

Werk

Jahr: 1934

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:10

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0010

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0010

LOG Id: LOG_0065

LOG Titel: Das Grundeis

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain there Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Das Grundeis

Von **P. Jakuschoff**, Berlin — (Mit 3 Abbildungen)

Vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die Aufmerksamkeit auf das Grundeis und seine Entstehungsursachen zu lenken. Erörtert werden verschiedene Eisarten, Entstehung der ersten Eiskristalle und Beobachtungen über das Grundeis und seine Eigenschaften. Die Theorien der Grundeisbildung werden in kritischer Besprechung einander gegenübergestellt und die Folgerungen daraus gezogen.

Die Eisbildung und besonders die Erscheinungen, die mit der Eisbildung in Flüssen zusammenhängen oder sich als ihre Folgen auswirken, verlangen besondere Beachtung. Die Wichtigkeit dieser Frage tritt besonders deutlich hervor in Anbetracht des stetig zunehmenden Ausbaues der Wasserkräfte und der sich dauernd weiterentwickelnden Schifffahrt. Die Entstehung von Eis und die Mächtigkeit der in Erscheinung tretenden Eisgebilde ist wesentlich von den mannigfaltigen, in der Natur vorkommenden Bedingungen abhängig. So finden wir, was die Art des Eises anbelangt, drei grundsätzlich verschiedene Erscheinungsformen: Das Oberflächen- oder Kerneis mit gut ausgebildeter kristallinischer Struktur und die beiden Unterwassereisarten, das Grundeis (anchor-ice) von schwammiger Natur, an der Flußsohle festgefroren und das Schwebeeis (frazil-ice), gleichfalls lockerer Konsistenz durch die ganze Wassermasse verteilt im Wasser treibend*).

Das Wasser gehört wegen der besonderen Rolle, welches es in der organischen und anorganischen Natur spielt, zu den Körpern, die am häufigsten und gründlichsten untersucht worden sind.

Seine Ausnahmestellung gegenüber der Mehrzahl der Flüssigkeiten beruht darauf, daß es eine ganze Reihe besonderer Anomalien zeigt. Dazu gehört die auffallende Größe seiner Dielektrizitätskonstante, die Abnahme der Kompressibilität bei Temperaturerhöhung zwischen 0 und 50° C, die Zunahme des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und die Abnahme der Viskosität bei Druckerhöhung und am bekanntesten und für uns am wichtigsten — das Dichtemaximum bei + 4° C.

*) Die beiden großen Gruppen, die man in einer Systematik der Eisarten zu unterscheiden hat, sind: 1. das thermische Eis, 2. das Druckeis. Die erste Gruppe verdankt ihre Entstehung nur thermischen Ursachen, während bei der zweiten noch die Wirkung starken Druckes hinzukommt. In die erste Gruppe gehört das Eis, das in Gewässern gebildet wird, in die zweite das Eis von Gletschern, Eisbergen, das Untergrundeis vereister Festländer usw. Eine natürliche Gliederung für die Gruppe I erhält man, wenn man nach dem Ort fragt, an dem das Eis in dem Gewässer gebildet wird. Man unterscheidet: a) Oberflächeneis (das sich an der Grenzschicht Luft—Wasser bildet), b) Unterwassereis (das im Wasser entsteht), c) Überwassereis (das über einer vorhandenen Eisdecke entsteht).

Es ist nur natürlich, daß diese vom normalen Verhalten der Flüssigkeiten abweichenden Erscheinungen zur Aufstellung einer ganzen Reihe von Konstitutionstheorien Anlaß gegeben haben. Die bekanntesten davon sind von Röntgen*) und Tammann**).

