



**Gesellschaft für Grundbau  
und Umwelttechnik mbH**

**Braunschweig**

Telefon +49 (0)531 / 312895

Telefax +49 (0)531 / 313074

www.ggu.de

post-bs@ggu.de

Baugrund

Grundwasser

Umwelttechnik / Altlasten

Damm- und Deichbau

Straßen- und Erdbau

Spezialtiefbau

Deponiebau

Kunststofftechnik

Software-Entwicklung

**Eisversatz und Eisdruck auf Deiche**

Geotechnische Untersuchungen

Teil 1: Literaturstudie

Baugrunderkundung

Feldmesstechnik

Prüflabore für Boden

Prüflabor für Kunststoff

Inspektionsstelle

Braunschweig

Magdeburg

Öhringen

Schwerin

**Bericht:**

10281.1/2019

**Auftraggeber:**

Artlenburger Deichverband

Braunschweig, 08.02.2019

Beratende Ingenieure VBI,  
BDB, DWA, DGGT, ITVA, BWK  
Sachverständige für  
Erd- und Grundbau  
Vereidigte Sachverständige

Amtsgericht Braunschweig  
HRB 9354

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. Johann Buß,

Dr.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing.

Peter Grubert, M.Sc.,

Dr.-Ing. Carl Stoewahse

Dipl.-Ing. Birk Kröber

Dipl.-Ing. Axel Seilkopf

## Inhalt

1	Einleitung .....	4
2	Unterlagen .....	4
3	Baumaßnahme.....	5
4	Eisdruck auf Bauwerke.....	7
5	Physikalische und mechanische Eigenschaften von Eis.....	7
5.1	Allgemeines .....	7
5.2	Dichte des Eises .....	8
5.3	Elastizitätsmodul des Eises .....	9
5.4	Festigkeit des Eises .....	10
5.4.1	Kovacs (1996).....	11
5.4.2	Hager (2001).....	12
5.4.3	Germanischer Lloyd ((2007).....	13
5.4.4	EAK 2002 (2007).....	14
5.4.5	Bureau Veritas (2010) .....	16
5.4.6	EAU (2012) .....	18
5.4.7	Fellin (2013) .....	19
5.4.8	Weitere Literaturstellen .....	20
5.5	Zusammenfassung.....	20
6	Belastung von Ufern und Bauwerken durch Eis.....	20
6.1	Shore Protection Manual (1987).....	20
6.2	DIN 19704-1 (1998) .....	21
6.3	Hager (2001).....	21
6.4	Ice Engineering (2002) .....	22
6.5	Germanischer Lloyd (2007) .....	24
6.6	Carstensen (2008) .....	28
6.7	Bureau Veritas (2010) .....	31
6.8	EAU (2012) .....	32
6.9	HPA, Richtlinie (2013).....	34
6.10	Lattermann (2014).....	34
6.11	Weitere Literaturstellen: .....	37
7	Zusammenfassung.....	38
8	Literatur.....	39

## Abbildungen

Abbildung 1:	Schäden am Deich durch Eisschollen, Hochwasser am 15.01.2003 (Foto Artlenburger Deichverband) .....	5
Abbildung 2:	Aufgeschobene Eisschollen bei Radegast, Hochwasser am 15.01.2003 (Foto Artlenburger Deichverband) .....	6
Abbildung 3:	Dichtentwicklung von Eis und Wasser von BARJENBRUCH aus [3] ..	8
Abbildung 4:	Entwicklung der Druckfestigkeit $\sigma_c$ und der Zugfestigkeit $\sigma_t$ in Abhängigkeit des Salzgehalts $S_B$ [21].....	14
Abbildung 5:	Entwicklung der Biegefestigkeit $\sigma_f$ in Abhängigkeit des Salzgehalts $S_B$ [21].....	14
Abbildung 6:	Würfeldruckfestigkeit von Elbe- und Ostseeeis aus [6] .....	15
Abbildung 7:	Eisdruckansatz bei vertikaler und geneigter Wand, nach [5] .....	21
Abbildung 8:	Kräfte einer Eisscholle auf eine geböschte Oberfläche, nach [9] .....	23
Abbildung 9:	Geometrische Parameter, Eis auf geneigten Strukturen, nach [21] ..	25
Abbildung 10:	Geometrische Parameter, Eis auf geneigten Strukturen mit Anhäufung von Trümmereis, nach [21].....	25
Abbildung 11:	Kräfteansatz und Interaktionsmechanismus zwischen Eis und Böschung, [4] .....	29
Abbildung 12:	Beiwerte $C^I$ und $C^{II}$ [4] .....	30
Abbildung 13:	Spannungsverteilung in einer am Ufer angefrorenen Eisdecke, nach [4].....	31
Abbildung 14:	Kräfte einer Eisscholle auf eine geböschte Oberfläche, nach [13] ....	31

## Tabellen

Tabelle 1:	Werte des E-Moduls von Eis, Versuchsergebnisse nach [20].....	10
Tabelle 2:	Festigkeiten von Eis nahe dem Gefrierpunkt HAGER [14].....	12
Tabelle 3:	Empfohlene Festigkeiten des Eises nach [10] bzw. HAGER [14] .....	12
Tabelle 4:	Festigkeiten von Frischwasser- und Meereis in $[10^2 \text{ kN/m}^2]$ , in EAK [9] .....	16
Tabelle 5:	Zugfestigkeit von Seeis, nach [16].....	17
Tabelle 6:	Salinität des Wassers nach [10] .....	18
Tabelle 7:	Empfohlene Werte für $C_1$ und $C_2$ , nach [7] .....	28
Tabelle 8:	gemessene maximale Eisdicken als Richtwerte für die Bemessung nach [10] .....	33
Tabelle 9:	Eisfestigkeiten $\sigma_z$ und $\sigma_0$ , Beiwert $k_E$ aus [18] .....	37

## **1 Einleitung**

Der linksseitige Elbdeich zwischen Bleckede und Radegast soll möglicherweise zur Verbesserung der Abflussverhältnisse zurückverlegt werden. In der Voruntersuchung werden drei Trassen zwischen dem bestehenden Deich und der Kreisstraße K 5 von Karze nach Radegast betrachtet.

Der Deichabschnitt liegt nördlich von Bleckede im Prallhang der Elbe. Durch die Deichrückverlegung wird südlich von Radegast im Prallhang eine „Bucht“ angelegt. Es wurden Befürchtungen geäußert, dass sich bei Eishochwasser hier vermehrt Eisschollen aufstauen und die Deiche zusätzlich belasten.

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Eisstaus auf die Standsicherheit der Deiche werden in diesem Bericht zunächst in einer Literaturstudie vorhandene Ansätze zum Eisdruck auf Ufereinfassungen, Deckwerke und Deiche zusammengestellt und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit bewertet. Die mechanischen Eigenschaften des Eises werden anhand von Literaturangaben zusammengestellt.

In einem zweiten Bericht folgen hydraulische Berechnungen zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten und Standsicherheitsberechnungen zur Beurteilung der Auswirkungen des Eisdrucks.

## **2 Unterlagen**

- [1] Artlenburger Deichverband – Eisversatz und Eisdruck auf Deiche – Literaturstudie, GGU-Bericht 10281.1/2019, GGU, Braunschweig, 06.02.2019
- [2] Machbarkeitsstudie für eine Deichrückverlegung im Bereich der Stadt Bleckede, Flurlage Vitico, (Elbe-km 551,4 bis 554,5), NLWKN, Lüneburg, 30.11.2018
- [3] Ergebnisse hydraulischer Berechnungen, Leichtweiß-Institut, TU Braunschweig, interne Ergebnismitteilung, E-Mail vom 17.07.2019 und 04.02.2019

### 3 Baumaßnahme

Der hier betrachtete Deichabschnitt liegt südlich von Radegast am Westufer der Elbe. Dieses Ufer bildet oberhalb von Radegast einen Prallhang. Bedingt durch den Deichverlauf kommt es unmittelbar südlich der Ortslage Radegast zu Eisversätzen.



Abbildung 1: Schäden am Deich durch Eisschollen, Hochwasser am 15.01.2003  
(Foto Artlenburger Deichverband)



Abbildung 2: Aufgeschobene Eisschollen bei Radegast, Hochwasser am 15.01.2003  
(Foto Artlenburger Deichverband)

Aufgrund der eingetretenen extremen Hochwasserereignisse mit Überschreitung des Bemessungswasserstandes wurde auch der Deich im Bereich der Vitico mehrmals stark belastet und konnte dabei stets erfolgreich verteidigt werden. Dennoch haben diese Hochwasserereignisse zu äußeren und inneren Schäden am Deich und der dazugehörigen Infrastruktur geführt [2].

Der vorhandene Deich weist Fehlhöhen auf und ist nach den Instandsetzungsmaßnahmen nicht mehr entsprechend des Hochwasserschutzplan untere Mittelelbe ausgebildet. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden unterschiedliche Trassen einer Deichrückverlegung untersucht [2], mit denen zusätzlicher Retentionsraum geschaffen werden soll.

Durch die Deichrückverlegung wird südlich von Radegast im Prallhang eine „Bucht“ angelegt. Es wurden Befürchtungen geäußert, dass sich bei Eishochwasser hier vermehrt Eisschollen aufstauen und die Deiche zusätzlich belasten.

## **4 Eisdruck auf Bauwerke**

Eis stellt für Bauwerke an fließenden und auch an ruhenden Gewässern eine Belastung dar. Horizontale Kräfte werden durch das Ausdehnen von Eisflächen in Form des thermischen Eisdrucks und durch dynamischen Eisdruck durch in Bewegung befindliche Eisflächen in angrenzende Bauwerke eingetragen. Bei Wasserstandsänderungen, z.B. in Tidegebieten, werden Bauwerke zusätzlich durch vertikale Kräfte belastet.

Die obere Grenze der Eisdruckbelastung von Bauwerken wird durch die Festigkeit des Eises in dem jeweils maßgeblichen Spannungszustand (Druck, Biegung) bestimmt. Experimentelle Untersuchungen an vielen Forschungseinrichtungen bilden die Grundlage für empirische Modelle, mit denen die Berechnung von Eiskräften auf Bauwerke ermöglicht werden soll. Die Eisdruckbelastung von Bauwerken ist demnach abhängig von

- den Festigkeitseigenschaften des Eises, wie z.B. die Druck-, Zug- und Biegefestigkeit,
- den physikalischen Eigenschaften des Eises wie Dichte, Porenanteil, Elastizitätsmodul und Salzgehalt,
- der Eisdicke bzw. der Eistemperatur.

In den nachfolgend aufgeführten Literaturstellen – Empfehlungen, Forschungsarbeiten, Veröffentlichungen - werden unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung von Eisfestigkeiten und den daraus resultierenden Belastungen von Bauwerken erläutert.

Schnell wird bewusst, dass die Modelle für die Belastungen auf Bauwerke, die auf experimentellen Ergebnissen basieren, unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen können, u.a. auch deswegen, weil Eis lokalspezifische mechanische Eigenschaften besitzt.

