## NORGES VASSDRAGS-OG ELEKTRISITETSVESEN



# GLASIOLOGISKE UNDERSÖKELSER I NORGE 1976

RAPPORT NR. 7-77

VASSDRAGSDIREKTORATET

HYDROLOGISK AVDELING

OSLO JULI 1977

## NORGES VASSDRAGS-OG ELEKTRISITETSVESEN



## GLASIOLOGISKE UNDERSÖKELSER

## I NORGE 1976

Redigert av Jon Ove Hagen

Bidragsytre: Herman Döhlen, Jon Ove Hagen, Olav Liestöl, Arne Lium, Sigmund Messel, Lars Roald, Arve Tvede og Gunnar Östrem

RAPPORT NR. 7-77

## VASSDRAGSDIREKTORATET

HYDROLOGISK AVDELING

OSLO JULI 1977

#### FORORD

Da Hydrologisk avdeling startet breundersøkelser i Norge i 1962 var dette diktert av ønsket om å få bedre greie på breenes innflytelse på avløpet, både når det gjelder de daglige og de årlige variasjoner. Dengang sto Jostedalsbreen i fokus fordi Statskraftverkene hadde begynt å undersøke mulighetene for utnyttelse av de relativt store potensielle vannkraftressurser i områdene rundt breen. Avløpsdata var det svært lite av og pålitelige informasjoner om breen fantes ikke, så derfor ble bl.a. breundersøkelser satt igang på Nigardsbreen og senere ved andre breer i Syd-Norge.

Måleserien med data fra Nigardsbreens hydrologi og klimatologi er nå den nest lengste i landet, og verdien av data øker etterhvert som tiden går. Bl.a. ser det ut til at den lange årrekke med bre-tilbakegang – noe som de fleste fjellvandrere sikkert har lagt merke til – nå er i ferd med å stoppe. Iallefall har Jostedalsbreen begynt å legge på seg igjen, noe som selvsagt har betydelige hydrologiske konsekvenser – det blir mindre vann i bre-elvene.

Foreliggende rapport, som inngår i en serie av årlige publikasjoner, gir resultatene fra glasiologiske undersøkelser i Norge foretatt i 1976. Rapporten inneholder bidrag fra flere forfattere (jfr. innholdsfortegnelsen) som igjen bygger på en rekke observasjoner og bearbeidelser foretatt av Brekontorets faste stab og en rekke kort-tidsansatte "sommerassistenter". J.O.Hagen har denne gang hatt hovedansvaret for den aller største delen av teksten og alle tekniske detaljer ved redaksjon og utgivelse. Det vil føre for langt å nevne alle andre som har deltatt aktivt i arbeidet med datainnsamling, bearbeidelse og tilrettelegging av materialet. Felles for dem alle er at de har arbeidet målbevisst for å få ut denne rapporten noe raskere enn ellers, for å komme i rute med den årlige publiseringen av resultatene fra våre breundersøkelser. Undersøkelsene av slammet i bre-elvene utgis i en egen, liknende rapportserie.

Oslo i juli 1977

Gunnar Østrem

## INNHOLD

Materialhusholdningen, meteorologiske og hydrologiske undersøkelser	
ved utvalgte breer (Jon Ove Hagen)	4
Innledning	4
Metodikk	6
Ålfotbreen	8
Blomsterskardbreen (Arve Tvede)	13
Nigardsbreen	15
Hardangerjøkulen (Olav Liestøl)	21
Storbreen (Olav Liestøl)	22
Hellstugubreen	23
Gråsubreen	25
Høgtuvbreen	28
Engabreen	31
En sammenlikning av materialhusholdningen på enkelte breer	37
Energibalansen på utvalgte breer (Sigmund Messel)	40
Innledning	40
Resultater	41
Diskusjon	42
Analyse av meteorologiske data og avløpsdata for Folgefonn-området	
(Lars Roald)	46
Innledning	46
Datagrunnlag	47
Resultater	47
Konklusjoner	48
Bondhusbreen (Jon Ove Hagen)	49
Innledning	49
Undersøkelser i forbindelse med subglasiale vanninntak	53
Diskusjon	64
Anleggsmessige synspunkter på breinntaket (Herman Døhlen)	66
Bevegelsesmålinger (Arne Lium)	70
Resultater fra Nigardsbreen, Høgtuvbreen og Engabreen	70

Side

Summary (Gunnar Østrem)	74
Mass balance studies, meteorological and hydrological	
investigations at selected glaciers	74
The energy balance on selected glaciers	83
An analysis of meteorological data and discharge from the	
Folgefonni area	84
Bondhusbreen, the subglacial water intake	85
Ice velocity measurements	91

## Litteratur

•

.

MATERIALHUSHOLDNINGEN, METEOROLOGISKE OG HYDROLOGISKE UNDERSØKELSER VED UTVALGTE BREER

#### Innledning

Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen har i 1976 foretatt glasiologiske undersøkelser på 4 breer i Sør-Norge og 2 breer i Nord-Norge. I tillegg har Norsk Polarinstitutt foretatt massebalansemålinger på 3 breer i Sør-Norge. Undersøkelsene er foretatt i følgende områder :

1) Ålfotbreen, 2) Folgefonni, 3) Hardangerjøkulen, 4) Jostedalsbreen,

5) Jotunheimen og 6) Svartisen.

På Ålfotbreen i Nordfjord foretas undersøkelsene på en nordvendt brearm som nå drenerer til Store Åskåravann. Dette vassdrag er ferdig utbygd av Sogn og Fjordane fylke, og undersøkelsene er pålagt utbyggeren i konsesjonsbetingelsene. Utgiftene deles likt mellom Elektrisitetsforsyningen i Sogn og Fjordane og Hydrologisk avdeling i NVE. Målingene har pågått siden høsten 1962. I 1976 ble det foruten materialbalansemålinger også foretatt endel meteorologiske registreringer.

På Folgefonni ble nettobalansen målt på Blomsterskardbreen som ligger på den sørvestlige siden av Folgefonni. Målingene her ble foretatt av Norsk Polarinstitutt.

På Hardangerjøkulen ble materialbalansen målt på Rembesdalsskåki som drenerer til Simadalen og som inngår i Eidfjordanleggenes interesseområde. Undersøkelsene ble igangsatt i 1963, og blir fra og med 1971 finansiert og utført av Norsk Polarinstitutt.

På Jostedalsbreen har NVE fortsatt undersøkelsene på Nigardsbreen. Dette var den første bre der Brekontoret utførte målinger av materialhusholdningen, og arbeidene har pågått kontinuerlig siden 1962. Nigardsbreen er spesielt interessant som hydrologisk objekt da planene for Breheimverkene forutsetter et subglasialt elveinntak under bretunga. I 1976 ble det i tillegg til bremålingene også foretatt meteorologiske observasjoner. Undersøkelsene bekostes av Statskraftverkenes generalplanavdeling.

I Jotunheimen er materialhusholdningen målt på Storbreen, Hellstugubreen og Gråsubreen. Målingene på Storbreen i Vest-Jotunheimen har vært utført av Norsk Polarinstitutt siden 1948 og de utgjør den nest lengste måleserie i sitt slag i verden. På Hellstugubreen og Gråsubreen har målingene pågått siden 1963. Utgiftene dekkes for tiden av Hydrologisk avdeling.

I Nord-Norge ble det i 1970 satt igang målinger på Engabreen og Trollbergdalsbreen i Svartisområdet. Disse målingene ble supplert med undersøkelser av en utløper fra



and the second se

#### Høgtuvbreen fra og med 1971.

Målingene er en del av Svartisundersøkelsene som finansieres av Statskraftverkene i forbindelse med kraftutbyggingsplanene i denne del av Nordland. Tidligere ble målinger foretatt også på Trollbergdalsbreen, men disse ble avsluttet i 1975. På Engabreen ble det i tillegg til bremålingene også foretatt meteorologiske observasjoner (samt slamundersøkelser i bre-elven, men disse omtales i en særskilt rapport).

#### Metodikk

## Materialhusholdningen

Metodikken som brukes ved massebalansemålinger av norske breer er utførlig beskrevet i tidligere årsrapporter fra Hydrologisk avdeling, se f.eks. Pytte 1969 og 1970. Arbeidsprosedyrer og måleteknikken som anvendes, bygger i hovedtrekkene på en arbeidsmanual utarbeidet av G.Østrem og A.Stanley. Interesserte henvises til denne (Østrem & Stanley 1969).

Målingene ble i 1986 fortsatt etter tidligere års prinsipper fordi en har funnet at disse er hensiktsmessige for praktisk bruk. Terminologien bygger på retningslinjer utarbeidet av "Commission on Snow and Ice of the International Association of Scientific Hydrology" (UNESCO 1970). Betydningen av de forskjellige termer og symboler er illustrert på fig. 2.

Vinterbalansen måles normalt i månedene april og mai ved sondering av snødypet i flere punkter utover breflaten. Sonderingene refererer seg alltid til forrige års sommeroverflate som kan bestå av breis eller firn, alt etter hvor på breen en befinner seg. I det første tilfelle er det normalt ingen vanskelighet å lokalisere sommeroverflaten med sonden, mens det kan være vanskelig og ofte umulig å lokalisere forrige års snøoverflate dersom denne er dårlig utviklet. I slike tilfeller er en avhengig av målinger på staker nedboret i breen.

Ved å ta opp snøprøver med et kjernebor er det også mulig å lokalisere siste sommers snøoverflate dersom denne framstår som en distinkt horisont. Hvis dette må gjøres i mange punkter blir akkumulasjonsmålingene en meget arbeidskrevende prosess.

Snøens tetthet måles bare i noen få punkter på breen og fortrinnsvis i forskjellige høydenivåer. Den vanligste metoden er å grave seg ned til sommeroverflaten og måle volum og vekt av snødekket med en stålsylinder som slås vertikalt ned i snøen. Er snødypet over 4-5 m blir denne arbeidsmåten vanskelig å praktisere og man er nødt til å ta opp snøprøver med et kjernebor for å kunne foreta tetthetsbestemmelser.

Snøens vannverdi kan deretter bestemmes i en rekke punkter utover breflaten. Alle



SS=time of formation of a summer surface

Fig. 2 Balansen i et punkt er vist som funksjon av tiden, og den terminologi som benyttes i det stratigrafiske system er angitt.
The balance as measured at a point is illustrated in relation to time.
The term used in the stratigraphic system is indicated in the diagram.

punktene plottes på et kart og deretter trekkes isolinjer gjennom punkter med lik vinterbalanse. Breens totale vinterbalanse  $(B_w)$  målt i m $^3$  vann og den spesifikke vannverdien  $(b_w)$  målt i m kan nå regnes ut ved å planimetrere dette kartet.

Som oftest vil det akkumulere endel snø på breen også etterat hovedmålingene er foretatt. Denne tilleggsakkumulasjonen kan enkelte ganger måles direkte ved målestedene, men vanligvis må den beregnes ut fra nedbør og temperaturobservasjoner på meteorologiske stasjoner nær breen. I årets resultater er vinterbalansen angitt som balansen slik den ble målt ved hovedmålingene dersom ikke annet er nevnt i teksten. Sommerbalansen måles i utvalgte punkter på breen ved at de vertikale forandringer ved stakene registreres gjennom sommeren. Dette gjøres ved å ta parallelle målinger av stakenes lengde over breoverflaten samt av tettheten i den gjenværende snø og firn. Siste måling foretas normalt etter at neste balanseårs akkumulasjon har startet.

Sommerbalansen målt ved stakene overføres til et kart over det aktuelle breområdet og isolinjer gjennom punkter med lik sommerbalanse kan trekkes. Kartet kan så planimeterbehandles og de søkte verdier  $B_s$  og b<sub>s</sub> beregnes. Sommerbalansen fordeler seg normalt mer regelmessig over breflaten enn vinterbalansen fordi den nesten alltid vil synke med stigende høyde. Særlig utpreget er dette på de maritime breene hvor konveksjon fra varm luft yter et vesentlig bidrag til smelteprosessen. En tilstrekkelig nøyaktig bestemmelse av sommerbalansen kan derfor basere seg på langt færre punktmålinger enn vinterbalansen.

Nettobalansen beregnes som den algebraiske sum av vinterbalansen og sommerbalansen  $(b_n = b_w + b_s)$  og er positiv i det tilfellet at breen har øket sin masse i løpet av balanseåret, negativ dersom breens masse er blitt mindre. Gjennom de punkter på breen der nettobalansen er null trekkes den såkalte likevektslinje.

## Meteorologiske og hydrologiske observasjoner og beregninger

Disse er stort sett foretatt etter samme mønster som forrige år. Målinger av varmebalansen er iår utført på Engabreen og Nigardsbreen. Disse målingene er ment å skulle danne basis for en beregning av de forskjellige meteorologiske faktorers innflytelse på smelteprosessen, både som et gjennomsnitt for hele sommeren og i kortere perioder med forskjellige værforhold. Beregninger og presentasjon av materialet er utført av cand.real. S.Messel.

Ellers er registreringer av skydekket, vindretning og styrke, lufttemperaturen, fuktighet og nedbør foretatt etter omtrent det samme mønster som tidligere år (se Pytte 1970). Sommernedbørens fordeling er også forsøkt registrert i noen brefelter ved måling av regnmengder oppsamlet i et større eller mindre antall "Pluvius"målere plasert utover breflaten.

Avløpet fra de breer der en har faste observatører blir registrert med limnigrafer eller ved regelmessige vannstandsobservasjoner. Døgnavløpet er beregnet og satt inn i observasjonsdiagrammene sammen med de tilhørende meteorologiske observasjoner. Alle observasjonsdiagrammer er også iår tegnet maskinelt med kurveplotteren på NVE's dataanlegg. Programmet som utfører plottingen er utarbeidet av statshydrolog J.Andersen og metoden er arbeidssparende selv om endel ettertegning alltid vil være nødvendig for publikasjonsøyemed.

#### Ålfotbreen

## Materialhusholdning

Vintersesongens første måling var den 9.oktober. Da var det kommet 30-100 cm snø. Ved besøket den 3.desember var det kommet 200-300 cm snø. 17 staker ble funnet og målt. Fram til neste besøk den 27.januar kom det store mengder snø slik at ingen staker ble funnet igjen. Det hadde da kommet 300-400 cm snø på sju uker. Det ble satt ut åtte erstatningsstaker. Ved besøket i slutten av mars ble disse stakene funnet igjen, og det ble tatt en tetthetsmåling av vinterens snøakkumulasjon. Snødybden lå da på 650-750 cm. Fram til akkumulasjonsmålingene den 5.mai kom det ytterligere omlag 250 cm snø. Snødypet ble da målt ved sonderinger på 115 punkter langs profiler vist på fig. 3. I tillegg ble snødybden kontrollert med ni kjerne-



Position of stakes, pits and sounding profiles



Fig. 3 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderinger i 1976. The location of stakes, pits and soundings in 1976.

## Part of ÅLFOTBREEN 1976

Winter balance in cm of water equivalent



Fig. 4 Kart over vinterbalansen 1976. Map showing the winter balance for 1976.

boringer, og det ble foretatt tetthetsmålinger av snøakkumulasjonen siden mars ved stake 7. På dette grunnlag ble det utarbeidet et vinterbalansekart, fig. 4. Snødypet varierte fra 850-1000 cm og vinterbalansen ble beregnet til 21,0  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann, noe som tilsvarer en vannmengde på 4,40 m jevnt fordelt over breflaten eller en avrenning på 139 1/s km<sup>2</sup> gjennom et helt år. Dette er 23% mer enn i et normalår (i perioden 1963-1975) men er likevel ikke eksepsjonelt.

Sommersesongens målinger ble foretatt 22.juni, 13.juli, 13.august, 14.september og 15.oktober. Sommeren var nokså kjølig, og bare i 1973 og 1974 er det målt lavere ablasjonsverdier. Ved minimumsmålingene den 15.oktober var det is/firn kun på en liten del av breen mellom 950 og 1100 m. Ablasjonen lå på 85% av det normale for perioden 1963-1975. Sommerbalansen ble beregnet til 13,7  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. Det vil si et vannlag på 2,9 m fordelt jevnt over breen eller 91 1/s km<sup>2</sup> fordelt på et helt år.

Den høye vinterakkumulasjonen sammen med den lave sommerablasjonen førte til at det ble en positiv nettobalanse i alle høydeintervall. I området mellom 950 og 1050 m ble det frilagt et lite område med blåis, men det var ikke stort nok til å gi en negativ massebalanse i hele høydeintervallet. De store snømengdene førte til at det ikke var synlig firn eller is det meste av sommeren. Dermed holdt albedoen seg høy slik at ablasjonen ble noe mindre enn vi normalt ville fått med sommerens værforhold. Siden målingene tok til i 1963 har det bare vært målt større masseøkning i





Winter, summer and net balances in relation to elevation. Glacier area and areal values of net balance for every 50 m height interval are illustrated. 1973, og det er sjette året på rad at nettobalansen er positiv. Overskuddet ble 7,3  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup>, dette tilsvarer et vannlag på 1,53 m over hele breen eller en avrenning på 48 1/s km<sup>2</sup> gjennom et helt år.

Årets likevektslinje ble dermed liggende nedenfor selve breen, se fig. 5.

		Vinterbalar	nse		Somme	erbalanse		Nettobalanse		
Høyde- intervall	Areal	Bw	ł	)w	Bs		bs	Bn	b	n
m.o.h.	km <sup>2</sup>	106 m <sup>3</sup>	m	l/s km <sup>2</sup>	$106m^{3}$	m	l/s km²	106m3	m	l/s km <sup>2</sup>
1350 - 1380	0,245	1,082	4,42	140	0,505	2,06	65	0,577	2,36	75
1300 - 1350	1,015	4,294	4,23	134	2,426	2,39	76	1,868	1,84	58
1250 - 1390	0,811	3,575	4,41	140	2,068	2,55	81	1,507	1,86	59
1100 - 1250	0,765	3,430	4,48	142	2,111	2,76	88	1,319	1,72	55
1150 - 1200	0,649	2,961	4,56	145	1,953	3,01	96	1,008	1,55	49
1100 - 1150	0,553	2,480	4,48	142	1,819	3,29	104	0,661	1,19	38
1050 - 1100	0,356	1,551	4,36	138	1,278	3,59	114	0,273	0,77	24
1000 - 1050	0,216	0,883	4,09	130	0,855	3,96	126	0,022	0,13	4
950 - 1000	0,125	0,545	4,36	138	0,510	4,08	129	0,035	0,28	.9
900 - 950	0,047	0,219	4,66	148	0,199	4,23	134	0,020	0,43	14
870 - 900	0,004	0,018	4,54	144	0,015	3,87	123	0,003	0,67	21
870 - 1380	4,786	21,038	4,40	139	13,739	2,87	91	7,299	1,53	48

## ÅLFOTBREEN 1976

## Meteorologiske observasjoner

Ved observasjonshytta ble det også dette året satt opp en termograf, en hygrograf og en pluviograf. Alle instrumentene hadde månedsomløp, de ble satt igang den 22. juni og med et lite avbrudd i august gikk de fint fram til 15.oktober. De ble ettersett en gang hver måned. Resultatene er presentert i fig. 6.

Middeltemperaturen for hele perioden var  $6,0^{\circ}$ C, og ingen døgn hadde negativ temperatur. Kaldest var 14.oktober da det ble målt  $0,0^{\circ}$ C, mens varmeste var den 7.juli da det ble målt 14,4°C. Middeltemperaturen for juli, august og september var henholdsvis  $6,2^{\circ}$ C,  $9,3^{\circ}$ C og  $4,6^{\circ}$ C. For hele måleperioden er temperaturgradienten mellom Førde i Sunnfjord og Ålfotbreen beregnet til  $0,68^{\circ}$ C/100 m med et standardavvik på 50% for 105 observasjonsdøgn.

Pluviografen gikk hele perioden uten avbrekk. Det ble registrert 103 mm for 22.-30.juni, 158 mm for juli, 139 mm for august, 105 mm for september og 226 mm for 1.-15.oktober. For hele observasjonsperioden ble det totalt registrert 731 mm. Maksimal døgnnedbør ble registrert den 2.august og var på 70 mm. 59 døgn av 116 var helt uten nedbør, og hele perioden 15.september til 5.oktober var fri for nedbør.

Hygrografen hadde et avbrekk på 11 dager i august, men ellers fungerte den tilfredsstillende. Midlere vanndamptrykk for 105 observasjonsdøgn var på 8,2 mb med høyeste døgnverdi på 14,1 mb den 29.august og laveste på 4,4 mb den 6.juli. Ialt hadde 9





Fig. 6

Resultatene av de daglige meteorologiske observasjonene ved hytta på Ålfotbreen (910 m o.h.).

The results of the daily meteorological observations at Ålfotbreen (910 m a.s.l.).

døgn og derav 4 i oktober et midlere vanndamptrykk lavere enn 6,1 mb og følgelig var det en mulighet for sublimasjon for breoverflaten disse dagene. I tillegg har det sikkert vært muligheter for avdunsting også i kortere perioder andre døgn.