Zur Bildung von Kristallen aus einer unterkühlten Lösung ist das Vorhandensein sogenannter „Kristallisationskeime“ eine Vorbedingung. Wenn kleine Eis- oder Schneekristalle oder auch andere feste Teilchen in die unterkühlte Lösung gelangen können, so ist mit ihnen als Kernen die Entstehung von Kristallen gegeben. Bei Ausschluß dieser Möglichkeit muß jedoch nach einer anderen Entstehungsursache gesucht werden. Röntgens Annahme, daß im Wasser stets Eismoleküle vorhanden seien, welche als Eiskeime wirken, hat die moderne Chemie dahin präzisiert, daß sie statt von Molekülen erster Art von Trihydrolmolekülen (H_2O_3 spricht***). Andere Autoren wieder schreiben dem — wie das Eis hexagonal kristallisierenden — Quarz, der ja als Hauptbestandteil des Sandes im Wasser allgegenwärtig ist, die Rolle der Keime zu. Es ist mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß in unterkühltem Wasser allein das Vorhandensein von fester Phase gleichwertiger Natur zur Einleitung des Kristallisationsvorgangs genügt†). Das Grundeis, ein Naturphänomen, hat wegen seiner Merkwürdigkeit, daß es sich, trotz seines geringen Gewichts unter Wasser bildet und an der Flußsohle ansetzt, seit Jahrhunderten die Aufmerksamkeit auf sich gezogen.

Unmittelbar auf der Flußsohle, auf Steinen, an ins Wasser versenkten Gegenständen, wie Ankerketten, Netzen usw., aber auch schwimmend im Wasser der Flüsse, Seen und Meere oder unter dem Oberflächeneis, konnte dieses Grundeis immer wieder beobachtet werden (Fig. 1). Berichte über die Grundeisbildung

*) W. Röntgen: Ann. d. Phys. **45**, 91 (1892).

) G. Tammann: Göttinger Nachr. 1913, S. 99; Zeitschr. f. phys. Chem. **84, 257 (1913); **88**, 57—62 (1914); Zeitschr. f. anorg. Chem. **158**, 1 (1926).; vgl. hierzu noch: Handb. d. Physik, herausgegeben von Geiger und Scheel, Kapitel 3: „Thermische Eigenschaften der Stoffe“, Bd. X, S. 126—222, Berlin 1926; van der Waals: Veröffentlichungen der Akademie der Wissenschaften in Amsterdam aus den Jahren 1895—1914; W. Sutherland: Phil. Mag. **50**, 460—489 (1900); Chem. Soc. (A) **11**, 94 (1900); **11**, 603 (1906); **11**, 843 (1910); H. Barnes: Trans. Roy. Soc. of Canada, 3rd Serie, Vol. I, S. 29 (1908); J. Duclaux: Journ. d. Phys. **10**, 73 (1912); L. Schames, Ann. d. Phys. **38**, 830 (1912); H. Armstrong: Proc. Roy. Soc. London (A) **81**, 80—95 (1908).

*** Vgl. J. van der Laar: Zeitschr. f. phys. Chem. **41**, 1 (1891).

†) Mit der Entdeckung des „schweren“ Wassers, das dem „gewöhnlichen“ Wasser (H_2O) beigemischt ist, wird die Frage der Entstehung der ersten Eiskristalle wohl ihre Lösung gefunden haben. Das schwere Wasser, das sich aus dem schweren Wasserstoff (Atomgewicht 2) und dem Sauerstoff zusammensetzt, zeigt folgende physikalischen Eigenschaften (gegenüber H_2O): Gefrierpunkt $+3.8^\circ\text{C}$ (0°C), Siedepunkt 101.42°C (100°C), maximale spezifische Dichte 11.6°C (4°C). Der Unterschied von leichtem und schwerem Wasser wurde neuerdings von Harteck (London) durch Eintauchen der beiden Substanzen in das gleiche Flüssigkeitsbad von 1°C gezeigt, wobei das gewöhnliche Wasser flüssig blieb, während das schwere wegen des höheren Schmelzpunktes zu Eis erstarrte.

findet man schon in über 200 Jahre alten Schriften*), besonders aber in Schriften der letzten Jahrzehnte**), die hier wegen des Platzmangels nur auszugsweise in der Fußnote angeführt sind.

