

- : Merzlye tolshchi zemli. – Priroda, 1, 46–53, 1968.
- Ministeriet for Grønland: Arsberetning Grønland 1968. – 1–132, København 1970.
- : Arsberetning Grønland 1975. – 1–116, 1°–163°, København 1976.
- MÜLLER, S. W.: Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. – 1–231, Ann Arbor 1947.
- ØSTREM, G.: Present alpine ice cover. – in: J. D. IVES & R. G. BARRY (ed.): Arctic and alpine environments, 225–250, London 1974.
- PEWE, T. L.: Permafrost and environmental-engineering problems in Arctic. – Internat. Symposium on Arctic Geology, 2d: Program abstracts 44, San Francisco 1971.
- PUTNINS, P.: The Climate of Greenland. – in: S. ORVIG (ed.): Climates of the Polar Regions. World Survey of Climatology, Vol. 14, 3–128, Amsterdam 1970.
- SHUMSKII, P. A.: Ground ice. – Canada Nat. Research Council, Techn. Translation, 1130, 1–118, 1964.
- STÄBLEIN, G.: Untersuchung der Auftauschicht über Dauerfrost in Spitzbergen. – Eiszeitalter und Gegenwart, 21, 47–57, Öhringen 1970.
- : Der polare Permafrost und die Auftauschicht in Svalbard. – Polarforschung, VII, 41, 112–120, Holzminden 1971.
- : Periglaziale Formengesellschaften und rezente Formungsbedingungen in Grønland. – Abh. d. Ak. d. Wiss. in Göttingen, Math. Phys. Kl. III (im Druck), Göttingen 1976.
- : Rezente Morphodynamik und Vorzeitreliefinfluenz bei der Hang- und Talentwicklung in Westgrønland. – Z. f. Geomorph., Suppl. Bd. 28, 181–199, Berlin, Stuttgart 1977.
- STEARNS, S. R.: Permafrost, perennially frozen ground. – US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Cold Regions Science and Engineering, 1 (A 2), 1–77, 1966.
- TERZAGHI, K.: Permafrost. – Boston Soc. Civil Engineers J., 39, 1–50, 1952.
- WASHBURN, A. L.: Periglacial processes and environments. – 1–320, London 1973.
- WEIDICK, A.: Observations on some Holocene Glacial Fluctuations in West Greenland. – Medd. Grønland, 165 (6), 1–202, København 1968.

ZUR GENESE DER THUFUR ISLANDS UND OST-GRÖNLANDS

Mit 4 Abbildungen und 3 Photos

EKKEHARD SCHUNKE

Summary: On the genesis of thufurs in Iceland and East Greenland.

The present study is a survey of the most important results of cryopedological field studies on earth hummocks (thufurs) in Iceland and East Greenland (Anngmagssalik) in the years 1970–76. The formation of thufurs is a result of the lateral-horizontal cryostatic pressure, which is caused by differences in the penetration of the freezing front. This locally differential penetrating of the freezing front is initiated by an embryonic hummocky micro-relief of a cellular groundplan. This hummocky micro-relief is caused by the movement of moisture that is adjusted towards the freezing front during the freezing period. The decisive frost-climatic factor is the formation of thufurs and for the relatively uniform shape of thufurs in parts of Iceland and East Greenland, which are different with respect to climate, is a long-term persistence of the freezing front with its adsorption of capillary water in a depth of 20–30 cm. In comparison with materials affected by the formation of thufurs, the spectrum of the grain-size is shifted in favour of the portion of fine and medium-sized sand in those materials, which do not have any thufur formation; moreover, the substrata without any thufurs contain much less organic matter.

Die vorliegende Arbeit zur Genese der Thufur Islands und Ost-Grönlands resultiert aus insgesamt einjährigen kryopedologischen Feld- und Laborarbeiten während der Jahre 1970–72 und 1975–76.

Als „thúfur“ (Einz.: „thúfa“) werden im Isländischen kleine, geschlossen von Vegetation bedeckte Erdbüten bezeichnet. Da die Bütenböden Islands den Prototyp dieser Art periglaziärer Bodenmusterung darstellen, hat ihre isländische Bezeichnung „thúfur“ Eingang in die internationale periglazialmorphologische Terminologie gefunden. Konstituierende Merkmale der Thufur sind ihr Aufbau aus überwiegend minerogenem Feinmaterial und ihre geschlossene Vegetationsbedeckung. Ihnen fehlt in aller Regel ein perennierend gefrorener Kern aus Frostboden oder Bodeneis.

Seit den einschlägigen Studien von BERGSTRÖM (1912), GRUNER (1912), THORODDSEN (1913), HÖGBOM (1914) u. a. sind Thufur in den verschiedensten Regionen der Subarktis und Arktis untersucht worden, in Island und Ost-Grönland zuletzt von JÓHANNESSON (1960), MÜLLER (1962), RAUP (1965, 1966), BESCHEL (1966), WEBB (1972) u. a.

Die Fragestellung der vorliegenden Arbeit gilt den Prozessen und Faktoren der Bütenbodenbildung. Mit der Thufur-Bildung wird im übrigen ein auch für die isländische Landnutzung relevantes Problem aktueller Umweltforschung berührt. Dabei gründet sich die Untersuchung auf eine Analyse der Formen, ihrer Verbreitung und ihres sedimentären Aufbaus sowie auf eine Analyse des klimatischen und edaphischen Milieus.

I. Der Formenschatz und seine Verbreitung

Die folgende Darlegung des Formenschatzes der Thufur beruht auf Feldarbeiten in den verschiedensten Bereichen des Tief- und Hochlandes von Island und der Angmagssalik-Insel im mittleren Ost-Grönland. Auf eine ausführliche Ausbreitung dieses regionalen Beobachtungsmaterials wird hier zugunsten einer zusammenfassenden Betrachtung verzichtet.

Nach dem Habitus der Erdbülten lassen sich kuppelförmige, plateauförmige, schildförmige und wallförmige Thufur unterscheiden. Zwar können die Erdbülten nach ihrem Aufriß insgesamt solchermaßen differenziert werden, im einzelnen jedoch besitzen sie durch kleine Einsattelungen, Aufwölbungen und Verflachungen ein variables Feinrelief.

Die kuppelförmigen Thufur mit rundem bis ovalem Grundriß stellen die verbreitetste Form der Erdbülten dar. Ihre Abmessungen variieren zwischen 30–80 cm in der Höhe und 40–120 cm im Durchmesser. Sie treten vorwiegend in dichter Vergesellschaftung auf, wobei der Abstand der Erdbülten häufig nicht mehr als 10–15 cm beträgt. Daneben gibt es weitständige kuppelförmige Thufur, die durch größere flächige Zwischenräume getrennt werden. Auf Island heben sich häufig jene Thufur-Felder, die aus zur Heugewinnung angelegten Hauswiesen (isl. „tún“) hervorgegangen sind, durch besonders regelmäßige und gleichbleibende Gestalt und Dimension der Erdbülten von den außerhalb der Hauswiesen bestehenden Thufur-Feldern deutlich ab. Die relativ gleichbleibende und formscharfe Ausprägung der kuppelförmigen Thufur auf Hauswiesen geht wahrscheinlich auf die bei der Anlage der Hauswiesen erfolgte Bodenbearbeitung zurück.