#### Blomsterskardbreen

#### Materialhusholdning

Ved et besøk på breen 24.september ble ingen av stakene som var synlige høsten 1975, gjenfunnet. Tre nye staker ble satt ut i omtrentlig samme posisjoner som de nedsnødde stakene. Det er likevel mulig å foreta en beregning av nettobalansen også for dette balanseåret og unngå et brudd i måleserien. Hele breen ble nemlig flyfotografert 21.september 1976 (Fjellanger-Widerøe nr. 5282) og den temporære snøgrensa på fotografiene kunne forholdsvis enkelt overføres til et topografisk kart over breen. Ny snø dekket på dette tidspunkt breen høyere enn ca. 1370 m o.h., eller nøyaktig over det nivå som regnes å representere likevektslinja i et år med balanse i materialhusholdningen. Flyfotograferingen ble følgelig utført på et meget gunstig tidspunkt. Den temporære snøgrensa som igjen kan regnes å representere årets likevektslinje, var ikke forstyrret av nysnøen og lå i gjennomsnitt 1210 m o.h. (variasjonsbredde 1130-1260 m o.h.).

For å kunne anvende likevektslinjas høyde til å beregne breens nettobalanse, tok en i bruk en framgangsmåte som er beskrevet av Liestøl (1967 s. 46). For de år hvor både likevektslinjas høyde og nettobalansen er kjent, er samhørende verdier plottet mot hverandre i et aksediagram. For Blomsterskardbreen kjenner en disse verdiene for perioden 1970-75, ialt 6 år. Resultatet er vist i fig. 7. Det er tydeligvis et meget nært og tilnærmet lineært samband mellom de to variablene. Med den nøyaktige bestemmelse av likevektslinja en har fått i 1976, skulle det derfor være forsvarlig å bruke diagrammet til å beregne nettobalansen. Liknende gode overensstemmelser har Østrem (1975 s. 411-412) også funnet for en rekke breer i Skandinavia og Canada.

Årets nettobalanse er satt til +1,40 m. Fra høsten 1969 har følgelig Blomsterskardbreen i middel øket med 6,3 m vann, eller 0,9 m pr.år. På grunn av Blomsterskardbreens moderate overflatehastighet og den lange avstand fra likevektslinja til brekanten (ca. 5 km) er det beregnet at breen har en meget lang reaksjonstid, anslagsvis 25-30 år (Tvede 1972). En kan derfor ikke vente at masseøkningen siden 1970 vil gi seg utslag i noe markert framstøt av brefronten før om flere år. En sammenlikning av flybilder fra august 1959 med bildene fra september 1976, viser svært små eller ingen endringer av brekantens posisjon. Blomsterskardbreen må derfor antas å ha nådd en dynamisk likevektstilstand med

de klimaforhold som har hersket de siste 30-40 år. Dette står i motsetning til praktisk talt alle andre breer i Skandinavia.

Det er også interessant å notere den gode samvariasjon det har vært mellom nettobalanseverdiene på Ålfotbreen og Blomsterskardbreen. Ålfotbreen har hatt et gjennomsnittlig nettooverskudd lik 0,82 m pr.år i perioden 1970-76. Samvariasjonen mellom Ålfotbreen og Blomsterskardbreen, med innbyrdes avstand 205 km, men begge med ekstremt maritime klimaforhold, er bedre enn samvariasjonen mellom Ålfotbreen og Nigardsbreen hvor avstanden er 80 km. Dette styrker antagelsen om at massebalansevariasjonene i Sør-Norge de siste 15 år har vært mer bestemt av klimatisk beliggenhet, i praksis avstanden fra vestkysten, enn av geografisk avstand mellom breene, se Tvede (1974).



BLOMSTERSKARDBREEN FOLGEFONNI

Fig.7 Høyden av den årlige likevektslinjen i forhold til nettobalansen (b) på Blomsterskardbreen.

Elevation of annual equilbrium lines plotted against measured net balances  $(b_n)$  at Blomsterskardbreen.

### Nigardsbreen

## Materialhusholdning

Kraftig snøfall og vedvarende uvær førte til at bare 11 staker ble funnet ved besøket på breen den 10.-18.desember. De samme stakene ble funnet og skjøtt den 26. januar. Den 10.-12.mars ble det satt ut 5 erstatningsstaker, det ble tatt snøprøver og lagt ut fargefelt ved stake 52 og 56. Snødybden varierte fra 350-650 cm. Akkumulasjonsmålingene ble foretatt i tiden 22.-27.april. 15 staker var da fortsatt inntakt. Det var kommet 140-150 cm snø siden besøket i mars, og snøtettheten ble igjen målt ved stake 52 og 56. Snødybden ble målt i 240 sonderingspunkter etter et fordelingsmønster som vist på fig. 9. Dybden varierte fra 350 til 800 cm. På dette grunnlag ble det utarbeidet et vinterbalansekart som er vist på fig. 10. Totalt ble vinterbalansen beregnet til 138,9  $\cdot 10^6 \text{m}^3$  vann eller 2,88 m jevnt fordelt over breflaten. Dette er 25% mer enn normalt og siden 1962 har det bare vært målt større vinterbalanse i 1967.

Stasjonen på Steinmannen var fast bemannet fra 16.juni til 1.september. Stakene ble avlest hver uke og wirene på bretunga hver 10.dag. Dessuten ble tre staker like ved hytta avlest hver dag. Minimumsmålinger ble foretatt 10.oktober. Det var mye varmt, pent vær så den totale ablasjonen ble 30% høyere enn gjennomsnittet for pe-



Fig. 8 Temporær snøgrense på Nigardsbreen 18.juli 1976. Transient snowline at Nigardsbreen on July 18, 1976. rioden 1962-75. Totalt ble ablasjonen 119,6  $\cdot$  10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> vann, eller tilsvarende en spesifikk vannverdi på 2,48 m.

På grunn av de store snømengdene ble det til tross for den kraftige avsmeltingen en total masseøkning i breen på 19,3  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann. Dette tilsvarer et vannlag på 0,40 m og er nesten akkurat lik den gjennomsnittlige årlige økningen siden 1962.

Likevektslinjen ble liggende på 1540 m o.h.

## Meteorologiske observasjoner

Observatørene på Steinmannen foretok også endel meteorologiske observasjoner i perioden 15.juni til 1.september. Målingene fulgte samme mønster som tidligere år, og endel resultater er presentert i fig. 12.

Midlere skydekke for hele perioden på 76 observasjonsdøgn var 6/10. 13 dager var helt eller nesten skyfri mens 20 dager hadde tett skydekke eller tåke.



Fig. 9 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1976. The location of stakes, pits and sounding profiles in 1976.

Vindstyrkens døgnmiddelverdi varierte fra 1,3 m/s den 8.august til 16,1 m/s den 27.juni. For hele observasjonsperioden var den midlere vindstyrken 5,2 m/s, noe som er litt høyere enn middelet for de siste ti år.

Middeltemperaturen for hele sesongen ble ved Steinmannen (1630 m o.h.) på  $4,8^{\circ}$ C, dvs.  $1,0^{\circ}$ C høyere enn normalt for perioden 1965-75. Middelet for juli var også  $4,8^{\circ}$ C og for august  $5,5^{\circ}$ C. Høyeste døgnlige verdi ble målt til  $10,9^{\circ}$ C den 9.august, mens det laveste ble målt den 1.september med  $-3,4^{\circ}$ C. 10 dager hadde negativ temperatur, og derav en syvdagersperiode fra 28.juli til 3.august.

Ved bur B (1840 m o.h.) var sesongens middeltemperatur  $2,6^{\circ}C$ . I juli var middelet  $2,7^{\circ}C$  og i august  $3,4^{\circ}C$ . Høyeste døgnmiddel ble målt den 28.august og var  $10,1^{\circ}C$ . Laveste var  $-3,8^{\circ}C$  den 31.juli. 20 av 77 observasjonsdøgn hadde negativ middel-temperatur.

Gradienten mellom Steinmannen og bur B var 0,99°C/100m. Temperaturgradienten mellom



Fig. 10 Kart over vinterbalansen 1976. Map showing the winter balance for 1976. Bjørkehaug (320 m o.h.) og Steinmannen (1630 m o.h.) var for hele perioden  $0,68^{\circ}$ C/100 m, med et standardavvik på 21%. Mellom Bjørkehaug og bur B var gradienten  $0,71^{\circ}$ C/100 m, med et standardavvik på 17%.

Ved Steinmannen ble nedbøren målt både i en normalnedbørsmåler, en pluviograf og en pluvius. Det var bra samsvar mellom målingene i pluviografen og normalnedbørsmåleren med henholdsvis 159 mm og 170 mm for hele måleperioden. Pluviusen derimot målte hele 250 mm. Den viste høyere nedbørstall ved alle målingene, og grunnen kan være at pluviusens innfangingsnivå er bare 30 cm over bakken mens normalnedbørsmåleren står vel 1 m over marka. Verdiene for standardnedbørsmåleren fordeler seg på 57 mm i juni, 67 mm i juli og 46 mm i august. Det var nedbør i 35 av de 76 observasjonsdagene. Normalnedbørsmåleren registrerte nesten 60 mm mindre nedbør enn gjennomsnittet for perioden 1965-75. Nedbøren på Bjørkehaug var i samme periode 158 mm, altså 12 mm mindre enn normalnedbørsmåleren på Steinmannen registrerte.



Fig. 11 Variasjonene med høyden over havet av vinter-, sommer- og nettobalanse, samt breens arealfordeling og arealverdier av netto-balansen i hvert 50 m høydeintervall.

Winter, summer and net balances in relation to elevation. Glacier area and areal values of net balance for every 50 m height interval are illustrated.

#### NIGARDSBREEN 1976



Fig. 12 Resultatene av de daglige meteorologiske observasjonene på Nigardsbreen (1630 m o.h.) og beregnet døgnavløp ved limnigrafen i Nigardsvatnet.

The diagram illustrates the daily meteorological observations on Nigardsbreen (1630 m a.s.1.) and computed daily discharge at the stream gauge in Nigardsvatnet. Midlere vanndamptrykk for hele perioden var 7,0 mb. Månedsmidlet for juli var 7,0 mb og for august 7,1 mb. 16 døgn hadde et vanndamptrykk på under 6,1 mb og samtidig positiv temperatur. Disse døgn og i deler av andre døgn kan det ha forekommet en viss sublimasjon eller avdunsting direkte fra breflaten.

## Avrenning

Fra 1. juni til 1. september passerte ialt 139,4  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann forbi limnigrafen ved utløpet av Nigardsvann. Det fordelte seg på 27,5  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> i juni, 64,7  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> i juli og 47,2  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> i august. Største døgnavløp ble målt den 10. juli og var på 2,7  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann, mens midlere døgnavløp var på 1,5  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann. Nesten 75% av dreneringsarealet for utløpet av Nigardsvann er bredekket, slik at det meste av vanntilgangen skyldes smelting på breen. Sammenlikner vi avrenningstallet 139  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> med sommerbalansen på 119  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> så ser en at tallene stemmer bra overens.

		Vinterbalanse			Som	merbala	nse	Nettobalanse			
Høyde- intervall	Areal	Bw	b	w	Bs	t	os	Bn	b	n	
m.o.h.	km2	(106m3)	(m)	(l/km2s)	(106m3)	(m)	(l/km2s)	(106m3)	(m)	(l/km2s)	
1900 - 1960	0,31	1,240	4,00	127	0,341	1,10	35	0,899	2,90	92	
1800 - 1900	3,93	14,281	3,64	115	4,983	1,27	40	9,298	2,37	.75	
1700 - 1800	9,35	31,641	3,38	107	14,169	1,51	48	17,472	1,87	59	
1600 - 1700	12,76	40,754	3,19	101	24,560	1,92	61	16,194	1,27	40	
1500 - 1600	9,62	25,067	2,60	82	26,787	2,78	88	-1,720	-0,18	- 6	
1400 - 1500	6,12	15,002	2,45	78	18,664	3,05	97	-3,662	-0,60	- 19	
1300 - 1400	2,18	4,822	2,21	70	7,478	3,43	109	-2,656	-1,22	- 39	
1200 - 1300	0,88	1,784	2,03	64	3,423	3,89	123	-1,639	-1,86	- 59	
1100 - 1200	0,44	0,830	1,89	60	1,922	4,37	139	-1,092	-2,48	- 79	
1000 - 11 <del>0</del> 0	0,54	0,923	1,71	54	2,685	4.97	157	-1,762	-3,26	- 103	
900 - 1000	0,45	0,714	1,59	50	2,475	5,50	174	-1,761	-3,91	-124	
800 - 900	0,47	0,659	1,40	45	2,844	6,05	192	-2,185	-4,65	- 147	
700 - 800	0,31	0,388	1,25	40	2,131	6,87	218	-1,743	-5,62	-178	
600 - 700	0,38	0,461	1,21	39	2,933	7,72	245	-2,472	-6,51	- 206	
500 - 600	0,26	0,200	0,77	24	2,200	8,46	268	-2,000	-7,62	-244	
400 - 500	0,14	0,077	0,55	17	1,330	9,50	301	-1,253	-8,95	-284	
300 - 400	0,06	0,024	0,40	13	0,630	10,50	333	-0,606	-10,10	-320	
300 - 1960	48,20	138,867	2,88	91	119,555	2,48	79	19,312	0,40	12	

#### NIGARDSBREEN 1976

## Hardangerjøkulen

## Materialhusholdning

Målingene foretas på Rembedalsskåki, en vestlig utløper av Hardangerjøkulen. Den har vestlandsklima og hadde i år en svært høy vinterakkumulasjon. Bare tre staker nær toppen av breen overlevde vintersesongen, og de store snømengdene gjorde det vanskelig å sondere snødybden. Resultatet ble en vinterbalanse på 2,45 m vann fordelt over breflaten. Sommeren var svært varm og sommerbalansen ble målt til 2,30 m. Det ble dermed en nettoøkning i breens masse på 0,15 m vann jevnt fordelt over breflaten. På grunn av målevanskelighetene er usikkerheten satt til ± 0,20 m.



HARDANGERJØKULEN 1976

Fig. 13 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdiene av nettobalansen.
Winter, summer and net balances in relation to the elevation, the area distribution and the areal net balance.

## Materialhusholdning

Snøakkumulasjonen var i balanseåret 1975/76 preget av store mengder i vest og mer moderat akkumulasjon øst for vannskillet. Storbreen er lokalisert omtrent på vannskillet og er mest influert av vestlandsklimaet. Vinterbalansen ble i år målt til 1,80 m vann jevnt fordelt over breflaten, noe som er 30% mer enn midlet for de siste 27 år. Sommeren var svært varm og resulterte i en ablasjon på 1,90 m slik at nettobalansen ble negativ og tilsvarte -0,10 m vann.

> mas.l. 2100 โร 2000 1900 1800 1700 distributio 1600 1500 1400 1300 - -3 -2 -1 0 1 2 m water equivalent

STORBREEN 1976



## Materialhusholdning

Årets vinterakkumulasjon ble målt den 15. og 16.mai. Tidligere på vinteren hadde breen bare blitt besøkt en gang, den 24.januar, og da ble alle stakene funnet. Snødybden ved akkumulasjonsmålingene varierte fra ca. 10 cm nederst på bretunga til mere enn 500 cm øverst i de sørvestlige botnene. Dybden ble sondert i 140 punkter etter profiler vist på fig. 15. Snøtettheten ble målt ved stake 46 på 1960 m o.h. og ved stake 15 på 1650 m o.h. På dette grunnlag ble vinterbalansekartet, fig. 16, tegnet.



HELLSTUGUBREEN 1976 Winter balance in cm of water equivalent



- Fig. 15 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderinger i 1976. The location of stakes, pits and soundings in 1976.
- Fig. 16 Kart som viser vinterbalansen 1976.

Map of the winter balance 1976.

Totalt ble vinterbalansen beregnet til 3,83  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann. Dette tilsvarer en spesifikk vannverdi på 1,16 m eller en avrenning på 37 1/s km<sup>2</sup> over et helt år. Dette er litt over gjennomsnittet for perioden 1963-75, men variasjonene er ikke store på denne breen.

I ablasjonssesongen ble stakene målt den 20.juli og 15.august. Minimumsmålingene ble foretatt først den 16.november. Sommeren var varm og preget av mye pent vær. Dette resulterte i en ablasjon som var 36% større enn middelet for perioden 1963-75, og bare to ganger tidligere har det vært målt større avsmelting. Sommerbalansen ble beregnet til 6,29  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann, noe som tilsvarer et vannlag på 1,89 m jevnt fordelt over breflaten.

Som en følge av den varme sommeren ble netto-balansen negativ. Breen mistet en total masse på 2,46  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann. Dette tilsvarer et vannlag på 0,73 m, et ekstra tilskudd i avrenningen på 23 1/s km<sup>2</sup> fordelt over et år eller 56 1/s km<sup>2</sup> fordelt over fem sommermåneder. Med unntak av 1974 har breen hatt negativ nettobalanse hvert år siden 1968.

Årets likevektslinje ble liggende på 1970 m o.h.



Fig. 17 Variasjonene med høyden over havet av vinter-,sommer- og nettobalanse, samt breens arealfordeling og arealverdier av netto-balansen i hvert 50 m høydeintervall.

Winter, summer and net balances in relation to elevation. Glacier area and areal values of net balance for every 50 m height interval are illustrated.

#### **HELLSTUGUBREEN 1976**

1		Vinterbala	nse		Sommert	oalanse	2	Nettobalanse		
Høvde-	Areal	Bw	bu	1	Bs	bs	5	Bn	bi	n
intervall m.o.h.	km <sup>2</sup>	$106m^{3}$	m	l/s km <sup>2</sup>	106m <sup>3</sup>	m	l/s km <sup>2</sup>	106m3	m	l/s km <sup>2</sup>
2150 - 2200	0.021	0.042	2.00	63	0,019	0,96	30	0,023	1,04	33
2100 - 2150	0.088	0.176	2,00	63	0,084	0,95	30	0,092	1,05	33
2050 - 2100	0,306	0.502	1,64	52	0,337	1,10	35	0,165	0,54	17
2000 - 2050	0,165	0.276	1,67	53	0,206	1,25	40	0,070	0,42	13
1950 - 2000	0,372	0,625	1,68	53	0,539	1,45	46	0,086	0,43	13
1900 - 1950	0,605	0,569	0,94	30	0,986	1,63	52	-0,417	-0,70	- 22
1850 - 1900	0,369	0,376	1,02	32	0,672	1,82	58	-0,296	-0,80	- 25
1800 - 1850	0,348	0,393	1,13	36	0,696	2,00	63	-0,303	-0,87	- 28
1750 - 1800	0,149	0,177	1,19	38	0,325	2,18	69	-0,148	-1,01	- 32
1700 - 1750	0,146	0,194	1,33	42	0,343	2,35	75	-0,149	-1,02	-32
1650 - 1700	0,213	0,243	1,14	36	0,541	2,54	81	-0,298	-1,40	-44
1600 - 1650	0,182	0,178	0,98	31	0,495	2,72	86	-0,317	-1,74	-55
1550 - 1600	0,196	0,069	0,35	11	0,568	2,90	92	-0,499	-2,55	-81
1500 - 1550	0,110	0,007	0,06	2	0,337	3,06	97	-0,330	-3,00	-95
1450 - 1500	0,045	0,001	0,02	1	0,146	3,25	163	-0,145	-3,22	-102
1450 - 2200	3,315	3,830	1,16	37	6,29	1,89	60	-2,46	-0,73	-23

#### Gråsubreen

### Materialhusholdning

Breen ble ikke besøkt i vintersesongen før den 22.april da det ble foretatt akkumulasjonsmålinger. 11 staker var da fortsatt synlige og det ble foretatt 75 sonderinger av snødybden etter et fordelingsmønster vist på fig. 18. Det var lett å sondere over hele breen. Snøens tetthet ble målt ved stake 8 og ved stake 14. Snøen samler seg vesentlig på de nedre deler av breen, mens de øvre deler blåses nesten fri for snø. Fordelingen av vinterbalansen er vist på fig. 19.

Totalt ble vinterbalansen 1,6  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, dette tilsvarer 0,62 m vann jevnt fordelt over breen. Dette er litt i underkant av det vanlige og utgjør ca. 86% av midlere vinterbalanse målt etter 1963.

I sommersesongen ble breen besøkt 21.juli, 19.august og 17.november. På grunn av de små snømengdene ble det på de midtre og høyere deler av breen blottlagt is og firn tidlig på sommeren. Dermed blir det her en mindre albedo enn på de laveste deler av breen. Fordi omlag 70% av den totale ablasjonen på Gråsubreen forårsakes av strålingen får albedoen stor betydning. Lavest albedo høyt oppe på breen gjør at forskjellen i ablasjon oppe og nede på breen blir mye mindre enn høydeforskjellen skulle tilsi. Sommerbalansekurva på fig. 20 blir svært bratt. Totalt ble sommerbalansen 4,1  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann. Det utgjør et vannlag på 1,62 m jevnt fordelt over breen, eller en avrenning på 51 1/s km<sup>2</sup> over et helt år eller 154 1/s km<sup>2</sup> gjennom fire sommermåneder. Dette var en litt lavere sommerbalanse enn i 1975, men likevel var den 155% av midlere sommerbalanse for perioden 1963-1975.



Fig. 18 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1976. The location of stakes, pits and sounding profiles in 1976.





Netto-balansen ble dermed negativ, totalt ble den -2,5  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. Dette utgjør en spesifikk vannverdi på -1,00 m eller et ekstra tilskudd i avrenningen på 95 l/s km<sup>2</sup> fordelt over fire sommermånder.

Det store underskuddet i materialhusholdningen er det nest høyeste som er målt siden 1963, bare i 1969 ble det målt større underskudd. Likevektslinjen ble dermed liggende langt over breens høyeste deler, jfr. balansediagrammet som er vist på fig. 20.



## GRÅSUBREEN 1976

## Fig. 20

Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 50 m høydeintervall.

Winter, summer and net balance in relation to the elevation, the area distribution and areal net balance in every 50 m height interval.

