

## Empfehlungen F

### Buhnen als Küstenschutz

#### Inhalt

1. Einführung . . . . .	471
1.1 Problematik der Buhnen . . . . .	471
1.2 Begriffsbestimmungen . . . . .	474
2. Wirkung von Buhnen . . . . .	474
2.1 Funktionelle Wirkungsweise . . . . .	474
2.2 Konstruktionsbedingte Wirkungsweise . . . . .	480
3. Funktionelle und konstruktive Gestaltung von Buhnen . . . . .	481
3.1 Entwurfskriterien . . . . .	481
3.1.1 Buhnenrundrisse . . . . .	481
3.1.2 Anordnung von Buhnengruppen . . . . .	481
3.1.3 Buhnenabstände . . . . .	481
3.1.4 Buhnenlänge und Streichlinie einer Buhnengruppe . . . . .	483
3.1.5 Buhnenhöhe und Buhnenlängsneigung . . . . .	484
3.1.6 Buhnenquerschnitte . . . . .	485
3.1.7 Buhnenbau in Kombination mit anderen Maßnahmen . . . . .	487
3.2 Bemessung und konstruktive Gestaltung von Buhnen . . . . .	487
3.3 Buhnenbauweisen an tidiefreien Küsten am Beispiel der Ostsee . . . . .	488
4. Bauausführung und Unterhaltung . . . . .	497
4.1 Allgemeines . . . . .	497
4.2 Gerätesystem und Bauweisen . . . . .	497
4.3 Unterhaltung von Buhnen . . . . .	502
5. Kontrolle von Buhnen und Strandzustand . . . . .	506
6. Beispiele ausgeführter Buhnenkonstruktionen . . . . .	507
7. Schriftenverzeichnis . . . . .	538

#### 1. Einführung

##### 1.1 Problematik der Buhnen

Buhnen sind wohl die auf der Welt am häufigsten ausgeführten Küstenschutzwerke, dennoch sind sie problematisch. In vielen Fällen wurden durch sie die beabsichtigten Wirkungen erreicht. Manchmal war jedoch nur ein geringer oder kaum ein Erfolg zu verzeichnen, und es gibt Fälle, in denen Buhnen sogar Schäden (z. B. durch Lee-Erosion) verursacht haben. Deshalb sollte erst dann an den Bau von Buhnen gedacht werden, wenn es nicht möglich ist, den Strand mit wirtschaftlichen Mitteln durch künstliche Sedimentzufuhr zu stabilisieren.

Die Problematik der Buhnen liegt in der Unsicherheit bei der vorausschauenden Beurteilung ihrer Wirkung. Konstruktiv dagegen können Buhnen so bemessen werden, daß sie den Beanspruchungen durch Brandung, Strömungen usw. (s. Empfehlungen A) widerstehen.

Die Auswirkungen eines Eingriffes mittels Buhnen in die Naturvorgänge können nur durch hinreichend lange und systematische Untersuchungen und Beobachtungen über die

Energiebilanz und den Sandtransport in schutzbedürftigen und, soweit erforderlich, auch angrenzenden Uferabschnitten ermittelt werden (Empf. A).

Von maßgebender Bedeutung ist die Sandbilanz der durch Buhnen zu schützenden Strandabschnitte.

Hierbei ist zu unterscheiden zwischen

- a) positiver,
- b) langfristig ausgeglichener – jedoch mehr oder weniger stark wechselnder – und
- c) langfristig negativer Sandbilanz.

In Fällen langfristiger negativer Sandbilanz, die im allgemeinen durch starke Tide- und/oder Brandungsströmungen hervorgerufen wird, sind Buhnen zu erwägen, um den Strand zu stabilisieren und Sedimentverluste zu verzögern und zu verringern. Bei langfristig ausgeglichener, jedoch kurzfristig wechselnder Sandbilanz können Buhnen mit ausgleichender Wirkung sinnvoll sein. Im Falle positiver Sandbilanz sind Buhnen unangebracht.

Die Erfahrung lehrt, daß der gewünschte Erfolg, einen Strand aufzubauen oder zu erweitern oder kritische Sandumlagerungen und/oder Sandverluste zu vermindern bzw. zu verhindern, mit einer Einzelbuhne im allgemeinen nicht erreichbar ist, sondern meistens Buhnengruppen erforderlich sind. An der Nordsee (Tideküsten) sind in den meisten Fällen Buhnen vor Deckwerken gebaut worden, um Längsströmungen zu verhindern, die durch Sandabtrag den Deckwerksfuß zu unterspülen drohten (Abb. F 1 bis F 3).

Der Zwang zum Bau weiterer Buhnen in den angrenzenden Strandabschnitten ergibt sich aus der auf ihrer Leeseite auftretenden Erosion. Zahlreiche Versuche, die Lee-Erosion durch bauliche Maßnahmen zu verringern bzw. zu verhindern, haben nicht immer befriedigende Ergebnisse gebracht.



Abb. F 1. Gruppe von Flachbuhnen am Nordstrand von Norderney



Abb. F2. Gruppe von Einwand-Holzpahlbuhnen am Südstrand von Borkum



Abb. F3. Tetrapodenbuhnen mit Längswerk vor Hörnum auf Sylt

## 1.2 Begriffsbestimmungen

Unterscheidung nach der Lage am Strand oder Vorstrand:

**Buhnen** sind quer zur Strandlinie angeordnete damm- oder wandartige Bauwerke zum Schutz von Stränden, Vorländern, Längswerken oder anderen Anlagen. Zu unterscheiden sind: Strandbuhnen, Strombuhnen und Unterwasserbuhnen. Aus ihrer Funktion und Bauweise ergeben sich Mischformen.

**Strandbuhnen** sind in den Strand einbindende Buhnen, die überwiegend einen Sandabtrag durch Wellen und Brandungsströmungen vermindern oder verhindern sollen.

**Strombuhnen** sollen das Ufer, den Strand oder das Vorland mit oder ohne Verbindung zu einem Längswerk gegen Erosion durch Längsströmungen schützen.

**Unterwasserbuhnen** sind unter Wasser liegende Verlängerungen von Buhnen, die der Sicherung eines Unterwasserhanges (Vorstrand) dienen. Beide sind vornehmlich an Tideküsten (Nordsee) zu finden, an der Ostsee nur in Verbindung mit im Wasser errichteten Steinwällen zur Steilküstensicherung (Längswerken).

## 2. Wirkung von Buhnen

### 2.1 Funktionelle Wirkungsweise

Eine Buhne wird senkrecht oder schräg zur Uferlinie angeordnet; damit stellt sie mehr oder weniger ein Hindernis für den natürlichen Längstransport von Material am Strand und/oder Stromufer dar und bewirkt eine Auflandung an ihrer Luvseite. Im gleichen Maße wie sich hier Sedimente ablagern, verringert sich der Sedimenttransport zur Leeseite. Ist die sandfangende Wirkung der Buhne zu stark, entsteht auf der Leeseite durch die verringerte natürliche Zufuhr ein Abtrag und die Uferlinie weicht im Wirkungsbereich der Buhne zurück. Unmittelbar hinter der Buhne ist die auf das Ufer gerichtete Sandtransportkomponente am geringsten. Sie wird mit zunehmendem Abstand von der Buhne stärker. Deshalb kann bei zu geringen Buhnenabständen der Sedimenttransport den Strand im Uferbereich nicht ausreichend versorgen. Im Anlandungsbereich an der Luvseite der Buhne schiebt sich die Uferlinie vor, die sich insgesamt gesehen senkrecht zur resultierenden Wellenaufrichtung ausrichtet.

Im Bereich des nassen Strandes (Wasserwechselzone) stellen sich auf der Luvseite gewöhnlich steilere Strandneigungen als auf der Leeseite ein.

Wenn die Strandneigung im Bereich der Ablagerung ihre Grenzsteilheit entsprechend den vorherrschenden Wellen- und Strömungsparametern erreicht hat, wird kein weiteres Material mehr abgelagert und der natürliche Längstransport passiert die Buhne oder Buhnengruppe je nach der Höhenlage entweder darüber hinweg und/oder um das seewärtige Ende herum.

Meistens werden Buhnen in Gruppen gebaut, damit sie in dem gesamten zu schützenden Küstenabschnitt

- a) die durch Wellenangriff und/oder Strömungen verursachte Erosion verhindern oder auch nur einen Strandabbruch verzögern oder
- b) bewirken, daß der durch Wellen und/oder Strömungen erzeugte Materiallängstransport der Erhaltung oder gar Erhöhung des Strandes zugute kommt.

Zur Darstellung der Funktion von Buhnen wird in den schematischen Darstellungen (Abb. F 4 bis F 10) davon ausgegangen, daß sie nicht überströmt werden.

Die Funktion von Einzelbuhnen (Abb. F 11 bis F 13) oder Buhnengruppen wird vor allem bestimmt durch den Buhnen Grundriß, die Anordnung in Buhnengruppen, die gewähl-

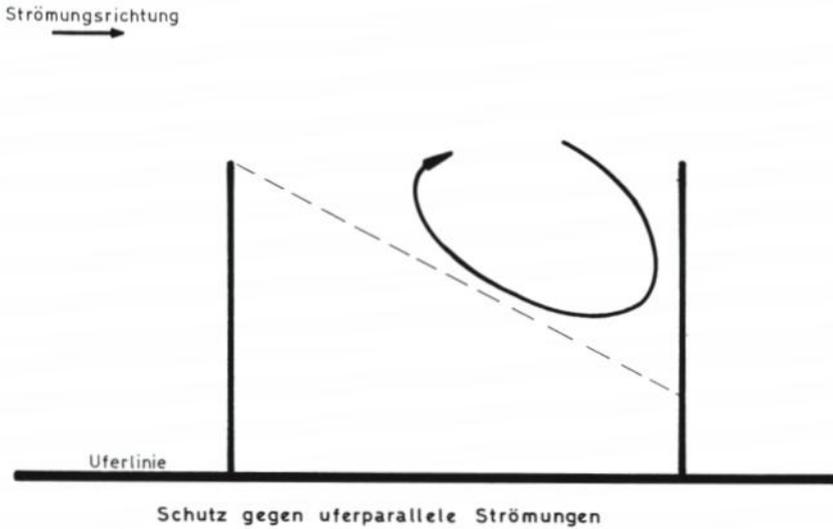


Abb. F4. Ablenkung einer uferparallelen Strömung durch eine Buhne

ten Buhnenabstände, die Buhnenlänge, die Buhnenhöhe sowie den Buhnenquer- und -längsschnitt.

Der **Buhnen Grundriß** (Abb. F14), die senkrechte oder schräge Ausrichtung zur Uferlinie, beeinflusst die Sandablagerung (s. 3.1.1). Der **Buhnenabstand** (s. 3.1.3) in einer **Buhnengruppe** (s. 3.1.2) ist wesentlich für die Lage der angestrebten Uferlinie. Er ist einerseits der vorherrschenden Strömungs- und/oder Brandungsrichtung sowie der natürlichen Strandneigung anzupassen, andererseits ist er von der **Buhnenlänge** (s. 3.1.4) und

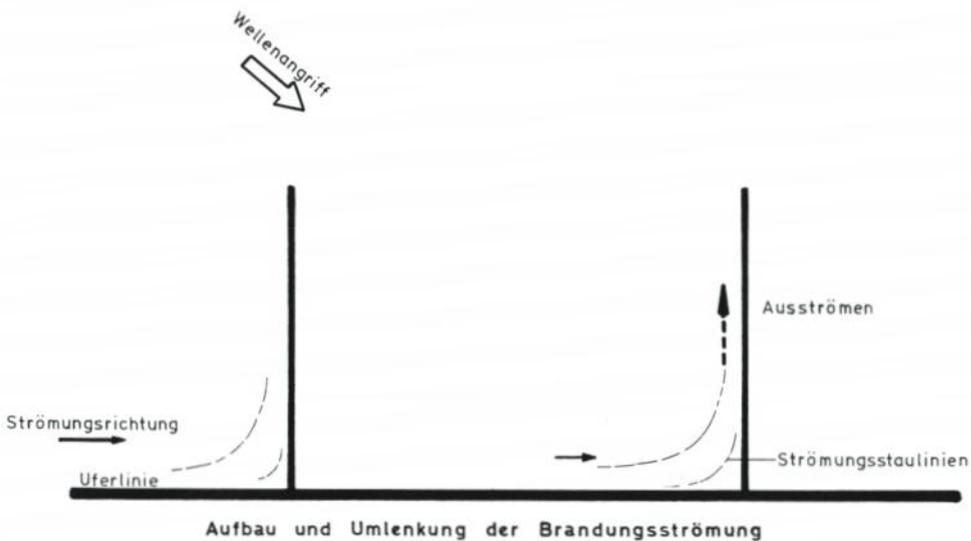


Abb. F5. Aufbau und Umlenkung einer Brandungsströmung

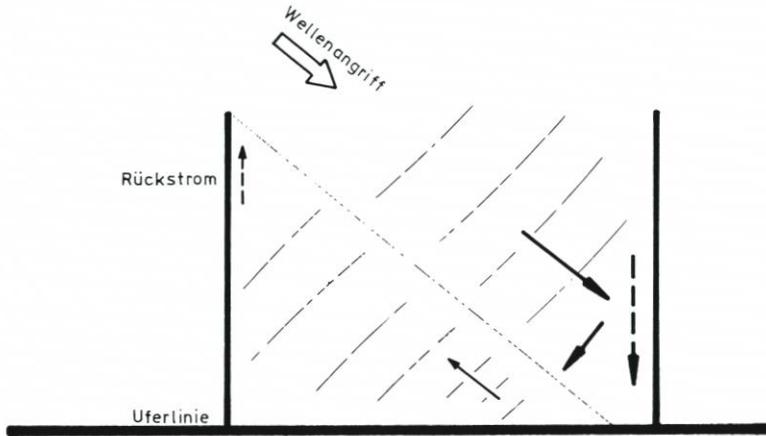


Abb. F6. Reflexion einer schräg anlaufenden Welle

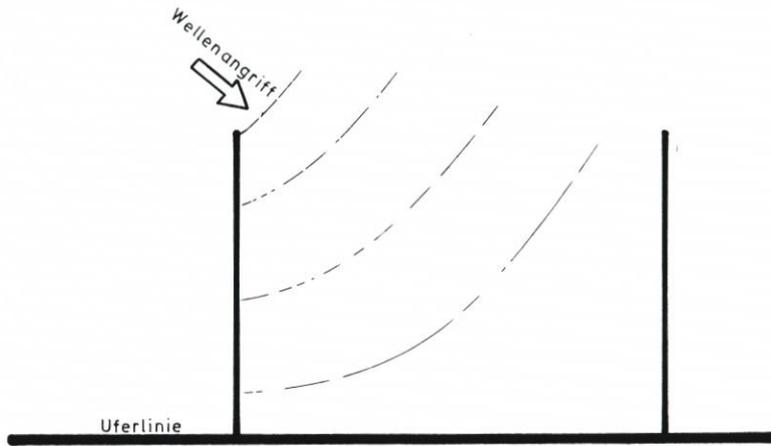


Abb. F7. Diffraktion einer schräg anlaufenden Welle

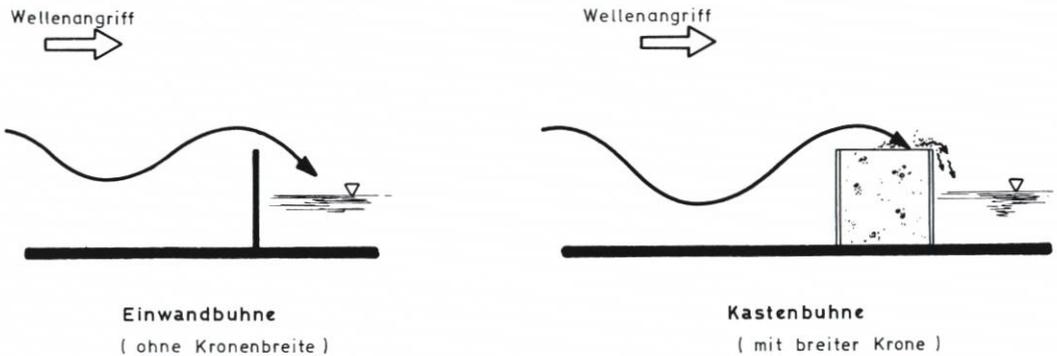


Abb. F8. Wirkung einer Einwandbuhne sowie einer Kastenbuhne mit breiter Krone auf eine überschlagende Welle

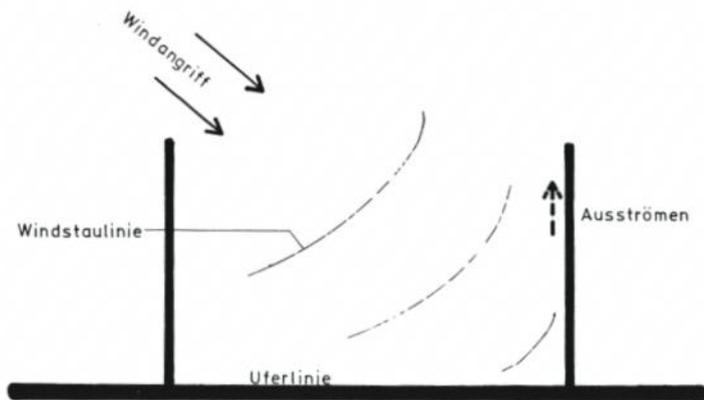


Abb. F9. Windstau auf der Luvseite einer Buhne

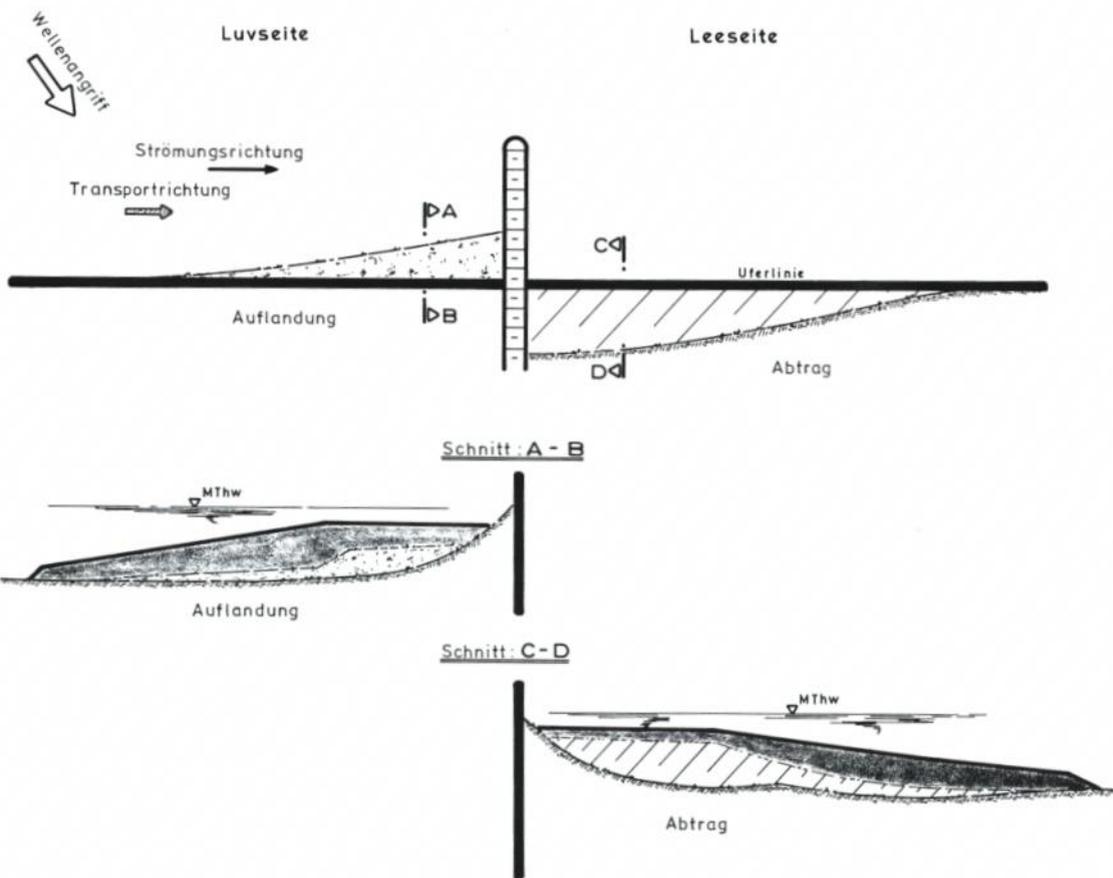


Abb. F10. Sandfangende Wirkung auf der Luvseite und Erosionswirkung auf der Leeseite einer Buhne



Abb. F 11. Wirkung einer langen Buhne aus Tetrapoden vor Hörnum auf Sylt – Auflandung auf der Luvseite und Erosion auf der Leeseite

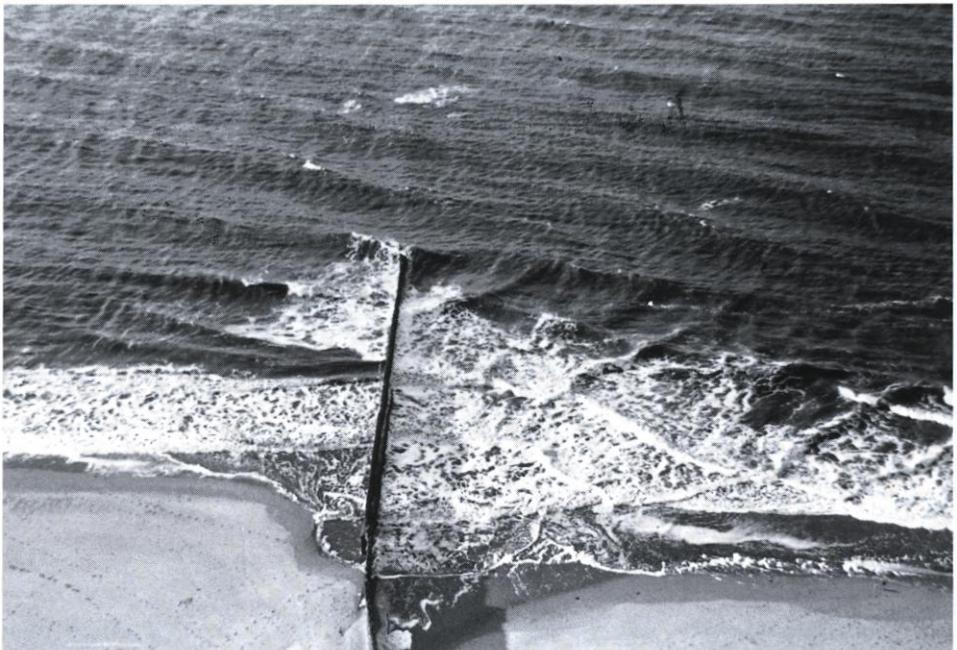


Abb. F 12. Wirkung einer Einwandbuhne auf Sylt mit unterschiedlichen Strandbreiten durch Auflandung auf der einen und Erosion auf der anderen Seite



Abb. F 13. Geböschte Steinbuhne mit Abdeckung aus Basaltsäulen am Westkopf von Norderney



senkrechte Buhnen



Sichelbuhnen



L-förmige Buhnen



T-Buhnen



geknickte Buhnen



Y-Buhnen

Abb. F 14. Beispiele für Buhnengrundrisse [16]

von der Stärke der natürlichen Materialumlagerung abhängig. Die Verbindungslinie der Buhnenköpfe einer Buhnengruppe ergibt die sogenannte *Streichlinie* (s. 3.1.4), die von Einfluß auf die Buhnenwirkung ist und möglichst zügig, der beabsichtigten Führung der Strömung angepaßt, verlaufen soll. Zu berücksichtigen sind ebenfalls die *Buhnenhöhe* und der *Buhnenlängsschnitt* (s. 3.1.5) sowie der *Buhnenquerschnitt* (s. 3.1.6).

## 2.2 Konstruktionsbedingte Wirkungsweise

Zu unterscheiden sind durchlässige und undurchlässige Buhnen:

*Undurchlässige Buhnen* bilden zunächst ein vollständiges Hindernis gegen den Längstransport von Material. Nach luvseitiger Auflandung wird das Material – zunehmend mit der Höhe der Sandauffüllung im Buhnenfeld – über die Buhne hinweg und/oder um das seewärtige Ende der Buhne herumtransportiert.

