

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Dietz, Johann W.

Kolksicherung am Störsperwerk

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103028>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Dietz, Johann W. (1972): Kolksicherung am Störsperwerk. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 33. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 35-56.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dr.-Ing. J.W. D i e t z

KOLKSICHERUNG AM STÖRSPERRWERK

Scour protection at the Stör-dam

Zusammenfassung

Am Störsperwerk soll die Kolksicherung teilweise durch eine Packsteinlage erfolgen. Zur Beurteilung der Stabilität dieser Befestigungsstrecke und zur Dimensionierung der Steingewichte wurden Modellversuche durchgeführt. Diese brachten das Ergebnis, daß örtliche Geschwindigkeitskonzentrationen über der Sohle in Verbindung mit der Liftwirkung der Wirbel an der Packsteinlage Schäden hervorrufen und damit weitergehende Sicherungsmaßnahmen erforderlich machen.

SUMMARY

The Stör-dam shall partly be protected against scour by rock filling. Model tests were carried out for estimating the stability of the fastened reach and for dimensioning the stone weight. The result was that damage was caused by local velocity concentrations near the bed in connection with the lift effect of eddies. Therefore extensive securing measures are to be taken.

I n h a l t

	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	37
2. Aufbau und Durchführung der Versuche	39
3. Ergebnisse der Modelluntersuchungen	41
3.1 Eindimensionale Parallelströmung	42
3.2 Zweidimensionale Unterströmung eines Segmentes	44
3.3 Dreidimensionale Strömung mit seit- licher Ablösung	47
3.4 Allgemeine Auswertung der Versuchs- ergebnisse	50
4. Zusammenfassung und Beurteilung	53
5. Schrifttum	55

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Im Zuge der mündungsnahen Abdämmung der Stör werden zur Zeit die Bauarbeiten für ein Sturmflutsperrwerk durchgeführt, das an dieser Bundeswasserstraße in die dadurch verkürzte Deichlinie einbindet. Dieses Sperrwerk soll an jeder Seite eine Flutöffnung mit je 43,00 m lichter Weite erhalten, für die aus Gründen der doppelten Sturmflutsicherheit jeweils zwei Segmente als Verschlüsse vorgesehen sind. In der Mitte liegen zwei 22,00 m breite Schiff-fahrtsöffnungen, die mit zwei hintereinander liegenden Stemmtoren verschlossen werden können. Die lichte Durchflußbreite des Sperrwerkes beträgt damit insgesamt 130 m.

Durch Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau in einem aerodynamischen Analogiemodell [3] wurde für den Flut- und Ebbestrom die strömungsgerechte Lage des Sperrwerkes in einer geraden Übergangsstrecke zwischen zwei gleichsinnigen Krümmungen nachgewiesen, wobei für die beiden alternierenden Strömungsrichtungen ein Ausgleich der Anströmverhältnisse angestrebt worden ist.

Zum Schutz des Bauwerkes gegen die Kolkbildung in dem feinkörnigen Untergrund ist auf beiden Seiten der tiefgegründeten Sohlplatte eine Sohlbefestigung erforderlich, die unter Ausnutzung des umfangreichen und systematisch angelegten Versuchsmaterials aus den Modelluntersuchungen für das Eidersiel [5] [7] und für das Elbewehr Geesthacht [6] in ihren wesentlichen Grundzügen ohne spezielle Modellversuche geplant werden konnte [3].

Aufgrund dieser Versuchsergebnisse und unter Berücksichtigung der Baugrubenabmessungen kommt auf beiden Seiten des Sperrwerkes eine 50 m lange Befestigungsstrecke (gemessen ab Pfeilerende) in nahezu horizontaler Anordnung zur Ausführung (Abb.1).

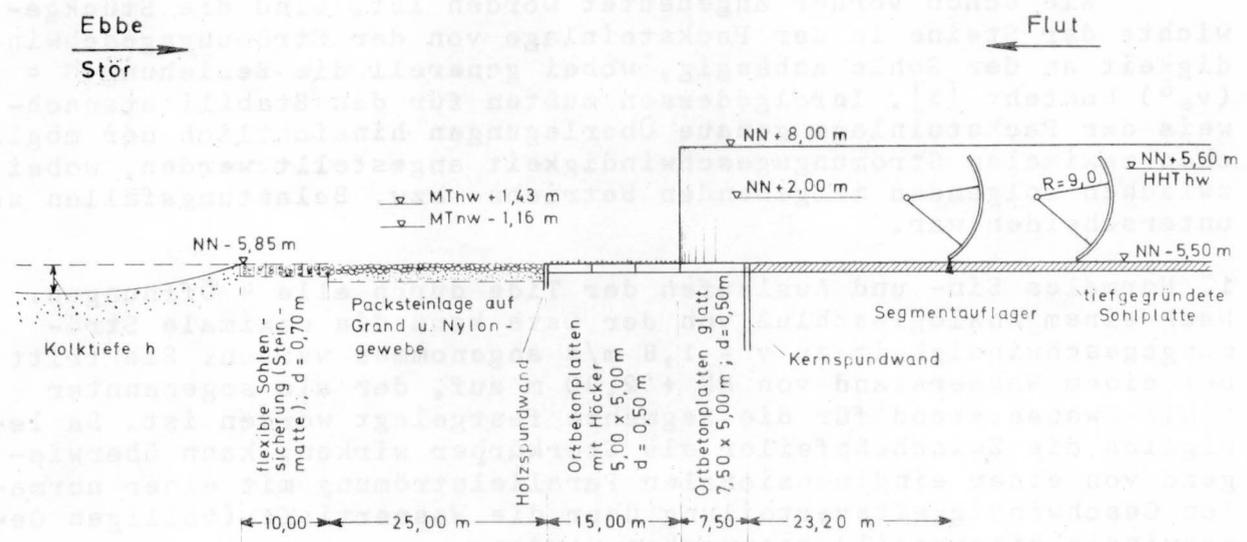


Abb. 1 Ausbildung der Sohlensicherung am Störsperwerk

Entsprechend der unterschiedlichen Beanspruchung durch die Strömung wird hierbei eine Aufgliederung in drei konstruktiv verschieden ausgebildete Abschnitte vorgenommen.

I. Im Nahbereich des Sperrwerkes, also in der Zone der stärksten Strömungsangriffe, werden auf einer Länge von 15 m quadratische Ort betonplatten mit einem Stückgewicht von rd. 30 Tonnen angeordnet, deren Fugen zur Entlastung des Sohlwasserdrucks durchlässig gehalten werden sollen, ohne daß hierbei eine Ausspülung des Untergrundes stattfinden kann. Da der Kolkessel bei rauhen Befestigungsstrecken flacher abfällt als bei glatten [5], werden diese Ort betonplatten zur Erzielung der gewünschten Rauheitswirkung mit Höckern versehen.

II. Die eigentliche Befestigungsstrecke bildet eine 25 m lange Packsteinlage auf Grand und Nylongewebe, deren vertikaler Aufbau in analoger Weise wie beim Eidersiel [4] vorgenommen wird. Aus Kostengründen sollten bei der Herstellung dieser Packsteinlage nach Möglichkeit sogenannte Standard-Wasserbausteine mit einem Stückgewicht von rd. 25 bis 40 kg verwendet werden, die mit genügender Sicherheit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 2,0 m/s zulassen [3].

III. Der Übergang auf die ungesicherte Flußsohle soll durch eine 10 m lange flexible Sohlensicherung (Steinmatte) erfolgen, deren elastische Verbundwirkung durch Torpedofangnetze erreicht wird, die sich bei Freilandversuchen an der Eider (Versuchsfläche am Pegelpriel) [4] außerordentlich bewährt haben, da die mit ihnen gebildeten Steinmatten elastisch dem Uferabbruch folgten, ohne daß ein Nachrutschen einzelner Steine eintrat. Diese spezielle Ausbildung der Übergangsstrecke bzw. der Befestigungskante ist zum Schutz gegen die gefährlichen Unterhöhlungserscheinungen erforderlich, welche die im Tidegebiet wechselnden Strömungen dann bringen, wenn sie von der beweglichen Sohle gegen die Befestigungskante gerichtet sind [5].

Wie schon vorher angedeutet worden ist, sind die Stückgewichte der Steine in der Packsteinlage von der Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle abhängig, wobei generell die Beziehung $G = f(v_s^6)$ besteht [5]. Infolgedessen mußten für den Stabilitätsnachweis der Packsteinlage genaue Überlegungen hinsichtlich der möglichen maximalen Strömungsgeschwindigkeit angestellt werden, wobei zwischen folgenden maßgebenden Betriebs- bzw. Belastungsfällen zu unterscheiden war.

