

Abteilung II Seehäfen und Seeschiffahrtsstraßen

(für die gewerbliche und die Sportschiffahrt und den Fischfang)

zu Thema 4:

Thema des deutschen Berichts

Zur Standsicherheit steiler Küstenabschnitte aus bindigen Böden

Berichtersteller:

Dr.-Ing. Michael Heibaum, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Achim Schneider, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

Jedes Küstenprofil ist permanenten Veränderungen unterworfen, wobei Erosion und Landabbrüche so stark sein können, daß auch Menschenleben gefährdet sind. Der Widerstand des Untergrundes hängt von der Bodenfestigkeit ab. Um die Standsicherheit einer Boden- oder Felsformation zu ermitteln, werden bodenmechanische Berechnungsverfahren benutzt. Die Belastungen resultieren vornehmlich aus den hydraulischen Randbedingungen, d.h. Grundwasserverhältnissen und Seewassereinflüssen. Der Beitrag behandelt die Standsicherheitsberechnungen für einen Küstenabschnitt an der Ostsee als Beispiel und den Einfluß von Grundwasserströmung und eindringendem Seewasser.

Inhalt

- 1 Geotechnische Aspekte der Küstenmorphologie
- 2 Beispielrechnung
- 3 Standsicherheit in situ

- 4 Einflüsse auf die Standsicherheit
- 5 Schutzmaßnahmen
- 6 Danksagung

Literatur

1 Geotechnische Aspekte der Küstenmorphologie

Gezeiten und jahreszeitlich wechselnde Einflüsse verändern die Küstenmorphologie. Küstenparallele Strömungen, Wellenaufwurf, Sturmfluten und andere hydraulische Belastungen sind die Ursachen ständig wechselnder Küstengeometrie, wobei die Prozesse zum Teil schnell ablaufen, zum Teil sich über Jahre erstrecken.

Handelt es sich um eine Strandzone, ist es denkbar, daß sich Erosion und Anlandung über das Jahr die Waage halten und schwerwiegender Landverlust nur durch große Sturmfluten eintritt. An anderer Stelle wirkt ständige Erosion, so daß Küstenschutzmaßnahmen erforderlich

werden. Allerdings wird der Nutzen solcher Maßnahmen häufig mit Nachteilen an anderer Stelle erkauft (Buhnenfelder führen zu Landgewinn in Luv, aber andererseits zu Lee-Erosion), oder es sind immer wiederkehrende Maßnahmen, wie z.B. Strandaufspülungen, die sich zu großen Kosten aufsummieren können. Solche morphologischen Prozesse und zugehörige Schutzmaßnahmen sind z.B. in PIANC (1992) behandelt.

Wenn es sich um eine Steilküste oder gar unterschrittene Ufer handelt, wirkt Erosion noch schädlicher: Uferabbrüche, verbunden mit hohen Bodenverlusten sind die Folge, die sich nicht wieder aufbauen lassen. Bei kohäsiven Böden können solche Abbrüche in kurzer Folge auftreten und schnell zur Bedrohung werden, wenn

Ansiedlungen davon betroffen sind.

Die Küstengeometrie reicht von steil und sogar unterschritten (bei Fels und festen bindigen Böden) bis zum flachen Strand (bei Sanden und Kiesen), je nach Bodenmaterial. Um die Standsicherheit zu beurteilen zu können, gibt es Verfahren der Felsmechanik, wenn die Stabilität durch das Kluftsystem und das darin fließende Wasser bestimmt wird, und der Bodenmechanik, wenn es sich um ein Lockergestein handelt, bei dem sich Bruchkörper wie Gleitkreise oder Gleitkeile ausbilden können. Bei den Berechnungsverfahren stößt man auf Schwierigkeiten, wenn der Fels vielfach gefaltet oder der Boden vielfach geschichtet ist. Ein großer Einfluß geht von den Porenwasserdrücken aus, sei es, daß sie durch zuströmendes Grundwasser entstehen oder durch den Tidewechsel.

