NORGES VASSDRAGS- OG ENERGIVERK

HYDROLOGISK AVDELING

KARTLEGGING AV ISTYKKELSE OG FELTAVGRENSNING PÅ BLÅMANNSISEN 1990

OPPDRAGSRAPPORT

8 - 90

OPPDRAGSRAPPORT 8-90

Rapportens tittel:	Dato: 1990-12-06
KARTLEGGING AV ISTYKKELSE OG FELTAVGRENSNING PÅ BLÅMANNSISEN 1990	Rapporten er: Åpen
	Opplag: 75

Saksbehandler/Forfatter:	Ansvarlig:
Mike Kennett Brekontoret	Tron Laumann Tron Laumann

Oppdragsgiver:

STATKRAFT

Sammendrag:

Rapporten beskriver resultater fra breradarmålinger på Blåmannsisen 1990. Resultatene er brukt til å beregne dreneringsgrensene på breen, og spesielt for brefeltet som drenerer mot Rundvatnet (671 m o.h.). Dreneringsfeltene er sammenlignet med felt beregnet på grunnlag av breoverflate og bunntopografi.

Kartene viser at istykkelsen på Blåmannsisen er nokså varierende, med et maksimum på 471 m og et middel på 163 m. Passpunktet i den subglasiale topografien ovenfor Rundvatnet har en høyde på 1000 ±20 m o.h.

Forskjellen mellom vannskillene og isskillene på Blåmannsisen er forholdvis stor med et maksimalavvik på ca 1500 m. Arealet på Rundvatnets dreneringsfelt oppstrøms passpunktet er 10.9 ±0.3 km^2. I perioder med sterk smelting vil dreneringsarealet kunne bli mindre.

Ved en eventuell forandring i breens massebalanse - særlig ved en negativ utvikling - vil vannskillene kunne flyttes betraktelig.

Vann 1051 ved nordkanten av breen er i dag stabilt, men kan tømme seg plutselig under isen hvis breen ved vannet blir ca 30 m tynnere.

FORORD

Foreliggende rapport er avtalt sluttproduktet på oppdrag fra ELKEM A/S, som ønsket bestemmelse av dreneringsgrenser og feltarealer på Blåmannsisen i forbindelse med planlagt utvidelse av kraftverk i området.

Dette er det tredje store breområdet i Norge som har vært gjenstand for en slik grundig feltavgrensning. Mike Kennett har vært ansvarlig for kjøring av breradaren, og rekognosering i felt under radarkjøring ble gjort av Bjarne Kjøllmoen. Forsvarets Forskningsinstitutt stilte velvilligst en GPS navigasjonsmottaker til rådighet. Arne Chr. Sætrang har tolket radarbildene. Grunnlag for breens overflate var M711-serie kart over Blåmannsisen laget etter flyfotos fra 1985. Bearbeidingen av resultatene og utarbeidelsen av denne rapport er gjort av Mike Kennett.

Oslo, desember 1990

Bjørn Wold
fung. avdelingsdirektør

INNHOLD

		Side
1.	INNLEDNING	3
2.	TEORI	4
3.	FELTARBEID	5
4.	BEARBEIDING AV DATA FRA FELT	5
4.1	Navigasjon	5
4.2	Istykkelse	6
5.	RESULTATER	6
6.	JØKULHLAUP	8
7.	KONKLUSJON	8
8.	ANBEFALINGER	9
9.	REFERANSER	10

1. INNLEDNING

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

Brekontoret anskaffet i 1981 i samarbeid med andre norske institusjoner en islandsk breradar (Sverrisson m. flere, 1980). I 1984 og 1985 ble det utført subglasial kartlegging med breradar på midtre Jostedalsbreen (Sætrang og Wold, 1986) og i 1986 på Svartisen (Sætrang, 1988) og nordre Jostedalsbreen (Sætrang og Holmquist, 1987). Dataene fra nordre Jostedalsbreen ble benyttet til å beregne dreneringsfeltene (Kennett, 1989a). I 1989 ble breradaren kjørt på Spørteggbreen for å avgrense feltene (Kennett, 1989b).

Denne rapporten beskriver metode og resultater ved subglasial kartlegging med breradar på Blåmannsisen (fig. 1) våren 1990 og avgrensning av dreneringsfeltene. Blåmannsisen (87 km^2, 810-1560 m o.h.) er Norges 5. største bre (Østrem m. flere, 1988).

To forskjellige grenser er beregnet i denne rapporten:

a) Bunntopografigrensen, som beskriver plassering av vannskillet hvis breen var borte, eller hvis alt vannet i og under breen skulle strømme i åpne kanaler (altså med atmosferisk trykk).

b) Dreneringsgrensen, som beskriver plassering av vannskillet på breoverflaten når vi tar hensyn til drenering i og under breen.

I tillegg er isoverflategrensene (altså isskillene; pers. medd. Bærdal Strømme nov. 1990) vist på figurene for sammenligning.

Breradarkjøringene og beregningene er konsentrert i nordvest-delen av breen for å finne dreneringsgrensene for brefeltet som drenerer mot Rundvatnet (671 m o.h.). Men breradardataene er også blitt brukt til å stedfeste hovedvannskillet mellom Norge og Sverige, og avgrense feltene på "norsk side", samt feltet som drenerer mot Messingmalmvatn der det finnes en vannføringsstasjon.

Rapporten inneholder derfor både 1: 100 000 kart over hele Blåmannsisen og mer detaljerte 1: 50 000 kart for nordvestre del av breen.