1. Normales Ein- und Auslaufen der Tide durch alle 4 Öffnungen. Nach einem Analogieschluß von der Oste kann die maximale Strömungsgeschwindigkeit zu $v = 1,8$ m/s angenommen werden. Sie tritt bei einem Wasserstand von NN + 2,80 m auf, der als sogenannter Schließwasserstand für die Segmente festgelegt worden ist. Da lediglich die Zwischenpfeiler als Störkörper wirken, kann überwiegend von einer eindimensionalen Parallelströmung mit einer normalen Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe (völliges Geschwindigkeitsprofil) gesprochen werden.

2. Um die möglichen Ablagerungen in den Schiffahrtsöffnungen und den Nischen zu beseitigen, wird an einen sogenannten Spülbetrieb

gedacht. Hierbei soll entweder eine sekundliche Flutwassermenge von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ oder eine Ebbwassermenge von $450 \text{ m}^3/\text{s}$ (jeweils Q_{max} während einer bestimmten Tide) durch eine Schiffahrtsöffnung abgeführt werden, wobei sich Strömungsgeschwindigkeiten von 4,3 bzw. 3,3 m/s einstellen. Da bei diesem Spülvorgang die restlichen Öffnungen geschlossen sind, wird der Spülstrom durch Ablösungswalzen mit Wirbelketten begrenzt, die örtliche Geschwindigkeitskonzentrationen bewirken können. Neben den schon hohen Strömungsgeschwindigkeiten bringen diese dreidimensionalen Strömungserscheinungen für die Sohlensicherung eine zusätzliche Belastung.

3. Wenn die beiden seitlichen Segmente spätestens bei einem Wasserstand von $\text{NN} + 2,80 \text{ m}$ geschlossen werden, stellt sich auf der Aussenseite des Sperrwerkes ein Absperrschwall ein. Über die Dauer des Schließvorganges, der vom Eintauchen der Verschlüsse bis zu ihrem Aufsetzen auf die Sohle rund 3 Minuten beträgt, liegt der Abflußfall des Unterströmens mit einer stetigen Ausbreitung des Strahls auf der Binnenseite vor. Die über dem Strahl um eine horizontale Achse drehende Walze ist nicht mehr als Deckwalze anzusprechen. Da die größten Strömungsgeschwindigkeiten in Sohlennähe liegen, das Geschwindigkeitsprofil also unten stark ausgebeult ist, steht die Sohlbefestigung unter einer starken Belastung. Hierbei fällt noch zusätzlich ins Gewicht, daß bei diesem Absperrvorgang die beiden Schiffahrtsöffnungen in der Mitte schon geschlossen sind und auch hier die schon genannten ungünstigen dreidimensionalen Strömungserscheinungen auftreten.

Während für den unter Punkt 1 aufgeführten Normalfall eine Packsteinlage mit Standard-Wasserbausteinen allen Anforderungen mit großen Sicherheiten genügen kann, sind die Strömungsgeschwindigkeiten über der Sohle in den beiden anderen Fällen und vor allem die möglichen Geschwindigkeitskonzentrationen und die Umwandlung des unten stark ausgebeulten Geschwindigkeitsprofils in Verschlussnähe zu einem normalen ungestörten Profil, das über der Befestigungsstrecke vorliegen sollte, so weit unbekannt, daß die Stabilität der Packsteinlage nicht mehr sicher beurteilt werden kann. Bleiben die Standard-Wasserbausteine mit einem Stückgewicht bis zu 40 kg auch unter der Liftwirkung der Wirbel und Makroturbulenzen dieser dreidimensionalen Strömungsvorgänge in einer stabilen Lage?

Hiermit ist schon die Aufgabenstellung für die Modelluntersuchungen genannt, die im Auftrag des Wasser- und Schiffahrtsamtes Glückstadt bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt worden sind und deren Ergebnisse nachfolgend mitgeteilt und interpretiert werden.

2. Aufbau und Durchführung der Versuche

Nach der Aufgabenstellung kam es darauf an, bei den verschiedenen, vorher aufgeführten Betriebsfällen die Strömungsgeschwindigkeiten über der Befestigungsstrecke zu ermitteln und die Stabilität der Packsteinlage zu beurteilen, wobei die binnenseitige Sohlensicherung infolge der Unterströmung beim Schließvorgang der Segmente und der größeren Spülwassermengen in Flutrichtung

als gefährdeter anzusehen war. Aus diesem Grund konnte eine verhältnismässig einfache Versuchsanordnung gewählt werden, die sich auf die Nachbildung eines binnenseitigen Segmentes und der sich daran anschließenden Befestigungsstrecke beschränkte, also in ihrer Grundkonzeption als rein zweidimensional anzusehen war. Die Versuche wurden daher in einem 1,00 m breiten Versuchsgerinne durchgeführt, dessen vertikale Abmessungen und Wasserversorgung einen Modellmaßstab von 1:25 zuließen, der zur Lösung der gestellten Aufgaben auch anzustreben war.

Neben der maßstäblichen Nachbildung der Ort betonplatten ist die Packsteinlage im Modell mit Splitt gestaltet worden, wobei das Gewicht der einzelnen Splitt-Körner so gewählt worden ist, daß sie den zunächst vorgesehenen Wasserbausteinen von etwa 25 bis 45 kg Gewicht entsprachen. Der Korndurchmesser der verwendeten Materialien war hierbei so groß, daß der Anwendung der FROUDE'schen Maßstäbe auf die Stückgewichte nichts im Wege steht ($d_{50} > d_{krit} = 5 \text{ mm}$ [6]). Die Sohlensicherung lag im Modell über einer wasserdurchlässigen Diolen-Gaze, die ihrerseits wieder einen Mittelsand abdeckte, der als bewegliche Sohle eingebaut war. Auf diese Art ist ein vertikaler Filteraufbau der Sicherungsstrecke simuliert worden. Um die Bewegung einzelner Körner beobachten und mittels photographischer Farbaufnahmen fixieren zu können, ist die Packsteinlage im Modell mit gelb, rot und grün eingefärbtem Splitt in 5 optisch verschiedene Abschnitte gegliedert worden.

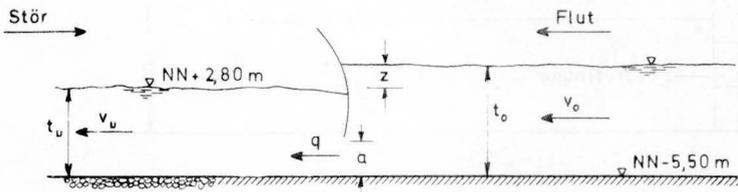
Nach einer Versuchszeit von rund 3 Stunden sind die aus der Deckschicht herausgelösten Steine ausgezählt und gewogen worden, um so auf dem Vergleichsweg eine Beurteilungsmöglichkeit des Einflusses der verschiedenen Strömungsfälle auf das Verhalten der Packsteinlage zu erhalten.

Da die Vorgänge an der Befestigungskante und gegebenenfalls ihr Abbruch für die Beurteilung der Stabilität der Packsteinlage ebenfalls von Bedeutung waren, wurde auf die Anordnung der elastischen Übergangsstrecke im Modell verzichtet und die bewegliche Sohle in horizontaler Lage direkt an die Packsteinstrecke angeschlossen. Diese bewegliche Sohle ist nicht maßstäblich nachgebildet worden, da die Kolktiefen nach der Aufgabenstellung nicht zu betrachten waren.

Im Interesse eines geringen Versuchsaufwandes, ist der Schließvorgang der Segmente durch verschiedene stationäre Lagen des Verschlusskörpers simuliert worden. Hierzu war es aber auch notwendig, daß der sich beim Absenken der Segmente einstellende Absperrschwall berechnet und als hydraulische Randbedingung ins Modell eingeführt werden mußte. Seine Höhe konnte nach der Formel von BÖSS [1] zu $z = 0,85 \text{ m}$ ermittelt werden.

Mit diesem Absperrschwall und der angegebenen Zuströmgeschwindigkeit von $v = 1,8 \text{ m/s}$ bei einem Schließwasserstand von $\text{NN} + 2,8 \text{ m}$ lagen die hydraulischen Randbedingungen für das Modell fest, deren genaue Zuordnung unter Einschluß der Spalthöhe a und des sekundlichen Abflusses q durch Eichversuche im Modell ermittelt worden ist (Abb. 2).

