NORGES VASSDRAGS-OG ELEKTRISITETSVESEN

GLASIOLOGISKE UNDERSØKELSER

I NORGE 1978

RAPPORT NR. 4-79

VASSDRAGSDIREKTORATET

HYDROLOGISK AVDELING

OSLO JULI 1979

NORGES VASSDRAGS-OG ELEKTRISITETSVESEN

GLASIOLOGISKE UNDERSØKELSER I NORGE 1978

REDIGERT AV BJØRN WOLD OG KJELL REPP

BIDRAGSYTERE: NILS HAAKENSEN, OLA KJELDSEN, OLAV LIESTØL, SIGMUND MESSEL, KJELL REPP, ARVE M. TVEDE, BJØRN WOLD OG GUNNAR ØSTREM

RAPPORT NR. 4-79

VASSDRAGSDIREKTORATET

HYDROLOGISK AVDELING

OSLO JULI 1979

ISBN 82-554-0196-2

FORORD

Brekontoret, som er en enhet innen Hydrologisk avdeling i Vassdragsdirektoratet, har foretatt bremålinger ved en rekke breer i Sør-Norge og Nord-Norge gjennom de siste 15 årene. Undersøkelser startet i 1962 ved Jostedalsbreen, idet Nigardsbreen ble valgt ut som et representativt studieobjekt. Senere har bremålingene her fortsatt uavbrutt, og resultatene danner en nærmest unik serie som er av meget stor betydning for vurdering av de årlige avløpsvariasjoner som breen er årsak til. Vår måleserie fra Nigardsbreen er en av de lengste i verden i sitt slag, og blir mer og mer verdifull for hydrologiske beregninger i samband med planlagte kraftverk i Breheimen.

En rekke andre sør-norske breer har også vært undersøkt gjennom perioder opp til 5-6 år i samband med utbyggingsplaner, men for tiden pågår systematiske målinger bare ved et utvalg som ligger nærmest i et Øst-Vest profil fra Gråsubreen i Jotunheimen til Ålfotbreen i Nordfjord.

Da Svartisområdet også tenkes utnyttet for framtidig kraftproduksjon, har Brekontoret foretatt undersøkelser ved 3 utvalgte breer, men etter noen års parallelle målinger har vi konsentrert oss om Engabreen som en god representant for Svartisens vestre del. Her har målingene pågått kontinuerlig siden 1970.

Resultatene fra bremålingene i 1978 er samlet i denne rapport, mens tilsvarende data fra slamundersøkelsene presenteres i en egen rapport. Det kan tilslutt nevnes at arbeidene er finansiert fra flere kilder: Statskrafverkene, Sogn og Fjordane Kraftlag, Hydrologisk avdeling, og materialet presenteres som et resultat av et teamwork mellom de ansatte ved Brekontoret.

Oslo i mai 1979

Gunnar Østrem

INNHOLD

	Side
Materialhusholdningen, meteorologiske og hydrologiske undersøkelser ved utvalgte breer (Kjell Repp og Bjørn Wold)	3
Innledning	3
Metodikk	5
Ålfotbreen	7
Bondhusbreen	14
Nigardsbreen	17
Storbreen (Olav Liestøl)	21
Hellstugubreen	24
Gråsubreen	26
Engabreen	29
En sammenlikning av materialhusholdningen på enkelte breer	34
Energibalansen på Engabreen (Sigmund Messel)	37
Innledning	37
Resultater	37
Likninger til beregning av nettobalansen fra værdata (Arve M.Tvede)	40
Innledning	40
Teori og metodikk	40
Resultater. Diskusjon	42
Bruk av likningene	45
Oppsummering	46
Brimkjelen (Nils Haakensen)	47
Subglasial hydrologi på Bondhusbreen (Bjørn Wold)	50
Innledning	50
Vanntilgang før 1978	52
Vanntilgang i 1978	54
Beregnet avrenning	55
Frontmålinger (Ola Kjeldsen)	55
Engabreen	55
Nigardsbreen	56
Ålfotbreen	57
English Summary (Gunnar Østrem)	57
Mass balance, meteorological and hydrological investigations	57
The energy balance on Engabreen	64
Equations to calculate glacier net balance from meteorological data	64
Brimkjelen, a glacier dammed lake	66
Subglacial hydrology at Bondhusbreen	66
Glacier frontal observations	67
Litteratur	69

MATERIALHUSHOLDNINGEN, METEOROLOGISKE OG HYDROLOGISKE UNDERSØKELSER VED UTVALGTE BREER.

Innledning

Norges Vassdrags- og Elektrisitetsvesen har i 1978 foretatt glasiologiske undersøkelser på 5 breer i Sør-Norge og 1 bre i Nord-Norge. I tillegg har Norsk Polarinstitutt foretatt massebalansemålinger på 1 bre i Sør-Norge og 1 bre i Nord-Norge. Undersøkelsene er foretatt i følgende områder:

1) Ålfotbreen, 2) Folgefonni, 3) Jostedalsbreen, 4) Jotunheimen, 5) Svartisen og 6) Svartfjelljøkulen (Vest-Finnmark).

På Ålfotbreen i Nordfjord foretas undersøkelsene på en nordvendt brearm som nå drenerer til Store Åskåravatn. Dette vassdrag er utbygd av Sogn og Fjordane fylke, og undersøkelsene er pålagt utbyggeren i konsesjonsbetingelsene. Utgiftene til undersøkelsene deles likt mellom Elektrisitetsforsyningen i Sogn og Fjordane og Hydrologisk avdeling i NVE. Målingene har pågått siden høsten 1962. I 1978 ble det foruten materialbalansemålinger også foretatt en del meteorologiske registreringer.

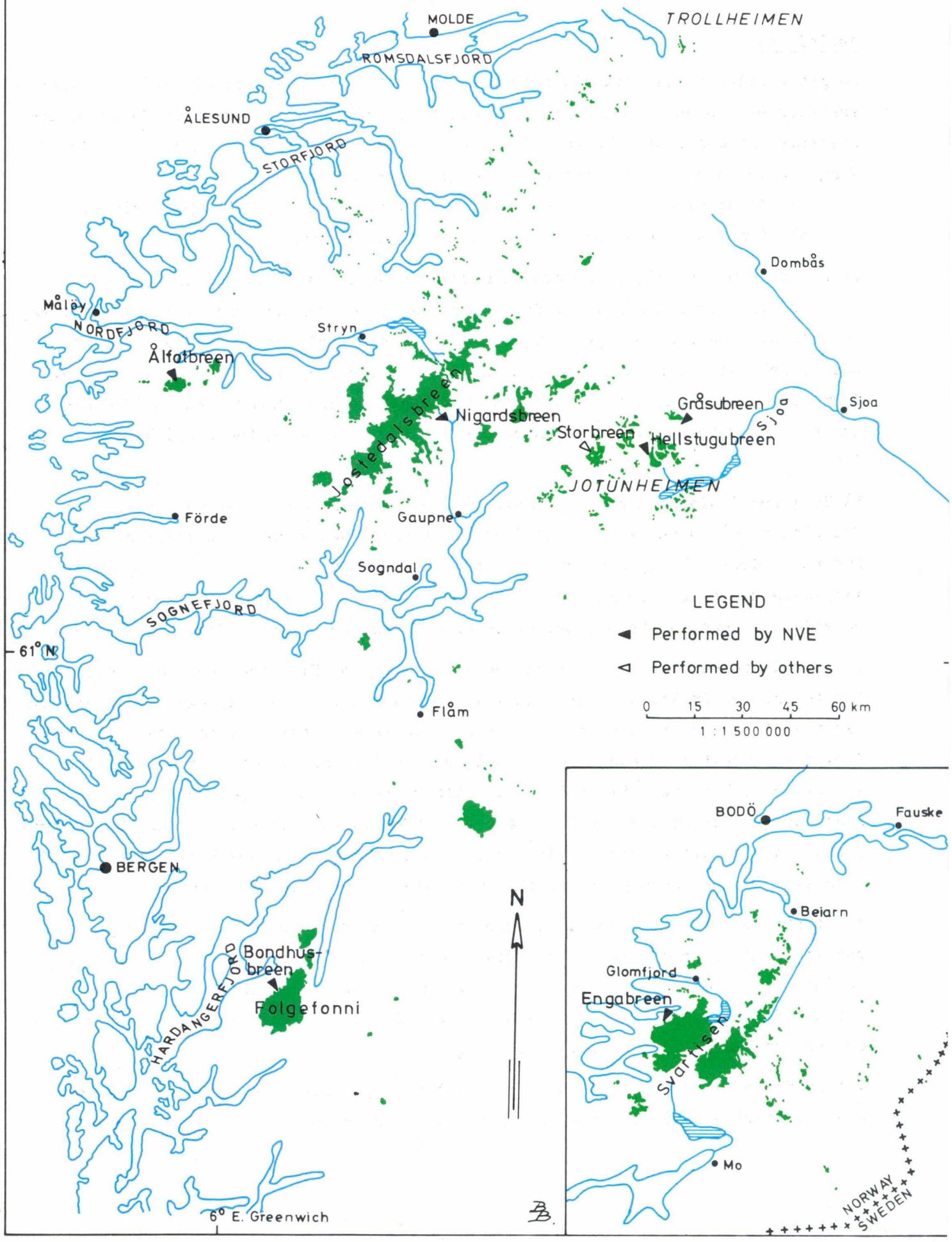
På Folgefonni ble nettobalansen målt på Bondhusbreen som ligger på vestsiden av Folgefonni. Målingene er et ledd i arbeidet med å bedre vår forståelse av Bondhusbreens dynamikk, og hvordan dette påvirker mulighetene til å fange opp vann subglasialt. Derfor ble det høsten 1976 satt igang målinger av materialbalansen og endel meteorologiske parametre. Undersøkelsene bekostes av Statskraftverkene.

På Jostedalsbreen har NVE foretatt 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. Siden 1977 har måleprogrammet vært endel forenklet, og stasjonen på Steinmannen er ikke lenger fast bemannet i sommersesongen. Dette har medført at de meteorologiske målingene ikke lenger er av samme kvalitet som tidligere. Undersøkelsene på Nigardsbreen betales av Statskraftverkene.

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 ut-

Fig. 1 MASS BALANCE STUDIES OF NORWEGIAN GLACIERS 1978



løper fra Høgtuvbreen fra og med 1971. Målingene er en del av Svartisundersøkelsene som finansieres av Statskraftverkene i forbindelse med kraftutbyggingsplanene i denne del av Nordland. Målingene på Trollbergdalsbreen ble avsluttet i 1975, og på Høgtuvbreen i 1977. På Engabreen ble det i tillegg til bremålingene også foretatt meteorologiske observasjoner. Norsk Polarinstitutt satte i 1978 igang målinger på Svartfjelljøkulen

Metodikk

Materialhusholdningen

Metodikken som brukes ved massebalansemålinger på norske breer er utførlig beskrevet i tidligere rapporter 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 1978 fortsatt etter tidligere års prinsipper fordi en har funnet at disse er hensiktsmessige for praktisk bruk. Terminologien bygger på retningslinjer utarbeidet av "Commision 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 punktene plottes på et kart og deretter trekkes isolinjer gjennom punkter med lik

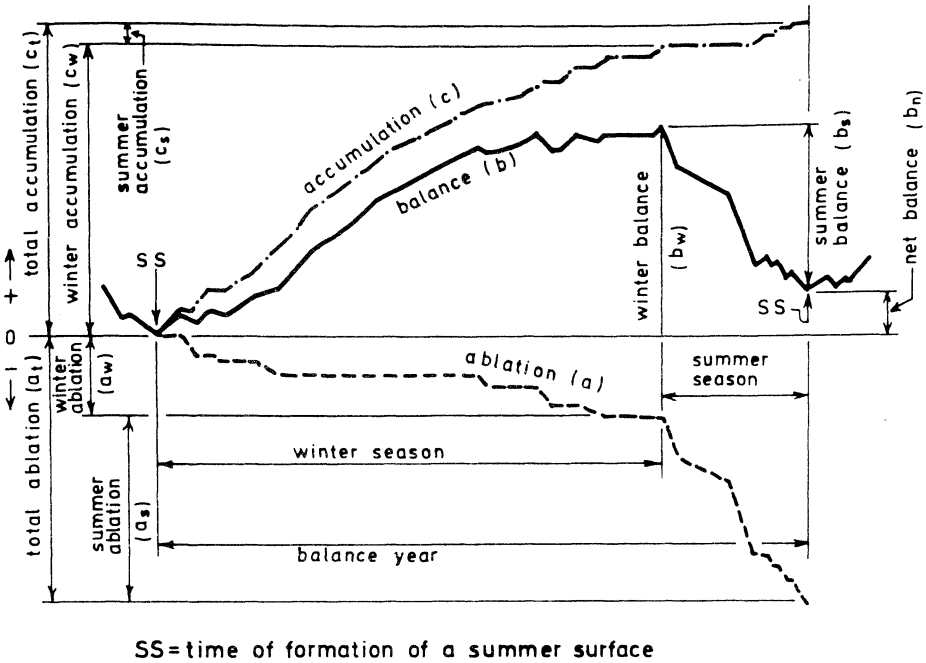


Fig. 2 Balansen i et punkt er vist som funksjon av tiden, og den terminologi som benyttes i det stratigrafiske system er angitt.

The balance as measured at a point is illustrated in relation to time. The terms used in the stratigraphic system are indicated in the diagram.

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_s 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 i år utført på Engabreen. 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).

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.

Ålfotbreen

Materialhusholdningen

Ved besøk på breen 28. september 1977 var det kommet ca. 50 cm nysnø over hele breen. Dette forsvant imidlertid under et senere mildvær, og neste måling som fant sted 30. oktober blir derfor regnet som begynnelsen på Ålfotbreens glasiologiske år 1978. Dette stemmer godt med Meteorologisk Institutts kart over tidspunkt for snøakkumuleringens begynnelse, som viser 1. november for 1200 m-nivået og 17. november for 800 m-nivået.

Neste besøk fant sted 6. desember. 23 staker ble målt og forlenget. Snødypene var ca. 150 cm over hele breen. Fram til 20. januar kom det ytterligere vel 300 cm snø, og hele 16 staker var enten nedsnødd eller bøyd ned av kombinasjonen rim/vind. Som erstatning ble 9 nye staker boret ned til sommeroverflaten.

Siste vinterbesøk og akkumulasjonsmålingen ble foretatt 15. april. Samtlige staker som var synlige eller nyutsatt i januar ble gjenfunnet og brukt som kontroll på sonderingsresultatene. Referanseflaten fra høsten 1977 var stort sett lett å identifisere ved sonderingene, og snødypet ble målt i ca. 150 punkt langs profiler vist på fig. 3. Snøens tetthet ble målt i sjakter ved stake 37 - 72. Ved hvert besøk

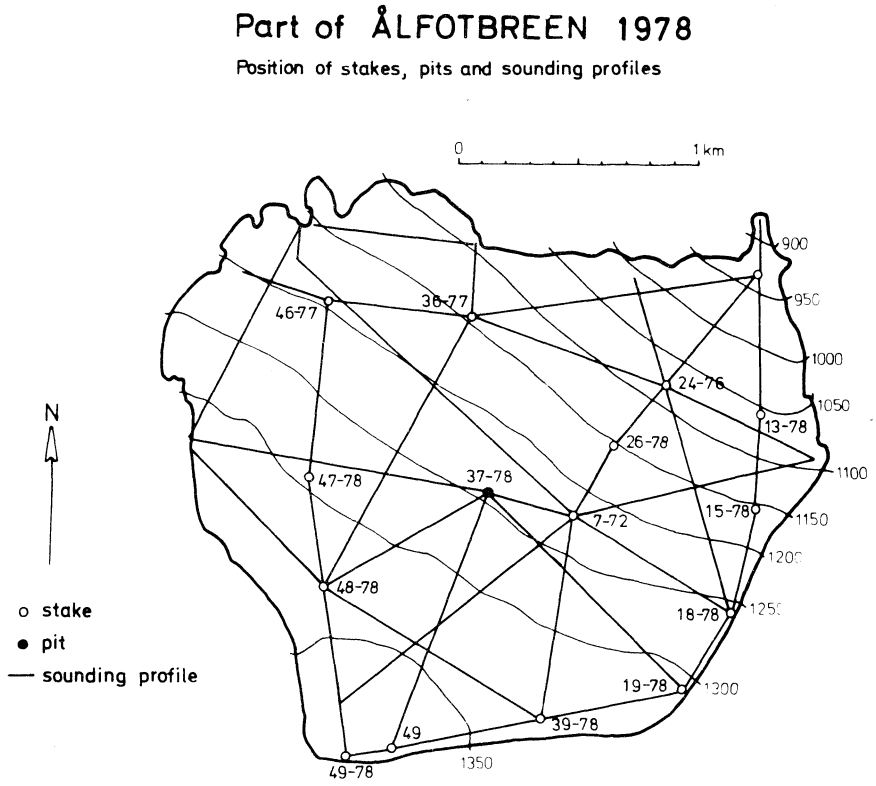


Fig. 3 Beliggenheten av staker, sjakt og sonderingsprofiler i 1978.

The location of stakes, pit and sounding profiles in 1978.

ble det tatt tetthetsprøve ned til forrige målings toppflate, dvs. referanseflater markert med fargepulver. De ulike tetthetsprøver ble summert og justert i henhold til faktisk snødyp ved akkumulasjonsmålingen. Midlere snøtetthet var 0.42 g/cm^3. Totalt beløp vinterbalansen seg til 12.3 · 10^{6}m^3 vann. Dette tilsvarer et vannlag på vel 2.5 m tykkelse over hele breen, og en årlig spesifikk avrenning på 81 l/s km^2. Dette resultatet ligger 10% høyere enn fjorårets vinterbalanse, men det er likevel bare 72% av middelet for perioden 1963 - 77. Snøakkumulasjonskartet fra Meteorologisk Institutt angir pr. 30. april at snømengden 1200 m o.h. var i underkant av 80% av normalt for dette området, og dette passer jo bra med våre observasjoner. Vinterbalansen er vist i fig. 4.

Ablasjonen ble målt 3. juni, 3. juli, 22. juli, 19. august og 12. oktober. I løpet av sommeren ble det gjort flere justeringer på stakenettet, slik at det i oktober sto 22 staker på breen. Mye nysnø kom på breen i september, men det meste smeltet igjen utover i oktober, og vi regner målingen 12. oktober som slutten på årets ablasjonssesong på Ålfotbreen. Sommerbalansen er beregnet til 14.7 · 10^{6}m^3 vann, som tilsvarer et nesten 3.1 m tykt vannlag, dersom ablasjonen hadde vært jevnt fordelt over hele breen. Dette er bare 92% av middelet for årene 1963 - 77, men 6% mer enn fjorårets sommerbalanse. Nettoresultatet ble dermed et underskudd på 2.5 · 10^{6}m^3

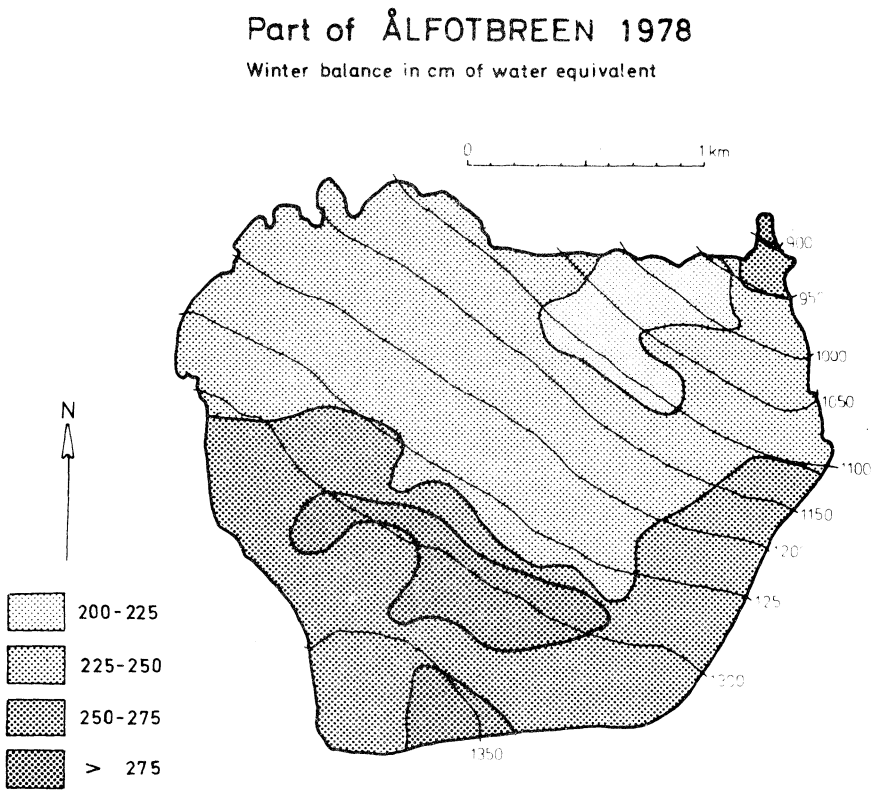


Fig. 4 Kart over vinterbalansen i 1978.
Map showing the winter balance in 1978.

vann som spesifikt fordelt gir 0.51 m. Dette var det andre negative år på rad, og selv Ålfotbreen begynner nå å vise en del stygge bresprekker. Balansetallene er vist i fig. 5 og i tabell på s. 10.

Meteorologiske observasjoner

Ved observasjonshytta (900 m o.h.) ble meteorologiske parametere registrert på termograf, hygrograf og pluviograf. Omløpstiden var 1 måned. Instrumentene ble satt i gang 3.juni og gikk med noen små avbrudd til 12.oktober. Kontroller og papirskift ble foretatt 3.juli, 22.juli, 19.august og 15.september. Resultatene er presentert i fig. 6.

Middeltemperaturen for hele observasjonsperioden var 6.3°C, med 3 døgnmidler under frysepunktet. Disse ble alle målt i september. Middeltemperatur for juni var 6.9°C, med døgnmaksimum 12.0°C og døgnminimum 1.5°C. Tilsvarende tall for juli var 7.9°C, 11.9°C og 2.8°C. I august var middeltemperaturen 7.5°C, med døgnlig maksimum og minimum på henholdsvis 13.3°C og 1.3°C. Temperaturgradienten mellom Førde i Sunnfjord og Ålfotbreen er beregnet til 0.76°C/100 m for juni, 0.71°C/100 m for juli, 0.79°C/100 m for august og 0.61°C/100 m for september. For hele måleperioden er gradienten beregnet til 0.71°c/100 m med et standardavvik på 23.5% for i alt 119 observasjonsdøgn.

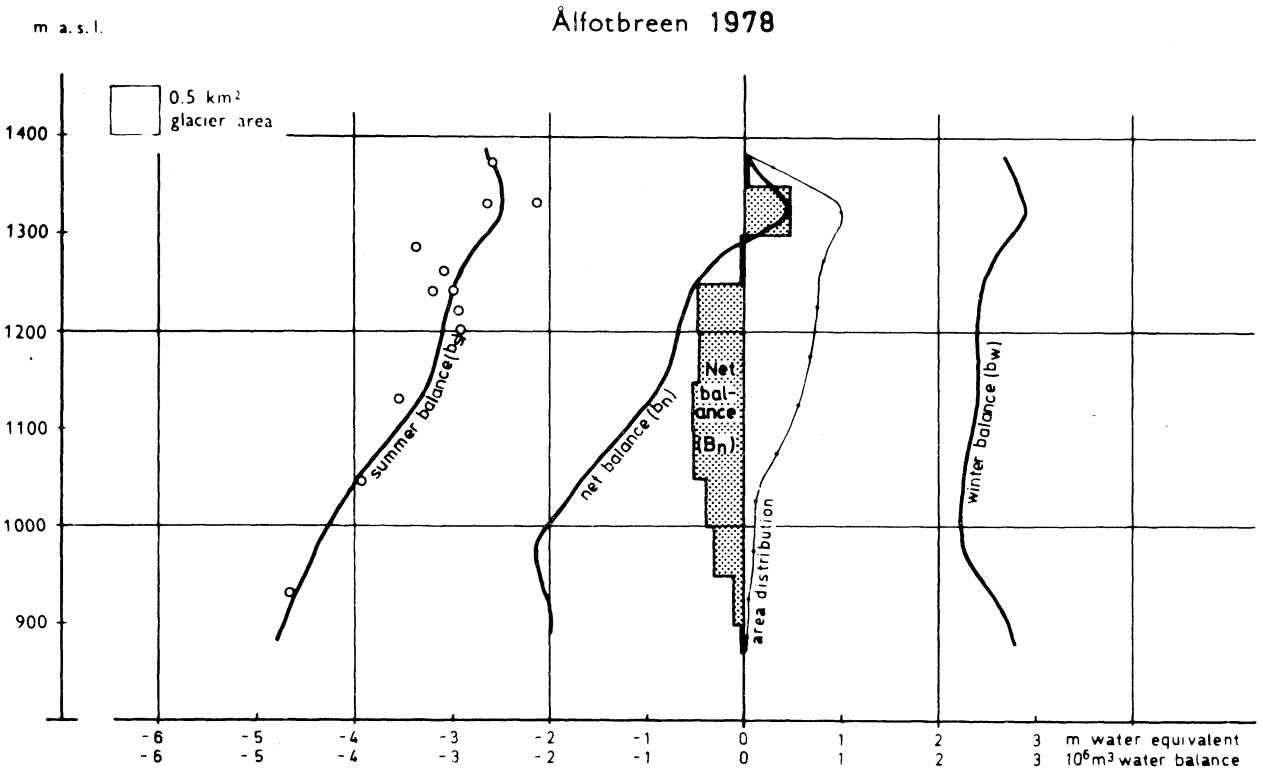


Fig. 5 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 50 m høydeintervall.

