

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 86 (1968)
Heft: 31

Artikel: Das Problem der Tragfähigkeit der Eisdecke anlässlich der Zürcher Seegfrörni 1963
Autor: Röthlisberger, Hans
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-70101>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

direkten Beobachtungen aus dem Verbauegebiet ermittelt (Windeinfluss!). Andererseits beruht die Berechnung der extremen Schneehöhe H auf der aus langjährigen meteorologischen Reihen benachbarter Beobachtungsstationen abgeschätzten mittleren extremen Schneehöhe H einer Verbaueungslage. Da die verwendbaren meteorologischen Beobachtungsreihen sich meistens nur über die letzten 20 ÷ 30 Jahre zurückerstrecken, liegt hier ein grosser Unsicherheitsfaktor für die Bemessung der Werkhöhen unserer Stützverbaueungen. Eingeschnellte und überdeckte Anrissverbaueungen stützen die Schneedecke nicht mehr vollständig ab, und das Anbrechen grossflächiger Lawinen über der Verbaueung wird wieder möglich. Wenn der letzte schnee- und lawinenreiche Winter 1967/68 einige Lehren gebracht hat, dann ist es neben der Unterstreichung der Bedeutung des Windes vor allem die Erkenntnis, dass dem Problem der Abstimmung der Werkhöhen der Stützverbaueungen auf die maximalen Schneehöhen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Neben der Überprüfung der Werte der mittleren extremen Schneehöhe einer Region sollte gesamtschweizerisch an geeigneten Beispielen versucht werden, die durchschnittliche windbedingte Erhöhung dieses Wertes für ganze Leelagen (meist Verbaueungslagen) zu erfassen.

Dies sei anschliessend an einem Beispiel einer Lawinenverbaueung des Berner Oberlandes dargestellt: Die grösstenteils südost-exponierte Lawinenverbaueung Tanngrindel (Brienz), 1600 ÷ 2000 m ü. M., mit total 2093 Laufmetern Stützwerken, bedeckt eine leeseitige Fläche von rund 4 ha Grösse. Auf dieser Verbauefläche waren die Stützwerke sowohl am 21. 3. 67 wie am 21. 1. 68 praktisch randvoll eingeschnellt oder leicht überdeckt (1967 15% der Werke, 1968 rund 75% der Werke nicht mehr sichtbar). Es kann somit gesagt werden, dass die mittlere Schneehöhe in der ganzen Verbaueung die mittlere lotrechte Werkhöhe etwas übertroffen hat, die mit 390 cm errechnet wurde. Demgegenüber wird für die Region Brienzgrat oberhalb 1700 m ü. M. mit einer mittleren extremen Schneehöhe H von 300 cm (ohne Windeinfluss!) gerechnet. Falls diese letztere Berechnungsannahme stimmt, entfallen auf windbedingte Schneeeablagerungen im ganzen leeseitigen Verbauegebiet im Durchschnitt 90 cm. Ein gewisser und schwer zu bestimmender Anteil dieser zusätzlichen 90 cm kann dabei auf eine windbeeinflussende Wirkung der Stützwerke selbst zurückzuführen sein.

Stützverbaueungen haben zur Aufgabe, das Abgleiten von Lawinen überhaupt zu verhindern, oder doch deren Ausbreitung sowohl flächen- wie geschwindigkeits- und mengenmässig in beschränktem Rahmen zu halten. Diese Formulierung nimmt Rücksicht darauf, dass bei offenen Verbaueungsrändern Lawinen in die Verbaueung einreissen können, dass die Anbruchsicherung in einer Stützverbaueung namentlich für die alleroberste Neuschneesicht und für Lockerschnee nicht vollständig ist und ein Verbaue bei ungünstigem, namentlich konkavem Geländeprofil mit Steilaufschwüngen viele Probleme aufgibt. Nach dieser Umschreibung dürfen wir also von einer Stütz-

verbaueung nicht in allen Fällen eine absolute Schutzwirkung erwarten. Ein Restrisiko liegt in den dargestellten Unzulänglichkeiten und vor allem in ausserordentlichen Wettersituationen.

Gerade weil sich die Betrachtungen dieses Aufsatzes vorwiegend mit den Grenzen der Möglichkeit des modernen Anrissverbaues befassen, müssen auch die *Erfolge* dieser Massnahmen kurz dargestellt werden. In den beiden Alpenländern, die sich am meisten mit Problemen des Lawinenschutzes auseinandersetzen müssen, wurden gegliederte Stützverbaueungen als Hauptschutzmassnahmen von folgendem Ausmass erstellt:

Schweiz 1936 bis 1966 permanente Stützverbaueungen	89074 m
Stützverbaueungen aus Holz	31613 m
Oesterreich 1945 bis 1967 Total Stützverbaueungen	56965 m

In der Schweiz betrugen hiezu die Gesamtkosten (Verbaue einschliesslich Begründung neuer oder Wiederherstellung zerstörter Schutzwaldungen) seit 1951 rund 100 Mio Fr.

