

Sanierung der Kolke am Eidersperrwerk - Geotechnische Stabilität von Deckwerk und Untergrund

Scour stabilisation at the Eider storm surge barrier -
geotechnical stability of revetment and subsoil

Assainissement des affouillements à la barrière d'Eider

Stabilité géotechnique du revêtement et du sous-sol

Выздоровление размывов у заградительной плотины на реке Эйдер -
геотехническая устойчивость береговых укреплений и грунта



Michael Heibaum, Dr.-Ing., Baudirektor, Referatsleiter "Erdbau, Ufer- und Sohlsicherungen" in der Bundesanstalt für Wasserbau.

Geboren 1951, Studium des Bauingenieurwesens an der TH Darmstadt 1972-1978, Ingenieur im innerstädtischen Tiefbau bei der Fa. Hochtief, Frankfurt/M 1978-1979, wiss. Angestellter in der Universität Stuttgart (Institut für Werkstoffe im Bauwesen) und der TH Darmstadt (Institut für Geotechnik) 1979-1985. Promotion über Verankerungen von Stützwänden 1986. Seit 1985 wiss. Mitarbeiter und seit 1987 Referatsleiter in der BAW.

Inhaltsangabe

Zur Stabilisierung eines sehr tiefen (25 m) und sehr steilen (1:1) Kolkes am Ende der Sohlsicherung vor dem Eider-Sperrwerk mußte eine Sohlsicherung gegen rückschreitende Erosion der Kolkböschung entworfen werden, wofür es bislang kein Beispiel gab. Da die traditionellen Sinkstücke auf der steilen Böschung rutschen würden und Kornfilter wegen der Entmischungsproblematik nicht verklappt werden konnten, wurde der Mischkornfilter in geotextilen Großsäcken auf der Kolkböschung eingebaut, wobei das Geotextil selbst als Filter dimensioniert war. Filterregeln waren nur an der Grenzschicht Filter-Auffüllung streng einzuhalten, während am Übergang Untergrund-Filter Grenzwerte akzeptiert werden mußten. Dennoch ist ein stabiles System entstanden, da große Schichtdicken von Auffüllung und Deckschicht zum einen eine starke Dämpfung der hydraulischen Belastung an den Grenzschichten bewirken und zum anderen die Auflast auf dem Untergrund ausreicht, um stets einen ausreichenden Spannungszustand im Boden zu gewährleisten.

Summary

An unprecedented system of slope protection had to be developed to stabilize a very deep (25 m) and very steep (1:1) scour hole at the end of the bottom protection of the Eider storm surge barrier, progressing toward the barrier. Since fascine mattresses would slide downslope and granular filter could not be dumped due to segregation problems, the wide graded filter material was placed on the bottom in geotextile containers, themselves designed as geotextile filters to achieve a twofold safety. Filter rules could be obeyed strictly only at the interface filter to cover, while at the interface filter to subsoil borderline cases had to be accepted. Nevertheless a reliable protection system has been built since thick layers cause strong damping of hydraulic loads at the interfaces and their surcharge provides a sufficient state of stress in the subsoil under all load conditions.

Résumé

Pour stabiliser un très profond (25 m) et très raid (1:1) affouillement à la fin du revêtement du fond du barrage d'Eider on a inventé un système pour protéger le fond contre l'érosion. Pour l'instant il n'existe pas une autre solution jusqu'à présent.

Le système ne convient pas parce que les cailloux se déplacent avec le courant, et le filtre granulaire se mélange en le jetant dans l'eau. A cause de ce problème on a mis en place

des filtres granulaires dans des grands sacs en geotextiles. Seulement à la limite de la couche du filtre et du remblais les reglements de filtrage sont réalisé correctement, mais entre le sous-sol et le filtre on a accepté des valeurs limitées. Mais néanmoins un système stable est disponible. Une grande epaisseur du remblais et du revêtement affaiblissent le chargement hydraulique et la charge sur le sol suffit pour garantir un état des contraintes necessaire dans le sol.

Аннотация

Для стабилизации размыва большой глубины (25м) и крутости (1:1) в конце донного укрепления заградительной плотины на реке Эйдер пришлось спроектировать укрепление против обратных размывающих воздействий на откос этого размыва, что пока уникально. Ввиду того, что применяемые обычно тюфики пользали бы по откосу размыва, а зернистых фильтров отсыпать нельзя из-за проблематики размешивания, были встроены на откосе перемешанные зернистые фильтры в крупных геотекстильных мешках, причем геотекстильные материалы сами рассчитаны на фильтрующее действие. Правила фильтрации должны были строго соблюдены только на границе между фильтрующим слоем и засыпкой, а на переходе грунта в фильтр пришлось согласиться с предельными значениями. Несмотря на это удалось создать стабильную систему, ввиду того, что крупные слои засыпки и покрытия обеспечивают значительное гашение гидравлической нагрузки, с одной стороны, а большая пригрузка на грунт достаточна для обеспечения необходимого напряженного состояния грунта, с другой стороны.

INHALT		Seite
1	Einführung	113
2	Kolkbildung und -auswirkung	113
3	Schadensbild	114
4	Sanierungsvorschläge	116
5	Stabilitätsbetrachtungen	117
6	Planungsgrundlagen	118
7	Diskussion der Ausführungsvariante	119
8	Literatur	122

1 Einführung

Selten zeigte sich Notwendigkeit und Erfolg des fruchtbaren Zusammenspiels von Wasserbau und Geotechnik so deutlich wie bei der Sanierung der Kolke am Eidersperrwerk. Die dort entstandene Kolkgeometrie und die gegebenen Randbedingungen verhindern den Einsatz von Standardverfahren des Wasserbaues bzw. des Küstenschutzes. Bild 1 zeigt den seeseitigen, tieferen Kolk in Relation zu Sperrwerk und Sohlsicherung. Nur weitere Oberflächenerosion zu verhindern, reicht hier nicht aus, vielmehr muß ebenso die Systemstand-sicherheit und die Stabilität von Grenzflächen berücksichtigt werden.

