

»Fluted moraine« på Omø – isbevægelsesretning og aflejringsmåde

OLE HUMLUM



Humlum, O.: »Fluted moraine« på Omø – isbevægelsesretning og aflejringsmåde. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1978*, side 15–22. København, x. januar 1979.

A wave pattern at the basis of a till bed is described from southern Denmark. This pattern is interpreted as casts of glacial flutes. Implications for determination of the direction of ice movement, mechanisms of till deposition and the subglacial thermal regime are discussed.

Ole Humlum, Laboratorium for Geomorfologi, Geografisk Institut v. Københavns Universitet, Haraldsgade 68, 2100 København Ø, 10. oktober 1978.

Fluted moraine eller blot flutes (Boulton 1976), er en overfladeform der observeres i bundmorænelandskaber foran mange recente gletschere. Størsteparten af de beskrevne eksempler viser, at fluted moraine består af till, mens kun et

mindre antal består af andre sedimenttyper som fx. ler (Boulton 1971) eller sand (Poul og Evans 1974).

Morfologisk fremtræder fluted moraine som parallelle, lave rygge (0,1–0,5 m høje, 0,2–1,5 m



Fig. 1. Fluted moraine foran nordranden af Myrdalsjökull, Island. Isbevægelsen har været i retning bort fra iagtageren. De enkelte flutes er ca. 50 cm brede og 10–20 cm høje.

Fluted moraine beyond the northern margin of Myrdalsjökull, Iceland. Flutes are approximately 50 cm from side to side and 10–20 cm in height. The direction of viewing is away from the glacier.



Fig. 2. Fluted moraine foran en udløbsgletscher fra Lyngmarkens Iskappe, Disko, Grønland. Isbevægelsen har været fra højre mod venstre. De tre flutes på billedet ses alle at begynde umiddelbart bag en stor blok (pil), og løber derfra mod venstre i retning mod de sorte pletter. Isøksen ved blokken i forgrunden er ca. 90 cm lang.

Fluted moraine beyond a outletglacier from Lyngmarkens Iskappe, Disko, Greenland. Glacier movement is from right to left. Three flutes are seen (black spots), each with a large boulder at the head (arrow). The iceaxe at the boulder in the foreground is approximately 90 cm long.

brede, 5–500 m lange), der alle proximalt (i forhold til isbevægelsesretningen) er forankret til en blok (fig. 1–2). Ryggenes retning er altid strengt parallelt med isbevægelsen.

Undersøgelser af flutes inde under recente gletschere, påvisning af folder i frismeltede flutes samt fabric analyser har vist, at fluted moraine normalt dannes subglacialt ved oppresning af till eller andre sedimenter i langstrakte hulrum mellem gletschersål og underlag. Disse hulrum er et resultat af isbevægelsen, idet de opstår, hvor gletschersålen med tilstrækkelig fart glider hen over faststående forhindringer i underlaget, fx. store blokke, så der åbnes et hulrum på disses læside. Det relative undertryk i hulrummene forårsager dernæst oppresningen. Denne tolkning er resultatet af et stort antal undersøgelser (fx. De Quervain og Schnitter 1920, Dyson 1952, Hoppe og Schytt 1953, Baranowski 1970, Boulton 1971 og 1976, Paul og Evans 1974). På tidspunktet for oppresningen menes materialet at have været ufrosset og gennemvædet, hvorfor dannelsen af fluted moraine formodes at være begrænset til de

tempererede dele af en aktiv gletschers sål (Krüger og Humlum 1978).

Fluted moraine er en overfladeform af beskeden dimensioner. Når den alligevel har formået at tiltrække en betydelig interesse, skyldes det ikke så meget håbet om at påvise fluted moraine som overfladeform i de tidligere pleistocæne nedisningsområder, men i højere grad det forhold, at studier af fluted moraine har kunnet bidrage væsentligt til kendskabet om de processer, der foregår under en gletscher, som glider hen over et deformérbart underlag.

Idag er analysen af fluted moraine ved recente gletschere ført så langt, at det med rimelig sikkerhed kan konkluderes, at denne overfladeform giver oplysning om tidligere isbevægelsesretninger samt om gletschersålens temperaturforhold, da formen blev dannet.

