NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

PUBLIKASJON

Tron Laumann

SIMULERING AV BREERS MASSEBALANSE

$$\int_{\tau}^{\infty} f(\tau)\left(\int_{A} \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-(\tau-\tau D)^2/(2Q)^2}\right)dt\,d\tau$$

(05)

HYDROLOGISK AVDELING

Nr 17
1992

NORGES
VASSDRAGS- OG ENERGIVERK
BIBLIOTEK

Omslagsbilde: Tegnekontoret NVE

NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

TITTEL Simulering av breers massebalanse	**PUBLIKASJON** 17/1992
	DATO Juni 1992
FORFATTER Tron Laumann	ISBN 82-410-0152-5
	ISSN 0802-2569

SAMMENDRAG

En enkel graddagsmodell er benyttet for å beregne massebalansen på Ålfotbreen, Nigardsbreen og Hellstugubreen ved hjelp av klimadata fra nærliggende meteorologiske stasjoner. Modellen er kalibrert med målte massebalansedata for perioden 1964-90. Parameterverdier benyttet er nedbørgradienter fra 7% til 8% pr.100m, temperaturgradienter mellom -0.7K og -0.75K pr 100m, graddagsfaktor for snø fra 3.5 mm/K/dag til 4.5 mm/K/dag, og graddagsfaktor for is fra 5.5 mm/K/dag til 6 mm/K (tabell 1). Resultater av massebalanseberegningene med disse parameterverdier er vist i fig. 5 og fig. 6. Hvis ikke en eventuell temperaturheving blir fulgt av en betydelig nedbørøking (mellom 27 % og 38 % nedbørøking per grad temperaturheving) vil norske breer smelte dramatisk ned (fig. 9).

ABSTRACT

A simple degree-day model has been used to calculate the mass balance of the Ålfotbreen, Nigardbreen and Hellstugubreen glaciers using climate data from nearby meteorological stations. The model is calibrated using massbalance data from the period 1964-90. A precipitation gradient of 7% to 8% per 100m and a temperature gradient og -0.7K to -0.75K per 100m have been used, together with degree-day factors of 3.5 to 4.5 mm/K/day for snow and 5.5 to 6.6 mm/K/day for ice (table 1). The results of the mean balance calculations are shown in fig. 5 and fig. 6. Unless a climatic warming is accompanied by a dramatic increase in precipitation (between 27 % and 38 % precipitation increase per K warming), all of the Norwegian glaciers will retreat significantly (fig. 9).

EMNEORD/SUBJECT TERMS
Glasiologi
Massebalanse
Klimamodell

ANSVARLIG UNDERSKRIFT

Bjørn Wold
avd.direktør

NORGES
VASSDRAGS- OG ENERGIDIREKTORAT
BIBLIOTEK

Kontoradresse: Middelthunsgate 29
Postadresse: Postboks 5091, Maj.
0301 Oslo 3

Telefon: (02) 95 95 95
Telefax: (02) 95 90 00
Telex: 79397 NVEO N

Bankgiro: 0629.05.75026
Postgiro: 0803 5052055

011. Andvord.

92/218

556(05)
~~N08~~

ex 2

FORORD

Hovedmålet med dette arbeidet har vært å utvikle en modell som kan brukes til beregning av breers massebalanse. Det har vært et poeng å benytte så få klimaparametere som mulig. Etter at effekten av eventuelle klimaforandringer på breenes massebalanse er beregnet, vil resultatene kunne være inngangsdata til dynamiske modeller for å estimere breenes utbredelse.

Prosjektet har vært et nordisk samarbeidsprosjekt under paraplyprosjektet "Klimaendringer og energiproduksjon". Medarbeidere i Danmark har vært Niels Reeh og Roger Braithwaite, og på Island Thomas Johannesson og Oddur Sigurdsson.

Oslo, juni 1992

Bjørn Wold
avd. direktør

INNHOLDSFORTEGNELSE

		side
1.	INNLEDNING	3
2.	BESKRIVELSE AV MODELLEN	3
2.1	Graddagsberegninger	3
2.2	Snø- og issmelting	4
2.3	Nedbør	5
3.	KALIBRERING AV MODELLEN	6
3.1	Ålfotbreen	6
3.2	Nigardsbreen	7
3.3	Hellstugubreen	7
3.4	Konklusjoner og diskusjoner	7
4.	KLIMAENDRINGER	9
5.	SAMMENDRAG	11
6.	REFERANSER	12

1. INNLEDNING

Breenes massebalanse er bestemt av et komplisert samspill mellom nedbør og smelting. En detaljert beskrivelse, modellering, av disse prosessene krever kjennskap til et stort antall variable, som for eksempel stråling, albedo, vind, temperatur, eksponering, fuktighet, nedbør osv. En rekke slike energibalansestudier er utført på breer i Norge.(Liestøl,1967; Messel 1982). Disse gir god informasjon om hvilke prossesser som har betydning for smeltingen på de enkelte breene. Ulempen ved disse modellene er imidlertid det store antall variable som kreves og som vanligvis ikke er tilgjengelig.

Det er derfor ønskelig å prøve forenklede smeltemodeller der færre klimaparametere er involvert. Den mest vanlige modelltypen relaterer smeltingen til temperaturen alene. Dette er de såkalte graddagsmodellene eller temperaturindeksmodellene. Disse beskriver ikke fysikken i smelteprossessen. Temperaturen blir direkte korrelert med smeltingen. Modellene er ikke godt egnet til beregninger av smelting på dagbasis. De har likevel fått stor utbredelse, og gir ofte gode resultater over lengre perioder. Årsaken ligger i at de fleste smeltefaktorene til en viss grad er korrelert med temperaturen.

I det følgende er en enkel graddagsmodell benyttet for å parametrisere massebalansen på tre breer i Sør-Norge. Breene som er benyttet er Ålfotbreen, Nigardsbreen og Hellstugubreen (fig.1). Disse har alle blitt målt siden 1963 og fram til idag. Modellen som er benyttet er utviklet av Niels Reeh (1991) til å estimere smeltingen på Grønlands innlandsis. Endel forandringer er imidlertid foretatt for at den skal kunne benyttes under andre klimaforhold.

2. BESKRIVELSE AV MODELLEN

Modellen er beskrevet i detalj av Niels Reeh (1991). Nedenfor blir det derfor bare gitt en kort redegjørelse med de endringer som er utført.

2.1 Graddagsberegninger

Inngangsdata er månedsmiddel for temperaturene. Modellen tilpasser så den beste trigonometriske funksjon til disse verdiene (fig. 2):

$$TD = TMA - AMP \cos(2\pi t/A) \qquad 1)$$

der TMA er langtidsmiddelet av gjennomsnittstemperaturen for hele året og AMP er amplituden. TD er den daglige temperatur, t er tid og A = 1 år. For 30-års normalene gir ligning 1) en

meget god tilnærming.

For å inkorporere tilfeldige temperaturvariasjoner på langtidsmiddelet gitt i ligning 1, er det innført et stokastisk ledd i modellen. Dette er nødvendig fordi disse fluktuasjonene vil kunne gi bidrag til den positive graddagssummen, særlig om våren og høsten, selv om middeltemperaturen for en dag er under frysepunktet. Graddagssummen (PDD) for hele året blir beregnet ved hjelp av

$$PDD=\int_0^{\infty}\left(T\left(\int_0^{A}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(T-TD)^2/(2\sigma)^2}\,dt\right)\right)dT \qquad 2)$$

der TD er gitt i ligning 1) og σ er standardavviket for normalfordelingen av temperaturen for hver dag (se fig. 2).

