

Küstenschutzwerke an der deutschen Nord- und Ostsee

Von Johann Kramer

1. Deichbau an der Nordsee

Die erste Besiedlung der Marschen an der Nordsee und den Tideströmen Ems, Weser, Elbe und Eider in der Zeit vor Christi Geburt war möglich, ohne daß die Wohnstätten gegen Sturmfluten geschützt werden mußten, weil der Meeresspiegel tiefer als heute lag. Als dann in der Folgezeit die Wasserstände der Nordsee anstiegen, mußten die Bewohner Erdhügel, sogenannte Wurten, aufschütten, um sich und ihre Habe bei Sturmfluten zu bergen (s. Beitrag ROHDE). Mit der zunehmenden Zahl der Bewohner wurden zunächst vereinzelt Siedlungen durch Ringdeiche umschlossen, aus denen dann bis zum 13. Jahrhundert die erste geschlossene Bedeichung des Nordseeküstengebietes entstand.

Die ersten Deiche (Abb. 1) hatten sehr kleine Querschnitte. Zu Beginn des Deichbaues waren es niedrige Erdwälle mit steilen Böschungen und geringer Breite. Sie wurden zunächst im ausreichenden Abstand von der Uferlinie angelegt, so daß sie über ein Vorland verfügten. Wenn durch Erosion das Vorland abgebrochen worden war, wurde häufig versucht, den Fuß der nunmehr scharliegenden Deiche durch senkrechte Wände aus Holz zu schützen. Die Unterhaltung dieser kurzlebigen „Holzdeiche“ war sehr kostenaufwendig, wurde dennoch streckenweise bis gegen Ende des 18. Jahrhunderts beibehalten. Als ihre hydraulisch ungünstige Wirkung erkannt worden war, die in der verstärkten Ausräumung des Wattes vor dem Deichfuß bestand, wurde dieser flach geböschd angelegt, mit Soden bedeckt und diese mit Strohbestick befestigt. Jedoch erforderten diese „Strohdeiche“, die an der gesamten Nordseeküste verbreitet waren, ungeheure Strohmenngen und deshalb ebenfalls einen jährlichen hohen Unterhaltungsaufwand. Bereits im 18. Jahrhundert wurden daher die ersten Schardeiche massiv als „Steindeiche“ befestigt. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erhielten dann alle Schardeiche auf dem Festland und den Inseln Befestigungen aus Natur- oder Ziegelsteinen.

Die Außenböschungen der Seedeiche, die vor allem der Brandung ausgesetzt waren, wurden im Laufe der Jahrhunderte flacher angelegt (Abb. 1). Es war erkannt worden, daß auf ihnen die Wellen weniger branden und geringere Schäden an der Grasnarbe und dem Erdkörper des Deiches entstehen. Die Innenböschungen der Deiche blieben dagegen nach wie vor steil und wurden bei Wellenüberlauf oder Überströmung ausgewaschen, woraus häufig Deichbrüche entstanden. Mit den bis zur Gegenwart weiterhin ansteigenden Sturmflutwasserständen wuchs auch die Deichhöhe von rd. 2,0 m bis zu 9,0 m über Gelände (Abb. 1). Das Wachsen der Deichquerschnitte vom Beginn des Deichbaues bis heute auf ein Vielfaches – mit der Zunahme ihrer Breite von rd. 4,0 m auf rd. 70,0 m – zeigt diese Abbildung ebenfalls deutlich. Darin wirkt sich auch die Erkenntnis der letzten Jahrzehnte aus, daß die Innenböschung flach zu bauen ist, damit überlaufende höchste Wellen keinen Boden auswaschen können.

Nach den sehr schweren Sturmfluten in der Nordsee von 1953, 1962, 1973 und 1976 ist wiederum die Erhöhung und Verstärkung aller See- und Stromdeiche im Nordseeküstengebiet begonnen worden und wird in etwa 10 Jahren abgeschlossen sein. Die Ab-

Coast Protection Works on the German North Sea and Baltic Coast

By Johann Kramer

1. Embankment construction on the North Sea

The first settlement of the marshland areas on the North Sea and in the tidal areas of the Ems, Weser, Elbe and Eider in the period before Christ's birth was possible without protecting habitations against storm tides since the sea levels were lower than they are today. As the water levels rose in the following period the inhabitants had to build mounds of earth, so called "Wurten", to protect themselves and their property against storm tides (see paper by ROHDE). As the number of inhabitants increased individual settlements were enclosed by ring dykes, until by about the 13th century the first continuous embankment of the North Sea coastal area had been built.

The first dykes (Fig. 1) had a very small cross section. At the beginning of dyke building they were low earth walls, steeply sloping and narrow. They were at first built far enough away from the shore line to leave them with a foreshore. If the foreshore was cut away by erosion, an attempt was usually made to protect the now more exposed dyke by vertical walls of wood. The maintenance of these short lived "wooden dykes" was very costly, but it was nevertheless continued in some stretches till towards the end of the 18th century. As their unfavourable hydraulic effect, which consisted of increased erosion of the flat at the foot of the dyke, came to be recognised, they were given a flat slope, turfed and the turf was fixed with straw bands. These "straw dykes" which were used along the whole North Sea coast required enormous quantities of straw and therefore had a high annual maintenance cost. By the 18th century the first of these exposed dykes had been solidly fixed as stone dykes. In the second half of the 19th century all exposed dykes on the mainland and the islands were fixed either by stones or bricks.

The outer slope of the sea dykes which was above all attacked by the breakers was built flatter over the centuries (Fig. 1). It became recognised, that waves would break less against them and would cause less damage to the roots of the grass and the earth fill of the dyke. The inner slope of the dyke, on the other hand, still remained steep and was washed away when waves broke over it or when it was over-topped, and this was frequently a cause of breaches in the dyke. With continuing rise of storm tide water levels up to the present day the height of embankments also increased from around 2.0 m up to 9.0 metres above the level of the surrounding land (Fig. 1). This figure clearly shows how the cross section of the dykes multiplied from their first building to the present, with an increase of width from about 4.0 metres to 70 metres. This also takes account of the recognition in recent decades that the inner slope should be built flat so that the highest waves breaking over it cannot wash away any soil.