## **5 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Eis**

### **5.1 Allgemeines**

Die physikalischen Eigenschaften des Eises sind u.a. nach HAGER [14] von zahlreichen Einflüssen abhängig:

- Entstehungsgeschichte und Entstehungsort des Eises,
- Zusammensetzung, Salzgehalt, Luftgehalt, Verunreinigungen,
- Temperaturzustand und –änderung,
- Dauer der Temperatureinwirkungen,
-



- Belastung, Belastungsgeschichte, Belastungsgeschwindigkeit, Belastungsdauer.

Durch Untersuchungen, Laborversuche und Beobachtungen in situ wurden durch die zitierten Autoren Modelle und Gleichungen entwickelt, die die Eigenschaften des Eises unter Berücksichtigung der o.g. möglichen Einflüsse beschreiben sollen. Schnell wird dem Leser bewusst, dass die von den Autoren empirisch hergeleiteten Gleichungen zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften untereinander Unterschiede aufweisen und ein einheitliches Modell kaum zulassen.

Nachfolgend werden die Ansätze für die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Eis der zitierten Literaturstellen zusammengestellt.

## 5.2 Dichte des Eises

Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Dichte bei der Eisbildung:

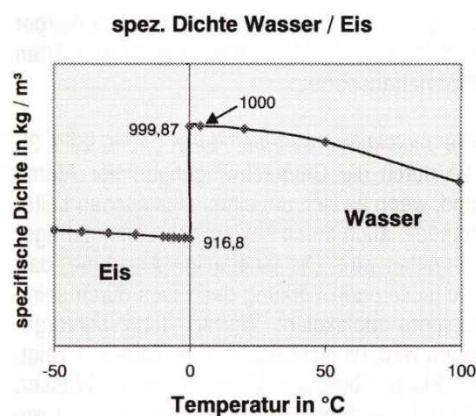


Abbildung 3: Dichtentwicklung von Eis und Wasser von BARJENBRUCH aus [6]

Bei einer Temperatur von + 4°C hat Wasser seine größte Dichte von  $\rho = 999,841 \text{ kg/m}^3$ . Bei weiterer Abkühlung nimmt die Dichte durch eine Umordnung der Wassermoleküle bei der Kristallisation ab. Bei der Umwandlung von Wasser in Eis verringert sich die Dichte spontan auf  $916,8 \text{ kg/m}^3$ , es kommt zu einer Volumenzunahme von ca. 8,3 % (CARSTENSEN [7]). Bei weiter sinkenden Temperaturen steigt die Dichte jedoch wieder leicht an (Abbildung 1).

Als Mittelwert für den Ausdehnungskoeffizienten wird von HAGER in [14] ein Wert von  $\alpha_t = 5 \cdot 10^{-5}$  angegeben.

Die temperaturabhängige Dichte- und Volumenänderung haben Einfluss auf die Belastung von an das Eis grenzenden Bauwerken durch thermischen Eisdruck und werden von einigen



Modellen zur Beschreibung von Materialeigenschaften und zu erwartenden Einwirkungen berücksichtigt.

### 5.3 Elastizitätsmodul des Eises

Der Elastizitätsmodul von Eis ist von der Temperatur, der Belastung, der Belastungsgeschwindigkeit und natürlich von der Zusammensetzung (Süßwasser, Meerwasser, Verunreinigungen, granulares Eis, säulenförmiges Eis) des Eises abhängig. Die in der Literatur genannten Werte variieren deutlich.

HAGER [14] nennt einen Wertebereich zwischen  $E = 9.500 \text{ MN/m}^2$  bis  $12.000 \text{ MN/m}^2$ . Für Übersichtsrechnungen empfiehlt er eine Obergrenze von  $E = 10.000 \text{ MN/m}^2$ .

FELLIN [13] gibt in Abhängigkeit von der Dichte des Eises und der Temperatur die folgenden elastischen Parameter an:

$\rho = 917 \text{ kg/m}^3, 0^\circ\text{C}:$	$E \approx 9.200 \text{ MN/m}^2, \nu \approx 0,3$
$\rho = 917 \text{ kg/m}^3, -16^\circ\text{C}:$	$E \approx 9.330 \text{ MN/m}^2, \nu \approx 0,35$
$\rho = 830 \text{ kg/m}^3:$	$E \approx 7.000 \text{ MN/m}^2, \nu \approx 0,3$

BUREAU VERITAS [16] verweist auf Veröffentlichungen des US Army Corps of Engineers und gibt einen Wertebereich des Elastizitätsmoduls zwischen  $2.000 \text{ MN/m}^2$  und  $9.000 \text{ MN/m}^2$  an. Weiterhin wird eine Gleichung gegeben, mit der in Abhängigkeit vom gesamten Porenvolumen der „effektive“ E-Modul bestimmt werden kann:

$$E = E_0 \cdot (1 - \sqrt{\nu_T})^4$$

mit

$E:$	effektiver E-Modul
$E_0:$	Referenzmodul
$\nu_T:$	gesamtes Porenvolumen des Eises

Der GERMANISCHE LLOYD nennt übliche Werte für den E-Modul zwischen  $2.500 \text{ MN/m}^2$  und  $11.500 \text{ MN/m}^2$ . Ortsbezogene Untersuchungen sind jedoch unerlässlich.

CARSTENSEN [7] nennt einen Wertebereich von ca.  $400 \text{ MN/m}^2$  bis ca.  $12.000 \text{ MN/m}^2$  und gibt einen formellen Ansatz, mit dem der E-Modul in Abhängigkeit von den Eistemperaturen bestimmt werden kann:

$$E = (1 - c_n \cdot T_i) \cdot C_E$$

Versuche an säulenförmigem Eis ergaben für den statischen Elastizitätsmodul die Parameter  $c_n = 0,0012^\circ\text{C}^{-1}$  und  $C_E = 6.100 \text{ MN/m}^2$ .

KORZHAVIN [20] gibt für unterschiedliche Versuchsbedingungen in der nachfolgenden Tabelle folgende Werte für den E-Modul an, weist jedoch auf die schwierige Bestimmung des statischen E-Moduls mit großen Schwankungsbereichen hin ( $\text{t/cm}^2$  entspricht  $100 \text{ MN/m}^2$ ):

Tabelle 1: Werte des E-Moduls von Eis, Versuchsergebnisse nach [20]

Elastic Modulus E of Ice, Based on Data of Determinations							
Researcher	Year	Type of Ice	Method	Conditions of loading	$-t^\circ\text{C}$	$E, \text{t/cm}^2$	Biblio.
MacRae	1885	lake	static	bending	1-3 5-7	41-72 59-104	[ 12 ]
Pinegin, V.N.	1923	river	"	"	5-9 15-19	12 21	[ 14 ]
Shul'man, A.R., Ivanov, K.Ye., Kobeko, P.P.	1946	"	"	compres. bending of ice field	5 44	48-84 44	[ 94 ]
Kartashkin, B.D.	1943-45	"	"	expansion bending	6-8 2-21	37-50 35-62	[ 24 ]
Voytkovskiy, K.F.	1954-58	artif.	"	"	1-4	25-65	[ 94 ]
Butyagin, I.P.	1957-58	river	"	"	3-9	30-40	[ 31 ]
Erwing, Crary & Thorne	1934	lake	dynamic	artif.	5-15	98-98	[ 98 ]
Makaya	1958	glacial	"	"	9	90	[ 94 ]
Bordemikov, V.P.	1948	artif.	"	"	2-40	88-97	[ 26 ]
Boyle & Sproule	1931	lake	"	"	10 35	94 109	[ 104 ]

KORZHAVIN [20] nennt Größen des E-Moduls von ca.  $3.300 \text{ MN/m}^2$  bis  $4.000 \text{ MN/m}^2$  als zu verwendende Werte für die Bestimmung von Belastungen auf Bauwerke.

Die EAU 2012 [10], die EAK 2007 [9] und das SHORE PROTECTION MANUAL [26] liefern keine Angaben zur Größe des E-Moduls.

Auf die plastischen Eigenschaften des Eises wird im Zuge des vorliegenden Berichts nicht weiter eingegangen.

## 5.4 Festigkeit des Eises

Die Angaben zur Eisfestigkeit variieren nicht nur wegen der o.g. Einflüsse, sondern auch wegen der nicht standardisierten Untersuchungsmethoden und Prüfverfahren. Bei der Eisfestigkeit wird unterschieden in Druck-, Zug-, Biege- und Scherfestigkeit. Im Folgenden werden unterschiedliche Ansätze vorgestellt.

Die Eisfestigkeiten sind von großer Bedeutung, wenn Eislasten auf wasserbauliche Anlagen einwirken. Bauwerke werden durch Eis solange belastet, bis dieses aufgrund der Überschreitung u.a. der Bruchfestigkeit versagt.

#### 5.4.1 Kovacs (1996)

KOVACS [21] wertet eine Vielzahl von Versuchen aus und gibt einen empirischen Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit des Meerwassereises und dem gesamten Porenraum aus Salzlaugeneinschlüssen und Lufteinschlüssen:

$$\sigma_0 = 2700 \cdot \dot{\varepsilon}^{1/3} \cdot \phi_B^{-1}$$

mit

$$\phi_B = 19,37 + 36,18 \cdot S_B^{0,91} \cdot |\vartheta_A|^{-0,69}$$

Dabei sind:

$\sigma_0$ :	horizontale einachsige Eisdruckfestigkeit [MN/m <sup>2</sup> ]
$\dot{\varepsilon}$ :	= 0,001, spezifische Dehnungsgeschwindigkeit [s <sup>-1</sup> ]
$\phi_B$ :	Porosität [% <sub>o</sub> ]
$S_B$ :	Salinität [% <sub>o</sub> ]
$\vartheta_A$ :	=( $\vartheta_o + \vartheta_u$ ) / 2, mittlere Eistemperatur [°C]
$\vartheta_u$ :	Temperatur an der Eisuntersiete (= -1°C deutsche Ostsee, = -2°C deutsche Nordsee) [°C]
$\vartheta_o$ :	Temperatur an der Eisoberseite, entspricht Lufttemperatur [°C]

Mit dem Volumen der Salzlake im Eis in Abhängigkeit des Salzgehalts und der Temperatur

$$\nu_B = 41,64 \cdot S_B^{0,88} \cdot |\vartheta_A|^{-0,67} \quad [\%_o]$$

wird die empirische Gleichung zur Beschreibung der Zugfestigkeit angegeben:

$$\sigma_t = 0,816 - 0,069 \cdot \nu_B^{0,5}$$

Die Biegefestigkeit wird mit der empirischen Gleichung beschrieben:

$$\sigma_f = 1,76 \cdot e^{-5,88 \cdot \sqrt{\nu_b}}$$

## 5.4.2 Hager (2001)

HAGER [14] wählt als Anhaltswerte für die Druck-, Zug-, Biege- und Scherfestigkeit Werte aus der Arbeit von KORZHAVIN [20] für kontinentales Klima und aus der EAK [9] für den norddeutschen Küstenraum ohne Berücksichtigung des Einflusses eines Laugenvolumens.

