

Rapport nr.: 2003.036		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Borehullbasert energilager ved Akershus Universitetssykehus - geologiske forundersøkelser 2002-03			
Forfatter: Kirsti Midttømme & Harald Elvebakk		Oppdragsgiver: SPA (Sykehus Prosjektene i Akershus)	
Fylke: Akershus		Kommune: Lørenskog	
Kartblad (M=1:250.000) Oslo		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1914 IV Oslo	
Forekomstens navn og koordinater: Ahus 611500; 6645400		Sidetall: 61 Kartbilag: 5	Pris: kr 350, -
Feltarbeid utført: november 02 / februar 03	Rapportdato: 02.04.03	Prosjektnr.: 296102	Ansvarlig:
<p>Sammendrag:</p> <p>NGU har på oppdrag for Sykehusprosjektene i Akershus vurdert muligheten for lokalisering av et større borehullbasert energilager ved det nye Ahus på Lørenskog.</p> <p>En N-S-orientert knusningssone fylt med leire går gjennom sykehusområdet. Da det er sannsynlig at sonen kan demme opp for grunnvannet, slik at grunnvannsnivået er høyere på vestsida enn på østsida, anbefales det ikke å bore i eller gjennom knusningssonen.</p> <p>Ved termisk responstest måles midlere effektuttak for to testboringer til $\lambda=3,1$ W/m·K og en borehullsmotstand $R_b=0,08$ K·m/W. Borehullslogging viser liten grunnvannsstrømning, og en middeltemperatur for et borehull på 200 m på 6,5°C. Løsmassetykkelsen i området varierer fra 0 m til mer enn 30 m .</p> <p>NGU anbefaler etablering av et borehullbasert energilager for det nye sykehuset på Lørenskog. Det er ut fra de geologiske forholdene mulig å etablere et større energilager med mer enn 350 boringer på den tilgjengelige tomten, men for å benytte enkelte områder anbefales nye testboringer blant annet for å kartlegge knusningssonen bedre.</p>			
Emneord: Grunnvarme	Energilagring	Grunnvannsstrømning	
Geofysikk	Borehullslogging	Optisk televiwer	
Temperaturmåling	Ledningsevne	Fagrapport	

INNHold

1. INNLEDNING	4
2. GEOLOGI	4
2.1 Berggrunnsgeologi	4
2.2 Løsmassegeologi	5
2.3 Knusningssoner	5
2.4 Boringer.....	7
3. GRUNNVANNSSTRØMNING	8
4. TEMPERATUR I GRUNNEN	9
5. TERMISK RESPONSTEST	10
6. LOKALISERING AV BOREHULLSLAGER	11
7. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	12
8. REFERANSER	13

TABELLER

Tabell 1: Borehullsinformasjon fra Bh 1, Bh 3 og Bh 4

Tabell 2: Målinger av grunnvannstand i testboringene

Tabell 3: Resultater fra termisk respons test i Bh 1 og Bh 4.

FIGURER

Figur 1 : Skisse av den kritiske knusningssonen.

Figur 2 : Skisse av den kritiske knusningssonen ved Bh 3.

DATABILAG

Databilag 1 : Logg av temperatur, elektrisk ledningsevne og gammastråling for Bh 1, Bh 3 og Bh 4.

Databilag 2 : Data fra TRT måling i Bh 1 og Bh 4.

TEKSTBILAG

Tekstbilag 1 : Loggerapport fra borehull Bh 3 og Bh 4, 21 sider

Tekstbilag 2 : Termisk Responstest –att ta reda på energibrunnens effektivitet, notat av S. Gehlin og G. Hellstrøm, 4 sider

Tekstbilag 3: Hydrauliske egenskaper i berggrunnen i Norge, modifisert versjon av NGU Rapport 2003.016 kap.3, 13 sider

KARTBILAG

Kartbilag 1 : Kart over testboringer og seismikkprofil.

Kartbilag 2 : Kart over fjelltopografien.

Kartbilag 3 : Kart over løsmassetykkelse.

Kartbilag 4 : Kart over grunnvannsnivå inntegnet på fjellkotekartet.

Kartbilag 5 : Skisse over egnede områder for et borehullbasert energilager.

1. INNLEDNING

NGU har på oppdrag for Sykehusprosjektene i Akershus utført geologiske undersøkelser ved det planlagte sykehus i Lørenskog for å vurdere muligheten for et større borehullbasert energilag. Tidligere undersøkelser er utført og rapportert. (Midttømme m.fl. 2000a, 2000b). Refraksjonsseismikk ble utført av GeoMap as (Geomap 2002a, 2002b). Kartskisse med oversikt over testboringer og seismikkprofil er vist i kartbilag 1. I tillegg er grunnundersøkelser utført av Noteby (Noteby 2001 og 2002)

Området består av grunnfjellsbergarten dioritt overdekket med finkornede sedimenter. Tykkelse på løsmassene varierer fra 0- 30 m. Det er synlige fjellblotninger flere steder på tomte.

Følgende fra NGU har bidratt i prosjektet

John Dehls	kartgrunnlag
Harald Elvebakk	borehullslogging, testpumping
Louise Hansen	løsmasse-/fjellkotecart
Janusz Koziel	termisk respons test, måling
Kirsti Midttømme	prosjektleder
Øystein Nordgulen	berggrunnskartlegging/tolking
Randi Kalskin Ramstad	termisk respons testing, testpumping
Helge Skarphagen	feltarbeid, grunnvarmeekspert
Gaute Storrø	grunnvannsstrømning

2. GEOLOGI

Berggrunnen er kartlagt ved feltbefaring og logging med optisk televiwer i testboringene. I kartlegging av fjelltopografien og knusningssoner er refraksjonsseismikk og Notebys sonderboringer benyttet.

2.1. Berggrunnsgeologi

Berggrunnen består av grunnfjellsbergarten dioritt. Bergarten har en godt utviklet planstruktur (foliasjon) noe som gir bergarten en lagdelt struktur. Foldestrukturen i bergarten gjør at foliasjonen har variabel orientering. Det finnes en del lyse pegmatittganger i dioritten, vanligvis som ganger med tykkelse 2-15 cm. Det er også observert ganger som er opp til 60 cm tykke og soner på flere meters tykkelse med et nettverk av pegmatittganger. Flere mørke ganger med tykkelse opp til 3,8 m finnes også i området. Noen av disse mørke gangene og grensesonene til disse er sterkere oppsprukket enn den omgivende dioritten. Mer spesifikk informasjon om berggrunnen basert på optisk televiwer er gitt i tabell 1 og i egen rapport om borehullslogging, tekstbilag 1.

Fjellkotekartet, kartbilag 2, viser at det nye sykehuset bygges på en høyde med høyeste punkt på 180m mellom sengefløy S1 og S2 (figur 1). Høyden er en del av et øst-vest gående høydedrag som i øst skråner raskt ned i bekkedalen øst for psykiatriske bygg, mens det vestover fortsetter på høyder over 160 m. Nord og sør vest for høydedraget faller fjelltopografien raskt ned til 150 m. En kritisk knusningssone er vist som et søkk i fjelltopografien i området sør for det psykiatriske bygget. Flere gamle sonderboringer som er gjort i nordøst under bygning ved inngang psykiatri viser at det er store lokale variasjoner i fjelltopografien i det området. Det antas at den kritiske knusningssonen går gjennom dette området, og at den er årsak til de store variasjonene i fjelltopografien.

2.2. Løsmassegeologi

Generelt består løsmassene i undersøkelsesområdet av finkornede sedimenter. Tykkelsen på løsmassene varierer fra 0 m til ca 30 m. I den leirfylte knusningssonen er det vanskelig å sette noe skille mellom hvor løsmasseoverdekningen slutter og fjellet starter. På grunnlag av sonderboringer fra Noteby og de seks refraksjonseismikkprofilene er det utarbeidet et kart over løsmassemektigheten (kartbilag 3). Løsmassetykkelsen er bestemt av fjelltopografien, med et tynt løsmassedekke på den øst-vest gående høydedraget sentralt på området. Lokalt i området rundt knusningssonen samt på parkeringsplassen nord for sykehuset er løsmassene over 20 m tykke.

NGU har ikke gjort undersøkelser for å kartlegge type og kvaliteten til løsmassene. I følge Noteby AS består området av et øvre fast lag (tørrskorpe) på 3-4 m over middels fast siltig leire, med mye rene siltsjikt av varierende tykkelse. Ned mot fjellet er det delvis et lag med fastere masser med tykkelse 0-5 m over fjell. Løsmassene er telefarlige (Noteby 2001,2002).

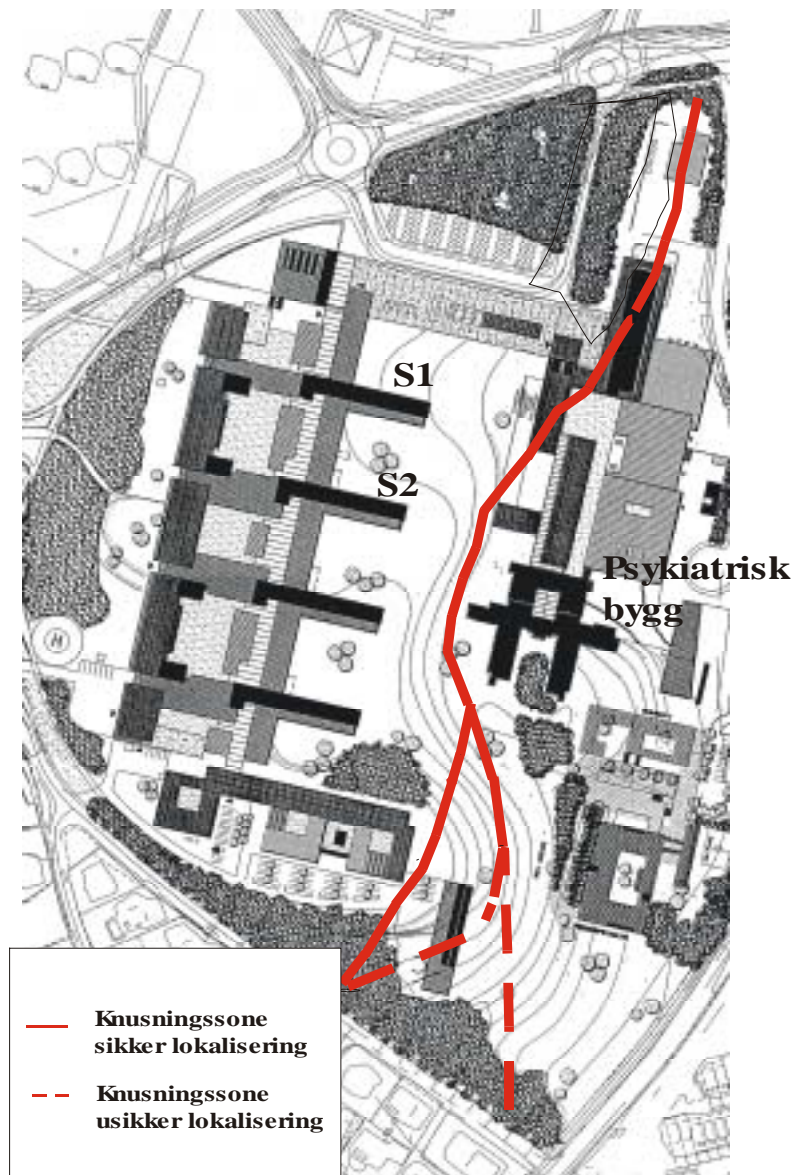
2.3. Knusningssoner

Refraksjonsseismikken (Geomap 2002) påviste flere soner med lav seismisk hastighet i området. Svært lave hastigheter (2000-2900 m/s) ble målt i de 3 profilene sørvest for eksisterende psykiatrisk avdeling. Lavhastighetsområdene tolkes som gjennomgående knusningssoner, med høy oppknusningsgrad, og sannsynligvis fylt med leire. Ut fra seismikken har de kritiske sonene en bredde på ca 10 m. Den seismiske hastigheten i berggrunnen forøvrig i dette området er høy (5800-6000 m/s), noe som viser stabilt godt fjell.

For seismikkprofil 4 ved veien sør for de profil 1-3 er det en lavhastighetssone (3000 m/s) på 20 m som antas å være fortsettelsen av sonen som er påvist i krysningspunktet mellom P2 og P3 ca 80 m lengre nord. Geomap as antyder også at det kan være en lavhastighetssone i området øst for startpunktet for profil 4.

Det er registrert soner med lave hastigheter for seismikkprofil P5 og P6. Hastigheten for disse sonene er høyere (3200-4000) enn de som er påvist for profil P1-P4, og det antas at disse sonene ikke er kritiske med hensyn på boring. Det anbefales å utføre testboring gjennom disse lavhastighetssonene før den endelige lokaliseringen av brønnparken blir bestemt.

De kritiske knusningssonene er vist i kartskisse i figur 1. Lokalisering av sonene bygger på refraksjonsseismiske data, blotninger av berggrunn og Notebys sonderboringer. Det er en hovedsone som deler seg i området sør for psykiatriske bygget. Slike forgreninger er vanlig (pers. kom. A. Braathen, NGU).



Figur 1. Skisse av den kritiske knusningssonen.

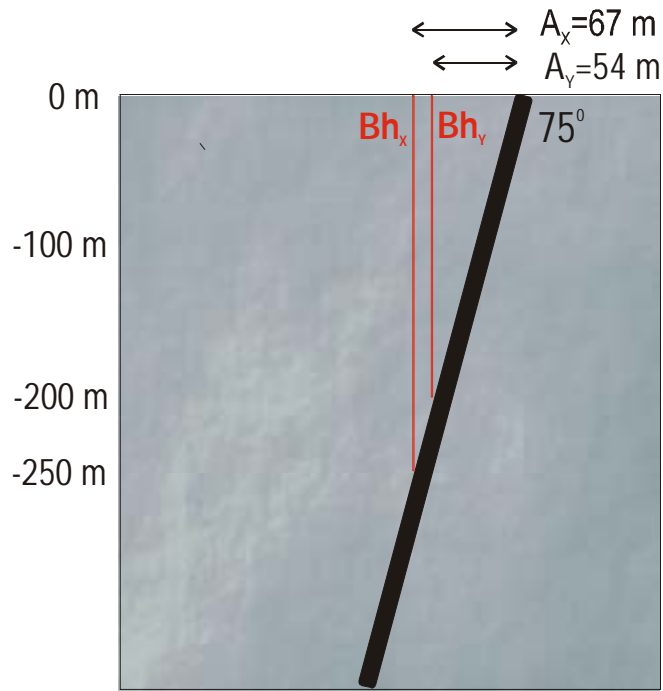
2.4. Boringer

Borehull 1 ble boret i 2000 og er tidligere rapportert (Elvebakk 2001). Alle de tre nye testboringene ble lokalisert i området rundt de kritiske knusningssonene. De ble boret med helning mot sonene. Begge boringene vest for knusningssonene ble mislykket. Den første boring (Bh 2) ble avbrutt ved 20 m og den neste (Bh 3) ble avbrutt ved 62 m. Begge boringene ble avsluttet fordi det ble boret inn i bløt leire, noe som gjorde videre boring umulig. Den siste boringa (Bh 4) øst for de kritiske sonene ble boret som planlagt ned til 200 m uten store tekniske problem. Bildene (tekstbilag 1) fra borehullet viser at boringen ikke har vært i berøring av noen knusningssone. Fjellet i Bh 4 er stedvis sterkt oppsprukket, men ikke mer enn i det gamle borehullet, Bh 1. Ut fra boringene antas sonen ved Bh 3 å falle ca 75 ° mot vest. Skisse av sonen er vist i Figur 2. Avstand A_x og A_y viser avstanden mellom sonen og et vertikalt borehull på 250 m (Bh_x) og 200 m (Bh_y) hvis man skal unngå å bore i sonen.

Tabell 1. Informasjon om testboring Bh 1, Bh 3 og Bh 4. (for detaljer se tekstbilag 1).

Borehull	Bh 1	Bh 3	Bh 4
Koordinater UTM sone 32 N ØV	611364	611508	611572
NS	6645459	6645430	6645392
Høyde over havet (m)	175,24 m	176,17 m	173,55 m
Boredyp: lengde (m)	245,0 m	62,5 m	196,4 m
Kote bunn av borehull	- 68,1 m	105,3 m	- 20,1 m
Planlagt fall på boring	0°, loddhull	15 ° fra lodd mot øst	15° fra lodd mot sørvest
Borehullsavvik (bunn) fra loddlinje	28,6m N (N353)	14,0 m Ø (N93)	32,0 m V (N278)
Borehullsavvik fra planlagt boring	28,6m N (N353) fra plan	2,2 m V (N273) fra plan	40,6 m NNØ (N006) fra plan
Hovedsprekkeretning	N019 17 svakt fall ØNØ	N260 20 svakt fall NNV	N052 06 svakt fall SØ
Sprekkefrekvens middel	2,2 pr m	1,3 pr m	2,1 pr m
Soner med høy sprekkefrekvens	104-120m maks 8 pr m 143-145m maks 8 pr m	10-15m 51-53m –åpne sprekker	122-134m 5,8 pr m 156-165m 157,8m åpent hull 173-182m
Grunnvannskapasitet	1100 l/time	ikke testet	1900 l/time
Grunnvannstand Dyp	4,49	8,75	11,75
Grunnvannsnivå	170,76	167,42	161,80
Soner med grunnvannsinnslag	80-81 m 107-118 m 127-128 m	ikke testet	81m 10 % 109m 37 % 153m 53 %
Mørke ganger, andel av borehullet	5,4%	6,9 %	3,8%
Temperatur middel °C	6,93	6,0	6,52
TRT λ -verdi	3,0	ikke testet	3,2
TRT R_b	0,09	ikke testet	0,07

Borehullsavviket for Bh 1 var 28,6 m med retning nordover. De andre boringene ble boret med 15° helning øst eller sør-vest, men Bh 4 avviker i tillegg nordover. Selv om foliasjonsretningen (lagretning) varierer, ser det ut som boringene avviker mot nord.



Figur 2. Skisse av den kritiske knusningssonen ved Bh 3.

3. GRUNNVANNSSTRØMNING

Grunnvannstand ble målt i borehullene ved flere anledninger (se tabell 2). I tillegg har Noteby utført 9 poretrykksmålinger i området. Notebys målinger Pz 1-3 sammenfaller også bra i tid med første måling av grunnvannstand i Bh 1. Den gode korrelasjonen i grunnvannsnivå mellom NGU sin måling og Notebys poretrykksmålinger viser at det er små trykkforskjeller i grunnen. Ut fra de tilgjengelige målinger er det utarbeidet koter for grunnvannsnivå. Grunnvannskotene er tegnet inn på fjellkotecartet (kartbilag 4).

Grunnvannstanden ble målt til 11,8 m under bakkenivå i Bh 4, som er det eneste borehullet på østsida av den kritiske knusningssonen. Hvis det er en markert trinnvis endring (og ikke en kontinuerlig endring som skyldes topografien,) i grunnvannsnivå på øst- og vestsiden av knusningssonen, kan det være kritisk å bore gjennom sonen, da man kan risikere å drenere ut vannet fra vestsiden og dermed senke grunnvannstanden under flere av bygningene. Målingene viser en endring i grunnvannsnivå på 5,6 m over en avstand på 74 m. Grunnvannsnivået i Bh3 og Bh4 samsvarer også dårlig med terrenget. Vi antar den store variasjonen i grunnvannsnivået skyldes at knusningssonen fungerer som en demning, og demmer opp for grunnvannet.

Bortsett fra området rundt den sentrale høyden i området rundt sengebygningene S1 og S2, og fjellknausen som stikker opp sørøst for psykiatrisk bygg, vil grunnvannstanden stå over fjellet og oppe i de overliggende løsmasseavsetningene.

Grunnvannsstrømningen i området antas å være liten. Grunnvannkapasiteten i Bh 1 ble antatt til 1100 l/time. Strømningsmålinger ble utført i Bh 4. Den totale pumperaten i borehullet var 1900 l/time. Det ble målt vanninnslag fra 3 dybder i borehullet, 53 % av vannet kom fra innstrømning fra 153 m dyp, 37 % kom fra innstrømning på 109 m dyp og 10 % fra 81 m dyp.

Tabell 2 Målinger av grunnvannsnivå i testboringene.

Borehull	Koord. målt GPS UTM ØV	Koord. målt GPS UTM NS	Høyde topp rør [m.o.h.]	Gr.vannst. u. topp rør	Dato
1	611364	6645459	175,243	4,1 m	15.08.00
				4,4 m	feb 03
				4,49 m	26.02.03 9.03.03
2	611486	6645305	ikke nivellert	8,00 m	okt 02
	611489	6645309		8,71 m	14.11.02 feb 03
3	611505	6645434	176,165	8,54	13.11.02
				8,65 m	14.03.03
	611511	6645426		8,75 m	feb 03 9.03.03
4	611575	6645395	173,548	11,2 m	13.11.02
				11,76 m	feb 03
	611568	6645388		11,75 m	26.02.03 9.03.03

4. TEMPERATUR I GRUNNEN

Logg av temperatur, elektrisk ledningsevne og gamma (TCN-logg) for Bh 1, Bh 3 og Bh 4 er vedlagt i databilag 1.

I Bh 4 øker temperaturen jevnt med dypet i hele borehullet med en gradient på 0,91°C/100m. Middeltemperaturen i borehullet er 6,52°C. I Bh 3 er temperaturen tilnærmet konstant lik 6,0°C i hele borehullet.

Temperaturloggen for Bh 1 er tidligere beskrevet og rapportert (Midttømme m.fl. 2000b). Loggen viser at temperaturen synker til 6,2°C på 71 m dyp før den stiger til 8,1°C. Middeltemperaturen i borehullet er 6,93°C. Temperaturmålingen i Bh 1 ble kritisert av professor Bo Nordell (Nordell 2002). Han mente at temperaturforløpet som ble målt ikke var troverdig. På grunn av at kollektorslange var montert i borehullet har vi ikke fått gjort ny logging. At klimaet påvirker temperaturforløpet i grunnen og at minimumstemperaturen måles på mer enn 10 m dyp er dokumentert i flere artikler (eks. Kukkonen et al. 1998; Beltrami 2001). Det finnes også en egen hjemmeside med data over klimarekonstruksjon ut fra borehullstemperaturer (<http://www.geo.lsa.umich.edu/~climate/index.html>). Flere av temperaturloggene som er utført ved NGU de siste årene har tilsvarende trend med minimumstemperaturen på 40-80 m dyp, noe vi mener skyldes en økning i midlere lufttemperatur gjennom de siste 100 årene. NGU mener at det ikke er grunn til å betvile riktigheten av temperaturmålingene.

Siden det er store forskjeller på temperaturforløpet i de tre borehullene endrer vi på konklusjonen fra NGUrapport 2000.091 og hevder nå at det er menneskelig aktivitet som er årsak til variasjonen i temperaturforløpet som observeres i de øverste 100 m av grunnen. I

over 40 år har det stått et sykehus på tomten, og spesielt i byggeperioden rundt 1960 ble terrenget endret ved at masser ble fjernet eller lagt i fyllinger, i tillegg ble skog-/jordbruksareal gruslagt eller asfaltert slik at solinnstrålingen til grunnen økte.

Siden middeltemperaturen korrigert for boredyp samsvarer bra for de to dype boringen, vil variasjonen i temperaturforløp ha liten betydning i utredningen av et borehullslager. Men variasjonene kan tolkes som en indikasjon på liten grunnvannstrømning. Hvis det hadde vært en betydelig grunnvannsstrømning antas temperaturvariasjonene å ha blitt utvisket over tid.

En temperaturgradient på under 1,3 °C/100m er lavt også for norske forhold. Den lave gradienten kan forklares med et lavt innhold med radioaktive elementer (uran, thorium og kalium) i berggrunnen.

5. TERMISK RESPONSTEST

Ved en termisk responstest (TRT) måles borehullets effekuttak og borehullsmotstanden. Mer informasjon om termisk respons- testing er vedlagt som tekstbilag 2. Termisk respons test ble utført i borehull Bh 1 og Bh 4 (også kalt Bh250 og Bh200). Målingene ble utført i en 40 mm tykk enkel U-rør kollektorslange fylt med vann. Tilsvarende test ble utført i Bh 1 av Geoenergi as i 2000. Målingene er kontrollberegnet av Signhild Gelhlin (svenske VVS tekniska forening). Resultatet er vist i tabell 3 og plott av TRT data finnes i databilag 2.

Tabell 3. Resultater fra termisk respons test i Bh 1 og Bh 4.

Borehull	Dato	Borehullets varmetilskudd λ (W/m·K)	Borehullsmotstand R_b (K·m /W)	Borehullets middeltemperatur °C
Bh 1 (Bh 250)	20-23.aug 00 Geoenergi as	3,1	0,06	7,9
Bh 1 (Bh 250)	20-25.feb.03 NGU	3,0	0,09	6,93
Bh 4 (Bh 200)	14-18.feb.03 NGU	3,2	0,07	6,53

Variasjoner i λ mellom de 2 borehullene kan skyldes lokale variasjoner i berggrunnen, tekstur og mineralogi. Sannsynligvis vil pegmatittgangene øke λ - verdi. Grunnvannskapasiteten i Bh 4 var noe høyere enn i Bh 1 og dette kan også gi noe høyere λ - verdi i Bh 4.

Vanlig borehullsmotstand for enkle U-rør kollektorer er 0,05-0,06 K·m/W (Gehlin 2002). For begge borehullene måles høyere borehullsmotstand. For Bh 1 er borehullsmotstand beregnet 50% høyere enn den som Geoenergi as beregnet i 2000. Forklaringen på det avviket er at middeltemperaturen i borehullet har stor betydning for borehullsmotstanden. NGU har bestemt midlere borehullstemperatur ut fra borehullslogging, mens temperaturen vanligvis bestemmes med TRT-riggen ved å sirkulere væske i borehullet før man tilfører ekstra varme i borehullet. Vår erfaring er at middeltemperatur bestemt med TRT-riggen er noe høyere enn den bestemt ved borehullslogging. Borehullsmotstanden beregnet med data fra TRT-riggen vil da bli lavere enn den beregnet med data fra temperaturlogging. Dype brønner vil også gi

større borehullsmotstand og det er sannsynligvis forklaringen på at borehullsmotstanden i Bh 1 er høyest. Begge borehullene er boret på skrå, med henholdsvis 83,3 ° og 80,6 ° fall. Sannsynligheten for at kollektorslangene vil ligge tettere sammen er større i skråbrønner, noe som vil medføre større borehullsmotstand.

