

Eisdruck auf Kanalbrücken

DIPL.-ING. MATTHIAS ALEXY, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, AUSSENSTELLE BERLIN

1 Einleitung

Eisdruckkräfte stellen bei Wasserbauten häufig den ungünstigsten Lastfall dar. Trotz zahlreicher Forschungsarbeiten zu dieser Problematik [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] u.a. bestehen nach wie vor große Unsicherheiten beim Ansatz dieser Eisbelastungen. Der projektierende Ingenieur muß deshalb meist auf wenig fundierte, oft stark voneinander abweichende Lastannahmen aus der Literatur zurückgreifen. Die Folge sind überdimensionierte Bauwerke oder teilweise erhebliche Zerstörungen.

einfachte Darstellung der Wirkungsweise des thermischen Eisdruckes auf eine Kanalbrücke.

Eis verhält sich physikalisch wie jeder andere feste Körper, das heißt er zieht sich bei Abkühlung zusammen und dehnt sich bei Erwärmung aus. Damit besteht die Gefahr, daß sich die nach einer längeren Frostperiode gebildete, relativ starke Eisdecke durch eine plötzliche Erwärmung (intensive Sonneneinstrahlung) ausdehnt. In Abhängigkeit von der Elastizität der Brückenkonstruktion werden dadurch mehr oder weniger große horizontale Druckkräfte auf die Trogwände wirksam.

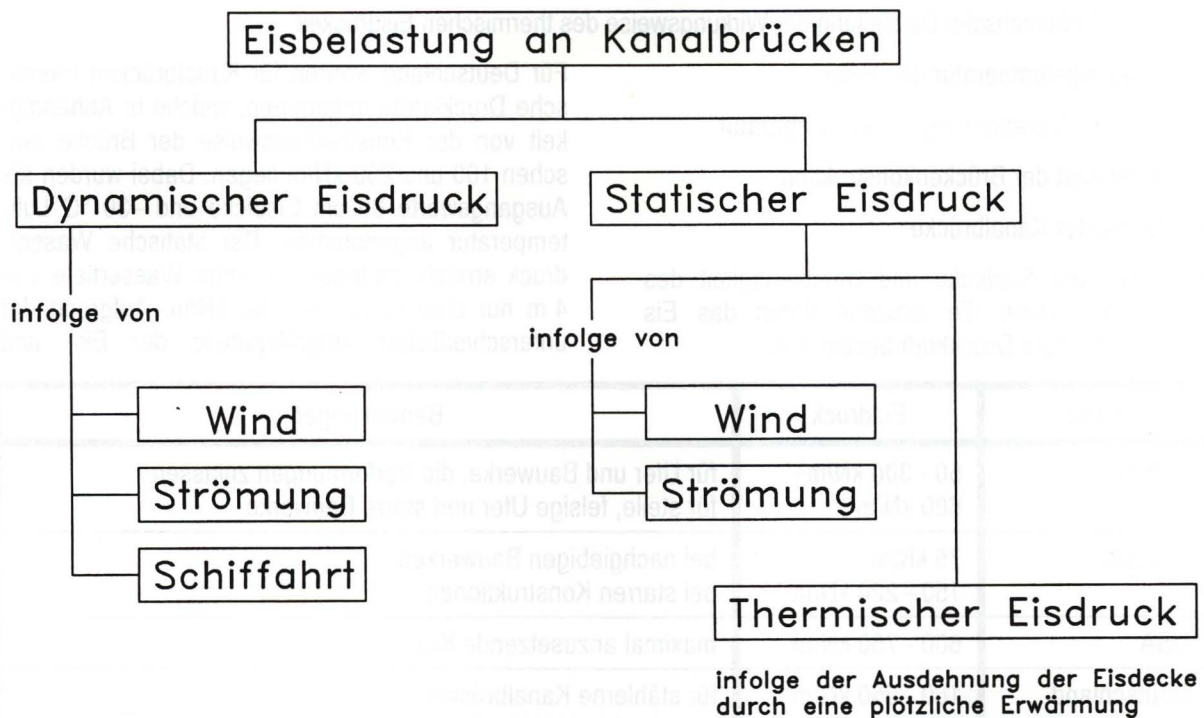


Bild 1: Mögliche Eisbelastungen an Kanalbrücken

Auch bei frei gespannten Kanalbrücken stellt die Wirkung des Eises ein erhebliches Problem dar. Dabei wird zwischen dem statischen und dem dynamischen Eisdruck unterschieden (Bild 1).

