

Glazial- und Periglazialuntersuchungen im Skíadadalur, Tröllaskagi (N-Island)

Von H.-N. Müller, J. Stötter, A. Schubert und A. Betzler*

Zusammenfassung: Im Bestreben, Landschaftsforschung in einem umfassenden Rahmen klimageschichtlicher Betrachtung zu betreiben und die Grundlagen für einen Vergleich mit den Alpen zu schaffen, wurden im Tröllaskagi-Gebirge (N-Island) glazial- und periglazialmorphologische Untersuchungen durchgeführt. Das Gebiet weist eine beträchtliche, von den großen Eisschilden auch im Spätglazial unabhängige Vergletscherung auf. Durch die Morphologie und Vegetation lassen sich Gletschervorfelder neuzeitlicher Hochstände (Schneegrenze auf 960 m bis 990 m über NN) deutlich abgrenzen. Vier weitere, mehrgliedrige Gletscherstadien können im Gebirgsinneren erfaßt werden. Ihre Schneegrenzendepressionen (zwischen 70 m und 440 m) weisen im Vergleich mit den Alpen Werte spätglazialer Größenordnung auf. Eine Verbindung zu den bisher bekannten beiden Spätglazialstadien Islands (Álftanes und Búdi-Hólkot) kann vorläufig nicht hergestellt werden. Im Vorgelände des Gljúfurárfjökull durchgeführte Untersuchungen an Thúfur bestätigen einerseits die aus anderen Gebieten Islands bekannten Formen, ermöglichen aber andererseits aufgrund von Tephrahorizonten weiterführende Aussagen. Der als H₅ (Vulkanascheauswurf der Hekla) erkannte unterste Horizont zeigt, daß seit mindestens 6 500 Jahren das Gebiet eisfrei liegt. Die Gletscher schwanken somit seither im Bereich neuzeitlicher Erstreckung. Die bis maximal H₄ erfaßten Kryoturbastrukturalen belegen die später einsetzende Permafrosttätigkeit und geben ein Maximalalter (3 800 Jahre) für die Entstehung der Thúfur. Eine Holzlage aus einem Moor im Haupttal ergab durch die C14-Datierung, daß dort vor 4 400 Jahren ein Birkenwald wuchs.

Summary: In the Tröllaskagi area (N-Iceland) both glacial and periglacial environments were intensively investigated in order to make a fundamental comparison with the results of research on Alpine climatic history.

The recent glaciers (snow-line at 960 m—990 m above sea level) of the Tröllaskagi area were already independent of the large ice caps of Central and S-Iceland during the late glacial period. From an analysis of the morphology and vegetation the proglacial areas can be sharply outlined. The lowering of the equilibrium line (between 70 m and 440 m) during four glacial stadials are equivalent to the Alpine advances of the late glacial period. To date these results cannot be connected with the two well-known late glacial advances in Iceland (Álftanes and Búdi-Hólkot).

The investigations of earth hummocks in the valleys of the Gljúfurá and Skíadadalsá show results similar to other regions of Iceland. Furthermore, the tephra layers allow interpretations concerning climatic history. The base horizon, which is recognized as H₅ (Hekla Volcano) shows that the area has been ice-free for at least 6500 years. Within this period the size of the glaciers has been similar to recent times. The structures of cryoturbation, extending to H₄ (3800 BP), give a maximum age for the beginning of permafrost activities and the genesis of the earth hummocks.

A layer of wood found in a fen in the main valley showed the existence of a forest of birch-trees 4400 years ago.

1. EINFÜHRUNG

1.1 Thema, Methodik

In der vergleichenden Hochgebirgsforschung gewinnen Untersuchungen zur Klimageschichte zunehmend an Bedeutung. Im Hinblick auf Langzeitprognosen und als Grundlage für die Abschätzung von Klimamodellen sind diese Forschungen im Zusammenhang möglicher und befürchteter, anthropogener bedingter, Klimaänderungen von besonderem aktuellen Interesse.

Aussagen zur Klimageschichte werden durch Untersuchungen von Landschaftselementen ermöglicht, die sich unter wechselnden klimatischen Bedingungen verändern. Vermehrt wurden in letzter Zeit Gletscher und Vegetation — und Zeugen und Spuren ihrer früheren Verbreitung — unter diesem Gesichtspunkt erforscht. Die glazialmorphologischen und palynologischen Ergebnisse sind vor allem dann aussagekräftig, wenn durch interdisziplinäre Zusammenarbeit mit verschiedenen Methoden unabhängige Teilergebnisse zusammengefügt und Veränderungen und Entwicklungen über weite Zeiträume sichtbar werden.

Weitere klimageschichtliche Hinweise können durch Untersuchungen des periglaziären Formenschatzes gewonnen werden. Diese sind besonders dort aufschlußreich, wo durch das Vorkommen von Vulkanasche-Horizonten tephrochronologische Datierungsmöglichkeiten bestehen.

*DDr. Hans-Niklaus Müller, Institut für Geographie der Universität, Innrain 52, A-6020 Innsbruck.

Dipl.-Geogr. Johann Stötter und Dipl.-Geogr. Angelika Betzler, Institut für Geographie der Universität, Luisenstr. 37, 8000 München 22.

Dipl.-Geogr. Alfred Schubert, Lehrstuhl für Bodenkunde der Universität, Amalienstr. 52, 8000 München 40.