Möglichkeiten und Grenzen der geotechnischen Berechnungsverfahren müssen klar bekannt sein, wenn damit die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen beurteilt werden soll, da mit solchen Baumaßnahmen häufig hohe Kosten verbunden sind. Für eine Beispielrechnung wird ein polnischer Küstenabschnitt der Ostsee zugrunde gelegt. Daraus zeigt sich zum einen die Notwendigkeit, Schutzmaßnahmen ergreifen zu müssen, andererseits aber auch die schwierige Abbildung in der Rechnung infolge der geologischen und hydraulischen Randbedingungen.

2 Beispielrechnung

Die betrachtete Küstengeologie birgt eine Reihe von Schwierigkeiten für Rechnung und mögliche Schutzmaßnahmen in sich. Zum einen handelt es sich um relativ weiche Böden (Tone und Sande) in wechselnder Schichtfolge mit Schichtdicken von einigen Zentimetern bis zu Dezimetern. Zum anderen lassen sich die Porenwasserdruckverhältnisse nur sehr schwer abschätzen.

Das geologische Küstenprofil wird im wesentlichen von quartären Ablagerungen gebildet. Über dem sehr mächtigen Bänderton finden sich Moräneschichten aus Lehm und Sand. Bild 1 zeigt einen groben Überblick über den Uferaufbau.

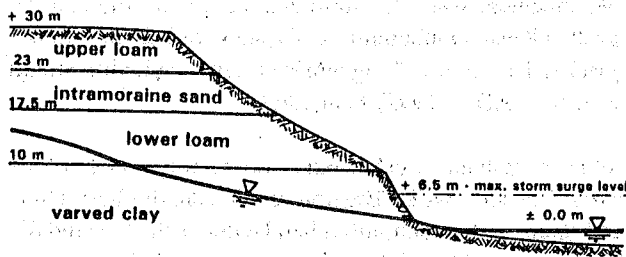


Bild 1: Vereinfachtes geologisches Profil

Bei näherer Betrachtung des Bändertons fällt eine starke Feinschichtung auf: Es wechseln Sande und Tone und Mischböden mit unterschiedlichen Anteilen dieser Bodenarten. Solch eine Schichtenfolge ist in geotechnischen Berechnungen nicht mehr detailliert abbildbar, weder hinsichtlich der Festigkeiten noch hinsichtlich der Durchlässigkeiten. Auch die Porenwasserdruckverhältnisse oder Grundwasseroberflächen lassen sich bei dieser schnellen Folge von zum Teil sehr durchlässigen und nahezu undurchlässigen Schichten kaum abschätzen. Demgegenüber muß beachtet werden, daß gerade die Porenwasserdrücke jede Stabilitätsberechnung maßgeblich beeinflussen.

Da es sich bei Küstenschutzbauwerken um sehr kostenintensive Maßnahmen handelt, zumindest wenn mehr als nur lokale Aufgaben anstehen, müssen umfangreiche Voruntersuchungen angestellt werden, z.B. welche Bruchmechanismen überhaupt auftreten können, wodurch sie hervorgerufen werden, welche Lasten überlagert sein können und letztlich, welche Berechnungsverfahren geeignet sind.

Der Küstenabschnitt, der hier betrachtet werden soll, weist eine Reihe von Abbrüchen auf. Zum Teil finden sich gestaffelte Brüche, wobei die sichtbare Bruchgeometrie den klassischen Gleitkreisen sehr ähnlich ist. Im folgenden wird die Ursprungsgeometrie untersucht und eine Antwort gegeben, wie diese Abbrüche zustande kommen konnten. Der einzelne Bruchkörper hat sich nach einer bestimmten Bewegungsbahn offensichtlich stabilisiert: Die ursprüngliche Oberfläche ist horizontal geblieben und dadurch haben die darauf befindlichen Pflanzen kaum Schaden genommen (Bild 2).

