

# Physikalische Bemerkungen zur Zürichseegfrörni 1963

Von

KLAUS CLUSIUS †

## I. «Blasenschnüre» im Eis bei der Seegfrörni

1. Bei der Seegfrörni 1963 wurde verschiedentlich eine eigentümliche Ordnung von Gasblasen in klaren Stellen der Eisschicht beobachtet und photographiert (Abb. 1). Die Eisdecke schloß zahlreiche rundliche, auch abgeplattete Blasen von einem Durchmesser von 10 bis 30 mm ein, die in vertikaler Richtung regelmäßig übereinander angeordnet waren. Sie waren meist von einem Filz von Eiskriställchen erfüllt, so daß die dadurch bewirkte Lichterstreuerung sie besonders gut sichtbar machte.

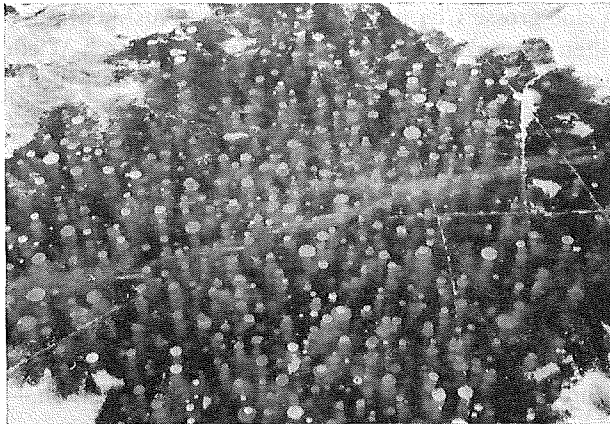


Abb. 1. Blasenschnüre im Eis des Zürichsees in ca. 6 m Uferentfernung beim Zürichhorn. Photo Prof. Dr. F. LAVES.

Der Gasinhalt scheint in keinem Falle analysiert worden zu sein. Für die Herkunft der Blasen kommen prinzipiell zwei Quellen in Frage:

a) Im Wasser gelöste Gase, also vor allem Luft. Diese Entstehungsursache dürfte ausscheiden, weil lufthaltiges Wasser so gefriert, dass es durch und durch trübe wird. Luft ist in Eis praktisch unlöslich und wird in kleinen Bläschen beim Erstarren des

Wassers ausgeschieden. Die Trübung entsteht, sobald die Gaskonzentration die Löslichkeitsgrenze überschreitet. Zum Beispiel zeigen die von aussen nach innen gefrierenden Eiswürfel im Haushalt-Kühlschrank meist eine äussere Klarzone, die nach der Mitte der Würfel zu in einen trüben Kern übergeht, weil dort die Restkristallisation stattfindet.

b) Die tatsächliche Quelle für die Blasen dürften daher Gase aus dem Seeboden sein. Dort herrscht weitgehend eine konstante Temperatur, so dass Gas regelmässig durch Fäulnisprozesse gebildet werden kann. Die aufsteigenden Blasen bleiben unter der Eisdecke hängen und frieren in der wachsenden Eisschicht ein.

2. Unter diesen Umständen gibt es eine einfache Erklärung für die Tatsache, dass sich die Blasen schnurartig übereinander anordnen, dass sie also keine statistische Verteilung in der Eisschicht zeigen. Die Eisfläche kann als unendlich ausgedehnt angesehen werden, so dass in ihr nur der vertikale Temperaturgradient  $d\theta/dl$  zu berücksichtigen ist. Hat sich anfangs eine dünne Eisschicht gebildet, so bleibt eine aufsteigende Blase an irgend einer Stelle unter der Decke hängen, wo sie allmählich einfriert. An dieser Stelle wird aber die Wärmeleitung der Schicht in vertikaler Richtung vermindert, weil hinter den guten Wärmeleiter Eis (0,0045 cal/cm sec Grad) der schlechte Wärmeleiter Gas (0,000072 cal/cm sec Grad für Methan bei 0° C) geschaltet ist. Infolgedessen wird unter einer eingefrorenen Blase die Wachstumsgeschwindigkeit der Eisdecke etwas geringer sein als daneben. Dies bewirkt, dass die Unterseite der Eisdecke nicht mehr streng eben bleiben kann, sondern unter den Blasen Ausbuchtungen nach oben zeigen muss. Wenn weitere Blasen aufsteigen, so haben sie beim Anprall an die Unterseite der Eisschicht und dem damit verbundenen Hinundhergleiten eine grosse Chance, in einer solchen Ausbuchtung unter ihrer Vorgängerin festgehalten zu werden und dort einzufrieren. Durch Wiederholung dieses Vorgangs entstehen die beobachteten «Blasenschnüre». Es darf nicht übersehen werden, dass die Geschwindigkeit der Dickenzunahme des Eises zu der nicht zu kleinen und nicht zu grossen Menge der produzierten Gasblasen innerhalb gewisser Grenzen in einem vernünftigen Verhältnis stehen muss. Wird sehr wenig Gas gebildet, so werden auch nur wenige Blasen einfrieren, die dann annähernd statistisch verteilt sein sollten, weil die Beeinträchtigung der Wärmeleitung des Eises durch eine einzelne Blase um so geringer wird, je dicker die Eisschicht unter der Blase ist. Entsteht viel Gas, so bleibt das Phänomen aus, weil grössere Hohlräume gebildet werden. Die Bildung einer kompakten Eisdecke ist dann überhaupt in Frage gestellt, eine Erscheinung, die diesen Winter am Bodensee stellenweise beobachtet wurde, wobei die Eisdecke ab und zu durch brennbare Gase — wohl Sumpfgas, Methan — durchbrochen wurde.

