

Neue Beobachtungen an arktischen Strukturbodenformen

Peter Abt, Fritz Bachmann, Jürg Bühler, Gerhard Furrer
Geographisches Institut der Universität Zürich

Nach dem Prinzip des Aktualismus liegt der Schlüssel zur Erforschung der Vergangenheit in der Gegenwart. Vergleichende morphologische Untersuchungen in der Frostschuttstufe von Hochgebirgen und der Frostschuttzone der Arktis vermögen Aufschlüsse zu geben, die sich im Hinblick auf die Untersuchung der pleistozänen Landschaften im mitteleuropäischen Bereich verwerten lassen.

Zum Formenschatz der subnivalen Stufe bzw. Zone, denen mitteleuropäische Gebiete entsprechen, die im Pleistozän nicht von Eismassen überdeckt waren, gehören die Strukturbodenformen. Den in jüngerer Zeit veröffentlichten Untersuchungsergebnissen kann entnommen werden, daß sich rezente Formen im alpinen und arktischen Raum in ihren innern Merkmalen weitgehend entsprechen. Eine Untersuchung an fossilen Strukturböden auf jungpleistozänen Schotterflächen im nordostschweizerischen Mittelland führte zur Erkenntnis, daß auch bei ausgegrabenen und damit gesicherten Steinringen und -streifen die gleichen Formmerkmale wiederkehren (Furrer 1966, 1968, 1969; Bachmann 1966). Umgekehrt können diese Merkmale in Aufschlüssen die Identifikation von fossilen Strukturböden, die nicht dreidimensional erfaßbar sind, ermöglichen.

Damit erlangt die Untersuchung von Formmerkmalen der rezenten Strukturböden weitreichende Bedeutung. Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich im allgemeinen mit Steinringen und -polygonen auf dem Plateau von Sverdruphamaren im Westen von Longyearbyen auf Spitzbergen (Furrer 1959, Semmel 1969). Die Strukturbodenformen treten dort recht auffällig in Erscheinung, weil die ocker- bis rostfarbenen angewitterten Gesteinstrümmer (tertiäre Sandsteine in horizontaler Lagerung), welche die Rahmen bilden, sich deutlich von den dunkelolivgrünen bis schwarzen, steinarmen Feinerdezentren abheben.

Im besonderen werden am Beispiel je eines Steinrings und -polygons die Formmerkmale eingehend untersucht.

Wie die Abbildungen 1 und 2 zeigen, bilden diese beiden Formtypen über weite Flächen hin ausgedehnte Steinnetze. Ob es sich bei Ringen und Polygonen genetisch um dieselbe Form handelt, bleibt vorderhand ungeklärt. Abgesehen vom optischen Eindruck lassen sich die beiden Formtypen, von denen je ein Vertreter durch Grabung aufgeschlos-

sen wurde, zunächst morphometrisch auseinanderhalten. Weitere Untersuchungen zielen darauf hin, Übereinstimmungen oder Unterschiede bei den beiden Formtypen festzustellen.

1. Morphometrische Erfassung und quantitative Auswertung

An 100 Steinpolygonen und 40 Steinringen wurden Ende Juli/Anfang August 1970 (also im aufgetauten Zustand, vgl. dazu Jahn 1961, S. 6 f.) morphometrische Messungen durchgeführt (vgl. Abb. 3). Aus den Ergebnissen sind folgende arithmetische Mittel errechnet worden:

	Steinring	Stein-polygon
Durchmesser (je 2 Wertemittel)	348,6 cm	185,1 cm
Rahmenbreite (je 3 Werte)	80,3 cm	22,0 cm
Rahmenhöhe	17,3 cm	3,3 cm
Feinerdedurchmesser (je Form 2 Werte: Fed 1 und Fed 2)	233,3 cm	154,4 cm
Aufwölbung der Feinerde	11,2 cm	3,5 cm
Durchmesserdifférenz (je Form 2 Werte: $D_1 - D_2$)	11,8 cm	20,8 cm
Eckenzahl	—	5,5
Verhältnis D : Rb	4,4	9,0

