NORGES VASSDRAGS- OG ENERGIVERK
VASSDRAGSDIREKTORATET
HYDROLOGISK AVDELING

ISTYKKELSESMÅLINGER PÅ FOLGEFONNA

OPPDRAGSRAPPORT
18 - 87

NORGES
VASSDRAGS- OG ENERGIVERK
BIBLIOTEK

OPPDRAGSRAPPORT 18-87

Rapportens tittel:	Dato: 1987-11-10
ISTYKKELSESMÅLINGER PÅ FOLGEFONNA	Rapporten er: Åpen
	Opplag: 75

Saksbehandler/Forfatter:	Ansvarlig:
Mike Kennett, Brekontoret Arne C. Sætrang, Brekontoret	Bjørn Wold

Oppdragsgiver:

L/L SUNNHORDLAND KRAFTLAG

Sammendrag:

Rapporten beskriver metode og resultater fra istykkelsesmålinger med breradar (radio-ekko) på Blomsterskarsbreen og Sauabreen.

Målingene ble gjort i mars 1987 med en 8 MHz pulsradar og med navigasjon ved hjelp av en kombinasjon av landmåling, distansemåling og fotografering av spor fra helikopter. Tilsammen 15 km profiler ble kjørt på Blomsterskarsbreen og 5 km på Sauabreen.

Resultatene er vist i fig. 5 og fig. 6.

FORORD

Foreliggende rapport er avslutning på bestilling (B 87 141) fra L/L Sunnhordland Kraftlag.

Formålet for arbeidet var måling av istykkelse over planlagte overføringstunnel traseer for å sikre at tunnelene ikke blir slått ut i isen.

Avdelingsingeniør Arne Chr. Sætrang har vært hovedansvarlig for planlegging og gjennomføring av feltarbeidet. Snøscooterene var utlånt av L/L Sunnhordland Kraftlag. Avdelingsingeniør Mike Kennett har vært hovedansvarlig for tolkning av dataene og utarbeidelse av denne rapporten.

Oslo, november 1987

Arne Tollar
Avdelingsdirektør

INNHOLD

		Side
1.	INNLEDNING	3
2.	FELTARBEIDET	4
3.	GLASIOLOGISKE FORHOLD	5
3.1	Radarbølgens hastighet	5
3.2	Radarbølgens frekvens	5
3.3	Bresprekker og hulrom	5
4.	BEARBEIDING AV DATA FRA FELT	6
4.1	Ferdskurver	6
4.2	Høydekurver	6
4.3	Radarkurver	8
5.	RESULTAT	9
6.	KONKLUSJON	9
7.	REFERANSER	12

1. INNLEDNING

Instrumenter og metoder for radio-ekko målinger ble utviklet i slutten av 1950 og begynnelsen av 1960 årene p.g.a. behovet for rask, nøyaktig og kontinuerlig måling av isbreers tykkelse (Drewry, 1981). Målinger ble utført på polare breer (Evans og Smith, 1969), men det tok mange år før teknikken kunne benyttes på tempererte breer (Watts m.flere, 1975).

Brekontoret anskaffet i 1981 en islandsk Mark II breradar (Sverrison m. flere, 1980). Enkle måleopplegg ble gjennomført på Bondhusbreen, Stegholtbreen og Nigardsbreen frem til 1984. Etter dette ble mer systematiske målemetoder benyttet.

I 1984 og 1985 ble det utført subglasial kartlegging med breradar på midtre Jostedalsbreen. Kartet som er publisert dekker et 60 km^2 stort område og benytter seg også av feltmålingene fra 1981 (Sætrang og Wold, 1986; Sætrang, 1986). I 1986 ble subglasial topografi av Svartisen (85 km^2) og nordre del av Jostedalsbreen (50 km^2) kartlagt med breradar (Sætrang og Holmqvist, 1987).

Den 12. mars 1987 ble den islandske breradar brukt for å måle istykkelse på Blomsterskarsbreen og Sauabreen. Denne rapporten beskriver metoden og resultatene fra Folgefonna (fig. 1).