Die größten Tiefen, in denen sich Grundeis bilden kann, sind im wesentlichen von der Mannigfaltigkeit der örtlichen Bedingungen abhängig. Im allgemeinen gelten 12 bis 14 m als Grenze; darüber hinaus wurden selten Beobachtungen gemacht. Im Meerwasser hat man allerdings das Ansetzen der Eiskristalle in einer Tiefe von 31 m beobachtet. Die Zeit der Grundeisbildung ist vorwiegend die der Nacht, und zwar bei klarem Himmel. Feuchte Luft und Nebel beein-

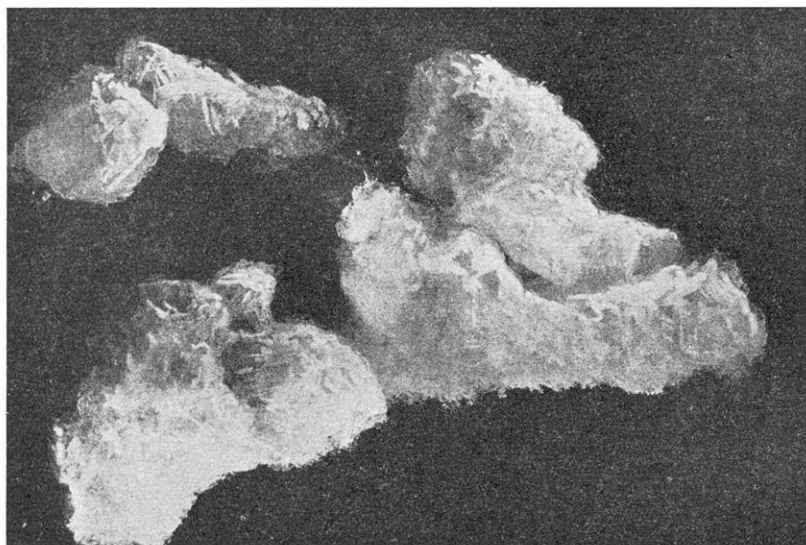


Fig. 1

Grundeeisklumpen, die sich an einem ins Wasser herabgelassenen Seile gebildet haben

trächtigen den Bildungsprozeß. Sonnenschein soll nach Angaben einiger Beobachter***) den Prozeß der Grundeisbildung gänzlich aufhalten. Schmauss†) vergleicht die Grundeisbildung mit Raureifbildung aus unterkühlten Nebel-

*) Plot: The natural history of Oxfordshire. Oxford 1705. S. 28; Hales: Vegetable Statics. London 1731. Anhang S. 398; Vgl. die Zusammenstellung bei Scoppever: „Über das Grundeis“. Brandenburg 1859. S. 10.

**) Vgl. Lüscher: Das Grundeis und daherige Störungen in Wasserläufen und Wasserwerken. Aarau 1906. S. 124; Altberg: Das Grundeis. Leningrad 1931 (russisch). Bydin: Sammlung über die Eistechnik. Moskau 1933. Bd. I, S. 9—57.

***) T. C. Keefer: Ice in Rivers, Transactions Royal Society of Canada, 1898, Vol. 4, S. 3; W. Lochtin: Das Schwemmeis und winterliche Störungen auf der Newa, Bd. X. St. Petersburg 1906.

†) A. Schmauss: Über Grundeisbildung. Meteorol. Zeitschr. 59, 116 (1924).

tröpfchen an Drähten usw. Nach Barnes*) erscheinen die Eisteilchen beim Betrachten unter dem Mikroskop als richtige Kolloide in runder Plättchenform, im Gegensatz zu den sich in stehenden Gewässern bildenden Kristallen, die eine schöne federartige Form, ähnlich wie beim Schnee, aufweisen. Diese kleinen kolloidalen Plättchen, die den ersten Niederschlag des Eises bilden, findet man in Flüssen als nebelartiges Gebilde vor, das das Wasser durchsetzt (Fig. 2). Nach Altberg**) bilden sich im Wasser ebenfalls bei ganz geringer Unterkühlung kleine, runde durchsichtige Scheibchen von $\frac{1}{10}$ mm Durchmesser, die er die Eiselemente (Eiskeime) nannte. Bei Berührung mit Körpern in fester Phase bleiben sie an ihnen haften und beginnen zu wachsen; bei gegenseitiger Berührung verbinden sie sich infolge von Regelation und bilden bei größerer Ansammlung lockeres Eis (Fig. 3).