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

ÅLFOTBREEN 1978

Høyde intervall	Areal	Vinterbalanse			Sommerbalanse			Nettobalanse		
	S	B_w		b_w	B_s		b_s	B_n		b_n
m o.h.	km²	$10^6 m^3$	m	l/s km²	$10^6 m^3$	m	l/s km²	$10^6 m^3$	m	l/s lm²
1350-1380	0,274	0,743	2,71	86	0,721	2,63	83	0,022	0,08	3
1300-1350	1,015	2,996	2,95	94	2,522	2,48	78	0,474	0,46	15
1250-1300	0,811	2,069	2,55	81	2,283	2,82	89	-0,214	-0,26	- 8
1200-1250	0,765	1,851	2,42	78	2,321	3,03	96	-0,470	-0,61	-19
1150-1200	0,649	1,564	2,41	76	2,031	3,13	99	-0,467	-0,72	-23
1100-1150	0,553	1,319	2,39	76	1,846	3,34	105	-0,527	-0,95	-30
1050-1100	0,356	0,820	2,30	73	1,332	3,74	118	-0,512	-1,44	-45
1000-1050	0,216	0,488	2,26	72	0,880	4,07	129	-0,392	-1,81	-57
950-1000	0,125	0,280	2,24	71	0,548	4,38	139	-0,268	-2,14	-68
900- 950	0,047	0,123	2,62	83	0,218	4,63	147	-0,095	-2,02	-64
870- 900	0,004	0,011	2,75	87	0,019	4,75	150	-0,008	-2,00	-63
870-1380	4,786	12,264	2,56	81	14,721	3,07	97	-2,457	-0,51	-16

ÅLFOTBREEN 1978

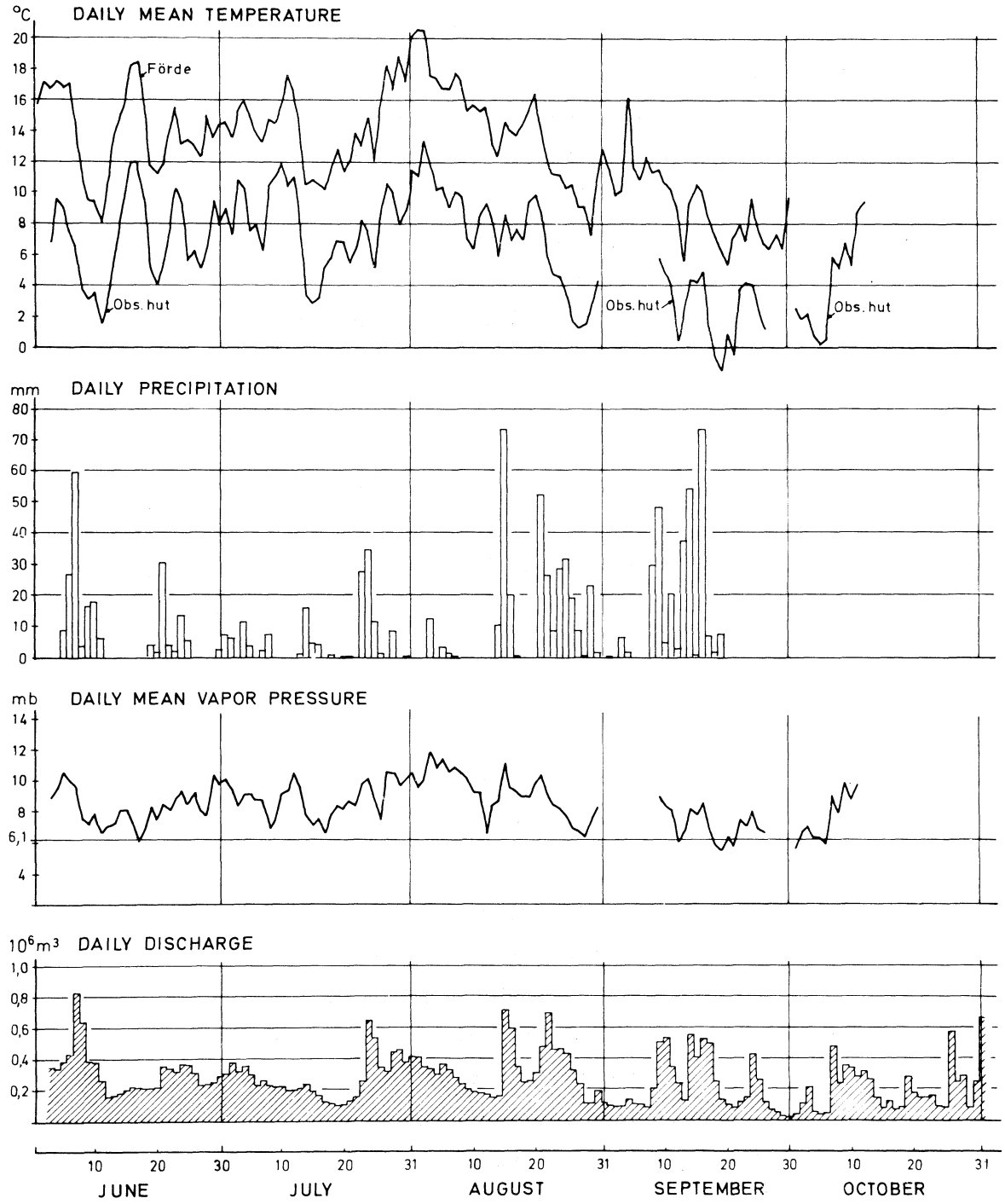


Fig. 6 Resultater fra de daglige meteorologiske observasjoner på Ålfotbreen (900 m o.h.), samt daglig avløp i breelva i 1978.

The daily meteorological observations at Ålfotbreen (900 m a.s.l.), and the daily discharge at the water gauge in the glacier river in 1978.

Totalnedbøren var 204 mm i juni, 150 mm i juli, 325 mm i august og 295 mm i september. For hele måleperioden oppfanget pluviografen i alt 974 mm nedbør. Maksimal døgn-nedbør kom den 15.august og den 16.september, begge gangene 73.6 mm. Av totalt 109 observasjonsdøgn var 37 døgn uten nedbør.

Også hygrografen ga stort sett brukbare resultater. Midlere vanndamptrykk for 118 observasjonsdøgn var 8.4 mb, med høyeste døgnverdi på 11.9 mb (3.juni) og laveste døgnverdi på 5.4 mb (19.september). 1 døgn i juni og 4 døgn i september hadde midlere vanndamptrykk lavere eller lik 6.1 mb, og følgelig var det mulighet for sublimasjon fra breoverflaten i disse 5 døgn i løpet av sommeren. Dette gjelder døgnmidler, og muligheten for avdunsting kan ha forekommet også i kortere perioder av andre døgn. Generelt utgjør imidlertid avdunsting en svært liten del av ablasjonen på Ålfotbreen.

Avrenning

Fra 3.juni til 31.oktober passerte totalt $40.15 \cdot 10^6 m^3$ vann forbi limnigrafen i breelva (710 m o.h.). Dette fordelte seg med $8.87 \cdot 10^6 m^3$ i juni, $8.59 \cdot 10^6 m^3$ i juli, $9.77 \cdot 10^6 m^3$ i august, $6.48 \cdot 10^6 m^3$ i september og $6.45 \cdot 10^6 m^3$ i oktober. Største døgnavløp ble målt 7.juni med $0.83 \cdot 10^6 m^3$. Midlere avløp for hele perioden var $0.27 \cdot 10^6 m^3$ vann pr.døgn.

Meteorologiske observasjoner 1977

De meteorologiske observasjonene fra Ålfotbreen 1977 ble dessverre ikke ferdig bearbeidet før rapporten fra undersøkelsene i 1977 gikk i trykken. De presenteres derfor i foreliggende rapport.

Som tidligere år ble det registrert meteorologiske parametere på termograf, hygrograf og pluviograf med omløpstid på en måned. Registreringene ble utført på samme sted som foregående år (900 m o.h.). De ble satt i gang 11.juni og gikk til 29.oktober. Kontroller og papirskift ble foretatt 11.juli, 31.juli, 28.august og 27.september. Termografen fungerte dårlig i august og september, og vi har lange perioder uten temperaturregistreringer i disse månedene. De øvrige instrumenter fungerte stort sett tilfredsstillende hele sesongen. Resultatene er presentert sammen med vassføringen i breelva i fig. 7.

Med de manglende registreringer i august og september har vi ikke kunnet beregne middeltemperatur for hele sesongen. Middeltemperaturen for perioden 11. - 30.juni var 6.9°C, med maksimumstemperatur på 10.7°C og minimumstemperatur på 3.3°C. For juli var middeltemperaturen 8.3°C, med maksimum på 15.6°C og minimum på 3.4°C. Perioden 1. - 29.oktober hadde en middeltemperatur på 3.0°C, med maksimum og minimum på henholdsvis 7.7°C og - 1.5°C. Oktober hadde 5 døgn med middeltemperatu-

ÅLFOTBREEN 1977

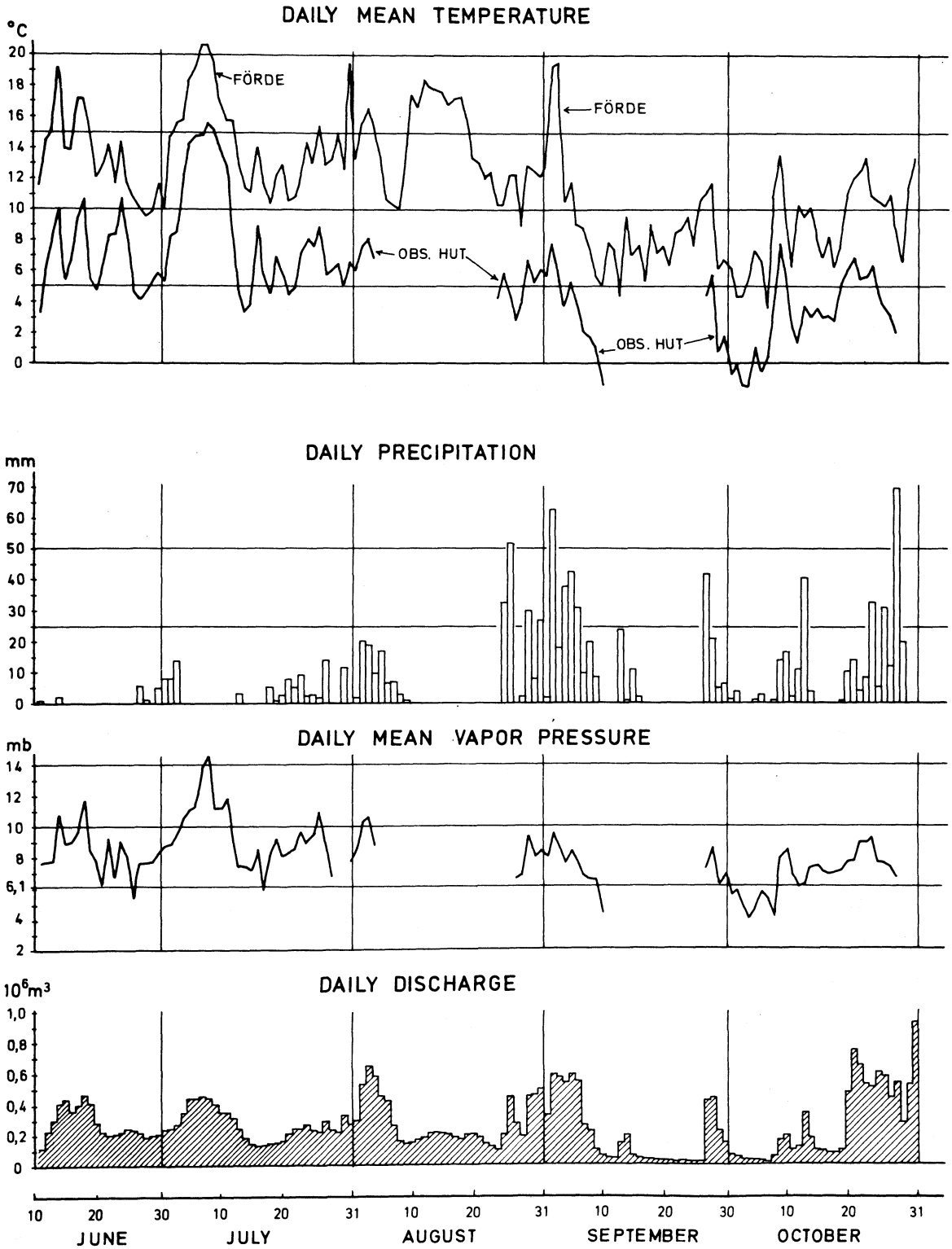


Fig. 7 Resultater fra de daglige meteorologiske observasjoner på Ålfotbreen (900 m o.h.), samt daglig avløp i breelva i 1977. Nedbørregistreringene er fullstendige, uten avbrekk.

The daily meteorological observations at Ålfotbreen (900 m a.s.l.), and the daily discharge at the water gauge in the glacier river in 1977. The precipitation measurements are complete.

rer under null, mens juni og juli bare hadde positive døgnmiddeltemperaturer. Temperaturgradienten mellom Førde i Sunnfjord og Ålfotbreen er beregnet til 0.71°C/100 m for perioden 11. - 30.juni, 0.69°C/100 m for juli og 0.63°C/100 m for perioden 1. - 29.oktober.

Den målte nedbør var 15 mm i juni, 96.3 mm i juli, 234.9 mm i august, 343.3 mm i september og 307.3 mm i oktober. Maksimal døgnnedbør kom 28.oktober med 69.5 mm. Av totalt 141 observasjonsdøgn var 59 døgn uten nedbør, mens 3 døgn hadde mer enn 50 mm nedbør.

Hygrografen ga stort sett brukbare resultater for den relative fuktighet. På grunn av manglende temperaturdata har det imidlertid ikke vært mulig å beregne midlere vanndamptrykk for en del perioder i august og september. Midlere vanndamptrykk for perioden 11. - 30.juni var 8.3 mb, juli 9.4 mb og perioden 1. - 29. oktober 6.8 mb. I oktober hadde 8 døgn lavere enn 6.1 mb i døgnlig midlere vanndamptrykk, mens tallene for juli og juni var 1 døgn i hver måned.

Avrenning 1977

Fra 1. juni til 31. oktober passerte i alt 38,5 · $10^6 m^3$ vann forbi limnigrafen i breelva (710 m o.h.). Dette fordelte seg med 6,5 · $10^6 m^3$ i juni, 8,4 · $10^6 m^3$ i juli, 8,7 · $10^6 m^3$ i august, 6,1 · $10^6 m^3$ i september og 8,8 · $10^6 m^3$ i oktober. Største døgnavløp ble målt 31. oktober med 0,9 · $10^6 m^3$. I perioden 21. - 31. oktober var avrenningen i alt 6,4 · $10^6 m^3$. Utenom denne flomperioden var største avløp den 3. august med 0,7 · $10^6 m^3$ vann.

Bondhusbreen

Akkumulasjonsmålingene ble utført 8.mai. 6 staker var synlige over snøoverflaten. Snødypet ble målt ved sondering i 125 punkter ovenfor kote 1200. Dette gir en midlere måletetthet på 6.5 punkter pr. km^2. I tillegg ble snødypet målt ved stakene ca. 1100 m o.h. På lavere nivåer finnes ingen målinger, og balansetallene er estimert. Snøens tetthet ble målt dels i sjakt og dels ved kjerneboring. Midlere snøtetthet ble 0.48 g/cm^3. Total vinterbalanse er beregnet til 24 · $10^6 m^3$ vann, som tilsvarer et vannlag på 2.37 m over hele breen eller en årlig avrenning på 75 l/s km^2.

Ablasjonen er målt på 10 staker fra ca. 1100 m o.h. til ca. 1600 m o.h. Nedenfor 1100 m o.h. er ablasjonen forsøkt estimert ved sammenlikninger med bretungen på Nigardsbreen. Total sommerbalanse er beregnet til 29.3 · $10^6 m^3$ vann, tilsvarende et vannlag på 2.88 m over hele breoverflaten eller en årlig avrenning på 91 l/s km^2.

Nettobalansen blir - 5.2 · $10^6 m^3$ vann. Breen har altså tapt masse tilsvarende et vannlag på 0.51 m over hele breoverflaten dette året. Det tilsvarer et ekstra til-

BONDHUSBREEN 1978

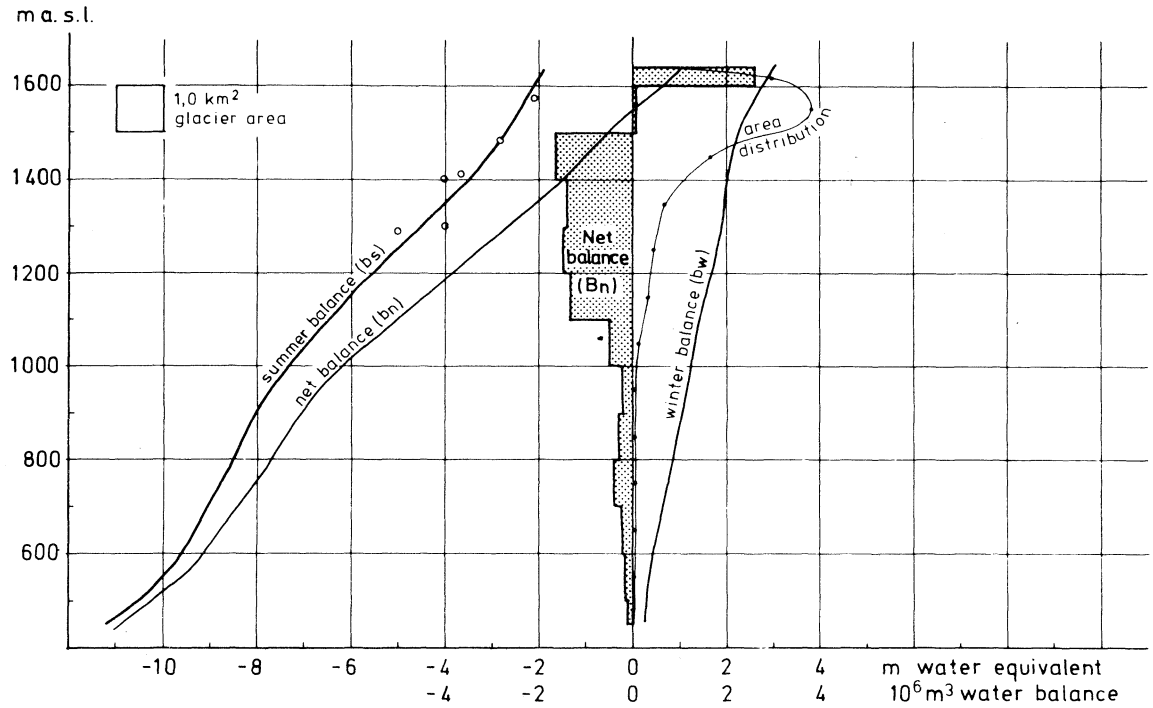


Fig. 8 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 100 m høydeintervall.

Winter, summer and net balance in relation to elevation, glacier area distribution and net balance for every 100 m height interval.

B O N D H U S B R E E N 1 9 7 8

Høyde intervall	Areal	Vinterbalanse			Sommerbalanse			Nettobalanse		
	S	B_w	b_w		B_s	b_s		B_n	b_n	
m o.h.	km²	$10^6 m^3$	m	l/s km²	$10^6 m^3$	m	l/s km²	$10^6 m^3$	m	l/s km²
1600-1635	2,96	8,501	2,87	91	5,920	2,00	63	2,581	0,87	28
1500-1600	3,81	9,211	2,42	76	9,186	2,41	76	0,025	0,01	0
1400-1500	1,68	3,475	2,07	65	5,145	3,06	97	-1,670	-0,99	-32
1300-1400	0,69	1,336	1,93	61	2,766	4,01	127	-1,430	-2,07	-66
1200-1300	0,45	0,790	1,76	56	2,248	5,00	158	-1,458	-3,24	-103
1100-1200	0,30	0,465	1,55	49	1,781	5,94	188	-1,316	-4,39	-139
1000-1100	0,09	0,122	1,35	43	0,623	6,92	220	-0,501	-5,57	-177
900-1000	0,03	0,035	1,15	37	0,233	7,75	246	-0,198	-6,60	-209
800- 900	0,04	0,038	0,95	30	0,330	8,25	262	-0,292	-7,30	-231
700- 800	0,05	0,038	0,75	24	0,438	8,75	278	-0,400	-8,00	-254
600- 700	0,03	0,017	0,55	18	0,278	9,25	294	-0,261	-8,70	-276
500- 600	0,02	0,007	0,35	11	0,199	9,95	316	-0,192	-9,60	-304
450- 500	0,01	0,003	0,30	10	0,108	10,75	342	-0,105	-10,45	-332
450-1635	10,16	24,038	2,37	75	29,255	2,88	91	-5,217	-0,51	- 16

skudd på 16 l/s km^2 i årlig avrenning.

Firnlinjen ved årets slutt er ikke observert direkte, men ifølge beregningene skal den ligge på ca. 1590 m o.h.

Som nevnt i fjorårets rapport er målingene på Bondhusbreen forbundet med større usikkerhet enn på våre andre målesteder. Dette skyldes hovedsakelig mangel på et godt kartgrunnlag. En nøyaktig avgrensning av dreneringsområdet er derfor ikke mulig. En mindre antall målepunkter og færre besøk gjør også sitt til å heve usikkerheten.

Årets resultater er vist i fig. 8 og i tabell på s. 15. Ytterligere opplysninger om årets arbeid på Bondhusbreen er samlet i artikkel på s. 50 i denne rapport.

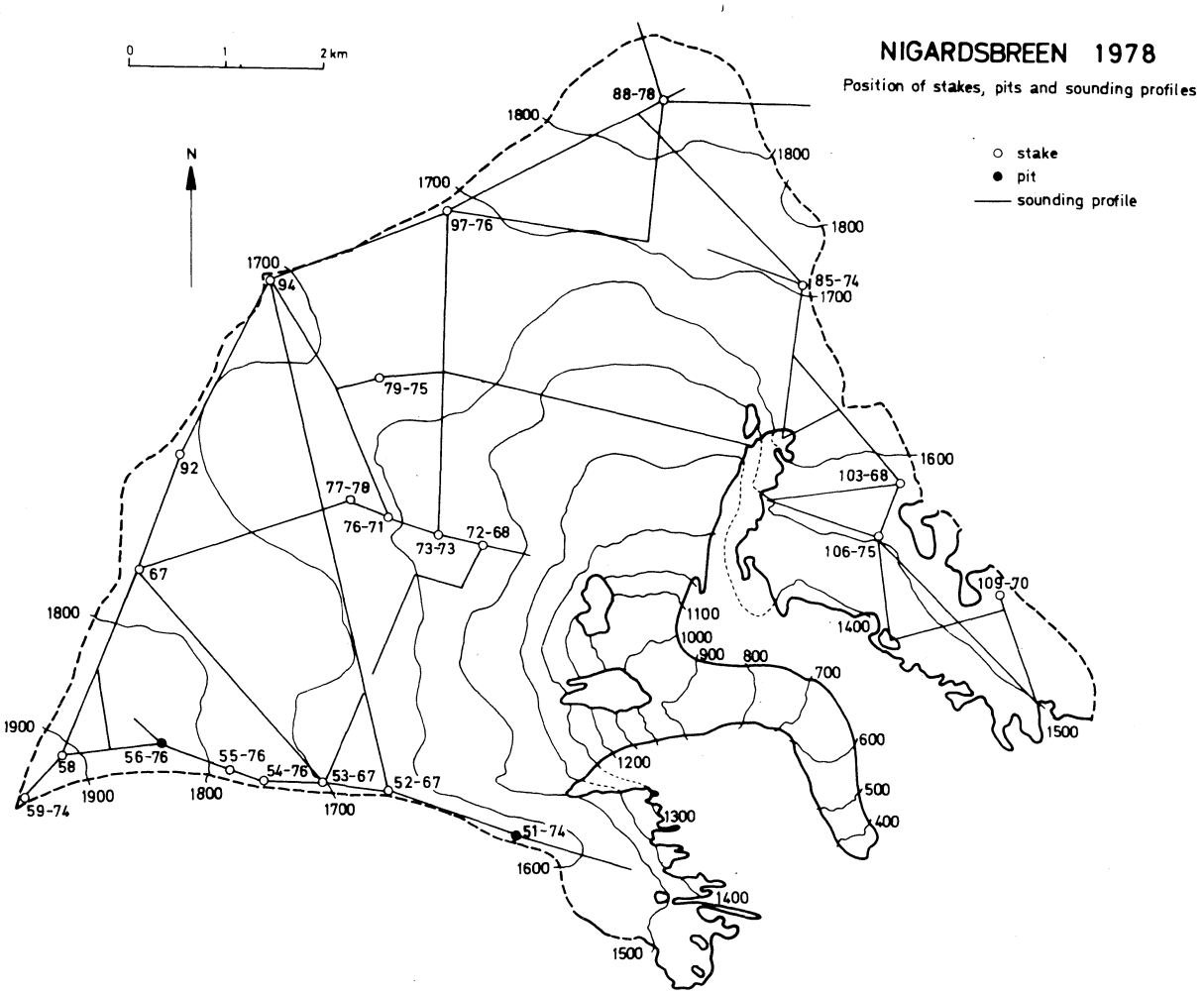


Fig. 9 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1978.
The location of stakes, pits and sounding profiles in 1978.

Nigardsbreen

Materialhusholdning

Breen ble besøkt 3 ganger i løpet av vinteren, før den endelige akkumulasjonsmålingen ble foretatt i slutten av april. De fleste stakene ble målt og skjøtt. Vinternedbøren lå litt under middelet for perioden 1962 - 77. I april hadde bare noen få staker forsvunnet i løpet av vinteren. Snødypet ble målt i 411 punkter langs sonderingsprofilene vist på fig. 9. Dette gir en måletetthet på 8.5 sonderinger på hver km^2. Snødypene varierte fra ca. 350 cm til ca. 700 cm. Tetthetsprøver ble tatt ved stakene 56 og 51. Den totale vinterbalansen er beregnet til 102.1 $\cdot 10^6 m^3$ vann, som gir 2.12 m jevnt fordelt over breflaten. Vinterbalansen er vist i fig. 10.

I ablasjonssesongen ble stakene målt 1.juni, 10. - 11.juli, 24.juli, 1.august og

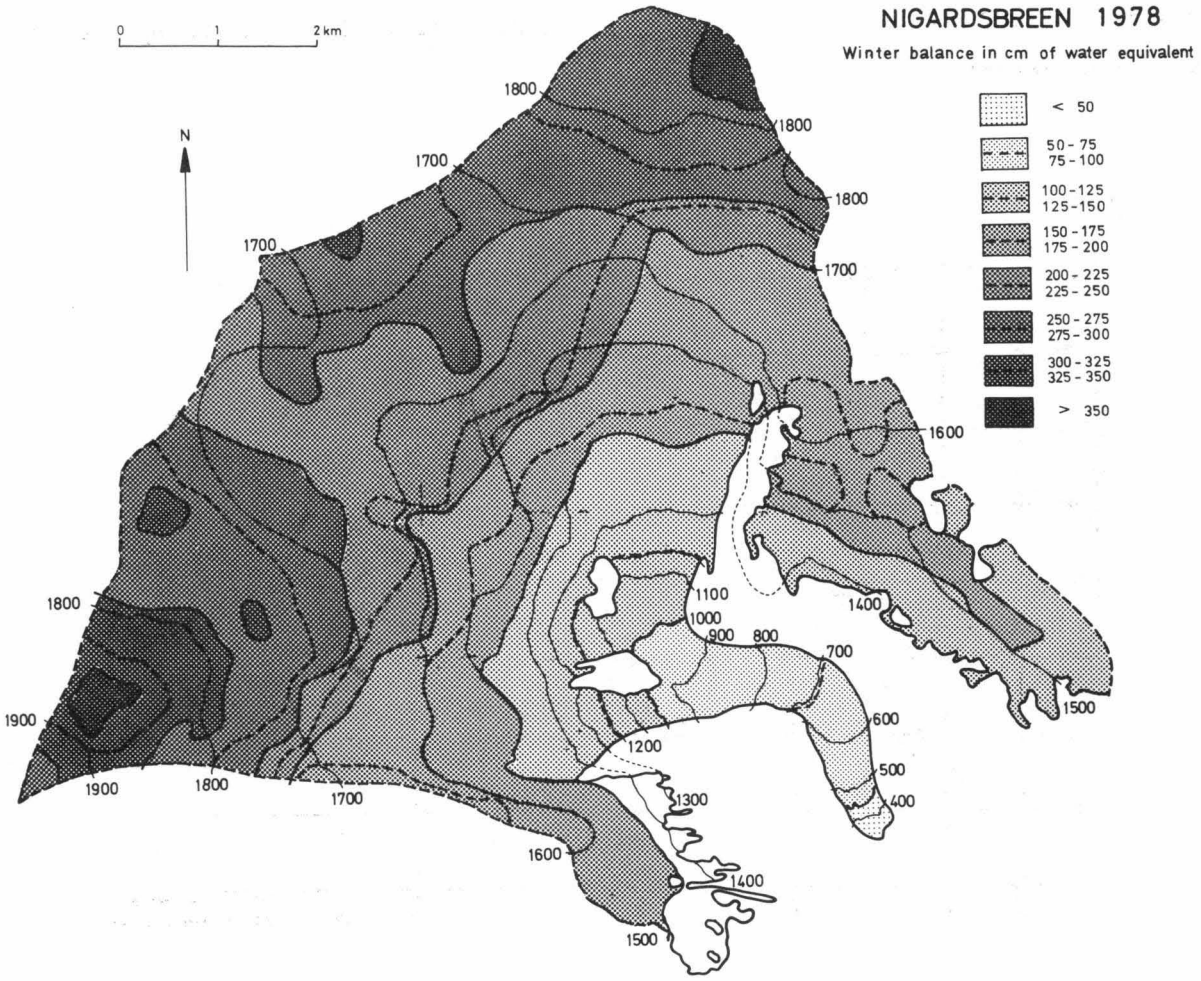


Fig. 10 Kart over vinterbalansen i 1978.
Map showing the winter balance in 1978.

