

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

DIBLIOTEKA GŁÓWNA

II

2761

L. inw.

0.75

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000297459

x
1.027

DAS GRUNDEIS

UND DAHERIGE

STÖRUNGEN IN WASSERLÄUFEN

UND WASSERWERKEN

MIT 2 TAFELN

VON

Dr. phil. G. LÜSCHER, INGENIEUR

IN AARAU

F. Nr. 27057



AARAU 1906

DRUCK UND VERLAG VON EMIL WIRZ VORMALS J. J. CHRISTEN

DAS GRÄNDERS

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

II 2761

Akc. Nr. 2135/49

Meinem verehrten Lehrer

Herrn Prof. Dr. Crd. Zschokke

Nationalrat, in Aarau

gewidmet.

Alle Rechte, namentlich das der Uebersetzung
vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort	VII
I. Die Entstehung des Grundeises.	
a) Die drei Grundeisarten	1
b) Abkühlung des Wassers stehender Gewässer	3
c) Abkühlung des Wassers fließender Gewässer	4
d) Eisbildung an der Oberfläche fließender Gewässer	4
e) Die Grundeisbildung	5
f) Einige Angaben über Temperaturmessungen u. meteorologische Beobachtungen	25
1. Temperatur des Wassers	30
2. Sohlentemperatur	32
3. Temperatur der Steine	34
4. Einfluss des Windes	49
5. Die Bewölkung	51
6. Der Barometerstand	52
g) Neue Theorie der Grundeisbildung	53
1. Das blättrige Grundeis	59
2. Das körnige Grundeis	68
3. Das Galerteis	75
4. Résumé	88
II. Aeltere Beobachtungen und Theorien	99
III. Spezielle Beispiele von Störungen in Wasserläufen und Wasser- werken	149

Druckfehler :

- Seite 46, Zeile 21, 22 und 26 : lies brechbar, statt wirksam.
Seite 47, Zeile 28 : lies so wirksam, statt wirksam.
Seite 68, Zeile 20 : lies Grundeis» sowohl, statt Grundeis»,
Seite 80, Zeile 25 : lies Oberflächenspannung, statt Oberflächenspannung.
Seite 81, zweite Zeile : lies einen speziellen, statt ein spezieller.
Seite 110, Zeile 10 : lies ein Teil davon, statt ein Teil.
Seite 119, Zeile 10 : lies wahrscheinlich, statt wahrscheinliich.
Seite 143, Zeile 14 : lies Grundes, statt Grundeis.

Vorwort.

Die vorliegende Schrift verdankt ihr Entstehen dem Umstande, dass die schweizerische Presse bei Anlass des Ausbleibens der Beleuchtung und Motorenkraft in Städten und Dörfern, infolge von Betriebsstörungen der Elektrizitätswerke durch Treibeis, in öffentlichen Besprechungen den Appell an die Techniker richtete, es möchten Mittel und Wege geschaffen werden zur Beseitigung solcher Störungen.

An vielen Anstrengungen zur Erreichung dieses Zieles hat es zwar bisher keineswegs gefehlt, allein es bewegen sich die zum Teil mit grossem Kostenaufwande in Szene gesetzten Versuche in einer Richtung, in der denselben keine Aussicht auf Erfolg verbleibt.

Selbst seit Jahren mit diesen Fragen beschäftigt, zeigte es sich, dass die naturwissenschaftlichen Theorien über die Entstehung des die häufigen Störungen veranlassenden Grundeises — die bekanntesten sind diejenigen von Horner, Arago und Gay-Lussac — bei näherer Prüfung nicht befriedigen; was Wunder, wenn die Wasserfachleute in ihrem Urteil über diesen Gegenstand noch unsicher sind.

Diese Tatsache und sodann der Widerspruch, auf den ich mich bei der Bearbeitung dieser Schrift gefasst machen musste, veranlassten mich, meine Grundeistheorie im I. Kapitel voranzustellen, eingehend zu begründen und im II. Kapitel an Hand früher veröffentlichter Beobachtungen zu überprüfen, während in einem III. Kapitel die wesentlichen praktischen Folgerungen und Anwendungen kurz zusammengestellt sind. Hierbei sind Wiederholungen unvermeidlich geblieben.

VIII

Diese Gruppierung hat immerhin den Vorteil, dass derjenige, der sich lediglich einige praktische Ratschläge für den Wasserwerksbetrieb holen möchte, diese in Kapitel III kurz zusammengestellt findet; während für den Wasserbau-Ingenieur bei Studien für neue Projekte, wobei sich ganz spezielle lokale Bedingungen geltend machen, eine eingehende Begründung des innern Vorganges erwünscht sein muss.

Wer die vorliegende Schrift gründlich prüft, wird die Schwierigkeiten erkennen, welche sich der Erlangung der Erkenntnis über das Wesen und die Bildungsweise dieser Eisart entgegenstellen, und ein nachsichtiges Urteil fällen.

Aarau, Juni 1906.

G. LÜSCHER.

Die Entstehung des Grundeises.

I.

Untersuchungen über das Grundeis und dessen Bildungsweise.

a) Die drei Grundeisarten.

Man nennt «Grundeis» im eigentlichen Sinne des Wortes die am Grunde fliessender Gewässer auftretenden Eisbildungen, welche den Boden schichtweise bedecken und meist erst dadurch zur Beobachtung gelangen, dass sie bei Sonnenschein oder nach dem Aufhören der veranlassenden Fröstperiode, oft in grossen Massen, mit Kies, Schutt und Moos beladen, an die Oberfläche emporsteigen und flussabwärts treiben. Solches Eis hat loses, schwammiges Gefüge und gleicht mehr durchnässten Schneeklumpen, als dem eigentlichen an der Oberfläche des Wassers entstandenen Eise, welches letzteres feste, weisse Schichten bildet. Diese Aehnlichkeit mag der Grund dafür sein, dass alles im Wasser treibende Eis und Schnee — gleichviel ob es am Grunde sich entwickelt hat, oder nicht — und das sich deutlich von dem treibenden festen Oberflächeneis unterscheidet, schlechtweg «Grundeis» genannt wird. Die allgemein unter der Benennung «Grundeis» bekannten Eisbildungen, erscheinen bei näherer Prüfung nach ihrem Vorkommen, nach Art und Stadium ihrer Entwicklung, und in der Folge auch nach ihren speziellen Eigenschaften, als drei bestimmt abgegrenzte Spezien, welche — wie wir später sehen werden — alle gemeinschaftlich ihren Ursprung in der Oberflächen-Eisbildung oder im gefallenem Schnee, oft auch in beiden Ursachen zusammen haben.

Es sind sekundäre Eisbildungen, die in ihrer ursprünglichen Entwicklung an der Wasseroberfläche gestört, und deren oft mikroskopisch feine Krystalle mit dem fließenden Wasser fortgetrieben worden sind, um an passenden günstigen Stellen der Sohle und Ufer sich festzusetzen, mechanisch anzuhäufen oder eventuell ihre Entwicklung neu zu beginnen und bis zu einem bestimmten Grade fortzusetzen.

Man hat zu unterscheiden:

1. Das „blättrige Grundeis“.
2. Das „körnige Grundeis“.
3. Das „Galerteis“.

Die im nachstehenden für die Entwicklung dieser drei Grundeisarten zu begründende Theorie ist die folgende:

«Die Erstarrung der bei der Grundeisbildung tätigen «Eiskrystalle und Eispartikel geschieht auf der Wasseroberfläche in Berührung mit der freien Luft. So lange «eine Oberflächeneisdecke nicht zustande kommt, oder die «Krystalle an diese nicht anschliessen, treiben sie mit dem «Wasser fort, meist unsichtbar als mikroskopisch feine «Gebilde.»

Die Zusammengruppierung dieser im Wasser treibenden Krystallelemente auf der Flusssohle geschieht sodann:

1. *Gesetzmässig unter Einwirkung der Molekularkräfte beim «blättrigen Grundeis»;*
2. *Mechanisch mit ungleichartiger Orientierung der Krystalle unter Einwirkung der Regulation beim «körnigen Grundeis»;*
3. *Unter Mitwirkung dieser beiden Arten des Wachstums, sowie durch Einwirkung der Grenzflächen-
spannung verschieden temperierter Wasser-Blasen beim «Galerteis».*

Da nun die letztere Eisart sich auch im freien Wasser bilden kann, so gehört das Galerteis strenge genommen nicht zum Grundeis, wird aber allgemein als solches bezeichnet, seines ähnlichen Aussehens wegen.

b) Abkühlung des Wassers stehender Gewässer.

(Bildung der Oberflächeneisschicht.)

Bekanntlich nimmt das sogenannte Süßwasser im ruhenden Zustande mit zunehmender Abkühlung an Dichte und daher auch an Schwere bis zur Temperatur von 4° Celsius zu, bei noch weiterer Abkühlung indes wieder ab. Da nun aber das Wasser sich seiner Dichte und Schwere entsprechend lagert, so findet bei der Abkühlung eine Verschiebung der Wasserteilchen in senkrechter Richtung so lange statt, bis die ganze Wassermasse auf 4° C gekühlt ist; dies geschieht in der Weise, dass die kältern Molekel sinken, die wärmeren aufsteigen.

Hat die ganze Wassermasse die Temperatur von 4° C erreicht, so bewirkt eine weitere Abkühlung, dass das Wasser sich von der Oberfläche aus, unter diesen Temperaturgrad abzukühlen beginnt, ohne dass aber weitere Ortsveränderungen der Teilchen eintreten, da ja Wasser von 1° leichter ist als solches von 2° , Wasser von 2° leichter als solches von 3° und dieses wieder leichter als Wasser von 4° , welches letzteres die grösstmögliche Dichte und Schwere besitzt und daher unverrückbar die tiefsten Stellen des ruhenden Gewässers einnimmt; vielmehr wird nun das kälteste Wasser an der Oberfläche bleiben.

Erreicht die Temperatur an der Oberfläche 0° , so beginnt an ihr die Eisbildung und diese schreitet nun von oben nach unten fort; indem das auf oder unter 0° erkaltete Eis die anliegenden Wasserschichten fortgesetzt abkühlt. Die beim Gefrierprozess frei werdende Erstarrungswärme des Wassers verzögert hierbei in wirksamer Weise die weitere Abkühlung, unterstützt durch die schlechte Leitungsfähigkeit des Eises und Wassers, indem jeder Wärmeaustausch durch die Wärmebewegungen aufgehört hat.

Bei Temperaturmessungen in einem mit Eis bedeckten stehenden Gewässer treffen wir daher unter der Eisschicht eine Wasserwärme von wenig über 0° , darunter höhere Temperaturen und an der Sohle 4° , vorausgesetzt, dass der Boden diese Temperatur ebenfalls annahme.

c) Abkühlung des Wassers fließender Gewässer.

Ganz anders gestaltet sich dieser Abkühlungsprozess im fließenden Wasser.

Je grösser in einem Gewässer die Bewegung der Wassertheilchen ist, infolge des Einflusses von Gefälle beziehungsweise Erdschwere, und Wind, umso mehr wächst auch der Einfluss, den die auf der Sohle liegenden Vorsprünge und Hindernisse, wie Steine, Kies und Gras auf die Richtung der Wasserfäden ausüben, welcher Begriff in der Technik kurz als «Rauhigkeitsgrad» bezeichnet wird; und um so erheblicher ist die Abweichung des Vorganges der Abkühlung von dem oben für ruhende Gewässer beschriebenen Prozesse.

Hier spielt die Verschiedenheit der Dichte eine untergeordnete Rolle, rasch fließendes und über Unebenheiten streichendes Wasser lässt seine Theilchen von ersterer nicht beeinflussen, die ganze Masse wird gemischt und kühlt sich mehr oder weniger gleichmässig ab. Wenn die Erstarrung des Wassers an der Oberfläche beginnt, so nähert sich auch die Wassertemperatur an der Sohle mehr oder weniger dem Nullpunkt. An konkaven sogenannten stauen Stellen fließender Gewässer nähert sich indess der Vorgang der Abkühlung mehr demjenigen des ruhenden Wassers, da dort das Wasser nur träge sich bewegt.

d) Eisbildung an der Oberfläche fließender Gewässer.

Das entstehende Eis setzt sich als Saum- oder Randeis zuerst an den Ufern der konkaven oder stauen Flussstellen fest und bildet sich wie im ruhenden Wasser als Oberflächeneisschicht. Es geschieht dies im ruhenden Wasser nämlich in der Weise, dass kleine Eisnadeln sich bilden, die unter Einwirkung der Molekularkräfte orientierend zusammen schießen, zu einem mehr oder weniger vollständig ausgebildeten gesetzmässigen Krystalle, Tyndalls-Schmelzfiguren.

Es ist eine Eigentümlichkeit aller Krystallisationen, dass da, wo ein Krystall oder Krystallbestandteil sitzt, sich ein anderer leicht dazu setzt, respektive anschiesst und an dem ersteren haftet, und dass der Krystall sich zu vergrössern strebt, bis er seine gesetzmässige Gestalt besitzt.

So überzieht sich die Wasseroberfläche nach und nach mit einer Eishaut, die unter weiterer Einwirkung von Frost zur Oberflächeneisschicht erstarrt, welche dann nach unten wächst; indem stets neue Krystallnadeln sich bilden und anschiessen, und die entstehenden Krystallgebilde ihrerseits sich wieder bei weiterer Frosteinwirkung mit der Eisschicht verkitten.

Erst wenn bedeutende und dauernde Kälte einwirkt, so bilden sich die Eiskrystalle auch auf der freien Wasseroberfläche. Aehnlich gestaltet sich wie bemerkt der Vorgang an geschützten oder stauen Flusststellen der fliessenden Gewässer. Bei dauernder Kälte ergreift das Eis auch die ungeschützten Ufer und so entsteht das allgemein bekannte Saum- oder Randeis. Auch Brückenpfeiler, Pfähle, aus dem Wasser herausragende Kiesbänke und Steine werden bald mit einem Wulst von Eis auf Wasserspiegellhöhe umgeben. Endlich entsteht bei anhaltender Frosteinwirkung auch auf dem fliessenden Wasser die Oberflächeneisschicht, vorausgesetzt, dass die Wassergeschwindigkeit nicht eine zu grosse ist.

e) Die Grundeisbildung.

Vorerst muss auf folgende Tatsache, welche für die Grundeisbildung grundlegend ist, aufmerksam gemacht werden:

Hat sich an ufernahen, konkaven Stellen eines Flusses eine Eishaut gebildet und es wird deren sofortige vollständige Erstarrung zur Oberflächeneisschicht durch die Wasserbewegung verhindert, so werden die Krystallgruppen in grösserer und kleinerer Zahl vom Wasser fortgeführt und flussabwärts getrieben. Sodann ist klar, dass eine

Krystallnadel, welche sich im ruhigen Wasser in bestimmter Entfernung von einem in der Entstehung begriffenen Krystallstern bildet und mit Schnelligkeit an letzteren anschiesst, dieses Anschiessen im stark fliessenden Wasser nicht mehr zustande bringt, obschon ihre Entfernung von einander kleiner als der Radius der molekularen Wirkungssphäre ist, da dann leicht die Molekularkraft durch die Energie der bewegten Teilchen (Stosskraft $\frac{m \cdot v^2}{2}$) überwunden wird. Vielmehr wird diese Krystallnadel ebenfalls vom Wasser fortgeführt und flussabwärts getrieben.

Aus dem gleichen Grunde können auch die im fliessenden Wasser, auf der freien Oberfläche gebildeten Eisnadeln und Krystalle nicht unter alleiniger Einwirkung der orientierenden Kraft, in gesetzmässiger Form zusammentreten und kompakte Blättchen (Sternchen) bilden; es bilden sich vielmehr regellose Krystallgruppen und Anhäufungen, beziehungsweise Aneinanderreihungen von Eispartikeln, sofern die Wassergeschwindigkeit nicht so gross ist, dass sie diese, wie bereits bemerkt, einzeln oder in Gruppen sofort abführt.

Die so mitgerissenen, erstarrten Wasser-Molekel erfüllen und durchsetzen bei namhaftem Frost als mikroskopisch feine, dem blossen Auge oft unerkennbare Nadeln, die ganze Wassermasse. Sie werden dem blossen Auge erst sichtbar, wenn sie infolge lange anhaltenden Frostes an Grösse zunehmen oder zu grössern Krystallgruppen zusammentreten. Die Ursache dieser Unsichtbarkeit liegt in der Feinheit der Gebilde und dann auch in dem Umstande, dass Eis und Wasser Brechungsexponenten besitzen, die sehr wenig verschieden sind. Man kann diese feinen Nadeln oft dadurch leicht beobachten, dass man von dem Wasser ein Glas voll heraushebt und es gegen die Sonne gerichtet vor dem Auge hin und her schiebt. Aehnlich wie zur Zeit starker Reifbildung dem Auge im Glanze der Sonne ein dichter fliegender Eisstaub wahrnehmbar wird; der oft so dicht ist, dass man das Gefühl hat, derselbe sollte Atmungsbeschwerden verursachen.

Die so beschriebene Erscheinung nun tritt stets ein, wenn die Eisbildung an der Oberfläche schon begonnen hat und noch ehe die Temperatur der tiefern Wasserschichten dem Nullpunkte nahe gekommen ist.

Bei Beginn der veranlassenden Frostperiode, ebenso auch bei Eintritt von Tauwetter, werden daher die im Wasser schwimmenden Eisnadeln leicht wieder geschmolzen, namentlich wenn sie in tiefere Wasserschichten geraten.

Wenn aber auch das Tiefenwasser auf $+0.2^{\circ}$ bis 0.3° C gekühlt ist, so vermag es die Nadeln schon längere Zeit zu halten und mitzuführen, ohne sie vollständig schmelzen zu können. Solche zahlreiche, auch im tieferen Wasser schwimmende Krystalle treten also auf bevor die Sohlen- und die Wassertemperatur Grundeisbildung überhaupt zulässt, letztere tritt erst bei länger andauernder Kälte von zirka -4° C (Lufttemperatur) ein.

In grössern Mengen haben solche im Schmelzzustand befindliche Krystallgruppen Aehnlichkeit mit Schaum oder im ruhigeren Wasser mit Froschlauch. Will man bei unbedeutender Kälte oder bei Tauwetter eine Hand voll dieses schwammigen flockigen Eises aus dem Wasser herausheben, so gelingt dies sehr oft nicht; es zerfließt augenblicklich zu Wasser und rinnt zwischen den Fingern fort. Gelingt dies, so lässt es sich leicht zusammenballen, eine Eigentümlichkeit, die vom Schnee im Schmelzzustand, respektive mit Temperatur des Taupunktes, allgemein bekannt ist. Diese Eigenschaft wird «Regelation» genannt. Das Auftauen des Eises, namentlich bei Temperatur nahe 0° ist eben nicht ein blosses Abschmelzen der Eisstücke, sondern es gelangt dasselbe auch in seinem Innern in einen minder kohärenten Zustand. Die beschriebenen schneeflockenähnlichen Eisansammlungen schwimmen wie ein grauer Schleier träge im Wasser oder der Sohle entlang, ohne wahrnehmbares Bestreben sich zu erheben, da sie vom Wasser vollständig durchsetzt sind. Das spezifische Gewicht des Wassers, mit solchen Flocken gemischt, zeigt kaum eine merkbare Differenz, gegen das Gewicht des

2. Formbildung
mit dem
Wasser in
im $+0.2^{\circ}$ C
mitgeführt
80 = 400 g
im
mit $+0.2^{\circ}$ C
geben 3132
im 0° C

reinen Wassers. Es ist übrigens ein Merkmal, das man bei allen in Flüssigkeiten fein zerteilten festen Körpern, Erde, Schlamm, Sand etc. bemerken kann: Selbst wenn die Flüssigkeit in Ruhe ist, so folgen diese nur sehr langsam und träge dem geringen Zuge des spezifischen Gewichtes, welches sie nach oben oder nach unten treibt. Beweis hierfür ist schon trübes Wasser; hebt man ein Glas voll desselben heraus, so beobachtet man, dass die spezifisch schwereren Sandkörnchen hinauf und hinunter steigen, bei geringster Bewegung der Wasserteilchen. Noch mehr ist dies beim Eis der Fall; sind die Teilchen auch oft grösser, so ist die Gewichts-differenz im Schmelzzustand dafür geringer. (Spezifisches Gewicht des festen Eises = 0,9166.)

Es hat eben dieses schwimmende und vom Wasser durchzogene schwammige, schaumähnliche Eis an spezifischem Gewichte zugenommen, indem die einzelnen kleinen Teilchen so viel Schmelzwärme vom Wasser aufgenommen haben zur Lockerung der innern Reibung und Kohäsion, dass das ganze sich im Stadium vorgerückter Schmelzung befindet und jedes Teilchen vom Wasser vollständig durchtränkt ist. Die Volumendifferenz fest-flüssig ist geringer geworden. Aehnlich wie Eis auch in Stückform sich nahe 0° nicht rasch verflüssigt, sondern auftaut und in der ganzen Masse in einen minder kohärenten brüchigen Zustand übergeht. Stark begünstigt wird nun die Fortführung solcher sich bildender Eiskristalle durch das Wasser dort, wo ein Fluss aus einem Profil mit grosser Querschnittsfläche in ein solches mit geringerer Fläche übergeht; also beim Uebergang einer stauen Flussstelle in eine Stromschnelle. In ersterer steht das Wasser verhältnismässig in Ruhe und die Oberfläche bedeckt sich oft beim ersten stärkern Frost mit einer zarten Eishaut, deren einzelne Partikeln in die Stromschnelle abfliessen, so lange bis in dem ruhigeren Bassin durch weitere Kälte eine kräftige Obereisschicht, vom Ufer aus fortschreitend, sich bildet. Beim Uebergang in das enge Profil bilden sich auch dann noch Eisnadeln, die aber infolge der grössern Bewegung des Wassers mit der Eis-

decke nicht mehr gekittet werden können, sondern abgeführt werden.

Nach meinen Messungen in russischen Gewässern kommt bei Geschwindigkeiten des Wassers bis ca. 1 m secd. die Oberflächeneisschicht bei sonst günstigen Umständen noch leicht zustande, bei grösseren Geschwindigkeiten, ca. 1,5 m secd., konnte sich indes auch bei -25° bis -30° C keine Obereisschichte bilden, sondern die Krystallnadeln wurden einzeln oder in ganzen Gruppen als zarte, bewegliche und unzusammenhängende Eishaut, unter leichtem Klirren abgeführt. Es setzt diese Angabe der Geschwindigkeit voraus, dass das Wasser ungestört fliesst, nicht etwa schäumend über Hindernisse stürzt. Eine Ueberdeckung auch des schnellfliessenden Wassers, aus dem stehenbleibenden Treibeis ist indess natürlich möglich und kommt oft vor.

Ich trete absichtlich auf diese Vorgänge so ausdrücklich ein, mit Rücksicht auf die Einwände, dass das spezifisch leichtere Eis nicht untersinken könne, welche Frage namentlich bei Gewässern mit geringer Geschwindigkeit auf den ersten Blick berechtigt erscheint, und die Günther*) gegen die Bildung des Grundeises aus nicht zustande gekommenem Oberflächeneis ins Feld führt.

Man stützt sich nämlich in der Hydrotechnik zumeist noch auf die natürlich scheinende Annahme, dass in einem fließenden Gewässer die Wasserfäden parallel verlaufen, eine Hypothese, die für technische Berechnungen genügend genaue Werte ergibt, da man bei Neubauten und Korrekturen darauf Bedacht nimmt, den Rauigkeitsgrad von Sohle und Ufer der Kanäle möglichst gering zu gestalten. Dieser Verlauf trifft indess, namentlich bei allen Gewässern mit stark unregelmässigen Ufern und grössern Sohlenhervorragungen und bei unbedeutender Tiefe nicht zu. J. Thomson**) leistete den Nachweis, dass bei sonst ruhig

*) *Günther*, Handbuch der Geophysik. 1899. Stuttgart. II. Band, Seite 542.

**) do.

fließenden Gewässern nicht nur die Stromfäden selbst eine spiralförmige Drehung erfahren, sondern dass auch im Innern der strömenden Masse unausgesetzt vertikale Wirbelbewegungen statthaben, durch welche ein Ausgleich zwischen den vorhandenen verschiedenen Geschwindigkeiten der oberen und der tieferen Schichten herbeigeführt wird. Man hat zu unterscheiden zwischen stetiger und sinusoidaler Bewegung; je rascher der Fluss strömt, je mehr die Bewegungshindernisse sich häufen, um so mehr tritt letztere Bewegungsform in ihr Recht. Es wurde durch Beobachtungen und Kalkul konstatiert, dass zwei vom Stromstriche beiderseits gleichweit abstehende Wasserteilchen Spiralkurven symmetrischer Form, aber entgegengesetzten Drehsinnes beschreiben. Bei der Grundeisbildung nun kommen gerade die Gewässer mit unebenem Bett und grösserer Geschwindigkeit in erster Linie in Frage. Während nun erstere nicht zutreffende Hypothese dem Absteigen spezifisch leichterer Körper ungünstig ist, so wird dies durch die spiralförmige Bewegung begünstigt.

Aber auch eine Menge lokaler Umstände bewirken ein Absaugen der obern Wasserschichten und damit der schwimmenden Eiskristalle nach der Sohle.

Zum Beispiel:

Plötzliche Profilerweiterungen eines Flusses am Fusse einer Stromschnelle etc., nach Passieren von Brücken, Wehren, eingelagerten Inseln und Sandbänken, haben Geschwindigkeitsstörungen und Störung der Geschwindigkeitsrichtung zur Folge, in der Weise, dass das Wasser beim Eintritt in die stauende, erweiterte Stelle noch in der Richtung beharrt, die es in dem engern Profil mit grösserer Spiegelneigung inne hatte. Es schießt unter die in der Erweiterung ruhiger fließende Wassermasse hinein. Ferner nimmt Wasser, welches eine starkgeneigte Stromschnelle mit bedeutenden Sohlenunebenheiten passiert und über Steinblöcke fließt, starke Bewegungen in senkrechtem Sinne an. Es entstehen Grundwellen, welche die untern Wasserschichten der Oberfläche zuführen, und nach der

Sohle saugende Wirbel, die das Gegenteil bewirken Beim Anprall an einen grössern untergetauchten Stein nimmt die Geschwindigkeit eine Richtung schief nach oben an und das Wasser wallt auf; hinter einem in rascher Bewegung überspülten Hindernis entstehen Lufträume, in welche die obern Wasserschichten mit Kraft einbrechen u. s. w. — Auch im verhältnismässig ruhig fliessenden Wasser (Geschwindigkeit weit unter 1 m secd.) entstehen durch grobe Unebenheiten der Sohle noch kräftige Wirbelbewegungen, welche die Wasserteilchen bis in die höhern Schichten in nach oben zu abnehmende kreisende Bewegungen versetzen und so nach der Bettsohle saugend wirken.

Zum Beispiel weist der Rhein in seinem ruhigen Laufe der deutsch-schweizerischen Grenze entlang, trotz Geschwindigkeiten von oft unter 0,3 m secd., solche Strömungen in senkrechtem Sinne, in sehr grosser Zahl auf. Es sind solche Beobachtungen wohl die Ursache zu der frühern Annahme gewesen, die Wasserbewegung sei eine wälzende. Aber auch Unregelmässigkeiten und Unebenheiten der Ufer können Ursache zu Störungen der Geschwindigkeit in der fortschreitenden Richtung sein. So z. B. entstehen beim Uebergang einer konvexen zu einer konkaven Uferstelle eine Menge nach der Bettsohle saugende Wirbel, welche sich in der Richtung der an das konvexe Ufer und parallel dem Stromstrich resp. Geschwindigkeitsrichtung angelegten Tangente aneinander reihen. Sie sind die Folge von in dieser Richtung auftretenden Reibungen — infolge Geschwindigkeitsdifferenzen — des rasch vorbeiströmenden Wassers gegen das im Schutze der Kolken und konkaven Stellen ruhig vorwärts fliessende, stillstehende oder gar rückwärts und kreisend sich bewegende Wasser. Solche Wirbel üben bei namhafter Geschwindigkeit oft sehr bedeutende Kräfte auf im Wasser schwimmende Körper aus; nicht selten sieht man Holzstücke oder grosse, feste Eisschollen von Treibeis, durch ihre saugende Wirkung zur Sohle absteigen und

erst weiter flussabwärts steigen diese wieder auf, wenn sie nicht etwa an der Sohle an ein Hindernis gepresst werden und dort verbleiben. Aber auch im ruhiger fließenden Wasser werden bei Wirbelbewegungen etc. leichte Körper wie Sägespähne, dürre Baumblätter u. s. w. unter entsprechenden Bedingungen ohne Schwierigkeit in die Tiefe geführt, worüber man sich durch ein Experiment leicht überzeugt.

Durch Einbauten von Pfeilern und Jochen in die Flüsse werden solche stauende Flussstellen und Stromschnellen dadurch gebildet, dass die Verminderung der Profilflächen durch die Einbauten sich in vergrößerter Geschwindigkeit und entsprechender verllorener Druckhöhe äussert, so dass also ein oberes und ein unterhalb gelegenes Wasserbecken durch eine Stromschnelle im Einbaugesbiet getrennt werden. Daher entsteht unterhalb Brücken und anderen Einbauten sehr oft Grundeis.

Es ist klar, dass die erwähnten lokalen Stellen ihren Charakter und damit den Mechanismus der Wasserbewegungen mit steigendem und fallendem Wasserspiegel, also auch dem Wasserquantum entsprechend, verändern können. So z. B. kann an einer Flussstelle, wo das Wasser gewöhnlich glatt über Sohlenunebenheiten und Steine fließt, bei sinkendem Wasserspiegel (Niederwasser) Schäumen und Brausen auftreten, d. h. es kann in diesem Falle aus dem sogenannten «Stillwasser» ein sogenanntes «Wildwasser» werden.

Wir haben diese lokalen Verhältnisse wie gesagt näher betrachtet, um zu beweisen, dass in einem Flusse sich eine grosse Zahl von Gelegenheiten für das Absteigen der spezifisch leichteren Eisnadeln finden, aber ihre Betrachtung ist ebenso notwendig zur Erklärung der Grundeisbildung selbst.

Verfolgt man nämlich während eines Winters aufmerksam einen Fluss, von dem man weiss, dass er der Grundeisbildung unterworfen ist, so findet man bald die Gesetze heraus, nach welchen sich dasselbe diesen lokalen Flussstellen anpasst, wie gerade diese Verhältnisse die Bildung veranlassen und wie ferner jede dieser Stellen,

je nach der vorherrschenden Art der Wasserbewegung, die eine der genannten Grundeisarten bevorzugt und begünstigt, die andere aber in der Bildung zu hindern sucht.

Betrachten wir als erstes interessantes Beispiel den erwähnten Fall, wo Wasser mit bedeutender Strömung an einer konvexen Uferstelle vorbeistreicht und diese dadurch tangential von der darauf folgenden konkaven Stelle abgelenkt wird, in welcher letzterer Kolkung also verhältnismässig Ruhe herrscht.

Ich habe folgende Beobachtungen gemacht, und zwar zum erstenmal in diesem Umfange im Winter 1898/99 an der Narova bei Narva.

Das Wasser strich mit ca. 2 m secd. Geschwindigkeit an einer solchen konvexen Uferstelle vorbei und hatte in der tangentialen Geschwindigkeitsrichtung ca. 1,8 m tief gekolkt. Auf der Sohle lagen grössere Kiesel, welche infolge der Stosskraft des Wassers nicht in Sand gebettet waren, sondern lose lagen. Der mitgeführte Sand selbst wurde in die anschliessende konkave Stelle hineingelegt, in dieser floss das 0,5 m tiefe Wasser langsam rückwärts und bildete beim Zusammentreffen mit der Strömung kräftige Wirbel. Die konkave, sandige Flussstelle war leicht mit Gras und Moos bewachsen. Die Flusssohle hatte nun vom konvexen Ufer ausgehend ein breites Band weissen, festen Grundeises angenommen und es folgte dieses Band auffallender Weise genau der erwähnten Tangentenrichtung in den Fluss hinein, sich vom konkaven Ufer mit geringer Wassertiefe entfernend. Die sandige Sohle der konkaven Stelle hatte nur sehr wenig Grundeis, ferner strichen wenige Schwämme von solchem als Treibeis träge der sandigen Sohle entlang. An den Kronen der Gräser und am Moos dagegen hatten sich Kuppen von Grundeis glockenförmig etwas über der Sohle angesetzt. Dieses Grundeis war im Gegensatz zu ersterem weich und von schmutzig grauer Farbe. Es gab Sandstellen an der Sohle, auf der einige Kieselsteine zerstreut lagen und die sich alle mit Grundeis einhüllten, währenddem die fein-sandige

Sohle selbst solches nicht annahm, oder doch nur an be-
moosten Stellen. Bei grösserem Frost nun kam es vor,
dass sich das Grundeis — brückenförmig über den Sand
wegsetzend — von Stein zu Stein verband. War die
Schicht mächtig genug geworden, so wollte sie sich los-
trennen, erhob sich über den Sandstellen und wurde even-
tuell wieder unterfüllt von treibenden Krystallen, wenn
es von den Steinen noch festgehalten blieb.

Die genauere Untersuchung ergab folgendes: Das
Eisband in starker Strömung bestand aus porösem, aber
ziemlich festem Eise, welches sich sofort erhob, so bald
man es mit einer Stange kräftig berührte. Es gelang
daher nur sehr schwer, einen Stein mit samt seiner Eis-
hülle herauszuheben. Bei der geringsten Bewegung erhob
sich das Eis infolge seines geringern spezifischen Gewichtes,
oder es wurde von der Strömung fortgerissen und am
raschen Aufsteigen verhindert. Diese porösen, vom Wasser
durchzogenen Eisschollen hatten ausgesprochen körniges
Gefüge; es war ein Gemenge von regellos zusamme-
gewürfelten Krystallkörnern, Nadeln und Krystallgruppen,
von nicht sehr bedeutender Kohäsion. Diese Eisschollen,
mit denen die einzelnen Steine umhüllt waren, hielten sich
an letzteren nicht eigentlich durch Anfrieren fest; sondern
es griffen vielmehr nur die einzelnen Körner in die Un-
ebenheiten der Steine ein, und ferner waren die Kiesel
von den Hüllen von allen Seiten bis zu ihrem Auflager
völlig umfasst und gehalten. Es hat dieses körnige Grund-
eis viel Aehnlichkeit mit Schnee, welcher durch rasche
Folge von Tau und Wiedergefrieren hart und firnähnlich
geworden ist. Beim Herausheben wurde das Eis weisser
und fester, indem das Wasser aus den Schollen heraustrat
und durch kalte Luft ersetzt wurde.

Das Vorkommen in den Wirbelbewegungen an diesen
Stellen war sofort Grund zu der Vermutung, es sei dieses
Eis entstanden aus den früher geschilderten, im Wasser
massenweise vorkommenden Eisnadeln.

Nun wurde auch an die Untersuchung des Grundeises
geschritten, das sich, wie bemerkt, an konkaver Stelle in

ruhiger Strömung (0,3 m secd.) an die Kuppen der Gräser und am Moos angesetzt hatte.

Welch hochinteressantes Bild bot sich mir dar:

Es wurden einzelne Grashalme an der Sohle abgeschnitten und man konnte den ganzen Grundeisschwamm am Halm herausheben.

Die erste so untersuchte Pflanze war die *Elodea canadensis* (Wasserpest). Die Blätterkrone ragte in allen Verästelungen vollständig intakt in den umhüllenden Grundeisschwamm hinein, ein Zeichen, dass sich derselbe in sehr kleinen Teilchen angesetzt hatte und nicht etwa aus einer untergetauchten und dort festgehaltenen Eischolle bestand. Dieser Schwamm war im Wasser grauschmutzig anzusehen, wurde aber beim Herausheben ebenfalls weisslich. Er bestand durchwegs aus fischschuppenähnlichen rundlichen Blättchen von zwei bis fünf selten mehr mm Durchmesser und $\frac{1}{4}$ bis 1 mm Dicke. Diese einzelnen Blättchen waren glashart, an der Luft durchsichtig und zeigten meist an der Peripherie sechs rundliche Aus- und Einbuchtungen. Es waren dies die Richtungen der Nebenachsen der Krystallsterne.

Ferner zeigte sich bei eingehender Untersuchung die Tatsache, dass viele dieser Pflanzenblätter am Stiele, in der Mitte oder am Ende, mit den kleinen, rundlichen und glasharten Eisblättchen Durchdringungen aufwiesen. Letztere waren also durch die äussert weichen Pflanzenblätter und zu diesen senkrecht stehend, teils ganz, teils einseitig durchdrungen und durchstoßen. Aber auch die Pflanzenhalme waren an verschiedenen Stellen, unterhalb der Krone von glasharten Eisblättchen umschlossen.

Eine weiter untersuchte Pflanze war das *Myriophyllum verticillatum* (Tausendblatt). Auch hier zeigten sich vollständige und unvollständige Durchdringungen. Einzelne Halme waren nahe dem Wurzelstocke von beschriebenen Eisblättchen vollständig umschlossen. Stets war indess zu beobachten, dass die Eisblättchen auf dem durchdringenden Halme, Blattstiele oder Pflanzenblättchen senkrecht standen,

d. h. dass letztere stets angenähert die Richtung der Hauptachse des Krystallgebildes inne hatten.

Damit war nun der Beweis unzweideutig und endgültig erbracht, dass wenigstens diese Grundeisart sich am Grunde entwickelte und seine Blättchenform dort ausgebildet hat, indem seine glasharten Krystallgebilde dort Stellungen einnehmen, die absolut unmöglich wären, wenn sich die Krystallblättchen an der Wasseroberfläche, in ihrer Vollkommenheit und Abgeschlossenheit ausgebildet hätten, um erst nachher an den Grund und an die Pflanzen zu gelangen.

Dort sahen wir nun, wie sich in starker Strömung unter dem Einflusse kräftig saugender Wirbel das spontan entstandene *körnige Grundeis* mehr als blosses mechanisches Gemenge bildete, hier dagegen sehen wir, mit welcher Feinheit die Natur in ruhiger Strömung ihre Gesetzmässigkeit durch die orientierende Molekularkraft wahrte und das *blättrige Grundeis* entstehen liess. Nach dem Gesagten kann also die Bildung des Grundeises in molekulartheoretischem Sinne eine zweifache sein:

Dasselbe wächst entweder in Gemässheit eines Krystallisationsprozesses, oder auch durch mechanische Aneinanderreihung kleiner Eispartikeln (Analogie mit Raufrostbildung).

Meine vielen weitem Beobachtungen an andern Stellen waren nur Wiederholungen und Variationen des Gesagten. Körniges Grundeis war überall zu sehen in grosser Strömung und bei stärkerer Wirbelbewegung in Stromschnellen etc.; blättriges Grundeis dagegen in ruhigerem Wasser an konkaven Uferstellen, in Kolken und auch in Profilweiterungen am Ende von Stromschnellen und Verengungen. Ersteres, an der Flusssohle anhaftend über die das Wasser mit grösserer Geschwindigkeit und mit kräftiger Wirbelbildung streicht, ist eine rohe Ansammlung der bei starkem Frost treibenden Eiskrystalle und Krystallgruppen, deren Orientierung schon durch die Stosskraft des Wassers verhindert ist. Letzteres dagegen im ruhigen Wasser sich bildend, orientiert die einzeln auftreffenden feinen Krystall-

molekel in gesetzmässiger Form. Die Orientierungskraft ist hier grösser, dort aber geringer als die Stosskraft des Wassers auf die Eisteilchen. Eine ganz strenge Grenze lässt sich zwischen beiden indess natürlich nicht ziehen.

In Bezug auf das körnige Grundeis habe ich sodann ebenfalls zuerst an der Narova eine weitere interessante Beobachtung gemacht:

Wasser von 0,6 m Tiefe floss mit zirka 1,5 m : secd. Geschwindigkeit wellenförmig über Gerölle. Der Fluss hatte sehr viel Grundeis gebildet.

An der beschriebenen Stelle waren auf dem Grundeis an der Sohle deutliche Erhebungen «Kräuselungsmarken» sichtbar. Es waren dünenförmige Eisrippungen, deren erhöhte Scheitel der Rippen weisser und fester waren, als das übrige die ganze Sohle überwuchernde Grundeis. Die Rippen verliefen in parallelen Kurven, senkrecht zum Stromstrich, man könnte also sagen sie bildeten Horizontalkurven. Sie waren das Spiegelbild der Wasserwellen. Es hat diese Erscheinung Verwandtschaft mit den durch den Wind entstehenden Schnee- und Sanddünen, noch mehr aber mit den kleinen Sanddünen (Kräuselungsmarken), welche entstehen wenn ein konstanter Strom Sand mitführt und ihn ablegt.

Nach Lyell*) nimmt die Länge solcher Furchungen bei Sanddünen mit der Höhe und Geschwindigkeit der Welle, oder mit der Intensität des linearen Anstosses, sowie auch mit der Korngrösse und Dichte des Sandes zu. Diese Eigenschaft wurde gegeben für sehr geringe Geschwindigkeiten (0,2 m : secd.).

Es war diese Beobachtung eine Bestätigung meiner Ansicht, dass das Grundeis wohl entstehe durch Niederschlag der im Wasser mitgeführten kleinen Eispartikeln, welche noch fest oder aber schon im Zustand der Verflüssigung sein können. Dies veranlasste mich zu folgendem empirischen Versuche:

*) Günther, Handbuch der Geophysik. Stuttgart 1898. II. Band, Seite 626.

*2 m ...
die ...
im ...
Kühlung!*

Ich beobachtete während mehreren Tagen, dass die Steine, an einer bestimmten Stelle der Bettsohle sich regelmässig nachts in bedeutendem Umkreise mit Grundeis überzogen. Die Strömung betrug im Mittel $1,2 \text{ m} : \text{secd.}$ Daneben, wenige Meter gegen das Ufer, war infolge eines kleinen Hindernisses die Strömung gehemmt und betrug bloss zirka $0,5 \text{ m} : \text{secd.}$, hier war keine Grundeisbildung zu beobachten. Ich bewegte nun einige Steine, die bisher regelmässig nachts Grundeis annahmen, mit Hülfe eines Bootshackens der Sohle entlang in diese ruhigere Strömung. Dort nahmen sie indess kein Grundeis mehr an, obschon in geringerer Wassertiefe gelegen, während die Sohle der vorherigen Lagerstelle sich nach wie vor mit Grundeis überzog. Dieses Experiment wiederholte ich mehrere Tage und auch in umgekehrtem Sinne, indem ich Steine, die in ruhiger Strömung kein Grundeis annahmen, in die grössere Strömung legte; aber immer ergab es sich, dass die Steine in der grössern Strömung und auch trotz grösserer Wassertiefe Grundeis annahmen, in der geringern dagegen nicht.

Es lag nun der Gedanke nahe, sich durch einen grössern Versuch zu überzeugen, ob wirklich die Bewegung des Wassers unbedingtes Erfordernis zur Grundeisbildung sei.

Dieses Experiment, an der Narova angestellt, hat die vollkommene Bestätigung dieser Vermutung ergeben.

Die Narova (Mittelwasserquantum zirka $500 \text{ m}^3 : \text{secd.}$, Hochwasserquantum zirka 2500 bis 3000 $\text{m}^3 : \text{secd.}$) verbindet den Peipussees mit dem zirka 60 Werst nördlicher gelegenen Finnischen Meerbusen. Bald ihre Wasser in einem einzigen Bette vereinigt und in starken Stromschnellen, bald in viele Arme und Serpentina mit geringem Gefälle geteilt führend, erreicht der Fluss, zirka 12 Werst vor seiner Mündung in das Meer, die Fabrikstadt Narva. Während derselbe direkt oberhalb Narva einen sehr ruhigen Lauf ($0,1 \text{ m} : \text{secd.}$), bei einer Tiefe von 8 und mehr Metern hat, steigt die Flusssohle gegen die Stadt, also flussabwärts, stark an, um dort bei nur 2 Metern Tiefe eine Felsenbarre zu überschreiten und dann in zwei Flussarme

geteilt, als steil abfallende Stromschnellen die Vorstadt zu erreichen. In jedem dieser Arme stürzen ihre Wasser, welche dort zum kleinen Teil zu Industriezwecken abgeleitet sind, zudem noch als Wasserfall über sozusagen senkrechte Felswände von 6 bis 8 Metern Höhe. Nachher vereinigen sich diese beiden Arme wieder und der Fluss erreicht nach Passieren einer zweiten Stromschnelle von 1,5 Werst Länge und 12 Meter Totalgefälle die alte Handels- und Festungsstadt Narva.

Kurz oberhalb der beschriebenen Felsenbarre ist der Fluss durch einige Inseln ebenfalls in mehrere Arme geteilt, die zum Teil den Uebergang zur ausschliessenden oberen Stromschnelle vermitteln. In diesen letzteren Armen und Kanälen nun war zu konstatieren, dass bei Geschwindigkeiten bis zu 1 m : secd. sich schon sehr bald Oberflächeneissschichten bildeten, Grundeis aber meist fehlte; solche Arme dagegen, deren Wasser grössere Geschwindigkeiten aufweisen, liessen jeden Winter mehr oder weniger Grundeis an ihrer Sohle entstehen.

Ein ebensolcher zirka 30 Meter breiter Flussarm nun, an dessen Felssohle sich alle Winter sehr starke Grundeissschichten bildeten, wurde zu bestimmtem Zwecke an seinem Einlaufe mittelst Holzeinbau in der Weise abgesperrt, dass seine früher zirka 1,5 m : secd. betragende Wassergeschwindigkeit auf 0,3 bis 0,4 m : secd. herabgemindert wurde. Die Wasseroberfläche überzog sich nun auch hier beim ersten stärkern Frost mit einer kräftigen, passierbaren Obereissschicht und von Grundeisbildung war in der Folge in diesem Flussarme nicht mehr die Spur zu finden, obschon an den übrigen, das Grundeis stark fördernden Bedingungen: felsige Sohle, ruhiger Lauf oberhalb und Uebergang zur Stromschnelle, nichts geändert wurde. Mehrfache Temperaturmessungen, zum Teil mit Hülfe des Tauchers gemacht, ergaben, dass die Wassertemperatur an der Spiegelfläche unter dem Obereise öfters 0°, selten + 0,01° bis + 0,02° C betrug, während sie in zwei Meter Wassertiefe an der Sohle stets $\frac{1}{100}$ bis $\frac{2}{100}$ Grad höher stand. In der Sohle

aus Kalkfelsen ergaben sich Temperaturen, gemessen in Löchern von zirka 0,3 Meter Tiefe, von $+0,1^{\circ}$ bis $+0,2^{\circ}$ C. Da diese Wassertemperaturen von den im Flusse und auch an grundeisbildenden Stellen gemessenen, nicht erheblich abwichen, so war offenbar früher die grössere Wasserbewegung und damit in Verbindung auch das Fehlen der Obereisschicht, Ursache zur Grundeisbildung. Der Versuch war indess noch kein vollständiger Beweis dafür, dass das Grundeis nur eine Weiterentwicklung und Absetzung der im Wasser schwimmenden Eisnadeln an der Sohle sei; vielmehr war die Möglichkeit noch nicht absolut ausgeschlossen, dass früher und bei Verhinderung der Obereisschicht durch die grosse Geschwindigkeit die Sohle des Flussarmes andern Gesetzen der Strahlung und Abkühlung unterworfen war. Ferner stand die Frage noch offen, ob nicht etwa die grosse Wassergeschwindigkeit vor der Absperrung des Flussarmes nach dessen Sohle saugende Wirbel erzeugt hatte, welche kalte Luft eintreten liessen und die Sohle gekühlt haben könnten. Sodann konnte ich meinen angeführten Temperaturmessungen im Sohlenfelsen, bei 2 Meter und mehr Wassertiefe keine absolute Zuverlässigkeit beisprechen.

Eine anschliessende, d. h. vom 18. bis 22. Januar 1899, alten Stiels, zur allgemeinen Orientierung und Temperaturmessungen dem Flusslaufe entlang bis zum Peipussee unternommene Exkursion ergab folgendes: Der ganze See war mit Eis bedeckt und Fuhrwerke passierten darauf; die Temperatur des Wassers betrug unter der Oberflächeneisschicht in der seichten Seemündung in die Narova $+0,1^{\circ}$ C.; über der Sandsohle in 2 Meter Tiefe $+0,35^{\circ}$ C.; Lufttemperatur -6° C.; bei etwas Sonnenschein. In der versandeten Einmündung in's enge Flussbett fehlte die Obereisschicht infolge grosser Strömung; die Wassertemperatur betrug dort $\pm 0^{\circ}$. Flussabwärts war dessen Oberfläche auf eine Länge von zirka 20 Werst mit Eis bedeckt, um dann offen (ohne Obereisschicht) und in schnellem Laufe eine zirka 3 Werst lange Stromschnelle bei «Omut»

zu passieren. Vor dieser Stromschnelle war unter der Ober-eisschicht am Wasserspiegel eine Temperatur des Wassers von $+ 0,05^{\circ} \text{C.}$ und in 2,5 Meter Tiefe $+ 0,1^{\circ} \text{C.}$ zu finden bei Lufttemperatur $- 4,5^{\circ} \text{C.}$ In die Flusssohle aus feinem Sand liess ich hier einige hölzerne Pfähle, über dessen Spitze je ein Thermometer eingelassen war, ca. 0,3 m tief einrammen und konstatierte eine Bodentemperatur von $+ 0,35^{\circ} \text{C.}$ bei Wassertiefe von ca. 1,80 m. Am untern Ende der anschliessenden Stromschnelle bildeten sich in einer plötzlichen Profilerweiterung alle Winter Eisbarrieren in der ganzen Breite des Flusses, die das Wasser stauten (bisweilen bis 5 m hoch), indem sich das Treibeis der Stromschnelle über und unter die dort vorhandene, kräftige Obereisschicht schob. Ich will mich hierüber nicht weiter auslassen, sondern nur bemerken, dass solche Stopfungen in der Weise das Grundeis fördern helfen, dass sich das langsam durch das Eis sickernde Wasser stark abkühlt, wobei seine Temperatur durchaus 0° annimmt.

