NORGES VASSDRAGS- OG ENERGIVERK
VASSDRAGSDIREKTORATET
HYDROLOGISK AVDELING

KARTLEGGING AV ISTYKKELSE OG FELTAVGRENSNING PÅ SPØRTEGGBREEN 1989

OPPDRAGSRAPPORT
15 - 89

OPPDRAGSRAPPORT 15-89

Rapportens tittel:	Dato: 1989-12-11
KARTLEGGING AV ISTYKKELSE OG FELTAVGRENSNING PÅ SPØRTEGGBREEN 1989	Rapporten er: Åpen Opplag: 100

Saksbehandler/Forfatter:	Ansvarlig:
Mike Kennett Brekontoret	Bjørn Wold

Oppdragsgiver:

STATKRAFT

Sammendrag:

Rapporten beskriver resultater fra breradarmålinger på Spørteggbreen 1989. Resultatene er brukt til å beregne dreneringsgrensene mellom Vigdalen, Vanndalen, Geisdalen, Fagredalen og Mørkridsdalen, samt arealer for de forskjellige feltene. Dreneringsfeltene er sammenlignet med felt beregnet i henhold til breoverflate og bunntopografi.

Kartene viser at vannskillene på Spørteggbreen ligger nær breoverflate-grensene, med typisk 100 m forskjell og et maksimalavvik på ca 600 m. Arealforskjellene er ubetydelige.

I perioder med sterk smelting vil dreneringsarealet mot Vigdalen kunne øke noe på bekostning av feltene mot Geisdalen og Mørkridsdalen.

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

Det finnes flere bredemte sjøer i området som ved ytterligere utvikling vil kunne tappes under breen. Dette vil kunne gi både endrede dreneringsfelt og mulige flomskader.

FORORD

Foreliggende rapport er et resultat av bestilling B-01/9478 fra Statkraft.

Bakgrunnen for arbeidet var ønsket om en bedre bestemmelse av dreneringsgrenser og feltarealer på Spørteggbreen i forbindelse med utbyggingen av Jostedal kraftverk.

Dette er det andre større breområdet i Norge som har vært gjenstand for en slik grundig feltavgrensning. På grunn av manglende kapasitet ved Brekontoret ble deler av arbeidet utført av konsulenter. Entreprenørfirma Heli-Anlegg A/S har vært ansvarlig for kjøring av breradaren og tolkning av radarbildene. Statens Kartverk sørget for GPS-innmåling av alle navigasjonspunktene med hjelp fra Bjarne Kjøllmoen. Rekognosering i felt under radarkjøring ble gjort av Christian Nielsen. Grunnlag for breens overflate var 1: 10 000 kart over Spørteggbreen laget og digitalisert av Norkart A/S etter flyfotos fra 1988. Bearbeidingen av resultatene og utarbeidelsen av denne rapport er gjort av Mike Kennett.

Oslo, desember 1989

Arne Tollan
avdelingsdirektør

INNHOLD

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

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, 1989).

Denne rapporten beskriver metode og resultater ved subglasial kartlegging med breradar på Spørteggbreen våren 1989 og avgrensning av dreneringsfeltene. Spørteggbreen (28 km^2, 1270-1750 m o.h.) er Norges 12. største bre (Østrem m. flere, 1988).

Tre forskjellige grenser er beregnet i denne rapporten:

a) Breoverflategrensen, som beskriver vannskillet som om breen var ugjennomtrengelig og alt vannet ville renne på breoverflaten.

b) Bunntopografigrensen, som beskriver vannskillet hvis breen var borte, eller hvis alt vannet i og under breen skulle strømme i kanaler med atmosfærisk trykk.

c) Dreneringsgrensen, som beskriver vannskillet på breoverflaten med hensyn til drenering i og under breen.

Grensene mellom Mørkridsdalen og Jostedalen er beregnet, samt grensene mellom de forskjellige brefeltene som drenerer ned mot Jostedalen.

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

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

Z er punktets høyde over havet, P_w er vanntrykk, R_w er vannets tetthet og g er tyngdens akselerasjon. Vann på bunnen av breen går vinkelrett på Φ_b kotene, der Φ_b er potensialets størrelse på bunnen.

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 er kanalene små og Q ubetydelig, derfor antar vi at $P_w = P_i$. Denne antagelsen 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

$$P_w = R_i * g * (Z_o - Z) \qquad (2)$$

der R_i er isens tetthet og Z_o er breoverflatehøyde.

Dreneringsgrensen på brebunnen $\langle\Phi_b\rangle$ finnes ved å beregne bunnpotensial Φ_b under hele breen ved å sette Z lik bunnhøyde Z_b i ligning (1) og (2).

Dreneringsgrensen på breoverflaten V beregnes ved å følge vannstrømsretningen baklengs fra $\langle\Phi_b\rangle$ på brebunnen til breoverflaten. Den ligger som regel mellom $\langle\Phi_b\rangle$ og breoverflategrensen $\langle Z_o\rangle$ (isskillet).

3. FELTARBEID

Staker i et tilnærmet 1 km x 1 km rutenett ble satt ut på breen, og innmålt med "Global Postitioning System"-utstyr (GPS) av Statens Kartverk 25. - 26. april 1989. Noen av de 47 punkter ble målt to ganger og gir en usikkerhet på ± 5 m i x, y og z koordinater.

