

Treibeisdruck auf Pfähle

Von Joachim Schwarz

Zusammenfassung

Für die Ermittlung des maximalen Eisdruckes auf Bauwerke wurde die Würfeldruckfestigkeit verschiedener Eissorten im Laboratorium untersucht. Die Ergebnisse enthalten den Einfluß der Temperatur, der Verformungsgeschwindigkeit und der Druckrichtung auf die Festigkeit des Eises.

Um diese Laboratoriumsergebnisse für die Bemessung von Bauwerken gegen Eisdruck verwenden zu können, wurde zwischen der Würfeldruckfestigkeit und der Festigkeit des Eises in der Natur eine Beziehung hergestellt, indem der Treibeisdruck auf den Pfahl einer Brücke gemessen wurde, die z. Z die Mündung der Eider überquert.

Die Untersuchung führt zu einer Gleichung, die die Berechnung des Eisdruckes auf Pfähle erlaubt.

Einleitung

In Kälteregeionen ist der Eisdruck für die Bemessung von Wasserbauten entscheidend. Dieser Druck ist jedoch noch weitgehend unbekannt. Daher ist es nicht überraschend, daß in strengen Wintern Wasserbauten durch Eisgang zerstört werden.

In Flußläufen nimmt die Gefahr des Eisdruckes mit der Zeit ab, weil einmal die Eisbildung durch Kühlwasser der Kraftwerke vermindert wird und weil zum anderen in den Tauperioden Eisaufbruch und Eisabfuhr durch Eisbrecherschiffe unterstützt werden, um die gefürchteten Eisversetzungen zu vermeiden.

Im Küstenbereich gibt es dagegen kaum wirtschaftlich vertretbare Möglichkeiten, die Eisdruckkräfte von den Bauwerken abzuwehren, und gerade in diesen Gewässern wird die Frage

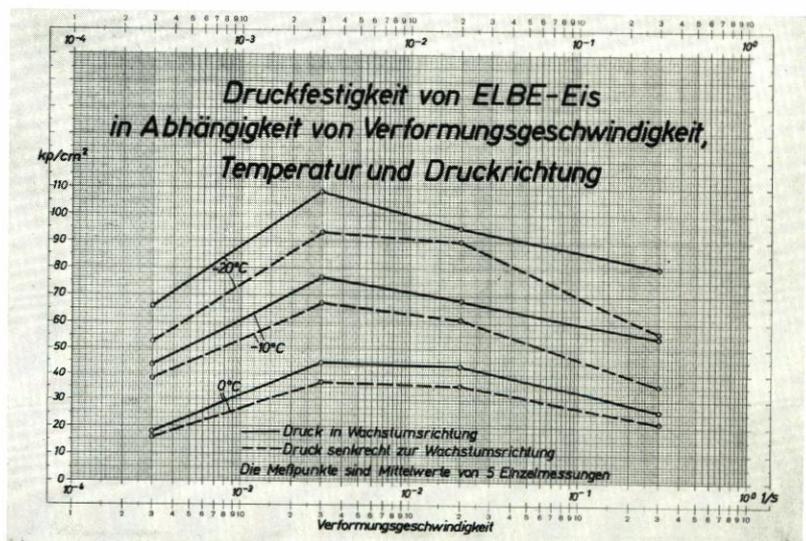
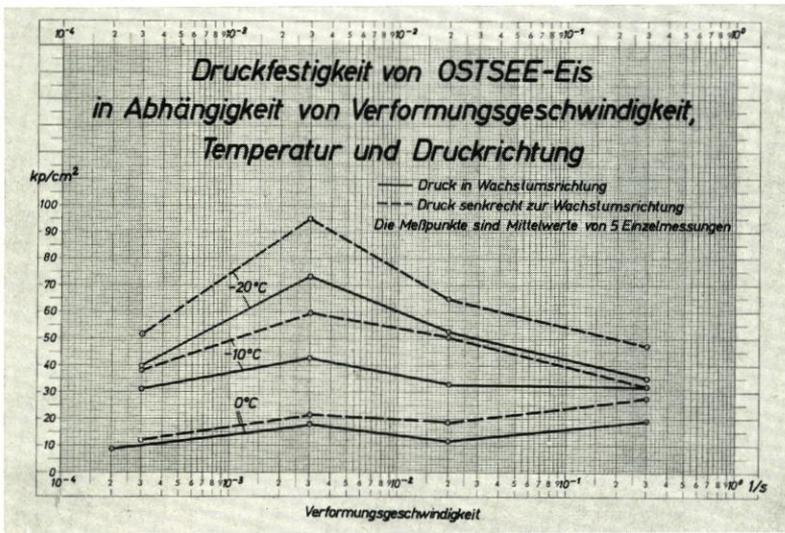