Wir kommen auf diesen Umstand später noch bei der Beschreibung des Galerteises zurück.

Im ruhigen Lauf oberhalb den Narva'schen Stromschnellen und Wasserfällen war zu dieser Zeit die Wasseroberfläche ebenfalls durch eine kräftige Eisdecke überbrückt und schwimmende Eiskrystalle und Krystallnadeln traten gewöhnlich erst gegen die Stromschnellen hin in grösseren Massen auf, wo die Obereisschicht fehlte. Trieb der Fluss aber in den in seinem Mittellauf gelegenen Stromschnellen Grundeis ab, so wurde solches als Sulz unter der Ober-eisschicht durchgeführt und in der Folge in die Narva'schen Stromschnellen getrieben. Hier bildete sich nun das Grundeis in jedem Winter und namentlich auch 1898/99 massenweise, aber stets erst nachdem der Fluss an ruhigen Stellen weiter oben bereits längst mit Eis sich überdeckt hatte. In grosser Strömung und an schattigen Stellen konnte sich das Grundeis oft mehrere Tage halten und vermehren; in geringer Strömung dagegen trieb es

sozusagen alle Tage schon am Vormittag auf und schwamm fort, um sich in der Nacht neu zu bilden.

Dieser Grundeisaufrtrieb war nun für den denkenden Beobachter ein höchst interessantes Schauspiel. Die hierfür speziell in Betrachtung gezogene Flussstelle hatte eine Bettsohle in grösserer Strömung aus Kalkfelsen, ohne Geschiebeüberdeckung, doch abwechselnd mit Stellen aus mehr oder weniger grossem Kiesgeschiebe; in kleiner Strömung dagegen aus feinem Sand und Schlamm. Von den Ufern aus hatten die Anwohner für den Lachsfischfang zahlreiche kleine Dämmchen (Buhnen) aus Steinen des gewachsenen Felsens der hohen Flussufer in den Fluss hinein und senkrecht zu dessen Laufe angelegt. Der Uferfels besteht in der Höhe von 10 m über Wasserspiegel, welcher unterhalb Narva schon Meerhöhe repräsentiert, aus Kalkfelsen mit Versteinerungen von Organismen der See (Silur); in ca. 5 m Höhe über dem Wasser geht der Kalkstein in rötlichen bis grünen Kalkstein oder Kalksandstein über und auf Wasserspiegelhöhe befindet sich der Uebergang zu Lehmschichten, welche mit dünnen rötlichen Sandsteinschichten abwechseln und bis auf 20 m unter Wasser reichen, allwo nur noch fester blauer Lehm in gemachten Bohrlöchern zu finden ist.

Nachdem nun Ende Dezember 1898 nach kurzem Tauwetter wieder stärkerer Frost eintrat, bildete sich hier im Januar 1899 das Grundeis in bedeutendem Umfange aus.

Hatte sich in kühler Nacht eine Grundeisansammlung, teils schichtförmig, teils als Hüllen einzelner Steine oder Gräser an der Sohle gebildet, so war am darauffolgenden Tage folgendes zu beobachten: Steine die mit der Flusssohle in sehr guter Verbindung standen, so dass das Wasser — infolge Sandanlagerung etc. — nicht unter denselben zirkulieren konnte, nahmen im allgemeinen nur ungen und seltener Grundeis an.

Die der Sonne mit ihrer grössern Fläche zugekehrten mit Grundeis bedeckten Steine trieben dieses zuerst ab und zwar begann der Auftrieb stets an ufernahen Stellen,

also in geringer Wassertiefe und ebenso auch in geringer Strömung und setzte sich dann nach und nach gegen die Flussmitte hin fort. Wie Inseln standen diese besagten Steine nach dem Auftriebe ihres Grundeises inmitten der noch bleibenden Eisschicht, welche die Sohle daneben noch bedeckte. War die Grundeisschicht sehr kräftig oder mehrere Tage ohne Auftrieb angewachsen, so kam es vor, dass bei Einwirkung der Sonne wohl eine oder mehrere Gruppen von Steinen das Eis abtrieben und dass solches sich an diesen Stellen einige Centimeter erhob, ohne indess weiter aufsteigen zu können, da es an andern Stellen (Steinen oder Gras) noch gehalten wurde. So bildeten sich oft förmliche Brücken von Steingruppe zu Steingruppe, oder an Kuppen von Gräsern, die nicht selten wieder mit Neubildungen von Grundeis unterfüllt wurden, wie schon früher angeführt.

Das Grundeis, welches bei Einwirkung bedeutenden Frostes oder auch infolge kräftigen Auftreffens der Krystalle durch grosse Strömung feste Schichten auf der Sohle bildete, tauchte beim Auftrieb in grössern und kleinern Schollen rasch an die Wasseroberfläche empor. Es hatte durch seine Entwicklung und feste Aneinandergruppierung kleineres spezifisches Gewicht erlangt, im Gegensatze zu den ursprünglichen im Schmelzzustande der Sohle entlang streichenden feinen Nadeln und Krystallen. Solche auf dem Wasser treibende Schollen, wie auch Obereisstücke, versammeln oft die auf und im Wasser schwimmenden Krystalle um sich, und werden von diesen reifähnlich eingehüllt. Sodann zeigten einzelne grössere Steine auf der Sohle das gewiss sonderbare Verhalten, dass sie sich geradezu sträubten, während der Nacht oder auch am Tage Grundeis überhaupt anzunehmen. Sie liessen die um sich herum entstandene Eisschicht über ihre Stirnseiten emporwuchern und an der Oberfläche wulstartig zusammenstreben, sich überbrücken, ohne dass die Oberfläche selbst dem Eis Halt bot und dieses annahm. In sehr starker Strömung nahmen diese Steine an derjenigen Fläche öfters das Eis

an, an welche die Strömung anprallte. Auch war zu bemerken, dass grössere Plattensteine, welche auf der Sohle lagen, das Grundeis zuerst an ihrer Oberfläche abtrieben und es noch an den Stirnseiten behielten. Ebenso hielt sich dasjenige Grundeis bis zuletzt, welches — infolge schlechter Lagerung auf andern Steinen — etwa an der untern überragenden Fläche eines Steines entstanden war.

Es fiel mir bei diesen Beobachtungen auf, dass sowohl alle zuerst das Grundeis abtreibenden Steine, als auch diejenigen, welche sich gegen die Grundeisbildung überhaupt sträubten, dunkel-rötliche, gelbliche oder vorzugsweise grünliche Farbe hatten, herrührend von sie durchsetzenden Metalloxyden.

Erst in zweiter Linie stiessen dann die grössern weisslichen Kalksteine das Grundeis ab, und nun nach und nach auch die kleinern Steine, die Kiesel und zuletzt der Sand; während dasselbe an den Graskuppen länger gehalten blieb, oft bis es an Ort und Stelle abschmolz.

Fand der Auftrieb des Grundeises an Tagen mit vollständig bedecktem Himmel, also ohne direkte Einwirkung kräftiger Sonnenstrahlung statt, so begann derselbe nicht mehr an grössern Steinen in geringer Tiefe zuerst, sondern es begann vielmehr der Auftrieb unter diesen Bedingungen an ruhigen Stellen in grösserer Tiefe. Hierbei muss neben der Wassertemperatur die Erdwärme mitgewirkt haben, deren Einfluss grösser geworden ist als derjenige der Strahlung.

Die kräftigsten Grundeisbildungen waren dort zu sehen, wo Wasser mit grosser Geschwindigkeit plötzlich durch Hindernisse gestört wurde und dessen Strömung in starke senkrechte Wallungen oder Sprudel sich umsetzte.

Allgemein war ferner zu konstatieren, dass diejenigen Gegenstände, die am vollkommensten von Wasser umspült waren und in diesem über die Sohle hoch emporragten, die Grundeiskristalle zuerst anhaften liessen, wie z. B. lose auf groben Kies gelagerte Steine, Gräser, oder

auch Wolle und Lappen, welche im Wasser schwimmend irgendwo hangen geblieben, die alle also leicht befähigt waren, durch das Wasser gekühlt zu werden, und dessen Temperatur anzunehmen, unbeeinflusst von der höheren Sohlentemperatur. Dagegen schien der Rauheitsgrad der Steine selbst nur unbedeutenderen Einfluss auszuüben.

In allen diesen Vorgängen lag durchaus Gesetzmässigkeit. Obschon bei Aenderung des Wasserstandes, was sogar oft durch die Bildung von Grundeis selbst bewirkt wurde, die Richtung der stärkeren Strömung sich veränderte und das Grundeis in seiner Anordnung dieser Strömung stets genau folgte, so wiederholte sich doch der ganze Vorgang, an der neuen Stelle mit grösster Aehnlichkeit wieder. Das Gesetz, nach welchem sich die Vorgänge abspielten, war in seinen Wirkungen klar und einfach und leicht zu überblicken, aber zur Ermittlung der Ursachen waren Messungen nötig und zwar systematische Messungen mit grösstmöglicher Genauigkeit. Ueber die zweckentsprechenden Methoden und Instrumente hierzu war ich durch meine bisherigen Beobachtungen, wobei es ohne Täuschungen und viele Schwierigkeiten nicht abging, ins klare gekommen und vor persönlichen Opfern, wie sie ein schutzloser Aufenthalt von früh bis spät in Kälte, Sturm und Schnee erforderte, durfte man nicht zurückschrecken.

f. Einige Angaben über Temperaturmessungen und meteorologische Beobachtungen.

Meine ersten Temperaturmessungen machte ich im Sinne der im Novemberheft 1888 der Zeitschrift «Das Wetter», Verlag von Otto Salle in Braunschweig, gegebenen Anleitung.*) Weitere, der ohnehin spärlichen Literatur, mit deren Beschaffung ich ein Berliner Haus von St. Petersburg aus 1898 beauftragt hatte, passierte die Zensur erst nach meiner im Frühjahr 1899 bereits erfolgten Rückkehr in die Schweiz.

*) Siehe Seite 111 dieses Heftes.

Nachdem die entsprechend obiger Anleitung in Röhren, welche in den Boden der Flusssohle eingesteckt wurden, vorgenommenen Temperaturmessungen keine genügende Genauigkeit ergaben, sondern nur noch mehr verwickelten und verwirrten, so benützte ich hierzu folgende Mittel:

Ich beschaffte mir aus der optischen Werkstätte Müller in St. Petersburg einige Wasserthermometer mit ca. $\frac{1}{4}^{\circ}$ C direkter Ablesung; und als sich diese ebenfalls im Laufe der Beobachtungen als von ungenügender Genauigkeit für meine Zwecke erwiesen, gab ich der obigen Werkstätte den Auftrag zur Konstruktion mehrerer Thermometer, deren Skalen nur einen Umfang weniger Grade in der Nähe des Nullpunktes hatten, wodurch ich eine Genauigkeit von $\frac{1}{200}^{\circ}$ C. erzielen konnte.

Am obern Ende der Quecksilberröhre wurde eine Blase angeschmolzen zur Aufnahme des überschüssigen Quecksilbers in den höheren Temperaturen.

Die grosse Empfindlichkeit der Thermometer war dadurch herabgemindert worden, dass die Mantelröhre aus Glas, in welches die Quecksilbersäulenröhre samt Skala wasserdicht eingelegt war, ihrerseits wieder mit einer an der Ablesestelle ausgeschlitzten Schutzhülse aus Messing umgeben ward, die am untern Ende an einen erweiterten dickwandigen Kupferzylinder anschloss und dessen Höhlung die etwas grosse Quecksilberkugel aufnahm. Die Thermometer wurden auf dem St. Petersburger Zentralamt geprüft und die Korrekturen anher bekannt gegeben. Zur öftern Kontrolle hielt ich ausserdem ein grösseres Normalthermometer.

Die mit diesen Instrumenten erzielten Resultate befriedigten gut, trotz den grossen Schwierigkeiten, denen man bei solchen Messungen stets begegnet. Einige dieser Thermometer verlor ich indess bald, theils durch Zermalmen durch Treibeis, sodann infolge Einbrechen durch die Ober-eisschicht und Sturz ins Wasser, wobei ich zwei in der Hand gehaltene Thermometer fallen liess.

Diese Thermometer wurden nun der Reihe nach wie folgt verwendet: Unterhalb des — wie beschrieben — abgesperrten Flussarmes, wo an dessen unterer Mündung die Narova mit grösserer Geschwindigkeit vorbeifliesst und wo also eine Obereisschicht, wie solche im gesperrten Arme selbst erzeugt wurde, fehlte, bildete sich Grundeis an felsiger Sohle und an Ufermauersockeln. An diesen Stellen liess ich Löcher senkrecht in die Sohle und in die Mauersockel bohren von 30 mm Durchmesser und 0,3 bis 0,35 m Tiefe, so dass das eingesteckte 0,25 m lange Thermometer in seinem höchsten Punkte noch 5 bis 10 cm mit dem Metallzylinder unter der Sohle stand. War das Thermometer eingeführt, so wurde das Loch gut verkittet mit wasserdicht präpariertem blauem Lehm. Jeden Tag wurde abgelesen und das Thermometer sofort wieder eingeführt.

Als Beispiel mögen folgende Temperaturangaben genügen:

1./13. Februar 1900:

Temperatur der Luft — $8,0^{\circ}$ C.

» des Wassers $\pm 0,00^{\circ}$ C. an der Oberfläche.

Thermometer Nr. 3146; im Loch I $+ 0,5^{\circ}$ C.

» Nr. 600; im Loch II $+ 0,46^{\circ}$ C.

Himmel bedeckt mit vollständig grauem Schleier, Wind wechselnd. In der Nähe der Messlöcher war Grundeis gebildet. — Also steht hier die Sohlentemperatur 0,3 m tief, am Auslaufe des besagten Flussarmes über Null (sie variierte stets zwischen $+ 0,3$ bis $+ 0,5^{\circ}$ C), trotz Grundeisbildung und trotz Wassertemperatur von 0° . Diese Messungen zeigten bei den öftern Wiederholungen nichts Neues.

Sodann liess ich mehrere im Flusse liegende grosse Steine, die das früher beschriebene auffallende Verhalten bei der Grundeisbildung und beim Auftrieb desselben zeigten, ohne sie zu bewegen, mit 7 bis 12 cm tiefen Löchern versehen, in welche die Thermometer mit den Kupferzylindern so eingekittet wurden, dass die Nullstelle der Skala herausragte, um sie von Zeit zu Zeit abzulesen.

Als Beispiel gebe ich einige Temperaturen solcher Steine Nr. I, II und III in der beigefügten Tabelle.

Es zeigte sich indess bald, dass die so erhaltenen Messresultate nicht absolute Verlässlichkeit boten, wenn schon sie die Gewissheit gaben, dass die Sohlentemperatur an allen Stellen, auch im Moment der Grundeisbildung, über Null steht; denn Luft und Wassertemperatur waren stets niedriger als die Gesteintemperatur und diese hätten daher das Thermometer unter keinen Umständen in steigendem Sinne beeinflussen können. Die hier angewandte Methode hatte aber folgende Uebelstände: Die mit ihrem oberen Teile aus den Löchern herausragenden Thermometer waren naturgemäss an dieser Stelle von der äussern oder Wassertemperatur, und auch im Schatten von der Strahlung, beeinflusst. Sodann war es wünschenswert, die Gesteintemperatur direkt an der grundeisfassenden Oberfläche, statt mehrere Centimeter tief im Innern, zu kennen; dies ganz abgesehen davon, dass die so eingesetzten Thermometer oft von Treibeis zerstört wurden und die neue Einsetzung bei grosser Kälte und starker Strömung bis 0,6 m unter der Wasseroberfläche Schwierigkeiten bot. Obschon ich dies mit blossen Armen und Händen besorgte, so war es doch nicht immer zu vermeiden, dass treibende oder anhaftende Krystallnadeln in das Loch gelangten oder dass mit dem Kitt Grundeiskrystalle von der Steinoberfläche hineingeschoben wurden, was dann zur Folge hatte, dass die Krystalle im Loche langsam schmolzen und dadurch das Thermometer einige Zeit die Temperatur von 0° und oft auch unter 0° anzeigte. Aehnliche Schwierigkeiten dieses Verfahrens wären noch mehr anzuführen.

Besser befriedigende Ergebnisse hatte folgendes Verfahren: Ich suchte einige transportierbare aber noch genügend grosse, verschieden farbige Steine aus, die regelmässig Grundeis annahmen und abtrieben, hob sie aus dem Wasser und liess dieselben, mit einem Einschnitte (Furche) an der Oberfläche versehen, gerade lang, tief und breit genug, um das Thermometer liegend und allseitig

*Die Temperatur
des Grundes
kann so genau
bestimmt werden
wie bei den
Tiefenmessungen*

den Stein berührend einlegen zu können. Die Skala des Thermometers wurde nach oben gekehrt und das parallel der Steinoberfläche (also nicht senkrecht stehend wie bei Nr. I, II und III) liegende Thermometer eingekittet, so dass nach Ausebnung des Schlitzes mit Kitt entsprechend der Oberfläche des Steines, dieser Kitt noch ca. 5 bis 10 mm dick das Thermometer überdeckte. Um womöglich den Stein mit dem Thermometer bei den Messungen unberührt und im Wasser lassen zu können, wurde in der Nähe der Nullstelle der Kitt über der Skala auf 1 bis 2 cm Länge und 5 mm Breite ausgespart, so dass die Variation der Quecksilbersäule jederzeit genau beobachtet werden konnte. Zur sorgfältigen Fernhaltung von Eiskrystallen beim Einbringen der Thermometer wurde dieses unter einem schützenden Baume und bei Feuer vorgenommen und dann das Ganze mit Temperatur über 0° ins Wasser gebracht, an den entsprechenden Stellen, wo sich das Grundeis bildete. Es hatte sich nämlich gezeigt, dass Steine, welche mit Temperatur unter 0° ins Wasser gelegt wurden, sich sofort mit einer glasharten Schicht Eis überzogen und diese sehr lange behielten. Die Ablesungen dieser Steine-Temperaturen (No. 1, 2 und 3) wurden gewöhnlich früh 7 Uhr, mittags 11 Uhr und abends 4 Uhr vorgenommen, dabei wurde stets auch die Temperatur des Wassers und der Sohle neben den Steinen im feinen Gerölle und im Schlammssande bestimmt und überhaupt alle möglichen und wünschenswerten Aufzeichnungen gemacht, zu welchem Behufe die ganzen Tage bei jeder Witterung am Flusse zugebracht werden mussten.

Diese Aufzeichnungen gestatteten nun in Bezug auf den Vorgang und die Ursachen bestimmte Schlüsse zu ziehen und sie sind nach meiner Ansicht interessant genug, hiervon ebenfalls ein charakteristisches Beispiel folgen zu lassen. Der Uebersicht wegen sind die Angaben in Tabellenform und graphisch gegeben.

(Siehe Tafel I und II.)

Diese Messungen sind längere Zeit hindurch fortgesetzt worden, im Winter 1898/99 an der Narova von mir selbst, vom 26. Februar bis 25. März 1899 und im Winter 1899/1900 in ganz gleicher Weise von Ingenieur Balbian in Narva an der Narova, und von mir an der Aare, ohne aber irgendwelche nennenswerten Abweichungen von dem hier gegebenen Beispiel zu konstatieren. Die allgemeinen Grundsätze blieben stets die gleichen, so dass von der Mitgabe des sehr umfangreichen Materials abgesehen werden kann. —

An die beigegebenen Messresultate lassen sich folgende Bemerkungen anschliessen:

1. Die Temperatur des Wassers.

Die in der Tabelle (Tafel I) angegebenen Masszahlen und die betreffenden Kurven der graphischen Aufzeichnung (Tafel II) stellen die Temperaturen des Wassers in der Nähe der Steine No. 1, 2 und 3 an der Oberfläche und 0,3 m tief an sandiger Sohle dar. Es wurden auch an anderen Stellen und in verschiedenen Strömungen Messungen der Wassertemperatur gemacht, ohne bemerkenswerte Abweichungen zu konstatieren. In nicht allzu grosser Strömung nimmt dessen Temperatur mit der Tiefe zu und zwar umsomehr, je ruhiger dort das Wasser fliesst, was schon früher bemerkt wurde.

Aus den beigegebenen Aufzeichnungen ist ersichtlich, dass die Wassertemperatur in erster Linie durch die Lufttemperatur, dann aber durch eine ganze Reihe verschiedener meteorologischer Erscheinungen beeinflusst wird. Das Wasser als Körper von grosser Wärmekapazität erwärmt sich sehr langsam, gibt aber die einmal aufgenommene Wärme auch nur langsam wieder ab.

Sehr stark wird es in seiner Temperatur durch die Verdunstung und Ausstrahlung bei klarem Himmel beeinflusst, indem es dadurch energisch gekühlt wird, haupt-

sächlich dann, wenn das Wasser infolge Tauwetter und den durch dieses beförderten Zufluss aus den ausgedehnten Morästen im Mittellauf der Narova, durch Zufuhr von Sand und Erde, getrübt wurde, was die Verdunstung fördert. Denn wenn auch durch den bei letzterer entstehenden Nebel die Ausstrahlung der Wasserwärme gehindert wird, so absorbiert andererseits der Wasserdampf die Sonnenstrahlen stark und es war bei Auftreten und Aufsteigen desselben stets beträchtliche Wasserkühlung zu konstatieren, wie allgemein schon mit Erhebung der Luft Abkühlung verbunden ist. Dem Gefrieren geht daher oft das Aufsteigen eines dichten Nebels «Frostrauch» voran, der darauf hindeutet, dass die Luft bereits gründlich durchkältet ist, während das Wasser kraft seiner grössern Wärmekapazität noch höhere Temperatur aufweist. Auch die Windströmung hilft hierbei mit. (Zur Verdampfung eines Grammes Wasser wird so viel Wärme gebunden, dass dadurch ca. 7 Gramm Eis erzeugt bzw. geschmolzen werden könnten.) Ferner wird die Wassertemperatur sehr stark erniedrigt, wenn Schnee in das Wasser fällt, sei es direkt beim Schneefall selbst, oder auch durch kräftigen Wind, welcher letzterer den auf den anliegenden Ebenen angehäuften Schnee oft in grossen Massen ins Wasser wirbelt. Auch zu Zeiten stärkern Auftriebes von Grundeis oder beim Eisgang überhaupt kühlt sich das Wasser sehr stark ab, indem dessen Wärme molekulare Arbeit leistet, welche die Massen gefrorenen Wassers in tropfbare Flüssigkeit zurück zu verwandeln strebt. Ferner kann Regen Ursache weitgehender Abkühlung des Flusswassers sein, nämlich dann, wenn dieser fällt, nachdem die Erdoberfläche bereits mit Schnee bedeckt ist, an welcher letzteren das Regenwasser seine Wärme zur Leistung von Schmelzarbeit abgibt, bevor es in den Fluss gelangt. Die beschriebenen Faktoren, einzeln oder im Verein, können, trotz steigender Lufttemperatur, Kühlung der Wassertemperatur bewirken (siehe 13. Februar). Es bleibt zu bemerken, dass bei aller Sorgfalt bei diesen Messungen und trotz peinlichen Vor-

sichtsmassregeln und öfteren Wiederholungen doch kleine Differenzen nicht immer und absolut ausgeschlossen sein werden. So war es z. B. stets notwendig, die Thermometer vor den Wassertemperaturmessungen auf wenig über Null zu erwärmen, damit sie nicht beim Eintauchen einen Eisüberzug auf sich entstehen liessen. Dies besorgte ich dadurch, dass ich die Instrumente bis zum Gebrauche in der Tasche behielt. Ebenso war Schutz vor Zutritt der Sonnenstrahlen erforderlich u. a. m.

Es kam sogar vor, dass die zur Messung eingesetzten Thermometer im Wasser von Grundeisblättchen umhüllt wurden und die Temperatur mömentan unter Null fiel.

2. Die Sohlentemperatur.

Wie bereits angeführt, stellen die Ziffern und die zugehörige Kurve der Sohlentemperatur diese in der Nähe der Steine No. 1, 2 und 3 dar und zwar wurden sie gemessen an einer Sandablagerungsstelle, 2 m vom Ufer entfernt, 0,05 m tief im Sande der Sohle, bei Wassertiefe von 0,3 bis 0,5 m. Die Geschwindigkeit des Wassers an der Messungsstelle betrug 0,2 bis 0,3 m per Sekunde, d. h. in der der Flussströmung entgegengesetzten Richtung in einer Kolkung und im Schutze eines Ufervorsprunges. Von diesem Vorsprunge aus, in tangentialer Richtung, reihten sich zahlreiche Wirbel aneinander und besorgten die gehörige Durchmischung des Wassers. Eine grosse Zahl weiterer Messungen an andern Flussstellen, auch im Kies und Gerölle können hier nicht näher erwähnt werden. Es sei nur bemerkt, dass die Temperatur des Wassers, 5 bis 8 cm tief im Gerölle der Flusssohle, stets merklich höher war, als auf freier Sohle und zwar auch im gröbern Geschiebe.

Die Sohlentemperatur nun weist nur geringe Schwankungen auf, sie folgt der Kurve der Lufttemperatur ziemlich träge nach. Diese wirkt auf die Sohlentemperatur indirekt ein und zwar durch Ausstrahlung sowohl, als

durch den Einfluss der durch die Luft bewirkten Abkühlung des Wassers, welches überdies bei grösserem Frost viele Krystalle treibt, die durch Schmelzung seine Wärme binden. Im fernern hat auch die Höhe des anliegenden Uferlandes über dem Wasserspiegel Einfluss auf die Sohlentemperatur, da ein steil und tief eingeschnittenes Bett sich weniger rasch zu kühlen vermag, als ein flaches. Ferner sind spezifische Wärme und Wärmeleitung des betreffenden Gesteins, Feuchtigkeit und Pflanzendecke des Uferlandes u. s. w. einflussreiche Faktoren.

Die täglichen Schwankungen, herrührend von Aufnahme der Strahlungswärme der Sonne treten hier nicht so deutlich zu Tage, wie bei den mit dem Erdinnern in schlechter Leitung stehenden und nur lose auf der Sohle gelagerten Steinen, deren Temperaturen gemessen wurden und die unter Ziffer 3 besprochen werden sollen.

Interessant ist, dass die Kurve der Sohlentemperatur ihre tiefste Senkung ziemlich ohne Rücksicht auf diejenige der Lufttemperatur zeigt, gleichzeitig wenn ein Minimum des Barometerstandes eintritt, was wohl hauptsächlich darin begründet ist, dass zur Zeit des letzteren das Wasser durch Verdunstung, Schneefälle und auch durch den bei Eintritt von Tauwetter sehr kräftigen Grundeisauftrieb gekühlt wurde und dieses seinerseits der Flusssohle Wärme entzog.

Auch bei diesen Temperaturbestimmungen war grösste Vorsicht nötig und es mussten die Messungen mehrmals wiederholt werden, um sich zu überzeugen, dass beim Einstecken des Thermometers in den Sand, was mit freier Hand geschah, nicht etwa Grundeiskrystalle mit eingestossen wurden, welche — wie schon früher angeführt — den Stand des Thermometers auf längere Zeitdauer zu erniedrigen vermochten, sogar unter 0°. Auch zu diesen Bestimmungen wurden beschriebene Thermometer mit Kupferzylindern verwendet. Es hatte dies zwar den Nachteil, dass dieselben zur Vornahme einer Messung längere Zeit in der Sohle belassen werden mussten; allein dieser

Nachteil war aufgewogen durch den Vorteil, dass ein ruhiges Ablesen ohne Variation noch leicht gestattet blieb.

In Bezug auf die Temperatur der Gräser und Moose auf der Flusssohle zur Zeit der Grundeisbildung ist zu bemerken, dass diese nicht unter 0° sein konnte, da sich in den Pflanzenzellen selbst Eisansammlungen hätten bilden müssen, welche aber den Tod der Pflanze zur Folge haben würden; überdies sind sie vom Wasser vollständig und allseitig umströmt.

Paraphrasierung
nicht stimmen.

3. Die Temperatur der Steine.

Die Kurven der Gesteinstemperaturen geben wohl die interessantesten Aufschlüsse, und wie die früher angeführten, so sind auch diese Temperaturmessungen mit aller denkbaren Sorgfalt ausgeführt worden. Wenn nun noch vorausgesetzt werden darf, dass die für die Steine No. 1, 2 u. 3 angewandte, früher beschriebene Messmethode sehr wenig zu wünschen übrig lässt und unter den obwaltenden Verhältnissen als die passendste bezeichnet werden muss — da namentlich direkte Berührung der Thermometer mit dem Wasser und auch direkte Bestrahlung ausgeschlossen blieb — so haben die aufgezeichneten Daten Anspruch auf alle mögliche und erforderliche Genauigkeit.

In Bezug auf die benützten Steine ist folgendes zu bemerken:

Der Stein No. 1 ist ein weisslicher Kalkstein, Dimensionen $0,3 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$; dessen Oberfläche lag ca. $0,3 \text{ m}$ unter Wasser und in ca. $1,5 \text{ m}$: secd. Geschwindigkeit.

Der Stein No. 2 ist ein rötlichbrauner, eisenhaltiger Kalkstein, Grösse und Lage wie No. 1.

Der Stein No. 3 ist ein sehr stark rotfarbiger Kalkstein; Dimensionen $0,4 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$, mit Oberfläche $0,6 \text{ m}$ unter Wasser und in $0,3 \text{ m}$: secd. Geschwindigkeit.

Stein No. I (siehe Tabelle), Kalkstein von rötlicher Farbe; Dimensionen 0,7 m \times 0,6 m \times 0,25 m; Oberfläche ca. 0,3 m unter Wasser.

Stein No. II, rötlich; Dimensionen 1,0 m \times 0,6 \times 0,3 m; Oberfläche 0,35 m unter Wasser.

Stein No. III, rotgelblich bis grünlich; 0,7 m \times 0,3 m \times 0,15 m; Oberfläche 0,25 m unter Wasser.

Geschwindigkeit des Wassers bei No. I, No. II u. No. III gleich ca. 1,5 bis 2 m : secd.

Die Lagerung sämtlicher Steine auf der Flusssohle war eine sehr lose, sodass durch das Gerölle der Unterlage das Wasser ohne Schwierigkeit zirkulierte und daher eine Beeinflussung durch Radiation und Insolation sehr gering sein musste.

Diese Gesteinstemperaturen zeigen in Bezug auf die Variation bei Einwirkung der Sonnenstrahlen, selbst bei vollständig bedecktem Himmel, bestimmte Gesetzmässigkeit, welche letztere indess gestört werden kann durch verschiedene Einflüsse, die wir noch zu betrachten haben werden.

Aus den Kurven der Steintemperaturen in der graphischen Aufzeichnung ist ersichtlich, dass diese Temperaturen gewöhnlich am frühen Morgen vor Sonnenaufgang ihren tiefsten Stand aufweisen, dass dann die Temperatur der Steine rasch ansteigt bis gegen Mittag, dann etwas träger wieder sinkt gegen Abend, welches Sinken sich dann normaler Weise bis morgens früh fortsetzt.

Sodann ist auffallend, dass die Temperatur des Steines No. 2 am frühen Morgen derjenigen des Steines No. 1 nahe tritt, um sich dann bedeutend über letztere zu erheben und im übrigen aber das gleiche Gesetz des Steigens und Fallens zu befolgen. Eine Störung dieser Gesetzmässigkeit im Verlaufe der Kurven der Steintemperaturen ist zu konstatieren vom 16. auf den 17. Februar alten Stiels, ebenso vom 19. auf den 20. Februar und zwar jedesmal wenn nachher ein Minimum des Barometerstandes eintrat. Der Grund für die Störungen ist darin zu finden, dass bei der angeführten Erniedrigung des Barometerstandes (745

2.3/5!
2
bezw. 740 mm) jeweils starker Schneefall, begleitet von kräftigem Nordwind eintrat, der starke Wasserkühlung zur Folge hatte und der auch zu ungewöhnlichen Stunden Grundeisbildungen veranlasste, was alles die Gesteinstemperaturen beeinflusste. Ein Blick auf die graphische Darstellung zeigt denn auch, dass die Kurve der mittleren Gesteinstemperaturen den Schwankungen der Lufttemperatur nur träge folgt; dies trifft selbst bei klaren, hellen Nächten und bei sehr starkem Frost zu; ein Beweis, dass direkte Ausstrahlung der Steine hier keine bedeutende Rolle spielt, sondern vielmehr das Wasser seinerseits, durch die Luft, Ausstrahlung und Verdunstung, gekühlt wird, und dieses dann den Steinen der Sohle die Wärme entzieht. Hieraus sollte man schliessen, dass die Kurven der mittleren Steintemperaturen wenigstens annähernd parallel der Kurve der Wassertemperatur verlaufen müssten, was aber darum nur in sehr beschränktem Masse der Fall sein kann, weil das Wasser grosse Wärmekapazität besitzt, Schmelzarbeit leistet und höchstens auf die Temperatur Null Grad sinkt an seiner Oberfläche, dann aber durch die beim Gefrieren freiwerdende Erstarrungswärme auf diesem Punkte erhalten bleibt, während anderseits die Gesteinstemperaturen an eine solche Grenze nicht gebunden sind, sondern diese als Körper von geringer Kapazität durch die Strahlungswärme der Sonne, weit empfindlicher als das diatermane Wasser, beeinflusst werden und deren Temperatur sich daher selbständig beliebig über Null erheben kann.

Es ist sodann im Speziellen die Tatsache erwähnenswert, dass die Temperaturen der Steine 1 und 2, bzw. 3, an den einzelnen Tagen in den frühen Morgenstunden nicht nur sich selbst untereinander, sondern auch in Bezug auf die Wassertemperatur, sehr ungleich nahe treten und dass diese Verschiedenheit engstens zusammenhängt mit dem Umfange, den die Grundeisbildungen um diese Zeit an den einzelnen Steinen und in der Umgebung derselben genommen hatten.

Beispielsweise liegen die Temperaturen der einzelnen Steine nahe beisammen und nähern sich der Wassertemperatur am 11., 13., 18., 19., 20., 22. und 23. Februar, an welchen Tagen starke Grundeisbildungen auftraten; ferner halten sie sich ziemlich auseinander und bleiben stets über der Wassertemperatur am 14., 15., 16. und 17. Februar, wo Grundeisbildung nicht auftrat, und endlich treten am 12., 24., 25. u. s. f. Ausnahmen von diesen Regeln auf.

Es erklärt sich das alles aus den Beobachtungen die — zwar in sehr abgekürzter Form — der Temperaturtabelle (Tafel I) beigegeben sind und in einigen Bemerkungen nachstehend ergänzt werden sollen.

Am 11., 13., 18., 19., 20., 22. und 23. Februar hatten die Steine selbst sich mit Grundeissschwämmen überzogen. Je mehr Grundeis der betreffende Stein angenommen hatte, um so tiefer war der Stand des darin befindlichen Thermometers und um so mehr näherte sich dessen Temperatur derjenigen des Wassers. Während normaler Weise die Grundeisbildungen sich im Laufe der Nacht, oder doch vor früh 7 Uhr, vollzogen hatten, so bildete sich am 20. und 24. Februar das Grundeis erst zwischen 7 Uhr und 12 Uhr vormittags und dies trotz steigender Lufttemperatur. An ersterem Tage infolge Schneefall und an letzterem infolge sehr starken Grundeisauftriebs an oberhalb gelegenen Flussstellen. Es war dies eine abnormale Bildung von sehr losem Grundeise, das keine Festigkeit erlangte.

Sehr interessant ist hier die Tatsache, dass am 20. Februar das Wasser mit Temperatur nahe Null Grad die Steine über Nacht bis früh 7 Uhr nicht sehr stark abzukühlen vermochte, da wenig Grundeisbildung entstanden war, ähnlich wie am 14. bis 16. Februar, wo keine Grundeisbildung auftrat, dass aber trotz ansteigender Wassertemperatur die Temperatur der Steine No. 1, 2 und 3 am 20. Februar gegen Mittag sank, wobei sich diese in Grundeis hüllten. Es ist dies der Beweis, dass das anhaftende Eis den Steinen die Wärme entzog, und dass dieser Einfluss grösser als derjenige der Strahlung und des Wassers

ist. Das entstehende Grundeis selbst kühlt also die Steine ab, vermag ihre Temperatur aber nicht unter diejenige des sie umströmenden Wassers zu senken. Dagegen ist ganz ausgeschlossen, dass hier die Steine durch andere Ursachen abgekühlt oder gar unterkühlt werden und erst infolge dieser Abkühlung Grundeis annehmen.

Am 14., 15., 16. und 17. Februar trat infolge Tauwetter keine Grundeisbildung ein. Trotzdem das Wasser infolge seiner Schmelzarbeit an treibendem Grundeis und bei seiner grossen spezifischen Wärme nur langsam der höhern Lufttemperatur folgte, so vermochte es allein die Steine nicht so intensiv zu kühlen, wie zur Zeit der oben beschriebenen Grundeisperiode. In dieser letzteren Tatsache liegt auch zugleich wieder der Beweis, dass nicht nur das Wasser an der Abkühlung der Steine nicht so regen Anteil hatte, wie das an den Steinen anhaftende Grundeis selbst, sondern vielmehr, dass die intensive Abkühlung der Steine wirklich von diesem Eis und nicht etwa von der Ausstrahlung der Steine herrührte, da in letzterem Falle die Temperaturen der Steine gerade am 15. bis 17. Februar hätten verhältnismässig am tiefsten sinken müssen, weil der Himmel nachts unbedeckt war. Es ist dies auch sehr leicht verständlich, da ja die Steine als dunkle Wärmequelle aufgefasst und bei ihren Temperaturen nahe Null Grad für die Strahlung $\frac{1}{2}$ sozusagen wirkungslos sind. Es ist also nicht zu widerlegen, dass die Steine durch die an sie ansetzenden Eiskristalle gekühlt werden, was auch Experimente beweisen. Am 17. Februar war die Lufttemperatur über Null Grad und beeinflusste die Wasser- und Steintemperatur in steigendem Sinne, da nicht mehr viel Eis in diesem trieb und dasselbe abkühlte. Die Ausnahmen nun von den genannten Regeln am 12. und 25. Februar erklären sich wie folgt: Am 12. Februar war der Kupferzylinder des Thermometers im Stein No. 1 auf $\frac{1}{6}$ seiner Fläche vom Kitt entblöst und vom Wasser bespült. Es wurde nun der Stein No. 1, der bisher in Wassergeschwindigkeit von ca. 1,5 m : secd. bis 2 m : secd.

lag, zum Stein No. 2 gelegt, an welcher Stelle die Wassergeschwindigkeit für diesen Tag vorübergehend auf nur ca. 0,3 m : secd. gesunken war infolge oberhalb gebildeter starker Randeisschicht. Ich fand diese Verschiebung für notwendig, da es mir nicht angehend schien, die Temperatur zweier Steine in strengen Vergleich zu ziehen, die dauernd im Wasser von verschiedener Tiefe und verschiedener Geschwindigkeit lagen. Es läge sonst die Vermutung nahe, die niedrigere Temperatur des Steines No. 1 als diejenige von No. 2 rühre von dieser Differenz der Lage und Wassergeschwindigkeit her. Die Tatsache nun, dass der Stein No. 2 am 13. Februar früh, wie am 12. Februar früh, trotz der besagten Geschwindigkeitsverminderung und bei Temperatur von $+ 0,08^{\circ}$ C. blättriges Grundeis angenommen hatte, stimmt mit den übrigen Beobachtungen überein, wonach sich ersteres in grösserer Ruhe und bei sonst günstigen Bedingungen schon bei verhältnismässig hoher Temperatur bildet. Am 25. Februar erklärt sich die Ausnahme aus der Tatsache, dass die Frostperiode mit diesem Tage zu Ende ging und Stein No. 1 wenig, Stein No. 2 sehr wenig und Stein No. 3 gar kein Grundeis annahm. Auch an diesem Tage vermochte das an sich kühle Wasser allein die Steine nicht so stark abzukühlen, wie dies im Verein mit kräftiger Grundeisbildung stets zu konstatieren war; das Mass der Abkühlung entspricht denn auch genau dem Quantum angenommenen Grundeises.

Es mögen diesen Ausführungen nun noch einige spezielle Beobachtungen angefügt werden:

Am 12. Februar blieb das Grundeis an sehr vielen Stellen auch in der Nähe des Steines No. 1 bis mittags 3 Uhr stehen, während es sonst gewöhnlich schon ca. 10 Uhr auftrieb. Es erklärt sich dies aus der vollständigen Bewölkung des Himmels und daheriger Schwächung der Sonnenstrahlen, ferner durch die starke Wasserkühlung an der Oberfläche infolge heftiger Verdunstung (Nebel). Beliebige Steine, die ich heute aus ruhigem Wasser, wo sie kein Grundeis annahmen, ins

strömende Wasser legte, hatten sich am 13. Februar früh mit Grundeis überzogen. Am 13. war der Himmel ebenfalls bedeckt und es zeigte sich, dass an diesem Tage das Grundeis nicht zuerst an den ufernahen Stellen mit geringer Wassertiefe auftrieb, sondern in grosser Tiefe. Es war also zweifellos die Wirkung der Wasser- und Erdwärme hier grösser, als die durch das Wasser hindurch von den Steinen aufgenommene Strahlungswärme der Sonne. Am 13. Februar vormittags war die Temperatur des Steines No. 1 ausnahmsweise höher als diejenige des Steines No. 2. — Stein No. 1 hatte das Eis an der Oberfläche bereits abgetrieben und behielt es nur noch an den Stirnen, sodass also die Strahlungswärme an der Oberfläche freien Zutritt hatte, während der Stein No. 2 noch ganz in Eis gehüllt war, welches letzteres die Wärme stark absorbierte. Das Eis ist nämlich für strahlende Wärme nur sehr wenig durchlässig. Als dann mittags 3 Uhr allgemeiner Grundeisauftrieb eintrat und die Steine dasselbe ebenfalls ganz abtrieben, so trat sofort in deren Temperatur wieder die beschriebene Gesetzmässigkeit ein; während die Temperatur des Wassers niedrig blieb, indem bei dem massenhaften Auftrieb dasselbe mit Grundeis durchsetzt und dessen Wärme durch Schmelzarbeit absorbiert wurde. An einigen Stellen des Flusses blieb auch jetzt das Grundeis noch an der Flusssohle haften und die nähere Untersuchung über die Ursache ergab, dass sich vom Fluss mitgeführter Sand und Kies auf dasselbe gelegt hatte und dieses beschwerte, auch mag die Sohle hier der Strahlungswärme weniger zugänglich gewesen sein.

Am 18. Februar früh bildete sich bei Wassertemperatur $+ 0,04^{\circ} \text{C}$ sehr viel Grundeis, begünstigt durch Schneefall vom 17. und 17./18. Februar, durch starkes Abfallen der Lufttemperatur und durch Nordwind. Die Steine No. 1 und No. 2 hatten sich beide vollständig dicht in Grundeis eingehüllt, was zur Folge hatte, dass die Temperatur derselben nahezu gleiche Werte annahm und zwar stand diese ausnahmsweise niedriger als die Tempe-

ratur des sich umströmenden Wassers. Kräftige Grundeisbildung vermag also die Gesteine der Sohle, an denen es anhaftet, sehr stark abzukühlen und es verhindert dasselbe wirksam die Steine an der Aufnahme von Wärmestrahlen durch das Wasser hindurch, so dass die Temperatur des letzteren bei Sonnenschein diejenige der Steine sogar übersteigen kann.

In Bezug auf die Eigenschaften, des an diesem Tage infolge Schneefalles gebildeten Grundeises, ist zu bemerken, dass dasselbe auch blätteriges Gefüge zeigte; allein es hatten die einzelnen Blättchen Durchmesser von nur ca. 1 mm, und sehr geringe Dicke, während das blätterige Grundeis normalerweise Durchmesser der Blättchen von 4 bis 6 mm und mehr aufwies.

Nach Hellmann*) sind solche tafelförmige Schneekristalle die Regel. — Zur Kontrolle, ob die Steine in ruhigem Wasser, die bisher kein Grundeis annahmen, dieses Verhalten zeigten, weil möglicherweise ihre Temperatur höher stand, als diejenige der Grundeisbildenden Steine in grösserer Strömung, habe ich einen solchen Stein am 19. Februar mit Thermometer versehen. Es zeigte sich durch die Messung, dass die Temperatur dieser Steine nicht höher war, dass also ganz zweifellos die Wassergeschwindigkeit die Ursache ist, denn die Temperatur des Wassers selbst war bei beiden Stellen die gleiche.

Am 19. zeigte sich der Einfluss der Lufttemperatur von -20° C. in der spontanen, mechanischen Grundeisbildung. Während bisher geringe Unterschiede in der Wassertiefe nicht von erheblichem Einfluss auf die Grundeisbildung zu sein schienen, so hatten nun die Steine der Sohle um so mehr und um so festeres Eis, je näher ihre Oberfläche dem Wasserspiegel stand. Das Eis hatte sich mehr an den Extremitäten, Kanten, und den der Strömung zugekehrten Seitenflächen angesetzt, als wie bisher an den ganzen Oberflächen. Auch haben nunmehr die an der

*) *Hellmann*. Schneekristalle, Beobachtungen und Studien. Berlin 1893.

Sohle gutgelagerten kleinen Steine mit Durchmesser von 10 bis 20 cm und auch die Gräser Grundeis angenommen; mehr indess in grosser Strömung, welche überhaupt sehr ausgesprochene Wirkung zu zeigen beginnt. Auch ganz dunkle Steine nehmen jetzt Grundeis an, obschon sie sich bisher dagegen sträubten. Beweis, dass hier die treibenden Krystalle des Oberflächeneises die Elemente des Grundeises sind. Das vorher in der Tasche erwärmte Wasserthermometer umhüllte sich an diesem Tage nach dem Einsetzen in das Wasser mit Eiskrystallblättchen; dessen Temperatur sank hierbei auf -5° C., so dass öftere Wiederholungen der Messungen nötig waren. Diese starke Temperatursenkung war bisher nie so ausgesprochen beobachtet worden. Um bei wiederholter Messung das Glasthermometer vor Unterkühlung zu schützen, rieb ich dasselbe am Pelzmantel. Es nahm aber sofort nach dem Eintauchen Grundeisblättchen an.

Die im Wasser millionenweise schwimmenden Krystalle zeigten sich nun schon als grössere Nadeln von bis 5 mm Länge und Durchmesser von Bruchteilen von $\frac{1}{10}$ mm. Das jetzt sich bildende Grundeis erweist sich als eine mechanische Ansammlung solcher grosser und kleiner Eisnadeln ohne gesetzmässige Orientierung derselben, d. h. die gesetzmässige Blättchenbildung wird seltener, sie tritt mehr und mehr zurück mit der Frostzunahme.

Das so gebildete festere, körnige Grundeis glänzt stellenweise wie Silbertropfen im Wasser. Sobald man das Eis heraushebt, wobei das Wasser sich durch die Luft ersetzt, so hört dieser Glanz auf, die glänzenden Stellen zeigen sich als angeschmolzene Kanten und Flächen fester Krystallgruppen, ähnlich dem geschliffenen Glas. An einigen Stellen fliesst das Wasser galertartig, also vollständig gesättigt und durchsetzt von Mengen beschriebener Krystallnadeln und Krystallgruppen im Schmelzzustand. Um 9 Uhr beginnt der Auftrieb; auch die Luft ist durch feine Eiskrystalle geschwängert. In Tiefen des Wassers von ca. 2, 3 und mehr Metern kommt auch heute

noch wenig Grundeis zustande. Wasser und Sohle haben dort noch etwas höhere Temperatur, und wenn sich dennoch Grundeis bildet, so hat es dort mehr blätterige Struktur und ist weissgrau wie Schlamm, wenig fest und minder körnig, sondern schleierartig. Es treffen dort die Krystalle noch nicht in so grossen Mengen auf und die wenigen auftreffenden feinen Nadeln haben daher noch Gelegenheit zur Orientierung. Oft erhebt sich ein Grundeis-schollen an die Oberfläche und nimmt gut eingehüllte Steine mit in die Höhe. Das Wasser fliesst heute nach dem Grundeisauftrieb wie eine Eissuppe; aus dem Wasserspiegel hervorragende treibende Grundeis-schollen werden an der Luft weiss und fest.

In grosser Strömung und bis in mittlere Tiefe hält sich das Grundeis ohne Auftrieb bis nachts.

Am 20. Februar fiel Schnee, dessen Flocken im Wasser massenweise wie ein Schleierband schwimmen und in grosser Menge Grundeis ansetzen, welches auch nach dem Ansetzen einfach nassem Schnee gleicht. Beim Herausheben aus dem Wasser entfernte sich letzteres nur langsam aus den Schollen und machte der Luft Platz, es wurde daher an der Luft auch nur sehr langsam weiss. An den im Wasser schwimmenden Schneeflocken sieht man deutlich, wie scheinbar grundlos diese Flocken schon den kleinsten Geschwindigkeitsrichtungsstörungen folgen und in die Tiefe geführt werden, dort sich nach und nach sammeln und ansetzen, wobei das Grundeis stets den Einfluss der Strömung und die Sohlenhindernisse markiert. Es beginnt abends 5 Uhr ein Schneesturm. Die Narova fliesst mit Schnee — wie Rahm — bedeckt. Das hiervon über Nacht gebildete Grundeis ist sehr feinkörnig, fast krystrallinisch zu nennen, doch ohne grosse Festigkeit. Die Temperaturmessungen im Sande der Sohle werden schwierig und verlangen Wiederholungen infolge der überall zerstreuten Schneekrystalle, welche leicht mit dem Thermometer eingeschoben werden; umso mehr da man mit frierenden Fingern die Krystalle

an der Sohle nur schwierig fühlen und beseitigen, oder eine vollständig eisfreie Stelle finden kann.

