

Strömungsuntersuchungen für das Eider-Sperrwerk

Experimental study of flow at the Eider barrage

Etude expérimentale de l'écoulement au niveau du barrage sur l'Eider

Исследования потоков 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 und u. a. über Staustrufen, Wehre, Sperrwerke, Querströmungen in Vorhafenzufahrten, Kolkbildung, Sohlensicherungen und Modelluntersuchungen.



Franz Nestmann, Dr.-Ing., Ltd. Baudirektor, Abteilungsleiter in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Geboren 1951; Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe 1972 - 1977. Wiss. Angestellter in der Universität 1978 - 1986. Seit 1986 Referatsleiter in der BAW Karlsruhe. Seit 1990 Leiter der Abteilung Wasserbau/Hydraulik.

Berufung an die Universität Karlsruhe zum ordentlichen Professor für das Gebiet Wasserbau im März 1994.

Inhaltsangabe

Auf der Grundlage der Analogie zwischen Wasserströmungen und unterkritischen, inkompressiblen Luftströmungen wurden bei der Bundesanstalt für Wasserbau die Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk in einem Luftmodell erfaßt. Zunächst waren die verschiedenen Betriebsfälle beim Verschluß einer Sperrwerksöffnung Gegenstand der Strömungsuntersuchungen. Der zweite Versuchsabschnitt beinhaltet Untersuchungen über die Wirkung von Störkörpern auf das Strömungsfeld im Rahmen eines aktiven Kolkschutzes für das Sperrwerk.

Summary

On the basis of the analogy between flow of water and subcritical incompressible flow of air, field data of the flow at the Eider barrage were recorded at the Bundesanstalt für Wasserbau (Federal Waterways Engineering and Research Institute). According to these data an aerodynamical model was calibrated. The first step of research was to look into the condition of flow by different operations, especially by closing one of the five weirs. In the second step research was done in connection with drag-bodies to initiate turbulent mixing of momentum. By that the horizontal velocity distribution was strongly equalized and so the formation of scours is prevented.

Résumé

Sur la base de l'analogie entre le courant de l'eau et le courant sub-critique et incompressible de l'air, les données du champs sur le courant du barrage de l'Eider ont été enregistrées a l'Institut Fédéral d'Etudes et de Recherches des Voies de Navigation (die Bundesanstalt für Wasserbau). Selon ces dates un modèle aérodynamique a été calibré. Le premier pas de cette recherche fut d'observer les conditions d'écoulement durant différentes opérations, en particulier pendant la fermeture de l'une des 5 vannes. Les recherches effectuées par la suite ont eu pour objet l'efficacité des pieux sur le champs d'écoulement. De cette manière la distribution horizontale de la vitesse a été régularisée et la formation du creusage prévenue.

Аннотация

Основываясь на аналогии между водными потоками и некритическими, несжимаемыми воздушными потоками, на аэродинамической модели Федерального института водного строительства Германии были определены условия потоков на заградительной плотине реки Эйдер. Сначала предметом исследований потоков были разные случаи эксплуатации при закрывании отверстий заградительной плотины. На втором этапе экспериментов исследовалось воздействие мешающих предметов на поле потоков в рамках активной защиты заградительной плотины от размывов.

INHALT

	Seite
1 Übersicht und Aufgabenstellung	17
2 Aufbau und Durchführung der Versuche	24
2.1 Maßstab, Abmessungen und Aufbau des Modells	24
2.2 Meßverfahren und Auswertung	25
3 Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle auf die Strömungsverhältnisse	27
3.1 Untersuchte Modellzustände	27
3.2 Sohlzustand mit Kolk vom Dezember 1990	27
3.2.1 Durchfluß durch n = 5 Öffnungen	27
3.2.2 Linkes Randfeld geschlossen; (n-1) ₁ -Fall	30
3.3 Sohlzustand mit Kolk vom Januar 1992 und Befestigung der Kolkböschungen	33
3.3.1 Beschreibung der Variante	33
3.3.2 (n-1)-Betriebsfälle generell	34
3.4 Beurteilung der Kolkbildung	36
4 Einfluß von Störkörpern auf die Strömungsverhältnisse	37
4.1 Untersuchte Modellzustände	37
4.2 Physikalische Grundlagen	38
4.3 Störkörper in longitudinaler 5-reihiger Anordnung	42
4.4 Störkörper in orthogonaler doppelreihiger Anordnung	45
4.5 Störkörper in orthogonaler Anordnung mit zwei Doppelreihen	46
4.6 Bewertung der Ergebnisse der Störkörperversuche	50
5 Schlußbemerkung	54
6 Literatur	55

1 Übersicht und Aufgabenstellung

Das in den Jahren 1967 bis 1973 im Zuge des Eiderdammes zwischen Hundeknöll und Vollerwiek erbaute Eider-Sperrwerk besteht aus fünf Durchflußöffnungen zu je 40 m lichter Weite. Mit den jeweils 6 m breiten Pfeilern ergibt sich zwischen den beiden Widerlagern eine Gesamtbreite von 224 m. Zwei see- und binnenseitig angeordnete Segmentverschlußreihen bieten eine doppelte Torsicherheit (Bild 1). Die südlichen Leitdämme und die Trenn-

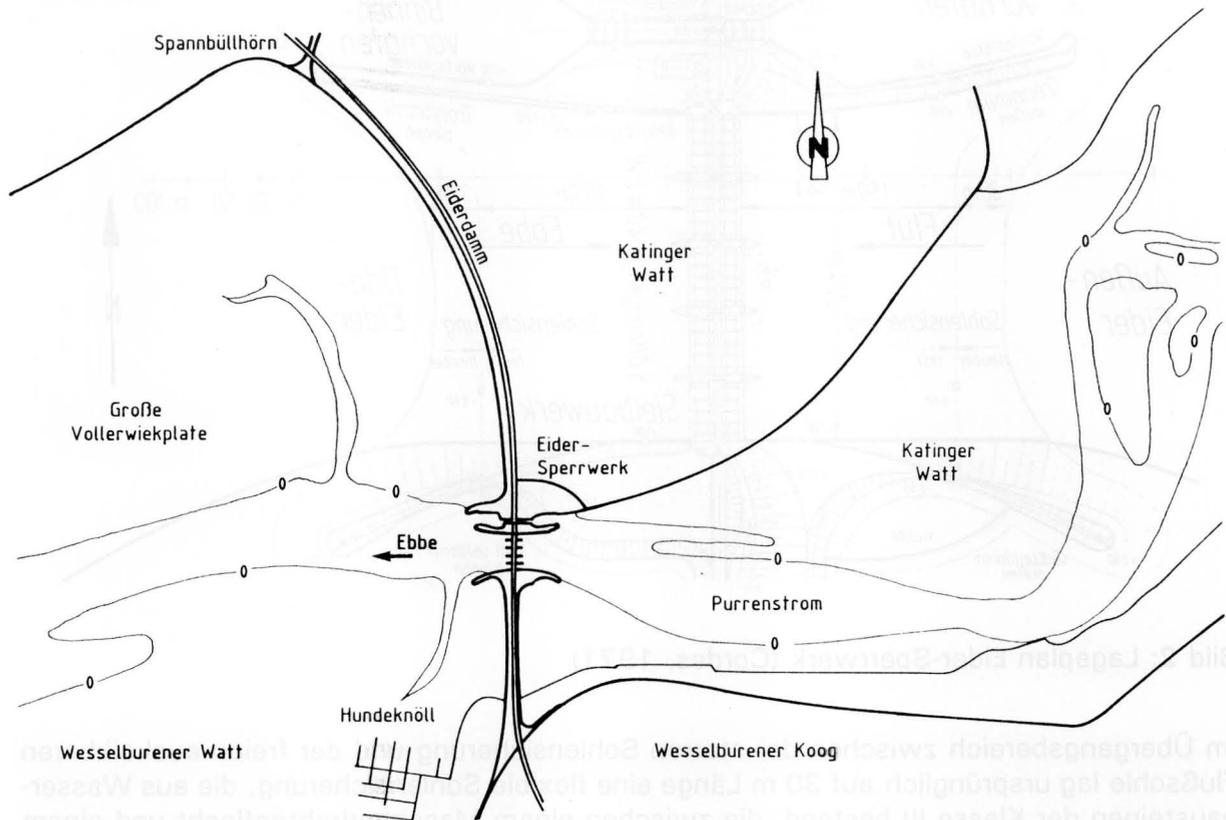


Bild 1: Übersichtsplan Eiderdamm zwischen Vollerwiek und Hundeknöll

molen auf der Nordseite begrenzen die trichterförmig verlaufenden An- und Abströmbereiche auf beiden Seiten des Siels. Ihre Linienführung wurde in Modellversuchen für die im Tideablauf wechselnden Strömungsrichtungen optimiert (Dietz, 1970). Ihre Wirkung muß wechselseitig bei Ebbe und Flut einerseits der Potentialströmung auf der jeweiligen Anströmseite und andererseits dem durch die diffusorartige Anordnung der Anlage bedingten strahlförmigen Abfluß auf der Abströmseite genügen. Da diese besondere Strömungssituation unterschiedliche, teils entgegengesetzte Maßnahmen verlangt und ein bei einer bestimmten Strömungsrichtung (z.B. Flut) hydraulisch gut wirkendes Bauwerk bei der entgegengesetzten Richtung (z.B. Ebbe) hydraulisch ungünstig sein kann, konnte die gewählte Linienführung der Leitdämme und Trennmolen nur ein Kompromiß sein (Bild 2).

Zum Schutz des Sperrwerks gegen die Kolkbildung wurde ebenfalls nach dem Ergebnis von entsprechenden Modelluntersuchungen mit beweglicher Sohle (Dietz, 1970) beidseitig 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.

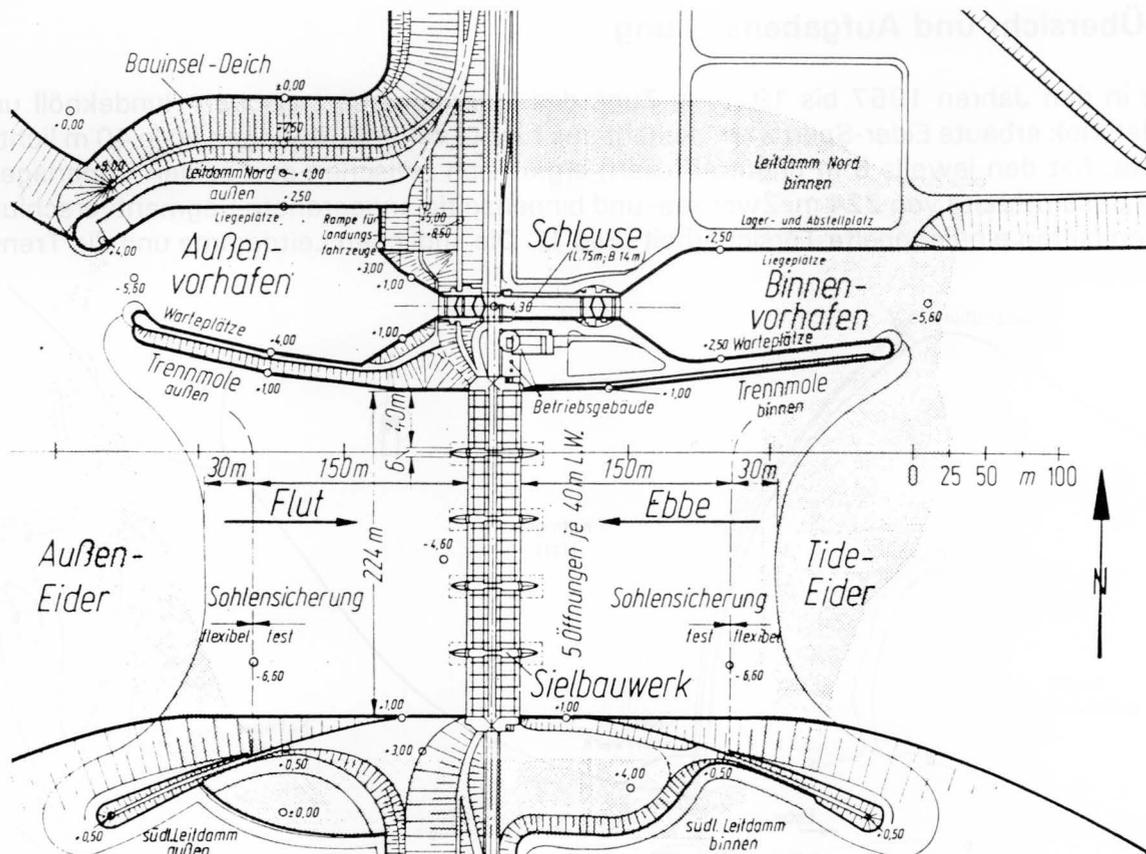


Bild 2: Lageplan Eider-Sperrwerk (Cordes, 1971)

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 Übergangstrecke 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.

Infolge des labilen Zustandes der flexiblen Sohlensicherung wurde im Dezember 1979 der bis dahin betriebene freie Tidedurchfluß durch das Sperrwerk eingestellt und mit den Segmentverschlüssen eine Drosselung der anlaufenden Flut vorgenommen ("Flutdrosselung"), um die Fließgeschwindigkeiten im Sperrwerk und über der Befestigungsstrecke sowohl bei Ebbe als auch bei Flut merklich zu verringern (Hollmer, 1992). Trotz der Anordnung von Befestigungsstrecken kann nach generellen Erkenntnissen und auch nach dem Ergebnis von speziell für das Eider-Sperrwerk durchgeführten Modelluntersuchungen (Dietz, 1969) eine Kolkbildung im natürlichen beweglichen Sohlmaterial im Anschluß an die Befestigungskante nicht vermieden werden. Wohl kann durch die Geometrie einer Befestigungsstrecke und deren Rauheit in der Deckschicht die Kolkbildung in Grenzen ermäßigt werden, doch die Hauptaufgabe einer Befestigungsstrecke liegt darin, die Kolkbildung so weit vom Bauwerk weg zu verlagern, daß die Verbindungslinie zwischen dem tiefsten Kolkpunkt und dem höchsten Punkt der unterstromigen Bauwerkskante möglichst flach liegt (Dietz, 1969).

Die Kolkbildung in der an die Befestigungsstrecken anschließenden beweglichen Flußsohle verlief beidseitig des Sperrwerks in den ersten Jahren nach der Inbetriebnahme infolge einer anstehenden Kleischicht verhältnismäßig schwach (Bild 3).

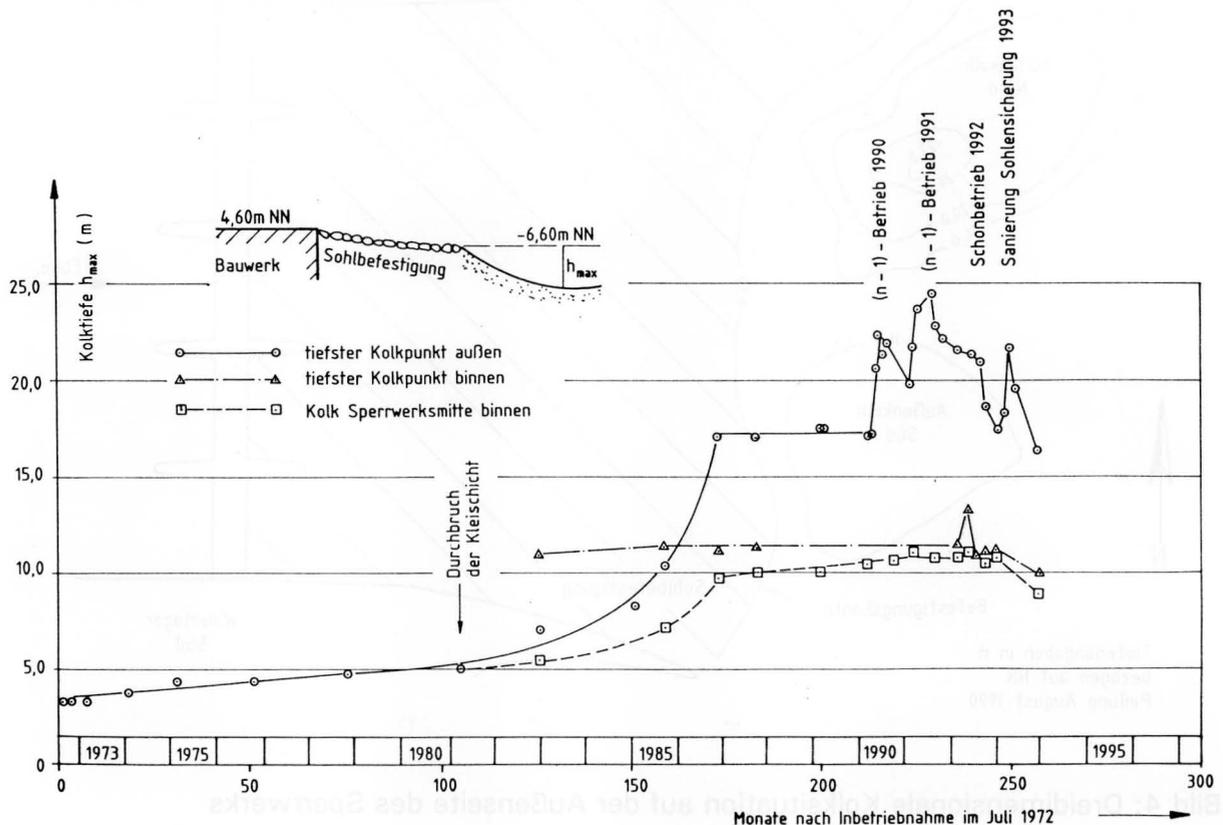


Bild 3: Entwicklung der Kolkiefen am Eider-Sperrwerk

Nach Durchbruch der Kleischicht etwa im Jahre 1981 nahmen die Kolkiefen wesentlich schneller zu und erreichten Ende 1986 unter der Wirkung des Ebbstromes auf der Außenseite des Sperrwerks einen Wert von $h_{max} = 17,0$ m (bezogen auf die Befestigungskante). Die kesselartige Form der Kolke und die relativ steilen Kolkböschungen wiesen die Kolk-situation auf der Außenseite als dreidimensional aus, wie sie unter den Angriffen von Sekundärströmungen, Ablösungen, Scherschichten und Wirbeln entsteht. Der nach Ausmaß und Tiefe (Kolkvolumen) größte Kolk stellte sich auf der Außenseite Nord ein, während der Außenkolk Süd in seinen Abmessungen deutlich zurückblieb (Bild 4).

Auf der Innenseite war mit einer über die gesamte Sperrwerksbreite reichenden flachen Kolkmulde eine typisch zweidimensionale Kolk-situation gegeben, deren verhältnismäßig geringe Kolkiefen über viele Jahre bis heute weitgehend konstant blieben.

Im großen und ganzen steht dieses Kolkbild im Einklang mit den Ergebnissen der in den 60er Jahren durchgeführten Kolkversuche (Dietz, 1988).

Für die ungleichen Kolkentwicklungen beidseitig des Sperrwerks und hier insbesondere den tiefen Kolk auf der Außenseite Nord sind im wesentlichen die unterschiedlichen An- und Abströmverhältnisse verantwortlich.

Sowohl nach dem Ergebnis von früheren Tidemodellversuchen (Harten, 1970), als auch nach Beobachtungen vor Ort verläuft die Flutströmung im Großbereich des Sperrwerks weitgehend orthogonal zur Sperrwerksachse und gestreckt; auch auf der Binnenseite

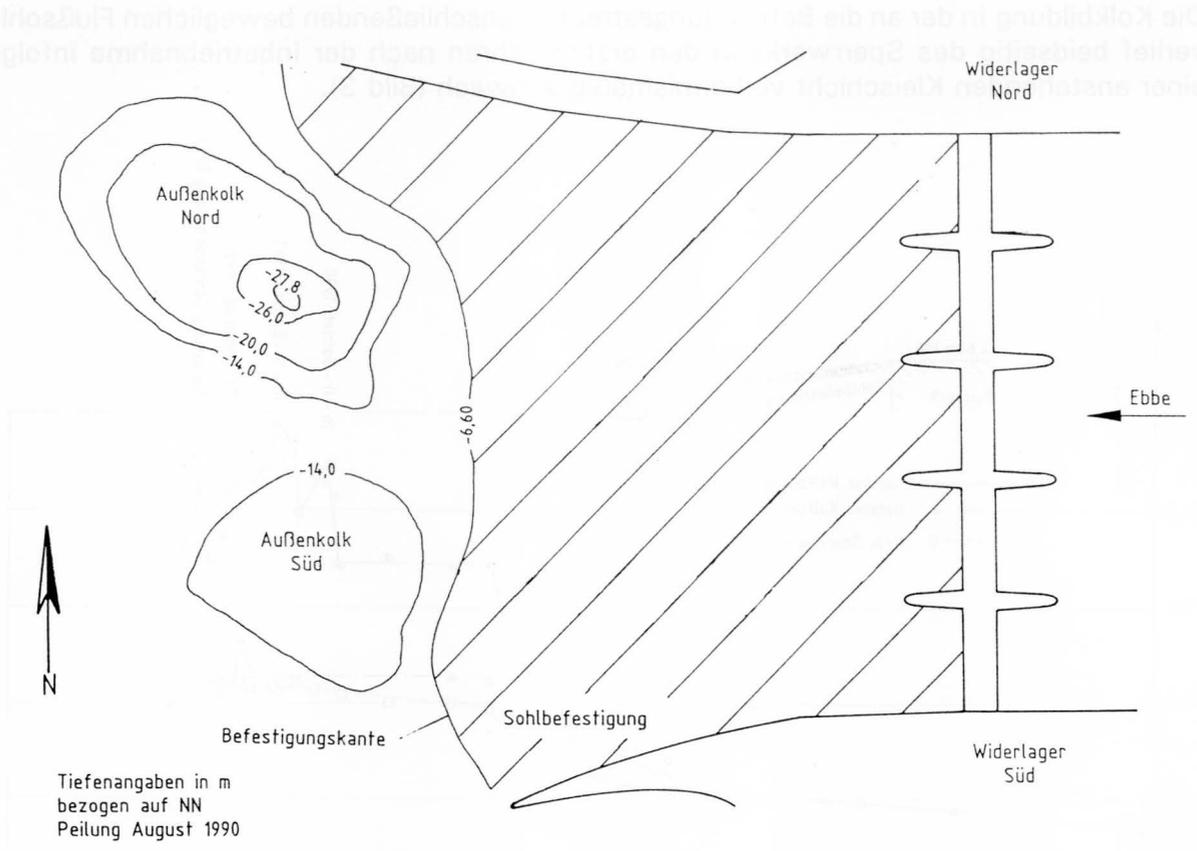


Bild 4: Dreidimensionale Kolksituation auf der Außenseite des Sperrwerks

verbleibt der Flutstrom nördlich entlang der Kante des Katinger Watts. Dieser gestreckte Verlauf des Flutstromes wurde auch bei den Modellversuchen über die sohlennahen Strömungsvorgänge am Eider-Sperrwerk unter Anwendung der Luftmodelltechnik deutlich (BAW, 1988).