Diese Ergebnisse zeigen:

- Der Steinring weist gegenüber dem Steinpolygon im allgemeinen einen größeren Durchmesser, größere Rahmenbreite und Rahmenhöhe auf und ist daher als die größere Form anzusehen. Die größere Rahmenbreite läßt auf eine größere Menge an sortiertem Skelett (Steine) schließen.
- Die Aufwölbung der Feinerde ist im Sommer beim Steinring meist deutlicher als beim Polygon.
- In der Regel sind Polygone fünf- bis sechseckig.
- Im Vergleich mit entsprechenden Formen in den Alpen unterscheiden sich die beiden Formtypen im Verhältnis Durchmesser:Rahmenbreite nicht (Furrer 1965, Elsasser 1968):



Abbildung 1. Steinringe auf Sverdruphamaren. Spatenlänge 60 cm

	Alpen	Spitzbergen
Steinring	4,0	4,4
Steinpolygon	9,0	9,0

Beziehung zwischen Rahmenbreite und Rahmenhöhe.

Untersuchungen über die Korrelation zwischen Durchmesser und Rahmenbreite im speziellen zeigen, daß die Variablen der Steinringe bedeutend besser korrelieren als die Polygone:

Generell gilt: Steinringe weisen im Vergleich zum Durchmesser einen breiten, Steinpolygone aber einen schmalen Rahmen auf.

Steinring 0,75, Steinpolygon 0,13

e) Hohe Korrelation weisen auf:

Durchmesser der gesamten Form	Steinring	Steinpolygon
zu Feinerde-Durchmesser	0,95	0,97
Rahmenbreite zu Rahmenhöhe		0,75
Feinerde-Durchmesser zu Rahmenhöhe	0,65	
Durchmesser zu Feinerde-Höhe	0,60	

Bei der Durchführung einer einfachen linearen Regression mit der Abhängigen D und der Unabhängigen Rb wird im Fall der Steinringe 60% der Streuung von D durch die Variable «Rahmenbreite» erklärt. Der Durchmesser läßt sich dabei folgendermaßen berechnen:

$$\text{Steinringdurchmesser} = 48,5 + 3,6 \times \text{Rahmenbreite}$$

Es zeigt sich, daß bei beiden Formtypen der Durchmesser der Form und der Feinerde-Durchmesser die höchste Korrelation aufweisen. Beim Steinring äußert sich außerdem eine Abhängigkeit der Rahmenbreite und in geringerem Maß auch der Feinerde-Höhe vom gesamten Durchmesser. Beim Steinpolygon dagegen besteht lediglich noch eine enge

Wird die gleiche lineare Regression mit den Werten der Steinpolygone durchgeführt, ergibt sich ein weit schlechteres Resultat (erklärte Streuung = rund 2%). Die Abhängigkeit von Rahmenbreite und Durchmesser ist damit für den Steinring gesichert, für das Steinpolygon kann aber keine solche Abhängigkeit festgestellt werden. Dies bedeutet,



Abbildung 2. *Steinpolygone, ein Steinnetz bildend* (Sverdruphamaren). Dunkle Flecken: Vegetation, Maßstab 120 cm. Die von den Steinpolygonen umgrenzte Feinerdefläche ist von feinen, «sekundären» Steinpolygonen gemustert

daß die Rahmenbreite des Steinrings mit dem Durchmesser zu- und abnimmt und damit die Rahmenbreite vom Durchmesser kausal abhängig sein kann. Dies trifft für die Rahmenbreite des Steinpolygons nicht zu; ihr Wert von etwas über 20 cm hält sich annähernd konstant, unabhängig von der wechselnden Größe des Durchmessers. Die hohe Korrelation ist durch geringe Variation der Polygondurchmesser erklärbar.