Bei den plateauförmigen Thufur, die weitaus weniger häufig auftreten als die kuppelförmigen, handelt es sich um oben abgeflachte Erdbülten. Ihre Dimensionen entsprechen weitgehend denen der kuppelförmigen Thufur. Die plateauförmigen Thufur finden sich immer in dichter Vergesellschaftung; weitständige plateauförmige Erdbülten wurden nicht beobachtet.

Die schildförmigen Thufur unterscheiden sich von den kuppel- und plateauförmigen Erdbülten durch die geringere Steilheit ihrer Flanken sowie durch ihre geringeren Abmessungen. Ihre Höhe beträgt 20–30 cm und ihr Durchmesser 30–80 cm. Sie treten sowohl in weit- als auch in engständiger Anordnung auf.

Die wallförmigen Thufur mit langgestrecktem Grundriß stellen einen Sonderfall der kuppelförmigen Thufur dar, denen sie auch in der Höhe gleichen.

Außer durch Auf- und Grundriß ist das Erscheinungsbild der Thufur durch eine eng- oder weitständige Anordnung der einzelnen Erdbülten gekennzeichnet. Die engständigen Thufur werden durch schmale rinnenförmige oder durch etwas breitere muldenförmige Vertiefungen voneinander getrennt, die namentlich im ersten Fall insgesamt als ein netzartiges System von schmalen Gängen erscheinen. Die weitständigen

Thufur weisen größere flächige Abstände zwischen den einzelnen Erdbülten auf.

Regelhafte Unterschiede im Erscheinungsbild der Thufur werden auch durch die Vegetationsbedeckung hervorgerufen. Abgesehen von den Thufur-Feldern auf den Hauswiesen Islands, die meist einen relativ gleichmäßigen Besatz aus Gräsern tragen, bestehen in den Thufur-Feldern vielfach charakteristische Vegetationsdifferenzierungen zwischen den Erdbülten und den sie trennenden Vertiefungen. Auf den Erdbülten dominiert xerophile Vegetation aus Zwergsträuchern, Gräsern, Moosen und Flechten, in den Vertiefungen hygrophile Vegetation, häufig mit einer Vorherrschaft von Sauergräsern.

Hinsichtlich der Verbreitung der Thufur bestehen zwischen den isländischen und ost-grönländischen Untersuchungsgebieten insofern Unterschiede, als Thufur auf Island weitaus häufiger und geschlossener auftreten als auf der Angmagssalik-Insel, wo sie nur an wenigen Plätzen zu finden sind. Hinzu kommt, daß im mittleren Ost-Grönland ausschließlich kuppelförmige Thufur angetroffen werden.

Die Verbreitung der Thufur folgt ganz allgemein der Verbreitung von Feinmaterialarealen mit geschlossener Vegetationsdecke. Auf Island wird dieser natürlich-potentielle Verbreitungsbereich der Thufur durch die ackerbauliche Nutzung eingeschränkt, namentlich im Tiefland. Die Thufur-Felder Islands und Ost-Grönlands befinden sich vorwiegend auf ebenen Geländepartien, auf Island werden sie auch auf Hangflächen von bis zu 10–15° Böschung angetroffen. Die Verbreitung der Thufur findet ihre untere Grenze im Meeresniveau. Die auf der Angmagssalik-Insel in rund 150 m ü. M. und in Island in rund 700 m ü. M. verlaufende obere Verbreitungsgrenze der Thufur wird durch die obere Verbreitungsgrenze von Feinmaterialarealen mit geschlossener Vegetationsbedeckung vorgezeichnet.

Eine besonders weite und geschlossene Verbreitung haben die Thufur im Tiefland Islands, da hier vegetationsbedeckte Feinmaterialareale als edaphische Voraussetzung ihres Auftretens von weiträumigerer und geschlossenerer Verbreitung sind als im isländischen Hochland und auf der Angmagssalik-Insel. Klimatisch begründete, regelhafte regionale Differenzierungen im Erscheinungsbild der Thufur, etwa solche, die mit der regionalen Variabilität der Schärfe des Frostregimes einhergingen, konnten nicht festgestellt werden. Hingegen treten Differenzierungen, die die unterschiedliche Beschaffenheit, Mächtigkeit und Durchfeuchtung des Feinsubstrates nachzeichnen, deutlich hervor, und zwar ganz besonders in Island.

Durch große Formscharfe und Dichtständigkeit der einzelnen Erdbülten gekennzeichnete Thufur-Felder sind auf Island an das homogene pelitische Feinmaterial der Móhella, eines lößähnlichen Substrates, geknüpft. Dabei fällt auf, daß Büldenböden nur dort vorkommen, wo die Mächtigkeit des Feinmaterials

20–30 cm nicht unterschreitet. Vor allem an Plätzen, an denen das pelitische Feinmaterial von hochgradig wasserdurchlässigen Substraten (fluviale Schotter, sandig-kiesige Grundmoräne, junge Lavadecken, anstehender Palagonittuff) unterlagert wird, setzt die Ausbildung von Thufur eine Mindestmächtigkeit des Feinmaterials voraus. In homogenem Feinmaterial sandiger oder gröberer Beschaffenheit sind Büldenböden im allgemeinen nicht ausgebildet. Des weiteren treten Thufur an solchen Standorten zurück oder fehlen völlig, die zwar Lockermaterial von pelitischer Beschaffenheit, aber schlechte oder fehlende Drainage aufweisen. An diesen Plätzen mit hohem Grundwasserstand bzw. mit Staunässe findet man häufig den Typ des weitständigen Büldenbodens.

Die folgende Betrachtung der Genese des skizzierten Formenschatzes und seiner Verbreitung wendet sich zunächst den Prozessen der Thufur-Bildung zu und hernach den sie steuernden Faktoren.

II. Die Prozesse der Thufur-Bildung

Aufschluß über die der unmittelbaren Beobachtung gemeinhin nicht zugänglichen frostdynamischen Prozesse, die zur Entstehung der Thufur führen, ist vor allem vom sedimentären Aufbau der Erdbülden zu erwarten. Dieser läßt sich besonders deutlich auf Island in solchem Feinmaterial erkennen, das geschichtete vulkano-äolische Ablagerungen beinhaltet (Photo 3). In Thufur-Feldern, deren Substrat derartige Tephra-Bänder enthält, wurde regelhaft eine dem Habitus der Erdbülden entsprechende Aufwölbung der Tephra-Straten angetroffen (Photo 1), und zwar im Tief- und Hochland gleichermaßen. Die Aufwölbung der Tephra-Straten läßt sich bis in eine Bodentiefe von 70–80 cm verfolgen. Unterhalb dieser Tiefe weisen die Straten