Modellens beregning av antall graddager er testet mot et datasett fra Bjørkehaug i Jostedalen for perioden 1964-82. Bjørkehaug er en av DNMI's synoptiske stasjoner der man i tillegg til maksimum- og minimumstemperaturen for hver dag, også måler temperaturen kl. 0700, kl. 1300 og kl. 1900. På grunnlag av disse dataene er middeltemperaturen for hver dag i et middelår beregnet. I beregningene er det tatt hensyn til både de daglige og de årlige temperaturvariasjonene i perioden. Standardavviket (σ) på den daglige middeltemperaturen er 4.4 ± 0.8 K, og det totale antall positive graddager for et middelår er 2035.

Disse verdiene er sammenlignet med tall funnet fra modellen med ulike verdier av σ (fig.3). For σ = 4.6 gir modell og beregninger på dagbasis samme verdi, i god overensstemmelse med ovennevnte og svært nær Niels Reehs valg av σ = 4.5 for beregninger på Grønland.

2.2 Snø- og issmelting

De beregnede positive graddager (PDD) fra ligning 1 og 2 blir brukt til å smelte snø og is. Smeltevann kan drenere gjennom snøpakken og gjenfryse. Avrenning foregår ikke før kuldemagasinet i snøen er brukt opp. Dersom det er nok graddager tilgjengelig vil all snø og påfrossen is smelte først, og deretter smeltes det breis. For snø og is benyttes ulike smelte-faktorer (graddagsfaktorer). På hvilket stadium modellen stopper er avhengig av tilgjengelige graddager i de ulike høydenivåer. Temperaturen blir beregnet ved hjelp av målte eller teoretiske temperaturgradienter.

2.3 Nedbør

På grunn av at modellen i sin opprinnelige form er laget for Grønlands innlandsis antas det at all nedbør faller som snø. En modifikasjon for norske klimaforhold trengs derfor for å beregne hvor stor del av den totale nedbør som faller som snø i de ulike høydenivåer.

Tilgjengelige data vil ofte bestå av månedsmidler for nedbør og temperatur på ulike klimastasjoner i nærheten av breen. Disse vil imidlertid gi en for grov tilnærming ved beregning av snøakkumuleringen, spesielt for måneder med middeltemperatur nær frysepunktet, idet all nedbør da enten vil beregnes å være snø eller regn. Temperaturen antas derfor å være normalfordelt, og den brøkdelen av måneden som har lavere temperatur enn skilletemperaturen mellom snø og regn beregnes. På dette grunnlag fordeles deretter den totale nedbøren som regn eller snø i hver måned.

Testing av beregningsmetodikken er gjort med samme datasett som for graddagsberegningene. Modellens snøakkumulering i ulike høydenivåer er sammenlignet med beregninger som er utført ved hjelp av daglige målinger av temperatur og nedbør fra 1964-81. For å få sammenlignbare resultater er nedbør-gradienten satt lik null, slik at snøakkumuleringen i de ulike høydenivåer bare er avhengig av temperaturen.

I modellens beregninger er standardavviket for månedsmiddel-temperaturen satt lik 3.6, som er den målte gjennomsnittsverdi i perioden 1964-82. Dette standardavviket må ikke forveksles med standardavviket for den daglige middeltemperaturen som er benyttet i graddagsberegningene foran.

Resultatene er vist i fig. 4, og viser at man får et rimelig bra estimat av snøakkumuleringen med denne metoden, selv om modellen gir for mye snø i lavere regioner og noe for lite snø i øvre områder av breen ifølge "fasit". Dette skyldes i hovedtrekk at temperaturen vanligvis stiger på nedbørsdager om vinteren og synker på nedbørsdager om sommeren. En større del av nedbøren enn det modellen gir, vil derfor falle som regn i breens lavere områder i vinterhalvåret. I tillegg vil noe mer snø falle om sommeren i de høyeste områdene av breen. Resultater av beregninger som benytter middeltemperaturen for dager med nedbør, istedenfor middeltemperaturen for alle dager i måneden er også plottet i fig.4 (stiplet linje), og viser en mye bedre tilpassning.

Det er imidlertid lite tilgjengelig statistikk om dette, og sett i forhold til andre usikkerhetsfaktorer som f.eks fastsettelse av graddagsfaktorer, temperaturgradienter og nedbørgradienter, gir bruk av månedsmiddelet av temperatur og nedbør tilfredsstillende grad av nøyaktighet for vårt formål.

3. KALIBRERING AV MODELLEN

For at modellen skal kunne benyttes til prognosestudier av massebalansen under ulike klimaforhold må den kalibreres mot kjente dataserier. I disse studiene er Ålfotbreen, Nigardsbreen og Hellstugubreen benyttet. Disse gir et godt bilde av klimaet vest/øst i Sør-Norge, fra det maritime til det mer kontinentale. For alle breene finnes det data for massebalansen fra 1963 til 1990. Tilsvarende finnes det datasett for nedbør og temperatur fra 1961-90 (30-årsnormaler) fra ulike meteorologiske stasjoner i nærheten av breene. Feilen man her gjør ved å benytte to ulike perioder for massebalansedata og meteorologiske data er liten fordi middelverdien for årene 1961 og 1962 er svært nær 30-års middelet.

Kalibreringen består i å finne et rimelig sett verdier for de parametrene som inngår i modellen. Foruten temperatur og nedbør på nærliggende meteorologiske stasjoner inngår følgende parametere: 1) nedbørgradient, 2) temperaturgradient, 3) issmeltefaktor og 4) snøsmeltefaktor. Det følgende er en beskrivelse av kalibreringsprosedyren for de enkelte breene.

3.1 Ålfotbreen

Den mest maritimt beliggende breen i Norge er Ålfotbreen. Nedbørsmengden i disse områdene av landet er meget store, og kan variere sterkt fra sted til sted. Til beregning av nedbøren på Ålfotbreen er det derfor valgt tre stasjoner rundt selve breen: Svelgen, Grøndalen og Ålfoten. Middelverdien fra disse er benyttet i beregningene. Temperaturdata er hentet fra DNMI's synoptiske stasjon i Førde (se fig. 1).

Det største problemet i kalibreringen av modellen er at parametrene er delvis innbyrdes avhengige, dvs at forandring av en parameter vil innvirke på de andre. Det er defor viktig at man benytter målte verdier for parametere der disse eksisterer.

På Ålfotbreen har man i tillegg til massebalansen også målt temperaturen ved brefronten i perioden 1965-81. For denne perioden er derfor temperaturgradienten mellom Førde og breen tilgjengelig for månedene juni, juli, august og september. Middelverdien for alle årene er -0.7 K/100 m. De målte verdiene er minst i juni (min = -0.94 K/100 m) og høyest i september (max = -0.6 K/100 m).

Med målt verdi av temperaturgradient og vinterbalanse som inngangsdata, vil de gjenværende ukjente parametrene i modellen være smeltefaktorene for is og snø. Den beste tilpasning av disse er funnet ved å sammenligne modellberegnede og målte verdier for sommer- og nettobalanse i 30-års perioden 1961-90. Resultatet vist på fig. 5a, med snøsmeltefaktor og issmeltefaktor på henholdsvis 4.5 mm/K/dag og 6 mm/K/dag.

Siste trinn i kalibreringen er innføring av målt nedbør fra nedbørstasjoner i nærheten av breen, istedenfor målt vinterbalanse. En god tilpasning oppnås med en nedbørgradient på 7 % /100 m (fig. 6a). Figuren viser forøvrig også vindens betydning for snøtransport fra breens øvre områder til mer lavtliggende deler. Denne effekt er ikke med i modellens beregningsprosedyrer.