6. LOKALISERING AV BOREHULLSLAGER

Skisse av aktuelle områder for borehullslageret er vist i kartvedlegg 5. Området er inndelt i 9 areal merket A1 til A9. Hvordan arealet er egnet til borehullslager er vist med farger der grønt er godt egnet, gult er usikkert og rødt er ikke egnet. Den kritiske knusningssonen er årsaken til at områdene A2, A5, A7, A8 er klassifisert som ikke egnet. Da sonen faller mot vest er det fare for å bore inn i sonen hvis man lokaliserer boringene i området vest for sonen. Størrelsen på sikkerhetssonen avhenger av boredypet. Her er det antatt en bredde på 90 m fra knusningssone. Det er basert på at knusningssonen faller med 75° og et boredyp på 200m. Sikkerhetssonen kan reduseres hvis man velger å bore grunnere brønner. Det er usikkerheter med hensyn på fallet til sonen. Det anbefales derfor å bore en testboring i området A2 for å kartlegge helning på sonen hvis deler av dette arealet ønskes benyttet, før endelig lokalisering blir bestemt.

Områdene A3 og A4 er gode lokaliteter for borehullslager, med liten løsmassetykkelse. For begge disse områdene vil grunnvannstanden være høyere enn fjelltopografien, dvs at grunnvannet står oppe i løsmassene. Det anbefales en minimumsverdi på 15 m til bygninger pga mulig setninger.

Område A1 er usikkert. Det er påvist svakhetssoner i det området, men hastigheten er høyere enn for den kritiske knusningssonen. Det er mektigere løsmasser i dette området også, og er av den grunn ikke helt optimalt for lokalisering av et borehullslager.

Område A9 er også merket som usikkert. Det er ikke klarlagt hvor den østligste knusningssone fortsetter, og ifølge Geomap kan det være muligheter for at den fortsetter rett sørover. Hvis det er tilfellet er A9 lite egnet som energilager.

Område A6 er det gunstigste området for lokalisering. Rundt sørenden av psykiatrisk bygning er det liten løsmassetykkelse. Her er fjellet høyere enn grunnvannstanden, dvs at man kan legge boringene nærmere byggingene da det ikke er fare for setninger. Da knusningssonen faller mot vest kan man legge boringene helt inn til sonen på østsida, hvertfall i det området der man har god oversikt hvor sonen er. Det antas en løsmassemekktighet ned mot 15 m helt sør i område A6 noe som vil fordyre boringer betydelig.

Det er sjelden at borehull i et energilager bores inn i hverandre (jfr brev fra Bo Nordell av 22 aug 2002). Som en kompensasjon for mindre areal tilgjengelig kan en reduksjon i borehullsavstanden være et alternativ.

7. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

NGU anbefaler å gå videre med planlegging og etablering av et borehullbasert energilager for den nye sykehuset på Lørenskog. En knusningssone som går gjennom området fra nord til sør vil redusere det tilgjengelige arealet, men det er fortsatt store arealer, og ikke minst store bergvolum tilgjengelig i nærområdet.

På grunnlag av geologiske og geofysiske undersøkelser er det utarbeidet en oversikt over de areal som er egnet til et borehullslager. Det anbefales nye testboringer/geologiske undersøkelser hvis området A1/A2 og A9 skal benyttes. Deler av område A5 kan også benyttes, men dette vil kreve geologisk oppfølging og at det tas hensyn til spesielle vilkår for plassering av borehull.

Det er erfaringsmessig sjelden at borehull bores i hverandre. Borehullsavstanden kan derfor reduseres fra 7 m som tidligere anbefalt, til det som vil være optimal avstand basert på energiforbruk og grunnforholdene. Selv om dette kan medføre at antall boringer som går i hverandre øker, vil gevinsten bli større enn det de tapte boremetrene utgjør. I de områdene der grunnvannstanden er lavere i berggrunnen enn i løsmassene er det viktig at foringsrøret bores lengre ned i berggrunnen og tettingen mellom berget og røret utføres med ekstra grundighet.

NGU har ikke utført dimensjonering av et energilager med hensyn på boremeter, anbefalt borehull, boreavstand og boredyp. NGU anbefaler at dimensjonering av lageret blir utført av konsulenter med mer erfaring enn oss, og gjerne med mer avansert programvare.

8. REFERANSER

Beltrami, H. 2001: Surface heat flux histories from inversion of geothermal data: Energy balance at the Earth's surface. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B10, 21979-21993.

Elvebakk, H. 2001: Borehullsinspeksjon med Optisk Televiewer SiA, Lørenskog, Akershus. *NGU Rapport 2001.021*, 49s

Gehlin, S. 2002: Thermal Respons Test. Methode Development and Evaluation. Doctoral Thesis Luleå University of Technology 2002:39

GeoMap AS 2002a : Nye SIA Plassering av energibrønner oppdragsnr. 221418 rapport nr 1, 10.oktober.2002

GeoMap AS 2002b : Nye SIA Plassering av energibrønner oppdragsnr. 221418 rapport nr 2, 18.desember.2002

Kukkonen, I.T; Gosnold, W.D. & Šafanda, J. 1998: Anomalously low heat flow density in eastern Karelia, Baltic Shield: a possible palaeoclimatic signature, *Tectonophysics* 291, 235-249.

Midttømme, K., Skarphagen, H. Nordgulen, Ø. & Longva O. 2000a: Utredning om grunnvarme til planlagte sykehus i Akershus. Feltundersøkelser. *NGU-Rapport 2000.073*, 31s.

Midttømme, K., Skarphagen, H. & Elvebakk, H. 2000b: Bruk av grunnvarme ved sentralsykehuset i Lørenskog - testboring, systemløsning og økonomiske beregninger. *NGU Rapport 2000.091*, 56s.

Nordell, B., 2002: Extern gjennomgang av anbud: Grunnundersøkelser vedrørende borehullslager Nya Ahus. Brev til Prosjekteringsgruppen Nya SiA ANS datert 22.08.02.

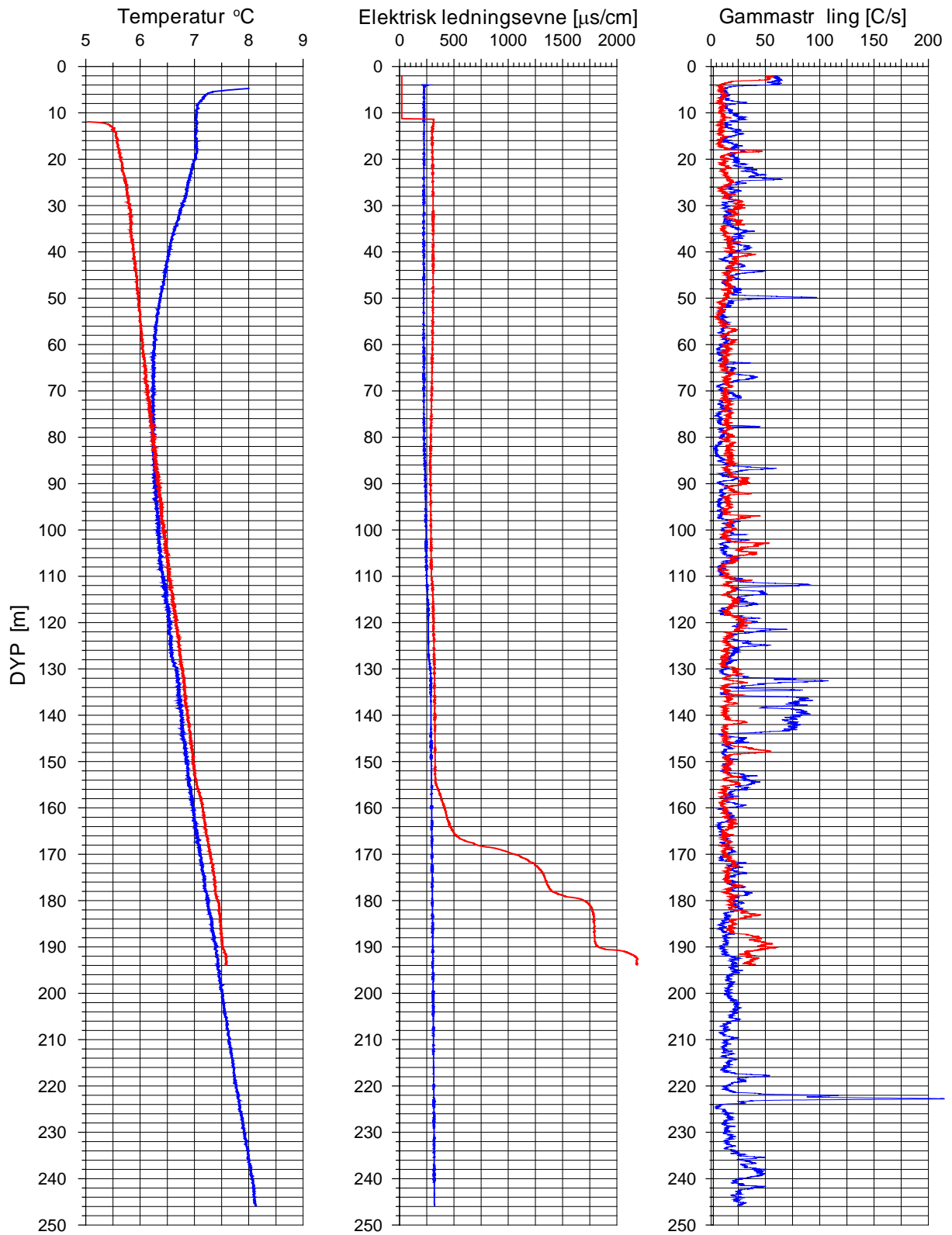
Noteby AS 2001: Sykehusprosjektene i Akershus, SPA Grunnundersøkelser. *Datarapport 101434-3*, 4.april 2001.

Noteby AS 2002: Sykehusprosjektene i Akershus, SPA Grunnundersøkelser. *Datarapport 101434-5*, 18.juni 2002.

Lorenskog - SiA

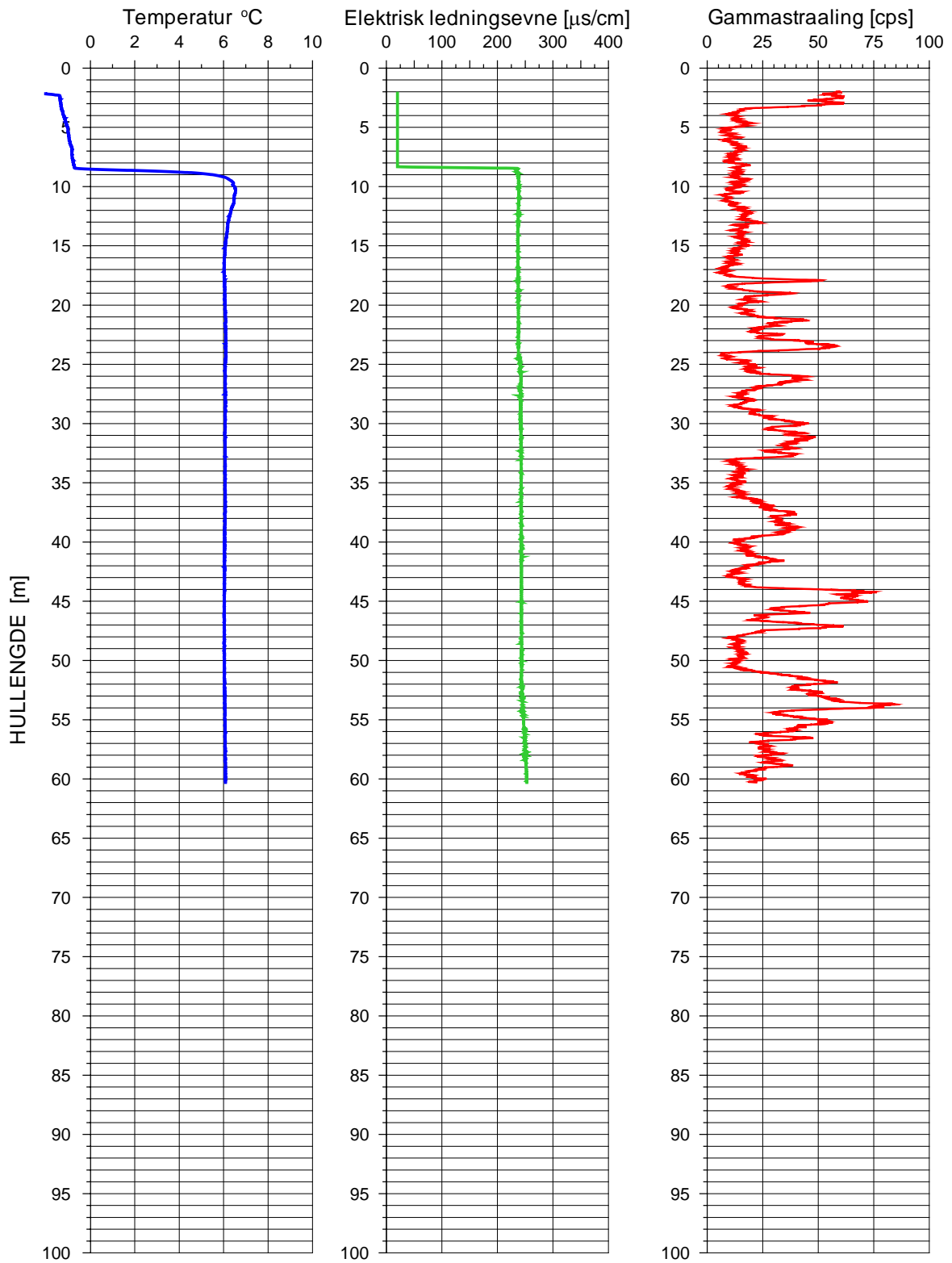
Bh 4 - 2002

Bh 1 - 2000



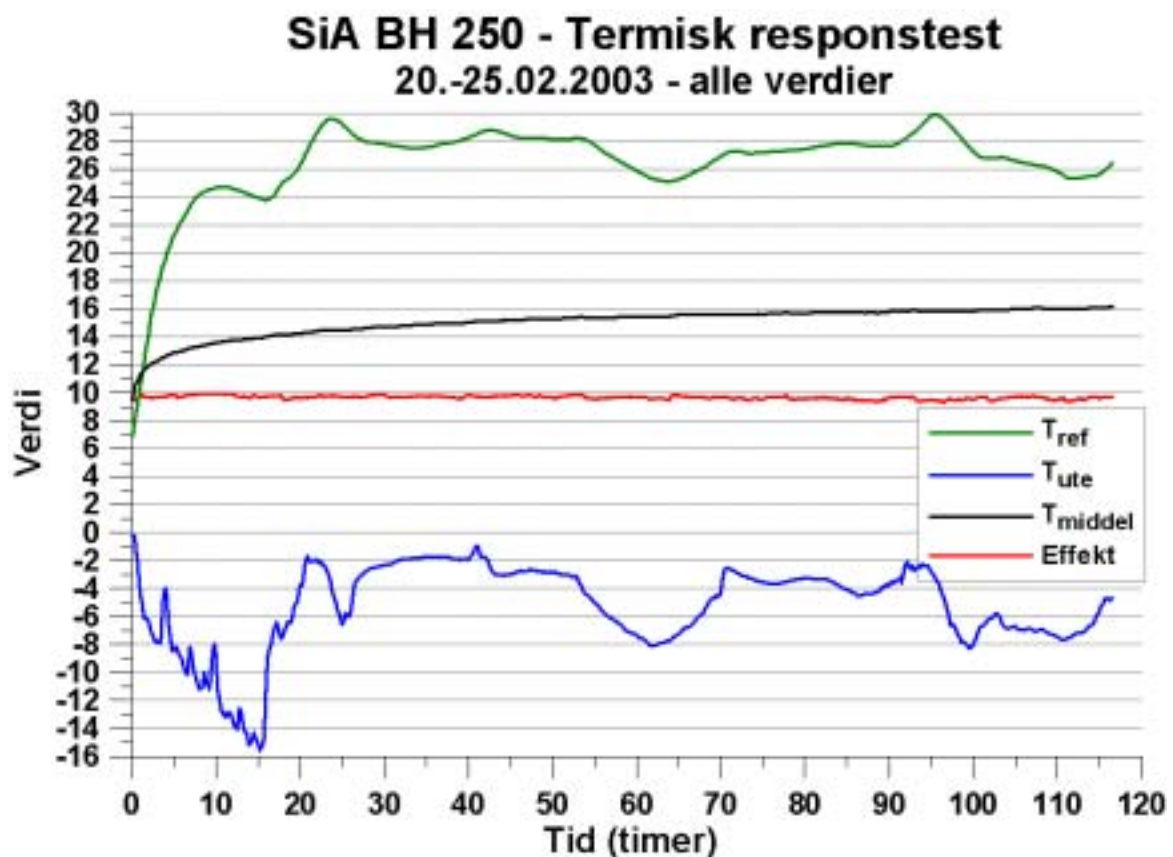
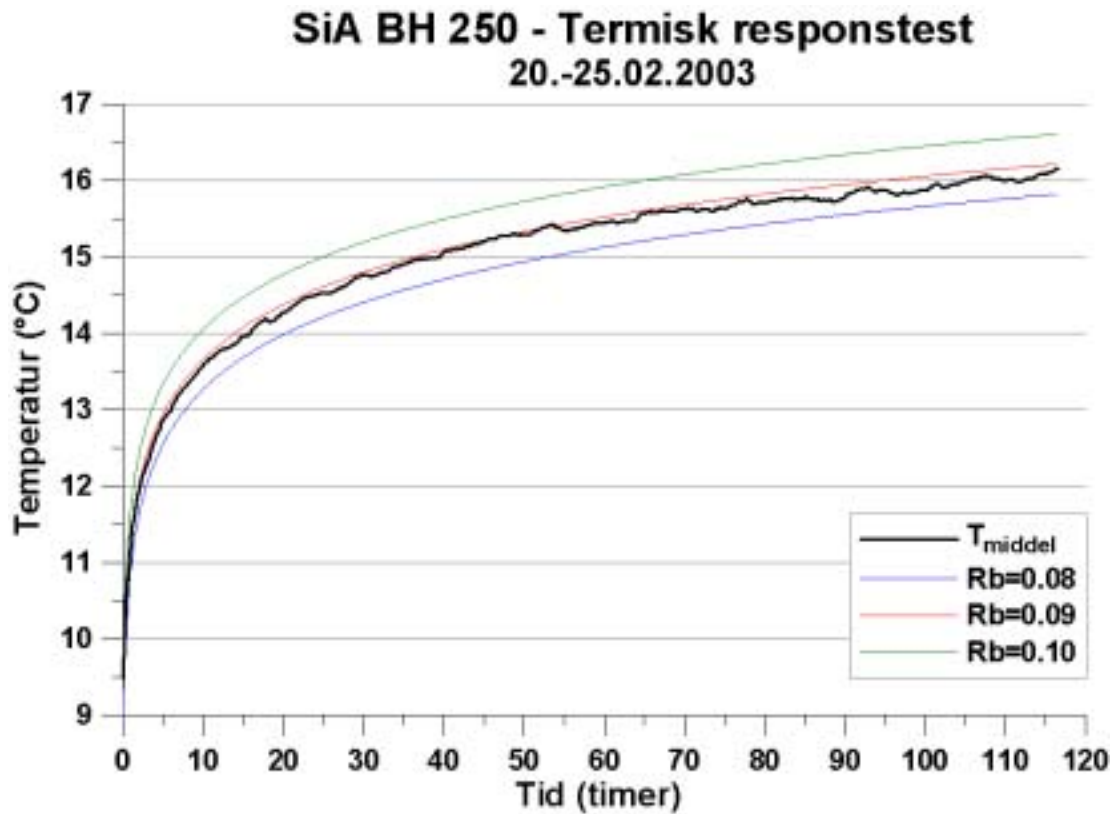


TEMP. COND. GAMMA LOG UTM 611505 - 6645434
SiA, Bh 3 - 2002



$\lambda (250) = 3,00 \text{ W/m,K}$
 $R_b (250) = 0,088 \text{ K,m/W}$

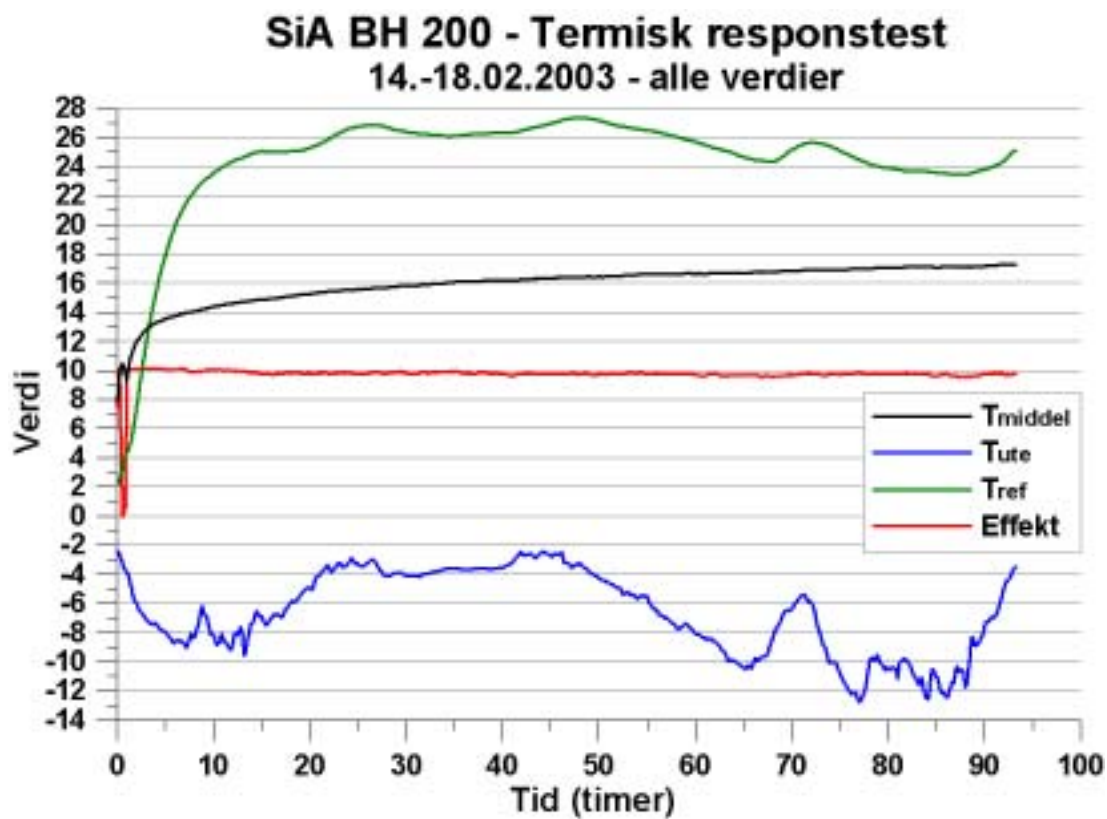
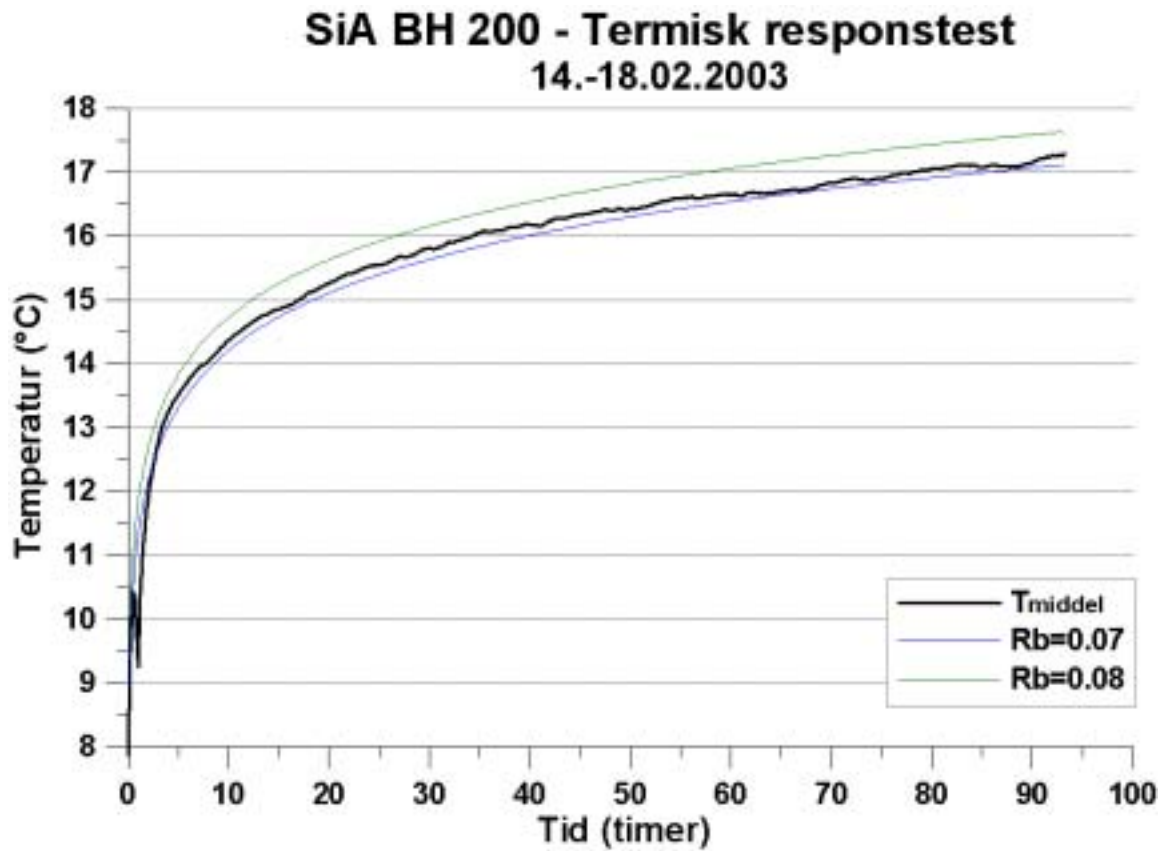
Bh 250 = Bh 1



Effekt er oppgitt i kW og temperatur i °C

$\lambda(200) = 3,16 \text{ W/m,K}$
 $R_b(200) = 0,073 \text{ K,m/W}$

Bh200 = Bh4



Effekt er oppgitt i kW og temperatur i °C

1. BOREHULLSLOGGING

For å kartlegge berggrunnen ble begge borehullene (Bh 3, 60 m og Bh 4, 200 m) logget med optisk televiewer. Det ble i tillegg logget vanntemperatur, vannets elektriske ledningsevne, total gammastråling, fjellresistivitet og vertikal vannstrømning. Strømningsmåling ble bare gjort i Bh 4.

