

Strömungsverhältnisse, Kolkbildung und Sohlensicherung am Eider-Sperrwerk

Current pattern, scouring and bottom protection at the Eider barrier
Situation du courant hydraulique, d'affouillement et de la sécurité
du revêtement du fond à la barrière d'Eider

Условия течения, размывы и донные укрепления
заградительной плотины на реке Эйдер



Johann Wolfgang Dietz, Prof. Dr.-Ing., Baudirektor in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Geboren 1932, Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe von 1952 bis 1959.

Seit 1959 in der Bundesanstalt für Wasserbau und dort ab 1964 Leiter des Referats "Stauregelungen". 1968 Promotion an der Universität Karlsruhe über die Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß. Von 1974 bis 1981 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Karlsruhe im Fach Wasserbau. Von 1981 bis 1993 Leiter des Referats "Wasserbauliches Versuchswesen" und Vertreter des Leiters der Außenstelle Küste in Hamburg. Von 1983 bis 1993 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Hamburg in den Fächern Wasserwirtschaft/Flußbau und wasserbauliches Praktikum. 1988 Verleihung der akademischen Bezeichnung "Professor" durch den Senat der Freien und Hansestadt Hamburg. Seit 1993 Leiter der Projektgruppe Eider-Sperrwerk in Karlsruhe. Veröffentlichungen u. a. über Staustufen, Wehre, Sperrwerke, Querströmungen in Vorhafenzufahrten, Kolkbildung, Sohlensicherungen und Modelluntersuchungen.

Inhaltsangabe

Nach dem mehr als 20jährigen Sperrwerksbetrieb befaßt sich die vorliegende Arbeit im einzelnen mit den Zusammenhängen zwischen den Strömungsverhältnissen und Betriebsformen einerseits und der komplexen Kolkbildung andererseits, wobei auch auf die Wechselwirkung zwischen der Strömung und der sich deformierenden Sohle, das heißt den Kolkmechanismus eingegangen wird. In einem weiteren Abschnitt werden die Planung, die Ausführung, die Schäden und die Sanierung der Sohlensicherung behandelt, die mit diesen Vorgängen eng verbunden sind. In diese Untersuchung der Strömungsvorgänge, Kolkbildung und Sohlensicherung fließen die Ergebnisse sowohl der Peilungen, Messungen und Beobachtungen vor Ort, als auch aller für das Eider-Sperrwerk durchgeführten Modellversuche mit ein.

Summary

The Eider barrier is in operation for more than 20 years now. The paper deals with the interaction of the operation modes and the current pattern as well as the complex development of scours. Additionally, the mechanism of scouring, i.e. the interaction of the currents and the deforming sea bottom is treated. Planing and placing, damage and rehabilitation measures of the bottom protection are discussed. The research activities on the currents, the scouring and the bottom protection comprised soundings, measurements and observations in situ as well as model tests with respect to the Eider barrier.

Résumé

Le rapport suivant fait un exposé complet des connexions de la situation du courant hydraulique et les formes du fonctionnement sur une côte par rapport de l'affouillement sur l'autre côte après 20 ans d'expérience.

En plus le rapport décrit l'action réciproque entre le courant et l'affouillement complexe. Dans une deuxième section le rapport traite la planification, l'exécution, le traitement des dommages et la réparation du revêtement au fond, qui sont en interdependance avec les phénomènes nommés.

Toutes les sondages et les mesures et les surveillances sur place sont intégré dans les recherches

sur les courants hydrauliques, sur les développements des affouillements et sur la sécurité du revêtements.

En plus le rapport donne les résultats des essais du model courantologique, fait pour la barrière d'Eider.

Аннотация

После более 20-летней эксплуатации этой заградительной плотины настоящая работа занимается детально взаимосвязью между условиями течения и видами эксплуатации, с одной стороны, и комплексного размыва, с другой стороны, причем и освещаются взаимодействие течения и деформирующегося дна, т.е. рассматривается механизм размыва. Затем освещаются вопросы планирования, реализации, виды повреждения и методы выздоровления донного укрепления, тесно связанные с этими процессами. В исследовании процессов течения, размыва и донного укрепления учтены как результаты пеленгации, промеров и наблюдений на месте, так и всех проведенных модельных исследований заградительной плотины на реке Эйдер.

INHALT

Seite

1	Einleitung	27
2	Strömungsverhältnisse, Betriebsformen und Fließgeschwindigkeiten	32
2.1	Anströmung des Sperrwerks	32
2.2	Strömungsverhältnisse bei den (n-1)-Betriebsfällen	38
2.3	Betriebsformen am Sperrwerk	47
2.4	Fließgeschwindigkeiten	50
3	Kolkbildung	61
3.1	Einführung	61
3.2	Kolkversuche im Hauptmodell	62
3.3	Kolkbildung in der Natur	65
3.4	Vergleich der Kolke in Natur und Modell	83
4	Sohlensicherung	84
4.1	Modellversuche	84
4.2	Ausbildung der Sohlensicherung in der Natur	86
4.3	Schadenserscheinungen	88
4.4	Sanierung der Sohlensicherung	95
5	Schlußfolgerungen	102
6	Ausblick	105
7	Literatur	108

1 Einleitung

Im Zuge des Eiderdammes zwischen Hundeknöll und Spannüllhörn (Vollerwiek) wurde in den Jahren 1967 bis 1973 das Eider-Sperrwerk erbaut (Bild 1).

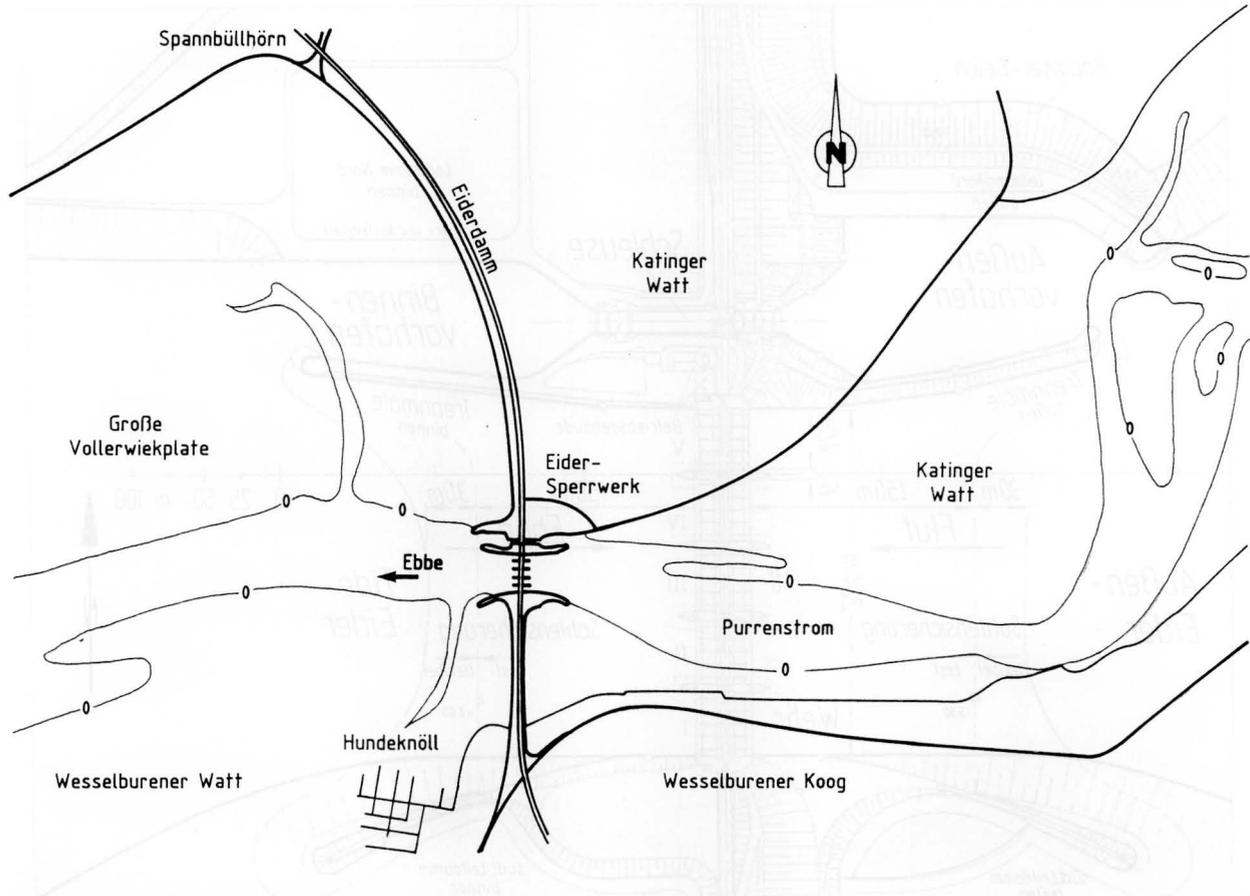


Bild 1 Übersichtsplan Eiderdamm mit dem Eider-Sperrwerk

Eine ausführliche Beschreibung der Vorgeschichte und der Planungsgrundlagen sowie des Baues von Sperrwerk und Eiderdamm gibt Cordes, 1970/1971/1972. Weitere Erläuterungen zum Sperrwerksbetrieb generell, zum inzwischen betriebenen Flut-Drosselbetrieb sowie zur Unterhaltung der Anlage liefern Hollmer, 1992 und Vierfuß, 1994, wobei der zuletzt genannte Autor auch auf die Kolkentwicklung und die sich daraus ergebenden Sicherungsmaßnahmen eingeht.

Dem Bau des Eider-Sperrwerks gingen umfangreiche Modelluntersuchungen durch die Bundesanstalt für Wasserbau voraus, die in einem Tidemodell der Eider von Rendsburg bis zur Außeneider (Harten, 1970) einem Versuchsgerinne auf zweidimensionaler Basis (Dietz, 1969) und einem Hauptmodell des Sperrwerks (Dietz, 1970) betrieben wurden. In jüngster Zeit erfolgten auch Untersuchungen zum Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle auf die Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk in einem aerodynamischen Analogiemodell (Dietz, 1994 und Dietz/Nestmann, 1994).

Das Sperrwerk besteht aus fünf Durchflußöffnungen zu je 40 m lichter Weite. Mit den jeweils 6 m breiten Pfeilern ergibt sich zwischen den Widerlagern eine Gesamtbreite von 224 m. Zwei see- und binnenseitig angeordnete Segmentverschlußreihen bieten eine doppelte Torsicherheit. Der Wehrträger ist als Tunnel ausgebildet, durch den die Straße Wesselburen - St. Peter-Ording führt.

Die südlichen Leitdämme und die Trennmolen auf der Nordseite begrenzen die trichterförmig verlaufenden An- und Abströmbereiche auf den beiden Seiten des Siels. Ihre Linienführung wurde in den vorher genannten Modellversuchen für die im Tideablauf wechselnden Strömungsrichtungen optimiert (Bild 2).

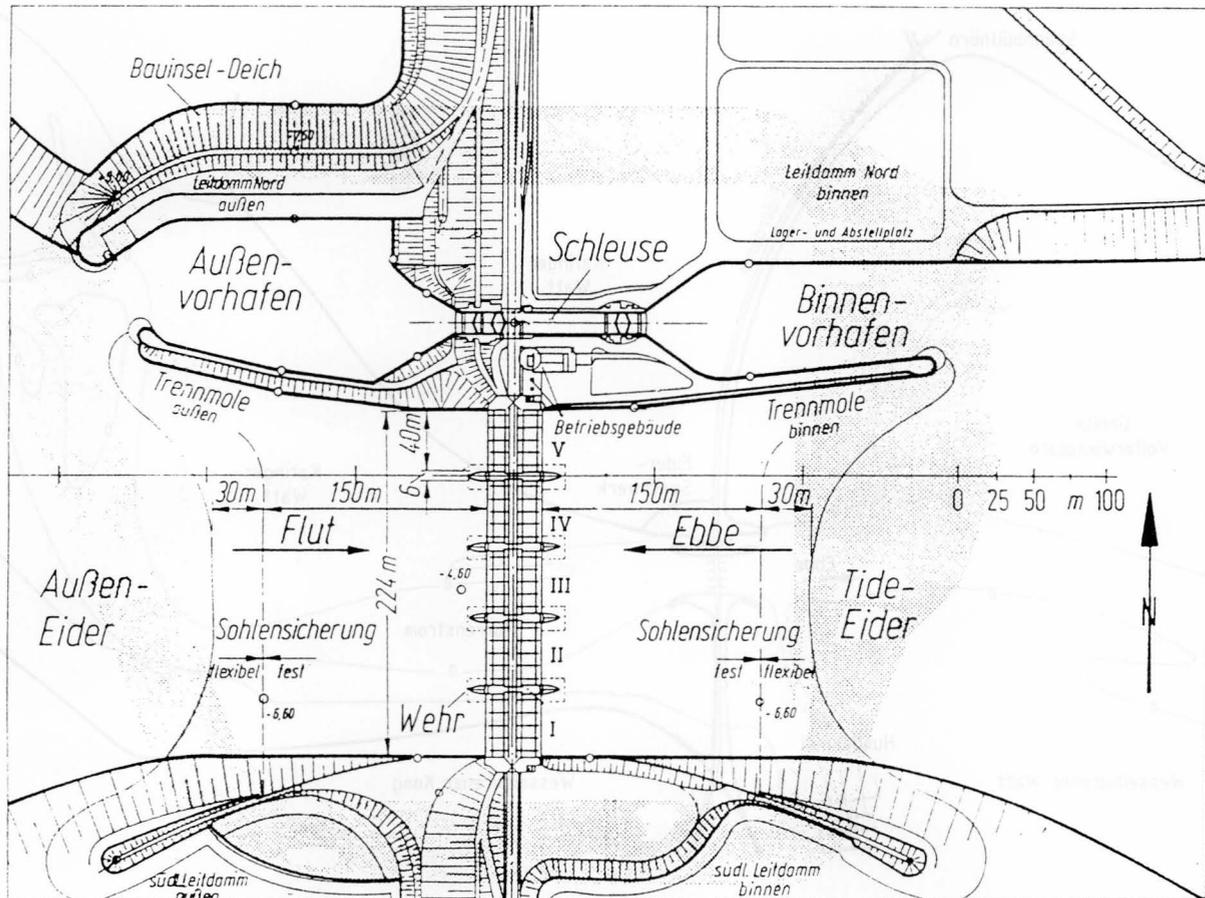


Bild 2 Lageplan Eider-Sperrwerk mit Wehr, Schleuse und Vorhäfen

Zum Schutz des Sperrwerks gegen die Kolkbildung wurde nach dem Ergebnis entsprechender Kolkversuche im erwähnten Hauptmodell beidseits des Sperrwerks auf insgesamt 180 m Länge eine Sohlensicherung eingebaut, die auf jeweils 150 m Länge aus groben Granitblöcken besteht. Inzwischen sind die zunächst lose gesetzten Steine vergossen worden, so daß eine starre Sicherungsstrecke vorliegt, die sehr hohen, weit über den Bemessungsgrenzen liegenden Fließgeschwindigkeiten standhält.

Im Übergangsbereich zwischen der starren Sohlensicherung und der freien auskolkbaren Flußsohle lag ursprünglich auf 30 m Länge eine flexible Sohlensicherung, die aus Wasserbausteinen der Klasse III bestand, die zwischen einem Maschendrahtgeflecht und einem äußeren Torpedofangnetz eingepackt waren (Cordes, 1971). Infolge Korrosion wurden Teile des Torpedofangnetzes so weit zerstört, daß die Verbundwirkung aufgehoben war und die Standfestigkeit der Übergangsstrecke nur noch vom Einzelgewicht der Wasserbausteine und der durch die gegenseitige Verkeilung und den Muschelbewuchs gegebenen Bettungsreibung ungenügend gewährleistet war. Im Zuge der später beschriebenen Baumaßnahme zur Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen wurde 1993/94 die flexible Sohlensicherung mit Wasserbausteinen der Klasse III mit einer Schichtdicke von 1,00 m überdeckt und verklammert.

Wie nach dem Ergebnis der Kolkversuche mit beweglicher Sohle vorauszusehen war, stellten sich schon bald nach der Inbetriebnahme des Sperrwerks in der an die Befestigungsstrecken anschließenden beweglichen Flußsohle beidseitig des Sperrwerks Kolke ein, deren Tiefenentwicklung abhängig von der Schichtung des Untergrundes (eingelagerte Kleischicht) und dem jeweiligen Sperrwerksbetrieb in ihrem zeitlichen Verlauf unterschiedlich erfolgte. Zum Ende des Jahres 1986 wurde in der Kolkentwicklung auf beiden Seiten des Sperrwerks ein (nach heutigem Wissen temporärer) Beharrungszustand erreicht, der im wesentlichen durch die Strömungsverhältnisse bei den vorherrschenden Betriebsbedingungen am Sperrwerk (Flutdrosselung, überwiegender Durchfluß durch $n = 5$ Wehröffnungen) bedingt war. Hierzu ist auch anzumerken, daß bis Ende 1986 ca. 11.000 Sandsäcke und bis Ende 1989 noch 21.000 weitere Sandsäcke zur Sicherung der Kolkböschung und der Befestigungskante eingebracht worden sind, was sicher auch zur Stabilisierung der Kolksohle beigetragen hat.

In den Jahren 1990 und 1991 mußte für Betonuntersuchungen und für die Betonsanierung (Oberflächenschutz) am Wehrträger I (Südseite) das Feld I des Sperrwerks jeweils für mehrere Monate geschlossen werden. Dieser (n-1)-Betrieb brachte eine sprunghafte Zunahme der Kolkiefen und insbesondere auch des Kolkvolumens auf der Außenseite des Sperrwerks, die im Jahr 1991 so dramatische Ausmaße erreichte, daß zum Schutz der stellenweise schon stark abgebrochenen Befestigungskante die Kolkböschungen an den gefährdeten Stellen mit insgesamt 20.000 Sandsäcken abgedeckt werden mußten. Auf der Außenseite Nord wurde im tiefsten Punkt eine Sohllage auf NN - 31,0 m erreicht, das heißt eine Kolktiefe von knapp 25 m, wenn man sie auf die Höhenlage der Befestigungskante bezieht. Um die notwendigen Betonuntersuchungen und Betoninstandsetzungen an den weiteren Wehrträgern II bis V ohne Gefahr für die bestehenden Sohlbefestigungen und Befestigungskanten zu beiden Seiten des Sperrwerks durchführen zu können, wurden in 1993/94 umfangreiche Baumaßnahmen zur Verstärkung der flexiblen Sohlensicherungen und zur Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen durchgeführt. Diese Verstärkungsmaßnahmen beschreiben Vierfuß, 1994; Heibaum, 1994 und Saathoff/Witte, 1994 im einzelnen.

Die komplexe Kolkentwicklung am Eider-Sperrwerk und die mit ihr einhergehenden Schäden an den Befestigungskanten in mehr als 20 Jahren Sperrwerksbetrieb geben Anlaß, mit dem aus mehreren Modellversuchen und regelmäßigen Naturpeilungen samt Beobachtungen vor Ort vorliegenden Ergebnismaterial den Ursachen der Kolkbildung beziehungsweise den Zusammenhängen zwischen den besonderen Strömungserscheinungen am Sperrwerk bei den unterschiedlichen Betriebsformen einerseits und den Auskolkungsvorgängen andererseits nachzugehen.

Die Betrachtung der Kolkbildung setzt die Kenntnis der sie verursachenden Strömungsmechanismen voraus. Hierbei muß auch besonderer Wert auf die Wechselwirkung zwischen der sich deformierenden Sohle und der Strömung gelegt werden, die als Kolkmechanismus bezeichnet wird. Entscheidend für die Größe, Form und den zeitlichen Verlauf der Auskolkung sind neben der Art und der Zusammensetzung des anstehenden Bodens die Stärke, Richtung und Turbulenzintensität der wirkenden Strömung sowie die Geometrie ihrer Ränder. Als wesentliche Ursache der Kolkbildung müssen auch Sekundärströmungen mit freien oder wandgebundenen Scherschichten und ihren Wirbelablösungen gesehen werden, die von der Berandungsgeometrie der Strömung abhängen. Diese Strömungsmechanismen bestimmen auch, ob die Auskolkung in Form einer Kolkmulde mit relativ einheitlichen Kolkböschungen zweidimensional abläuft oder ob sich ein dreidimensional gearteter Kolkessel mit sehr steilen Kolkböschungen einstellt.

Im Sinne dieser Zusammenhänge befaßt sich die vorliegende Arbeit im ersten Hauptabschnitt mit den Strömungsverhältnissen, Betriebsformen und Fließgeschwindigkeiten am Eider-Sperrwerk und im zweiten Hauptabschnitt mit der Kolkbildung. Der dritte und letzte

Hauptabschnitt befaßt sich mit der Sohlensicherung am Sperrwerk, die eng mit den Strömungsverhältnissen und der Kolkbildung zusammenhängt. In diese Untersuchung der Strömungsverhältnisse, Kolkbildung und Sohlensicherung fließen die Ergebnisse sowohl der Peilungen, Messungen und Beobachtungen vor Ort, als auch von den genannten Modelluntersuchungen mit ein.

2 Strömungsverhältnisse, Betriebsformen und Fließgeschwindigkeiten

2.1 Anströmung des Sperrwerks

Die Anströmung des Sperrwerks bei Flut ist durch die konvergente Berandungsgeometrie auf der Außenseite geprägt. Infolgedessen liegt in Strömungsrichtung eine starke Konvergenz der Stromlinien vor, die ihre größte Dichte im Bereich des Sperrwerks haben. Im Nahbereich der Anlage verläuft die Flutströmung weitgehend orthogonal zur Sperrwerksachse; daraus resultiert eine recht günstige, gerade Anströmung der Sperrwerksöffnungen. Auf der Binnenseite divergieren die Stromlinien wieder infolge der sich öffnenden Sperrwerksberandung, wobei die abrupten Erweiterungen an den Köpfen der binnenseitigen Vorhafentrennmole und des südlichen Leitdammes zu seitlichen Ablösungszonen mit freien Scherschichten führen. Insgesamt verläuft der Flutstrom auf der Binnenseite gestreckt und liegt hart an der Kante des Katinger Watts auf der Nordseite des Purrenstroms an.

Dieses Strömungsbild war nach den in den 60er Jahren durchgeführten Modellversuchen im Hauptmodell des Sperrwerks im Maßstab 1 : 66 $\frac{2}{3}$ auch zu erwarten (BAW, 1971). Die Lichtbildaufnahme der Oberflächenströmung im Modell zeigt deutlich die Zuströmung zum Sperrwerk in Form einer Einlauftrumpete und die gebündelten Stromlinien mit den seitlichen Ablösungszonen im Abströmbereich auf der Binnenseite (Bild 3).

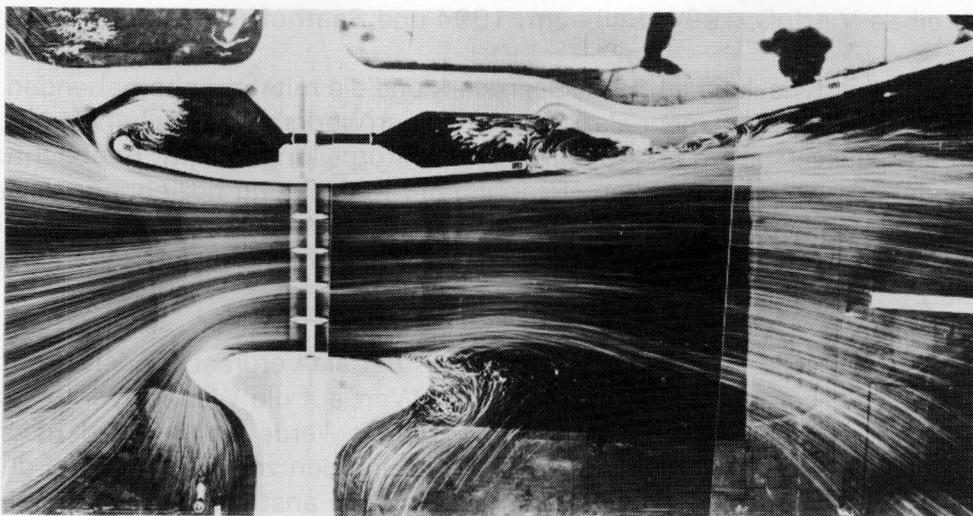


Bild 3 Oberflächenströmung bei Flut im Hauptmodell des Eider-Sperrwerks

Allerdings lagen diesen früheren Modelluntersuchungen noch die Sohlverhältnisse in der Eider zugrunde, wie sie bis zur Inbetriebnahme des Sperrwerks im Sommer 1972 vorhanden waren. Im wesentlichen ist hierzu die Trennung der Eiderrinne außerhalb der Seegrenze Hundeknöll - Vollerwiek in die Süd- und die Nordrinne mit der dazwischen liegenden "Großen Vollerwiek-Plate" zu nennen. Nachdem nun die Eiderrinne durch das Sperrwerk festgelegt war, vertiefte sich die Nordrinne und verlagerte sich im Nordbogen zunehmend rasch zum Vollerwieker Seedeich hin. Um letzteren zu sichern, wurde 1979 die Nordrinne mittels Durchstich in die Südrinne umgelenkt und der Nordrinnenbogen abgedämmt (Wieland,

1992). Der Südrinnenabschnitt vor dem Sperrwerk hat sich danach den zur Aufnahme des gesamten Tidewasservolumens benötigten größeren Querschnitt selbst geschaffen und stellt sich im näheren Bereich des Sperrwerks heute weitgehend von West nach Ost gerade verlaufend dar, was die Anströmung des Sperrwerks bei Flut noch verbessert hat. Beim Vergleich mit den im Jahr 1988 durchgeführten Modellversuchen über die sohnahen Strömungsvorgänge unter Anwendung der Luftmodelltechnik (BAW, 1988) wird die günstigere Anströmung des Sperrwerks deutlich, wenn auch zu berücksichtigen ist, daß es sich jetzt um sohnnahe Stromlinien und nicht um die Oberflächenströmung handelt (Bild 4).

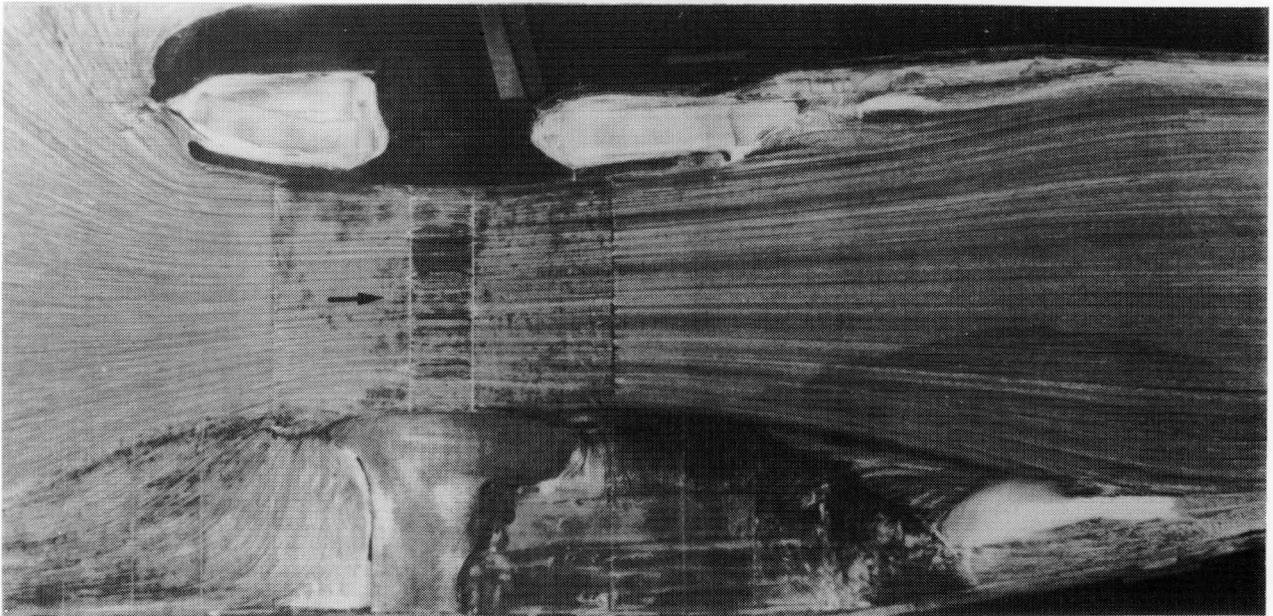


Bild 4 Sohlstromlinien bei Flut im Luftmodell

Die großräumige Anströmung des Sperrwerks bei Ebbe wird stark durch die 90°-Krümmung des Purrenstroms ca. 3 km oberhalb der Abdämmung und den weiteren Verlauf dieser Eider-Haupttrinne beeinflusst. Das kann anhand der im Luftmodell fixierten Sohlstromlinien verdeutlicht werden (Bild 5).

Da es sich bei den gezeigten Stromlinien wohlgerneht um sohnnahe handelt, sind sie in der herrschenden Spiral- oder Flechtströmung, wie sie in Flußkrümmungen durch Überlagerung der Sekundärströmung mit der Hauptströmung entsteht, vom Außenufer eingangs der Krümmung nach innen gerichtet. Kurz nach der dem Krümmungsauslauf folgenden Engstelle nimmt die Strömung weitgehend wieder die volle Breite zwischen den seitlichen Wattgebieten ein; sie ist von ihnen durch Scherzonen abgegrenzt, die sich bis zum Sperrwerk hinziehen. Die volle Ausbreitung der Strömung in die Ausbuchtung auf der Südseite des Purrenstromes hat zur Folge, daß sie den eingeeengten Durchflußquerschnitt des Sperrwerks nur durch eine starke Einschnürung, verbunden mit einer Schräganströmung auf der Südseite erreicht.

Bei der Fertigstellung des Sperrwerks konnte im Bereich der südlichen Leitdämme der Ringdeich der Bauinsel wegen dessen zu großer Festigkeit nicht restlos beseitigt werden. Insbesondere der Ringdeichrest auf der Binnenseite erweist sich nach Beobachtungen vor Ort beim Ebbstrom als nachteilig, da er die Schrägströmung des Sperrwerks noch verstärkt. Da die Ringdeichreste im Luftmodell nicht nachgebildet waren, fehlt dieser ungünstige Effekt in den sichtbar gemachten Sohlstromlinien. Die Strömungsuntersuchungen im Luftmodell ergaben weiter - dies zeigen die dunklen Erosionsstreifen in den sohnahen Stromlinien an -, daß die nördlichen Sperrwerksfelder stärker beaufschlagt werden, wie es auch an späterer Stelle durch die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen quantifiziert wird.

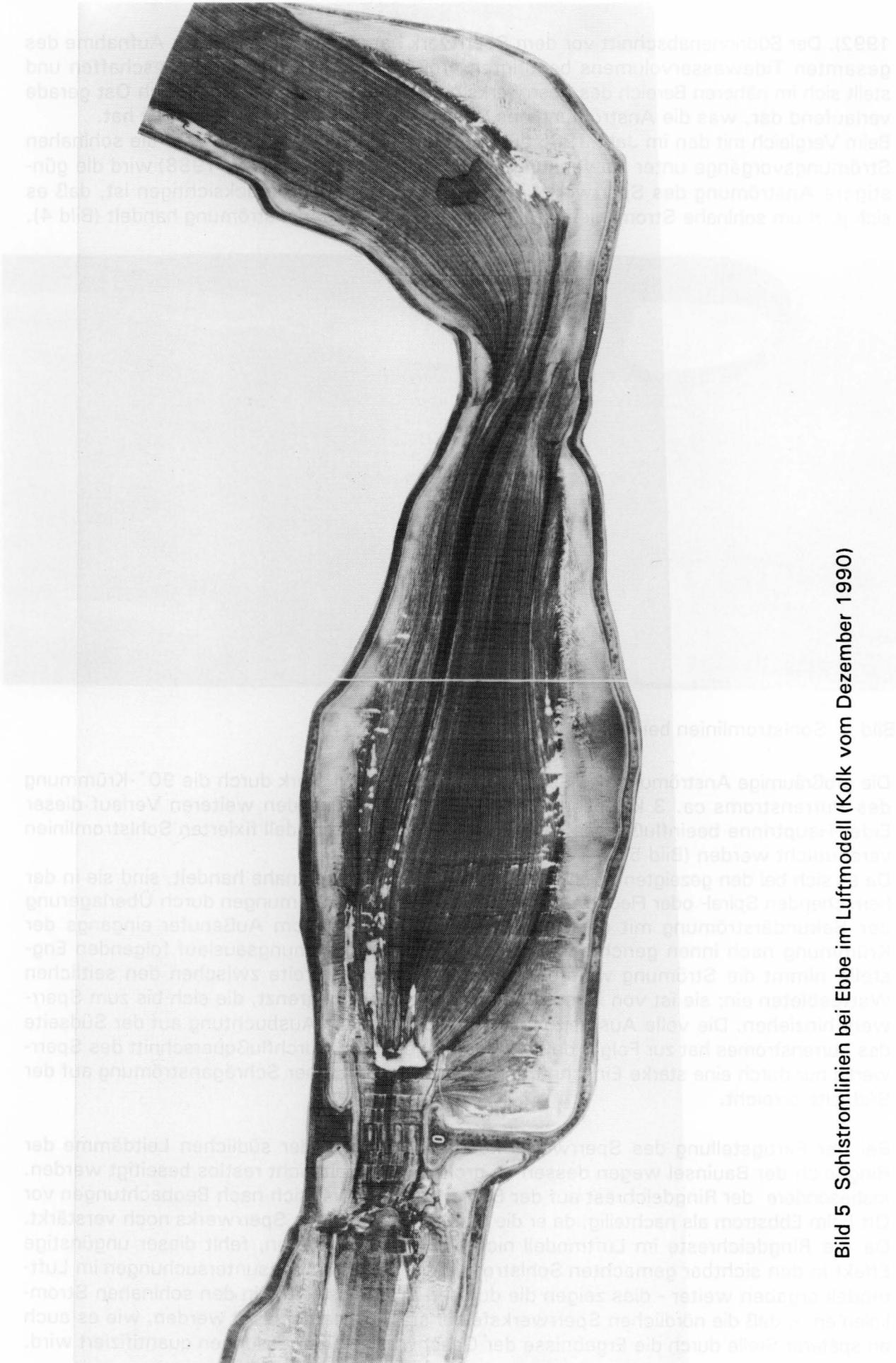


Bild 5 Sohlstromlinien bei Ebbe im Luftmodell (Kolk vom Dezember 1990)

Im weiteren Verlauf der Strömung über der Befestigungsstrecke auf der Außenseite des Sperrwerks konvergieren die Sohlstromlinien zum tiefen Kolk auf der Nordseite.

Anmerkung: Den auf Bild 5 gezeigten Sohlstromlinien liegt die Kolsituation entsprechend der Peilung vom 14./17.12.1990 zugrunde.

Wie die Versuche im Luftmodell (BAW, 1993) und hier insbesondere der Vergleich der beiden Zustände mit und ohne Kolk gezeigt haben, ist die Konvergenz der Sohlstromlinien zur Nordseite des Sperrwerks beim Vorhandensein des Kolkes viel deutlicher ausgebildet.

Der Zusammenhang zwischen Strömung und Kolk war auch bei den in den 60er Jahren für das Eider-Sperrwerk im Maßstab 1 : 66 2/3 durchgeführten Modelluntersuchungen mit beweglicher Sohle zu beobachten (BAW, 1971).

Während bei der ebenen Sohle kurz nach Beginn des Kolkversuchs nur eine leichte Einschnürung der Stromlinien infolge der seitlichen Ablösungsvorgänge auf der Außenseite des Sperrwerks zu erkennen war, wurde die Konvergenz der Stromlinien zum tiefen Kolk hin mit zunehmender Kolkbildung immer deutlicher. Diese zuletzt genannte Erscheinung zeigt eine Wechselwirkung zwischen Strömung und Kolk an, innerhalb der die Tendenz zur Eintiefung des Kolkes bis zu einer Gleichgewichtskolkentiefe besteht (Dietz/Nestmann, 1994).

Wie die Sohlstromlinien für den Ebbstrom (Bild 5) weiter zeigen, treten an der nördlichen Trennmole infolge ihres trichterförmigen Verlaufs sowohl auf der Binnen- als auch auf der Außenseite Ablösungsbereiche auf, die von der Hauptströmung durch eine Scherzone abgegrenzt werden. Diese wandgebundene Scherzone zieht sich auch durch den eigentlichen Sperrwerksbereich; sie ist auf der Strömungsaufnahme als relativ dunkler Streifen auszumachen.

Auf der Südseite binnen ist infolge der starken Umlenkung der schräg aus dem Purrenstrom kommenden Stromlinien am vorgezogenen Leitdamm eine Ablösung zu beobachten, deren Wirkung bis ins Wehrfeld 1 reicht. Auch auf der Außenseite löst sich die Strömung am zurückweichenden Leitdamm ab; es bildet sich zwischen der Hauptströmung und einer großräumigen Ablösungswalze eine freie Scherschicht, die sich weit nach außen erstreckt. Zusammen mit der Ablösungswalze im Bereich der Vorhafeneinfahrt führen die beiden seitlichen Ablösungsvorgänge zu einer starken Einschnürung der Hauptströmung, die das Strömungsbild auf der Außenseite prägt.

Insgesamt erfolgt die Durchströmung des Sperrwerks bei Ebbe schiefwinkelig von Südost nach Nordwest, worauf auch Vierfuß, 1994, nicht zuletzt auch aufgrund von Beobachtungen vor Ort, hinweist. Diese Umlenkung der Strömung in die nordwestliche Richtung bei Ebbe wird durch einen vor Kopf des südlichen Leitdamms einmündenden Priel aus dem Wesselburener Watt noch verstärkt (s. Bild 1). Interessant sind an dieser Stelle die Ergebnisse der Modellversuche im Tidemodell der Eider und im Hauptmodell des Sperrwerks, die ebenfalls schon diese Schrägströmung des Sperrwerks aus dem Purrenstrom anzeigen (Bild 6).

Infolge der begrenzten Modellberandung des Hauptmodells - die Krümmung des Purrenstroms ca. 3 km oberhalb der Sperrstelle konnte aus Platzgründen in Verbindung mit dem Modellmaßstab (1 : 66 2/3) nicht im Modell nachgebildet werden -, ist diese Schräganströmung im Hauptmodell verständlicherweise weniger stark ausgeprägt. Auf die geringeren Fließgeschwindigkeiten im Hauptmodell wird im späteren Abschnitt 2.4 näher eingegangen.

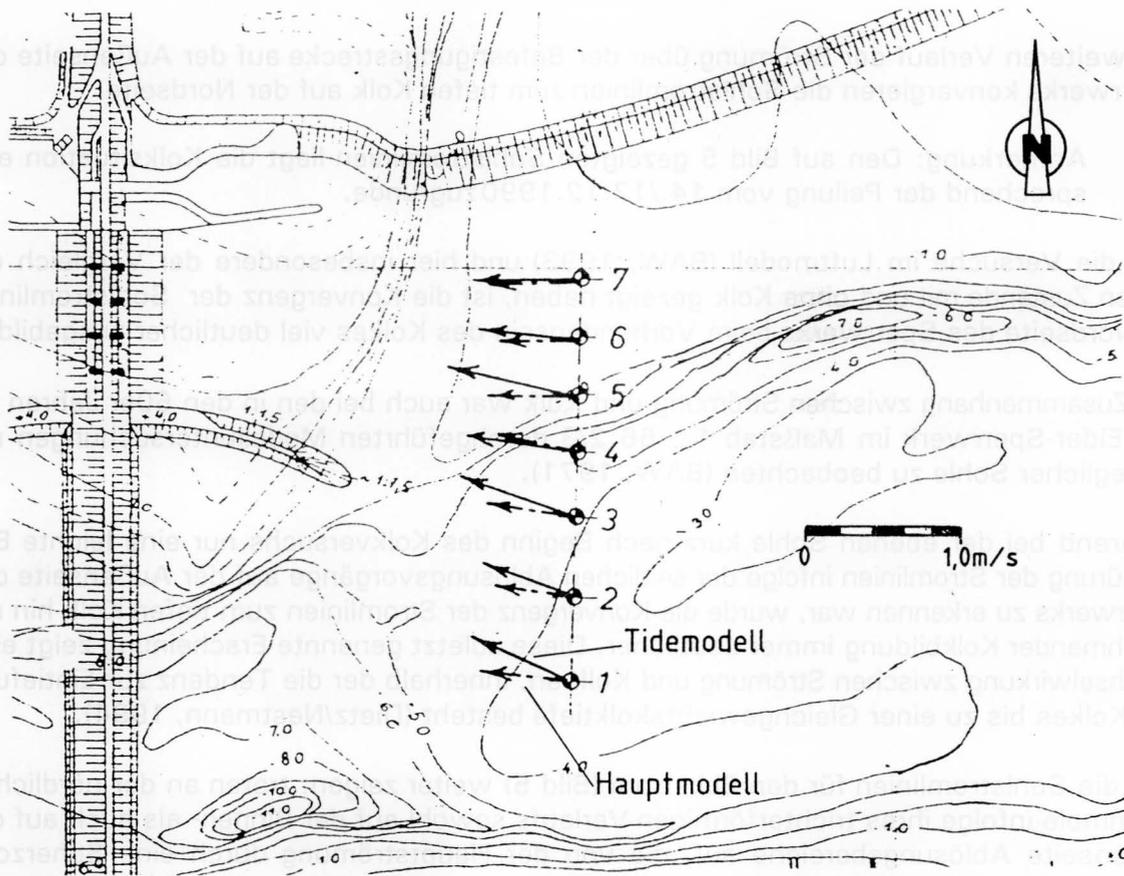


Bild 6 Anströmung des Sperrwerks bei Ebbe im Tidemodell und im Hauptmodell

Bei beiden Strömungsrichtungen - Flut und Ebbe - werden die geschilderten Strömungsbilder durch die Wirbelstraßen im jeweiligen Nachlauf der Sperrwerkspfeiler überlagert. Hierbei entwickeln sich im jeweils unterstromigen Bereich zwischen den Wehrfeldern freie Scherschichten, aus denen sich alternierend Wirbel ablösen, welche die durch die Pfeiler verursachte Strömungsstörung weit nach unterstrom tragen.

Die Strömungsvorgänge im Pfeilernachlauf sind für den Kreiszyylinder eingehend erforscht (z.B. Chen, 1973; Prandtl u.a., 1990) und können ohne nennenswerte Einschränkung auch auf die vorliegenden Sperrwerkspfeiler übertragen werden. Demnach muß für die am Eidersperrwerk auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten mit Reynoldszahlen von $Re > 1,0 \cdot 10^7$ gerechnet werden.

Nach Chen, 1973 ist damit der transkritische Reynoldszahlbereich angezeigt, in dem die Grenzschicht abgelöst wird, nachdem sie bereits turbulent ist. Es bilden sich keine Blasen mehr, wie sie im superkritischen Reynoldsbereich ($Re = 2 \cdot 10^5$ bis $3 \cdot 10^6$) zu beobachten sind. Eine Kármánsche Wirbelstraße wird wieder ermöglicht, jedoch mit sehr turbulenten Wirbeln.

Wie Hankó, 1967 am Beispiel einer Wehranlage zeigt, können die sich nach der Seite ausdehnenden Wirbelstraßen zu einer Verstärkung der Wirbelwirkungen auf die bewegliche Flußsohle und in Folge zu starken Auskolkungen führen, wenn sich die abgelösten Wirbel zweier benachbarter Pfeiler überlagern. Im Fall des Eider-Sperrwerks kann es durchaus möglich sein, daß diese Überlagerung außerhalb der Befestigungsstrecke, d. h. im Bereich der auskolkbaren Flußsohle erfolgt und dort im Zusammenwirken mit den anderen ungünstigen Strömungserscheinungen zu den beträchtlichen Auskolkungen führt (Dietz/Nestmann, 1994).

Der unterschiedliche Verlauf des Flut- und Ebbstromes wird auch in der charakteristischen Sohlausbildung auf der Binnenseite des Sperrwerks ersichtlich, wie die Sohlpeilungen der letzten Jahre erkennen lassen (Bild 7).

In der Mitte des Purrenstroms bildet sich kontinuierlich eine Untiefe, die eine Stromteilung bewirkt. Ohne dies durch Naturmessungen belegen zu können, ist nach den Ergebnissen der Modellversuche davon auszugehen, daß der Flutstrom überwiegend durch die Nordrinne verläuft, während sich die Ebbströmung auf die Südrinne konzentriert und somit die ungünstige, schräge Bauwerksanströmung weiter verstärkt wird.

Der vorher gezeigte großräumige Verlauf der Strömung am Eider-Sperrwerk und hier insbesondere des Ebbstromes hängt im wesentlichen mit der Lage des Sperrwerks im Purrenstrom, das heißt mit der beim Bau des Sperrwerks gewählten Wattbauweise zusammen.