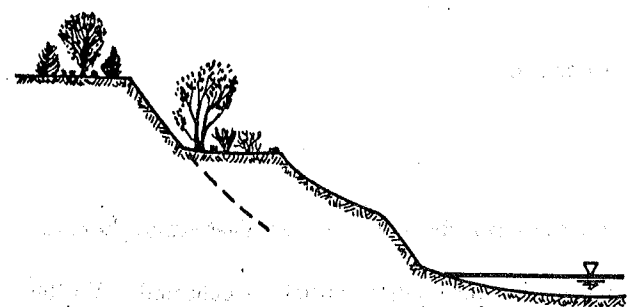


Bild 2: Gleitkreisartige Uferabbrüche

Die Böschungen sind sehr steil, so daß neue Bruchmechanismen durch folgende Sturmfluten leicht in Gang gesetzt werden können und Landverluste unvermeidlich sind. Eine solche Ufergeometrie deutet auf eine Stabilität nahe am Grenzzustand hin, so daß nur geringe zusätzliche Lasten zum Bruch führen müssen.

In situ und bei der Berechnung verursachen die Sandlagen im Bänderton die größten Schwierigkeiten: Sie

stellen zum einen gute Grundwasserleiter dar und können aber auch bei hohem Tidewasserstand durch eindringendes Seewasser aufgefüllt werden, wodurch sich ein Porenwasserdruck im Korngerüst ausbildet, der dem Außenwasserstand entspricht.

Wo und in welchem Maße dies geschieht, hängt von der Durchlässigkeit des Bändertones ab, die aber kaum als einheitlich angesetzt werden kann. Die Tonlagen zeigen horizontale und vertikale Klüfte, die je nach Entstehung und Spannungszustand offen und damit wasserführend oder fest geschlossen sein können. Die Sandlagen besitzen je nach Schluff- und Tonanteil eine mehr oder minder große Durchlässigkeit.

Ein Weg wäre, eine Querisotropie einzuführen, also größere horizontale als vertikale Durchlässigkeit. Da es sich dann aber auch wieder um Mittelwerte handeln muß, können die besonderen Auswirkungen insbesondere der Sandschichten nicht genügend verdeutlicht werden. Deshalb wird in der Beispielrechnung eine dünne Sandschicht im sonst homogen angenommenen Bänderton eingeführt, die die vielen dünnen Schichten repräsentiert.

3 Standsicherheit in situ

3.1 Freie Spiegellinie des Grundwassers

Die Kennwerte des Küstenuntergrundes sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Schicht	Nr	γ	γ_s	n	w	φ'	c'	E_s
		kN/m ³	kN/m ³					
upper loam	4	20,7	26,7	0,34	0,17	14	24	3
sand	3	18	26,5	0,37	0,08	32	0	65
lower loam	2	22	26,7	0,24	0,08	22	40	14
clay	1	19,2	27,2	0,44	0,26	11	50	10

Tabelle 1: Bodenkennwerte

Da keine genauen Daten über den Verlauf der Grundwasseroberfläche vorlagen, wurde die Spiegellinie über eine Finite-Elemente-Berechnung ermittelt. Bekannt waren nur der Grundwasserspiegel landeinwärts bei ca. 17-18 m über Meeresspiegel und die schon beschriebene Geometrie und Geologie. Die berechnete Sickerlinie ist in Bild 1 eingetragen und verläuft von dem landeinwärts vorgegebenen Wasserstand bis auf Null an der Austrittsstelle.

Die Berechnung nach der Gleitkreismethode (LGA 1990) zeigt, daß ohne zusätzliche Lasten aus Sturmflut oder

Wellen die Standsicherheit schon nahe am Grenzzustand ist. Zwar wird in situ die Kapillarkohäsion noch eine gewisse Standsicherheitserhöhung bewirken, jedoch kann diese in der Rechnung nicht angesetzt werden, da ihre Größe auf reiner Schätzung beruhen würde.

Die Schicht- und Grundwassergeometrie für die Berechnung ist in Bild 3 dargestellt, ebenso die Gleitkreise mit den niedrigsten Sicherheiten. Wie man sieht, wird der wahrscheinlichste Gleitkreis durch den Bänderton bestimmt, in dem sich zwei Drittel der Bruchfläche befinden. Aber auch Böschungsfußkreise haben nur eine wenig höhere Sicherheit (Bild 3).