Abb. 1



des Eisdruckes durch den Bau von Umschlaganlagen für Superschiffe, von Leuchttürmen und Brücken zunehmend wichtiger.

Eine intensive Eisforschung begann erst nach dem 2. Weltkrieg, insbesondere in den USA, Kanada und der UdSSR, indem zunächst die grundlegenden Eigenschaften des Eises untersucht wurden (WEEKS, ASSUR, 6). Die Probleme des Eisdruckes auf Bauwerke wurden erst in den letzten 10 Jahren aufgegriffen: KORZHAVIN (3) hat eine Gleichung entwickelt, mit der der Treibeisdruck in Flußläufen in der Frühjahrstauperiode berechnet werden kann. Seine Gleichung stützt sich auf Annahmen, die nur aus Laboratoriumsversuchen abgeleitet sind. PEYTON (4) hat den Eisdruck auf die Beine einer Bohrinself in Cook Inlet, Alaska, gemessen. Seine qualitativen Ergebnisse stimmen mit den Messungen des Verfassers überein (5). Von den Ölgesellschaften sind interessante Versuche mit einem sogenannten „Nußknacker“ durchgeführt worden, deren Ergebnisse vorerst noch geheimgehalten werden (CROASDALE, 2).

Ein allgemeiner Überblick über den gegenwärtigen Stand der Erforschung der Eisdruckkräfte auf Bauwerke wurde von ASSUR (1) auf dem 1. Eiskongreß des IAHR* gegeben, der vom 8. bis 10. September 1970 in Reykjavik stattfand. (Über diesen Eiskongreß wird vom Verfasser an anderer Stelle dieser Ausgabe der „Küste“ berichtet.)

Allgemeine Überlegungen

Die Untersuchung des Verfassers (5) über den Treibeisdruck auf Pfähle gründet sich auf das Axiom, daß der maximale Eisdruck durch die Druckfestigkeit des Eises begrenzt wird. Diese Festigkeit wurde zunächst in Würfeldruckversuchen ermittelt, um die verschiedenen Einflüsse wie Temperatur, Verformungsgeschwindigkeit und Druckrichtung systematisch zu bestimmen. Die hieraus gewonnenen Festigkeiten dürfen aber nicht ohne weiteres für die Bemessung der Bauwerke angewendet werden, weil der Bruchvorgang in der Natur anders verläuft als im Laboratoriumsversuch. So ist z. B. in der Natur der Kontakt zwischen Eis und Bauwerk geringer als in den Versuchen zwischen dem Eiswürfel und den Druckplatten der Prüfmaschine.

*) International Association for Hydraulic Research.

Darüber hinaus haben Form und Größe des Bauwerkes sowie die Dicke des Eises einen Einfluß auf die Festigkeit.

Da die grundsätzlichen Festigkeitseigenschaften trotzdem für die Ermittlung der Eisdruckkräfte angewendet werden sollten, war es erforderlich, durch Eisdruckmessungen in der Natur den notwendigen Zusammenhang zwischen dem Laboratoriumsversuch und den Vorgängen in der Natur herzustellen.