3.2 Nigardbreen

Kalibreringsmetodikken som er beskrevet ovenfor er også benyttet for Nigardsbreen. Her er DNMI's synoptiske klimastasjon Bjørkehaug brukt (fig. 1). Temperaturgradienten mellom Bjørkehaug (324 m.o.h) og Steinmann (1630 m.o.h) er målt i perioden 1965-81. Middelverdien er -0.75 K/100 m. Med denne temperaturgradient, 30-årsmiddelet (1961-90) for temperaturen på Bjørkehaug og målt vinterbalanse for perioden 1964-90 gir moddelen rimelig bra beregninger av massebalansen med en snøsmeltefaktor på 4 mm/K/dag og issmeltefaktor på 5.5 mm/K/dag (fig. 5b).

Fig. 6b viser beregnede og målte verdier for massebalansen på Nigardsbreen der både nedbør og temperatur målt på Bjørkhaug er benyttet. En god tilpasning fås med en nedbørgradient på 8 %/100 m. Denne tilpasningen ville ha vært enda bedre hvis middeltemperaturen for dager med nedbør var benyttet i beregningene (jfr. kap. 2.3)

3.3 Hellstugubreen

For beregningene på Hellstugubreen er nedbørstasjonen Bygdin (1055 m.o.h) og temperaturstasjonen på Skåbu (865 m.o.h) benyttet (fig. 1). Det er ikke utført målinger av temperaturgradienten mellom Skåbu og Hellstugubreen. Det er derfor valgt samme temperaturgradient som for Nigardsbreen, -0.75 K/100 m. Resultatene er vist i fig. 5c. Graddagsfaktorene for snø og is er henholdsvis 3.5 mm/K/dag og 5.5 mm/K/dag. Disse er noe lavere enn de som ble funnet på Nigardsbreen. Med en nedbørgradient på 7 %/100 m fås en rimelig bra tilpasning for massebalansen på Hellstugubreen (fig. 6c). Også her ville tilpasningen blitt bedre ved å benytte middeltemperaturen for dager med nedbør istedenfor alle dager i måneden.

3.4 Konklusjoner og diskusjoner

En oversikt over parameterverdiene for de enkelte breene er gitt i tabell 1.

Tabell 1: Parameterverdier funnet ved kalibrering

	Ålfotbreen	Nigardsbreen	Hellstugu-breen
Temperatur-gradient	-0.70 K/100m	-0.75 K/100m	-0.75 k/100m
Nedbør-gradient	7%/100m	8%/100m	7%/100m
Snøsmelte-faktor	4.5 mm/K/d	4 mm/K/d	3.5 mm/K/d
Issmelte-faktor	6 mm/K/d	5.5 mm/K/d	5.5 mm/K/d

Temperaturgradienten vil naturlig minke (bli mer negativ) fra vest til øst, som gjenspeiler temperaturgradienten for fuktig og tørr luft.

Nedbørgradienter på 7-8% ser ut til å gi bra resultater for alle breene.

Verdiene til smeltefaktorene synker fra vest mot øst. Dette skyldes i hovedtrekk mer vind og høyere luftfuktighet i de maritime strøk, noe som gir større smelte-effekt ved samme temperatur. På Ålfotbreen er betydningen av stråling kontra konveksjon/kondensasjon 40% mot 60 %, mens det motsatte er tilfelle i Jotunheimen (Messel 1982). For en mer detaljert beregning av massebalansen i ulike år vil sansynligvis en variabel graddagsfaktor og daglige verdier for temperatur og nedbør, være nødvendig som inngangsdata til modellen. Til slike beregninger vil HBV-modellen være godt egnet (Bergstrøm, 1976; Wingård et. al 1978).

Snøsmeltefaktorene ser ut til å ligge i nærheten av hva andre har funnet, mens verdien av issmeltefaktorene er noe lavere. Målinger som ble utført på Ålfotbreen av NVE i 1965 gir tall for smeltefaktoren på 5.3 mm/K/dag ved likevektslinja og 7.5 mm/K/dag på bretunga. I en måleserie på Fillefjell fra 1967-1974 fant Furmyr og Tollan (1975) et middeltall for snøsmelting på 3.9 mm/K/dag. Liestøl (1967) beregnet en middelverdi for Storbreens avsmelting på 5.5 mm/K/dag i perioden 1949-65. For breavsmelting på Grønland benytter Braithwaite (1989) verdier på 3 mm/K/dag for snø og 7-8 mm/K/dag for breis.

Disse verdiene bygger på målt avsmeltning og temperatur på samme sted, eller meget nær breen. Beregningene i foreliggende arbeid tar imidlertid utgangspunkt i temperaturen på nærliggende meteorologiske stasjoner, og teoretisk eller målt temperaturgradient. Små forandringer av de valgte gradientene vil kunne gi utslag på smeltefaktorene. Spredte målinger på Nigardsbreens tunge viser f.eks at temperaturen er 1-2 °C

lavere enn på Bjørkehaug i samme høydenivå. Dette innebærer en øking av issmeltefaktoren til 7 mm/K/dag for å innpasse beregnet smelting til de målte verdiene.

På Ålfotbreen er det stor spredning i de målte temperatur-gradientene og et annet valg ville også her kunne gi en noe høyere verdi for smeltefaktorene.

Verdiene av is- og snøsmeltefaktorene som her er valgt må derfor ses på som de best tilpassede til de meteorologiske data som her er tilgjengelig. I betraktning av den enkle beregningsmetoden som her er benyttet synes verdiene likevel å ligge rimelig nær verdier funnet av andre.

Hovedmålet med dette prosjektet er som før nevnt å undersøke effekten av storskala klimaendringer på breenes utvikling. Til dette formål bør derfor foreliggende kalibrering være tilstrekkelig.

4. KLIMAENDRINGER

Med de ovennevnte kalibrerinsresultater som utgangspunkt, er breenes nettobalanse beregnet for ulike klimascenarier.Med en dobling av CO_2 innholdet, noe som antas å inntreffe omkring år 2030, er det mest sannsynlige estimat at temperaturen vil stige 1.5 til 3.5 K, og at man får en nedbørøking på 7 til 8% (Sælthun m.fl.1990). Parameterverdiene som er funnet i kalibreringen ovenfor holdes konstant i beregningene.

Det er foretatt simuleringer med temperaturøking fra 0K til 5K med steg på 1K. For hver temperaturheving er nettobalansen beregnet med en nedbørøking på 0 %, 20% og 40 %. Resultatene for 1K og 3K temperaturheving er vist i fig. 7

På Ålfotbreen vil en temperaturheving på 3K få dramatiske følger. Breen ligger lavt og er derfor sensitiv for tempera-turforandringer, idet en forholdsvis større del av nedbøren vil falle som regn istedenfor snø. Ved 3K temperaturheving vil firnlinja ligge høyere enn breen, dersom det ikke samtidig blir en nedbørøking på 30-40%. En mer moderat temperatur-hevingen på 1K vil kreve en nedbørøking på ca 20 % for at breen skal opprettholde sin nåværende størrelse.

Nigardbreen vil klare seg bedre, selv om firnlinja for det mest dramatiske alternativ (3K temperaturheving og ingen øking i nedbøren), vil stige med 300 m, fra ca 1500 m.o.h. til ca 1800 m.o.h. Fordi store deler av breens næringsområde ligger i dette høydenivå vil dette få større betydning for breen enn massebalanseberegningene alene viser. På bretunga vil breen smelte opptil 5 m mer pr år enn idag. Dette betyr at den vil bli brattere og sannsynligvis mer aktiv. Disse spørsmål vil man imidlertid få svar på ved hjelp av en bredynamisk modell der massebalansedataene er inngangsdata. For det mer moderate

temperaturanslaget på 1K vil Nigardsbreen klare seg bra med en nedbørøking på ca 20 %, selv om breen også da vil få en betydelig større avsmelting i de lavere områder enn med dagens klima.