Fall	Bemerkung	a in m	t_o in m	v_o in m/s	q in $\frac{m^3}{sm}$	t_u in m	v_u in m/s
1	Vor dem Eintauchen des Segmentes	> 8,30	¹⁾ 8,30	¹⁾ 1,80	²⁾ 14,90	8,50	1,75
2	Absperrschwall z = 0,85 m (berechnet nach Böss) für plötzliche Absenkung auf a = 2,50 m	⁴⁾ 4,15	9,15	¹⁾ 1,80	²⁾ 16,50	8,50	1,94
3		2,50	9,15	²⁾ 0,98	⁴⁾ 9,00	8,50	1,06
4		1,00	9,15	²⁾ 0,37	⁴⁾ 3,40	8,50	0,40
5		0,50	9,15	²⁾ 0,18	⁴⁾ 1,60	8,50	0,19
6		Spülen durch eine Schiffsöffnungsöffnung b = 22,00 m (Segmente geschlossen)	0 (Ebbe)	⁵⁾ 6,20	⁵⁾ 3,30	20,40	6,40
7	(Segmente geschlossen)	0 (Flut)	⁵⁾ 6,40	⁵⁾ 4,30	27,30	6,60	4,15



- 1) nach Angaben der WSA Glückstadt
- 2) errechnet aus $q = t \cdot v$
- 3) am Ende der Packsteinlage (Sohle NN-5,70 m)
- 4) nach den Eichversuchen im Modell
- 5) nach Strömungsmessungen v. 1.8. 1962

Abb. 2 Zusammenstellung der Abflußfälle und Wasserstände

Neben 3 relativ kleinen Spalthöhen bis zu $a = 2,50$ m (Fälle 3, 4 und 5), ist noch eine größere Spalthöhe von $a = 4,15$ m (Fall 2) betrachtet worden, da hier im Unterwasser (also über der Packsteinlage) größere Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten waren. Zu Vergleichszwecken ist auch noch der Zustand kurz vor dem Eintauchen der Segmente (Fall 1) untersucht worden. Die Fälle 6 und 7 stehen für den sogenannten Spülbetrieb, wobei die jeweiligen Spülrichtungen nur über die Größe der Strömungsgeschwindigkeiten zu beachten waren.

Wie schon bei der Behandlung der maßgebenden Betriebsfälle im vorangegangenen Abschnitt zum Ausdruck gebracht wurde, liegen beim Spülen und beim Absperrvorgang tatsächlich dreidimensionale Abflußerscheinungen vor, die durch den bisher beschriebenen Versuchsaufbau nicht erfaßt werden. Da nach allen bisher bekannten Erfahrungen die dreidimensionalen Strömungsangriffe besonders heftig und gefährlich sind, wurden die Untersuchungsfälle mit den größten Strömungsgeschwindigkeiten (Fälle 2, 6 und 7) durch zwei besondere Versuchsanordnungen (Abb.3) auch in dreidimensionaler Hinsicht betrachtet (Fälle 2', 6' und 7'). Damit war Gewähr gegeben, daß bei den Untersuchungen auch die ungünstigsten Belastungsfälle berücksichtigt worden sind.

3. Ergebnisse der Modelluntersuchungen

Je nach der Wahl der vorher beschriebenen Versuchseinrichtung in Verbindung mit den untersuchten Betriebsfällen kann zwi-

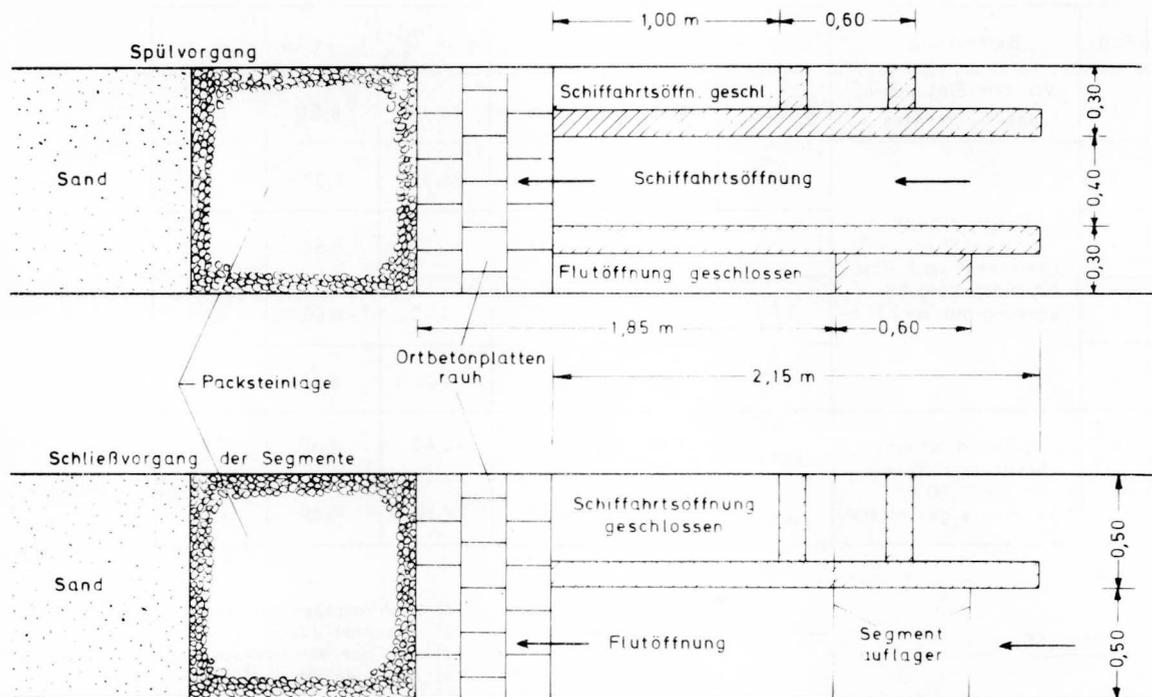


Abb. 3 Versuchsanordnung für dreidimensionale Untersuchungen

schen ein-, zwei- und dreidimensionalen Untersuchungen unterschieden werden. Der Zustand kurz vor dem Eintauchen der Segmente (Fall 1) und das Spülen in beiden Richtungen (Fälle 6 und 7) sind zunächst ohne seitliche Einbauten betrachtet worden, so daß im Modell eine eindimensionale Parallelströmung gegeben war. Bei der Untersuchung des Schließvorgangs (Fälle 2 bis 5) war in der ersten Versuchsreihe ebenfalls die seitliche Schiffahrtsöffnung nicht nachgebildet worden und demnach eine zweidimensionale (vertikal-ebene) Unterströmung des Segmentes vorhanden. Eine eindeutig dreidimensionale Strömungssituation lag bei den kritischen Fällen 2', 6' und 7' vor, bei denen die verschlossenen Seitenöffnungen im Modell stilisiert dargestellt worden sind. Wie wir bei der näheren Behandlung der Versuchsergebnisse sehen werden, ist diese systematische Unterscheidung nach der Art der Strömung für die Beurteilung der Stabilität der Packsteintage nicht ohne Bedeutung.

3.1 Eindimensionale Parallelströmung

Aufgrund der Modelluntersuchungen für das Eidersiel und das Elbewehr Geesthacht sowie einer theoretischen Betrachtung [5] [6] war eine angenäherte Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Strömungsgeschwindigkeit v_s in Sohlennähe einerseits und dem zur Stabilität einer Befestigungsstrecke erforderlichen Stückgewicht G der Steine im Trockenen andererseits möglich (Abb.4). Da die Einflüsse der Turbulenzintensität und des Geschwindigkeitsprofils sowie eventuell vorhandener Makroturbulenzen und Wirbel auf die Stabilität eines in einer Befestigungsstrecke eingebetteten Körpers erheblich sind, darf die dargestellte Funktion $G = f(v_s)$