Radaren ble kjørt etterpå av Heli-Anlegg A/S i tilnærmet rette linjer mellom stakene, i periodene 27. - 29. april og 4. - 8. mai. Det var ofte vanskelig å se til neste stake, noe som gjorde noen av profilene litt krokete.

4. BEARBEIDING AV FELTDATA

Et punkt på flaten under breen er bestemt av de tre koordinatene X, Y og Z_b. Navigasjonen gir grunnlag for beregninger av X og Y, mens kart over breoverflaten (Z_o) og måling av istykkelsen (H) gir grunnlag for beregning av $Z_b = Z_o - H$. Radarposisjon (X,Y) og istykkelsesdata er brukt sammen med digitale kartdata (X,Y,Z_o) til å beregne bunnhøyde langs radarprofilene.

4.1 Navigasjon

Posisjonen (X,Y) for radarprofilene er beregnet fra koordinatene til de GPS-innmålte punktene, og radarens odometerhjul. Profilene er vist i fig. 1. Usikkerheten i radarposisjon er antatt å være

±50 m i både X og Y (pers. medd. Heli-Anlegg A/S, aug. 1989).

4.2 Istykkelse

Negativfilmene med radarregistreringene ble kopiert til papirbilder. Radarbildene ble manuelt tolket og avtegnet på diagram og radarkurvene digitalisert i 25 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 3284 punkter langs 82 km radarprofiler.

Akkumulasjonsmålinger på Spørteggbreen våren 1989 viser at snødybden var 5-6 m, som tilsvarer 4 m is for radiobølger. Derfor er beregnet istykkelse redusert med 4 m slik at den korresponderer til breens overflate høsten 1988.

4.3 Bunnhøyde

Overflatehøyde Z_o til hvert radarpunkt er beregnet ved interpolasjon av et digitalt kart. Kartet over Spørteggbreen var laget fra flyfotoer tatt høsten 1988 i skala 1: 10 000 med 10 m koter av Norkart A/S, som også sto for digitaliseringen. Dermed kunne bunnhøyde $Z_b = Z_o - H$ beregnes for hvert punkt.

5. RESULTATER

Beregning av koter over breens subglasiale topografi ble gjort av et grafisk programsystem Surface II (Sampson, 1978). Programmet interpolerer først over et rutenett og lager deretter koter. Avstanden mellom punkter i rutenettet var 250 m og resultatet er vist i fig. 2. Interpolasjonsmetoden var "Universal Krigging" som teoretisk gir best mulig estimat av en flate. Bunntopografigrensen $\langle Z_b \rangle$ er også tegnet på fig. 2.

For sammenligning er kart i samme format tegnet over breens istykkelse (fig. 3) og av breoverflaten (fig. 4). Breoverflategrensen $\langle Z_o \rangle$ er også vist i fig. 4. Perspektivplott av breens overflate og bunn er vist i fig. 5.

Usikkerheten i bunnhøyde for et vilkårlig punkt på bunntopografikartet øker med avstanden fra de målte datapunktene, dvs. fra radarprofilene eller brebegrensningen. For å få et estimat på usikkerheten ble kartet i fig. 2 sammenlignet med et kart laget med en mindre nøyaktig interpolasjonsmetode. Disse to kart har et standardavvik på 10.7 m og maksimum forskjell på 46 m. Derfor antas at usikkerheten på grunn av interpolasjonen er ca 10 m. I tillegg kommer avvik på grunn av usikkerhet i navigasjonen. Bunnhellingen

er typisk 20% og maksimum 50%. Det vil si at en usikkerhet på 50 m i både x og y gir typisk 14 m og maksimum 35 m avvik i høyde. Til slutt er det usikkerhet i tolkning av radarbildene. En analyse av profiler kjørt to eller flere ganger viser at usikkerheten her ligger på ±15 m. Dette er større enn den som teoretisk kan nås (±8 m), antagelig på grunn av usikkerheten i navigasjonen.

Totalt sett forventer vi derfor et standardavvik for beregnet bunnhøyde på ca 23 m. Den maksimale feilen er vanskelig å beregne, men antas å ligge omkring 60 m.

Beregninger fra nordre Jostedalsbreen (Kennett, 1989) viser at isoverflatetopografien har større betydning for bunnpotensial Φ_b enn bunntopografien. For å beregne Φ_b for Spørteggbreen med størst mulig nøyaktighet har vi derfor interpolert Z_o fra digitalkartet og istykkelsen h fra breradarmålingene hver for seg over et grid. Deretter ble Φ_b beregnet for hvert gridpunkt. Resultatet er vist i fig. 6, med bunnpotensialgrensene $\langle\Phi_b\rangle$ tegnet på. Φ_b-kartet ligner på Z_o-kartet (fig. 4), men med grunne daler som tilsvarer dal i bunntopografien.

En sammenligning av to forskjellige interpolasjonsmetoder antyder at usikkerheten i Z_o er bare 1 m, dvs. 0.09 bar i Φ_b. Usikkerheten i bunnhøyde på 23 m tilsvarer 0.16 bar i Φ_b. Derfor er totalusikkerheten i Φ_b bare 0.18 bar.