1. - 2.september. På grunn av langvarige perioder med dårlig vær høsten 1978 ble minimumsmåling først foretatt 27. - 30.november. Akkumulasjonssesongen hadde da forlengst startet. Ablasjonen hadde vært noe større enn normalt, og total sommerbalanse ble beregnet til 108.2 · $10^6 m^3$, eller 2.25 m jevnt fordelt over hele breen. Dette gir en avrenning på 71 l/s km^2 i 1978.

Resultatet ble en negativ netto balanse på - 6.10 · $10^6 m^3$, som utgjør et vannlag på 13 cm. over hele breen. Dette gir et ekstra tilskudd til vassdraget på 4 l/s km^2 gjennom hele året.

Meteorologiske observasjoner

De meteorologiske måleresultatene på Steinmannen er blitt ytterligere forringet etter at feltstasjonen ble nedlagt som bemannet stasjon. Dette er en naturlig følge ettersom måleinstrumentene som benyttes er avhengig av hyppig stell og ettersyn. Mens feltstasjonen i 1977 ble besøkt én gang pr. uke, gikk man i 1978 over til månedsregistreringer. Eventuelle feil ved instrumentene kan derfor forårsake relativt lange opphold i registreringene. Fig. 13 viser da også flere brudd i måleseriene.

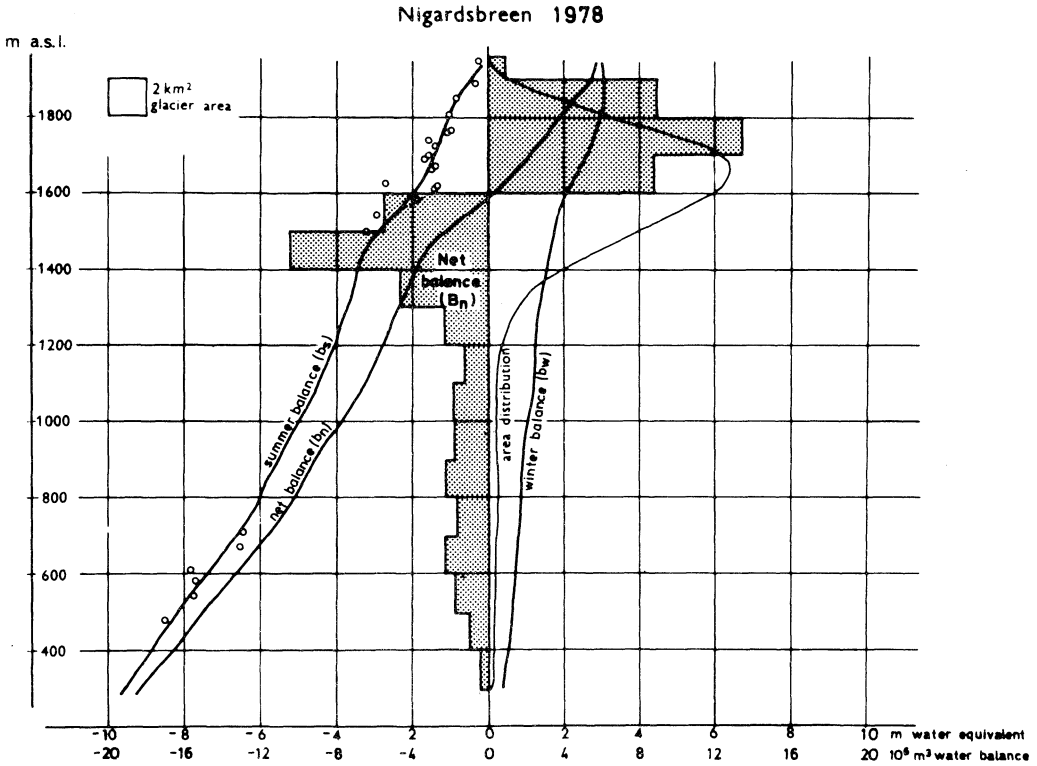


Fig. 11 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, samt breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 100 m høydeintervall.

Winter, summer and net balance in relation to elevation, glacier area distribution and net balance for every 100 m height interval.

Middeltemperaturen for hele observasjonsperioden var 3.1°C, med 7 døgnmidler under 0°C i juni, 4 i juli, 6 i august og 1 i september. Middeltemperaturen for juni var 2.3°C, med høyeste døgnmiddel 7.2°C og laveste døgnmiddel -3.8°C. Tilsvarende tall for juli var 3.4°C, 11.3°C og -2.5°C. For august var tallene 3.9°C, 11.0°C og -3°C. Temperaturgradienten mellom Bjørkehaug (320 m o.h.) og Steinmannen (1630 m o.h.) er beregnet til 0.78°C/100m for hele måleperioden.

Nedbøren ble målt i pluviograf, som tidligere har vist godt samsvar med standard nedbørmåler. Totalnedbør i juni var 41.2 mm, 88.4 mm i juli og 88.7 mm i august. Summen for hele måleperioden var 218.3 mm. Maksimal døgn-nedbør var 27.4 mm, som kom den 15.august.

Hygrografen ga til dels dårlige resultater for august, da den hadde flere avbrekk i registreringene på grunn av instrumentfeil. I juni var midlere vanndamptrykk 6.5 mb og i juli 7.1 mb. 4 døgn i juni og 3 døgn i juli hadde et vanndamptrykk på under 6.1 mb, samtidig som temperaturen var positiv. I disse døgn vil det trolig ha foregått en viss sublimasjon fra breoverflaten.

Avrenning

Ved limnigrafen ved utløpet av Nigardsvatnet passerte det i juni 35.81 · $10^6 m^3$ vann, i juli 53.10 · $10^6 m^3$ og i august 61.97 · $10^6 m^3$. Totalt passerte i alt 150.88 · $10^6 m^3$ vann forbi limnigrafen.

Største døgnavløp ble registrert den 2.august med 2.94 · $10^6 m^3$, mens midlere avløp for hele perioden var 1.64 · $10^6 m^3$ vann pr. døgn.

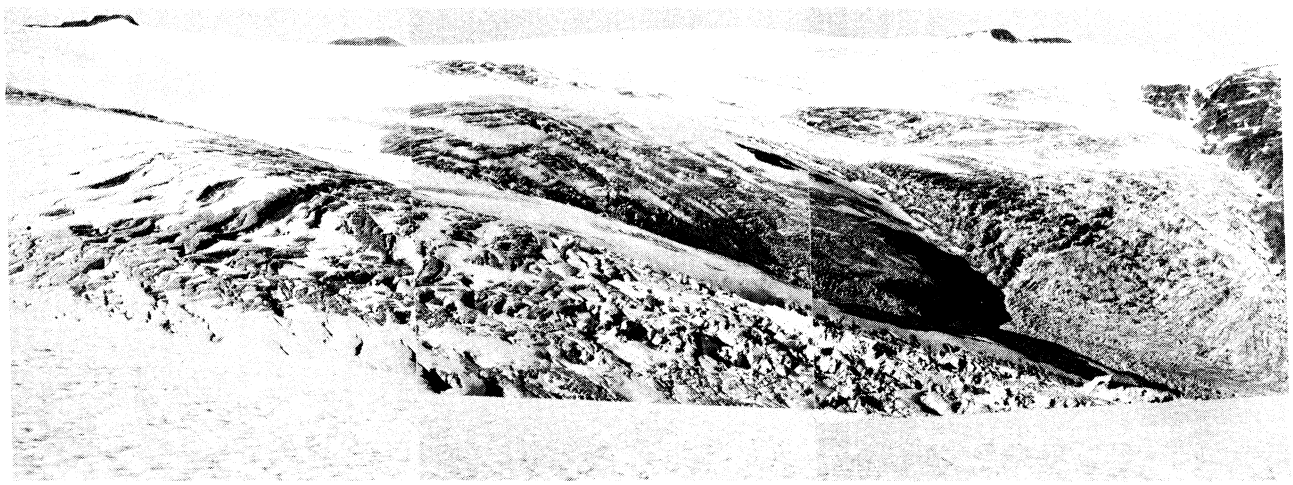


Fig. 12 Temporær snøgrense på Nigardsbreen 12. juli 1978.
Transient snowline at Nigardsbreen on July 12, 1978.

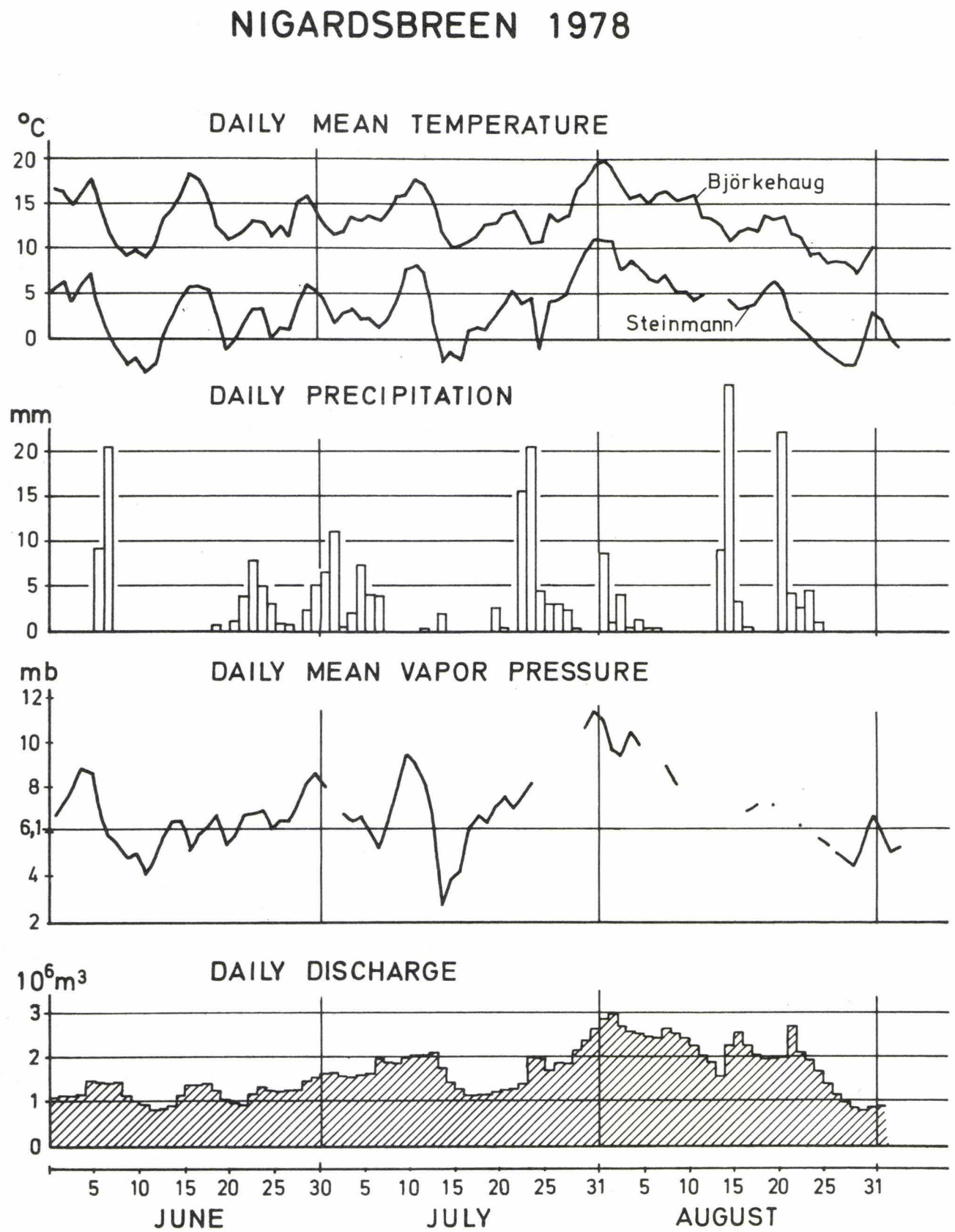


Fig. 13 Resultater fra de daglige meteorologiske observasjoner på Nigardsbreen (1633 m o.h.) og temperaturmålingene fra Bjørkehaug i Jostedalen, samt døgnlig avløp ved limnigrafen i Nigardsvatn.

Diagram showing the daily meteorological observations on Nigardsbreen (1633 m a.s.l.), temperature at Bjørkehaug, Jostedalen, and the daily discharge at the water gauge in the lake Nigardsvatn.

N I G A R D S B R E E N 1 9 7 8

Høyde intervall m o.h.	Areal S km^2	Vinterbalanse B_w $10^6 m^3$	b_w m	b_w l/s km^2	Sommerbalanse B_s $10^6 m^3$	b_s m	b_s l/s km^2	Nettobalanse B_n $10^6 m^3$	b_n m	b_n l/s km^2
1900-1960	0,31	0,937	3,02	96	0,078	0,25	8	0,859	2,77	88
1800-1900	3,93	12,104	3,08	98	3,218	0,82	26	8,886	2,26	72
1700-1800	9,35	25,302	2,70	86	11,724	1,25	40	13,578	1,45	46
1600-1700	12,76	29,469	2,31	73	20,763	1,63	52	8,706	0,68	21
1500-1600	9,62	17,516	1,82	58	23,068	2,40	76	- 5,552	-0,58	- 18
1400-1500	6,12	9,735	1,59	50	20,196	3,30	105	-10,461	-1,71	- 54
1300-1400	2,18	3,139	1,44	46	7,771	3,56	113	- 4,632	-2,12	- 67
1200-1300	0,88	1,118	1,27	40	3,471	3,94	125	- 2,353	-2,67	- 85
1100-1200	0,44	0,528	1,20	38	1,870	4,25	135	- 1,342	-3,05	- 97
1000-1100	0,54	0,626	1,16	37	2,565	4,75	151	- 1,939	-3,59	-114
900-1000	0,45	0,446	0,99	31	2,363	5,25	166	- 1,917	-4,26	-135
800- 900	0,47	0,414	0,88	28	2,738	5,83	185	- 2,324	-4,95	-157
700- 800	0,31	0,248	0,80	25	1,938	6,25	198	- 1,690	-5,45	-173
600- 700	0,38	0,270	0,71	23	2,665	7,01	222	- 2,395	-6,30	-199
500- 600	0,26	0,164	0,63	20	2,035	7,83	248	- 1,871	-7,20	-228
400- 500	0,14	0,071	0,51	16	1,190	8,50	270	- 1,119	-7,99	-254
300- 400	0,06	0,026	0,43	14	0,556	9,25	293	- 0,530	-8,82	-280
300-1960	48,20	102,113	2,12	67	108,209	2,25	71	- 6,096	-0,13	- 4

Storbreen

Akkumulasjonssesongen startet tidlig i september med mye nedbør som falt som snø på de øvre deler av breen. I denne perioden var nedbøren i Vest-Norge 150% av normalt. Senere på vinteren var nedbøren mindre eller omlag normal. Målinger i mai viste en vinterakkumulasjon på 126 cm vann, jevnt fordelt over hele breen. Dette er omlag 90% av middelet for de foregående 29 år. Temperaturen var over det normale i mai og juni, men lavere for resten av sommeren. Resultatet ble en ablasjon på 170 cm vann, som er nær middelverdien (166 cm) for de foregående 29 år. For de samme årene var midlere nettobalanse -28 cm, mens nettobalansen for 1977-78 ble -44 cm.

Vinter-, sommer- og nettobalansen er vist i fig. 14, mens tabell på s.23 og fig.15 viser balansen for de siste 30 år. Ettersom det ikke foreligger kontinuerlige observasjoner av sommerakkumulasjonen, vil tabellen ikke vise total akkumulasjon. Snøfall på øvre deler av breen tidlig og sent på sommeren er vanskelig å observere. Dette vil også ha virkning på ablasjonstallene, ettersom smelting av sommersnøen ikke er målt. Nettobalansetallene, som er de mest interessante ved vurdering av brefluktuasjoner og brevolum, vil imidlertid ikke bli influert av disse problemene.

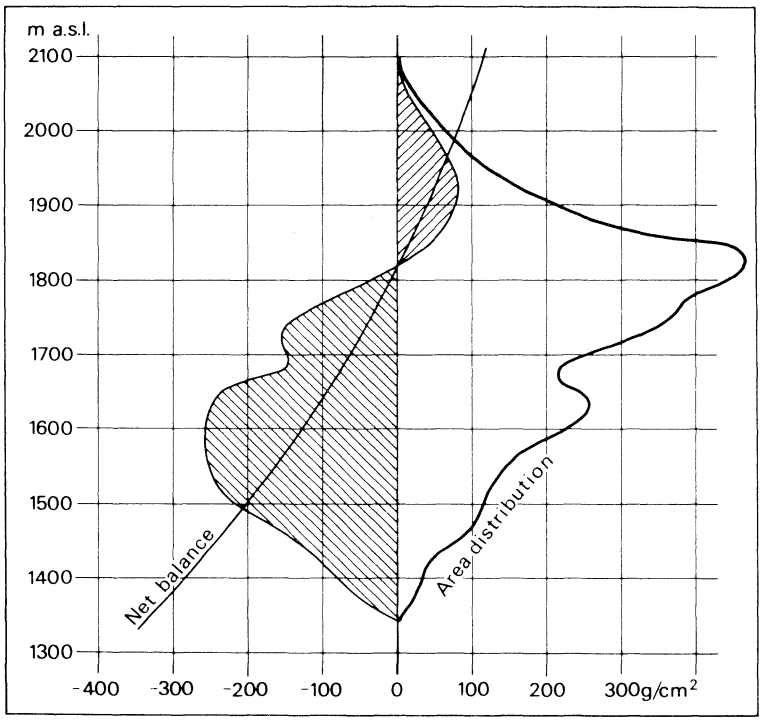


Fig. 14 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdiene av nettobalansen.

Winter- summer and net balance in relation to the elevation, the area distribution and the area net balance.

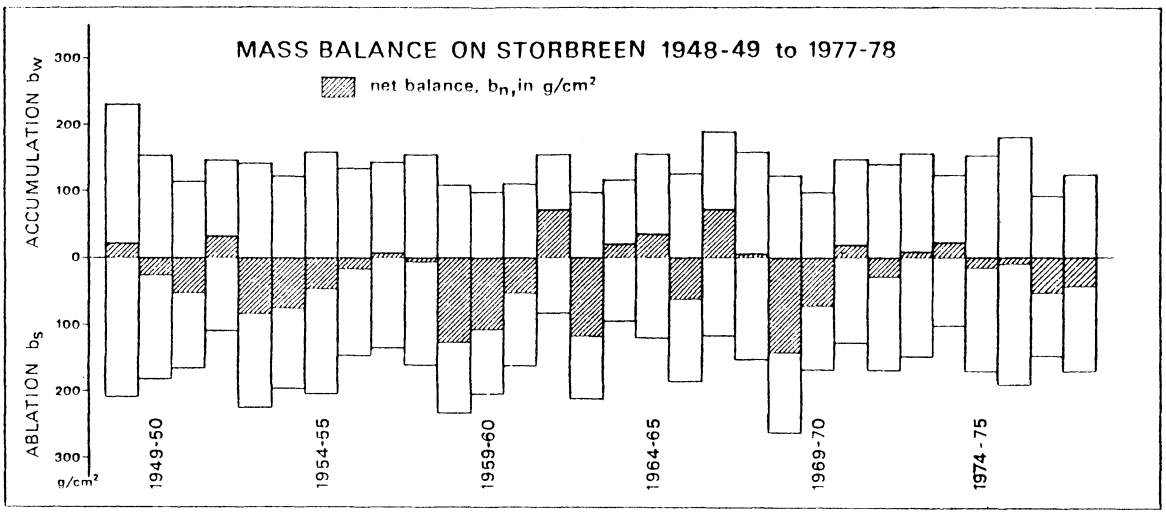


Fig. 15 Vinter-, sommer-, og nettobalansen på Storbreen de siste 30 år.

Winter, summer and net balance shown as staples for the 30 years when detailed mass-balance studies have been performed at Storbreen.

MASSEBALANSE, STORBREEN 1949 - 78

År	Akkumu-lasjon g/cm^2	Abla-sjon g/cm^2	Netto-balanse g/cm^2	Temperatur i Bergen 1/5 - 30/9 C^o
1949	228	208	20	13.02
1950	152	181	- 29	13.38
51	113	167	- 54	12.62
52	144	113	31	11.32
53	140	225	- 85	13.60
54	121	198	- 77	12.96
55	157	206	- 49	13.00
56	131	148	- 17	12.28
57	142	137	5	11.82
58	154	162	- 8	12.98
59	107	235	-128	13.06
1960	98	207	-109	13.46
61	110	162	- 52	12.56
62	154	82	72	11.48
63	96	214	-118	12.88
64	116	95	21	11.38
65	154	120	34	12.50
66	125	186	- 61	12.26
67	189	117	72	12.28
68	164	159	5	13.01
69	122	264	-142	13.46
1970	97	169	- 72	13.00
71	146	128	18	12.52
72	139	170	- 31	12.30
73	148	140	8	12.18
74	126	102	24	12.48
75	155	170	- 15	12.62
76	181	190	- 9	12.84
77	94	148	- 54	11.90
78	126	170	- 44	12.60
Middel	137.7	165.8	- 28.2	12.58

Hellstugubreen

Akkumulasjonssesongen startet ca. 1.oktober. Som vanlig ble det bare nødvendig med et besøk før akkumulasjonsmålingen. Dette besøket fant sted 22.januar og 19 staker ble målt og skjøtt. Ved akkumulasjonsmålingen 26.april ble 17 staker funnet. Snødypene varierte fra 1 m til 3 m, og midlere snøtetthet ble målt til 0.42 g/cm^3 i 1960 m o.h. og 0.43 g/cm^3 i 1630 m o.h. Snødypet ble målt ved sondering på 265 steder langs profiler vist på fig. 14. Dette gir en midlere måletetthet på ca. 80 punkter pr. km^2. Vinterbalansens fordeling er vist på fig.17. Totalt beløp den seg til 3.5 . 10^{6}m^3 vann som jevnt fordelt ville gi et vannlag på 1.05 m over hele breen. Dette er nær middelet for perioden 1963 - 77, og hele 54% mer enn fjoråret.

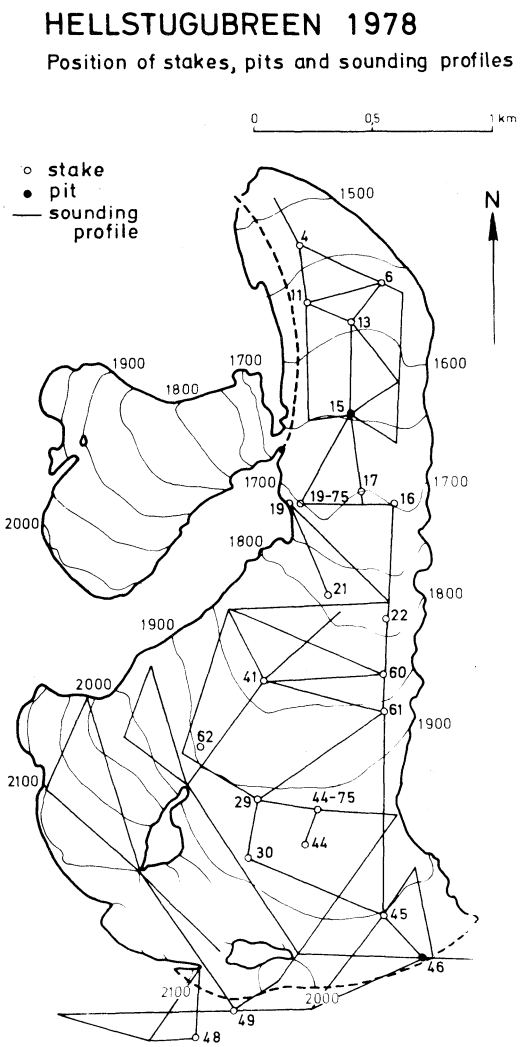


Fig. 16 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1978.

The location of stakes, pits and sounding profiles in 1978.

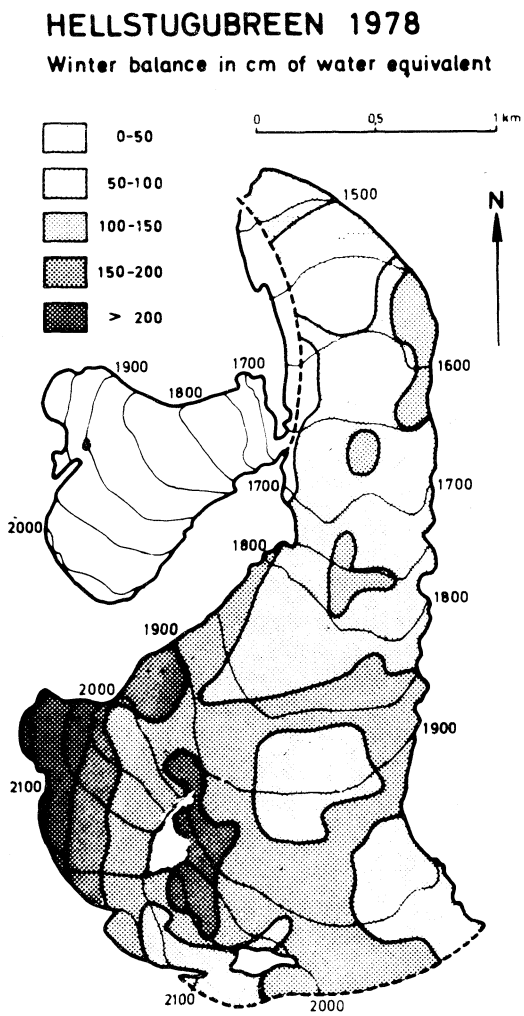


Fig. 17 Kart over vinterbalansen i 1978.

Map showing the winter balance in 1978.

I løpet av sommeren ble ablasjonen målt den 5.juli, 28.juli og 5.september. Ved siste måling ble 24 staker målt. Det lå da 50 - 60 cm nysnø på breens øvre deler og årets ablasjonssesong ble regnet som avsluttet. Sommerbalansen ble beregnet til 5.3 . $10^6 m^3$ vann, tilsvarende et vannlag på 1.59 m over hele breen eller en årlig avrenning på 50 l/s km^2. Dette er 12 % større sommerbalanse enn middelet for perioden 1963 - 77.

Nettoresultatet var en negativ balanse på 1.8 . $16^6 m^3$. Det vil si at i tillegg til årets snø smeltet det også mye av tidligere års nedbør. Underskuddet tilsvarer et 54 cm tykt vannlag over hele breen, og vassdraget har fått et ekstra vanntilskudd på 17 l/s km^2 på årsbasis. Årets resultater er vist i fig. 18 og i tabell s. 26.

Høyden av firnlinjen kunne ikke observeres direkte p.g.a. nysnø ved siste besøk, men skal ifølge beregningene ligge på ca. 1890 m o.h.

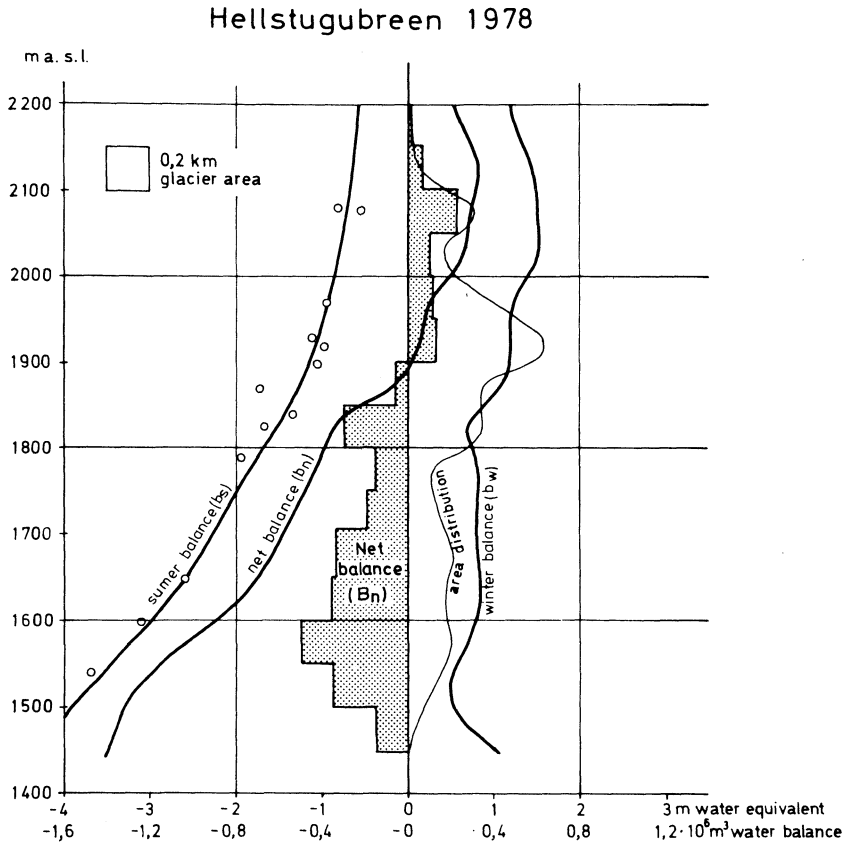


Fig. 18 Variasjonene med høyden over havet av vinter-, sommer- og nettobalansen, breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 50 m høydeintervall.