Optisk televiewer er et videokamera som filmer borehullsveggen. Metodebeskrivelse er vist i tekstbilag 1.1 og 1.2. Bildene viser bergartstype, strukturer og oppsprekking. I tillegg måles borehullsavviket. Endringer i vannets temperatur og ledningsevne kan indikere vannførende sprekker, mens fjellresistivitet kan indikere oppsprekking og svakhetssoner. Strømningsmåling sammen med pumping indikerer vannførende sprekker (vanninnslag i borehullet).

1.2 Optisk televiewer

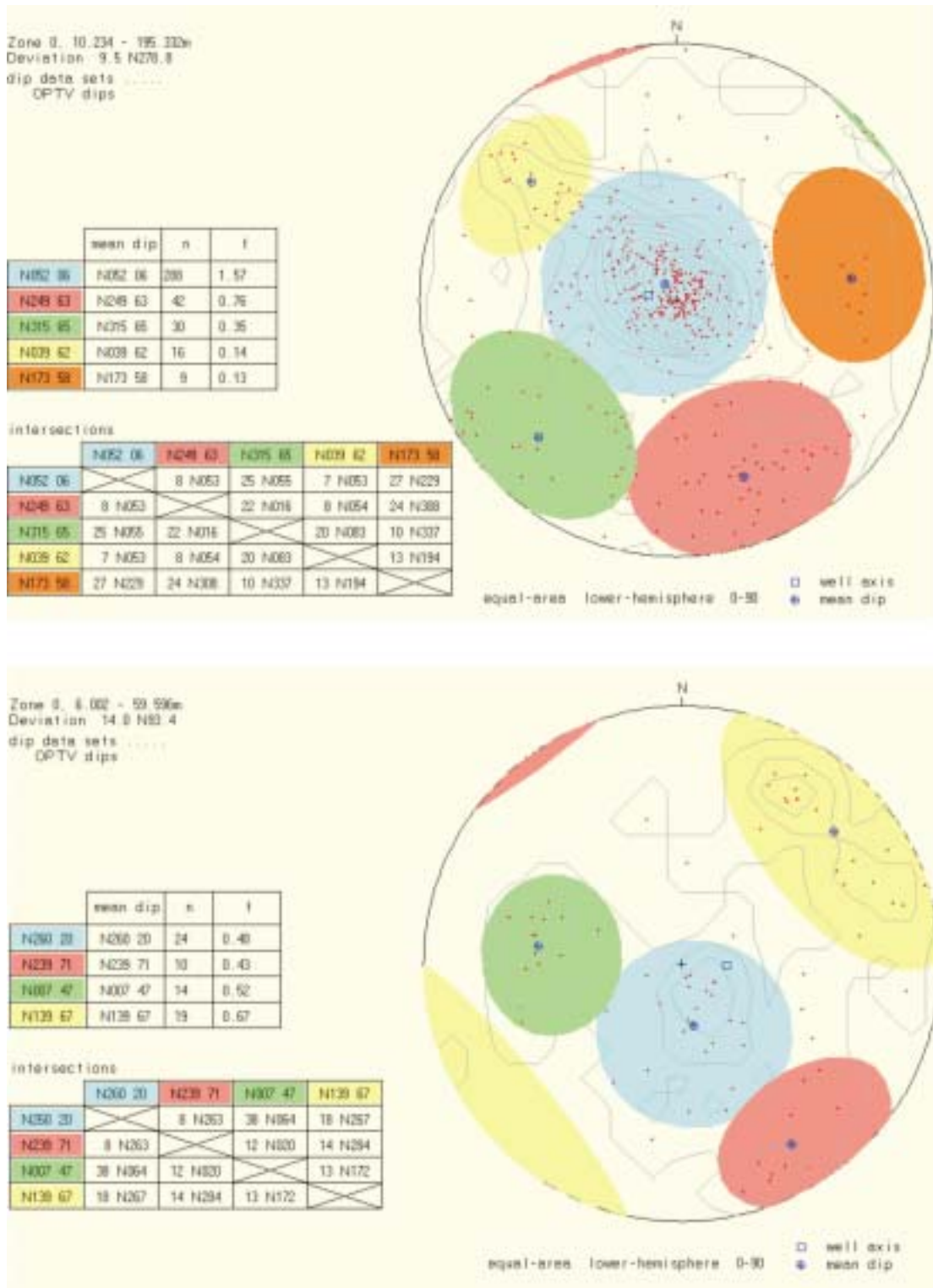
Data fra den optiske loggen er prosessert med programvare fra Robertson Geologging (Robertson Geologging 2000). Det er utarbeidet sprekkestatistikker for alle indikerte sprekker. I statistikken er både rene sprekker og mineraliserte sprekker tatt med. Bildelogg fra hele hullets lengde kan skaffes på CD fra NGU (CD 2003.036.01). Loggen kan kjøres på PC ved å starte programmet OPTV.exe som ligger på CD'en. Utførlig bruksanvisning er vist i tekstbilag 1.3.

Bh 4. Sprekkeanalyse. Stereografisk projeksjon med definerte grupper.

Figur 1.1 (øverst) viser stereogram hvor alle indikerte sprekker er plottet. En tydelig hovedsprekkeretning skiller seg klart ut, N052 06 med svakt fall mot SØ. Denne gruppen inneholder ca 75 % av alle indikerte sprekker. Ingen andre sprekkegrupper skiller seg klart ut, men i tabellen på figur 1.1 er det definert til sammen 5 sprekkegrupper. Disse sprekkeene har større fallvinkel, 58 – 65⁰ i gjennomsnitt, og utgjør til sammen ca 25 % av de indikerte sprekker.

Bh 3. Sprekkeanalyse. Stereografisk projeksjon med definerte grupper.

Figur 1.1 (nederst) viser stereogram for indikerte sprekker. Boring av hullet stoppet i en svakhetszone på ca 60 m dyp. Tabellen på figur 1.1 (nederst) viser definerte sprekkegrupper med gjennomsnittlig strøkretning og fallvinkel. Gruppen med strøkretning N260 20 har flest sprekker og har noenlunde samme strøkretning som hovedretningen i Bh 4, men fallretningen er NNV (motsatt Bh 4).



Figur 1.1. Sia, Lørenskog. Stereografisk projeksjon av indikerte sprekker Bh 4 (øverst) og Bh 3 (nederst).

Bh 4. Sprekkeanalyse. Frekvenshistogrammer for definerte soner.

Figur 1.2a og 1.2b viser frekvenshistogrammer for sprekker langs hele Bh 4. Det er beregnet en gjennomsnittsfrekvens for hele hullet (antall sprekker pr. meter) og en gjennomsnittsfrekvens for definerte soner. Sonene defineres der en vanligvis har en viss ansamling av sprekker. Databilag 1.1 viser sprekkeedata for hver av de definerte sonene. Forklaring på tabellen er vist i tekstbilag 1.1 (metodebeskrivelse).

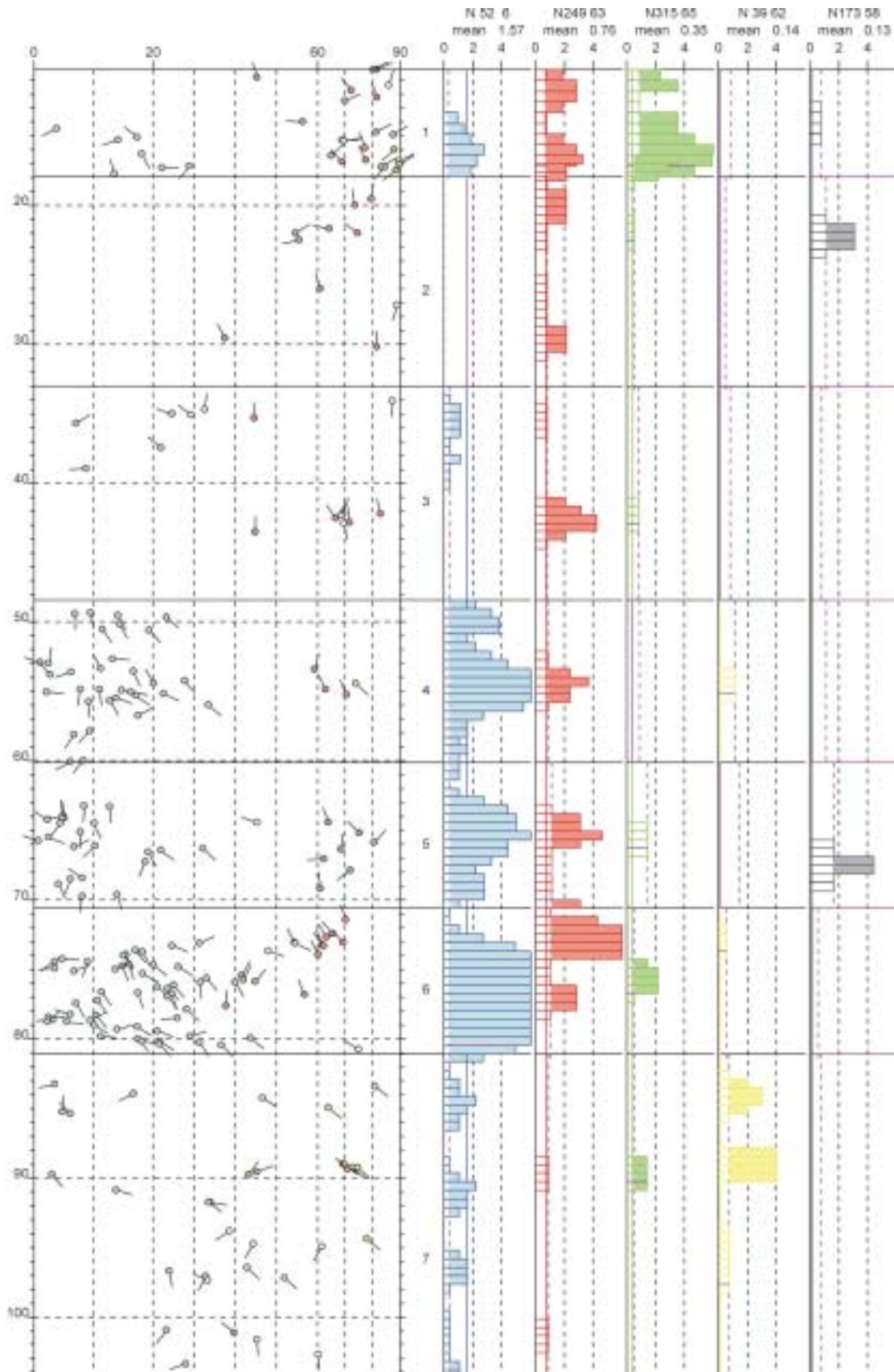
Bh 4 er stedvis sterkt oppsprukket. Fra frekvenshistogrammene og tabell i databilag 1.1 ser en sterk oppsprekking i sonene 1, 4, 5, 6 10 13 og 15. Hovedsprekkeretningen dominerer bortsett fra i sone 1 (10 – 20 m) der steile sprekker (N315 65) opptrer. Området mellom 50 og 80 m dyp er sterkt oppsprukket med en gjennomsnittsfrekvens på 4.9 sprekker pr. meter mellom 70m og 80 m som den største verdi. I sone 10 mellom 122 og 134 m er frekvensen 5.8 sprekker pr. meter som er den høyeste verdi i borehullet. Videre er det høy sprekkefrekvens fra 156 – 165 m og 173 – 182 m.

Figur 1.3 viser bildelogg fra utvalgte deler av Bh 4 hvor det er sterk oppsprekking, 75 – 80 m, 127 – 132 m, 155 – 160 m. Mesteparten av sprekkeene er tilnærmet horisontale. Ved ca 157.8 m observeres et åpent hull.

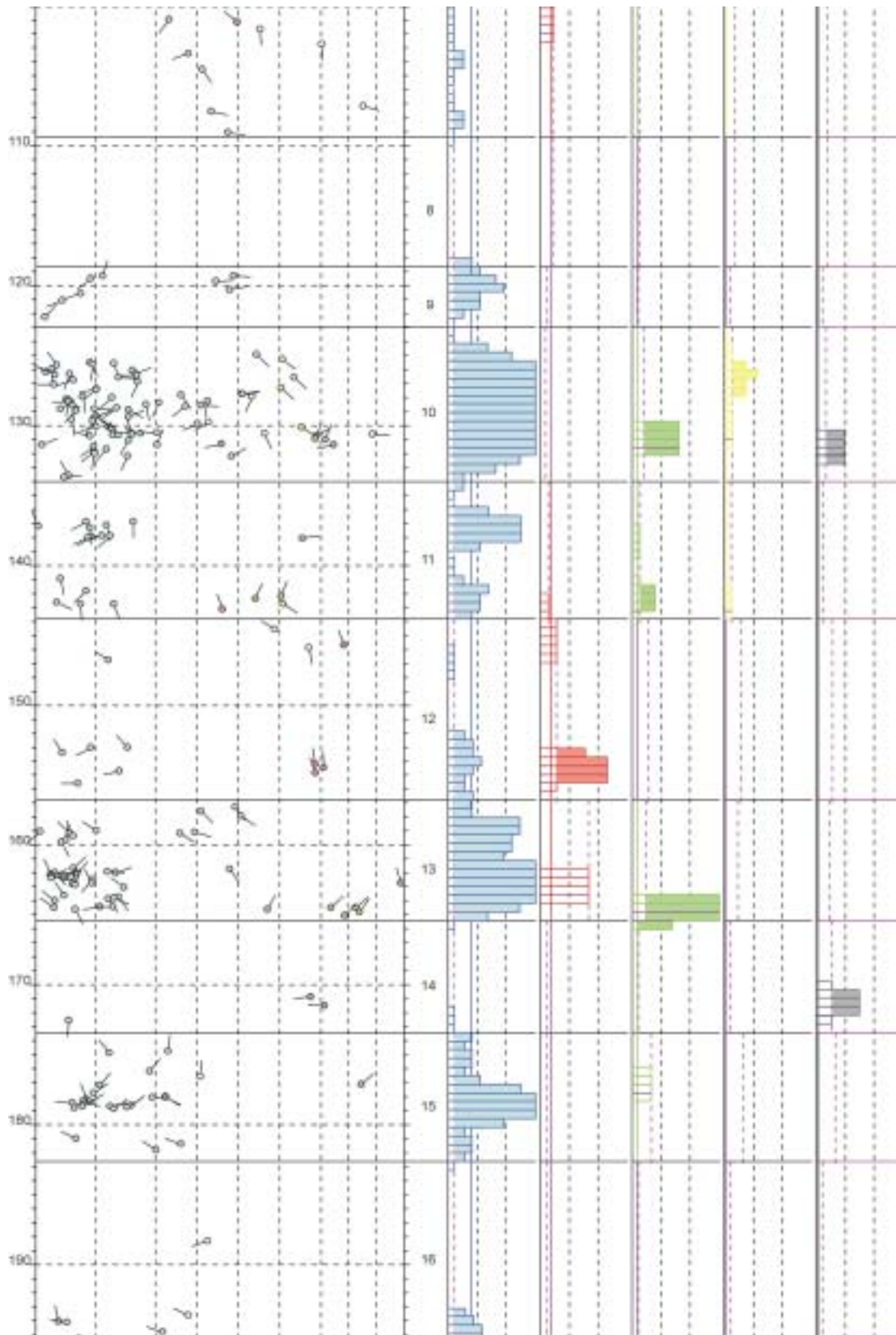
Bh 3. Sprekkeanalyse. Frekvenshistogrammer for definerte soner.

Figur 1.4 viser frekvenshistogrammer for Bh 3. Databilag 1.1 viser sprekkeedata for hver av de definerte sonene. Borehullet er spesielt sterkt oppsprukket over 18 m. Her opptrer både steile og mindre steile sprekker. Gjennomsnittlig sprekkefrekvens ligger mellom 1.7 og 2.6 sprekker pr. meter for flere av de definerte sprekkegruppene i sone 1. Maksimumsfrekvens innen sonen er oppe i 3 sprekker pr. meter. Under 18 m er hullet lite oppsprukket med noe økende oppsprekking fra ca 50 m. Boring stoppet ved ca 62 m på grunn av dårlig fjell.

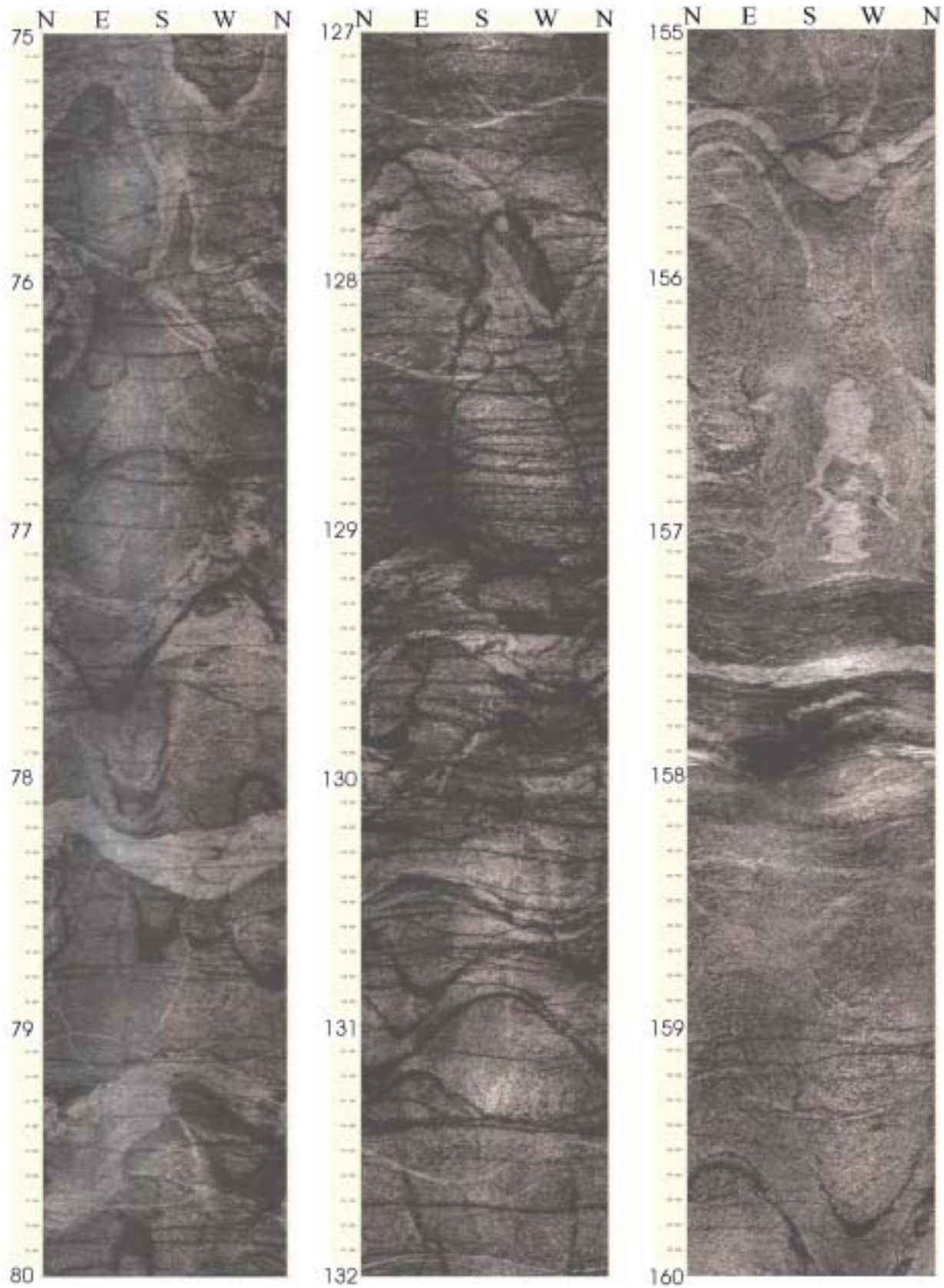
Figur 1.5 viser bildelogg fra deler av borehullet, 10 – 15 m, 50 – 55 m og 57.5 – 62.5 m. Loggene viser sterkt oppsprukket fjell mellom 10 og 15 m. Mellom 51 og 53 m vises tre tydelige åpne sprekker. Ved 62.5 m stoppet sonden i tett borehull uten at en kan se noen klar årsak til dette på bildelogg.



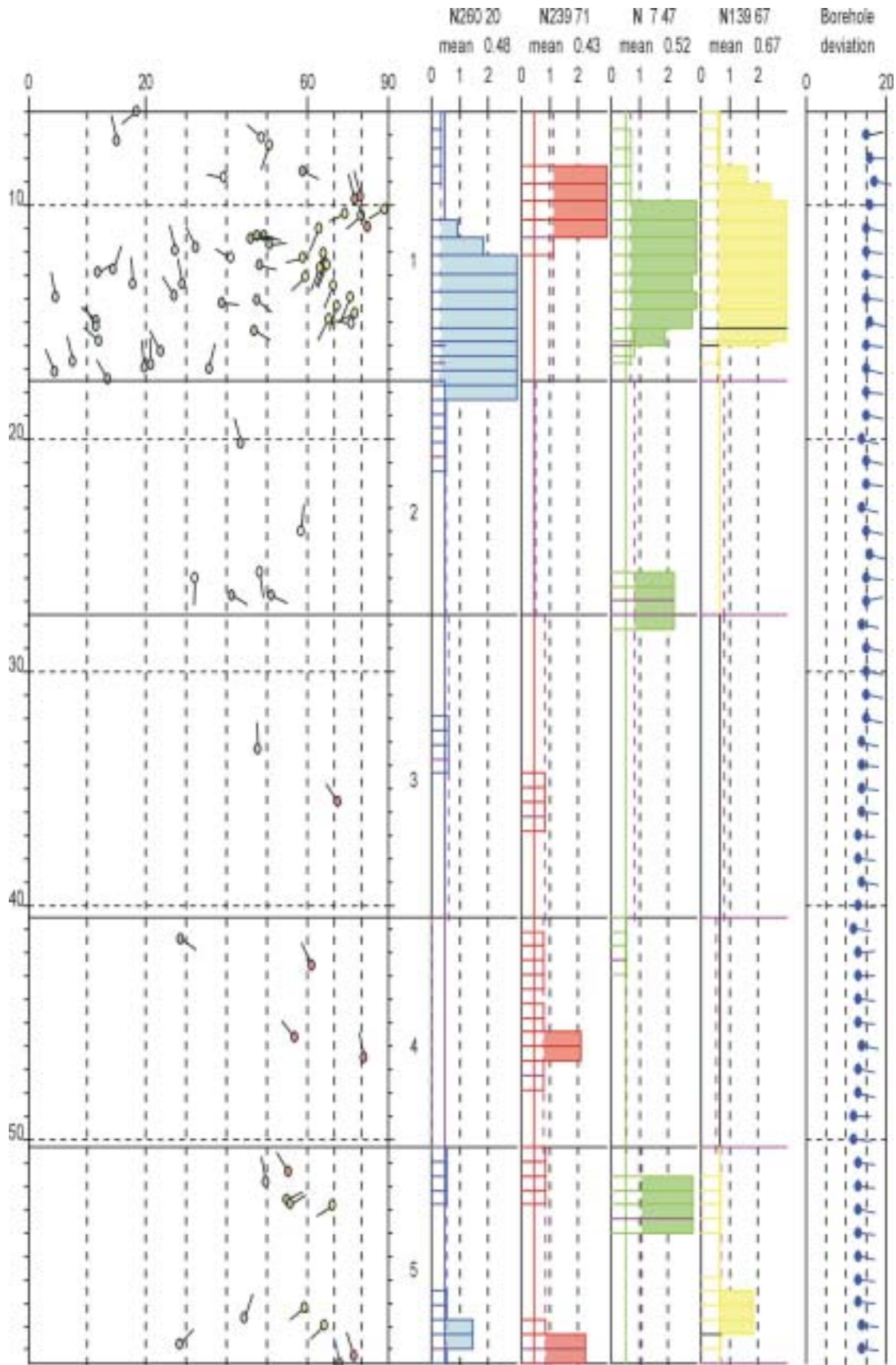
Figur 1.2a. Sia Bh 200 m, frekvenshistogram over indikerte sprekker 0 – 105 m.



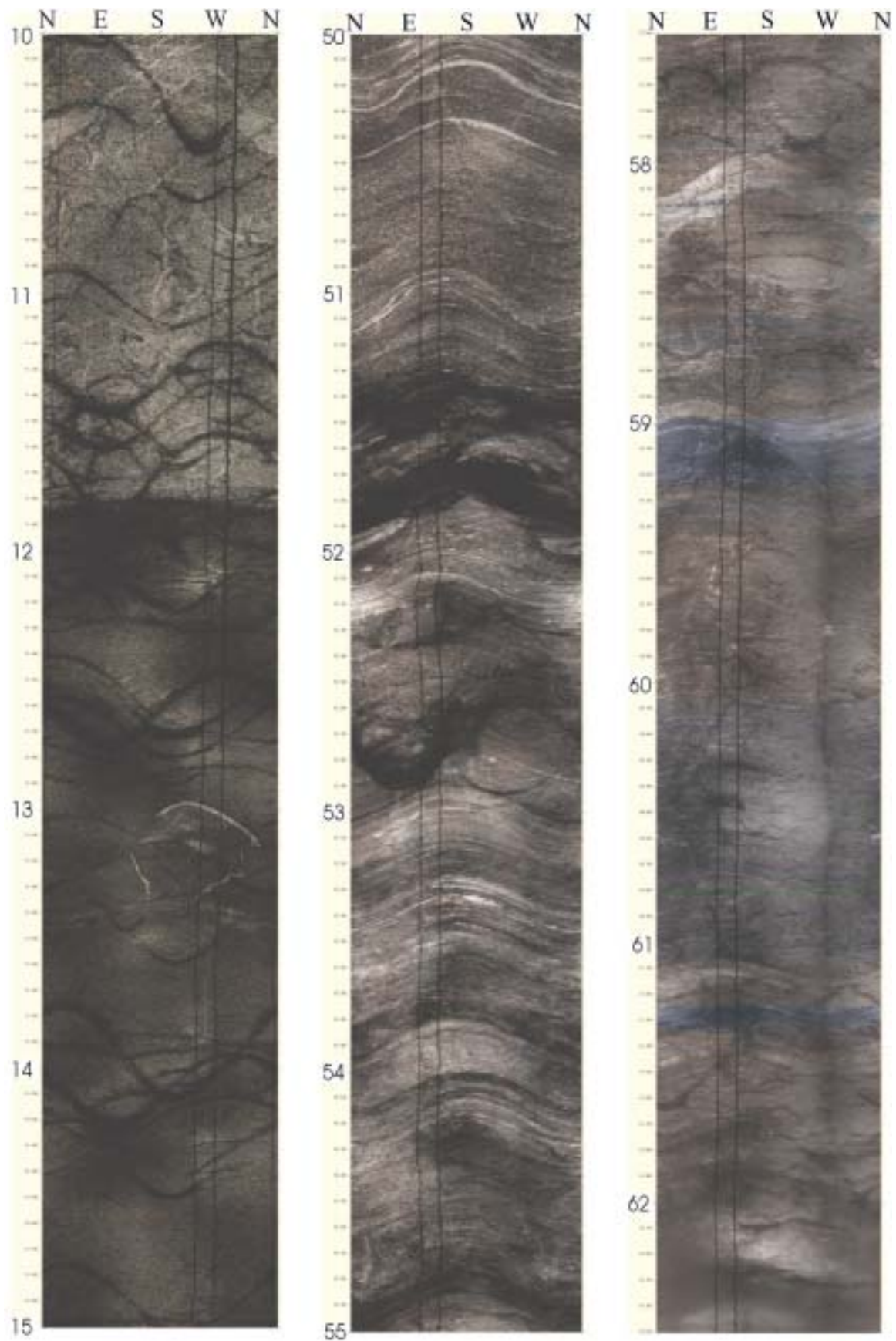
Figur 1.2b. Sia Bh 200 m, frekvenshistogram over indikerte sprekker, 100 – 195 m.