3. Die Ausfüllung der Blasen mit Eiskriställchen erklärt sich gleichfalls aus der Existenz des vertikalen Temperaturgradienten. Die Unterseite jeder Blase ist notwendig wärmer als ihre Oberseite, so dass eine Sublimation des Eises erfolgt. Es ist eine bekannte Tatsache, dass Substanzen in einem mit einem indifferenten Gas gefüllten Raum in gut ausgebildeten Kristallen sublimieren; im Vakuum entstehen dagegen vorzugsweise Krusten. In welchem Umfang diese Sublimation stattfindet, hängt natürlich von verschiedenen äusseren Bedingungen ab, wie der Grösse des Temperaturgradienten und der Absoluthöhe der durchschnittlichen Temperatur. Der Prozess

wird um so langsamer erfolgen, je tiefer die Temperatur ist, weil der Sättigungsdruck des Eises mit sinkender Temperatur rasch abnimmt:

° Celsius	0°	—5°	—10°	—15°	—20°	—25°
p mm Hg	4,58	3,01	1,95	1,24	0,77	0,47

## II. Kleine thermodynamische Betrachtung zur «Seegfroreni»

A. Die Voraussetzungen zum Eintritt einer «Seegfroreni», die im Durchschnitt etwa dreimal in einem Jahrhundert vorkommt, sind günstig, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Kaltes, windiges Wetter am Anfang des Winters (vor Weihnachten), durch das die konvektive Durchmischung des Wassers und seine Abkühlung auf das Dichtemaximum bei 4° C befördert wird.

2. Anschliessend anhaltende Kälte mit relativ wenig Wind, damit die unter 4° C abgekühlte Oberflächenschicht des Wassers schwimmen bleibt und nicht mit dem wärmeren Tiefenwasser durchwirbelt wird. Der Wind wird unschädlich, sobald die erste dünne Eisschicht vorliegt. Er erhöht dann sogar die Wärmeübergangszahl Luft  $\rightleftharpoons$  Eis und befördert die Eisbildung. Eine auftretende Schneedecke ist jedoch wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit ungünstig.

B. Die Eisdecke schwimmt auf dem Wasser und hat an der Unterseite exakt 0° C, auf der Oberfläche dagegen annähernd die Lufttemperatur  $-\vartheta^\circ$  C. Durch die Eisfläche  $F$  von der Dicke  $x$  fliesst von der Unterseite nach der Oberfläche ein Wärmestrom, der von der Kristallisation neuen Eises herrührt. Dieser Wärmestrom ist dem vertikalen Temperaturgradienten im Eis  $[0^\circ - (-\vartheta^\circ)]/x = \vartheta^\circ/x$  proportional. Während der Zeit  $dt$  nimmt dadurch das Eis um  $dx$  an Dicke zu, und mit der Schmelzwärme  $L_e$  und der Dichte  $\rho$  wird

$$FL_e \rho dx = F \lambda \frac{\vartheta}{x} dt, \tag{1}$$

wobei  $\lambda$  die Wärmeleitzahl ist.

Integriert wird

$$L_e \rho \frac{x^2}{2} = \lambda \vartheta t + C. \tag{2}$$

Zur Zeit  $t=0$  ist auch  $x=0$  und somit  $C=0$ , also

$$x = \sqrt{\frac{2 \lambda \vartheta t}{L_e \rho}} \sim \sqrt{\vartheta t}.$$

Die Dicke der Eisschicht ist daher der Wurzel aus dem Produkt von Kältegrad in Celsius und Zeit proportional. Übrigens ist  $\lambda$  von Eis mit  $\sim 0,004_5$  cal/cm sec Grad etwa 200mal kleiner als die Wärmeleitung von Kupfer.

C. Der Zürichsee hat eine Oberfläche von  $88,5 \text{ km}^2 = 88,5 \cdot 10^6 \text{ qm}$ . Nimmt man

wie üblich an, dass eine Dicke von 10 cm das Eis für Menschen begehbar macht, so beläuft sich die bedeckende Eismasse auf

$$88,5 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 0,9 = 8 \text{ Millionen Tonnen.}$$

Diese Masse wird später nur zum Teil mit der Limmat abfliessen können und muss zum grösseren Teil im Frühjahr aufgeschmolzen werden. Der Beginn der wärmeren Jahreszeit wird dadurch merklich verzögert. Eis hat eine Schmelzwärme von 80 Kal/kg. Also werden rund

$$80 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^6 \approx 64 \cdot 10^{10} \text{ Kal}$$

(äquivalent der Verbrennungswärme von 80 000 Tonnen Steinkohle) für eine 10 cm dicke Eisschicht benötigt, die uns, die wir am Rande des Zürichsees leben, im Frühling durchaus fehlen werden.

D. Schliesslich sei daran erinnert, dass die gesamte Bevölkerung der Schweiz ( $4,8 \cdot 10^6$  Einwohner) bequem auf der Seefläche untergebracht werden könnte. Jeder Person würde ein Platz von etwa 18 qm zur Verfügung stehen, was einem mittleren Zimmer von  $4 \times 4,5$  m entspricht.

## Nachtrag

Die beiden Artikel «Formveränderungen von Textur-Zink bei thermozyklischer Beanspruchung», von W. EPPRECHT, und «Klimamorphologische Untersuchungen in Marokko», von O. BÄR und A. LEEMANN, wurden publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. Dieser Vermerk unterblieb aus Versehen bei den Originalarbeiten in Heft 3, 1963.

Die Autoren.