

Rapport nr.: 98.085		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen	
Tittel: Holmedal brønnfelt, Sunnfjord: Geologiske undersøkelser og prøvepumping				
Forfatter: Braathen, A., Gaut, S., Henriksen, H., Storrø, G. & Jæger, Ø.			Oppdragsgiver: NGU	
Fylke: Sogn og Fjordane			Kommune: Askvoll	
Kartblad (M=1:250.000) Måløy			Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1117-I Dale	
Forekomstens navn og koordinater: Holmedal brønnfelt 32V 2965 68095			Sidetall: 46	Pris: 130,-
Feltarbeid utført: juni 97 - nov. 97		Rapportdato: august 1998	Prosjektnr.: 2685.00	Ansvarlig:
<p>Sammendrag:</p> <p>Norges geologiske undersøkelse sin økte forskningsinnsats på grunnvann i fjell gjennom forskningsprosjektet «Bruddsoner og grunnvann i Sunnfjord» har hatt som mål å fremskaffe en regional forståelse av deformasjonen langs større post-devonske lineamenter/ bruddsoner i krystalline bergarter, og disse lineamentenes betydning for vanngiverevnen i borebrønner. Denne rapporten presenterer resultater fra et av flere hydrogeologiske arbeider som prøver å vurdere den optimale plasseringen av borebrønner langs lineamenter.</p> <p>Et brønnfelt bestående av ni brønner er utformet ved Holmedal i Sunnfjord, innenfor et 100x100 meters område. Feltet er konstruert med tanke på å teste en hypotese som tilsier at bergspenninger har betydning for sprekkepermeabilitet og dermed grunnvannsstrøm i områder med lav til moderat oppsprekning av berggrunnen.</p> <p>Et studium av bruddstrukturer er gjennomført i området, og danner sammen med geofysiske forundersøkelser basis for en vurdering av sprekkefrekvensen rundt brønnfeltet. Videre presenteres resultater fra korttids pumpetester av brønnene i brønnfeltet. Det er store variasjoner i vanngiverevnen fra brønner innenfor et svært avgrenset område. Kapasitetene varierer fra &gt;800 l/t til mer typiske verdier på 50-100 l/t, og helt ned til &lt; 1 l/t. Fire av ni brønner reagerer klart på pumping i nærliggende brønner. Dette viser at det er god sprekkekommunikasjon for grunnvann i deler av feltet.</p> <p>En foreløpig konklusjon fra arbeidene er at bergspenningene ved Holmedal brønnfelt påvirker sprekkepermeabiliteten, og dermed grunnvannsstrømmen mellom brønnene, som ser ut til å være høyere i en retning som er tilnærmet parallell med største bergspenning.</p>				
Emneord: Hydrogeologi		Berggrunn	Sprekkesone	
Grunnvannsbrønn		Prøvepumping		
				Fagrapport

## INNHold

1. INNLEDNING .....	4
1.1 Bakgrunn .....	4
1.2 Lokalisering og utforming av brønnfeltet .....	7
1.3 Borelogging .....	7
1.4 Geofysiske forundersøkelser .....	9
1.5 Bergspenningsstudier .....	9
1.6 Faglig bakgrunn og hydrogeologisk modell .....	10
2. REGIONAL GEOLOGI.....	12
2.1 Introduksjon .....	12
2.2 Kartlegging av bruddfrekvens og bruddorientering .....	15
2.3 Bergartstyper og brudd i testfeltet.....	16
3. METODEBESKRIVELSE.....	20
3.1 Tekniske spesifikasjoner .....	20
3.2 Teknisk utførelse av pumpetestene og stigningstestene.....	22
3.3 Kapasitetsberegninger .....	22
4. RESULTATER PRØVEPUMPING .....	23
4.1 Grunnvannstand før pumping.....	23
4.2 Resultater fra pumpetestene .....	23
4.2.1 Korttidstesting av borhull 6.....	25
4.2.2 Korttidstesting av borhull 2.....	28
4.2.3 Korttidstesting av borhull 4.....	28
4.2.4 Naturlige vannstandsendringer 25-26.oktober .....	28
4.2.5 Korttidstesting av borhull 1 .....	31
4.2.6 Korttidstesting av borhull 8.....	31
4.2.7 Korttidstesting av borhull 5.....	34
4.2.8 Korttidstesting av borhull 3.....	34
4.2.9 Korttidstesting av borhull 9.....	37
4.2.10 Naturlig vannstandsending 31. oktober-12. november .....	37
4.2.11 Borhull 7.....	40
5. DISKUSJON .....	40
5.1. Oppsummering .....	40
5.2. Trykkforplantninger .....	42
5.3. Retningsbetinget konduktivitet .....	42
5.4. Videre undersøkelser.....	44
6. REFERANSER .....	45