Seit Beginn der gegliederten Stützverbaueungen in grossem Ausmass (nach 1951) sind keine Schadenfälle von Lawinen bekannt, die aus vollständig verbaueuten Anrissgebieten stammen. Auch im letzten Lawinenwinter 1967/68 haben die gegliederten Stützverbaueungen ihre Aufgabe vollauf erfüllt. Diese positiven Feststellungen dürfen für die Schnee- und Lawinenforschung als Antrieb zur unentwegten Weiterführung ihrer Arbeiten und für die Gebirgskantone und den Bund als Rechtfertigung ihrer Anstrengungen auf dem Gebiete des Lawinenverbaues gelten.

Literaturverzeichnis

- [1] Haefeli, R.: Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik in «Der Schnee und seine Metamorphose». Beitrag zur Geologie der Schweiz, Geotechn. Serie Hydrologie, Lfg. 3. Bern 1939. – Neuere Entwicklungstendenzen und Probleme des Lawinenverbaues im Anbruchgebiet, in No. 26 «Beiheft zu den Zeitschriften des Schweiz. Forstvereins» 1951. – Fundationsprobleme des Lawinenverbaues in «Mitteilungen VAW an der ETH», Nr. 32, 1954. – Von den Anfängen der Schnee- und Lawinenforschung in «Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen» 1961.
- [2]
- [3]
- [4]
- [5] Bucher, E.: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbaues in «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechn. Serie Hydrologie, Lfg. 6», Bern 1948.
- [6] Lawinenverbaue im Anbruchgebiet, Richtlinien für den permanenten Stützverbaue (Eidg. Inspektion für Forstwesen, Bern, 1961).
- [7] Kommentar zu den Richtlinien für den permanenten Stützverbaue vom Februar 1961. (Mitteilungen des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Mai 1963, Nr. 19).

Adresse des Verfassers: Walter Schwarz, dipl. Forst-Ing. ETH/SIA, 3800 Interlaken, Renggliweg 3.

Das Problem der Tragfähigkeit der Eisdecke anlässlich der Zürcher Seegfrörni¹ 1963

Von Dr. H. Röthlisberger, VAW – ETH, Zürich

DK 627.17:549.511.1

Einleitung

Als sich gegen Ende Januar 1963 die Eisdecke im untersten Zürichseebecken schloss, gelangte das Inspektorat der Stadtpolizei mit dem Wunsch um Beratung in technischen Fragen an die Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH und an die Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt (MZA). Dem Gesuch wurde gerne entsprochen, wurde doch damit eine Tradition fortgesetzt, dass die Stadt bei Seegfrörnen an die ETH und an die MZA gelangt. Im Februar/März 1929 stützte sich die Stadtpolizei auf Angaben von Professor Albert Heim und Direktor Julius Maurer. Im Februar 1940, als sich die Eisfläche bis nach Zürich auszubreiten begann, arbeitete der damalige Chef der Erdbau-Abteilung der VAW, Dr. R. Haefeli, ein Programm aus, das eingehende Belastungsversuche und die technische Prüfung von Eisproben in Zusammenarbeit mit der EMPA vorsah, die in der Folge nicht zur Ausführung kamen, weil frühzeitig Tauwetter einsetzte. Auch 1941 konnten die neuerlichen Vor-

schläge der EMPA nicht ausgeführt werden. 1963 wurde die Abteilung für Hydrologie und Glaziologie der VAW mit der Beurteilung der Tragfähigkeit des Eises betraut, unterstützt und beraten durch die Erdbau-Abteilung und die Direktion. Die Arbeiten wurden in direktem Kontakt mit der Seepolizei ausgeführt. Allen Beteiligten, insbesondere dem Inspektorat der Stadtpolizei als Auftraggeber, sei an dieser Stelle für die Förderung der Untersuchungen gedankt. Besonderen Dank verdienen auch die amerikanischen Kollegen des U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL, früher SIPRE), die uns mit ihrer grossen Erfahrung auf dem Gebiet der Eistragfähigkeit behilflich waren.

Frühere Erfahrungen

Die Tragfähigkeit des Eises auf zugefrorenen Seen und Flüssen hat in nordischen Ländern sowohl wirtschaftliche wie militärische Bedeutung, wobei in erster Linie die schweren Einzellasten interessieren. Im militärischen Schrifttum sind aber auch Angaben für einzelne Personen oder Truppenverbände zu finden (Tabelle 1), während uns die früheren Seegfrörnen selbst die besten Unterlagen für grosse Volksmassen liefern. Vom untersten Zürichseebecken wissen wir, dass das Eis am 25. Januar 1880 bei 13 ÷ 15 cm, am 27. Januar 1891

¹) Mundartausdruck für das totale Gefrieren der Seen in genügender Stärke, so dass grosse Volksmassen die Eisfläche betreten können. Da dies in Zürich im Mittel nur etwa alle 30 Jahre einmal geschieht, wird die Seegfrörni als grosses Volksfest auf dem Eis gefeiert, wobei die Stadtpolizei die Verantwortung für die Sicherheit der Bevölkerung zu übernehmen hat.

Tabelle 1. Für das Betreten der Eisdecke erforderliche Eisdicke nach einer Zusammenstellung von H. Brunk [1].