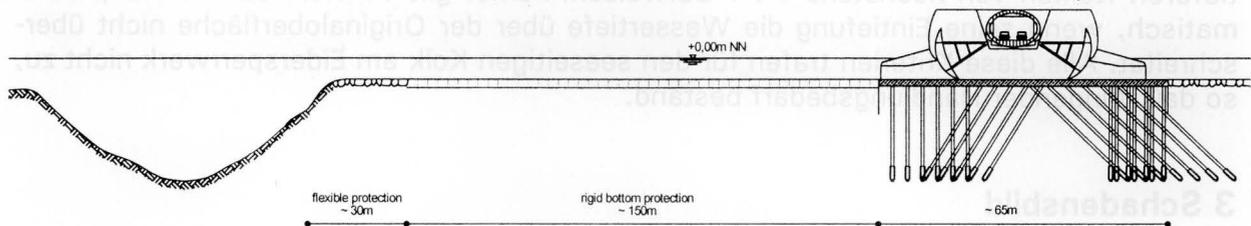


Bild 1 Schnitt durch Sperrwerk und seeseitigen Kolk

2 Kolkbildung und -auswirkung

Kolkbildung zu verhindern oder entstandene Kolke unschädlich zu halten ist zunächst eine Aufgabe des Wasserbaus. Durch einen einmal entstandenen Kolk stellt sich jedoch der Untergrund - hier der Meeresgrund - hinsichtlich der geotechnischen Stabilität anders dar, als die ursprüngliche Geometrie. Selbst ein Auffüllen eines Kolkes und damit das Wiederherstellen der Ausgangsgeometrie stellt geotechnisch nicht den Ausgangszustand im Korngerüst her. Der Aufbau eines Bodens ist grundsätzlich das Ergebnis eines ggf. sehr langen Prozesses und ist häufig - gerade an der Küste - kein statischer Zustand, sondern Veränderungen unterworfen durch Abtrag und Wiederanlandung. Häufig wird damit nur ein labiles Gleichgewicht erreicht, das unter Umständen sehr lange Bestand haben kann, aber stets empfindlich bleibt. Ein Kolk ändert den Spannungszustand im Korngerüst erheblich, und zwar nicht nur aufgrund der fehlenden Masse. Zum einen führt die dann veränderte äußere Geometrie (insbesondere die Bildung einer Kolkböschung) zu bislang nicht erfahrenen Schubspannungszuständen, zum anderen ändern sich die Wechselwirkungen von freiem Wasser und Grundwasser und die daraus resultierenden Wirkungen auf die Stabilität des Korngerüsts. War der Untergrund schon vorher nur in einem labilen Gleichgewicht, so wird dieses durch einen Kolk empfindlich gestört, und eine Reihe von Prozessen wird in Gang gesetzt, deren Entwicklung nur schwer vorhersehbar ist und bis zu deren Beruhigung größere Zeiträume vergehen können.

Selbst die natürliche oder künstliche Auffüllung eines Kolkes mit Originalmaterial kann den Ausgangszustand nicht wiederherstellen, da die durch Sedimentation entstandene Schichtenfolge gestört bleibt, der Spannungszustand verändert ist und das neu hinzugekommene Material zunächst auskonsolidieren muß, um etwa die gleiche Stabilität zu erhalten wie der gewachsene Meeresgrund. Bevor dieser Zustand eingetreten ist, wird die Auffüllung auf äußere Angriffe wie Strömungen und Druckschwankungen wesentlich empfindlicher reagieren als das gewachsene Material. Wäre z. B. im vorliegenden Fall des Eidersperrwerkes der Kolk mit Originalmaterial wieder aufgefüllt worden, so wäre unvermeidbar beim nächsten Tidewechsel Material verlagert worden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, größe-

res und damit lagestabileres Material zur Auffüllung zu benutzen. Dies muß jedoch filterrichtig auf den Untergrund abgestimmt sein, d. h., daß auf den feinsandigen Meeresuntergrund nichts gröberes als Feinkies geschüttet werden dürfte. Dieses Material ist selbst noch sehr gefährdet von Verlagerungen durch Druckschwankungen und Strömungen.

Generell ist ein Kolk, auch in dieser Größenordnung nicht von vornherein ein gefährdendes Element. Nach in den Niederlanden üblichen Faustregeln ist ein Kolk dann ungefährlich, wenn seine Sohle oberhalb einer gedachten Böschung mit einer Neigung von 1 : 15, ausgehend vom Sperrwerk liegt. Zusätzlich darf der Kolk, um nicht gefährdend zu sein, bei einer maximalen Eintiefung von bis zu 5 m höchstens einer Böschungsneigung von 1 : 5, bei tieferen Kolken von höchstens 1 : 7 aufweisen. Ferner gilt ein Kolk dann als unproblematisch, wenn seine Eintiefung die Wassertiefe über der Originaloberfläche nicht überschreitet. Alle diese Kriterien trafen für den seeseitigen Kolk am Eidersperrwerk nicht zu, so daß dringender Handlungsbedarf bestand.

3 Schadensbild

Der tiefere und steilere Kolk hatte sich seeseits des Sperrwerks gebildet, weshalb im folgenden nur darauf eingegangen werden soll. Alle Aussagen gelten jedoch im wesentlichen auch für den Binnenkolk. Vom Sperrwerk erstreckt sich seewärts über 150 m eine sogenannte starre Sohlensicherung - schwere Granitblöcke, deren Fugen mit Mörtel vergossen sind. Daran anschließend folgt eine konkav geformte flexible Sohlensicherung, die an ihrer schmalsten Stelle 30 m breit ist. Diese insgesamt 180 m sind für eine Sohlensicherung vor und hinter einem Sturmflutsperrwerk wesentlich zu kurz, wie man heute weiß. Der seinerzeitige Bau im trockenen erlaubte jedoch keine längere Ausführung innerhalb des Baufeldes.