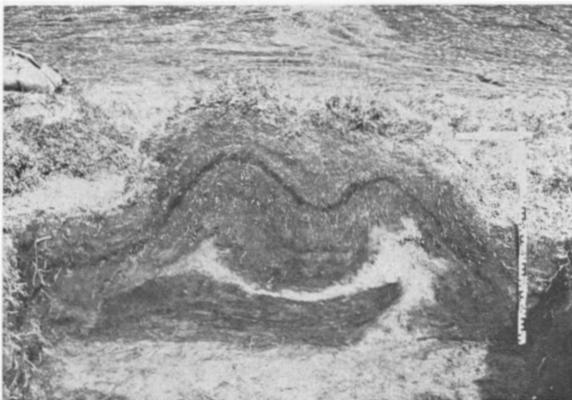


Photo 1: Frostdynamische Aufbiegung von Tephra-Straten in kuppelförmiger Erdbülte
Cryogenetic updoming of tephra layers in a hump-shaped thufur
Seydisárdreg (Central Iceland), 610 m a.s.l. (29. 8. 1975)



Photo 2: Kryoturbate Deformation von rhyolithischer Tephra in kuppelförmiger Erdbülte
Cryoturbatic displacement of rhyolitic tephra in a hump-shaped thufur
Háafell (N-Iceland), 730 m a.s.l. (29. 8. 1972).

die ursprüngliche nahezu horizontale Lage auf. Im Prinzip entsprechende Aufbeulungen wurden in den Thufur-Feldern Ost-Grönlands angetroffen.

Daß diese Bodenaufwölbungen ein Resultat der Bodenfrostwirkung sind, dokumentieren unter anderem die im isländischen Hochland gelegentlich noch im Sommer beobachteten Frostbodenkerne der Thufur. Der gefrorene Kern beinhaltet teils einen durch Zementeis bewirkten Bodenfrost, teils Segregationeis.

Die Aufwölbung der Büldenböden bleibt nach Abklingen der Bodenfrostperiode bestehen. Da in den Thufur keine Hohlräume beobachtet wurden, durch die sich eine solche Volumenzunahme erklären ließe, muß während der Bodenfrostperiode am Platze der Erdbülden eine Zunahme der Feinmaterialmenge erfolgt sein. Dies soll anhand von Beobachtungen in Süd-Island beispielhaft demonstriert werden.

Am Fuße des Kálfafell wurde in einer Höhe von 130 m ü. M. ein grasbedecktes Thufur-Feld mit 15–20 cm hohen schild- bis buckelförmigen Erdbülden angetroffen, das in eine Wiesenfläche ohne Thufur-Bildung übergeht. Das Thufur-Feld und die unmittelbar benachbarte büldenfreie Wiese zeigen den gleichen Aufbau des Substrates: Das rund 200 cm mächtige, grasbewachsene Feinmaterial besteht überwiegend aus lößähnlichem Feinmaterial von schluffig-feinsandiger Zusammensetzung, das durch zehn 2–3 cm mächtige Tephra-Lagen in verschiedene Abschnitte gegliedert wird (Photo 3). In dem nicht von Thufur-Bildung betroffenen Teil des Wiesenstückes weisen sämtliche Substratlagen die ursprüngliche horizontale Lagerung auf. Die Tephra-Straten im Bereich des Thufur-Feldes hingegen zeigen die bereits beschriebene beulenförmige Deformation, wobei jeder Aufwölbung der in rund 25 cm Tiefe befindlichen obersten Tephra-Strate (Katla-Tephra 1918) eine Erdbülte an der Bodenoberfläche entspricht. Die in rund 70 cm Bodentiefe nächsttiefere

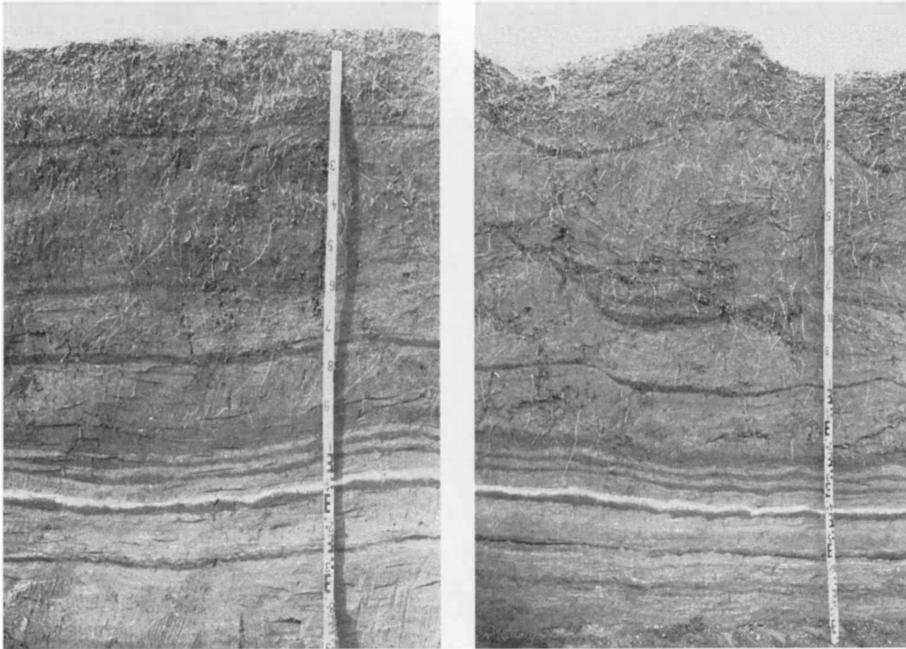


Photo 3: Ursprüngliche und kryogen deformierte Substratlagerung in einem Areal mit und ohne Thufur. Helle rhyolithische Tephra: Öraefajökull-Tephra 1362 A. D., oberste basaltische Tephra: Katla-Tephra 1918 A. D.

Original and cryogenetically deformed substrata-layers in an area with and without thufurs. Light-coloured rhyolitic tephra: Öraefajökull tephra of A. D. 1362, uppermost basaltic tephra: Katla tephra of A. D. 1918 Kálfafell (S-Iceland), 130 m a.s.l. (24. 8. 1971)

Tephra-Lage (Laki-Tephra 1783) ist unter den Erdbülten abwärts gebogen.

Die im Thufur-Feld gegenüber der ursprünglichen Lagerung eingetretene Veränderung der Abstände der verschiedenen Tephren läßt deutlich erkennen, daß die Bildung der Erdbülten durch Materialzufuhr aus dem Bereich zwischen den Erdbülten resultiert. Diese zur Aufwölbung der Bodenoberfläche führenden Umlagerungen im Feinmaterial vollziehen sich vornehmlich in Bodentiefen von 30–60 cm. Da dies der Tiefenbereich unmittelbar unterhalb der normalen Eindringtiefe des Bodenfrostes im süd-isländischen Tiefland ist (Abb. 1), kann davon ausgegangen werden, daß sich die zur Bodenaufwölbung führenden Substratumlagerungen hauptsächlich an der Untergrenze der Bodenfrostfront abspielen.

