

## Die Besonderheiten der Bildung der Untergrundwasserzusammensetzung im Gebiet Ewiger Gefornis

Von E. V. PINNEKER & B. I. PISSARSKI (Irkutsk, UdSSR)

Der Entwicklungsraum mehrjährig gefrorener Gesteine ist weit und umfaßt den Norden Eurasiens, einen bedeutenden Teil Nordamerikas, arktische Inseln, Grönland, die Antarktis und Hochgebirgszonen aller Kontinente. Auf dem Festland beträgt er 35 Mill. km<sup>2</sup>, und zwar 22 Mill. km<sup>2</sup> in der Nordhemisphäre und 13 Mill. km<sup>2</sup> in der Südhemisphäre (R. F. BLACK, 1954).

Die Fläche Ewiger Gefornis in der UdSSR beträgt 48 Prozent von der ganzen Fläche des Landes (10,7 Mill. km<sup>2</sup>), und dabei sind die Gebiete mit einer geschlossenen, einer unterbrochenen und einer inselhaften Verbreitung zu unterscheiden. Von großer Bedeutung ist die Ewige Gefornis auf dem Territorium Sibiriens und des Nordostens der UdSSR (Tafel I), wo sie eine weite Verbreitung hat. Hier wird sie schon seit 100 Jahren untersucht, und gerade hier wurde unlängst das Institut für Frostbodenkunde der Akademie der Wissenschaften der UdSSR gegründet.

Von den zahlreichen Problemen, auf welche die Hydrogeologen beim Studium der Untergrundwässer im Gebiet Ewiger Gefornis stoßen, ist das Problem der Bildung der Untergrundwasserzusammensetzung am wenigsten erforscht. Im Zusammenhang damit bieten die Verfasser dieses Aufsatzes den Lesern ihre allgemeinen Erkenntnisse zu dieser Frage an, die als Ergebnis ihrer persönlichen Beobachtungen und der Benutzung vorhandener Veröffentlichungen entstanden sind.

### Einige Begriffe und Termini

Für gefroren gelten solche Gesteine, die eine Null- oder Minustemperatur haben und in denen auch wenigstens ein Teil des Wassers in den Kristallzustand übergegangen ist. Solch eine Definition vertreten bekannte sowjetische Wissenschaftler wie M. I. SUMGIN, N. I. TOLSTICHIN, P. F. SCHWEZOW und N. A. ZYTOWITSCH. Es ist üblich, die gefrorene Zone der Erdkruste Kryolithsphäre zu nennen. Ihre Mächtigkeit beträgt 0,5 bis 1 km, ja nach einigen Angaben bis zu 1,5 km (P. I. MELNIKOW, 1967).

Die Gesteine, die eine Minustemperatur haben und alles Gravitationswasser im Kristallzustand (und zwar im Eiszustand) haben, nehmen im Gebiet der Ewigen Gefornis bedeutende Flächen ein und sind wasserdicht.

Nach der Lage **flüssiger** Wasserlösungen werden die Untergrundwässer den gefrorenen wasserdichten Schichtenfolgen gegenüber in **über** der Ewigen Gefrornis liegende, der Gefrornis **zwischen**geschaltete und **unter** dieser gelagerte Wässer gegliedert (N. I. TOLSTICHIN, 1941).

Bei den über der Dauergefrornis liegenden Wässern sind die Wässer der sogenannten saisonaufgetauten Schicht, die im Sommer bis 2,5 m tief aufgetaut und im Winter gefroren sind, zu unterscheiden von den Wässern des sogenannten Nichtquerauftaubodens. Dieser ist ein Abschnitt aufgetauter (nicht gefrorener) Gesteine in den gefrorenen Schichtenfolgen (meist unter Seen und Flüssen), die eine Temperatur höher als 0°C haben und flüssige Wasserlösungen enthalten. Als nicht-queraufgetaut gilt solch ein Auftauboden, wenn seine Mächtigkeit geringer als die Mächtigkeit der gefrorenen Schichtenfolge ist.

Zu den der Gefrornis zwischengelagerten Wässern gehören die Wässer des sogenannten Querauftaubodens (dessen Mächtigkeit der Mächtigkeit gefrorener Schichtenfolge gleich oder höher ist) und die Wässer aufgetauter Schichten, die oben und unten von gefrorenen Gesteinen begrenzt sind (meist linsenförmige Lagerung). Durch den Querauftauboden können über und unter der Gefrornis liegende Wässer miteinander verbunden sein (Fig. 1).

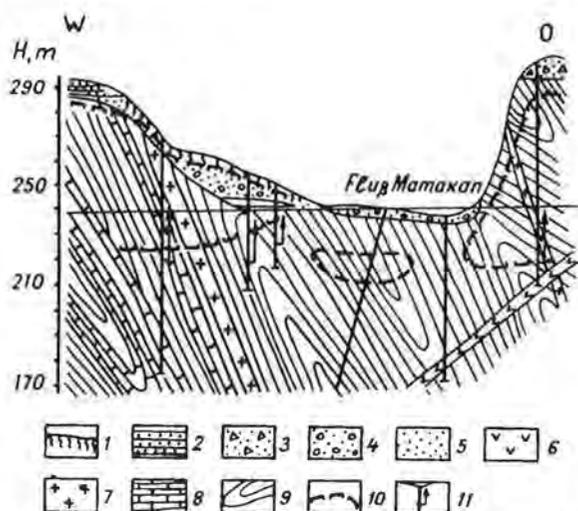


Fig. 1: Frost-Hydrogeologisches Profil durch den Auftauboden des Flußtales Mamakan (nach E. V. PINNEKER, 1962). 1 — die Boden- und Pflanzenschichte; 2 — Ton- und Staubsande; 3 — Sande mit Gesteinsbruchstücken; 4 — Sand- und Geröllablagerungen; 5 — Sande; 6 — Pegmatite; 7 — Granite; 8 — marmorisierte Kalksteine; 9 — Glimmerschiefer; 10 — Grenzen Ewiger Gefrornis; 11 — hydrogeologische Bohrung und bestimmter Untergrundwasserstand bzw. -bewegungsrichtung.

Besonders weit verbreitet sind im Gebiet Ewiger Gefrornis die **Aufeise**. Als Aufeis wird (nach N. I. TOLSTICHIN, 1941) ein Eiskörper bezeichnet, der sich bei der Vereisung des Wassers bildet, das auf der Bodenoberfläche (Quellaufeis) oder im Flußbett auf der Eisoberfläche (Flußaufeis) austrat. Weil Quell- und Flußaufeis im Winter gebildet werden, stellen sie einen Austritt der Untergrundwässer auf der Bodenoberfläche dar (nach O. N. TOLSTICHIN, 1974).

Nicht gefroren sind schließlich alle Untergrundwässer, die unterhalb der unteren Grenze gefrorener Gesteine liegen.

In Sibirien und im Nordosten der UdSSR (Hydrogeologie der UdSSR, Bd. XX, 1970 und Bd. XXVI, 1972) sind über der Gefrornis liegende Wässer weit verbreitet. Sie charakterisieren sich durch hohe Beweglichkeit, sind Süßwässer und werden von atmosphärischen Niederschlägen genährt.

Die Auftauböden sind gewöhnlich in den Flußtälern (der unter dem Flußbett gelegene Auftauböden); unter den großen Seen, in den Zonen der tektonischen Brüche und in den Bereichen der verkarsteten Karbonatgesteine zu finden. In den beschriebenen Regionen sind die Wässer bei intensivem Wasseraustausch vorwiegend süß. Brack- und Salzwässer sind für die Bedingungen des verzögerten Wasseraustausches kennzeichnend. Die Solen sind in den Auftauböden unter den salzhaltigen Gesteinen und an der Nordmeerküste verbreitet.

Einlagerungen und Linsen von der Gefrornis zwischengeschalteten Wässern kommen selten vor, und je nach den Verbindungen mit anderen Wasserarten können sie süß oder salzig sein. In den abgeschlossenen Linsen stellen sie Salzlösungen dar.

Die unter der Gefrornis liegenden Wässer sind verbreitet sowohl in den Gebirgsmassiven, die aus kristallinen Gesteinen aufgebaut sind, als auch in den sedimentären Schichtenfolgen der artesischen Becken. Die Mineralisierungshöhe ist bestimmt durch die Grundwassertiefe, die wieder von der Mächtigkeit der überlagernden gefrorenen Schichtenfolge abhängig ist, was letzten Endes die Intensität eines Wasseraustausches bestimmt. Im Zusammenhang damit sind die unter der Gefrornis liegenden Wässer Sibiriens und des Nordostens der UdSSR in den Gebieten der unterbrochenen und inselhaften Gefrornis meistens süß, da sie mit den Oberflächenwässern durch die Querauftauböden in Verbindung stehen. Dasselbe gilt für die Verbreitungsgebiete der nichtgefrorenen (aufgetauten) Gesteine. Tiefliegende Brack- und Salzwässer sind dagegen in ausgedehnten Teilen des Gebietes der dichten Ewigen Gefrornis verbreitet (da sind sie selten süß). Die Salzlösungen bilden sich in den salzhaltigen Schichtenfolgen mit erschwerten Bedingungen für einen Wasseraustausch, d. h. in großen Tiefen und an der Nordmeerküste.