På Hellstugubreen vil firnlinja stige med ca 300 m dersom temperaturstigningen er 3 K, og man antar at det ikke blir noen nedbørøking i forhold til dagens klima. Med dette alterativet vil breen sannsynligvis forsvinne i løpet av 50-100 år. Det er imidlertid mer sannsynlig med en temperaturheving på 1-2 K, og en nedbørøking på 10 % i dette området. Dette innebærer en moderat tilbakegang for breen. Det er i denne forbindelse viktig å påpeke at Hellstugubreen er en dal/botnbre, og derfor ikke så sensitiv for firnlinjeheving som de store platåbreene, der en forholdsvis liten forandring vil kunne gi en stor forrykking av forholdet mellom avsmeltingsområdet og næringsområdet.

En nyttig parameter for å bedømme breens "helsetilstand" er den spesifikke årlige balanse (nettobalansen) for hele breen. En sammenligning av observert nettobalanse i perioden 1963-90, og modellens beregninger av nettobalansen i normalperioden 1961-90 er vist i tabell 2.

Tabell 2: Sammenligning mellom målt og beregnet nettobalanse (meter vannekvivalenter).

	Ålfotbreen	Nigardsbreen	Hellstugubreen
Observert 1963-90	+ 0.30	+ 0.43	- 0.25
Modellert (med beregnet vinterbalanse)	+ 0.45	+ 0.26	- 0.16
Modellert (med observert vinterbalanse)	+ 0.39	+ 0.43	- 0.29

Fig. 8 viser følsomheten til de ulike massbalansekomponentene på en klimaendring. Figuren bekrefter at Ålfotbreen er mer følsom for klimaoppvarming enn Nigardbreen og Hellstugubreen, både når det gjelder vinter- og sommerbalansen. Dette resulterer i en sterkt synkende tendens for nettobalansen (specific annual balance).

For små forandringer i temperaturen i forhold til dagens klima (1960-90 normalen), kan følsomheten til klimaforandringer for de tre breene illustreres av følgende ligninger (Δb = forandring i nettobalnse (m/år), ΔT = forandring i temperatur (K), $\Delta P/P$ = relativ forandring av nedbør (%)):

Ålfotbreen	$\Delta b = -1.04\Delta T + 3.87\Delta P/P$	
Nigardsbreen	$\Delta b = -0.60\Delta T + 2.28\Delta P/P$	3 a,b,c
Hellstugubreen	$\Delta b = -0.54\Delta T + 1.42\Delta P/P$	

For større forandringer må ligningene modifiseres av minst to årsaker: 1) Fig.8 viser at det ikke er et lineært forhold mellom massebalanseforandring og temperaturforandring. 2) Forandring i breens geometri pga endring i klima vil forrykke forholdet mellom akkumulasjons- og ablasjonsområdet. Etter noen år vil denne forandring bli så stor at den vil få en signifikant innflytelse på massebalansen for hele breen.

Forandringene av nettobalansen for de enkelte breene vil klart være avhengig av både nedbør- og temperaturforandring. Dette illustreres i fig .9, som viser forandring i nettobalansen for en temperaturheving på 1 K (db/dT), som funksjon av prosentvis øking av nedbøren pr.grad (dp/PdT). Fra figuren ser man at nettobalansen for Hellstugubreen vil synke hvis temperaturen stiger 1 K, dersom ikke nedbørøkingen er over 38 $\%K^{-1}$. For Ålfotbreen og Nigardsbreen er tilsvarende prosenttall 27 $\%K^{-1}$. Dette betyr at dersom ikke den klimatiske oppvarmingen blir fulgt av en dramatisk øking av nedbøren vil alle tre breene miste masse.

5. Sammendrag

En enkel graddagsmodell er benyttet for å beregne massebalansen på ulike breer på grunnlag av temperatur og nedbørdata fra nærliggende klimastasjoner. Breene som er valgt er Ålfotbreen, Nigardsbreen og Hellstugubreen i et vest/øst profil over Sør-Norge.

Modellen er kalibrert mot målt massebalanse i perioden 1963-90 og metereologiske data for 30-årsperioden 1961-90. Parametrene som inngår i modellen er foruten temperatur og nedbør på nærliggende klimastasjoner, temperaturgradient, nedbør-gradient, snøsmeltefaktor (graddagsfaktor) og issmeltefaktor. Temperaturgradienter som er benyttet i modellen ligger mellom -0.7 og -0.75K pr 100 m. Nedbørgradienten er på 7-8% pr 100 m. Graddagsfaktorerene ligger mellom 3.5 og 4.5 mm/K/dag for snø, og fra 5.5 til 6 mm/K/dag for is.

Med de nevnte paramerverdiene er det gjort beregninger av nettobalansen på breene for ulike klimascenarier. For det mest sannsynlige med en temperaturheving på 1-2 K og nedbørøking på ca 10%, vil Hellstugubreen klare seg best. Dette skyldes at breen ligger så høyt at mye av nedbøren vil falle som snø selv om temperaturen øker. På Nigardsbreens lavereliggende områder ser man det motsatte, at øking av nedbøren har liten betydning for nettobalansen, fordi mesteparten av økingen faller som regn. Breen vil muligens bli brattere og dynamisk mer aktiv.

Hvis temperaturen øker ytterligere noen grader vil også Hellstugubreen få en betydelig tilbakegang fordi nedbøren faller som regn også her. Disse studiene viser at dersom ikke en eventuell temperaturheving blir fulgt av en betydelig nedbørøking (mellom 27 $\%K^{-1}$ og 38 $\%K^{-1}$), vil alle breene smelte drastisk ned.

Det er et komplisert samspill mellom mange faktorer, klimatiske, geometriske og dynamiske som bestemmer hvordan en bre vil reagere på en klimaforandring. For å få den fulle forståelsen av dette kreves større dataserier og egnede modeller, som tar hensyn til både de klimatiske og dynamiske aspekter.

6. Referanser

Bergsrøm, S. (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catcments. SMHI rapporter, RHO 7, Norrkøping.

Braithwaite, R.J and Olesen, O.B (1989): Calculation of glacier ablation from air temperature, West-Greenland. In: Oerlemans, J (ed): Glacier Fluctuations and Climatic Change, Klüwer Academic Publ 219-223.

Furmyr, S and Tollan, A (1975): Resultater og erfaringer av undersøkelser i Filefjell representative område 1967-1974. Den norske IHD-komite, Sekretariatet.

Liestøl, O (1967): Storbreen glacier in Jotunheimen, Norway. Norsk Polarinstitutt skrifter nr.141.

Messel, S (1982): Energibalanseundersøkelser på breer i Norge 1954-1981. In Glasiologiske undersøkelser i Norge 1982. Rapport nr 1-85. NVE, Hydrologisk avdeling.

Reeh, Niels (1991): Parameterization of melt rate and surface temperature on the Greenland Ice Sheet. Polarforschung 59/3 s 113-128.

Sælthun, N.R., Bogen, J., Flood, M., Laumann, T., Roald, L., Tvede, A.M. og Wold, B. (1990): Klimaendringer og vannressurser. Bidrag til den interdepartementale klimautredning. V-publikasjon nr 30. Vassdragsdirektoratet.