Der faltenartige Verlauf von Tephra-Straten unter und in den Erdbülten legt die Vermutung nahe, daß die vertikale Aufbeulung des Substrates im wesentlichen durch seitlichen kryostatischen Druck bewirkt wird. Für die maßgebliche Mitwirkung von lateral gerichtetem kryostatischen Druck als Ursache der ermittelten horizontalen Bodenverlagerung beim Eindringen der Bodenfrostfront spricht ferner die Beobachtung, daß in den Erdbülten Islands anstelle eines regelmäßig aufgebeulten Verlaufes von Tephra-Straten häufig auch unregelmäßig kryoturbierte Verwürgungen der Tephra-Straten und eine Verlagerung der Tephra

ausschließlich in den Bültbereich hinein angetroffen werden (Photo 2). Auf die Bedeutung von lateralem kryostatischen Druck für die Bültbildung weisen auch GRIGORIEV (1925, 353), BESKOW (1930, 628), FALK (1940, 6) und HOPKINS & SIGAFOOS (1951, 1954) hin. Experimentelle Untersuchungen über derartige laterale kryostatische Druckkräfte werden von KHAJKIMOV (1966) referiert.

Voraussetzung für die aufpressende Wirksamkeit von lateralem kryostatischen Druck auf ungefrorene Substratpartien, die infolge von Bodenwassersorption durch die Gefrierfront stark durchfeuchtet und plastisch sind, ist ein unterschiedlicher Tiefgang dieser Gefrierfront. Diese Voraussetzung ist dadurch gegeben, daß der Bodenfrost infolge der Reliefunterschiede im Thufur-Feld zwischen den Bültten erheblich tiefer reicht als in den Bültten (vgl. GERLACH 1972).

Da das unterschiedlich tiefe Eindringen der Bodenfrostfront erst eine Folge der Reliefunterschiede des Bülttenbodens ist, muß es bei der Bildung embryonaler Thufur aus einer ebenen Bodenoberfläche einen Faktor geben, der ein unterschiedliches Eindringen der Bodenfrostfront initiiert. Wie die regelmäßige zellenförmige Anordnung der Thufur zeigt, erfolgt das unterschiedlich tiefe Eindringen des Bodenfrostes zellenförmig. Angesichts der weiten Verbreitung und der regelmäßigen Anordnung der Thufur Islands kann dieses unterschiedlich tiefe Eindringen der Bodenfrostfront nicht

durch Differenzierungen in der Vegetationsbedeckung der frostempfindlichen Substrate begründet sein, wie sie CARBIENER (1970) für die Büldenbildung in den Vogesen verantwortlich macht. Das gilt ganz besonders für die Thufur auf den Hauswiesen Islands, die einen gleichmäßig dichten Besatz an Kulturgräsern aufweisen. Nach Beobachtungen an solchen Hauswiesen, die nach ihrer Anlage erneut von Thufur-Bildung betroffen werden, setzt die Thufur-Bildung mit sehr flachen Bodenaufwölbungen ein.

Der folgenden Erörterung der morphodynamischen Vorgänge, die die Thufur-Bildung einleiten, sei vorausgeschickt, daß homogenes pelitisches Feinmaterial eine große Kapillarität besitzt und zur Ausbildung zellenförmiger Bodenfroststrukturen prädestiniert ist, wie auch experimentell nachgewiesen wurde (vgl. TABER 1929, 457; BESKOW 1935, 223; DÜCKER 1940, 123; PISSART 1970, 24). Angesichts der von der Gefrierfront im Boden ausgehenden kryo- bzw. hydrostatisch bedingten Saugwirkung kann die subkutane Umlagerung von Feinmaterial im Gefolge einer auf zellenartige Bodeneisbildungszentren zulaufenden Wasserbewegung zustande kommen. Ähnliche Vorstellungen über die Bildung der isländischen Thufur äußert bereits THORODDSEN (1913, 254), der aber weniger die Bodeneisbildung als vielmehr die durch die Aufwölbung der Vegetationsdecke an den Erdbülten vermehrte Verdunstung als Motor der Bodenwasserbewegung annimmt. Die Bedeutung dieser kryo- bzw. hydrostatischen kapillaren Saugkräfte für die Thufur-Bildung geht nicht zuletzt daraus hervor, daß die Büldenbildung abgeschwächt verläuft oder sogar unterbleibt, wenn das Feinmaterial von einem Substrat geringerer Kapillarität (Sand, Kies, Lava) unterlagert wird oder seine Mächtigkeit deutlich geringer ist als die Frosteindringtiefe. Die Möglichkeit solcher Feinmaterialverlagerungen im Gefolge der durch das Frosteindringen bewirkten kryo- bzw. hydrostatischen kapillaren Bodenwasserbewegungen ist bekannt (vgl. COOK 1956, 16f.; WASHBURN 1956, 841f.; BREWER & HALDANE 1957, 308).

Nach dem Gesagten wird die Thufur-Bildung durch die Summation von zahlreichen Frosthebungen und der an sie geknüpften kryo- bzw. hydrostatisch bedingten subkutanen Umlagerung von Feinmaterial eingeleitet, die dann einen regelhaft differenzierten unterschiedlichen Tiefgang der Bodenfrostfront bewirkt. Aus dem mit unterschiedlichem Tiefgang der Bodenfrostfront verbundenen lateralen kryostatatischen Druck auf noch ungefrorene plastische Substratpartien resultiert die horizontale Substratverlagerung und damit die Büldenbildung. Daß es beim Eindringen des Bodenfrostes zu einem kleinräumig differenzierten Frosteindringen mit unterschiedlichen Frosthebungsbeträgen des Bodens kommt, ergibt sich aus Frosthebungsmessungen von SIGURDSSON (1967) in vegetationsbedecktem pelitischem Feinmaterial in Reykjavík (vgl. S. 285).

Wie die unterschiedliche Ausprägung der Thufur er-

kennen läßt, kann die oben abgeleitete Thufur-Bildung durch die Substrat- und Vegetationsbeschaffenheit, möglicherweise auch durch die Beweidung, modifiziert werden.

Eine Modifikation besteht darin, daß sich in vegetationsbedecktem Feinmaterial unter Wirkung des Bodenfrostes Rißnetze ausbilden können, die den Umriß der Erdbülten vorzeichnen. Da bei den ausgedehnten Geländebegehungen Rißnetze als Vorläufer von Büldenböden nur in einem einzigen Falle angetroffen wurden, kann davon ausgegangen werden, daß sie im Gegensatz zu einer von THORODDSEN (1913) geäußerten Auffassung keine unerläßliche Voraussetzung der Thufur-Bildung darstellen.

