

Brolægninger i tills: Iagttagelser fra Mýrdalsjökull, Island

OLE HUMLUM



Humlum, O.: Brolægninger i tills: iagttagelser fra Mýrdalsjökull, Island. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1980*, side 7–17, København, 25. januar 1981.

Exposures of Pleistocene tills may show concentrations of pebbles, cobbles and boulders at the surface or as internal bands. Eventually the particles are glacially abraded to form a striated pavement. A recent pavement of particles 1–15 cm in diameter is currently being exposed along the northern margin of the ice cap Mýrdalsjökull, Iceland. This pavement overlies a fine-grained lodgement till, and is interpreted as the result of subglacial sorting. The attention is drawn to pavements as this as a criterion for subglacial deposition of a underlying till, and for the presence of a temperate glacier sole.

Ole Humlum, Laboratorium for Geomorfologi, Geografisk Institut v. Københavns Universitet, Haraldsgade 68, 2100 København Ø. 10. oktober 1980.

Lodrette snit gennem tills viser ikke sjældent lineære zoner med stor koncentration af sten og blokke (se fx. Flint 1971, s. 169). Koncentrationerne af store partikler, brolægninger, kan stratigrafisk dels findes ved toppen eller undersiden af en till bæk, dels internt i denne, fx. som et bånd af blokke. I nogle tilfælde er de store partikler isskurede, og de danner da en egentlig glacial brolægning (engl.: striated pavement, tysk: Geschiebepflaster). Brolægninger i pleistocæne tills kendes mange steder i udlandet (se fx. Seifert 1954, s. 170; Flint 1971, fig. 7–14; Muller 1973, Gripp 1973 og 1974; Dreimanis 1976, s. 35) samt i Danmark (se fx. Sarauw 1904, Hansen 1942, Nielsen 1959 og 1967, s. 296).

Der er formuleret forskellige forklaringer på dannelsen af brolægninger i tills generelt, og specielt egentlige glacial brolægninger. Seifert (1954), der beskriver flere lokaliteter med brolægninger i tills fra Fehmarn og tilgrænsende områder i Nordtyskland, påviser, at brolægningerne her adskiller to bænke af till. Blokkene i brolægningerne viser tydelig og overensstemmende skurestriberetning på deres overside, mens undersiden kun i få tilfælde viser tegn på isskuring. Seifert diskuterer forskellige hypoteser vedrørende brolægningernes oprindelse og fremfører bl.a., at blokkene kan have været til stede som et groft overfladelag på den underliggende till, inden et fornyet isfremstød nåede området og skabte skurestriberne på blokkenes

overside. Flint (1971) påpeger, at zoner med koncentration af sten og blokke ved oversiden af en till bæk kan opfattes som et overfladeresidual skabt af regn og vind. Hvis dette residual senere overskrides af en gletscher, kan isskuringen være dannet. Flint peger dog samtidig på, at glacial brolægninger også kan tænkes dannet helt og holdent subglacialt, idet de store partikler tænkes aflejret fra undersiden af en stagnerende gletscher, som senere reaktiveres og skaber isskuringen på blokkenes overside. Det understreges af Flint, at en glacial brolægning derfor ikke i sig selv er et bevis for en periode uden isdækning. Gripp (1973, 1974) mener generelt, at glacial brolægninger er et rent subglacialt fænomen. Forudsætningen for denne konklusion er en formodning om, at en bund till altid aflejres under et tyndt isdække, mens en større ismægtighed vil medføre deformation og erosion af en underliggende till. Gripp forestiller sig, at en allerede aflejret till udsættes for selektiv erosion i en fase med tiltagende ismægtighed, hvorved et residual af sten og blokke gradvis koncentrerer langs oversiden af den tilbageblevne del af en underliggende till, presses ned i denne og abraderes dernæst på oversiden. Når gletscheren senere smelter tilbage, afsættes påny till over brolægningen. Ifølge Gripp markerer brolægninger af denne art altså ikke en deglaciationsfase, men snarere kulminationsfasen af en glaciationsperiode.

Geologiske konklusioner, som drages på

grundlag af observationen af en bestemt sedimentær struktur, afhænger naturligvis helt af opfattelsen om den pågældende strukturs dannelse. Brolægninger i tills vil, som det fremgår af ovenstående, kunne opfattes som et kriterium for deglaciation eller glaciations-kulmination, alt efter iagttagerens geologiske skoling. At dette er uheldigt er selvfølgelig indlysende, og det forekommer derfor vigtigt at undersøge forekomster af brolægninger i tills under dannelse ved recente gletschere. Derved kan man håbe, at én eller flere almindelige dannelsesmåder kan klarlægges for denne iøjnefaldende struktur. Det er vigtigt at understrege, at brolægninger i tills vides at kunne optræde ved basis og top, såvel som internt i tills, og muligheden for polygenetisk dannelse bør derfor ikke på forhånd udelukkes. Med denne baggrund skal den følgende beskrivelse af udvikling af en recent brolægning kun ses som én mulig måde, hvorpå nogle af de pleistocæne eksempler på lignende brolægninger kan være dannet.

Mýrdalsjökull

Systematiske undersøgelser vedrørende dannelsen af brolægninger i tills er især udført på en række lokaliteter langs randen af den islandske gletscher Mýrdalsjökull (Fig. 1). Områdets generelle geomorfologi er allerede beskrevet i Krüger og Humlum (1980), og her skal derfor kun suppleres med nogle oplysninger specielt vedrørende iskappens glaciologiske karakteristika, som er væsentlige for tolkningen af de følgende felt-iagttagelser.