Am 21. Februar war die Grundeisbildung ganz massenweise aufgetreten, mit besonders ausgeprägter Markierung der Strömung; aber es war auch der reinste untergetauchte Schnee. Der Ausdruck «feinschwammig» gibt vielleicht einen Begriff von dessen Gefüge.

Um 8 bis 9 Uhr steigt bei Beginn des Sonnenscheins Wasserdampf vom Flusse auf, der das Wasser abkühlt; trotzdem steigt das Grundeis in grossen Massen auf. Am flachen Boden der Sohle und am flachen Gerölle treibt bis nachmittags alles Eis auf; in den Fugen des grösseren Gerölles und in den Hohlräumen von Steinbuhnen, an Gräsern und auch an schattigen Stellen, ebenso in sehrs tarker Strömung hält sich das Grundeis noch; ein wiederholter Beweis, dass die Wassertemperatur der Einwirkung der Sonnenstrahlen hier beim Auftrieb entgegen arbeitet. Das Grundeis bildete sich an diesem Tage in Wassergeschwindigkeit bis ca. 3 m : secd. Bei Geschwindigkeit von ca. 4 bis 5 m : secd. schien die Bildung und Ansetzung im offenen Flusse unmöglich, d. h. die Energie des Wassers war grösser als die Kohäsion und Adhäsion des Eises.

Am 24. Februar bildete sich um 12 Uhr mittags um und über den Steinen No. 1 und 2 Grundeis, trotz ihrer hohen Temperatur die bereits $+0,1^{\circ}\text{C}$, bzw. $+0,15^{\circ}\text{C}$ betrug. Es war dieses Eis sehr lose an den Steinen haftend, die leiseste Berührung bewirkte dessen Auftrieb; sodass anzunehmen ist, dass die Krystalle, welche die Steinoberflächen berührten, bereits im Schmelzzustande waren. Auch im Innern eines Grundeisschwammes betrug die Temperatur $+0,1^{\circ}\text{C}$.; es war also eine Versammlung angetriebener Krystalle.

Ausnahmen von allen Regeln können natürlich sehr leicht entstehen. Es braucht z. B. nur eine grössere Eischolle an einen Körper auf der Sohle angetrieben zu werden, der dann schmelzend die Umgebung stark abkühlt, so

kann in der Folge an dieser Stelle die Grundeisbildung vor sich gehen.

Es ist nun die interessante Tatsache erwähnenswert, dass sich in den Tagen vom 20. bis 25. Februar, bei bedeutender Kälte überall in grösserer Strömung und auch an den Steinen No. 1 und 2, bei ca. 1 m : secd. Wassergeschwindigkeit, körniges Grundeis spontan und in grosser Menge ansetzte, der Stein No. 3 in Wassergeschwindigkeit von 0,3 bis 0,4 m : secd. dagegen oft ganz eisfrei blieb, oft nur wenig Grundeis annahm, mit eher blättrigem Gefüge trotzdem aber seine Temperatur unter, oder doch zwischen derjenigen der Steine No. 1 und 2 blieb. Ein Beweis, dass entsprechend grösserer oder kleinerer Geschwindigkeit mehr oder weniger Krystalle zugeführt werden, und dass das körnige Grundeis kleinere Geschwindigkeit meidet, dagegen in dieser letzteren die auftreffenden Krystalle sich orientieren und blättriges Grundeis, wenn auch in geringerer Menge, bilden, sobald die Luft und das Wasser genügend gekühlt sind. In der grösseren Geschwindigkeit von 1 m secd. und mehr kann sich also sowohl blättriges Grundeis schon bei geringerem Frost, als auch bei grösserem Frost körniges Grundeis in grosser Menge bilden, letzteres jedoch unter der Bedingung, dass Krystallnadeln in sehr grosser Zahl und bei Wassertemperatur nahe dem Schmelzpunkte zugeführt werden. Die geringe Geschwindigkeit beim Stein No. 3 war hierbei nur ganz lokal und zunächst oberhalb fand sich durch Geschwindigkeitsstörungen Gelegenheit genug zur Absaugung der Krystalle.

Eisstücke oder Schollen, die auf dem Wasser treiben — gleichviel ob von Grundeis oder von Obereis herrührend — können sich auf ihrem Wege bei niedriger Wassertemperatur leicht stark vergrössern, indem sie treibende Krystalle um sich versammeln oder wohl auch Krystallisation direkt veranlassen. So kann man bei grossem Frost solche Schollen treiben sehen, die grundeisähnlich sind, bei näherer Prüfung aber im Innern einen Kern von festem Obereis

besitzen. Auch in der Tiefe kann solches Eis sich an einem etwa angepressten Eisstück bilden.

Es erübrigt nun noch die Ursachen des eigentümlichen gegenseitigen Verhaltens der Gesteinstemperaturen unter sich näher zu betrachten, obschon es nach dem Vorhergesagten unschwer ist auf diese zu schliessen.

Wir haben gesehen, dass die Temperatur der Steine auf der Flusssohle früh morgens bei Tagesanbruch den niedrigsten Wert hat, dass sie gegen Mittag rasch ansteigt und gegen Abend wieder abfällt. Es erklärt sich das sehr einfach wie folgt:

Von den auf den Wasserspiegel auftreffenden Sonnenstrahlen wird ein Teil vom Wasser absorbiert, ein Teil reflektiert und ein anderer Teil durchgelassen, da das Wasser diatherm, d. h. wärmedurchlässig ist. Die vom Wasser durchgelassenen Strahlen treffen auf die Flusssohle und werden auch hier zum Teil aufgenommen, zum Teil reflektiert.

Das Wasser, als Flüssigkeit mit grosser Wärmekapazität, wird durch die aufgenommene Strahlungswärme nur langsam in der Temperatur beeinflusst, um so mehr, als es die wirksamsten Strahlen durchlässt und nur weniger wirksame absorbiert, abgesehen von den vielen Ursachen, wie Verdunstung, Ausstrahlung und Schmelzarbeit zur Verflüssigung des in ihm befindlichen Eises, welche alle auf Abkühlung des Wassers hinwirken. Die Steine dagegen nehmen diese vom Wasser durchgelassenen wirksamsten Wärmestrahlen begierig auf und ihre Temperatur erhöht sich rasch und übersteigt diejenige des Wassers, sodass letzteres auf diese selbst abkühlend zu wirken beginnt.

Melloni*) hat durch seine Versuche den Nachweis geleistet, dass das Wasser die brechbarsten Strahlen einer leuchtenden Wärmequelle durchlässt und dass die Wärmestrahlen sich so verhalten, als ob sie um so brechbarer wären, je höher die Temperatur der sie aussendenden Wärmequelle ist.

*) Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie 1832, 1833 u. 1835.

*fehlt nicht
Wärmequelle?*

*Die Wärmequelle
von der die
Wärme kommt!*

Ferner zeigte Melloni an Gläsern und Flüssigkeiten etc., dass durch den Farbstoff von Körpern in erhöhtem Masse Wärmeabsorption bewirkt wird. Nach seinen Untersuchungen absorbiert die weisse Farbe die Wärme am wenigsten, dann folgt rot, gelb, grün, blau, violett und schwarz, welche letztere Farbe am meisten Wärmestrahlen absorbiert und also am wenigsten durchlässt. Es ist aus diesen Angaben über die Wärmefarben sofort klar, dass der Stein No. 1 (weisslicher Kalkstein) niedrigere Temperatur unter ganz gleichen Bedingungen hatte unter Einwirkung der Sonnenstrahlen, als No. 2 von rötlichbrauner Farbe u. s. w.

Ich habe früher angeführt, dass die grünlich gefärbten Kalksteine stets das Grundeis zuerst auftrieben. Melloni hat bewiesen, dass die grüne Farbe die brechbaren Strahlen mit grösster Begierde aufsaugt, und wenn man noch daran erinnert, dass das Wasser gerade für diese Art von Strahlen diatherm ist, so ist der besagte Vorgang damit ohne weiteres erklärt.

Die Steine selbst können sodann während der Nacht als dunkle Wärmequelle betrachtet werden, da ihre Temperatur höher ist, als diejenige des sie umfliessenden Wassers und der Luft. Ihre Wärmestrahlen sind aber nicht brechbar und werden daher vom Wasser absorbiert, ohne dasselbe merklich durchdringen zu können. Es ist also eine wirksame Ausstrahlung der Gesteine der Flusssohle in den klaren Himmelsraum, wie bisher vielfach angenommen wurde, vollständig ausgeschlossen. Dagegen ist durch meine Beobachtungen der Einfluss der direkten Abkühlung der Steine auf der Sohle durch das Wasser, sodann in erhöhtem Masse durch die auftreffenden und anhaftenden Eiskrystalle — welche schmelzend dem Steine die Wärme entziehen — unwiderlegbar nachgewiesen.

Haben nun die Steine der Sohle eine Hülle von Grundeis angenommen und es tritt Sonnenschein ein — gleichviel, dass hierbei eventuell die Lufttemperatur noch verhältnismässig niedrig bleibt — so nehmen die Steine, durch

22
Himmel
die Abkühlung
des Wassers
durch die
Grundsohle
bis 0° erfolgt

ihre Eishülle hindurch, einen Teil der Strahlungswärme auf, denn es ist das Eis für dieselben in dünneren Schichten durchlässig*) und wengleich der vom Eis absorbierte Teil der Wärmestrahlen in Schmelzarbeit übergeht, so erhöht sich doch ziemlich rasch die Temperatur der Gesteine; um so rascher, je geringer die Wärmekapazität derselben ist; und bei Temperatur von $+ 0,05^{\circ}$ bis $+ 0,1^{\circ}$ C. derselben, werden die durch Eingreifen in die Unebenheiten der Steinoberflächen den Grundeissschwamm haltenden Krystalle geschmolzen und das Eis treibt auf. Der Auftrieb selbst erfolgt um so kräftiger und rascher, je besser das Eis sich entwickelt hat, d. h. je fester, kompakter und weisser, und je geringer also dessen spezifisches Gewicht ist. Alles Eigenschaften, die von den günstigen meteorologischen Verhältnissen mehr oder weniger gefördert werden, und die sich schon an der Dauer der Grundeisentwicklung erkennen lassen. Nach Mellonis Angaben würde ein mit dünner Wasserschicht bedeckter Körper im Mittel bei Solarkonstante ~ 3 ungefähr 0,13 Calorien pro Flächeneinheit und Zeiteinheit aufnehmen.

Es kommt dieser Aufnahme von Strahlungswärme der Sonne durch das Wasser hindurch und dem damit verbundenen fast täglichen Auftrieb des Grundeises, eine sehr grosse Bedeutung zu, wenn man bedenkt, dass ohne dies ein Fluss sein Grundeis so lange vermehren müsste, bis das Wasser dasselbe abzuschmelzen oder zu durchbrechen vermöchte, und dass dadurch das Flussbett vollständig verlegt und gestopft würde, sodass Ueberschwemmungen und Unglücksfälle unvermeidlich an der Tagesordnung wären.

*) Melloni fand, dass eine Tafel festen Eises in 2,6 mm dicker Schicht von 100 Strahlen der Locatellischen Lampe 6 durchlässt, dass von Wärmequellen von geringerer Temperatur dagegen 0 durchtreten. Eine 2 mm dicke Wasserschicht liess von 100 Strahlen 11 durch, welche letztere Zahl mit der Dicke der Schicht etwas abnimmt.

4. Einfluss des Windes.

Der Wind wirkt auf die Grundeisbildung stark fördernd ein, indem derselbe den auf dem Wasser bei Verdunstung entstehenden Wasserdampf wegfeht und dadurch die mit der Verdunstung verbundene Abkühlung fördert.

In hervorragendem Masse gilt dies naturgemäss für die der Stromrichtung entgegengesetzte Windrichtung.

Bei Gewässern von ruhigem Lauf, bei seichten Stellen an Teichen und Seen kann der Wind so starke Wasserbewegung hervorrufen, dass er sogar zur Hauptursache der Grundeisbildung wird.

Durch zahlreiche Beobachtungen an vielen Gewässern ist festgestellt, dass der Grundeisbildung stets die Bildung von Eiskrystallen an der Oberfläche, wenn auch nur am Ufer, gewöhnlich längere Zeit voran ging. Wenn nun an konkaver oder stauer Stelle im ruhigeren Wasser von Flüssen, beziehungsweise auf der Oberfläche stehender Gewässer sich eine Eishaut bildet, die bei geringer Wassergeschwindigkeit demnächst zur festen Oberflächeneissschicht gefrieren würde, so kann die Einwirkung des Windes, namentlich durch die dadurch erzeugten Wasserwellen, das Festwerden verhindern und das Abführen der einzelnen Eiskrystalle durch das Wasser veranlassen. Bekanntlich haben die auf dem Wasser treibenden Eiskrystalle das Bestreben, an der Oberfläche zu schwimmen, infolge ihres geringeren spezifischen Gewichtes und auch zufolge des Widerstandes, den das Oberflächenhäutchen des Wasserspiegels den eindringenden Körpern entgegensetzt. In ähnlicher Weise, wie bei rasch fliessendem Wasser die Grundwellen und Wirbel, hervorgerufen durch die Sohlensprünge und Unebenheiten, diese Krystalle untertauchen lassen und der Sohle zuführen, kann dies nun durch die vom Winde auf seichten Gewässern erzeugten Wasserwellen bewirkt werden.

*fluvial
nicht!*

2
1

Durch die entstehenden Wellen werden nicht nur die einzelnen Wasserteilchen in kreisende (undulatorische) Bewegung versetzt, sondern es müssen mit ihnen auch die im Wasser mikroskopisch kleinen, feinverteilten Eisnadeln mit untertauchen. Feine Eiskrystalle aber, die einige Zeit im tieferen Wasser schwimmen, gelangen dort in den Schmelzzustand und folgen um so weniger dem Auftrieb, können also leicht an der Sohle haften bleiben. Man hat, wie schon bemerkt, beobachtet, dass in hervorragender Weise der der Stromrichtung entgegengesetzte Wind stark fördernd für die Grundeisbildung wirkt. Es erklärt sich dies bei fließenden Gewässern dadurch, dass durch diesen nicht nur die Entstehung einer festen Oberflächeneissschicht leicht gestört wird, und so die Krystalle einzeln vom Wasser abgeführt werden, sondern dass der der Wassergeschwindigkeitsrichtung entgegenarbeitende Wind die oberen Wasserschichten aufhält, wodurch die Bildung einer Eishaut gefördert wird und wodurch zur Ausgleichung der Geschwindigkeitsunterschiede der verschiedenen Wasserschichten Wirbelbewegungen erzeugt werden, welche die entstandenen und im Wasser treibenden Krystalle der Flusssohle zuführen.

Kommt der dem Strome in entgegengesetzter Richtung wehende Wind sodann aus dem eisigen Norden, wie dies an der Narova der Fall ist, so hat er von sich aus stets merkliche Abkühlung des Wassers zur Folge, was die Grundeisbildung ebenfalls fördern hilft.

In Bezug auf die früher erwähnten Kräuselungsmarken, welche sich in der Grundeissschicht auf der Sohle gebildet hatten, mag noch erwähnenswert sein, dass an dieser Stelle eine lokale Stromschnelle sich befand, über deren Kiesgrund das Wasser rasch abfloss und ruhige, nicht stürzende und nicht schäumende Wellen bildete. Es entsprachen nun die kurvenförmigen weisslicheren Rippungen und Erhöhungen des Grundeises deutlich den Wellentälern und die Kurven der Wellenbewegung und der Rippungen in der horizontalen Projektion waren einander ähnlich. Es erklärt sich dies daraus, dass in den Wellentälern, d. h. beim Ueber-

gang vom Wellenberg zum Wellental, die treibenden Krystallnadeln in grösserer Zahl und mit grösserer Kraft tangential abgelenkt und der Sohle zugeführt werden. Sodann wirken solche Wellen über untiefer und unebener Geröllsohle auf die Krystalle direkt absaugend, welche Wirkung «Sog» genannt wird.

Mit der Höhe und Geschwindigkeit der Wellen oder mit der Korngrösse des Treibeises nehmen die Längen dieser Rippungen zu, während sie der Wassertiefe umgekehrt proportional sind.

Es sind solche Kräuselungsmarken oft auch auf der seichten Sohle ruhender Gewässer zu beobachten. Sie entstehen dort durch oscillierende Wasserbewegung, hervorgerufen durch die Windwellen, und es haben die entstehenden Erhöhungen an der Lee- und Luvseite ungefähr gleichen Böschungswinkel. Auch der im Wind treibende Schnee bildet oft ähnliche Schneedünen auf ebenem Gelände.

Diese Grundeiskräuselungsmarken, welche ich beobachtet habe, sind ferner ähnlich den durch den Wind erzeugten kleinen Sanddünen der Küste.

Wir haben sodann schon vorstehend darauf hingewiesen, dass in den Fluss getriebener Schnee, sei es direkt beim Schneefall, oder infolge Aufwehung der auf dem Uferland liegenden Schneedecke und Uebertragung durch den Wind ins Wasser, die Wärme des Wassers schmelzend gebunden und auf diese Weise rasche Abkühlung herbeigeführt wird.

5. Die Bewölkung.

Die Verschluckung der von der Sonne ausgesandten Wärmestrahlen wird durch die Bewölkung beeinflusst. Klare, trockene Wintertage vermindern die Verchluckung der Wärmestrahlen durch die Atmosphäre, atmosphärischer Wasserdampf befördert sie und verringert die auf dem

Erdboden auftreffenden Wärmestrahlen der Sonne. Maurer*) fand die Ausstrahlung der Flächeneinheit (1 qcm) zu 0,13 Kalorien. Dies ist ungefähr der zehnte Teil des Strahlungsbetrages, welchen die Flächeneinheit bei normaler Bestrahlung und hohem Sonnenstand in der Zeiteinheit von jenem Gestirn empfängt. Die Solarkonstante, d. h. das Quantum wirklich emittierter Sonnenwärme beträgt ~ 3 Kalorien.

Der Aufnahme heller Wärmestrahlen der Sonne am Tage entspricht sodann die Ausgabe dunkler Wärmestrahlen in der Nacht, d. h. bei Tage dringen die Wärmestrahlen in die feste Erde ein und bei Nacht gibt die Erde die vorher empfangene Wärme wieder ab. Die Vernichtung der Wärmestrahlen durch die Atmosphäre kann bis zwei Drittel derselben betragen und es wird die Absorption im Mittel auf 40 % der an der Aussenseite der Erdatmosphäre angekommenen Strahlungsenergie veranschlagt.

Wird nun durch die Bewölkung während des Tages die Aufnahme von Strahlungswärme des Erdbodens behindert, in der Nacht aber die Ausstrahlung bei klarem Himmel befördert, so ist dies der Grundeisbildung im höchsten Grade förderlich.

6. Der Barometerstand.

Einem tiefen Barometerstande folgen Tauwetter und Niederschläge, bezw. Schneefall nach. Dieser letztere hat starke Wasserkühlung zur Folge, indem die Wärme zur Schmelzarbeit des ins Wasser gefallenen Schnees verbraucht wird. Die im Wasser treibenden Schneekristalle setzen sich sodann bei hinreichender Abkühlung auf der Flusssohle fest und haben eine ganz eigentümliche, feinschwammige Grundeisbildung zur Folge, die bei grossem Frost einen sehr bedeutenden Umfang annehmen kann.

*) *Günther*, Handbuch der Geophysik. Stuttgart 1898. II. Bd.

Dem steigenden Barometerstand folgt Frost nach mit klaren hellen Nächten, welche starke Ausstrahlung der Erd- und Wasserwärme verursachen, Umstände, die der Grundeisbildung besonders günstig sind.

Die Erniedrigung beziehungsweise Erhöhung des Schmelzpunktes bei zunehmendem beziehungsweise abnehmendem Drucke spielt nur eine untergeordnete Rolle, da einer Atmosphäre Druckerhöhung eine Schmelzpunkt-erniedrigung von nur $0,0075^{\circ}$ C entspricht. Bei Kraftanlagen dagegen, sind in Druckleitungen Druckerhöhungen von mehreren Atmosphären nicht selten und es ist zweifellos, dass die Schmelzpunktsänderung hier von Bedeutung ist.

Während in der Druckleitung das im Wasser treibende Eis in den Schmelzzustand gerät, erscheint es beim Uebertritt durch die Leitrad-schaukeln als unterkühlt und muss Krystallbildungen veranlassen.

g) Neue Theorie der Grundeisbildung.

An Hand der vorausgeschickten Beobachtungen und Erklärungen lässt sich der Vorgang bei der Grundeisbildung leicht darlegen, wie folgt:

Die Grundeisbildung hat ihren Ursprung in der Bildung des Oberflächeneises. Bei der Entstehung des letzteren treten die erstarrten Wassermolekel auf der ruhigen Wasseroberfläche zu Krystallnadeln und zu Krystall-Blättchen zusammen, welche eine Eishaut bilden, die nach und nach zur festen Eisdecke erstarrt.

In der Folge schreitet die Eisbildung nach der Tiefe fort, indem der Frost auf die Eisschicht einwirkt und neue erstarrte Wassermolekel sich bilden, die unter dem Einflusse der Molekularkräfte anschiessen und sich orientieren. Die normale Form der Krystalle sind die rundlichen Blättchen (Tyndall's Schmelzfiguren) mit meist deutlich sichtbaren sechs rundlichen Ein- und Ausbuchtungen an der Peri-

pherie, entsprechend den Nebenachsen der Krystallgebilde, welche Blättchen dann unter sich und zusammen mit der Eiskecke bei weiterer Frosteinwirkung verkittet werden. Diese rundlichen Blättchen nun entsprechen in Form und Grösse genau denjenigen des blättrigen Grundeises. Beim Abschmelzen einer Oberflächeneisschicht ist zu beobachten, dass zuerst das Eis zwischen diesen glasharten Blättchen ausgelaugt wird und erst zuletzt diese selbst angegriffen werden, vorausgesetzt, dass die Abschmelzung in Wasser nahe Null Grad langsam erfolgt. So trifft man oft an der untern Fläche einer schmelzenden Obereisschicht die den Grundeisblättchen ähnlichen, rundlichen Krystallblättchen in grosser Masse.

Im stark fliessenden Wasser kann je nach dessen Geschwindigkeit und der Intensität des Frostes die Bildung der festen Eishaut durch die Wasserbewegung ganz verhindert und die erstarrten Krystalle einzeln oder in Gruppen sofort abgeführt werden. Häufig kommt noch das Saum- oder Randeis zustande; aber sobald sich auch dieses letztere in die grössere Geschwindigkeit des Stromstriches erstreckt, so hört dessen Wachstum auf und die neu sich bildenden Krystallnadeln werden gleichfalls abgeführt, sobald die Energie der bewegten Wasserteilchen grösser ist, als die Molekularkraft. Dieses letztere ist der Fall je nach lokalen Verhältnissen bei Wassergeschwindigkeiten von ca. 0,8 bis 1 m secd. Nach Quinke*) beträgt die Krystallgrösse oft nur Tausendstel von mm, sodass sich diese Vorgänge der Beobachtung gewöhnlich entziehen. Treten nun solchermassen mitgeführte und im Wasser schwimmende Krystalle des ersten Entwicklungsstadiums auf ihrem Wege etwa an ruhiger Stelle wieder an die Oberfläche nahe einer im Entwickeln begriffenen Eisschicht und bewegen sie sich in Entfernung kleiner als der Radius der molekularen Wirkungssphäre an einem eben sich bildenden Krystallblättchen vorbei, so kann nichts sie hindern, anzuschliessen und an der Bildung

*) Annalen der Physik und Chemie, Seite 1—34, 1902, 9.

jenes Krystallgebildes teilzunehmen. Auf solche Weise kann ein gesetzmässig und vollständig ausgebildeter Krystall zustande kommen, eigentlich als sekundäre Bildung, und so können auch treibende Krystalle an der unteren Fläche der Eisschicht die rundlichen Blättchen bilden, die aber bei geringem Frost nicht mit der Eisschicht verkittet werden, sondern lose anhängen. Diese Krystallbildung in ihrer gesetzmässigen Vollkommenheit ist dagegen ausgeschlossen, wenn sich das Krystallelement auf seinem Wege schon mit andern Eisnadeln zu einer regellosen Krystallgruppe vereinigt hat, was bei starkem Frost die Regel ist, namentlich wenn dieselben sich längere Zeit auf der Wasseroberfläche bewegen. Dagegen besteht nach O. Lehmann*) die Fähigkeit der deformierten Krystalle, in Lösungen zu normalen Krystallen beziehungsweise Zwillingen auszuheilen, wie insbesondere durch Versuche von O. Mugge nachgewiesen wurde.

Solche schwimmende Krystallelemente befinden sich im Schmelzzustand und werden natürlich sehr oft, namentlich im Anfange der Frostperioden, vom Wasser, das seine Wärme noch längere Zeit behält und nur langsam abgibt, vollständig geschmolzen. Sie existieren in diesem Falle momentan noch als flüssige Krystalle im ruhigen Wasser oder an geschützter Stelle fort; im stark strömenden Wasser werden sie meist mit diesem vermengt und aufgehoben. Auch hierüber spricht sich O. Lehmann in der bereits genannten Zeitschrift wie folgt aus (Seite 140): «Eine der wichtigsten Folgerungen aus dem Verhalten der plastischen, fließenden und flüssigen Krystalle, speziell ihrer Homöotropie ist ferner die Erkenntnis der Existenz einer nicht mit der Elastizität identischen «molekularen Richtkraft», welche sich anscheinend nur erklären lässt durch elektrostatische und elektrodynamische Wirkungen der Atomladungen oder Elektronen, so dass also diese Untersuchungen zu Ergebnissen führen, zu welchen bereits die Entdeckungen auf

*) Annalen der Physik, Bd. 12, Heft 2, Seite 314, 1904.

dem Gebiet der elektrischen Entladungen hingeleitet haben. In «gasförmigen Körpern» fehlt die Oberflächenspannung und damit die richtende Wirkung.

Werden diese im Wasser treibenden Krystalle durch irgend eine der genannten mannigfaltigen Gelegenheiten der Tiefe zugeführt, so bleiben sie leicht an rauhen Gegenständen durch die Reibung hängen und haften, oder auch die Wasserbewegung kann sie dort andrücken und halten; ja sogar elektrische Kräfte ziehen, wie wir später sehen werden, die Krystalle an die Körper an.

In Bezug auf die Temperatur dieser im Schmelzzustand befindlichen Krystalle lässt sich sagen, dass zur Lockerung der Kohäsion an den Oberflächen Schmelzarbeit aufgewendet wird, welche als Wärme dem umgebenden Wasser selbst entzogen wird, diese also auch im wärmeren Wasser höchstens die Temperatur von Null Grad haben. Diese Temperatur von Null Grad herrscht natürlich auch noch in den ersten Momenten nach Verflüssigung im Wassertröpfchen weiter, erhöht sich dann aber sehr bald auf die Temperatur des sie umgebenden Wassers; um so rascher, je reger die Strömung das Wasser durcheinander mischt. Sticht aber eine gerade zutreibende Krystallnadel in das als gesättigt zu betrachtende Tröpfchen ein, so kann es erstarren.

Diese festen oder flüssigen Krystalle, klein und oft ganz unsichtbar, setzen sich wie bemerkt, vom Wasser an rauhe Gegenstände angetrieben, ja selbst elektrisch angezogen, fest, kühlen diese schmelzend ab bis die Körpertemperatur so tief gesunken ist, dass neu antreibende Krystalle nicht mehr abzuschmelzen vermögen, sondern sich orientieren zum Krystallsterne. Auf solche Weise sich bildendes Grundeis gerät sofort wieder in den Schmelzzustand, so lange bis der Körper, an dem es haftet und auch das umgebende Wasser eine Temperatur nahe Null Grad erreichen, wodurch nun gewissermassen ein Beharrungszustand eintritt, indem die Körperwärme zur Leistung weiterer Schmelzarbeit nicht mehr hinreicht. Es bildet sich also nach und nach das «Blättrige Grundeis» aus.

Bei anhaltendem Frost kann das Wasser die in ihm in vermehrter Zahl massenweise schwimmenden Krystall-elemente nicht mehr in so grosser Zahl schmelzen, sie treiben in grossen Mengen im Wasser fort. An ruhiger Stelle treten sie in vermehrter Zahl zu gesetzmässigen Krystallen zusammen, sie schiessen an zu Blättchen sekundären Bildungsstadiums; aber wo sie in allzu grossen Massen und mit zu grosser Kraft auftreffen, da fehlt die Orientierungsgelegenheit und es entstehen mechanische Anhäufungen von Eisnadeln. Die Orientierung ist auch schon ausgeschlossen, wenn wie bemerkt, die Krystallnadeln sich unterwegs bei starkem Frost und hinreichender Wasserkühlung unter sich bereits zu regellosen Krystallgruppen vereinigen. Die ersteren gesetzmässig orientierten Krystalle bilden, wie wir gesehen haben, das «*Blättrige Grundeis*», die letzteren, mechanischen Anhäufungen aber das «*Körnige Grundeis*», welch' letzteres um so weisser und fester wird, je grösser der Frost, je stärker die sie treibende und aufschlagende Strömung ist und je länger die Bildungsdauer anhält.

Nun entsteht die Frage, warum auf solche Weise auf der Sohle nicht vollständig entwickelte Eisschichten entstehen, was wenigstens bei der normalen Bildung des blättrigen Grundeises zu erwarten stünde.

Diese unvollständige Entwicklung wurde vielfach der freiwerdenden Erstarrungswärme zugeschrieben, welche die Temperatur der umgebenden Wasserschicht erhöhe. (Arago, Gay-Lussac.)

Allein auch bei der Bildung der gleichen Eisblättchen an der unteren Fläche der Oberflächeneisschicht wird die gleiche Erstarrungswärme frei, sie wird hier wie unter Wasser zweifellos sofort an das umströmende Wasser abgegeben.

Weiter einwirkende überschüssige Kälte von aussen aber ist es, die die Blättchen an die Oberflächeneisschicht an und unter sich zusammen kittet, diese fehlt aber eben unter Wasser in der Regel vollständig. Die Erstarrungs-

wärme ist bei der Erstarrung der Molekel, bei der Ausscheidung, also an der Oberfläche, meist schon ausgetreten. Der Zusammentritt zu dem gesetzmässigen Krystallblättchen des Grundeises ist nur mehr ein Ausgleich der elektrischen Spannung.

Die Annahme, dass die freiwerdende Erstarrungswärme die Bildung kompakter Eisschichten unter Wasser verhindern sollte, setzt eben voraus, dass das Wasser auf der Flusssohle selbst erstarre, was aber durch meine Temperaturmessungen widerlegt und für gewöhnlich ganz ausgeschlossen ist.

Es ist konstatiert, dass die Grundeisbildung bei Wasser- und Sohlentemperatur über 0° sich schon vollzieht, wobei doch offenbar in der Regel von einer Erstarrung des Wassers nicht die Rede sein kann. Vielmehr sind es die im Wasser treibenden, bereits an der Oberfläche erstarrten Krystalle, welche auf der Sohle zu Grundeissschwämmen zusammen treten.

Die Tatsache, dass bei der Bildung des Grundeises keine festen Eisschichten entstehen können, beantwortet sich aber in einfacher und einwandfreier Weise wie folgt:

Das Wasser der Flüsse und Seen enthält stets anorganische Salze gelöst und ist meist auch organisch stark verunreinigt. Ein milliontel von Salzen im Wasser genügt, um diesem die Eigenschaften einer wässrigen Salzlösung zu erteilen.

Aus einer Salzlösung gefriert aber stets reines Eis, das Salz wird beim Gefrieren ausgeschieden, so dass die entstandenen Krystalle von sehr dünnen Schichten salzhaltigeren Wassers umgeben werden.

Da nun der Gefrierpunkt einer Salzlösung mit dem Salzgehalt sinkt, so braucht es weiterer Kälteeinwirkung, um die den Krystall umgebende dünne Wasserschicht zum Gefrieren zu bringen.

Diese überschüssige Kälte hat an der Wasseroberfläche Zutritt und kittet die einzelnen Krystalle unter sich und mit der Oberflächeneisschicht zusammen, sie fehlt aber

*Amorph
Zufahrt
nach dem
Gefrieren*

sehr hart und durchsichtig, ihr Wachstum ist aber begrenzt, und hört auf, sobald das Blättchen seine gesetzmässige Gestalt erreicht hat, und Gleichgewicht besteht, also auch die Molekularkraft zu wirken aufhört.

*Wann hat
das Blättchen
aufhört zu
wachsen?*

Dass übrigens die Molekularkraft es ist, welche die gesetzmässige Anordnung und Angruppierung der im Wasser mit Temperatur wenig über Null Grad treibenden Krystalle bewirkt, unterliegt gar keinem Zweifel, wenn man sich daran erinnert, dass Grashalme, Woll- und Bürstenhaare usw., welche von solchen Grundeisblättchen umschlossen werden, in diesen stets die Richtung der Hauptachse des hexagonalen Krystallgebildes einnehmen, und zwar dies selbst dann noch, wenn die Wasserbewegung einer solchen Stellung der Eisblättchen mit Kraft entgegenarbeitet.

Damit ist zugleich bewiesen, dass die Molekularkraft durch das Treiben der Krystalle, selbst im Wasser von über Null Grad in ihrer Wirkung nicht beeinträchtigt wird.

Die Krystallblättchen gefrieren hierbei an diese linearen Körper nicht an, sie lassen sich leicht bewegen, abnehmen oder abstreifen; wie überhaupt das Grundeis nur lose an den Körpern der Sohle haftet.

Die erwähnte Tatsache, dass die sich bildenden Grundeisblättchen lineare Körper zur Hauptachse, bzw. zum Kräftepole der Krystallsterne wählen, obschon die Wasserbewegung einer derartigen Entwicklung entgegenarbeitet, beweist, dass die Kraft, welche die einzelnen Krystallnadeln in einer solchen der Strömung entgegenstrebenden Lage hält und aneinanderreihet, eine ganz bedeutende sein muss; sie muss grösser sein, als die Energie der bewegten Wasserteilchen, welche auf die Krystallnadeln und Gebilde einwirken. Es berechtigt dies zu der Annahme, dass diese Kraft von der bei Mischung von Wasser- und Eisteilen reichlich sich entwickelten Elektrizität von namhafter Spannung Nahrung erhält. L. Sohnke*) hat durch Versuche bewiesen, dass

*) L. Sohnke, Elektrizität durch Wasserreibung. — Widemanns Annalen der Physik und Chemie, Leipzig 1886.

mit Wasser, nahe Null Grad, geriebene Eisblättchen stets positiv elektrisch werden, während übrige Körper bei Wasserreibung negative Elektrizität erzeugten.

Ein ferneres bezügliches Experiment beschreiben H. Ebert und B. Hoffmann*) wie folgt:

«Füllt man flüssige Luft in ein Becherglas, und hängt man in dasselbe ein an einem Seidenfaden befestigtes Metallstück, so erweist sich dieses, wenn man es nach einiger Zeit aus der flüssigen Luft herauszieht und dann an ein Elektroskop anlegt, stark negativ geladen. Dieser Versuch, der niemals versagt, wenn die Luft schon einige Zeit in dem Glase gesiedet hat, und das isolierte Metallstück genügend lange in sie eingetaucht war, wurde mit gleichem Erfolge mit Aluminium, Eisen, Zink, Blei, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Palladium, Zinn und Messing, ja sogar mit Nichtleitern: Siegellack, Glas, Holz und Gummi angestellt.»

«Als Ursache der Elektrizität konnten durch Ueberlegung und Versuche der Reihe nach ausgeschlossen werden: Eine Kontaktwirkung, die Temperaturverminderung, die Verdampfung der flüssigen Luft, die Bereifung des festen Körpers bei seiner Ueberführung zum Elektroskop und die Reibung des beeisten Metallstückes gegen den Knopf des Elektroskopes. Der Versuch konnte auch mit gleichem Erfolge in möglichst getrockneter Luft ausgeführt werden, so dass die Elektrizitätserregung in der flüssigen Luft ihren Sitz haben musste.»

Die Verfasser wandten sich daher der Frage zu, welchem Bestandteile der flüssigen Luft, die bekanntlich ausser Stickstoff, Argon- und Sauerstoff, noch Kohlensäure, so wie Reste von Maschinenöl als Verunreinigung und nach längerem Stehen an der feuchten Luft auch Eis in reichlichem Masse enthält, die Elektrizitätserregung zugeschrieben werden müsse. Sie filtrierten zunächst die flüssige Luft und fanden mit der schön blauen, klaren

*) Naturwissenschaftliche Rundschau, Nr. 33, 1900, XV. Jahrgang.

Flüssigkeit keine Spur einer Elektrisierung; das Eintauchen in reine, flüssige Luft vermochte weder Glas noch ein Metall elektrisch zu machen. Somit konnten nur die Verunreinigungen der flüssigen Luft die Ursache der Elektrizitätserregung der Metalle liefern, und nachdem direkte Versuche gelehrt, dass feste Kohlensäure gleichfalls keine Elektrizitätserregung veranlasse, wurde mit den erforderlichen Vorsichtsmassregeln fein verteiltes Eis der filtrierten, flüssigen Luft zugesetzt und hiebei festgestellt, dass nun die eingetauchten Körper wieder negativ wurden, und zwar um so stärker, je mehr das die flüssige Luft trübende Eis sich anreicherte. «Es ist also die Reibung des in der flüssigen Luft enthaltenen Eises, welche den eingetauchten Körper negativ elektrisiert, das Eis selbst aber positiv.»

Dieser Schluss wurde noch durch eine Reihe anderer Versuche bekräftigt, in denen speziell die starke positive Ladung des zurückgebliebenen Eises nachgewiesen wurde.

H. Ebert und B. Hoffmann*) bemerken ferner:

Dadurch, dass das reibende Eis positiv, jeder geriebene Körper aber ebenso stark negativ elektrisch wird, erklären sich auch einige Nebenerscheinungen, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Ferner war es den Verfassern möglich, mit Hülfe der flüssigen Luft, die ein amalgamiertes Kupferdrahtnetz passierte, dieses durch die Reibung mittels des mitgeführten Eises negativ elektrisch zu laden.

Bei diesen Versuchen können gelegentlich Störungen aus dem Umstande erwachsen, dass die negative Ladung der geriebenen festen Körper durch die stark positive Ladung des reibenden Eises verdeckt wird. Zweifellos erwiesen dürfte aber durch die Versuche sein, dass beim Reiben mit vollkommen trockenem, sehr kaltem Eise fast alle Körper, insbesondere die Metalle, stark negativ elektrisch werden.

In Bezug auf die Existenz von Krystallen in flüssigem Zustande schreibt O. Lehmann**) unter anderem folgendes:

*) Naturwissenschaftliche Rundschau No. 33, 1900, XV. Jahrgang.

**) Naturwissenschaftliche Rundschau No. 33, 1900, XV. Jahrgang.

«Der Nachweis, dass es Flüssigkeiten gibt, die bezüglich aller Eigenschaften anisotrop sind und molekulare «Richtkraft besitzen, genau so wie die festen Krystalle, «dass Uebergänge zwischen den festen und flüssigen Krystallen durch Mischungen herstellbar sind, zwingt dazu «aus dem Krystallbegriff das Attribut «fest» auszuschneiden. «Man hätte demnach zu definieren: «Ein Krystall ist ein «anisotroper, mit molekularer Richtkraft begabter Körper, «dessen Aggregatzustand fest oder flüssig sein kann. Trotz «der Tropfenform, welche die flüssigen Krystalle durch die «Wirkung der Oberflächenspannung annehmen, lassen sie «sich ohne weiteres in die bekannten Krystallsysteme einordnen.

Es ist zweifellos, dass die Eiskrystalle sowohl im festen Zustande, wie auch als Galerte oder bereits im Zustande der Verflüssigung an der Grundeisbildung teilnehmen.

In Bezug auf das *blättrige Grundeis* geht aus den angeführten Experimenten hervor, dass die Bildung der gesetzmässigen Eisblättchen aus den im Wasser treibenden äusserst feinen Eiskrystallen unter Einwirkung orientierender Kräfte zweifellos möglich ist, indem schon durch das Treiben derselben im Wasser namhafte elektrische Spannungen auftreten, die bei der Bildung der Eisblättchen tätig sind. Werden doch auch die Molekularkräfte überhaupt als von elektrischer Natur erklärt.

So klärt sich auch die Tatsache auf, dass die Bildung dieses Grundeises schon im Wasser mit Temperatur bedeutend über Null Grad vor sich gehen kann, wobei aber doch die Erstarrung des Wassers selbst, in welchem es sich bildet, ausgeschlossen bleibt. Ferner ist damit die Tatsache begründet, dass die Entwicklung der Eisblättchen aufhört, sobald die gesetzmässige Gestalt erreicht ist und Gleichgewicht eintritt.

Es kompliziert sich das Bildungsgesetz des Eises am Grunde des Gewässers dadurch, dass die Reaktion eine umkehrbare ist. Ich habe bei den Beobachtungen an der Narova, z. B. am 20. Februar, konstatiert, dass sich an

einer bestimmten Stelle Grundeis ansammeln kann, während solches nahe daneben im Stadium des Schmelzens und Auftriebes sich befindet. Aber auch bei einem eben entstehenden Grundeis schwamm selbst kann man nicht sagen, in welchem Moment die Entwicklung und Abschmelzung wechselt, man kann nur als Folge die Vergrößerung oder Verkleinerung und den Auftrieb konstatieren.

In seltenen Fällen ist die Erstarrung der bei der Bildung des blätterigen Grundeises tätigen Eiskristalle aus der Wassermasse selbst heraus sehr wohl möglich, z. B. dort, wo auf Null Grad gekühltes Wasser durch Wirbel von der Oberfläche rasch auf die Sohle geführt wird und hier hinter Ufervorsprüngen oder passenden Sohlenhindernissen relativ zur Ruhe gelangt, möglicher Weise noch unter Zuführung kalter Luft in Blasen bei Wirbeln und Sprudeln.

Solches Wasser kann unter Einfluss der Grenzflächen- spannung Schaum und Galerte bilden, erstarrend sich an passenden Gegenständen als blätteriges Grundeis ansetzen; dies namentlich dann, wenn das antreibende Wasser mit Galerte von schmelzenden Krystallen der Oberfläche vermenget ist.

Die oft aufgeworfene Frage, warum sich unter diesen Bedingungen nicht fest kompakte Eistafeln bilden, beantwortet sich damit, dass beim Erstarren eines Krystalls die geringe in jedem Wasser enthaltene Salzmenge ausgeschieden wird und sich als Lösung auf dem Krystall ausbreitet, wie schon früher angeführt. Diese äusserst dünne Schicht salzhaltigeren Wassers mit etwas niedrigerem Gefrierpunkt verhindert unter Wasser das weitere Wachstum des Krystalls, da eben hier die überschüssige Kälte fehlt, welche an der Oberfläche die Krystalle unter sich und mit der Eisdecke verkittet.

In diesem Falle geht die Bildung der Eiskristalle auf ähnliche Weise vor sich, wie bei der Bildung des *Galert- eises*, welches in den weitaus meisten Fällen ebenfalls durch die Grenzflächen- spannung verschieden temperierter Wasserschichten oder Wasserblasen verursacht wird, aber in der ganzen Wassermasse selbst sich bildet.

Das Galerteis tritt meist auf, wenn nach Tauwetter plötzlicher Frost eintritt oder umgekehrt, wobei stark gekühlte Wassermassen meist noch mit grösseren Mengen Eispartikeln einer zerstörten Oberflächeneisschicht, von oberhalb auftreibendem Grundeis, oder vom Schneefall herführend, in die tieferen, wärmeren Wasserschichten getrieben werden. Es entstehen unter Einfluss der Oberflächenspannung Schaummassen, deren Zellenwände aus salzreicherem Wasser bei einer Temperatur wenig über Null Grad starke Grenzflächenspannung gegen das reinere Wasser, mit dem die Zellen gefüllt sind, besitzen. Zellenwände und Zelleninhalt können hierbei ihre Rolle vertauschen. Im Wasser gelöste Luft befördert die Schaumbildung. Bei Temperatur von Null Grad erstarrt der Zelleninhalt, während die salzreicheren Zellenwände mit etwas niedrigerem Gefrierpunkt noch flüssig bleiben, indem zu ihrer Erstarrung die erforderliche überschüssige Kälte fehlt, diese soweit sie Zutritt hat vielmehr stets neue Zellen zum Erstarren bringt. Bei der Erstarrung wird Salz ausgeschieden. Der Gefrierpunkt der die Krystalle umgebenden Salzlösung sinkt aber umso tiefer, je konzentrierter diese ist.

Auf solche Weise entsteht das lockere, unzusammenhängende Galerteis in der ganzen Wassermasse, oft in so gewaltigen Mengen, dass ganze Flussgerinne dadurch verstopft werden, derart, dass der Wassertransport ins Stocken gerät, dieses angestaut wird und in der Folge auf die Ufer austritt.

Stark begünstigt wird die Galerteisbildung dort, wo die kühleren Wassermassen mit ihren Treibeispartikeln in das wärmere Wasser unter einer weiter flussabwärts bereits an ruhiger Stelle gebildeten Oberflächeneisschicht getrieben werden.

In Analogie mit den Versuchen von Quinke*) bleiben die entstehenden Krystalle verschieden orientiert und daher von einander getrennt, wenn sie bei der Erstarrung von

*) Quinke, Annalen der Physik und Chemie 1902; 9; S. 1—43.

dünnen Schichten salzhaltigeren Wassers umgeben bleiben; während sie gleiche Orientierung aufweisen und aneinander wachsen, wenn bei der Erstarrung die Zellenwände aus salzreicherer Lösung durchbrochen werden.

Durch zahlreiche Beobachtungen ist konstatiert worden, dass das Galerteis stets bei plötzlicher Veränderung der Wassertemperatur auftritt, sei es beim Uebergang von Frost zu Tauwetter, oder auch umgekehrt; während dieses bei sich gleichbleibenden Verhältnissen auch trotz sehr grosser Kälte sich nicht bildet. Auch bei langsamem Temperaturwechsel bildet es sich nicht, es entsteht aber in um so grösseren Mengen und bildet seine Krystalle um so kräftiger aus, je rascher der Uebergang sich vollzieht.

Es hat dies also seinen Grund darin, dass durch die Verschiedenheit der Temperatur der sich mischenden Wassermassen die Oberflächenspannung kräftigere Wirkung annimmt.

Um die Bildung des Galerteises zu verhindern, hat man demnach auf gleichmässige Temperatur des Wassers beziehungsweise auf langsame kontinuierliche Temperaturänderungen hinarbeiten.

Diese Eisbildungen haben oft bei Kraftanlagen grosse Betriebsstörungen im Gefolge, namentlich wenn die Zuführungskanäle zum Teil offen liegen und zum Teil unter der Erde sich befinden. Bei plötzlichem Temperaturwechsel vollzieht sich dann die Temperaturänderung des Wassers in offenem Gerinne sehr rasch, wogegen in den geschlossenen Gerinntteilen der Wechsel sehr langsam sich vollzieht und also die günstigsten Bedingungen zur Eisbildung vorhanden sind.

In Bezug auf im Wasser liegende Metalle lässt sich sagen, dass denselben die Fähigkeit zukommt, die Grundeisbildung stark zu fördern. In hohem Masse trifft dies für stark salzhaltiges Wasser zu. So kommt es zum Beispiel vor, dass im Meereswasser liegende und verloren gegangene Ketten und Anker von bedeutendem Gewicht sich derart im Grundeis einhüllen, dass sie von diesem

beim Auftrieb gehoben und durch das einhüllende Eis an die Oberfläche getragen werden.

Es erscheint als zweifellos, dass bei den auf der Flusssohle liegenden Metallen Elektrolyse — wenn auch in geringem Grade — stattfindet, dies um so mehr, je salzreicher das Wasser ist.

Metalle gehen nun bei ihrer Lösung stets in den Jonenzustand über, sie müssen also in den Stand gesetzt werden, elektrische Ladungen und zwar als Kationen positive Ladungen aufzunehmen. Erinnerung man sich nun, dass das im Wasser treibende Eis stets positiv elektrisch geladen ist, so würden also die Eisteilchen von den negativ geladenen Metallen angezogen. Ein Teil des Wassers ist stets im Jonenzustand, selbst ganz reines Wasser ist dissociirt*).

Wenn nun auch die elektrolytische Dissociation des Wassers verhältnismässig gering ist, so ist doch die Hydrolyse in sehr merklichem Grade auch für anorganische Salze, zum Beispiel Wismuth und Zinn nachgewiesen.

Nun ist aber das Wasser unserer Gewässer meist auch organisch stark verunreinigt.

Durch die Wasserbewegung wird sodann die Hydrolyse stark gefördert, wie A. Fischer**) durch Bewegung von Elektrolyten mittelst Rührwerk nachgewiesen hat.

Es ist nun interessant, darauf hinzuweisen, dass Zinn bei der Fähigkeit der Grundeisbildung im ersten Range steht, dann folgt Messing usw. und zuletzt das Eisen.