## Die Rolle der Kryogenese in der Bildung der Untergrundwasserzusammensetzung

Die Bildung und die Salzsättigung verschiedener Arten der Untergrundwässer erfolgt unter der Wirkung unterschiedlicher natürlicher Faktoren. Die Bildungsprozesse der Untergrundwasserzusammensetzung sind ziemlich gut erforscht und in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt (N. I. TOLSTICHIN, 1941; N. P. ANISSIMOWA, 1973; I. A. TJUTJUNOW, 1961, 1962; R. S. KONONOWA, 1973; O. N. TOLSTICHIN, 1974; S. L. SCHWARZEW, 1965, 1970).

Besondere Bedingungen der Bildung der Untergrundwasserzusammensetzung sind im Gebiet Ewiger Gefrornis verbunden mit dem Phasenübergang „Wasser-Eis-Wasser“, der ständigen Anwesenheit der harten Phase (des Eises), der Existenz der flüssigen Wasserlösungen bei einer Minustemperatur, dem verzögerten, schwierigen und sehr schwierigen Wasseraustausch (im Zusammenhang mit der weiten Entwicklung der gefrorenen wasserdichten Schichtfolgen) und endlich mit den spezifischen Prozessen der Umgestaltung der wasserhaltenden Gesteine unter den Bedingungen der Minustemperaturen. Der gesamte Komplex der physikalisch-chemischen Prozesse, der sich bei den Minustemperaturen mit dem Phasenübergang „Wasser-Eis-Wasser“ und an der Grenze des Wassers mit dem Eis oder den gefrorenen Gesteinen abspielt, wird **Kryogenese** genannt.

Physikalisch-chemische Prozesse verlaufen in den gefrorenen Gesteinen ziemlich aktiv. Davon zeugen Erforschungsergebnisse in den verschiedenen Gebieten der Erdkugel, z. B. von S. S. MOROSOW & V. A. SELIWANOW (1961), I. A. TJUTJUNOW (1961, 1962), S. L. SCHWARZEW

---

Tafel I: Karte der Verbreitung mehrjährig gefrorener Gesteine im Osten der UdSSR (nach I. A. NEKRASSOW).

Bereiche der Verbreitung der Ewigen Gefrornis auf dem Festland:

1 — geschlossen, mit der vorherrschenden Mächtigkeit über 500 m;

2 — geschlossen, mit einer vorherrschenden Mächtigkeit bis 500 m;

3 — unterbrochen, mit einer vorherrschenden Mächtigkeit bis 100 m;

4 — inselhaft, mit einer vorherrschenden Mächtigkeit bis 50 m;

5 — Ewige Gefrornis fehlt.

Bereiche der Verbreitung der Ewigen Gefrornis auf dem Meeres-

boden und im Flachwassergebiet der Ozeane; 6 — geschlossen, mit

einer vorherrschenden Mächtigkeit bis 100 m; 7 — inselhaft, mit

einer vorherrschenden Mächtigkeit von 5 bis 10 m;

Grenzen: 8 — Grenze Ewiger Gefrornis auf dem Meeres- und

Ozeanboden; 9 — Grenze zwischen inselhafter und geschlossener

Ewiger Gefrornis auf dem Meeres- und Ozeanboden; 10 — Grenze

verschiedener Bereiche Ewiger Gefrornis auf dem Festland;

11 — Umgrenzung der Bereiche der Entwicklung der Kryopegen

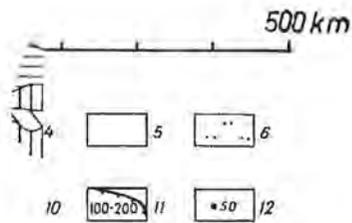
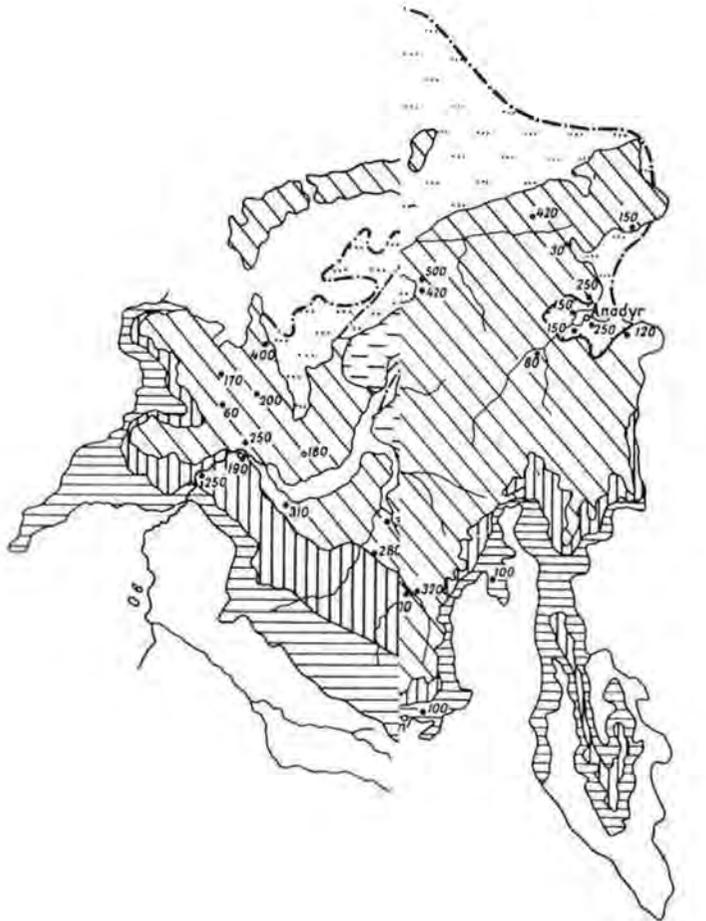
(Salzwässer und Salzlösungen mit Minustemperatur), die Ziffern

bezeichnen die Mitteltiefe der Lagerung der Kryopegen (nach

O. N. TOLSTICHIN); 12 — Stellen mit der für diesen Bereich maxi-

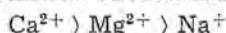
malen Mächtigkeit Ewiger Gefrornis.

TAFEL I  
 & B. I. PISSARSKI (1975)



Chloridgehalt des Kalziums, Magnesiums und bei den niedrigen Temperaturen auch des Natriums.

Zum Gesagten ist hinzuzufügen, daß unter der Wirkung der Kryogenese aus den aufgetauten Gesteinen etwa um zweimal mehr Salze als aus den nichtgefrorenen Gesteinen in die Lösung eindringen können. Außerdem (I. A. Tjutjunow, 1961) verwandelt sich die für die aufgetauten Gesteine kennzeichnende Kationenabsorbierung



in die Rückabsorbierung bei dem Übergang der Plustemperaturen in die Minustemperaturen, d. h. die Bindung mit dem Gestein des Natriums und die Verdrängung aus dem absorbierten Komplex des Kalziums und Magnesiums werden verstärkt. In den gefrorenen Gesteinen (bei den Minustemperaturen) bleibt die flüssige Wasserlösung in Form dünner Wasserhäute erhalten, die von der Gesteinsoberfläche absorbiert werden. Unter der Wirkung dieser Wasserlösung verändern sich die Struktur und die Eigenschaften des Gesteins. Das Hauptergebnis der kryogenen Metamorphisierung der Untergrundwässer ist also die Veränderung der Mineralisierung und der Ionen-Salzzusammensetzung der Untergrundwässer.

Häufig steigt die Mineralisierung, und dieser Prozeß wird von der sekundären Mineralbildung begleitet. Gleichzeitig verändert sich die Gas- (besonders  $\text{CO}_2$ -Gehalt) und Isotopenzusammensetzung der Untergrundwässer (Anhäufung des Deuteriums und Sauerstoffes-16 in der flüssigen Phase).

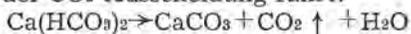
## Die Bildung der Wasserzusammensetzung der Aufeise

Die Veränderung der Untergrundwasserzusammensetzung zeigt sich ziemlich exakt durch die Kryogenese bei der Aufeisbildung.

In diesem Fall haben wir es mit physikalisch-chemischen Prozessen zu tun, von denen die Phasenübergänge in der „reinen“ Form begleitet werden, d. h. ohne Anteilnahme der wasserbehaltenden Gesteine. Bekannt sind die Erforschungsergebnisse dieser Prozesse in Jakutien (L. T. Tschistotinowa & O. N. Tolstichin, 1969; N. A. Wlassow et al., 1972), im Baikal-Gebiet (B. I. Pissarski & G. M. Speiser, 1973) und im Nordwesten der Mongolei (B. I. Pissarski et al., 1973).