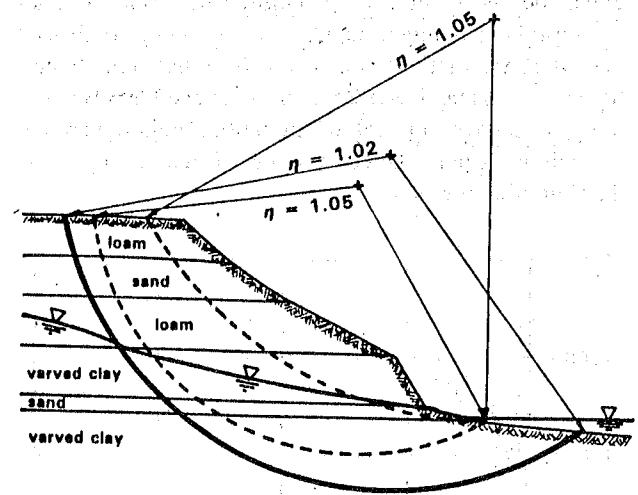


Bild 3: Gleitkreisberechnung (ursprüngliche Ufergeometrie)

Da bei Stabilitätsberechnungen die Ergebnisse immer auch von dem Berechnungsverfahren abhängen, wurde parallel ein ganz anderes Verfahren benutzt. Finite-Elemente-Berechnungen haben sich im allgemeinen als Verfahren zur Verformungsberechnung in der Geotechnik sehr gut bewährt. Bei einigen Programmen ist es außerdem möglich, den Grenzzustand abzuschätzen. Mit solch einem Programm (Vermeer 1991) wurde derselbe Querschnitt mit denselben Kennwerten (Tabelle 1) untersucht. Das verwendete Elementnetz mit den Materialkennzahlen ist in Bild 4 dargestellt. Um den Sicherheitsfaktor zu ermitteln, wird iterativ die Scherfestigkeit (Reibungswinkel und Kohäsion) reduziert, bis eine weitere Verringerung nicht mehr möglich ist und nur noch endlos wachsende Verformungen erhalten werden. Bild 5 zeigt diesen Prozess für den Elementknoten an der Böschungsschulter.

3.2 Artesisch gespanntes Grundwasser

Um auch den Fall zu untersuchen, daß die bindigen Schichten des Bändertones praktisch undurchlässig sind,

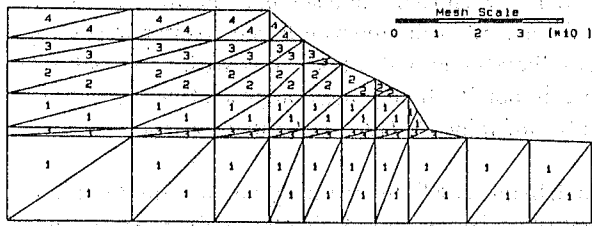


Bild 4: Finite-Elemente-Netz mit Materialkennzahlen

wurde angenommen, daß sich in der Sandschicht gespanntes Grundwasser befindet. Die Drucklinie wurde dabei identisch mit der Spiegellinie des freien Grundwasserabflusses angesetzt. Diese Berechnung ergab nach der Gleitkreismethode einen um 0.01 höheren Sicherheitsfaktor als bei freier Spiegellinie, bei der FE-Berechnung betrug der Unterschied nur 0.006. Weitere Parameterstudien sollen daher nur mit freier Spiegellinie durchgeführt werden.

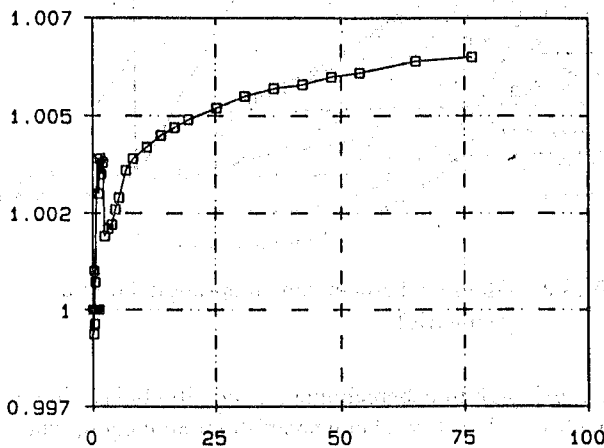


Bild 5: Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit von der Verschiebung der Böschungsschulter

4 Einflüsse auf die Standsicherheit

Für die weiteren Parameterstudien wurden die Geometrie und die Kennwerte beibehalten. Um den großen Einfluß der Porenwasserdrücke zu verdeutlichen werden folgende Zustände verglichen:

- Grundwasser mit freier Oberfläche oder gespannt
- Der Einfluß eines zeitlich begrenzten hohen Meeresspiegels.

