

## AKTUELLE THERMISCHE KLIMAVERÄNDERUNGEN AM POLARRAND DER ÖKUMENE EUROPAS – AUSMASS, URSACHEN UND AUSWIRKUNGEN

Mit 7 Abbildungen und 2 Tabellen

EKKEHARD SCHUNKE

*Summary:* Present thermal climatic changes at the polar eocumenical frontier of Europe – dimensions, reasons, and consequences.

The warming of the Arctic and its adjacent regions which had begun at the end of the last century, has turned to a temperature depression since the fifties and sixties of our century. In this paper the dimensions, reasons, and consequences of the present temperature depression in the European Sub-arctic are examined, mainly by examples from Iceland.

The degree of this thermal climatic change is analyzed by means of those parameters that are relevant to the land use and the morphodynamics: degree days above 0°C, degree days below 0°C, totals of days with alternate freezing and thawing, icedays, and frost intensity.

The present temperature depression affects the terrestrial ecological resources in a double way: directly the vegetable production (grass, potatoes), which is the most important basis of the land use in Iceland, is impaired in the course of a reduced summer warmth, and, indirectly, the vegetation potential is disturbed by an intensification of the cryogenic processes. In addition to the change of the cryogenic morphodynamics, which affects indirectly the available potential of the land use, the present temperature depression involves hydrologic changes, namely a reduction of the hydro-energetic potential.

Temperaturveränderungen haben in der europäischen Subarktis schon mehrfach nachhaltige Auswirkungen gehabt: Eine besonders warme Klimaperiode begünstigte die Besiedlung Islands und Südgrönlands im 9. und 10. nachchristlichen Jahrhundert durch die Wikinger. Eine spätmittelalterliche kühlere Periode im 13. bis 15. Jahrhundert war eine der Ursachen des Unterganges der Wikingersiedlungen auf Grönland. Die als „Little Ice Age“ bekannte kalte Periode des 17. bis 19. Jahrhunderts hatte besonders negative Folgen in diesem Raum, vor allem für Island, wo sie zusammen mit vulkanischen Naturkatastrophen zu einer so drastischen Verschlechterung der Lebensbedingungen führte, daß die dänischen Behörden ernsthaft erwogen, die Isländer auf den Kontinent zurückzuholen. Am Ende des vorigen Jahrhunderts wurde diese säkulare Kälteperiode durch eine Erwärmungsphase mit Höhepunkt in den 20–50er Jahren dieses Jahrhunderts abgelöst, in deren Gefolge sich eine Erweiterung des geoökologischen Nutzungspotentials mit zum Teil weitreichenden sozio-ökonomischen Veränderungen ergab. Die Umstellung der grönländisch-eskimoischen Bevölkerung vom Leben arktischer Jäger und Fänger auf das Leben von subarktischen Fischern in diesem Zusammenhang ist beispielsweise von DEGE (1965) ausführlich dargelegt worden.

Diese am Ende des vorigen Jahrhunderts eingetretene Erwärmung der Arktis und ihrer Randgebiete wird seit den 50–60er Jahren dieses Jahrhunderts von einem teilweise recht drastischen Temperaturrückgang abgelöst. Besonders deutlich läßt sich diese aktuelle Klimaveränderung am Beispiel Islands aufzeigen. Die Insel gilt bekanntlich auch für Mitteleuropa als „Fühler“ von Klimaveränderungen. Nicht zuletzt auch aus diesem Grunde stehen im folgenden die aktuellen thermischen Klimaveränderungen Islands im Mittelpunkt der Betrachtung. Dabei gilt die Fragestellung 1. dem Ausmaß, 2. den Ursachen und 3. den wichtigsten geoökologischen Auswirkungen der Klimaveränderungen.

### 1. *Trend und Ausmaß der aktuellen thermischen Klimaveränderungen*

In der atlantisch-europäischen Subarktis liegen die Jahres-Mitteltemperaturen seit etwa 1960 deutlich unter dem langjährigen Mittel der Normalperiode (1931–60). Für 20 aus allen Bereichen der Insel ausgewählte Wetterstationen Islands ergeben sich für die Periode 1961–77 durchschnittliche Erniedrigungen der Jahres-Mitteltemperatur bis zu 2,0°C; im Mittel aller 20 Stationen beträgt diese mittlere Temperaturdepression 0,5°C. Eine für 10 Stationen durchgeführte Korrelationsanalyse der Temperaturveränderungen im Sommer (Juni–September), Winter (Dezember–März), Vorwinter (April–Mai) und Vorwinter (Oktober–November) zeigt durch Korrelationskoeffizienten zwischen 0,76 und 0,99 bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 0,1%, daß sich die Temperaturverhältnisse in Island überall gleichsinnig verändern. Der gleiche negative Trend gilt auch für Ostgrönland und Nordskandinavien.

Der negative Temperaturtrend seit 1960 betrifft nicht nur die Jahres-Mitteltemperatur; auch die Mitteltemperaturen der Jahreszeiten und fast aller Monate liegen unter den langjährigen Mittelwerten. Besonders deutlich sind diese Temperaturerniedrigungen während der Dekade 1966–1975: Die mittlere Temperaturerniedrigung für diesen Zeitraum beträgt im Mittel aller 20 Bezugsstationen im Sommer 0,7°C, im Winter 0,7°C, im Vorwinter 0,4°C, im Vorwinter 1,2°C und im Jahr 0,8°C. Die Station Grimsstadir beispielsweise weist während der Periode 1961–1975 eine durchschnittliche Erniedrigung der Jahres-Mitteltemperatur von 1,1°C, der Sommer-Mitteltemperatur von 1,4°C und der Winter-Mitteltemperatur von 0,8°C auf. Bemerkenswert groß ist die Temperaturerniedrigung im Vorwinter mit durchschnittlich 1,7°C. Insgesamt zeigt die Analyse des Temperaturtrends, daß die aktuelle

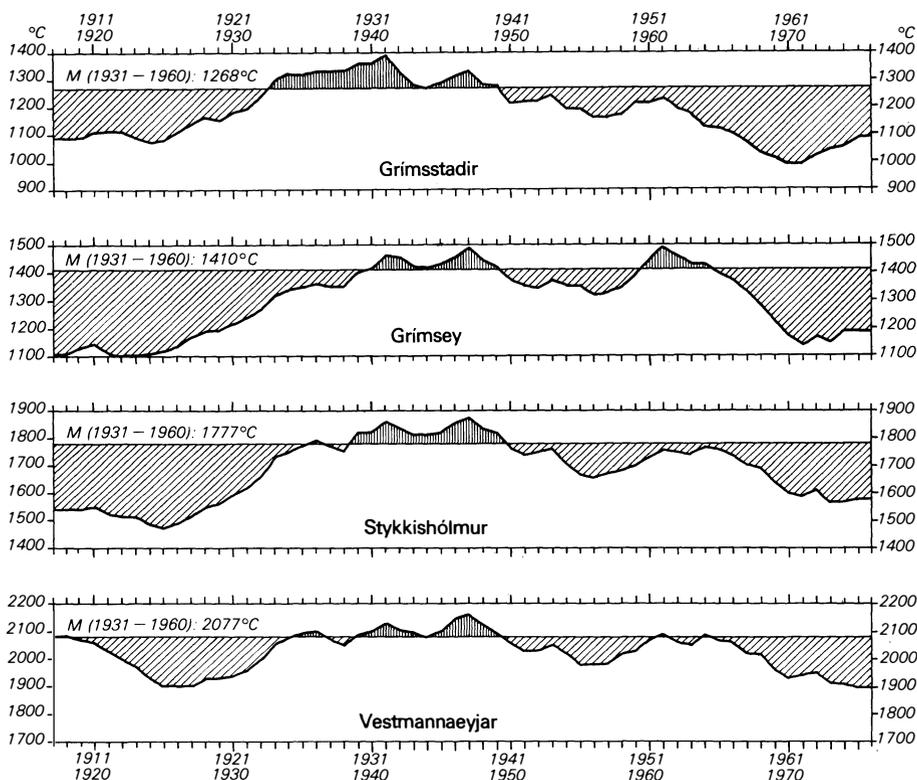


Abb. 1: Gang der jährlichen Wärmesumme und seine Abweichung vom Normalwert (1931–1960) seit 1918 für ausgewählte Stationen Islands (9jährig übergreifende Mittelwerte)

Trend of the annual degree days above 0° C and its deviations from the 30 year norms (1931–1960) since 1918 of selected Icelandic stations (9-year running means)

Temperaturerniedrigung generell alle Jahreszeiten und Monate betrifft, wenn auch in unterschiedlicher Stärke.