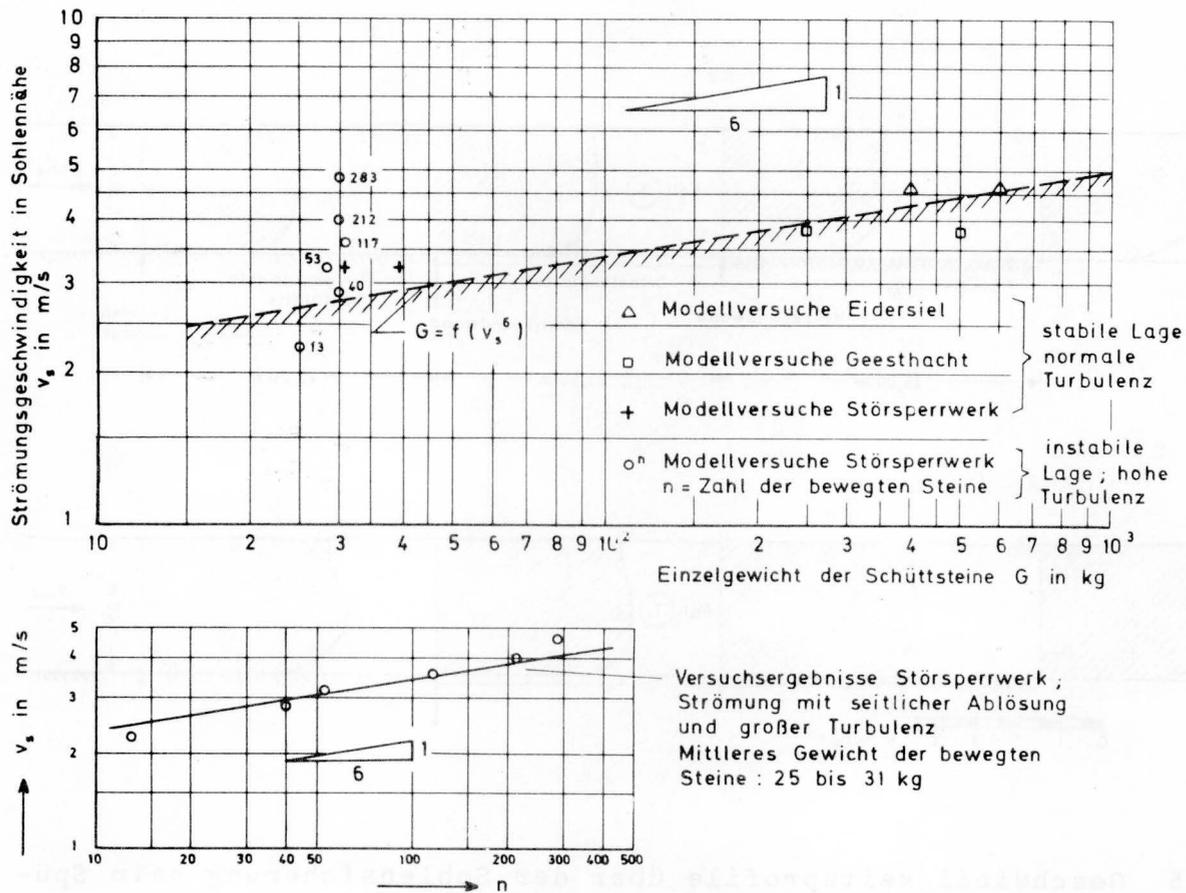


Abb.4 Einzelgewicht der Schüttsteine einer Befestigungsstrecke

nur für die Bedingungen gültig sein, unter denen die einzelnen Meßpunkte ermittelt worden sind. Hier ist in erster Linie eine ungestörte, ablösungsfreie Strömung mit einem normalen Turbulenzgrad und einem völligen Geschwindigkeitsprofil zu nennen, bei dem näherungsweise für die Geschwindigkeit in Sohlennähe v_s die mittlere Geschwindigkeit v_m gesetzt werden darf.

Ein solches Geschwindigkeitsprofil lag auch bei den hier zu behandelnden Modelluntersuchungen mit der Parallelströmung vor, wie durch Geschwindigkeitsmessungen mit einem Laborflügel an 4 charakteristischen Punkten auf der Modellängsachse nachgewiesen werden konnte (Abb.5). Während sich beim Spülen in Ebberichtung (Fall 6) dieses Profil noch in völlig ungestörter Form zeigt, deutet sich beim Spülen in Flutrichtung (Fall 7) schon eine gewisse Unordnung in der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung an. Bei den beiden Untersuchungsfällen stellt man aber fest, daß die Strömungsgeschwindigkeiten in Sohlennähe vom Segmentauflager bis zur Befestigungs-kante geringer werden, und zwar kontinuierlich mit zunehmender Entfernung, was auf die Wirkung der Höcker auf den Ort betonplatten und der rauhen Packsteinlage an der Sohle zurückgeführt werden kann. Diese Beobachtung läßt sich auch für den Fließvorgang kurz vor dem Eintauchen der Segmente (Fall 1) machen (Abb.6, oben). Es zeigt sich also die angestrebte günstige Wirkung der Sohlrau-higkeit, die sich nach bisher bekannten Versuchsergebnissen [2] [5] auch in einer Abflachung des Kolkes stromabwärts der Befestigungs-strecke auswirken wird.

Geht man nach diesen Überlegungen auf das Verhalten der

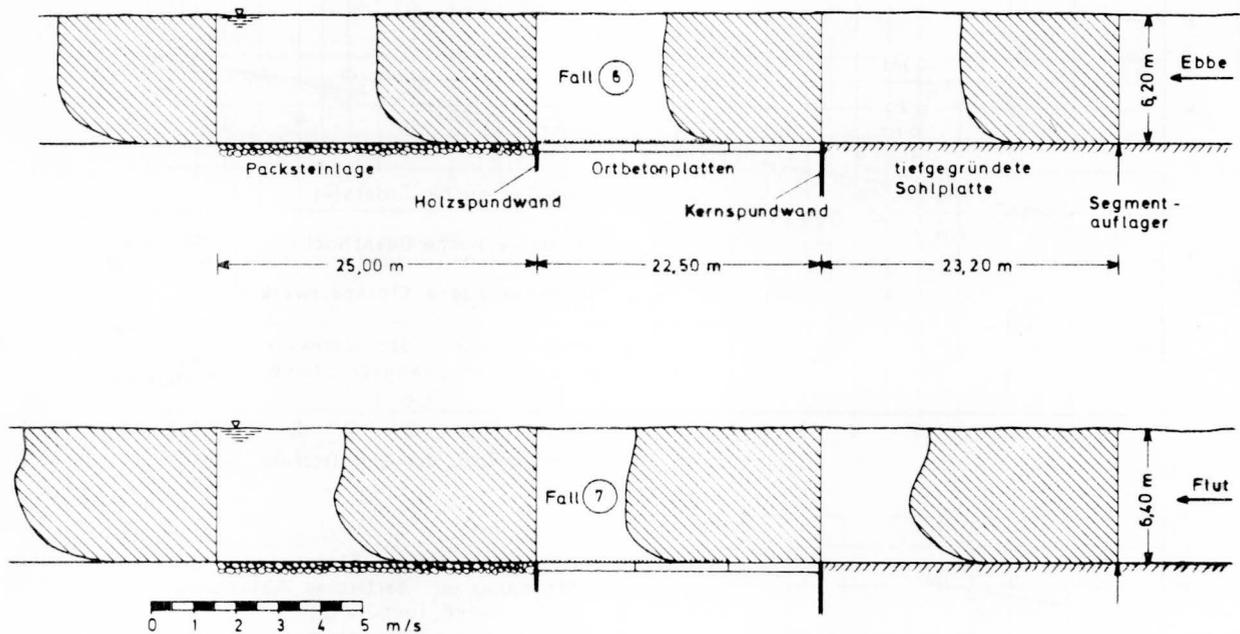


Abb.5 Geschwindigkeitsprofile über der Sohlensicherung beim Spülen durch eine Schiffsöffnungsöffnung (eindimensionale Parallelströmung)

Packsteinlage unter der Parallelströmung über, so überrascht es nach der nunmehrigen Kenntnis des Zusammenhanges zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Stückgewicht nicht, daß sich bei den Fällen 1 und 6 infolge der noch verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten in Sohlennähe die Packsteinlage als stabil erwies. Erst die größeren Sohlgeschwindigkeiten beim Spülen in Flutrichtung waren in der Lage, einzelne Steine aus der Deckschicht herauszulösen (unter den Versuchsbedingungen 16 Stück) und stromabwärts zu transportieren, wobei sicherlich noch die beginnende Ausbeulung im Geschwindigkeitsprofil eine Rolle spielte.

Jedoch war auch ein labiles Verhalten vieler anderer Steine beim Strömungsvorgang im Modell zu beobachten, so daß es nur eine Frage der Versuchs- bzw. Einwirkzeit der Strömung gewesen wäre, bis sich auch diese Steine fortbewegt hätten. Beim Spülen in Flutrichtung begann sich auch ein Abbruch der Befestigungskante und das damit verbundene Abrutschen einzelner Steine aus der Packsteinlage in den Kolkessel abzuzeichnen.

3.2 Zweidimensionale Unterströmung eines Segmentes

Die Unterströmungsvorgänge beim Absenken der Segmente wurden im Modell durch 4 verschiedene stationäre Segmentlagen simuliert (Fälle 2 bis 5). Die bei diesen 4 Fällen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten (Abb.6) zeigen nunmehr eine starke Ausbeulung des Geschwindigkeitsprofils über der Sohle an, die auf die star-