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

H E L L S T U G U B R E E N 1 9 7 8

Høyde intervall m o.h.	Areal S km^2	Vinterbalanse B_w $10^6 m^3$	b_w m	b_w l/s km^2	Sommerbalanse B_s $10^6 m^3$	b_s m	b_s l/s km^2	Nettobalanse B_n $10^6 m^3$	b_n m	b_n l/s km^2
2150-2200	0,021	0,026	1,24	41	0,013	0,62	20	0,013	0,62	21
2100-2150	0,088	0,127	1,45	46	0,055	0,63	20	0,072	0,82	26
2050-2100	0,301	0,452	1,50	48	0,232	0,77	24	0,222	0,73	23
2000-2050	0,159	0,240	1,51	48	0,140	0,88	28	0,100	0,63	20
1950-2000	0,362	0,442	1,22	39	0,333	0,92	29	0,109	0,30	9
1900-1950	0,605	0,744	1,23	39	0,618	1,02	32	0,126	0,21	7
1850-1900	0,368	0,412	1,12	36	0,475	1,29	41	-0,063	-0,17	- 5
1800-1850	0,348	0,234	0,67	21	0,539	1,55	49	-0,305	-0,88	-28
1750-1800	0,149	0,122	0,82	26	0,280	1,88	60	-0,158	-1,06	-34
1700-1750	0,146	0,115	0,79	25	0,311	2,13	68	-0,196	-1,34	-43
1650-1700	0,213	0,173	0,81	26	0,515	2,42	77	-0,342	-1,61	-51
1600-1650	0,182	0,152	0,83	26	0,508	2,79	88	-0,356	-1,96	-62
1550-1600	0,196	0,135	0,69	22	0,638	3,26	103	-0,503	-2,57	-81
1500-1550	0,110	0,051	0,46	15	0,406	3,69	117	-0,355	-3,22	-102
1450-1500	0,045	0,034	0,75	24	0,183	4,07	129	-0,149	-3,31	-105
1450-2200	3,293	3,461	1,05	33	5,246	1,59	50	-1,785	-0,54	- 17

Gråsubreen

Akkumulasjonssesongen startet ca. 1.oktober, og breen ble i vintersesongen ikke besøkt før akkumulasjonsmålingene 26.april. 19 staker ble funnet og snødypet ble målt ved sondering på 137 steder langs profiler vist på fig.19. Dette gir en måletetthet på 54 punkter pr. $km.^2$. Snøens vannverdi ble målt i snøsjakter 1960 m o.h. og 2240 m o.h. Midlere tetthet ble begge steder funnet å være 0.41 g/cm^3. Vinterbalansens fordeling er vist på fig.20. Den beløp seg totalt til 1.7 . $10^6 m^3$ vann, som er 95% av middelet for perioden 1963-77 og ca. 30% mer enn fjoråret. Jevnt fordelt over breflaten tilsvarer den et vannlag på 0.67 m eller en årlig avrenning på 21 l/s km^2.

Ablasjonen ble målt 6.juni, 8.juli, 30.juli og 6.september. Ved siste besøk var det 30 - 60 cm nysnø over hele breen,og ablasjonssesongen regnet som avsluttet. På Gråsubreen dannes det hele sommeren en del påfrossen is. Denne påfrysing medfører at en del masse forflyttes fra et område til et annet på breen. Vi har imidlertid ikke gjort detaljerte målinger av påfrossen is og regner bare med de målte nettotall i vår sommerbalanse. Årets sommerbalanse beløp seg til 2.2 . $10^6 m^3$ vann, tilsvarende et vannlag på 0.89 m eller en årlig avrenning på 28 l/s km^2. Dette er ca 80% av midlere sommerbalanse for årene 1963 - 77, og omtrent likt fjorårets balanse. Det vil si at den er forholdsvis mye mindre enn sommerbalansen på Hellstugubreen. Dette skyldes antakelig hyppige snøfall over 1900 m i løpet av sommeren, noe som bare påvirket Hellstugubreen i liten grad, mens Gråsubreens netto ablasjon ble vesentlig forsinket.

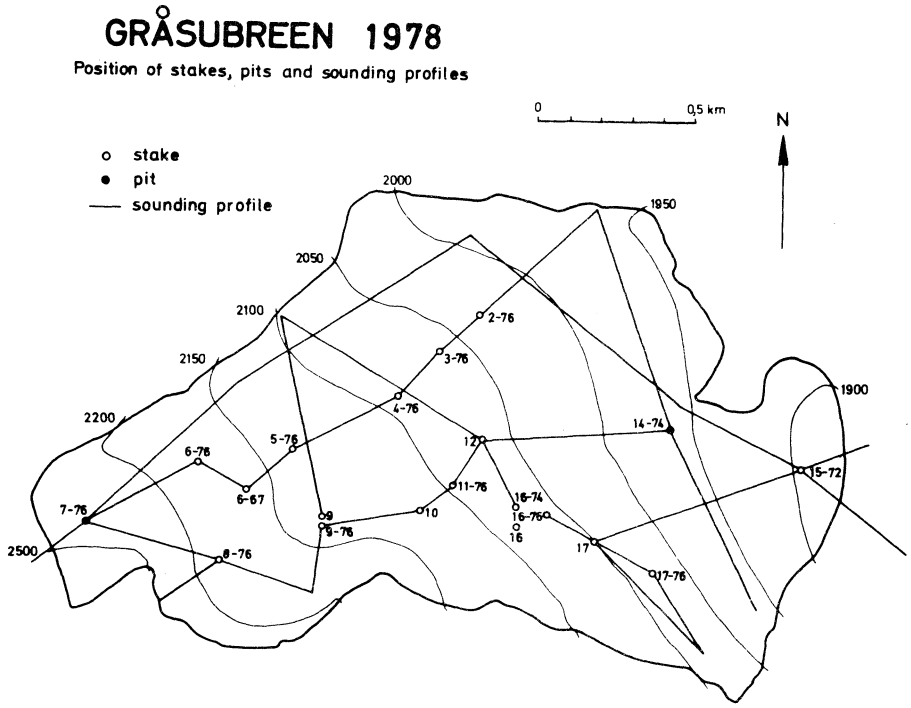


Fig. 19 Kart over vinterbalansen i 1978.
Map showing the winter balance in 1978.

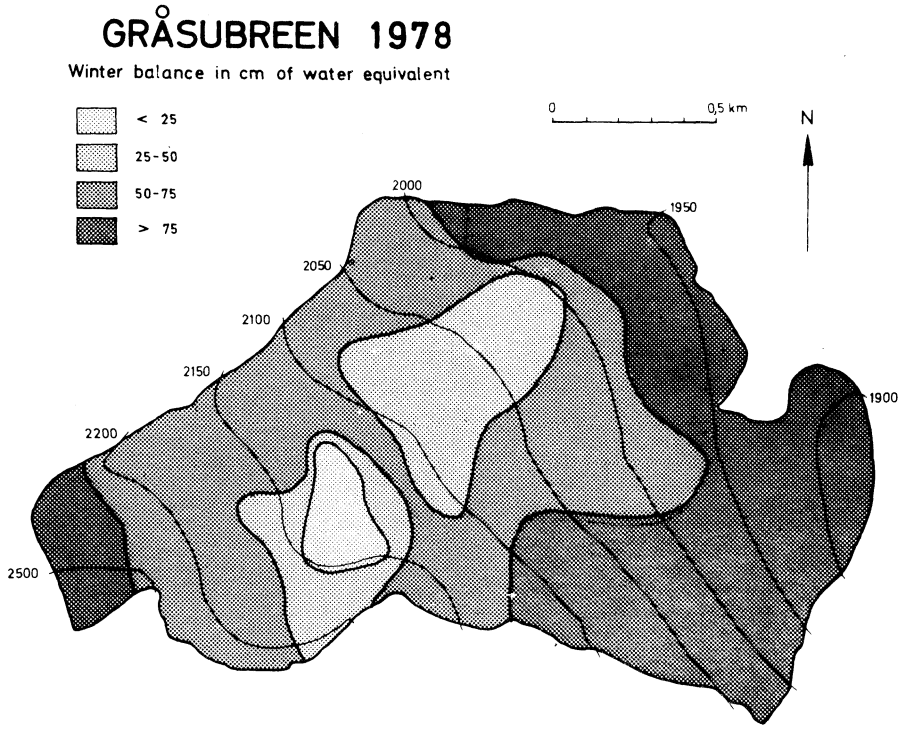


Fig. 20 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1978.
The location of stakes, pits and sounding profiles in 1978.

Årets nettobalanse ble likevel negativ og viste et underskudd på 0.6 . $10^6 m^3$ vann. Dette tilsvarer et vannlag på 0.22 m på breen eller et årlig ekstra tilskudd til breelva på 7 l/s km^2. Balansen er vist i fig. 21 og i tabell s. 28.

På grunn av nysnøen kunne firngrensen ikke observeres direkte.

I følge beregningene skal den ligge på ca. 2145 m o.h.

GRÅSUBREEN 1978

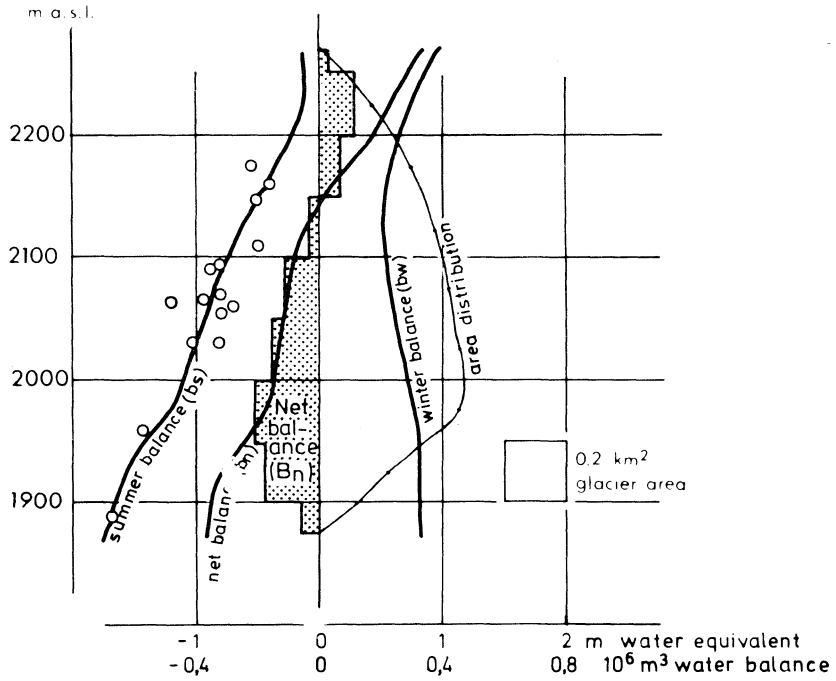


Fig. 21 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 50 m høydeintervall.

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

G R Å S U B R E E N 1 9 7 8

Høyde intervall	Areal	Vinterbalanse			Sommerbalanse			Nettobalanse		
	S	B_w	b_w		B_s	b_s		B_n	b_n	
m o.h.	km^2	$10^6 m^3$	m	l/s km^2	$10^6 m^3$	m	l/s km^2	$10^6 m^3$	m	l/s km^2
2250-2300	0,034	0,034	1,00	32	0,004	0,12	4	0,030	0,88	28
2200-2250	0,179	0,138	0,77	24	0,023	0,13	4	0,115	0,64	20
2150-2200	0,305	0,179	0,59	19	0,116	0,38	12	0,063	0,21	7
2100-2150	0,384	0,208	0,54	17	0,241	0,63	20	-0,033	-0,09	- 3
2050-2100	0,416	0,249	0,60	19	0,368	0,88	28	-0,119	-0,28	- 9
2000-2050	0,464	0,300	0,65	21	0,460	0,99	31	-0,160	-0,34	-10
1950-2000	0,457	0,352	0,77	25	0,562	1,23	39	-0,210	-0,46	-14
1900-1950	0,214	0,171	0,80	25	0,349	1,63	52	-0,178	-0,83	-26
1850-1900	0,065	0,052	0,80	25	0,112	1,73	55	-0,060	-0,92	-29
1850-2300	2,518	1,683	0,67	21	2,235	0,89	28	-0,552	-0,22	- 7

Engabreen

Materialhusholdning

Med de til dels store snømengdene som kan forekomme på Engabreen, har det vært vanskelig å opprettholde stakenettet komplett gjennom vinteren. Høsten 1976 ble det derfor satt ut et tårn av samme type som Televerket bruker i sine antennemaster. Dette var antatt å være mer motstandsdyktig mot sne og vind enn tilfellet er med aluminiumsstakene som lett bøyes ned av vind og ising dersom de rager mer enn 3 meter over snøflaten. Dette tårnet nådde 6.5 m over snøen og viste seg å stå fint gjennom hele vinteren. Med disse gode erfaringene ble derfor et liknende tårn satt opp ved stake 105 høsten 1977. Disse tårnene danner to gode kontrollpunkter for bestemmelsen av sommeroverflaten og forenkler sonderingene under akkumulasjonsmålingen.

Det falt lite snø på breen i løpet av vinteren 1977/78. Breen ble besøkt 18. - 19. november, 21.januar og 15.mars. Ved det første besøket var det kommet snaut 3 m snø på de øvre deler av breen. Den 21.januar var snødypet øket til 5 - 6 m, og 7 staker var da snødd ned. I perioden 21.januar - 15.mars falt det lite snø, og alle stakene som var målt i januar ble gjenfunnet 15.mars.

Akkumulasjonsmålingen ble utført i dagene 23. - 30.mai. Sonderingene ble imidlertid vanskelige p.g.a. mye islinser og våt snø de øverste 3 - 4 m. Flere steder forekom det tykke islag, samtidig som sommeroverflaten var lite utviklet. I alt ble det foretatt 492 sonderinger langs profilene, vist i fig. 23. Dette gir en måletetthet på 12.9 sonderinger for hver km^2. Snøprøver ble tatt ved stakene 16, 35 og 105, og utifra disse ble vannverdien beregnet for samtlige sonderingspunkter.

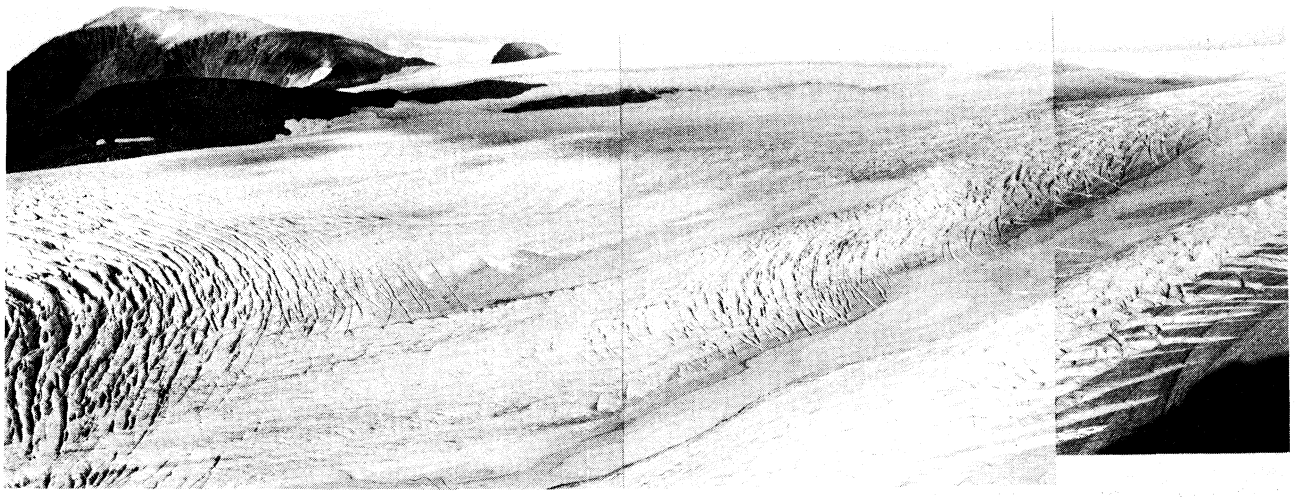


Fig. 22 Temporær snøgrense på Engabreen 20. juli 1978.
Transient snowline at Engabreen on July 20, 1978.

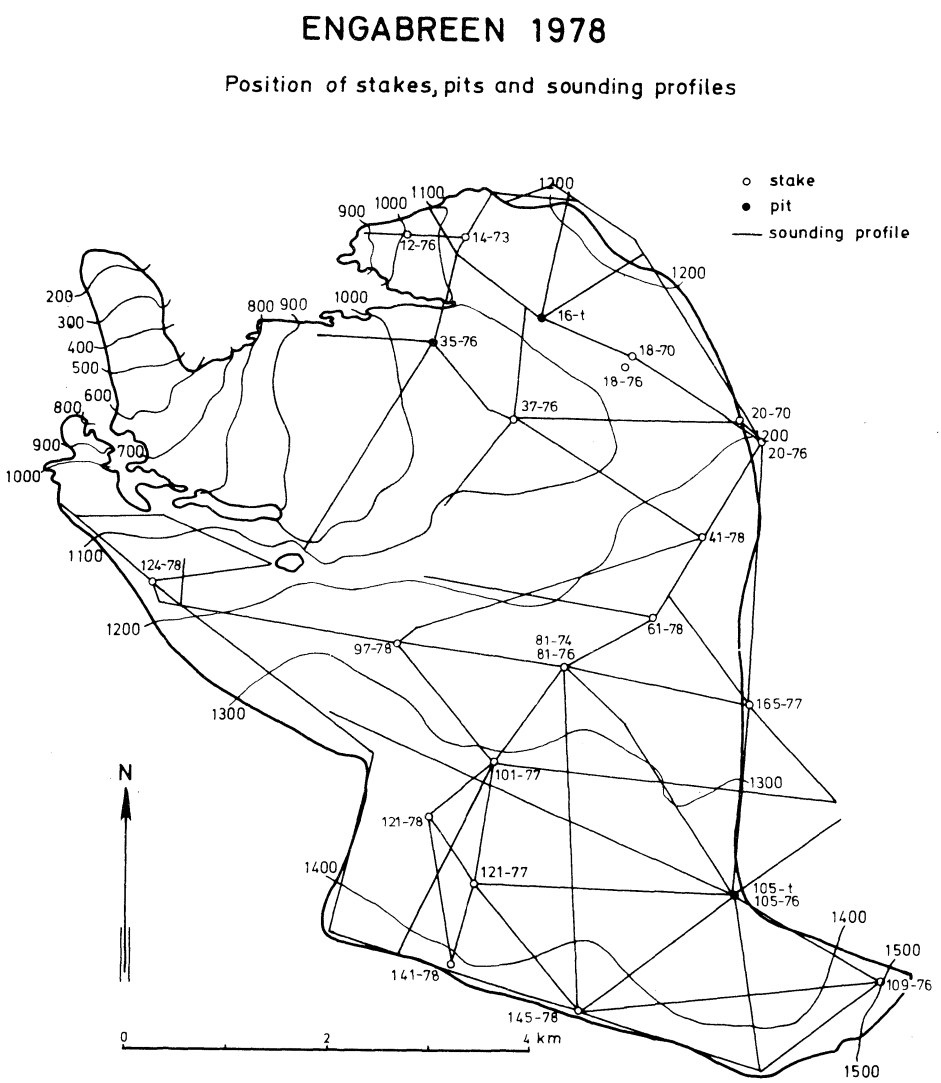


Fig. 23 Beliggenheten av staker, sjakter og sonderingsprofiler i 1978.
The location of stakes, pits and sounding profiles in 1978.

Vinterbalansen for breen er beregnet på grunnlag av sonderingsresultatene og vises i fig. 24. Totalt tilsvarte vinterbalansen 94.40 · $10^6 m^3$ vann. Jevnt fordelt over hele breen gir dette et vannlag på 2.08 m, som er 78% av middelet for de 8 foregående år.

Feltstasjonen på Engabreen var bemannet fra 13.juni til 1.september. Ablasjonen ble målt daglig på de nærmeste stakene, mens resten av breen ble forsøkt målt hver 5.dag. Sommeren var relativt varm, unntatt 14. - 15.juli og 12. - 13.august da det falt litt nysnø på breen. Smeltingen kom skikkelig i gang fra ca. 20.juni og var relativt stor frem til midten av juli, da en litt kaldere periode inntrådte. Denne perioden varte bare noen få dager, og senere holdt ablasjonen seg jevn resten av sommeren. Sommerbalansen var på 113.86 · $10^6 m^3$, eller et vannlag på 2.99 m jevnt fordelt over hele breen. Dette er 140% av årsmiddelet siden 1970, og tilsvarer en avrenning på 95 l/s km^2.

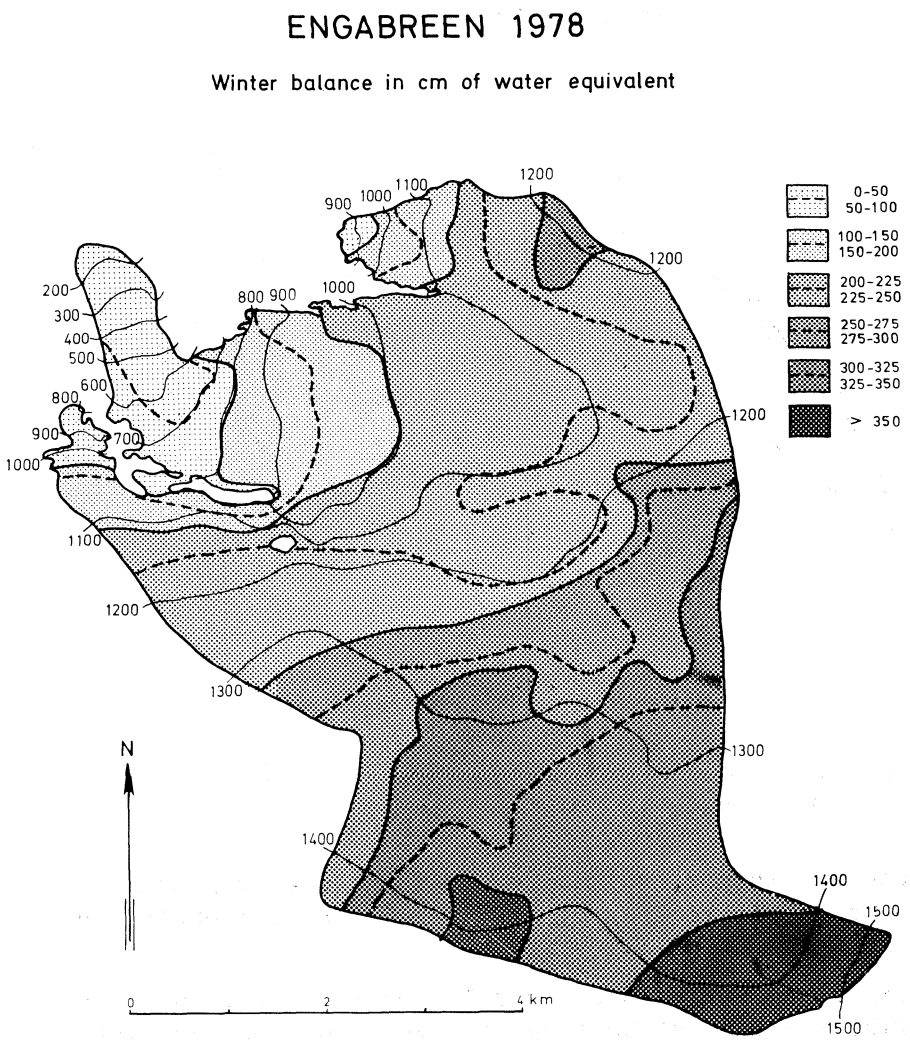


Fig. 24 Kart over vinterbalansen i 1978.
Map showing the winter balance in 1978.

Denne relativt store avsmelting, sammen med en beskjeden snøakkumulasjon ga i alt en stor negativ balanse på - 19.46 · $10^6 m^3$ vann, som utgjør et vannlag på 51 cm jevnt fordelt over breen. Sett på årsbasis ga dette et ekstra tilskudd til vassdraget på 16 l/s km^2. Massebalansen er vist i tabell s. 32 og i fig. 25.

Meteorologiske observasjoner

De meteorologiske målingene ble utført i perioden 13.juni - 1.september på de samme stedene som i 1977, henholdsvis på den gamle observasjonsplassen (880 m o.h.), på feltstasjonen (1100 m o.h.) og på Skjæret (1360 m o.h.) På de to førstnevnte steder ble lufttemperatur, nedbør, vindstyrke og retning, sikt, skymengde og skyhøyde registrert daglig kl.0700 og kl. 1900. Temperatur, luftfuktighet og vind ble registrert kontinuerlig. På Skjæret ble det kun målt temperatur og nedbør. I tillegg ble det på feltstasjonen utført kontinuerlige registreringer av kort-

ENGABREEN 1978

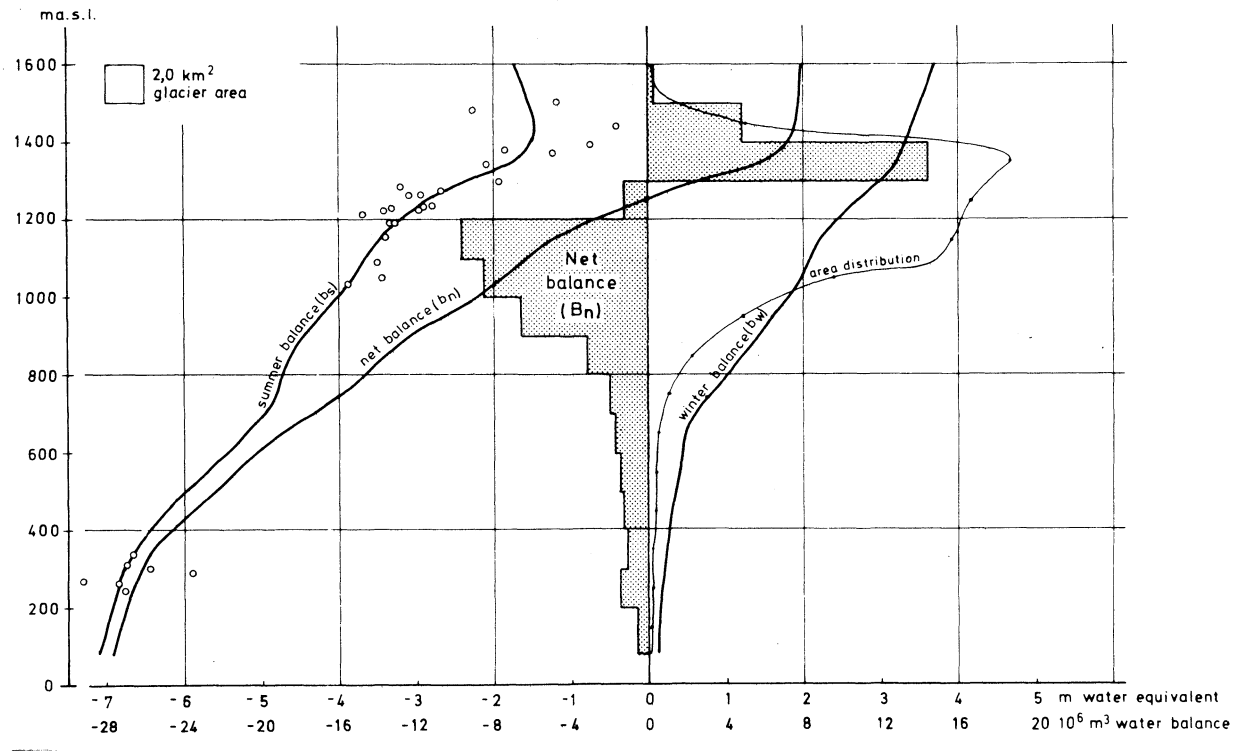


Fig. 25 Variasjonene av vinter-, sommer- og nettobalansen med høyden over havet, breens arealfordeling og arealverdier av nettobalansen i hvert 100 m høydeintervall.