Dagegen folgt der Ebbstrom der Wattkante im Purrenstrom auf der Südseite, wodurch das Sperrwerk, insbesondere in seinen südlichen Öffnungen, schräg angeströmt wird. Wenn auch die verhältnismäßig langen Pfeiler im engeren Bauwerksbereich eine parallele Ausrichtung der Strömung zu ihnen bewirken, ist der Ebbstrom durch den Krümmungseffekt im Purrenstrom so vorgeprägt, daß der Abstrom auf der Außenseite wieder in nördlicher Richtung erfolgt, wo sich die Stromlinien zum tiefen nördlichen Außenkolk konzentrieren. Diese Umlenkung der Strömung in die nördliche Richtung bei Ebbe wird durch einen vor Kopf des südlichen Leitdammes einmündenden Priel aus dem Wesselburener Watt noch verstärkt.

Bei allem spielt auch die über 35 % längere jahresmittlere Ebbedauer gegenüber der Flutdauer ein Rolle.

Dieses Strömungsbild auf der Außenseite bei Ebbe war auch bei den in De Voorst/Niederlande durchgeführten Modelluntersuchungen zur Ermittlung der Stabilität von losen Schüttsteinen für die geplante Kolkсанierung am Eider-Sperrwerk zu beobachten (Akkerman, 1993).

Zum Ende des Jahres 1986 wurde in der Kolkentwicklung auf beiden Seiten des Sperrwerks ein Beharrungszustand erreicht (Bild 3). Diese (nach heutigem Wissen temporäre) Endkolktiefe war von den Betriebsbedingungen am Sperrwerk (Flutdrosselung, überwiegend

der Durchfluß durch $n = 5$ Öffnungen), der wirksamen Strömungsgeschwindigkeit, der Wassertiefe sowie den Parametern des anstehenden Sohlmaterials bestimmt. Zum zuletzt genannten Punkt ist hinzuzufügen, 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 Sperrwerkes 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 Sperrwerkes, 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.

Der deutliche Unterschied zwischen der Kolkbildung in n-Fall und der kritischen Kolkentwicklung beim (n-1)-Betrieb läßt sich durch die besonderen Strömungserscheinungen erklären (Bild 5).

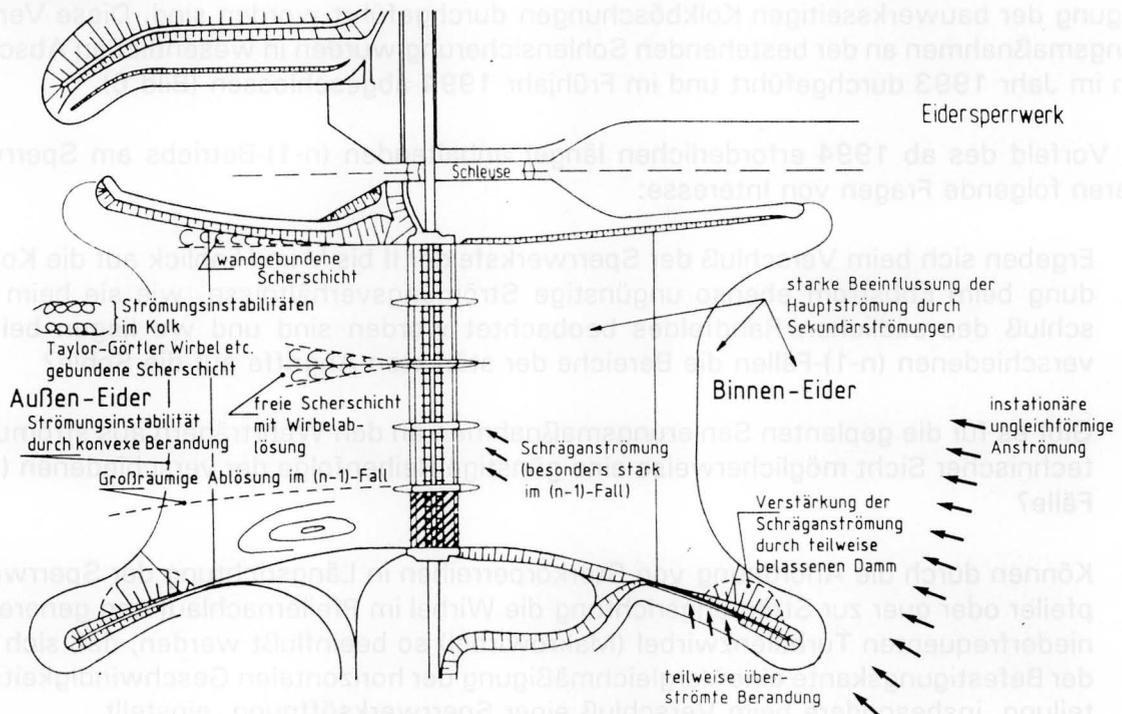


Bild 5: Besondere Strömungserscheinungen am Eider-Sperrwerk

Bei Öffnung aller Felder (n-Betriebsfall) entstehen durch die diffusorartige Ausbildung nahezu gleichförmige Strömungszustände, die erst unterhalb des Bauwerkes am Übergang zur natürlichen Geländeausbildung Ablösetendenzen aufweisen. Dieser Betriebsfall ist hinsichtlich einer Strömungsstörung lediglich dadurch gekennzeichnet, daß sich jeweils im unterstromigen Bereich der Sperrwerkspfeiler zwischen den Feldern freie Scherschichten ausbilden, aus denen sich alternierend Wirbel ablösen, die von der Hauptströmung nach unterstrom transportiert werden. Diese Strömungsvorgänge werden überlagert durch die vorher beschriebene Schräganströmung des Sperrwerkes bei Ebbe, was zu einer gewissen Asymmetrie hinsichtlich der Impuls- und Energieverteilung der Anströmung führt.

Die für die Sicherheit der Gesamtanlage äußerst kritischen Strömungszustände beim (n-1)-Betrieb sind nicht nur durch die Erhöhung des spezifischen Durchflusses und damit durch größere Fließgeschwindigkeiten geprägt, sondern das Strömungsbild erfährt eine grund-

gende Wandlung zu einer Strömung mit hoher Wirbel- und Turbulenzproduktion.

Im einzelnen überlagern sich wandgebundene Scherschichten aus der diffusorartigen Begrenzung des Strömungsfeldes und freie Scherschichten mit Wirbelablösungen im Nachlauf der Pfeiler, wie sie schon im n-Fall auftreten, mit großräumigen Wirbeln und freien Scherschichten im Nachlauf der verschlossenen Öffnung. Die Ablösegebiete werden deutlich vergrößert und die Schräganströmung verstärkt, was insgesamt eine Zunahme der Strömungsasymmetrie bewirkt.

Im Jahr 1994 sollen betontechnologische Untersuchungen am Wehrträger V und eine Nachuntersuchung am Wehrträger I vorgenommen werden. Für 1995 sind Spanngliederuntersuchungen und betontechnologische Untersuchungen am Wehrträger IV geplant. Danach folgt in den Jahren 1996 bis 1999 in einer noch festzulegenden Reihenfolge die Betoninstandsetzung an den Wehrträgern II bis V. Diese Untersuchungs- und Sanierungsarbeiten machen jährlich einen 6 - 8-monatigen (n-1)-Betrieb erforderlich.

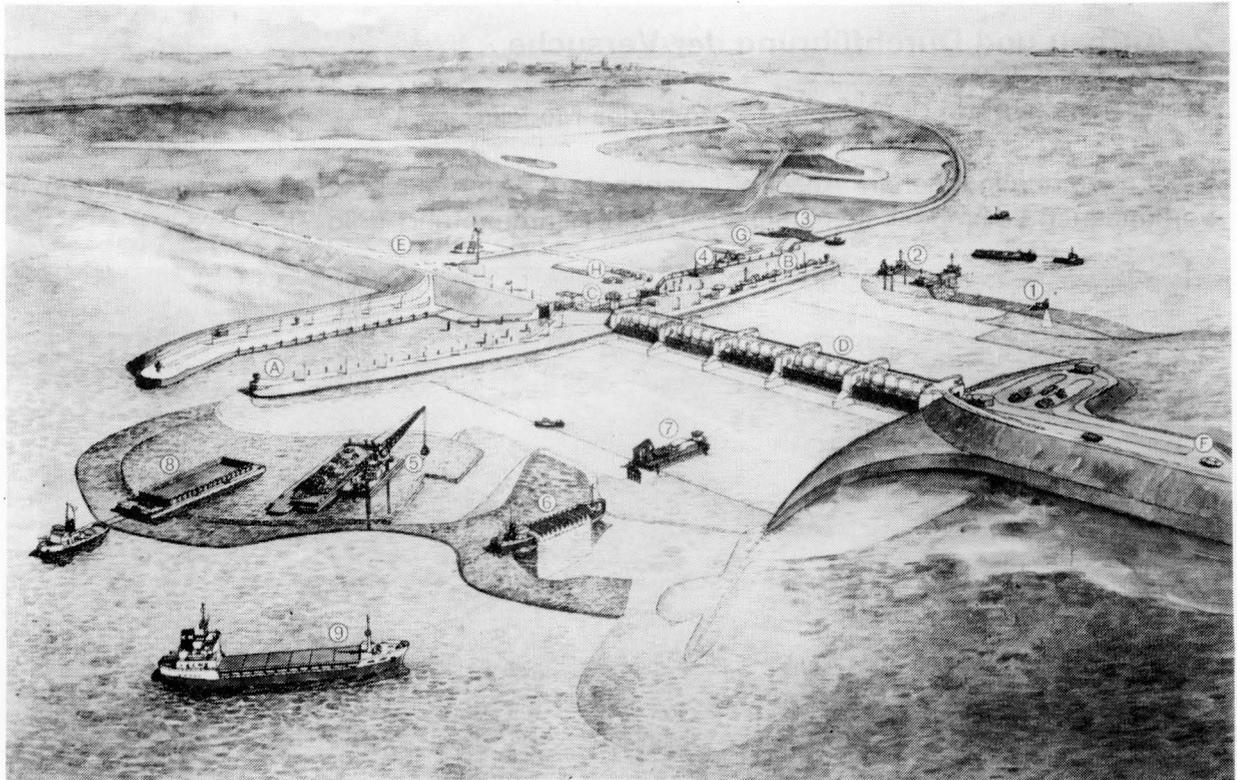
Nach den bisherigen negativen Erfahrungen mit dem (n-1)_I-Betrieb in den Jahren 1990 und 1991 war klar, daß künftig ein (n-1)-Betrieb nur dann möglich sein wird, wenn vorher umfangreiche Baumaßnahmen zur Verstärkung der flexiblen Sohlensicherungen und zur Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen durchgeführt worden sind. Diese Verstärkungsmaßnahmen an der bestehenden Sohlensicherung wurden in wesentlichen Abschnitten im Jahr 1993 durchgeführt und im Frühjahr 1994 abgeschlossen (Bild 6).

Im Vorfeld des ab 1994 erforderlichen länger anhaltenden (n-1)-Betriebs am Sperrwerk waren folgende Fragen von Interesse:

1. Ergeben sich beim Verschluß der Sperrwerksfelder II bis V im Hinblick auf die Kolkbildung beim Ebbstrom ebenso ungünstige Strömungsverhältnisse, wie sie beim Verschluß des südlichen Randfeldes beobachtet worden sind und wo liegen bei den verschiedenen (n-1)-Fällen die Bereiche der stärksten Angriffe auf die Sohle?
2. Gibt es für die geplanten Sanierungsmaßnahmen an den Wehrträgern aus strömungstechnischer Sicht möglicherweise eine günstige Reihenfolge der verschiedenen (n-1)-Fälle?
3. Können durch die Anordnung von Störkörperreihen in Längsrichtung der Sperrwerks Pfeiler oder quer zur Strömungsrichtung die Wirbel im Pfeilernachlauf und generell die niederfrequenten Turbulenzwirbel (Makrowirbel) so beeinflußt werden, daß sich über der Befestigungskante eine Vergleichmäßigung der horizontalen Geschwindigkeitsverteilung, insbesondere beim Verschluß einer Sperrwerksöffnung, einstellt.

Bei den beiden erstgenannten Fragen ging es weniger um absolute Größen, sondern mehr um relative Geschwindigkeitsverhältnisse und Geschwindigkeitsverteilungen im Außenbereich des Sperrwerks bei den verschiedenen relevanten Betriebsfällen sowie um die jeweilige sohlnahe Strömungsstruktur. Mit dieser überwiegend qualitativ gearteten Problemstellung bot sich auf der Grundlage der Analogie zwischen Wasserströmungen und unterkritischen, inkompressiblen Luftströmungen ein aerodynamisches Analogiemodell (Luftmodell) in einem geeigneten Maßstab zur Untersuchung an.

Eine exakte Untersuchung zur Anordnung, Gestaltung und Dimensionierung der mit der dritten Frage angesprochenen Störkörper in Verbindung mit ihrer Wirkung auf die Strömung und mit dieser auf die auskolkbare Flußsohle, auf die es hier in erster Linie ankommt, kann nur in einem physikalischen Modell mit beweglicher Sohle, zumindest aber mit einem Kolkbett, erfolgen.



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 6: Baustellenbetrieb (nach Firmenprospekt der ARGE Sohlensicherung Eider-Sperrwerk, 1993)

Für generelle Voruntersuchungen mit dem Ziel, einen umfassenden Überblick über eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten zu erhalten, weniger wirksame Varianten auszusondern und den weiteren Fortgang der Untersuchungen auf effektive Maßnahmen zu konzentrieren, bietet sich aber ebenfalls ein Luftmodell an, in dem mit einem relativ geringen Aufwand an Personal, Material und Zeit diese Aufgaben gelöst werden können.

In diesem Sinne wurden alle anstehenden Fragen im vorhandenen Luftmodell des Eider-Sperrwerks behandelt, das noch von früheren Untersuchungen der sohlernen Strömungsvorgänge beim Flutstrom (BAW, 1988) zur Verfügung stand.

Diese Untersuchungen zum Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle und von Störkörpern auf die Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk (BAW, 1993 und 1994) sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit, in der nur die Strömungsverhältnisse beim Ebbstrom behandelt werden, die allerdings wegen der tiefen Kolke auf der Außenseite des Sperrwerks relevant sind. Sinngemäß können die Ergebnisse aber, wenigstens in ihrer qualitativen Aussage, auch auf den Flutstrom übertragen werden.

2 Aufbau und Durchführung der Versuche

2.1 Maßstab, Abmessungen und Aufbau des Modells

Die im vorangegangenen Abschnitt genannten Strömungsuntersuchungen wurden im vorhandenen Luftmodell des Eider-Sperrwerks durchgeführt (Bild 7).



Bild 7: Luftmodell des Eider-Sperrwerks im Maßstab 1 : 1000/500 (Blick von Nordosten)

Das Modell ist mit den Maßstäben
 der horizontalen Längen $L_{rh} = 1000$
 und
 der vertikalen Längen $L_{rv} = 500$
 höhenverzerrt, wobei der Überhöhungsfaktor

$$n = \frac{L_{rh}}{L_{rv}} = \frac{1000}{500} = 2$$

beträgt, der erfahrungsgemäß noch zulässig ist ($n < 3$). In diesem Maßstab sind im Luftmodell ca. 4000 m Länge vom Binnenbereich (einschließlich der 90°-Krümmung des Purrenstromes) und ca. 2000 m Länge vom Außenbereich des Sperrwerks nachgebildet. Das Luftmodell war als sogenanntes Einfachmodell eingerichtet, bei dem die bekannte freie Wasserspiegellage durch eine Modellabdeckung aus Plexiglas mit vergrößerter Abdeckungshöhe fixiert wird (Nestmann/Bachmeier, 1987).

Im vorliegenden Fall wurde der Untersuchungswasserspiegel auf NN + 1,52 m (MThw) festgelegt, womit auch der Höhennullpunkt für die Geschwindigkeitsprofile vorgegeben war. Die Vergrößerung der Abdeckungshöhe betrug

$$h_2 = 0,007 \text{ m}$$

über der angenommenen Wasserspiegellage.

Entsprechend der vorhandenen Einrichtung wurde das Modell nur für den Ebbstrom unter stationären Bedingungen betrieben. Die Nachbildung der Tideverhältnisse wäre infolge spezieller Eigenschaften der Luftmodelltechnik nicht möglich gewesen. Das Gebläse für die Luftversorgung war saugseitig an das Modell angeschlossen. Für die Versuche ist die Drehzahl auf einen Wert festgelegt worden, bei dem die Geschwindigkeit der Luftströmung an einem 2,0 km binnenseits des Sperrwerks gelegenen Meßpunkt in Höhe des angenommenen Wasserspiegels in allen Untersuchungsfällen $v_r = 15,0$ m/s betrug. Auf diese Referenzgeschwindigkeit v_r wurden alle gemessenen Geschwindigkeitsgrößen bezogen, deren Darstellung demnach als dimensionslose Verhältniswerte erfolgt.

Die physikalischen Grundlagen und Ähnlichkeitskriterien aerodynamischer Modelle sowie die Möglichkeiten und Grenzen der angewendeten Luftmodelltechnik werden ausführlich von Nestmann/Bachmeier, 1987 und Nestmann, 1992 beschrieben.

Der Nachweis vollturbulenter Strömungsverhältnisse ist mit

$$Re_M = \frac{4 \cdot v_r \cdot r_{hy}}{v} = 5,9 \cdot 10^4 > Re_{krit} = 5000$$

erbracht. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß es sich beim Luftmodell um eine abgedeckte Strömung handelt; der hydraulische Radius r_{hy} ist demnach wie für einen geschlossenen Rechteckkanal zu ermitteln. Die Reynoldszahlen in einem Luftmodell sind, wie auch in Wassermodellen, kleiner als diejenigen in der Natur.

2.2 Meßverfahren und Auswertung

Bei der anstehenden Untersuchungsaufgabe kam es darauf an, zum einen im Modell die Strömungsstruktur an der Sohle sichtbar zu machen und zum anderen die relativen Geschwindigkeitsverhältnisse und Geschwindigkeitsverteilungen durch eine geeignete Meßsonde zu ermitteln.

Zur Erfüllung der erstgenannten Zielvorstellung wurde zur Strömungssichtbarmachung das sogenannte Erosionsverfahren angewendet. Eine auf die Modelloberfläche aufgetragene Suspension aus einem Öl-Pigment-Gemisch wird bei Luftüberströmung infolge der Schubspannungswirkung in Richtung der Stromlinien bewegt. Hierbei entstehen nach Verdunstung des Ölfilmes streifenförmige Pigmentablagerungen, durch welche das sohlennahe Strömungsfeld sichtbar gemacht wird. Dieser Strömungssichtbarmachungsmethode liegt der ableitbare physikalische Zusammenhang zwischen Partikelerosion bzw. -deposition und dem herrschenden Geschwindigkeitsgradienten sowie der Korrelation turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen zugrunde (Nestmann/Bachmaier, 1987).

Im vorliegenden Fall wurde die Modellsohle mit einer Mischung aus Talkum und Petroleum gleichmäßig eingestrichen. Nach Beendigung des Versuchs wurden die an der Sohle sichtbar gemachten Strömungsstrukturen durch eine Lichtbildaufnahme festgehalten.

Zur Erfüllung der zweiten Zielvorstellung wurde, wie auch schon bei den früheren Untersuchungen über den Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle, ein Hitzdrahtanemometer eingesetzt. Mit diesem Gerät können gleichzeitig die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und die Schwankungsgeschwindigkeit gemessen werden. Die Temperatur des Fluids muß dabei in engen Grenzen konstant gehalten werden. Das Gerät ist in der Lage, den relativ hochfrequenten Pulsationen der turbulenten Strömung zu folgen. Im vorliegenden Fall wurde über ein Meßintervall von $\Delta t = 20$ s der jeweilige Betrag der momentanen Geschwindigkeit v_i mit einer Abtastzeit von 10 Millisekunden (d.h. einer Frequenz von 100 Hertz) ermittelt.

Die Geschwindigkeitsmessungen auf der Außenseite des Sperrwerks wurden in zwei Meßprofilen bei 89,700 und 89,750 vorgenommen, die in ihrer Lage den Bereich der Auskolkungen erfaßten (Bild 8).