Für die Genese der isländischen Thufur stellt die von MÜLLER (1962, 273) und ELLENBERG & ELLENBERG (1969, 8) hervorgehobene maßgebliche Beteiligung der Beweidung an der Thufur-Bildung eine offene Frage dar. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Beweidung und Büldenbildung ist für Thufur-Felder mit dichtstündigen Erdbülten denkbar, deren Tiefenlinien den Eindruck eines Systems schmaler Gänge vermitteln. Für weitständige Erdbülten kommt eine Mitbeteiligung von Viehtritt an der Büldenbildung von vornherein kaum in Betracht. Bei den dichtstündigen Thufur sprechen vor allem die Regelmäßigkeit der Gestalt und des inneren Aufbaus der einzelnen Erdbülten dagegen, daß eine Beweidung, namentlich der Viehtritt, an der Thufur-Bildung in nennenswertem Ausmaß beteiligt ist. So gibt es auf Island über Sandboden weite Vegetationsgebiete, die trotz Beweidung keine Thufur aufweisen. Umgekehrt zeigt die Existenz von Thufur-Feldern im unbeweideten Ost-Grönland gleichfalls, daß die Beweidung keine Voraussetzung für ihre Bildung darstellt. Hingegen läßt sich nicht ausschließen, daß Beweidung und Viehtritt die Thufur-Bildung verstärken und beschleunigen können.

Ein besonderes Problem stellt auch die Frage nach dem Alter der Thufur-Bildung dar. Für Island ist bekannt, daß sich im Tiefland auf den Hauswiesen innerhalb von 10–20 Jahren nach der Einebnung von Thufur-Feldern erneut Erdbülten einstellen können (GRUNER 1912, 71). Das rezente Alter von Thufur des isländischen Tieflandes geht auch aus den oben angesprochenen Beobachtungen im Fljótshverfi in Süd-Island hervor (vgl. S. 281): Wie die Einbeziehung der Katla-Tephra von 1918 in die Thufur-Bildung belegt (Photo 3), stammen diese Erdbülten aus diesem Jahrhundert. Die weiteren eigenen Untersuchungen über die rezente Bildung von Thufur aus Island ergaben jedoch insgesamt ein differenzierteres Bild. So wurden Hauswiesen, die vor mehr als 40 Jahren angelegt wurden und bislang keine Neubildung von Thufur erkennen lassen, neben solchen angetroffen, auf denen sich eine Neubildung vollzogen hat. Diese Gegensätze spiegeln unterschiedliche edaphische Verhältnisse wider. Damit wird die im folgenden zu erörternde Frage nach den Faktoren der Thufur-Bildung angesprochen.

III. Die Faktoren der Thufur-Bildung

Die Faktoren der Thufur-Bildung ergeben sich großräumig aus den klimatischen und pedologischen Verhältnissen sowie aus der Vegetationsanordnung in den Verbreitungsgebieten der Thufur. Aufschluß über die unmittelbare Wirksamkeit der genannten Faktorenkomplexe für die Thufur-Bildung kann nur eine kleinräumig-standörtliche Analyse der Bodenbedingungen erbringen.

Unter den klimatischen Bedingungen der Thufur-Bildung kommt dem Frostregime die größte Bedeutung zu. Bei dessen Charakterisierung wird im folgenden auf Daten aus Island zurückgegriffen, da nur von hier auch für eine kleinräumig-standörtliche Analyse der Bodenbedingungen ausreichende Meßwerte vorliegen. Hinsichtlich des Frostregimes in Luft und Boden bestehen zwischen dem Tief- und Hochland Islands beträchtliche Unterschiede (SCHUNKE & STINGL 1973). Die das Luftfrostregime betreffenden Unterschiede werden ganz allgemein durch Unterschiede der mittleren jährlichen Kältesumme angezeigt: Im zentralisländischen Hveravellir (642 m ü. M.) beträgt die mittlere jährliche Kältesumme (1966–75) -1165°C ; im Tiefland nimmt sie Werte von -274°C in Reykjavík (41 m ü. M.) und -560°C in Akureyri (23 m ü. M.) an. Aus der unterschiedlichen Schärfe des Luftfrostregimes im isländischen Tief- und Hochland resultieren Unterschiede des für die Thufur-Bildung unmittelbar verantwortlichen Bodenfrostregimes: Im Hochland herrscht ganz allgemein ein jahreszeitlich geprägtes Bodenfrostregime geschlossener Gefronnis mit wenigen Frostwechseln zu Beginn und am Ende der Frostperiode und mit Frosteindringtiefen von über 100 cm (Abb. 2). Anders als im Hochland besteht im Tiefland ein tageszeitlich geprägtes Frostregime (Abb. 1): Die Bodenfrostwechselhäufigkeit ist bei zugleich erheblich geringerer Frosteindringtiefe (20–30 cm) wesentlich größer als im Hochland.

Bemerkenswerterweise entspricht diesen unterschiedlichen Bodenfrostverhältnissen im isländischen Tief- und Hochland kein erkennbarer Wandel in der Ausprägung der Thufur. So weisen die Thufur des Hochlandes keine größeren Dimensionen aufgrund der erheblich größeren Frosteindringtiefe auf. Um den Ursachen hierfür nachzugehen, sollen im folgenden die Bodenfrostbedingungen des Tief- und Hochlandes kleinräumig analysiert werden, und zwar am Beispiel der Bodentemperaturmessungen in Reykjavík-Sólland (SW-Island) und in Hveravellir (Zentral-Island).

Wie ein Vergleich der Jahresgänge der Bodentemperaturen an den beiden Meßplätzen zeigt (Abb. 1 u. 2), stimmen die Bodenfrostregime im Hoch- und Tiefland trotz aller Unterschiede darin überein, daß der Bodenfrost zu Beginn der Frostperiode aufgrund der vorhandenen Wärmekapazität des Bodens relativ langsam in den Boden eindringt und diesen am Ende der Frostperiode relativ rasch verläßt. Die Geschwindig-

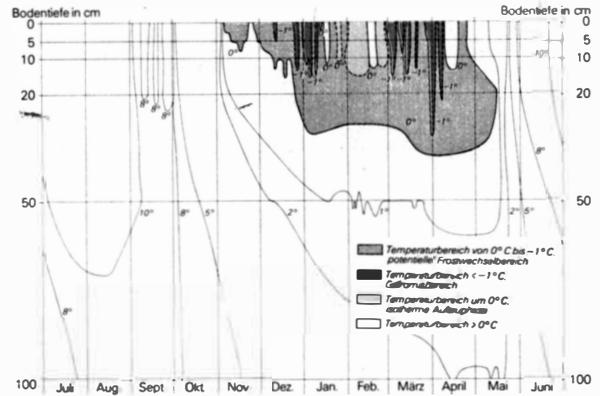


Abb. 1: Verlauf der Bodentemperaturen von Reykjavík-Sólland (41 m ü. M., SW-Island) im Winter 1966/67

Ground frost regime at Reykjavík-Sólland (41 m. a.s.l., SW-Iceland) during the winter 1966/67

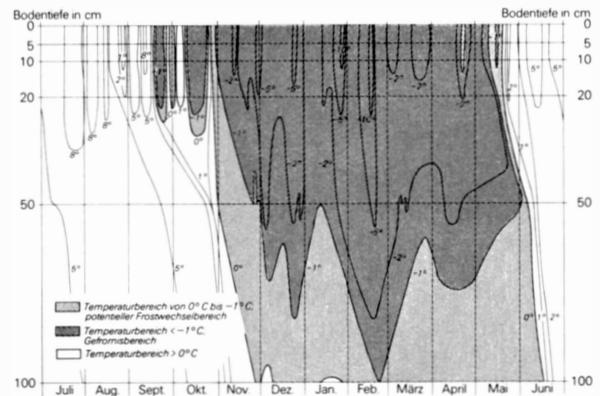


Abb. 2: Verlauf der Bodentemperaturen von Hveravellir (642 m ü. M., Zentral-Island) im Winter 1971/72

Ground frost regime at Hveravellir (642 m a.s.l., Central Iceland) during the winter 1971/72

keit des Frosteindringens in den Boden ist bekanntlich für die Bildung des Bodeneises, namentlich für die Bildung des geomorphologisch besonders wirksamen Segregationseises, von entscheidender Bedeutung.