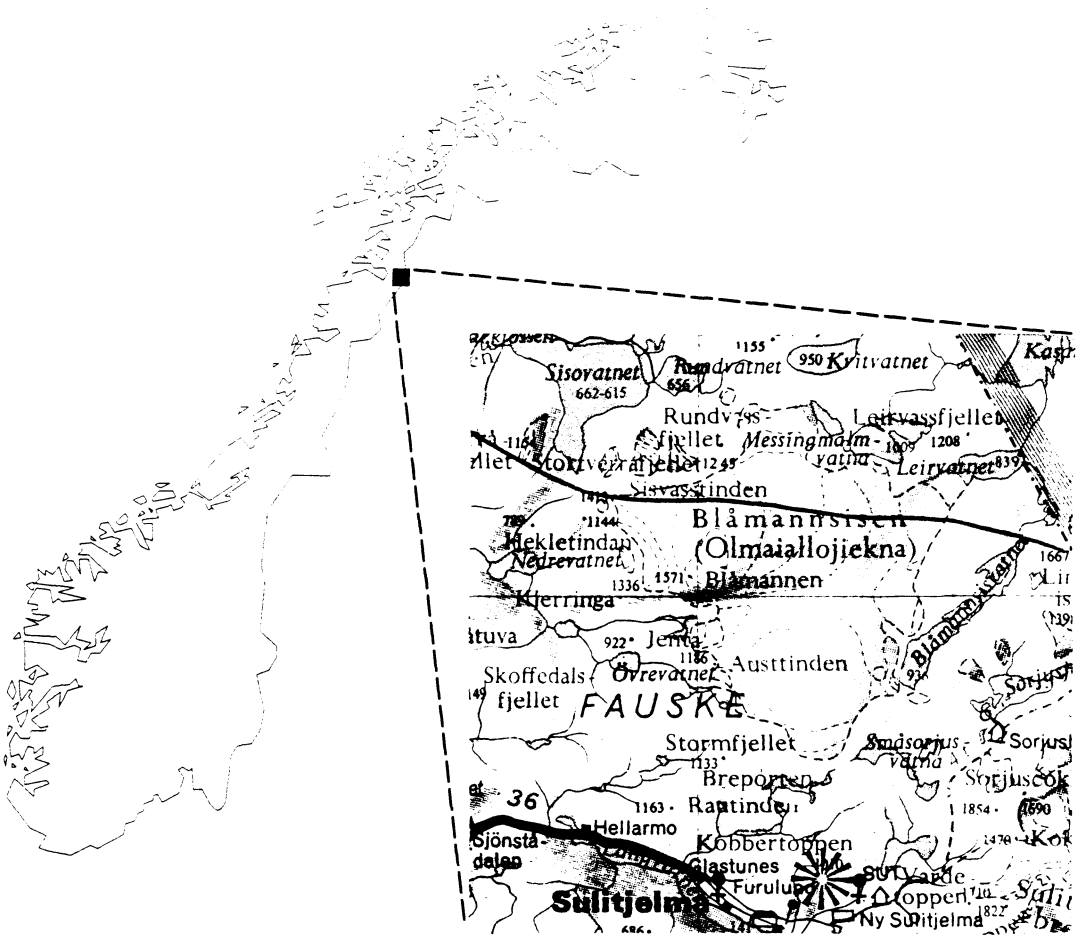

Fig. 1. Blåmannsisens beliggenhet.

2. TEORI

Smeltevann eller regnvann drenerer gjennom breen ved perkolasjon gjennom snøen, eller gjennom sprekker i isoverflaten. Shreve (1972) har vist at vann i isen beveger seg vinkelrett på ekvipotensiale flater der potensialet er definert som

$$\Phi = P_w + (\rho_w * g * Z) \qquad (1).$$

Z er punktets høyde over havet, P_w er vanntrykk, ρ_w er vannets tetthet og g er tyngdens akselerasjon.

Vann i likevekt med isen har trykk P_w lik istrykket P_i, mens det i en vannkanal minker med økning i vannstrømmen Q og kanalhelling (Röthlisberger, 1972). Vanntrykket blir atmosfærisk dersom Q når en kritisk verdi (Hooke, 1984).

Omkring dreneringsgrensene antar vi at kanalene er små og Q ubetydelig, og derfor at $P_w = P_i$. Dette er støttet også av

vanntrykkmålinger under isen i Grønland utført av Grønlands Geologiske Undersøgelse. (pers. medd. H. Thomsen, GGU, okt. 1989). Vanntrykket kan derfor skrives

$$P_w = \rho_i * g * H \qquad (2)$$

der ρ_i er isens tetthet og H er istykkelsen.

Dreneringsgrensen på brebunnen svarer til skillet i bunnpotensialet Φ_b, der

$$\Phi_b = (\rho_i * g * H) + (\rho_w * g * Z_b) \qquad (3)$$

fra ligning (1) og (2) med Z lik bunnhøyde Z_b. Vann på bunnen av breen går vinkelrett på Φ_b kotene.

Dreneringsgrensen V på breoverflaten beregnes ved å følge vannstrømsretningen baklengs fra dreneringsgrensen på brebunnen til breoverflaten. Den ligger som regel mellom den subglasiale dreneringsgrensen og isoverflategrensen $<Z_o>$.

3. FELTARBEID

Feltarbeidet ble gjort i perioden 6/6 - 9/6 1990. Radarprofilene ble bestemt på forhånd for å gi god dekning, spesielt over Rundvatnfeltet. Noen profiler måtte kjøres flere ganger på grunn av usikre data. Bratte skråninger og sprekker gjorde noen deler av breen utilgjengelig.

Satellitt navigasjon (GPS) ble brukt under radarkjøringene. En Trimble Pathfinder mottaker ble montert på radarscooteren for å få posisjon hver 30. sekund. I tillegg ble en Trimble Trimpack referansemottaker satt på en fjelltopp for å korrigere satellittstøy (differensiell korrigering), og radarens odometerhjul ble brukt som en grov sjekk på navigasjonen.

4. BEARBEIDING AV FELTDATA

4.1 Navigasjon

Differensiell korrigering kunne ikke benyttes på grunn av manglende programvare, og Pathfinderdataene kunne derfor ikke korrigeres. En analyse av Trimpackdataene viser at usikkerheten i GPS-posisjonen ligger på ±54 m i horisontal retning. Vi antar at usikkerheten i Pathfinderdataene derfor er ±60 m på grunn av dårligere satellittdekning enkelte steder på breen.

4.2 Istykkelse

Negativfilmene med radarregistreringene ble kopiert til papirbilder. Radarbildene ble manuelt tolket og avtegnet på diagram, og radarkurvene digitalisert i 50 m steg.

En radiobølgehastighet på 169 m/μs ble brukt i beregningene av istykkelse. Målingene ble korrigert geometrisk for sender - mottaker avstand. I tillegg er dataene blitt "migrert" for å korrigere for bunnhelling. Posisjon og istykkelse X, Y og H er beregnet for 4369 punkter langs 218 km radarprofiler.

5. RESULTATER

For å tegne kart over bunnhøyde osv. må dataene først interpoleres over et grid. Interpolasjonsmetoden "Universal kriging" ble brukt til å lage et grid (rutemønster) over isoverflatehøyde $Z_0(i,j)$ fra M711 kartene, og istykkelse $H(i,j)$ fra breradardataene, der i = kolonne-indeks og j = rad-indeks. $Z_b(i,j) = Z_0(i,j) - H(i,j)$ er beregnet og $\Phi_b(i,j)$ fra ligning (3) er funnet for alle gridpunktene. Punkter langs kanten og utenfor breen (H=0) ble også brukt i interpolasjonene for å gi et mer komplett grid. Programmet Surface II (Sampson, 1978) ble benyttet til interpolasjon og tegning av kart.

Det er blitt laget kart over nordvestlige Blåmannsisen med en gridstørrelse på 100 m, og over hele breen med gridstørrelse på 200 m. UTM (nord, øst) koordinater (zone 33W) er brukt på alle kart. Figur 2 viser datagrunnlaget for istykkelsesinterpolasjonen. På noen steder (merket med sirkler) måtte istykkelsen antas fordi interpolasjonen ellers ga urimelige verdier. Figur 3, 4 og 5 viser kart over henholdsvis istykkelse, bunnhøyde og bunnpotensial for nordvestlige Blåmannsisen, mens figur 6, 7, og 8 viser tilsvarende kart for hele breen. Dreneringsgrensene på isoverflaten er beregnet på grunnlag av bunnpotensialgrensene slik som beskrevet i kapittel 2 og er tegnet på fig. 5 og 8. Isskillene $\langle Z_0 \rangle$, bunntopografigrensene $\langle Z_b \rangle$ og dreneringsgrensene V er tegnet sammen på fig. 9 og 10.

Tabell 1 viser beregnede arealer for området oppstrøms det subglasiale passpunkt P (fig. 4). Vi antar at det subglasiale vannet går i et løp nedstrøms passpunktet. Derfor er den subglasiale dreneringsgrensen her antatt å være den samme som bunntopografigrensen, dvs. langs toppen av terskelen ved P.

Felt	Areal km^2
Isskiller $<Z_0>$	10.5
Bunntopografigrenser $<Z_b>$	5.3
Bunnpotensialgrenser $<\Phi_b>$	11.1
Dreneringsgrenser V	10.9

Tabell 1. Beregnede arealer for området oppstrøms P i henhold til isskillene, bunntopografigrensene, bunnpotensialgrensene og dreneringsgrensene.

Usikkerheten i kartene avhenger av usikkerheten i tolking av radarbildene, navigasjonen, interpolasjonen og isoverflategrunnlaget.