Winter, summer and net balance in relation to elevation, glacier area distribution and net balance for every 100 m height interval.

E N G A B R E E N 1 9 7 8

Høyde intervall m o.h.	Areal S km²	Vinterbalanse B_w $10^6 m^3$	b_w m	b_w l/s km²	Sommerbalanse B_s $10^6 m^3$	b_s m	b_s l/s km²	Nettobalanse B_n $10^6 m^3$	b_n m	b_n l/s km²
1500-1594	0,12	0,436	3,63	115	0,198	1,65	52	0,238	1,98	63
1400-1500	2,51	8,553	3,41	108	3,722	1,48	47	4,831	1,93	61
1300-1400	9,35	30,259	3,24	103	15,772	1,68	53	14,487	1,56	50
1200-1300	8,55	23,230	2,72	86	24,520	2,87	91	- 1,290	-0,15	5
1100-1200	7,60	16,775	2,21	70	26,530	3,49	111	- 9,755	-1,28	41
1000-1100	4,66	9,314	2,00	63	17,816	3,82	121	- 8,502	-1,82	58
900-1000	2,46	3,851	1,57	50	10,455	4,25	135	- 6,604	-2,68	85
800- 900	0,94	1,140	1,21	38	4,371	4,65	147	- 3,231	-3,44	109
700- 800	0,50	0,400	0,80	25	2,400	4,80	152	- 2,000	-4,00	127
600- 700	0,37	0,168	0,45	14	1,943	5,25	167	- 1,775	-4,80	153
500- 600	0,27	0,108	0,40	13	1,553	5,75	182	- 1,445	-5,35	169
400- 500	0,21	0,063	0,30	10	1,313	6,25	198	- 1,250	-5,95	188
300- 400	0,17	0,043	0,25	8	1,122	6,60	214	- 1,105	-6,35	206
200- 300	0,22	0,043	0,19	6	1,510	6,86	218	- 1,467	-6,67	212
80- 200	0,09	0,014	0,16	5	0,632	7,02	223	- 0,618	-6,86	218
80-1594	38,020	94,397	2,48	79	113,857	2,99	95	-19,460	-0,51	16

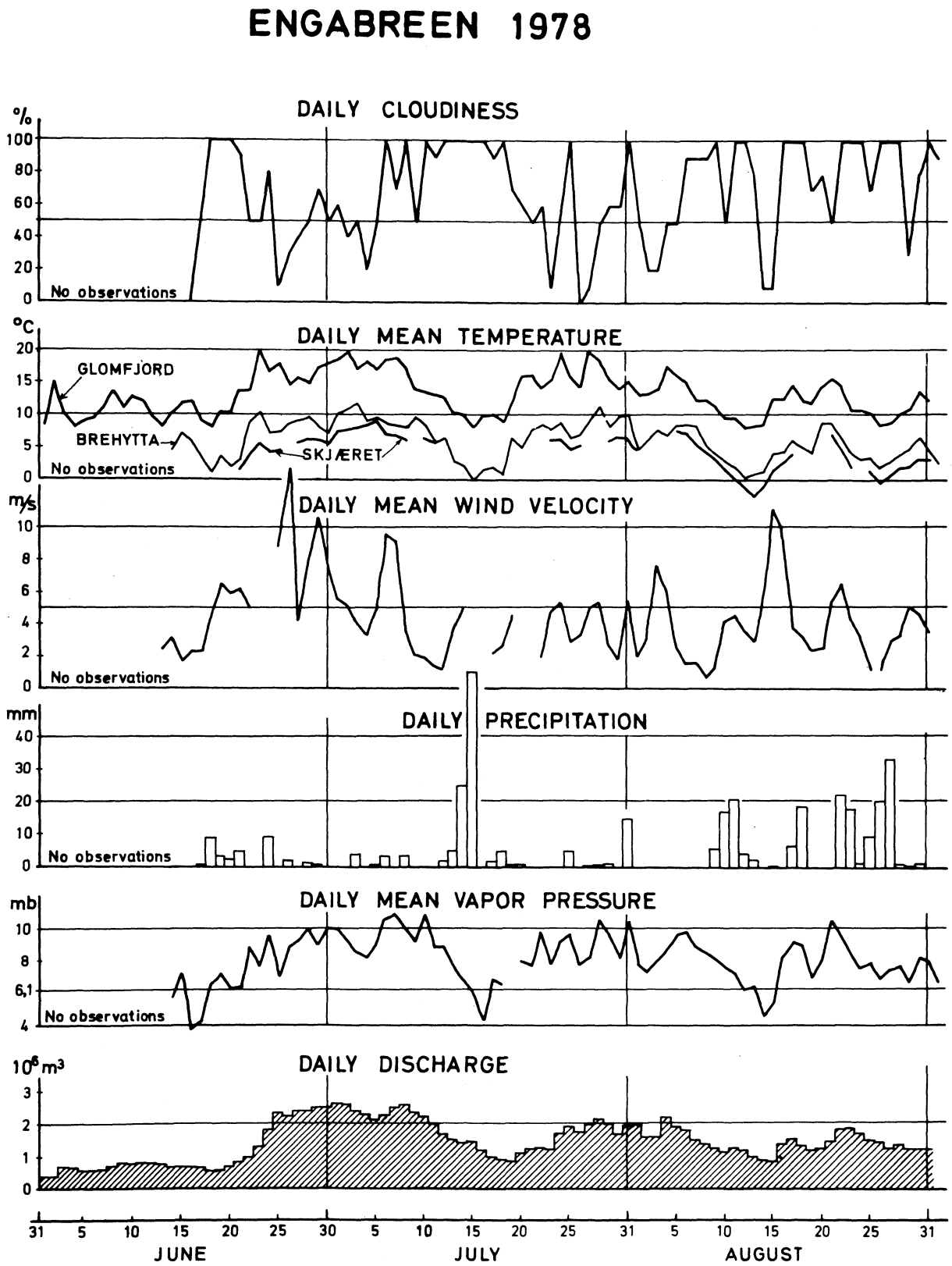


Fig. 26 Resultatene av de daglige meteorologiske observasjonene på Engabreen (1100 m o.h.) samt beregnet døgnavløp ved utløpet av Engavatn.

The daily meteorological observations at Engabreen (1100 m a.s.l.) and computed daily discharge at Engavatn.

bølget stråling. Disse målingene er behandlet i eget kapitel, mens et utvalg av de øvrige meteorologiske målingene er vist i fig. 26

Skydekket ble målt i 10-deler med tallet 10 som symbol for helt overskyet eller tåke. Middelet for observasjonsperioden var 6.6. Av hele perioden på 81 dager var bare 5 dager helt skyfrie, mens 26 dager var helt overskyet eller tåket. 32 dager hadde mindre enn 50% skydekke.

Midlere døgnlig vindstyrke (1100 m o.h.) over 75 døgn var 4.3 m/s. 23.juni ble høyeste døgnmiddelverdi målt med 13.6 m/s. Laveste døgnmiddel ble målt 8.august med 0.7 m/s.

Sommertemperaturen på stasjonen (1100 m o.h.) var relativt høy. For hele måleperioden var middeltemperaturen 6.1^{o}C, med høyeste døgnmiddel på 11.8^{o}C den 3.juli. Laveste døgnmiddeltemperatur ble målt 15.juli med 0°C. På Skjæret (1360 m o.h.) var temperaturmålingene ikke helt tilfredsstillende på grunn av mangler ved termografen. I alt ble temperaturen registrert i 52 døgn. Laveste døgnmiddelverdi ble målt 13.august med - 2.4^{o}C, mens høyeste ble målt 5.juli med 9.1^{o}C. Middeltemperaturen for 52 døgn ble 4.4^{o}C.

I en standard nedbørmåler (1100 m o.h.) ble det i alt målt 338 mm nedbør. Nedbøren fordelte seg med 29.9 mm i juni (18 døgn), 128.2 mm i juli (31 døgn) og 179.9 mm i august (31 døgn). Til sammenlikning falt det i Glomfjord i samme perioden (13.juni - 1.september) 86.9 mm nedbør og ved Engavatn 159.6 mm, henholdsvis 25% og 47% av brestasjonens nedbør.

Avrenning

Fra 1.juni til 1.september var total avrenning fra nedslagsfeltet 133.05 $\cdot$ $10^6 m^3$, målt ved utløpet av Engavatn. Dette gir et døgnlig middelavløp på 1.45 $\cdot$ $10^6 m^3$. Høyeste døgnavløp ble målt 1.juli til 2.63 $\cdot$ $10^6 m^3$. I juni, juli og august var månedsavløpene henholdsvis 32.12 $\cdot$ $10^6 m^3$, 56.01 $\cdot$ $10^6 m^3$ og 44.92 $\cdot$ $10^6 m^3$. Av hele Engavatns nedslagsfelt utgjør Engabreen 77%.

En sammenlikning av materialhusholdningen på de enkelte breer

Massebalansen ble i 1978 målt på 8 breer i Norge, hvorav 2 i Nord-Norge og 6 i Sør-Norge. For første gang ble det foretatt målinger på Svartfjelljøkulen, en liten bre i Vest-Finnmark,(v/Norsk Polarinstitutt). Dette vil gi et bedre regionalt bilde av Nord-Norge med hensyn til materialhusholdningen på breene. Resultatene av undersøkelsene vil bli publisert i Norsk Polarinstitutts årbok 1978.

For andre år på rad kom samtlige breer i Sør-Norge ut med negativ nettobalanse. Vinterakkumulasjonen på Hellstugubreen og Nigardsbreen var nær normalt (gjennom-

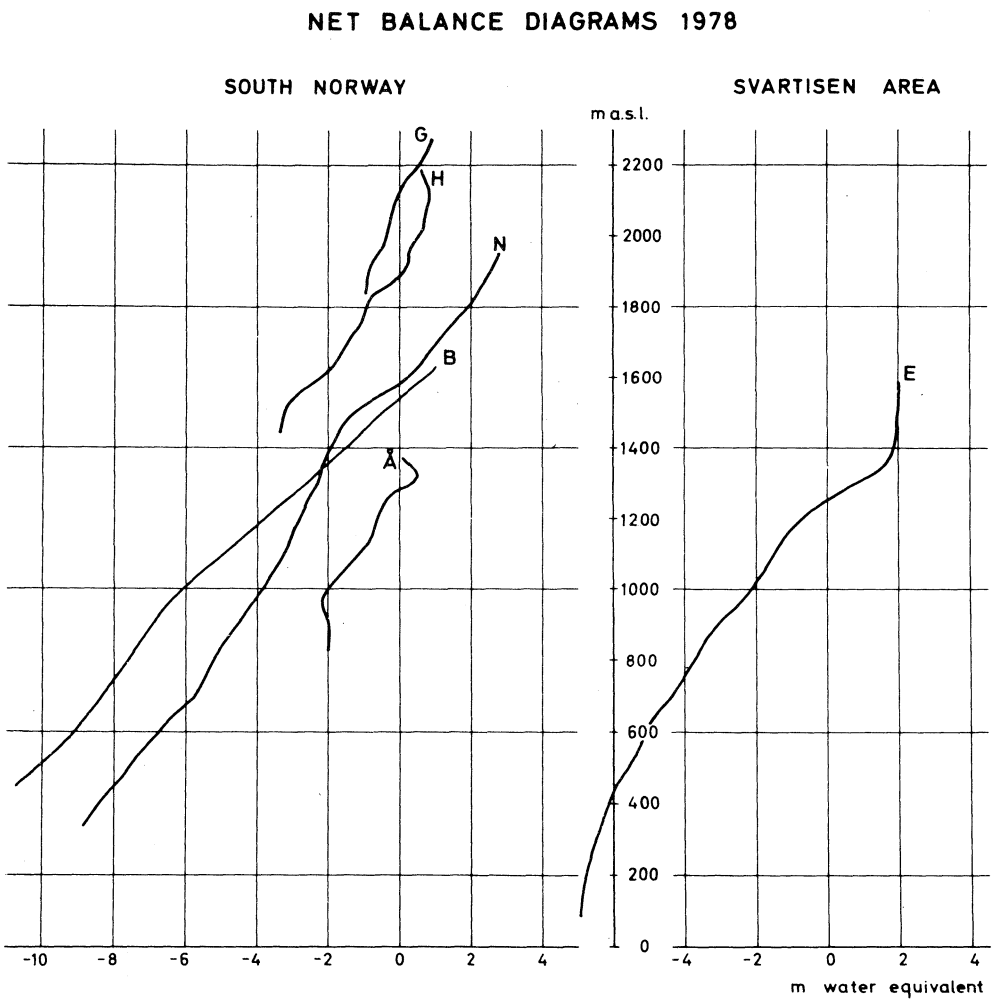


Fig. 27 Nettobalansekurver for 1978.

Net balance curves for 1978.

G = Gråsubreen, N = Nigardsbreen, B = Bondhusbreen, H = Hellstugubreen, Å = Ålfotbreen og E = Engabreen.

MASSEBALANSERESULTATER 1978

Bre	Areal	Vinterbalanse			Sommerbalanse			Nettobalanse			Likevekts-linje
	S	B_w		b_w	B_s		b_s	B_n		b_n	
	km^2	$10^6 m^3$	m	$l/s\ km^2$	$10^6 m^3$	m	$l/s\ km^2$	$10^6 m^3$	m	$l/s\ km^2$	m o.h.
Ålfotbreen	4.8	12.3	2.56	81	14.7	3.07	97	- 2.5	-0.51	-16	1290
Bondhusbreen	10.2	24.0	2.37	75	29.3	2.88	91	- 5.2	-0.51	-16	1540
Nigardsbreen	48.2	102.1	2.12	67	108.2	2.25	71	- 6.1	-0.13	- 4	1590
Hellstugubreen	3.3	3.5	1.05	33	5.3	1.59	50	- 1.8	-0.54	-17	1890
Gråsubreen	2.5	1.7	0.67	21	2.2	0.89	28	- 0.6	-0.22	- 7	2140
Storbreen	5.4	6.8	1.26	40	9.2	1.70	54	- 2.4	-0.44	-14	1815
Engabreen	38.0	94.4	2.48	79	113.9	2.99	95	-19.5	-0.51	-16	1250
Svartfjelljøkulen x											

x) Ennå ikke ferdig bearbeidet p.g.a. manglende data.
Resultatene vil bli publisert i Norsk Polarinstitutts årbok 1978.

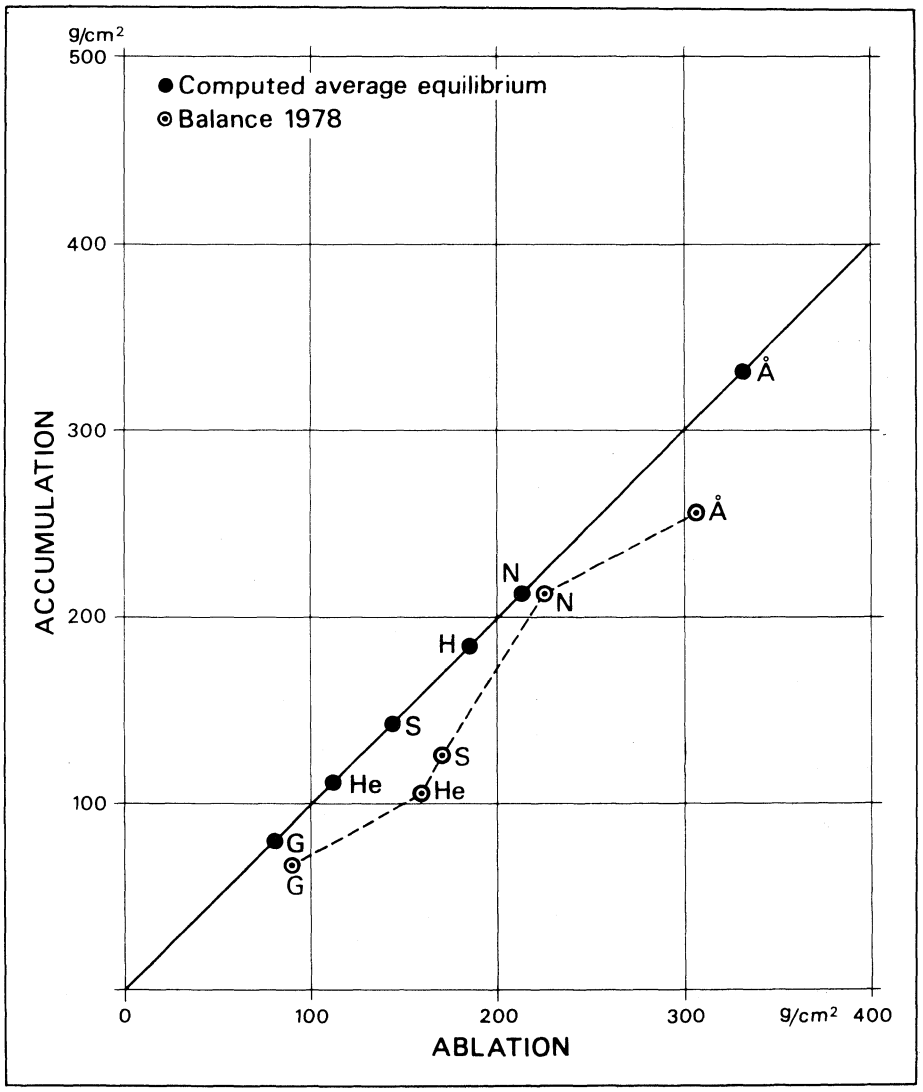


Fig. 28 Forholdet mellom vinter- og sommerbalansen i 1978 sammenlignet med et år med beregnet "normal" materialomsetning.

Relation between winter and summer balance in 1978 compared to a year with a computed "normal" mass exchange.

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

snittet for henholdsvis 15 og 16 års målinger), mens ablasjonen var litt høyere enn normalt (111 - 118%). På Gråsubreen var vinternedbøren 95% av normalt (målt siden 1963), mens ablasjonen var bare 80% av normalt. Dette førte likevel til et lite underskudd på -0.22 m, da midlere årlig nettobalanse siden 1963 er på -0.41 m. Grunnen til den negative balansen på Ålfotbreen er i første rekke liten vinterakkumulasjon (75% av normalt).

På Engabreen var vinteren relativt nedbørfattig, og breen mottok bare 78% av normalt (målt siden 1970). Med en varm sommer ble ablasjonen meget stor, og for første gang siden 1972 kom breen ut med negativ massebalanse.

Massebalanseresultatene er sammenstilt i tabell på s. 35 og fig. 27 og 28.

ENERGIBALANSEN PÅ ENGABREEN

Innledning

For å få bedre kjennskap til samspillet mellom klima og avsmelting på ulike partier av en bre, ble energibalansemålinger i 1978 utført både i snø-området (1100 m o.h.) og på bretunga (300 m o.h.) av Engabreen.

Observasjonsperioden var fra 15.juni til 30.august i snø-området, mens den på bretunga utgjorde tidsrommet 6.juli - 3.september.

Idet 78-undersøkelsene er nær identiske med dem fra tidligere år, henvises til Tvede (1975) for detaljerte opplysninger om metoder og instrumenter. Her skal bare nevnes at to Robitzsch aktinografer registrerte globalstrålingen, en plassert ved brehytta (1100 m o.h.), og en nær bretunga. Avsmeltingen ble registrert daglig ved hjelp av staker i snø-området, og ved ukentlige målinger av wirelengder på tunga.

Bortsett fra et par mindre tekniske vansker med aktinografskriverne, gikk observasjonene etter planen. Usikkerheten i de relative verdier for stråling og nonradiative faktorer er derfor vurdert, som i tidligere år, til 4% (jfr. tabellene I og II).

Resultater

Tabellene I og II gir de ukentlige verdier for de viktigste

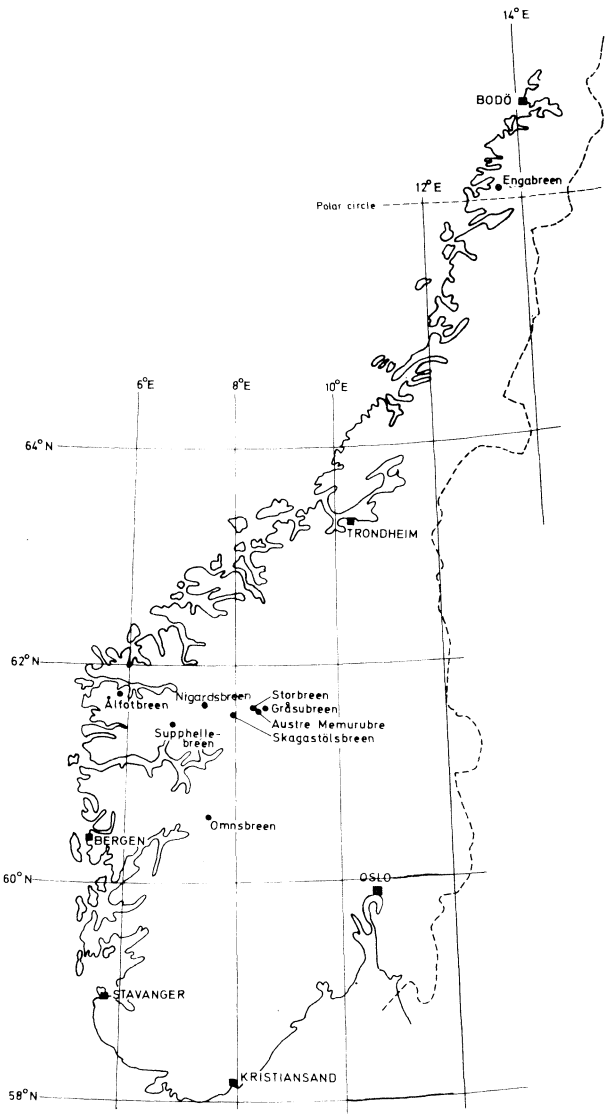


Fig. 29

Kart som viser beliggenheten av de breer hvor energibalanseundersøkelser er foretatt. I 1978 ble det gjort undersøkelser på Engabreen.

Map of Norway, containing the location of glaciers where heat balance investigations have been performed. In 1978 investigations are performed at Engabreen.

faktorene i energibalansen for henholdsvis snø-område og bretunge.

I snøområdet bidro strålingen med 43% til ablasjonen. Konveksjon pluss kondensasjon forårsaket 57%, mens nedbøren betydde mindre enn 1%.

På bretunga utgjorde strålingen 34%, konveksjon pluss kondensasjon 65%, mens nedbør også her bidro med under 1% til ablasjonen.

Idet observasjonsperioden for snø-området ikke helt faller sammen med observasjonsperioden for bretunga, kan ovennevnte verdier ikke uten videre sammenlignes. Imidlertid kan den sammenfallende perioden 6.juli - 30.august studeres. Den relative verdi for strålingen blir da 44% i snø-området, mens den på bretunga blir knapt 35% - altså en liten forskyvning.

TABLE I

ABLATION CONDITIONS ENGABREEN SNOW AREA 1100 M.A.S.L.

Period	Mean Albedo	Global Radiation	Net.Rad. absorbed by glacier	Ablation caused by Radiation	Ablation caused by Rain	Registered total Ablation	Relative heat supply by		
							Radiation	Convection + Condensation	Precipitation
day/month	%	cal/cm^2		g/cm^2			%		
15/6 - 21/6	63	3537	928	11.6	0.1	8.8	131.8	-32.5	0.7
22/6 - 28/6	63	3980	1091	13.6	0.1	49.8	27.3	72.5	0.2
29/6 - 5/7	62	4112	1183	14.8	0	41.6	35.6	64.4	0
6/7 - 12/7	62	2881	1035	12.9	0.1	45.1	28.6	71.2	0.2
13/7 - 19/7	68	2708	768	9.6	0	9.9	96.7	3.5	-0.2
20/7 - 26/7	62	3750	1065	13.3	0	34.2	38.9	61.1	0
27/7 - 2/8	60	3094	876	11.0	0.2	31.1	35.4	64.0	0.6
3/8 - 9/8	60	3296	898	11.2	0	26.9	41.6	58.4	0
10/8 - 16/8	62	2434	779	9.7	0.1	11.4	85.1	14.9	0
17/8 - 23/8	60	1762	700	8.8	0.4	19.4	45.4	52.5	2.1
24/8 - 30/8	61	1695	622	7.8	0.1	13.5	57.8	41.8	0.4
15/6 - 30/8	62	33249	9945	124.3	1.1	291.7	42.6	57.1	0.3

TABLE II

ABLATION CONDITIONS ENGABREEN 1978 GLACIER TONGUE 300 M.A.S.L.

Period	Mean Albedo	Global Radiation	Net.Rad. absorbed by glacier	Ablation caused by Radiation	Ablation caused by Rain	Registered total Ablation	Relative heat supply by		
							Radiation	Convection + Condensation	Precipitation
day/month	%	cal/cm^2		g/cm^2			%		
6/7 - 12/7	35	2295	1451	18.1	0.1	49.7	36.4	63.4	0.2
13/7 - 19/7	35	2369	1431	17.9	0.4	32.4	55.2	43.6	1.2
20/7 - 26/7	35	2949	1699	21.2	0.1	62.8	33.8	66.1	0.1
27/7 - 2/8	35	2476	1440	18.0	0.1	60.8	29.6	70.3	0.1
3/8 - 9/8	35	2467	1365	17.1	0	42.7	40.0	60.0	0
10/8 - 16/8	35	2009	1127	14.1	0.1	39.8	35.4	64.3	0.3
17/8 - 23/8	35	1381	878	11.0	0.4	47.0	23.4	75.7	0.9
24/8 - 30/8	35	1355	822	10.3	0.3	30.9	33.3	65.7	1.0
31/8 - 6/9	35	1319	808	10.1	0.1	36.6	27.6	72.1	0.3
6/7 - 6/9	35	18620	11021	137.8	1.6	402.7	34.2	65.4	0.4

En kan ellers merke seg at globalstrålingen i 300 m o.h. ser ut til å være ca. 80% av globalstrålingen i 1100 m o.h. på Engabreen. Både værlag og topografi bidrar til denne forskjellen. Når det gjelder netto tilført strålingsenergi, tyder undersøkelsene i 1978 på at snø-området mottar ca. 70% sammenlignet med bretunga. Albedo-forskjellen (nær 30%) er naturligvis hovedårsaken. Forskjell i langbølget stråling spiller en mindre rolle.

Ut fra den erfaring at ablasjonsforholdene på en og samme bre kan variere ganske kraftig fra år til år, skal mer omfattende kommentarer vente til enda 1 - 2 sommersesonger med observasjoner på Engabreen er over.

Tabell III gir en oversikt over årets energibalansemålinger på Engabreen, samt tidligere års målinger på norske breer.