Weiterhin dokumentiert dieser Bodentemperaturverlauf, daß die Bodenfrostfront im Tief- und Hochland relativ lange, nämlich rund 1–2 Monate, in Bodentiefen von 20–30 cm verharret. Während sie im Tiefland infolge der geringeren Kältesummen der bodennahen Luftschicht ständig in der genannten Tiefe bleibt, sinkt sie im Hochland bei Anwachsen der Kältesummen im November/Dezember sehr rasch in größere Tiefen ab. Ganz offensichtlich ist dieses Verharren der Bodenfrostfront und die damit verbundene, für die kryogenen Vorgänge und Kräfte relevante Wassersorption der entscheidende Grund dafür, daß die Thufur des Hoch- und Tieflandes kaum nennenswerte Unterschiede aufweisen. Das spätere Absinken der Boden-

frostfront im Hochland scheint für die Thufur-Bildung ohne Auswirkungen zu sein. Die entscheidende Rolle, die der relativ lange Verbleib der Bodenfrostfront in relativ geringen Bodentiefen von 20–30 cm für die Thufur-Bildung spielt, geht daraus hervor, daß die Deformation von Tephra-Lagen in Thufur-Feldern des Tief- und Hochlandes trotz der unterschiedlichen Frosteintrittstiefe übereinstimmend bis in Tiefen um 70–80 cm reicht und ihr Maximum meist in Bodentiefen um 30–50 cm hat (Photo 3).

Über das Ausmaß der Frosthebung im Zusammenhang mit dem Bodenfrosteinbringen liegen Untersuchungen von SIGURDSSON (1967) vor, auf die sich die folgenden Angaben beziehen. Während des Winters 1965/66 wurde in Reykjavík-Sólland in pelitischem Feinmaterial (Abb. 4) mit Vegetationsbedeckung eine Frosthebung von maximal 29 cm registriert. Im Winter 1966/67 betrug die maximale Frosthebung 20,6 cm. Zu diesem Zeitpunkt erreichte die Bodenfrostfront eine Eindringtiefe von 31 cm (Abb. 1). Der Frosthebungsbetrag von 20,6 cm übertrifft die nach theoretischen Erwägungen bei einer Frosteintrittstiefe von 31 cm beim Gefrieren des Bodenwassers zu erwartende Volumenvermehrung des Substrates um das rund Siebenfache. Die Frosthebung resultiert also nur zu einem Teil aus der Volumenvergrößerung beim Übergang des Wassers von der flüssigen oder gasförmigen Phase in die feste Phase, zum größeren Teil aus dem Kristallisationsdruck des Bodeneises (vgl. u. a. VON STACKELBERG 1964). Für die Thufur-Bildung zeigen die Untersuchungen von SIGURDSSON ganz allgemein, daß auch bei geringer Frosteintrittstiefe große Frosthebungsbeträge auftreten können.

Wie die Verbreitung der Thufur in Island und Ost-Grönland dokumentiert, sind hier vom Meeresspiegelniveau bis zu einer gewissen Obergrenze die thermischen Voraussetzungen zur Büldenbildung gegeben. Auch die hygrischen Bedingungen – Menge und Verteilung der jährlichen Niederschläge – stellen großräumig keinen begrenzenden Faktor der Büldenbildung dar. Die Verbreitungsanalyse läßt vielmehr erkennen, daß es vor allem pedologische Faktoren sind, die die Thufur-Bildung und -Verbreitung begrenzen.

Die entscheidende Bedeutung der pedologischen Bedingungen für die Thufur-Bildung äußert sich in einer engen Abhängigkeit der Thufur-Verbreitung von der Beschaffenheit des Substrates. Korngrößenanalysen von Bodenstichproben aus vegetationsbedecktem Feinmaterial mit und ohne Thufur-Bildung erbrachten, daß sich das von Büldenbildung erfaßte Feinmaterial durch einen erheblich höheren pelitischen Anteil gegenüber dem nicht von Büldenbildung betroffenen Feinmaterial signifikant auszeichnet (Abb. 3). Bei diesen auf Island weitverbreiteten pelitischen Sedimenten handelt es sich teils um Gesteinsrohböden, teils um Substrate mit einem hohen Anteil organogenen Materials. Das ist für die Wirksamkeit des Bodenfrostes insofern von Bedeutung, als Rohböden meist ein weniger komplexes Ge-

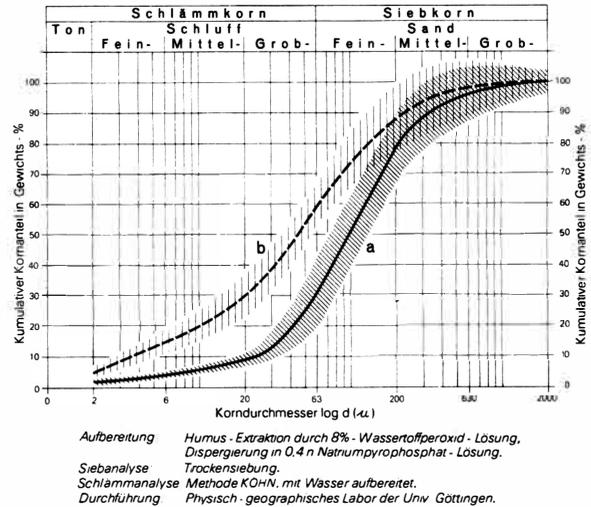


Abb. 3: Mittlere kumulative Korngrößenverteilung (mit Standardabweichung) ausgewählter Bodenproben aus Feinmaterial ohne (a) und mit (b) Thufur in Island