Auf der Basis von Mitteltemperaturen läßt sich zwar der allgemeine Temperaturtrend kennzeichnen, mit Blick auf die Landnutzung oder auch auf geomorphologische Vorgänge sind jedoch andere thermische Parameter von größerer Relevanz, nämlich die Wärmesumme, die Kältesumme, die Anzahl der Frostwechsel und Eistage, die Frostandauer und die Frostintensität. Um das Ausmaß der durch Mitteltemperaturveränderung angedeuteten thermischen Veränderungen detaillierter zu erfassen, soll die Veränderung dieser thermischen Parameter im Mittelpunkt der Analyse stehen. Dabei wird auf die Stationen Grimsey (15 m ü.M.) in N-Island, Grimsstadir (384 m ü.M.) in NE-Island, Vestmannaeyjar (118 m ü.M.) in S-Island und Stykkishólmur (16 m ü.M.) in W-Island Bezug genommen, deren Temperaturreihen größtenteils bis ins vorige Jahrhundert zurückreichen. Im besonderen wird auf die Daten der unmittelbar an der Kältengrenze der Landnutzung gelegenen Station Grimsstadir zurückgegriffen. Wie schon für die Veränderungen der Mitteltemperaturen erwähnt, besteht auch für die Varianz der Größenordnung der hier zu untersuchenden thermischen Parameter eine signifikante Korrelation zwi-

schen den verschiedenen Stationen, so daß die Trendanalyse der Veränderungen dieser Parameter auf der Basis des Datenmaterials der vier ausgewählten Stationen als repräsentativ gelten kann.

Hinsichtlich der jährlichen Wärmesumme zeigt sich eine bereits in den 50er Jahren einsetzende Abnahme, die sich um 1960 verstärkt und bis in die Gegenwart anhält (Abb. 1). Der Trend der Abnahme ist für alle vier Stationen gleichsinnig, in seinen absoluten Werten jedoch unterschiedlich (Tab. 1). Allerdings liegen die Werte der Wärmesummenabnahme innerhalb oder nur wenig außerhalb des Standardbereiches der Normalperiode. Besonders deutlich ist die Abnahme der mittleren jährlichen Wärmesumme während der Dekade 1966–1975. Gegenüber der Dekade 1931–1941 mit besonders großer Sommerwärme nimmt die aktuelle Depression der mittleren jährlichen Wärmesumme dieser kalten Dekade 1966–1975 sogar Werte zwischen 225°C (Vestmannaeyjar) und 317°C (Grimsstadir) an. Insgesamt werden jene niedrigen jährlichen Wärmesummen erreicht, wie sie zu Beginn dieses Jahrhunderts geherrscht haben.

Außer auf dem Absinken der jährlichen Wärmesumme beruht die aktuelle Temperaturdepression auf einem merklich stärkeren Anstieg der jährlichen Kälte-

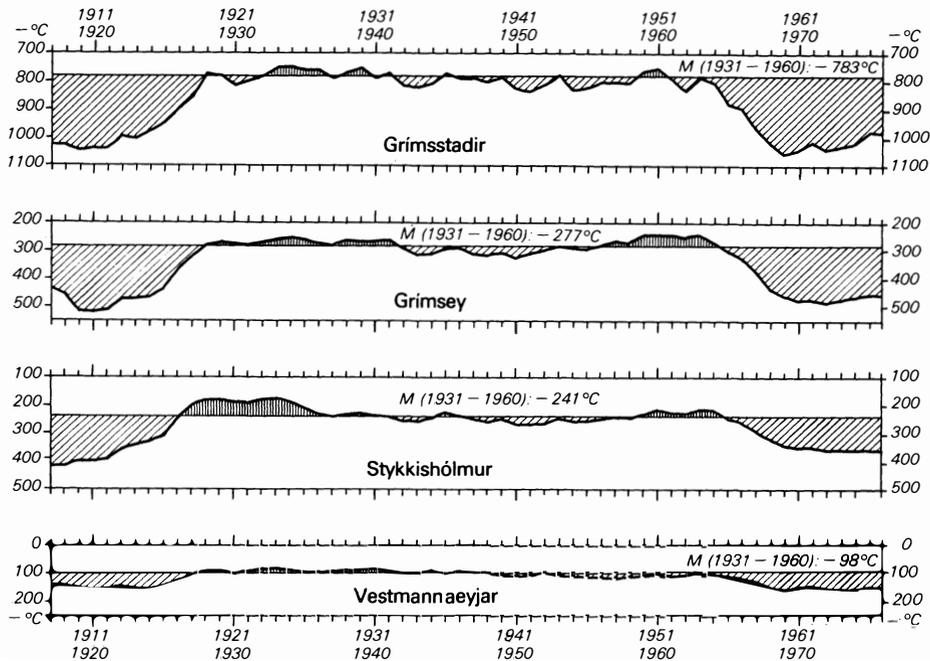


Abb. 2: Gang der jährlichen (frostperiodischen) Kältesumme (Mittel des Zeitraumes Juli–Juni) und seine Abweichung vom Normalwert (1931–1960) seit 1918 für ausgewählte Stationen Islands (9-jährig übergreifende Mittelwerte)

Trend of the annual degree days below  $0^{\circ}\text{C}$  (averages of the period July–June) and its deviations from the 30 year norms (1931–1960) since 1918 of selected Icelandic stations (9-year running means)

summe (berechnet für den Zeitraum Juli bis Juni). Das Anwachsen der jährlichen Kältesumme setzt Anfang der 60er Jahre ein (Abb. 2). Die aktuelle mittlere Zunahme der jährlichen Kältesumme gegenüber der Normalperiode liegt an den vier Stationen deutlich außerhalb des Standardbereiches des Normalwertes. Bezogen auf die mittlere jährliche Kältesumme der Normalperiode bedeuten diese Werte Steigerungsraten zwischen 24% (Grimsstadir) und 50% (Grimsey) (Tab. 1). Im Vergleich der besonders kalten Periode 1966–1975 mit der besonders kältearmen Periode 1925–1934 nimmt die Steigerung der mittleren jährlichen Kältesumme Werte zwischen  $-74^{\circ}\text{C}$  (Vestmannaeyjar) und  $-236^{\circ}\text{C}$  (Grimsstadir) an – das bedeutet eine aktuelle Erhöhung der mittleren jährlichen Kältesumme um 31% (Grimsstadir) bis 90% (Vestmannaeyjar). Hinsichtlich der absoluten Erhöhung der jährlichen Kältesumme liegen innerhalb der Periode 1961–1975 nur die Jahre 1962, 1970, 1971 und 1975 unterhalb des langfristigen Normalwertes bzw. entsprechen ihm (vgl. Abb. 3). Eine besonders große Erhöhung der jährlichen Kältesumme weisen die Jahre 1965, 1967, 1968 und 1969 auf, bei denen es sich um Jahre mit ausgedehnten Treibeisvorkommen vor der Nordküste Islands handelt (vgl. SIGTRYGGSSON 1972).