Der durch Wind und Strömung verursachte dynamische und statische Eisdruck spielt in einem Kanal nur eine untergeordnete Rolle. Auch der durch die Schiffahrt verursachte dynamische Eisdruck (auch Eisstoß genannt) stellt keinen maßgebenden Lastfall dar. Von entscheidender Bedeutung ist damit der thermische Eisdruck. Bild 2 zeigt eine ver-

Eine wichtige Voraussetzung für das Auftreten großer Eisdruckkräfte ist nach ROSE [8] neben einer vorausgegangenen längeren Frostperiode und einer niedrigen Ausgangstemperatur des Eises ein relativ hoher Sonnenstand. Diese Bedingungen sind in der Regel am Ende eines strengen Winters im Zeitraum von Ende Februar bis Mitte März gegeben.

Die Größe der auf die Brückenkonstruktion wirkenden Kräfte wird im wesentlichen durch folgende Einflußfaktoren bestimmt:

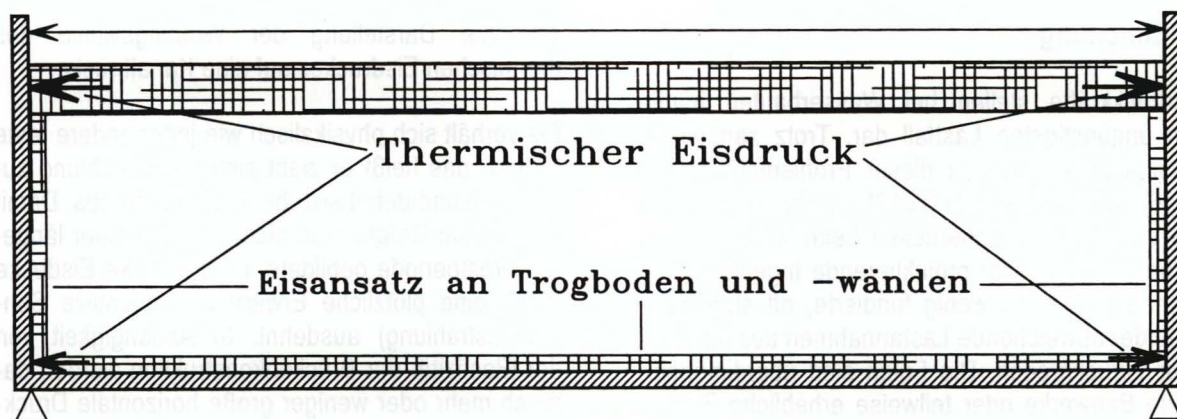


Bild 2: Schematische Darstellung der Wirkungsweise des thermischen Eisdruckes

- Ausgangstemperatur des Eises
- zeitliche Veränderung der Eistemperatur
- Elastizität der Brückenkonstruktion
- Breite der Kanalbrücke
- Dicke der Eisdecke und Bruchfestigkeit des Eises, welche die maximal durch das Eis übertragbare Druckkraft bestimmen

Für Deutschland werden für Kanalbrücken thermische Druckkräfte angegeben, welche in Abhängigkeit von der Konstruktionsweise der Brücke zwischen 160 und 250 kN/m liegen. Dabei wurden als Ausgangswerte 80 cm Eisdicke und $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Lufttemperatur angenommen. Der statische Wasserdruck erreicht dagegen bei einer Wassertiefe von 4 m nur eine Größe von 80 kN/m. Aufgrund der unterschiedlichen Angriffspunkte der Eis- und

Land	Eisdruck	Bemerkungen
Rußland	50 - 300 kN/m ² 600 kN/m ²	für Ufer und Bauwerke, die Verformungen zulassen für steile, felsige Ufer und starre Bauwerke
Kanada	75 kN/m 150 - 220 kN/m	bei nachgiebigen Bauwerken bei starren Konstruktionen
USA	600 - 750 kN/m	maximal anzusetzende Kraft
Deutschland	160 - 250 kN/m	für stählerne Kanalbrücken

Tabelle 1: In verschiedenen Ländern empfohlene Werte für Lastannahmen aus thermischem Eisdruck

Dabei ist zu beachten, daß die Bruchfestigkeit des Eises immer von der Eistemperatur, vom Gas- und Salzgehalt sowie anderen Inhaltsstoffen des Eises, der Druckrichtung im Vergleich zur Wachstumsrichtung der Eiskristalle und der Belastungs- und Verformungsgeschwindigkeit abhängt.