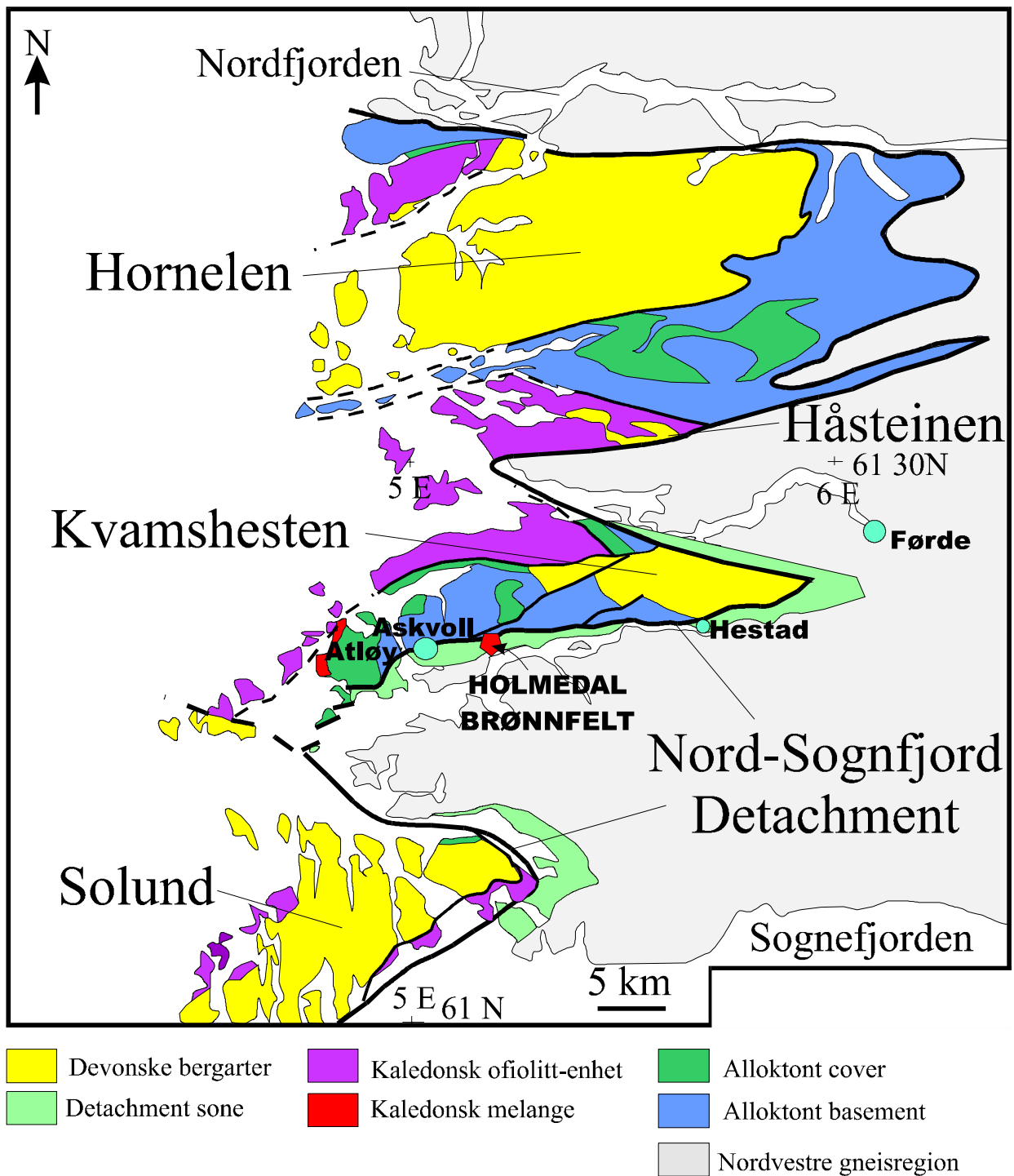
# 1. INNLEDNING

## 1.1 Bakgrunn

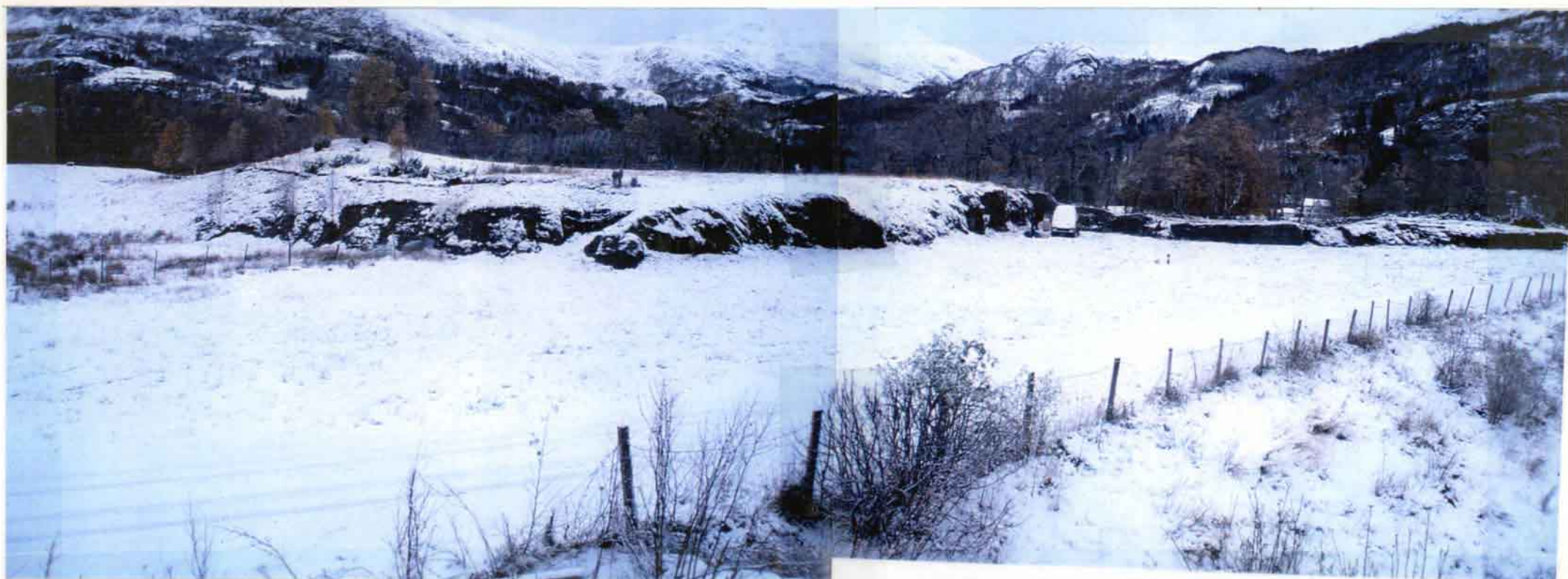
Norges geologiske undersøkelse har de senere år økt sin forskningsinnsats innen temaet grunnvann i fjell. Med bakgrunn i denne satsingen ble forskningsprosjektet «Bruddsoner og grunnvann i Sunnfjord» påbegynt i 1996. Følgende hovedmål for prosjektet ble definert: *Å fremskaffe en regional forståelse av deformasjonen langs større post-devonske lineamenter/bruddsoner i krystalline bergarter, og disse lineamentenes betydning for vanngiverevnen i borebrønner.* For å nå hovedmålet ble flere delmål definert, herunder å (1) vurdere oppsprekkingen av berggrunnen langs større lineamenter, (2) vurdere (relativ) alder til -, bevegelsen langs - og skorpedypet for dannelsen av lineamentene, (3) belyse den regional-tektonisk betydningen av disse lineamentene og deres mekanisk forklaring, (4) vurdere muligheten for neotektonisk reaktivering av lineamentene og in-situ spenninger, og (5) vurdere den optimale plasseringen av borebrønner for uttak av grunnvann langs lineamentene.

Prosjektarbeidet har så langt resultert i (i) bergspenningsstudier (Hansen 1996; Midtbø 1996a) og betraktninger rundet betydningen av in-situ spenninger for vannstrøm på brudd/sprekker i berggrunnen (Midtbø 1996b), (ii) en modell for lineament-arkitektur basert på et større datasett om oppsprekking av berggrunnen rundt større lineamenter (Braathen et al. 1997; Braathen et al. under forb.), og (iii) en vurdering av lineamentenes geologiske historie og betydning (Braathen & Henriksen 1997; Braathen 1998).