De tre forskjellige grensene $\langle Z_o\rangle$, $\langle Z_b\rangle$ og V er sammenstilt i fig. 7, mens tabell 1 viser beregnede arealer for de forskjellige feltene rundt Spørteggbreen. Usikkerheten her er vanskelig å anslå, men ligger antagelig omkring 0.1 km^2 for $\langle Z_o\rangle$ og V, og litt mer for $\langle Z_b\rangle$.

Felt	Definisjon*	$\langle Z_o\rangle$	$\langle Z_b\rangle$	V
Mørkridsdalen	KHIJK	29.26	28.87	29.26
Vigdalen	BCKAB	14.92	18.46	15.00
Vanndalen	BCDB	1.38	1.02	1.34
Geisdalen	DCFED	14.13	11.57	14.09
Fagredalen	HFGH	3.48	3.25	3.48
Jostedal total	KHGEAK	33.91	34.30	33.91

* Se også fig. 7. Strekningen langs grensen er understreket.

Tabell 1. Beregnede arealer (km^2) i henhold til breoverflategrensene $\langle Z_o\rangle$, bunntopografigrensene $\langle Z_b\rangle$ og dreneringsgrensene V.

6. KONKLUSJON

Spørteggbreens bunntopografi er blitt kartlagt ved bruk av breradar over et omtrentlig 1 km rutenett.

På vestsiden av breen er det en dyp dal med flere overfordypninger med utgang mot Smådalene. Her er isen tykkest (300 m). Den nest største dalen går vestover sør fra Grånosi. Istykkelsen på Leirbotnbreen er ikke målt, men den antas å være ca 100 m.

Istykkelsesdataene er blitt brukt til å beregne dreneringsgrensene på Spørteggbreen, samt arealer for de forskjellige feltene som drenerer mot Jostedalen.

Dreneringsgrensene V er bedre korrelerte med breoverflategrensene $\langle Z_o \rangle$ (maks. avvik 600 m) enn med bunntopografigrensene $\langle Z_b \rangle$ (maks. avvik 1500 m).

I beregningene av bunnpotensialgrensene $\langle \Phi_b \rangle$, som er grunnlaget for beregninger av dreneringsgrensene V, har vi antatt at vanntrykket er lik istrykket (lign. 2). Stor smelting om sommeren kan imidlertid føre til mindre vanntrykk og en flytting av V vekk fra breoverflategrensene $\langle Z_o \rangle$ og mot bunntopografigrensene $\langle Z_b \rangle$. I fig. 7 kan vi se at dette f.eks. vil kunne gi et større dreneringsareal til Vigdalen.

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).

Flere isdemte sjøer ligger rundt kanten av Spørteggbreen. De kan tømme seg plutselig under isen idet de når et kritisk vannivå. Flom fra disse sjøene vil antagelig kunne forutsies ved ytterligere undersøkelser. Dette har ikke vært gjenstand for undersøkelser under dette oppdrag.

7. ANBEFALINGER

Kartlegging av breers subglasiale topografi er en omfattende prosess både med feltmålinger og bearbeiding av data, og innebærer samtidig kartlegging av breens overflate. Kontinuerlige målinger av posisjon med GPS utstyr på radarsleden vil kunne gjøre både feltmålinger og bearbeiding av data raskere og mer nøyaktig. Usikkerheten på grunn av interpolasjon blir antagelig mindre for samme totale profillengde med parallelle profiler på 500 m avstand istedenfor et 1 km rutenett.

Direkte målinger av vanntrykket under breen vil kunne si om dette er lik istrykket, slik som antatt i potensialberegningene, og hvordan dette eventuelt forandrer seg gjennom året.

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

8. REFERANSER

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.

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

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: Instruments and methods. 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. 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.