Dabei wurden wieder beide Berechnungsverfahren eingesetzt, wobei sich jedoch unterschiedliche Grenzen zeigten.

4.1 Horizontaler Grundwasserspiegel

Die größte Standsicherheit erhält man sicherlich für die Annahme eines horizontalen Grundwasserspiegels in Höhe des normalen Seewasserspiegels, da keine Strömungskräfte zusätzliche Belastungen hervorrufen. Die geringste Sicherheit weist in diesem Fall ein Böschungsfußkreis mit $\eta = 1.09$ auf. Die FE-Berechnung, die schon bei der vorangegangenen Studie stets eine etwas geringere Sicherheit ergeben hat, führt zu $\eta = 1.065$.

Bild 6 zeigt die Linien gleicher Gesamtverformung (aufsummiert über den Iterationsprozess bis zum Grenz-zustand), wie sie aus der FE-Berechnung erhalten wurden. Die größte Verformung findet sich am Böschungsfuß und die 85%-Isolinie ist die erste (d.h. diejenige mit den größten Verformungswerten), die durch das gesamte Bödenprofil reicht, und damit den Bereich möglicher Bruchflächen kennzeichnet. Selbstverständlich ist dies nur eine erste Näherung, da FE-Berechnungen Verformungen liefern und Bruchzustände im Sinne von Gleitflächen nicht erhalten werden können. Wie der Vergleich mit dem ebenfalls eingezeichneten Gleitkreis mit der kleinsten Sicherheit zeigt, ist ein Böschungsfußbruch wahrscheinlich, wobei der Gleitkreis oben steiler verläuft als die 85%-Isolinie der FE-Berechnung.

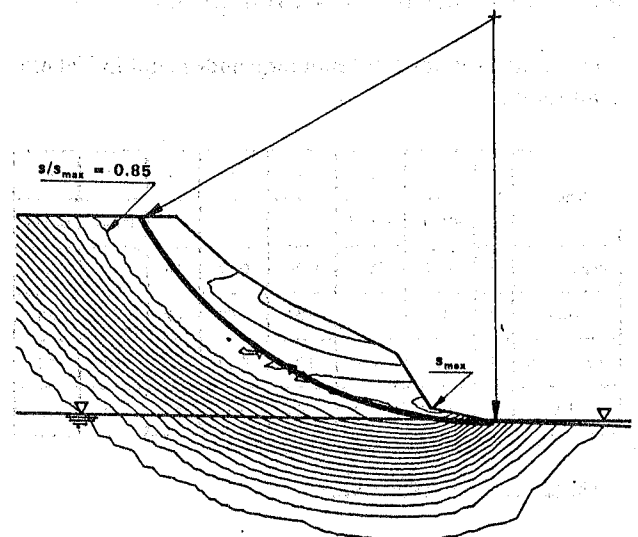


Bild 6: Grenzstände bei Gleitkreis- und FE-Berechnung

4.2 Stationärer Grundwasserspiegel

Die Grundwasserverhältnisse in situ, also hoher Stand landeinwärts auf Meeressniveau abfallend, wurden in Abschnitt 3 behandelt. Dabei wurde der normale Seewasserspiegel als Randbedingung vorgegeben. Während längerer Sturmfluten kann der Wasserspiegel jedoch bis um 6.5 m steigen, woraus sich eine Folge von

instationären Belastungszuständen ergibt, was im folgenden behandelt werden soll.

4.3 Schnelle Spiegelsenkung nach Hochwasser

Das Hochwasser kann wesentlich über dem normalen Austrittswasserstand des Grundwassers liegen. Dadurch wird durch Infiltration im Porenraum ein höherer Wasserdruck erzeugt. Eine mögliche Druckverteilung zeigt Bild 7 (strichlierter Wasserspiegel). Fällt das Hochwasser, was ein relativ schneller Vorgang sein kann, bleibt der Porenwasserdruck zunächst auf dem vorher erreichten Niveau.

