



NORGES VASSDRAGS- OG ENERGIVERK

VASSDRAGSDIREKTORATET

HYDROLOGISK AVDELING

ANTATTE ENDRINGER PÅ AUSTDALSMBREEN
OG SYGNEKARDBREEN ETTER REGULERING
AV AUSTDALSVATN OG KUPVATN

OPPDRAKSRAFFORT

13 - 86

NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIDIREKTORAT
BIBLIOTEKET

Rapportens tittel: <i>ANTATTE ENDRINGER PÅ AUSTDALSBREEN OG SYGNEKARDBREEN ETTER REGULERING AV AUSTDALSVATN OG KUPVATN</i>	Dato: 1986-10-30 Rapporten er: Åpen Opplag: 100
---	---

Saksbehandler/Forfatter: Erik Roland Brekontoret	Ansvarlig: <i>Bjørn Wold</i> Bjørn Wold
--	---

Oppdragsgiver: <i>STATKRAFT</i>

Sammendrag

Kalvingen fra Austdalsbreen under den første oppfyllingen vil ventelig bli omlag ca 15 ganger større enn den årlige kalvingen i perioden 1966-84 da brefronten trakk seg tilbake ca 100 m. Etter reguleringen vil istransporten ut i magasinet bli ca 4-5 ganger så stor som den nåværende. Kalvingen i dagens situasjon foregår som ras fra brefronten. Under den første oppfyllingen av magasinet vil relativt store isfjell brette av og drive mot dammen. Etter reguleringen vil det foregå begge typer kalving. Intensiteten blir ventelig størst på sensommeren.

Det mest sannsynlige forløpet blir dannelsen av en kalvingsbukt som vil stoppe før eller på en terskel ca 1 600 m innenfor dagens brefront i løpet av ca 20 år. Manøvreringen av magasinet bestemmer tilbakegangen med mindre endrede vanntrykksforhold langs bunnen av breen forårsaker en dramatisk økning i brebevegelsen. Disse forhold vet man lite om i dag. Breens reaksjoner på endring i de fysiske forholdene bør simuleres med en dynamisk bremodell.

Kalving fra Sygneskardbreen i Kupvatn vil neppe endre seg vesentlig da HRV blir lik dagens normalvannstand. Kalvingen vil skje som ras fra brefronten som vil stabiliseres eller gå litt framover.

Bølgene som dannes når isblokker raser fra brefrontene, blir større etter reguleringen fordi fallhøyde og blokkstørrelse øker. Bølgehøyden kan bli opp til 3 m i kalvingsområdet i Austdalsvatn.

Adkomsten til Jostedalsbreen via den sydlige ruten på Austdalsbreen vil neppe kunne opprettholdes, mens den nordlige må brukes med større forsiktighet pga. endring i gradient og sprekke mønster på breoverflaten.

Ferdseisruten opp Sygneskardbreen ventes ikke å endre seg vesentlig.

FORORD

Foreliggende rapport er et resultat av bestilling nr B-01/5228 fra Statkraft, der Brekontoret ble bedt om å komme med en uttalelse om breforholdene ved Austdalsbreen og Sygneskardbreen etter utbygging av Jostedalsvassdraget.

Før noen uttalelse kunne gis var det nødvendig å kjenne breens dybde i forhold til vannstanden i magasinene. Dette arbeid ble etter kombinasjon med andre bestillinger fra Statkraft et omfattende arbeid som vil bli presentert i egen rapport.

Det er under arbeidet med denne rapporten blitt klart at det foreligger stor usikkerhet i mulig utvikling av Austdalsbreen etter regulering.

Konklusjonene i foreliggende rapport bygger hovedsaklig på skjønn basert på tilgjengelig erfaring og kunnskap om bredynamikk.

Hovedarbeidet med rapporten er utført av førstehydrolog Erik Roland. Den er imidlertid også et resultat av innsats fra flere personer innen Hydrologisk avdeling, som har deltatt i faglige diskusjoner eller gitt enkeltbidrag.

Siv.ing. Bonsak Schieldrop har vært engasjert i vurdering av bølgedannelsen.

Oslo, oktober 1986



Arne Tollan

Avdelingsdirektør

INNHOOLD

	Side
1. INNLEDNING	3
1.1 Beskrivelse av reguleringen	3
1.2 Beskrivelse av kalvingsprosessen	4
2. KALVING I AUSTDALSVATN	5
2.1 Dagens situasjon	5
2.2 Etter reguleringen	7
2.2.1 Første gangs oppfylling	7
2.2.2 Senere oppfyllinger	8
2.2.3 Endrede vanntrykksforhold under breen	13
3. KALVING I KUPVATN	14
3.1 Dagens situasjon	14
3.2 Etter reguleringen	15
4. BØLGER I MAGASINENE SOM FØLGE AV KALVING	16
4.1 Dagens situasjon	16
4.2 Etter reguleringen	17
5. ISFJELL I AUSTDALSVATN/STYGGEVATNMAGASINET	19
5.1 Smelting av isfjell	19
5.2 Isfjelldrift	21
6. ADKOMSTRUTER TIL JOSTEDALSBREEN	22
6.1 Austdalsbreen	22
6.2 Sygneskardbreen	24
7. REFERANSER	25

APPENDIX

1. INNLEDNING

1.1 Beskrivelse av reguleringen

Ved utbyggingen av Jostedalsvassdraget i Luster kommune vil vannstanden i Austdalsvatn bli regulert mellom kotene 1130 (LRV) og 1200 (HRV). Austdalsbreen er en østlig utløper av Jostedalsbreen som munner ut i den nordlige delen av Austdalsvatn (1157 m o.h.).

Syngeskardbreens utløper mot øst (heretter kalt Syngeskardbreen) ender i Kupvatn (1265 m o.h.). Etter utbyggingen vil vannstanden i det nordlige bassenget der brearmen kalver, bli regulert mellom kote 1250 (LRV) og dagens normalvannstand (HRV).

Breenes beliggenhet er vist i fig. 1.

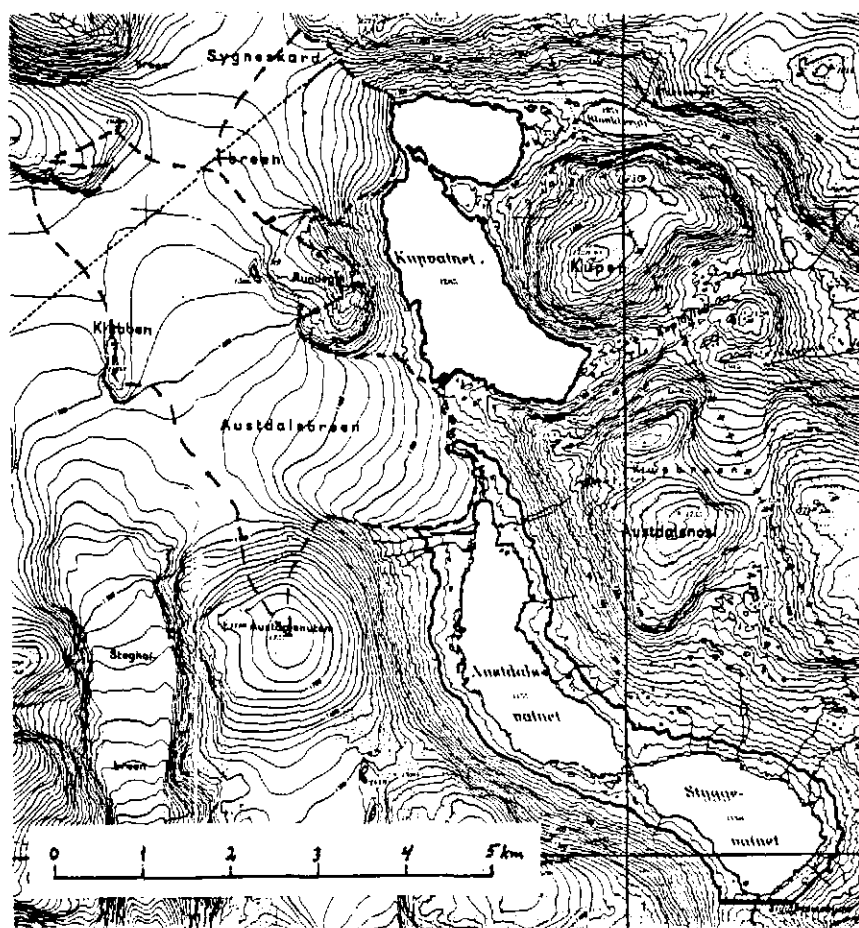


Fig. 1. Kart over området med bregrenser (etter overflatetopografien) og HRV for magasinene inntegnet.