Erfaring med breradar på Island og i Sverige og Norge viser at usikkerheten i tolkningen er ±10 m. Middel helling på brebunnen er 11%, og med en navigasjonsusikkerhet på ±60 m gir dette en usikkerhet i bunnhøyde på ±7 m. Usikkerheten i interpolasjonen er blitt estimert ved å sammenligne krig-interpolasjonen med en dårligere interpolasjonsmetode. Dette gir

$$\Delta h^2 = 1.45 * S \qquad (4)$$

der Δh er forskjellen mellom interpolasjonene (m) og S er avstand til nærmeste datapunkt (m). For hele breen får vi en usikkerhet i istykkelse på grunn av interpolasjonen på ±15 m. Breens overflate har antagelig ikke forandret seg mye siden 1985 som er fotoårstall for M711 kartene, og vi antar en usikkerhet på ±5 m på grunn av dette.

Tilsammen gir dette en usikkerhet på ±20 m i istykkelse og bunnhøyde. Når det gjelder passpunktet P (fig. 5) er avstanden til det nærmeste datapunktet ca 150 m, derfor ligger usikkerheten i interpolasjonen her på ±15 m (fra lign. (4)) og totalusikkerheten på ±20 m. En analyse av den griddede datafilen viser at passpunktet har koordinater ca UTM (7466500,545200) og en høyde på 1000 ±20 m o.h.

Usikkerheten i bunnpotensial Φ_b er ca ±0.5 m bar, men usikkerheten i plassering av dreneringsgrensene får også et bidrag fra manuell trekning av skillene på Φ_b-kartet. En sammenligning av ulike estimater på bunnpotensialgrensene utført av flere personer på Hydrologisk avdeling viser ca ±0.2 km^2. Derfor antar vi skjønnsmessig en total usikkerhet på ±0.3 km^2 i arealet til dreneringsfeltet oppstrøms fra P.

6. JØKULHLAUP

Et jøkulhlaup er en flom fra et isdemmet vann, der vannet tømmes i løpet av noen timer eller dager etter at vannstanden har nådd en kritisk høyde. Vann 1051 ligger ved nordkanten av Blåmannsisen, men har et utløp over en fjellterskel og er derfor stabilt. Blir imidlertid isen tynnere, kan vannet presse seg under isen og flomme ut gjennom en subglasial kanal. Under et slikt jøkulhlaup vil vann fra Vann 1051 krysse det norsk/svenske hovedvannskillet og drenere til Rundvatnet.

Potensialet Φ for Vann 1051 er 103.1 bar i forhold til havnivå. Punkt Q i fig. 5 (UTM (7466400, 546200), Z_0 = 1108 m, H=118 m) har lavest bunnpotensial på Φ_b-terskelen mellom Vann 1051 og Rundvatnet, med en verdi Φ_b = 107.8 bar, dvs. 4.7 bar høyere enn Vann 1051. Ifølge undersøkelser på Island (Bjørnsson, 1988) må antagelig forskjellen falle til ca 2 bar før det blir noen fare for jøkulhlaup, dvs. isoverflaten må synke med ca 30 m.

7. KONKLUSJON

Blåmannsisens bunntopografi er blitt kartlagt ved bruk av breradar.

Den subglasiale topografien blir delt i to områder av en dyp øst-vest renne. Her er isen tykkest (471 m ved UTM(7459600, 547800)). Den nordlige delen er mye mer kupert en den sørlige delen, og har dessuten større istykkelse. Passpunktet i bunntopografien ovenfor Rundvatnet har koordinater ca UTM(7466500, 545200) og en høyde på 1000 ±20 m o.h. Blåmannsisen har en middel istykkelse på 163 m.

Istykkelsesdataene er blitt brukt til å beregne dreneringsgrensene på Blåmannsisen, samt arealet for det feltet som drenerer over et passpunkt under breen ovenfor Rundvatnet.

Forskjellen mellom dreneringsgrensene og grensene trukket på grunnlag av isoverflatetopografien er større på Blåmannsisen (opptil 1500 m avvik) enn på nordre Jostedalsbreen og Spørteggbreen (Kennett, 1989a og b). Dette skyldes en forholdsvis jevn isoverflate og samtidig et kupert subglasial terreng på Blåmannsisen.

Arealet på dreneringsfeltet oppstrøms passpunktet er 10.9 ±0.3 km^2. Med en avrenning for denne delen av Blåmannsisen på 85 $l/s \cdot km^2$ (Norges vassdrags- og energiverk, 1987) får vi et årsmiddel avløp på 0.93 m^3/s ved passpunktet hvis breen er i balanse. Økt sommersmelting vil imidlertid gi større avløp. 1 m/år vannekvivalent smelting over hele feltet tilsvarer 0.35 m^3/s ved passpunktet.

I beregningene av bunnpotensialgrensene som er grunnlaget

for beregninger av dreneringsgrensene V, har vi antatt at vanntrykket er lik istrykket. Stor smelting om sommeren kan imidlertid føre til mindre vanntrykk og en flytting av V vekk fra isoverflategrensene og mot bunntopografigrensene. I fig. 9 kan vi se at dette vil kunne gi et mindre dreneringsareal for passpunktet.

Klimaforandringer kan føre til en betydelig flytting av dreneringsgrensene i løpet av noen år. Målinger på Midtre Folgefonni, som bare er 2 km bred, viser at det høyeste punktet på breen har flyttet seg ca 70 m vestover mellom 1959 og 1981 (Østrem og Tvede, 1986).

Vann 1051 på nordkanten av Blåmannsisen er i dag stabilt, men kan tømme seg plutselig under isen og over passpunktet hvis isen mellom vannet og passpunktet blir ca 30 m tynnere.

8. ANBEFALINGER

Direkte målinger av vanntrykket under breen vil kunne si om dette er lik istrykket og hvordan dette eventuelt forandrer seg gjennom året.

Sporstoffmålinger kan gjøres for å bekrefte eller avkrefte de beregnede dreneringsgrensene.

Posisjonen og høyden på det subglasiale passpunktet ovenfor Rundvatnet kan bestemmes mer nøyaktig ved bruk av en helikoptermontert breradar i brefallet. En slik radar er nå under utvikling hos NVE-Hydrologisk avdeling.

Avrenningsdataene for Blåmannsisen er nokså usikre og kan forbedres vesentlig ved å måle breens massebalanse. Slike målinger gir et meget godt estimat på vinternedbør og sommersmelting og deres variasjon med høyden. Våren 1991 vil data fra en ny vannføringsstasjon ved utløp av Messingmalmvatnan kunne benyttes til å forbedre avrenningsdataene.

Elveløpet under brefallet går ikke nødvendigvis i den dypeste delen av bunnen. Forsøk for å lokalisere elven bør gjøres før konstruksjon av et eventuelt breinntak påbegynnes.

9. REFERANSER

Bjørnsson, H.
1988: Hydrology of ice caps in volcanic regions. University of Iceland, Reykjavik.

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

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

Hooke, R. LeB.
1984: On the role of mechanical energy in maintaining subglacial water conduits at atmospheric pressure. Journal of Glaciology, v. 30, p. 180-187.

Kennett, M.I.
1989a: Feltavgrensning på nordre Jostedalsbreen. - Oppdragsrapport 2-89, Hydrologisk avdeling, NVE.

1989b: Kartlegging av istykkelse og feltavgrensning på Spørteggbreen 1989. - Oppdragsrapport 15-89, Hydrologisk avdeling, NVE.

Norges vassdrags- og energiverk
1987: Avrenningskart over Norge.

Röthlisberger, H.
1972: Water pressure in intra- and subglacial channels. Journal of Glaciology, v. 11, p. 177-203

Sampson, R.J.
1978: Surface II graphic system. Computer Services Section, - Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas.