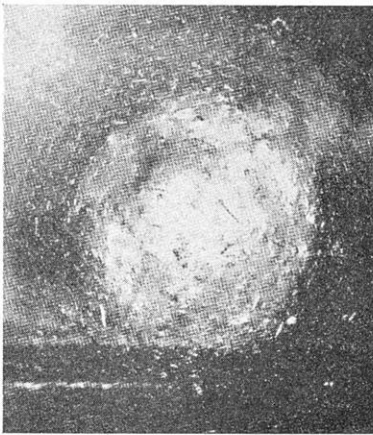


Fig. 2. Mikroskopische Darstellung eines kolloidalen Eisteilchens. Da die Bildung des Nebels durch das kolloidale Eis derjenigen beim übersättigten Wasserdampf ähnlich ist, nennt Barnes das kolloidale Eis den „Unterwassernebel“, subaqueous fog.

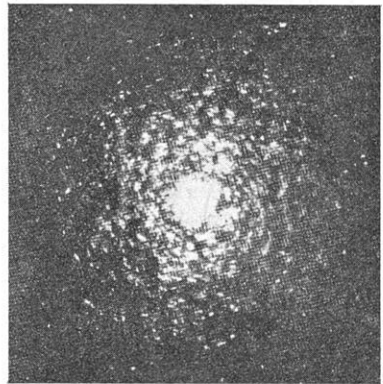


Fig. 3
Die Bildung des Schwebeseises
im Wasser (nach Altberg)

Die Tatsache, daß das Wasser fern von der Abkühlungsquelle zuerst gefriert, hat die Aufmerksamkeit auf sich gelenkt. Zur Erklärung dieses auf den ersten Blick seltsamen Phänomens haben eine Reihe von Forschern die Hypothese aufgestellt, daß die Abkühlung der Flußsohle bis unter 0° durch Kälteleitung vom Ufer oder durch Ausstrahlung gegen den Luftraum erfolgt. Diese Hypothese vertreten eine Reihe von Forschern, wie Hales (1713), Desmarest (1781), M'Kiever (1822), Farquharson (1883), Assmann (1888), in letzter Zeit

*) H. T. Barnes: Ice Engineering, Montreal, Canada 1928, S. 6.

**) W. Altberg: Das Grundeis, S. 16 und 67. Leningrad 1931.

auch Barnes (1906), dessen Arbeiten und Ansichten vor allem in Amerika große Verbreitung und zahlreiche Anhänger gefunden haben. Neuerdings vertreten die gleiche Ansicht auch die Russen Jatschewsky (1915), Malyschew (1930) und Bydin (1931). Die Theorie behauptet, daß das Grundeis sich dort bildet, wo neben der Unterkühlung des Wassers auch eine solche des Bodens besteht. Die an der Sohle bewegten Wasserteilchen kommen in Berührung mit dem unter Null unterkühlten Boden und frieren an. Die starke Abkühlung der Sohle wird in den früheren Theorien durch Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes erklärt, der von den Ufern aus durch seitliche Wärmeableitung abgekühlt werden soll. Die späteren Theorien sehen die starke Wärmeabgabe der Flußsohle in der Ausstrahlung durch die eisfreie Wasseroberfläche als Abkühlungsursache an.

Nollet (1743), Mairan (1824) und Zschokke (1855) glauben, das Grundeis sei fein geteiltes Oberflächeneis, welches beim Eisgang durch die Strömung untertaucht und sich an den Unebenheiten der Sohle festsetzt.

Die dritte Gruppe von Forschern wie Mérian (1823), Arago (1833), Mohr (1838) und Kohlmann (1854) haben eine andere Erklärung gesucht. Sie sahen die Ursache des Entstehens kleiner Eiskristalle im fließenden Wasser in der Abkühlung der Wassermasse an der freien Oberfläche des Flusses und im Vorhandensein gelöster Eisteilchen im unterkühlten Wasser, ähnlich einer übersättigten Salzlösung. Rauhe scharfkantige Gegenstände, Wurzeln, Algen und Unterwasserpflanzen, sowie verringerte Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle fördern, nach Arago, wegen des besseren Anhalts für die Kristallisation und wegen der größeren Ruhe die Ausscheidung von Eiskristallen, die dann beim Zusammenwachsen eine lockere, schwammige Masse von Grundeis bilden.