Die Aufeisbildung beginnt in allen diesen Gebieten mit dem Oberflächeneuß der Hydrogenkarbonat-Kalzium-, Magnesium-Kalzium- und manchmal Kalzium-Magnesium-Untergrundwässer, deren Mineralisierung in Jakutien in Konzentrationen von 0,15 bis 0,4 g/l, im Baikal-Gebiet von 0,1 bis 1,1 g/l, im Nordwesten der Mongolei von 0,1 bis 0,25 g/l auftritt. Allerwegs ist derselbe Vorgang der physikalisch-chemischen Prozesse auf der Anfangsstufe der Aufeisbildung zu verzeichnen, wenn die Eiskristallisation die Steigerung der Mineralisierung der gebliebenen Lösung verursacht. Unter den Bedingungen der niedrigen

Temperaturen erfolgen dabei die Veränderungen des pH-Wertes von 7,0—7,5 und 8,0—8,5 (in Jakutien und im Baikal-Gebiet), stellenweise von 9,0—9,5 (im Nordwesten der Mongolei) und der Übergang des  $\text{HCO}_3^-$ -Ions ins  $\text{CO}_3^{2-}$ -Ion, was zum Ausfällen des  $\text{CaCO}_3$ -Salzsedimentes und zu der  $\text{CO}_2$ -Ausscheidung führt:



Das Aufeiswachstum und die Kristallisation des Ausgangswassers führen letzten Endes zur Bildung der nach der Zusammensetzung und der Mineralisierung verschiedenartigen Eisschichtenfolge unabhängig von der Gesamtmächtigkeit des Aufeises. In der oberflächennahen Schicht ist die hohe Mineralisierung (häufig ist sie viel höher als die des Ausgangswassers) und die gesteigerte  $\text{HCO}_3^-$ -,  $\text{CO}_3^{2-}$ -,  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Konzentration typisch. So enthielt beispielsweise ein Aufeis im Nordwesten der Mongolei in der oberflächennahen Schicht 1280 mg/l  $\text{HCO}_3^-$  und 24 mg/l  $\text{CO}_3^{2-}$  nach dem vollständigen Auftauen der Eisprobe fielen 8 g  $\text{CaCO}_3$  aus 2,5 l Lösung aus, und die Mineralisierung des Wassers betrug nur noch 0,23 g/l bei einer  $\text{HCO}_3^-$ -Konzentration von 150 mg/l. Von oben nach unten sinkt sowohl die Gesamtmineralisierung des Eises als auch die  $\text{HCO}_3^-$ -,  $\text{CO}_3^{2-}$ - und  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration. Der  $\text{SO}_4^{2-}$ -,  $\text{Cl}^-$ - und  $\text{Na}^-$ -Gehalt verändert sich um ein geringes, im ganzen Bereich des Profils. Weil die  $\text{Na}^+$ -Konzentration relativ hoch bleibt, steigt der Relativgehalt von oben nach unten; die Eiszusammensetzung der unteren Schicht charakterisiert sich durch den Hydrogenkarbonat-Natriumgehalt bei einer geringen Mineralisierung, die selten der Mineralisierung des Ausgangswassers gleich ist.

Vermutlich ist diese Ionenverteilung im Vertikalprofil der Aufeise durch die Migration der in den Eisporen gebliebenen mineralisierten Lösung durch die Mikropalten von unten nach oben zur Oberfläche zu erklären (L. T. Tschistotina & O. N. Tolstichin, 1969). Es ist zu vermuten, daß die Ursache einer solchen Migration im aktiven Durchfrieren der unteren Schichten liegt, das sukzessiv die großen Schichtenfolgen von unten nach oben umfaßt. Wegen des  $\text{CO}_2$ -Mangels gehen nicht alle ausfallenden Karbonate beim Aufeisauftauen im Winter und Sommer in die Lösung über: sie werden schwer aufgelöst und bleiben in bedeutendem Maße am Aufeisbildungsort. Nur auf dem Territorium Jakutiens verlieren die Untergrundwässer unwiederbringlich  $2\text{--}4 \cdot 10^9$  T/Jahr  $\text{CaCO}_3$  (N. A. Wlassow et al., 1972). Das zeugt von einer riesigen geochemischen Aufeisbildungstätigkeit.

Am Beispiel von Aufeisen im Nordwesten der Mongolei wurde die sukzessive Mineralisierungssenkung des aufgetauten Wassers festgestellt. In der Anfangsperiode (April bis Mai), während die oberflächennahen Eisschichten aufgetaut werden, übersteigt gewöhnlich die Mineralisierung des aufgetauten Wassers die des Ausgangsuntergrundwassers, selten ist sie ihr gleich. Nach der Zusammensetzung werden die aufgetauten Wässer zu den Karbonat-Hydrogenkarbonat-Kalzium-

und Magnesium-Wässern zugerechnet, die Wasserreaktion ist alkalisch (pH 9,0—9,2). In der nächsten Periode (Mai bis Juni) werden die mittleren Profilschichten aufgetaut; die Mineralisierung des aufgetauten Wassers sinkt bis zu ihrem Wert im Ausgangswasser und noch niedriger (0,1—0,15 g/l), die Wasserreaktion nähert sich der schwachalkalischen (pH 8,0—8,2), nach der Zusammensetzung werden die aufgetauten Wässer der mittleren Schicht als Hydrogenkarbonat-Magnesium- und Kalzium-Wässer betrachtet. Beim Auftauen der letzten Eisschollen (Juli bis August) hat das Wasser eine außergewöhnlich minimale Minerali-

Tabelle 1: Ionen- und Salzzusammensetzung des beim künstlichen Gefrieren aus den Aufeiswässern aus dem Nordwesten der Mongolei gebildeten Eises (B. I. PISSARSKI et al., 1973).

Ort der Probeentnahme des Ausgangswassers	Mineralisierung des aufgetauten Eises, mg/l	Ionenzusammensetzung, mg/l					
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
<b>I. Aufeis am Fluß Tschshiglig</b>							
Wasser vor dem Gefrieren	43,00	9,02	0,49	4,75	21,20	5,75	1,91
Eis: obere Schicht	122,29	12,82	1,95	18,75	73,20	12,76	2,81
mittlere Schicht	79,62	6,3	0,24	17,00	41,48	11,93	2,67
untere Schicht	62,55	3,15	0,97	13,75	36,60	5,76	2,32
<b>II. Aufeis am Fluß Bajan</b>							
Wasser vor dem Gefrieren	38,63	5,81	0,31	4,75	19,83	6,99	0,89
Eis: obere Schicht	62,46	4,81	0,49	12,75	34,16	8,23	2,02
mittlere Schicht	62,11	3,94	2,55	9,75	36,60	7,41	1,86
untere Schicht	37,39	1,97	1,34	7,00	19,52	6,17	1,39
<b>III. Quellaufeis unweit des Flusses Tschshiglig am Ufer des Chub-sugulsee</b>							
Wasser vor dem Gefrieren <sup>1</sup>	234,50	43,69	3,77	4,00	152,50	5,34	1,20
Eis <sup>2</sup> : obere Schicht	176,88	24,05	2,92	19,50	115,90	11,93	2,58
mittlere Schicht	181,01	25,99	5,22	14,25	122,00	11,11	2,44
untere Schicht	70,87	5,12	1,94	12,25	42,70	7,00	1,86
<b>IV. Aufeis am Fluß Hanch</b>							
Wasser vor dem Gefrieren	122,21	21,47	5,47	1,75	83,88	8,63	1,01
Eis: obere Schicht	242,38	36,47	7,78	16,00	164,70	14,40	3,03
mittlere Schicht	97,81	12,60	5,47	5,00	65,88	7,00	1,86
untere Schicht	39,09	0,63	1,58	8,75	20,74	5,76	1,63

<sup>1</sup> Für das Experiment wurde eine Wasserprobe entnommen, bei deren Auftauen aus 2,5 l 8 g CaCO<sub>3</sub> ausfiel.

<sup>2</sup> Beim Auftauen wurde 14,5 mg/l CaCO<sub>3</sub>-Sediment gebildet.

sierung (30–40 mg/l), eine neutrale Reaktion (pH 7,5–7,7) und eine Hydrogenkarbonat-Natrium-, seltener Kalzium- oder Magnesium-Natrium-Zusammensetzung.

Für die Bestätigung der gezeigten Gesetzmäßigkeiten wurden Experimente zum Verständnis der Veränderung der Mineralisierung und Zusammensetzung des Aufeises beim Auftauen mittels künstlichen Gefrierens durchgeführt. Bei der Temperatur  $-6^{\circ}\text{C}$  wurden die aufgetauten Eisproben, die aus den untersuchten Aufeisen genommen wurden, sowie die Flußwasserproben, deren Wasser früher nicht gefroren war, für die Kontrolle gefroren (s. Tabelle 1).

Die Erforschungsergebnisse zeigten, daß die Prozesse „Durchfrieren-Auftauen“ auf die Mineralisierungssenkung und die Veränderung der Zusammensetzung von den Hydrogenkarbonat-Kalzium- und Magnesium-Kalzium-Wässern bis zu den Hydrogenkarbonat-Natrium-Wässern gerichtet sind, d. h. sie charakterisieren die unter den natürlichen Bedingungen verlaufenden Prozesse.