*Durchlässige Buhnen* (aufgelöste Buhnen) werden gebaut, wenn eine begrenzte Durchströmung und damit das Durchlassen von äolisch oder hydraulisch verfrachtetem Sand erwünscht ist. Hiermit werden zwei Ziele verfolgt: zum einen eine ausreichende Versorgung unter Lee-Erosion leidender angrenzender Strandabschnitte und zum anderen die Beeinflussung des horizontalen Geschwindigkeitsgefälles in einer Gruppe durchlässiger Buhnen, z. B. durch unterschiedliche Wahl der Pfahlabstände, so daß die Lee-Erosion verhindert oder gemindert wird.

### 3. Funktionelle und konstruktive Gestaltung von Buhnen

#### 3.1 Entwurfskriterien

##### 3.1.1 Buhnengrundrisse

Die Entwicklung des Buhnenbaues hat zu einer Vielfalt von Buhnengrundrissen (senkrecht und schräg zur Küstenlinie) geführt, an die bestimmte funktionelle Erwartungen geknüpft werden.

Dabei handelte es sich weniger um eine Bemessung, sondern um die Umsetzung von vorhandenen Erfahrungen zum Zeitpunkt der Erstellung von Buhnenbauten, außerdem wurden der jeweilige Stand der Bautechnik und auch die verfügbaren Baumaterialien berücksichtigt.

Die konstruktive Ausbildung von Buhnen, die an einer Küste einer hohen Seegangbelastung und in Tideästuaren hohen Strömungskräften ausgesetzt ist, ist unproblematisch. Durch regelmäßige Überprüfung der Standsicherheit können erforderliche Unterhaltungsmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden. Hinsichtlich der funktionellen Anordnung von Buhnen, einzeln oder in einer Gruppe, gibt es keine einheitlichen Richtlinien, sondern unterschiedliche Auffassungen ohne Gewähr für das Eintreten der gewünschten Funktion. Nachfolgend werden aus dem Schrifttum Vorschläge für die Anordnung von Buhnen als Planungshilfe für eigene Überlegungen erörtert.

Im allgemeinen erhalten Buhnen eine geradlinige Achse und werden senkrecht zur Uferlinie angeordnet. Bei Strandbuhnen ist zu überlegen, ob durch eine Anpassung der Buhnenachse(n) an die vorherrschende Wellenangriffsrichtung eine erhöhte Wirkung hinsichtlich erwünschter Sandablagerung und damit ein optimaler Strandschutz erreicht werden kann. Hierzu ist zu prüfen, ob der Längstransport nur in einer Richtung wirkt oder bei wechselnden Transportrichtungen der Anteil einer Richtung vernachlässigt werden kann.

##### 3.1.2 Anordnung von Buhnengruppen

Der Bau gleich langer Buhnen an einer gestreckten Küste oder deren fächerförmige Anordnung vor einer Ausbuchtung der Uferlinie mit gleicher oder unterschiedlicher Länge ist jeweils von der Morphologie des Vorstrandes abhängig (Abb. F 15). Buhnengruppen mit Buhnen wechselnder Länge entstehen z. B., wenn der Buhnenabstand ursprünglich zu groß war, Zwischenbuhnen errichtet werden mußten und für diese häufig kürzere Längen ausreichten.

T-Buhnengruppen sollen dazu dienen, bei wechselnden Küstenlängstransportrichtungen die Verweilzeit des Sandes in den einzelnen Feldern zu erhöhen; bekannt sind solche Bauten in Verbindung mit Sandvorspülungen vor erodierten Küstenabschnitten. Da die Wirkung neben der Länge hauptsächlich von der Kronenhöhe des Querriegels und auch des Längskörpers im Verhältnis zu den maßgebenden Wasserständen abhängt, empfehlen sich T-Buhnen hauptsächlich an Küsten ohne oder mit nur geringem Tidehub.

##### 3.1.3 Buhnenabstände

In einer Buhnengruppe ist der Buhnenabstand so festzulegen, daß die leeseitige Buhne dort angeordnet wird, wo die abschirmende Wirkung der luvseitigen Buhne nicht mehr



gleichlange Buhnen



abwechselnd kurze und lange Buhnen



fächerförmige Anordnung mit gleichlangen Buhnen



fächerförmige Anordnung mit unterschiedlich langen Buhnen



T - Buhnen

Abb. F 15. Beispiele für die Anordnung von Buhnengruppen

ausreicht, um Erosion durch Strömung und Brandung ausreichend zu verhindern. Dabei ist ein Sicherheitszuschlag anzusetzen, damit auch im ungünstigsten Fall ein ausreichendes Sandpolster erhalten bleibt.

Der Buhnenabstand hängt von der Buhnenlänge ab. Je länger die Buhnen sind, um so größer kann der Buhnenabstand gewählt werden; umgekehrt muß der Buhnenabstand um so geringer sein, je kürzer die Buhnen sind.

Da die Baukosten der Buhne seawärts mit größerer Wassertiefe zunehmen, sollten die Buhnenabstände und -längen als Kompromiß zwischen ausreichend hydraulischer Wirksamkeit und vertretbarem Kostenaufwand festgelegt werden. Nicht erreichbar ist der Idealfall, daß jedes Buhnenfeld eine physiographische Einheit, also ein geschlossenes System (s. Empf. A, Abschn. 6) bildet und kein Material aus ihm verlorengeht.

**Bemessungshinweise:** Für gerade, gleich lange undurchlässige *Strombuhnen* können die Buhnenabstände (a) im Verhältnis zur Buhnenlänge (L) nach dem *SHORE PROTECTION MANUAL* [30] mit  $a = 2$  bis  $3 L$  gewählt werden. Für strandnormale, gleich lange undurchlässige *Strandbuhnen* kann nach Erfahrungen an der deutschen Nordseeküste folgende Formel für die Ermittlung des Buhnenabstandes herangezogen werden (Abb. F 16) [26].

$$\text{Buhnenabstand } a_{\max} = 2e \cdot \text{ctg } \beta$$

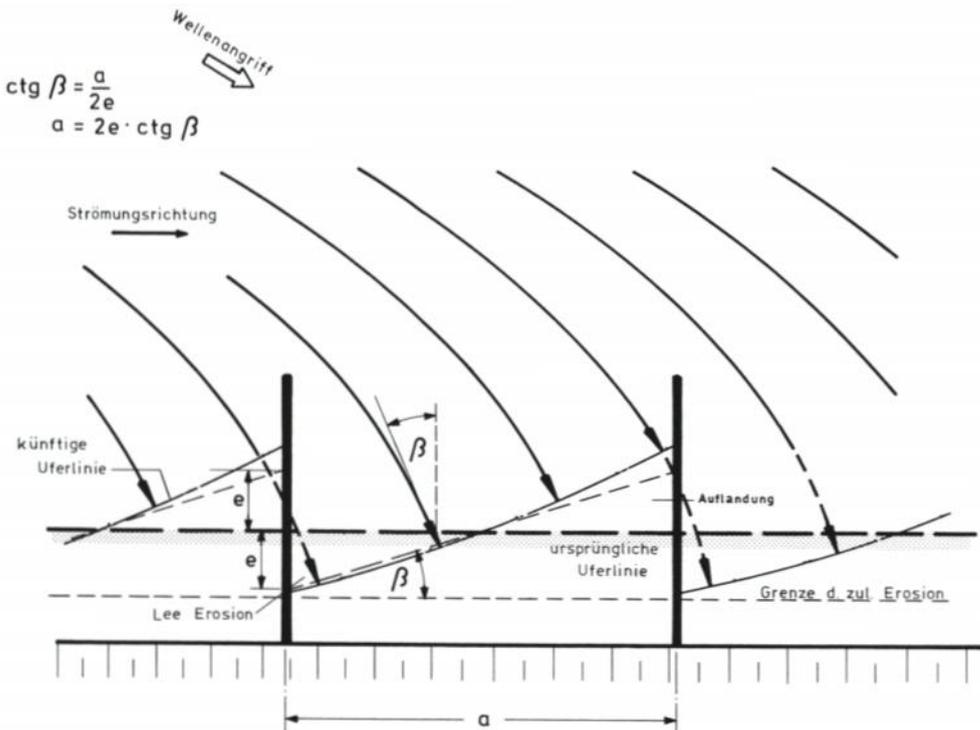


Abb. F 16. Verfahren zur Ermittlung des Bühnenabstandes [26]

### 3.1.4 Bühnenlänge und Streichlinie einer Bühnengruppe

Die Baukosten von Buhnen wachsen mit dem Abstand vom Ufer infolge zunehmender Wassertiefe. Daher muß die Bühnenlänge auf die hydraulischen Mindestforderungen begrenzt werden. So könnte beispielsweise daran gedacht werden, bei Bühnengruppen anstelle von gleich langen Buhnen gegebenenfalls die Länge der Einzelbuhnen in Leerichtung stufenweise zu verringern, um die Lee-Erosion und zugleich auch die Kosten zu vermindern.

Die Mehrzahl der Buhnen an der deutschen Nordseeküste haben Längen zwischen 200 m und 400 m. An der Ostseeküste sind sie kleiner als 100 m (Holzpfahlbuhnen 30–80 m). Bekannt sind jedoch auch Bühnenlängen von 500 m und darüber. Eine Ausnahme – auch hinsichtlich ihrer Funktion – bildet die sogenannte Strombuhne H am Westende von Wangerooge; sie wurde 1938/40 von 500 auf 1500 m verlängert, um damit die „Dove Harle“ zu durchdämmen, deren Seegat den Westkopf der Insel bedrohte.

Die Länge der Strombuhnen muß vom Ufer bis zum unterhalb der Brandungswirkung liegenden Hang der Stromrinne reichen. Der Hang der Rinne wird durch eine flexible Abdeckung gesichert, damit Erosion durch Strömung und eine Verlagerung der Rinne in Richtung auf das Ufer verhindert wird.

Die Längen von Strombuhnen einer Bühnengruppe sollten auch so bemessen werden, daß die Strömung hydraulisch optimal geführt wird (Abb. F 15) und damit die Verbindungslinie der Bühnenköpfe eine sogenannte Streichlinie bildet.

Die Länge von Strandbuhnen an Tideküsten muß ausreichen, den leeseitigen Strandbereich gegen Brandungsströmungen und Brandungswellen hinreichend abzuschirmen, um den Sandabtrag zu verhindern. Dabei ist zu beachten:

- Eine Strandbuhne sollte seewärts möglichst bis über den Bereich der Brandungszone hinaus gebaut werden, in der der überwiegende Küstenlängstransport stattfindet.
- Ist im Buhnenbereich eine strandparallele Rinne vorhanden, die keine gefährliche Vertiefung erwarten läßt, so sollten die Buhnen bis zu dieser Rinne vorgestreckt werden und ihre Kopfsicherung die landseitige Böschung der Rinne mit abdecken, damit eine Annäherung an das Ufer verhindert wird.
- Ist zu befürchten, daß die strandparallele Rinne sich gefahrdrohend vertieft, so ist die Kopfsicherung der Buhne in großflächiger, flexibler Bauweise auszuführen. In besonderen Fällen (Borkum, Norderney) kann die Rinne - z. B. durch Sinkstücke - bis zum seeseitigen Hang verbaut werden (Unterwasserbuhne).
- Ist dem Strand ein mehr oder weniger durchgehendes stabiles Riff in annehmbarer Entfernung vorgelagert, so sind zur Erhöhung ihrer Wirksamkeit die Buhnen bis zum seeseitigen Hang des Riffes vorzuziehen. Anzustreben sind jedoch aus Kostengründen möglichst kurze Buhnen, wenn sie z. B. mit anderen Maßnahmen zur Stranderhaltung, wie Strandauffüllung o. ä., verbunden werden können.
- Liegen stark veränderliche Riffe oder Platen vor dem Strand, sollten die Buhnen bis zu dem Bereich vorgestreckt werden, wo die relativ stabilsten Riffe bzw. Platen liegen.

Damit eine Gruppe von Strandbuhnen eine ausgeglichene Schutzwirkung ausüben kann, müssen die zugehörigen Buhnen entweder die gesamte Sandtransportzone überdecken oder mindestens Teilbereiche gleicher Transportleistung. Da der Sandtransport meistens strandparallel verläuft, ergeben sich in der Regel gleiche Buhnenlängen und damit eine Streichlinie. Die Bezeichnung „Streichlinie“ bezieht sich hier also primär auf den Sandtransport und weniger auf die Strömung wie bei Strombuhnen.

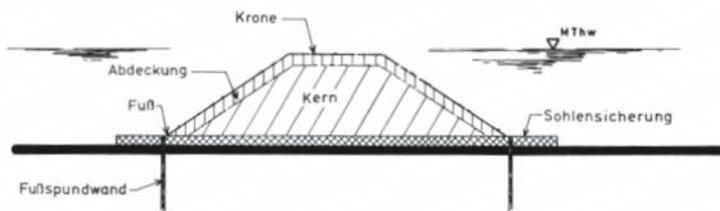
### 3.1.5 Buhnenhöhe und Buhnenlängsneigung

Wenn im Bereich von Strombuhnen das Ufer nicht durch ein Deckwerk geschützt ist, muß die Buhnenwurzel theoretisch so hoch liegen, daß sie auch beim höchsten zu erwartenden Wasserstand nicht überströmt wird, weil sonst Uferschäden eintreten (Abb. F 17). Der Buhnenkopf muß mindestens so hoch gelegt werden, daß er sich während der Niedrigwasserzeiten in dem gewählten Profil herstellen und später unterhalten läßt, wobei die Bauweise von Bedeutung ist. In Ausnahmefällen kann der Buhnenkopf auch als „Unterwasserbuhne“ gestaltet werden (s. Beispiel 13). Eine Strandbuhne muß eine Mindesthöhe über dem Strand haben, damit eine erosionshemmende bzw. sandfangende Wirkung erzielt wird. Mit zunehmender Höhe nimmt die sandfangende Wirkung zu. Sie kann so groß werden, daß die Leeseite nicht mehr ausreichend mit Sand versorgt wird und Lee-Erosion auftritt.

Die Buhnenhöhe müßte theoretisch so bemessen werden, daß auch bei höchsten Wasserständen keine Wellen überschlagen, die im benachbarten Strandbereich erodierende Wirkungen haben könnten. Dann bildet das Buhnenfeld ein Tosbecken, das energiezehrend wirkt. Dem stehen im Tidegebiet hohe Baukosten und außerdem ästhetische Gründe entgegen. Weiter muß bedacht werden, daß mit der Buhnenhöhe die brandungsbedingte Rückströmung entlang der leeseitigen Buhne zunimmt, wodurch Sandverluste und bauwerksgefährdende Rinnen am Buhnenfuß auftreten können.

Praktisch wird eine Buhne so ausgebildet, daß der Buhnenkopf mindestens 0,5 m höher

## Querschnitt



## Längsschnitt

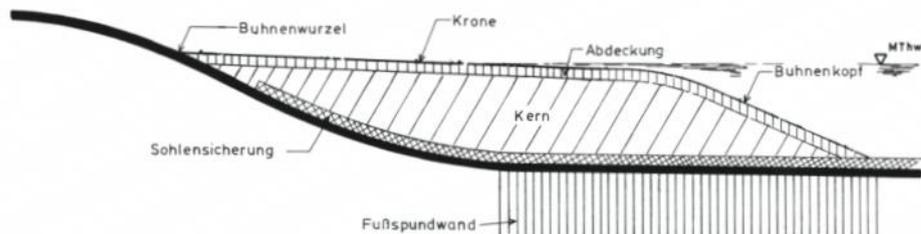


Abb. F 17. Bezeichnung von Bauwerksteilen einer Buhne

liegt als der normale Niedrigwasserstand, weil die Baudurchführung und Unterhaltung sonst schwierig und kostspielig wird.

Die Bühnenkrone sollte an Stränden mit schwacher Erosion und wenig wechselnder Strandhöhe nur um ein geringes Maß über der angestrebten Strandhöhe liegen; üblich ist bei flachen Bühnen eine Höhe über dem Strand bis etwa 0,75 m und bei Bühnen mit steilen Flanken (z. B. Einwandbühnen) von etwa 0,5 m. Die Höhe der Bühnenwurzel ergibt sich aus dem der Strandneigung folgenden Anstieg in der Bühnenachse und liegt 0,5 m über MTHw bis HHTw. Sie sollte um so höher sein, je weniger das Ufer befestigt ist. An Stränden mit starker Erosion und stark wechselnder Strandhöhe sollte die Bühnenkrone etwa 0,5 m über dem höchsten noch zu schützenden Strandniveau liegen. Die Längsneigung der Bühnenkrone wird der mittleren Ufer- oder Strandneigung angepaßt. Da im Bereich von Strombühnen die Ufer stärker geböscht sind als dort, wo Strandbühnen gebaut werden, weisen die Strombühnen in der Regel steilere Neigung auf als die Strandbühnen. Gebräuchliche Neigungen sind 1:40 bis 1:200.

## 3.1.6 Bühnenquerschnitte

Wenn die Bühnenhöhe so bemessen wird, daß der Seegang auf der Bühnenkrone branden kann, ist der Bühnenquerschnitt – z. B. als Kastenbühne (Abb. F 18) – auch diesen

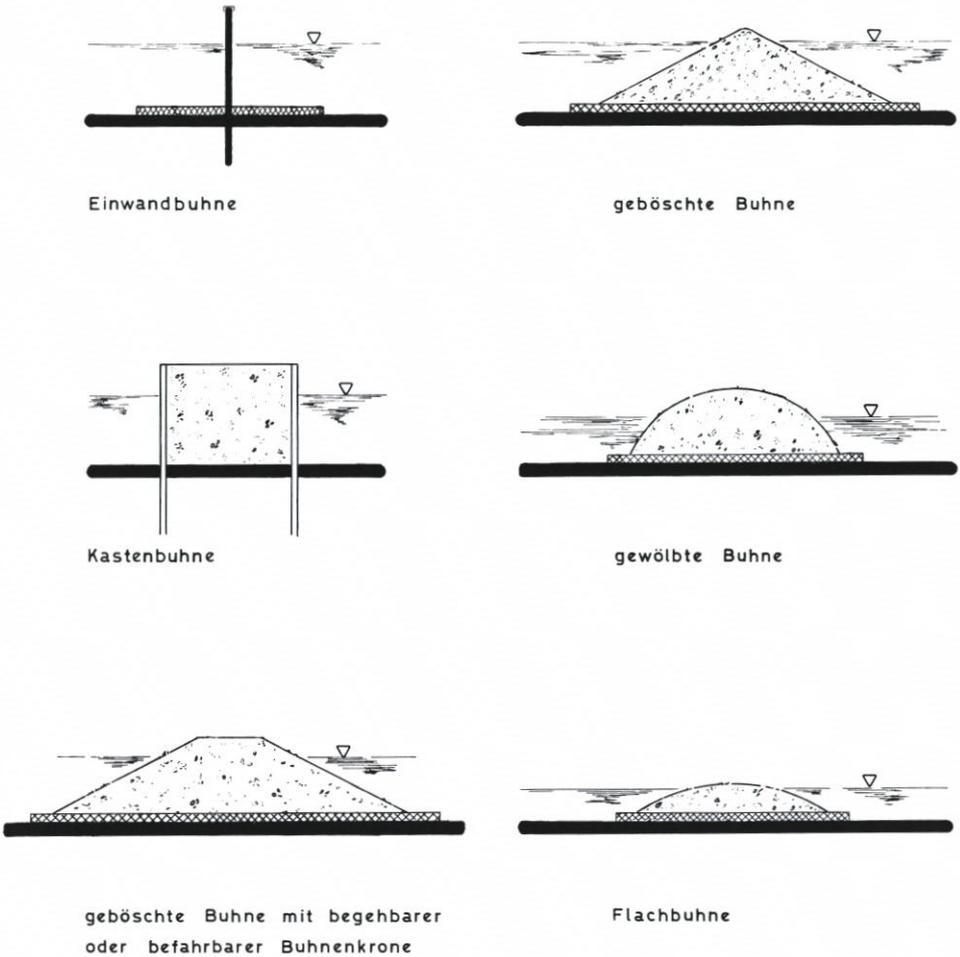


Abb. F 18. Beispiele für Buhnenquerschnitte (Darstellung in unterschiedlichen Maßstäben)

Beanspruchungen entsprechend auszubilden. Der Buhnenkörper, insbesondere die Buhnenkrone, sollte in diesem Fall so breit angelegt werden, daß überschlagende Wellen auf dem festen Bauwerkskörper ausbranden und dort ihre Energie abbauen. Bei schmalen undurchlässigen Buhnenbauwerken – z. B. Einwandbuhnen (Abb. F 18) – können die Wellen das Bauwerk überlaufen oder in das leeseitige Buhnenfeld überschlagen und dort selbst oder durch Anfachen neuer Wellen erodierend wirken. Daraus folgt, daß Buhnenquerschnitte um so breiter sein sollten, je niedriger sie über dem Strandniveau liegen – z. B. geböschte oder gewölbte Buhne (Abb. F 18).

Senkrechte Buhnenflanken von Einwand- oder Kastenbuhnen bewirken eine Wellenreflexion und damit eine wellenabweisende Wirkung. Dadurch kann die Turbulenz im luvseitigen Strandbereich zwar einerseits vermindert, aber andererseits unter Umständen auch erhöht werden. Zu erwarten ist in jedem Fall ein verminderter Sedimenttransport aus dem Buhnenfeld, weil die schräg anlaufende Welle durch die Reflexion eine zum Ufer gerichtete Komponente erhält.

Geböschte Buhnen ohne befahrbare Buhnenkrone sind ungünstig zu unterhalten, soweit der seitliche Strand nicht trocken fällt. Etwaige Fehlstellen sind dann nicht mit Bau- und Transportgerät zu erreichen (s. Abschn. 4.3).

Am flach geböschten, breit ausladenden runden Kopf von Flachbuhnen (Abb. F 18) erfahren die auf sie zulaufenden Wellenfronten eine Richtungsänderung als Folge der Diffraktion auf der Leeseite und der Refraktion am Bauwerk. Beide Einflüsse führen zu einer Beugung der Wellen zur Buhnenachse und bewirken ihre bogenförmige Ausbreitung gegen den Strand. Eine Gruppe von Flachbuhnen bewirkt auf diese Weise eine Gleichrichtung der je nach Windrichtung verschieden einfallenden Wellenfronten, so daß die gebeugten Wellen unter nahezu gleichem Winkel auf den Strand treffen und das Strandprofil durch die Richtung der brandenden Wellen nicht unmittelbar beeinflusst wird. Weiterhin stellen breite Flachbuhnen gewissermaßen einen harten „Strand“ dar, auf dem die gebeugten Wellen branden und einen schräg auf das Ufer gerichteten Brandungsstrom entstehen lassen. Dieser kann die Ausbildung einer ausräumenden Rippströmung weitgehend verhindern.

### 3.1.7 Buhnenbau in Kombination mit anderen Maßnahmen

Wenn Buhnen bei erhöhten Wasserständen bis zur Buhnenwurzel und höher überströmt werden, gerät der Strand oberhalb der Buhnenwurzel (Ufer, Dünenfuß) in Gefahr, erodiert zu werden. Deshalb ergeben Buhnen im allgemeinen erst im Zusammenwirken mit rückwärtigen Längswerken (Deckwerken), in die die Buhnenwurzel einbindet, eine befriedigende Schutzwirkung. Buhnen ohne hinteren Deckwerksanschluß sind selten ausgeführt worden.

Es kann nützlich sein, den Bau von Buhnen mit einer Strandauffüllung (s. Empfehlungen D) zu verbinden, wenn z. B. infolge fehlender oder zu geringer natürlicher Sandzufuhr die Buhnen allein keine ausreichende Wirkung erwarten lassen. Außerdem verhindert die Materialzugabe, daß eine ohnehin geringe Sandzufuhr in den leeseitig der Buhnen gelegenen Bereich noch weiter vermindert wird und Lee-Erosion einsetzt. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, daß in neuerer Zeit vielfach anstelle fester Küstenschutzbauwerke der erforderliche Uferschutz durch Strandauffüllungen hergestellt worden ist, die entsprechend dem Sandverlust am Strand wiederholt werden müssen. Zur Erhöhung ihrer Lebensdauer kann jedoch der Bau von Buhnen empfehlenswert sein, wenn Beobachtungen über eine längere Zeit erweisen, daß der Sandabtrag so stark ist, daß nur durch den Bau von Buhnen eine wirtschaftliche Lösung erreicht werden kann.