Ueberhaupt ergeben die bisherigen Beobachtungen, dass die Metalle bei ihrer Fähigkeit zur Förderung der Grundeisbildung in der Reihenfolge ihrer elektrochemischen Aequivalente zu stehen scheinen.

*) Vergleiche hierzu: O. Berg und Knauth, Naturwissenschaftliche Rundschau, Bd. 51 und 52, 1898, insbesondere Seite 661 und 675, Einfluss der Elektrizität auf den Sauerstoffgehalt unserer Gewässer. Ferner Annalen der Physik, Band 14, Seite 936, 1904.

**) A. Fischer, Zeitschrift für Elektrochemie, Seite 945—953.

Durch diese Betrachtungen kann man sich die massenhafte Anreicherung von Grundeis auf in salzhaltigem Wasser liegende Metallstücke erklären, welche zuletzt — wie bemerkt — bewirkt, dass schwere Gegenstände von demselben zur Oberfläche emporgehoben werden.

Durch die angedeuteten lokalen Verhältnisse wird naturgemäss die Grundeisbildung beeinflusst, sowohl in ihrem Umfange als auch in ihren speziellen Eigenschaften. Die Uebergänge von einer Grundeisart zur andern sind sehr oft gar nicht scharf begrenzt, sondern ineinandergreifend, so dass eine bestimmte Grenze in vielen Fällen nicht vorhanden ist.

Es ist dies nach dem Gesagten auch verständlich, da die verschiedenen Grundeisarten nicht immer durch verschiedene Ursachen bedingt sind, sondern vielmehr die gerade an Ort und Stelle die Oberhand gewinnenden Ursachen für die vorherrschenden Eigenschaften der durch sie beförderten Grundeisbildung bestimmend sind.

Dies trifft zu für den Uebergang vom «*blättrigen Grundeis*» zum «*körnigen Grundeis*», sowohl als zum «*Galerteis*»; im ersteren Falle veranlasst durch Frostzunahme beziehungsweise grössere Wassergeschwindigkeit, im letzteren durch Zunahme der Oberflächenspannung infolge Temperaturdifferenzen der anliegenden Wasserschichten und Wasserblasen.

2. Das körnige Grundeis.

Bei länger andauerndem Frost werden — wie wir gesehen haben — die schwimmenden Eisnadeln häufiger; sie durchziehen das bis sehr nahe Null Grad gekühlte Wasser in Flocken, als ob Schnee in dasselbe gefallen wäre. Die Krystalle werden grösser und gruppieren sich auch schon an der Wasseroberfläche zu grösseren Eispartikeln, scheinbar ohne jede Gesetzmässigkeit, zusammen. Sie schwimmen schleierartig in und auf dem Wasser und lassen sich beim Herausheben mit der Hand leicht ohne starken Druck zu-

sammenballen, wie der Schnee mit Temperatur des Taupunktes. Die Flocken schwimmen zum Teil unter Wasser ruhig fort, ohne das Bestreben zu zeigen, an die Oberfläche aufzusteigen, und der geringste Einfluss der Wasserströmung genügt, sie der Sohle zuzuführen.

Die Erhabenheiten der Sohle, Steine, Gräser etc. werden wie beim blättrigen Grundeis durch das Wasser und die auftreffenden Krystalle abgekühlt bis nahe dem Nullpunkt, dann können die letzteren sich ansetzen und bleibend halten. Orientierung der einzelnen Nadeln zu Blättchen ist hierbei meist nicht mehr möglich. Die in ihrer Bildung schon fortgeschrittenen Krystallnadeln und Krystallgruppen treffen in sehr grosser Zahl auf und werden dort mechanisch aufgehäuft, und je nach der Wassergeschwindigkeit mehr oder weniger fest aufgeschlagen und aneinandergedrückt; das Ganze wird entsprechend auch mehr oder weniger fest, weiss und körnig. Durch die besagte Zusammengruppierung der Krystallnadeln zu Krystallgruppen tritt zweifellos die Wirkung der Molekularkräfte zurück; abgesehen von der allmählichen Ausheilung von unvollkommenen Krystallen. Es ist sodann ausser Zweifel, dass hier die mit der Temperatur des Schmelzpunktes durch die Strömung mit geringerer oder grösserer Kraft aufschlagenden Eispartikel durch Regelation der Berührungsflächen zusammengehalten und zusammengeballt werden; während auch hier natürlicherweise zur vollständigen Verkittung der Krystallgruppen unter sich, die überschüssige Kälte fehlt.

In Bezug auf den Begriff der Regelation gibt Tyndall in seinem Buche «Die Wärme», Seite 231, 232 und 233 folgende Erklärung: «Dies ist die Wirkung, auf welche Faraday zuerst im Juni 1850 aufmerksam machte, und welche nun unter dem Namen «Regelation» bekannt ist. (Ein Ausdruck, den Dr. Hooker Herrn Huxley und mir bei der Veröffentlichung unserer ersten Abhandlung über «Gletscher vorschlug.)

«An einem heissen Sommertage ging ich einst in einen Laden, wo am Schaufenster Eisstücke in einem Becken

«ausgestellt waren, und fasste mit des Verkäufers Erlaubnis
«das oberste Stück Eis und hob damit den ganzen Berg
«von Stücken aus der Schüssel heraus.

«Obgleich das Thermometer damals auf 27°C stand,
«waren die Eisstücke mit ihren Berührungspunkten anein-
«ander gefroren. Selbst im warmen Wasser tritt diese Er-
«scheinung ein. Ich habe hier ein Becken voll Wasser, so
«warm es meine Hand ertragen kann; ich tauche diese zwei
«Eisstücke hinein und halte sie im Wasser eine Weile an-
«einander. Trotz der umgebenden warmen Flüssigkeit sind
«sie zusammengefroren. Ein hübsches Experiment von Fa-
«raday besteht darin, eine Anzahl kleiner Eisstücke in eine
«Schüssel voll Wasser zu tun, welches tief genug ist, um
«sie schwimmen zu lassen. Wenn ein Stück das andere
«berührt, tritt augenblicklich Regelation ein. So kann man
«eine Reihe von Stückchen einander berühren lassen und
«nach erfolgter Berührung das Endstück anfassen und damit
«alle andern nachziehen. Wenn wir zwei Stücke, die auf
«diese Weise an ihren Berührungspunkten verbunden sind,
«zu biegen suchen, trennen sich die gefrorenen Punkte plötz-
«lich durch Bruch, aber zugleich kommen andere Punkte mit-
«einander in Berührung, zwischen denen nun Regelation
«eintritt. So könnte man ein Rad von Eis über eine Eis-
«fläche rollen lassen, wobei die Verbindungspunkte unauf-
«hörlich mit krachendem Geräusch auseinandergebrochen
«und andere dafür ebenso schnell durch Regelation wieder
«hergestellt würden.

«Vermöge dieser Eigenschaft der Regelation kann Eis
«viele der Erscheinungen zeigen, die gewöhnlich nur bei
«zähen Körpern vorkommen, wie bei Eisen etc.

«Ich nehme eine Hand voll dieser kleinen Eisstückchen
«und drücke sie zusammen; sie frieren mit ihren Berüh-
«rungspunkten aneinander und bilden nun eine einzige Masse.
«Das Formen eines Schneeballs veranschaulicht, wie Faraday
«bemerkt, dasselbe im Prinzip. Damit er zusammenfrieren
«kann, muss der Schnee Null Grad haben und feucht sein.
«Ist er unter Null Grad und trocken und wird er gedrückt,

«so verhält er sich wie Salz. Das Ueberschreiten von Schnee-
«brücken, die in den oberen Regionen der Schweizer Gletscher
«vorkommen, wird oft nur durch die Regelation der Schnee-
«körner ermöglicht. Der Alpensteiger betritt die Masse
«vorsichtig und verursacht, dass Regelation zwischen den
«Schneekörnern stattfindet. Er erhält hierdurch einen so
«festen Boden, wie er ohne die Einwirkung der Regelation
«gar nicht zu erreichen wäre. Hierbei wirkt zweifellos die
«Regelation mit.

«Der Schnee- und Eismensch hatte mit der Tatsache
«der Regelation weit früher als die Kulturwelt Bekannt-
«schaft geschlossen. Wenn es in der Eskimo-Schneehütte
«von der Decke zu tropfen beginnt, so schneidet der Insasse
«von einem schon bereit gehaltenen Schneebrocken ein Stück
«ab, behaucht es und drückt es an die schadhafte Stelle
«an; es gefriert mit der Decke zusammen und das Rinnen
«hört einstweilen auf.

«Es erinnert die Regelation an das Schweissen des
«Eisens beim Schmelzpunkt.»

Die körnige Grundeisart lagert sich an der Flusssohle,
sehr strenge entsprechend den grösseren Strömungen, Wirbel
und Grundwellen, und bildet dort, wie bemerkt, in seiner
Gesamtheit ein rohes Gemenge von regellos aneinander-
geballten Krystallgruppen. Diese hüllen den betreffenden
Körper nach kurzer Zeit ein, in der Regel aber ohne
an diesen anzufrieren. Die Kohäsion der Masse ist gross
genug, um sich an den Körpern umfassend und in deren
Unebenheiten eingreifend zu halten und dem mit der Zu-
nahme des Grundeissschwammes anwachsenden Auftriebe
zu widerstehen; dieses letztere so lange, bis durch Wärme-
aufnahme des Körpers die denselben berührenden Krystalle
geschmolzen werden und so die Eishülle sich ablöst. Es
ist nun leicht einzusehen, dass eine solche Grundeissscholle,
die sich z. B. über mehrere grössere und kleinere Steine
erstreckt, bei Einfluss der Sonnenwärme von ersteren ab-
getrieben wird, während die letzteren — für die Strahlungswärme
vielleicht weniger empfindlichen, oder vom Wasser

besser gekühlten — noch fest eingeschlossen bleiben und abgeführt werden mit dem sie umhüllenden Eis. So kommt es öfters vor, dass grössere Steine mit dem Eis auftreiben und transportiert werden.

Dies namentlich dann, wenn das Grundeis sich oft bei bedecktem Himmel und namhaftem Frost mehrere Tage halten, vermehren und festeren Zustand annehmen kann.

Besonders an schattigen Stellen, wo naturgemäss der Einfluss der Strahlungswärme der Sonne sehr gering ist, — da Eis die Wärmestrahlen aus dunkler Quelle absorbiert solche aus leuchtender Quelle aber durchlässt — hält und vermehrt sich das Grundeis oft mehrere Tage ohne von der Sohle abgetrieben zu werden. Das Grundeis wächst an solchen Stellen gewöhnlich — trotz Einfluss der Sonne auf die Wassertemperatur im übrigen Flusslaufe — täglich schichtweise an, meist in den Nachtstunden, und es kann sich so sehr leicht bis über den Wasserspiegel erheben und Inseln bilden. Bei Tauwetter schmilzt es an solchen Stellen mehr ab unter Einfluss der Wasserwärme, als dass es durch die Erhöhung der Sohlen- oder der Steinwärme auftreibt.

Erwähnenswert ist noch die Tatsache, dass die Narova auf der sehr tief ausgekolkten Felssohle, unterhalb den Narv'schen Wasserfällen, keine Grundeisbildung zeigte, obgleich oberhalb und unterhalb diese Bildung stets sehr kräftig war. Die höhere Erdwärme der zirka 10 m tiefen Kolkung, verbunden mit der zu grossen Wassergeschwindigkeit, vermochte also die Ansetzung von Grundeis zu verhindern.

Unter günstigen Umständen, nämlich dort, wo verhältnismässig gleichförmige Wasserbewegung durch sehr starke Wirbel nach der Bettsohle, oder durch starke Grundwellen plötzlich gestört wird und etwa Sprudel mit Luftblasen auftreten, kann die Bildung des körnigen Grundeises auch wie folgt vorsichgehen und es ist diese Bildung den Wildwassern eigen.

Die auf ruhigerem Wasserspiegel dahertreibenden Eisnadeln können an ihrer oberen Fläche in Berührung mit

der kalten Luft unter Null erkalten und ebenso auch der dieser Oberfläche zunächst liegende Teil der Krystallkörper. Werden nun diese Krystalle durch besagte Geschwindigkeitsstörung plötzlich der Bettsohle zugeführt und gegen ein Hindernis getrieben, so geben sie ihre überschüssige Kälte an die Sohle ab, halten sich nach und nach und gefrieren mit den nachfolgenden Krystallen an den Berührungsflächen zusammen. Es entsteht dadurch, namentlich in Sprudeln, welche der Bettsohle noch direkt kalte Luft zuführen, ein ziemlich festes körniges Eis, welches man mit grosser Aehnlichkeit künstlich dadurch herstellen kann, dass man Schnee abwechselnd unter Null Grad abkühlt und dann Wasser von etwas über 0° C. darauf giesst.

Neuch*) 1843/44 hat durch Experimente gezeigt, dass kalter, trockner Schnee mit Wasser von 0° C. fein bespritzt in Firn (körniger Schnee) übergeht, während Wasser über 0° C. unregelmässige Vereisung, aber keinen Firn erzeugt.

In Bezug auf die Grundeisbildung im Wasser oder auf der Flusssohle in starken Sprudeln, durch welche letztere Luft mitgerissen und durch das Wasser gepresst wird, welche in dem Eise als unzählige, kleine Blasen zum Vorschein kommt, gibt Himstedt**) u. a. noch folgende interessante Aufschlüsse:

«Wasser übt auf Säuren, Salze und Gase eine stark jonisierende Wirkung.

«Je stärker der Druck, mit dem die Luft durch das Wasser gepresst wird, desto inniger die Berührung und «Durchmischung der Moleküle und desto grösser die Anzahl «der erzeugten, leicht jonisierenden Moleküle, desto grösser «die Leitfähigkeit der Luft.

«Durch Befeuchten der Luft bilden sich dissociierbare «Moleküle. Durch Jonenstoss, durch ultraviolettes Licht,

*) Heim, Handbuch der Gletscherkunde, Stuttgart 1885.

**) Himstedt: Ueber Jonisierung der Luft durch Wasser, Annalen der Physik 1904, Band 12, Heft 1, Seite 107 u. f.

«durch Strahlen radioaktiver Substanzen werden diese in «Jonen gespalten und wird dadurch Leitfähigkeit der Luft «hervorgerufen.»

Das körnige Grundeis hat weit mehr als das blättrige Störungen in Wasserläufen und Wasserwerken zur Folge.

Während das blättrige Grundeis für gewöhnlich nur in geringen Mengen auftritt, nimmt das körnige Grundeis bei dauernder Kälte grössten Umfang an und treibt nach dem Auftrieb in so grossen Massen mit dem Wasser fort, dass es an seichten Flussstellen, bei Wehr- und Rechenanlagen oder beim Zusammentreffen mit einer weiter unterhalb gebildeten Oberflächeneisschicht leicht Stockungen veranlassen kann.

Schiebt es sich in grossen Massen unter eine kräftige Obereisschicht, oder gelangt es in kühlem Wasser treibend mit diesem plötzlich in wärmere Wasserschichten, so können sich die Schwierigkeiten durch die veranlasste Bildung von Galerteis noch steigern.

Kaum irgendwo gelöst, hängen die treibenden Schollen sofort wieder zähe aneinander. Sprengschüsse haben in demselben naturgemäss nur eine geringe Wirkung im Vergleiche zu solchen im Erdboden und sie vermögen lediglich im Momente des Beginnes einer Stockung, d. h. so lange das Wasser noch genügend Kraft zur Fortbewegung der gelösten Schollen besitzt, Abhülfe zu bringen.

Ist eine Flusstopfung vollständig vorhanden, so wird es meist unerlässlich, die einzelnen gelösten Schollen durch einen im Eis hergestellten Kanal von Hand weiter zu bewegen und abfliessen zu lassen. In Gewerbekanaln dagegen, wo der Wasserdurchfluss in diesem Falle überhaupt aufhört, ist meist Beseitigung des entstandenen Eises durch vollständiges Ausschöpfen nötig zum Wiederbetrieb des Werkes.

Eine solche Flusstopfung ist nachstehend auf Seite 119 ausführlich beschrieben, welche sofortige Ausserbetriebsetzung einer bedeutenden Kraftanlage zur Folge hatte.

An bestimmten Stellen mancher Flüsse treten diese Störungen alljährlich auf, oft in so bedeutendem Masse,

dass das dadurch angestaute Wasser über die Ufer austreten muss, wenn nicht die Stopfung sofort künstlich gehoben wird.

Wir kommen auf diesen Gegenstand bei der nachfolgenden Beschreibung des Galerteises noch eingehender zu sprechen.

3. Das Galerteis.

Wir haben die Bildung des Galerteises bereits auf Seite 65 und 66 kurz betrachtet im Zusammenhang mit der Bildung des «Blättrigen Grundeises.» Strenge genommen gehört das Galerteis nicht zum Grundeis, wird aber allgemein als solches bezeichnet, seines ähnlichen Aussehens wegen.

Mit der dort gegebenen Erklärung könnte diese Eisart nunmehr als hinreichend gewürdigt betrachtet werden, da sie kein bedeutendes wissenschaftliches Interesse bietet und daher eine weitgehende theoretische Behandlung nicht verdient.

Anders stellt sich dagegen dieser Gegenstand in Bezug auf die praktischen Folgen der in Wasserwerken und Wasserläufen hierdurch auftretenden Betriebsstörungen.

Die schwersten Grundeisstörungen treten nämlich dort auf, wo bei Wasserwerken die Stau- und Kanalverhältnisse der geregelten Abführung des zutreibenden Grundeises hinderlich, der Galerteisbildung in der Folge aber förderlich sind.

Diese Tatsache lässt hier eine eingehendere theoretische Würdigung gerechtfertigt erscheinen.

Wie wir gesehen haben, sind die Galerteisbildungen eine Folge des Zusammentrittes und der Durcheinandermischung von mit Eispartikeln geschwängertem Wasser von verschiedener Temperatur, sei es infolge plötzlichen Wechsels von Tauwetter zu Frost oder von Frost zu Tauwetter.

Ferner begünstigt der unvermittelte Wechsel der benetzten Querschnittsflächen und Wassergeschwindigkeit in Wasserläufen diese Bildung sehr stark.

Die Bildung zeigt sich um so kräftiger und ausgedehnter, je rascher der Wechsel sich vollzieht und die Störungen durch das Galerteis erreichen ihr Maximum, wenn grosse Massen aus Stromschnellen oder Kanälen mit grosser Wassergeschwindigkeit abtreibenden Grundeises in das an stauer Stelle mit grosser Querschnittsfläche und kleiner Wassergeschwindigkeit unter dem Schutze einer Oberflächeneisschicht noch wärmere Wasser geführt werden.

Statt dass nun bei der Anlage von künstlichen Wasserläufen behufs Verhinderung von Grundeisstörungen mit aller Kraft auf möglichst gleichmässige Wassertemperatur hingearbeitet wird, werden sehr oft ohne zwingende Gründe mangels Erkenntnis der Ursachen zu diesen Störungen geradezu die Verhältnisse künstlich geschaffen, welche der Galerteisbildung günstig sind und welche die daherigen Störungen in den natürlichen Wasserläufen veranlassen.

So sieht man an Flüssen, welche der Grundeisbildung stark unterworfen sind, Wasserkraftanlagen entstehen mit Zuleitungskanälen von unzweckmässig wechselnder Querschnittsfläche und daheriger wechselnder Wassergeschwindigkeit. Ebenso Kanäle für grosse Wassergeschwindigkeit, in denen offener und Stollenbau unvermittelt wechseln.

Was in der freien Natur der Wechsel von Tauwetter und Frost für die natürlichen Wasserläufe, das bedeutet hier der rasche Wechsel zwischen der Einwirkung der freien Luft auf die offenen Gerinneteile und der Erdwärme auf die geschlossenen.

Durch unsere Betrachtungen ist doch ohne weiteres klar, dass in Industriekanälen, wo offener und Stollenbau abwechseln müssen, die Wassergeschwindigkeit in den offenen Stücken so klein gewählt werden muss, dass sich der Wasserspiegel hier beim ersten grösseren Frost mit einer Eisdecke überzieht, wodurch gewissermassen der ganze Kanal als geschlossenes Gerinne erscheint und die Einwirkung der in ihrer Temperatur starkem Wechsel unterworfenen freien Luft geschwächt wird. Wenn dann noch durch die Erhaltung eines konstanten Wasserspiegels die

entstandene Oberflächeneisschicht vor vorzeitigem Bruche bewahrt wird, so vollzieht sich der Wassertransport in dem Kanale während der ganzen Frostperiode ohne jede Störung.

Dass die Anlage der Zuleitungskanäle in Bezug auf die durch Grundeis hervorgerufenen Störungen von entscheidender Bedeutung ist, bedarf wohl der Begründung nach dem Gesagten nicht mehr, allein es mag dies an einigen praktischen Beispielen doch dargetan werden:

Zwei grössere Kraftwerke, beide an Wildwassern, die der Grundeisbildung stark unterworfen sind (Lütschine bei Lauterbrunnen und Rhone im Wallis), beide mit längeren Zuleitungskanälen und anschliessender Druckleitung, also im Grossen und Ganzen mit ähnlichen Verhältnissen, zeigen unter dem Einflusse des Grundeises ein ganz verschiedenartiges Verhalten, indem das erstere sozusagen gar keine Störungen kennt, während das letztere unter diesen schwer zu leiden hat.

Da nun auch die Turbinen und das Gefälle (45 beziehungsweise 65 Meter) in beiden Anlagen ähnlich sind, so muss der Grund zu dem verschiedenen Verhalten lediglich in den Zuleitungskanälen liegen.

Die erstere Anlage nun hat einen Zuleitungskanal von mehreren hundert Metern Länge bis zum Wasserschloss aus in den Erdboden verlegten eisernen Röhren von zirka zwei Metern Durchmesser und nur ein kurzes Einlaufstück zur Anbringung von Kiesschwelle, Leerlauf und Einlaufschützen; dieses ist als offener Kanal von sehr grossem Querschnitt ausgebaut. An das Wasserschloss schliesst die zirka ein Kilometer lange Druckleitung ebenfalls aus schmiedeisernen Röhren an, welche zum Teil gleich wie die Zuleitung zur Temperatúrausgleichung überdeckt ist. Die Wassergeschwindigkeit in der Leitung beträgt im Maximum zirka 3 m sec.

Die letztere Anlage an der Rhone dagegen hat einen mehrere Kilometer langen zum grössten Teil offenen Zuleitungskanal mit einer für unsere Betrachtung zu grossen

Wassergeschwindigkeit, zirka 1,5 bis 2 m sec. Auf einige hundert Meter ist dieser im Stollen geführt.

Dieser Zuleitungskanal mündet in ein als offener Weiher ausgebildetes Reservoir zum Ausgleich der Druckschwankungen, an welches die einige hundert Meter lange an freier Luft verlegte Druckleitung von zirka 2,5 m Durchmesser anschliesst; die das Wasser den Turbinen zuleitet.

Die Störungen, welchen diese Anlage im Winter unterworfen ist, zeigen sich durch starke Grundeisentwicklung im offenen Zuleitungskanal und durch Anhäufung desselben und folgender Galerteisentwicklung im Reservoir bis zu dessen vollständiger Verstopfung.

Beim Beginn der Störungen oder bei geringerem Umfang derselben zeigen sich diese zuerst in den Turbinen durch Verstopfung der Schaufelöffnungen und zwar früher bei den kleinen Hülfturbinen als bei den grössern, den eigentlichen Kraftturbinen.

Es steht ausser Zweifel, dass das ganz verschiedenartige Verhalten dieser Werke in deren verschiedenartiger Anlage liegt, so dass man es also, nachdem solche Erfahrungen nun zu Gebote stehen, in der Hand hat, durch zweckmässige Anordnungen den Störungen in vielen Fällen zu begegnen, oder doch dieselben auf ein zulässiges Mass zu reduzieren.

Ein ähnliches Verhalten wie die zuletzt betrachtete Anlage zeigt ein grösseres Kraftwerk ähnlicher Bauart an der Kander, wo an ein kleines festes Ueberfallwehr ein auf ein längeres Stück offenliegender Zuleitungskanal mit grosser Wassergeschwindigkeit anschliesst, der dann in einen Stollen übergeht mit folgendem Weiher zum Tages- und Wochen- ausgleich und anschliessender Druckleitung.

Auch Kraftanlagen an ein und demselben Flusse zeigen je nach der auf ihre Anlage aufgewendeten Sorgfalt und Sachkenntnis unter dem Einflusse der Grundeisbildung ein durchaus verschiedenes Verhalten.

Ganz verschiedenes Verhalten zeigen z. B. auch die Kraftwerke an der Aare.

Während beispielsweise die Anlage in der Beznau das Grundeistreiben des Flusses ohne Störung erträgt, dasjenige von Hagneck die Störungen dadurch fernhält, dass es beim Frosteintritt die Bildung einer Oberflächeneisschicht auf dem hierzu günstig angelegten Kanal herbeiführt, haben andere Werke in nicht ungünstigerer lokaler Lage mit den grössten Schwierigkeiten zu kämpfen und zum Teil ohne bedeutendere Umbauten kein Mittel zur Hand zur Beseitigung der Störungen.

Man kann indes nicht bestreiten, dass die Gründe hierzu lediglich in deren Anlage zu suchen sind.

Bei der mangelhaften Kenntnis des Wesens der Grundeisbildung und bei der bisherigen Unsicherheit in dessen Behandlung wäre es durchaus ungerecht, irgendwie einen Vorwurf zu erheben; glaubt man doch heute noch vielfach allen Ernstes, durch die Wahl grosser Durchflussgeschwindigkeiten in den Gerinnen die Eisschwierigkeiten wirksam bekämpfen zu können, wodurch zwar wohl die Bildung einer schützenden Oberflächeneisschichte verhindert wird, die Grundeissschwierigkeiten dafür aber herbeigeführt werden. Nachdem nun aber einmal solche Erfahrungen vorliegen, so müssen diese notgedrungen berücksichtigt werden und es bedarf wohl keines weiteren Hinweises mehr, wie dringend unerlässlich es ist, bei der Anlage derartiger Werke an der Grundeisbildung unterworfenen Gewässern, schon in erster Linie auf die Beseitigung daheriger Betriebsstörungen hinzuwirken.

Die Beobachtung des zur Kraftgewinnung zu benützten Flusslaufes in Bezug auf die Bildung und Führung von Grundeis und in der Folge die strikte Anpassung der Konstruktionen an diese Verhältnisse ist von höchster Wichtigkeit und es ist dies jedenfalls weitaus wirtschaftlicher als die peinlichste rechnerische Begründung eines möglichst hohen Nutzeffektes, der selten eintritt, oder der

Aufstellung eines Projektes lediglich mit Rücksicht auf einen geringen Kostenvoranschlag, der dann bei der Ausführung meist doch überschritten wird.

Dies vorausgeschickt, mag es nicht unerwünscht sein, auch auf die theoretische Seite der Bildung des Galerteises noch etwas weiter einzutreten.

Die Bildung des Galerteises tritt wie bemerkt meist überraschend auf, wenn nach Tauwetter plötzlich Frost eintritt oder umgekehrt.

Verursacht wird es gewöhnlich durch grössere Massen Eiskristalle (Schnee, aufgetriebenes Grundeis, zerbröckeltes oder unentwickeltes Oberflächeneis) welche in Wasser mit Temperatur von etwas über 0° getrieben werden; es hat seinen Grund, wie wir gesehen haben, in der Grenzflächen- spannung verschieden temperierter Wasserblasen oder Wasserschichten.

Schon die geringsten Mengen gelöster Salze, wie sie in keinem Wasser fehlen, genügen, um bei den geringsten Temperaturdifferenzen starke Grenzflächenspannung hervorzurufen.

Gelangen nun beim Wechsel von Tauwetter und Frost kühlere Wassermassen mit unzähligen Eispartikeln gemengt in Wasser von noch etwas höherer Temperatur, so entsteht unter dem Einflusse ihrer Schmelzgalerte starke Grenzflächenspannung, so dass es sich in der Folge in Schaum und Galerte verwandelt, in der Weise, dass der Wassertransport des ganzen Flusskanals ins Stocken geraten kann.

Oft wird die Galerteisbildung dadurch noch befördert, dass die Stückchen einer zerbröckelten dünnen Oberflächeneis- schicht an der freien Luft unterkühlt waren und in diesem Zustand in die tieferen Wasserschichten gelangend, nicht nur zu starker Grenzflächenspannung Veranlassung sind, sondern ganz direkt Krystallisation veranlassen, wie bereits auf Seite 73 für die Bildung des körnigen Grundeises dargetan.

Die Zufuhr unterkühlter Eispartikel bildet indes keineswegs die Regel bei der Galerteisbildung, sondern nur ein spezieller Fall.

In Analogie mit den Untersuchungen von Quinke*) kann schon die Grenzflächenspannung die Eisbildung veranlassen.

Zwischen den oben beschriebenen Blasen, die als konzentrierter betrachtet werden können als die sie umgebende Wassermasse selbst, besteht — was nicht von der Hand zu weisen ist — Oberflächenspannung bezw. Grenzflächenspannung gegen das sie umgebende Wasser. Dies wird auch durch O. Lehmann**) bewiesen.

Der Nullpunkt beim Wasser ist nämlich ein ausgezeichneter Punkt, bei welchem ein kleiner Zusatz in der einen oder andern Richtung eine relativ starke Aenderung der Oberflächenspannung hervorrufen muss, entsprechend dem neutralen Punkt bei Neutralisationsvorgängen einer Säure. Dieses Mehr oder Weniger kann schon die Aenderung des Barometerstandes bewirken.

Quinke hat in Bezug hierauf durch viele Experimente folgendes konstatiert:

«Unter dem Einfluss der Grenzflächenspannung bilden die aus wässriger Salzlösung bei Zusatz von Alkohol in kurzen Zwischenräumen abgeschiedenen, wasserreichen und alkoholreichen Salzlösungen zahlreiche Tropfen und Blasen, in denen wieder einzelne oder aneinanderliegende Blasen (Schaumzellen) aus alkoholreicher oder wasserreicher Salzlösung verteilt sind. Dabei bilden sich zuerst Röhren parallel dem Umfang und parallel dem Radius der Tropfen in regelmässiger Verteilung, die dann später durch Grenzflächenspannung, Anschwellungen und Einschnürungen bekommen oder in einzelne kugelförmige Blasen zerfallen.

Diese Blasen können Wasser aufnehmen und aufquellen, oder Wasser abgeben an den umgebenden Alkohol und kleiner werden, oder zu Krystallmassen erstarren. An den mehr oder weniger deformierten Krystallmassen ist noch

*) G. Quinke, Annalen der Physik, Seite 1—43, 1902, 9.

**) Annalen der Physik, Band 12, Heft 2, Seite 314 u. f.

die ursprüngliche Gestalt der flüssigen Blasen und Schaumzellen zu erkennen, aus denen sie entstanden sind.

Ein Krystall kann bei seinem Entstehen die übersättigte Salzlösung im Innern einer Nachbarblase durch Kontakt zum krystallisieren bringen, die dann zu gleich orientierten Krystallen erstarrt. Eine Reihe Blasen kann auf diese Weise eine nach der andern in feste Krystalle übergehen, aneinanderhängende oder voneinandergetrennte, gleich orientierte Krystallmassen bilden.

Die Krystallskelette oder Tannenbäume entstehen aus ölartiger (konzentrierter) Flüssigkeit A und wässriger Flüssigkeit B mit Grenzflächenspannung an der gemeinsamen Grenze, indem die Flüssigkeit A hohle Röhren, Blasen und Schaumzellen in der Flüssigkeit B bildet. An die erstarrten und von strömender Flüssigkeit durchbrochenen Röhrenwände des Hauptstammes und der Seitenäste setzen sich die neuen, noch flüssigen Wände der Seitenäste oder Tannennadeln normal an. Bei schief angesetzten Seitenästen und Tannennadeln müssen die Wände aus ölartiger Flüssigkeit verschiedene Oberflächenspannung gehabt haben oder erstarrt sein, ehe die durch die Grenzflächenspannung bedingte Gleichgewichtslage erreicht war.

Gekrümmte oder schraubenförmige Krystalle sind aus Röhren oder Schaumzellen mit flüssigen Wänden von ölartiger Flüssigkeit entstanden. Die Wände oder der Inhalt der Röhren und Schaumzellen ist später zu Krystallen erstarrt, an denen sich noch die etwas geänderte Gestalt der Flüssigkeit erkennen lässt, aus der sie entstanden sind.

Trichiten aus Büscheln haarförmiger Krystallnadeln, hohlen Röhren mit Schaumzellen in den Wänden, ähnlich wie bei Sphärokrystallen scheiden sich aus einer Kugel oder Linse ölartiger Flüssigkeit, vielleicht durch Aufnahme kleiner Mengen fremder Substanzen, Röhren, Blasen oder Schaumzellen periodisch ab, parallel dem Umfang oder parallel dem Radius der Linse in regelmässiger Verteilung. Die Nadeln wachsen, indem sich an die Spitze der Nadel neue Substanz ansetzt.

Ein Salz bildet mit Wasser eine kleine Menge salzreicher Lösung A und eine grosse Menge salzärmerer Lösung B mit merklicher Oberflächenspannung an der gemeinsamen Grenze.

Die Krystalle entstehen aus einer *Galerte*, oder aus unsichtbaren Schaumzellen mit ursprünglich flüssigen Wänden aus ölarziger, salzreicher Flüssigkeit A, gefüllt mit salzärmerer Flüssigkeit B, welche beide später unter Wasserabgabe erstarren.

Wahrscheinlich beeinflussen kleine Mengen fremder Substanzen die Bildung und Neigung der Schaumwände aus ölarziger, salzreicher Flüssigkeit A und die Form der Schaumzellen. Krystalle sind erstarrte Schaummassen.»

Die Wände der Schaumkammern fand Quinke mit nur 0,0005—0,005 mm Dicke, die Zellen 0,0001—0,01 mm. Quinke bemerkt, dass er bei Gegenwart von reinem Wasser, auch ohne Alkohol Krystalle mit Hohlräumen ähnlicher Art erhalten hat und schliesst daraus, dass auch hier nahe der Oberfläche der festen Krystallmassen eine Oberflächenspannung der gemeinsamen Grenze zweier Flüssigkeiten gewirkt haben muss. — Inwiefern die Oberflächenspannung durch die Elektrizität des Eises im Wasser beeinflusst wird, bedarf noch näherer Untersuchung.

Nach dem Lippmannschen Gesetz*), dessen allgemeine Gültigkeit zwar noch bestritten, aber für einen gegebenen Elektrolyten und verschiedene Amalgame nachgewiesen ist, ist die Oberflächenspannung durch die Potentialdifferenz bestimmt.

Gewöhnlich geht man von der Annahme aus, dass die Oberflächenspannung teils durch die von Laplace eingeführten Anziehungen benachbarter Moleküle, teils durch galvanische Polarisierungen bestimmt sei. Nach dem Lippmannschen Gesetz ist auf die Annahme zu schliessen, dass die von Laplace eingeführten Kräfte elektrischer Natur seien, veranlasst durch Anziehungen zwischen Anionen und Kationen.

*) G. Lippmann, Ann. de phys. et chim. 5, Seite 504, 1875; 12, Seite 265, 1877.

Das Wachstum der Krystalle erklärt O. Lehmann*) durch die Ausbreitung der konzentrierten Salzlösung auf der Oberfläche der schon gebildeten Krystallflächen, welche die weniger konzentrierte Flüssigkeit auf dieser Oberfläche verdrängt; analog bei den flüssigen Krystallen.

In Bezug auf die Form der entstandenen Krystalle ist zu sagen nach O. Lehmann**) und Frankenheim und O. Lehmann***):

Krystallskelette oder Tannenbäume, gekrümmte und schraubenförmige Krystalle entstehen bei wenig veränderter Gestalt der konzentrierten Flüssigkeit; Büschel von Krystallnadeln oder Trichiten bei ruckweisen Flüssigkeitsströmungen; Sphärokrystalle aus um runde Kernblasen radial angeordneten Röhrchen.

Die Gestalt der Schaumwände hängt nach Quinke†) ab von der Erstarrungsgeschwindigkeit, Viskosität und kleinen Verunreinigungen. Die Richtkraft der Krystalle kann nach Lehmann††) durch Trübung beeinträchtigt werden, die Doppelbrechung der Mischung ist geringer als die der reinen Substanz. Die Richtkraft wird naturgemäss auch durch die Wassergeschwindigkeit beim Erstarren des Eises beeinflusst.

Was das milchige Aussehen des Grundeises anbetrifft, so ist zu bemerken, dass Aggregate von zahlreichen, verschieden orientierten Individuen mit freiem Auge betrachtet trübe erscheinen, auch wenn die Zwischenräume mit einer Flüssigkeit von gleichem mittlerem Brechungsexponenten erfüllt sind.

Dazu bemerkt O. Lehmann†††) ferner: Infolge der Störungen durch Wirbelbewegungen bei stärkerer Tempe-

*) Molekularphysik 1, Seite 355, 715, 1888.

Zeitschrift für Krystallographie 1, Seite 476, 1877.

**) Molekularphysik 1, Seite 355—357, 1888.

***) Pogg's Annalen, 111, Seite 28, 1860.

†) Annalen der Physik u. Chemie, Seite 1—34, 1902, 9.

††) Agnes Pockels Annalen d. Physik u. Chemie, No. 8, 1902, Leipzig.

†††) Annalen der Physik, Bd. 12, Heft 2, Seite 314 u. f.

raturdifferenz behalten aber diese linsenförmigen Krystalle ihre anfängliche Durchsichtigkeit nicht, sie erfüllen sich vielmehr mit zahlreichen Tropfen, welche Stellen mit gestörter Struktur sind etc.

Auf analoge Weise bilden sich durch schmelzende Eiskrystalle im Wasser Blasen und Schichten kühleren Wassers mit Grenzflächenspannung gegen das übrige Wasser und als Folge die Krystallisation.

Nach Tammann*) ist die innere Reibung des Eises verhältnismässig gering und nimmt mit der Annäherung an die Schmelzkurve rasch ab. Es ist die landläufige Meinung, dass ein krystallisierter Stoff bei Annäherung an seinen Schmelzpunkt erweicht, in dem Sinne richtig, dass die Viskosität mit Annäherung an die Schmelzkurve stark abnimmt.» Dieses Aufquellen der Krystalle beim Abschmelzen im Verein mit den Kapilaritätskräften und Regelation der unendlich vielen, kleinen Krystallblättchen verursacht das Verhalten gleich einer zähen Flüssigkeit. — Ist in einem Flusse die Eisstopfung durch Galerteis vollständig zu Stande gekommen, so ist sodann Unterkühlung des in ihm fein verteilten Wassers nicht absolut ausgeschlossen, aber nicht konstatiert worden.

Wenn nämlich eine tropfbare Flüssigkeit durch feine Ritzen langsam sickert, erleidet sie nach J. Thomson**) eine Ueberkältung, sodass also der geringste Anstoss den Gefrierprozess einleiten muss***). Hierdurch wird Wärme frei und das Wasser bleibt in seiner grossen Masse stets auf Null Grad, wie konstatiert. Da durch die auf solche Weise entstehenden Eisbarren und Eisstopfungen aus Oberflächen-, Treib- und Galerteis das Wasser des oberhalb liegenden Flusslaufes bis 5 und oft noch mehr Meter gestaut wird, wie es an der Narova regelmässig vorkommt, so ist unschwer einzusehen, dass dadurch leicht Unheil

*) Annalen der Physik und Chemie 1902, 1.

**) Transact Roy. Soc. Edinburg.

***) Günther, Handbuch der Geophysik, VI. Band, Seite 757, Stuttgart 1899.

herbeigeführt wird. Es bilden sich solche Eisbarren an der Narova fast alljährlich bei Omut, dort wo eine Stromschnelle das Treibeis über und unter eine anschliessende, an ruhiger Stelle mit grossem Flussquerschnitt gebildete Oberflächeneisschicht schiebt. Diese Stopfungen werden öfters durch Zivilarbeiter und durch Militär gesprengt und beseitigt, in der Weise, dass von unten herauf mit Sprengung eines Kanals begonnen wird, in welchem dann die gelösten Eisschollen einzeln abgeführt werden, ansonst sie sofort wieder zum Stehen kommen.

Solche Eisstopfungen durch Grund- und Oberflächeneis treten an bestimmten Stellen vieler Flüsse beinahe jeden Winter auf, namentlich eben dort, wo der Eisgang im Oberlauf zeitlich früher beginnt als im Mittellauf und wo das in Stromschnellen erzeugte und abtreibende Grundeis in grösseren Mengen unter eine unterhalb an stauer Stelle gebildete, feste Obereisschicht geschoben wird; sie sind öfters Veranlassung zu Ueberschwemmungen.

An manchen Orten «Oesterreich» sucht man solchen gefährlichen Eisstopfungen durch Artillerie beizukommen, indem dieselben im Entwicklungszustand von Uferbatterien aus mit Sprenggranaten beschossen werden, oft mit Erfolg.

Im allgemeinen ist es schwierig, diese Stopfungen durch Sprengschüsse zu beseitigen, namentlich wenn sie lediglich aus Grundeis bestehen, indem diese zähe Masse, kaum gelöst wieder fest aneinander klebt.

Wenn das Grundeis in festen grossen Schollen aufsteigt und abtreibt, so kann dasselbe an stauer oder seichter Stelle stehen bleiben und zu einer unebenen, brockigen Obereisschicht zusammenfrieren, ohne hierbei den Wassertransport zu stören.

Stets und überall ist indes beobachtet worden, dass auch in fliessenden Gewässern naturgemäss das Gefrieren zuerst, und gewöhnlich längere Zeit vor der Grund- oder Galerteisbildung, an der Oberfläche beginnt, indem sich, wie schon bemerkt, am Uferrand das Saum- und Randeis auf der Wasseroberfläche bildet und gleichzeitig der Fluss

an ruhigen, stauen Stellen eine Oberflächeneisschicht annimmt; dann folgt erst die Grundeisbildung. Bei lange dauernder, grosser Kälte werden die Flüsse auch an den Stellen grösserer Geschwindigkeit mit Obereis überdeckt; während an denjenigen Stellen, an denen wegen gar zu grosser Strömung eine Obereisschicht nie zustande kommen kann, die Grundeisbildung ihren Fortgang nimmt.

Auch andere Beobachter haben auf diese Tatsache hingewiesen, so z. B. Geistbeck*) in seiner «Beschreibung der Eisverhältnisse an der Isar und ihrer Nebenflüsse» u. a. m.

Eine den eben beschriebenen drei Grundeisarten sehr ähnliche Bildung findet sich auch in den oberen, der Frosteinwirkung ausgesetzten Schichten wasserzügigen Bodens. In Sibirien, wo der tiefere Erdboden das ganze Jahr gefroren ist, kommen ganze Schichten solchen Grundeises unter der bepflanzten Erde vor. Oft entstehen dadurch Frostbeulen, Aufblähungen, welche den Kunstbauten der sibirischen Bahn sehr oft gefährlich werden.

Die Ursachen zur Bildung sind auch dort die gleichen wie hier; je nach dem Vorherrschen dieser verschiedenen Ursachen, entsteht auch im Boden das «blättrige» oder das «körnige» Grundeis:

Ist z. B. genügend Wasser in sehr lockerem Boden vorhanden, so liegt die Möglichkeit vor, dass die erstarrten Wassermolekel sich orientieren und in gesetzmässige Form zusammentreten können. Ist nur spärlich Wasser vorhanden, so fehlt nach Erstarren desselben das Medium, in welchem sich die Krystallnadeln bewegen und orientieren können, oder aber das in geringer Quantität vorhandene Wasser gestattet wohl den Zusammentritt einzelner Krystalle zu Krystallgruppen, aber nicht genügend Freiheit und Raum zur gesetzmässigen Orientierung und Gruppierung. Man überblickt hier sehr deutlich die Analogie mit der Grundeisbildung im Wasser, wo bei der Bildung des «blättrigen Grundeises» einzelne zugeführte Krystalle an-

*) Jahresbericht der geographischen Gesellschaft zu München, X, Seite 1 ff.

schiessen und sich unter Einwirkung der ihnen inwohnenden Orientierungskraft gesetzmässig vereinigen; während sich anderseitig bei grossem Frost spontan ein Gemenge von Krystallen und Krystallgruppen auf den Gegenständen der Sohle anhäuft. Allen diesen Eisarten aber, gleichviel ob im Wasser oder im feuchten Boden sich bildend, fehlt zur vollständigen Verkittung, als der dritten Phase der Eisbildung, der hierzu erforderliche Zutritt überschüssiger Kälte, bezw. überschüssigen Wassers. Ueber die Beseitigung solcher Bildungen von Bodeneis auf der Sibirischen Bahn*), die oft sehr störend einwirken und bis 2 m tief in die Erde reichen, wird angegeben, dass sie durch die Absenkung des Grundwasserspiegels und Aufschichten schlechter Wärmeleiter auf den Boden — also Hebung der Frostgrenze über die Grundwasseroberfläche — herbeigeführt wird. Das Grundeis dagegen, welches im Meerwasser vorkommt und dort in tieferen Lagen ganze Schichten bildet, ist Galerteis und entsteht wie hier beschrieben: indem entweder durch Zuflüsse Wasser von tieferer Temperatur evtl. mit Eispartikeln vermenget zugeführt wird, oder aber letztere von der Wasseroberfläche bei Wellenbewegung in die Tiefe gelangen, dort unter Einfluss der höheren Temperatur und wohl auch des Salzgehaltes des Meerwassers schmelzen, dessen Wärme binden, Schaum und Galerte bilden und erstarren. (Kältemischung.) Beim salzhaltigen Wasser ist sodann Unterkühlung möglich.

4. *Resumé.*

Aus den vorstehenden Ausführungen ergibt es sich, dass für Wasserläufe, welche der Grundeisbildung unterliegen, je nach den örtlichen meteorologischen Verhältnissen, nach Beschaffenheit und Rauigkeitsgrad von Sohle und Ufer, nach Profilgestaltung und Vegetation, eine be-

*) Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, 6. Heft, Seite 111, 1902.

stimmte Grenze der Wassergeschwindigkeit und Tiefe besteht und bestimmt werden kann, unterhalb welcher Grundeisbildungen nicht mehr oder nur ganz unschädlich auftreten. Resümierend finden wir also in fließenden Gewässern, welche der Grundeisbildung unterworfen sind:

1. *Das blättrige Grundeis*, es entwickelt sich aus im Wasser treibenden Eiskrystallen auf der Flusssohle unter Einwirkung der Elektrizität und der Molekularkräfte in Befolgung des gesetzmässigen Krystallisationsprozesses.

2. *Das körnige Grundeis*, als mechanische Anhäufung grosser Mengen im Wasser treibender Eisnadeln und Krystallgruppen unter Einwirkung der Regelation, auch etwa als Zusammengruppierung von an der Oberfläche bei starkem Frost überkäliteten und durch kräftige Wirbelströmung rasch auf die Sohle geführter Eiskrystallgruppen.

3. *Das Galerteis* entsteht im Wasser selbst gewöhnlich, indem Oberflächen-Eispartikel, Grundeis oder Schnee in so grossen Massen, oft sogar unterkühlt, ins Wasser getrieben werden, dass dieses in seiner ganzen Masse auf Null Grad gekühlt wird, unter Einwirkung der nicht geschmolzenen Krystalle selbst krystallisiert und Galerte bildet.

Durch vielfache Experimente habe ich die für die Grundeisbildung wichtige Frage zu lösen gesucht, ob es möglich sei, dass ein Eisstückchen von Null Grad in Wasser von über Null Grad und unter Atmosphärendruck abschmelzend, im Innern eine Temperatur unter Null Grad annehmen könne durch Wärmeabgabe zur eigenen Schmelzung.

Zu diesem Zwecke benützte ich ein Thermometer mit kräftiger Kupferumhüllung und Ablesegenauigkeit von 0,005° C., das dem Drucke zu widerstehen vermochte, der beim Einfrieren in einen Eis-Würfel entsteht, und liess es einfrieren. Solche Eiswürfel, mit eingefrorenem Thermometer, von verschiedener Temperatur, brachte ich in Wasser mit Temperatur von 1° bis 50°, bei Zimmertemperatur 0°, zum Abschmelzen und es zeigte sich, dass das Thermo-

Alfa-Männ
übertragung
Wärme
zum Einfrieren
des Wasser!
Clausius!

meter. auf der Anfangstemperatur konstant blieb, bis die Eisschicht soweit abgeschmolzen war, dass das warme Wasser einen wesentlichen Teil des Metallzylinders des Thermometers berührte. Auch bei Temperatur unter Null Grad blieb diese konstant, so dass also die Wasserwärme zur Schmelzung verbraucht wurde und daher eine Temperaturerhöhung im Innern des Eisstückes nicht oder nur sehr langsam stattfand, dies namentlich in dem Falle, wo die Schmelzung energisch und in Wasser höherer Temperatur geschah. Bei Wassertemperatur von nur wenigen Graden, näherte sich die Temperatur im Innern des Eiskörpers successive 0° .

Die Anfangstemperaturen des Eiswürfels wurden gewählt von 0° bis -1° C.