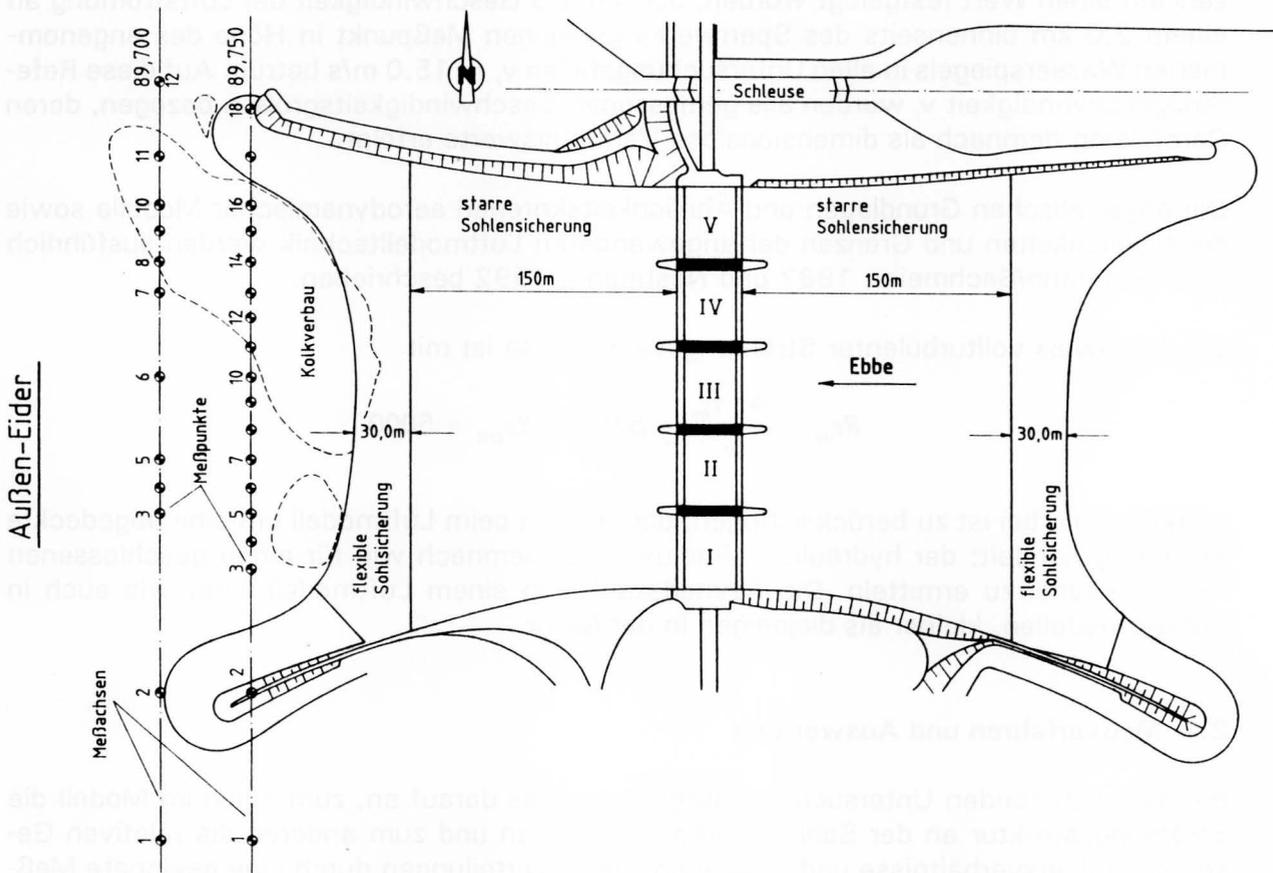


Bild 8: Lage der Meßprofile und Meßpunkte

Jedes Meßprofil war in 12 bzw. 18 Meßlotrechten unterteilt, in denen im Abstand von 3 m (beginnend am angenommenen Wasserspiegel bei MThw = NN + 1,52 m) die Strömungsgeschwindigkeiten bis in Sohlhöhe gemessen worden sind. Dadurch konnte für jede Meßlotrechte ein ausreichend genaues Geschwindigkeitsprofil dargestellt werden.

Wie schon erwähnt, wurden die mit dem Hitzdrahtanemometer gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten v in allen Untersuchungsfällen auf eine Referenzgeschwindigkeit von $v_r = 15,0 \text{ m/s}$

bezogen, die einem 2,0 km binnenseitig des Sperrwerks gelegenen Meßpunkt zugeordnet ist und bei allen Varianten durch eine entsprechende Drehzahlregulierung des Gebläses konstant auf diesen Wert gehalten worden ist. Die Darstellung der Meßergebnisse erfolgt daher als dimensionslose Geschwindigkeitsverhältnisse, die entweder als zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit v/v_r und der Standardabweichung s/v_r über die Tiefe aufgetragen werden (vertikale Geschwindigkeitsprofile) oder als tiefengemittelte Geschwindigkeitsverhältnisse v_m/v_r Aufschluß über die horizontale Verteilung der Geschwindigkeit geben.

3 Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle auf die Strömungsverhältnisse

3.1 Untersuchte Modellzustände

Als Episodensimulation erfolgte zunächst im Luftmodell die Untersuchung des Sohlzustandes vom 14./17.12.1990, dem im Sommer 1990 mit dem Verschluß der linken Randöffnung ein länger anhaltender (n-1)-Betrieb vorausgegangen war. Dieser Betriebsfall hatte eine beträchtliche Zunahme der Kolkiefen und eine erhebliche Aufweitung des Kolkessels auf der nördlichen Außenseite des Sperrwerks zur Folge. Entsprechend den Verhältnissen in der Natur erstreckte sich diese Untersuchung über den Durchfluß durch $n = 5$ Sperrwerksöffnungen und über den (n-1)₁-Betriebsfall.

Die Untersuchung zum Einfluß der (n-1)-Betriebsfälle auf die Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk generell, wurde für den Sohlzustand mit Kolk und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschung in der Neigung 1 : 3 geführt, wie er nach Beendigung der Sanierungsmaßnahmen an der Sohlensicherung etwa ab Mai/Juni 1994 vorliegen wird. Dieser Sohlzustand ist in den kommenden Jahren für den im Zusammenhang mit der Sanierung der Wehrträger notwendigen (n-1)-Betrieb relevant.

3.2 Sohlzustand mit Kolk vom Dezember 1990

3.2.1 Durchfluß durch $n = 5$ Öffnungen

Die Sichtbarmachung der Sohlstromlinien im Luftmodell zeigt beim Durchfluß durch alle 5 Sperrwerksöffnungen die schon im einleitenden Abschnitt beschriebene Strömungsstruktur, wie die Schräganströmung aus dem Purrenstrom, die Ablösungen an den seitlichen Berandungen des Sperrwerks mit ihren freien und wandgebundenen Scherschichten sowie die freien Scherschichten mit den alternierenden Wirbelablösungen im Nachlauf des Pfeilers (Bild 9).

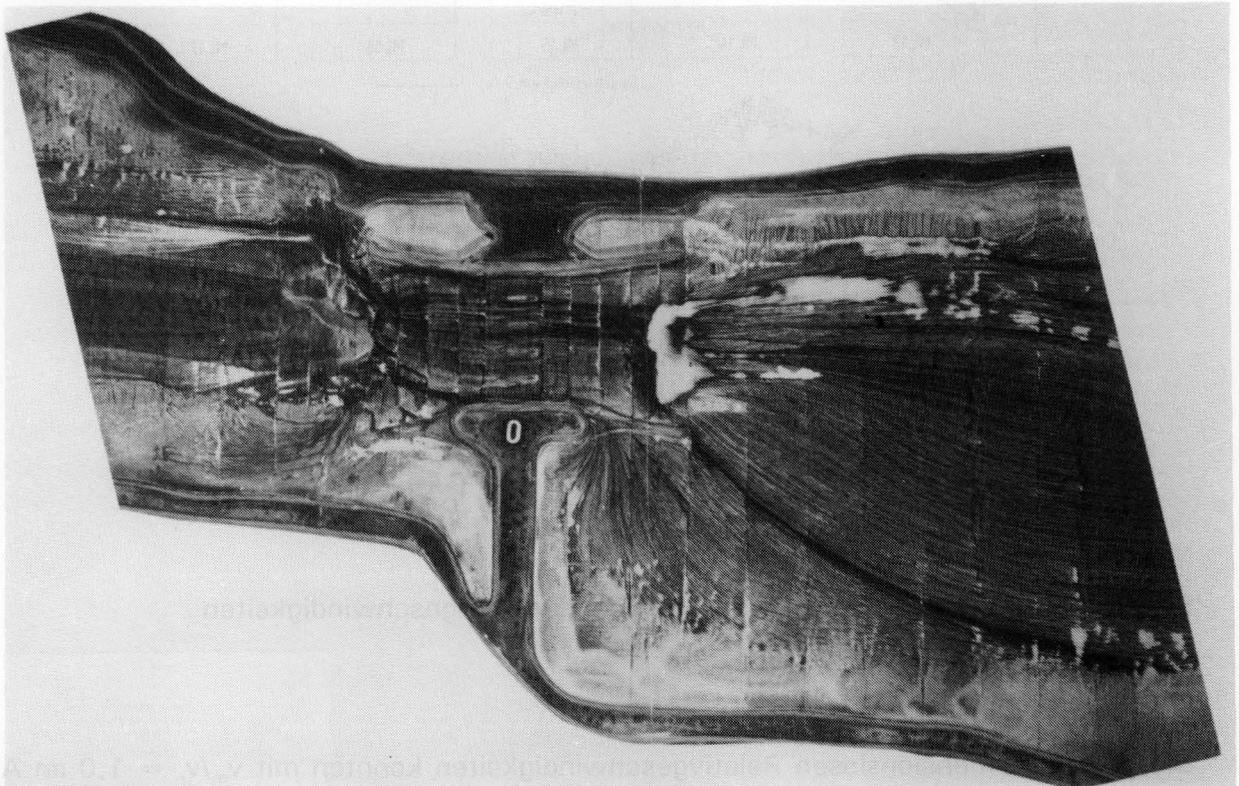


Bild 9: Sohlstromlinien mit Kolk vom Dezember 1990 ($n = 5$)

Insbesondere ist eine deutliche Bevorzugung der nördlichen Sperrwerksfelder III bis V zu erkennen, was mit der Konvergenz der Sohlstromlinien auf der Außenseite des Sperrwerks zum tiefen Kolk auf der Nordseite zusammenhängt. 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.

Die bevorzugte Beaufschlagung der nördlichen Sperrwerksseite durch die Strömung bringt auch die Darstellung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten über die Sperrwerksbreite zum Ausdruck (Bild 10, unteres Diagramm, ausgezogene Kurve).

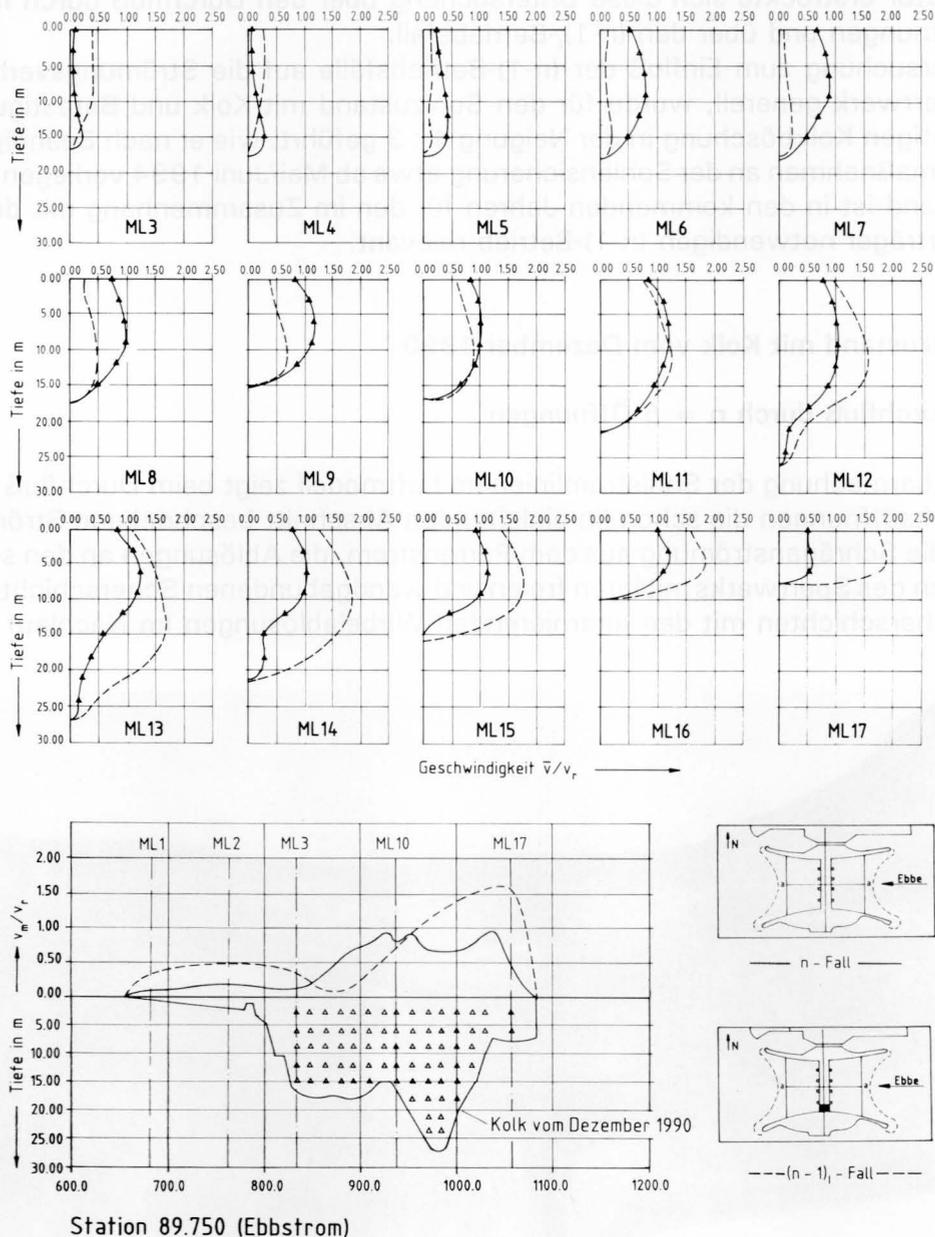
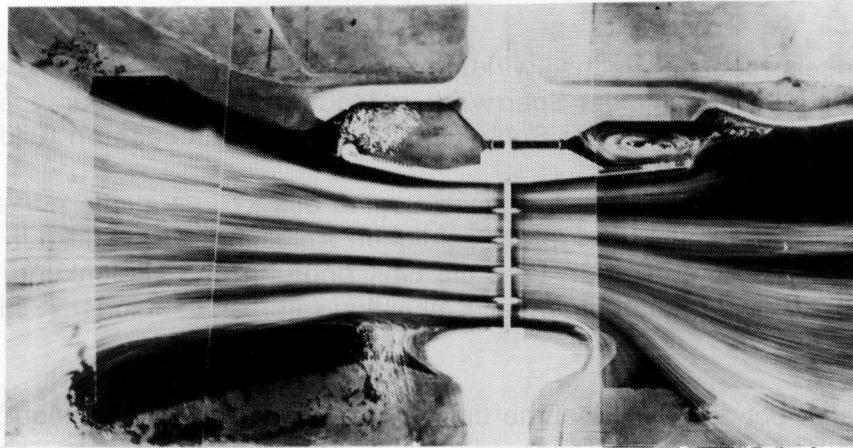
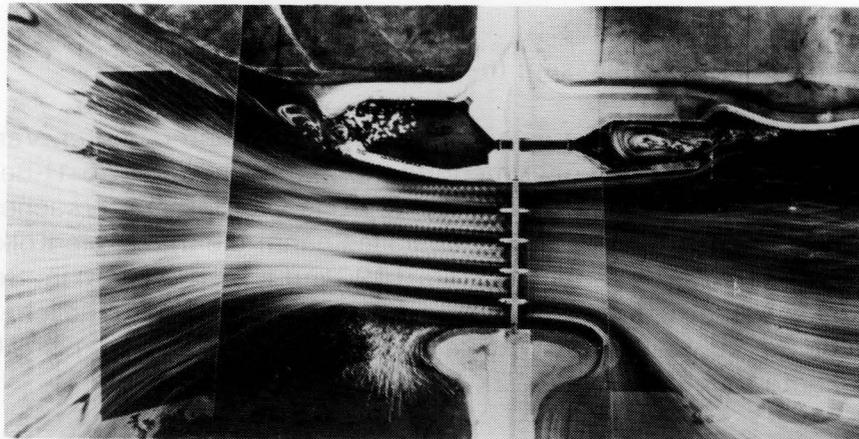


Bild 10: Vertikale und horizontale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten (Kolk vom Dezember 1990)

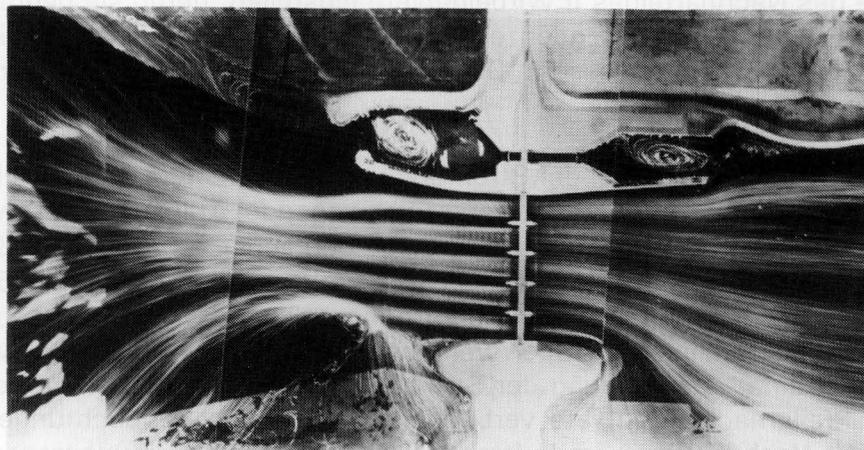
Die größten dimensionslosen Relativgeschwindigkeiten konnten mit $v_m/v_r = 1,0$ im Abströmbereich der Felder III und V gemessen werden, während die horizontale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten über dem tiefen Nordkolk eine deutliche Delle zeigt.



Sofort nach Beginn des Versuchs mit leichter Kolkbildung



Nach 1 Std. Versuchszeit mit stärkerer Kolkbildung



Nach 2 Std. Versuchszeit mit ausgeprägter Kolkbildung

Bild 11: Verlauf der Oberflächenströmung bei Ebbe im Kolkmodell des Eider-Sperrwerks (BAW, 1971)

Da mit dem im Luftmodell eingebauten Sohlzustand vom Dezember 1990 für den Durchfluß durch $n = 5$ Sperrwerksöffnungen eine Gleichgewichtskolkentiefe in der Natur erreicht war, wie sie auch in den Jahren 1987 bis 1989 vorhanden war, liegt mit der vorher genannten Relativgeschwindigkeit $v_m/v_r = 1,0$ offensichtlich ein Grenzwert vor, der für die Versuchsbedingungen des Luftmodells die beginnende Auskolkung oder einen Gleichgewichtskolk anzeigt, je nachdem ob er überschritten wird oder unter dem genannten Wert bleibt.

Die früher angesprochene Wechselwirkung 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 (BAW, 1971) zu beobachten (Bild 11).

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 ist, wird die Einschnürung und Umlenkung der Stromlinien zum tiefen Kolk hin mit zunehmender Kolkbildung immer deutlicher (Bildfolge von oben nach unten).

Obwohl es sich bei dieser Aufnahme um den Verlauf der Oberflächenströmung in einem Wassermodell handelt, ist eine grundlegende Ähnlichkeit mit den Sohlstromlinien im Luftmodell unverkennbar.

3.2.2 Linkes Randfeld geschlossen; (n-1)_I-Fall

Dem Kolk vom Dezember 1990, wie er der im Luftmodell untersuchten Variante zugrunde liegt, war im Sommer 1990 ein über mehrere Monate anhaltender (n-1)-Betrieb vorausgegangen, bei dem das linke Randfeld zur Durchführung von Betonuntersuchungen geschlossen war. Unter der Wirkung dieses Betriebsfalles nahm die maximale Kolktiefe im nördlichen Kolkkessel von $h_{\max} = 17,0$ m im April 1990 auf $h_{\max} = 21,9$ m im September 1990 zu und der Kolkkessel erfuhr eine erhebliche Aufweitung an seiner südlichen Flanke und in die nordöstliche Richtung. Mit dieser Kolkentwicklung war gleichzeitig eine Gefährdung der Befestigungskante verbunden (Bild 12).

Wie die Sohlstromlinien für diesen Fall zeigen, werden sie im Anströmbereich vor dem verschlossenen Feld I so stark umgelenkt, daß sich vor ihm und vor allem entlang der linken Pfeilerflanke des Nachbarfeldes II Wirbelgebiete einstellen, deren sie begrenzende Scherschichten erhebliche Erosionstendenzen aufweisen, wie die dunklen Streifen in den genannten Bereichen erkennen lassen. Die Schräganströmung des Sperrwerks wird erheblich verstärkt (Bild 13).

Infolge der scharfen Umlenkung der Strömung vor dem verschlossenen Wehrfeld wird das unterstrom auf der südlichen Sperrwerksseite liegende Ablösungsbiet wesentlich vergrößert. Dabei werden die Sohlstromlinien noch deutlicher zum tiefen Außenkolk auf der Nordseite des Sperrwerks umgelenkt, als dies beim Durchfluß durch $n = 5$ Öffnungen zu beobachten ist. Der Durchfluß durch die Öffnungen IV und V nimmt erheblich zu, womit das Bild der Sohlstromlinien im Sperrwerksbereich stark asymmetrisch wird. Mit dieser Asymmetrie ist eine Verschiebung der Strömungsstaupunkte und eine Beeinflussung der Formen der Pfeilernachlaufgebiete verbunden. Gleichartige Beobachtungen in der Natur bestätigen mit Nachdruck die im Luftmodell aufgezeigten Strömungsstrukturen und insbesondere den schrägen, zum nördlichen Außenkolk verlaufenden Abstrom vom Sperrwerk.

