

## **Sohl- und Böschungsbefestigungen für hochbelastete wasserbauliche Anlagen**

### **Kurzfassung**

Zur Sicherung des Schiffsverkehrs in Häfen und Binnenschiffahrtsstrassen werden zur Standsicherheit von Bauwerken Deckwerke und Sohlensicherungen erstellt. Diese müssen dauerhaft hydraulischen, mechanischen und chemisch-physikalischen Einwirkungen widerstehen.

In der vorliegenden Arbeit werden die möglichen Bauweisen von Deckwerken und Sohlensicherungen aufgezeigt. Ansätze zur Dimensionierung werden erläutert. Anhand von ausgewählten Bauprojekten, die von der Firma Colcrete-von Essen GmbH durchgeführt wurden, wird der Bau von Deckwerken bzw. Sohlensicherungen dargestellt.

### **Summary**

For the safety of the shipping traffic in harbours navigation-channels and bottom protections are constructed, which are responsible for the stability of different structures. These protections must be resistant against hydraulic, mechanic, and chemical-physical load.

In this feature different bank and bottom protections are described. Aspects of designing these protections are discussed. Final, special embankments and bottom protections, which were built by Colcrete-von Essen GmbH, are explained.

## **1 Einleitung**

Überall dort, wo Böschungen und Sohlen gegen Erosion infolge des strömenden Wassers, Druckänderungen oder mechanische Angriffe gesichert werden müssen, werden zum Schutz der Menschen, zur Standsicherheit von Bauwerken und zur Sicherung der Leichtigkeit des Schiffsverkehrs in Häfen, See- und Binnenschiffahrtsstraßen Deckwerke erstellt. Unter dem Oberbegriff „Deckwerke“ werden sowohl „durchlässige“ als auch „dichte“ Böschungs- und Sohlensicherungen (Auskleidungen) verstanden.

Die unterschiedlichen Beanspruchungen an den Deckwerken wirken einzeln oder in Kombination, wobei die Bemessung von Deckwerken letztendlich von den speziellen Randbedingungen, z.B. der topografischen Lage und den morphologischen Bedingungen sowie der Schwere, Häufigkeit und Dauer der Bean-

spruchungen abhängt. Diese Deckwerke müssen dauerhaft hydraulischen, mechanischen und chemisch-physikalischen Einwirkungen standhalten.

Im Rahmen einer Dimensionierung gilt es dann, das wirtschaftlich vernünftigste System unter Berücksichtigung aller Einflußgrößen zu finden.

## **2 Deckwerke**

### **2.1 Vorbemerkungen**

Die Dimensionierung von losen Deckschichten erfolgt im Seebereich nach der Hudson-Formel und/oder der van der Meer-Gleichung. Ergänzt werden diese Ansätze durch bautechnische Grundsätze für die Planung und Durchführung, die in den Empfehlungen für Küstenschutz (EAK, 1993 und der EAU, 1996) nachzuschlagen sind. Maßgebende Parameter für die Deckschicht sind die Steingrößen, d.h. das Steingewicht  $W_{\text{erf}}$  bzw. der Durchmesser  $d_{\text{erf}}$  und das spezifische Gewicht des Steines sowie die Neigung des Deckwerkes. Im Binnenbereich wird die Dimensionierung zumeist mit Hilfe der Diagramme nach Knies (1983) durchgeführt. Verschiedene Regelbauweisen werden in der MAR (1991) aufgezeigt.

Bemessungsansätze für Sohlensicherungen sind z. B. in DIETZ (1973), FUEHNER, POHL und RÖMISCH (1987) zu finden. Ergänzungen dieser Ansätze liegen in HANSEN (1985) vor.

Außerdem ist ein sehr umfangreiches Merkblatt zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB 1999) der Bundesanstalt für Wasserbau als Entwurf erschienen. Darin werden ausschließlich Deckschichten aus ungebundenen Steinschüttungen behandelt. Andere mögliche Befestigungssysteme sollten bezüglich ihres Stabilitätsverhaltens auch berücksichtigt werden. Zumindest sollte für die Anwender ein Hinweis auf deren Verfügbarkeit und Anwendungsmöglichkeit erfolgen. Dies erscheint um so wichtiger, da die Verbundsysteme wie z.B. Betonmatten (LWI, TU-BS, 1995), gekoppelte Betonblocksysteme oder verklammerte Steinschüttungen (LWI, TU-BS, 1998) oft eine gute Alternative insbesondere bei hohen Strömungsbelastungen darstellen und damit dünnere Deckwerke ermöglichen.

### **2.2 Durchlässige Deckwerke**

Das durchlässige Deckwerk besteht aus der Deckschicht, evtl. einer Zwischenschicht und dem darunterliegenden Filter. Alle Schichten müssen den ungehinderten Wasseraustausch zwischen Untergrund und überströmendem Wasser ermöglichen.