After the very severe storm tides in the North Sea in 1953, 1962, 1973 and 1976 the raising and strengthening of all sea and river embankments in the North Sea coastal area was again begun and will be completed in about ten years. Figure 2 shows typical embankment cross sections. An embankment with a foreshore (A) starts from an outer slope of 1:6 with the slope gradually changing to blend with the foreshore. The "Schardeich" (B), an exposed embankment without foreshore, with the same slope to the

bildung 2 enthält typische Deichquerschnitte. Ein Deich mit Vorland (A) geht von der Außenneigung von 1:6 mit Neigungswechseln in das Vorland über. Der Schardeich (B) – ein Deich ohne Vorland – hat bei gleicher Neigung der Außenböschung einen im Vergleich zu früher höher hinaufgeführten massiven Fuß, der mit Natursteinen, Asphalt oder Beton befestigt wird. Ein Flußdeich (C) an der Elbe ist mit einer Asphaltbetondecke auf der Außenseite, der Krone und im oberen Bereich der Binnenböschung befestigt. Der Kern der gegenwärtig verstärkten oder auch neu gebauten Deiche besteht im allgemeinen aus Sand, da nicht genügend Klei verfügbar ist und dieser deshalb nur für eine möglichst erosionsfeste Kleidecke mit einer Dicke von 1,0 m bis 1,5 m benutzt wird. Für die Kronenhöhe von Seedeichen ist der Bemessungswasserstand maßgebend, der – nach unterschiedlichen Verfahren ermittelt (Abb. 3) – auf den höchsten Sturmflutwasserstand aufbaut und einen Zuschlag für den säkularen Anstieg des Meeresspiegels enthält, der rund 25 cm beträgt. Der um den Wellenauflauf erhöhte Bemessungswasserstand ergibt die Deichhöhe. Für die Bestimmung der Kronenhöhe von Stromdeichen an Ems, Weser und Elbe sind hydraulische Modellversuche erforderlich, weil anders die Eingriffe durch Flußregulierungen, Hafengebäuden und Abschließung der Nebenflüsse durch Sperrwerke nicht erfaßt werden können.

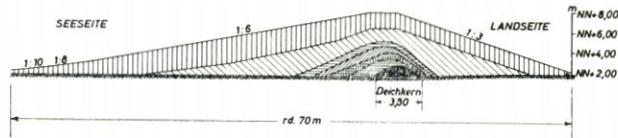


Abb. 1. Vergleich älterer Deichquerschnitte mit modernen;
der älteste Querschnitt wurde ungefähr 1000 nach Christi und der höchste nach 1962 angelegt

Fig. 1. Comparison of older embankment cross sections with modern ones;
the oldest cross section was built at approximately 1000 A.D. and the highest after 1962

Für den Küstenschutz ist seit dem 16. Jahrhundert die Neulandgewinnung bedeutsam gewesen (Abb. 4). Auf diese Weise konnten Einbrüche des Meeres beseitigt oder Buchten wie Dollart, Jadebusen und Meldorfer Bucht auf einen geringen Teil ihrer größten Ausdehnung verkleinert werden, was die Deichlinien erheblich verkürzte. Für die Landgewinnung (Abb. 5) werden Landgewinnungsfelder angelegt, die durch Lahnungsdämme abgeteilt sind, wodurch stärkere Wellenbewegung in den Feldern verhindert wird. In die Felder strömt zweimal täglich schlickhaltiges Flutwasser ein, aus dem im ruhigen Wasser Feststoffe sedimentieren und die Fläche auffüllen. Sobald eine bestimmte Höhe des Lahnungsfeldes erreicht ist, werden Gräben – kleine Gräben – ausgehoben, die nach Füllung durch Sedimentation wieder hergestellt werden, wobei der Aushub auf die Flächen zwischen den Gräben verteilt wird. Die häufige Wiederholung dieses Vorganges läßt die Landgewinnungsfelder weiter aufwachsen, wobei ein Fortschritt von bis zu 10 cm/Jahr erzielt werden kann. Für die buhnenartig wirkenden Lahnungsdämme gibt es verschiedene Bauweisen unter Verwendung von Busch bis zu Betonfertigteilen.

Durch den Bau neuer Deiche im Zuge der Landgewinnung, vor allem aber durch die Schließung der Nebenflüsse von Ems, Weser und Elbe sowie der gesamten Eider, wird gegenwärtig die Deichlinie an der deutschen Nordseeküste von rd. 1430 km Länge zwischen der holländischen und dänischen Grenze auf rd. 970 km verkürzt. Die Sperr-

outer wall, has a solid base which has been raised to a higher level than in earlier times and which is strengthened with stone, asphalt or concrete. A river embankment (C) on the Elbe is strengthened on the outer side, on the crown and at the top of the inner side with an asphalt concrete layer. The core of recently strengthened or newly built embankments generally consists of sand, since not enough clay is available, and this is therefore used to make an erosion proof clay cover 1.0 m to 1.5 m thick. The crest level of sea embankments is fixed by the measured water level. This is determined in various ways (Fig. 3) based on the highest storm tide levels with an addition of about 25 cm for secular rise in sea levels. This measured level is raised by an allowance for wave action and this gives the height of the embankment. To determine the crest level of the river embankments in the Ems, Weser and Elbe, hydraulic model investigations are required as otherwise account cannot be taken of river regulation, harbour works and barriers closing tributary rivers.

Since the 16th century land reclamation has become important for coast protection (Fig. 4). In this way the sea could be prevented from breaking through, or inlets like the Dollart, Jadebusen and Meldorfer Bucht could be reduced to a small part of their maximum size, thus considerably shortening the length of the embankments. For land reclamation (Fig. 5) land reclamation fields are laid out, divided by small dams (Lahnungsdämme) which prevent strong wave action in them. The fields are covered twice a day by tides carrying mud in suspension, from this solids are deposited at slack water and fill up the area. When the "Lahnungs" fields have reached a certain level "Grüppen" (small ditches) are dug. As these are filled up by sedimentation they are re-dug and the material excavated is spread on the area between them. The frequent repetition of this procedure allows the reclaimed fields to rise higher, so that an increase of 10 cm a year can be achieved. There are various ways of building these groyne-like "Lahnungs" dams from bushy twigs to ready made concrete sections.

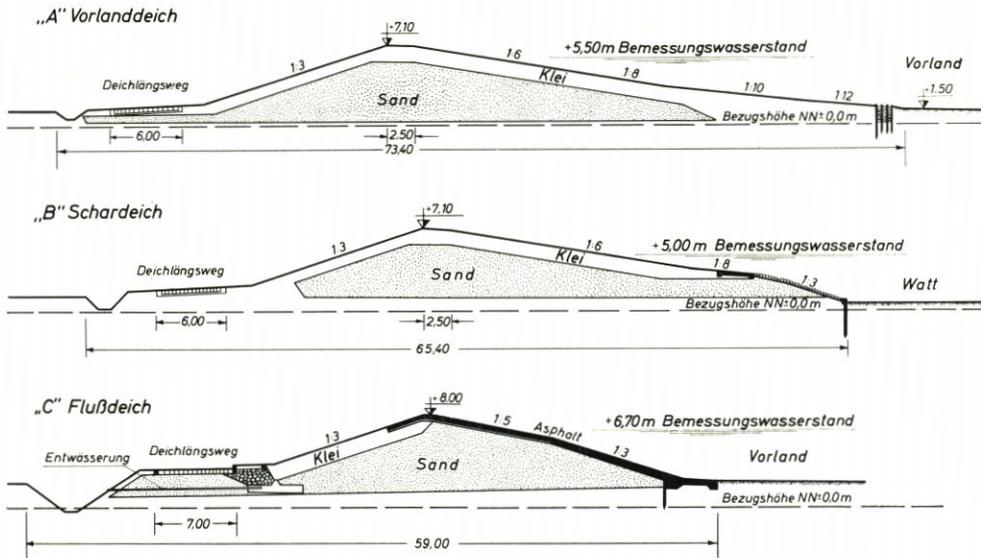


Abb. 2. Querschnitt von Deichen mit Sandkern und einer Klei- oder Asphaltdecke
 Fig. 2. Cross section of embankments with sand cores and a clay or asphalt covering

werke (Abb. 6) bleiben bei normalen oder wenig erhöhten Tiden geöffnet, um das Flußregime möglichst wenig zu beeinträchtigen, und werden nur bei erhöhten Sturmflutwasserständen geschlossen.