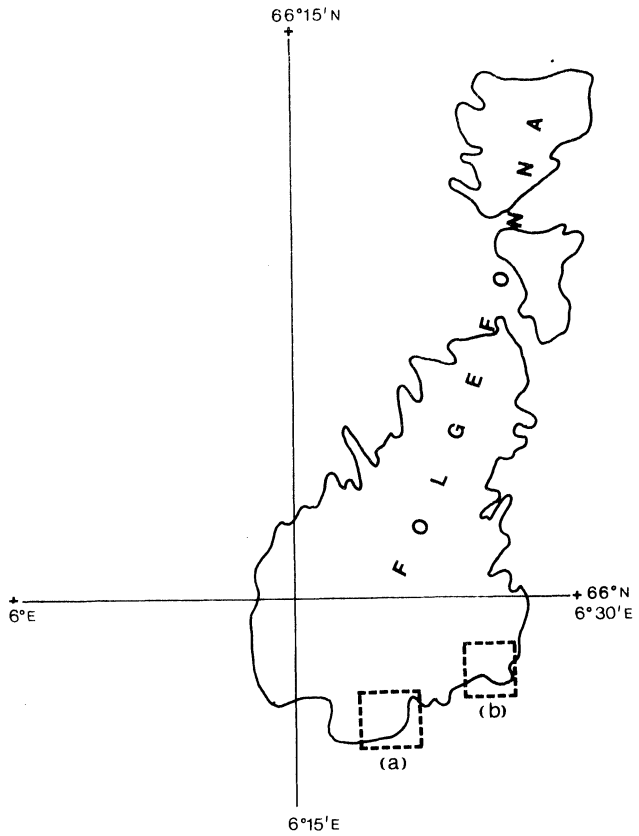


Fig. 1. De undersøkte områdenes beliggenheter på Folgefonna: (a) Blomsterskarsbreen og (b) Sauabreen.

Observasjoner med breradaren består av registreringer av en utsendt elektromagnetisk bølgepuls som går gjennom isen og reflekteres fra grenseflater mot bl.a. fjell, luft og vann p.g.a. disse medienes forskjellige elektriske ledningsevne. Gangtiden mellom utsendt puls og innkommet refleks blir målt, og avstanden til det reflekterende punktet (for eksempel berggrunnen under breen) kan beregnes (fig. 2.). Reflekser kan på enkelte områder av breen være lette å observere, mens det på andre områder kan være svært dårlig refleks. Spesielt i kupert terreng og sprekkeområder kan det være så mange ulike reflekser at de skygger over hverandre og gjør det vanskelig å definere bunnrefleksen. Mottageren og senderen taues bak en snøscooter i opptil 40 km/t. Det finnes idag ingen andre målemetoder enn radio-ekko sonderinger for å måle istykkelse over store områder på kort tid.

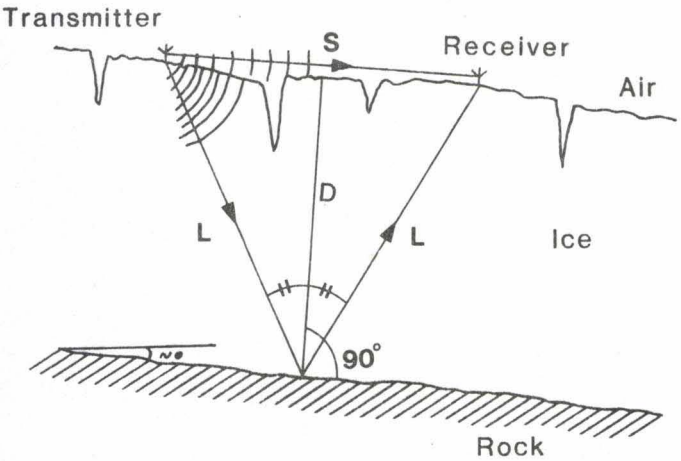


Fig. 2. Direkte og reflektert bølge i et tenkt tverrsnitt.

2. FELTARBEIDET

Feltmålingene består av tre typer måling; navigasjon (X og Y), høydemåling (Z) og istykkelsesmåling (D). Istykkelsesmålingene på Blomsterskarsbreen og Sauabreen ble foretatt med breradar og analoge signaler ble registrert på 35 mm negativ film for hver 2,56 m langs profilet. Breradaren var koblet til et odometerhjul som målte avstand langs profilet og styrte bildefremtrekket slik at ett bilde tilsvarte 800 m profillengde.

Målingene foregikk den 12. mars 1987 og det ble kjørt 20 km profiler tilsammen. Profiler ble merket med staker. På Blomsterskarsbreen ble disse innmålt neste dag av A/S Geoteam. Det var vanskelig å kjøre helt rette profiler. Derfor ble det tatt flybilder av scootersporene den 13. mars. Stakene på Sauabreen ble ikke innmålt, men navigasjon på breen var mye lettere enn på Blomsterskarsbreen. Kjøring av profiler var begrenset av overflatens skråning og sprekker.

3. GLASIOLOGISKE FORHOLD

3.1 Radarbølgens hastighet

Elektromagnetiske bølgers forplantningshastighet gjennom is er målt og beregnet av bl.a. Robin (1975). Han viser en sammenheng mellom bølgehastigheten (v) og mediets tetthet (rho)

$$v = c / (1 + rho/1175),$$

der c er lysets hastighet i vakuum. Formelen viser at bølgehastigheten avtar med økende tetthet. Velges en tetthet på 900 kg/m^3 blir hastigheten 169.9 m/µs.