Wingård, B., Sæltun, N .R., Aam, S og Killingtveit, Å. (1978): Hydrologiske modeller for tilsigsprognoser og kraftverksdrift. Hydrologisk avdeling, Elektrisitetsforsyningens forskningsinstitutt, Institutt for vassbygging, rapport EFI-TR 2314.

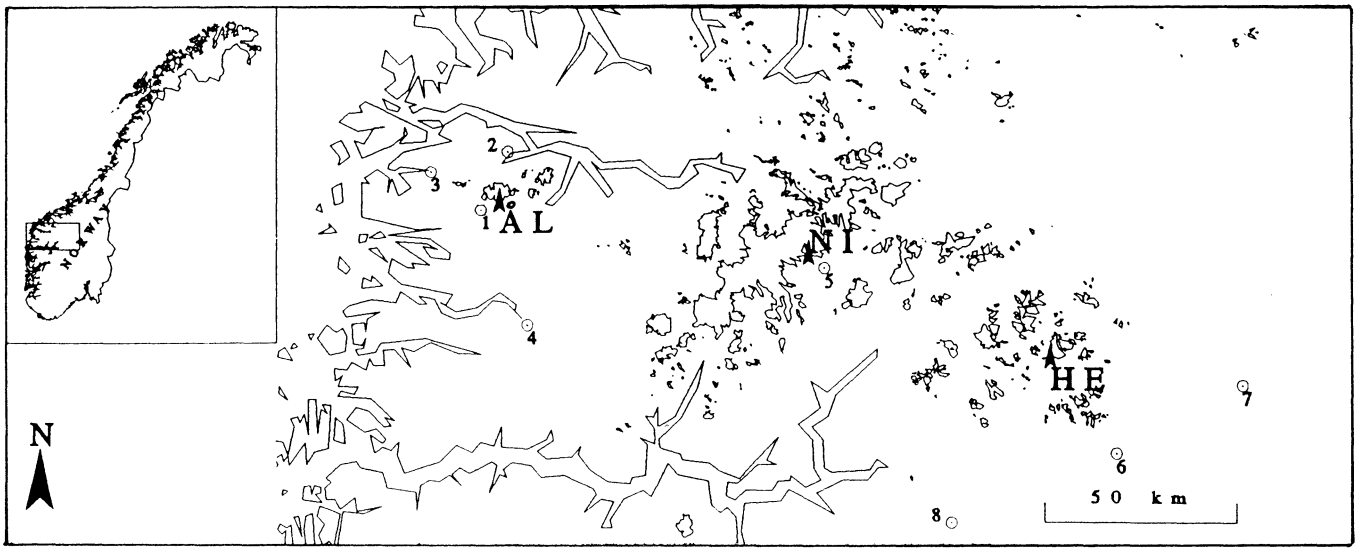

Fig. 1: Lokalisering av breer og metereologiske stasjoner. ÅL= Ålfotbreen, NI= Nigardsbreen, HE= Hellstugubreen. Klimastasjoner: 1=Grøndalen, 2=Ålfoten II, 3=Svelgen, 4= Førde, 5=Bjørkehaug, 6=Bygdin, 7=Skåbu, 8=Fillefjell.

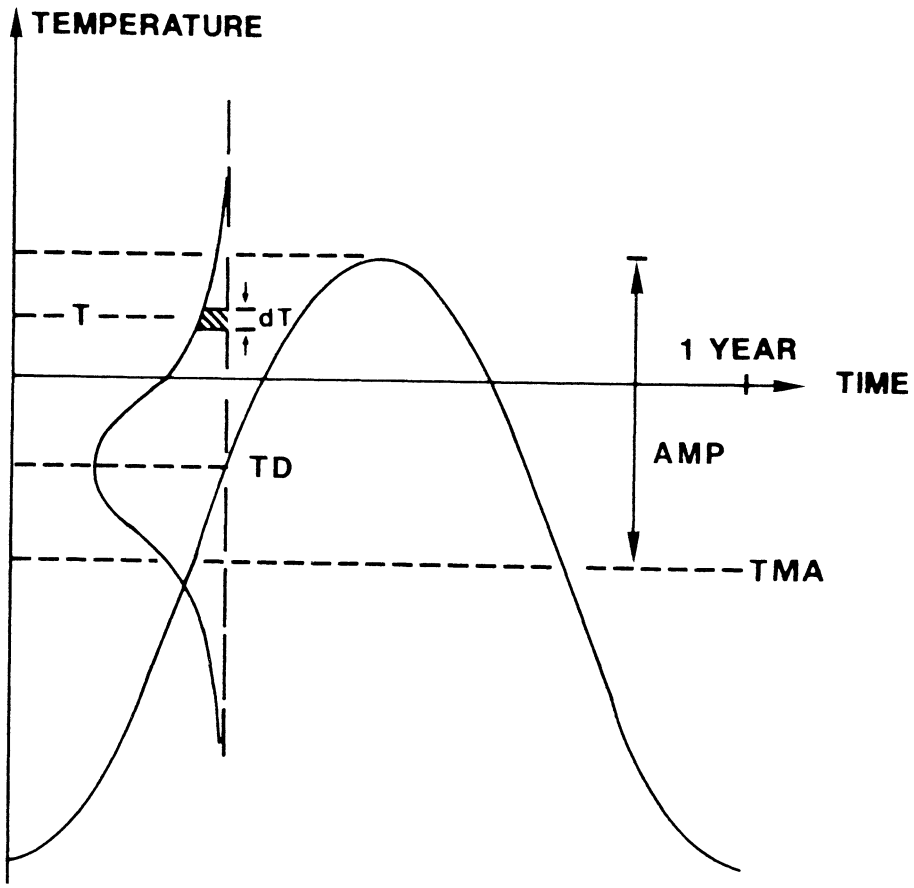

Fig. 2: Årlig temperaturvariasjon benyttet til beregning av positive graddager pr år. TD er daglig temperatur, TMA er årlig middeltemperatur, AMP er amplitude, t er tid og A er 1 år. Mer forklaring i teksten.

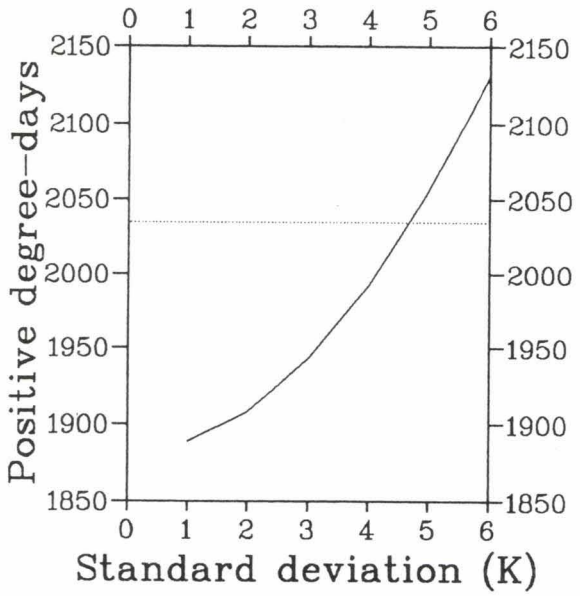

Fig. 3: Modellberegnede positive graddager med ulike standardavvik for perioden 1964-82 på Bjørkehaug. Prikket linje angir antall positive graddager (2035) beregnet utfra daglige observasjoner. Det korresponderende standardavvik er 4.6 K.

