

Abteilung II — Seeschifffahrt

Thema 4

Wirkung von Eis auf die Bauwerke und die Schifffahrt. Mittel zur Verhütung der Bildung von Eis und Beherrschung seiner Verlagerung.

von

Dipl.-Ing. Rüdiger Bock, Regierungsbaudirektor, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel; Dipl.-Ing. Friedrich Cordes, Regierungsbaudirektor, Neubauamt Eiderabdämmung, Heide; Dipl.-Ing. Hans Dieter Dudziak, Oberregierungsbaurat, Wasserbauamt Brunsbüttel; Dr.-Ing. Ludwig Franzius, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsamt Hannover; Dipl.-Ing. Hermann Grothues-Spork, Wissenschaftlicher Angestellter, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin; Dipl.-Phys. Friedhelm Günneberg, Wissenschaftlicher Angestellter, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz; Dr.-Ing. Heinz Wismer, Regierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg.

Zusammenfassung

Das Eis führt zu Schäden an den Bauwerken der Schifffahrtswege und behindert die Schifffahrt und den Betrieb der Verkehrsanlagen an der Schifffahrtsstraße. In dem nachstehenden Bericht werden Versuche, Beobachtungen und Erfahrungen über die Eiswirkung zusammengestellt.

Über den Eisdruck auf Bauwerke liegen kaum Angaben vor. Messungen beim Bau des Eidersperrwerks ergaben Eisdruckkräfte von maximal 20 kp/cm². Die Stoßkraft treibender Eisblöcke war nicht direkt erfaßbar, sondern ließ sich nur angenähert aus der Verformung einzelner Bauteile ableiten. Die Kraft ist mit einem Schiffsstoß vergleichbar. Bauwerke in und an eisgefährdeten Gewässern sollten durch Lage und Formgebung dem Eisangriff soweit wie möglich ausweichen.

Auch beim Eisangriff auf Schiffe sind die Kräfte nicht genau bekannt. Eisbrecher und eisbrechende Massengutfrachter wurden im Modell untersucht. Solche Versuche sind sehr schwierig, weil die Modellgeschwindigkeiten für das Brechen, den Transport und die Gleitreibung der Eisschollen nach unterschiedlichen Gesetzen ermittelt werden müssen. In einem Versuch wurden eine Eisscholle durch eine feste, verschieden stark zu bremsende Rolle ersetzt. Beim Auflaufen eines Modelleisbrechers mit geneigtem Steven auf die Rolle zeigte das Schiff Längsbiegeschwingungen.

Die Behinderung der Schifffahrt durch das Eis auf den Wasserstraßen beeinträchtigt unmittelbar auch den Landverkehr, wenn dieser die Schifffahrtsstraße auf Fähren überquert. Das Bestreben, den Fährbetrieb möglichst lange aufrechtzuerhalten, führte am Nord-Ostsee-Kanal zum Einsatz von Fähren mit Voith-Schneider-Propellern, die unter Gondeln am Schiffskörper angesetzt sind, um eine große Eintauchtiefe zu erhalten. Hierdurch ließ sich der Betrieb bei Eis verbessern. Da jedoch die Fähren nur soweit auf die Fahrt bei Eis auszulegen sind, wie es den Betrieb im eisfreien Wasser nicht wesentlich beeinträchtigt, sind bei starker Eisführung weiterhin Maßnahmen zur Eisverringering am Anleger und in der Fahrrinne erforderlich.

In Tideflüssen, in denen sich infolge der Schifffahrt und der großen Breiten keine feste Eisdecke bildet, ballt sich das Treibeis häufig an einzelnen Orten unter der Wirkung der wechselnden Tidebewegung, des Windes und der örtlichen Beschaffenheit des Flusses zusammen und behindert besonders dort die Kleinschifffahrt. Das ist der Fall bei der Elbe. Durch Eisablagerungen auf Stränden und Sänden, festliegende Treibeisfelder und Absperrungen der Nebenrinnen durch Eis und der dadurch entstehenden Änderungen der Flußrinne können zudem Wasserstandsänderungen eintreten, die die Fahrt tiefgehender, den Tidehub ausnutzender Schiffe erschweren. Auch eine Verringerung des Zuflusses aus dem tidefreien oberen Bereich des Flusses infolge einer dort gebildeten Eisdecke trägt zu den Wasserstandsänderungen bei. Auf der Elbe wurden in strengen Wintern Absenkungen der Thw-Wasserstände in der Größenordnung von 0,30 m ermittelt.

Die Verhinderung starker Eisansammlungen kann durch Eisbrecher und bauliche Maßnahmen erreicht werden. Auf den Binnenwasserstraßen ist der Einsatz von Eisbrechern nicht immer wirksam, da das gebrochene Eis nicht im ausreichenden Maße abgeführt werden kann. Hier muß versucht werden, durch Zugaben von warmem Kühlwasser aus Kraftwerken die Eisbildung zu verhindern oder Eisfelder abzutauen. Über den Wärmeaustausch bei der Eisbildung wurden Untersuchungen angestellt, die unter anderem ergaben, daß Treibeis einer Abkühlung des Wassers mit der Windgeschwindigkeit zunehmend entgegenwirken kann, bei geringer Windgeschwindigkeit aber die Abkühlung an seinen Rändern durch die Erzeugung vertikaler Luftbewegungen fördert. Das Ausmaß der Wärmeabgabe des Wassers ist deshalb gerade bei Treibeis schwer zu bestimmen.

Eine theoretische Betrachtung über die Wirkung der Kühlwassereinleitung aus dem geplanten Kernkraftwerk Geesthacht-Krömmel an der Elbe ergab, daß das Kraftwerkskühlwasser unter üblichen Temperatur- und Windverhältnissen nach längerer Durchsetzungsdauer eine Flußstrecke von 20 km bis 25 km eisfrei halten kann.

Die gleichen Überlegungen, angestellt für eine Einleitung von 20 m³/s Kühlwasser von +5° für Kanäle von etwa 50 m Spiegelbreite und 170 m² Querschnittsfläche — das trifft etwa für den Main-Donau-Kanal, den Elbe-Seitenkanal und den Mittellandkanal zu — ergaben eine eisfreie Strecke von 20 km Länge.

Beobachtungen und Messungen an einer Warmwassereinleitung in den Mittellandkanal bei Hannover, bei der rd. 0,5 m³/s Wasser von 12° — 16° C gleichbeibend abgegeben werden, zeigten eine deutliche Minderung der Eisdicken in einem Einflußbereich zwischen 6 bis 20 km.

Die Warmwassereinleitungen können auch gezielt dem Gewässer zugegeben werden, um Schleusenanlagen und andere Betriebseinrichtungen freizuhalten. Ein solches Vorhaben wird am Nord-Ostsee-Kanal unter Verwendung des Kühlwassers eines im Bau befindlichen Kernkraftwerkes bei Brunsbüttel in Erwägung gezogen.

Inhalt

	Seite
1. Wirkung von Eis auf Bauwerke	231
2. Wirkung von Eis auf die Schifffahrt	238
2.1 Allgemeines	238
2.2 Modellversuche für eisbrechende Massengutfrachter	238
2.3 Verhalten von Fähren im Eis	242
2.4 Über Eisführung und Schifffahrtsbehinderungen durch Eis im Tidebereich der Elbe	247
3. Mittel zur Eiskämpfung	250
3.1 Allgemeines	250
3.2 Eiskämpfung durch Wärmeeinleitung	251

1. Wirkung von Eis auf Bauwerke**1.1. Einleitung**

Die Belastung und Beanspruchung eines Bauwerkes durch Eisangriff ist rechnerisch nicht exakt zu erfassen, da Kraftgröße und Kraftangriff von vielen gleichzeitig auftretenden, jedoch in der Praxis nicht gleichzeitig bestimmbaren Faktoren abhängen. Die oftmals bei Seebauten maßgebende Belastung aus Eisdruck muß deshalb aus Naturbeobachtungen und -messungen auf statistischem Wege ermittelt und analytisch ausgewertet werden. Die erste Voraussetzung für derartige Naturmessungen ist die Anwendung einer zweckmäßigen Meßtechnik sowohl in der gerätemäßigen Ausstattung als auch in der Abwicklung der Untersuchungen und einer schnellen Auswertemöglichkeit der Meßergebnisse. Außerdem muß beachtet werden, daß gleichzeitig mit den Kraftmessungen die Eis-, Wasser- und atmosphärischen Verhältnisse erfaßt werden, damit die Meßergebnisse von vielen Stationen miteinander in Beziehung gesetzt und keine verwirrenden Rückschlüsse oder Folgerungen aus ihnen gezogen werden können.

1.2. Allgemeines über Eisbelastung

Um die Beanspruchung von Bauwerken durch Eisangriff beurteilen zu können, sind Eisarten, mechanische Eigenschaften des Eises, Arten der Eisbildung, Eiskräfte und Bauwerksformen, auf die das Eis einwirkt, als mitwirkende Faktoren zu beachten.

Als Eisarten werden unterschieden:

Süßwassereis,

Salzwassereis $\begin{matrix} < \text{Meereis} \\ < \text{Brackwassereis} \end{matrix} \begin{matrix} < 24,7\text{‰ Salzgehalt} \\ < \end{matrix}$ (nach Pounder)

Die Eishärte ist nicht groß. Sie liegt bei 1,5 der Härteskala. Auch die Elastizität ist gering. Der E-Modul schwankt zwischen 950 kp/mm² parallel und 1120 kp/mm² senkrecht zur Gefrierfläche. Diese Eigenschaften werden durch Eistemperatur, Salzgehalt, Druck und Gasgehalt (Porosität) beeinflusst. Im allgemeinen ist die Elastizität des Meereises infolge seiner inhomogenen Struktur geringer und seine Plastizität größer als die des Süßwassereises. Die mittlere Druckfestigkeit liegt bei Süßwassereis nach [3] bei

6 B = 40 kp/cm²; sie fällt bei größerem Blasenanteil ab. Bei Meereis liegt sie wegen des Salzgehalts niedriger.

Nach Schwarz [2] erreicht die Druckfestigkeit ihren größten Wert bei einer Verformungsgeschwindigkeit je cm von $\sim 0,003 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

Im Gegensatz zu anderen festen Körpern verhält sich das Eis schon bei geringer Belastung nicht nur elastisch sondern auch plastisch, sofern die Belastung lange und langsam auf das Eis einwirkt.

Bei der Beanspruchung von Bauwerken sind zu unterscheiden:

Treibeis = durch Strömung und Wind verdriftete Eisschollen

Packeis = eng zusammen- und übereinandergeschobenes Treibeis

Eisfeld = geschlossene großflächige Eisdecke

Die auf Bauwerke einwirkenden Eiskräfte werden statisch, dynamisch oder abwechselnd statisch/dynamisch wirksam und treten als Druck-, Stoß- oder Schubkräfte auf, die häufig durch Strömung mit zusätzlichen Windeinwirkungen ausgelöst werden:

Statisch als Eisdruck = Horizontalkraft, die ein geschlossenes, seitlich eingespanntes Eisfeld bei Temperaturanstieg infolge Ausdehnung ausübt. Dynamisch als Eisstoß = Stoßkraft eines treibenden Eisfeldes oder Eisblocks beim Auftreffen auf ein Hindernis. Unregelmäßig abwechselnde statische und dynamische Beanspruchung durch Eisdruck und Eisstoß = stark schwankender Kraftfluß beim örtlichen Zermahlen eines schmalen Streifens einer treibenden Eisscholle durch ein Hindernis. Hierbei treten Zwängungskräfte auf, die durch den zachsigen Spannungszustand eine höhere Belastung ergeben, als sie sich aus der Eisdruckfestigkeit ableiten läßt.

Bisher war die Druckfestigkeit des Eises häufig Ausgangspunkt für die Festlegung des Eisdruckes. Die im Küstenbereich der Nord- und Ostsee angesetzten Belastungswerte schwankten zwischen 5 und 150 Mp/m. Beim Eidersperrwerk wurden für die Segmentstütze 15 Mp/m als statischer und 75 Mp/m als dynamisch bewirkter Eisdruck angesetzt. Auch die beim Angriff wirksame Eisdicke „h“ wird unterschiedlich behandelt. Sie beträgt in Schweden h = 0,3 bis 0,7 m, in Holland h = 0,4 bis 0,5 m, in Deutschland h = 0,5 bis 1 m.

Die in Würfeldruckversuchen ermittelten Druckfestigkeiten können jedoch nicht einfach mit Annahme einer Druckfläche zur anzusetzenden Eisbelastung umgerechnet werden, da dieses zu einer erheblichen Überdimensionierung führen würde, sondern es muß eine Beziehung zwischen tatsächlichem Eisdruck und ermittelter Eisdruckfestigkeit aufgestellt werden.

In der Eidermündung an der Westküste Schleswig-Holsteins (Nordsee) wurden während des Baues des Eiderdammes Hundeknöll-Vollerwiek [1] mehrjährige Eisbeobachtungen und Eisdruckmessungen in der Natur vorgenommen. Sie dienten der Erprobung der angewandten Meßtechnik und sollten darüber hinaus Aufschlüsse über auftretende Eisbeanspruchung von Bauwerken geben.