Glen og Paren (1975) foreslår en bølgehastighet på 167.7 m/µs og bygger på den temperaturavhengige formelen til Gough (1972)

$$v = c / (3.093 + 0.000072 * T + 0.0000011 * T^2) **0.5,$$

der T er absolutt temperatur.

Begge formlene er på formen v = c / n, der n = epsr**0.5 er brytningsindeksen til mediet og epsr er mediets relative elektriske permittivitet. Størrelsen på den relative elektriske permittiviteten avhenger av mediets evne til å la seg polarisere og er for vann ca. 80, fjell mellom 6 og 10, is 3.15 og luft 1.0.

Målinger av bølgehastighet i borhull er gjort i Canada (Robin, 1975) og ga bl.a. 168.8 og 168.6 m/µs med en unøyaktighet på ± 0.2 m/µs.

I denne rapporten er det brukt en bølgehastighet på 169.0 m/µs under bearbeidingen av dataene.

3.2 Radarbølgens frekvens

Tempererte breer inneholder vann i porer, sprekker, kanaler, o.s.v.. Frekvensen til radarbølgen er valgt slik at vannansamlingene ikke skal absorbere eller reflektere all energien i pulsen. Båndbredden er 2 til 10 MHz med resonansfrekvens på 8.1 MHz som gir en bølgelengde i isen på 21 m. Radarens oppløsning er 8 m og minimums- og maksimumsdyp som kan måles er henholdsvis 30 og 1300 m (Sverrisson m. flere, 1980).

For polare breer som ikke inneholder fritt vann kan frekvensen til radarbølgen, og derfor målenøyaktigheten, økes vesentlig. Som eksempel gir 300 MHz en bølgelengde i isen på bare 56 cm. Nøyaktigheten i avlesning av ekkoet er vanlig å sette til ±1/4 bølgelengde.

3.3 Bresprekker og hulrom

Hulrom, kanaler og sprekker danner trolig det interne vann-

dreneringssystemet til breen og er et bindeledd mellom overflate-avrenning og subglasial drenering av nedbør og smeltevann.

Sprekker dannes ved at skjærspenningene er større enn normal-spenningene og dette sees oftest i brefallene, men det er også sprekker i breen under snølaget på de øvre platåene.

Radarbølgene reflekteres fra disse inhomogenitetene i isen dersom størrelsen på dem er på en bølgelengde eller mer. Ekkoet fra bunnen vil ofte være forstyrret av disse refleksene. Studier av reflekser fra hulrom er gjort i Sverige og det er mulig å bestemme om hulrommene er fylt av luft eller vann (Kennett, 1987).

4. BEARBEIDING AV DATA FRA FELT

Et punkt på flaten under breen er bestemt av de tre koordinatene X, Y og Z_b. Navigasjon gir grunnlag for beregninger av X og Y, mens kart over breoverflaten (Z_o) og istykkelsesmåling (D) gir grunnlag for beregning av $Z_b = Z_o - D$. Dermed er det 3 uavhengige datasett som sammen gjør det mulig å beregne subglasiale punkter.

4.1 Ferdskurver

Ferdskurver blir plottet ut på kart i målestokk 1:20 000 med bruk av landmålingsresultatene, odometerhjul-målinger og foto av spor fra helikopter. De beregnete ferdskurvene sees på fig. 3. NGO I koordinat system ble brukt.

4.2 Høydekurver

Grunnlag for høydekurver har vært Hordaland Fylkes Økonomisk kart i 1:20 000 konstruert fra flyfotografering i 1967.

Ferdskurvene ble avtegnet på kartet over breoverflaten (fig. 3) og skjæringspunkter mellom ferdskurve og koter ble manuelt plottet i et høydekurvediagram. En kontinuerlig kurve ble trukket for hånd gjennom skjæringspunktene (fig. 5) som angir overflaten av isen. Usikkerhet i avlesning av høydeverdier (Z_o) antas å være ±2 m, mens avtegning av ferdskurve til kart antas å være ±20 m (X og Y). Høydevariasjoner i breoverflaten siden 1967 er ikke tatt hensyn til. A/S Geoteam's målinger av 7 staker på Blomsterskars-breen viser mellom 0 m og 10 m høyre enn kartet, med gjennomsnitt 6 m.