Figur 1.3. Sia, OPTV bildelogg fra deler av Bh 200 m. 75-80 m, 127 – 132 m og 155 – 160 m.



Figur 1.4. Sia, Bh 60 m. Frekvenshistogrammer over indikerte sprekker.

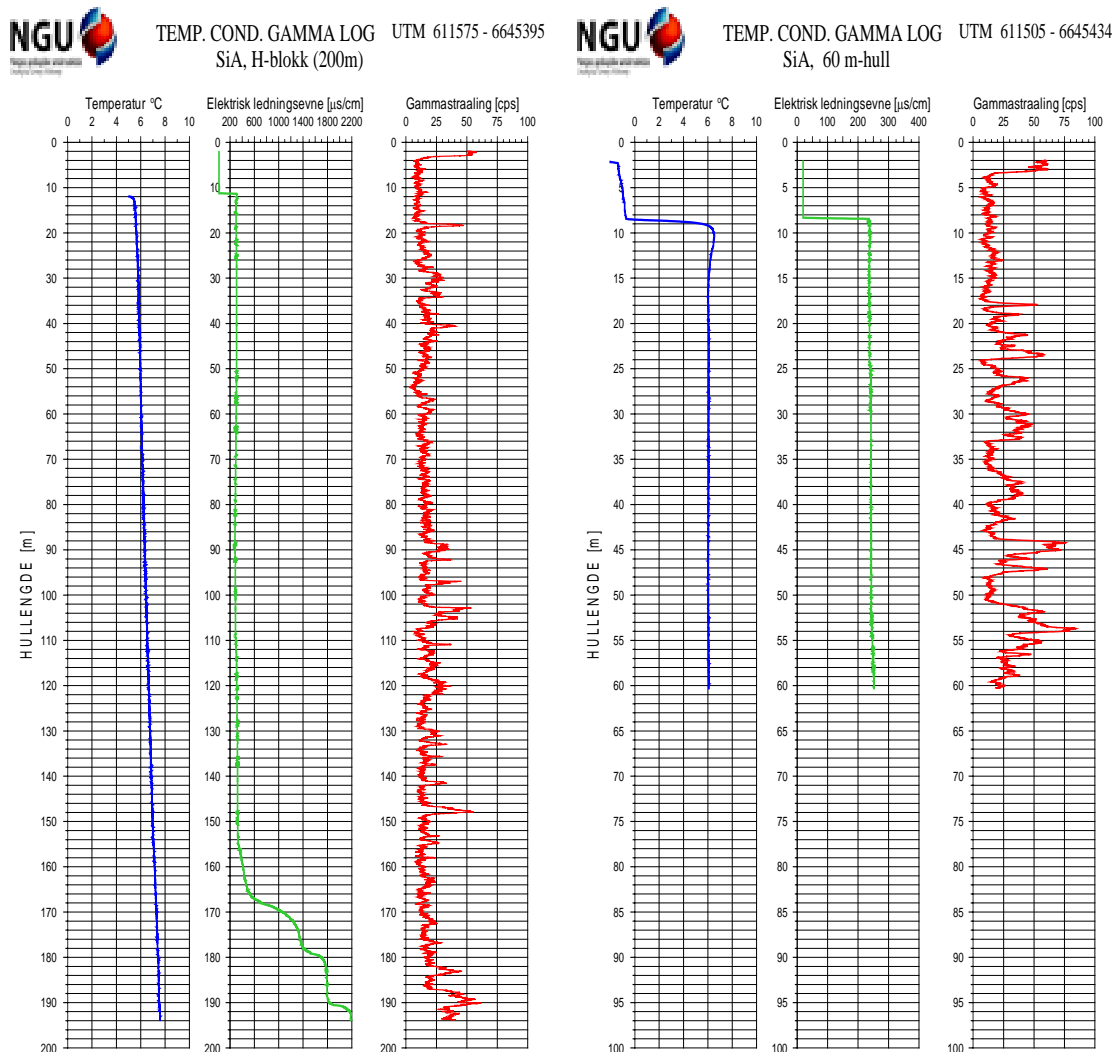


Figur 1.5. Sia. OPTV bildelogg fra deler av Bh 60 m. 10 – 15 m, 50 – 55 m og 57.5 – 62.5 m.

1.3 Temperatur, elektrisk ledningsevne og naturlig gammastråling

Figur 1.6 viser logg over vannets temperatur, elektrisk ledningsevne og naturlig gammastråling for begge borehull. Endringer i temperatur og ledningsevne kan indikere vanninnstrømning i hullet. I Bh 4 øker temperaturen jevnt nedover hele borehullet med en gradient på $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Ingen sprang i temperaturen tyder på innstrømning av vann med annen temperatur. Ledningsevnen er tilnærmet konstant ned til 110 m der en liten økning kan registreres. Fra 155 m øker ledningsevnen tydelig og ved 168 m, 179 m og 190 m er økningen betydelig til $2200\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ i bunnen av hullet. Årsaken kan være vanninnstrømning i borehullet. Det må imidlertid bemerkes at økningen er bemerkelsesverdig høy (saltvann?). Gammastrålingen er generelt svært lav i hele hullet (10 –20 cps). Lokale topper indikerer trolig økning i kaliuminnhold, bånd med kalifeltspat.

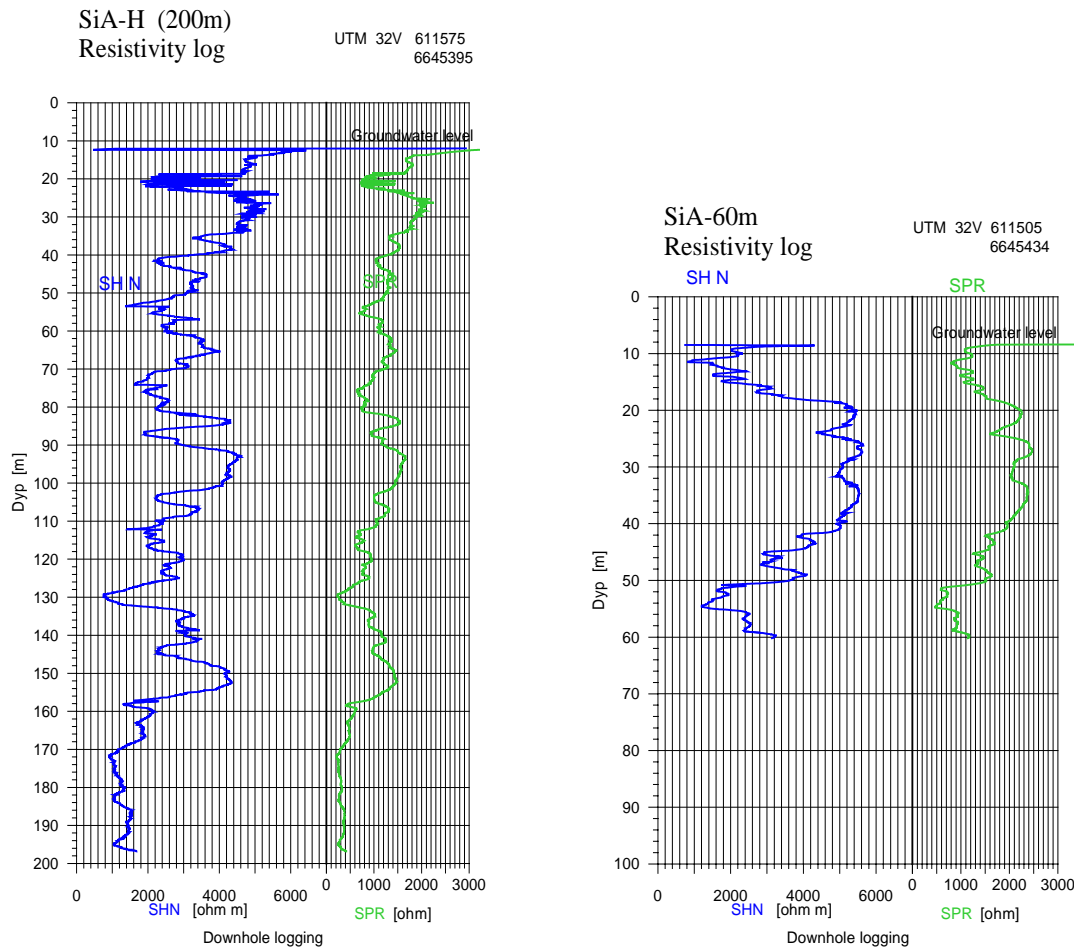
I Bh 4 er temperaturen tilnærmet konstant langs hele hullet ned til 60 m. Ledningsevnen viser en svak økning ved 24 m og fra ca 54 m. Åpne sprekker ble registrert på den optiske loggen mellom 51 og 53 m. Gammastrålingen er generelt lav med lokale topper på grunn av bånd med kalifeltspat.



Figur 1.6, Sia, temperatur, ledningsevne og total gammastråling i Bh 4 (venstre) og Bh 3 (høyre).

1.4 Resistivitet

Fjellresistivitet ble målt med utrustning fra Robertson Geologging. Det ble målt med konfigurasjon Short Normal (SN). Denne konfigurasjonen måler motstanden i umiddelbar nærhet av borehullsveggen da avstand mellom strøm og potensialelektrode er 16". Samtidig med SN måles SPR (Single Point Resistivity). Dette er en punktmåling der det måles hvor mye strøm som går ut fra strømelektroden på sonden i borehullet. Ved å dividere spenningen på denne strømstyrken får en motstand (ohm) som er et mål for overgangsmotstanden mellom strømelektroden og borehullsveggen. SPR vil variere i takt med SN.



Figur 1.7. Sia. Resistivitet i fjell, Bh 4 (venstre) og Bh 3 (høyre).

Resistivitetslogg for begge hull er vist i figur 1.7. Fjellresistiviteten avspeiler oppsprekningen i hullet på en tydelig måte. Sammenstiller en resistivitetsloggen for Bh 4 med frekvenshistogrammene, figur 1.2, ser en lav motstand der oppsprekningen er stor. Laveste motstand er observert ved ca 130 m dyp, på samme sted hvor sprekkefrekvensen er størst. Fra ca 158 m, hvor det er stor oppsprekking, er motstanden lav helt til bunnen av hullet. Bortsett fra stor sprekkefrekvens ved 178 m er hullet forholdsvis lite oppsprukket under 165 m. Den lave motstanden kan ha sammenheng med den høye ledningsevnen i vannet. Porevannet i bergarten vil ha samme ledningsevne nær borehullsveggen, og dette vil påvirke fjellresistiviteten ved bruk av SN-konfigurasjon. Motstanden i lavmotstandssonene går ned mot 900 – 1000 ohmm, som ved 130 m dyp. Slike motstandsverdier kan indikere at det er leirmineraler tilstede i sonen. Det er imidlertid ikke observert leirsoner på den optiske loggen

ved dette dyp, så det er nok den intense oppsprekkingen som gir den lave motstanden, se bildelogg figur 1.3. Det samme kan sies om de øvrige sonene.

I Bh 3 er det lav motstand øverst og nederst i hullet. Mellom 10 og 16 m indikeres en lavmotstandssone med motstandsverdier ned mot 800 ohmm (ca 12 m dyp). Den optiske loggen viser høy oppsprekking i det samme området. I tillegg er det en mørkere bergart mellom 11.8 og 15.5 m . Mellom 18 og 50 m er hullet lite oppsprukket noe som gir høy resistivitet (5000 ohmm). Fra 50 m går resistiviteten ned til 1200 – 1600 ohmm. Økende oppsprekking er årsaken og spesielt åpne sprekker mellom 51 og 53 m, se bildelogg figur 1.5. Fastboring ved ca 63 m tyder på svært dårlig fjell (leirslepper?) fra dette dyp. Resistivitetsloggen når ikke ned til dette dyp slik at en kan ikke si noe om motstandsforholdene i svakhetssonen det er boret inn i.

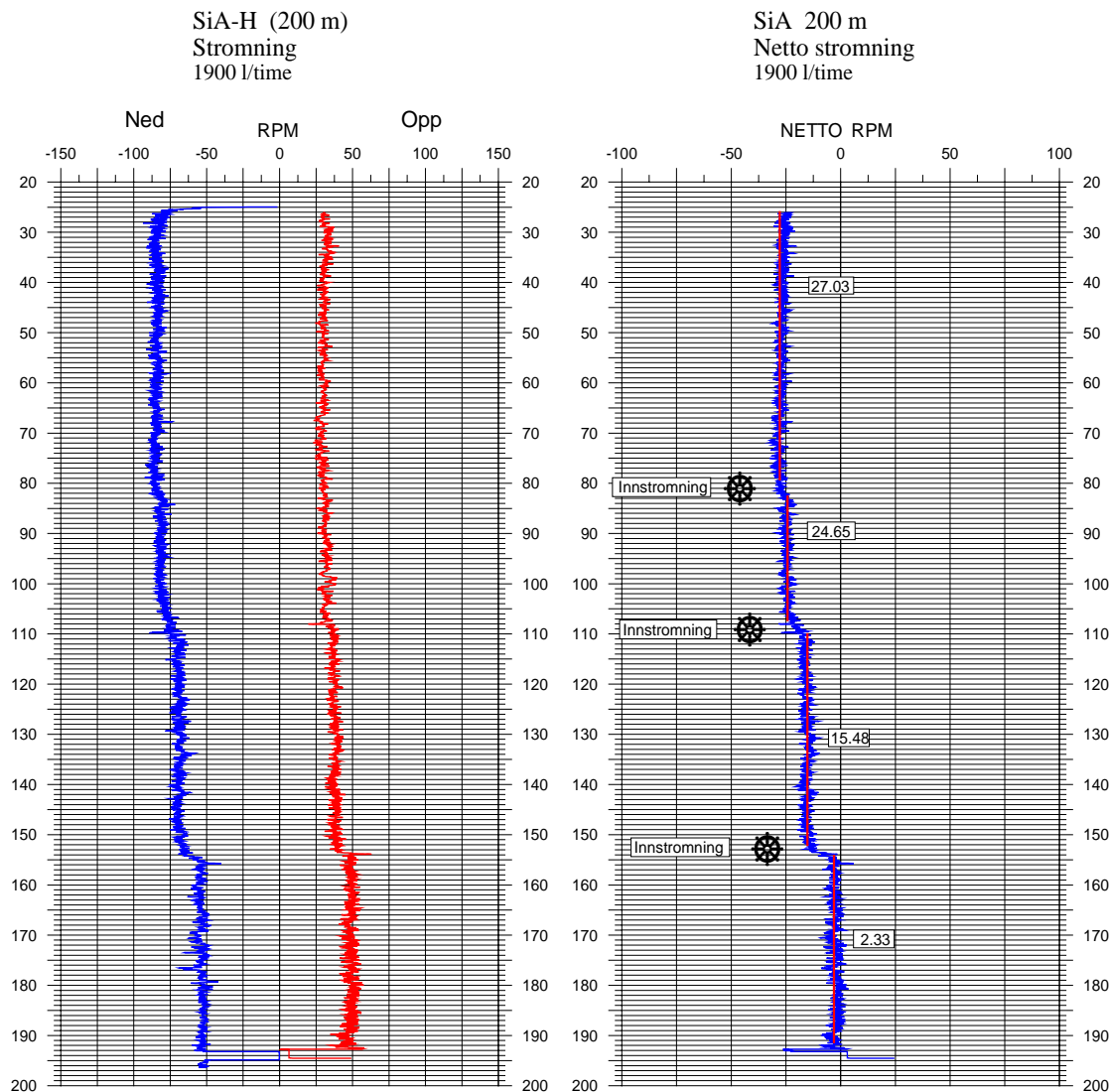
1.5 Strømningsmåling med pumping

Med strømningsmåling i borehull kan en bestemme hvor i hullet vann eventuelt strømmer inn. Måling må skje samtidig med pumping. Strømningsmåling kan utføres ved at sonden senkes eller heves med konstant hastighet i borehullet. Sonden som består av en veldig følsom propell (roterer i begge retninger), vil begynne å rotere når vann strømmer forbi. Det som registreres er omdreiningstallet (rpm) og dette er et mål for vannets strømningshastighet. Ved logging opp eller ned vil propellen rotere pga. sondens hastighet. Strømning i hullet vil da påvirke omdreiningstallet positivt eller negativt alt etter om det logges nedover eller oppover. Ved å ta differansen mellom logging opp og ned får en netto omdreiningstall for kun vannstrøm. Pumpa må plasseres over sonden så langt opp i hullet som mulig. Vann fra eventuelle sprekker vil da strømme oppover i hullet og endringer i omdreiningstallet indikerer hvor vann strømmer inn i hullet. Negativt omdreiningstall er definert som strøm oppover.

Strømningsmåling ble bare utført i Bh 4. Pumpa ble plassert på 20 dyp og det ble logget opp og ned med konstant hastighet 5 m/min. Pumperaten var 1900 l/time. Figur 1.8 viser resultatet fra strømningsmålingene. Ut fra loggedata opp og ned er netto omdreiningstall regnet ut. Gjennomsnittlig omdreiningstall over og under vanninnslag er beregnet. Forutsatt at vannstrømmen øverst i hullet utgjør 100 % av den totale strømmingen kan en beregne prosentvis fordeling fra de forskjellige vanninnslagspunktene (sprekkesoner). Dette ga følgende resultat :

Sprekkesone	% innstrømning
81 m	9.6
109 m	37.1
153 m	53.3

Det ble indikert vanninnslag på tre steder i borehullet. Over halvparten (53.3 %) av vannet kommer fra en sone på 153 m dyp. 37.1 % kommer fra 109 m mens en liten del kommer fra 81 m, 9.6 %.



Figur 1.8. Sia Bh 4. Strømningsmåling opp og ned (venstre) og netto strømning som viser hvor en har vanninnslag (høyre).

1.6 Diskusjon, borehullslogging

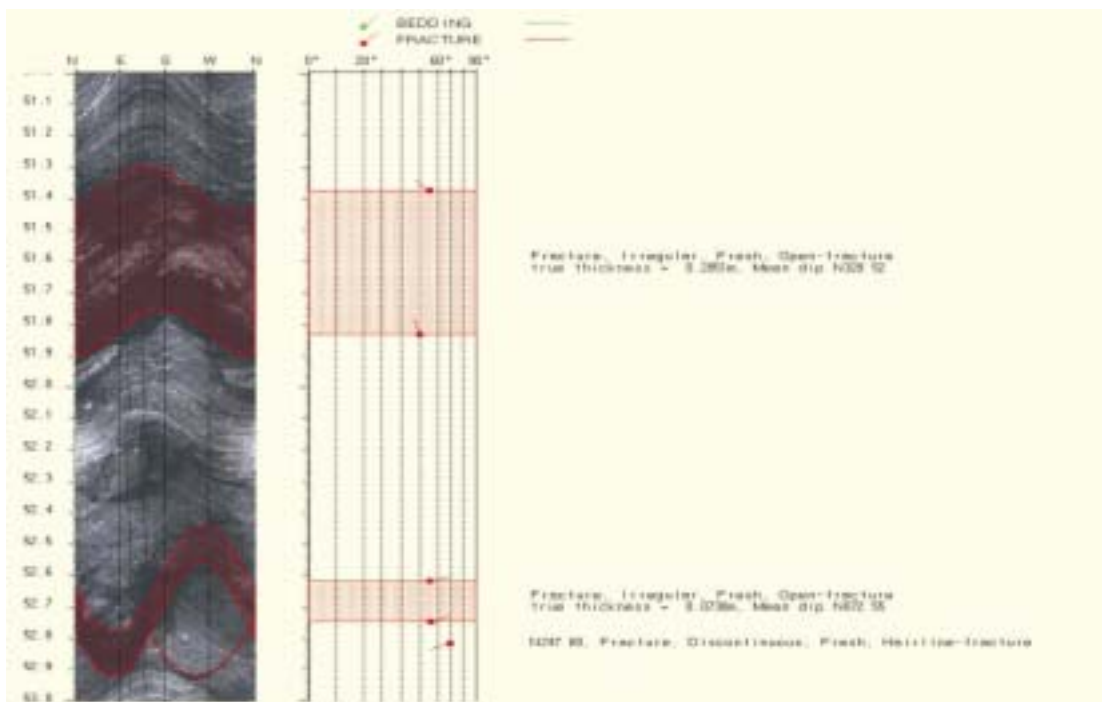
Hensikten med borehullsloggingen i energibrønnen ved Sia har vært å karakterisere berggrunnen. All oppsprekking i de undersøkte brønner er kartlagt med optisk televiewer. Indikasjoner på vanninnstrømning i brønnene er kartlagt ved logging av temperatur og ledningsevne i vannet. Logging av naturlig gammastråling gir geologisk informasjon. Resistivitet i fjell har gitt opplysninger om oppsprekking og strømningsmåling har påvist vanninnslag.

Bh 4 er stedvis sterkt oppsprukket, Hovedandelen av sprekkene har slakt fall med gjennomsnittlig strøkretning N052, NØ-SV. Dette kan ha betydning for grunnvannsstrømmen i et borehullslager med stor horisontal overflate. De påviste vanninnslag er imidlertid ikke alltid knyttet til områder i hullet hvor oppsprekkingen er størst. Vanninnslag er påvist ved 81 m, 109 m og 153 m. Oppsprekkingen er stor mellom 50 og 80 m dyp. Vanninnslaget, 9.6 %, kommer like under denne sonen og har sikkert tilknytning til de overliggende

sprekkesystemer. Vanninnslaget ved 109 m (37.1 %) ligger i den del av borehullet som er minst oppsprukket i følge den optiske loggen. Ledningsevnen i vannet har en svak økning ved 110 m og resistiviteten går ned fra 109 m, begge deler er indikasjon på vanninnstrømning. Ved ca 130 m hvor en har den mest intense oppsprekningen i borehullet, er det ingen påvisning eller indikasjon på vanninnstrømning. Lav resistivitet i fjellet bekrefter imidlertid den intense oppsprekningen.

Mesteparten av vannet kommer fra en sone ved ca 153 m (53.3 %). Oppsprekningen er moderat, men øker fra 157 m til 165 m. Ved 157 m observeres et åpent hull på den optiske loggen. Vannets ledningsevne øker tydelig fra 154 m som er en indikasjon på innstrømning. Ledningsevnen øker ytterligere ved 168 m, 180 m og 190 m uten at det er påvist innstrømning på de samme steder.

I Bh 4 er oppsprekningen størst øverst i hullet, mellom 10 og 18 m. Ellers er hullet lite oppsprukket men oppsprekningen øker fra 50 m. Resistivitetsloggen avspeiler samme mønster. Temperaturloggen gir ingen indikasjon på vanninnstrømning. Ledningsevnen øker svakt fra 54 m. En åpen sprekkese observeres på den optiske loggen mellom 51 og 52 m, se figur 1.9. Sann tykkelse på denne er 28 cm med et fall på 52° mot NNV. Det er ikke gjort strømningsmåling i dette hullet slik at en har ikke fått bekreftet vannstrøm fra denne sprekkeseonen. En litt mindre åpen sprekk observeres ved 52.8 m.

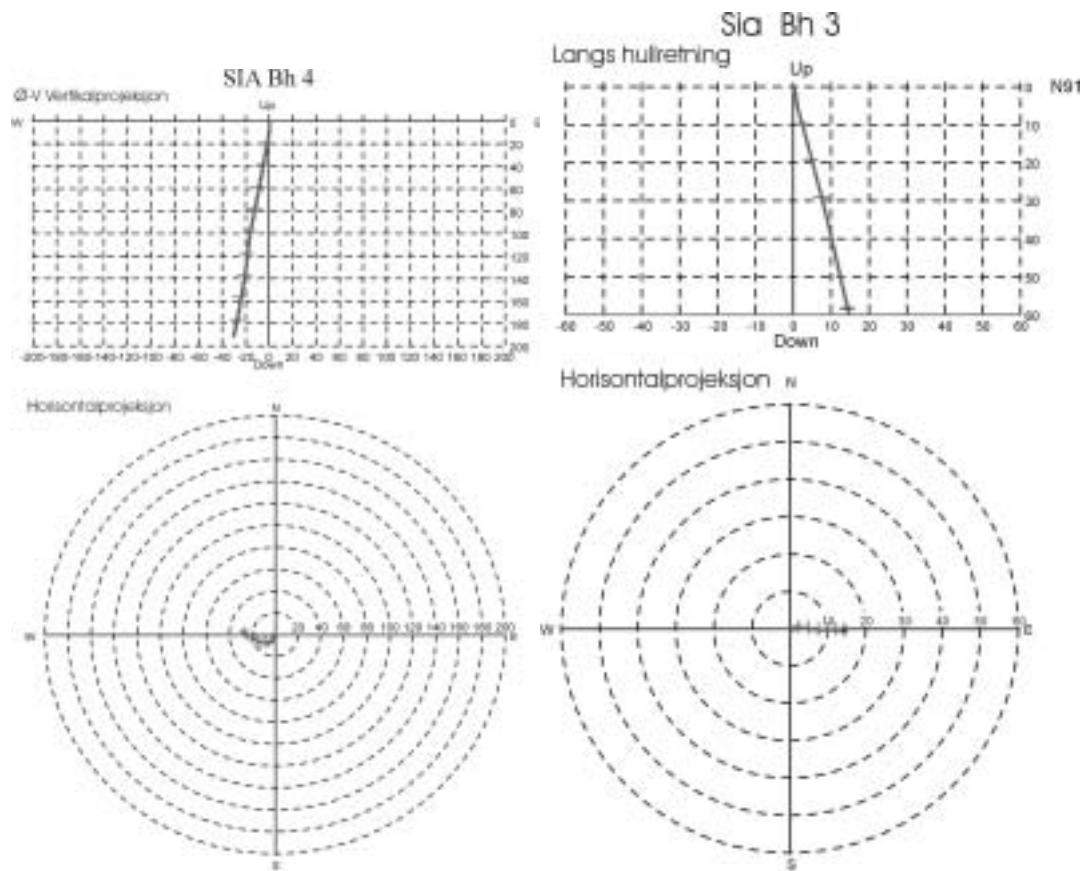


Figur 1.9. Sia Bh 3. Sprekkelogg med åpne sprekker mellom 51 og 53 m dyp.