1.3. Eisverhältnisse in der Eidermündung

Im Wattengebiet der Außeneider, das bis zu 15 m tiefe Stromrinnen und großflächige, i. M. auf NN bis NN +0,5 m liegende Platen aufweist, bestimmen Lufttemperatur, Wind und Wasserstand die Eisentwicklung. Bei einsetzendem Frostwetter herrschen meistens Ostwindlagen vor, die niedrige Wasserstände mit sich bringen und die Eisbildung günstig beeinflussen. Geringe Wassertiefen auf den großen weiten Wattflächen, die schon

bei halber Tide trockenfallen, bewirken ein rasches Absinken der Wasser- und Bodentemperatur und ein schnelles Wachsen der Eisfelder. Sobald sich die Wasserstände nur geringfügig erhöhen, schwimmen die Eisfelder auf und verstärken den Treibeisgang in den Stromrinnen. Wie die Eisbeobachtungen in den Wintern 1967/68 bis 1971/72 gezeigt haben, beginnt die Eisbildung regelmäßig bei Lufttemperaturen unter -3°C , und zwar örtlich auf den flach überfluteten Platen und an den Watträndern. Ein verstärktes Eiswachstum tritt bei Temperaturen unter -10°C ein, wobei die Wassertemperatur mit einer zeitlichen Verzögerung von 1 bis 2 Tagen folgt, wie es die Eisentwicklung im Winter 1969/70 deutlich erkennen läßt (Bild 1). Das Eis treibt dann in großen Eisfeldern mit dem Tidestrom hin und her und schiebt sich an den Rändern der Stromrinnen zu Packeisgürteln auf (Bild 2).

Beobachtete Maximalwerte:

Größe der Eisscholle	5 000 m ²
Dicke der Eisscholle	30 — 40 cm
Treibeisgeschwindigkeit	1 m/s

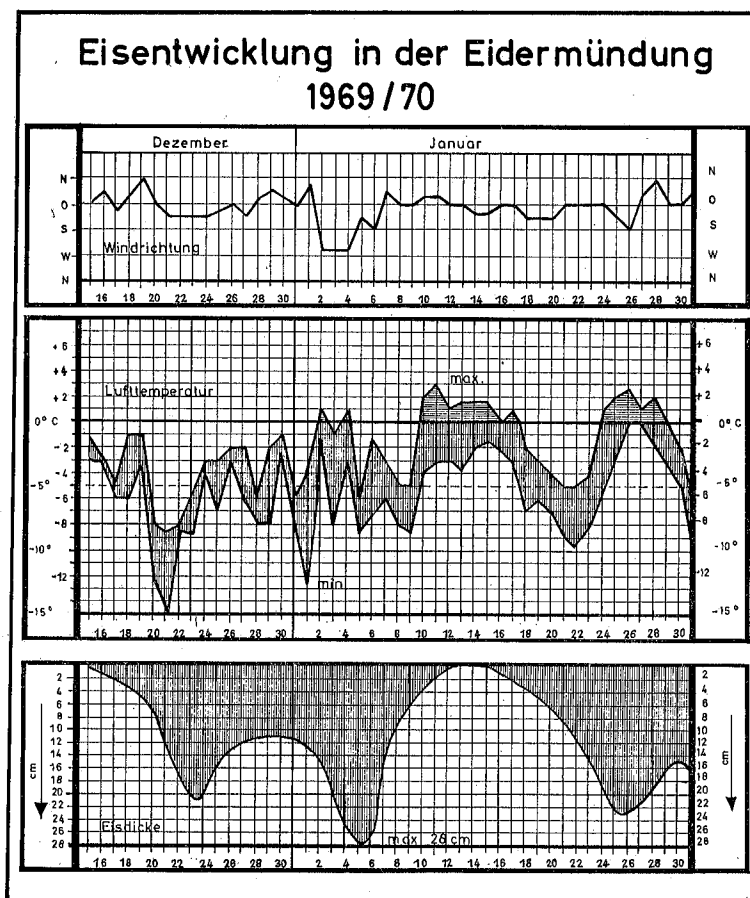


Abb. 1: Eisentwicklung in der Eidermündung

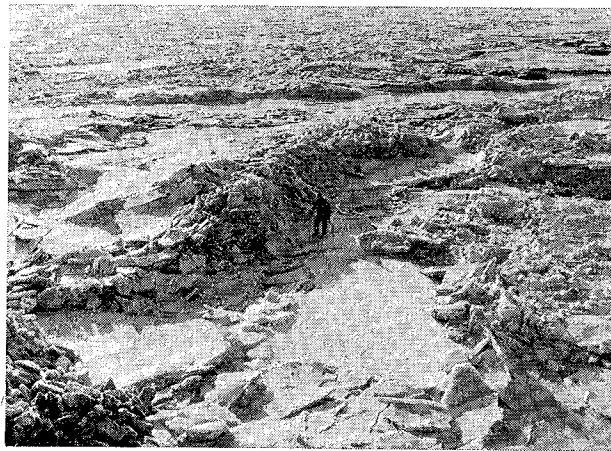


Abb. 2: Packeisgürtel in der Eidermündung

Eisfelder und Eisschollen treiben grundsätzlich in Richtung der Tidenströmung. Sie werden jedoch durch Wind in ihrer Richtung stark beeinflusst.

Bei einsetzendem Tauwetter schwimmen auch die auf den Platen liegenden Eisblöcke auf und treiben in Eisfeldern oder als Einzelblöcke mit dem Tidestrom. Diese Eisblöcke haben ein maximales Volumen von 300—400 m³ und Dicken bis zu 4 m. Sie sind für Bauwerke gefährlicher als das Treibeis. Bei beginnendem Tauwetter, das oftmals mit einer Winddrehung von Ost auf West und mit erhöhten Wasserständen verbunden ist, bewegt sich auch das Flächeneis verstärkt von den Watten in die Rinnen und bildet große Eisfelder mit zusammenhängenden und z.T. auf- und übereinandergeschobenen Schollen, die sich an den Rändern und bei Auftreffen auf Hindernisse zu hohen Packeisgürteln (bis zu 8 Metern) auftürmen.

1.4. Eisdruckermittlungen

1.4.1. Direkte Eisdruckmessungen

Das Eidersperrwerk wurde auf einer künstlichen Insel im Wattenmeer gebaut. Eine 900 m lange stählerne Transportbrücke stellte die Verbindung zum Festland her. Die in 40 m Abstand stehenden Brückenjoche bestanden aus Großrohrpfählen ϕ 760 mm, die in Jochlängsrichtung auf 100 Mp Eisdruck berechnet waren. Während des Eisgangs wurde der Eisdruck auf die Jochpfähle und Dalben mit Hilfe von Meßvorrichtungen und anhand von Verformungen ermittelt. An den Brückenjochen 7 und 8 waren je eine Druckmeßvorrichtung aufgebaut. Sie unterscheiden sich voneinander durch ihre äußere Form. Mit der Meßanlage am Joch 7 wurde der Eisdruck auf einen Rohrpfahl, mit der Meßanlage am Joch 8 auf eine lotrechte planebene Fläche gemessen (Bild 3).

Die Pfahldruck-Meßanlage bestand aus einem halbschalenförmigen Druckschild mit 56 Druckgebern, die in 10 Reihen übereinander saßen. Die Druckgeber arbeiteten nach der Methode der elektrischen Widerstandsmessung, wobei die elastische Verformung als Änderung des elektrischen Widerstandes von eingekerbten Dehnungsmeßstreifen gemessen und aufgezeichnet wurde. Die Meßwerte wurden durch 12 Trägerfrequenzbrücken verstärkt und mit einem direktschreibenden UV-Lichtstrahloszillographen (Visicorder) aufgezeichnet.

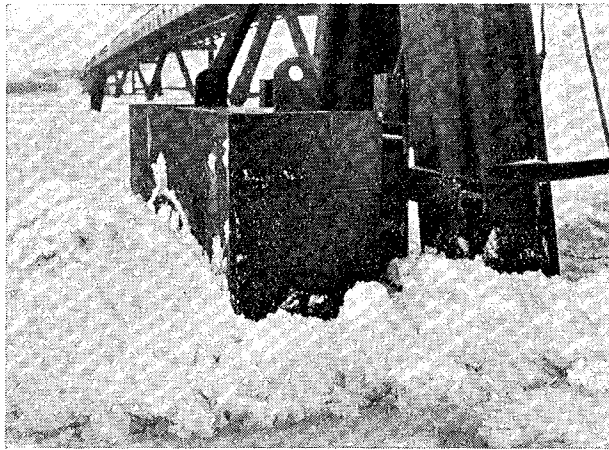


Abb. 3: Flächendruck-Meßanlage

Die Flächendruck-Meßanlage bestand aus einer großen zylindrischen Druckmeßdose ϕ 1,5 m, deren quadratischer Schutzkasten an einem vor dem Brückenjoch gerammten Zweibock montiert war. Am zylindrischen Mantel der Druckmeßdose waren aktive und passive Dehnungsmeßstreifen aufgeklebt, mit denen der auf die Druckmembrane wirkende Eisdruck gemessen wurde. Hierbei wurde die Widerstandsänderung sämtlicher Dehnungsmeßstreifen addiert, registriert und als singularer Wert aufgezeichnet. Der Gesamtdruck konnte durch Multiplikation mit dem Eichwert sofort errechnet werden.

Während der Messungen mit beiden Meßanlagen wurden gleichzeitig alle übrigen interessierenden Daten wie Dicke, Richtung und Geschwindigkeit des Treibeises sowie Daten über Wind, Wasserstand und Temperatur gemessen und registriert.

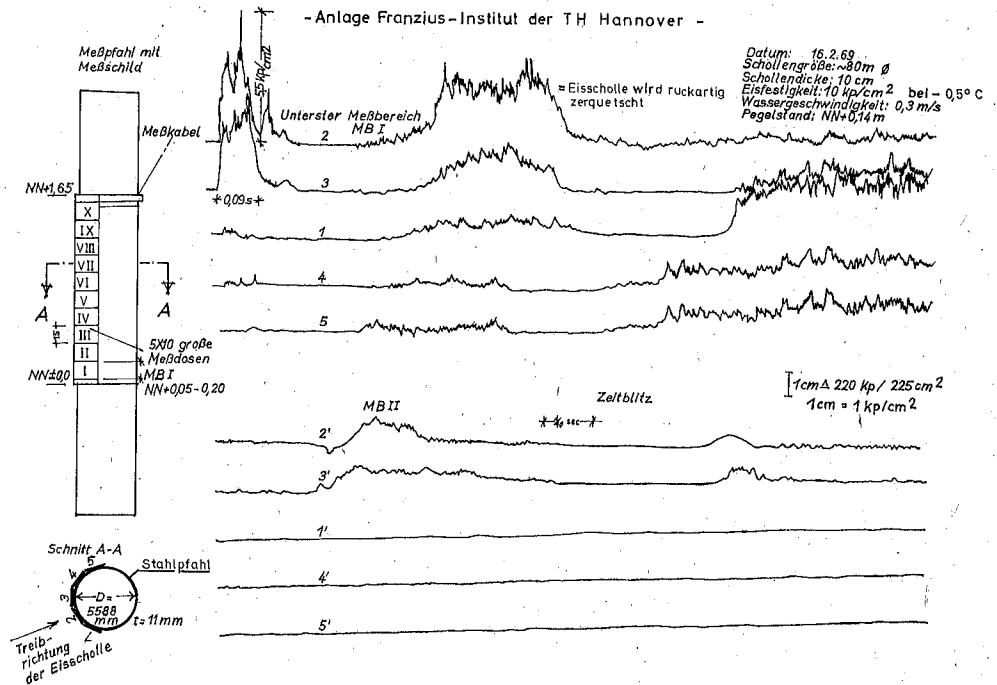
Der größte Druck einer gegen einen Rohrpfahl treibenden Eisscholle entstand nicht beim ersten Auftreffen, sondern erst nach Abbremsen auf eine langsamere Treibgeschwindigkeit, wobei der herrschende einaxiale Spannungszustand sich in einen zwei-axialen umwandelt. In dieser Schnittphase wird die Scholle unter nahezu gleichbleibender Gesamtbelastung vom Jochpfahl „zersägt“. Kam die Scholle zum Stillstand, so trat kurz vor Ende dieser dynamischen Belastung der größte Eisdruck auf. Der nach dem Stillstand eintretende statische Druck war immer geringer als die vorangegangene dynamische Druckbelastung.

Beim „Zersägen“ der Eisschollen (Bild 4) zeigten die einzelnen Meßwertgeber des halbschalenförmigen Meßschildes ständig wechselnde Lokalbelastungen an, während der Eisdruck an der großen Meßdose weitaus geringer schwankte. Die an beiden Meßanlagen gemessenen Eisdrücke variierten je nach Temperatur, Struktur und Dicke des Eises z. T. erheblich, so daß verwertbare Ergebnisse nur aus Häufigkeitsverteilungen gewonnen werden können.