Nevnte, innledende studier og resultater har dannet fundamentet for etablering av to hydrogeologiske modeller (se under). Disse modellene blir nå testet. I denne rapporten presenteres foreløpige resultater fra det første konkrete hydrogeologiske forsøket i prosjektet, som vurderer betydningen av sprekkeorienteringer og in-situ bergspenning i et avgrenset felt bestående av ni borebrønner. Brønnefelt er lokalisert til Holmedal, nær Askvoll i Sunnfjord, i Sogn og Fjordane fylke.



Figur 1.1. Forenklet geologisk kart over Sunnfjord-området (modifisert fra Osmundsen & Andersen 1994). Brønnefeltet er avmerket.



*Figur 1.2. Brønnfeltet i Holmedal sett fra syd. Brønn 8 kan ses foran bilen til høyre, brønnene 1-4 er lokalisert rett over kanten av steinbruddet bak bilen. Brønnene 5 og 6 kan ses på knausen over steinbruddet til venstre i bildet*

## 1.2 Lokalisering og utforming av brønnfeltet

Et område øst av Askvoll, Holmedal (figur 1.1), ble valgt ut som egnet for et brønnfelt bestående av ni brønner. Valg av område ble basert på nødvendigheten av:

- (i) plassering i marginen av et lineament, hvor oppsprekningsgraden var kjent (gode blotninger av fjell),
- (ii) en viss avstand til elver og bekker som kunne påvirke grunnvannet,
- (iii) avstand til fjellsider som kunne forstyrre in-situ spenningsbildet, og
- (iv) praktiske hensyn, som avstand til vei, tilgjengelighet for borerigg, arealutnyttelse (beite- eller dyrket mark), osv.

