

Über die Entstehung von Frostspalten

Von Alfred DUCKER, Elmshorn/Holstein.

A. Einleitung.

In den pleistozänen Ablagerungen wurden schon frühzeitig Erscheinungen beobachtet, die man infolge ihrer Gestaltung der Einwirkung des Frostes auf den Boden zuschrieb und somit für klimabedingte Zeugen eines im Eisvorland entwickelten Dauerfrostbodens ansprach. Sie werden als „Löss“- bzw. „Lehmkeile“, „Sandgänge“ und „-spalten“, kurz auch als „Frostspalten“, „Eiskeile“ oder „Eiskeilspalten“ bezeichnet und beschrieben. Wie aus ihrer Terminologie hervorgeht, handelt es sich dabei vornehmlich um keilförmige, spaltenähnliche Einsenkungen in den pleistozänen und anderen oberflächennahen Gesteinen, die mit Sand, Kies, Löss oder Lehm ausgefüllt sind. Dabei ist, wie besonders SOERGEL (1936) betont, die Keilform als die Idealform anzusehen. Mit dem Wechsel des Schnittwinkels an der Aufschlußwand können außerordentlich vielgestaltige Formen entstehen, so daß es oft schwer ist, ihre ursprüngliche Spaltennatur als solche zu erkennen. GALLWITZ (1949) hält eine breite, annähernd rechteckige, oder eine in sehr stumpfem Winkel endende Gestalt für die Idealform der Spalten, die allerdings fossil nicht sehr häufig anzutreffen ist; dagegen ist die spitze Keilform am häufigsten vertreten. Auch schmale, langgestreckte Keile mit nahezu parallelen Seitenflächen werden gar nicht selten beobachtet. Die Keilwangen sind besonders in ihrem Hangenden vielfach ausgebaucht ausgebildet, wobei man sowohl breit geschweifte konkave als auch konvexe Formen antrifft.

Die Keilspalten treten sowohl in bindigem als auch in nichtbindigem Gesteinsmaterial auf. Während sie in Schluffen und Tonen besonders scharf ausgeprägt sind, erscheinen sie in Sanden und Kiesen vielfach unscharf, verschleiert und verwaschen ausgebildet. Das Nebengestein kann ungestört bis an die Keilspalte herantreten. Ebenso oft aber beobachtet man, daß an den Keilflanken der Boden bei bindigem Gesteinsmaterial zumeist aufgebogen und aufgerichtet ist, während im nichtbindigen Gestein die Schichten oft nach unten zu abgerutscht auftreten.

B. Die bisherige Deutung über den Ursprung der „Frostspalten“.

Alle Dislokationsformen der oben beschriebenen Art sind bislang als „Pseudomorphosen“ nach diluvialen Eiskeilen oder Eiskeilspalten gedeutet worden und werden als wichtige Kennform für den diluvialen Dauerfrostboden angesehen (POSER 1948). Dabei stützt sich die Erklärung über den Vorgang der Spaltenbildung auf die physikalische Erscheinung, daß das Eis mit abnehmender Temperatur sich zusammenzieht. Während man noch im 18. Jahrhundert annahm (MAIRAN 1749), daß bei der Abkühlung das Eis eine Volumenvergrößerung erfährt, wurde Anfang des 19. Jahrhunderts durch HEINRICH (1806) erstmalig der

Nachweis erbracht, daß das Volumen des Eises mit abnehmender Temperatur sich verringert. Nach den genaueren Messungen von LEDUC (1906) und den ergänzenden Untersuchungen von BRIDGMANN (1912) erreicht das normale Eis (Eis I), bezogen auf Wasser, bei 0°C und 0 at das absolute Maximum seines Volumens mit $1,0900\text{ cm}^3$. Bei -20°C und 0 at zieht sich das Eis auf das Volumen von $1,0866\text{ cm}^3$, bei -20°C und 1970 at sogar auf etwa $1,055\text{ cm}^3$ zusammen. Die Zahlen besagen also, daß das Volumen des Eises sowohl bei Abnahme der Temperatur als auch bei Zunahme des Druckes sich immer verringert.