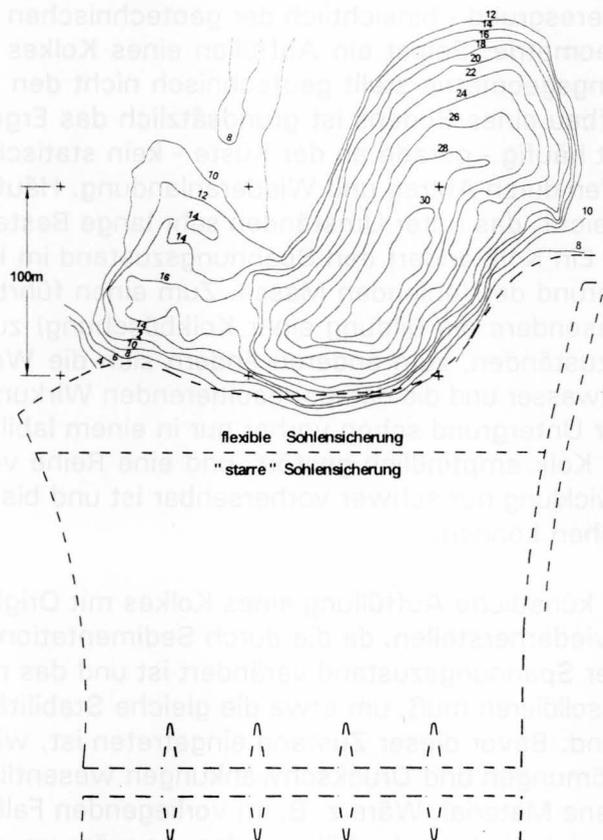


Bild 2 Linien gleicher Tiefe unter NN des seeseitigen Kolkes

Zum Vergleich: die Sohlsicherung vor und hinter dem Oosterscheldesperrwerk (Niederlande) ist bei etwa gleicher Strömungsbelastung 600 m lang. Nach derzeitiger niederländischer Einschätzung beträgt die erforderliche Länge bei vergleichbaren Randbedingungen ca. 400 m. Bild 2 zeigt in einer Draufsicht den Kolk in seiner tiefsten Ausbildung, gekennzeichnet durch entsprechende Höhenlinien. In vier Schnitten wurden parallel zum Sperrwerk Querprofile aufgetragen (Bild 3), die das Ausmaß und damit das Gefährdungspotential des Kolkes verdeutlichen.

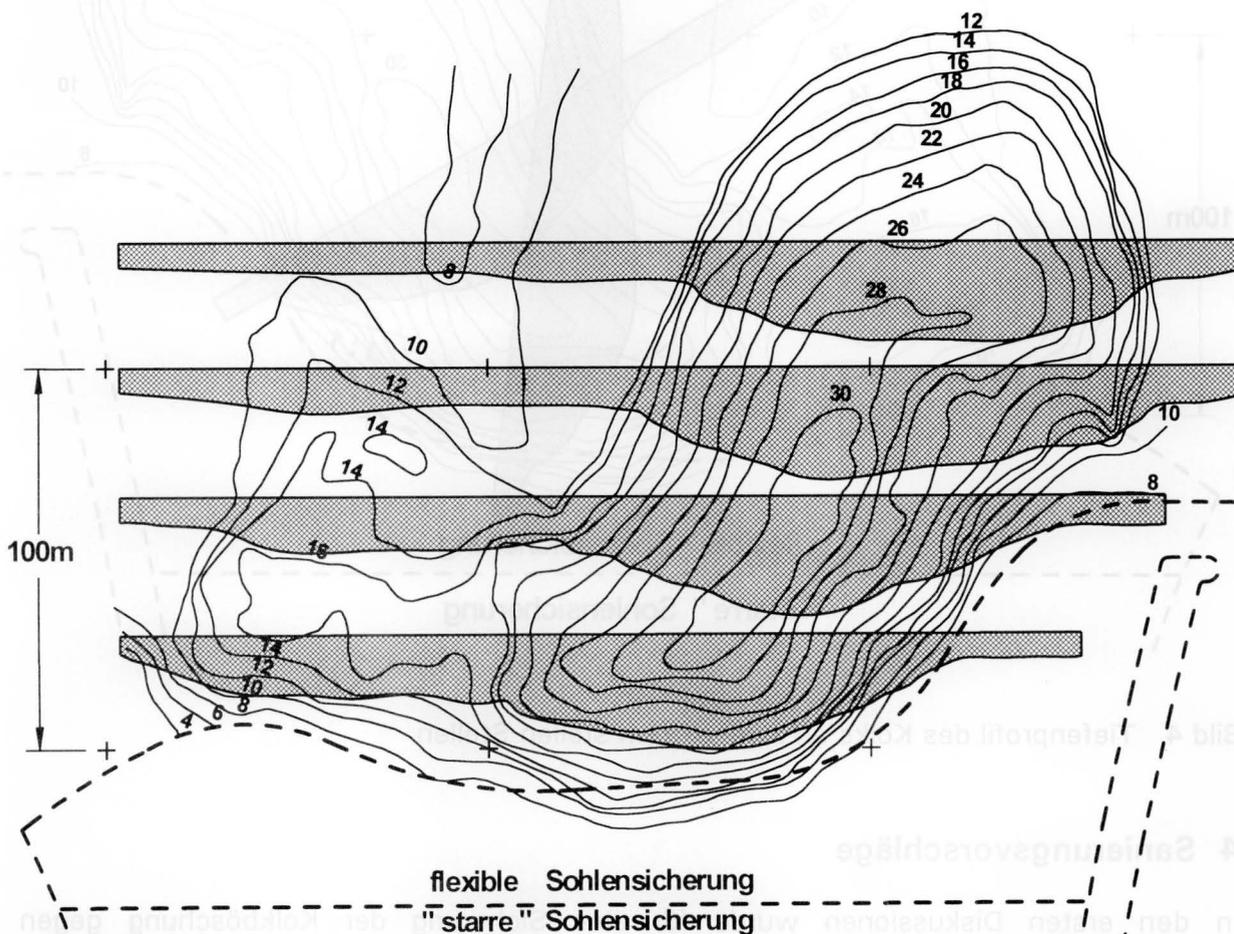


Bild 3 Querschnitte durch den Kolk parallel zum Sperrwerk

Auf Bild 4 ist das Böschungsprofil des Kolkes an zwei der steilsten Stellen dargestellt. Die Kolkböschung ist im oberen Bereich bis zu 1 : 1 geneigt, eine Neigung, die für alle Sicherungsmaßnahmen besondere Schwierigkeiten mit sich bringt, wozu noch weitere Erläuterungen folgen. Diese Steilheit unterstreicht den dringenden Sanierungsbedarf, denn eine solche Böschung kann nie über längere Zeit stabil bleiben. Dementsprechend fanden sich an diesen Stellen schon Abbrüche der Sohlsicherung. (Im Bild ist erkennbar, daß an der ursprünglichen Vorderkante der flexiblen Sohlsicherung bereits Tiefen bis 16 m erreicht sind.)