Belastung durch	Mindestabstand m	Last kg	Eisdicke cm
Einzelne Schützen auf Ski	5	100	4
Infanterie in geöffneter Ordnung	5	100	5
Einzelne Personen ohne Lasten	2-3	100	5-8
Infanterie in Reihe mit doppelten Abständen	7	100	7
Infanterie in Marschkolonne			10
Einzelne Pferde	10	750	10
Einzelne Personen ohne Lasten in Reihen			10
Reiter			10-15
Infanterie und Kavallerie in Marschkolonne mit leichten Fahrzeugen			15
Einzelne Schlitten mit bis zu 2 t Last	15		15

bei 9 cm und am 21. Februar 1929 bei durchschnittlich $11 \div 12$ cm freigegeben wurde. Nur von 1880 ist ein Missgeschick durch Massenbesuch bekanntgeworden, das leicht hätte tragisch ausfallen können. Es wird gemeldet, dass am 8. Februar anlässlich eines abendlichen Eisballes mit Lampions, Polonaise und Feuerwerk bei einer Ansammlung von 10000 bis 15000 Personen plötzlich die Menge unter Geschrei in panischer Eile auseinanderstob, wobei die Leute nasse Füße kriegten [2]. Das Eis war rund 30 cm mächtig.

Trotz der Erfahrung von früheren Seegfrörnen war es Ende Januar 1963 nicht leicht, zu entscheiden, bei welcher Mächtigkeit das Eis freigegeben werden könne, da der früher jeweils vorhandene Sicherheitsfaktor unbekannt war. Es war deshalb zunächst ungewiss, wie der gewachsenen Bevölkerungszahl (mehr als 50%ige Zunahme seit 1929 auf Stadtgebiet allein!) Rechnung zu tragen sei. Vor allem galt es, zur Abschätzung der Sicherheit neuere theoretische und experimentelle Arbeiten zu berücksichtigen und die Materialeigenschaften des Zürichsee-Eises zu überprüfen. Die dabei angestellten Überlegungen, ergänzt durch seitherige Erkenntnisse, sind im folgenden dargestellt. Die wichtigen, das viskoelastische Verhalten des Eises berücksichtigten Arbeiten [12] und [13] waren dem Autor zur Zeit der Niederschrift des Manuskripts leider nicht bekannt.

Einzellasten

Das Einbrechen einer Last im Eis wickelt sich in mehreren Phasen ab. Der erste Riss bildet sich an der Eis-Unterfläche vom Zentrum radial ausstrahlend, gefolgt von weiteren Radialrissen in sternförmiger Anordnung. Diese Phase ist ungefährlich. Erst wenn die Last genügend erhöht wird, entstehen rechtwinklig zu den Radialrissen in einigem Abstand vom Zentrum Risse an der Eisoberkante, die Tangentialrisse, die sich zu einem mehr oder weniger konzen-

Bild 1. Belastungsversuch auf dem Zürichsee in fortgeschrittenem Stadium. Kreuzungsstelle von Radial- und Tangentialriss (Kreisriss)

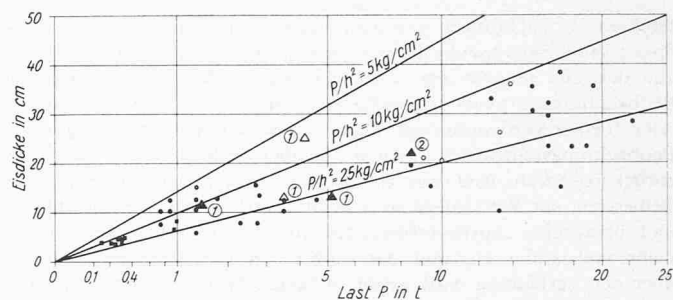


Bild 2. Eisdicken auf Seen und Flüssen, bei denen Einzellasten getragen wurden, bzw. durchgebrochen sind (leere, bzw. ausgefüllte Signaturen)
○ ● Nach Meyerhof [5], Fig. 8, Seite 131
△ ▲ Seegfröni 1963; 1 Belastungsversuche auf dem Zürichsee, 2 Einbruch eines Lastwagens auf dem Hallwilersee
■ Nach Brunk [1], Tafel 15 und 16 (Reduktion der Mächtigkeit von Schnee-Eis auf die Hälfte)

trischen Kreisriss um die Last schliessen (Bild 1). An dieser Scharnierlinie werden nun die durch die Radialrisse vorgezeichneten Sektoren stärker nach unten gedrückt, erstaunlicherweise aber ohne ganz nach unten zu klappen, da sie gegenseitig verkeilt sind. Doch erfolgt der Durchbruch nach einiger Zeit auch wenn die Last nicht weiter erhöht wird. Vorher entstehen weitere Tangentialrisse sowohl innerhalb wie ausserhalb des ersten, und auch die Zahl der Radialrisse wächst weiter. Der endgültige Durchbruch erfolgt im allgemeinen unmittelbar an der Peripherie der Last durch Zerdrückung des am stärksten beanspruchten Eises an den Sektorensitzen und durch Abscherung. Im wesentlichen sind also drei Hauptphasen zu unterscheiden:

1. Bildung der Radialrisse
2. Bildung der Tangentialrisse
3. Durchbruch der Last

Die verschiedenen Phasen erfordern unterschiedliche Berechnungsweisen.