2. Grabungen

Man gewinnt den Eindruck, daß die Steinringe auf «Frostbeulen» zurückgeführt werden können (Furrer 1959, S. 296–299), während die Polygone aufgrund präexistenter Reißnetze entstanden sind. Jahn spricht von einem «fissure type» (1965, S. 142, 143). In den Alpen kann man gelegentlich unter den Steinrahmen von Polygonen vertikale, klaffende Risse beobachten, was im Auftauboden Spitzbergens nicht der Fall war. Die im folgenden beschrie-

benen Grabungen sollen allfällige Unterschiede im Profilaufbau nachweisen.

2.1. Grabung durch einen Steinring (vgl. Abb. 4)

Das Profil zeigt im wesentlichen die von Furrer (1959, S. 296) beschriebenen Merkmale der Riesensteinringe: weitgehende Kantenrundung der etwa faustgroßen Steine im Rahmen und oft Vegetationswülste am Rand der Feinerdezentren. Im Gegensatz zum Polygon ist im Steinring ein zweiter konzentrischer, schwebender Ring zu erkennen.

2.2. Grabung durch ein Steinpolygon (Abb. 5)

Im Gegensatz zum äußeren Ring, dessen Rahmen sohlenständig zu sein scheint (Furrer 1969, S. 5–6), ist der Rahmen beim Polygon schwebend und zeigt ein keilförmiges Profil. Wie beim Rahmen des Steinrings bilden zahlreiche kleine Steinchen den Grenzsaum Steinrahmen/Feinerde.

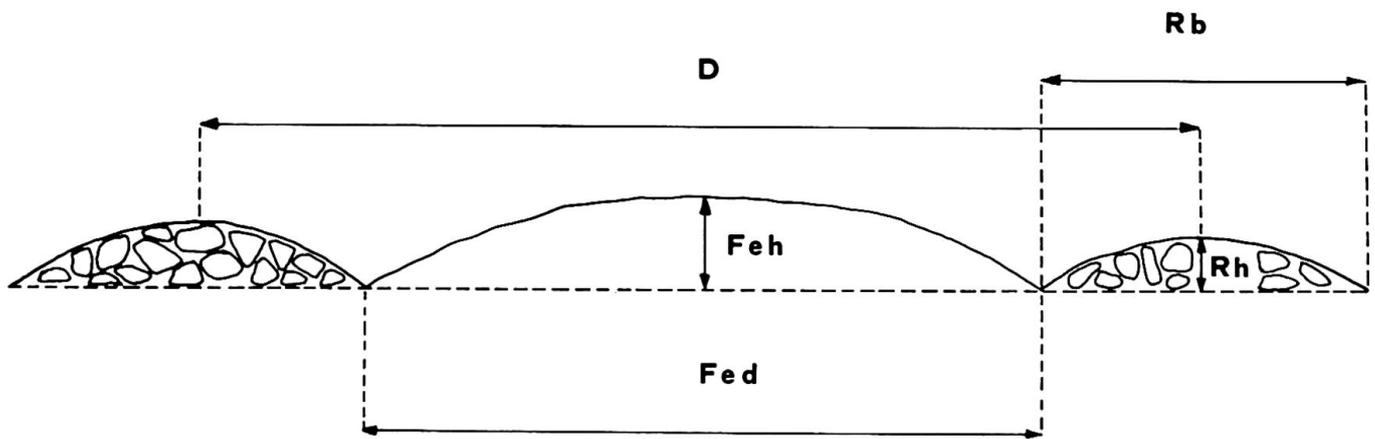


Abbildung 3. Schematischer Querschnitt durch die Oberfläche eines Steinrings. Es bedeuten: D Durchmesser, Rb Rahmenbreite, Rh Rahmenhöhe, Fed Feinerde-Durchmesser, Feh Aufwölbung der Feinerde

Auffällig ist ferner das reichlich vorhandene, kantige Skelett im Feinerdezentrum.