Dieses Phänomen stellt sich ein, weil das Porenwasser keine ideale Flüssigkeit ist, sondern Luft enthält, die infolge des höheren Wasserdruckes zusammengedrückt wurde und sich nun entspannt. Dies wiederum verhindert einen schnellen rückschreitenden Druckabfall im Porenwasser. Dadurch bildet sich am Austrittspunkt des Porenwassers eine relativ steile Sickerlinie aus (Bild 7, durchgezogene Linie). Erst nach Ablauf einiger Zeit, die von der Durchlässigkeit des Bodens und der eingeschlossenen Luftmenge abhängig ist, stellt sich die ursprüngliche Wasserdruckverteilung wieder ein.

Dieser instationäre Lastfall kann am Ufer Bruchvorgänge auslösen. Um die Porenwasserdruckverteilung zu messen und vorauszuberechnen, wurden entsprechende Lösungswege gefunden (Köhler 1989). Um die prinzipiellen Auswirkungen darzustellen, erfolgt hier für die Standsicherheitsberechnungen nur eine Abschätzung der möglichen Randbedingungen.

Um zu verdeutlichen, daß der bruchauslösende Faktor der instationäre Zustand ist, wurden die beiden Spiegellinienverläufe in Bild 7 als stationäre Zustände einer Gleitkreisberechnung zugrunde gelegt. Für den hohen Wasserstand wird dann die Sicherheit $\eta = 1.04$ erhalten, für den abgesenkten Fall $\eta = 1.0$. Letzteres bedeutet zwar Grenzzustand, muß aber noch kein zwingender Hinweis auf Bruchvorgänge sein.

Die Gleitkreisberechnung für den instationären Fall, d.h. Porenwasserdruck auf hohem Niveau und Spiegellinie abgesenkt, ergibt eine Sicherheit von $\eta = 0.96$, also einen klaren Hinweis auf den Bruchzustand. Die Gleitkreise mit den jeweils geringsten Sicherheiten sind für die letzten drei Fälle gleich, so daß ein Einfluß aus der Gleitkreisgeometrie entfällt. In der FE-Berechnung war es in diesem Fall nicht möglich, eine stabile Iteration zu erreichen, was ebenfalls als Hinweis gedeutet werden muß, daß keine Standsicherheit unter diesen Randbedingungen gegeben sein kann.

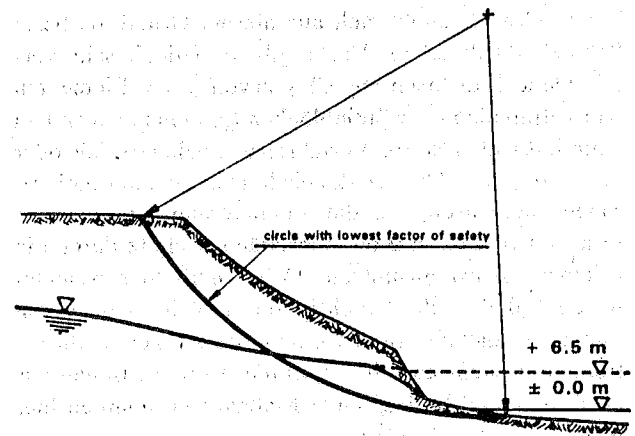


Bild 7: Grenzzustand infolge Wasserstandsabfall

5 Schutzmaßnahmen

Um Uferabbrüche zu verhindern, können grundsätzlich zwei Wege besprochen werden: entweder muß der Einfluß des Porenwassers begrenzt werden oder die Widerstandsseite muß verstärkt werden. Übliche und geeignete Methoden, den Einfluß des Wassers zu begrenzen, sind Drains und Filter, während eine Fußvorlage die erste Maßnahme zur Sicherung gegen Abgleiten darstellt.

Im vorliegenden Fall ist eine Begrenzung des Grundwasserzustroms nicht oder nur verbunden mit immensen Kosten denkbar, so daß der landeinwärtige Grundwasserstand für die Überlegungen als fest vorgegeben angesehen werden muß.