Bei geringer Belastung ist die Durchbiegung proportional der aufgetragenen Last, die Berechnung ist auf der Basis der Elastizitätstheorie möglich mittels der Formeln, die für dünne Platten auf elastischer Unterlage längst entwickelt worden sind. Bei Belastung entsteht eine glockenförmige Vertiefung in der Eisdecke, in der die Last wie in einem Boot getragen wird. Das Gewicht der Last ist gleich dem Gewicht des Wassers, das infolge der Deformation der Platte verdrängt wird. Für die Punktlast sowie für die gleichmässig auf kreisförmiger Fläche verteilte Last lässt sich die Biegelinie durch Zylinderfunktionen beschreiben [3], [4]. Die elastische Durchbiegung w_0 im Zentrum einer Punktlast P , die einer unendlichen Platte aufliegt, beträgt:

$$(1) \quad w_0 = P/8 C_b L^2,$$

wobei

$$(2) \quad L = \left[\frac{E h^3}{12 (1 - \nu^2) C_b} \right]^{1/4}.$$

L wird als elastische Länge bezeichnet, E ist der Elastizitätsmodul, h die Eisdicke, ν die Poisson-Konstante und C_b die Bettungsziffer, die in unserem Falle gleich dem spezifischen Gewicht des Wassers $\gamma_w = 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ ist.

Es lassen sich weiter die maximalen Biegespannungen ermitteln. Für die gleichmässig auf eine kreisförmige Fläche vom Radius a verteilte Last wird häufig nach Westergaard der Ausdruck

$$(3) \quad \sigma_{\max} = 1,1 (1 + \nu) (10 \log \frac{L}{a} + 0,26) P/h^2$$

verwendet, der die Maximalspannung an der Eis-Unterfläche im Zentrum der Last angibt [5], [6].

Die Last, bei der sich der erste Radialriss bildet, wird berechnet, indem man in (3) σ_{\max} gleich der Biegezugfestigkeit σ_{bz} setzt:

$$(3a) \quad P_{\text{rad}} = \sigma_{bz} h^2 / 1,1 (1 + \nu) (10 \log \frac{L}{a} + 0,26).$$

Es stellt sich dabei die Frage, inwieweit die Belastungszeit wegen Überschreitens der Elastizitätsgrenze eine Rolle spielt.

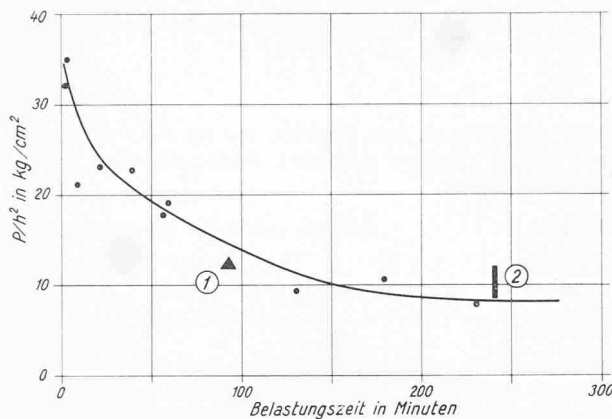


Bild 3. Beobachtungen über die Zeitspanne, nach der gewisse Lasten bei unterschiedlichem Faktor P/h^2 durchs Eis gebrochen sind, nach Assur [4], Fig. 1, Seite 919, ergänzt durch das Resultat des Belastungsversuches vom 30. Januar 1963 auf dem Zürichsee; 1 Belastung mit 7 Fässern ohne Berücksichtigung der Vorbelastung mit 5 Fässern, 2 mit Berücksichtigung der Vorbelastung

Während die Poisson-Konstante meistens mit rund $1/3$ angegeben wird, bewegen sich die Werte in der Literatur für E und σ_{bz} in weiten Schranken, für E zwischen 5000 kg/cm² und dem dynamischen Wert von 90000 ÷ 100000 kg/cm², für σ_{bz} zwischen rund 5 kg/cm² und 20 kg/cm² [1], [6], [7], wobei die untere Grenze bei Frühjahrsbedingungen sogar unter 1 kg/cm² sinken kann [8]. Bei Belastungsversuchen mit Fässern auf dem Zürichsee ergaben sich für E aus der Durchbiegung im Zentrum der Last bei geringer Messgenauigkeit relativ hohe Werte zwischen 25000 und 100000 kg/cm². Für $E = 66700$ kg/cm² wurde σ_{bz} mit 3,3 bis 6,3 kg/cm² ermittelt. Im allgemeinen ist die Eisdicke wegen des Dickenwachstums (Änderung des Temperaturgradienten) und wegen veränderlicher Lufttemperatur thermisch vorgespannt, was die grosse Streuung bei der Bestimmung der Materialkonstanten auch bei vollständiger Homogenität des Eises zum Teil erklären dürfte. Da die Bildung der Radialrisse nicht zum Einbrechen der Last führt, würde nach Gl. (3a) die Tragfähigkeit wesentlich unterschätzt. Bei kurzfristiger Belastung trägt das Eis ein Mehrfaches, und auch für grössere Belastungszeiten kann die Last noch erhöht werden.