### 3.2 Bemessung und konstruktive Gestaltung von Buhnen

Für die Standsicherheit von Buhnen sind die äußeren Beanspruchungen und der Baugrund mit seinen erdstatischen Kenngrößen maßgebend (s. Empfehlungen A und B). Die konstruktive Bemessung von Buhnen ist nicht nur für den Endzustand des Bauwerkes, sondern auch für dessen Bauzustände vorzunehmen. Für Buhnen sind neben den angreifenden Kräften aus Strömung, Wellen, Eisdruck usw. auch Beanspruchungen zu berücksichtigen, die sich aus den zu erwartenden Veränderungen – besonders der Strandhöhen – ergeben. Diese Sandumlagerungen führen an den Längsseiten zu ungleich angreifenden Erddrücken. Nach dem heutigen Stand der Kenntnisse über die äußeren Beanspruchungen ergeben diese zwar die Grundlage für die Bemessung von Buhnen, auf Erfahrungswerte für ihre konstruktive Gestaltung kann jedoch nicht verzichtet werden.

Dem Entwurf und der Bemessung muß eine sorgfältige Auswertung von Strand- und Vorstrandvermessungen vorausgehen, um die tiefste Lage zu ermitteln, nach der die Buhne standsicher zu dimensionieren ist. Von der Zuverlässigkeit der Strandbeobachtungen sowie der Beurteilung der Einzelbeanspruchungen hängt der jeweils einzuführende Sicherheitsfaktor ab. Zu der beobachteten tiefsten Strand- und Vorstrandlage sollte ein Sicherheitszuschlag sowohl für den Standsicherheitsnachweis als auch für die Konstruktionsplanung angesetzt werden. Dieser Zuschlag kann je nach örtlichen Gegebenheiten durchaus 0,5 m und mehr betragen. Der Sicherheitsfaktor wird auch von seebautypischen Erscheinungen, wie Abrostung an Stahlbauteilen, Schwingungserscheinungen an Rammelementen usw., beeinflusst.

Die entscheidenden Kriterien für die Planung von Buhnen sind: Die funktionellen Aufgaben, die Konstruktion, der Bau- und Unterhaltungsaufwand sowie die Umweltverträglichkeit. Die äußeren Einwirkungen auf das Bauwerk (s. Empfehlungen A) ergeben die entscheidenden Kriterien für die Auswahl der Baustoffe (s. Empfehlungen C) für die einzelnen Konstruktionsteile von Buhnen. Die Verwendung von Stahlpundwänden, z. B. bei Einwand- und Kastenbuhnen, sollte dort unterbleiben, wo mit starkem Sandschliff und starker Korrosion zu rechnen ist; zu erwägen ist z. B. der Schutz mit Betonfertigteilen. Bei der Verwendung von Betonbauteilen sind die Zemente und Zuschlagsstoffe, aber auch die Überdeckung der Bewehrung auf die Aggressivität des Seewassers abzustimmen.

Die zu erwartenden Beanspruchungen des Bauwerks, dessen voraussichtliche Lebensdauer sowie die Kosten der verfügbaren Baustoffe stehen in enger Beziehung miteinander. So kann eine an sich zweckmäßige Buhnenbauweise durch die Möglichkeit preisgünstiger Beschaffung eines zunächst nicht vorgesehenen Materials zu einer anderen technischen und kostengünstigeren Lösung führen.

Mehr als ein Jahrhundert Buhnenbau an der deutschen Küste hat zu einer Vielzahl von Buhnenkonstruktionen geführt, die sich aus der Lage, den funktionellen Erfordernissen, den bis dahin gewonnenen Erfahrungen sowie den jeweils verfügbaren Baumaterialien und Bauweisen ergaben. Beispiele für verschiedene Bauweisen zeigen die Abbildungen F 19 bis F 31. Beispiele ausgeführter Konstruktionen an der deutschen Nordseeküste (Abb. F 32 bis F 34) gibt Abschnitt 6 wieder, in dem neben zeichnerischen Darstellungen der Buhnen Angaben über Lage, Beanspruchung, Baugrund, Baujahr und Bauweisen sowie konstruktive und funktionelle Beurteilungen enthalten sind. Die Tabelle F1 enthält eine Zusammenstellung überwiegend verwendeter Baustoffe für die Bauwerksteile des Buhnenkörpers entsprechend dem heutigen Stand der Technik. Die Beispiele und die Zusammenstellung können als Grundlage für die konstruktive Gestaltung von Buhnen an der Nordsee genutzt werden.

### 3.3 Buhnenbauweisen an tidefreien Küsten am Beispiel der Ostsee

Buhnen mit massiven Kasten- oder Dammquerschnitten in Naturstein-, Beton- oder Asphaltbauweise wie an der Nordseeküste sind an tidefreien Küsten, wie z. B. an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern, bislang praktisch kaum zur Anwendung gekommen. Hier wird seit Jahrzehnten der Bau von Holzpfahlbuhnen als einreihige Einwandbuhnen bevorzugt. Die Anordnung von Buhnen in einem Buhnensystem hängt wesentlich von der Länge des zu schützenden Küstenabschnittes ab. Das Buhnensystem besteht im hauptsächlich zu schützenden Bereich, d. h. dort, wo durch die Buhnen die größte Wirkung hinsichtlich Sandakkumulation erreicht werden soll, aus undurchlässigen Standardbuhnen mit dicht an dicht geramten Holzpfählen. Der seewärtige Teil der Buhnen soll jedoch im Falle

Tabelle F1  
Zusammenstellung überwiegend verwendeter Baustoffe für einzelne Bauwerksteile

Bauwerksteil	Konstruktionsart	Baustoff	Materialtypische Kenngrößen (Gewichtsangh. i. Trocken)	Gewinnungs- bzw. Bezugsort	Anlieferung per	Bemerkungen und Hinweise
A. SOHLEN-SICHERUNG A.1 als Unterlage unter Schüttkörpern	Sinkstücke Geflecht aus	Laub- bzw. Nadelholzbusch, auch in Verbindung mit geotextilen Geweben	Buschbunde, i. allg. $\varnothing$ 30 cm, Mattenstärke 0,20 bis 1,20 m	Bundesrepublik Deutschland, Polen, Niederlande usw., nicht regional begrenzt	Schiff, Bahn, Lkw	Bei Kunststoffgeweben Konfektionsgrößen beachten
	Geflecht aus	Holz, überwiegend Bongossiholz	keine	Bundesrepublik Deutschland	Bahn, Lkw	Verwendung nur unter kleineren Schüttkörpern
A.2 als reine Sohlensicherung	Sinkstücke wie unter A.1 beschrieben					
	Kunststoffgittergewebe	Polyamid o. ä. ggf. verstärkt mit Buschbunden	v. Empfehlungen C: „Baustoffe“ Mattengröße bis zu 30 m $\times$ 200 m	Bundesrepublik Deutschland	Bahn, Lkw	Beschwerung mit Schüttsteinen, Geröll o. ä. In spezieller Anfertigung; Beschwerung durch maschinell gefertigte und mit der Matte verbundene Betonsteine $\rightarrow$ Blockmatten
	Betonmatten	Mit kolloidalem Beton gefüllte Hohlmatten aus Polyamidgewebe	Stärken 10 bis 25 cm	Bundesrepublik Deutschland	Schiff, Lkw	
	Durchlässige Mastixschottermatten	Filtergewebe verstärkt mit Bewehrung und verbunden mit 2 Lagen Mastixschotter	Mattengröße bis zu rd. 17 $\times$ 200 m Mattenstärke 12 cm	Herstellung und Verlegung ortsungebunden auf schwimmendem Spezialschiff		Beschwerung der Mattenränder mit Betonblöcken (v. 5.2 hier 2c)
	Dichte Mastixbahnen	Asphaltmastix	1,9-2,0 t/m <sup>3</sup> Dicke d. Bahn 15-30 cm, übl. Bahnbreiten b = 5,0 m	Herstellung und Verlegung ortsungebunden auf schwimmendem Spezialschiff		
B. FUSS-SPUNDWÄNDE	Spund- bzw. Bohlwände	vorzugsweise aus Stahl, seltener aus Holz oder Beton	unterschiedlich	Bundesrepublik Deutschland	Schiff, Bahn, Lkw	Hinsichtlich der Baustoffqualität gelten die entsprechenden DIN-Vorschriften
C. WÄNDE BEI EINWAND-UND KASTENBUHNEN	Bei Kastenbuhnen Spundwände fangedammartig gegenseitig verankert; bei Einwandbuhnen Spundwände mit Holm	Stahl, Beton, Holz	entsprechend der statischen Dimensionierung unterschiedliche Profile	Bundesrepublik Deutschland	Schiff, Bahn, Lkw	Hinsichtlich der Baustoffqualität gelten die entsprechenden DIN-Vorschriften
D. BUHNEN-KERN	Schüttmaterial	Natürliche Schuttsteine, z. B. Granit Diabas Quarzit  Labradorit Piesburger Karbonquarzit  Colith	Schüttgewichte um 1,5 t/m <sup>3</sup> Einzelgewichte 10-50 kg und mehr	Schweden Norwegen Bundesrepublik Deutschland (Harz) Schweden Norwegen Bundesrepublik Deutschland (Raum Osnabrück) Bundesrepublik D. (Wesergeb.)	inländische Erzeugnisse per Schiff, Bahn u. Lkw; ausld. Erzeugnisse überwiegend per Schiff	Einzelne dieser Gesteinsarten sind auch je nach Bearbeitungsart als Geröll, Schotter oder Split erhältlich, Verwendung der kleineren Größen zum Verfüllen der Hohlräume. Beachten, daß es auch frostunbeständiges Material gibt.

Tabelle F1 (Fortsetzung)  
Zusammenstellung überwiegend verwendeter Baustoffe für einzelne Bauwerksteile

Bauwerksteil	Konstruktionsart	Baustoff	Materialtypische Kenngrößen (Gewichtsangb. i. Trockenem)	Gewinnungs- bzw. Bezugsort	Anlieferung per	Bemerkungen und Hinweise
		Ostseefindlinge	bis zu 2 t/Stück	Ostseeraum	Schiff	
		Felsenbruch aus Granit	üblich 0,5-2,5 t/Stück	Schweden	Schiff	
		Spülsand	rd. 1,8 t/m <sup>3</sup> wasserverdichtet	Nähe Baustelle Voraussetzung	Spüler, Schuten	Als Füllmaterial für Kastebuhnen. Hierbei undurchlässige Abdeckung Voraussetzung
		Bitumensand	Bitumen/Sandgemisch (Empfehlung C, Abschnitt 6)	Herstellung zumeist am Einbauort oder in dessen Umgebung		
		Künstliche Schüttsteine, z. B. aus Kupferschlacke Stahlschlacke	rd. 1,9 t/m <sup>3</sup> (bis zu 2,3 t/m <sup>3</sup> ) i. verdicht. Zust. rd. 1,7 t/m <sup>3</sup>	Bundesrepublik Deutschland, z. B. Hamburg		
		Phosphorschlacke		Niederlande		
		Beton	in verschiedenen Formen und Größen, z. B. als Tetrapoden, Betonabbruch o. ä.	Herstellung zumeist am Ort		Hinsichtlich der Baustoffqualität gelten die entsprechenden DIN-Vorschriften unter besonderer Beachtung der Betonzusammensetzung mit Rücksicht auf die Seewasserbeständigkeit
	Gabionen	Mit Steinen, Geröll oder kl. Schüttsteinen gefüllte Drahtkörbe unterschiedl. Abmessungen	entspr. den vorstehend aufgef. Materialien, f. Korb: Maschendraht, Baustahlgewebe o. ä.	Herstellung am Einbauort Anlieferung des Füllmaterials entspr. d. verw. Baustoff.		
E. BUHNEN- ABDECKUNG	Abdeckmaterial wie unter „D“ beschrieben mit Ausnahme von Sand	Natürliche Steine wie unter „D“, dazu Basalt wie unter „D“, Betonsteine sinngemäß wie unter „D“	rd. 1,7 t/m <sup>3</sup>  vergleiche „D“	Bundesrepublik Deutschland ehem. Tschechoslowakei  vergleiche „D“	Schiff, Bahn, Lkw  vergleiche „D“	Gegenüber Kernschüttungen werden die Abdeckungen oft als Packungen oder Pflasterungen ausgeführt. Dies setzt (bei natürlichen Steinen) oft eine besondere Bearbeitung bzw. (bei künstlichen Steinen und Beton) Formgebung voraus. Hierdurch werden in der Abdeckschicht höhere Raumgewichte und eine geschlossenerere Fläche erreicht.
	Verguß des Abdeckmaterials	Beton	herkömmlich	örtliche Herstellung		Nur über MThw üblich, i. ü. heute selten als normaler Unterwasserbeton (Empfehlung C., Abschnitt 5.6)
			kolloidaler Spezialbeton	örtliche Herstellung		(Empfehlung C., Abschnitt 5.7)
		Asphaltmastix	Gemisch aus Bitumen und Mineralstoffen rd. 1,9-2,0 t/m <sup>3</sup>	örtliche Herstellung		Hohlraumfüllung der oberen dm, über und unter Wasser In Ausnahmefällen auch als Abdeckung selbst verwendet
	Fertigteile	Stahlbeton	in Anpassung an die Konstruktion	Herstellung im Fertigteilwerk oder örtlich	vorzugsweise Schiff	

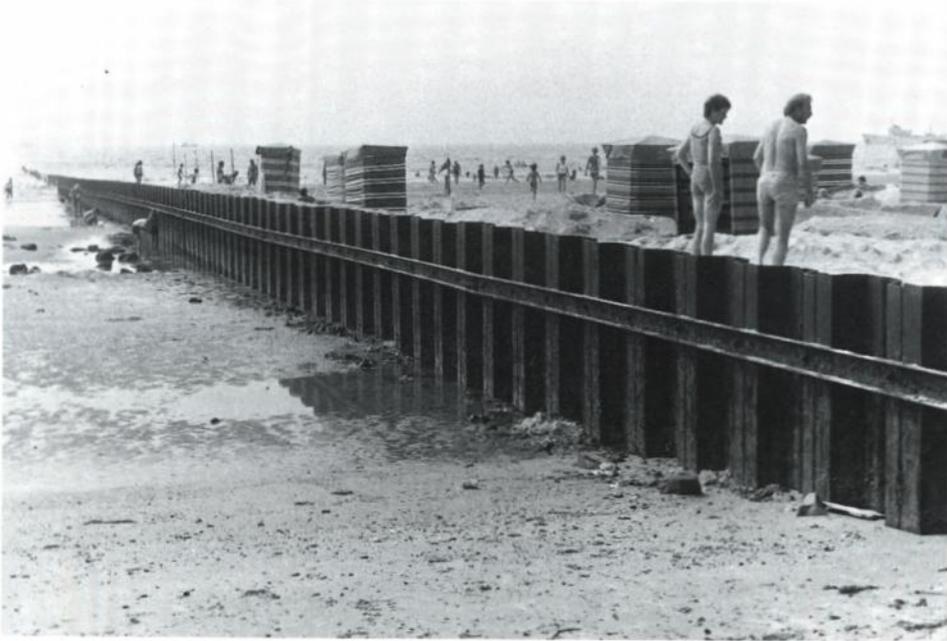


Abb. F 19. Einwandbuhne aus Stahlspundbohlen auf Borkum



Abb. F 20. Einwandbuhne aus Stahlbetonbohlen als Verbindung zwischen Deckwerk und Kastenbuhnenkopf am Nordstrand von Norderney



Abb. F 21. Kopf einer Einwandbühne in Form einer Kastenbühne aus Stahlbetonbohlen mit Basaltplaster am Nordstrand von Norderney



Abb. F 22. Kastenbühne aus Stahlspundbohlen mit Basaltplaster am Nordstrand von Norderney

von langen Standardbuhnen (flache Schorreineigung) auch Pfahlabstände von 5 bis 20 cm (zum Buhnenkopf zunehmend) besitzen. Die Standardbuhnen sind das Zentrum eines Buhnensystems. Die Anschlüsse (Übergang) an die beidseitig bestehenden Küstenabschnitte erfolgen durch eine gestaffelte Durchlässigkeitserweiterung (durchlässige Buhnen mit zunehmenden Abständen zwischen den einzelnen Holzpfählen). Durch diese Bauweise sollen Lee-Erosionen minimiert und zugleich ein allmähliches, d. h. harmonisches Einbinden des Buhnenabschlusses in die unverbauten Abschnitte erreicht werden.

Die maßgebenden Parameter für die Anordnung dieser sog. Standardbuhnen an der Ostsee sind:

- Buhnenlänge
- Buhnenabstand
- Kronenhöhe über Mittelwasser
- Pfahldurchmesser
- Durchlässigkeit

Hinsichtlich Festlegung der Buhnenlänge wird folgende Abhängigkeit berücksichtigt:

- Maßgebende Wellenlänge (vorherrschend bei einer Windstärke Bft 7)
- Neigung des Unterwasserstrandes (von Uferlinie zu Tiefenlinie NN -4 m)

$$\tan \alpha = 1 : m_4$$

- Charakteristik der küstendynamischen Verhältnisse, ausgedrückt durch den „Grad“ der Küstenbelastung (grobe Einteilung)

Beispiele für Buhnenlängen

(bei Wellenlängen von 25 m bis 30 m und mittlerem Belastungsgrad; Abb. F 23, unten)

- flache Neigung (1 : 80 bis 1 : 100)  
Buhnenlänge: 50 m bis 80 m
- steile Neigung (1 : 50 bis 1 : 60)  
Buhnenlänge: 30 m bis 50 m

Empfehlung: Betrag der erwarteten Strandverbreiterung durch Akkumulation dem Wert der Buhnenlänge zuschlagen

Der Buhnenabstand hängt ab von:

- Buhnenlänge
- Durchlässigkeit
- Grad der Küstenbelastung

Beispiele für Buhnenabstand

(bei Wellenlängen von 25 m bis 30 m; Abb. F 23, oben)

- Abstand/Länge von 1 bis 2,5 bei Durchlässigkeit  $\sim 0\%$
- Abstand/Länge von 0,8 bis 1,5 bei Durchlässigkeit = 35%

Empfehlung: Durchlässigkeit  $> 35\%$  nicht bei Standardbuhnen, sondern nur im Übergangsbereich (Einbindung in natürliche Küstenabschnitte) anwenden.

Unterteilung nach Durchlässigkeit

- Dichte einreihige Holzpfahlbuhnen (Durchlässigkeit  $< 20\%$ ) überwiegend bei steilen Neigungen (steiler als 1 : 65), auf ganzer Länge nur minimale Abstände
- Offene einreihige Holzpfahlbuhnen (Durchlässigkeit  $> 20\%$ ) überwiegend bei flachen Neigungen (flacher als 1 : 65), zur Seeseite hin gestaffelte Abstandsvergrößerung (z. B. Pfahlabstände 10 cm, 15 cm und 20 cm); zur Uferlinie hin möglichst geringe Abstände

Kronenhöhe aus funktionellen Gründen:

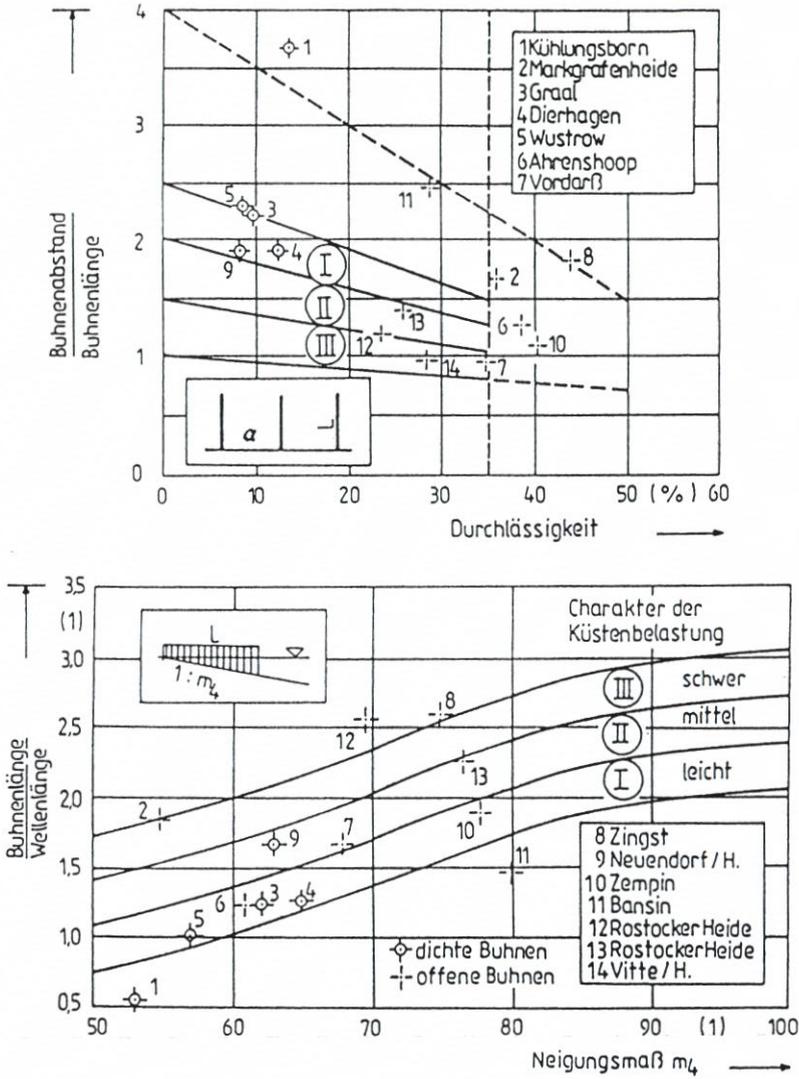


Abb. F23. Empfohlenes Verhältnis von Buhnenlänge, Abstand, Durchlässigkeit, Schorreinigung und Uferbelastung bei einreihigen Holzpfahlbuhnen

0,5 bis 0,6 m über Mittelwasser, auf ganzer Länge gleiche Höhe

Durchmesser der Holzpfähle: im Mittel 25 cm

Alter von Holzpfahlbuhnen: 50 Jahre und mehr

(vgl. Abb. F24 und F25, Buhnensystem vor Hiddensee aus dem Jahre 1936)



Abb. F 24. Bunnensystem Neuendorf/Hiddensee; einreihige, dichte Holzpfahlbunnen; Baujahr 1936  
(Foto: D. WEISS, August 1990)

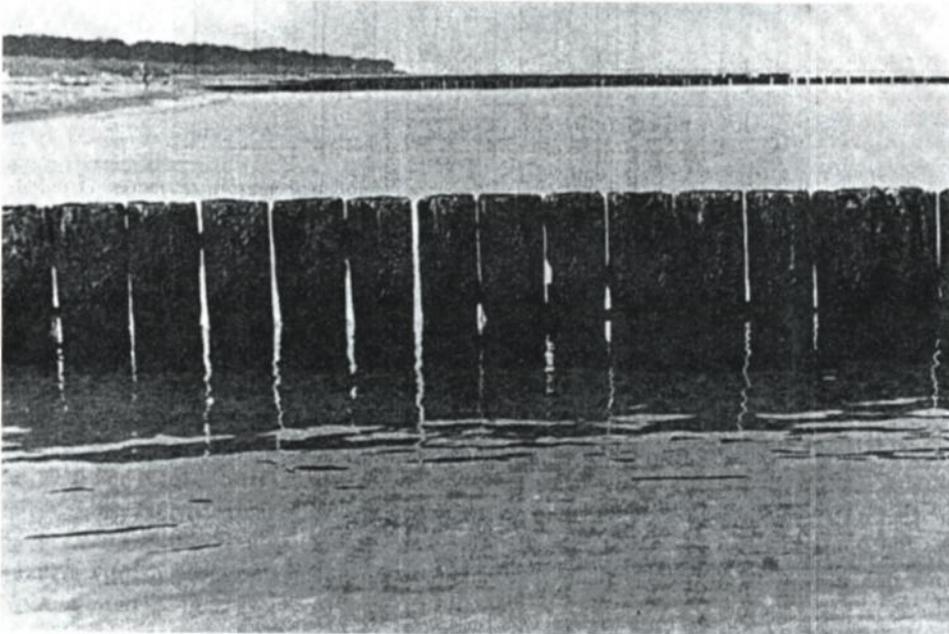


Abb. F 25. Einreihige, dichte Holzpfahlbunnen vor Neuendorf/Hiddensee; mittlere Bunnenhöhe 51 cm  
über MW; mittlere Durchlässigkeit 8,2 % (Foto: D. WEISS, 1990)



Abb. F 26. Kastenbühne aus Stahlbetonbohlen mit einer Abdeckung aus Betonplatten am Südstrand von Borkum

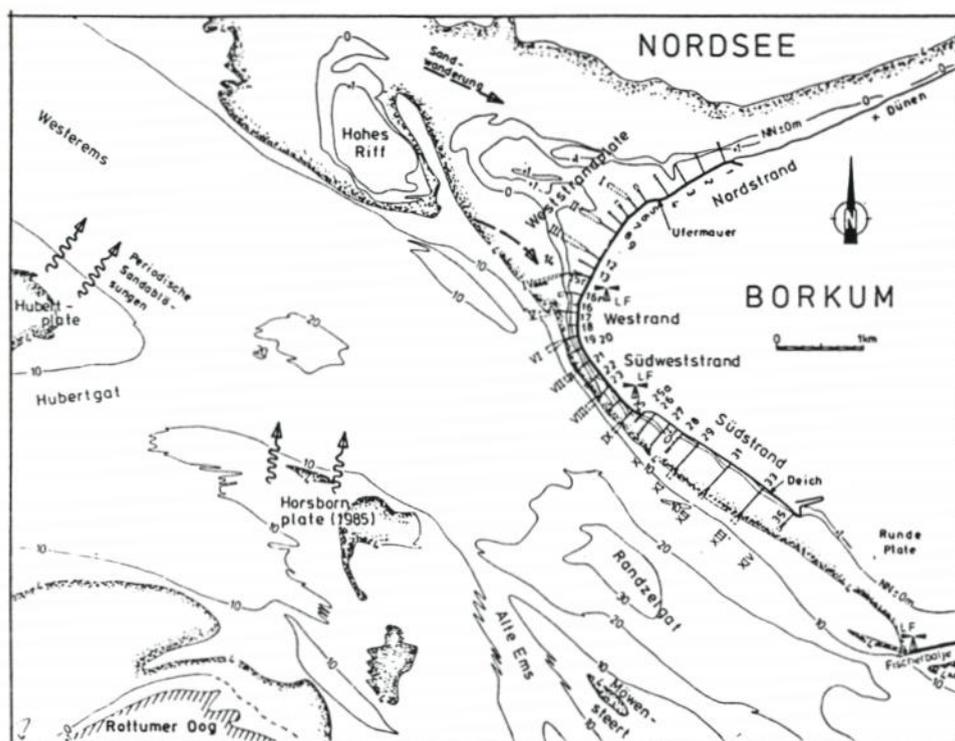


Abb. F27. Das Buhnensystem der Insel Borkum im Mündungsgebiet der Außenems

#### 4. Bauausführung und Unterhaltung

##### 4.1 Allgemeines

Die Konstruktion von Buhnen wird bestimmt zum einen durch die ihnen zugedachte Funktion und zum anderen durch die grundsätzliche Forderung nach einer wirtschaftlichen und umweltverträglichen Bauweise. Hierbei sind Örtlichkeit, Lieferpreise der Baustoffe, Kosten der Baugeräte und der Arbeitskräfte sowie die Abschätzung des Unterhaltungsaufwandes für die zu erwartende Lebensdauer des Bauwerkes wesentliche Einflußgrößen.

