und Erosionssicherheit unter Wellenangriff und die Praktikabilität des Einbaus und Zusammenwirkens von geschütteten Erdkörpern mit Konstruktionen im Deich ermittelt worden. Es ergab sich, dass eine Deichaußenneigung von 1:3 und eine Neigung der Innenböschung von 1:2 die Grundlage für die weiteren Überlegungen sein konnten. Die hiermit erreichbaren Einsparungen gegenüber der heutigen Bauweise sind in Abb. 6-2 dargestellt.

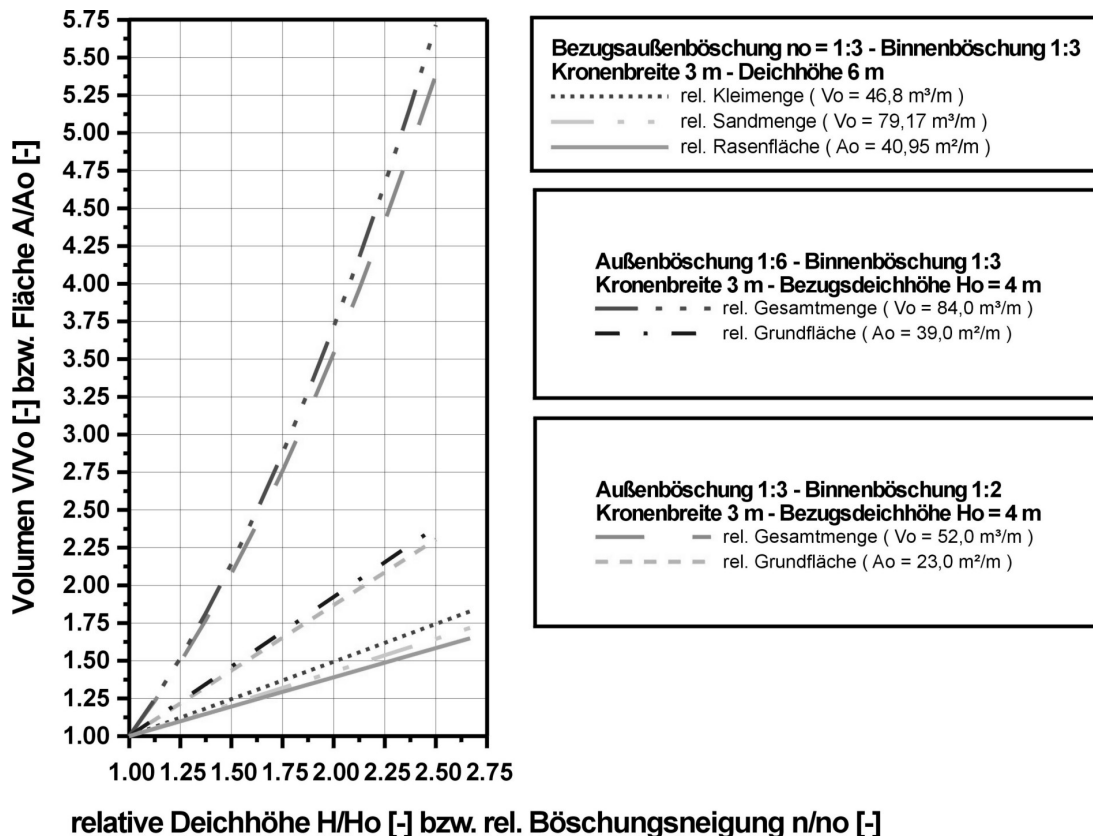


Abb. 6-2: Deichvolumen, Deichhöhe und Materialbedarf bei Deichen unterschiedlicher Neigungen

In einer umfassenden Literaturanalyse und Recherche bei für den Deichbau zuständigen Ämtern und Behörden konnten Kriterien für den Einbau konstruktiver Verstärkungen erarbeitet werden:

Die verschiedensten Belastungen auf Deiche und hieraus resultierenden lokalen Schäden führen in der Mehrzahl der Schadensfälle zu begrenztem Versagen (Wellenüberlauf, Teilerosion) bis hin zum Totalversagen (Deichbruch).

Aufgrund dieser Ergebnisse werden die Varianten „VERPACKTER SANDKERN“ und „SANDKERN MIT RAHMEN“ als UNGEEIGNET für eine Stabilisierung eines Deiches eingestuft.

Als GEEIGNET und bereits heute einsetzbar wird die Variante „SANDKERN MIT SPUNDWAND“ angesehen. Sie ließe sich bei bereits bestehenden und zu ertüchtigenden Deichen unmittelbar einsetzen und erproben.

Die Variante „SANDKERN MIT INJEKTION“ ERFORDERT WEITERE UNTERSUCHUNGEN hinsichtlich der Injektionsfähigkeit verschiedener Bindemittel im Hinblick auf die Durchlässigkeit und Kornzusammensetzung des Sandkerns sowie eine Verbesserung der Injektionsmöglichkeiten zur Sicherstellung der Dichtigkeit.