Die Kontraktionserscheinungen des Eises können im Winter auch in unserem Klima an einer Eisdecke auf Seen festgestellt werden. Bei einem plötzlichen Temperaturabfall hört man besonders des Nachts unter lautem Knistern die Eisdecke als Folge der Volumenänderung in einzelne Teilfelder zerbrechen. Es entstehen zumeist millimeterstarke Risse und Spalten, in die von unten Wasser nachströmt, das sofort gefriert und dabei die Eisdecke vergrößert.

Die gleichen Erscheinungen werden in weitaus verstärktem Maße auch aus den arktischen und subarktischen Gebieten berichtet, wo unter der Einwirkung plötzlich auftretender tiefer Wintertemperaturen nicht nur die freien Wasserflächen, sondern auch der aus lockeren Aufschüttungen bestehende Boden mit lautem Krachen und Donnern in Risse und Spalten aufreißt. Oft sind damit Erschütterungen der Erdoberfläche verbunden, die als „Erdbeben“ beschrieben werden. Die Breite der gebildeten Spalten beträgt etwa 0,5 bis 2 cm; ihre Tiefe wird mit 1 bis 2 m angegeben. Diese Erscheinungen, die vornehmlich aus Alaska bekannt geworden sind, bilden für BUNGE (1902) und für LEFFINGWELL (1915) die Ausgangsform eines von ihnen im Tundraboden beobachteten, netzförmigen, mit Grundeis erfüllten „Spaltensystems“. Dadurch, daß bei Schneeschmelze Wasser in die Kontraktionsrisse eindringt, welches gefriert, werden Druckkräfte erzeugt, die einen Horizontalschub auf die Seitenflächen der Risse ausüben; es erfolgt eine Erweiterung des Risses. Durch die periodische Wiederholung des Vorganges kommt es schließlich zur Entstehung einer keilförmigen, bis zu 3 m breiten, mit Eis erfüllten Spalte.

In den Eiskeilspalten Alaskas glaubte man nun ein Analogon für die in den pleistozänen Ablagerungen vorkommenden „Löbkeile“ usw. gefunden zu haben. Für die Richtigkeit dieser Annahme als „Frostspalten“ im Sinne von LEFFINGWELL sprechen scheinbar neben der allgemeinen keilförmigen Umrißform vor allem die in bindigen Böden festzustellenden Schichtenaufbiegungen und Verpressungen des Nebengesteins.

C. Kritik an der Deutung als „Frostspalte“.

Nimmt man die von LEFFINGWELL gegebene Erklärung der Ausweitung eines ursprünglich höchstens etwa 2 cm breiten Kontraktionsrisses zu einer dezimeterstarken, keilförmigen Spalte als richtig an, so muß vorausgesetzt werden, daß es beim Übergang des Wassers in die feste Zustandsform tatsächlich zur Entstehung von Druckkräften kommt, die auf die Seitenwände des Risses einwirken und zu ihrer Erweiterung führen können. In diesem Zusammenhang weist man im allgemeinen auf die Druckkräfte hin, die erkennbar werden, wenn man eine mit Wasser gefüllte, aber luftdicht abgeschlossene Flasche der Einwirkung des Frostes aussetzt. Zwischen diesem Flaschenversuch und dem Gefrieren von Wasser in einer etwa 1 bis 2 cm breiten, nach oben hin offenen Spalte ist aber doch ein wesentlicher Unterschied festzustellen. Während der Gefrierprozeß bei dem Flaschen-