Tabelle 2: Festigkeiten von Eis nahe dem Gefrierpunkt HAGER [14]

**Tabelle 1.** Festigkeiten von Eis nahe dem Gefrierpunkt [MN/m<sup>2</sup>] nach Korzhavin [15] und EAK [6]

Art der Beanspruchung	Flüsse in Rußland		Norddeutscher Küstenraum	
	Norden/Sibirien	Europäischer Teil	Süßwassereis	Meerwassereis
Örtl. Zermahlen	2,0–3,0	1,25–1,75		
Druck	1,0–1,2	0,50–0,70	3,5–4,0	1,2–1,5
Biegung	0,9–1,2	0,50–0,70	0,8	0,4
Abscheren	0,5–0,6	0,15–0,30	1,5	0,4–0,6
Zug	0,7–1,0	0,30–0,40	1,5	0,8–1,0
Zug waagrecht			0,8	0,3–0,5

Für die im norddeutschen Küstenraum meist mäßigen Eistemperaturen verweist HAGER [14] auf die Druckfestigkeitswerte aus der EAU [10] und den Hinweis in der EAK [9], dass die Festigkeit des Frischwassers um 450 kN/m<sup>2</sup> je °C und die des Meereises um 250 kN/m<sup>2</sup> je °C ansteigen. Die Biegezugfestigkeit und die Scherfestigkeit schwanken lt. HAGER [14] aufgrund von versuchstechnischen Schwierigkeiten und werden mit den in der nachfolgenden Tabelle genannten Größen angenähert:

Tabelle 3: Empfohlene Festigkeiten des Eises nach [10] bzw. HAGER [14]

**Tabelle 3.** Empfohlene Festigkeiten von Eis [MN/m<sup>2</sup>] in E 177 [7]

Art der Beanspruchung	Zeichen	Süßwassereis	Meerwassereis
Druck bis –5°C	$\sigma_0$	$\sigma_0 = 2,5$	$\sigma_0 = 1,5$
Druck unter –5°C	$\sigma_0$	$\Delta\sigma_0 = 0,45 \text{ je } ^\circ\text{C}$	$\Delta\sigma_0 = 0,25 \text{ je } ^\circ\text{C}$
Biegung	$\sigma_b$	$\sigma_0/3 = 0,833$	$\sigma_0/3 = 0,5$
Abscheren	$\tau$	$\sigma_0/3 = 0,833$	$\sigma_0/6 = 0,25$

Nach KORZHAVIN [20] steigt mit sinkenden Temperaturen die Eisfestigkeit. HAGER zitiert die Gleichung aus [20] :

$$\sigma_0 = 1,1 + 0,35 \cdot t \text{ [MN/m}^2\text{]}$$

mit

t: mittlere Eistemperatur in Kältegraden Celsius.

### 5.4.3 Germanischer Lloyd ((2007))

Die Druckfestigkeit von Eis wird analog zur EAU [10] und KOVACS [21] mit der folgenden Gleichung beschrieben:

$$\sigma_0 = 2700 \cdot \dot{\varepsilon}^{1/3} \cdot \phi_B^{-1}$$

mit  $\phi_B = 19,37 + 36,18 \cdot S_B^{0,91} \cdot |\vartheta_A|^{-0,69}$

Dabei sind:

$\sigma_0$ :	horizontale einachsige Eisdruckfestigkeit [MN/m <sup>2</sup> ]
$\dot{\varepsilon}$ :	= 0,001, spezifische Dehnungsgeschwindigkeit [s <sup>-1</sup> ]
$\phi_B$ :	Porosität [% <sub>o</sub> ]
$S_B$ :	Salinität [% <sub>o</sub> ]
$\vartheta_A$ :	=( $\vartheta_o + \vartheta_u$ ) / 2, mittlere Eistemperatur [°C]
$\vartheta_u$ :	Temperatur an der Eisunterseite (= -1°C deutsche Ostsee, = -2°C deutsche Nordsee) [°C]
$\vartheta_o$ :	Temperatur an der Eisoberseite, entspricht Lufttemperatur [°C]

Mit dem Volumen der Salzlauge im Eis in Abhängigkeit des Salzgehalts und der Temperatur

$$\nu_B = 41,64 \cdot S_B^{0,88} \cdot |\vartheta_A|^{-0,67} \quad [\%_o]$$

wird die Zugfestigkeit von Salzwassereis angenähert mit:

$$\sigma_t = 1,0 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\nu_b}{\nu_0}}\right)^2 \cdot \sigma_0 + S$$

mit

$\nu_b$ :	Volumenanteil Salzlauge in [% <sub>o</sub> ]
$\nu_0$ :	Referenzvolumen, sollte in Berechnungen zu 142 [% <sub>o</sub> ] angenommen werden
$\sigma_0$ :	Referenzspannung, hier $\sigma_0 = 2,5$ MN/m <sup>2</sup>
S:	Sicherheitszuschlag, hier S = 0,4

Die Biegefestigkeit kann angenähert werden mit:

$$\sigma_f = 1,76 \cdot e^{-5,88 \cdot \sqrt{\nu_b / 1000}} = 1,76 \cdot e^{-0,19 \cdot \sqrt{\nu_b}}$$

Die folgenden Abbildungen aus [24] zeigen die Entwicklung der Druck-, Zug- und Biegefestigkeiten von Meerwassereis in Abhängigkeit von dem Salzgehalt.

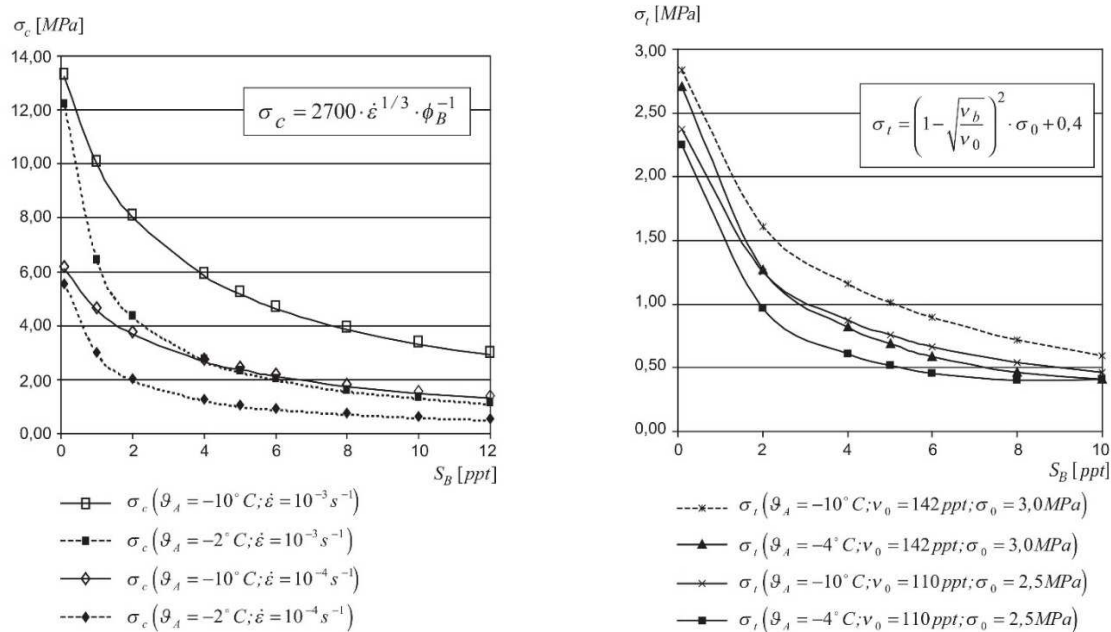


Abbildung 4: Entwicklung der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  und der Zugfestigkeit  $\sigma_t$  in Abhängigkeit des Salzgehalts  $S_B$  [24]

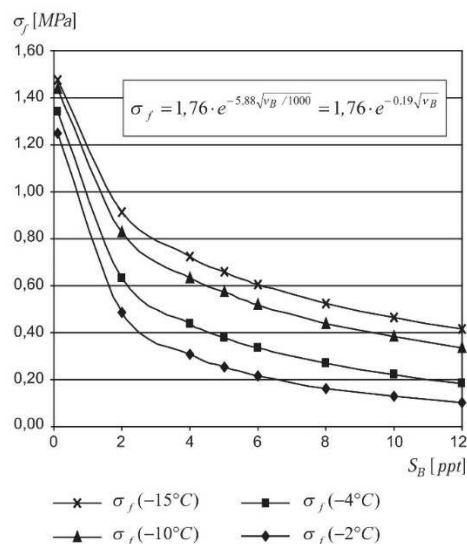


Abbildung 5: Entwicklung der Biegefestigkeit  $\sigma_f$  in Abhängigkeit des Salzgehalts  $S_B$  [24]

#### 5.4.4 EAK 2002 (2007)

Die EAK [9] zeigt in den folgenden Graphiken die Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeiten von Meereis (Ostsee) und Frischwassereis (Elbeis) von der Verformungsgeschwindigkeit und

der Temperatur. Bei einer Verformungsgeschwindigkeit von  $\varepsilon = 0,003 \text{ s}^{-1}$  werden die Maximalwerte der Druckfestigkeit ermittelt. Sie liegen beim Frischwassereis zwischen ca.  $4,5 \text{ MN/m}^2$  und ca.  $11 \text{ MN/m}^2$ , beim Meerwassereis zwischen ca.  $1,8 \text{ MN/m}^2$  und ca.  $9,5 \text{ MN/m}^2$ .

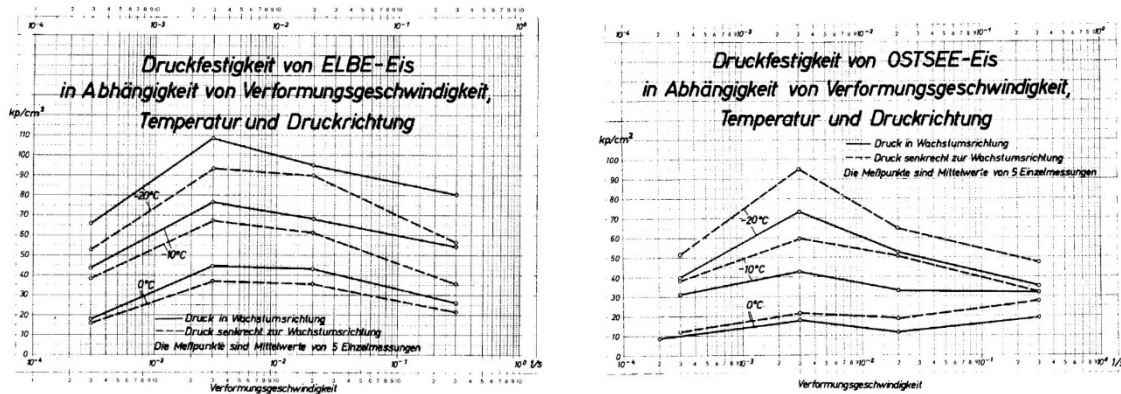


Abbildung 6: Würfeldruckfestigkeit von Elbe- und Ostseeis aus [9]

Mit sinkender Temperatur des Eises steigt die Festigkeit an, die des Frischwassers um  $450 \text{ kN/m}^2 \text{ je } ^\circ\text{C}$  und die des Meereises um  $250 \text{ kN/m}^2 \text{ je } ^\circ\text{C}$ . Bei einer Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  beträgt die maximale Druckfestigkeit von Frischwassereis ca.  $4,5 \text{ MN/m}^2$ .