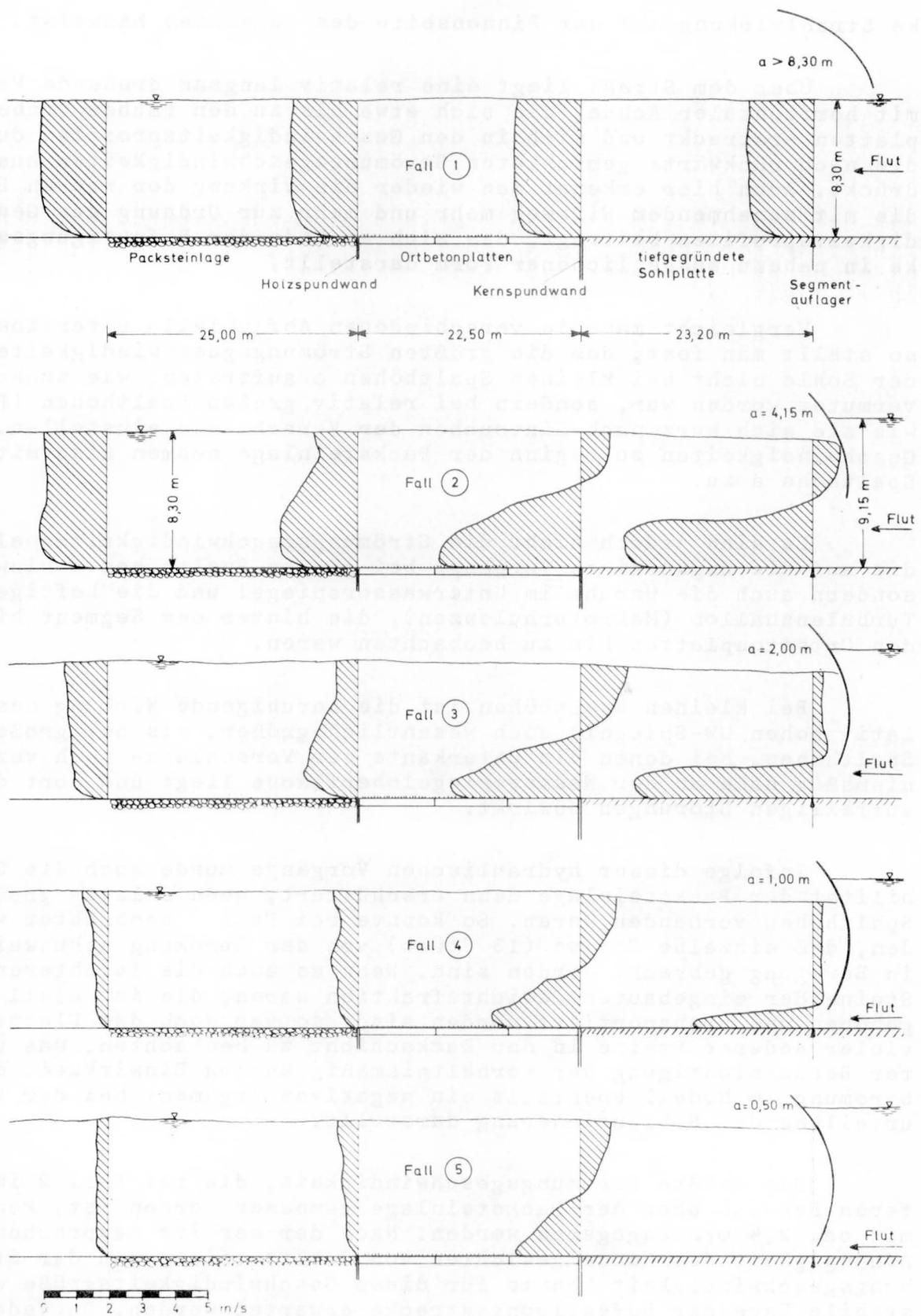


Abb.6 Geschwindigkeitsprofile über der Sohlensicherung beim Schließvorgang der Segmente (zweidimensionale Untersuchungen)

ke Strahlwirkung auf der Binnenseite des Segmentes hinweist.

Über dem Strahl liegt eine relativ langsam drehende Walze mit horizontaler Achse, die sich etwa bis zu den rauhen Ortbetonplatten erstreckt und sich in den Geschwindigkeitsprofilen durch die nach rückwärts gerichteten Strömungsgeschwindigkeiten ausdrückt. Auch hier erkennt man wieder die Wirkung der rauhen Sohle, die mit zunehmendem Wirkweg mehr und mehr zur Ordnung des Geschwindigkeitsprofils beiträgt, das sich am Ende der Befestigungsstrecke in nahezu ausgeglichener Form darstellt.

Vergleicht man die verschiedenen Abflußfälle untereinander, so stellt man fest, daß die größten Strömungsgeschwindigkeiten an der Sohle nicht bei kleinen Spalthöhen a auftreten, wie zunächst vermutet worden war, sondern bei relativ großen Spalthöhen (Fall 2), wie sie sich kurz nach Eintauchen der Verschlüsse einstellen. Die Geschwindigkeiten zu Beginn der Packsteinlage nehmen also mit der Spalthöhe a zu.

Es sind jedoch nicht die Strömungsgeschwindigkeiten allein, die auf die ungünstigen Vorgänge bei großen Spalthöhen a hinweisen, sondern auch die Unruhe im Unterwasserspiegel und die heftigen Turbulenzballen (Makroturbulenzen), die hinter dem Segment bis zu den Ortbetonplatten hin zu beobachten waren.

Bei kleinen Spalthöhen ist die beruhigende Wirkung des relativ hohen UW-Spiegels doch wesentlich größer, als bei großen Spalthöhen, bei denen die Unterkante der Verschlüsse noch verhältnismäßig nahe an der Wasserspiegeloberfläche liegt und dort die auffälligen Störungen bewirkt.

Infolge dieser hydraulischen Vorgänge wurde auch die Stabilität der Packsteinlage dann erschüttert, wenn relativ große Spalthöhen vorhanden waren. So konnte bei Fall 2 beobachtet werden, daß einzelne Steine (13 Stück) von der Strömung schubweise in Bewegung gebracht worden sind. Wenn es auch die leichteren Steine der eingebauten Gewichtsfraktion waren, die im Modell angehoben und transportiert worden sind, so war doch das Flattern vieler anderer Steine in der Deckschicht zu beobachten, was unter Berücksichtigung der verhältnismäßig kurzen Einwirkzeit der Strömung im Modell ebenfalls ein negatives Argument bei der Beurteilung der Sohlensicherung darstellt.

Die größte Strömungsgeschwindigkeit, die bei Fall 2 im unteren Bereich über der Packsteinlage gemessen worden ist, kann mit ca. 2,4 m/s angegeben werden. Nach der bereits besprochenen Abhängigkeit des Einzelgewichtes von Schüttsteinen von der Strömungsgeschwindigkeit könnte für diese Geschwindigkeitsgröße eine stabile Lage der Befestigungsstrecke erwartet werden. Da jedoch beim unterströmten Segment keine Parallelströmung mit einem normalen Turbulenzgrad vorhanden ist, sondern die heftigen Turbulenzballen unterstrom des Verschlusses als sogenannte Liftkräfte auf die Packsteinlage einwirken, genügt schon diese relativ geringe Geschwindigkeit von 2,4 m/s, um erste Zerstörungen an der Deckschicht zu bringen. Versieht man die vorher genannte Geschwindig-

keitsgröße mit einem Beiwert β für die Einflüsse der Turbulenz und des Geschwindigkeitsprofils und setzt nach früheren Erfahrungen für $\beta = 1,5$, dann erhält man die fiktive Geschwindigkeitsgröße

$$v_{\max} = \beta \cdot v = 1,5 \cdot 2,4 = 3,6 \text{ m/s,}$$

für die nach der früher genannten Abhängigkeit ein Steingewicht von 25 bis 45 kg nicht mehr ausreichend ist.

Hier wird schon deutlich, wie stark die Einflüsse der Turbulenzintensität der Strömung und der Form des Geschwindigkeitsprofils bei der Betrachtung von Befestigungsstrecken beachtet werden müssen, was selbstverständlich auch für die starken Liftwirkungen eventuell vorhandener Makroturbulenzen und Wirbel gilt.

3.3 Dreidimensionale Strömung mit seitlicher Ablösung

Für die dreidimensionale Betrachtung der Strömungsverhältnisse beim Schließvorgang der Segmente wurde der Zustand mit einer relativ großen Spaltöffnung (Fall 2) als repräsentativ angesehen, da sich bei ihm die größten Strömungsgeschwindigkeiten in Sohlennähe und vor allem über der Packsteinlage ergeben haben. Wie erwartet, stellt sich seitlich vor der geschlossenen Schiffahrtsöffnung eine Ablösungswalze ein, die gegen den eigentlichen Flutstrom durch eine Wirbelkette begrenzt wird. Diese Ablösungswalze ist in ihrer Lage und ihrer Form nicht stabil, sondern tritt in periodischen Schwankungen entweder in Form einer langgestreckten Ellipse oder zweigeteilt und gedrunken, fast kreisförmig auf, wobei sich der unterstromige Teil ablöst und sich die verbleibende Walze wieder zur elliptischen Form aufbaut (Abb.7). Durch diese Ablösungsercheinungen wird der Abflußquerschnitt stellenweise stärker eingeschnürt, so daß sich eine unregelmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt und örtliche Geschwindigkeitskonzentrationen ergeben, die an diesen Stellen stärker auf die Sohle einwirken. Infolge dieser Erscheinung konnten in der verlängerten Achse der Flutöffnung über der Packsteinlage wesentlich größere Strömungsgeschwindigkeiten als beim zweidimensionalen Fall gemessen werden (Abb.8). Da auch noch eine zusätzliche Sogwirkung durch die Wirbel auftritt, wird die Sohlbefestigung wesentlich stärker als beim rein zweidimensionalen Strömungsvorgang angegriffen. Beispielsweise konnte unter den speziellen Versuchsbedingungen die Zahl der aus der Deckschicht gerissenen und fortbewegten Steine zu 40 ermittelt werden, während sie beim zweidimensionalen Fall noch 13 betrug (Abb.4).