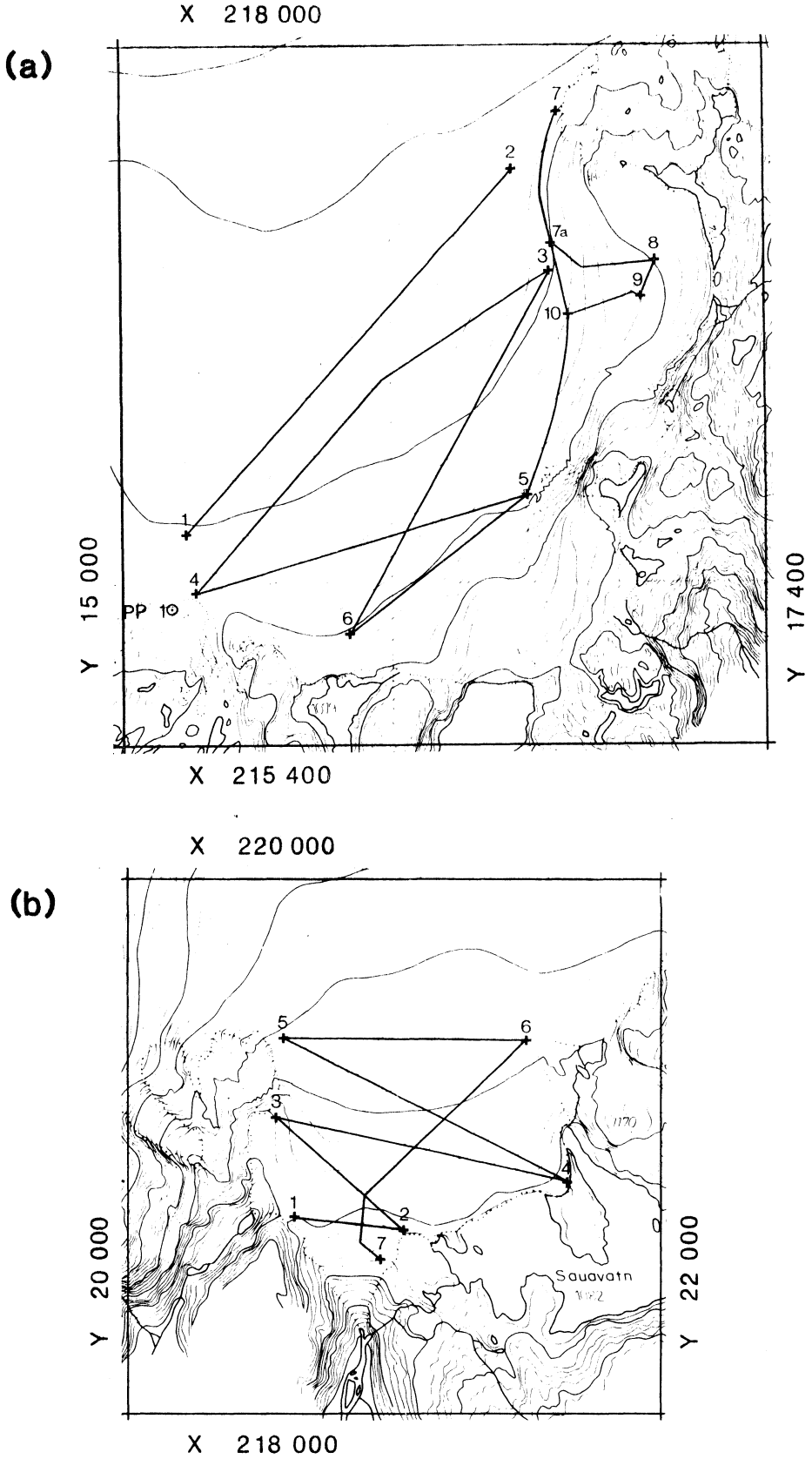
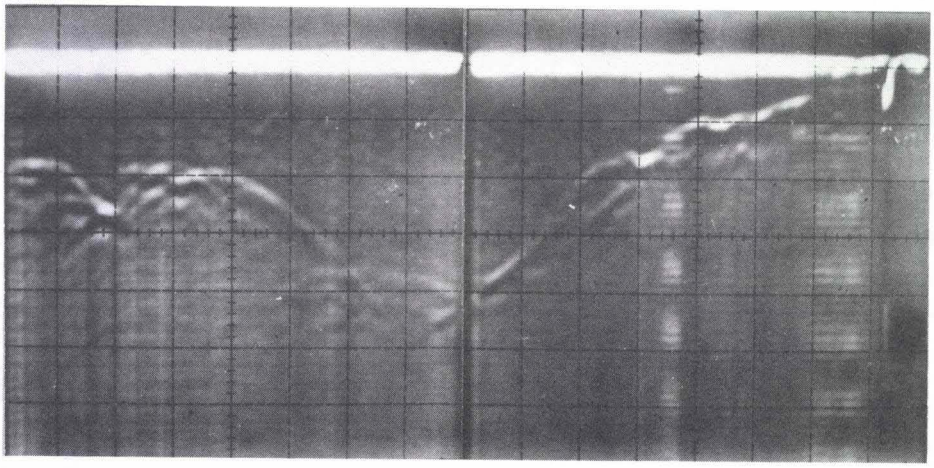


Fig. 3. Profiler kjørt på (a) Blomsterskarsbreen og (b) Sauabreen.