Beide Meßanlagen haben sich als richtig und brauchbar erwiesen und erstmals aufschlußreiche Messungen ermöglicht, die die Problematik des Eisdrucks verdeutlichen.

Der maximale Eisdruck auf beide Meßanlagen schwankte je nach Eisfestigkeit sowie Form und Abmessung der Meßanlage um 30 Mp Gesamtlast, wobei einzelne Spitzen drücke bis zu 20 kp/cm² auftraten. Würfeldruckversuche (10×10×10 cm) in Wachstumsrichtung des Eises ergaben in Abhängigkeit von der Eistemperatur bei einer Verfor-

Eisdruckmessung am Joch 7



Eisdruckmessung am Joch 8

Anlage der BAW Karlsruhe

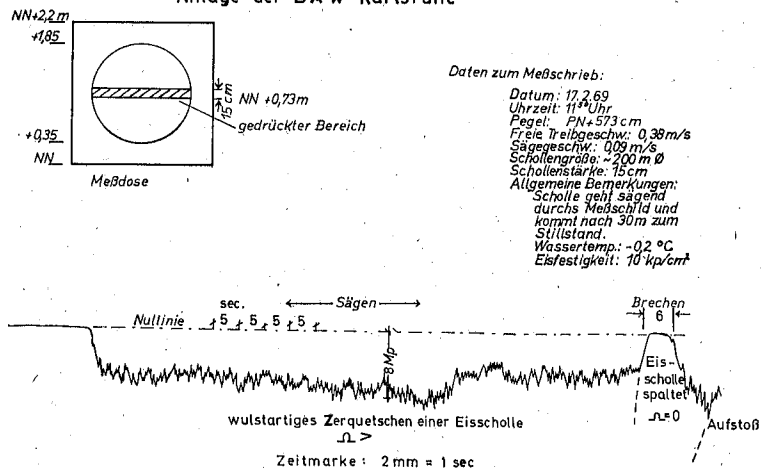


Abb. 4: Eisdruckmessung am Joch 7 und Joch 8 (Meßschrieb)

mungsgeschwindigkeit je cm von $0,003 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ als mittlere Druckfestigkeiten:

- $0,5^{\circ} \text{ C} = 17 \text{ kp/cm}^2$
- $7^{\circ} \text{ C} = 30 \text{ kp/cm}^2$
- $10^{\circ} \text{ C} = 40 \text{ kp/cm}^2$

Eindeutige Beziehungen über Größe und Abhängigkeit des Eisdruckes von Treibeis können nur auf statistischem Wege aus vielen Messungen gefunden werden. Die von Schwarz [2] aufgestellte Formel für die Berechnung von Eisdruck gilt nur für kreisförmige Rohrdalben mit einem Durchmesser von etwa 60 cm. Für alle anderen Bauwerksformen und Abmessungen kann sie nur näherungsweise gelten.

1.42. Indirekte Eisdruckermittlung

Aus der Verformung freistehender Stahlrohrdalben in der Schiffahrtsöffnung der Transportbrücke infolge Treibeiseinwirkung konnten weitere überschlägliche Rückschlüsse auf die Größe des Eisdrucks gezogen werden. Der Stahlpfahl ($\phi = 812,8 \text{ mm}$, $t = 12,7 \text{ mm}$), Stahl St 52, war 25 m lang, davon waren 11 m im Boden eingespannt. Der Pfahl zeigte nach dem Eisangriff eine obere Auslenkung von 1,55 m. Mit vereinfachten Annahmen der Verformungslinie und Formstabilität unter starrer Einspannung im Boden ergab sich eine Gesamt-Eisdruckkraft von etwa 30 Mp, die den später gemessenen Werten entsprach.

Die Eisdruck-Meßanlage am Joch 8 wurde bei starkem Eisgang (Flutstrom) nachts zerstört. Die Sollbruchstellen waren auf 60 Mp ausgelegt, die vom Eisdruck überschritten wurden.

1.5. Eisstoß und Eisabrieb

Die bei Tauwetter sich von den Watten ablösenden Eisblöcke (300—400 m³ Vol.) treiben mit dem Tidestrom. Beim Aufprall auf ein Bauwerk ist die gespeicherte kinetische Energie maßgebend, da die Eisdruckfestigkeit wegen der großen Dicke keine entscheidende Rolle spielt. Die Größe des Eisstoßes hängt von dem Volumen des Eisblocks, der Treibgeschwindigkeit und von einem Stoßfaktor ab, der etwa wie beim Schiffsstoß anzusetzen ist. Die Treibrichtung des Eisblocks paßt sich dem Tidestrom an, da der tief eingetauchte Eisblock dem Wind praktisch keine wirksame Angriffsfläche bietet.

Beim Eiderdamm wurde beobachtet, daß das Steindeckwerk des scharliegenden *) Dammes durch längsscherende Eisschollen auf Abrieb beansprucht wurde. Die Spitzen der herausragenden Granitsteine waren nach einem Eiswinter abgerundet. Ein Herausreißen oder Abheben von Steinen war durch den Fugenverguß mit Colcretemörtel verhindert worden. Es empfiehlt sich, beim Vorkommen derartiger Eisbewegungen kein fugenoffenes Deckwerk vorzusehen.

1.6. Zusammenfassung

Die vorliegenden Beobachtungen und Messungen lassen erkennen, in welcher Größenordnung die Eisbeanspruchung auftritt. Es ist jedoch schwer, den Stoß treibender Eisblöcke in seiner absoluten Größe zu erfassen, der durch die Strömung, mit der sich der Eisblock auf ein Hindernis bewegt, maßgebend beeinflusst wird.

Natürlich ist es zweckmäßig, die Bauwerke von vornherein so zu planen, daß sie durch ihre Lage und Formgebung Eisangriffe weitgehend ausschließen oder kräftemäßig

*) f. d. Übersetzer: des unmittelbar am Wasser liegenden

abbauen. Eisschollen sollten möglichst durch ihr Eigengewicht bei freier linien- oder schmalflächiger Streifenauflagerung aufbrechen. Zu beachten ist, daß die Eisangriffsrichtung nicht nur von der Strömung, sondern wesentlich auch von der Windrichtung abhängt, ausgenommen hiervon sind Eisblöcke. Es erscheint sinnvoll, die geometrischen Körperformen wie bei der Pfeileranströmung auch bei Eisangriff systematisch zu untersuchen. Geneigte, rund oder spitzwinklig geformte Angriffsflächen sind auf jeden Fall günstiger als quer zur Treibeisrichtung stehende planebene Flächen.

2. Wirkung von Eis auf die Schifffahrt

2.1. Allgemeines

Der Schiffsverkehr auf der SeeschiffsstraÙe kann heute durch Einsatz stärke- und verbesserter Eisbrecher auch bei ungünstigen Eisverhältnissen aufrechterhalten werden. Die Klein- und Binnenschifffahrt wird jedoch weiterhin durch Treibeis behindert und muß in Winter häufig für mehrere Wochen eingestellt werden. Am stärksten wird der Verkehr auf den Schifffahrtskanälen beeinträchtigt, da der Abtransport des Eises bei Eisbrechereinsatz und Tauwetter in Ermangelung einer durchgehenden Längsströmung auf den bis zu 200 km langen Haltungen unterbleibt. Ist der Verkehr auf diesen Kanälen durch Eis einmal zum Erliegen gekommen, so kann er im Gegensatz zu den fließenden Gewässern auch während zwischenzeitlicher Tauwetterperioden oft noch nicht wiederaufgenommen werden. Das Eis kann zudem auch unmittelbar den Landverkehr behindern, wenn dieser den Schifffahrtsweg mit Fähren kreuzt.

Die folgenden Ausführungen betrachten einige der vielfältig zur Wirkung des Eises anstehenden Fragen, sie befassen sich mit Untersuchungen und Versuchen, die Eisbehinderung durch verbesserte Bauweisen der Schiffe zu verringern, und behandeln die Eisführung auf einem Tidefluß am Beispiel der Elbe.

2.2. Modellversuche für eisbrechende Massengutschiffe

2.2.1. Allgemeines

Die Erschließung bisher unzugänglicher Bodenschätze in den unwirtlichen Gebieten Kanadas und Alaskas führte zu der Frage nach geeigneten Schiffen als Transportmittel. Wegen der in arktischen Gewässern besonders extremen klimatischen und hydrographischen Bedingungen und wegen der Behinderung der Fahrt durch Eis müssen Spezialschiffe entwickelt werden, die den besonderen Beanspruchungen gewachsen sind und auch im arktischen Winter unter besonders ungünstigen Eisverhältnissen einsatzfähig bleiben.

Neben hoher Ladekapazität ist somit eine genügend große Vortriebs- und Rückwärtsleistung erforderlich, damit z. B. bei schwer zu überwindenden Barrieren mächtiger glazialer Eisinseln o. ä. ein wiederholter Anlauf unternommen werden kann.

Für den Entwurf herkömmlicher Polareisbrecher steht heute eine Reihe von Unterlagen zur Verfügung, die durch praktische Betriebserfahrung und theoretische Berechnungen erhalten wurden. Ihre Verwendbarkeit hängt von der Übertragbarkeit der Eisverhältnisse, vom Schiffstyp und von der betrachteten Schiffsgröße und -leistung ab. Für 200—400 m lange eisbrechende Massengutfrachter bei Fahrt in Eisstärken von 3—6 m lassen sich diese Unterlagen naturgemäß nur sehr begrenzt verwenden.

Eine rein theoretische Ermittlung des Schiffswiderstandes beim Eisbrechen sowie die Berechnung der seitlichen Beanspruchungen bei Eispressung ist nur beschränkt möglich,

da die Unterlagen für die tatsächlich auftretenden Werte der Eisfestigkeit und der Reibungskoeffizienten, die stark vom Alter, dem Salzgehalt, der Temperatur, dem Kristallgefüge und gegebenenfalls vom Schneebelag abhängen, noch unzureichend sind. Es ist schwierig, durch Modellversuche ein ausreichend übertragbares Bild der an einem Eisbrecher und besonders an einem Massengutfrachter auftretenden Beanspruchungen zu erhalten. Die physikalischen Ähnlichkeitsgesetze für die Umrechnung der am Modell gemessenen Widerstände beim Eisbrechen und bei der Überwindung des Reibungswiderstandes sowie ihre wechselseitige Beeinflussung sind noch weitgehend ungeklärt. Die Schwierigkeiten bei der Planung geeigneter Modellversuche gehen aus der Vielfalt der Vorgänge am Schiff beim Eisbrechen hervor.

2.22. Über Vorgänge am Schiff beim Eisbrechen

Bei Fahrt gegen eine geschlossene Eisdecke werden je nach Vorstevenneigung, Spantform, Schärfe des Wasserlinieneintritts im Eis Druck- und Biegespannungen erzeugt, die bei genügend großer Vortriebskraft des Schiffes zum Bruch des Eises führen. Geneigte Vorsteven in Verbindung mit ausfallenden Spanten beanspruchen das Eis überwiegend auf Biegung, senkrechter stehende Spanten und Steven verursachen vorwiegend Druck- und Knickbeanspruchungen. Bei homogener Eisdecke entstehen radial verlaufende Sprünge im Eis, welches dann kreisförmig um den Vorsteven abbricht und in Schollen zerfällt. Die entstandenen Schollen werden mit bestimmtem Energieaufwand gegen ihre Massenträgheit zur Seite geschoben und gekoppelt; sie werden entgegen ihren hydrostatischen Auftriebskräften untergetaucht oder gegen die Schwerkraft aufeinandergeschoben, wobei Gleitreibungswiderstände zwischen den Schollen am Vorsteven und an den Außenhaut Kanadas und Alaskas führte zu der Frage nach geeigneten Schiffen als Transportmittel. wirksam werden. Das Vorschiff ist ein Werkzeug, dessen Abmessungen, Form, Oberflächenbeschaffenheit und Fortschrittsgeschwindigkeit alle Phasen des Vorganges bestimmt. Eine Berechnung lediglich des für die Kinematik der Schollen notwendigen Energiebedarfs führt bereits zu Abschätzungen der bei gegebenem Propellerschub überwindbaren Eisdicke. Mit einem Näherungsansatz für die Reibungskoeffizienten zwischen dem Eis und der Außenhaut ist eine gewisse Verfeinerung der Rechnung vorstellbar.

Bei Fortschreiten des Schiffes im gebrochenen Kanal werden Reibungskräfte der Schollen an den Schiffsseiten wirksam. Sie sind bei Eisbrechern mit durchweg 2fach gekrümmter Außenhaut meist von geringerer Bedeutung, können jedoch den Hauptanteil im Eisfahrtwiderstand bei großen Massengutschiffen mit parallelen in weiten Bereichen ebenen Platten ausmachen. Ein nur begrenzt mögliches Verjüngen der Wasserlinienbreite nach achtern bzw. ein Verbreitern des Vorschiffes, ähnlich wie bei der „Manhattan“, führt zu einer Verminderung der Schollenpressungen an den langen Schiffsseiten und setzt die Reibungskräfte herab.