Spredte iagttagelser af parallelstribninger på flyfotos (Svensson 1969 og 1970, Flint 1971, fig. 5–13) antyder, at fluted moraine kan iagttages i dele af de tidligere Pleistocæne nedisningsområder under gunstige omstændigheder, og i det føl-

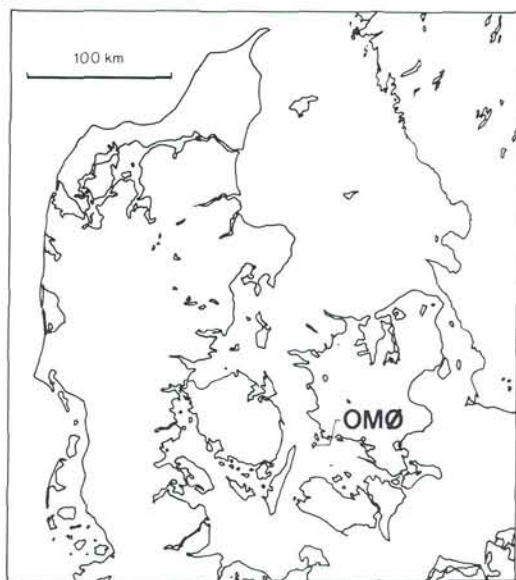


Fig. 3. Oversigtskort.

Location map.

gende skal en dansk forekomst af fluted moraine fra sen Weichsel beskrives fra Omø i Storebælt (fig. 3).

Omø

Omø's kvartærgeologi er behandlet af Jacobsen (1976 og 1977). Nogle hovedpunkter af den synlige kvartære lagsøjle på øen skal kort resumeres. Nær øens nordøstende findes i Skovbanke-partiet kystblotninger, i hvilke der nederst optræder en forstyrret bæk af till på ca. 5 m mægtighed. Denne till menes afsat af en NØ-is, og overlejres af 12–15 m smeltevandssedimenter. Smeltevandssedimenternes nederste del er ligeledes forstyrret og viser palaeostrømretning mod syd-vest, mens den øverste del er uforstyrret og viser palaeostrømretning mod nordvest.

Den yngste istidsaflejrning i kystklinerne er en todelt bæk af till, der menes afsat subglacialt af SSØ–SØ-is. I grænsezonen mellem de to bænke findes en blokhorisont, der et enkelt sted er udviklet som en egentlig glacial brolægning, med skurestriberetning SSØ–NNV.

Observationer

De iagttagelser, der skal redegøres for er gjort nær nordenden af Omø, i kystklingen i østsiden af Skovbanke-partiet. Her ses en SØ-till (Jacobsen 1977), der overlejrer smeltevandssand, hvis do-



Fig. 4. Kontaktzonen mellem smeltevandssand og den overliggende baltiske till på Omø. Set mod vest. Isbevægelsen menes at have været i retning mod nordnordvest. Bemærk den lille deformation til venstre i billedet. Bankestrukturerne i sandet angiver en palaeostrømretning mod nordvest.

The till-sand interface on Omø, viewed toward the W. Inferred glacier movement is toward the NNW. A small deformation is seen in the glaciofluvial sand near the left margin of the picture. Dune-structures (planar cross-stratification) in the sand are dipping toward the NW.



Fig. 5. Blok fastsiddende i kontaktzonen mellem sand og till på Omø. Set mod vest. Bemærk deformationerne i smeltevandssandet til højre for blokken.

A large boulder lodged at the till-sand interface. Deformations are seen in the glaciofluvial sand to the right of the boulder. The direction of viewing is toward the W.

minerende primære struktur er bankestrukturer, der angiver en palaeostrømretning mod nordvest.

Kontakten mellem till og smeltevandssand er knivskarp, og de primære strukturer i sandet ses som hovedregel at være uforstyrrede indtil få mm fra till'ens underside (fig. 4). Kun lokalt optræder mindre deformationer, der sædvanligvis ledsages af små reverse forkastninger. Både de plastiske deformationer og småforkastningerne af den viste type (fig. 4) angiver konsekvent en trykretning mod nordvest og nordnordvest.

Langs grænsezonen mellem till og smeltevandssand ses flere blokke, der halvvejs er begravet i sandet, halvvejs rager op i den overliggende till (fig. 5). Lokalt omkring disse blokke er smeltevandssandet deformeret og evt. gennemsat af små forkastninger. I et par blotninger sås deformationszonen at have særlig stor udstrækning på blokkens nordvestside. Her observeredes to trykretninger, dels mod nordøst, dels mod sydvest; dvs. vinkelret på den ovennævnte nordvestretning.