1.2 Beskrivelse av kalvingsprosessen

Kontinuitetsligningen for en brefront kan skrives

$$Q_c = Q_i - S \frac{dX}{dt} \quad (1.1)$$

hvor dX/dt er endringen av brefrontens tverrsnitt projisert på et plan normalt på x-aksen. Denne er horisontal og positiv i bevegelsesretningen med $x=0$ der breens toppområde begynner. S er arealet av ovennevnte tverrsnitts projeksjon. Q_i er volumfluksen (istransporten) i x-retningen til brefronten og Q_c er volumfluksen av isfjellkalvingen i samme retning fra brefronten. Forholdene $Q_i/S = v_i$ og $Q_c/S = v_c$ defineres som henholdsvis midlere brebevegelse ved fronten og kalvingshastighet. Ovennevnte ligning kan da skrives

$$v_c = v_i - \frac{dX}{dt} \quad (1.2)$$

hvor kalvingshastigheten kan beregnes om brebevegelsen ved fronten og endringen i frontposisjon er kjent.

Ras fra en brefront inntreffer når smelting under vannflaten, sammen med en økende ishastighet fra bunnen av breen og oppover mot overflaten, forårsaker underminering og overheng. Dette er den mest vanlige formen for kalving der brefronten står på grunn i en innsjø eller fjordarm.

Kalving fra en bre som følge av variasjoner i vannstanden, vil inntreffe når deler av breen flyter. På stigende vannstand vil det dannes bunnsprekker der breen begynner å flyte, og isfjell kan brette opp pga. oppdriften. Når vannstanden synker, vil de deler av bretinga som fløt i likevekt med vannstanden kunne brette av. Eksempler på denne typen kalving har vi ved oppfylling og tapping av bredemte sjøer hvor endringen i vannstand er av samme størrelsesorden som i reguleringsmagasinene.

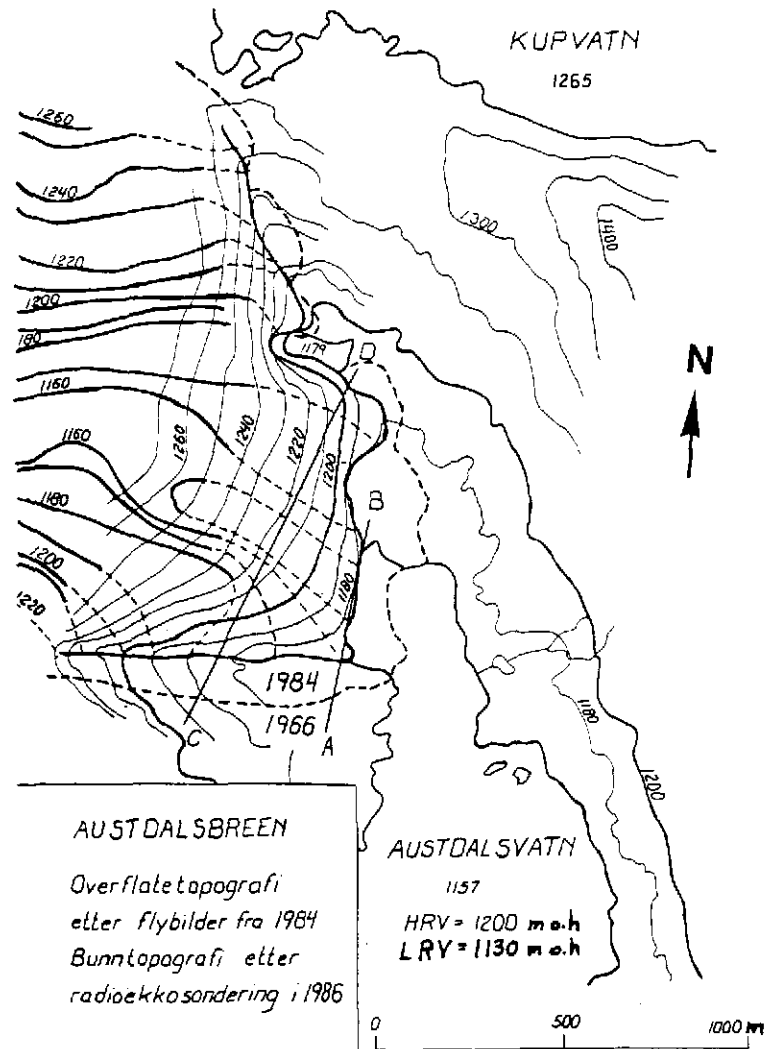


Fig. 2. Utsnitt av nedre deler av Austdalsbreen. Tverrprofilene AB og CD er benyttet til beregning av istransport.

2. KALVING I AUSTDALSVATN

2.1 Dagens situasjon

Kart over nedre deler av Austdalsbreen, konstruert fra flybilder i målestokk 1: 6 000 tatt i 1984, viser at dagens kalvingsfront er ca 300 m bred og 15-20 m høy (maksimum), se fig. 2 og 3. Med en beregnet brebevegelse ved fronten på 20 m/år blir transporten av is ut i Austdalsvatnet ca $150\,000\text{ m}^3/\text{år}$ (profil AB, fig. 2). I tillegg har kalvingsfronten trukket seg ca 100 m tilbake mellom 1966 og 1984, hvilket tilsvarer en årlig kalving på ca $45\,000\text{ m}^3$ om vi antar at kalvingsfrontens tverrsnitt har vært det samme i de 18 årene. Totalt kalvisvolum blir ca $200\,000\text{ m}^3/\text{år}$. Smelting

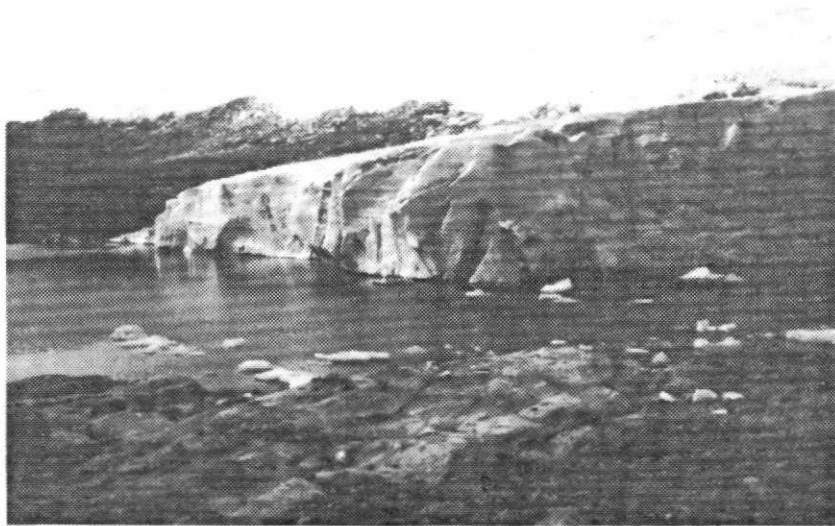


Fig. 3. Sydlige del av Austdalsbreens kalvingsfront fotografert mot sydvest i september 1985. (Foto: Arne Sætrang, VHB.)

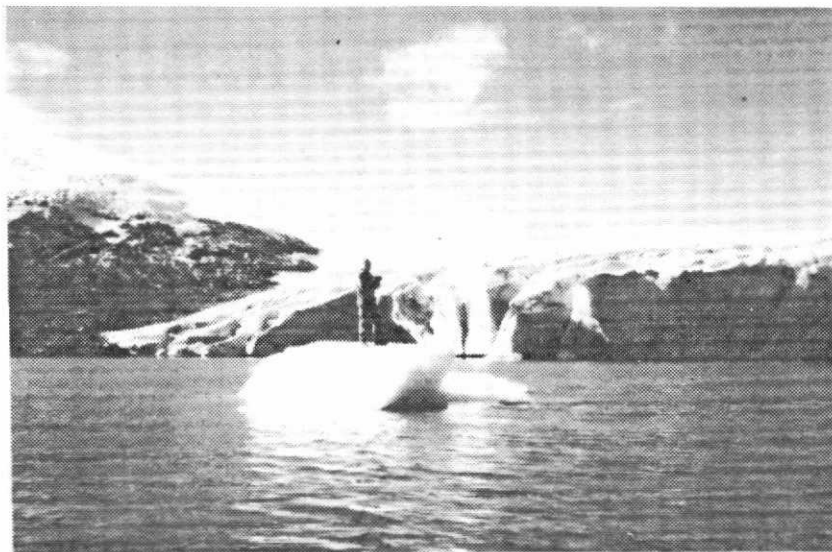


Fig. 4. Isfjell i Austdalsvatn fotografert i september 1985. (Foto: Arne Sætrang, VHB.)

av breis som følge av varmeutveksling med vatnet er inkludert. Det presiseres at disse og senere anslag bare antyder størrelsesorden siden beregningsgrunnlaget foreløpig er sparsomt.

Kalvingen foregår som ras fra brefronten. Størrelsen på isblokkene som raser ut i Austdalsvatnet er vanskelig å beregne. Vurdert ut i fra ovennevnte flyfotos er de største av dagens isfjell i størrelse 8-10 x 10-12 meter og antagelig ca 10 m tykke, altså et volum på ca $1\,000\text{ m}^3$. Fig. 4 viser et mindre isfjell i vatnet sommeren 1985. Se også avsnitt 4.1.