Um das Baurisiko so gering wie möglich zu halten, ist es üblich, Buhnenbauten in der witterungsmäßig günstigsten Jahreszeit auszuführen. Da es sich dabei fast immer um öffentliche Bauvorhaben handelt, bei denen sich oftmals die Bereitstellung der Geldmittel verzögert, ist eine zeitgerechte Bauabwicklung nicht immer möglich. Dadurch können Bauweise und Kosten nachteilig beeinflusst werden.

##### 4.2 Gerätesystem und Bauweisen

Die wichtigsten Bauweisen und Gerätesysteme sind in der Tabelle F2 zusammengestellt, einige spezielle wasserbauliche Geräte nachstehend beschrieben.

Tabelle F 2  
Übersicht über die wichtigsten Einbauarten und die verwendeten Gerätesysteme

Verwendeter Baustoff	Einbau im Trockenen	Einbau im Nassen
1. Buschmatten	Herstellung und Einbau an Ort und Stelle oder in größtmöglicher Nähe der Einbaustelle	a) Herstellung auf stationärer Senkbank bzw. auf nahegelegendem, trockenfallendem Strandabschnitt. Schleppen zum Einbauort und Absenkung durch Beschweren mit Steinmaterial von Hand, mit Schwimmgreifern oder Steinstürzern b) Herstellung auf schwimmender Senkbank an geschützter Stelle oder am Einbauort, sonst wie a)
2. Matten aus geotextilen Geweben und Vliesstoffen	Verlegen der Matten je nach Gewicht von Hand oder mit leichtem Greifer bei Niedrigwasser	Einschwimmen des zuvor z. B. durch Faschinenroste ausgesteiften Mattenstücks und Absenken wie 1a), wobei wegen der Weichheit des Elementes die Strömung am Einbauort besonders zu beachten ist
3. Spundwände und Pfahlreihen aus Holz-, Stahl- und Beton-elementen	Rammen und Rüttler verschiedener Größen oder Spüllanzen	Rammen, Rüttler oder Spüllanzen auf Gerüst, Hubinsel oder Schiff
4. Schüttsteine, Geröll u. ä.	Baggergeräte mit Polypgreifer (z. B. für Schüttsteine) oder Schalengreifer (z. B. für Geröll) oder Kräne zum Versetzen von Formsteinen (z. B. Tetrapoden, Multipoden, Quader)	Schwimmende Baggergeräte mit Polyp- oder Schalengreifer und Klappschuten oder Steinstürzern
5. Asphaltverguß	Eimer, Kübel, Gießrinnen, Bagger-schaufeln, Mastixpumpen	Kübel, Baggerschaufeln, Mastixpumpen und Hosenrohre vom Schiff
6. Spezialmörtel als Fugenverguß für geschlossenes Deckwerk und Verklammerung von Schüttsteinen für offenes Deckwerk	Zwei Typen (Arten) Vergußmörtel mit großem Widerstand gegen Erosion sind zu unterscheiden: Typ A ist ein dichter Zementmörtel, der in Kolloidmühlen durch Hochgeschwindigkeits-Scheraktion aufbereitet wird; er wird auch Kolloidalmörtel genannt. Typ B ist ein dichter Zementmörtel, der durch Zugabe von Zusatzmitteln die geforderten Eigenschaften erreicht.  Aufbereitung an Land, Einbau durch Pumpen über Hochdruckschläuche von Hand oder maschinell	Aufbereitung an Land oder auf Spezialschiffen, Einbau über Hochdruckschläuche von Hand durch Taucher oder mit elektronisch über die Förderleistung gesteuertem Einbaugerät
7. Boden evtl. zwischen Spundwänden, Sinkstücken usw.	Land- und Schwimmbagger, Einspülen von wasserseitig gefördertem Material	Schwimmbagger und Klappschuten, Einspülen von wasserseitig gefördertem Material
8. Bitumensand	Lkw, Kipper und Bagger	Klappschuten, Hosenrohre, Förderbänder, Silos mit Bodenklappen, Lkw. – Bei Einbau in größeren Tiefen Einwickeln in engmaschigem Drahtgeflecht

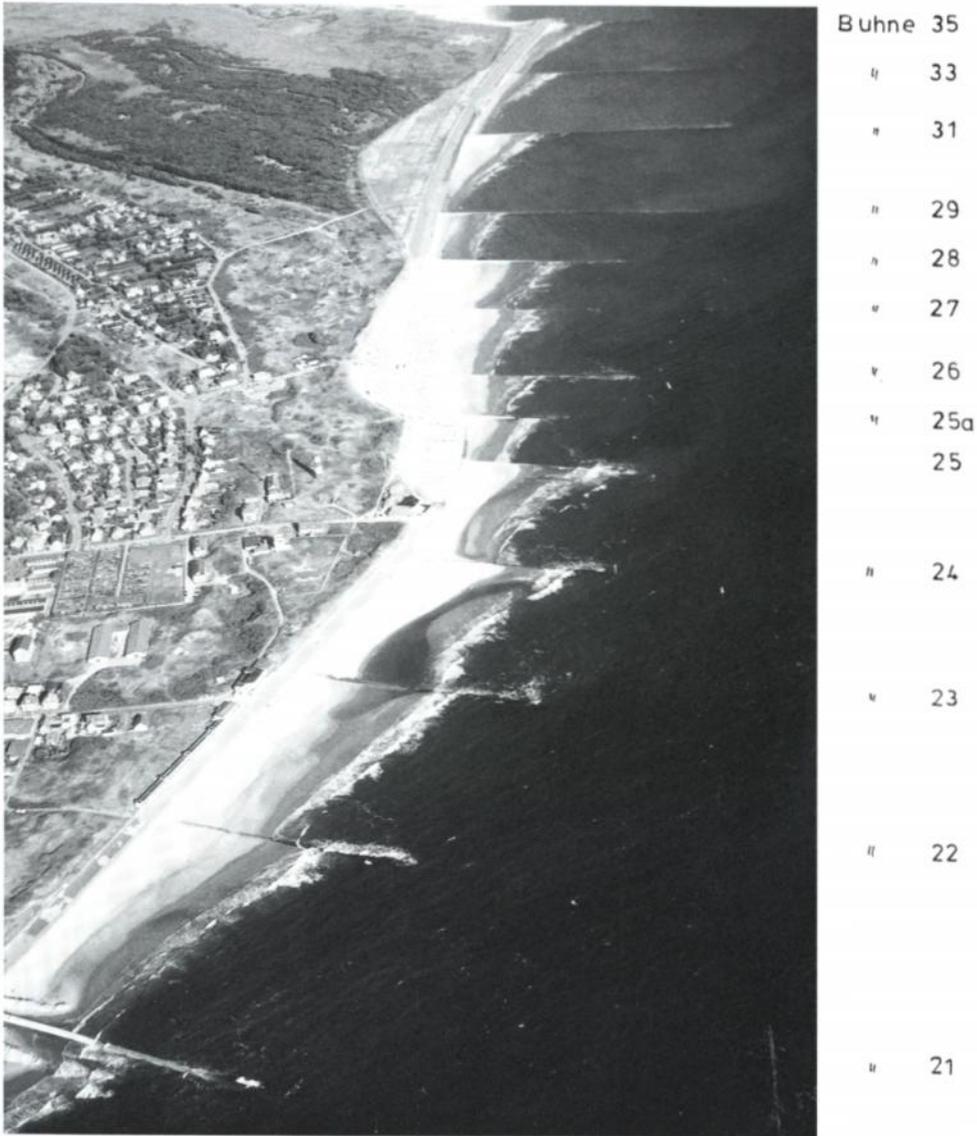


Abb. F28. Das Bühnensystem von Bühne 21 bis Bühne 35 [2, Luftbild/Kolde/Juist]

Die stationäre Senkbank ist eine etwa bis 10:1 oder flacher geneigte befestigte Ebene, deren Größe sich nach den Sinkstückabmessungen richtet. Die Senkbank wird an geschützter Stelle des Ufers in Baustellennähe angelegt. Diverse Einrichtungen dienen je nach Ausführungsart den einzelnen Herstellungsphasen und dem Zuwasserlassen, dem sogenannten Abziehen oder Abschieben des Sinkstückes. Den Absenkvorgang gibt die Abbildung F 36 wieder. Andere Bauweisen einer Senkbank bestehen z. B. aus einer wasserseitigen Spundwand mit Hinterfüllung und darüberliegendem Balkenrost oder auch Balkenrost auf Pfahlkonstruktion. Bei kleineren Sinkstücken, die in einer Tide gefertigt werden können, ist ihre Herstel-

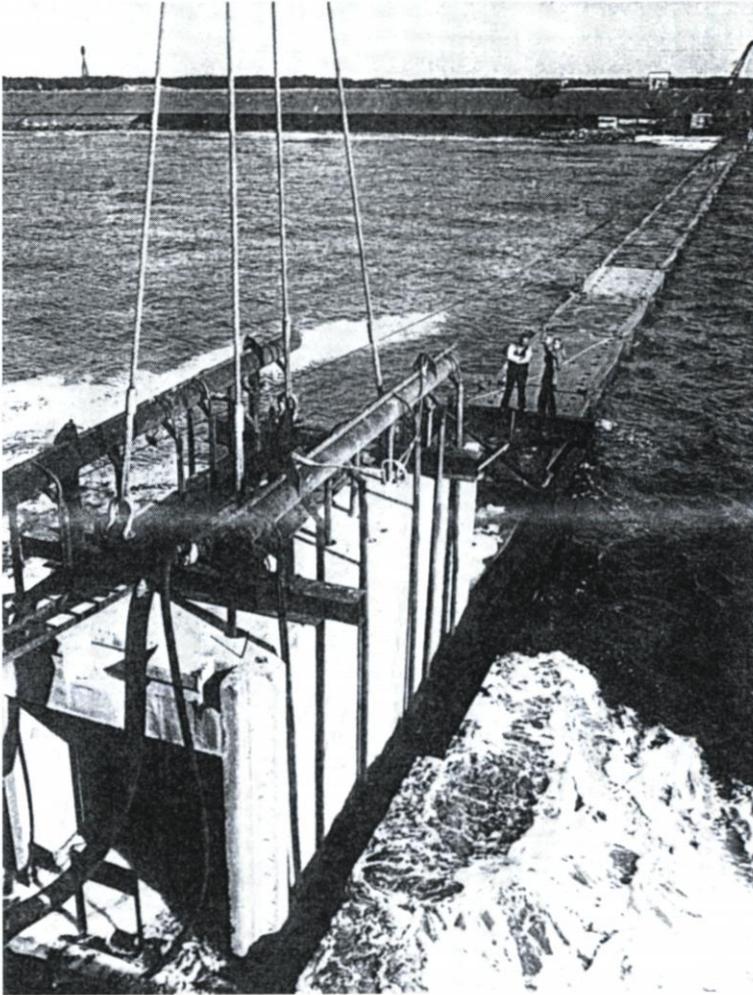


Abb. F 29. Bau einer Kastenbühne aus Stahlbetonfertigteilen am Südstrand von Borkum

lung auf dem Strand üblich; sie schwimmen dann bei auflaufendem Wasser auf und werden zum Einbauort transportiert.

Die schwimmende Senkbank ist eine geneigte Ebene, die auf Pontons, Schuten oder anderen Auftriebskörpern befestigt ist. Ihre Ausrüstung gleicht der stationärer Senkbänke. Der Vorteil ist, daß die Sinkstücke in unmittelbarer Nähe oder direkt über dem Einbauort gefertigt werden können. Außerdem ist die Herstellung beliebig langer Sinkstücke durch wiederholtes Verziehen der schwimmenden Senkbank möglich. Eine Voraussetzung ist jedoch ruhiges Wasser am Herstellungs- und Einbauort.

Der Steinstürzer ist ein schwimmendes, meist selbstfahrendes Gerät, auf dessen Deck Schubschilder montiert sind. Hierauf liegt gleichmäßig verteilt das Steinmaterial. Über dem Einbauort wird durch Verfahren des Gerätes ein gleichmäßiger Abwurf des Materials mit Hilfe der Schubschilder möglich (Abb. F 36). Ein dem Steinstürzer ähnliches Gerät besteht aus einem Schwimmkörper mit aufgesetzten Kästen, die gekippt werden und nach Öffnen der





Abb. F 32. Einwandbuhne aus Stahlspundbohlen, die im oberen Bereich durch Korrosion und Sandschliff starke Schäden aufweist

Seitenwand ihre Ladung seitlich über Bord entleeren. Der Vorteil ist, daß durch Entleerung einzelner Kästen kleine Teilladungen abgeworfen werden können, wodurch es besonders für Unterhaltungsarbeiten geeignet ist.

Aus einer Klappschute – geschleppt oder selbstfahrend – kann der Ladeinhalt durch zu öffnende Bodenklappen über der Einbaustelle abgeworfen werden. Wasserdichte Luftkammern halten die Schute schwimmfähig.

Zum Einbau von an Land hergestellten, mit Betonsteinen verbundenen Kunststoffmatten – 30 m × 200 m – dienen ebenfalls *Großpontons*. Die Abrolltrommeln schwimmen beim Verlegevorgang, der im Prinzip dem vorher beschriebenen entspricht.

Auf die beim Einbau unter Wasser in größeren Wassertiefen entstehenden Vermessungsprobleme sei hier nur am Rande verwiesen. Verwendet werden für Einbau und Ortung zunehmend elektronische Ortungsgeräte.

#### 4.3 Unterhaltung von Buhnen

Bereits bei der Entwurfsgestaltung ist das Erfordernis einer notwendigen künftigen Unterhaltung zu berücksichtigen. Da jedes Seebauwerk dem natürlichen Kräftespiel im jeweiligen Uferstrandabschnitt ausgesetzt ist, ist mit der Planung des Bauwerkes bereits die Voraussetzung für seine ständige Unterhaltung gegeben.

Der Unterhaltungsaufwand hängt in erster Linie von der gewählten Konstruktion, den Baustoffen und den äußeren Einwirkungen (s. Empfehlungen A) sowie der Lebensdauer des

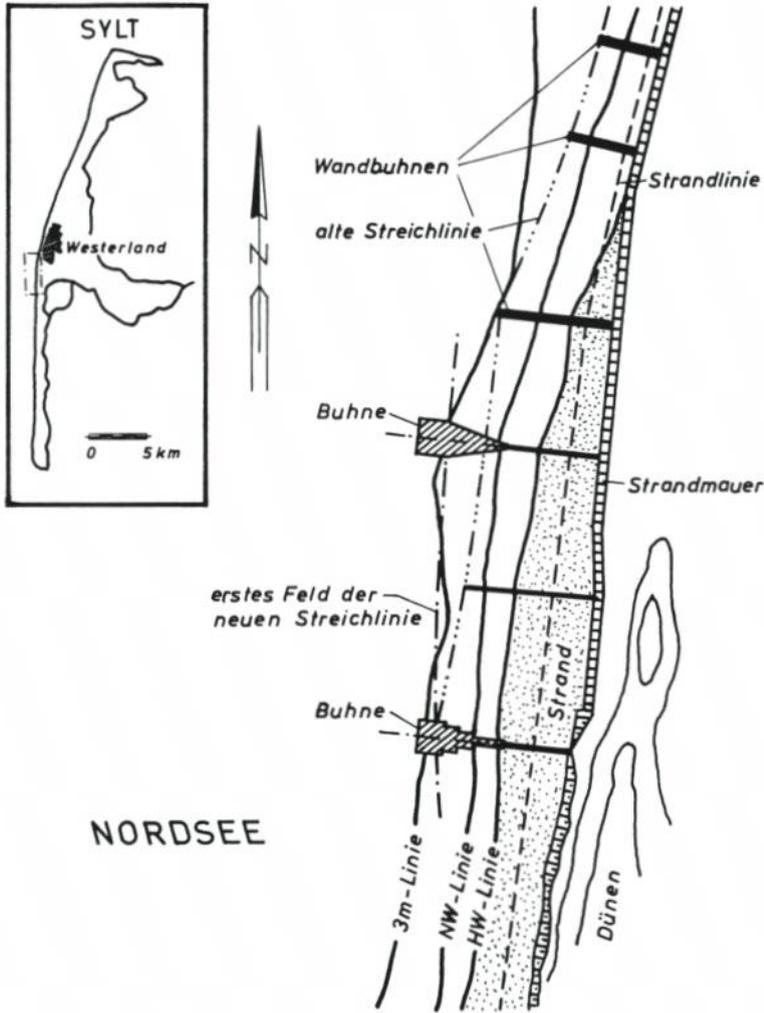


Abb. F 33. Buhnen vor Westerland auf Sylt

Bauwerkes ab. Beispielsweise muß bei einer Einwandbuhne aus Stahl bedacht werden, daß die mechanische Beanspruchung und der Abtrag durch Sandschliff und Eis erheblich sein können. Außerdem muß von vornherein mit einer stetigen Abrostung gerechnet werden. Gegen diese Einwirkung gibt es praktisch keine wirksame Schutzmaßnahme, sondern hier stellt sich die Frage nach der gewünschten Lebensdauer.

Bauweisen aus Steinschüttungen weisen – je nach den Stückgewichten – Abtragungerscheinungen und Umlagerungen durch Wellen, Strömung, Eisangriff usw. auf. An manchen Stränden läßt sich ein Zusammenhalten der Schüttung durch Seepockenbewuchs beobachten. Vor allem an Buhnenköpfen ist mit Sackungen durch Veränderungen der Sohle zu rechnen. Die Unterhaltung besteht im Normalfall in dem Ersatz der Materialverluste. Sind die Sackungen besonders stark, kann ein neuer Aufbau des Steinkörpers auf neu verlegten Sinkstücken erforderlich werden. Besteht die Deckschicht des Steinkörpers aus schweren



Abb. F 34. Buhne aus Tetrapoden vor Hörnum auf Sylt



Abb. F 35. Buhne aus Tetrapoden vor Hörnum auf Sylt

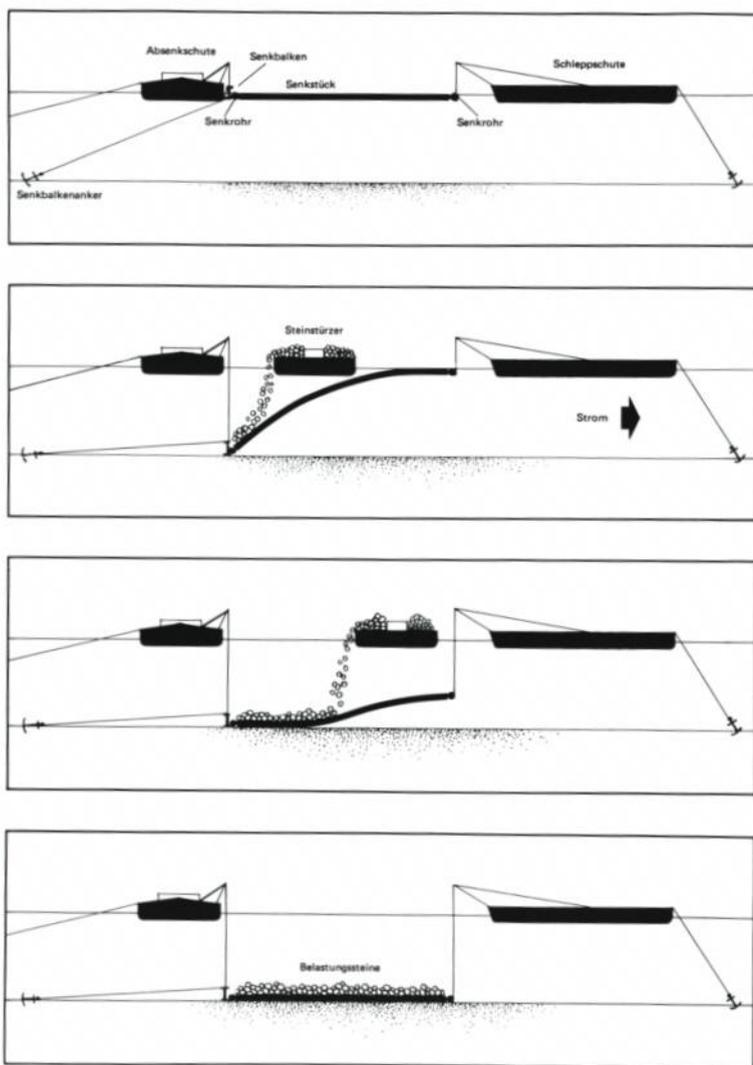


Abb. F36. Einbau von Sinkstücken (nach VON ESSEN, 1978)

Steinen bis zum gebrochenen Fels oder Betonfertigteilen, so hat dies zwar den Vorteil eines großen Widerstandes gegen mechanische Angriffe, jedoch den Nachteil, daß bei Versackungen der Einsatz schwerer Geräte erforderlich wird, um die Deckelemente abzuheben, zu unterfüllen und neu zu setzen.