Ved andre blokke, der sad relativt langt inde i klinten (fig. 6), var det ikke muligt at undersøge

om tilsvarende deformationer var til stede, men det var karakteristisk, at undersiden af till-bænken buede ned i smeltevandssandet på disse blokkes sydøstside.

Set på afstand, kan grænsen mellem smeltevandssand og till generelt beskrives som en ret linie. Betragtet på tættere hold (fig. 7), ses den imidlertid at være ujævn, flere steder med en amplitude på 10–30 cm. Gravninger og eksisterende blotninger viste endvidere, at disse ujævnheder ikke var lokale tilfældige afvigelser fra en ret linie, men derimod var resultatet af kystklingens diagonale snit gennem et antal parallelle bølger af smeltevandssand, der ragede op i undersiden af till-bænken. Bølgenes længdeudstrækning målt til at have retningen 145° (bestemt som gennemsnit af 7 målinger, intervalgrænser 140° og 150°).

Diskussion

Jacobsen (1976) har undersøgt den dominerende stenorientering i SØ-till'en, og retningen af denne er som de nævnte skurestriber SSØ–NNV.



Fig. 6. Blok fastsiddende i kontaktszonen mellem sand og till på Omø. Set mod vest. Bemærk forløbet af grænselinien mellem smeltevandssand og till umiddelbart til venstre for blokken.

Boulder lodged at the till-sand interface. To the left of the boulder is seen the cross-section of a furrow ploughed by the boulder during lodgement. The direction of viewing is toward the W.

Partiklernes imbrikation angiver endvidere, at isbevægelsen var fra sydsydøst mod nord-nordvest – i overensstemmelse med orienteringen af folder i de underliggende sandlag (Jacobsen 1976, fig. 2, samt fig. 4 i nærværende artikel).

Det kan derfor fastslås, at den seneste isbevægelse over Omø foregik fra sydøstlig retning mod omtrent nordvest. Det er yderst iøjnefaldende, at denne retning er ganske sammenfaldende med orienteringen af det observerede bølgerelief i undersiden af till-bænken.

Det skal derfor foreslås, at de observerede bølger i undersiden af SØ-till'en på Omø i virkeligheden er negativaftryk af flutes (fig. 8), dannet da en baltisk is fra sydøstlig retning gled frem over en foranliggende smeltevandsslette.

Denne tolkning støttes ikke alene af den påviste parallellitet mellem isbevægelsesretning og bølgeform, men også af det forhold, at trugene imellem bølgetoppene (de formodede flutes) ofte viser en tydelig plan bund (fig. 7), svarende til bundmorænefladen mellem de enkelte flutes på fig. 1. Også de lokale forstyrrelser ved blokkene i grænsesonen till-sand (trykretninger vinkelret på isbevægelsesretningen) støtter tolkningen, idet

disse deformationer meget vel kan være resultatet af oppresningen af det underliggende sand i hulrum dannet på blokkenes læside ved isbevægelsen hen over disse (se fig. 8).

Smeltevandssandet umiddelbart under basis af till'en er ensartet, og blokkene i kontaktszonen må derfor betragtes som tilhørende et helt andet sedimentationsmiljø; d.v.s., at blokkene har næppe ligget på overfladen af smeltevandssletten inden SØ-isen nåede frem til denne, men er snarere aflejret fra gletschersålen. Inden blokkene aflejreredes, d.v.s. blev fastliggende i gletscherens underlag, har de formodentlig en tid lang pløjet frem gennem underlaget (se Krüger 1978, fig. 4, samt Krüger in press). Er den derved skabte fure senere udfyldt med till, opstår den struktur der er beskrevet fra Omø, hvor blokke i nogle tilfælde var ledsaget af en till-udfyldning på sydøst-siden (sml. fig. 6 og 8). Også denne iagttagelse kan således forklares ved den foreslåede tolkning af bølgerelieffet som negativaftryk af glaciale flutes.

Der kan fremføres to indvendinger mod den foreslåede tolkning: 1) Fluted moraine udformes sædvanligvis i till og ikke som på Omø, i smeltevandssand. 2) Den postulerede dannelse under



Fig. 7. Bølgerelief på undersiden af den baltiske till på Omø. Set mod nordnordvest.