2. Schutzwerke an der Ostsee

Der Schutz der Ostseeküste gegen Sturmfluten unterscheidet sich von dem der Nordsee, weil hier die weiten Marsch- und Wattgebiete fehlen (s. Beitrag PETERSEN). Der Unterwasserstrand fällt steiler ab, so daß größere Wassertiefen bis an die Küste reichen. Von der 530 km langen Ostseeküste hat der größte Teil flache Ufer vor Niederungsgebieten, die streckenweise von Steilufeln unterbrochen werden. Der Landverlust an der Ostsee ist seit jeher größer als der Landgewinn gewesen.

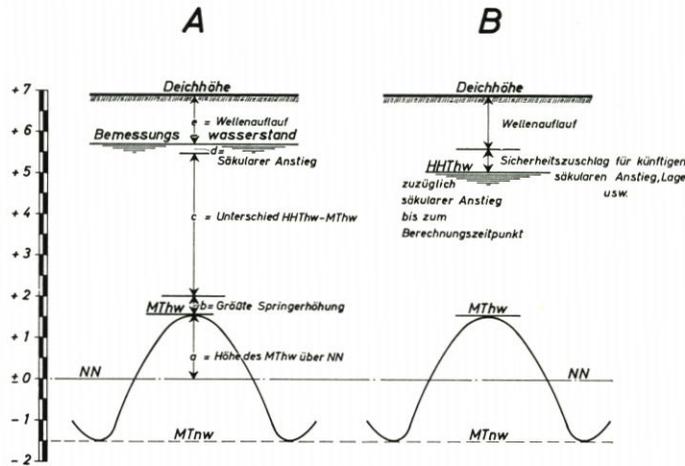


Abb. 3. Bestimmung der Kronenhöhe von Deichen:
A) Einzelwertverfahren
B) Vergleichsverfahren

Fig. 3. Determination of the crest level of embankments.
A) method based on an individual value
B) method based on comparison

Vor den Niederungen ist von der Brandung im allgemeinen ein Strandwall aufgeworfen worden, der bei Bauten zu ihrem Schutz vor Überschwemmungen den Ansatz für den Deichkörper bildete. Um die Mitte des 18. Jahrhunderts begann der Deichbau und wurde verstärkt nach der sehr schweren Ostseesturmflut des Jahres 1872 fortgeführt, wobei Kronenhöhen bis zu NN +5,0 m angestrebt wurden (Abb. 7). Deiche auf dem Strandwall waren bei weiterem natürlichen Zurückweichen des Strandes gefährdet, so daß sie mit massiven Fußbefestigungen und Bühnen gesichert werden mußten. Auf die Dauer hatte dieser starre Uferschutz jedoch nur Erfolg, wenn aus dem natürlichen Transport ausreichend Sand zugeführt wurde, um Unterspülungen zu vermeiden. Wo die Sandbilanz negativ blieb, sind in neuerer Zeit Strände künstlich aufgefüllt worden, wobei jedoch zu erkennen ist, daß der Sandbedarf für die Erhaltung aller Strände nicht aus dem begrenzten Sandvorrat des Küstenvorfeldes gedeckt werden kann.



Tafel XI: Haken bei Flüge auf Fehmarn verlängert sich in die Bucht hinein; Vorstufe für das Entstehen einer Nehrung. (Aufn. U. Muuß)

Plate XI: Curved sand spit near Flüge on the island of Fehmarn advancing into the bay. This is the early stage of the formation of a water logged area behind the spit.

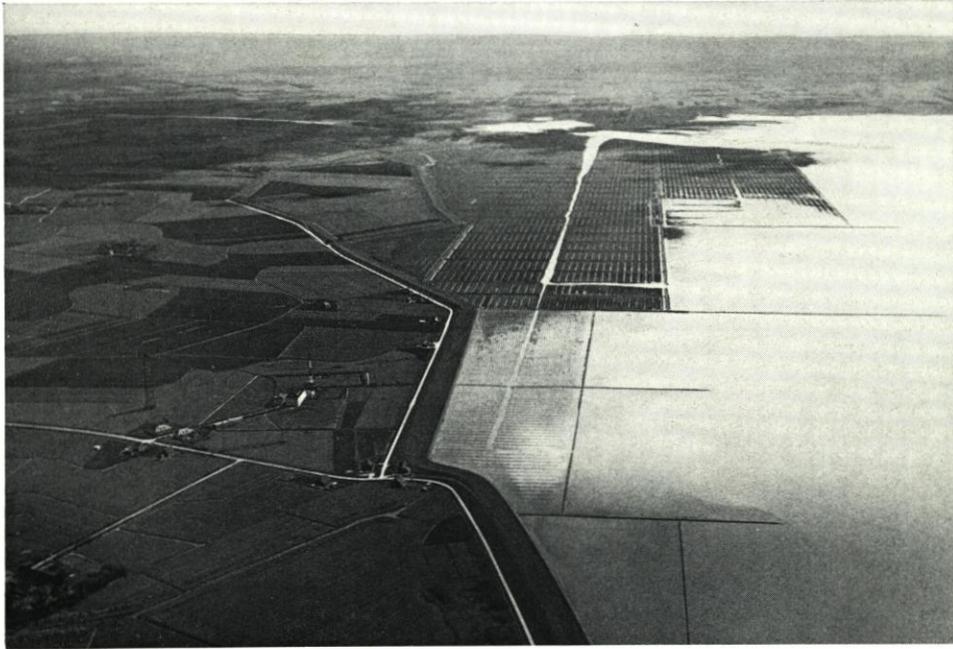


Abb. 4. Seedeich bei Utlandshörn mit Blick in die Leybucht; im Vordergrund Schardeich mit Lahnungen, im Hintergrund begrüpfte Landgewinnungsfelder (Luftbild freigegeben: SH 487-151)

Fig. 4. Sea embankment beside Utlandshörn looking towards Leybucht; in the foreground a "Schardeich" or exposed embankment with "Lahnung" dams, and in the background land reclamation fields with parallel ditches

The building of new embankments in the course of land reclamation, and above all the closing of the tributaries of the Ems, Weser and Elbe as well as the whole of the Eider have shortened the present line of embankments on the German North Sea coast between the Danish and Dutch borders from 1430 km to about 970 km. The tidal barriers (Fig. 6) remain open during normal or slightly high tides so as to have the minimum effect on the regime of rivers and are only closed against the raised water levels caused by storm tides.