Aufgrund der vielfältigen Einflußfaktoren, die oft entweder gar nicht oder nur näherungsweise zu bestimmen sind, schwanken die in der Literatur empfohlenen Lastannahmen erheblich. So liegen die in drei Ländern mit ähnlichen klimatischen Bedingungen (Rußland, Kanada, USA) empfohlenen Werte zwischen 50 und 750 kN/m (Tabelle 1).

Wasserdruckkräfte ergibt sich für die aus den Belastungsgrößen resultierenden Eckmomente eine noch größere Differenz:

- Eckmoment aus Wasserdruck: 106 kNm/m
- Eckmoment aus Eisdruck: 640 - 1000 kNm/m

Eine Bemessung des Trogquerschnittes auf der Grundlage dieser sehr großen Kräfte und Momente würde zu praktisch nicht mehr realisierbaren Brückenkonstruktionen führen. Deshalb ist es unbedingt erforderlich, die Wirkung des thermischen Eisdruckes auszuschalten bzw. wesentlich zu reduzieren.

2 Maßnahmen zur Eisabwehr

2.1 Allgemeines

In einer Studie [2] wurden 1982 folgende Maßnahmen zur Eisabwehr hinsichtlich ihrer Eignung für die praktische Anwendung untersucht:

Beheizung der Kontaktflächen: Damit soll ein Anfrieren der Eisdecke an der Trogwand und somit die Kraftübertragung verhindert werden.

Aufsägen der Eisdecke: Eine sichere, für die Ausführenden aber nicht ganz ungefährliche Methode, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf eventuell mehrmals zu wiederholen ist. Bleibt immer als letzte Möglichkeit, wenn andere Methoden versagt haben.

Entleeren der Kanalbrücke nach Eintritt der Schifffahrtssperre: Diese Maßnahme setzt eine sichere Funktion der Sperrtore auch unter winterlichen Bedingungen voraus.

Einbau einer Luftsprudeleinrichtung: In die am Trogboden installierte Rohrleitungen wird Luft gedrückt, so daß das wärmere Wasser an die Oberfläche gelangt und die Bildung einer geschlossenen Eisdecke verhindert. Wegen der allseitigen Auskühlung einer Kanalbrücke ist der Nachweis zu führen, daß der Wärmeinhalt der Trogwassermenge ausreicht, um eine eisfreie Rinne auch über einen längeren Zeitraum zu erhalten.

Einbau hochelastischer Bauglieder: Hierbei wird die Ausdehnung der Eisdecke durch eine seitlich angebrachte Gummimembran aufgenommen, so daß nur sehr geringe horizontale Kräfte auf die Trogwände wirken.

Aufbringen dunkler, energieabsorbierender Stoffe: Damit soll ein schnelleres Abschmelzen der Eisdecke bei Sonneneinstrahlung bewirkt werden. Unter extremen Witterungsbedingungen ist die Wirksamkeit dieser Maßnahme allerdings sehr zweifelhaft.

Warmwassereinleitung: Ein Aufheizen des Wassers für diesen Zweck kommt sicher nicht in Frage, so daß hier Abfallenergie, z.B. aus Kraftwerken, genutzt werden könnte. Damit ist der Einsatz dieser Methode immer standortabhängig.

Unter der Berücksichtigung folgender Gebrauchswerte

- Sicherheit des Wirkprinzips 30 %
- Energiebedarf im Betrieb 15 %
- Personalbedarf im Betrieb 15 %
- Möglichkeit der Realisierung 15 %
- notwendige Forschungsarbeiten 5 %
- Reparaturbedingungen 8%
- Kombinationsfähigkeit mit anderen Varianten 2%

wurde aus den hier genannten Möglichkeiten zur Eisabwehr an einer Kanalbrücke mit Hilfe einer Gebrauchswert-Kosten-Analyse [1] der Einbau hochelastischer Bauglieder in Form einer an der Trogwand befestigten Gummimembran (Förderband) als günstigste Maßnahme zur Vermeidung bzw. deutlichen Verminderung der thermischen Eisdruckkräfte ermittelt.