Shreve, R.L.
1972: Movement of water in glaciers. - Journal of Glaciology, v. 11, no. 62, p. 205-214.

Sverrisson, M. m. flere.
1980: Radio echo equipment for depth sounding of temperate glaciers, by M. Sverrisson, Æ. Johannesson, and H. Bjørnsson.- Journal of Glaciology, Vol. 25, No. 93, p 477 - 486.

Sætrang, A.C.
1988: Kartlegging av istykkelse på vestre Svartisen, 1986. - Oppdragsrapport 3-88, Hydrologisk avdeling, Norges vassdrags- og energiverk.

Sætrang, A.C. og Wold, B.
1986: Results from the radio echo-sounding on parts of the Jostedalsbreen ice cap, Norway. - Annals of Glaciology, Vol. 8, 1986. p. 156 - 158.

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

Watts, R.D. m flere.
1975: Radio-echo sounding on Cascade Glacier, Washington, using a long wavelength mono-pulse source, by R.D. Watts, A.W. England, R.S. Vickers, and M.F. Meier.- Journal of Glaciology, Vol. 15, No. 73, p. 459 - 461.

Østrem, G. m. flere
1988: Atlas over breer i Sør-Norge, by G. Østrem, K. Dale Selvig og K. Tandberg. - Meddelse nr. 61 fra Hydrologisk Avdeling, Norges vassdrags- og energiverk.

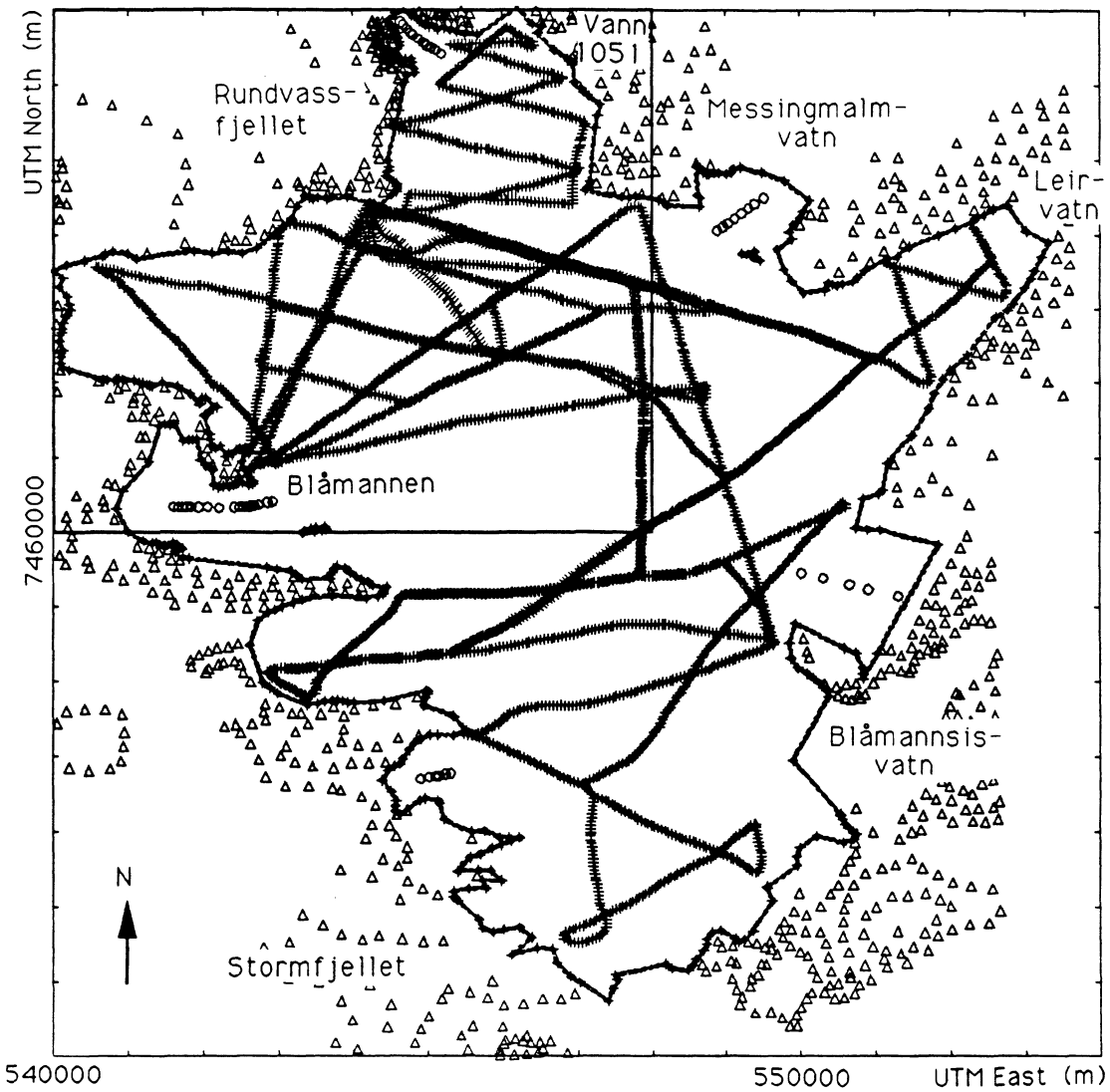

Fig. 2. Datagrunnlaget for istykkelse interpolasjon:
+ god radardata *x usikker radardata*
o antatt istykkelse *✦ brekanten*
△ punkter utenfor breen
Boksen viser delområdet nordvestlige Blåmannsisen vist i fig. 3,4,5 og 9.