2.2 Etter reguleringen

2.2.1 Første gangs oppfylling

Arealet av Austdalsbrens overflate som ligger lavere enn kote 1200 (HRV) utgjør 0.12 km^2 av brens totale areal på 11.6 km^2 . Dette tilsvarer et volum på ca $3 \cdot 10^6\text{ m}^3$ som vil brette opp ved første oppfylling til HRV, se fig. 2. I tillegg kommer antagelig de delene av breen hvor vanddypet blir over 90% av istykkelsen. Kalvingen under oppfyllingen ventes altså å bli omlag 15 ganger større enn årlig kalving i perioden 1966-84. Kalvingen blir ventelig mest intens i juli og første halvdel av august da stigningen i vannstanden vanligvis er størst (se fig. 5). De største isfjellene vil antagelig brette av når oppfyllingen nærmer seg HRV. Brefronten vil trekke seg 200-300 m tilbake.

Bretunga er gjennomsett av sprekker, og dette sprekkemønster styrer kalvingen til en viss grad. Avstanden mellom sprekkene er 20-30 meter. Sprekkene går vanligvis ikke dypere enn ca 30 m. Det vil dermed være istykkelsen som avgjør om sannsynlig bredde og lengde på isfjellene vil tilsvare avstanden mellom sprekkene, eller om de vil kunne bli større. På grunn av sprekkene har det ikke vært mulig å kjøre breradar nedenfor brekote 1200, slik at istykkelsen ikke er godt nok kjent i dette området.

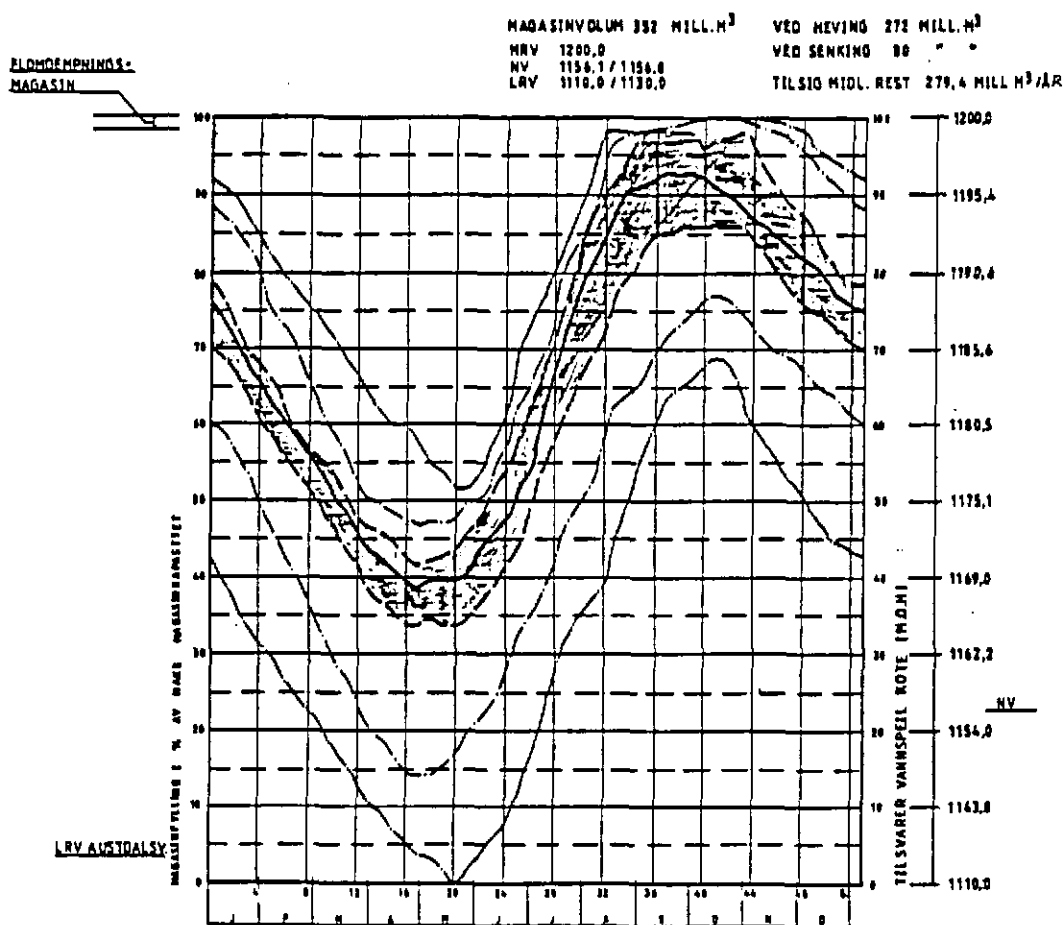


Fig. 5. Karakteristiske størrelser for magasinfyllingen i Austdalsvatn/Styggevatnmagasinet (periode 1930-60). Det er vist verdiene for maksimum, 90 persentil, øvre kvartil, median, nedre kvartil, 10 persentil og minimum basert på ukeverdier i simuleringsperioden. (Etter Statskraftverkene, 1985.)

Ved reguleringen av Juklavatn i 1974 ble vannstanden hevet fra kote 1010 til 1060 (HRV). Fig. 6 viser fronten til Juklabreen (Nordre Folgefonni) som kalver i magasinet umiddelbart etter første oppfylling. Et av de største isfjellene som brakk av brefronten er vist i fig. 7. Volumet er anslått til ca 5 000 m³.

2.2.2 Senere oppfyllinger

Kalvingen etter første gangs oppfylling er beregnet ved å legge et tverrsnitt litt ovenfor kote 1200 med en kalvingsfront med største høyde på 15 m over HRV (profil CD, fig. 2). Brehastigheten er antatt til ca 20 m/år. Dette gir en istransport ut i magasinet på ca 700 000 m³/år, dvs. 4-5 ganger større enn den nåværende transport.

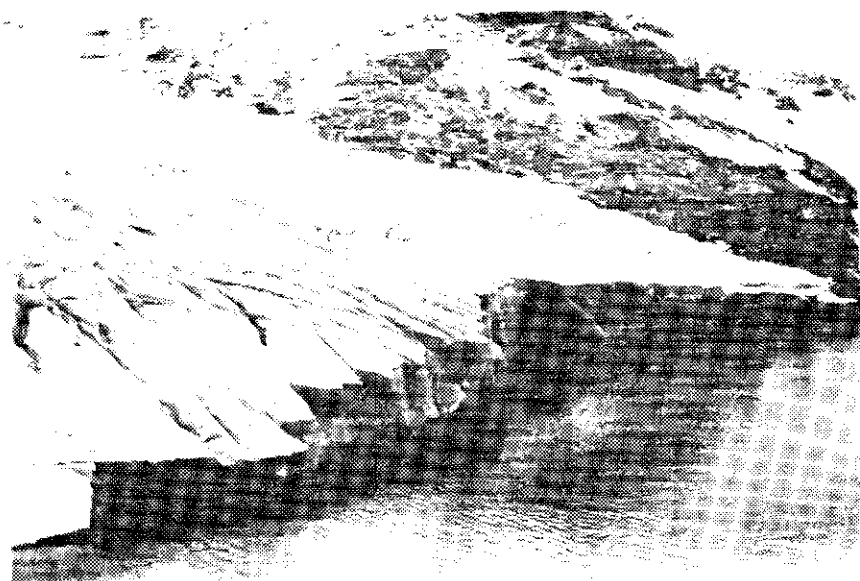


Fig. 6. Juklabreens front 17. oktober 1974 etter første oppfylling av Juklavatn. Magasinet ble oppdemt 50 m og reguleres mellom kotene 1060 (HRV) og 950 (LRV). (Foto: Vestlandsverkene)

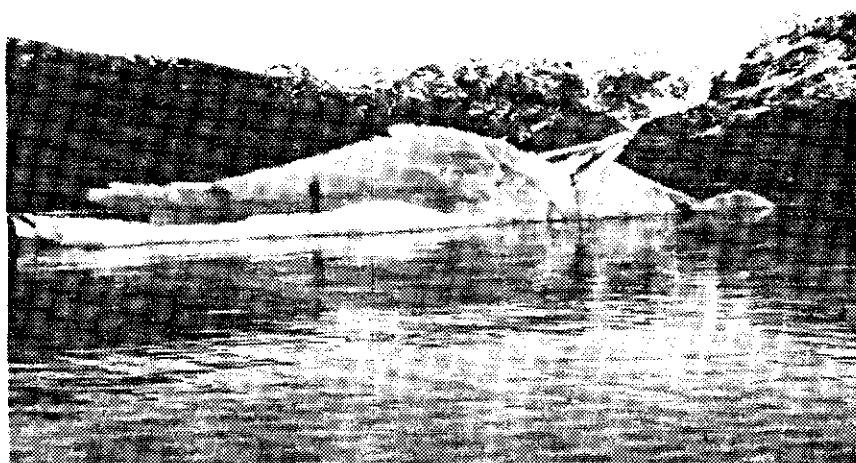


Fig. 7. Et av isfjellene som brakk av Juklabreens front under første oppfylling av Juklavatn, fotografert 17. oktober 1974. Personen midt på bildet er målestokk. (Foto: Vestlandsverkene)

Man har funnet empirisk at kalvingshastigheten v_c varierer lineært med vanndypet h_w ved brefronten (Brown m.fl., 1982),

$$v_c = c_1 \cdot h_w \quad (2.3)$$

hvor c_1 er en kalvingskoeffisient. Verdiene er gjennomsnitt for hele brefrontens bredde. Denne relasjonen var den beste av flere undersøkte for store breer som står på grunn og kalver i fjorder i Alaska.