Darin liegt nun aber doch ein Naturvorgang, dem bei der Grundeisbildung zweifellos unter sonst günstigen Umständen eine grosse Bedeutung zukommt. Wenn nämlich die treibenden Krystalle auf der Wasseroberfläche durch die Luft unterkühlt werden oder wenn Schneekrystalle in diesem Zustand in das Flusswasser fallen, so gelangen sie wohl an der Oberfläche in den Schmelzzustand und kühlen das Wasser nach und nach auf 0° ab, behalten aber, so lange sie als fest existieren, noch überschüssige Kälte genug in ihrem Kerne, um nach hinreichender Abkühlung des Wassers Krystallisation zu veranlassen. Dieser Vorgang ist ganz zweifellos sehr oft bei der Bildung des Galerteises, wie ich konstatieren konnte, tätig. Es kann derselbe auch öfters unter begünstigenden Bedingungen bei der Bildung des körnigen Grundeises mitwirken; wogegen aber bei der Bildung des blättrigen Grundeises, wo die äusserst feinen und unsichtbaren Krystalle sich sehr lange Zeit im Wasser aufhalten, dieser Einfluss offenbar stark herabgedrückt wird, da sonst durch diese zugeführte Kälte ja auch die einzelnen Krystallblättchen unter sich verkittet würden zu festem Eis. Man beobachtet auch wirklich beim körnigen Grundeise oft Weiterentwicklung des Krystallisationsprozesses an der Flusssohle, wengleich die spontane An-

häufung eine gesetzmässige Ausbildung meist verunmöglich. Die Blättchen bleiben klein und unregelmässig, werden aber zusammengekittet, wenn auch nur zu porösen Klumpen. Bei diesem Vorgange tritt sodann zweifellos der Einfluss der Erstarrungswärme hervor. Das gleiche Resultat habe ich erhalten, wenn ich unterkühlten Schnee in einen Kübel Wasser gab, das im Begriffe war, an der Oberfläche eine Eishaut zu bilden, also gefrierrecht war, indem der feinstaubige Schnee nach und nach unregelmässige fischschuppenartige Blättchen bildete, wie solche beim körnigen Grundeis gefunden werden. Die Entwicklung zu Eisblättchen aus dem Schnee wurde sehr stark befördert durch Bewegung des Wassers im Becken, was ich durch eine kleine unter Wasser betätigte Wasserpumpe (Spritze) besorgte. Diese Blättchenbildung ging vor sich, obschon das Wasser unter der Oberfläche noch eine Temperatur etwas über Null Grad aufwies, also selbst zur Bildung von Eiskristallen in der Masse nicht Veranlassung sein konnte.

Wir haben unter «Beobachtungen» bereits bemerkt, und kommen nunmehr darauf zurück, dass plötzlicher Temperaturwechsel von Tauwetter zu Frost spontane Galerteisbildungen zur Folge hat und es führt dieser Umstand oft zu grossen Störungen im Wassertransport in Gerinnen und bei Kraftanlagen. Nach obigem Experiment ist ersichtlich, dass die bei Tauwetter angenommene Wassertemperatur etwas über Null Grad geradezu schädlich und der Grundeisbildung förderlich ist, vorausgesetzt, dass nicht eine schützende Eisdecke den Einfluss der kalten Luft auf die Wasseroberfläche abschwächt und die Krystallbildung auf dieser letzteren selbst verhindert, oder aber gestattet, dass erstarrende Krystalle an der Eisdecke anschliessen, statt abzutreiben mit dem Wasser. Diese Tatsache kann durch Experimente sehr leicht wiederholt nachgewiesen werden, am besten wie oben mit Zuhülfenahme von Schneekrystallen. Im kühlen Wasser sehr nahe Null Grad, wird das in ihm treibende Grundeis weit besser und geregelter

abgeführt, als in Wasser von etwas höherer Temperatur, da letzteres dem Eise durch rasches Anschmelzen die zähen Eigenschaften verleiht.

Da die Wärme nur beim Uebergang zwischen Körpern höherer Temperatur Arbeit leistet, so muss in der Aufhebung der Temperaturdifferenzen als einer Zerstreung der Energie sehr oft das Mittel zur Verhütung der Störungen zu finden sein, wie wir später noch sehen werden.

Die Regelation im Wasser befindlicher Eiskörperchen wird durch Wassertemperatur etwas über Null Grad befördert, indem die Krystalle leichter anschmelzen. Die gleiche Regelation kann auch durch Druck erzeugt werden, welchen wir aber ebenfalls als Zwangsschmelzung betrachten können. Wir haben den Vorgang der Regelation aus der Literatur zu den Erklärungen der Grundeisbildung beigezogen und deren Vorhandensein durch viele Experimente erkannt, ohne für denselben irgend eine befriedigende Erklärung gefunden zu haben und es scheint mir notwendig zu sein, diesen Begriff nun zu verfolgen, zu erweitern und ebenfalls aufzuklären.

4. Neuer Begriff der Regelation. Man bezeichnet es als Krystallisationsprozess, wenn durch das Erstarren von Wasser Eis gebildet wird, welches gewöhnlich zu gesetzmässigen Blättchen (Sternen) zusammentritt.

Bei der Bildung des blättrigen Grundeises z. B. kann aber dieser Prozess nicht mehr als ein einziger zusammenhängender Vorgang betrachtet werden. Es ist zu unterscheiden das Erstarren der Wassermolekel an der Oberfläche und die spätere Entwicklung auf der Flussohle zum gesetzmässigen Krystallgebilde (Stern, Blättchen). Letztere nun ist der der Regelation analoge Vorgang, indem erstarrte Molekel erst nach einem bestimmten Zeitraum zusammentreten und zusammenfrieren, wie man sich auszudrücken pflegt, ohne dass dabei überschüssige Kälte Zutritt hat. Ist dies nicht der Vorgang der Regelation, das Zusammenfrieren von Eiskörpern im Wasser über Null Grad? Dort sind es Krystalle des ersten Entwicklungs-

stadiums, die reguliert werden, hier sind es fortgeschrittenere Bildungen, die durch das Anschmelzen zurückgeführt und durch das Erstarren wieder weiter entwickelt werden.

Wir haben beigelegt und bewiesen, dass die Entwicklung zu gesetzmässigen Blättchen unter Einwirkung von bedeutenden Kräften, der Richt- oder der Molekularkraft erfolgt; denn nur so ist es möglich, dass die 5 bis 10 mm im Durchmesser haltenden und 1 mm dicken rundlichen Blättchen in starker Strömung auf Gräser, Halme, Bürsthaare etc. senkrecht sich ansetzen, entwickeln und dabei der Energie der bewegten Wasserteilchen in grosser Strömung Widerstand leisten können. Ich habe gestützt auf bezügliche Experimente angeführt, dass diese Kraft elektrodynamischer Natur sein muss.

Ferner nahmen wir an, dass eine Verkittung der rundlichen Blättchen unter sich zur festen Eisschicht auf der Flusssohle nicht stattfinden könne, weil die Molekularkraft zu wirken aufhört, polarisiert wird, also Gleichgewicht eintritt, sobald rings um den Kräftepol Krystalle angeschossen sind und so die gesetzmässige Gestalt erreicht ist.

Heim*) hat zuerst die Tatsache konstatiert, dass die Regulation von zwei Eisstücken in ihrer Vollständigkeit abhängig ist von der gegenseitigen « Krystallographischen Orientierung » derselben, indem parallel gestellte unter Druck vollständig regulieren und beim Bruche *neben* der Regulationsstelle brechen, wogegen ungleichgestellte nicht vollständig regulieren und beim Bruche die Regulationsfuge wieder öffnen.

Hieran anschliessend sei noch bemerkt, dass man bei den Grundeisbeobachtungen folgendes konstatiert: Besteht in einem Gerinne Treibeis als Täfelchen einer oberhalb gebrochenen Oberflächeneisschicht und es legen sich in ruhiger Strömung die Täfelchen auf die Wasseroberfläche, so entsteht schon bei verhältnismässig geringer Kälte die feste Eisschicht daraus. Treten aber Grundeispartikel an

*) Handbuch der Gletscherkunde, Stuttgart 1885, Seite 330.

die Oberfläche, so braucht es längere Einwirkung grösserer Kälte. Erstere sind eben gleich, letztere dagegen ungleich orientiert.

Diese Tatsache führt also ebenfalls auf das Bildungsgesetz, und da diese gesetzmässige Bildung durch die Molekularkraft bewirkt wird, auf diese selbst zurück; denn wenn der Stellung und Richtung der Eiskörper bei der Regolation eine so grosse Bedeutung zufällt und die Wirkung ungeahnter Kräfte zeitigt, so ist einleuchtend, dass die Richtkraft, welche schon die kleinsten Körperchen in gesetzmässige Stellung brachte und der Strömung trotzend dort hielt und verband, hier zweifellos wieder in Tätigkeit tritt.

Damit lässt sich das Verhalten des im Wasser mit Temperatur etwas über Null Grad treibenden Eises erklären; damit auch die Versuche von Neuch*), welcher durch Experimente gezeigt hat, dass kalter, trockener Schnee mit Wasser von 0° C. fein bespritzt in Firn (körniger Schnee) übergeht; während derselbe bei Bespritzen mit Wasser über 0° C. unregelmässige Vereisung zeigt und also dort, wo das Wasser die Krystalle trifft, diese zum Zusammentritt veranlasst.

Die gesetzmässig orientierten Krystalle haben von Natur aus grosse Festigkeit, wogegen die plötzlich entstandenen Gebilde, z. B. aus unterkühltem Wasser, Orientierungsgelegenheit nicht haben und keine solche Festigkeit erlangen, sondern lediglich ein ziemlich regelloses Gemenge von Eispartikeln bilden.

Beim langsamen Abschmelzen von festem Eis werden nun zuerst die Schmelzfiguren blosgelegt, indem in erster Linie die Krystalle zwischen diesen Figuren ausgeschmolzen und ausgelaugt werden, während die Figuren selbst von grösserer Festigkeit sind und daher länger Widerstand leisten; es entspricht dies ihrer Orientierung bei der Eis-

*) Handbch der Gletscherkunde, Stuttgart 1885, Seite 330.

bildung, indem den zur Zusammenkittung der einzelnen vorher entstandenen gesetzmässigen Blättchen dienenden Krystallelementen der Raum in den Zwischenfugen und damit die Gelegenheit zur gesetzmässigen Orientierung fehlte, daher auch ihre geringere Festigkeit.

In Bezug auf die Orientierung hat Quinke*) folgendes konstatiert:

« Traf die Ecke eines neugebildeten Krystalles auf eine Nachbarblase mit ölartiger übersättigter Salzlösung A und berührte diese, ohne von ihr durch eine dünne Haut alkoholreicher Flüssigkeit B getrennt zu bleiben, so wurde durch Kontaktwirkung sofort die Krystallisation eingeleitet. — Die neue Krystallmasse ist ebenso orientiert, wie die aus der ersten Blase entstandene, braucht aber mit dieser nicht im Zusammenhang zu bleiben. Berührt die Ecke des neugebildeten Krystalles nicht die übersättigte Salzlösung A der Nachbarblase und bleibt von ihr durch eine sichtbare oder unsichtbare Haut von alkoholreicher Flüssigkeit B getrennt, so sind die aus der Nachbarblase entstandenen Krystalle unter sich gleich orientiert, aber anders als die Krystallmassen der ersten Blase.

Daraus, aus der zuerst von Heim konstatierten Tatsache und aus Tyndalls Schmelzfiguren, glaube ich für den Vorgang der Regelation die folgende neue Erklärung geben zu sollen:

Das schmelzende Eis kann im Innern eine Temperatur unter Null Grad haben, aber doch höchstens Null Grad. Das Wasser hat beim Abschmelzen an der Eisoberfläche in seiner dem Eise nächst liegenden dünnen Schicht höchstens Null Grad, ist also gefrierrecht oder gerade gesättigt und mit Oberflächenspannung gegen die anliegenden Schichten begabt. Durch Kontaktwirkung wird also die Krystallisation eingeleitet in dieser dünnen Wasserschicht. Die Verbindung beider Eiskörper bleibt eine lose, wenn beide

*) *Annalen der Physik und Chemie*, Seite 1—43, 1902, 9.

Eiskörper, und also auch die neu entstehenden Krystalle, verschieden orientiert sind, sie wird eine sehr kräftige, wenn gleiche Orientierung besteht.

Werden nun zwei Eisstückchen in gleicher Orientierung zusammengebracht, an deren Oberflächen durch Wärmezufuhr oder durch Druck die Schmelzfiguren etwas blosgelegt sind, und es berühren diese letzteren die Wasserschicht von Null Grad ohne durch eine warme Schichte (Haut) getrennt zu sein, so entsteht gleiche Orientierung auch in der Regelationsfuge. Die Verhinderung der Zwischenlagerung einer warmen Schicht geschieht am besten durch Druck auf beide Eisstücke, wobei unter Schmelzpunktserniedrigung allfällige Unebenheiten der Regelationsfuge noch abschmelzen.

Es ist so auch verständlich, dass zwei kalte harte Eisstücke nicht regelieren, ohne entweder durch Druck oder aber durch Wärmezufuhr an den zu regelierenden Oberflächen angeschmolzen zu werden.

Auf analoge Weise entsteht, wie gesagt, das Grundeis: Hat sich ein im Wasser treibender kleiner, vielleicht unsichtbarer Eiskrystall an einen durch Wasser und Eis genügend abgekühlten rauhen Gegenstand angesetzt und es treiben weitere Krystalle heran, als fest, Galerte oder im Moment des Flüssigwerdens, so wird durch Kontakt die Krystallisation eingeleitet und es entstehen auf diese Weise die gesetzmässigen Bildungen des blättrigen Grundeises unter Einwirkung der Molekularkräfte. Zur Fugenverkittung aber, die ohne Gesetzmässigkeit ist, tritt an Stelle der letzteren die überschüssige Kälte, welche hier fehlt, beim Oberflächeneis aber Zutritt hat. Werden dagegen die Treibeiskrystalle einzeln oder bereits in versammelten Gruppen durch grosse Strömung spontan zusammengetrieben und mit Kraft massiert, so entsteht das körnige Grundeis, indem die Orientierungsgelegenheit fehlt und die mit verschiedener Orientierung massenweise zusammengewürfelten Krystalle und Krystallgruppen auch verschiedene Orientierungen der Neukrystallisation veranlassen,

soweit eine feinere Krystallisation unter den vorliegenden ungünstigen Bedingungen überhaupt noch möglich ist. Kommen in Wildwassern etc. die Krystallnadeln unterkühlt auf die Sohle, so wird das Eis weisser und fester, infolge möglicher und konstaterter Nachkrystallisationen. Langsame Ausheilung von Krystallen kann dagegen bei jeder Grundeisart auftreten.

Bei der Bildung des Galerteises endlich, entstehe dieses durch grosse Massen unterkühlter Eispartikel und daheriger Abkühlung und Krystallisation oder durch Eispartikel, die in wärmere Wasserschichten gelangen und unter Einfluss der Grenzflächenspannungen zwischen diesen und den Schmelzgalerten Krystallisation hervorrufen, so entsteht aus den angeführten Gründen einfach eine Vermehrung des regellosen unzusammenhängenden Gemisches von Eispartikeln, die lose zu Schollen zusammenhängen.

Allen drei Spezien aber mangelt nun zur Weiterentwicklung zur festen Eisschicht die notwendige überschüssige Kälte.

In einem Gefässe mit Wasser, das dem Frost ausgesetzt wird, konnte ich leicht die Ausscheidung hohler Röhren und Blasen verfolgen, wie sie Quinke beschreibt. Veranlasst durch ein in ein solches Gefäss gehängtes Metallstück, welches die Kälte in die tiefern Wasserschichten leitete, ohne den Boden zu berühren, schieden sich an den Wänden und dem Boden hohle Röhren aus, welche alle als konvergierende Strahlenbündel nach dem Endquerschnitt des Metallstabes strebten, und auch von letzterem aus strebten solche Röhren den ersteren wie eine Blume entgegen. Beweis, dass die Oberflächenspannung verschieden temperierter Wasserschichten hierbei tätig ist.

Damit mögen die Ursachen über die Entstehung des Grundeises hinreichend besprochen und die Bildungen an Hand der Beobachtungen und Erfahrungen erläutert sein.

Soll die hier gegebene Theorie aber Anspruch auf einige Genauigkeit machen können, so müssen auch die früheren veröffentlichten Beobachtungen — soweit sie autentische

Angaben enthalten — an Hand derselben erklärt werden können. Zum Behufe dieser Untersuchungen ist es notwendig, einige wichtigere Publikationen hierüber zu erwähnen und das denselben Eigentümliche kurz zu besprechen: Mit Rücksicht darauf, dass ich mich mit der vorstehend gegebenen Erklärung der Grundeisbildung mit allen mir bekannten Theorien mehr oder weniger im Widerspruche befinde, ist dieser Vergleich unerlässlich.

II.

Aeltere Beobachtungen und Theorien.

Die bekannteren Grundeisttheorien lassen sich kurz wie folgt charakterisieren:

1. Theorien, welche das Grundeis als untergetauchtes Oberflächeneis erklären, das beim Eisgang an den Vorsprüngen der Sohle festgehalten oder abgestreift wird.

Deren Autoren sind:

Nollet 1743,
Mairan,
Zschokke Th. 1855.

2. Theorien, welche den Beginn des Gefrierens auf den Grund der Gewässer verlegen, und die annehmen, es werde das fließende Wasser durch seine Bewegung in seiner ganzen Masse bis auf oder unter Null Grad erkältet und es gefriere am Grunde wegen des bessern Anhalts für die Krystallisation und wegen der grösseren Ruhe zuerst, während die Bildung an der Oberfläche durch die Bewegung gestört sei.

Autoren: Merian 1823,
Arago 1833,
Mohr 1838,
Kohlmann 1854.

3. Theorien, welche annehmen, die Flussole werde durch Leitung vom Ufer aus, oder durch Ausstrahlung unter Null Grad erkältet und damit auch das die Gerölle und den Sand der Sohle durchziehende Wasser.

Autoren: Hales 1730/1731,
Desmarest 1781,
M'Keever,
Dr. Assmann 1888,
O. Krieg 1888.

4. Theorien, welche Unterkühlung der an der Wasseroberfläche entstandenen und treibenden Krystalle und, als Folge hiervon, deren direktes Anfrieren an der Sohle voraussetzen.

Autoren: Gai-Lussac,
Weber 1856.

5. Theorie, welche das Grundeis aus der Ausgleichung verschiedener Temperaturen benachbarter Wasserschichten erklärt.

Autor: Hugl 1829.

Bei dieser Verschiedenheit kann es nicht überraschen, dass — wie früher angeführt — noch die neuesten technisch-wissenschaftlichen Schriften Zweifel aussprechen über die gegebenen Erklärungen der Grundeisbildung und dass noch vielfach das Oberflächeneis als eine Folge der Grundeisbildung erklärt wird, statt umgekehrt.

Plot *) erwähnt, dass nach der Erzählung von Schiffern die Flüsse seiner Provinz vom Grunde aus zu gefrieren beginnen, welches Eis «Ice meers» genannt werde und oft mit Kies und Sand beladen aufsteige.

Hales **) beginnt mit der selbständigen Untersuchung. Er beobachtete an der Themse zwei Jahre hintereinander ausser dem oberflächlichen Randeis eine zweite Eisschicht am Grunde, welche schwammiger und weicher war und am Ufer sich mit ersterer vereinigte. Wasserleute an der Themse erzählten ihm, dass sich das Grundeis mit solcher Gewalt vom Boden hob, dass es auf der schmalen Kante

*) Plot, The Natural History of Oxfordshire, Oxford 1705, Seite 28.

**) Hales, Vegetable Statics, London 1731, Anhang Seite 398.

stehend $\frac{1}{2}$ bis 1 Fuss über die Wasseroberfläche hervorgeschossen sei, eine zeitlang in dieser Stellung geblieben wäre und sich dann auf die Seite gelegt hätte. Hales glaubt die Sache erklärt zu haben, indem er angiebt, dass der Grund Kälte genug erlangen könne, um das Wasser gefrieren zu lassen, welches dort langsamer fliesst als anderwärts. Von einiger Bedeutung ist, dass schon Hales auf den Einfluss des Windes aufmerksam macht und erwähnt, dass ein schwacher Nordost, kalt und der Strömung entgegengesetzt, als sehr fördernd für die Grundeisbildung erscheine.

Diese Beobachtungen haben nichts Aussergewöhnliches an sich.

*Scoppewer**) nimmt Anstoss, sowohl an den beiden beobachteten Eisschichten, wie auch an dem ihm nicht erklärbar erscheinenden Aufsteigen der plattenförmigen Grundeissschollen. Er glaubt, es liege hier nicht das vor, was man Grundeis nenne.

Meine Beobachtungen decken sich dagegen mit denjenigen Hales, wengleich ich seiner Erklärung der Grundeisbildung nicht beistimme.

*Nollet****) bekämpfte bald darauf Hales und zwar mit unverdientem Erfolge. Er beginnt mit einer Entschuldigung dafür, dass er sich die Mühe gibt, eine ernsthafte Widerlegung eines der gesunden Vernunft so widerstreitenden Volksurtheils, wie das über das Grundeis, zu unternehmen; nur die ihm häufig von bewährten Personen gemachten Gegenbemerkungen, die von Plot und Hales öffentlich ausgesprochenen Meinungen hätten ihn hierzu bewegen können.

«Er liess zu dem Ende der Begründung seiner vor-gefassten Ansicht im Winter des Jahres 1743, als bei einer Lufttemperatur von -12° C. die Seine in Paris

*) *Scoppewer*: Ueber das Grundeis. Brandenburg 1859.

***) *Nollet*, Memoire sur la manière dont se forment les glaçons qui flottent sur les grandes rivières, et sur les différences qu'on y remarque Histoire de l'académie royale des sciences, année 1743, page 51—66.

überfroren war, das Eis 3 oder 4 Fuss vom Ufer durchstechen und ein Stück Eis von ungefähr einem Quadratfuss Oberfläche auslösen, welches er 8 Zoll dick fand. Die untere Seite war nicht eben, wie das an dem Eise, welches sich auf stehenden Wassern bildet, zu sein pflegt; sie war auch nicht fest, wie der übrige Teil, sondern ungleich und schwammig, und hatte ganz das Ansehen von in feine Teile zerstoßenem Eise, welches unter einem festeren Eise sich angelegt hatte. An allen Stellen des Flusses, wo das Eis durchstochen wurde, zeigte sich dieselbe Erscheinung. Man bemerkte ferner, dass die gebildeten Eislöcher kein klares Wasser zeigten, wie die Löcher auf dem Eise der Teiche, sondern sie waren mit Stücken schwammigen, wenig festen Eises erfüllt, demjenigen ähnlich, welches an der Unterseite der Eisstücke bemerkt worden. Vergeblich suchte man die Oberfläche des Wassers von diesem losen Eise zu befreien, es erneuerte sich beständig, und die Arbeiter behaupteten, dieses lose Eis, welches sie bouzin nennen, bilde sich während der Nacht am Boden des Flusses, und werde den Tag über durch die Sonne an die Oberfläche gezogen. Deswegen seien die meisten herausgezogenen Stücke schmutzig, voll Erde, und enthielten zuweilen Grashalme.

Die Unreinigkeiten des losen Eises zeigten sich nicht nur am Ufer des Flusses, wie Nollet zuerst glaubte, sondern selbst an Stellen, wo dessen Tiefe 9 bis 10 Fuss betrug. Dennoch konnte er sich nicht « allen Prinzipien zuwider » überzeugen, dass das Eis der Flüsse am Boden sich ausbildet, umso mehr, da er mehrere Male und in verschiedenen Jahren, die Temperatur des Wassers der Seine in verschiedenen Tiefen untersucht hatte, als das Eis der Oberfläche eine Dicke von 2, 3, 6 bis 8 Zoll zeigte, und er niemals das Wasser bis zu dem zum Gefrieren erforderlichen Grade von Kälte abgekühlt fand. Es kam oft in der Tat diesem Grade sehr nahe, aber bloß nach mehreren Tagen eines strengen Frostes, und nicht, wenn das Eis der Oberfläche nur noch $\frac{3}{4}$ Zoll Dicke hatte.

Um das flockige, schwimmende Eis wegzuschaffen, liess Nollet an einer Stelle des durchbohrten Eises ein Fass ohne Boden einsetzen. Aus demselben konnten nun mit Leichtigkeit alle Eisflocken ausgeschöpft werden. Wenn er nun aber daraus den Schluss zieht, dass, weil er an dieser Stelle kein Eis von unten herauf in das Fass emporsteigen sah, es am Boden sich nicht bilden könnte, so ist er im Irrtum.

Scoppewer*) bemerkt zu diesem Experiment: An einer eng begrenzten Stelle, wie im Umfang des Fasses, kann natürlicherweise in einer gegebenen Zeit wenig oder kein Eis vom Boden sich ablösen und an die Oberfläche kommen; das allermeiste wird in höher gelegenen Stellen des Flusses sich gebildet haben. Ebensowenig kann die folgende Bemerkung, welche nach Nollet allein hinreichen soll, die Gegner zu widerlegen, aus der angeführten Ursache auch nur vom geringsten Gewichte sein: «Wenn es wahr ist, dass das Grundeis vom Boden kommt», sagt Nollet, «sollten die Unreinigkeiten, die es mit sich führt, nicht dem Boden angehören, an welchem es gebildet sein soll, und über dem es schwebt, wenn man es herausfischt?» Nollet unterscheidet das Grundeis von dem gewöhnlichen Eise dadurch, dass es weniger eben und glatt, und weniger durchsichtig, sondern meist milchartig sei, und das letztere rührt, nach seiner Meinung, von der unregelmässigen Vertreibung der Luft her, welche sich nicht wie beim stillen Gefrieren in einzelnen deutlichen Blasen sammeln kann.

Die Erklärung über die Bildung des Grundeises glaubt Nollet damit abzutun, dass er sagt, es bestehe aus nichts anderem als aus Eisstücken, die aus den Nebenflüssen kämen, wo bei Mühlen u. s. w. die obere Eisschicht vielfach zerstoßen würde.

Alle Beobachtungen und auch die Temperaturmessungen Nolllets sind zweifellos richtig, sie stimmen denn

*) Scoppewer: Ueber das Grundeis, Brandenburg 1859.

auch vollständig mit den meinigen überein, wonach also das Grundeis bei Wassertemperatur über 0° sich bildet; unrichtig sind aber die hieraus gezogenen Schlüsse.

Die «Blättchenbildung» an der untern Fläche der Obereisschicht, welche dieser das von Nollet angeführte unregelmässige Aussehen gibt, haben wir bereits besprochen. Es ist dies eine Eigentümlichkeit bei der Obereisbildung fliessender Gewässer, während bei stehenden Gewässern die Obereisschicht an der untern Fläche mehr oder weniger glatt ist. Dies beweist wiederholt, dass das fliessende Wasser der Eisbildung hinderlich ist und der Molekularkraft hierbei eine viel grössere Bedeutung beikommt, als bei der Eisbildung auf dem ruhenden Wasser. Das im Wasser treibende flockige Eis, welches Nollet in den obern Wasserschichten unter der Obereisdecke fand, war Grundeis, das weiter oberhalb im Flusse, da wo dieser keine feste Eisdecke angenommen hatte, aufgetrieben war und mit dem Wasser als Treibeis talwärts und unter der fraglichen Obereisschicht durchgeführt wurde. Denn unter einer kräftigen Obereisschicht bildet sich sehr selten Grundeis, was auch Scoppewer übersieht.

Dass Nollet unter einer 8" dicken Obereisschicht auf den ersten Versuch kein Grundeis findet, ist nach meinen Beobachtungen ganz natürlich und berechtigt keineswegs dazu, das Grundeis einfach zu leugnen. Das milchfarbige Aussehen des Grundeises rührt — wie ebenfalls besprochen — davon her, dass die Zwischenräume der an sich glasharten und durchsichtigen Blättchen des Grundeises von Wasser durchzogen werden. Auch das Eis der Gletscher zeigt die gleiche Farbe, dort wo durch die Bewegung Haarrisse entstehen, in welche das Wasser sickert*).

Als ganz richtig zitiert Nollet, dass grosse Ströme nur vom Ufer aus gefrieren können, so dass man das Gefrieren verhindern würde, wenn man die Eisbildung am Ufer hindern könnte. Hieraus hätte er schliessen können,

*) Homberg, l'histoire de l'Académie 1707, page 9.

dass das gegen die Strommitte in grosser Geschwindigkeit erstarrende Eis gewöhnlich nicht, wie er annimmt, in Stückform, sondern in kleinen Krystallpartikeln und Nadeln vom Wasser abgeführt wird; denn nur das Gefrieren zu einer festen Schicht könnte vom Ufer aus verhindert werden, nicht aber das Erstarren der Wassermolekel zu Krystallen.

Aus allem geht hervor, dass die erwähnten Arbeiter Nollets einer richtigen Erklärung weit näher waren, als er selbst und dass er statt nach der Wahrheit zu suchen, seine vorgefasste Meinung stützen und aussprechen wollte, und leider hatte dieser Irrtum, wie Professor Merian*) in Basel klagt, allgemeine Annahme bei den Physikern gefunden.

*Mairan***), ein Nachbeter Nollets, gibt für den Ursprung der Erscheinung, welche Grundeis genannt wird, folgende Erklärung: Es gibt Stellen im Flusse, an denen das Wasser auf so gleichmässige Weise fliesst, dass die einzelnen Teile vermöge ihrer gemeinsamen Geschwindigkeit gegeneinander in relativer Ruhe bleiben. Diese Stellen überziehen sich bei strenger Kälte mit einer zarten Eishaut (*premier glaçons tendre et mince*), welche weiter schwimmt, sich dabei, wenn die Bedingungen eine zeitlang sich gleichbleiben, verdickt und endlich in Schollen zerbricht; oder welche, was das gewöhnlichere sein mag, an bewegteren Stellen in kleinen Stücken zerbröckelt, die sich wegen ihrer rollenden Bewegung nicht vereinen, sondern sich gegenseitig nur zerreiben.

Im übrigen schliesst Mairan sich Nollet an.

Gegen die Beobachtungen Mairans ist nichts einzuwenden, nur kann man nicht den Vorgang an gewissen lokalen Stellen eines Flusses einfach verallgemeinern. Hätte Mairan, der mit seinen Beobachtungen auf dem richtigen Wege war, den Vorgang genau weiterverfolgt, so würde

*) Meissner's Annalen 1824, II. Band, 1. Heft, Seite 58—71.

**) de Mairan, dissertation sur la glace, insérée dans le recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie de Bordeaux, tome I, page 77.

er auch wirkliches Grundeis getroffen und damit den Irrtum Nollets wohl bald erkannt haben.

Desmarest *), Mitglied der Akademie der Wissenschaft, beobachtete 1780, zufällig aufmerksam gemacht, im südlichen Frankreich, als bei lebhaftem Nordwind plötzliche Kälte eintrat, dass in dem Flüsschen Déome, in der Nähe von Annonay in Languedoc, zuerst vom Rande aus in 2 bis 3 Fuss Tiefe, später auch mitten im Flusse, wo derselbe einen sehr starken Lauf hatte, schwammige Eismassen entstanden, in dem sich der Rand der Sohle mit Eis verband, welches ebensoviel Hüllen (*cellules*) bildete, als es Sandkörner gab.

An der Stelle, wo das Wasser über nackte Felsen floss, bemerkte Desmarest niemals eine Spur von Grundeis. An den sandigen Stellen der Sohle bildete es sich rasch und erreichte an einigen Stellen eine Dicke von 2 Fuss. Nach Desmarest war es der untere, den Boden berührende Teil, wo die Eisschollen sich allmählich vergrösserten. Das bereits gebildete Eis wurde fortwährend durch die Expansivkraft des sich bildenden Eises gehoben. Diesen Vorgang beachtend, habe ich, sagt Desmarest, gesehen, dass gewisses Grundeis sich in einer einzigen Nacht um 5 bis 6 Zoll *gehoben* hatte. An einigen Stellen bildete es durch den täglichen Ansatz Eisinseeln. Dabei war der Himmel dicht bedeckt und die Kälte ziemlich konstant.

Bei Eintritt von Tauwetter lösten sich die Eismassen, wie Desmarest angibt, entweder durch die grössere Geschwindigkeit des anschwellenden Flusses oder durch die Wärme des Wassers. Es liessen sich darauf am Eise die Schichten unterscheiden, welche von Nacht zu Nacht dazufroren. Als sich dieselbe Erscheinung ein zweites Mal wiederholte, trat bei Tage Sonnenschein ein und es wurde

*) Desmarest, précis d'un mémoire sur le lieu et les autres circonstances de la formation des glaçons spongieux que les rivières charient. (Eu à la séance publique de l'académie des sciences le 14 avril 1781.) Journal de physique, tome XXII, part. I., 1783, janvier, page 50—60.

während dieser Zeit das Frieren vermindert, ja zum Teil ganz verhindert.

Zur Erklärung des Vorganges sagt Desmarest, dass das zwischen den Sandkörnern des Sandes der Flüsse zerstreute Wasser eine zur Aufnahme der äussern Kälte hinreichende Ruhe hatte, und dass ausserdem die Sand- und Erdteile an jenen Stellen die Erstarrung des Wassers begünstigen, welche dort eine noch geringere Temperatur als das Eis erreichen könnten, also unterkühlt wären.

Diese angeführten Beobachtungen haben nichts aussergewöhnliches an sich. Wer die Grundeisbildungen wirklich, und nicht nur vom Hörensagen kennt, nimmt daran keinen Anstoss. Eigentümlich will es scheinen, dass die nackte Felssohle kein Grundeis annahm. Allein wenn man bedenkt, dass die Wassergeschwindigkeit als sehr gross angegeben wird, und gross genug war, um jede Geschiebeablagerung an dieser Stelle zu verunmöglichen, so ist es unschwer einzusehen, dass auch Grundeisansetzung ausgeschlossen war.

Wenn das über die Felsen strömende Wasser die Kraft besass, die Gerölle (Geschiebe) wegzutragen, so hatte es auch die Kraft, die Ansetzung von Grundeis zu verunmöglichen, obschon alle Bedingungen hierzu günstig gewesen sein möchten. Meine Messungen und Beobachtungen beweisen, dass auch die Felssohle Grundeis annehmen kann, dass aber zu grosse Geschwindigkeit auch die Bildung des körnigen Grundeises verhindert. Sobald die Energie des bewegten Wassers grösser als die Kohäsion und Adhäsion des Grundeises ist, so ist die Grundeisbildung unmöglich, und zwar trifft dies natürlicherweise auf nackter glatter Felssohle früher zu, als auf Geschiebeablagerungen.

Desmarest glaubt sodann, das sich bildende und bei bedecktem Himmel täglich mehrende Grundeis wachse von unten auf und es sei die Expansivkraft des sich auf dem Boden bildenden Grundeises, welche den Auftrieb bewirke.

Dies ist ein Irrtum. Das Grundeis erhebt sich, infolge seines geringeren spezifischen Gewichtes, sobald die Gerölle infolge Temperaturzunahme die direkt anhaftenden Grundeiskristalle an ihrer Oberfläche zu schmelzen vermögen. Hierzu genügt die Strahlungswärme der Sonne sogar bei grossem Frost; auch bei vollständig bedecktem Himmel, verbunden mit Tauwetter, kann schon die Wassermärmezunahme allein dies bewirken.

Wir haben gesehen, wie einige Gesteinsarten das Grundeis früher abtreiben lassen als andere, da sie für die brechbaren Strahlen, für welche das Wasser durchlässig ist, grössere Aufnahmefähigkeit besitzen als jene, und dass dadurch von Geröllgruppe zu Geröllgruppe eigenartige Eisbrücken entstehen können, indem sich eine grössere schichtförmige Eisscholle in der Mitte erhebt, an den Enden aber noch gehalten wird, sodass nachkommende feste oder flüssige Eiskristalle die entstandene Höhlung wieder unterfüllen können. Auch Gräser können solche Stützpunkte einer im Auftrieb begriffenen Eisplatte sein. Solche Beobachtungen gehören zu oft vorkommenden Tatsachen, wenn sie auch nicht Regel zu sein brauchen, und es ist notwendig beizufügen, dass Desmarest nur eine ganz lokale Stelle eines einzigen Flusses beobachtete, also allgemeine Schlüsse nicht ziehen durfte.

Uebrigens sagt Desmarest, dass die Schichten während der Nacht dazugefrozen seien und meine Erfahrungen bei den Eisbeobachtungen lassen mich vermuten, dass Desmarest nicht während der Nacht beobachtete, sondern am Morgen sich wieder einstellte. Dann ist aber sein Irrtum erklärlich, denn das zugewachsene Grundeis von heute und gestern ist nicht verschieden; das Wachstum aber meist unsichtbar.

Die bei bedecktem Himmel durch den täglichen Zuwachs während der Nacht auf dem Eise entstandene Schichtbildung rührt davon her, dass die gebildete Grundeisschicht sich an der Oberfläche über Nacht etwas durch die KrySTALLISATION verfestigte, bis am frühen Morgen die Ab-

kühlung und die elektrische Ladung soweit fortgeschritten ist, dass sich ein neuer Ansatz darüber lagert. Letzterer Ansatz kann, wie wir gesehen haben, sich direkt bilden, aus Obereisnadeln, ja sogar aus tags zuvor an oberhalb gelegenen Flussstellen aufgetriebenem Grundeise bestehen. Es ist hier beizufügen, dass Desmarest nicht konstatierte, wie diese Schichten sich nachts zu den bereits vorhandenen dazulagerten, ob von unten oder von oben. Hätte er auf die vorhandene Eisschicht am Abend etwa Steine aufgelegt, so würde er bald seine irrthümliche Verallgemeinerung etwa einer einzelnen lokalen Beobachtung «die Unterfüllung von durch den Auftrieb entstandenen Eisbrücken» eingesehen haben. Auch die Verschiedenheit der Temperatur des Wassers und der Eisnadeln bei Tag und bei Nacht spielt hierbei eine Rolle, da bestehendes Grundeis sich über Nacht weiter entwickelt und überhaupt das bei Nacht erzeugte Eis weisser wird.

Schon Desmarest unterscheidet zwei Arten von Eis, das schwammige und das kompakte; das erstere sei die Grundlage für alles Eis, das auf der Oberfläche der Flüsse treibt, das letztere bilde sich aus dem ersteren während des Treibens, und er glaubt, dass dies unbedingt die Grundlage der festen Obereisdecke bilde. Desmarest beobachtete offenbar blättriges und körniges Grundeis, und weil letzteres in grossen Massen abtreibend stehen bleiben, und ausnahmsweise, regelierend und erstarrend, eine feste Obereisdecke bilden kann, so glaubte er auch hier, es sei nun dies die Regel.

Desmarest hat richtig beobachtet, aber ebenfalls zu wenig, um in das Wesen der Grundeisbildung tiefer einzudringen.

*Brauns**), Amtmann auf der Halbinsel Wilhelmsburg bei Hamburg, bestätigt die Beobachtungen der Fischer, dass Netze, Aalkörbe, Anker u. dgl. sich am Grunde der Gewässer mit Eis bedecken, und sagt, durch Versuche gefunden zu

*) Hannoverisches Magazin 1783, No. 20—22.

haben, dass Hanf, Wolle, Haare, vorzüglich Moos und Baumrinde, diejenigen Körper seien, welche sich am schnellsten mit Eis bedecken. Bei den Metallen würde Zinn den ersten, Eisen den letzten Rang in Bezug auf Grundeisbildung einnehmen.

Diesen Beobachtungen ist nichts beizufügen.

*Knight**) beobachtete die Grundeisbildung im Jahre 1816 an der Temse in Herfordshire, wo das Wasser aus einem oberen grösseren Becken durch ein Wehr in einen engen Mühlkanal fliesst und ein Teil über das Wehr in den Fluss abfällt, der hie und da durch Felsspitzen und grosse Steine verengt ist, wodurch Strudel, starke Aufstauung und Abfälle gebildet werden. Der Fluss hatte nur geringe Tiefe und ein kiesiges Bett.

An der Oberfläche des stehenden Wassers im oberen Bassin entdeckte das Auge Millionen schwimmender Eisnadeln. Weiter hinab, nach dem Falle in den eigentlichen Fluss, waren die Steine des Grundes mit einer glänzenden silberweissen Substanz überzogen, die, näher untersucht, aus zusammengefügteten, unter allen Winkeln, wie beim Schnee, sich kreuzenden Eisnadeln bestehend, gefunden wurde. Längs den dem Strom gegenüberliegenden Seiten war dieses schwammige Eis in grösster Menge auf jedem Stein abgesetzt. Nur sehr dicht am Ufer hatte es die gewöhnliche kompakte Konsistenz des Eises. Uebrigens war der Fluss an seiner *Oberfläche* blos an einigen Stellen am Ufer gefroren, wo das Wasser keine merkliche Bewegung hatte.

Auch diese Beobachtungen zeigen nichts, das nicht schon durch meine Beobachtung und Erörterung erklärt worden wäre.

Der gleichen Veröffentlichung ist zu entnehmen:

Am 11. Februar 1816 beobachteten die Brücken- und Wegebaumeister, welche sich in Strassburg aufhielten, von

*) 106. Band der Philosophical Transaction; vergleiche Scoppewer, Brandenburg a. H., 1859, Seite 10.

der Brücke von Kehl herab, dass im Bette des Rheines an den Stellen, wo Steine oder andere hervorspringende Gegenstände lagen, sich schwammiges Eis gebildet hatte, welches jeweils gegen 10 oder 11 Uhr morgens in die Höhe stieg. Die Temperatur der freien Luft habe an diesem Tage — 12° C., das Wasser 0° aufgewiesen.

*Merian**) beschreibt — einige frühere Veröffentlichungen zitierend — das blättrige Grundeis und bemerkt, dass zu dessen Bildung eine anhaltende, mehrere Grade unter Null stehende Lufttemperatur erforderlich sei, und dass nach allgemeiner Bemerkung ein kalter, dem Laufe des Stromes entgegengesetzter Wind die Bildung ungemein befördere. Er spricht die Ansicht aus, dass das *Grundeis sich am Grunde der Gewässer bilde*, schon die Benennung «Grund-eis» zeige dies an.

Wenn man nun bedenkt, wie fein die Natur die glasharten Eisblättchen des blättrigen Grundeises aus kleinen sich orientierenden Krystallen gesetzmässig zusammensetzt, mit Grashalmen und Wolle- etc. Durchdringungen eingehen lässt, und aus Merians Beschreibung sich ergibt, dass er gerade diese Spezie von Grundeis im Auge hatte, so kann man seiner Ansicht, die keine eigenen Messungen zur Stütze hatte, sehr wohl bedingungsweise beistimmen, ob- schon er auch die ursprüngliche Erstarrung auf die Sohle verlegt.

Indem er sodann seine eigene Beobachtung anschliesst, schreibt er:

«Der St. Alban-Teich, ein durch Basel geleiteter Kanal des Birsflusses trieb häufig Grundeis. Zur Zeit der Beobachtung, im Monat Januar 1823, führte der Rhein hingegen keines. Einige Zeit vorher hatte das Umgekehrte stattgefunden. Das Wasser war äusserst klar, so dass auch an Stellen, wo die Tiefe des Kanals drei und mehr Fuss betrug, die Gegenstände am Grunde sich deutlich

*) Peter Merian, Professor in Basel; Einige Bemerkungen über das Grundeis (vorgelesen in der naturforschenden Gesellschaft Basel, 8. Nov. 1823). Meissners Annalen 1824, II. Band, 1. Heft, Seite 58—71.

unterscheiden liessen. Der Boden wird hier durch gerollte Steine gebildet. An jeder Stelle nun, wo irgend eine Hervorragung am Grunde zu bemerken war, an den tiefern Stellen des Wassers, wie an den weniger tiefen, hatte ein Büschel losen Eises sich angesetzt, der von weitem einem Baumwollenflocken zu vergleichen war. An mehreren Stellen war beinahe der ganze Boden mit solchen Flocken überzogen. Zuweilen lösten sich dieselben ab und stiegen im strengfliessenden Wasser allmählich an die Oberfläche empor. Fischte man dieselben heraus, so zeigten sie ganz dieselbe Beschaffenheit zusammengehäufter rundlicher Eisblättchen, wie das Grundeis, was häufig an der Oberfläche schwamm; es bleibt also kaum zu bezweifeln, dass nicht auch das letztere auf ähnliche Weise gebildet worden und erst durch Ablösung vom Grunde an höhern Stellen des Flusses auf die Oberfläche gekommen sei. Die eigentümliche, gleichförmige Anordnung des Eises am Grunde lässt der Vermutung keinen Raum, dass dasselbe erst von der Oberfläche auf den Boden gesunken sei.

Die natürlichste Erklärung der Sache ist wohl die folgende: Die fliessenden Wasser kühlen sich im Winter zwar vorzugsweise an der Oberfläche ab, ihre beständige Bewegung, zumal wenn noch ein widriger Wind zu Hülfe kömmt, mengt aber die Wasser der Oberfläche und die des Grundes beständig durcheinander, des geringen Unterschiedes des spezifischen Gewichts ungeachtet. Die Temperatur des Grundes und der Oberfläche, selbst bei ziemlich tiefen Strömen, kann daher keine erheblichen Verschiedenheiten zeigen. Die hervorragenden festen Körper am Boden bieten aber für das sich bildende Eis einen vorteilhafteren Ansetzungspunkt dar, als die beständig sich bewegende Oberfläche, und wenn man weiss, wie viel es bei Krystallisationen auf solche Ansetzungspunkte ankömmt. Das genugsam erkältete Wasser fängt daher am Grunde an Eis abzusetzen, vorzugsweise an denjenigen Stellen, wo eine vorliegende Erhabenheit vor der Gewalt des Stromes schützt. Die immerwährende Bewegung im

Innern hindert aber, wie in bewegten anschliessenden Salzaufösungen, die Ausbildung grösserer fester Massen, und es entstehen daher blos Anhäufungen kleiner, unvollständig ausgebildeter Eisblättchen. Sind diese Anhäufungen endlich zu grösseren Massen angewachsen, so reissen sie sich, infolge ihrer grösseren spezifischen Leichtigkeit, oder infolge der Gewalt des Stromes vom Boden los und erheben sich an die Oberfläche, oft noch Teile des Bodens in sich schliessend, denn bekanntlich trifft man nicht selten Sand, kleine gerollte Steine, Schlamm und andere Gegenstände am Grundeis haftend an ».

Die so gegebenen Beobachtungen sind zweifellos richtig, wenn auch, wie bemerkt, an einer Stelle beobachtet wurde, die nur das blätterige Grundeis entstehen liess, und wenn die Beobachtungen weit ausgedehnt und mit genauen Temperaturmessungen verbunden worden wären, hätte auch eine befriedigendere Erklärung sich finden lassen, ohne sich einfach auf *genugsam* erkältetes Wasser und dessen Erstarren in grössere Ruhe hinter einer schützenden Erhabenheit der Sohle stützen zu müssen.

Hätte also Merian selbst genaue Temperaturmessungen vorgenommen oder denjenigen von Nollet Glauben geschenkt, so hätte er offenbar eingesehen, dass die Erstarrung des Tiefenwassers nicht die Ursache der Grundeisbildung sein kann, indem letztere schon bei Temperatur desselben von über Null Grad auftritt. Wenn er dazu noch die mikroskopisch feinen im Wasser treibenden Eiskrystalle der nicht zustande gekommenen Obereisschicht betrachtet hätte, so hätte auch die genaue Erklärung nicht ausbleiben können.

Es verdient hier immerhin bemerkt zu werden, dass Merian der erste war, der die oben genannte Theorie aufgestellt hatte, obschon dieselbe in die Lehrbücher übergegangen, Arago zugeschrieben wurde, der sie 1833 etwas modifiziert wiederholte und durch Versuche zu erklären suchte.

Desmarest, welcher schon 1781 dieser Theorie nahetrat, nahm bekanntlich an, das im Sand zerstreute Wasser

nehme zufolge seiner Ruhe die äussere Kälte an, werde also mitsamt der Sohle unterkühlt, was aber ebenfalls ein Irrtum ist.

*Hugi**), Präsident der naturforschenden Gesellschaft zu Solothurn, ist meines Wissens der Physiker, welcher zuerst die Bildung des Grundeises im grössten Massstab gesehen hat. Seine ersten Beobachtungen sind vom Jahre 1827. Vom 2. bis 5. Februar dieses Jahres ging die Aare bei Solothurn mit Eis. Am 15. war sie offen. Am 16. floss sie ruhig und ihr Wasser war vollkommen klar. Am nämlichen Tage, bei Ostwind, stieg 60 Fuss unterhalb der Brücke und auf einer Fläche von 500 Quadratfuss unaufhörlich eine Fülle grosser Eisschollen aus dem Grunde des Flusses in die Höhe. Ich muss hinzufügen, denn dieser Umstand bestätigt, was Hales sich von den Bootsleuten auf der Themse erzählen liess, dass die meisten Eisschollen vertikal ein bis zwei Fuss über die Oberfläche emporstiegen, einige Zeit in dieser Stellung blieben, dann sich legten und horizontal fortschwammen. So ging dann von diesem Orte ab der Fluss mit Eis.

Nach Verlauf einiger Zeit wurden die Eisschollen seltener; sie hatten sich aber in dem Masse vergrössert, dass mehrere von ihnen, wiewohl sie mit dem einen Ende vertikal zum Wasser hinausragten, mit dem andern noch auf dem Boden des Flusses ruhten, und sehr lange in dieser Stellung beharrten. Dieses Schauspiel dauerte etwa zwei Stunden.

Von der Brücke ab fliesst die Aare mit grosser Schnelligkeit auf einem etwa 20 bis 30° geneigten Bett, welches hie und da ganz steinig ist**). Ueber der Stelle, wo sich

*) *Hugi*, Notice sur la glace du fond des eaux courantes. Bibliothèque universelle des sciences, belles-lettres et arts, XLVme année, tome XLI, page 201—213.