Mýrdalsjökull dækker 596 km² ifølge satellit-fotos fra 1973, imod 701 km² ved århundredets start (Björnsson 1978). Dette svarer til en reduktion på 15% i fladeareal. Iskappen ligger i et område af Island med særlig stor nedbør, mere end 4000 mm/år (Eythorsson og Sigtryggsson 1971), hvilket resulterer i store isbevægelseshastigheder. Intern deformation og basal glidning udvikler derfor en betydelig varmemængde, der sammen med områdets store geothermale varmemestrøm, omkring 5 $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$ (Lee 1970) betyder, at gletscheren overalt må karakteriseres som tempereret. Med andre ord er temperaturen overalt på tryksmeltepunktet, og vand kan eksistere i ligevægt side om side med is. Det forventes ligeledes, at en betydelig nettosmeltning foregår overalt langs gletscherens underside.

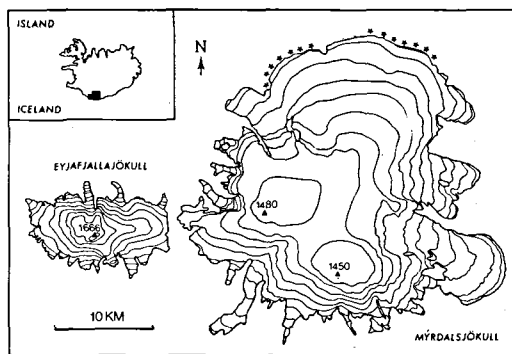


Fig. 1. Mýrdalsjökull og Eyjafjallajökull, kurvækkvidistance 100 m. Sléttjökull er den nordlige del af Mýrdalsjökull (Rist 1967). Fundsteder for recent brolægning er markeret med stjerne. Åbne cirkler angiver en del af Sléttjökulls front, som endnu ikke er detailundersøgt.

Mýrdalsjökull and Eyjafjallajökull, equidistance 100 m. Sléttjökull is the northern regular part of Mýrdalsjökull (Rist 1967). The presence of pavements is indicated by an asterisk, while open circles indicate a section of the glacier terminus, which has not been investigated in detail.

Sléttjökull, som er betegnelsen for den nordlige del af Mýrdalsjökull (Fig. 1), er ren på overfladen med undtagelse af to tynde smudsbånd af vulkansk oprindelse. Hovedparten af smuds i denne del af gletscheren er koncentreret til en 2–5 cm mægtig gletschersål, og formodes næsten udelukkende at være af subglacial oprindelse, idet gletscheren kun har få og små nunatakker.

Målinger af sedimentmængden i en række islandske smeltevandfloder (Tómasson 1976, cf. Björnsson 1979) angiver, at den gennemsnitlige erosionshastighed for Mýrdalsjökull er 4,5 mm/år, hvilket placerer denne gletschers underlag blandt de mest intensivt eroderede overflader på Jorden. Til sammenligning kan anføres at de tilsvarende gennemsnitlige erosionshastigheder for andre større islandske gletschere opgives som følger: Vatnajökull 3,2 mm/år, Hofsjökull 0,9 mm/år, Langjökull 0,4 mm/år (Björnsson 1979). Tilsvarende gennemsnitlige erosionsrater for gletschere i andre områder angives eksempelvis til 0,05–0,2 mm/år for gletschere i Nordøst-Canada, og til 2–5 mm/år for gletschere i tempererede områder (Andrews 1972). Alle de nævnte erosionshastigheder er som anført gennemsnitstal, hvorfor den lokale erosionshastighed kan være betydeligt større eller alternativt nul.



Fig. 2. En del af Sléttjökulls front juli 1979. Det frilagte bundmorænelandskab er dækket af sten og blokke. Bemærk spaden til højre.

The present (july 1979) glacier front of Sléttjökull. Stones and boulders covers the surface of the groundmoraine landscape. Notice the spade to the right for scale.

Brolægningen

Som angivet i figur 1 er brolægninger observeret flere steder langs Mýrdalsjökulls nordlige del, Sléttjökull. Systematiske undersøgelser er indtil videre dog kun udført ved Sléttjökulls nordøstlige del.

Sideløbende med gletscherens tilbagesmeltning siden slutningen af forrige århundrede, er der langs Sléttjökulls rand frilagt et vidtstrakt bundmorænelandskab (se også Krüger og Humlum 1980 for nærmere beskrivelse). Umiddelbart betragtet synes bundmorænelandskabet at bestå af en till helt domineret af store partikler, idet overfladen er dækket af sten og blokke omkr. 1–15 cm i diameter (Fig. 2). Lodrette profiler i bundmorænelandskabet viser imidlertid, at dette første indtryk er fejlagtigt (Fig. 3). De store partikler danner kun et overfladelag, en brolægning, der overlejrer en meget mere finkornet till. Denne till tolkes som en bund till (lodgement till), bl.a. på grundlag af sit indhold af små-skala deformationer omkring blokke i till'en (Krüger

1979, s. 332–334) samt flutes på overfladen (Humlum 1979).

Det er nærliggende at mene, at overfladelaget af sten og blokke kan være opstået ved fjernelse af finere kornstørrelser ved regn og vind, således at større kornstørrelser gradvis koncentrerer ved overfladen som et residual. Denne forklaring kan dog afvises, idet overfladelaget fortsætter uændret ind til den tilbagesmeltende gletschers front, hvor sten og blokke endvidere kan ses smelte fri af de nederste centimeter gletscheris (Fig. 4). Det er også muligt direkte at iagttage denne partikkelpopulation i gletscherens basale transportzone, hvor supraglaciale smeltevandsløb har skåret ned gennem gletscherfronten og dennes underlag (Fig. 5). Overfladelaget af sten og blokke er derfor ikke dannet ved udvaskning efter deglaciationen, men må karakteriseres som en speciel type udsmeltnings till (engl.: melt-out till), der aflejres i forbindelse med frontal deglaciation.