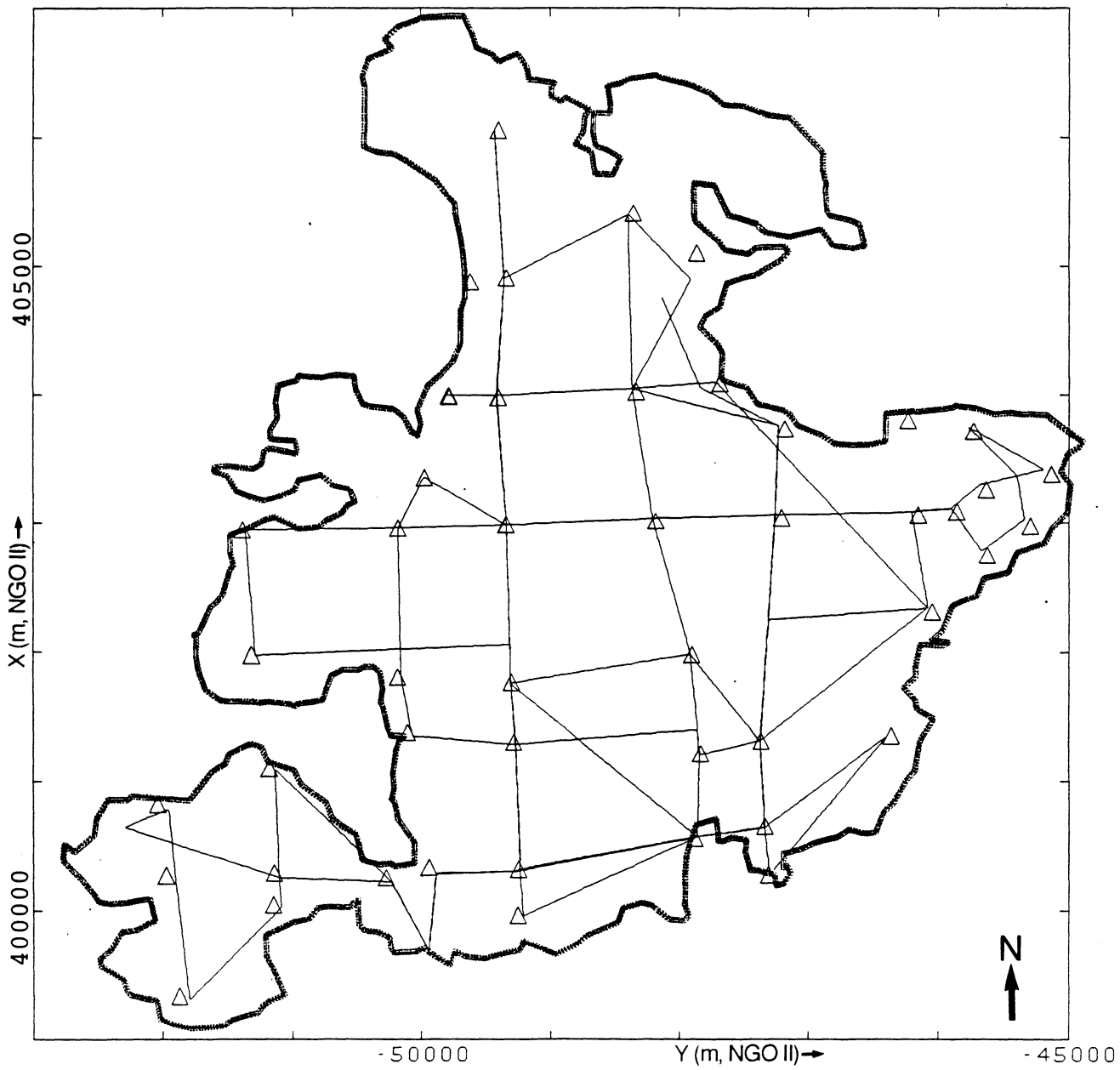

Fig. 1. GPS-innmålte navigasjonspunkter (trekanter) på Spørtegg-breen og kjørte radio-ekko profiler.