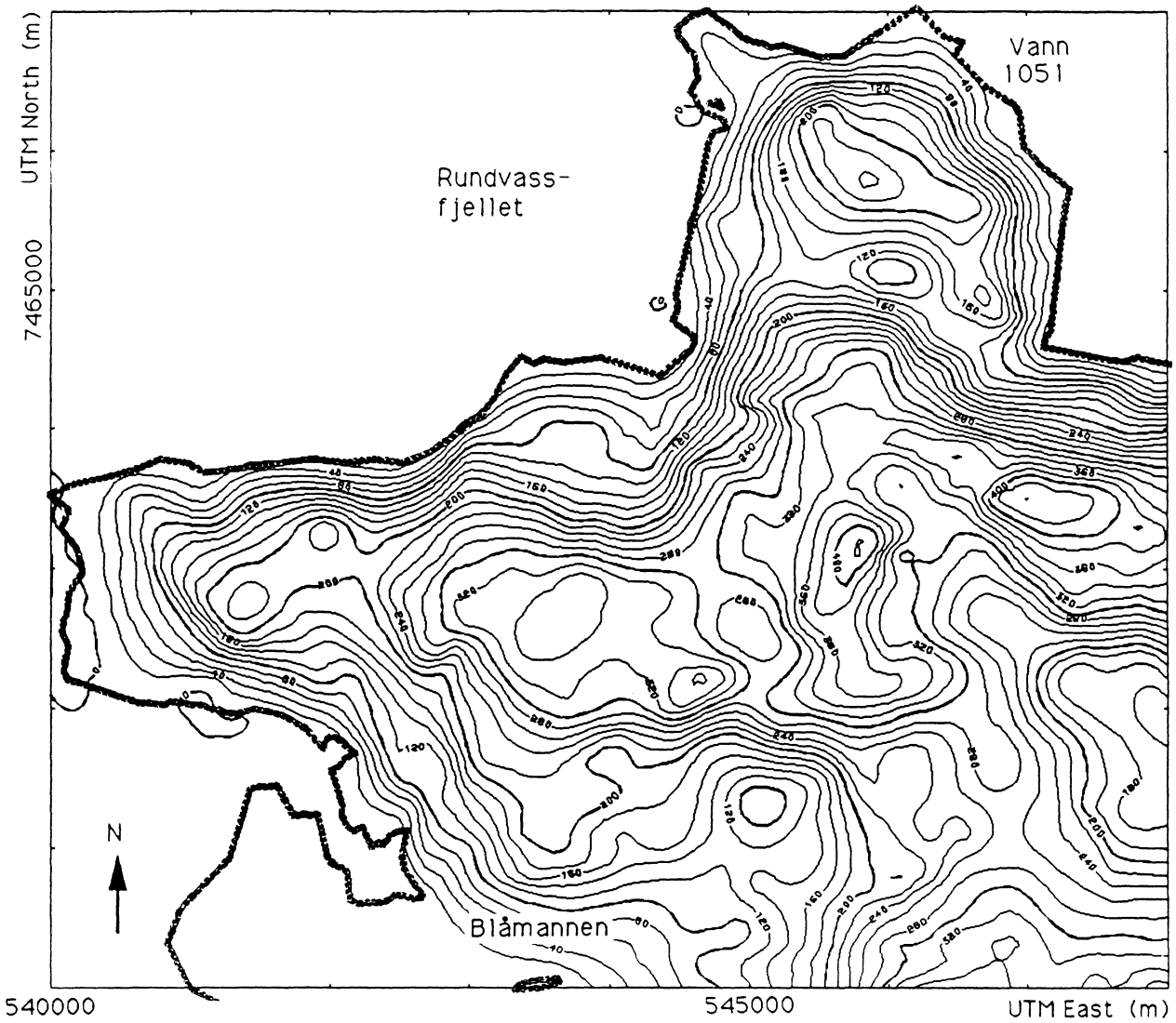

Fig. 3. Istykkelsen i meter for nordvestlige Blåmannsisen.

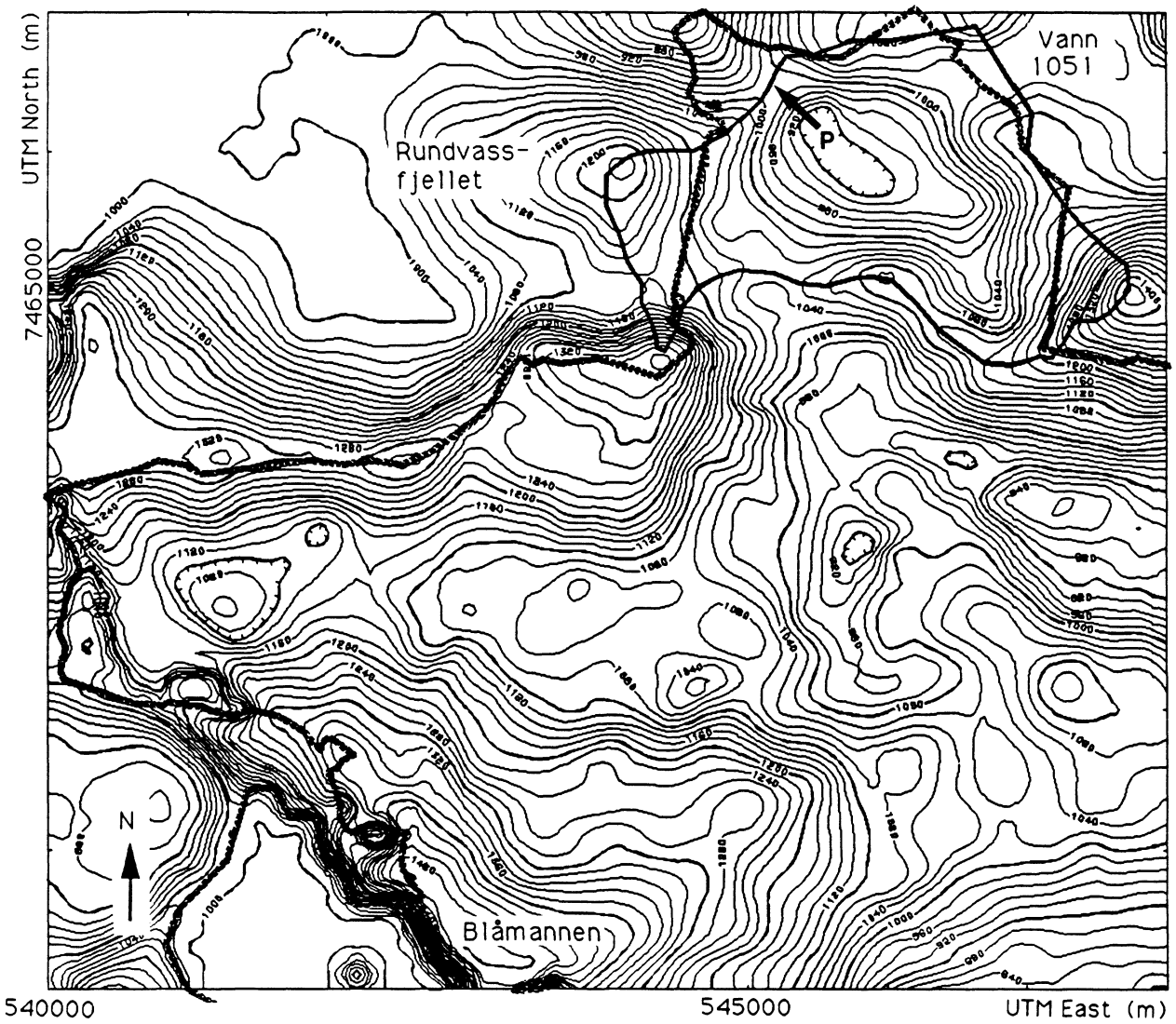

Fig. 4. Bunntopografien for nordvestlige Blåmannsisen og bunntopografigrensen <Z_b> for området oppstrøms passpunkt P.