1.7 Avviksmåling

Avviksmåling blir gjort kontinuerlig med OPTV-sonden. Ettersom magnetometre brukes til å bestemme retningen til hullbanen vil unøyaktigheter oppstå med magnetisk materiale borehullet, for eksempel foringsrør eller magnetittholdige bergarter. Figur 1.10 viser

borehullsforløp, vertikal- og horisontalprojeksjon, av begge borehull. Det er ingen store avvik fra planlagt fall og retning, bortsett fra retningen på Bh 4. Hullet er satt på mot SV men dreier nesten 90° mot NV.



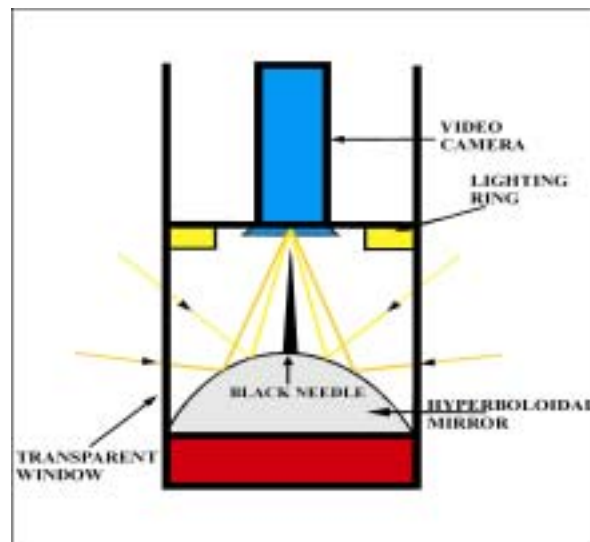
Figur 1.10. SIA. Borehullsavvik for Bh 4 (venstre) og Bh 3 (høyre).

METODEBESKRIVELSE OPTISK TELEVIEWER (OPTV)

Optisk televiewer kan benyttes til inspeksjon av grunnvannsbrønner, grunnvarmebrønner, forundersøkelser for fjellanlegg (tunneler, fjellrom), og er i mange tilfeller bedre enn tradisjonell kjerneboring da en får orienterte sprekker og strukturer. I det følgende blir måleprinsipp for optisk televiewer beskrevet. Analyse av data blir illustrert ved eksempler fra borehull.

Måleprinsipp og utførelse.

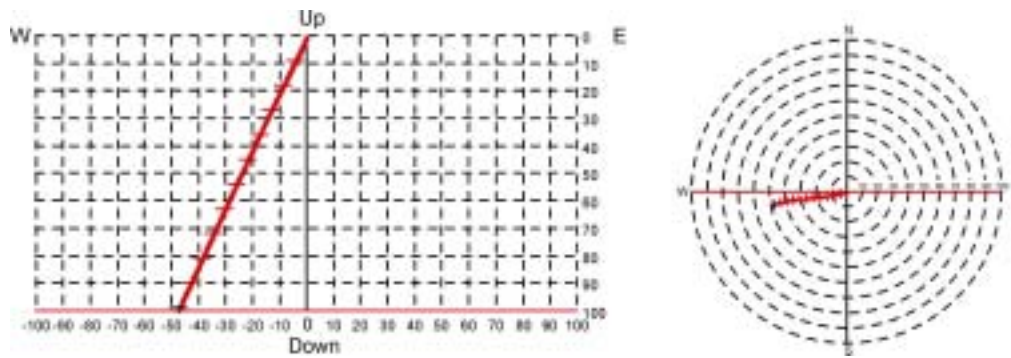
Optisk televiewer er et instrument som brukes ved inspeksjon av borehull med en diameter fra 70 – 160 mm. Instrumentet består av et digitalt kamera som filmer mot et hyperbolsk speil, se prinsippskisse figur 1. Kameraet ”ser” vinkelrett en større del av borehullsveggen, men bare en sirkel med høyde 1 mm registreres. Sonden senkes med en maksimal hastighet 1 meter pr minutt ned i borehullet, og for hver millimeter gjøres en registrering. Det kan samples 360 eller 720 punkter sirkelen rundt, og i vanlige fjellbrønner gir dette en pikselstørrelse på ca. 1mm x 1 mm. Med en slik oppløsning kan metoden påvise sprekker med tykkelse ned mot 0,5 mm. Metoden kan benyttes i tørre og vannfylte hull, men krever selvsagt relativt klart vann.



Figur 1: Prinsippskisse av optisk televiewer.

Sonden har innbygget et trekomponent magnetometer, og dette sammen med tre akselerometre sørger for å orientere bildet (opptaket) uansett sonden og borehullets forløp. På grunnlag av det orienterte bildet av borehullsveggen kan strøk, fall og sann tykkelse av kryssende strukturer beregnes.

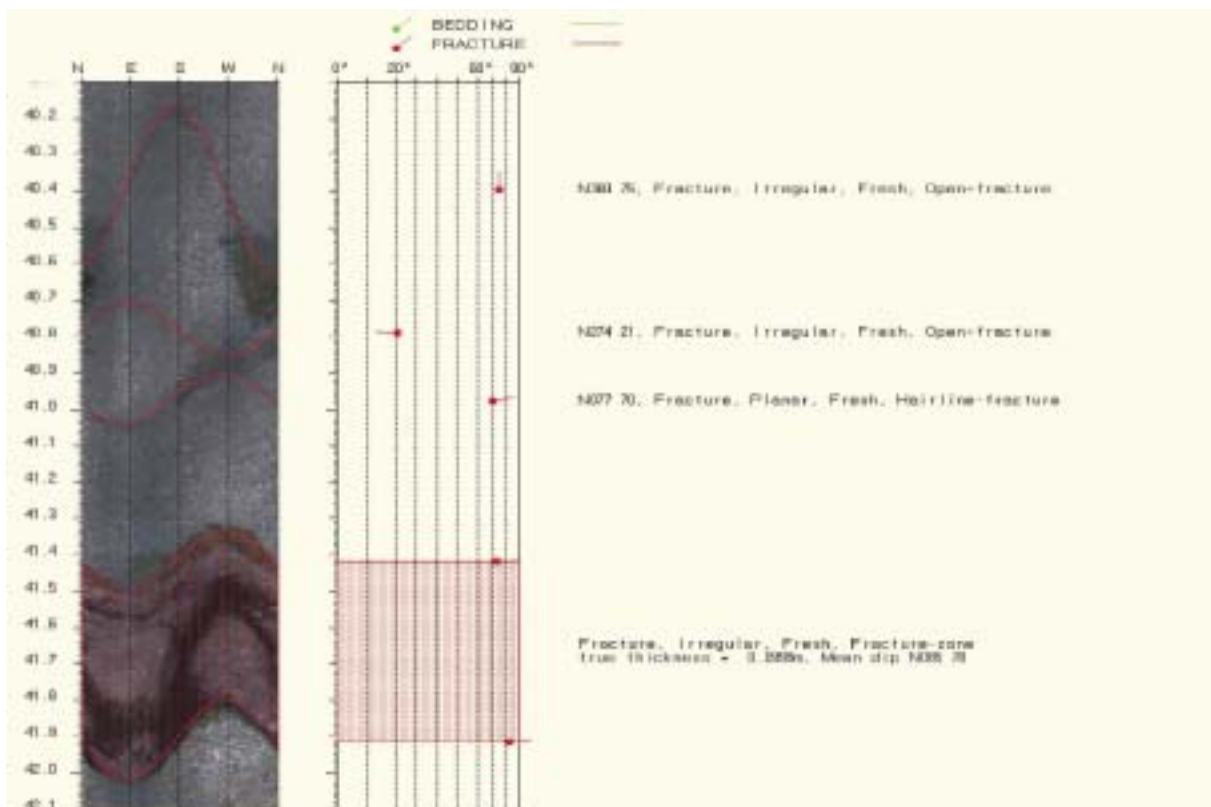
Med data fra denne instrumenteringen kan også borehullets forløp (avvik) beregnes (Figur 2). Borehullsvinkel kan måles i området 0 – 180° med en nøyaktighet på +/- 0.25°. Retningen kan måles fra 0 til 360° med en nøyaktighet på +/- 2.5°. Avviket måles kontinuerlig langs hele borehullet. Data kan plottes ut grafisk og i tabellform. Vertikalsnitt (tre retninger), horisontalprojeksjon og 3D-plott kan plottes ut. I tillegg til at det er viktig å vite hvor hullet går, må en vite fall og retning på hullet for å bestemme strøketretning og fallvinkel til sprekken som observeres.



Figur 2: Eksempel på borehullsforløp, vertikalprojeksjon øst-vest (venstre) og horisontalprojeksjon (høyre).

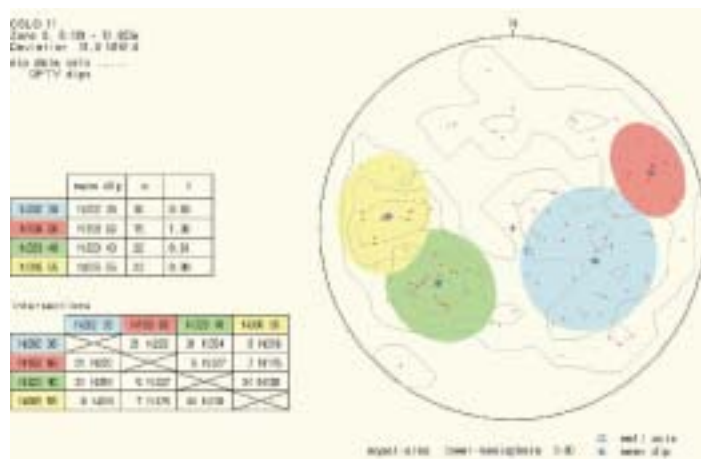
Analyse av data.

Ved analyse brettes det orienterte digitale bildet ut (se figur 3). Plane sprekker vil da indikeres som en sinusformet kurve. Steile sprekker vil indikeres med store amplituder ved loddrette hull. Dersom borehullet skjærer sprekken vinkelrett, vil disse vises som rette linjer. Siden bildet er orientert, kan sprekkenes retning og fall beregnes ved å tilpasse (digitalisere) en sinuskurve til hver av dem. Har sprekkenes en viss utbredelse, kan både topp og bunn digitaliseres, og derved kan den sanne tykkelsen beregnes. Analyseprogrammet inneholder en menystyrt beskrivelse av de enkelte hendelser. Tilsvarende analyse kan gjøres for primære geologiske strukturer (ganger, lagdeling).



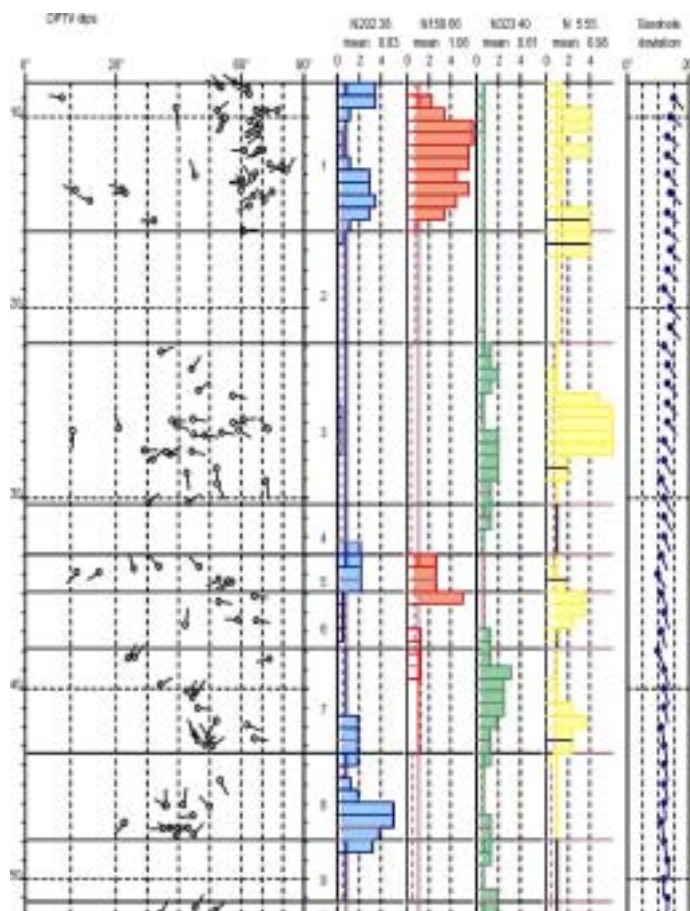
Figur 3: Eksempel på opptak og analyse. Enkeltstående sprekker er tilordnet sinusfunksjon og fallretning og vinkel beregnet. Pilhodet angir individuelle sprekkers fall mens halen viser fallretning (nord opp). Ved større åpne sprekker er topp og bunn digitalisert og sann åpning på sprekkenes er beregnet (nederst på bildet – fracture zone). Når alle hendelser er digitalisert, kan en utføre sprekke- og strukturanalyse. Etter å ha plottet polen (normalvektoren) til alle digitaliserte sprekker i et stereogram (figur 4), kan forskjellige

sprekkegrupper defineres. Disse får tildelt en farge, og sprekkegruppens middelværdi for strøk og fall beregnes. Det kan også gjøres analyse på skjæringslinjer mellom midlere sprekkplan.



Figur 4. Eksempel på analyse av sprekker i stereogram. I øverste tabell er midlere sprekkeretning og fallvinkel for hver sprekkegruppe beregnet, og antall sprekker og sprekkfrekvens for hele hullet beregnet for hver av gruppene. Nederste tabell viser retning og fall på skjæringslinjen mellom de midlere sprekkplanene.

Neste steg er å plote alle digitaliserte hendelser, nå med tilordnet gruppefarge, som funksjon av dyp. De forskjellige sprekkemønstrene tilordnes histogrammer, og på grunnlag av disse kan hullet deles inn i soner som hver er karakterisert med spesielle sprekkemønstre. Sprekkfrekvens for alle definerte grupper kan deretter beregnes innenfor hver sone i borehullet. Tilsvarende analyser kan også gjøres for bergartsganger og eventuelt bergartsgrenser. I tillegg til grafisk presentasjon kan alle data listes i tabellform.



Figur 5. Sprekkelogg for tolket borehull. Til venstre vises de individuelle sprekkene som pilplott. Pilhodene angir individuelle sprekkers fall, mens halen viser fallretning (nord opp). Histogrammene viser hvor i borehullet de forskjellige sprekkemønstrene opptrer (sprekkfrekvens). Høyre kolonne viser borehullsforløp med fall og retning. Heltrukne horisontale linjer angir grenser mellom definerte soner.

Figur 5 viser frekvenshistogrammer for et borehull som er undersøkt med optisk televiwer. Frekvenshistogrammene (rød, blå, grønn og gul) viser beregnet sprekkfrekvens i definerte soner av hullet, og viser dermed detaljert hvordan oppsprekningen er i hullet. Alle sprekker er angitt i "pilplott" der pilens hode angir fallet, mens halen angir fallretning. Nord er opp på arket. Hvert

pilhode er fylt med den gruppefarge tilsvarende sprekk tilhører. Piler uten farge er sprekker utenfor noen av de definerte gruppene.

Strøk og fall til et plan er entydig bestemt i et stereografisk plott (her plottet som plan-normalens skjæringspunkt, pol, med nedre kuleskall, lower hemisphere). Planets strøk er en horisontal linje i planet, mens fallet er vinkelen mellom planet og horisontalen målt 90° på strøket.

Planets fallretning der strøkretningen er den samme (f.eks. N180 og N0), bestemmes av retningen til planets normal, og vil være normalens retning pluss 180°. Planets strøkretning er fallretning minus 90 grader. Dermed er også strøkretningen entydig bestemt. Strøkretning beregnes som vinkel fra nord. Hvis for eksempel strøkretning og fall er N180 45, er strøkretningen 180° fra nord (NS) og fallet er 45° mot vest (fallretning N270), mens N0 45 faller mot øst (fallretning N90).

Alle sprekk- og borehullsdata kan listes opp i tabeller. Eksempler på slike tabeller med forklaring er vist i tabell 1, 2 og 3.

RGLDIPv5.2 OPTV results
K = 0: BEDDING
K = 2: FRACTURE

borehole OSLO 11
zone from 1.350 to 53.043 m

	Depth	Azimuth	Dip	1-P0/100	n	Q	K	Upper Depth	Lower Depth	Well Diam	Well deviation Azimuth	Well deviation Dev
1	51.823	36	34.1	0.000	3		2	51.778	51.868	0.135	177.92	12.46
2	51.617	55	51.8	0.000	3		2	51.533	51.701	0.135	180.58	13.00
3	51.514	39	45.2	0.000	3		2	51.448	51.580	0.135	180.64	13.00
4	47.671	53	39.4	0.000	3		2	47.617	47.725	0.135	168.50	11.50
5	47.629	48	44.8	0.000	3		2	47.563	47.695	0.135	168.68	12.00
6	47.352	269	35.0	0.000	3		2	47.305	47.349	0.135	169.00	12.00
7	47.312	281	43.0	0.000	3		2	47.330	47.375	0.135	168.33	12.00
8	47.311	280	42.8	0.000	3		2	47.250	47.372	0.135	168.31	12.00
9	47.296	285	37.3	0.000	3		2	47.246	47.346	0.135	168.01	12.00
10	47.294	276	39.7	0.000	4		2	47.239	47.349	0.135	168.18	12.00
11	47.041	230	22.9	0.000	3		2	47.024	47.070	0.135	170.00	11.91
12	47.040	228	22.6	0.000	3		2	47.025	47.068	0.135	170.00	11.89
13	46.651	263	44.7	0.000	3		2	46.585	46.717	0.135	169.11	11.11
14	46.205	307	50.0	0.000	3		2	46.258	46.285	0.135	172.00	12.00
15	46.151	292	36.3	0.000	3		2	46.140	46.201	0.135	172.90	12.00
16	46.125	359	35.7	0.000	3		2	46.078	46.172	0.135	173.41	12.00
17	46.093	12	41.5	0.000	3		2	46.035	46.151	0.135	174.00	12.00
18	44.807	148	53.3	0.000	3		2	44.718	44.896	0.135	169.23	12.00
19	42.991	61	50.9	0.000	3		2	42.910	43.072	0.135	167.10	12.00
20	42.949	58	48.5	0.000	3		2	42.874	43.024	0.135	167.92	12.00

Tabell 1, Data for borehullene og digitaliserte sprekker.

Depth	- Dyp langs borehullet
Azimuth	- Sprekkens fallretning
Dip	- Sprekkeplanets fallvinkel
n	- Antall punkter brukt for å digitalisere en sprekk
K	- Type sprekk (2 = sprekk, 0 = bånding)
Upper depth	- Dyp til sprekkplanets øvre skjæringspunkt med borehullsveggen
Lower depth	- Dyp til sprekkplanets nedre skjæringspunkt med borehullsveggen
Well diam.	- Borehulldiameter
Well deviation:	
Azimuth	- Borehullets fallretning
Dev	- Borehullets fallvinkel målt fra loddlinjen

RGLDIPv5.2 DIP DATA INTERPRETATION: FRACTURE ANALYSIS

borehole
zone from 8.000 to 52.000 m
16 Aug 2000

Data is classed into 1 types
5 OPTV_dips
Quality cut-off level: *
Mean well deviation: 11.8deg to N147.8
4 small-circles defined

SEARCH AREA				MEAN DIP			
	azim	pl	cone	strike	dip	n	f
1	112.2	53.7	30.0	202	38	30	0.83
2	66.5	23.8	17.6	158	66	15	1.06
3	231.2	49.3	23.7	323	40	22	0.61
4	276.3	31.8	22.8	5	55	23	0.98

Total number of data = 90
Number of data unaccounted for = 26

ZONE No.	DEVIATION		DEPTHS m		No. DATA	MEAN DIPS and FREQUENCIES															
	Dev	Azim	TOP	BASE		Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f
1	13.3	128.8	8.20	16.01	42	197	40	13	1.88	157	69	11	3.10	328	52	1	0.24	358	65	5	2.46
2	13.3	133.8	16.01	21.87	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	
3	12.2	139.9	21.87	30.34	27	253	21	1	0.12	0	0	0	0.00	329	36	8	1.23	8	48	12	2.67
4	11.7	149.6	30.34	32.94	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	
5	11.0	150.0	32.94	34.90	8	217	28	4	2.16	155	55	3	2.68	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
6	11.3	157.1	34.90	37.90	5	182	59	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	5	62	3	9.38
7	11.5	162.6	37.90	43.36	16	234	47	3	0.68	170	73	1	0.60	321	39	8	1.82	9	58	3	1.26
8	11.7	168.0	43.36	47.92	15	192	40	8	2.19	0	0	0	0.00	320	42	2	0.56	0	0	0	0.00
9	12.4	177.8	47.92	51.17	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	
10	13.0	180.5	51.17	51.82	3	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	314	43	3	5.64	0	0	0	0.00

Tabell 2. Data for definerte soner i borehullet for hver sprekkegruppe (search area).

Zone deviation:

Dev og azimuth - Sonens (borehullets) fallvinkel (fra lodd) og fallretning

Top og base - Sonens topp og bunn langs borehullet

No data - Antall sprekker i sonen

Mean dips and frequencies:

Str - Gjennomsnittlig strøkretning for hver av de definerte gruppene (i sonen)

Dip - Gjennomsnittlig fallvinkel for hver av de definerte gruppene (i sonen)

n - Antall sprekker i hver av de definerte sprekkegruppene (i sonen)

f - Gjennomsnittlig sprekkefrekvens i hver av de definerte sprekkegruppene (i sonen)

Borehole:

Depth range: 1.396 - 52.996m

Depth	Deviation components				
	North	East	Down	Devaz	Dev
2.046	-0.108	0.124	0.629	131.00	15.00
3.046	-0.265	0.330	1.595	134.00	15.00
4.046	-0.409	0.546	2.560	120.00	16.00
5.046	-0.533	0.770	3.526	129.00	14.00
6.046	-0.671	0.979	4.495	122.00	14.00
7.046	-0.799	1.177	5.466	122.00	14.00
8.046	-0.936	1.380	6.435	127.00	13.00
9.046	-1.105	1.558	7.405	132.00	15.00
10.046	-1.238	1.751	8.377	125.00	14.00
11.046	-1.367	1.943	9.349	125.00	13.00
12.046	-1.488	2.144	10.322	122.00	13.00
13.046	-1.629	2.313	11.297	137.00	13.00
14.046	-1.807	2.467	12.269	132.00	14.00
15.046	-1.955	2.635	13.243	125.00	13.00
16.046	-2.088	2.810	14.218	124.00	13.00
17.046	-2.238	2.990	15.190	130.00	14.00
18.046	-2.388	3.170	16.163	133.00	13.00
19.046	-2.549	3.325	17.137	134.00	12.00
20.046	-2.712	3.483	18.111	136.00	14.00

Tabell 3. Data for borehullsforløp (avvik).

Depth - Dyp langs borehullet
North - Nordkomponent
East - Østkomponent
Down - Vertikalt dyp
Devaz - Hullets fallretning
Dev - Hullets fallvinkel målt fra lodd.

METODEBESKRIVELSE

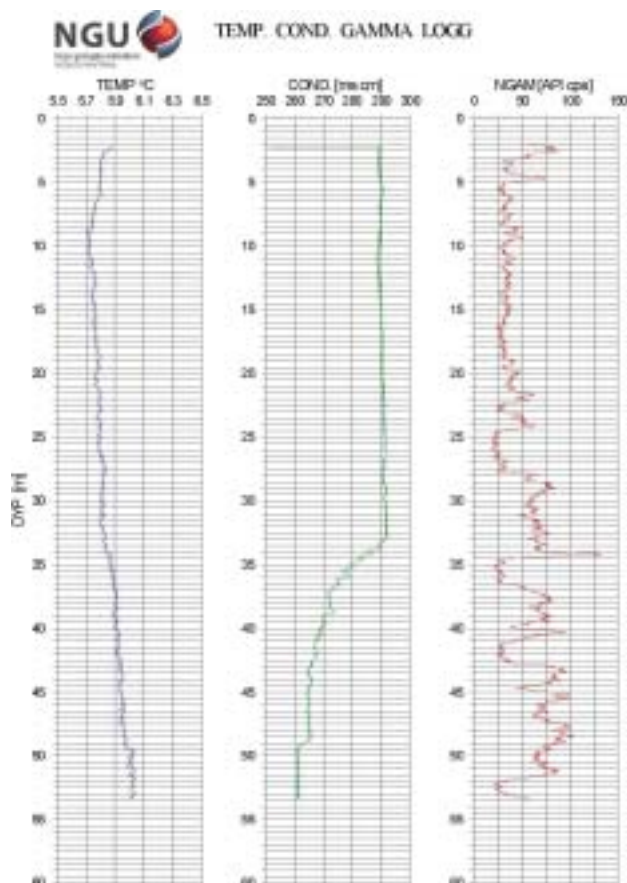
LOGGING TEMPERATUR, ELEKTRISK LEDNINGSEVNE, NATURLIG GAMMA.

Måling av vanntemperatur, vannets elektriske ledningsevne og naturlig gamma i borehull kan gi opplysninger om fjellets oppsprekking og om vanninnstrømning i borehullet. I grunnvarme- sammenheng er det viktig å vite temperaturgradienten mot dypet for å bergene en brønns varme- potensial. Miljøvennlig grunnvarme benyttes stadig mer til oppvarming både i private og større offentlige bygninger. Gammastråling gir geologisk informasjon. Temperatur, ledningsevne og gammastråling logges med en og samme sonde med en loggehastighet på 3 m/min.

Temperatursensoren produserer en elektrisk strøm som er proporsjonal med temperaturen og kan måle temperaturer i området 0 – 70 °C. Ledningsevnen i vannet måles ved å måle strømmen i en vannfylt celle. Strømstyrken er avhengig av ledningsevnen og det kan måles i området 50 – 50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Naturlig gammastråling måles i counts per second (cps), API standard. API er en felles internasjonal standard som sonden er kalibrert etter, slik at målinger med ulike typer og størrelser kan sammenlignes. Krystallen som brukes er NaI, 50 x 25 mm.