2.3. Laboruntersuchungen und Temperaturmessungen

Semmel (1969, S. 48) macht auf die Arbeiten von Dege, Büdel, Jahn, Herz aufmerksam, nach deren Auffassung dem abspülenden Wasser für die Landformung in nicht ständig vereisten arktischen Gebieten eine große Bedeutung zukommt. Zusätzlich zur oberflächlichen Abspülung wirkt nach Semmel die «innere Erosion» im Sinne von Williams. Büdel (1967, S. 65 f.) spricht von «Drainagespülung» und «Filterspülung». Er stellt fest, daß diese beiden Vorgänge wesentlich zur Sortierung, Strukturierung und Reife eines Frostmusterbodens beitragen. Büdel sowie Herz und Andreas haben bei Grabungen den Materialtransport im wasserführenden Auftauboden beobachtet. Semmel (1969, S. 49) weist nun darauf hin, daß derartige Vorgänge eine Abnahme der kleineren Korngrößen im Auftauboden gegenüber dem Permafrostbereich zur Folge haben sollten, was er tatsächlich in zwei Grabungen nachweisen konnte. Dagegen wies Semmel andererseits an zwei Profilen nach, wie über Gesteinen, die leicht verwitterbare Mineralien enthalten, stellenweise ein Ansteigen des Ton- und (weniger deutlich) des Fein-

schluffgehaltes stattfindet. Das gilt jedoch nur, wenn kein Fremdmaterial seitlich zugeführt wird und keine äolische Beimengung erfolgt. Außerdem besteht zwischen dem Auftauboden und dem Dauerfrostboden kein wesentlicher primärer Unterschied. Die Analysen lassen erkennen, daß durch kryoklastischen Zerfall Grobton gebildet wird (Semmel 1969, S. 50). Obwohl Tyutyunow (Zit. nach Semmel) chemische Umsetzungen selbst bei Temperaturen weit unter 0° experimentell nachweisen konnte, ist damit nach der Meinung Semmels die Wirkung der chemischen Verwitterung im Dauerfrostboden nicht eindeutig bewiesen. Möglicherweise stellt das verwitterte Gestein ein Relikt aus einer wärmeren Zeit dar. Nach Büdel (1967, S. 74 f.) handelt es sich dabei um den Aufbauboden aus der postglazialen Wärmezeit, der heute zum großen Teil im Dauerfrostboden-Bereich liegt.

Unsere Materialproben aus den beiden Grabungen weisen vorwiegend einen hohen Tongehalt auf (meist zwischen 10 und 20%; Minimum 5,5%, Maximum 48,5%). Wir dürfen für das Plateau von Sverdruphamaren (ähnlich wie bei Semmel 1969, S.49) annehmen, daß keine äolische Beimengung von Bedeutung und keine seitliche Zufuhr von Fremdmaterial erfolgt. Auch die Gesteinsunterlage ist homogen (die beiden Grabungsplätze liegen bloß 30 m auseinander), in einem Gebiet mit praktisch

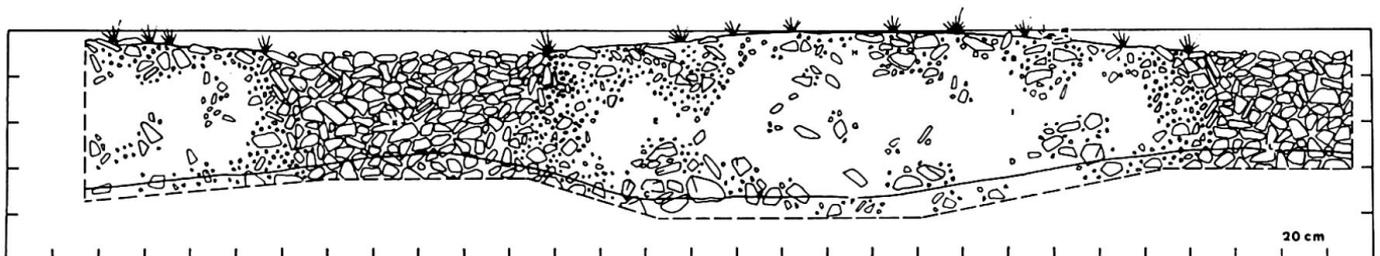


Abbildung 4. Grabung durch einen Steinring. Ausgezogene Linie: Untergränze des Auftaubodens/Obergränze des Permafrostes, gestrichelte Linie: Gränze der Grabung. Die Entnahmestellen der Proben sind durch Buchstaben gekennzeichnet