## Die Bildung der Zusammensetzung der über der Gefrornis liegenden Wässer

Die Bildung der Wasserzusammensetzung der saisonaufgetauten Schicht ist in den Berggebieten und Tiefebene ganz verschieden. Die

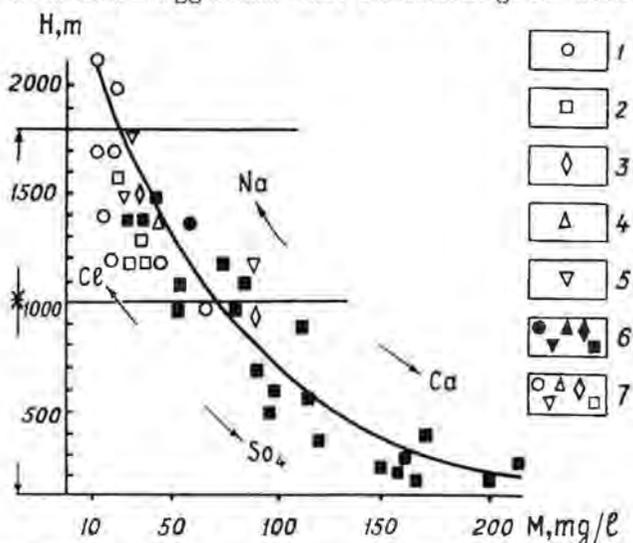


Fig. 2: Veränderung der Mineralisierung und Zusammensetzung der über der Gefrornis liegenden Wässer in den Berggebieten Ostjaku tiens (R. S. KONONOWA, 1973): 1 — Hydrogenkarbonate und Chloride; 2 — Hydrogenkarbonate und Sulfate; 3 — Hydrogenkarbonate und Silicium; 4 — Chloride und Hydrogenkarbonate; 5 — Sulfate und Hydrogenkarbonate; 6 — Kalzium; 7 — Natrium.

Berggebiete sind gekennzeichnet durch eine hydrochemische Zonalität, die in der Veränderung der Wassermineralisierung nach den Höhenstufen besteht (Fig. 2). Bei der unwesentlichen Mächtigkeit der saisonaufgetauten Schicht, die auf den wasserdichten gefrorenen Gesteinen lagert, unterscheidet sich die Wasserzusammensetzung von der Zusammensetzung der atmosphärischen Niederschläge sehr wenig.

Die Hochgebirgszone (absolute Höhenmarken mehr als 1800 m) ist durch eine minimale Mineralisierung der Wässer der saisonaufgetauten Schicht gekennzeichnet. Nach der Zusammensetzung dominieren hier Hydrogenkarbonat- und Chlorid-Natrium-Wässer. Die Mittelgebirgszone (absolute Höhenmarken 1000—1800 m) ist durch eine Mineralisierungssteigerung bis 50—100 mg/l gekennzeichnet. Nach der Zusammensetzung werden die Wässer dieser Zone den Hydrogenkarbonat- und Chlorid- sowie Sulfat-Natrium-Wässern zugerechnet.

In der Flachgebirgszone (absolute Höhenmarken weniger als 1000 m) erreicht die Mineralisierung 100—300 mg/l. Nach der Zusammensetzung dominieren hier Hydrogenkarbonat- und Sulfat-Kalzium-Wässer.

Die Rolle der Kryogenese in der Bildung der Wasserzusammensetzung der saisonaufgetauten Schicht ist in den Berggebieten nicht erforscht, weil die Wässer keine praktische Nutzung haben. Es ist nur anzunehmen, daß das Vorherrschen des Natriums in der Wasserzusammensetzung der Hoch- und Mittelgebirgszonen durch die Tätigkeit der kryogenen Prozesse bestimmt ist, denn außerhalb des Gebietes Ewiger Gefrorenis dominieren gewöhnlich Kalziumwässer.

Bedeutende Veränderungen der Ionen- und Salzzusammensetzung und Mineralisierung geschehen in den Flachgebirgszonen im Laufe eines Jahreszyklus (N. P. ANISSIMOWA, 1973). Das Durchfrieren der Wässer ist durch die gesteigerte Mineralisierung gekennzeichnet. Die Hydrogenkarbonat-Kalzium- und Magnesium-Wässer verwandeln sich in die Karbonat-Kalzium- und Magnesium-Wässer, die ihrerseits ein Eutektikum mit dem Eis bilden. In der flüssigen Phase erhöht sich die Konzentration der Hydrogenkarbonat-Natrium- und manchmal Sulfat-Natrium- und Magnesium-Ionen (Tabelle 2).

Die Chloride, die sich in den Porenlösungen vorwiegend in den unteren, als letzte gefrorenen Schichten ansammeln, kommen teilweise in die unterlagernden gefrorenen Gesteine. In diesen Schichten dominieren Sulfate beim Vorhandensein des Eiseinschlusses. In den abflußlosen Senkungen, wo der Wasseraustausch erschwert ist und nach der Zusammensetzung Chloride und Sulfate dominieren, scheint solch ein Salzeindringen in die unterlagernden gefrorenen Gesteine besonders bedeutend zu sein; dabei erfolgt der Transport der aufgelösten Stoffe sowohl unter der Wirkung der Konvektion als auch der Diffusion. Beim Auftauen der gefrorenen Gesteine steigt die Mineralisierung des Wassers auf Kosten von den Hydrogenkarbonaten des Kalziums und Magnesiums, die später wieder in die Lösung übergehen. Im Zusammenhang mit der höheren Löslichkeit des Magnesiumkarbonats im Vergleich zum

Tabelle 2: Ionen- und Salzzusammensetzung der über der Gefrornis und der dieser zwischengelagerten Wässer  
(nach N. P. ANISSIMOWA)

Ort der Probeentnahme	Datum	Tiefe m	Mineralisierung g/l	Konzentration der Hauptionen, $\frac{\text{mg/l}}{\text{mval } \%}$					
				Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
über der Gefrornis liegende Wässer									
I. Terrasse der Lena unweit von Jakutsk	20. XI. 1950	1,2	0,31	81,5	37,3	12,2	21,0	342,5	115,2
				50,4	32,2	17,4	10,0	21,0	68,6
II. Flußtal Chantschala	24. VII. 1964	1,5	1,9	1118,6	69,6	63,9	2,3	360,7	264,2
				63,7	23,6	42,6	4,6	63,2	32,2
III. Terrasse der Lena	12. VIII. 1960	1,8	1,0	267,3	44,1	51,3	156,0	48,0	433,3
				66,9	11,2	21,9	22,4	5,1	72,4
IV. Senkung im Flußtal Lunicha	12. VII. 1960	2,5	1,2	45,2	220,4	121,6	425,5	189,6	197,7
				0,9	52,0	47,1	56,4	28,4	15,2
Wässer der unter dem Flußbett gelegenen Auftauböden									
V. Flußbett der Lena	19. VIII. 1958	14,0	0,44	73,9	56,5	23,1	118,8	62,4	105,3
				41,0	35,0	24,0	41,0	16,0	43,0
VI. Flußbett der Tamma	29. IV. 1959	3,0	0,24	5,8	44,7	31,9	7,3		150,3
				4,0	44,0	52,0	2,0		98,0
flüssige Lösungen von in die Gefrornis eingeschlossenen Linsen									
VII. Terrasse der Lena	24. IX. 1960	5,1	14,7	3120,8	669,1	1133,3	8169,9	1497,1	109,8
				48,6	12,4	35,4	87,5	11,8	0,7
VIII. Terrasse der Lena unweit von Jakutsk	30. IX. 1966	5,0	59,9	8794,9	2575,1	7908,8	35658,6	4322,2	639,4
				29,6	11,6	58,8	91,0	8,1	0,9

Kalziumkarbonat, führt dies zur Bildung der Hydrogenkarbonat-Magnesium-Wässer.

## **Die Bildung der Wasserzusammensetzung in den Auftauböden**

Mehrere Jahrzehnte lang dauert die Veränderung der Untergrundwasserzusammensetzung unter der Wirkung der Kryogenese in den Auftauböden.

In den unter dem Flußbett gelegenen Auftauböden, wo ein intensiver Wasseraustausch zustande kommt, nähert sich die Zusammensetzung der Untergrundwässer gewöhnlich der Zusammensetzung der Flußwässer (Tab. 2). Die Mineralisierung des Wassers steigt erst im Winter unter den flachgewordenen und versiegten Flüssen in der oberen Schicht der Auftauböden, was mit dem Salzeindringen aus den gefrorenen Schichten der Gesteine verbunden ist.