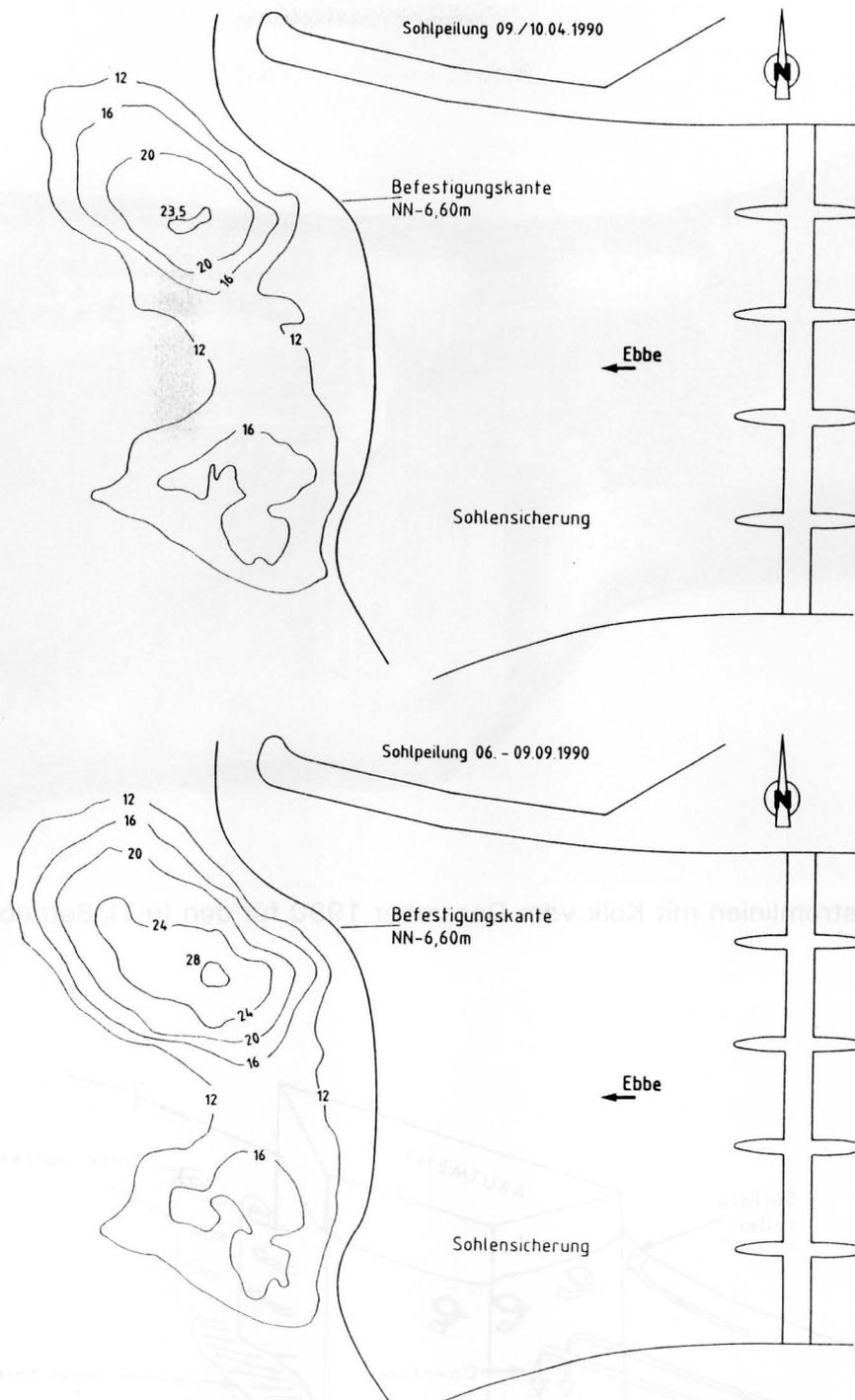


Bild 12: Kolksituation im Sommer 1990 vor und nach dem (n-1)₁-Betrieb

Insgesamt kann das Strömungsfeld um die verschlossene Randöffnung mit dem um einen Randpfeiler (Widerlager) verglichen werden, für den Breusers/Raudkivi, 1991 schematisch die Strömungs- und Wirbelstruktur zeigen (Bild 14).

Der vergrößerte Abfluß durch die beiden nördlichen Sperrwerksöffnungen IV und V, die Ausweitung des Wirbelgebietes unterstrom des versperrten Randfeldes I sowie die verstärkte Umlenkung der Stromlinien kann durch die Geschwindigkeitsmessungen im Luftmodell quantifiziert werden (Bild 10).

Für die Fälle (n = 5) und (n-1), werden für die Meßlotrechten 3 bis 17 in zwei verschiedenen Signaturen die Geschwindigkeitsprofile gezeigt, wobei anzumerken ist, daß sich die angegebenen Tiefen T auf den angenommenen Wasserspiegel, d.h. auf MThw = NN + 1,52 m, beziehen (s.a. Bild 8).

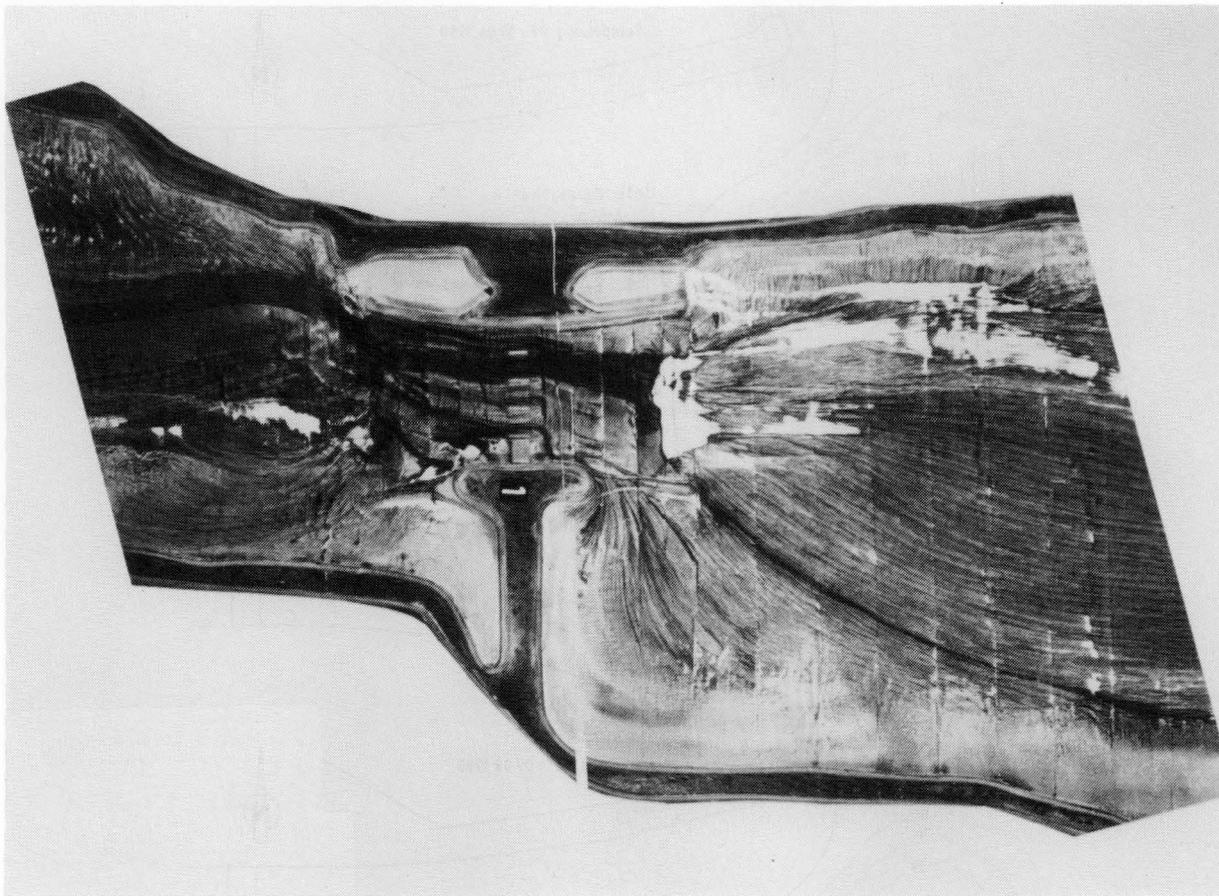


Bild 13: Sohlstromlinien mit Kolk vom Dezember 1990 für den (n-1)₁-Betriebsfall

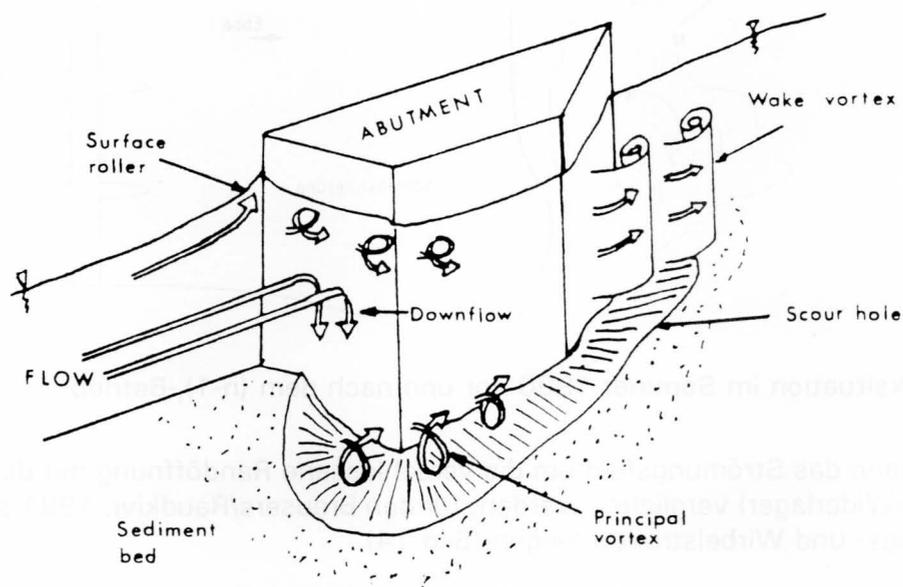


Bild 14: Strömungsstruktur um einen Randpfeiler (Breusers/Raudkivi, 1991)

Bis zur Meßlotrechten 10, d.h. im Einflußbereich der Felder I bis III, werden die Relativgeschwindigkeiten im Kolkessel beim Verschuß der linken Wehröffnung geringer, 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, wobei auffällt, daß sich diese Zunahme nicht nur in Höhe des angenommenen Wasserspiegels zeigt sondern auch bis in die Tiefe des Kolkessels reicht.

Dieses Ergebnis schlägt sich auch in der Integration der Geschwindigkeitsprofile und damit in den tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten nieder, deren horizontale Verteilung im unteren Diagramm auf Bild 10 dargestellt ist.

Der früher herausgearbeitete, versuchsspezifische Grenzwert der Relativgeschwindigkeit für die Kolkbildung aus einer Ausgangslage oder aus einer zu einer bestimmten Betriebsform gehörenden Gleichgewichtskolkentiefe von $v_m/v_r = 1,0$ wird beim Verschuß des linken Randfeldes deutlich überschritten. Die Maximalwerte liegen um das 1,6-fache über den Werten beim n-Fall.

Diese Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten machen schon für sich allein verständlich, warum der bis zum Jahr 1990 bestehende Beharrungszustand der Kolkentwicklung mit einer Kolkentiefe von ca. 17,0 m (siehe Bild 3) durch den (n-1)-Betrieb im Sommer 1990 mit einer weiteren Eintiefung des Kolkes um etwa 5,0 m abrupt verschlechtert worden ist.

Es sind jedoch nicht nur die Strömungsgeschwindigkeiten, welche die Kolksituation verschärft haben, sondern das Strömungsbild erfährt eine grundlegende Wandlung zu einer Strömung mit hoher Turbulenz- und Wirbelproduktion mit gesteigerter Strömungsinstabilität und Strömungsasymmetrie.

3.3 Sohlzustand mit Kolk vom Januar 1992 und Befestigung der Kolkböschungen

3.3.1 Beschreibung der Variante

Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung im Luftmodell waren die Planung und Entwurfsaufstellung für die Verstärkungs- und Befestigungsmaßnahmen an der Sohlensicherung noch nicht so weit fortgeschritten, daß der endgültige Ausführungsvorschlag hätte in das Luftmodell eingebaut werden können. Jedoch war zu Beginn der Untersuchungen an der Variante "Sohlzustand mit Kolk und Befestigung der Kolkböschungen" schon entschieden, daß zur Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen eine filtergerechte Auffüllung mit abschließender Deckschicht in der Neigung 1 : 3 gewählt wird (Bild 15).

Die hydraulischen Umriss dieser Variante wurden in Verbindung mit dem Kolk vom Januar 1992 in der im Bild gezeigten Form beidseitig des Sperrwerks in das Luftmodell eingebaut.

Nicht abgeschlossen war zum Zeitpunkt der Versuche im Luftmodell die Planung zum Anschluß der 1 : 3 geneigten befestigten Kolkböschung an die bestehende Sohlensicherung und zur Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung. Der später aufgestellte Ausführungsentwurf beinhaltet hierfür eine schwellenartige Erhöhung von 1,0 m auf einen ca. 40 m breiten Randstreifen über der bestehenden flexiblen Übergangsstrecke entlang der Befestigungskante aus verklammerten Wasserbausteinen der Klasse 0. Diese schwellenartige Überhöhung war demnach bei den zeitlich vorauslaufenden Untersuchungen im Luftmodell nicht vorhanden.

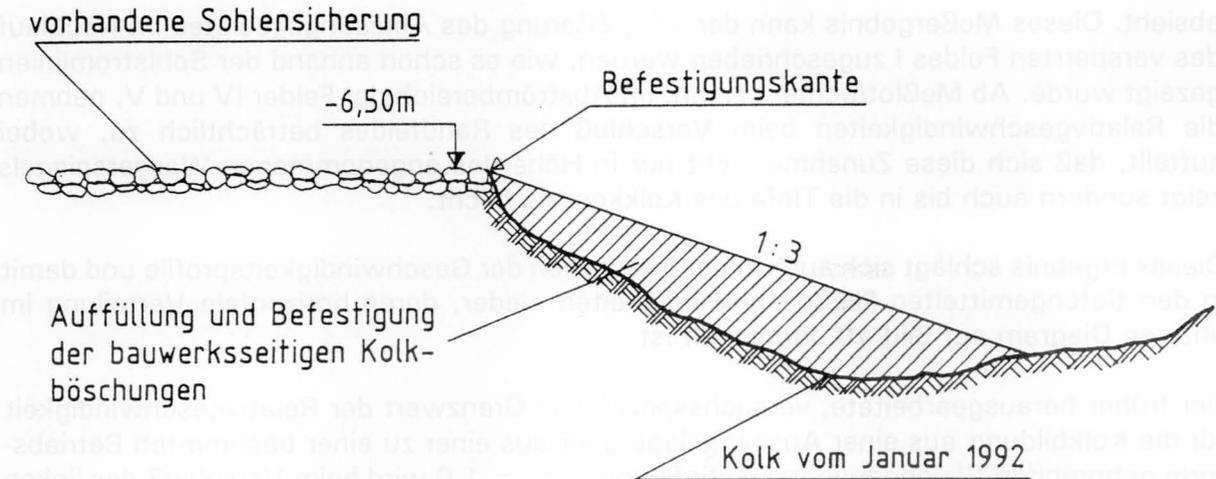


Bild 15: Untersuchungsvariante "Sohlzustand mit Kolk und Befestigung der Kolkböschungen"

3.3.2 (n-1)-Betriebsfälle generell

Die Darstellung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten über die Sperrwerksbreite läßt einen übersichtlichen Vergleich der untersuchten Betriebsfälle zu, wie sie durch den Durchfluß durch alle 5 Sperrwerksöffnungen (n-Fall) und den Verschuß jeweils einer der Öffnungen I bis V bedingt sind (Bild 16).

Für den n-Fall (oberes Diagramm) stellt man fest, daß die unter der Wirkung des tiefen Nordkolkes entstandene Eindellung in der Kurve der horizontalen Geschwindigkeitsverteilung in der neuen Kolksituation mit der Auffüllung der Kolkböschungen auf die Neigung 1 : 3 noch leicht verstärkt wird, während die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten unbeeinflusst bleiben und weiterhin $v_m/v_r = 1,0$ betragen. Ansonsten ließ die Sichtbarmachung der Sohlstromlinien im großräumigen Strömungs- und Wirbelmuster keine Veränderungen erkennen, so daß auf die Darstellung der Strömungsverhältnisse im vorangehenden Abschnitt 3.2.1 verwiesen werden darf.

Beim Verschuß des linken Randfeldes nehmen im Abströmbereich der Sperrwerksfelder IV und V die Relativgeschwindigkeiten beträchtlich zu (Bild 16, 2. Diagramm von oben). Die Grenzlinie der maximalen Relativgeschwindigkeiten im n-Fall bei $v_m/v_r = 1,0$ wird beim Verschuß des linken Randfeldes über die gesamte Breite der beiden nördlichen Sperrwerksfelder überschritten, wobei der Maximalwert auf das 1,6-fache ansteigt.

Im direkten Vergleich der beiden Varianten - mit und ohne Befestigung der Kolkböschungen - (siehe hierzu nochmals Bild 10, unteres Diagramm) stellt man in der Größe und Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten eine weitgehende Übereinstimmung fest, aus der abgeleitet werden darf, daß der Einfluß der Böschungsauffüllung auf das Geschwindigkeitsfeld im (n-1)_r-Fall vernachlässigbar gering ist. Auch bleibt die schon für die vorangegangene Variante geschilderte Strömungs- und Ablösungsstruktur beim Verschuß des linken Randfeldes im Prinzip unverändert - auch die starke Schräganströmung des Sperrwerks - womit auf die ausführliche Darstellung der Strömungsvorgänge im Abschnitt 3.2.2 zurückgegriffen werden darf.

Beim Verschließen der zwischenliegenden Felder II, III oder IV entsteht eine Strömungssituation, die im Bereich der geschlossenen Felder mit der komplexen Strömungsstruktur

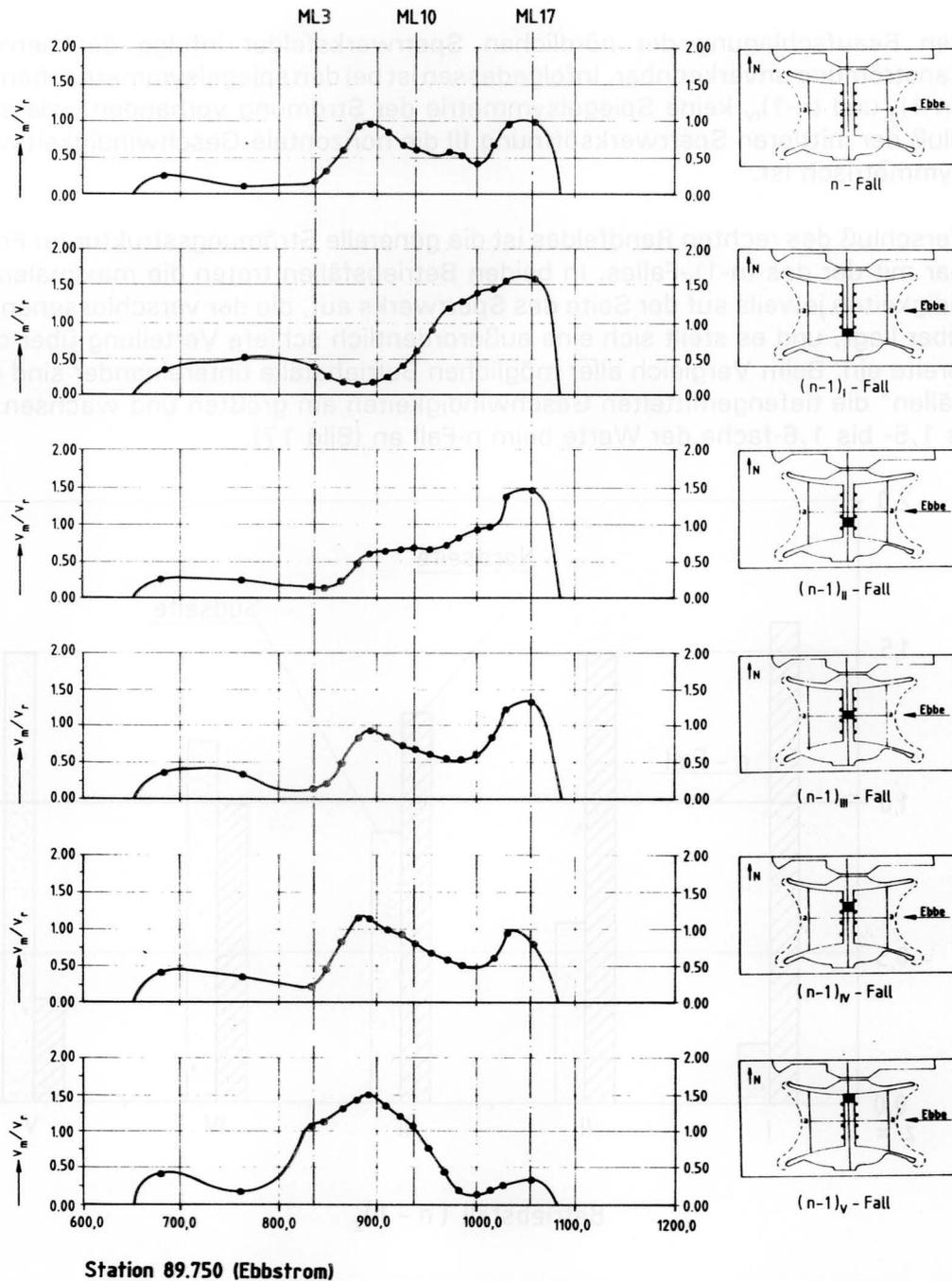


Bild 16: Horizontale Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten (Kolk vom Januar 1992 mit Befestigung der Kolkböschungen)

bei der Pfeilerumströmung vergleichbar ist, die von den Untersuchungen an Brücknpfeilern bekannt ist (z.B. Breusers/Raudkivi, 1991). Neben dem Hufeisenwirbel 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 wieder (Bild 16), 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 Spiegelsymmetrie der Strömung vorhanden, wie auch beim Verschluß der mittleren Sperrwerksöffnung III die horizontale Geschwindigkeitsverteilung nicht symmetrisch ist.