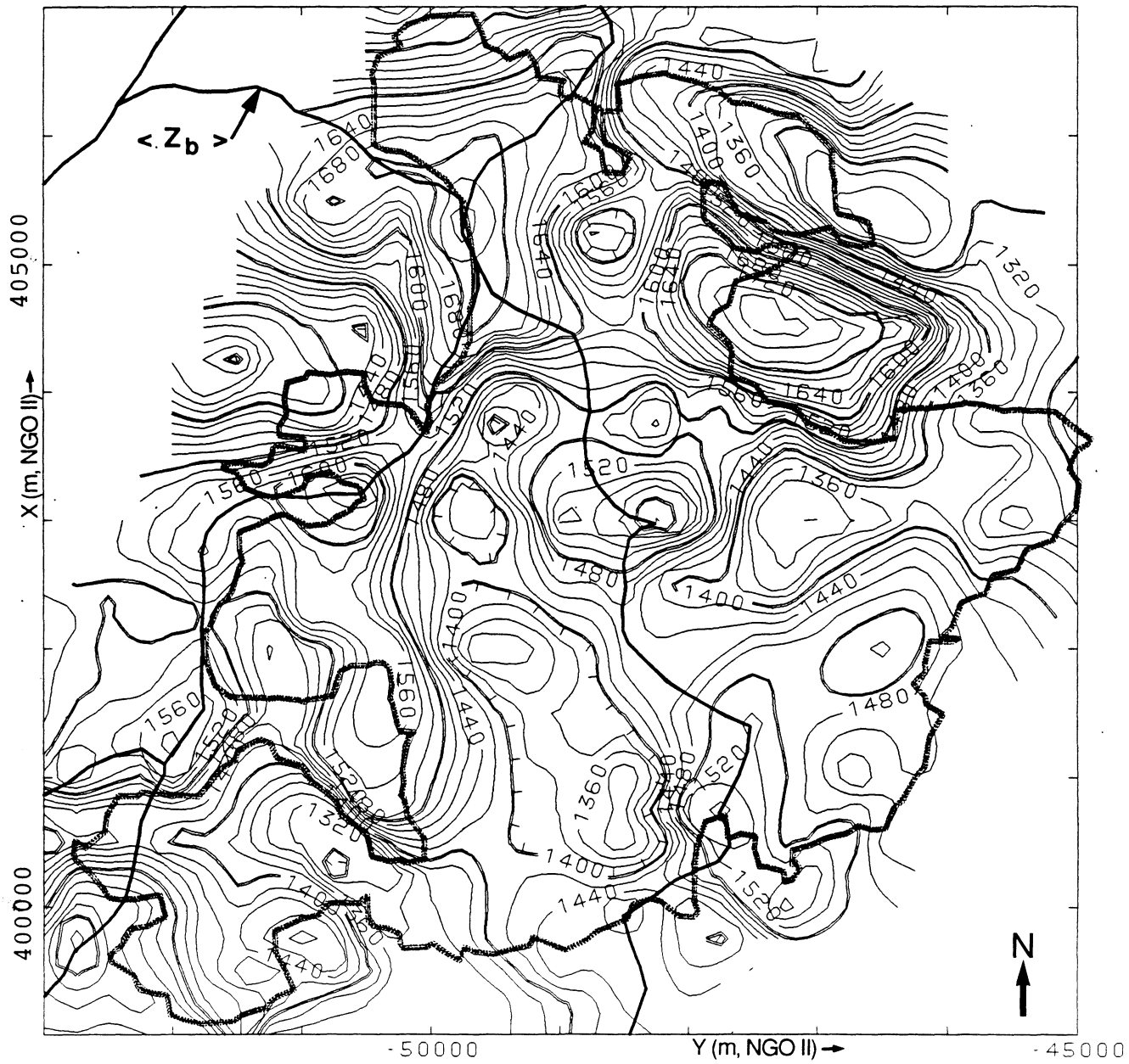

Fig. 2. Spørteggbreens subglasiale topografi og bunntopografigrensene $\langle Z_b \rangle$.

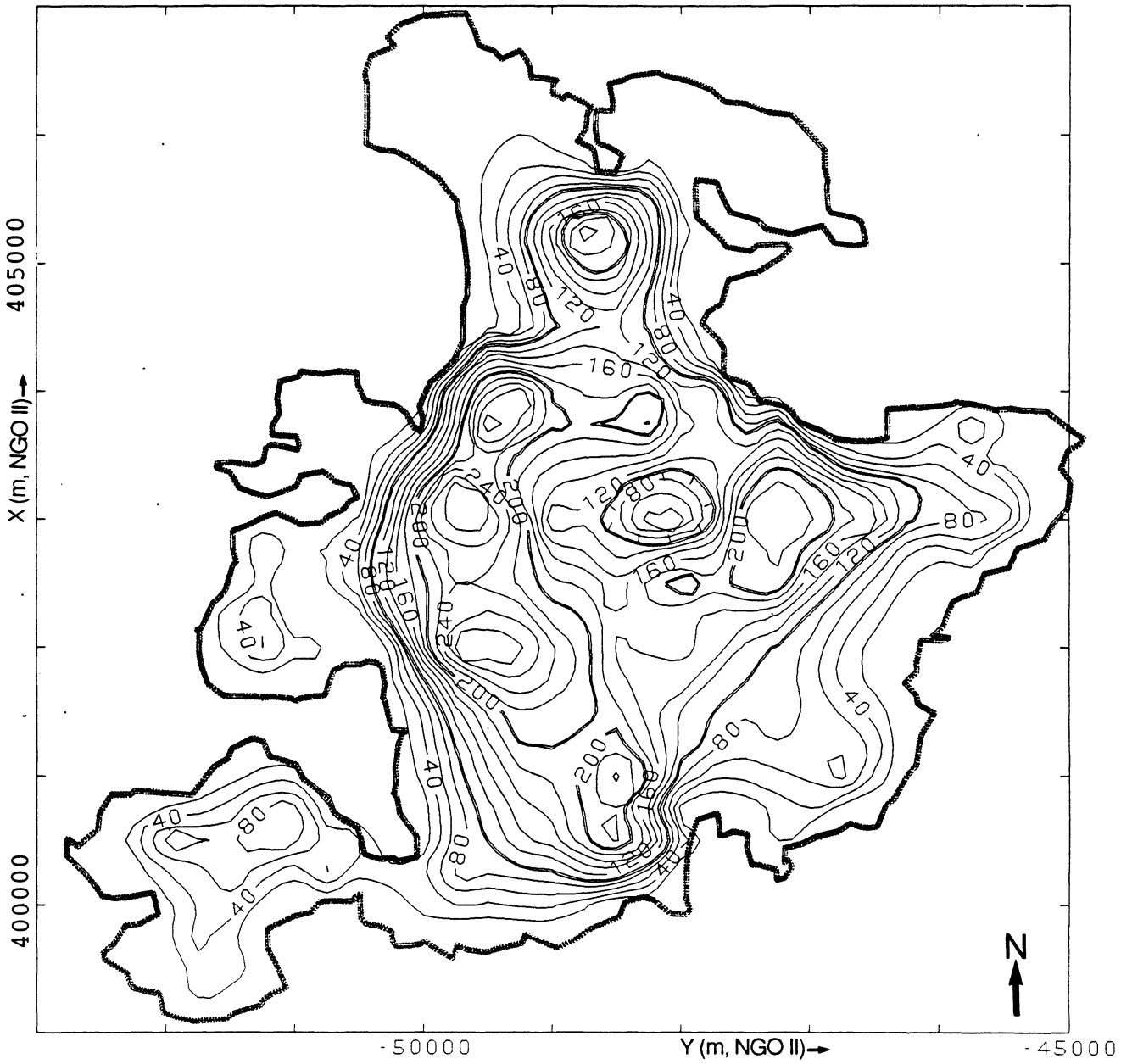

Fig. 3. Spørteggbreens istykkelse høsten 1988.