Als Beziehung zwischen Druckfestigkeiten und Salzlaugenvolumen  $v_b$  wird der folgende Zusammenhang in [9] genannt:

$$\sigma_c = 16,5 \cdot 10^5 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{v_b}{0,275}} \right) [N / m^2]$$

In EAK [9] wird darauf hingewiesen, dass mit Würfeldruckversuchen Festigkeiten ermittelt werden, die ca. 33 % über denen von prismatischen zylindrischen Proben liegen.

Die Druckfestigkeit ist ca. 20 % größer, wenn das Eis parallel zur Wachstumsrichtung abgedrückt wird, als senkrecht dazu.

Die Zugfestigkeit des Eises ist kaum von der Verformungsgeschwindigkeit, jedoch von der Belastungsrichtung abhängig: das Eis reagiert zwei- bis dreimal fester, wenn die Zugkraft parallel zur Wachstumsrichtung aufgebracht wird, als senkrecht dazu. In [9] werden Gleichungen für die Zugfestigkeit angegeben:

$$\sigma_t(\text{vertikal}) = 15,4 \cdot 10^5 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{v_b}{0,311}} \right) [N / m^2]$$



$$\sigma_t(\text{horizontal}) = 8,2 \cdot 10^5 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{v_b}{0,142}}\right) [N / m^2]$$

Die Biegefestigkeit stellt keine mechanische Grundgröße dar, ist nur unmerklich von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig und nimmt mit dem Salzlaugenvolumen ab. Die EAK [9] nennt den folgenden Zusammenhang, wobei Einflüsse aus Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit bisher nur wenig untersucht wurden.

$$\sigma_f = 10,3 \cdot 10^5 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{v_b}{0,209}}\right) [N / m^2]$$

Über die Scherfestigkeit des Eises ist lt. EAK [9] bisher relativ wenig bekannt. Die bekannten Werte der Scherfestigkeit liegen etwa im Bereich der Biege- bzw. Zugfestigkeiten.

Zusammenfassend werden die einaxialen Festigkeiten für Frischwasser- und Meereis bei ca. 0°C dargestellt.

Tabelle 4: Festigkeiten von Frischwasser- und Meereis in [10<sup>2</sup> kN/m<sup>2</sup>], in EAK [9]

Tab. A 7.1: Festigkeiten von Frischwasser- und Meer-Eis

Art der Festigkeit	Frischwassereis x 10 <sup>2</sup> kN / m <sup>2</sup>	Meer-Eis x 10 <sup>2</sup> kN / m <sup>2</sup>
Druck	35 – 40	12–15
Zug <sup>*)</sup>	15	8–10
Zug <sup>**) </sup>	8	3– 5
Scheren	15	4– 6
Biegung	8	4

<sup>\*)</sup> Zugrichtung senkrecht zur Eisoberfläche  
<sup>\*\*)</sup>  Zugrichtung parallel zur Eisoberfläche

#### 5.4.5 Bureau Veritas (2010)

Für eine Belastungsrate von kleiner als 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> wird in der Veröffentlichung des BUERAU VERITAS [16] die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  von Süßwassereis, wie auch in ICE ENGINEERING [12] beschrieben, mit der folgenden Gleichung angenähert:

$$\sigma_c = 212 \cdot \dot{\epsilon}^{0,34} \cdot \left(3,07 \cdot 10^{-4} \dot{\epsilon}^{0,34}\right)$$

mit

$\dot{\epsilon}$ : Verformungsgeschwindigkeit [s<sup>-1</sup>]

Aus Laborversuchen an säulenförmigem Seewassereis werden folgende Gleichungen für unterschiedliche Belastungsrichtungen abgeleitet:

$$\sigma_c = 37 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,22} \cdot \left( 1 - \left( \frac{v_T}{270} \right)^{0,5} \right) \quad (\text{senkrecht zur Eiswachsrichtung})$$

$$\sigma_c = 160 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,22} \cdot \left( 1 - \left( \frac{v_T}{200} \right)^{0,5} \right) \quad (\text{in Eiswachsrichtung})$$

mit

$v_T$  : Gesamtporenvolumenanteil im Eis, aus Salzlauge und Luft in [%]

Die Zugfestigkeit von Eis ist im Bereich von  $\dot{\varepsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  bis  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  nahezu nicht abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit, wohl aber vom Volumen der Salzlauge:

$$\sigma_t = 2,2 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{v_b}{0,31}} \right) \quad (\text{senkrecht zur Eiswachsrichtung})$$

$$\sigma_t = 1,0 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{v_b}{0,14}} \right) \quad (\text{in Eiswachsrichtung})$$

mit

$v_b$  : Volumenanteil Salzlauge in [%]

Die nachfolgende Tabelle zeigt Ergebnisse, die mit den Gleichungen ermittelten Werte:

Tabelle 5 Zugfestigkeit von Seeis, nach [16]

Temperature	Ice type	Ice Salinity	Action direction	
			Vertical	Horizontal
-10 °C	Sea Ice	4 – 6 ‰	1.7 MPa	0.9 MPa
-10 °C	Baltic Ice	0.2 ‰	2.2 MPa	1.0 MPa

Table 1: Ice tensile strength, according to ISO 19906 draft <sup>[6]</sup>

Für die Biegefestigkeit von Frischwassereis wird in [16] ein Mittelwert von  $\sigma_f = 1,73 \text{ MN/m}^2$  bei einer Eistemperatur von  $-5^\circ\text{C}$  angegeben. Für Salzwassereis wird die folgende Gleichung

unter Berücksichtigung des Volumenanteils der Salzlauge  $v_b$  gegeben, sie kann Werte zwischen 0,5 MN/m<sup>2</sup> bis 0,7 MN/m<sup>2</sup> annehmen:

$$\sigma_f = 1,76 \cdot e^{-5,88 \cdot \sqrt{v_b}}$$

mit

$v_b$ : Volumenanteil Salzlauge in [%]

#### 5.4.6 EAU (2012)

Die Eisdruckfestigkeit  $\sigma_0$  im Küstenbereich hängt ab von der Temperatur des Eises, dem Salzgehalt, der Dehnungsgeschwindigkeit und der Druckrichtung. Für die folgenden Annahmen:

- Lineare Temperaturverteilung über die Eisdicke, Temperatur von -2°C an der Eisunterseite für die deutsche Nordseeküste und ca. -1°C für die deutsche Ostseeküste,
- Dehnungsgeschwindigkeit von  $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$  (Bereich zwischen duktilem und spröden Versagen),
- Salinität des Wassers gemäß nachfolgender Tabelle E 177-1

Tabelle 6: Salinität des Wassers nach [10]

**Tabelle E 177-1.** Richtwerte für Salzgehalt (Salinität  $S_B$ ) des Meerwassers und Meereises an der deutschen Nord- und Ostseeküste nach Kovacs 1996

Nordsee	Salinität Wasser [‰]	Salinität Eis [‰]	Ostsee	Salinität Wasser [‰]	Salinität Eis [‰]
Deutsche Bucht Flussmündungen	32 bis 35 25 bis 30	14 bis 18 12 bis 14	Beltsee	15 bis 20	10 bis 12
			Kieler Bucht	15	8 bis 10
			Mecklenburger Bucht	15	8 bis 10
			Arkonabecken und Bornholmsee	8 bis 10	5 bis 7
			Gotlandsee	5 bis 7	*)
			Finnischer und Botnischer Meerbusen	1 bis 5	*)

\*) Die Bestimmung der Eisdruckfestigkeit für Salinitäten kleiner 5 ‰ erfolgt gemäß Empfehlung E 205, Abschnitt 5.16

wird die folgende Gleichung für die einachsige Eisdruckfestigkeit nach KOVACS [21] zitiert:

$$\sigma_0 = 2700 \cdot \dot{\epsilon}^{1/3} \cdot \varphi_B^{-1}$$

mit

$$\varphi_B = 19,37 + 36,18 \cdot S_B^{0,91} \cdot |\vartheta_m|^{-0,69}$$

Dabei sind:

$\sigma_0$ :	horizontale einachsige Eisdruckfestigkeit [MN/m <sup>2</sup> ]
$\dot{\varepsilon}$ :	= 0,001, spezifische Dehnungsgeschwindigkeit [s <sup>-1</sup> ]
$\varphi_B$ :	Porosität [%o]
$S_B$ :	Salinität
$\vartheta_m$ :	=( $\vartheta_o + \vartheta_u$ ) / 2, mittlere Eistemperatur [°C]
$\vartheta_u$ :	Temperatur an der Eisuntersiete (= -1°C deutsche Ostsee, = -2°C deutsche Nordsee) [°C]
$\vartheta_o$ :	Temperatur an der Eisoberseite, entspricht Lufttemperatur [°C]

Im Binnenbereich wird die Eisdruckfestigkeit nur in Abhängigkeit von der mittleren Eistemperatur  $\vartheta_m$  formuliert:

$$\sigma_0 = 1,1 + 0,35 \cdot |\vartheta_m| \quad \text{für } -5^\circ\text{C} < \vartheta_m < 0^\circ\text{C}$$

$$\sigma_0 = 2,85 + 0,45 \cdot |\vartheta_m + 5| \quad \text{für } \vartheta_m < -5^\circ\text{C}$$

In der EAU [10] wird die Biegezugfestigkeit  $\sigma_B$  mit ca.  $1/3 \cdot \sigma_0$  und die Scherfestigkeit  $\tau$  mit  $1/6 \cdot \sigma_0$  angenähert.

#### 5.4.7 Fellin (2013)

FELLIN [13] gibt unter Verweis auf andere Autoren folgende Werte für die Druckfestigkeit  $\sigma_C$  als Spannungen an, die einen Sprödbbruch verursachen:

- bei ca. -10°C:  $\sigma_C \approx 10 \text{ MN/m}^2$
- bei ca. 0°C (See- und Flusseis):  $\sigma_C \approx 2,4 \dots 4,1 \text{ MN/m}^2$

Die Bruchspannung beim Zugbruch  $\sigma_t$  ist kaum von der Temperatur und praktisch nicht von der Verzerrungsrate abhängig. FELLIN [13] gibt die folgenden Verhältniswerte von einaxialer Druckfestigkeit und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur des Eises an, Hinweise zur Biege- oder Scherfestigkeit werden nicht jedoch gegeben:

- bei ca. -10°C:  $\sigma_C \approx 8 \cdot \sigma_t$
- bei ca. -50 °C:  $\sigma_C \approx 20 \cdot \sigma_t$

#### **5.4.8 Weitere Literaturstellen**

Im SHORE PROTECTION MANUAL [26] wird die Bruchfestigkeit von Eis pauschal mit  $2,75 \text{ MN/m}^2$  angenähert, BRINKMANN [5] verweist bei den Angaben zur Festigkeit des Eises auf die EAK [9], LATTERMANN [18] nimmt Bezug auf die in der EAU [10] genannten Werte. CARSTENSEN [7] verweist in seiner Arbeit auf die EAK [9] und zitiert die o.g. Beziehungen und Gleichungen.