2.2 Einbau hochelastischer Bauglieder

Bild 3 zeigt die prinzipielle Wirkung des thermischen Eisdruckes beim Einbau einer Gummimembran. Die Längenänderung der Eisdecke wird dabei durch ein an der Trogwand befestigtes Förderbandgummi aufgenommen. Deshalb wird die Größe der auftretenden horizontalen Kräfte nicht mehr durch die Steifigkeit der Brückenkonstruktion, sondern durch die Elastizität der Gummimembran bestimmt.

Neben der im wesentlichen von der Temperaturdifferenz und der Kanalbrückenbreite abhängenden Ausdehnung der Eisdecke werden die Druckkräfte von folgenden Faktoren bestimmt:

- Elastizitätsmodul des Gummimaterials
- Einspannlänge der Gummipatte (L)
- Dicke der Gummipatte (D)
- Breite der Gummipatte (B) = Länge der Kanalbrücke
- Dicke der Eisdecke (d)
- Angriffspunkt der Eisdruckkräfte
- Vorspannung der Gummipatte H_v

Bei der konstruktiven Gestaltung ist darauf zu achten, daß eine ungehinderte Ausdehnung der Eisdecke gewährleistet ist. Dazu ist es erforderlich, in bestimmten Abständen Entleerungsstützen anzuordnen (Bild 3). Dadurch kann das in den Raum zwischen Gummi und Trogwand eventuell eindringende Wasser, welches in gefrorenem Zustand die

Wirkung der elastischen Membran einschränkt oder sogar ausschaltet, abgeführt werden.

3 Modelluntersuchungen

Die Zielstellung der Modelluntersuchungen umfaßte im Wesentlichen zwei Punkte:

1. Die experimentelle Bestimmung der Druckkräfte in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen.

- Ausdehnung des Eises
- Angriffspunkt der Eisdruckkräfte
- Dicke der Eisdecke
- Einspannlänge des Gummis

Außerdem wurde der Elastizitätsmodul des Gummimaterials festgestellt und Untersuchungen zur Zeitabhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des Gummimaterials sowie zum Einfluß der Gummibreite (= Kanalbrückenlänge) auf die Größe der Druckkräfte durchgeführt.