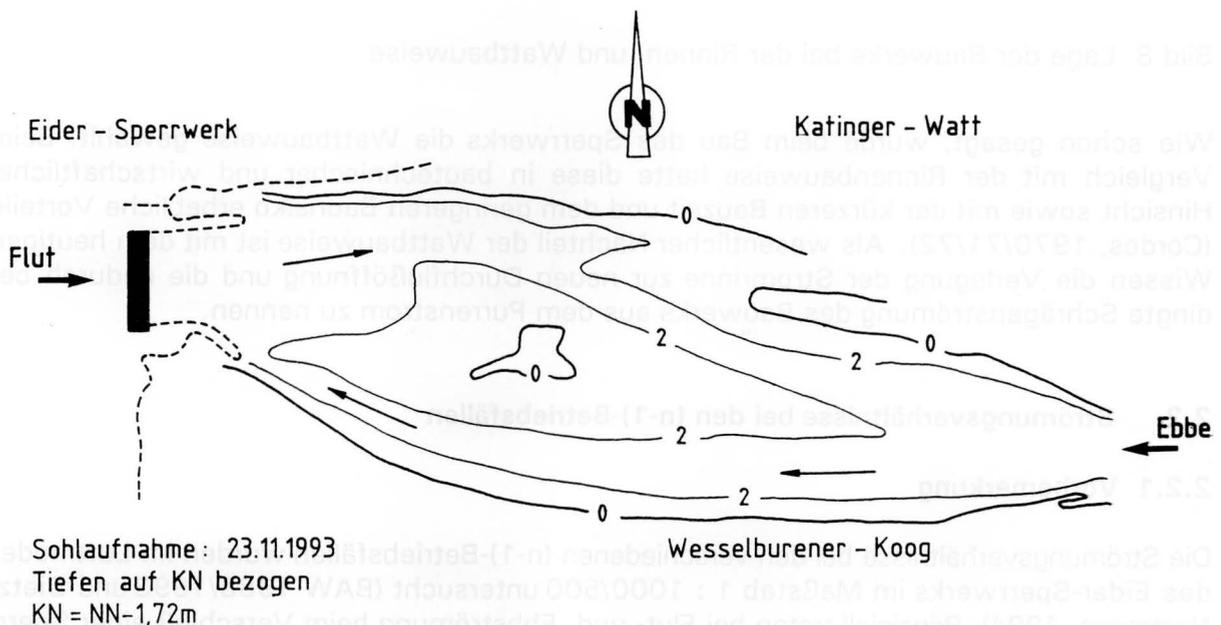


Bild 7 Charakteristische Sohlausbildung auf der Binnenseite des Eider-Sperrwerks

Der Purrenstrom unterlag von jeher starken morphologischen Veränderungen. Er wanderte im Laufe einer mehr als 200 jährigen Beobachtungszeit über die ganze Querschnittsbreite in der Linie Hundeknöll - Vollerwiek. Allerdings war seit mehr als 100 Jahren trotz aller Rinnenverlagerungen im Bereich der Außeneider und der "Großen Vollerwiek-Plate" ein Beharren des Purrenstromes hart an der Kante Hundeknöll zu beobachten (Cordes, 1970/71/72).

Nach dem Ergebnis von Modellversuchen in einem großflächigen Tidemodell der Eider bei der Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste - (Harten, 1970) ergaben sich für die Wahl des Standortes von Sperrwerk und Schiffahrtsschleuse zwei Möglichkeiten, und zwar Bau des Sperrwerks im Purrenstrom (Rinnenbauweise) oder auf der Südspitze des Katinger Watts (Wattbauweise) innerhalb eines zu errichtenden Ringdeichs (Bild 8).

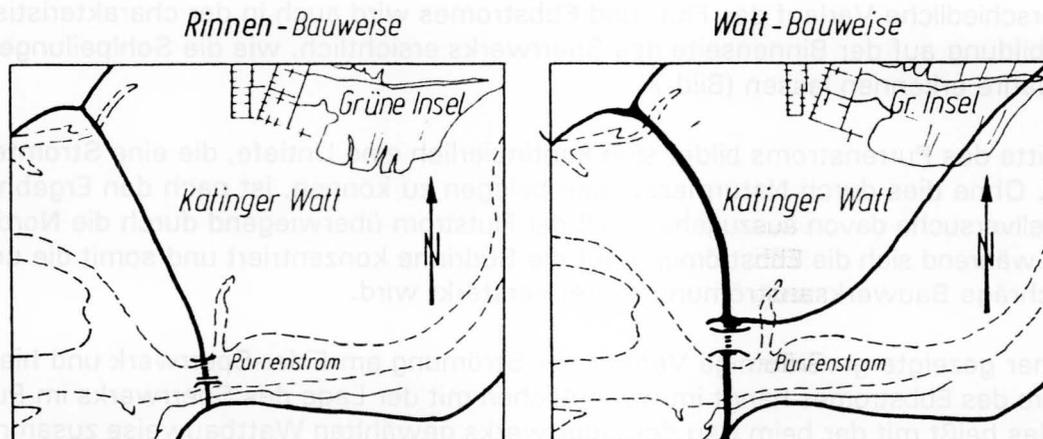


Bild 8 Lage der Bauwerke bei der Rinnen- und Wattbauweise

Wie schon gesagt, wurde beim Bau des Sperrwerks die Wattbauweise gewählt. Beim Vergleich mit der Rinnenbauweise hatte diese in bautechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht sowie mit der kürzeren Bauzeit und dem geringeren Baurisiko erhebliche Vorteile (Cordes, 1970/71/72). Als wesentlicher Nachteil der Wattbauweise ist mit dem heutigen Wissen die Verlegung der Stromrinne zur neuen Durchflußöffnung und die dadurch bedingte Schräganströmung des Bauwerks aus dem Purrenstrom zu nennen.

2.2 Strömungsverhältnisse bei den (n-1)-Betriebsfällen

2.2.1 Vorbemerkung

Die Strömungsverhältnisse bei den verschiedenen (n-1)-Betriebsfällen wurden im Luftmodell des Eider-Sperrwerks im Maßstab 1 : 1000/500 untersucht (BAW 1988/1993 und Dietz/ Nestmann, 1994). Prinzipiell treten bei Flut- und Ebbströmung beim Verschluß einer Sperrwehroffnung im Nahbereich des Sperrwerks gleichartige Strömungsstrukturen auf, die mit denen um einen Randpfeiler (Widerlager) oder um einen breiten Brückenpfeiler verglichen werden können, je nach dem, ob ein Randfeld oder eines der mittleren Felder geschlossen ist. Infolgedessen können Flut- und Ebbströmung gemeinsam behandelt werden. Soweit sich aus der Schräganströmung des Sperrwerks bei Ebbe doch gewisse Unterschiede ergeben, wird auf diese speziell hingewiesen.

2.2.2 Linkes Randfeld geschlossen; (n-1)₁-Fall

Im jeweiligen Anströmbereich wird die Strömung vor dem verschlossenen Feld I so stark umgelenkt, daß sich vor ihm und entlang der Pfeilerflanken im Feld II Wirbelgebiete einstellen. Auf der jeweiligen Leeseite wird die auf der südlichen Sperrwerksseite liegende Ablösungszone wesentlich vergrößert und reicht jetzt bis an das versperrte Wehrfeld heran; sie wird von der Hauptströmung durch Scherschichten getrennt, welche die Instabilitäten und die Turbulenzproduktion fördern. Die Schräganströmung des Sperrwerks wird ungünstiger, infolgedessen nimmt die Strömungsasymmetrie im Bereich des Sperrwerks merklich zu. Insbesondere bei Ebbe führt dieser Effekt zu einer verstärkten Konvergenz der Stromlinien zum tiefen Außenkolk auf der Nordseite, wie die Sichtbarmachung der Sohlstromlinien im Luftmodell zeigt (Bild 9).

Die Analyse der Sohlstromlinien ergibt ferner, daß der Durchfluß durch die Öffnungen IV und V erheblich verstärkt wird, wie es die dunklen Erosionsstreifen anzeigen. Auch wird im Strömungsbild die nachteilige Veränderung der Pfeilernachlaufgebiete deutlich, die beim betrachteten $(n-1)_1$ -Betriebsfall schräg zum tiefen Außenkolk gerichtet sind. Dieses Strömungsbild wird durch die am 25.07.1991 vor Ort vorgenommenen Schwimmermessungen bestätigt. Alle drei etwa bei Tidehalbwasser in die Wehröffnungen III bis V eingesetzten Schwimmkörper wurden im Ebbstrom in den Bereich des nördlichen Außenkolks getrieben. Die Auswertung der Schwimmerbeobachtungen hinsichtlich der Fließgeschwindigkeiten zeigte deutlich, daß diese von Süd nach Nord zunehmen.

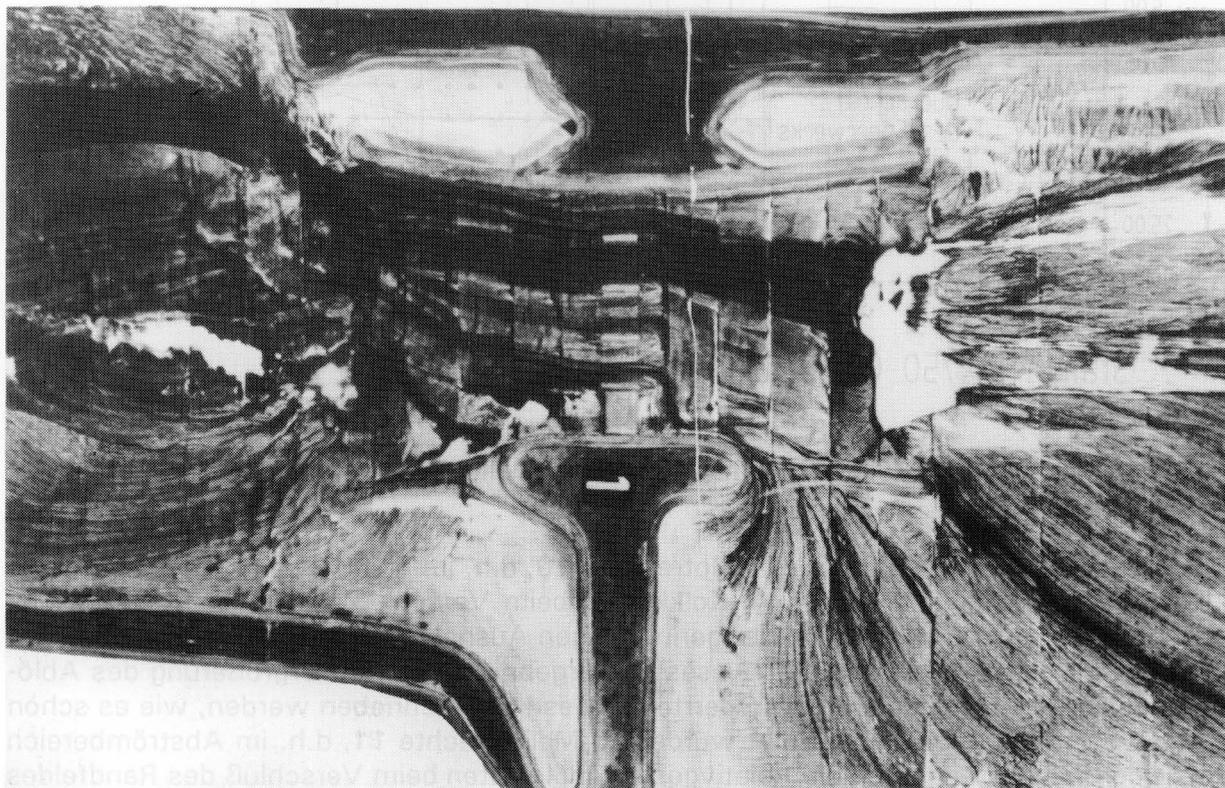


Bild 9 Sohlstromlinien bei Ebbe im Luftmodell für den $(n-1)_1$ -Betriebsfall
(Kolk vom Dezember 1990)

Der vergrößerte Abfluß durch die beiden nördlichen Sperrwerksöffnungen, die Ausweitung der Ablösungszone unterstrom des versperrten Randfeldes sowie die verstärkte Konvergenz der Stromlinien beim Ebbstrom können durch die Geschwindigkeitsmessungen im Luftmodell nachgewiesen werden (Bild 10).

Für die Betriebsfälle $(n=5)$ und $(n-1)_1$ werden in zwei verschiedenen Signaturen die beim Ebbstrom an 17 Meßlotrechten ermittelten tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten v_m in ihrer horizontalen Verteilung über die Station 89.750 (etwa in Höhe der äußeren Trennmolenspitze) gezeigt. Hierzu ist anzumerken, daß es sich um dimensionslose Geschwindigkeitsverhältnisse v_m/v_r handelt, in denen v_r eine Referenzgeschwindigkeit angibt, die einem 2,0 km binnenseits des Sperrwerks gelegenen Meßpunkt zugeordnet ist.

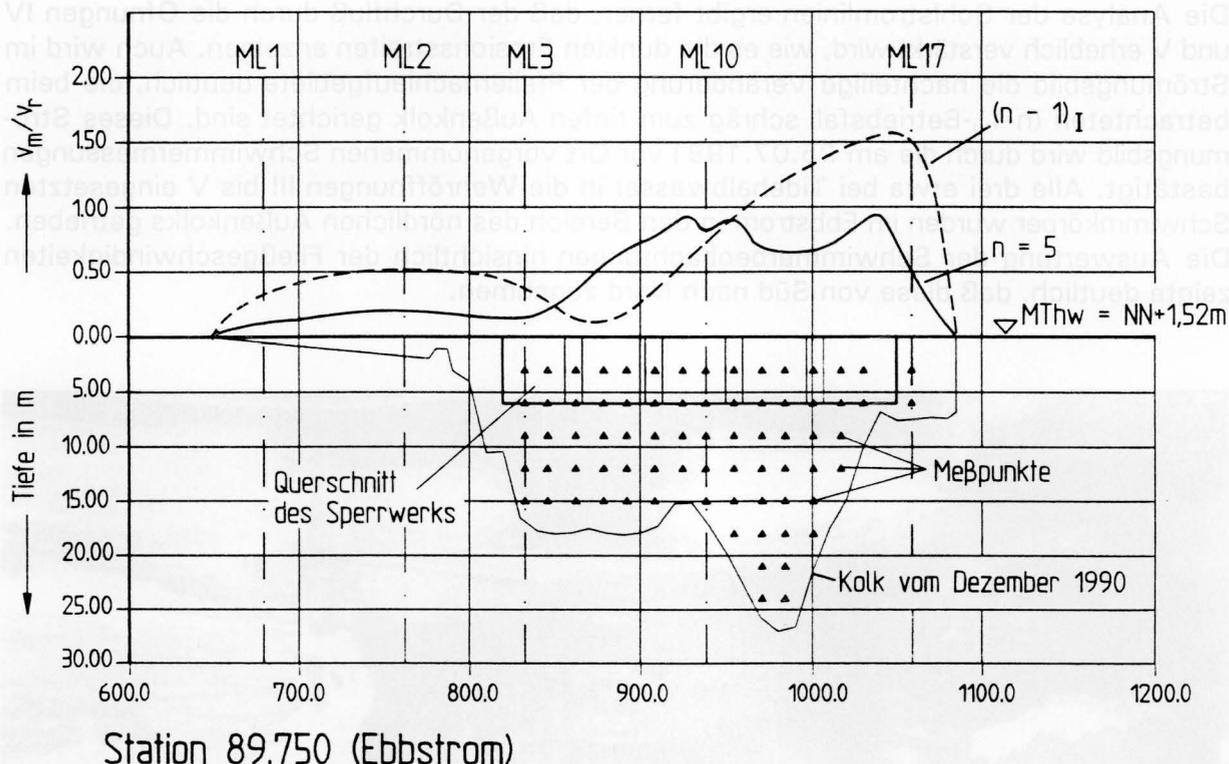


Bild 10 Horizontale Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten bei Ebbe

Die Darstellung zeigt, daß bis zur Meßlotrechten 10, d.h. im Einflußbereich der Felder I bis III die Relativgeschwindigkeiten im Kolkessel beim Verschuß der linken Wehröffnung geringer werden, wenn man von der geringfügigen Ausnahme der Meßlotrechten 3 und 4 ganz auf der linken Seite absieht. Dieses Meßergebnis kann der Vergrößerung des Ablösungsgebietes im Nachlauf des versperrten Feldes I zugeschrieben werden, wie es schon anhand der Sohlstromlinien gezeigt wurde. Ab Meßlotrechte 11, d.h. im Abströmbereich der Felder IV und V nehmen die Relativgeschwindigkeiten beim Verschuß des Randfeldes beträchtlich zu. Die Maximalwerte liegen um das 1,6-fache über den Werten beim $(n = 5)$ -Fall.

2.2.3 Feld II geschlossen; $(n-1)_{II}$ -Fall

Beim Versperren des Feldes II entsteht eine Strömungssituation, die im Bereich der geschlossenen Öffnung mit der Umströmung eines Pfeilers vergleichbar ist. Die komplexen Strömungsvorgänge bei der Pfeilerumströmung sind von den Untersuchungen an Brückenpfeilern bekannt (z.B. Breusers/Raudkivi, 1991) und können sinngemäß auch auf die vorliegende Situation übertragen werden.

Infolge des verschlossenen Sperrwerkfeldes wird oberstrom ein großräumiger Staubereich erzeugt, der die Strömung in Richtung auf die links und rechts liegenden geöffneten Wehrfelder ablenkt. Dieser Staubereich zeigt sich bei den im Luftmodell sichtbar gemachten Sohlstromlinien deutlich abgegrenzt (Bilder 11 und 12).

Um das verschlossene Wehrfeld liegt zwischen Sohle und Pfeilerwandung ein langgezogener Hufeisenwirbel (horseshoe vortex), der sich zwar in den Sohlstromlinien nur schwach anzeigt, dessen Existenz aber aus vergleichbaren Pfeileruntersuchungen hergeleitet werden

kann. Im Nachlauf des verschlossenen Sperrwerksfeldes entsteht als Folge ein weit ausgedehntes Ablösegebiet, das durch die stark gekrümmte Stromlinienformen und Verwirbelungen fixiert ist.

In Form sich alternierend ablösender Wirbel (wake vortex) wird die durch die verschlossene Öffnung verursachte Strömungsstörung weit nach unterstrom getragen.

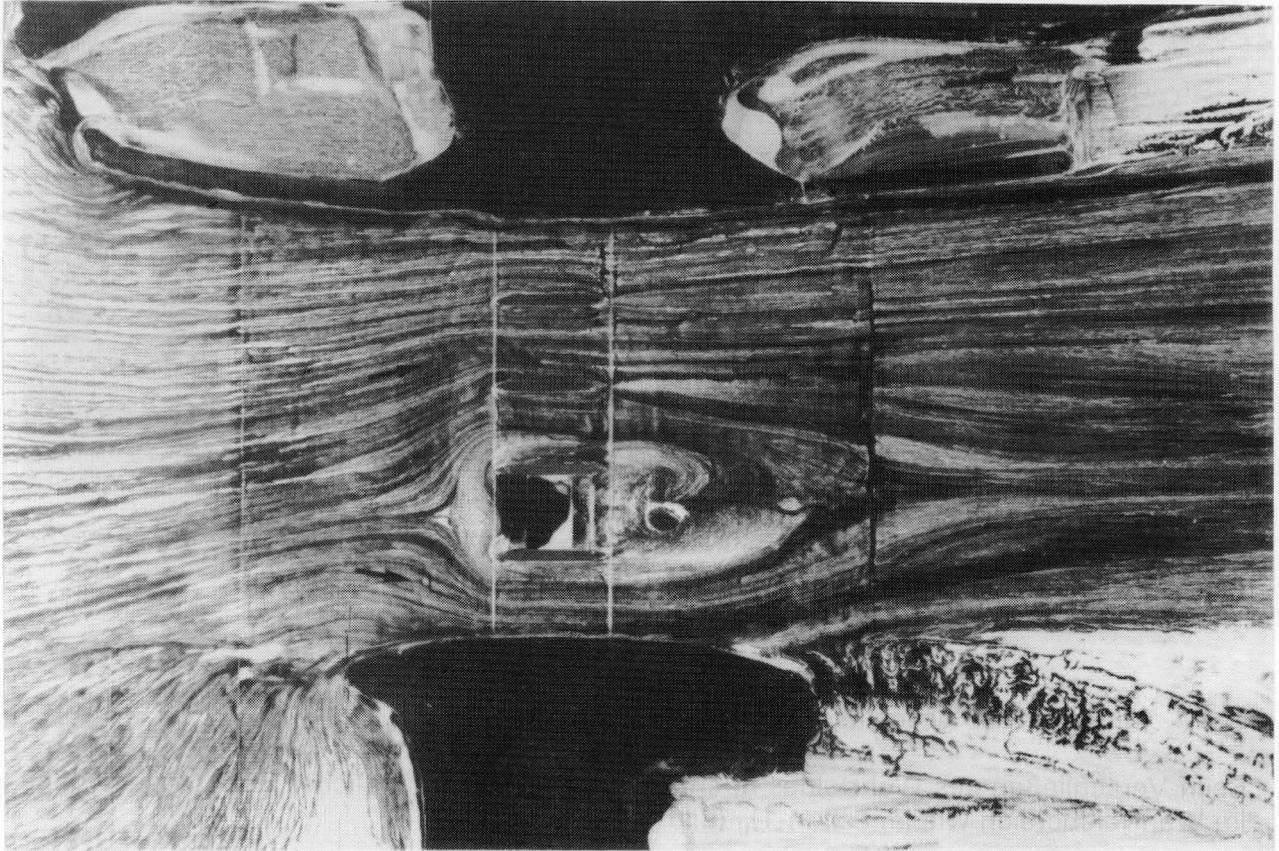


Bild 11 Sohlstromlinien bei Flut im Luftmodell für den $(n-1)_{II}$ -Betriebsfall

Wie der Vergleich der bei Flut und Ebbe sichtbar gemachten Sohlstromlinien zeigt (Bilder 11 und 12), sind diese komplexen Strömungs- und Wirbelstrukturen bei der Umströmung der versperrten Öffnung bei beiden Strömungsrichtungen im Prinzip gleich, soweit man auf den Nahbereich der exponierten Stelle schaut. Im großflächigen Strömungsfeld des Sperrwerks erkennt man jedoch deutliche Unterschiede im Verlauf der Sohlstromlinien, die sich beim Ebbstrom infolge der Schräganströmung aus dem Purrenstrom und der Umlenkung der Stromlinien zum tiefen Außenkolk auf der Nordseite wesentlich asymmetrischer ausdrücken. Insbesondere fällt bei Ebbe auf, daß von der Umlenkung der Strömung in die nordwestliche Richtung - zum tieferen Kolk hin - auch das Nachlaufgebiet hinter der versperrten Öffnung mit seiner Wirbelstraße betroffen ist.

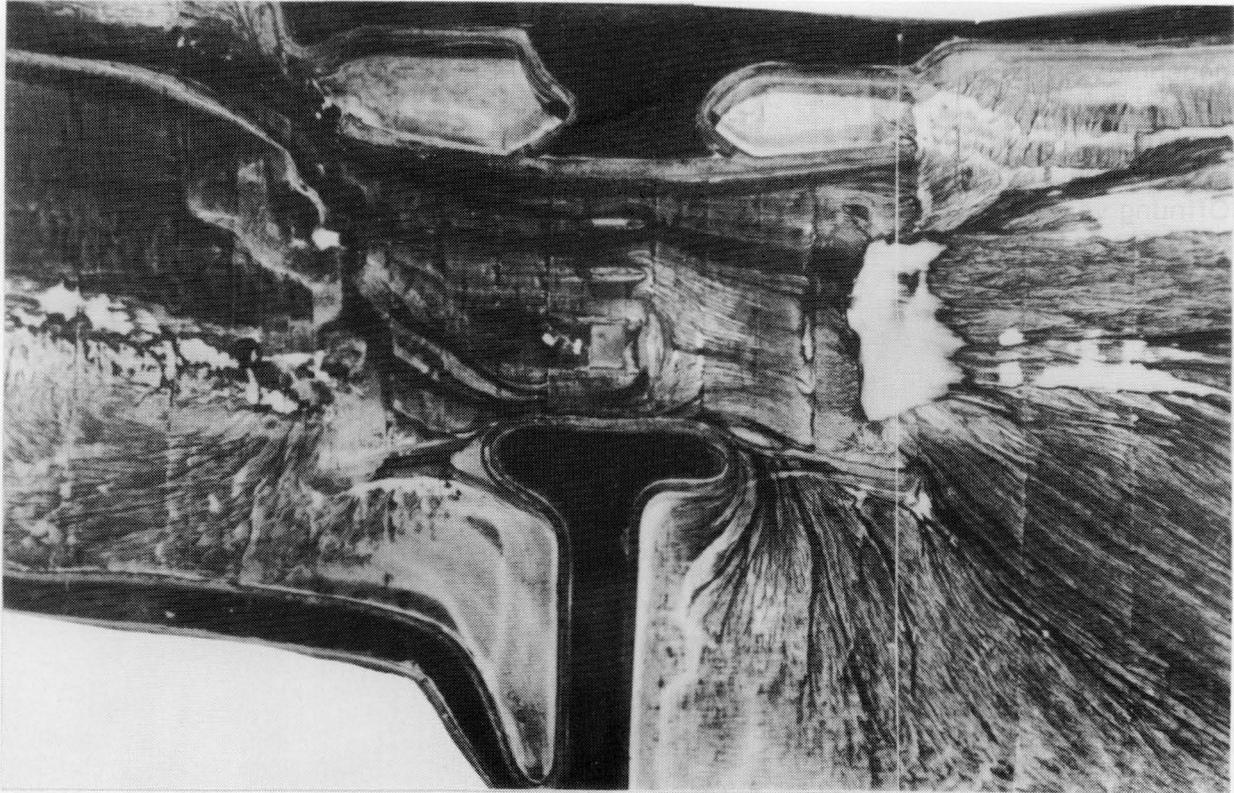


Bild 12 Sohlstromlinien bei Ebbe im Luftmodell für den $(n-1)_{II}$ -Betriebsfall

2.2.4 Mittleres Feld geschlossen; $(n-1)_{III}$ -Fall

Beim Verschließen des Wehrfeldes III entsteht prinzipiell ein ähnlicher Strömungsvorgang im Wehrfeldbereich wie im Fall $(n-1)_{II}$ (Bild 13).

Durch die spezielle Lage dieses Wehrfeldes wird eine nahezu symmetrische Strömung im Bereich der gesamten Wehranlage verursacht. Infolge des wiederum großräumigen Hufeisenwirbels wird die Strömung relativ gleichmäßig auf die Wehrfelder I und II sowie IV und V verteilt. Die Größe der unterstromig gelegenen großräumigen Ablösegebiete ist vergleichbar mit denjenigen des n -Falles.

Im Nachlaufgebiet der versperrten Öffnung wird in Form sich ablösender Wirbel die Strömungsstörung weit nach unterstrom getragen.

Bis auf die Schräganströmung aus dem Purrenstrom bei Ebbe bestehen bei diesem Betriebsfall zwischen Flut und Ebbe keine nennenswerten Unterschiede im Strömungsverlauf.

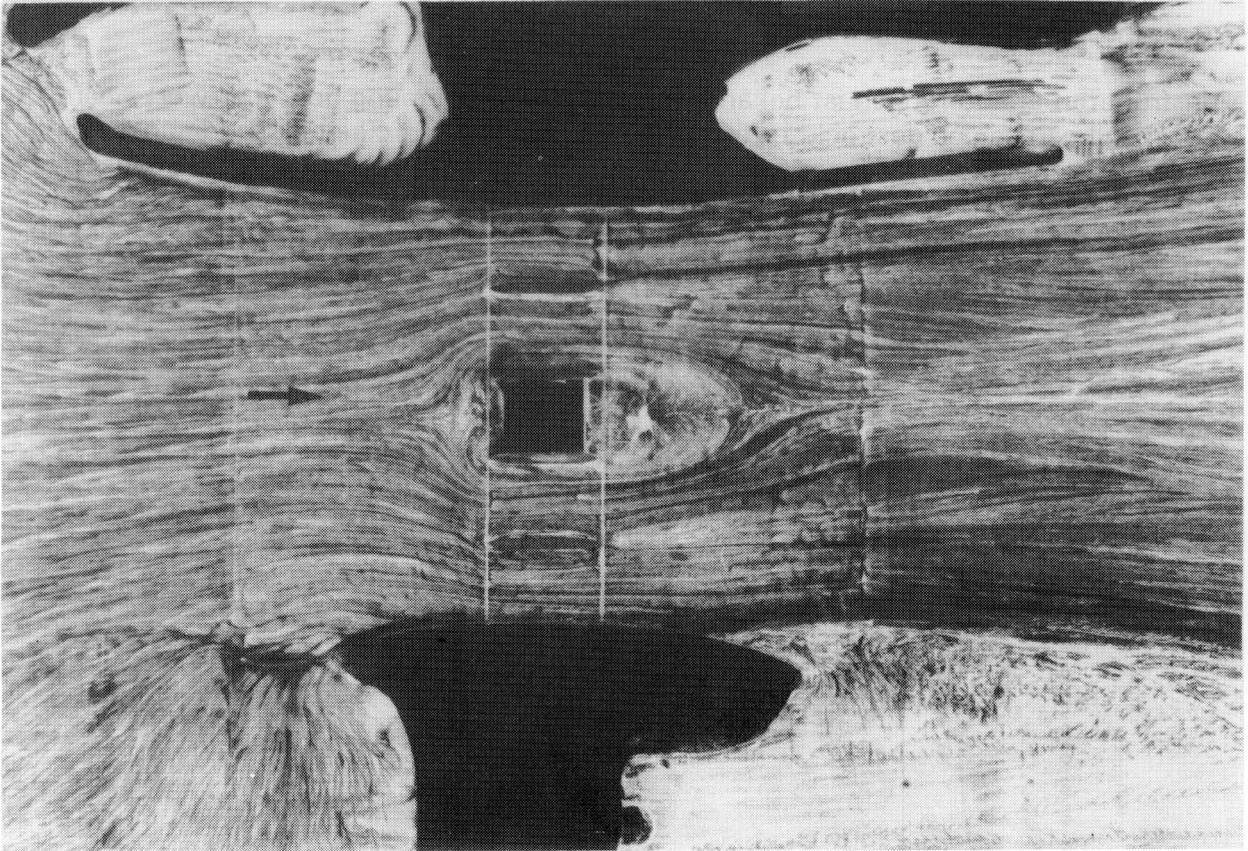


Bild 13 Sohlstromlinien bei Flut im Luftmodell für den $(n-1)_{III}$ -Betriebsfall

2.2.5 Feld IV geschlossen; $(n-1)_{IV}$ -Fall

Beim hier betrachteten Betriebsfall findet man im großen und ganzen einen gespiegelten Strömungszustand zum vorher beschriebenen $(n-1)_{II}$ -Fall vor. Im Unterschied zum Fall des versperrten Mittelfeldes tritt jetzt wieder die Asymmetrie der Strömung in den Vordergrund, die infolge der Schräganströmung aus dem Purrenstrom bei Ebbe stärker ausgebildet ist, als bei Flut. Auf eine weitere Interpretation der Strömungsbilder darf unter Hinweis auf den eingehend behandelten $(n-1)_{II}$ -Fall verzichtet werden.

2.2.6 Rechtes Randfeld geschlossen; $(n-1)_{V}$ -Fall

Vom Prinzip (geschlossenes Randfeld) und der generellen Strömungsstruktur her ist das Strömungsbild des Betriebsfalles $(n-1)_{V}$ vergleichbar mit dem des $(n-1)_{I}$ -Falles, so daß auf die detaillierte Darstellung im Abschnitt 2.2.2 verwiesen werden darf. Beim Ebbstrom darf allerdings nicht übersehen werden - dies wiederum eine Folge der Schräganströmung des Sperrwerks generell -, daß beim Verschuß der rechten Randöffnung das Abströmen vom Sperrwerk weitgehend gestreckt, in kaum gekrümmten Stromlinien erfolgt, während beim Verschuß des linken Randfeldes die schon mehrmals erwähnte Konvergenz der Stromlinien zum tiefen Kolk auf der Nordseite zu beobachten ist.

2.2.7 (n-1)-Betriebsfälle generell

Von früheren Erläuterungen ist bekannt, daß die Durchströmung des Sperrwerks bei Flut weitgehend gerade und gestreckt erfolgt, während bei Ebbe infolge der Schräganströmung aus dem Purrenstrom (Wattbauweise) die Wehröffnungen schiefwinkelig von Südost nach Nordwest durchströmt werden. Dieser generelle Strömungsverlauf zeigt sich als Grundmuster bei allen Betriebsfällen, in denen eine Wehröffnung verschlossen ist, indem bei Ebbe immer eine größere Strömungsasymmetrie als bei Flut festzustellen ist.

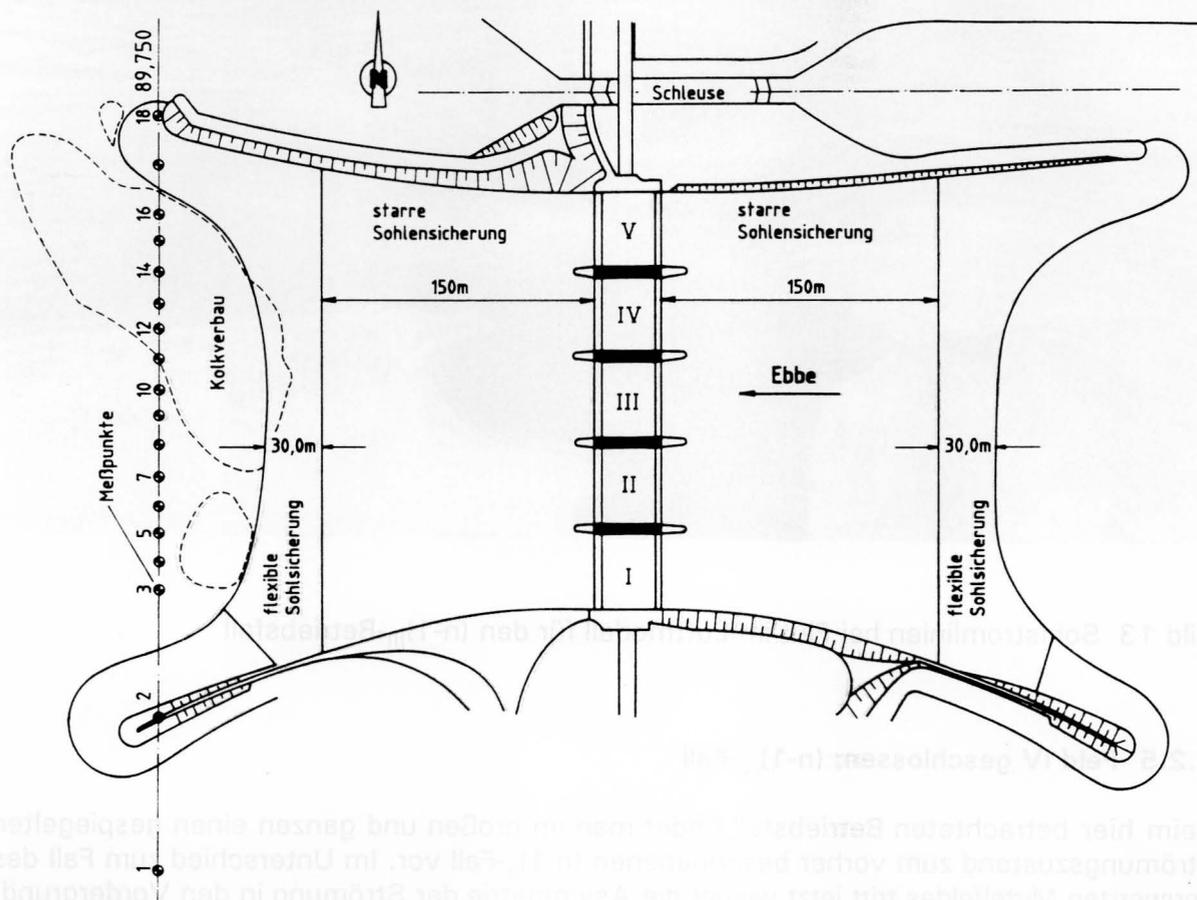


Bild 14 Lage des Meßprofils und der Meßpunkte im Luftmodell

Diese Asymmetrie der Strömung bei Ebbe kann durch die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen im Luftmodell quantifiziert werden. An insgesamt 18 Meßlotrechten auf der Außenseite des Sperrwerks wurden vertikale Geschwindigkeitsprofile ermittelt, deren Integration zu den tiefengemittelten Geschwindigkeiten v_m führt (Bild 14).

Bezogen auf eine 2,0 km binnenseits des Sperrwerks gemessene Referenzgeschwindigkeit v_r können uns diese dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnisse v_m/v_r , dargestellt über die Breite des Sperrwerks, Aufschlüsse über die horizontale Geschwindigkeitsverteilung bei den verschiedenen (n-1)-Betriebsfällen geben (Bild 15).

Beim Durchfluß durch alle 5 Wehröffnungen (n-Fall) konnten die größten tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten mit $v_m/v_r = 1,0$ im Abströmbereich der Felder III und V gemessen werden, während die horizontale Verteilung der Geschwindigkeiten über dem tiefen Nordkolk eine deutliche Delle zeigt (Bild 15, oberes Diagramm).

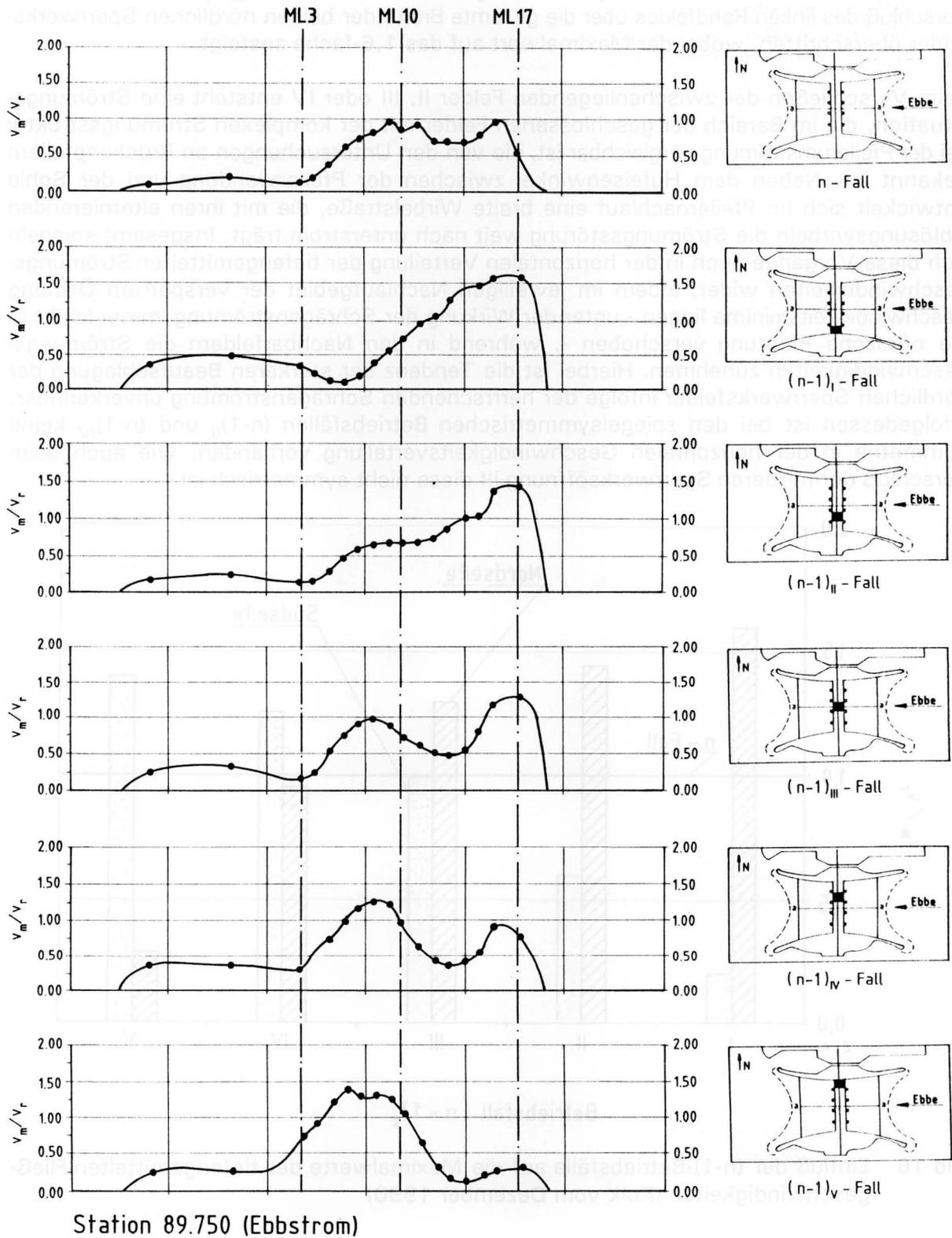


Bild 15 Horizontale Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten bei Ebbe (Kolk von Dezember 1990)

Beim Verschluß des linken Randfeldes nehmen im Abströmbereich der Sperrwerkfelder IV und V die Relativgeschwindigkeiten beträchtlich zu (Bild 15, 2. Diagramm von oben). Die Grenzlinie der maximalen Relativgeschwindigkeiten im n-Fall bei $v_m/v_r = 1,0$ wird beim Verschluß des linken Randfeldes über die gesamte Breite der beiden nördlichen Sperrwerksfelder überschritten, wobei der Maximalwert auf das 1,6-fache ansteigt.

Beim Verschließen der zwischenliegenden Felder II, III oder IV entsteht eine Strömungssituation, die im Bereich der geschlossenen Felder mit der komplexen Strömungsstruktur bei der Pfeilerumströmung vergleichbar ist, die von den Untersuchungen an Brückenpfeilern bekannt ist. Neben dem Hufeisenwinkel zwischen der Pfeilerwandung und der Sohle entwickelt sich im Pfeilernachlauf eine breite Wirbelstraße, die mit ihren alternierenden Ablösungswirbeln die Strömungsstörung weit nach unterstrom trägt. Insgesamt spiegeln sich diese Vorgänge auch in der horizontalen Verteilung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten wider, indem im jeweiligen Nachlaufgebiet der versperrten Öffnung Geschwindigkeitsminima liegen - unter der Wirkung der Schräganströmung immer leicht in die nördliche Richtung verschoben -, während in den Nachbarfeldern die Strömungsgeschwindigkeiten zunehmen. Hierbei ist die Tendenz der stärkeren Beaufschlagung der nördlichen Sperrwerksfelder infolge der herrschenden Schräganströmung unverkennbar. Infolgedessen ist bei den spiegelsymmetrischen Betriebsfällen $(n-1)_{II}$ und $(n-1)_{IV}$ keine Symmetrie in der horizontalen Geschwindigkeitsverteilung vorhanden, wie auch beim Verschluß der mittleren Sperrwerksöffnung III diese nicht symmetrisch ist.

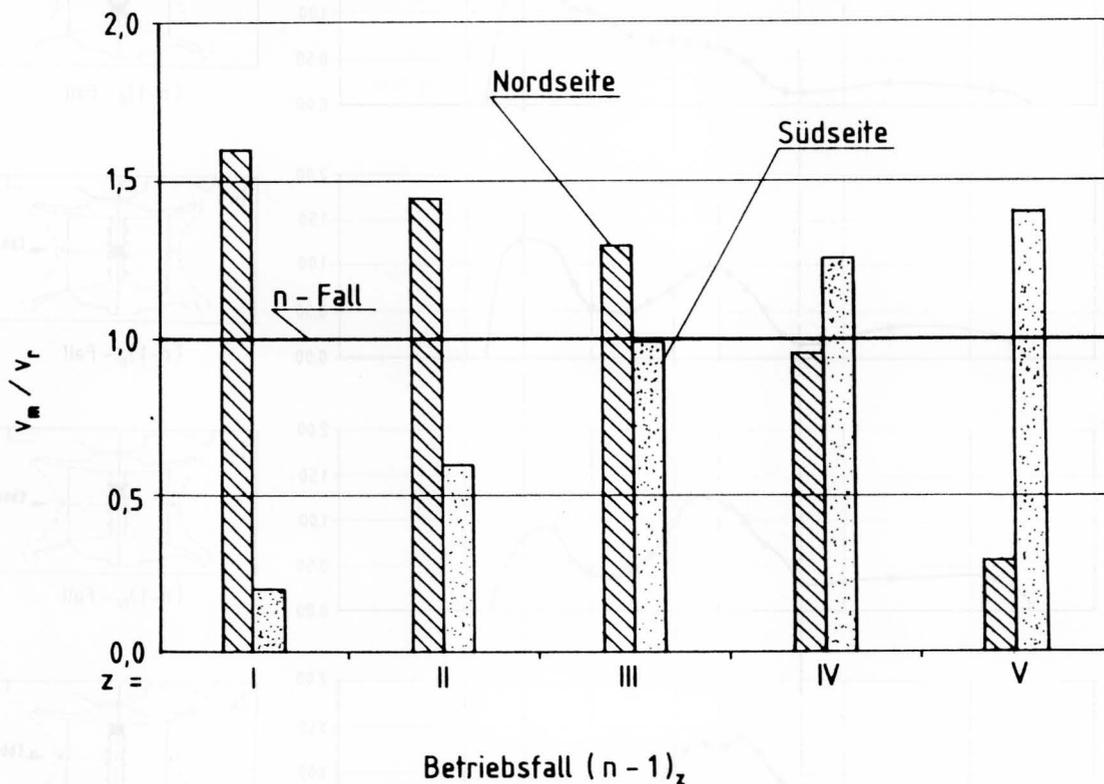


Bild 16 Einfluß der $(n-1)$ -Betriebsfälle auf die Maximalwerte der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten (Kolk vom Dezember 1990)

Beim Verschluß des rechten Randfeldes ist die generelle Strömungsstruktur im Prinzip vergleichbar mit der des $(n-1)_I$ -Falles. In beiden Betriebsfällen treten die maximalen Fließgeschwindigkeiten jeweils auf der Seite des Sperrwerks auf, die der verschlossenen Öffnung gegenüber liegt und es stellt sich eine außerordentliche schiefe Verteilung über die Sperrwerksbreite ein. Beim Vergleich aller möglichen Betriebsfälle untereinander sind in bei-

den "Randfällen" - im Einklang mit entsprechenden Erfahrungen von anderen Wehranlagen - die tiefengemittelten Geschwindigkeiten am größten und wachsen maximal auf das 1,4- bis 1,6-fache der Werte beim n-Fall an (Bild 16).

Insgesamt gesehen nehmen die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten auf der Nordseite des Sperrwerks ab und auf der Südseite zu, wenn man mit dem (n-1)-Fall vom Feld I nacheinander zum Feld V vorrückt.

2.3 Betriebsformen am Sperrwerk

Nach Hollmer, 1992 kann am Eider-Sperrwerk im wesentlichen zwischen vier Betriebsformen unterschieden werden, die mit den jeweiligen Ganglinien ihrer Binnen- und Außenwasserstände schematisch auf Bild 17 dargestellt sind.