Es hat nicht an Arbeiten gefehlt, in denen auch die späteren Phasen des Einbruchs einer Einzellast theoretisch oder experimentell untersucht wurden [1], [4], [5], [9]. Wenn bis jetzt keine Einigkeit über das Vorgehen erzielt werden konnte, so liegt das in der Ungewissheit, welches Modell für die plastischen Eigenschaften des Eises zu verwenden ist, oder besser gesagt, wo die Grenzen der Anwendbarkeit einzelner Modelle liegen.

Empirisch wurde gefunden, dass auch für die Bruchlast die Proportionalität zum Quadrat der Eisdicke wie für P_{rad} gilt, was Bild 2 veranschaulicht. In dieser graphischen Darstellung sind die Eisdicken aufgetragen, bei denen die jeweiligen Lasten zum Teil getragen wurden, zum Teil aber eingebrochen sind (zur Linearisierung ist in der Abszisse $x = \sqrt{P}$ verwendet worden). Es zeigt sich, dass bei Belastungsfaktoren $P/h^2 < 5$ kg/cm² keine, und zwischen 5 und 10 kg/cm² nur ausnahmsweise Lasten durchgebrochen sind, während bei P/h^2 über 25 kg/cm² in allen Fällen Bruch erfolgte. Im Diagramm sind zwei wichtige Faktoren nicht berücksichtigt, welche zum Teil für die relativ grosse Streuung verantwortlich sein dürften, nämlich die Dauer der Belastung und die Grösse der belasteten Fläche. Für eine genauere Betrachtung müssen diese beiden Faktoren in Rechnung gesetzt werden.

Bild 3 gibt die Beziehung zwischen Belastungsfaktor P/h^2 und Belastungszeit nach Assur [4] für Einzellasten mit relativ grosser Standfläche, unter anderem beruhend auf Versuchen mit einem kreisrunden Wassertank von 3,6 m Durchmesser. Das Ergebnis des unten beschriebenen Belastungsversuches vom Zürichsee passt gut in Assurs

2) Ein bequemer Wert von rund $2/3$ des dynamischen E -Moduls, der mit $\nu = 1/3$ für den Faktor $\left[\frac{E}{12(1-\nu^2)\gamma_w} \right]^{1/4}$ den Wert von 50 cm^{1/4} ergibt; infolge des kleinen Exponenten ist die Rechnung auf die Wahl von E recht unempfindlich.

Tabelle 2. Maximale Biegespannungen bei Belastung im elastischen Bereich

Anordnung der Last	y	σ_{max}
	$\frac{\pi}{4} L_1$	$\frac{3}{4} \sqrt{2} e^{-\frac{\pi}{4}} q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2 = 0,485 q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2$
	$\frac{\pi}{4} L_1$	$\frac{3}{2} \sqrt{2} e^{-\frac{\pi}{4}} q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2 = 0,97 q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2$
	$y_1 = \frac{\pi}{4} L_1$ $y_2 = \frac{5\pi}{4} L_1$	$\frac{3}{2} \sqrt{2} \left(e^{-\frac{\pi}{4}} + e^{-\frac{5\pi}{4}} \right) q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2 = 1,01 q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2$
Kreisfläche mit Radius y $\nu = \frac{1}{3}$	$1,72 L = 1,22 L_1$	$0,92 q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2$

o = Ort maximaler Biegespannung

y = Distanz des Ortes maximaler Biegespannung von den Rändern der belasteten Fläche; σ_{max} = maximale Biegespannung

Diagramm. Für die theoretische Erfassung der Belastungszeit sei auf [12], für weiteres Beobachtungsmaterial auf [13] verwiesen.

Der Radius a der belasteten Kreisfläche ist in einer Formel von Meyerhof [5] für die Bruchlast berücksichtigt, bei der sich der erste Tangentialriss bildet (bei rein plastischem Verhalten des Eises):

$$(4) \quad P_{tan} = 0,825 \pi (1 + 3 a/2 L) \sigma_s h^2, \quad \text{für } 0,05 < a/L < 1,$$

mit σ_s = Streckgrenze. Alternativformeln finden sich in der selben Arbeit von Meyerhof und bei Assur [4], [9]. Die Last P_{tan} ist als Bruchlast aufzufassen, bei welcher der Durchbruch erst nach einiger Zeit erfolgt.

Während der Seegfrörni wurde auf einen Belastungsversuch abgestellt, der vor Freigabe der Eisfläche am 30. 1. 1963 zur Ausführung kam. Wegen der knappen Zeit, die für Vorbereitung und Versuch zur Verfügung stand, musste eine möglichst einfache Versuchsanordnung gewählt werden. Diese hat man in der Belastung der Eisdicke mit 7 Blechfässern zu je 200 l gefunden, welche rosettenartig in dichtester Anordnung aufgestellt und mit Wasser vollgepumpt wurden. Bei einem Durchmesser der Fässer von 60 cm ergab sich so ein Umkreis der Belastungsfläche mit dem Radius $a = 90$ cm. Die mittlere Eisdicke betrug 11,35 cm. Daraus folgt für $E = 66700$ kg/cm² $L = 310$ cm und $a/L = 0,29$. Der erste Radialriss bildete sich schon beim Füllen des ersten Fasses, während der Tangentialriss erst entstand, als das 7. Fass fast gefüllt war. Vorgängig war eine Last von 1140 kg während rund $2\frac{1}{2}$ h getragen worden. Der Durchbruch der 7 Fässer (Gesamtgewicht rund 1540 kg) erfolgte erst nach weiteren 85 min, wobei der Versuch durch eindringendes Wasser etwas gestört war.