Höyde	Areal	Vinterbalanse			Sommer	balanse		Nettobalanse		
intervall	km 2	Bw	bv	N	Bs	Bs bs		Bn bi		n
m o.h.	кш	106m3	m	l/s km2	106 <sub>m</sub> 3	m	l/s km2	106m <sup>3</sup>	m	l/s km²
2250 - 2300	0.034	0.013	0 38	12	0.043	1 26	40	- 0.030	- 0.88	- 28
2200 - 2250	0,179	0,091	0,51	16	0,252	1,40	18 44	- 0,161	- 0,89	- 28
2150 - 2200	0,305	0,170	0,56	18	0,455	1,49	47	- 0,285	- 0,93	- 30
2100 - 2150	0,384	0,162	0,42	13	0,611	1,59	50	- 0,449	- 1,17	- 37
2050 - 2100	0,416	0,215	0,52	17	0,657	1,58	50	- 0,442	- 1,06	- 34
2000 - 2050	0,464	0,262	0,56	18	0,759	1,64	52	- 0.497	- 1,08	- 34
1950 - 2000	0,457	0,334	0,73	23	0,801	1,75	56	- 0,467	- 1,02	- 32
1900 - 1950	0,214	0,243	1,13	36	0,391	1,82	58	- 0,148	- 0,69	- 22
1850 - 1900	0,065	0,072	1,11	35	0,118	1,82	58	- 0.046	- 0,71	- 23
1850 - 2300	2,518	1,562	0,62	20	4,087	1,62	51	- 2,525	- 1,00	- 32

#### **GRÅSUBREEN 1976**

#### Høgtuvbreen

### Materialhusholdning

Vintersesongens første måling ble foretatt den 28.november 1975. Alle stakene ble da funnet, og det var kommet 50-250 cm nysnø. Fram til neste besøk den 13.januar 1976 kom det svært mye snø og bare to staker ble funnet igjen. Det ble da satt ut 9 erstatningsstaker. Snødybden den 13.januar varierte fra 350-600 cm. Breen ble besøkt en gang til, den 10.mars, før vinterakkumulasjonsmålingene ble utført den 9.-11.mai. Snødybden varierte da fra vel 5 m nederst på bretunga til over 10 m nær toppen av breen. Det ble sondert etter et fordelingsmønster vist på fig. 21, og det ble tatt to tetthetsprøver. På grunnlag av disse målingene ble vinterbalansekartet på fig. 22 tegnet.

Vinterbalansen ble beregnet til 9,5  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann, noe som tilsvarer 3,66 m jevnt fordelt over breflaten eller en avrenning på 116 1/s km<sup>2</sup> fordelt over hele året. Dette er den nest høyeste vinterbalansen som er registrert siden målingene startet i 1971.

## **HØGTUVBREEN 1976**



Position of stakes, pits and sounding profiles

Fig. 21 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1976. The location of stakes, pits and sounding profiles in 1976. Sommeren 1976 ble breen besøkt den 8.juli, 5.august og 9.september. Ablasjonen var nokså jevnt lav hele sommeren. Bare i 1975 har det vært målt mindre ablasjon. Det skyldes nok vesentlig en nokså kjølig sommer, men dels også at albedoen var svært høy over store deler av breen fordi den store vinterakkumulasjonen gjorde at det svært sent smeltet fram is eller firn med lavere albedo.

Sommerbalansen ble beregnet til 7,15  $\cdot$  10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> vann, eller 2,75 m vann jevnt fordelt over breen.

Nettobalansen ble positiv også i 1976. Det ble et overskudd på 2,36  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann, eller 0,91 m vann jevnt fordelt over hele breen eller 29 1/s km<sup>2</sup>. Bare i 1973 har det vært målt større masseøkning på Høgtuvbreen.

Ved minimumsmålingene den 9.september var det allerede kommet mellom 20 og 100 cm snø over hele breen slik at snøgrensen ikke lot seg observere direkte.

Årets likevektslinje lå på ca. 730 m o.h.



## **HØGTUVBREEN 1976**

Winter balance in cm of water equivalent

Fig. 22 Kart som viser vinterbalansen i 1976. Map showing the winter balance in 1976.

## Avrenning

Observasjonsperioden var i år fra 9.juli til 2.oktober. Totalavløpet i perioden var 17,15  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> med en middelvannføring på 2,31 m<sup>3</sup>/s. Det var størst vannføring i juli med et middel på 3,92 m<sup>3</sup>/s mens det var 2,83 m<sup>3</sup>/s i august og bare 0,65 m<sup>3</sup>/s i september. Avrenningen var totalt ca. 90% av snittet for de siste 5 årene.



Fig. 23 Variasjonene med høyden over havet av vinter-,sommer- og nettobalanse, samt breens arealfordeling og arealverdier av netto-balansen i hvert 50 m høydeintervall.

> Winter, summer and net balances in relation to elevation. Glacier area and areal values of net balance for every 50 m height interval are illustrated.

#### HØGTUVBREEN 1976

		Vinterbalanse			Sommerl	balanse		Nettob	alanse	
Høyde- intervall	Areal km 2	Bw 106 m 3	b m	w l/s km <sup>2</sup>	Bs 106 m3	m t	l/s km <sup>2</sup>	Bn 106 m	3 m	<sup>on</sup> l/s km <sup>2</sup>
1150 - 1160	0.080	0.316	3.95	125	0,152	1.90	60	0,164	2,05	65
1100 - 1150	0.214	0.897	4.19	133	0,428	2,00	63	0,469	2,19	69
1050 - 1100	0.220	0.942	4,28	136	0,473	2,15	68	0,469	2,13	68
1000 - 1050	0.252	1.061	4,21	133	0,580	2,30	73	0,481	1,91	61
950-1000	0.318	1,346	4,23	134	0,779	2,45	78	0,567	1,78	56
900 - 950	0,321	1,157	3,61	114	0,835	2,60	82	0,324	1,01	32
850 - 900	0,316	1,002	3,17	101	0,869	2,75	87	0,133	0,42	13
800 - 850	0.177	0,644	3,64	115	0,513	2,90	92	0,131	0,74	23
750 - 800	0,161	0,570	3,54	112	0,499	3,10	98	0,071	0,44	14
. 700 - 750	0,162	0,541	3,34	106	0,551	3,40	108	-0,010	-0,06	- 2
650 - 700	0,217	0,638	2,94	93	0,814	3,75	119	-0,176	-0,81	- 25
588 - 650	0,160	0,395	2,47	78	0,656	4,10	130	-0,261	-1,63	-52
588 - 1160	2,598	9,509	3,66	116	7,149	2,75	87	2,360	0,91	29

## Engabreen

## Materialhusholdning

Akkumulasjonen var meget stor vinteren 1975/76. Fra den 19.november til 6.januar kom det mellom 3 og 4 meter snø slik at bare tre staker ble funnet igjen i januar. Breen ble besøkt også i februar og mars, og ialt ble det satt ut 17 erstatningsstaker fram til akkumulasjonsmålingene den 20.mai. Da varierte snødybden fra 7 m til 13 m. Det var tatt snøprøver og lagt ut fargefelt i mars slik at tetthetsmålingene kunne utføres uten vanskeligheter. Det var imidlertid svært vanskelig å sondere til fjorårets sommeroverflate, både på grunn av de store snømengdene og en dårlig sommeroverflate. Sonderingene ble imidlertid supplert med flere kjerneboringer slik at det endelige resultatet burde være tilfredsstillende. Snødybden ble målt ved 235 sonderinger etter et fordelingsmønster vist på fig. 25. På dette grunnlag ble vinterbalansens fordelingskart tegnet, se fig. 26.

Totalt ble vinterbalansen beregnet til 146,8  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> vann eller 3,86 m vann jevnt fordelt over breen. Bare i 1973 er det målt en større akkumulasjon siden målingene tok til i 1970, og den utgjorde 120% av den midlere akkumulasjon for de 5 foregående år.



Fig. 24 Hytta ved Engabreen ble flyttet fra sin gamle tomt på 880 m o.h. opp til scootergarasjen på 1100 m o.h. sommeren 1976.Her er den fotografert den 13.februar vinteren 1977.

The observation hut at Engabreen. The hut was moved from 880 to 1100 m a.s.l. in July 1976. This picture was taken at the new location i February 1977.

I sommersesongen, fra 16.juni til 4.september lå to sommerassistenter fast stasjonert på breen og stakene ble målt omlag hver 5.dag. Wirene på Engabretunga ble målt hver 10.dag. Sommeren var kjølig og i månedsskiftet juli/august kom det ca. 15-20 cm nysnø over 1100-meters niväet. Ablasjonen varierte fra 6,5 m nederst på bretunga til 0,6 m på et par av de høyestliggende stakene.

Totalt ble sommerbalansen beregnet til 55,1  $\cdot 10^6 \text{m}^3$  eller et vannlag på 1,45 m over hele breflaten. Dette er den laveste ablasjonen som er målt siden målingene tok til i 1970 og utgjør bare 60% av den midlere sommerbalanse for perioden 1970-75. Dette skyldes i første rekke den lave sommertemperaturen med en middeltemperatur som lå 0,7 grader lavere enn det normale målt for perioden 1970-75. I Glomfjord var til sammenlikning juli og august 1,9°C kaldere enn normalt.

## ENGABREEN 1976

Position of stakes, pits and sounding profiles



Fig. 25 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1976. The location of stakes, pits and sounding profiles in 1976.

Den lave ablasjonen vises også ved at det var rekordlav avrenning mält i Engavatn, og i alt førte sommerens lave temperaturer til at breen fikk en nettoøkning på  $91,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  vann eller tilsvarende et vannlag på 2,5 m jevnt fordelt. Bare i 1973 har det blitt målt en større nettoøkning i bremassen, og det er **f**jerde år på rad balansen er positiv. Massebalansens variasjon med høyden er vist på tabellen side 34. Likevektslinjen ble i år liggende på 910 m o.h.

#### Meteorologiske observasjoner

Det meteorologiske måleprogrammet sommeren 1976 var identisk med det for de tre foregående år. Ved observasjonshytta (880 m o.h.) ble det målt nedbør, temperatur, luftfuktighet, vindstyrke, skydekke og kortbølget innstråling. Ved skjæret (1360 m o.h.) ble det målt temperatur og nedbør. Et utvalg av observasjonsresultatene er vist på fig. 28. Energibalansen er behandlet i eget kapitel.

## ENGABREEN 1976

Winter balance in cm of water equivalent



Fig. 26 Kart som viser vinterbalansen i 1976. Map showing the winter balance in 1976.



ENGABREEN 1976

Fig. 27 Variasjonene med høyden over havet av vinter-,sommer-og nettobalanse, samt breens arealfordeling og arealverdier av netto-balansen i hvert 50 m høydeintervall.

Winter, summer and net balances in relation to elevation. Glacier area and areal values of net balance for every 50 m height interval are illustrated.

Høyde-		Vinterbalanse			Sommerb	alanse		Nettobalanse		
intervall	Areal	Bw	bv	V	Bs	bs		Bn	br	1
m.o.h.	km <sup>2</sup>	106 m <sup>3</sup>	m	l/s km2	106 km3	m	l/s km²	106 km2	m	l/s km²
1500 - 1594	0,12	0,456	3,68	117	0,124	1,00	32	0,332	2,68	85
1400 - 1500	2,51	12,782	5,10	162	2,006	0,80	25	10,776	4,30	136
1300 - 1400	9,35	49,264	5,27	167	7,011	0,75	24	42,253	4,52	143
1200 - 1300	8,55	32,146	3,76	119	10,258	1,20	38	21,888	2,56	81
1100 - 1200	7,60	25,718	3,38	107	11,020	1,45	46	14,698	1,93	61
1000 - 1100	4,66	15,420	3,31	105	8,392	1,80	57	7,028	1,51	48
900 - 1000	2,46	6,953	2,83	90	5,412	2,20	70	1,541	0,63	20
800 - 900	0,94	2,021	2,20	70	2,632	2,80	89	-0,611	- 0,60	-19
700 - 800	0,50	0,900	1,80	57	1,625	3,25	103	-0,725	-1,45	-46
600 - 700	0,37	0,481	1,30	41	1,388	3,75	119	- 0,907	-2,45	-78
500 - 600	0,27	0,311	1,15	36	1,215	4,50	143	-0,904	-3,35	- 106
400 - 500	0,21	0,168	0,80	25	1,071	5,10	162	-0,903	-4,30	-136
300 - 400	0,17	0,083	0,50	16	0,932	5,65	179	-0,849	-5,15	-163
200 - 300	0,22	0,066	0,30	10	1,375	6,25	198	- 1,309	- 5,95	-189
100 - 200	0,09	0,029	0,30	10	0,636	6,70	212	-0,607	- 6,40	-203
80 - 1594	38,02	146,798	3,86	122	55,097	1,45	46	91,701	2,41	76

ENGABREEN 1976
#### ENGABREEN 1976



Fig. 28 Resultatene av de daglige meteorologiske observasjonene på Engabreen (900 m o.h.) samt beregnet døgnavløp ved utløpet av Engavatn.

The daily meteorological observations at Engabreen (900 m o.h.) and computed daily discharge at Engavatn.

.

Midlere skydekke for observasjonsperioden 15.juni til 3.september var 7,1. 30 av de 81 døgnene ble notert som helt overskyet eller tåket. 24 dager var halvskyet eller lettere og bare to dager var helt skyfri.

Midlere døgnlig vindstyrke for perioden 15. juni til 3. september var 4,3 m/s. Høyeste døgnlig middelverdi var 11,2 m/s den 16.juli og laveste den 3.juli var 0,7 m/s. For hele perioden var det mindre vind enn det som er målt tidligere år.

Middeltemperaturen for perioden 15.juni - 3.september var 6,0<sup>°</sup>C ved hytta på 880 m o.h. Dette er 0,7<sup>°</sup>C kaldere enn somrene 1971-75. Juli hadde 6,3<sup>°</sup>C og august 6,8<sup>°</sup>C. Kaldeste dag var 3.september da det var -3,6<sup>°</sup>C. Varmest var 12.august med 13,9<sup>°</sup>C.

Ved hytta på 880 m oppfanget standardnedbørsmåleren ialt 491 mm nedbør i hele observasjonsperioden. Det meste falt i nedbørsperiodene i siste halvdel av hver måned. I Glomfjord ble det i samme periode registrert 320 mm nedbør, mens det ved hytta ved Engabrevann ble registrert 322 mm.

I tillegg ble nedbøren målt på 11 forskjellige steder utover breen i nedbørsmålere av typen "Pluvius". Disse målingene foregikk fra 23.juni til 26.august. Det ble også foretatt slike nedbørundersøkelser i 1974 og 1975 men målingene i 1975 ble mislykket p.g.a. det dårlige været, mye snø og uregelmessig tømming. I 1974 var målingene bra og en kunne da antyde perioder der nedbøren økte jevnt med høyden. Målingene i 1976 viste derimot ingen slik tendens. Tvert imot ble de største nedbørstallene registrert ved hytta på 880 m o.h. Inne på breplatået kunne det være store lokale forskjeller. I enkelte nedbørsperioder varierte nedbøren opptil 20-30 mm på et par kilometer. Totalt var det imidlertid små variasjoner, kanskje med unntak av de høyeste områdene i sydvest der nedbøren stort sett lå litt høyere enn på resten av breplatået.

I perioden 23.juni til 26.august ble det totalt registrert en nedbør på 240 mm på breplatået mellom 1100 og 1450 meters nivåene, mens pluviusen ved hytta i samme periode registrerte 390 mm. Årsaken til den store forskjellen er nok at en del av nedbøren i månedsskiftet juni/juli og i juli/august kom som snø inne på breplatået og var vanskelig å fange i pluviusene.

# Avrenning

Totalavløpet målt i Engavann var 120,8  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> for perioden 1.juni til 15.september. Det gir et døgnlig middelavløp på 1,13  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup>. Høyeste døgnavløp ble målt 22.juli med 2.58  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup>. De månedlige totalavløpene fordelte seg på 19,3  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> i juni, 50,5  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> i juli, 40,9  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> i august og 13,8  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> i september.

#### En sammenlikning av materialhusholdningen på de enkelte breer

I 1976 ble massebalansen målt på 9 breer, 7 i Sør-Norge og 2 i Nord-Norge. I Sør-Norge er breene godt geografisk fordelt, men i Nord-Norge foregår undersøkelsene bare i Svartisenområdet slik at en vet lite om forholdene lenger nord i landet.

Resultatene av årets undersøkelser er presentert i tabellen på s.38. Visuelt er materialomsetningen på breene i Sør-Norge vist på fig. 29 der de er plottet inn på et øst-vest profil. Tendensen fra tidligere år er helt klar, likevektslinjen har en mye brattere stigning enn i et normalår. Det vil altså si at breene i vest har økt også i år, mens breene øst i Jotunheimen har minket.

Denne utviklingen skyldes vesentlig en økning i vinternedbøren. Både på Nigardsbreen og Ålfotbreen var vinterbalansen 20-25% høyere enn normalt, så selv med en ganske varm sommer ble det nettoøkning på begge disse breene.

I Svartisenområdet var det også noe større (10-15%) vinternedbør enn normalt. I tillegg var sommeren kald slik at det på Engabreen ble målt den laveste avsmelting siden målingene tok til i 1970. Vi ser imidlertid den samme tendens i Svartisenområdet som i Sør-Norge. Nettobalansen på Engabreen ble +2,41 m mens den på Høgtuvbreen var på +0,91 m, det vil si nesten tre ganger så stor økning på Engabreen ute mot kysten enn på Høgtuvbreen som ligger like langt vest, men i større avstand fra kysten.



#### MASS EXCHANGE ON GLACIERS IN SOUTHERN NORWAY 1976

#### Fig. 29

Materialomsetningen på de undersøkte breene i Sør-Norge. Et profil er lagt fra Ålfotbreen til Gråsubreen, og de øvrige breer er plassert i forhold til likevektslinjens høyde et år breene er i likevekt.

The mass exchange on glaciers in Southern Norway. The glaciers are placed on a profile from Ålfotbreen to Gråsubreen according to the height of the equilibrium line calculated for steady state conditions on the glaciers.

MASSEBALANSERESULTATER	197	6
------------------------	-----	---

		Vinterbalansen			Sot	mmerbalan	isen	N			
Bre	Areal km <sup>2</sup>	B <sub>10</sub> m <sup>3</sup>	m	$\frac{b}{w}$ 1/s km <sup>2</sup>	<sup>B</sup> <sup>8</sup> 10 <sup>6</sup> <sup>8</sup> 3	m	$b_{s}$ 1/s km <sup>2</sup>	<sup>B</sup> n 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	m	$b_n$ 1/s km <sup>2</sup>	Likevekts- linje m o.h.
Ålfotbreen	4,8	21,0	4,40	139	13,7	2,87	91	7,3	1,53	48	<b>&lt;8</b> 70
Blomsterskardbreen	45,7	-	-	-	-	-	-	64,0	1,40	44	1210
Nigardsbreen	48,2	138,9	2,88	91	119,6	2,48	79	19,3	0,40	12	1540
Hardangerjøkulen	17,8	43,6	2,45	78	40,9	2,30	73	2,7	0,15	5	1620
Storbreen	5,4	9,7	1,80	57	10,3	1,90	60	-0,5	-0,10	-3	1740
Hellstugubreen	3,3	3,8	1,16	37	6,3	1,89	60	-2,5	-0,73	-23	1970
Gråsubreen	2,5	1,6	0,62	20	4,1	1,62	51	-2,5	-1,00	-32	>2260
Engabreen	38,0	146,8	3,86	122	55,1	1,45	46	91,7	2,41	76	910
Høgtuvbreen	2,6	9,5	3,66	116	7,1	2,75	87	2,4	0,91	29	730

# NET BALANCE DIAGRAMS 1976



Fig. 30 Nettobalansekurvene for 1976 Å - Ålfotbreen, N - Nigardsbreen, Ha - Hardangerjøkulen, S - Storbreen, He - Hellstugubreen, G - Gråsubreen, Gr -Gråbureen, E - Engabreen, H - Høgtuvbreen og T - Trollbergdalsbreen.
Net balance curves for 1976. For code explanation, see above.

Vest i landet ser det altså ut til å gå mot et enda mer maritimt klima enn det som allerede er, noe som også stemmer bra med resultatet av energibalanseundersøkelsene. Utviklingen av forholdet mellom vinter- og sommerbalansen er vist på fig. 31. Alle nettobalansekurvene er sammenliknet i fig. 30.



#### Fig. 31

Diagrammet viser forholdet mellom vinter- og sommerbalansen i 1976 sammenliknet med middelverdien av de siste 14 års målinger og et år med beregnet "normal" materialomsetning.

Relation between winter and summer balance in 1976 compared to the mean of the previous fourteen years and also that of a year with a computed "nor-mal" mass exchange.

Å = Ålfotbreen, N = Nigardsbreen, H = Hardangerjøkulen, S = Storbreen, H = Hellstugubreen og G = Gråsubreen.

#### ENERGIBALANSEN PÅ UTVALGTE BREER

# Innledning

Energibalanse-undersøkelser er utført på 9 breer i Norge, hvorav 8 i Sør-Norge. På kartet (fig. 32) er breene markert. Disse undersøkelsene er presentert nærmere i tabell III, i tidligere rapporter fra NVE (2/71, 2/72, 1/74, 1/75, 5/75, 2/77) og i publikasjoner fra de respektive forfattere notert i tabell III.

Brekontoret startet energibalanse-undersøkelser på Austre Memurubre og Ålfotbreen sommeren 1970. I de 4 siste sommersesonger har undersøkelsene pågått på Engabreen og Nigardsbreen.