Für die Unterhaltung einer Buhne ist ihre Befahrbarkeit mit Baugeräten von großem Wert. Geböschte Buhnen ohne befahrbare Krone und Einwandbuhnen sind daher ungünstig zu unterhalten, besonders soweit der seitliche Strand während der Tidezeit nicht trocken fällt.

Mit Beton oder Asphalt vergossene Schüttsteinkonstruktionen sind widerstandsfähiger gegen äußere Einwirkungen als unvergossene Schüttungen. Die Unterhaltung – vor allem bei Nachsackungen – ist schwierig, da nachgeschüttete Steine einen erneuten Verguß – oft für kleine Steinmengen – erfordern und der Verbund der neu eingebrachten mit der alten

Vergußmasse nur schwer zu erreichen ist. Daher ist bei Neubauten oder Grundinstandsetzungen von Buhnen besonders darauf zu achten, daß der Sandkern gut verdichtet und durch seitliche Fufseinfassungen und Abdeckung mit dauerhaft funktionsfähigem geotextilen Filter wirksam gegen Ausspülungen umschlossen wird. Dann können Sackungen nahezu ausgeschlossen werden. Sollten trotzdem Sackungen oder Setzungen eintreten, so neigen betonvergossene Deckschichten infolge ihrer Plattenwirkung zum Überspannen von Hohlräumen, bis die Platte bei größeren Ausspülungen plötzlich einbricht und ein großer Schaden sichtbar wird. Der plastisch verformbare Asphaltverguß paßt sich den Sackstellen besser an. Einzelheiten des Vergusses mit Beton bzw. Asphalt können aus den Empf. E, Abschn. 3.1.3 bzw. 3.2.3 entnommen werden.

Der Unterhaltungsaufwand kann gering gehalten werden durch

- regelmäßige Beobachtung des Bauwerkes und des Strandabschnittes und Auswertung der Beobachtungsergebnisse in Verbindung mit Erfolgskontrollen über die Wirkung des Bauwerkes,
- Ergründung der Ursachen für aufgetretene Mängel und Schadensbeseitigung ggf. mit Behebung der eigentlichen Schadensursache, wie z. B. Fehlstelle im Filter oder dgl.

Die unverzügliche Beseitigung erkannter Schäden hält den Aufwand für die Unterhaltung von Seebauwerken gering. Treten erst Folgeschäden auf, wird der Aufwand unverhältnismäßig hoch.

Über Bau, Kontrolle sowie Unterhaltung sollte für jede Buhne ein Bestandsbuch geführt werden, damit die Entwicklung von Schäden, ihre Beseitigung und die finanziellen Aufwendungen systematisch verfolgt werden können. Daraus können Konsequenzen für die weitere Unterhaltung oder auch für einen Umbau oder Ausbau oder gar für eine Beseitigung oder einen Neubau gezogen werden.

## 5. Kontrolle von Buhnen und Strandzustand

Die Buhnen sind insbesondere Tide- und Brandungsströmungen sowie Seegangs- und Brandungskräften ausgesetzt, die ihren Bestand gefährden. Auch Eisbildung und Eisgang können Bauwerksschäden verursachen. Ebenso sind Schäden durch menschliche Einwirkungen bekannt, z. B. durch Entfernen oder Umpacken von Steinen. Witterungseinflüsse und ständiger Wasserwechsel lassen weniger geeignete Baustoffe verwittern. Vor allem aber kann durch Höhenänderungen des Strandes die Standsicherheit von Buhnen gefährdet werden.

Den stärksten Beanspruchungen sind Buhnen in den Herbst- und Wintermonaten durch Sturmfluten und Frost ausgesetzt. Eingetretene Schadstellen können sich sehr schnell vergrößern. Sie müssen daher möglichst bald nach ihrer Entstehung erkannt und beseitigt werden. Erforderlich ist deshalb eine Kontrolle nach jeder Sturm- und Eislage. Wegen der rauen Seegangsverhältnisse ist das im allgemeinen nur im Überwasserbereich möglich. Der Unterwasserbereich kann erst nach Beginn ruhiger Wetterlagen untersucht werden. Das muß jährlich so zeitig im Frühling geschehen, daß festgestellte Schäden bis zum Herbst beseitigt werden können.

Die oberhalb des Tideniedrigwassers gelegenen Bauwerksteile können durch Besichtigung überprüft werden. Das gleiche gilt für tiefergelegene Teile bei außergewöhnlich niedrigen Wasserständen, wie sie z. B. an der Nordseeküste bei Ostwindlagen auftreten. Diese gilt es zu nutzen, weil eine Überprüfung unter Wasser schwierig und ungenau ist.

Die Kontrolle kann eine einfache Besichtigung und Abschätzung der Schäden sein. Eine gute Hilfe leisten dabei Fotoaufnahmen für die Dokumentation. Diese erhält eine erhöhte

Aussagekraft, wenn die Aufnahmen regelmäßig (z. B. jährlich oder halbjährlich) von jeweils gleichen, fest vermarkten Standpunkten aus mit gleichem Blickwinkel gemacht werden.

Die ständig unter Wasser liegenden Bauwerksteile müssen durch Bauwerkspeilungen kontrolliert werden. Im Bereich des Bühnenkopfes wird vielfach eine sogenannte Sternpeilung um einen auf den Bühnenkopf fixierten Punkt durchgeführt.

Wichtig für die Kontrolle der Wirkung und für die Standsicherheit von Bühnen sind die Höhenänderungen des Strandes und Vorstrandes. Durch Sandabtrag in den Bühnenfeldern bis unter die die Standsicherheit der Fußeinfassung gewährleistende Geländehöhe verlieren die Bühnen ihren seitlichen Halt. Das kann Seiten- und Kopfsicherungen der Bühnen oder auch Strandauffüllungen erforderlich machen. Um die Strandentwicklung zu verfolgen, sind deshalb regelmäßig zu wiederholende Strandbeobachtungen angebracht.

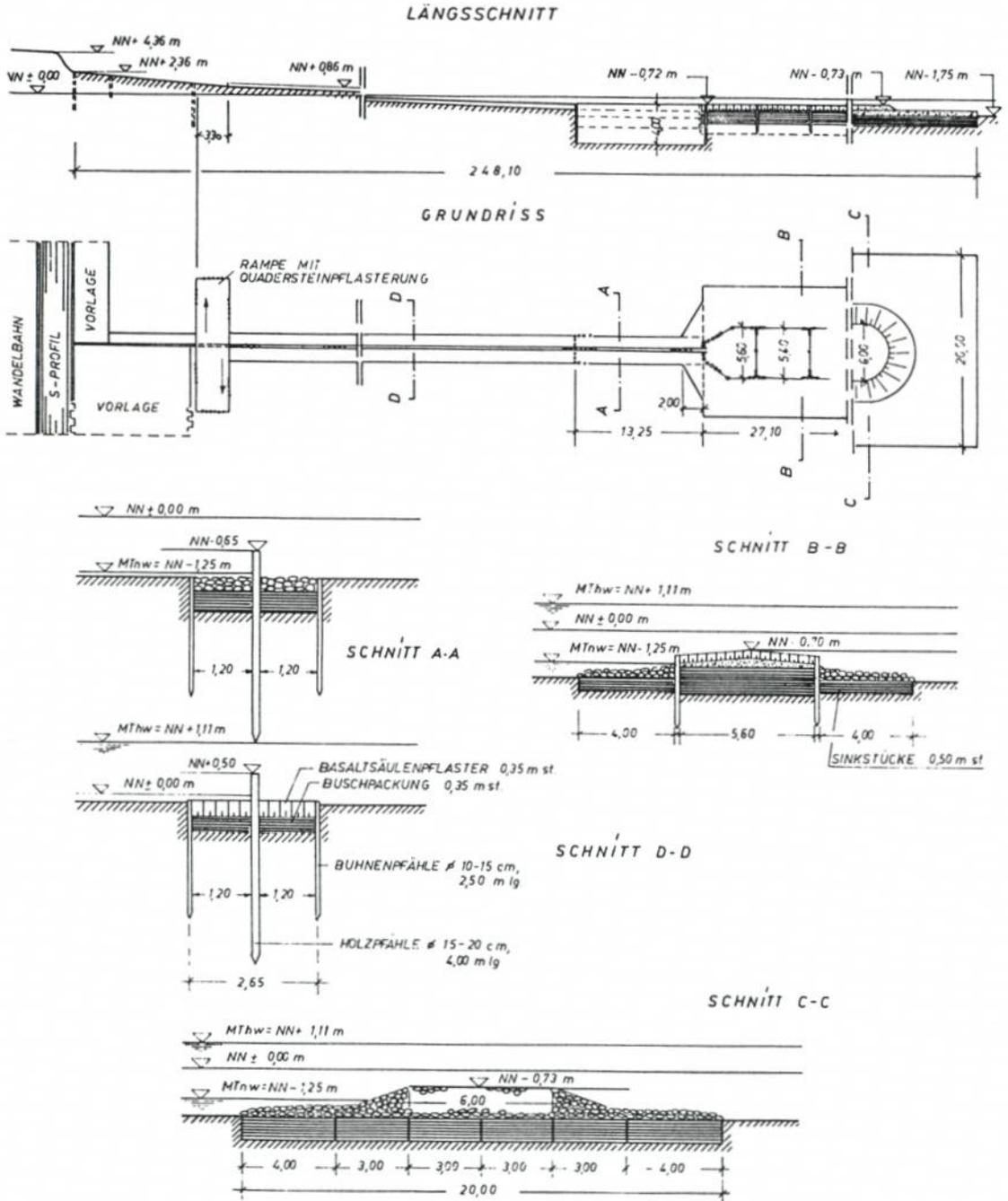
Quantitative Angaben über Strandveränderungen lassen sich am besten durch Nivellements und Lotungen in Strandprofilen in 50 m bis 200 m Abstand oder durch tachymetrische Aufnahmen gewinnen, die in Höhenplänen aufgetragen und verglichen werden können. Qualitativ lassen sich Höhenänderungen des Strandes auch mittels Luftbildern erkennen, die bei niedrigen Tidewasserständen aufgenommen worden sind und deren Aufnahmezeitpunkt und Tidewasserstand bekannt sind. Derartige Luftbilder lassen meistens auch die Verlagerung von Sandplaten erkennen, so daß die wahrscheinliche Strandentwicklung beurteilt werden kann.

## 6. Beispiele ausgeführter Bühnenkonstruktionen

- Beispiel 1: Einwandbühne aus Holzpfehlern
- Beispiel 2: Einwandbühne aus Stahlspundbohlen
- Beispiel 3: Geböschte Bühne in Steinbauweise mit Mittelspundwand
- Beispiel 4: Geböschte Bühne in Steinbauweise mit breiter Krone
- Beispiel 5: Gewölbte Bühne in Steinbauweise mit seitlichen Bermen
- Beispiel 6: Gewölbte Bühne in Steinbauweise mit seitlich dichter Einfassung
- Beispiel 7: Bühne in Steinbauweise mit Asphaltverguß (Flunderbühne)
- Beispiel 8: Kastenbühne mit Holzspundwänden
- Beispiel 9: Kastenbühne mit Stahlspundbohlen
- Beispiel 10: Kastenbühne mit Stahlbetonbohlen
- Beispiel 11: Kastenbühne mit Stahlbetonfertigteilen
- Beispiel 12: Bühne aus Betonformkörpern
- Beispiel 13: Unterwasserbühne als Sinkstückkörper
- Beispiel 14: Einreihige Holzpfehlbühne (Ostseeküste)
- Beispiel 15: Einreihige Holzpfehlbühne (Ostseeküste)

## Beispiel 1:

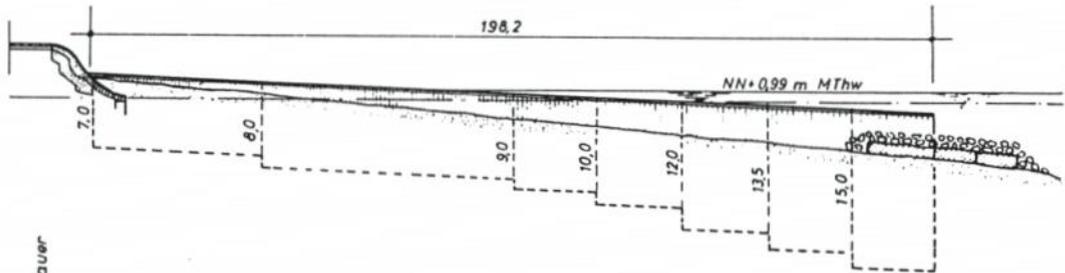
- Buhnentyp:** Einwandbühne aus Holzpählen
- Lage:** Bühne L1 am Nordweststrand der Insel Norderney (Abb. F 30)
- Beanspruchung:** Seegang, Brandungs- und Tideströmung
- Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)
- Baujahr:** 1917, verlängert 1953
- Bauweise:** Einwandige Holzpählreihe ohne Holm mit seitlicher, waagerechter Berme aus Schüttsteinen oder Basaltpflaster auf Buschpackung. Die Bühnenwurzel schließt an ein Deckwerk (Norderneyer S-Profil) an. Die Kopfsicherung besteht aus einer bis zu 20 m breiten Steinschüttung auf Sinkstücken.
- Beurteilung:**
- a) **konstruktiv:** Die Holzpfähle wurden erst 1953 ausgewechselt; sie hielten sich damit relativ lange. Der Bühnenkopf mußte 1953 durch eine 29 m lange Sinkstückvorlage gesichert werden. Der übrige Bereich der Bühne war standfest.
  - b) **funktionell:** Die Bühne L1 ist vor allem Seegang und Brandungsströmungen ausgesetzt. Ihre Aufgabe sollte es sein, den weiteren Strandabbruch zu verhindern. Im Zusammenwirken mit den gleichzeitig gebauten Nachbarbühnen J1 und K1 sowie den anschließenden, bereits vorher und noch später gebauten Bühnen ist es weitgehend gelungen, den Sandabtrag zu verlangsamen, doch wurden seit 1951/52 7 Strandaufspülungen durchgeführt, die auch den Strand im Bereich der Bühne L1 verbessert haben.



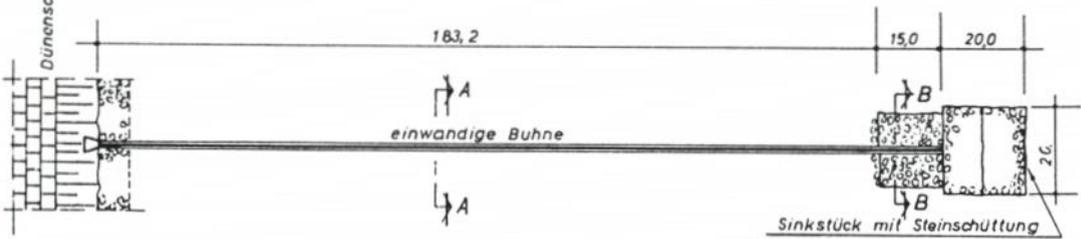
## Beispiel 2:

- Buhentyp:** Einwandbühne aus Stahlspundbohlen
- Lage:** Bühne 17 am Westkopf der Insel Borkum (Abb. F 27)
- Beanspruchung:** Seegang, Tide- und Brandungsströmung
- Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)
- Baujahr:** 1937
- Bauweise:** Einreihige Stahlspundwand mit beiderseitigem Holm. Die Bühnenwurzel schließt an ein Deckwerk (S-Profil) an. Der Bühnenkopf ist durch eine Unterwasserbühne aus Schüttsteinen auf Sinkstücken gesichert.
- Beurteilung:**
- a) **konstruktiv:** Nachteilig sind Korrosion und beidseitiger Sand-schliff an den Stahlspundbohlen.
  - b) **funktionell:** Die Bühne hält Längsströmungen vom Inselsockel fern und behindert die Ausbildung von Brandungsströmungen um so mehr, je schräger die Brandungswellen anlaufen. Die Brandung steilt sich vor der senkrechten Wand auf. Bei höheren Wasserständen schlagen Wellenköpfe über die Bühne und fachen auf der Leeseite neue Wellen und Strömungen an.

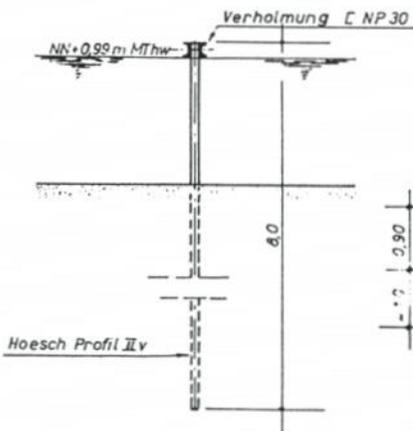
Längsschnitt



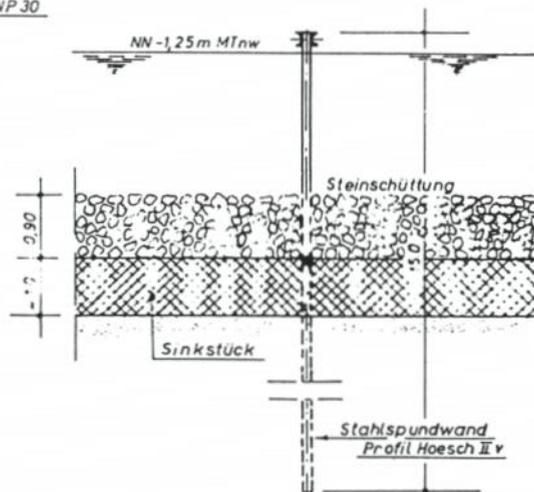
Draufsicht



Querschnitt A-A



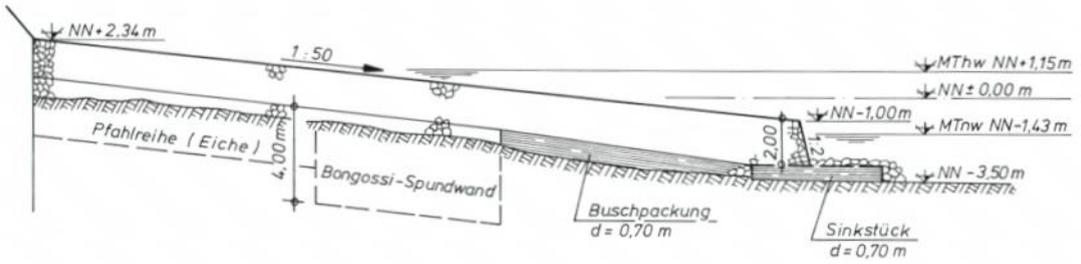
Querschnitt B-B



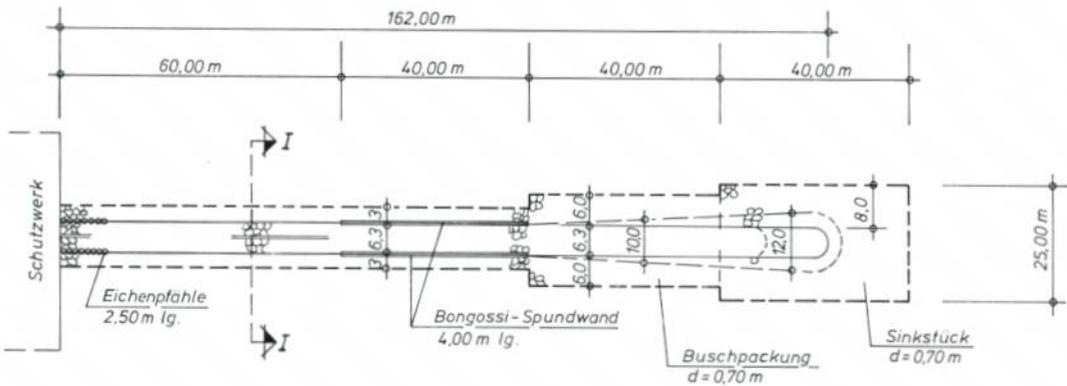
### Beispiel 3:

- Buhnentyp:** Geböschte Buhne in Steinbauweise mit Mittelspundwand
- Lage:** Buhne A im Westen der Insel Spiekeroog
- Beanspruchung:** Seegang, Tide- und Brandungsströmung
- Baugrund:** Feinsand
- Baujahr:** 1873, 1961
- Bauweise:** Die Buhne wurde 1873 als flachgewölbte Buhne mit seitlichen Pfahleinfassungen gebaut. 1961 wurde sie erhöht und erhielt das Profil einer geböschten Buhne. Als Einfassung an beiden Seiten des Bühnenkörpers wurden landseitig Eichen-Pfahlreihen,  $\varnothing$  18–20 cm, im Mittelabschnitt Bongossi-Spundwände, jeweils mit Fußvorlage aus Buschpackung mit Steinlage, und am Kopfende unterhalb MTnw lediglich eine Buschpackung mit Steinlage angeordnet. Die Deckschicht besteht aus Steinsatz mit Asphaltverguß.
- Beurteilung:** Die erhöhte Buhne hat den Sandlängstransport verzögert und führt in Zeiten mit stärkerem Litoraltransport zu deutlicher Aufhöhung des Strandes, vor allem an der Luvseite (Nordseite). Die vergossene Deckschicht hat sich bewährt, wenngleich in den Fugen an der Oberfläche vom Verguß nur noch wenig zu sehen ist. Vermutlich ist er aufgrund zu weicher Einstellung in tiefere Schichten gesickert.
- In Zeiten mit niedriger Strandlage kann die offene Pfahlreihe im Wurzelbereich zu Sandverlusten führen.
- Ohne befahrbare Krone ist die geböschte Buhne mit Bau- und Transportgerät nur zu unterhalten, soweit der seitliche Strand jeweils für längere Zeit um Tnw trockenfällt.

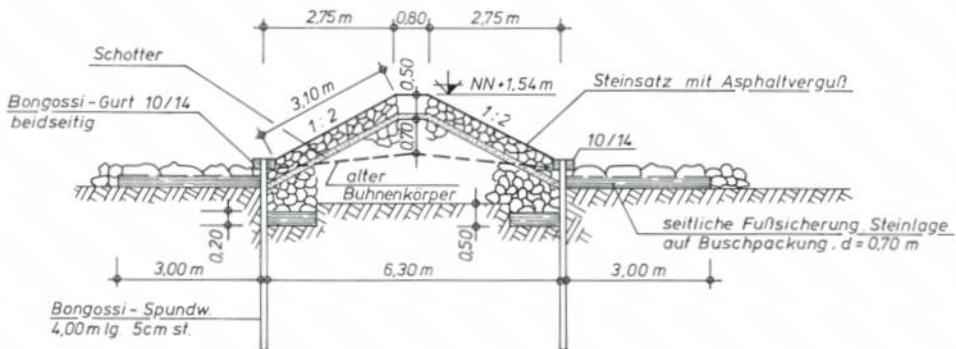
Seitenansicht



Draufsicht



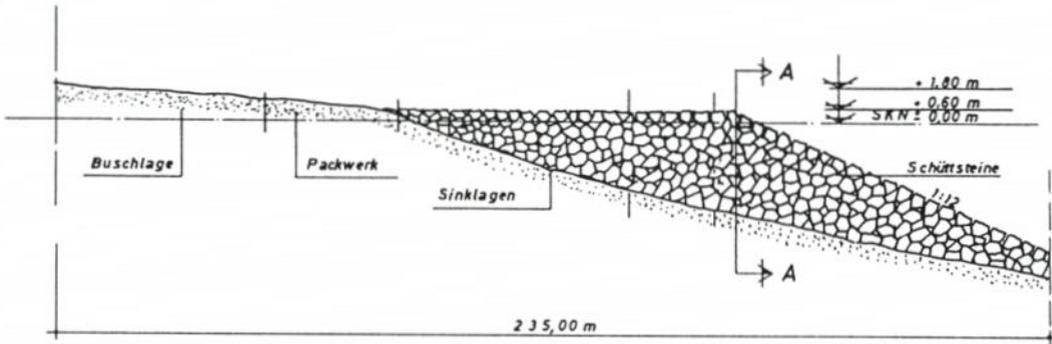
Querschnitt I - I



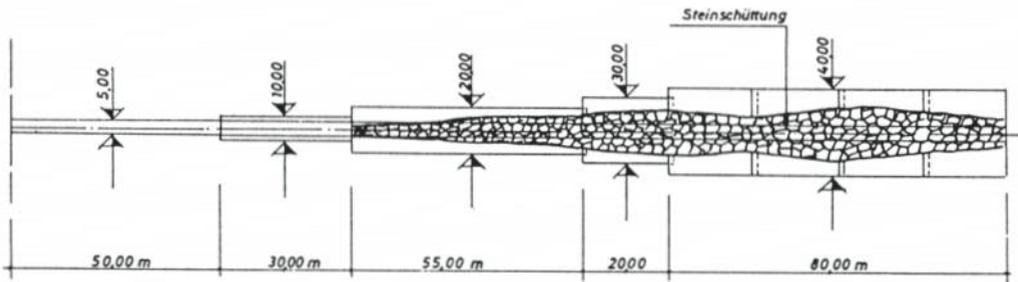
Beispiel 4:

- Buhnentyp:** Geböschte Buhne in Steinbauweise mit breiter Krone  
**Lage:** Buhne in der Außenweser bei km 68,4  
**Beanspruchung:** Tideströmung, Wellenkräfte, Eisgang  
**Baugrund:** Toniges, festes Watt (gleiche Bauweise auf Sanduntergrund üblich)  
**Baujahr:** 1974  
**Bauweise:** Schüttsteine auf Sinkstücken. Die 30 cm dicken Sinklagen sind mit Kunststoffmatten verstärkt. Die Kunststoffmatten überlappen an den Stößen, so daß das Kernsinkstück entfallen konnte. Die Kronenbreite beträgt auf ganzer Länge 4,00 m. Die Bühnenwurzel schließt an das hohe Watt an. Der Bühnenkopf hat keine besondere Sicherung.
- Beurteilung:** a) **konstruktiv:** Die Buhne mit 4 m breiter Krone bietet den angreifenden Wasserkräften größeren Widerstand als Bühnen ohne oder mit schmaler Krone. Der Wattanschluß mit Packwerk und Buschlage verhindert die bei Bühnenbauten häufig auftretende Hinterläufigkeit.  
b) **funktionsell:** Die Buhne gehört zu einer Gruppe von Bühnen, deren Aufgabe es ist, das Weserufer zu schützen und die Strömung zur Regulierung des Fahrwassers zu führen, was voll erreicht wird.