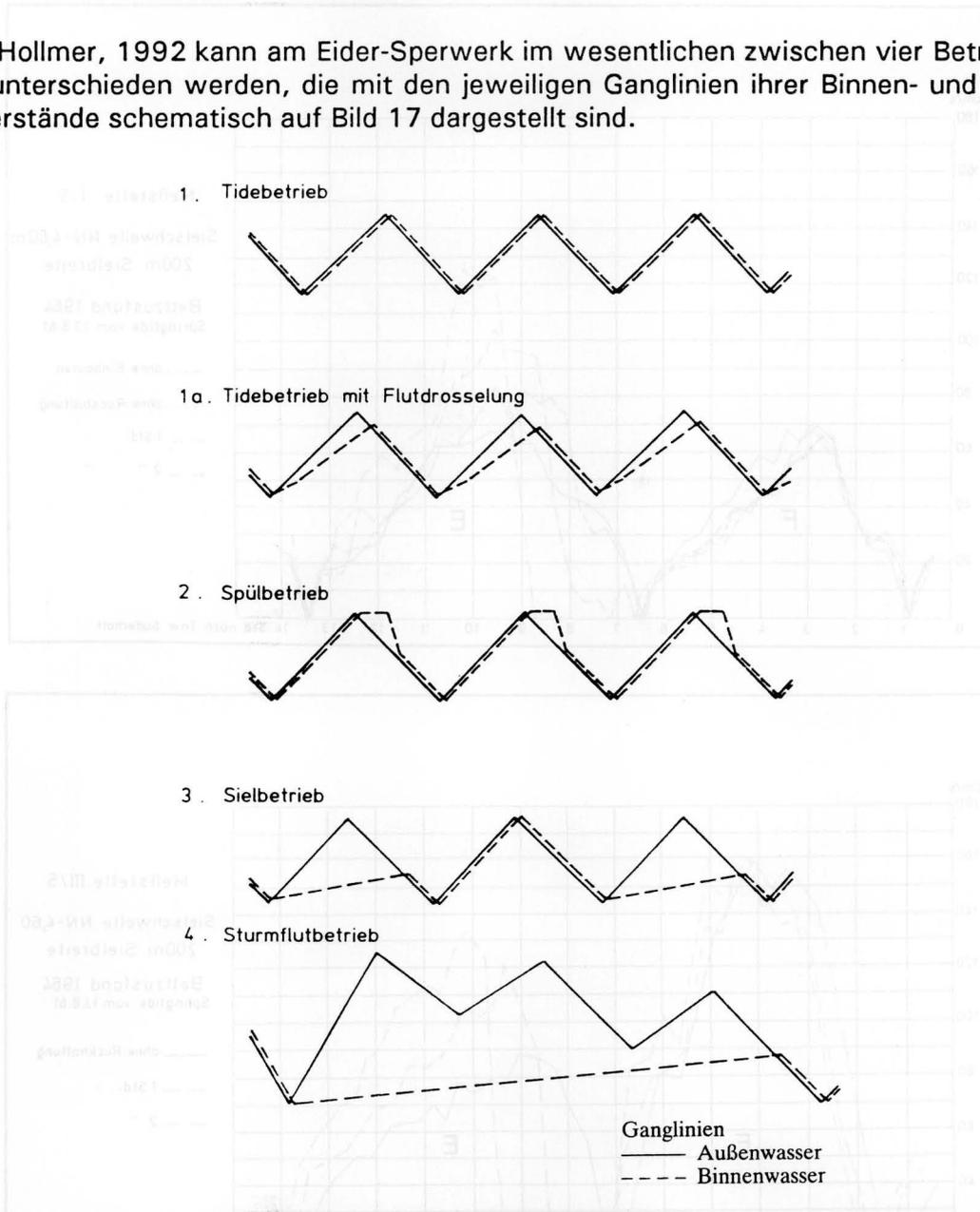


Bild 17 Hauptsächlichste Betriebsformen des Eider-Sperrwerks (Wasserstandsganglinien)

Die Betriebsform "Tidebetrieb" (Nr. 1 in Bild 17) entspricht dem Normalbetrieb eines Sturmflutsperrwerks, bei dem im allgemeinen normale und nur gering erhöhte Tiden ohne Beeinflussung in das Ästuar ein- und ausgelassen werden.

Um den Versandungstendenzen in der Außeneider entgegenwirken zu können, war nach

den Ergebnissen aus dem Tidemodell der Eider (Harten, 1970) für das Sperrwerk ursprünglich ein sogenannter "Rückhalte - oder Spülbetrieb" vorgesehen (Nr. 2 in Bild 17). Bei diesem Betrieb wird das Sperrwerk bei Hochwasser geschlossen und das Wasser bis zu einer Rückhaltezeit von zwei Stunden in der Tideeider zurückgehalten. Das sich bei außen ablaufender Ebbe ergebende Gefälle wird in einem intensiven Spülstoß genutzt, um dadurch einen möglichst großen Abschnitt der Außeneider vor Versandung freizuhalten. Die Strömungsgeschwindigkeiten des Spülstoßes nehmen mit der Dauer der Rückhaltezeit deutlich zu. Andererseits nimmt die durch die Fließgeschwindigkeiten angezeigte Spülwirkung mit zunehmender Entfernung vom Bauwerk ab (Bild 18).

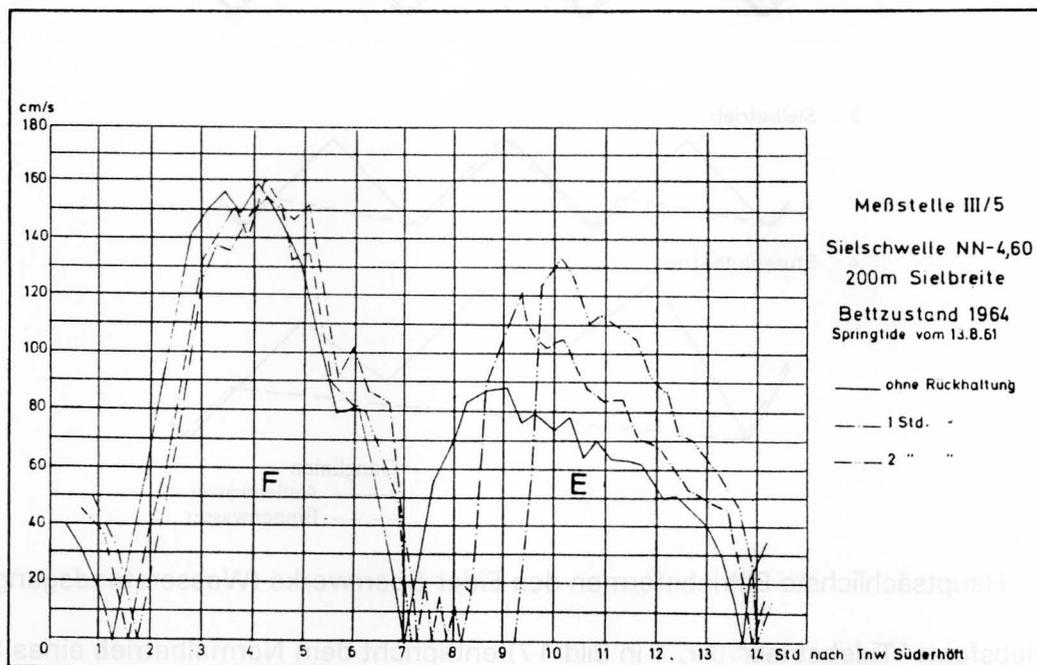
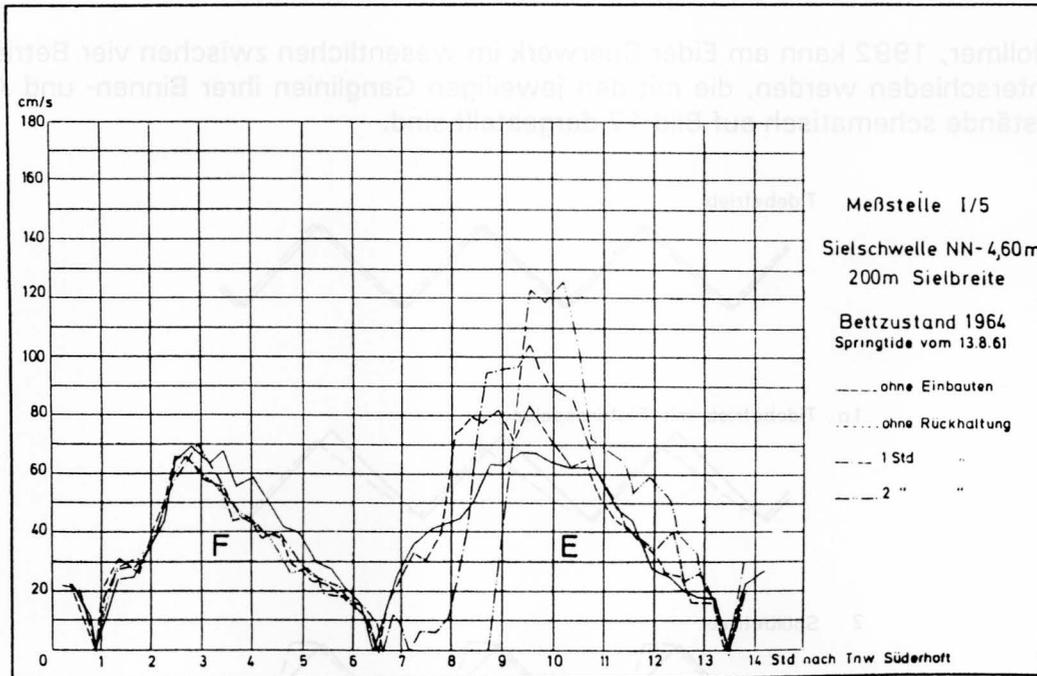


Bild 18 Fließgeschwindigkeiten 1200 m außenseits (oben) und 650 m binnenseits des Sperrwerks (unten) nach Untersuchungen im Tidemodell

Der Spülbetrieb wurde nach kurzem Probetrieb im Jahr 1976 eingestellt, nachdem die Fischerei wegen Beeinträchtigung ihrer Fanggründe heftig protestiert hatte.

Seit 1980 wird das Sperrwerk im "Flut-Drosselbetrieb" gefahren (Nr. 1 a in Bild 17). Es bewirkt eine Angleichung der Flut- und Ebbstromdauer und vermindert die Flutströmungsgeschwindigkeiten. Er bringt somit eine Entschärfung der Versandungsprobleme (Bild 19). Die Flutdrosselung ist seitdem zur normalen Betriebsform des Eider-Sperrwerks geworden.

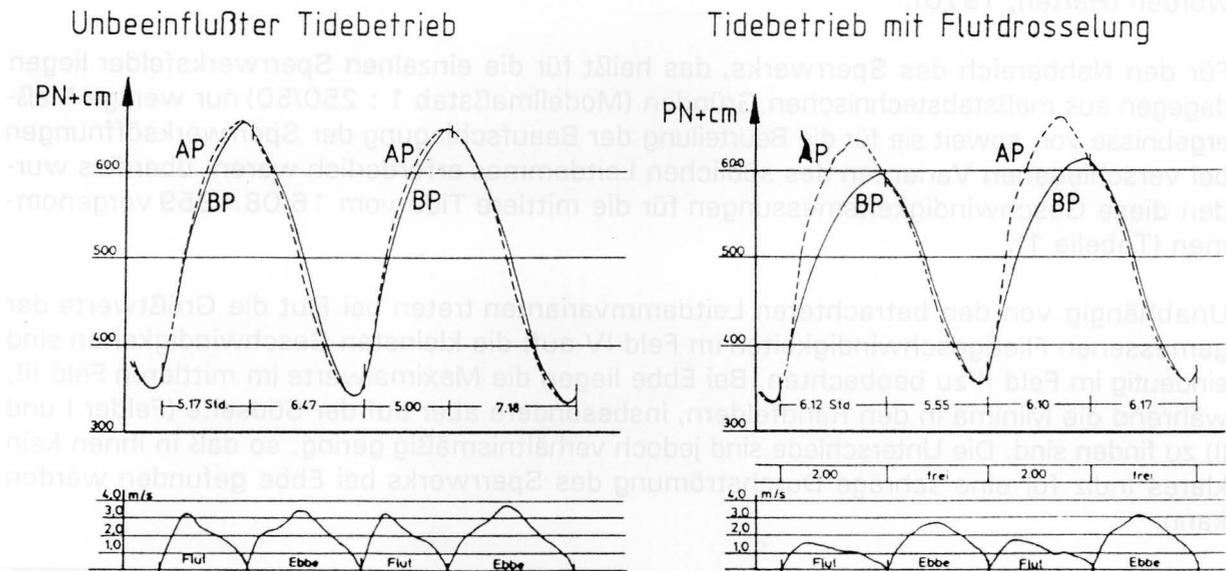


Bild 19 Tidekurven und Strömungsgeschwindigkeiten beim unbeeinflussten Tidebetrieb und beim Flut-Drosselbetrieb

Im "Sielbetrieb" (Nr. 3 in Bild 17), in dem die Tiden gekehrt werden, wird das Sperrwerk bei Niedrigwasser geschlossen, um oberhalb des Sperrwerks einen möglichst großen Speicherraum für den Binnenabfluß zu haben. Dies dient der Verlängerung der Sielzugzeiten für die sehr tief gelegenen Entwässerungsgebiete. Bei ergiebigen Niederschlägen kommt dieser Betriebsform deswegen sehr große Bedeutung zu.

Hohe Außenwasserstände und Sturmfluten, besondere Eissituationen, Betriebsstörungen, die Überwachung und Unterhaltung der Betriebsanlagen erfordern den sogenannten "Sturmflutbetrieb" (Nr. 4 in Bild 17), bei dem die Segmentverschlüsse möglichst frühzeitig bei niedrigem Wasserstand geschlossen werden. Der zugelassene höchste Binnenwasserstand beträgt NN + 2,00 m.

Nach Vierfuß, 1994 gelten für die hauptsächlichen Betriebsformen etwa folgende Häufigkeiten:

- + Flut-Drosselbetrieb 80 %
- + Sturmflutbetrieb 8 %
- + Sielbetrieb 7 %
- + Sonderbetrieb 5 %

2.4 Fließgeschwindigkeiten

2.4.1 Geschwindigkeiten in den Sperrwerksfeldern

Zur Beurteilung der verschiedenen Sperrwerksvarianten, ihrer Spülwirkung in Abhängigkeit von der Rückhaltezeit und der zweckmäßigsten Bauzustände und Baufolgen für die gewählte Sperrwerksanordnung sind im Tidemodell der Eider im Großraum der Sperrstelle eine Vielzahl von Geschwindigkeitsmessungen für die Springtide vom 13.08.1961 durchgeführt worden (Harten, 1970).

Für den Nahbereich des Sperrwerks, das heißt für die einzelnen Sperrwerksfelder liegen dagegen aus maßstabstechnischen Gründen (Modellmaßstab 1 : 250/50) nur wenige Meßergebnisse vor, soweit sie für die Beurteilung der Beaufschlagung der Sperrwerksöffnungen bei verschiedenen Varianten des südlichen Leitdammes erforderlich waren; überdies wurden diese Geschwindigkeitsmessungen für die mittlere Tide vom 16.08.1959 vorgenommen (Tabelle 1).

Unabhängig von den betrachteten Leitdammvarianten treten bei Flut die Größtwerte der gemessenen Fließgeschwindigkeiten im Feld IV auf; die kleinsten Geschwindigkeiten sind eindeutig im Feld II zu beobachten. Bei Ebbe liegen die Maximalwerte im mittleren Feld III, während die Minima in den Randfeldern, insbesondere aber auf der Südseite (Felder I und II) zu finden sind. Die Unterschiede sind jedoch verhältnismäßig gering, so daß in ihnen kein klares Indiz für eine schräge Durchströmung des Sperrwerks bei Ebbe gefunden werden kann.

Variante		Sperrwerksöffnung					
		Süd	I	II	III	IV	Nord
Langer südlicher Leitdamm	Flut	2,02	1,77	1,87	2,08	1,89	
	Ebbe	1,93	1,90	2,13	2,01	1,97	
Kurzer südlicher Leitdamm	Flut	1,95	1,79	1,88	2,04	1,83	
	Ebbe	1,83	1,93	2,14	1,99	1,97	

Tabelle 1: Mittlere Fließgeschwindigkeiten in m/s in den Sperrwerksöffnungen I bis V (Tidemodell)

Den im Hauptmodell des Eider-Sperrwerks (Maßstab 1 : 66 2/3) vorgenommenen Geschwindigkeitsmessungen haftet der Mangel an, daß die Abflüsse im unverzerrten Hauptmodell gegenüber denen des verzerrten Tidemodells um 20 % verringert werden mußten, um Ähnlichkeit in den Wasserspiegellagen zu erhalten. Da die Ähnlichkeitsmechanischen Gründe hierfür einerseits in der starken Modellverzerrung des Tidemodells (5-fach überhöht) und andererseits in der stationären Nachbildung der Tideströmung im unverzerrten Hauptmodell zu sehen sind, konnte man davon ausgehen, daß die tatsächlichen Werte in der Natur etwa in der Mitte zwischen den beiden Modellsystemen liegen dürften. Unter diesem Gesichtspunkt müssen alle Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen im Hauptmodell gesehen werden. Der qualitative Wert der Versuchsergebnisse aus dem Hauptmodell bleibt davon unberührt.

Im Rahmen der Untersuchung der südlichen Leitdämme im Hauptmodell wurden für die Springtide vom 13.08.1961 Geschwindigkeitsmessungen in den Sperrwerksfeldern durchgeführt (Bild 20).

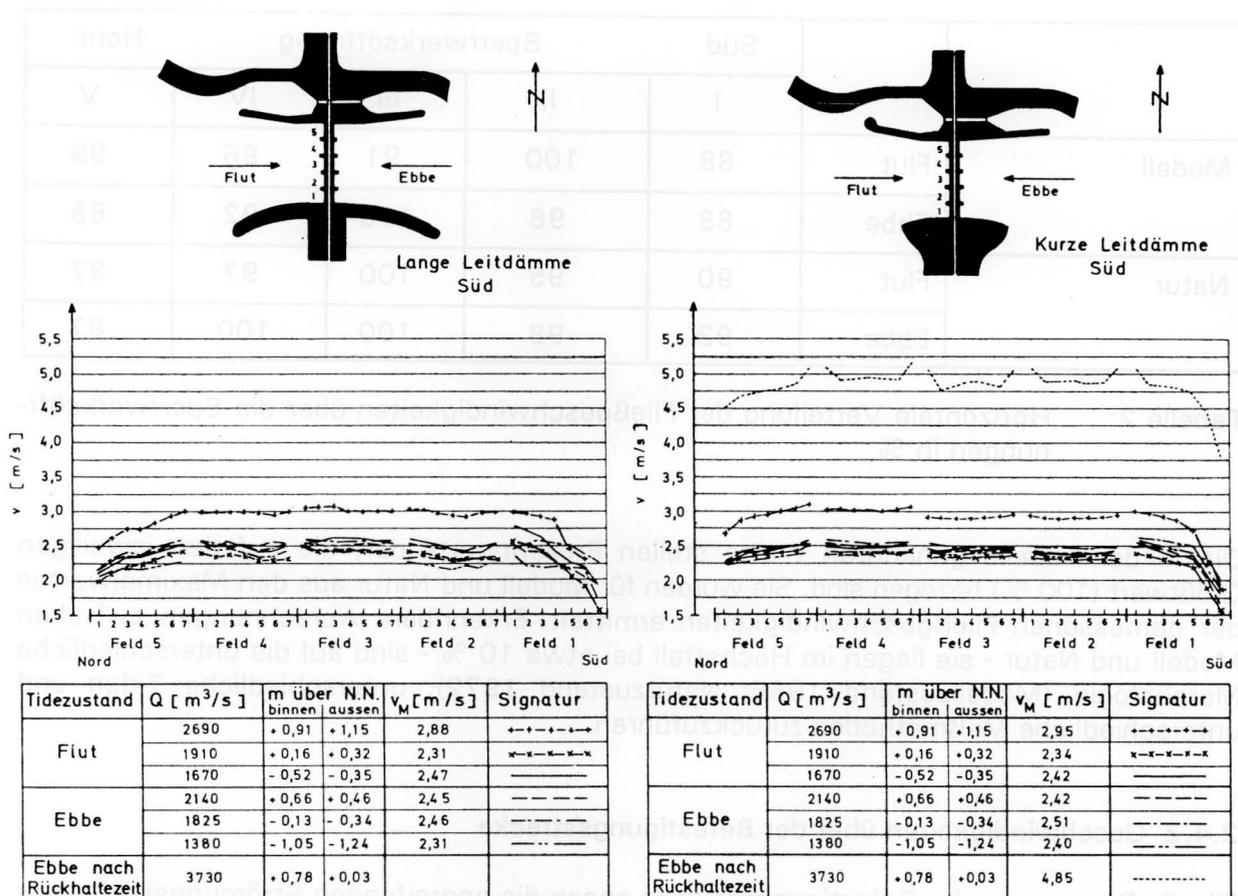


Bild 20 Geschwindigkeiten in den Sperrwerksfeldern (Hauptmodell)

Die Ergebnisse zeigen, daß abhängig von der Form und Länge der südlichen Leitdämme nur im südlichen Randfeld schwach unterschiedliche Beaufschlagungen auftreten können, die aber in den übrigen Wehrfeldern wieder zu einer gleichbleibenden Leistungsfähigkeit ausgeglichen werden. Abgesehen von der Abnahme der Fließgeschwindigkeiten an den Sperrwerksrändern, ist bei diesen Untersuchungen eine recht gleichmäßige Beaufschlagung der Wehrfelder zu erkennen.

Damit geben die Messungen keinerlei Hinweis für eine schiefwinkelige Durchströmung des Sperrwerks bei Ebbe und die daraus resultierende stärkere Beaufschlagung der nördlichen Sperrwerksfelder, wie sie die Untersuchungen im Luftmodell zum Ausdruck bringen.

Möglicherweise bestand die schräge Durchströmung des Sperrwerks bei Ebbe nicht von Anfang an, sondern hat sich erst infolge morphologischer Veränderungen im Laufe der Zeit entwickelt. Als solche sind die Verlagerung der Nordrinne in der Außeneider, der vor Kopf des südlichen Leitdammes außen einmündende Priel und der tiefe nördliche Kolkessel auf der Außenseite des Sperrwerks zu nennen.

Für eine solche Deutung sprechen auch die Untersuchungen von Harten/Knieß, 1976, die bei allen vergleichenden Natur- und Modellmessungen eine gute Verteilung der Strömung auf die einzelnen Sperrwerksöffnungen festgestellt haben (Tabelle 2).

		Sperrwerksöffnung				Nord
		I	II	III	IV	
Modell	Flut	88	100	91	86	99
	Ebbe	88	96	100	92	88
Natur	Flut	90	95	100	97	87
	Ebbe	93	98	100	100	87

Tabelle 2: Horizontale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten über die Sperrwerksöffnungen in %

Die in der Tabelle genannten Werte stellen Prozentwerte dar, die auf den jeweiligen Größtwert (100 %) bezogen sind. Sie wurden für Modell und Natur aus den Maximalwerten der gemessenen Fließgeschwindigkeiten ermittelt. Erkennbare Abrechnungen zwischen Modell und Natur - sie liegen im Höchstfall bei etwa 10 % - sind auf die unterschiedliche Morphologie (Modellzustand 1966; Naturzustand 1972), unterschiedliche Tiden und unterschiedliche Meßmethoden zurückzuführen.

2.4.2 Geschwindigkeiten über der Befestigungsstrecke

Für die Bemessung der Befestigungsstrecke gegen die angreifenden Strömungskräfte war die Kenntnis der über der Sohlensicherung herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten von Bedeutung.

Von der horizontal auf NN - 4,60 m liegenden Stahlbetonplatte des Sperrwerks bis zur 180 m entfernt angeordneten Kante der elastischen Sohlensicherung nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten infolge der Erweiterung des Abflußquerschnitts theoretisch auf etwa 60 % der Geschwindigkeitsgrößen in den Wehrfeldern ab. Die Querschnittserweiterung ergibt sich dabei aus einer Breitenzunahme von 200 m auf 245 m und einer Tiefenzunahme von 2,0 m auf die auf NN - 6,60 m liegende Befestigungskante. Voraussetzung für diese rechnerische Abnahme der Fließgeschwindigkeiten ist allerdings, daß die Strömung die ihr angebotene Querschnittserweiterung auch annimmt und nicht durch seitliche Ablösungszonen eingeengt wird, wie sie an den seitlichen Berandungen des Sperrwerks tatsächlich beobachtet werden können (siehe Abschnitt 2.1). Hinzu kommt, daß die Rauheitswirkung der 1 : 75 geneigten starren Sohlensicherung zur Abnahme der Fließgeschwindigkeiten beiträgt. Diese teils entgegengerichteten Vorgänge (Ablösung und Rauheitswirkung) schließen eine exakte rechnerische Behandlung der Geschwindigkeitsabnahme aus.

Trotz dieser Einschränkungen konnte im Tidemodell der Eider fast genau die Abnahme der Fließgeschwindigkeiten von der Sperrwerksachse bis zur Kante der elastischen Sohlensicherung gemessen werden, wie sie vorher zu 60 % angegeben worden ist (Bild 21).

Die Messungen wurden auf der Außenseite des Sperrwerks in der Längsachse des mittleren Feldes für die Springtide vom 13.08.1961 vorgenommen; dabei handelt es sich um die jeweiligen Maximalwerte. Sie zeigen einerseits, daß die stärkste Abnahme der Fließgeschwindigkeiten über der Befestigungsstrecke erfolgt, andererseits aber in einer Entfernung von 600 m noch deutlich ein Einfluß der Rückhaltezeit auf die Größe der Fließgeschwindigkeiten zu erkennen ist. Über der Kante der elastischen Sohlensicherung können bei einer 2-stündigen Rückhaltezeit maximal 3,30 m/s erwartet werden.

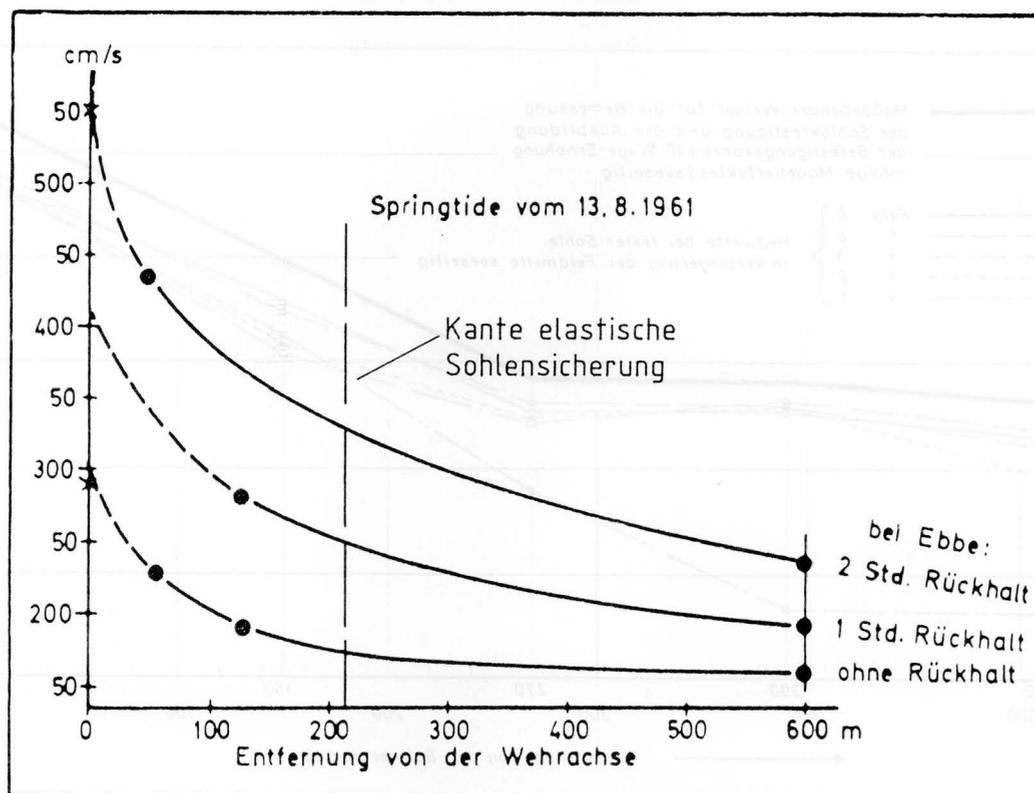


Bild 21 Abnahme der maximalen Fließgeschwindigkeiten auf der Außenseite des Sperrwerks bei Ebbe (Tidemodell)

Im Hauptmodell des Eider-Sperrwerks sind nicht nur in der Längsachse des mittleren Feldes die Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt worden, sondern die Messungen erstreckten sich auch auf die Längsachsen in der Mitte der übrigen Felder auf der Außenseite des Sperrwerks. Auch hier handelt es sich wieder um die Springtide vom 13.08.1961, begrenzt auf die Ebbe nach 2-stündiger Rückhaltezeit, die im Hauptmodell entsprechend dessen Möglichkeiten als stationärer Zustand mit ihrem Höchstabfluß simuliert wurde (Bild 22).

Infolge des größeren Meßaufwandes sind die Ergebnisse jetzt differenzierter und aussagekräftiger. Man erkennt wieder die starke Abnahme der Fließgeschwindigkeiten über der Befestigungsstrecke, die sich gegenüber den Meßergebnissen aus dem Tidemodell bis zu einer Entfernung von 270 m fortsetzt und dort praktisch ausklingt. Bei einer Entfernung von 150 m, das heißt in der Nähe der Kante der starren Sohlensicherung, ist im Unterwasserbereich der nördlichen Felder 4 und 5 eine leichte Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten um ca. 0,20 m/s zu beobachten, in der sich möglicherweise die Schräganströmung des Sperrwerks niederschlägt. Die Tendenz der Geschwindigkeitsabnahme bleibt für die Felder 2 bis 5 davon unberührt, wie auch alles in allem die Unterschiede in den Geschwindigkeiten in den genannten Feldern verhältnismäßig gering sind. Für eine spätere Betrachtung soll hier noch festgehalten werden, daß im Bereich des mittleren Feldes 3 die Fließgeschwindigkeiten an der Befestigungskante (ca. 200 m von der Sperrwerksachse) etwa 60 % der Geschwindigkeiten im Sperrwerk betragen und damit wiederum mit dem theoretisch ermittelten Wert übereinstimmen. Anders dagegen sieht es unterhalb des Feldes 1 auf der Südseite aus, wo das Vorhandensein der großen Ablösungszone vor Kopf des südlichen Leitdammes, auf die schon bei der Behandlung der Anströmung des Sperrwerks hingewiesen wurde, zu einer beträchtlichen Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten führt.

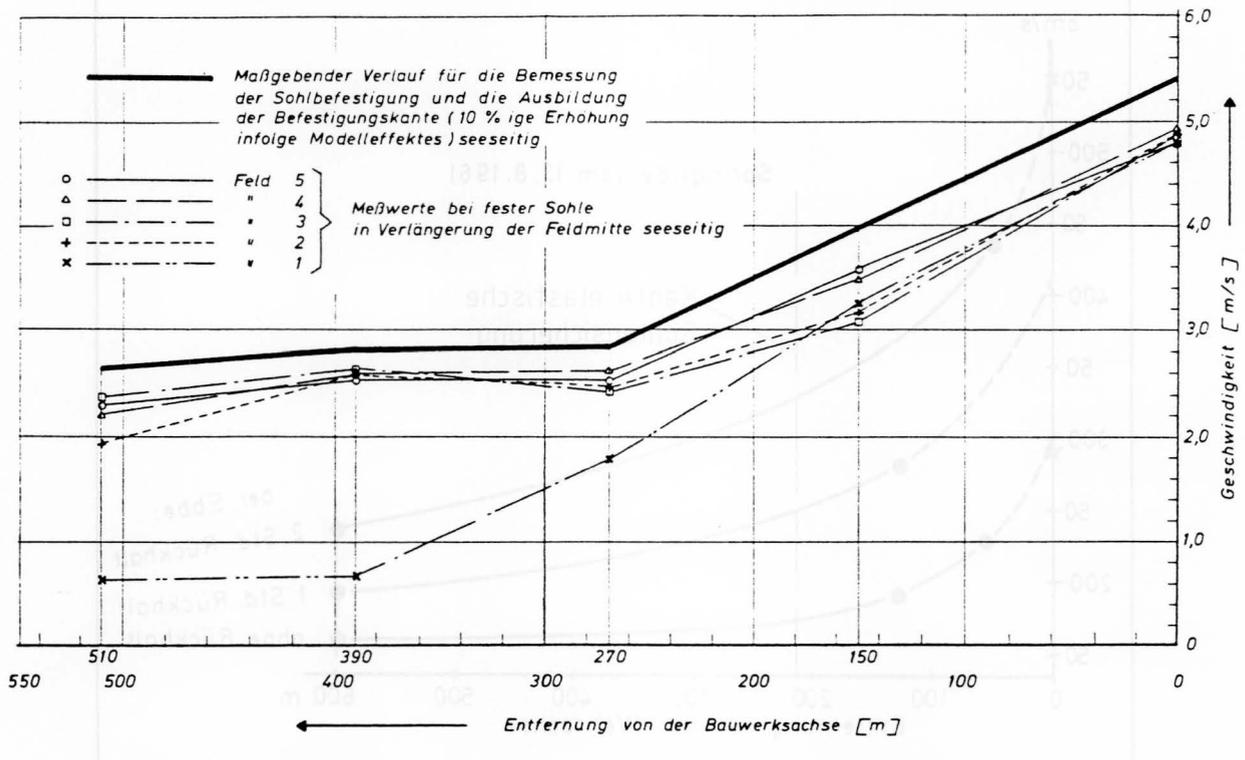


Bild 22 Abnahme der maximalen Fließgeschwindigkeiten auf der Außenseite des Sperrwerks bei Ebbe nach 2-stündiger Rückhaltezeit (Hauptmodell)

Von 1979 bis 1983 wurden vom Wasser- und Schiffsamt Tönning in verschiedenen Meßkampagnen mit unterschiedlichen Meßmethoden (NSW-Sonden, Meßflügel und Dauerstrommesser) Strömungsmessungen im Wehrfeld 3 und dessen Verlängerung nach binnen und außen bis zum Übergang von der starren zur elastischen Sohlensicherung (etwa 170 m beidseits der Sperrwerksachse) durchgeführt, die in einem internen Bericht des WSA Tönning vom 28.11.1984 behandelt werden.

Die im mittleren Sperrwerksfeld für eine Vielzahl von Tiden beim unbeeinflussten Tidebetrieb (freier Durchfluß) und beim Tidebetrieb mit Flutdrosselung gemessenen maximalen Flutstrom - bzw. Ebbstromgeschwindigkeiten wurden in dem vorher genannten Bericht der jeweiligen Tidesteig- und Tidefallgeschwindigkeit gegenübergestellt, die sich aus dem Quotient von Tidesteig (cm) und Flutdauer (min) bzw. von Tidefall und Ebbdauer ergeben (Bild 23).

Die **Flutstromgeschwindigkeiten** nehmen mit der Tidesteiggeschwindigkeit zu, wobei sie durch den Flut-Drosselbetrieb auf etwa 65 bis 60 % der Werte beim freien Durchfluß reduziert werden. Die größte Flutstromgeschwindigkeit konnte beim freien Durchfluß zu 4,6 m/s und beim Drosselbetrieb zu 3,1 m/s gemessen werden; die zugeordneten Tidesteiggeschwindigkeiten lagen bei 1,26 bzw. 1,28 cm/min. Ohne gleichzeitige Geschwindigkeitsmessungen im Sperrwerk wurden mehrmals Tidesteiggeschwindigkeiten über 1,4 cm/min beobachtet; der Maximalwert betrug bis zum Zeitpunkt des Berichts 1,52 cm/min. Nach der Darstellung auf Bild 23, oben, könnte bei dieser Tidesteiggeschwindigkeit die Fließgeschwindigkeit im Sperrwerk etwa 5,0 m/s bei freiem Durchfluß und etwa 3,35 m/s beim Drosselbetrieb betragen haben, wenn man die Ausgleichslinien wie angedeutet geradlinig verlängert.

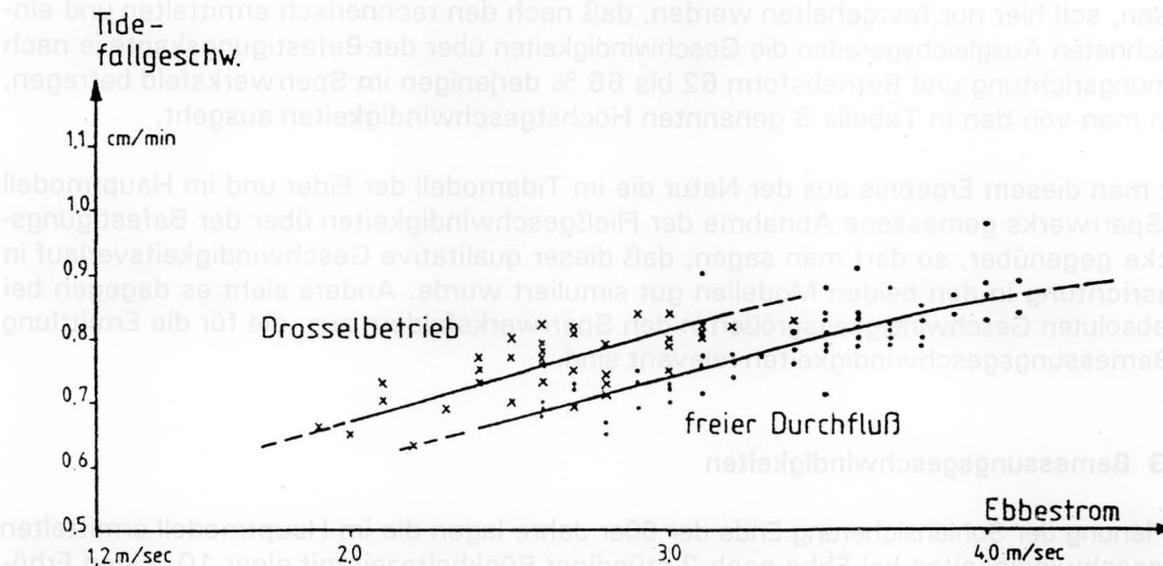
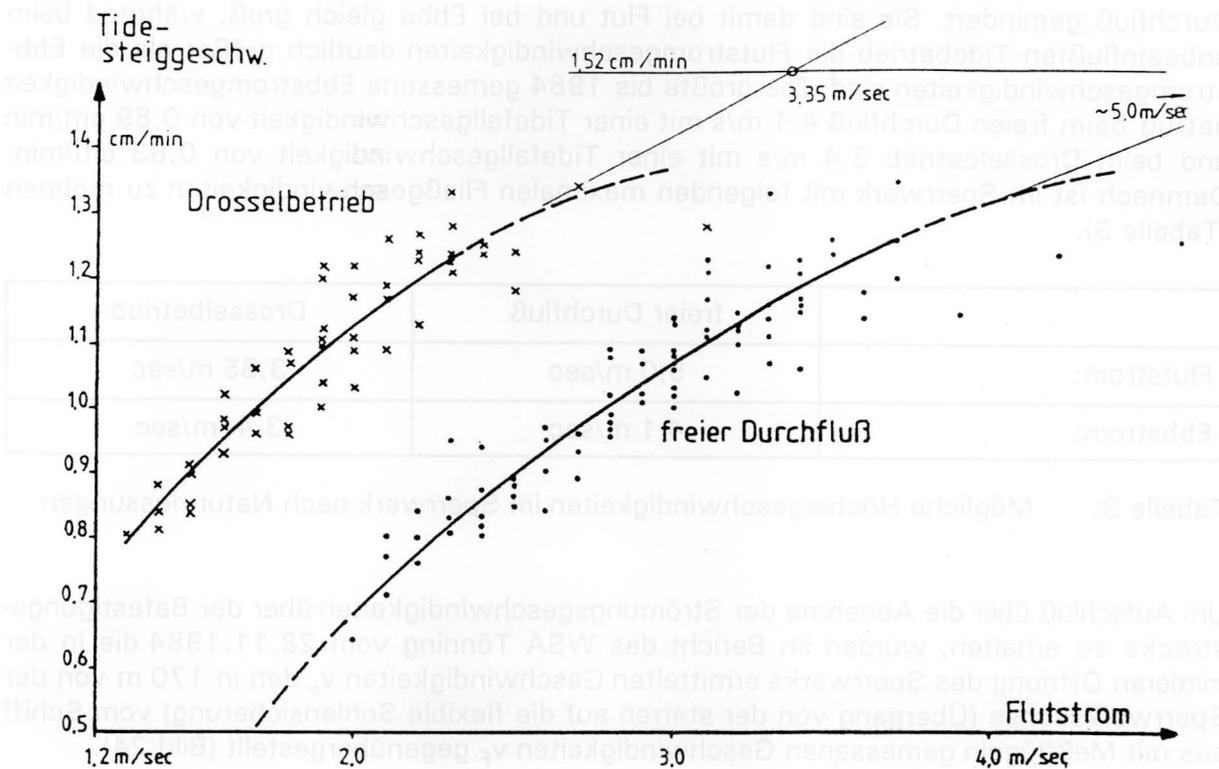


Bild 23 Maximale Flutstrom- und Ebbstromgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Tidesteig- und Tidefallgeschwindigkeit im Wehrfeld III nach Naturmessungen

Beim **Ebbstrom** erfolgt die Zunahme der maximalen Fließgeschwindigkeiten mit der Tidefallgeschwindigkeit wesentlich stärker als beim Flutstrom (Bild 23, unten). Durch den Drosselbetrieb werden die Fließgeschwindigkeiten auf etwa 85 bis 80 % der Werte beim freien Durchfluß gemindert. Sie sind damit bei Flut und bei Ebbe gleich groß, während beim unbeeinflussten Tidebetrieb die Flutstromgeschwindigkeiten deutlich größer als die Ebbstromgeschwindigkeiten sind. Die größte bis 1984 gemessene Ebbstromgeschwindigkeit betrug beim freien Durchfluß 4,1 m/s mit einer Tidefallgeschwindigkeit von 0,89 cm/min und beim Drosselbetrieb 3,4 m/s mit einer Tidefallgeschwindigkeit von 0,83 cm/min. Demnach ist im Sperrwerk mit folgenden maximalen Fließgeschwindigkeiten zu rechnen (Tabelle 3).

	freier Durchfluß	Drosselbetrieb
Flutstrom:	5,0 m/sec	3,35 m/sec
Ebbstrom:	4,1 m/sec	3,4 m/sec

Tabelle 3: Mögliche Höchstgeschwindigkeiten im Sperrwerk nach Naturmessungen

Um Aufschluß über die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten über der Befestigungsstrecke zu erhalten, wurden im Bericht des WSA Tönning vom 28.11.1984 die in der mittleren Öffnung des Sperrwerks ermittelten Geschwindigkeiten v_s den in 170 m von der Sperrwerksachse (Übergang von der starren auf die flexible Sohlensicherung) vom Schiff aus mit Meßflügeln gemessenen Geschwindigkeiten v_f gegenübergestellt (Bild 24).

Die Fließgeschwindigkeiten v_f an der Kante der starren Sohlensicherung wurden in Verlängerung der Achse des mittleren Wehrfeldes bei Flut auf der Binnenseite und bei Ebbe auf der Außenseite gemessen. Ohne auf die dargestellten Abhängigkeiten genauer eingehen zu müssen, soll hier nur festgehalten werden, daß nach den rechnerisch ermittelten und eingezeichneten Ausgleichsgeraden die Geschwindigkeiten über der Befestigungskante je nach Strömungsrichtung und Betriebsform 62 bis 66 % derjenigen im Sperrwerksfeld betragen, wenn man von den in Tabelle 3 genannten Höchstgeschwindigkeiten ausgeht.

Stellt man diesem Ergebnis aus der Natur die im Tidemodell der Eider und im Hauptmodell des Sperrwerks gemessene Abnahme der Fließgeschwindigkeiten über der Befestigungsstrecke gegenüber, so darf man sagen, daß dieser qualitative Geschwindigkeitsverlauf in Längsrichtung in den beiden Modellen gut simuliert wurde. Anders sieht es dagegen bei den absoluten Geschwindigkeitsgrößen in den Sperrwerksfeldern aus, die für die Ermittlung der Bemessungsgeschwindigkeiten relevant sind.

2.4.3 Bemessungsgeschwindigkeiten

Der Planung der Sohlensicherung Ende der 60er Jahre lagen die im Hauptmodell ermittelten Fließgeschwindigkeiten bei Ebbe nach 2-stündiger Rückhaltezeit mit einer 10 %igen Erhöhung zugrunde, wie sie auf Bild 22 gezeigt werden. Sowohl nach den Untersuchungen im Tidemodell (siehe Bild 21), als auch im Hauptmodell (siehe Bild 20) waren mit dieser Spülströmung die größtmöglichen Strömungsgeschwindigkeiten verbunden. Im Sperrwerk mußten dabei mit Geschwindigkeiten von ca. 5,50 m/s gerechnet werden. Der Spülströmung war zwingend der (n = 5)-Betriebsfall zugeordnet, bei dem alle 5 Sperrwerksöffnungen durchströmt werden. Bei Ausfall eines Verschlusses, das heißt beim (n-1)-Betrieb mußte der Rückhalte- bzw. Spülbetrieb aufgegeben werden.