TABLE III
ABLATION CONDITIONS ON GLACIERS IN NORWAY

Year of investigation	Period day/month	Glacier (See map)	Position °N °E m.a.s.l.	Ablation components %				Author (year)
				Radiation	Convection	Condensation	Rain and sublimation	
1963	12/6 - 18/6	Gråsubreen	61° 39'	98	2			T.Klemsdal
	27/7 - 9/8		08° 36' 1975	59	27	14		(1968)
1970	26/6 - 30/8	Austre Memurubre	61° 33' 08° 30'	67	33		< 1	S.Messel (1971b)
1971	15/6 - 6/9		ca.1900	77	23		< 1	(1973)
1955	6/7 - 8/9	Storbreen	61° 35' 08° 20' 1600	54	32	14	< 1	O.Liestøl (1967)
1954	May - Sept.	Skagastølsbreen	61° 30' 07° 50'	79	21			B.E.Eriksson (1959)
1955	May - Sept.		ca.1600	66	34			
1968	3/6 - 8/9	Omnsbreen	60° 39' 07° 30'	50	34	16	< 1	S.Messel (1971a)
1969	3/6 - 8/9		1540	55	31	14	< 1	
1972	15/6 - 6/9	Nigardsbreen	61° 43' 07° 08'	64	36		< 1	S.Messel (1974)
1973	22/6 - 6/9		1620	53	47		< 1	(1975a)
1974	22/6 - 6/9			77	23		< 1	(1975b)
1975	22/6 - 30/8			54	46		< 1	(1977a)
1976	15/6 - 30/8			64	36		1	(1977b)
1977	15/6 - 30/8			65	35		1	(1978)
1967	1/7 - 12/7	Supphellebreen	61° 30' 06° 48'	32	68			O.Orheim (1970)
	1/8 - 18/8			26	74			
	4/9 - 8/9		ca.70	14	86			
1970	1/6 - 14/9	Ålfotbreen	61° 45' 05° 40'	44	56		< 1	S.Messel (1971b)
1971	1/6 - 6/9			43	56		1	(1973)
1972	1/6 - 2/8		ca.1250	53	46		1	(1974)
1973	22/6 - 30/8	Engabreen	66° 40' 13° 50'	32 *	67		1	S.Messel (1975a)
1974	22/6 - 6/9			33 *	66		1	(1975b)
1975	22/6 - 30/8		850	48	52		< 1	(1977a)
1976	15/6 - 30/8			45	54		1	(1977b)
1977	15/6 - 30/8		1100	48	52		1	(1978)
1978	15/6 - 30/8			43	57		< 1	(1979)
1978	6/7 - 6/9		300	34	65		< 1	(1979)

* Area not representative for Engabreen (very strong catabatic winds).

LIKNINGER TIL BEREGNING AV NETTOBALANSEN FRA VÆRDATA

Innledning

Beregninger av nettobalansen på norske breer ved hjelp av data fra mer eller mindre nærliggende værstasjoner er tidligere gjort for Storbreen i Jotunheimen av Liestøl (1967). Liestøl beregnet vinterbalansen og sommerbalansen hver for seg ved å korrelere disse grafisk mot h.h.v. vinternedbøren (1.september - 31.mai) og sommertemperaturen (1.mai - 30.september) målt i Bergen. Ved hjelp av de etablerte korrelasjonskurvene, beregnet han så vinter-, sommer- og nettobalansen for Storbreen for hvert år tilbake til 1862, dvs. så langt tilbake det finnes værdata fra Bergen.

Dybvadskog (1965) foretok en sammenlikning mellom massebalansen på Tverråbreen og meteorologiske data fra 5 meteorologiske stasjoner, og fant en viss korrelasjon, men ikke så god at han ville bruke metoden til videre beregninger.

Forsøk på å prognosere breavløpet i sommersesongen ble gjort av Østrem (1968, 1970) og Roald (1971) ved å utvikle modeller for daglig totalavløp, basert på meteorologiske parametre fra nærliggende stasjoner. Man fant da bl.a. at vinden spiller en relativ stor rolle for døgn-avsmeltningen ved en del av de undersøkte breene, ved siden av lufttemperaturen.

Siden 1963 er det blitt utført massebalansemålinger på et stort antall breer i Sør-Norge. For de fleste breer finnes bare en 5 - 6 års serie med observasjoner, men på noen breer har målingene pågått kontinuerlig. For 5 av breene som har lengst måleserier er det her forsøkt etablert et samband mellom den målte nettobalansen og data fra nærliggende værstasjoner (tabell 1). Om et slikt samband kan etableres med tilfredsstillende resultater, kan vi deretter beregne disse breenes årlige nettobalanseverdier så langt tilbake det kan skaffes data fra de værstasjonene som brukes. Ut fra de beregnete nettobalanseverdiene kan vi videre brekorrigere målt avløp fra breen, dvs. beregne hva avløpet i elva nedenfor breen ville blitt uten breens innflytelse. En slik anvendelse vil bli vist i en kommende glasiologisk årsrapport.

Teori og metodikk

Nettobalansen (b_n) er forskjellen mellom vinterbalansen (b_w) og sommerbalansen(b_s). Vinterbalansen utgjøres i det alt vesentligste av direkte nedbør på breen i akkumulasjonsperioden. Denne periodens varighet vil vesentlig avhenge av høydeforholdene på breen, men vil normalt ha startet i begynnelsen av oktober og ender en gang i mai. En enkel korrelering av b_w mot målt nedbør i perioden 1.oktober - 30.mai (P) er derfor fysisk fornuftig for de breer vi behandler. Sommerbalansen, derimot,

Tabell 1

Bre	År anvendt til kalibrering av likning	Værstasjoner som er testet med h.o.h. angitt
Ålfotbreen	1963 - 1976	Bergen (T og P) (40m) Botnen i Førde (P) (237m) Førde i Sunnfjord II (T) (37m)
Nigardsbreen (Jostedalsbreen)	1968 - 1976	Bergen (T og P) (40m) Jostedal (P) (370m) Bjørkehaug i Jostedal (T) (324m)
Storbreen	1949 - 1976	Bergen (T og P) (40m) Jostedal (P) (370m) Bjørkehaug i Jostedal (T) (324m) Luster Sanatorium (T) (484m)
Rembesdalsskåki (Hardangerjøkulen)	1964 - 1976	Bergen (T og P) (40m)
Gråbreen/ Midtre Folgefonni (i teksten kalt Folgefonni)	1964 - 1968, 74 - 75 1970 - 71	Bergen (T og P) (40m) Bondhus (P) (37m) Indre Matre/Upsangervatn (T) (60m)

influeres av flere værparametre, hvorav lufttemperatur, stråling, vindstyrke og luftfuktighet er de viktigste. Også breoverflatens karakter til enhver tid kan ha en betydning, spesielt albedoen. En fysisk riktig beregning av b_s skulle derfor inkludere alle disse parametrene i form av et fullstendig varmebalansebudsjett. I praksis er dette både arbeidskrevende og ofte umulig å gjennomføre, da de nødvendige data ikke finnes. Verdier for b_s må derfor bestemmes ut fra meget forenklete modeller hvor bare de viktigste og lettest tilgjengelige parametrene inngår. I tillegg må det være parametre som er godt korrelert over større avstander, både horisontalt og vertikalt. Roald (1973,1977) har analysert sambandet mellom en del værparametre målt både på faste stasjoner i lavere strøk og på sommerstasjoner i breenes høydenivå. Han fant ut at lufttemperaturen var den parameter som var klart best korrelert mellom stasjonene. Dessuten var avløpet målt nedenfor breen i visse tilfeller bedre korrelert med temperaturmålinger i lavere strøk enn med målinger ved breene. Temperaturmålinger er dessuten tilgjengelige for mer enn 100 år ved noen lavtliggende stasjoner (f.eks. fra Bergen). Temperaturmålingene påvirkes normalt også lite ved lokale flyttinger av observasjonsstedet sammenliknet med, f.eks. nedbøren. Sommerbalansen er derfor forsøkt beskrevet ut fra lufttemperaturen alene.

Lufttemperaturen er testet i tre varianter; som middeltemperaturen for perioden 1.mai - 30.september, som middeltemperaturen for perioden 1.juni - 31.august og som middeltemperaturen for enkelt-månedene juni, juli og august. De likningene som er testet kan derfor settes opp slik:

(1) $b_n = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot T_5$

(2) $b_n = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot T_3$

(3) $b_n = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot T_{juni} + c_4 \cdot T_{juli} + c_5 \cdot T_{aug.}$

b_n = spesifikk nettobalanse for hele breen

P = nedbørsum for vinterperioden (1.oktober - 31.mai)

T_5 = middeltemp. for perioden 1.mai - 30.september

T_3 = middeltemp. for perioden 1.juni - 31.august.

T_{juni}, T_{juli}, $T_{aug.}$ = middeltemp. for hver sommermåned

c = konstanter.

Av tabell 1 framgår det for hver bre hvilke værstasjoner som er testet som input i likningen. Data fra Bergen er testet for alle breene. Dessuten er det tatt ut noen lokale værstasjoner med lange observasjonsserier nær breene, med unntak for Hardangerjøkulen hvor bare Bergen er benyttet. For Ålfotbreen er P-verdiene fra perioden 1.oktober - 30.april da vintersesongen normalt avsluttes rundt 1.mai på denne mer lavtliggende breen.

Analysene er utført ved å bruke trinnvis regresjonsanalyser ved hjelp av et data-program tilrettelagt for NVE's CDC - 3200 av statshydrolog Lars Roald. Programmet korrelerer først den avhengige variable (b_n) mot hver enkel av de uavhengige variable og bestemmer deretter korrelasjonslikningen med 1 variabel, 2 variable, 3 variable osv. inntil det ikke lenger oppnås noen forbedring ved å trekke inn flere variable. Fisherfraktilen regnes ut for resultatet og for hver avhengig variabel slik at signifikansnivået kan bestemmes for de variable som er tatt med i likningene.

Resultater.Diskusjon.

Vinterbalansen (b_w) kunne bestemmes fra vinternedbøren i Bergen (P) med en korrelasjonskoeffisient (r) mellom 0.68 til 0.94 for de enkelte breene. Ved bruk av lokale værstasjoner ble det oppnådd r-verdier mellom 0.78 og 0.88. Bruk av lokale værstasjoner synes ikke å bidra til noen vesentlig bedring i korrelasjonen i noen tilfeller; for noen breer ble resultatet dårligere enn ved bruk av P-data fra Bergen.

Med unntak for Ålfotbreen, var sommerbalansen (b_s) bedre korrelert med T_3 enn med T_5; korrelasjonen lå her mellom 0.69 og 0.90. Heller ikke for bestemmelsen av b_s var det noen påviselig bedring ved å bruke lokale stasjoner i stedet for data fra

Bergen. Korrelert mot hver enkelt måned kunne b_s best bestemmes fra middeltemperaturen i august for alle breene med unntak for Folgefonni hvor juni var litt bedre. Korrelasjonen lå mellom 0.60 og 0.76. Det var ikke forbausende at værforholdene i august synes å være såvidt bestemmende for hele sommerens totale avsmelting. I august vil breoverflatens albedo normalt være lavest over hele breen og de smelteprosessene som er avhengige av albedoen vil være maksimalt effektive.

Tabell 2 Best bestemte likning ved bruk av værdata fra Bergen eller fra lokale stasjoner

Brenavn	Værstasjon(er) brukt	Likning[x)]	Multippel Korrelasjons-koeff.	Signifikansnivå i %	
				i resultat	høyest i variable
Ålfotbreen	Bergen	$b_n = 728 + (3.21 \pm 0.56)\,P - (91 \pm 35)\,T_5$	0.89	5	$P < 5$ $T < 25$
Ålfotbreen	P = Botnen T = Førde	$b_n = 663 + (1.61 \pm 0.31)\,P - (68 \pm 21)\,T_3$	0.90	5	$P < 5$ $T < 10$
Nigardsbreen	Bergen	$b_n = 1351 + (1.02 \pm 0.33)\,P - (116 \pm 24)\,T_5$	0.95	5	$P < 10$ $T < 5$
Nigardsbreen	P = Jostedal T = Bjørkehaug	$b_n = 609 + (1.15 \pm 0.53)\,P - (57 \pm 13)\,T_3$	0.94	5	$P < 25$ $T < 5$
Storbreen	Bergen	$b_n = 475 + (0.89 \pm 0.19)\,P - (45 \pm 7)\,T_3$	0.86	5	$P < 5$ $T < 2.5$
Storbreen	P = Jostedal T = Bjørkehaug/ Luster San.	$b_n = 362 + (0.93 \pm 0.28)\,P - (39 \pm 7)\,T_3$	0.84	5	$P < 10$ $T < 5$
Hardangerjøkulen	Bergen	$b_n = 693 + (1.56 \pm 0.29)\,P - (66 \pm 12)\,T_3$	0.93	5	$P < 5$ $T < 5$
Folgefonni	Bergen	$b_n = 444 + (2.16 \pm 0.40)\,P - (54 \pm 17)\,T_3$	0.92	10	$P < 5$ $T < 10$
Folgefonni	P = Bondhus T = Indre Matre	$b_n = 324 + (2.15 \pm 0.39)\,P - (44 \pm 14)\,T_3$	0.93	10	$P < 5$ $T < 10$

x) b_n i cm, P i cm og T i ^oC

I tabell 2 er satt opp de best bestemte likninger ved bruk av værdata fra Bergen eller lokale værstasjoner for hver enkelt bre. Likninger av formen:

$$b_n = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot T_3$$

ble valgt ut i de aller fleste tilfellene. Bare for Ålfotbreen og Nigardsbreen ga bruk av T_5 - verdier fra Bergen best resultat. Dette er forståelig da disse to breene har hele, eller store deler, av sitt breareal i et lavere nivå enn de andre breene. Smeltesesongen vil derfor normalt starte tidligere enn 1.juni og avsluttes seinere enn 31.august.

Ellers kan vi konstatere at bruk av værdata fra lokale stasjoner ikke synes å gi nevneverdig bedre korrelasjonskoeffisienter for noen av breene enn det som oppnås ved bruk av værdata fra Bergen. For et par breer synes de lokale stasjonene til og med å gi litt dårligere likninger. Dette resultatet indikerer at nedbørs- og lufttemperaturverdier for de relativt lange periodene som disse parametrene er

summert over, er høyt korrelert innen det området de aktuelle breene befinner seg. Dette området av Vestlandet strekker seg fra Hardangerfjorden til Nordfjord og fra kysten til vannskillet mot Østlandet.

I fig.30 er de likningene i tabell 2, som baseres på værdata fra Bergen, brukt til å sammenlikne beregnete og målte b_n-verdier i kalibreringsperioden, samt for 1977 og 1978. For Folgefonni er det også beregnet verdier for år med manglende massebalansemålinger (1969, 1972, 1973, 1976).

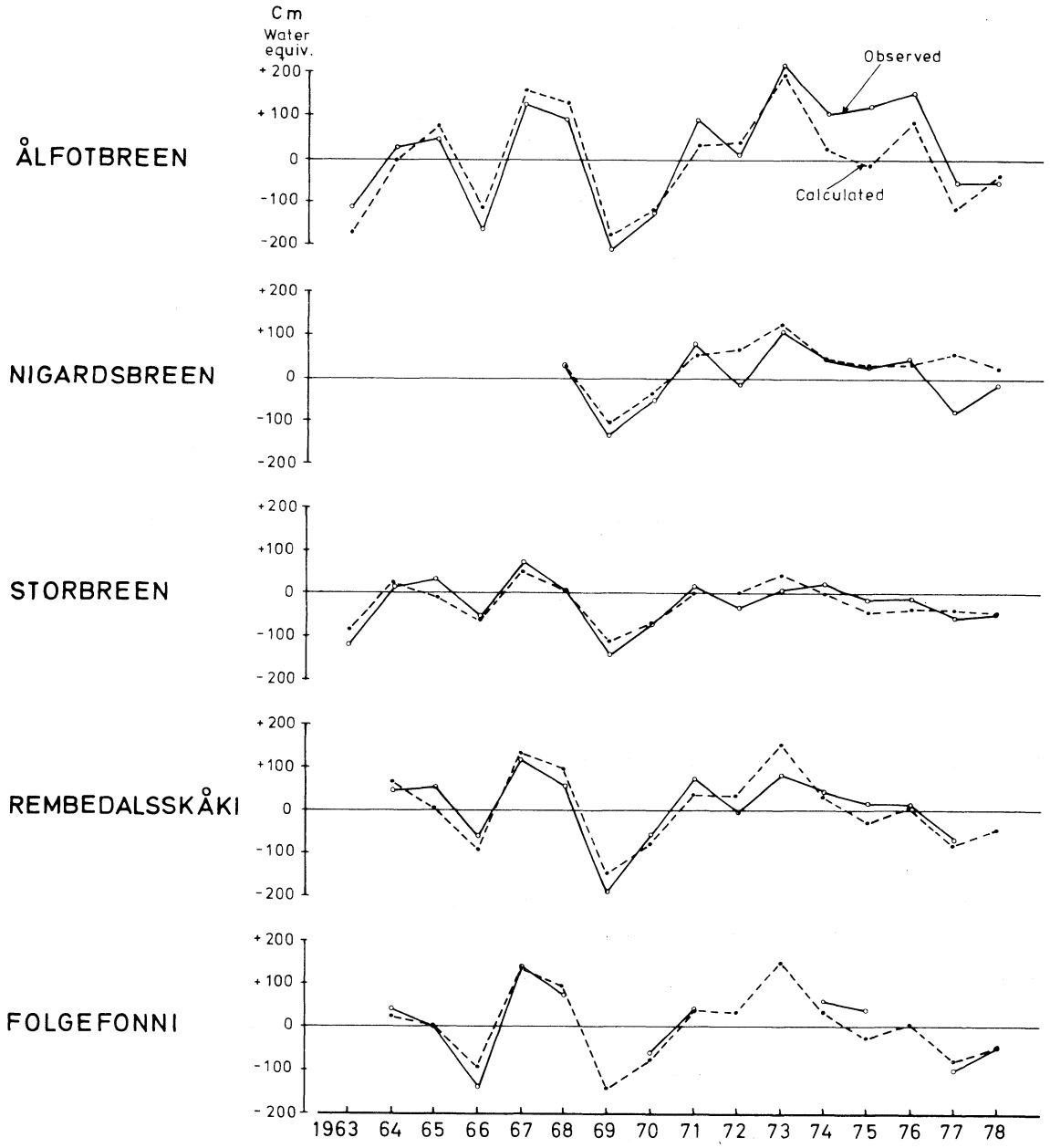


Fig. 30 Målte og beregnete nettobalanseverdier for de årene som er brukt til bestemmelse av likningene (t.o.m. 1976), samt for balanseårene 1977 og 1978. For Folgefonni er det også beregnet verdier for år med manglende massebalansemålinger.

Observed and calculated values of net balance.

Tabell 3 Beregnet nettobalanse (b_n) i cm for to uavhengige år. Værdata fra Bergen.

Bre	1977		1978	
	beregn.	målt	beregn.	målt
Ålfotbreen	-115	- 56	-41	-51
Nigardsbreen	58	- 77	18	-13
Storbreen	- 43	- 54	-46	-44
Hardangerjøkulen	- 39	- 72	-36	
Folgefonni	- 74	-100x)	-41	-51x)

x) Målte verdier fra Bondhusbreen, ca. 6 km SW for Gråbreen.

Bruk av likningene

Som nevnt i innledningen kan slike korrelasjonslikninger brukes til å bestemme nettobalansen bakover i tid, eller motsatt, framover i tid etterat en måleserie er avsluttet. Dessuten kan likningene brukes til å komplementere en ufullstendig måleserie,slik det er gjort for Folgefonni i Fig.30. Forutsetningene for dette er imidlertid at:

(i) likningene er godt nok bestemt

(ii) at breens arealfordeling er tilnærmet den samme som i den periode likningene ble bestemt for

(iii) at værstasjonene som brukes også opprettholdes i framtida.

Den første forutsetningen må vurderes ut fra de oppnådde korrelasjonskoeffisienter og signifikansnivåer. Dessuten gjelder vanlige statistiske forutsetninger, bl.a. om at den avhengige variable er tilnærmet normalfordelt. I praksis vil dette si at kalibreringsperioden må inneholde år med flere negative og positive b_n-verdier. Dersom den andre forutsetningen ikke holder, må det innføres korreksjoner for endret arealfordeling. Dersom det f.eks. skal beregnes årlige nettobalanseverdier for Nigardsbreen, så vet vi at denne breens areal har endret seg så meget at nettobalansen f.eks. i 1940 ville blitt vesentlig mer negativ enn i 1970, under forutsetning av identiske værforhold disse to årene. Arealendringer er breens måte å tilpasse massebalansen til endrete klimaforhold. Disse arealendringene må vi derfor ta hensyn til ved beregninger utover den perioden likningene er bestemt for. Hvis ikke vil de beregnete b_n-verdiene bli gradvis mer upålitelige.

I tabell 3 er de antatt beste likningene blitt brukt til å beregne b_n-verdiene for balanseårene 1977 og 1978. Værdataene som benyttes er fra Bergen. De målte b_n-verdiene fra 1977 og 1978 er ikke blitt benyttet ved kalibreringen av likningene

og en sammenlikning av målte og beregnete b_n-verdier kan derfor gi en pekepinn på hvor godt bestemt likningene er.

Resultatene må generelt sies å være tilfredsstillende tatt i betraktning av at usikkerheten i de målte b_n-verdiene antas å være $\pm$ 20 - 30 cm. Et unntak er resultatet for Nigardsbreen i 1977 hvor likningen gir en klar positiv b_n-verdi, mens det ble målt en klart negativ nettobalanse. Brukes derimot likningen basert på lokale værstasjoner, så blir det beregnete b_n-resultatet for 1977 -38 cm, hvilket er mer i samsvar med det målte.

Generelt må Nigardsbreen regnes å være den breen som er vanskeligst å få tilpasset en god likning til. Grunnen til dette er:

i) store høydedifferanser (300 - 2000 m o.h.) som gir store variasjoner i lengden av vinter- og sommersesongen innen brearealet
ii) et stort areal (40 km^2) kombinert med store snømengder i høyere områder.

Dette medfører igjen at pålitelige målinger er vanskelig å få utført over hele breen. For noen år, særlig år med store snømengder, er det store forskjeller i de målte massebalanseverdiene fra Nigardsbreen sammenliknet med andre breer på Vestlandet. Noen av disse forskjellene kan nok forklares ut fra en større usikkerhet i massebalansemålingene på Nigardsbreen. En ukjent faktor er også den evt. vindtransport av snø som foregår fra breområdene vestenfor over til Nigardsbreens dreneringsområde. Det er framsatt ideer om at denne transporten kan være betydelig enkelte vintre og da særlig i vintre med mye uvær fra vest. Om dette er tilfelle, vil en enkel korrelering av b_w mot P bli ufullstendig.

Oppsummering

For 5 breer i Sør-Norge hvor massebalansemålinger har pågått en del år, er det etablert korrelasjonslikninger mellom målt nettobalanse og noen kombinasjoner av vinternedbør- og sommertemperaturdata fra forskjellige værstasjoner. Samme type likning viste seg å kunne anvendes på alle de aktuelle breene med varierende parameterkonstanter for hver enkelt bre. Bruk av data fra værstasjoner nær breene (lokalstasjoner) viste seg ikke å gi nevneverdig bedre resultater enn ved bruk av tilsvarende data fra Bergen. Dette gjelder tilsynelatende uavhengig av avstanden fra breene til Bergen. Likningene som er etablert på grunnlag av massebalansedata t.o.m. 1976 er brukt til å beregne nettobalansen for 1977 og 1978 og beregningsresultatene er sammenliknet med de målte verdiene.

Dersom de etablerte likningene ansees gode nok, kan de brukes til å beregne nettobalanseverdier bakover og framover i tid dersom en del spesifiserte forutsetninger er oppfylt. Dette kan igjen danne grunnlaget for en brekorrigering av målte avløp ved brepåvirkete avløpstasjoner i det aktuelle området.

BRIMKJELEN

Leirdøla kraftverk i Jostedalen er nå ferdig og satt i drift. Oppfyllingen av Tunsbergdalsvannet, som er demmet opp, begynte 1. juni 1978. Vannets nedslagsfelt er 140 km^2, og 57 km^2 er bredekket. Av dette utgjør Tunsbergdalsbreen, som er den største utløperen fra Jostedalsbreen, 48 km^2.

Når magasinet er fullt, er Tunsbergdalsvannet ca. 8 km langt, og det er bare 6-800 m fra vannet og inn til fronten av Tunsbergdalsbreen, som ligger 520 m o.h.

Vel 3 km ovenfor brefronten på breens vestside ligger den bredemte sjøen Brimkjelen, som gjerne er blitt tappet en gang i året. De siste ti-årene har Tunsbergdalsbreen gått mye tilbake. Breens tykkelse ved Brimkjelen er redusert med 40-50 m, og flommene har derfor vært små. Ifølge Rekstad (1904) var Brimkjelen 100 m dyp i 1900. Ifølge Mottershead & Collin (1976) ble bresjøens areal redusert fra ca. 565 dekar i 1900 til ca. 160 dekar i 1957. Fram til 1973 var arealet ytterligere redusert til ca. 90 dekar. Det er også gjort beregninger som viser at Brimkjelens høyeste vannstand er sunket fra 855 m o.h. i 1937 til 794 m o.h. i 1973. (Mottershead & Collin 1976, s. 503).Den største flommen man kjenner til, fant sted i 1926 da 25-30 $\cdot$ $10^6 m^3$ ble tappet ut (Liestøl 1956), og det ble gjort stor skade. Den største uttapningen i de senere år var i 1962 med 11.5 $\cdot$ $10^6 m^3$. (Mottershead & Collin 1976, s. 498).

Den 13. juli 1978 ble Brimkjelen undersøkt av folk fra Brekontoret. Den var da nylig blitt tappet, og det var bare et vannspeil på ca. 50 m^2 i bunnen. Ifølge det topografiske kartet i målestokk 1: 50 000 (kartblad 1418 III - Jostedalen) som er konstruert fra flybilleder tatt i 1966, ligger bunnen av Brimkjelen på 750 m o.h. og den er 50-70 m dyp. Ved besøket 13. juli var strandlinjen fra høyeste vannstand godt synlig, og man fikk derfor en god oversikt over vannvolumet som var tappet ut. Denne strandlinjen lå omtrent 10 m under brekanten. Brimkjelens overflate i tapningsnivået ble anslått til 100-120 dekar og høyden fra bunnen og opp til strandlinjen til ca. 40 m. Antar vi at Brimkjelen er kjegleformet, blir volumet 1.3 - 1.6 $\cdot$ $10^6 m^3$. Det er da ikke tatt hensyn til de store ismasser som lå igjen i Brimkjelen (se fig. 31), og volumet av den uttappede vannmengde er beregnet til mellom 1.0 og 1.5 $\cdot$ $10^6 m^3$.

Tunsbergdalsvannet magasin er ca. 8 km^2 ved høyeste regulerte vannstand, og en tømming av Brimkjelen på 1.5 $\cdot$ $10^6 m^3$ tilsvarer en stigning på 19 cm i magasinet.

Tapningen av Brimkjelen har normalt vart 2-3 uker med en akselererende økning mot maksimum (Liestøl 1956, s. 134), og kortere tømming enn ett døgn kan vanskelig tenkes. En liten tømming i august 1973 på ca. 0.2 $\cdot$ $10^6 m^3$ skjedde i løpet av ett døgn, og vannstanden i Brimkjelen sank da med 21 m (Mottershead 1975). Dammen i

Fig. 31 Brimkjelen 13.juli 1978, like etter uttapning.

Brimkjelen on July 13, 1978, a few days after drainage of the ice-dammed lake.

Tunsbergdalsvann er bygget for å tåle en uttapning fra Brimkjelen på 27 · $10^6 m^3$ i løpet av ett døgn. Dette er samme mengde som ble tappet under storflommen i 1926. Dette tilsvarer en stigning i Tunsbergdalsvannet på 3.38 m.

Hver gang Brimkjelen har blitt tømt, har vannet brutt seg vei under isen på grunn av det store hydrostatiske trykket og varmeinnholdet i vannet. Men man kan også tenke seg at vannet ikke tvinger seg frem under breen, men at det renner over kanten av breen og graver seg ned gjennom isen og tømmer sjøen slik som det skjedde ved Rembesdalsvann i 1897 (Liestøl 1956 s. 128). Men det vil sannsynligvis ta tid for vannet å skjære seg ned i isen og danne et stort avløp, slik at tapning på den måten ikke vil gå så raskt, og dermed vil flommen bli mindre.