Energibalanse-undersøkelsene er hovedsakelig ment å være et supplement til undersøkelsene om massebalansen. Man har lagt vekt på å kjøre et arbeidsprogram hvor måling av stråling og ablasjon lar seg kombinere med de årvisse målinger Brekontoret utfører i forbindelse med massebalanse-beregninger. Imidlertid er energi-



Fig. 32

Kart som viser beliggenheten av de breer hvor energibalanseundersøkelser er foretatt. Nigardsbreen og Engabreen er undersøkt i 1976.

Map of Southern Norway, containing the location of glaciers where heat balance investigations have been performed. Nigardsbreen and Engabreen are the two glaciers examined in 1976. balanse-undersøkelsene også lagt opp slik at de føyer seg inn i rekken av arbeider som gjøres på breer over hele verden for å få oversikt over samspillet mellom klima-fluktuasjoner og bre-variasjoner.

Både på Engabreen og Nigardsbreen er perioden for undersøkelsen i 76-sesongen fra 15.juni til 30.august.

Idet 1976-undersøkelsene er nær identiske med dem som tidligere er utført på Engabreen og Nigardsbreen, henvises det til tidligere års rapporter for opplysninger om metoder og instrumenter. Rapporten for 73-sesongen (Tvede, 1975) er den mest omfattende i så måte.

#### Resultater

Den døgnlige stråling og ablasjon er vist i fig. 34.

De raskt skiftende værforhold på breene illustreres godt i figuren ved de markerte variasjonene i globalstråling og ablasjon. Netto tilført stråling er mer jevn, særlig på Nigardsbreen med så høy albedo som 64% i gjennomsnitt for sommeren. På Engabreen, med gjennomsnittsalbedo lik 56% ved målestedet, vil globalstrålingen avspeile seg sterkere i nettostrålingen.

De relativt barske sommerforhold på breene illustreres også i fig. 34 ved at 14 døgn på Engabreen og 24 døgn på Nigardsbreen er beregnet til å ha hatt "vinterklima". Dette betyr at i disse døgn har netto tilført strålingsenergi vært større enn energien som tilsvarer ablasjonen. Med andre ord kan man si at i disse døgn har de non-radiative faktorer avkjølt bremassen slik at noe (i enkelte døgn all) strålingsenergi er brukt til å varme opp snø og is til (eller opp mot) smeltepunktet. Henholdsvis 14 og 24 døgn med "vinterklima" er i overkant av det normale for Engabreen og Nigardsbreen. Skal man dømme etter tidligere års observasjoner, har Engabreen ca. 10% og Nigardsbreen ca. 25% "vinterdøgn" i normale somre - målt ved de respektive observasjonsstasjoner.

Korrelasjonen mellom netto stråling og ablasjon er dårlig. Man kan derfor gjenta tidligere års konklusjon som er at strålingen tilfører en noenlunde jevn "grunnsum" av ablasjonsenergi fram gjennom sommeren. Ablasjonssvingningene fra døgn til døgn dirigeres åpenbart av de non-radiative faktorer, hovedsakelig konveksjon og kondensasjon.

For Engabreen er de mest interessante faktorer i energibalansen ført opp i tabell II. Illustrasjon av tabellen er vist som fig. 33. Ukentlige verdier er valgt.

I observasjonsperioden sett under ett bidro strålingen med ca. 138  $g/cm^2$ , som er vel 45% av den registrerte ablasjon på ca. 304  $g/cm^2$ . Konveksjon og kondensasjon

forårsaket om lag 54%, mens nedbør ytet i underkant av 1%. Sublimasjon kan ikke ha vært noen nevneverdig faktor.

For Nigardsbreen er de ukentlige resultater ført opp i tabell I og illustrert i fig. 33. Samlet forårsaket strålingen her ca. 117  $g/cm^2$  – eller nær 64% av den målte ablasjon på ca. 184  $g/cm^2$ . Konveksjon og kondensasjon bidro med ca. 36%, mens nedbøren må ha betydd under 1%. Sublimasjon har vært årsak til i underkant av 1%; den er i tabellen slått sammen med kondensasjon.

#### Diskusjon

Vurdert ut fra tidligere års resultater for energibalansen sammen med de direkte observasjoner av værlaget, er det rimelig å notere at klimaet både på Engabreen og Nigardsbreen sommeren 1976 var mer kontinentalt enn normalt. Dersom man tar middelverdien for de 5 somrene på Nigardsbreen, er strålingsbidraget til ablasjonen i overkant av 62% (1620 m o.h.). For Engabreens vedkommende skal man være mer var-



Fig. 33 Uke-verdier av ablasjonen med markering av bidrag fra stråling og fra de non-radiative faktorer på Nigardsbreen og Engabreen fra 15.juni til 30.august 1976. På Nigardsbreen har 3 uker hatt dominans av "vinterklima". På Engabreen har perioden 27.juli - 2.august hatt dominans av vinterklima.

> Ablation and the contribution of radiation and the non-radiative factors. Weekly accounts during the summer season on Nigardsbreen and Engabreen from June 15 to August 30 in 1976. Note the periods, three weeks on Nigardsbreen and from July 27. to August 2 on Engabreen, when "winter climate" was predominant.



Fig. 34 Døgnlige ablasjons- og strålingsverdier på Engabreen (øverst) og Nigardsbreen sommeren 1976.

Daily ablation and radiation values on Engabreen (top) and Nigardsbreen during the summer season 1976.

somme med å gi tall i så måte, fordi målestedet er flyttet noe, fordi målingene har pågått i kun 4 somre og fordi den relativt sterkt skrånende breflaten nær observasjonsstasjonen er utsatt for lokal kraftig katabatisk luftstrøm.

For å få oversikt over hvordan de ulike faktorene virker inn på ablasjonen av breene i Norge, er de hittil framkomne resultatene vist i tabell III.

Av tabell III ser man tydelig hvordan strålingsbidraget (og dermed også bidraget fra kondensasjon og konveksjon) relativt sett varierer ganske kraftig fra år til år. Selvsagt kan usikkerheten ved måling og beregning spille en rolle – men denne

	Me an	Global	Net.Rad.	Ablation	Ablation	Registered	Relat	Relative heat supply by		
Period	Albedo	Radiation	absorbed by glacier	caused by Radiation	caused by Rain	total Ablation	Radiation	Convection + Condensation	Precipitation	
day/month	z	cal,	'cm <sup>2</sup>		g/cm <sup>2</sup>		7.			
15/6 - 21/6	64	3982	802	10,0	0,1	8,9	112,4	-13,6	1,2	
22/6 - 28/6	65	3586	1085	13,6	0,1	22,5	60,4	39,2	0,4	
29/6 - 5/7	63	4521	1175	14,7	0,1	17,1	86,0	13,4	0,6	
6/7 - 12/7	63	5028	1176	14,7	0,1	25,5	57,6	42,0	0,4	
13/7 - 19/7	63	3735	995	12,4	0,2	24,2	51,2	48,0	0,8	
20/7 - 26/7	63	3156	924	11,6	0,1	14,4	80,5	18,8	0,7	
28/7 - 2/8	69	3438	6 3 2	7,9	0	0,4	1975,0	-1825,0	-50,0	
3/8 - 9/8	64	4223	616	7,7	0	6,1	126,2	-26,2	0	
10/8 - 16/8	63	3783	721	9,0	0,1	25,1	35,8	63,8	0,4	
17/8 - 23/8	62	3532	711	8,9	0	21,8	40,8	59,2	0	
24/8 - 30/8	63	2972	535	6,7	0,2	17,9	37,4	61,5	1,1	
15/6 - 30/8	64	41956	9372	117,2	1,0	183,9	63,7	35,8	0,5	

TABLE I ABLATION CONDITIONS - NIGARDSBREEN 1976

Rain (+) and snow (-). Sublimation is calculated as a negative part of condensation.

	Mean	Glob al	Net.Rad.	Ablation	Ablation	Registered	Rela	Relative heat supply by				
Period	Albedo	Radiation	absorbed	caused by	caused by	total		Convection +				
			by glacier	Radiation	Rain	Ablation	Radiation	Condensation	Precipitation			
day/month	z	cal/cm <sup>2</sup>			g/cm <sup>2</sup>			z				
15/6 - 21/6	61	4689	1249	15,6	0,1	24,4	63,9	35,7	0,4			
22/6 - 28/6	60	1563	888	11,1	0,4	22,7	48,9	49,3	1,8			
29/6 - 5/7	58	2136	1067	13,3	0,1	13,4	99,2	0,1	0,7			
6/7 - 12/7	56	4529	1462	18,3	0	36,5	50,1	49,9	0			
13/7 - 19/7	54	3423	1269	15,9	0,1	41,3	38,5	61,3	0,2			
20/7 - 26/7	53	1814	970	12,1	0,5	43,2	28,0	70,8	1,2			
27/7 - 2/8	62	2079	786	9,8	0	6,1	160,7	-60,5	-0,2			
3/8 - 9/8	54	2415	9 39	11,7	0,1	30,2	38,7	61,0	0,3			
10/8 - 16/8	52	3027	1004	12,6	0,1	38,9	32,4	67,4	0,2			
17/8 - 23/8	54	1786	696	8,7	0,4	21,3	40,8	57,3	1,9			
24/8 - 30/8	52	1467	669	8,4	0,2	25,7	32,7	66,5	0,8			
15/6 - 30/9	56	28928	10999	137,5	2,0	303,7	45,3	54,0	0,7			

TABLE II ABLATION CONDITIONS - ENGABREEN 1976

Sublimation is insignificant, even compared with Rain. Snow (-)

skulle ikke være vesentlig. Feilgrensen i verdiene for ablasjonsfaktorenes bidrag er vurdert hvert år, og over 4% er den aldri funnet å kunne være.

Tallene i tabell I og II bekreftet tidligere års erfaring med at ikke bare de døgnlige, men også de ukentlige verdier for ablasjonsfaktorenes relative bidrag kan variere kraftig. Derfor er det grunn til å understreke den korte observasjonstid enkelte av undersøkelsene i tabell III har.

Likevel, særlig ut fra det etterhvert store registreringsmateriale fra Nigardsbreen, er det rimelig å anta at fig. 35 gir et nokså riktig bilde av forholdet mellom strålingen og de non-radiative faktorers virkning på ablasjonen. Grafen gir et brukbart kvantitativt inntrykk av hvordan klimaet skifter fra det maritime på Vestlandskysten til det kontinentale øst i Jotunheimen. Det er mulig at deler av grafen må justeres en smule, men til dette trenger man nok enda noen observasjonssesonger på Nigardsbreen.

Year of	Period	Glacier	Position		Ablation	components %		Author
investigation	d <b>ay/m</b> onth	(See map)	<sup>0</sup> N <sup>0</sup> E m.a.s.l.	Radiation	Convection	Condensation	Rain and sublimation	(year)
		Gråsu-	61° 39'					T.Klemsdal
1963	12/6 - 18/6	breen	08° 36'	98		2		(1968)
	27/7 - 9/8		1975	59	27	14		
		Austre	61° 33'					S.Messel
1970	26/6 - 30/8	Memurubre	08° 30'	67	3	3	< 1	(1971Ъ)
1971	15/6 - 6/9		ca.1900	77	2	3	< 1	(1973)
		Stor-	61° 35'					0.Liestøl
1955	6/7 - 8/9	breen	08 <sup>0</sup> 20'	54	32	14	< 1	(1967)
			1600					
		Skagastøls-	61 <sup>°</sup> 30'					B.E.Eriksson
1954	May - Sept.	breen	07 <sup>0</sup> 50'	79	2	1		(1959)
1955	May - Sept.		ca.1600	66	3	4		
		Omm s-	60° 39'					S.Messel
1968	3/6 - 8/9	breen	07° 30'	50	34	16	< 1	(1971a)
1969	3/6 - 8/9		1540	55	31	14	< 1	
								S.Messel
1972	15/6 - 6/9	Nigards-	61° 43'	64	3	6	< 1	(1974)
1973	22/6 - 6/9	breen	07 <sup>0</sup> 08'	53	4	7	< 1	(1975a)
1974	22/6 - 6/9		1620	77	2	3	< 1	(1975b)
1975	22/6 - 30/8			54	4	6	< 1	(1976)
1976	15/6 - 30/8			64	3	6	<1	(1977)
•	1/7 - 12/7	Supphelle-	61° 30'	32	6	8		0.Orheim
1967	1/8 - 18/8	breen	06°48'	26	7	4		(1970)
	4/9 - 8/9		ca.70	14	8	6		
								S.Messel
1970	1/6 - 14/9	Ålfot-	61 <sup>°</sup> 45'	44	5	6	< 1	(1971Ъ)
1971	1/6 - 6/9	breen	05 <sup>°</sup> 40'	43	5	6	1 1	(1973)
1972	1/6 - 2/8		ca.1250	53	4	6	1	(1974)
								S.Messel
1973	22/6 - 30/8	Enga-	66° 40'	32	6	7	1	(1975a)
1974	22/6 - 6/9	breen	13° 50'	33	6	6	1	(1975b)
1975	22/6 - 30/8		850	48	5	2	< 1	(1976)
1976	15/6 - 30/8			45	5	4	1	(1977)

TABLE III ABLATION CONDITIONS ON GLACIERS IN NORWAY



Fig.35

Stråling og de non-radiative faktorers relative bidrag til ablasjonen i et normalt balanseår for breene i Sør-Norge.

The mean role of radiation and non-radiative factors in the ablation. This profile covers the main glacier regions in Southern Norway.

ANALYSE AV METEOROLOGISKE DATA OG AVLØPSDATA FOR FOLGEFONN-OMRÅDET

#### Innledning

Det er i flere tidligere rapporter (1967-1971) blitt foretatt analyser av breavløpet som funksjon av meteorologiske parametre. Metodikken er beskrevet mer utførlig i disse rapportene. For å klarlegge om meteorologiske data observert på eller nær breen kan brukes til å prognosere/simulere avløpet i bre-elvene rundt Folgefonna er data fra 4 vannmerker, 1 værstasjon, 1 nedbørstasjon, radiosondedata fra Sola og data fra 2 av Brekontorets stasjoner blitt analysert. Som grunnlag for analysen er døgnverdier blitt benyttet, de foreløpige modellene kan derfor ikke beskrive den daglige variasjonen i avrenningen.

Stasjon	HOH (m)	Temp. ( <sup>°</sup> C)	Nedb. (mm)	Fukt. (mbar)	Vind (m/s)	Skydekke (1/10)
Holmaskjeri	1565	<sup>t</sup> H	P <sub>H</sub>		v <sub>H</sub>	с <sub>н</sub>
Breplatået	1455	<sup>t</sup> P				
Indre Matre	24	<sup>t</sup> M ·	Р <sub>М</sub>			
Sola ( 850 mbar )	1300 1400	t s		f s	V s	
Bondhus	32		Р <sub>В</sub>			

#### TABELL 1.

#### Datagrunnlaget

Fra Brekontorets stasjon på Holmaskjeri foreligger observasjoner av temperatur, nedbør, vindstyrke og skydekke for sommermånedene 1965-68, ialt 356 observasjonsdøgn. Denne perioden ligger derfor til grunn for analysen.

Avløpsdataene omfatter vm. 962-0 Øyreselv (breandel 38%), vm. 1426-0 Bondvatn (52%), vm. 1452-0 Jordal (58%) og vm. 1683-0 Øverhus (88%). For vm. 1683 foreligger observasjoner bare fra og med 1967.

#### Resultater

Korrelasjonen mellom avløpet og de ulike meteorologiske parametrene er :

Temperatur:	0.10-0.40	med	tidsforsinkelse	på	2	-	3	døgn.
Nedbør:	0.37-0.67	med	tidsforsinkelse	på	1	-	2	døgn.
Vanndamptrykket:	0.50-0.63	med	tidsforsinkelse	på	1	-	2	døgn.
Vindstyrken:	0.27-0.56	med	tidsforsinkelse	på	1	-	3	døgn.
Skydekket:	0.14-0.60	med	tidsforsinkelse	på	0	-	3	døgn.

Sammenliknes data observert på breen med data observert utenfor finner en den høyeste korrelasjonen for temperaturen, noe lavere for nedbøren og lavest for vinden.

Ved tidligere undersøkelser fra andre breer er det vist at avløpet kan beskrives ved relasjoner av følgende type:

$$Q=A_0+A_1 \cdot (t \cdot V) + A_2 \cdot (t \cdot P) + A_3 \cdot t$$

der t er lufttemperatur, P nedbør og V vindstyrke. Det forutsettes her at de meteorologiske parametrene er midlet glidende over 2 - 3 døgn og forskjøvet 2 - 3 døgn relativt til avløpet. Konstantene A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> og A<sub>3</sub> bestemmes ved regresjonsanalyse. For de analyserte bre-elvene rundt Folgefonna er en relasjon av følgende type bestemt:

 $Q = A_0 + A_1 \cdot (t \cdot V) + A_2 \cdot (t \cdot P) + A_3 \cdot (f \cdot V)$ 

I likningene inngår bare parametre som er forskjøvet 1 - 2 døgn i forhold til avløpet.

For Øyreselv er den multiple korrelasjonen 0,79, for Bondhusvatn 0,75, for Jordal 0,69 og for Øverhus 0,87. Forskjellene skyldes tildels de ulike vannmerkenes breandel, men henger også sammen med breenes eksponering mot den framherskende vindretningen. For Øyreselv og Bondhusvatn bidrar vann i vassdragene mellom breen og vannmerket til å forsinke avrenningsforløpet. Modeller av den typen som her er blitt tilpasset gir sjelden godt resultat når breandelen er mindre enn 60 - 70%. For slike avløpsserier bør antagelig noe mer kompliserte modellstrukturer prøves.

#### TABELL 2

Stasjon		<sup>t</sup> H	P <sub>H</sub>	v <sub>H</sub>	с <sub>н</sub>	t p	<sup>t</sup> M	PM	t s	fs	V <sub>s</sub>	PB
062.0	r <sub>1</sub>	0.099	0.424	0.430	0.598	0.183	0.294	. 0.480	0.235	0.501	0.532	0.447
902-0	1	3	2	2	3	3	2	2	3	2	2	1
	r <sub>1</sub>	0.215	0.387	0.432	0.264	0.250	0.333	0.367	0.270	0.549	0.417	0.231
1426-0	1	3	2	3	· 1	3	3	2	3	2	2	2
1452.0	r <sub>1</sub>	0.399	0.367	0.273	0.139	0.413	0.417	0.331	0.414	0.530	0.268	0.178
1452-0	1	2	1	1	0	2	3	1	2	1	1	1
1692 0	r <sub>1</sub>	0.185	0.668	0.458	0.367	0.251	0.324	0.504	0.307	0.627	0.558	0.469
1003-0	1	2	1	2	1	2-3	2	2	2	1	2	1

# Liste over korrelasjonen mellom ulike meteorologiske parametre og avløpet.

Tabellen inneholder maksimal korrelasjon for ulike parametre med avløpet og det antall døgn denne korrelasjonen er forskjøvet i forholdt til avløpet.

#### TABELL 3

Stasjon	Felt (km <sup>2</sup> )	Breandel (%)	Regressjonslikning	Antall ob <b>s</b> .	'Korrela- sjon	Restfeil
962-0	17.6	38.3	Q=0.367 + 0.015 $\cdot \overline{tVe}_{n-1} + 0.0054 \cdot \overline{tP}_{Mn-1}^{3} + 0.039$ $\cdot \overline{tm}_{n-1}^{2}$	356	0.792	56.2
1426-0	25.1	47.4	$\frac{Q=0.521+0.0091 \cdot \overline{tV}_{Hn-1}}{V_{Sn-1}} + 0.0009 \cdot \overline{t \cdot F}_{n-1}^{3} + 0.0078 \cdot \overline{f}$	356	0.746	30.8
1452-0	28.8	57.6	Q=0.363+0.0080 $\overline{tV}_{Hn-2}^{2}$ +0.0010 $\overline{tP}_{n-1}^{2}$ +0.0954 $\overline{t}_{sn-1}^{3}$	356	0.694	28.5
1683-0	18.5	88.1	$\frac{Q=0.324+0.012 \cdot t \vec{v}_{Hn-1}^{2}+0.0015 \cdot t \cdot \vec{P}_{Mn-1}^{2}+0.0097 \cdot \vec{f}}{\vec{v}_{Sn-1}^{3}}$	169	0.873	29.3

Tabellen inneholder de estimerte regressjonsmodellene for de 4 vannmerkene som analysen omfatter.

#### Konklusjoner

Det er påvist at data observert utenfor breen på faste værstasjoner fullt ut kan erstatte stasjoner oppe på breen dersom også radiosondedata fra Sola i 850 mbarnivået (1300-1400 m o.h.) benyttes. Spesielt inneholder dataene fra Indre Matre mye informasjon om tilstanden på breen. Denne stasjonen ble flyttet i 1971 noe som har medført homogenitetsbrudd i nedbørsdataene. Alternativt bør derfor nedbørsdata fra Bondhus benyttes. Det er mulig å finne modeller for avløpet som funksjon av meteorologiske parametre. En forutsetning er at det foreligger avløpsserier for det stedet man ønsker å simulere/prognosere avløpet. Før arbeidet med å utvikle prognosemodeller kan gå videre må derfor slike serier skaffes tilveie.