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 außerordentlich schiefe Verteilung über die Sperrwerksbreite ein. Beim Vergleich aller möglichen Betriebsfälle untereinander sind in beiden "Randfällen" die tiefengemittelten Geschwindigkeiten am größten und wachsen maximal auf das 1,5- bis 1,6-fache der Werte beim n-Fall an (Bild 17).

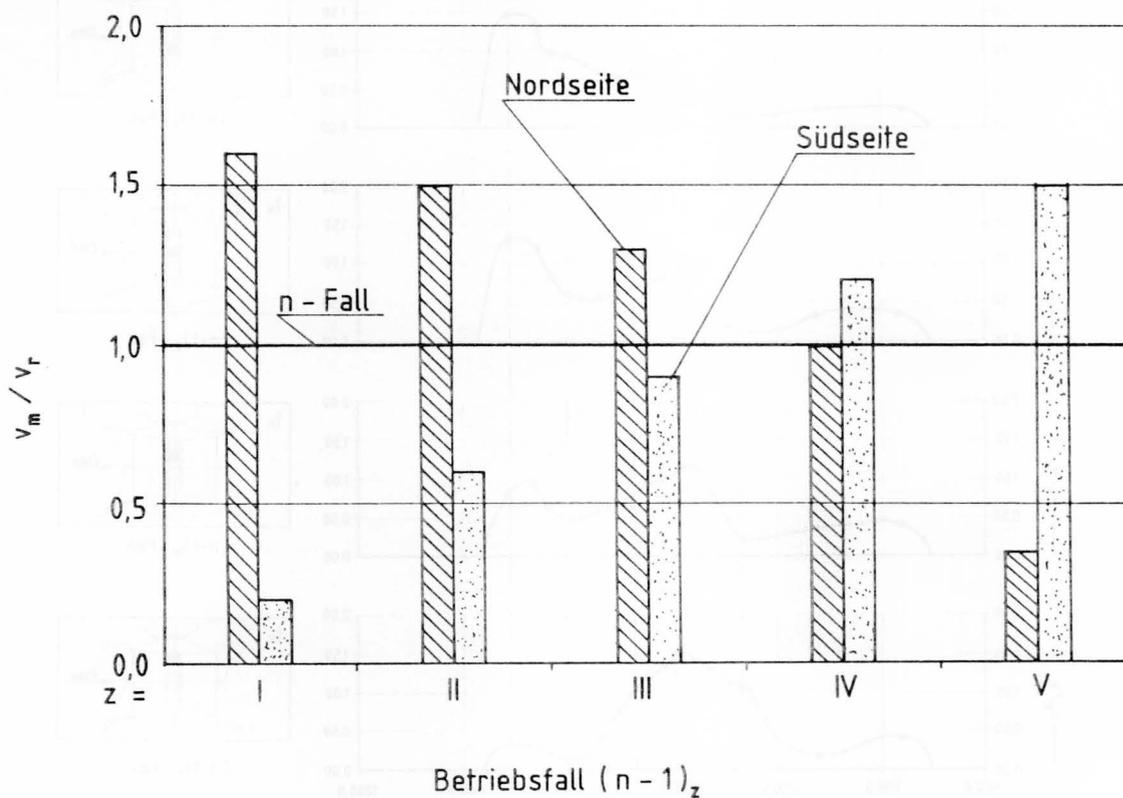


Bild 17: Einfluß der $(n-1)$ -Betriebsfälle auf die Maximalwerte der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten

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

3.4 Beurteilung der Kolkbildung

Mit den bekannten Zusammenhängen zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Kolkentiefe in Verbindung mit der in der Natur bei bestimmten Betriebszuständen beobachteten Kolkbildung können die im Luftmodell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auch hinsichtlich der Kolkbildung interpretiert werden.

Beim Durchfluß durch $n = 5$ Öffnungen mit Flutdrosselung betrug die maximale Tiefe des nördlichen Kolkes auf der Außenseite des Sperrwerks $h_{\max} = 17,0$ m, wenn man sie auf die bei NN - 6,60 m liegende Befestigungskante bezieht. Beim Verschuß der linken Randöffnung in den Jahren 1990 und 1991 (jeweils über mehrere Monate) war eine drastische Zunahme der Kolkentiefe auf $h_{\max} = 24,5$ m zu verzeichnen und mit ihr eine erhebliche Vergrößerung des gesamten Kolkessels, wie es auch die im Luftmodell gemessenen Fließgeschwindigkeiten mit ihrem Maximum auf der Nordseite für diesen Betriebsfall anzeigen.

Etwa die gleichen Kolkiefen sind zu erwarten, wenn das rechte Randfeld länger anhaltend geschlossen wird. In diesem Fall wird aber die Kolkbildung auf die Südseite verlagert, d. h., der südliche Kolk wird beträchtlich an Tiefe und Volumen zunehmen.

Etwas schwächer wird die Kolkbildung verlaufen, wenn eines der dazwischenliegenden Felder II, III oder IV länger anhaltend verschlossen wird. Während beim $(n-1)_{II}$ -Fall das Kolkgeschehen noch eindeutig auf der Nordseite verbleibt, verlagert es sich in den Betriebsfällen $(n-1)_{III}$ und $(n-1)_{IV}$ nach und nach auch zur Südseite des Sperrwerks.

Im Einklang mit den Ergebnissen von Kolkuntersuchungen der BAW für andere Wehranlagen (z.B. Rheinwehr Iffezheim, Mainwehr Kesselstadt, Weserwehr Bremen) ist generell festzustellen, daß sich beim Verschuß eines Randfeldes größere und tiefere Kolke als beim Verschuß eines der dazwischenliegenden Felder einstellen werden.

Alles in allem wird man davon ausgehen müssen, daß auch nach Beendigung der derzeit laufenden Baumaßnahmen zur Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen beim $(n-1)$ -Betrieb weiterhin so beträchtliche Kolke auftreten werden, wie sie bisher in der Natur beobachtet worden sind.

Die derzeitigen Sanierungsmaßnahmen an der Sohlensicherung dienen der Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und der Sicherung der bauwerksseitigen Kolkböschungen und damit der Sicherung des Gesamtbauwerks gegen die Kolkbildung für den in den kommenden Jahren anstehenden $(n-1)$ -Betrieb; eine Verringerung der Kolkbildung kann von ihnen nicht erwartet werden.

Bei der im Luftmodell erkannten Verlagerung der Strömungsintensitäten mit dem jeweiligen $(n-1)$ -Betriebsfall ist im gleichen Sinne auch eine Verlagerung des Auskolkungsgeschehens verbunden. Aus diesem Grund bietet sich bei der für die Jahre 1996 bis 1999 geplanten Betoninstandsetzung der Wehrträger eine günstige Reihenfolge an. Demnach sollte nach Möglichkeit mit dem Randfeld V begonnen werden und danach die Felder IV, III und II folgen. Dadurch werden die Kolkkonturen vergleichmäßigt und in Folge die Strömungsinstabilitäten und Sekundärströmungen vermindert.

4 Einfluß von Störkörpern auf die Strömungsverhältnisse

4.1 Untersuchte Modellzustände

Der Ausgangszustand bzw. Grundzustand für die Störkörperuntersuchungen war durch den Kolk vom Januar 1992 mit der Angleichung bzw. Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen in der Neigung 1 : 3 vorgegeben (siehe Abschnitt 3.3.1). Die an diesem Modellzustand erzielten Ergebnisse (siehe Abschnitt 3.3.2) dienen für die Betriebsfälle $n = 5$ und $(n-1)$, als Bezugsgrößen für die Störkörperuntersuchungen.

Bei den untersuchten Störkörpervarianten kann zwischen der Anordnung in Längsrichtung der Pfeiler (longitudinale Anordnung) und der Anordnung von Störkörperreihen quer zur Strömungsrichtung (orthogonale Anordnung) unterschieden werden. Für die im Nachlauf der Pfeiler längs zur Strömungsrichtung angeordneten Störkörpergruppen sind nach Zahl der Einzelkörper und deren Lage und Abstand untereinander mehrere Varianten untersucht worden. Da die hierbei erzielten Ergebnisse nur wenig differieren und überdies nur eine geringe Wirkung anzeigen, wird im Rahmen dieser Arbeit nur eine fünfreihe Längsanordnung als repräsentatives Beispiel gezeigt. Bei den quer zur Strömungsrichtung gesetzten Störkörpern werden ein und zwei Doppelreihen näher behandelt. Die Störkörper wurden im Luftmodell durch dünne bis zur Plexiglasplatte geführte Drahtstifte mit einem Durchmesser von 1,0 mm simuliert. Sie entsprechen in der Natur kreiszylindrischen Körpern mit einem Durchmesser von 1,0 m, die bis zum Wasserspiegel reichen.

4.2 Physikalische Grundlagen

Bei der Untersuchung der (n-1)-Betriebsfälle wurde die ungünstige Wirkung der Wirbelstraßen im Nachlauf der vier Sperrwerkspfeiler und unterstrom einer versperrten Sperrwerksöffnung auf die Flußsohle deutlich.

Die Strömungsvorgänge im Pfeilernachlauf sind für den Kreiszyylinder eingehend erforscht (z.B. Chen, 1973; Eck, 1978; Prandtl u.a., 1990; Schlichting, 1965) und können ohne nennenswerte Einschränkung auch auf die vorliegenden Sperrwerkspfeiler übertragen werden.

Für die am Sperrwerk bei Ebbe auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten von $v = 3,0 - 7,5 \text{ m/s}$ und die vorhandene Pfeilerbreite von $b = 6,0 \text{ m}$ kann mit $v_{13} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, die auf die Pfeilerbreite bezogene Reynoldszahl $Re = v \cdot d/v$ zu

$$Re = (1,5 - 3,75) \cdot 10^7$$

ermittelt 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 (Bild 18).

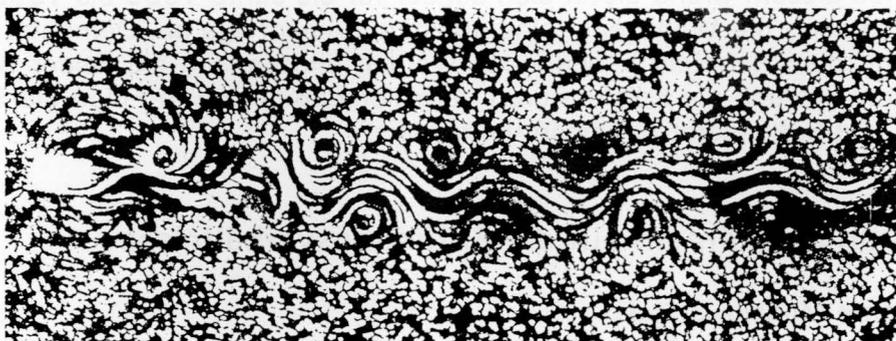


Bild 18: Wirbelstraße hinter einer schmalen Platte (ruhende Kamera) nach Prandtl u.a., 1990

Die Wirkung der Wirbelstraßen im Unterwasser kann noch deutlich in einer Entfernung von $x = 50 \cdot d$ nachgewiesen werden (Eck, 1978), was für das Eider-Sperrwerk 300 m bedeuten.

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 (Bild 19).

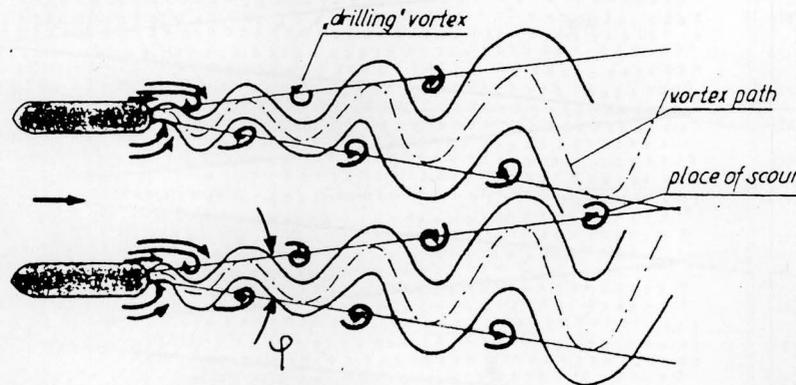


Bild 19: Überlagerung zweier Wirbelstraßen im Nachlauf von benachbarten Pfeilern (Hankó, 1967)

Der Ausbreitungswinkel Φ hängt von der Reynoldszahl, der Pfeilerform und insbesondere von der Rauheit der Pfeileroberfläche ab und erreicht in keinem Fall 25° . Bei kleinen Reynoldszahlen ($Re < 3 \cdot 10^2$) nimmt Φ mit Re zu (Schlichting, 1965); für größere Re-Zahlen ist die Abhängigkeit $\Phi = f(Re)$ noch wenig erforscht. Bei Modelluntersuchungen für das Weserwehr Bremen konnte für $Re = 3 \cdot 10^4$ der Ausbreitungswinkel zu $\Phi = 15^\circ$ ermittelt werden.

Dagegen ergaben die Untersuchungen für das Eider-Sperrwerk im Luftmodell (BAW, 1993) für etwa die gleiche Re-Zahl einen Ausbreitungswinkel von $\Phi = 10^\circ - 12^\circ$. Etwa die gleiche Ausbreitung war auch bei den Untersuchungen im Kolkmodell des Eider-Sperrwerks (BAW, 1971) mit einer Re-Zahl von $4,5 \cdot 10^4$ zu beobachten.

Konstruiert man mit diesen Versuchsergebnissen für das Eider-Sperrwerk ($\Phi = 11^\circ$) ein rein geometrisches Bild der Wirbelausbreitung im Pfeilernachlauf (Bild 20), so zeigt diese vereinfachte Darstellung doch schon deutlich, daß sich die abgelösten Wirbel zweier benachbarter Pfeiler im Bereich der auskolkbaren Flußsohle überlagern und dort durchaus im Zusammenwirken mit den anderen ungünstigen Strömungserscheinungen die beträchtlichen Auskolkungen bewirken können. Allerdings ist bei dieser Betrachtung zu berücksichtigen, daß infolge der herrschenden Schrägströmung - insbesondere im (n-1)-Fall - die Strömungsverhältnisse im Bereich des Sperrwerks weitaus komplexer sind und sich die Strömung einschließlich der Wirbelstraßen im Pfeilernachlauf stärker zum tiefen Kolk auf der Nordseite konzentriert, als dies die geometrische Konstruktion zeigen kann.

Bei der Betrachtung der Vorgänge im Pfeilernachlauf sind auch die Wirbelfrequenzen n der Kármánschen Wirbelstraße von Bedeutung, die in der dimensionslosen Frequenz

$$\frac{n \cdot D}{v} = S$$

ausgedrückt werden können, die man auch als Strouhalzahl S bezeichnet. Die Strouhalzahl ist von der Reynoldszahl abhängig (z.B. Chen, 1973; Schlichting, 1965) und kann für den transkritischen Reynoldszahlbereich am Eider-Sperrwerk zu

$$S = 0,28$$

angegeben werden.

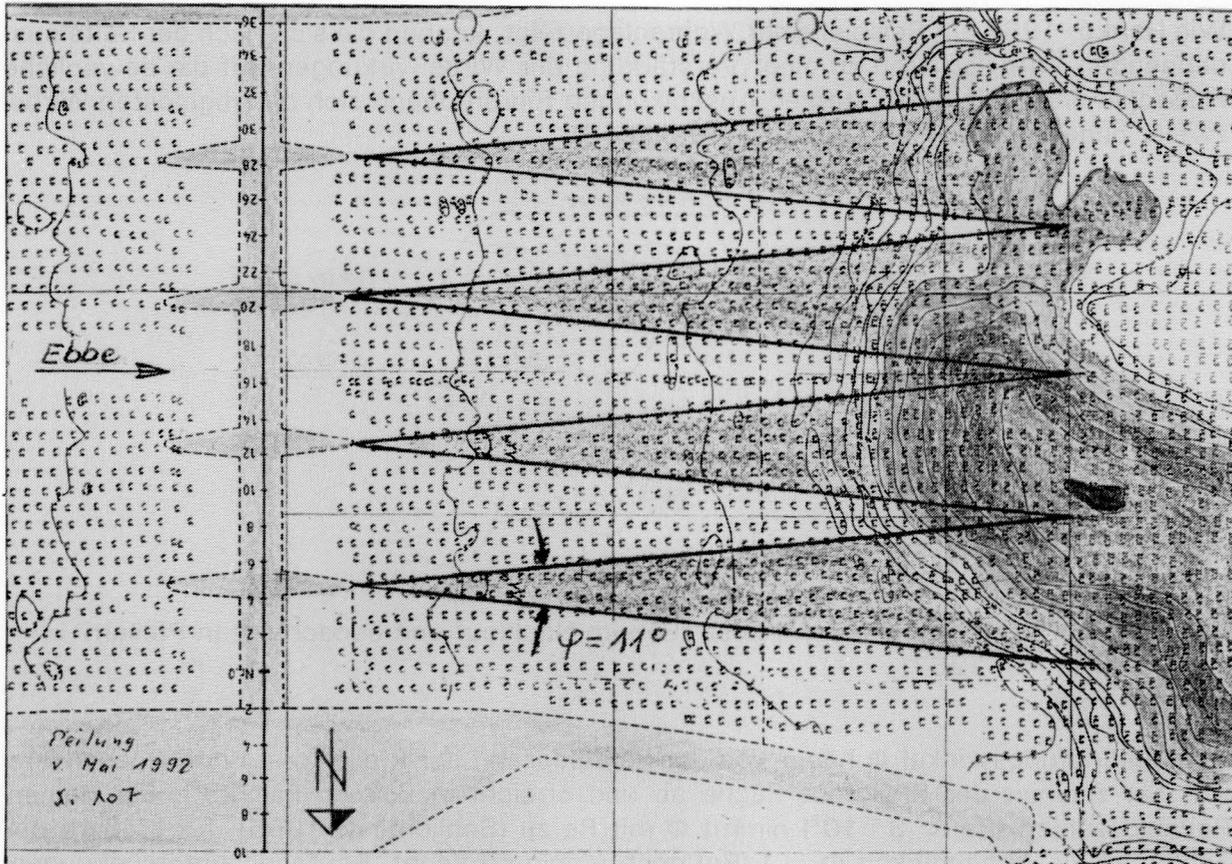


Bild 20: Vereinfachte Darstellung der Wirbelstraßen im Pfeilernachlauf

Anmerkung: Im transkritischen Reynoldszahlbereich ist die Strouhalzahl gegen die Turbulenz der freien Strömung und die Rauheit der Pfeileroberfläche empfindlich und streut daher bei den verschiedenen Verfassern sehr stark.

Mit $v = 3,0 - 7,5 \text{ m/s}$ und $b = 6,0 \text{ m}$ können die Wirbelfrequenzen am Eider-Sperrwerk zu

$$n = \frac{v}{b} \cdot S = 0,14 - 0,35 \frac{1}{s}$$

ermittelt werden.

Mit diesen theoretischen Grundlagen können wir anschließend der Frage nachgehen, wie die ungünstigen Wirbelwirkungen im Pfeilernachlauf vermindert werden können.

Selbstverständlich kann die Strömungsablösung und in Folge die Entwicklung der Wirbelstraße im Pfeilernachlauf durch die Wahl eines Stromlinienkörpers vermieden werden. Die wechselnden Strömungsrichtungen im Tidegebiet, aber auch praktische Gründe schließen eine derartige Lösung aus. Die schon vorhandenen Pfeiler am Eider-Sperrwerk lassen es auch nicht zu, eine geringere Pfeilerbreite b zu wählen, um die Frequenz n der Wirbelstraße zu erhöhen. Bei einer höheren Frequenz ist der Energiegehalt der Einzelwirbel geringer und die Energiedissipation entsprechend größer. Eine derartige Wirkung könnte auch durch beidseitig der Sperrwerkspfeiler angeordnete doppelte Leitwände erzielt werden, die sich im Nachlauf auf einem längeren Weg kontinuierlich zu einer konstruktiv noch machbaren Pfeilerbreite b' verjüngen (Bild 21).

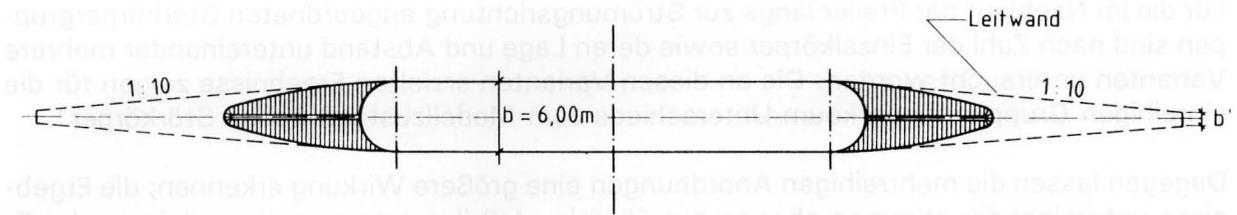


Bild 21: Verringerung der strömungswirksamen Pfeilerkopfbreite durch Leitwände

Da eine derartige lange Pfeilerwand gegen eine Schräganströmung außerordentlich empfindlich ist, kann mit ihr beim Eider-Sperrwerk nur dann eine abschwächende Wirkung auf das Wirbelsystem im Pfeilernachlauf erreicht werden, wenn durch weitergehende Maßnahmen (z.B. Leitdämme und Bühnen) im Anströmbereich des Sperrwerks die bestehenden Strömungsverhältnisse verbessert werden.