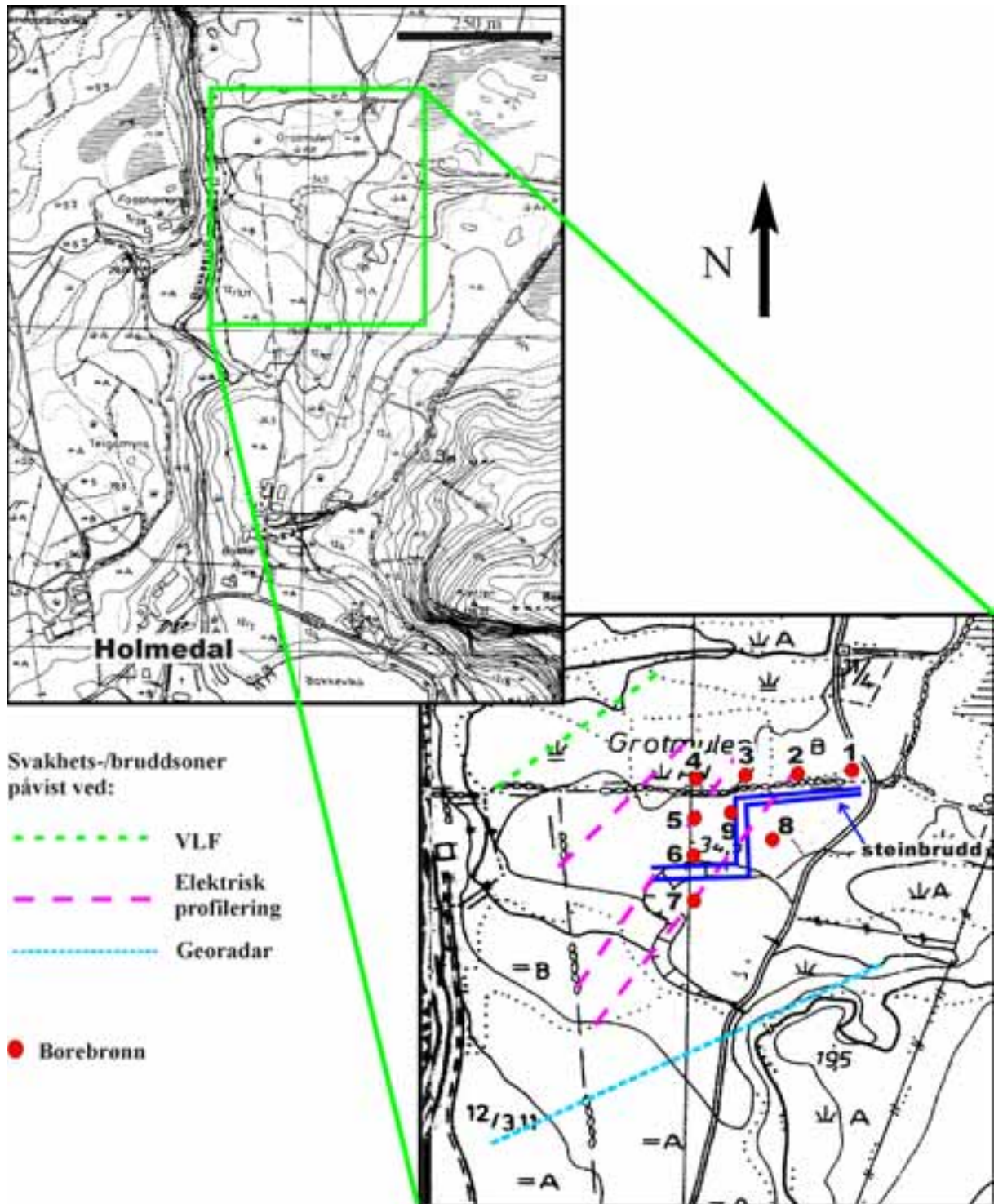
Brønnfeltet i Holmedal er lokalisert til en lav knaus i et bredt dalføre (figur 1.2). Nærliggende områder benyttes til produksjon av for, mens området rett rundt selve feltet består av beitemark. Et mindre steinbrudd har en gunstig plassering med tanke på blotninger, men utgjør også en risiko for et økt antall overflatenære, åpne sprekker fra sprengingsarbeider i steinbruddet. Ca. 300 meter vest for feltet renner en elv mot sør i retning Dalsfjorden. Den følger et N-S orientert drag langsetter et større lineament. En mindre bekk passerer ca 100 meter sydøst for de nærmeste brønnene. Topografien rundt brønnfeltet er relativt flat, den nærmeste fjellsiden ligger mer en 500 meter unna, mot nord.

Brønnene i Holmedal ble boret av Hallingdal bergboring i oktober 1997. Over en uke ble det boret et brønnfelt bestående av ni brønner. Disse er plassert i et trekantnett som vist i figur 1.3. Brønnene ble boret vertikalt med en diameter på 135 mm (5,5 tommer). Under boringen ble det satt ned et foringsrør med en høyde på 30-50 cm over bakken, og brønnene ble deretter avstengt med et lokk. De fleste brønnene (1 - 8) er boret til 50 meters dyp, mens senter-brønnen (9) er 100 meter dyp. Den relative dybden av brønnen varierer noe ut fra brønnhodets høyde. Brønnene 1-4 står tilnærmet på samme høyde, brønnene 5, 6 og 9 har brønnhodet ca 1,5 meter høyere, mens brønnene 7 og 8 står ca 2 meter lavere enn de førstnevnte brønnene.