#### BONDHUSBREEN.

#### Innledning

I forbindelse med Folgefonnanlegget og byggingen av Mauranger Kraftverk (fig. 37) ble det planlagt et subglasialt vanninntak under Bondhusbreen. Inntaket skulle fange inn vannet under breen i en høyde av ca. 930 m o.h. og føre det i tunnel over til Mysevatn som er inntaksmagasinet til kraftverket. Breinntaket er en del av et "takrennesystem" som fanger opp flere små elver som kommer ned fra Folgefonna. Brearmen går ned til ca. 490 m o.h. men for å få inn smeltevann fra breen måtte inntaket legges minst 900 m o.h. og dermed var det nødvendig å lage inntaket under selve breen.



Fig. 36 Folgefonna med den vestlige utløperen Bondhusbreen. Folgefonna with the westerly going glacier Bondhusbreen in the foreground.



Ut fra undersøkelser og observasjoner andre steder mente en å kunne si med ganske stor sikkerhet at vannet drenerer ned til bunnen av isen nokså raskt, og ikke renner inne i isen eller langs kanten mellom isen og fjellet. Det går ned i sprekker og hull og smelter seg raskt ned til bresålen der det drenerer langs de laveste dypåler. Problemet ble derfor å finne disse dypåler.

Brekontoret ble engasjert våren 1972 med undersøkelser av breens glasiologi og materialtransport. Breen fører fram store mengder fint og grovt materiale. Slikt morenemateriale vil være uønsket i en overføringstunnel som raskt vil fylles og tilstoppes. Derfor er det ved inntaket under breen bygd et sedimentasjonskammer som skal fange opp materialet før vannet slippes inn i tunnelen. Det aller fineste materialet vil nok likevel følge med gjennom hele systemet. For å dimensjonere dette kammeret måtte det bestemmes hvor mye materiale breen normalt fører med seg. Disse undersøkelsene er omtalt og resultatene presentert i rapportene for materialtransportundersøkelser i norske bre-elver for 1972, 1973 og 1974.

Anlegget under Bondhusbreen er helt unikt i sitt slag. Det har aldri tidligere blitt bygd subglasiale inntak med så stor isoverdekning. I Frankrike, under Argentiere-breen, er det bygd et lignende anlegg, men her er isoverdekningen på 80 -90 m mens det på Bondhusbreen er ca. 160 m. Dette skaper spesielle problemer som behandles senere. Ved det franske Chute de Bois-anlegget, på breen Mer de Glace, er det også bygd et subglasialt inntak, men her renner den subglasiale elva i et markert elvegjel uten noen mulighet til å skifte løp.

På Argentiere-breen har det vært arbeidet nesten kontinuerlig siden 1955. Først i 1969 hadde man greid å få det meste av vannet inn til anlegget. Da fungerte vanninntaket bra i tre år, men så forsvant vannet. Det ble året etter funnet igjen på



# Fig. 38 Snitt gjennom det subglasiale vanninntaket. Cut through the subglacial water intake.

andre siden av breen, idet bre-elva helt hadde skiftet løp. I andre perioder forsvant bre-elva opp i isen. Isen måtte da "punkteres" med smelteboring fra undersiden. Selv med disse problemene og ved å anta at man fikk vann bare halvparten av den mulige tiden regnet man med at anlegget var økonomisk forsvarlig.

Selv om en har fått en del hjelp av de erfaringer en har vunnet ved disse franske anleggene, så er forskjellene så store at en har møtt mange nye problemer og anleggspraktiske vanskeligheter som måtte løses underveis. Derved har en også høstet nye erfaringer som kan komme til nytte ved senere subglasiale anlegg.



Fig. 39 Skjematisk skisse over det subglasiale prosjektet på Bondhusbreen; a og b er øvre og nedre vanninntak, ved t har det vært istunneler, c er sedimentasjonskammeret, d er stengselsporter, e er flom og utlastingstunnel, f er helikopterplatform og messe, g er lager og verksted og h er overføringstunnel til Mysevatn.

> Scheme of the subglacial project at Bondhusbreen; a and b are upper and lower water intake, at t there have been tunnels in the ice, c is sedimentation chamber, d is gates, e is spillway and loading tunnel, f is helicopter platform and mess-room, g is storeroom and workshop, h is diverting tunnel leading to Mysevatn.

De ingeniørtekniske probelemene når det gjelder overføringstunnelen, flomtunnel, inspeksjonstunnel, sjaktinntak og sedimentasjonskammer er delvis løst med hjelp av erfaringer fra de franske anleggene. Sandkammeret er dimensjonert for å ta imot 12 000 m<sup>3</sup> masse – en mengde som antas å være maksimum under et helt ekstremt flomrikt år. Det er meningen å tømme kammeret hver vinter når det ikke renner noe vann. En shoveldoser må være stasjonert inne i fjellet slik at den kan brukes til å tømme kammeret via en egen flom- og utlastningstunnel. Skjematisk skisse over anlegget er vist på fig. 38 og 39.

For tiden gjenstår endel av problemene med å lokalisere hvor vannet renner, idet bare en del av smeltevannet hittil er fanget inn i de nåværende inntakene.

En er villig til å satse ganske mye på å lykkes i dette prosjektet av flere grunner. Bondhusbreens vann vil alene kunne sørge for nesten 10% av tilløpet til kraftverket, og det er såpass mye at det kan forrente en relativt stor anleggskapital. Videre vil den tekniske løsning ved Bondhusbreen få konsekvenser for liknende prosjekter ved andre breer. Både når det gjelder Breheimprosjektet i Jotunheimen/Jostedalsbreens område og Svartisenprosjektet er det aktuelt med subglasiale vanninntak. Vi får nyttige kunnskaper og erfaringer fra Bondhusbreen, og skulle dette prosjektet mislykkes, så kan det i værste fall føre til en skrinlegging av liknende planer for de nevnte kraftprosjektene.

De norske planleggerne var altså klar over at det ville bli mange uventede problemer og skuffelser, men framtidsmulighetene for anlegg av samme type var så store at en likevel ville gjøre et forsøk. De fire siste årene er det foretatt en rekke undersøkelser for å samle mest mulig erfaringer både av teknisk og vitenskapelig art.

#### Undersøkelser i forbindelse med subglasiale vanninntak

#### Hastighetsmålinger

Måling av brehastigheten nær det planlagte inntaksnivå ble foretatt første gang allrede sommeren 1972, altså før en hadde sprengt tunnel under breen. Senere er det foretatt hastighetsmålinger flere ganger og på flere høydenivå. Ved å registrere overflatehastigheten vil en også kunne si noe om breens bunnhastighet, altså hastigheten ved selve inntaket, og dette er ønskelig å vite ut fra bygningstekniske synspunkter og for å se om hastigheten kan ha noen innflytelse på inntakets effektivitet. Dessuten er det nødvendig for å beregne hvor mye vann som passerer forbi inntaket i form av is.

Det ble satt ut staker i et profil på 1100 meters-nivået, og disse ble målt i perioden 8.juli - 12.oktober 1972. Midlere døgnlig bevegelse var 37,4 cm/døgn, litt

høyere mot midten og litt lavere mot kanten av breen. I omlag samme nivå ble brebevegelsen målt i perioden 12.oktober 1974 til 1.august 1975. Middelhastigheten var da 34,6 cm/døgn. I perioden 15.mars til 18.juni 1976 ble resultatet 36,5 cm/ døgn. Hastigheten i dette nivået ser ut til å være nokså konstant rundt 36 cm/døgn. Noen variasjoner vil vi få fra år til år idet vi ikke greier å sette ut stakene i nøyaktig samme nivå.

Beregningene gir en årlig overflatehastighet av breen over inntakene på vel 130 m. Bevegelsen er noe langsommere om vinteren enn om sommeren, vesentlig fordi vanntilgangen er mye større om sommeren slik at friksjonen mellom is og fjell blir mindre.

Hastigheten øker nedstrøms hvilket er nokså naturlig når både fallet øker og bredden minker mens ispassasjen er nesten like stor. I 900 metersnivået, rett ut for helikopterplattformen, ble det i 1976 satt ut en stake for å måle brebevegelsen. Breen er svært oppsprukket og utilgjengelig her, slik at en mann måtte settes av med helikopter ute i brefallet for å få satt ned staken og målt inn avstanden til den. I perioden 24.september til 1.november 1976 ble hastigheten målt til 55 cm/døgn. Selv om vi antar at det er noe lavere hastighet om vinteren, kommer vi likevel nær opp mot 200 m pr.år.

Ut fra overflatehastigheten kan en ikke umiddelbart si hvor stor hastigheten er langs bunnen av breen. Sikkert er det imidlertid at hastigheten avtar ned mot bunnen, men hvor raskt den avtar varierer fra bre til bre ut fra lokale forhold. På Bondhusbreen viser målinger i istunnelen under breen at glidehastigheten er noe under halvparten av bevegelsen på overflaten. I istunnelene ble glidehastigheten bestemt ved hjelp av isskruer i veggene, målt inn fra fastpunkter i fjellet.



Fig. 40 Overflatehastigheter målt over inntakene på Bondhusbreen.

Movement at the glacier surface at Bondhusbreen.

Resultatene varierte mellom 10 og 20 cm/d $\phi$ gn eller 40-70 m pr.år. Det er imidlertid vanskelig å få et helt riktig resultat på grunn av de spesielle trykkforholdene i breen som gjør at veggene i tunnelen klemmes inn fra alle kanter. Derfor må en regne med ganske stor usikkerhet i disse beregningene. Hastighetsfordelingen på overflaten og i et snitt mot bunnen er vist på fig. 40 og 41.



Fig. 41 Hastighetsfordelingen i et snitt gjennom isen ved inntakene.

> Surface and bottom movement in a cut through the glacier close to the water intake.



Fig. 42 Bunntopografien tegnet etter smelteboring gjennom isen. Borehullene er inntegnet.

After hot point drilling from the glacier surface the bottom topography could be estimated. The drill holes are marked on the figure above.

#### Smelteboringer

For å få et bilde av topografien under breen ble det av Statskraftverkene høsten 1972 foretatt smelteboringer i et profil over breen i 1100 metersnivået. Etter en del problemer med utstyret greide en å bore 12 hull i profilet, og på det grunnlag ble det tegnet et dalprofil. Fig. 42 viser resultatet.

Imidlertid viste det seg at disse smelteboringene var for usikre for en nøyaktig kartlegging av bunntopografien. Når smelteboret kommer ned i is som er blandet med morenemateriale vil det frigjorte materialet bli liggende i bunnen av hullet, og boret vil da raskt stoppe. Dermed kan det bli opp til 10 meters feil. Som en grov indikator av forholdene er metoden brukbar, men en nøyaktigere kartlegging krever sonderboringer fra undersiden.

#### Sonderboringer

I 1973 ble det drevet en tunnel under breen, og derfra ble det foretatt sonderboringer med diamantbor opp gjennom fjellet. Dette er et ganske tidkrevende arbeid, så med en fjelloverdekning på 20-30 m bores det ikke mer enn et hull pr.dag. Høsten 1973 ble det foretatt en rekke slike sonderboringer som ga et adskillig mer detaljert bilde av bunntopografien enn smelteboringene fra breoverflaten. Et snitt gjennom driftstunnelen med sonderboringene inntegnet er vist på fig. 43. Disse boringene blir nærmere behandlet senere i denne rapporten.



Fig. 43 Bunntopografien tegnet etter sonderboringer fra driftstunnelen. Borehullene er inntegnet, i er inspeksjonstunnelen, m er morenemasse. Stiplet linje viser bunntopografien tegnet etter smelteboringer.

Bottom topography drawn from the drilling through the bedrock from the tunnel. The drill holes are marked, i is the inspeciton tunnel, m is the morainic material. The dotted line shows the topography after the hot point drilling from the surface.

#### Istunneler

Det viste seg at heller ikke på grunnlag av sonderboringene kunne en sikkert si hvor vannet gikk. Det så ut til å være flere mulige elveløp, og i noen av hullene kom det vann der en ikke ventet det. Dessuten var avstanden mellom hullene såpass stor at det godt kunne skjule seg små vannførende kløfter imellom. En slo derfor opp sjakt til isen der det var mest sannsynlig at vannet kom, for så å drive istunneler langs bunnen av breen i overgangen is/fjell.

Bare ved å lage istunneler for direkte inspeksjon kunne en få et helt korrekt bilde av bunntopografien. Forutsatt at vannet virkelig følger dypålene, burde en ha gode sjanser til å finne det og fange det inn.

Selve driftsteknikken ved driving av istunneler var kjent tidligere. Franskmennene har gjennom årene smeltet tilsammen 4000 m istunnel under Argentiere-breen. Prosessen går ut på å sprøyte varmt vann med en temperatur på 40-50°C mot isen. Det viste seg at denne temperaturen ga optimalt resultat. Spillvannet får da en temperatur på 0-5°C. Høyere temperatur vil gi mye damputvikling og isen vil bare sprekke istykker uten at framdriften blir raskere. Vannet ledes gjennom flere slanger med dyser som sprer vannet (fig. 44). På Bondhusbreen ble det smeltet flere tunneler



Fig. 44 Smelteutstyr for driving av istunnel i overgangen is/fjell. Legg merke til den store steinblokka.

Hot water was sprinkled towards the ice through several rubber tubes with brass nozzles.

av 30-40 meters lengde. Istunnelundersøkelsene ble foretatt vintrene 1974, 1975 og 1976 ved punktene merket t på fig. 39. Resultatet av undersøkelsene ble at man laget en ny sjakt like ved nedre inntak, men ellers mente en fortsatt at inntakene dekket de aktuelle dypålene.

#### Sedimenter

Ved de vertikale innslagene viste det seg at en ofte måtte grave seg gjennom et tykt morenelag før en kunne begynne arbeidet med selve smeltingen. Dette morenematerialet var hardt og vanskelig å grave i. Anleggsarbeiderne mente det var delvis frosset og kittet sammen med is. Fjellet var dessuten flere steder så oppsprukket at det var vanskelig å se overgangen fra fjell til morene. Morenen inneholdt mange ganske store blokker. De største var av størrelsesorden 1 m<sup>3</sup> og hadde gjerne en kantet form. Tykkelsen på morenelaget var opptil 5 m, det hadde lett for å rase ut og gjorde arbeidet både farefullt og tidkrevende. Nærmest bresålen var materialet mindre konsolidert og var til sine tider nesten flytende p.g.a. et høyt vanninnhold. Dette kan også skyldes at eventuell is mellom moreneblokkene raskt smeltet når varmluft fra fjelltunnelen slapp inn. Morenematerialet var tydelig samlet i forsenkningene og jevnet ut bunntopografien. Dette gjorde at det var vanskelig å få sikker kontakt med fjelloverflaten ved framdriften av istunnelene.



Fig. 45 Kornfordelingskurver for to prøver tatt i en istunnel under breen. Particle size distribution for two samples taken in an ice tunnel under the glacier.

Breisen inneholdt også overraskende mye morenemateriale i bunnskiktet. Dette smeltet løs, la seg som et lag i bunnen og var med å hindre at kontakten med fjellet kunne holdes. Dessuten hindret det en effektiv utnyttelse av varmvannet ved at det selv absorberte mye av den tilførte energien.

Morenematerialet i isen var svært usortert, det varierte fra distinkte lag med fin sand til store blokker. Steinenes form varierte i like stor grad fra helt kantete blokker til nesten kulrunde steiner i alle størrelser. Ved de to inntakssjaktene var det stort innslag av vannbehandlet materiale, noe som ble tolket som at det her gikk, eller hadde gått, dreneringsveger. Kornfordelingskurver for to materialprøver er tegnet inn på fig. 45, den ene viser en grusig morene og den andre en siltig morene. På grunn av den store vanntilgangen ved smeltingen ble morenen raskt utvasket slik at det var vanskelig å få en representativ prøve.

Materialet forekom fra under en halv meter og opp til 10 m over fjellgrunnen, men var ofte noenlunde samlet i lag, eller materialbånd. Andre steder var materialet jevnt fordelt men med en viss tetthetsøkning ned mot bresålen. Det meste var likevel konsentrert i de to nederste metrene av breen. Over dette nivå var isen nesten ren, bare med enkelte horisonter av finkornet materiale.

Det var overraskende mye materiale som var fastfrosset i isen og dermed blir transportert forbi inntaket og ikke føres ned i sedimentkammeret. Lenger ned mot brefronten vil det være en viss tining langs bunnen både på grunn av friksjonsvarme og noe jordvarme. Tykkelsen på det morenefylte islaget vil dermed avta mot fronten, den morenefylte isen blir malt istykker, steinene avrundes og størrelsen minker. Ved fronten vil materialet transporteres fram langs bunnen. De verdier en har brukt ved beregning av sedimentkammerets størrelse er derfor for store idet de er basert på at det aller meste av materialet føres fram som bunntransport under breen eller som suspendert materiale i brevannet.

#### Isdeformasjon

Vi vet at en isbre må betraktes som en plastisk masse. Under stort trykk deformeres isen som et seigtflytende materiale og dette er årsaken til at en bre strømmer ut fra et akkumulasjonsområde. Den siger ned i daler, fortynnes og fortykkes avhengig av topografien under breen og bredden av dalen. Breen er imidlertid en mellomting mellom et fullkomment viskøst og et fullkomment plastisk materiale. Deformasjonshastigheten eller formforandringen er avhengig av den deformerende kraft som virker pr. flateenhet. Den teoretiske modellen kan skrives på formen

$$\dot{E} = B \cdot S^{u}$$

der  $\dot{E} = \frac{DE}{dt}$  er deformasjons-hastighet eller forandring i form pr.tidsenhet. S er

den deformerende kraft pr.arealenhet, B og u er konstanter. B er temperaturavhengig og u er en empirisk konstant der u $\approx$  3.

Figur 46 viser sammenhengen mellom deformasjonskraften og deformasjonshastigheten ved forskjellige modeller. Vi ser av figuren at det på isen må virke en viss minstekraft S<sub>o</sub> for at formforandring i det hele tatt skal foregå. Dersom S er lavere enn S<sub>o</sub> kan isen nærmest betraktes som et fast stoff. Strekkreftene vil da gjøre at isen kan sprekke opp, men lenger nede i isen er trykket større og isen sprekker ikke opp, den bare forandrer form. Desto dypere vi kommer, desto større blir S, og vi nærmer oss da mot et fullkomment plastisk stoff.

Ved driving av istunneler vil dermed breens plastisitet gjøre at tunnelen vil deformeres og gradvis lukke seg helt. Denne lukkingshastigheten ble på Bondhusbreen målt ved hjelp av isskruer i veggene og i taket i tunnelen. Det ble foretatt slike målinger flere ganger både i 1974, 1975 og 1976. Resultatene viser at deformasjonen er meget jevn. Taksenkingen ble målt til noe mellom 10 cm/døgn og 20 cm/døgn, men de fleste målingene lå samlet rundt 15-16 cm/døgn. Hastigheten var tilsynelatende helt uavhengig av tunnelens diameter.

Ved kontinuerlig drift i tunnelen vil temperaturen holde seg på ca.  $3^{\circ}$ C. Dette medfører en avsmelting på isveggene med omlag 3 cm/døgn, mens temperaturen synker til  $0^{\circ}$ C når vannet er avslått og smeltingen opphører. En kontinuerlig drift i tunnelen virker altså til å sinke effekten av isens deformasjon. På fig. 47 er deformasjonen vist som funksjon av tiden.

Ved boringene av istunneler på Argentierebreen kom en ut i et område der sprekker gjennomløp hele breen. Vann, is og steinblokker falt da ned gjennom sprekkene, noe som selvfølgelig gjorde arbeidet meget farefullt. Det ble også observert glepper som kunne være 1 - 2 m brede og 10 - 20 m lange mellom isen og fjellet på lesiden av knauser og bratte fjellpartier. Istykkelsen på Argentierebreen lig-



#### Fig. 46

Sammenhengen mellom deformasjonshastigheten (È) og den deformerende kraft pr.arealenhet (S). X er en helt plastisk modell, Y er en helt viskøs modell der E=konstant · S. Z er en empirisk modell for isen med E=B · S<sup>u</sup>, der B og u er konstanter.

Relation between deformation (E) and the deformation force pr.unit area (S). X is a complete plastic model, Y is a complete liquid model where  $\dot{E}$  = constant  $\cdot$  S, Z is an empirical model for glacier ice ( $\dot{E}$  = B  $\cdot$  S<sup>U</sup>) where B and u are constants.

ger på 80 - 90 m mens Bondhusbreens tykkelse ved inntaket er ca. 160 m, men glidehastigheten er likevel lavere på Bondhusbreen.

Med en så stor istykkelse er trykket mye større og følgelig også plastisiteten mer framtredende enn på Argentierebreen. Dermed blir også trykkforholdene i tunnelen mer homogene og stabile. En risikerer ikke en oppsprekking eller plutselig bevegelse i isen, noe som er en stor fordel for sikkerheten under arbeidet.

På Bondhusbreen ble det overhode ikke observert noen åpne glepper mellom isen og fjellet på lesiden av fjellknatter. Isen er så plastisk og glidehastigheten så lav at isen rekker å fylle alle hulrom. Den følger nøye hver dump i fjellet selv om trykket selvfølgelig vil bli noe lavere på lesidene.



Fig. 47 Målt deformasjon av istunnel i perioden 26.mars-1.april 1974. Istunnelens bredde som funksjon av tiden. Stiplet linje viser deformasjonen uten ablasjon på grunn av varmluft i tunnelen.

Deformation in the ice-tunnel in the period March 26-April 1, 1974. The width of the tunnel as a function of the time. Dotted line is the deformation when there is no ablation because of the warm air in the tunnel.