Aus dem Belastungsversuch wurde nach Formel (4) die Streckgrenze σ_s mit 3,2 kg/cm² bestimmt, und durch Extrapolation auf $a = L = 310$ cm ergibt sich, dass bei der vorhandenen Eisdicke von $h = 11,35$ cm eine Kreisfläche von 6,20 m Durchmesser mit einer gleichmässig verteilten Last von 2670 kg hätte belastet werden können, was einer spezifischen Belastung von 89 kg/m² entspricht (nach den Alternativformeln von Meyerhof oder Assur wäre die zulässige Belastung noch etwas grösser ausgefallen). Als Ansammlung von Personen umgedeutet erhält man: 45 Personen zu 60 kg auf je $2/3$ m² Fläche. Für grössere Eisdicken wurden entsprechende Berechnungen durchgeführt. Dass die Extrapolation von $a/L = 0,29$ auf 1 nicht gründlich falsch sein konnte, erwies sich anlässlich der Belastungsprobe einer fraglichen Rampenkonstruktion durch 50 Polizeirekruten. Der Tangentialriss bildete sich erwartungsgemäss. Es zeigte sich dabei, dass dieser auch bei grösserer belasteter Fläche kurzfristig nicht gefährlich ist. Die Beschränkung der Aussage mittels Formel (4) auf $a < L$, das heisst auf Flächen von wenigen Metern Durchmesser, erwies sich bei den Problemen, die sich im Laufe der Seegfrörni stellten, immer wieder als Mangel. Auch mit den Formeln von Meyerhof für

Streifenbelastung liessen sich keine befriedigenden Aussagen für grössere belastete Flächen erzielen.

Grosse belastete Fläche

Das Problem der ausgedehnten gleichmässig belasteten Flächen ist seither von *Nevel* und *Assur* [10] für Beanspruchung im elastischen Bereich behandelt worden. In Anlehnung an *Hetényi* [11] gilt bei gleichmässiger Belastung eines unendlich langen Streifens einer unendlichen Platte für die Biegespannung σ in einem Punkt, der von den beiden Rändern des Streifens den Abstand a bzw. b hat:

$$(5) \quad \sigma = \frac{6}{h^2} \frac{q L_1^2}{4} (e^{-\alpha} \sin \alpha \pm e^{-\beta} \sin \beta) .$$

h = Eisdicke, q = spezifische Belastung

$$L_1 = \left[\frac{E h^3}{3 (1 - \nu^2) \gamma_w} \right]^{1/4} = \sqrt[4]{2} L$$

$$\alpha = a/L_1, \beta = b/L_1 .$$

Das positive Vorzeichen gilt für Punkte innerhalb, das negative für solche ausserhalb des belasteten Streifens. Für mehrere Streifen gilt Superposition. Einige Lösungen für das Auftreten maximaler Biegespannungen σ_{\max} sind in Tabelle 2 gegeben, ergänzt durch das Resultat der genauen Analyse der gleichmässig belasteten Kreisfläche mittels Zylinderfunktionen. Die Belastung längs des einfachen und doppelten Streifens und die belastete Kreisfläche erzeugen alle maximale Biegespannungen von gleicher Grössenordnung. Es gilt für die praktische Anwendung:

$$(6) \quad \sigma_{\max} \approx q \left(\frac{L_1}{h} \right)^2 = q \sqrt[4]{\frac{E}{3 \gamma_w (1 - \nu^2) h}} .$$

Bild 4. Eisfläche des untersten Zürichseebeckens (Mythenquai–General-Guisan-Quai) am 3. Februar 1963, etwa um 15.45 Uhr. Die Auszählung auf einer Fläche von rund $\frac{1}{4}$ km² im Dreieck Hafen Enge–Bürkliplatz–Badanstalt Utoquai ergab rund 7500 Personen, d. h. etwa 30 000 Pers./km². Aufnahme Swissair-Photo AG



Mit $\nu = \frac{1}{3}$ und $E = 66700 \text{ kg/cm}^2$ ergibt sich eine zulässige spezifische Belastung von

$$(7) \quad q = 2 \sigma_{bz} \sqrt{h} ,$$

(q in kg/m², σ_{bz} in kg/cm² und h in cm). Aus der durch Belastungsversuche auf dem Zürichsee ermittelten Biegezugfestigkeit σ_{bz} von 3,3 bis 6,3 kg/cm² folgt:

Eisdicke h	zulässige spezifische Belastung q
10 cm	21 ÷ 40 kg/m ²
20 cm	30 ÷ 56 kg/m ²
30 cm	36 ÷ 69 kg/m ²

Für diese Berechnung wurde ein relativ hoher Wert für den E -Modul verwendet; der halbe Wert, nämlich 33 300 kg/cm², ergäbe eine um rund 30% höhere zulässige Belastung bei um 7,5% geringerer Biegezugfestigkeit.