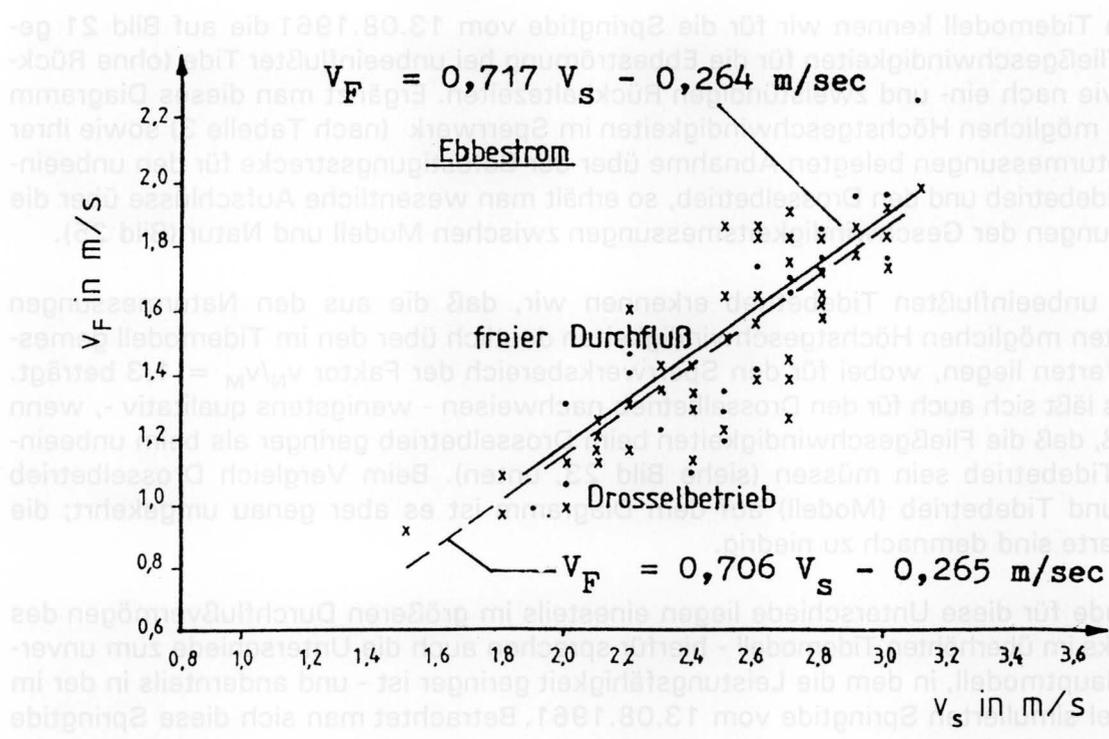
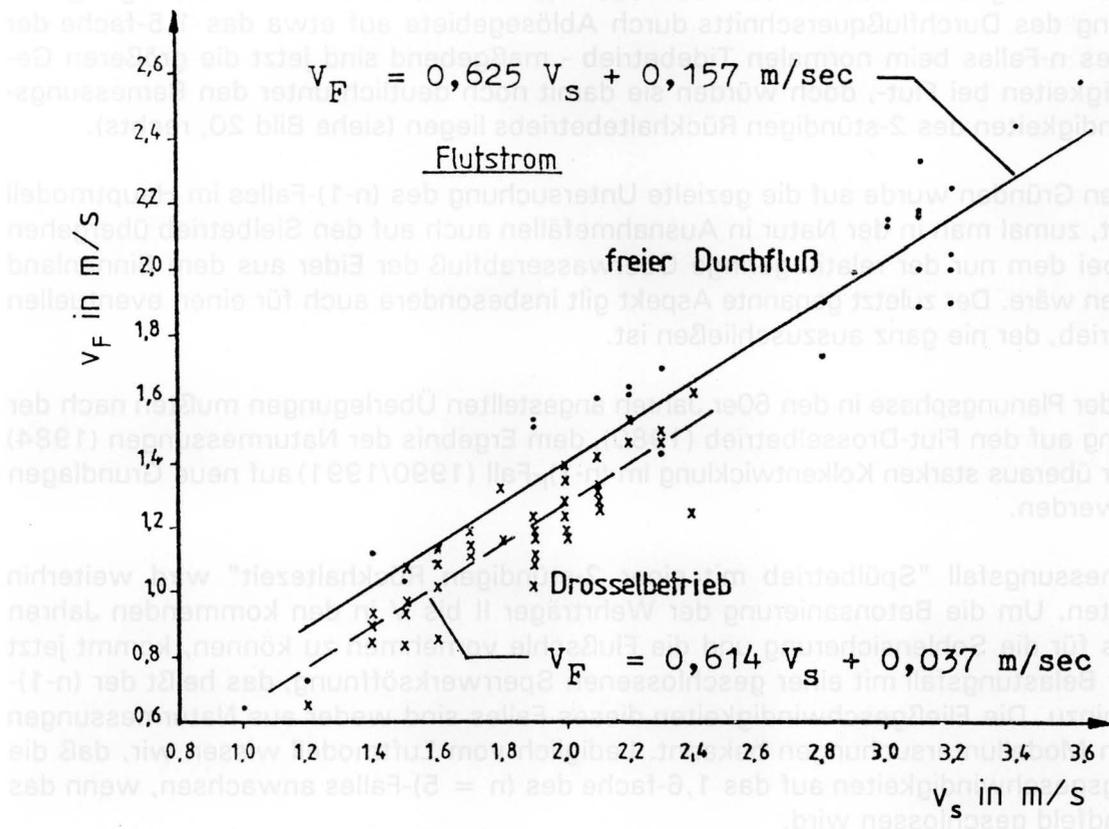


Bild 24 Fließgeschwindigkeiten v_F an der Kante der starren Sohlensicherung in Abhängigkeit von den Geschwindigkeiten v_S im Sperrwerk nach Naturmessungen

Nach dem Ergebnis der früheren Modellversuche konnte jedoch der unbeeinflusste Tidebetrieb im (n-1)-Fall zugelassen werden. In diesem Fall erhöhen sich zwar die maximalen Fließgeschwindigkeiten rechnerisch auf das 1,25-fache, unter Berücksichtigung der Verengung des Durchflußquerschnitts durch Ablösegebiete auf etwa das 1,5-fache der Werte des n-Falles beim normalen Tidebetrieb - maßgebend sind jetzt die größeren Geschwindigkeiten bei Flut-, doch würden sie damit noch deutlich unter den Bemessungsgeschwindigkeiten des 2-stündigen Rückhaltebetriebs liegen (siehe Bild 20, rechts).

Aus diesen Gründen wurde auf die gezielte Untersuchung des (n-1)-Falles im Hauptmodell verzichtet, zumal man in der Natur in Ausnahmefällen auch auf den Sielbetrieb übergehen könne, bei dem nur der relativ geringe Oberwasserabfluß der Eider aus dem Binnenland abzuführen wäre. Der zuletzt genannte Aspekt gilt insbesondere auch für einen eventuellen (n-2)-Betrieb, der nie ganz auszuschließen ist.

Diese in der Planungsphase in den 60er Jahren angestellten Überlegungen mußten nach der Umstellung auf den Flut-Drosselbetrieb (1980), dem Ergebnis der Naturmessungen (1984) sowie der überaus starken Kolkentwicklung im (n-1)-Fall (1990/1991) auf neue Grundlagen gestellt werden.

Der Bemessungsfall "Spülbetrieb mit einer 2-stündigen Rückhaltezeit" wird weiterhin beibehalten. Um die Betonsanierung der Wehrträger II bis V in den kommenden Jahren gefahrlos für die Sohlensicherung und die Flußsohle vornehmen zu können, kommt jetzt noch der Belastungsfall mit einer geschlossenen Sperrwerksöffnung, das heißt der (n-1)-Betrieb hinzu. Die Fließgeschwindigkeiten dieses Falles sind weder aus Naturmessungen noch von Modelluntersuchungen bekannt. Lediglich vom Luftmodell wissen wir, daß die Strömungsgeschwindigkeiten auf das 1,6-fache des (n = 5)-Falles anwachsen, wenn das linke Randfeld geschlossen wird.

Aus dem Tidemodell kennen wir für die Springtide vom 13.08.1961 die auf Bild 21 gezeigten Fließgeschwindigkeiten für die Ebbeströmung bei unbeeinflusster Tide (ohne Rückhalt) sowie nach ein- und zweistündigen Rückhaltezeiten. Ergänzt man dieses Diagramm durch die möglichen Höchstgeschwindigkeiten im Sperrwerk (nach Tabelle 3) sowie ihrer durch Naturmessungen belegten Abnahme über der Befestigungsstrecke für den unbeeinflussten Tidebetrieb und den Drosselbetrieb, so erhält man wesentliche Aufschlüsse über die Abweichungen der Geschwindigkeitsmessungen zwischen Modell und Natur (Bild 25).

Für den unbeeinflussten Tidebetrieb erkennen wir, daß die aus den Naturmessungen abgeleiteten möglichen Höchstgeschwindigkeiten deutlich über den im Tidemodell gemessenen Werten liegen, wobei für den Sperrwerksbereich der Faktor $v_N/v_M = 1,3$ beträgt. Ähnliches läßt sich auch für den Drosselbetrieb nachweisen - wenigstens qualitativ -, wenn man weiß, daß die Fließgeschwindigkeiten beim Drosselbetrieb geringer als beim unbeeinflussten Tidebetrieb sein müssen (siehe Bild 23, unten). Beim Vergleich Drosselbetrieb (Natur) und Tidebetrieb (Modell) auf dem Diagramm ist es aber genau umgekehrt; die Modellwerte sind demnach zu niedrig.

Die Gründe für diese Unterschiede liegen einesteils im größeren Durchflußvermögen des Sperrwerks im überhöhten Tidemodell - hierfür sprechen auch die Unterschiede zum unverzerrten Hauptmodell, in dem die Leistungsfähigkeit geringer ist - und andernteils in der im Tidemodell simulierten Springtide vom 13.08.1961. Betrachtet man sich diese Springtide für den Zustand mit Sperrwerk genauer, sie wird von Harten/Knieß, 1976 gezeigt, so findet man bei ihr eine Tidesteiggeschwindigkeit von 1,06 cm/min und eine Tidefallgeschwindigkeit von 0,87 cm/min. In der Natur sind mehrfach ungünstigere Tiden mit größeren Tidesteig- und Tidefallgeschwindigkeiten aufgetreten, die zu den größeren Fließge-

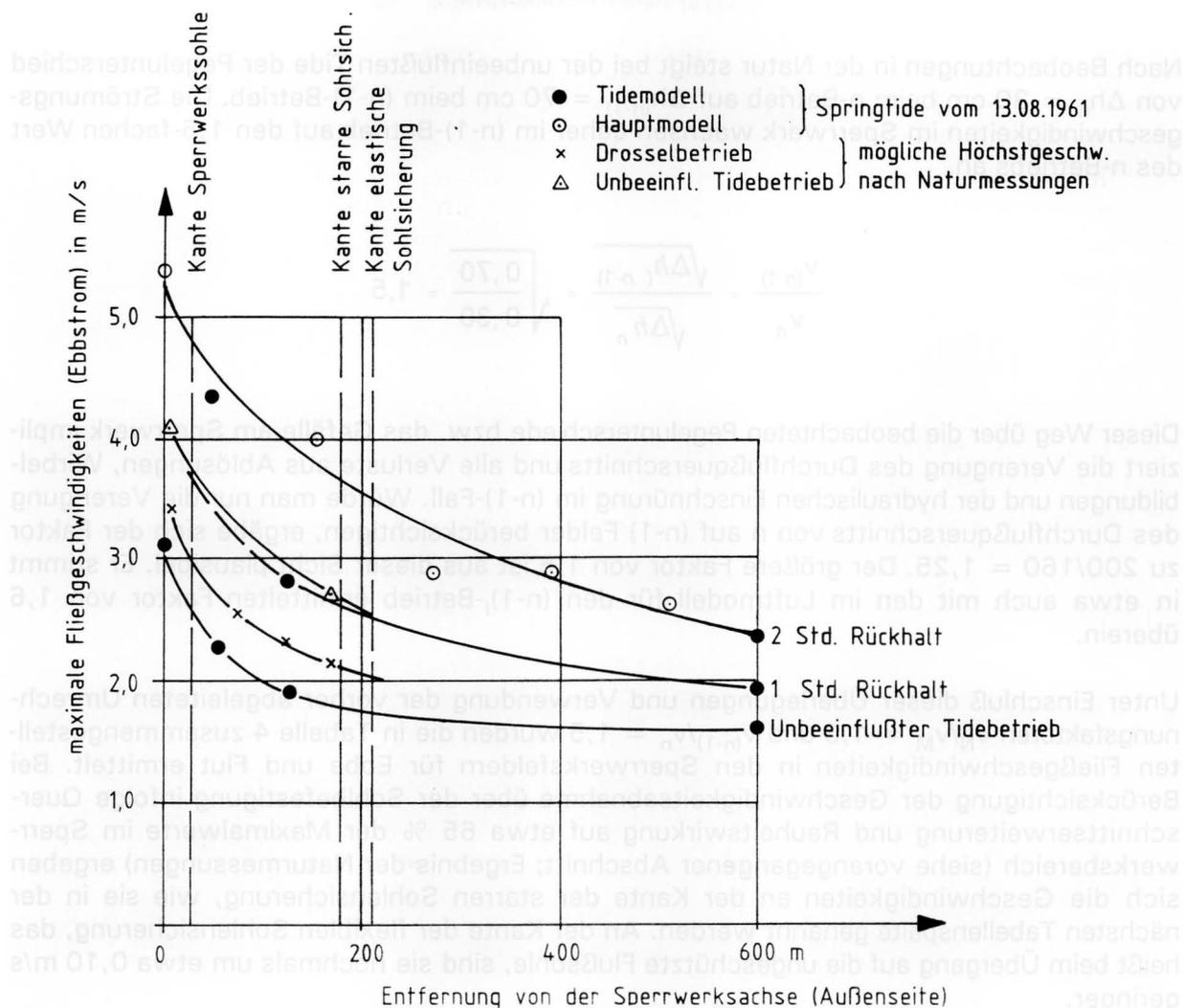


Bild 25 Fließgeschwindigkeiten auf der Außenseite des Sperrwerks bei Ebbe für verschiedene Betriebsfälle

schwindigkeiten im Bereich des Sperrwerks geführt haben. Neben dieser Veränderung der Tidedynamik, bei der auch meteorologische Einflüsse eine Rolle spielen, sind insbesondere auch morphologische Umwandlungen (Modellmorphologie 1964 - Naturmorphologie 1979/1983) und meßtechnische Schwierigkeiten zu nennen, worauf schon Harten/Knieß, 1976 hinweisen.

Diese Beobachtung wird auch in Annäherung für die im Tidemodell ermittelten Fließgeschwindigkeiten beim Rückhaltebetrieb gelten müssen; die hinreichend gute Übereinstimmung zwischen dem Tidemodell und dem Hauptmodell für das die Werte um 10 % erhöht wurden, darf nicht darüber hinweg täuschen.

Da für den Spülbetrieb keine Daten aus Naturmessungen vorliegen, muß bei der Ermittlung der Bemessungsgeschwindigkeit für die Sohlensicherung auf die Ergebnisse der Modellversuche zurückgegriffen werden. Da sich wegen der fehlenden Daten keine andere Möglichkeit anbietet, werden die Fließgeschwindigkeiten im Sperrwerk aus dem Modellversuch mit dem Faktor 1,3 multipliziert, wie er vorher für den unbeeinflussten Tidebetrieb angegeben worden ist.

Vor einer ähnlichen Schwierigkeit stehen wir, wenn wir den (n-1)-Fall betrachten, der seinerzeit nicht im Modell untersucht worden ist. Für diesen Fall müssen wir ebenfalls auf einen Umrechnungsfaktor zurückgreifen, der wie folgt ermittelt werden kann.

Nach Beobachtungen in der Natur steigt bei der unbeeinflussten Tide der Pegelunterschied von $\Delta h_n = 30$ cm beim n-Betrieb auf $\Delta h_{(n-1)} = 70$ cm beim (n-1)-Betrieb. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Sperrwerk wachsen daher im (n-1)-Betrieb auf den 1,5-fachen Wert des n-Betriebs an.

$$\frac{v_{(n-1)}}{v_n} = \frac{\sqrt{\Delta h_{(n-1)}}}{\sqrt{\Delta h_n}} = \sqrt{\frac{0,70}{0,30}} = 1,5$$

Dieser Weg über die beobachteten Pegelunterschiede bzw. das Gefälle am Sperrwerk impliziert die Verengung des Durchflußquerschnitts und alle Verluste aus Ablösungen, Wirbelbildungen und der hydraulischen Einschnürung im (n-1)-Fall. Würde man nur die Verengung des Durchflußquerschnitts von n auf (n-1) Felder berücksichtigen, ergäbe sich der Faktor zu $200/160 = 1,25$. Der größere Faktor von 1,5 ist aus dieser Sicht plausibel. Er stimmt in etwa auch mit den im Luftmodell für den (n-1)-Betrieb ermittelten Faktor von 1,6 überein.

Unter Einschluß dieser Überlegungen und Verwendung der vorher abgeleiteten Umrechnungsfaktoren $v_N/v_M = 1,3$ und $v_{(n-1)}/v_n = 1,5$ wurden die in Tabelle 4 zusammengestellten Fließgeschwindigkeiten in den Sperrwerksfeldern für Ebbe und Flut ermittelt. Bei Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabnahme über der Sohlbefestigung infolge Querschnittserweiterung und Rauheitswirkung auf etwa 65 % der Maximalwerte im Sperrwerksbereich (siehe vorangegangener Abschnitt; Ergebnis der Naturmessungen) ergeben sich die Geschwindigkeiten an der Kante der starren Sohlensicherung, wie sie in der nächsten Tabellenspalte genannt werden. An der Kante der flexiblen Sohlensicherung, das heißt beim Übergang auf die ungeschützte Flußsohle, sind sie nochmals um etwa 0,10 m/s geringer.

Beginnen wir mit dem **Ebbstrom**, so können wir auf der Außenseite des Sperrwerks beim 2-stündigen Rückhaltebetrieb (Spülbetrieb) die größten Fließgeschwindigkeiten erwarten, die im Sperrwerksbereich $v_{sp} = 7,0$ m/s und an der Kante der starren Sohlensicherung $v_k = 4,7$ m/s betragen. Der zuletzt genannte Wert wurde auch von Vierfuß, 1994 angegeben.

Wenn auch die Fließgeschwindigkeiten für den (n-1)-Betrieb beim freien Durchfluß etwas geringer sind, dürfte dieser Fall für die Belastung der Sohlensicherung und Kolkbildung ebenso kritisch wie die 2-stündige Rückhaltung sein, da die beträchtliche Wirkung der freien Scherschichten, der Wirbel und der örtlichen Geschwindigkeitskonzentrationen hinzukommt.

Beim **Flutstrom** dagegen schafft der (n-1)-Fall beim freien Durchfluß eindeutig die ungünstigsten Bedingungen. Möglicherweise ist die für den Sperrwerksbereich ermittelte Fließgeschwindigkeit geringfügig zu groß (sie wurde aus der möglichen Höchstgeschwindigkeit im n-Fall ermittelt), jedoch werden die Geschwindigkeiten auf keinen Fall geringer sein, als die maßgebenden Bemessungsgeschwindigkeiten auf der Außenseite beim 2-stündigen Rückhaltebetrieb.

Die Sohlensicherung auf der Binnenseite des Sperrwerks wird demnach unter bestimmten Betriebsbedingungen ebenso stark belastet, wie auf der Außenseite.

Betriebsfall		v in m/s		Bemerkung
		Sperrwerk	Kante starre Sohlensicherung	
Flut	Freier Durchfluß	5,0	3,3	Mögl. Höchstgeschwindigkeiten
	Drosselbetrieb	3,3	2,1	
	(n-1)-Betrieb; freier Durchfluß	7,5	4,9	gerechnete Werte
	(n-1)-Betrieb; Drosselung	5,0	3,3	
Ebbe	Freier Durchfluß	4,1	2,7	Mögl. Höchstgeschwindigk.
	Freier Durchfluß	3,1	1,8	Modellmessungen
	Drosselbetrieb	3,4	2,1	Mögl. Höchstgeschwindigk.
	(n-1)-Betrieb; freier Durchfluß	6,1	4,0	gerechnete Werte
	(n-1)-Betrieb; Drosselung	5,1	3,3	
	2-stündiger Rückhaltebetrieb	5,4	3,6	Modellmessungen
	2-stündiger Rückhaltebetrieb	7,0	4,7	gerechnete Werte

Tabelle 4: Bemessungsgeschwindigkeiten für das Eider-Sperrwerk

3 Kolkbildung

3.1 Einführung

Die im ersten Hauptabschnitt dieser Arbeit beschriebenen Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk werden in ihrem Grundmuster von der Tidedynamik und den meteorologischen und hydrologischen Bedingungen geprägt. Im Nahbereich des Bauwerks kommen jedoch die wesentlichen, teils dominierenden Einflüsse der Brandungsgeometrie der Strömung hinzu, wie sie durch die Sohltopographie im An- und Abströmbereich, durch die geometrischen Ränder des Bauwerks einschließlich der Sohlensicherung und die verschiedenen Betriebsfälle bestimmt wird.

In der Abhängigkeit der Kolkbildung von den Strömungsmechanismen spielen demnach die geometrischen, strömungsbegrenzenden Ränder des Bauwerks, wie Form und Länge der

Trennmolen und Leitdämme, Länge und Höhenlage der Befestigungsstrecken sowie im (n-1)-Fall die Lage der verschlossenen Wehröffnung, eine beachtliche Rolle. Je nach Lage und Form dieser Einzelbauwerke können durch sie Ablösevorgänge und Scherflächen, Wirbel und Sekundärströmungen verursacht werden, die eine Verstärkung des Auskolkungsprozesses bewirken. Es steht damit außer Frage, daß der strömungstechnischen Optimierung der Berandungsbauwerke im Hinblick auf die Kolkbildung eine große Bedeutung zukommt. Aus verständlichen Gründen ist eine strömungstechnisch günstige Gestaltung dieser exponierten Bauwerke nur über den Weg und mit den Mitteln eines Modellversuchs möglich, wenn man von den seltenen Fällen absieht, in denen in der Natur durch die schrittweise Anpassung eines Bauwerkes an die Belange der Strömung die optimale Lösung der Großausführung gesucht werden kann (z.B. schrittweise Verlängerung von Bühnen).

In diesem Sinn wurden in den 60er Jahren in einem Hauptmodell des Sperrwerks im Modellmaßstab 1 : 66 2/3 Kolkversuche mit beweglicher Sohle durchgeführt (Dietz, 1970). Diese Versuche brachten wertvolle Erkenntnisse über die Lage, Form und Tiefe der dreidimensionalen Kolke auf der Binnen- und Außenseite des Sperrwerks in Abhängigkeit von den herrschenden Fließgeschwindigkeiten, der Gestaltung der südlichen Leitdämme und der Länge der Sohlbefestigung. Diese Versuchsergebnisse zu den genannten Zusammenhängen können bei der Analyse und Interpretation der Kolkvorgänge in der Natur gute Hilfestellung leisten und zum Verständnis dieser Vorgänge beitragen. Die wesentlichen Aussagen dieser Kolkversuche werden daher nochmals kurz zusammengefaßt und der weiteren Behandlung der Kolkbildung am Sperrwerk vorangestellt.

3.2 Kolkversuche im Hauptmodell

Unter der Wirkung der beiden Ablösezonen vor Kopf der nördlichen Trennmole und des südlichen Leitdammes sowie der freien Scherschichten, welche die Ablösegebiete von der Hauptströmung abgrenzen (siehe Abschnitt 2.1) bilden sich auf der Außenseite des Sperrwerks beim Ebbstrom zwei dreidimensionale Kolke aus. Diese dreidimensionale Kolk-situation ist nach der Tiefe und Ausdehnung der Kolke umso stärker ausgeprägt, je größer der Durchfluß durch das Sperrwerk ist und demnach bei der Spülströmung nach 2-stündiger Rückhaltezeit am ungünstigsten (Bild 26).

Typisch für die dreidimensionalen Kolke ist die Steilheit der oberstromigen Kolkböschung, die zum Abbruch der Befestigungskante führt.

Die Kolkbildung auf der Innenseite des Sperrwerks beim Flutstrom des normalen Tidebetriebs zeichnet sich mit einer über die gesamte Sperrwerksbreite verlaufenden flachen Kolkmulde angenähert als sogenannte zweidimensionale Kolksituation aus, deren verhältnismäßig einheitliche Kolk-tiefen bei weitem nicht an die der dreidimensionalen Kolke auf der Außenseite des Sperrwerks beim Spülstrom heranreichen. Nach den Ergebnissen der Kolkversuche ist die Kolkbildung auch von der Form der südlichen Leitdämme abhängig, von denen im wesentlichen eine kürzere und eine längere Form eingehender untersucht worden sind (Bild 27).

Die Strömungsaufnahmen bei beiden Varianten ließen erkennen, daß sich der kurze Leitdamm im Anströmbereich durch eine gute Umlenkung und gleichmäßige Verteilung der Stromlinien auszeichnet, während bei dem längeren Leitdamm im Anströmbereich Ablösewirbel und wandgebundene Scherschichten auftreten. Umgekehrt ist aber nicht zu übersehen, daß im Abströmbereich der längere Leitdamm durch eine bessere Führung des abströmenden Wassers Vorteile hat, wogegen der kürzere Leitdamm die Bildung einer großräumigen Ablösewalze begünstigt.

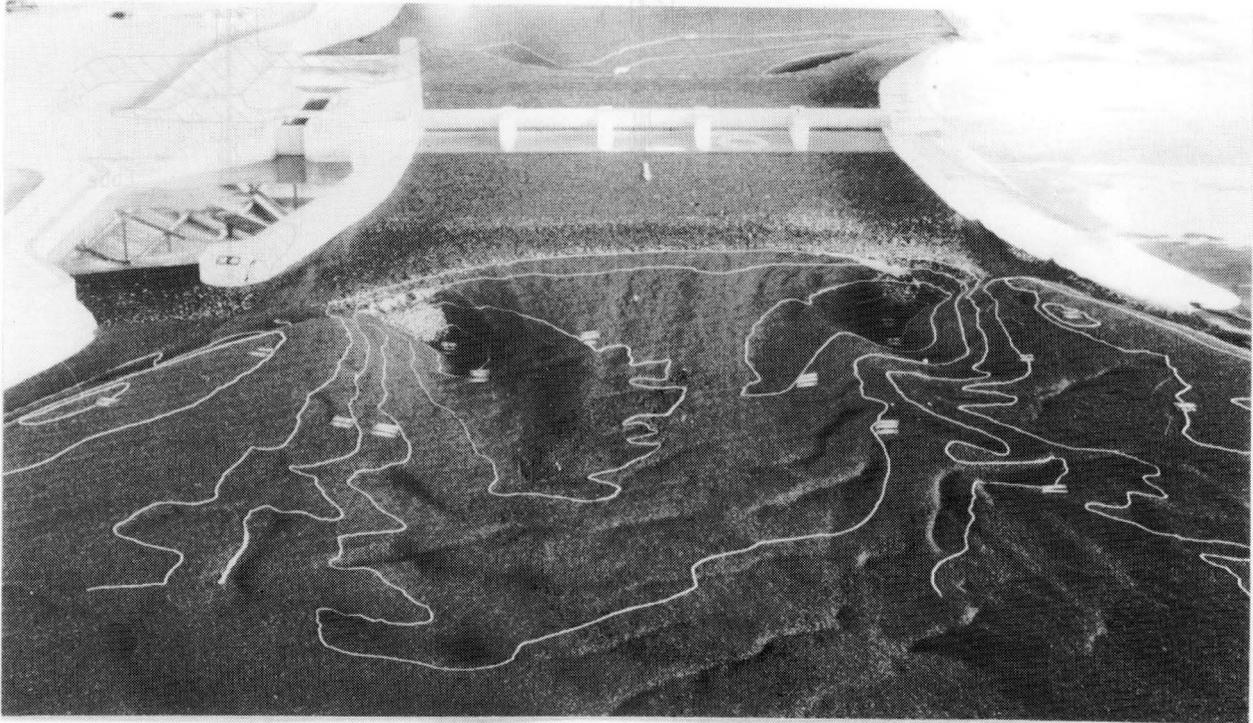


Bild 26 Dreidimensionale Kolksituation auf der Außenseite des Sperrwerks nach vorangegangener Spülströmung (Hauptmodell)

Die im Tideablauf wechselnden Strömungsrichtungen bewirken, daß beide südlichen Leitdämme, wie auch die nördlichen Trennmolen, in ständig wechselnder Folge sowohl auf der Anström- als auch auf der Abströmseite liegen, so daß die bei einer bestimmten Strömungsrichtung (z.B. Flut) durch eine spezielle Formgebung erzielten hydraulischen Vorteile bei der entgegengesetzten Richtung (z.B. Ebbe) wieder verlorengehen.

In analoger Weise reagieren die Kolke auf die Gestaltung der südlichen Leitdämme. So überrascht es nicht, daß die Kolke auf der jeweiligen Abströmseite (bei Flut binnen; bei Ebbe außen) bei den kurzen Leitdämmen deutlich größer sind, als bei den langen Formen, wenn man einmal von den Verhältnissen bei relativ kleinen Fließgeschwindigkeiten absieht.

Der lange südliche Leitdamm ging mit seinen Abmessungen deutlich über den Umfassungsdamm der Bauinsel hinaus (siehe Bild 2). Aus diesem Grund wurde zwischen den beiden relevanten Leitdammtypen ein Kompromiß gewählt, bei dem die kurze, innerhalb der Bauinsel zu erstellende Form mit einem niedrig vorgezogenen Steinkörper verbunden ist, der so angeordnet ist, daß er die gleiche Lage wie der Molenkopf des langen südlichen Leitdammes einnimmt. In dieses Bauwerk konnten auch Reste des Ringdeiches integriert werden.

Bei den Kolkversuchen im Hauptmodell nahm die Untersuchung der Befestigungsstrecke einen breiten Raum ein. Während die Kolkiefen in einer zweidimensionalen Strömung mit zunehmender Länge der Befestigungsstrecke nur schwach abnehmen (Dietz, 1969 und 1969a), zeigte sich im Hauptmodell, daß die dreidimensionalen Kolkiefen auf der Außenseite des Sperrwerks - dargestellt am Beispiel des Südkolkes - mit der Befestigungslänge erwartungsgemäß stärker abnehmen, als die zweidimensionalen Kolkiefen. Bei der größten untersuchten Befestigungslänge von 300 m beträgt die Abnahme gegenüber einer 150 bis 180 m langen Sicherungsstrecke ca. 33 % (Bild 28).

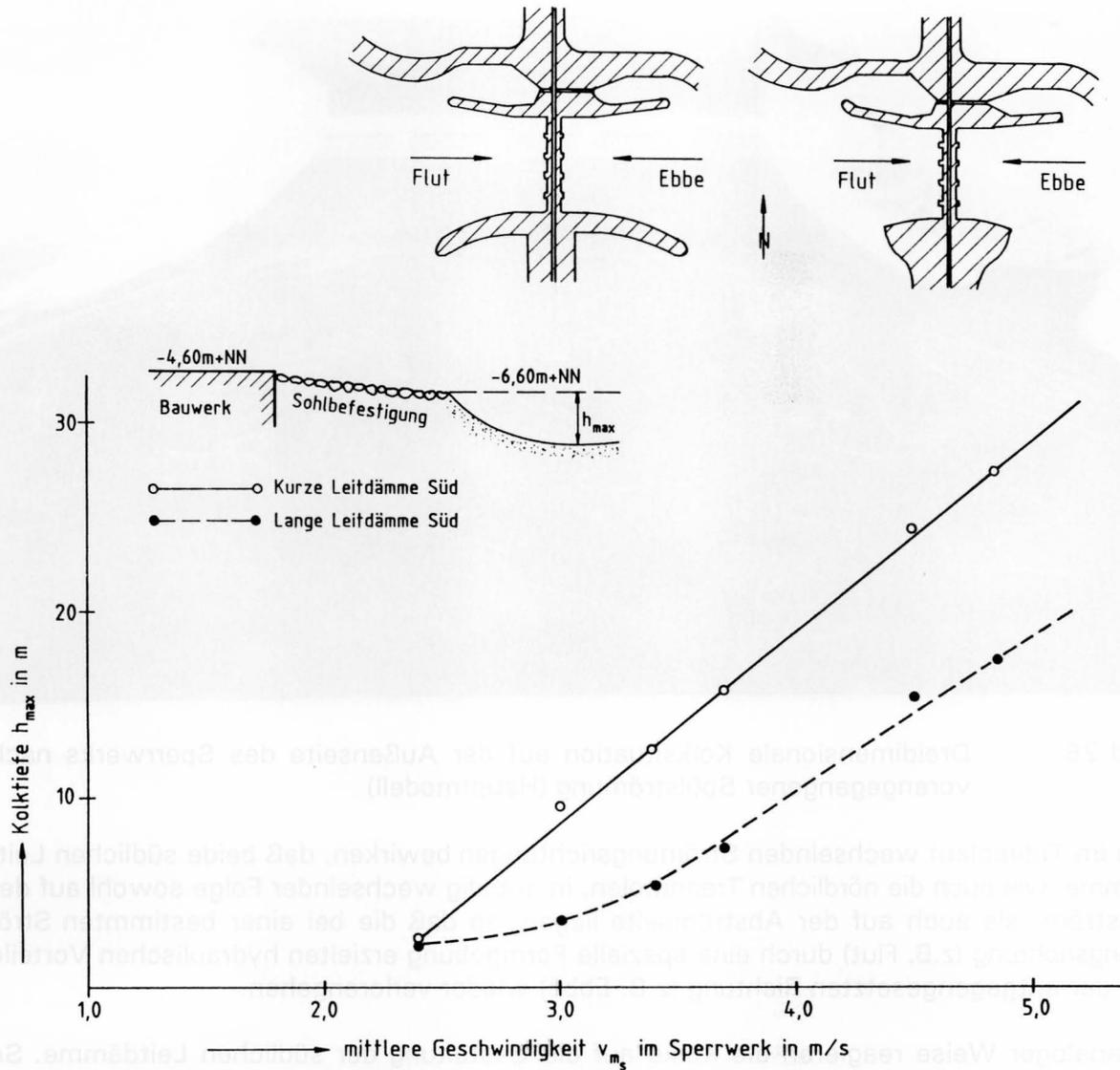


Bild 27 Einfluß der südlichen Leitdämme auf die maximalen Kolk-tiefen auf der jeweiligen Abströmseite des Sperrwerks (Ebbe und Flut)

Trotzdem wurde aus Gründen der Kosten und der Bauausführung in Verbindung mit den Abmessungen der Bauinsel die Gesamtlänge der Befestigungsstrecke einschließlich der flexiblen Übergangsstrecke zu 180 m gewählt. Diese Wahl bot die Möglichkeit, die Sohlbefestigung innerhalb des vorhandenen Ringdeiches im Trockenen einzubauen, was insbesondere für die Ausführung der flexiblen Übergangsstrecke samt ihres Anschlusses und der zugfesten Verankerung an die starre Sohlensicherung von großer Bedeutung war. Immerhin war die Anordnung einer flexiblen Befestigungsstrecke im Übergangsbereich von der festen Sohlensicherung auf die Flußsohle zur damaligen Zeit wasserbauliches Neuland.

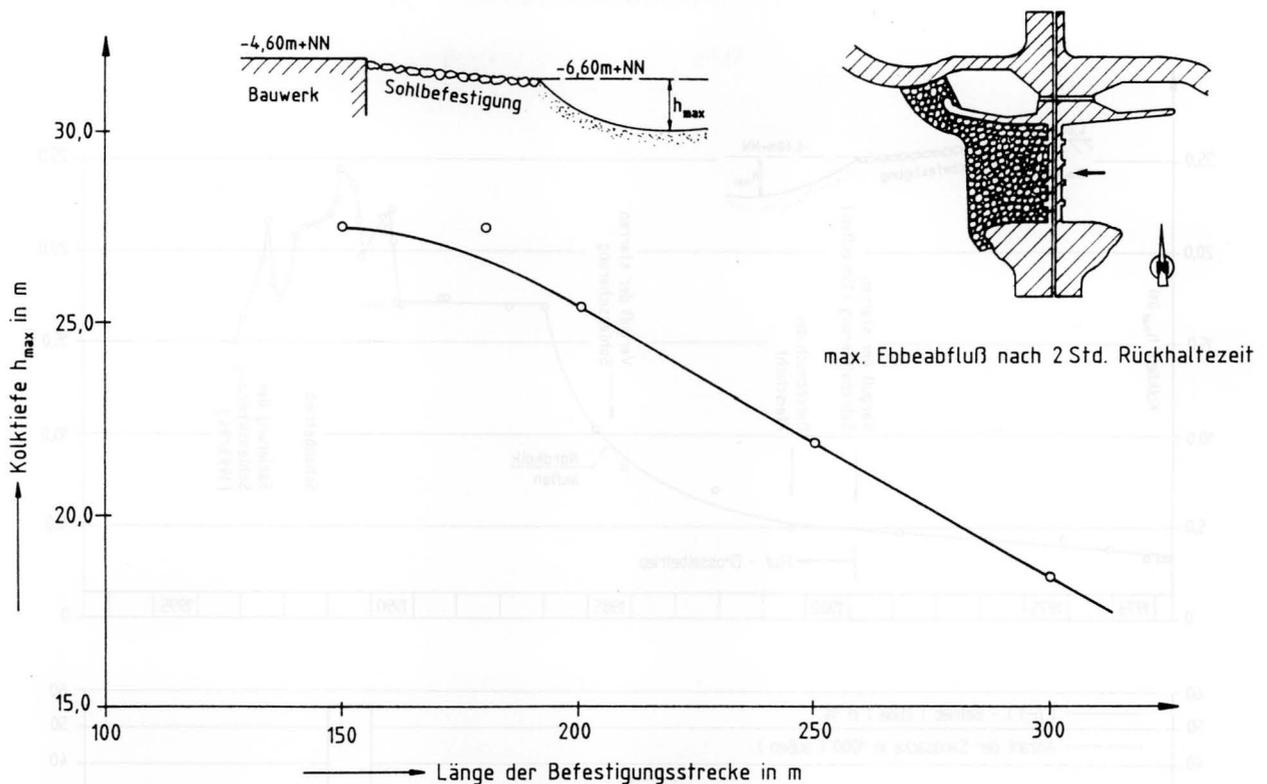


Bild 28 Maximale Kolkiefen auf der Außenseite des Sperrwerks in Abhängigkeit von der Länge der Befestigungsstrecke

3.3 Kolkbildung in der Natur

3.3.1 Überblick

Von Anfang an verlief die Kolkbildung auf beiden Seiten des Sperrwerks nach Tiefe und Zeit sehr uneinheitlich, was am Beispiel der Entwicklung des Nordkolkes auf der Außenseite gezeigt werden kann (Bild 29).

So gab es Phasen, in denen die Kolkiefen über 8 Jahre lang nur um knapp 2 m zunahm, was mit der anstehenden Kleischicht zusammenhängt, die den Kolkprozess, als sie einmal freilag, erheblich dämpfte, wenn sie auch keinen anhaltenden Kolkenschutz bieten konnte (Bild 30). Es gab aber auch Abschnitte, in denen unter der starken Strömungsbelastung des (n-1)-Betriebs die Kolkiefen innerhalb weniger Jahre um mehr als 10 m anwuchsen. Es gab aber auch einige Jahre mit einem temporären Beharrungs- oder Gleichgewichtszustand der Kolke, der einerseits durch einen geringen Anteil des (n-1)-Betriebs, andererseits durch einen umfangreichen Einbau von Sandsäcken zum Schutz der Befestigungskante geprägt war. Hinzu kommt, daß zur Ertüchtigung der starren Sohlensicherung in den Jahren 1979 und 1985/86 die Fugen zwischen den einzelnen Steinen der Deckschicht mit Mörtel vergossen worden sind. Dadurch wurde ohne Zweifel die Rauheit der Deckschicht herabgesetzt, was sich nach dem Ergebnis der Modellversuche negativ auf das Auskolkungsgeschehen auswirken mußte (Dietz, 1969a).

Mit der Aufnahme des Flut-Drosselbetriebs im Dezember 1979 wurden die Flutstromgeschwindigkeiten (stark) und die Ebbeabstromgeschwindigkeiten (weniger stark) vermindert; sie sind danach etwa gleich groß (siehe Abschnitt 2.4.2). Dadurch verlagerte sich der Schwerpunkt der Auskolkungsvorgänge von der Binnen- auf die Außenseite des Sperrwerks. Ab 1986 sind die tieferen Kolke auf der Außenseite zu finden (Bild 31).

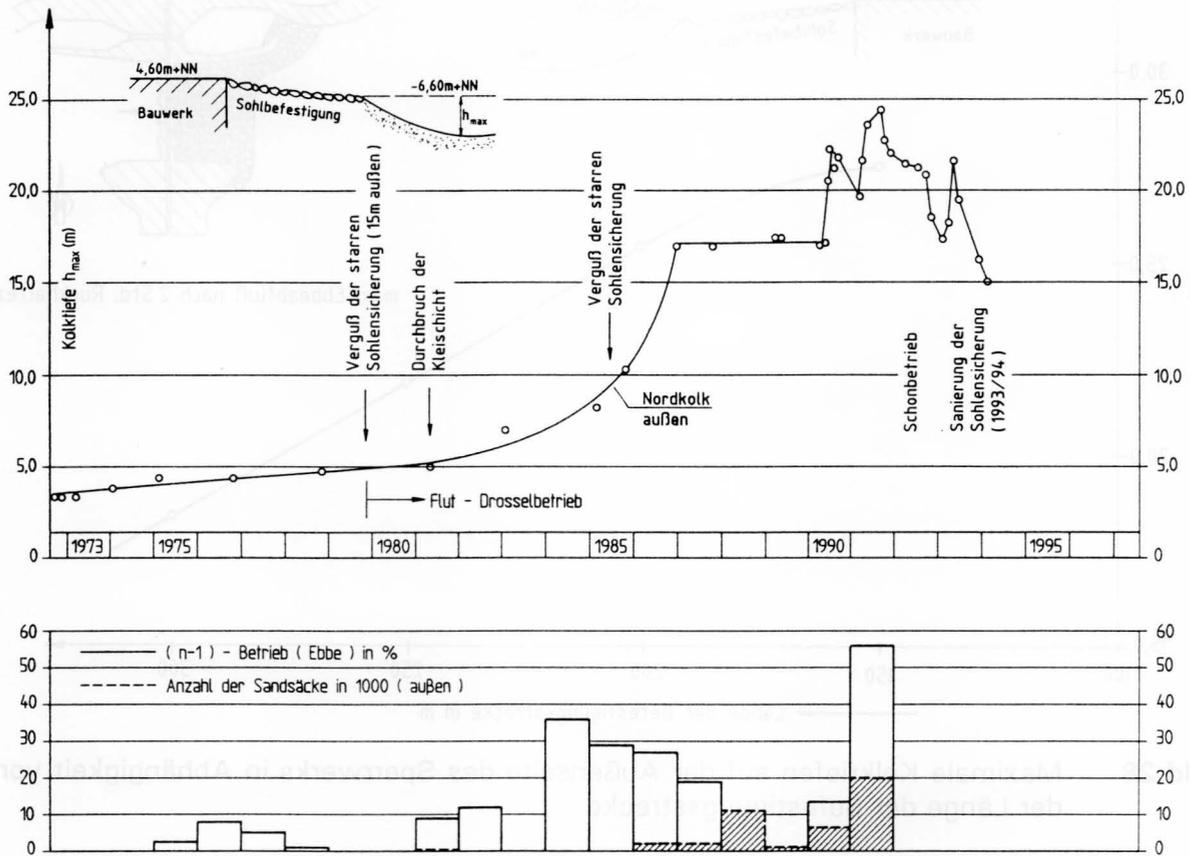


Bild 29 Maximale Kolkstiefen, (n-1)-Betrieb bei Ebbe und Sandsackeinbau auf der Außenseite des Sperrwerks

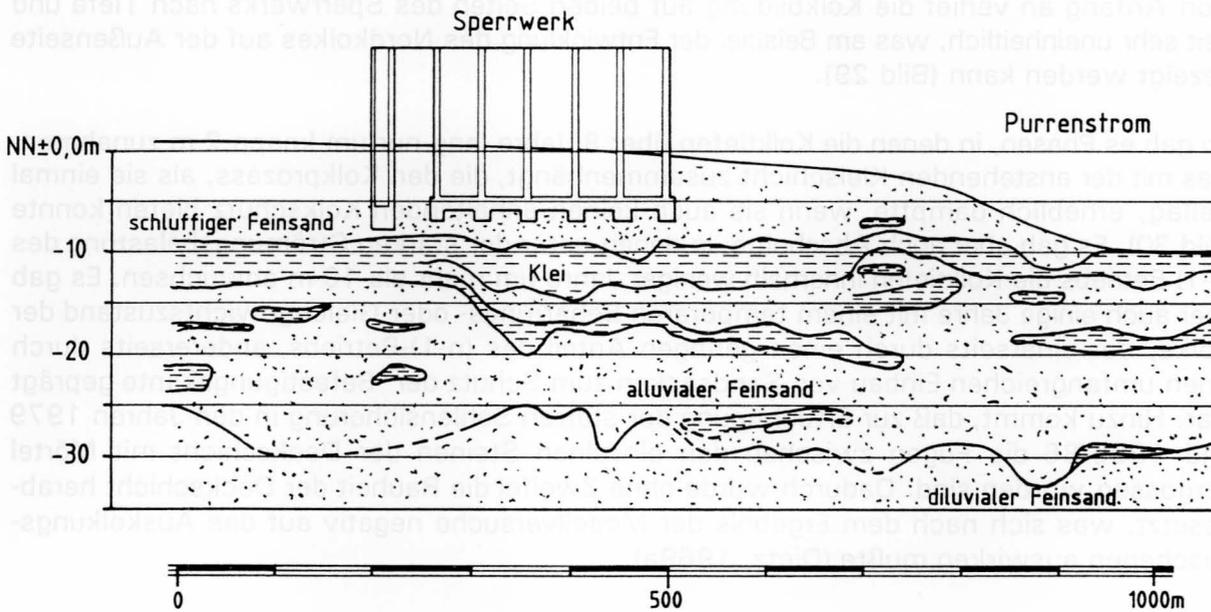


Bild 30 Geologischer Längsschnitt

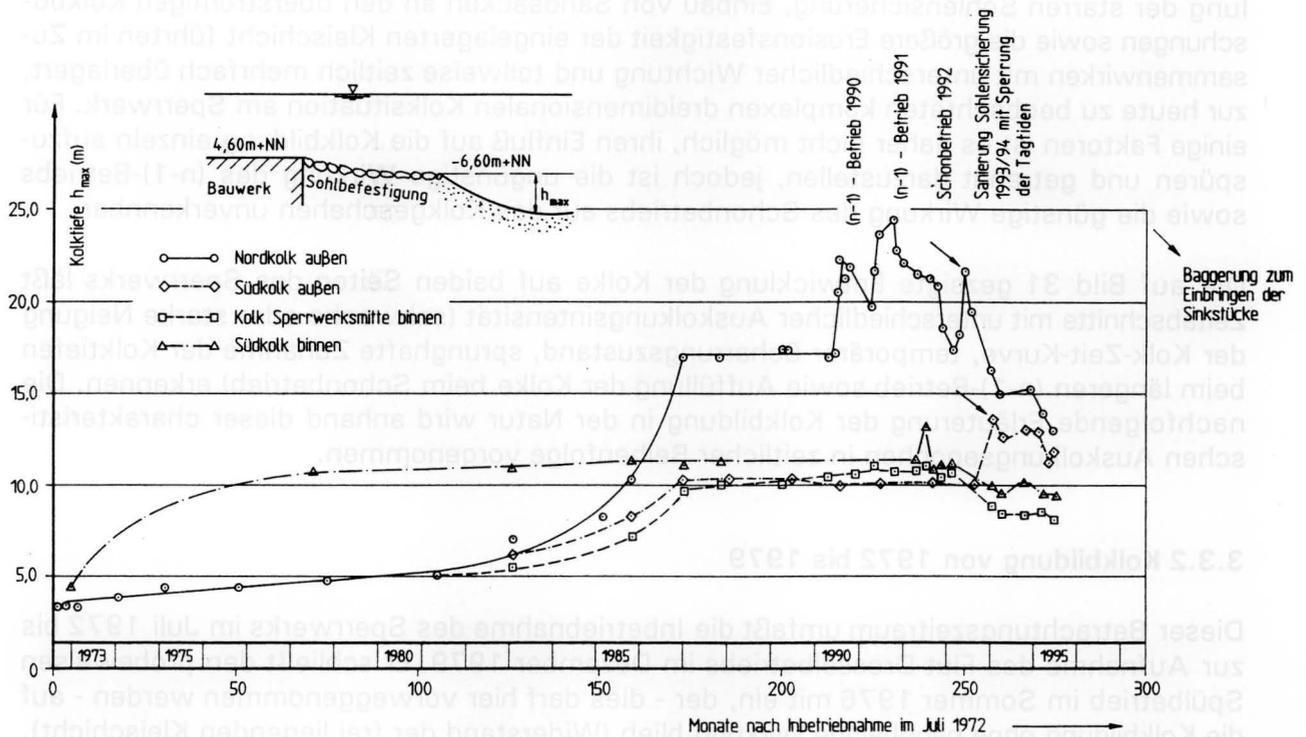


Bild 31 Entwicklung der Kolke auf der Binnen- und Außenseite des Sperrwerks

Infolge des fast 25 m tiefen Kolkes auf der Außenseite Nord und der damit verbundenen, für die Sicherheit der starren Sohlensicherung und der nördlichen Trennmole kritischen Abbrüche an der Befestigungskante mußte das Sperrwerk zeitweise in 1991/92 im sogenannten "Schonbetrieb" gefahren werden (Bild 32).