Der Filter soll den Boden unter den möglichen hydraulischen Einwirkungen zurückhalten, damit Setzungen des Deckwerkes durch Kornverlust vermieden werden. Außerdem muß er den Boden so entwässern, daß ein Druckanstieg unterbleibt. Die evtl. vorhandene Zwischenschicht schützt den Filter und ist so zu



bemessen, daß sie gegenüber der Deckschicht suffisionssicher ist. Die Deckschicht muß gegenüber den hydraulischen, mechanischen Beanspruchungen lagestabil sein.

### **2.3 Deckwerk aus loser Steinschüttung**

Der klassische Schutz eines Deckwerkes besteht aus einer losen Steinschüttung. Der Bestand eines Deckwerkes aus losen Wasserbausteinen gegenüber angreifenden Wellen oder turbulenten Strömungen wird weitgehend von der Lagestabilität der an der Oberfläche der Deckschicht liegenden Steine bestimmt. Löst sich ein Stein aus dem beim Einbau zufällig entstandenen Verband, so werden neue Bewegungsmöglichkeiten für die benachbarten Steine geschaffen. Das Herauslösen eines einzelnen Steines kann dann zu kettenreaktionsartig ablaufenden Zerstörungen führen, so daß der darunterliegende Filter seinen Schutz verliert und die Sicherheit von Bauwerken usw. gefährdet ist.

Die Lagestabilität von losen Wasserbausteinen ist abhängig von der Trockenrohdichte, der Steingröße (und -form) sowie von der Einbaudicke.

### **2.4 Dichte Deckwerke**

Dichte Deckwerke werden aus Asphaltdecken, Betonplatten oder mit Asphalt oder Zementmörtel vollvergossenen Schüttsteinen hergestellt.

Für außergewöhnliche Belastungsfälle muß sichergestellt sein, daß die Eigenlast des dichten Deckwerkes stets größer ist als der unmittelbar darunter auftretende, größte Wasserdruck, so daß die Deckschicht nicht abgehoben werden kann. Übersteigt die Komponente des Eigengewichts der Deckschicht in Richtung der Böschung die Reibungskraft, treten wegen hoher Innenwasserdrücke zusätzliche Beanspruchungen auf, die zum Abrutschen führen können. Die schwierige Einschätzung der Belastung aus der Höhendifferenz zwischen dem nicht stationären Wasserspiegel und dem Außenwasser führte zu der Erkenntnis, daß möglichst nur noch oberhalb MTHW ein geschlossenes, darunter aber ein offenes Deckwerk angeordnet wird. Ausgenommen hiervon sind dichte Deckwerke in Dammstrecken.

## **3 Sohlensicherungen**

Sohlensicherungen bestehen im traditionellen Wasserbau aus losen Steinschüttungen auf Kornfiltern oder auf geotextiler Filterschicht. Die Lagestabilität gegenüber den angreifenden Strömungskräften wird ausschließlich aus dem Eigengewicht des Einzelsteines hergeleitet. Daraus folgt, daß für hohe Strömungsgeschwindigkeiten auch zunehmend große Steingewichte erforderlich werden (Bild 1).

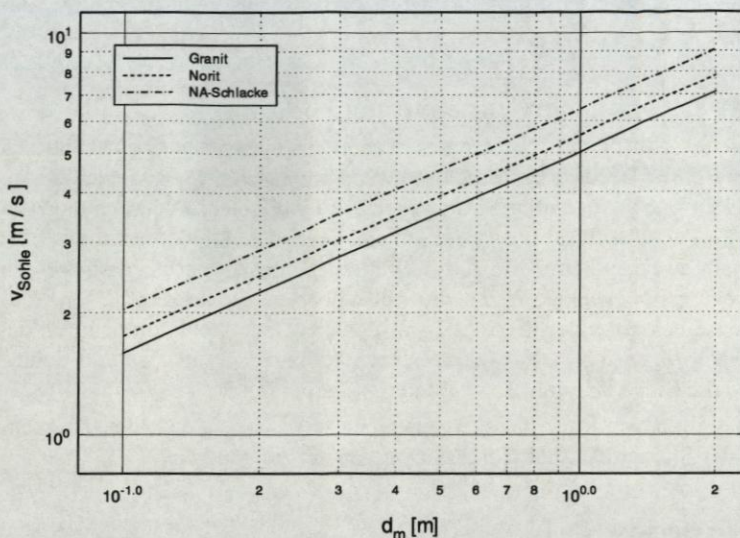


Bild 1: Grenzstabilität loser Schüttsteine (HACKMANN, RÖMISCH, 1996)

An Schiffsliegstellen, an denen Fähr- und Containerschiffe selbständig an- und ablegen muß mit sohlennahen Strahlgeschwindigkeiten von 4,5 bis 5 m/s gerechnet werden. Bei energischeren Manövern, die im Falle ungünstiger Wetterbedingungen gefahren werden, kann es sogar zu Geschwindigkeiten von 6 bis 8 m/s kommen (RÖMISCH, 1993).