Beregninger som er utført av Vassdrags- og Havnelaboratoriet (VHL 1975) viser at ved et naturlig avløp fra Brimkjelen på 27 · $10^6 m^3$ pr. døgn med startvannstand i magasinet på HRV (høyeste regulerte vannstand) og med en vannføring Q = 900 m^3/s i startfasen vil kulminasjonsvannstanden bli 1.79 m over HRV etter 12 timer. Kommer flommen på en vannstand 0.50 m over HRV, vil kulminasjonsvannstanden bli 2.14 m over HRV etter 12 timer. Forutsatt konstant avløp fra Brimkjelen (312 m^3/s) kulminerer flommen etter 24 timer på 1.42 m over HRV ved en startvannstand på HRV.

Dammen er bygget spesielt for å tåle store flommer. Dammens kjerne går 3 m over HRV, og det er 5 m fra overløpet til damkronen. Brimkjelens volum i dag skulle derfor ikke tyde på noen fare for noen katastrofeartet uttapning.

I perioden 1966-72 utførte Brekontoret massebalansemålinger på Tunsbergdalsbreen. På Nigardsbreen, som ligger nord for Tunsbergdalsbreen, har Brekontoret utført massebalansemålinger siden 1962, og disse målingene pågår fremdeles. Begge disse breene er sydøstlige utløpere fra Jostedalsbreen, de ligger i samme høydeinterval og er omtrent like store. Selv om arealfordelingen er litt forskjellig (Tunsbergdalsbreen har lavere middelhøyde), er det mulig å gjøre korrelasjoner mellom disse to.

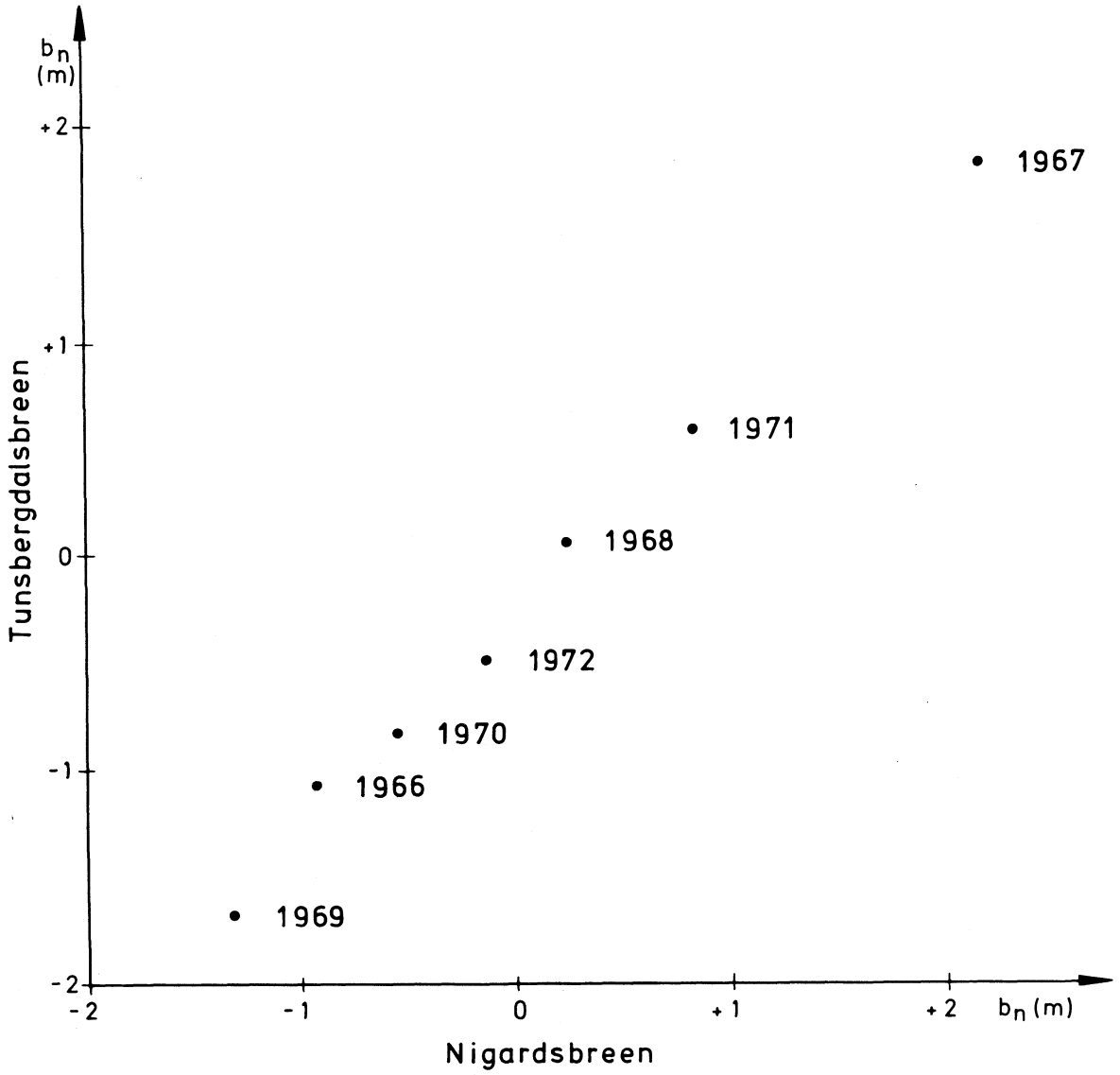


Fig. 32 En sammenligning mellom Nigardsbreens og Tunsbergdalsbreens nettobalanse (m vannverdi) i perioden 1966-72.

A comparison between the net balance at the two glaciers Nigardsbreen and Tunsbergdalsbreen (in m water equivalent) for the period 1966-72.

År	Nettobalanse (m vannverdi)			Likevektlinjens høyde (m o.h.)		
	Nigards-breen	Tunsberg-dalsbreen	Diffe-ranse	Nigards-breen	Tunsberg-dalsbreen	Diffe-ranse
1966	- 0.92	- 1.09	0.17	1700	1640	60
1967	+ 2.16	+ 1.79	0.37	1310	1160	150
1968	+ 0.22	+ 0.04	0.18	1550	1270	280
1969	- 1.31	- 1.69	0.38	1850	1700	150
1970	- 0.56	- 0.84	0.28	1650	1590	60
1971	+ 0.82	+ 0.57	0.25	1400	1240	160
1972	- 0.14	- 0.50	0.36	1570	1490	80

Tabellen viser at det i de 7 årene det er gjort målinger på begge breene, har nettobalansen på Nigardsbreen vært ubetydelig større enn på Tunsbergdalsbreen. Forskjellen er svært liten og varierer mellom 17 og 38 cm i vannverdi. I de samme årene har likevektslinjen på Nigardsbreen ligget mellom 60 og 280 m høyere enn på Tunsbergdalsbreen.

Målingene på Nigardsbreen i fremtiden vil derfor kunne forutsi en eventuell fremgang for Tunsbergdalsbreen og en økning av Brimkjelens volum, og dermed muligheten for en uttapning av et større omfang enn i dag. En slik stor uttapning vil imidlertid kunne forhindres ved å sprenge en tunnel, hvor avløpet fra Brimkjelen kan gå kontinuerlig.

SUBGLASIAL HYDROLOGI PÅ BONDHUSBREEN

Innledning

Bondhusbreen er en nordvestlig utløper av Folgefonnas sørligste iskappe. Den drenerer et område som strekker seg fra Folgefonna's toppområde (ca.1630 m o.h.) ned til ca. 450 m o.h. i Mauranger i Hardanger. Arealet er vanskelig å avgrense på det eksisterende kartgrunnlag, men det antas at ca. 10 km^2 drenerer direkte, mens ytterligere ca 1 km^2 drenerer via Holmavatn.

Under utbyggingen av vannkraftreservene i området ble det bestemt at man skulle forsøke å ta inn Bondhusbreens vann under isen, for å kunne utnytte det naturlige fall ned til magasinet. Smelteboring fra breoverflaten viste at breen var 150 - 170 m tykk i området hvor man ønsket å ta inn vannet. Etter at en tunnel var bygget inn under breen, ble det utført en rekke sondérboringer gjennom fjellet opp til bresålen for å få bedre kjennskap til den subglasiale topografi i området. Tre forsenkninger i dalbunnen ble funnet, hvorav to var meget markerte.

Også anleggsmessig var disse to de som var lettest tilgjengelige, fordi det var liten fjelloverdekning opp til bresålen. Etter detaljundersøkelse av de aktuelle områdene fra istunneler, ble det laget inntakssjakter begge steder (inntak 1 og 2, fig. 33). Håp og beregninger ble imidlertid ikke innfridd når det gjaldt vanntilgangen. Det ble derfor gjennomført ytterligere undersøkelser og anleggsarbeider, som førte til nytt inntak ved punkt 3 våren 1978. Her ble avløpet fra Holmavatn funnet, og selv i kalde vinterperioder gikk vannføringen (størrelsesorden 50 l/s) i et konsentrert løp.

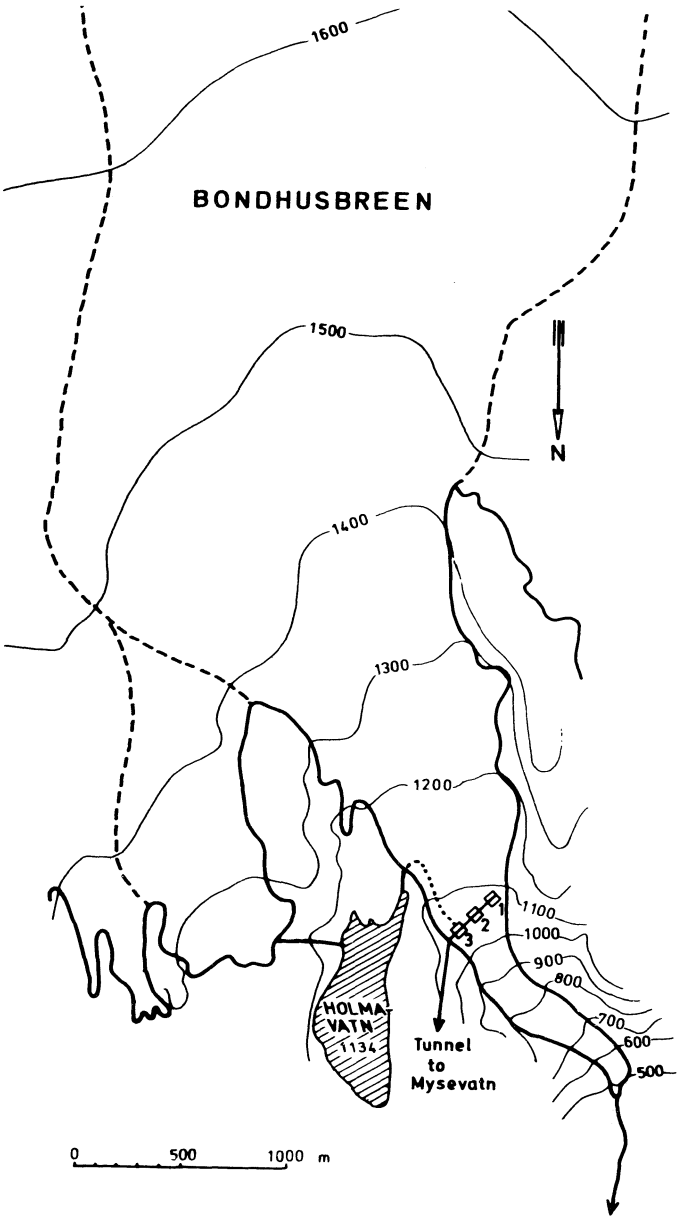


Fig. 33 Kartskisse over nedre del av Bondhusbreen med de subglasiale vanninntak inntegnet. Småstiplet linje angir subglasialt elveløp fra Holmavatn til inntak 3.

Sketch map of the lower part of Bondhusbreen and the subglacial water intakes. Dotted line shows where the subglacial river from lake Holmavatn runs to intake 3.

For å hindre at stein- og grusmasser som blir transportert i brevannet følger med inn i tunnelsystemet, er det bygget et sedimentasjonskammer inne i fjellet. I dette kammeret er det også installert limnigrafer for å registrere innfanget vann. Det har imidlertid vært mange tekniske problemer forbundet med disse målingene, med den følge at vi i lange perioder ikke har hatt registreringer av vannføringen. Undersøkelser og tekniske løsninger er ellers nærmere beskrevet av Hagen (1977), Wold og Haakensen (1978) og Wold og Østrem (1979).

Vanntilgang før 1978

Sommeren 1974 fikk man for første gang subglasialt vann inn i tunnelsystemet. Det var imidlertid bare små mengder, uten at størrelsen kan antydes. Sommeren 1975 sto så både inntak 1 og 2 ferdig til å ta imot vannet. Vi vet at vannet kom ca.10. mai, og først i inntak 2. Etter som vannføringen økte noe utover sommeren, ble dette inntak tørrlagt, mens inntak 1 ble det mest produktive. Vanntilgangen gjennom dette inntaket holdt seg hele sesongen, men vi vet intet om hvilke mengder som kom. De eneste brukbare registreringer finnes fra en periode i månedskiftet juni-juli, (fig. 34). Det ble da registrert en flom med maksimum vannføring på ca. 4 m^3/s. Flomtoppen faller ikke sammen med spesielt sterk bresmelting eller nedbør. En slik situasjon fant derimot sted ca. 1 uke tidligere, og denne er registrert i nabovassdraget ved Brufoss. Dette vassdraget har også meget høy bredekningsprosent, og vannføringen på dette sted og under Bondhusbreen burde vise noenlunde samme forløp. Denne gang falt flomtoppen fra de subglasiale inntak sammen med raskt synkende og lav vassføring ved Brufoss. Det kan se ut til at Brufoss og Bondhusinntakene startet økningen i vassføringen fra omtrent samme tid. Kulminasjonen på Brufoss kom imidlertid 1 uke før Bondhus.

I 1976 ble vassføringen fra de subglasiale inntakene registrert kontinuerlig fra slutten av mai til midt i september. I løpet av juni,juli og august var totalt innfanget ca. 5 . $10^6 m^3$ vann. En røff estimering av vassføringen i mai og høstmånedene viser at ca. 7,5 . $10^6 m^3$ vann ble innfanget under breen i løpet av sesongen. Dette er bare ca. 15% av total vannmengde i breen i inntaksnivået. Midlere vassføring i sommermånedene var 0.63 m^3/s, og høyeste målte flom var 2,72 m^3/s i begynnelsen av juli. Denne flommen hadde samme forløp som 1975-flommen. Den begynte som følge av økende smelting. Utviklingen ved inntakene på Bondhus er identisk med utviklingen ved Brufoss, inntil Brufoss når sin topp, for deretter å falle raskt. Flomtoppen ved Bondhusinntakene kommer 5 dager senere. Mens Brufoss fra samme dato har startet en ny stigning som etterhvert når nye rekordhøyder, synker vassføringen ved Bondhusinntakene til sitt vanlige nivå på mindre enn 1 m^3/s. Også i 1976 kom vannet de første dagene i inntak 2, mens inntak 1 var det mest effektive resten av sommeren. I perioden 11. - 18.juni

ble det observert en mengde kort-periodiske svingninger på limnigrafen. Det kan ikke forklares med instrumentfeil eller spesielle forhold i sedimentkammeret hvor limnigrafen er installert. Svingningene hadde en periode på 50 - 200 minutter og en amplitude tilsvarende maksimum 0.5 m^3/s. Fenomenet falt sammen med lav og synkende vassføring fra inntakene.(Se også Hagen (1977) s. 62 - 63).

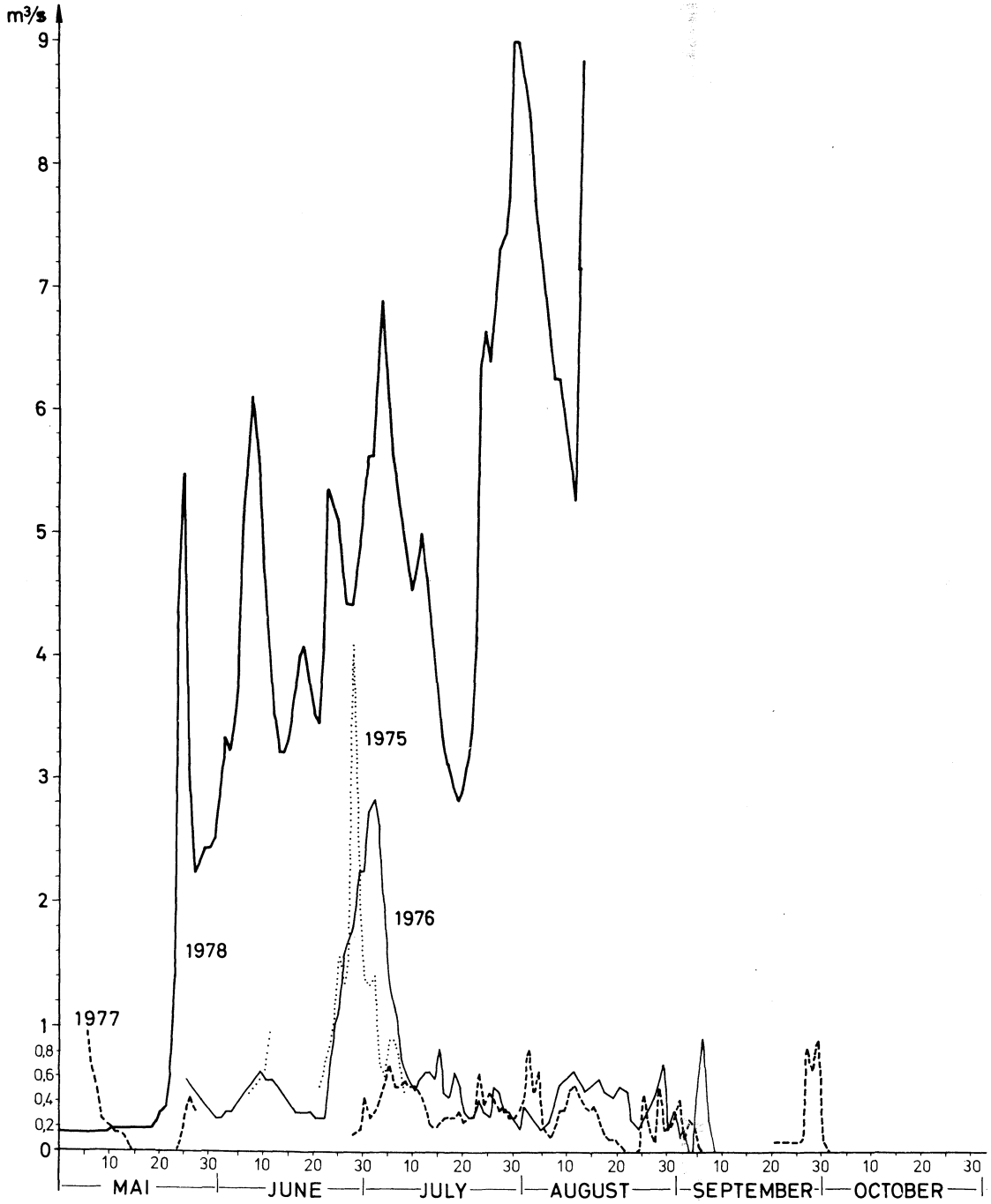


Fig. 34 Vassføringen fra de subglasiale vanninntakene er målt med limnigraf i sedimentasjonskammeret siden 1975. På grunn av tekniske problemer med måleutstyret er det en rekke brudd i måleseriene.

The discharge from the subglacial water intakes as measured by an automatic gauge in the sedimentation chamber since 1975. Technical problems caused several breaks in the readings.

1977-sesongen startet med nesten 1 m^3/s i vassføring i første del av mai. Resten av sommeren holdt det seg stort sett på samme lave nivå som tidligere år. Hva som kan ha skjedd i løpet av juni vites ikke, da registreringen dessverre sviktet denne måned. Det innfangede vann kom så å si bare fra inntak 1. Inntak 2 var tørt, mens det i flere borhull bare noen få meter unna var stort vanntrykk hele sommeren. Vanntrykket i disse hullene, som lå mellom inntak 1 og 2, varierte med de generelle avrenningsforhold, og den døgnlige variasjon var markert.

Vanntilgang i 1978

I april 1978 ble inntak 3 gjort ferdig, og allerede før smeltingen på breen hadde begynt, var vassføringen til tunnelen kommet opp i ca. 150 l/s. Det var klart at vi hadde fått inn dreneringen fra Holmavatn som har avløp inn under breen. I slutten av mai kom den første flommen med over 5 m^3/s i døgnmiddel. Den totale avrenning fra breen til tunnelsystemet var i mai ca. 3 . $10^6 m^3$. Utover sommeren ble det stadig nye flomrekorder. I juni var vassføringen to ganger over 5 m^3/s, en gang endog over 6 m^3/s, og total avrenning i tunnelen var 11 . $10^6 m^3$. Juli måned oppnadde et høyeste døgnmiddel på 9 m^3/s, og en absolutt høyeste vassføring på 10,3 m^3/s. Totalt kom det 14 . $10^6 m^3$ vann inn i tunnelen i juli. Første halvdel av august hadde en vassføring på ca. 10 . $10^6 m^3$, med laveste døgnmiddel på 5 m^3/s. Dessverre var det ikke mulig å få registrering av vassføringen lenger enn til 16.august, fordi sedimentkammeret hvor limnigrafene er montert, da var helt oppfylt av masse. Inntil denne dato var det kommet i alt 38 . $10^6 m^3$ vann. Avrenningen til tunnelen holdt seg høy resten av august, og et anslag på 10 . $16^6 m^3$ for disse 14 dagene er antakelig realistisk. Utover høsten varierte vassføringen betydelig, avhengig av nedbør- og temperaturforhold. Sporadiske målinger av vassføringen viste 2 - 4 m^3/s i september, gradvis synkende til ca. ½ m^3/s i desember. Beregninger viser at totaltilførsel av vann til tunnelsystemet i 1978 var mellom 57 . $10^6 m^3$ og 69 . $10^6 m^3$.

Hvor mye vann som har gått forbi inntakene vet vi ikke. Det finnes ingen registreringer av vassføringen foran breen, men ved flere sporadiske besøk ved brefronten i løpet av sommeren er vassføringen forsøkt anslått. Disse anslagene varierer fra 50 l/s til 500 l/s. Dersom man beregner avsmeltingen nedenfor inntakene (450 - 1100 m o.h.) meget forsiktig til 1 cm.pr.døgn, får man en avrenning på 30 l/s. Om avsmeltingstallene økes til 10 cm pr. døgn, økes avrenningen til 300 l/s. I tillegg kommer avrenningen fra fjellsidene rundt breen. Det synes derfor som om innfangingen av vann i inntaksnivået må være nær 100%.

Årets vanntilgang har nesten bare kommet gjennom det nye inntak 3. Anslagsvis 2% har kommet gjennom en gammel prøvesjakt som ble gjenåpnet våren 1978. Denne ligger like i nærheten av inntak 2. Av samme størrelsesorden er det som kom fra

borhullene mellom inntak 2 og 3. Disse borhullene ligger i samme område som den nevnte prøvesjakt. Inntakene 1 og 2 har vært tørrlagte hele sesongen.

Døgnvariasjonene i avrenningen finnes hele sesongen, men blir særlig utpreget i august, med laveste vassføring ca. kl. 0800 og høyeste vassføring ca. kl. 1800. Den døgnlige amplitude er i størrelsesorden 1.5 m^3/s.

Beregnet avrenning

Vanninntakene ligger omtrent rett under overflatekote 1100. Det drenerings-areal som ligger overfor denne kote er nær 10 km^2 av Bondhusbreen, pluss ca. 1 km^2 breareal som drenerer via Holmavatn og et brefritt areal på vel 1.5 km^2, tilsammen ca. 12.5 km^2. Balansemålingene på Bondhusbreen viser en ablasjon på ca. 27 . $10^6 m^3$ vann ovenfor inntakene. Det breareal som drenerer til Holmavatn har en midlere høyde på ca. 1400 m o.h., og ved bruk av tall fra målingene på Bondhusbreen, kan ablasjonen beregnes til ca. 4 . $10^6 m^3$. Dette gir i alt ca. 31 . $10^6 m^3$ vann direkte fra bresmelting. I tillegg kommer sommernedbøren over hele nedslagsfeltet. Det finnes ingen målinger av denne nedbøren i nedslagsfeltet. Nærmeste målestasjon er Mauranger Kraftstasjon nede ved fjorden, hvor det ble målt i alt 698 mm nedbør i perioden mai - september. Med en grov antakelse om at nedbøren på breen er nærmere dobbelt så stor som nede ved fjorden, har nedslagsfeltet fått 1200 - 1400 mm nedbør i perioden mai - september. Dette skulle teoretisk gi en avrenning på ca. 16 . $10^6 m^3$ vann. Sammen med breavsmeltingen gir det en total avrenning på 47 . $10^6 m^3$. Ved å ta hensyn til snøsmelting på det brefrie areal øker vannmengden med ytterligere 1 mill. m^3. Likevel er beregnet vannmengde noe mindre enn det som er kommet i inntakene. Det er mange mulige feilkilder i disse beregningene, og den største feilmuligheten synes å være selve arealavgrensningen.

FRONTMÅLINGER

Engabreen

Norsk Polarinstitutt har siden 1965 foretatt målinger av brefrontens avstand til ett punkt omlag midt foran bretunga. Resultatet av disse målingene blir årlig publisert i Norsk Polarinstitutts Årbok, se f.eks. Liestøl 1978.

I 1972 ble det i Brekontorets regi etablert 11 målepunkter rundt spissen av bretunga (Haakensen 1977), og målinger er siden blitt foretatt fra disse punkter til iskanten hver høst.

I tabellen nedenfor er det gitt resultater av disse målingene. I tillegg er tatt med nettobalansen for Engabreen, målt i meter vannverdi jevnt fordelt over hele breen:

		1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
NVE, snitt 11 punkter	m								-19.2	-2.8	0.0	+7.4	+20.1	+18.6
NPI	m	+5	+10	+22	+8	+34	+28	-31	-12	-4	0	+7	+31	+25
Nettobalanse, bn	m					-0.99	+1.01	-0.07	+2.72	+0.80	+1.61	+2.41	+0.88	-0.51

Tabellen viser at Engabreen hadde en jevn framgang på i alt over 100 meter i perioden 1966 - 1971. Deretter rykket fronten nesten 50 meter tilbake igjen i løpet av 3 år. Denne tilbakegangen stagnerte i 1975, og siden har brefronten igjen rykket fram. I 1976 rykket breen fram ved 10 av de 11 punktene. Endringene i forhold til forrige år varierte fra -1.6 til +18.3 m. I 1977 kunne en registrere framgang ved alle målepunktene fra 4.2 til 43.0 m. Bretunga hadde nå rykket så langt fram at nye punkter måtte etableres ved flere av posisjonene.

I 1978 rykket også breen fram ved alle målepunktene, framrykkingen varierte mellom 3.55 og 34.75 m. Et av punktene hadde breen dekket over slik at det nå måles fra 10 punkter. Brefrontens posisjon høsten 1978 var lenger framme enn noen gang siden målingene startet opp i 1965.

Engabreen hadde en negativ massebalanse første året målingene ble foretatt, nemlig i 1970. Siden har balansen stort sett vært positiv fram til og med 1977. I alt utgjør økingen over 9 m omregnet i vann jevnt fordelt over hele breen og dette tilsvarer en masse på $355 \cdot 10^6 m^3$, som er bundet på breen i løpet av 7 år. Om denne økingen i masse er årsaken til brefrontens kraftige framrykking siden 1976, vil det si at Engabreen har en "reaksjonstid" på ca. 5 år. Men måleserien er for kort til å uttale noe bestemt om dette.

I 1978 var nettobalansen igjen negativ. Om dette blir tilfelle også i de nærmeste år, vil brefronten ventelig stagnere igjen om få år.

Nigardsbreen

Også ved Nigardsbreen har Norsk Polarinstitutt foretatt målinger av brefrontens posisjon gjennom en årrekke. Breen har i de siste 10-årene rykket sterkt tilbake. Fra 1936 til 1967 ble området frilagt der Nigardsvatnet nå ligger. Den sterke tilbakerykkingen fortsatte fram til og med 1974. Senere har den stagnert noe.