Average cumulative grain size distribution curves (with standard deviation) of selected fine-grained soil samples from Iceland; a = without, b = with formation of thufurs

füge – vielfach sogar Einzelkorngefüge (HELGASON 1963, 69) – aufweisen als die gleichen Substrate in einem fortgeschritteneren pedogenen Stadium. Gefüge und Körnung des Substrates legen bekanntlich als für den Bodenwasserhaushalt verantwortliche Faktoren das Verhalten des Substrates gegenüber der Frosteinwirkung fest. Die Bestimmung der organogenen Anteile der oben genannten Bodenproben ergab für die Substrate mit Thufur-Bildung einen durchschnittlichen Humus-Anteil von 15,6% (Standardabweichung: 5,3%) und für die Substrate ohne Thufur-Bildung einen durchschnittlichen Humus-Anteil von nur 6,8% (Standardabweichung: 3,6%). Das Feinmaterial, in dem die oben zitierten Frosthebungsmessungen von SIGURDSSON (1967) durchgeführt wurden (Abb. 4), zeigte nach eigenen, mit verschiedenen Methoden durchgeführten Humus-Bestimmungen für die Korngrößenklassen von über 63 Mikron einen Humus-Anteil von 10,8% und für die Korngrößenklassen von unter 63 Mikron einen Humus-Anteil von 22,0%. Durch einen hohen Anteil an organogenem Substrat kann die Frostgefährdung und damit die Anfälligkeit gegenüber der Büldenbildung heraufgesetzt werden. Dies geht beispielsweise aus Untersuchungen an Substraten mit Thufur-Bildung in Ost-Grönland hervor. Hier kommt es in dem vorherrschenden sandigen Feinmaterial (Abb. 4), das normalerweise keine Thufur aufweist, dort zu einer Thufur-Bildung, wo die sandigen Substrate einen hohen Anteil an organogenem Material enthalten, der nach eigenen Untersuchungen

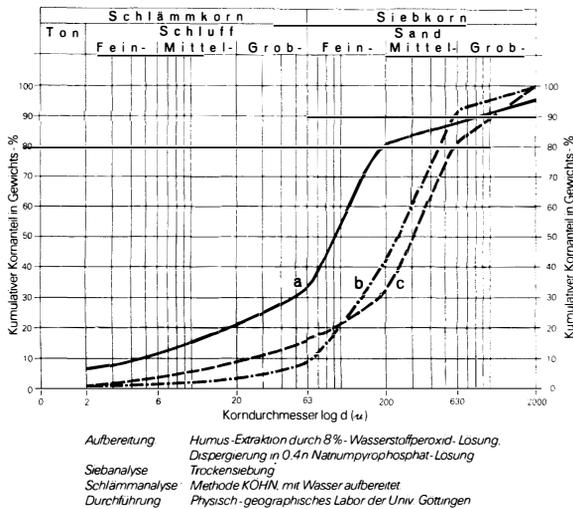


Abb. 4: Kumulative Korngrößenverteilung im Boden der Bodentemperatur-Meßstelle Reykjavík-Sólland in SW-Island (a) und im Boden eines Thufur-Feldes auf der Angmagssalik-Ø in Ost-Grönland (b und c)
 Cumulative grain size distributions at Reykjavík-Sólland (SW-Iceland), where soil temperatures have been taken (a), and of a thufure field at Angmagssalik-Ø in East Greenland (b and c)

bis zu 50% betragen kann. Daß hierdurch die geringere Frostempfindlichkeit reiner sandiger Substrate heraufgesetzt werden kann, zeigen auch Untersuchungen von RAUP (1965, 105) an Thufur im nördlichen Ost-Grönland.

Die optimale Verbreitung und prägnante Ausbildung der Thufur in schluffig-feinsandigem Substrat mit relativ gleichbleibender Korngrößenzusammensetzung deuten darauf hin, daß sich hier bei Einwirkung des Frostes besonders regelmäßige frostdynamische Bewegungen im Boden vollziehen. Wahrscheinlich beruht die Regelmäßigkeit der zellenförmig angeordneten Frostaufbeulungen des Bodens letztlich auf einer durch die gleichmäßig kleine Körnung des pelitreichen Feinmaterials vorgezeichneten gleichmäßigen Wasserverteilung im Boden. Da in den Mòhella-Gebieten Islands bei hohem Grundwasserstand oder Staunässe eine Bütenbildung kaum stattfindet oder sogar völlig unterbleibt, läßt sich die starke geomorphologische Wirksamkeit des Frostes in der Mòhella kaum allein durch einen großen absoluten Wassergehalt dieses frostanfälligen Substrates erklären. Offenbar können sich bei einer Wasserübersättigung der schluffigen Mòhella die durch Körnung und Gefüge vorgezeichneten speziellen hydrologischen Eigenschaften dieses Substrates beim Gefrieren des Bodenwassers nicht auswirken. Wahrscheinlich ist es die durch sorptive, osmotische und kapillare Kräfte verursachte Saugkraft des schluffig-feinsandigen Substrates, auf der die regelmäßige Ausbil-

dung der Thufur beruht. Das geht beispielsweise auch daraus hervor, daß in jenen Thufur-Feldern des isländischen Hochlandes, die in relativ geringer Tiefe von Permafrostboden unterlagert werden, und in denen sich somit die von der saisonalen Bodenfrostfront ausgehende sorptive Wasserbindung wegen des permanent gefrorenen Untergrundes nicht voll auswirken kann, die Thufur relativ geringe Höhen von 20–30 cm aufweisen.

Die Kräfte der Bindung und Ansaugung von Bodenwasser stellen eine wichtige, von der Beschaffenheit der Lockersubstrate gesteuerte Voraussetzung für die frostbedingte Ausbildung von zellenförmig angeordneten Bodenaufwölbungen dar (vgl. BESKOW 1935, 223; TABER 1929, 457; 1943, 1456; DÜCKER 1940, 123; PISSART 1970, 24); sie sind in sandig-kiesigem Substrat von geringerer Wirksamkeit als in pelitischem. Außerdem ist nach Untersuchungen von VON STACKELBERG (1964), OSLER (1967), PENNER (1967) u. a. der aus der Bodeneisbildung resultierende Kristallisationsdruck, der bei der frostdynamischen Bodenaufwölbung eine wichtige Rolle spielt, in feinporigem pelitischem Substrat größer als in großporigem sandig-kiesigem Substrat.

Die Bedeutung von Körnung und Gefüge der isländischen Mòhella für die frostdynamische Thufur-Bildung läßt sich am deutlichsten daran erkennen, daß es in sandigem Substrat, für das gegenüber der pelitreichen Mòhella mit einem geringeren Porenvolumen und einem größeren Porendurchmesser gerechnet werden muß, trotz günstiger frostklimatischer Voraussetzungen nicht zur Ausbildung von Thufur kommt.

Die Bedeutung der Vegetationsdecke für die Thufur-Bildung beruht hauptsächlich auf dem von ihr ausgehenden Erosionsschutz, worauf auch J. LUNDQVIST (1962, 31f.) hinweist. Bei den im Prinzip in ähnlicher Weise entstandenen frostdynamischen Feinmaterialaufbeulungen in nacktem Detritus mit Struktur- und Zellenbodenbildung kann die Abtragung in viel stärkerem Maße angreifen und emporgehobenes Feinmaterial beseitigen. Die Bedeutung der Vegetationsdecke der Thufur als Erosionsschutz geht auch daraus hervor, daß die Erdbülten bei einer Verletzung der geschlossenen Vegetationsdecke rasch von der Abtragung erfaßt und beseitigt werden. Eine der regelhaften Thufur-Anordnung vergleichbare Vegetationsdifferenzierung in noch nicht von der Bütenbildung erfaßten Feinmaterialarealen, aus der sich die regelhafte zellenförmige Anordnung der Bodenfroststrukturen erklären ließe (vgl. CARBIENER 1970), ist bislang nicht bekannt geworden.