Eine Verkleinerung der Wirbelzone im Pfeilernachlauf kann auch durch die Anordnung von unterteilten Leitflächen am unterstromigen Ende des Pfeilers bewirkt werden (Flügel, 1930), die sich nach Eck, 1981 in der Praxis gut bewährt haben (Bild 22).

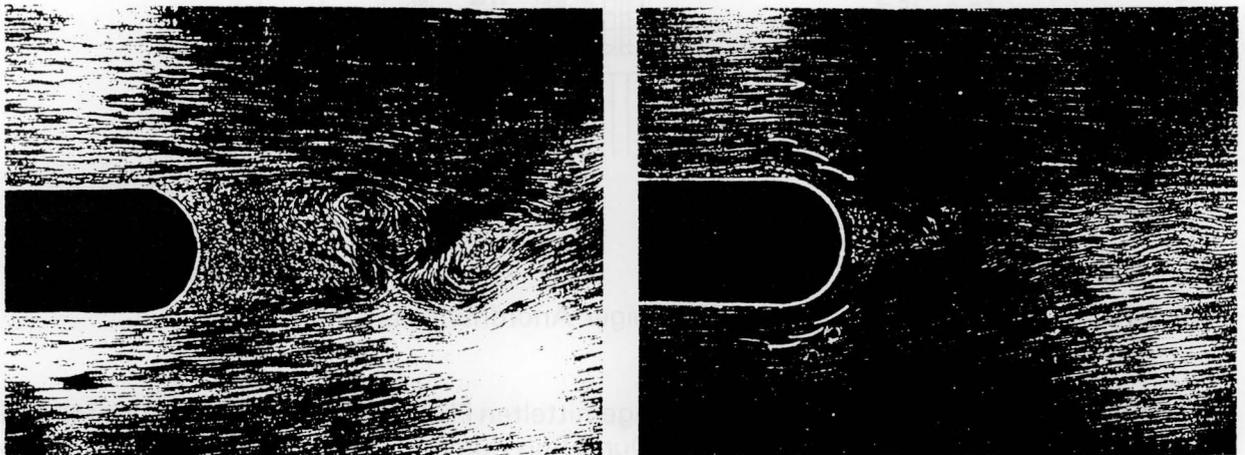


Bild 22: Wirbelsystem im Pfeilernachlauf ohne (links) und mit (rechts) unterteilten Leitflächen (Flügel, 1930)

Wie auch der Stromlinienkörper, verlangen derartige Hilfsflügel jedoch einen richtungs-konstanten Abfluß und dürften daher kaum für die wechselnden Strömungsrichtungen im Tidegebiet optimiert werden können.

Die Nachteile der Empfindlichkeit gegen die wechselnden Strömungsrichtungen und die bestehende Schräganströmung des Sperrwerks könnten durch aufgelöste Störkörperreihen vermieden werden, mit denen möglicherweise in einer bestimmten Anordnung in Längs- und/oder Querrichtung zu den Pfeilern symmetrisch auf beiden Seiten des Sperrwerks die auftretenden Wirbelsystem gestört und höhere Wirbelfrequenzen mit einer gesteigerten Energiedissipation erzwungen werden. Dieser Frage soll in den vorliegenden Untersuchungen im Luftmodell nachgegangen werden.

4.3 Störkörper in longitudinaler 5-reihiger Anordnung

Für die im Nachlauf der Pfeiler längs zur Strömungsrichtung angeordneten Störkörpergruppen sind nach Zahl der Einzelkörper sowie deren Lage und Abstand untereinander mehrere Varianten untersucht worden. Die an diesen Varianten erzielten Ergebnisse zeigen für die einreihigen Gruppierungen kaum Unterschiede zum Modellzustand "ohne Störkörper".

Dagegen lassen die mehrreihigen Anordnungen eine größere Wirkung erkennen; die Ergebnisse untereinander stimmen aber so gut überein, daß ihre Interpretation allein an der 5-reihigen Variante erfolgen kann (Bild 23).

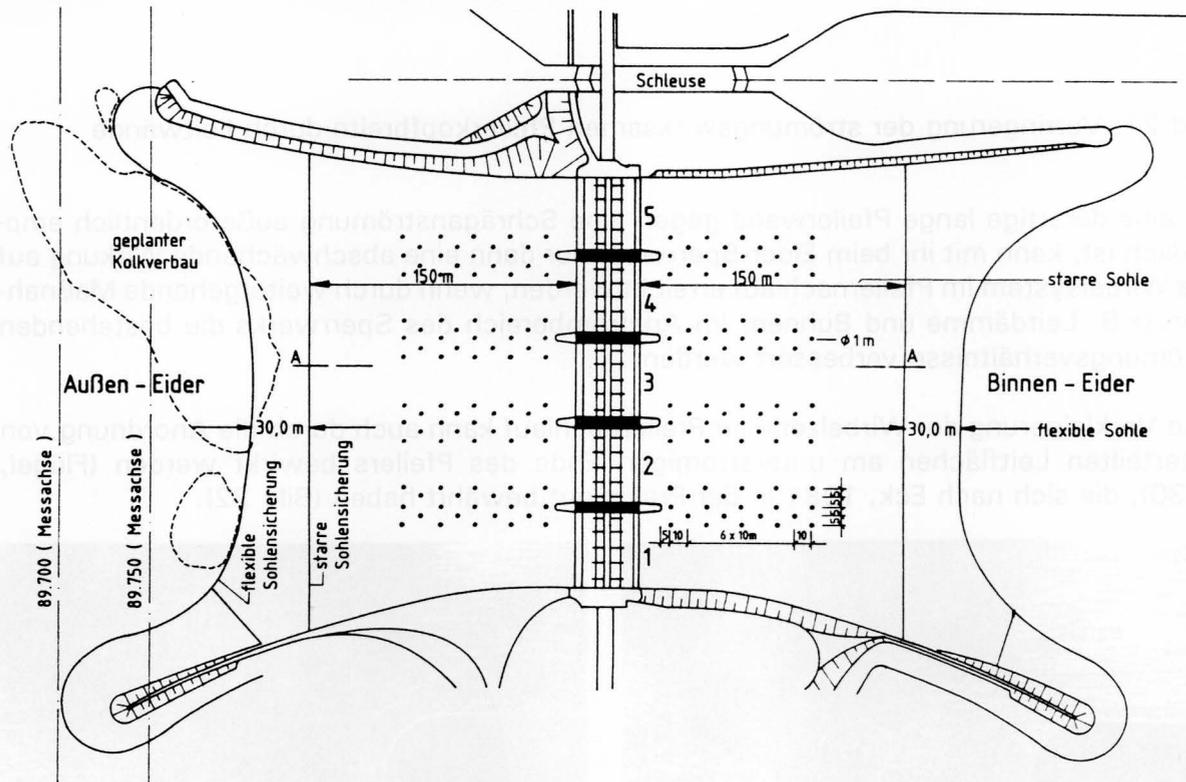


Bild 23: Störkörper in longitudinaler 5-reihiger Anordnung (Lageplan)

Beginnen wir die Betrachtung mit den tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten, so fällt bei der horizontalen Verteilungskurve für den Durchfluß durch 5 Sperrwerksöffnungen (n-Fall) der wellige Verlauf auf (Bild 24, oberes Diagramm).

Etwa in der Mitte jedes Sperrwerksfeldes, d.h. jeweils zwischen zwei Störkörpersystemen, treten Geschwindigkeitsmaxima auf, von denen die beiden äußeren infolge des Vorhandenseins von einengenden Ablösungswirbeln an den seitlichen Berandungen am größten sind. Im Nachlaufgebiet jedes Störkörpersystems stellt sich jeweils ein Geschwindigkeitsminimum ein.

Im Vergleich mit dem Ausgangszustand (ohne Störkörper) bedeutet dies, daß im Bereich der mittleren Sperrwerksfelder II bis IV im Nachlaufgebiet der Störkörperanordnung leichte Verbesserungen erzielt werden, die aber auf Kosten der Geschwindigkeitsverhältnisse in den Randfeldern I und V gehen, wo die Fließgeschwindigkeiten zunehmen. Der früher für die speziellen Bedingungen im Luftmodell herausgearbeitete Grenzwert für eine erhöhte Kolkbildung von $v_m/v_r = 1,0$ wird teils deutlich überschritten, was insbesondere in der Nähe der nördlichen Trennmole kritisch sein kann.

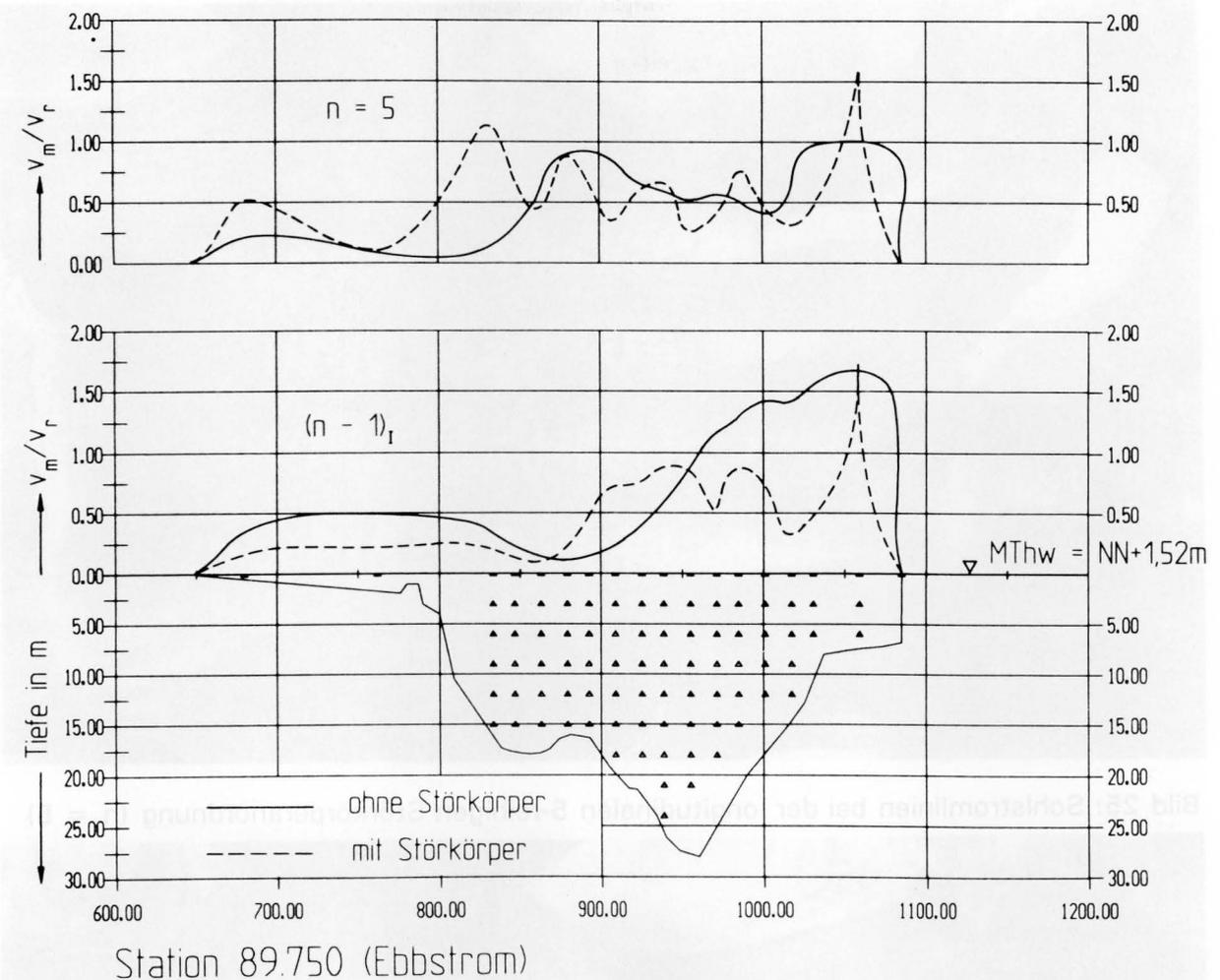


Bild 24: Horizontale Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten bei der longitudinalen 5-reihigen Störkörperanordnung

Die Sichtbarmachung der Sohlstromlinien bestätigt diese Interpretation der Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen (Bild 25).

Die verringerten Fließgeschwindigkeiten im Nachlauf der Störkörpergruppen zeigen sich im Lichtbild in den teils sehr dichten Talkumflächen; die vergrößerten Geschwindigkeiten in den freien Abströmzonen zwischen den Störkörpergruppen führen zu starken Erosionen, die im Bild als dunkle Streifen zu erkennen sind. Auffallend und als günstiges Versuchsergebnis zu werten ist das dichte Talkumfeld im nördlichen Kolkessel, das auf eine stabile Kolkssituation schließen läßt.

Betrachten wir jetzt die Strömungsverhältnisse beim $(n-1)_1$ -Fall (Verschluß der linken Randöffnung), so stellen wir bei der horizontalen Darstellung der tiefengemittelten Geschwindigkeiten wieder eine Abfolge von Maxima und Minima fest, je nach dem, ob die Meßpunkte im Abströmbereich der Wehrfelder III bis V oder im Nachlauf der Pfeiler mit den Störkörpergruppen liegen (Bild 24, unteres Diagramm). Jedoch sind im zuletzt genannten Fall die Minima etwas in die nördliche Richtung versetzt, was mit der starken Schrägströmung zum tiefen nördlichen Außenkolk beim $(n-1)_1$ -Fall zusammenhängt. Insgesamt ist die schiefe Geschwindigkeitsverteilung des Ausgangszustandes durch die Störkörper deutlich verbessert worden, wobei nur noch am Meßpunkt 17 die für die Kolkbildung kritische Geschwindigkeitsgrenze von $v_m/v_r = 1,0$ überschritten wird.

Bei den sichtbar gemachten Sohlstromlinien (Bild 26) bietet sich ein Vergleich mit einer entsprechenden Aufnahme beim Zustand ohne Störkörper (Bild 13) an. Hierbei fällt auf,

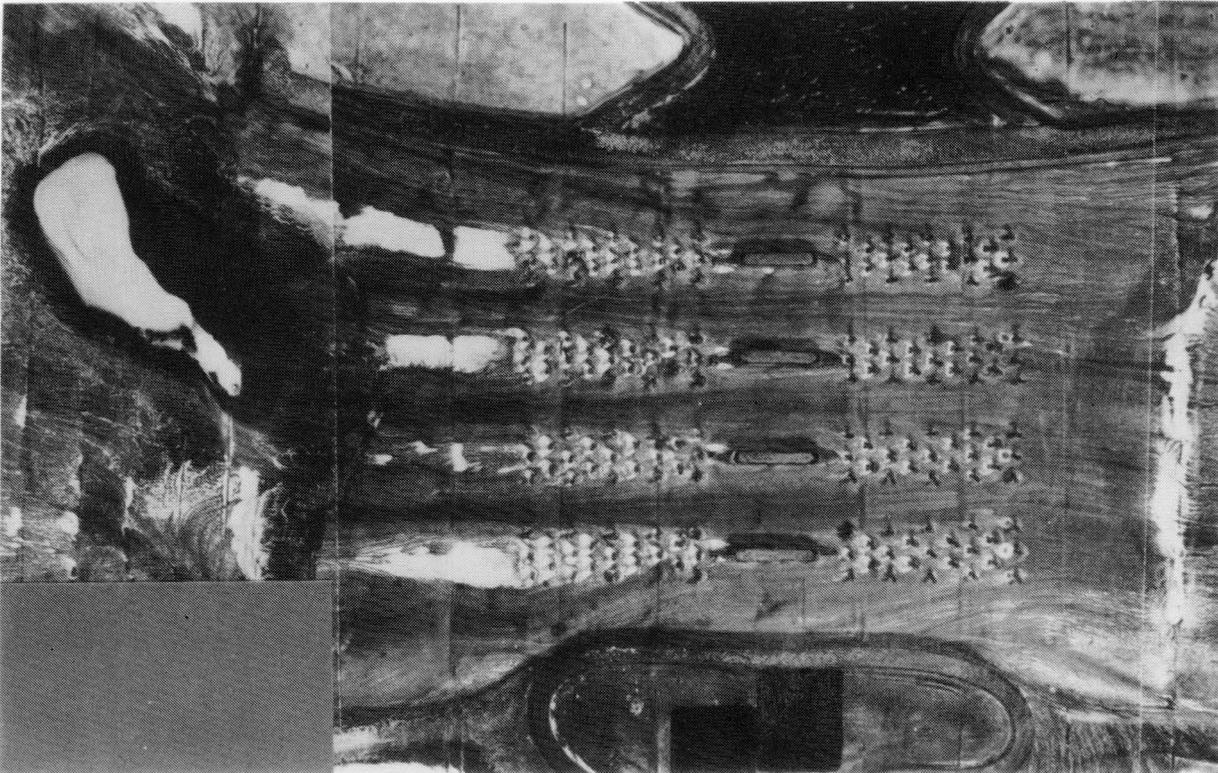


Bild 25: Sohlstromlinien bei der longitudinalen 5-reihigen Störkörperanordnung ($n = 5$)

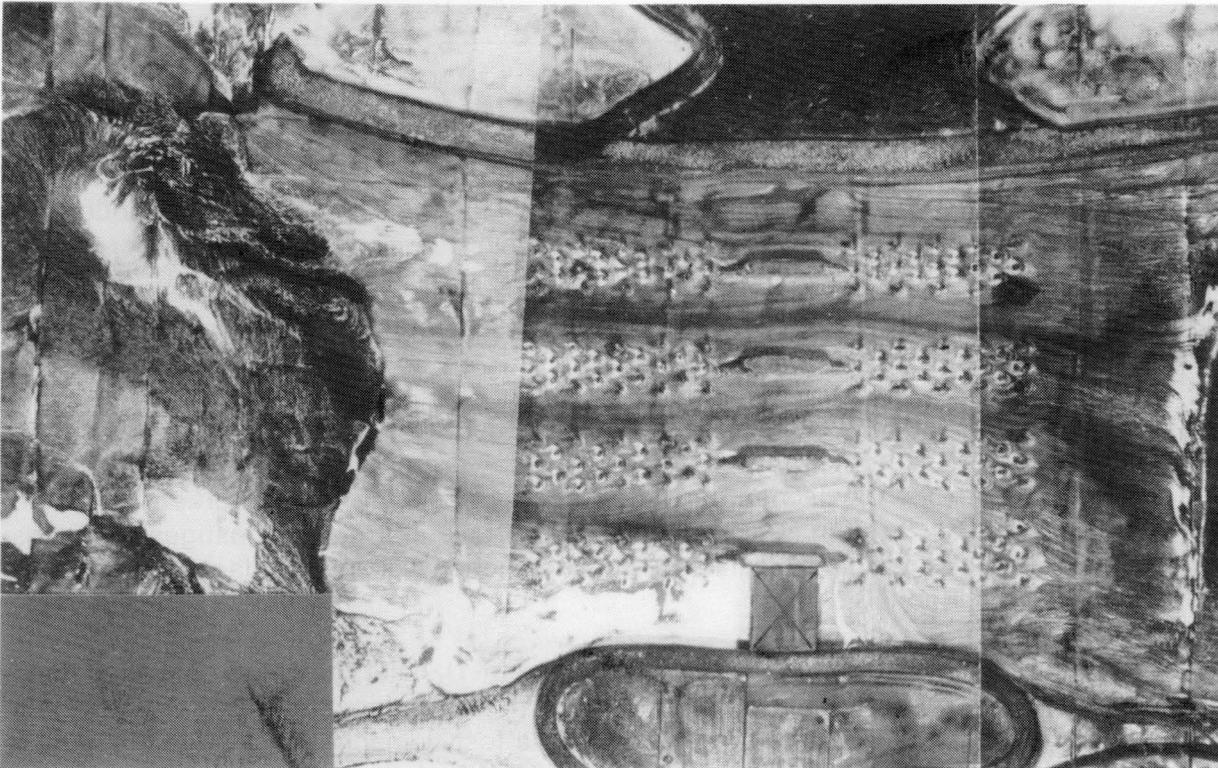


Bild 26: Sohlstromlinien bei der longitudinalen 5-reihigen Störkörperanordnung für den $(n-1)$ -Betriebsfall

daß infolge der Störkörper die Umlenkung der Strömung zum tiefen Außenkolk weniger stark ist, was sich auch in dem deutlich erkennbaren Talkumfeld im Kolkessel anzeigt und mit einer Verringerung der Auskolkungstendenz interpretiert werden kann. Von Interesse ist noch das Ergebnis, daß schon 50 m weiter außerhalb (Querschnitt 89.700) der vorher geschilderte wellige Verlauf der horizontalen Verteilungskurve in beiden betrachteten Be-

triebsfällen weitgehend ausgeglichen ist und wir finden dort eine verbesserte Geschwindigkeitsverteilung vor.

4.4 Störkörper in orthogonaler doppelreihiger Anordnung

Bei dieser Variante ist auf jeder Seite des Sperrwerks etwa 80 m unterhalb der jeweiligen Pfeilerenden quer zur Strömungsrichtung eine Doppelreihe von Störkörpern angeordnet. Die Störkörper sind nicht versetzt; ihr Abstand beträgt jeweils 10,0 m (Bild 27).