4.3 Radarkurver

Negativfilmene med radarregistreringene ble kopiert i 1:1. Vertikalskalaens (tidsaksens) nullpunkt ble avlest på et amplitudemodulert kontrollsignal. Horisontalskalaen (lengde langs profilet) ble justert relativt til ferdskurven p.g.a. odometerhjulets sluring i snøen.

Radarkurvenes odometerlengde ble sammenlignet med ferdskurvenes lengde. Radarbildene ble manuelt tolket og avtegnet på diagram der nøyaktighet til den reflekterte bølgen ble notert langs profilet (fig. 4).



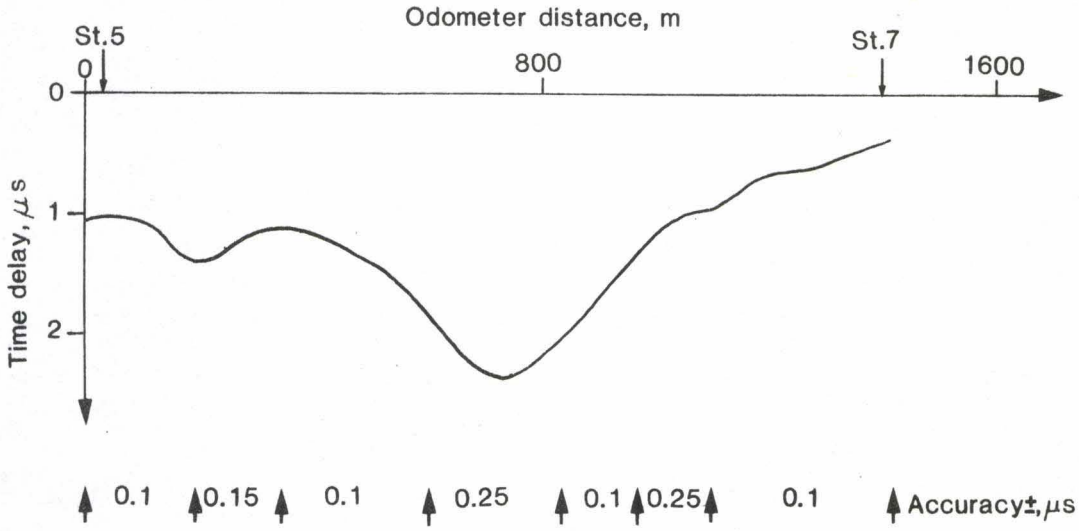


Fig. 4. Rekonstruksjon av bunnrelieff fra breradarregistreringer.

Istykkelsen ble beregnet ut fra følgende resonnement. Breradaren sender ut energi radielt symmetrisk i en lobe vinkelrett på antennens lengdeutstrekning. Dette medfører at breradaren "ser" like godt til sidene for profilet som loddrett ned, men den ser

ikke like godt fremover og bakover i profilet som loddrett ned. Sidereflekser er derfor et større problem enn reflekser forfra og bakfra langs profilet. Rekonstruksjon av breens bunn ut fra sidereflekser kan gjøres hvis det blir kjørt parallell-profiler. Refleksene som registreres ligger antagelig sjelden rett under profilet, men dette må antas ved bunnprofilberegningene som er gjort.

Enkelte forutsetninger og forenklinger kreves for å kunne gi entydig informasjon om istykkelsen:

a) at tolket bunnrefleks tilnærmet kom fra ett punkt loddrett under midten mellom sender og mottager;
b) at bølgehastigheten var konstant;
c) at bølgeforplantningen var rettlinjet;
d) at direktebølgen gikk i luftlaget umiddelbart over isen; og
e) at breens og berggrunnens overflater var tilnærmet horisontale.

Når dette er oppfylt kan istykkelsen midt mellom sender og mottager beregnes.

Avstanden S mellom sender og mottager tilsvarer bølgelengden i isen og mottageren ble trigget (etter tid T_s) av direktebølgen. Den reflekterte bølgen ble vist på mottager monitoren etter tid $T_m = T - T_s$, der T var den reflekterte bølgens gangtid over avstand 2*L (fig. 2). Direktebølgens gangtid i luftlaget (V_o = 300 m/µs i luft) kan skrives $T_s = S/V_o$. Den reflekterte bølgens gangtid kan skrives $T = 2*L/V_i = T_m+T_s$ (V_i (i is) = 169 m/µs). Pythagoras setning gir $L^2 = D^2 + (S/2)^2$ og kombinasjon av de nevnte ligninger gir istykkelsen