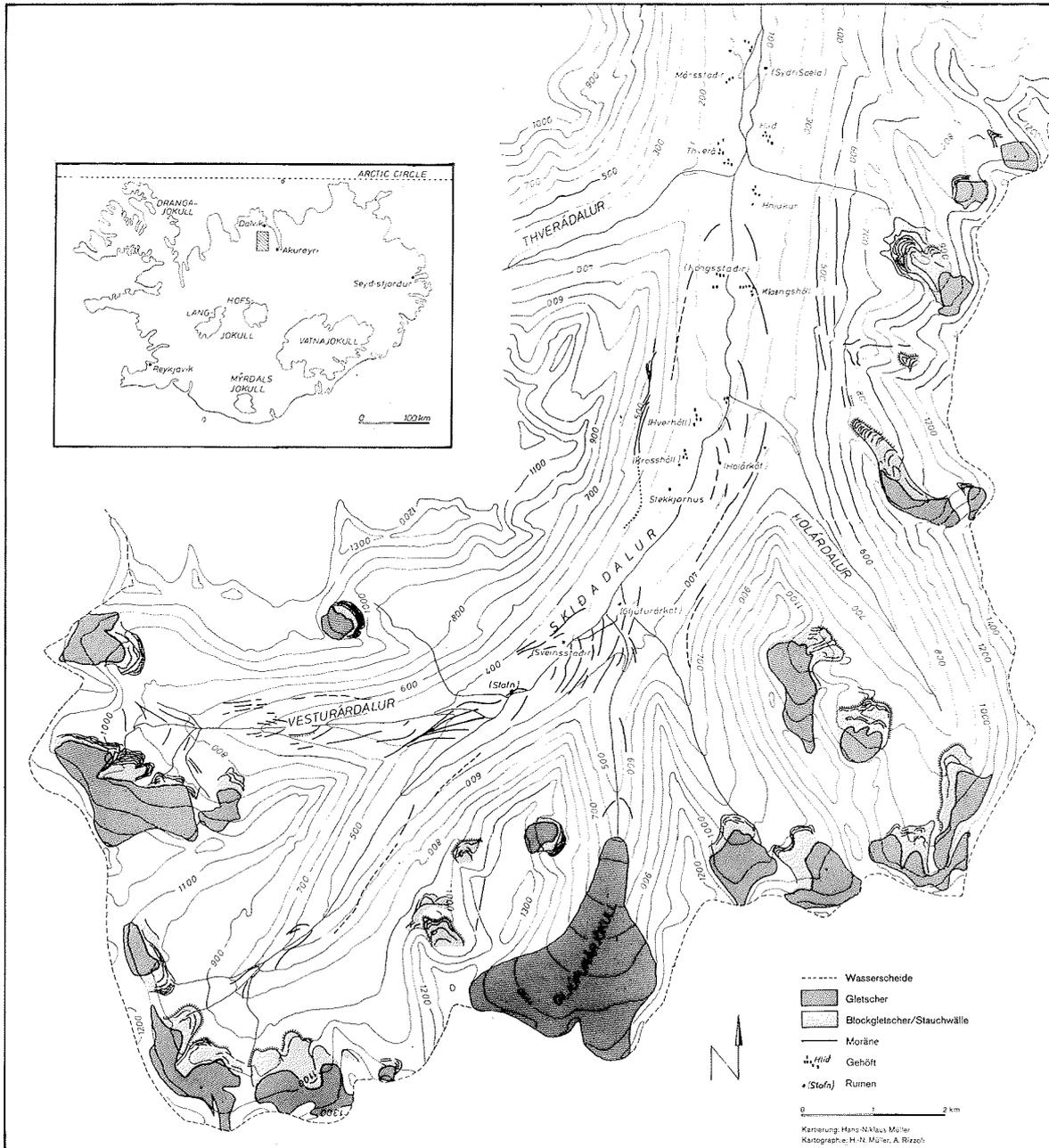


Abb. 1: Moränen und Blockgletscher, Skidadalur (N-Island).

Fig. 1: Moraines and blockstreams, Skidadalur (N-Iceland).

Nachdem mit neuen Untersuchungen und einheitlichen Methoden gezeigt werden konnte, daß mindestens für die Zeit des Spätglazials die Gletscherschwankungen und die vegetationsgeschichtliche Entwicklung in den Ostalpen (PATZELT 1972, PATZELT & BORTENSCHLAGER 1978) mit jenen der Westalpen vergleichbar sind (MÜLLER et al. 1980, 1983, MÜLLER 1982), interessierte als Grundlage für einen Vergleich der klimageschichtliche Verlauf in einem außeralpinen Gebiet.

Das dazu ausgewählte Island steht durch seine ozeanische und nordische Lage unter klimatischen Einflüssen, die sich von den Alpen beträchtlich unterscheiden. Da die orographischen Gegebenheiten im Norden der Insel in ihrer Hochgebirgsnatur aber durchaus alpinen Charakter aufweisen, bestehen dennoch gute Vergleichsmöglichkeiten.

Unsere Untersuchungen im Skíðadalur (Tröllaskagi-Gebirge) befaßten sich mit dem glaziären und periglaziären Formenschatz und aktuellen Vegetationsaufnahmen. Durch die Kartierung von Gletscherrandablagerungen sollte die Rekonstruktion ehemaliger Gletscherausehnungen angestrebt und die Grundlage für Schneegrenz-Berechnungen gelegt werden. Mit bodenstratigraphischen Profiluntersuchungen an Thúfur und in Moorgräben wurde in erster Linie die zeitliche Komponente anvisiert, wobei besondere Bedeutung den tephrochronologischen Leithorizonten zukommt. Einerseits sollten also Hinweise auf Gletscherschwankungen, andererseits Anhaltspunkte für deren zeitliche Einstufung gewonnen werden.

Der vorliegende Bericht behandelt die im Juli 1982 durchgeführten Geländearbeiten und bisher erfolgten Auswertungen. Die Untersuchungen sollen später in erweitertem Rahmen fortgesetzt werden.

1.2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in dem nordwestlich von Akureyri gelegenen Skíðadalur, einem Seitental des bei Dalvík in das Meer mündenden Svarfardalur (Abb. 1, Nebenkarte). Zum Haupttal stößt mit dem Thverárdalur aus westlicher Richtung ein weiteres großes Seitental. Svarfadar- und Thverárdalur wurden vorläufig nicht in die Untersuchungen einbezogen. Das Arbeitsgebiet blieb auf den oberen Talbereich des Skíðadalur (Abb. 1) eingeschränkt, der sich hinter dem Zusammenfluß mit dem Thverárdalur (auf 150 m) in fünf Äste aufgliedert. Zum Haupttal, das über einer auf 900 m gelegenen Felsstufe mit einer zwischen 1 200 m bis 1 300 m aufragenden Kammumrahmung endet, münden bei Stafn aus Westen das Vesturárdalur (Abb. 2) und als Hängetäler zwischen Sveinsstadir und Klaengshóll aus Süden das Gljúfurárdalur (Abb. 3) sowie aus Südosten ein namenloses Tal und das Holárdalur. Mehrere kleine Kare liegen an beiden Hauptflanken. Das Untersuchungsgebiet bedeckt eine Fläche von rund 120 km².

Den geologischen Untergrund bilden tertiäre Plateau-Basalte. Sie sind aus dünnen Lavadecken aufgebaut und liegen nahezu horizontal. Gegenüber der vorherrschenden physikalischen Verwitterung sind sie nicht sehr widerstandsfähig. Die niederen Temperaturen hemmen die chemische und biologische Bodenbildung. Die Bindigkeit der Mineralböden ist durch eine kleine Tonkomponente gering (THORARINSSON 1967). Die große mechanische Abtragung einerseits und die hohe Anfälligkeit gegen Winderosion andererseits wirkten sich somit nachhaltig auf die Oberflächengestaltung aus.

Das Klima kann als subarktisch-kühlgemäßigt-ozeanisch mit hohen Niederschlägen, kühlen Sommern und relativ milden Wintern charakterisiert werden. An der dem Untersuchungsgebiet benachbarten Wetterstation von Akureyri beträgt die Temperatur im Jahresmittel 3,9° C (1931 bis 1960), die mittlere Niederschlagsmenge 474 mm. Diese Werte können jedoch nur bedingt für das Arbeitsgebiet übernommen werden. Im besonderen muß mit wesentlich höheren Niederschlägen gerechnet werden: 1 600 mm bis 2 400 mm jährlich (EYTHORSSON & SIGTRYGGSSON 1971).

Im Gegensatz zu den großen Eisschilden im Süden der Insel blieben die kleinen Gletscher alpinen Typs im Tröllaskagi-Gebirge bis in neueste Zeit unbeachtet. Erst mit dem Nordisländischen Gletscherinventar (ESCRITT 1974) und einigen englischen Expeditionen setzten in diesem Gebiet glaziologische und geomorphologische Untersuchungen ein. Sie beschränkten sich jedoch auf die Gletscherschwankungen der Neuzeit (MÜLLER, im Druck).



Abb. 2: Blick von Gljúfurárkot aus dem Skidadalur in das Vesturárdalur (Richtung WSW).

Fig. 2: View from Gljúfurárkot in Skidadalur into Vesturárdalur (facing WSW).



Abb. 3: Gljúfurárdalur mit Gljúfurárjökull und Thúfur im Vorgelände (Blickrichtung S).

Fig. 3: Gljúfurárdalur with Gljúfurárjökull and earth hummocks (thúfur) in front (facing S).

Obwohl Untersuchungen zur eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Gletschergeschichte fehlen, nimmt SCHWARZBACH (1955) an, daß es in diesem Gebirge vereinzelt lokale Vergletscherungen gab. EINARSSON (1961) ist der Auffassung, daß der größte Teil des Gebietes während der letzten Eiszeit eisfrei war.