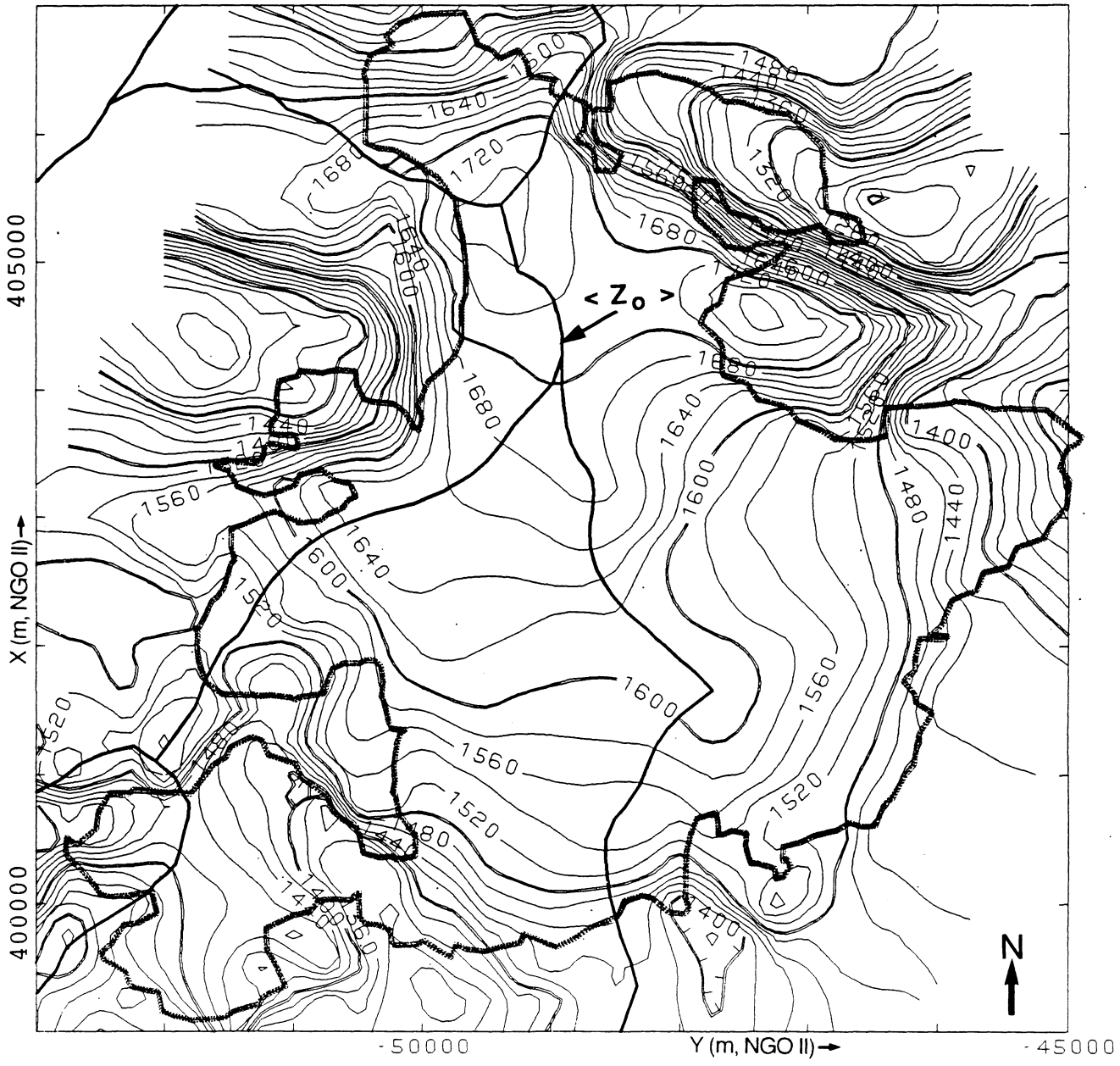

Fig. 4. Spørteggbreens breoverflatehøyde høsten 1988, og breoverflategrensene $<Z_o>$.