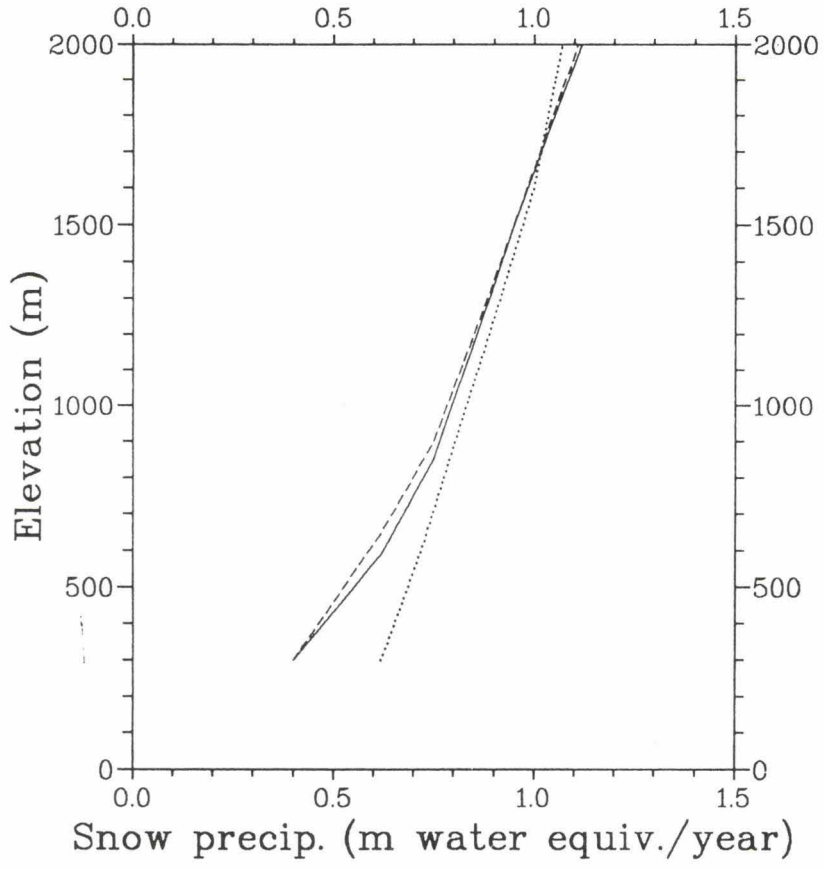

Fig. 4: Modellberegnet snøakkumulasjonen som funkjon av høyden over havet (prikket og stiplet kurve), sammemlignet med beregninger fra daglige observasjoner (heltrukket linje) på Bjørkehaug i perioden 1964-82. I testen er nedbørgradienten satt til null. Prikket kurve er resultater av beregninger der månedlig middeltemperatur er benyttet, og stiplet kurve angir resultater der månedlig temperatur for dager med nedbør er benyttet.

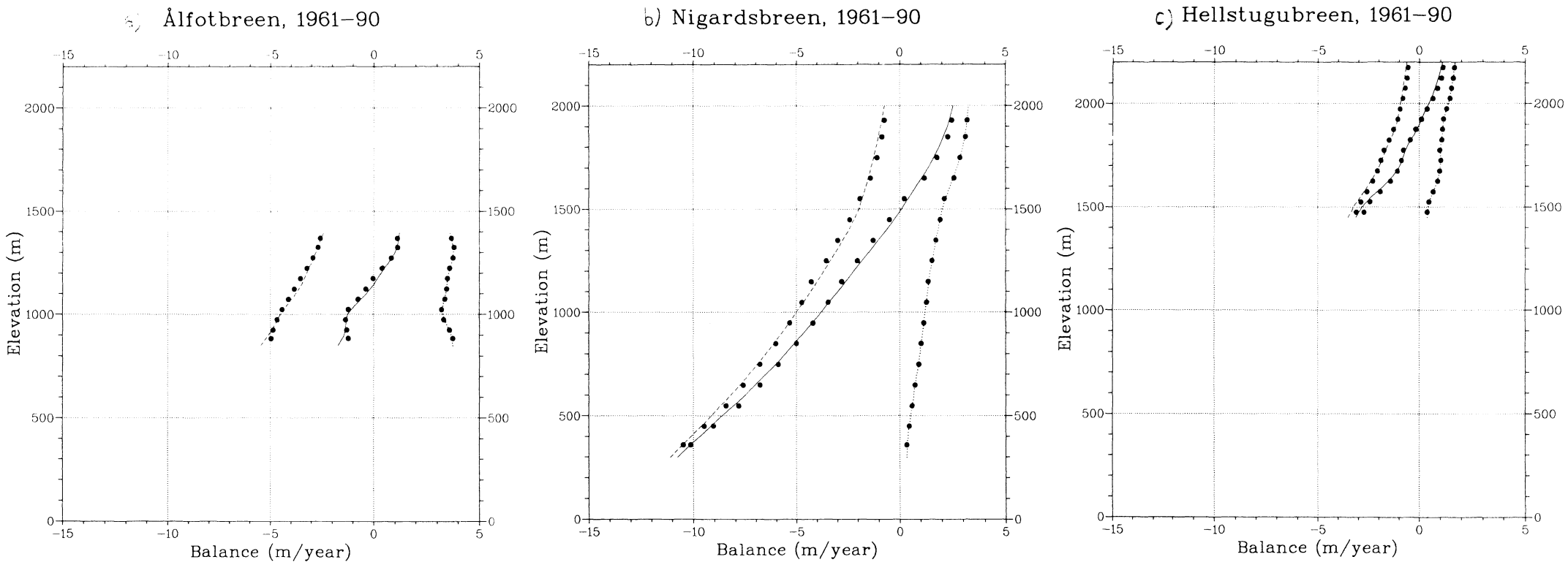

Fig. 5: Beregnet (stiplet og heltrukket linje, periode 1961-90) og observert (punkter, periode 1963-90) massebalanse som funkson av høyden over havet for Ålfotbreen. Inngangsdata til modellen er observert vinterbalanse på breen (prikket linje), og månedlige middelverdier for temperaturen i Førde. For andre parameterverdier se tabell 1. -----sommerbalansen, _____ nettobalansen, ... vinterbalansen.