En annen relasjon som ga god korrelasjon er

$$v_c = c_2 \cdot h_w' \quad (2.4)$$

hvor vanndypet h_w' er ved breens sentrale lengdeprofil ved fronten. Dersom vi antar at relasjonen er gyldig også for norske breer, kan endringen i frontposisjon dx/dt bestemmes av uttrykket

$$dx/dt = v_1 - v_c = v_1 - c_2 h_w' \quad (2.5)$$

For noen av dem viser forenklete beregninger at verdier for kalvingskoeffisienten er $c_2 \sim 2-5 \text{ år}^{-1}$. På Austdalsbreen ser $c_2 = 3 \text{ år}^{-1}$ til å være en sannsynlig verdi. Setter vi denne og ishastigheten $v_1 = 20 \text{ m/år}$ inn i ligning (2.5) får vi følgende verdier for frontendringen dx/dt når vanndypet h_w' varierer:

- a) $h_w' = 10 \text{ m}, dx/dt = -10 \text{ m/år}$
- b) $h_w' = 20 \text{ m}, dx/dt = -40 \text{ m/år}$
- c) $h_w' = 40 \text{ m}, dx/dt = -100 \text{ m/år}$

Antar vi at gjennomsnittlig vanndybde i området mellom frontposisjonen etter første oppfylling til HRV og ytterste terskel er 30 m, får vi at det tar ca 20 år før brefronten når terskelen. Denne terskelen ligger 1 600 m innenfor dagens frontposisjon. Se fig. 8 og 9.

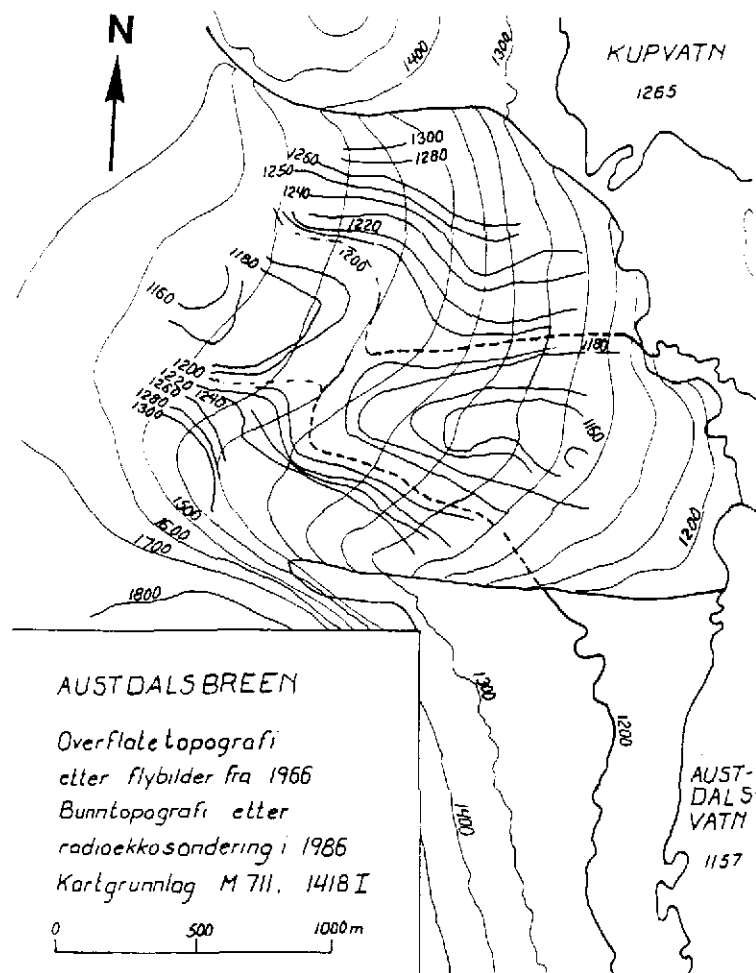


Fig. 8. Bunntopografien for nedre deler av Austdalsbreen med kote 1200 (HRV) stiplet under breen.

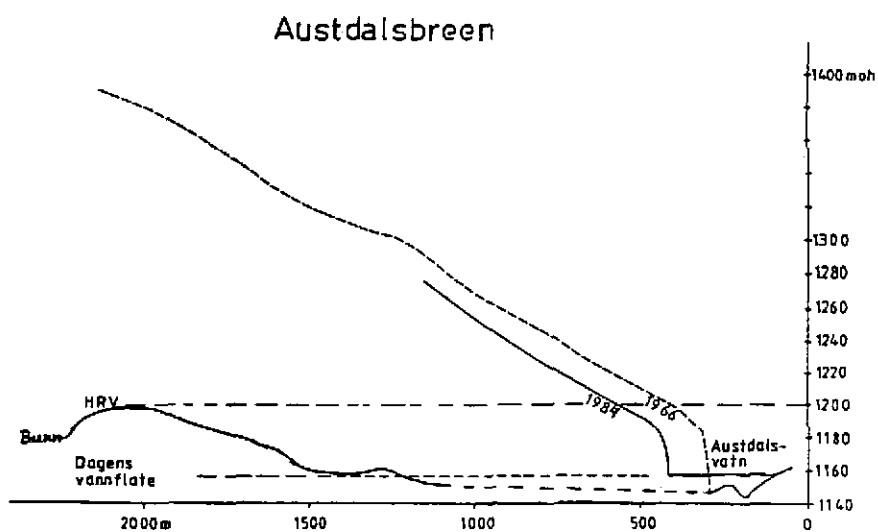


Fig. 9. Lengdeprofiler over nedre sentrale deler av Austdalsbreen. Bunntopografien er tegnet etter radioekkosondering i 1986.

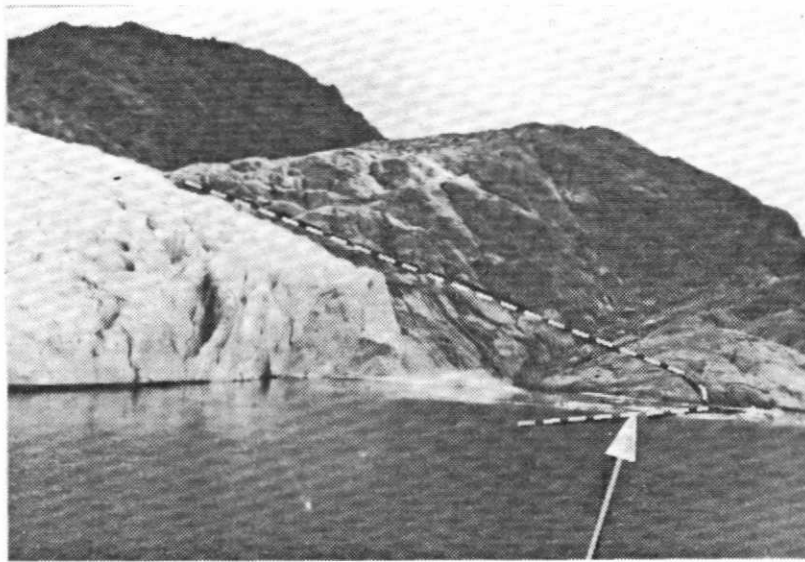


Fig. 10. Kalving i Møsevatn fra Møsebreen 14. september 1969. Magasinet ble oppdemt 18 m i 1965 og reguleres mellom kotene 873 (HRV) og 820 (LRV). Brefrontens posisjon i 1965 er vist med stiplet linje. (Foto: Sundhordland Kraftlag.)

Oppgrunning mot terskelen vil imidlertid kunne redusere kalvingen. Stabil frontposisjon ($dx/dt = 0$) fås ved vanndyp på $h_w' = v_1/c_2 = 7$ m, hvilket synes rimelig da brefronten i dag rykker tilbake og vanndypet er 10–12 m. For et framtidig vanndyp på 30 m må brebevegelsen være ca 90 m/år for å holde frontposisjonen uforandret. Brefrontens posisjon kan mao. styres av manøvreringen av magasinet.

Så sant det ikke skjer noen dramatisk økning i brebevegelsen vil brefronten kunne gå raskt tilbake. Dette er også erfaringene fra andre oppdemninger som i Juklavatn og Møsevatn hvor brearmer av henholdvis Nordre og Søndre Folgefonni kalver.