2. Protection works on the Baltic

The protection of the Baltic coast against storm tides differs from that on the North Sea because here there are no broad areas of marshes and flats (see PETERSEN's paper). The underwater bed slopes more steeply so that greater depths of water reach right to the coast. Of the 530 km long Baltic coast the greater part has shallow beaches in front of low lying areas which are broken in some stretches by steep cliffs. The land lost on the Baltic coast has always been more than the land reclaimed.

In front of the low lying areas there is generally a sand bar thrown up by breaking waves. When engineering works are being constructed to protect them from flooding

Die Erhaltung der Steilufer an der Ostsee bringt die gleichen Probleme, handelt es sich hierbei doch meistens um Bereiche mit negativer Sandbilanz. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts wurde begonnen, einzelne Uferabschnitte durch Buhnen und Deckwerke zu schützen und den Sandeintrieb in die Fahrwasser und Häfen zu verhindern. Die Bauwerke waren mancherorts wirkungslos, so daß auch hier Strandauffüllungen erforderlich sind, wenn ein weiterer Uferabbruch nicht zugelassen werden darf.

Die verstärkte Nutzung der Ostseeküste für den Fremdenverkehr zwingt auf langen Strecken dazu, den weiteren Uferabbruch durch Sturmfluten zu verhindern. In das Programm der Verstärkung des Küstenschutzes ist deshalb auch die Ostseeküste einbezogen worden. Sie soll im nächsten Jahrzehnt abgeschlossen werden und wird zu sehr viel breiter gelagerten Schutzwerken als bisher führen (Abb. 7, Deichkörper 1975).

An der stark gegliederten Ostseeküste sind Städte wie Flensburg und Eckernförde, aber auch Kiel der Gefahr der Überschwemmung bei hohen Sturmflutwasserständen aus-

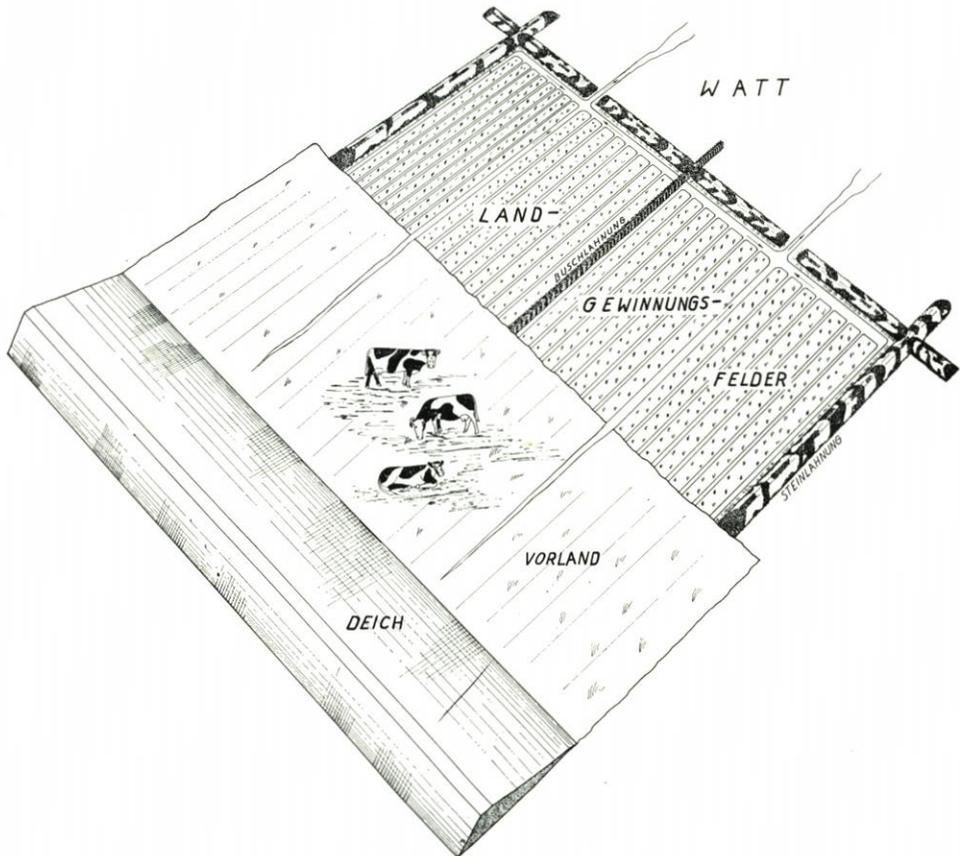


Abb. 5. Deich mit Vorland und Landgewinnungsfeldern als aktiver Küstenschutz (schematisch dargestellt)

Fig. 5. Embankment with foreshore and land reclamation fields as an active coast protection (shown schematically)

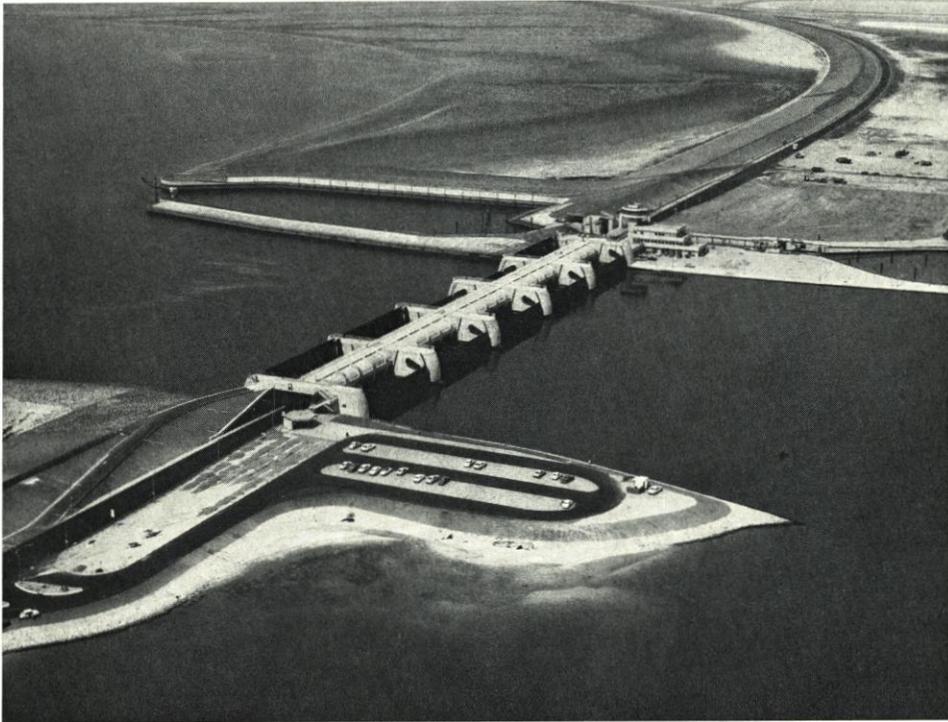


Abb. 6. Eider-Sperrwerk mit 5 Durchflußöffnungen und Schleuse sowie Anschlußdeich
(Ph. Holzmann Archiv; Luftbild freigegeben: LA Hamburg 965/77)