Demgegenüber sind Veränderungen der Vegetationszusammensetzung in Nordisland über die letzten 8 000 Jahre bekannt. Durch Pollenanalysen an Moorprofilen (THORARINSSON 1955, STRAKA 1956, EINARSSON 1961) wurde vor allem die Ausbreitung der Birke (*Betula pubescens*) und der menschliche Eingriff in frühere Waldbestände aufgezeigt.

2. GLETSCHER UND GLETSCHERSCHWANKUNGEN ISLANDS

Obwohl die heutige Vergletscherung vorwiegend durch die vier großen Eisschilde in der südlichen Inselhälfte geprägt wird, finden sich überdies rund 160 Gletscher in Island. Diese durchwegs temperierten Eiskörper zeigen Übergänge von der kleinen Karvergletscherung über den Talgletscher zum mächtigen Plateaueis. Mit 11 200 km² sind 11% der Landesfläche vereist (THORARINSSON 1981).

Untersuchungen über die früheren Gletscherschwankungen konzentrierten sich auf die aus den Eisschilden abfließenden Gletscherzungen. Ihre Veränderungen während der letzten 250 Jahre stellt THORARINSSON (1943) zusammen. Danach wurden zwei neuzeitliche Haupthochstände um 1750/60 und 1840/50 nachgewiesen.

Zur post- und spätglazialen Entwicklung lieferte EINARSSON (1961) aufgrund pollenanalytischer Untersuchungen eine Zusammenfassung bisheriger Erkenntnisse. Einen Überblick über die Klimageschichte Islands stellte SCHWARZBACH (1955) zusammen. Aufgrund der Inselgröße und des Vulkanismus ist die Erforschung des Pleistozäns erschwert und dessen Gliederung unsicher. Als gesichert gelten drei Eiszeiten mit zwei Interglazialen. Außerdem werden die beiden Stadien Álftanes und Búdi (Südland) — Hólkot (NE-Island) als spätglazial aufgefaßt (EINARSSON 1961, vgl. MÜLLER 1984). Nach einer kartographischen Darstellung von EYTHORSSON (in SCHUTZBACH 1976) steht ihre Ausdehnung nicht in Verbindung zum Tröllaskagi-Gebirge. Fehlende Datierungen und eine systematische Untersuchung verhinderten bisher eine genauere zeitliche Einstufung.

3. GLAZIALMORPHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Außer der für eine Ermittlung früherer Gletscherschwankungen notwendigen vollständigen Kartierung der Gletscherablagerungen wurde auch der gegenwärtige Gletscher- und Teile des Permafrostbereichs in Geländebegehungen und aus Luftbildern erfaßt.

Die aktuelle Vergletscherung im Skíðadalur ist charakterisiert durch zahlreiche kleine Kargletscher und Firnfelder sowie einen Talgletscher. Ihre Lage geht aus Abb. 1 hervor. Vor den in den Karmulden gelegenen Eiskörpern erstrecken sich meist mächtige und in zahlreichen Girlanden ausgebildete Wälle, die über eine steile Front in das Gletschervorfeld übergehen. Bei diesem deformierten Schutt im Permafrostbereich handelt es sich einerseits um Stauchwälle und andererseits um meist aktive Blockgletscher. Die Kargletscher enden in der Regel zwischen 900 m bis 1 100 m. Nur vereinzelt reichen sie bis unter 900 m. Der einzige Talgletscher des Gebietes ist der Gljúfurárjökull. Er umfaßt mit 3,7 km² die größte zusammenhängende Eisfläche und stirnt auf rund 580 m (1982). Sein Vorstoß bezifferte sich von 1979 bis 1981 mit rund 30 m (CASELDINE 1983). Die Vergletscherung im Skíðadalur bedeckt gegenwärtig eine Fläche von 11,5 km².

Die Moränen des Untersuchungsgebietes wurden auf einer Grundkarte im Maßstab 1:25 000 kartiert und

vollständig in die Abb. 1 übernommen. Einzig im Vorfeld des Gljúfurárjökull wurde darauf verzichtet, die zahlreichen neuzeitlichen Wälle einzutragen. Diese von CASELDINE & CULLINGFORD (1981) detailliert kartierten Ablagerungen sind für die vorliegende Untersuchung nicht von Bedeutung.

In jedem Talast liegen zahlreiche Moränen, oft in Gruppen, die einerseits selbständige Gletscherstände in den einzelnen Tälern, andererseits ihre Vereinigung zu einem Eisstrom im Haupttal belegen.

Im Vesturárdalur findet sich eine innerste Wallgruppe zwischen 800 m und 1 000 m, die zwei Gletscherstände darstellt. Eine nächst größere Gletschererstreckung wird durch zahlreiche Moränen deutlich, die im Talgrund fünf Endlagen zwischen 600 m und 500 m erkennen lassen. Während die rechtsufrigen Wälle wenig ausgeprägt und von Hangschuttmaterial teilweise angelagert und überflossen sind, zeigen die linksufrigen Endmoränen eine markante steilgratige Form. Ihre Außenseiten sind gut bewachsen. Auf den Kämmen und den Innenseiten erkennbare Deflationswirkungen verdeutlichen die Hauptwindrichtung. Über dieser Wallgruppe liegen am linken Talhang einige Moränen- und Terrassenreste in drei verschiedenen Niveaus zwischen 700 m und 800 m. Die oberste Ausdehnung läßt sich talauswärts in einer mehrmals unterbrochenen Moräne über rund 1 km zwischen 700 m bis 600 m verfolgen. Auf der rechten Talseite finden sich ebenfalls mehrere Moränen, die von rund 650 m abfallend zwei Gletscherendlagen vor der Einmündung des Haupttales erkennen lassen.

Der Gletscher aus dem Haupttalast hat in diesem Gebiet bis Stafn eine Gruppe — vor allem linksseitiger — Moränen abgelagert, die eine Staffel von fünf Endlagen darstellt. Zwischen den teilweise durch die Entwässerung des Vesturárdalur durchschnittenen Wällen liegen viele Tümpel, kleine Seen und Moore. Auf der rechten Talflanke im hinteren Skíadadalur können Moränenreste in eigentümlicher Form erkannt werden. Durch den Einfluß der Hangentwässerung, die sich in linearen Zügen über den Hang erstreckt, sind die Ufermoränen an ungezählten Stellen durchbrochen und teilweise erodiert worden. Dadurch sind nur mehr Reststücke der ehemaligen Gletscherablagerungen vorhanden. Durch Verbindung ihrer Oberkanten kann der ursprüngliche Verlauf der Moränen jedoch gut erkannt werden (Abb. 4). Sie sind zwischen 450 m bis 750 m in einem unteren Teilstück über fast 900 m und in einem oberen Abschnitt über 1,5 km erfaßbar. Dazwischen zeigen zwei größere abtauchende, endnahe Ufermoränenstücke eine kleinere Zungenlage an, die bis auf rund 390 m gereicht haben dürfte. Im Talhintergrund bilden markante, jeweils beidseitige Moränen zwei Gletscherstände ab, die auf 550 m und 700 m endeten.

Außerhalb von Stafn vereinigten sich die beiden Eismassen aus Vesturár- und Skíadadalur und lagerten zwischen Sveinsstadir und Gljúfurárkot eine ausgedehnte Moränengruppe ab, die eine Staffel von sieben Zungenlagen aufzeigt. Die an der Stufenmündung des Gljúfurárdalur gelegenen Wälle sind relativ breit und an ihren Kämmen teilweise winderodiert.