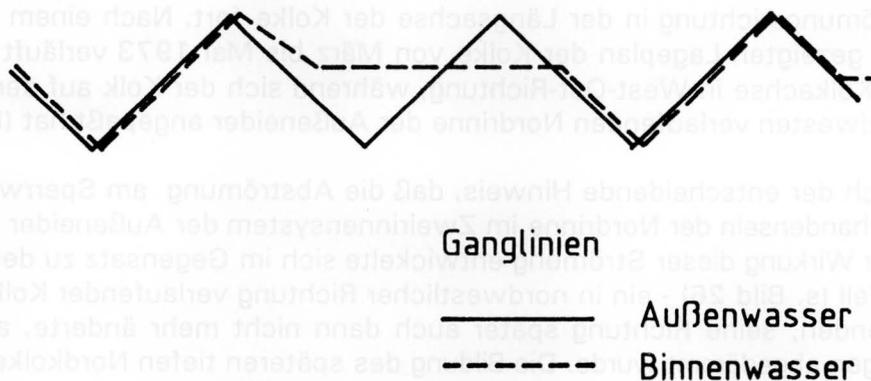


Bild 32 Ganglinien des Schonbetriebs

Dieser Betrieb brachte eine spürbare Entlastung des Auskolkungsgeschehens, mit der eine Kolkauffüllung um ca. 8 m verbunden war. Nach Bohraufschlüssen besteht die Auflandung im Kolk vorwiegend aus feinsandigem bis sandigem Schlack breiiger Konsistenz, so daß sofort nach Aufgabe des Schonbetriebs wieder ein beschleunigter Kolkprozess einsetzte.

All die genannten Einflüsse, wie unterschiedliche Betriebsformen am Sperrwerk, Vermörtelung der starren Sohlensicherung, Einbau von Sandsäcken an den oberstromigen Kolkböschungen sowie die größere Erosionsfestigkeit der eingelagerten Kleischicht führten im Zusammenwirken mit unterschiedlicher Wichtung und teilweise zeitlich mehrfach überlagert, zur heute zu beobachteten komplexen dreidimensionalen Kolsituation am Sperrwerk. Für einige Faktoren ist es daher nicht möglich, ihren Einfluß auf die Kolkbildung einzeln aufzuspüren und getrennt darzustellen, jedoch ist die ungünstige Wirkung des (n-1)-Betriebs sowie die günstige Wirkung des Schonbetriebs auf das Kolkgeschehen unverkennbar.

Die auf Bild 31 gezeigte Entwicklung der Kolke auf beiden Seiten des Sperrwerks läßt Zeitabschnitte mit unterschiedlicher Auskolkungsintensität (schwache oder starke Neigung der Kolk-Zeit-Kurve, temporärer Beharrungszustand, sprunghafte Zunahme der Kolkiefen beim längeren (n-1)-Betrieb sowie Auffüllung der Kolke beim Schonbetrieb) erkennen. Die nachfolgende Erläuterung der Kolkbildung in der Natur wird anhand dieser charakteristischen Auskolkungsepochen in zeitlicher Reihenfolge vorgenommen.

3.3.2 Kolkbildung von 1972 bis 1979

Dieser Betrachtungszeitraum umfaßt die Inbetriebnahme des Sperrwerks im Juli 1972 bis zur Aufnahme des Flut-Drosselbetriebs im Dezember 1979. Er schließt den probeweisen Spülbetrieb im Sommer 1976 mit ein, der - dies darf hier vorweggenommen werden - auf die Kolkbildung ohne nachhaltige Wirkung blieb (Widerstand der frei liegenden Kleischicht). Über die Kolkbildung unmittelbar nach der Inbetriebnahme der Anlage berichten Cordes/Knieß, 1974 (Bild 33).

Demnach wurde sehr schnell nach Aufnahme des Sperrwerksbetriebs zu beiden Seiten der Befestigungsstrecke ein Kolkhorizont von NN - 10 m bis - 11 m erreicht, wobei die etwas tiefere Lage der Kolksohle auf der Binnenseite zu finden war. Wie der Blick auf den geologischen Längsschnitt im Bereich des Sperrwerks (s. Bild 30) zeigt, dürfte damit die anstehende Kleischicht freigelegt worden sein, die der Erosion wesentlich mehr Widerstand bot, als der darüber liegende schluffige Feinsand. Während die Kolksohle im betrachteten Halbjahrszeitraum mit leichten Veränderungen nach oben und unten auf diesem Horizont zu beharren schien, setzte sich die Kolkbildung mit einer Aufweitung des Kolkkessels in die jeweilige Strömungsrichtung in der Längsachse der Kolke fort. Nach einem von Cordes/Knieß, 1974 gezeigten Lageplan der Kolke von März bis Mai 1973 verläuft auf der Binnenseite die Kolkachse in West-Ost-Richtung, während sich der Kolk auf der Außenseite der nach Nordwesten verlaufenden Nordrinne der Außeneider angepaßt hat (Bild 34).

Hier findet sich der entscheidende Hinweis, daß die Abströmung am Sperrwerk bei Ebbe durch das Vorhandensein der Nordrinne im Zweirinnensystem der Außeneider vorbestimmt war. Unter der Wirkung dieser Strömung entwickelte sich im Gegensatz zu den Versuchen im Hauptmodell (s. Bild 26) - ein in nordwestlicher Richtung verlaufender Kolkkessel, der, einmal vorhanden, seine Richtung später auch dann nicht mehr änderte, als 1979 der Nordrinnenbogen abgedämmt wurde. Die Bildung des späteren tiefen Nordkolkes war damit initiiert, der fortan in Wechselwirkung diese Schrägströmung begünstigte, wie die Modellversuche (Hauptmodell und Luftmodell) und die Beobachtungen vor Ort gezeigt haben. Die Anströmung des Sperrwerks bei Ebbe aus dem Purrenstrom hat natürlich zu dieser Entwicklung beigetragen.

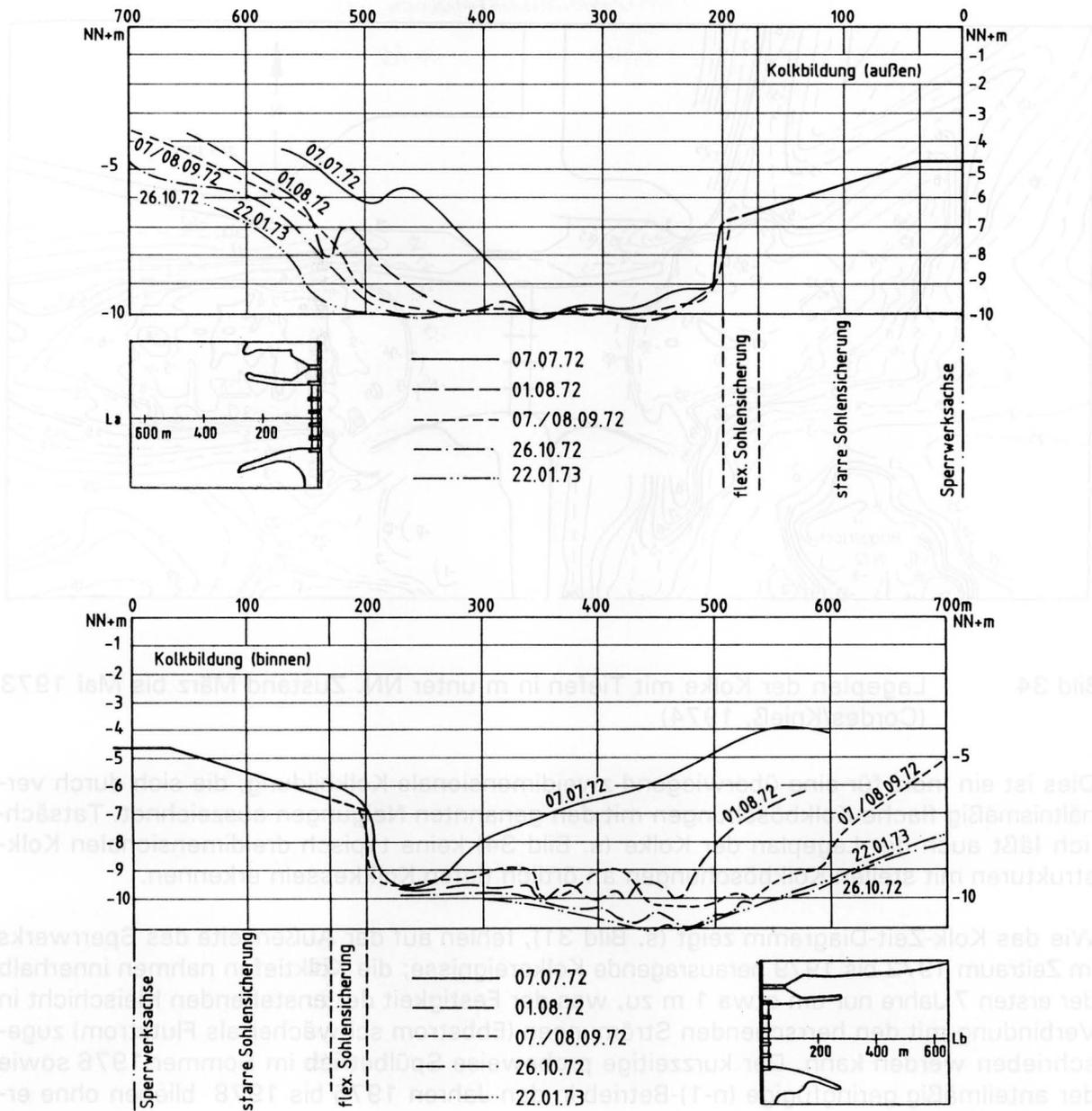


Bild 33 Längsschnitt durch die Kolkachsen auf der Außen- und Binnenseite des Sperrwerks

Die von Cordes/Knieß, 1974 erwartete Verschwenkung des Außenkolkes in die Ost-West-Richtung entsprechend der weiteren morphologischen Veränderungen im Bereich der Großen Vollerwiek-Plate ist nicht eingetreten. Vielmehr vertiefte sich die Nordrinne und verlagerte sich im Nordbogen zunehmend rasch zum Vollerwieker Seedeich hin, was 1979 die Durchdämmung des Nordrinnenbogens erforderlich machte (Wieland, 1992).

Um nochmals auf die Sohlpeilungen von 1972/73 zurückzukommen, so ergaben damalige Kontrollpeilungen im Bereich der Befestigungskanten, daß sich der äußere Rand der flexiblen Sohlensicherung den oberstromigen Kolkböschungen mit Neigungen von 1 : 6 binnen und 1 : 4 außen gut angepaßt hatte.

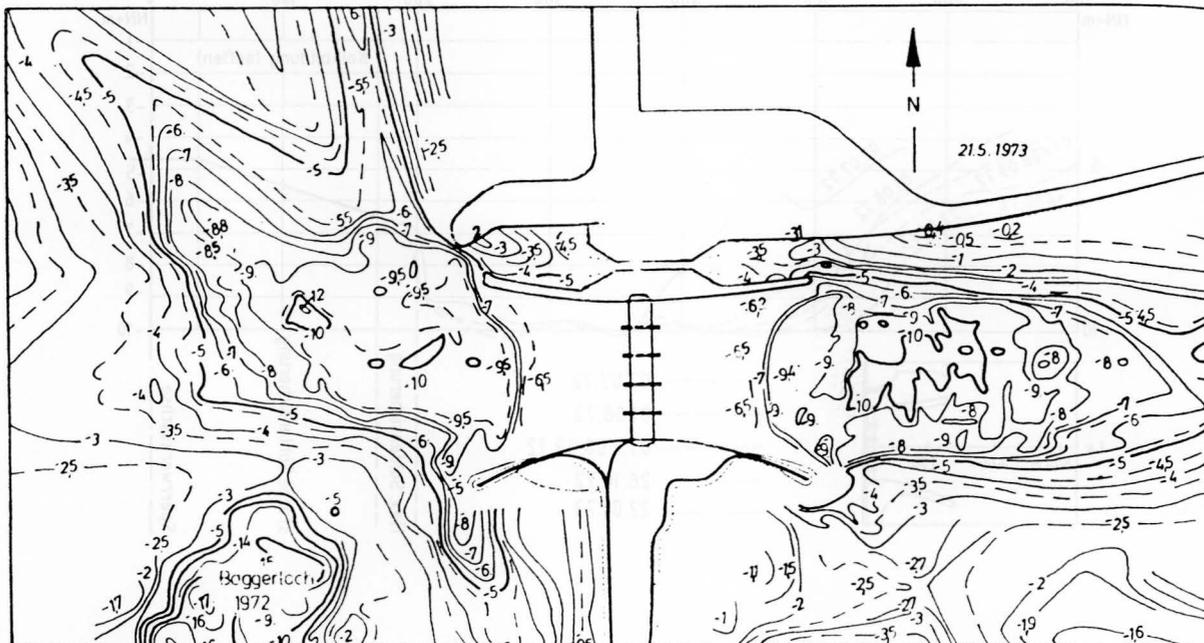


Bild 34 Lageplan der Kolke mit Tiefen in m unter NN. Zustand März bis Mai 1973 (Cordes/Knieß, 1974)

Dies ist ein Indiz für eine überwiegend zweidimensionale Kolkbildung, die sich durch verhältnismäßig flache Kolkböschungen mit den genannten Neigungen auszeichnet. Tatsächlich läßt auch der Lageplan der Kolke (s. Bild 34) keine typisch dreidimensionalen Kolkstrukturen mit steilen Kolkböschungen an örtlich tiefen Kolkkesseln erkennen.

Wie das Kolk-Zeit-Diagramm zeigt (s. Bild 31), fehlen auf der Außenseite des Sperrwerks im Zeitraum 1972 bis 1979 herausragende Kolkereignisse; die Kolk-tiefen nahmen innerhalb der ersten 7 Jahre nur um etwa 1 m zu, was der Festigkeit der anstehenden Kleischicht in Verbindung mit den herrschenden Strömungen (Ebbstrom schwächer als Flutstrom) zugeschrieben werden kann. Der kurzzeitige probeweise Spülbetrieb im Sommer 1976 sowie der anteilmäßig geringfügige (n-1)-Betrieb in den Jahren 1975 bis 1978 blieben ohne erkennbare Wirkung.

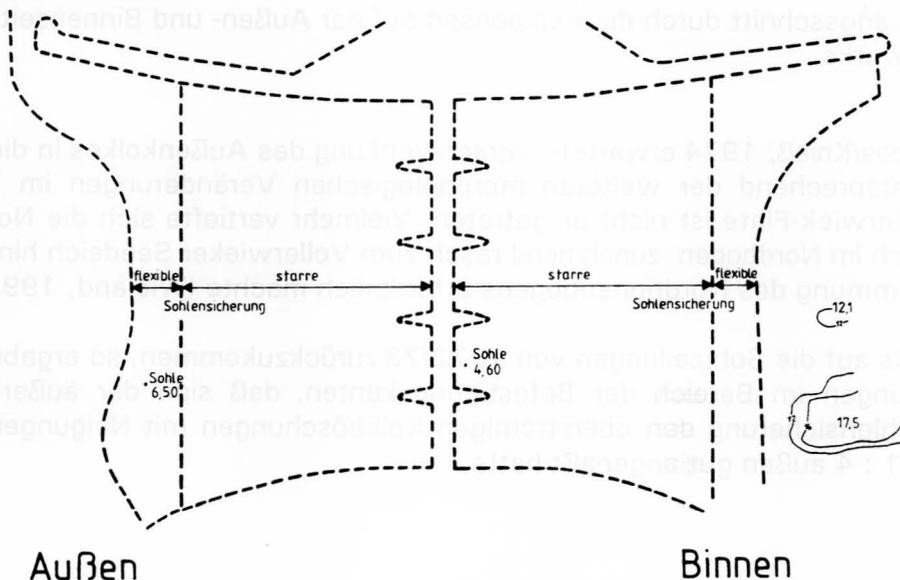


Bild 35 Lageplan der Kolke mit Tiefen in m unter NN. Zustand 1978 (Vierfuß, 1994)

Auf der Binnenseite dagegen vergrößerten sich die maximalen Kolkiefen im genannten Betrachtungszeitraum unter der Wirkung des beim normalen Tidebetriebs stärkeren Flutstromes um ca. 6 m. Und zwar durchbrach der Kolk auf der Südseite lokal die erste Kleischicht und erreichte mit seiner auf NN - 17,5 liegenden Kolksohle vermutlich den obersten Horizont einer zweiten Kleischicht (Bild 35).

3.3.3 Kolkbildung von 1980 bis 1986

Ab Dezember 1979 wurde am Sperrwerk der Flut-Drosselbetrieb (s. Abschnitt 2.3) aufgenommen, so daß fortan geänderte Strömungsverhältnisse vorhanden waren. Während beim normalen Tidebetrieb vorher die Flutstromgeschwindigkeiten überwogen hatten, waren beim Flut-Drosselbetrieb danach die Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten etwa gleich groß. Jedoch ist die jahresmittlere Ebbdauer von 430 Minuten über 35 % länger als die mittlere Flutdauer von 315 Minuten. Hydraulisch gesehen liegt über die Dauer des Drosselvorgangs die Abflußform des unterströmten Verschlusses vor. Die Steuerung wird durch die außenliegende Verschlußreihe vorgenommen. Dadurch werden die Deckwalze und die ihr innewohnenden großen Turbulenzen und hohen Fließgeschwindigkeiten innerhalb der betonierten Sperrwerkssohle zwischen den äußeren Verschlüssen und der starren Sohlensicherung gehalten (Ross, 1980). Der weitere Abfluß über die starre Sohlensicherung erfolgt strömend mit welliger Oberfläche, wobei bis zur Kante der starren Sohlensicherung die früher beschriebene Verzögerung eintritt (s. Abschn. 2.4.2 und Bild 24 oben).

Mit dem Flut-Drosselbetrieb und der damit verbundenen Änderung der hydraulischen Bedingungen mußte sich zwangsläufig das stärkere Kolkgeschehen von der Binnen- auf die Außenseite des Sperrwerks verlagern.

Etwa gleichzeitig (ab 1981) mußte das Sperrwerk zur Durchführung von Unterhaltungs- und Ersatzmaßnahmen verhältnismäßig häufig im (n-1)-Betrieb gefahren werden (s. Bild 29). Anteilmäßig betrug dieser bei Ebbe in den Jahren 1981/82 ca. 10 % und in den Jahren 1984 bis 1986 ca. 30 %. Beim (n-1)-Betrieb erhöhen sich nicht nur die Fließgeschwindigkeiten bis auf den 1,6-fachen Wert des n-Falles, bei dem alle $n = 5$ Felder durchströmt werden, sondern das Strömungsbild erfährt eine grundlegende Wandlung zu einer Strömung mit hoher Turbulenz- und Wirbelproduktion mit Sekundärströmungen und Strömungsinstabilitäten, welche die Kolkbildung erheblich beschleunigen (s. Abschn. 2.2).

Als dritter Einflußfaktor auf die Kolkbildung in dem hier betrachteten Zeitabschnitt muß die Vermörtelung der starren Sohlensicherung genannt werden, die Ende 1979 (15 m außen, 62 m binnen) und 1985/86 (außen und binnen gesamt) vorgenommen worden ist. Die dadurch verminderte Rauheit der Deckschicht führt nach den Ergebnissen der Modellversuche (Dietz, 1969) zu einer größeren Eintiefung der Kolke.

Zwar ist es nicht möglich, die durch die verschiedenen Betriebszustände am Sperrwerk und die Vermörtelung der Sohlensicherung bedingten Einflüsse auf die Kolkbildung explizit herauszuarbeiten, dies gilt insbesondere für die Vermörtelung, jedoch zeigt sich in der zeitlichen Entwicklung der maximalen Kolkiefen schon, daß mit dem ab 1981 verstärkt vorgenommenen (n-1)-Betrieb die maximalen Tiefen des Nordkolkes auf der Außenseite beschleunigt anwachsen und auf der Binnenseite unter der Wirkung der unterströmten Verschlüsse bei der Flutdrosselung eine Vergleichmäßigung der Kolke einsetzte, in dem sich der Kolk auf der Südseite nicht weiter eintiefte und die weitere Kolkbildung in der Mitte und auf der Nordseite erfolgte (s. Bild 31).

Die Sohlpeilung vom 10./19.01.1983 (Bild 36) zeigt schon diese Entwicklung an. Auf der Außenseite entwickelt sich mit Tiefen von NN - 12,0 m die spätere Zwei-Kolk-Situation

(Nord- und Südkolk), in der beim Nordkolk deutlich wieder die nach Nordwesten gerichtete Hauptachse sichtbar wird, obwohl 1979 der Nordrinnenbogen durchdämmt wurde. Auf der Binnenseite findet mit Tiefen von NN - 12,0 m eine flächenmäßige Ausdehnung des Südkolkes in die nördliche Richtung statt.

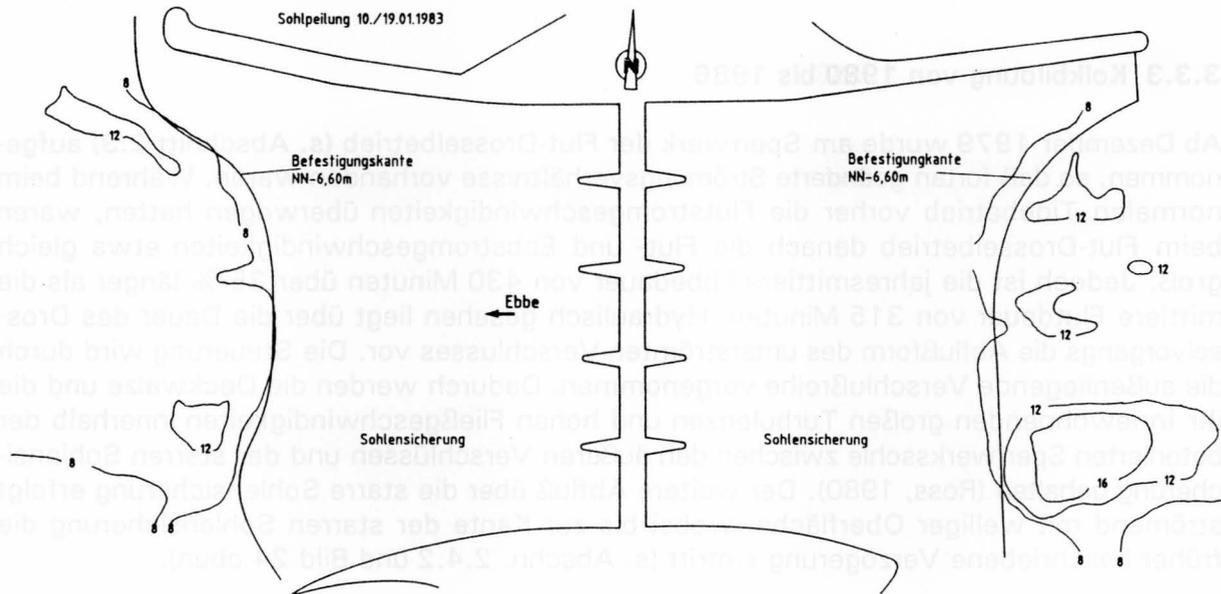


Bild 36 Lageplan der Kolke mit Tiefen in m unter NN. Zustand Januar 1983

Diese Entwicklung setzte sich in den nachfolgenden Jahren mit gleicher Tendenz fort (Bild 37). Bemerkenswert ist bei dieser Sohlpeilung vom 11./17.10.1985, daß auf der Außenseite des Sperrwerks der Nordkolk jetzt schon deutlich tiefer als der Südkolk ist und sich mit NN - 16,0 m die gleiche Kolkentiefe wie auf der Binnenseite einstellt.

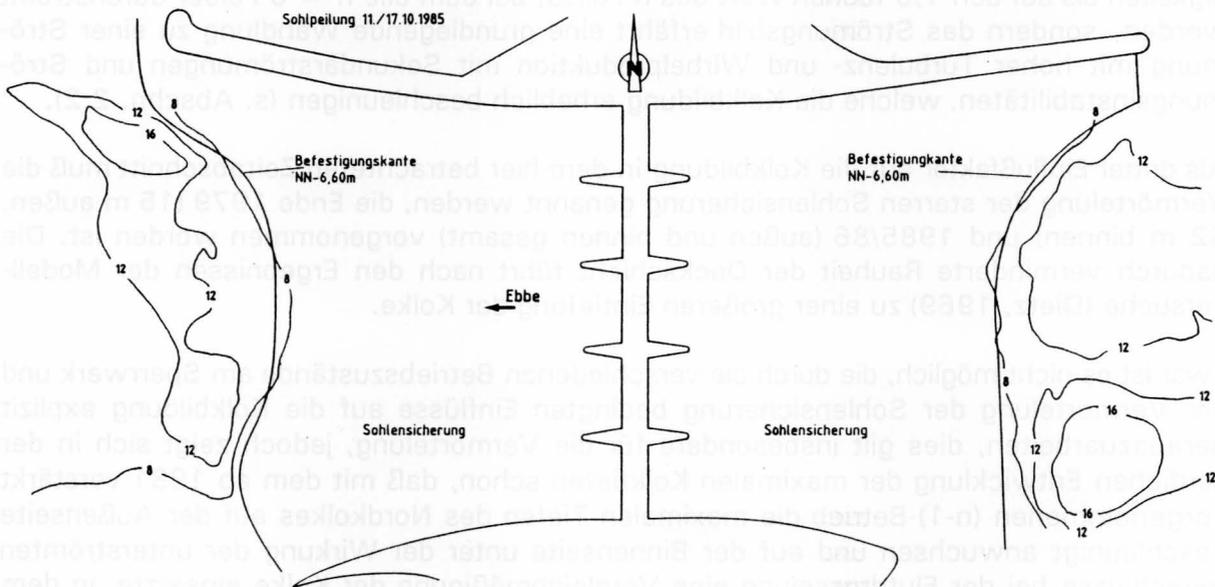


Bild 37 Lageplan der Kolke mit Tiefen in m unter NN. Zustand Oktober 1985

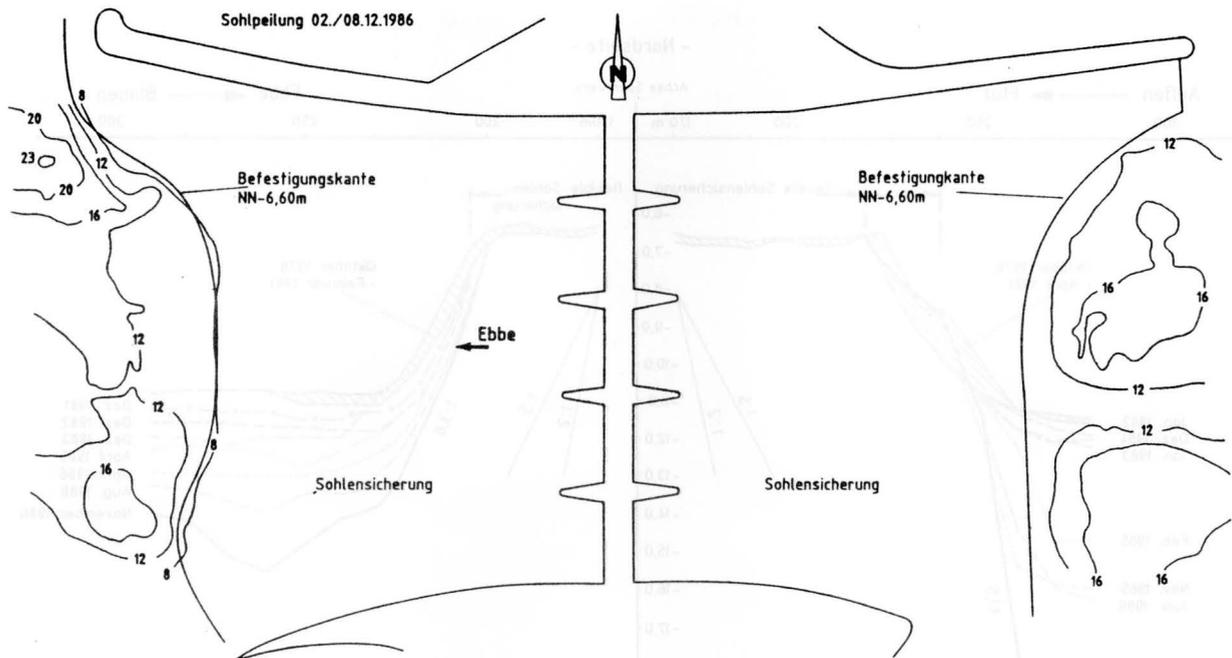


Bild 38 Lageplan der Kolke mit Tiefen in m unter NN. Zustand Dezember 1986

Im Dezember 1986 wurden auf der Binnenseite im Zuge der flächenmäßigen Ausdehnung des Südkolkes nach Norden auch in der Mitte und auf der Nordseite Kolkiefen von NN -16,0 m erreicht (Bild 38). Es ist zu vermuten, daß auf der Höhe von NN - 16,0 m ein zweiter Kleihorizont entsteht, der im Fortgang der Kolkbildung nach und nach frei gelegt wird und der weiteren Eintiefung erheblichen Widerstand bietet. Auf der Außenseite nahmen die Kolke sowohl nach der Tiefe als auch nach ihrer flächenmäßigen Ausdehnung weiter zu; der Nordkolk jedoch wesentlich stärker, so daß jetzt hier mit Abstand der tiefste Kolk am Sperrwerk zu finden ist.

Der Blick auf die bauwerksseitigen Kolkböschungen zu beiden Seiten des Sperrwerks zeigt, daß mit fortschreitender Eintiefung der Kolke die Kolkböschungen immer steiler geworden sind (Bild 39).

Auf der Außenseite stellten sich mit 1 : 1,5 (Oktober 1986) sehr steile Kolkböschungen ein, die im Bereich anstehender Kleischichten teilweise senkrecht abrachen, wie es für dreidimensionale Kolke typisch ist. Weniger dramatisch verlief die Entwicklung auf der Binnenseite, wo sich die Kolkböschungen bis zum November 1986 auf 1 : 3,8 aufteilten. Diese etwas flachere Kolkböschung binnen weist schon auf die Entwicklung einer zweidimensionalen Kolkssituation hin.

3.3.4 Kolkbildung von 1987 bis 1989

Die Darstellung der maximalen Kolkiefen in ihrer zeitlichen Entwicklung (s. Bild 31) macht sichtbar, daß im Dezember 1986 auf der Außenseite ein temporärer Beharrungszustand der Kolkbildung erreicht wurde, der bis Anfang 1990 stabil blieb. Auf der Binnenseite setzte sich die schon mehrmals erwähnte Vergleichmäßigung der Kolksohle auf dem Niveau NN - 16,0 m (vermutete 2. Kleischicht) fort, so daß schon im März 1989 ein nahezu "topf-ebener" Kolk vorhanden war, der sich gleichmäßig über die gesamte Sperrwerksbreite erstreckte (Bild 40).

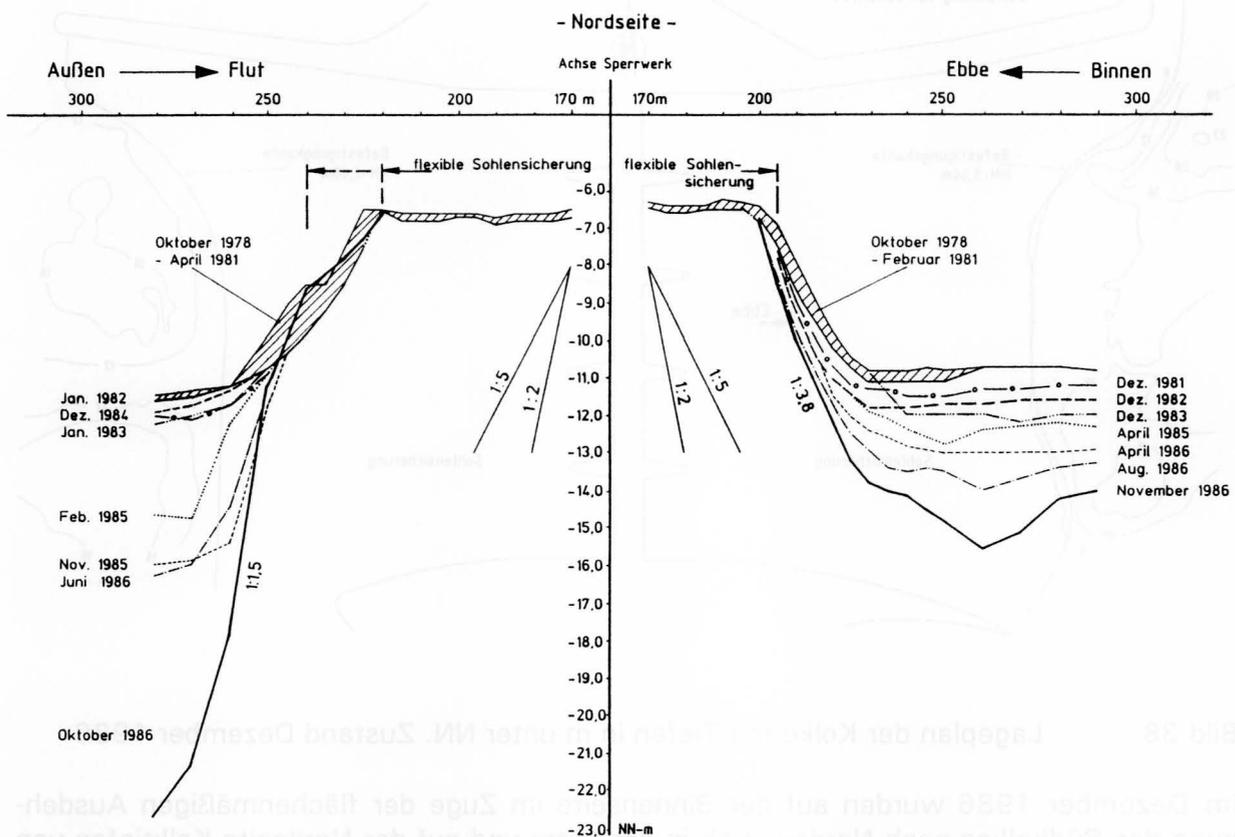


Bild 39 Entwicklung der Kolkböschungen von 1978 bis 1986 auf der nördlichen Seite des Sperrwerks

Bis zum März 1989 hat sich damit am Sperrwerk endgültig die generelle Gesamtsituation der Kolke herausgebildet, wie sie schon bei den Modellversuchen im Hauptmodell erkannt und mit ihren Ursachen im Abschnitt 3.2 beschrieben wurde. Auf der Außenseite treffen wir eine dreidimensionale Kolsituation mit zwei voneinander getrennten Kolkkesseln an, von denen der nördliche deutlich tiefer als der südliche ist. Auf der Binnenseite dagegen finden wir eine Kolkmulde mit nahezu ebener Kolksohle vor, die sich im großen und ganzen gleichmäßig über die gesamte Sperrwerksbreite erstreckt. Bei diesem als zweidimensional zu bezeichnenden Kolkbild fehlt ein Kolkkessel mit einem eindeutig fixierten tiefsten Kolkpunkt.

Die Ursache des temporären Beharrungszustandes der Kolkentwicklung auf der Außenseite ist vermutlich in dem verstärkten Einbau von Sandsäcken und einem relativ geringen (n-1)-Betrieb zu suchen (s. Bild 29). Dieser Sandsackeinbau war zum Schutz der oberstromigen Kolkböschungen gegen Abbruch der Befestigungskante und rückwärts schreitende Erosion erforderlich geworden, nachdem die Kolkböschungen mit zunehmender Eintiefung der Kolke immer steiler wurden und die flexible Sohlensicherung, deren Funktion in Folge der Durchrostung der Netze und Drähte schon seit längerem aufgehoben war, abschnittsweise zur Hälfte in den Kolk abgerutscht war.

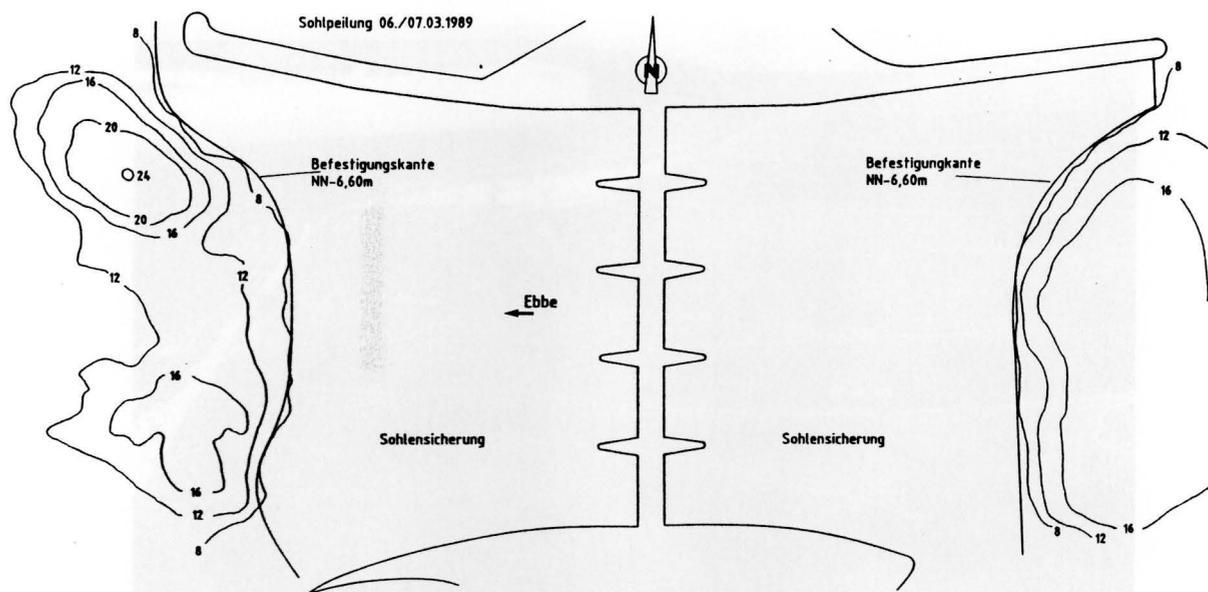


Bild 40 Lageplan der Kolke mit Tiefen in m unter NN. Zustand März 1989

Insgesamt ist in den Jahren 1986 bis 1989 die folgende Anzahl von Sandsäcken eingebaut worden (Tabelle 5).

Jahr	Binnen	Außen
1986	-	2000
1987	-	1800
1988	-	11000
1989	7000	1000

Tabelle 5: Anzahl der in den Jahren 1986 bis 1989 eingebauten Sandsäcke

Der Einbau von Sandsäcken mußte insbesondere auf der Außenseite entlang der Nordost-Flanke des Nordkolkes flächig betrieben werden, da die dortigen Abbrüche an der Befestigungskante der flexiblen Sohlensicherung die Trennmole gefährden konnten. Bei der Peilung im Juni 1988 sind an der Trennmole Nord Kolkböschungen in der Neigung 1 : 0,8 angetroffen worden. Derartige Abbrüche konnten auch bei den Kolkversuchen im Hauptmodell beobachtet werden (Bild 41).

Aber auch auf der Binnenseite haben sich bis 1989 stellenweise recht steile bauwerksseitige Kolkböschungen eingestellt, deren Neigungen in der Mitte des 3. Wehrfeldes (hier verläuft der Stromstrich) 1 : 0,7 und am südlichen Leitdamm (hier verläuft die Strömung schräg zur Befestigungskante) 1 : 1 betragen haben. Infolge dieser Situation mußten noch in 1989 die gefährdeten Stellen an der Kolkböschung durch eine flächige Abdeckung von Sandsäcken vor weiteren Angriffen gesichert werden.

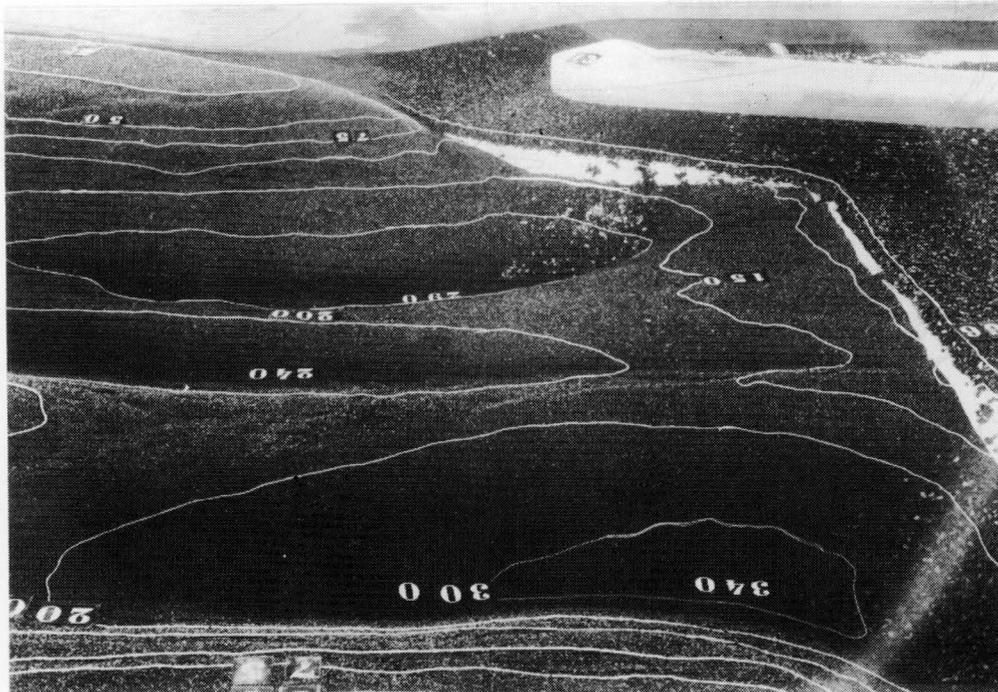


Bild 41 Abbrüche an der Befestigungskante außen im Hauptmodell

3.3.5 Kolkbildung von 1990 bis 1991

Von Mai bis September 1990 war das linke Randfeld (Feld I) zur Durchführung von Betonuntersuchungen und Sanierungsarbeiten am Wehrträger I etwa 4 Monate geschlossen. Unter der Wirkung dieses $(n-1)_1$ -Betriebsfalles nahm im Nordkolk auf der Außenseite des Sperrwerks die auf die Höhenlage der Befestigungskante (NN - 6,60 m) bezogene maximale Kolkentiefe von $h_{\max} = 17,0$ m im April 1990 auf $h_{\max} = 21,9$ m im September 1990 sprunghaft zu (s. Bild 31) und der Kolkkessel erfuhr eine erhebliche Aufweitung an seinen Flanken und in Richtung zur Befestigungskante (Bild 42). Die seit 1989 bestehende und nicht zuletzt durch den verstärkten Einbau von Sandsäcken bewirkte stabile Kolkssituation wurde damit auf der Außenseite abrupt verschlechtert, wovon allerdings nur der Nordkolk betroffen war. Der Südkolk lag größtenteils im Stromschatten der versperreten Wehröffnung und blieb unbehelligt. Auch auf der Binnenseite traten beim $(n-1)_1$ -Betrieb keinerlei ungünstige Veränderungen in der Kolkssituation ein, wie eine spätere Kolkaufnahme zeigen wird.