Eine Aufschlüsselung der jährlichen Kältesumme auf die Jahreszeiten Vorwinter, Winter und Vorsommer läßt erkennen, daß die Kältesumme des Vorwinters eine besonders markante Steigerung erfahren hat. Sie

liegt während der gesamten Periode 1961–1975 über dem Normalwert (Abb. 3). Die Erhöhung der mittleren Kältesumme des Vorsommers der Periode 1966–1975 erreicht bei weitem nicht dieses Ausmaß. Diese überproportionale Erhöhung der Kältesumme im Vorwinter, die für alle untersuchten Stationen gilt, ist insbesondere im Hinblick auf die Bodenfrostdynamik von Bedeutung.

Aus der dargelegten Erniedrigung der Wärmesumme und der Erhöhung der Kältesumme ergibt sich eine drastische Erniedrigung der jährlichen Wärmebilanzsumme in der Gegenwart. Für die aufgrund ihrer nördlichen und hypsomtrischen Lage besonders betroffene Station Grimsstadir ist die mittlere jährliche Wärmebilanzsumme der Periode 1961–1975 gegenüber der Normalperiode um  $396^{\circ}\text{C}$  ( $=82\%$ ) zurückgegangen. Im Vergleich zur durch einen großen Wärmeüberschuß ausgezeichneten Periode 1931–1940 beträgt die mittlere aktuelle Verringerung der jährlichen Wärmebilanzsumme sogar  $521^{\circ}\text{C}$  ( $=86\%$ ).

Während das Absinken der jährlichen Wärmesumme bereits in den 50er Jahren einsetzt, macht sich das Anwachsen der jährlichen Kältesumme erst Anfang der 60er Jahre in verstärktem Maße bemerkbar. Offensichtlich wurde die negative Veränderung der thermischen Verhältnisse zunächst mit einem Absinken der Wärmesummen eingeleitet.

Ein weiterer Parameter des Frostklimas, dem am Rande der Polargrenze der Ökumene auch für die

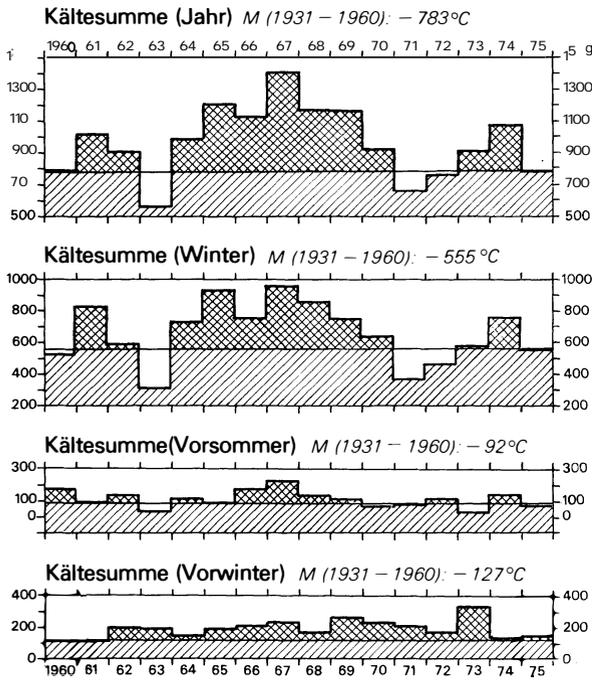


Abb. 3: Gang der Kältesumme (Jahr, Winter, Vorwinter, Vorsommer) und seine Abweichung vom Normalwert (1931-1960) seit 1960 in Grímsstadir (NE-Island, 384 m ü. M.)

Trend of the degree days below 0°C (year, winter, pre-winter, pre-summer) and its deviations from the 30 year norms (1931-1960) since 1960 at Grímsstadir (NE-Iceland, 384 m. a.s.l.)

Landnutzung Bedeutung zukommt, ist die Anzahl der Frosttage. Gegenüber der Normalperiode hat sich die Anzahl der Frosttage während der Periode 1961-1975 im allgemeinen nur geringfügig erhöht (Tab. 1). Die bemerkenswert große Zunahme der Frosttage auf Grimsey, die in Einklang steht mit einer überproportional großen Veränderung der anderen frostklimatischen Parameter, wird als lokales Phänomen hernach noch näher zu betrachten sein (vgl. S. 287).

Durch die relativ geringe Zunahme der Frosttage erfährt die mittlere Andauer der frostfreien Periode während des Zeitraumes 1966-1975 gegenüber der Normalperiode eine geringfügige Abnahme, die an den untersuchten Repräsentativstationen zwischen 0 Tagen (Vestmannaeyjar) und 14 Tagen (Grímsstadir) ausmacht.

So wie die aktuelle Erhöhung der Kältesumme keine größere Vermehrung der Anzahl der Frosttage nach sich zieht, tritt auch in der Anzahl der Tage mit negativer Mitteltemperatur, die bekanntlich zur Berechnung der Kältesumme herangezogen werden, keine nennenswerte Änderung ein. In Grímsstadir beispielsweise verzeichnet die Normalperiode im Jahresmittel 148 Tage mit negativer Mitteltemperatur, die Periode 1961-1975 155 Tage. Daraus ergibt sich, daß die Er-

	Grímsey	Grímsstadir	Vestmannaeyjar	Stykkis-hölmur
Mitteltemperatur (Jahr)	-0,9°C	-1,0°C	-0,5°C	-0,7°C
Wärmesumme (Jahr)	-183°C (-13%)	-209°C (-16%)	-135°C (-6%)	-152°C (-9%)
Kältesumme (Jahr)	+139°C (+50%)	+187°C (+24%)	+48°C (+49%)	+86°C (+35%)
Kältesumme (Winter)	+93°C (+45%)	+117°C (+21%)	+30°C (+37%)	+60°C (+30%)
Kältesumme (Vorwinter)	+27°C (+100%)	+57°C (+45%)	+16°C (+200%)	+21°C (+100%)
Kältesumme (Vorsommer)	+15°C (+33%)	+9,0°C (+10%)	+1,0°C (+13%)	+5,0°C (+24%)
Frostintensität (Jahr)	+0,7°C (+22%)	+1,0°C (+20%)	+0,5°C (+21%)	+0,6°C (+21%)
Frostintensität (Winter)	+0,8°C (+22%)	+1,1°C (+18%)	+0,4°C (+15%)	+0,6°C (+19%)
Frostintensität (Vorwinter)	+0,5°C (+24%)	+1,0°C (+24%)	+1,0°C (+71%)	+0,7°C (+39%)
Frostintensität (Vorsommer)	+0,4°C (+16%)	+0,6°C (+17%)	-0,1°C (-5%)	+0,6°C (+38%)
Frostwechsellage	+23 Tge (+33%)	+10 Tge (+11%)	+3 Tge (+5%)	+15 Tge (+23%)
Eistage	+9 Tge (+15%)	-1 Tge (-1%)	+1 Tge (+6%)	-8 Tge (-14%)

Tab. 1: Die mittleren absoluten und relativen Abweichungen thermischer Parameter während der Periode 1961-1975 gegenüber der Normalperiode (1931-1960) für ausgewählte Stationen Islands.

The average absolute and relative deviations of thermic parameters during the period 1961-1975 in comparison to the 30 year norms (1931-1960) of selected Icelandic stations.

höhung der Kältesumme weniger zu einer Vermehrung der Frosttage als vielmehr zu einer Erhöhung der Frostintensität führt.

Die mittlere jährliche Frostintensität, d. h. die mittlere Kältemenge pro Tag mit negativer Mitteltemperatur in einem Jahr (Die jährliche Frostintensität bezieht sich hier auf die Zeit Juli bis Juni.), hat sich an den vier repräsentativen Stationen seit Beginn der 60er Jahre gegenüber der Normalperiode beträchtlich erhöht (Abb. 4). Hinsichtlich der jahreszeitlichen Veränderung der Frostintensität ist während der Periode 1961-1975 an allen Stationen die mittlere Erhöhung im Vorwinter deutlich größer als die im Vorsommer (Tab. 1). Damit schlägt sich die oben ermittelte überproportional große Erhöhung der Kältesumme im Vorwinter in einer verstärkten Frostintensität während dieser Jahreszeit nieder.