Durch den Einsatz neuer Antriebssysteme, sog. Azimutpropeller, werden bei An- und Ablegemanövern Sohlengeschwindigkeiten bis zu 10 m/s erzeugt. Hinzu kommt der Einsatz dieses Hauptantriebes als sog. Bugstrahlruder. Dies bedeutet, es werden auch sehr hohe Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Kaianlage erzeugt.

Auch aus dem Bereich des konstruktiven Wasserbaus sind auf Schußböden und Tosbecken hinter Wehren und im Bereich der Sohlen an Sperrwerken Strömungsgeschwindigkeiten von 5 – 7 m/s mit hohen Turbulenzen bekannt. Ohne Sohlensicherungsmaßnahmen ist die Standsicherheit dieser Bauwerke nicht gewährleistet.

Eine lose Steinschüttung, die normalerweise zum Erosionsschutz angewendet wird, ist bei derartig hohen turbulenzreichen Geschwindigkeiten nicht mehr wirtschaftlich. Eine Sicherung mit losen Steinschüttungen führt zu erforderlichen Steindurchmessern von 0,8 bis 1,5 m und größer. Mit den Abstufungen in den Filterlagen werden Aufbaustärken von 2,0 bis 4,0 m erforderlich. Hier zeigt



sich alternativ ein großer Anwendungsbereich für Verbundsysteme. Von den Verbundsystemen wird nachfolgend nur die mit Zementmörtel verklammerte Steinschüttung erläutert.

#### **4 Verklammerte Steinschüttung**

Durch den Verguß mit Mörtel kann die Strömungsstabilität von Steinschüttungen erhöht werden. Viele ausgeführte Projekte an Schifffahrtsstraßen, Wehren und Sperrwerken (Muldewehr Wurzen, Emssperrwerk, Sohlensicherungen in den Fährhäfen Mukran und Puttgarden) beweisen dies.

Zusätzlich zu dem Gewicht eines Steines kommen bei einer vergossenen Steinschüttung die Verklammerungskräfte zur Wirkung, die sich aus dem Verbund zwischen Schüttstein und Vergußmaterial ergeben.

Bei flächenartigem Teilverguß eines Deckwerkes nach dem COLCRETE-Verfahren wird (nahezu) jeder Stein gehalten und die gesamte Deckschicht damit in die Lage versetzt, Längskräfte, Querkräfte und in begrenztem Umfang auch Biegemomente aufzunehmen. Dadurch entsteht im Deckwerk ein Sicherheitspotential, das es ermöglicht, mit kleinen Steingrößen dünne Deckschichten zu bauen, die durch gegenseitige Verklammerungen in hohem Maße erosionsstabil sind.

Zur Sicherung einer ausreichenden Durchlässigkeit, einhergehend mit einer hohen Verbundwirkung der Deckschicht, werden ca. 50% des Hohlraumgehaltes mit Vergußmasse verfüllt. Bei Deckwerken, die geringeren hydraulischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, kann die Verklammerungsmenge auf ca. 30% des Hohlraumgehaltes reduziert werden. Dadurch wird auch eine gewisse Flexibilität der Deckschicht erreicht.

Basierend auf theoretischen Untersuchungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig (LWI, TU-BS 1998) wurde für eine verklammerte Steinschüttung nachstehendes Stabilitätsmodell formuliert (HACKMANN / RÖMISCH, 1996). Bei diesem Modell wird vorausgesetzt, daß als stabilisierendes Moment neben dem Eigengewicht des Steines eine Verklammerungskraft angesetzt wird.

Diese Verklammerungskraft  $F_V$  wird dabei als zusätzliches Gewicht, im Schwerpunkt des Steines angreifend in die Rechnung eingeführt, vgl. Bild 2.

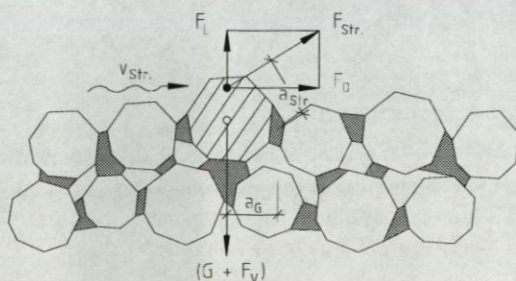


Bild 2: Kräfte an einem verklammerten Stein

- $F_{str.}$  = Resultierende Strömungskraft**  
 **$G$  = Gewichtskraft**  
 **$F_V$  = Haltekraft infolge Verklammerung**