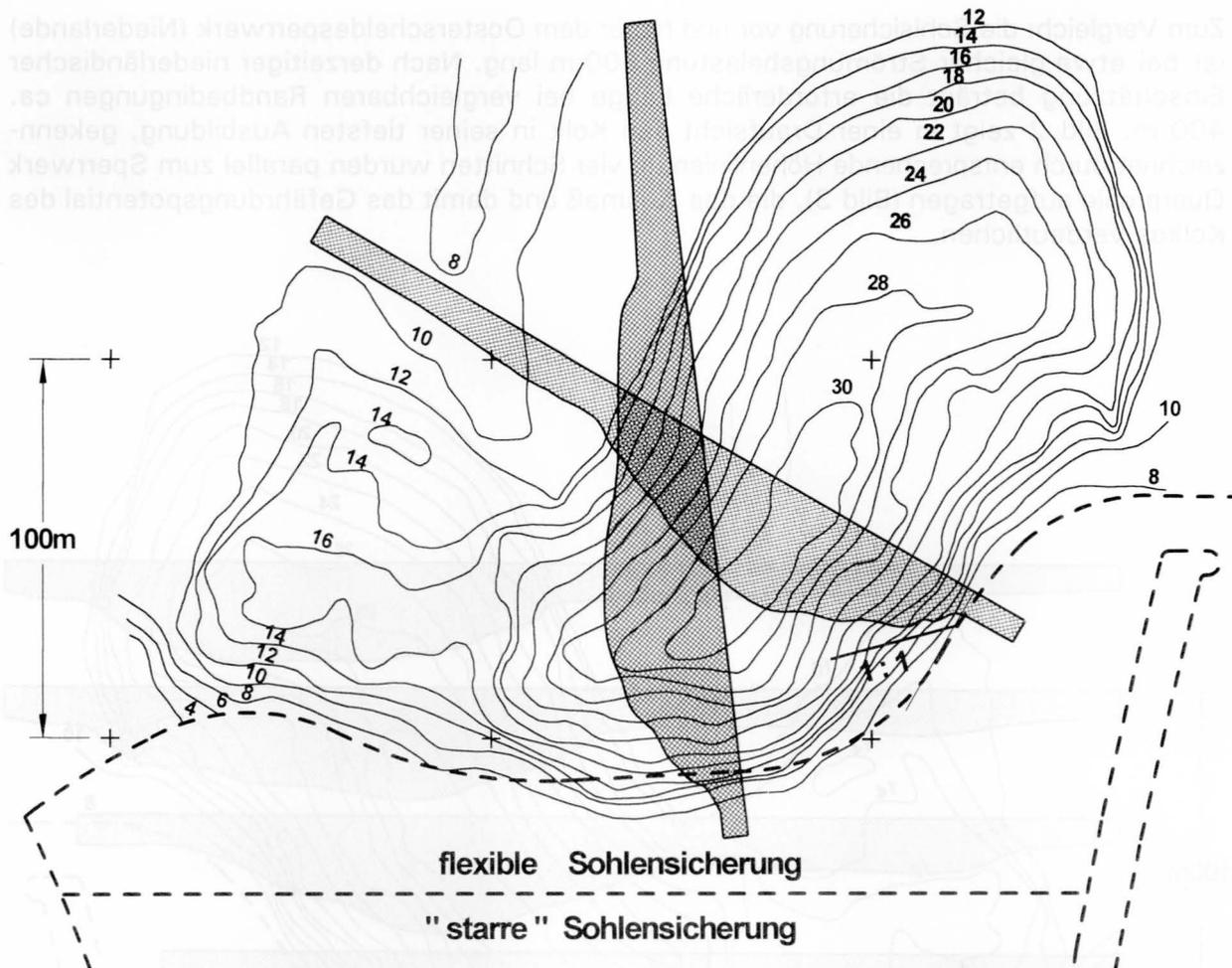


Bild 4 Tiefenprofil des Kolks an zwei extrem steilen Stellen

4 Sanierungsvorschläge

In den ersten Diskussionen wurde für eine Sicherung der Kolkböschung gegen rückschreitenden Abbruch folgende Mindestforderung gestellt: der Kolk sollte soweit aufgefüllt werden, daß eine maximale Neigung von 1 : 4 zum Sperrwerk hin vorhanden bleibt. Diese korrigierte Kolkböschung sollte mit einem Deckwerk, das den zu erwartenden Strömungskräften standhält, gesichert werden. Dabei wurde es als vorteilhaft angesehen, wenn die Berandung der Sohlensicherung konvex seeseits zeigte. Dies ergäbe eine zu schützende Fläche von ca. 9.000 m³ und eine Füllkubatur von ca. 120.000 m³. Die konvexe Form der Sohlensicherung wurde schon 1970 aus hydraulischer Sicht aufgrund von Modellversuchen von Dietz (1970) für die Ausführung vorgeschlagen. Diese Modellversuche belegten eindeutig den Vorteil einer konvexen Deckwerksberandung gegenüber der konkaven Ausführung. Diese wünschenswerte Geometrie fiel jedoch den beengten Verhältnissen des Baufeldes zum Opfer, und wir wissen heute, daß die Prognose richtig war, daß nämlich bei entsprechend extremen Belastungen ein Kolk in dieser Tiefe und Ausdehnung auftreten kann.

Die genannten aus hydraulischer wie aus geotechnischer Sicht optimalen Sanierungsvorschläge sollte aus Kostengründen modifiziert und es mußten Reduzierungen vorgenommen werden. Damit war von vornherein klar, daß bei jeder für die Sanierung gefundenen Kompromißlösung die Grenzen des Machbaren erreicht würden. Man muß sich auch heute nach

der Fertigstellung der Maßnahme immer wieder vor Augen halten, daß hier Grenzen mindestens erreicht, wenn nicht sogar überschritten wurden. Dies gilt für die Sicherheit und die Ausführbarkeit: die Maßnahmen ließen sich zwar auf dem Papier sehr leicht entwerfen, unter Berücksichtigung der Randbedingungen an der Küste bedeutete dies jedoch, daß an die Bauausführung allerhöchste Ansprüche gestellt waren. Auch darf nicht vergessen werden, daß eine ähnliche Maßnahme bislang noch nie ausgeführt wurde! Hinsichtlich der Dimensionierung einer Sohlsicherung, die in diesem kritischen Fall Bestand haben soll, aber wegen des Kostendrucks keine Reserven mehr beinhalten kann, sollen zunächst einige grundsätzliche Anmerkungen gemacht werden.