Aus dem Hängetal des Gljúfurárjökull belegen Moränen in der Steilstufe einerseits einen selbständigen Stand, andererseits ein Zusammenfließen mit dem Haupttalgletscher. Eine jüngere Gletschererstreckung über der Steilstufe wird durch eine rechtsseitige, teilweise erodierte und überflossene Moräne markiert. Innerhalb dieser Zungenlagen erfolgten die Thúfur-Grabungen. Die beiden Endmoränen vor dem Gletscher grenzen seine neuzeitlichen Ausdehnungen ab und bilden eine auffällige Vegetationsgrenze. Während sich außerhalb dieser Wälle eine geschlossene Vegetationsdecke ausbreitet, konnten sich innerhalb bisher nur Pionierpflanzen festsetzen. Es ist gerechtfertigt, hier das Gletschervorfeld abzugrenzen.

Östlich von Gljúfurárkot können zwei, zum Teil bruchstückhaft erhaltene, rechtsseitige Moränen auf 500 m bis 600 m lokalisiert werden, die einen Eiszufluß aus dem namenlosen — zwischen Gljúfurár- und Holárdalur — gelegenen Tälchen belegen.

Außerhalb von Gljúfurárkot finden sich im Haupttal bis zur Mündung in das Thverárdalur sowohl an den Talflanken wie im Talboden zahlreiche Moränen. Eine Staffel nicht sehr gut erhaltener Wälle läßt sich in eine größere zweiteilige und in eine drei- bis vierteilige kleinere Gruppe gliedern. Keiner dieser



Abb. 4: Durch Hangentwässerung vertikal zerschnittene Ufermoräne im Skidadalur.

Fig. 4: Lateral moraine in Skidadalur vertically cut by surface water.

Wälle zieht über weite Strecken, sondern wird von zahlreichen Rinnen der Hangentwässerung mehrfach unterbrochen. Die verbleibenden Buckel tragen als Folge der Windwirkung teilweise keine Vegetationsbedeckung. Einzig der zweitäußerste Wall ist markant ausgebildet und führt von Klaengshóll — nach einer Unterbrechung, die in Form einer leichten Erhebung mit dahinterliegender Verflachung dennoch als deutliche Linie im Gelände erkennbar ist — bis südlich Holárkot. Dort ist der Wall als Ganzes aus seiner ursprünglichen Lage abgerutscht.

Das gleiche Phänomen läßt sich noch viel ausgeprägter auf der linken Talseite (westlich Stekkjarhus) erkennen. In Form einer Girlande ist der südliche Teil einer auf rund 500 m (westlich Hverhóll) gelegenen Moränengruppe teilweise bis zum Hangfuß abgeglitten. Diese Wälle stellen eine Gletscherausdehnung sicher, die erst im Thverárdalur geendet hat. Ein Ansteigen talauswärts und eine Ausbuchtung hangwärts, verbunden mit einer Aufteilung in mehrere Wälle, setzt dort ein, wo auf der gegenüberliegenden Talseite das östliche Seitental Holárdalur zum Haupttal stößt. Die Wälle sind über fast 2 km verfolgbar und gehen gegen Norden in Hangverflachungen über, die die ursprüngliche Moränenlage anzeigen.

Auf der rechten Talseite findet sich in entsprechender Höhenlage über Klaengshóll eine Gruppe talaus ziehender Wälle. Durch ihre Lage zeigen sie für diese außerhalb des Untersuchungsgebietes endenden Gletscherstände Zuflüsse aus Holár- und Thverárdalur auf.

Anhand der kartierten Moränenlagen (Abb. 1), die hier beschrieben wurden, lassen sich aufgrund räumlicher und morphologischer Zusammenhänge und mit Hilfe der Konstruktion von Zungenlängsprofilen die ehemaligen Ausdehnungen der Eismassen rekonstruieren. Die ermittelte Gliederung ergibt eine Abfolge von fünf Stadien (Abb. 5).

In ihrer größten Ausdehnung innerhalb des Untersuchungsgebietes vereinigten sich die Gletscher aus den

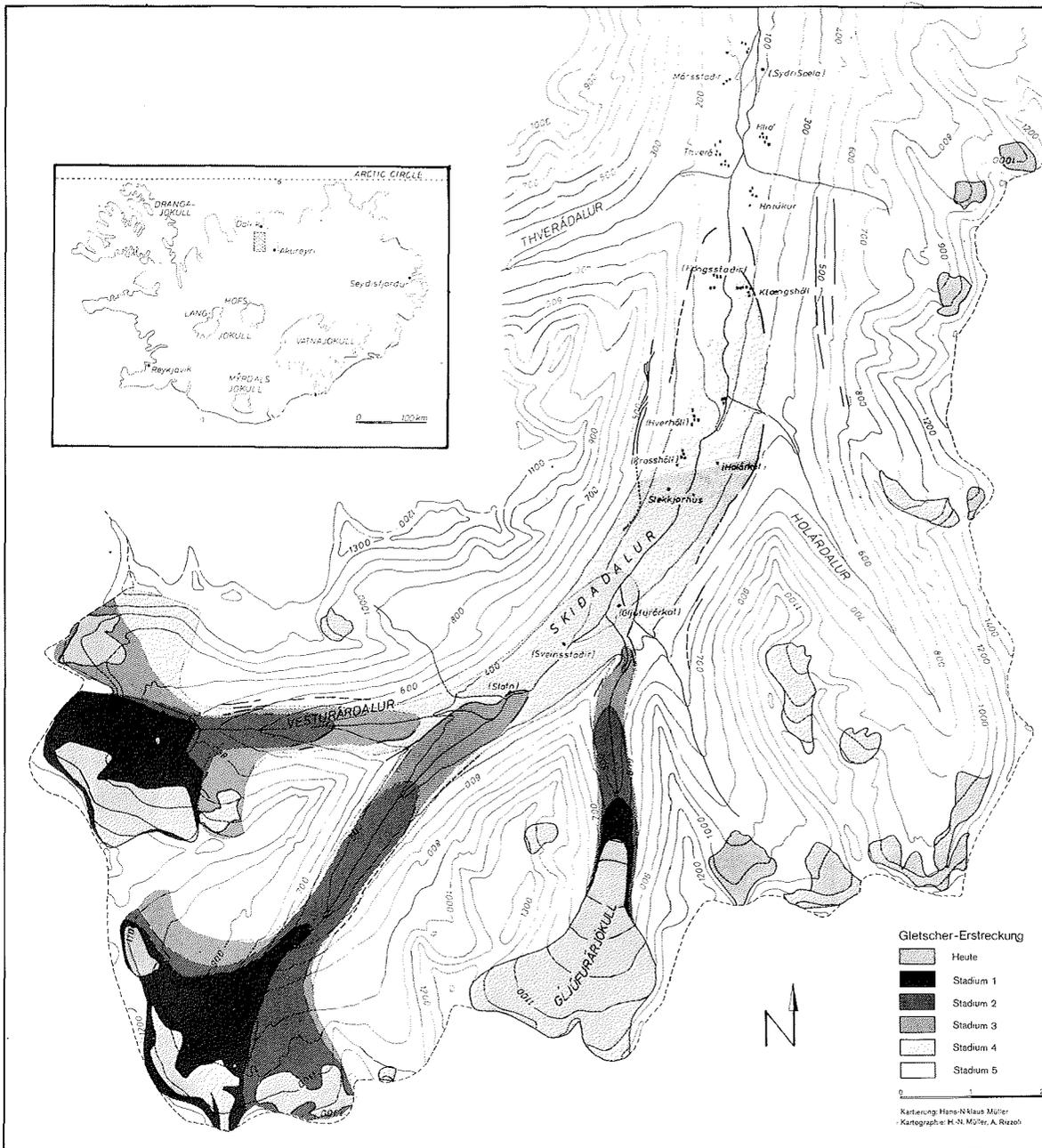


Abb. 5: Spätglaziale Vergletscherung, Skíðadalur (N-Island).