Viel komplizierter scheinen die Prozesse der Bildung der Wasserzusammensetzung der unter einem See gelegenen Auftauböden zu sein (N. P. ANISSIMOWA, 1971). In den unter dem See, der Wasserfüllung einer Erosionswanne gelegenen Auftauböden ist die Anfangszusammensetzung der Untergrundwässer gleich der Wasserzusammensetzung der unter dem Flußbett gelegenen Auftauböden. Die Mineralisierung des Wassers ist gewöhnlich nicht höher als 0,5 g/l und nach der Zusammensetzung dominieren hier Hydrogenkarbonate des Kalziums und Magnesiums. In solchen Auftauböden können sich später Salze ansammeln, die von über der Gefrornis liegenden Wässern der Umgebung herangebracht werden. In der Anfangsphase der Bildung der unter einem Thermokarstsee gelegenen Auftauböden hängt die Mineralisierung der Untergrundwässer von der Mächtigkeit der Schicht der Eisnebengesteine, ihrem Eisumfang und der Salzkonzentration ab. Das Anfangseisauftauen führt zu der Mineralisierung der flüssigen Phase bis 0,5 g/l mit einer Hydrogenkarbonat-Kalzium- oder Magnesium-Zusammensetzung bei einer in der Regel geringen Mächtigkeit (weniger als 10 m) der eisgesättigten Sande und Staubsande, aus denen der Auftauboden besteht. Die Rolle der über der Gefrornis liegenden Wässer hinsichtlich der Ernährung der Auftauböden ist unbedeutend. Beim Auftauen der von den sich auflösenden Salzen gesättigten See-Alluviallehme mit einer Mächtigkeit von 20 bis 30 m erreicht die Mineralisierung des Wassers 1—1,5 g/l. Nach der Zusammensetzung enthält es sowohl Hydrogenkarbonate des Kalziums und Magnesiums als auch Sulfate und Chloride des Natriums.

Die weiteren Veränderungen der Mineralisierung und Zusammensetzung der Untergrundwässer der unter dem See gelegenen Auftauböden verlaufen unter der schwer erfaßbaren Wechselwirkung mit den Flußwässern, Schlammlösungen und Eisnebengesteinen und hängen von den Bedingungen und vom Tempo des Wasseraustausches, der

Intensität der Wasserverdunstung und dem Durchfrieren bzw. Auftauen der Auftauböden ab. Die Rolle der Seewässer in der Ernährung der Auftauböden hängt vom Vorhandensein oder Fehlen einer schwach durchlässigen Schlammschicht ab. Dort, wo die Auftauböden nicht bis zum Grund durchgefroren werden, ist ein Salzaustausch mit dem Seewasser, der Schlammlösung und dem Wasser des Auftaubodens in Form der Diffusion zu vermuten. Dabei steigt die Mineralisierung des Seewassers und der Schlammlösung. In Verbindung mit der Ionenmigration in die Richtung zur geringen Konzentration steigt auch die Mineralisierung des Wassers im unter dem See gelegenen Auftauboden.

Die physikalisch-chemischen Prozesse des Durchfrierens sind von großer Bedeutung in der Steigerung der Mineralisierung und Veränderung der Wasserzusammensetzung, wenn ein Teil der aufgelösten Salze und der organischen Stoffe in die Auftauböden kommt. Im Zusammenhang damit ist das Wasser an der Grenze mit den gefrorenen Gesteinen immer mehr mineralisiert als in den tieflagernden Schichten.

Die Mineralisierung des Wassers steigt am Kontakt mit den oberen und unteren Grenzen der gefrorenen Gesteine beim Durchfrieren der abgeschlossenen Auftauböden oben und unten. Aus Fig. 3 ist zu ersehen, daß die Steigerung der Mineralisierung der flüssigen Phase in den unter dem See gelegenen Auftauböden vorwiegend auf Kosten von den Hydrogenkarbonaten des Magnesiums geschieht, von denen die wenig

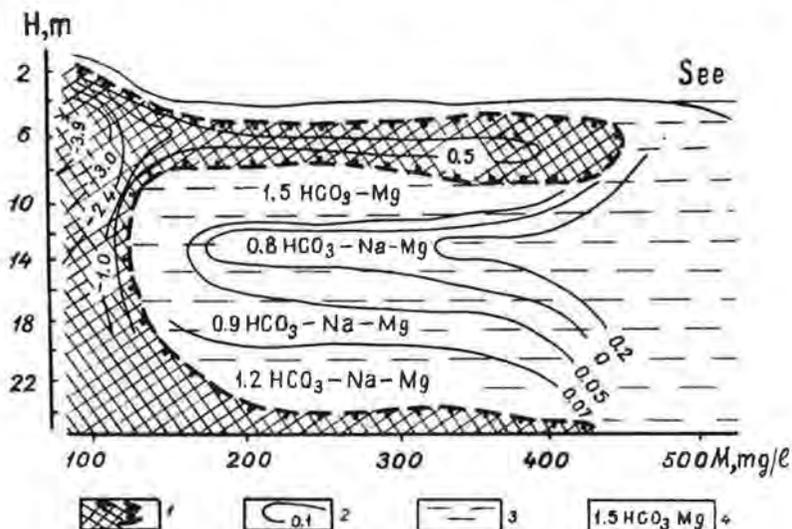


Fig. 3: Hydrogeochemisches Profil des abgeschlossenen Auftaubodens (nach N. P. ANISSIMOWA, 1971): 1 — mehrjährig gefrorene Gesteine; 2 — Isothermen (die Ziffer bezeichnet °C); 3 — vom Wasser durchsetzte Gesteine; 4 — Mineralisierung (g/l) und geochemischer Wassertyp (vorherrschende Ionen).

mineralisierten Wässer in den Grenzschichten mit den gefrorenen Gesteinen angereichert werden. Die Ursache besteht einerseits in der höheren Löslichkeit des Magnesiumkarbonats im Vergleich zum Kalziumkarbonat und andererseits im Übergang des Natriums in den Absorptionskomplex der Gesteine und im Ausfallen der Natriumsalze. Mit der Entfernung von der Grenze „Wasser—Eis“ steigt der Hydrogenkarbonat-Natrium-Gehalt im Wasser der wärmeren Schichten der Auftauböden. In bedeutendem Maße ist die Veränderung der Mineralisierung der Wässer in den Auftauböden durch die Intensität des Wasseraustausches bestimmt. Deshalb ist die große Ansammlung der Salze in der Senkung des Reliefs an den Orten der unter dem See gelegenen Auftauböden sowie in den hydroskopischen Querauftauböden in den gut durchlässigen, lockeren Ablagerungen oder klüftigen Kalksteinen nicht zu vermerken. Bei einer erschwerten Wechselbeziehung ist die Steigerung der Mineralisierung der Wässer von der Veränderung ihrer Zusammensetzung begleitet, die durch das Ausfallen einiger Salze, die biochemischen Wechselabsorptionsprozesse (und zwar durch die Desulfatbildung) bedingt ist.

Der Charakter des physikalisch-chemischen und biochemischen Prozesses verändert sich in der Abhängigkeit vom Grade der Mineralisierung der Wässer.

Für die Mehrheit der unter dem See gelegenen Auftauböden (Fig. 3) sind Hydrogenkarbonate in der Zusammensetzung charakteristisch. Ihre intensive Konzentration erfolgt bei der Mineralisierung unter 2 g/l. Bei der Mineralisierung über 1 g/l enthält das Wasser sowohl Hydrogenkarbonate als auch Karbonate, deren Gehalt bei der Mineralisierung über 5 g/l die Konzentration der Hydrogenkarbonate übersteigt oder ihr gleich ist.

Das Wasser der unter dem See gelegenen Auftauböden, die aus den sulfathaltigen Gesteinen bestehen, hat einen erhöhten Sulfatgehalt. Die Mineralisierung der Sulfatwässer erreicht 3—5 g/l beim Vorherrschen des Natriums und Magnesiums nach der Kationenzusammensetzung.

Das Erscheinen der Chloride ist für die unter dem Thermokarstsee gelegenen Auftauböden charakteristisch; die bedeutende Auslaugung der Chloride geschieht in den durchgetauten Eisnebenlehmen sowie in den isolierten, durchgefrorenen Auftauböden, auf denen die Salzböden entwickelt sind.

### **Die Bildung der Zusammensetzung der der Gefronnis zwischengelagerten und unter ihr liegenden Wässer**

Die Wässer der hohen Mineralisierung mit dem Vorherrschen der Chloride des Magnesiums der Zusammensetzung nach werden in den isolierten Linsen der der Gefronnis zwischengelagerten Wässer in den Schichtenfolgen der gefrorenen Gesteine bei Minustemperaturen gebildet. Unweit von der Stadt Jakutsk wurde eine Linse von Salzlösun-

gen mit einer Mineralisierung bis 60 g/l (Tabelle 2) in den Alluvialablagerungen entdeckt. Als Salzquelle wirken hier sowohl das Wasser selbst als auch der Boden, der Sulfate und Chloride enthält.