Gai-Lussac (1856), Weber (1856) und Aitken (1917) behaupten, daß das auf der Flußsohle vorgefundene Eis von kleinen, an der Wasseroberfläche entstandenen Kristallen herrührt, die durch die Turbulenz nach unten getrieben werden. Die gleichen Anschauungen vertreten Lochtin (1905) und Lüscher (1906). Das Anfrieren und Zusammenfrieren der Eisteilchen an der Flußsohle und an den dort befindlichen Gegenständen erfolgt nach Gai-Lussac durch Unterkühlung einer Seite der Teilchen, und zwar an der Grenzschicht Luft—Wasser und durch nachfolgenden turbulenten Transport in diesem Zustand durch das Wasser von 0° hindurch an die Sohle. Nach Lüscher müßte auf Grund seiner Beobachtungen im Augenblick der Bildung der Eisteilchen die Wassertemperatur um ein geringes über Null und das Zusammenwachsen der Kristalle durch Molekularkräfte erfolgen, vor allem aber durch Regelation, d. h. die Eigenschaften der Eisteilchen sich beim Zusammendrücken in einen festen Klumpen verwandeln, wie es etwa bei nassem Schnee der Fall ist. Lochtin teilt die Ansicht von Gai-Lussac, nur hält er die Unterkühlung einer Seite der Teilchen nicht für notwendig und nennt dieses Eis — angeschwemmtes Oberflächeneis. Neuerdings hat Altberg (1923) eine Theorie aufgestellt, wonach a) zur Grundeisbildung eine ganz geringe Unterkühlung des Wassers der ganzen Tiefe nach notwendig ist; b) das in sämtlichen Schichten gleichmäßig unterkühlte Wasser und der sich

langsamer abkühlende Boden eine Grenzschicht an der Sohle bildet, die als Berührungsschicht zwischen der Sohle und dem Wasser allmählich die Temperatur des sie umspülenden Wassers annimmt und dadurch neue Kristallisationsherde schafft; c) die Abweichung der Eiskristalle, die sich in Form von kleinen runden Scheibchen und Körnern um die Kristallisationszentren bzw. -kerne herum bilden, von der hexagonalen Form (Nadeln und Säulen) auf die turbulente Bewegung des Wassers zurückzuführen ist*).

Bereits in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde Einwurf gegen die Ausstrahlungstheorie von Arago**) gemacht, der noch heute seine volle Gültigkeit hat; die Grundeisbildung wird stets nur dann beobachtet, wenn durch kalte Winde und starken Wellengang die Voraussetzungen für eine starke Wasserunterkühlung gegeben sind. Trotzdem erhält Barnes***) die Ausstrahlungstheorie der Grundeisbildung auf Grund seiner Untersuchungen und Beobachtungen weiter aufrecht. Auch die Beobachtungen von C. Wright's und R. Priestley's†), die sie bei der Britischen Antarktischen Expedition im Jahre 1922 gemacht hatten, weisen in vielen Punkten starke Differenzen mit den Anschauungen von Barnes auf. Die physikalischen Untersuchungen††) haben gezeigt, daß nur ein Teil des sichtbaren Lichtes vom Wasser durchgelassen wird, während es die infraroten Strahlen (Wärmestrahlen) fast vollkommen absorbiert. Beim Übergang vom sichtbaren ins infrarote Gebiet nimmt dabei die Absorption sehr schnell zu. Der Absorptionskoeffizient hat im sichtbaren Gebiet die Größenordnung $k = 10^{-4}$, dagegen ist er im unsichtbaren Gebiet 2 bis 18μ von 10^6 -bis 10^7 mal größer.