Forandring i vanntemperatur og elektrisk ledningsevne indikerer innstrømning av vann i hullet med andre egenskaper enn i brønnen forøvrig. Dette kan igjen tyde på åpne sprekker. Temperaturgradienten mot dypet har betydning for grunnvarmekapasiteten. Økt ledningsevne betyr økt ioneinnhold i vannet. Lavere ledningsevne kan tyde på innstrømning av overflatevann, da slikt vann vanligvis har noe lavere ioneinnhold enn vann som har oppholdt seg lenge i fjellet. Kravet til drikkevann er en ledningsevne mindre enn 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Figur 1 viser eksempel på logg.

Med gammalogg kartlegges den naturlige gammastrålingen (totalstråling) langs borehullet. Forandringer i gammastråling er knyttet til endringer i geologien og den mineralogiske sammensetningen i bergartene. Det er i hovedsak elementene kalium, uran og thorium som gir gammastråling. Mest vanlig er kalium som finnes i feltspat. Feltspat (kalifeltspat) er et mineral som finnes i de vanligste bergartene. Sandstein, f. eks., har liten gammastråling (mye kvarts), mens noen granitter har sterkere stråling da de inneholder feltspat og i enkelte tilfeller uran og thorium. Alunskifer har høy stråling da den inneholder noe uran.



Figur 1. Temperatur-, ledningsevne- og gammalogg fra borehull. Litt høyere temperatur dagnært skyldes påvirkning fra overflatetemperaturen. En svak økning ved 33 m kan skyldes innstrømning av vann med høyere temperatur. En tydelig nedgang i den elektriske ledningsevnen ved samme dyp kan tyde på det samme. Mest sannsynlig er det overflatevann som strømmer inn gjennom en åpen sprekke. Gammaloggen viser stor variasjon fra 20 m. Dette skyldes trolig varierende feltspatinnhold (kalium)

VEILEDNING FOR KJØRING AV OPTISK LOGG VED BRUK AV PROGRAMMET "OPTV.exe"

Ved å kjøre **Replay** i dette programmet kan en se en kontinuerlig logg (bilde) av borehullsveggen fra topp til bunn. Programmet kan kjøres direkte fra CD eller det kan kopieres inn på hard disken og kjøres derfra. Datafilene må kopieres over på hard disk (se senere).

Gå inn i **Utforsker** og klikk på symbolet for CD-rom. Klikk på katalogen **Sia**. En får da opp en liste over alle filer pluss katalogen **directx6**.

Hvis operativsystemet er Windows NT, får en problemer med å lukke programmet. Derfor må Windows NT brukere opprette en katalog som heter **Windows** direkte på C-disken (eller der operativsystemet ligger, vanligvis C). Windows 95-, 98-brukere trenger ikke tenke på dette.

Før oppstart kontroller at **directx6** er installert på PC. Ved å åpne katalogen **directx6** som ligger på CD'en får en opp en fil som heter **dx6core.exe**. Dobbeltklikk på denne filen og installering skjer automatisk, følg veiledningen og svar "yes".

Kontroller også at . (punktum) er satt opp som desimaltegn. Dette gjøres ved å klikke på **START – Innstillinger – kontrollpanel**. Klikk på **Regionale innstillinger** (settings) og deretter på **Tall** (number). I den øverste kolonnen – desimaltegn – må det stå . (punktum). Ofte kan det stå , (komma) her.

Både programfiler og datafil(er) ligger på CD'en. Datafilene har ending **.otv** og **.hed** (headerfil). Det går ikke an å lese en datafil direkte fra CD. Datafilene må derfor kopieres over på hard-disk og fjerning av skrivebeskyttelse. Dette gjøres på følgende måte. Kopier datafila (.otv og .hed) til egnet katalog på hard-disken. Kopier gjerne alt innhold på CD (program-filer) over på harddisk. Klikk deretter med høyre musknapp på .otv fila. Klikk på **Egenskaper** (properties) nederst på listen som kommer opp. Klikk deretter på **Generelt** . Nederst på det bilde som kommer opp står **Attributter**. Fjern haken som står i ruten ut for **skrivebeskytter** (read only) og deretter **ok**.

Nå er det klart for å kjøre programmet **OPTV.exe**. Dette gjøres på følgende måte. Dobbeltklikk på filen **OPTV.exe** som ligger på CD. Programmet starter (Optical Televiewer-viewer mode). Klikk på **Fil** i menyen øverst til venstre og deretter på **Replay**. Det kommer da opp en boks for åpning av filer. Bla gjennom til den filen som skal åpnes (**NB!** .otv- fil som ble kopiert fra CD). Klikk på denne filen og åpne. Det kommer da opp en boks som viser Start depth og End depth. Disse tallene viser mellom hvilke dyp det er logget. Som oftest er det topp og bunn av borehullet. Disse tallene kan endres hvis en vil se bare et utsnitt av loggen innenfor det området som er logget. Klikk på **OK**. Nå kan avspilling av loggen starte ved å klikke på startsymbolet ▶ nederst til høyre . Bildet begynner da å rulle over skjermen. Bildet stoppes ved å klikke på pausesymbolet II . Start ved å klikke ▶ igjen. Loggen stoppes ved å klikke stoppsymbolet ■ . Nå kan en enten ta inn en ny fil ved å klikke på **replay** eller gå ut av programmet ved å klikke på **Exit**.

RGLDIPv5.2 DIP DATA INTERPRETATION: FRACTURE ANALYSIS

borehole 200 m
zone from 10.000 to 196.000 m
31 Jan 2003

Data is classed into 1 types
5 OPTV_dips

Quality cut-off level: *

Mean well deviation: 9.5deg to N278.8

5 small-circles defined

	SEARCH AREA				MEAN DIP		n	f
	azim	pl	cone	strike	dip			
1	306.0	80.8	36.6	52	6	288	1.57	
2	159.3	27.8	31.6	249	63	42	0.76	
3	226.8	26.6	29.2	315	65	30	0.35	
4	307.4	25.5	21.0	39	62	16	0.14	
5	78.4	30.1	27.5	173	58	9	0.13	

Total number of data = 385
Number of data unaccounted for = 30

ZONE No.	DEVIATION		DEPTHS m		No. DATA	MEAN DIPS and FREQUENCIES																			
	Dev	Azim	TOP	BASE		Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f				
1	15.5	211.7	10.23	17.93	29	135	4	7	0.97	242	70	6	1.72	327	82	10	3.51	0	0	0	0.00	182	56	1	0.31
2	14.5	221.6	17.93	33.02	10	0	0	0	0.00	253	67	6	0.80	325	55	1	0.09	0	0	0	0.00	181	59	2	0.38
3	11.1	241.1	33.02	48.41	15	211	13	4	0.28	258	62	5	0.63	288	69	1	0.14	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
4	10.1	256.1	48.41	60.11	36	50	8	32	2.78	257	63	3	0.57	0	0	0	0.00	46	74	1	0.24	0	0	0	0.00
5	10.2	269.7	60.11	70.58	30	78	6	22	2.14	253	66	4	1.08	311	81	1	0.35	0	0	0	0.00	159	66	2	0.78
6	11.3	285.1	70.58	81.05	67	43	15	51	4.91	243	60	10	2.52	301	43	3	0.38	26	55	1	0.13	0	0	0	0.00
7	10.7	292.3	81.05	109.37	36	57	14	16	0.57	223	55	2	0.17	320	43	2	0.09	39	68	9	0.59	0	0	0	0.00
8	7.4	307.4	109.37	118.61	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
9	8.0	309.7	118.61	122.92	8	354	12	8	1.88	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
10	8.6	309.5	122.92	134.00	77	91	3	64	5.82	0	0	0	0.00	302	58	3	0.54	41	52	4	0.50	167	50	2	0.32
11	10.2	302.8	134.00	143.86	19	113	7	14	1.45	249	36	1	0.14	310	46	3	0.44	33	51	1	0.13	0	0	0	0.00
12	10.9	302.7	143.86	156.79	12	195	9	6	0.49	257	61	4	0.88	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
13	10.4	304.8	156.79	165.41	44	32	5	38	4.43	255	89	1	0.95	310	65	5	1.35	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
14	10.8	300.9	165.41	173.41	3	97	6	1	0.13	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	179	59	2	0.68
15	11.7	302.2	173.41	182.65	23	312	7	21	2.33	0	0	0	0.00	318	75	1	0.35	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
16	14.3	299.8	182.65	195.33	6	196	9	4	0.34	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00

RGLDIPv5.2 DIP DATA INTERPRETATION: FRACTURE ANALYSIS

borehole
zone from 6.000 to 60.000 m
31 Jan 2003

Data is classed into 1 types
5 OPTV_dips

Quality cut-off level: *

Mean well deviation: 14.0deg to N 93.4

4 small-circles defined

	SEARCH AREA				MEAN DIP		n	f
	azim	pl	cone	strike	dip			
1	170.0	66.5	30.6	260	20	24	0.48	
2	143.9	17.6	24.6	239	71	10	0.43	
3	273.7	47.0	23.9	7	47	14	0.52	
4	51.0	10.9	39.9	139	67	19	0.67	

Total number of data = 67
Number of data unaccounted for = 8

ZONE No.	DEVIATION		DEPTHS m		No. DATA	MEAN DIPS and FREQUENCIES																			
	Dev	Azim	TOP	BASE		Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f	Str	Dip	n	f				
1	15.0	91.0	6.00	17.55	52	251	16	19	1.73	244	80	3	0.92	10	48	9	1.70	137	68	16	2.58	0	0	0	0.00
2	14.9	95.7	17.55	27.55	6	248	43	1	0.13	0	0	0	0.00	19	46	2	0.41	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
3	14.0	94.7	27.55	40.49	2	267	48	1	0.11	223	71	1	0.16	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
4	12.9	93.3	40.49	50.34	4	0	0	0	0.00	237	66	3	0.58	22	29	1	0.13	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
5	13.1	92.1	50.34	59.60	11	288	37	3	0.44	239	68	3	0.67	342	55	2	0.57	153	65	3	0.55	0	0	0	0.00

Termisk Responstest -att ta reda på energibrunns effektivitet

Hur många meter borrhål krävs för att klara ett visst energibehov med en viss effektvariation för att klara rimliga driftsvillkor (teknisk funktion och ekonomi)? Vilka mått finns på en energibrunns effektivitet? Som diskuterats i tidigare artiklar (E&M 1/2000, 2/2000) beror effektiviteten hos energibrunnen på ett flertal faktorer, dels hos själva marken och dels hos energibrunns konstruktion och driftförhållanden. Emellertid är de förhållanden som bestäms av projektören enkla att ta reda på (t ex temperaturnivåer, driftförhållanden, kollektortyp m m) medan t ex markens egenskaper utmed hela borrhålsdjupet är betydligt svårare att bestämma.

Bestämning av markens termiska egenskaper

Markens förmåga att transportera värme är mycket betydelsefull för energibrunns effektivitet. Värmetransporten i berggrunden är i huvudsak beroende av bergartstypens mineralsammansättning och struktur, men även av förekomsten av sprickor och spricksystem, grundvatten och grundvattensrörelse. Vilken bergart eller jordart som förekommer inom ett visst område kan man ta reda på genom att studera geologiska kartor eller besöka platsen. När bergarten är bestämd finns tabeller att tillgå för statistiska uppgifter om de olika bergarternas termiska egenskaper. Värmeledningsförmågan för en viss bergartstyp varierar inom ett visst intervall. I Sverige är de vanligaste bergarterna graniter och gnejser, och för dessa bergarter är värmeledningsförmågan angivet i ett intervall som varierar med ca 30% kring medelvärdet, till största delen beroende av kvartsinnehåll. Berggrundens värmetransporterande förmåga (effektiva värmeledning) påverkas även av grundvattenrörelser och vattenmättnad.

I dimensioneringssammanhang används vanligtvis medelvärdet för värmeledningsförmågan hos den aktuella bergarten. För små bergvärmeanläggningar är det i de flesta fall tillräckligt noggrant att använda de tabellerade värdena för den aktuella bergarten i området, men för större anläggningar är det viktigare med en exaktare bestämning av de lokala termiska egenskaperna i berggrunden.

In-situ mätningar = Termisk Responstest

Med en termisk responstest kan man med hjälp av ett testborrhål försedd med aktuell kollektortyp, bestämma markens och energibrunns effektivitet på den aktuella platsen för energibrunnsanläggningen. Testborrhålet får sedan ingå i den färdiga anläggningen. Mätningen går principiellt till så att man kopplar samman energibrunns kollektorslangar med en slinga bestående av en cirkulationspump, en elektrisk värmare och temperaturgivare för ingående och utgående temperatur till borrhålet. Värmebäraren i slangarna får cirkulera i minst 50 timmar medan en datalogger registrerar temperaturförändringen hos värmebäraren, samt den tillförda värmeeffekten. Utifrån dessa data - den termiska responsen - kan man med hjälp av simuleringsmodeller bestämma berggrundens effektiva värmeledning, samt temperaturförlusterna i borrhålet.

Den effektiva värmeledningen i berggrunden är kan uppskattas från hur temperaturen i borrhålet ökar med tiden för en konstant tillförd värmeeffekt. Ju brantare temperaturökning, desto sämre värmeledning. Temperaturförlusterna mellan värmebärare och borrhålsvägg kan bestämmas utifrån temperaturnivån i borrhålet.

Termisk responstest för energibrunnar är en relativt ny teknik. Den föreslogs för första gången vid en energikonferens i Stockholm 1983 av forskaren Palne Mogensen och användes vid några tillfällen på färdigkonstruerade flerbrunnssystem för att bekräfta simuleringsteorier.

Men tekniken tog ordentlig fart först 1995-96 då de första mobila apparaterna för termisk responstest konstruerades i vid Luleå tekniska universitet i Sverige och vid Oklahoma State University i USA. Sedan dess har tekniken spritt sig till de flesta länder som nyttjar bergborrade borrhålssystem för uttag och lagring av värme och kyla. Svensktillverkade responstestapparater finns i Sverige, Norge och Turkiet. I Tyskland, Holland, England, Frankrike och Schweiz finns europeiska enheter, och i Kanada och USA finns idag ett antal responstestutrustningar som används i stor skala både kommersiellt och i forskning.

TED

Den svenska responstestutrustningen går populärt under namnet TED, och dimensionerades i ett studentprojekt vid avdelningen för Vattenteknik, Luleå tekniska universitet, hösten 1995. Efter dimensioneringen fortsatte projektet i form av ett examensarbete och byggdes av IdéArktica i Övertorneå. Apparaten testades och utvärderades under våren 1996, och resultaten sammanfattades i examensarbetet "TED - A mobile equipment for thermal response test" av Eklöf & Gehlin, hösten 1996. Examensarbetet övergick sedan i ett doktorandarbete och resulterade i en licentiatavhandling "Thermal response test - In Situ measurement of thermal properties in hard rock", 1998. Doktorandprojektet är nu inne i sitt slutskede och en doktorsavhandling ska bli klar under 2002. Avhandlingen behandlar olika typer av mätutrustningar, analysmetoder och inverkan av grundvattenflöde i sprickor på responstest och energibrunnar i drift.

Sedan 1996 har ett drygt trettiotal responstestmätningar utförts i Sverige. Hälften av dessa har utförts i forskningssyfte på testborrhål vid Luleå tekniska universitet, och övriga mätningar har gjorts vid kommersiella borrhål på olika platser i Sverige, huvudsakligen borrhålsbaserade direktkylanläggningar i syd- och mellansverige.

Inte för enskilda brunnar

När det gäller enskilda energibrunnar för till exempel småhusuppvärmning är det vanligtvis billigare att dimensionera för ett konservativt värde på berggrundens värmeledningsförmåga och borra några meter extra för att vara på den säkra sidan. Ska man däremot borra många hål till ett större energibrunnsystem blir det rimligt ur kvalitetssäkringssynpunkt att göra en in-situ mätning för att noggrannare bestämma den effektiva värmeledningen hos berggrunden på den specifika platsen. Ju fler borrhål som ingår i systemet, desto mer värdefullt är det att utföra termiska responstest på platsen. Att borra fler borrhål än man behöver kostar pengar, och att borra för få

hål än vad som behövs, för att man antagit alltför goda termiska förhållanden, kan bli mycket dyrt eftersom det äventyrar systemets funktion.

Termisk responstest kan även användas för att testa temperaturförlusterna i nya kollektortyper, och för att kontrollera befintliga energibrunnar om en tvist skulle uppstå. Exempel på framtida frågeställningar där termisk responstest som mätmetod kan komma till nytta, är hur man ska hantera borrhål med låg grundvattenyta och hur effektiviteten hos borrhål påverkas av att det "ger mycket vatten" vid borring.

Tekn. Lic Signhild Gehlin

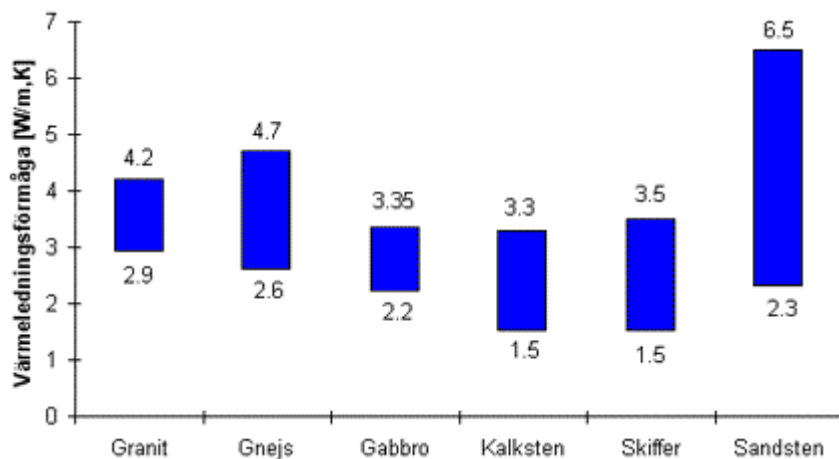
Avd. för Vattenteknik, Luleå tekniska universitet
Gehlin@sb.luth.se

Docent Göran Hellström

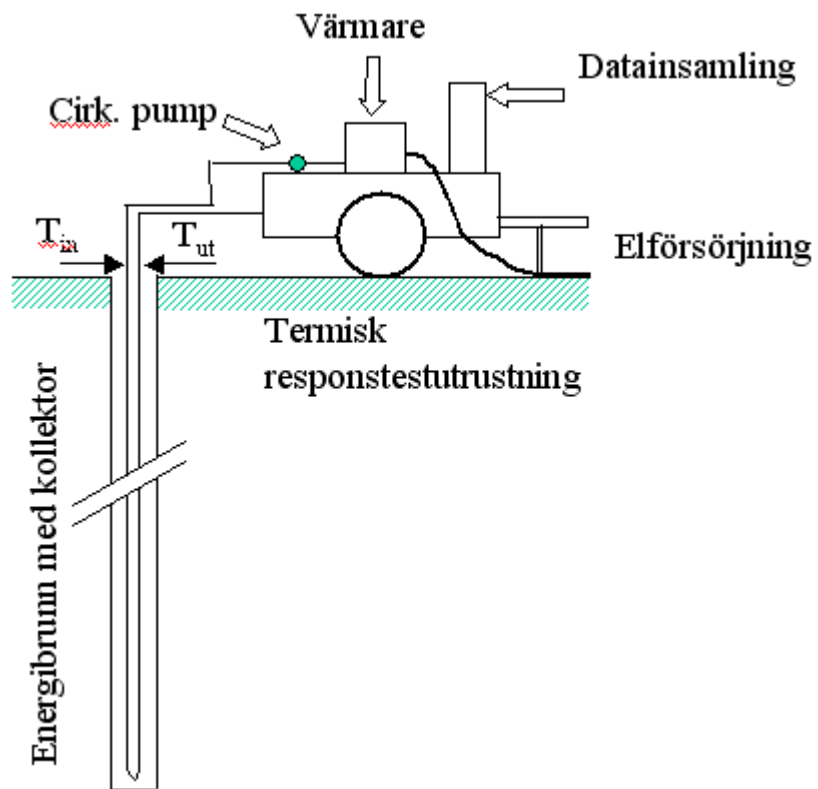
Avd. för Matematisk Fysik, Lunds tekniska högskola
Goran.hellstrom@matfys.lth.se

Mer information om termisk responstest:

- Eklöf C, Gehlin S (1996). TED - A Mobile Equipment for Thermal Response Test (testing and evaluation). Examensarbete 1996:198 E. Avd. för Vattenteknik, Luleå tekniska universitet. pp. 61.
http://epubl.luth.se/avslutade/0349-6023/1996/198/HLU_EX_1996198E_SE.pdf
- Gehlin S (1998). Thermal Response Test - In-situ measurements of thermal properties in hard rock. Licentiatavhandling 1998:37. Luleå Tekniska universitet.
<http://epubl.luth.se/1402-1757/1998/37/LTU-LIC-9837-SE.pdf>
- Länkar till termisk responstest: <http://www.sb.luth.se/~gehlin/ted2.ht>



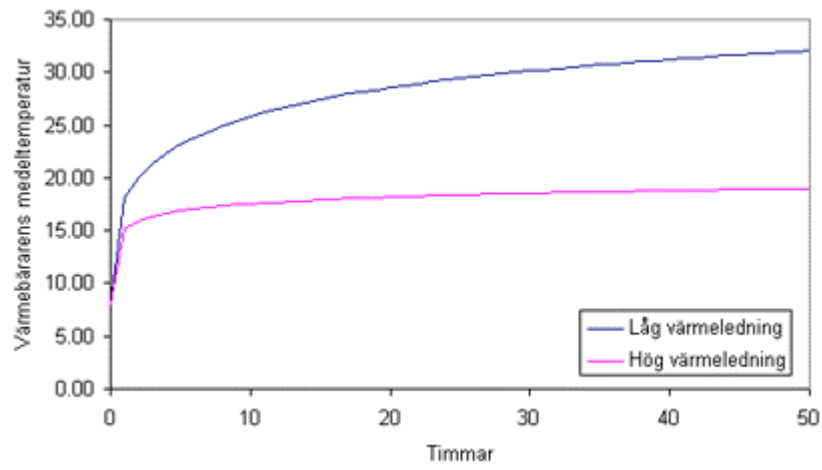
Figur 1: Värmeledningsförmåga för några vanliga bergarter i Sverige



Figur 2: Principen för en termisk responstest.



Figur 3: Termisk responstest i Sverige - TED.



Figur 4: Typisk responskurva från termisk responstestmätning med god respektive dålig värmeledning.

Artikeln publicerad i Energi & Miljö nr 3/2002

HYDRAULISKE EGENSKAPER I BERGGRUNNEN I NORGE

Teksten er en modifisert versjon av kap.3 i NGU Rapport 2003.016 Hydrauliske egenskaper i løsmasser og berggrunn i Norge sett i sammenheng med EU-direktivet om deponering av avfall, av A. Dagestad, L. Hansen og A. Braathen

- **Generelt**

Vann i berggrunnen kan transporteres gjennom porer hvor væskestrømmen kontrolleres av berggrunnens porøsitet eller sprekker hvor strømming foregår i komplekse nettverk av sprekker og kanaler. Fordelingen av de to strømmingstyper i berggrunn i Norge er:

- *Porøsitetkontrollerte* strømming – skjer hovedsakelig i sedimentære og vulkanske bergarter med primær porøsitet. Porøse bergarter er lite utbredt på land i Norge, og utgjør kun ca. 2%
- *Sprekkekontrollerte* strømming – skjer hovedsakelig i krystalline metamorfe/omvandlede bergarter og dypbergarter uten primær porøsitet. De utgjør over 98 % av norsk berggrunn.

Ut fra denne fordelingen er det fokusert på sprekk kontrollert væskestrømming i den videre beskrivelsen av berggrunnens hydrauliske egenskaper i Norge. Dette gjør samtidig oppgaven mer komplisert fordi væskestrømming i oppsprukket fast fjell er beheftet med langt større usikkerhetsfaktorer enn vannstrømming i porøse medier. Det teoretiske grunnlaget og det matematiske formelverk som benyttes for å karakterisere væskestrøm i porøse medier vil ikke kunne benyttes på væskestrøm i oppsprukket fjell uten at det innføres et sett av forutsetninger og betydelige forenklinger.

Undersøkelser og observasjoner av berggrunnen i Norge viser at oppsprekningen er langt fra homogen eller isotrop. Den svært variable romlige oppsprekkingsfrekvensen som observeres er styrt bla. av lagdeling i fjellet samt nåværende og tidligere tektoniske spenningsforhold i berggrunnen med forkastninger og knusningssoner som de mest fremtredende fenomener. Væskestrømmen langs antatt like sprekkplan, eller langs et og samme sprekkplan, kan også være svært variabel. Sprekkeåpningen kan variere, som følge av uregelmessig oppsprekking, og sprekkplanet kan være helt eller delvis gjentettet som følge av leirfyllinger eller utfelling av mineraler på sprekkplanet. Samlet påvirker disse forholdene i betydelig grad berggrunnens hydrauliske egenskaper slik at væskestrøm i oppsprukket fjell må betraktes som væskestrøm langs foretrukne strømningsveier på et fåtall av fjellets totale antall sprekker.

Hydraulic conductivity [m · s ⁻¹]	Rocktype		
	unconsolidated rocks	hard sedimentary rocks	igneous and metamorphic rocks
1		<i>karstified</i>	
10 ⁻¹	gravel		lava
10 ⁻²	<i>coarse</i>		
10 ⁻³	sand	limestone	
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵	<i>fine</i> loess		<i>fissured</i>
10 ⁻⁶		<i>fissured</i>	
10 ⁻⁷			
10 ⁻⁸	moraine,	<i>compact</i>	sandstone
10 ⁻⁹	clayey drift deposits		basalt
10 ⁻¹⁰			granite, gneiss metamorphic rocks
10 ⁻¹¹		slate	
10 ⁻¹²		shale	
10 ⁻¹³			<i>compact</i>

Figur 3-1. Variasjon i hydraulisk konduktivitet for ulike løsmassetyper samt sedimentære og krystalline bergartstyper . Berggrunnen i Lørenskog er dioritt som er en metamorphic rock (Stuckmeier og Margat 1995).

For sammenlikningens del er det vist en sammenstilling mellom konduktivitet i fjell og løsmasser i figur 3-1. Det er i denne sammenstilling viktig å ha forståelse for de overnevnte forutsetninger og forenklinger som ligger bak estimeringen av berggrunnens konduktivitet i figuren.

- **Hydrauliske egenskaper og vanngiverevne i berggrunnen i Norge**

For å kunne si noe generelt om hydrauliske egenskaper i heterogen berggrunn som den vi finner i Norge, kreves det et stort datagrunnlag for å estimere statistisk signifikante gjennomsnittsverdier. Ved NGU har vi tre typer nasjonale (regionale) datasett som kan benyttes i vurderinger rundt væskestrømning i berggrunnen:

- NGU's *Berggrunnsdatabase*, som beskriver utbredelsen av forskjellige bergarter.
- NGU's *Strukturdatabase*, som beskriver lineære svakhetssoner i berggrunnen hovedsaklig betinget av intens oppsprekning.
- NGU's *Brønndatabase*, med informasjon fra ca. 19.000 brønner som er boret i fjell.