So wie hier für repräsentative Stationen Islands dargelegt, läßt sich beispielsweise auch für Ost-Grönland anhand der thermischen Parameter von Angmagssalik (35 m ü.M.) eine erhebliche aktuelle Verschärfung des Frostregimes feststellen, deren Trend mit dem für das isländische Frostregime ermittelten übereinstimmt (Abb. 5). Die durchschnittliche Erhöhung der mittleren jährlichen Kältesumme während der Periode 1961-1975 beträgt -316°C, was gegenüber der mittleren jährlichen Kältesumme der Normalperiode in Höhe von -1041°C einen Anstieg um 30% bedeutet. Entsprechendes gilt für die mittlere jährliche Frostintensität, die in der Periode 1961-1975 von -6,1°C in der Normalperiode um 16% auf -7,1°C

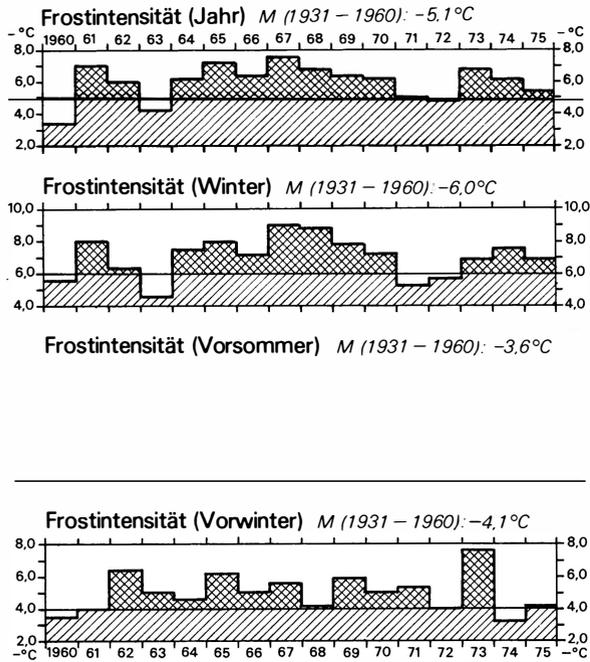


Abb. 4: Gang der Frostintensität (Jahr, Winter, Vorwinter, Vorsommer) und seine Abweichung vom Normalwert (1931–1960) seit 1960 in Grímsstadir (NE-Island, 384 m ü. M.)

Trend of the frost intensity (year, winter, pre-winter, pre-summer) and its deviations from the 30 year norms (1931–1960) since 1960 at Grímsstadir (NE-Iceland, 384 m. a.s.l.)

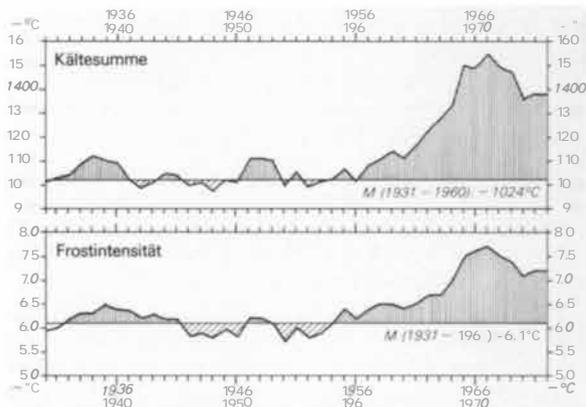


Abb. 5: Gang der jährlichen (frostperiodischen) Kältesumme und Frostintensität (Mittel des Zeitraumes Juli–Juni) und die Abweichungen vom Normalwert (1931–1960) seit 1935 in Angmagssalik (SE-Grönland, 35 m ü. M.) (5-jährig übergreifende Mittelwerte)

Trends of the annual degree days below 0° C and of the frost intensity (average of the period July–June) and its deviations from the 30 year norms (1931–1960) since 1935 at Angmagssalik (SE-Greenland, 35 m. a.s.l.) (5-year running means)

ansteigt. Die Anzahl der Frosttage nimmt wie in Island nur geringfügig zu, nämlich von 228 auf 235 Frosttage.

Insgesamt wird aus der Analyse der thermischen Parameter für die vergangenen 15 Jahre außer einem Rückgang der Sommerwärme eine markante Verschärfung des Frostregimes deutlich, die ihren Ausdruck vor allem in einer Erhöhung der Kältesumme und der Frostintensität findet. Bemerkenswert ist des weiteren auch die besonders markante Verschärfung des Frostregimes im Vorwinter (Oktober/November).

## 2. Ursachen der Klimaveränderungen

Die bedeutende Erwärmung der Arktis und ihrer Randgebiete in den 20–50er Jahren dieses Jahrhunderts, die durch einen hohen Zonalindex gekennzeichnet ist, hatte ihre Ursache in einer Verlagerung der Polarfront nach Norden sowie in einer Intensivierung der atmosphärischen Zirkulation, ausgelöst durch ein im Mittel bei etwa 70°N gelegenes Druckdefizit und einen Drucküberschuß bei 30–40°N (vgl. SCHERHAG 1936, KIRCH 1970). Die Folge davon war im Mittel der Jahre ein verstärktes Vordringen warmer Tropikluft weit nach Norden. Seit den 50er Jahren werden die Strömungsverhältnisse durch einen niedrigen Zonalindex gekennzeichnet (vgl. RODEWALD 1958); meridionale Strömungskomponenten dominieren. Die Polarfront ist nach Süden verschoben und in der europäischen Subarktis häufen sich Kaltluftvorstöße aus der Arktis. Für das besonders kalte Jahr 1967 beispielsweise, dessen Wärmebilanzsumme z. B. an der Station Grímsstadir um 962°C unter dem Normalwert bleibt, ergibt die Auswertung der Strömungsverhältnisse im 500-mb-Niveau an 42% der Tage eine Vorherrschaft von Meridionalzirkulation und an 28% der Tage eine Dominanz von Zonalzirkulation (an 30% der Tage herrscht Mischzirkulation). Insgesamt hat sich gegenüber dem langfristigen Mittel (1881–1950) der Anteil der Tage mit Meridionalzirkulation pro Jahr seit 1961 im Durchschnitt um 4% erhöht, der Anteil der Tage mit Zonalzirkulation um 9% verringert.

Mit diesen Bemerkungen werden allerdings die primären Ursachen dieser Zirkulationsveränderungen nicht berührt. Diese sind, wie insbesondere BUDYKO (1978) aufzeigt, Veränderungen der direkten Sonnenstrahlung von 1–2% sowie damit auch der Globalstrahlung.

Speziell für den subpolaren Raum Islands ist außer der primären Ursache strahlungsbedingter Zirkulationsveränderungen für die dargelegten thermischen Veränderungen auch das Verhalten des polaren Drifteises von Bedeutung, das sich in Abhängigkeit von bestimmten Wetterlagen bis vor die Küsten Islands ausbreitet und somit das Witterungsgeschehen beeinflusst (vgl. MEINARDUS 1908, BJÖRNSSON 1969 u. a.). Seit 1965 häuft sich das Auftreten von Drifteis vor der Nord- und Ost-Küste Islands (vgl. SIGTRYGGSSON

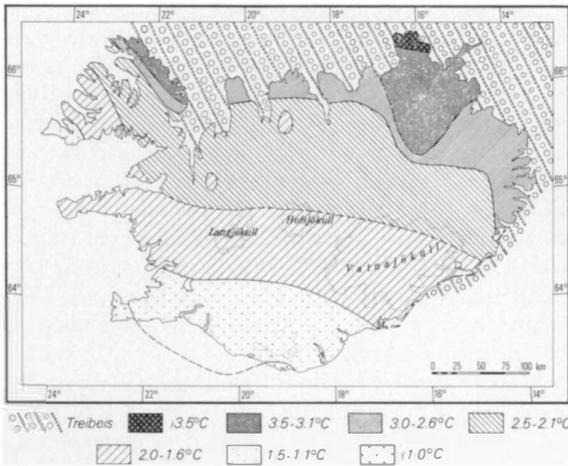


Abb. 6: Karte der Treibeisverbreitung und Temperatur-Isanormalen Islands für die Monate März/Juni 1968