Für die beträchtliche Eintiefung und Aufweitung des Nordkolkes sind ursächlich die besonderen Strömungserscheinungen beim Verschluss einer Wehröffnung mit ihrer erhöhten Turbulenz- und Wirbelproduktion, ihrer vergrößerten Strömungsasymmetrie, ihrer verstärkten Umlenkung der Strombahnen zum tiefen Außenkolk und den erhöhten Fließgeschwindigkeiten (auf das 1,6-fache des n -Falles) heranzuziehen, wie sie speziell für den vorliegenden $(n-1)_1$ -Fall von Dietz/Nestmann, 1994 und im Abschnitt 2.2.2 dieser Arbeit beschrieben werden. Zur Sicherung der Kolkböschung und zum Schutz der von Abbrüchen bedrohten Befestigungskante auf der Außenseite des Sperrwerks wurden noch in 1990 6.500 Sandsäcke eingebracht.

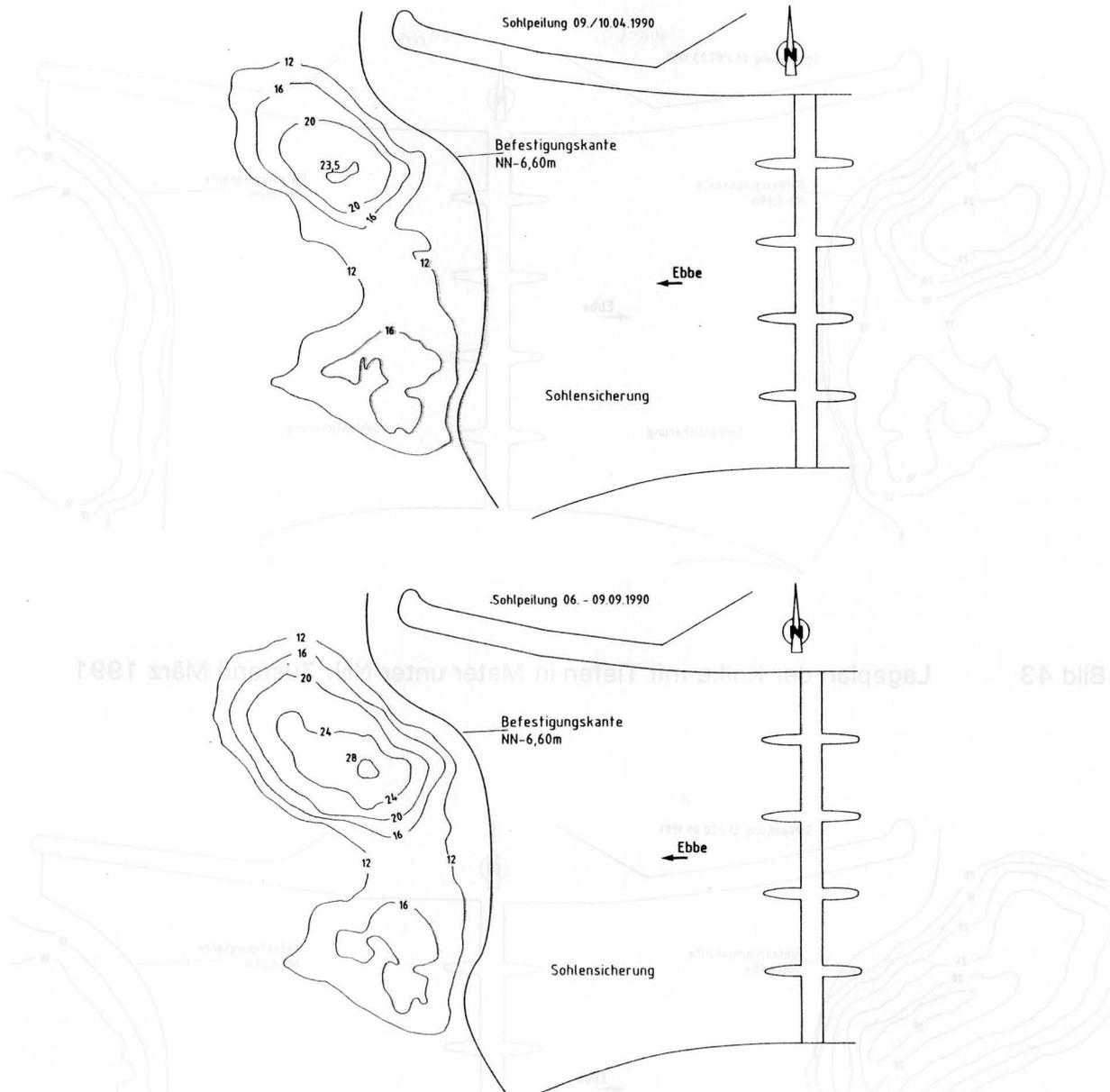


Bild 42 Kolkssituation im Sommer 1990 vor und nach dem (n-1)₁-Betrieb (Tiefen in Meter unter NN)

Nach Beendigung des (n-1)₁-Betriebs im September 1990 trat unter den mildereren Strömungsverhältnissen des Flut-Drosselbetriebs bei 5 durchströmten Öffnungen eine Entspannung im Kolkprozess ein, die bis zum März 1991 eine merkbare Auffüllung des Kolkessels brachte; wenn sich auch nicht die bis zum April 1990 bestehende stabile Kolkssituation wieder zurückgebildet hat (Bild 43).

Allerdings bestand diese Anlandung im Kolkessel aus feinsandigem bis sandigem Schlick breiiger Konsistenz, so daß die Wiederaufnahme des zur Betoninstandsetzung an Wehrtträger I erforderlichen (n-1)₁-Betriebs zum 01.04.1991 sofort wieder zu einer heftigen Kolkbildung auf der Außenseite des Sperrwerks führte, die bis zum September 1991 ein Kolk bisher nie erreichten Ausmaßes entstehen ließ (Bild 44).

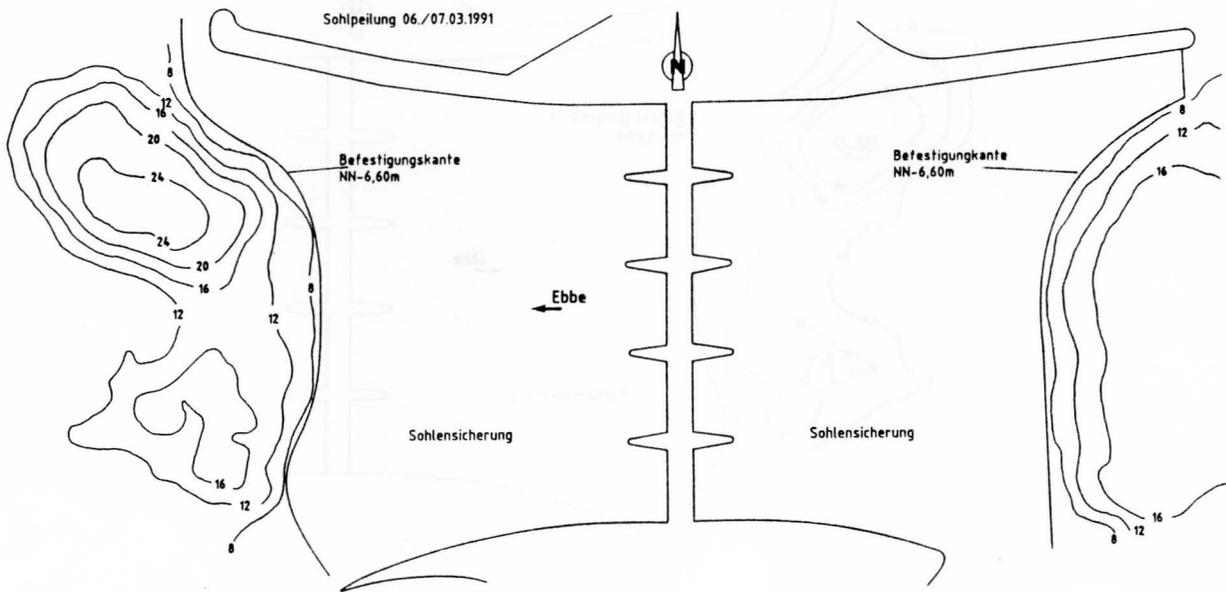


Bild 43 Lageplan der Kolke mit Tiefen in Meter unter NN. Zustand März 1991

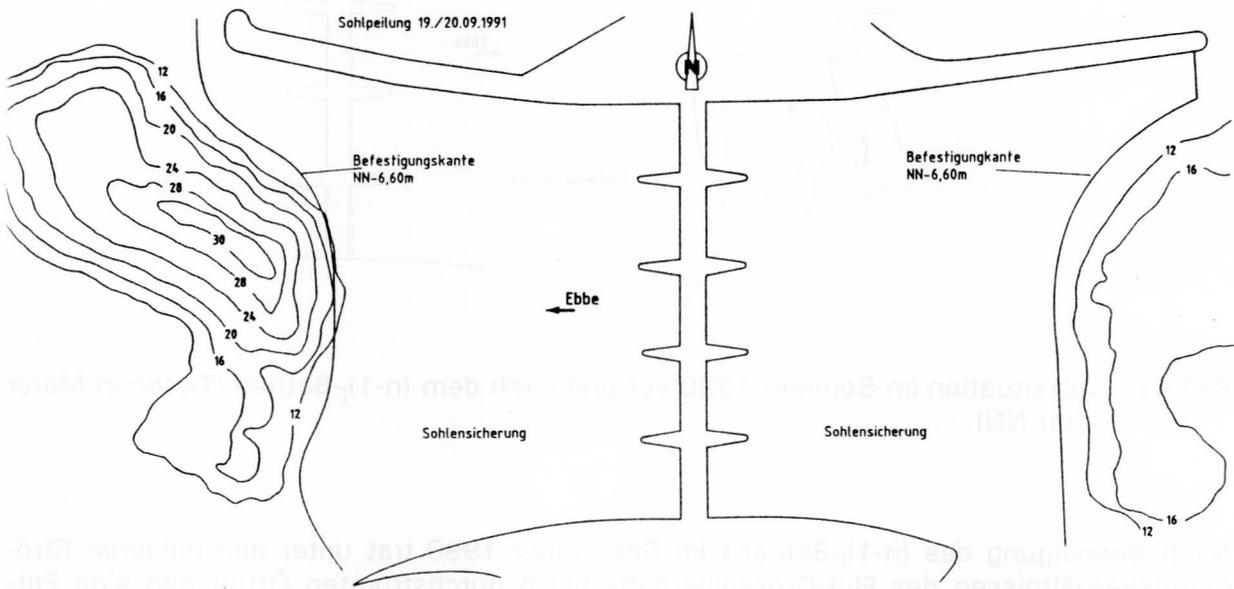


Bild 44 Lageplan der Kolke mit Tiefen in Meter unter NN. Zustand September 1991

Auf einer Fläche von ca. 15 x 75 m wird die Tiefenlinie NN - 30,0 m unterschritten; der tiefste Kolkpunkt liegt auf NN - 31,1 m, was eine maximale Kolkentiefe von $h_{\max} = 24,50$ m (bezogen auf die Befestigungskante bei NN - 6,60 m) bedeutet. Der Kolk ist weiter gegen die Befestigungskante vorgerückt und hat insbesondere im Abströmbereich der Sperrwerksfelder III und IV starke Abbrüche an der Befestigungskante hervorgerufen, die stellenweise einen bis zu 10 m breiten Randstreifen der elastischen Sohlensicherung erfaßt haben. Erstmals hat sich der Nordkolk auch so weit nach Süden ausgedehnt, daß sich eine Vereinigung der beiden Außenkolke (Nord- und Südkolk) zu einem einheitlichen Kolkessel sehr

großer Tiefe abzeichnet. Auf der Binnenseite sind dagegen, abgesehen von einigen Umlagerungen, keine gravierenden Veränderungen zu beobachten, am allerwenigsten was die maximale Kolkentiefe angeht, die weiter auf dem Horizont NN - 16,0 verharret.

Die kritische Kolkentwicklung auf der Außenseite des Sperrwerks beim Verschluß der linken Randöffnung im Sommer 1991 wurde durch fortlaufende Sohlpeilungen in kurzen Zeitabständen aufmerksam verfolgt. Da man in einer weiteren Eintiefung des Kolkes ein erhebliches Sicherheitsrisiko für die Sohlensicherung und das Bauwerk sah, wurde der weitere (n-1)₁-Betrieb ab 06.09.1991 im sogenannten "Schonbetrieb" (siehe Bild 32) vorgenommen. Ab Mitte Oktober 1991 konnten wieder alle 5 Sperrwerksöffnungen für den Durchfluß freigegeben werden.

Das für das Gesamtbauwerk bestehende Risiko konnte anhand des Sicherheitswinkels σ abgeschätzt werden, der von Dietz, 1969 wie folgt definiert worden ist (Bild 45).

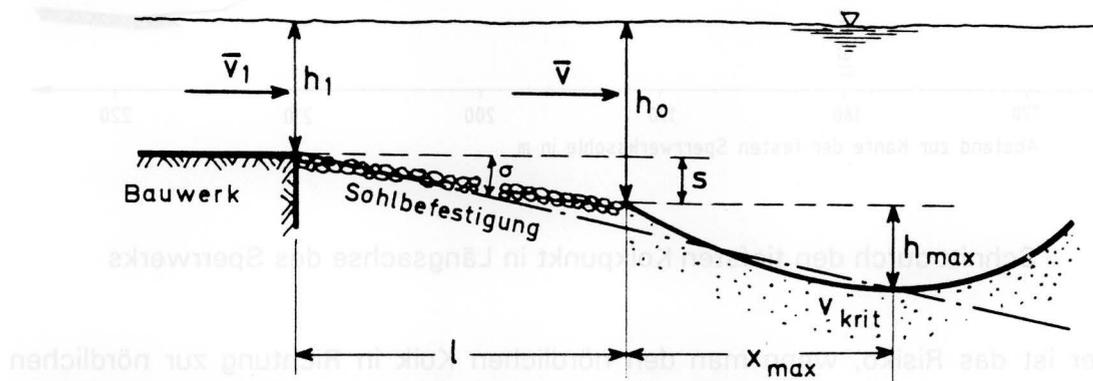


Bild 45 Definition des Sicherheitswinkels σ

Demnach kann dann von einer ausreichenden Sicherheit des Bauwerks gegen die Kolkbildung gesprochen werden, wenn die Verbindungslinie zwischen dem höchsten Punkt der unterstromigen Bauwerkskante und dem tiefsten Kolkpunkt möglichst flach liegt, wobei hinsichtlich der geotechnischen Stabilität folgendes Kriterium gelten sollte (Pilarczyk, 1987).

Leicht bewegliche Böden, wie z. B. Sande	$\cot \sigma \geq 15$
Bindige Böden, wie z. B. Klei	$\cot \sigma \geq 6$

Für die geologischen Verhältnisse am Eider-Sperrwerk (Feinsande mit eingelagerten Kleischichten, ab NN - 20,0 m nur noch alluvialer und diluvialer Feinsand) muß sicherheits halber mit dem größeren Wert gerechnet werden. Selbst wenn man diesen Wert unter Berücksichtigung der anstehenden Kleischichten und -linsen etwas ermäßigen würde, lägen die mit den Peilerggebnissen vom 09.09.1991 für den nördlichen Außenkolk ermittelten $\cot \sigma$ -Werte noch deutlich darunter. Und zwar konnte für den tiefsten Kolk-punkt in Längsachse des Sperrwerks die Neigung der Sicherheitsgeraden zu 1 : 8,3 bestimmt werden (Bild 46).

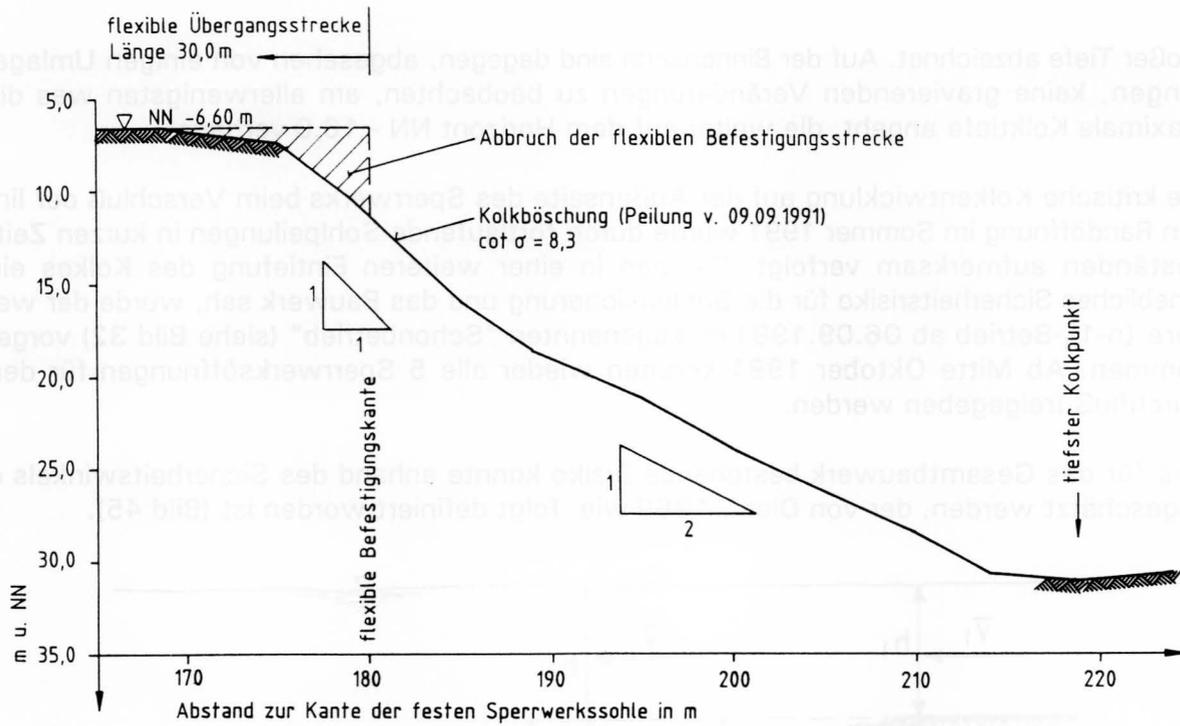


Bild 46 Schnitt durch den tiefsten Kolkpunkt in Längsachse des Sperrwerks

Viel größer ist das Risiko, wenn man den nördlichen Kolk in Richtung zur nördlichen Trennmole betrachtet. Hier erhält man für die Verbindungslinie zwischen der oberen Trennmolenkante und dem tiefsten Kolkpunkt eine Neigung von 1 : 3,2. Selbst wenn man als oberen Bezugspunkt der Sicherheitsgeraden den Anschluß der flexiblen Sohlensicherung an die Trennmole (NN - 6,60 m) wählt, erhält man eine Neigung von 1 : 4,1, die nach dem vorher genannten Kriterium auch noch als zu steil anzusehen ist (Bild 47).

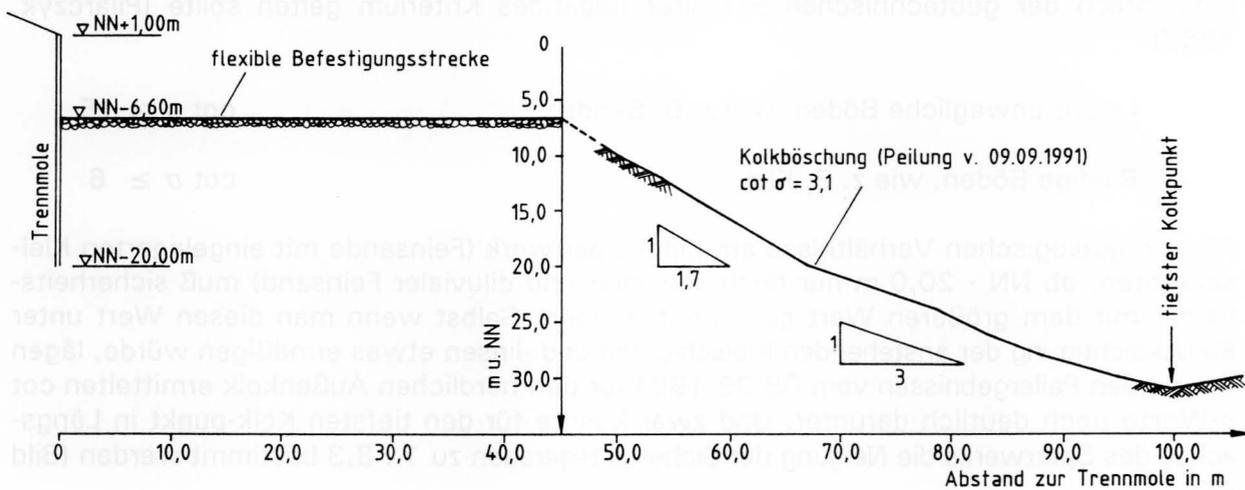


Bild 47 Schnitt durch den tiefsten Kolkpunkt quer zur nördlichen Trennmole

Aufgrund dieser kritischen Lage wurden im Herbst 1991 als Sofortmaßnahme entlang der gefährdeten Befestigungskante im Abströmbereich der Wehrfelder III und IV 20 000 Stück

Sandsäcke zu je 1 m³ verstürzt. Diese Sicherung konnte aber nur als provisorisch verstanden werden, da die bedrohten Kolkböschungen mit 1 : 1 sehr steil und teilweise nur mit 1 - 2 Säcken abgedeckt waren. Im Bereich der nördlichen Trennmole brauchten im Rahmen dieser Sofortmaßnahme keine neuen Säcke abgeworfen zu werden, da die dort aus dem Jahr 1990 vorhandene Sandsackabdeckung die Strömungsangriffe aus dem (n-1)₁-Betrieb des Jahres 1991 recht gut überstanden hat.

In dieser durch einen 25 m tiefen Kolk, sehr steile bauwerksseitige Kolkböschungen, Abbrüche an der Befestigungskante und eine beginnende rückschreitende Erosion bestimmten Situation im Herbst 1991 war klar, daß ein weiterer (n-1)-Betrieb ohne eine dauerhafte Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und Befestigung der Kolkböschungen mit Rücksicht auf die Sicherheit des Bauwerks nicht mehr vorgenommen werden durfte. Von einem weiteren Einsatz von Sandsäcken konnte in dieser verschärften Kolksituation keine dauerhafte Stabilisierung erwartet werden, zumal auch mit dem Einbringen von 20 000 Stück Sandsäcken eine Grenze in der jährlichen Unterhaltung der Sohlensicherung erreicht war.

Da aber die Wehrträger II bis V ebenfalls umfangreiche Sanierungsmaßnahmen am Beton erfordern, mit denen jeweils ein über mehrere Monate im Jahr anhaltender (n-1)-Betrieb verbunden sein wird, mußte unverzüglich mit der Planung von dauerhaften Maßnahmen zur Sicherung der flexiblen Sohlbefestigung und der bauwerksseitigen Kolkböschungen begonnen werden, die sowohl einen längeren (n-1)-Betrieb als auch den Bemessungsfall "Spülbetrieb" ohne Schaden für die Sohlbefestigung zulassen.

3.3.6 Kolkbildung ab 1992

Beginnt man mit der Betrachtung der Kolkbildung auf der Außenseite des Sperrwerks, so war nach Beendigung des (n-1)₁-Betriebs Mitte Oktober 1991 wieder eine Auffüllung des Kolkes zu beobachten (Bild 48).

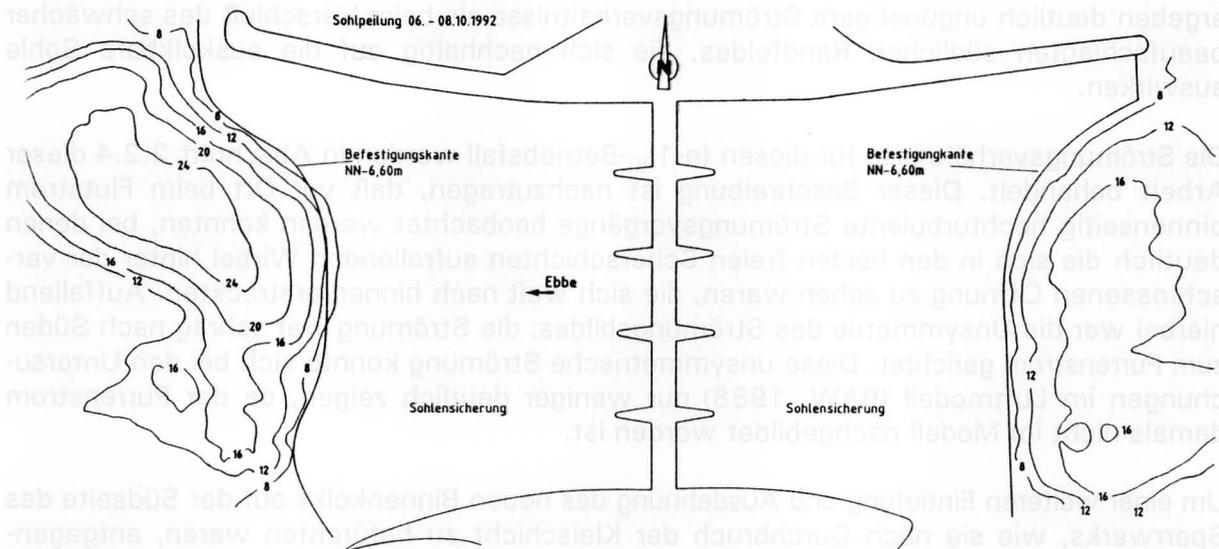


Bild 48 Lageplan der Kolke mit Tiefen in Meter unter NN. Zustand Oktober 1992

Diese Auffüllung hielt unter der Wirkung der bis September 1992 durchgeführten besonderen "schonenden" Betriebsformen unvermindert bis Ende 1992 an; die geringste (auf die Höhenlage der Befestigungskante bezogene) maximale Kolkentiefe konnte bei der Peilung am 20./27.01.1993 zu $h_{\max} = 17,40$ m ermittelt werden (gegenüber $h_{\max} = 24,50$ m im

September 1991). Als "schonende" Betriebsform ist für die Durchführung von Reparaturarbeiten an den Antrieben der Wehrfelder III (Austausch von Hydraulikleitungen) Ende April/Anfang Mai 1992 der $(n-1)_{III}$ -Flutstrom-Drosselbetrieb gewählt worden, wobei der Ebbstrom unbeeinflusst durch $n = 5$ Öffnungen abfloß (n -Betrieb).

Die danach folgenden Betonuntersuchungen an den Wehrträgern II und III wurden bei einer Kombination normaler Tidebetrieb/Schonbetrieb vorgenommen. Da die abgehängten Arbeitsbühnen vom normalen Tidedurchfluß nicht beeinträchtigt wurden, brauchten die Arbeitsöffnungen bei dieser Betriebsform nicht geschlossen zu werden; der Durchfluß erfolgte demnach durch $n = 5$ Öffnungen. Dagegen mußte beim Schonbetrieb, der insbesondere für Springtiden gewählt wurde, die jeweilige Arbeitsöffnung geschlossen werden und es war damit der $(n-1)$ -Fall gegeben.

Auf der Binnenseite dagegen brachte der Flut-Drosselbetrieb beim Verschuß des Wehrfeldes III Ende April/Anfang Mai 1992 ungünstige Auswirkungen auf den bislang stabilen Binnenkolk.

Die vom 11.05. bis 13.05.1992 vorgenommene Peilung ergab, daß der bisher in weiten Bereichen topfebene, zweidimensionale Binnenkolk (Höhenlage NN - 17,0 m bis maximal NN - 17,6) in Verlängerung der Mittelachse des Feldes 1 auf einer kleinen Fläche eingetieft worden ist. Die maximale Kolktiefe konnte zu NN - 19,5 m ermittelt werden; die von der NN - 18m-Tiefenlinie umschlossene Fläche betrug ca. 120 m². Damit ist offensichtlich der auf der Binnenseite anstehende zweite Kleihorizont mit diesem Beginn eines dreidimensionalen Kolkes auf der Südseite durchbrochen worden.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß die gleiche $(n-1)$ -Flutstromdrosselung im Jahr 1991 für das verschlossene Wehrfeld 1 (Randfeld) langfristig ohne erkennbaren Nachteil für die binnenseitige Kolkssituation betrieben worden ist. Die Vergrößerung der Wirbelproduktion in den nunmehr zwei freien Scherschichten des versperrten Wehrfeldes 3 und die vermutete stärkere Beaufschlagung des Mittelfeldes beim n -Betrieb ergeben deutlich ungünstigere Strömungsverhältnisse als beim Verschuß des schwächer beaufschlagten südlichen Randfeldes, die sich nachhaltig auf die auskolkbare Sohle auswirken.

Die Strömungsverhältnisse für diesen $(n-1)_{III}$ -Betriebsfall werden in Abschnitt 2.2.4 dieser Arbeit behandelt. Dieser Beschreibung ist nachzutragen, daß vor Ort beim Flutstrom binnenseitig hochturbulente Strömungsvorgänge beobachtet werden konnten, bei denen deutlich die sich in den beiden freien Scherschichten aufrollenden Wirbel hinter der verschlossenen Öffnung zu sehen waren, die sich weit nach binnen erstreckten. Auffallend hierbei war die Unsymmetrie des Strömungsbildes; die Strömung war schräg nach Süden zum Purrenstrom gerichtet. Diese unsymmetrische Strömung konnte sich bei den Untersuchungen im Luftmodell (BAW, 1988) nur weniger deutlich zeigen, da der Purrenstrom damals nicht im Modell nachgebildet worden ist.

Um einer weiteren Eintiefung und Ausdehnung des neuen Binnenkolks auf der Südseite des Sperrwerks, wie sie nach Durchbruch der Kleischicht zu befürchten waren, entgegenzuwirken, wurde in einer Sofortmaßnahme (noch im Juni 1992) der Kolk mit Moränengeröll 60/200 mm verfüllt. Die überraschende Kolkentwicklung auf der Binnenseite beim $(n-1)_{III}$ -Flut-Drosselbetrieb hatte die Konsequenz, daß die geplante Betonsanierung der Wehrträger II bis V erst dann möglich sein würde, wenn auch auf der Binnenseite die flexible Sohlensicherung verstärkt und die Kolkböschung befestigt worden sind.

Die Bauarbeiten zur Verstärkung der Sohlensicherung und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen erstreckten sich von April 1993 bis zum Mai 1995. Die zeitliche

Entwicklung der Kolke während des Baustellenbetriebs, bei dem an den Wochentagen die Tagtiden gesperrt wurden, verdeutlicht Bild 49.

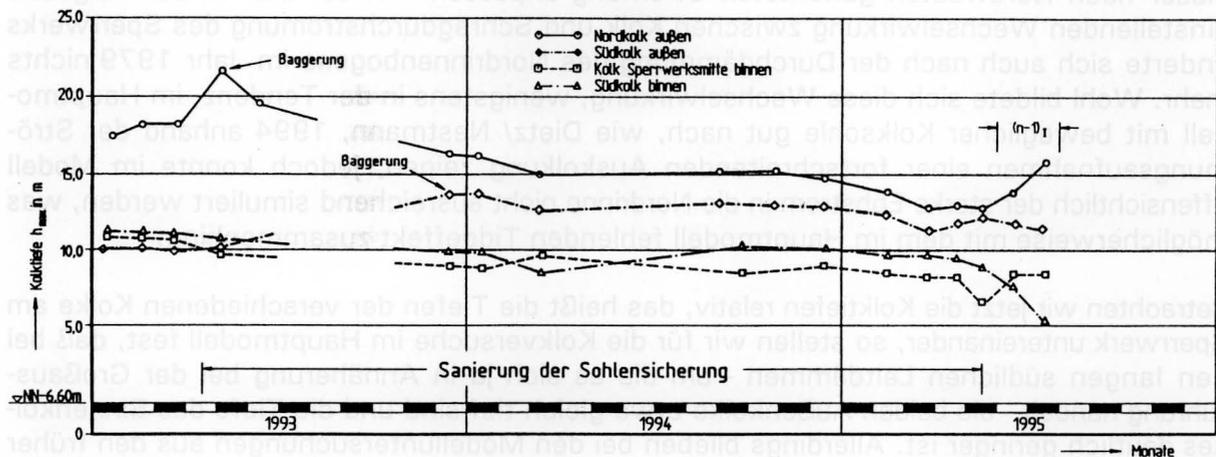


Bild 49 Entwicklung der Kolke während des Baustellenbetriebs zur Sanierung der Sohlensicherung

Der Anstieg der Kolkhöhen auf der Außenseite des Sperrwerks, den die Peilungen von Mai 1993 (Nordkolk) und von Dezember 1993 (Südkolk) anzeigen, ist auf das Ausbaggern der mit Schlick und Feinsand breiiger Konsistenz verfüllten Kolkkessel zurückzuführen, was zum Verlegen der Sinkstücke im Randbereich der befestigten Kolkböschungen erforderlich war. Die Sperrung der Tagtiden brachte in der Folgezeit eine Verschlickung der Kolkkessel, von der der Nordkolk außen infolge seiner großen Tiefe am stärksten betroffen war.

Unmittelbar nach Beendigung der Sanierungsarbeiten im Mai 1995 wurde zur Betonuntersuchung am Wehrträger I der $(n-1)_1$ -Betrieb wieder aufgenommen und Ende Juli 1995 abgeschlossen. Die im Juni und Juli durchgeführten Peilungen der ungesicherten Kolksohle zeigen schon nach dieser kurzen Zeit die Wirkung der verschlossenen Wehröffnung. Im Einklang mit den früher schon festgestellten Auskolkungen bei dieser besonderen Betriebsform (siehe Abschnitt 3.3.5) und auch mit den Strömungsuntersuchungen im Luftmodell (siehe Abschnitt 2.2.2) nehmen die Kolke auf der Binnenseite in Sperrwerksmitte und auf der Außenseite im nördlichen Bereich entsprechend dem Verlauf der Stromstrichs auf größeren Flächen deutlich an Tiefe (siehe Bild 49) und Volumen zu. Unter dem Einfluß der versperrten Wehröffnung I und der durch sie bewirkten Totwasser- und Ablösegebiete traten dagegen auf der Südseite binnen (stärker) und außen (schwächer) Anlandungen ein.

3.4 Vergleich der Kolke in Natur und Modell

Was die generelle Kolkssituation auf beiden Seiten des Sperrwerks angeht - zwei tiefe, steile Kolke auf der Außenseite, relativ einheitlicher flacher Kolk auf der Binnenseite - besteht zwischen den Kolkversuchen im Hauptmodell und den Kolkvorgängen in der Natur gute Übereinstimmung. Bei der Detailbetrachtung fällt jedoch auf, daß die beiden Außenkolke im Modell symmetrisch zur Mittelachse des Sperrwerks lagen, auf der sich auch ihre Hauptachsen schneiden (s. Bild 26), während sich in der Natur nach Inbetriebnahme des Sperrwerks ein in die nordwestliche Richtung verlaufender Kolkkessel ausbildete, der fortan diese Richtung beibehielt (s. Bilder 34 und 48).

Die Ursache dieser Kolkform in der Natur ist schon bei der Behandlung der Kolkentwicklung unmittelbar nach Fertigstellung des Bauwerks genannt worden (s. Abschn. 3.3.2). Sie ist

in dem schon vor dem Bau des Sperrwerks herrschenden Verlauf der Ebbeströmung aus dem Purrenstrom in die tiefere Nordrinne zu suchen, an dem sich auch nach der Inbetriebnahme nichts änderte. Der auf der Außenseite entstehende Kolk mußte sich zwangsläufig dieser nach Nordwesten gerichteten Strömung anpassen. An der sich in der Folgezeit einstellenden Wechselwirkung zwischen Kolk und Schrägdurchströmung des Sperrwerks änderte sich auch nach der Durchdämmung des Nordrinnenbogens im Jahr 1979 nichts mehr. Wohl bildete sich diese Wechselwirkung, wenigstens in der Tendenz, im Hauptmodell mit beweglicher Kolksohle gut nach, wie Dietz/ Nestmann, 1994 anhand der Strömungsaufnahmen einer fortschreitenden Auskolkung zeigen, jedoch konnte im Modell offensichtlich der starke Ebbstrom in die Nordrinne nicht ausreichend simuliert werden, was möglicherweise mit dem im Hauptmodell fehlenden Tideeffekt zusammenhing.

Betrachten wir jetzt die Kolkiefen relativ, das heißt die Tiefen der verschiedenen Kolke am Sperrwerk untereinander, so stellen wir für die Kolkversuche im Hauptmodell fest, daß bei den langen südlichen Leitdämmen - um die es sich ja in Annäherung bei der Großausführung handelt - die beiden Außenkolke etwa gleich tief sind und die Tiefe des Binnenkolkes deutlich geringer ist. Allerdings blieben bei den Modelluntersuchungen aus den früher genannten Gründen die Betriebsfälle mit einer versperrten Wehröffnung unberücksichtigt, was die symmetrische Kolsituation auf der Außenseite des Sperrwerks verstehen läßt. Ein Vergleich mit dem Naturzustand kann damit nur für die Zeit bis 1984 gesucht werden, in der (n-1)-Betrieb anteilmäßig noch gering war. In der Tat finden wir bis dahin auch in der Natur zwei gleich tiefe Außenkolke entsprechend den Ergebnissen des Modellversuchs vor. Erst mit der Zunahme des (n-1)-Betriebs in den Jahren 1984 bis 1987 setzte unter der Wirkung der dadurch verursachten Strömungsasymmetrie die starke Eintiefung des nördlichen Außenkolks zur heutigen Kolkasymmetrie ein. Die Zuordnung der Kolkiefen auf der Außenseite des Sperrwerks zu denen auf der Binnenseite (mehr als doppelt so tief) stimmt für die Natur im heutigen Zustand und das Modell gut überein.

Die exakte Umrechnung der Kolkiefen im Modell auf die Natur, das heißt die quantitative Auswertung der Versuchsergebnisse nach dem Froudeschen Modellgesetz ist nicht möglich, wenn auch für die Wahl des Modellfeststoffes im Kolkmodell in Verbindung mit der Festlegung des Modellmaßstabes umfangreiche Versuche mit Fragen nach der Ähnlichkeitsmechanischen Nachbildung von Kolkvorgängen im Modell und dem Übertragungsmaßstab durchgeführt worden sind (Dietz, 1969 und 1970). Die trotzdem nach dem Froudeschen Modellgesetz umgerechneten Kolkiefen dürfen daher nur als Beurteilungszahlen beim Vergleich verschiedener Anordnungen im Modell verwendet werden. Mit dem heutigen Wissen um die Kolkentwicklung in der Natur kann man aber von diesen Beurteilungszahlen annehmen, daß sie in etwa auch quantitativ die Kolkbildung in der Natur beschreiben, wenn man mit einer gewissen Großzügigkeit an eine derartige Umrechnung oder Übertragung der im Modell gemessenen Kolkiefen herangeht. Auf jeden Fall widerlegt die Kolkbildung am Sperrwerk die früher mancherseits vertretene Auffassung, daß die Modellkolke im leicht beweglichen Kunststoff Polystyrol nach ihrer Tiefe und der Steilheit ihrer bauwerksseitigen Kolkböschungen im Hinblick auf die in der Natur anstehenden Kleischichten überzogen seien und die Versuchsergebnisse damit deutlich auf der sicheren Seite lägen.

4 Sohlensicherung

4.1 Modellversuche

Die Aufgabe einer Sohlensicherung ist es, die Kolkbildung in der beweglichen Flußsohle so weit vom zu schützenden Bauwerk weg zu verlagern, daß die Verbindungslinie zwischen dem tiefsten Kolkpunkt und dem höchsten Punkt der unterstromigen Bauwerkskante mög-

lichst flach liegt (s. Bild 45). Durch die Befestigungsstrecke selbst, wie deren Länge, Höhenlage, Neigung und Rauheit der Deckschicht kann die Kolkbildung nur innerhalb gewisser Grenzen ermäßigt werden, wie spezielle Modellversuche für das Eider-Sperrwerk gezeigt haben (Dietz, 1969 und 1970).

Aus Gründen der vorhandenen Bauinsel konnte nur eine insgesamt 180 m lange Befestigungsstrecke gewählt werden, um die 30 m lange flexible Übergangsstrecke von der starren Sohlensicherung (Länge 150 m) auf die bewegliche Sohle mit aller Sorgfalt im Trockenbau einbauen zu können.

Diese neuartige Gestaltung der Befestigungskante in Form flexibler Matten, die zugfest an die starre Sohlensicherung anzuschließen waren, war bei den Modelluntersuchungen als geeignetes Mittel entwickelt worden, um das Abbrechen und Abrutschen einzelner Befestigungselemente in den Kolkkessel zu verhindern. Infolge ihres Gewichts und ihres flexiblen Verhaltens können sie sich ungleichen Unterspülungen und Aushöhlungen durch die Strömung ohne die gefährlichen Abbruchserscheinungen an der Befestigungskante anpassen (Dietz, 1973).

Diese Eigenschaften waren insbesondere bei der Tidebewegung am Eider-Sperrwerk gefragt, die viermal täglich eine Bewegungsumkehr erzeugt; dadurch ist die Strömung nicht nur vom Sperrwerk zur beweglichen Sohle gerichtet (Normalfall der Kolkbildung), sondern im Wechsel des Tidespiels auch vom Kolk in der beweglichen Sohle gegen die Befestigungskante. Dieser zuletzt genannte Strömungsvorgang führt mit zunehmender Einwirkzeit zu immer steileren bauwerksseitigen Kolkböschungen, bis der Abbruch der Befestigungskante erfolgt (Bild 50).

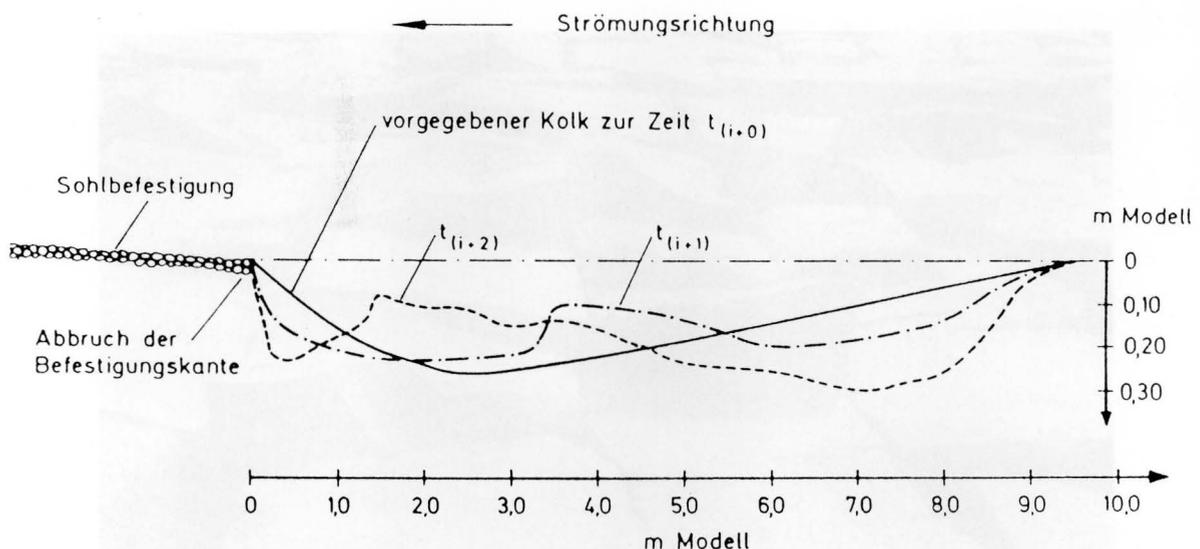


Bild 50 Kolkbildung bei Strömung gegen die Befestigungskante im Modell

Bei den Kolkuntersuchungen im Hauptmodell war die Sohlensicherung als sogenanntes loses Schüttsteindeckwerk auf Filterunterlage konzipiert, das durch eine Splittschüttung auf einer wasserdurchlässigen Diolen-Gaze simuliert wurde (s. Bilder 26 und 41). Das mittlere Steingewicht lag nach der Umrechnung nach dem Froudeschen Gesetz (bei den vorliegenden Steinabmessungen ohne Einschränkung möglich) bei 0,450 t. Die derart dimensionierte Befestigungsstrecke erwies sich im Modell auch bei einer lange anhaltenden Ebbeströmung nach einer 2-stündigen Rückhaltezeit mit Fließgeschwindigkeiten von ca. 5,0 m/s Natur (s. Bild 22) als stabil, so daß dieses Ergebnis als Planungsgrundlage gelten konnte. Aus Sicher-

heitsgründen wurden für den Bereich der größten Strömungsgeschwindigkeiten in Sperrwerksnähe Steingewichte von 0,600 t vorgeschlagen.

4.2 Ausbildung der Sohlensicherung in der Natur

An die auf NN - 4,60 m liegende Betonsohle des Wehres schließt sich auf beiden Seiten des Bauwerks höhengleich die 150 m lange starre Sohlensicherung an, die mit einer Neigung von 1 : 75 auf Höhe NN - 6,60 m endet. Den Übergang zur ungeschützten Sandsohle bildet eine flexible Sohlensicherung, deren Länge in der Mitte 30 m beträgt und nach den Seiten hin zunimmt. Insgesamt ist die Befestigungsstrecke damit in der Mitte 180 m lang (s. Bild 2).

Für die starre Sohlensicherung wurde aus Kostengründen erstmalig eine neuartige Bauweise aus hydraulisch gespaltenen 400 bis 600 kg schweren Granitquadersteinen gewählt, die so eng auf ein doppelschichtiges Kornfilter (Grand) gesetzt wurden, daß ein Austreten des Grandes durch die Fugen zwischen den Decksteinen nicht möglich war. Unter dem Grand liegt eine Nylonplane, die das Ausspülen des feinsandigen Untergrundes verhindern soll.