#### Vannlommer

På Argentierebreen hendte det at en smeltet seg inn i store vannlommer under trykk som gjorde at tunnelen måtte evakueres øyeblikkelig. Slike lommer oppsto når vann begynte å renne ned i breen, men ikke kunne drenere helt ned. Store vannmengder kunne derved bli isolert ved at isen klemte seg sammen over vannet. Dette har ikke vært noe problem på Bondhusbreen, selv om en også her har smeltet seg inn i mindre vannlommer der vannet sto under høyt trykk. Dette kommer antagelig av at vi her befinner oss langt nedenfor den nedre grense for oppsprekking mens en på Argentierebreen er like under sprekksonen.

## Inntakenes effektivitet

Somrene 1974, 1975 og 1976 har det kommet visse mengder vann til inntakene under breen og det har vært montert en limnigraf i slamkammeret for å registrere vannmengden, som imidlertid har variert meget, og til sine tider har det nesten ikke kommet noe vann i det hele tatt. Vannføringskurver for Bondhuselv, Bondhuskammeret og Brufoss for 1976 er vist på fig. 48. Kurvene viser at vannføringen i kammeret stort sett følger de samme variasjonene som forekommer i Bondhuselva. Porsentdelen med innfanget vann ligger på vel 15 prosent.



Fig. 48 Vannføringskurver for Bondhuselv (BE), Brufosselv (BR) og Bondhuskammeret (BK) i 1976. Brufosselv renner ut like ved Bondhusbreen og sees i forgrunnen på bildet på fig. 36, s. 49.

Water discharge in Bondhuselv (BE), Brufosselv (BR) and Bondhus sediment chamber (BK) in 1976. Brufosselv can be seen in the foreground of the picture on fig. 36, p. 49.

På fig. 49 ser en at vannstanden i kammeret viste periodiske svingninger med en svingetid på 2-4 timer over en 6-dagers periode i juni. Fenomenet kom igjen senere på sommeren, men varte da bare et døgn. Det virker som om et vannkammer i breen fylles opp og tømmes med jevne mellomrom, men hvordan dette foregår vet en ikke. For å få et mer eksakt tall for inntakenes effektivitet ble det fra 30.juli 1976 til 18.august 1976 foretatt målinger av ablasjonen på Bondhusbreen. Mangel på godt kartgrunnlag gjør beregningene noe usikre, men tallene gir en bra indikasjon på hva som har skjedd i denne perioden. For å unngå problemer med lokale dreneringsgrenser valgte en å beregne ablasjonen for hele det breområdet som drenerer til Bondhus og Brufoss. Den vannmengden som passerer ved inntaket blir derfor differensen mellom total ablasjon og vannføringen ved Brufoss. Vannet fra Holmavatn er inkludert i tallet for Bondhus. Tallene i parentes gir døgnmiddel for hele perioden.

	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Beregnet smelting i dreneringsområdet til Bondhus og Brufoss over 1100 m o.h.	ca.6,5 (0,38)
Målt ved limnigraf Brufoss	" 3,5 (0,21)
Vann passert 1100 m koten på Bondhus (inkl.Holmavatn)	" 3,0 (0,18)
Målt ved limnigrafen i Bondhuskammer	" 0,5 (0,03)
Passert forbi Bondhusinntak (ikke innfanget)	<u>ca.2,5 (0,15)</u>

Beregningene viser at bare ca. 1/6 av vannmengdene ble fanget inn under breen. Det kan være flere årsaker til dette, men dersom vannet følger bunnen av breen har en altså ikke greid å fange det inn på de riktige steder. Flere undersøkelser er dermed nødvendig for å lokalisere de vannstrømmer som ennå ikke er funnet.

# **BONDHUSBREEN**, Norway

Subglacial water intake



Fig. 49 Vannstandskurven i kammeret under Bondhusbreen viste merkelige periodiske svingninger over en seks dagers periode i juni 1976.

The water gauge in the sedimentation chamber showed some strange periodical variations during a six days' period in June 1976.

#### Sporundersøkelser

Det var ønskelig å bestemme hvor vannet fra sjaktene og borehullene kom ifra. Spesielt ville en gjerne konstatere hvorvidt en hadde greid å fange inn noe av vannet fra Holmavatn. Sporundersøkelser ble derfor foretatt 10.september og 11.oktober 1976.

Metoden gikk ut på at en skulle tømme porsjoner av sterk saltlake i vannløp ved Holmavatn, ute på breen og på sørsiden av breen, nærmest fjellsida mot Fønderdalshorgi. Det ble brukt ca. 50 kg salt utrørt i vann og dette ble tømt ut i et turbulent sted i vannløpet. Ved hjelp av ledningsevnemålere ble det tatt kontinuerlige målinger av vannet som kom ned på flere steder inne i tunnelen. Til kontroll av saltpassasjen ble det også foretatt måling av ledningsevnen ved brefronten. Ved målingene var det imidlertid så kaldt i været at det bare rant vann fra Holmavatn, og ikke ute på breen. Bare vannløpet fra Holmavatn kunne derfor bli undersøkt i denne omgang.

Undersøkelsene viste at vannet fra Holmavatn <u>ikke</u> ble fanget inn noe sted i tunnelen. Dette vannet blander seg tydeligvis ikke med resten av smeltevannet under breen, men passerer forbi de nåværende inntakene. Målingene ved brefronten viste derimot en markert økning i vannets ledningsevne ca. 45 minutter etter saltutslippet ved Holmavatn, og dette bekrefter at saltbølgen passerte tunnelen uten å bli fanget inn.

Metoden viste seg altså å være brukbar, og det vil derfor bli fulgt opp med flere sporundersøkelser i 1977. Da skal en først foreta ytterligere sonderboringer for så å se om noen av disse nye borehullene vil føre vann sommeren 1977.

# Lytteundersøkelser

I tillegg til sporundersøkelser ble det også foretatt vibrasjonsmålinger med seismometer i alle tunnelene. Dette ble gjort 30.august - 1.september og 27. - 29.september 1976. Det ble registrert noen forstyrrelser utenom inntaksstedene, og disse områdene vil bli undersøkt nøyere ved hjelp av sonderboringer og eventuelt nye saltmålinger.

#### Diskusjon

Etter tre års arbeid under isen har en høstet mange erfaringer, men også fått mange skuffelser. Breinntakenes effektivitet har ikke svart til forventningene. Innfanget vannmengde har variert mye, til sine tider har det nesten ikke kommet noe, mens det til andre tider har vært ganske store mengder. Det kan en bl.a. se på de store, grove steinmassene som er transportert inn i tunnelen mellom inntaket og sandkammeret.

Sandkammeret ser ut til å ha fungert tilfredsstillende, men plasseringen er utvilsomt for langt fra breinntaket. Avstanden til kammeret og relativt lite fall samt ujevn bunn i tunnelen har ført til at store mengder grov masse er lagt igjen mellom breinntaket og kammeret. Totalt er det beregnet at innfanget vann bare utgjør ca. 1/6 av den potensielle vannmengde. Resten av vannet passerer forbi inntaket enten i andre vannveier langs bunnen av breen eller i vannveier oppe i isen. Selv på Argentierebreen som er 70-80 meter tynnere enn Bondhusbreen gikk vannet oppe i isen i enkelte perioder. En må kunne regne med at vannet vil gå lettere opp i isen i Bondhusbreen der trykket og plastisiteten er større. Dette vil nok helst skje når vannføringen er liten, slik at energimengden i det rennende vannet ikke er stor nok til å kunne erodere vannløpet ned til bresålen.

Hvis dette er tilfelle, kan det bli meget vanskelig å få fanget inn <u>alt</u> vannet fra breen. I Frankrike "punkterte" man breen med smelteboring fra undersiden og fikk vannet ledet inn igjen, men da må en vite nøyaktig hvor vannet renner og vannet bør ha et nokså stabilt leie.

Det er sannsynlig at vi under Bondhusbreen har flere elveløp. Franskmennene presiserte at en måtte undersøke breen på tvers med en gang og ikke se seg blind på områder der en regnet med at vannet ville komme. Isens plastisitet kan gjøre at den presser vannet over i nye elveleier. På Argentiere skiftet bre-elva løp og ble funnet igjen langt fra de første stedene. Vannmengden der var imidlertid nokså samlet i ett løp, noe den ikke ser ut til å være på Bondhusbreen. Det negative resultatet av saltmålingene fra Holmavatn viser dette tydelig.

En mulig løsning både her og ved framtidige anlegg kan bli å bygge en tunnel eller "grøft" bare 3-4 m fra fjelloverflaten på tvers av breretningen, og så lage flere rektangulære sjakter opp til breen på langs av tunnelen. Derved vil en kunne fange inn flere skiftende elveløp. Dette krever imidlertid en grundig sondering av bunntopografien og denne sonderingen bør foretas med tette boringer langs et profil på tvers av hele breen. Derved kan en både kartlegge bunntopografien og stort sett finne hvor vannet renner.

Arbeidet med subglasiale vanninntak krever tid og tålmodighet. Det er vanskelige arbeidsforhold og en har svært lite av tidligere erfaringer og kunnskap å bygge på, men en grundig forundersøkelse vil nok lønne seg før en bestemmer hvor inntakene skal ligge.

# Anleggsmessige synspunkter på bre-inntaket

# Innledning

Slik inntaket etterhvert er blitt utformet ved Bondhus består det av et tunnelsystem som logisk sett burde kunne virke bra. Systemet har vannoppsamlingssjakter og stoller som sender vannet til magasinet; et grus- og steinkammer som kan lastes tomt i vintersesongen når det ikke kommer vann fra breen, og et inspeksjonstunnelnett som gir adkomst til inntakene selv om sommeren når det renner vann i systemet. Men de første driftsårene viste at de store vannmassene manglet, de vannmasser som det hele er bygget for.

Det kan være flere grunner til at vi ikke har lykkes å fange inn smeltevannet. Dersom det er flere elveleier under isen enn de to hovedrennene vi hittil har lokalisert, må det være sonderingsarbeidet som har sviktet, dvs. den subglasiale topografi ble ikke godt nok bestemt. Forståelsen av breens dynamikk kan også være mangelfull, dvs. isen oppfører seg kanskje annerledes enn man hittil hadde trodd

Isen med sin tykkelse på 165 meter og sin stadige bevegelse, åpner og stenger vannveier. Morenemasser ligger som rygger og kan lede vannet både hit og dit. Samtidig vasker vannet morenen med seg. Det er mulig at forståelsen av denne dynamikken har vært for svak. En teori er at vannet kanskje også kan finne seg veg oppe i isen, og altså ikke følge bresålen.

I det følgende behandles sonderingene som ble gjort på Bondhus og forslag antydes til forbedringer som bør vurderes dersom det blir aktuelt å gjøre noe lignende ved andre breer. Videre følger noen refleksjoner over hva som eventuelt skjer i området mellom is og fjell under breen.

### Sonderingsteknikken

Av de tanker som har vært fremme under drivingen av tunnelen frem mot inntakene kan nevnes :

Sonderstollen som først drives frem under bretungen legges i en høyde tilsvarende 5-10 meter lavere enn den ønskede inntakshøyden. Stollens plassering avgjøres etter et kotekart over fjelloverflaten. Dette kotekartet er tegnet etter smelteboringer (eventuelt seismikk eller andre akkustiske målinger) fra isoverflaten. Dette kart vil imidlertid være for unøyaktig til at en kan lokalisere vannveiene direkte, derfor må det senere også sonderes fra en tunnel under breen. Det er viktig at denne sonderstollen legges vinkelrett på bretungen, og at den krysser hele bredden av bretungen hvor det kan være muligheter for å finne eventuelle dypløp. Et effektivt fjellboringsutstyr må fremskaffes slik at det vil muliggjøre sonderboring av vertikale hull med senteravstand på 2 meter over hele profilet. Der det er tegn til renner eller lavtliggende områder, bør det bores imellom, dvs. slik at en får senteravstand på 1-2 meter.Boreutstyret må kunne klare vertikale hull på minst 50 meters lengder. Der en finner de lavestliggende partier bores det en serie med hull på skrå utover, f.eks. i  $45^{\circ}$ , men vinkelrett på sonderstollen, og en tilsvarende rast på  $30^{\circ}$  (fra horisontalen).

Den sonderboring som ble utført på Bondhusbreen var for en stor del gjort med et boreaggregat som krevde for mye arbeid ved utstrossing av standplasser. For å spare tid og arbeid ble resultatet vifteformete borhullserier langs sonderstollaksen og på nytt vifteformete serier ut fra vertikalaksen for lokalisering av dypløpene. Ved en enkel betraktning er det lett å se de feilkilder en da kan få. Se fig. 50.



Fig. 50 Vifteformede sonderboringer fra sonderstollen.

Detailed mapping of the ice/bedrock interface made by several holes drilled in various directions from certain points in the tunnel roof.

Ved boring på tvers av traceen med vifteform kan en risikere å få de fleste hullene ut på omtrent samme kote, hvilket igjen vil si at det blir en umulig oppgave å konstruere et brukbart kotekart etterpå. Borhullene vil selvsagt også bli lengre enn nødvendig med dertil større usikkerhet, og et stort antall hull kommer kanskje ikke ut i isen i det hele tatt. En må også regne med at boret vil bøye noe av ved skrå boringer.

Det må derfor presiseres at tunnelen lages stor nok til å begynne med slik at boreaggregatet kan sette på de nødvendige hull vinkelrett på bunnaksen uten ekstra strossing.

På basis av resultatene fra boringene tegnes det inn koter over fjelloverflaten. Adkomststoller frem til de potensielle inntaksområdene drives frem og nye sonderhull bores. Deretter drives det sjakter opp til fjelloverflaten der det senere kan tenkes å utforme inntak. Sjaktlengden fra tunneltaket og opp anbefales til ca. 5 meter. Før sjaktene drives opp må tempo-planen vurderes. Enten må sjaktene kunne forsynes med innstøpte porter for å holde vannet ute i sommersesongen, eller en må regne med evakuering av tunnelen i denne perioden.

Det sikreste er selvsagt å foreta en størst mulig grad av sonderinger for å lokalisere vannet før sjaktene drives opp. Det kan gjøres på følgende måte :

- måling av støy fra rennende vann ved lytteundersøkelser og en boring opp gjennom evt. morenelag med f.eks. diamantboring i de aktuelle områdene.
- Saltgjennomgangsmålinger ved utslipp av saltlake i tilførsler til brearmen lenger oppe. Derved kan en finne ut om vannet som kommer i sonderhullene er brevann eller bare grunnvannsårer eller bekketilløp fra dalsiden og i tilfelle hvor det kommer fra. Disse undersøkelsene er nærmere omtalt i kapitelet foran.

Parallelt med en grundig vannlokalisering kan en planlegge og utføre de øvrige arbeidene: avsetningskammer for løsmasser, inspeksjonstoller, overløp etc. Dermed kan en arbeide effektivt hele sommerhalvåret og først ta gjennomslagene til vann når alt det andre er ferdig. Dersom gjennomslagene taes i november-desember vil en kun ha tiden fram til begynnelsen av mai til å ordne resterende arbeider og sonderinger under isen.

Når sjaktene drives opp til isen må en sikringsplan for arbeid gjennom mulige morenelag være klar. En kritisk fase forekommer fra det tidspunkt en kommer ut av fjellet til en har breisen over seg.

Ved å dele sjakta med en solid tømmervegg der kanskje 1/3 av sjakttverrsnittet forsynes med forskansning og solid tømmertak, kan en arbeide trygt på skrå oppover i morenen og benytte resten av sjakten for løsgjorte masser. En må ikke fristes til å stå nede i tunnelen å forsøke å spyle ned massene. En får da så store høyder at en fort mister oversikten og arbeidsplassen blir livsfarlig. Sålenge en har nær kontakt med taket og kan sette tømmerforskansning foran seg arbeides det trygt og under full kontroll.

# Refleksjoner over breens dynamikk

Grus og morene som ligger i rygger på fjellet ser ikke ut til å flyttes av breisens bevegelser. Isen "skubber" ikke morenen med seg, den flyter med en slags amøbisk bevegelse over den. Mellom isen og morenen danner det seg et tynt glideskikt av "morenegrøt" på ca. 1-2 cm's tykkelse. Dette skiktet er vanskelig å observere men det ser ut til å bestå av nokså finkornet, oppbløtt morenemateriale antagelig dannet p.g.a. friksjonsvarmen når breen sklir.

Vannet er den virkelige masseforflytter. Isen bærer store mengder stein og grus i seg fra forskjellige kilder inne fra breen. Ved vannets tine-effekt frigjøres

disse massene og føres med bre-elvene nedover.

Så høyt oppe i brefallet som inntakene ligger under Bondhusbreen er steinmassene vesentlig grovere enn nede ved bretungen. Blokker på over 1 m<sup>3</sup> er ingen sjeldenhet, og stein på 100-200 liter er det store mengder av. Steinene er ofte relativt skarpkantede og derfor vanskelige å forflytte med vannstrømmen inne i en tunnel.

I dypløpene under isen sildrer det litt vann hele vinteren. Det ble en gang observert små istapper i tunnelhengene under et av elveleiene vinteren 1973-74. Ventilasjonsluften ble dengang tatt inne fra Rennedalen og hadde således vandret 5500 meter i dukrør før den kom inn. En mener at det derfor er utelukket at kulda kom inn med luften utenifra, så underkjølt vann var sannsynligvis forklaringen på fenomenet. Dette kan forklare den sterke frostsprengningen som ser ut til å finne sted i bunn av dypløpene og som gjorde overgangen mellom fast fjell og morenelag så vanskelig å definere i enkelte sjakter.

Varmen som dannes ved fallet i bre-elvene holder vannveiene åpne. Er det stort fall genereres mye varme med tilsvarende stor avsmelting av isen som hele tiden siger ned fra "taket" eller inn fra sidene. Dersom vannet plutselig forsvant ville istunnelen raskt lukke seg over elveleiet. En bre-elv med konstant vannføring vil ha en likevekt mellom mengden av is som smeltes og mengden av is som siger inn i "tunnelprofilet". Likevektstilstanden er avhengig av en rekke faktorer. De viktigste er antakelig :

- a. Breisens plastisitet som igjen er en funksjon av istykkelsen.
- b. Tverrsnittet på elveleiet. Et trangt gjel i fjellet vil ha liten fri isflate i forhold til tunnelarealet og vil således få størst fri åpning.
- c. Bre-elvas fall og gradient. En stor bratthet betyr stor varmeutvikling og f $\phi$ lgelig stor smelteaktivitet.
- d. Elvas vannføring (Q).

Ut fra betraktningene under avsnittet ovenfor kan en, for en gitt istykkelse, tenke seg 3 situasjoner :

- Det genereres nok varme til at bre-elva kan ha fri vannflate, dvs. at vanntverrsnittet er mindre enn "istunnelen".
- (2) Varmemengden er så liten at istunnelen fylles helt, eller at vannet t.o.m. står under trykk.
- (3) Varmemengden blir så liten at tunnelen klapper helt sammen.

For en brearm hvor istykkelsen og dermed plastisiteten er kjent, slik som på Bondhusbreen, vil en kunne regne seg fram til grenseverdiene for elvas fall ved overgangen mellom de 3 situasjonene ved å anta et rimelig tverrsnitt på elveprofilet. Det er imidlertid mange parametre som vi ikke kjenner størrelsen av og derfor vil

regnestykket i praksis være svært vanskelig å få til å stemme.

For å kunne ta inn en bre-elv, og med noenlunde sikkerhet vente et brukbart resultat, må en ha situasjon (1).

Ved Bondhusinntaket ser det ut til at vi har situasjon (1) sålenge vannet følger "gunstige" dype kløfter og vannføringen er relativt konstant.

Øker imidlertid vannføringen noe, eller tettes elveleiet med grus, inntrer situasjon (2) og trykket kan Øke meget raskt. Vannet finner da nye veier som ikke nødvendigvis følger dypålene og grusrygger kan for en kortere eller lengre tid blokkere de naturlige rennene.

Sommeren 1975 ble det ført så mye stor stein ned i tunnelen at det bygget seg opp masser i hele inntakssjakta i hovedløpet. Det dannet seg også en hel haug av masser, anslått til en 5 meter høy rygg, oppunder isen og videre oppover elveleiet. Sannsynligheten taler for at tilstoppingen av dette løpet, som på det aktuelle tidspunkt antagelig førte en vannmengde på over 10 m<sup>3</sup>/s. (anslått utfra de steinstørrelser som var vasket vekk) skyltes at elveløpet ble kastet til siden p.g.a. trykkøkning. Sommeren 1976 hadde vi ingen større flommer (knapt nok en middels stor flom) så etter opprenskningen i og over inntaket vinteren 75-76 har det ikke vært vann nok til å spyle elveleiet rent igjen.

Det er å håpe at vi i et kommende år får en relativt kraftig flom slik at vannet kan åpne en skikkelig subglasial tunnel. Det skal da bli interessant å se om denne tunnel vil følge en av dypålene og bli fanget inn, eller om vannet vil finne seg andre veier.

#### BEVEGELSESMÅLINGER

#### Resultater fra Nigardsbreen, Høgtuvbreen og Engabreen

På grunnlag av koordinatbestemte punkter omkring de undersøkte breene og ut fra årets og tidligere års staketrianguleringer, er stakenes bevegelser beregnet.

I 1973-rapporten ble bevegelsesmålinger sist publisert, slik at i år er det målingene fra 1973 til 1976 som er blitt beregnet. En del av resultatene følger i denne rapporten, resten vil komme sammen med 1977 målingene i neste rapport.

Resultatene fremgår i tabeller og stakebevegelsene er også angitt som vektorer på brekartene.


Fig. 51

Brebevegelse på Nigardsbretunga 1973-74.