Unter Beachtung dieser Voraussetzung gilt:

$$\text{zul. } v_{\text{Sohle}} = B_{\text{Grenz}} \sqrt{d_{50} \cdot g \cdot \Delta' \cdot \left[ 1 + 6 \cdot a \frac{\tau_v}{g \cdot (\rho_s - \rho_o) \cdot d_{50}} \right]} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- $B_{\text{Grenz}}$  = Stabilitätsbeiwert wie in Gl. (1), = 1,25  
 $\Delta'$  = relative Dichte des Steinmaterials, unter Wasser  
 $d_{50}$  = mittlerer Steindurchmesser in [m]  
 $\tau_v$  = Verklammerungsspannung, näherungsweise identisch mit der Zugspannung des Verbundmaterials (z.B. Mörtel), [kN/m<sup>2</sup>]  
 $(\rho_s - \rho_o)$  = Dichte des Steinmaterials unter Wasser, [t/m<sup>3</sup>]  
 $a$  = Verhältnis der Verbundfläche (Fläche an der der Mörtel den Verbund realisiert) zur gesamten Steinoberfläche;  $a = 0,1$  bis  $0,6$ , je nach Vergußmenge

Eine entscheidende Größe in Gl. (1) stellt die Verklammerungsspannung dar. In (ROSTASY, 1983) werden dazu folgende Angaben gemacht:

$$\tau_v = 0,5 \text{ bis } 5,0 \text{ N/mm}^2.$$

Mittels durchgeführter Ausreißversuche an unter Wasser vergossenen Steinen konnten Verklammerungsspannungen in gleicher Größenordnung, nämlich von  $\tau_v = 2$  bis  $5 \text{ N/mm}^2$ , bestimmt werden.



Für praktische Berechnungen wird unter Beachtung abmindernder Aspekte (Unterwassereinbau, Sedimentablagerung auf den Haftflächen der Steine) vorgeschlagen, mit folgenden Eingangsgrößen zu arbeiten:

$$a = 0,2$$

$$\tau_v = 0,1 \text{ N/mm}^2.$$

Der auf Bild 3 dargestellte Funktionsverlauf beruht auf diesen Eingangsgrößen. Bemerkenswert ist, daß die Verklammerungswirkung sich auf die zulässige Sohlengeschwindigkeit umso stärker auswirkt, je kleiner der Steindurchmesser ist, d.h. bereits für kleine Steindurchmesser wird eine hohe zulässige Stromgeschwindigkeit erreicht.

Diese zulässige Sohlengeschwindigkeit liegt für Steine der Steinklasse II bis III (nach TLW) bei 13 bis 14 m/s, was einen unerwartet hohen Wert darstellt.

Eine experimentelle Überprüfung konnte für Strömungsgeschwindigkeiten bis 7,7 m/s durchgeführt werden.

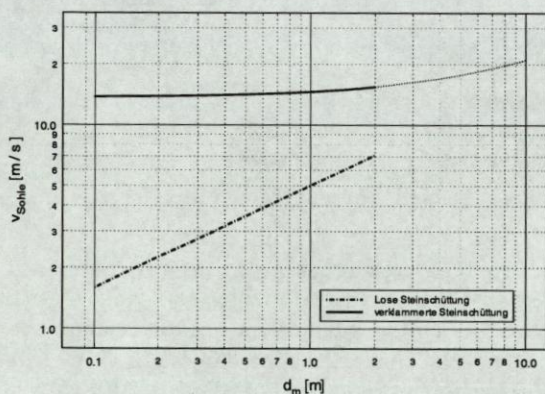


Bild 3: Zulässige sohlennahe Geschwindigkeit für lose und verklammerte Steinschüttungen (HACKMANN, RÖMISCH, 1996)

## 5 Ausgeführte Projekte

### 5.1 Sohlensicherung Fährhafen Sassnitz / Mukran

Der Fährhafen Sassnitz-Mukran ist zu einem der modernsten Fähranleger Europas ausgebaut worden und hat 1998 mit der Fertigstellung einer 310 m langen

Fingerpier zwei weitere Liegeplätze, einen für Kfz- und Eisenbahntransfer, der andere für den PKW- und LKW-Transfer, erhalten. Die neue Pieranlage besteht aus einem Fangedamm mit geneigter Spundwand und überbauter Strömungs- und Eiskammer und einer 62 m langen, offenen Pier.

Die An- und Ablegemanöver der Fähren mit eigenen Maschinen (Heckschraube, Bugstrahlruder) können im Bereich der Sohle der neuen Pier zu Erosionen führen und die Standsicherheit der Pierkonstruktion gefährden. Zum Schutz der Sohle im Bereich vor der Fingerpier wurden insgesamt 30.000 m<sup>2</sup> Sicherung eingebaut. Aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungen wird die Sohlensicherung in 3 unterschiedliche Bereiche aufgeteilt:

Bereich I:	Flächensicherung,
Bereich II:	Spundwandsicherung,
Bereich III:	Randsicherung.

**Bereich I:** Die Flächensicherung besteht aus einem geotextilen Filter mit der darüberliegenden Deckschicht aus Schüttsteinen der Kl. II/III, die mit 125 l/m<sup>2</sup> kolloidalem Mörtel verklammert wurden. Die Dicke der Deckschicht beträgt 70 cm. Wegen der großen Lagestabilität im Einbauzustand und der möglichen Einbaugenauigkeit wurde ein sandgefülltes Vlies als Filter verlegt (Sandmatte, Sandfüllung ca. 5000 gr/m<sup>2</sup>).