***) Es handelt sich hierbei um die mittlere Brücke in der Stadt Solothurn, die sog. „Wengibrücke“. Damals eine hölzerne Brücke auf 5 Pfahljochen; seit Ende der 70er Jahre umgebaut und durch eine Eisenkonstruktion auf 2 Steinpfeilern ersetzt. Die Stromverhältnisse, die siedende und sprudelnde Bewegung, sind aber geblieben bis heute.

die Eisschollen erhoben, bildete sich in dem schon ruhig gewordenen Wasser beständig eine Art Strudel.

Die Temperatur in der Luft war $-5,7^{\circ}$ C., nahe am Wasser $-4,9^{\circ}$ C., an der Oberfläche des Flusses selbst $+2,1^{\circ}$ C., im Wasser an den Brückenbogen, wo sich kein Eis bildete, $+3,0^{\circ}$, am Grunde, von dem sich das Eis erhob, 0° C.

Die zweite Beobachtungsreihe machte Hugi im Februar 1829. Am 11. ds. Mts. war die Aare bei Solothurn überall frei von Eis. Seit mehreren Tagen war die Temperatur der Luft $+4$ bis $+6^{\circ}$ C. In der Nacht vom 11. zum 12. Februar fiel sie plötzlich auf -14° C. Am 12., bei Sonnenaufgang, fing der Fluss an, mit grosser Hastigkeit Eis zu treiben. Hinzugefügt werden muss, dass der Fluss nirgends am Ufer, selbst nicht an geschützten Stellen, wo das Wasser vollkommen ruhig war, eine Eisschicht auf seiner Oberfläche zeigte. Man konnte also nicht sagen, dass sich Eisschollen vom Ufer losgerissen hätten. Ebenso unbegründet würde die Voraussetzung gewesen sein, dass sie von einer stromaufwärts befindlichen festen Eisdecke gekommen wären, denn zu Altrey, $1\frac{1}{2}$ Meilen oberhalb Solothurn, ging der Strom fast nicht mit Eis. Uebrigens begannen die Eisschollen bald sich unterhalb der Brücke zu zeigen, an derselben Stelle, wo sie 1827 erschienen waren. Gegen Mittag sah man sie sogar Eisinseln mitten im Strome bilden. Am 13. waren deren 23 vorhanden. Die grössten hatten 100 Fuss im Durchmesser. Sie waren ringsum frei, widerstanden einem Strome, der sich mit einer Geschwindigkeit von 200 Fuss in der Minute bewegte, und dehnten sich auf einen Raum von einer Achtelmeile aus. Hugi fuhr in einem Boote an dieselben heran, und fand ihre Oberfläche bestehend aus einer 2,5 bis 4 Zoll dicken Schicht von kompaktem Eis, die auf einer 9 bis 12 Fuss tiefen, auf dem Boden des Flusses festsitzenden Eismasse, von der Gestalt eines umgekehrten Kegels, ruhte. Diese Kegel bestanden aus einem halbgeschmolzenen, gallertartigen, wie Hugi sagt, dem Frosch-

laich ähnlichen Eise, das unten weicher als oben war, und in allen Richtungen mit den Rudern leicht durchstossen werden konnte. An die Luft gebracht, verwandelte sich die Masse dieser Kegel rasch in körniges Eis, dem am Grunde des Wassers gebildeten ähnlich.

Zur Zeit der Beobachtung war die Temperatur in der Luft, 28 Fuss über der Aare, -11° C., 4 Fuss über derselben $-9,4^{\circ}$ C., im Wasser in 2 Zoll Tiefe, 0° C., in 5,5 Fuss Tiefe $+1^{\circ}$ C., 6 Zoll vom Boden $+1,5^{\circ}$ C., am Boden selbst $+2,4^{\circ}$ C, 2 bis 3 Fuss tief im Boden des Flussbettes $+8^{\circ}$ C. Diese Temperaturen des Wassers wurden an einer Stelle des Flusses genommen, wo kein Grundeis war.

Hugi selbst ist der Ansicht, es sei dieses Grundeis die Folge des Ausgleiches zweier entgegengesetzter Temperaturen des Wassers, die eine über, die andere unter Null. Ferner ist Hugi der Ansicht, der Strom habe bei der Brücke Eisstücke auf den Boden gepresst, was das Sieden des Flusses ermöglicht habe.

Die Eisschollen hätten bei dem Andrücken an den Boden diesen und das dazwischen liegende Wasser erkältet, bis das letztere gefroren sei, darauf hätten sie sich erhoben, die darunter liegende Eisschicht wäre gefolgt und der kalte Boden hätte von neuem das nächstliegende Wasser in Eis verwandelt u. s. w. Hugi liess Krüge voll heissen und Krüge voll kalten Wassers in das Flusswasser hinab. Die ersteren sagt er, waren beim Herausziehen mit einer zolldicken Eiskruste bedeckt, die andern zeigten keine Spur davon. Kugeln mit Zeug umhüllt, die einen heiss, die andern kalt, gaben dasselbe Resultat.

Diese Beobachtungen Hugis haben durch Scoppewer*), dessen eigene Beobachtungen doch wahrhaftig zu keinem selbständigen Urteil berechtigten, eine unverdiente, schroffe Zurückweisung erfahren, indem er sagt: «Ich gestehe, dass keine Beobachtung über das Grundeis mir bedenklicher vorgekommen ist als diese.»

*) Scoppewer: Ueber das Grundeis, Brandenburg 1859, Seite 7—9.

Wenn man auch über die spekulative Erklärung, welche Hugi seinen offenbar ganz zuverlässig und in guten Treuen angestellten Beobachtungen anschloss, getrennter Ansicht sein und diese näherer Untersuchung nicht entraten kann, so ist dennoch auch der weitere ebenso absprechende Ausspruch Scoppewers unberechtigt und unbegreiflich: «Bei soviel Widersprüchen und Ueberschreitung der gewöhnlichen Vorstellungen und Erfahrungen glaube ich, die vorliegende Beobachtung vor der Hand aus der Reihe der Tatsachen streichen zu müssen, welche eine befriedigende Theorie der Eisbildung zu erklären hat.»

Die erste Beobachtung Hugis führt auf Hales und die zweite auf Desmarest zurück.

Ein Beobachter bekämpfte den andern oft aus dem einfachen Grunde, weil er eine andere der drei Grundeisarten, die wir kennen gelernt haben, zu beobachten Gelegenheit hatte als sein Vorgänger, und wenn dann hierbei der eine die Angaben des andern bis zum Unsinn übertreibt, so glaubt er sich damit berechtigt zu dem billigen Ausspruche, jene Beobachtungen seien aus der Reihe der Tatsachen zu streichen.

Hugis erste Beobachtung ergibt, dass sich am 16. Februar 1827 unterhalb der Aarebrücke in Solothurn an einer Stelle, wo das Wasser mit sehr grosser Geschwindigkeit auf stark geneigtem Bett fliesst und unter das ruhige Wasser der unterhalb folgenden stauen Flussstelle wallend und strudelnd hineinschiesst, in grosser Menge Grundeis erhob.

Wie wir gesehen haben, sind vorbeschriebene Uebergänge von Stromschnellen zu stauen und ruhigen Wasserbassins mit Kies- und Geröllesohle, die der Grundeisbildung günstigsten Flussstellen. Hugi hat, wie er selbst angibt, nur den Auftrieb beobachtet, so dass sicher das Grundeis sich schon ein oder mehrere Tage vorher entwickelt hatte. Der Auftrieb erfolgt allgemein bei Eintritt von Sonnenschein oder bei Tauwetter, und wenn Hugi ausdrücklich sagt, er habe die Temperaturen des Wassers am 16. an

den Brückenbogen gemessen, wo sich kein Eis bildete, so kann ich in keiner Weise an den gemessenen Temperaturen Anstoss nehmen, vielmehr finde ich sie ganz zutreffend; nur sind eben nach Angabe Hugis die Temperaturmessungen bei Sonnenschein und offenbar ohne Schutz gegen die Strahlung gemacht worden, sodass es nahe liegt, die bezüglichen Korrekturen anzubringen. Es handelte sich im übrigen hier zweifellos um die Bildung des körnigen Grundeises, und zwar war dies vor dem 15. Februar entstanden.

Zur zweiten Beobachtungsreihe Hugis vom Februar 1829 an der gleichen Stelle ist folgendes zu bemerken:

Bis zum Abend des 11. Februar war Tauwetter, das seit mehreren Tagen andauerte und durch welches die Oberflächeneisschichten der Aare, einschliesslich des Randeises an und oberhalb der Beobachtungsstelle zerstört worden waren. In der Nacht vom 11. auf den 12. fiel die Lufttemperatur plötzlich von $+4$ bis $+6^{\circ}$ C. auf -14° C. ab und am 12. bei Sonnenaufgang fing der Fluss an, mit grosser Hastigkeit Eis zu treiben. Auch an der Strudelstelle unterhalb der Brücke hatte sich Grundeis gebildet, das auftrieb und zwar hier etwas später, weil der Strudel der Sohle an der Luft abgekühlte Wassermassen von der Oberfläche zuführte, wodurch der Strahlungswärme wirksam entgegengearbeitet wurde. Hugi gibt hier an, dass dieses Eis körnig war.

Die flussabwärts treibenden, dem starken Frost ausgesetzten Eisplatten bildeten nun im ruhigeren Wasser unterhalb der Brücke Eisinseln. Die grossen Mengen an ihrer Oberfläche unterkühlten Eisschollen und Eispartikeln, welche mit dem Strudel den tieferen Wasserschichten zugeführt wurden, kamen nämlich dort bei Wassertemperatur von Null Grad am Spiegel und von $+1^{\circ}$ bis $+2,4^{\circ}$ C. in der Tiefe energisch in Schmelzzustand, wobei sie die Wärme des Wassers absorbierten, regelierten und teils körniges, teils galertartiges Eis bildeten. Dieses fand flussabwärts an den Treibeisschollenanhäufungen Halt und so entstanden die fraglichen Eisinseln, die nach Angabe Hugis einem

Strom von ca. 1 m:sec. Geschwindigkeit Widerstand leisten konnten. Es kommt wie gesagt öfters vor, dass sogar sich bewegende Schiffe und Flösse durch solche Eisansammlungen mit der Flusssohle verbunden werden, die wieder zu lösen oft sehr schwierig ist, sie sitzen fest, wie der Vogel auf der Leimrute. Namentlich eisernen Schiffen passiert dieses Schicksal bei grosser Kälte leicht.

Ich selbst habe ähnliche Bildungen oft beobachtet und muss namentlich auch diese Temperaturmessungen Hugi in Schutz nehmen, obschon dieselben wahrscheinlich ohne besondere Hilfsmittel und Schutz gegen Strahlungswärme ausgeführt worden sind und daher auf sehr grosse Genauigkeit nicht Anspruch werden erheben können. Hugi bemerkt übrigens selbst, er habe an Stellen gemessen, wo kein Grundeis sich bildete.

Bezüglich der Versuche, die Hugi mit Versenken von heissen und kalten Gegenständen machte, kann an das erinnert werden, was wir hierüber schon gesagt haben. Ein kalter Gegenstand überzieht sich beim Eintauchen in Wasser mit einer sehr dünnen Schicht Glatteis, während warme Gegenstände Oberflächenspannungen bezw. Grenzflächenspannungen erzeugen und Ansetzung von Grundeis-schwämmen veranlassen. Dabei erniedrigt sich die Temperatur nach und nach, so dass dieses Grundeis sich halten kann ohne zu schmelzen. Das gleiche Resultat habe ich mit Steinen und Metallen erhalten, und wie wir später sehen werden, Gay-Lussac mit Erbsen ein Analoges.

Es liessen sich noch eine grosse Zahl von mir gemachter einschlägiger Beobachtungen hier anschliessen, allein es mag die folgende über Galerteis genügen:

Am 30. Dezember 1898 alten Stils hatte die Lufttemperatur in Narva — 14° C. Am 1. Januar 1899 fiel Schnee bei 0° C.; während der Nacht zum 2. sank die Lufttemperatur stark ab. Am 2. Januar trat in einem Seitenarme der Narova starkes Sinken des Wasserspiegels auf; es war der natürliche Flussarm durch Galerteis gestopft, und zwar, wie die Untersuchung zeigte, auf ca.

250 m Länge. Die Stockungsstelle war wie der ganze Flussarm mit einer Obereisschicht von ca. 30 cm Dicke versehen, auf dieser lagerte 40 cm Schnee. Oberhalb der Stockungsstelle verbreitert sich der Flussarm und wird dafür seicht; hier war die Obereisschicht am Ufer kräftig, aber gegen die Mitte zu war der Flussarm offen, weil an der seichten Stelle das Wasser rascher floss. Weiter nach oben war wieder eine tragfähige Obereisschicht vorhanden, welche bis an die Einmündung der Narova in diesen Arm reichte. Die Narova selbst war eisfrei.

Um den Umfang der Störungen festzustellen und diese zu beheben, wurden alle 30 m Löcher in die Obereisschicht gemacht. In diesen trat sofort schwammiges, graues Eis zutage, welches an der Luft weiss wie der aufgelagerte Schnee wurde. Das Wasser hatte sich unter der Obereisschicht infolge der Stockung unter Druck gesetzt, so dass es über die mit Schnee belastete Eisschicht trat, nachdem diese durchbrochen war. Man beseitigte die Störung durch Sprengungen eines ca. 10 m breiten Kanals im Stromstrich, in der Weise, dass die Obereisschicht von unten gegen den Flusslauf plattenweise herausgeschnitten, und dann das schwammige Galerteis in grossen Klumpen von Hand gelöst und meist durch das Wasser selbst fortgespült, andernfalls aber durch Militär gesprengt und abgeleitet wurde, wenn es sehr umfangreich auftrat.

Mit einem Thermometer in doppelter Glasröhre, welches direkt $\frac{1}{200}^{\circ}$ Ablesung gestattete, machte ich dort Messungen. Das Wasser an der Stockungsstelle hatte 0° C. in seiner ganzen Masse, in der offenen Stelle etwas oberhalb der Stockung $+0,2^{\circ}$ C. an der Oberfläche, $+0,25^{\circ}$ C. bei 1,8 m Tiefe auf der Flusssohle.

Als ich gelegentlich bei diesen Messungen bis an die Arme in ein solches Sondierloch fiel, welches durch das dem Schnee auf der Oberflächeneisschicht ähnlich sehende weisse Schwammeis unkenntlich geworden war, konnte ich die Konsistenz des Eises, welche die Stopfung verursachte, sehr gut beurteilen. Das Schwammeis liess mich ohne

Schwierigkeit durchfallen bis an die Arme, und bot den Füßen zum Herausarbeiten durchaus keinen Halt. Es war wie ein Brei, in dem kleine Körner fühlbar waren, es war Galerte*).

Die Untersuchung des losgesprengten Galerteises zeigte eine Massenansammlung kleiner durchsichtiger, glasharter Stückchen einer zermalmten dünnen Obereisschicht, wie sie etwas oberhalb denn auch vollständig fehlte.

Die Millionen im Eise eingeschlossenen Obereisblättchen hatten eine Fläche von je 1 bis 3 cm², bei 1 bis 3 mm Dicke; zwischen diesen bestand die ganze Eismasse aus Eisnadeln und gewöhnlichen Grundeisblättchen, welche meist sehr klein und dem nassen Schnee ähnlich waren.

Infolge Oeffnens der Leerläufe, einer dort am Auslaufe des fraglichen Flussarmes bestehenden Kraftanlage während den vorhergehenden Feiertagen, war der Wasserspiegel der Narova stark gesunken, die dicke und solide Obereisschicht im Flussarme sank nach, ohne stark in Mitleidenschaft gezogen zu werden. Die dünnern Schichten am obersten Ende zerbrachen dagegen und wurden in kleinen Stückchen vom Wasser und Wind unter die folgende starke Obereisschicht ins ruhigere Wasser getrieben und dazu gesellten sich noch grosse Mengen ins Wasser fallenden Schnees des vorhergehenden Tages; alles bei russischem Frost.

Im weiteren Verlauf gelangten die Oberflächen der Krystalle und Blättchen dort in den Schmelzzustand, weil in Wasser von über 0° C. sich aufhaltend, und entzogen dessen Wärme zur Schmelzarbeit, erzeugten also Oberflächenspannungen und veranlassten Krystallisation.

War dann durch den angegebenen Prozess die Temperatur des Wassers auf Null Grad gesunken, so konnten

*) Die 20 Arbeiter, welche in ca. 100 m Entfernung von der Einbruchsstelle solche Sondierlöcher öffneten, liessen mich ruhig im Loche stecken, wohl aus dem bekannten, gegen die Wissenschaft gehegten Aberglauben.

die ferneren zugetriebenen Eismassen von der zermalzten Oberflächeneisschicht nicht mehr erwärmt werden, und da diese, an der Oberfläche schwimmend, wie der fallende Schnee bei starker Abkühlung der Luft zudem Temperatur unter Null Grad annehmen konnten, veranlassten sie auch ganz direkt die Bildung neuer Eiskrystalle in ihrer Umgebung an der Stockungsstelle. Denn auch nur um einen kleinen Bruchteil unter Null gekühlte Wassertropfen, wirken wie eine gesättigte bzw. übersättigte Salzlösung und es kann sofort die Erstarrung unter Einfluss eines fremden Körpers stattfinden, indem sich die Gefrierung, von dem veranlassenden Körper (Eisnadeln) ausgehend, plötzlich durch die ganze so gekühlte Masse ausbreitet und die Bildung von unendlich vielen unvollkommenen Eiskrystallen bewirkt, wie dies bei der plötzlichen Krystallisation einer übersättigten Salzlösung auch tatsächlich geschieht, ohne dass die Krystalle sich auf dem Körper niederschlagen oder sich um ihn anhäufen.

Der Kanal liess zuletzt nur noch die Hälfte des gewöhnlichen Wasserquantums durch die Eisstockung durchsickern. Durch diesen Erstarrungsprozess nimmt naturgemäss die ganze Wassermasse die Temperatur von Null Grad an — wie sie auch wirklich gemessen wurde —; indem $\frac{1}{8}$ der unterkühlten Wassermasse sich in Eis verwandelt, wird die Temperatur der übrigen $\frac{7}{8}$ durch die Erstarrungswärme auf Null erhöht.

Dieser Vorgang kann sich wiederholen, indem neue unterkühlte Krystalle zugeführt werden und auch das durch feine Ritzen einer solchen Eisstopfung sickernde Wasser sehr leicht um Bruchteile eines Grades unter Null sich abkühlen kann, was bei Gletschern konstatiert wurde.

Das Grundeis, wie das Eis überhaupt, ist eben eine der wunderbarsten Erscheinungen. So lange man diese Vorgänge der Natur auch belauschen mag, man stösst immer wieder auf neue interessante Erscheinungen; aber so sehr auch die Veröffentlichungen Hugis davon zeugen, dass die von ihm gemachten Beobachtungen einen über-

wältigenden Eindruck auf ihn machten, so ist denn doch die Behandlung, welche denselben zu Teil geworden ist, nur zu bedauern. Grund genug für mich, auf dieselben eingehender eingetreten zu sein.

Fargeau *), Professor der Physik in Strassburg, hat am Rhein Beobachtungen gemacht und dieselben der Pariser Akademie eröffnet. Sie verdienen, selbst nach dem bereits Mitgetheilten, noch angeführt zu werden:

«Am 25. Januar 1829, gegen 7 Uhr morgens, war die Temperatur der Luft nahe Kehl — 13,71° C. Zur nämlichen Zeit hatte in dem Teil des Rheins, welcher an der französischen Seite wegen seiner Sandbänke eine Art See ohne Strömung bildet, das Wasser 0° C., allein in 0,5 m Tiefe fand man + 4,4° C. Dieser Teil zeigte nur nahe am Ufer einige Eisplatten.

Ueber die Sandbänke hinaus, in einer kleinen Bucht, wo das nicht tiefe Wasser an einen sehr raschen Strom grenzte, schienen alle Kieselsteine mit einer Art durchsichtigen Schaums von 3 bis 4 cm Dicke bedeckt, welcher näher untersucht, aus unregelmässig nach allen Richtungen durchwachsenen Eisnadeln bestand. In dieser Bucht zeigte das Thermometer gleichfalls Null an der Oberfläche wie am Boden des Wassers. Ebenso verhielt es sich mit dem Wasser des Stroms in seinem raschesten Teile. Hier unterschied man auch, sowohl im Bett des Rheins selbst, als an einigen Stücken Holz, die sich an der andern Seite des Stroms in 2 m Tiefe befanden, grosse Massen eines schwammigen Eises, in die man nur schwierig mit dem Ruder stossen konnte. Dies Eis, an die Oberfläche gebracht, zeigte sich durchaus den unzählbaren Eisschollen ähnlich, die damals mit dem Flusse hinabschwammen. *Fargeau* sagt, er habe mehrmals beobachtet, wie unter seinen Augen Eis im grossen Rhein vom Grunde sich losriss und darauf zur Oberfläche schwamm.

*) Pogg. Annalen, Band XXVIII, 1833.

Seinen eigenen Beobachtungen hat Fargeau eine andere ihm mitgeteilte hinzugefügt, aus der wiederholt hervorgeht, welchen Einfluss die Beschaffenheit des Flussbettes auf die Erscheinungen des Zufrierens kleiner wie grosser Massen strömenden Wassers ausübt. Der Besitzer eines Hammerwerks in den Vogesen sagte ihm, dass er, um die Bildung des Grundeises in dem seine Wasserräder treibenden Bach zu hindern, alle Jahre genötigt sei, die Steine und andere zufällig in denselben gefallenen Körper herausnehmen zu lassen.»

Anfangs Februar 1830 liess Duhamel das Eis, mit dem die Seine damals bedeckt war, etwas unterhalb dem Pont de Grenelle, zwei bis drei Fuss vom Ufer durchbrechen, und fand dabei am Boden eine zusammenhängende Eisschicht von 4 cm Dicke, von der er sich mehrere Stücke verschafte. An dieser Stelle hatte das Wasser mehr als einen Meter Tiefe und unten wie oben 0° C. Die Strömung war ziemlich rasch.

Es dürfte sich hierbei um eine Randeisschicht handeln.

*Überfließen -
bis zum Grund
ist?*

Arago*) wiederholte die ihm bekannten älteren Beobachtungen, wahrscheinlich unter Benützung Hofrat Horners**) Zusammenstellung, und wendet sich zur Theorie, damit beginnend, zwei ältere Erklärungen als unhaltbar zu bezeichnen. Die erste derselben entlehnt er aus den «Observations sur les écrits modernes, T. XXXI, Jahrgang 1742» folgenden Inhalts:

«Aus einer heftigen Bewegung der Teilchen der Körper entsteht Wärme. Nun strömt der Fluss an der Oberfläche schneller als am Grunde, also muss an der Oberfläche stets das Maximum der Temperatur stattfinden, und am Grunde, wo die Bewegung geringer ist, die Gefrierung anfangen. Das Steigen der Eisschollen rührt her von der Elastizität der im Wasser gelösten und beim Gefrieren entweichenden

*) Arago, Ueber das Grundeis, Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, Band XXVIII, 1833, Seite 204—223.

**) Gehlers Phys. Wörterbuch 1827, Band 3.

Luft, die mitten in der Eismasse grosse Blasen bildet.» (Es war hier offenbar eine Sprudelstelle beobachtet worden.)

Diese Erklärung kann auch wirklich eine Probe an Hand der Temperaturmessungen nicht bestehen, ist doch die Wasseroberfläche der kühlen Luft ausgesetzt, und mit Recht fertigt Arago dieselbe mit den Worten Montaignés ab: «Les hommes aux faits qu'on leur propose s'amasent plus volontiers à en chercher la raison que la vérité; ils laissent les choses et courent aux causes».

Die zweite Theorie, die Arago verwirft, ist diejenige des irischen Physikers M'Keever: «Die Felsen, die Steine, der Kiessand, mit denen für gewöhnlich der Boden der Flüsse bedeckt ist, besitzen, vielleicht wegen ihrer besonderen Natur, hauptsächlich aber wegen ihrer rauhen Oberfläche, ein stärkeres Strahlungsvermögen als der Schlamm. Felsen in grossen Massen, wie in kleineren Bruchstücken erkalten demnach, wenn die Temperatur sehr niedrig ist, durch die Strahlung sehr beträchtlich und bewirken dadurch die Gefrierung des sie berührenden Wassers.»

Diese Theorie, die die Unterkühlung der Bettsohle voraussetzt, ist nicht glücklicher als die erste, welche Arago abfertigte. Trotzdem tauchte dieselbe im Jahre 1888 neuerdings auf, und zwar von Dr. Assmann*), wenn auch vermutungsweise und unter der weiteren Annahme der Möglichkeit von Wärmeleitung gegen die Ufer. Diese Vermutung wurde gestützt durch angebliche Beobachtungen von O. Krieg**). Arago erörtert sodann des Näheren den Vorgang der Abkühlung fliessenden Wassers und zu seiner eigenen Theorie übergehend, sagt er kurz: «In einer tiefen Masse stehenden Wassers kann der Grund nicht unter $+ 4^{\circ}$ C. erkalten; wird dieselbe Masse aber bewegt, können Grund und Oberfläche dieselbe Temperatur haben.»

«Es bleibt uns, sagt Arago weiter, nur noch zu untersuchen, weshalb, wenn diese Gleichförmigkeit der Tempe-

*) Zeitschrift „Das Wetter“, Heft 11, 1888, Otto Salle in Braunschweig.

***) do. Heft 12.

ratur vorhanden ist, weshalb, wenn sich die ganze Masse auf Null befindet, die Gefrierung am Boden und nicht an der Oberfläche beginnt. Wer wüsste nun aber nicht, dass man, um die Krystallbildung in Salzlösungen zu beschleunigen, nur einen spitzigen oder rauhen Körper hineinstecken braucht; dass auf diesen Unebenheiten die Krystalle vorzugsweise entstehen und schnell an Grösse zunehmen?

Jedermann kann sich überzeugen, dass es sich mit den Eiskrystallen ebenso verhält; dass, wenn das Gefäss, worin die Gefrierung vorgehen soll, einen Riss, einen Vorsprung, kurz irgend eine Unterbrechung des Zusammenhangs besitzt; dieser Riss, dieser Vorsprung, diese Unterbrechung des Zusammenhangs ebensoviel Mittelpunkte werden, um welche sich die erstarrten Wasserfäden vorzugsweise gruppieren.

Was wir indes eben sagten: Ist es nicht genau die Geschichte des Zufrierens der Ströme? Ich denke, man kann es kaum bezweifeln, wenn man sich erinnert, dass die Gefrierung niemals auf dem Boden des Flussbettes vor sich geht, als im Fall sich daselbst Felsen, Kieselsteine, Holzstücke, Wurzeln usw. befinden.

Ein anderer Umstand, der auch eine Rolle bei diesem Phänomen zu spielen scheint, ist die Bewegung des Wassers. An der Oberfläche ist diese Bewegung sehr gross und stossweise; sie muss also die symetrische Gruppierung der Krystallnadeln verhindern, jene polare Anordnung stören, ohne welche die Krystalle, von welcher Natur sie auch seien, weder regelmässige Gestalt noch Festigkeit annehmen; sie muss selbst die ersten Rudimente der Krystalle zerstören.

Die Bewegung, dieses grosse Hindernis für die Krystallisation, ist, wenn überhaupt am Boden des Wassers wie an der Oberfläche vorhanden, doch mindestens daselbst sehr geschwächt. Man kann also annehmen, dass ihre Wirkung daselbst nur die Bildung eines regelmässigen und kompakten Eises störe, keineswegs aber hindere, dass sich nicht auf die Länge eine Fülle kleiner Fädchen an-

einanderlegen, und dadurch jene schwammige Eismasse bilden, welche Hugi so leicht mit dem Ruder durchstossen konnte.»

Was nun diese Theorie von Arago anbetrifft, die er übrigens nicht unbedingt aufstellt, weil nach seiner eigenen Angabe der Nachweis fehlt, dass das Wasser bei der Eisbildung auf dem Grunde auf Null gekühlt ist, und er ferner die Möglichkeit zulässt, die sinkenden Krystallnadeln von «Knight» könnten unterkühlt auf der Sohle auftreten und so dort anfrieren — so ist es unschwer, dieselbe an Hand der beobachteten Tatsachen und Messungen als allgemeingültige Theorie zu widerlegen.

In Bezug auf den ersten Teil lässt sich sagen, dass erwiesen ist, dass sich Grundeisbildung zeigt bevor die Gesamtheit des Wassers auf Null abgekühlt ist, es ist also ein Irrtum den Beginn des Zufrierens auf die Sohle zu verlegen. Ich habe in einer Ansammlung von losen, fröschlauch- oder bierschaumartigen Grundeischwämmen, im Momente kaum nach der Entstehung und sogar bei deren Weiterentwicklung bezw. Anhäufung am Nachmitage die Temperatur $+ 0,2^{\circ}$ C. konstatiert, gleich der Temperatur des Tiefenwassers. Dieses Grundeis liess sich mit Bestimmtheit weder zum blättrigen noch körnigen einreihen; vielmehr war es schwach regeliertem Galerteise ähnlich, obschon das Lokal eher für erstere beiden Spezien entschieden haben würde. Eine sehr grosse Zahl von Messungen bestätigen dasselbe, wenn schon oft nicht so ausgesprochen. Es machen meine Temperaturmessungen es eben unbedingt notwendig, für gewöhnlich mit der Hypothese «*des eigentlichen Gefrierens am Grunde*» selbst zu brechen.

Die Vergleichung der Eisbildung am Grunde der Flüsse aus der ganzen Wassermasse heraus mit Krystallisation einer Salzlösung, durch den Eintritt eines rauhen oder spitzigen Körpers auf die Arago abstellt, ist nicht zutreffend ohne die Annahme, dass Eiskrystalle von der Oberfläche eine Rolle spielen. Diese Begründung fällt

schon dahin mit der Tatsache, dass Grundeis sich auch schon bei Temperatur des Tiefenwassers über Null bildet, welche letzteres aber doch offenbar nicht wie eine gesättigte Salzlösung wirken kann. Dies ganz abgesehen davon, dass fremde Körper in einer Salzlösung nur dann wirken können, wenn diese übersättigt ist, dieselben Körper sind durchaus ohne Wirkung, wenn die Lösung eben nur gesättigt ist; ja selbst in einer übersättigten Lösung dann noch, wenn sie nicht plötzlich eingetaucht worden, sondern sich bereits vor der Sättigung darin befunden haben.

Es ist durch meine Beobachtungen und Messungen dargetan und erwiesen, dass die Temperatur des Wassers eines Flusses, von lokalen durch Sprudlung beeinflussten Stellen und Wildwassern abgesehen, in seiner Allgemeinheit nicht auf Null Grad sinkt, sondern diesem Punkte nur sich nähert, wobei die warme Sohle die Temperatur des Tiefenwassers stets zu erhöhen strebt. Damit ist aber, wie gesagt, dieser Theorie Aragos die Begründung mit der übersättigten Lösung entzogen.

In Bezug auf den zweiten Teil der Erklärung Aragos ist dieser nicht im Unrecht, wenn er sagt, dass grosse Bewegung des Wassers an der Oberfläche die regelmässige Krystallisation verhindere und schon die ersten Rudimente der Krystalle zerstöre. Diese Zerstörung der Oberflächeneisschicht bedingt aber ja gerade das Treiben der entstandenen und durch Bewegung nicht zerstörbaren Eisnadeln mit dem Wasser, die unbedingte Grundlage der Grundeisbildung. Interessant ist nun aber, dass alle Beobachtungen, auch die von Arago angeführten, zeigen, dass ganz entgegen seiner Theorie starke Bewegung, Wirbel und Strudel nach der Sohle gerade die ergiebigsten Grundeisstellen sind, während dieses an den Stellen grösserer Ruhe nur spärlich oder oft gar nicht auftritt, wenn nicht besondere lokale Umstände, oberhalb gelegene Strudel etc., dieser Bildung besonders günstig sind. Damit hat Arago den von ihm angeführten Beobachtungen selbst widersprochen.

Um gerecht zu sein, muss nun aber ausdrücklich betont werden, dass Arago, obschon er entsprechend den von ihm blos kurz gestreiften Beobachtungen Merians, wie dieser annimmt, die Grundeisbildung stütze sich ausschliesslich auf eine *wirkliche Krystallisation*, ein Erstarren des Wassers in der Tiefe, und — abgesehen von den angeführten Beobachtungen Fargeaus über die Entwicklung *körnigen Grundeises* im Rhein, sowie Hugis Veröffentlichungen sowohl über körniges Grundeis als auch über Galerteis in der Aare etc. — insofern doch im Recht ist, als es sich lediglich um die Ausbildung und Weiterentwicklung der treibenden Eisnadeln und flüssigen Krystalle auf der Flusssohle zu gesetzmässigen Krystallen handelt, wie diese bei der Bildung des blättrigen Grundeises nachgewiesenermassen auftritt und welche tatsächlich durch die grössere Ruhe des Wassers gefördert wird. Und in der That haben wir angeführt, wie sich das «blättrige Grundeis» vorzugsweise im Wasser bildet, das regelmässig genug fliesst, um die polare, symmetrische Gruppierung der antreibenden Krystallnadeln zu Krystallen regelmässiger Gestalt nicht zu stören; also im Wasser, dessen Stosskraft auf die sich orientierenden Eisnadeln kleiner ist als die anziehende und orientierende Molekularkraft derselben.

Ebenso ist Arago im Recht, wenn er annimmt, es könnten die Krystalle, welcher Knight gedenkt, unterkühlt auf der Sohle auftreten. Im ersteren Fall würde durch seine Theorie die Bildung des «blättrigen Grundeises» erklärt, aber mit der irrthümlichen Voraussetzung der Erstarrung des Wassers auf der Flusssohle; im letzteren Falle weisen seine Zweifel auf die oft mögliche Art der Bildung des «körnigen Grundeises» hin.

Ueberraschend ist indes, dass Arago durch die von ihm wiedergegebenen Beobachtungen über drei verschiedene Grundeisarten nicht auf die notwendige Verschiedenheit des Entwicklungsprozesses aufmerksam wurde; und es erscheint als eine Unterlassung, dass seine Veröffent-

lichung unter Benützung der von Merian 7 Jahre früher gemachten Beobachtungen in die Lehrbücher als Aragos Theorie aufgenommen wurde, während Merian seinen Beobachtungen auch die gleiche Erklärung des Vorganges beigefügt hatte.

*F. Strehlke**) in Berlin beobachtete folgendes:

«Im Anfange des Februars 1832 war die Witterung in Berlin sehr mild, das Thermometer hielt sich einige Grade über dem Gefrierpunkte; am 12. stellte sich Frostwetter ein bei Ostwind und heiterem Himmel. Am 14. Februar, 10 Uhr abends, liess ich in den schnell fliessenden Kanal, welcher die Werderischen Mühlen treibt, einen Korb, 2 Fuss lang, 1 Fuss breit, $\frac{1}{2}$ Fuss tief, hinab, der mittelst einer Leine an einem Flosse befestigt, auf dem Grunde des Wassers durch mehrere darin befindliche Ziegelsteine und Metallplatten festgehalten wurde. Ausser den genannten Gegenständen befand sich im Korbe eine langhaarige Bürste, welche durch mehrere Stücke Buchenholz festgeklemmt war. Die Tiefe des Kanals betrug an der Stelle, wo der Korb eingesenkt war, ungefähr 3 Fuss, die Entfernung vom nächsten Ufer 7 bis 8 Fuss. Die Temperatur im Kanale war an der Oberfläche und am Boden 0° C.

Am 15. Februar um 6 Uhr morgens war die Temperatur — $6,8^{\circ}$ C. Die ganze Nacht war heiter gewesen. Um 7 Uhr morgens wurde der erwähnte Korb aus dem Wasser gezogen, welches, wie auch den Tag zuvor, nirgends an der Oberfläche zugefroren war. Aber in dem Korbe war überall Eis gebildet. An den Wänden des Korbes zeigten sich grössere, an den Metallplatten kleinere Eisblättchen. Die Zinkplatten, deren Oberfläche weniger sorgfältig bearbeitet war als die Kupfer- und Messingplatten, waren mehr damit bedeckt, als die letzteren. Auch die zum Festhalten der Bürste dienenden Holzstücke zeigten Eisblättchen, aber die grössten sassen an den

*) Poggendorfs Annalen, 1833, Band 28, Seite 223.

Haaren der Bürste, welche unter allen in dem Korbe befindlichen Gegenständen am reichlichsten damit bedeckt war. Die Blättchen bildeten der Kreisgestalt sich nähernde Polygone von 6 bis 8 Linien Durchmesser und drei bis vier Zehntel Linien Dicke, und sahen fast wie die Schuppen von Fischen aus. Das Eis hatte eine weisse Farbe und geringe Durchsichtigkeit. Mit Leichtigkeit liessen sich diese Eisblättchen, deren Ebene fast senkrecht auf der Richtung der Haare waren, von der Bürste und von dem Korbe ablösen.

Nachdem der Korb vielleicht eine halbe Stunde aus dem Wasser entfernt war, ging ich wieder zu der Stelle zurück, wo derselbe die Nacht hindurch gestanden hatte. Hier sah ich nun ganze Gruppen von Eisblättchen neben einander im Wasser stehen, welche an zarten, sich bis zum Flosse erstreckenden Eisfäden festgehalten wurden, und auf dem Kanale zeigten sich überall schwimmende Eisblättchen von derselben Art, nur dass sie nicht wie jene mit ihren Ebenen im Wasser vertikal standen. Ohne Zweifel hatten sich die den Kanal bedeckenden runden Eisblättchen unter denselben Umständen wie die im Korbe gefundenen gebildet.

Am 15. Februar abends wurde derselbe Korb mit denselben Gegenständen auf der nämlichen Stelle auf den Grund des Kanals gesenkt. Aber weder in dieser noch in den folgenden Nächten (ich setzte die Versuche bis zum 21. früh fort) habe ich eine Spur von Grundeis wahrnehmen können.

Nach den Beobachtungen des Dir. August hatte die Luftfeuchtigkeit am 15. im Verhältnis gegen die früheren Tage zugenommen, und man könnte annehmen, dass die Erhöhung des Wassergehalts der Atmosphäre in einem Zusammenhange mit der Bildung des Grundeises stände, wäre es auch kein anderer, als dass die Oberfläche des Wassers dann nicht mehr so stark abgekühlt würde, wenn die Luftfeuchtigkeit zunimmt.»

Diese Beobachtungen an der Spree bestätigen meine Messungen und Beobachtungen an anderen Flüssen. Beachtenswert ist, dass die an den Bürstenhaaren und senkrecht auf diesen entstandenen Eisblättchen ganz besonders gut entwickelt waren, was sich in ihrer besonderen Grösse ausdrückte. Es weist dies ausgesprochen auf die bereits früher konstatierten elektrischen Kräfte hin, die das im Wasser treibende fein zerteilte Eis verursacht.

Auch Strehlke gibt in noch weiteren Beobachtungen für die Tage der Grundeisbildung Angaben der Windrichtung und es ist interessant, dass sich diese für gewöhnlich als entgegen der Strömung erweist, ohne aber, dass Strehlke auf den daherigen Einfluss aufmerksam wurde. Auch Strehlke bezeugt, dass das Eis am Korbe und an den Bürstenhaaren nicht angefroren war, obschon er die Wassertemperatur zu 0° angibt. Wenn man aber die Temperaturmessungen mit gewöhnlichen Thermometern macht, so kann die Ablesgenauigkeit leicht $\frac{1}{10}^{\circ}$ Fehler aufweisen, ganz abgesehen von den Korrekturen für das Instrument selbst.

*Gay-Lussac**) schloss sich dem Zweifel von Arago an und betrachtet als wahrscheinlich, dass Unterkühlung der auf der Wasseroberfläche schwimmenden Eisblättchen, welcher Knight gedenkt, bei der Berührung der kalten Luft wenigstens an ihrer oberen Fläche stattfindet und dass diese Unterkühlung eine wichtige Rolle in der Erscheinung spielen könnte; z. B. die, die in dem Flussbette liegenden Kieselsteine zu erkälten, wenn die Eisblättchen durch die Strömung hinabgeführt werden, um dann dortselbst anzufrieren.

Es trifft zu, dass diese Möglichkeit oft vorkommt, namentlich an einer Stelle, wie sie von Knight ins Auge gefasst war, wo nämlich das Wasser oberhalb einem zu Industriezwecken eingebauten Wehr in Ruhestand ist, dann als Wasserfall über das Wehr abfällt und auf seichter

*) Annales de Chemie et de Physik, tome LXIII, page 359.

Kiessohle abfließt. In der Regel aber legen die kleinen Eisnadeln und Eisflocken in dem fließenden Wasser grosser Flüsse so grosse Strecken zurück, bevor sie durch eine Geschwindigkeitsstörung der Sohle zugeführt werden, dass sie durch die Wassertemperatur nahe Null, auf Temperatur Null gebracht werden. Diese Tatsache ist denn auch durch vielfache Beobachtungen festgestellt. Auch Krieg bemerkt in seinem Aufsätze des 12. Heftes der Zeitschrift «Das Wetter» 1888, dass die Krystalle und Krystallgruppen bei fortgeschrittenem Froste wie Schneeflocken träge im Wasser und der Sohle entlang schwimmen. Die gleiche Beobachtung führt auch Zschokke Th.*) für die Aare an etc. etc.

Gay-Lussac setzt denn auch selbst fest, dass hierbei nur von *sehr schnell* fließendem Wasser die Rede sein könne. Als Grundlage dienten ihm einzig und allein die Beobachtungen Fargeaus **) und zwar die einzige Tatsache, dass das im Rheine gesehene Grundeis, wenn es nach oben gebracht wurde, durchaus denjenigen Eisschollen glich, welche an der Oberfläche in unzählbaren Schollen trieben.

Statt nun, wie Arago, das treibende Eis aus dem Grundeis zu erklären, dreht Gay-Lussac den Zusammenhang um, setzt die Entstehung des Eises an die Oberfläche und erklärt somit das Grundeis für eine sekundäre Bildung. Damit ist Gay-Lussac zweifellos im Rechte; dagegen ist es nicht zutreffend, dass, wie er anführt, die Temperatur der Luft mindestens auf -8 bis 10° C. gefallen sein müsse, bevor sich Grundeis zeigen könne, und dass nur unterkühlte Krystalle an der Grundeisbildung Anteil haben können, und nur in grosser Geschwindigkeit das Grundeis zustande kommt.

Zu seiner eigenen Erklärung übergehend bemerkt nun Gay-Lussac, dass bei dieser niedrigen Temperatur wohl die oberflächlich schwimmenden Eisnadeln in Berührung

*) Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern, 1854 Seite 169.

**) Pogg. Annalen, Band XXVIII, 1833.

mit der kalten Luft unter Null erkaltet werden, wenigstens an ihrer Oberfläche und in dem zunächstliegenden Teile ihrer Masse. Werden diese Nadeln nun untertauchend gegen ein Hinderniss getrieben, so werden einige zunächst nur durch die Reibung hängen bleiben, während andere sich hebend und senkend weiterschwimmen. Das angehaltene Eisteilchen aber gebe die überschüssige Kälte ab, es gefriere die ausserordentlich dünne Wasserschicht, welche dasselbe vom festen Körper trennt und befestige sich somit selbst. Andere Eisnadeln wiederholen dasselbe und so bedecken sich in unregelmässiger, massenhafter Anlagerung Kiesel, Steine und Pflanzen, bis die schwammige Masse zu gross wird, um dem hydrostatischen Zuge nach oben widerstehen zu können, bis also eine Trennung innerhalb der Masse oder vom Flusse selbst eintritt und das Eis zur Oberfläche steigt.

Zunächst ist zu bemerken, dass das Grundeis schon bei anhaltender Lufttemperatur von ca. 4° C. unter Null auftritt und beobachtet wurde, und es ist nicht zu verkennen, dass diese Herabsetzung Gay-Lussacs Feststellung ermässigt und den Einfluss der Temperaturdifferenz der Eisnadeln, herrührend von Unterkühlungen der Luft und des Wassers, niederdrückt, wie schon Scoppewer*) zutreffend anführte.

Diese Erklärung der Erscheinung durch Gay-Lussac kann bei ganz speziellen, lokalen Flussstellen mit sehr grosser Wassergeschwindigkeit und bei starker Kälte etwa zutreffen und wie wir konstatiert haben, die Bildung *körnigen Grundeises* unter Beihülfe weiterer Ursachen, wie z. B. Zuführung sehr kalter Luft in Blasen bei Sprudlung wirklich veranlassen. Würde wirklich ein *Zusammenfrieren* der auftreffenden Eisnadeln, d. h. wie Gay-Lussac sich ausdrückt, der zwischengelagerten Wasserschichten eintreten, so heisst das nichts anderes, als es entstände eine kompakte Eisschicht, ähnlich dem Oberflächeneis, was aber nicht der Fall ist. Auch ist es ganz unzutreffend, dass

*) Scoppewer, Ueber das Grundeis, Brandenburg, 1859.

das Grundeis an die Gegendstände wirklich anfriere, es ist dies bei den konstatierten Temperaturen derselben über Null Grad auch ausgeschlossen, es sei denn, dass gerade an dieser Stelle durch Sprudlung genügend kalte Luft zugeführt werde. Eine Verallgemeinerung dieser Erklärung ist daher selbstverständlich unmöglich. Ebenso ist das Experiment, durch welches Gay-Lussac seine Erklärung zu stützen suchte, ohne Beweiskraft. Er erkältete nämlich Erbsen bis auf einige Grad unter Null und warf sie ins Wasser, das genau auf dem Gefrierpunkt war. Die Erbsen sanken zu Boden und froren untereinander und mit dem Boden so fest zusammen, dass das Gefäss umgedreht werden konnte, ohne dass die Erbsen herausfielen. Die Erbsen waren in der Luft erkältet worden, während die fraglichen Eisnadeln sehr klein sind, im Wasser schwimmen und daher einen direkten Vergleich nicht zulassen.

Ich selbst habe dieses Experiment mit unter Null erkälteten grösseren Steinen und Kieseln, sogar mit ebensolchem Schnee gemacht. Die Steine überzogen sich plötzlich mit einer glasharten, dünnen Eisschicht, wie dies offenbar auch für die Erbsen der Fall war. Der überkältete Schnee in Wasser langsam eingeschüttet, das vorher über eine grosse Eistafel geflossen war, also Null Grad hatte und in ein unteres Bassin einstürzte, setzte sich an den Kieseln des Bassins in der Flusssohle nicht an. Dagegen gelingt dies mit Schnee, der längere Zeit in Wasser mit Temperatur nahe Null fliesst, wobei er sich aber die Ansetzungsstelle beliebig auswählt.

Es ist daher unbedingt nicht zu leugnen, dass in vorstehend besprochenen Falle die *Regelation* an der Verfestigung mitwirkt, und es ist ohne weiteres klar, dass die entstehende Grundeisansammlung fester und kompakter sich gestalten muss, wenn in sehr grosser Geschwindigkeit unterstützt durch Grundwellen oder Wirbel (Strudel) die Eisnadeln mit bedeutender Kraft aufgeschlagen werden. Es sind dies Grundregeln der *Regelation*, und wirkliches Gefrieren durch Unterkühlung der Eisnadeln an der Ober-

fläche braucht hierbei gar nicht immer mitzuwirken. Die Regelation erklärt auch ohne Umschweife den losen Zusammenhang der Eisnadeln eines Grundeissschwammes unter sich. Gay-Lussac sagt denn auch selbst, dass *unmittelbar nach dem Eintauchen* der Eisnadel eine sehr geringe Wasserschicht erstarre, und glaubt, es sei damit zugleich gesagt, dass — weil das Wasser die beständige Temperatur von Null behalte — kein natürlicher Grund für ein weiteres Wachstum zur Bildung kompakten Eises vorliege.

Es ist entgegen der Ansicht von Gay-Lussac für gewöhnlich konstatiert, dass ein eigentliches Anfrieren der Eiskristalle an den Gegenständen der Flusssohle nicht stattfindet, sondern dass das Eis und sogar die Blättchen des blättrigen Grundeises nur lose anhaften (Vergleiche hierüber Strehlke*).

Aus den Temperaturangaben im I. Kapitel ist dies übrigens selbstverständlich.

*Mohr*** in Koblenz erhob 1838 gegen Gay-Lussac folgende Einwürfe:

«Während der Grundeisbildung im Rheine seien keine Eisnadeln zu sehen gewesen; wenn solche mitunter in kleineren Flüssen vorkämen, so wären sie so dünn, dass sie unmöglich eine andere Temperatur als die des umgebenden Wassers haben könnten. Der Rhein sei im Gegenteil während der Grundeisbildung klar und grün.»

Letzteres hat mit der Grundeisbildung nichts zu tun nach meiner Ansicht. Vielmehr tritt der Prozess der Grundeisbildung bei grösserer Kälte ein, welche andererseits bewirkt, dass der Zufluss von trübem Wasser von den Ufergeländen aufhört, indem diese gefrieren, also das Flusswasser klar wird. Ich habe früher bemerkt, dass die treibenden Eisnadeln in ihrem ersten Stadium der oberflächlichen Beobachtung verborgen bleiben, indem die Brechungsexponenten für Eis und Wasser nicht sehr ver-

*) Poggendorfs Annalen, Band 43 (119. Band der ganzen Folge), Seite 527—531.

**) do.

schieden und die Eiskrystallelemente dem blossen Auge ihrer Kleinheit wegen unsichtbar sind.

*Kohlmann**) bestätigt Mohrs Einwendungen und wiederholt über das Aussehen des Eises Strehlkes Angaben. Das schwammige Gefüge des Grundeises erklärt er damit, dass die freiwerdende Wärme die den eben entstandenen Krystall umgebende Wasserschicht am Gefrieren verhindere, während ausser ihrem Bereiche die Bildung neuer Krystallblättchen ihren ungestörten Fortgang hätte.