versuch in einem völlig geschlossenen System erfolgt, in welchem das Wasser so lange als Flüssigkeit vorhanden ist, als die Flasche den mit abnehmender Temperatur entwickelten Druckkräften (z. B. bei -5°C etwa 600 at) standhalten kann, gefriert das in der Spalte vorhandene Wasser in einem völlig offenen System, das für einen entsprechend raschen Druckausgleich sorgt. Die sich bildenden Eiskristalle üben einen Druck in der Richtung des Wachsens aus, die im allgemeinen durch die Bewegung der 0° -Isotherme bestimmt wird. Dabei orientieren sich die Kristallprismen in der Richtung des geringsten Widerstandes, d. h. mehr oder weniger senkrecht nach oben. Lediglich bei außergewöhnlich raschem Gefrieren und bei meist allseitigem Angriff tiefer Temperaturen kann es zu einer Umwandlung des Spaltenwassers zu Eis in einem geschlossenen System kommen. Die dann auf das Nebengestein sich auch horizontal auswirkenden Druckkräfte werden allerdings nicht zu einer Schichtenaufbiegung Veranlassung geben. Vielmehr wird es, wenn der Boden dem Horizontalschub nicht widerstehen kann, zu einer Abscherung des Gesteinsmaterials kommen. Erdstatisch haben wir es mit einem Vorgang zu tun, der mit der Wirkung des passiven Erddruckes identisch und dem Verhalten eines Bodens hinter einer senkrechten, auf den Boden zu sich bewegenden Wand vergleichbar ist. Hierbei wird ein Teil des Bodens nach aufwärts geschoben, wobei die Bewegung auf einer Gleitfläche, in welcher die Reibungs- und Haftkräfte des Gesteins überwunden sind, erfolgt. Im Bodenprofil lassen sich solche Scherbewegungen an dem Schichtenverlauf un schwer erkennen. Die bislang aber bekanntgewordenen Schichtenstörungen an pleistozänen Keilspalten zeigen, daß eine Abscherung des Bodens nicht stattgefunden hat. Vielmehr deuten fast alle Dislokationen darauf hin, daß nicht eine Verpressung des Nebengesteins, sondern offensichtlich eine Hochschleppung der Schichten stattgefunden hat, die durch eine nach oben gerichtete Bewegung ausgelöst wurde. Es zeigt sich also, daß man die Deutung von LEFFINGWELL über die Bildung der Eiskeile in Alaska nicht ohne weiteres auf die pleistozänen „Frostspalten“ übertragen kann.

Hinzu kommt, daß man durch die industrielle Erschließung neuer Gebiete vornehmlich während des Krieges einen eingehenden Einblick in den inneren Aufbau des Dauerfrostbodens in Alaska gewonnen hat. Wie die ausgezeichneten Beschreibungen von TABER (1943) erkennen lassen, sind die Deutungen von BUNGE und LEFFINGWELL über die Entstehung der netzförmigen Eiskeilspalten einer erheblichen Revision zu unterziehen.

TABER gelang es, den Nachweis zu erbringen, daß der in Alaska entwickelte, über 300 m mächtige Dauerfrostboden von einem Grundeis gebildet wird, welches sowohl aus horizontalen als auch aus vertikalen Eismassen besteht, die miteinander ein netzförmiges System darstellen. Die horizontalen Eisbildungen reichen von kaum sichtbaren Schichten bis zu 3,50 m dicken Bänken. Wenn die Eisschichten dünn und ausgeprägt sind und nur geringe Zwischenräume haben, gleicht der gefrorene Boden einem gebänderten Gneis, weshalb TABER ihn auch Eisgneis nennt. Die Eisgneis-Struktur ist weit verbreitet, und wo man die Eisschichten im einzelnen verfolgen kann, laufen sie immer allmählich aus. Gelegentlich gabeln sie sich, wobei sich die Äste oft wieder vereinigen und Linsen von Boden umschließen.