Um eine möglichst große Rauheit zu erhalten, die sich nach den Versuchsergebnissen mäßigend auf die Kolkbildung (geringere Kolkiefen, flachere Kolkböschungen) auswirkt, wurden für die Decksteine unterschiedliche Höhen gewählt, so daß in Fließrichtung einem flachen Plattenstein ein höherer Höckerstein (von Führböter, 1986 auch als Bremsstein bezeichnet) folgt. Die Rauheitserhebungen sollten dadurch 10 bis 15 cm und die mittlere Steinhöhe 0,43 m betragen (Bild 51).



Bild 51 Gesetzte Granitquadersteine in der starren Sohlensicherung

Da es sich bei dieser Bauweise mehr um eine Setz- als um eine Schüttsteinbauweise handelt, wie sie den Modelluntersuchungen zugrunde lag, konnte von den gewählten

Steingewichten eine größere Sicherheit gegen die Strömungskräfte erwartet werden, wie es auch die Formel von Shore Protection Manual (Breusers/Raudkivi, 1991) mit der größeren Isbash-Konstante für eingebettete Steine ausweist. Die Kosten dieser neuartigen Sohlensicherung lagen 1971 mit DM 90,-/m² erheblich niedriger als bei herkömmlichen Schüttsteinbauweisen mit Filteraufbau (Cordes, 10/1971).

Nach den im Kolkmodell beobachteten Unterhöhungen und Abbrüchen an der Befestigungskante, die im wesentlichen durch das Abrutschen einzelner Steine aus der losen Schüttsteinbefestigung bedingt waren, mußten an eine flexible Übergangsstrecke von der starren Sohlensicherung auf die ungesicherte auskolkbare Flußsohle folgende Forderungen gestellt werden. Sie mußte:

- flexible Eigenschaften haben, daß sie den im Kolkprozess fortschreitenden ungleichen Veränderungen an der bauwerksseitigen Kolkböschung folgen kann und diese voll abdeckt,
- gewährleisten, daß an der Befestigungskante keine einzelnen Steine in den Kolkessel abrutschen,
- in ihrem Vertikalaufbau unbedingt wasserdurchlässig sein, um im Fall der vom Kolk gegen die Befestigungskante gerichteten Strömung (Strömungswechsel im Tidegebiet) ein Anheben der flexiblen Befestigungsmatte durch die untergreifende Strömung zu verhindern.

Aufgrund dieser Forderungen wurde unter verschiedenen Ausführungsarten der von Cordes, 10/1971 im einzelnen beschriebene Aufbau gewählt (Bild 52).

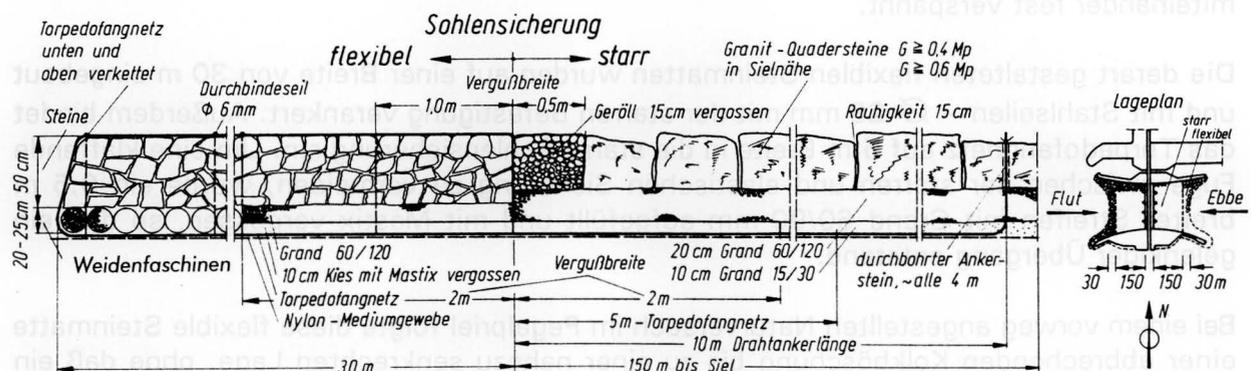


Bild 52 Aufbau der starren und flexiblen Sohlensicherung auf beiden Seiten des Sperwerks (Cordes, 1971)

Der Vertikalaufbau dieser flexiblen Sohlensicherung ist von unten nach oben wie folgt:

- Nylonmediumgewebe als Unterlage,
- Torpedofangnetz aus feuerverzinkten Stahlseilen, 6fach in Ringform, Ring-Ø 28 cm, Einzeldraht Ø 2 mm (Bild 53),
- Weidenfaschinenrollen, Ø 20 bis 25 cm,
- 50 cm Wasserbauschüttsteine 10/60 kg,
- Maschendrahtgeflecht 100/100 mm doppeltfeuerverzinkt,
- Torpedofangnetz wie vor als oberer Abschluß.

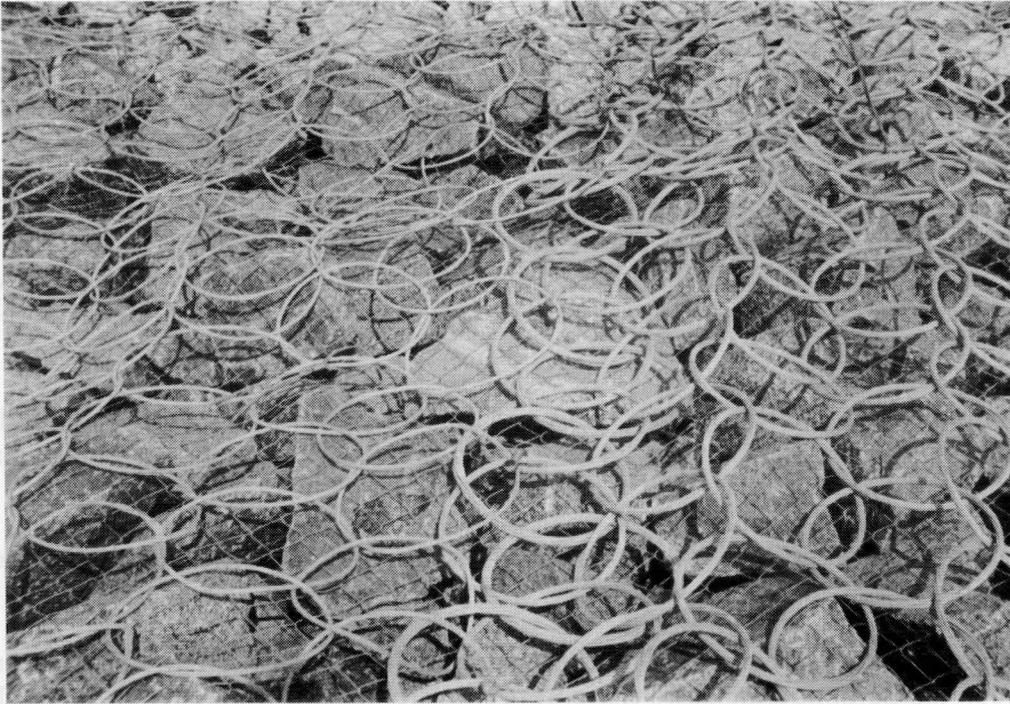


Bild 53 Torpedofangnetz in der flexiblen Sohlensicherung

Die untere und obere Torpedofangnetzlage wurden matrattenartig durch 6 mm Stahlseile miteinander fest verspannt.

Die derart gestalteten flexiblen Steinmatten wurden auf einer Breite von 30 m eingebaut und mit Stahlseilen – \varnothing 28 mm mit der starren Befestigung verankert. Außerdem bindet das Torpedofangnetz auf 5 m Breite in die starre Sohlensicherung ein. Um eine klaffende Fuge zwischen der starren und elastischen Sicherung zu vermeiden, wurde ein 0,5 m breiter Streifen mit Grand 60/90 mm aufgefüllt und mit Mastix vergossen, so daß ein gelenkiger Übergang entstand.

Bei einem vorweg angestellten Naturversuch im Pegelpriel folgte diese flexible Steinmatte einer abbrechenden Kolkböschung bis zu einer nahezu senkrechten Lage, ohne daß ein Abrutschen einzelner Steine eintrat. Die Kosten für die flexible Sohlensicherung betrugen 69,-- DM/m² in fertiger Ausführung.

4.3 Schadenserscheinungen

4.3.1 Schäden an der flexiblen Sohlensicherung

Nach der Inbetriebnahme des Sperrwerks im Jahr 1972 wurde die Anlage einschließlich der Sohlensicherung mit einem umfangreichen Meß- und Kontrollprogramm ständig überwacht (Harten/Knieß, 1976). Dabei wurden auch viermal pro Jahr Peilungen der Sperrwerksvorfelder innen und außen vorgenommen, die später, als kaum noch Veränderungen festzustellen waren, auf zweimal pro Jahr reduziert wurden. Im Rahmen einer dieser Routine-Peilungen erfolgte im Oktober 1976 auch ein Tauchereinsatz der Taucherguppe des Wasserbauamtes Brunsbüttel.

Infolge der in der großen Untersuchungstiefe herrschenden Dunkelheit - die starke Trübung des Wassers ließ auch keinen Einsatz von Scheinwerfern und Unterwasserkameras zu - konnten die jeweiligen Untersuchungsflächen nur ertastet und erfühlt werden, was die Taucheruntersuchungen außerordentlich erschwerte. Trotzdem ergaben die Untersuchungen, daß im gesamten Bereich der flexiblen Sohlensicherung binnen und außen Korrosionsschäden an der oberen Lage der Torpedofangnetze vorhanden waren. Von einigen Stellen wurden Einzelringe sowie Einzeldrähte von Ringen mit nach oben gebracht.

Im Bereich des Feldes II auf der Außenseite des Sperrwerks konnte auch ein Schaden im Aufbau der flexiblen Sohlensicherung festgestellt werden. Unmittelbar am Übergang zur ungesicherten Sandsohle wurden Teile einer unten liegenden Weidenfaschinenrolle ertastet; die Wasserbausteine waren nicht mehr in der ursprünglichen Einbaudicke von 0,50 m vorhanden. Ein Teil der Steinfüllung war über der bauwerksseitigen Kolkböschung nach unten abgerutscht.

Infolge früh eintretender und lange anhaltender Wasserniedrigtemperaturen konnten weitergehende Taucheruntersuchungen erst in der zweiten Märzhälfte 1977 erfolgen.

Nach einem Bericht des Wasser- und Schiffsamtes Tönning vom 14.04.1977 brachte die Auswertung der flächenhaft über die gesamte flexible Sohlensicherung binnen und außen durchgeführten Taucheruntersuchungen den folgenden Schadensbefund.

"Die obere Abschlußschicht der flexiblen Sohlensicherung, bestehend aus dem ringförmig gewebten Torpedofangnetz, ist über die gesamte Fläche zu ca. 80 - 90 % in ihrer Struktur zerstört und bildet kein zusammenhängendes Netz mehr. Die lotrechte Verspannung zur unteren Netzlage durch die sog. "Durchbindeseile" ist nicht mehr vorhanden. Die 28 mm starken Verbindungstrossen liegen, soweit auffindbar, lose, die Einzelringe sind stark korrodiert, so daß sie ohne Kraftaufwand aus noch vorhandenen Netzflächen bzw. aufgerollten Netzbündeln herausgelöst werden können. Die Netzabschlußkanten zur Flußsohle sind teilweise ausgerissen, die Anschlüsse zur starren Sohlensicherung sind vornehmlich in Höhe der Sielfelder 2, 3 und 4 binnen wie außen nicht mehr vorhanden.

Die Anschlüsse der Torpedofangnetze an die seitlichen Spundwände der südlichen Leitdämme und nördlichen Trennmole sind weitgehend erhalten.

Bis auf wenige Ausnahmen hat sich die Wasserbauschüttsteinschicht (Stärke 0,50 m) der flexiblen Sohlensicherung nicht verändert oder verlagert. Ins Gewicht fallende Unterspülungen der flexiblen Sohlensicherung an den westlichen und östlichen Endkanten wurden nicht festgestellt."

Die später im Juni und September 1977 wiederholten Taucheruntersuchungen ergaben, daß die im März 1977 weitgehend noch intakten Anschlüsse der Torpedofangnetze an die seitlichen Spundwände jetzt auch die beschriebenen Korrosionsschäden aufwiesen.

Die Ursache dieser Korrosionsschäden an den Torpedofangnetzen ist in erster Linie auf die rasche Abzehrung der ca. 57 μm dicken Zinkauflage an den Drahringen zurückzuführen, die nach neueren Erkenntnissen im Meerwasser 12 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ beträgt. Der Abbau wird im Bereich von Maschenknoten infolge gegenseitiger Verdrehung und Verschiebung der Drahringe bei Überströmung und im Bereich von Kontaktzonen eng aneinander liegender Drähte noch verstärkt.

Aufgrund der bis 1974 allgemein bestehenden Auffassung, daß der Angriff auf die Zinkschicht im Meerwasser infolge der Bildung von Magnesiumverbindungen enthaltenden Schutzschichten langsamer erfolgt, konnten diese Korrosionsschäden bei der Planung nicht abgesehen werden.

Mit den Steinmatten aus Torpedofangnetzen wurde seinerzeit eine flexible Sohlensicherung gebaut, über die sich alle an ihrer Entwicklung, Prüfung, Genehmigung und Durchführung befaßt gewesenen Stellen darin einig waren, eine besonders gute Bauweise gewählt zu haben. Deshalb hat man diese Bauweise auch später beim Stör-Sperrwerk wiederholt, wo bis heute keine derartig gravierenden Korrosionsschäden aufgetreten sind.

Durch die festgestellten Zerstörungen an der oberen Torpedofangnetzabdeckung verlor die Übergangstrecke den Verbund des Steinmaterials in der Deckschicht und damit ihre flexiblen Eigenschaften. Sie war jetzt keine flächig wirkende Steinmatte mehr, sondern bestand nur noch aus einer losen Steinschüttung aus Wasserbausteinen von 10 bis 60 kg. Damit konnte die Übergangstrecke bei großen Fließgeschwindigkeiten einmal von oben her flächig angegriffen, abgetragen und zerstört werden und zum zweiten bestand die Gefahr des Kantenabbruchs in den steil abfallenden Kolkkessel und einer rückwärts schreitenden Erosion.

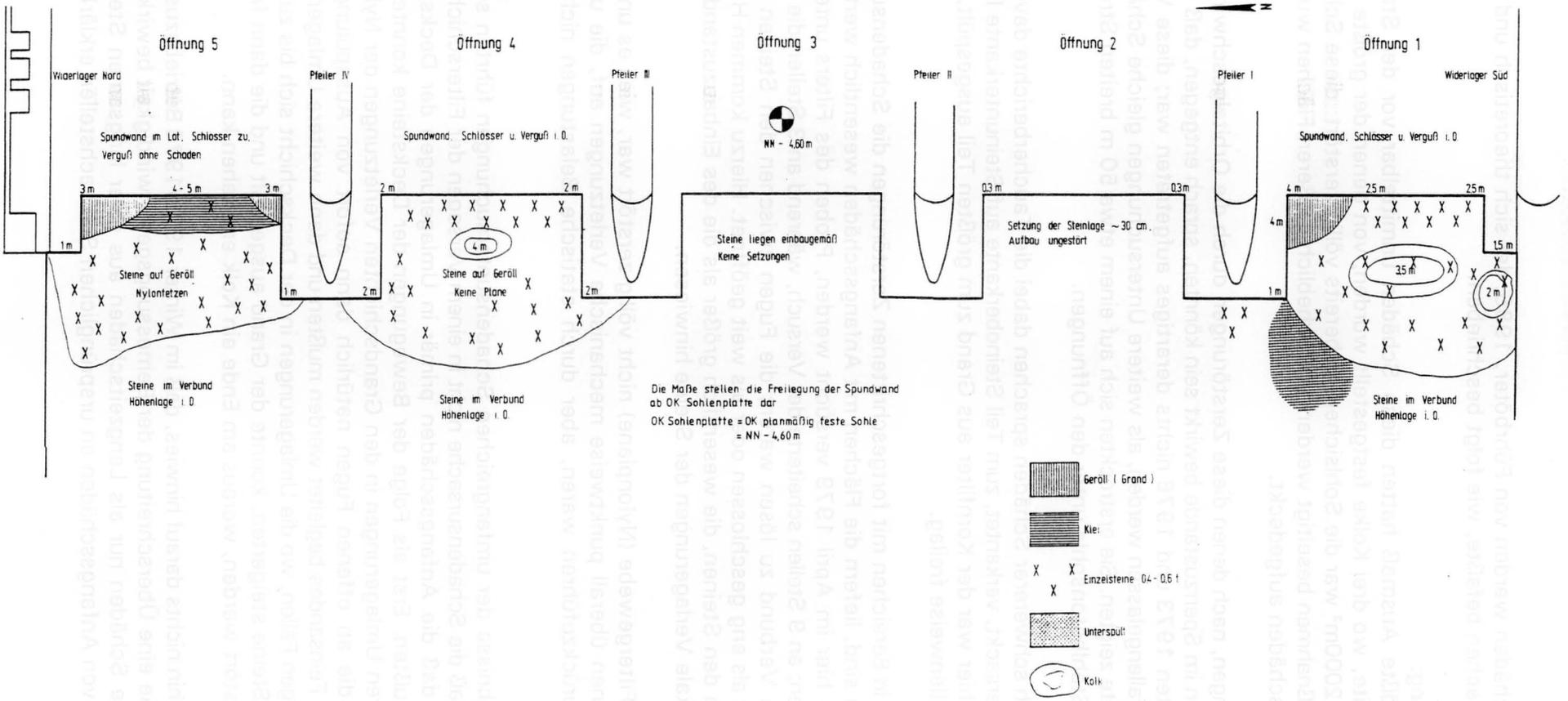
Geht man einmal von locker gelagerten Schüttsteinen aus, so lassen sich nach den bekannten Formeln $G = f(v^6)$ (z.B. Dietz, 1973) für die vorhandenen Steingewichte von 10 bis 60 kg in horizontaler Anordnung zulässige mittlere Fließgeschwindigkeiten von ca. 2,35 bis 3,15 m/s ermitteln. Dies sind Geschwindigkeiten, wie sie im Bereich der Übergangstrecke beim Drosselbetrieb nicht und beim freien Durchfluß nur selten überschritten werden, wie der Blick auf die möglichen Höchstgeschwindigkeiten (s. Tabelle 4) zeigt. Nimmt man jetzt noch den starken Muschelbewuchs hinzu, der bei den Peilungen im Herbst 1977 binnen und außen über der gesamten Fläche der flexiblen Sohlensicherung angetroffen wurde (Stärke ca. 20 - 30 cm binnen und 40 - 50 cm außen), so wird es durchaus verständlich, daß in den vielen Jahren des Sperrwerksbetriebs von 1977 bis heute die lose liegende Deckschicht der ehemals flexiblen Übergangstrecke durch die Strömung von oben her nicht angegriffen und zerstört worden ist. Auch beim häufigen (n-1)-Betrieb in den Jahren 1984 bis 1987 und insbesondere in den Jahren 1990 und 1991 waren derartige Strömungsangriffe auf die Decklage nicht zu beobachten.

Wohl aber traten beim Verschluß einer Wehröffnung infolge der starken Kolkentwicklung und der steilen Kolkböschungen Abbrüche an der lose liegenden Befestigungskante auf, die immer wieder durch das Einbringen von Sandsäcken gesichert werden mußten. Beim (n-1)-Betrieb im Jahre 1991 war mit dem Abbruch der Befestigungskante im Abströmbereich der Wehrfelder III und IV auch eine rückwärts fortschreitende Erosion verbunden, die einen Streifen von etwa 10 m erfaßt hatte (s. Abschnitt 3.3.5). Da zur Sicherung dieser Schäden in einer Sofortaktion 20.000 Sandsäcke abgestürzt werden mußten, war damit eine Situation erreicht, in der beim weiteren (n-1)-Betrieb die bauwerksseitigen Kolkböschungen durch den Einsatz von Sandsäcken nicht mehr dauerhaft befestigt werden konnten. Bei dem in den kommenden Jahren zur Sanierung der Wehrträger notwendigen umfangreichen (n-1)-Betrieb waren Maßnahmen zur Verstärkung der "flexiblen" Übergangstrecke und zur Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen unabdingbar.

4.3.2 Schäden an der starren Sohlensicherung

Die nach der Inbetriebnahme des Sperrwerks im Jahr 1972 regelmäßig vorgenommenen Kontrollpeilungen und auch noch die Taucheruntersuchungen 1976/77 haben keine nennenswerten Veränderungen an der starren Sohlensicherung ergeben, obwohl in diesen Zeitraum die Sturmtidenkette von 1973 und die Januarsturmfluten von 1976 fielen.

Umso unerwarteter war der Befund einer routinemäßigen Taucheruntersuchung im April 1978, wo nach einem an Sturmfluten ereignisarmen Winter erhebliche Schäden an der starren Sohlensicherung vorgefunden wurden (Bild 54).



Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1995) Nr. 73

Bild 54 Schäden an der starren Sohlensicherung nach dem Befund einer routinemäßigen Taucheruntersuchung am 28./29.04.1978

Diese Schäden werden von Führböter, 1986, der sich theoretisch und experimentell mit ihren Ursachen befaßte, wie folgt beschrieben.

Zitatanfang:

"Das größte Ausmaß hatten diese Schäden unmittelbar vor der Stahlbetonsohle der Außenseite, wo drei Kolke festgestellt wurden, von denen der größte 5 m tief war; auf weiteren 2000m² war die Sohlensicherung bereits völlig zerstört; diese Schäden mußten mit Sofortmaßnahmen beseitigt werden. Auf erheblich größeren Flächen wurden aber weitere Anfangsschäden aufgedeckt.

Vermutungen, nach denen diese Zerstörungen durch die Orbitalgeschwindigkeiten stehender Wellen im Sperrzustande bewirkt sein könnten, sprach entgegen, daß bei den schweren Sturmfluten 1973 und 1976 nichts derartiges aufgetreten war; diese Vermutung mußte gänzlich fallengelassen werden, als weitere Untersuchungen gleiche Schäden auch auf der Binnenseite zeigten. Sie erstreckten sich auf einem etwa 50 m breiten Streifen binnenwärts von der Stahlbetonsohle unter den Öffnungen.

Im Bereich schwererer Schäden sprachen dabei die Taucherberichte davon, daß die Decksteine "versackt, verkantet, zum Teil Steinoberkante auf Steinunterkante liegend" gefunden wurden; hier war der Kornfilter aus Grand zum größten Teil ausgespült, so daß die Filterplane stellenweise freilag.

Während in Bereichen mit fortgeschrittenen Zerstörungen die Schadensursachen kaum zu erkunden sind, liefern die Flächen mit Anfangsschäden wesentlich wertvollere Hinweise. Es sollte hier im April 1979 versucht werden, Proben des Filters unter den Steinen zu entnehmen; an 9 Stellen scheiterte der Versuch, während an 3 Stellen die Decksteine leicht aus dem Verbund zu lösen waren; die Fugen zwischen den Steinen zeigten sich also entweder als eng geschlossen oder als weit geöffnet. Hierzu kommen Höhenunterschiede zwischen den Steinen, die wesentlich größer als die des Einbauzustandes waren und die auf vertikale Verlagerungen der Steine hinwiesen.

Wo das Filtergewebe (Nylonplane) nicht völlig zerstört war, wies es unter den gestörten Decksteinen überall punktweise mechanische Verletzungen auf, die unschwer auf den Grand zurückzuführen waren, aber durch statische Belastungen nicht erklärt werden konnten.

Alle Ergebnisse der umfangreichen Schadensuntersuchungen führten schließlich zu dem Schluß, daß die Schadensursache nicht in einem Versagen der Filterschicht zu suchen war, sondern daß die Anfangsschäden primär in Umlagerungen der Deckschicht bestanden haben mußten. Erst als Folge der Bewegungen der Decksteine konnten dann durch die sekundären Umlagerungen in den Grandschichten Verletzungen der Nylonplanen erzeugt werden, die an offenen Fugen natürlich dann sofort von Ausspülungen des darunter liegenden Feinsandes begleitet werden mußten und dann weitere Umlagerungen bewirkten. In denjenigen Fällen, wo die Umlagerungen in der Deckschicht sich bis zum Herausbrechen einzelner Steine steigerten, konnte der Grand ausgespült und die dann freiliegende Nylonplane zerstört werden, woraus am Ende ein Kolk entstehen kann.

Da weiterhin nichts darauf hinwies, daß im Winter 1977/1978 Betriebszustände geherrscht hatten, die eine Überschreitung der Bemessungsgeschwindigkeit bewirkt haben könnten, waren die Schäden nur als Langzeitschäden aus einer langsamen Steigerung und Verstärkung von Anfangsschäden an ursprünglichen Schwachstellen erklärbar." Zitatende.

Nach Führböter, 1986 kommen für diese Schäden nur Strömungskräfte in Frage, die ständig und flächig die gesamte Deckschicht der starren Sohlensicherung belasten und mit der Struktur der neuartigen Befestigungsstrecke zusammenhängen.

Bei einer filtergerecht aufgebauten Schüttsteinlage, wie sie zum Beispiel den Kolkuntersuchungen im Hauptmodell zugrundelag, werden in den Hohlräumen zwischen den Steinen Sekundärströmungen erzeugt, die sich auch in die unteren Schichten fortsetzen. Da jedoch mit den nach unten kleiner werdenden Hohlräumen (Filteraufbau) auch der Reibungswiderstand stark anwächst, werden die Strömungskräfte bis zur untersten Filterlage (z.B. ein Kunststoffgewebe oder -vlies) weitgehend abgebaut. Diesem Abbau kommt eine ausreichende Dicke der Deckschicht entgegen, die im allgemeinen das 2,0- bis 2,5-fache der mittleren Steindurchmesser betragen soll. Die Steine an der Oberfläche der Deckschicht selbst werden neben dem Anströmdruck der Hauptströmung auch durch die hydrodynamischen Drücke der Sekundärströmungen von unten her belastet.

Diese Vorgänge entziehen sich einer theoretischen Behandlung; die Lagestabilität der Steine, beziehungsweise ihr hierzu erforderliches Gewicht G wird durch empirische Formeln $G = f(v^6)$ nachgewiesen.

Während bei einem Schüttsteindeckwerk die Strukturen der Hohlräume als Zufallsgrößen nach allen Richtungen gleich sind, wie auch die Rauheitsstrukturen an der Oberfläche, liegt bei der neuartigen Sohlensicherung am Eider-Sperrwerk keine Zufallsverteilung der Hohlräume zwischen den Quadersteinen vor, sondern ein regelmäßig in Längs- und Querfugen unterteiltes Fugensystem, bei den infolge des einlagigen Aufbaues die Fugen direkt bis zur unterliegenden Grandschicht durchgehen.

Von wesentlicher Bedeutung sind hier die Strömungsvorgänge an den Querfugen, an denen aus Rauheitsgründen bewußt höher gesetzte Höckersteine (Bremssteine) neben flacheren Steinen (Plattensteinen) liegen, so daß der Bremsstein mit seiner Stirnfläche einen Strömungswiderstand erzeugt (Bild 55, links).

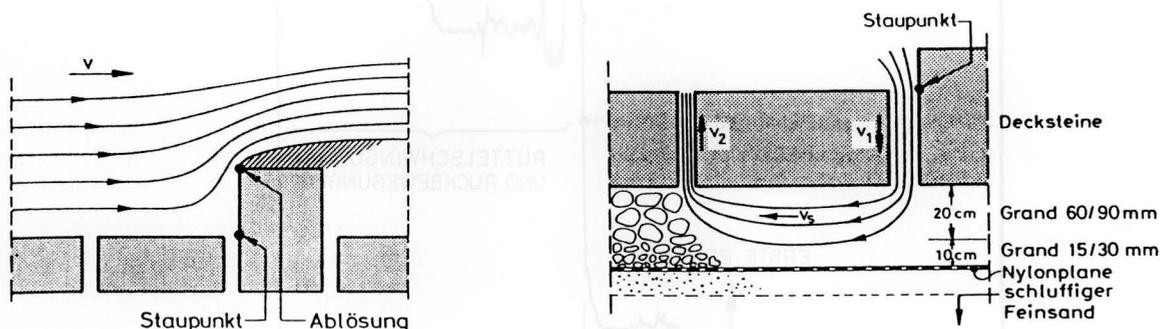


Bild 55 Strömungsfeld über der Sohle (links) und Sekundärströmung um einen Plattenstein (schematisch nach Führböter, 1986)

In der Ecke zwischen Plattenstein und Bremsstein baut sich entsprechend der Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$ ein Staudruck auf, der durch die Fugen auf die unten liegenden Grandschichten übertragen wird und dort Sekundärströmungen erzeugt (Bild 55, rechts).

Zusammen mit dem Anströmdruck der Hauptströmung können die Sekundärströmungen die Lagestabilität der Steine beeinflussen, die darüber hinaus noch durch Unterdruckscheinungen in den Ablösegebieten beeinträchtigt werden kann.

In einer theoretischen Analyse der hydrodynamischen Belastungen an der neuartigen Sohlensicherung des Eider-Sperrwerkes weist Führböter, 1986 weiter nach, daß selbst bei stationärer Strömung beim Erreichen einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit in der Decksteinschicht der Sohlensicherung hydrodynamisch bedingte Bewegungen auftreten können, die sich als Ruckbewegungen infolge des Auftriebes zusammen mit Sprengkräften in den Einstromfugen und als Rüttelschwingungen infolge bistabiler Kipplagen äußern können; außerdem wird bewirkt, daß sich die Einstromfugen vor den Bremsblöcken erweitern und dafür die anderen Fugen enger werden.

Die zum Auslösen dieser hydrodynamischen Vorgänge kritischen Fließgeschwindigkeiten liegen deutlich unter der Bemessungsgeschwindigkeit von $v = 4,65 \text{ m/s}$. Um dieses zu überprüfen, wurden im Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig Modellversuche im Maßstab 1 : 5 durchgeführt. Bild 56 zeigt als Beispiel den Verlauf eines solchen Versuchs an einem Höckerstein, bei dem die mittlere Geschwindigkeit allmählich gesteigert wurde.

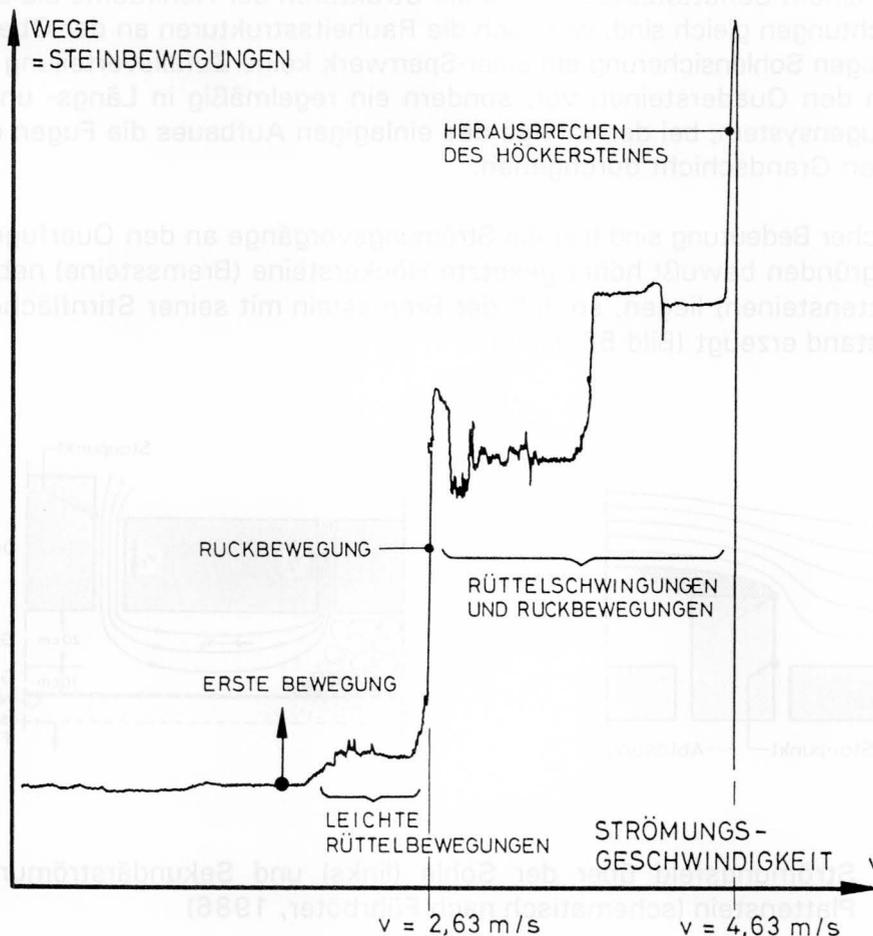


Bild 56 Meßschrieb mit Ruckbewegungen, Rüttelschwingungen und Bruch eines Höckersteins im Modell (Führböter, 1986)

Demnach ergeben sich schon für Geschwindigkeiten unter $2,63 \text{ m/s}$ (Natur) leichte Rüttelschwingungen, denen bei $v = 2,63 \text{ m/s}$ eine Ruckbewegung folgt, bei der die Einstromfuge vor dem Höckerstein voll geöffnet wird. Bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit fol-

gen verstärkte Rüttelschwingungen und Ruckbewegungen, die das Kippen des Höckersteines einleiten, der bei $v = 4,63$ m/s endgültig aus dem Verbund herausfällt.

Bei der Tidebewegung am Eider-Sperrwerk werden durch die fortlaufende Bewegungs-umkehr die Ruck- und Rüttelbewegungen verstärkt und wirken als Dauerbelastung auf die Grandschichten ein, in denen es dann zu Umlagerungen mit entsprechenden Angriffen auf die Nylonplanen kommen muß, wie es das früher beschriebene Schadensbild zeigt.

Nach diesem Ergebnis seiner Schadensanalyse empfiehlt Führböter, 1986, die Quadersteine der Deckschicht durch einen Magerbetonmörtel so im Verbund festzulegen bzw. zu verklammern, daß es zu diesen Ruck- und Rüttelbewegungen nicht kommen kann. Abschließend stellt er fest, daß diese sehr komplizierten Belastungsvorgänge bei der Ausführung der neuartigen Bauweise noch nicht bekannt sein konnten.

Aufgrund dieser Empfehlung wurden im Jahr 1979 die gefährdeten Flächen mit Unterwasserbeton nach dem Colcrete-Verfahren in den Fugen vergossen. Soweit Kolke vorhanden waren, wurden diese mit Bitu-Sand aufgefüllt und mit einer colcrete-vergossenen NA-Steinschicht abgedeckt. Die bisher um 30 cm abgesenkte Befestigungsfläche im Bereich der Sperrwerksöffnung II wurde in ihrer Höhenlage belassen und die Fugen mit Colcrete vergossen.

Im Jahre 1985 wurde die gesamte Außenfläche und im Jahr 1986 die gesamte Binnenfläche der starren Sohlensicherung vermörtelt. Seit der Durchführung dieser Vermörtelungsmaßnahmen konnten keine Veränderungen mehr an der starren Sohlensicherung, insbesondere auch an den betroffenen Schadensflächen festgestellt werden.

4.4 Sanierung der Sohlensicherung

4.4.1 Anforderungen

Aufgrund der überaus kritischen Kolkbildung und den mit ihr einhergehenden Abbrüchen an der Befestigungskante beim Verschuß der linken Sperrwerksöffnung im Jahr 1991 war mit Rücksicht auf die Sicherheit des Bauwerks vorab ein weiterer (n-1)-Betrieb nicht mehr möglich. Auch von einem weiteren Sandsackeinbau, immerhin mußten im Herbst 1991 in einer Sofortmaßnahme 20.000 Stück 1m^3 -Säcke abgestürzt werden, konnte keine dauerhafte Stabilisierung der Kolkböschungen erwartet werden (siehe hierzu die ausführliche Darstellung im Abschnitt 3.3.5).

Da aber die notwendige Betonsanierung der Wehrträger II bis V in den kommenden Jahren einen (n-1)-Betrieb größeren Umfangs erfordert, mußten die flexiblen Sohlensicherung verstärkt und die bauwerksseitigen Kolkböschungen gesichert werden.

Für den (n-1)-Betrieb gelten die in Tabelle 4 genannten Bemessungsgeschwindigkeiten, die beim freien Durchfluß größer als bei der Flut-Drosselung sind und bei Flut an der äußeren Kante der starren Sohlensicherung maximal $v = 4,9$ m/s betragen. Weiterhin mußte die Ebbströmung nach einer 2-stündigen Rückhaltezeit, d. h. der Spülbetrieb als Bemessungsfall zugrundegelegt werden; aufgrund neuerer Untersuchungen betragen die Bemessungsgeschwindigkeiten hierfür an der Kante der starren Sohlensicherung $v = 4,7$ m/s. Im Normalfall wird man davon ausgehen dürfen, daß die (n-1)-Fälle mit Flut-Drosselung betrieben werden, so daß alles in allem der zuletzt genannte Wert als Bemessungsgeschwindigkeit für die Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen gelten kann.

Bei der Planung dieses erweiterten Kolkschutzes im Jahr 1992 mußte man hinsichtlich der ehemals flexiblen Sohlensicherung, der vorhandenen Kolke und Abbrüche an der Befestigungskante aber auch hinsichtlich des Sperrwerksbetriebs von folgenden Bedingungen ausgehen (Vierfuß, 1994).

- Die Wiederherstellung eines flexiblen Verbundes der in der Übergangsstrecke von der starren Sohlensicherung auf die ungesicherte Flußsohle lose liegenden Wasserbausteine war nicht möglich. Ebenso mußte die Möglichkeit ausscheiden, die gesamte Übergangsstrecke zu entfernen und den neuen Kolkschutz unmittelbar an die starre Sohlensicherung anzuschließen. Die Gründe hierfür lagen in der Unsicherheit, wie weit die Rückverankerung in die starre Sohlensicherung durch ein 5 m breit einbindendes Torpedofangnetz und 10 m lange Drahtanker noch intakt war und das Risiko einer nicht begrenzbaren Zerstörung an der starren Sohlensicherung bestand (s. Bild 52).
- Die steilen bauwerksseitigen Kolkböschungen, die im Bereich zwischenliegender Kleinschichten stellenweise mit senkrechten Abbruchkanten abfielen, und insbesondere die unregelmäßig wechselnden Böschungsneigungen schlossen das Verlegen von Sinkstücken im Anschluß an die Übergangsstrecke aus.
- Die bestehenden Kolke, insbesondere der tiefe Kolk auf der Außenseite des Sperrwerks, sollten als "Tosbecken" für die schadhafte Energieumwandlung möglichst erhalten bleiben. Die auf der jeweiligen Bauwerksseite abfallenden Kolkböschungen mußten hierzu durch ein Deckwerk gesichert werden. Anzustreben war eine Deckwerksneigung von 1 : 4, die sich bei den früheren zweidimensionalen Modellversuchen (Dietz, 1969) als optimale Lösung ergeben hat. Bei den wesentlich steiler liegenden Kolkböschungen hätte eine solche Neigung allerdings einen sehr hohen Massenbedarf zur Auffüllung der steiler liegenden Kolkböschungen erfordert. Es wurde daher eine Deckwerksneigung von 1 : 3 gewählt, die aus geotechnischen Gründen an keiner Stelle unterschritten werden sollte.
- Dem Übergang dieses Deckwerks auf die ungesicherte Kolksohle war wiederum ein besonderes Augenmerk zu widmen, wie es die Umkehrströmung im Tidegebiet fordert (s. Bild 50). Durch den Einbau eines geotextilen Sinkstückes sollte eine Fußsicherung erfolgen, die das Abrutschen der schweren Deckwerksteine in den Kolkessel und ein Untergreifen der Strömung verhindern soll. Der Übergang zur unbefestigten Kolksohle muß problemlos verlängert werden können, wenn eine ungünstige Kolkentwicklung dies erfordert.
- Eine längere Schließung des Sperrwerks (Sielbetrieb) schied aus. Zwar konnte die Tagtide gesperrt werden, aber nachts und am Wochenende mußte in der Tideeider grundsätzlich die normale Tidebewegung stattfinden. Damit mußte in allen Bauzuständen mit den Strömungsgeschwindigkeiten des Normalbetriebs gerechnet werden. Für die erforderliche Teilauffüllung des Kolkes konnte daher nur ein relativ grobkörniges Material in Frage kommen.

4.4.2 Planung und Ausführung

Bei dem in Zusammenarbeit zwischen dem Wasser- und Schiffsamt Tönning und der Bundesanstalt für Wasserbau erstellten Entwurf für die Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen mußten neben den im vergangenen Abschnitt genannten Bedingungen auch hydraulische Gesichtspunkte, wie die Lagestabilität der Steine in der Deckschicht unter den Strömungsangriffen sowie geotechnische Aspekte, wie Filteraufbau beachtet werden (Bild 57).

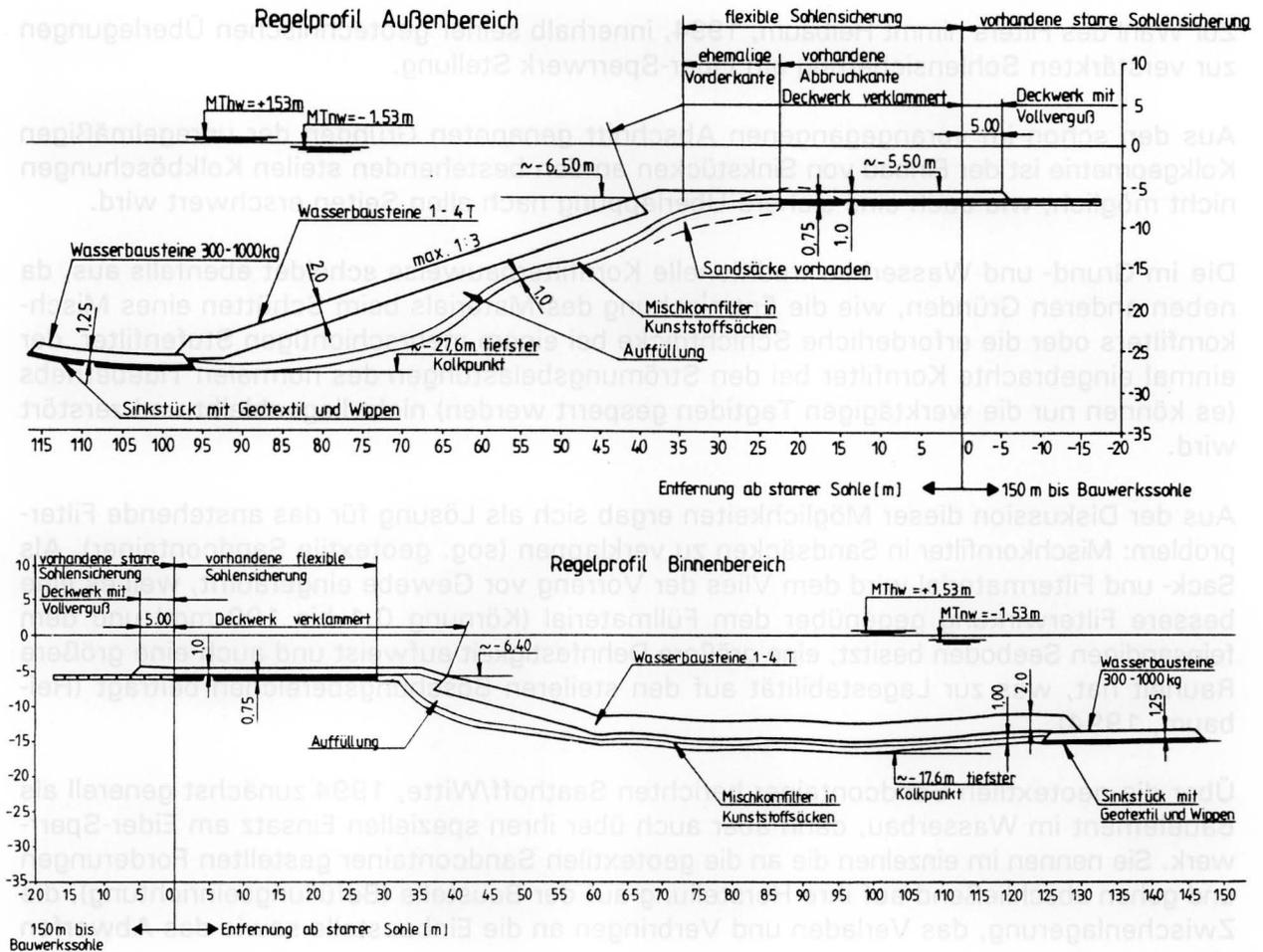


Bild 57 Regelprofile der verstärkten Sohlensicherung außen und binnen (Vierfuß, 1994)

Eine kurzgefaßte Beschreibung hierzu liefert Vierfuß, 1994.

"Als Grundlage der Kolkssicherung kommt ein Mischkornfilter zur Anwendung, der sowohl gegen den anstehenden Feinsand (Korndurchmesser um 0,15 mm), als auch gegen die Auffüllung filterstabil ist. Damit er sich beim Einbau nicht entmischt und durch die Strömung nicht erodiert wird, wird er in Vliesäcke (1 m³) gefüllt und so in einer Mindestdicke von 1,0 m eingebaut. Da das Vliesmaterial selbst als Filter wirkt, ergibt sich eine beabsichtigte zusätzliche Sicherheit.

Als Auffüllung und als erforderliche Zwischenschicht zu den großen Deckwerkssteinen werden Wasserbausteine der Größenklasse III verwendet. Sie sind gegen die 1,0 bis 4,0 t schweren Granitsteine (Mindestdicke 2,0 m) filterstabil. Als Flußsicherung und Übergang zur unbefestigten Sohle werden Sinkstücke mit Geotextil und Wippen und mit 300 - 1000 kg schweren Granitsteinen eingebaut.

Zur Verstärkung der alten flexiblen Sohlensicherung wird eine 1,0 m dicke Schicht aus Wasserbausteinen Klasse III aufgebracht und mit kolloidalem Mörtel verklammert bzw. im wehrseitigen Übergangsstreifen voll vergossen. Von dieser Lösung wird ein erosionsfester

und langzeitstabiler Übergang zwischen der vorhandenen starren Sohlensicherung und dem neuen Deckwerk erwartet."