#### **5.5 Zusammenfassung**

Aus den Ausführungen ist ersichtlich, dass es keine einheitlichen Werte für die Druck,- Zug,- Biege- und Scherfestigkeiten von Eis gibt. Diese schwanken zwischen  $0,5 \text{ MN/m}^2$  nach KORZHAVIN [20] für Flüsse des europäischen Teil der damaligen UdSSR und  $11 \text{ MN/m}^2$  nach EAK [9] bei einer Eistemperatur von  $-20^\circ\text{C}$ .

Unterschiedliche Salzgehalte, Luftgehalte, Verformungsgeschwindigkeiten und Belastungseinrichtung für Laborversuche und unterschiedliche Temperaturen führen zwangsläufig zu signifikant voneinander abweichenden Werten.

Für den Anwendungsfall ist daher jeweils zu prüfen, welche Merkblätter, Empfehlungen und Vorschriften zu verwenden sind. Evtl. sind Alternativberechnungen durchzuführen, um mit Varianzbereichen Extremwerte abzuschätzen. Versuche können ortsspezifische Charakteristika des Eises bzgl. seiner Festigkeitseigenschaften absichern.

### **6 Belastung von Ufern und Bauwerken durch Eis**

Nachfolgend werden Modelle zur Berechnung von Eisbelastungen vorrangig auf breite Bauwerke dargestellt, um die Belastungssituation von Böschungen an Fließgewässern abbilden zu können. Auch diese Modelle weisen z.T. große Unterschiede auf, was der experimentellen Ermittlung von Grundlagen geschuldet ist.

#### **6.1 Shore Protection Manual (1987)**

Das SHORE PROTECTION MANUAL gibt eine pauschale Größe der aus einem treibenden Eisfeld resultierende Belastung auf Bauwerke von bis zu „ $120.000 \text{ kg/m}^2$ “ an, dies entspricht bei einer Eisdicke von  $h_E = 30 \text{ cm}$  einer Linienlast von  $360 \text{ kN/m}$ .

Weitere einflussnehmende Größen werden nicht betrachtet und finden keinen Eingang in den Belastungsgrößen.

## 6.2 DIN 19704-1 (1998)

Zusätzlich zum statischen Wasserdruck sind Einwirkungen aus Eisdruck als horizontal wirkende Flächenlast auf Bauwerke zu berücksichtigen:

- In Binnengebieten mit  $p_E = 150 \text{ kN/m}^2$  mit einer Mindesteisdicke von  $h_E = 0,3 \text{ m}$
- In Küstengebieten mit  $p_E = 250 \text{ kN/m}^2$  mit Eisdicken zwischen  $h_E = 0,5 \text{ m} \dots 0,8 \text{ m}$

Der Eisdruck ist entsprechend der folgenden Abbildungen unterhalb des Wasserspiegels anzusetzen.

Für die Berechnung der Eislast auf geneigten Wänden ist zwischen Eis und Tragwerk eine Reibung von  $\mu = 0,1$  anzusetzen:

$$p_{E1} = p_E \cdot \sin \alpha$$

$$p_{E2} = \mu \cdot p_E \cdot \cos \alpha$$

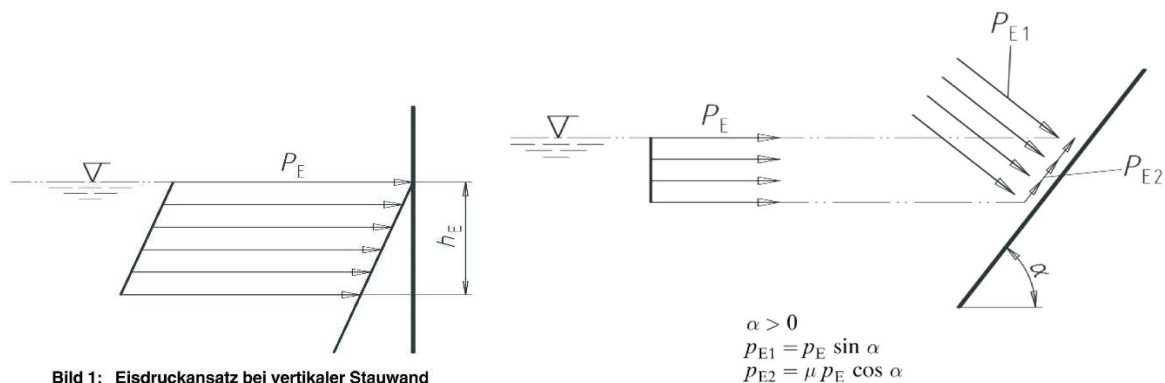


Abbildung 7: Eisdruckansatz bei vertikaler und geneigter Wand, nach [8]

## 6.3 Hager (2001)

Für breite Bauwerke kann die Eislast gemäß HAGER [14] aus der Druckfestigkeit des Eises berechnet werden mit:

$$p_0 = k \cdot \sigma_0 \cdot h \cdot d$$

mit

$p_0$ : horizontale Eislast [MN/m]

$k$ : = 0,33, Kontaktbeiwert [-]

- $h$ : Dicke des Eises, Empfehlung nach EAU [10]:  $h \leq 0,5$  m für den norddeutschen Küstenraum,  $h \leq 0,3$  m im Binnenbereich
- $\sigma_0$ : Eisdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>]
- $d$ : Breite des Bauwerks [m]

Für den norddeutschen Küstenbereich und unter Ansatz der o.g. Eisfestigkeiten ergibt sich eine horizontale Linienlast von

$$p_0 = 0,33 \cdot 1,5 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot 0,5 \text{ m} = 0,25 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Im Tidegebiet wird die Linienlast aufgrund von einer dort gebrochenen Eisdecke auf 40 % zu  $p_0 = 0,10$  MN/m reduziert.

Für geneigte Oberflächen breiter Bauwerke wird kein Ansatz für eine anzusetzende Eislast vorgestellt. Für schmale, geneigte Bauwerke wird die Eisdrucklast mit Gleichungen für Scherbruch und Biegebruch gemäß KORZHAVIN [20] berechnet.

Für eine Eislast aus Temperaturänderung zitiert HAGER [14] eine Gleichung aus KORZHAVIN [20] :

$$p_T = 0,031 \cdot \frac{(|t_0| + 1)^{1,67}}{|t_0|^{0,88}} \cdot \left( \frac{0,35 \cdot \Delta t}{s} \right)^{0,33}$$

mit

- $t_0$ : Ausgangstemperatur des Eises [°C]
- $\Delta t/s$ : Temperaturanstieg [°C/h]

KORZHAVIN empfiehlt für nicht starre Bauwerke den Ansatz von  $p_T = 50$  bis  $300$  kN/m<sup>2</sup>.

Diese Kräfte sind jedoch in Flussläufen mit aufgebrochenen, eisversatzbildenden Eisflächen nicht zu erwarten.

## 6.4 Ice Engineering (2002)

In ICE ENGINEERING [12] werden die zu erwartenden Kräfte einer Eisscholle auf eine geböschte Oberfläche mit einem sehr ähnlichen Ansatz wie in BUREAU VERITAS [16] beschrieben, vgl. Kapitel 6.7. Jedoch wird zusätzlich die Kraftkomponente T berücksichtigt, die



aus Aufschieben der Eistrümmer auf die Böschung aus der Reibung zwischen Eisblöcken und der Böschungsoberfläche resultieren:

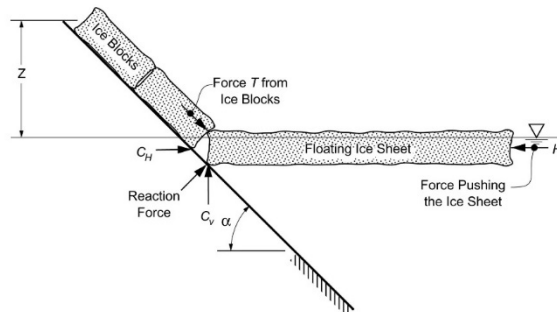


Figure 6-6. forces during an interaction of a floating ice sheet of thickness  $h$  being pushed against a wide sloping surface at an angle  $\alpha$  with the horizontal.

Abbildung 8: Kräfte einer Eisscholle auf eine geböschte Oberfläche, nach [12]

$$C_V = \frac{\sigma h^2 + 6le^{\frac{\pi}{4}} T \sin \alpha + Th \cos \alpha}{6le^{\frac{\pi}{4}} - h \tan(\alpha + \arctan \mu)} \quad [\text{N/m}]$$

mit

- $\sigma$ : Biegefestigkeit des Eises
- $h$ : Eisdicke
- $\alpha$ : Böschungswinkel gegen die Horizontale
- $\mu$ : Reibung zwischen Eis und Oberfläche der Böschung
- $l$ : charakteristische Länge der Eisscholle

$$l = \left[ \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu)^2 \cdot \rho_w \cdot g} \right]^{0,25}$$

- $E$ : elastischer E-Modul des Eises, für Süßwasser ca. 1,0 bis 3,0 MN/m<sup>2</sup>
- $\nu$ : Querdehnzahl des Eises, für Süßwasser ca. 0,33
- $\rho_w \cdot g$ : spezifisches Gewicht des Eises

Das Gewicht  $W$  der auf die Böschung bereits geschobenen Eistrümmer berechnet sich zu:

$$W = \frac{\rho_w \cdot g \cdot h \cdot z}{\sin \alpha}$$

Somit wird die Kraft zwischen Eistrümmern und der Oberfläche der Eisscholle T:

$$T = W \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha)$$

Die horizontale Komponente der Kraft, die zwischen der Böschung und dem Eis wirkt, ist:

$$C_H = C_V \cdot \tan(\alpha + \arctan \mu) + T \cdot \cos \alpha$$

Die hergeleiteten Kräfte berücksichtigen nicht die sich bei Eisversatz einstellende Auftürmung von Trümmereis an der Oberfläche bzw. im Wasser.

## 6.5 Germanischer Lloyd (2007)

Der GERMANISCHE LLOYD [24] weist darauf hin, dass mit den gegebenen Gleichungen und Beziehungen die Kräfte aus Eisdruck abgeschätzt werden können, die Ergebnisse jedoch stark von den wirklichen, an der Struktur zu erwartenden Kräften abweichen können.