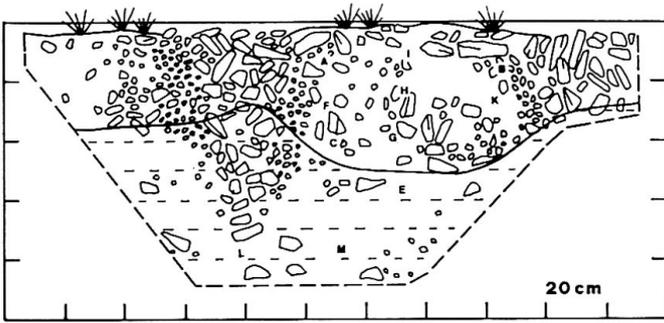


Abbildung 5. Grabung durch ein Steinpolygon. Ausgezogene Linie: Untergrenze des Auftaubodens/Obergrenze des Permafrostes, gestrichelte Linie: Grenze der Grabung

horizontalen Sandsteinschichten. Unterschiedliche Korngrößenverteilungen wären somit besonders auf die Wirkungen von Drainage- und Filterspülung und auf das Vorhandensein fossiler Bodenhorizonte (postglaziale Wärmezeit nach Büdel) zurückzuführen.

2.3.1. Korngrößen im Steinring (Abb. 6)

Die in gleicher Tiefe (30–40 cm) im Feinerde-Zentrum liegenden Proben E, G, I weisen im wesentlichen dieselbe Korngrößenverteilung auf. Im Zentrum (G) haben wir den höchsten Tonanteil von 15%. Nicht wesentlich verschieden ist das Bild bei der Probe H (über G), der Tonanteil ist gleich. Ganz anders sieht das Diagramm der Probe F aus. Hier, in 75 cm Tiefe unter der Feinerde-Kulmination, fanden wir zum Zeitpunkt der Grabung (10. Juli 1970) die Untergrenze des sommerlichen Auftaubodens. Wie die Profilzeichnung zeigt (Abb. 4), steigt diese unter dem Rahmen auf 40 cm Tiefe an. Nach Büdel (1967, S. 39) wären wir mit der Probe F bereits im Bereich des fossilen Auftaubodens, der in etwa 50–100 cm Tiefe liegt. So wäre der außerordentlich hohe Tonanteil von 48,5% möglicherweise auf die damals herrschenden Klimaverhältnisse zurückzuführen. Allerdings haben wir auch

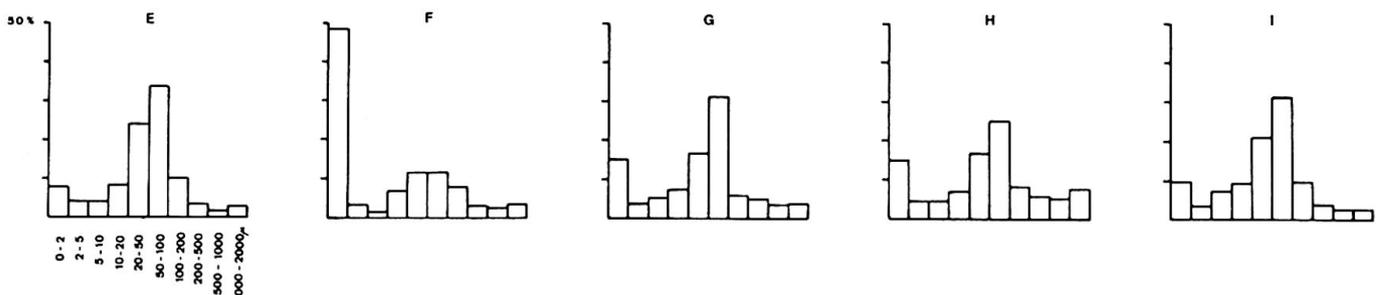


Abbildung 6. Resultate von Korngrößenanalysen der Feinerde des Steinrings

rechnen, da die rezente Auftautiefe den Wert von 75 cm gelegentlich überschreiten dürfte.