Dette overfladelag af særligt store partikler overlejrende bund till er ikke et specielt træk for

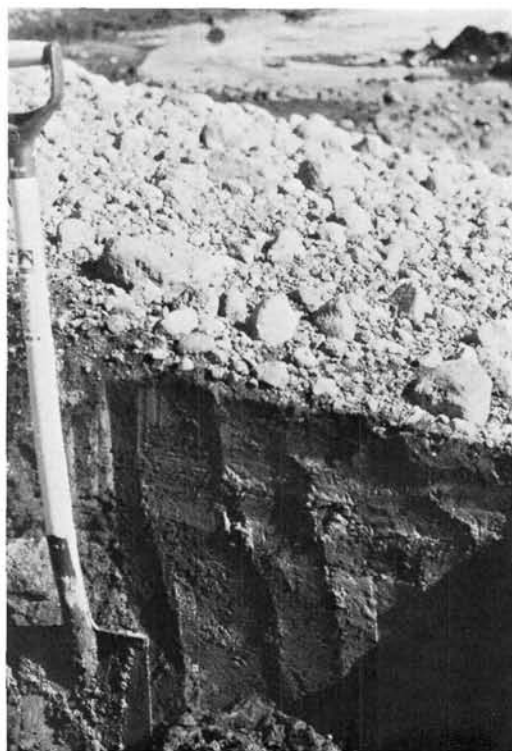


Fig. 3. Profil i bundmorænelandskabet foran Sléttjökull. Et overfladelag af sten og blokke overlejrer bund till.

Vertical section in the groundmoraine landscape beyond Sléttjökull. Underneath a coarse surface layer of stones and boulders a fine-grained lodgement till is found.

bundmorænelandskabet foran Sléttjökull, men er ligeledes observeret ved flere sydnorske gletschere, især i Jotunheimen samt i Sognefell. De pågældende gletschere har alle det til fælles med Sléttjökull, at de thermalt må karakteriseres som tempererede gletschere.

I de seneste år er Sléttjökull begyndt at vise tegn på forøget aktivitet, hvilket bl.a. registreres ved aftagende afstand mellem successive vintermoræner. Hvis gletscheren senere avancerer ud over det nu frilagte bundmorænelandskab, vil overfladelaget af sten og blokke muligvis abraderes og begraves under en yngre bund till. I så fald vil en isskuret brolægning være dannet.

Nogle af de eksempler på pleistocæne brolægninger i tills, som kendes fra litteraturen, er måske dannet som skitseret ovenfor for Sléttjökull: dvs. oprindelig transporteret i gletschersålen, dernæst aflejret som udsmeltnings till under en deglaciationsfase, og endelig begravet under

yngre till i forbindelse med en senere glaciationsfase. For om muligt at udskille pleistocæne brolægninger af denne type, er der ved Sléttjökull udført en række detailundersøgelser, og nogle vigtige resultater af disse skal beskrives i det følgende. Nogle af disse resultater har endvidere en bredere interesse end blot i forbindelse med brolægninger i tills, idet de synes at afgrænse vigtige parametre for aflejring af bund till generelt.

Detailundersøgelser

For at undersøge hele smudsindholdet i gletschersålen blev der udtaget fem prøver (4,9–7,5 ltr. store) af denne fra en ca. 4 km lang sektor af den ialt 21 km lange gletscherfront. Isen smeltedes, og prøverne pumpedes igennem filtre, således at det minerogene indhold isoleredes. Smudsindholdet fandtes at variere fra ca. 15% til knap 31% efter volumen, med et gennemsnit på knap 25%.

Sedimentet i gletschersålen viste sig at være domineret af kornstørrelser fra 16 mm til 128 mm (-4Φ til -7Φ), hvilket nøje svarer til den dominerende kornstørrelse i overfladelaget foran gletscheren (Fig. 2). I figur 6 er vist kornstørrelsessammensætningen for tre af prøverne. Korn mindre end 1 mm udgør mindre end 0,1% efter vægt af smudsindholdet i gletschersålen, mens partikler mindre end 1 mm sædvanligvis udgør omkring 70–75% af den underliggende bund till (Krüger og Humlum, in press).

Partikelformen er bestemt med Zingg's (1935) klassifikationsskala for partikler større end 10 mm (størsteakse) i det isolerede sediment. Omtrænt 60% af partiklerne viste sig at være terningformede, ca. 19% tavleformede, ca. 19% stavformede og knap 2% bladformede. Formens afhængighed af moderbjergarten (lava) er ikke i øjeblikket kendt. Partiklernes angularitet er ret ensartet, nærmest subangular ifølge Powers (1953) visuelle klassifikationsskala.

Nogle af de største blokke fra prøverne viste tydelige tegn på glacial abrasion, f.eks. facetter eller skurestriber. Op-ned orienteringen af disse abrasionsformer blev undersøgt på partikler i tre 60×50 cm arealer, som udlages tilfældigt umiddelbart foran gletscherfronten. Dette kunne gøres, idet løbende observationer af partikler under frismeltning fra gletschersålen viste, at disse partikler i høj grad bevarede deres orientering fra



Fig. 4. Nærbillede af gletscherfronten. Sten og blokke ses at smelte ud af de nederste centimeter gletscheris. Målestokken er 40 cm lang.

Detail of the present glacier front. Coarse particles corresponding to the surface layer of fig. 2 and 3 are seen melting out from the lowermost glacier ice. A 40 cm ruler is shown for scale.

transportfasen efter aflejring (fig. 4). Undersøgelsen viste at af 223 indmålte sten og blokke besad knap 20% abrasionstegn; heraf havde knap 3% af partiklerne abrasionstegn alene på oversiden, knap 12% alene på undersiden, mens omkring 5% af partiklerne viste abrasionstegn på såvel over- som underside. Dette forhold kan naturligvis ændres i forbindelse med en senere isoverskridning.