Demnach verschluckt eine z. B. 1 m dicke Wasserschicht sämtliche infrarote Strahlen; bei längeren Wellen ($\lambda > 2\mu$) ist selbst eine dünne Schicht vollkommen undurchlässig. Die Strahlung kalter Körper an der Flußsohle wird durch die absorbierte Wassermenge und Temperaturdifferenz bedingt. Die ausgestrahlte Wärmeenergie eines Körpers von 0° hat bei $\lambda = 10\mu$ ihr Maximum und ist bei 2 und 15μ so unwesentlich, daß eine Ausstrahlung von der Flußsohle durch das Wasser nicht möglich ist, weshalb auch die Flußsohle kaum die eigentliche Kältequelle sein könnte. Da Barnes bei seinen Temperaturmessungen an den Lachine-Schnellen des St. Lorenz-Stromes sehr geringe Unterkühlung des Wassers gefunden hat, sieht er in seiner Strahlungshypothese die einzige Erklärungsmöglichkeit

*) Vgl. hierzu die angeführten Arbeiten von Scoppewer, Lüscher, Barnes, Altberg, Bydin und noch von Joganson: Veröffentlichungen der Bauverwaltung des Kraftwerkes am Wolchow-Fluß, Bd. 14. Leningrad 1927.

) Arago: Über das Grundeis. Poggendorfs Ann. d. Phys. u. Chem. **28, 204—223 (1833).

***) H. Barnes: Trans. Roy. Soc. Canada **12**, 65 (1906); **1**, 29 (1908).

†) C. Wright u. R. Priestley: Glaciology, London 1922; Amer. Geol. Soc., Publ. Nr. 7 (1928).

††) Vgl. F. Paschen: Wied. Ann. **53**, 334 (1894); E. Aschkinass: Ann. d. Phys. **55**, 401 (1895); H. Rubens u. E. Aschkinass: Wied. Ann. **65**, 252 (1898); W. Schmidt: Akad. d. Wissenschaft in Wien **47**, Abt. IIa, 237—241 (1908).

für Grundeisbildung. Er muß sich aber bei dieser Theorie der Annahme einer bisher unbekannten, selektiven Durchlässigkeit des Wassers für ultrarote Strahlen bedienen. Auf die Vorwürfe Altbjergs, daß die Strahlungstheorie jeglicher Grundlage entbehre, führt Barnes*) aus, daß das infrarote Spektrum des Wassers „unzweifelhafte Anzeichen dafür gibt, daß eine durchlässige Bande jenseits 2μ vorhanden ist“, und daß bei der Entstehung von Eis aus unterkühltem Wasser das Entweichen einer für das Thermometer unmeßbar geringen Wärmemenge genügt, um die erste Eisschicht zu erzeugen. Zu einer Kritik der Strahlungstheorie ist es notwendig, den Wärmeaustausch von Wasser und Boden zu vergleichen. Der Wärmeverlust des Wassers und die Art des Wärmetransports von Schicht zu Schicht regulieren im wesentlichen die Eisbildung. Der Wärmeaustausch erreicht in Gewässern z. B. nach Angaben von Homén**) für den Loio-See (Finnland) bis zu 1000 gcal/cm^2 Wasseroberfläche pro Tag. In Flüssen, besonders in solchen mit starker Turbulenz wird von Natur aus ein noch stärkerer Wärmeverlust und eine gleichmäßige Abkühlung von der Oberfläche bis zum Boden gewährleistet. Daß Barnes dem Wärmeverlust des Bodens zu große Wichtigkeit beigemessen hat, geht aus den Messungen von Hann***) hervor, die 54.2 gcal/cm^2 pro Jahr ergeben haben. Hinsichtlich der großen Wärmekapazität des Wassers kommt diese Wärmemenge als Regulator der Eisbildung nicht in Frage. Die Bodenwärme ist umgekehrt im wesentlichen von der Wassermenge abhängig.