Fig. 5: Lateglacial glacierisation, Skíðadalur (N-Iceland).

drei westlichen Talästen zu einem zusammenhängenden Eisstrom bis Kóngsstadir (Stadium „5“). Noch während des nächst kleineren Stadiums flossen die drei Eismassen zusammen und bildeten eine gemeinsame Gletscherzunge bei Gljúfurárkot (Stadium „4“). Zur Zeit des nächstjüngeren Vorstoßes blieben die drei Gletscher selbständige Eiskörper und erfüllten jeweils ihre Talabschnitte bis zur Mündung bei Stafn bzw. Sveinsstadir (Stadium „3“). Der spätere, erneute Vorstoß blieb davon deutlich abgesetzt, erreichte aber doch eine nahezu gleiche Größenordnung (Stadium „2“). Außerhalb der gegenwärtigen Vergletscherung kann jeweils im Talhintergrund eine von den Stadien „2“ bis „5“ deutlich abgesetzte Randlage erfaßt werden (Stadium „1“). Sie begrenzt das Gletschervorfeld und wird damit als neuzzeitlicher Hochstand betrachtet. Zu welchem Zeitpunkt dieser erfolgte, kann vorläufig nicht festgelegt werden. Hinweise für die Alter der außerhalb davon gelegenen Ablagerungen ergeben sich einerseits aus den bodenstratigraphischen Untersuchungen, andererseits aus den Schneegrenz-Berechnungen.

Ihre Bestimmung erfolgte mit der Flächenteilungsmethode $S_c : S_a = 2 : 1$. Als Bezugsniveau für die Schneegrenz-Depressionen der Stadien „2“ und „3“ konnten die Schneegrenzwerte der neuzzeitlichen Hochstände (Gljúfurár- 960 m, Skídadals- 962 m, Vesturárjökull 990 m) verwendet werden. Daraus ergab sich für die Stadien „4“ und „5“ ein neuzzeitliches Bezugsniveau von 971 m. Die Schneegrenzen der einzelnen Stadien der drei Gletscher liegen in vergleichbarer Größenordnung (Tab. 1). Nur der Wert Vesturárjökull-Stadium „3“ fällt aus dem Rahmen. Berücksichtigt man aber, daß die Gleichgewichtslinie dieser Eisbedeckung in die Steilstufe zu liegen kommt, wird diese — projektionsbedingte — Verfälschung verständlich. Ein Wert um 840 m bei einer Schneegrenz-Depression von 150 m würde den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen.

Die ermittelten Schneegrenz-Depressionen der einzelnen Gletscherstadien im Skídadalur liegen in einer Größenordnung, die in den Alpen für spätglaziale Stadiale üblich ist (GROSS et al. 1977, MÜLLER et al. 1980).

4. PERIGLAZIALMORPHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Vielfältig sind die im Arbeitsgebiet auftretenden periglazialen Formen. Außer den bereits angesprochenen Großformen (Blockgletscher und Stauchwälle) finden sich zahlreiche kleinere Bildungen.

Die unterschiedlichen Erscheinungsformen der Bodenmusterung und -sortierung reichen von Steinpolygonen und -streifen über Feinerdeinseln und -streifen bis zu Thúfur und strangmoorartigen Formen. Erdströme (Fließerden), Wanderblöcke und Rasentreppen mit Girlandenböden belegen Bodenfließprozesse.

Die das Landschaftsbild eindeutig beherrschende Form — im Bereich unterhalb der Frostschuttstufe — sind die Thúfur, auf deren Beobachtung und Untersuchung das Hauptaugenmerk gelegt wurde. Um Aussagen über Regelmäßigkeiten ihrer Verbreitung und Genese im Untersuchungsgebiet treffen zu können, wurden fünf Areale ausgewählt, die hinsichtlich Lage und erfaßter Parameter einen repräsentativen Querschnitt darstellen (Abb. 6): Areal 1 = ebene Tallage, im Hängetal nahe der Grenze zum Gletschervorfeld, 460 m über NN, NE-Exposition; Areal 2 = leicht geneigte Unterhanglage im Hängetal, 450 m über NN, E-Exposition; Areal 3 = ausgesetzte Lage auf der rückenartigen Hängetalschulter, 435 m über NN, NE-Exposition; Areal 4 = geneigte mittlere Hanglage im Haupttal, 360 m über NN, NNW-

Gletscher	Schneegrenzen					Schneegrenz-Depressionen				
	1	2	3	4	5	2	3	4	5	
Gljúfurárjökull	960	888	821			72	139			
Skídadalsjökull	962	886	810	739	532	76	152	232	439	
Vesturárjökull	990	914	884			76	106			

Tab. 1: Gletscherstadien „1“ bis „5“ im Skídadalur: Höhenlage der Gleichgewichtslinien (Schneegrenzen $S_c : S_a = 2 : 1$) und ihre Depressionen (in m).

Tab. 1: Glacial stadials "1" to "5" in Skídadalur: altitude of equilibrium lines (snow lines $AAR = 0,6$) and their depressions (in meters).

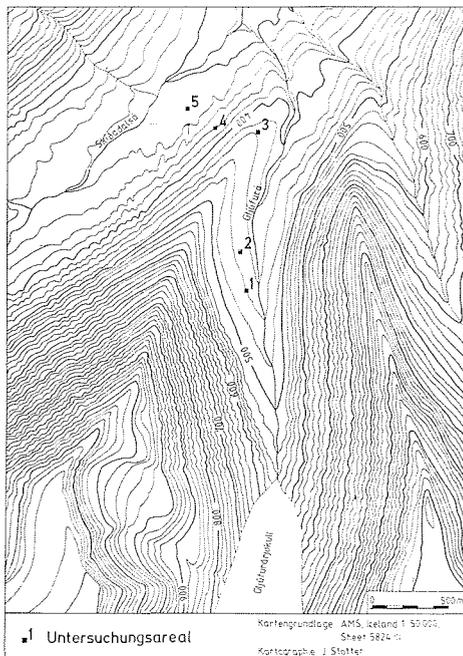


Abb. 6: Lage der Untersuchungsareale 1–5 im Gljúfurárdalur.

Fig. 6: Location of study areas 1–5 in Gljúfurárdalur.

Exposition; Areal 5 = Tallage im Lee eines kleinen Hügels im Haupttal, 305 m über NN, E-Exposition.

Innerhalb der einzelnen Areale erfolgte die Untersuchung der Thúfur in Abhängigkeit der Höhe ihrer Aufwölbung und ihrer Form. Ausgehend von einer elliptischen Grundform wurden folgende Lage- und Formparameter aufgenommen: Länge (große Achse) a , Breite (kleine Achse) b , Höhe (im Mittelpunkt) h , Neigung der großen Achse α , Neigung der kleinen Achse β , Exposition der großen Achse (Azimutwinkel) γ .

Außerdem diente das Vegetationsbild (Gesellschaft, Bedeckungsgrad) als Unterscheidungs- und gleichzeitig als Auswahlkriterium der Untersuchungen.