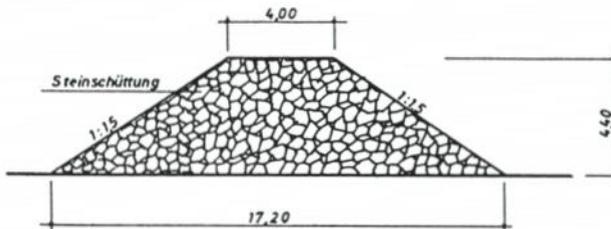
Längsschnitt



Draufsicht



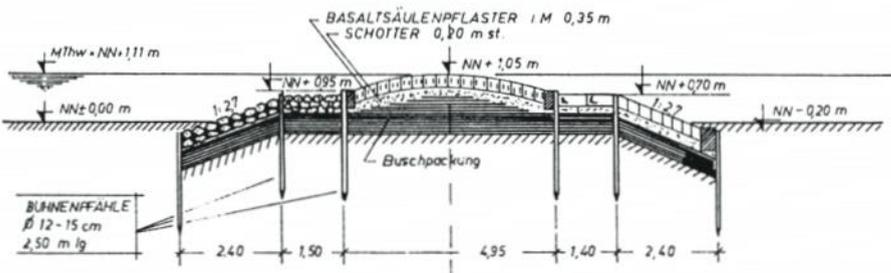
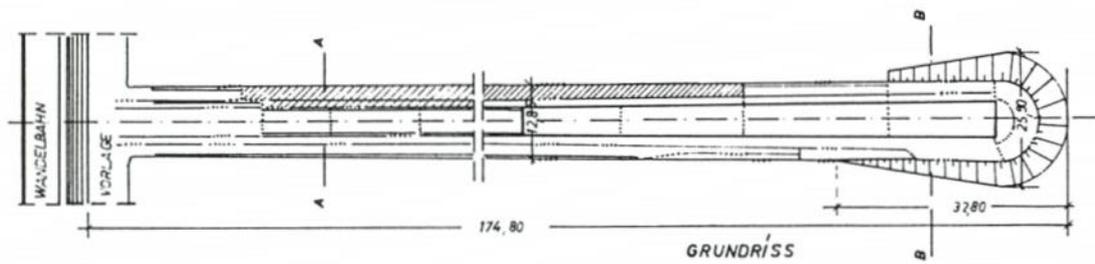
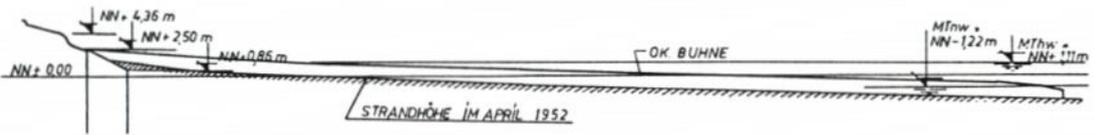
Querschnitt A-A



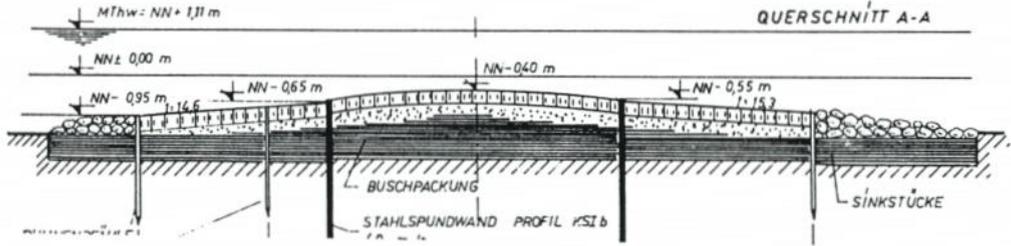
Beispiel 5:

- Buhentyp:** Gewölbte Buhne in Steinbauweise mit seitlichen Bermen
- Lage:** Buhne G1 am Nordweststrand der Insel Norderney (Abb. F 30)
- Beanspruchung:** Seegang, Brandungs- und Tideströmung
- Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)
- Baujahr:** 1875, Sicherung durch Seitenbermen 1911, Bühnenkopfsicherung 1931
- Bauweise:** 1875 als gewölbte Steinbuhne aus Basaltpflaster zwischen zwei Pfahlreihen auf Buschpackung erbaut. Beiderseits sind 1911 zwei von Pfahlreihen eingefasste Bermen aus Pflaster bzw. Packlage auf Buschpackung ergänzt worden. Die Bühnenwurzel schließt an ein Deckwerk (Norderneyer S-Profil) an. Der Bühnenkopf ist verbreitert und besonders flach gehalten.
- Beurteilung:**
- a) **k o n s t r u k t i v:** Die Holzpfähleinfassungen verwittern zwar langsam, erforderten jedoch zunehmend das Auswechseln abgängiger Pfähle, weil sonst die ursprüngliche Abdeckung aus Quadersteinen ihren Halt verloren hätte. 1951 war der Bühnenkörper nach 76 Jahren so abgängig, daß er mit einer Stahlspundwand eingefast und die Quadersteine durch Basaltsäulen ersetzt werden mußten. Außerdem mußten der Bühnenkopf und die westliche Seite der Buhne durch Steinschüttungen gesichert werden.
- b) **f u n k t i o n e l l:** Die Buhne G1 ist überwiegend Seegang und Brandungsströmungen und weniger Tideströmungen ausgesetzt. Ihr war, zusammen mit den gleichzeitig gebauten Bühnen E1, F1, H1 die Aufgabe zugeordnet, den weiteren Strandabbruch zu verhindern. Das ist zwar im erheblichen Maße, aber nicht voll erreicht worden, so daß der Strand langsam weiter abnahm. Daher wurde es erforderlich, den Strand seit 1951/52 sieben mal durch Aufspülungen wieder zu erhöhen.

LANGSSCHNITT

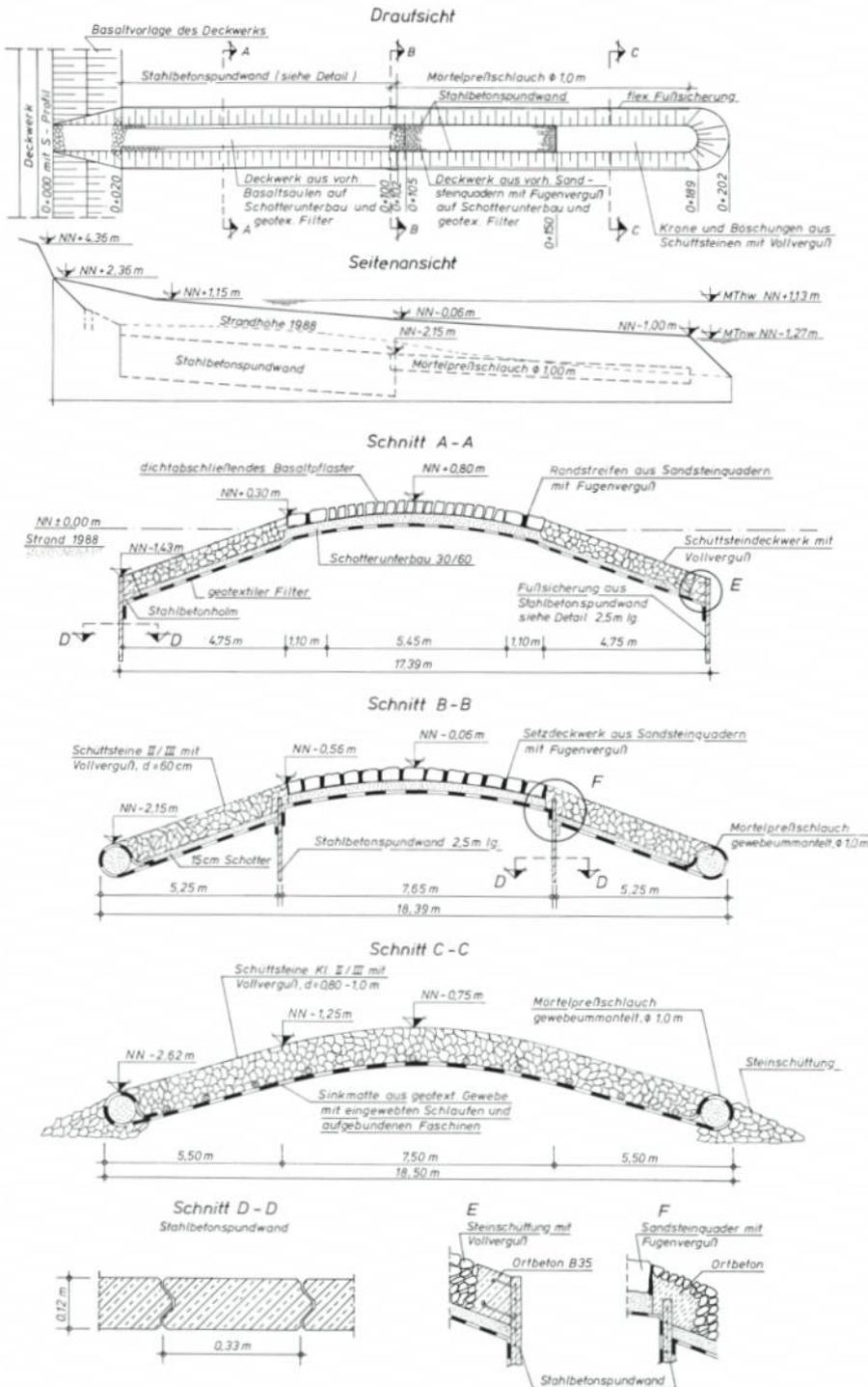


QUERSCHNITT A-A



Beispiel 6:

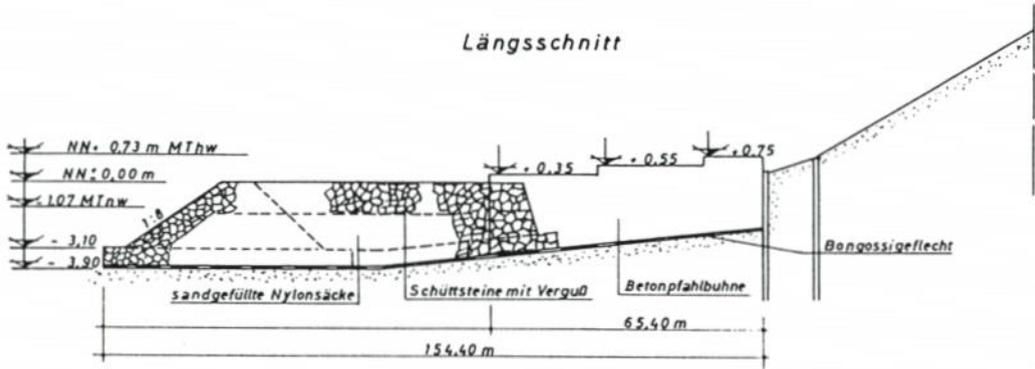
- Buhmentyp:** Gewölbte Buhne in Steinbauweise mit seitlich dichter Einfassung
- Lage:** Buhne E1 am Nordweststrand der Insel Norderney (Abb. F 30)
- Beanspruchung:** Seegang, Brandungs- und Tidedrömung
- Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)
- Baujahr:** 1873, Sicherung der Seitenbermen 1913, Bühnenkopfsicherung 1931, Verlängerungen von 148 m auf 172 m 1925 und auf 205 m 1954
- Bauweise:** 1873 als gewölbte Steinbuhne wie die Buhne G1 nach Beispiel 5 gebaut. 1989 fand die Grundinstandsetzung statt, bei der der Bühnenquerschnitt völlig neu aufgebaut worden ist. Hauptmerkmal der neuen Bauweise ist die seitlich dichte Einfassung des Bühnenkörpers
- mit Stahlbetonspundwänden, deren Holm vor Ort zusammen mit dem Schüttsteinverguß betoniert wird, und
  - mit einem Mörtelpreßschlauch,  $\varnothing$  1,0 m, im Unterwasserbereich.
- Der Bühnenkern aus Sand ist mit einem geotextilen Filter bedeckt, der Ausspülungen verhindert. Die Bühnendecke besteht aus Schüttsteinen mit Vollverguß, im oberen Bereich ist die Krone mit der aus der alten Buhne vorhandenen Basaltplasterschicht bzw. der Sandsteinquaderlage bedeckt und letztere in den Fugen vergossen.
- Beurteilung:** Die dichte seitliche Einfassung – auch im Unterwasserbereich – und die Kernbedeckung mit dem die Sperrbedingung erfüllenden geotextilen Filter (s. Empf. E, Abschn. 2.3.4) verhindern ein Ausspülen von Kernmaterial. Die weitgehend vergossene Decke verringert die Schadensmöglichkeiten durch Seegang, Strömung und Eis. Die nach diesem Verfahren seit 1983 grundinstandgesetzten Bühnen haben bisher keine Mängel erkennen lassen. Funktionell gilt das zu Beispiel 5 Gesagte.



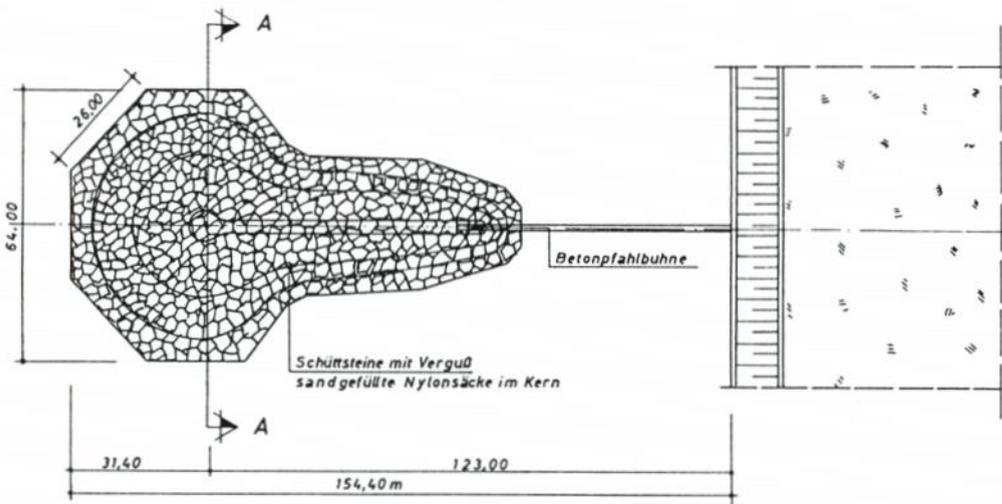
## Beispiel 7:

- Buhnentyp:** Bühne in Steinbauweise mit Asphaltverguß (Flunderbühne)
- Lage:** Bühne 2a vor der Strandmauer von Westerland (Abb. F 33)
- Beanspruchung:** Seegang, Brandungs- und Tidenströmung
- Baugrund:** Fein- bis Grobsand (Körnung 0,315–0,63 mm, Feinsand weniger als 10 %)
- Baujahr:** 1959
- Bauweise:** Als Unterlage für den Bühnenkörper dient eine Bongossiflechtmatte. Der Bühnenkern besteht aus sandgefüllten Nylonsäcken. Er ist mit Senksteinen abgedeckt, die im unteren Bereich 700–1500 kg, im mittleren 100–700 kg und im oberen 20–40 kg Stückgewicht haben. Die Steinschüttung wurde durch Asphaltverguß festgelegt. Die Bühnenkopfform erübrigt eine besondere Kopfsicherung. Der Anschluß der Bühnenwurzel an die Strandmauer erfolgt durch eine einwandige Betonpfahlwand.
- Beurteilung:**
- a) **k o n s t r u k t i v**: Die Neigung des Bühnenkopfes beträgt 1:8 und geht nach hinten hin in eine Neigung von 1:3 über. Diese Formgebung ist hydraulisch günstig, so daß Auskolkungen vor dem Bühnenkopf nahezu ausbleiben. Durch den Einbau von sandgefüllten Nylonsäcken als Füllkörper für den Kern konnten die Baukosten um rd. 5 % vermindert werden.
- b) **f u n k t i o n e l l**: Durch die Form der Bühne soll das Brechen der Wellen vermieden und deren Beugung am Bühnenkopf sowie die Umlenkung der auflaufenden Wellen erreicht werden, um dadurch den Energieumsatz im Bühnenfeld und damit den Sandabtrag zu vermindern.

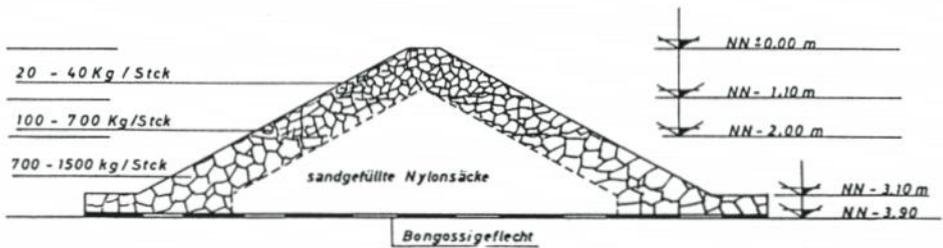
Längsschnitt



Draufsicht



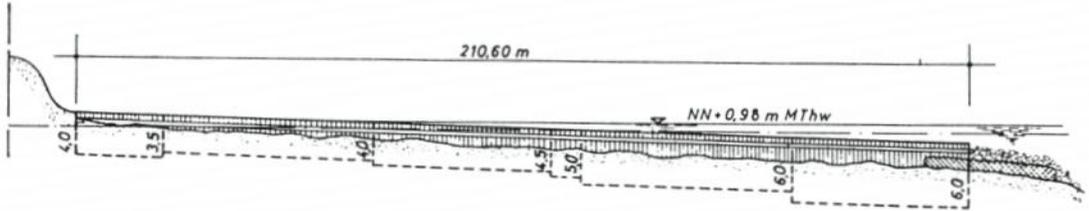
Querschnitt A - A



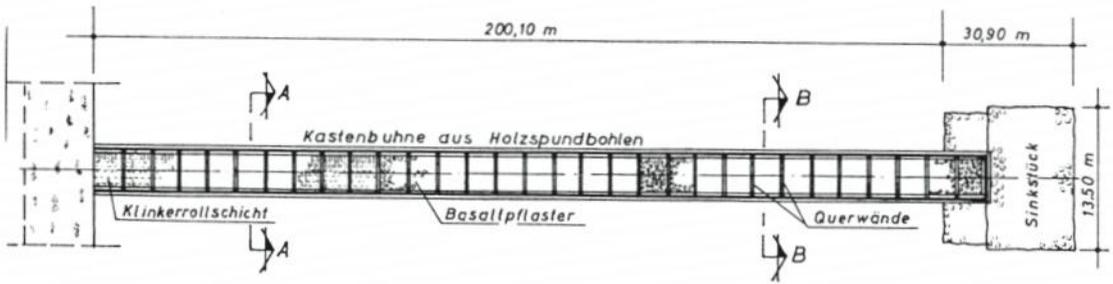
Beispiel 8:

- Buhentyp:** Kastenbühne mit Holzspundwänden  
**Lage:** Bühne 1 am Nordweststrand der Insel Borkum (Abb. F 27)  
**Beanspruchung:** Seegang, Brandungs- und Tideströmung  
**Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,20 mm Korndurchmesser)  
**Baujahr:** 1928  
**Bauweise:** Kastenbühne mit gegeneinander verankerten Seitenwänden aus teerölgetränktem Holzspundbohlen. Die Fugen sind mit Dichtungsbrettern abgedeckt. Der Kasten ist von unten nach oben mit Sand, Splitt und Schotter gefüllt und im hinteren Bereich mit einer Klinkerrollschicht, im vorderen mit Basaltplaster abgedeckt. Die Bühnenwurzel schließt an eine Steilmauer an. Der Bühnenkopf ist durch ein Sinkstück mit Steinschüttung gesichert.
- Beurteilung:** a) **k o n s t r u k t i v:** 1950 war eine Instandsetzung erforderlich, weil das Pflaster teilweise abgesackt war und sich die Spundwände dadurch auf kurzer Strecke geneigt hatten. Die Holzbauweise hat sich bewährt; sie war allerdings auch keiner schweren Dauerbelastung ausgesetzt, weil sie die meiste Zeit nur wenig aus dem Strand ragte oder zeitweise – zumindest in Teilabschnitten – auch unter Sand lag.
- b) **f u n k t i o n e l l:** In den zwanziger Jahren bildete sich vor dem Weststrand von Borkum eine Rinne, die sich immer näher an die Insel heran verlagerte, nach Norden ausdehnte und vertiefte. Um die weitere Annäherung der Rinne zu verhindern, wurde u. a. als nördlichste eines Bühnensystems die Bühne 1 gebaut. Sie erfüllte die ihr zugedachte Aufgabe als Strombühne, bis die Rinne (Strandgatje) im Jahre 1933 im Südtail verbaut worden war und sich der Strand u. a. auch im Bereich der Bühne 1 allmählich erhöhte, so daß die Strömungs- und Wellenbeanspruchung nachließen, wodurch sie sich von einer Strombühne allmählich zu einer Strandbühne wandelte.