Die mächtige Schichtenfolge der gefrorenen Gesteine übt eine große Wirkung auf die Zusammensetzung der unter ihr liegenden Wässer aus. Dies kommt vor allem im eigenartigen Charakter der hydrochemischen Zonalität unter der Sohle der Ewigen Gefrornis zum Ausdruck. Unmittelbar unter der Schichtenfolge der gefrorenen Gesteine wird eine „Aussüßungszone“ gebildet, die tiefer deutlich in eine „Konzentrationszone“ übergeht (Fig. 4). R. S. KONONOWA (1973) nimmt an, daß diese Konzentrationszone bis zur maximalen Tiefe des Durchfrierens der Gesteine in den vergangenen viel kälteren Epochen zu vermerken ist; das tiefe Anfangsdurchfrieren wurde einerseits von der Bildung der wenig-mineralisierten Eise (gegenwärtige Aussüßungszone) und andererseits von der relativen Steigerung der Mineralisierung an der unteren Grenze des Durchfrierens (Konzentrationszone) begleitet. Viel tiefer

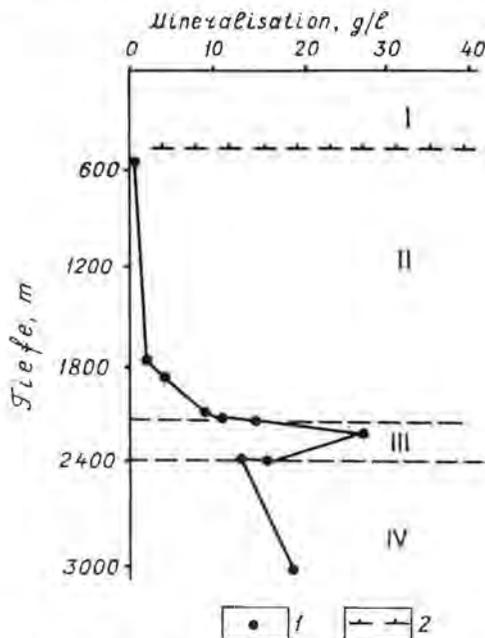


Fig. 4: Die Veränderung der Mineralisierung der Untergrundwässer abhängig von der Tiefe in einer Bohrung Jakutiens (nach R. S. KONONOWA): 1 — Ort der Probeentnahme; 2 — die untere Grenze Ewiger Gefrornis.

Zonen: I — nach dem Mineralisierungsgrad verschiedener Wässer; II — Aussüßungszone; III — Konzentrationszone; IV — Zone der Wässer, deren Zusammensetzung und Mineralisierung einer kryo-genen Metamorphisierung nicht unterworfen worden sind.

lagern die Untergrundwässer, auf die die Kryogenese keine Wirkung ausübte. Folglich ist das Erscheinen der genannten Zonen durch die paläoklimatischen Bedingungen bestimmt.

Die Aussüßungszone hat eine Mächtigkeit über 1000 m und enthält Hydrogenkarbonat- und Chlorid-Natrium-Wässer mit einer Mineralisierung von 0,5 bis 6,0 g/l in den sandig-tonigen und karbonatischen Ablagerungen des Mesozoikums und Perms auf der sibirischen Tafel unter den Schichtenfolgen der gefrorenen Gesteine (500—600 m). Besonders stark steigt die Mineralisierung (bis zu 25—35 g/l) in der Konzentrationszone, und nach der Zusammensetzung dominieren hier Chlorid-Natrium- und Kalzium-Wässer. Weiter gegen die Tiefe zu sinkt die Mineralisierung bei einer fast unveränderlichen Wasserzusammensetzung.

Im Mittellauf des Flusses Lena sind unter der Gefrornis liegende Karstwässer weit verbreitet. Es ist bemerkenswert, daß sie hier im Gebiet der geschlossenen Verbreitung der Ewigen Gefrornis nach der Zusammensetzung Hydrogenkarbonat-Natrium-Wässer sind, was sie von den außerhalb der gefrorenen Zone verbreiteten Karstwässern unterscheidet.

Der Schirm mehrjährig gefrorener Gesteine im Tunguska-Becken (Westen der Sibirischen Tafel) spielt eine führende Rolle sowohl für die hydrodynamischen als auch hydrogeochemischen Besonderheiten des unterlagernden geologischen Profils. Dank der Blockstruktur, die in bedeutendem Maß von den jüngsten tektonischen Bewegungen erneuert ist, steigen die Solen aus den tiefen Teilen des geologischen Profils nach oben. Die Entlastung der Salzlösungen auf die Oberfläche wird aber von der obenerlagernden, schwach durchlässigen triassischen Tuffserie behindert, die praktisch in ihrer Mächtigkeit durchgefroren ist. Deshalb wird unter der Sohle mehrjährig gefrorener Gesteine in den Sandsteinen des Perm (300—500 m tief) ein persistenter, nach der Fläche wasserführender Horizont der Salzlösungen gebildet, die von unten aus den kambrischen Ablagerungen migrierten (2000—3000 m tief und noch tiefer).

Im Becken der Unteren Tunguska (E. V. PINNEKER, 1973) ist der unter der Gefrornis liegende Horizont der Salzlösungen 125 km weit zwischen den Flußmündungen von Nidym und Wiwi verfolgt. Die hydrochemische Zonalität ist hier unikal, das ganze Profil stellt eine Zone der Salzlösungen (Solen) dar; Süß- und Salzwässer fehlen. Nach der Ionen- und Salzzusammensetzung unterscheiden sich die Solen des unter der Gefrornis liegenden Teils des Profils von den Salzlösungen der Grundablagerung nicht (letztere charakterisieren sich durch das  $\text{CaCl}_2$ -Vorherrschen), ihre Mineralisierung erreicht nicht 350 bis 450 g/l, sondern ist ein wenig niedriger (200—300 g/l).

Unter den die Gefrornis zwischen und unterlagernden Wässern finden sich Untergrundwässer mit Minustemperaturen, die fast immer

Salzlösungen darstellen. N. I. TOLSTICHIN (1970) bezeichnete sie als „Kryopegen“.

Als Beispiel der Bildung der Wässer mit Minustemperatur können die Untergrundwässer des südlichen Hanges des Anabar-Schildes dienen, die in den lokalen, die halogen-karbonatischen Ablagerungen des Kambriums durchbrechenden Intrusionen, Kimberliten entwickelt sind.

Von der Wirkung der Kryogenese zeugt die scharf ausgeprägte Zonalität der sekundären Mineralbildung, die sich im sukzessiven Wechsel (von oben nach unten) von Kalzit, Dolomit, Mirabilit und in der Tiefe von 400 m im einzelnen Einschluß von Halit zeigt. Aus Tabelle 3 ist zu ersehen, daß die viel niedrigeren Temperaturen der höheren Mineralisierung der Salzlösungen entsprechen. Das Vorhandensein der Chloride des Magnesiums in diesen Wässern kann durch die Prozesse der Kryogenese geklärt werden, denn die Salzlösungen mit Plus-temperatur enthalten viel weniger Magnesium.

Die in Linsen lagernden Solen mit Minustemperaturen sind weit verbreitet im Norden der Sibirischen Tafel, am südlichen Hang des Anabar-Schildes. So wurden z. B. in der Marchinischen Bohrung, wo die maximale Mächtigkeit der gefrorenen Gesteine 1,5 km erreicht, im Tiefenabstand von 1040 bis 1060 m Chlorid-Kalzium-Salzlösungen mit einer Mineralisierung von 311 g/l und einer Temperatur von  $-1,8^{\circ}\text{C}$  entdeckt (P. I. MELNIKOW, 1967).

Tabelle 3: Die Veränderung der Mineralisierung der Salzlösungen im Süden des Anabar-Schildes abhängig von der Temperatur (S. G. USTINOVA, 1964).

Gesteine	Tiefe, m	Temperatur der Salzlösung, $^{\circ}\text{C}$	Mineralisierung, g/l	Salzzusammensetzung (in der Reihenfolge der Konzentrationsabnahme)
Intrusivgesteine	178	$-4,0$	92	Chloride d. Magnesiums, Kalziums, Natriums
Intrusivgesteine	184	$-4,3$	97	Chloride d. Magnesiums, Kalziums, Natriums
Intrusivgesteine	190	$-3,8$	76	Chloride d. Magnesiums, Kalziums, Natriums
Karbonatgesteine	330	$-3,0$	48	Chloride des Kalziums, Magnesiums, Natriums

Wässer mit Minustemperaturen wurden auch im Nordosten der UdSSR an den Küsten des Beringmeeres und Ochotskischen Meeres in den schlammigen Sand- und Geröllablagerungen durch Bohrungen entdeckt. Sie stellen Chlorid-Natrium-Salzlösungen mit einer Mineralisierung von 35 bis 88 g/l und Minustemperaturen von  $-1,5$  bis  $-6,0^{\circ}\text{C}$  dar. Die Wässer enthalten Brom (bis 76 mg/l), Jod (bis 1,6 mg/l) und unterscheiden sich von den Seewässern durch die viel höhere Mineralisierung, die erhöhte Konzentration des Magnesiums und andere Merkmale (Tabelle 4). O. N. TOLSTICHIN betrachtet diese zwischengelagerten

Tabelle 4: Ionen- und Salzzusammensetzung der Wässer mit Minustemperaturen an den Meeresküsten im Vergleich zum Seewasser (nach I. A. SUEW, V. I. FILJAKINA, A. L. DEKIN)