Es ist hierzu zu bemerken, dass zweifellos bei Bildung von Krystallblättchen, die ja vollständig von kühlem Wasser nahe 0° C. umspült und umflossen sind, die freiwerdende Wärme sofort abgeführt wird. Vielmehr ist klar, dass die gleiche Erstarrungswärme auch frei wird bei der Bildung der gleichen Blättchen an der unteren Fläche der Oberflächeneisschichten (Tyndalls Schmelzfiguren), die man mit der Hand leicht hervorholen kann und vom Wasser vollständig umspült und durchzogen sind. Doch tritt dort nach und nach vollständige Verkittung zur kompakten Masse ein, dies offenbar allein unter Einwirkung weiterer Kälte von aussen. Diese zur Verkittung der einzelnen Blättchen notwendige überschüssige Kälte fehlt unter Wasser und im Boden. Die Erstarrungswärme tritt offenbar wenigstens teilweise schon im Momente der Erstarrung der Molekel aus, in einiger Entfernung vom entstehenden Grundeiskrystalle, während zweifellos bei der blossen Angruppierung durch die Molekularkraft keine oder doch unbedeutende Wärme erzeugt wird. Das körnige Grundeis hat ja auch schwammiges Gefüge und doch ist hierbei sehr oft kein eigentlicher Krystallisationsprozess tätig. Es ist dasselbe vielmehr eine mechanische Aneinanderreihung von Krystallpartikeln, oft mehr oder weniger gruppenweise regeliert, je nach den Umständen.

Ich habe, um dies kurz zu wiederholen, durch zahlreiche Messungen und Beobachtungen festgestellt, dass im

*) Zeitschrift für die gesamte Naturwissenschaft, Halle, 1854, Seite 40.

Wasser nahe Null Grad die gesetzmässige Zusammengruppierung und Orientierung der Eisnadeln soweit ge-
deihen und die Bildung glasharter Eisblättchen vor sich
gehen kann, als die Molekularkraft mitwirkt. Ist im
Wasser diese gesetzmässige Bildung eines Krystallblätt-
chens vollständig in aller Form zustande gekommen, so
hört die Wirkung der Molekularkräfte auf und zur Ver-
kittung der einzelnen Krystallblättchen unter sich fehlt
die notwendige Kälte, die bei der von aussen stark ab-
gekühlten Oberflächeneisschicht vorhanden ist, hier unter
Wasser aber fehlt.

Es ist daher klar, dass wenn das Wasser nahe Null
Grad in der Tiefe die Erstarrung der Molekel bei der
Grundeisbildung ohne Beeinflussung durch die schwim-
menden Krystalle selbst bewirken könnte, so müsste
ebenso gut das den Grundeisschwamm durchziehende
Wasser erstarrend die einzelnen Krystallblättchen unter
sich verkitten zur kompakten Eisschicht, wie wir sie an
der Oberfläche finden. Da dies aber, ausser bei Zuführung
kalter Luft, niemals der Fall ist, so ist auch unter nor-
malen Verhältnissen, und abgesehen von dem Vorgange
bei der Galerteisbildung, eine Erstarrung des Tiefen-
wassers aus sich selbst heraus ganz ausgeschlossen. Die
einzelnen Blättchen des blättrigen Grundeises sind all-
gemein so lose aneinander gefügt, dass hierzu schon der
kapilare Druck genügt. Die Erstarrung der bei der Grund-
eisbildung mitwirkenden Eispartikel geschieht also in
Berührung mit der freien Luft oder der Obereisschicht, die
Zusammengruppierung der festen oder wieder in Verflüs-
sigung befindlichen Krystallelemente dagegen geschieht
gesetzmässig unter Einwirkung der Molekularkräfte beim
blättrigen Grundeise und mehr mechanisch unter Einwir-
kung der Wasserbewegung und Regelation beim körnigen
Grundeis, während beim Galerteis beide Arten des Wachs-
tums möglich sind und wobei der Grenzflächenspannung
die Hauptarbeit zufällt. Allem Grundeis aber fehlt zur
vollständigen Verkittung die überschüssige Kälte; dem

Bodeneise oft diese, oft das zur vollständigen Verkittung zum festen Körper nötige überschüssige Wasser als das Medium, in welchem sich die Krystallnadeln bewegen, gruppieren und unter sich verkitten könnten.

Zschokke Th. *) referiert über die Beobachtungen einiger Mitglieder der « Aarg. Naturforschenden Gesellschaft » über Eisgänge an der Aare und gibt eine Beschreibung der öfters erwähnten rundlichen Eisblättchen, aus denen das Grundeis dieses Flusses bestehen soll. Im Gegensatz zu unsern Beobachtungen glaubt Zschokke nicht, dass diese Blättchen aus regelmässigen krystallisierten Nadeln bestehen. Es wird sodann erwähnt, dass das im Wasser treibende Eis als lose, wenig kohärente Masse, mit dem Wasser leicht auf- und absteige und der Tiefe zugeführt werde. Sand und Steine, die durch das Eis von der Tiefe emporgehoben wurden, seien niemals beobachtet worden. Beim Eisgange wurde konstatiert, dass dieses Treibeis an denjenigen Stellen des Flusses treibe, wo die Strömung am stärksten ist. Messungen der Wassertemperatur ergaben an dieser Stelle an der Oberfläche sowohl als in der Tiefe von 9 Fuss 0° R.; dabei wird aber bemerkt, dass das Instrument immer einige Grundeisblättchen hervorbrachte. Es ist dies für uns, wie früher bemerkt, Grund, diese Temperaturangaben nicht als strenge genau zu beachten. Aber auch hiervon abgesehen, genügt es zu wissen, dass bei den bekannten älteren Messungen die Ablesungsgenauigkeit gewöhnlich $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{4}^{\circ}$ nicht überschritt.

Zschokke macht ferner darauf aufmerksam, dass an Stellen, wo der Fluss nur wenige Fuss tief, aber sehr reissend war, und sehr viel Eis führte, an allen Steinen, die im Wasser vorsprangen, anhängendes Grundeis zu bemerken war; ebenso an und zwischen den Steinen, welche die Uferwehren bildeten. « *Wo die Strömung am stärksten anprallte, war auch das anhängende Eis am dichtesten.* » An

*) Das Grundeis auf der Aare, Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern, 1855, Seite 169.

den Stellen ruhiger Strömung war trotz geringer Tiefe kein Grundeis zu sehen.

Die Frage, wie das Eis sich bilde, sei sodann, wie Zschokke berichtet, durch die Beobachtung plötzlich gelöst worden, in der Weise, «*dass das an den Steinen hängende Grundeis bloss von den Treibeisschollen, wenn sie mit dem Ufer oder dem Grunde in Berührung kamen, abgestreift ward und hängen blieb.*»

Ueber den Einfluss des Windes äussert sich Zschokke dahin, dass der östliche Wind*) vorzugsweise der Bildung des Grundeises förderlich sei.

Alle angeführten Beobachtungen sind richtig und zutreffend, sie beziehen sich aber, wie Zschokke ausdrücklich erwähnt, nur auf *den Eisgang* selbst, während der Bildungsprozess seinerseits nicht eingehenden Untersuchungen unterworfen worden ist, ansonst wohl eine bessere Erklärung des letzteren hätte erfolgen können.

Weber**) behauptet mit Gay-Lussac, dass das Grundeis, ehe es am Boden der Flüsse erscheint, an der Oberfläche entstanden sei, indem dort eher die Temperatur Null herrsche als in der Tiefe und also die Eisbildung dort beginnen müsse. Hierfür zitiert er die Temperaturangaben von Hugi etc., während ihm eigene Messungen fehlen.

Entgegen den Angaben Zschokkes, dass am meisten Grundeis in grösster Strömung zu finden war, sagt Weber, dass das im Wasser treibende Eis an den ruhigen Stellen sich absetze, dort wo der Fluss seine Sinkstoffe, Sand und Kies ablagere.

Dieser scheinbare Widerspruch ist durch meine früher angeführten Beobachtungen erklärt, ersterer hatte eine Stelle ins Auge gefasst, wo sich vorzugsweise *das körnige Grundeis* ansetzt, letzterer eine solche, die der Bildung *blättrigen Grundeises* günstig ist.

*) Anmerkung des Verfassers: Die Aare hat in dem beobachteten Stück, Richtung von Westen nach Osten, also ist Ostwind der Flussrichtung entgegengesetzt.

**) Weber, C. W., Die Entstehung des Grundeises, Spandau, 1856.

Weber nimmt Anstoss an den Angaben Desmarests, dass das Grundeis bei bedecktem Himmel und geringer Temperaturdifferenz bei Tag und bei Nacht gleichförmig zunimmt, im entgegengesetzten Falle aber, wenn z. B. die Sonne schien, das Anwachsen des Eises aufhörte, und sagt, dass im Gegenteil heiterer Himmel der Grundeisbildung am zuträglichsten sei, indem dadurch die Wärmeausstrahlung gefördert werde.

In Bezug auf diesen Punkt habe ich bereits angeführt, dass helle Nächte der Abkühlung des Wassers und damit der Grundeisbildung förderlich sind; dagegen die Sonnenstrahlen diese verhindern, der Elektrizität entgegenwirken und das Eis zum Aufsteigen veranlassen, weil demselben durch Abschmelzung der Haltepunkte infolge Temperaturzunahme der Flusssohle der Boden entzogen wird. Neben der Wassertemperatur, die an der Oberfläche niedriger als an der Sohle sein müsse, nimmt Weber sodann Anstoss an dem Aussehen des Grundeises. Er sagt, und mit Recht, es sei ein Widerspruch, anzunehmen, dass das Wasser auf dem Grunde die zur Eisbildung nötige Kälte gehabt und dass dennoch unvollständiges Eis sich bilde, welches eher durchnässten Schneeklumpen, als dem Treibeis ähnlich wäre. Dass diese Verschiedenheit durch die Bewegung des Wassers nicht erklärt werde, ergebe sich daraus, dass auch an ruhigen Stellen dasselbe Aussehen gefunden werde.

Indem Weber mit diesen beiden Gründen die älteren Theorien beseitigt zu haben glaubt, deduziert er weiter folgendermassen: «Da das Grundeis überhaupt Eis ist, so wird es auch ebenso entstanden sein wie alles andere Eis, also an der Oberfläche; da es aber anders aussieht, als das gewöhnliche Treibeis, so muss es entweder unvollständig entwickeltes oder auf dem Wege der Zerstörung befindliches Eis sein, und da das letztere aus einfachen Gründen nicht sein kann, so ist das erstere.»

Durch diese Schlussfolgerung wird die Berechtigung gewonnen, den Satz aufzustellen: Das Grundeis entsteht auf dem Wasser und ist unentwickeltes Treibeis, und dann

wird im Speziellen folgende Erklärung des Phänomens gegeben:

Zur Bildung des Grundeises gehört erstens starke und anhaltende Kälte und zweitens Wind, der die Oberfläche des Wassers in unruhige Bewegung versetzt, zugleich aber auch das Strömen des Wassers hindert und fast aufhebt, so dass die oberen Schichten ziemlich stille stehen, das darunterfließende Wasser aber in seiner gewöhnlichen Schnelligkeit abfließen kann. Wenn beide Bedingungen erfüllt sind, so bilden sich an der Oberfläche des Wassers Eisblättchen, welche infolge der Bewegung nicht zu regelmässigen Formen, sondern nur zu lockeren Massen sich zusammenballen können. Diese Massen steigen mit den Wellen auf und nieder, kommen oft den vom Winde weniger beunruhigten, tieferen Schichten zu nahe, fließen mit diesen ab und können nicht wieder zur Oberfläche kommen. Die Steine und Erhabenheiten des Grundes geben bei der fortwährenden Berührung mit dem Eise ihre Wärme ab und erreichen zuletzt die Temperatur des Grundeises, so dass dasselbe sich ansetzen und so am Grunde haften bleiben kann. Am geeignetsten für diesen Ansatz sind sogenannte stauende Stellen (ruhigere, tiefere Stellen unterhalb der Stromschnellen), an denen der Fluss die Sinkstoffe abzulagern pflegt. Von dort erhebt sich das Grundeis, wenn es nur mit geringer Fläche am Boden des Flusses festhaftet, schon infolge seines spezifischen Gewichtes oder durch Erhöhung der Temperatur, wozu schon die Sonnenwärme ausreichen mag, und steigt, etwaige Anhängsel oder eingefrorene Gegenstände mit sich nehmend zur Oberfläche.

Webers Ansicht ist in Bezug auf die Bildungsweise des «Körnigen Grundeises» ganz richtig. Dagegen unzutreffend für die übrigen Grundeisarten. Er setzt die Entwicklung der Blättchen an die Oberfläche, statt nur die Erstarrung der Wassermoleküle.

*Scheck**), Regierungsbaumeister hat an der Saale bei Trebnitz Untersuchungen über die Grundeisbildung an-

*) „Zentralblatt der Bauverwaltung“, 1889, 16. Februar.

gestellt und zwar unter Berücksichtigung einer «Anleitung» hierzu von Dr. Assmann*).

Obschon Scheck selbst seine Messungen und Beobachtungen nicht für hinreichend hielt, um Folgerungen daran anzuknüpfen, so sind dieselben dennoch interessant genug, um kurz darauf einzutreten. Die Beobachtungen begannen am 1. Januar 1889 und wurden bis zum 12. Januar fortgesetzt; sie umfassten 2 Frostperioden.

In der erwähnten «Anleitung» wird als Erklärungsversuch die Annahme gemacht, dass die Sohle entweder durch Leitung vom Ufer oder durch Ausstrahlung sich bis unter den Gefrierpunkt abkühlt und das Grundeis sich dem Glatteis ähnlich bildet, welches erst nach Erwärmung des Grundeis über 0° an die Oberfläche steigen könne und hierbei Teile der Sohle mit in die Höhe bringt. Zur Begründung dieser Ansicht wird vorgeschlagen, einige unten geschlossene, oben offene Zinkröhren an seichten Flussstellen in verschiedenen Wassertiefen etwa 20 cm tief in den Erdboden zu setzen in die etwa 4 cm weiten Röhren ein Thermometer einzuführen und je morgens Temperaturmessungen vorzunehmen, welche bei eintretendem Tauwetter öfters am Tage zu wiederholen wären. Das Thermometer ist hierbei in der gegen einstürzende Kälte sorgfältig an der oberen Oeffnung zu verschliessenden Röhre 5 bis 10 Minuten lang am Grunde zu belassen und dann schnell empor zu ziehen; auch muss die Ablesung schnell vor sich gehen, wenn man an das Instrument nicht einen passenden, kleinen Schöpfeimer (Brunnenthermometer) befestigen will. In die Röhre soll etwa 5 cm hoch eine nicht gefrierende Lösung (Rohglycerin) gegossen werden, damit auch bei niedrigen Temperaturen noch das Thermometer sich einführen lässt.

Scheck schreibt: «Der Verein für Erdkunde in Halle (Saale) lässt am hiesigen Orte seit dem 1. Juli v. J. täg-

*) Zeitschrift „Das Wetter“, Novemberheft 1888, Verlag von Otto Salle in Braunschweig.

lich Temperaturmessungen in der Saale vornehmen. Im Anschluss daran wurde wiederholt die Verteilung der Temperaturen an einem bestimmten Stromquerschnitt untersucht und stets gefunden, dass die im Stromstrich an der Oberfläche gemessene Temperatur sich mit Schwankungen von weniger als $0,1^{\circ}$ über alle Teile des Querschnitts gleichmässig verteilt. In der Mitte des Stromes behält das Thermometer in allen Tiefen genau denselben Stand, die Schwankungen (Zunahme) in der Nähe des Ufers sind wahrscheinlich auf die während der längeren Beobachtung zunehmende Lufttemperatur zurückzuführen*). Um genau die Temperatur des Wassers an der bestimmten Tiefe zu erhalten, war das Instrument in ein Holzgefäss von rund 4 Liter Inhalt befestigt, welches mit Klappen versehen war, die erst in der erforderlichen Stellung der Messvorrichtung geöffnet bzw. geschlossen wurden. Die Versuche sollen nach Eingang eines vollkommeneren und bequemer zu handhabenden Instrumentes fortgesetzt werden. Es ist jedoch schon jetzt mit ziemlicher Sicherheit anzunehmen, dass eine Unterkühlung der ganzen Wassermasse nicht stattgefunden hat, wie aus den Angaben der beigegebenen Tabelle**) hervorgeht. Das Thermometer ist vor Beginn der Messungen auf dem Observatorium in Halle genau geprüft worden.

Für die Untersuchungen über Grundeisbildung habe ich zwei Röhren einführen lassen, von denen Nr. 1 etwa 5 m vom Ufer absteht und in einer Tiefe von 60 cm, Nr. 2 dagegen, bei rund 10 m Abstand vom Ufer, in einer Tiefe von 1 m, beides bezogen auf den Stand von $+1,0$ am hiesigen Baupiegel, angeordnet wurde. Die Messungen auf dem 30 cm unter der bezeichneten Sohle liegenden Grunde in den Röhren lassen ein Gesetz nicht erkennen, scheinen vielmehr die Sache noch mehr zu verwirren;

*) Diese Ansicht ist unzutreffend. Die grössere Ruhe in der Nähe der Ufer ist die Ursache.

**) Diese Tabelle wird hier nur auszugsweise behandelt.

höchstens kann daraus entnommen werden, dass die Temperatur der in der Luft herrschenden bei starkem Wechsel williger folgt, als die des Stromstrichs. Ich habe das Thermometer deshalb unmittelbar in die Sohle eingeführt und hierbei zeigte sich, dass ein Aufsteigen von Eiskrystallen am 5. und 11. Januar beobachtet wurde, wenn die Sohlentemperatur unter 0° sank. An beiden Tagen trat ein Mindestwert in der Luft- und Wassertemperatur ein. Die Messstelle an den Röhren war bis zur Mittagszeit nicht mehr vollkommen eisfrei zu halten, die Bildung der Eisdecke dürfte jedoch die Ausstrahlung verhindern und dadurch die Bodentemperatur beeinflussen. Die Zusammenstellung der Ergebnisse während der letzten zwei Frostzeiten mag immerhin einiges Interesse beanspruchen; ich füge sie daher bei ohne weitere Folgerungen daran zu knüpfen.» Soweit Scheck.

Die gemessenen Temperaturen der Flusssohle in den Röhren Nr. 1 und 2 variierten im allgemeinen von 0° C. bis $+1,2^{\circ}$ C., hierbei stand die Temperatur in der Röhre Nr. 1 stets einige Zehntel Grad höher als in der Röhre Nr. 2. Nur bei drei Messungen sind Abweichungen beobachtet worden, welche aber negative Werte ergaben, was lediglich auf Mängel der Messungen zurückzuführen ist, indem dabei wohl die äussere Lufttemperatur schädlich einwirkte. Es bestätigt sich diese Annahme sofort auch durch die Messungen selbst, denn die Temperaturen der Flusssohle neben den Messröhren, welche durch direkte Einführung des Thermometers in die Sohle gefunden wurde, ergaben nämlich auch für alle Messungen positive Werte, nämlich von $+0,1^{\circ}$ C. bis $+0,6^{\circ}$ C. Nur zwei dieser letzteren Messungen machen hiervon eine Ausnahme, nämlich am 5. morgens wurde gefunden:

(in der Röhre Nr. 1 = $+0,2^{\circ}$ C.)
neben der Röhre Nr. 1 = $\pm 0,0^{\circ}$ C.
(in der Röhre Nr. 2 = $\pm 0,0^{\circ}$ C.)
neben der Röhre Nr. 2 = $-0,2^{\circ}$ C.

und am 11. morgens:

(in der Röhre Nr. 1 = $+0,6^{\circ}$ C.)
neben der Röhre Nr. 1 = $-0,6^{\circ}$ C.

(in der Röhre Nr. 2 = $\pm 0,0^{\circ}$ C.)
neben der Röhre Nr. 2 = $+0,1^{\circ}$ C.

Hierbei wird bemerkt, dass beim Einstecken der Thermometer in der Sohle neben der Röhre an diesen beiden Tagen Eiskrystalle aufstiegen. Es erklären sich diese Temperatur-Widersprüche nach unseren eigenen Beobachtungen sofort dahin auf, dass an diesen beiden Tagen an den Messungsstellen sich Grundeiskrystalle angesetzt hatten, und das von Scheck erwähnte Aufsteigen von solchen beim Einstecken lässt darauf schliessen, dass diese durch das Thermometer berührt wurden. Es findet dies Bestätigung darin, dass die Lufttemperatur vom 4. zum 5. von $-1,1^{\circ}$ auf $-9,1^{\circ}$ C. und vom 10. zum 11. von $+4,8^{\circ}$ auf $-8,5^{\circ}$ C. sank bei Südwest, bezw. Ostwind, und bei jeweils vorherigem ganz oder teilweise wolkenlosem Himmel; was alles, wie wir gesehen haben, der Grundeisbildung günstig ist. Die Temperaturangaben sodann weisen darauf hin, dass einige der Grundeiskrystalle bei der Messung neben der Röhre mit dem Instrument in den Boden eingestossen wurden, dort in energischen Schmelzzustand gierten und so das Sinken der Temperatur unter Null verursachten, wie ich selbst solche Tatsachen öfters zu beobachten Gelegenheit hatte. Wie wäre es anders erklärlich, dass das Thermometer in der Röhre No. 1 am 11. $+0,6^{\circ}$ C. und neben der Röhre $-0,6^{\circ}$ C. ergab, während sonst stets die Temperatur in der Röhre selbst niedriger gefunden wurde, als daneben, was auch bei Berücksichtigung der Möglichkeit des Zutrittes freier Luft mit Temperatur unter Null Grad in die Messungsröhre als ganz natürlich erscheint.

Die Wassertemperatur im Stromstrich variierte an den 12 Tagen, während denen Scheck beobachtete, von $+0,1^{\circ}$ bis $+0,7^{\circ}$ C. und sie betrug am 5. und 11., als an den

Tagen, an denen das Aufsteigen von Grundeiskrystallen beobachtet worden ist, $+ 0,2^{\circ}$ an ersterem bzw. $+ 0,1^{\circ}$ C. an letzterem Tage.

Es ist diese Beobachtung in Uebereinstimmung mit den meinigen, dass nämlich das Grundeis bereits auftritt, bevor das Tiefenwasser auf 0° abgekühlt ist, und man darf wohl schliessen, dass vielmehr an der Saale eine Abkühlung des tieferen Wassers bis auf Null gar nicht stattfand und dennoch Grundeis sich zeigte. Es bleibt somit auch hier ausgeschlossen, dass die aufsteigenden Krystalle in der Tiefe entstanden sind in Wassertemperatur über 0° . Sie entstanden an der Wasseroberfläche in Berührung dieser mit der kalten Luft und setzten sich, mit dem Wasser an die Sohle gelangt, dort an und entwickelten sich.

So gibt Scheck in einer Anmerkung zu seiner Temperaturtabelle selbst an: «Vom 1. bis 4. war Treibeis auf dem Flusse, vom 4. bis 12. Eisstand oberhalb der Messstelle.» Dies alles bestärkt die gezogenen Schlüsse schon an sich selbst.

Das vorstehende Verzeichnis der in Kürze angeführten bekannteren Beobachtungen erhebt keineswegs Anspruch auf Vollständigkeit: Alle Angaben aber, von einigen Spekulationen und unrichtigen Auffassungen abgesehen, bestätigen meine eigenen Beobachtungen und Messungen. So unglaublich solche Angaben auch oft erscheinen möchten, so erklären sie sich sehr leicht, durch ein hinreichendes Studium aller bei der Grundeisbildung mitspielenden Fragen. Die Ursachen der Erscheinungen sind aber so mannigfach und ineinandergreifend, dass man in der Belauschung derselben nicht müde werden darf. Frost, Wind und Unwetter sind bei dieser Aufgabe in seltenem Masse hinderlich fühlbar, nicht allein in Bezug auf ihren Einfluss auf die Messinstrumente und Messungen, sondern ebenso sehr auf die physische Kraft auch des geduldigsten Beobachters selbst. Nur zu leicht sind diese geeignet, entmutigend und abschreckend einzuwirken und die beste

Geduld zu brechen. Den festen Willen zur Erreichung eines bestimmt vorgesteckten Zieles können indes keine in den Weg tretenden Schwierigkeiten aufhalten.

Der Umstand, dass noch die neuesten Bücherausgaben die Entstehung des Grundeises aus der Erstarrung überkälten Tiefenwassers etc. ableiten (vergleiche Meyers und Brockhaus Konversations-Lexikon und Luegers Lexikon der gesamten Technik; Tolkmitt, Wasserbaukunst und Handbuch der Ing. Wissenschaften etc. etc.) lässt die Bekanntgabe der bei der Grundeisbildung beobachteten Tatsachen und einer diesen wirklich entsprechenden Grundeistheorie als dringendes Bedürfnis erscheinen; umsomehr als nicht sowohl allein die Wissenschaft, als auch die Technik der mit Wasserkraft arbeitenden Industrien hierbei in nicht zu unterschätzender Masse interessiert sind. Dabei verhehle ich mir nicht, dass eine berufeneren Feder aus meinen Messresultaten noch weitere Schlüsse ziehen können.

Spezielle Beispiele von Störungen in Wasserläufen und Wasserwerken.

III.

Technische Anwendungen.

Während die Bildung einer Oberflächeneisschicht an sich für gewöhnlich keine üblen Folgen hat, diese im Gegenteil im tragfähigen Zustande vielerorts mit Erfolg als Gerüst oder Dienstbrücke bei Montage von Brücken, bei Baggerarbeiten etc. benützt wird; in Russland sogar Dampf- und elektrische Verbindungsbahnen über Flüsse und Seebecken auf dem Eise direkt abgestellt werden, und während solche nur etwa bei zu frühem Abtreiben von Treib- und Grundeis aus dem Oberlaufe mit zu Störungen der regelmässigen Wasserabfuhr Anlass geben kann, so ist dagegen allgemein die Grundeisbildung schädlich, sobald sie einen grösseren Umfang annimmt.

Dem treibenden Oberflächeneis kann in Kanälen und Flüssen gewöhnlich leicht Abfluss verschafft werden, weil es in einzelnen spezifisch leichteren, festen und fassbaren Stücken sich an der Wasseroberfläche bewegt, welche Temperatur nahe Null Grad hat. Das Grundeis dagegen gleicht einer zähen Flüssigkeit, ist nicht fassbar, setzt sich überall beliebig fest und stört oft den ganzen Wassertransport. Die Eigenschaft der zähen Massen erhält es durch seine unvollkommene Entwicklung bei Mangel überschüssiger Kälte zur Zusammenkittung der Krysalgebilde, zu welcher die Molekularkraft nicht mehr mitwirkt; sodann durch Anschmelzen in den tieferen Wasserschichten, in denen es sich bewegt (Regelation). Es kann treibend an die Wasseroberfläche gelangen, Kälte aufnehmen, unter-

kühlt absteigen und weitere Eisbildungen veranlassen. Auch mit Sprengmitteln ist einer Verstopfung nur sehr schwer beizukommen, kaum gelöst hängen die Schollen sofort wieder aneinander, wenn sie nicht einzeln sofort abgeführt werden.

Schon aus den vorstehend in Kapitel I und II gegebenen Ausführungen ergeben sich nun für den Techniker eine Reihe von Mitteln und Anwendungen zur Behebung von Störungen, die durch die Grundeisbildung hervorgerufen werden können. Einige weitere Andeutungen darüber mögen hier daher genügen.

Um Grundeisbildungen und daherige Störungen in Industriekanälen und Flüssen zu vermeiden, muss die Wassergeschwindigkeit auf dasjenige Mass verringert werden, welches beim ersten grösseren Frost die Bildung einer unschädlichen Oberflächeneisschicht ermöglicht und die Bildung des Grundeises aber verhindert.

Diese Grenze der Wassergeschwindigkeit befindet sich je nach Klima und Rauigkeitsgrad des Bettes bei 0,5 bis 0,9 m:sec. Bei 1 bis 1,5 m:sec. ist die Bildung einer schützenden Oberflächeneisschicht für gewöhnlich und auch in nördlichen Gegenden unmöglich, wogegen unter sonst günstigen Verhältnissen der Grundeisbildung Tür und Tor offen stehen. Neben einer beschriebenen Herabminderung der Geschwindigkeit des Wassers — die für gewöhnlich keine Nachteile hat, da diese kleine Geschwindigkeit mit der Frost- und der Niederwasserperiode zusammenfällt —, sind naturgemäss die Bettsohle und die Ufer möglichst glatt zu gestalten, um Wallungen und nach der Sohle saugende Wirbel zu vermeiden und zu verhindern, dass die Krystalle, statt eine Eishaut an der Oberfläche zu bilden, der Tiefe zuströmen.

Diese angegebenen Geschwindigkeitsgrenzen sind durch Experimente an grösseren Industriekanälen bestimmt worden und hierzu ist vorstehend die zutreffende Erklärung gegeben. Unter einer schützenden Eisdecke ist der Einfluss der kalten Luft auf das Wasser gemindert, die erwärmende Kraft des Bodens gewinnt die Oberhand, die Grundeis-

bildung hört auf und etwa im Wasser treibende Eiskristalle treten an die Oberfläche, schiessen an die Eisschicht an, oder werden in den tieferen Wasserschichten geschmolzen.

O. Krieg*), Fabrikdirektor und meteorologischer Beobachter in Eichberg, beobachtete die Grundeisbildung in seinem Gewerbekanal und gibt eine Beschreibung, welche das hierüber Gesagte bestätigt; er vermutet aber bestimmt, die Sohle des Kanals kühle sich durch Ausstrahlung in den klaren Winterhimmel ab bis unter Null Grad, was bekanntlich nicht der Fall ist.

Dr. M. Schmid**) glaubt auf Grund der Beobachtung zweier Mühlenkanäle, der im Wasser schwimmende Sand werde abgekühlt, und an die Sohle gelangt, kühle dieser seinerseits dieselbe ab bis sich dort Eis bilde, eine Ansicht, die einer Widerlegung nicht mehr bedarf.

Die Industrie sucht gerade die stark geneigten Wasserläufe oder Stromschnellen auf, um sich deren Kraft zu bedienen. Diese sind nun aber auch gerade die grundeisbildenden Flussstellen und mit Rücksicht auf die grossen und schweren, aus der Grundeisbildung folgernden Betriebsstörungen muss darauf hingewiesen werden, dass bei den Wehreinbauten und Kanalanlagen unbedingt auf kleine Geschwindigkeiten vor dem Kanaleinlaufe und im Kanal selbst Bedacht genommen wird, auch auf die Gefahr hin, dass die Kanalquerschnitte etwas grösser gewählt werden müssen. Die Bildung einer Oberflächeneisschicht in einem Kanal kann auch etwa bei nicht gar zu grosser Geschwindigkeit durch in bestimmten Abständen quer zum Stromstrich in den Kanal auf den Wasserspiegel eingelegte Holzbalken befördert werden, nachdem vorher grössere Steine und Hervorragungen der Ufer und Sohle beseitigt sind. Durch solche Balken kann auch den schädlichen Einflüssen des Windes etwas gesteuert werden.

Auch in Kanälen, deren Ufer mit Brettern verkleidet sind, bildete sich nach meinen Beobachtungen das Grund-

*) Zeitschrift „Das Wetter“, No. 12, Dezember 1888, Seite 272.

**) do., Seite 284.

eis, wenn die Geschwindigkeit gegen 1,3 m:sec. anstieg. Es genügt daher nicht, den Rauigkeitsgrad gering zu gestalten, ohne auch die Geschwindigkeit des Wassers auf ca. 0,8 m:sec. herabzumindern. Eine Geschwindigkeit von unter 1,0 m:sec. verlangen auch die auf das Wasser zu legenden Holzbalken als Anhaltspunkte für die Oberflächeneisbildung; ein Experiment, das ebenfalls praktisch erprobt wurde.

Unter einer beim ersten stärkeren Frost gebildeten Oberflächeneissschicht geht der Wassertransport oft den ganzen Winter, jedenfalls während der Frostperiode, ohne Störung vor sich, wenn man darauf Bedacht nimmt, die Wasserspiegelhöhe etwas konstant zu erhalten, damit das Eis nicht bricht; allfällig im Wasser noch treibende Krystalle treten in ruhiger Strömung an die Oberfläche und schießen an die Eisschicht an. Durch eine Eisschütze oder den Leerlauf wird dann diese Eisdecke stückweise abgelassen, wenn sie zerstört wird, ohne einfach schadlos abzuschmelzen.

Eine solche Eisdecke vermindert dann auch, wie gesagt, den Einfluss der Variationen der Lufttemperatur, des Windes und Luftdrucks auf das Wasser, ebenso die wirksame Ausstrahlung.

Wir haben schon früher darauf hingewiesen, dass plötzlicher Frost nach Tauwetter die grössten Grundeis-schwierigkeiten im Gefolge hat, indem dann das bereits durchwärmte Wasser an der Oberfläche plötzlich gekühlt wird und in einer einzigen Nacht massenweise Krystalle auf dieser entstehen.*)

Diese Krystalle gelangen in Berührung mit den tieferen Wasserschichten, in den Schmelzzustand, kühlen diese ab, bilden Galerteis und regeln sich sobald sie in grossen Massen auftreten.

Alle diese Vorgänge werden durch eine kräftige Oberflächeneissschicht gemildert oder ganz behindert.

*) Diese Tatsache erwähnen auch andere Beobachter. Siehe Kapitel II: Knight, Hugli, Strehlke und Scheck.

Tüchtige Praktiker haben dies auch auf empirischem Wege erkannt und sie sorgen beim Eintritt von Störungen im Turbinenbetrieb künstlich für die Bildung einer Eisdecke auf dem Werkskanal, indem sie Kanäle mit für die Bildung der Obereisschicht zu grosser Geschwindigkeit ausser Betrieb stellen, ohne das Wasser abzulassen, und überfrieren lassen und dann diese Eisschicht zu halten suchen durch einen konstanten Wasserspiegel. So bald nämlich das Wasser stark durchkühlt ist und Grundeis treibt, so geht die Bildung der Oberflächeneisschicht sehr rasch von statten bei Frostwetter, indem beim ruhig gestellten Wasser das Grundeis an die Oberfläche steigt und sehr bald die Eishaut entsteht. Dazu genügt oft schon der Sonntag, welcher beim Fabrikbetrieb ohnehin meist Ruhetag ist.

Unzutreffend und unheilvoll aber ist es, dass man noch an vielen Orten bei Störungen an die Aufeisung eines etwa schon vorhandenen Stückes einer Oberflächeneisschicht schreitet, sofern sie nicht nur ganz lokal ist.

Ebenso ist das Entleeren des Kanals schädlich, da hierbei die Ufer unterkühlt werden.

Ueberhaupt ist eine entsprechende Instruktion des Bedienungspersonals erforderlich, schon bevor sich Störungen bemerkbar machen, indem solche leicht verhütet werden können, wenn man den Anfängen wehrt. Dagegen ist die Beseitigung von vorhandenen vollständigen Stockungen sehr schwierig und hat gewöhnlich vollständige Ausserbetriebsetzung zur Folge.

Die grössten Störungen, welche vielerorts im Betriebe von Kraftanlagen auftreten, liegen darin, dass bei Eintritt von starkem Frost nach Tauwetter, auch etwa — wenn gleich seltener — plötzlicher Auftrieb grosser Grundeismassen bei Eintritt von Tauwetter nach starkem Frost, Einfrieren und Stillstehen der Turbinen erfolgt.

Alle diese Schwierigkeiten haben ihren Grund in dem eigentümlichen Verhalten des Eises, in Wasserschichten von etwas über Null Grad anzuschmelzen, dann zu rege-

lieren, oder etwa unter Einfluss der Grenzflächenspannungen massenweise Galerteis zu bilden, was auch unterkühltes Treibeis bewirken kann.

Ein Beispiel mag das Gesagte bestätigen: Einige Turbinenanlagen*) in Narva zeigten das eigentümliche Verhalten, längere Zeit gut zu arbeiten, um dann plötzlich stille zu stehen und im vollen Betriebe einzufrieren, wenn Tauwetter in starken Frost umschlug.

Dabei liefen die Turbinen am Morgen früh um 6 Uhr bei Inbetriebsetzung an, verlangsamten nach einiger Zeit ihren Gang, um dann ganz stille zu stehen. Diese bei Textilindustrie etc. sehr unangenehmen Störungen wurden dann durch Auftauen beseitigt, indem aus einem bereitgestellten Dampfkessel Warmwasser und Dampf eingeführt wurde. War nun aber auf solche Weise eine Störung beseitigt, so folgten sich diese auf dem Fusse, bis wieder die Temperaturen sich ausgeglichen hatten und mehr konstant und gleichmässig wurden.

Diese Schwierigkeiten traten meist im Monat März auf.

In einigen Turbinenanlagen fehlte eine Dampfkesselanlage zur Aufwärmung und es wurden die Störungen durch Auspickeln und Ausschöpfen des Eises aus den Gehäusen beseitigt. Diese Turbinen — wieder in Gang gesetzt — wiederholten Stillstand und Einfrieren nicht mehr am gleichen Tage. Das Unterwasser dieser letzteren floss direkt in den Fluss bei nur kurzem Unterwasserkanal. Um nun diese Störungen besser zu verstehen, muss beigefügt werden, dass die staffelweise**) angeordneten vier Turbinen (System Jonval), welche die Störungen öfters nach dem Auftauen wiederholten, in den Erdboden versenkt waren und deren Triebwasser in zwei kürzeren und zwei längeren Unterwassertunnels wieder dem Flusse zufloss. Die Oberwasserkanäle dieser Turbinenanlagen hatten allgemein zu grosse Geschwindigkeit, um die Bil-

*) Jonval-Turbinen von je ca. 1000 HP.

**) nicht etagenförmig.

dung einer Oberflächeneisschicht zu gestatten und zu ermöglichen (ca. 1,5 m:sec).

Diejenigen dieser zwei Turbinen, deren Unterwassertunnels länger waren, waren bedeutend mehr Störungen ausgesetzt und diese traten auch schon frühzeitiger auf, als bei den andern zweien. Die Tunnels waren an der Ausmündung in den Fluss mit hölzernen Toren über Wasserspiegelhöhe geschlossen.

Damit ist nun auch die Erklärung der Vorgänge schon gegeben:

Bei Tauwetter nahmen die Unterwassertunnels und auch die Turbinengehäuse eine höhere Temperatur (Erdwärme) an, als die offenliegenden Oberwasserkanäle und das Wasser in denselben, und zwar umsomehr, je länger diese Tunnels waren, da durch die grössere Länge der Tunnels die Einwirkung der kalten Luft abgeschwächt wurde. Trat nun nach Tauwetter über Nacht starker Frost ein und es bildeten sich auf dem Flusse und Oberwasserkanal grössere Massen schwimmender Eiskrystalle, so gelangten diese in die Turbinengehäuse und dort in höherer Temperatur in den Schmelzzustand; umsomehr, als die Tunnelräume dem starken Temperatursturz nicht zu folgen vermochten, indem wie gesagt die Erdwärme auf die Turbinengehäuse einwirkte und in ihrer Temperatur beeinflusste, namentlich an der berührenden Umfassung. Die Turbinen gingen nun eine Weile, da die Eisenteile und das Gehäuse zufolge ihrer Temperatur über Null Grad Eiskrystallanhaftungen nicht in grosser Zahl zuliessen. Das die Schaufeln und das Leitrad allseitig umströmende Wasser kühlte dieses mit Beihülfe der Eiskrystalle rasch ab, bis dort die mit grosser Kraft unter Druck auftreffenden Krystalle anhaften konnten und nicht mehr abzuschmelzen vermochten und nun in grossen Massen auf dem Leitrad regelierten, sich anhäuften und die Schaufeln schliesslich stopften. Im Nu ist dann das Gehäuse voll Grundeis und die Turbine steht still. Ist dann die erste Störung durch Aufwärmen gehoben, so sind die günstigen Bedingungen für die sofortige

Wiederholung des Prozesses und nacheinander folgenden Störungen geschaffen; während diejenigen Turbinen, die nicht tief in der Erde versenkt waren und wie diejenigen, in denen das Eis ausgeschöpft wurde, ein für alle Mal abgekühlt waren und den Krystallen Anlass zur Anschmelzung und Regelation nicht mehr in dem Masse boten, um Störungen zu wiederholen.

Auch in der Luft haben plötzliche, starke Wechsel von Tau und Frost Eisbildung zur Folge: Sinkt die Temperatur bei schneller Abkühlung rasch unter den Taupunkt, so tritt dichter Nebel ein und Erfüllung der Luft mit Eiskrystallen.

Bei ruhigem, langsamen Temperaturwechsel ist dies nicht der Fall. Dagegen würde sich auch hier der gleiche Vorgang wiederholen, wenn wir es in der Hand hätten, Tau und Frost nacheinander abwechslungsweise eintreten zu lassen.

Auf einem Zwischenboden über dem Unterwasser der besagten vier Turbinen waren überdies Koksöfen aufgestellt worden, und es wurde der Tunnelraum im Winter kräftig geheizt, um die Störungen zu heben, was aber naturgemäss nicht gelang. Nach den vorstehenden Begründungen ist es unschwer zu erraten, dass Abhülfe dadurch gesucht werden musste, bei Anzeige von Witterungsumschlag durch das Barometer, von Tauwetter zu Frost, die Unterwassertunnelräume zu ventilieren, um der äusseren Luft Zutritt zu gestatten und gleichmässiger Abkühlung zu ermöglichen.

Die Heizung hat nur Berechtigung, wo es nötig ist, Temperaturen von unter Null Grad zu bekämpfen und zu beseitigen; sie ist aber ein Feind der störungslosen Bewegung von Wasser, in welchem sich Eispartikel befinden; es sei denn, dass sie mit solcher Wucht und Kraft einsetzen könnte, dass sie das Eis vollständig zu vernichten vermöchte, was für gewöhnlich ausgeschlossen ist bei grösserem Wasserquantum, wie bei Wasserwerken üblich.

Ganz analoge Verhältnisse weist eine Kraftanlage eines schweizerischen Eisen- und Walzwerkes auf:

Aus dem ca. 1,5 km langen Oberwasserkanal mit ca. 1,1 bis 1,5 m Wassergeschwindigkeit pro Sekunde zweigen am Ende fünf schmiedeiserne Röhrenleitungen ab zu den Turbinen mit ca. 10 m Gefälle. Vier dieser Leitungen haben Längen von bis 50 m, die grösste dagegen hat eine Länge von ca. 280 m mit 1,8 m Durchmesser. Alle fünf Leitungen sind in den Erdboden verlegt.

Der Fluss, aus dem das Triebwasser entnommen wird, ist ein ausgesprochenes Wildwasser und sehr der Grundeisbildung unterworfen.

Die meisten, am ehesten und stärksten auftretenden Störungen zeigen die an der 280 m langen Rohrleitung liegenden Turbinen, obwohl man bei oberflächlicher Betrachtung hätte annehmen sollen, dass die Erdwärme in der langen Leitung das mit Eisnadeln geschwängerte Wasser günstig beeinflussen müsste. Das Gegenteil ist der Fall, und es kann dieses Resultat nach den vorstehenden Erklärungen nicht befremden. Die Leitung war zu kurz, um die Eispartikel ganz abzuschmelzen. Die Ursache dieses Verhaltens der Turbinen ist lediglich in den schädlichen Temperaturdifferenzen zu suchen, da alle Turbinen gleichen Systems waren und zudem der Einlauf vom Oberwasserkanal für diese grosse Rohrleitung günstiger lag, als für die andern vier. Ersterer zweigt unterwegs seitlich vom Kanal ab, letztere vier dagegen am Kanalende, wo alles Treibeis sich ansammelt.

Es bestätigt dies die Störungen, wie sie in den Kraftanlagen in Narva auftraten; aber diese nachträgliche Bestätigung wird noch ausgesprochener durch Betrachtung der Unterwasserabführung dieser letzteren fünf Turbinen. Alle fünf Turbinen münden in den gleichen gemeinschaftlichen längern (200 m) Unterwasserkanal, welcher überwölbt und wie an der Narova als Tunnel ausgebaut ist.

Die Ausgangsmündung gegen den Fluss zu war wie in Narva mit hölzernem Klappentor geschlossen und wurde

alle Winter sorgfältig gestopft und gehütet, in der scheinbar berechtigten Meinung, die Störungen würden noch grösser sein, wenn die kalte Luft zutreten könnte.

Das Gegenteil war aber auch hier der Fall: Seitdem das Tor weggenommen d. h. defekt und nicht mehr erneuert worden, und also in dem langen Tunnel auch nur einige Ausgleichung der Temperaturen möglich ist, so haben sich die Störungen sofort ganz bedeutend vermindert, an Zahl sowohl als an Umfang.

Unter allen Umständen ist es notwendig, die Rohrleitungen vor Temperaturen unter Null Grad zu schützen und nicht an freier Luft zu verlegen, wenn Grundeis-schwierigkeiten zu gewärtigen sind, da sonst die Röhren im Innern konzentrische Eisanlagerung zulassen, bis sie geschlossen sind. Bei einem städtischen Elektrizitätswerk in der Schweiz, das an einem Wildwasser mit ausgesprochener Grundeisbildung liegt, wurde auf diese Weise ein Druckrohr von 1,60 m Durchmesser gestopft; so dass bei Ausserbetriebsetzung nur noch ein lichter Durchmesser von 0,5 bis 0,6 m vorhanden war.

Die gleiche Erfahrung machte ich mit einer Pressluftleitung für Caissonbetrieb, in welcher sich die Feuchtigkeit an den Rohrwänden niederschlug und krystallisierte, bis die Stopfung vorhanden war.

In dem benannten städtischen Wasser- und Elektrizitätswerke treten sehr viele Störungen durch Grundeis auf und es ist dort eine umfangreiche Dampfheizung eingerichtet worden.

Von einer grösseren Stauwehranlage bei der Wasserentnahme ist Umgang genommen worden, da sie beweglich und sehr kräftig hätte sein müssen zur Abführung der in dem betreffenden Gebirgsflusse auftretenden sehr bedeutenden Hochwasser- und Treibeisgängen.

Das Wasser rieselt daher im Winter bis zum Kanaleinlaufe über das grobe Flussgerölle herunter und muss so durchwegs die Temperatur Null Grad annehmen. Treibt

der Fluss Grundeis, so wird dieses durch ein kleines, festes Wehr dem Werkskanal zugeführt. Dieser selbst weist eine Wassergeschwindigkeit von ca. 1,5 m:sec. auf. Diese als zu gross bezeichnete Geschwindigkeit ist in diesem Falle, wo die ganze Eismasse einer gewaltigen Flusstrecke mitgeführt werden muss, nicht nachteilig. Würde hier im Kanal die Geschwindigkeit klein genommen und die Bildung einer Oberflächeneisschicht ermöglicht, so müssten die bedeutenden unter diese geführten Eismassen regeln und Galerteisstopfungen verursachen. Es sei denn, es würde ein höheres Stauwehr eingebaut, das Wasser im Flusse eine Strecke weit ruhig gestellt und Eisansammlungen durch eine Schütze des Stauwehrs abgelassen. Eine solche Anordnung kann natürlich bei Gewinnung einer nur geringen Kraft zu teuer sich stellen. Unerlässlich ist aber ein Eisablass auch in jedem Falle in dem festen Grundwehr.

Der Rechen und die Rohrmündung am Ende des $2\frac{1}{2}$ Kilometer langen offenen Kanals, mit ca. 15 m Nutzgefälle, wurde wegen zu vielen Stopfungen durch Eis auf die Sohle des Kanals verlegt, was sich als untunlich erweist, indem Stopfungen doch auftreten und aber jetzt ein Reinigen des an der Kanalsohle befindlichen Rechens sehr umständlich ist.

Die Druckrohrleitung wurde sorgfältig mit einem Zementgewölbe umschlossen, welches mit Dampf geheizt wird.

Auch der Raum der Turbine (System Girard) wird geheizt und vor dem Turbinenkessel münden überdies in das Druckrohr links und rechts seitlich je ein Gasrohr $\frac{3}{4}$ englische Zoll, durch welches Dampf ins Triebwasser gelassen werden kann, und endlich ist ein solches Gasrohr um den Spalt zwischen Leit- und Laufrad herumgeführt mit vielen Düsen, welche den Dampf in den Spalt eindringen lassen. Auch die Leerlaufschütze ist aufwärmbar.

Diese gewiss sehr ausgiebige und kostspielige Heizung befriedigt aber keineswegs; sie gewinnt die Uebermacht

über eine Eisstopfung erst, wenn bei vollständig offener Regulierung der Wasserdurchtritt durch die Turbine auf 100 bis 200 Sekundenliter gefallen ist, was bei einer Turbine von einigen hundert Pferdestärken einer gänzlichen Stopfung nahezu gleichkommt. Die Heizung verhindert also das vollständige Stillstehen, aber sie kann nicht verhindern, dass die Wasserkraft sozusagen vollständig durch Dampfkraft ersetzt werden muss, und zudem würde der Verlust an Kohlen für die Turbinenheizung eine grössere Dampfkraft abgeben als die 30 HP, welche diese Turbine noch leistet unter Einfluss der Eisstopfung.

Von der besprochenen Heizung kann der Spaltheizung allein einige Bedeutung zugesprochen werden. Beim Druckrohr zielt sowohl die Heizung des Tunnelraumes als auch der in das Druckrohr strömende Dampf auf Ueberführung des mitgeführten Eises in flüssigen Zustand ab, ähnlich wie die Heizung in Narva, denn es sind bei einer in den Boden verlegten Druckrohrleitung keine schädlichen Temperaturen unter 0° zu bekämpfen, wohl aber oft das Gegenteil.