Resultatet af macro fabric analyser udført på partikler i overfladebrolægningen er vist i figur 7. Der er dels vist resultatet af tre analyser for alle partikler i et prøveområde uanset form, dels én for rodformede partikler alene. Analyserne er både vist som traditionelle 5°-klassedelte frekvenser, samt i en udjævnet og kontureret form, som tillader en bedømmelse af bestemte retningers eventuelle signifikans. Fabric analyserne er sammenlignet med »sædvanlige« fabricmønstre, noget uregelmæssige, men vigtige maxima optræder bemærkelsesværdigt nok i omtrentlig diagonal retning i forhold til isbevægelsesretningen.

Denne diagonalorientering genfindes også i en række andre fabricanalyser udført på partikler i brolægningen, der med andre ord også m.h.t. fabric adskiller sig tydeligt fra den underliggende bund till, hvor orienteringsmaxima sædvanligvis optræder i longitudinalposition (se Krüger og Thomsen 1981).

Diskussion

Der er ikke foretaget målinger af isbevægelsehastigheden nær randen af Sléttjökull, men hvis hastigheden preliminært antages at være omtrent 15 m/år, som målt ved Breidamerkurjökull længere mod øst (Boulton 1979), kan det beregnes, at ca. 4000 m³ sediment hvert år føres frem til den 21 km lange gletscherfront, hvis al smuds transporteres i en 5 cm mægtig gletschersål og en smudskoncentration på 25% er repræsentativ for hele gletscherfronten. Sléttjökull dækker ca. 150 km², så 4000 m³ sediment korresponderer til en gennemsnitlig erosionshastighed på ca. 0,03 mm/år.



Fig. 5. Vertikalsnit gennem den basale transportzone. Isbevægelse fra højre mod venstre. Transportzonen er kun nogle få centimeter mægtig, men indeholder flere store partikler. Ovenover ses ren gletscheris. Underlaget er bundtill. Målestokken er ca. 5 cm lang.

The basal transport zone in vertical section. Ice movement from right toward left. Several large particles are present in the lowermost glacier ice, overlying a fine-grained lodgement till. A 5 cm ruler is shown for scale.

Sammenlignet med den førnævnte erosionshastighed på ca. 4,5 mm/år er den her beregnede værdi en faktor 150 for lille. Dette misforhold tyder på, at en særlig stor del af Sléttjökull's un-

derlag præges af aflejring snarere end af erosion, sammenholdt med den resterende del af Mýrdalsjökull. I så fald kan partikelpopulationen i gletschersålen ved Sléttjökull's front betragtes

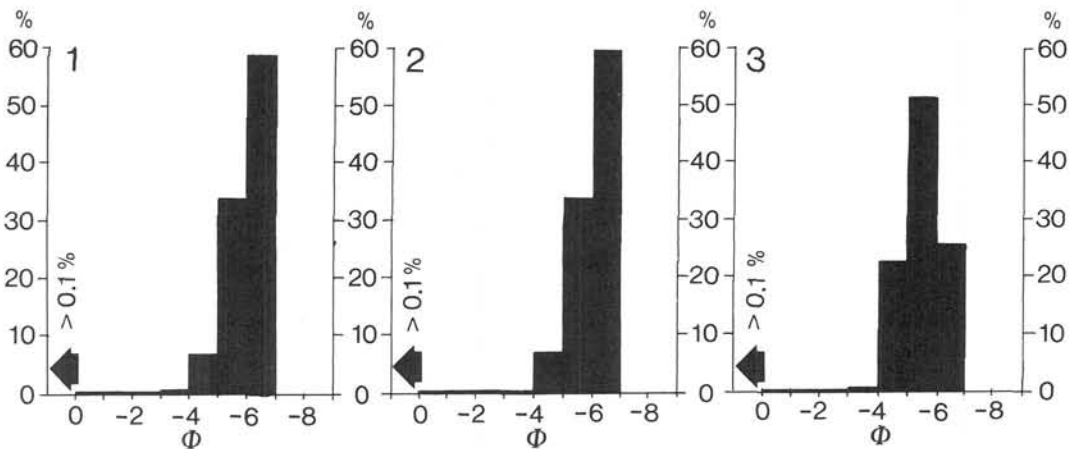


Fig. 6. Kornstørrelsesfordeling af prøver fra den basale transportzone.

Size frequency diagrams for debris in the basal transport zone.