		1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
Front	m							- 515					-65	-46	-16	-1	-7	-14
Nettobalanse bn	m	+2.25	-0.22	+0.95	+0.91	-0.92	+2.16	+0.22	-1.31	-0.56	+0.82	-0.14	+1.10	+0.48	+0.27	+0.40	-0.77	-0.13

Som tabellen viser, har det siden målingene startet i 1962 vært overveiende positiv massebalanse på Nigardsbreen. Tilsammen har breen i perioden fra 1962 til 1976 lagt på seg 6.4 m regnet i meter vannverdi jevnt fordelt over hele breen. På tross av dette har altså bretunga hele tiden rykket tilbake. Det kan synes urimelig at Nigardsbreen har en så lang "reaksjonstid" at ikke denne forholdsvis lange perioden med positiv massebalanse skulle ha gitt seg utslag på bretunga. En mulig årsak kan være at breen ennå ikke har rukket å tilpasse seg den situasjon som eksisterte fram til ca. 1960 med ugunstig klima for breen. Stagnasjonen i tilbakerykkingen som inntrådte fra 1975 er muligens et tegn på at breen er i ferd med å oppnå balanse med de nåværende klimaforhold.

Ålfotbreen

Foran Ålfotbreen etablerte Brekontoret et målepunkt i 1974. I forhold til dette punktet gikk breen fram med en snau meter til 1975 og med nærmere 21 meter i 1976. Senere er ikke punktet gjenfunnet, muligens på grunn av at breen har gått fram over det. Avstanden var bare 20 meter i 1976. I 1978 ble avstanden målt fra et nytt punkt lenger bort fra breen.

ENGLISH 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 the sections within the Hydrology Division, Glaciology Section, has undertaken glaciological investigations at five glaciers in Southern Norway and two glaciers in Northern Norway. In addition the Norwegian Polar Institute (Norsk Polarinstitutt) has investigated one additional glacier in Southern Norway. The location of all these glaciological investigations is marked on the map, Fig. 1.

The longest observation series are available from the glacier Storbreen in Jotunheimen (observed by Norsk Polarinstitutt) and Nigardsbreen, an outlet glacier from the Jostedalsbreen ice-cap. At Storbreen Olav Liestøl started complete mass balance studies (including winter balance and summer balance) already in 1948. On Nigardsbreen mass balance investigations have been carried on since 1962 by NVE.

Mass balance studies started in Northern Norway in 1970 when three glaciers were selected in the Svartisen area. Since NVE started complete glaciological mass ba-

lance investigations at selected glaciers, the number of selected glaciers has changed slightly because the investigations are made in connection with hydrological studies of basins where future hydro-electric power developments are considered. In some cases the engineers found that they had obtained sufficient hydrological data after an observation series of 5-6 years. Later, other groups of glaciers were selected for similar studies - some of them are still being studied, whereas the studies have terminated on others. This report contains results from all glaciers where mass balance investigations were carried out in 1978.

Methods

NVE's glaciological program is principally based 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. 10, 15, 21 and 32). 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 elevations 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. 10).

The meteorological and hydrological observations were performed in 1978 in the same manner as during previous years. Data collected on the heat balance on Engabreen

are intended to give information on the relation between meteorological factors and glacier melt, both for the entire summer and for shorter periods during the melt season. The calculations and the presentation of this material are made by Mr. S. Messel.

Air temperature, precipitation, air moisture wind and cloud cover have been observed similar to previous years (see, for example, Pytte 1970). Water discharge from some of the investigated glaciers has been recorded on automatic water level recorders or by staff gauge readings on a routine basis. The daily water discharge has been calculated and plotted into diagrams together with other meteorological information.

Ålfotbreen

Some snow fell on the glacier during September 1977 but it disappeared again so that the start of the glaciological year was set at 30 October. Then the glacier was visited to check all accumulation stakes etc. for the coming winter. Snow accumulation started in November and at the next visit on December 6 approximately 150 cm snow had accumulated. 23 stakes were then present on the glacier but on January 20 it was found that 16 stakes had disappeared due to heavy rime and wind, so it proved necessary to replace 9 new stakes. All of them were placed with their lower end on the previous summer surface.

The final winter visit was made on April 15 when a detailed snow survey was performed by sounding at 15 single points along profiles shown in Fig. 3. The mean snow density was 0.42 g/cm^3 at this occasion. The total winter balance amounted to $12.3 \cdot 10^6 m^3$ water, which corresponds to 2.5 m water equivalent averaged over the entire glacier surface. This is 10% more than last year's winter balance but it is only 72% of the mean for the period 1963-77. See Fig. 4.

The ablation was measured by visits five times during the summer. The summer balance up to October 12, which is regarded as the end of the summer season at Ålfotbreen, amounted to $14.7 \cdot 10^6 m^3$ water, corresponding to an average of 3.2 m water equivalent. This is 92% of the mean for the years 1963-77, but 6% more than last year. Consequently, the glacier had its second year of negative mass balance, this time amounting to -0.51 m water equivalent, compare Fig. 5.

Meteorological parameters were recorded on a thermograph, a hygrograph, and a pluviograph, all of them running for one month. The results are shown in Fig. 6. The mean temperature for the entire summer was 6.3°C. The total precipitation amounted to 204 mm in June, 150 mm in July, 325 mm in August, and 295 mm in September. Ålfotbreen is a very rainy place - of the 109 days of observation only 37 were without any precipitation. The air is also fairly moist, the mean water va-

pour pressure was 8.4 mb. Only one day in June and four days in September showed a water vapour pressure less than 6.1 mb which indicates that some evaporation may have taken place from the glacier during these five days, but it is anticipated that condensation is the dominant process during the summer.

Water discharge was calculated for every day from records made by the automatic gauge in the glacier stream. In total 40.15 $\cdot$ $10^6 m^3$ water left the glacier from June 3 to October 31. The maximum daily discharge amounted to 0.83 $\cdot$ $10^6 m^3$ on June 7, whereas the average daily discharge was 0.27 $\cdot$ $10^6 m^3$.

Meteorological observations made at Ålfotbreen in 1977 were not available for presentation when the 1977- report went to the printers. The thermograph did not work properly in August and September but reliable observations are available from the standard meteorological station Førde which normally shows a good correlation with temperature data from the glacier. The observed data are presented in Fig. 7.

Bondhusbreen

The spring snow survey was performed on May 8. The snow thickness was then determined in 125 single points above 1200 m a.s.l. This corresponds to about 6.5 points per square kilometer. The mean snow density amounted to 0.48 g/cm^3 and the total winter balance is calculated to 24 $\cdot$ $10^6 m^3$ water which corresponds to 2.37 m water equivalent.

The ablation was observed along 10 stakes in the section of the glacier between 1100 m a.s.l. to about 1600 m a.s.l. Below 1100 m a.s.l., where the glacier is heavily crevassed, it was necessary to estimate the summer melt from observed data obtained at Nigardsbreen. The total summer balance amounted to 29 $\cdot$ $10^6 m^3$ water corresponding to 2.88 m of water equivalent, thus resulting in a negative net balance of approx. 5 $\cdot$ $10^6 m^3$ water. The specific mass balance was 0.51 of water equivalent.

The snow line at the end of the season could not be observed directly but it must have been situated at approx. 1590 m a.s.l.

All the results are plotted in Fig. 8 and in a table on page 15. It should be noted that data collected from Bondhusbreen are not as accurate as similar data collected from the other glaciers dealt with in this report, mainly due to lack of good glaciological maps. Results from subglacial observations are shown on page 50 in this report.

Nigardsbreen

Due to the heavy snow cover which is normally found on this glacier it was necessary to visit Nigardsbreen three times during the winter before the final snow

survey could be made at the end of April. Then the snow depth was measured in 411 points along profiles shown in Fig. 9. No less than 8.5 snow depth observations per square kilometer formed the base for a map of the winter balance shown in Fig. 10. In general, the snow thickness ranged from 350-700 cm.

The ablation was similarly monitored through five visits made during the summer season. The total melt proved to be a little larger than normal and the total summer balance amounted to $180 \cdot 10^6 m^3$, corresponding to a specific value of -2.25 m of water equivalent. The mass balance turned out to be negative, corresponding to -13 cm of water equivalent.

Meteorological observations at Nigardsbreen are no longer made up to the standards kept during previous years when the observation hut was continuously manned throughout the summer. The automatic instruments are not so reliable, compare Fig. 13 where several interruptions in the records are demonstrated.

The mean temperature for the summer amounted to 3.1^oC, the total precipitation was 218 mm with a daily maximum, 24.4 mm, recorded on August 15. The hygrograph indicated that the water vapour pressure was above the critical 6.1 mb level for most of the summer. Only four days in June and three days in July showed a smaller water vapour pressure and it is possible that some evaporation took place during these days (and possibly during mid-day in other parts of the summer).

The total water discharge amounted to $150 \cdot 10^6 m^3$, with a daily maximum on August 2 amounting to almost $3 \cdot 10^6 m^3$ water. The daily mean for the entire summer was $1.64 \cdot 10^6 m^3$.

Storbreen

This glacier was surveyed in May, then it was found that the winter balance amounted to +126 cm of water equivalent, which is 90% of the average for the previous 29 years. The summer balance amounted to -170 cm water equivalent which is near the average for the previous 29 years. The net balance turned out to be negative, amounting to -44 cm of water equivalent, compare Fig. 14.

Hellstugubreen

The glacier, which is situated in a continental part of Southern Norway called Jotunheimen, receives normally much less snow than Nigardsbreen and it is therefore not necessary to make more than one or two winter visits to check the stakes. The snow survey was made on April 26 when 17 of the original 19 stakes were still visible through the 1-3 m snow cover. The snow density ranged between 0.42 g/cm^3 and 0.43 g/cm^3 at various elevations, i.e. it was almost constant over the entire glacier. In total 265 snow depth soundings were made along profiles shown in Fig. 16. The winter balance amounted to $3.5 \cdot 10^6 m^3$ water corresponding to a spe-

cific value of +1.05 m of water equivalent. This is very close to the average for the period 1963-77 but no less than 54% more than last year. See Fig. 17.

During the summer the glacier was vistied three times, last time at the beginning of September when next winter's accumulation had started. The summer balance was $5.3 \cdot 10^6 m^3$ water corresponding to -1.59 m of water equivalent, which is 12% larger than the mean summer balance for the years 1963-77. Consequently, the glacier lost $1.8 \cdot 10^6 m^3$ water which corresponds to -0.54 m of water equivalent, compare Fig. 18 and the corresponding table. Due to fresh snow it was impossible to observe the height of the equilibrium line at the end of the summer but it is calculated to be at an elevation of about 1890 m a.s.l.

Gråsubreen

This glacier receives less snow than the others, so it is normally not visited during the winter season and stakes do not normally disappear. The snow survey was made on April 26 when the snow depth was measured in 137 points, compare Fig. 19. The snow density was measured in two pits at 1960 and 2240 m a.s.l. where it amounted to 0.41 g/cm^3. A winter balance map is shown on Fig. 20. The total winter balance amounted to $1.7 \cdot 10^6 m^3$ water corresponding to +0.67 m of water equivalent. This is 5% less than the mean for the period 1963-77.

The ablation was measured four times during the summer season which terminated at the beginning of September. The total summer balance amounted to $2.2. \cdot 10^6 m^3$ water or -0.89 cm of water equivalent. This is only 80% of the mean summer balance for the period 1963-77 and much less than the summer balance on Hellstugubreen which is situated in a similar climatological area. It is assumed that frequent snow falls above 1900 m during the summer increased the albedo and hampered the glacier melt. Note that Gråsubreen is situated at higher elevations than Hellstugubreen. In spite of this the net balance turned out to be negative, amounting to -0.22 m of water equivalent, compare Fig. 21 and the corresponding table. The height of the equilibrium line is calculated to be at 2145 m a.s.l.

Engabreen

This glacier is one of the most difficult to observe due to very heavy snowfall during the winter and frequent winter storms. Several experiments have been made to replace the thin aluminum stakes and for this reason a special tower was erected during the fall 1976. Such constructions are used by the Norwegian Telecommunications Service as antennas. This nine meter long tower, penetrating 6.5 m above the snow surface at the end of the summer withstood all physical forces throughout the winter and therefore a second tower was erected in the fall of 1977. These two towers are now invaluable tools to check readings on the conventional stakes.

The glacier was visited three times during the winter whereas the final snow survey was carried out on 23-30 May. Unfortunately som snow melt had taken place at that time so several ice lenses formed in the snow pack made the snow survey more difficult than normal. In total 492 snow depth soundings were made, compare Fig. 23. Three snow pits were dug to determine the snow density. The winter balance shown in Fig. 24 amounted to 94.4 · $10^6 m^3$ of water, corresponding to the specific value of +2.08 m water equivalent. This is 78% of the mean for the last 8 years.

Detailed observations of the summer melt could be made because the observation hut was manned continuously from June 13 to September 1. The daily ablation was then measured at stakes nearby whereas the rest of the stake net was visited every five days. The summer balance amounted to 113 · $10^6 m^3$ water, corresponding to -2.99 m of water equivalent. This is no less than 140% of the mean since 1970. This large melt combined with a relatively small snow accumulation resulted in a negative mass balance amounting to 19.46 · $10^6 m^3$ water or -0.51 m of water equivalent, compare Fig. 25 and the corresponding table.

The meteorological observations were carried out from June 13 to September 1 in three points: 880 m a.s.l., 1100 m a.s.l. and a nunatak 1360 m a.s.l. A selection of the meteorological data is shown in Fig. 26. Meteorological observations were performed during 81 days at the two first-mentioned stations. Only five days were completely cloudfree whereas 26 days had complete cloud cover or fog. The mean daily wind velocity was 4.3 m/s, with a daily maximum on June 23 amounting to 13.6 m/s. The summer temperature at the observation hut was relatively high, at an average 6.1°C with a maximum of 11.8°C on July 3. The mean temperature for the summer as measured on the nunatak amounted to +4.4.°C during the 52 days of observation.
The precipitation amounted to 338 mm at the station whereas it was measured only 87 mm at Glomfjord and 160 mm at the lake Engavatn during the same period. The water discharge from the lake Engavatn amounted to 133 · $10^6 m^3$ with a daily maximum on July 1 when 2.63 · $10^6 m^3$ water passed the outlet of the lake. The drainage area is 77% glacierized.

Comparison between mass balance on various glaciers

The mass balance was measured at 8 glaciers, two in North Norway and six in South Norway. Both in 1977 and in 1978 it was observed negative mass balances at the glaciers in South Norway. The winter accumulation was near the average for the last 15-16 years on Hellstugubreen and Nigardsbreen whereas it was less than average on Gråsubreen and Ålfotbreen. The summer balance was 11-18% higher than the average in Southern Norway whereas it was even higher in Northern Norway. Due to a smaller winter balance than normal this resulted in a negative mass balance for the first time since 1972, compare Fig. 27 and 28.

The energy balance on Engabreen

A Robitzsch actinograph was placed at the glacier station (1100 m a.s.l.) and another similar instrument near the glacier tongue. The glacier melt was observed daily in the upper part of the glacier and at least every week on the lower part. The observations were carried out from June 15 to August 30 in the snowcovered part of the glacier and from July 6 to September 3 on the lower part where glacier ice was exposed. The tables I and II contain the most important results.

In the snow-covered area it was found that the incoming radiation accounted for 43% of the ablation, whereas convection and condensation accounted for 57%. Similar figures for the lower parts of the glacier were 34% and 65% respectively. Here the melt caused by rain accounted for 1% of the ablation. The global radiation at 300 m a.s.l. seems to be in the order of 80% of the global radiation at 1100 m a.s.l. at Engabreen. This difference is caused partly by the topography. The results from 1978 are plotted together with the results from previous investigations in Table III on page 39.

Equations to calculate glacier net balance from meteorological data

Introduction

Attempts to calculate the net balance for Storbreen in Jotunheimen, based upon meteorological data from standard meteorological stations were made by Liestøl (1967) who calculated the winter balance and the summer balance separately by a graphic method. He used meteorological data from Bergen and was able to calculate winter, summer and net balance for the glacier Storbreen for every year since 1816, i.e. since the meteorological observations started in Bergen. Similarly Dybvadskog (1965) compared the mass balance on Tverråbreen in Jotunheimen with meteorological data from five various stations and found a certain correlation but deviations were too great to allow calculations as made by Liestøl. Daily meltwater discharge from various glaciers were compared with meteorological data by Østrem (1968, 1970) and Roald (1971) who developed models for the daily discharge. It was then found that the wind is very important factor, together with the temperature, for the daily glacier melt.

Since 1963 the glacier mass balance has been established for a number of glaciers in Southern Norway. In most cases only 5-6 years of observations are available but for other glaciers longer series exist. Five glaciers were selected for a comparison between the net balance and meteorological data (see table I).

Theory and method

It is anticipated that the winter accumulation takes place in the period October 1

to May 30 and that the winter balance is more or less entirely dependent upon the precipitation during this time period. The summer balance, on the contrary, is influenced by several meteorological parameters such as air temperature, radiation, wind and air moisture. Also the surface characteristics, such as albedo are important so a physical correct calculation should include all these parameters. However, this is a very tedious and time-consuming job and, in many cases, almost impossible to carry out due to lack of data. Roald (1973,1977) has studied the correlation between meteorological parameters from stations in the lower parts of the country and stations at high altitude, i.e. near the glaciers. He found a good correlation between air temperatures so it was decided to base the study solely on air temperature observations.

Air temperature observations for the summer were divided in various periods and data from different stations were included in the study.

Results, discussion

The winter balance could be determined from the winter precipitation in Bergen with a correlation coefficient ranging from 0.68 to 0.94 for various glaciers. No significant improvement of the correlation could be obtained by using local meteorological stations, i.e. stations closer to the glaciers. The summer balance was found from various temperature observations, the resulting models are presented in Table 2 on page 43. Also in this case it could be shown that data from local stations did not significantly improve the correlation coefficients so it was decided that meteorological data from Bergen should be used in the models.

In Fig. 30 it is demonstrated how well observed and the calculated annual values are correlated. The results must be regarded as very satisfying for most of the glaciers. The greatest difficulties seem to be present at Nigardsbreen and the reason for this is assumed to be its very large vertical extension (from 300 to 2000 m a.s.l.) which gives great variations in the length of the winter and summer seasons. Also its large area (40 km^2) combined with heavy snow accumulation in the highest areas makes it difficult to develop good models for this glacier.

If the established models are regarded good enough, it will be possible to calculate the net balances for the glaciers during years when direct measurements were not made. These results can then be used for hydrological calculations, for example in connection with the planning of hydro-electric power installations where turbines etc. are dimensioned according to existing statistics from a great number of discharge stations. If the glacier mass balance has been negative for a long series of years, this means that the statistics are too "optimistic" and some kind of corrections must be made. It is anticipated that the developed models will be used for such corrections in the future.

Brimkjelen, a glacier-dammed lake

A hydro-electric power plant, the Leirdøla Power Project, is situated in the Jostedalen valley. It was recently completed and started normal production in 1978. The total drainage basin is 140 km^2 of which 57 km^2 are glacierized.When the reservoir was filled up, the previous little lake Tunsbergdalsvatnet was transformed into an eight kilometer long reservoir, almost reaching the front of the Tunsbergdalsbreen outlet glacier which terminates at 520 m a.s.l. This glacier tongue dams in turn the small lake Brimkjelen and this well-known glacier-dammed lake has caused during historie time smaller or larger "jøkullaup". However, due to considerable thinning of the glacier these events are not very spectacular or dangerous any more. The greatest catastrophy caused by an outburst of the Brimkjelen took place in 1926 when some 25-30 million m^3 of water passed the steep valley Leirdalen down to Jostedalen and great damage was made in these valleys. The largest known sudden discharge since then occured in 1962 when about $12 \cdot 10^6 m^3$ water was released.

In 1978 it was possible to estimate the total water volume released during a single event taking place in the first part of July. A total volume of $1.3 \cdot 10^6 m^3$ water was draining during a couple of days or so. Calculations indicate that such an amount of water would increase the water level in the artificial lake Tunsbergdalsvatnet by only 19 cm. A smaller sudden discharge was observed by Mottershead in 1973. Then $0.2 \cdot 10^6 m^3$ was released during one single day (Mottershead 1975).

The dam at the lower end of the lake Tunsbergdalsvatnet is constructed so that it can withstand an extremely large amount of water released from the glacier-dammed lake. Calculations were based upon a "theoretical maximum" volume of $27 \cdot 10^6 m^3$, i.e. the amount that was released in 1926. The glacier-dammed lake Brimkjelen will therefore, even if it grows much greater than it is today, make no harm to the new installations in the valley but if the glacier thickness should grow so that the dammed volume of water should increase the abovementioned theoretical maximum, it is planned to construct a tunnel through the bedrock to restrict the volume of ice-dammed water.

Subglacial hydrology at Bondhusbreen

The Bondhusbreen outlet glacier drains from the ice-cap Folgefonni northwestwards towards Mauranger at the Hardangerfjord. About 10 km^2 drain directly whereas about 1 km^2 drains via the lake Holmavatn but all meltwater is joining in one single stream from the glacier front at about 450 m a.s.l. When the hydro-electric power development was planned for this part of Norway, it was decided to collect meltwater subglacially under Bondhusbreen. Hot point drilling indicated that the ice

was about 150 m thick in the area where the intake shafts should be constructed. A horizontal water-collecting tunnel was placed under the glacier and vertical shafts were then blasted up to the glacier sole. To avoid coarse material to be transported by the meltwater to the resevoirs it was decided to construct a large sedimentation chamber in the bedrock under the glacier, see Hagen (1977), Wold and Haakensen (1978) and Wold and Østrem (1979).

During the summer 1974 it was possible to collect some subglacial meltwater but it was only very small amounts that were caught by the tunnel system. The following year, in the summer 1975 it was planned to collect water through several intake shafts and meltwater started to drain about May 10. Up to 4 m^3/s was collected during the summer (compare Fig. 34) but it became clear that only a fraction of the available meltwater was really captured by the system.

In 1976 it became clear that only about 15% of the total available meltwater was actually diverted and a maximum discharge of only 2.7 m^3/s was observed.

During the spring 1978 another intake shaft, named "Inntak 3" was completed and this intake was really able to catch the main part of the water which is available under the glacier. It captured the water from lake Holmavatn together with meltwater from most of the glacier. During the summer larger and larger amounts of water could be observed with a record discharge amounting to 6 m^3/s in June and an even higher record in July amounting to 10.3 m^3/s. Up to Augugst 16 no less than $38 \cdot 10^6 m^3$ water had been captured and this is probably very close to 100% of the water which is available at that elevation under the glacier.

The intakes are located approx. under the contour line 1100 m a.s.l. A calculation made of the summer balance, based upon readings of a number of stakes above this elevation, reveals that there is a relatively good agreement between the ablation figures, the precipitation in liquid form and the amount of water captured in the diverting tunnel. There are still some minor errors in this calculation but it is assumed that these errors are originating from unreliable topographic maps which do not allow a correct calculation of the drainage basin.

Glacier frontal observations

Since 1965 it has been made front measurements at Engabreen by Norsk Polarinstitutt. Results are reported annually in "Årbok", see for example Liestøl 1978. In 1972 it was decided to establish no less than 11 measuring points and measurements from these to the glacier front have been carried out since then. Results from these measurements are shown in the table page 56. It is obvious that the Engabreen has advanced more than 100 m in the period 1966-71 and then retreated some 50 m during three years. Since 1976 it has been advancing again.

Similar investigations have been carried out at Nigardsbreen during a long series of years. The glacier has retreated considerably during the last decades. During the period 1936-67 the glacier uncovered the present lake Nigardsvatn and the retreat has continued up to 1974 but the retreat has gone somewhat slower since then, compare the Table on page 56.

Also Ålfotbreen has shown advances since 1974. Up to 1976 it advanced more than 20 m but since then it was impossible to find the markers any more and a new fix point has been established.

LITTERATUR

Dybvadskog, O.
1965: Tverråbreen - Akkumulasjon og ablasjon i relasjon til data fra 5 meteorologiske stasjoner. Hovedfagsoppgave våren 1965 ved Geografisk Institutt, Universitetet i Oslo (ca. 140 s. inkl. bilag).

Eriksson, B.E.
1959: An experimental study of heat transmission in the surface layer of the Skagastøl Glacier. - Medd. från Uppsala Univ.Geogr.Inst., Ser.A (141 p.).

Haakensen, N.
1977: Frontmålinger. - I: Wold, B. og Hagen, J.O., 1977, p. 52-54.

Hagen, J.O.
1977: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1976. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 7/77, 94 p. (English summary).

Klemsdal, T.
1968: A glacial-meteorological study of Gråsubreen, Jotunheimen. - Norsk Polarinst. Årbok 1968, p. 58-74.

Liestøl, O.
1956: Glacier dammed lakes in Norway. - Norsk Geogr. Tidsskrift, Bind XV p. 122-149.

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

1978: Glaciological work in 1977. - Norsk Polarinst.Årbok 1977, p. 271-277.

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.M., 1971, p. 69-80.

1973: Glasial-meteorologiske undersøkelser i 1971. - I: Tvede, A.M., 1973, p. 72-83.

1974: Glasial-meteorologiske undersøkelser i 1972. - I: Tvede, A.M., 1974 p. 75-87.

1975a: Glasial-meteorologiske undersøkelser i 1973. - I: Tvede, A.M., 1975 p. 49-58.

1975b: Energibalansen på utvalgte breer 1974. - I: Tvede, A.M., Wold, B. & Østrem, G., 1975, p. 53-60.

1977a: Energibalansen på utvalgte breer 1975. - I: Wold, B. & Hagen, J.O., 1977, p. 45-51.

1977b: Energibalansen på utvalgte breer 1976. - I: Hagen, J.O., 1977, p. 40-45.

1978: Energibalansen på utvalgte breer 1977. - I: Wold, B. & Haakensen, N., 1978, p. 35-39.

Mottershead, D.N.
1975: Observation of a temporary ice-dammed lake, Brimkjelen, Southern Norway. - Norsk Geogr. Tidsskrift 29, p. 69-74.

Mottershead, D.N. & Collin, R.L.
1976: A study of Glacier dammed lakes over 75 years - Brimkjelen, Southern Norway. - Journal of Glaciology, Vol. 17, no. 77, p. 491-505.

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).

Rekstad, J.
1904: Opdæmning ved Tunsbergdalsbreen i Sogn. - Naturen, Årg. 28, hefte 1, p. 1-6.

Roald, L.
1971: Breavløpet som funksjon av de meteorologiske parametre. - I: Tvede, A.M., 1971, p. 80-99.

1973: Litt om sambandet mellom værparametre målt ved breene og på faste værstasjoner i nærheten. - I: Tvede, A.M., 1973, p. 90-100.

1977: Analyse av meteorologiske data og avløpsdata for Folgefonn-området. - I: Hagen, J.O., 1977, p. 46-49.

Tvede, A.M.
1971: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1970. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 2/71, 111 p. (English summary).

1973: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1971. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 2/73, 110 p.(English summary).

1974: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1972. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 1/74, 99 p.(English summary).

1975: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1973. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 1/75, 72 p.(English summary).

Tvede, A.M., 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 balance at selected glacier basins. Technical papers in hydrology, no. 5, 20 p.

VHL (Vassdrags- og Havnelaboratoriet)
1975: Leirdøla Kraftverk, Flomløp Tunsbergdalsvann. Notat. Oppdragsnummer 601391.

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).

Wold, B. & Haakensen, N.
1978: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1977. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 3/78, 54 p.(English summary).

Wold, B. & Østrem, G.
1979: Subglacial constructions and investigations at Bondhusbreen, Norway. - Journal of Glaciology, Vol. 23, no. 89. - In press.

Østrem, G.
1968: Korrelasjonsberegninger - et middel til avløpsprognosering. - I: Østrem, G. & Pytte, R., 1968, p. 104-116.

1970: Breavløpet som funksjon av meteorologiske parametre. - I: Pytte, R., 1970, p. 73-84.

Østrem, G. & Pytte,R.
1968: Glasiologiske undersøkelser i Norge 1967. - Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen. Rapport nr. 4/68, 131 p.(English summary).

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.