Oppfylling av magasinet vil foregå fra midten av mai til slutten av september. Det må forventes kalving hele perioden, men muligens mest intenst i siste del. Dette skyldes at brebevegelsen er større i sommersesongen enn om vinteren. På den annen side vil breen enkelte år kunne bevege seg fram over tørt land eller grunne områder fra februar til juni (fig. 5). Dette gjør at mye is kan bli tilgjengelig for kalving når magasinet fylles. I tillegg til

Som en kontroll av breradaren ble det i august/september utført boringer på en av tersklene. Disse undersøkelsene viste sannsynlige fjellhøyder som ligger 6-25 meter over HRV. Dette er innenfor breradarkartets usikkerhet. Boringene gir imidlertid ingen garanti for at det ikke kan finnes områder på terskelen som er lavere enn HRV.

Når vannstanden heves, vil vanntrykket langs bunnen av breen øke. Spørsmålet er hvor langt innover det økede vanntrykket vil forplante seg. I det internasjonale glasiologiske fagmiljøet er det fremkommet flere hypoteser på hvordan breen kan reagere. En av disse går bl.a. ut på at breen, som følge av redusert friksjon i den perioden magasinet fylles opp over dagens normalvannstand, kan få en øket bevegelse som vil føre den raskt framover i magasinet. Dette vil isåfall resultere i ytterligere oppsprekking og mer intens kalving.

Brekontoret tror ikke det er sannsynlig med en så dramatisk utvikling, men vi kan heller ikke med vår nåværende kunnskap om bredynamikk helt avvise en slik hypotese.

3. KALVING I KUPVATN

3.1 Dagens situasjon

Arealet til Sygneskardbreen er beregnet til 3.1 km^2 ut fra overflatetopografien. I beregningene av istransporten ut i Kupvatn anslås brebevegelsen ved fronten til 10 m/år ved å sammenligne med hastighetsmålinger på Vetledalsbreen som er en nærliggende, vestlig utløper av Jostedalsbreen. Ut fra vatnets dybdekart og topografisk kart (målestokk 1: 50 000) anslås istykkelsen på bretunga gjennomsnittlig å være ca 15 m. Kalvingsfrontens bredde er ifølge kartet ca 600 m. Dette gir en antatt istransport på ca $90\,000 \text{ m}^3/\text{år}$. Kalvingen foregår som ras fra brefronten. Formen på brefronten viser at breen trekker seg tilbake eller er stabil.

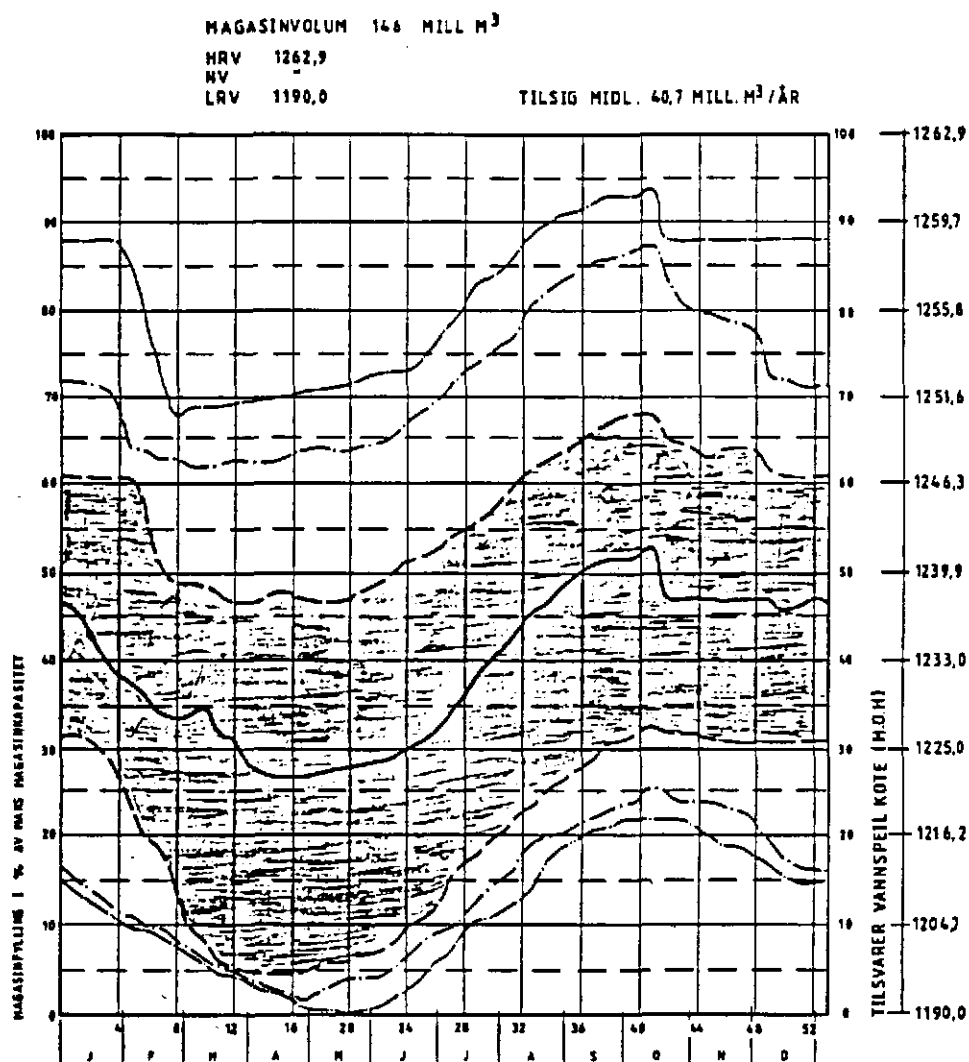


Fig. 12. Karakteristiske størrelser for magasinforholdene i Kupvatnmagasinet (periode 1930-60). Det er vist verdiene for maksimum, 90 persentil, øvre kvartil, median, nedre kvartil, 10 persentil og minimum basert på ukeverdier i simuleringsperioden. (Etter Statskraftverkene, 1985.)

3.2 Etter reguleringen

Da HRV er lik dagens normalvannstand (fig.12) vil det ikke bli noen oppbrekking av Bretunga. Senkning av vannet medfører en redusert kalvingshastighet (og kalving) ifølge ligning (2.4). Derved vil brefronten stoppe sin tilbakegang eller bevege seg noe framover i magasinet hvis brebevegelsen ikke avtar. Istransporten vil ventelig fortsette å bli omtrent som i dagens situasjon. Breen virker lite aktiv, og det antas små endringer i brebevegelsen, dersom det ikke blir forandringer i massebalansen.

4. BØLGER I MAGASINENE SOM FØLGE AV KALVING

4.1 Dagens situasjon

Det er gjort visuelle observasjoner av kalvingen i 1986.

Overingeniør J. K. Halset i Statkraft skriver i et notat:

"Under måleoppdrag 29. august 1986 la jeg fra meg båten innerst i Austdalsvatn i bukta der Austdalsbreen kalver. Båten lå på motsatt bredd ca 100 m fra fronten på breen og bak noen store steiner (1-1.5 m høye). Mens jeg var inne på land og 700-800 m unna båten kalvet breen. Jeg sto oppe i lia mot Kupvatn og hadde god utsikt mot kalvingen og bukta der båten lå. Kalvingen forårsaket en brottsjø som gikk over halve bukta (ca 50 m) før bølgen "la seg". På motsatt bredd skyllet vannet inn over land. Da jeg kom ned til båten var denne slynget opp på en stor stein, ca 0.5 m over vannspeilet. Isklumper som tidligere lå og fløt ved bredden, var slynget 3-4 m inn over land. Enkelte var opp til 0.25 m^3 store. Etter fuktigheten på et svaberg å bedømme hadde vannet skyllet 2-3 m høyere enn vannspeilet i Austdalsvatn".

Statshydrolog Arne Sætrang ved Brekontoret i NVE beskriver forholdene ved brefronten slik:

"Under tjenestereise 3.-9. september 1986 ble det benyttet båt og foretatt målinger ved innløpet i Austdalsvatn. Under arbeidet ble det observert isblokker (opptil 1 m^3 store) som lå på land ca 2 m over daværende vannstand. Disse (rundt 20 stykker) samt en del mindre isblokker lå i en avstand av 100-200 m utenfor fronten til Austdalsbreen. Blokkene hadde ligget i vannet og blitt skylt på land av bølger fra et kalvingsras. Kalving og bølger ble observert, men da i mindre målestokk (bølgehøyde 0.5 m). Når det gikk ras (hver 2-3 time), ble blokkene knust og kastet mot hverandre i vannet pga. bølgene".

Dagens kalving medfører altså betydelige forstyrrelser langs strendene innerst i Austdalsvatnet. Rashyppigheten viser at all ferdsel sommertid ved brefronten er forbundet med stor fare.

4.2 Etter reguleringen

Høyden på Austdalsbreen's kalvingsfront vil etter reguleringen være 60-70 m når vannstanden er lavere enn kote 1150 og 10-20 m på HRV. Sygneskardbreens kalvingsfront i Kupvatnet vil maksimalt være ca 30 m når vannet er nedtappet og 10-15 m ved HRV. De største fallhøydene blir derfor i april og mai når magasinene er nedtappet. På denne tiden av året er både brebevegelse og kalvingsintensiteten minst. Isblokkene som raser ut vil kunne bli større enn de nåværende pga. økningen i brefrontenes høyde.