Das vertikale Grundeis dagegen ist gangförmig ausgebildet. Es handelt sich um senkrecht verlaufende Eisadern mit zumeist keilförmigem Querschnitt. Ihre durchschnittliche Breite schwankt zwischen 0,50 m und 1,00 m; ihr Maximum

wird von TABER mit 2,50 m angegeben. In der Senkrechten erstrecken sie sich auf über 9,00 m. Bei Abteufung von Schächten und in Bergwerken sind sie sogar bis zu Tiefen von über 30 m unter der Oberfläche beobachtet worden. Während einige große, keilförmige Adern vereinzelt und isoliert dastehen und dabei gelegentlich im Hangenden in eine horizontale Eisschicht übergehen, so daß sie wie riesige, von der Grundfläche der Eisschicht herabhängende Tannenzapfen aussehen, bilden sie besonders dort, wo sie sich in mächtigen, ausgedehnten Ablagerungen entwickelt haben, ein zusammenhängendes System, wobei sie polygonal geformte Bodenkomplexe umschließen. Gehen dabei die senkrechten Eisadern sowohl im Hangenden als auch im Liegenden in horizontale Eisschichten über, so entsteht eine mehr oder weniger unregelmäßig gestaltete, mit einem Honigwabengefüge zu vergleichende Zellenstruktur. Der durchschnittliche Durchmesser der auf diese Weise eingeschlossenen, vieleckig gestalteten Bodensäulen beträgt etwa 5 bis 6 m; gelegentlich erreichen sie eine Breite von 10 bis 15 m. Wo bei Frostaufgang die oberen Bodenschichten und die hangende Eisschicht durch Erosion beseitigt sind, treten die Enden der vertikalen Eisadern an die Oberfläche, so daß das von ihnen gebildete polygonale Netz deutlich sichtbar wird, was insbesondere durch Luftaufnahmen bestätigt wird. Dabei werden die Oberflächenpolygone von natürlichen Gräben von 0,50 m Tiefe und 0,5 m bis 2,50 m Breite umgeben, die sich unmittelbar über den Eisadern entwickeln. In ihnen siedelt sich oft eine Flora an und im Sommer enthalten sie stellenweise stehendes Wasser.

Von besonderer Bedeutung ist es, daß alle diese Strukturen des Grundeises sich nur in einem Bodenmaterial entwickelt haben, das einen feinkörnigen Aufbau besitzt. Vertikale Eisadern, die in ihrem Liegenden auf Kies- oder Sandschichten stoßen, enden unvermittelt oberhalb dieser Schichten. Träger der in Alaska zur Ausbildung gelangten Grundeisstrukturen ist im wesentlichen ein grobschluffiger Boden, dessen Hauptkorngröße mit über 50 % von der Kornfraktion 0,074 bis 0,031 mm gebildet wird.

Auf Grund seiner Beobachtungen kommt TABER zu dem Schluß, daß die von BUNGE, LEFFINGWELL u. a. vertretene Theorie über den Ursprung der vertikalen Eisadern vom Standpunkt der Physik aus sich nicht länger aufrecht erhalten läßt. Bislang konnte von niemandem der Nachweis erbracht werden, daß die besonders in schneefreien Gebieten entstehenden Spannungsrisse eine polygonale Struktur besitzen. Zudem erstrecken sich nach TABER's Beobachtungen die Risse nicht viel unter die Tiefe des jährlichen Tauens. Bereits in einer Tiefe von 1,50 m bis 3,00 m ist der Einfluß der Außentemperatur derartig gering, daß eine Zusammenziehung des Bodens durch die Kälte kaum mehr zu erwarten ist und unbedeutend bleibt. Eine Theorie über den Ursprung des Grundeises muß daher sowohl die horizontalen Eisschichten als auch die vertikalen Eisadern sowie deren beiderseitiges, flächenhaftes Auftreten als mehr oder weniger vollständiges Zellensystem beinhalten.

Ausgehend von den Ergebnissen der Experimentaluntersuchungen, nach denen das Eindringen der Kälte in ein feinkörniges (frostgefährliches) Gesteinsmaterial mit der Absonderung und dem Wachsen von reinen Eismassen begleitet ist, glaubt TABER, daß auch die in dem Dauerfrostboden auftretenden polygonalen Grundeisstrukturen auf die beim Abwärtsgefrieren des Bodens erfolgte Anreicherung des Wassers zu reinen Eismassen zurückgeführt werden können.