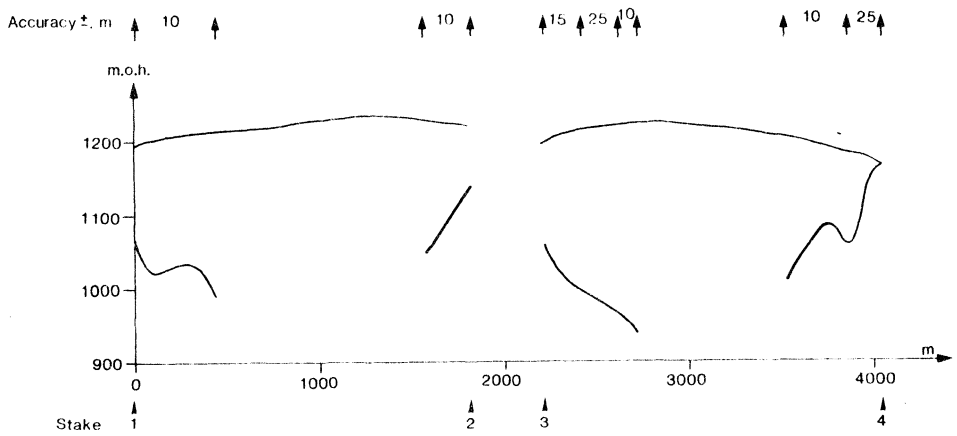
$$D = ((V_i/2*(S/V_o+T_m))^2 - (S/2)^2)**0.5 .$$

5. RESULTAT

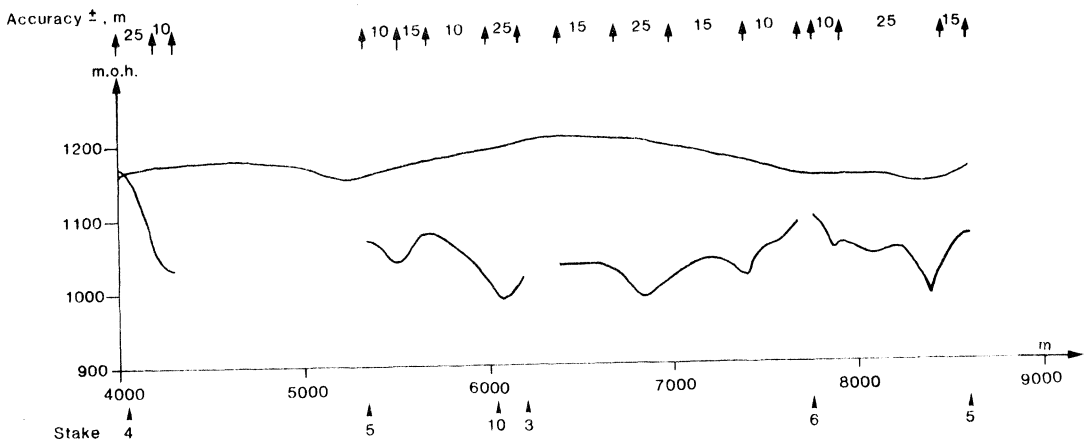
Isoverflate og bunnprofiler ble tegnet fra kartet og istykkelsesmålingene (fig. 5). Bunnens høyde ble plottet ut på kartet og koter ble trukket manuelt med ekvidistanse på 50 m (fig. 6). Det er bare under profillinjer at istykkelsen er kjent. Kotene er stiplet fordi topografien mellom profilene er meget usikker. Nøyaktighet i bunnens høyde er mellom ±10 m og ±25 m, som angitt på fig. 5.

6. KONKLUSJON

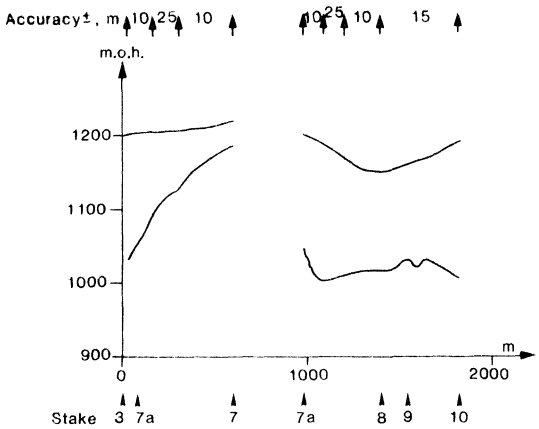
Rapporten beskriver metode og resultat ved istykkelsesmålinger på Blomsterskarsbreen og Sauabreen. Profilenes x og y nøyaktighet er ±20 m. Bunnhøydens (z) nøyaktighet er mellom ±10 m og ±25 m,