**Bereich II:** Für die Sicherung des Spundwandanschlusses wurden sandgefüllte, geotextile Container in die Spundwandtäler eingebaut. An der Spundwand wurden die Steine in 1,0 m Dicke eingebaut und auf 3 m Breite voll mit kolloidalem Mörtel vergossen.

**Bereich III:** Die flexible Randsicherung besteht aus Colcrete-Betonmatten; das sind untereinander verbundene, kissenförmige, geotextile Matratzen, die nach dem Verlegen mit kolloidalem Injektionsmörtel verfüllt werden. Die Ober- und Unterlagen sind durch eingewebte Abstandshalter und Bewehrungsbänder fest miteinander verbunden. Die Matratzen sind streifenförmig, im Abstand von vier Kissen geschlitzt und passen sich im Übergangsbereich zur ungeschützten Sohle einer möglichen Randkolkung an. Unter die Betonmatte ist ein Filtervlies genäht.



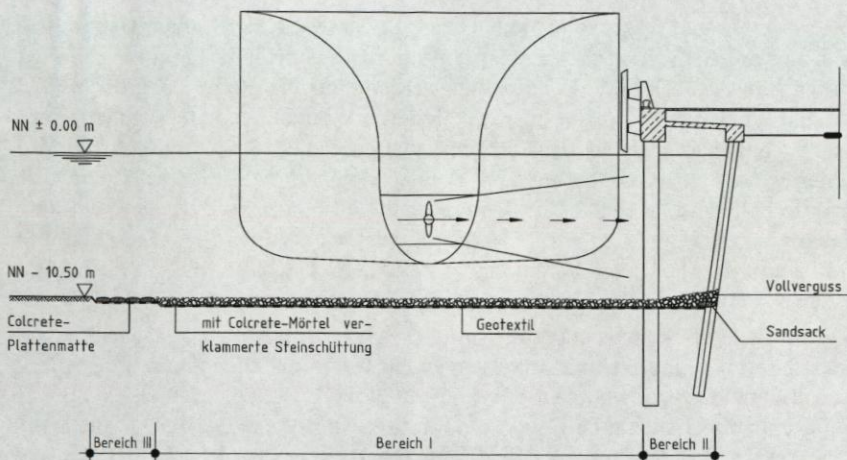


Bild 4: Sohlensicherung Fährhafen Sassnitz / Mukran

#### Einbau der Sohlensicherung:

Nach profilgenauer Sohlbaggerung mit einem Stelzenponten wurden die Sandmatten mit Hilfe eines automatisierten Mattenverlegegerätes unter Wasser zwangsgeführt ausgerollt. Nach dem Einbau des geotextilen Filters wurden Schüttsteine der Kl. II/III aus Granit mit einem Steinschüttgerüst auf einer Fläche von jeweils ca. 6 x 20 cm abgestürzt. Dabei wurde über Wasser die Einbaudicke der Schüttsteinlage überprüft. Die Lagegenauigkeit der einzelnen Einbauschritte wurde durch die Einmessung über DGPS (Satellitennavigation) gesichert. Die abschließende Verklammerung erfolgte mit Hilfe eines eigenentwickelten Einbaugerätes, das die vorgegebene Vergußmenge von 125 l/m<sup>2</sup> gleichmäßig auf die Steinschüttung verteilte. Alle Einbauschritte wurden zusätzlich von Tauchern überwacht.

Beim Bau von Sohlensicherungen hat sich der hohe Automatisierungsgrad von Einbausystemen bewährt und gewährleistet eine präzise und wirtschaftliche Ausführung.

## 5.2 Sohlensicherung am Emssperrwerk

Das Emssperrwerk in der Ems bei Gandersum wird als Sturmflutsperrwerk zum Schutz der Bevölkerung vor zukünftigen Sturmfluten erstellt. Zusätzlich erhält das Sperrwerk eine Staufunktion, um die Wasserstände der Ems für die Schiffsüberführungen von der Papenburger Meyer-Werft zur Nordsee in ihrer Höhe zu sichern.

Das Emssperrwerk erhält sieben Durchflußöffnungen mit 6 Hubtoren und einem Drehsegmenttor in der Hauptschiffahrtsöffnung.

Die Drempe und Sperrwerkspfeiler des Bauwerkes müssen gegen Unterläufigkeit und die Bauwerksein- und -ausläufe durch ausreichend bemessene Sohlsicherungen vor Kolkbildung geschützt werden. Für die Bemessung der Sohlsicherung sind beim Franzius-Institut Modelluntersuchungen durchgeführt worden. Dabei wurde festgestellt, daß mit maßgeblichen Strömungsgeschwindigkeiten von 6,6 m/sec. zu rechnen ist. Bei der Variante „Sturmflutentlastung“, die erforderlich wird, wenn die Außenwasserstände NN + 6,65 m überschreiten, treten oberstromig (Richtung Papenburg) zwar noch größere Fließgeschwindigkeiten auf, die aber bei der Bemessung nicht berücksichtigt wurden, da die Eintrittswahrscheinlichkeit sehr gering ist.