Um den Zustrom von Meerwasser in das Porenvolumen zu verhindern oder zu begrenzen, wäre ein undurchlässiges Deckwerk denkbar. Dies hat jedoch den Nachteil, daß sich gleichzeitig das Grundwasser dahinter aufstauen und wieder zu erhöhten Belastungen führen würde.

Eine Möglichkeit besteht darin, den Grundwasserstand nur in der Nähe der Böschung zu erniedrigen. Die Steilheit des Ufers und die Höhe des Geländesprunges machen auch dies zu einer aufwendigen und damit teuren Maßnahme. Außerdem würde damit der Lastfall 'eindringendes Meerwasser' nicht verhindert.

Die Einwirkungsseite zu verändern, erweist sich demnach als nahezu aussichtslos. Es muß daher versucht werden, den Widerstand zu erhöhen. Die beste Art und Weise, eine Böschung zu stabilisieren, ist die Abflachung. Vielleicht war die Küste einmal flacher, doch infolge des sehr erosionsgefährdeten Bodenmaterials ergibt sich sehr schnell eine Versteilung, immer wieder gefolgt von Abbrüchen.

Ein Deckwerk bietet sich aus diesem Grund als beste Schutzmaßnahme an. Dafür gibt es jedoch sehr verschiedene Bauweisen, angefangen von großen Elementen wie Tetrapoden oder Steinblöcken (mit entsprechendem Unterbau), über 'starre' Verfahren wie Schutzwände oder voll vergossene Deckwerke bis hin zu ingenieurbio-logischen Bauweisen, die die Verankerungskapazität der Pflanzenwurzeln und den Oberflächenschutz durch die Pflanzen selbst ausnutzen. Dabei muß hier beachtet werden, daß viele Bruchfiguren tief in den Böden reichen, so daß die Ankerwirkung der Wurzeln in diesen Bereichen nicht ausreichen würde. Kombinationen aus Deckwerk und biologischen Maßnahmen könnten hier jedoch zum Erfolg führen.

Die Methode der Sandaufspülung, wie sie an erosionsgefährdeten Dünenküsten häufig ausgeführt wird (van de Graaff, Koster 1990) ist für dieses Steilufer aus bindigen Böden sicher nicht der richtige Weg, da jedesmal, wenn der aufgespülte Sand erodiert ist, sofort auch das Ufer wieder angegriffen wird.

Zusätzliche Maßnahmen gegen Sturmfluten oder Wellenschlag, z.B. das Anlegen von Bermen oder vorgelagerte Wellenbrecher sind generell nützlich. Diese Baumaßnahmen verringern die zusätzlichen Lasten aus hohen oder brechenden Wellen oder Wellenauflauf. Doch diese Lasten waren in den Berechnungen noch gar nicht berücksichtigt worden. Allein der schnelle Wasserstandswechsel bei Sturmflut kann bruchauslösend wirken (der normale Tidewechsel ist im betrachteten Küstenabschnitt ohne Einfluß).

Für jede Maßnahme ist jedoch eine sehr sorgfältige Planung erforderlich, wobei ein gutes Zusammenspiel der

Fachgebiete Hydraulik und Geotechnik zum Erfolg führen wird.

6 Danksagung

Die Autoren danken Prof.R.Zeidler von der polnischen Akademie der Wissenschaften für die Bereitstellung der örtlichen Informationen.

Literatur

Graaff, J.van de; Koster, M.J.: Dune and beach erosion and nourishment. In: Pilarczyk, C. (Ed.). Coastal Protection. Rotterdam: A.A.Balkema 1990.

Köhler, H.-J.: Messungen von Porenwassertberdrücken im Untergrund. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Heft 66. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau 1989.

LGA: Porgramm 'KREBIS'. Nürnberg: Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt Bayern 1990.

PIANC: Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles in marine environment. Report Working Group 21 of the Permanent Technical Committee II. Supplement to Bulletins nos.78/79 of the Permanent international Association of Navigation Congresses (PIANC) 1992.

Vermeer, P.A. (Ed.): PLAXIS - Finite Element Code for Soil and Rock Plasticity. Rotterdam: A.A.Balkema 1991.