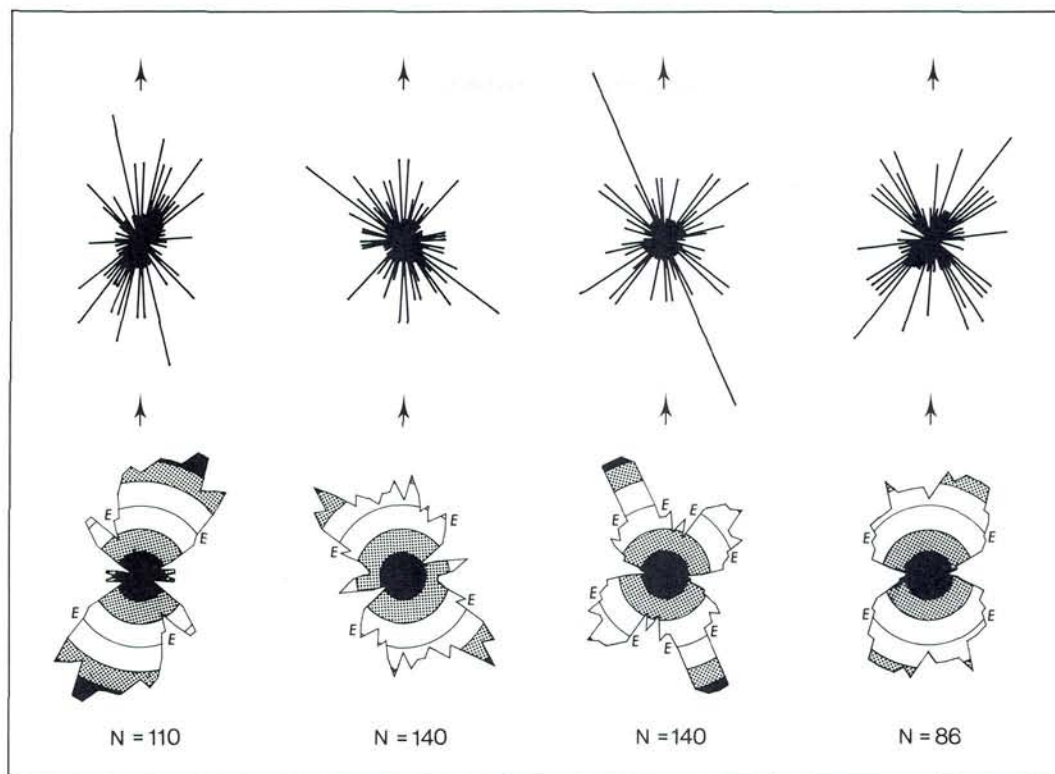


Fig. 7. Horizontale rosediagrammer for partikler længere end 1,5 cm i overfladeresidualt foran Sléttjökull. Diagrammet til højre er for rodformede partikler, mens de øvrige diagrammer er for alle partikler uanset form. Isbevægelsesretningen er vist med pil. Øverst er analyserne vist traditionelt som 5°-klasse-delte frekvenser, mens diagrammerne nederst er udjævnede og konturerede med ækvidistancen én standardafvigelse for en tilfældig fordeling omkring frekvensen E for en homogen 360°-fordeling. Hertil er anvendt en omarbejdning af Kamb's (1959) metode til konturering af equal-area net.

Horizontal rose diagrams for particles longer than 1.5 cm in the surface residual beyond Sléttjökull. The diagram to the right is for rodshaped particles only, while the other diagrams are for all particles with no distinction as to particle form. Ice movement is shown with arrows. The upper row of diagrams are prepared with data grouped in 5°-intervals, while the lower diagrams are contoured with an equidistance of one standard deviation for a random distribution around the mean frequency E, using a modified procedure of the method proposed by Kamb (1959) for equal-area nets.

som et residual, der af en eller anden årsag har undgået subglacial aflejring. Såvel texturanalyserne (Fig. 6) som fabricanalyserne (Fig. 7) markerer ligeledes partikelpopulationens særpræg.

Det er rimeligt at overveje, om ikke partikelpopulationen i Sléttjökull's gletschersål kan forklares som en stort set uændret population af bjergartsfragmenter, der er løsgjort fra det faste underlag længere opstrøms, transporteret inglacialt til gletscherfronten, og først der nået ned til gletscherbasis som følge af den basale smeltning? Dette kunne forklare, hvorfor sedimentet er domineret af relativt store fragmenter og fattigt på små partikler. En kvantitativ vurdering viser imidlertid, at denne forklaring næppe er anvendelig i den konkrete situation. Afstanden fra

centrum af Mýrdalsjökull til randen af Sléttjökull er 12–15 km (se fig. 1). Hvert år smelter nogen is fra gletscherbasis som følge af geothermal varme samt friktions- og deformationsvarme, under isens bevægelse ud mod randen. Hvis det årlige smeltebidrag og isbevægelseshastigheden kendes, kan mægtigheden Δh af det ved fronten ialt bortsmeltede islag beregnes. Det årlige smeltebidrag fra gletscherbasis kan omtrentlig sættes til 0,03 m med en geothermal varmestrøm på 5 $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$ og en basal forskydningspænding på ca. 1 bar, idet gletscherisen tænkes oprindeligt at være på tryksmeltepunktet, således at al varme anvendes til smeltning af is. For nu at opnå et forsigtigt skøn af Δh , antages en lav transportdistance på 10 km og en stor isbevægelses-

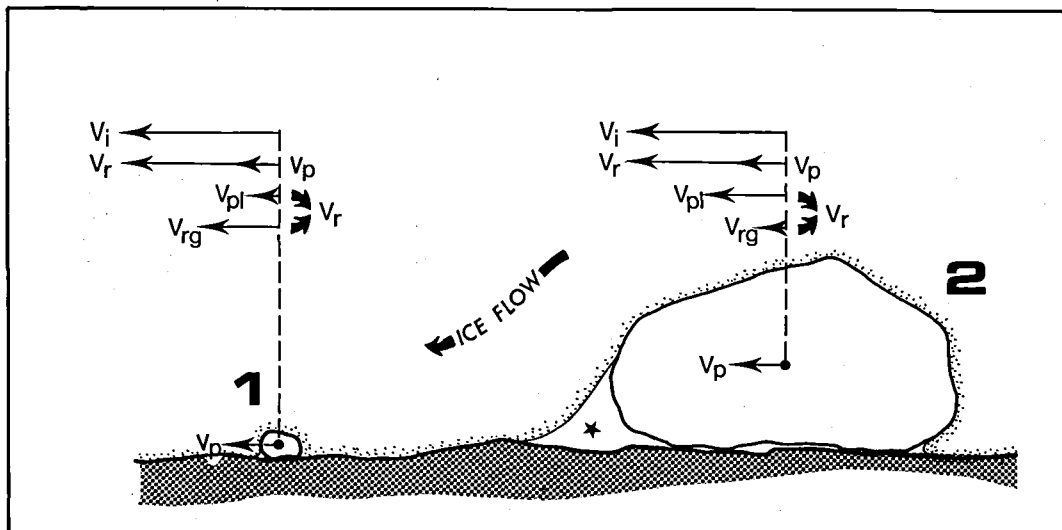


Fig. 8. Principskitse for Boultons (1975) teori for friktionsbetinget subglacial aflejring. V_i = gletschersålens hastighed, V_p = partiklens hastighed, $V_r = V_i - V_p$, V_{pl} = bidrag til V_r p.g.a. plastisk deformation, V_{rg} = bidrag til V_r p.g.a. regelation. Figuren diskuteres i teksten.