2.3.2. Korngrößen im Steinpolygon (Abb. 7)

Beim Polygon bemerken wir den bedeutendsten Tongehalt (21%) bei der Probe I, welche 10 cm unter der Feinerde-Kulmination entnommen wurde. Alle andern Proben zeigen nur 9–14% Ton. Verglichen mit der Probe H des Steinrings, mit 15% Tonanteil, liegt indessen kein signifikanter Unterschied vor. Es könnte sich lediglich um eine geringfügige stellenweise Tonanreicherung im Auftauboden handeln, wie sie auch von Semmel (1969, S. 49) beschrieben wurde. Hingegen fällt auf, wie die Probe M, welche der Probe F beim Steinring entspricht, keinen besonders hohen Tonanteil aufweist (10,5%). Obgleich die bei der Grabung festgestellten Auftautiefen (50 cm in der Feinerde, 25 cm im Rahmen) geringer sind als beim Steinring, haben wir vermutlich mit der Probe M den fossilen Auftauboden noch nicht erreicht. Dies ist wohl ein weiteres Indiz für einen unterschiedlichen inneren Aufbau von Polygon und Ring.

2.3.3. Chemische Analysen

Beim Steinring sind sämtliche Proben völlig entkalkt, der organische Kohlenstoff ist überall unbedeutend, der PH-Wert liegt bei 4,1. Beim Steinpolygon zeigen einzig die Proben L und M einen unbedeutenden CaCO_3 -Gehalt von 0,4 bzw. 0,2%. Der organische Kohlenstoffgehalt ist wiederum unbedeutend, der pH-Wert erreicht bei der Probe L das Maximum von 4,5. Die Gleichförmigkeit der chemischen Analysenresultate bestätigt das homogene Gesteinsmaterial.

2.3.4. Temperaturen

Während der Grabung herrschte eine Lufttemperatur von 3°C . Es wurden in den Aufschlußwänden folgende Temperaturen gemessen (Abb. 4 und 5):

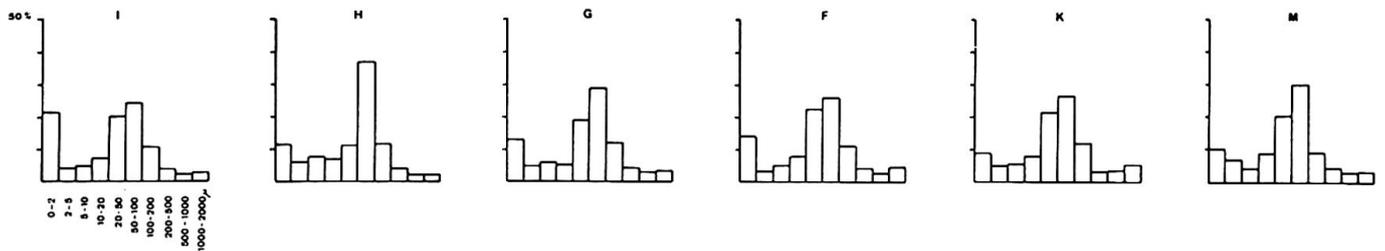


Abbildung 7. Resultate von Korngrößenanalysen der Feinerde des Steinpolygons

Steinring	Steinpolygon
A 2,6° C	A 2,8° C
B 2,5° C	B 2,8° C
C 0,2° C	C 1,6° C
D 1,0° C	D 1,3° C
E 0° C	

nen Steine auf der Feinerde (mündl. Mitt. von Prof. Poelt, Berlin). Die Flechten im zentralen Bereich deuten darauf hin, daß diese Steinringe seit Jahrzehnten inaktiv zu sein scheinen, bzw. daß die Steine aufgrund ihres Flechtenbewuchses lange nicht mehr bewegt wurden.