Map of the range of Greenland drift-ice and the anomalous lines of the air temperature of Iceland for the season March/June 1968

1972). Derartige Eisblockaden tragen je nach ihrem Ausmaß zu einer Temperaturdepression bei. Aus jüngster Zeit läßt sich dieser Sachverhalt besonders deutlich für das schwere Treibeisjahr 1967/68 demonstrieren (vgl. SIGURDSSON 1969). Im Gefolge der bis zur Süd-Küste reichenden Treibeisblockade der Nord- und Ost-Küste Islands während der Monate März bis Juni 1968 ergab sich eine auffallende negative Anomalie der Mitteltemperaturen, die im unmittelbaren Einflußbereich des Treibeises in Nord- und Ost-Island bis über  $-3,5^{\circ}\text{C}$  ausmachte und im entfernteren südwestlichen Teil Islands noch eine Größenordnung von  $-0,9^{\circ}\text{C}$  hatte (Abb. 6). Hieraus resultieren zum Teil beträchtliche Auswirkungen für die thermischen Parameter (Tab. 2):

Während die Wärmesumme des Jahres 1968 an den vier untersuchten Stationen gegenüber dem mittleren Wert der Periode 1961–1975 keine signifikanten Abweichungen zu erkennen gibt, ist die jährliche Kältesumme 1967/1968 nicht nur erheblich höher als die der Normalperiode, sondern zugleich, an allen Stationen übereinstimmend, auch beträchtlich größer als die der Periode 1961–1975. Die Erhöhung der Kältesumme im Gefolge des Drifteisvorstoßes bis nach Island führt zu einer beträchtlichen Verstärkung der Frostintensität (Tab. 2).

Die erhebliche Verschärfung des Frostregimes im Jahre 1967/1968 führt des weiteren zu einer markanten Zunahme der Frosttage, besonders an der unter unmittelbarem Treibeiseinfluß stehenden Inselstation Grimsey (Tab. 2). Durch die Zunahme der Frosttage werden die frostfreien Zeiträume innerhalb der Frostperiode kürzer. Zugleich rücken die Häufigkeitsmaxima der Frostwechseltage im Vorwinter und Vorsommer auseinander, d. h. das Frostregime nimmt mehr arktisch-kontinentalen Charakter an.

Im übrigen erfährt in Analogie zum Frostregime Islands auch das Frostklima der gleichfalls unter polarem Drifteiseinfluß stehenden ost-grönländischen Station Angmagssalik im Jahr 1967/1968 eine überproportionale Zunahme der Kältesumme und Verstärkung der Frostintensität. Auch hier bekommt das Frostregime des starken Treibeisjahres 1967/1968 insgesamt mehr arktisch-kontinentale Züge.

Aus den dargelegten überproportional großen Veränderungen der frostklimatischen Parameter folgt, daß die Treibeisbedeckung der subpolaren Meere eine erhebliche Verschärfung des Frostregimes auslösen kann. Anhand einer Analyse der Großwetterlagen des betrachteten Zeitraumes zeigt sich, daß diese besonders starke Verschärfung des Frostregimes einerseits aus einer unmittelbaren thermischen Beeinflussung der aus nördlichen Richtungen herangeführten Luftmassen

	Abweichung vom Normalwert 1931 – 60 (in Klammern: Abweichung vom Mittelwert 1961 – 75 in %)									
	Mittel – tempera – tur März/Juni	Wärme – summe	Kälte – summe (Jahr)	Kälte – summe (Winter)	Kälte – summe (Vor – sommer)	Frostin – tensität (Jahr)	Frostin – tensität (Winter)	Frostin – tensität (Vor – sommer)	Eistage	Frostwech – seltage
Grimsey	- 3,4°C	- 286°C (91%)	- 491°C (184%)	- 331°C (179%)	- 121°C (276%)	- 1,9°C (135%)	- 2,3°C (134%)	- 2,1°C (158%)	+ 57 (167%)	+ 16 (92%)
Grimsstadir	- 3,0°C	- 160°C (104%)	- 625°C (145%)	- 409°C (143%)	- 123°C (212%)	- 2,5°C (124%)	- 3,0°C (126%)	- 3,1°C (159%)	+ 29 (128%)	- 6 (84%)
Vestmannaeyjar	- 1,1°C	- 65°C (103%)	- 144°C (132%)	- 73°C (138%)	- 13°C (233%)	- 1,1°C (120%)	- 1,0°C (120%)	- 4,8°C (333%)	+ 6 (126%)	+ 16 (120%)
Stykkishólmur	- 1,7°C	- 142°C (100%)	- 235°C (145%)	- 182°C (147%)	- 26°C (180%)	- 0,7°C (102%)	- 1,4°C (121%)	- 0,6°C (100%)	- 4 (107%)	+ 51 (145%)

Tab. 2: Die Abweichung thermischer Parameter während des Treibeisjahres 1967/68 gegenüber dem Normalwert (1931–1960) für ausgewählte Stationen Islands [in ( ): die Relation zum Mittelwert der Periode 1961–1975 (= 100%/o)]

The deviations of thermic parameters during the ice year 1967/68 in comparison to the 30 year norms (1931–1960) of selected Icelandic stations [ in ( ): the relation to the average of the period 1961–1975 (= 100%/o)]

durch die dichte Treibeisdecke herrührt. Zum anderen zieht die Treibeisdecke ein südwärtiges Vordringen der Polarfront und damit den Zustrom kalter Polarluftmassen nach sich. Damit besteht zwischen der strahlungsbedingten Intensivierung der Meridionalzirkulation und dem Vordringen von polarem Drifteis in den subarktischen Bereich ein Rückkoppelungseffekt, der nicht nur thermische, sondern auch zirkulationsdynamische Auswirkungen hat.

### 3. Auswirkungen der Klimaveränderungen

Die dargelegte aktuelle Verschärfung des Frostregimes bei gleichzeitiger Verringerung der Wärmesumme bleibt wegen ihres direkten und indirekten Einflusses auf die marinen und terrestrischen ökologischen Ressourcen für den wirtschaftenden Menschen am Polarrand der Ökumene nicht ohne Bedeutung. Direkte Auswirkungen, wie sie sich zum Beispiel aus den klimatisch bedingten Veränderungen des Drifteisganges ergeben, liegen auf der Hand: Große Treibeishäufigkeit und -dichte behindern den Seeverkehr und Fischfang. Die wichtigeren Folgen der Temperaturveränderungen betreffen aber den Landschafts- und Meereshaushalt. Hier sollen die terrestrischen Ressourcen im Blickfeld stehen, nämlich das agrarische und hydrologische Nutzungspotential.

Die Landnutzung Islands beruht heute wie in historischer Zeit vorwiegend auf Viehwirtschaft (1975: 860 000 Schafe, 61 000 Rinder, 46 000 Pferde). Diese wird mit sommerlicher Fernweide im Hochland und winterlicher Stallfütterung betrieben. Die Futtergewinnung für die Stallfütterung erfolgt auf Hauswiesen. Von der rund 103 000 km<sup>2</sup> umfassenden Fläche Islands ist gegenwärtig nur eine Fläche von rund 20 000 km<sup>2</sup> einigermaßen geschlossen von Vegetation bedeckt. Davon werden rund 1100 km<sup>2</sup> als Hauswiesen genutzt. Damit wird deutlich, daß das Potential der Landnutzung als neben den Wasserenergie-Ressourcen nahezu einzige terrestrische Nutzungsmöglichkeit Islands relativ gering ist. Direkte und indirekte Beeinträchtigungen dieses Potentials erlangen also auf Island ein ganz anderes ökonomisches Gewicht als im subarktischen Nordamerika oder Nordeurasien, wo zudem noch andere Ressourcen zur Verfügung stehen.