Zur Zeit eines kälteren Klimas während des Pleistozäns, in der das Gefrieren im Winter das Tauen im Sommer übertrifft, kommt es in Alaska zur Entstehung eines Dauerfrostbodens. In den feinkörnigen, schluffigen Ablagerungen erfolgt dabei eine Absonderung reiner Eismassen; nahe der Oberfläche, wo die Abkühlung verhältnismäßig schnell erfolgt, entstehen parallel zur 0°-Isotherme dünne, eng beieinanderliegende Eisschichten. Mit größerer Tiefe und damit bei langsamerem Gefrieren neigen sie dazu, stärker zu werden und weiter auseinander zu liegen. Die zu ihrer Bildung notwendigen Wassermengen werden einmal dem noch ungefrorenen, wassergesättigten Untergrund entzogen und zum anderen aus dem im Liegenden vorhandenen Grundwasserhorizont entnommen und durch den Gefriervorgang zur Frostzone gefördert. Von den Eisschichten ausgehend, wachsen gleichzeitig vertikale Eisadern nach abwärts, wobei sie ein grobpolygonales Muster bilden und Schluffsäulen umschließen. Bei günstigen Bedingungen wird das Abwärtswachsen der Adern durch die Entstehung einer neuen, tiefer gelegenen Eisschicht unterbrochen, um dann erneut zu einem späteren Zeitpunkt von hier aus wieder zu beginnen. Auf diese Weise kommt es zur Bildung einer Zellen- oder Honigwabenstruktur (vergl. hierzu Abb. 2, Tafel 2 bei TABER (1943) und Abb. 6 und 7 bei DUCKER (1940)). Dabei erfolgt das Gefrieren des von den Eismassen eingeschlossenen Schluffes, wie sich durch Versuche zeigen läßt, teilweise mit der allgemeinen Abwärtswanderung der 0°-Isotherme, teilweise aber auch erst nach der Herausbildung der Eisadern, wobei der Schluff, je nach Wasservorrat, eine mehr oder minder ausgeprägte Gneis-Struktur annimmt. Die Größe der entstehenden Bodenpolygone ist abhängig von der Geschwindigkeit des Gefrierens, von der Größe der Wasser-versorgungsquelle und dem Tonanteil des Bodens. Je geringer der Tonmineralgehalt ist und je langsamer der Gefrierprozeß im Boden Fortschritte macht, umso größere Eisschichten und Eisadern werden gebildet und in umso größerem Maßstab entwickelt sich die Zellenstruktur. Sobald der Gefriervorgang grobkörnige, sandige und kiesige Ablagerungen erreicht, hört die Absonderung reiner Eismassen auf. Das entstehende Eis füllt lediglich die einzelnen Poren-räume des Bodens aus und die wachsenden Eiskristalle zwingen das überschüssige Wasser nach unten in den noch ungefrorenen Untergrund abzufließen.¹⁾

D. Folgerungen für die Entstehung der „Frostspalten“.

Auf Grund der vorstehenden Ausführungen erscheint es notwendig, die bis heute allgemein gültige Vorstellung, daß die pleistozänen „Löß“- und „Lehmkeile“ durch die Expansionskraft des in Spannungsrisen gefrierenden Wassers gebildet wurden, einer gründlichen Nachprüfung zu unterziehen. Dabei können genetisch zwei verschiedene, spaltenähnliche Formen fossil in Erscheinung treten:

¹⁾ In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß TABER zum Teil auch Steinpolygone auf die gleiche Weise entstehen läßt. Überall dort, wo durch den Tau- und Erosionsvorgang die strukturierten Grundeismassen, von den hangenden Deckschichten befreit, bloßgelegt sind, zeigen sich an der Erdoberfläche polygonale Strukturen. Unmittelbar über den vertikalen Eisadern bilden sich mehr oder weniger vertiefte Einsenkungen und Gräben. Im Boden eingeschlossene Gesteinsstücke werden durch den bekannten Vorgang des „Wachsens“ bis an die Oberfläche der Bodenpolygone gebracht, von wo aus sie durch weitere Frostwirkung (Kammeisbildung) im Verein mit der Schwerkraft allmählich in die Gräben wandern. Auf diese Weise entsteht schließlich das übliche Bild der Steinpolygone.