## 1.3 Borelogging

Under boring ble beskaffenhet og variasjoner i berggrunnen fortløpende registret, og i tillegg ble det gjort et anslag over vannmengden i brønnene ved blåsing (Appendix 1). Brønnene 1 til 7 ble boret gjennom forholdsvis homogent fjell med enkelte mindre sleppesoner. I mange tilfeller var det noe vanninnslag ved foten av eller rett under foringsrøret, mens resterende deler av brønnen var mer eller mindre tørre. I brønn 8 ble flere større slepper påtruffet i nær hele brønnens lengde. På 9 og 16 meters dyp var det vanninnslag. Førstnevnte gav 50 l/t, mens det nedre innslaget var på 650 l/t. Brønnen ble derfor anslått til å gi 700 l/t. Brønn 9 ble også





Figur 1.3 Utforming av - og topografi ved brønnfeltet i Holmedal. Brønnene er nummerert 1 til 9. Tolkningen av de geofysiske undersøkelsene (Elvebakk & Lauritsen 1997), med linjer som antyder svakhets-/bruddsoner i berggrunnen, er vist.

boret igjennom en rekke sleppesoner. Her kunne vanninnslaget ikke lokaliseres til en bestemt sone, men totalt gav brønnen 10-20 l/t.

De estimerte vannmengdene er basert på blåsing av brønnen under og etter boring. Etterfølgende testpumping (se under) gav et mer nyansert bilde, og klargjorde at beregning av vannmengde ved blåsing i brønner med forholdsvis lite vann gir stor usikkerhet. Beregninger basert på testpumpingen gav gjennomgående mer vann (l/t) enn blåsing.

#### **1.4 Geofysiske forundersøkelser**

I forbindelse med forberedelsene til boringer i Holmedal ble det gjennomført geofysiske forundersøkelser (Elvebakk & Lauritsen 1997). Hensikten var å avdekke strukturer i berggrunnen i områder som hadde overdekke av løsmasser. Metodene som ble benyttet var VLF, elektrisk profilering og georadar. Konklusjonen fra arbeidet (figur 1.3) var at det er minst tre nordøst-sydvest orienterte ledende soner (elektrisk profilering) innenfor brønnfeltet. En tilsvarende orientering er antydning for en sone identifisert med georadar utenfor feltet mot nordvest. I sydøst, ca 40 meter utenfor brønnfeltet, gir VLF utslag på en østnordøst-vestsydvest sone med en klar signatur, som muligens kan være vannfylt.

#### **1.5 Bergspenningsstudier**

Bergspennings-modeller for vest Norge antyder at største horisontal spenning er orientert øst-vest i Sunnfjord og dreier mer mot nordvest-sydøst i Nordfjord (Bungum et al. 1991; Lindholm et al. 1995; Fejerskov et al. 1995). For å få sammenstilt, testet og kvantifisert disse spenningene, samt vurdert betydningen av steile, høye fjellsider, ble det i 1996 gjennomført et delprosjektet i samarbeid mellom NTNU/SINTEF og NGU (Midtbø 1996a,b).

Sammenstillingen av eksisterende data fra området mellom Førde og Haradanger ('målecelle' på 21 lokaliteter i tunneler) viser en klar nordvest-sydøst akse på den største spenningen, samt en nordøst-sydvest retning. Retningene er sammenfallende med orienteringen av dalsider, noe som antyder en betydelig influens av gravitative spenninger. De høyeste spenningene ble lokalt målt til over 30 MPa, mens mer typiske målinger gav rundt 15 MPa.

På tre målestasjoner, nord og sør på Atløy, og ved Hestad innerst langs Dalsfjorden, ble det foretatt nye spenningsmålinger i til sammen fem grunne borhull (Hansen 1996). Dette for å fremskaffe spenningsdata fra prosjektområdet. I hvert 2 tommers borehull ble det utført flere målinger. På målestasjonene på Atløy (figur 1.1) ble det utført registreringer på hver side av Dalsfjord forkastningen, som man antok kunne påvirke det lokale spenningsbildet, mens området ved Hestad ble valgt for å vurdere effekten av en bratt dalside. Alle målingene ble gjennomført ved «hydraulisk splitting». Resultatene fra arbeidet var sammenfallende med eksisterende regionale modeller for spenningsbildet (Lindholm et al. 1995; Fejerskov et al. 1995), så vel som modeller hvor gravimetriske spenninger er innkalkulert (Midtbø 1996b). På



Atløy var største horisontal spenning på ca 7,5 MPa i øst-vest retning, mens minste spenning var 4,2 MPa. Spenningene i dalsiden ved Hestad hadde en tilsvarende orientering, parallelt med dalsiden, men oversteg 15 MPa for største og 8-10 MPa for minste spenningsakse.