Eine direkte Beeinträchtigung der Landnutzung ergibt sich aus dem Rückgang der Grasproduktion bei Minderung der Wärmesumme (vgl. FRIDRIKSSON 1972). Auch das Kartoffelwachstum wird durch die Abnahme der Wärmesumme verringert (vgl. MALMSTRÖM 1960). Schon zu normalen Zeiten bereitet die Kartoffelkultur wegen der Kürze der frostfreien Vegetationszeit Probleme. Mit einem Rückgang der Wärmesumme und einer Ausweitung der Frostperiode wächst das Risiko der Mißernte: Ein verzögertes Auftauen des Bodenfrostes bedingt eine verzögerte Feldbestellung. Damit rückt die Reifezeit weiter in den Risikobereich vorzeitiger Nachtfröste im August. Durch das Absterben

der Blätter bei frühzeitigem Frost entstehen deshalb Nachteile, weil zu dieser Zeit eine Knollenbildung erst in geringem Umfang stattgefunden hat. So gab es beispielsweise während der besonders kalten Jahre 1966–1970 einen auffälligen Rückgang der Kartoffelernte, der vor allem aus durch vorzeitige Nachtfröste im August bedingten Mißernten resultiert. Dies war besonders im Jahr 1966 der Fall, in dem der Ertrag nur 3500 t ausmachte, gegenüber einer mittleren Jahresernte 1966–1970 von 6000 t (vgl. SIGGEIRSSON 1977).

Die indirekten Auswirkungen, die sich aus der Temperaturdepression für die Landnutzung Islands ergeben, beruhen im wesentlichen auf einer Ausweitung und Intensivierung der Bodenfrostdynamik. Abgesehen davon, daß eine verlängerte Andauer des Bodenfrostes, wie oben ausgeführt, den Anbau der Kartoffel verzögert, sind es vor allem die Auswirkungen der kryopedogenen Morphodynamik, die neben ihrer Bedeutung für die geomorphologische Abtragung und Formung nicht unerhebliche Auswirkungen für die Landnutzung haben.

Zwar lassen sich die aktuellen Veränderungen des Bodenfrostregimes aus Mangel an in die wärmeren Klimaphasen zurückreichenden Bodentemperaturmessungen nicht wie etwa die dargelegten Veränderungen des Luftfrostregimes quantitativ erfassen, aber immerhin können anhand der 1965 einsetzenden Bodentemperaturregistrierungen in Reykjavik-Sólland Veränderungen des Tiefganges, der Häufigkeit der Frostwechsel und der Andauer der Bodengefrorenis festgestellt werden. So hat sich beispielsweise in der Frostperiode 1967/1968 in allen Bodentiefen die Anzahl der Frostwechsel je nach Bodentiefe um 16–53% erhöht, vor allem in den oberen Bodenpartien. Zugleich gibt es gegenüber dem Normalzustand eine Ausdehnung der Bodenfrostperiode um 2–3 Wochen bis in den Mai hinein.

Die Auswirkungen der Bodenfrostdynamik im Tiefland werden eindrucksvoll dokumentiert durch große jährliche Frosthebungsbeträge von maximal 29 cm in schluffigem Feinmaterial mit geschlossener Vegetationsdecke (vgl. SIGURDSSON 1967). Dabei kann sich die Bodenhebung und -senkung relativ rasch vollziehen: Die Hebung pro 24 Stunden beträgt bis zu 2,5 cm, die Senkung pro 24 Stunden bis zu 5,5 cm. Es bedarf nicht der weiteren Erläuterung, daß derartige frostdynamische Bodenbewegungen im besonders frostempfindlichen schluffigen Feinmaterial der isländischen Móhella, die auf der Insel eine weite Verbreitung besitzt und die wichtigste pedologische Grundlage der Landnutzung abgibt, nicht nur Folgen für die kryopedogene Morphodynamik, sondern auch negative Auswirkungen für die Vegetationsdecke hat. Hinzu kommt die vermehrte Bildung von Nadeleis, die zu einer oberflächlichen Auflockerung des Substrates und zu einer Vegetationszerstörung führt, die Boden und Vegetation in verstärktem Ausmaß der Deflation aussetzt.

Von den Frostbodenformen Islands sind vor allem die Büldenböden (Thufur) und die Erscheinungen des Permafrostbodens für die Landnutzung relevant. Beide geben Auswirkungen der aktuellen Verschärfung des Frostregimes zu erkennen.

Der in seiner Verbreitung auf das Hochland begrenzte Permafrostboden ist für die Landnutzung Islands deshalb von Bedeutung, weil sein Verhalten den Zustand der Weidegebiete im Hochland beeinflussen kann: Das Hochland Islands hat nämlich aufgrund der hochgradigen Wasserdurchlässigkeit seiner Substrate weithin wüstenhaften Charakter. Vegetations- und Weideareale sind häufig an die Existenz von wasserstauendem Permafrostboden im Untergrund gebunden.

Im Gefolge der durch die allgemeine Temperaturdepression ausgelösten Verschärfung des Frostregimes kommt es im isländischen Hochland gegenwärtig zu einer Neu- bzw. Weiterbildung von Frostspaltenmakropolygonen sowie verstärkt zu frostdynamischen Beschädigungen der den inselhaften Permafrostboden thermisch-isolierenden Vegetationsdecke und damit zu einer durch das Zusammenwirken von kryopedogener, gelideflatorischer und thermo-erosiver Morphodynamik bedingten Degradation des Permafrostbodens. Dabei bilden sich häufig geschlossene Thermo-karsthohlformen im Permafrostboden, in denen sich Wasser ansammelt und die dann in aller Regel an markanten Degradationskliffs durch die fortschreitende Thermo-Erosion des stagnierenden Wassers erweitert werden, woraus langfristig ein völliger Zerfall des Permafrostbodens resultiert.

Auf der anderen Seite führt die Verschärfung des Frostregimes seit Mitte der 60er Jahre zu einer Neu- bzw. Weiterbildung von Permafrostboden. Während sich die flächenhafte Neubildung von Permafrostboden meist nicht oberflächlich formenbildend bemerkbar macht und daher nur schwer ohne größeren technischen Aufwand zu erfassen ist, tritt die punkthafte Permafrostbodenaggradation in Gestalt von Palsas bereichsweise prägnant in Erscheinung.

Wie die Analyse der aktuellen Verschärfung des Frostregimes ergab, führt diese im Vorwinter zu einer besonders großen Erhöhung der Kältesumme und Verstärkung der Frostintensität. Da im Vorwinter dem Boden Zentral-Islands eine thermisch-isolierende geschlossene Schneedecke größerer Mächtigkeit häufig noch fehlt, kann sich diese Verschärfung des vorwinterlichen Frostregimes aufgrund größerer Eindringtiefen und Eindringgeschwindigkeiten des Bodenfrostes im Sinne einer Verstärkung der Bodenfrostdynamik auswirken. Es sind dies Voraussetzungen, die in Sumpf- und Mooregebieten die Anlage von Palsas begünstigen. Insgesamt wurden rund 1200 Palsas aktuellen Alters im isländischen Hochland erfaßt und kartiert.

Der Palsa-Entstehung liegt teils die Bildung von Segregationseis, teils auch die Bildung von Massiveis zugrunde. Die in solchen Massiveiskörpern häufig an-

zutreffenden stabförmigen Lufteinschlüsse sind zusammen mit dem stabförmigen Habitus der hexagonalen Bodeneiskristalle Indizien dafür, daß sich die Eisbildung sehr rasch vollzogen haben muß (vgl. SCHUMSKI 1957, 107). Sofern durch die Bodenaufwölbung im Gefolge dieser punkthaften Permafrostbodenbildung nicht die thermisch-isolierende Vegetationsdecke stark beschädigt wird und somit aufgrund des dadurch ermöglichten Zutrittes von Luft und Wasser mit dem Wachstum der Permafrostbodenkörper gleichzeitig ihr Zerfall eingeleitet wird, begünstigt die festgestellte Abnahme der sommerlichen Wärmesumme die Erhaltung der neugebildeten Permafrostbodenformen.