Der Formel (7) liegt das Kriterium der Bildung des ersten Radialrisses (bzw. Achsialrisses) zu Grunde, also eines Ereignisses, das sich bei Einzellasten als absolut harmlos erwiesen hat. Wie die Erfahrung der Seegrörni lehrt, kann auch bei ausgedehnten Flächenbelastungen die Bildung von Radialrissen toleriert werden, obschon der Sicherheitsfaktor möglicherweise nicht mehr ganz so beträchtlich ausfällt wie bei den konzentrierten Lasten. Ohne Zweifel kam es 1963 unzählige Male zur Bildung von Radialrissen, so zum Beispiel am Eröffnungstage beim Schiffsteg Bürkliplatz, als sich Neugierige um den daselbst versammelten Stadtrat drängten. Ein lauter Knall beendigte die ungewollte Belastungsprobe augenblicklich. Ähnliche Vorfälle haben sich bestimmt täglich mehrmals wiederholt, und immer hat der Knall die Leute gewarnt, schon lange bevor die Belastung auch nur annähernd kritisch wurde. Für die Sicherheit ist dann ferner der Umstand wichtig, dass die Risse rasch wieder heilen, bei niedrigen Eis-

temperaturen möglicherweise schon bevor das Eis wieder entlastet wird.

Die Bildung sehr langer gerader Risse, speziell im Falle von zwei parallelen belasteten Streifen, wo der erste Riss an der Eisoberfläche entstehen würde, ist weniger harmlos als die Bildung der Radialrisse bei einer kreisförmigen Last. Meyerhof [5] hat gezeigt, dass bei schmalen Streifen (halbe Breite $a \leq L$) oberflächliche, den Tangentialrissen der Kreislast entsprechende Risse bei ähnlicher Belastung zu erwarten sind, wie der achsiale Riss an der Eis-Unterfläche, allerdings unter der Annahme von Materialeigenschaften, die von denjenigen unserer Versuchsergebnisse abweichen. Mit unseren Festigkeitswerten und mit der Annahme, dass der Durchbruch auch in diesem Fall durch Verkeilung der Plattenbruchstücke verzögert würde, kann die zulässige Belastung für die Streifenlasten ebenfalls nach Gl. (7) abgeschätzt werden. Es ist aber sehr zu wünschen, dass der Ablauf der späteren Phasen beim Einbruch ausgedehnter Lasten gelegentlich experimentell geklärt werde, und zwar für variables thermisches Regime der Eisdecke.

Es ist leicht einzusehen, dass sich auf grosser Fläche ganz enorme Lasten ohne Bruch des Eises anordnen liessen, falls vom Grundsatz der gleichmässigen Flächenbelastung abgewichen würde. Es wäre aber falsch, für sehr grosse Flächen die Biegebeanspruchung als einziges Kriterium zu verwenden. Schon bei den oben nach Gl. (7) gerechneten zulässigen spezifischen Belastungen für 10 ÷ 30 cm dickes Eis würde die Eisoberfläche unter einer sich ringsum sehr weit erstreckenden Last um 1,1 bis 4,4 cm unter die Wasserlinie gedrückt. In Anbetracht der Spalten, die sich durch thermische Kontraktion bei Abkühlung bilden, sowie wegen anderen Undichtigkeiten des Eises, würde die Eisfläche früher oder später unter Wasser gesetzt. Für sehr grosse Menschenmengen darf daher die Belastung höchstens so weit gehen, dass die Eisoberfläche gerade bis auf die Wasseroberfläche hinuntergedrückt wird, das heisst dass die Last durch die Eisdecke wie von einem Floss getragen wird. Die zulässige spezifische Belastung beträgt dann entsprechend dem Auftrieb von blasenfreiem Eis (spezifisches Gewicht $\gamma_e = 0,917 \text{ g/cm}^3$)

$$(8) \quad q_a = 0,83 h, (q_a \text{ in kg/m}^2, h \text{ in cm}).$$

Bei 10 cm Eisdicke lässt sich für das rund 1 km² messende unterste Seebecken bis zur Linie Zürichhorn-Strandbad Enge eine zulässige Totalbelastung von 8,3 Mio kg berechnen, was einer Anzahl von 100000 bis 150000 Erwachsenen entspricht.

Schlussfolgerungen

Wollte man bei der Freigabe des Eises auf die totale Einwohnerzahl der Stadt abstellen, so müsste eine Eisdicke von rund 30 cm gefordert werden. Das hiesse aber mit den Verordnungen zu weit gehen. Wegen der grossen Kälte bei der Eröffnung der Zürcher Seegröfni 1963, wo nebenbei bemerkt die Eismächtigkeit um 13 cm mass, sind viele Leute nur so kurze Zeit auf dem Eis geblieben, dass die Spitzenwerte der Besucherzahlen weit unter 100000 blieben (Bild 4). Dass aber Massenveranstaltungen von Zehntausenden auf beschränktem Raum gefährlich werden können, ist sowohl aus der Theorie wie aus den nassen Füßen der Eisballbesucher von 1880 zu folgern. Auch