Brønnefeltet ved Holmedal er lokalisert 8 km øst for målestasjonene på Atløy, og 15 km vest for Hestad (figur 1.1). Siden spenningsmålingene på begge stasjonene er i samsvar med etablerte modeller, er det høyst sannsynlig at største horisontale bergspenning ved brønnefeltet i Holmedal har en øst-vest orientering, og er i størrelsesorden 7,5-10 MPa, mens minste spenning antagelig er rundt 5MPa.

## 1.6 Faglig bakgrunn og hydrogeologisk modell

Studier av bruddsystemer i Sunnfjord viser at det er en systematisk fordeling av sprekker rundt regionale lineære strukturer (lineamenter; se under). Det generelle bildet som framkommer (Berg et al. 1997; Braathen et al. 1997; Gabrielsen et al. 1997) er illustrert i figur 1.4, og er nærmere beskrevet under:

- (1) I en avstand fra lineamentene som overstiger 250 meter påvirkes ikke berggrunnen av disse (kun bakgrunnsstøy), og vanlig bruddfrekvenser er 0-2 sprekker/meter (sp/m).
- (2) I lineamentenes *ytte sone*, dvs. i en avstand mellom 50 og 250 meter fra lineamentet, er bruddfrekvensen vanligvis 1-3 sp/m. Sprekkene har varierende orientering, i mange tilfeller med en dominerende 20-40° vinkel til lineamentet.
- (3) Den *marginale sonen*, som varierer i bredde fra 10 til 50 meter, har typiske frekvensverdier på 3-6 sp/m. Denne sonen har en dominans av sprekker som er subparallele til lineamentet.
- (4) Den *sentrale sonen* har gjennomgående en bredde på 5 til 20 (maks. 30) meter. Den er karakterisert ved en sverm av sprekker subparallele med lineamentene med en frekvens på 6-12 sp/m. I tillegg forekommer ofte breksjer med varierende bredde og utholdenhet. I sentralsonen er sprekke ofte fylt med leirmineraler som kan bidra til en vesentlig permeabilitets-reduksjon. Denne reduksjonen kan imidlertid til en viss grad være motvirket av senere reaktivering(er) av lineamentene.

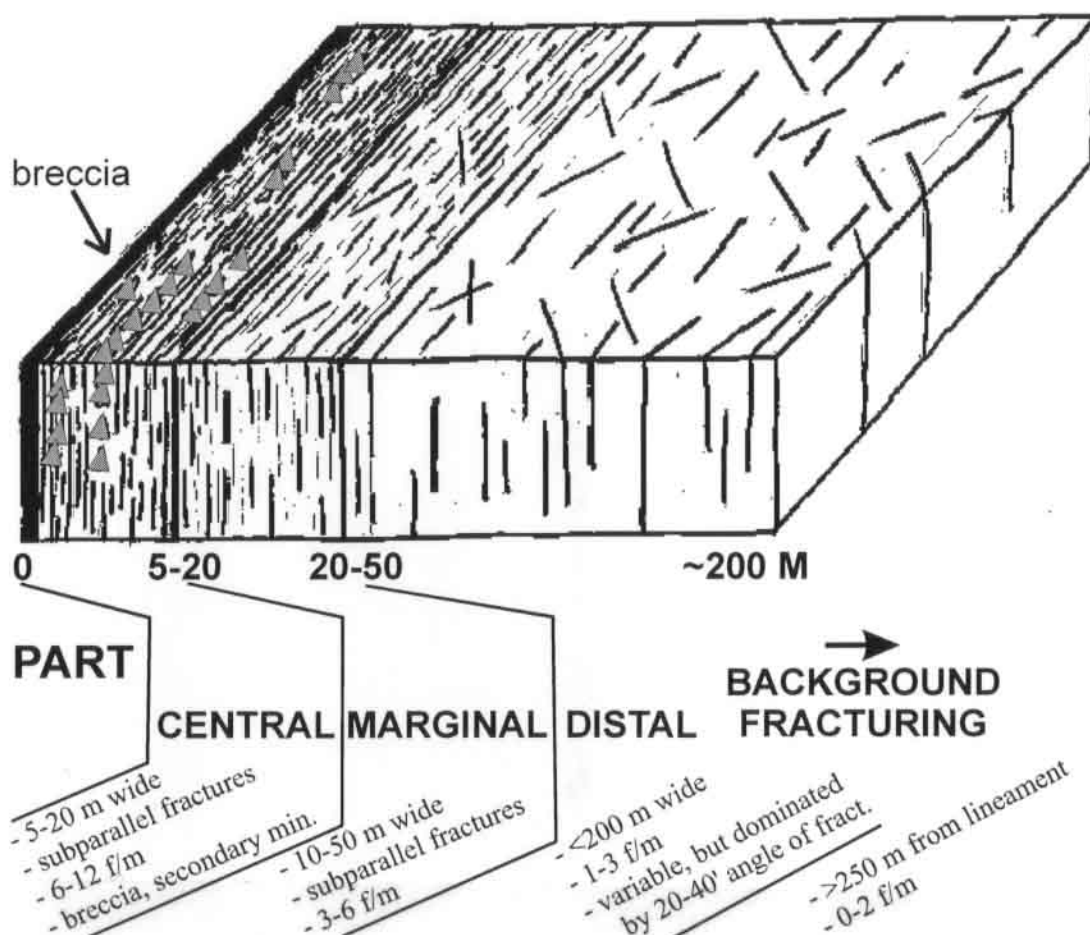
Den krystalline berggrunnen i Norge er uten primær permeabilitet og porøsitet. All oppbevaring og transport av nyttbart grunnvann forekommer derfor på sprekker i fjellet. Med bakgrunn i den systematiske bruddfordelingen rundt lineamenter er to hydrogeologiske modeller definert:

- (i) I den ytte sonen og i områder med bakgrunnsstøy vil vannstrøm hovedsakelig foregå langs sprekker som er parallele med den største bergspenningen.

(ii) Marginalsonen, med høy bruddfrekvens og mindre leirmineral-innfylling/omvandling, har det største potensialet for grunnvann langs lineamenter.

Brønnfeltet ved Holmedal er plassert og utformet for å vurdere den første modellen (i). Er modellen gyldig vil vannstrøm på sprekker i en øst-vest retning, parallelt med største bergspenning, dominere innenfor brønnfeltet, mens det vil være minimal strømming i N-S retning. For å teste strømningsretningene av grunnvannet har hver brønn vært pumpet for seg samtidig som senkningen i de andre brønnene ble fortløpende registret (se Kap. 4). Resultatet fra disse kort-tids pumpetestene er ikke entydige, men antyder at permeabiliteten på sprekker i berggrunnen er høyere i en øst-vestlig retning enn i en nord-syd retning. Dette er nærmere diskutert i Kapittel 5.

## LINEAMENTS OPPBYGNING



Figur 1.4 Generell oppbygning av lineamenter i Norges berggrunn. Modellen er fra Braathen et al. (under forberedelse).

## 2. REGIONAL GEOLOGI

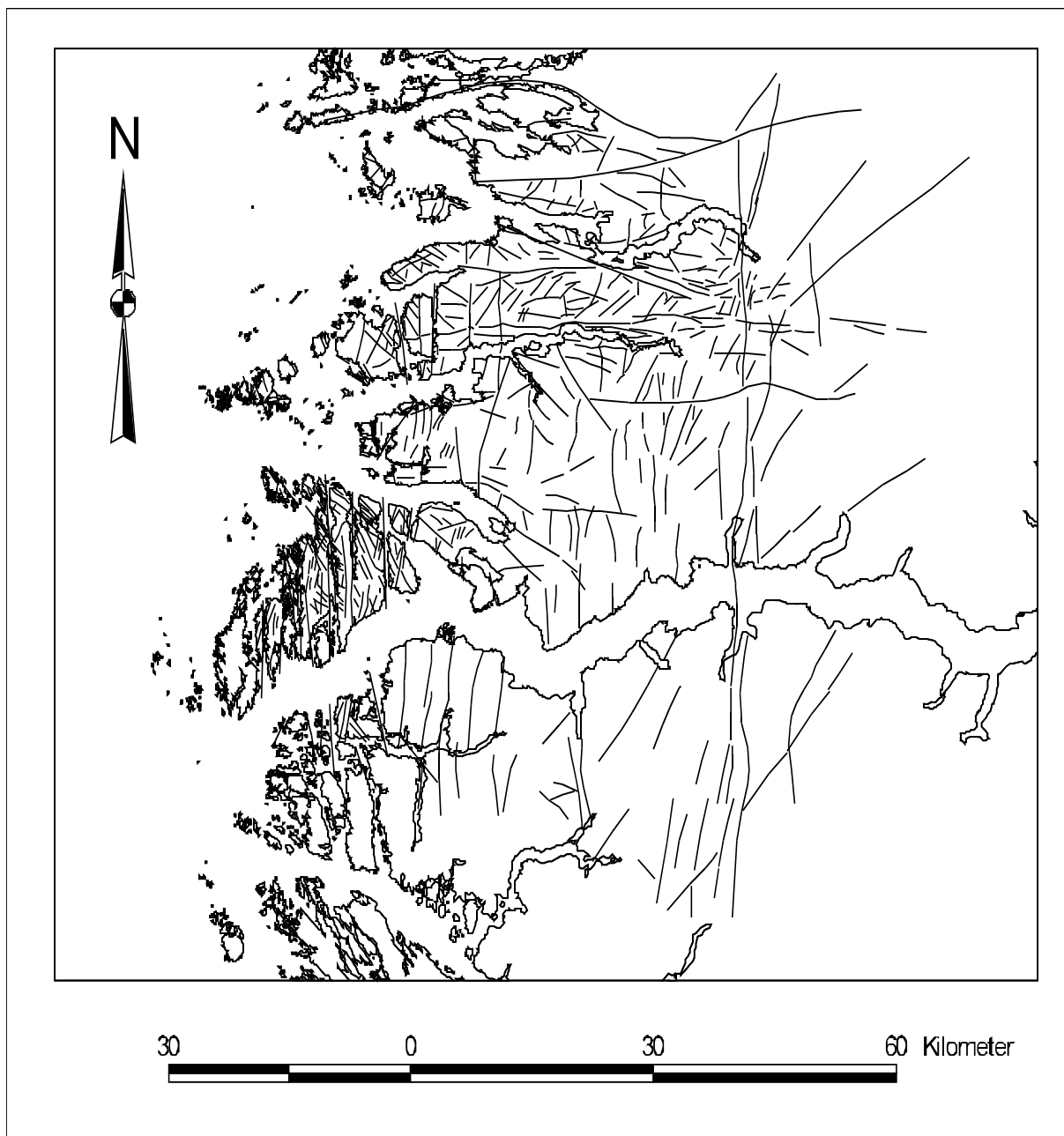
### 2.1 Introduksjon

Sunnfjord utgjør en del av de vestnorske Kaledonidene. Stedegne, og lokalt høymetamorfe prekambriske gneiser tilhørende den Nordvestre Gneisregion ligger i dette området tektonostratigrafisk under en serie med kaledonske skyvedekker og devonske metasedimenter (figur 1.1). I de senere årene har omfattende feltstudier framskaffet nye opplysninger om den tidlig paleozoiske tektoniske historien til disse bergartene (e.g. Andersen & Jamtveit 1990, Osmundsen & Andersen 1994). Den kaledonske orogenesis som kulminerte med kontinentkollisjon og eklogittfacies metamorfose av grunnfjellet i den Nordvestre Gneisregion tidlig i Devon, ble etterfulgt av en tilbakeglidning av den fortykkede skorpen langs vestlig hellende normale ekstensjonsforkastninger. Samtidig ble det dannet devonske sedimentasjonsbassenger på toppen av de nedsynkende hengblokkene. Under tilbakeglidningen ble de høymetamorfe eklogittførende gneisene i liggblokkene brakt i kontakt med de alloktone enhetene og de devonske sedimentasjonsbassengene i hengblokken. De høyeste strukturelle nivåene i tilbakeglidningssonene er karakterisert ved en 1-3 km tykk sone med mylonitter og fyllonitter rekrystallisert under grønnskiferfacies metamorfose. Tilbakeglidningssonene er påvirket av sendevonsk eller karbonsk Ø-V folding og flere faser med sprø kataklastisk deformasjon opp til tidlig kritt tid (e.g. Eide et al. 1997, Braathen & Henriksen 1997; se også tabell 2.1).