5 Stabilitätsbetrachtungen

Unter der Last von Strömung, Wellen und infolge der Wechselwirkung von Porenwasser und freiem Wasser stellt sich ein Kornhaufwerk mit Korngrößen im Sandbereich sehr flach ein. "Sandspiele" an Küsten- oder Flußstränden zeigen deutlich, daß es zwar infolge der Kapillarkohäsion möglich ist, auch im Sand zunächst steil abzugraben, daß jedoch, sobald bewegtes Wasser ins Spiel kommt, die Ränder sofort abgeflacht werden. Selbst stehendes Wasser reicht dazu aus: die Wassersättigung des Korngerüst führt zum Verlust der Kapillarkohäsion und dadurch zum Zusammenbruch einer zu steilen Böschung.

Die maximal mögliche Neigung eines kohäsionslosen Kornhaufwerkes ist abhängig von den Randbedingungen und vom Bodenmaterial, insbesondere von dessen Korndurchmesser und seiner Abstufung. Die steilsten Neigungen, die sich bei künstlicher Aufspülung im Meer erreichen lassen liegen bei 1 : 15, im Normalfall weit darunter (CUR 1992). Beim am Eidersperrwerk anstehenden Sand wäre bei einer Aufspülung eine Böschungsneigung von höchstens 1 : 25 zu erreichen. Dieser Wert kann auch als Anhaltswert für eine im Endzustand sich einstellende Kolkböschung gelten, allerdings kann diese Neigung nicht auf Dauer garantiert werden. Der Abflachungsvorgang wird zunächst durch die Sohlsicherung behindert, führt aber zu einer rückschreitenden Erosion unter die Sicherung mit der Folge eines stückweisen Einbrechens.

Diese Erosionsvorgänge sind nicht nur eine Folge des äußeren Angriffes von Strömungen oder Wellen, sondern ebenso bedingt durch die Wechselwirkung von freiem Wasser und Grundwasser. Insbesondere hat die Tatsache große Auswirkungen, daß eine Druckänderung im freien Wasser (z. B. durch Wellen) im Porenwasser des Untergrundes immer erst zeitverzögert folgt. Wie von zahlreichen Autoren (z. B. Maeno/Nago, 1988 oder Köhler, 1989) gezeigt, entsteht die beschriebene Situation durch die Tatsache, daß bei der Interaktion von Wasser und Boden stets auch die eingeschlossene Luft berücksichtigt werden muß, d. h., daß es sich um Wechselwirkungen in einem 3-Phasen-System handelt. Die eingeschlossene Luft entspannt sich beim äußeren Druckabfall und verhindert dadurch die Druckminderung im tieferen Bodenbereich - es entsteht ein Porenwasserüberdruck im Boden und eine nach außen gerichtete Strömungskraft.

Bild 5 (nach Köhler, 1993) zeigt den Vorgang an einer Bodenprobe: wird an einem Ende der Probe schlagartig der Druck herabgesetzt, dann wird im ersten Augenblick im Boden der alte Wasserdruck erhalten bleiben - es herrscht 100 % Porenwasserüberdruck - bezogen auf die Druckdifferenz. Ein Abbau erfolgt dann zeitlich und räumlich nichtlinear bis auf den stationären Zustand, sofern die Belastung solange anhält. Ist der Porenwasserdruck größer als die wirksamen Spannungen im Korngerüst, so führt dies zum hydraulischen Grundbruch bis in die Tiefe, in der der Porenwasserüberdruck geringer ist als die wirksamen Spannungen im Boden. Diese Vorgänge bewirken, daß die Grenzschicht des Bodens zum freien Wasser sich nahezu permanent in einem labilen Zustand befindet.

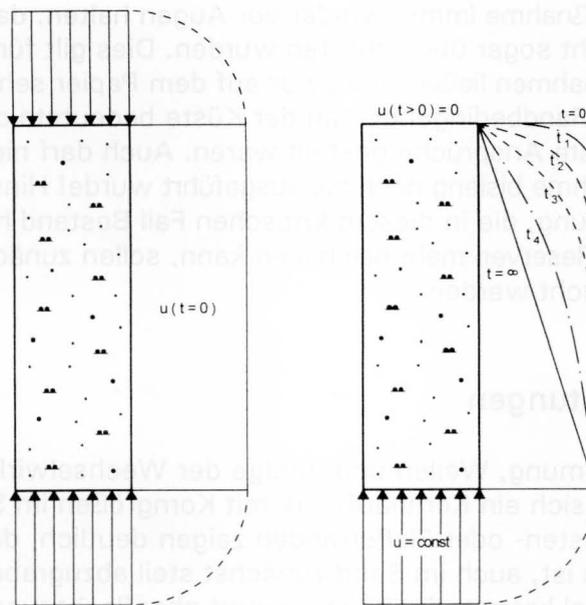


Bild 5 Zeitabhängiger Porenwasserdruckverlauf bei schlagartiger Druckänderung (nach Köhler)

6 Planungsgrundlagen

Am Eidersperrwerk haben die Böschungen des Außenkolkes im oberen Bereich zum Teil eine Steilheit bis zu 1 : 1 und werden erst nach unten zum Kolk tiefsten hin immer flacher. Diese steile Neigung wird ermöglicht durch die Zwischenschichten aus Klei in einem ansonsten sandigen Untergrund. Die bindigen Schichten bedeuten eine Art "Bewehrung" für den Sandboden. Langfristig wird jedoch auch dieser Klei erodiert, wie die Kolkdurchbrüche durch die Kleischicht nach einer Zeit relativer Ruhe gezeigt haben. Da somit keine Stabilität gegeben war, andererseits aber ein Verfüllen des Kolkes aus verschiedenen Gründen nicht in Frage kam, blieb als eine einzige Möglichkeit die dauerhafte Sicherung der sperrwerkseitigen Kolkböschung. Das dafür zu planende Deckwerk sollte aus Kostengründen so steil wie möglich ausgeführt werden, und es sollten die Auffüllungsmengen minimiert werden. Mit der Planung einer an den steilsten Stellen 1 : 3 geneigten Böschung wurde absolutes Neuland betreten. Daher waren an die Qualität der Planung und der Ausführung sehr hohe Ansprüche zu stellen.

Die Bemessung eines Deckwerkes ist so durchzuführen, daß die weiter oben beschriebenen möglichen Überdrücke infolge von Druckschwankungen keine schädlichen Auswirkungen haben (Bezuijen/Köhler, 1995). Um die Auswirkungen von Druckschwankungen zu minimieren, ist das Deckwerk so durchlässig wie möglich auszuführen. Die Wahl einer relativ gering durchlässigen Abdeckung wie z. B. paßgenau versetzte Blocksteine, führt zu einer relativ zum Untergrund dichten Deckschicht und damit zur Bildung von Porenwasserüberdrücken unter dem Deckwerk, die letztendlich auch zum Herausdrücken einzelner Blöcke führen können. Diese Effekte wurden z. B. von de Groot et al. (1988) und von Führbötter/Sparboom (1988) beschrieben.