Fig. 6. Eider barrage with 5 sluice openings and lock and the adjoining embankment

these provide the basis for the body of the embankment. Dyke building began in the middle of the 18th century and was carried on more intensively after the very bad Baltic storm tides of 1872, when the aim was to achieve embankments with a crest height of NN +5.0 m* (Fig. 7). Dykes along the sand bar were endangered by the further natural retreat of the beach so that they had to be secured with massive reinforcements of their footings and with groynes. In the long run, however, this rigid embankment protection was only successful, when natural transport brought in sufficient sand to prevent their being undercut. In recent times the beach has been built up artificially in cases where the sand balance remains negative as it has been recognised that the sand requirements to maintain all the beaches cannot be maintained from the limited sand stocks in the coastal foreshore.

The maintenance of the cliffs on the Baltic involves the same problems which are mostly to do with negative sand balance. In the middle of the 19th century a start was made on the protection of individual stretches of shore with groynes and paving and on the prevention of sand movement into shipping channels and harbours. The engineering works in many areas were ineffective, so that beach nourishment was also necessary here if further erosion of the coast was not to be allowed.

*) NN is approximately equivalent to English O.D.

gesetzt. Wegen der Enge der Bebauung können hier keine flach geböschten Erddeiche aufgeführt werden, sondern es sind Hochwasserschutzwände zu errichten, die mit vielen verschließbaren Öffnungen für den Verkehr ausgestattet werden müssen und deshalb besonders hohe Kosten bringen.

3. Strand- und Dünenschutz auf den Inseln an der Nordsee

Der Schutz der Strände und Dünen der Ostfriesischen und Nordfriesischen Inseln (s. Beiträge LUCK und PETERSEN) begann in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts, nachdem die Inseln durch Sturmfluten so viele schützende Dünen verloren

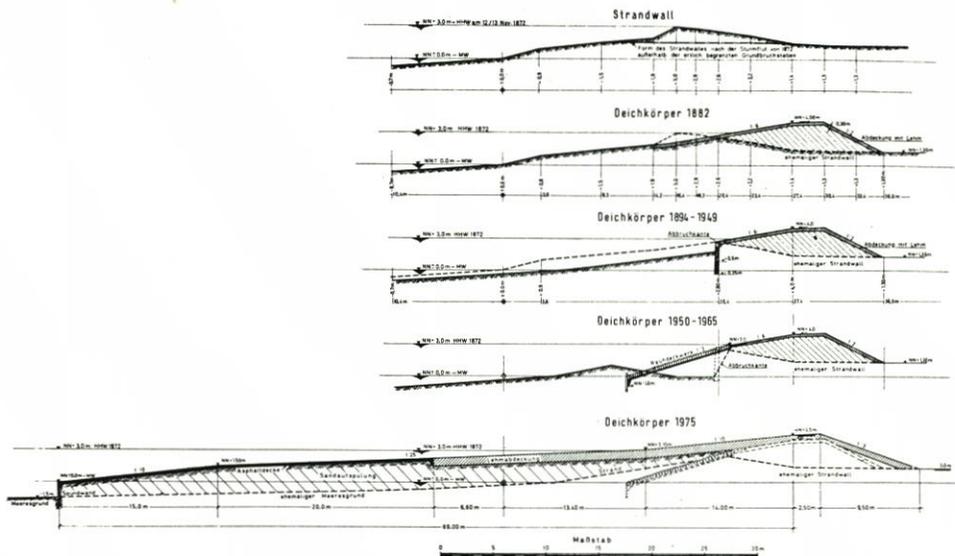


Abb. 7. Strandwall und Deichprofile an der Ostseeküste vor der Probstei
Fig. 7. Beach wall and embankment profile on the Baltic coast in front of Probstei

hatten, daß die Wohnorte gefährdet waren. Der Bau von Schutzwerken erschien in dieser Zeit günstiger als die Verlegung der zwischenzeitlich gewachsenen Siedlungen mit ihren Badeanlagen. Hinzu kamen die damals geringen Kenntnisse über die hydrologisch-morphologischen Vorgänge im Küstenvorfeld, nach denen erwartet wurde, daß die auf kurzen Uferstrecken angelegten Bauwerke für den Inselchutz ausreichen würden. Beispiele dafür sind die Inseln, auf denen zunächst einige hundert Meter Dünendeckwerk und einige Buhnen erbaut wurden, aus denen dann bis zur Gegenwart nach weiteren Strand- und Dünenabbrüchen langgestreckte Deckwerke mit einer großen Zahl von Buhnen entstanden. Insgesamt sind auf den Düneninseln an der Nordsee rd. 60 km Deckwerke und mehrere Hundert Buhnen der verschiedensten Bauweise entstanden.

The increased use of the Baltic coast for tourism made it necessary to prevent further erosion by storm tides over long stretches of coast. The Baltic coast has therefore also been included in the programme for strengthening coast defences that will be carried out in the next decade and this will lead to much more widely spread protection works than before (Fig. 7, embankment core 1975).

On the very indented Baltic coast towns like Flensburg and Eckernförde, and indeed also Kiel are in danger of flooding by the high water levels of storm tides. Because they are so closely built up it is not possible to build flatly sloping earth embankments here. Instead high water protection walls have to be built with many openings for traffic that can be closed at high tide and these involve very high costs.