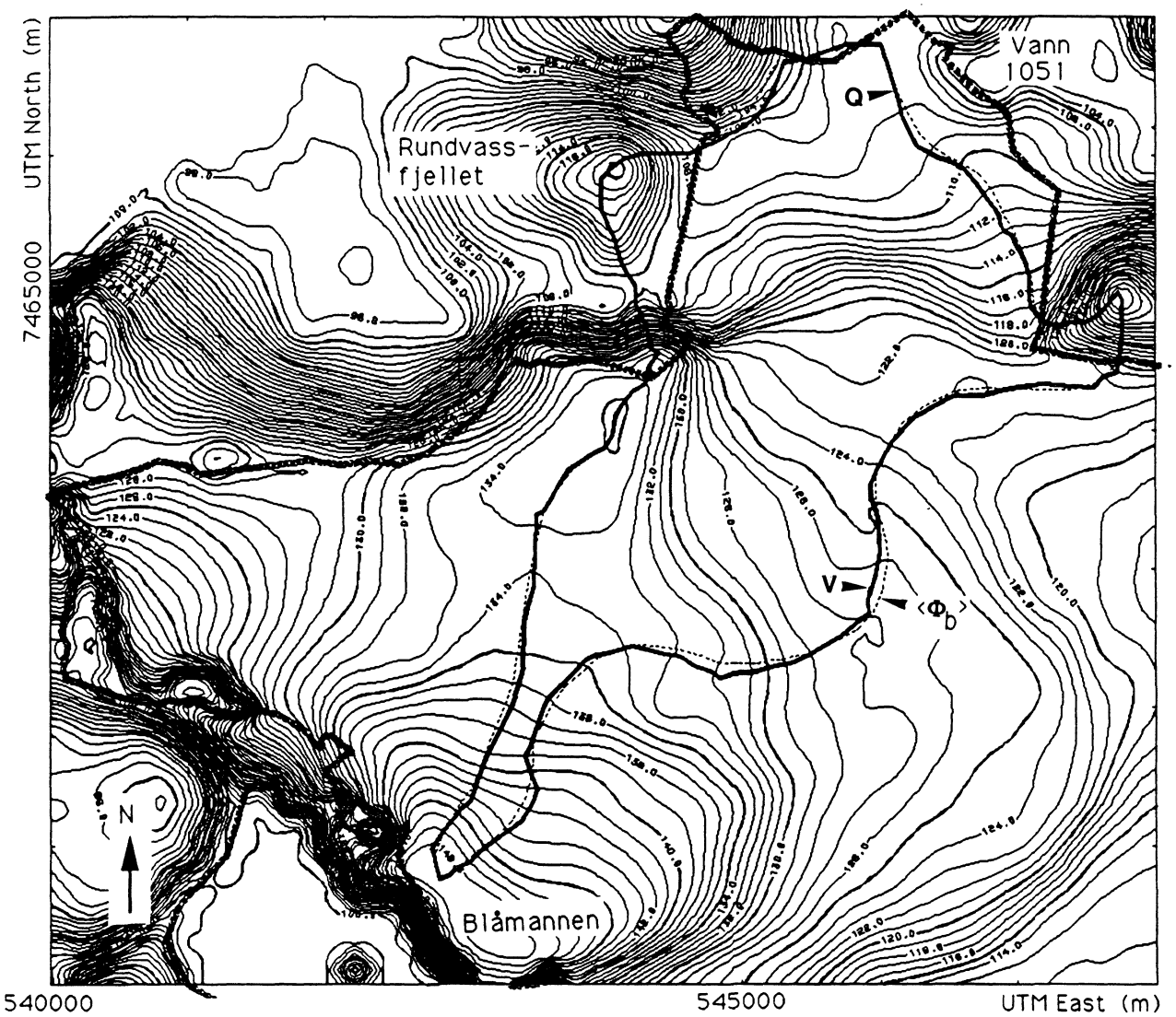

Fig. 5. Bunnpotensialet (bar) for nordvestlige Blåmannsisen med bunnpotensialgrensen $\langle\Phi_b\rangle$ (stiplet) og drenerings-grensen V for området oppstrøms P.

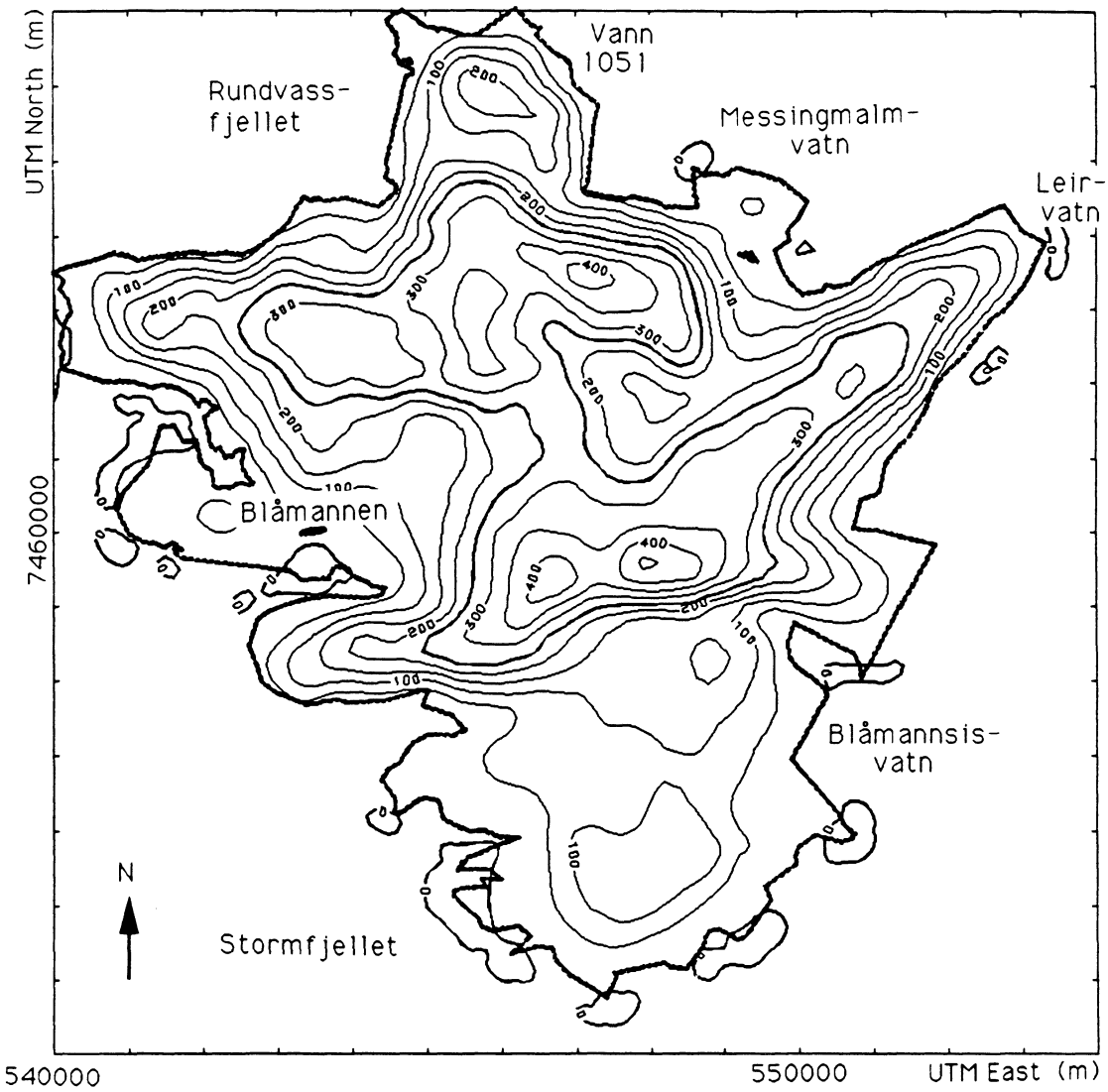

Fig. 6. Blåmannsisens istykkelse i meter.