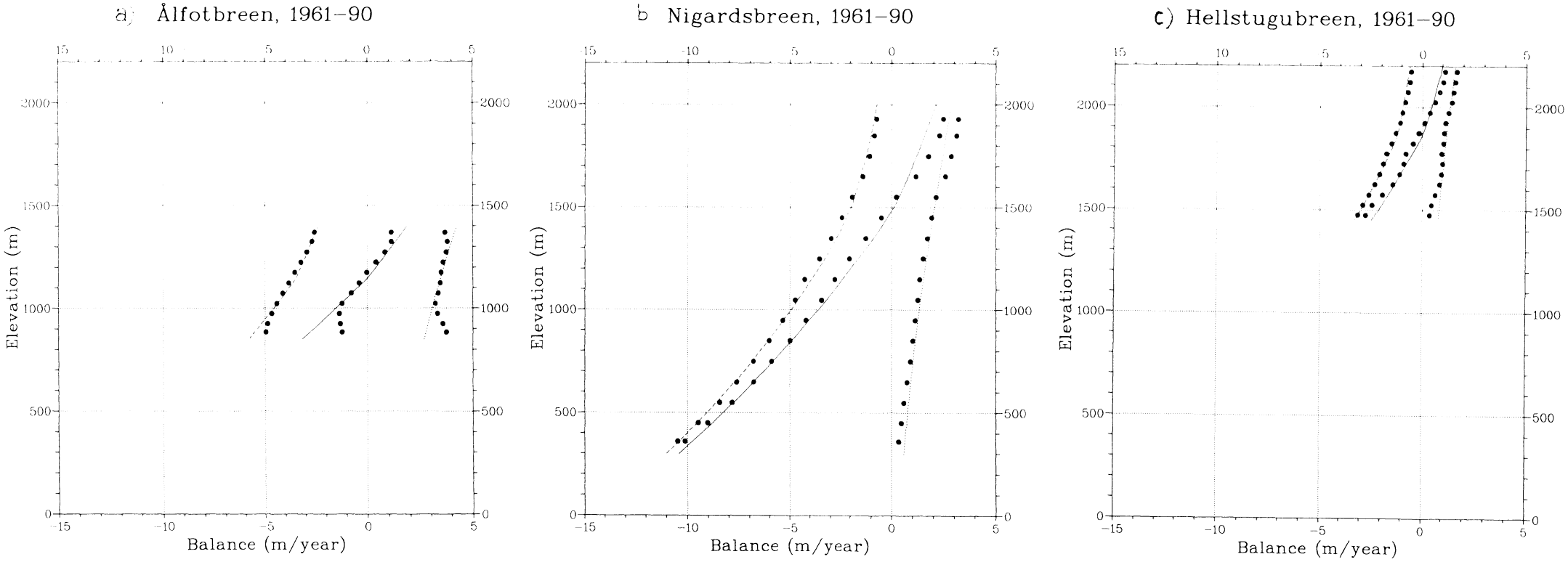

Fig. 6: Beregnet (stiplet og heltrukket linje, periode 1961-90) og observert (punkter, periode 1963-90) massebalanse som funkson av høyden over havet for a) Ålfotbreen, b) Nigardsbreen og c) Hellstugubreen. Inngangsdata til modellen er månedlige middelverdier for temperaturen på a) Førde, b) Bjørkehaug og c) Skåbu, og månedlig middelverdi for nedbøren på a) Ålfoten, Grøndalen og Svelgen (middelverdi), b) Bjørkehaug og c) Bygdin. For andre parameterverdier se tabell 1. -----sommerbalansen, _____ nettobalansen, ... vinterbalansen.

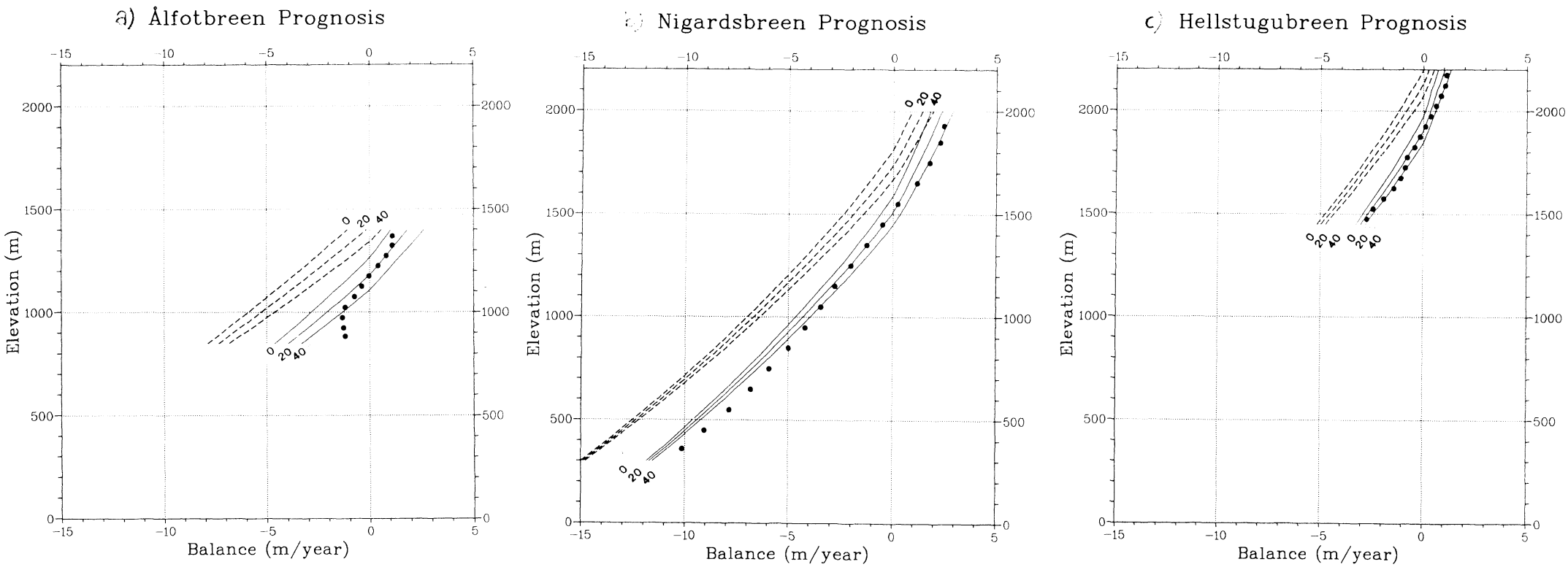

Fig. 7: Beregnet nettobalanse for ulike klimascenarier sammenlignet med observert nettobalanse (punkter) for perioden 1963-90 på a) Ålfotbreen, b) Nigardsbreen og c) Hellstugubreen. Heltrukne linjer illustrerer beregnet nettobalanse for en temperaturøking på 1 K med en øking av nedbøren på henholsvis 0%, 20% og 40%. Stiplede linjer illustrerer nettobalansen for en øking av temperaturen på 3 K og tilsvarende nedbørforandringer.