Weitere wichtige Merkmale ergaben sich aus den bis zu einem basalen Horizont aus Hangschutt- oder Moränenmaterial gegrabenen Profilen. Ihre Ansprache erfolgte nach den Parametern Farbe, Dichte, Bodenart, Bodenfeuchte, Durchwurzelung. Von ausgewählten Schichten wurden Proben entnommen und später im Labor (AAS-Analyse der Schwermetalle) untersucht.

In Anlehnung an die Terminologie nach SCHUNKE (1977a) treten folgende Thúfurformen auf: Die dominierende Form bilden die kuppelförmigen Thúfur, die größtenteils dicht vergesellschaftet auftreten (Abb. 7). Sie erreichen an Standorten optimaler Bildungs- und Erhaltungsbedingungen eine Höhe von 50 cm bis 60 cm (z. B. in den Arealen 1, 2 und 5). Als ein Sonderfall sind die wallförmigen Thúfur zu bezeichnen, deren Vorkommen hier an die steileren Hangbereiche gebunden ist (Areal 4 ist hierfür eine repräsentative Fläche). Die Höhe dieser in ihrer Längsachse weitgehend hangparallelen Formen beträgt etwa 25 cm bis 30 cm. Neben diesen Klimaxformen treten alle möglichen Generationsstufen auf. Auffallend und gleichermaßen bezeichnend ist die Standortabhängigkeit ihres Vorkommens von der Feuchte. Während die schildförmigen, embryonalen Thúfur an überdurchschnittlich feuchte Stellen — wie moorige oder sumpfige Zonen — gebunden sind, können bereits kuppelförmige Thúfur an verhältnismäßig trockenen Stellen gefunden werden (z. B. exponierte Stellung im Areal 3).

Die Vegetationsbedeckung umfaßt die Pflanzengesellschaften der Schneeböden (mit Spalier-Weide — vorwiegend *Salix herbacea* — und Moosen) und der Thúfur (Zwergstrauchheide mit dominierenden *Anthoxantum odoratum*, *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium myrtillus*, *Loiseleuria procumbens*, *Empetrum hermaphroditum*, diversen Flechten und Moosen mit Begleitern *Salix herbacea*, *Alchemilla alpina*, *Polygonum viviparum*) mit krautreichen Übergangsstadien. Bei Beweidung dominiert *Nardus stricta*.

Auf exponierten Kuppen, die die Schneedecke zu überragen vermögen, ist die Vegetation vernichtet. Diese windgefehten Thúfurscheitel sind der Erosion besonders ausgesetzt und zeigen Zerfallserscheinungen unterschiedlicher Intensität.



Abb. 7: Thúfur im Gljúfurárdalur (Blickrichtung N).

Fig. 7: Earth hummocks in Gljúfurárdalur (facing N).

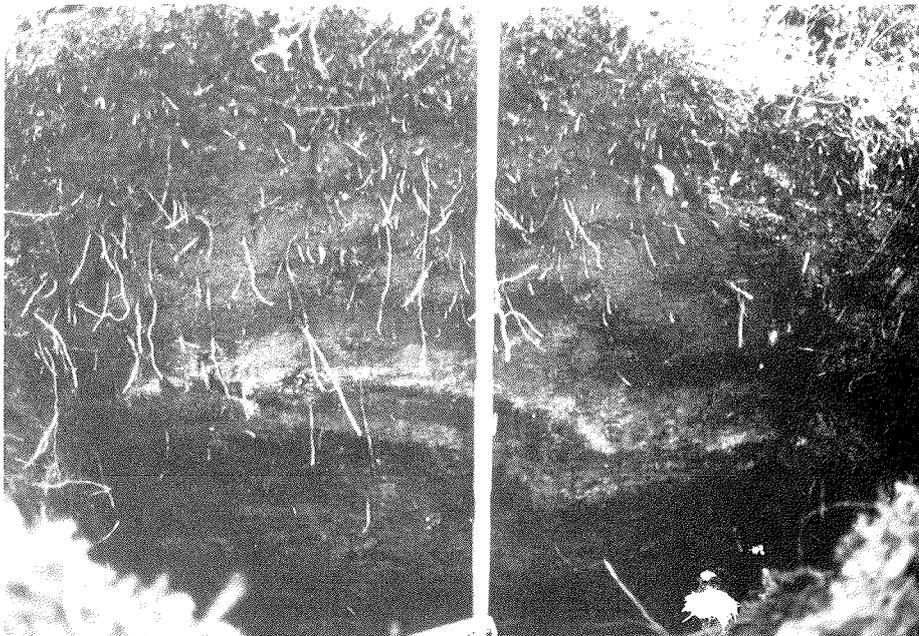


Abb. 8: Thúfur-Aufschluß mit kryoturbierten Tephralagen.

Fig. 8: Profile of an earth hummock with cryoturbated tephra horizons.

Daß die Art des Substrats von entscheidender Bedeutung für das Auftreten von Thúfur ist, zeigen die Bodenprofile. Die Böden mit Thúfurbildung weisen einen höheren Schluff- und Feinsandanteil auf als ungestörte Böden in entsprechender Lage, wobei in den Profilen der kryoturbierte Kern jeweils den höchsten Feinmaterialanteil zeigt. Auf die Bedeutung dieses lößartigen Substrats (isl.: móhella) für den Bodenwasserhaushalt und die spezielle Wirksamkeit des Bodenfrostes weist bereits SCHUNKE (1977a, b) hin.

Der Tonanteil ist sehr gering. Der ebenfalls relativ kleine Steinanteil zeigt sich teilweise in den obersten Schichten angereichert. Ob es sich in diesen Fällen um Lokalerscheinungen — durch einmalige Ab- bzw. Einlagerung einer blockigen Schuttschicht — oder um durch Frosteinflüsse entstandene Anreicherung handelt, kann vorläufig nicht entschieden werden.

Der Anteil der organischen Substanz ist innerhalb der Thúfur höher als in trockenen ungestörten Böden, aber geringer als in feuchten bis nassen Böden. Wie die Sequenzuntersuchungen zeigen, können die durchfeuchteten Böden auch ungestörte Profile aufweisen.

In den Thúfur können Tephrahorizonte erkannt werden (Abb. 8). Diese eingelagerten Schichten sind teilweise faltenartig aufgewölbt, teilweise verwürgt. Dadurch erlauben sie Rückschlüsse auf die Intensität (Eindringtiefe) des Bodenfrostes. Die Untergrenze der verwürgten Schichten ermöglicht, ein Maximalalter der Kryoturbationsprozesse sowie Hinweise auf die Bildungsverhältnisse (im klimageschichtlichen Sinn) zu gewinnen.

Die zeitliche Einordnung der Tephrahorizonte ist durch ein ungestörtes Profil möglich, das zwischen den Arealen 1 und 2 in 460 m über NN (Unterhanglage, ENE-Exposition) gelegen ist. Die Benennung und Zuordnung der verschiedenen Tephralagen, die mit S. Thorarinsson diskutiert und bestätigt wurden, gliedern sich folgendermaßen (Abb. 9): Gut erkennbar sind die ockerfarbenen Tephraschichten H₃ (2720 ± 130 BP), H₄ (3830 ± 120 BP) von Ausbrüchen der Hekla sowie die schwarzbraune Schicht N (~ 5000 BP) unsicherer Herkunft. Der verfestigte Horizont vulkanischen Ursprungs an der Basis konnte H₅ (6400 ± 170 BP) zugeordnet werden (Daten nach THORARINSSON et al. 1960, EINARSSON 1961). Damit wird eine vom Gletscher ungestörte Bodenentwicklung seit mindestens rund 6 500 Jahren belegt.