Für die gesamte Sohlsicherung wurde ein geotextiler Filter, bestehend aus einem Filtervlies und einem darüberliegenden festvernadelten Gewebe, gewählt. Auf das zugefeste Gewebe wird eine 15 cm dicke Buschpackung und kreuzweise Faschinen gebunden. Diese so kombinierten Sinkstücke werden auf die Sohle abgesenkt und dabei mit ca. 250 kg/m<sup>2</sup> Schüttsteinen der Kl. II/III beschwert (Lagesicherung).

Für die Bemessung des Sohlschutzes gegen Überströmung wurde die Sohlsicherung in 3 Bereiche unterteilt.

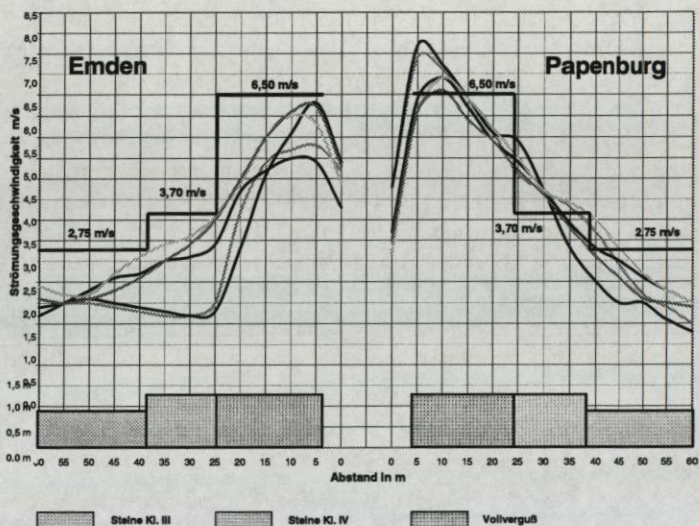


Bild 5: Sohlsicherung Emssperrwerk



**Bereich I** Die Deckschicht im Anschluß an die DrempeI wurde für eine Fließgeschwindigkeit von 6,6 m/s dimensioniert. Dort werden Schüttsteine der Steinklasse III mit einem spez. Gewicht von 2,75 to/m<sup>3</sup> in einer Gesamtdicke von 1,50 m, zum Rand hin auf 1,25 m fallend, eingebaut. Die Steine werden anschließend mit Vergußmörtel (Hydrocrete) voll vergossen.

**Bereich II** Der weitere Kolkschutz, bemessen für Strömungsgeschwindigkeiten von 3,7 m/sec., besteht aus einer losen Steinschüttung der Steinklasse IV mit einem spez. Gewicht von 3,0 to /m<sup>3</sup> in 1,25 m Dicke.

**Bereich III** Der dritte Bereich wird durch lose Steinschüttung der Kl. III mit einem spez. Gewicht von 3,0 to/m<sup>2</sup> gesichert. Die Deckschichtdicke reduziert sich zum Ende der Sohlensicherung auf 90 cm.

#### Einbau der Sohlensicherung

Nach der Baggerung der Bauwerksmulde und Profilierung der Sohle mit Stelzenbagger werden die Sinkstücke eingeschwommen, über DGPS positioniert und mit 2 Einbauschiffen in ihrer Lage gehalten. Über ein Senkrohr werden sie abgesenkt und mit Schüttsteinen gleichmäßig beschwert. Dabei fährt der Steinstürzer über das Sinkstück und schiebt die Steine hydraulisch ab.

Anschließend werden die Steine in der geforderten Dicke mit dem Steinstürzer und Stelzenpontons eingebaut. Alle Geräte sind mit DGPS (Satellitennavigationssystem) ausgerüstet und können somit exakt ihre Einbauposition bestimmen. Abschließend erfolgt der Verguß mit „Hydrocrete-dicht“. Der Vergußmörtel wird auf einem Betonierschiff hergestellt und über eine Betonverteilermast mit Taucherhilfe unter Wasser eingebaut. Für die bessere Orientierung werden die Vergußbereiche in kleine Einzelfelder unterteilt, die systematisch DGPS-gestützt fertiggestellt werden.

Für die Erstellung der Sohlensicherung werden ca. 72.000 m Sinkstücke hergestellt, ca. 125.000 to Schüttsteine eingebaut und ca. 23.000 m<sup>2</sup> Bauwerksanschlüsse mit „Hydrocrete-dicht“ voll vergossen.

Die Arbeiten werden zur Zeit am Emssperrwerk ausgeführt.