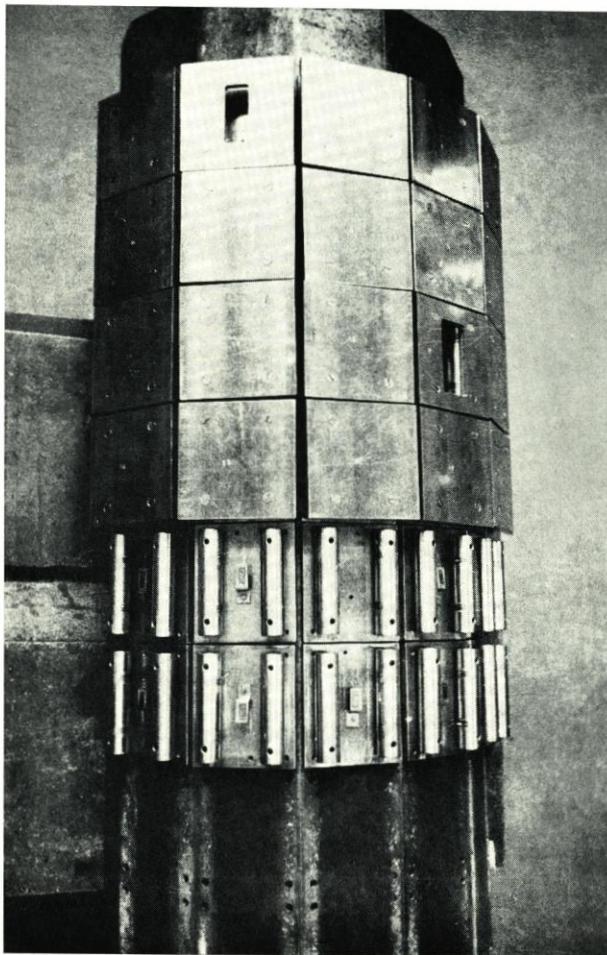


Abb. 3. Eisdruckmeßschild während des Zusammenbaues

Laboratoriumsversuche

Druckfestigkeits-Eigenschaften wurden in Würfeldruckversuchen am Fluß-Eis, Binnensee-Eis und Hafen-Eis (Süßwasser-Eis) sowie am Ostsee-Eis, Nordsee-Eis und Brackwasser-Eis (Salzwasser-Eis) untersucht.

Die Kantenlängen der Eiswürfel betragen 10 cm. Die Versuche wurden bei Temperaturen von 0°, -10° und -20° C jeweils in zwei Druckrichtungen (senkrecht und parallel zur Wachstumsrichtung) durchgeführt. Die Verformungsgeschwindigkeit wurde von $S = 3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s}$ bis $3 \cdot 10^{-1} \frac{1}{s}$ verändert. Zwischen Eiswürfel und Druckplatten wurden Sperrholzplatten gelegt, um Unebenheiten der Würfeloberfläche auszugleichen; dadurch wurde erreicht, daß die Ergebnisse nur bis zu $\pm 5\%$ streuten.

Ergebnisse

1. Durch Erniedrigung der Eistemperatur nimmt die Festigkeit des Süßwasser-Eises um $\alpha = 4,5 \text{ kp/cm}^2 \cdot ^\circ \text{C}$ und des Salzwasser-Eises um $\alpha = 2,5 \text{ kp/cm}^2 \cdot ^\circ \text{C}$

zu.

Diese Festigkeitszunahme ist bis -20° C nahezu linear. Die geringere Festigkeit des Salzwasser-Eises ist auf die Salzlaugeneinschlüsse zurückzuführen, die als Flüssigkeitszellen innerhalb des Eises den wirksamen Druckquerschnitt vermindern.