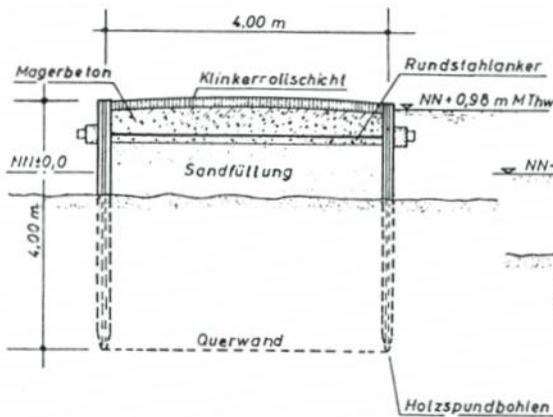
Längsschnitt



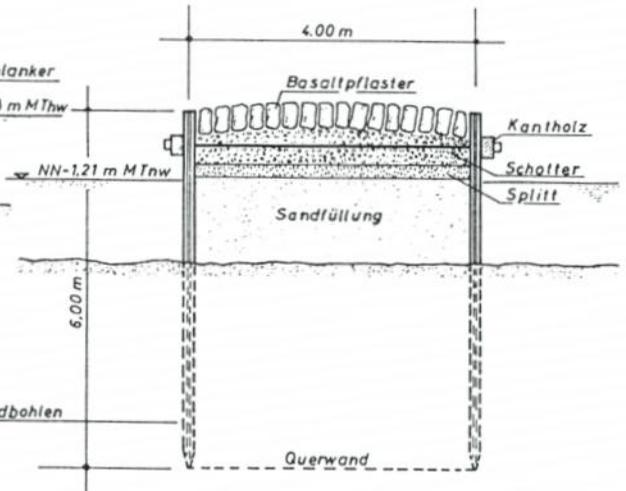
Draufsicht



Querschnitt A-A



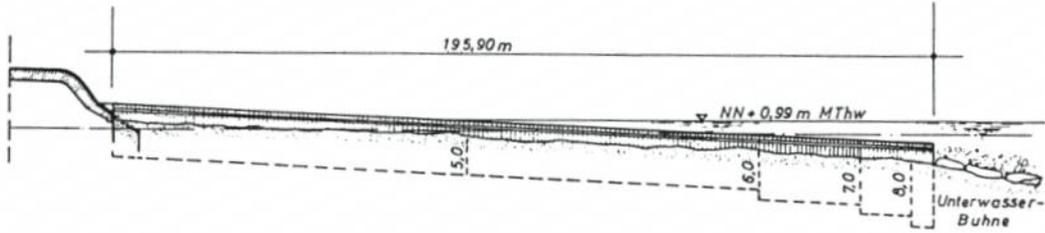
Querschnitt B-B



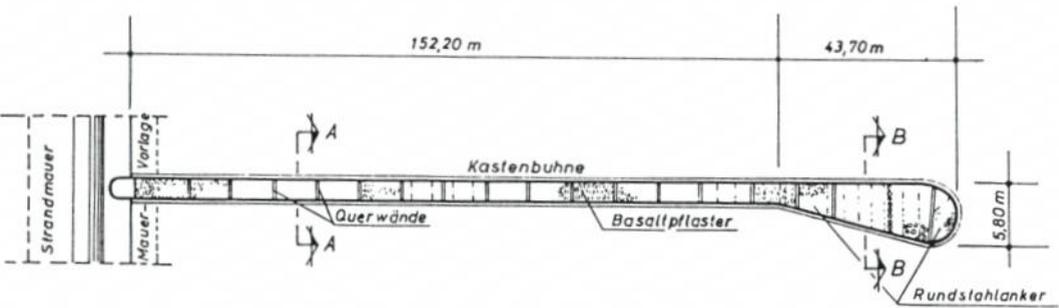
Beispiel 9:

- Buhnentyp:** Kastenbühne mit Stahlspundbohlen  
**Lage:** Bühne 21 am Südweststrand der Insel Borkum (Abb. F 27)  
**Beanspruchung:** Tide- und Brandungsströmung, Seegang, Eisgang  
**Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)  
**Baujahr:** 1950/51  
**Bauweise:** Die ursprünglich 1891 erbaute, gewölbte Steinbühne mußte 1950/51 erneuert werden. Dabei wurde sie zu einer Kastenbühne aus 5 bis 7 m langen Stahlspundbohlen umgebaut. Der Kasten ist mit Schotter auf Sand gefüllt und mit Basaltplaster abgedeckt. Die Querwände bestehen aus Holzpfählen. Die Bühnenwurzel schließt an ein Deckwerk (S-Profil) an. Der Bühnenkopf ist durch eine 150 m lange Unterwasserbühne aus Schüttsteinen auf Sinkstücken geschützt, die bereits 1938 der ursprünglichen gewölbten Steinbühne hinzugefügt worden war.
- Beurteilung:**
- a) **k o n s t r u k t i v:** Die Stahlspundbohlen rosten sehr stark und zeigen Schäden durch Sandschliff. Die Basaltabdeckung hält sich gut. Die Schüttsteinabdeckung der Unterwasserbühne war teilweise erodiert und mußte 1976 ergänzt werden.
  - b) **f u n k t i o n e l l:** Die Bühne 21 ist eine Strombühne, welche die weitere Annäherung der Stromrinne der Ems verhindern soll. Die Hauptbelastung trägt die Unterwasserbühne. Das Bauwerk erfüllt voll seine Aufgabe.

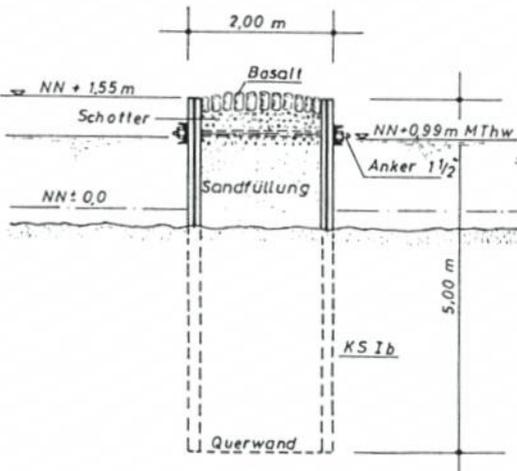
Längsschnitt



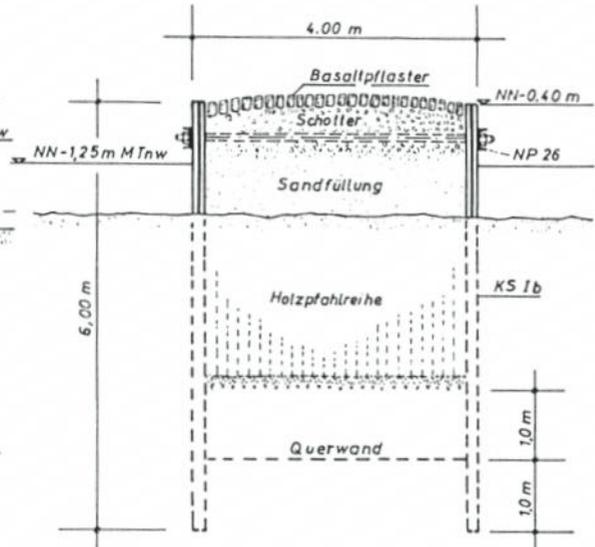
Draufsicht



Querschnitt A-A



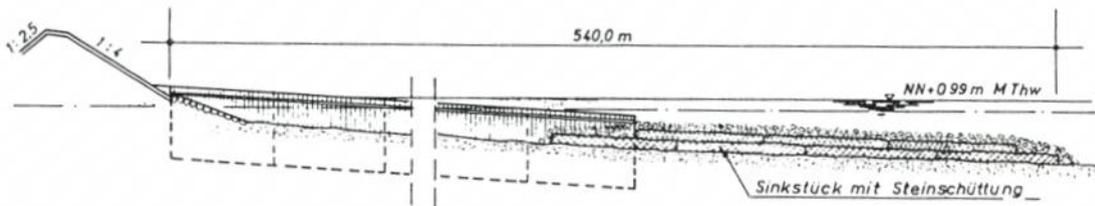
Querschnitt B-B



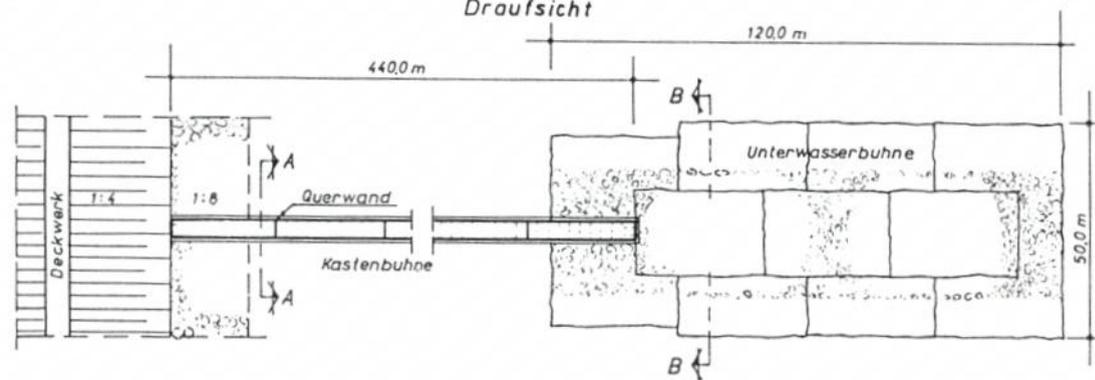
## Beispiel 10:

- Buhentyp:** Kastenbuhne mit Stahlbetonbohlen
- Lage:** Buhne 31 am Südstrand der Insel Borkum (Abb. F 27)
- Beanspruchung:** Tide- und Brandungsströmung, Seegang, Eisgang
- Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)
- Baujahr:** 1975/76
- Bauweise:** Kastenbuhne mit gegeneinander verankerten Seitenwänden aus schlaffbewehrten Stahlbetonbohlen. Der Kasten ist mit Beton und Ziegelbruch gefüllt und oben mit Betonplatten abgedeckt. In Abständen von 25 m sind Querwände aus den gleichen Stahlbetonbohlen wie die Seitenwände angeordnet. Die Buhne schließt an ein 1:4 geneigtes Asphaltdeckwerk an. Der Bühnenkopf hat im vorderen Bereich eine seitliche Sicherung aus Steinschüttung auf Sinkstücken und ist vor Kopf durch eine 100 m lange und 50 m breite Unterwasserbuhne gesichert, die das weitere Abbrechen des Unterwasserhanges verhindern soll.
- Beurteilung:**
- a) **konstruktiv:** Die Konstruktion hat sich bisher bewährt. Die Betonbohlen sowie die Abdeckung aus Betonplatten sind im Wasserwechselbereich stark von Algen bewachsen. Durch den Algenbewuchs ist die Bühnenkrone glitschig und das Begehen und Befahren gefährlich. Die seitlichen Stahlholme sind einer starken Korrosion ausgesetzt, wodurch die Standfestigkeit der Buhne bei den im übrigen verwendeten langlebigen Bauelementen beeinträchtigt werden kann.
- b) **funktio n e l l:** Im Bereich des Südstrandes der Insel Borkum wich in den letzten Jahren das Ufer zunehmend zurück; das Strombett wandert an die Insel heran. Das zur Festlegung des Ufers zunächst gebaute Asphaltdeckwerk wurde durch eine Buhnengruppe ergänzt. Davon ist die Buhne 31 als Strombuhne konzipiert. Seit der Fertigstellung hat sich der Strand im vorderen Bereich der Buhne deutlich aufgehöhht, und die Tiefenlinien haben sich uferparallel geordnet.

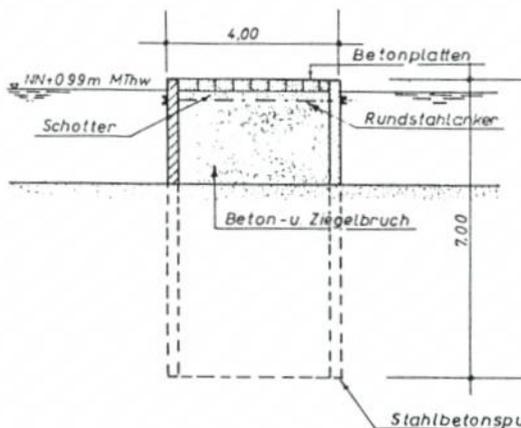
Längsschnitt



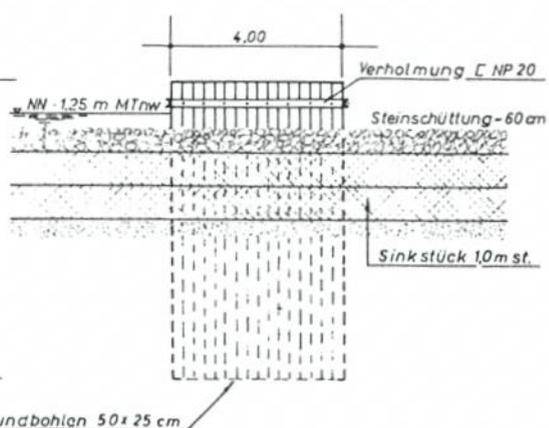
Draufsicht



Querschnitt A-A

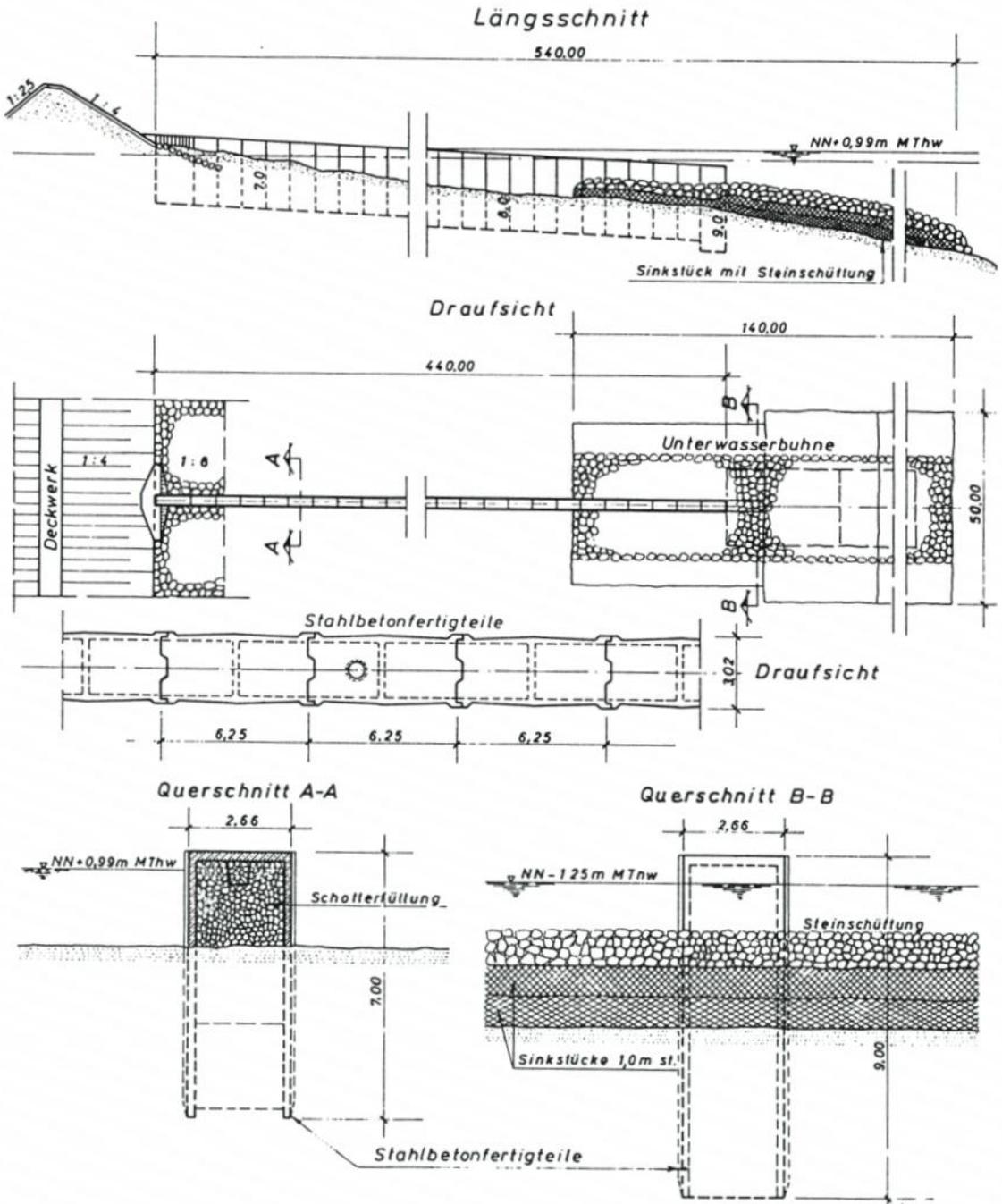


Querschnitt B-B



## Beispiel 11:

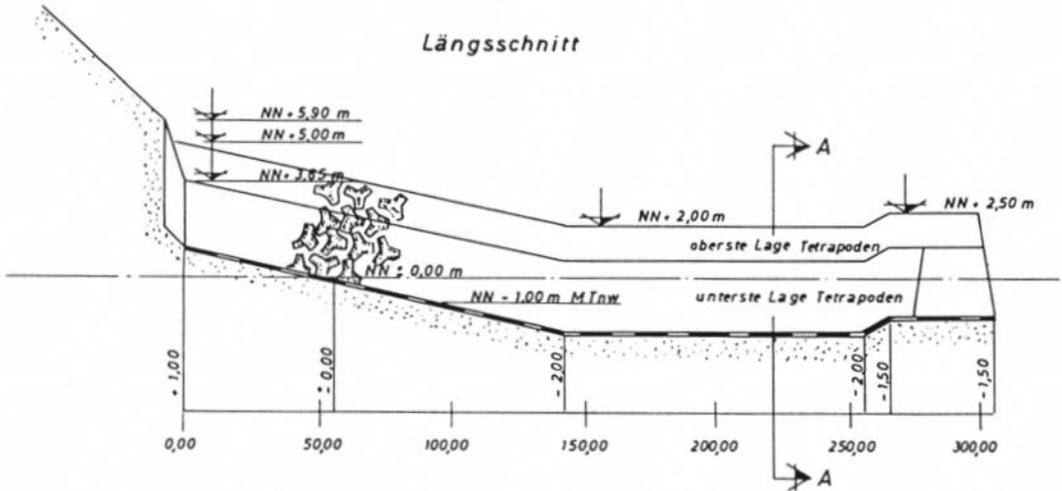
- Buhnentyp:** Kastenbühne aus Stahlbetonfertigteilen
- Lage:** Bühne 33 am Südweststrand der Insel Borkum (Abb. F 27)
- Beanspruchung:** Tide- und Brandungsströmung, Seegang, Eisgang
- Baugrund:** Feinsand (fs 0,15 bis 0,2 mm Korndurchmesser)
- Baujahr:** 1977/78
- Bauweise:** Die Bühne ist aus an Land gefertigten, über See transportierten und rd. 100 t schweren U-förmigen Betonfertigteilen gebaut worden, die mittels eines Kranschiffes versetzt wurden. Trotz der an der Baustelle herrschenden Seegangsbedingungen konnten die Fertigteile mit befriedigender Genauigkeit eingespült werden. Die Bühnenkrone ist rd. 3 m breit und befahrbar, so daß die Hohlräume durch verschließbare Öffnungen in der oberen Plattform mit Schotter verfüllt werden konnten, der mit Lastwagen angefahren wurde.
- Beurteilung:**
- a) **k o n s t r u k t i v** : Die Fertigteilkonstruktion zeigt bisher keine Verwitterungsschäden. Sie ist jedoch von Algen bewachsen, so daß die für Unterhaltungszwecke erwünschte Befahrbarkeit der Bühne schwierig ist.
  - b) **f u n k t i o n e l l** : Die Bühne 33 ist eine Strombühne, welche die weitere Annäherung der Stromrinne der Ems verhindern und Sedimente im Bühnenfeld durch Minderung von Strömung und Turbulenz anlagern bzw. halten soll. Das Bauwerk erfüllt seine Aufgabe.



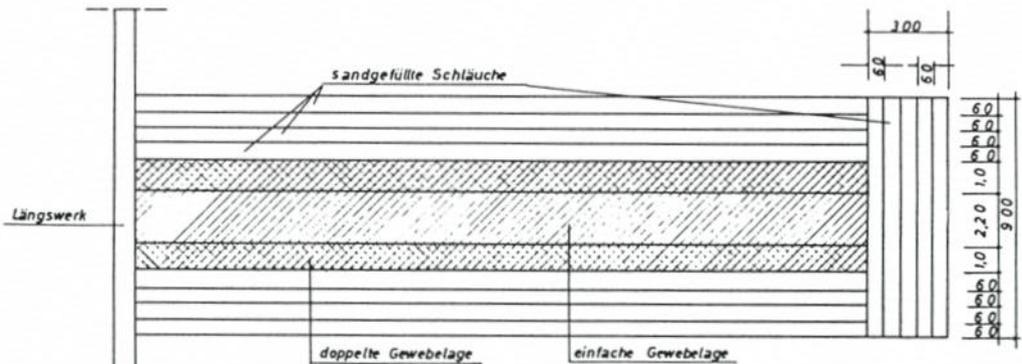
Beispiel 12:

- Buhentyp:** Buhne aus Betonformkörpern  
**Lage:** Buhne am Strand vor Hörnum auf Sylt (Abb. F 33)  
**Beanspruchung:** Seegang, Brandungs- und Tidedrömung, Eisgang  
**Baugrund:** Fein- bis Grobsand (Feinsand 30 bis 50 %, Körnung 0,2–0,63 mm)  
**Baujahr:** 1967/68  
**Bauweise:** Tetrapodenpackung auf Nylongewebematten, die an beiden Seiten aufgenähte, mit Sand gefüllte Taschen haben, damit ein Aufschwimmen und Aufklappen verhindert wird.
- Beurteilung:**
- a) **konstruktiv:** Die Tetrapoden stellen eine hohlraumreiche Konstruktion dar. Sie sind im Verbund gesetzt und halten damit auch Brandungs- und Strömungskräften stand. Die Wellenreflektion wird stark vermindert.
  - b) **funktio n e l l:** Die Buhne ist weniger durchlässig als erwartet wurde. Sie unterbricht die Sandwanderung so weitgehend, daß es zwar zur Sandablagerung und Strandverbesserung in Luv kam, aber auch zum Sandabtrag in Lee, so daß der Strand stark zurückweicht und die Randdüne im Abbruch liegt.

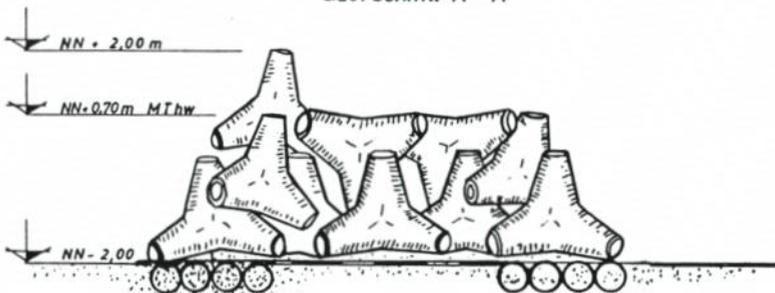
Längsschnitt



Draufsicht



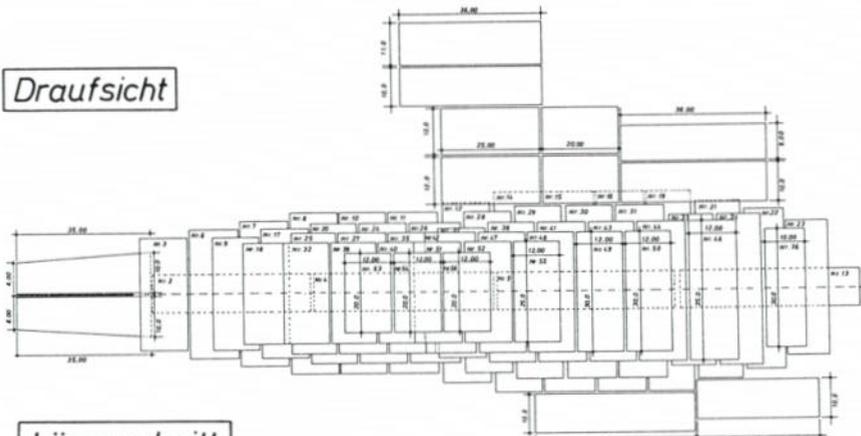
Querschnitt A - A



## Beispiel 13:

- Buhnentyp:** Unterwasserbuhne als Sinkstückkörper
- Lage:** Buhne II am Westkopf Norderney
- Beanspruchung:** starke Tideströmung
- Baugrund:** Feinsand
- Baujahr:** 1934
- Bauweise:** Die Unterwasserbuhne der Buhne II ist als Sinkstückkörper auf dem Unterwasserhang und der Sohle des Norderneyer Seegats in Verlängerung der 176 m langen Strandbuhne in Spundwandbauweise von März bis Juli 1934 hergestellt worden. Die einzelnen Sinkstücke sind auf einer Senkbank (wahrscheinlich am nahegelegenen Strand) aus längs- und querliegenden Buschfaschinen gefertigt und um Thw zur Einbaustelle geschleppt worden. Dort sind sie abgesenkt worden durch Beschweren mit Steinmaterial (s. Abschn. 4.2 u. Abb. F 36). Ein lagegenaues Absenken der Sinkstücke bei bis zu 25 m Wassertiefe und unterschiedlichen Tideströmungen setzt schwierige Vermessungen voraus und erfordert erfahrene Fachkräfte und Schiffsbesatzungen.
- Eingebaut wurden in dem 218 m langen und bis zu 50 m breiten Sinkstückkörper 56 Sinkstücke mit Einzellängen von 20 bis 50 m und Breiten von 10 bis 12 m. Weitere 10 Sinkstücke wurden seitlich als Kolkschutz verlegt.
- Für den Bau wurden verwendet:
- |                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| Sinkstücke:       | 31 407 m <sup>3</sup> |
| Schüttsteine:     | 6 790 m <sup>3</sup>  |
| Belastungssteine: | 12 563 m <sup>3</sup> |
- Beurteilung:** Die Unterwasserbuhnen im Norderneyer Seegat sollten den trotz des Strandbuhnenbaus seit 1858 stets weiter an den Westkopf der Insel drängenden Hang des Seegats endgültig festlegen und einen weiteren Abbau des ohnehin schmalen Inselsockels stoppen. Dieses Ziel ist durch die aufwendigen Sinkstückkörper voll erreicht worden.