Diagram illustrating fundamentals of Boulton's (1975) theory for frictional subglacial lodgement of isolated particles. V_i = velocity of the glacier sole, V_p = velocity of the particle, $V_r = V_i - V_p$, V_{pl} = component of V_r due to increased plastic deformation, V_{rg} = component of V_r due to regelation. Further discussion in the text.

hastighed på 25 m/år, hvilket giver et bortsmeltet islag Δh på ca. 12 m ved gletscherfronten. Med den indbyggede usikkerhed betyder dette resultat, at der udmærket kan tænkes at være smeltet 10–15 m is fra Sléttjökull's underside under bevægelsen fra iskappens centrum til isranden. Dette vil effektivt bringe subglacialt eroderede bjergartsfragmenter i kontakt med underlaget på et tidligt tidspunkt. Desuden er Sléttjökull som nævnt en tempereret gletscher, hvorfor subglacialt optaget smuds næppe på noget tidspunkt vil være ført op i nogen større afstand over gletscherbasis. Partikelpopulationen i gletschersålen ved fronten kan derfor ikke have været i inglacial transport helt frem til isranden, men må have været i basal transport gennem lang tid. Uafhængig heraf tyder også abrasionsmærker samt partiklernes angularitet på dette.

Hermed er der kun tilbage at betragte partikelpopulationen i Sléttjökull's gletschersål som et residual betinget af en sorteringsproces, der skyldes selektiv subglacial aflejring. Informationerne i figur 6 og 7 tyder på, at vigtige parametre for sorteringsprocessen er partikelstørrelse og -orientering. En forudsætning for udvikling af et markant residual ved selektiv subglacial aflejring er formodentligt, at transporteret sediment ef-

ektivt holdes i kontakt med gletscherunderlaget. Derfor skal det foreslås, at brolægninger som her beskrevet kan anvendes som et kriterium for klassifikation af en direkte underliggende till som bund till, aflejret fra en tempereret gletschersål.

Hvad kan mekanismen være bag selektiv subglacial aflejring? Da en gletschers sål stort set unddrager sig egentlige feltstudier, er det vanskeligt at formulere en sammenhængende forklaring baseret på feltagttagelser alene. I stedet må man forsøge at anvende eksisterende glaciologisk og geoteknisk erfaring og laboratoriedata. Med dette udgangspunkt er det muligt at skitsere en teori for friktionsbetinget subglacial aflejring, der som en delprognose forudsiger udvikling af subglaciale partikelresidualer under bestemte forhold. I det følgende gennemgås kort hovedtræk af en teori af denne art, fremsat af den engelske glacialmorfolog Boulton (1975), og dernæst demonstreres hvordan teorien direkte forudsiger dannelse af brolægninger ved toppen af bund tills.

Figur 8 forestiller to bjergartsfragmenter siddende i en aktiv gletschers sål og i berøring med underlaget. Mellem fragmenterne og gletscherunderlaget virker en tangentiel friktionskraft, der søger at hindre relativ bevægelse mellem frag-

ment og underlag. Gletschersålen er i bevægelse som vist, og påvirker derfor fragmenterne med en kraft rettet mod venstre. Bjergartsfragmenterne vil transporteres af gletscheren, så længe den sidstnævnte kraft er større end den modsatte rettede friktionskraft, og de vil aflejres når dette forhold ikke længere er opfyldt.

Selv mens bjergartsfragmenterne er i transport, vil den omgivende gletscher normalt have en større hastighed end de partikler, som berører underlaget. Dette skyldes friktionskraften mellem fragment og gletscherunderlag, idet den korresponderende spænding mellem is og fragment lader isen passere forbi fragmentet ved en kombination af plastisk deformation og regelation (tryksmeltning efterfulgt af genfrysning). Bidraget fra regelation forudsætter en varmestrøm på tværs af fragmentet, og aftager derfor med voksende størrelse af dette, mens bidraget fra plastisk deformation vokser, idet større bjergartsfragmenter påvirker et større rumfang is med spændingsforøgelse. Generelt kan et bjergartsfragments bevægelsehastighed V_p udtrykkes ved ligningen

$$V_p = V_i - V_r$$

hvor V_i er gletschersålens hastighed og V_r er hastighedsforskellen mellem gletscheris og bjergartsfragmentet. Idet V_r som nævnt er en kombination af plastisk deformation og regelation, kan man supplerende skrive

$$V_r = V_{pl} + V_{rg}$$

hvor V_{pl} er hastighedsbidraget fra plastisk deformation og V_{rg} er bidraget fra regelation. I fig. 8 er disse sammenhænge vist vektorielt for to bjergartsfragmenter af forskellig størrelse. De to fragmenters hastighed er i dette tilfælde vist lige stor, hvorved forskellen mellem V_{pl} og V_{rg} træder klart frem de to partikler imellem. De to hastighedsbidrag er forskellige og ikke-lineære funktioner af de involverede spændinger og dimensioner, hvorfor den viste situation (Fig. 8) angiver et specielt tilfælde. Generelt vil det dog være således, at meget små partikler let vil gå i stå (aflejres), fordi V_{rg} bliver stor, mens meget store partikler ligeledes let aflejres, men her fordi V_{pl} bliver stor. Partikler af intermediær størrelse aflejres derimod vanskeligt, fordi hverken V_{pl} eller V_{rg} bliver særlig stor, og dermed heller ikke summen af de to bidrag.