Glacier movement on the lower part of Nigardsbreen 1973-74.

Bret	pevegel	se	рă	Ni	ga	rdsbreen
i	tiden	15.	9.7	3	-	18.7.74

Wire	Bevegelseslengde (m)	Døgnlig midlere bevegelseslengde (cm/døgn)	Årshast. (m)	Retn. (g)
30	28.32	9.25	34	154
31	51.61	16.87	62	154
32 ·	70.07	22.90	84	167
34	77.63	25.37	93	169
35	80.64	26.35	96	177
36	87.82	28.70	105	185
37	92.82	30.33	111	188
38	96.04	31.39	115	185
39	102.27	33.31	122	177
40	114.24	37.21	136	170
42	145.01	47.39	173	134

(Den åilige hastigheten som her er regnet ut er nok noe lav, da sommeren ikke er kommet med.)



Fig. 52 Brebevegelse på Høgtuvbreen 1973-74. Glacier movement on Høgtuvbreen 1973-74.

Brebevegelse	på	Høgtuvbreen
--------------	----	-------------

Stake	Bevegelseslengde (m)	Døgnlig midlere bevegelseslengde (cm/døgn)	Årshast (m)	Retn. (g)
10	2.52	0.60	2.19	94
23	2.45	0.58	2.13	107
50	9.93	2.37	8.65	88
64	5.48	1.31	4.77	103
85	5.03	1.20	4.38	128
97	4.35	1.04	3.79	121
103	1.58	0.38	1.38	87
107	1.08	0.26	1.33	104
110	1.99	0.47	1.73	69

i tiden 20.7.73 - 12.9.74



Q 50 100 150 200 250 m

.

### Brebevegelse på Engabretunga

i tiden 6.7.73 - 24.6.74

Wire	Bevegelseslengde (m)	Døgnlig midlere bevegelseslengde (cm/døgn)	Årshast. (m)	Retn. (g)
4	73	20.6	75	358
5	85	24.1	88	357
6	90	25.4	93	362
7	97	27.4	101	363
8	97	27.6	102	365
9	117	33.1	121	360
10	134	37.3	136	368
11	136	38.5	141	370
12	160	45.3	165	371
13	173	49.0	179	374

Wire	Bevegelseslengde (m)	Døgnlig midlere bevegelseslengde (cm/døgn)	Årshast (m)	Retn. (g)
8	103.96	28.48	104	363
10	118.79	32.54	119	367
12	141.12	38.66	141	368
14	160.90	44.08	161	374
16	190.66	52.24	191	375
17	219.65	60.18	220	382

Brebevegelse på Engabretunga i tiden 12.8.75 - 11.8.76

#### SUMMARY

# Mass balance, meteorological and hydrological investigations at selected glaciers

### Introduction

The Norwegian Water Resources and Electricity Board (NVE) is a Government organization. One of its sections within the Hydrology Division, Glaciology Section, has undertaken glaciological investigations at four glaciers in Southern Norway and two glaciers in Northern Norway during 1976. The Norwegian Polar Institute (Norsk Polarinstitutt) has investigated three additional glaciers in Southern Norway. The location of all these glaciological investigations are marked on the map, Fig. 1.

The longest series of observations have been made at the glacier Storbreen in Jotunheimen (observed by Norsk Polarinstitutt) and Nigardsbreen, an outlet glacier from the Jostedalsbreen ice-cap (performed by NVE). The series of mass balance investigations started on Storbreen in 1948 and on Nigardsbreen in 1962. The investigations on glaciers in Northern Norway started in 1970, in the Svartisen area.

All NVE's glacier investigations are made in connection with hydrological studies of selected basins which are considered for possible hydro-electric power developments in the future. Also some sediment transport studies were performed in selected glacier streams because suspended material, and to some extent bottom load carried by the melt water, may cause technical problems in future power installations. The results of these sediment transport studies are given in a separate series of annual reports, published by the Hydrology Division of the Norwegian Water Resources and Electricity Board. Methods

It was decided already at the beginning of NVE's glaciological program in 1962 that one should base the terminology on the guide-lines published by UNESCO (1970). Various terms and symbols are shown on Fig. 2. The practical details in field work, data processing, etc. are described in Østrem and Stanley (1969).

The winter balance is normally observed during April/May when a large number of snow depth measurements are made and the snow density is determined in pits. These pits may be 4-6 m deep; for deeper snow packs a method of snow sampling by a coring auger has been developed. Additional accumulation that may occur after the main snow survey is normally measured in June, and this additional accumulation is added when the winter balance is calculated.

The summer balance is similarly measured in a number of points on the glacier, but the number of such points is much smaller. Ablation stakes, made of a strong aluminum alloy, are drilled into the glacier ice in each measuring point. In the firn basin similar stakes are inserted in the firn but are supported at the bottom to prevent sinking of the stakes into the firn. A map of the summer accumulation is constructed for each glacier and this map together with the winter balance map will form the base for further calculations. Both maps are planimetred and tables are plotted for winter balance and summer balance in selected height intervals for all glaciers under study. These tables are shown for each glacier in this report (see for example p. 11, 20, 25, etc.). The net balance is calculated as the algebraic sum of winter balance and summer balance; a positive result indicates that the glacier has been growing; a negative result indicates that the glacier has been decreasing during the year of observation. A diagram showing variations in summer balance and winter balance with elevation is also made for each glacier. In this diagram an additional curve is constructed for variations in net balance with height. From the diagram it is also possible to see the area distribution of the glacier and the height of the equilibrium line (compare, for example, Fig. 11).

#### Meteorological and hydrological observations

A special study was performed to calculate the heat balance at Engabreen and Nigardsbreen. The presentation of this material is found on p. 40-46 (a short summary is made below).

Meteorological observations were made of cloud cover, wind direction and daily run of wind, air temperature, air moisture and precipitation at the stations where assistants were based during the summer. The local distribution of precipitation on the glacier surface has been observed by a great number of simple "Pluvius" rain gauges distributed over the glacier surface. At some glaciers where continuous ob-

servations are no longer made during the summer, a set of automatic instruments has been installed to obtain records of air temperature, air moisture and precipitation during the entire melt season.

It has been attempted to establish discharge observations at as many glaciers as possible. This is done partly by observers reading a gauge, partly by automatic recording instruments.

All daily observations are transferred to punch cards, and the diagrams showing meteorological observations have been plotted by computer, compare, for example, Fig. 6.

#### Ålfotbreen

This glacier is traditionally receiving the heaviest winter accumulation due to its location in a maritime part of the country. It is therefore necessary to visit the glacier several times during the winter. At the first visit on October 9th the glacier had already received 30-100 cm of snow. As much as 2-3 m of snow had accumulated until the beginning of December and 17 stakes were still visible. Then, during the middle of the winter (up to January 27th) such large amounts of snow accumulated so that all stakes disappeared. It had then arrived 3-4 m of fresh snow during 7 weeks, so it was necessary to place replacement stakes on the entire glacier. They were still visible in March when the total winter accumulation was determined. The snow depth was then about 7 m. An additional accumulation of about 2,5 m occurred up to May 5th when the final snow survey was made by depth measurements in 115 points, compare Fig. 3. Based upon these data a map of the winter balance was constructed, see Fig. 4. The heaviest snow accumulation amounted to almost 10 m. the total winter balance was 21  $\cdot$  10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> of water which equals 4,4 m water equivalent evenly distributed over the entire glacier surface. This is 23% more than the average for the period 1963-1975.

Observations of the ablation were made in June, July, August, September and October. The total ablation was only 85% of the average for the period 1963-1975. It amounted to  $13,7 \cdot 10^6 \text{m}^3$  which equals 2,9 m water equivalent. The glacier experienced a positive net balance all over its surface and old glacier ice was never exposed during that summer. This caused, naturally, a relatively high albedo and only during one single year since the measurements started in 1963 we observed a higher glacier growth on Ålfotbreen (1973). The glacier has now experienced positive net balances during six consecutive years. For details, see the Table on page 11 and the diagram, Fig. 5.

#### Blomsterskardbreen

This glacier is not normally visited as often as the glaciers under study because the main task for the observations is to obtain the net mass balance only.

Although no stakes were found when the glacier was visited at the end of September, 1976, it is possible to calculate the net mass balance also for this year because the glacier was photographed on September 21st, 1976 (Fjellanger Widerøe, Mission No. 5282). It is supposed that the summer season had just ended then. The temporary snow line could be easily transferred from the photographs onto a topographic map of the glacier, and its height is supposed to directly indicate the equilibrium line height; it was determined to be about 1210 m a.s.l.

The net balance was then calculated by a method mentioned by Liestøl (1967, p. 46), and the result is shown in Fig. 7. It seems that it is a linear correlation between the height of the transient snow line and the net balance (also shown by Østrem 1975, p. 411-412), thus it is supposed that the diagram can be directly used to calculate the net balance for Blomsterskardbreen 1976.

The net balance amounted to +1,4 m which indicates that the glacier has increased in thickness by 6,3 m water equivalent since the fall 1969; corresponding to 0,9 m/year. In spite of this relatively heavy mass surplus it is not expected that the glacier will push forward until several years in the future. This is due to the fact that there is a long distance from the equilibrium line to the snout and it is supposed that the glacier has a relatively long "reaction time".

Comparing with results from Ålfotbreen it seems that the mass balance on both these glaciers are very like; during the period 1970-76 Ålfotbreen had an annual net positive balance of 0,82 which is very close to that of Blomsterskardbreen. The distance between the glaciers is 205 km but they are both situated in an area of extreme maritime climatic conditions. All glaciers in this part of the country have had, as an average, a positive mass balance during the last few years.

### Nigardsbreen

The accumulation season started with heavy snow falls and long periods of bad weather which prevented our observers to visit the glacier then. When they finally reached the area in the middle of December only 11 stakes could be found. Visits were then made to the glacier at the end of January, at the middle of March when snow samples were taken and dust layers were placed at two stakes. The total snow depth had then reached between 3,5 and 6,5 metres. The final snow survey was made at the end of April when further about 1,5 m of snow had accumulated. Density measurements were made again in the same points and the snow depth was measured in

240 points along profiles shown in Fig. 9. The total snow depth ranged between 3,5 and 8 m. A snow accumulation map is shown in Fig. 10.

The total winter balance amounted to  $138,9 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water. This corresponds to 2,88 m of water equivalent evenly distributed on the glacier surface. This is 25% more than the average since 1962 and only once (1967) a higher snow accumulation was observed on Nigardsbreen.

The observation station at Steinmannen was occupied from June 16 to September 1 when stakes were observed every week and the deep drilled cables on the tongue every ten days. Three stakes, located near the hut, were measured every day.

Due to a generally nice weather with many hot days the ablation proved to be higher than the average - in total 119,6  $\cdot 10^6 \text{m}^3$  of water was removed from the glacier. This is approx. 30% more than during an average summer in the period 1962-76. The specific summer balance amounted to 2,48 m of water equivalent evenly distributed on the entire glacier surface. In spite of this large melt the net balance amounted to +19,3  $\cdot 10^6 \text{m}^3$  of water, corresponding to 0,40 m of water equivalent evenly distributed on the glacier surface. This amount is quite near the average annual glacier growth since 1962. The equilibrium line was situated at 1540 m a.s.1.

Some meteorological observations were made in the period June 15 - September 1 and the results are shown in Fig. 12. The mean cloud cover was 6/10. Only 13 days were cloudfree whereas 20 days had complete cloud cover or fog. The mean wind speed amounted to 5,2 m/sec which is slightly higher than the average for the last 10 years. The mean temperature for the entire season at Steinmannen (1630 m a.s.1.) was  $4,8^{\circ}$ C, i.e.  $1,0^{\circ}$ C higher than average for the period 1965-75. The highest mean temperature was observed on August 9 (10,9°C) whereas 10 days had negative mean temperatures, the period July 28 - August 3 was extremely cold. Observations were also made at a Stevenson screen placed at 1840 m a.s.1. ("Bur B").

The precipitation was measured in various precipitation gauges, one standard Met. Inst. rain gauge, a pluviograph, and a small gauge of the type "Pluvius". The two first-mentioned collected about the same amount of precipitation (170 and 160 mm) whereas the "Pluvius" collected significantly more rain (250 mm). During the 76 days of observation, rain was observed during 35 days, but in general, the summer 1976 was much drier than the previous 10 years.

The mean water vapour pressure for the entire period was 7,0 mb. Only 16 days had a lower mean water vapour pressure than 6,1 mb during days of positive temperatures, so only during these days (and perhaps parts of other days) there were physically any possibilities for evaporation from the glacier surface.

The discharge from the glacier has been observed annually since the glaciological studies started at Nigardsbreen. During the period from June 1 to September 1, a total amount of 139,4  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> water passed the gauging station at the outlet of the lake Nigardsvatn. The maximum daily discharge was observed on July 10, amounting to 2,7  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> water whereas the main daily discharge was 1,5  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup> water. Most of this water originates from the glacier melt because almost 75% of the basin above the gauging station is glacierized. The discharge figure (139  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup>) agrees fairly well with the summer balance figure (119  $\cdot 10^{6}$  m<sup>3</sup>) - the difference being snow melt from the rest of the basin, and summer precipitation.

### Hardangerjøkulen

Hardangerjøkulen which is a dome-shaped ice-cap in south-western Norway is not observed entirely, but a west-facing outlet glacier, Rembedalskåki, has been selected as representative for the ice-cap. Annual observations are made by Dr. O.Liestøl, Norsk Polarinstitutt, and results will be dealt with in detail in the annual "Årbok" issued by that organization. For the purpose of comparison with other glaciers in Norway some results are included in this report, see particularly Fig. 13.

### Storbreen

The valley glacier Storbreen in Jotunheimen has been observed since 1948 by Dr. Olav Liestøl in Norsk Polarinstitutt. This is one of the longest observations series in the world (only the series from Storglaciären, Northern Sweden, is known to be longer). Similar to the results from Hardangerjøkulen it is a normal routine that results are reported in the annual publication "Årbok" from Norsk Polarinstitutt, but a short summary is given in this report on page 22. The winter accumulation was 30% higher than during the last 27 years, namely 1,80 m of water equivalent, whereas the summer melt amounted to 1,90 m of water equivalent. The mass balance turned out to be negative; the figure -0,10 m water equivalent is indicated by Liestøl. See also his Fig. 14 which is constructed analogously to other diagrams of the same kind in this report.

#### Hellstugubreen

Hellstugubreen is also a valley glacier in the Jotunheimen area but it is situated slightly east of Storbreen and, due to the fact that the gradient for annual mass balance seems to be very steep in this area, it has a different mass exchange than Storbreen.

The winter accumulation was measured in the middle of May when the snow pack ranged between 0,1 m and 5 m. The thickness was measured in 140 points along measuring profiles shown in Fig. 15. Snow density was measured in two points and the result-

ing winter balance map is shown in Fig. 16; it amounted to  $3,83 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  of water which corresponds to the specific figure 1,16 m of water equivalent.

The ablation stakes were observed in July and August and the total summer balance was measured on November 16. Due to a very hot and dry summer the summer balance proved to be no less than 36% higher than the average for the period 1963-75. A higher summer melt has been observed only during two previous summers (1963 and 1969). The total summer balance amounted to  $6,29 \cdot 10^6 \text{m}^3$  water corresponding to 1,89 m of water equivalent.

The net balance turned out to be negative; the glacier lost  $2,46 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water which corresponds to -0,73 m of water equivalent. This glacier has shown a negative mass balance during all the years of observation since 1968, apart from 1974 when it had a positive mass balance. The results obtained in 1976 are shown on the diagram, Fig. 17 and in the table on page 25.

## Gråsubreen

Gråsubreen is the easternmost glacier in Jotunheimen and also the highest situated glacier under study. Both winter accumulation and summer melt are traditionally smaller on this glacier than on any other of the glaciers under study. Consequently, it is normally not necessary to visit the glacier during the accumulation season, and the snow survey was made on April 22, 1976 when all 11 stakes were visible and snow thickness measurements were made in 75 points (cf. Fig. 18). Snow density was measured in two points (at stake 8 and stake 14). The pattern of snow accumulation is particular for this glacier in that the snow blows away from certain parts of the glacier, compare the map of winter balance, Fig. 19.

The winter balance amounted to 1,6  $\cdot$  10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, corresponding to 0,62 m of water equivalent. This is slightly less than the average winter balance for the period 1963-1975.

The summer was very warm and due to a relatively thin snow cover on the middle and the higher parts of the glacier, ice and firn were exposed very early in the melt season and the albedo was consequently unusually low on certain parts of the glacier. Radiation contributes significantly to the melt on this glacier (about 70%) and, consequently, the albedo is very important for the resulting summer melt. A low albedo on the higher parts of the glacier will cause a higher melt than if the glacier had a more "normal" distribution of the albedo - whiter snow on the higher parts and lower albedo on the lower parts. Consequently, the curve showing variations in summer balance with height, (Fig. 20) will therefore show a steeper slope than for most other glaciers.

The total summer balance amounted to 4,1  $\cdot$  10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> of water which corresponds to

1,62 m of water equivalent evenly distributed on the glacier surface. This is slightly less than during the summer of 1975 but is still 155% of the average summer balance for the period 1963-1975.

The net balance is therefore negative, -1,0 m of water equivalent, which is the second highest deficit ever measured on this glacier. The equilibrium line was situated higher than the highest parts of the glacier, i.e. the glacier was entirely below the equilibrium line in 1976 - compare Fig. 20.

#### Høgtuvbreen

This valley glacier in Northern Norway, situated south-west of the main part of the Svartisen ice-cap, has been investigated since 1971 but this series of observations will be discontinued because sufficient hydrological data have been collected for the planning purposes of a hydro-electric development in this area.

The winter balance was fairly heavy, large amounts of snow accumulated in December and January so that most of the stakes disappeared in the snow. The glacier was visited several times during the winter and the final snow survey was made at the beginning of May when the snow pack amounted to more than 5 m on the tongue and more than 10 m in the firn basin. The snow survey was made according to the standard procedures; the sounding profiles are shown in Fig. 21. The snow density was measured in two points. The winter balance map, Fig. 22, is based upon these data.

The total winter balance amounted to  $9,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water which corresponds to 3,66 m of water equivalent equally distributed on the entire glacier surface. This is the second highest winter balance ever observed since the observations started in 1971.

The summer balance turned out to be very low, a smaller summer balance has been observed only once, in 1975. The reason is partly that it was a cool summer in 1976, partly the very high winter accumulation caused a high albedo almost throughout the entire summer.

The summer balance amounted to  $7,15 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water, corresponding to 2,75 m of water equivalent. The net balance turned out, of course, to be positive also in 1976. No less than  $2,36 \cdot 10^6 \text{m}^3$  water was left on the glacier, corresponding to +0,91 m of water equivalent. A higher mass increase on this glacier was observed only in 1973. The transient snow line could not be observed in 1976 because fresh snow had fallen on the entire glacier at the last visit during the summer. The equilibrium line was situated at 730 m a.s.1.

Discharge observations were performed in the period from July 9 - October 2. The total discharge amounted to  $17,15 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water which corresponds to a mean

water discharge of  $2,31 \text{ m}^3/\text{sec}$ . This is about 90% of the average for the last five years.

#### Engabreen

All glaciers in Northern Norway received large amounts of snow during the winter of 1975/76. Snow surveys on Engabreen on November 19 and January 6, 1976, indicated that at least 3-4 m of snow accumulated during this relatively short period. Thus only 3 stakes were found in January. When the total accumulation was measured on May 20 no less than 7-10 m of snow had arrived. To facilitate measurements of total water equivalent of this huge snow pack, a number of dye surfaces had been placed on the glacier at the various visits during the winter. Consequently, the water equivalent of the snow pack up to these dye layers had been determined, so that the field work in spring was limited to take snow samples down to the uppermost dye layer. Several drillings down to the previous summer surface were, however, necessary to check the snow depth soundings. In total 235 snow depth soundings were performed, compare Fig. 25. The winter balance map, Fig. 26, was based upon these measurements.

The total winter balance amounted to  $146.8 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water or 3,86 m of water equivalent. This is 120% of the average winter accumulation during the five previous years, and a higher accumulation was found only in 1973.

The summer was fairly cool and already at the end of July a layer of 15-20 cm of fresh snow had fallen above 1100 m a.s.l. The summer balance amounted to only  $55,1 \cdot 10^6 \text{m}^3$  of water or 1,45 m of water equivalent. This is the lowest ablation ever measured since the observation series started in 1970. It is only 60% of the average for the period 1970-75. The summer mean temperature was  $0,7^{\circ}$ C lower than the average in this period, and at the meteorological station in Glomfjord the monthly temperatures for July and August were  $1,9^{\circ}$ C cooler than normal. (The "normal" period being 1931-1960).

The net balance amounted to  $1,7 \cdot 10^6 \text{m}^3$  water or +2,5 m of water equivalent. A slightly higher positive balance was measured in 1973. The glaciological year 1976 is the fourth consecutive year of positive mass balance on Engabreen.

At the observation hut (880 m a.s.l.) the following meteorological parameters were observed or recorded throughout the entire summer season: precipitation, temperature, air moisture, wind speed, cloud cover and short-wave incoming radiation. At a point in the accumulation basin (1360 m a.s.l.) only precipitation and temperature were measured. Some of the results are shown on Fig. 28, whereas the energy balance is described in a separate chapter (see page 40). The total discharge from the lake Engavatn was only 120,8  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> water for the period June 1 to September 15 which is almost a record in low water discharge, amounting to a daily mean of only 1,13  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> water.