BLOMSTERSKARSBREEN
Ice surface and bed topography, 1

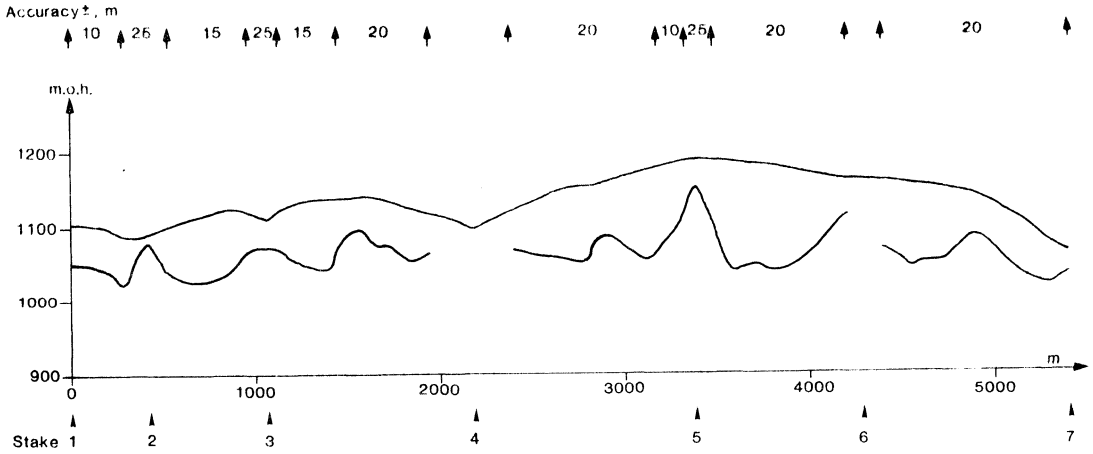


BLOMSTERSKARSBREEN
Ice surface and bed topography, 2



BLOMSTERSKARSBREEN
Ice surface and bed topography, 3

Fig. 5(a). Isoverflate og bunnprofiler på Blomsterskarsbreen.



SAUABREEN
Ice surface and bed topography.

Fig. 5(b). Isoverflate og bunnprofiler på Sauabreen.

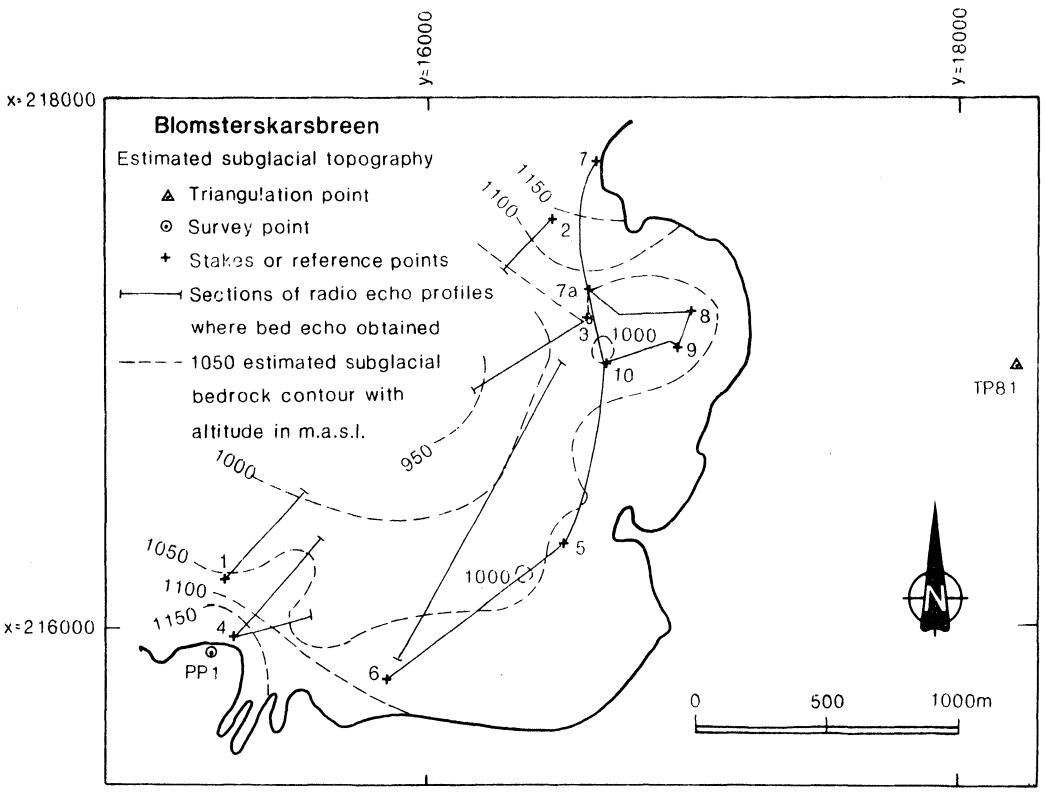


Fig. 6(a). Subglasial topografi under Blomsterskarsbreen.