Für breite, um bis zu 80° gegen die Horizontale geneigte Strukturen wird eine Gleichung angegeben, um die horizontale Kraft auf die Struktur für den Fall abzuschätzen, dass das Eis auf eine Böschung geschoben wird, ohne dass Eisbruchstücke bereits auf der Böschung liegen.

$$F_H = \left( C_1 \cdot \sigma_f \cdot W \left( \frac{\rho_w \cdot g \cdot t^5}{E} \right)^{1/4} + C_2 \cdot h \cdot t \cdot W \cdot \rho_i \cdot g \right) \cdot S_F \quad [\text{kN}]$$

mit:

$$C_1 = 0,68 (\xi_1 / \xi_2)$$

$$C_2 = \xi_1 (\xi_1 / \xi_2 + \cos \alpha / \sin \alpha)$$

$$\xi_1 = \sin \alpha + \mu_{s,i} \cos \alpha$$

$$\xi_2 = \cos \alpha - \mu_{s,i} \sin \alpha$$

$\alpha$ : Böschungswinkel

$\mu_{s,i}$ : Reibungskoeffizient zwischen Struktur und Eis, für Boden kann ein Wert von 0,7 angenommen werden

$W$ : Breite der Struktur

$\rho_w$ : Dichte des Wassers, Meerwasser: 1,028 t/m<sup>3</sup>, Süßwasser 1,0 t/m<sup>3</sup>

$g$ : Gravitation,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

- $t$ : Dicke des Eises  
 $E$ : E-Modul des Eises, Werte zwischen 2,5 MN/m<sup>2</sup> bis 11,5 MN/m<sup>2</sup>  
 $h$ : Höhe, bis zu der das Eis aufgeschoben wird  
 $S_F$ : Sicherheitszuschlag,  $S_F = 4,0$

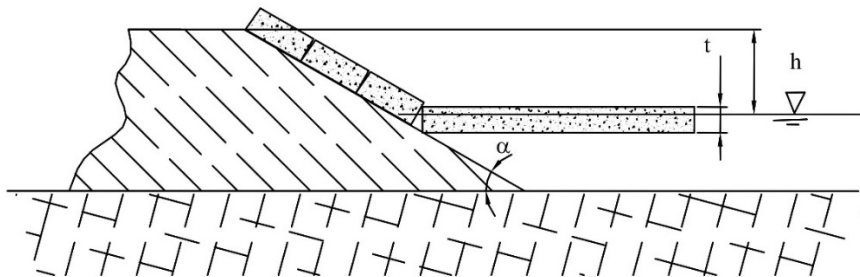


Fig. 2.9 Geometric parameters for level ice acting on inclined structures

Abbildung 9: Geometrische Parameter, Eis auf geneigten Strukturen, nach [24]

Für den Fall, dass auf der Böschung Trümmereis aufgetürmt wird, können die Kräfte gemäß [24] auf die Struktur mit der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$F_H = (F_B + F_{pt} + F_R + F_L + F_T) \cdot S_F$$

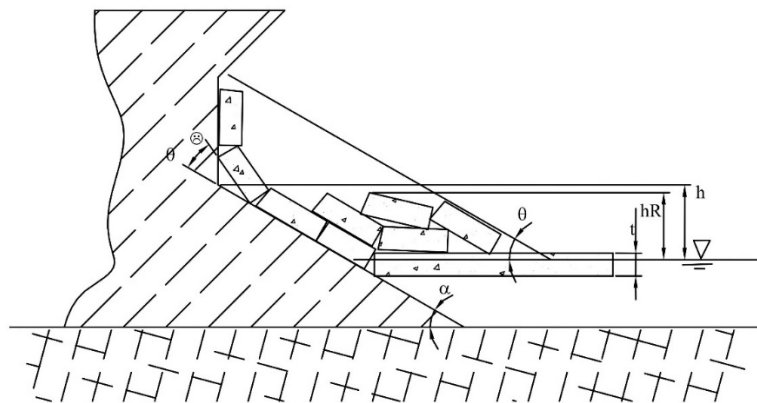


Fig. 2.10 Basic parameters for inclined structures with present rubble pile

Abbildung 10: Geometrische Parameter, Eis auf geneigten Strukturen mit Anhäufung von Trümmereis, nach [24]

Die fünf Kraftanteile  $F_B$ ,  $F_{pt}$ ,  $F_R$ ,  $F_L$ ,  $F_T$ , werden in [24] mit den folgenden Gleichungen angenähert:

F<sub>B</sub>: Eisbruchkraft. Je größer der horizontale Druck im Eis wird, desto größer wird die Biegefestigkeit. Die Kraft F<sub>B</sub> muss daher iterativ bestimmt werden:

$$F_B = C_1 \cdot \sigma_f \cdot D \cdot \left( \frac{\rho_w \cdot g \cdot t^5}{E} \right)^{1/4} \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot \ell}{4 \cdot D} \right) + C_2 \cdot h \cdot t \cdot D \cdot \rho_i \cdot g$$

mit den aus dem vorigen Abschnitt bekannten Variablen und

$\ell$ : charakteristische Länge

$$\ell = \left[ \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot \rho_w \cdot g \cdot (1 - \nu^2)} \right]^{1/4}$$

$\sigma_{f,i}$ : vergrößerte Biegefestigkeit des Eises, iterativ bestimmt zu

$$\sigma_{f,i} = \frac{F_{b,i-1} \{ \sigma_{f,i-1} \}}{L_C \cdot t} + \sigma_{f,0}$$

$$L_C = W + \frac{\pi^2}{4} \cdot \left( \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot \rho_w \cdot g \cdot (1 - \nu^2)} \right)^{1/4}$$

Die Querdehnzahl  $\nu$  des Eises kann dabei mit  $\nu = 0,33$  angesetzt werden.

F<sub>Pt</sub>: Kraft zum Durchschieben von Eisblöcken durch das Trümmereis.

$$F_{Pt} = W \cdot h_R^2 \cdot \mu_{i,i} \cdot \rho_i \cdot g \cdot (1 - n) \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \tan \theta}$$

mit den aus dem vorigen Abschnitt bekannten Variablen und

$h_R$ : Höhe der Aufschiebung auf der Böschung, kann gemäß Abbildung 10 kleiner sein als die Höhe zu der die Eisbrocken an einer Wand geschoben werden

$\mu_{i,i}$ : Reibung zwischen Eis und Eis, zwischen 0,1 und 0,2

$n$ : Porosität des Trümmereises, zwischen 0,2 und 0,4, sollte in situ bestimmt werden

$\theta$ : Winkel der Oberfläche des Trümmereises und der Horizontalen

F<sub>R</sub>: Zusätzliche Reibungskraft. Verursacht durch das Gewicht des Trümmereises auf der nachschiebenden Eisfläche.

$$F_R = \left[ \frac{1}{2} \cdot \mu_{i,i} \cdot (\mu_{i,i} + \mu_{s,i}) \cdot \rho_i \cdot g \cdot (1-n) \cdot h_R^2 \cdot \sin \alpha \cdot \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + \frac{1}{2} \cdot (\mu_{i,i} + \mu_{s,i}) \cdot \rho_i \cdot g \cdot (1-n) \cdot h_R^2 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + h_R \cdot t \cdot \rho_i \cdot g \cdot \left( \frac{\sin \alpha + \mu_{s,i} \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \right] \cdot \frac{W}{\cos \alpha - \mu_{s,i} \cdot \sin \alpha}$$

F<sub>R</sub>: Hebungskraft. Notwendig, um das Trümmereis anzuheben, bevor die Eisfläche auf der Böschung versagen kann.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot W \cdot h_R^2 \cdot \rho_i \cdot g \cdot (1-n) \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2} \cdot \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + \frac{1}{2} \cdot W \cdot h_R^2 \cdot \rho_i \cdot g \cdot (1-n) \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2} \cdot \tan \phi \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)^2 + \frac{\xi_1}{\xi_2} \cdot c_R \cdot W \cdot h_R \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)$$

mit den aus dem vorigen Abschnitt bekannten Variablen und

$\phi$ : innerer Reibungswinkel des Trümmereises, zwischen 30° und 60°  
 $c_R$ : Kohäsion des Trümmereises [kN/m<sup>2</sup>], kann mit der Dicke des Eises  $t_b$  in [m] bestimmt werden zu:

$$8 \cdot t_b \leq c_R \leq 24 \cdot t_b$$

F<sub>T</sub>: Kraft zum Drehen der Eisblöcke. Notwendig, um die Eisblöcke in die Vertikale vor einer vertikalen Wand zu drehen.

$$F_T = 1,5 \cdot t^2 \cdot \rho_i \cdot g \cdot W \cdot \frac{\cos \theta_L}{\sin \theta_L - \mu_{s,i} \cdot \cos \theta_L}$$

mit den aus dem vorigen Abschnitt bekannten Variablen und

$S_F$ : Sicherheitszuschlag,  $S_F = 4$  für  $t < 0,5$  m und  $S_F = 8$  für  $t > 0,5$  m

Die mit den obigen Gleichungen ermittelten Ergebnisse können nur eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Kräfte darstellen [24]. Die zur Bemessung von Bauteilen verwendeten Kräfte sollten durch Modellversuche und Expertenteams abgesichert werden.

Die genannten Werte für den Sicherheitsfaktor liefern jedoch auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

## 6.6 Carstensen (2008)

CARSTENSEN [7] gibt eine Gleichung zur Berechnung des dynamischen Eisdrucks, der beim Auftreffen einer Eisscholle auf ein Bauwerk wirksam wird. Der Berechnungsansatz hierfür ist einer russischen Norm entliehen, er basiert wiederum auf Arbeiten von KROZHAVIN [20].

Mit der Geschwindigkeit des Eisfelds bzw. - bei Unkenntnis hierüber - der Oberflächengeschwindigkeit des fließenden Gewässers, der Eisschollenfläche und -dicke wird in [7] die folgende Gleichung genannt:

$$F_{H,St} = 0,07 \cdot v_i \cdot h_i \cdot \sqrt{A_i \cdot \sigma_N} \quad [\text{MN}]$$

mit

$F_{H,St}$ :	Eisstöß [MN]
$v_i$ :	Geschwindigkeit des Eisfelds bzw. der Oberfläche des Fließgewässers [m/s]
$h_i$ :	Dicke der Eisscholle [m]
$\sigma_N$ :	Normfestigkeit des Eises, nach KORZHAVIN [20]: $\sigma_N = 0,45 \dots 0,75 \text{ MN/m}^2$

Zu der auf das Bauwerk wirkenden Kraft kommen noch die Anteile aus Schubkräften hinzu, die durch eine Windbelastung der Eisoberfläche und der Strömung des Gewässers an der Eisunterseite resultieren:

$$\tau_{Wind} = \rho_{Luft} \cdot C_1 \cdot v_{Wind}^2$$

$$\tau_{Wasser} = \rho_{Wasser} \cdot C_2 \cdot v_{Wasser}^2$$

Folgende Beiwerte  $C_1$  und  $C_2$  werden empfohlen:

Tabelle 7: Empfohlene Werte für  $C_1$  und  $C_2$ , nach [7]