I tabell 1 er det ført opp observasjoner av kalving som følge av vannstandsendringer. Erfaringene fra Griesgletscher i Sveits viser at bølgene blir små, med amplituder på mindre enn 0.2 m når et større isfjell brekkes av under første gangs oppfylling av reguleringsmagasinet.

Bre	År	Isfjell- størrelse	Vannstands- endring m	Sjødyp m	Bølgehøyde m	Referanse
Barens Ice Cap (Canada)	1969	28-30m (lengde) 25-35m (tykkelse)		50	-	Holdsworth (1973)
	1970	100m (lengde)	2.08		-	" "
Austerdalsisen (Svartisen)	1954	100m (lengde)	57	65	-	Liestøl (1956) " (1979)
Griesgletscher (Sveits)	1966	3000-4000m ³	21	-	0.1	Haeberli (1977)
	1966	150 000m ³ (160x120x8m ³)	29	-	0.2	" "

Tabell 1. Observerte kalvinger fra brefronter pga. vannstands-
endringer.

Ved utrasing av isblokker vil det dannes sjokkbølger. Observasjoner av slike er også gjort i Sveits (tabell 2). Vi ser at bølgehøydene varierte mellom 0.5 m og 5 m målt 400-500 m fra isklipper med høyder på mellom 10-20 m og 70 m. Blokkstørrelsene har vært 3 000-100 000 m³. Denne kalvingen har foregått i august - oktober.

En vurdering av disse observasjonene og en beregning av de bølger en større isblokk, som raser ut fra fronten til Austdalsbreen, vil forårsake i magasinet, er utført nedenfor av siv.ing. Bonsak Schieldrop (se også APPENDIX).

Bre	År	Isblokkvolum m ³	Isklippehøyde m	Sjødyp m	Bølgehøyde m	Avstand m	Merkn.
a) Aletschgletscher (Märjelensee)	1908	(~100000)	70	40	4.85*	400	*Max. bølgehøyde 1908-13
b) Steingletscher	1956-60	(~ 16000)	10-20	20	0.5	500	
c) Grubengletscher	1973	5000	25	(~15)	3	60-100	
d)	1974	3000	(~10)	10	1	-	
e)	1975	4000		-			

Tabell 2. Observerte isblokkutrasinger fra brefronter og resulterende bølger i Sveits. Etter Haeberli (1977). Tallene i parentes er beregnede verdier av Schieldrop (se APPENDIX).

"Settes tyngdepunktets fallhøyde til 35 m, tettheten til 900 kg/m³, vanddypet til 45 m og isvolumet til 60 000 m³, viser beregningen at den mest sannsynlige største bølgehøyde produsert ca 130 m fra kalvingsstedet vil være ca

$$H_{\max} = 2a_{\max} = \underline{3.0 \text{ m}} \quad (4.1)$$

hvor a er bølgeamplituden.

Allerede i en avstand på ca 600 m vil denne bølgen ha redusert sin høyde til ca

$$H_{600} \sim \underline{0.7 \text{ m}}.$$

I en avstand på ca 3 000 m ville bølgehøyden etter denne forenklete regningen, ha tapt seg til

$$H_{3000} \sim \underline{0.14 \text{ m}}$$

Tar en med i betraktning at bølgen i første omgang sannsynligvis vil skylle opp på og reflekteres fra motstående strand, vil bølgehøyden reduseres vesentlig hurtigere enn dette.

Utfra disse beregningene skulle en derfor kunne konkludere at et isvolum på 60 000 m³ med midlere fallhøyde (tyngdepunkt) på ca 35 m nok vil skape betraktelige forstyrrelser i kalvingsområdet

og muligens skylle opp vertikalt på motstående strand til en høyde av 2-4 m, men neppe være merkbar utenfor dette området."

5. ISFJELL I AUSTDALSVATN/STYGGEVATNMAGASINET

5.1 Smelting av isfjell

I følge Iskontolet (VHI) er den midlere vanntemperaturen ca 4°C i sommersesongen. Dette kan imidlertid variere mye fra år til år, og en øket kalvisproduksjon vil kunne senke temperaturen.

Det finnes en rikholdig litteratur om smelting av isfjell i havet. I følge Russel-Head (1980) er det liten forskjell på smeltingen i havvann og ferskvann ved en temperatur på 10°C, og han påviser en smelting på 26 cm/døgn ved 4°C. Morgan & Budd (1979) oppgir en smelting på 19 cm/døgn ved 4°C. Ved rolige strøm- og vindforhold vil det kunne danne seg et lag med kaldere vann nær isen, som vil bremse avsmeltingen. Bremålinger i samme høydenivå som Austdalsvatn viser at smeltingen på den delen av isfjellet som er over vannflaten vil være 3-5 meter i løpet av en sommer.

Ved beregning av smeltingen antar vi at isfjellene er terningformet med lengde h_o umiddelbart etter kalving. Volumet blir da

$$V_o = h_o^3 \quad (5.1)$$

Forholdet mellom isens tetthet (900 kg/m^3) og vannets tetthet (1000 kg/m^3) medfører at ca 90% av isfjellet ligger under vannflaten. For enkelthets skyld regner vi at smeltingen over og under vannet er den samme og at den er lik på alle seks sider. Hvis vi antar at smelteintensiteten K_{sm} som hver side utsettes for, er konstant, får vi følgende uttrykk for isfjellets lengde $h(t)$ som funksjon av oppholdstiden t i magasinet:

$$h(t) = h_o - 2K_{sm} t \quad (5.2)$$

Herav får vi volumet:

$$V(t) = (h_o - 2K_{sm}t)^3 \quad (5.3)$$

Likning (5.3) er grafisk illustert i fig.13 for eksemplene a) og b) nedenfor.

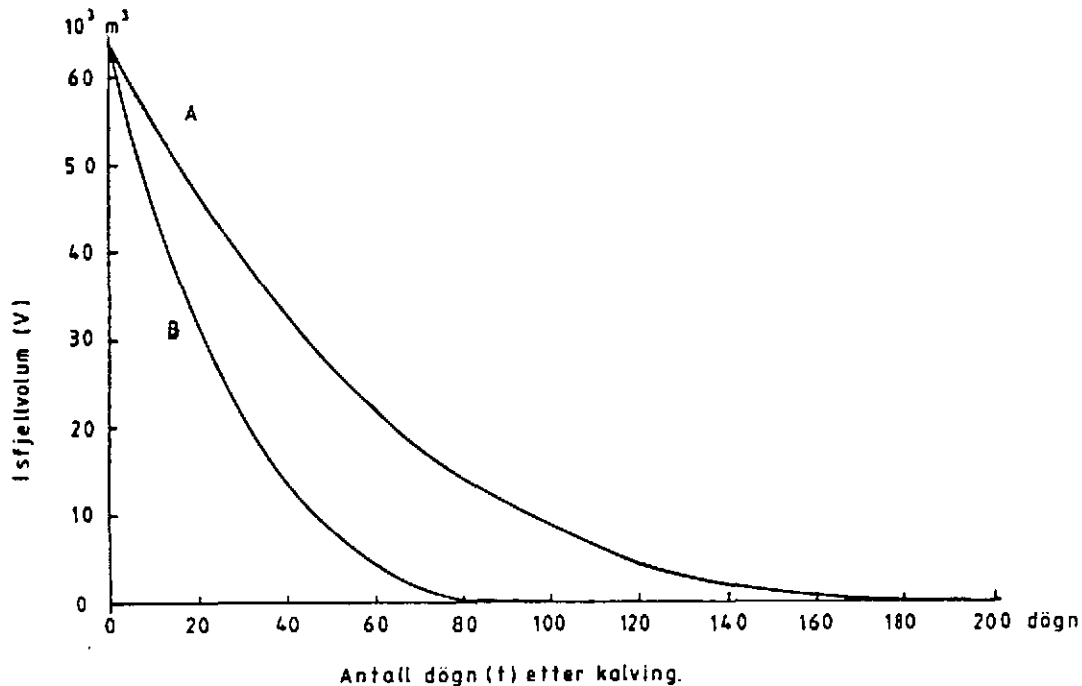


Fig. 13. To modeller av volumreduksjonen til et terningformet isfjell som er 64 000 m³ stort umiddelbart etter kalving. Smelteintensiteten er 0.1 m/døgn (A) og 0.2 m/døgn (B).

Isfjellenes levetid T fåes ved å sette $V(T) = 0$ i likning (5.3) som gir

$$T = 0.5 h_o / K_{sm} \quad (5.4)$$

Levetiden blir altså halvparten av forholdet mellom lengden etter kalving og smelteintensiteten. Noen talleksempler er vist nedenfor.