2.23 Schwierigkeiten der modellmäßigen Erfassung

Die starke gegenseitige Abhängigkeit der beschriebenen Widerstandsanteile verstärkt die Schwierigkeiten, übertragbare Modellversuche selbst nur für eine als gleichförmig angesehene bestimmte Eisfahrtbedingung durchzuführen. Es müßten hierfür alle Materialkonstanten des im Modellversuch verwendeten „Eises“ physikalisch richtig reduzierte Größen besitzen und es müßte gewährleistet sein, daß bei einer in bestimmtem Maße reduzierten Modellgeschwindigkeit die anteiligen Widerstandsgrößen zueinander in einem der Großausführung entsprechenden Verhältnis stehen. Wie jedoch bei normalen Schiffsmodellversuchen im freien glatten Wasser die verschiedenen Modellgesetze für Zähigkeitsbedingten Reibungswiderstand und schwerebedingten Wellenwiderstand völlig unterschiedliche Modellgeschwindigkeiten bedingen und somit jeweils eine erhebliche

Widerstandskorrektur durch einen Reibungskorrekturabzug notwendig machen, so ist zu erwarten, daß die z.T. noch unbekannten Modellgesetze für das Brechen, den Transport und die Gleitreibung der Eisschollen an Eis und Stahl selbst bei maßstäblich genau reduzierten Materialkonstanten des verwendeten Modelleises jeweils unterschiedliche Gesetze für die Ermittlung der Modellgeschwindigkeit bedingen. Es muß daher bezweifelt werden, ob die bei Eisbrecher-Modellversuchen bisher verwendete Umrechnung der Modell- auf die Schiffsgeschwindigkeit nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz zu richtigen Werten führte, da es neben den Massenkräften lediglich die rein schwerebedingten Kräfte am Modell berücksichtigt. Am Anfang dieser speziellen Modellversuchstechnik sollte daher versucht werden, zunächst eine gewisse Trennung der beim Eisbrechen am Modell bei verschiedenen Modelleisverhältnissen auftretenden Teilwiderstände vorzunehmen.

Erste Grundlagen für eine Berechnung der Arbeit beim Eisbrechen am Bug und beim Schollentransport lassen sich theoretisch und aufgrund von Beobachtungen am Schiff gewinnen (Eisbrecher-Formeln nach Vinogradov u. a.). Auch Modellversuche in gebrochenen Eisschollen vorgegebener Abmessungen (Bild 5) können einen ersten Anhalt über den Fahrtwiderstand bei bestimmter Bedeckung des Fahrwassers mit Eis liefern.

Weiterhin erscheint es sinnvoll, an geteilten Modellen durch geeignete Meßglieder bei gemessenem Gesamtwiderstand den im Vorschiffsbereich wirksamen Brechwiderstand und den an den Modellseiten wirksamen Reibungswiderstand getrennt zu erfassen und somit eine weitere Analyse zumindest des Modellverhaltens zu ermöglichen.

Angesichts der genannten Schwierigkeiten einer modellähnlichen Durchführung von Versuchen können die bisher üblichen Untersuchungen nur einen ersten Ansatz mit mehr oder weniger beschränkter Aussagefähigkeit darstellen. So ist z. B. bei Versuchen in Frischwassereis, in modifiziertem Paraffin und künstlichem Modelleismaterial eine mit übertragbarer Festigkeit verbundene Eisdicke meist erheblich zu dünn bzw. umgekehrt bei übertragbarer Dicke und Masse der Eisschollen die Festigkeit um ein Vielfaches zu hoch, wodurch die Versuche nur sehr begrenzt übertragbar werden.

Einen Fortschritt in der Modellversuchstechnik stellt die in der jüngsten Zeit vorgenommene Verwendung von durch Übersalzen in der Bruchfestigkeit heruntergesetzten

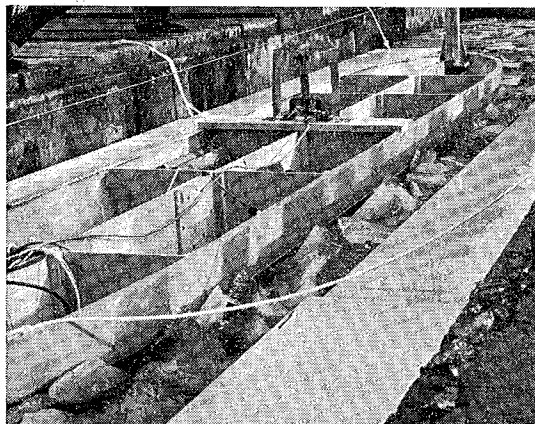


Abb. 5: Propulsionsversuche in gebrochenen Eisschollen einer Dicke von entspr. 4—5 m

Eises dar, bei dem durch bestimmte Salzkonzentrationen und gezielte Gefriermethoden bei tiefen Temperaturen Modelleis erzeugt wird. Während jedoch die Eisdicke hierbei maßstäblich richtig dargestellt wird, weicht die Festigkeitsverteilung über dem Querschnitt von der des Natureises stark ab. So wird u. a. die Festigkeit einer durch Unterkühlung erzeugten schwachen porösen Salzeissschicht durch zusätzliches Auffrieren einer dünnen Frischwassereisdecke erhöht, so daß die Oberschicht einen erheblichen Teil der Gesamtbruchfestigkeit übernimmt. Die Durchbiegung dieses Modelleises ist erfahrungsgemäß wesentlich höher als die des vergleichbaren Natureises. Es ist also auch hier noch nicht zu erwarten, daß die Größe der beim Modelleisbrechen entstehenden Eisschollen sowie ihr Bewegungsverhalten genügend übertragbar ist.

Neben den Modellversuchen zur Abschätzung der beim Eisbrechen erforderlichen Leistung ist noch eine Reihe anderer Modell-, Groß- und Laborversuche möglich, welche für die Klärung weiterer beim Entwurf eines eisbrechenden Massengutschiffes entstehenden Fragen von Nutzen sein können.

2.24. Modellversuche in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin

In der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin wurden im Rahmen eines größeren Versuchsprogramms für verschiedene Typen eines eisbrechenden Massengutfrachters für die AG. Weser Bremen Versuche durchgeführt, bei denen das Verhalten des Eisbrechermodells beim Auflaufen auf eine feste verschieden stark gebremste Rolle, entsprechend etwa einer harten glazialen Eisscholle großer Dicke, beobachtet wurde und die dabei am Vorsteven auftretenden Horizontal- und Vertikalkräfte gemessen wurden. Da die Rolle, auf der der geneigte Eisbrechervorsteven hochgleitet, völlig starr angebracht war, sind die Versuchsbedingungen zu ungünstig, da selbst glaziales Eis größter Härte ein gewisses Eindringen des Vorstevens zuläßt, zumal meist jüngeres und damit weicherer Eis den glazialen alten harten Gletschereiskern umgibt. Trotzdem ergaben sich wertvolle Hinweise auf die Größe der Stoßkraftkomponenten sowie das Verhalten des Schiffes. Aus Messung und Beobachtung geht hervor, daß das Modell beim ersten Aufprall des geneigten Vorstevens auf die feste Rolle zu Längsbiegeschwingungen angeregt wird. Diese Schwingungen führten zu mehrfachem Abheben und Zurückschlagen des Modell-Vorstevens auf das Hindernis verbunden mit entsprechenden Stoßkraftspitzen.

In Bild 6 sind die horizontalen und vertikalen Kraftamplituden beim ersten Stoß des Modells auf die Rolle wiedergegeben. Die entsprechenden Amplituden des 2., 3. und 4. Aufstoßens sind von gleicher Größenordnung, streuen jedoch etwas mehr. In gewissen Grenzen wurde auch die Reibung beim Hochgleiten des Stevens verändert. Wegen der starken elastischen Biegeschwingungen des Modells an dem starren Hindernis und den damit verbundenen Meßwertstreuungen ließ sich dieser Einfluß jedoch nicht klar erfassen. Wenngleich der Stoß des Schiffes am Eis nicht so hart erfolgt wie im Modellversuch, ist anzunehmen, daß infolge der erregten Längsbiegeschwingungen Bewegungs- und Kraftamplituden auftreten, die bei der Festigkeitsberechnung beachtet werden müssen, und deren näherungsweise Bestimmung bei Reduktion der Versuchsergebnisse möglich sein dürfte.

2.25. Schlußbemerkung

Die obenstehenden Ausführungen lassen erkennen, daß wir gegenwärtig noch am Anfang einer sinnvollen Modellversuchstechnik für eisbrechende Massengutfrachter stehen, daß jedoch gute Ansätze vorhanden sind, einer Lösung der vielschichtigen Probleme näherzukommen. Weitere Groß-, Modell- und Laborversuche sowie theoretische

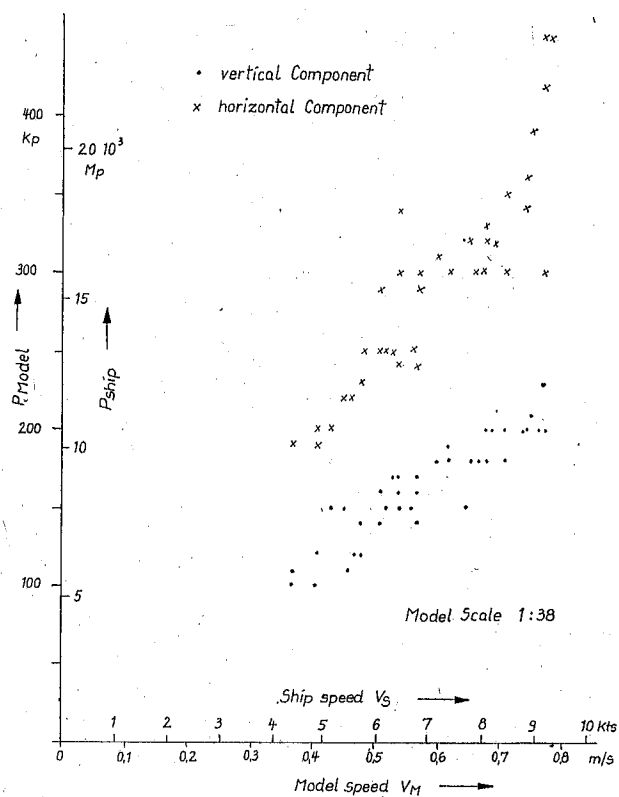


Abb. 6: Vertikale und horizontale Kräfte am Vorsteven beim ersten Stoß auf die Rolle

Rechnungen und Analysen sind in erhöhtem Maße notwendig, um gute Entwurfsgrundlagen für diese Schiffe zu schaffen, die als leistungsfähiges Transportmittel für die arktischen Bodenschätze in naher Zukunft eingesetzt werden sollen.

2.3. Verhalten von Fähren im Eis

2.3.1. Allgemeines

Um die hier zu betrachtenden Fähren von anderen Schiffen und der Vielzahl der möglichen Fährschiffstypen abzugrenzen, beschränken sich die Ausführungen auf die am Nord-Ostsee-Kanal (NOK auch: Kiel-canal) eingesetzten Doppelendfähren, die in beiden Axialrichtungen, also „vor-“ und „rückwärts“ vollkommen gleichartig fahren und manövrieren können.

Die als Binnenschiff gebauten Fähren werden von Ketten, Ruderpropellern oder Voith-Schneider-Propellern (VSP) angetrieben.

Die Beschränkung auf den NOK umfaßt alle wesentlichen Randbedingungen — mit Ausnahme der Strömung im Gewässer, wie sie bei Flußfähren zusätzlich in Betracht zu ziehen wäre.

2.32. Am Nord-Ostsee-Kanal zu berücksichtigende Gegebenheiten

Im einzelnen müssen bei den Fährten am NOK folgende Teilfaktoren betrachtet werden:

Verkehrsbedingungen:

Die Verpflichtung zur Aufrechterhaltung des Fährverkehrs erfordert besondere technische und betriebliche Anstrengungen. Die Fährschiffe müssen ihren Betrieb noch dann aufrechterhalten, wenn nur noch sehr große Schiffe den durch Eisbrecher offengehaltenen NOK befahren, während vergleichbar motorisierte Schiffe die Kanalpassage schon eingestellt haben.

Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, daß die Fährten nicht in einer ungestörten Fahrrinne, die sie sich im Eise durch ihre Fahrtbewegungen selbst offenhalten, fahren können. Durch die Passage der in der Kanalachse fahrenden Schiffe wird das Oberflächeneis immer wieder in die Fahrrinne, in die Fährbuchten und vor die Fähranleger gedrückt. Dies kann soweit führen, daß die Fährbucht bis auf den Grund mit Eis vollgeschoben wird und dann der Fähranleger mittels Greifbaggern freigehalten werden muß. Es findet also fortwährend eine Bewegung und Stauung des Eises statt, so daß die Fährschiffe erschwerten Betriebsverhältnissen unterworfen sind.

Selbst in kälteren Gegenden mit folglich größeren Eisdicken und bei größeren Wasserflächen bestehen insoweit günstigere Bedingungen.