### Comparison between mass balance on various glaciers

The mass balance was in 1976 measured at 9 glaciers, 7 in Southern Norway and 2 in Northern Norway. The east-west variations are fairly well covered by the various selected glaciers in Southern Norway, whereas the two glaciers in Northern Norway are just located around the Svartisen area so that very little can be said about the mass balance conditions on other glaciers in that part of Scandinavia. (Observe however, that mass balance investigations are carried out at Storglaciären in Northern Sweden). The diagram, Fig. 29 on page 37, indicates that the glaciers in the west had a year of positive mass balance whereas glaciers in the east, i.e. in the Jotunheimen area, had a year of negative mass balance. This result is thought to be based on the fact that the winter precipitation was unusually high, so even a relatively warm summer in Southern Norway was unable to melt all this snow, and the balance turned out to be positive. In the Svartisen area it was also observed a slightly higher winter precipitation than normal but the summer was extremely cool which, in turn, caused the positive mass balance in this area. All mass balance data are presented in the table on page 38 and in the diagram, Fig. 30.

#### The energy balance on selected glaciers

The map, Fig. 32, indicates the location where energy balance measurements have been performed (cf. previous reports in this series, and literature mentioned in the table on page 45).

The energy balance measurements were started in 1970 on Austre Memurubre and Ålfotbreen, but during the four latest summer seasons such measurements have been limited to Engabreen and Nigardsbreen only. The period of observation extended from June 15 to August 30, 1976. For methods used in this investigation see Tvede (1975).

#### Results

Most of the results are shown in the diagrams, Figs. 33, 34 and 35, as well as in the tables on pages 44 and 45.

The correlation between net radiation and ablation is fairly poor. Thus, one can repeat the conclusion which has been pointed out earlier, i.e. that the radiation accounts for a "base" of energy supply throughout the summer. The daily variations in ablation seem to be more or less a result of variations in other factors, mainly convection and condensation (condensation and/or sublimation is, however, a very minor component on most glaciers, probably under 1%).

Results from various years at various glaciers are shown in the table III on page 45.

### An analysis of meteorological data and discharge from the Folgefonni area

In previous reports in this series it has been published various results of analyses of the discharge as a function of meteorological parameters on the glacier. The methods have been described in detail in these reports. In order to investigate possibilities of making a good forecast, or to simulate the discharge in glacier streams in the Folgefonni area, it was attempted to correlate data from four various water discharge stations, one meteorological station, one precipitation station, atmospheric data from balloons released from the Radiosonde station at Sola Airport, and, finally data from two glacier stations. In all cases the daily means were computed. Thus, the results cannot be used to study rapid daily variations in discharge.

The discharge stations were :

962-0	Øyreselv	(38%	glacier-covered),
1426-0	Bondvatn	(52%	glacier-covered),
1452-0	Jordal	<b>(</b> 58%	glacier-covered),
1683-0	Øvrehus	(88%	glacier-covered).

For the last mentioned there are available data from 1967 only.

The results indicate that there are correlation coefficients between discharge and various meteorological parameters as follows :

Temperature:	0,10 - 0,40	with a time lag of	2-3 days
Precipitation:	0,37 - 0,67		1-2 days
Water vapour pressure:	0,50 - 0,63	"	1-2 days
Wind velocity:	0,27 - 0,56	"	1-3 days
Cloud cover:	1,14 - 0,60	"	0-3 days

Previous investigations have shown that the discharge can be explained by a formula of the following type:

 $Q = A_0 + A_1 \cdot (t \cdot V) + A_2 \cdot (t \cdot P) + A_3 \cdot t$ 

in which t = air temperature, P = precipitation and V = wind velocity. This formula can be used when the meteorological parameters are running means of 2-3 days. The result will show the expected discharge within the next 2-3 days. The constants  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  and  $A_3$  must be determined by regression analysis for each individual glacier area. For the glacier streams in the Folgefonni area a similar equation was found:

$$Q = A_0 + A_1 \cdot (t \cdot V) + A_2 \cdot (t \cdot P) + A_3 \cdot (f \cdot V)$$

The difference from the previous formula is that the last paranthesis contains the factor f which is air moisture expressed as water vapour pressure. The multiple correlation coefficient ranges between 0,69 and 0,87. A formula of this form seems to be fairly good only when the glacier covers more than 60-70% of the entire basin. This study indicates that data observed at standard meteorological stations in the area can be used for the production of a water discharge forecast, and the observations taken at the glacier proper can be replaced by atmospheric observations from balloons, in this case rediosonde data from Sola Airport (data from the 850 mb surface, which is about 1300-1400 m a.s.1.).

#### Bondhusbreen, the subglacial water intake

#### Introduction

When a water power development was planned in the Folgefonni area a long, almost horisontal, diverting tunnel system was designed to collect water from a great number of smaller and larger streams draining from the ice-cap, compare Fig. 37. The southernmost outlet glacier shown on the map, Bondhusbreen, has a fairly long and narrow tongue penetrating down to about 490 m a.s.l., whereas the diverting tunnel system must be constructed at an elevation about 900 m a.s.l., for technical reasons. Consequently, if water should be collected from this outlet glacier, which has a fairly large drainage basin, it was necessary to construct a subglacial water intake.

According to our knowledge, only one similar construction has been made anywhere else in the world, i.e. under the glacier Argentiere in France where the ice thickness is in the order of 80-90 m. The Bondhusbreen tongue is much thicker, about 160 m, which causes special problems. Some of these problems are dealt with in this chapter.

One technical problem was expected to originate from the large amounts of solid material carried by the meltwater stream. A sedimentation chamber was therefore planned to be placed under the glacier and a special tunnel must be constructed to enable a complete clearance of this chamber during the winter when no liquid water drains from the glacier. A sketch of the various tunnel systems, the sedimentation chamber, and the diverting tunnel which is thought to carry the water collected under the glacier, are shown on Fig. 39. The size of the sedimentation chamber was determined from special studies of the amount of solid material carried annually by the meltwater stream at the glacier front. Also the suspended sediments which had settled on the bottom of the lake Bondhusvatn during the last several hundred years were taken into account. A detailed description of methods used in these calculations is not given here (see Kjeldsen 1975, p. 50-75).

The calculated amount of water draining from the Bondhusbreen water shed accounts for approx. 10% of the total amount of water available for water power production at the power station in Mauranger. It was therefore thought that quite extensive technical experiments could be justified, particularly taking into mind that similar subglacial water intakes are planned at several future power developments in Norway (e.g. Jostedalsbreen, Svartisen). Experience gained at Bondhusbreen could, therefore, also be utilized in the planning procedure for these future projects.

### Measurements of ice velocity

It was clear that some knowledge of the ice movement in the water intake area would be useful, so already in 1972 some studies were made of the surface ice velocity at various elevations. The results from these measurements indicate that the mean daily movement at 1100 m a.s.l. is in the order of 35 cm, slightly more (37,4 cm) during the summer and slightly less (34,6 cm) during a complete year. The annual movement of the glacier is in the order of 130 m. At the altitude of the intake it proved very difficult to obtain reliable results because the glacier is heavily crevassed. However, from September 24 to November 1, 1976, it was observed a surface velocity of 55 cm/day which corresponds to approx. 200 m/year (cf. Fig.40).

The bottom velocity cannot be directly calculated from these figures but could be directly observed in some of the ice caves which were made in connection with the engineering (see below). The daily ice velocity at the very bottom of the glacier amounted to 10-20 cm or 40-70 m/year. These figures are, however, not very accurate due to the practical difficulties of measurements in caves where both the roof and the walls were moving continuously due to the heavy hydrostatic ice pressure.

### Hot point drillings

A survey of the bedrock topography must be made before the gallery was placed in the bedrock under the glacier. No less than 12 vertical holes were therefore drilled from the ice surface by hot point techniques, the results are shown in Fig. 42. However, the data obtained by this method proved to be slightly inaccurate for engineering purposes so that another series of soundings had to be made later when the tunnel in the bedrock was completed. This survey proved to be very time-consuming but the results indicate that there are no less than 3 "valleys" in the bedrock under the glacier. This again indicates that water may flow in one or more of the three various routes in the bedrock/ice interface, compare Fig. 43.

### Tunnels in the ice

The engineers wanted a more detailed picture of the bedrock topography at the points where the intake tunnels should be constructed, so it became necessary to open caves in the ice at these points. For this purpose it was arranged a hot water sprinkling system in which water of a temperature of 40-50<sup>°</sup>C was sprinkled onto the glacier ice and a cave was melted out. The practical installations are shown in Fig. 44.

Several tunnels were melted at lengths of 30-40 m from places where entrance tunnels were blasted through the bedrock. The locations of these tunnels, which were made in 1974, 1975 and 1976, are indicated on Fig. 39.

#### Sediments

When the ice caves were made and during the construction of the vertical intake shafts it became clear that a layer of compacted till was present in certain places between the ice and the bedrock, but the bedrock could be quite clear without any loose materials in other places. Within the ice it was observed rocks up to 1  $m^3$  whereas the maximum observed thickness of the till layers was 5 m. Samples taken of this material indicate a great variety of grain sizes, compare Fig. 45. The coarse material within the ice seems to be present only in the lower 10 m of glacier ice. In some places it was concentrated in distinct layers, in other places it was more randomly distributed in the ice.

It is obvious that a great part of the total amount of solid materials will be carried within the ice and thus pass the water intakes. It is therefore thought that the sedimentation chamber is definitely large enough because its size was determined from <u>all</u> solid material carried by the glacier and found at the front. Only a small correction was made for some material which was thought to be transported within the ice. Probably, this correction could have been made larger.

### Ice deformation

According to the regular flow law of ice it is clear that a cave made under a high hydrostatic pressure will be relatively quickly deformed. It was made some attempts to measure the "closing velocity" of the artificial caves under Bondhusbreen. Ice screws were inserted in the walls and in the roof, and almost continuous observations were made in all places where such caves had been made. The results indicate almost the same rate of deformation - the roof is lowered by 10-20 cm/day. Most of the measurements showed a surprisingly constant figure, namely 15-16 cm/day, and this velocity seemed to be independent of the size of the cave.

When the caves were made and people worked in them, the air temperature was in the order of  $+3^{\circ}$ C which caused an ice melt of about 3 cm/day, thus a continuous acti-

vity in the tunnel tends to decrease the effects of ice deformation. The results of measurements made in various caves are shown on Fig. 47.

Concerning hollows or crevasses within the ice, which were observed on the glacier Argentiere, it should be mentioned that no such observations were made at Bondhusbreen. The ice seemed to be much more plastic so that all bumps in the bedrock were completely filled with ice. No pressure observations were made, however, on the upward side and/or the downward side of such bumps in the bedrock.

#### Water pockets

No real water pockets have been observed in the Bondhusbreen glacier ice. However, small "drops" of water under high pressure were experienced when the caves were made. Their content ranged from a few decilitres to some litres of water, only.

### The efficiency of the water intakes

The amount of water which has been captured under the glacier seems to be significantly less than the theoretical amount. A water gauge has been installed at the outlet of the sedimentation chamber, thus recording all the diverted water, i.e. the amount of water collected under the glacier. The record from this instrument is plotted in Fig. 48 together with similar recordings from the river draining from the glacier and from a neighbouring stream. This graph indicates that water discharge variations are well correlated but the total amount of water collected under the glacier is only a small fraction of what should be expected. A calculation of the theoretical annual amount of liquid water at the altitude of the intake indicates that approx. 3  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> water should have been available. However, measurements at the above-mentioned discharge station indicate that only 0,5  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> water really passed through the system. This makes a deficit of no less than 2,5  $\cdot$  10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> water which apparently has passed the intake area without draining into the vertical shafts. In this connection it should be mentioned that shafts are made only to two of the small "valleys" that were found in the bedrock - compare Fig. 43. It is possible that most of the water really follows the third of these "valleys". Another interesting feature is the rapid fluctuation in water discharge that has been observed in the sedimentation chamber. The record from the water level recorder is shown on Fig. 49. However, no explanation can be given for these observations.

### Investigations by tracers and by accoustic methods

It was supposed that some of the water deficit described above could be connected to water from the lake Holmavatn. This lake drains into the glacier at an higher altitude. Salt brine was injected in the stream from Holmavatn and observations were made within the tunnel in a great number of points. Finally, observations were made also at the snout of the glacier. The result showed quite clearly that <u>nothing</u> of the water in the stream from Holmavatn did go into the tunnel but it was clearly observed as a "salt wave" at the glacier snout after about 45 minutes. A continuation of this measuring program is planned for 1977 when also more vertical holes will be drilled from the tunnel roof up to the glacier bottom to make possible further studies of the water flow under the glacier.

Parallel to the experiments with salt brine it was attempted to use accoustic methods to find areas where the relatively heavy flow from Holmavatn might pass across the tunnel. Some noise was recorded at some distance from the intake points and these areas will be more closely examined in the future, possibly also by means of tracers.

## Discussion

The last three years of observations under the glacier have given a lot of information and experience. A negative experience is that the water intakes are not as efficient as they were thought to be. During some periods relatively large amounts of water drained through the system, because fairly large boulders were found in the tunnel between the intake points and the sedimentation chamber. These boulders, up to  $1 \text{ m}^3$  in size, must have been moved by large amounts of water. The tunnel connection from the intake shafts to the sedimentation chamber is obviously too long and it is not sufficiently steep to allow such rocks to be moved by the running water to the sedimentation chamber, which was, of course, the original intention.

The high hydrostatic pressure within the ice, more than 160 m, makes it possible that water courses under the ice might not only follow the lowest areas; the streams may be pressed to the side and consequently water might run in areas where intake shafts have not been considered at all.

Further, the water courses under the glacier might change from year to year or even during the summer. This is confirmed by the fact that one of the intake shafts had been dry for a long time and then started to catch considerable amounts of water. Later, it dried up again (and was filled by ice).

## Engineering viewpoints on the subglacial intake project

The tunnel system in the bedrock under Bondhusbreen has been described in a previous chapter and visualized in Figs. 38 and 39. The main problem for the engineers was that only a fraction of the water was really captured under the glacier. Presently, it is impossible to explain why so much water really passes without draining into the system. In the following some engineering viewpoints are expressed concerning various problems which were met during the construction work.

#### The sounding technique

One of the first steps in the engineering is to survey, by hot point drilling or by seismic methods, the total ice thickness so that the diverting tunnel can be placed at a correct level, which is 5-10 m under the lowest point of the glacier ice. From the roof of this diverting tunnel it is necessary to drill vertical sounding holes through the bedrock up to the glacier ice to make possible a more accurate survey of the bedrock topography. The distance between these holes must be selected on the spot - a denser pattern will be necessary in areas where a "valley" in the bedrock is indicated. In the case of Bondhusbreen it was impossible, for technical reasons, to drill parallel <u>vertical</u> holes, the drilling equipment had to be placed in a relatively small number of points and holes must be drilled in <u>various directions</u> from these locations, compare Fig. 50. This method is obviously not the best because several unnecessary and some of them may be slightly bent. Some of the holes may not even reach the ice (see the right-hand side of Fig. 50).

Accoustic investigations have proven to be a good tool in the search for running water in the summer. Similarly, the use of a tracer, for example a solution of table salt, has also been very useful in connection with a great number of holes drilled in the tunnel roof. Some of the sounding holes shown in Fig. 50 were used for this purpose and water from various sources up-glacier (e.g. streams from the valley sides) could be recognized.

Most of the tunnel work can be done at any time of the year but the final intake shafts must be completed before any significant melt has started on the glacier. Arrangements must be made to avoid melt water to penetrate into the system until the sedimentation chamber, closing gates etc, have been completed.

The layer of till in the transition zone between bedrock and ice may cause difficulties and danger so it might be better to make oblique shafts instead of vertical shafts, and various possibilities must be discussed to construct an opening towards the ice which <u>might not</u> invite the ice to penetrate into the shaft and block it for long periods (this happened several times under Bondhusbreen - the ice penetrated into the shaft almost as toothpaste).

### Reflections concerning ice dynamics

From our observations of the caves under Bondhusbreen it seems that the moving ice does not always push rocks and till in the direction of movement. The ice moves more or less plastically over these unevenesses and there is often a thin layer of "till porridge" which works as a grease between the ice proper and the underground. Most of the solid material is carried by flowing water. The rocks that were found within the ice were generally much larger and they had a coarser appearance than the material normally found near the snout of the glacier. Pieces of rock, over  $1 \text{ m}^3$  in size, were observed frequently and rocks of the size 0,1-0,2 m<sup>3</sup> were very common. These rocks will apparently be crushed down to smaller sizes before they reach the snout of the glacier.

The plasticity of the ice makes it probable that if a water stream has developed a drainage tunnel, this tunnel will close rapidly after that the water has disappeared (for any reason). However, if there is a narrow canyon in the bedrock it is supposed that even a relatively small meltwater stream may be able to keep an open channel. This was found under the glacier Mer de Glace when the hydro-electric installations were made in Chute de Bois in France. Further, a steeper longitudinal profile will tend to keep water-leading tunnels open because more energy is released from the falling water.

Attempts were made to calculate the amount of water that would be sufficient to keep a tunnel open under the glacier under various conditions (slope, canyon-like cross-sectional profile, "flat" cross-sectional profile, etc.) but it was very difficult to make any valid conclusions. It is thought, however, that if a subglacial stream keeps its tunnel open and then the water discharge suddenly increases the water will fill up the tunnel completely and an over-pressure will be created. Possibilities for the water to find another drainage channel will then be present. These new water courses may not follow the lowest parts of the valley and this may be the reason why large amounts of the water suddenly disappeared from the intake shafts.

Also coarse material carried by the water may block the shafts or the diverting tunnel and engineering measures must be taken to avoid such blocking, for example by constructing the upper part of the collecting tunnel (leading from the intake shafts to the sedimentation chamber) much steeper than under Bondhusbreen.

### Ice velocity measurements

### Results from Nigardsbreen, Høgtuvbreen and Engabreen

Surface observations of the glacier movement were reported in the annual publication on glaciological investigations made in 1973 (Tvede, 1975). Most of the later observations of this kind (up to 1976) are dealt with in this report, and some further details will be given in the report for 1977.

The results from the surface velocity measurements are shown on the maps (Figs. 51,

52 and 53) and individual figures are plotted in the tables on page 71-74. In these tables the first column gives the number of the measured item - stake or wire, the second column shows the total displacement in metres, the third column the daily mean movement. In the fourth column the annual displacement has been calculated. Finally, in the last column the direction of the movement is indicated in 400<sup>g</sup> divisions.

### Haakensen, N.

1975: Materialtransportundersøkelser i norske bre-elver. Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 4/75, 107 p.

#### Kjeldsen, 0.

- 1975: Materialtransportundersøkelser i norske bre-elver 1974. Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 3/75, 92 p. (English summary).
- Klemsdal, T.
  - 1968: A glacial-meteorological study of Gråsubreen, Jotunheimen. Norsk Polarinst. Årbok 1968, p. 58-74.

#### Liestøl, 0.

1967: Storbreen Glacier in Jotunheimen, Norway. - Norsk Polarinst. Skrifter 141, 63 p.

### Messel, S.

- 1971a:Mass and heat balance studies on Omnsbreen, a climatically dead glacier in Southern Norway. - Norsk Polarinst. Skrifter 156, 43 p.
- 1971b:Glasial-meteorologiske undersøkelser i Sør-Norge. I: Tvede, A., 1971, p. 69-80.
- 1973: Glasial-meteorologiske undersøkelser i 1971. <u>I</u>: Tvede, A., 1973, p. 72-83.
- 1974: Glasial-meteorologiske undersøkelser i 1972. <u>I</u>: Tvede, A., 1974a, p. 75-87.
- 1975: Glasial-meteorologiske undersøkelser i 1973. <u>I</u>: Tvede, A., 1975, p. 49-58.

#### Orheim, O.

1970: Glaciological investigations of Store Supphellebre, West-Norway. Norsk Polarinst. Skrifter 151, 48 p.

### Pytte, R.

1970: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1969. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 5/70, 94 p. (English summary).

### Tvede, A.

- 1971: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1970. Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 2/71, 111 p. (English summary).
- 1972: En glasio-klimatisk undersøkelse av Folgefonni. Hovedfagsoppgave ved Universitetet i Oslo. Upubl., 109 p.
- 1973: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1971. Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 2/73, 110 p. (English summary).
- 1974a:Glasiologiske undersøkelser i Norge 1972. Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 1/74, 99 p. (English summary).
- 1974b:Volumendringer på breer i Sør-Norge, 1962-73. Vannet i Norden. IHD-nytt nr. 4/74, p. 35-43.

Tvede, A. 1975: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1973. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 1/75, 72 p. (English summary). Tvede, A., Wold, B. & Østrem, G. 1975: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1974. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 5/75, 68 p. (English summary). UNESCO 1970: Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins. Technical papers in hydrology, no. 5, 20 p. Østrem, G. 1975: ERTS-data in glaciology - an effort to monitor glacier mass balance from satellite imagery. Journal of Glac., vol. 15, no. 73, p. 403-415. Østrem, G., Liestøl, O. & Wold, B. 1976: Glaciological investigations at Nigardsbreen, Norway. - Norsk Geogr. Tidsskr. 30, p. 187-209. Østrem, G. & Stanley, A., 1969: Glacier mass balance measurements. - A guide prepared jointly by the Canadian Dept. of Energy, Mines and Resources and the Norwegian Water Resources and Electricity Board, 128 p. Wold, B. & Hagen, J.O. 1977: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1975. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 2/77, 66 p. (English summary).

Ziegler, T.

1974: Materialtransportundersøkelser i norske bre-elver 1972. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 2/74, 95 p. (English summary).