2. Bei einer Verformungsgeschwindigkeit von $S = 0,003 \frac{1}{s}$ ist die Druckfestigkeit des Eises am größten (Abb. 1, 2). Das Maximum trat bei allen Eissorten bei derselben Verformungsgeschwindigkeit auf, und zwar um so deutlicher, je kälter das Eis ist. Die Verformungsgeschwindigkeit von $S = 0,003 \frac{1}{s}$ entspricht einer Treibgeschwindigkeit des Eises in der Natur von nur wenigen cm/s. Das bedeutet, daß der größte Eisdruck in der Natur kurz vor dem Stillstand des Eisfeldes zu erwarten ist.
3. Wenn der Druck parallel zur Wachstumsrichtung wirkt, ist die Festigkeit des Süßwasser-Eises um rd. 20 % größer als bei senkrechter Zuordnung von Druck- und Wachstumsrichtung (Abb. 1). Beim Salzwasser-Eis sind diese Verhältnisse genau umgekehrt (Abb. 2).
4. Zwischen dem Luftgehalt im Eis und der Festigkeit besteht ein nahezu linearer Zusammenhang.

Naturmessungen

Der Eisdruck und damit auch die Eisfestigkeit wurde in der Natur in den Wintern 1967/68 und 1968/69 an einem Pfahl der Brücke zur Baustelleninsel des Eidersperrwerkes gemessen.

Vor der Eidermündung liegen, wie an der gesamten deutschen Nordseeküste, ausgedehnte Wattflächen, auf denen sich schnell große Eisfelder bilden können. Diese Eisflächen schwimmen nur bei hohen Wasserständen (Springtiden oder bei entsprechendem Windstau) auf. Wenn sie mit der Tideströmung gegen die Brücke treiben, werden die Eisschollen von den Brückenpfählen aufgeschnitten. Hierbei entsteht ein Spannungszustand, in dem das Eis am festesten ist.

Das Meßgerät zur Bestimmung des Eisdruckes bestand aus einem Schild mit 50 Druckmeßdosen (Abb. 3), die zu je 5 in einer Höhe halb um den Pfahl herum angebracht waren.

Die Druckfläche der Meßdosen betrug 15×15 cm. In einigen der 225 cm^2 großen Druckmeßdosen waren zusätzlich kleinere mit Druckflächen von 25 cm^2 und 50 cm^2 angeordnet, um die Abhängigkeit der Eisfestigkeit von der Größe der Druckfläche zu ermitteln.



Abb. 4. Meßstelle an der Brücke zur Bauinsel des Eidersperrwerkes

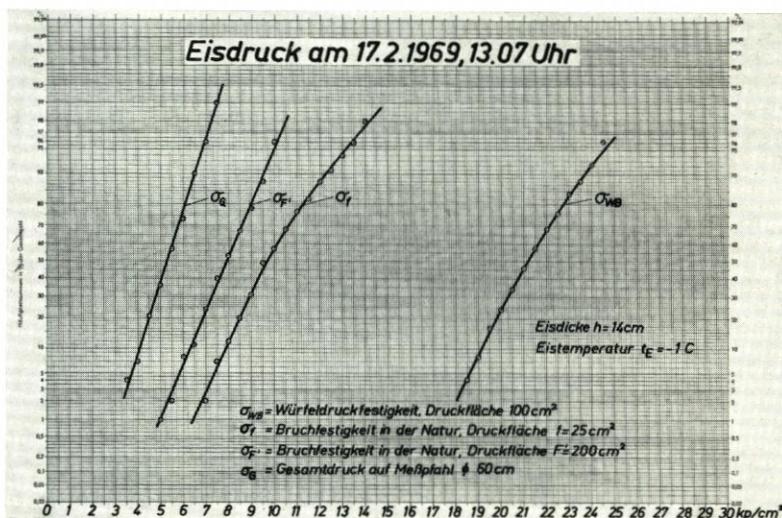
Das Eisdruckmeßschild war etwa in Brückenmitte auf der Seeseite eines Brückenpfahles angebracht (Abb. 4).

Ein besonderes Problem stellte die Isolierung des elektronischen Teiles der Druckmeßdosen gegen Salzwasser dar; es wurde mit BOSTIK-NEOSEAL und SILIKON-KAUTSCHUK gelöst.