Gewässertyp:

Das Wasser im NOK besteht im westlichen von der Elbe und durch Zuflüsse beeinflussten Teil nahezu aus Süßwasser, im östlichen Teil zur Ostsee hin zunehmend aus Salzwasser. Seewasser der Ostsee tritt durch die Schleusen in Holtenau ein. Da die Fährten überwiegend im westlichen Teil des Kanals eingesetzt sind, herrschen Süßwasserverhältnisse vor. Bei anhaltend niedrigen Temperaturen bildet sich dort rasch Oberflächeneis, welches durch Treibeis, das elbabwärts durch die Schleusen in Brunsbüttel eintritt, verstärkt wird. Die größte Wassertiefe beträgt 11 m, und der trapezförmige Kanalquerschnitt besitzt rd. 800 m² (künftig rd. 1350 m²) Fläche (eingetauchter Hauptquerschnitt des Regelschiffs rd. 200 m²), das Wärmereservoir der tieferen Wasserschichten ist deshalb verhältnismäßig gering. Hinzu kommt, daß das Wasservolumen durch die Schifffahrt stark verwirbelt wird und somit fast gleichmäßige Temperaturen annimmt.

Infolge der geringen Wärmespeicherung in der Tiefe des Kanals verliefen Versuche erfolglos, durch propellerartige Propulsionsanlagen oder durch Luft aus perforierten Preßluftleitungen in Richtung der Fährlinie die Fährbuchten eisfrei zu halten.

In Schweden führten diese Verfahren wegen der vorhandenen großen Wassermengen z. B. zu erheblichen Erfolgen.

Fährschiff:

Die Entwicklung der am NOK eingesetzten Fährtypen zeigt die nachfolgende Übersicht:

	Ketten- fähre	Schottel- fähre	Klappen- fähre	45 t VSP- Fähre	10 t VSP- Fähre
Verdräng. belad. (t)	90—115	185	234	165	414
Mot.Lstg. (PS)	2×30	2×75	2×100	2×120	4×240
Zulad. (t)	20	40	45	45	100
Lstg. (PS)					
Verdr. (t)	0,63—0,52	0,81	0,85	1,45	2,32

Die Fahren sind in o. a. Aufstellung nach der Indienststellung chronologisch geordnet.

Die schrittweise Vergrößerung der Zuladung trägt den steigenden Verkehrsansprüchen Rechnung.

Die Steigerung der Leistung steht im Zusammenhang mit der gesteigerten Zuladung. Wie aber die letzte Zeile ausweist, ist die spezifische Leistung PS/t überproportional gestiegen. Diese Steigerung wurde nicht nur angestrebt, um die Geschwindigkeit zu erhöhen, was bei den kurzen Fahrstrecken von ca. 150 bis 200 m bzw. 500 m in Brunsbüttel von untergeordneter Rolle bleibt, sondern um die Beschleunigungsvorgänge zu verbessern (An- und Ablegen, Manövrieren). Diese Erhöhung der spezifischen Leistung kommt dem Betrieb unter Eisverhältnissen auch unmittelbar zugute.

Es liegt auf der Hand, daß die Kettenfähren, die wegen ihres eigenartigen Antriebes dem modernen Verkehr nicht mehr gerecht werden und auch im Eis trotz des für die Fortbewegung günstigen Kettenzuges natürlich in den Fährbuchten besondere Schwierigkeiten haben, Zug um Zug durch VSP-Fahren ersetzt werden.

Bei den Schottelfahren sind spezifische Eisschwierigkeiten nicht bekannt. Einige der nachfolgend für VSP-Fahren dargelegten Erfahrungen gelten sinngemäß auch für Schottelfahren.

Zu der Wahl des Voith-Schneider-Antriebs kam es, weil er für Fahren ganz allgemein den Vorteil bietet, daß An- und Ablegemanöver mit größter Präzision und stoßfrei durchgeführt werden können. Darüber hinaus ist die Voith-Schneider-Fähre in der Lage, auf der Fährstrecke selbst sich dem vorrangigen Längsverkehr optimal anzupassen.

Da diesen Vorteilen Schwierigkeiten im Eis entgegenstehen, wurden aufgrund gesammelter Erfahrungen bei den VSP-Fahren von Anfang an bauliche Vorkehrungen zur Erhöhung der Eisfestigkeit getroffen:

Der Schiffskörper hat an den Schiffsenden in der Wasserlinie Zuschärfungen erhalten, damit ein Eisstau vermieden wird. Die zwei VSP sind unter Gondeln gesetzt, damit eine große Tauchtiefe erreicht wird. Zu den Schiffsenden hin sind die Gondeln durch besondere Kragen geschützt, welche die Eisstücke abweisen sollen, die bei der Fahrt unter den Schiffskörper gedrückt werden.

Von der Maßnahme, die Propeller durch Eiskörbe zu schützen, wurde nach verschiedenen Versuchen — trotz der guten Erfahrungen in Schweden — Abstand genommen. Im NOK wird das Eis in der Masse infolge des starken Schiffsverkehrs usw. soweit

zerkleinert, daß sich die Eiskörbe mit Eisgruß zusetzen und somit die notwendige Zu- und Abströmung unterbunden wird. Auch die Variation der Stababstände usw. führte bisher zu keinem befriedigenden Erfolg.

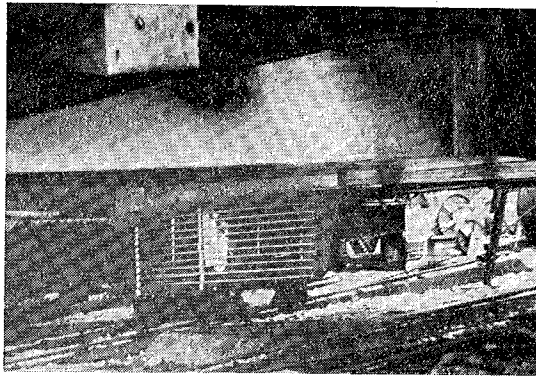


Abb. 7: Eiskorb an einer 45 t VSP-Fähre

Die 100-t-Fähren haben eine gegenüber den 45-t-Fähren weiterhin verbesserte Schiffsförmgebung erhalten und sind mit zusätzlichen Eisspornen versehen, die tiefgreifende Eiszusammenballungen abweisen und die Propellerflügel vor größeren Eisschollen schützen.

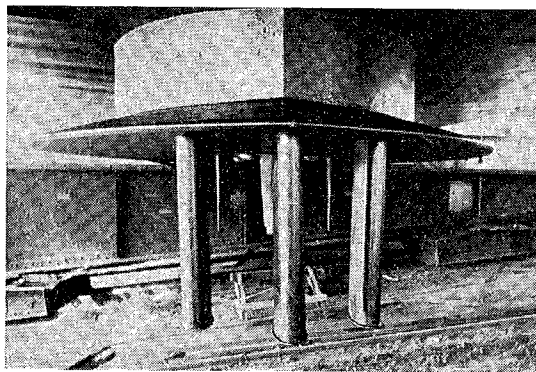


Abb. 8: Eissporne an einer VSP-Fähre

In dem besonders harten Eiswinter 1962/63 traten zahlreiche Schäden an den Flügeln und am Triebwerk ein. Es wurden daraufhin besonders eisfeste Flügel eingebaut, bei denen zudem der Schaft in Richtung Eintrittskante verschoben wurde. Hierdurch werden die Momente verkleinert, welche aus den Schlägen aus dem Zusammentreffen mit Hindernissen herrühren und in die Kinematik weitergegeben werden. Schließlich wurden Sicherheitsventile in die Steuerhydraulik eingebaut, die aus Schlägen herrührende Überdrücke ableiten und kurzzeitig Überbeanspruchungen der Kinematik abbauen.

Diese Maßnahmen wurden im langen und eisreichen Winter 1969/70 praktischer Bewährung unterworfen. Die aufgetretenen Schäden — in der Gesamtzahl geringer als 1962/63 — bestanden überwiegend aus Verbiegungen der Flügel selber. Dies bedeutet eine wesentliche Verbesserung, da die Flügel verhältnismäßig einfach ausgebaut, gerichtet und wieder eingebaut werden können. Schäden an der Kinematik sind sehr selten geworden.

Bei einer im Bau befindlichen Fähre werden die Propeller noch tiefer gesetzt. Weiterhin wird — da bisher die volle Steigung nicht ausgenutzt werden konnte — die Drehzahl reduziert und auf volle Steigung ausgelegt. Hierdurch erreicht man bei höherem Drehmoment eine Reduzierung der Umfangsgeschwindigkeit und damit eine Reduzierung der Stoßkräfte. Die Umfangsgeschwindigkeiten liegen unter denen vergleichbarer Propellerschrauben, deren äußerste Kanten, an denen die Kollision mit dem Eis erfolgt, entsprechend stärker gefährdet sind.

Fährlandanlagen:

Die bauliche Gestaltung der Landeanlagen hat auf die Verhältnisse beim Anlegen der Fähre nicht unerheblichen Einfluß.

Die landseitigen Landeklappen, durch Schwimmer dem jeweiligen Wasserstand angepaßt oder durch Hydraulik betätigt, haben eine Kraglänge von 6 m. Die Landeklappen ergeben sich aus den geometrischen Verhältnissen eines möglichst knickfreien Fährbahn-Überganges bei unterschiedlichen Wasserständen.

In dieser Betrachtung kommt ihnen aber Bedeutung zu, da sie einen gewissen Eisstau an der Fährstelle auffangen können, ohne das Schiff beim Anlegen zu behindern. Tatsächlich jedoch ist unter besonderen schweren Umständen der Eisstau größer als die Klappenlänge. Um dem Eisstau Ausdehnungsmöglichkeit zu geben, wird eine weitflächige Fährbucht angestrebt. Die wirtschaftliche Begrenzung liegt in den hohen Kosten. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, daß unter den bereits geschilderten Verhältnissen der Eisbewegung durch den Schiffslängsverkehr jede Fährbucht — ungeachtet ihrer Größe — durch Eisstau verstopft wird. Um einen freien Abstrom des Eises zu ermöglichen, sollte weitestgehend auf jegliche Stütz- und Führungsdalben verzichtet werden.

2.33. Der Betrieb der Fähren im Eis

Die vorstehend erörterten technischen Maßnahmen werden durch betriebliche Vorkehrungen ergänzt. Die hier ausführlich behandelten VSP-Fähren sind in ihrer Bauart soweit auf die Eisverhältnisse ausgelegt, wie es den weit überwiegenden Glattwasserbetrieb nicht — oder nicht wesentlich — beeinträchtigt. Sie sind daher nicht eisbrechende Fähren im eigentlichen Sinne. Daher werden die Rinnen der besonders stark eisbehinderten Fährstellen durch leistungsstarke Schlepper freigehalten. Bei den stark eisbehinderten Fähranlagen liegen entweder Schlepper oder Ersatzfähren mit laufenden Propellern und bemühen sich, soweit möglich, die Fährbuchten freizuspülen. Die guten Manövriermöglichkeiten des VSP werden voll ausgenutzt, um durch Traversieren die hinderlichen Eismassen beiseite zu schieben oder durch entgegengesetzte Schubrichtungen der VSP die Fährbuchten freizuspülen. Ebenso voll ausgenutzt werden die Möglichkeiten der VSP bei der freien Überfahrt, beim Ausweichen oder Abbremsen vor erkennbaren großen Eisstücken. Bei diesen Maßnahmen oder Manövern spielt natürlich Erfahrung, Reaktionsvermögen und Zielstrebigkeit der Schiffsführer eine entscheidende Rolle.

2.34. Zusammenfassung

Durch schiff- und wasserbauliche Maßnahmen ist es möglich, den Verpflichtungen zur Aufrechterhaltung des Fährbetriebes über den NOK im Eis weitestgehend gerecht zu werden. Die Aufwendungen hierfür sind beträchtlich. Wenn es nicht vollständig gelingt, Schäden im Eis zu verhüten, so darf nicht übersehen werden, daß die Fähren über 95 % ihrer Betriebszeit in Glattwasserverhältnissen fahren, dafür ausgelegt sind und auch noch unter extremen Eis-Bedingungen, wenn vergleichbar motorisierte Schiffe den Betrieb einstellen oder die Passage meiden, noch Dienst tun.

Eine analytische Erforschung des Zusammenwirkens zwischen Fähre und deren Propulsionsorganen mit dem Eise ist erschwert durch die Unkenntnis der verschiedenen Einflußgrößen. Diese wiederum scheinen z. Z. der Erforschung noch unzugänglich, da sie im betrachteten Fahrtbereich von unüberschaubaren Randbedingungen abhängig sind.

2.4. *Über Eisführung und Schiffahrtsbehinderungen durch Eis im Tidebereich der Elbe*

2.4.1. Allgemeines

Im Tidebereich der Elbe (Bild 9) bilden sich geschlossene Eisdecken nur noch auf Nebenarmen und im Tidegrenzbereich oberhalb von Hamburg. Unterhalb verhindern die Schifffahrt und die großen Breiten die Entstehung einer Eisdecke.