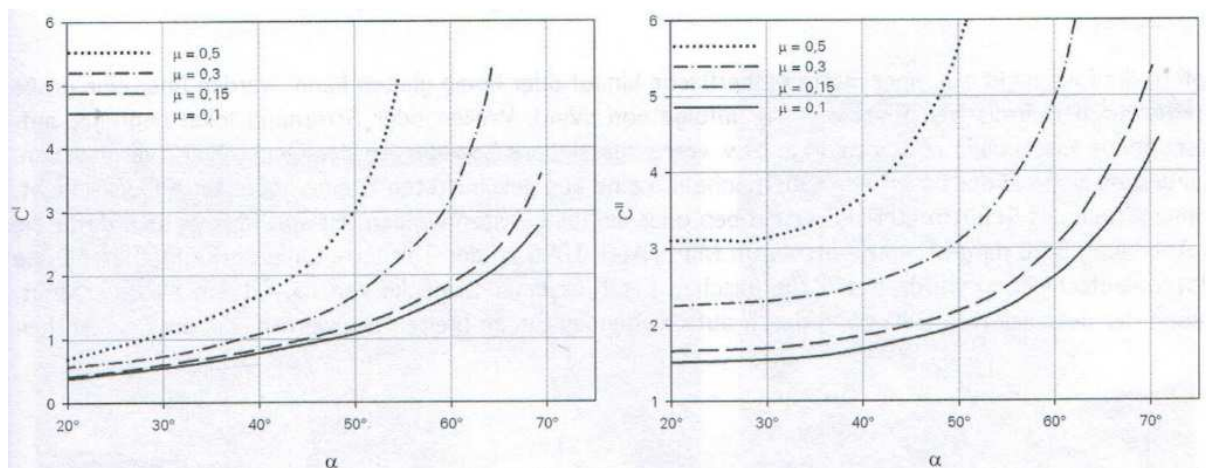


Abbildung 12: Beiwerte  $C^I$  und  $C^{II}$  [7]

und

$\sigma_f$ :	Biegefestigkeit des Eises
$h_i$ :	Eisdicke
$z$ :	Höhe des aufgeschobenen Eises
$\rho_i$ :	Dichte des Eises
$\rho_{Wasser}$ :	Dichte des Wassers
$E$ :	E-Modul des Eises
$C^I, C^{II}$ :	Beiwerte gem. Graphik in Abhängigkeit vom Böschungswinkel und des Reibungsbeiwerts zwischen Eis und Böschung

Friert eine Eisdecke am Ufer am Deckwerk an, so wird bei Hebungen und Senkungen des Wasserspiegels ein Belastungsmoment auf das Deckwerk ausgeübt, das mit der folgenden Gleichung bestimmt werden kann, vgl. [8]:

$$M_B = \sigma_f \cdot \frac{h_i^2 \cdot b}{6}$$

mit

$\sigma_f$ :	Biegefestigkeit des Eises
$h_i$ :	Eisdicke

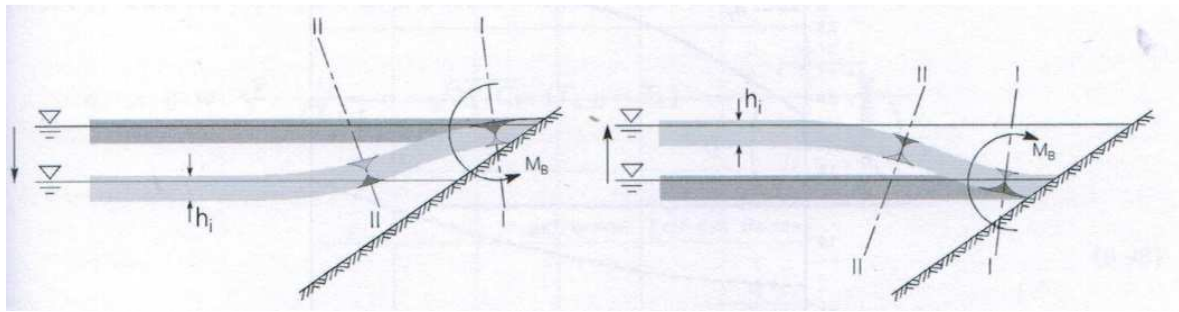


Abbildung 13: Spannungsverteilung in einer am Ufer angefrorenen Eisdecke, nach [7]

## 6.7 Bureau Veritas (2010)

BUERAU VERTIAS [16] gibt mit den nachfolgenden Gleichungen die maximale Belastung einer geböschten Struktur, bevor das Eis durch Biegebruch versagt, ohne jedoch das Aufschieben von Eistümmern zu berücksichtigen (dies wird im Ansatz von ICE ENGINEERING [12] gezeigt, vgl. Kapitel 6.4):

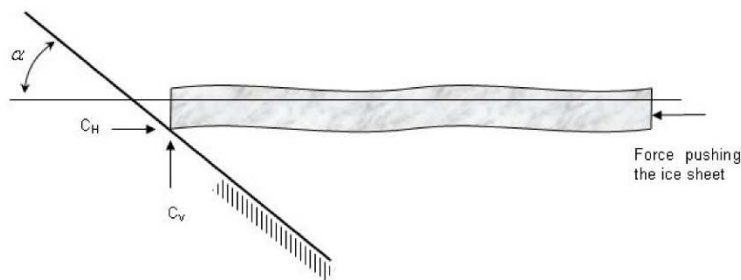


Abbildung 14: Kräfte einer Eisscholle auf eine geböschte Oberfläche, nach [16]

$$C_V \geq \frac{\sigma_f \cdot h^2}{6 \cdot l \cdot e^{-\pi/4} - h \cdot \tan(\alpha + \arctan \mu)} \quad [\text{N/m}]$$

$$C_H = C_V \cdot \tan(\alpha + \arctan \mu) = \frac{\sigma_f \cdot h^2 \cdot \tan(\alpha + \arctan \mu)}{6 \cdot l \cdot e^{-\pi/4} - h \cdot \tan(\alpha + \arctan \mu)} \quad [\text{N/m}]$$

mit

- $\sigma_f$ : Biegefestigkeit des Eises
- $h$ : Eisdicke
- $\alpha$ : Böschungswinkel gegen die Horizontale
- $\mu$ : Reibung zwischen Eis und Oberfläche der Böschung

$l$ : charakteristische Länge der Eisscholle:

$$l = \left[ \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu)^2 \cdot \rho_w \cdot g} \right]^{0,25}$$

$E$ : elastischer E-Modul des Eises, für Süßwasser ca. 1000 bis 3000 MN/m<sup>2</sup>

$\nu$ : Querdehnzahl des Eises, für Süßwasser ca. 0,33

$\rho_w \cdot g$ : spezifisches Gewicht des Eises

## 6.8 EAU (2012)

Die EAU [10] gibt für Eislasten  $p_0$  auf senkrechte „Ufereinfassungen und andere Bauwerke größerer Ausdehnung“ im Küstenbereich für Eisdicken zwischen  $0,25 \text{ m} \leq h \leq 0,75 \text{ m}$  den folgenden Bemessungsansatz:

$$p_0 = k \cdot h \cdot \sigma_0$$

mit

$p_0$ : mittlere Linienlast [MN/m]

$k$ : = 0,33, Kontaktbeiwert [-]

$h$ : Dicke des Eises

$\sigma_0$ : Eisdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>]

Für eine gebrochene Eisdecke ist nach HAGER [14] für Bühnen und Uferdeckwerke u.a. im Tidegebiet die folgende reduzierte, mittlere, waagrecht wirkende Linienlast  $p'_0$  anzusetzen:

$$p'_0 = 0,4 \cdot p_0$$

Liegen keine standortspezifischen ermittelten Werte für die Eisdicke vor, so können die Werte der folgenden Tabelle verwendet werden:

Tabelle 8: gemessene maximale Eisdicken als Richtwerte für die Bemessung nach [10]

Nordsee	max h [cm]	Ostsee	max h [cm]
Helgoland	30 bis 50	Nord-Ostsee-Kanal	60
Wilhelmshaven	40	Flensburg (Außenförde)	32
Leuchtturm „Hohe Weg“	60	Flensburg (Innenförde)	40
Büsum	45	Schleimünde	35
Meldorf (Hafen)	60	Kappeln	50
Tönning	80	Eckernförde	50
Husum	37	Kiel (Hafen)	55
Hafen Wittdün	60	Lübecker Bucht	50
		Wismar Hafen	50
		Wismar – Bucht	60
		Rostock – Warnemünde	40
		Stralsund – Palmer Ort	65
		Saßnitz – Hafen	40
		Koserow – Usedom	50

Im Binnenbereich wird die Eisdicke nach EAU [10] gemäß KORZHAVIN [20] aus der Summe der in einer Eisperiode täglich auftretenden Kältegrade abgeleitet werden:

$$h = \sqrt{\sum |t_L|}$$

mit  $t_L$  als Summe der Absolutbeträge der mittleren täglichen Minustemperaturen der Luft in °C. Liegen keine Messergebnisse vor, kann bei den Berechnungen eine Eisdicke von  $h \leq 0,3$  m angesetzt werden.

Für den Binnenbereich gibt die EAU [10] für Eislasten  $p_0$  auf senkrechte „Ufereinfassungen und andere Bauwerke größerer Ausdehnung“ den folgenden Bemessungsansatz:

$$p_0 = k \cdot h \cdot \sigma_0$$

mit

$p_0$ : mittlere Linienlast [MN/m]

$k$ : = 0,33, Kontaktbeiwert [-]

$h$ : Dicke des Eises

$\sigma_0$ : Eisdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>]

Auf eine geböschte Fläche kann nach KORZHAVIN [20] eine reduzierte horizontale Eisdruckkraft angesetzt werden:

$$p'_0 = k \cdot h \cdot \sigma_B \cdot \tan \beta$$

mit

$p'_0$ :	mittlere Linienlast [MN/m]
$k$ :	= 0,33, Kontaktbeiwert [-]
$h$ :	Dicke des Eises
$\sigma_B$ :	= $1/3 \sigma_0$ , Biegezugfestigkeit des Eises [MN/m <sup>2</sup> ]
$\tan \beta$ :	Böschungsneigung [°]

Für den thermischen Eisdruck auf Bauwerke bei schnellen Temperaturänderungen und gleichzeitiger Dehnungsbehinderung - z.B. enge, vereiste Hafenbecken - verweist die EAU 2012 auf aufgrund der schwierigen Ermittlung der den thermischen Eisdruck beeinflussenden Größen wie Eingangs- und Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenstrahlung etc. auf DIN 19704-1 [8], in der für den deutschen Küstenbereich mit Eisdicken von  $h < 0,8$  m über die Eisdicke eine gleichmäßig verteilte Flächenlast von  $0,25 \text{ MN/m}^2$  anzusetzen ist.

## 6.9 HPA, Richtlinie (2013)

Gemäß der Richtlinie [23] ist der Eisdruck in statisch ungünstiger Höhe zwischen NN -2,0 m und NN +5,0 m mit einer charakteristischen Liniensatzlast von  $p = 30 \text{ kN/m}$  auf die Bauwerke anzusetzen.

## 6.10 Lattermann (2014)

Die Belastungen aus Eisdruck werden vor allem durch die Dicke einer Eisschicht  $h_E$  und der Druckfestigkeit des Eises  $\sigma_0$  bestimmt. LATTERMANN [18] führt die Gleichungen zur Bestimmung von Eisdicken von stehenden bzw. fließenden Gewässern in Russland an:

$$h_E = 2,0 \cdot \sqrt{\sum T} \text{ für stehende Gewässer bzw.}$$

$$h_E = 3,68 \cdot \sqrt{\sum T} \text{ für stehende Gewässer,}$$

wobei  $\sum T$  die Summe der durchschnittlichen Tagestemperaturen unter  $0^\circ\text{C}$  vom Tag der Eisbildung an darstellt.

Für eine dynamische Eislast aus Eisschollen auf Böschungen durch sich aufschiebendes Eis und Überschreiten der Biegezugfestigkeit zitiert LATTERMANN [18] die EAU 1996 mit einem Ansatz einer horizontalen Linienlast von  $p = 100 \text{ kN/m}$  in ungünstiger Höhenlage. In der EAU 2012 werden aktuellere Ansätze diskutiert, vgl. Abschnitt 6.8.