- a) $h_o = 40 \text{ m}$
 $K_{sm} = 0.1 \text{ m/døgn}$ $T = 200 \text{ døgn}$
- b) $h_o = 40 \text{ m}$
 $K_{sm} = 0.2 \text{ m/døgn}$ $T = 100 \text{ døgn}$
- c) $h_o = 20 \text{ m}$
 $K_{sm} = 0.2 \text{ m/døgn}$ $T = 50 \text{ døgn}$

5.2 Isfjelldrift

Isfjellene vil drive ut fra brefronten som følge av vind og strøm. Da ca. 90% av isfjellene er under vann vil strømmen i vannet være viktigst, men vinden vil kunne gi noe avdrift. Hovedstrømretningen vil være fra breen mot dammen. Vinden vil periodevis være dominert av fallvind fra breen, og avvike fra strømretningen. Dette kan føre til at isfjellene grunnstøter langs breddene, og blir forsinket i sin drift.

De største isfjellene vil også kunne grunnstøte på eidet mellom Austdalsvatn og Styggevatn. Ved fullt magasin vil det imidlertid være en 110 m bred passasje hvor dypet er ca 40 meter. Med dyp på ca 30 meter vil bredden på passasjen øke til ca 250 meter. Relativt store isfjell vil dermed kunne passere ut i Styggevatn.

Et uttrykk for isfjellets hastighet v_{id} gjennom magasinet får vi ved å sette

$$v_{id} = s/t \quad (5.5)$$

hvor s er tilbakelagt distanse og t er tiden etter kalving.

Hvis vi setter uttrykket for isfjellets levetid (5.4) inn i (5.5) får vi følgende formel for hastigheten isfjellet må ha for å nå demningen før det smelter helt bort

$$v_{id} = 2s K_{sm}/h_o = 12\,000 K_{sm}/h_o \quad (5.6)$$

da $s = 6\,000 \text{ m}$ er magasinets lengde etter oppfylling til HRV.

De tidligere benyttede talleksemler gir følgende verdier:

- a) $v_{id} = 30 \text{ m/døgn}$
- b) $v_{id} = 60 \text{ m/døgn}$
- c) $v_{id} = 120 \text{ m/døgn}$

Dette er alle realistiske verdier for isfjelldrif. I perioder med sterk vind og strøm vil hastigheten være betydelig større.

Modellberegningene viser at store isfjell etter all sannsynlighet kan drive fram til dammen. Dette forsterkes ved at de største isfjellene kan ventes produsert i siste del av smeltesesongen, men før isleggingen. Hvor store de eventuelt vil være ved ankomst til damområdet, vil bestemmes av opprinnelig størrelse, smelteintensitet og drifhastighet.

Tidspunktet for isleggingen på magasinet vil ha betydning for isfjelldriften. En sen islegging medfører at flere isfjell kan drive ut i Styggevatn før nedtappingen begynner enn ved tidlig islegging.

6. ADKOMSTRUTER TIL JOSTEDALSMBREEN

6.1 Austdalsmbreen

De to rutene opp på Austdalsmbreen (fig.14) vil endre karakter avhengig av endringene i breen. Ved utvikling av en kalvingsbukt vil innsiget av is mot denne etter noe tid føre til oppsprekking av den bakenforliggende bre. Langs land vil det antaglig i noe tid bli liggende igjen en smal isrand som vil kunne medføre at oppgangene i en periode blir forholdsvis lite påvirket.

Etterhvert ventes det imidlertid dels oppsprekking og dels bortsmelting av disse sidekanter. Dette vil føre til at en passasje langs den sydlige oppgang vil måtte skje oppe i en bratt og antagelig rasfarlig fjellside. I praksis antar vi at ruten vil måtte ansees som stengt.

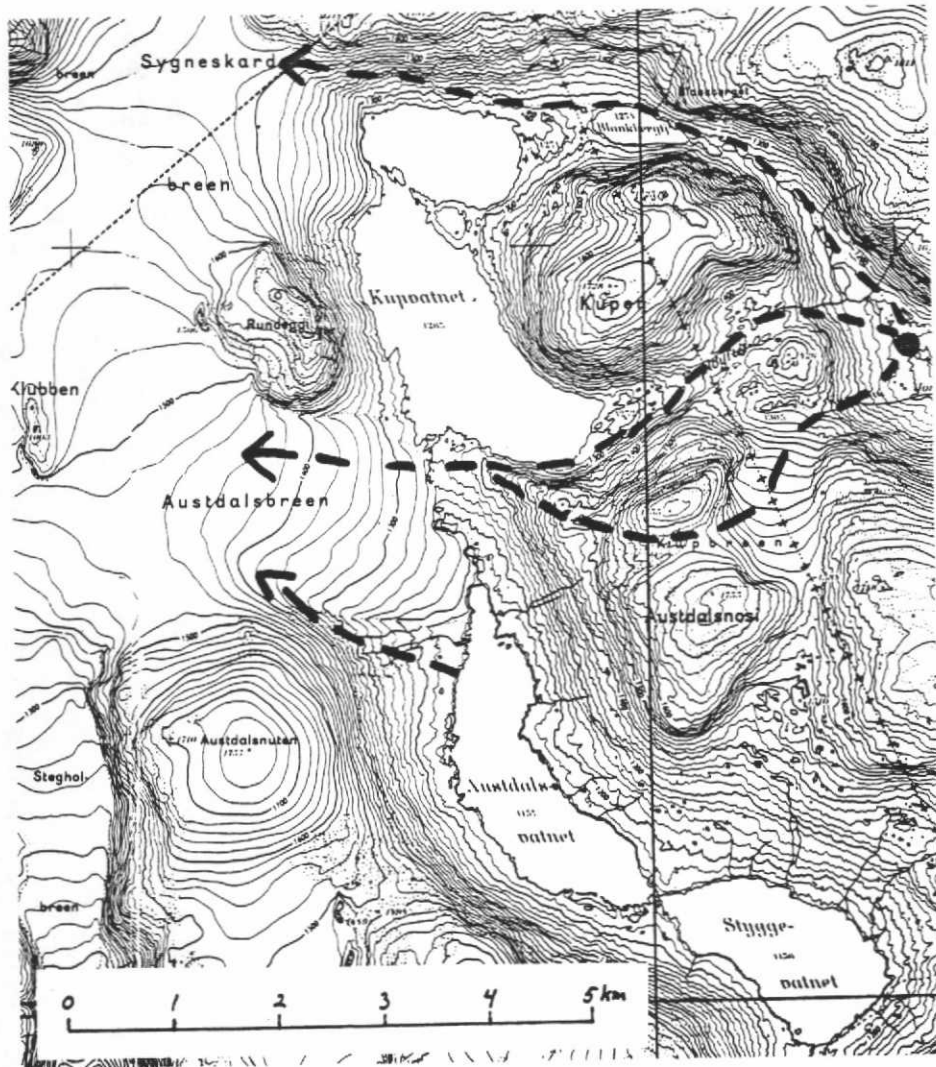


Fig. 14. Adkomstruter til Jostedalsglaciaren via Austdalsbreen og Sygneskardbreen.

Den nordlige ruten vil ikke i samme grad bli direkte influert av kalvingen, men endringer i brebevegelsen vil også her medføre større oppsprekking så lenge breen er ute av dynamisk likevekt. Etter noe tid vil breen kunne innstille seg på en ny likevekts-tilstand med et sprekkemønster forskjellig fra idag. Med en moderat tilbakegang av breen antas det at ruten kan opprettholdes, men at den vil kunne bli vesentlig vanskeligere enn dagens rute. Dersom det skulle utvikle seg en større kalvingsbukt, vil oppsprekkingen bli vesentlig større og ruten vil kunne bli meget vanskelig eller umulig å benytte.

6.2 Sygneskardbreen

Ferdselruten over selve breen blir neppe påvirket av reguleringen. Brebevegelsen synes å være liten, og det blir ventelig bare minimale forandringer i kalvingsfrontens form og posisjon. Vi venter derfor at den vanlige ruten opp denne breen vil kunne bli uforandret.

7. REFERANSER

- Brown, C. S., Meier, M. F., and Post, A. (1982): Calving speed of Alaska Tidewater Glaciers with application to Colombia Glacier. Geol. Survey, Professional Paper 1258-C. 13 s.
- Haerberli, W. (1977): Experience with glacier calving and air-bubbling in high alpine water reservoirs. - Journal of Glaciology, Vol.19, No. 81 s. 589-594.
- Holdsworth, G. (1973): Ice calving into the proglacial Generator Lake, Baffin Island, N.W.T. Canada. - Journal of Glaciology, Vol. 12, No. 65, s. 235-250.
- Liestøl, O. (1956): Glacier dammed lakes in Norway. - Norsk Geografisk Tidsskrift, bind XV, 1955-56, hefte 3-4.
1979: Svartisen. - Den Norske Turistforenings Årbok 1979. s. 137-143.
- Morgan, V.I and Budd, W.F. (1977): The distribution, movement and meltrates of Antarctic icebergs.
- I Hussein, A.A. (red): Iceberg utilization. Proceedings of the first International Conference, Ames, Iowa, 1977. New York, Pergamon Press, s. 220-228.
- Russel-Head, D.S. (1980): The melting of free-drifting icebergs. - Annals of Glaciology, Vol., 1 s.119-122.
- Statskraftverkene (1985): Beskrivelse av vannstandsforholdene i Kupvatn- og Austdalsvatn/Styggevatnmagasinene. Jostedalsutbyggingen. Skjønn. Juli 1985. 23 s.