### **5.3 Instandsetzung des seeseitigen Deckwerkes der Buhne A auf der Insel Minsener Oog**

Die Strombauwerke der Insel Minsener Oog haben die Aufgabe, die Wanderung von zusammenhängenden Sandplatten durch die Außenjade zu unterbinden, um so ein lagebeständiges und ausreichend tiefes Fahrwasser nach Wilhelmshaven zu gewährleisten. Bereits 1909 wurde auf Veranlassung der Reichsmarine mit

dem Bau der Strombauwerke aus Buschpackwerken und Sinkstücken begonnen. Die Buhne A ist ein Teil dieser Bauwerke, sie wurde von 1910-1913 auf 2.500 m Länge hergestellt. 1922/23 wurde die Buhne A auf 2.960 m Länge erweitert. Diese Verlängerung hatte erhebliche Stromverstärkungen vor Kopf zur Folge, so daß dort drei eiserne Senkkästen abgesenkt wurden, die mit erheblichen Mengen an Sinkstücken, Steinen, Eisenschrott und unbrauchbaren Schuten gesichert wurden.

So waren immer wieder neue Sicherungsmaßnahmen und Erweiterungen erforderlich, insbesondere wenn die Fahrwassertiefe der Jade erhöht wurde.

Anhand der praktischen Erfahrungen und im Zuge der technologischen Entwicklung wurden im Verlauf der ständigen Erweiterungen und Schadensbeseitigungen andere Bauweisen und Materialien eingesetzt. So erfolgte z. B. die Sicherung des Kopfes der Buhne A mit Tetrapoden, die ein Stückgewicht von rd. 6 to haben. Trotz der großen Lagestabilität und des großen Eigengewichtes haben sich einige Tetrapoden aus dem Verband gelöst. Aus diesem Grunde wurden die Tetrapoden 1983 in Teilbereichen durch den Einbau von Schüttsteinen und Verguß dieser Schüttsteine mit kolloidalem Mörtel gesichert. Seitdem sind keine Tetrapoden mehr verschlagen.

Bedingt durch die negativen morphologischen Entwicklungen führten verstärkte Seegangsbelastungen, besonders im vorderen Teil der Buhne A, zu erheblichen Beschädigungen an den immer wieder ausgebesserten, im oberen Bereich vollvergossenen Seitenböschungen.

In dem nördlichen Abschnitt der Buhne A hat sich seeseitig im Bereich des Böschungsfußes eine tiefe Rinne gebildet. Einhergehend mit dem Überdruck im Bühnenkern führte dies zu den Zerstörungen in der zu dünnen Deckschicht.

Aus diesem Grunde erfolgte 1995 eine Nachbemessung der vorhandenen Deckschicht der Bühnenböschung für diesen Bereich. Bedingt durch die exponierte Lage des Bauwerkes sind die Belastungen aus Wellen maßgebend.

Die Bemessungswelle hat ein  $H_s$  von 2,50 m, die maßgebliche Windrichtung ist NNW.

Die Bemessung ergibt folgende Varianten für die Deckschicht:

1. lose Deckschicht:

1.1 lose Deckschicht aus Granit

Bei einer Ausführung der Deckschicht, Neigung 1:4, aus Granitsteinen mit einem spez. Gewicht von  $2,7 \text{ to/m}^3$  sind Einzelsteine von 1 bis 3 to Stückgewicht erforderlich, die zu einer Deckschichtdicke von 2,0 führen. Mit der erforderlichen Zwischenschicht führt das zu einer Gesamtdicke von 2,60 m.



## 1.2 lose Deckschicht aus Norit

Bei einer Ausführung der Deckschicht aus Noritgestein mit einem spez. Gewicht von  $3,05 \text{ to/m}^3$  sind Einzelsteine von 0,8 bis 2,5 to erforderlich, die zu einer Deckschichtdicke von 1,65 m führen. Mit der erforderlichen Zwischenschicht führt das zu einer Gesamtdicke von 2,25 m.

## 1.3 lose Deckschicht aus Eisensilikatgestein

Bei einer Ausführung der Deckschicht aus NA-Schlacke mit einem spez. Gewicht von  $3,70 \text{ to/m}^2$  sind Einzelsteine von 0,4 bis 0,8 to erforderlich, die zu einer Deckschichtdicke von 1,00 m führen. Mit der erforderlichen Zwischenschicht führt das zu einer Gesamtdicke von 1,40 m. Die Schlackensteine in dieser Größe Dr => 60 cm fallen bei der Produktion nur in sehr geringer Menge an und können daher nur für kleine Bauvorhaben eingesetzt werden.

## 2. Teilvergossenes Deckwerk

Für die teilvergossene Deckschicht ist der Nachweis gegen „Abgleiten“ maßgebend. Die Bemessung ergab folgenden Deckwerksaufbau. Das Schüttsteindeckwerk aus NA-Schüttsteinen der Kl. III mit einem spez. Gewicht von  $3,7 \text{ to/m}^2$  muß in einer Dicke von 0,80 m und einer Verklammerungsmenge von  $120 \text{ l/m}^2$  hergestellt werden.