Ein in der Tendenz ähnliches, jedoch quantitativ wesentlich deutlicheres Ergebnis zeitigten die Versuche mit der Spülströmung, die entsprechend den örtlichen Bedingungen nun beidseitig durch Ablösungswalzen und Wirbelketten begrenzt wird. Dabei wird der Spülstrom nach Austritt aus der Schiffahrtsöffnung so stark von der Seite her eingeschnürt, daß er strahlartig in das jeweilige Unterwasser stößt, wie es auch die außerordentlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten zum Ausdruck bringen (Abb.9).

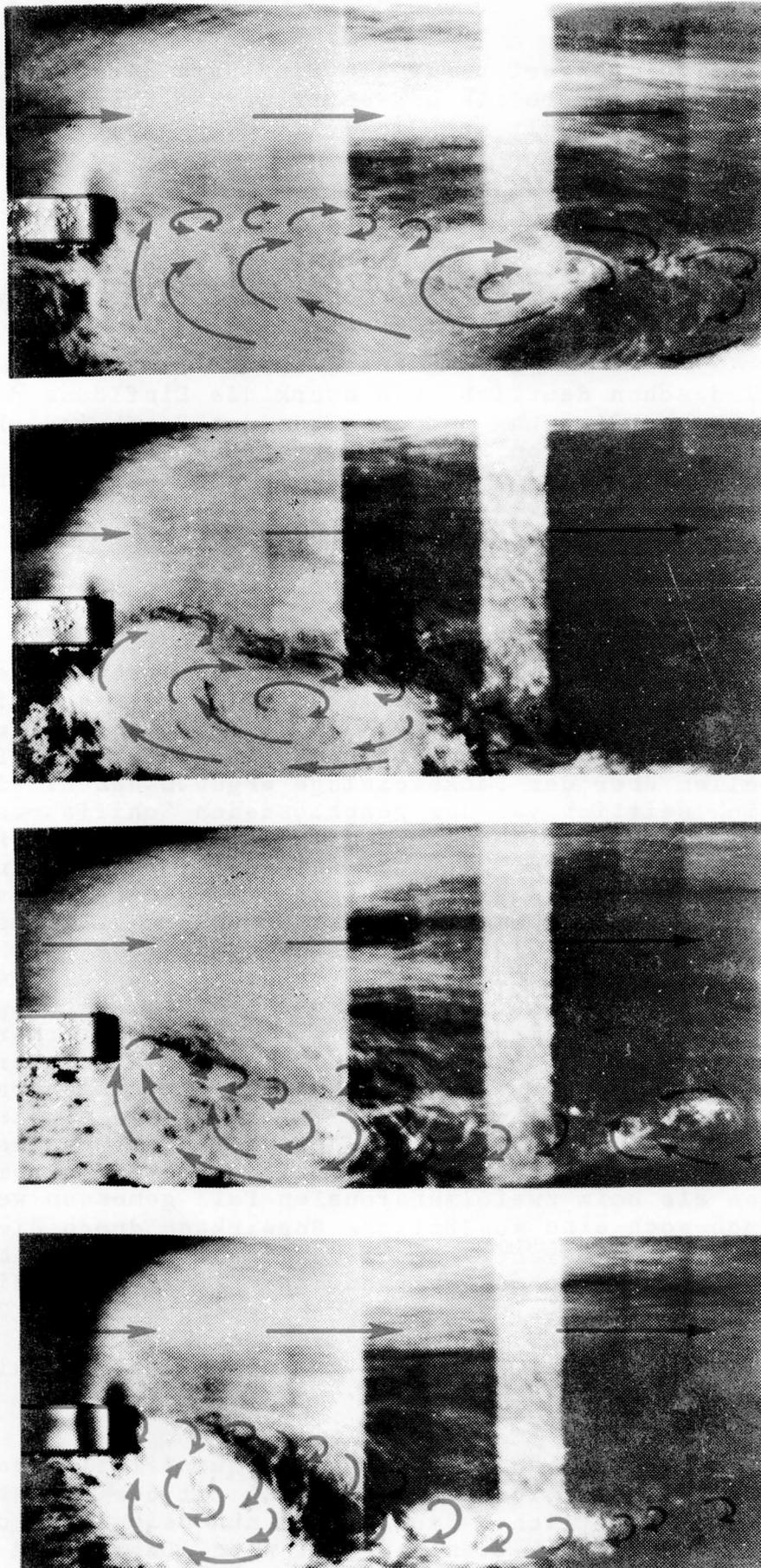


Abb.7 Instabile Ablösungserscheinungen beim Schließen der Segmente (Schiffahrtsöffnungen geschlossen)

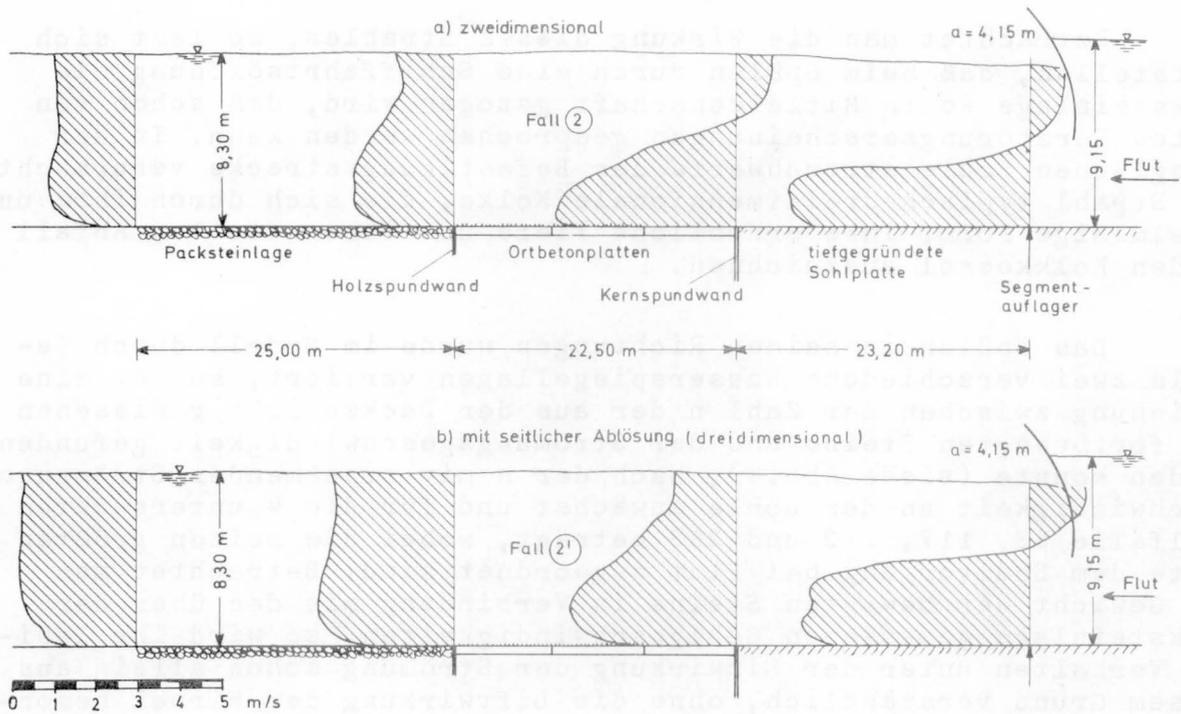


Abb.8 Geschwindigkeitsprofile über der Sohlensicherung beim Schließvorgang der Segmente (zwei- und dreidimensional)