Zur Wahl des Filters nimmt Heibaum, 1994, innerhalb seiner geotechnischen Überlegungen zur verstärkten Sohlensicherung am Eider-Sperrwerk Stellung.

Aus den schon im vorangegangenen Abschnitt genannten Gründen der unregelmäßigen Kolkgeometrie ist der Einbau von Sinkstücken an den bestehenden steilen Kolkböschungen nicht möglich, wie auch eine sichere Überlappung nach allen Seiten erschwert wird.

Die im Grund- und Wasserbau traditionelle Kornfilterbauweise scheidet ebenfalls aus, da neben anderen Gründen, wie die Entmischung des Materials beim Schütten eines Mischkornfilters oder die erforderliche Schichtdicke bei einem mehrschichtigen Stufenfilter, der einmal eingebrachte Kornfilter bei den Strömungsbelastungen des normalen Tidebetriebs (es können nur die werktägigen Tagtiden gesperrt werden) nicht liegenbleibt und zerstört wird.

Aus der Diskussion dieser Möglichkeiten ergab sich als Lösung für das anstehende Filterproblem: Mischkornfilter in Sandsäcken zu verklappen (sog. geotextile Sandcontainer). Als Sack- und Filtermaterial wird dem Vlies der Vorrang vor Gewebe eingeräumt, weil es eine bessere Filterwirkung gegenüber dem Füllmaterial (Körnung 0,1 bis 100 mm) und dem feinsandigen Seeboden besitzt, eine größere Dehnfestigkeit aufweist und auch eine größere Rauheit hat, was zur Lagestabilität auf den steileren Böschungsbereichen beiträgt (Heibaum, 1994).

Über die geotextilen Sandcontainer berichten Saathoff/Witte, 1994 zunächst generell als Bauelement im Wasserbau, dann aber auch über ihren speziellen Einsatz am Eider-Sperrwerk. Sie nennen im einzelnen die an die geotextilen Sandcontainer gestellten Forderungen und gehen abschließend auf ihre Herstellung auf der Baustelle (Befüllungseinrichtung), die Zwischenlagerung, das Verladen und Verbringen an die Einbaustelle sowie das Abwerfen ein.

Die Lagestabilität der 1,0 bis 4,0 t schweren Deckwerkssteine auf den bauwerksseitigen Kolkböschungen wurde durch Versuche in einem hydraulischen Ausschnittmodell des Sperrwerks im Maßstab 1 : 75 nachgewiesen (Akkerman, 1993). Diese Versuche wurden im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Sohlensicherung Eidersperrwerk bei Delft Hydraulics/Niederlande durchgeführt; die Bundesanstalt für Wasserbau hat diese Versuche fachlich begleitet (Bild 58).

Nach diesen Versuchen ist bei dem 1 : 3 geneigten Schüttsteindeckwerk mit den vorher genannten Steingewichten eine Sicherheitsspanne von 1,5 (bezogen auf die geometrische Steinabmessung D , die dem Gefälle H direkt proportional ist) enthalten.

Für den Fall des Spülbetriebs nach 2-stündiger Rückhaltezeit wurde im Modell für die 1,0 - 4,0 t schweren Steine auf der Außenseite des Sperrwerks ein sog. "Entwurfsgefälle" (ein um den vorher genannten Sicherheitsfaktor reduziertes Gefälle) von etwa 3,4 m ermittelt, für das die entsprechende theoretische Geschwindigkeit ca. 7,2 m/s beträgt. Diese Geschwindigkeit ist höher als die für die Bemessung der Sohlensicherung festgelegte Geschwindigkeit an der Kante der starren Sohlensicherung von 4,7 m/s. Allerdings muß dieser Wert wegen der neuen um ca. 1,00 m schwellenartig erhöhten Befestigungskante (Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung durch Überhöhung) auf ca. 5,5 bis 6,0 m/s nach oben korrigiert werden, ist danach aber immer noch geringer als die vorher genannte kritische Geschwindigkeit für die Lagestabilität der 1,0 bis 4,0 t schweren Deckwerkssteine von 7,2 m/s.

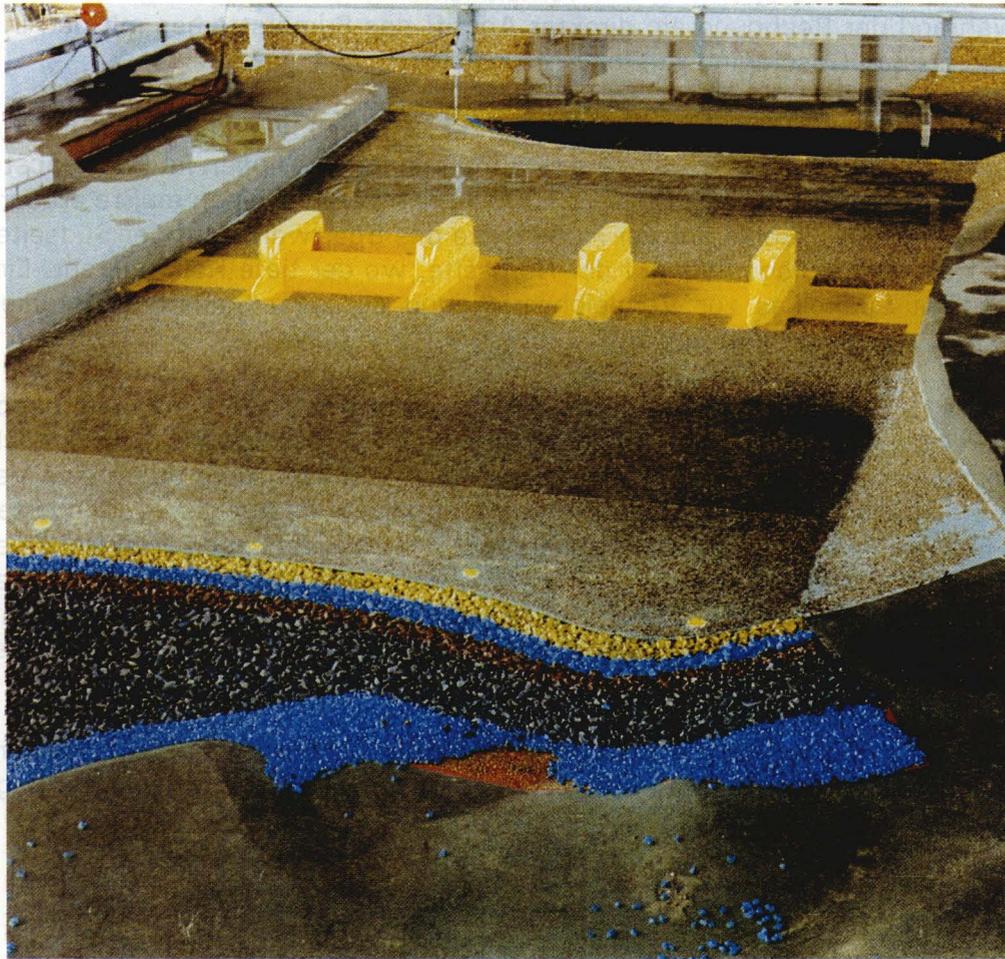


Bild 58 Ermittlung der Steingewichte im Ausschnittmodell des Eider-Sperrwerks bei Delft Hydraulics (Akkerman, 1993)

Für die Binnenseite wurde eine kritische Geschwindigkeit von 6,8 m/s gefunden, die damit der vorgegebenen nach oben korrigierten Bemessungsgeschwindigkeit von 5,5 bis 6,0 m/s genügt. Selbst bei einer Erhöhung der Geschwindigkeiten im Modell über 6,8 m/s hinaus, waren die Schäden immer noch so leicht, so daß auf der Binnenseite Steingewichte von 1,0 bis 3,0 t ausreichen würden.

Aus Gründen einer wirtschaftlichen Beschaffung, des Transports und der Haldenlagerung wurde auch auf der Innenseite eine 1,0 bis 4,0 t schwere Steinschüttung wie auf der Außenseite gewählt.

Mit den bekannten Formeln zur Ermittlung der Steingewichte auf geneigter Ebene, z.B.

- Knieß, 1977
- Shields und Manning-Strickler (Pilarczyk, 1987)
- Shore Protection Manual mit Isbash-Faktor (Breusers/Raudkivi, 1991)

ergeben sich für das vorliegende 1 : 3 geneigte Deckwerk und die genannte Bemessungsgeschwindigkeit größere mittlere Steingewichte als beim Modellversuch. Die gute Stabilität der geringeren Steingewichte des Modellversuchs (Steine 1,0 - 4,0 t) ist auf die vertiefte Lage der befestigten Kolkböschung zurückzuführen, die sich sehr günstig auswirkt. Hinter der überhöhten alten Befestigungskante löst sich die Strömung ab und es bildet sich eine

Ablösungswalze mit horizontaler Achse, die auf der befestigten Kolkböschung eine stromauf gerichtete Sekundärströmung mit verhältnismäßig geringen Fließgeschwindigkeiten bringt, während der Rechnung ein direkter Angriff des Primärstromes mit den ihm innewohnenden großen Geschwindigkeiten zugrundeliegt.

Das am Ende des schweren Deckwerks folgende Sinkstück (Faschinenrost mit Geotextil und eingewebten Schlaufen mit kreuzweise aufgebundenen Wippen im Rasterabstand 1 x 1 m) und einer Aufschüttung aus 300 bis 1000 kg schweren Steinen mußte entsprechend der unregelmäßigen Kolksohle auf der Außenseite des Sperrwerks auf der Südseite (weniger tiefer Kolk) höher liegen als auf der Nordseite, wo der tiefe Kolk ansteht. Eine Ausbaggerung des Südkolkes zur Vergleichsmäßigung der dem Sinkstück unterliegenden Kolksohle war zunächst nicht geplant.

Wie die Versuche gezeigt haben, konnte durch eine derartige Anordnung im exponierten Abströmbereich der Wehrfelder I und II keine Lagestabilität der 300 bis 1000 kg schweren Wasserbausteine erreicht werden (siehe hierzu auch Bild 58). Auch durch eine Verlängerung des Sinkstücks war keine Verbesserung zu erzielen, da auf dem verlängerten Sinkstück die Fließgeschwindigkeiten nicht abnahmen, wie entsprechende Messungen ergeben haben. Da die Schäden am Sinkstück überwiegend dort auftraten, wo es im Leebereich der Felder I und II verhältnismäßig hoch lag und dort auch vergleichsweise große Geschwindigkeiten auftreten mußten, konnte nur ein tiefer gelegtes Sinkstück eine Verbesserung bringen.

Aus diesem Grund wurde im Modell auf der südlichen Außenseite das Sinkstück um 5,0 m tiefer gelegt, was in der Natur eine entsprechende (ursprünglich nicht geplante) Baggerung erforderlich machte (Bild 59).

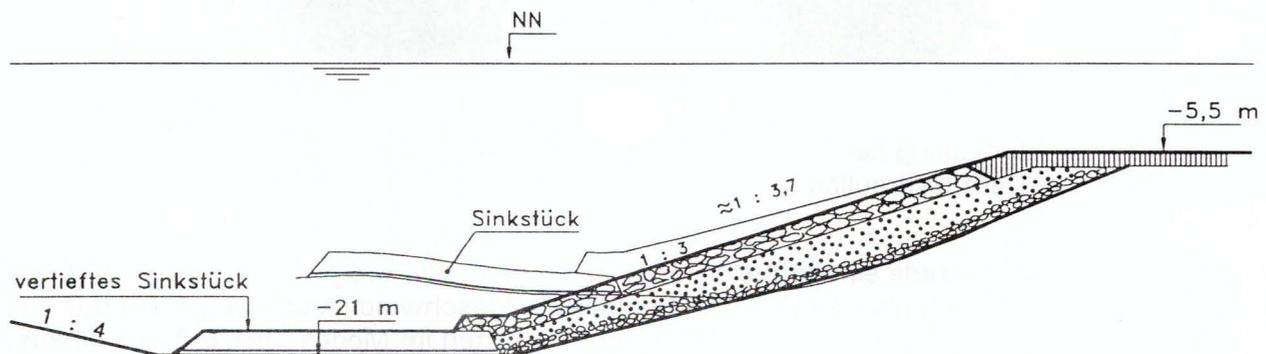


Bild 59 Regelprofil des vertieften Sinkstücks auf der Außenseite Süd

Die Modellversuche an dieser Variante haben diese Auffassung bestätigt. Die sogenannten theoretischen Geschwindigkeiten für das kritische Gefälle konnten durch die Tieferlegung des Sinkstücks deutlich erhöht werden und liegen jetzt zwischen 6,0 und 7,0 m/s. Wie vorher erwähnt, beträgt die Bemessungsgeschwindigkeit für die schwellenartig erhöhte Befestigungskante 5,5 bis 6,0 m/s, ist demnach mit einer Sicherheitsmarge von etwa 0,5 m/s geringer.

Die Stabilität der Befestigungskante kann nach einer im Versuchsbericht (Akkerman, 1993) ausgesprochenen Empfehlung durch eine lose, sanddurchlässige Steinschüttung auf die sich bildende Kolkböschung ("falling apron") verbessert werden. Eine derartige geschüttete "Vorschürze" kann auch später eingebracht werden.

Nach einer EG-weiten Ausschreibung umfaßte das Auftragsvolumen der Baumaßnahme zur Verstärkung der flexiblen Übergangsstrecke und zur Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen ca. 30 Mio DM. Die Bauarbeiten haben im April 1993 begonnen und sollen im wesentlichen bis zum Jahresende 1994 abgeschlossen sein (Bild 60).



Legende

- | | | |
|---|--|---------------------------------|
| 1. Peilschiff | 6. Einbau von Vliessäcken durch Stürzer | A. Außenvorhafen |
| 2. Absenken eines Sinkstückes | 7. Verklammerung von Schüttsteinen mit Beton | B. Binnenvorhafen |
| 3. Fertigung eines Sinkstückes | 8. Schlepper mit Ponton für Antransport der Schüttsteine | C. Schleuse |
| 4. Füllen von Vliessäcken mit Mischkornfilter | 9. Küstenmotorschiff für Antransport der Schüttsteine (10-60 kg) | D. Sperrwerk |
| 5. Einbau von Bauschüttsteinen (1-4 Tonnen) | | E. Richtung St. Peter Ording |
| | | F. Richtung Heide/Büsum |
| | | G. Lagerflächen Mischkornfilter |
| | | H. Baustellenbüro |

Bild 60 Baustellenbetrieb (nach Firmenprospekt der ARGE Sohlensicherung Eider-Sperrwerk, 1993)

Durch Saathoff/Witte, 1994 wird der Einsatz der geotextilen Sandcontainer als vorbildlich und äußerst erfolgreich eingestuft, die insbesondere auf die guten Erfahrungen mit den gewählten Vliesstoffcontainern hinweisen. Von den insgesamt 48000 eingebauten Sandcontainern wurden nur wenige beim Stürzen beschädigt. Auch nach Vierfuß, 1994 hat sich die gewählte Lösung des Mischkornfilters in Vliessäcken gut bewährt, wenn er auch von einigen Schwierigkeiten berichtet, einen flächendeckenden Einbau zu erreichen.

Der Überbau der ehemals flexiblen Sohlensicherung durch Wasserbausteine bereitete bei der Profilierung dieser verhältnismäßig flachen "Sohlschwelle" ebenfalls einige Probleme. Die notwendige Verklammerung - eine andere Lösung kam bei der begrenzten Bauhöhe und den hohen Fließgeschwindigkeiten nicht in Frage - erforderte wegen der Verschlickung der

Steine zwischen dem Einbauen, Profilieren und Vermörteln kurze Vorlaufzeiten und erwies sich deswegen als problematisch.

Unter den gegebenen schwierigen Verhältnissen, wie Tidebewegung mit hohen Fließgeschwindigkeiten, Wind, Seegang und großen Wassertiefen sowie den örtlichen Bedingungen an der Sohle, wie unregelmäßig ausgebildete Kolke mit steilen Kolkböschungen und fehlende Kenntnisse über den erreichten Schadenszustand der flexiblen Übergangsstrecke, darf bei der gewählten Bauweise zur Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen alles in allem von einer guten Lösung gesprochen werden, wenn auch die Bewährung bei dem (n-1)-Betrieb der kommenden Jahre noch aussteht.

5 Schlußfolgerungen

Nach dieser Untersuchung über die Kolkbildung am Eider-Sperrwerk wird man sich fragen müssen, ob die tiefen Kolke und die damit verbundenen Abbrüche an der Befestigungskante generell hätten verhindert werden können, wenn man bei der Planung des Sperrwerks eine andere Konzeption für das Bauwerk und die Befestigungsstrecke gewählt hätte. Die Antwort hierauf lautet kurz und knapp: Nein.

Allerdings könnten die Kolke weniger tief sein, wenn man für das Sperrwerk eine größere Lichtweite, eine tiefere Schwellenlage, eine längere Befestigungsstrecke und/oder eine steilere Neigung der Befestigungsstrecke gewählt hätte, womit man am Ende der Befestigungsstrecke, das heißt beim Übergang auf die bewegliche Sandsohle geringere Fließgeschwindigkeiten gehabt hätte.

Die Lichtweite von 200 m und die Schwellenhöhe von NN - 4,60 m waren das Ergebnis von Untersuchungen im Tidemodell der Eider (Harten, 1970), wobei auf der einen Seite der Durchflußquerschnitt so groß gehalten sein sollte, daß die Tidewasserstände und -mengen durch die Einschnürung nicht wesentlich beeinflußt werden, auf der anderen Seite sollte aber die gewünschte Spülwirkung nicht durch einen zu großen Sperrwerksquerschnitt herabgesetzt werden.

Aus dem zuletzt genannten Grund wurde auch auf eine Nachbesserung der im Tidemodell ermittelten Werte für die Lichtweite und die Schwellenhöhe verzichtet, als beim Vergleich mit den später angestellten Untersuchungen im größermaßstäblichen unverzerrten Hauptmodell deutlich wurde, daß das Durchflußvermögen der Sperranlage im Tidemodell infolge der Modellverzerrung (5-fache Überhöhung) zu günstig nachgebildet war.

Die Modellversuche zum Einfluß der Befestigungsstrecke auf die Kolkbildung zeigten, daß die maximale Kolktiefe um etwa ein Drittel hätte verringert werden können, würde man statt der 180 m langen Sohlensicherungsstrecke eine solche von 300 m mit einer gegen die bewegliche Flußsohle konvex gekrümmten Befestigungskante gewählt haben. Neben den reduzierten Kolkturen wäre mit einer längeren Befestigungsstrecke auch der für die Sicherheit des Bauwerks wichtige Vorteil verbunden gewesen, daß das Kolkgeschehen sehr weit weg vom Bauwerk erfolgt. Aus Gründen der Kosten und der Bauausführung im Trockenen innerhalb des möglichst knapp gewählten Ringdeiches wurde aber die kürzere Form der Befestigungsstrecke vorgezogen. Beim bevorzugten Trockeneinbau spielte insbesondere die neuartige Ausbildung der flexiblen Übergangsstrecke und deren Verankerung eine große Rolle.

Mit einer steileren Neigung der Befestigungsstrecke - statt der ausgeführten Neigung von 1 : 75 wäre von der hydraulischen Seite her durchaus eine Neigung von 1 : 50 bis 1 : 40 möglich gewesen - hätte man mit der damit verbundenen Erweiterung des Abflußquerschnitts an der Befestigungskante geringere Fließgeschwindigkeiten erreicht. Gegen eine solche Konzeption sprachen die Kosten der hierfür notwendigen Baggerungen innerhalb der Bauinsel.

Immer wieder wird die Frage diskutiert, ob man mit der Errichtung des Sperrwerks im Purrenstrom (Rinnenbauweise) die Schrägdurchströmung des Sperrwerks, wie sie heute bei dem im Watt gebauten Sperrwerk (Wattbauweise) zu beobachten ist, hätte vermeiden können (s. Bild 8). Eine eindeutige Antwort hierauf ist nicht möglich, sondern muß differenzierter formuliert werden.

Betrachtet man zunächst die Strömungsverhältnisse auf der Binnenseite des Sperrwerks, so steht außer Frage, daß bei einem im Purrenstrom liegenden Sperrwerk die Anströmung bei Ebbe aus dieser tiefen Eiderrinne heraus ausgesprochen günstig erfolgen würde. Auch bei Flut würden die Strömungsverhältnisse binnenseitig der Anlage ebenso gut sein und der Abstrom genau in die Ost-West-Richtung des Purrenstroms erfolgen. Der heute zu beobachtende unterschiedliche Verlauf des Flut- und Ebbstromes und die damit verbundene charakteristische Sohlusbildung auf der Binnenseite des Sperrwerks (s. Bild 7) würden sich mit größter Wahrscheinlichkeit nicht eingestellt haben.

Ganz anders muß die Strömungssituation auf der Außenseite des Sperrwerks gesehen werden, wenn auch bei Flut für die beiden nachträglich zur Diskussion stehenden Bauweisen keine nennenswerten Unterschiede in der Anströmung aufzuzeigen sind.

Für die Abströmung vom Bauwerk bei Ebbe soll einmal davon ausgegangen werden, daß man auch bei der Rinnenbauweise keine Änderungen an dem damals bestehenden Zweirinnensystem mit der Nord- und Südrinne und der dazwischen liegenden "Großen Vollerwiek-Plate" vorgenommen hätte. Entsprechend dem damals bestehenden Trend, daß der Ebbstrom bevorzugt über die Nordrinne abläuft, hätte sich auch bei der Rinnenbauweise der Abstrom vom Sperrwerk überwiegend in die Nordrinne orientiert und es wäre zu einer ähnlichen unsymmetrischen Kolkbildung gekommen, wie sie auch bei den im Watt errichteten Sperrwerk beobachtet werden konnte, infolge der günstigen Strömungsverhältnisse auf der Anströmseite aber weniger stark ausgeprägt. Die dadurch vorbestimmte Unsymmetrie der Strömung auf der Außenseite des Sperrwerks würde sich mit größter Wahrscheinlichkeit auch bei einer späteren Abdämmung der Nordrinne erhalten haben, wie die Erfahrungen mit dem späteren Sperrwerk lehren (siehe hierzu Abschnitt 3.3.2).

Ein ganz anderes und ausgesprochen günstiges Strömungsbild hätte sich aber ergeben, wenn man schon mit der Inbetriebnahme des im Purrenstrom liegenden Sperrwerks den Nordrinnenbogen durchdämmt und die Strömung dadurch in die Südrinne gezwungen hätte. Allerdings stand ein derartiges Vorgehen nie zur Diskussion, da man damals davon ausging, daß die gebündelte Abströmung vom Sperrwerk und insbesondere die Spülströmung nach Rückhaltung dies selbst besorgen würden. Die frühzeitige Abdämmung der Nordrinne würde bei einem in der tiefen Eiderrinne (Purrenstrom) liegenden Sperrwerk zu einem genau in Ost-West-Richtung verlaufenden Ebbstrom und zu symmetrischen Strömungsverhältnissen geführt haben; durch diese ausgesprochen günstige Strömungsführung hätte man die kritische unsymmetrische Kolkbildung auf der Außenseite des Sperrwerks und die durch sie initiierte Wechselwirkung zwischen Kolk und Strömung (Kolkmechanismus) vermieden.

Es sei dahin gestellt, ob man auch bei der gewählten Wattbauweise durch eine frühzeitige Abdämmung der Nordrinne trotz der schrägen Anströmung aus dem Purrenstrom günstigere Strömungsbedingungen auf der Außenseite erhalten hätte.

Für andere ähnliche Bauvorhaben - nicht nur im Küstengebiet, z.B. für Wehre - können hinsichtlich der Sohlensicherung folgende Erfahrungen vom Eider-Sperrwerk wertvoll sein.

- Zur schnellen Sicherung akut auftretender Kolke bietet sich das Abstürzen von Sandsäcken an. Für diese geotextilen Sandcontainer sind zur Erzielung einer größeren Rauheit und somit eines größeren Haftverbundes nur vernadelte Vliesstoffe zu verwenden. Auch für die temporäre Kolsicherung von Baugrubenumschließungen (z.B. beim Bau des neuen Weserwehres Bremen) können Sandsäcke von Vorteil sein.
- Befestigungsstrecken unterhalb von Kontrollbauwerken sind ausreichend lang auszubilden, so daß die Kolkbildung in einer unkritischen Entfernung vom Bauwerk erfolgt. Die Verbindungslinie zwischen dem höchsten Punkt der unterstromigen Bauwerkskante und dem tiefsten Kolkpunkt sollte flacher als 1 : 6 (bei bindigen Böden) und 1 : 15 (bei leicht beweglichen Böden) liegen. Außerdem bringen längere Befestigungsstrecken den kleinen günstigen Nebeneffekt, daß die Kolke etwas weniger tief als bei kurzen Befestigungsstrecken sind.
- Mehrlagige, filtergerecht aufgebaute Schüttstein-Befestigungsstrecken sind wegen der unregelmäßigen Hohlraumstruktur einlagigen gesetzten Bauweisen mit einem relativ regelmäßigen Längs- und Querfugensystem vorzuziehen. Durch die nach unten kleiner werdenden Hohlräume (Filteraufbau) des Schüttsteindeckwerks werden mit dem zunehmenden Reibungswiderstand die Strömungskräfte bis zur untersten Filterlage weitgehend abgebaut, wenn eine ausreichende Dicke der Deckschicht vorliegt (2,0 bis 2,5-fache des mittleren Steindurchmessers). Die Lagestabilität der Deckschicht gegen den Anströmdruck der Hauptströmung und die hydrodynamischen Drücke der Sekundärströmungen von unten her kann mit den bekannten empirischen Formeln zur Bestimmung der Steingewichte (s. u.a. Abschn. 4.4.2) nachgewiesen werden. Im allgemeinen liegt man mit diesen Formeln auf der sicheren Seite. Trotzdem sollte man auf Modellversuche in einem geeigneten Maßstab aus Sicherheitsgründen nie verzichten, insbesondere dann nicht, wenn unzureichende Kenntnisse über die vertikale und horizontale Geschwindigkeitsverteilung vorliegen.
- Auch weiterhin sollte der Übergang von einem verhältnismäßig starren Schüttsteindeckwerk auf die unbefestigte auskolkbare Flußsohle mit einem flexiblen Konstruktionselement gesichert werden, das sich ungleichen Kolken anpassen kann. Die Idee der flexiblen Übergangsstrecke als solche hat sich beim Eider-Sperrwerk gut bewährt, jedoch muß durch die Verwendung geeigneter Baustoffe ein dauerhafter Verbund zwischen den einzelnen Befestigungselementen gewährleistet sein. Baustoffe, wie Stahlseile, Stahlnetze, Maschendraht o.a. sind wegen ihrer Korrosionsanfälligkeit, selbst wenn sie doppelt verzinkt sein sollten, zu vermeiden. Wie auch Vierfuß, 1994 fordert, muß der flexible Übergang problemlos verlängert werden können, wenn die Kolkentwicklung dies erfordert. Außerdem muß er als Verschleißteil betrachtet werden und somit nicht nur ausreichende Reserven, sondern auch einfache Möglichkeiten für eine Ergänzung und Verstärkung bieten, wenn ein Konstruktionselement versagt.

Abschließend kann mit Hollmer, 1992, und Vierfuß, 1994, festgestellt werden, daß sich trotz der umfangreichen Sanierungsarbeiten an den Wehrträgern und der Sohlensicherung und trotz der tiefen Kolke auf der Außenseite des Sperrwerks der Eiderdamm und das Eider-Sperrwerk bewährt haben. Die Sturmtidenkette von 1973 und die Januarsturmfluten von 1976, die an der Eidermündung am 03.01.1976 den höchsten bisher gemessenen Wasserstand (HHThw) brachten, konnten an der Eider keinen Schaden anrichten. Auch den anderen an die Eiderabdämmung gestellten Aufgaben, wie die Verbesserung der Vorflut und die Wahrung der Schifffahrtsbedingungen, wurde das "Jahrhundertbauwerk" an der Küste gerecht.

6 Ausblick

In den kommenden Jahren wird der Beton der Wehrträger II bis V saniert. Hierzu muß das Sperrwerk über längere Zeit mit einem jeweils geschlossenen Wehrfeld betrieben werden. Nach dem Ergebnis einer speziellen Untersuchung der (n-1)-Betriebsfälle im Luftmodell (Dietz/Nestmann, 1994) ist es empfehlenswert, bei der notwendigen Betoninstandsetzung mit dem rechten Randfeld V zu beginnen und danach die Felder IV bis II folgen zu lassen. Dadurch werden die asymmetrischen Kolke auf der Außenseite des Sperrwerks vergleichmäßig und die bestehenden Sekundärströmungen vermindert. Möglicherweise verlangt der derzeit bestehende bauliche Zustand des Betons der einzelnen Wehrträger eine andere Reihenfolge, wenn die Betonsanierung eines bestimmten Wehrträgers vorrangig erfolgen muß.

Beim (n-1)-Betrieb ergeben sich am Sperrwerk äußerst kritische Strömungszustände (siehe Abschnitt 2.2), die nicht nur durch die Erhöhung des spezifischen Durchflusses und damit durch größere Fließgeschwindigkeiten geprägt sind, sondern das Strömungsbild erfährt eine grundlegende Wandlung zu einer asymmetrischen Strömung mit einer hohen Wirbel- und Turbulenzproduktion.

Diesen kritischen Strömungsvorgängen wurde in den Jahren 1993/94 die vorhandene Sohlensicherung durch eine Verstärkung der flexiblen Übergangsstrecke und eine Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen angepaßt. Trotz dieser Verstärkungsmaßnahmen kann nicht ausgeschlossen werden, daß an der neuen Befestigungskante infolge neuer ungleichmäßiger Kolke mit steilen Kolkböschungen Unterhöhungen und Abbrüche am Sinkstück auftreten, die ein Abrutschen der 300 bis 1000 kg schweren Steine in den Kolkessel zur Folge haben können.

Der Sinkstückübergang von der schwer befestigten bauwerksseitigen Kolkböschung auf die ungesicherte auskolkbare Flußsohle muß daher als Verschleißteil angesehen werden und bedarf einer ständigen Überwachung. Festgestellten Veränderungen und Abbrüchen sollte ohne Verzug mit Nachbesserungen an der Befestigungskante begegnet werden. Als bauliche Maßnahmen hierzu stehen das Vorschütten einer Schürze aus losem Steinmaterial der Klasse 0 ("falling apron"), wie es am Oosterschelde-Sperrwerk mit Erfolg praktiziert wird, oder der Einbau von Sandsäcken zur Diskussion. Der Sandsackeinbau zum Schutz der Befestigungskante und der bauwerksseitigen Kolkböschung hat sich beim Eider-Sperrwerk über viele Jahre bewährt und wurde erst bei der übermäßig starken Kolkentwicklung des (n-1)-Betriebes unwirtschaftlich.

Bei den guten Erfahrungen mit dem "Falling-apron-Verfahren" am Oosterschelde-Sperrwerk muß man allerdings sehen, daß dort der Einbau der Vorschrürze in einer Entfernung von 500 bis 600 m zum Bauwerk erfolgt, wo die dreidimensionalen Strömungswirkungen, wie Wirbel und Makroturbulenzen schon weitgehend abgeklungen sind und sich daher mit 1 : 3 bis 1 : 5 eine verhältnismäßig flache bauwerksseitige Kolkböschung einstellt, wie sie zweidimensionalen Kolkvorgängen eigen ist.

Demgegenüber liegt beim Eider-Sperrwerk die Befestigungskante etwa 300 bis 350 m beidseitig des Bauwerks, wo durchaus beim (n-1)-Betrieb noch asymmetrische Strömungszustände mit einem hohen Wirbel- und Turbulenzgehalt auftreten können, die zu wesentlich steileren Kolkböschungen als 1 : 3 führen können (dreidimensionale Kolkbildung!). Überdies liegen beim Eider-Sperrwerk beim (n-1)-Betrieb größere Fließgeschwindigkeiten als beim Oosterschelde-Sperrwerk vor.

Aus diesem Grund darf von einer Vorschürze aus Schüttsteinen beim Eider-Sperrwerk nicht so ohne weiteres ein so guter Erfolg wie beim Oosterschelde Sperrwerk erwartet werden und es sollte daher die Sicherung der Sinkstückkanten mit Sandsäcken vorgenommen werden.

Längerfristig ist im Rahmen eines aktiven Kolkschutzes daran zu denken, die derzeit bestehende ungünstige Schräganströmung des Sperrwerks bei Ebbe mit ihren nachteiligen Auswirkungen auf die Kolkbildung durch strombauliche Maßnahmen im Purrenstrom zu verbessern.

Möglicherweise kommt die Natur mit ihren derzeit zu beobachtenden Veränderungen der Sohlverhältnisse in der Tideeider einer günstigeren Anströmung des Sperrwerks von sich aus entgegen. So können neueste Peilungen von der Tideeider zwischen Tönning und dem Sperrwerk zeigen, daß sich die früher im Abschnitt 2.1 beschriebenen Zwei-Rinnenentwicklung auf der Binnenseite des Sperrwerks vom November 1993 bis September 1994 weiter verändert hat (Bild 61).

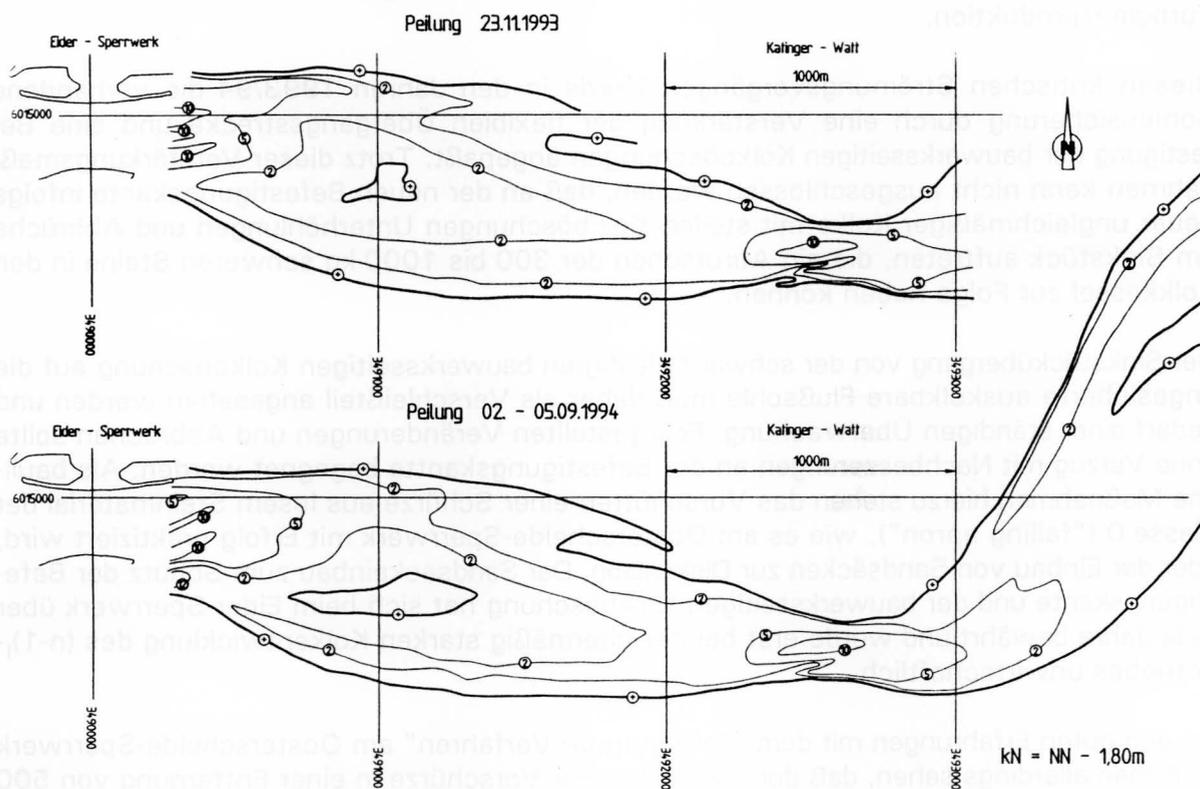


Bild 61 Sohlentwicklung auf der Binnenseite des Sperrwerks; Lageplan mit Tiefen in Meter unter KN

Die eine Stromteilung in Nord- und Südrinne bewirkende Untiefe hat sich weiter aufgehöhht und vergrößert. Mit dieser Veränderung ist eine etwa 2,0 km oberhalb des Sperrwerks einsetzende und nach unterstrom fortschreitende Verengung und Abflachung der Südrinne verbunden. In der Nordrinne dagegen schiebt sich eine vom Sperrwerk ausgehende und nach oberstrom gerichtete Erosionszunge vor (Bild 62).

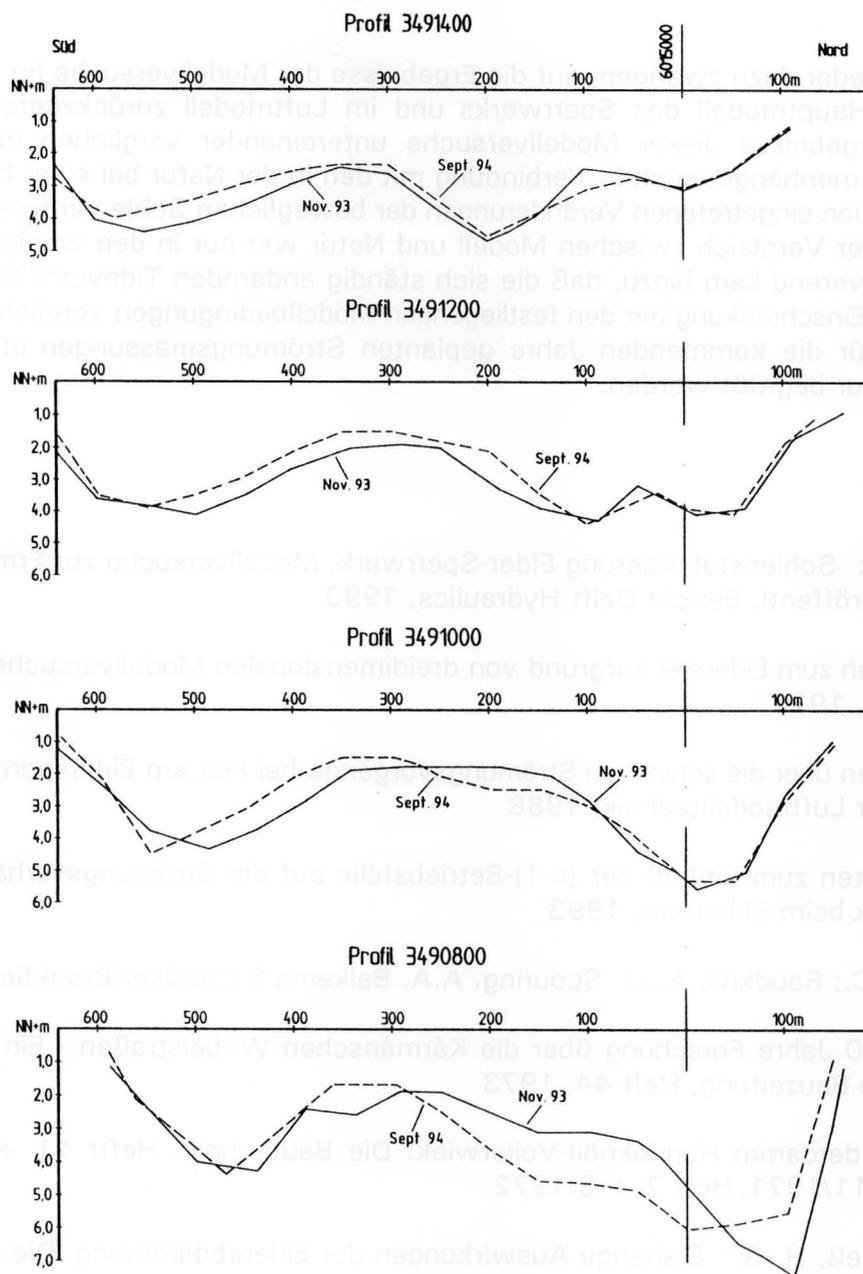


Bild 62 Sohlentwicklung auf der Binnenseite des Sperrwerks (charakteristische Querschnitte)

Diese Sohlveränderungen könnten zur Folge haben, daß nicht nur die Flut ihren bevorzugten Verlauf durch die Nordrinne nimmt, sondern auch der Ebbstrom die nördliche Rinne stärker als bisher beaufschlagt. Dies könnte der Beginn einer Entwicklung sein, in der sich der Purrenstrom etwas weiter in die nördliche Richtung verlagert und dadurch auf natürliche Weise die Anströmung des Sperrwerks bei Ebbe verbessert wird. Genauere Aufschlüsse über diese Entwicklung, die möglicherweise auch nur durch die Sperrung der werktägigen Tagtiden während der zweijährigen Bauzeit zur Sanierung der Sohlensicherung bedingt war, können nur weitere Sohlpeilungen in den kommenden Jahren in Verbindung mit Strömungsmessungen in der Natur bringen.

Die Untersuchung der Strömungsverhältnisse im Bereich des Sperrwerks und der herrschenden Fließgeschwindigkeiten im Rahmen dieser Arbeit machte deutlich, daß bei den Naturmessungen Defizite bestehen, die bei der Beschreibung der jeweiligen Strömungs-

bilder immer wieder dazu zwingen, auf die Ergebnisse der Modellversuche im Tidemodell der Eider, im Hauptmodell des Sperrwerks und im Luftmodell zurückzugreifen. Wohl konnten die Ergebnisse dieser Modellversuche untereinander verglichen und anhand logischer Zusammenhänge, auch in Verbindung mit den in der Natur bei einer bestimmten Strömungssituation eingetretenen Veränderungen der beweglichen Sohle verifiziert werden, doch ein exakter Vergleich zwischen Modell und Natur war nur in den wenigsten Fällen möglich. Erschwerend kam hinzu, daß die sich ständig ändernden Tideverhältnisse in der Natur nur unter Einschränkung mit den festliegenden Modellbedingungen verglichen werden konnten. Die für die kommenden Jahre geplanten Strömungsmessungen in der Natur können daher nur begrüßt werden.

7 Literatur

Akkerman, G.J.: Sohlenstabilisierung Eider-Sperrwerk, Modellversuche zur Ermittlung der Stabilität. Unveröffentl. Bericht Delft Hydraulics, 1993

BAW: Gutachten zum Eidersiel aufgrund von dreidimensionalen Modellversuchen im Maßstab 1 : 66 2/3, 1971

BAW: Gutachten über die sohlernen Strömungsvorgänge bei Flut am Eidersperrwerk unter Anwendung der Luftmodelltechnik, 1988

BAW: Gutachten zum Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle auf die Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk beim Ebbstrom, 1993

Breusers, H.N.C.; Raudkivi, A.J.: Scouring. A.A. Balkema Rotterdam/Brookfield, 1991

Chen, Y.N.: 60 Jahre Forschung über die Kármánschen Wirbelstraßen - Ein Rückblick. Schweizerische Bauzeitung, Heft 44, 1973

Cordes, F.: Eiderdamm Hundeknöll-Vollerwiek. Die Bautechnik, Heft 11 + 12/1970, Heft 9, 10, + 11/1971, Heft 7 + 8/1972

Cordes, F.; Knieß, H.-G.: Bisherige Auswirkungen der Eiderabdämmung. Die Bautechnik 51 (1974), Heft 12

Dietz, J.W.: Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß. Mitteilungen des Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratoriums der Universität Karlsruhe, Heft 155, 1969, a

Dietz, J.W.: Kolsicherung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 29, 1969

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

Dietz, J.W.: Sicherung der Flußsohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken. Wasserwirtschaft 63 (1973), Heft 3

Dietz, J.W.: Kolkbildung am Eider-Sperrwerk. BAW-Brief, Beitrag 438 K, 1988

Dietz, J.W.: Eidersperrwerk. Natur- und Modellversuche. Hansa 131 (1994), Heft 4

Dietz, J.W.; Nestmann, F.: Strömungsuntersuchungen für das Eider-Sperrwerk. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 71, 1994

Führböter, A.: Hydrodynamische Belastungen der Sohlsicherung des Eidersperrwerkes. Bauingenieur 61 (1986) 319 - 328

Hankó, Z.G.: Vortex - induced oscillations at low-head weirs. Journal of the Hydraulics Division, HY 6, November 1967

Harten, H.: Abdämmung der Eider; Modellversuche im Tidemodell. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 30, 1970

Harten, H.; Knieß, H.-G.: Eiderdamm-Natur- und Modellmessungen. Wasserwirtschaft 66 (1976), Heft 12.

Heibaum, M.: Kolksicherung am Eidersperrwerk. Geotechnische Überlegungen. Hansa 131 (1994), Heft 4

Hollmer, U.: Eider und Eider-Sperrwerk. Vorgeschichte, Bau, Betrieb. Eiderstedter Werbe- und Verlagsgesellschaft, Garding, 1992

Knieß, H.-G.: Bemessung von Schüttsteindeckwerken im Verkehrswasserbau, Teil 1: Lose Steinschüttungen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 42, 1977

Pilarczyk, K.W.: Local Scour. The Closure of Tidal Basins. Delft University Press, 1987

Prandtl, L.; Oswatitsch, K.; Wieghardt, K.: Führer durch die Strömungslehre. Vieweg Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1990

Ross, C.: Möglichkeiten und Grenzen eines geregelten Sperrwerksbetriebs zur Beeinflussung der Tidedynamik. Mitt.d. Franzius-Instituts der Universität Hannover, Heft 50, 1980

Saathoff, F.; Witte, J.: Eidersperrwerk. Geotextile Sandcontainer zur Stabilisierung der Kolkböschungen. Hansa 131 (1994), Heft 4

Vierfuß, V.: Sicherung des Eidersperrwerks gegen Auskolkungen. Hansa 131 (1994), Heft 4

Wieland, P.: Deichschutz und Binnenentwässerung im Eidergebiet. Historischer Küstenschutz, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1992