Infolge der Forderung nach einem sehr durchlässigen Deckwerk ist der Ausbildung der Filter besondere Beachtung zu schenken. Der Untergrund am Sperrwerk besteht aus einem feinen Sand (Kornverteilung 1 in Bild 6), der ohne Schwierigkeiten durch die Hohlräume der aus der hydraulischen Dimensionierung in ihrer Steingröße festgelegten Deckschicht (Kornverteilung 3 bei Teilverguß bzw. 4 für lose Steine) transportiert würde. Erforderlich ist

daher ein Filter, der einen Wasseraustausch von Grundwasser und freiem Wasser sicher ermöglicht, die feinen Sandpartikel aber zurückhält.

Die übliche Bauweise im Küstenbereich, eine Oberfläche zu schützen und gleichzeitig Filterfestigkeit zu gewährleisten, ist die Bauweise mit Sinkstücken, d. h. geotextilen Matten mit aufgebundenen Wippen und ggf. Weidenlagen, die schwimmend zu ihrem Einsatzort transportiert und dort durch Beschütten mit Steinen auf den Meeresgrund abgesenkt werden. Bei der hier vorliegenden Kolkgeometrie mit den schon genannten steilen Randböschungen ist diese Bauweise nicht möglich. Die unregelmäßige Geometrie erschwert eine sichere Überlappung an allen Stellen bzw. wird bei entsprechendem Aufwand unwirtschaftlich. Die Steilheit der Böschung macht die Verlegung zum Teil unmöglich. Eine hohe Verlegesicherheit muß aber gerade in solchen Fällen unbedingt gefordert werden, da ein weiterer Bodenabtransport mit Sicherheit verhindert werden muß und eine spätere Sanierung nur schwer möglich ist. Alternativ wären Bauweisen mit Geotextilien mit mineralischer Zusatzausrüstung ("Sandmatte") möglich, die zusätzlich an den Rändern mit Ketten beschwert sind, um eine hohe Lagestabilität zu gewährleisten. In entsprechenden Versuchen wurde die Stabilität belegt (Zanke, 1992), jedoch fehlt die Erfahrung mit einer solchen Bauweise unter den gegebenen Randbedingungen.

Auch die im Grund- und Wasserbau traditionelle Kornfilterbauweise birgt für die hier zu bewältigende Anwendung gewisse Risiken in sich. Ist der Unterschied in den Korndurchmessern der Deckschicht und des Untergrundes zu groß, werden mehrere Filterschichten erforderlich (Stufenfilter). Diese Filterstufen werden immer größer werdend auf den zu schützenden Untergrund nacheinander verklappt. Diese Vorgehensweise entfällt hier aus denselben Gründen wie die Kolkauffüllung: zum einen sind zahlreiche Schichten erforderlich, da zwischen Deckschicht und Feinsand ein großer Abstand der Korndurchmesser liegt, zum anderen sind so große Mengen erforderlich, daß sie nicht in kurzer Zeit verklappt werden können, so daß sie den erosiven Kräften des Tidewechsels ausgesetzt sind. Die erforderlichen großen Mengen wurden auch aus Kostengründen abgelehnt. Als Alternative blieb ein Mischkornfilter, d. h. ein sehr langgestrecktes Körnungsband, das zum einen in sich filterstabil ist, und zum anderen die Erosion des Untergrundes durch die Deckschicht verhindert. Ein Material mit langgestreckter Kornverteilung läßt sich jedoch nicht durch Wasser bis in größere Tiefe schütten. Die Fallgeschwindigkeit des groben Anteils ist höher als diejenige des feinen, so daß zum Schluß ein "Umkehrfilter" entsteht, bei dem die groben Bestandteile auf den feinkörnigen Untergrund zu liegen kommen und die feinen Filterbestandteile obenauf liegen (und dann natürlich durch Strömung abtransportiert werden).

7 Diskussion der Ausführungsvariante

Infolge der zuvor beschriebenen Zwänge kam eine unkonventionelle und in dieser Form noch nie ausgeführte Lösung für den Filter zum Tragen: ein Mischkornfilter mit langgestrecktem Körnungsband wurde in geotextile Großsäcke ("Container") gefüllt und auf den Meeresgrund verklappt. Dadurch ergaben sich folgende Vorteile: das Kornfiltermaterial in den Säcken kann sich beim freien Fall durchs Wasser nicht entmischen. Daneben wird das Sackmaterial, sofern die Säcke auf dem Untergrund dicht an dicht liegen und bestimmte Materialanforderungen erfüllen, selbst als Filter wirken.

Für die Filterbemessung mußten besondere Betrachtungen angestellt werden, da die in der Geotechnik üblichen Filterregeln z.T. nicht mehr einzuhalten waren. Die Deckschicht besteht aus Blöcken zwischen 1 und 2 m Durchmesser (Kornverteilung 4 in Bild 6) entsprechend den Ergebnissen hydraulischer Berechnung bzw. Modellversuche. Darunter sind Wasserbausteine der Klasse 3 (Kornverteilung 3) als Zwischen- und Auffüllschicht angeordnet, die der normalen Tideströmung standhalten. Material mit geringerem Durchmesser

konnten nicht eingesetzt werden, da der Auffüllvorgang zu lange dauert, um das Sperrwerk geschlossen zu halten, feineres Material aber wieder verlagert würde, zumal nach einem Verklappvorgang zunächst nur lockerste Lagerung erreicht wird und erst durch Lastwechsel mit der Zeit eine dichtere Lagerung erreicht wird. Ferner muß für das Füllmaterial ein Mindestdurchmesser gewährleistet sein, um nicht durch die Deckschicht erodiert zu werden.