Statistiske analyser av NGUs Brønndatabase sammenholdt med de to andre databasene (se Morland 1997, for metoder og begrensninger), gir en god regional oversikt over vanngiverevnen i Norges berggrunn. Basert på et utvalg på over 12.000 fjellbrønner i Brønndatabasen er den typiske vanngiverevnen (medianverdi) i disse brønner ca. 600 l/t. Med et gjennomsnittlig

brønndyp på 56 meter gir dette en gjennomsnittlig normalisert vanngiverevne Q_n på ca. 12 liter per time per meter borehull (Morland 1997). For å kunne omgjøre normalisert gjennomsnittlig vanngiverevne (Q_n = liter/time per meter borehull) til gjennomsnittlig konduktivitet i berggrunnen (dvs liter/sekund per kvadratmeter brønnvegg), må det innføres en del forutsetninger og forenklinger:

- Først må det forsettes at brønnene er vannførende i hele brønnens dyp
- Den hydrauliske gradient $dh/dl = 1$ under kapasitetstesten av brønnene (dh/dl = helling på grunnvannspeilet inn mot brønnen)
- Gjennomsnittlig brønndiameter på 130 mm på utvalget av brønner.

Ut fra disse forutsetningene og datautvalget fra Brønndatabasen gir dette en gjennomsnittlig konduktivitet for norsk berggrunn på **$K_m = 8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$** .

Ved siden av usikkerhetene ved å innføre de overnevnte forutsetninger er det også viktig å trekke fram andre begrensninger og usikkerheter ved å benytte data fra Brønndatabasen for å estimere gjennomsnittlig konduktivitet i norsk berggrunn:

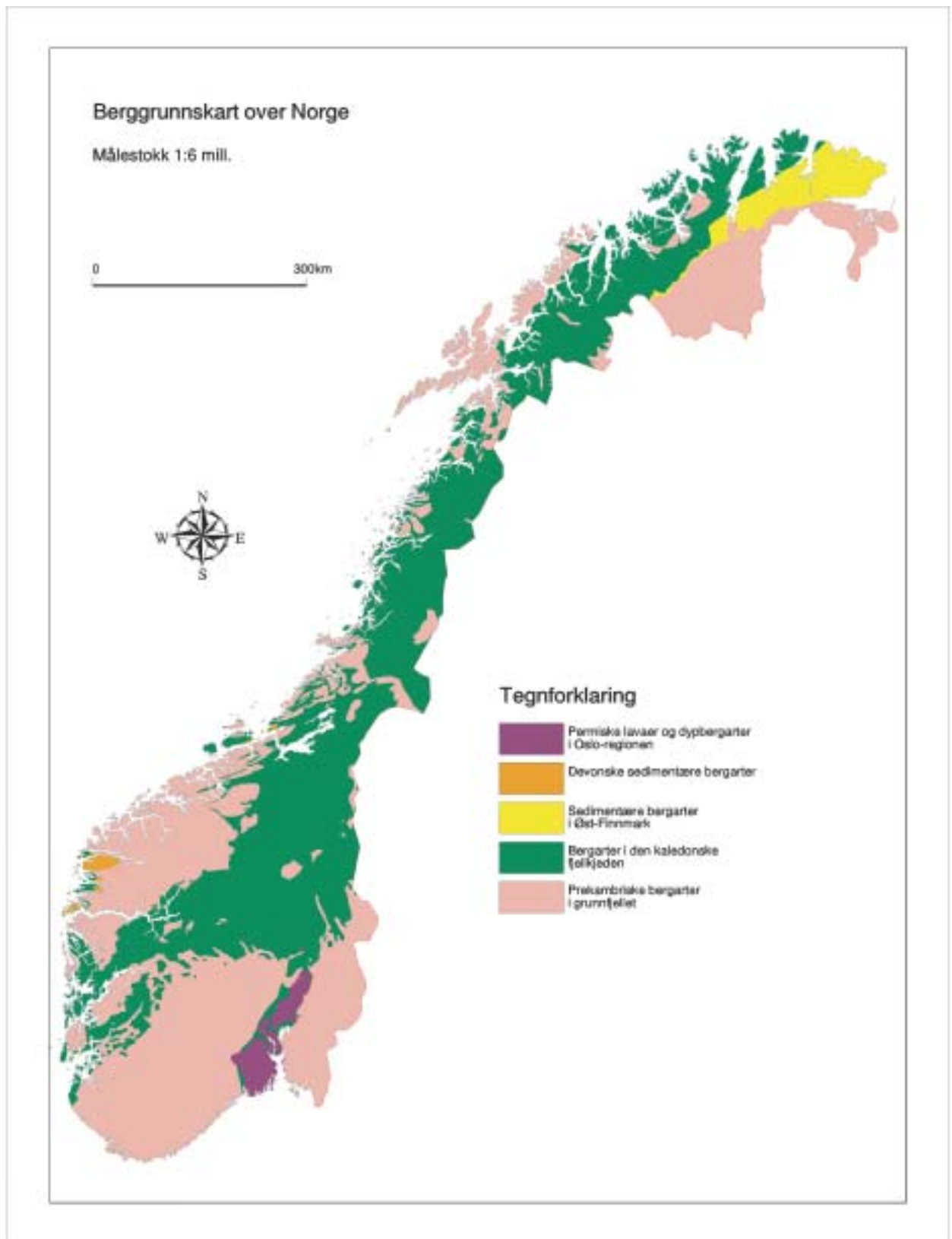
1. Data i Brønndatabasen relaterer seg til brønner som er forsøkt plassert optimalt i forhold til svakhetssoner og fjellets oppsprekking for å oppnå høyest mulig vanngiverevne i brønnene. Dette vil forventningsvis gi en høyere gjennomsnittlig vanngiverevne og konduktivitet for berggrunnen enn om brønnene hadde vært boret vilkårlig.
2. Brønnene er etablert for uttak og ikke infiltrasjon av grunnvann. Det vil si data som er benyttet til å beregne fjellets hydrauliske egenskaper relaterer seg til en væskestrøm som hovedsakelig foregår i den vannmettede sonen, ofte flere 10-talls meter under overflaten der sprekkefrekvensen og vannføringsevnen normalt er betydelig lavere enn i den dagnære umettete sonen. Ved ikke å innkalkulere den dagnære umettete sonens vannførende kapasitet i de statistiske bergningene vil dette gi en for lav gjennomsnittlig konduktivitet i berggrunnen i Norge.
3. Det er også i beregningene forutsatt at brønnen er vannførende i hele brønnens lengde. Dette er imidlertid en betydelig forenkling da dypet til grunnvannet i brønnene kan variere betydelig avhengig av topografiske forhold og grunnvannsuttak. Ved å forsette at brønnene er vannførende i hele brønnens lengde vil i de statistiske bergningene gi en for lav gjennomsnittlig konduktivitet i berggrunnen i Norge.

- **Hydrauliske egenskaper i ulike bergartstyper**

Selv om væskestrøm i oppsprukket fjell må betraktes som en til dels uforutsigbar strømming langs et fåtall foretrukne strømningsveier, har sammenstilling av de tre tidligere nevnte store nasjonale datasett vist at det statistisk sett kan være store forskjeller i hydrauliske egenskaper mellom ulike bergartstyper. De samme datasett viser også at det innen samme bergartstype er store variasjoner i hydrauliske egenskaper. Med utgangspunkt i den regionale fordelingen av

bergarter som utgjør fastlands-Norges berggrunn (se berggrunnskart på www.ngu.no; Sigmond et al. 1984), kan Norge deles inn i regioner med bergartstyper som har visse fellestrekk med hensyn til hydrauliske egenskaper (Figur 3-2, 3-3 og 3-3). Følgende hovedenheter hører naturlig sammen (Morland 1997):

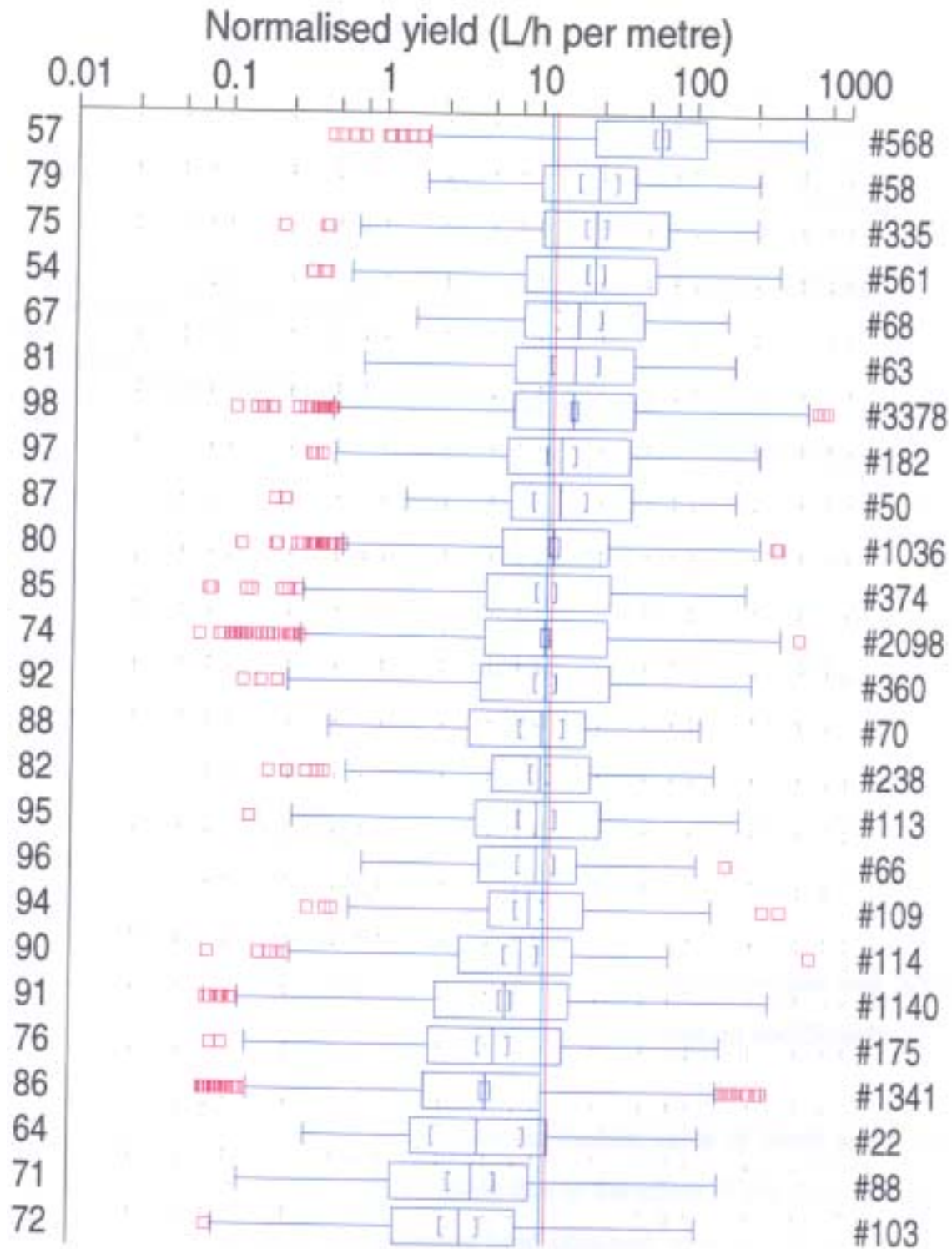
1. Prekambriske bergarter, hovedsakelig gneiser. Disse har regional utbredelsen.
 - Utgjør 68,5% av berggrunnen
 - Bergartskode 87, 98, 97, 92, 88, 95, 90, 96 og 94 i figur 3-3
 - Gjennomsnittlige normaliserte verdier på vanngiverevne som er typiske for norsk berggrunn, med $Q_n = 9 - 13$ l/t per meter borehull som gir $K = 6 - 9 \times 10^{-6}$ m/s.
2. Bergarter kraftig påvirket av den kaledonske fjellkjededannelsen. Hovedtyngden består av omvandlede kambro-siluriske sedimentære og vulkanske bergarter. De har en regional utbredelse.
 - Utgjør 29,2% av berggrunnen
 - Bergartskode 75, 67, 80, 85, 74, 82, 91, 76, 86, 71 og 72 i figur 3-3
 - Gjennomsnittlige normaliserte verdier på vanngiverevne varierer en god del, med høye verdier rundt $Q_n = 17$ l/t per meter borehull ($K = 1 \times 10^{-5}$ m/s) for en del sandsteiner og kalksteiner, og lav $Q_n = 4$ l/t per meter borehull ($K = 2 \times 10^{-6}$ m/s) for grønnsteiner og enkelte dypbergarter.
3. Devonske sedimentære bergarter, som er omvandlet. Disse opptrer kun nord for Bergen og lokalt langs kysten av Nordvestlandet.
 - Utgjør kun 0,4% av berggrunnen
 - Bergartskode 64 i figur 3-3
 - Har meget lave verdier på vanngiverevne, rundt 4 l/t per meter borehull ($K = 2 \times 10^{-6}$ m/s).
4. Permiske vulkanske bergarter, samt noen lite omvandlede sedimentære bergarter, som i mange tilfeller har primær porøsitet. Disse finnes hovedsaklig i Oslo-regionen samt i Øst-Finnmark på Varanger-halvøya.
 - Utgjør totalt 1,9% av berggrunnsarealet
 - Bergartskode 79 i figur 3-3
 - Har svært høy vanngiverevne med gjennomsnittlige verdier opp mot $Q_n = 60$ l/t per meter borehull ($K = 4 \times 10^{-5}$ m/s).



Figur 3-2. Berggrunnsprovinser i Norge

Rock-type	Definition	Number of boreholes	Median yield	Median depth	Median normalised yield
57	Permian volcanic rocks, with subordinate sedimentary rocks (Oslo Region)	568	2500	45	58.3
79	Upper Precambrian quartz sandstone	58	1020	50	23.2
75	Cambro-Silurian limestone and marble	335	1000	45	22.5
54	Permian plutonic rocks (Oslo Region)	561	1000	50.5	22.4
67	Upper Silurian sandstone	68	1000	63.5	17.6
87	Precambrian granite to tonalite	50	800	61	13.8
98	Precambrian gneiss, migmatite, foliated granite, amphibolite	3378	750	48	16.7
81	Upper Precambrian limestone, shale	63	700	41	16.8
97	Precambrian metarhyolite, metarhyodacite	182	700	54.5	14.0
80	Upper Precambrian sandstone, shale, conglomerate	1036	600	50	12.7
85	Precambrian rocks of different origin in Caledonian nappes	374	600	57	11.4
74	Cambro-Silurian meta-sediments of the Caledonian mountain chain and the Oslo Region	2098	600	57	11.4
82	Upper Precambrian metasandstone, mainly meta-arkose and quartz schist	238	600	61	10.7
92	Precambrian autochthonous granite to tonalite	360	590	53	11.4
88	Precambrian amphibolite, gneiss	70	575	68	10.9
95	Precambrian metasandstone, mica schist, conglomerate, supracrustal gneisses	113	550	58	10.3
90	Precambrian metamorphosed sedimentary and volcanic rocks, gneiss	114	525	73.5	8.3
96	Precambrian metabasalt, meta-andesite, amphibolite	66	500	67.5	10.3
94	Precambrian autochthonous gabbro, amphibolite, ultramafic rocks	109	420	55.5	9.4
91	Precambrian gneiss, migmatite, foliated granite, amphibolite (north-western gneiss region)	1140	420	71	6.6
76	Cambro-Silurian greenstone, greenschist, amphibolite, meta-andesite	175	360	65	5.6
86	Caledonian charnockitic to anorthositic rocks	1341	310	71	5.1
71	Caledonian granite to tonalite	88	300	78.5	4.1
64	Devonian sedimentary rocks, mainly sandstone and conglomerate	22	290	67	4.5
72	Caledonian gabbro, diorite, ultramafic rocks	103	250	80	3.5

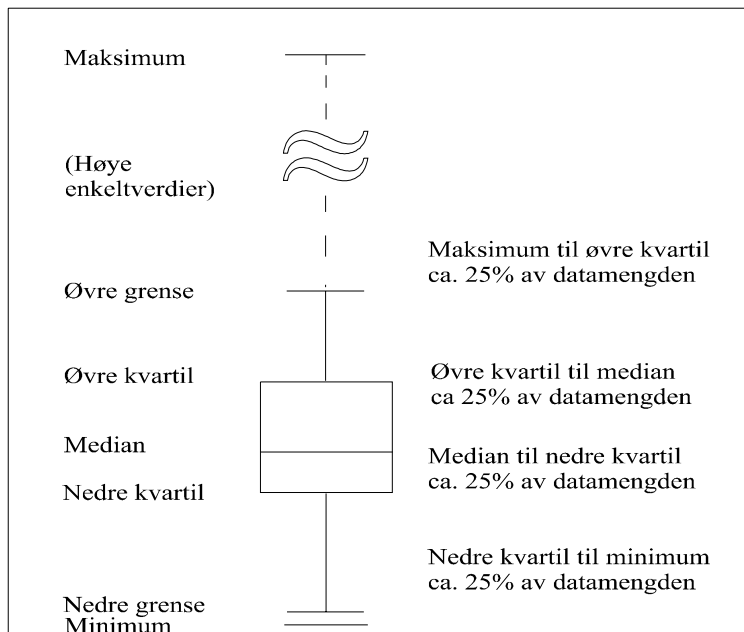
Figur 3-3. Tabell fra Morland (1997) som viser hydrogeologiske egenskaper for forskjellige bergartstyper. Raden til høyre angir gjennomsnittlig brønnyttelse i liter per time per meter boret brønn. Dioritt tilhører bergartstype 98.



Figur 3-4. Statistisk sammenstilling av brønnnyttelse (liter/time) per meter boret brønn i fjell for ulike bergartsgrupper (Morland 1997). Datasettet er det samme som i figur 3-3. Forklaring til statistisk fremstilling i boksplott er gitt i tekstboks. Merk at det er meget store variasjoner i brønnnyttelsen innen de forskjellige bergartstypene. Tallene til venstre i figuren refererer seg til bergartstype fra figur 3-3 mens tallene til høyre viser antall observasjoner som ligger til grunn for beregningene.

Boksplott

Boksplott er en fremstillingsmåte som gir en rask oversikt over dataenes fordeling og sentrale statistiske parametere. Den egner seg derfor meget godt der en ønsker å sammenligne to eller flere datasett. For at et boksplott skal kunne lages og for at meningsfulle medianverdier kan sammenlignes, kreves det minst fem verdier i datasettet.



Grafisk forklaring av boksplott

Medianen er den midterste verdien i tallsettet, dvs at halvparten av verdiene er høyere og halvparten er lavere. Medianen angis ved en strek som deler selve boksen i to.

Øvre kvartil representerer den verdien i datasettet der 75 % av verdiene er lavere og 25% er høyere. Tilsvarende er 75 % av verdiene høyere og 25% av verdiene lavere enn **nedre kvartil**. Øvre og nedre kvartil fremstilles som henholdsvis toppen og bunnen av selve boksen. Boksen inneholder dermed de midtre 50% av datasettets verdier og størrelsen på boksen gir et bilde av spredningen i disse verdiene.

Strekene (kalt "whiskers" dvs. værhår) viser spredningen av dataene utenfor boksen. I geokjemiske data er det vanlig at noen få verdier er mye høyere (eller eventuelt mye lavere) enn de midterste 50%. I boksplott settes det en øvre grense for streken når verdien plottes lengre fra øvre kvartil enn 1,5 ganger boksens lengde. Høyere verdier plottes som enkle punkt og utelukkes av og til fra grafiske fremstillinger fordi de trekker ut skalaen og reduserer oppløsningen. Tilsvarende er nedre grense for streken satt 1,5 ganger boksens lengde fra nedre kvartil, og lavere verdier enn dette vil bli plottet som enkle punkt. Antall prøver (#) som danner grunnlaget for boksplottet er angitt over boksen. Dersom antallet prøver er lavere enn 5 vil alle verdiene bli plottet som enkle streker.

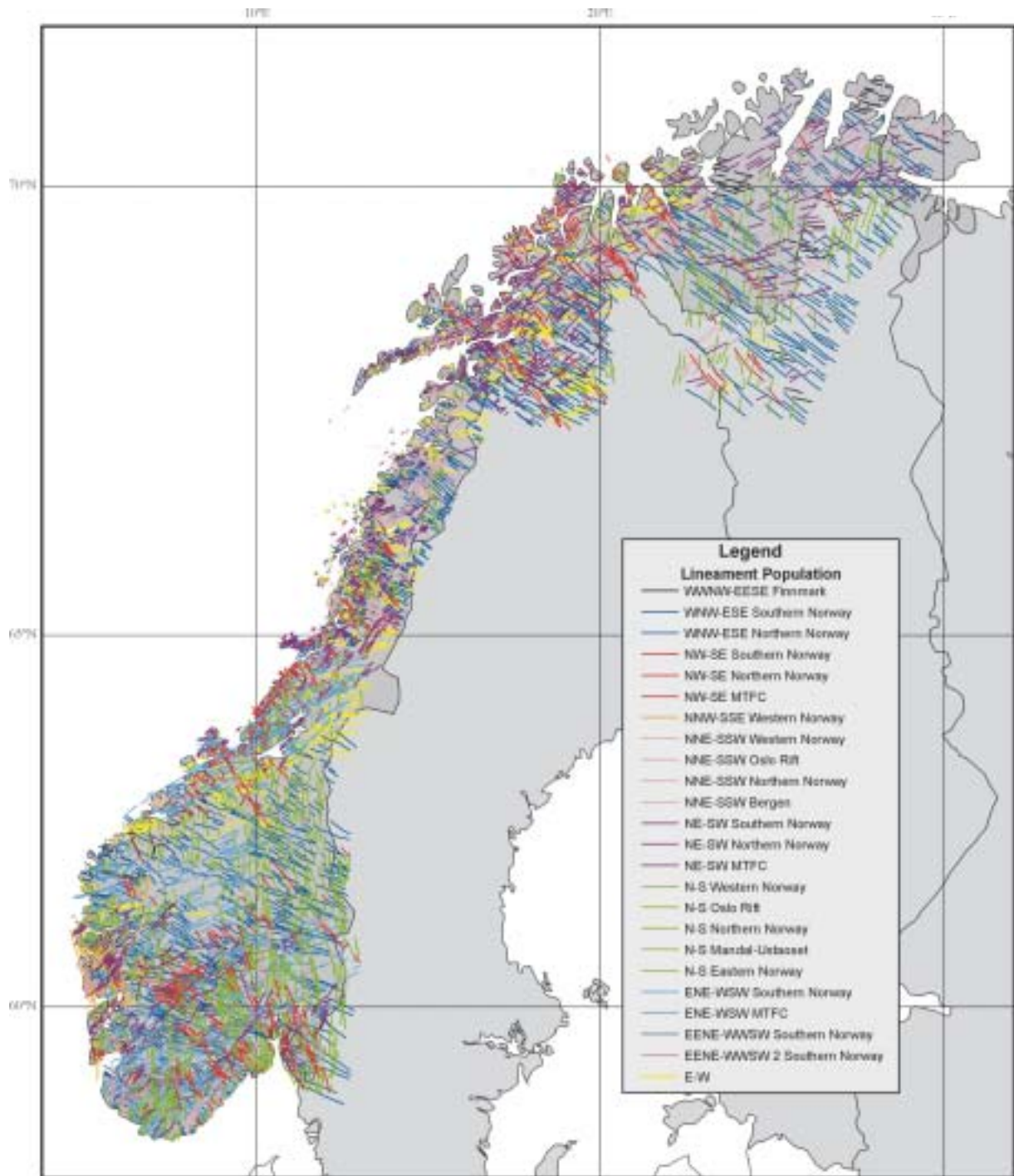
- **Andre geologiske forhold av betydning for berggrunnens hydrauliske egenskaper**

- **Sprekke-lineamenter**

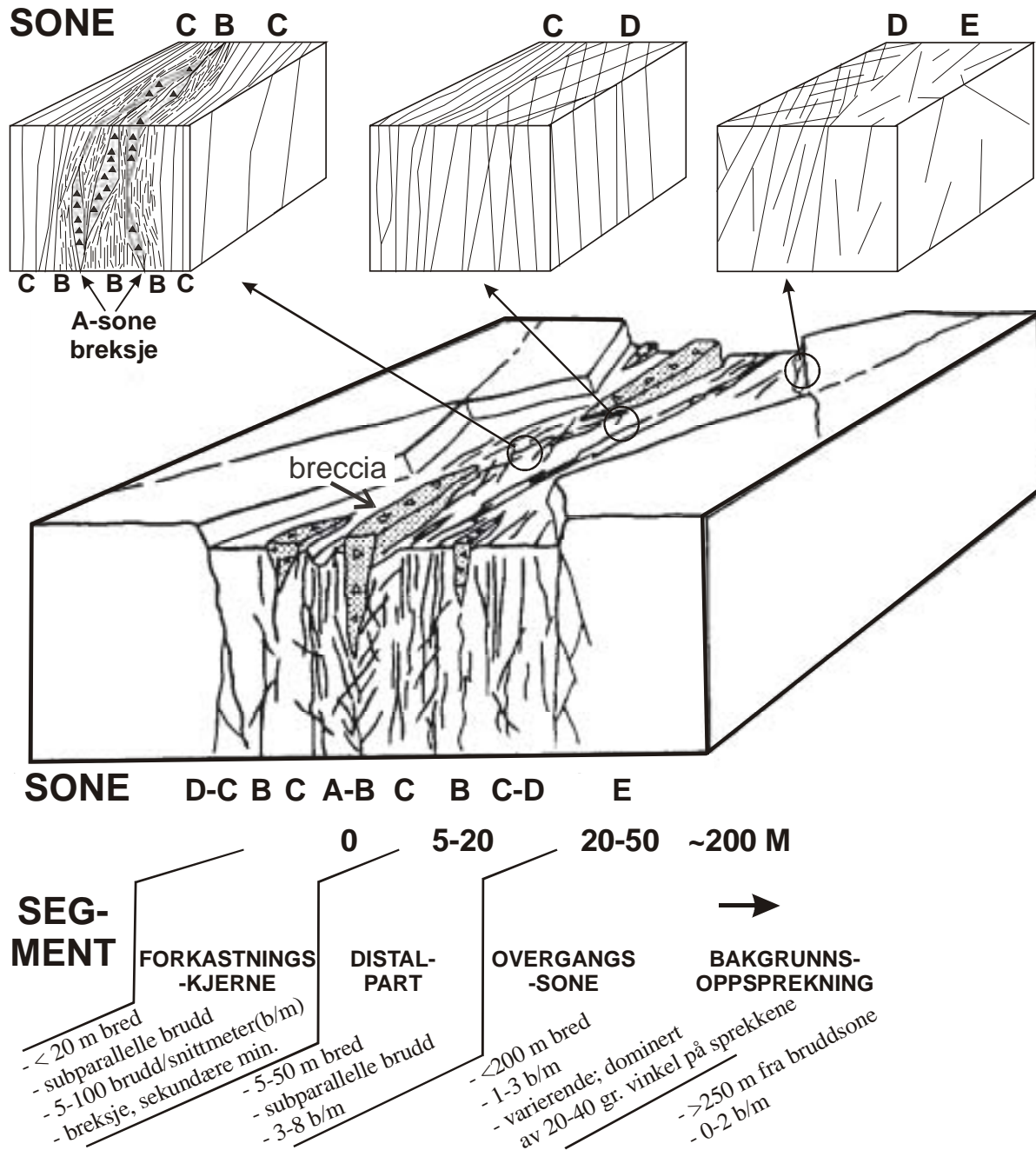
Norsk fjell er gjennomskåret av store sprekker/svakhetssoner også kalt lineamenter. Dette kan ses tydelig på satellittbilder, hvor langstrakte, nærmest snorrette daler, vassdrag og kløfter står fram som lineære soner, også kalt lineamenter (Fig. 3-5). I større detalj, på flybilder eller spesielt når en besøker området til fots, vil en se at disse topografiske forsenkningene er betinget av svakt fjell, som oftest i form av partier med meget høy grad av oppsprekning. De inneholder også linser med nedknust fjell karakterisert ved fjellbiter i en leirig grunnmasse (Fig. 3-6). Dette er soner i fjellet hvor det har vært bevegelse (forkastninger). Omkring slike soner er det vanlig å finne avtagende grad av oppsprekning, men selv i områder mellom lineamenter er fjellet svakt oppsprukket. Med andre ord; alt fjell er oppsprukket, men kun i avgrensede soner (lineamenter) finner en stor tetthet av sprekker. Ut fra den generelle fordelingen av sprekker synes det klart at det er større grunnvannsstrømning rundt lineamenter enn ellers i berggrunnen, dette fordi høy sprekketetthet gir større strømningspotensial (Figur 3-7). Enkelte meget gode brønner nær lineamenter gir ytelsesverdier opp mot $Q_n = 100$ l/t per meter borehull ($K = 70 \times 10^{-3}$), men det er langt vanligere med brønner som ligger nær gjennomsnittsverdien på $Q_n = 12$ l/t per meter borehull (Morland 1997).