1. Kontraktionsrisse

Diese Risse entstehen bei plötzlichem Temperaturrückgang durch die Zusammenziehung eines eiserfüllten Bodengefüges. Sie besitzen eine Breite von höchstens einigen Zentimetern und reichen wahrscheinlich nicht viel tiefer als die Mächtigkeit des jährlichen Auftaubodens. Sie bilden keine polygonalen Strukturen und sind wahrscheinlich in allen eiserfüllten Bodenarten zu erwarten. Eine Ausweitung des Risses im Sinne der Vorstellung von LEFFINGWELL ist unwahrscheinlich, da das gesamte Bodensystem einschließlich der Risse als offenes System gefriert, so daß ein Horizontalschub nicht auftritt. Die mit dem Übergang des Wassers in die feste Zustandsform verbundene Volumenvermehrung vollzieht sich in der Richtung der Abkühlung, d. h. zumeist mehr oder weniger senkrecht nach oben. Kommt es dennoch infolge eines allseitigen Angriffes der Gefriertemperatur zu einem plötzlichen Gefrieren in einem geschlossenen System, so bewirkt ein entstehender, horizontal wirkender Druck nicht eine Aufbiegung der Schichten, sondern ein Abscheren des Bodens; die sich bildenden Gleitflächen müssen im profilmäßigen Anschnitt aus dem Verlauf der Bodenschichtung erkennbar sein.

2. Vertikale Eisadern

Diese „Spalten“ sind als Gangausfüllungen aufzufassen, die sich auf vertikale, zumeist keilförmige Eisadern eines Dauerfrostbodens in einem feinkörnigen (frostgefährlichen) Gesteinsmaterial zurückführen lassen. Sie sind nicht in einem grobkörnigen (frostsicheren) Boden zu erwarten. Ihre durchschnittliche Breite schwankt zwischen 0,5 bis 1,0 m und kann gelegentlich bis auf 2,50 m anwachsen. Über ihre Tiefe lassen sich feste Angaben nicht machen, da diese abhängig ist von der Mächtigkeit des gebildeten Dauerfrostbodens, der zur Verfügung stehenden Wassermenge und der Geschwindigkeit des Frostfortschrittes im Boden. Sie können vereinzelt, isoliert im Boden auftreten oder aber sie bilden ein polygonales Netz, indem sie einzelne, im Durchmesser oft mehrere Meter breite, Bodenkomplexe umschließen. Die mit dem Übergang des Wassers in die feste Phase verbundene Volumenvermehrung vollzieht sich auch hier in der Richtung der Abkühlung, die zu einer allgemeinen vertikalen Hebung der Bodenoberfläche führt. In der Eisader selbst ist diese infolge des erhöhten Wasserzuflusses am größten, so daß am Rande der Ader das Nebengestein zum Teil entsprechend bevorzugt mit hochgeschleppt wird. Zahlreiche pleistozäne „Eiskeile“ in bindigen Bodenarten, besonders solche, die eine netzförmige Anordnung aufweisen (SELZER, 1936), mögen auf derart strukturiertes Grundeis eines ehemaligen Dauerfrostbodens zurückzuführen sein.

E. Zusammenfassung

Nach einem Überblick über die Gestaltung der als „Löb-“ und „Lehmkeile“, „Frostspalten“, „Eiskeile“ oder „Eiskeilspalten“ beschriebenen Einsenkungen in den pleistozänen oder anderen oberflächennahen Gesteinen wird gezeigt, daß die Schichtenaufbiegungen an Keilspalten nicht auf Druckkräfte zurückzuführen sind, die beim Übergang des Wassers in die feste Zustandsform in einem geschlossenen System entstehen. Das Fehlen von Gleitflächen in dem „gepreßten Nebengestein“ beweist, daß die sich bildenden Eiskristalle nur einen Druck in der Richtung der Wärmeleitung, d. h. mehr oder weniger senkrecht nach oben, ausgeübt haben.