Ort der Probenentnahme	Datum	Wasser-temperatur, °C	Konzentration der Hauptionen, $\frac{\text{mg/l}}{\text{m val } \%}$						pH-Wert	Mineralisierung, g/l
			Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
der Gefronnis zwischengeschaltete Wässer der lockeren Seeablagerungen										
Bohrung an der Küste der Anadyrskischen Bucht, Beringmeer	26. VI. 1966	-6,0	$\frac{26942,3}{78}$	$\frac{3630,1}{20}$	$\frac{1008,5}{2}$	$\frac{47882,9}{89}$	$\frac{7909,0}{11}$	$\frac{341,7}{0,5}$	6,7	87,7
Bohrung an der Küste der Anadyrskischen Bucht, Beringmeer	VII. 1964	-3,8	$\frac{14164,1}{61}$	$\frac{1893,3}{16}$	$\frac{4576,3}{23}$	$\frac{34855,1}{98}$	$\frac{870,8}{1,8}$	$\frac{104,9}{0,2}$	—	56,5
Bohrung an der Küste des Ochotskischen Meeres	24. V. 1957	-1,5	$\frac{10260,9}{73}$	$\frac{1659,1}{22}$	$\frac{568,1}{5}$	$\frac{19914,1}{92}$	$\frac{2156,9}{7}$	$\frac{256,2}{1}$	6,9	34,8
Seewasser										
Anadyrskische Bucht, Beringmeer	IV. 1957	Plus-temperatur	$\frac{8300,0}{81}$	$\frac{99,7}{1}$	$\frac{1582,0}{18}$	$\frac{13664,0}{86}$	$\frac{1762,0}{8}$	$\frac{1586,5}{6}$	—	27,0

Salzlösungen als begrabene Seewässer (Hydrogeologie der UdSSR, Bd. XXVI, 1972) und betont folgendes:

1. In den Kryopegen ist der Sulfatgehalt um zweimal höher und der Karbonatgehalt um 15mal niedriger als in den Seewässern. Das wird dadurch geklärt, daß sich  $\text{CaCO}_3$  bereits bei einer Temperatur von  $-1,9^\circ\text{C}$  aus dem Seewasser kristallisiert; bei der weiteren Temperaturabnahme fallen Sulfate des Natriums aus.
2. Die Eisbildung führt zur Steigerung der Mineralisierung des gebliebenen Wassers bis zur bei dieser Temperatur stabilen Konzentration ( $57\text{ g/l}$  bei der Temperatur von  $-3,4^\circ\text{C}$ ); dabei sinkt im Wasser die Konzentration der Hydrogenkarbonate und Sulfate, am wenigsten die des Natriums.

JA. V. NEISWESTNOW & JU. P. SEMENOW (1973) beschrieben die zwischengelagerten Salzlösungen des Schelfes und der Inseln des Nördlichen Eismeeres. Sie charakterisieren sich durch die Chlorid-Natrium-Zusammensetzung, eine Mineralisierung von  $35\text{ g/l}$  bis  $160\text{ g/l}$ , eine erhöhte Konzentration des Magnesiums und Temperaturen von  $-2^\circ$  bis  $-10^\circ\text{C}$ . Die Autoren betonen, daß solche Salzlösungen durch die kryogene Metamorphisierung des Meerwassers gebildet sind.

## Die Untergrundwasserzusammensetzung der Erzlagerstätten

Die Rolle der Kryogenese in der Bildung der Untergrundwässer der Erzlagerstätten wurde in Transbaikalien und im Norden der Sibirischen Tafel erforscht.

VON G. A. JURGENSSON & JU. P. BESRODNICH (1966) wurden die interessanten Schlußfolgerungen über die physikalisch-chemischen Prozesse der Bildung der Oxydationszone der Udokanischen Kupferlagerstätte (Transbaikalien) unter den Bedingungen der Minustemperaturen der erzführenden Schichtenfolge gezogen. G. A. JURGENSSON und JU. P. BESRODNICH entdeckten in einem der Stollen ( $1700\text{ m}$  weit von der Flußmündung und  $350\text{ m}$  unter der Oberfläche) im Bereich der Zerkleinerung der Gesteine Spalten, die von Eis, Hydrocyanit, Antlerit, Brochanit und Kalkarenit gefüllt sind. Antlerit bildet dünne Trümmer im Eis oder Auswüchse darauf.

Solch eine Paragenese von Eis, wasserhaltigen und wasserlosen Sulfaten des Kupfers zeugt beim offenbar spätesten Alter der letzteren nach dem Erachten von G. A. JURGENSSON und JU. P. BESRODNICH vom Verlauf der Prozesse der Mineralbildung bei Minustemperaturen. Der Meinung der Autoren nach ist I. A. TJUTJUNOWS Schlußfolgerung (1961) über die bedeutende Rolle der ungefrorenen Wasserhäute bei den ziemlich aktiv in den Gesteinen Ewiger Gefrorenis verlaufenden geochemischen Prozessen an der Lagerstätte überzeugend bestätigt.

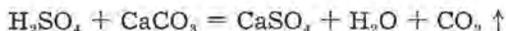
Wie S. L. SCHWARZEW (1965, 1970) betont, charakterisieren sich die Prozesse der kryogenen Metamorphisierung der Wässer durch die hohe Aktivität in den Zonen der Sulfid-Mineralisierung, wo sie durch die

Oxydationsprozesse der Sulfiderze verstärkt werden. Davon zeugt die hohe Mikroelementen- und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration in den Wässern der Zonen der Sulfid-Mineralisierung und der niedrige pH-Wert dieser Wässer.

Nach den Angaben der Beobachtungen an der Norilsker Lagerstätte ist die höchste Mikroelementen-,  $\text{CO}_2$ - und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration bei Untergrundwässern in der oberen Schicht der gefrorenen Schichtenfolge zu vermerken, was nach S. L. SCHWARZEWS Erachten vom erschweren Wasseraustausch dieser Schichtenfolge abhängt. Beim Eindringen dieser Wässer in die saisonaufgetauten Schichten und dem intensiven Wasseraustausch sinkt der Mikroelementen- und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalt, und der pH-Wert ist gleich 7.

Die intensive geochemische Tätigkeit der Untergrundwässer wird im Gebiet Ewiger Gefrorenis durch die große Anzahl der Mineralneubildungen in der oberen Schicht der Oxydationszone der Sulfid-Lagerstätten geklärt. Diese Minerale (Morenosit, Malenterit, Halotrechit u. a.), die die alten oxydierten Erze bedecken, wurden an der Norilsker Polymetallagerstätte gerade in der gefrorenen Schicht entdeckt. Allmählich steigt die Mächtigkeit der Neubildungen. Bei den Minustemperaturen werden dabei die Minerale gebildet, die unter den gewöhnlichen Bedingungen schwach stabil sind (S. L. SCHWARZEW, 1965).

Die Untergrundwässer der gefrorenen Schichtenfolgen charakterisieren sich in den Zonen der Sulfid-Mineralisierung durch den hohen Gehalt der freien Kohlensäure (bis 1–6 g/l, S. L. SCHWARZEW, 1970). Das läßt sich durch die Wechselwirkung der Schwefelsäure, die bei der Oxydation der Sulfid-Erze mit den Karbonat-Nebengesteinen gebildet wird, erklären:



Die niedrige Temperatur verursacht die erhöhte Löslichkeit der Kohlensäure, was zur Ansammlung der letzteren in den Untergrundwässern führt.

Schließlich ist zu bemerken, daß die vorliegende Arbeit nur eine Vorstellung über die wichtigsten und kennzeichnenden Besonderheiten der Bildung der Ionen- und Salzzusammensetzung der Untergrundwässer im Gebiet Ewiger Gefrorenis bietet. Bis jetzt sind noch nicht alle Prozesse der Kryogenese erforscht. Das Studium der kryogenen Metamorphisierung befindet sich im wesentlichen in der Anfangsphase. In naher Zukunft werden zu diesem Problem zweifellos neue Tatsachen und Gesetzmäßigkeiten entdeckt werden.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sind die Forschungsergebnisse der Autoren und vorhandene Veröffentlichungen zur Frage über die Rolle der kryogenen Prozesse in der Bildung der Zusammensetzung verschie-

dener Untergrundwassertypen im Gebiet der Ewigen Gefrorenis zusammengefaßt. Die Autoren stützten sich dabei vorwiegend auf Erfahrungen aus Bereichen Sibiriens, des Nordostens der UdSSR und der VR Mongolei, wo die Fragen der kryogenen Metamorphisierung der Untergrundwässer ziemlich gut erforscht sind.

Die kryogene Metamorphisierung der Untergrundwässer ist am Beispiel der Aufeise und der der Ewigen Gefrorenis über-, zwischen- und untergelagerten Wässer betrachtet, ihre große paläohydrogeologische Rolle wird betont.

Das im Gebiet der Ewigen Gefrorenis bedeutsame Auftreten der Kryopegen, d. h. der unterirdischen Salzwässer und Solen, die eine Minustemperatur haben und flüssig sind, wird eingehend behandelt.