Das Treibeis treibt mit der Flut und Ebbeströmung stromauf und -abwärts. Dabei entstehen infolge der fortlaufend und von Tide zu Tide wechselnden Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten sowie durch die ausgeprägten Unregelmäßigkeiten des Flußbettes an einigen Orten zeitweilig erhebliche Eisansammlungen, die die Kleinschifffahrt bereits bei insgesamt mittlerer Treibeisbedeckung wesentlich stören können.

In strengen Wintern kann das Eis auch eine Behinderung der Schifffahrt durch Wasserstandsänderungen herbeiführen. Sie können eintreten, wenn Eisablagerungen, festliegende Treibeisfelder und geschlossene Eisdecken in Nebenrinnen Größe und Rauigkeit der Flußrinne verändern und eine Eisdecke, die sich im oberen tidefreien Bereich des Flusses gebildet hat, den Oberwasserzufluß verringert. Das Oberwasser und die Größe und Beschaffenheit der Flußrinne sind neben der Tidebewegung auf See die wesentlichen Einflußfaktoren für die im Tidebereich eines Flusses auftretende Wasserbewegung.

2.4.2. *Über die Ursachen der Eisansammlungen und Wasserstandsänderungen*

Zu den wesentlichen Ursachen der unterschiedlichen Eisbedeckung an den einzelnen Orten gehört außer den tidebedingten Strömungen und Wasserständen und der örtlichen Beschaffenheit in Form von Ufervorsprüngen, Einbauten im Fluß und häufigen Bänken und Nebenrinnen der Windschub, der der strömungsbedingten Drift des Treibeises entgegenwirkt oder sie verstärkt. Neben der örtlichen Beschaffenheit ist auch ihr Wechsel von Ort zu Ort von Bedeutung, da sich mit der Änderung des Flußbettes sowie der Entfernung zur See und der oberen Tidegrenze Flut- und Ebbestromdauer und der während einer Tide zurückgelegte Weg eines Wasserteilchens ändern. Da überdies die Wasserbewegung an einem Ort eines Tideflusses letztlich durch die Form des gesamten Tidebereiches als Schwingungsraum der Tidewelle bestimmt wird, ist die örtliche Situation nicht ohne Berücksichtigung der Abmessungen und Eigenheiten des gesamten Ästuars zu beurteilen.

Die Eisablagerungen im Tidefluß entstehen beim Absinken der Wasserstände, wenn beim Abfließen des Wassers die Eisschollen trocken fallen, sich aufeinanderschieben und zusammenfrieren. Das Ausmaß der Ablagerungen hängt ab von der Neigung der Strände sowie von dem Vorhandensein von Sänden und Bänken, die bei höheren Wasserständen überflutet werden. Im Laufe mehrerer Tiden kann es besonders dann, wenn die Wasserstände im Mittel fallen, zu ausgedehnten Eisanhäufungen kommen.

Die Veränderung des Flusses durch Eisablagerungen, festliegende Treibeisfelder und geschlossene Eisdecken führt in der Regel zu einer verstärkten Dämpfung der Tidewelle, da eine größere Rauigkeit und stärkere Ungleichförmigkeit auftritt — als Ungleichförmigkeit wird der Wechsel der Querschnittsformen und -größen über die Flußlängsachse bezeichnet. Daneben entstehen durch die Änderung des Schwingungsraumes andere Re-

flexionen. Infolge der Verringerung des Oberwassers durch die Eisdecke im tidefreien oberen Flußbereich wird auch die Anhebung des Tidewasserspiegels durch das Oberwasser kleiner. Neben der Änderung der Höhen und Eintrittszeiten der Wasserstände tritt eine Änderung der Strömungsverhältnisse und Stromwege ein, die sich auf die Eisdrift und somit auf die örtlichen Eisansammlungen auswirkt. Wenn sich starke Eisansammlungen dennoch immer wieder an denselben Orten bilden, so überwiegt hier der Einfluß der örtlichen Beschaffenheit des Flußbettes.

2.43. Eisbehinderungen und Wasserstandsänderungen in der Elbe

Bild 9 zeigt den Verlauf der Elbe zwischen Hamburg und Cuxhaven. Der Fluß weist besonders im Streckenbereich zwischen Hamburg und der Störmündung (etwas unterhalb von Glückstadt) eine unregelmäßige Linienführung auf. Die Fahrwasserrinne wechselt mehrfach die Flußseiten, bedingt durch Einflüsse, die Krümmungen, Einmündungen der Nebenflüsse und unterschiedliche Querschnittsgrößen und -formen auf den Verlauf der Tidewelle und die Strömungen ausüben. Zwischen den Ufern und der Fahrwasserrinne befinden sich stellenweise ausgedehnte Flachwasserbereiche, auf denen sich Eis ablagert. Außerdem treten mehrere Inseln, Bänke und Nebenrinnen auf, die hoch mit Eisschollen bedeckt werden bzw. zufrieren. Dieser Streckenbereich bietet somit mit seinen Unregelmäßigkeiten die Voraussetzungen für örtliche Eisansammlungen; sie treten vornehmlich bei km 645, zwischen km 651 und 654, 661 und 668 und 673 bis 681 auf.

Stromab der Störmündung bis etwa Brunsbüttel (km 700) weist die Elbe weniger starke Unregelmäßigkeiten auf. Hier sind auch die Querschnittsanteile mit geringen Wassertiefen im Verhältnis zur Größe der Gesamtquerschnitte kleiner. Unterhalb von Brunsbüttel weitet sich der Mündungstrichter der Elbe stark aus, es beginnt ein Bereich ausgedehnter Sand- und Wattflächen. In strengen Wintern kommt es seewärts der Störmündung ebenfalls zu erheblichen Eisanhäufungen, deren Eintritt aber hauptsächlich durch den Wind bedingt ist, z. B. führt Wind aus Ost-Süd-Ost zur Eisansammlung vor Brunsbüttel und Ostwind häufig zur Ansammlung vor Cuxhaven.

Im Flußbereich oberhalb von Hamburg sind die Breiten geringer, hier bildet sich eine feste Eisdecke. Sie bildet sich zunächst im Bereich der Flutstromgrenze, da sich dort das von Oberstrom herantreibende Treibeis vorübergehend staut.

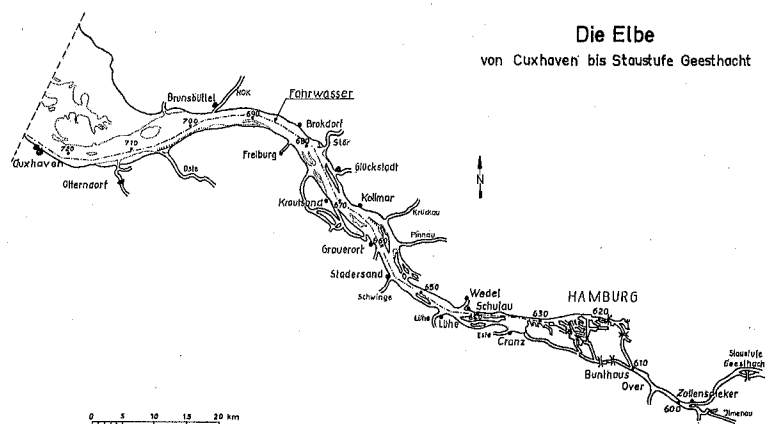


Abb. 9: Lageplan der Elbe von Cuxhaven bis zur Staustufe Geesthacht

Die Großschifffahrt wird durch die Treibeisbedeckung der Elbe nicht behindert. Die Kleinschifffahrt benötigt jedoch häufig Eisbrecherhilfe. Mehrere Schiffe folgen dann meistens in Kiellinie den routinemäßig verkehrenden Eisbrechern. Schwierigkeiten kann das Eis aber auch mittelgroßen Schiffen dadurch bereiten, daß es die Kühlwasserleitungen dichtsetzt.

Die Dämpfung der Tidewelle durch Eis wird aus Bild 10 ersichtlich. Es zeigt den Verlauf von Tnw- und Thw-Linien einer bei starker Eisführung eingetretenen Tide sowie den Verlauf der Linien, die unter sonst gleichen Voraussetzungen bei eisfreiem Strom eintreten würden. Die Linien des Verlaufes bei eisfreiem Strom sind gestrichelt für den Fall eingezeichnet, daß das Oberwasser in der selben Menge zutritt, wie sie bei der eingetretenen Tide im tidefreien Bereich unter der Eisdecke abfließt. Dieser Abfluß beträgt je nach Alter und Glättung der Eisdecke etwa das 0,3- bis 0,5fache des Abflusses im eisfreien Strom. Mit den weiteren punktierten Linien ist der Verlauf dargestellt, der sich einstellen würde, wenn der tidefreie Bereich ebenfalls eisfrei wäre und die Abflußminderung durch Eis nicht vorläge. Der Vergleich der Linien zeigt, daß bei eisführendem Fluß stromauf von Glückstadt eine Senkung der Thw-Linie und Anhebung der Tnw-Linie auftreten. Die Verringerung des Oberwassers durch die Eisdecke in der tidefreien Elbe unterstützt dabei die Absenkung der Thw-Linie und wirkt der Anhebung der Tnw-Linie entgegen. Unterhalb von Glückstadt hebt sich die Thw-Linie und senkt sich die Tnw-Linie durch die Reflexion der Tidewelle infolge der Eiswirkung oberhalb.

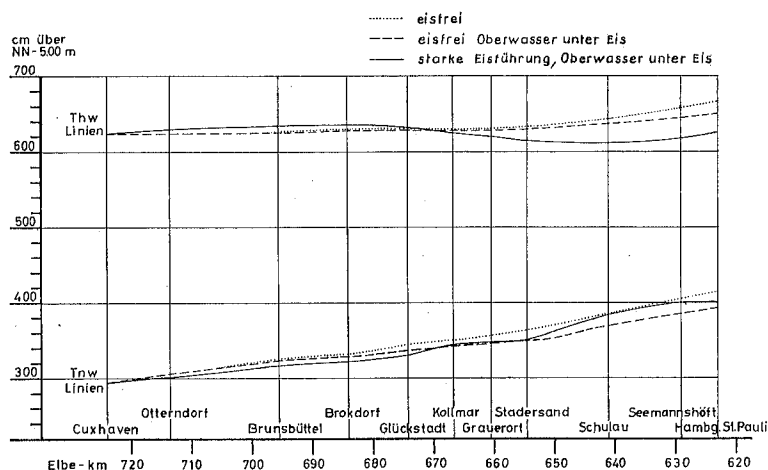


Abb. 10: Verlauf der Tnw- und Thw-Linien einer bei starker Eisführung eingetretenen Tide. Zum Vergleich der Verlauf unter sonst gleichen Voraussetzungen bei eisfreiem Strom

Naturgemäß treten von Tide zu Tide und Eiswinter zu Eiswinter unterschiedliche Tnw- und Thw-Änderungen ein. Zu der für die Schifffahrt störenden Absenkung der Thw durch Eis tritt erschwerend hinzu, daß im Winter östliche Windlagen häufig sind, die die Wasserstände in der Elbe senken. Überdies tritt die Absenkung durch Eis im Süßwasserbereich des Flusses ein, in dem die Eintauchtiefe der Schiffe größer ist. Wird der Eiswirkung auf die Wasserstände durch eine größere Keel-Clearance der Schiffe Rechnung getragen, so erhöht sich bei einem Schiff mit 14 m Tiefgang und einer Absenkung des Thw durch Eis von rd. 0,30 m die auf den Tiefgang bezogene Keel-Clearance um rd. 2%.

2.44. Zusammenfassung

Die Kleinschiffahrt kann auf großen Tideflüssen wie der Elbe, auf denen sich im Winter infolge des Schiffsverkehrs und der großen Breiten keine geschlossene Eisdecke bildet, besonders dadurch behindert werden, daß sich das Eis an einzelnen Orten ansammelt und anhäuft. Neben dem wechselnden Tideverlauf sind Windwirkung und örtliche Unregelmäßigkeiten des Flußlaufes die Ursachen der Eisansammlungen. Durch Eisablagerungen auf Stränden und Bänken, festliegende Treibeisfelder und Eisdecken auf Nebenrinnen verändert sich außerdem das Flußbett und kann hierdurch ein Absinken der Thw herbeiführen, durch das der Verkehr tiefgehender, den Zeitbereich des Thw ausnutzender großer Schiffe erschwert wird. Hinzu kommt ein Absinken der Wasserstände infolge der Verringerung des Zuflusses durch eine Eisdecke im oberen tidefreien Bereich des Flusses.

Der Wasserbauer muß bei Maßnahmen am Fluß die Wirkung des Eises auf die Schifffahrt berücksichtigen. Eine Verringerung der Eisbehinderung ist zu erreichen, wenn die Unregelmäßigkeiten im Lauf des Flusses vermindert werden. Durch diese Glättung der Linienführung läßt sich zugleich die Räumkraft auch des eisfreien Stromes, der bei knapp bemessenen Wassertiefen eine größere Bedeutung für die Schifffahrt als der Eisbehinderung zukommt, verbessern.