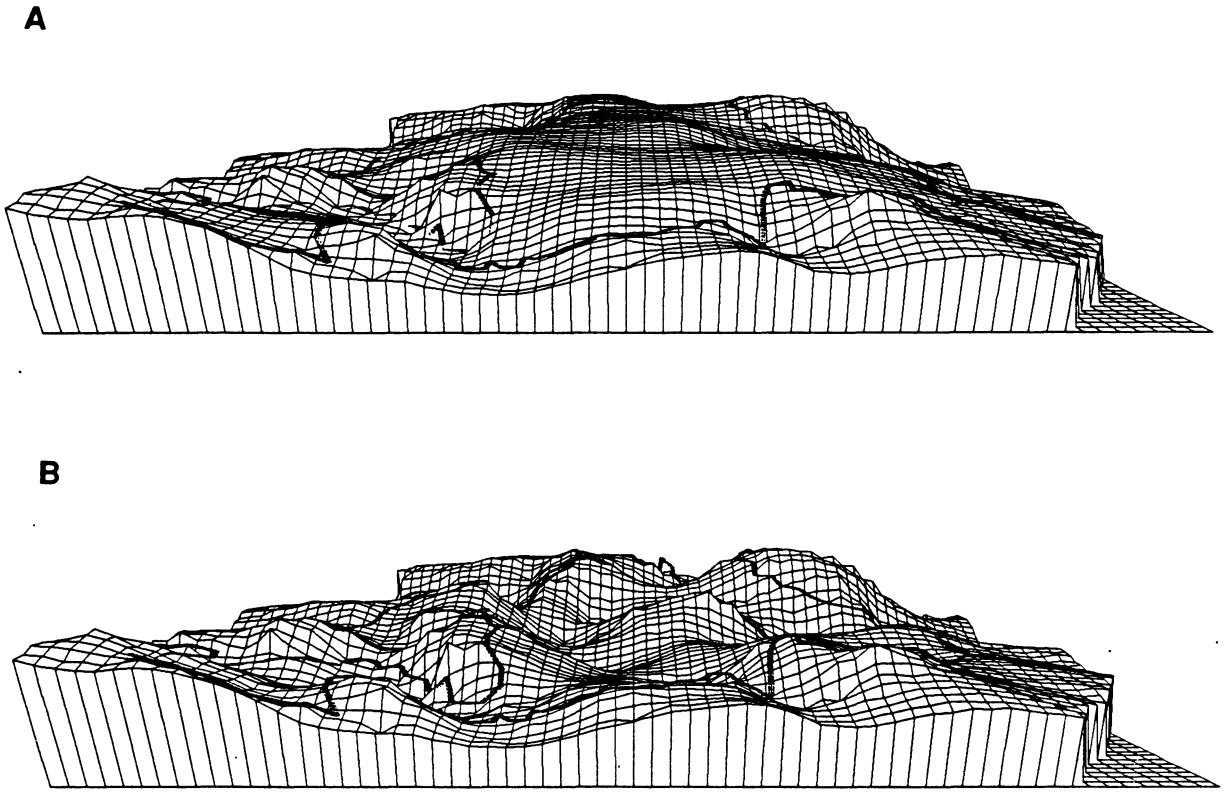

Fig. 5. Perspektivplott på Spørteggbreens A) breoverflate og B) bunn sett fra et punkt 10 km sør for midten av breen og på 6000 m høyde. Brekanten er tegnet på plottene. Basen på figurene er på 1200 m o.h. Se også fig. 2 og 4.