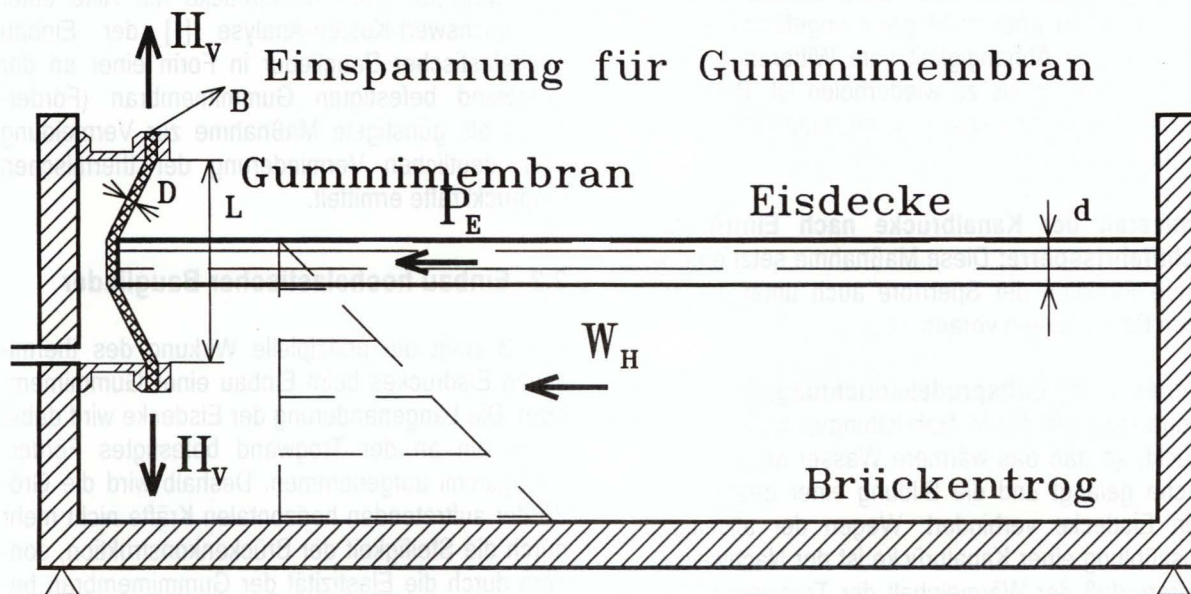


Bild 3: Schematische Darstellung der Wirkung des thermischen Eisdrukkes beim Einbau einer Gummimembran

2. Die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Eisdruckkräfte auf der Grundlage der Versuchsergebnisse.

Die Untersuchungen erfolgten an einem 2 m breiten Labormodell im Maßstab 1 : 1 im „Trockenen“. Dabei wurde ein durch zwei Spindeln getriebener Druckbalken (die „Eisdecke“) gegen die in einen frei hängenden Rahmen eingespannten Gummipplatten gedrückt. Der ausgeübte Druck konnte durch vier an einem Betonwiderlager befestigte Kraftmeßdosen erfaßt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchstechnik ist in [1] zu finden.

Bei den Versuchen kamen ein 12 mm dicker und 1400 mm breiter Gummi-Textilfördergurt mit zwei textilen Einlagen und eine 3 mm starke Gummimatte mit einer textilen Einlage zum Einsatz.

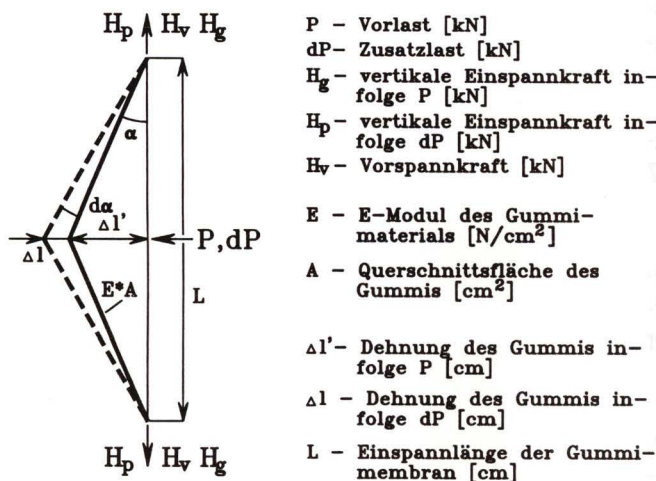
Das Untersuchungsprogramm sah die Messung der Druckkräfte unter Variation folgender Parameter vor:

4 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen der durchgeführten Modellversuche wurden insgesamt drei Lastfälle untersucht:

- mittiger Kraftangriff ohne Berücksichtigung der Eisdicke
- mittiger Kraftangriff mit Berücksichtigung der Eisdicke
- außermittiger Kraftangriff

Bild 4 zeigt eine Prinzipskizze mit den entsprechenden Bezeichnungen für den mittigen Kraftangriff ohne Berücksichtigung der Eisdicke als einfachsten Lastfall.



Berechnungsverfahren:

1. Ermittlung der Ausdehnung der Eisdecke:

$$\Delta l = \alpha_t \cdot l \cdot \Delta T$$

2. Berechnung einer Anfangsdruckkraft P_0 :

$$P_0 = \frac{\Delta l}{L} \left[\frac{192 \cdot E \cdot I}{L^3} \right] + 4 \cdot H_v$$

3. Schrittweise Berechnung der Druckkräfte:

$$dP = \frac{4 \cdot \frac{E \cdot A \cdot \Delta l'}{G \cdot L} + P}{\frac{\Delta l'}{\Delta l} - 1} \quad \text{mit } G = \frac{L^2}{4 \cdot \Delta l^2} \cdot \frac{1}{\cos^3 \alpha}$$