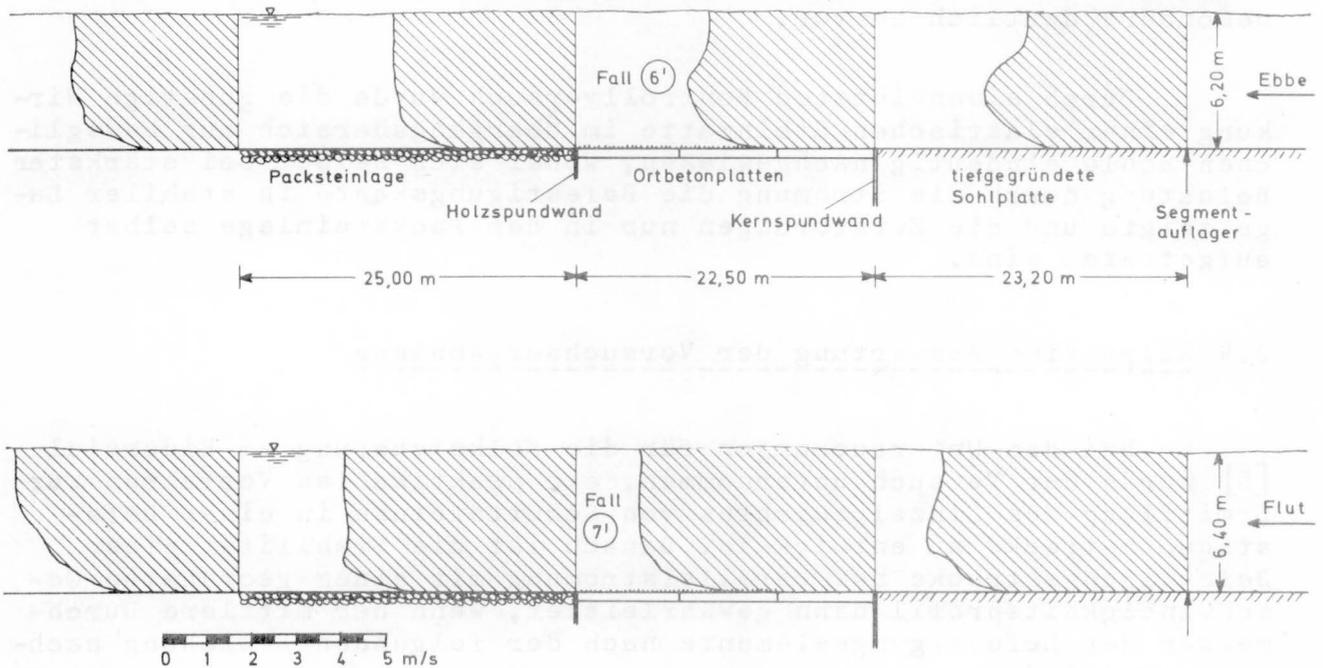


Abb.9 Geschwindigkeitsprofile über der Sohlensicherung beim Spülen durch eine Schiffsöffnungsöffnung (Strömung mit seitlicher Ablösung)

Betrachtet man die Wirkung dieses Strahles, so läßt sich feststellen, daß beim Spülen durch eine Schifffahrtsöffnung die Packsteinlage so in Mitleidenschaft gezogen wird, daß schon von ersten Zerstörungerscheinungen gesprochen werden kann. In der beweglichen Sohle stromabwärts der Befestigungsstrecke verursacht der Strahl typisch dreidimensionale Kolke, die sich durch ihre unregelmäßige Form, ihre erhebliche Tiefe und ihren steilen Abfall in den Kolkessel auszeichnen.

Das Spülen in beiden Richtungen wurde im Modell durch jeweils zwei verschiedene Wasserspiegellagen variiert, so daß eine Beziehung zwischen der Zahl n der aus der Deckschicht gerissenen und fortbewegten Steine und der Strömungsgeschwindigkeit gefunden werden konnte (siehe Abb.4), nach der n mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle anwächst und für die 4 untersuchten Spülfälle 53, 117, 212 und 283 beträgt, wobei die beiden größten Werte dem Spülvorgang bei Flut zugeordnet sind. Betrachtet man das Gewicht der bewegten Steine in Verbindung mit den über der Packsteinlage gemessenen Sohlgeschwindigkeiten, so wird ihr labiles Verhalten unter der Einwirkung der Strömung schon allein aus diesem Grund verständlich, ohne die Liftwirkung der Wirbel besonders in den Vordergrund zu rücken.

Da die Packsteinlage im Modell in ihrem Übergang auf die ungesicherte Sohle ohne elastische Steinmatte ausgebildet war, konnten sich die Abbrüche an der Befestigungskante und die rückwärts schreitenden Zerstörungen einstellen, die durch eine solche Matte eben vermieden werden sollen.

Diese Erscheinung tritt bei den steil abfallenden Kolken des dreidimensionalen Strömungsvorganges mit seitlicher Ablösung besonders deutlich hervor.

Durch einen letzten Kontrollversuch wurde die günstige Wirkung einer elastischen Steinmatte im Übergangsbereich zur beweglichen Sohle eindeutig nachgewiesen, wobei sich selbst bei stärkster Belastung durch die Strömung die Befestigungskante in stabiler Lage zeigte und die Zerstörungen nur in der Packsteinlage selbst aufgetreten sind.

3.4 Allgemeine Auswertung der Versuchsergebnisse

Bei den Untersuchungen für die Kolksicherung am Eidersiel [5] wurde der Versuch unternommen, ein praktikables Verfahren zur Ermittlung des Einzelgewichtes von Schüttsteinen in einer Befestigungsstrecke zu entwickeln. Danach ist die Stabilität einer Befestigungsstrecke bei Parallelströmung mit einem geordneten Geschwindigkeitsprofil dann gewährleistet, wenn der mittlere Durchmesser der Befestigungselemente nach der folgenden Beziehung nachgewiesen wird.

$$d_{m\text{erf}} = \frac{\epsilon}{\Delta \cdot k_s^2 \cdot h_o^{1/3}} \cdot \frac{1}{\tau_{*\text{krit}}} \cdot v^2$$

Hierin bedeuten:

- d_m [m] = mittlerer Durchmesser der Befestigungskörper
- ϵ [1] = Sicherheitsfaktor
- Δ [1] = relative Dichte $\left(\frac{\gamma_M - \gamma_w}{\gamma_w}\right)$
- k_s [m^{1/3} · s⁻¹] = Geschwindigkeitsbeiwert nach GAUCKLER-STRICKLER
- h_o [m] = Wassertiefe über der Befestigungsstrecke
- $\tau_{*\text{krit}}$ [1] = dimensionsloser Ausdruck für die Schubspannung beim Bewegungsbeginn ($\tau_{*\text{krit}} = 0,06$)
- v [m · s⁻¹] = mittlere Strömungsgeschwindigkeit über der Befestigungsstrecke

Entsprechend den Bedingungen, die der Ableitung dieses Verfahrens zugrunde liegen, kann der Sicherheitsfaktor ϵ im allgemeinen zu 2,5 angenommen werden.

Um nun bei der Wahl von ϵ nicht allein auf diese Angaben angewiesen zu sein, sollen die in der vorliegenden Arbeit behandelten Versuchsergebnisse bei Parallelströmung über die vorher angegebene Formel ausgewertet werden. Hierzu ist es notwendig, den mittleren Durchmesser der Steine in der Packsteinlage zu kennen, der aus dem Einzelgewicht im Trockenen wie folgt ermittelt werden kann:

kugelförmiger Körper	würfelförmiger Körper
$G = \gamma_M \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_m^3$	$G = \gamma_M \cdot d_m^3$
$d_m = 0,26 \text{ m}$	$d_m = 0,21 \text{ m}$

Beide Werte, die für die untere Gewichtsgrenze ($G = 25 \text{ kg}$) der in Frage kommenden Wasserbausteine errechnet worden sind, bringen den Einfluß der Körperform zum Ausdruck, wobei für die weiteren Untersuchungen von einem Durchmesser von $d_m = 0,23 \text{ m}$ ausgegangen wird.

Betrachtet man zunächst den Spülvorgang bei Flut (Fall 7), bei dem 16 transportierte Steine gezählt worden sind, so läßt sich aus den Geschwindigkeitsmessungen (Abb.5) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit am Beginn der Packsteinlage zu $v = 4,50 \text{ m/s}$ angeben. Mit einer Wassertiefe von $h_o = 6,60 \text{ m}$ (Abb.2) und $k_s = 28$ (kopfgroße Steine) erhält man nach der anfangs erläuterten Formel

einen ϵ -Wert von

$$\epsilon = 1,7.$$

Die gleiche Rechnung liefert für den Spülvorgang bei Ebbe (Fall 6), bei dem sich die Packsteine in stabiler Lage zeigten, einen Wert von

$$\epsilon = 2,5$$

wenn man die mittlere Strömungsgeschwindigkeit von $v = 3,60$ m/s und eine Wassertiefe von $h_0 = 6,40$ m einsetzt.

Man erkennt an der relativ geringen Spanne zwischen den beiden ϵ -Werten, innerhalb der der Übergang von der labilen zur stabilen Lage der Befestigungselemente erfolgt, daß man bei Annahme von $\epsilon = 2,5$ keine übertriebenen Sicherheiten in die Rechnung einbringt und es daher sinnvoll erscheint, bei Parallelströmung von etwas größeren ϵ -Werten (bis zu 3,0) auszugehen.

Nunmehr sollen die Verhältnisse beim Unterströmen der Segmente näher betrachtet werden.

Bei den Untersuchungen für die Sohlensicherung am Sektorwehr Geesthacht/Elbe [6] hat sich gezeigt, daß es möglich ist, den Durchmesser der erforderlichen Befestigungselemente nach der Kolkformel von Eggenberger für das reine Überströmen zu ermitteln, wenn man darin die Kolkentiefe $h = 0$ setzt (Grenzbedingung für die stabile Lage). In entsprechender Weise soll nun für das vorliegende Geschehen des reinen Unterströmens die von MÜLLER [8] angegebene Kolkformel herangezogen werden.

$$T = 10,35 \frac{H^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}}$$

Hierin bedeuten:

T = Kolkwassertiefe ($T = h + h_2$)

h = Kolkentiefe

h_2 = Unterwassertiefe

H = Spiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser

q = Abflußmenge je Breitereinheit

d_{90} = Korndurchmesser bei 90 % der Siebkurve in mm.