The under side of the till bed on Omø, showing undulating relief with waves and depressions orientated SSE–NNW. The direction of viewing is toward the NNW.

en aktiv gletscher modsiges af det forhold, at de underliggende smeltevandssedimenter viser uforstyrrede primære strukturer helt op til sand-till grænsen.

Ingen af disse indvendinger umuliggør dog, at hypotesen om fluted moraine på Omø er korrekt. Selv om fluted moraine i langt overvejende grad er udformet i till ved recente gletschere, eksisterer der dog også observationer af fluted moraine udformet i smeltevandssand (Poul og Evans 1974). Heller ikke karakteren af kontaktzonen mellem till og det underliggende sediment repræsenterer et alvorligt argument imod antagelsen om aflejring af till'en fra en aktiv gletschers sål. Dette sidstnævnte forhold skal her diskuteres lidt nærmere.

Under tilstrækkeligt stort tryk kan de fleste materialer deformeres plastisk. Vedrørende den plastiske deformation af polykrystallin gletscheris, så beskrives den bedst ved hjælp af en polynomial flydelov (Lliboutry 1969, Colbeck og Evans 1973):

$$\dot{\epsilon} = A\sigma + B\sigma^3 + C\sigma^5 \quad (1)$$

hvor spændingen σ (bar) er direkte proportional med forskydningspændingen τ på det betragtede plan ($\sigma \approx 2\tau$). Flydelovens udseende viser, at deformationshastigheden $\dot{\epsilon}$ øges meget hurtigt, når σ vokser til større værdier end 1 bar. I praksis betyder denne sammenhæng, at forskydningspændingen τ ved en gletschersål ikke kan blive væsentligt større end ca. 1,5 bar. Opfattes denne værdi derfor som en maksimalværdi for τ , og antages det samtidig at styrken S_0 af et løst sediment med stor permeabilitet som fx. sand kan beskrives ved Coulomb-relationen (Harremoës m.fl. 1974):

$$S_0 = c + \sigma' \tan \varphi \quad (2)$$

kan der opstilles et krav til udviklingen af subglaciale deformationer. I (2) er c sedimentets kohæsion, σ' er den effektive normalspænding på det betragtede plan (den totale spænding minus et eventuelt porevandstryk) og φ er sedimentets friktionsvinkel. Kravet til subglacial deformation af et sediment med stor permeabilitet kan da formuleres som