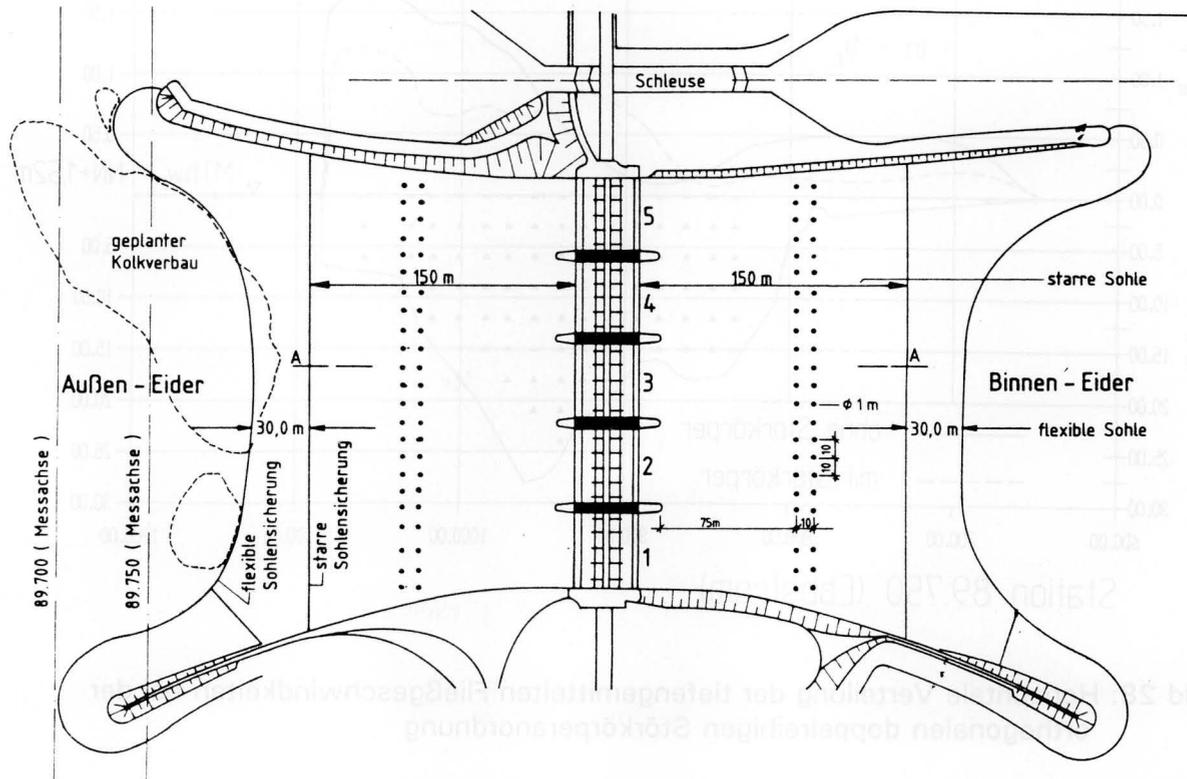


Bild 27: Störkörper in orthogonaler doppelreihiger Anordnung (Lageplan)

Die Kurve der horizontalen Geschwindigkeitsdarstellung zeigt für den Durchfluß durch alle 5 Wehröffnungen eine bessere Verteilung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten über die Breite des Sperrwerks als für den Zustand ohne Störkörper (Bild 28, oberes Diagramm).

Beim Vergleich mit der vorher untersuchten longitudinalen Anordnung der Störkörper (siehe hierzu Bild 24) fällt auf, daß die beiden Geschwindigkeitsspitzen an den seitlichen Sperrwerksberandungen (Meßpunkte 3 und 17) ermäßigt werden konnten, womit die Vermutung nahe liegen muß, daß diese Maxima durch die Längsanordnung der Störkörper bedingt sind. Vermutlich spielt hierbei die Einengung der Strömung zwischen den seitlichen Ablösungszonen und den Störkörperreihen eine Rolle.

Der Vergleich zeigt weiter, daß die Längsanordnung der Störkörper im Nachlauf der Pfeiler relativ wirkungslos auf die horizontale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten ist, dagegen die Queranordnung einen guten Ausgleich der Geschwindigkeiten über die Sperrwerksbreite bewirkt.

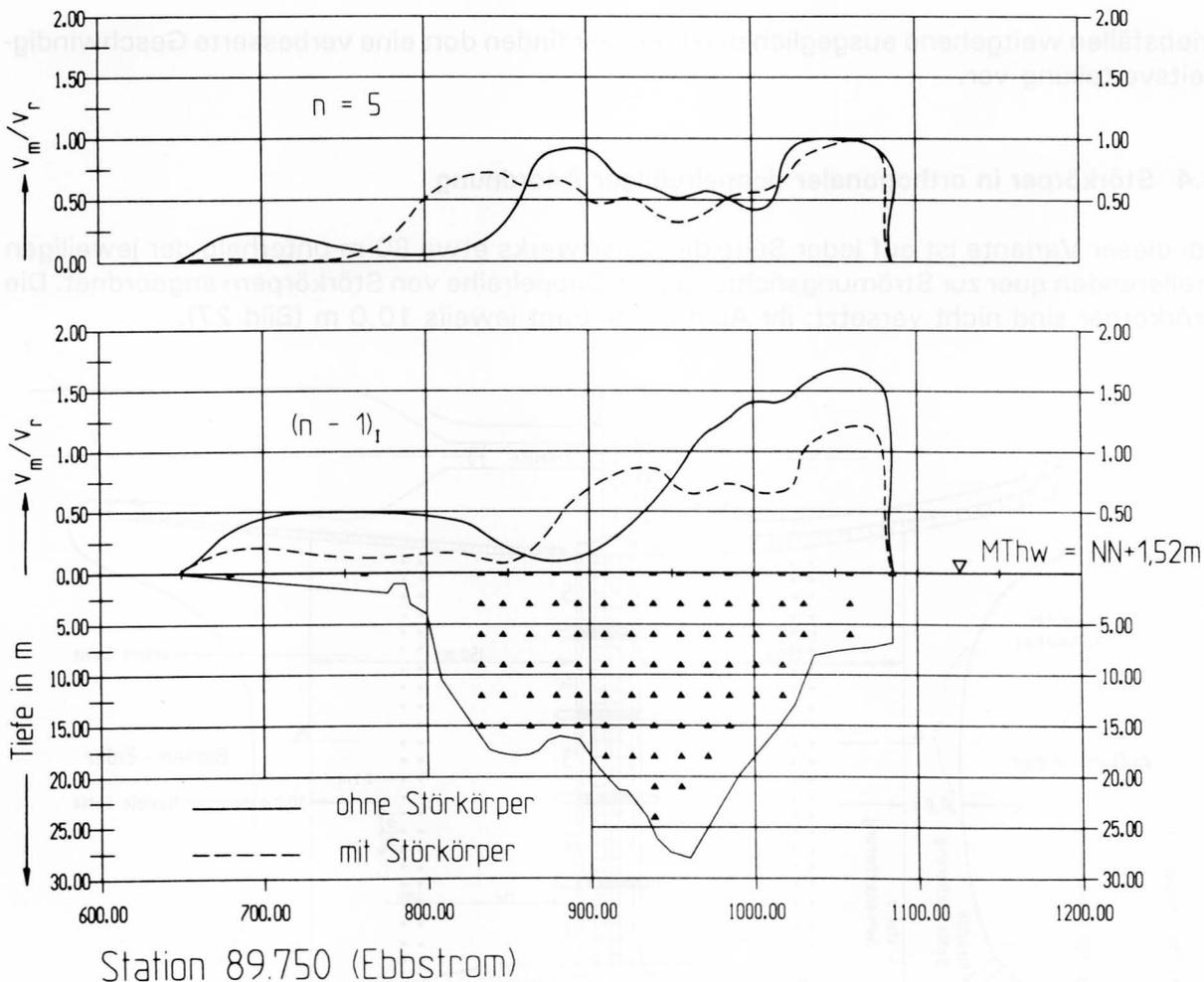


Bild 28: Horizontale Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten bei der orthogonalen doppelreihigen Störkörperanordnung

Ein ähnliches Ergebnis erhält man für den $(n-1)_1$ -Betrieb, bei dem die linke Randöffnung verschlossen ist (Bild 28, unteres Diagramm). Beim Vergleich mit dem Zustand ohne Störkörper wird die außerordentlich günstige Wirkung der Störkörper in der Queranordnung auf die horizontale Verteilung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten deutlich. Wie auch im n -Fall, konnten die Geschwindigkeitsmaxima an den Übergängen zu den seitlichen Ablösungsbereichen herabgesetzt werden.

4.5 Störkörper in orthogonaler Anordnung mit zwei Doppelreihen

Fügt man der vorher behandelten Variante noch eine zweite, näher zum Sperrwerk gelegene Doppelreihe von Störkörpern hinzu, erhält man die auf Bild 29 gezeigte Anordnung.

Auch hier sind die einzelnen Störkörper nicht gegeneinander versetzt; ihr gegenseitiger Abstand in der Doppelreihe beträgt längs und quer jeweils 10,0 m.

Insgesamt sind auf jeder Seite des Sperrwerks 92 Störkörper mit einem Durchmesser von 1,0 m (Naturmaß) angeordnet.

Die Darstellung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten über die Breite des Sperrwerks zeigt für den Durchfluß durch $n = 5$ Öffnungen, daß unter der Wirkung der

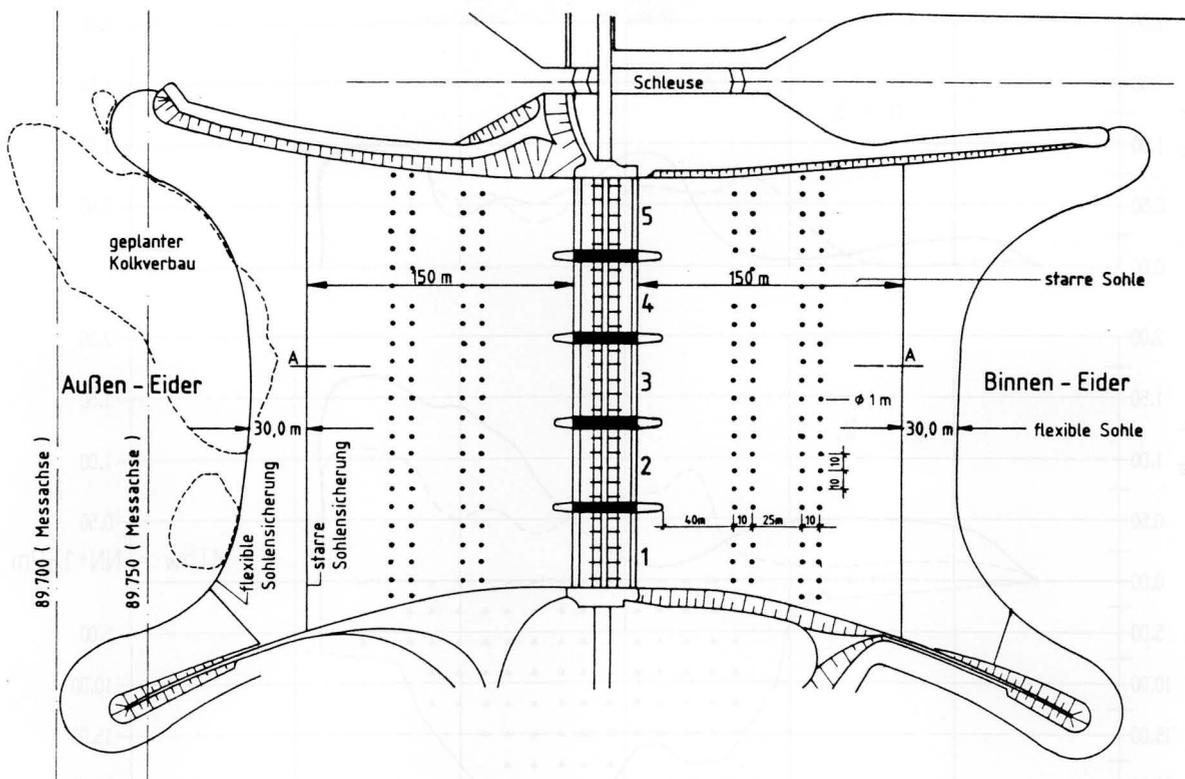


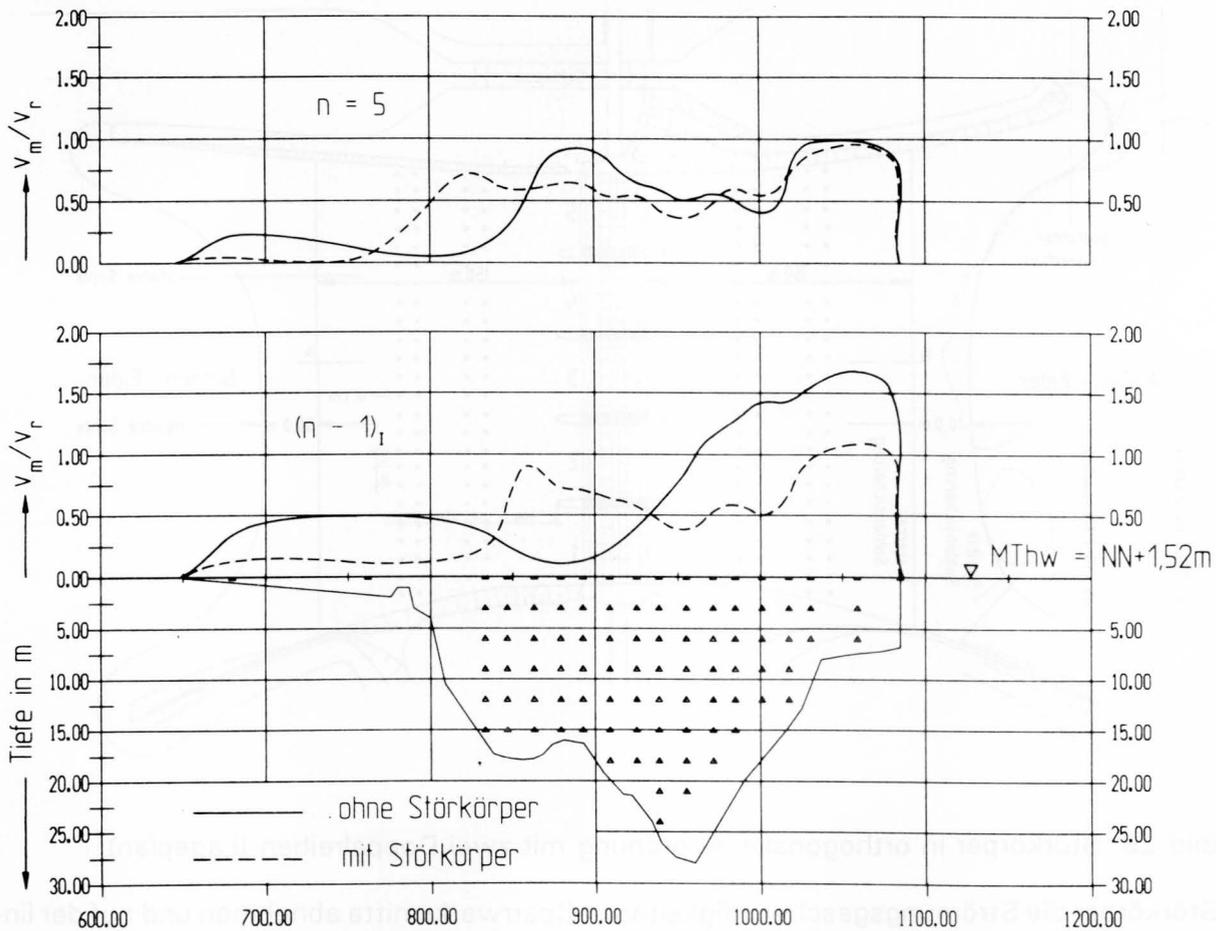
Bild 29: Störkörper in orthogonaler Anordnung mit zwei Doppelreihen (Lageplan)

Störkörper die Strömungsgeschwindigkeiten in Sperrwerksmitte abnehmen und auf der linken Sperrwerksseite zunehmen, wodurch sich die Geschwindigkeitsverteilung über die Sperrwerksbreite besser ausgleicht, wenn man von dem durch die Ablösung im Bereich des Trennmolenkopfs bedingten Maximum absieht, das durch die Störkörper nicht beeinflußt wird (Bild 30, oberes Diagramm).

Die Visualisierung der Sohlstromlinien vermittelt uns für die beiden Zustände ohne und mit Störkörper auf eine andere Art die günstige Wirkung der Störkörper auf das Strömungsfeld im Bereich des Sperrwerks (Bild 31).

Schon auf der Anströmseite des Sperrwerks beim Ebbstrom bewirken die Störkörper ein Gleichrichten der Strömung derart, daß innerhalb der einzelnen Wehrfelder die Strömung nahezu parallel zu den Pfeilerflanken liegt und die ohne Störkörper zu beobachtenden Schrägströmungen vermieden werden. Unter der Wirkung der Störkörperreihen auf der Außenseite des Sperrwerks bleibt dieser pfeilerparallele Strömungsverlauf über die gesamte Länge der Sohlensicherung bis in das Auskolkungsgebiet erhalten. Während bei der Variante "ohne Störkörper" die Strömung noch deutlich in die nördliche Richtung (zum Kolk hin) umgelenkt wird und in den Feldern III und IV höhere Geschwindigkeiten als in den restlichen Feldern auftreten (zu erkennen an den dunklen Erosionsstreifen), macht die Aufnahme der Sohlstromlinien bei der Störkörperanordnung durch die einheitliche Ausbreitung des Talkungemischs die gute Verteilung der Strömung über die Sperrwerksbreite sichtbar. Als Folge dieser günstigen Veränderungen im Strömungsfeld ist beim Vorhandensein von Störkörpern in der Querreihenlage mit einer verringerten Auskolkungstendenz zu rechnen, wie das ausgedehnte weiße Talkumfeld auf der Sohle des Kolkessels zeigt.

Für den $(n-1)_1$ -Betrieb (Versperren der linken Sperrwerksöffnung) sollen zunächst die vertikalen Geschwindigkeitsprofile \bar{v}/v_1 und die Standardabweichungen s/v_1 vorgestellt werden (Bild 32). Wie auch schon beim Durchfluß durch $n = 5$ Wehröffnungen, reagieren in der Darstellung ausgewählter Meßprofile die Meßwerte uneinheitlich auf die Störkörper; die nachfolgend gezeigten horizontalen Geschwindigkeitsverteilungen sind für die Beurteilung



Station 89.750 (Ebbstrom)

Bild 30: Horizontale Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten bei zwei Störkörperdoppelreihen

der Störkörperanordnungen in ihrer Wirkung auf das Strömungsfeld wesentlich aussagekräftiger. Festzuhalten ist nur noch das Ergebnis, daß die Standardabweichungen in Sohl­nähe wieder relativ groß sind; die Turbulenzgrade können zu 50 % bis 60 % angegeben werden.

Bei der horizontalen Geschwindigkeitsdarstellung ist bei der Variante mit Störkörpern für den Meßquerschnitt bei 89.750 eine Vergleichsmäßigung der Geschwindigkeitsverteilung über die Breite des Sperrwerks zu erkennen (Bild 30, unteres Diagramm). Sie kommt dadurch zustande, daß unter der Wirkung der Störkörper die Fließgeschwindigkeiten auf der linken Sperrwerksseite zunehmen und auf der rechten Seite abnehmen. Gerade die zuletzt genannte Abnahme der Geschwindigkeiten ist als besonders wertvoll einzustufen, da sie im Bereich des tiefen Nordkolkes erfolgt und zu Geschwindigkeiten führt, die um die Grenze $v_m/v_r = 1,0$ oder darunter liegen. Die Auskolkungstendenz wird dadurch deutlich verringert. Die Sichtbarmachung der Sohlstromlinien gibt uns wieder einen optischen Eindruck von der günstigen Wirkung der Störkörperanordnungen (Bild 33).