Ergebnisse

Auf Wahrscheinlichkeitspapier (Abb. 5) wurde der auf den Meßpfahl wirkende Eisdruck, bezogen auf die verschiedenen Druckflächen ($\sigma_f \rightarrow 25 \text{ cm}^2$, $\sigma_F \rightarrow 200 \text{ cm}^2$, $\sigma_G \rightarrow 840 \text{ cm}^2 \rightarrow$ die gesamte Pfahlbreite von 60 cm bei einer Eisdicke von 14 cm), der Würfeldruckfestigkeit desselben Eises gegenübergestellt:

Abb. 5
Darstellung der Bruchfestigkeit des Eises am Brückenpfahl (σ_G , σ_F , σ_f) und im Würfeldruckversuch (σ_{WB}) auf Wahrscheinlichkeitspapier



1. Wenn der Eisdruck auf einer Fläche von $F' = 200 \text{ cm}^2$ wirkt, ist die Druckfestigkeit des Eises in der Natur nur halb so groß wie die Würfeldruckfestigkeit:

$$\frac{\sigma_{F'99}}{\sigma_{WB50}} = \alpha_{F'} = 0,5.$$

Diese Verminderung der Würfeldruckfestigkeit ist auf den unvollständigen Kontakt zwischen Eis und Bauwerk zurückzuführen. Daher wird α Kontaktbeiwert genannt, obwohl hierin auch der Einfluß der unterschiedlichen Bruchspannungszustände zwischen dem Würfeldruckversuch und dem Druckvorgang in der Natur enthalten ist.

2. Wenn die Druckfläche nur $f = 25 \text{ cm}^2$ groß ist, nimmt der Kontaktbeiwert auf $\alpha_f = 0,56$ zu.
3. Weil nur auf 1 oder 2 der 5 nebeneinanderliegenden Druckmeßdosen Druckspitzen vorkommen (Abb. 6) – die anderen sind weitgehend entlastet –, ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{\sigma_G}{\sigma_F} = 0,66$$

ein zweiter Abminderungsfaktor.

σ_G ist der mittlere Eisdruck, der auf die gesamte quer zur Treibrichtung projizierte Druckfläche wirkt. 0,66 berücksichtigt insbesondere die Form des Bauwerkes, aber auch die Zunahme der Druckfläche von 200 cm^2 auf 840 cm^2 .