3. Beach and dune protection on the islands on the North Sea

The protection of the beaches and dunes of the East Friesian and North Friesian islands (see papers by LUCK and PETERSEN) began in the second half of the last century after the islands had lost so many of their protective dunes through storm tides that the settlement areas were endangered. The building of protective works appeared

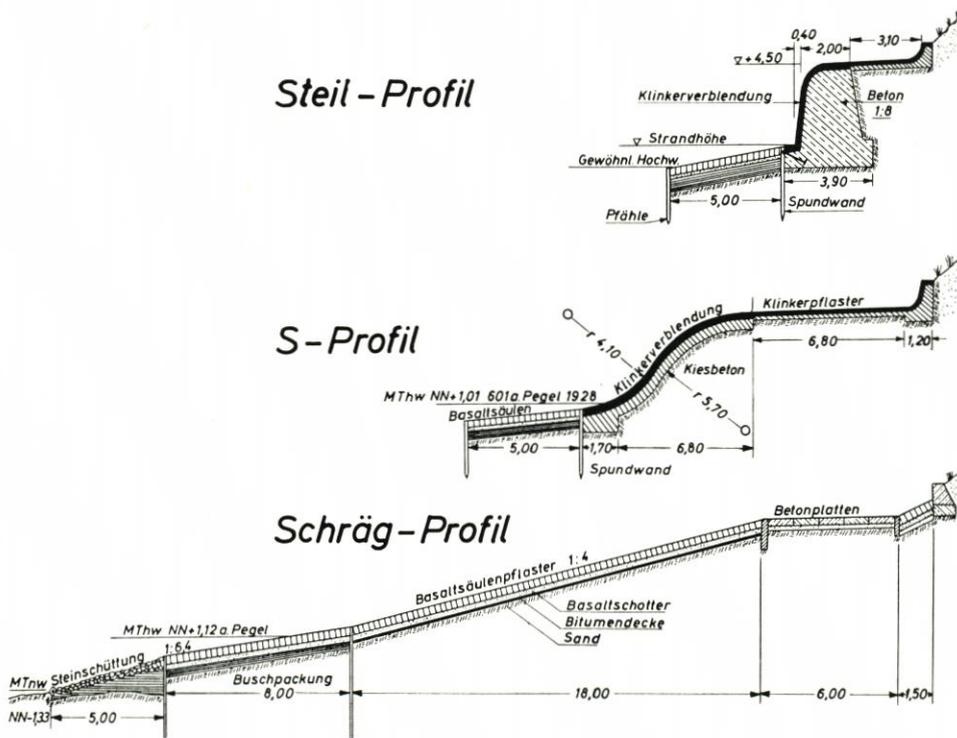
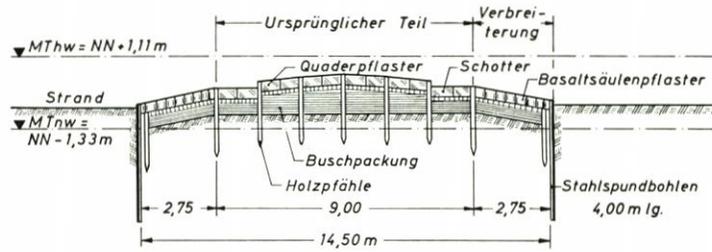


Abb. 8. Querschnitte von Dünendeckwerken
 Fig. 8. Cross section of dune surface protection works

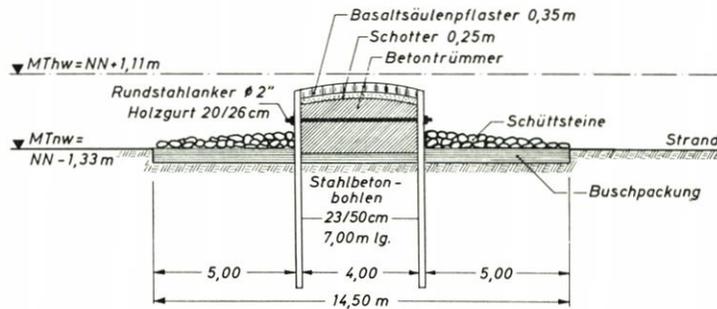
Die ersten Dünendeckwerke waren geschlossene oder offene Pfahlwerke. Ihre Lebensdauer war jedoch wegen der geringen Haltbarkeit des Holzes begrenzt. Sehr bald wurde deshalb begonnen, in massiver Bauweise Deckwerke im Steil-Profil oder S-Profil herzustellen (Abb. 8). Sie waren konstruktiv widerstandsfähiger, führten aber aufgrund der Brandung an ihrem Fuß zu Auskolkungen, besonders vor den Steilmauern, und mußten deshalb durch Spundwände und Steinvorschüttungen gegen Erosion gesichert werden. Meistens schritt jedoch der Sandverlust vor den Deckwerken fort, da sie in

Seebuhnen - Querschnitte

Flachbuhne



Kastenbuhne



Geböschte Buhne

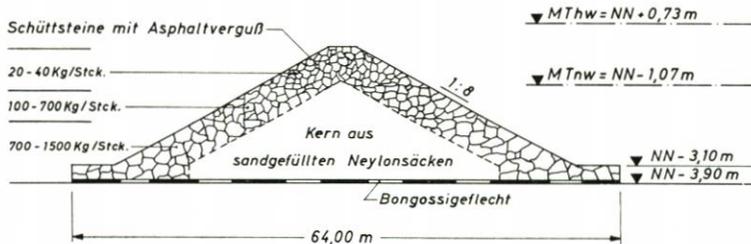


Abb. 9. Querschnitte von schweren Seebuhnen
 Fig. 9. Cross section of heavy duty sea groynes

at that time better than moving the settlements and bathing places which had grown up in the meantime. In addition with the little understanding at that time of hydraulic-morphological processes on the coastal foreshore it was expected that engineering works along short stretches of coast would be sufficient to protect the islands. Examples of this are the islands, on which at first a few hundred metres of dune paving works and a few groynes were constructed, until eventually by the present time after further beach and dune erosion long stretches of paving works and large numbers of groynes developed. Altogether on the barrier (dune) islands of the North Sea about 60 km of protective paving works and several hundred groynes were constructed.



Abb. 10. Westende der Insel Norderney nach der Strandaufspülung 1971 mit hochwasserfreiem Strand

Fig. 10. West of the island of Norderney after the beach feeding of 1971 with beach above high water level

The first dune protection works were closed or open timber works. Their length of life was limited because of the poor durability of the wood. Very soon, therefore, solidly built paving works in steep profile or S-profile began to be constructed (Fig. 8). These had greater resistance because of their construction but because of waves breaking at their base they led to scour, particularly in front of steep stone banks. They therefore had to be protected against erosion by sheet piling and dumping stones along their front. In most cases the sand loss in front of the paving works continued since they were erected on stretches of beach with a negative sand balance. In the thirties of this century the oblique profile was introduced, first in Sylt and later in Norderney to minimise the wave action on the paving (Fig. 8). This distributed the action of the breakers over a larger area. As well as changes in the profile, the strength of the construction of the protective works was always being increased, so that they are nowadays stable in the face of wave action so long as they are not endangered by undermining

Strandbereichen mit negativer Sandbilanz errichtet worden waren. Um die Brandung vor dem Deckwerk zu mindern, entstand dann in den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts das Schrägprofil, erstmals auf Sylt und später auf Norderney (Abb. 8), bei dem die Brandung auf eine größere Fläche verteilt wird. Neben der Veränderung im Profil wurden die Deckwerke in der Konstruktion immer schwerer, so daß sie heute standfest gegenüber den Brandungskräften sind, wenn sie nicht durch Unterspülung infolge Strandabnahme gefährdet werden. Auf Sylt und auf einigen anderen Inseln sind am Dünenfuß oder vor Steilmauern Wälle aus Tetrapoden gesetzt worden, die wellendämpfend wirken und damit den Strandabtrag vermindern. Für die gegenwärtig noch gebauten Dünendeckwerke werden vor allem massive Baustoffe wie Naturstein, Asphalt und Beton sowie Stahlpundwände als Längs- und Quersicherung verwendet.