Die neuen Erkenntnisse über die Struktur des Dauerfrostbodens in Alaska durch TABER (1943) zeigen, daß die hier auftretenden vertikalen Eisadern nicht ursprüngliche Kontraktionsrisse sind, die durch die Expansionskraft des in ihnen gefrierenden Wassers allmählich erweitert werden, wie dies BUNGE (1902), LEFFINGWELL (1915) u. a. annehmen, sondern das Ergebnis eines einzigen, stetigen, nach abwärts gerichteten Gefrierprozesses in einem „frostgefährlichen“ Boden sind, der zu einer horizontalen und vertikalen Absonderung und Anreicherung von reinen Eismassen führt. Der ständige Zuschuß von Wasser aus dem ungefrorenen Untergrund und seine Überführung in die feste Zustandsform bringt eine senkrechte Hebung des Bodens mit sich, die in der Nähe der vertikalen Eisadern am größten ist und dadurch zu einem Hochschleppen des Nebengesteins Veranlassung gibt.

Pleistozäne „Frostspalten“ können daher:

- a) entweder einfache, nicht erweiterte, meist mit dem Nebengestein erfüllte Kontraktionsrisse sein, die in einem eisgesättigten Boden jeglicher Kornzusammensetzung bei plötzlichem Temperaturrückgang entstehen, oder
- b) mit Löß, Lehm, Sand oder Kies ausgefüllte ehemalige Eisadern eines aus bindigem (frostgefährlichem) Gesteinsmaterial bestehenden Dauerfrostbodens darstellen.

Schriften

- BUNGE, A. von: Einige Worte zur Bodeneisfrage. Russ. Kgl. Mineralog. Ges. Verhdl. 2. Serie 40, S. 205 ff., 1902.
- BRIDGMANN, P. W.: Water, in the liquid and five solid formes, under pressure. — Proc. of the Americ. Acad. of Arts and Sciences, 42, S. 441—558, Boston 1912.
- DUCKER, A.: Frosteinwirkung auf bindige Böden. Straßenbau-Jahrb. 1939/40, Berlin 1940.
- GALLWITZ, H.: Eiskeile und glaziale Sedimentation. Geologica, Schriftenr. d. geol. Inst. d. Univers. Berlin, Greifswald, Halle, Rostock, H. 2, Berlin 1949.
- HEINRICH, P.: Ausdehnung des Eises und der Kohle durch Wärme. Schr. d. Kgl. Bayr. Akad. d. Wiss., 2. Abt., S. 149—200, 1806.
- LEDUC, A.: Sur la densité de la glace. — Compte rendu 142, S. 139, Paris 1906.
- LEFFINGWELL, K.: Ground-ice wedges, the dominant form on the North coast of Alaska. Journal, Geol. 23, 1915.
- MAIRAN: Dissertation sur la glace. — Paris 1749.
- POSER, H.: Boden- und Klimaverhältnisse in Mittel- und Westeuropa während der Würmeiszeit. Erdkunde II, Lfg. 1/3, S. 53—68, 1948.
- SELZER, G.: Diluviale Lösskeile und Lösskeilnetze aus der Umgebung Göttingens. — Geol. R. 27, S. 275—293, 1936.
- SOERGEL, W.: Diluviale Eiskeile. — Z. deutsch. geol. Ges. 88, 1936.
- TABER, St.: Perennially frozen ground in Alaska: Its origin and history. — Bull. of the Geol. Soc. of America, 54, S. 1433—1548, New York 1943.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein](#)

Jahr/Year: 1951

Band/Volume: [25](#)

Autor(en)/Author(s): Dücker Alfred

Artikel/Article: [Über die Entstehung von Frostspalten 58-64](#)