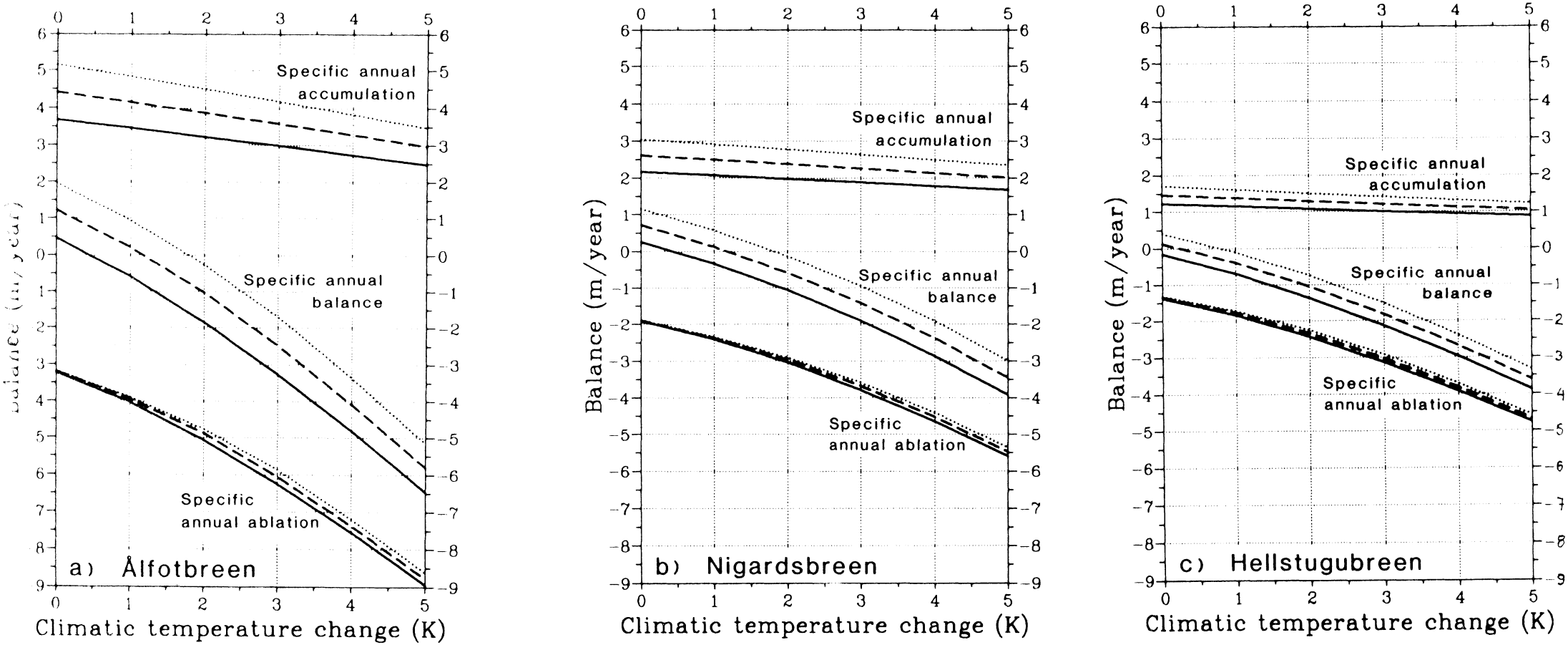

Fig. 8: Klimafølsomhet for vinterbalansen (specific annual accumulation), nettobalansen (specific annual balance), og sommerbalansen (specific annual ablation) for a) Ålfotbreen, b) Nigardsbreen og c) Hellstugubreen.
___ uforandret nedbørforhold sammenlignet med dagens,
--- 20% øking av nedbøren, ... 40% øking av nedbøren.

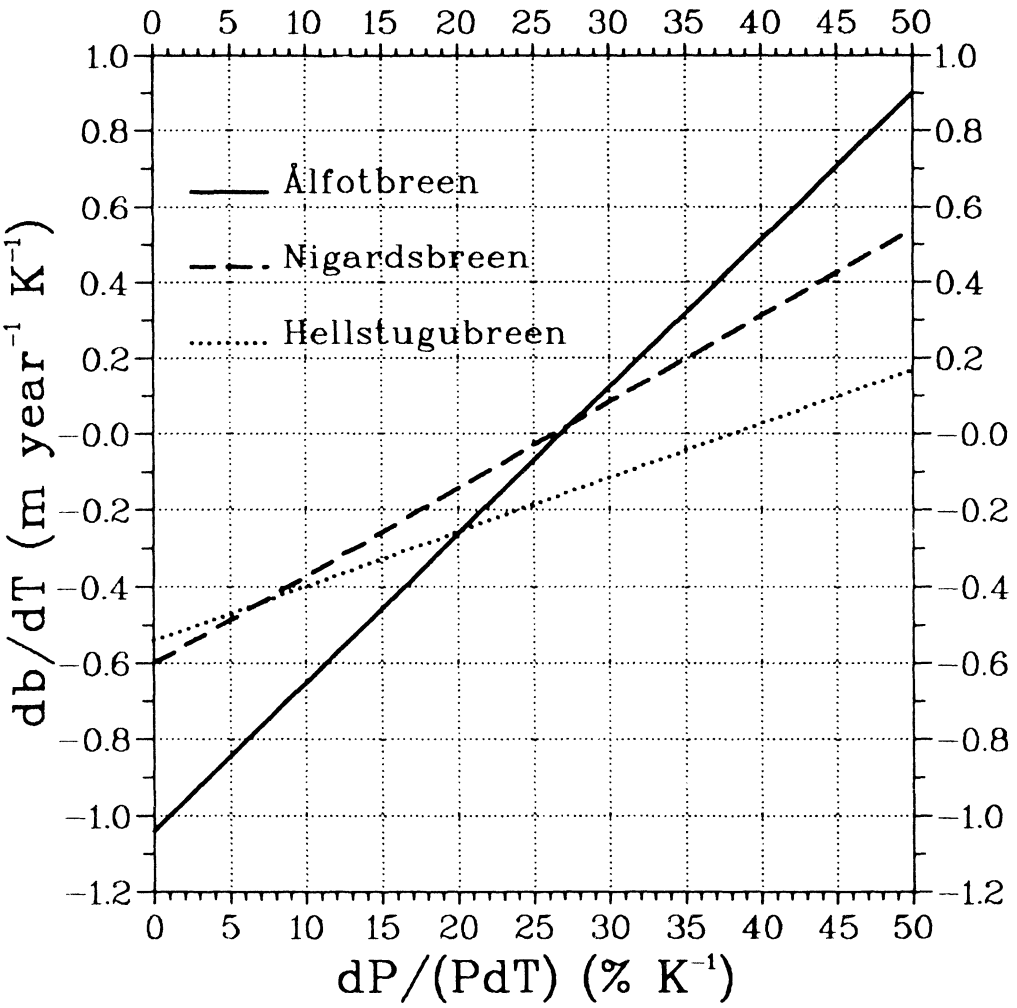

Fig. 9: Forandring av nettobalansen (specific annual balance) for en temperaturheving på 1K (db/dT) som funksjon av prosentvis øking av nedbøren pr.grad (dP/PdT) for Ålfotbreen, Nigardsbreen og Hellstugubreen.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energiverk (NVE)
Adresse: Postboks 5091 Majorstua, 0301 Oslo 3

I 1992 ER FØLGENDE PUBLIKASJONER UTGITT:

Nr 1 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Seminar om småkraftverk Olavsgård, 29. jan. 1992. (95 s.)

Nr 2 Gry Berg og Per Einar Faugli (red.): FoU-prosjekter i Orkla. Oppsummerende prosjektmøte. (349 s.)

Nr 3 Hallgeir Elvehøy og Nils Haakensen (red.): Glasiologiske undersøkelser i Norge 1990 og 1991. (103 s.)

Nr 4 John Cock: Pris på elektrisk kraft til husholdninger 1992. (7 s.)

Nr 5 Opprustning og utvidelse av vannkraft. Nr 18. Mælafoss og Skulbørstadfoss kraftverker, Nord-Trøndelag. (15 s.)

Nr 6 Olianne Eikenæs og Per Einar Faugli (red.): Etterundersøkelsesprogrammet - statusrapport 1991. (71 s.)

Nr 7 Jon Arne Eie, Per Einar Faugli og Odd E. Sjulsen: Type og referansevassdrag

Nr 8 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Erfaringer fra gjennomførte prosjekter, nr 19 Aurland I kraftverk, Sogn og Fjordane. (27 s.)

Nr 9 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk.
Erfaringer fra gjennomførte prosjekter, nr 20 Vamma kraftverk, Østfold. (35 s.)

Nr 10 Anders Korvald og Torodd Jensen, NVE/Ødegård & Grøner:
Vannkraftpotensialet relatert til kostnaden for vindkraftverk.
Grunnlag: ressurskartlegging i Vesterålen. (122 s.)

Nr 11 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Erfaringer fra gjennomførte prosjekter, nr 21 Nedre Nea kraftverk, Sør-Trøndelag. (30 s.)

Nr 12 Pål Meland: Strategisk plan for NVE. (20 s.)

Nr 13 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Utnyttelse av minstevannføring til kraftproduksjon i Sira-Kvina. (19 s.)

Nr 14 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Erfaringer fra effektutvidelse ved Tronstad kraftverk. (22 s.)

Nr 15 Opprusting og utvidelse av vannkraftverk. Beslutningsprosessen - en veiledning. (48 s.)

Nr 16 Konsesjonskraft. (59 s.)

Nr 17 Tron Laumann : Simulering av breers massebalanse. (16 s.)

NORGES VASSDRAG
OG ENERGIVERK
00531861