Dem Bau von Dünendeckwerken folgte sehr bald der von Bühnen, die den uferparallelen Brandungsstrom mit Sandtransport hemmen sollten, wodurch von ihnen eine stranderhaltende Wirkung erwartet wurde. Die Bühnen entstanden in den verschiedensten Bauweisen zunächst als flach geböschte Steinbühnen (Abb. 9), an die mit fortschreitendem Verlust an Strandhöhe seitlich Bermen angebaut wurden, bis man in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts begann, sie seitlich durch Stahlpundwände einzugrenzen. Auf diese Weise wurde auch ihre Standsicherheit bei veränderten Strandhöhen erhalten. Kastenbühnen (Abb. 9) mit seitlichen Stahlbeton- oder Stahlbohlen waren von vornherein anpassungsfähig gegenüber veränderlichen Strandhöhen, besonders dann, wenn seitlich Sinkstücke lagen. Daneben besteht eine Vielzahl anderer Bühnenkonstruktionen aus Schüttsteinen mit Asphalt- oder Zementmörtelverguß der oberen Steinlage sowie mit unterschiedlich geneigten Böschungen. Bei großen Bühnenquerschnitten (Abb. 9)

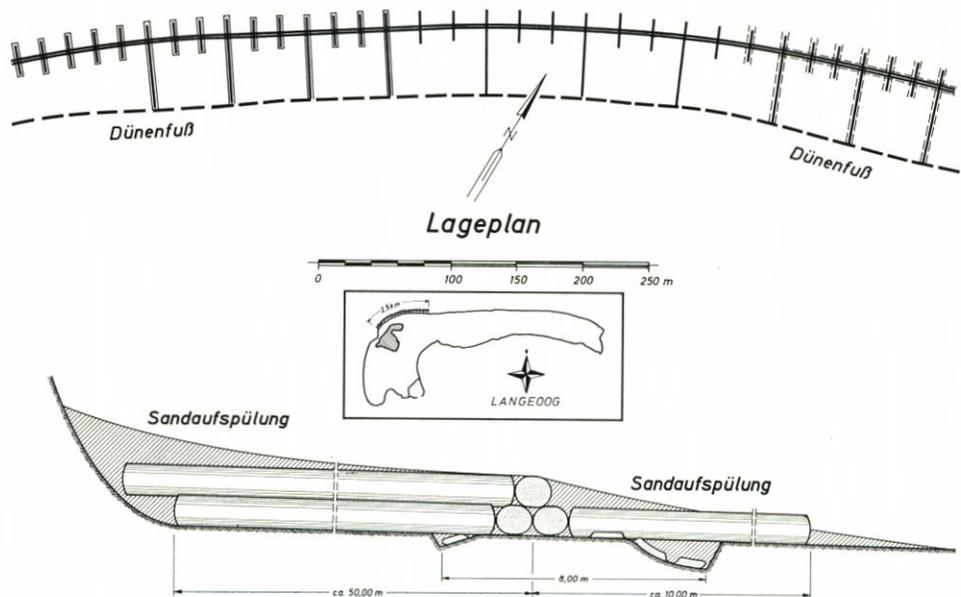


Abb. 11. Sandauffüllung auf der Insel Langeoog mit stabilisierendem, sandgefülltem Schlauchwerk 1971/72

Fig. 11. Beach feeding on the island of Langeoog with stabilizing sand filled tube works

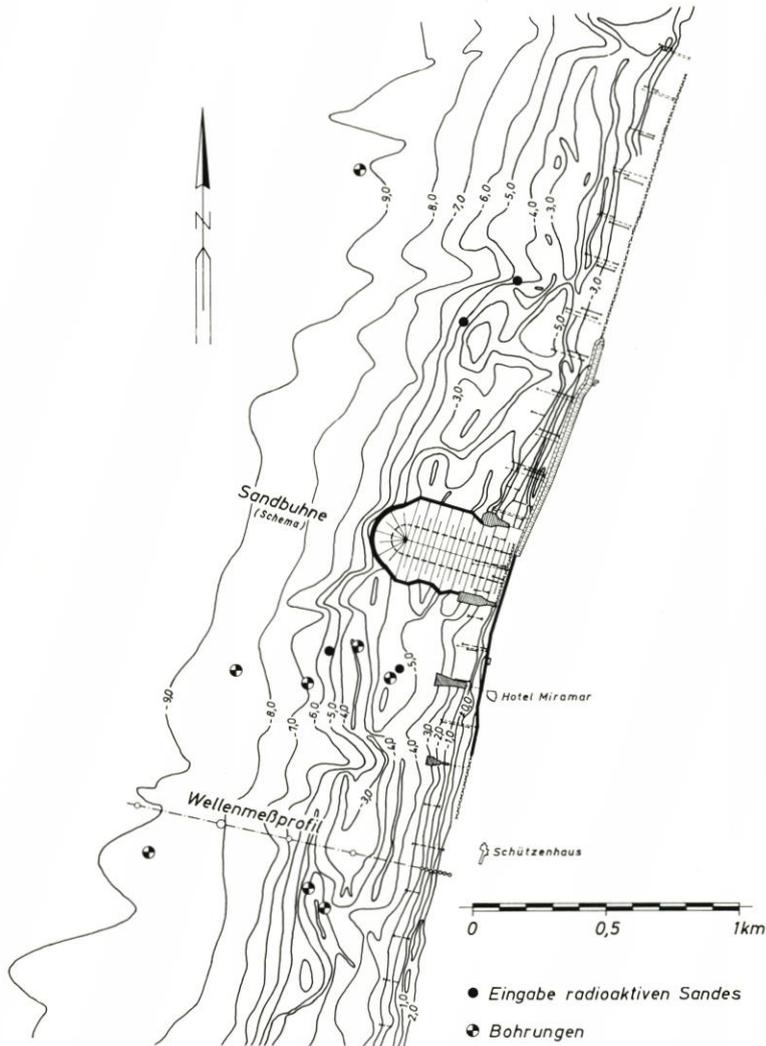


Abb. 12. Strandauffüllung vor Westerland auf Sylt 1972

Fig. 12. Beach feeding in front of Westerland on Sylt 1972

through sand erosion. On Sylt and in some other islands mounds of tetrapods have been put at the foot of dunes or at the base of steep embankment walls. These have the effect of damping down the wave action and thus diminishing beach erosion. For the dune protection works which are still being built today solid building materials such as stone, asphalt or concrete are used with steel sheet piling to secure them lengthwise and in cross-section.