APPENDIX

Austdalsbreen - Bølger som følge av kalving i Austdalsvatn
v/siv.ing. Bonsak Schieldrop

En foreløpig vurdering av forholdene er basert på følgende materiale:

- 1) "Mulige endringer i breforhold på Austdalsbreen ..." rapport pr. 25/6-86 av E. Roland.
- 2) Kartblad 1418 I "Skridulaupen", M=1:50 000.
- 3) Dybdekart for Austdalsvatn og Styggevatn, Bloms Oppmåling A/S nr. 1101 - 1 og 2.
- 4) Fotokart over området Z8. BFO88 og 089, M=1:1 000

1 Vurdering av verdier oppgitt i tabell 2: Observerte isblokkutrasinger fra brefronten og resulterende bølger i Sveits.

Det fremgår ikke av tabellen hvorvidt de oppgitte "bølgehøyder" er virkelige bølgehøyder, alstå to ganger bølgeamplituden, eller er målte oppskyllingshøyder (vertikale).

Betraktes tilfellet a), i tabell 2 ser man at maksimal bølgehøyde i perioden 1908-13 er gitt med 2 desimalers nøyaktighet. Jeg finner det rimelig, å tro at dette tallet 4.85 m representerer vertikalt målt oppskyllingshøyde og ikke bølgehøyde selv. Godtar en at dette ble målt ca 400 m fra kalvingsstedet, gir vanlig beregningsmetode (Slingerland and Voights, 1979) at isvolumet må ha vært av størresorden

$$V = 100\,000\,m^3$$

Jeg har da antatt at oppskyllingshøyden har vært ca 3 ganger bølgehøyden, dvs. 6 ganger amplituden, dvs.

$$a = 4.85/6 = \underline{0.81 \text{ m}}$$

Normalt regnes at bølgehøyden avtar som $1/x$, med x som avstand fra rasstedet, og at bølgeformen oppstår ca $3 d = 120 \text{ m}$ fra samme sted; d er vanddybden. De opprinnelige bølgene skulle etter dette ha hatt en amplitude på:

$$a_0 = 0.81 (10/3) = \underline{2.70 \text{ m}}$$

hvor $10 = 400/d$ og $3 = 120 d$. Hvis tallet 4.85 m virkelig representerte bølgehøyden selv, ville rasvolumet etter samme beregning ha vært på

$$\underline{V' = 4 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5 \text{ m}^3}$$

Ut fra de data som foreligger er det umulig å avgjøre hva de 4.85 m egentlig representerer, men den oppgitte nøyaktighet antyder at det er oppskyllingen som er målt.

For tilfelle b) blir tilsvarende tall hhv. $V = 16\,000 \text{ m}^3$ og $V' = 75\,000 \text{ m}^3$. Gruben-breen, tilfelle c), vil med de oppgitte tall og 3 m tolket som oppskyllingshøyde, forlange en vanddybde på 15 m , mens tilfelle d) beregningsmessig kunne ha funnet sted med tyngdepunktets fallhøyde på 5 m , dvs. 10 m isklippehøyde.

2 Utrasing av en stor isblokk fra Austdalsbreen

Settes i det foreliggende tilfelle tyngdepunktets fallhøyde til 35 m , tettheten til 900 kg/m^3 , vanddypet til ca 45 m og et antatt isvolum til $60\,000 \text{ m}^3$, viser beregningen at den mest sannsynlige største bølgehøyde produsert ca 130 m fra rasstedet (kalvingstedet) vil være ca

$$H_{\max} = 2a_{\max} = \underline{3.0 \text{ m}}$$

Allerede i en avstand på ca 600 m vil denne bølgen ha redusert sin høyde til ca

$$H_{600} \sim \underline{0.7 \text{ m}}$$

I en avstand på ca 3 000 m ville bølgehøyde etter denne forenklete beregningen, ha tapt seg til

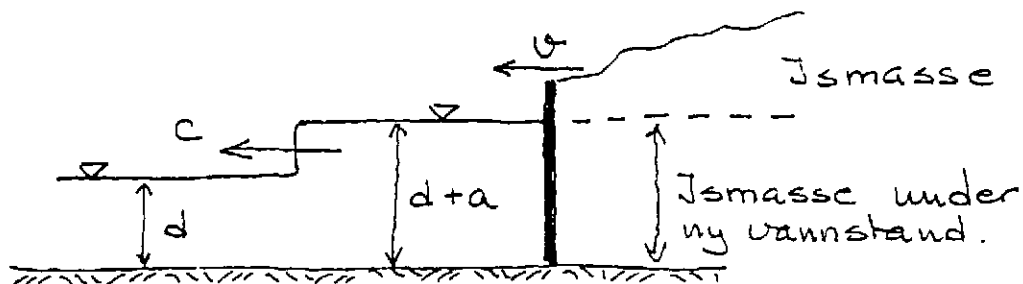
$$H_{3\ 000} \sim \underline{0.14 \text{ m}}$$

Tar en med i betraktning at bølgen i første omgang sannsynligvis vil skylle opp på og reflekteres fra motstående strand, vil bølgehøyden reduseres vesentlig hurtigere enn dette.

Utfra disse beregningene skulle en derfor kunne konkludere at et isvolum på $60\ 000 \text{ m}^3$ og fallhøyde (tyngdepunkt) på ca 35 m nok vil skape betraktelige forstyrrelser i kalvingsområdet selv og muligens skylle opp vertikalt på motående strand til høyde av 2-4 m, men neppe være merkbar utenfor dette området.

3 Vurdering av et mulig vasstandssprang/solitørbølge som følge av brebevegelse.

For å få en viss idé om hvor store isvolum som må til for å skape en "sjokkbølge" dvs. et vasstandssprang, kan en bruke følgende forenklete modell (H.Rouse, 1961).



En skillevegg beveger seg innover i stillestående vann og skyver vannet foran seg. Skilleveggs hastighet er v . Dette resulterer i en front, et vasstandssprang, som forplanter seg med en hastighet c .

Frontens hastighet kan beregnes etter følgende formel

$$c = (gd)^{1/2} (1/2((d+a)/d)((2d+a)/d))^{1/2}$$

Sammenhengen mellom hastighetene v og c er dessuten gitt ved relasjonen

$$v = ca/(d+a)$$

Antar en at vanddypet er $d = 45$ m og overhøyden $a = 3$ m gir dette at

$$c = 22 \text{ m/s og } v = 1.4 \text{ m/s}$$

Isvolum pr. breddeenhet under ny vannstand (se figur) som ville måtte trenge seg fram pr. sekund ville derfor være lik

$$Q/B = v(a+d) = 66 \text{ m}^3/\text{ms}$$

For at dette skulle inntreffe måtte vannet ikke kunne strømme tilbake på sidene og bredden måtte følgelig være av størrelsesorden $B = 1\,000$ m, dvs. at

$$Q = 66\,000 \text{ m}^3/\text{s}$$

Et tverrsnitt av vannet vil tilnærmet være trapesformet slik at den antatte dybden $d = 45$ m bare vil gjelde ca 300-400 m midt på. Volumstrømmen vil følgelig være noe mindre, både pga. dybden og fordi dybden i seg selv påvirker forplantningshastigheten. Tallet ovenfor må derfor kun taes som et uttrykk for størrelsesorden.

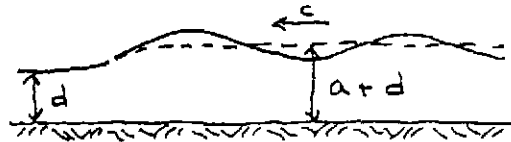
Det en imidlertid kan si er at en slik bølge, dvs. overhøyde $a = 3$ m, ville kreve en kalving hvert sekund av samme størrelsesorden som det som isvolum benyttet under pkt. 1 i beregningene ovenfor.

Resultatet antyder for øvrig kvalitativt hvilke følger en utglidning av selve ismassen vil kunne få.

Det er kjent at hvis forholdet $(a+d)/d$ er vesentlig mindre enn to, altså

$$(a+d)/d \ll 2$$

vil spranget antydnet på figuren ovenfor raskt bli bølgeformet og forplante seg utover som bølger som figuren her antyder.



Med så knapp tidsfrist som den som er satt for disse betraktninger er det kun mulig å antyde størrelsesorden og omtrentlig forløp resultatene av en kalving av den antydende størrelse vil få.

En nøyaktigere undersøkelse vil kreve en numerisk behandling av hele forløpet. En slik regnemodell er utviklet bl.a. av Bjørn Gjevik og Geir Pedersen ved Matematisk Institutt, avd. B, ved Universitetet i Oslo.

REFERANSER

- Slingerland, R.L. and Voight, B. (1979): Occurences, properties, and predictive models of landslide-generated water waves.
 - I Voight, B. (red): Rockslides and avalanches (2), Elsevier Scientific Publ. Co., New York. S. 317-397.
- Rouse, H. (1961): Fluid mechanics for hydraulic engineers, McGraw-Hill, New York.

Oslo 10/10-86

Bonsak Schieldrop.

Bonsak Schieldrop