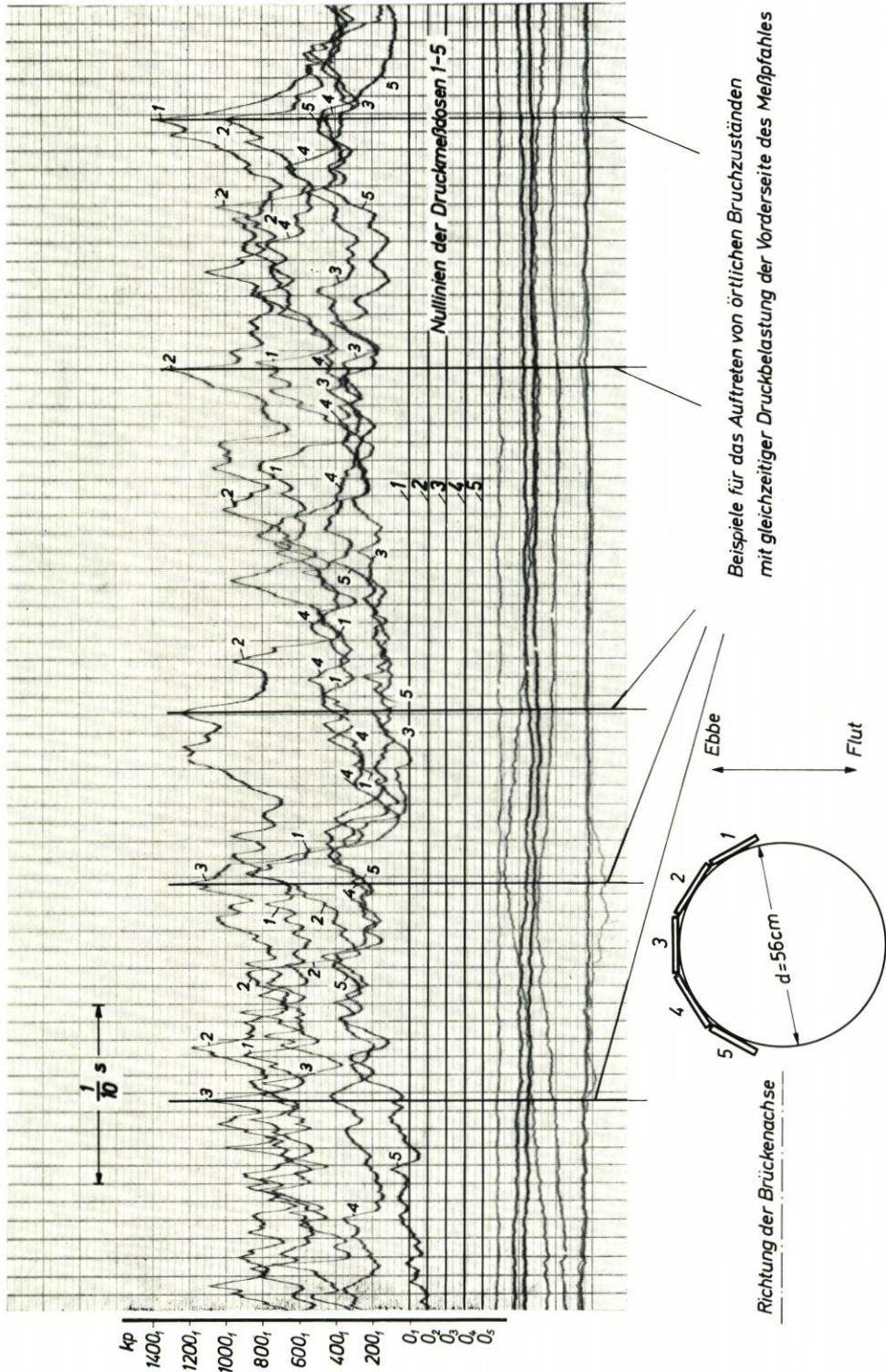


Abb. 6. Druckverlauf auf 5 höhengleichen Druckmessfösen

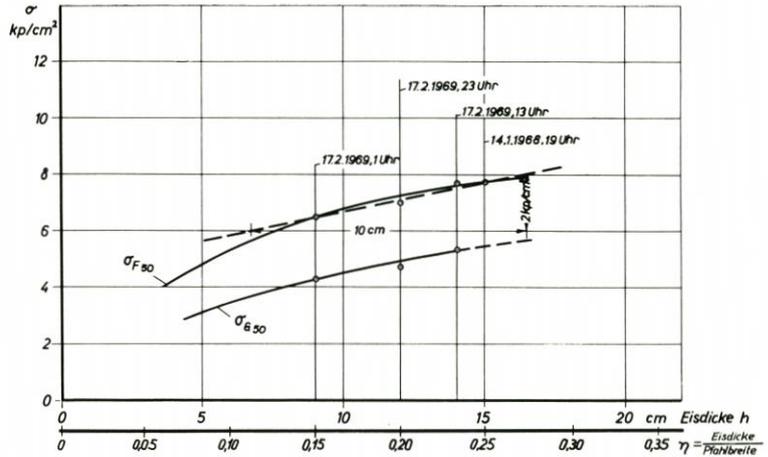
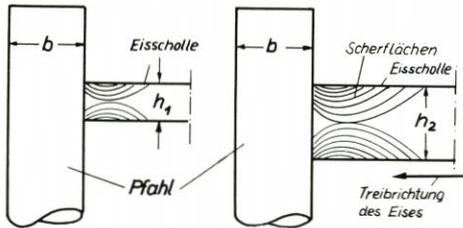