3. Mittel zur Eisbekämpfung

3.1. Allgemeines

Zur Eisbekämpfung wird auch heute noch vorwiegend der Eisbrecher eingesetzt. Auf den Seeschiffsstraßen dient er zur Aufrechterhaltung des Verkehrs. Auf den Flüssen des Binnenlandes ist der Einsatz zur Erhaltung der Vorflut erforderlich, zugleich wird dadurch die zeitige Wiederaufnahme des Schiffsverkehrs erreicht.

Auf den Binnenschiffahrts-Kanälen, die von Binnenschiffen befahren werden, kann der Verkehr durch Eisbrecher nur dann aufrechterhalten werden, wenn bei einer durch die Schifffahrt noch gerade zu bewältigenden Eisstärke von etwa 12—15 cm keine wesentliche Neueisbildung eintritt. Sinken unter diesen Verhältnissen die Lufttemperaturen im Tagesmittel auf -5°C ab, so kommt der Verkehr trotz der Eisbrecher innerhalb eines Tages zum Erliegen, da das Wasser durch die Schifffahrt bis zur Sohle ständig durchmischt, dadurch der geringe Wärmeverrat im Wasser trotz der vorhandenen Eisdecke schnell aufgezehrt wird und die Bildung von Neueis unverzüglich einsetzt. Darüber hinaus kann das Scholleneis in den schmalen Kanälen aus Platzmangel von den durchfahrenden Schiffen nicht genügend zur Seite geschoben werden. Kurz vor Einstellung der Schifffahrt besteht daher nur noch eine schmale „Fahrrinne“ in der Breite eines Schiffes in Fahrwassermitte, in der Überholungen unmöglich sind und Begegnungen oft dazu führen, daß das Fahrzeug mit der schwächeren Maschine im Scholleneis seitlich festfährt. Wird das Scholleneis durch die Schifffahrt oder Eisbrecher weiter zerkleinert, entsteht ein zäher Eisbrei, der von den üblicherweise 200 bis 600 PS starken Binnenschiffen nicht mehr bewältigt werden kann. Der Eisaufbruch auf den künstlichen Wasserstraßen des Binnenlandes erfolgt deshalb überwiegend zur Verkürzung der Verkehrssperren. Bei Eintritt einer durchgreifenden Tauwetterperiode wird das Eis dort aufgebrochen, um die Dauer der Verkehrssperre zu verkürzen sowie im Fahrwasser festgekommene Schiffe zu befreien.

Auch die „Luftblasenmethode“ (air-bubbles), die zur Verhütung der Eisbildung einen größeren Wärmeverrat in großer Wassertiefe erfordert, kann zur Aufrechterhaltung des Verkehrs auf den Binnenwasserstraßen mit relativ geringer Wassertiefe nicht in Be-

tracht gezogen werden, da wegen der starken Durchmischung des Wassers durch Schiffahrt und Strömung an der Sohle nicht ausreichend Wärme zur Verfügung steht. Dagegen wird das Einblasen von Luft zur Eisfreihaltung der Schleusentore im Raum Hannover seit 3 Jahren mit Erfolg angewendet. Hier kam es jedoch darauf an, Eisschollen für ein gefahrloses Bewegen der Klapp- und Stemmtore aus den kritischen Torbereichen fernzuhalten. Durch die örtlich sehr stark von der Sohle zur Wasseroberfläche aufsteigende Luft wird an der Oberfläche ein „Wasserberg“ erzeugt, der bei ununterbrochenen Betrieb bei Frost einen relativ großen Bereich vor den Schleusentoren eisfrei hält.

Eingesetzt werden: Kompressor mit 4,1 m³ Stundenleistung; Betriebsdruck 2,5 atü; Luftleistung für Austrittsdüsen $\phi \frac{3}{4}$ Zoll; Düsen ϕ 3 bis 5 mm; Düsenabstände 0,5 bis 1,0 m; in 3 m Wassertiefe. Im Falle der Schleuse Uelzen (Elbe-Seitenkanal) ist ein Kompressor mit 56 m³/h vorgesehen. Das lästige und oft gefährvolle Freilegen der Tore kann unterbleiben, die Schleusen bleiben für die Durchfahrt der Eisbrecher betriebsbereit.

Die Zuführung von angewärmtem Kühlwasser aus Kraftwerken in Industrien stellt eine weitere Möglichkeit zur Eisbekämpfung dar. In zunehmendem Maße werden schiffbare Ströme und kanalisierte Flüsse für Kühlzwecke in Anspruch genommen. Das angewärmte Kühlwasser kann in größeren Teilabschnitten für das Abtauen genutzt werden. Über solche Nutzung der Kühlwassereinleitungen wird im folgenden berichtet.

3.2. Eisbekämpfung durch Wärmeeinleitungen

Eine gezielte Nutzung der Kühlwassereinleitungen zur Eisbekämpfung setzt voraus, daß die Vorgänge bei der Abkühlung bzw. Anwärmung des Gewässers bekannt sind. Einige Angaben zu den physikalischen Gegebenheiten und Untersuchungsergebnisse im nachstehenden Abschnitt geben einen Einblick in diese Vorgänge. An drei Beispielen wird anschließend über Überlegungen zur praktischen Anwendung und über Versuche berichtet.

3.2.1. Über den Wärmeaustausch bei der Eisbildung

Bei konstanten Wetterbedingungen spielt sich innerhalb einiger Tage die Temperatur eines Flusses auf einen bestimmten Wert ein. Bei dieser Temperatur wird die durch Globalstrahlung erfolgende Wärmeeaufnahme gerade kompensiert durch die Wärmeabgabe, die Verdunstung und Konvektion bewirken. Die Wassertemperatur steigt zwar im Laufe des Tages an und sinkt im Laufe der Nacht ab, sie durchläuft aber nach jeweils 24 Stunden wieder die gleichen Werte. Diese Temperatur (mit Tagesgang) wird als Gleichgewichtstemperatur bezeichnet. Im Winter kann diese Gleichgewichtstemperatur etwa mit der Lufttemperatur gleichgesetzt werden.

Bei einem Kaltlufteinbruch wird die Gleichgewichtstemperatur plötzlich nach unten verschoben. Die Geschwindigkeit, mit der sich dabei das Gewässer der neuen Lufttemperatur anzupassen versucht, ist proportional der Differenz zwischen momentaner Wassertemperatur und der neuen Gleichgewichtstemperatur, sie hängt außerdem von der Wassertiefe und der Windgeschwindigkeit ab. In der folgenden Tabelle sind einige Werte für die Wärmeabgabe (Wärmeeinheiten je m² und Grad Temperaturdifferenz) bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten aufgeführt:

Windgeschwindigkeit	0 m/s	3 m/s	8 m/s
offenes Wasser von 0°	15 W/m ² , grd	25 W/m ² , grd	35 W/m ² , grd
Kerneis von 3—5 cm Dicke	10 W/m ² , grd	16 W/m ² , grd	

Solange die Wasserfläche wärmer ist als die Luft, sind die abgegebenen Wärmeleistungen je Grad Temperaturdifferenz um 3 % höher anzusetzen.

Durch die Wärmeabgabe aus der Oberfläche wird die darunter liegende Wassersäule gekühlt. Je tiefer der Fluß, desto langsamer sinkt seine Temperatur. Bei fortschreitender Abkühlung sinkt die Temperatur bis unter 0° und steigt dann bei Einsetzen der Eisbildung auf 0° an.

Sobald Eis an der Oberfläche erscheint, ändert sich auch die Wärmeabgabe. Messungen der Oberflächentemperaturen haben ergeben, daß z. B. bei einer Lufttemperatur von -15° und schwachem Wind die noch offenen Wasserflächen eine Temperatur von -1° haben, ebenso kleine Treibeisstrukturen und die inneren Flächen von noch nassen Treibeistellern. Die Kragen von Treibeistellern haben Temperaturen, die bei blauem Himmel etwas unter der Lufttemperatur liegen. Wenn im weiteren Verlauf der Eisbildung die inneren Flächen der Treibeisteller gefrieren, sinkt deren Temperatur ab, bis sie bei einigen dm Mächtigkeit die Temperatur des Kragens erreichen. Da die Temperaturdifferenz zwischen Gleichgewichtstemperatur und Oberflächentemperatur dann ~ 0 ist, ist auch die Wärmeabgabe ~ 0 , d. h. die Treibeisteller wirken als Wärmeisolator. Das muß aber nicht heißen, daß die Wärmeabgabe des Flusses damit reduziert sei im Verhältnis: noch offene Fläche zu Gesamtfläche. Einerseits verringern die Treibeisteller mit ihren hohen Kragen die Windgeschwindigkeit in Nähe der Wasseroberfläche. Andererseits werden durch die sehr großen Temperaturunterschiede zwischen Wasseroberfläche und den Kragen der Treibeisteller vertikale Luftbewegungen angefacht, die besonders bei geringen Windgeschwindigkeiten zu einer erheblich erhöhten Wärmeabgabe führen können. Über einem treibeisführenden Fluß kann man bei schwachem Wind die Luft flimmern sehen wie über einem trockenen Boden in der Sommersonne. Quantitativ läßt sich die Änderung des Wärmeaustausches sehr schwer verfolgen, weil die Menge des gebildeten Treibeises fast nicht zu bestimmen ist.

Wenn sich eine geschlossene Eisdecke gebildet hat, gibt es auch jene Effekte nicht mehr, die durch die relativ warmen Wasserflächen zwischen den Eisschollen bedingt sind. Mit zunehmender Dicke der Eisdecke nimmt ihr Wärmeisoliationsvermögen zu. Wenn schließlich nur noch so wenig Wärme vom Wasser durch das Eis an die Atmosphäre gelangt, wie gleichzeitig vom Untergrund und aus der Energie des Gefälles ans Wasser geliefert wird, kommt das Dickenwachstum zum Stehen.

Das Wärmeisoliationsvermögen dünner Kerneisdecken läßt sich ohne Berücksichtigung der zuletzt genannten Energiequellen aus der Wachstumsgeschwindigkeit bei bestimmten Wetterlagen bestimmen. Für die ersten 3–5 cm Eisdicke sind die in der vorstehenden Tabelle eingetragenen Wärmeabgaben berechnet. Das Wärmeisoliationsvermögen von blankem Kerneis ist nicht sonderlich groß, was sich auch in relativ hohen Oberflächentemperaturen äußert. Eisdecken, die aus zusammengeschobenen Treibeistellern hervorgegangen sind, tragen auf einer kreisähnlichen Platte eine Kruste aus lockerem Material hohen Isolationsvermögens, das von den Kragen der Treibeisteller stammt.

3.22. Nutzung der Abwärme von Kraftwerken

Als erstes Beispiel wird das geplante Kraftwerk Krümmel betrachtet. Dieses Kraftwerk soll an der Elbe etwa 6 km oberhalb des Wehres Geesthacht gebaut werden. Es soll 1200 MW elektrische Leistung erzeugen und 2600 MW Abwärme = 620 Mcal/s in den Fluß leiten. Damit lassen sich bei einer erforderlichen Schmelzwärme von 80 Mcal/t 7,75 t/s Eis schmelzen. Da der Abfluß stromauf der Einleitung durch eine Eisdecke gebremst wird, herrschen kleine Strömungsgeschwindigkeiten, so daß das eingeleitete Warmwasser sich über den Querschnitt verteilen kann. Leichtes bis mittleres Treibeis wird auf dem Weg bis zum Wehr (die Fließzeiten betragen 3 bis 5 Std.) geschmolzen werden. Ob die großen Treibeisteller von 3–6 m ϕ und bis 0,4 m Dicke innerhalb

dieser Strecke schon aufgeschmolzen werden, ist fraglich, weil in der recht ruhigen Strömung das an der Unterseite der Teller durch den Schmelzvorgang abgekühlte Wasser nur allmählich durch frisches warmes Wasser ausgetauscht wird. Wenn wesentlich mehr als 7,75 t/s Eis am Kraftwerk vorbeitreiben, kann es wie bisher zum Eisstand kommen. Diese Eisdecke würde durch die eingeleitete Abwärme von unten her auftauen. Die Flußoberfläche bis ans Wehr beträgt 1,4 Mio m², die Masse der Eisdecke etwa 280 000 t. Bei einer Abschmelzleistung von 7,75 t/s wären etwa 10 Stunden erforderlich, um die Decke bis zum Wehr wieder aufzuschmelzen.

Bei einem in diesem Gebiet gängigen Kaltlufteinbruch mit Lufttemperaturen um -12° und Windgeschwindigkeiten um 5 m/s werden der Wasserfläche etwa 400 W/m² Wärme entzogen. Die 2600 MW des Kraftwerkes reichen aus, den Wärmeentzug aus 6,5 Mio m² Flußoberfläche nachzuliefern. Das genügt, um eine Flußstrecke von etwa 20–25 km Länge unterhalb des Kraftwerks eisfrei zu halten. Da mit wachsender offener Fläche ein zunehmender Anteil der Abwärme an die Atmosphäre abgegeben wird und zum Schmelzen der vorhandenen Eisdecke immer weniger Wärme übrigbleibt, wird diese Strecke erst nach langer Zeit offen sein.