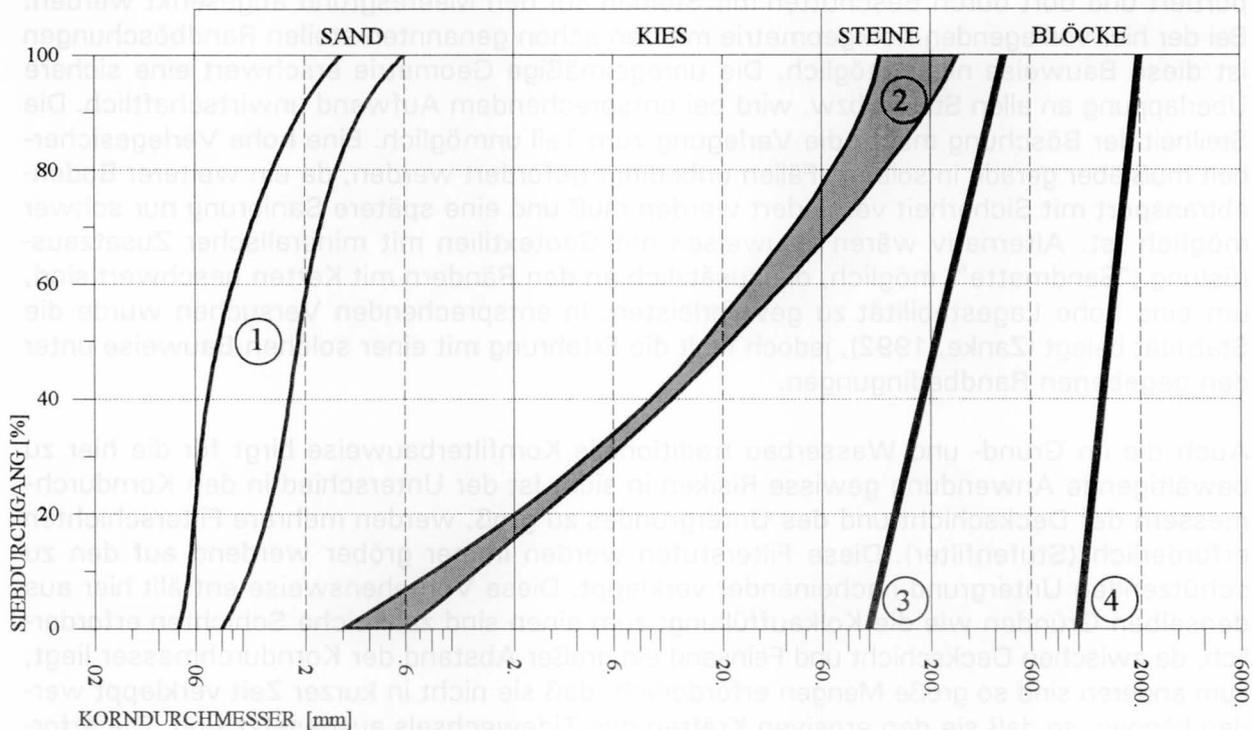


Bild 6 Kornverteilungen von Untergrund (1), Filter (2), Auffüllung (3) und Deckschicht (4)

Der Abstand der Korndurchmesser von Füllmaterial und anstehendem Boden ist noch sehr groß. Es wurde für den Filter eine Kornverteilung (Nr. 2 in Bild 6) mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von $C_u \approx 30$ so gewählt, daß der Abstand A_{50} der mittleren Korndurchmesser D_{50} von Filter und Schüttsteinen $A_{50} \approx 11$ und von Filter und Untergrund $A_{50} \approx 100$ beträgt. Grundsätzlich ist es günstig, einen weitgestuften Filter zu wählen, allerdings muß berücksichtigt werden, daß bei weitgestuftem Basismaterial (das ist der Filter gegenüber dem Füllmaterial) das Optimum bei eher geringen C_u -Werten liegt. Da die Beanspruchung mit zunehmender Überdeckungshöhe sinkt, wurde auf korrekte Dimensionierung der Grenzsicht Filter - Füllmaterial geachtet, während an der Grenzsicht Untergrund - Filter übliche Grenzen überschritten wurden.

Da die Anwendungsgrenzen des Verfahrens nach Cistin/Ziems (vergl. MAK 1989) weit überschritten sind, mußten andere Filterkriterien herangezogen werden, obwohl deren Gültigkeit ebenfalls für die vorliegenden Körnungen nicht ausdrücklich gegeben war. Im folgenden erwähnte Filterregeln finden sich z.B. bei Brauns/Schuler (1993). Das Verhältnis $d_{15,F}/d_{85,B}$ ist an der Grenze Filter - Füllmaterial mit ≈ 3 weit auf der sicheren Seite, während es mit ≈ 9 zwischen Untergrund und Filter die Grenzen nach Bertram und Sherard (vergl. Schuler 1993) erreicht. Ein ähnliches Bild ergibt sich nach Witt, dessen Forderungen $d_{5,F}/d_{95,B} \leq 2,5$ bei $d_{5,F} > 0,5$ mm und $C_u > 6$ für die Grenzsicht Untergrund-Filter und $d_{30,F}/d_{95,B} \leq 2,5$ für $d_{5,F} > 0,5$ mm und $C_u < 3$ für die Grenzsicht Filter - Schüttsteine gerade bzw. gut erfüllt sind. Die Bauweise kann trotzdem als insgesamt sicher angesehen werden, da die angreifenden Druckschwankungen durch die Deck- und die Zwischenlage

sehr stark gedämpft werden, so daß die kritischen hydraulischen Gradienten an den jeweiligen Schichtgrenzen voraussichtlich nicht erreicht werden. Im Fall, daß das Geotextil durch Beschädigung völlig wirkungslos geworden ist, sind Einwanderungen des anstehenden Materials in die Filterkörnung und ein gewisser Verlust der feineren Filterkörnung im Bereich der Grenzschicht Filter - Zwischenlage zu erwarten. Die möglicherweise bewegten Materialmengen werden sich in verträglichen Grenzen bewegen. Dadurch entstehende Verformungen kann das Deckwerk infolge seiner großen Flexibilität problemlos folgen.

Das gewählte Sackmaterial mußte zum einen filterfest gegenüber dem anstehenden Untergrund, zum anderen gegenüber dem Füllmaterial sein. Um dies sicher zu gewährleisten wurde ein Vlies gewählt, das zudem durch seine hohe Dehnfähigkeit eine hohe Verlegesicherheit erwarten ließ. Die Verlegung zeigte, daß die von Gewebesäcken her bekannten Materialversagen beim Verklappen nicht auftraten (siehe auch Saathoff/Witte 1994).