Die Behauptung, daß die Grundeisbildung durch mechanisches Heranschaffen von fein verteiltem Oberflächeneis an die Sohle erfolgt, kann wohl heute keiner Kritik mehr widerstehen. Was die dritte Theorie der Grundeisbildung (Arago) anbetrifft, so ist hier folgendes zu sagen: Arago†) hat als erster den wichtigen Schritt getan, der allein zu einer Erklärung des Phänomens der Grundeisbildung führen kann, nämlich den, der Unterkühlung des Wassers eine maßgebende Rolle zuzuschreiben. Arago's zweite Annahme, daß unterkühltes Wasser weiter nichts als eine übersättigte Lösung von Eismolekülen im Wasser sei, ist durch Röntgen und Tammann und seine Schule aufgenommen und weiterentwickelt worden. Die Unvollkommenheit der Annahmen von Arago besteht darin, daß er einerseits das frühere Entstehen des Grundeises an der Sohle durch die günstige Wirkung geringer Strömungsgeschwindigkeit erklärt, während im Gegensatz zu seiner Ansicht zahlreiche Messungen eine Grundeisbildung gerade an Stellen größter Geschwindigkeiten, so in den Schnellen des St. Lorenz-Stromes, der Nawa, des Wolchow, Swir, Angara usw. festgestellt haben. Andererseits können wir seine Anschauungen nicht erklären, warum das Wasser in seiner ganzen Masse in den unterkühlten Zustand gelangt und besonders, wie dieser Zustand dauernd und

*) H. Barnes: Ice Engineering, Montreal 1928, S. 102—104.

**) Th. Homén: Acta Societatis Scientiarum Fennicae 1897, Nr. 3.

***) J. Hann-Süring: Lehrbuch der Meteorologie, 4. Auflage, S. 27.

†) Arago: Über das Grundeis. Poggendorfs Ann. d. Phys. u. Chem. **28**, 204—223 (1833).

sogar bei Grundeisbildung beibehalten wird, wo er doch durch die ständig abgegebene Kristallisationswärme aufgehoben und die Kristallisation zum Stillstand kommen müßte.

Wenn die Theorie von Gai-Lussac*) besagt, daß Grundeis durch Oberflächeneisteilchen entsteht, die durch Turbulenz nach unten geschafft mit ihrer unterkühlten Seite am Boden anfrieren, so muß man unwillkürlich folgende zwei Fragen stellen, die diese Theorie unbeantwortet läßt:

1. Wie können die unterkühlten Eisteilchen, welche leichter als Wasser sind, bis zum Boden hinabsinken?

2. Wie soll bei der geringen Wärmekapazität der Teilchen auf ihrem langen Weg zur Sohle eine Angleichung an die Temperatur des Wassers vermieden werden?

Auf Grund seiner Versuche und Beobachtungen hat Altberg**) die seit zwei Jahrhunderten mit den Tatsachen nicht im Einklang stehenden Hypothesen der Grundeisbildung restlos aufzuklären versucht. Nach der von ihm aufgestellten Theorie sind zwei Faktoren für die Grundeisbildung von Wichtigkeit: der hydrodynamische — der Bewegung und Turbulenz des Wassers — und der thermodynamische — des starken Wärmeverlustes mit darauf folgender Unterkühlung des Wassers. Die Unterkühlung allein jedoch genügt für den Kristallisationsprozeß nicht; es muß auch die latente Wärme fortgeführt werden, weil diese sonst die Kristallisation aufhalten würde. Durch die turbulente Bewegung des Wassers entsteht ein leichter Wärmeaustausch zwischen allen Schichten und mit der Oberfläche, die ja in unmittelbarer Berührung mit der Quelle der Abkühlung steht. Da der Boden gewöhnlich eine geringe Wärmekapazität und schlechte Leitfähigkeit besitzt und die Wärmekonvektion dort ihr Mindestmaß erreicht, wird die dünne Grenzschicht der Sohle allmählich die Temperatur des sie umspülenden Wassers ungestört annehmen können. Dieser Angleich wird noch unterstützt durch die große Wärmekapazität des Wassers und gleichmäßige Abkühlung infolge Vermischung von Oberflächen- und Bodenwasserschichten. Dadurch kann also eine dünne Bodenschicht auf Temperaturen unter 0° gebracht und ein Kristallisationsherd geschaffen werden, der qualitativ anderen Wasserschichten nicht nachsteht. Bei Vorhandensein von Körpern in fester Phase geht der Kristallisationsvorgang weiter, die Temperaturabnahme hält an. Auf diese Weise geht die Grundeisbildung vor sich. In Flüssen kann eine große Unterkühlung schon deshalb nicht eintreten, weil das Vorhandensein von festen Körpern nicht verhindert werden kann. Die Theorie von Altberg kommt also der Lösung des Problems der Grundeisbildung am nächsten, wenn sie auch über einige Tatsachen keinen Aufschluß gibt. Die Beobachtungen zeigten, daß die in den Schnellen entstehenden Eisinseln stets aus schwammigem körnigem Eis bestehen, sich also nie zu einer zusammenhängenden, festen Eismasse umbilden. Das ist aber nach

*) Gai-Lussac: *Annales de Chemie et de Physik* (2) **58**, 363 (1836).