Bei einer Spalthöhe von $a = 4,15$ m (Fall 2) sind 13 Steine aus ihrer Lage gebracht und transportiert worden. Mit den diesem Fall zugeordneten hydraulischen Größen (Abb. 2) läßt sich nach der vorher angegebenen Formel der erforderliche Durchmesser zu

$$d = 180 \text{ mm}$$

ermitteln, wenn man für die Spiegeldifferenz H nicht nur die Höhe des Absperrschwalles z setzt, sondern auch eine Absenkung auf der Binnenseite berücksichtigt, die nach Beobachtungen im Modell etwa 0,25 m beträgt.

Bei der Beurteilung dieses Ergebnisses, das einen etwas zu kleinen Durchmesser der erforderlichen Steine anzeigt, ist zu berücksichtigen, daß das angewandte Rechenverfahren keine Sicherheiten enthält und die Bedingung $h = 0$ (keine Kolkbildung) die Bewegung einzelner Steine nicht ausschließen kann. Es muß daher auch in diesem Fall ein Sicherheitsfaktor ϵ' eingeführt werden, der mindestens zu 1,5 bis 2,0 angenommen werden sollte.

Die Dimensionierung des Einzelgewichtes von Befestigungssteinen bei dreidimensionalen Strömungsverhältnissen ist rechnerisch nur in grober Annäherung möglich. Hier sind es nicht nur die Liftwirkungen der Wirbel und Makroturbulenzen, die Schwierigkeiten bei ihrer rechnerischen Erfassung bereiten, sondern auch die Strahlwirkungen und Geschwindigkeitserhöhungen, die sich durch den Einschnürungseffekt der seitlichen Ablösungswalzen einstellen können. Die dreidimensionale Betrachtung der beiden Spülfälle hat beispielsweise über der Packsteinlage eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit um etwa 10 % ergeben, während die Ablösungswalze und die durch sie bedingte Strahleinschnürung beim Unterströmen des Segmentes eine Erhöhung um etwa 50 % brachte.

Diese speziellen Strömungserscheinungen sind nicht voraussehbar und lassen sich letzten Endes nur durch Modellversuche mit genügender Sicherheit klären, wie sie auch im vorliegenden Fall der Sohlensicherung für das Stör-Sperrwerk durchgeführt worden sind.

4. Zusammenfassung und Beurteilung

In einer kurzen Zusammenfassung kann gesagt werden, daß die hohen Makroturbulenzen beim Eintauchen der Segmente in Verbindung mit der seitlichen Ablösung vor den geschlossenen Schifffahrtsöffnungen mit den daraus resultierenden Geschwindigkeitserhöhungen und Liftwirkungen, sowie die außerordentlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei den beiden untersuchten Spülvorgängen, wiederum im Zusammenwirken mit den dreidimensionalen Ablösungserscheinungen vor den benachbarten verschlossenen Flut- bzw. Schifffahrtstoren, die Stabilität der vorgesehenen Packsteinlage mit Einzelgewichten von max. 40 kg derart erschüttern, daß einzelne oder mehrere Steine aus der Deckschicht gelöst und nach unterstrom transportiert werden. Hierbei ist es nur eine Frage der Einwirkzeit, bis diese ersten Schadenserscheinungen weiter um sich greifen und zur Zerstörung größerer Teile der Befestigungsstrecke führen.

Im Falle des Spülens in Flutrichtung sind die Zerstörungen an der Befestigungsstrecke so groß, daß selbst bei stärkerer Dimensionierung oder Ausbildung der Befestigungsstrecke der nach binnen gerichtete Spülvorgang mit seinen großen Strömungsgeschwin-

digkeiten wenigstens in der ersten Betriebszeit sorgfältig beobachtet werden muß. Falls sich eine übermäßig starke Kolkbildung oder Schäden an der Befestigungsstrecke zeigen sollten, der Nachweis müßte über Sohlpeilungen nach dem Spülvorgang geführt werden, bietet sich als Ausweg das Spülen durch zwei Schiffahrtsöffnungen an, wobei die sich hierbei ergebenden geringeren Strömungsgeschwindigkeiten mit $v = 2,10$ m/s immer noch eine ausreichend große Räumwirkung haben dürften.

Nach diesen Versuchsergebnissen muß also an eine stärkere Dimensionierung der bisher vorgesehenen Packsteinlage gedacht werden, wobei entweder eine Erhöhung des Einzelgewichtes der einzubauenden Steine in Frage kommt oder die Erzielung einer Verbundwirkung, wofür sich eine Verspannung mit Torpedofangnetzen [4] oder ein Fugenverguß mit Colcrete oder Asphalt anbieten.

Nachteilig bei einer Verspannung mit Torpedofangnetzen ist die Tatsache, daß die Stabilität einer derartig gestalteten Befestigungsstrecke ausschließlich vom Bestand des Torpedofangnetzes und der gegenseitigen Verspannung abhängt und eventuelle Schäden an diesem Netz, beispielsweise durch Korrosion oder mechanische Einwirkungen durch die Schiffahrt, zu einer Zerstörung der gesamten Befestigungsstrecke führen können.

Unter Berücksichtigung dieses Aspektes weist ein Verguß der Fugen, wie er beispielsweise bei dem im Bau befindlichen Ilmenau-Sperrwerk schon für geringere Strömungsgeschwindigkeiten als im vorliegenden Fall geplant ist, Vorteile auf. Bei der Wahl des Vergußmittels kann von wirtschaftlichen Überlegungen ausgegangen werden, jedoch ist bei der Verwendung von Asphalt darauf zu achten, daß die Haftung des Asphalts an den Steinen nicht durch eine übergroße Verschmutzung der Steine beeinträchtigt wird, was im Hinblick auf die geforderte Verbundwirkung von Wichtigkeit ist. Auch darf diese Verbundwirkung nicht durch zu große Mengen des Vergußmittels je Flächeneinheit erreicht werden, um dem Deckwerk noch eine gewisse Durchlässigkeit zu erhalten. Diese Forderung ist im Hinblick auf die Entlastung eines evtl. noch auftretenden Sohlwasserdrucks zu erheben. Nach den inzwischen angestellten Überlegungen kommen auf der 25 m langen Befestigungsstrecke (Abb.1) Granitsteine mit einem Stückgewicht zwischen 40 und 80 kg zum Einbau, die mit Asphalt oder Colcrete vergossen werden.

Unter Beachtung der Tatsache, daß einmal der Abfluß unter den sich schließenden Segmenten und andermal das Spülen durch die Schiffahrtsöffnungen die starken Angriffe auf die Sohle bringen, ist zumindest auf der Binnenseite der gesamte Bereich der Packsteinlage, also in voller Breite, in dieser Weise zu verstärken. Auf der Außenseite könnte eine Differenzierung in der zu verstärkenden Befestigungsfläche insofern vorgenommen werden, als nur der Spülstrom in der Mitte in Ebberichtung die gefährliche Belastung bringt. Da aber, wie sich bei den Versuchen gezeigt hat, die seitlichen Ablösungswalzen instabil sind und in einem nicht erkennbaren Rhythmus ihre Lage wechseln, wobei der Spülstrom sogar strahlartig nach der Seite ausweichen kann, sollte aus Sicherheitsgründen auch hier die Befestigungsstrecke in voller Breite verstärkt bzw. vergossen werden.

5. Schrifttum

- [1] BÖSS, P. : Technische Hydromechanik. In: Taschenbuch für Bauingenieure. Hrsg. von F. Schleicher, Bd.II 2. neubearb. Aufl. Berlin: Springer 1955 S.509-589
- [2] BREUSERS, H.N.C. : Conformity and time scale in two-dimensional local scour. Delft Hydraulics Laboratory, March 1965
- [3] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU : Gutachten W 257 zu hydraulischen Problemen am Störsperrwerk. Karlsruhe, Oktober 1970 (unveröffentl.)
- [4] CORDES, F. : Eiderdamm Hundeknöll-Vollerwiek. Die Bautechnik 48 (1971) S.325-344
- [5] DIETZ, J.W. : Kolksicherung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel. Mitt.Bl. d.Bundesanst.f.Wasserbau 17 (1969) Nr.29 S.3-50
- [6] DIETZ, J.W. : Kolksicherung am Elbewehr Geesthacht. Mitt.Bl.d.Bundesanst.f.Wasserbau 17 (1969) Nr. 29 S.51-75
- [7] DIETZ, J.W. : Abdämmung der Eider; Modellversuche für das Sielbauwerk. Mitt.Bl.d.Bundesanst.f.Wasserbau 18 (1970) Nr.30 S.79-103
- [8] MÜLLER, R. : Die Kolkbildung beim reinen Unterströmen und allgemeine Behandlung des Kolkproblems. Mitt.Nr.5 der Versuchsanst.f.Wasserbau a.d. ETH Zürich, 1944.