Während andererseits der in den Spalt strömende Dampf auf das in den Schaufelöffnungen angesetzte Eis stichflammenförmig einwirkt, namentlich bei vollständiger Stopfung der Leitrad-schaukeln, so dass dieses abschmelzen muss.

Es ist leicht rechnerisch nachzuweisen, dass Heizungen, die auf Ueberführung des im Wasser mitgeführten Eises in Wasser von Null Grad abzielen, wirtschaftlich wertlos sind.

In dem Gewerbekanal mögen bei 4 m^3 Wasser pro Sekunde etwa $0,03 \text{ m}^3$ Eis enthalten sein, was als sehr schwach gerechnet erscheint für das im Auge liegende Beispiel. Dieses Eis soll durch Heizung in Wasser von Null Grad verwandelt werden, wozu aber ein Heizmaterialquantum erforderlich ist, das einer weit grösseren Dampfkraft entspricht, als obige 4 m^3 :sec. Betriebswasser bei 15 m Gefälle je Wasserkraft liefern können.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass unterkühlte Eispartikel, welche energisch ins Schmelzen gebracht werden, im Innern unterkühlt bleiben, bis sie abgeschmolzen sind, was ich durch Experimente mit in Eisstücke eingefrorenen Thermometern nachgewiesen habe. Es trifft hier also die landläufige Meinung nicht zu, wonach jede Wärmezufuhr die Eisstörungen vermindern könnte. Sie ist nützlich zur Verhinderung von Unterkältungen unter 0° , was mehr getan wird, schlägt ins Gegenteil um, weil das im Wasser treibende Eis keine Temperaturdifferenzen verträgt, ohne sofort zu regelieren und weitere Eisbildungen zu veranlassen.

Es ergibt sich daraus, dass die Heizung im allgemeinen ein unwirksames, meist aber schädliches Mittel ist zur Bekämpfung von Eisstörungen und dass sie, wenn überhaupt, nur Berechtigung hat, soweit sie zur Verhinderung von Unterkühlung und daheriger Eisansetzung an die Eisenteile verwendet wird. Das letztere ist dagegen leicht zu erzielen, da hierzu Temperaturen von $+0,3$ bis $+0,5^{\circ}$ C. genügen, wie aus den früher gegebenen Steintemperaturen sich ergibt.

Bei einer Turbinenanlage in Schönenwerd mit kleinerem Gefälle werden öfters die Schaufeln des horizontal angeordneten, also von oben beaufschlagten Leitrades durch Grundeis gestopft. Man versuchte die Stopfungen, sobald sie in ihrem Beginn bemerkt wurden, durch Einführung eines kräftigen Dampfstrahles zu beheben. Aber mit gegenteiligem Erfolg. Ein günstiges Resultat hat dagegen die Zuführung eines starken Wasserstrahles aus der Druckwasserleitung auf die Schaufelöffnungen, und ohne dass etwa das Wasser künstlich erwärmt worden wäre. Es geschieht die Zuführung hier durch ein Rohr, dessen Mündung in die Nähe der gestopften Schaufeln gebracht wird; das mit Hydrantendruck zufließende Wasser schlägt sodann die in Stopfung befindlichen Schaufelöffnungen wieder durch. Also auch hier wieder der Beweis, wie schädlich grosse Temperaturdifferenzen sind.

Die Ursache der Störungen muss aber auch vom Turbinenkonstrukteur erfasst werden und er muss zu deren wirksamen Verhinderung in erster Linie beitragen.

Eine solche Stopfung der Turbinen geschieht nämlich in der Weise, dass sich auf die undurchbrochene Leitrad-scheibe innerhalb des Schaufelkranzes Eiskrystalle ansetzen, sobald diese Eisenteile vom Wasser und Eis hinreichend gegen Null Grad abgekühlt sind, dies umsomehr je leichter und rascher letzteres der Fall ist und je energischer die im Wasser treibenden Eiskrystalle durch die Wasserwärme selbst angeschmolzen werden. Nach einiger Zeit bilden diese Krystallansammlungen einen Kegel mit Grundfläche auf dem Leitrade. Die durch den engen Rechen durchtretenden Eisschwämme werden anfänglich noch ohne Schaden mit der Energie des Wassers durch die Schaufelöffnungen durchgerissen. Wie der besagte Eiskegel aber sich vergrössert, nimmt die Energie des Wassers langsam ab, bis der Kegel über die Schaufelöffnungen hinauswächst oder aber zerstört wird und mit seinen schon festen Schollen die Schaufelöffnungen schliesst; dann wird das Eis aus dem etwa noch durchtretenden Wasser abgeseibt, der Gang verlangsamt sich und bald ist das Gehäuse voll Eis gestopft und eingefroren.

Diese erste Ansammlung der Krystallmassen zu Eisschollen an ruhigerer Stelle auf dem Leitrade muss durch kegelförmigen Ausbau des undurchbrochenen Teiles der Leitrad-scheibe zu verhindern gesucht werden. An dessen Mantelfläche werden die Krystallansammlungen durch die Energie des den Schaufelöffnungen zuströmenden Wassers verhindert. Die Schaufelöffnungen ihrerseits sollten eher, selbst auf Kosten des Nutzeffektes, so gross als möglich gestaltet und den Eisverhältnissen angepasst werden.

Nötigenfalls könnte durch Höhlungen des beschriebenen Leitradkegels Druckwasser etwas über Null Grad durchgeleitet werden, um das Ansetzen der Krystalle an dem leicht abkühlbaren Kegelmantel zu verhindern, eine Konstruktion, die keinerlei Schwierigkeiten bietet. In den

Zwischenräumen der Schaufelöffnungen selbst können sich Krystalle nur sehr schwer festsetzen und die hier bloß regelierten Schollen haben im allgemeinen nicht die Festigkeit, um dem durchströmenden Wasser zu widerstehen; andernfalls könnten auch die Schaufelöffnungen mit Druckwasser behandelt werden.

Sodann ist auch den Reguliervorrichtungen bei Turbinen an Gewässern, die stark den Grundeisbildungen unterworfen sind, besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Reguliersysteme, bei denen der ganze Schaufelkranz gleichzeitig geschlossen wird, sind weit eher Störungen ausgesetzt, als solche, bei denen eine Schaufelöffnung (oder Gruppen derselben) nach der andern verschlossen wird, die arbeitenden Oeffnungen aber offen bleiben können.*)

Die durch Experimente nachgewiesene Tatsache (siehe Seite 60), dass durch Wasserreibung das Eis positiv, die übrigen Körper (Eisen) negativ elektrisch geladen werden, dürfte hierbei eine untergeordnete Rolle spielen und mehr nur wissenschaftliches Interesse bieten, handelt es sich doch hier meistens nicht darum, die Grundeisbildung zu verhindern, sondern vielmehr darum, das bereits abgetriebene Eis schadlos abzuführen; übrigens wäre diesem Uebelstand leicht abzuhelfen, wenn ihm irgendwo Bedeutung zukäme, da sehr viele Wasserwerke zur Erzeugung von Elektrizität dienen und die Eisenteile daher ohne Schwierigkeit positiv elektrisch geladen werden könnten.

Es ergibt sich sodann an Beispielen, wo Girard-Turbinen durch Francis-Turbinen ersetzt worden sind, dass letztere für Grundeisstörungen empfindlicher sind, als erstere. Es mag der Grund wohl zum Teil in der Schaufelung und zum Teil in dem Umstande liegen, dass die auf dem Laufrade austretenden Krystallgruppen nicht ins

*) In einer Turbinenanlage in Narva ist die Regulierung der Schaufelöffnungen ganz weggelassen worden. Diese wird in etwas grober Weise lediglich durch ein maschinell angetriebenes Schützentor bewirkt. Dadurch konnten aber öftere Störungen vermieden werden.

Unterwasser fallend sich sofort entfernen, sondern nur langsam abgeführt werden.

Sodann ist nicht zu übersehen, dass der Schmelzpunkts-Erniedrigung bezw. Erhöhung beim Durchtritt des Triebwassers vom Druckraum in den Reaktionskanal hier Bedeutung zukommt.

Unter Druck über dem Leitrade gelangen die Krystalle infolge Schmelzpunktserniedrigung in den Schmelzzustand und vermögen das Wasser etwas zu kühlen. Nach dem Austritt des Wassers aus dem Laufrade gelangen sie in den Reaktionskanal, wodurch der Schmelzpunkt erhöht wird, was zugleich zur Folge hat, dass das Eis in dieser Zone als unterkühlt erscheint und dass die treibenden Eisnadeln Krystallisation veranlassen müssen, wodurch die Wasserabführung verlangsamt und die Gelegenheit der Absetzung von Eisschwämmen auf das Leitrad erhöht wird.

Es handelt sich hierbei oft nur um Temperaturänderungen von Tausendstel Graden, allein eine kleine Temperaturerniedrigung genügt bei Wasser von Null Grad, $\frac{1}{8}$ desselben unter Einfluss der Treibeisnadeln erstarren zu lassen.

Es ist aber immerhin anzuführen, dass bei sorgfältiger Konstruktion des Leitrades und der Schaufelung die Francis-Turbinen auch trotz Grundeisführung des Wassers wohl Verwendung finden dürfen, umsomehr, da bei den neuern Wasserwerksanlagen, wo immer möglich, grössere Wasserreservoirs zum Ausgleich der täglichen Kraftschwankungen und oft sogar zur Ausgleichung der Hoch- und Niederwasserquantums angelegt werden, durch welche bei sorgfältiger Anlage zugleich auch die Störungen durch Grundeis vermieden werden können. Es wäre übertrieben, die Vorteile der Francis-Turbinen preiszugeben wegen dem Grundeis; aber Anpassung an dieses ist unerlässlich.

Als ein sehr grosser Nachteil, namentlich für die schweizerischen Elektrizitätswerke, die mit Wasserkraften arbeiten, müssen die von den Behörden wegen der Fischerei vorgeschriebenen, zu engen Rechenöffnungen bezeichnet

werden. Die vorgeschriebenen Oeffnungen von 3 cm zwischen den Rechenstäben sind die reinsten Grundeis-siebe. In Russland z. B. könnte kein Wasserwerk im Winter unter diesen Umständen betrieben werden. Dort wählt man die Stäbe meist aus Holz und lässt denselben bedeutend mehr Oeffnung, 10 bis 15 cm. Wenn bei uns für die Zukunft nicht Oeffnungen von 5—6 cm gestattet werden, wenigstens an den grossen Flüssen mit Niederdruckwerken, so muss man dazu überzugehen trachten, je den zweiten Rechenstab im Winter auszuheben. Auch dann noch wird man beim Eisgang vor dem Rechen beständig rühren müssen, so dass die Fische gewiss von selbst wegbleiben. Uebrigens ist der durch eine Betriebsstörung weniger Stunden verursachte Schaden, und dazu die Unannehmlichkeiten, meist weit grösser als der Ertrag der nahen Fischberechtigungen im ganzen Jahre.

In diesem Falle müssen sodann bei Werken, die mit geringem Gefälle arbeiten, die Schaufelöffnungen der Turbinen auf Kosten des Nutzeffektes etwas vergrössert werden, was immer noch besser ist als Betriebsstörungen, wie sie öfters vorkommen.

In Bezug auf die Konstruktion der Stauwehranlagen ist zu bemerken, dass feste gemauerte Wehre von irgendwie bedeutenderer Höhe ohne die Aussparung von Grund- und Eisablässen verwerflich sind. Man zwingt durch das Fehlen derselben das Geschiebe, Sinkstoffe und das Treibeis geradezu in den Gewerbekanal hinein, also dorthin, wo man es nicht haben will. Besser sind schon Klappenwehre, welche nach flussabwärts, also nicht etwa entgegen dem Drängen des Eises, geöffnet werden können; vorausgesetzt, dass zwischen den Stützpunkten eines allfälligen Wehrsteges genügend grosse Lichtöffnungen vorhanden sind.

Unglücklich in Flüssen, die mit viel Treibeis zu schaffen haben, sind sodann auch die Stauwehre mit eisernen Böcken und mit geringen, lichten Zwischenräumen zwischen denselben, seien sie nun fest oder beweglich, haben sie Nadel- oder Schützenabschlüsse oder Rollladendichtung.

Ebenso auch alle Wehrkonstruktionen, deren Stützen, sog. Griessäulen, oder deren Klappen nach flussaufwärts aufgezogen oder umgelegt werden müssen; gleichviel, ob deren Drehlager über oder unter Wasser angeordnet werden. Auch bei flussabwärts sich öffnenden Stützen, sind vorspringende Lagerteile Störungen ausgesetzt.

Am besten bewähren sich die neueren Schützenwehre mit grosser Lichtöffnung der Tore und mit Bedienung derselben von einem über Hochwasser geführten Stege aus. Diese lassen sich bei guten Konstruktionen durch keine Eisgänge stopfen oder im Betrieb stören. Ich führe dies ausdrücklich an, indem in neuerer Zeit von Deutschland aus (Deutsche Bauzeitung 1904) die Walzenwehre als diesen überlegen in Bezug auf Eisstörungen bezeichnet werden. Die Anwendung der Walzenwehre ist bei mittleren Stauhöhen und sehr grosser Lichtöffnung zwischen den Auflagerungen oft geboten. Bei grosser Stauhöhe und mittlerer Lichtweite sind die Schützentore überlegen und sie sind es ganz besonders in Bezug auf Eisstörungen.

Ebenso verwerflich wie die festen Wehre in Bezug auf die Fernhaltung von Geschieben und Treibeis sind die Einläufe in die Gewerbekanäle, deren Achse mehr oder weniger parallel dem Stromstrich des Flusses abzweigt; sie sind geradezu dazu angetan, das im Flusse treibende Eis und Geschiebe aufzunehmen. Um das letztere zu verhindern, muss gegenteils die Abzweigung des Kanals aus dem Flusse möglichst rechtwinklig zum Stromstrich erfolgen und wo die natürlichen Verhältnisse dies nicht schon von sich aus mit sich bringen, muss diese Abzweigungsrichtung künstlich geschaffen werden; wenn auch nur auf eine ganz kurze Strecke und viertelkreisförmig.

Wer die in den ersten Tagen des Januar 1905 durch Grund- und Treibeis entstandenen Störungen der schweizerischen Wasserwerke genau verfolgte, findet darin den Beweis für das Gesagte.

In Hinsicht auf das Verhalten der verschiedenen Metallsorten gegen die Grundeisbildung ist durch Versuche

konstatirt, dass Zinn, Zink, Kupfer und Messing am ehesten Grundeis anzunehmen scheinen, dann folgt Eisen, das am wenigsten Grundeis anzunehmen scheint. Sicher ist aber, dass bei den Metallen der Rauigkeit der Oberfläche eine sehr grosse Bedeutung zukommt. Mehr Grundeis und solches aus besser entwickelten Eisblättchen nehmen die Metalle mit rauher Oberfläche an.

Eine grosse Rolle scheint aber, wie früher schon besprochen, die elektrochemische Aequivalenz zu spielen. (Als elektrochemische Aequivalente bezeichnet man diejenigen Gewichtsmengen der Stoffe, welche im Jonenzustande die Einheit der Strommenge, also ein Coulomb, transportieren können.)

Und in der That scheint die Jonentheorie manches Geheimnis bei der Eisbildung aufzuklären, wie im I. Kapitel des ausführlicheren behandelt worden ist. Es ist notwendig sich in diese Fragen zu vertiefen, um über das innere Wesen Aufklärung zu erhalten.

Dagegen kann es sich aber, wie gesagt, bei der Industrie meist nicht darum handeln die Grundeisbildung ganz aufzuheben, sondern meist nur darum, das an anderen Flussstellen entstandene, zutreibende Grundeis ohne Störungen durchzulassen. Dies geschieht, indem das Wasser im Flusse oberhalb der Fassung durch Aufstauung zur Ruhe gebracht wird, wodurch das zutreibende Eis an die Oberfläche steigt und durch eine Eisschütze abgelassen werden kann. Ferner durch entsprechende Vorsorge im Kanal und den Turbinen.

Die Heizung ist hierbei, wie bemerkt, ein zweischneidiges Schwert und wirkt meist schädlich.

Das beste Mittel ist die Herstellung gleichmässiger Temperaturen, Aufhebung aller schroffen Temperaturwechsel in den Leitungskanälen und Maschinengehäusen.

Es liessen sich noch viele Beispiele von Heizungen gegen Grundeisstörungen ausser den schon besprochenen anführen, aber alle hatten einen eklatanten Misserfolg aufzuweisen, da wegen Mangel der Erkenntniss der Naturvorgänge bei

den Grundeisbildungen das Uebel nicht an der Wurzel gefasst, oft aber diesem noch Nahrung zugeführt wurde.

In einer schweizerischen Kraftanlage werden Francis-Turbinen in der Weise geheizt, dass im Innern des geschlossenen Turbinenkessels mit Dampf erwärmte Gasrohrleitungen schlangenförmig den Schaufelöffnungen entlang geführt werden, ohne damit die Störungen beseitigen zu können. Wir haben gesehen, dass dagegen die Zuführung von Hochdruckwasser oft Abhilfe schafft. In einer neueren, grossen Anlage in Frankreich werden diese schlangenförmigen Leitungen aussen um den geschlossenen Turbinenkessel in der Leitradhöhe herumgeführt; unerwähnt der vielen Versuche zur Heizung von Rechen, Griessäulen und Ablassschützen.

Ueber ein weiteres Beispiel der Installation einer Heizungsanlage zur Beseitigung von Grundeisstörungen entnehme ich der Schweiz. Bauzeitung*) noch folgende Notiz:

«Eine neue Anwendung der elektrischen Heizung: Seit einer Reihe von Jahren war die Entnahme des Wassers aus dem Oberen See in Marquette (V. St.) im Winter wegen starken Frostes nur mit grossen Schwierigkeiten möglich, so dass zu dieser Jahreszeit dort oft Wassermangel eintrat. Die grösste Unannehmlichkeit bereitete nicht das Oberflächeneis, sondern das Grundeis; die Oberfläche des Sees könnte zugefroren sein, ohne dass Schwierigkeiten erwachsen; wenn jedoch das Eis der Oberfläche durch Winde fortgeführt wurde und diese Winde die Bildung einer festen Eisoberfläche verhinderten, dann wurden durch die Wirbelbildungen des Wassers an der Entnahmestelle Eisnadelkonglomerate in die Entnahmeröhren geführt und verstopften dieselben. Derartige Missstände sind auch in England, sogar in verhältnismässig milden Wintern, an gewissen Orten nicht unbekannt, wenn auch selten, so dass bis jetzt besondere Mittel gegen derartige Vorkommnisse

*) No. 8, Band XXXVI, 1900, Seite 81.

nicht angewandt worden sind. In Marquette hingegen ist jetzt nach einer Mitteilung des «Engineering» ein elektrischer Heizapparat zur Aufstellung gelangt, welcher diese Schwierigkeiten beseitigen soll. Dieser Apparat besteht aus einer grossen eisernen Widerstandsschlange, welche an der Einmündungsstelle des Entnahmerohres in einer Eisentrommel untergebracht ist. Die Enden der Spiralen wurden durch wasserdichtes und feuersicheres Material aus der Trommel heraus- und der einer bestehenden Wasserkraftanlage entnommene Strom dem Heizkörper durch submarine Kabel zugeführt. Der Apparat tritt nur nach Bedürfnis in Betrieb, so dass die Kosten nicht sehr bedeutend sein können. Bei kleinen Betrieben mag die Möglichkeit einer günstigen Wirkung vorhanden sein. Es wird davon abhängen, wie lange das Wasser mit dieser Heizschlange in Berührung sein kann, ob es langsam oder schnell an derselben vorüberzieht und wie viele Pferdekkräfte der Pumpstation für den Notfall zur Erzeugung von Wärme verfügbar bleiben.»

In erster Linie muss dieser Notiz beigefügt werden, dass sie in dem ihr zukommenden Umfange meine vorstehende Grundeistheorie bestätigt, obschon es sich hier nicht um ein fliessendes Gewässer, sondern um einen See handelt, wobei die Wasserbewegung durch den Wind und die saugenden Wirbel durch Wasserentnahme erzeugt werden. Was die Heizung anbetrifft, so muss dieselbe folgenden Erfolg haben:

Wenn die Entnahmeröhren durch Eisnadelkonglomerate auf besagte Weise verengt und verstopft werden, indem die vom Winde hergetriebenen Eisnadeln durch die Wirbel an der Entnahmestelle von der Oberfläche absaugend in die tieferen und wärmeren Wasserschichten geraten, schmelzen und regelieren, so wird die Heizung in Kraft treten, sobald die Drosselung durch Eis unangenehm fühlbar wird. Sie wird zur Folge haben, dass die Ansammlungen sich noch mehren und der Wasserdurchfluss abnimmt bis Gleichgewicht eintritt, d. h. bis bei genügender

Heizkraft eine zum Abschmelzen hinreichende Temperaturerhöhung des noch durchströmenden Wassers herbeigeführt werden kann. Dann kann durch die Heizung möglicherweise der Auftrieb oder Abfluss des Eises angeregt werden. Es dürften aber die in das Rohr gelangenden Eispartikel sich in diesem unter Einfluss der Erdwärme und Heizung auf die Wandungen neuerdings an passenden Stellen wieder festsetzen, so lange bis eben die zugeführte Wärme genügt, um das Eis in den flüssigen Zustand überzuführen. Ob nun das letztere zutreffen kann oder ob die Schwierigkeiten noch grösser sein werden als vor der Heizung, hängt, wie gesagt, ab von der Grösse der Kraftquelle dem Quantum durchfliessenden Wassers und dem Umfange der Eisstopfungen. Nach dem schon früher Gesagten dürfte auch hier eine vollständige Behebung der Störungen kaum zu erwarten sein; — abgesehen von dem bedeutenden Kostenaufwande. Jedenfalls ist auf die vorbeschriebene Weise das Uebel nicht bei der Wurzel gefasst.

Ein besseres Resultat stünde auf Grund des Studiums der Eigenschaften des Grundeises zu erwarten von der Anbringung einer Pallisade um die Entnahmeröhre herum, aus Brettern, oder aus auf Pfosten gespanntes, feines Drahtsieb, welche Pallisade nicht bis auf die Sohle reichen dürfte, aber bewirken müsste, dass die Wasserentnahme aus den tiefern Wasserschichten geschehen würde, wohin Eiskrystalle durch die Windwellen nicht mehr geführt oder aber geschmolzen würden, wenn sie in geringerer Zahl dorthin gelangten. Dabei hätte das eventuell statt Brettern anzubringende Gitter nicht nur den Zweck die feinen Krystalle abzusieben, sondern es würden sich diese an dem Sieb anreichern unter Einfluss der Regelation und elektrodynamischen Kräfte, und eine Wand bilden, die die Wasserentnahme unter dem Sieb durch aus den tieferen Schichten zur Folge hätte. Das Gitter oder die Pallisade würde ferner die schädlichen saugenden Wirbel an der Oberfläche unschädlich machen und durch die gegebenen Haltepunkte wohl auch bei starkem Winde die Bildung

einer Oberflächeneisschicht über der Entnahmeröhre leicht ermöglichen. Eine genaue Disposition setzt indes natürlich in jedem einzelnen Falle die genaue Kenntnis des Lokals und der Störungen voraus. — Auf Seite 62 ist ein bezügliches Experiment von H. Ebert und B. Hoffmann beschrieben, wo ein amalgamiertes Kupferdrahtnetz, durch das flüssige Luft durchgeführt wurde, durch die Reibung mittelst des mitgeführten Eises beträchtlich negativ elektrisch geladen wurde.

Es liessen sich noch eine Reihe weiterer misslungener Versuche der Unschädlichmachung der Störungen durch Grundeis anführen, welche zum Teil noch in Funktion sind, allein es mögen diese vorstehenden genügen, da es sich grösstenteils nur um Wiederholungen handeln könnte. — Immer handelt es sich in erster Linie bei Behebung von Eisstörungen darum, die Temperaturdifferenzen aufzuheben; indem nur beim Uebergang der Wärme zwischen Körpern verschiedener Temperatur Arbeit geleistet wird, so kommt also die Aufhebung der Differenzen einer Zerstreuung der Energie gleich.

Bei der Korrektion von Flüssen handelt es sich im allgemeinen ebenfalls nicht darum, die Grundeisbildung ganz zu verunmöglichen, sondern mehr um eine geregelte Abführung des Treib- und Grundeises, da aus den auftretenden Eisverstopfungen den Ufern, Flussbetten und Ueberschwemmungsgeländen bedeutender Schaden erwachsen kann. Die Ursachen der Eisverstopfungen ergeben sich, wie aus unseren früheren Betrachtungen im Kapitel I und II ersichtlich, aus Unregelmässigkeiten des Flussbettes, aus zu starken Krümmungen, wechselnder Breite der Flussprofile, Flusspaltungen und Kiesbänken, besonders aber aus scharfen Uebergängen von Stromschnellen zu stauen Flussstellen mit ruhigem Lauf. In letzteren bildet sich bei Frost eine kräftige Oberflächeneisschicht, über und unter welche sich das aus der Stromschnelle öfters abtreibende Grund- und Treibeis schiebt, bis die Stopfung vollständig ist und die geregelte Wasserabführung aufhört.

Die so entstehenden Eisbarren haben oft Anstauungen des Flusses um mehrere Meter zur Folge, bis sie gelöst, gesprengt oder vom Wasser selbst bewältigt werden.

Das wirksamste Mittel, um solche Eisstopfungen zu vermeiden ist regelmässige Gestaltung des Flussbettes.

Durch die gegebenen Beobachtungen und Studien der Grundeisbildung sind die Grundlagen für die Beseitigung daheriger Störungen gegeben und es genügt, hier darauf noch kurz hingewiesen zu haben. Ich hoffe dem Wasserbau-Ingenieur die Wahl der Mittel hierzu erleichtert und öftere Behebung der Störungen ermöglicht zu haben, dort, wo der zu erreichende Zweck ohne zu grossen Kostenaufwand erkaufte werden kann. Jedenfalls wird es bei Projektierung von Kanalanlagen an Flüssen mit starker Grundeisbildung unerlässlich sein, den letzteren vermehrte Aufmerksamkeit zuzuwenden und neben den Beobachtungen über Wasserstände und Wasserquantums auch Grundeisbeobachtungen anzustellen, um die hydraulischen Anlagen und eventuell die Maschinen so einrichten zu können, dass daherige Störungen vermieden werden. Dies ist für Elektrizitätswerke, welche der öffentlichen Kraftabgabe und Beleuchtung dienen, geradezu Pflicht und wird öfters vor grossem Schaden bewahren.

Für die Mitteilung von Erfahrungen über bezügliche Versuche ist der Verfasser dieser Schrift stets dankbar.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Narova bei Narva, Russland.

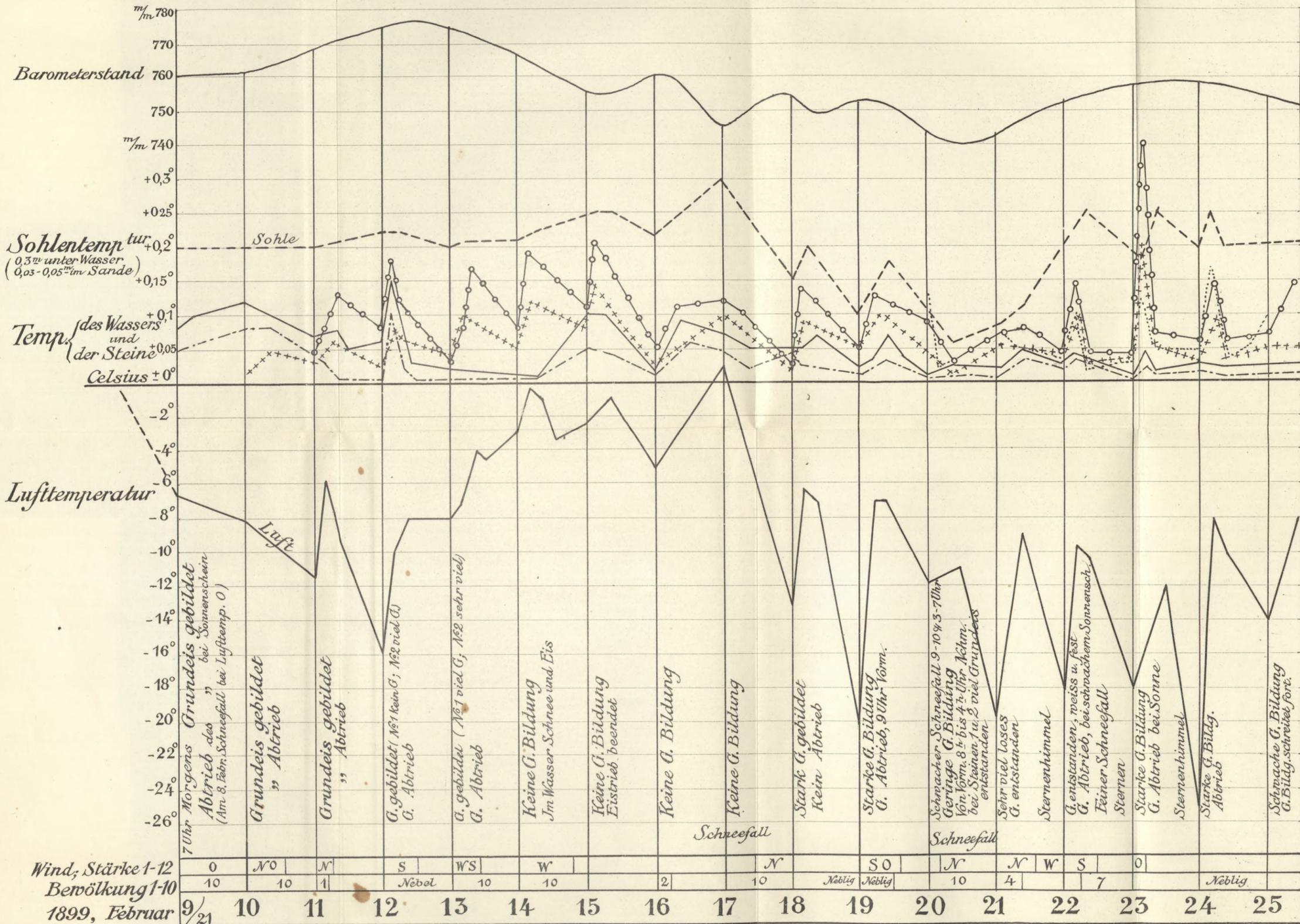
Beobachtungen über Grundeise.

Beobachter: G. Lüscher.

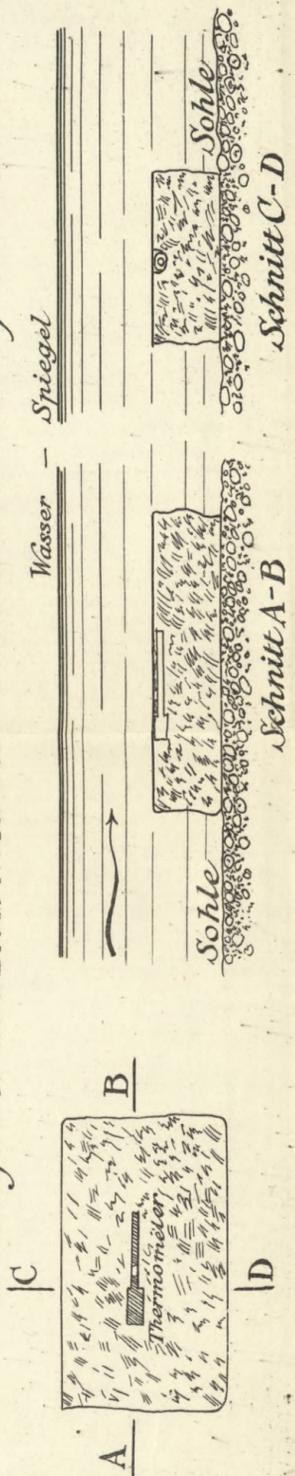
Zeit		Meteorologische Beobachtungen					Temperaturen in Celsius-Graden										Bemerkungen		
Febr. Tag	1899 Std.	Wetter	Bewölkung 1-10	Barometer- Stand	Wind		Der Luft	Des Wassers				Der Steine							
					Richtung	Stärke 1-12		0.3 m tief	An der Oberfl.	1 m tief	Der Flusssohle 0.3 m tief 0.04 m im Sande	No. 1	No. 2	No. 3	No. I	No. II		No. III	
9 ¹ / ₂ II	V. 9 Uhr N. 4 Uhr		10	760.3 761			-6.6	+0.08 +0.1	+0.05	+0.25	+0.2 +0.2 +0.18								Am 8. Schneefall, bei +2° C. Grundeis gebildet; Wasser der Narova klar. Die Steine Nr. 1 und 2 liegen in Wassergeschw. von 1 m.:secd.
10	Vorm. 7 Uhr Nachm. 4 Uhr		10	761.7 763.7	NO	5-6	-8	+0.12 +0.12	+0.08 +0.08	+0.01 +0.01	+0.2 +0.2	+0.01 { +0.04 bis 0.05			+0.05	+0.04			Ueber Nacht ist G. entstanden an Nr. 1 und auch weiter oberhalb. Wasser trübt sich und wird kaffeebraun. Schwacher Abtrieb von Grundeis.
11	Vorm. 7 Uhr 11 Uhr Ab. 4 Uhr	Sonne seit früh 8 ¹ / ₂ Uhr	1	768.2 770 771	N	3	-11.5 -5.8 -9	+0.07 +0.08 +0.05	+0.00 +0.04 +0.005	+0.09 +0.09 +0.05	+0.15 +0.2 +0.21	+0.03 +0.06	+0.04 +0.13	+0.18	+0.07				Nr. 1 hat viel Grundeis angenommen. Nr. 2 „ wenig „ „ Grundeisabtrieb, bei Nr. 1 Geschwindigkeit = 2 m.:secd. „ Nr. 2 „ = 0.2 „ „
12	Vorm 7 Uhr 11 Uhr 2 Uhr Ab. 4 Uhr	Nebelig am Fluss aber schon Son. Seit 12 Uhr Sonne kräftig	5	775 776 776 776.2	S	5	-16 -10 -8	+0.12 +0.15 +0.03	+0.01 +0.1 +0.02 +0.005	+0.12 +0.18	+0.22	+0.03 +0.08 +0.06 +0.06	+0.08 +0.18 +0.12 +0.11					+0.19	Nr. 1 hat wenig Grundeis; Nr. 2 hat viel Grundeis. Nr. 1 nimmt mehr G. an. Grundeisabtrieb. Stein Nr. 1 zu Stein Nr. 2 gelegt. Grundeisabtrieb hört auf bei Sonnenuntergang. Wasser wieder hell.
13	früh 7 ¹ / ₂ Uhr 11 Uhr 2 ¹ / ₂ Uhr Abends 8 Uhr		10	773.7 772.8 772	W	4	-8 -7 -4 -4.6 Abds. 8 h.	+0.02 +0.007	+0.00 +0.00 +0.005	+0.01 +0.01	+0.2 +0.21	+0.04 +0.1 +0.09	+0.03 +0.08 +0.17					+0.2	Nr. 1 hat viel Grundeis, Nr. 2 hat sehr viel Grundeis. Grundeisbildung weisser und körniger. Nr. 2 hat noch festes Grundeis um 11 Uhr vorm. Nr. 2 „ „ sehr wenig „ „ „ „ „ Eisabtrieb von 11 Uhr an.
14	7 Uhr 11 Uhr 4 Uhr	Von 9 Uhr an Schneefall. 2 Uhr Sonnen- schein	10	766.2 764 763	W	8	-3 -0.2 -1 -3.5 Abds. 8 h.	+0.01 +0.01	+0.00 +0.00 bis 0.01		+0.21 +0.22	+0.05 +0.12	+0.08 +0.19						Keine Grundeisbildung; fast alles von gestern ist abgetrieben. Von 9 Uhr bis 10 Uhr treibt im Wasser Schnee und Eis. Wasser wird wieder trübe. Strömung bei den Steinen wird stärker infolge Eisabts.
15	7 Uhr Vorm. 9 Uhr Abends 4 ¹ / ₂ Uhr			755 755.8			-2.5 -1.0 +0.1 -2.5 Abds. 8 h.	+0.00 bis +0.1 +0.1	+0.05 +0.04		+0.28 bis 0.30 +0.25	+0.14 +0.10	+0.19 bis 0.2 +0.18						Keine Grundeisbildung, Sonnenschein, Eisabtrieb beendet. Die Krystalle im Wasser verschwinden. Geschwindigkeit bei Nr. 1 und 2 = 1 m.:secd. oberhalb infolge Abtrieb von die Strömung hindernden Eises.
16	7 Uhr 4 Uhr		2	760.4 758			-5 -2.2	+0.03 +0.10	+0.01 bis 0.02 +0.00		+0.22 +0.25	+0.025 +0.05	+0.05 +0.11						Keine Grundeisbildung. Wasserspiegel ist um 20 cm. gesunken.
17	7 Uhr 4 Uhr	Schnee- fall	10	745 750	N	5 bis 6	+1 -4	+0.07 +0.05	+0.05 +0.02		+0.3 +0.25	+0.1 +0.08	+0.12 +0.10						Keine Grundeisbildung.
18	Vorm. 7 Uhr 11 Uhr 4 Uhr	Sonne wenig Kraft	8 10	745 752.2 749.6			-13.2 -6.2 -7	{ +0.04 +0.05 } +0.07 +0.06	+0.04 +0.025	+0.04 bis 0.05	0.2	+0.015 +0.09 +0.08	+0.025 +0.14 +0.12						Stein Nr. 1 sehr viel Grundeis, Stein Nr. 2 ebenfalls. Sehr viel Grundeis über Nacht entstanden im Flusse. Im Wasser treiben sehr viel Krystalle. Nr. 1 und 2 haben viel Grundeis. Abtrieb nur schwach.
19	7 Uhr 11 ¹ / ₂ Uhr 3 ¹ / ₂ Uhr	Nebel auf dem Fluss Sonne von 9 Uhr an		752.1 753 752.2	SO	6	-20.5 -7 -7	+0.02 +0.03 +0.07	{ +0.01 +0.02 }		+0.1 +0.18	+0.05 +0.09 +0.10	+0.05 +0.12 +0.12						Stein Nr. 1 sehr viel G., Nr. 2 ziemlich viel, Nr. 3 sehr viel. Sehr viel Grundeis entstanden im Flusse. „ „ Krystalle treiben im Wasser. Wasser oft gallertartig bei Auftrieb nach 9 Uhr.
20	7 Uhr 4 Uhr	Schwach. Schnee- fall	10	745 740.3	N	8	-12 -10.5	+0.01 +0.025	+0.00 +0.02		+0.1 +0.05 bis 0.06	+0.04 +0.01	+0.09 +0.025	+0.15 +0.02 bis 0.03					Nr. 1 hat etwas Grundeis, 2 wenig und Nr. 3 keines. In Nähe von 1 und 2 seit 7 Uhr viel Grundeis entstanden bis 12 Uhr. Im Wasser fließt sehr viel Eis.
21	9 Uhr 4 Uhr		4	743.3 747.2	N W	6	-20 -9	+0.02 +0.05	+0.00 +0.03		+0.08 +0.01	+0.05 +0.05	+0.07 +0.08	+0.07 +0.05					Nr. 1 und 2 haben sehr viel Grundeis wie nassen Schnee. Nr. 3 hat sehr wenig Eis. 9 Uhr Massenabtrieb. Wasserdampf auf Narova.
22	7 Uhr 12 Uhr 4 Uhr	Sonne ohne Kraft Feiner Schnee- fall	7	752	S	5	-18 -9.5 -10.5	+0.03 +0.01	+0.02 +0.04		+0.2 +0.25	+0.04 +0.10 +0.08	+0.045 +0.14 +0.04	bis 0.01 +0.1 +0.02					Nr. 1 hat viel Grundeis; Nr. 3 kein Grundeis nur die Umgebung. Nr. 1 und 2 wenig Grundeis um 12 Uhr. Um 3 Uhr treibt alles Grundeis fort.
23	7 Uhr 10 ¹ / ₂ Uhr 4 Uhr		0				-18 -12	+0.01 +0.04 +0.02	+0.00 +0.02 +0.01		+0.18 +0.25	+0.03 +0.2 +0.05	+0.04 +0.35 +0.07	+0.03 +0.13 +0.05					Nr. 1 und 2 sind in viel Grundeis eingehüllt. Stein Nr. 3 kein Eis, aber 0,6 m. tief unter Wasser. Wasser trübe. Eisabtrieb, Wasser gallertartig.
24	7 Uhr 12 Uhr 4 ³ / ₄ Uhr	Wasser- Dampf auf Fluss			O	2	-25 -8 -10	+0.03 bis 0.04 +0.02 +0.02	+0.01 +0.00 +0.00	+0.02	+0.2 +0.25 +0.2	+0.03 +0.09 +0.03	+0.03 +0.15 +0.06	+0.05 +0.17 +0.03					Sehr viel Grundeis gebildet, Nadeln im Wasser bis 5 mm. lang und Krystallgruppen. Seit 7 Uhr bis 12 Uhr haben Steine 1 und 2 viel Grundeis angenommen. 4 Uhr abends massenhafter Grundeisabtrieb.
25	7 Uhr 4 Uhr						-14 -8	+0.025 +0.025	+0.02 +0.02	+0.05 +0.025	+0.2 +0.2	+0.05 +0.05	+0.07 +0.15	+0.06 +0.10					Nr. 1 etwas Eis, 2 wenig Eis, 3 kein Eis angesetzt. Am Grunde des Flusses wenig Eis. Kein Treibeis auf dem Flusse.

Narova bei Narva, Russland

Beobachtungen
über
Grundeise.



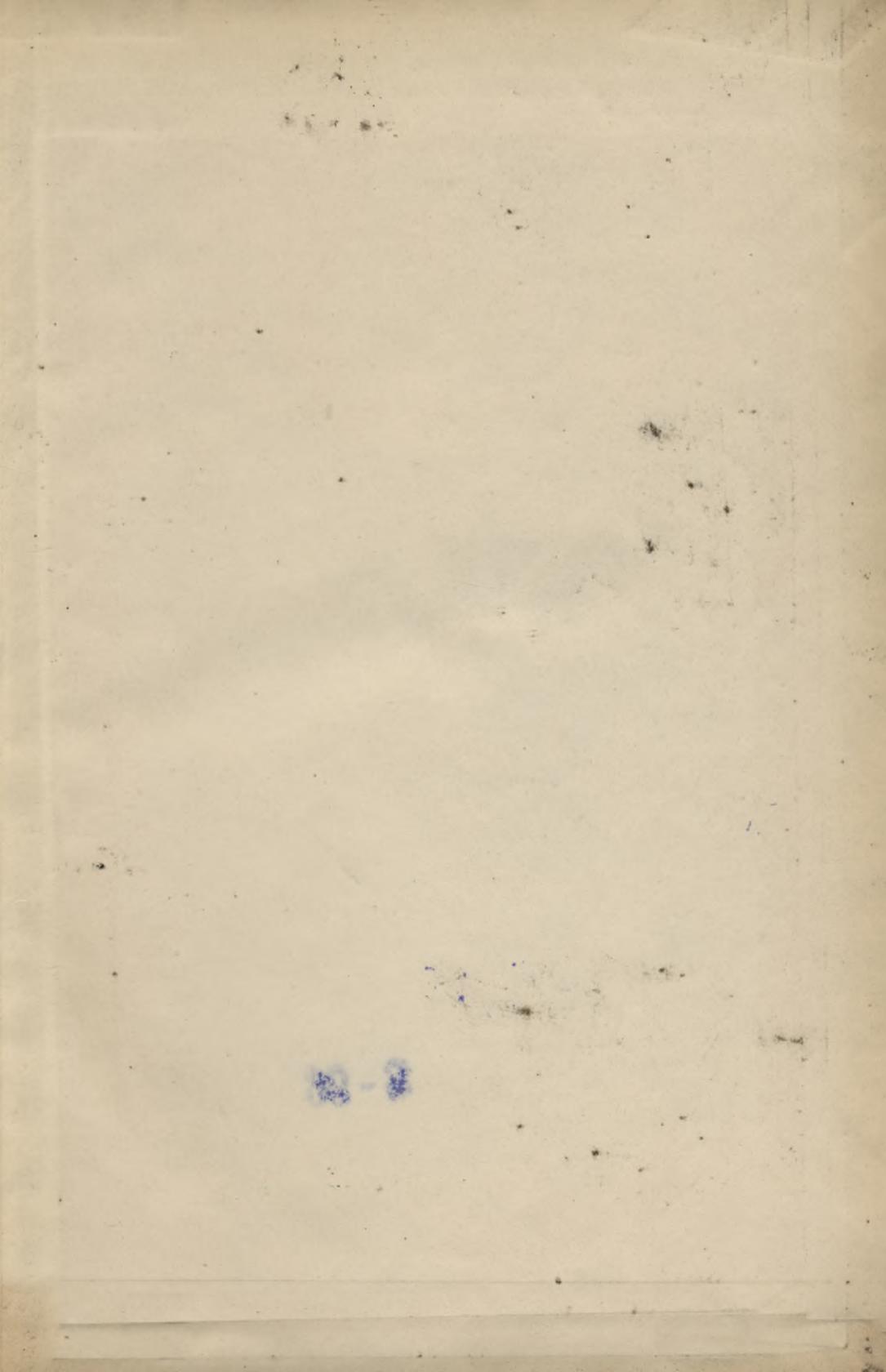
Lage der mit Thermometer versehenen Steine auf der Flusssohle.



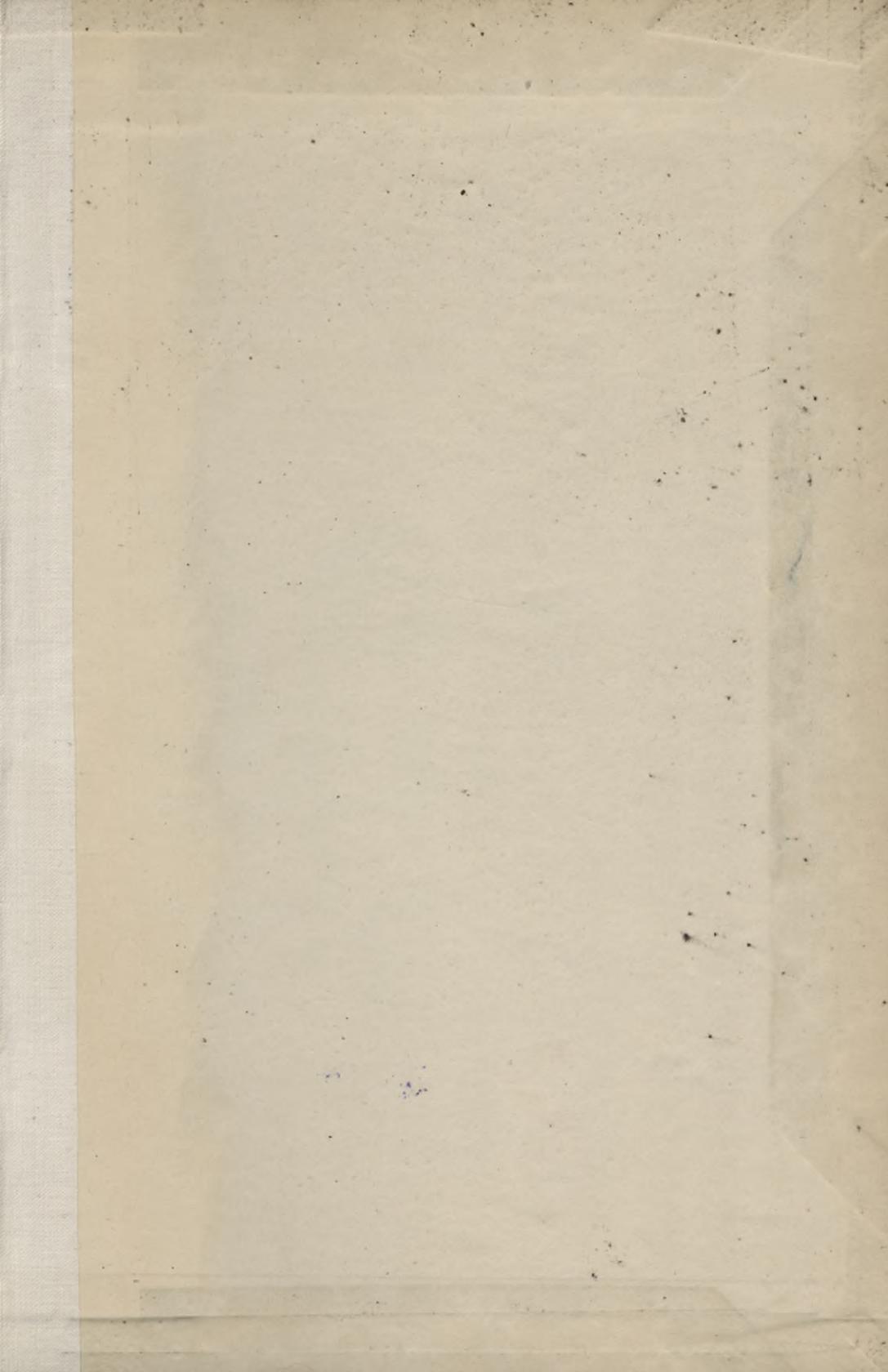
Anmerkung: - - - - - Temp. des Wassers an der Oberfl.; ——— Wasser 0,3^m tief; + + + + + Stein N°1; — o — o — Stein N°2; Stein N°3.

Die Datumsziffern beziehen sich auf 7^h Vormittags.

Februar 1899, Beobachter: Lüscher, Ingénieur.



8-96



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000297459