wenn sich damals keine Katastrophe ereignete, ist es doch angezeigt, eine Wiederholung des Ereignisses zu vermeiden. Für Besucher wie für Sicherheitsorgane sind die mittleren zu wählenden Abstände am anschaulichsten. Bei 10 cm Eis ist bei lokalen Zusammenballungen von Leuten in Abständen (hexagonale Anordnung) von weniger als 1,3 bis 1,8 m mit einem Krachen des Eises zu rechnen, das Warnung bedeuten, aber kein Grund zur Panik sein soll. Zur Sicherheit sind für sehr grosse Menschenmengen bei 10 cm Eisdicke mittlere Abstände von rund 2,9 m nötig, die sich bei 30 cm dickem Eis auf 1,7 m vermindern. Nach den bestehenden Erfahrungen und Kenntnissen kann auch in Zukunft verantwortet werden, die Eisfläche bei gut 10 cm Eisdicke freizugeben, wenn das Eis von guter Qualität ist und starke Massierungen durch entsprechende Orientierung der Öffentlichkeit und geschickte Anweisungen über Lautsprecheranlagen verhindert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Brunk, H.: Über die Tragfähigkeit von Eisdecken. Diss. T.H. Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1964.
- [2] Rühner, F.: Die Vereisung des Zürichsees in historischer Sicht. (In: Seegröfni 1963, Verlag der «Zürichsee-Zeitung», Stäfa, 1963).
- [3] Wyman, M.: Deflections of an infinite plate. Canad. J. Res. A. 38, 293-302, 1950.
- [4] Assur, A.: Traffic over frozen or crusted surfaces. Proc. of the 1st. Int. Conf. on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems, Torino-St. Vincent, 12-16 Giugno 1961, 913-923. Edizioni Minerva Tecnica.
- [5] Meyerhof, G.G.: Bearing capacity of floating ice sheets. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 86, No. EM 5, 113-145, 1960; 87, No. EM 6, 161-167, 1961.
- [6] Mahrenholtz, O.: Zur Tragfähigkeit von Eisdecken. «ZAMM» 46, Sonderheft, T 170-173, 1966.
- [7] Hitch, R.D.: Flexural strength of clear lake ice. U.S. Army Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Technical Report 65, 1959.
- [8] Frankenstein, G.E.: Strength data on lake ice. U.S. Army Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Technical Report 80, 1961.
- [9] Assur, A.: Bearing capacity of floating ice sheets by G.G. Meyerhof, Discussion. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 87, No. EM 3, 63-66, 1961.
- [10] Nevel, D.E. and Assur, A.: Crowds on Ice. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Technical Note, 13 May, 1965.
- [11] Hetényi, M.: Beams on an elastic foundation, Ann Arbor - Michigan Press, 1946.
- [12] Nevel, D.E.: Time dependent deflection of a floating ice sheet. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 196, 1966.
- [13] Frankenstein, G.E.: Strength of ice sheets. Proceedings of the Conference on Ice Pressures Against Structures, Laval University, Quebec, Canada, Nov. 10-11, 1966 [im Druck].

Adresse des Verfassers: Dr. Hans Röhliberger, Abteilung für Hydrologie und Glaziologie, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, Voltastrasse 24, 8044 Zürich.

Mittelfristige Schwankungen der Oberflächengeschwindigkeit des Khumbugletschers am Mount Everest

Von Fritz Müller, McGill Universität, Montreal, Kanada

Einleitung

Räumliche und zeitliche Unterschiede in der Gletscheroberflächenbewegung sind seit mehr als 100 Jahren an vielen Gletschern, besonders in gemässigten Breiten, teilweise sehr detailliert gemessen worden (Agassiz, 1847; Mercanton, 1916; Meier, 1960; und viele mehr). Aus diesen Untersuchungen ergab sich, dass Geschwindigkeitsänderungen an einem gegebenen Punkt der Gletscheroberfläche meistens nicht auf eine einzelne Ursache zurückgeführt werden können, sondern auf dem Zusammenspiel von verschiedenen Vorgängen beruhen und dass ferner je nach der Länge des Beobachtungsintervalls (Tage,

Monate oder Jahre) andere Ursachen die dominierende Rolle spielen. So können zum Beispiel die kurzfristigen Pulsationen, welche tägliche und halbtägliche Messwerte charakterisieren, nicht durch die selben Beweggründe erklärt werden wie die Änderungen der Jahresgeschwindigkeiten. Diese scheinen vorwiegend durch Massenhaushalts- und damit verknüpfte Dickenänderungen des Gesamtgletschers, oder grosser Teile davon, bedingt zu sein, während jene auf lokale, noch wenig abgeklärte Vorgänge der Gletschermechanik und eventuell der Glazialhydrologie zurückgehen. Mittelfristige, das heisst einige Tage bis Wochen dauernde Geschwindigkeits-

änderungen sind von besonderem Interesse. Sie scheinen noch deutlicher als die kurzfristigen Schwankungen mit der Wasserzirkulation im und unter dem Gletscher und – in der Folge – mit dem Gleitvorgang an der Gletschersohle verknüpft zu sein. Im Zusammenhang mit ungewöhnlich raschen Gletschervorstössen («glacier surges») und Gletscherkatastrophen hat man in neuerer Zeit dem Mechanismus des Gletschergleitens erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt.

Obwohl die hier mitgeteilten Ergebnisse nur von vorläufiger Natur sind, dürfte dieser Beitrag zum Thema der Gletscherbewegungsschwankungen in einer Festschrift für Pro-