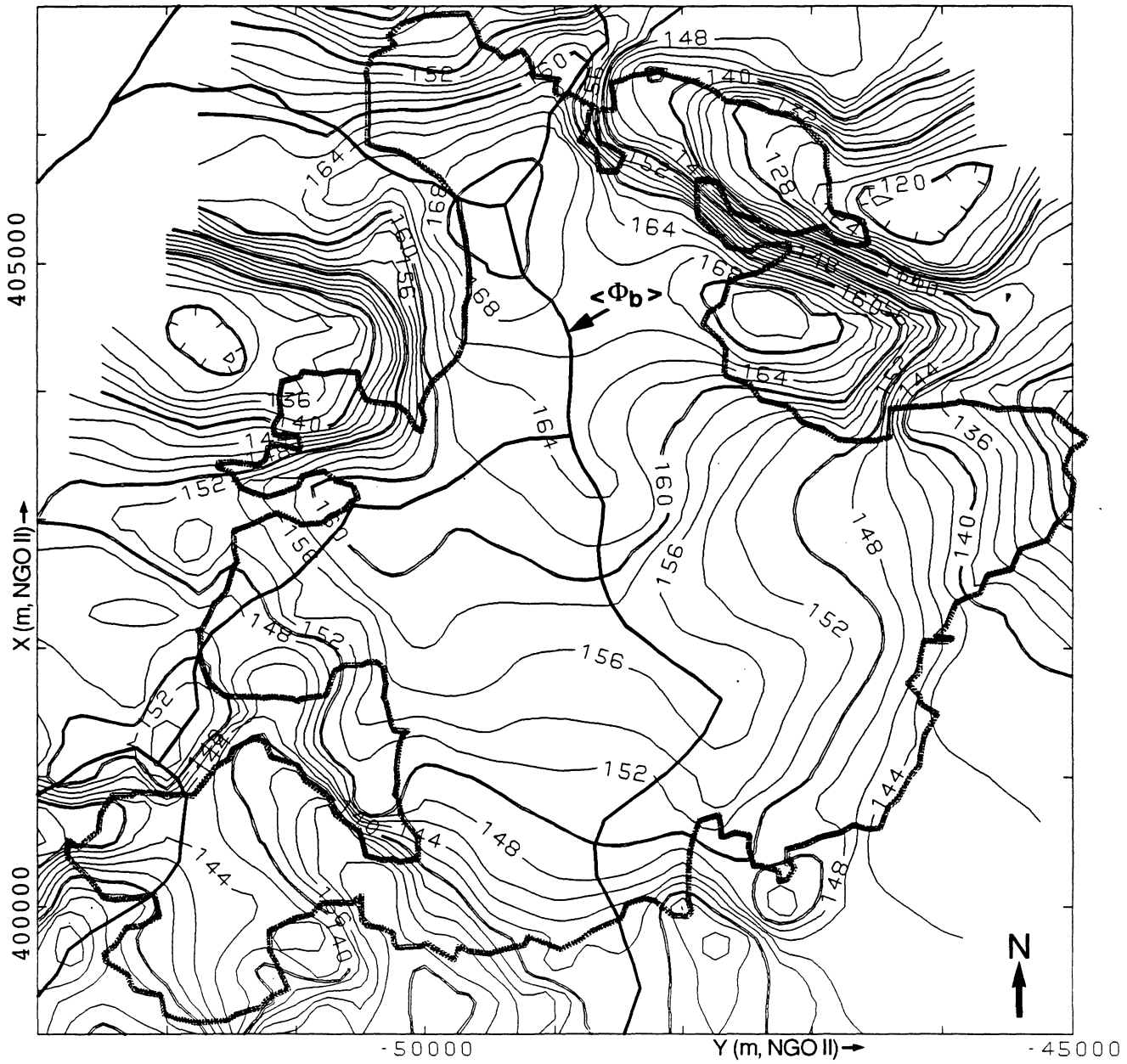

Fig. 6. Spørteggbreens bunnpotensial og bunnpotensialgrensene $\langle \Phi_b \rangle$.

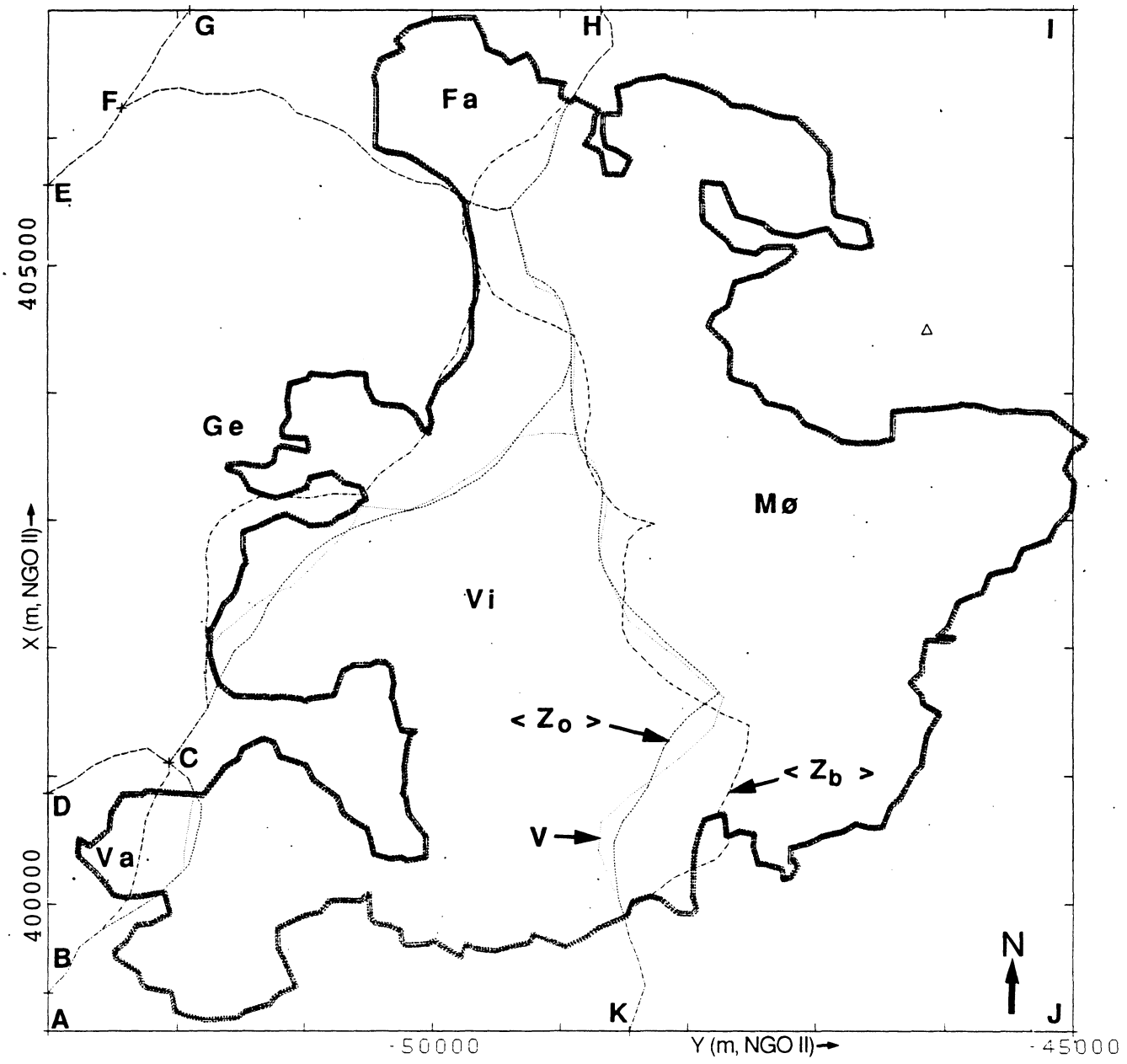

Fig. 7. Breoverflate-, bunntopografi- og dreneringsgrenser (henholdsvis $\langle Z_o \rangle$, $\langle Z_b \rangle$ og V). Arealer Mø (Mørkridsdalen), Vi (Vigdalen), Va (Vanndalen), Ge (Geisdalen) og Fa (Fagerdalen) er beregnet i tabell 1. Trekanten viser Grånosi NGO punkt.