Die starke Umlenkung der Sohlstromlinien zum tiefen Außenkolk beim Zustand ohne Störkörper (Bild oben) wird durch die Störkörperreihen unterbunden (Bild unten). Die durch Messungen ermittelte Verringerung der Fließgeschwindigkeiten im Bereich des nördlichen Außenkolks wird deutlich durch das dichte Talkumfeld auf der Sohle des Kolkkessels belegt und dadurch eine bemerkenswerte Abschwächung des Auskolkungsgeschehens angezeigt. Wie auch schon bei der vorher untersuchten Störkörpervariante, werden die Ergeb-

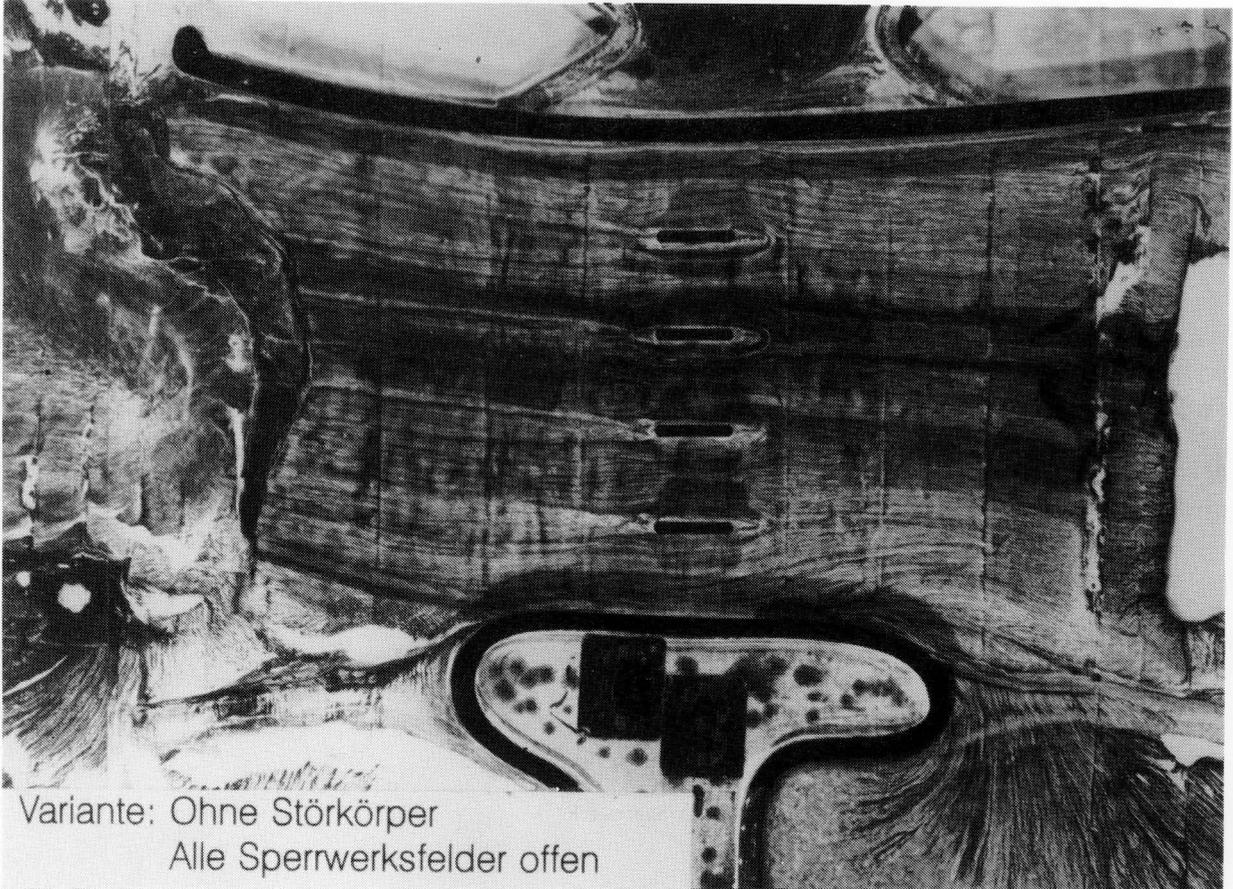


Bild 31: Sohlstromlinien ohne und mit Störkörper in orthogonaler Anordnung mit zwei Doppelreihen (n = 5)

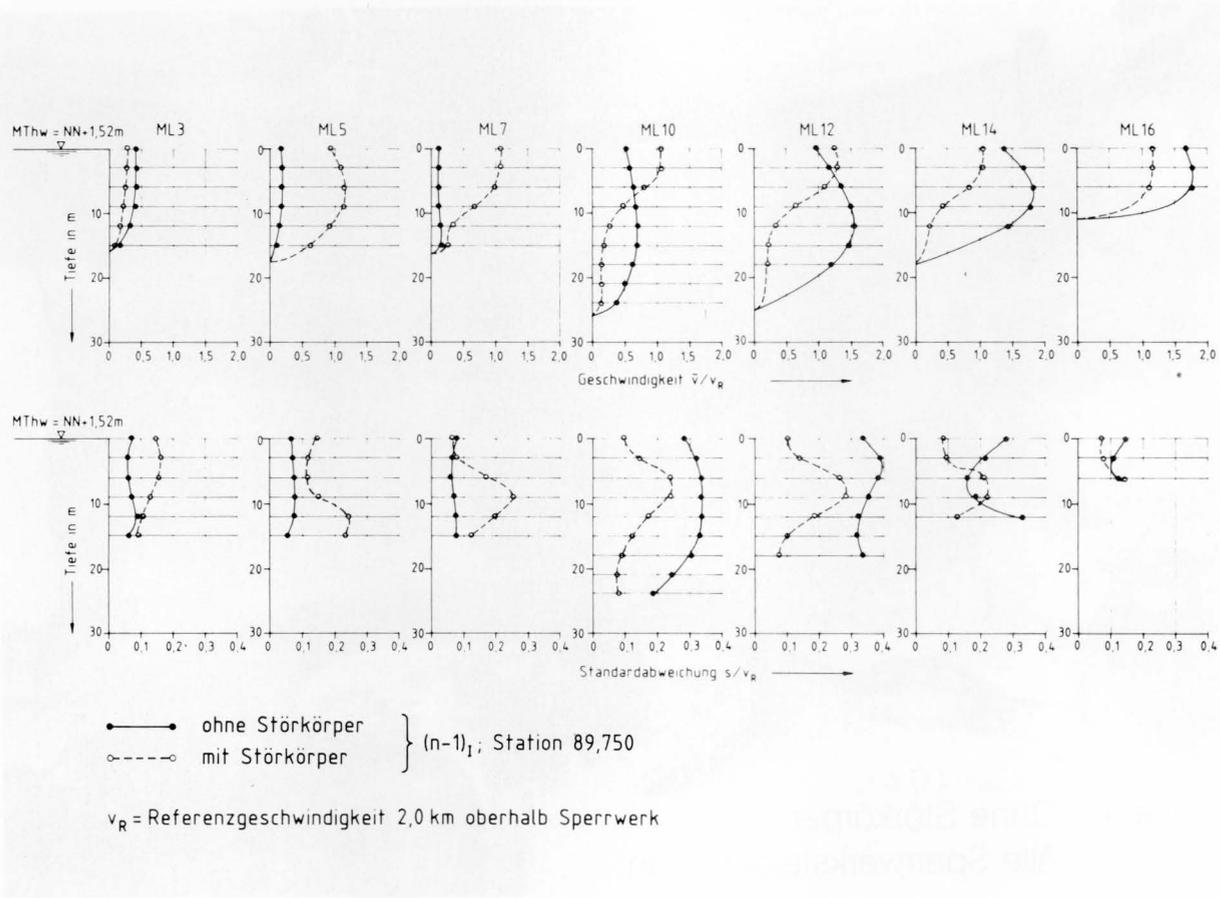


Bild 32: Vertikale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten und der Standardabweichungen ohne und mit Störkörper; $(n-1)_1$ -Betriebsfall

nisse der Geschwindigkeitsmessungen noch günstiger und in ihrer horizontalen Verteilung weiter ausgeglichen, wenn man mit dem Meßprofil um 50 m weiter nach unterstrom rückt (Meßstation 89.700).

4.6 Bewertung der Ergebnisse der Störkörperversuche

Bei der Formulierung der Aufgabenstellung wurde schon zum Ausdruck gebracht, daß es bei den Störkörperuntersuchungen im Luftmodell in erster Linie um eine Voruntersuchung über die Wirkung von Störkörpern auf das Strömungsfeld im Bereich des Eider-Sperrwerks ging. Hierbei blieben Fragen nach deren Machbarkeit in der Praxis, nach der konstruktiven Gestaltung der Störkörper und deren notwendigen und möglichen Abmessungen bewußt ausgeklammert. Es sollten ausschließlich auf wissenschaftlicher Grundlage die Grenzen möglicher Verbesserungen der Strömungsverhältnisse durch Störkörper gesucht werden.

Trotz einiger einschränkender Randbedingungen der Luftmodelltechnik, auf die Nestmann, 1987 und 1992 hinweist, bietet die vorgelegte Luftmodelluntersuchung dennoch eine Grundlage, um die Wirkung von Störkörpern in verschiedenen Anordnungen längs und quer zur Strömungsrichtung auf die Strömungsvorgänge im Bereich des Sperrwerks, auch im Hinblick auf die Kolkbildung, wenigstens qualitativ beurteilen zu können.

Durch die im Nachlauf der Pfeiler längs zur Strömungsrichtung angeordneten Störkörpergruppen können unabhängig von der Zahl der Einzelkörper und deren Lage und Abstand untereinander die Wirbelfrequenzen und -intensitäten im Pfeilernachlauf nicht so beeinflußt werden, daß sich daraus eine günstige Änderung des Geschwindigkeitsfeldes und der Aus-



Bild 33: Sohlstromlinien ohne und mit Störkörper in orthogonaler Anordnung mit zwei Doppelreihen; $(n-1)_1$ -Betriebsfall

kolkungstendenz ergäbe, die den Aufwand der Störkörperanordnung rechtfertigen könnte. Offenbar reichen aufgelöste Formationen nicht aus, nachhaltig in die bestehenden Strömungsstrukturen einzuwirken. Die bei der Behandlung der physikalischen Grundlagen im Abschnitt 4.2 angesprochenen Lösungen, wie lange Pfeilerwände mit schlanker Kopfausbildung oder unterteilte Leitflächen (Hilfsflügel) am Pfeilerende, dürften im vorliegenden Fall eine stärkere Wirkung auf die Strömungsverhältnisse im Pfeilernachlauf bringen. Sie sind jedoch konstruktiv aufwendig und im Fall der Hilfsflügel bei den wechselnden Strömungsrichtungen des Tidegebiets problematisch.

Nachteilig bei den mehrreihigen longitudinalen Störkörpersystemen ist auch das Ergebnis, daß in der horizontalen Geschwindigkeitsverteilung in der Nähe der seitlichen Sperrwerksberandungen Geschwindigkeitsspitzen auftreten, die durch die Einengung der Strömung zwischen den seitlichen Ablösungswirbeln mit ihren Scherschichten und den Störkörperreihen bedingt sind. Beim Durchfluß durch $n = 5$ Wehröffnungen werden auf der nördlichen Sperrwerksseite die Strömungsgeschwindigkeiten des Zustandes "ohne Störkörper" deutlich überschritten und Werte von $v_m/v_r > 1,0$ erreicht, die im Hinblick auf die Kolkbildung, insbesondere an dieser exponierten Stelle, kritisch sind. Im übrigen zeigt sich bei den mehrreihigen Störkörperformationen eine auffallend unruhige Geschwindigkeitsverteilung über die Sperrwerksbreite, die durch eine Abfolge von Maxima und Minima geprägt ist, wovon verständlicherweise die Minima im Nachlauf der Störkörperreihen liegen.

Diese nachteiligen Effekte örtlicher Geschwindigkeitsspitzen und Strömungsinstabilitäten mit eingeschlossenen Scherschichten werden bei den quer zur Strömungsrichtung angeordneten Störkörperreihen in den untersuchten Fällen vermieden. Die Querformationen bewirken einen Abbau örtlicher Geschwindigkeitsmaxima im mittleren und nördlichen Bereich des Sperrwerks (dort wo der tiefe Kolk liegt!) auf Kosten von Geschwindigkeitszunahmen auf der südlichen, bisher von der Strömung weniger beaufschlagten Sperrwerksseite, so daß sich insgesamt über die Breite des Sperrwerks eine verhältnismäßig ausgewogene Geschwindigkeitsverteilung einstellt, die ein wesentlich gleichmäßigeres Strömungsfeld als beim Zustand "ohne Störkörper" anzeigt.

In den sichtbar gemachten Sohlstromlinien drückt sich diese günstige Störkörperwirkung auf die Strömungsverhältnisse im Abströmbereich des Sperrwerks in einem dichten Tal-kumfeld im Kolkessel auf der Außenseite aus, woraus auf eine merkbare Verringerung der Auskolkungsintensität geschlossen werden kann.

Insbesondere beim $(n-1)_1$ -Betriebsfall, der sowohl nach den im Abschnitt 3 beschriebenen Untersuchungen im Luftmodell als auch nach Beobachtungen in der Natur hinsichtlich der Strömungsverhältnisse und der Kolkbildung als kritisch anzusehen ist, sind die Störkörperquerreihen außerordentlich wirkungsvoll. Die hohen, örtlich bis zu $\bar{v}/v_r = 1,7$ betragenden Strömungsgeschwindigkeiten auf der Nordseite des Sperrwerks werden auf Werte von 1,1 bis 1,2 abgebaut, was zu einer günstigen Vergleichsmäßigung des horizontalen Geschwindigkeitsprofils beiträgt und damit die beträchtliche Auskolkungsgefahr bei diesem Betriebsfall erheblich vermindert.

Dies gilt generell für die beiden untersuchten Querreihen-Varianten, von denen eine Variante aus jeweils einer Störkörper-Doppelreihe auf beiden Seiten des Sperrwerks bestand (Bild 27), während die andere Variante jeweils zwei Doppelreihen aufwies (Bild 29).

Insgesamt brachten zwei Störkörper-Doppelreihen etwas günstigere Ergebnisse, als nur eine Doppelreihe auf jeder Seite des Sperrwerks. Die Unterschiede in der Größe der Strömungsgeschwindigkeiten, in ihrer horizontalen Verteilung und im Verlauf der sichtbar gemachten Sohlstromlinien sind jedoch so gering, daß sich die Frage stellt, ob der doppelt so große bauliche Aufwand von zwei Störkörper-Doppelreihen gerechtfertigt ist. Hinzu kommt, daß die Störkörper in der Anordnung mit doppelt sovielen Störkörpern zu einer

Minderung der Leistungsfähigkeit des Sperrwerks führen, die erhebliche Auswirkungen auf die Wasserstände in der Tideeider und ökologische Probleme zur Folge hätte. Auch würde dadurch ein verstärkter Sielbetrieb notwendig werden.

Unabhängig von der Zahl der Störkörperreihen muß noch durch weitere Modellversuche ihre Lage auf der starren Sohlensicherung, d.h. ihr jeweiliger Abstand zur Befestigungskante, insbesondere auch im Hinblick auf die nach der Sanierung bestehende schwellenartige Überhöhung der flexiblen Übergangsstrecke, optimiert werden.

Möglicherweise kann von Anordnungen in der Nähe der Kante der starren Sohlensicherung, ähnlich wie von gezahnten Endschwelen bei Tosbecken, ein günstiger Einfluß auf die Strömungsführung und insbesondere auf die Kolkbildung erwartet werden. So wurden schon bei früheren Modellversuchen für das Eider-Sperrwerk (Dietz, 1969) verschiedene Anordnungen von Tetraedern im Bereich der Befestigungskante in ihrer Wirkung auf die Kolkbildung betrachtet.

Diese früheren Versuche haben gezeigt, daß die Kolkttiefen um etwa 10 % ermäßigt werden können, wenn beispielsweise 2 Reihen Tetraeder mit einer Höhe von 2,00 m aufgestellt werden (Bild 34). Diese Ermäßigung der Kolkttiefen ist relativ gering, jedoch ist bei ihrer Einschätzung zu bedenken, daß die Befestigungsstrecke bei diesen Versuchen mit $l = 367 \text{ m}$ (Naturmaß) sehr lang war und infolge ihrer Rauheitswirkung schon ein geordnetes Geschwindigkeitsprofil an der Befestigungskante vorlag. Überdies war das Verhältnis der Tetraederhöhe zur Wassertiefe mit $2,0/10,25$ verhältnismäßig gering.

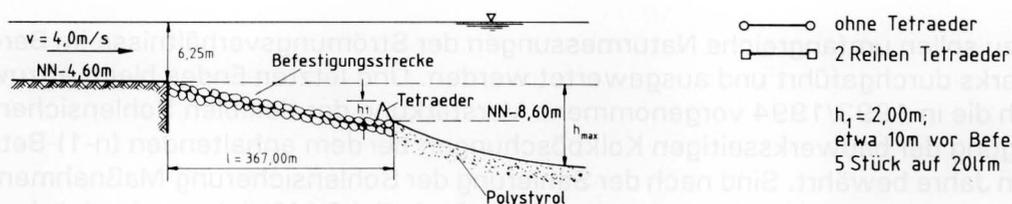
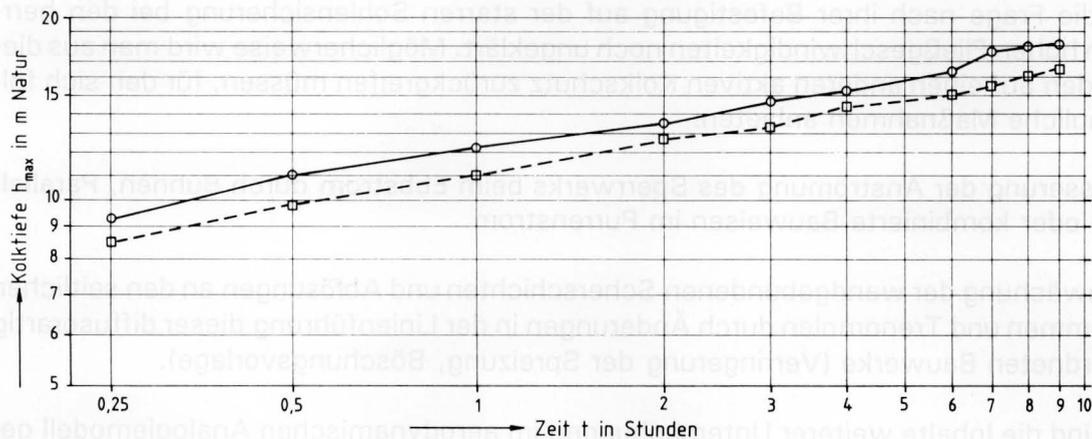


Bild 34: Einfluß von Tetraedern an der Befestigungskante auf die Kolkentwicklung (Dietz, 1969)

Die noch ausstehende Optimierung der quer zur Strömungsrichtung gesetzten Störkörper nach Lage und Zahl der Störkörperreihen sowie nach dem gegenseitigen Abstand (versetzt oder nicht versetzt) und den Abmessungen der Einzelkörper muß in weiteren Modelluntersuchungen vorgenommen werden, in denen auch die Frage nach der konstruktiven Ausbildung der einzelnen Störkörper und deren Höhe im Vordergrund stehen muß.

Für diese Versuche sollte ein hydraulisches Modell mit einem beweglichen Kolkbett in einem geeigneten Maßstab gewählt werden, das auch Untersuchungen über den Einfluß der Störkörper auf die Kolkbildung und die Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Sperrwerks zuläßt.

5 Schlußbemerkung

Wie die Untersuchung der (n-1)-Betriebsfälle ergeben hat, ist es empfehlenswert, bei der notwendigen Betoninstandsetzung der Wehrträger II bis V 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 vergleichsmäßig und die bestehenden Sekundärströmungen vermindert. Hierbei wird allerdings vorausgesetzt, daß der derzeitige bauliche Zustand der einzelnen Wehrträger ein derartiges zeitliches Vorgehen überhaupt zuläßt. Tatsächlich wird man nach dem augenblicklichen Stand der Betonuntersuchungen von einer umgekehrten Reihenfolge ausgehen müssen, da die Betoninstandsetzung des Wehrträgers II vorrangig erfolgen muß. Eine ähnliche von der praktischen Umsetzung der Versuchsergebnisse gebotene Einschränkung wird man auch bei den Störkörpern hinnehmen müssen. Aus Gründen des Eistriebs wird es auf keinen Fall möglich sein, die Störkörper bis zum Wasserspiegel hoch zu ziehen, wie dies im Luftmodell simuliert wurde. Dadurch wird die im Versuch nachgewiesene günstige Wirkung der Störkörper auf die Strömungsverhältnisse und die Auskolkungsvorgänge wieder vermindert.

Wie auch die Störkörper bei einer eventuellen Anordnung in der Natur später aussehen mögen, ist die Frage nach ihrer Befestigung auf der starren Sohlensicherung bei den herrschenden hohen Fließgeschwindigkeiten noch ungeklärt. Möglicherweise wird man aus diesen Gründen auf einen anderen aktiven Kolkschutz zurückgreifen müssen, für den sich folgende bauliche Maßnahmen anbieten.

- Verbesserung der Anströmung des Sperrwerks beim Ebbstrom durch Buhnen, Parallelwerke oder kombinierte Bauweisen im Purrenstrom.
- Abschwächung der wandgebundenen Scherschichten und Ablösungen an den seitlichen Leitdämmen und Trennmolen durch Änderungen in der Linienführung dieser diffusorartig angeordneten Bauwerke (Verringerung der Spreizung, Böschungsvorlage).

Hiermit sind die Inhalte weiterer Untersuchungen im aerodynamischen Analogiemodell genannt.

Parallel hierzu sollen umfangreiche Naturmessungen der Strömungsverhältnisse im Bereich des Sperrwerks durchgeführt und ausgewertet werden. Und letzten Endes bleibt abzuwarten, wie sich die in 1993/1994 vorgenommene Verstärkung der flexiblen Sohlensicherung und Befestigung der bauwerksseitigen Kolkböschungen bei dem anhaltenden (n-1)-Betrieb der nächsten Jahre bewährt. Sind nach der Sanierung der Sohlensicherung Maßnahmen zur Erhöhung der Langzeitsicherheit überhaupt noch erforderlich? Möglicherweise ist das am Oosterschelde-Sperrwerk mit Erfolg praktizierte Vorschütten einer Schürze aus losem Steinmaterial an der Befestigungskante ("falling apron") für lange Zeit ausreichend.

6 Literatur

Akkermann, 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 sohnnahen 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

BAW: Gutachten zum Einfluß von Störkörpern auf die Strömungsverhältnisse am Eider-Sperrwerk beim Ebbstrom, 1994

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, H. 44, 1973

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

Dietz, J.W.: Kolkssicherung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel. Mitt.Bl. d. Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 29, 1969

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

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

Eck, B.: Technische Strömungslehre. Band 1: Grundlagen, Springer-Verlag, 1978

Eck, B.: Technische Strömungslehre. Band 2: Anwendungen, Springer-Verlag, 1981

Flügel, G.: Ergebnisse aus dem Strömungsinstitut der Technischen Hochschule Danzig. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 31. Band, 1930

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

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

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

Nestmann, F./; Bachmeier, G.: Anwendung von Luftmodellen im strömungstechnischen Versuchswesen des Flußbaus. Mitt.Bl. d. Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 61, 1987

Nestmann, F.: Aerodynamische Modelle, eine strömungsmechanische Untersuchungsmethode zur Planung wasserbaulicher Maßnahmen. Mitt. a. d. Franzius-Institut der Universität Hannover, Heft 73, 1992

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

Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie. Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1965