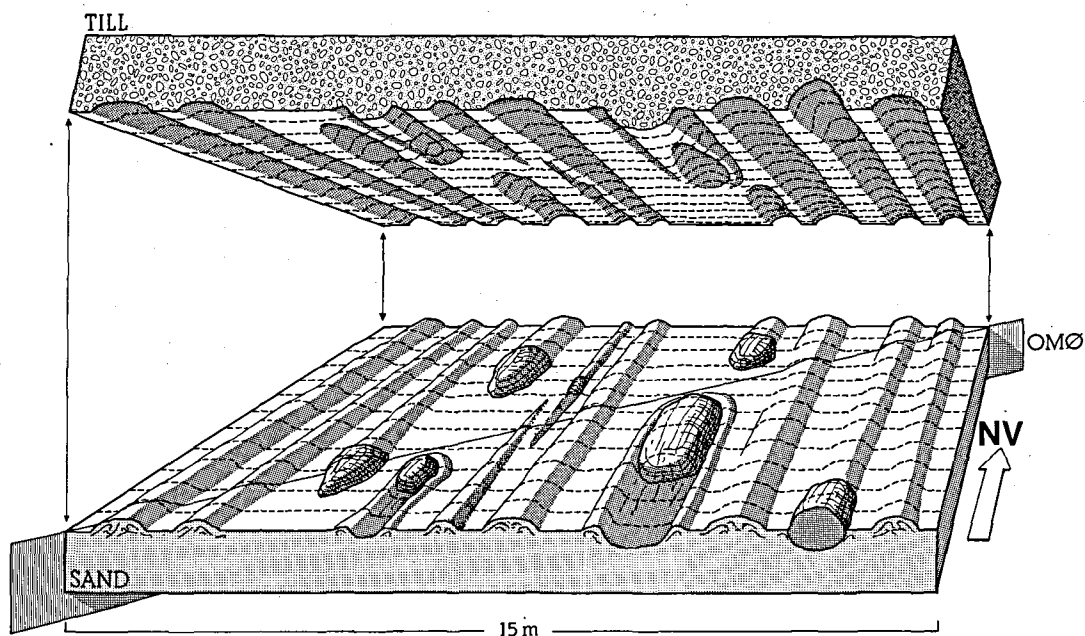


Fig. 8. Hypotetisk blokdiagram visende grænsefladen mellem smeltevandssand og SØ-till på Omø. Isbevægelsen har været parallel med pilen til højre, og grænsefladen er udformet som en flade med glacial flutes (sml.m. fig. 1). Det lodrette diagonalsnit angiver klintfacadens omtrentlige retning nord-syd.

Hypothetical diagram showing the interface between the till bed and the glaciofluvial sand on Omø. The interface is interpreted as a surface with glacial flutes, formed beneath a temperate glacier sole. Glacier movement parallel to the arrow (apr. NW). The vertical cross-section indicates the coastal cliff on Omø, where the observations were made (figs. 4–7).

$$\tau > S_0 \quad (3)$$

dvs.

$$\tau > c + \sigma' \tan \varphi \quad (4)$$

Betragtes sedimentet sand, er $c \approx 0$ og $\varphi \approx 30^\circ$. Antages $\tau_{\max} \approx 1,5$ bar, viser dette, indsat i (4), at subglacial deformation kun vil være mulig hvis $\sigma' < \text{ca. } 2,6$ bar. Denne spænding svarer omtrent til den belastning der udøves af 30 m gletscheris. Et advarende ord vil dog være på sin plads her. Styrkerelationen (4) må ikke generelt læses på den anden måde, at ved ismægtigheder større end ca. 30 m, mister en gletscher evnen til at deformere sit underlag – denne konklusion er kun rigtig for en gletscher med tør basis. Hvis der derimod er et stort porevandstryk under gletscheren, kan den vedblivende deformere underlaget selv ved væsentlig større ismægtighed. Den afgørende størrelse er altid differencen mellem isbelastnin-

gen og det subglaciale porevandstryk, dvs. størrelsen af den effektive normalspænding ved gletschersålen.

Det tilsyneladende paradoks, der er illustreret ved fig. 4, hvor en massiv bænk af en formodet subglacial till overlejrer smeltevandssand stort set uden deformationer, kan nu forklares ved de ovennævnte sammenhænge. Det krav der må stilles til situationen er blot det, at den effektive normalspænding mellem gletschersål og underlag i aflejringsøjeblikket var større end ca. 2,6 bar. Dette er langt fra et urealistisk krav at stille til en måske mange hundrede meter mægtig gletscher, og derfor menes da heller ikke det ovennævnte forbehold 2) at udgøre et vægtigt argument imod antagelsen om aflejring af till'en fra en aktiv gletschers sål. Specielt behøver en kontaktzone som vist på fig. 4 ikke at betyde, at det underliggende sand var frosset, da bænken af till blev aflejret.

Konklusioner vedrørende sedimentationsmiljøet Accepteres på det nævnte grundlag den fremførte tolkning: at bølgerelieffet på Omø er aftryk af

glaciale flutes, kan der drages en række konklusioner om de samtidige aflejningsforhold.

Isbevægelsesretning:

Orienteringen af de enkelte flutes samt deformationerne omkring blokke fastsiddende i kontaktzonen mellem till og smeltevandssand viser, at Omø på et sent tidspunkt af Weichsel blev overskredet af et isdække, der (i det mindste lokalt) bevægede sig fra sydsydøst mod nordnordvest. Dette svarer til Jacobsens (1976) resultater, baseret på undersøgelser af skurestriberetning og stenorienteringsmålinger.

Aflejringsmåde:

Forekomsten af flutes viser at aflejringen af den overliggende till sandsynligvis foregik subglaciel fra en aktiv gletscher. Dette vises også af blokke, der før den endelige aflejring har pløjet furer i smeltevandssandets overflade (fig. 6). Dannelsen af furerne forklares lettest ved at antage, at blokkene oprindeligt var indesluttet i en aktiv gletschers sål, og i takt med frismeltningen er blokkene kommet i kontakt med underlaget, og har pløjet furer i dette parallelt med isbevægelsen. Aflejringen af till menes derfor at være foregået kontinuert partikel-for-partikel (plastering-on, Holmes 1941; Boulton 1975), og ikke ved springvis stagnation af den smudsholdige gletschersål, som det er skildret af fx. Lawruschin (1971).