Die Spuren der Frosteinwirkung innerhalb der Thúfur reichen maximal bis in die Tiefe der Tephralage H₄. Das daraus folgende Maximalalter der Thúfurbildung im Untersuchungsgebiet liegt wohl wesentlich unter 3800 BP.

Neben der visuellen Ansprache scheint auch eine Unterscheidung der einzelnen Tephra- und Bodenhorizonte durch die Ergebnisse der Schwermetallanalyse möglich. Die Untersuchungen hierzu werden weiter geführt.

Die Bildung und Erhaltung der Thúfur ist neben der Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen vor allem als eine Funktion des Komplexes Substrat — Bodenwasser zu sehen. Der Vergleich mit den Lageparametern und deren Einflüssen läßt spezifische, für das Untersuchungsgebiet geltende Aussagen über die Abhängigkeit der Thúfurbildung zu.

Eine eindeutige Abhängigkeit von der Höhe ist im Untersuchungsgebiet nicht feststellbar. In jeder Höhenlage, in der Thúfur vorkommen, können alle Formen auftreten. Die Obergrenze ist nicht höhen- sondern substratbedingt, da das zur Thúfurbildung nötige Feinmaterial über 450 m bis 500 m über NN durch gröberes Schutt- und Moränenmaterial abgelöst wird. Die Unterschiede der Thúfur in Größe, Form und Vegetation zwischen den Arealen haben andere Ursachen.

Die Exposition zur Sonne (Einstrahlung) hat im Untersuchungsgebiet anscheinend keine entscheidende Bedeutung für das Auftreten der Thúfur. Eine klare Abhängigkeit ist aber aus der Stellung zu den Hauptwindrichtungen erkennbar. Dies gilt sowohl für die großräumigen als auch die lokalen Windsysteme. Der

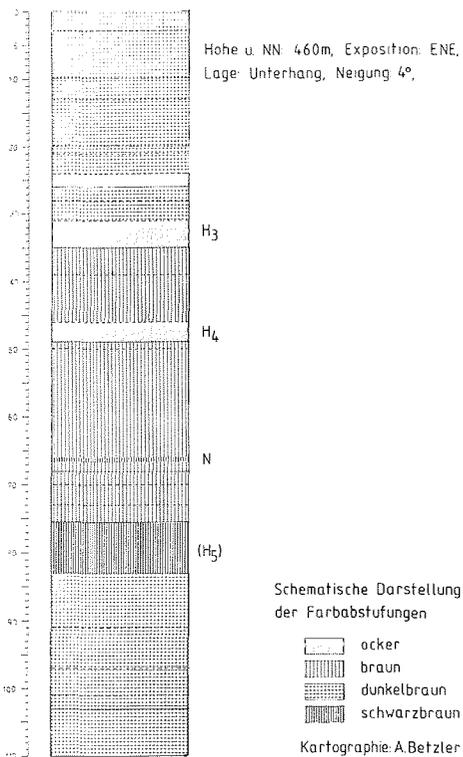


Abb. 9: Ungestörtes Bodenprofil zwischen Areal 1 und 2 (460 m NN) im Gljúfurárdalur.

Fig. 9: Undisturbed soil profile between the areas 1 and 2 (460 m) in Gljúfurárdalur.

Einfluß des Windes ist hierbei in zweifacher Hinsicht bedeutend:

1. Der Wind ist neben dem fließenden Wasser das wichtigste Transportsystem für das zur Thúfurbildung nötige Feinmaterial, das weitgehend aus den vegetationsarmen Gletschervorfeldern stammt.
2. Die schleifende Wirkung des Windes führt an exponierten Stellen zur Zerstörung der Vegetationsdecke und damit der Thúfur. Typische Erscheinungen hierfür treten in Areal 3 auf.

Einfluß auf die Form und Größe der Thúfur hat vor allem die Lage im Relief. Während die relativ ebenen Standorte (Talboden, Unterhang, Schulterlage) die gleichmäßigen, eindeutig ausgebildeten Thúfurformen aufweisen, sind an den steileren Hängen alle möglichen Übergangsformen festzustellen. Die Lage im Relief ist auch für die Feinmaterialmächtigkeit sowie die Situation der Wasserversorgung bedeutend. So weisen die Unterhanglagen die mächtigsten Feinmaterialschichten auf, während die exponierte Schulterlage hier ein Minimum zeigt.

Diese kurze Bestandsaufnahme der Thúfur in einem nordisländischen Tal bestätigt einerseits als reine Periglazialuntersuchung die Ergebnisse an anderen Stellen Islands (FUGE 1978, SCHUNKE 1977a, b, 1981, STINGEL & HERRMANN 1976), läßt aber andererseits in Verknüpfung mit den glazialmorphologischen Forschungen weiterführende Aussagen zu.

5. ZUSAMMENSCHAU: KLIMAGESCHICHTLICHE VERKNÜPFUNGEN

Der morphologische Formenschatz des Untersuchungsgebietes (Moränen, Kare, Trog- und Hängetäler) bezeugt eine glaziale Entstehung, die einer größeren Vergletscherung (Talgletscher und Eisstromnetz) als der heutigen (Tal- und Kargletscher) zuzuordnen ist.

Das durch Moränen belegte Ausmaß ehemaliger Eisrandlagen läßt aufgrund der Berechnung der Schneegrenzdepressionen eine spätglaziale Zeitstellung annehmen. Anhand der aktuellen Vergletscherung ist zu vermuten, daß seit der Eiszeit dauernd mit dem Vorhandensein von Firn- und Eisbedeckungen gerechnet werden kann, wobei vorläufig keine Aussage über die Minimalausdehnung möglich ist.

Die glazialmorphologischen Untersuchungen zeigen somit eine von den Eisschilden im Süden Islands unabhängige Eigenvergletscherung des Tröllaskagi-Gebirges, die in ihrer Art mit jener der Alpen verglichen werden kann.

Die periglazialmorphologischen Untersuchungen konzentrierten sich auf die vergesellschaftet vorkommenden Thúfur. Die gewonnenen Horizontabfolgen umfassen einen beträchtlichen Zeitraum des Postglazials, was durch die erkennbaren eingelagerten Tephralagen belegt wird.

Durch die Verknüpfung der Ergebnisse der glazial- und periglazialmorphologischen sowie tephrochronologischen Untersuchungen läßt sich der Versuch wagen, Aussagen zur Klimageschichte zu machen.

Ein ungestörtes Bodenprofil zeigt, daß seit mindestens 6 500 ($H_5 = 6400 \pm 170$ BP) Jahren der Bereich, in dem heute Thúfur zu finden sind, dem direkten Einfluß des Gletschereises entzogen ist. Die Gletscher schwankten somit zumindest seit dieser Zeit in jener Größenordnung, die dem neuzeitlichen Hochstand entspricht. Die Abgrenzung des Gletschervorfeldes wird damit sowohl durch morphologische Kriterien als auch durch Bodenentwicklung und Vegetationsbedeckung bestätigt.

Die Kryoturbationsspuren in den Thúfur reichen bis in die Tiefe des Horizonts $H_4 (= 3830 \pm 120$ BP). Sie geben somit ein Maximalalter von rund 3 800 Jahren für den Beginn entsprechender periglazialer Prozesse. Es ist jedoch durchaus anzunehmen, daß die Kryoturbationen erst wesentlich später eingesetzt haben, als eine entsprechende Entwicklung der Böden über der Tephraschicht H_4 die für die Thúfurbildung notwendige Vegetationsbedeckung zuließ.