Daß es sich bei den angesprochenen Permafrostbodenformen, die eine Höhe von 1–2 m erreichen, um aktuelle Neubildungen handelt, ergibt sich aus folgenden Belegen: 1. Wie unmittelbare Beobachtungen zeigen, erfolgt die Neubildung zum Teil an solchen Lokalitäten, an denen es vorher keine derartigen Permafrostbodenkörper gab. Für einige dieser Plätze läßt sich zudem nachweisen, daß die zu Beginn dieses Jahrhunderts dort existenten Palsas während der warmen 20–50er Jahre weitgehend degradierten.

2. Die Permafrostbodenbildung läßt sich anhand des Tritium-Gehaltes des Bodeneises datieren. Zur Probenentnahme wurde der Permafrostboden aufgesägt, um die Eisproben aus dem vom aktuellen Grund- und Niederschlagswasser unbeeinflussten Permafrostbodenkern zu entnehmen. Derartige Datierungen wurden für 25 verschiedene Permafrostbodenareale durchgeführt<sup>\*)</sup>. Sie erbrachten, daß die Permafrostbodenneubildung der Gegenwart im wesentlichen nach Beginn der 60er Jahre eingesetzt hat.

3. Pflanzensoziologische und pollenanalytische Befunde erlauben eine Unterscheidung von subrezentem und rezentem Palsas. So weist die Torfhülle der rezenten Palsas unmittelbar nach ihrer Heraushebung über den Grundwasserspiegel zunächst noch die abgestorbene ursprüngliche hygrophile Vegetation auf; eine den neuen Standortbedingungen angepaßte xerophile Vegetation hat sich noch nicht eingestellt. Des weiteren stimmt der Pollenbestand in der Palsahülle rezenter Permafrostbodenkörper mit demjenigen des umgebenden Sumpfgebietes qualitativ und quantitativ überein: Er weist einen dominanten Nichtgehölzpollen-Bestand (Gramineen, Cyperaceen, Caryophyllaceen u. a.) von 85–95% und einen geringen Gehölzpollen-Anteil (Salix, Betula, Ericaceen) von 5–15% auf. An den älteren Formen sowie an den konvergenten Kryokarstkluppen unterscheidet sich der Pollenbestand der Palsahülle deutlich von dem der sumpfigen Umgebung: Der Pollenbestand der Palsahülle enthält hier einen Ge-

<sup>\*)</sup> Die <sup>3</sup>H-Datierungen wurden dankenswerterweise vom Isotopen-Labor des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (Leitung: Prof. Dr. M. A. Geyh) vorgenommen.

hölzpollen-Anteil von 25–60% und einen Nichtgehölzpollen-Anteil von 40–75%, womit er sich signifikant von der Pollenzusammensetzung der sumpfigen Umgebung abhebt, in der die Nichtgehölzpollen mit einem Anteil von 85–95% vorherrschen. Insgesamt wurden 60 Pollenproben von 30 verschiedenen Palsavorkommen untersucht. Eine Kontrolle dieser Untersuchungsergebnisse ist dadurch gegeben, daß das aktuelle oder subrezente Alter einiger pollenanalytisch untersuchter Palsavorkommen auch anhand des  $^3\text{H}$ -Gehaltes bestimmt wurde.

Die Thufur als zweite agrarisch relevante Frostbodenerscheinung Islands beeinträchtigen die Bodennutzung deshalb, weil sie erstens schon durch ihre Natur als buckeliges Mikrelief die Grasnutzung der Hauswiesen in großem Stile mindern und weil sie zweitens häufig zu einer Schädigung der Vegetationsdecke führen. Die bis zu 80 cm hohen Erdbülten sind Bildungen der Bodenfrostdynamik. Und zwar entstehen sie, wie sich aus der beulenförmigen Anordnung von Tephrahändern in ihrem schluffigem Substrat ablesen läßt, durch seitlichen kryostatischen Druck, wie er bei ungleichmäßigem Eindringen des Frostes in den Boden auftritt (vgl. SCHUNKE 1977). Das rezente Alter von Erdbülten ist aus unmittelbarer Beobachtung an solchen Hauswiesen bekannt, auf denen sich nach einer mechanischen Beseitigung der Thufur zum Zwecke der Grasnutzung nach 30–60 Jahren die Erdbülten erneut eingestellt haben. Außerdem ergibt sich das rezente Alter von Erdbülten auch aus dem rezenten Alter von den in die Bültbildung einbegriffenen Tephralagen. Zwar lassen sich quantitative Aussagen über die aktuelle Neu- und Weiterbildung von Thufur nicht machen, jedoch geht man wohl nicht fehl in der Annahme, daß mit der aktuellen Intensivierung der Bodenfrostdynamik auch eine verstärkte Neubildung der Erdbülten einhergeht.

Im Zuge der durch die verstärkte Frostintensität vermehrten kryodynamischen Bodenbeanspruchung kommt es häufig zu einem Aufplatzen der Erdbülten sowie auch des ebenen Bodens, was sich oberflächlich zum einen durch kleine Barflecken und zum anderen durch Frostrisse bemerkbar macht. Aufgrabungen zeigen, daß diese kryodynamisch induzierten Barflecken auf einem verstärkten Aufdringen von Feinmaterial beruhen. Auf den Barflecken kann dann die Bildung von bis zu rund 10 cm hohem Nadeleis Platz greifen. Das Nadeleis hebt Bodenpartikel und Vegetationsteile empor und ermöglicht durch diese Bodenauflockerung und Vegetationszerstörung dem Wind eine verstärkte abtragende Wirksamkeit. Dabei kommt es zur Ausbildung von kleinen Rasenkliffs, an deren nackten Stirnseiten sich gleichfalls Nadeleis einstellen und unterminierend wirksam werden kann. Diese frostdynamisch induzierte Bodenerosion stellt ein vieldiskutiertes aktuelles Umweltproblem Islands dar (vgl. THORARINSSON 1962, SIGBJARNARSON 1969, PREUSSER 1974, GUDBERGSSON 1975). Bemerkenswerterweise fallen säku-

lare Phasen verstärkter Deflation mit langfristigen Perioden verschärften Frostklimas zusammen, so etwa mit der spätmittelalterlichen Kälteperiode des 13.–15. Jahrhunderts und mit der Kälteperiode des 16.–19. Jahrhunderts. Allerdings haben in diesen Zeiträumen auch Vulkanausbrüche stattgefunden, die durch vegetationszerstörende Aschenproduktion gleichfalls die Deflation begünstigten. Schließlich ist an der Initiierung der Bodenerosion auch anthropogene Einflüsse beteiligt.

Außer durch die dargelegten bodenfrostdynamischen Vorgänge die Bodennutzung, beeinträchtigt die aktuelle Temperaturerniedrigung auch das zweite große Nutzungspotential der erneuerbaren Naturressourcen Islands, das fluviale Wasserenergieservoir. Anders als die Minderung der Bodennutzung durch die verstärkte Bodenfrostdynamik läßt sich die Minderung des Wasserenergiepotentials quantifizieren. Ohne hier auf Einzelheiten des Wasserhaushaltes eingehen zu können, sei am Beispiel des nord-isländischen Flusses Blandá (Länge: 125 km), der für eine Nutzung der Wasserkraft vorgesehen ist, die ermittelte Beziehung zwischen jährlicher Abflußhöhe bzw. Abflußmenge und jährlicher Wärme-, Kälte- und Wärmebilanzsumme kurz aufgezeigt.