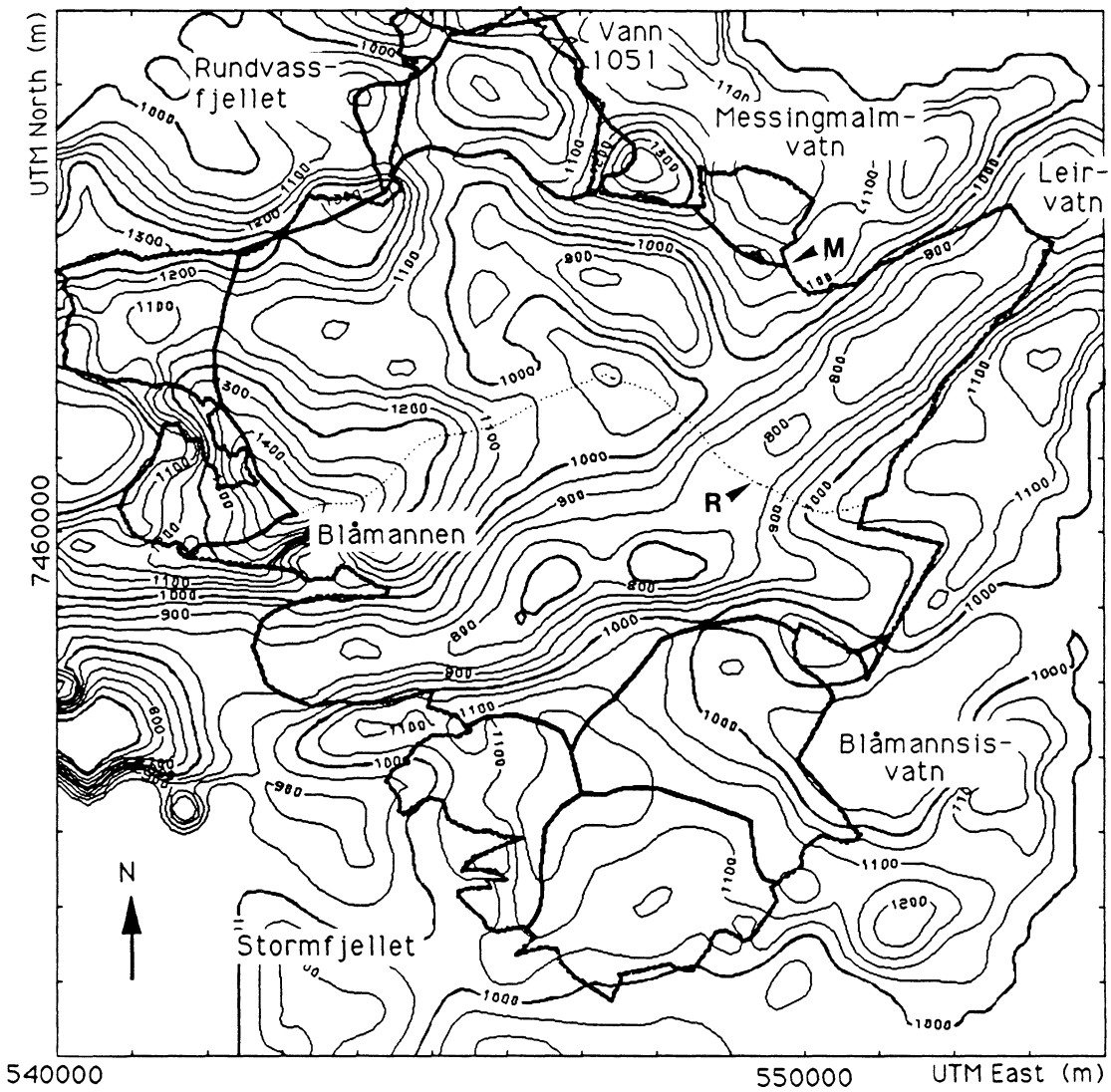

Fig. 7. Blåmannsisens bunntopografi og bunntopografigrenser $<Z_b>$. *Den norsk/svenske grensen er stiplet der plasseringen er usikker pga. nesten lik høyde ved passpunkt R (823 m o.h.) og utløp av Leirvatnet (826 m o.h.). Grensen går derfor alternativt fra punkt M og rundt østsiden av både Leirvatnet og Blåmannsisvatnet.*

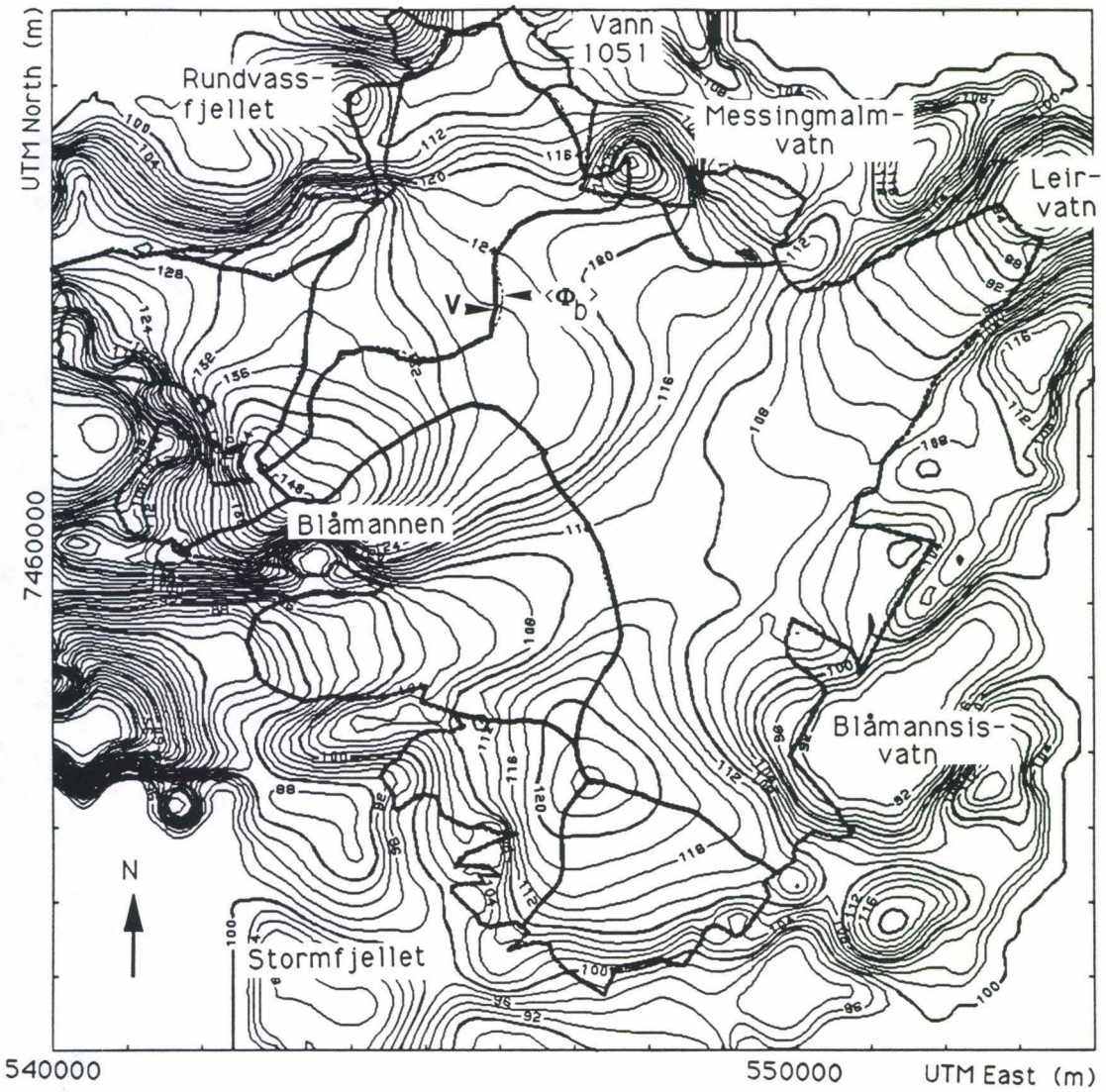

Fig. 8. Blåmannsisens bunnpotensial, bunnpotensialgrenser $\langle\Phi_b\rangle$ *(stiplet) og dreneringsgrenser V.*