Nach dem oben Gesagten erklärt sich die weite Verbreitung der Thufur in Island aus der weiten Verbreitung stark frostempfindlicher Substrate; die Differenzierungen der Thufur in den verschiedensten Regionen Islands und Ost-Grönlands werden weniger durch Unterschiede des Frostklimas als vielmehr durch Differenzierungen der Substratbeschaffenheit verursacht.

Literatur

- BERGSTRÖM, E.: En märklig form af rutmark fran barrskogsregionen i Lappland. – Geol. Fören. Förh. 34, S. 335–342, Stockholm 1912.
- BESCHEL, R.: Hummocks and their vegetation in the high Arctic. – Proc. Permafrost Int. Conf. 1963, Nat. Acad. Sci. – Nat. Res. Council. 1287, S. 13–20, Washington 1966.
- BESKOW, G.: Erdfließen und Strukturböden der Hochgebirge im Lichte der Frosthebung. – Geol. Fören. Förh. 52, S. 622–638, Stockholm 1930.
- : Tjälbildningen och tjällyftningen med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. – Sveriges Geol. Undersökning C 375, 242 S., Stockholm 1935.
- BREWER, R. & A. D. HALDANE: Preliminary experiments in the development of clay orientation in soils. – Soil Sci. 84, S. 301–309, Baltimore 1957.
- CARBIENER, R.: Frostmusterböden, Solifluktion, Pflanzengesellschafts-Mosaik und -Struktur, erläutert am Beispiel der Hochvogesen. – In: Gesellschaftsmorphologie (Strukturforchung). Ber. üb. d. Int. Symp. Rinteln 1966 d. Int. Verein. f. Vegetationskunde (hrsg. v. R. Tüxen), S. 187–215, Den Haag 1970.
- COOK, F. A.: Additional notes on mud circles at Resolute Bay, Northwest Territories. – Canadian Geographer 8, S. 9–17, Toronto 1956.
- DÜCKER, A.: Frosteinwirkung auf bindige Böden. – Straßenbau-Jahrb. 1939/40, S. 111–126, Berlin 1940.
- ELLENBERG, CH. & H. ELLENBERG: ‚Kal‘ – Das Kahlwerden von Kulturwiesen Islands als ökologisches Problem. – Ber. a. d. Forschungsstelle ‚Nedri Ás‘ Hveragerdi 3, 47 S., Hveragerdi (Island) 1969.
- FALK, P.: Further observation on the ecology of central Iceland. – Journ. Ecol. 28, S. 1–41, Cambridge 1940.
- GERLACH, T.: Contribution á la connaissance du développement actuel des buttes gazonnées (thufurs) dans les Tatras Polonaises. – In: Processus périglaciaires étudiés sur le terrain (hrsg. v. P. Macar u. A. Pissart), S. 57–73, Liège 1972.
- GRIGORIEV, A.: Die Typen des Tundra-Mikroreliefs von Polar-Eurasien, ihre geographische Verbreitung und Genesis. – Geogr. Ztschr. 31, S. 345–359, Leipzig 1925.
- GRUNER, M.: Die Bodenkultur Islands. – Archiv f. Biontologie 3, 2, 213 S., Berlin 1912.
- HELGASON, B.: Basaltic soils of South-West Iceland. I. – Journ. Soil-Sci. 14, S. 64–72, Oxford 1963.
- HÖGBOM, B.: Über die geologische Bedeutung des Frostes. – Bull. Geol. Inst. Upsala 12, S. 258–389, Upsala 1914.
- HOPKINS, D. M. & R. S. SIGAFOOS: Frost action and vegetation patterns on Seward Peninsula, Alaska. – U.S. Geol. Surv. Bull. 974-C, S. 51–100, Washington 1951.
- : Role of frost thrusting in the formation of tussocks. – Am. Journ. Sci. 252, S. 55–59, New Haven 1954.
- JÓHANNESSON, B.: The soils of Iceland. – Univ. Res. Inst. Dept. Agriculture, Rep. Ser. B. 13, 140 S., Reykjavík 1960.
- KHAKIMOV, K. R.: Artificial freezing of soil. – 121 S., Jerusalem 1966.
- KRETSCHMER, G.: Die Ursache für Eisschichtenbildung im Boden. – Wiss. Ztschr. Univ. Jena 7, Math.-Nat. Reihe, S. 273–277, Jena 1958.
- LUNDQVIST, J.: Earth and ice mounds: a terminological discussion. – In: The periglacial environment (hrsg. v. T. Péwé), S. 203–215, Montreal 1969.
- MÜLLER, S.: Isländische Thufur und alpine Buckelwiesen – ein genetischer Vergleich. – Natur u. Museum 92, S. 267–274 u. S. 299–304, Frankfurt 1962.
- OSLER, J. C.: The influence of depth of frost penetration on the frost susceptibility of soils. – Canadian Geotechn. Journ. 4, S. 334–346, Toronto 1967.
- PENNER, E.: Heaving pressure in soils during unidirectional freezing. – Canadian Geotechn. Journ. 4, S. 389–408, Toronto 1967.
- PISSART, A.: Les phénomènes physiques essentiels liés du gel, les structures périglaciaires qui en résultent et leur signification climatique. – Ann. Soc. Géol. Belgique 93, S. 7–49, Liège 1970.
- RAUP, H. M.: The structure and development of turf hummocks in the Mesters Vig district, Northeast Greenland. – Medd. om Grønland 166, 3, 112 S., Kopenhagen 1965.
- : Turf hummocks in the Mesters Vig district, Northeast Greenland. – Proc. Permafrost Int. Conf. 1963, Nat. Acad. Sci. – Nat. Res. Council. 1287, S. 43–50, Washington 1966.
- SCHUNKE, E.: Die Periglazialerscheinungen Islands in Abhängigkeit von Klima und Substrat. – Abh. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl., 3. F., 30, 273 S., Göttingen 1975.
- SCHUNKE, E. & H. STINGL: Neue Beobachtungen zum Luft- und Bodenfrostklima Islands. – Geogr. Annaler 55 A, S. 1–23, Stockholm 1973.
- STIGURSSON, F. H.: Frostlyfting jarðvegs í Fossvogi. – Vedrid 12, S. 48–50, Reykjavík 1967.
- STACKELBERG, M. VON: Die physikalische Deutung der Frostaufbrüche. – Umsch. Wiss. u. Techn. 64, S. 68–71, Frankfurt 1964.
- TABER, S.: Frost heaving. – Journ. Geol. 37, S. 428–461, Chicago 1929.
- : Perennially frozen ground in Alaska: its origin and history. – Bull. Geol. Soc. America 54, S. 1433–1548, New York 1943.
- THORODDSEN, T.: Polygonboden und ‚thufur‘ auf Island. – Pet. Geogr. Mitt. 59, S. 253–255, Gotha 1913.
- WASHBURN, A. L.: Classification of patterned ground and review of suggested origins. – Bull. Geol. Soc. America 67, S. 823–865, Baltimore 1956.
- WEBB, R.: Vegetation cover on Icelandic thufur. – Acta Bot. Islandica 1, S. 51–60, Reykjavík 1972.