The building of dune protection paving was followed very soon by that of groynes which should hinder wave movement with sand transport parallel to the shore and thus were expected to have the effect of conserving the beach. The groynes were built in

kann der Kern aus sandgefüllten Nylonsäcken bestehen. Durch den breiten Kopf einer solchen Bühne soll eine bessere stranderhaltende Wirkung als bei anderen Bühnenkonstruktionen erreicht werden.

Die auf den meisten Düneninseln bis heute entstandenen ausgedehnten Bühnensysteme mit der Vielfalt unterschiedlicher Bauweisen, deren Bau durch die in ihrem Bereich jeweils negative Sandbilanz verursacht wurde, haben im allgemeinen die Tendenz der Strandentwicklung grundsätzlich nicht ändern können. Deshalb wurde zum Ausgleich der natürlichen Sandverluste auf verschiedenen Inseln zur künstlichen Sandzufuhr übergegangen. Die erste große Strandauffüllung war 1951/52 am Westende von Norderney auf einer Strandstrecke von 5,1 km (Abb. 10). In zwei Jahren wurde flächenmäßig der Sand von der Strandmauer her eingespült, wobei zunächst ein sehr breiter hochwasserfreier Strand mit unnatürlich steilen Neigungen entstand, der dann durch die Sturmfluten des folgenden Winters abgetragen und den natürlichen Strandneigungen angepaßt wurde. Insgesamt ist diese Aufspülung bei naturgemäßer Abnahme der Menge rd. 15 Jahre wirksam geblieben. Eine flächenmäßige Aufspülung in den Jahren 1971/72 auf Langeoog wurde durch die Verlegung von sandgefüllten Schläuchen stabilisiert (Abb. 11). Dadurch wurde vor allem der Brandungsbereich vom Dünenfuß seewärts zum uferparallelen Schlauchwerk verlegt, wodurch weniger Sand in den Materialtransport während der Brandung gelangte und damit die Verluste am Strand sich verminderten. Vor der Westseite der Insel Sylt trat nach einer konzentrierten Vorspülung, die in Form einer bis ans Riff reichenden „Sandbühne“ geplant war (Abb. 12), eine schnelle Verlagerung der eingespülten Sandmassen in nördlicher und auch südlicher Richtung ein. Wichtig war hier die Beobachtung, daß nichts vom eingespülten Sand seewärts über das Riff verloren ging, sondern dieser voll in den uferparallelen Sandtransport einfloß. Neben diesen Strandauffüllungen sind inzwischen weitere ausgeführt worden, da sich erwiesen hat, daß sie unter Nutzung der hydraulischen Fördertechnik den wirtschaftlichsten Inselchutz ergeben. Hinzu kommt, daß die aufgespülten Strände auch für den Badebetrieb genutzt werden können, der die Grundlage der Existenz der Ost- und Nordfriesischen Inseln ist.

Eine Sonderstellung im Küstenschutz nimmt die in der Deutschen Bucht liegende Insel Helgoland (Tafel V) ein. Die Insel aus weichem Felsgestein, die unter der Wirkung der Brandung seit ihrer Entstehung auf einen Bruchteil ihrer ursprünglichen Größe abgenommen hat, erhielt in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts eine Schutzmauer, die sie voll umgibt. Einen Schutz erfordert auch die danebenliegende kleine Düneninsel, die vor allem für den Badebetrieb genutzt wird. Beide sind durch Schutzwerke verschiedener Art umschlossen, von senkrechten Ufermauern und Stahlspundwänden bis zum Tetrapodenwall. Die verschiedenen Konstruktionen erklären sich nicht nur aus der Bedeutung Helgolands als Badeort, sondern auch aus der früheren als Marinestützpunkt und der heutigen als Nothafen bei Stürmen in der Nordsee. Für die Hafenanlagen sind ausgreifende Molensysteme entstanden, die gleichzeitig als Schutz für die aufgeschütteten Landflächen dienen.

various ways, first as shallow sloping stone groynes (Fig. 9). As the level of the beach progressively fell these were extended with side berms (ledges) until in the twenties of this century steel sheet piling began to be used to limit their sideways extension. In this way it was also possible to keep them standing securely when the level of the beach changed. Cofferdams (Fig. 9) with lateral reinforced concrete or steel beams were from the first capable of adjustment for changes in beach level, especially in cases where there were sunken rocks. In addition there are a great many other types of groyne construction from loose stone, with asphalt or cement mortar poured over the top layer of stones, as well as with differently inclined slopes. Where the cross section of the groyne is large (Fig. 9), the core can be made of sand filled nylon sacks. The broad top of such a groyne is intended to achieve a better beach conservation effect than other types of construction.

In general the widespread groyne systems which still exist today and which are built in many different ways, and whose building was caused by the negative sand balance in their area, are not able to make a fundamental change in the trend of beach development. Because of this various islands have resorted to artificial beach feeding to make good the natural loss of sand. The first large beach feeding was carried out in 1951/52 on the west end of Norderney on a stretch of beach about 5.1 km long (Fig. 10). Over two years sand from the beach wall was pumped over the surface. This first produced a broad beach above high water line with an unnaturally steep slope, this was levelled by the storm tides of the following winter and conformed to the natural slope of the beach. Altogether this spreading of sand remains effective for about 15 years under reasonable natural conditions. In Langeoog in the years 1971/72 sand pumped on the surface was stabilized by laying down sand filled tubes (Fig. 11). In particular the tube-works were laid parallel to the shore in the area where the waves broke, from the foot of the dunes to the seaward, so that the waves succeeded in transporting less sand and the loss of sand on the beach was reduced. In front of the west side of the island of Sylt after a concentrated discharge of sand, which was planned in the form of a sand bar to reach as far as the sandbank (Fig. 12), there was a rapid shifting of the artificial sand mass in a northern and southern direction. The important observation was made that none of the newly deposited sand was lost to the seaward over the sandbank, but that it all flowed into the sand transport system parallel to the shore. Since then other cases of beach feeding as well as these have been carried out, as it has been shown, that by using the technique of encouraging hydraulic processes they provide the most economic method of island protection. An additional advantage is that the beaches on which sand is pumped can also be used for bathing, which is the basis for existence in the East and North Friesian islands.

The island of Heligoland, lying in the bay of Heligoland occupies a special position in coast protection (Plate V). The island with cliffs of soft rock, which has been reduced to a fraction of its original size by wave action, was given a protective wall, right round the island, in the first decade of this century. The small barrier (dune) islands lying close by which are mainly used as bathing resorts also require protection. Both are surrounded by protective works of various kinds, from vertical embankment walls and steel sheet piling to walls of tetrapods. These various protective works are accounted for not merely because of Heligoland's importance as a bathing resort, but because of its earlier role as a naval base and its present day one as an emergency harbour during North Sea storms. An extensive system of breakwaters has developed for the harbour installations which also serve as a protection for the built up land areas behind.