**) W. Altberg: *Nachrichten des russischen hydrologischen Instituts*, Petrograd 1921, Heft 1—3; „Das Grundeis“, Leningrad 1931.

Altbergs Theorie nicht erklärlich, da gerade dort durch die intensive Umspülung der Flächen und die gute Durchmischung das im Grundeis befindliche Wasser zum Frieren gebracht werden müßte, da sich die Abfuhr der latenten Wärme dort besonders günstig gestaltet. Diese Fragen bedürfen noch weiterer Aufklärung.

Zusammenfassung. Versuchen wir nunmehr aus den bereits angeführten Theorien der Grundeisbildung und ihrer kritischen Besprechungen folgende Schlüsse zu ziehen:

1. Alle Theorien ergeben in Übereinstimmung mit den unmittelbaren Beobachtungen in der Natur, daß als erste Ursache der Grund- und Schwebeeisbildung eine genügende Unterkühlung des Wassers anzusehen ist.

2. Von allen vorhandenen Theorien der Grundeisbildung sind diejenigen von Barnes und Altberg die am meisten überzeugenden und der Wirklichkeit am nächsten stehenden. Beide Forscher geben als Ursache der Grundeisbildung eine Unterkühlung des Bodens an, und wenn man einerseits zweifeln dürfte, daß diese Unterkühlung die Folge von Wärmeausstrahlung (Barnes) sei, so besteht andererseits kein Grund zur Behauptung, daß diese Unterkühlung des Bodens nicht durch das abgekühlte Flußwasser (Altberg) erfolgen sollte.

3. Beide Forscher vertreten die gleiche Anschauung, daß für den Übergang von Wasser zu Eis eine starke Abkühlung nicht unbedingt erforderlich ist, daß der Übergangsprozeß unabhängig vom Grade und sogar bei ganz geringer Unterkühlung erfolgt, wenn diese nur der Quantität der dem Wasser zu entziehenden Wärme entspricht. Er vollzieht sich auch nicht sofort in der ganzen Masse, sondern nur an einigen Punkten (Kristallisationszentren), deren Anzahl durch die Unterkühlung bedingt ist.

4. Als ausschlaggebendes Moment für die Grundeisbildung ist vor allen Dingen auch die Möglichkeit eines erheblichen Wärmeverlustes des Wassers anzusehen. Demnach müssen starke Grundeisbildungen im Wasser, an der Sohle und dort befindlichen Gegenständen an solchen Stellen auftreten, die einem besonders starken Wärmeverlust unterworfen sind, wie z. B. durch Gegenwind oder in Schnellen und an eisfreien Stellen, was auch den beobachteten Tatsachen in vollem Maße entspricht. Der starke Wärmeverlust in den eisfreien Stellen trägt bei anderen gleichen Umständen dazu bei, daß in quantitativer Hinsicht die Eisbildung an der Sohle und im Wasser diejenige an der Oberfläche um ein Vielfaches übersteigt.

5. Obgleich die Laboratoriumsversuche von Lochtin (1904), Altberg (1916) und auch von Barnes (1904) die Möglichkeit der Grundeisbildung auch bei Tageslicht einwandfrei gezeigt haben, so bildet sich das Grundeis in Flüssen fast ausschließlich in klaren, kalten Nächten bei wolkenlosem Himmel. Das Aufschwimmen des Grundeises erfolgt vorwiegend in den Morgenstunden.

6. Die Mannigfaltigkeit der vorkommenden Eisarten muß den jeweilig wirkenden hydrologischen und vor allem thermodynamischen Faktoren zugeschrieben werden, die für die Abkühlungsformen des Wassers verantwortlich sind.