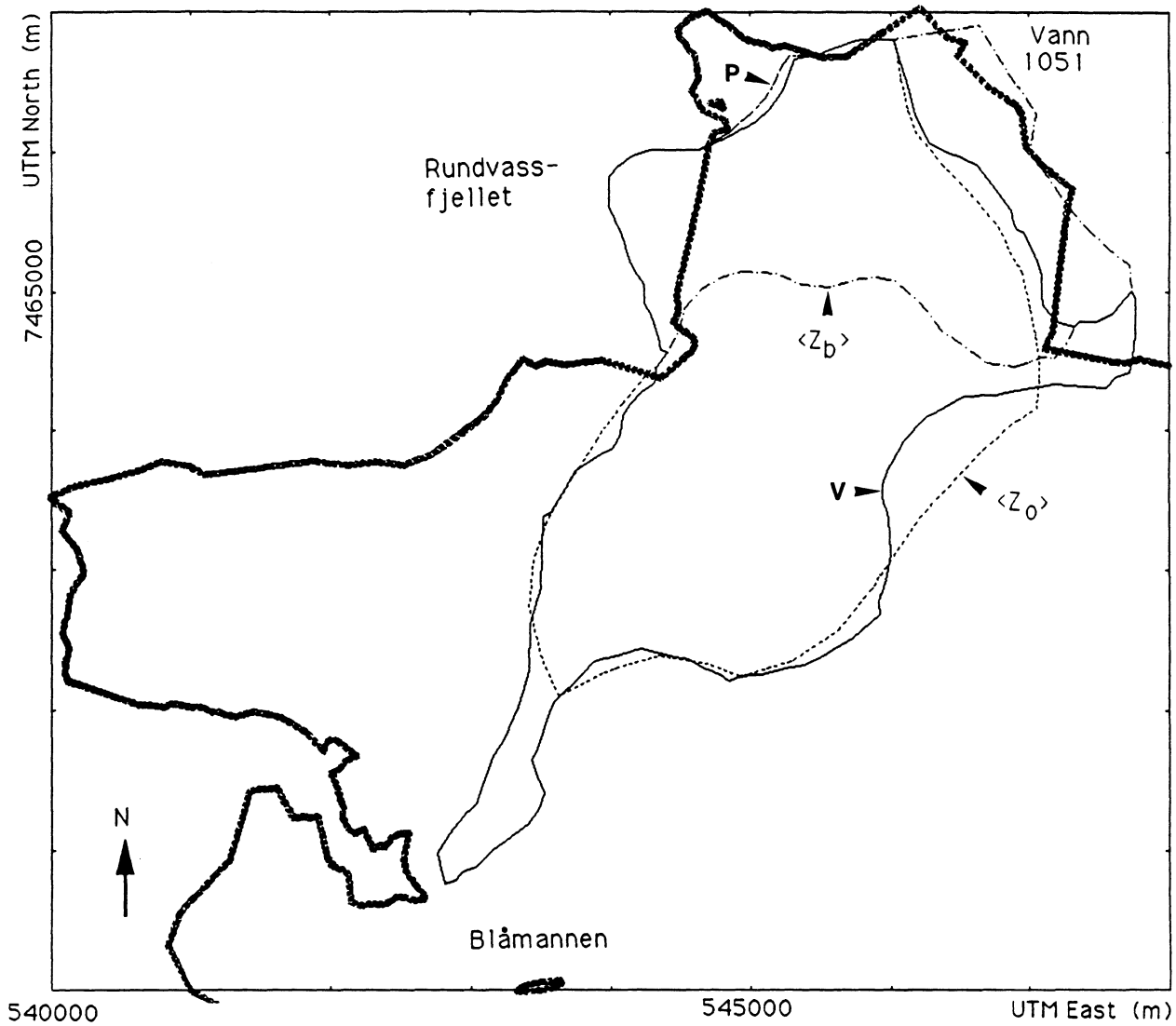

Fig. 9. Isskillene, bunntopografi- og dreneringsgrensene (hhv. $<Z_0>$, $<Z_b>$ og V) for området oppstrøms P.

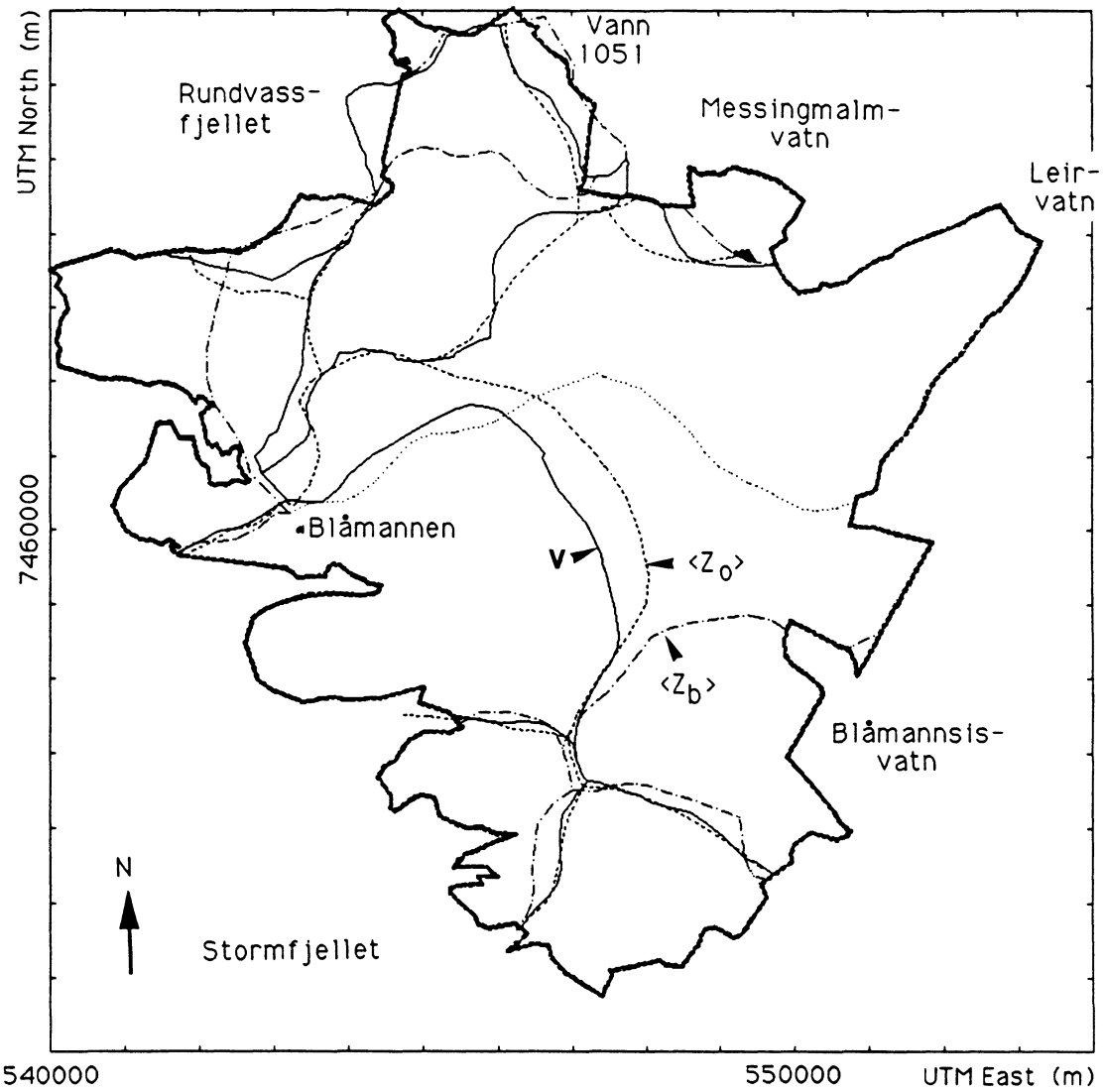

Fig. 10. Isskillene, bunntopografi- og dreneringsgrensene (hhv. $<Z_0>$, $<Z_b>$ og V) for Blåmannsisen.