Das sich in den Sondiergräben sammelnde Wasser (Filterspülung) wies eine Temperatur von 0,5° C auf.

Während die Meßstellen A und B bei Ring und Polygon praktisch dieselben Werte aufweisen, zeigen die tieferliegenden beim Steinring entsprechend der größeren Auftautiefe etwas höhere Werte als beim Polygon. Unsere Beobachtungen über die Auftauwerte stimmen mit denjenigen von Semmel (1969, S. 43, mit Hinweis auf Büdel) durchaus überein.

2.3.5. Flechten

Wir haben beim Steinring bereits auf den äußeren, sohlenständigen Rahmen, dessen Steine eine dicke Verwitterungskruste aufweisen, und den konzentrischen, schwebenden Rahmen im Feinerde-Zentrum, mit einer schwächeren Verwitterungskruste, hingewiesen. Der Flechtenbesatz auf dem äußeren Rahmen macht nun ebenfalls einen reiferen Eindruck als der des inneren Rahmens oder der einzel-

2.3.6. Situmetrie (Einregelung der Steine)

Die untenstehenden Werte stellen jeweils den Durchschnitt von je sechs Messungen dar. Beim Steinpolygon sind die Steine zu 45% in tangentialer und 29% in radialer Richtung eingeregelt. Beim Steinring weisen im äußeren Rahmen 38% der Längsachsen in tangentiale und 33% in radiale Richtung; im inneren Rahmen 44% in tangentiale und 23% in radiale Richtung. Beim Ergebnis des äußeren Rahmens ist eine Gleichverteilung nicht auszuschließen (Furrer/Bachmann 1968, S. 4 f.) im Gegensatz zu den bisher gewonnenen Ergebnissen an Steinringen, wo der Regel entsprechend etwa 50% der Steine in tangentiale, etwa 30% in radiale Richtung weisen (Elsasser 1968, S. 9, Furrer 1969, S. 11). Im Vergleich zum inneren Rahmen besteht bezüglich der Häufigkeitsverteilung ein signifikanter Unterschied. Die situmetrischen Werte des Steinpolygons entsprechen ziemlich genau denjenigen im inneren Rahmen des Steinrings.

Zusammenfassung der Unterschiede zwischen:

Steinring

Rahmen und konzentrischer Ring in der Feinerde: mehrphasige Entstehung

Profil des äußeren Rahmens kastenförmig und vermutlich sohlenständig

Rahmenbreite wahrscheinlich abhängig vom Durchmesser

Auftautiefen:

Rahmen: 40 cm
Feinerde: 75 cm

in 75 cm Tiefe fossiler Auftauboden (nach Büdel) vermutlich erreicht

Steinpolygon

nur ein Rahmen je Form: einphasige Entstehung

Profil des Rahmens keilförmig und schwebend

Rahmenbreite vermutlich unabhängig vom Durchmesser (fissure type nach Jahn)

Auftautiefen:

Rahmen: 25 cm
Feinerde: 50 cm

fossiler Auftauboden nicht erreicht

Daraus schließen wir: Steinring und Steinpolygon sind, zumindest was die untersuchten Formen auf Sverdruphamaren betrifft, formal und genetisch verschieden.

Nachtrag

Ergebnis der lichenologischen Untersuchung von fünf ausgewählten Proben, durchgeführt am Institut für systematische Botanik und Pflanzengeographie der Freien Universität Berlin von Prof. Poelt.