4. Berücksichtigung des Breitereinflusses:

$$k = \frac{\Delta l / L}{(L/B)^{0.089}}$$

Bild 4: Lastfall mittiger Kraftangriff ohne Berücksichtigung der Eisdecke

Wegen der großen Elastizität des Gummis treten starke Verformungen sowohl durch die Biegung der Gummipatte als auch durch die Längsdehnung des Gummis auf. Deshalb muß die Behandlung des Spannungsproblems nach der Theorie II. Ordnung erfolgen, d.h. der Einfluß der Verformungen auf den Schnittkraftzustand ist zu berücksichtigen. Außerdem wird durch die Einspannung des inkompressiblen Gummis die mit der Dehnung des Gummis einhergehende Verkürzung in Querrichtung behindert. Die so entstehenden Querkräfte schränken die Dehnung ein bzw. führen bei gleichen Verformungen zu größeren Kräften. Der Einfluß der Gummibreite wurde über einen mit Hilfe der Modellversuche bestimmten Beiwert berücksichtigt.

In Bild 4 sind die zur Bestimmung der Druckkräfte erforderlichen Berechnungsschritte für den Lastfall eines mittigen Kraftangriffs prinzipiell dargestellt. Ausführliche Informationen zu dem Berechnungsverfahren können [1] entnommen werden.

Die bei den Versuchen gemessenen Druckkräfte lagen bei ca. 4 kN/m und sind im Vergleich zu den sonst angenommenen Belastungen aus thermischem Eisdruck in der Größenordnung von 160 bis 250 kN/m sehr viel geringer. Dabei wurde das 12 mm starke Förderbandgummi mit einer Einspannlänge L von 123 cm verwendet. Die Ausdehnung der 30 cm starken Eisdecke ist mit 6 cm angesetzt worden, was bei einer Brückenbreite von 34 m eine Temperaturdifferenz von 32° voraussetzt. Damit betragen die Eisdruckkräfte auch nur

noch einen Bruchteil des Wasserdruckes, der bei 4 m Wassertiefe 80 kN/m erreicht.

5 Schlußfolgerungen

Der Einbau hochelastischer Bauglieder an Kanalbrücken ist eine mögliche Maßnahme zur wesentlichen Verminderung der sich aus dem thermischen Eisdruck ergebenden Belastungen. Die bei den Untersuchungen am Labormodell gemessenen Kräfte waren mit 4 kN/m wesentlich geringer als die in der Literatur angegebenen Werte, die in Abhängigkeit von der Elastizität der Kanalbrücke zwischen 160 und 250 kN/m liegen.

6 Literatur

- [1] ALEXI, M.: Eisdruck auf Kanalbrücken. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, 53 (1988)
- [2] STRAUPE, CH.: Lastannahmen aus Eisdruck bei stählernen Kanalbrücken. Studie, Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin 1982
- [3] LAUCHT, H.: Von den Eigenschaften des Eises. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TH Hannover, Heft 23 (1963)
- [4] SCHWARZ, I.: Treibeisdruck auf Pfähle. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TU Hannover Heft 34 (1970)

- [5] SCHWARZ, I.: Über die physikalischen Vorgänge beim Eisdruck. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der TU Hannover, Heft 31 (1968)
- [6] PLAGEMANN, W.: Zum Ansatz von Eisbelastungen. Bauplanung - Bautechnik, Berlin, Heft 7 (1969)
- [7] KORZHAVIN, K.N.: Vozdejstie L'da na inzhernye sooruzhenija. Verlag der sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Novosibirsk 1962
- [8] ROYEN, N.: Ice Pressure with Temperature. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire, 1955
- [9] ROSE, E.: Thurst exerted by expanding ice sheet. Proc. Amer. Soc. Of Civil Engineers. (1946) Vol. 72, (1947) Vol. 73
- [10] MONFORE, G.E.: Ice Pressure against Dams. American Society of Civil Engineers. Vol. 78 Report Nr. 162, 1952
- [11] ASSUR, A.: Maximum Lateral Pressure exerted by Ice-Sheets. Proceedings of International Association for Hydraulic Research. 8th Congress, Vol. III Montreal, 1959
- [12] DROUIN, M.: Static Ice Forces on Extended Structures, Ice Pressure against Structures. Proceedings of Conference. Laval University Quebec, Nov. 1966, Ottawa 1968
- [13] Sonderforschungsbereich 64 der Universität Stuttgart: Weitgespannte Flächentragwerke. Mitteilungen 12/1973, Stuttgart 1973