Draufsicht

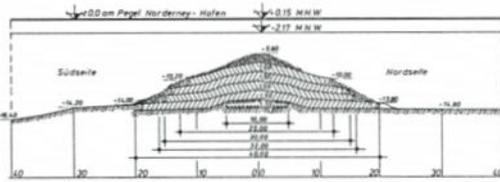


Längsschnitt



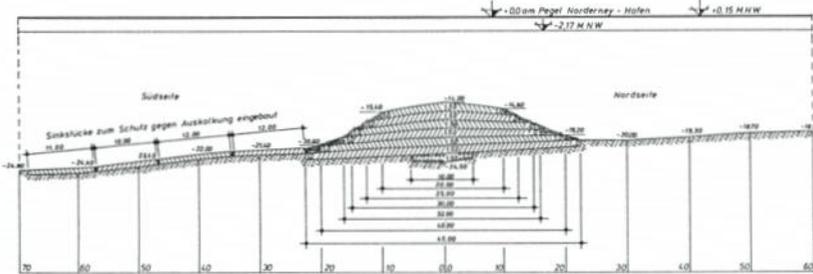
Querprofile

Querprofil Stat. 225 m



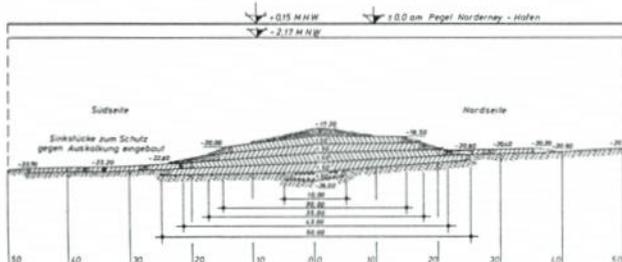
Stat. 225

Querprofil Stat. 260 m



Stat. 260

Querprofil Stat. 295 m



Stat. 295

## Beispiel 14:

**Buhentyp:** Einreihige Holzpfahlbuhne  
**Lage:** Buhnsystem vor Bansin/Usedom  
**Beanspruchung:** Seegang, Brandungsströmung, Sandschliff, Eis  
**Baugrund:** ganze Tiefe rezente, marine Sande; mittlerer Korndurchmesser 0,2 mm  
**Baujahr:** 1980/81 und 1985/86  
**Bauweise:** System von 18 Bühnen in 2 Etappen gebaut. Zuerst (1980/81) im westl. Bereich 10 Bühnen, davon 7 Stück mit hoher Dichte (s. Standardbühnen Nr. 7) und 3 Stück östlich angrenzend mit schrittweiser Öffnung (bis max. 15 cm Pfahlabstand). In der 2. Etappe (1985/86) Bau von 8 Bühnen. Die Bühnen Nr. 11 bis 15 übernehmen die Durchlässigkeit der Bühne Nr. 10 (gesamte Länge 15 cm Pfahlabstand), dagegen werden die Bühnen Nr. 16, 17 und 18 schrittweise weiter geöffnet (s. Bühne Nr. 17). Die letzte Bühne erreicht am Kopf einen Pfahlabstand von 50 cm. Der Landanschluß reicht unter Berücksichtigung der erwarteten seewärtigen Uferlinienverlagerung weit über Strandmitte landwärts.

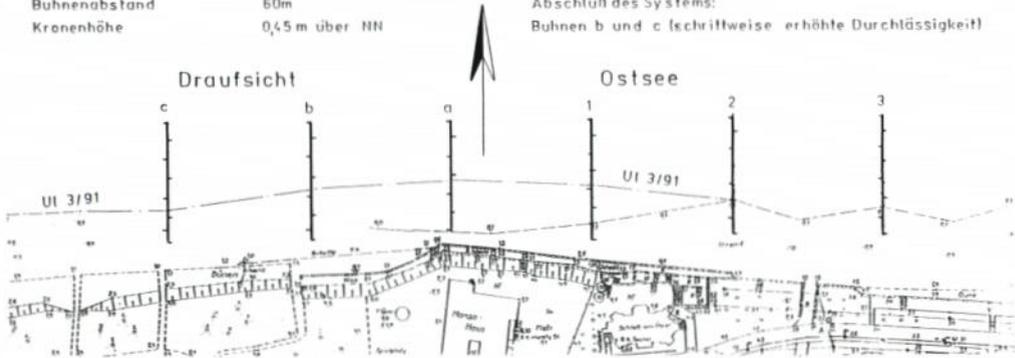
**Beurteilung:** a) **konstruktiv:** Seit Fertigstellung allgemein gleichbleibend guter Zustand, allerdings auch keine extreme Belastung. Eine Besonderheit war im südöstlichen Buhnsystemabschluß die Verlagerung der Rinne und damit örtliche Vertiefung. Die Einspannlänge einiger Pfähle der Bühnen Nr. 14, 15 und 16 wurde dadurch zu kurz, wodurch Lücken entstanden. Bei der Pfahllängenbemessung sind größtmögliche morphologische Änderungen zu berücksichtigen.

b) **funktional:** Die westlichen Bühnen Nr. 1 bis 7 haben auf Grund ihrer Länge, des Abstandes und der geringen Durchlässigkeit bei gleichzeitigem großen Sandangebot in West-Ost-Transportrichtung zu beachtlichen Aufsandungen geführt. Die geringe Bühnenhöhe (0,2–0,25 m über NN) war nicht nachteilig. Über die Systemmitte hin zum östlichen Abschluß erfolgt eine günstige Auflösung. Die Überführung in den unverbauten, natürlichen Nachbarabschnitt findet bisher ohne Lee-Wirkung statt.

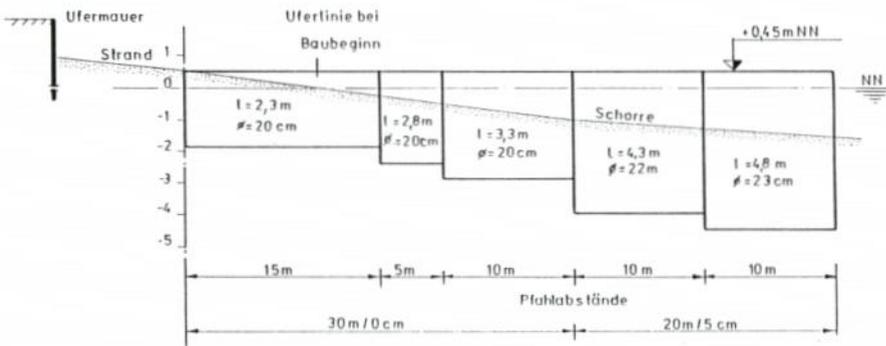
**Buhnenystem Kühlungsborn West**

Buhnenlänge in See i.M. 40 m  
 Landanschluß i.M. 10 m  
 Buhnenabstand 60 m  
 Kronenhöhe 0,45 m über NN

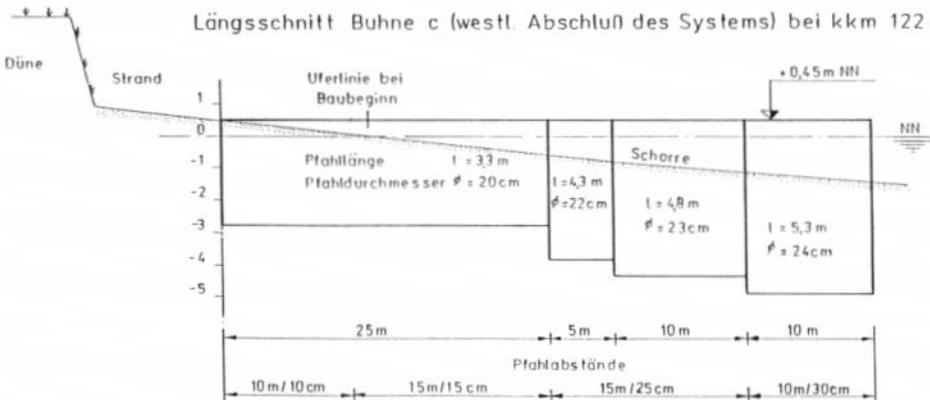
Standardbuhnen:  
 Buhnen a, 1, 2, 3 u.f.  
 Abschluß des Systems:  
 Buhnen b und c (schrittweise erhöhte Durchlässigkeit)



Längsschnitt Buhne 1 (Standardbuhne) bei kkm 122 + 380



Längsschnitt Buhne c (westl. Abschluß des Systems) bei kkm 122 + 200



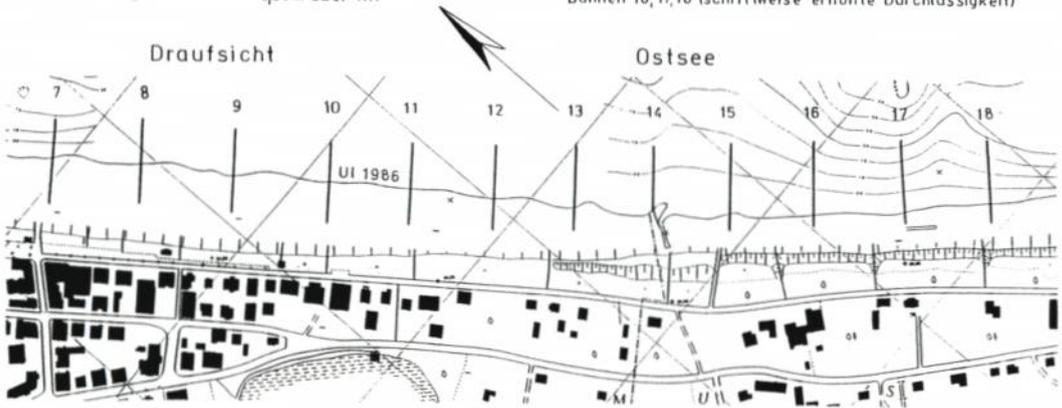
Beispiel 15:

- Buhentyp:** Einreihige Holzpfahlbühne  
**Lage:** Bühnensystem Kühlungsborn/West  
**Beanspruchung:** Seegang, Brandungsströmung, Sandschliff, Eis  
**Baugrund:** oberflächlich (0–1 m Tiefe) marine Sande mit mittl. Korndurchmesser von 0,3 mm, darunter Geschiebemergel mit Blockreichtum im Wechsel mit interglazialen Sanden.  
**Baujahr:** 1952; 1990/91  
**Bauweise:** Das gesamte Bühnensystem Kühlungsborn besteht aus 54 Holzpfahlbühnen, darin besitzt der Westteil (Bühne Nr. 1–9 und a, b, c) selbständigen Charakter. Im Jahre 1952 als dichte Bühnen gebaut (Nr. 1–9) wurde nach 40jähriger Belastung eine Rekonstruktion erforderlich (1990), gleichzeitig eine Verlängerung des Systems um 3 Bühnen (a, b, c) in westlicher Richtung, wobei b und c die Auflösung bilden. Bei Beibehaltung des Bühnenabstandes kommt es im Interesse der angestrebten seewärtigen Verlagerung der Uferlinie zur Vergrößerung der Bühnenlänge. Die Standardbühnen besitzen hohe Dichtigkeit (s. Bühne 1). Bei der Auflösung erreicht der größte Pfahlabstand (am Kopf von Bühne c) 30 cm. Die Kronenhöhe beträgt aus funktionellen Gründen 45 cm über NN.
- Beurteilung:** a) *konstruktiv*: Die Bühnen von 1952 haben alle Belastungsformen erfahren, dabei Lücken und Schäden im Kopfbereich erhalten. Die neu gerammten Bühnen zeichnen sich durch eine exakte Einhaltung der vorgegebenen Pfahlabstände aus.  
b) *funktionell*: Trotz der Schadhaftheit der Bühnen von 1952 konnte die Uferlinie gegen landwärtige Verlagerung (Küstenrückgang) bewahrt werden. Im westlichen Anschlußbereich entstand bei Nord- und Nordostwetterlagen (Hochwasser) Leewirkung mit starkem Rückgang. Die 1990/91 gebauten Bühnen a, b und c haben in kurzem Zeitraum zum Ausgleich und seewärtigem Zuwachs geführt.

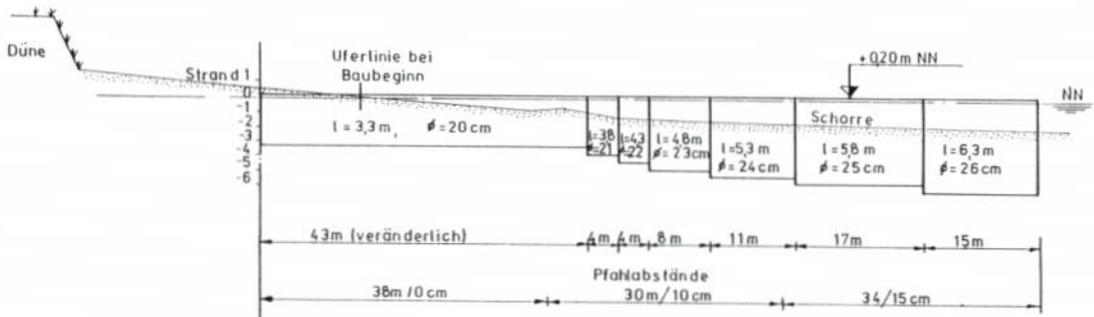
**Buhensystem Bansin / Usedom**

Buhnenlänge in See i.M. 70 m  
 Landanschluß i.M. 30 m  
 Buhnenabstand 80-100 m  
 Kronenhöhe i.M. 0,20 m über NN

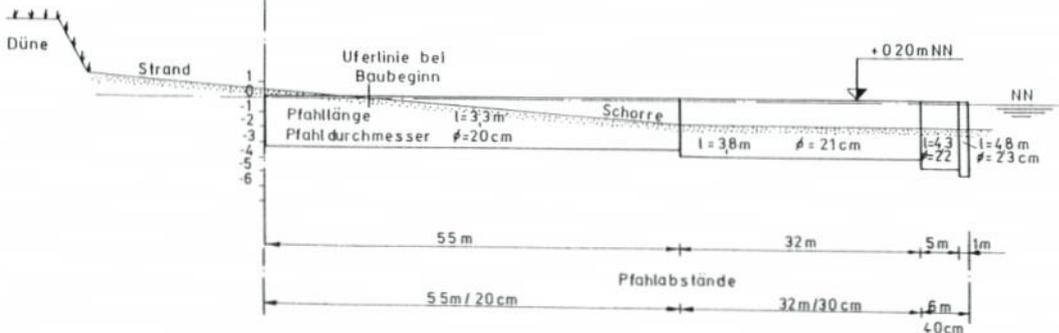
Standardbuhnen:  
 Buhnen 1-8, 9-15  
 Abschluß des Systems:  
 Buhnen 16, 17, 18 (schrittweise erhöhte Durchlässigkeit)



Längsschnitt Buhne 7 (Standardbuhne) bei kkm 34 + 325



Längsschnitt Buhne 17 (östl. Abschluß des Systems) bei kkm 35 + 250



## 7. Schriftenverzeichnis

- [1] ANDERSON, G. L., HARDAWAY, C. S. u. GUNN, J. R.: Beach Response to Spurs and Groins. Proceeding Coastal Structures '83, p. 727-739, 1983.
- [2] ASTER, D., JÜRGENS, H.-H. u. WEITZEL, H.: Bühnenbauten auf Borkum. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, Band 44, Schifffahrts-Verlag Hansa C. Schroeder und Co., Hamburg.
- [3] BAKKER, W. T.: The Dynamics of a Coast with a Groyne System (Dynamische Vorgänge an einer Küste mit Bühnen). Proc. 11th Coastal Eng. Conf., Vol. I, London, 1968.
- [4] BAKKER, W. T.: One Aspect of the Dynamics of a Coast Partly Protected by a Row of Groynes (Bemerkung zu den dynamischen Vorgängen an einer Küste, die z.T. durch ein Bühnensystem geschützt wird). Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Afd. Kustonderzoek, Studienrapport WWK 67-5, 1967.
- [5] BAKKER, W. T., HULSBERGEN, G. H., ROELSE, P., DE SMIT, C. u. SVASEK, J. N.: Permeable Groynes: Experiments and Practice in the Netherlands. Proceedings 19th Coastal Engineering Conference, ASCE, New York, Vol. II, p. 2026-2041, 1984.
- [6] BALSIELLE, J. H. u. BERG, D. W.: State of Groin Design and Effectiveness (Stand der Planung beim Bau von Bühnen und ihre Wirksamkeit). Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vol. II, Vancouver, Canada, 1972.
- [7] BALSIELLE, J. H. u. BRUNO, R. O.: Groins: An Annotated Bibliography (Bühnen: Eine Bibliographie mit Erläuterungen), 463 Schriftumsangaben für den Zeitraum 1900 bis 1972 (einschl. deutsch. Schrifttum). U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Eng. Research Center, Washington, USA, 1972.
- [8] BRAMPTON, A. H. u. GOLDBERG, D. G.: Mathematical Model of Groyned Shingle Beaches. Coastal Sediments '91, Vol. II, p. 1842-1855, 1991.
- [9] BRAMPTON, A. H. u. MOTKYA, J. K.: The Effectiveness of Groyness. Proceedings, Conference on Shoreline Protection, Southampton. Thomas Telford, London, 1983.
- [10] BRINCKMANN, M. u. HOLZ, K.-P.: Investigations on 3-D Flow Structures in Combined Systems of Groynes and Harbour Basins. Hydraulic Engineering, Richard M. Shane, p. 728-733, 1991.
- [11] COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER: Shore Protection Manual (4th edn), US Army Corps of Engineers, US Government Printing Office, Washington, DC, 1984.
- [12] FLEMMING, C. A., PRINCE, W. A. u. BRAMLEY, M. E.: The Principles and Effectiveness of Groynes. Third International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Vol. I, p. 273-287, 1991.
- [13] FLEMMING, C. A.: Guide on the Uses of Groynes in Coastal Engineering. Construction Industry Research and Information Association. Technical Report 119, ISSN 0305-408X, CIRIA, Westminster, London, 1990.
- [14] FUKUOKA, S.: Groins and Vanes Developed Basing Upon a New Concept of Bank Protection. Hydraulic Engineering, Michael Ports, p. 224-229, 1989.
- [15] FÜLSCHER: Über Schutzbauten zur Erhaltung der Ost- und Nordfriesischen Inseln. Zeitschrift für Bauwesen, 1905.
- [16] GUTSCHE, H.: Über den Einfluß von Strandbühnen auf die Sandwanderung an Flachküsten. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 20, 1961.
- [17] HALE, J. S.: Calculated Sand Fills and Groin Systems (Berechnete Sanddefizite und Bühnensysteme). Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vol. II, Vancouver, Canada, 1972.
- [18] HENSEN, W.: Modellversuche über den Strandabbruch an den Enden von befestigten Küstenstrecken - Lee-Erosion -. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 10, 1957.
- [19] HENTZE, T.: Wasserbau. Teubner Verlag, Stuttgart, 14. Aufl., 1967.
- [20] JACKSON, N. L. u. NORDSTROM, K. F.: Estuarine Beach Processes and Protection Methods. Coastal Zone '89, Orville T. Morgen, et al., p. 3360-3376, 1989.
- [21] KLUMPP, C. C. u. BAIRD, D. C.: Design of Groins on the Middle Rio Grande. Hydraulic Engineering, Richard M. Shane, p. 148-153, 1991.
- [22] KOLP, O.: Untersuchungen über die Wirksamkeit von Seebühnen mit farbigem Sand. Beiträge zur Meereskunde, Inst. für Meereskunde, Berlin, H. 17/18, 1966.
- [23] KHASKHACHIKH, G. D., TSATURYAN, G. A. u. SHULGIN, Y. S.: New Designs for Beach Protection Structures (Neuartige Pläne für Küstenschutzbauwerke). Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vol. III, Vancouver, Canada, 1972.

- [24] LUDWICK, J. C., KANG, H. J. u. REYNOLDS, R. N.: Loss of Filled Sand form an Estuarine Groin System. Coastal Sediments '87. Vol. I, p. 1158-1173, 1987.
- [25] LÜDERS, K. u. LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon. Verlagsbuchhandlung Lax, Hildesheim, 1976.
- [26] MAGENS, C.: Seegang und Brandung als Grundlage für Planung und Entwurf im Seebau und Küstenschutz. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 14, 1958.
- [27] NAGAI, S.: Arrangement of Groins on a Sandy Beach (Anordnung von Buhnen auf einem Sandstrand). Jour. of Waterw. and Harb. Div., Vol. 82, No. WW 4, 1956.
- [28] NIEMEYER, H. D.: Measurements of Tidal Currents in Groyne Fields (In German: Tide-strommessungen in Buhnenfeldern). Jahresberichte 1986 Forschungsstelle Küste, Vol. 38, 1987b.
- [29] O. V.: Groynes - Documentation Catalogue Arranged on Subjects (in company with PETERSEN, 1961). (Buhnen-Dokumentation - Aufteilung nach verschiedenen Gesichtspunkten in Anlehnung an PETERSEN, 1961). Rijkswaterstaat - Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Afdeling Kustonderzoek. Studienrapport 1-1, 1968.
- [30] O. V.: Shore Protection Manual (Handbuch für die Praxis im Küstenwasserbau). U.S. Army, Coastal Eng. Research Center, Washington, USA, 1975.
- [31] PETERSEN, M.: Das deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten. Die Küste, Jg. 9, 1961.
- [32] PRESS, H.: Seewasserstraßen und Seehäfen. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin/München, 1962.
- [33] PRICE, W. A., TOMLINSON, K. W. u. WILLIS, D. H.: Field Tests on Two Permeable Groynes (Naturmessungen an zwei durchlässigen Buhnen). Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vol. II, Vancouver, Canada, 1972.
- [34] SCHLEICHER, F.: Taschenbuch für Bauingenieure. Springer-Verlag, Berlin, 1955.
- [35] SUMMERS, L. u. FLEMMING, C. A.: Groynes in Coastal Engineering: A Review. construction Industry Research and Information Association, Technical Note 111, CIRIA, Westminster, London, 1990.
- [36] SYAMSUDIN: Characteristics of Several Types of Groynes along the Manado Beach. International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Vol. I, p. 243-253, 1983.
- [37] WEGGEL, J. R., ESCAJADILLO, J. C. u. TING, T.: A Comparison of the Performance of three Types of Groynes. Second International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Vol. I, p. 370-383, 1987.
- [38] WITTE, H.-H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. Die Küste, Heft 19, 1970.
- [39] WOOD, A. M.: Coastal Hydraulics, Verlag Macmillan and Co. Ltd. London, England, 1969.
- [40] WSA Emden: 175 Jahre staatlicher Wasserbau in Emden 1814-1989. Emden, 1991.
- [41] YAHYA, M.: Perpendicular Groyne System along the Particular Beach of Sanuar-Ball. International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Vol. I, p. 264-274, 1983.
- [42] ZITSCHER, F. F.: Schutz des Weststrandes der Insel Sylt durch Flachbuhnen. Wasser und Boden, H. 9, 1960.
- [43] ZITSCHER, F. F. et al.: Empfehlung für die Anwendung von Asphalt im Wasserbau. Die Bauechnik, H. 11/12, 1977, u. H. 1, 1978.