Probleme gab es mit der lückenlosen Verlegung: die Container erwiesen sich trotz der auf 80 % reduzierten Füllmenge als relativ steif, wenn sie auf weichem Untergrund zu liegen kamen. Die ersten Säcke drangen teilweise in den Boden ein und bildeten keine durchgehende Lage. Durch örtlichen Mehreinbau von Containern konnten diese Nachteile jedoch beseitigt werden, so daß letztendlich eine von Tauchern überprüfte lückenlose Bedeckung der Kolkböschung mit geotextilen Containern gegeben war.

Die Säcke wurden auf die vorhandene Kolkgeometrie verklappt, da, wie oben ausgeführt, ein vorhergehendes Auffüllen mit Sand nicht möglich war. Infolge der höheren Oberflächenrauigkeit eines Vlieses im Vergleich zu einem Gewebe besaßen die Container ausreichende Lagestabilität, um selbst in den steilsten Bereichen bis zur weiteren Auffüllung mit Wasserbausteinen standsicher zu sein.

Die Lagestabilität gegen den äußeren hydraulischen Angriff gewährleisten traditionell und auch im vorliegenden Fall große Steine mit hohen Einzelgewichten. Zunächst geplant war eine Deckschicht aus kleineren Steinen, die mit Asphalt oder hydraulisch gebundenem Mörtel teilvergossen werden sollten. Bei diesem Verfahren entstehen im Idealfall Konglomerate von mehreren Einzelsteinen, die als zusammenhängende Stücke ausreichend schwer und mit den Nachbarblöcken verzahnt sind, so daß die Lagestabilität gewährleistet ist, die Nachgiebigkeit jedoch ausreichend groß bleibt um etwaigen Untergrundverformungen folgen zu können. Das Einbringen des Vergußmörtels muß mit größter Akribie erfolgen und erfordert hinsichtlich der Positionsgenauigkeit eine noch höhere Genauigkeit als die Schüttvorgänge von Steinen oder auch der Geotextilsäcke. Örtlich zu geringe Vergußmengen führen unweigerlich zur Verlagerungen der dann zu kleinen und zu leichten Einzelsteine, örtlich zu hohe Vergußmengen führen zu einer in diesem Bereich zu wenig durchlässigen Deckschicht, unter der sich dann Wasserüberdrücke aufbauen können, wodurch langfristig Schäden unvermeidbar sind. Um solche Gefahren zu vermeiden, wurde die Bauweise mit losen Schüttsteinen gewählt.

Bild 7 zeigt eine Systemskizze der Ausführungsvariante. Sie erfüllt die geotechnischen Grundanforderungen:

- zunehmende Durchlässigkeit der Schichten vom Untergrund bis zur Deckschicht,
- ausreichendes Gewicht des Deckwerks zur Verhinderung von Stabilitätsverlusten im Untergrund einer Böschung,
- ausreichende Flexibilität der Konstruktion um etwaigen Untergrundverformungen schadlos folgen zu können.

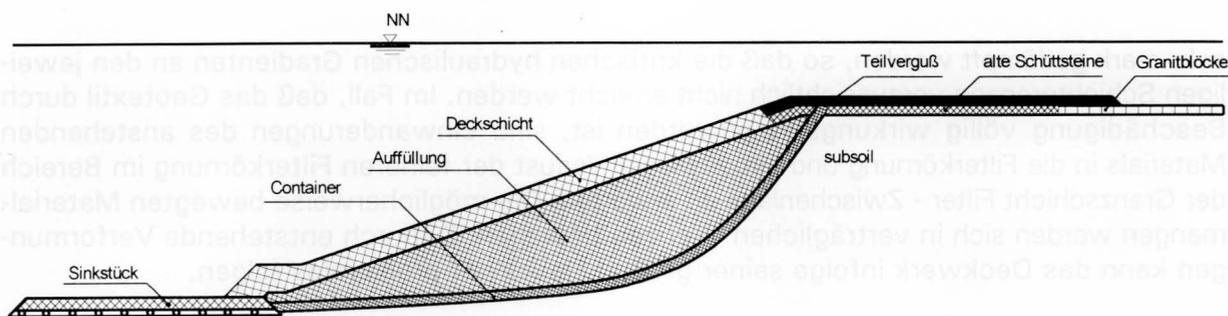


Bild 7 Ausgeführte Böschungssicherung (Systemskizze)

Damit bleibt zu hoffen, daß dieser bislang einmalige Deckwerksbau zur Verhinderung rückschreitender Erosion langfristig stabil bleibt. Es ist jedoch anzumerken, daß die Ränder einer solchen Befestigungsfläche immer Veränderungen unterworfen sind und dauerhafter Unterhaltung bedürfen. Selbst am Ende der 600 m langen Sohlsicherung des Osterscheldesperrwerkes in den Niederlanden sind in regelmäßigen Abständen Verklappungen von entsprechendem Schüttmaterial erforderlich. Entsprechende Maßnahmen am Eider-Sperrwerk sind daher bei der Unterhaltung einzuplanen, denn ein unterhaltungsfreies Deckwerk ist eine bislang nicht erreichte Idealvorstellung.

8 Literatur

Brauns, J.; Schuler, U.: Behaviour of coarse and well-graded filters. In: Brauns, Heibaum, Schuler (Hrsg.): Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Rotterdam: A.A. Balkema 1993

Dietz, J.W.: Abdämmung der Eider; Modellversuche für das Sielbauwerk. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr.30. Eigenverlag 1970

Führböter, A.; Sparboom, U.: Full-scale investigations on the stability of concrete block slope revetments. In: Kolkman et al. (Hrsg.): Modelling Soil-Water-Structure Interactions. Rotterdam: A.A. Balkema 1988

Groot, M.B.de et al: The interaction between soil, water and bed or slope protection. In: Kolkman et al. (Hrsg.): Modelling Soil-Water-Structure Interactions. Rotterdam: A.A. Balkema 1988

Maeno; S.; Nago, H.: Settlement of a concrete block into a sand bed under water pressure variation. In: Kolkman et al. (Hrsg.): Modelling Soil-Water-Structure Interactions. Rotterdam: A.A. Balkema 1988

Köhler, H.-J.; Bezuijen, A.: Permeability of Filter Layers on Stability of Rip-Rap Revetments Under Wave Attack. In: Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5. - 9. September 1994

MAK (Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau 1989

Saathoff, F.; Witte, J.: Geotextile Sandcontainer zur Stabilisierung der Kolkböschung. HANSA, 1994, Heft 4

Zanke, U.: Wissenschaftliches Gutachten über die Lagestabilität von Filtermatten unter Strömungseinfluß. Erstellt im Auftrag von NAUE Fasertechnik, Lübbecke 1992