Die Variante „SANDGEFÜLLTER SCHLAUCH / GEOCONTAINER“ kann ebenfalls als eine technisch ausführbare und GEEIGNETE Möglichkeit angesehen werden, jedoch NUR BEI NEU- ODER ERSATZBAUTEN unter Abtrag vorhandener Deiche.

Ausgehend von den Kosten für heute gebaute Deiche an der niedersächsischen Küste, wurde für die als ausführbar angesehenen Varianten ein Kostenvergleich durchgeführt. Es zeigt sich, dass hiernach auch bei Neubauten aufgrund der Einsparungen an Material und reduzierter Grundflächen, Kostenvergünstigungen bis zu rd. 30 % möglich sind.

Beträchtliche Kosten und Bauzeitvorteile ergeben sich aber besonders bei der Variante „Spundwand“ und auch bei der Variante „Injektion“ für den Fall, dass diese in einen vorhandenen Deich zur nachträglichen Stabilisierung und Sicherung eingebaut werden. Hier entfallen nahezu alle Kosten für neues Material, Kauf von Grundflächen und sonstige Arbeiten, die bei einem Neubau erforderlich sind.

Die bisherigen Untersuchungen haben drei technische Möglichkeiten zur Stabilisierung eines Deichkernes gegen Wasserstand und Wellen aufgezeigt. Sie bieten die Möglichkeit bei Neubauten und Ertüchtigungen vorhandener Deiche erheblich an Material und Grundfläche sowie Anbauzeit einzusparen.

Die technische Ausführbarkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen Wellen sollte unter Naturbedingungen, zumindest aber unter naturähnlichen Belastungen getestet werden. Hierzu können auf auszuwählenden Deichabschnitten entsprechende Einbauten vorgenommen und getestet werden. Die Belastungen lassen sich unter Naturbedingungen jedoch nur sehr schwer und nicht vorhersagbar darstellen, sodass hier die Dringlichkeit geboten ist, Labor-einrichtungen wie z.B. den GROßEN WELLENKANAL der UNIVERSITÄT HANNOVER einzusetzen.

Großflächige Untersuchungen, insbesondere bei schrägem Wellenangriff, müssten in 3-dimensionalen Wellenbecken für verschiedene Wellenrichtungen und Wellenhöhen einschließlich Spektren durchgeführt werden.

Während die Spundwandtechnik und der Einbau von Geotainern eine bewährte und erprobte Bautechnik ist, muss bei der viele Vorteile aufweisenden Injektionstechnik noch erhebliche Entwicklungsarbeit geleistet werden. Diese ließe sich in einem naturähnlichen Deich zunächst im Labor erproben (Art des Bindemittels, Wasser-Bindemittel-Wert, Porosität, Kornzusammensetzung, chemische Eigenschaften) und anschließend in einer Deichstrecke testen.

7 Schrifttum

BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS: Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems, Januar 1997

EAK: EAK 1993 - Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke, Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzwerke EAK erschienen in Die Küste , Heft 55, 1993

FRANZIUS-INSTITUT: Technische Systeme im Küstenschutz, Veränderte Deichbautechniken als Denkmodelle, Untersuchungen bei erhöhten Wasserständen und unter Wellen, 1. und 2. Teilbericht, 1998/1999

INGENIEURKOMMISSION: Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieurkommission: „Die Sturmflut vom 16./17.02.1962 im niedersächsischen Küstengebiet“, erschienen in Die Küste, Heft 1, 1962

INGENIEURKOMMISSION: Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieurkommission: „Erfahrungen aus den Sturmfluten vom November / Dezember 1973 und Folgerungen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke“, erschienen in Die Küste, Heft 29, 1976

KRAMER, J.: Kein Deich, Kein Land, Kein Leben, Verlag Gerhard Rautenberg, Leer, 1989

LAWA: Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 1993

MALUCHE, E: Bewehrte Erde, erschienen in Tiefbau, Heft 9, 1976

NDG: Niedersächsischen Deichgesetz, erschienen in Sander / Dietzsch, Wasserrecht in Niedersachsen, 3. Auflage, Kolhammer Deutscher Gemeindeverlag, 1998

NLWK: Zusammenstellung der Baukosten für Deicherhöhungs- und Verstärkungsmaßnahmen bzw. für Schöpfwerksbauten, Vorflutausbau und landwirtschaftliche Folgemaßnahmen der verschiedenen Deichverbände. Anlagen zum Schreiben der NLWK vom 14.12.1998, 1998

RAHMENENTWURF: Rahmenentwurf – Nacherhöhungen der Hauptdeiche von der Landesgrenze Hamburg – Stau-stufe Geesthacht, Aufsteller: Staatliches Amt für Wasser und Abfall, Lüneburg, 1993

RICHWIEN, W.: Kritische bodenmechanische Zustände von Deichböden - Nachweiskonzepte und Versagensformen, erschienen in Tagungsband HTG-Kongress, Hannover: Häfen, Wasserstraßen, Küstenschutz, 1995

VRIJLING, J.K.: Probabilistic design of water-retaining structures, Delft Hydraulic Laboratory, Niederlande, 1994