Wenn oberhalb des Kraftwerks Eisbrecher arbeiten, treiben Eistafeln von 5–20 m ϕ und ca. 0,3 m Dicke am Kraftwerk vorbei. Die Wehranlage Geesthacht wird durch diese harten Brocken beim Überfall sehr stark beansprucht. Gestützt auf Ergebnisse aus Laboruntersuchungen von Sokolov [4] wurden Abschmelzgeschwindigkeiten der Eistafeln auf dem Weg zwischen Kraftwerk und Wehr zu etwa 0,3–1 cm/Std. errechnet. Während der Fließzeit bis zum Wehr wird dann eine Schicht von 0,9–5,0 cm Dicke von der Unterseite der Tafeln abschmelzen. Somit wird die Dicke der Eistafeln durch die Einleitung des Warmwassers verringert. Da aber die Temperatur im Eis von der Lufttemperatur bestimmt wird, verringert sich die Härte des Eises durch die Kühlwassereinleitung nicht. Jedoch erfolgt der Einsatz der Eisbrecher in der Regel erst bei einsetzendem Tauwetter und relativ höheren Lufttemperaturen.

Als zweites Beispiel sei die Eisbekämpfung durch Abwärme in Kanälen der BRD diskutiert. Der Main-Donau-Kanal, der Elbe-Seitenkanal und der Mittellandkanal nach seiner Verbreiterung haben jeder etwa 50 m Spiegelbreite und etwa 170 m² Querschnitt. Es wird wieder der Kaltlufteinbruch mit -12° C und 5 m/s zugrunde gelegt, bei dem der Wasserfläche 400 W/m² entzogen werden.

Wenn 20 m³/s Kühlwasser von $+5^{\circ}$ C in den Kanal gepumpt werden, lassen sich damit 420 MW Abwärme einleiten. Diese Wärmemenge reicht aus, den Wärmeverlust von rd. 10⁶ m² Wasserfläche nachzuliefern. Das sind bei 50 m Breite 20 km Kanallänge. Wenn die Wassertemperatur vor dem Kraftwerk 0° C, nach dem Kraftwerk $+5^{\circ}$ C war, so ist sie nach 20 km wieder 0° C. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt etwa 12 cm/s, die Fließzeit etwas über 2 Tage. Um den Kanal durchgehend eisfrei zu halten, müßte alle 20 km eine derartige Abwärmeeinleitung installiert werden.

Der Unterschied zwischen momentaner Temperatur ($+2^{\circ}$ C) und Gleichgewichtstemperatur (-13° C) unter den genannten Bedingungen beträgt etwa 15° C. Wenn jetzt Tauwetter eintritt, die Gleichgewichtstemperatur z. B. auf 0° C ansteigt, verringert sich dieser Abstand im Mittel auf $3,5^{\circ}$ C. Damit verringert sich auch die Abkühlgeschwindigkeit auf etwa $\frac{1}{4}$ des ursprünglichen Wertes. Wenn längs eines Kanals eine Kette von Kraftwerken installiert ist, die bei Eisgefahr alle 20 km 420 MW Abwärme einleitet, so müssen diese Kraftwerke bei Tauwetter ihre Einleitung auf je 100 MW Abwärme drosseln, um den Kanal nicht übermäßig aufzuheizen. Außerhalb der Frostperioden müssen sie also ihre Abwärme größtenteils über Kühltürme oder anderweitig abführen. Diese doppelte Installation macht das Verfahren sehr kostspielig.

Das dritte Beispiel behandelt die Auswirkungen einer ständig in Betrieb befindlichen Warmwassereinleitung bei Hannover in den Mittellandkanal mit einer Wassermenge von rd. $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Temperatur von $12^\circ\text{--}16^\circ \text{ C}$ im Winter. Hier wurden im Winter 1969/70 Messungen und Beobachtungen über Größe und räumliche Ausdehnung der Beeinflussung der Warmwasser-Einleitung auf die Zu- und Abnahme der Vereisung des Kanals durchgeführt.

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung waren:

Ohne Zufuhr von Warmwasser nahm die Eisstärke mit sinkenden Lufttemperaturen bis zu einem Beharrungszustand zwischen 25 und 30 cm stetig zu. War dieser Zustand erreicht, wurde die Eisstärke durch nachfolgende Wärme- und Kälteperioden nicht mehr nennenswert verändert, da die starke Eisdecke den Wärmeaustausch zwischen Luft und Wasser weitgehend verhinderte.

Im mittelbaren Einflußbereich der Warmwassereinleitung (6—20 km Entfernung) nahm die Eisbildung unter der Einwirkung von Kaltluft nur zögernd zu. Jeder Anstieg der Lufttemperaturen noch unter dem Gefrierpunkt bewirkte einen Stillstand in der Eisbildung. Stiegen die Lufttemperaturen über den Gefrierpunkt an, so war eine sofortige Abnahme der Eisstärke zu verzeichnen.

Im unmittelbaren Bereich kam es entweder zu keiner oder in äußersten Extremfällen zu einer die Schifffahrt nur leicht behindernden Eisdecke (5 cm bis 10 cm). Diese Strecken waren bei jeder Frostmilderung unter dem Gefrierpunkt nach kurzer Zeit wieder eisfrei.

Im Einflußbereich von Warmwasser-Einleitungen erreichten die Wassertemperaturen bei starken Frosteinbrüchen den Gefrierpunkt später als in den übrigen Strecken. Wegen des aufgespeicherten Wärmeverrats im Wasser setzte die Eisbildung ebenfalls später ein, so daß der Verkehr über kurze Frostperioden aufrechterhalten werden konnte, während er wenige Kilometer weiter oft für 8 bis 10 Tage wegen starker Vereisung nicht möglich war.

Auf den von 30 m auf 47 m verbreiterten Kanalstrecken wurde eine 20 % bis 25 % größere Eisdicke gemessen. Die Ursache konnte bisher nicht festgestellt werden.

Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse wurde im Januar 1972 mit Beginn der ersten Frostperiode in Minden ein Versuch durchgeführt, bei dem über das dortige Hauptpumpwerk in 72 Stunden (3 Tage) $2\,962\,000 \text{ m}^3$ Wasser (rd. $13 \text{ m}^3/\text{s}$) aus der Weser in den Mittellandkanal gepumpt wurden.

Wegen der etwa 20 km oberhalb von Minden an der Weser gelegenen Kraftwerke Veltheim und Kirchlingern betrug die Wassertemperatur in der Weser zu Beginn des Versuches noch $+5,3^\circ \text{ C}$, sie sank während des Versuches bis auf $+0,6^\circ \text{ C}$. Im gleichen Zeitraum nahmen die mittleren Tageslufttemperaturen von -3° C auf -11° C ab, die Wassertemperaturen des Mittellandkanals betrugen bei Versuchsbeginn in Minden $+2,2^\circ \text{ C}$ und 18 km östlich $+0,5^\circ \text{ C}$.

Es war vorgesehen, die gesamte gepumpte Wassermenge von Minden durch den 81 m^2 umfassenden Kanalquerschnitt in Richtung Osten über einen Auslaß bei Hannover in die Leine zu leiten. Mit dem im Versuchszeitraum von 3 m/s auf $10,7 \text{ m/s}$ zunehmenden Ostwind wurden jedoch 37 % der gepumpten Wassermenge von Minden nach Westen verfrachtet. Der Versuch mußte wegen des auf $+0,6^\circ \text{ C}$ abgekühlten Wassers aus der Weser und des im Westen für die Schifffahrt gefährlichen Windstaus (zu niedrige Brückendurchfahrten) vorzeitig abgebrochen werden. Zu diesem Zeitpunkt war der Mittellandkanal auf einer Strecke von 18 km westlich und 13,5 km östlich vom Pumpwerk Minden noch eisfrei, während die mittlere Eisstärke außerhalb dieser 31,5 km lan-

gen eisfreien Strecke bereits 9 cm betrug. Die längere eisfreie Strecke westlich von Minden, in die nur 37 % der gesamten gepumpten Wassermenge einströmte, war durch die in den ersten 1½ Versuchstagen um etwa 3° C im Tagesmittel höheren Lufttemperaturen als östlich von Minden bedingt.

Als letztes Beispiel werden Überlegungen zur Eisbekämpfung bei den Schleusenanlagen des NOK in Brunsbüttel beschrieben.

Der Nord-Ostsee-Kanal ist am Zugang zur Elbe mit 2 Schleusenpaaren ausgestattet, den sogenannten Alten Schleusen und den später gebauten Neuen Schleusen. Die Schleusen dienen dem Schiffsverkehr, der Entwässerung und sind gleichzeitig Landesschutzdeich.

Die Alten Schleusen sind mit Stemmtoren — mit Ebbetoren und Fluttoren — ausgerüstet. Beim Vereisen der Wasserflächen der Schleusenkammern und vor allem der Stemmtornischen der Alten Schleusen wird das Schleusen durch die Alten Schleusen unmöglich.

Die Neuen Schleusen sind mit Schiebetoren ausgerüstet. Durch Vereisen bildet sich in der feingliedrigen Fachwerkkonstruktion auf den Ballasttanks usw. ein Eispanzer. Der Eispanzer bringt große Belastungen der Schiebetore bei Niedrigwasser und starken Auftrieb bei Hochwasser. Eine ständige Änderung der Balastierung der Tore wird erforderlich. Die Neuen Schleusen bleiben dann zwar noch betriebsfähig, jedoch werden die Torfahrten erschwert und verlangsamt.

Durch die Einleitung von Warmwasser in den Binnenhafen Brunsbüttel könnte die Wasserfläche des Nord-Ostsee-Kanals im Bereich Brunsbüttel einschließlich der dort befindlichen Fährbuchten eisfrei gehalten werden. Die von der Elbe in den Binnenhafen driftenden Eisschollen würden nach und nach aufgetaut werden. Angewärmtes Wasser würde in die Schleusen eindringen und eine Verringerung des Eises in den Schleusenkammern und Tornischen bewirken. Besonders bei in der Elbe niedrigeren Wasserständen als im Nord-Ostsee-Kanal würde das angewärmte Wasser durch den Schleusungsvorgang vom Binnenhafen durch die Schleusen in die Vorhäfen strömen und so zumindest die Schleusenkammern und Tornischen eisfrei halten.

Nach überschläglicher Ermittlung kann bei einer Übertemperatur von 8° C (vorgeschriebener Höchstwert) und einer Einleitung in unmittelbarer Nähe der Schleusen bei einem Kühlwasserbedarf von rd. 7 m³/s bis 10 m³/s eine Kanalstrecke von rd. 2000 m Länge eisfrei gehalten werden. Bei Ausdehnung der Warmwasserzone bis zur Fähre Ostermoor, die etwa 2500 m von den Schleusen entfernt liegt, wird der Bedarf angewärmten Kühlwassers etwa bei 15 m³/s liegen. Dieser Bedarf kann aus den Kühlwasserabläufen des Kernkraftwerks Brunsbüttel (rd. 45 m³/s) und der noch anzusiedelnden Großindustrie leicht gedeckt werden.

Das Kernkraftwerk liegt jedoch an der Elbe in einer Entfernung von rd. 5 km von den Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals. Da das Kernkraftwerk den größten Anteil des angewärmten Wassers liefern müßte, muß noch untersucht werden, ob die Kosten einer Einleitung im angemessenen Verhältnis zu dem Nutzen stehen.

Gegen die Einleitung spricht, daß im Raum Brunsbüttel nur selten strenge Eiswinter auftreten. Bei dauernder Einleitung treten Einbußen für die Wassergüte und das Fischleben ein, da dann im Sommer mit Wassertemperaturen im Bereich von 30° C und auch im Winter mit zeitweiligen örtlichen Temperatursteigerungen bis zu rd. 15° C gerechnet werden muß. Somit muß der Betrieb einer den Anforderungen entsprechend unterschiedlich zu beaufschlagenden Zweigleitung in Erwägung gezogen werden.

Zusammenfassend betrachtet ergibt sich aus diesen Beispielen, daß das Kühlwasser der Kraftwerke und Industriebetriebe ein gut geeignetes Mittel zur Eisbekämpfung ist. Der gezielte Einsatz setzt jedoch voraus, daß er fester Bestandteil der Überlegungen über Standort und Betrieb der mit Kühlwasser arbeitenden Werke wird. Dies sollte im Hinblick auf den großen volkswirtschaftlichen Nutzen, der sich aus einer weitgehenden Verringerung der Eisbehinderung auf den Schifffahrtsstraßen ergibt, zu erreichen sein.

Schrifttumsverzeichnis

- [1] CORDES, F.: Eiderdamm Hundeknöll-Vollerwiek. Die Bautechnik 1970 H. 11 S. 361 bis 370, H. 12 S. 397—402; 1971 H. 9 S. 289—294, H. 10 S. 325—344; 1971 H. 11 S. 377 bis 387; 1972 H. 7 S. 219—228
- [2] SCHWARZ, J.: Treibeisdruck auf Pfähle. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover 1970 H. 34 S. 89—193
- [3] WICKERT, G / SCHMAUSSER, G.: Stahlwasserbau. Springer-Verlag Berlin - Heidelberg - New York 1971
- [4] SOKOLOV, J. N.: Meteorologija i gidrologija 1954 No. 44—45