Für die Oxydationszone der Erzlagerstätten wird die gegenwärtige geochemische Tätigkeit der Untergrundwässer betont, die unter den Bedingungen der Minustemperaturen der Gesteine erfolgt.

## Literatur

- ANISSIMOWA, N. P.: Die Bildung der chemischen Untergrundwasserzusammensetzung der Auftauböden (am Beispiel von Zentraljakutien), Verlag „Nauka“, Moskau, 1971, S. 195 (in russischer Sprache).
- Die kryogene Metamorphisierung der chemischen Untergrundwasserzusammensetzung (am Beispiel von Zentraljakutien). — Im Sammelband „Untergrundwässer der Kryolithosphäre“, Jakutsk, 1973, S. 5—12 (in russischer Sprache).
- BLACK, R. F.: Permafrost, a review. — Bull. Geol. Soc. Amer., 65, 9, 1954.
- EVERDINGEN, R. O., van: Ground water in permafrost regions of Canada. Permafrost Hydrology. Proceedings of Workshop Seminar, 1974, p. 83—93.
- GLASOWSKAJA, M. A.: Die Bodenverwitterung und die primäre Bodenbildung in der Antarktis. Wissenschaftliche Vorträge der Hochschule, geologisch-geographische Wissenschaften, 1958, Heft 1, S. 65—71 (in russischer Sprache).
- HILL, D. E. & TEDROW, I. C. F.: Weathering and soil formation in the arctic environment. — Amer. Journ. Sci., 259, 2, 1961.
- Hydrogeologie der UdSSR, Bd. XX (Jakutische Republik), Verlag „Nedra“, Moskau, 1970, S. 383 (in russischer Sprache).
- Hydrogeologie der UdSSR, Bd. XXVI (Nordosten der UdSSR), Verlag „Nedra“, Moskau, 1972, S. 296 (in russischer Sprache).
- JURGENSSON, G. A. & BESRODNICH, JU. P.: Über die Oxidationszone der Udokaner Kupferlagerstätte und ihre Rolle in der Bildung des Temperaturfeldes mehrjährig gefrorener Gesteine. — Im Sammelband „Geokryologische Bedingungen des Nordens Transbaikaliens“, Verlag „Nauka“ Moskau, 1966, S. 53—54 (in russischer Sprache).
- KELLY, W. G. & ZUMBERGE, I. H.: Study of rock weathering in the Arctic. (Abstract). — Bull. Geol. Soc. Amer., 71, 12, 1960.
- KONONOWA, R. S.: Die hydrogeologische Zonalität der Untergrundwässer als ein Merkmal der Paläofrostbedingungen. — Im Sammelband „Untergrundwässer der Kryolithosphäre“, Jakutsk, 1973, S. 90—94 (in russischer Sprache).
- MELNIKOW, P. I.: Der Einfluß der Untergrundwässer auf die tiefe Abkühlung der oberen Zone der Erdkruste. — Im Buch „Frost-, hydrogeothermische und hydrogeologische Untersuchungen im Osten der UdSSR“, Verlag „Nauka“, Moskau, 1967, S. 24—29 (in russischer Sprache).

- MOROSOW, S. S. & SELIWANOW, V. A.: Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Verwitterungsprodukte der effusiven Gesteine unter den Bedingungen der Tundrenzzone des Nordostens der UdSSR. Westnik Mosk. Universiteta, geologische Serie, 1961, Heft 3, S. 10—17 (in russischer Sprache).
- NEISWESTNOW, JA. V. & SEMENOW, JU. P.: Untergrundkryopegen des Schelfes und der Inseln der sowjetischen Arktis. — Im Sammelband „Untergrundwässer der Kryolithosphäre“, Jakutsk, 1973, S. 103—106 (in russischer Sprache).
- PINNEKER, E. V.: Einige Besonderheiten der Entwicklung mehrjährig gefrorener Gesteine an den Lenar Fundorten. — Geologie und Geophysik, 1962, Heft 8, S. 76—85 (in russischer Sprache).
- Die Zusammenwirkung der Kryolithosphäre und der Untergrundwässer der tiefen Schichten der artesischen Becken. Im Sammelband „Untergrundwässer der Kryolithosphäre“, Jakutsk, 1973, S. 103—106 (in russischer Sprache).
- PISSARSKI, B. I. & SPEISER, G. M.: Physikalisch-chemische Prozesse bei der Eisbildung im Baikal-Gebiet und Chybsugul-Gebiet (VR Mongolei). Schriften der Baikal-Gebiet-Filiale der geographischen Gesellschaft der UdSSR, Herausgabe 92, 1973, S. 128—129 (in russischer Sprache).
- PISSARSKI, B. I., SPEISER, G. M., BADRACH, D., MINERWA, L. A. & ENEBISCH, E.: Die Bildung der Aufeise im Becken des Hubsugulsee (VR Mongolei). Die 2. internationale Konferenz in Frostbodenkunde (Vorträge und Berichte), Herausgabe 5. — Im Sammelband „Untergrundwässer der Kryolithosphäre“, Jakutsk, 1973, S. 51—56 (in russischer Sprache).
- SCHWARZEW, S. L.: Über die physikalisch-chemischen Prozesse in der Schichtenfolge mehrjährig gefrorener Gesteine. Im Buch „Kryogene Prozesse in den Böden und Gesteinen“, Verlag „Nauka“, Moskau, 1965, S. 132—140 (in russischer Sprache).
- Einige Merkmale der Bildung der chemischen Untergrundwasserzusammensetzung unter den Bedingungen der Entwicklung mehrjährig gefrorener Gesteine. Werke der wissenschaftlich-technischen Beratungen in Hydro- und Ingenieurgeologie. Herausgabe 3. Verlag „Nedra“, Moskau, 1970, S. 161—167 (in russischer Sprache).
- TJUTJUNOW, I. A.: Physikalisch-chemische Veränderungen der Gesteine im hohen Norden. — Im Sammelband „Physikalisch-chemische Prozesse in den durchgefrorenen und gefrorenen Gesteinen“, Verlag AN der UdSSR, Moskau, 1961, S. 7—27 (in russischer Sprache).
- Einige Gesetzmäßigkeiten der physikalisch-chemischen Veränderung und Differenzierung des Stoffbestandes des Bodens beim Durchfrieren. Werke der 1. sibirischen Konferenz in Bodenkunde. Krasnojarsk, 1962, S. 389 bis 401 (in russischer Sprache).
- TOLSTICHIN, N. I.: Untergrundwässer der gefrorenen Zone der Lithosphäre. Verlag „Gosgeolizdat“, 1941, Moskau—Leningrad, S. 203 (in russischer Sprache).
- Die Klassifikation der natürlichen Mineralwässer nach der Temperatur. — Iswestija WUZOW, Serie „Geologie und Erkundung“, 1970, Heft 3, S. 97—98 (in russischer Sprache).
- TOLSTICHIN, O. N.: Aufeise und Untergrundwässer des Nordostens der UdSSR. Verlag „Nauka“, Nowosibirsk, 1974, S. 163 (in russischer Sprache).
- TSCHISTOTINOWA, L. T. & TOLSTICHIN, O. N.: Einige Fragen der Bildung der chemischen Aufeiszusammensetzung (am Beispiel vom Ulahan-Taryn-Aufeis in Zentraljakutien). — Im Sammelband „Aufeise Sibiriens“, Verlag „Nauka“, Moskau, 1969, S. 172—183 (in russischer Sprache).
- USTINOWA, S. G.: Zur Hydrochemie der Kimberlitröhre Jakutiens. Werke von WSEGINGEO, 1964, Herausgabe 9, S. 237—252 (in russischer Sprache).

WLASSOW, N. A., PAWLOWA, L. I. & IWANOW, A. V.: Die Rolle der kryogenen Metamorphisierung in der Bildung der chemischen Untergrundwasserzusammensetzung. — Im Sammelband „Der internationale geochemische Kongreß“. Thesen zum Bericht, Teil 2, Moskau, 1972, S. 799—800 (in russischer Sprache).

## Summary

The present paper comprises the results of the authors' research work as well as publications about what part kryogen processes play in forming the composition of various types of underground waters in regions of Permafrost. The authors primarily refer to their experience made in different parts of Siberia, the North East of the USSR and the People's Republic of Mongolia, i. e. the regions where the question of kryogen metamorphization of underground waters have satisfactorily been examined.

The kryogen metamorphization of underground waters is being considered in the example of isings and supra-, intra- and subpermafrost waters, that is layered above, between and under the Permafrost. Particular emphasis is given to their paleohydrogeological relevance.

The significant occurrence of kryopeges in the Permafrost area, i. e. of subterranean salt waters and brines which show a minus degree temperature and are liquid are thoroughly dealt with.

As to the oxidation zone of ore deposits the present geochemical activity of underground waters working under the conditions of minus degree temperatures of the rocks is being emphasized.

Anschrift der Verfasser:

Professor Dr. E. V. PINNEKER und Dr. B. I. PISSARSKI, Institut für die Erforschung der Erdkruste in Ostsibirien. Favorskiistraße 1, 664033 Irkutsk, UdSSR.