Temperaturregime:

Undersøgelser ved recente gletschere viser, at fluted moraine normalt dannes ved oppresning af gennemvædet materiale i langstrakte subglaciale hulrum. Fluted moraine menes derfor at være associeret gletschere med tempereret sål. Forekomsten af flutes på Omø opfattes dermed som et indicium for at den overliggende bæk af till er aflejret fra en gletschersål, hvis temperatur var på tryksmeltepunktet.

Tak

Forfatteren vil gerne takke professor Harald Svensson og lektor Johannes Krüger, der begge har gennemlæst manuskriptet og bidraget med kritiske kommentarer.

Litteratur

- Baranowski, S. 1970: The origin of fluted moraine at the fronts of contemporary glaciers. *Geografiska Annaler*, 52 A: 1, 68–75.
- Boulton, G. S. 1971: Till genesis and fabric in Svalbard. I »*Till: a symposium*«, ed. R. P. Goldthwait, Ohio State University Press, 41–72.
- Boulton, G. S. 1975: Processes and patterns of subglacial sedimentation: a theoretical approach. I »*Ice Ages: Ancient and Modern*«, ed. A. E. Wright og F. Moseley, Seel House Press, Liverpool, 7–42.
- Boulton, G. S. 1976: The origin of glacially fluted surfaces – observations and theory. *Journ. Glaciol.*, 17: 76, 287–309.
- Colbeck, S. C. og Evans, R. J. 1973: A flow law for temperate glacier ice. *Journ. Glaciol.*, 12: 64, 71–86.
- De Quervain, A. og Schnitter, E. 1920: Das Zungenbecken des Bifertengletschers. *Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, 55:2, 137–149.
- Dyson, J. L. 1952: Ice-ridged moraines and their relation to glaciers. *American Journal of Science*, 250, 204–211.
- Flint, R. F. 1971: *Glacial and Quaternary Geology*. John Wiley and Sons Inc., New York, 892p.
- Harremoës, P., Krebs Ovensen, N. og Moust Jacobsen, H. 1974: *Lærebog i Geoteknik 1*. Polyteknisk Forlag, København.
- Holmes, C. D. 1941: Till Fabric. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 52:9, 1299–1354.
- Hoppe, G. og Schytt, W. 1953: Some observations on fluted moraine surfaces. *Geografiska Annaler*, 35: 2, 105–115.
- Jacobsen, E. M. 1976: En morænestratigrafisk undersøgelse af klinterne på Omø. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1975*, 15–17.
- Jacobsen, E. M. 1977: Tur til Omø. *Varv*, Geologisk Museum, København, 2, 42–48.
- Krüger, J. 1978: Bestemmelse af isens bevægelsesretning i et bundmorænelandskab. *Geografisk Orientering*, tidsskrift for Geografforbundet, 8:3, 318–322.
- Krüger, J. og Humlum, O. 1978: Glaciale landskaber i Island og Danmark. *Geografisk Orientering*, tidsskrift for Geografforbundet, 8:2, 262–267.
- Krüger, J. in press.: Structures and textures in till indicating subglacial deposition. *Boreas*.
- Lawruschin, J. A. 1971: Dynamische Fazies und Subfazies der Grundmoräne. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 17:8, 337–343.
- Lliboutry, L. A. 1969: The dynamics of temperate glaciers from the detailed viewpoint. *Journ. Glaciol.*, 8:53, 185–205.
- Poul, M. A. og Evans, H. 1974: Observations on the internal structure and origin of some flutes in glaciofluvial sediments, Blomstrandbreen, north-west Spitsbergen. *Journ. Glaciol.*, 13: 69, 393–400.
- Svensson, H. 1969: Några problem rörande bottenpograpfin vid Södra Öland. *Geol. Fören. Stockholm Förhandl.*, 91, 87–100.
- Svensson, H. 1970: Spår av »fluted surfaces« från den senaste nedisningen. *Geol. Fören. Stockholm Förhandl.*, 92, 79–85.