- **Landhevning**

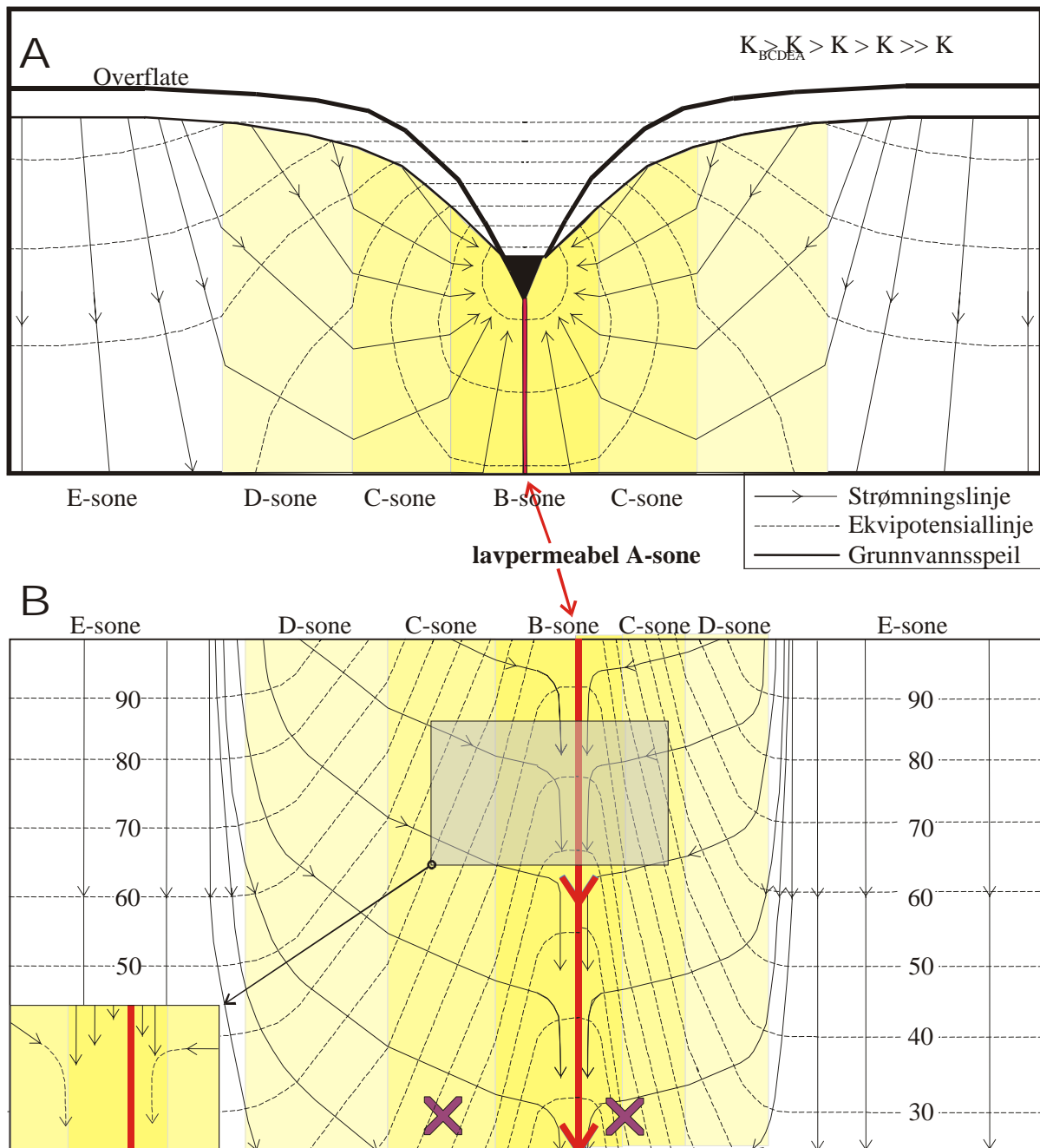
Som tidligere nevnt, genereres sprekker av bevegelser i jordskorpa. Av jordskorpebevegelser i nyere tid er landhevningen som etterfulgte siste istid vært svært viktig for berggrunnens hydrauliske egenskaper. Den landhevingen som forstst pågår varierer fra rundt 0 til 1mm per år nær kysten til over 5mm per år i grensestrøkene mot Sverige på Østlandet (Figur 3-8). Hevningen har utsatt de øverste 100 meterne av berggrunnen for strekkspenninger, som har kunnet åpne eldre sprekker (Gudmundson 1999). Dette er også vist i studier av forholdet mellom variasjoner i landhevning og brønnytelse (Rohr-Torp 1994; Morland 1997), som viser at brønner på innlandet, i områder med størst landhevning, i snitt gir langt mer vann enn brønner nærmere kysten. Variasjonen er i størrelsesorden $Q_n = 4$ l/t per meter borehull i kyststrøk med landhevning på rundt 0-1 mm, til opp mot $Q_n = 20$ l/t per meter borehull for landhevning på rundt 5 mm. Dette viser at landhevingen har en betydelig effekt på berggrunnens gjennomsnittlige hydrauliske egenskaper.



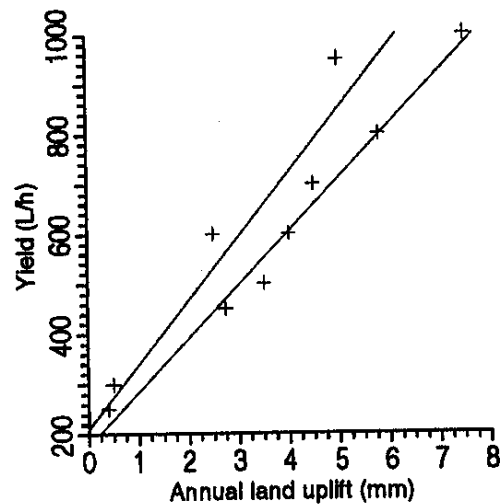
Figur 3-5. Lineamentskart over Norge (Gabrielsen m.fl. 2002). Lineamentene utgjør soner i berggrunnen med høy grad av oppsprekning, og er derfor viktige for grunnvannsstrømning i fjell.



Figur 12. Oppbygning av sprekkelineamenter, som kan beskrives med segmenter og distinkte soner. Hver a sonene B, C, D og E er karakterisert ved bestemte sett av brudd eller par av spekksett. A-sonen består av nedknust fjell.



Figur 3-7-(A) Konseptuell fremstilling av grunnvannsstrømning rundet et bruddlineament, vist i tverrsnitt av berggrunnen. Sonene B, C, D og E opptrer på begge sider av A-sonen, og har ulike konduktivitetsverdier. (B) Skjematisk kart av et asymmetrisk bruddlineament, hvor ekvipotensiallinjene (vinkelrett grunnvannsstrømmen) gjenspeiler topografien langs bruddlineamentet. Skråningen ned mot A-sonen er brattere på høyre side i forhold til på venstre side. Elva i midten følger lineamentets sentrale segment, som er karakterisert ved tett nedknust fjell. Legg merke til at en brattere skråning inn mot bruddlineamentet favoriserer størst strømning nærmere senteret av sprekkelineamentet. Kryssene illustrerer beste plassering av grunnvannsbrønner. Figurene er modifisert fra Berg (2000).



Figur 3-8. XY-plott som viser forholdet mellom årlig landhevning, fra kyst til innland i Sør-Norge, og brønnyttelse per meter brønn (fra Morland 1997).

Referanser:

Berg, S. 2000: Strukturell analyse av bruddsoner med hensyn på grunnvannspotensialet i oppsprukne bergarter. Cand. Scient. thesis, University of Bergen.

Gabrielsen, R.H., Braathen, A., Dehls, J., and Roberts, D. 2002: Tectonic lineaments of Norway. *Norwegian Journal of Geology (NGT)* 82, 153-174.

Gudmundsson, A. 1999: Post-glacial doming, stresses and fracture formation with application to Norway. *Tectonophysics* 307, 407-419.

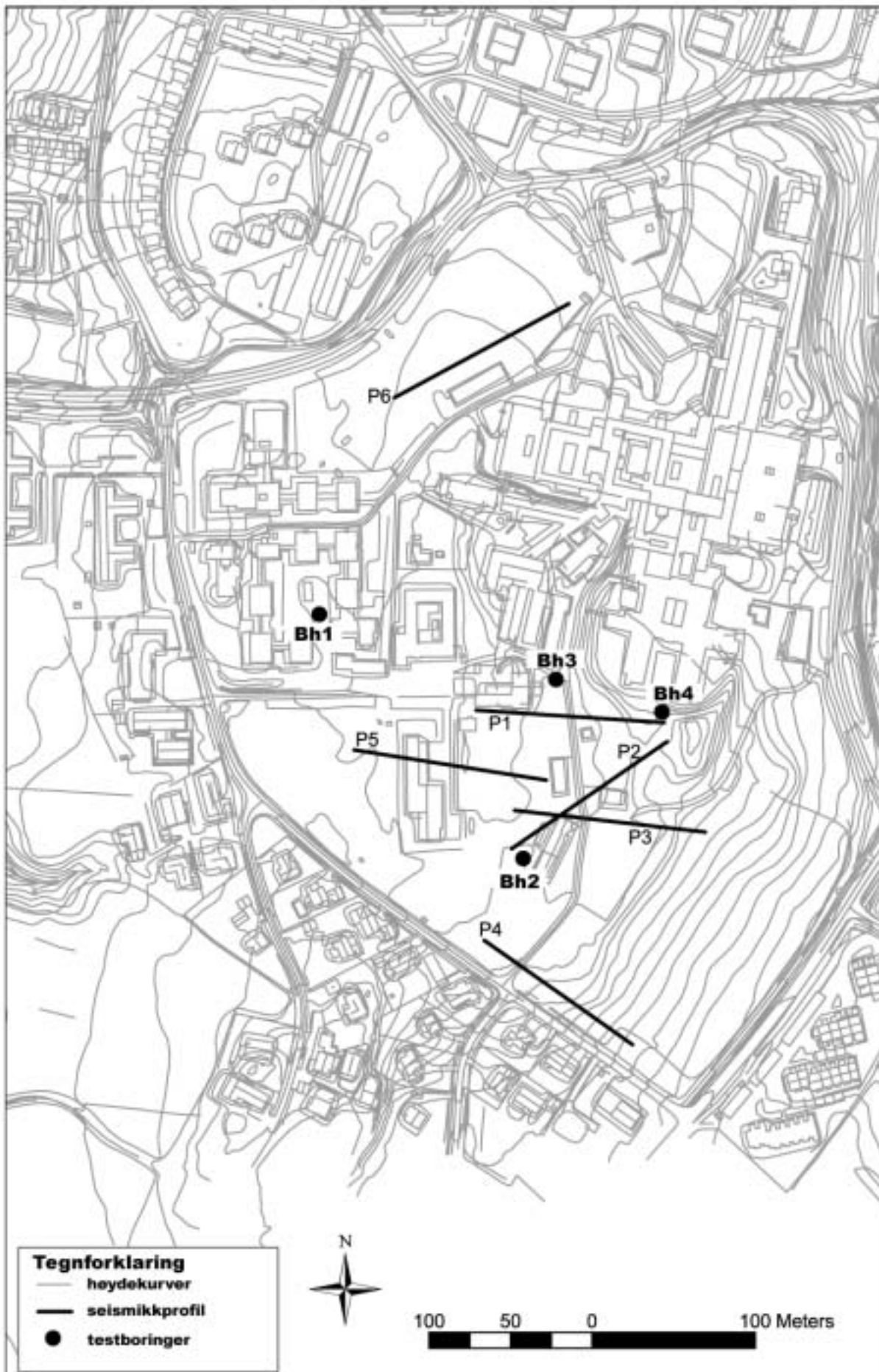
Morland, G. 1997: Petrology, Lithology, Bedrock Structures, Glaciation and Sea Level. Important Factors for Groundwater Yield and Composition of Norwegian Bedrock Boreholes? NGU Rapport 97.122 I, 274s

Rohr-Torp, E. 1994: Present uplift rates and groundwater potential in Norwegian hard rocks. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin* 426, 47-52.

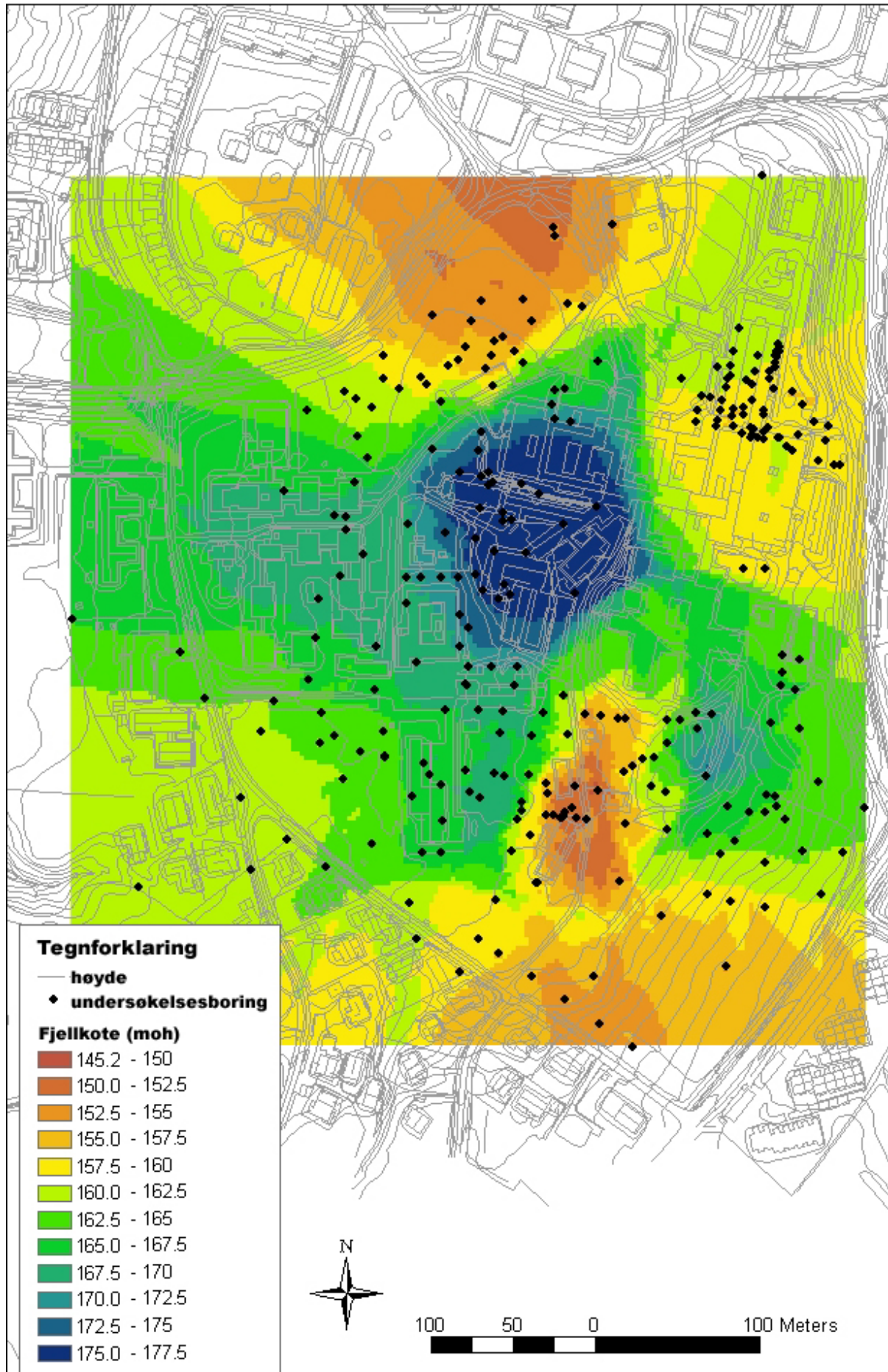
Sigmond, E.M.O., Gustavsson, M. & Roberts, D. 1984: Bedrock map of Norway, M 1:1 mill. *Norges geologiske undersøkelse*.

Stuckmeier, W.F., Margat J. 1995: Hydrogeological maps – A guide and a standard legend. IAH Volume 17. International contributions to hydrogeology.

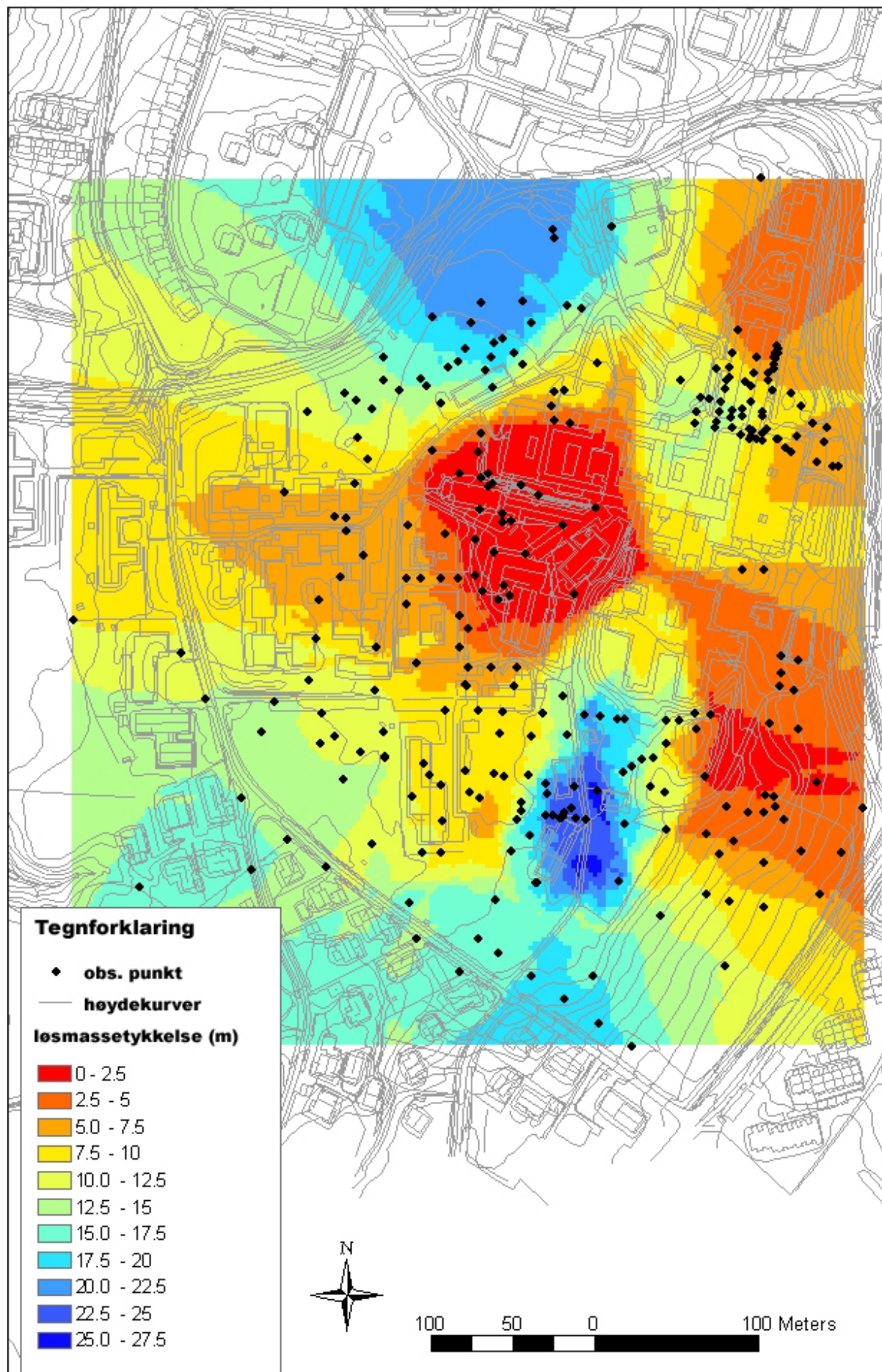
Kartbilag 1: oversikt over seismiske profiler og testboringer



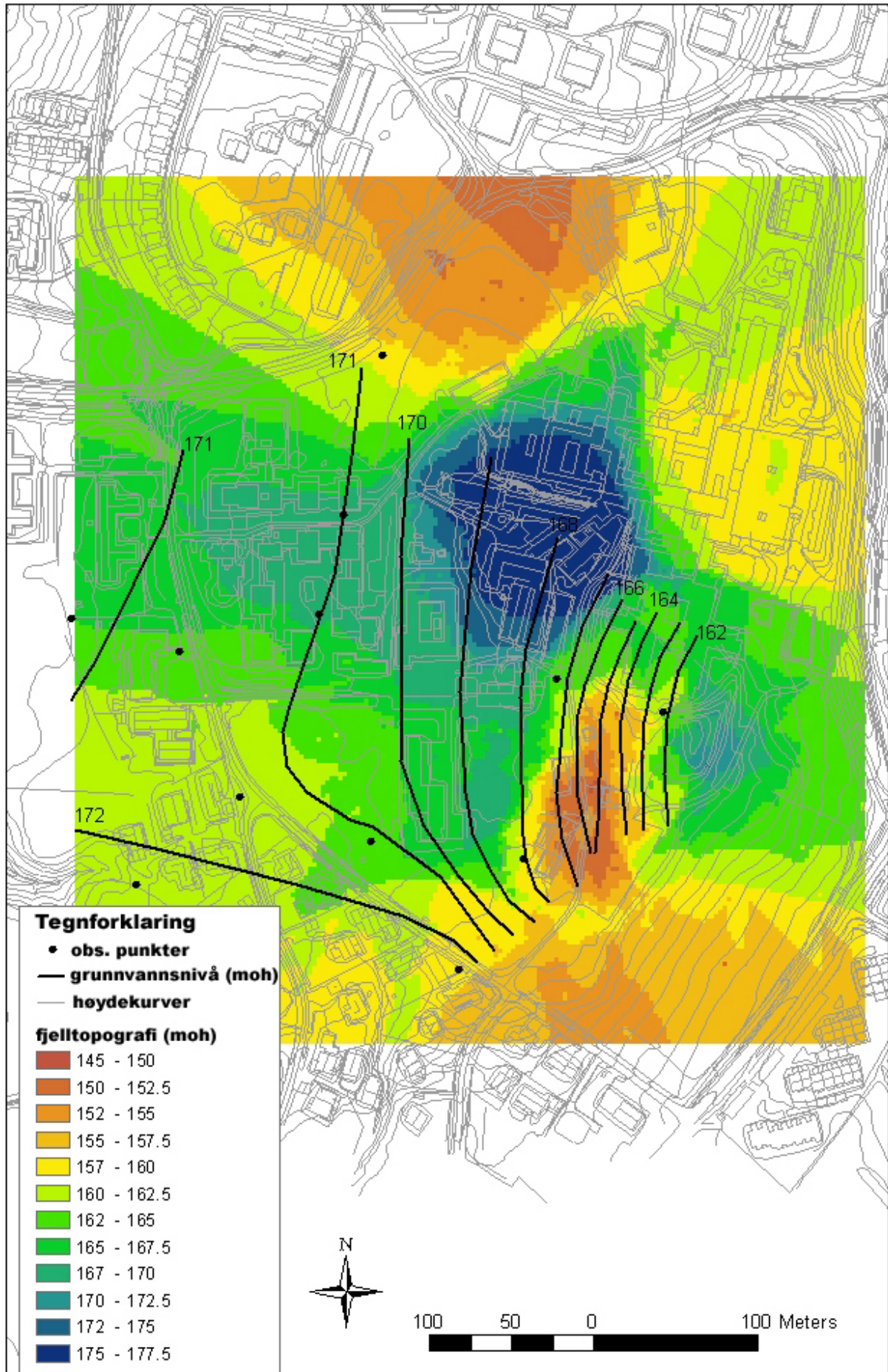
Kartbilag 2: oversiktskart, fjelltopografi



Kartbilag 3: oversiktskart, løsmassetykkelse



Kartbilag 4: fjelltopografi med grunnvannsnivå



Kartbilag 5: Egnede områder for et borehullbasert energilager