Die Blandá (mittlere Abflußhöhe: 798 mm; mittlere Abflußmenge: 1349 Gl = 1,35 km<sup>3</sup>), deren Einzugsgebiet (2370 km<sup>2</sup>) zu über 95% im Hochland mit ET-Klima liegt und die vorwiegend aus Gletscherwasser und Oberflächenabfluß gespeist wird, zeigt eine signifikante Abhängigkeit der jährlichen Abflußhöhe von der jährlichen Wärme-, Kälte- und Wärmebilanzsumme, repräsentiert durch die oben dargelegten Werte der Hochlandstation Grimsstadir (Abb. 7). Gegenüber der relativ warmen Periode 1951–1960 hat sich die mittlere jährliche Abflußhöhe der Blandá während der kalten Periode 1966–1975 von 843 mm auf 756 mm verringert, also um durchschnittlich 87 mm (= 150 Gl = 0,15 km<sup>3</sup>) abgenommen. Dieser durchschnittliche Rückgang der Wassermenge unter dem Einfluß der aktuellen Temperaturerniedrigung entspricht zum Beispiel fast dem gesamten Fassungsvermögen (181,3 Mio m<sup>3</sup> = 0,18 km<sup>3</sup>) der sechs großen Harztalsperren. Die Differenz zwischen der größten jährlichen Abflußhöhe (1953: 1094 mm = 1,85 km<sup>3</sup>) und der geringsten jährlichen Abflußhöhe (1966: 632 mm = 1,07 km<sup>3</sup>) beträgt sogar 462 mm (= 0,78 km<sup>3</sup>) – eine Minderung der jährlichen Abflußmenge, die dem 4fachen Fassungsvermögen der Harztalsperren gleichkommt.

Ganz entsprechend geht mit der Erniedrigung der jährlichen Wärmebilanzsumme auch an anderen Flußsystemen Islands eine signifikante Verringerung der jährlichen Abflußhöhe einher. Es liegt auf der Hand, daß thermisch bedingte Veränderungen hydrologischer Parameter in der skizzierten Größenordnung von Bedeutung für die Nutzungspraxis sind.

Insgesamt trägt die aktuelle Temperaturerniedrigung über die dargelegten frostdynamischen Prozesse außer

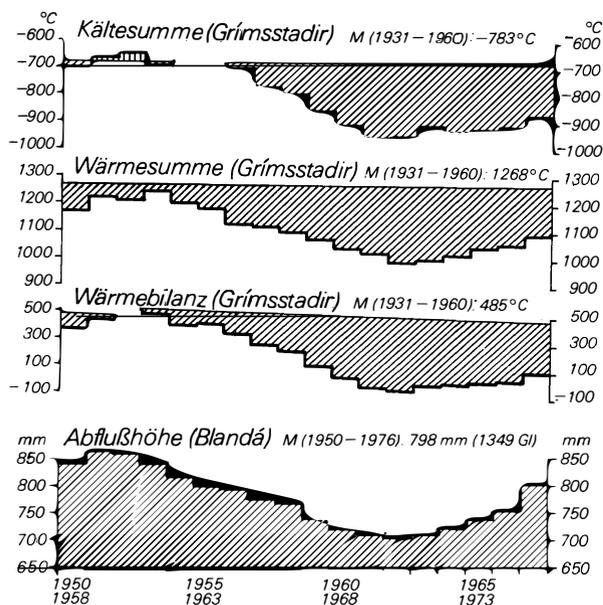


Abb. 7: Gang der jährlichen Kältesumme, Wärmesumme und Wärmebilanzsumme von Grímsstadir (NE-Island, 384 m ü. M.) und Gang der jährlichen Abflußhöhe des nord-isländischen Flusses Blandá seit 1958 (9jährig übergreifende Mittelwerte)

Trends of the annual degree days below 0° C, the annual degree days above 0° C, and the annual heat balance at Grímsstadir (NE-Iceland, 384 m. a.s.l.) in comparison to the annual mean discharge level (in mm.) of the river Blandá (N-Iceland) since 1958 (9-year running means)

durch ihren direkten Einfluß auf das pflanzliche Nutzungspotential entscheidend zu einer Labilisierung des Landschaftshaushaltes und einer Minderung des energetisch nutzbaren fluvialen Wasserpotentials bei. Bei dieser Labilität des geökologischen Gleichgewichtes führt die anhaltende extensive Beweidung weitester Bereiche des Vegetationsareales besonders rasch zu negativen Folgen in Form einer drastischen Minderung des Vegetationspotentials.

Literatur

BJÖRNSSON, H.: Sea Ice Conditions and the Atmospheric Circulation North of Iceland. *Jökull*, 19, S. 11-17, Reykjavik 1969.  
 BUDYKO, M. I.: The Heat Balance of the Earth. In: Climatic Change (hrsg. v. J. Gribbin), S. 85-113, Cambridge 1978.

DEGE, W.: Die Westküste Grönlands. Bevölkerung, Wirtschaft und Siedlung im Strukturwandel. *Dt. Geogr. Blätter*, 50, S. 5-212, Bremen 1965.  
 FRIDRIKSSON, S.: Grass and Grass Utilization in Iceland. *Ecology*, 53, S. 785-796, Durham 1972.  
 GUDBERGSSON, G.: Myndun móajardvegs í Skagafirdi (engl. Zus.: Soil Formation in Skagafjörður, Northern Iceland). *Íslenskar Landbúnadarrannsóknir*, 7, S.20-45, Reykjavik 1975.  
 KIRCH, D.: Klimaschwankungen in der Arktis. *Meteorol. Abh.*, 110, 4, 53 S., Berlin 1970.  
 MALMSTRÖM, V. H.: Influence of the Arctic Front on the Climate and Crops of Iceland. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 50, S. 117-122, Washington 1960.  
 MEINARDUS, W.: Zu den Beziehungen zwischen den Eisverhältnissen bei Island und der nordatlantischen Zirkulation. *Ann. d. Hydrogr. u. maritim. Meteorol.*, 36, S. 318-319, Berlin 1908.  
 PREUSSER, H.: Die Deflation in Island. *Deutsch-Isländisches Jahrb.*, 7, S. 32-48, Köln 1974.  
 RODEWALD, M.: Stand und Perspektiven der jetzigen Klimaschwankung. *Verhandl. Dt. Geogr. Tg.*, 31, S. 215-221, Wiesbaden 1958.  
 SCHERHAG, R.: Die Zunahme der atmosphärischen Zirkulation in den letzten 25 Jahren. *Ann. d. Hydrogr. u. maritim. Meteorol.*, 64, S. 397-407, Berlin 1936.  
 SCHUMSKI, P. A.: Principes de glaciologie structurale. *Ann. Centre Études et Documentation Paléontologiques*, 22, 309 S., Paris 1957.  
 SCHUNKE, E.: Zur Ökologie der Thufur Islands. *Ber. a. d. Forschungsstelle Nedri Ás*, 26, 69 S., Hveragerdi (Island) 1977.  
 SIGBJARNARSON, G.: Áfok og úppblástur (engl. Zus.: The Loessial Soil Formation and Soil Erosion on Haukadalsheidi). *Náttúrufræðingurinn*, 39, S. 68-118, Reykjavik 1969.  
 SIGGEIRSSON, E.: Phytopathologische Probleme des Kartoffelanbaues unter den speziellen Bedingungen in Island. *Rev. hort. Diss.*, 111 S., Hannover 1977.  
 SIGTRYGGSSON, H.: An Outline of Sea Ice Conditions in the Vicinity of Iceland. *Jökull*, 22, S. 1-11, Reykjavik 1972.  
 SIGURDSSON, F. H.: Frostlyfting jarðvegs í Fossvogi. *Vedrid*, 12, S. 48-50, Reykjavik 1967.  
 - : Report on Sea Ice of the Icelandic Coasts, October 1967 to September 1968. *Jökull*, 19, S. 77-92, Reykjavik 1969.  
 THORARINSSON, S.: L'érosion éolienne en Islande à la lumière des études téphrochronologiques. *Rev. Géomorph. Dyn.*, 13, S. 107-124, Paris 1962.