## 3. Gewählter Deckwerksaufbau

Vorerst mußte das alte Deckwerk aufgebrochen werden. Mit dem Abbruchmaterial wurde die Böschung ausgeglichen und profiliert. Die großen Brocken wurden als Böschungsfußsicherung genutzt.

Für die Fußsicherung wurde im Bereich der Erosionsrinne ein Sinkstück bestehend aus einem Kunststoffgewebe mit 15 cm aufgebundenem festem Busch und im Raster von  $1,0 \times 1,0 \text{ m}$  angeordneten Faschinen gewählt. Die Sinkstücke wurden mit ca. 75 cm NA-Schüttsteinen der Kl. IV und den großen Abbruchbrocken beim Absenken belastet. Oberhalb des Sinkstückes bis zur Niedrigwasserlinie wurde ebenfalls eine lose Steinschüttung aus NA-Steinen der Kl. IV in 1,0 m Dicke hergestellt.

Vom Mitteltideniedrigwasser bis OK Deckwerk ca. MTHW + 1,40 m wurden 80 cm Schüttsteine der Kl. III aus NA-Schlacke eingebaut. Diese Steine wurden mit ca.  $120 \text{ l/m}^2$  Colcretemörtel unter Beibehaltung der Durchlässigkeit verklammert; dies entspricht einer Hohlräumeauffüllung von 35 %.

Es wurden folgende Leistungen erbracht:

ca. 3.000 m <sup>2</sup>	vergossenes Deckwerk abbrechen
ca. 9.000 m <sup>2</sup>	vorhandenes Deckwerk abgleichen
ca. 4.000 m <sup>2</sup>	Sinkstücke als Fußvorlage
ca. 5.000 to	NA-Steine Kl. IV
ca. 15.000 to	NA-Steine Kl. III
ca. 9.000 m <sup>2</sup>	Verklammerung der Steinschüttung

## 6 Zusammenfassung

Zur Sicherung der Standfestigkeit von Bauwerken im Einflußbereich hoher turbulenter Strömungen an Wasserwegen werden Deckwerke und Sohlensicherungen gebaut. Diese Sicherungen bestehen aus losen Steinen oder Sicherungssystemen, wie einer verklammerten Steinschüttung.

In der vorliegenden Arbeit werden die Vorteile, insbesondere das hohe Sicherheitspotential, einer verklammerten Steinschüttung aufgezeigt. Es wurde ein Bemessungsansatz diskutiert. Die Ausführung wurde anhand von drei Projekten erläutert.

In Zukunft sind stetig zunehmende Schiffsgrößen, Erhöhung der Antriebe und damit verbundene erhöhte Fahrgeschwindigkeiten zu berücksichtigen. Es liegt daher nahe, für zukünftige Projekte auch die Haltekraft aus der Verklammerungswirkung zu berücksichtigen, um so zur Erstellung von wirtschaftlicheren Deckschichten für Sohlen und Böschungen zu gelangen.

Dipl.-Ing. G. Hackmann  
Colcrete - von Essen GmbH & Co. KG  
Am Waldrand 9c  
26180 Rastede



## 7 Literaturverzeichnis

- DIETZ (1973) Sicherung der Flußsohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken, Wasserwirtschaft 63, S. 76-83, 1973
- EAK (1993) Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke, Heft 55
- EAU (1996) Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Uferneufassungen“ Häfen und Wasserstraßen, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1997
- FUEHRER, M., POHL, H., RÖMISCH, K. (1987) Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protection of various constructions PIANC-Bulletin, No. 58 (1987)
- HACKMANN, G., Die Colcrete-Plattenmatte und die verklammerte Steinschüttung
- HANSEN, A.H. (1985) Wasserbausteine im Deckwerksbau, Bemessung und Konstruktion. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holstein)
- KNIESS, H.G. (1983) Kriterien und Ansätze für die technische und wirtschaftliche Bemessung von Auskleidungen von Binnenschiffahrtskanälen Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr.53, Karlsruhe (1983)
- MAR (1991) Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen der Klasse IV (MAR), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe (1991)
- MAV (1990) Merkblatt zur Anwendung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguß von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (MAV), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe (1990)
- RÖMISCH, K. (1993) Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen in Häfen Hansa, Nr. 8 (1993)
- RÖMISCH, K. (1996) HANSA, Nr. 8, 1996
- ROSTASY, F.S. (1983) Baustoffe, Verlag W. Kohlhammer, (1983)
- Versuchsbericht LWI, TU Braunschweig (1995) Großmaßstäbliche Untersuchungen und Optimierung des Kolkenschutzsystems "COLCRETE Plattenmatte" für den Einsatz als Sohlschutz vor hochbelasteten Kaianlagen, Versuchsbericht Nr. 791, Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Dezember 1995 (unveröffentlicht)
- Versuchsbericht LWI, TU Braunschweig (1998) Stabilität von verklammerten Steinschüttungen, Versuchsbericht Nr. 833, Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, August 1998 (unveröffentlicht)