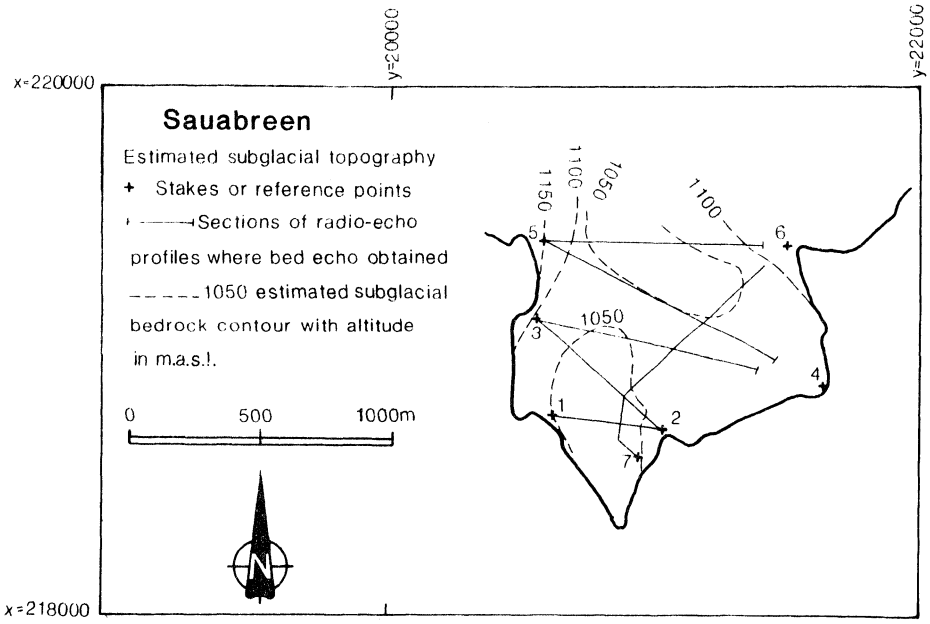


Fig. 6(b). Subglasial topografi under Sauabreen.

avhengig av hvor klart bunn-ekkoet synes over sidereflekser og ekkoer fra hulrom o.s.v. Noen steder ble bunn-ekkoet mistet fordi det var for mye støy fra SW-radio eller dybden gikk utenfor måleområdet som ble benyttet.

A/S Geoteams landmålingsresultater angir at Blomsterskarsbreens overflate var ca. 6 m høyere enn angitt på Hordaland Fylkes kart. Derfor kan de beregnede bunn profilene på Blomsterskarsbreen (fig. 5(a)) bli 6 m for lave. Unøyaktigheten i bunnens høyde er likevel større enn dette.

7. REFERANSER

Drewry, D.J.
1981: Radio echo sounding of ice masses: principles and applications. Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology. Ellis Horwood, England.

Evans, S. og Smith, B.M.E.
1969: A radio echo apparatus for sounding polar ice sheets. Journal of Scientific Instruments, Ser. 2, Vol. 2, No. 2.

Glen, J.W. og Paren, J.G.
1975: The electrical properties of snow and ice. Journal of Glaciology, Vol. 15, No. 73.

Gough, S.R.
1972: A low temperature dielectric cell and the permittivity of hexagonal ice to 2 K. Canadian Journal of Chemistry,

Vol. 50, No. 18.

Kennett, M.
1987: Ph.D. avhandling. An analysis of the scattering of radio waves within a temperate glacier. Department of Physics, University of Bristol, February 1987.

Robin, G. de Q.
1975: Velocity of radio waves in ice by means of a bore-hole interferometric technique. Journal of Glaciology, Vol. 15, No. 73.

Sverrisson, M. m. fler.
1980: Intstruments and methods. Radio-echo equipment for depth sounding of temperate glaciers, by M.Sverrisson, Æ.Johannesson, and H.Bjørnsson. Journal of Glaciology, Vol. 25, No. 93.

Sætrang, A.C. og Wold, B.
1986: Results from the radio echo-sounding on parts of the Jostedalsbreen ice cap, Norway. Annals of Glaciology, Vol. 8, 1986.

Sætrang, A.C.
1986: Radio-ekko sondering på temperert isbre. Hovedfagsopp gave i faste jords fysikk, Institutt for geofysikk, universitetet i Oslo 1986.

Sætrang, A.C. og Holmqvist, E.
1987: Kartlegging av istykkelse på nordre Jostedalsbreen 1986. Oppdragsrapport 8-87, Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og energiverk.

Watts, R.D. m. fler.
1975: Radio-echo sounding on Cascade Glacier, Washington, using a long wavelength mono-pulse source, by R.D.Watts, A.W.England, R.S.Vickers, and M.F.Meier. Journal of Glaciology, Vol. 15, No. 73.