Daß vorher günstigere klimatische Verhältnisse herrschten, belegt der im Moor bei Krosshóll (210 m über NN) gefundene Birkenhorizont, dessen Datierung ein Alter von 4380 ± 40 BP (B-4350) ergab. Das Tal war somit vor rund 4 400 Jahren mindestens an dieser Stelle bewaldet. Das Holz datiert die zweite Birkengroßschwankung, die pollenanalytisch im Moor bei Moldhaugar (EINARSSON 1961) nachgewiesen wurde.

DANK

Wir bedanken uns sehr herzlich

beim National Research Council Iceland für die Forschungsgenehmigung (Projekt 47/1982); bei den weiteren Expeditionsteilnehmern Dr. Marina Dalla Torre, Dr. Angelika Rizzoli, Mechthild Schatz, Manfred Oehm, Gerhard Sailer; für die Kartengrundlagen bei F. Demetz, Reykjavík; für die Vegetationsaufnahmen bei Dr. M. Dalla Torre und deren Verifizierung bei Doz. Dr. G. Grabherr, Institut für Botanik, Universität Innsbruck; für Unterstützung und Diskussion unserer Ergebnisse bei Prof. Dr. Sigurdur Thorarinsson (†), Reykjavík; für die Überlassung des Stekkjarhus bei Hjörtur Thorarinsson, Tjörn; für die Reinzeichnung zweier Karten bei Dr. A. Rizzoli; für chemische Analysen von Tephraproben bei T. Scheper, Institut für Techn. Chemie, Universität Hannover; für die Bestimmung eines Birkenstammes bei Dr. H. Hilscher, Institut für Botanik, Universität Innsbruck, und dessen C14-Datierung bei T. Riesen, Physikalisches Institut, Universität Bern.

Literatur

- Caseldine, C. J. (1983): Resurvey of the margins of Gljúfurárjökull and the chronology of recent deglaciation. — *Jökull* 33: 111–118.
- Caseldine, C. J. & R. A. Cullingford (1981): Recent mapping of Gljúfurárjökull and Gljúfurárdalur. — *Jökull* 31: 11–22.
- Einarsson, T. (1961): Pollenanalytische Untersuchungen zur spät- und postglazialen Klimageschichte Islands. — Sonderveröff. Geol. Inst. Univ. Köln 6: 1–52, Köln.
- Escritt, E. A., Hg. (1974): North Iceland glacier inventory. — Young Explorers Trust, 1–60, o. O.
- Eythorsson, J. & H. Sigtryggsson (1971): The climate and weather of Iceland. — In: S. L. Tuxen, Hg., The zoology of

- Iceland, I (3), 1—62, Copenhagen, Reykjavik.
- F u g e , K. (1978): „Thufur“-Studien zur Verbreitung und Ursache ausgewählter Periglazialformen im „Mývatn“-Gebiet, Nordost-Island. — Unveröff. Staatsexamensarbeit, Hannover.
- G r o s s , G., K e r s c h n e r , H. & G. P a t z e l t (1977): Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. — Z. Gletscherkde. Glazialgeol. 12 (2): 223—251.
- M ü l l e r , H. - N. (1982): Die spätglazialen Stadien von Gondo und Zwischbergen (Simplon, VS). — Vjs. Natf. Ges. Zürich 127/3: 247—255.
- M ü l l e r , H. - N. (1984): Spätglaziale Gletscherschwankungen in den westlichen Schweizer Alpen (Simplon-Süd und Val de Nendaz, Wallis) und im nordisländischen Tröllaskagi-Gebirge (Skidadalur). — 1—205, Näfels.
- M ü l l e r , H. - N. (im Druck): Österreichische Beiträge zur Erforschung der Gletscher Islands. — In: H. Neumann, Hg., Island und das nördliche Eismeer, Hannover.
- M ü l l e r , H. - N., K e r s c h n e r , H. & M. K ü t t e l (1980): Gletscher- und vegetationsgeschichtliche Untersuchung im Val de Nendaz (Wallis) — Ein Beitrag zur alpinen Spätglazialchronologie. — Z. Gletscherkde. Glazialgeol. 16 (1): 61—84.
- M ü l l e r , H. - N., K e r s c h n e r , H. & M. K ü t t e l (1983): The Val de Nendaz (Wallis, Switzerland) — a type locality for the Egesen advance and the Daun advance in the Western Alps. — In: H. Schroeder-Lanz, Hg., Late- and postglacial oscillations of glaciers: Glacial and periglacial forms (Coll. in memoriam H. Kinzl, Trier 1980), 72—82, Rotterdam.
- P a t z e l t , G. (1972): Die spätglazialen Stadien und postglazialen Schwankungen von Ostalpengletschern. — Ber. Dt. Bot. Ges. 85 (1—4): 47—57.
- P a t z e l t , G. & S. B o r t e n s c h l a g e r (1978): Zur Chronologie des Spät- und Postglazials im Ötztal und Inntal (Ostalpen, Tirol). — Führer Exkursionstagung IGCP „Quaternary Glaciations in the Northern Hemisphere 1976“, 185—197, Innsbruck.
- S c h u n k e , E. (1977a): Zur Ökologie der Thufur Islands. — Ber. Forschungsstelle Nedri Ás, Hveragerdi (Island) 26, Hveragerdi.
- S c h u n k e , E. (1977b): Geoökologie der Frostböden auf Island und ihre Bedeutung für die Bodennutzung. — Abh. Braunschweig. Wiss. Ges. 28: 23—51, Braunschweig.
- S c h u n k e , E. (1981): Zur kryogenen Bodendynamik der arktischen Tundren Nordamerikas und Nordeuropas. — Polarforschung 51 (2): 161—174.
- S c h u t z b a c h , W. (1976): Island, Feuerinsel am Polarkreis. — Bonn.
- S c h w a r z b a c h , M. (1955): Allgemeiner Überblick der Klimageschichte Islands. Beiträge zur Klimageschichte Islands I. — N. Jb. Geol. u. Paläo., Monatshefte 5: 97—130.
- S t i n g e l , H. & R. H e r r m a n n (1976): Untersuchungen zum Strukturbodenproblem auf Island — Geländebeobachtungen und statistische Auswertung. — Z. Geomorph. N. F. 20 (2): 205—226.
- S t r a k a , H. (1956): Pollenanalytische Untersuchung eines Moorprofils aus Nord-Island. Beiträge zur Klimageschichte Islands III. — N. Jb. Geol. u. Paläo., Monatshefte 6: 262—272.
- T h o r a r i n s s o n , S. (1943): Oscillations of Icelandic glaciers in the last 250 years. — Geogr. Annaler 25: 1—54.
- T h o r a r i n s s o n , S. (1955): The Nuclea shore line at Húnaflói in the lighth of tephrochronological and radiocarbon datings. — Náttúrufræðingurinn 25: 172—186.
- T h o r a r i n s s o n , S. (1967): Island. — In: A. Sömme, Hg., Die Nordischen Länder, 199—227, Braunschweig.
- T h o r a r i n s s o n , S. (1981): Island. — In: W. Tietze, Hg., Luftbildatlas Nordischer Länder, 60—83, Neumünster.
- T h o r a r i n s s o n , S., E i n a r s s o n , T. & G. K j a r t a n s s o n (1960): On the geology and geomorphology of Iceland. — Congrès international de Géographie, Norden.