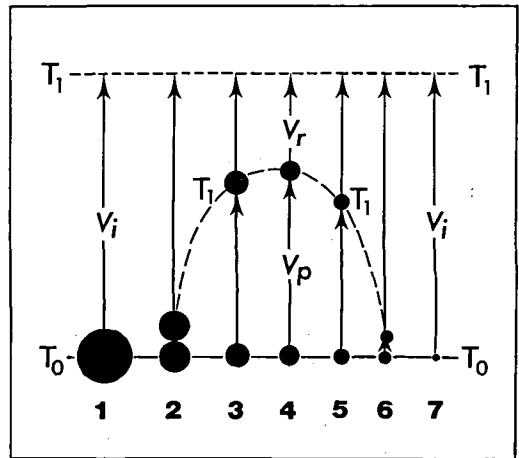


Fig. 9. Idealiseret snit parallelt med gletschersålen visende forskellige partikelstørrelses bevægelse i tidsrummet T_0-T_1 , ifølge Boultons (1975) teori. Gletschersålens bevægelse i tidsrummet T_0-T_1 er V_i .

Diagram parallel to the glacier-bed interface. During the time increment T_0-T_1 the glacier sole moves the distance V_i , and the diagram illustrates the different movement during this period for particles of different size, following the lodgement theory of Boulton (1975).

Den glacialsedimentologiske konsekvens af denne konklusion er illustreret på fig. 9. Figuren viser en tænkt situation, hvor en række bjergartsfragmenter af forskellig størrelse er anbragt i gletschersålen i en række vinkelret på isbevægelsesretningen til starttidspunktet T_0 . Gletschersålens hastighed er V_i , og til tiden T_1 er isen nået frem til linien T_1T_1 . Bevægelsen af bjergartsfragmenterne er i det samme tidsrum anderledes og indbyrdes forskellig. Et meget stort fragment 1 og et lille 7 aflejres, dvs. $V_p = 0$ og $V_r = V_i$, mens fragmenterne 2-6 transporteres en længere eller kortere distance. Lad nu linien T_0T_0 i stedet angive en iskappes isdeler, og linien T_1T_1 en del af iskappens rand. Det er så klart, at ifølge Boulton's (1975) teori for friktionsbetinget subglacial aflejring vil sedimentet i gletschersålen ved isranden være begrænset til kornstørrelsesspektret 2-6 (Fig. 9), og det er præcis denne konklusion, der kan tænkes verificeret i felten ved observationen af partikelresidualet ved Sléttjökulls rand (Fig. 10).

Mýrdalsjökull er centreret på det højtliggende Katla-massiv, og en del subglacial erosion kan tænkes at foregå her. Længere ude mod isranden kan forholdene tænkes at ændres, således at en

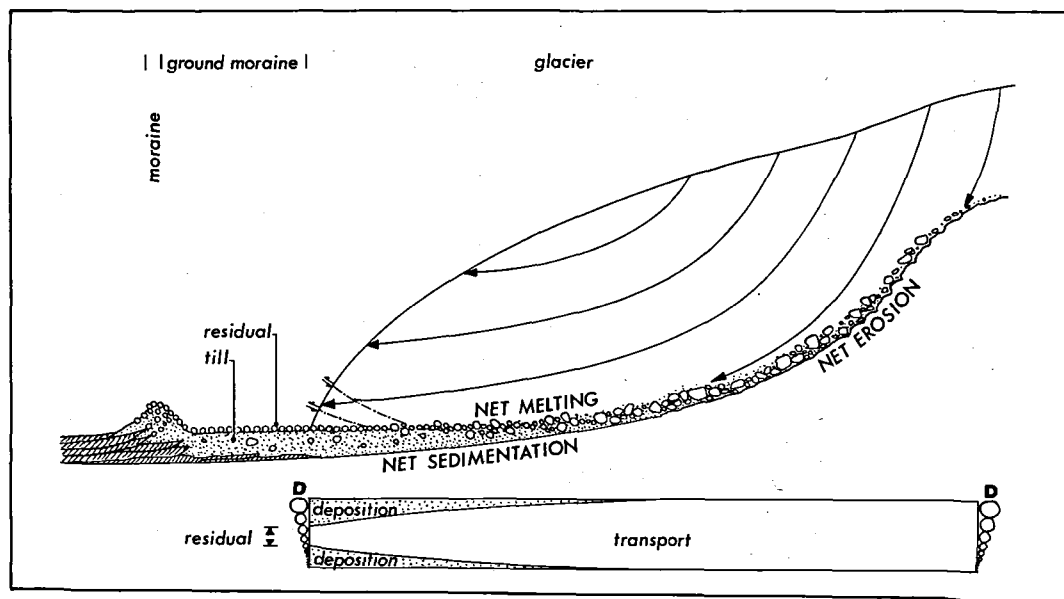


Fig. 10. Idealiseret længdesnit gennem Sléttjökull, visende hvordan overfladeresidualet af sten og blokke kan tænkes udviklet ved selektiv aflejring af meget store og meget små bjergartsfragmenter. Figurens nederste del illustrerer det korrespondende sedimentationsmiljø i et distance-kornstørrelses diagram.

Idealized section of Sléttjökull, showing the proposed gradual development of the surface residual due to selective lodgement of very large as well as very small particles. The corresponding deposition-transport pattern is shown beneath in a distance-particlesize diagram.

del subglacial aflejring foregår. Parametre som ændres kan f.eks. være hastighed, underlagets permeabilitet og den subglaciale effektive spænding. Herved indsnævres gradvis det kornstørrelsesinterval som stadig kan transporteres i berøring med underlaget. Ved gletscherfronten er tendensen til aflejring udbredt, og kun få kornstørrelser kan fortsat transporteres. Disse korn vil imidlertid først aflejres som en særlig udmeltningstills i forbindelse med gletscherfrontens tilbagemeltning (Fig. 4), og ligger derefter som et overfladelag af ret store partikler over den underliggende bundtills, der fortrinsvis består af mindre korn, men i hvilken også meget store blokke træffes. Grunden til små partiklers dominans i bundtills'en er den vedvarende abrasion som de transporterede partikler er udsat for undervejs ud mod isranden.