Abb. 7.
Eisdruck in Abhängigkeit von der Eisdicke und dem Verhältnis Eisdicke zu Pfahlbreite

4. Aus Messungen mit verschiedenen Eisdicken ergibt sich, daß die Festigkeit des Eises zunimmt, wenn das Verhältnis Eisdicke zur Pfahlbreite größer wird (Abb. 7). Dies wird durch den zunehmend dreidimensionalen Bruchspannungszustand hervorgerufen und kann u. a. folgendermaßen erklärt werden:

Wenn das Eis dicker wird, nimmt die Zahl der Scherflächen (s. Skizze) über die Höhe linear zu. Weil aber außerdem die Scherflächen länger werden, wird das Eis mit zunehmender Eisdicke fester.

Skizze:



5. Der Druck von brüchigem Eis mit geringer Würfeldruckfestigkeit war nahezu ebenso groß wie der Druck von festerem (kälterem) Eis, weil zwischen dem weichen Eis und dem Bauwerk ein enger Kontakt besteht. Es wird angenommen, daß der Kontaktbeiwert mit der Temperatur abnimmt.

Aus den Ergebnissen der Laboratoriumsversuche und den Eisdruckmessungen in der Natur wurde die folgende Gleichung entwickelt, mit der der Treibeisdruck auf Pfähle ermittelt werden kann.

$$P = h \cdot b [0,5 \cdot 0,66 (\sigma_{WB} [0^{\circ} C] + 0,35 \alpha [t_L - t_W]) + 12,5 (\eta - 0,15)]$$

0,5 = Kontaktbeiwert

0,66 = Formbeiwert (Pfahl- \varnothing 60 cm)

$\sigma_{WB} (0^{\circ} C)$ = Würfeldruckfestigkeit des Eises bei $0^{\circ} C$ und einer Verformungsgeschwindigkeit von $S = 0,003 \frac{1}{s}$

$0,35 \alpha (t_L - t_W)$ = Temperatureinfluß

α = Temperaturfaktor

t_L = Lufttemperatur während der letzten 24 Stunden

t_W = Wassertemperatur

0,35 = Faktor zur Ermittlung der mittleren Temperatur im Eis (KORZHAVIN, 3)

12,5 ($\eta - 0,15$) = Einfluß der Eisdicke im Verhältnis zur Pfahlbreite

η = Eisdicke : Pfahlbreite

h = Eisdicke
b = Pfahlbreite

Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um diese Gleichung auch zur Berechnung des Eisdruckes auf Bauwerke großen Ausmaßes anwenden zu können.

Schrifttum

1. ASSUR, A.: Forces Exerted by Ice on Marine Structures. Proceeding of 1. Ice Symposium of IAHR in Reykjavik, 8.-10. September 1970; will be published in sommer 1971.
2. CROASDALE, K. R.: The Nutcracker-Ice-Strength-Tester and its Operation in the Beaufort Sea. Preprints of papers of the 1. Ice Symposium of IAHR in Reykjavik, 8.-10. September 1970; Reykjavik Juli 1970.
3. KORZHAVIN, K. N.: The Action of Ice on Engineering Structures. Publication of the Siberian Department of the Academy of Science of USSR, Novosibirsk, 1962 (in Russian).
4. PEYTON, H. R.: Sea Ice Forces. Ice Pressure against Structures. Proceedings of Conference at Laval University Quebec, 1966, Ottawa 1968.
5. SCHWARZ, J.: Treibeisdruck auf Pfähle. Mitt. Franzius-Inst. H. 34 (1970).
6. WEEKS, W., ASSUR, A.: The Mechanical Properties of Sea Ice. Ice Pressure against Structures. Proceedings of Conference at Laval University Quebec, November 1966, Ottawa 1968.