Die Gegenüberstellung des Flechtenbesatzes auf zwei Steinproben aus Feinerdezentren und dreien aus Rahmen von Steinringen ergibt, daß in den Ringzentren zweifellos eine jüngere Flechtenvegetation vorliegt als in den Rahmen. Im Zentrum ist die Flechtenbesiedlung – auf die Fläche bezogen – sehr unvollständig, und die vorkommenden Arten können als Pioniere bezeichnet werden. Auf Grund der Flechtenbesiedlung ergibt sich ferner, daß nicht alle Steine im Ringzentrum gleich lang freigelegt sind, d. h. nicht gleichzeitig durch den Frost an die Oberfläche befördert wurden. Auf den Steinrahmen dagegen ist die Besiedlung weitgehend dekend. Es überwiegen flächenmäßig Arten, die nicht mehr als erste Pioniere gelten. Ob sie aber allenfalls dem Flechtenklimax angehören könnten, läßt sich mangels Beobachtungsmaterial aus dem Untersuchungsgebiet nicht abklären.

Systematisch erscheinen die Funde recht interessant. Bei *Caloplaca concinerascens* handelt es sich offenbar um einen Zweitfund. *Lecidea circumnigrata* ist bisher nur von wenigen Fundorten bekannt.

Auf den Steinen in den Rahmen nehmen wenige Arten mit großen Lagern den Hauptteil der Oberfläche ein. Die Pionierarten sitzen in den Lücken. In den Zentren sind die Steine hauptsächlich von Pionierarten besetzt. Arten der Folgegeneration fehlen oder sind nur in bescheidenen Anfängen feststellbar.

Résumé

Près de Longyearbyen (au Spitzberg) il y a sur un plateau de grès de merveilleux sols structurés. Comme dans les Alpes ils sont marqués en formation de

cercles – et de polygones de pierres. A l'aide de recherches détaillées on essaie à souder la question de l'identité de ces deux formes au point de vue de la genèse. Les auteurs répondent négativement à cette question. Ils croient que les formations de polygones de pierres sont à faire remonter aux crevasses en forme de polygones et que les formations de cercles de pierres sont causées par le gel.

Literatur

Bachmann F.: Fossile Strukturböden und Eiskeile auf jungpleistocänen Schotterflächen im nordostschweizerischen Mittelland. Diss. Univ. Zürich, 1966.

Büdel J.: Die Abtragungsvorgänge in der exzessiven Talbildungszone Südost-Spitzbergens. Unveröffentlichtes Manuskript, 1967.

Elsasser H.: Untersuchungen an Strukturböden im Kanton Graubünden. Diss. Univ. Zürich, 1968.

Furrer G.: Untersuchungen am subnivalen Formenschatz in Spitzbergen und in den Bündner Alpen. Geogr. Helv. 4, 1959.

— Die Höhenlage von subnivalen Bodenformen. Habilitationsschrift Univ. Zürich, 1965.

— Beobachtungen an rezenten und fossilen (kaltzeitlichen) Strukturböden. *Experientia* 22, 489, 1966.

— Untersuchungen an Strukturböden in Ostspitzbergen, ihre Bedeutung für die Erforschung rezenten und fossiler Frostmusterformen in den Alpen bzw. im Alpenvorland. *Polarforschung* VI, 38, 1968.

— Vergleichende Beobachtungen am subnivalen Formenschatz in Ostspitzbergen und in den Schweizer Alpen. *Ergebnisse der Stauferland-Expedition*. Steiner-Verlag, Wiesbaden, 1969.

Furrer G., Bachmann F.: Die Situmetrie (Einregelmessung) als Untersuchungsmethode. *Geogr. Helv.* 1, 1968.

Jahn A.: Polish I. G. Y. Spitzbergen Expeditions in 1957, 1958 and 1959. 1961.

— Origin and Development of Patterned Ground in Spitzbergen. *Proceedings Permafrost International Conference, NAS-NRG, Publication 1287*. 1965.

Semmel A.: Verwitterungs- und Abtragungerscheinungen in rezenten Periglazialgebieten (Lapland und Spitzbergen), 1969.