Die statische Eisdruckkraft aus unter einer geschlossenen Eisdecke strömendem Wasser und aus Wind auf eine Ufereinfassung bzw. ein Bauwerk wird mit einer empirischen, nicht einheitentreuen Gleichung angegeben:

$$F_{st} = A_{Eis} \cdot [(F_1 + F_2 + F_3) \cdot \sin \rho' + F_4 \cdot \sin \beta_w] \text{ in [kN]}$$

mit

$$F_1 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot v \quad [\text{kN/m}^2], \quad v: \text{Fließgeschwindigkeit des Wassers [m/s]}$$

$$F_2 = \frac{50 \cdot h_E \cdot v^2}{100 \cdot L_E} \quad [\text{kN/m}^2], \quad L_E: \text{Länge der geschlossenen Eisdecke [m]}$$

$$F_3 = 0,92 \cdot h_E \cdot I \quad [\text{kN/m}^2], \quad I: \text{Fließgefälle [-]}$$

$$F_4 = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot v_w \quad [\text{kN/m}^2] \quad v_w: \text{Windgeschwindigkeit}$$

und

$\beta_w$ : Angriffswinkel des Winds,  $\beta_w = 90^\circ$  bei senkrechtem Angriff

$\rho'$ : Angriffswinkel des fließenden Wasser,  $\rho' = 90^\circ$  bei senkrechtem Angriff

Thermischer Eisdruck wirkt bei schnellen Temperaturänderungen und gleichzeitiger Dehnungsbehinderung auf Ufereinfassungen und andere Flächenbauwerke, z.B. in vereisten engen Hafenbauwerken. Für den thermischen Eisdruck als Belastung auf ein Ufer gibt LATTERMANN die folgende Gleichung an, nach der eine vom Eis bei Erwärmung erzeugte Linienlast berechnet werden kann:

$$F_{therm} = 9 \cdot h_E \cdot (T_0 + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_0}{t_E} \cdot (T_0 + 1)^2}$$

Dies ist in Flussläufen mit aufgebrochenen, eisversatzbildenden Eisflächen jedoch nicht zu erwarten.

An Böschungen angefrorene Eisdecken können bei Heben und Senken des Wasserspiegels Momente auf das Ufer übertragen. LATTERMANN gibt die folgende Gleichung zur Berechnung der Kräfte auf das Deckwerk an:

$$F = 200 \cdot v \cdot t_d \cdot \sqrt[4]{\frac{h_E^3}{\phi}} \quad [\text{kN/m}]$$

$$M = 2 \cdot v \cdot t_d \cdot \sqrt{\frac{h_E^3}{\phi}} \quad [\text{MNm/m}]$$

mit:

- v:                    Geschwindigkeit des Hebens oder Senkens des Wasserspiegels in [m/h]  
 t<sub>d</sub>:                Zeit, in der sich die Eisdecke beim Heben bzw. Senken verformt in [h]  
 t<sub>E</sub>:                Eistemperatur in °C

$$\phi = 1 + \frac{300}{\mu} \cdot \left[ t_d + 50 \cdot \left( 1 - e^{-0,4 t_d} \right) \right]$$

$$\mu = \left( 3,3 - 0,28 \cdot t_E + 0,083 \cdot t_E^2 \right) \cdot 10^4$$

Das Moment M kann jedoch nie größer werden, als das aus der Druck- bzw. Zugfestigkeit des Eises resultierende Grenzmoment M<sub>0</sub>:

$$M_0 = \frac{h_E^2 \cdot \sigma_z' \cdot \sigma_0' \cdot (1 + 2 \cdot k_E)}{6 \cdot (\sigma_z' + \sigma_0')} \quad [\text{MNm/m}]$$

Mit

$$\sigma_z' = \sigma_z \cdot e^{\frac{400 \cdot \tau^*}{\mu}} \quad [\text{MN/m}^2]$$

$$\sigma_0' = \sigma_0 \cdot e^{\frac{400 \cdot \tau^*}{\mu}} \quad [\text{MN/m}^2]$$

- τ\*:                    Zeit, in der sich der Wasserspiegel um h<sub>E</sub> ändert  
 σ<sub>0</sub>, σ<sub>z</sub>:            Eisfestigkeiten auf Druck und Zug aus der Tabelle 9



Tabelle 9: Eisfestigkeiten  $\sigma_z$  und  $\sigma_0$ , Beiwert  $k_E$  aus [18]

**Tabelle 1.5** Eisfestigkeiten auf Zug und Druck

$t_E$ in °C	$\sigma_z$ in MN/m <sup>2</sup>	$\sigma_0$ in MN/m <sup>2</sup>
oberer Teil der Eisdecke		
0 bis -2	0,7	1,8
-3 bis -10	0,8	2,5
-11 bis -20	1,0	2,8
unterer Teil der Eisdecke		
0 bis -2	0,5	1,2

**Tabelle 1.5**  $k_E$ -Werte für Gl. (1.21)

$\frac{400 \cdot \tau^*}{e \cdot \mu}$	$\leq 0,8$	0,85	$\geq 0,9$
$k_E$	1,0	1,5	2,0

In Flussläufen im Binnenbereich mit aufgebrochenen, eisversatzbildenden Eisflächen sind diese Kräfte jedoch ebenfalls nicht zu erwarten.

### 6.11 Weitere Literaturstellen:

BRINKMANN [5] verweist bei den Berechnungsansätzen auf die EAU [10]. Die EAK [9] gibt lediglich Hinweise zur Berechnung des Eisdrucks auf senkrechte schlanke Stützen und verweist auf die Gleichung nach KORZHAVIN [20], vgl. auch HAGER [14].

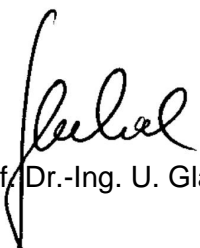
## 7 Zusammenfassung

Der linksseitige Elbdeich zwischen Bleckede und Radegast soll möglicherweise zur Verbesserung der Abflussverhältnisse zurückverlegt werden. Durch die Deichrückverlegung wird südlich von Radegast im Prallhang eine „Bucht“ angelegt. Es wurden Befürchtungen geäußert, dass sich bei Eishochwasser hier vermehrt Eisschollen aufstauen und die Deiche zusätzlich belasten.

In diesem Bericht werden zunächst Ansätze zum Eisdruck auf Deiche zusammengestellt. Aus den dargestellten Ansätzen zur Berechnung der Eiskräfte auf Bauwerke – zumal nicht explizit für Böschungen mit Bodenmaterial formuliert – wird ersichtlich, dass die von den Autoren empirisch hergeleiteten Gleichungen untereinander Unterschiede aufweisen und kein einheitliches Modell liefern. Einfache Gleichungen, wie z.B. in der EAU [10] oder HAGER [14], stehen aufwändigen Berechnungen gegenüber, wie z.B. im GERMANISCHEN LLYOD [24]. Viele Autoren weisen auf diese Problematik hin, viele empfehlen die Durchführung von Messungen am Bauwerk im Falle der Eisbelastung, um die berechneten Werte abzusichern.

Die in diesem Bericht vorgestellten Eisdruckansätze werden im Folgebericht auf die Bedingungen an der Elbe südlich von Radegast übertragen und in die Standsicherheitsberechnungen implementiert.

  
Dr.-Ing. C. Stoewahse  


  
Prof. Dr.-Ing. U. Glabisch

## 8 Literatur

- [4] Abbot, M.B., Price, W.A.: Coastal, Estuarial an Harbour Engineers' Reference Book, CRC Press, 1994
- [5] Brinkmann, B.: Seehäfen, Planung und Entwurf, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [6] Barjenbruch, U.: Wärmehaushalt von Kanälen, Mitteilungsblatt 79 der Bundesanstalt für Wasserbau, 1988
- [7] Carstensen, D.: Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen, Heft 37 der Dresdener Wasserbaulichen Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden, 2008
- [8] DIN 19704-1, Stahlwasserbauten, Deutsches Institut für Normung, e.V., Berlin, 1998
- [9] EAK 2002, Korrigierte Ausgabe 2007, Empfehlungen für die Ausführungen von Küstenschutzbauwerken, in: Die Küste, Kuratorium für die Forschung im Küsteningenieurwesen, Heft 65, Verlag Boyens & Co., Heide, 2007
- [10] EAU 2012, Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen, 11. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 2012
- [11] Empfehlungen des Arbeitsausschusses Sportboothäfen und wassertouristische Anlagen, Kapitel 3: Grundlagen für Entwurf und Bemessung, Lasten aus Eis, HTG Hafentechnik, Schifffahrt, Logistik, Hamburg, 2011
- [12] Engineering and Design, Ice Engineering, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2002
- [13] Fellin, W.: Einführung in Eis- Schnee- und Lawinenmechanik, Springer Verlag, 2013
- [14] Hager, M.: Eindruck, in Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, Geotechnische Grundlagen, 6. Auflage, 2001, Kapitel 1.14, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [15] Empfehlungen des Arbeitsausschusses Sportboothäfen und wassertouristische Anlagen, Kapitel 3: Grundlagen für Entwurf und Bemessung, Lasten aus Eis, Hafentechnische Gesellschaft HTG, 2011
- [16] Ice Characteristics and Ice/Structure Interactions, Bureau Veritas, Marine Division general Conditions, Guidance Note NI 565 DT R00 E, September 2010
- [17] Ice Pressure against Structures, Preceedings of a Conference held at Laval university, Quebec, November 1966
- [18] Lattermann, E.: Wasserbau-Praxis mit Berechnungsbeispielen, 4. Auflage, Beuth Verlag, 2017

- [19] Michel, B.: Ice Pressure on Engineering Structures, U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory , Hanover, New Hampshire, 1970
- [20] Korzhavin, K.N.: Action of Ice on Engineering Structures, Übersetzung ins Englische, U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory , Hanover, New Hampshire, 1971
- [21] Kovacs, A.: Sea Ice, Part II, Estimating the Full-Scale Tensile, Flexural, and Compressive Strength of First-Year Ice, U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, September 1996
- [22] Plagemann, Vorschlag zum Ansatz von Eisbelastungen auf Bauwerke, Bauingenier 63, 1988, S. 543 – 549
- [23] Richtlinie Berechnungsgrundsätze für Hochwasserschutzwände, Flutschutzanlagen und Uferbauwerke im Bereich der Tideelbe der Freien und Hansestadt Hamburg, Hamburg Port Authority, 2013
- [24] Rules and Guidelines, IV Industrial Services, Guideline for the Construction of Fixed Offshore Installations in Ice Infested Waters, Germanische Lloyd Oil and Gas GmbH, Hamburg, 2007
- [25] Schuh, A.: Eishochwasser an Oder und Elbe aus historischen und meteorologischen Gesichtspunkten und im Hinblick auf mögliche Gefährdungen, Dissertation, Technische Universität Cottbus, 2011
- [26] Shore Protection Manual, Volume I + II, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 1987
- [27] Tryde, P.: Ice Forces, Journal of Glaciology, Vol. 19, No. 81, 1977