Overfladeresidualer som beskrevet fra Sléttjökull er som nævnt fundet også ved andre gletschere, men grunden til at det er særligt veludviklet ved Sléttjökull formodes at være den overordentlig store subglaciale smeltning, der effektivt holder transporterede partikler i kontakt med gletscherunderlaget. Af den grund er

flere islandske gletschere yderst velegnede, når det gælder forskellige felttests af teorier for subglacial aflejring.

Konklusioner

Af den ovenstående diskussion kan sammenfattes et par vejledende hovedregler:

- 1) Brolægninger i pleistocæne tills kan være resultatet af en sorteringsproces, der er en konsekvens af friktionsbetinget subglacial aflejring.
- 2) Brolægninger af denne art er et kriterium for en forudgående glaciationsfase med tempereret gletschersål.
- 3) Brolægninger af denne art er et kriterium for at en underliggende tills er bundtills.

Tak

Undersøgelserne ved Mýrdalsjökull er gennemført med støtte fra Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd, og har til formål at redegøre for sedimentære karakteristika i forbindelse med tills ved en recent iskappe. Forfatteren ønsker at takke Johannes Krüger, ekspeditionernes leder, samt Eskild Lund, Lisbeth Pedersen og Henrik Højmark Thomsen for samarbejde og diskussi-

oner vedrørende undersøgelsen af det omtalte overfladeresidual. Endelig takkes Islands Forskningsråd for tilladelse til at arbejde i området.

Litteratur

- Andrews, J. T. 1972: Glacial power, mass balances, velocities and erosion potential. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.*, Supl.Bd. 13, 1–17.
- Björnsson, H. 1978: The Surface Area of Glaciers in Iceland. *Jökull*, 28, 31.
- Björnsson, H. 1979: Glaciers in Iceland. *Jökull*, 29, 74–80.
- Boulton, G. S. 1975: Processes and patterns of subglacial sedimentation: a theoretical approach. I »Ice Ages: Ancient and Modern«, eds. A. E. Wright and F. Moseley, Seel House Press, Liverpool, 7–42.
- Boulton, G. S. 1978: Boulder shapes and grain-size distributions of debris as indicators of transport paths through a glacier and till genesis. *Sedimentology*, 25, 773–799.
- Boulton, G. S. 1979: Processes of glacier erosion on different substrata. *Journal of Glaciology*, 23, 15–37.
- Dreimanis, A. 1976: Tills: Their Origin and Properties. I »Till«, ed. R. F. Legget, Royal Society of Canada, Canada, 11–49.
- Eythorsson, J. og Sigtryggsson, H. 1971: The climate and weather of Iceland. *The Zoology of Iceland* 1, 3, 1–62.
- Flint, R. F. 1971: *Glacial and Quaternary Geology*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 892 s.
- Gripp, K. 1973: Grundmoräne und Geschiebepflaster. *Meyniana*, 23, 49–52.
- Gripp, K. 1974: Untermoräne-Grundmoräne-Grundmoränenlandschaft. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 25, 5–9.
- Hansen, S. 1942: En isskuret »Brolægning« fra Egnen NØ for Odense. *Meddr. dansk geol. Foren.*, 10, 2, 119–129.
- Humlum, O. 1979: »Fluted moraine« på Omø – isbevægelsesretning og aflejningsmåde. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1978*, 15–22.
- Kamb, W. B. 1959: Ice Petrofabric Observations from Blue Glacier, Washington, in Relation to Theory and Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 64, 1891–1909.
- Krüger, J. 1979: Structures and textures in till indicating subglacial deposition. *Boreas*, 8, 323–340.
- Krüger, J. og Humlum, O. 1980: Deformations- og erosionsstrukturer i bundmorænelandskabet ved Mýrdalsjökull, Island. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1979*, 31–39.
- Krüger, J. og Humlum, O. in press: The Proglacial Area of Mýrdalsjökull, Iceland. *Folia Geographica Danica*, Tom. XV, No 1, 64 s.
- Krüger, J. og Thomsen, H. H. 1981: Till fabrics i et recent bundmorænelandskab, Island. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1980*, 19–28.
- Lee, W. H. K. 1970: On the global variations of terrestrial heat-flow. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2, 332–341.
- Muller, E. H. 1973: Boulder concentration in till at the close of a glacial cycle. *Abstracts, International Union for Quaternary Research, IX. Inqua Congress*, »Till«, Christchurch, New Zealand, 3.
- Nielsen, A. V. 1959: Ekskursjon til Nordøstfyn. *Meddr. dansk geol. Foren.*, 14, 2, 189.
- Nielsen, A. V. 1967: Landskabets tilblivelse. *Danmarks Natur*, Bd. 1, Politikens Forlag, København, 251–344.
- Powers, M. 1953: A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 25, 117–119.
- Rist, S. 1967: The thickness of the ice cover of Mýrdalsjökull, Southern Iceland. *Jökull*, 237–242.
- Sarauw, G. F. L. 1904: En Belægning af isskurede Blokke i Nymølle Grusgrav ved Hedehusene. *Meddr. dansk geol. Foren.*, 10, 143–144.
- Seifert, G. 1954: Das mikroskopische Korngefüge des Geschiebemergels als Abbild der Eisbewegung, zugleich Geschichte des Eisabbaues in Fehmarn, Ost-Wargrien und dem Dänischen Wohld. *Meyniana*, 2, 124–190.
- Tómasson, H. 1976: The sediment load of Icelandic rivers. *Nordic Hydrological Conference*, V-1-16, Reykjavik.
- Zingg, T. 1935: Beitrag zur Schotteranalyse. *Schweiz. Mineral. u. Petrograph. Mitteilungen*, 15, 38–140.