Brønnefeltet ved Holmedal (figur 1.2) er lokalisert til en av de viktigste ekstensjonsforkastningene, Nordfjord-Sogn detachment-sonen (NSD). De lokale bergartene i tilbakeglidningssonen består av grønne og grålige fyllonitter, kvartsskifre, grønnskifre/amfibolitter og flaser-gabbroer tilhørende Askvoll gruppen (Skjerlie 1969), samt mylonittiske gneiser utviklet fra gneisene i den Nordvestre Gneisregion.

Statusen til Askvollgruppens omdannede dypbergarter og metasedimenter er uklar, men de representerer enten en coversekvens til den Nordvestre Gneisregion eller en del av de alloktone enhetene. Bergartene i hengblokken opptrer ca. 1 km nord for Holmedal og utgjøres av Dalsfjordsuitens høymetamorfe ortogneiser og meta-intrusiver (mangeritt-syenitt) sammen med overliggende metasedimenter (Høyvikgruppen) lengre mot NV. Nederst i hengblokken trunkeres mylonittene i tilbakeglidningssonen av den lavvinklede og sprø Dalsfjord-forkastningen.

I denne rapporten brukes begrepet brudd om sprekker, skjærsprekker og forkastninger. De hydrauliske egenskapene til krystalline bergarter er i hovedsak avhengig av nettverket av sprø bruddstrukturer. Siden bruddstrukturene i testområdet i stor grad er elementer av større, regionale bruddsystem er en forståelse av de regionale bruddsystemene og de stressbetingelsene som førte til bruddsystemenes dannelse nødvendig for å tolke grunnvannsstrømmen under prøvepumpingen av borebrønnene.



Figur 2.1. Lineamentkart tegnet fra 1: 100 000 Landsat TM scene, bånd 5.

Bruddstrukturene i Vest-Norge er tektoniske brudd som typisk forekommer i flere sett med samme hovedretning (e.g. Ramberg et al. 1977). Det regionale bruddmønsteret nord for Dalsfjorden (figur 2.1) har blitt klargjort gjennom analyse av lineamenter fra satellittfoto kombinert med feltstudier. Kartleggingen av bruddmønsteret fra satellittbilder ble utført ved direkte avtegning av lineamenter fra 1: 100 000 svarthvitt kopier av Landsat TM scener, bånd 5. Bare lineamenter lengre enn 1 km ble registrert. Feltstudiene omfattet målinger av orientering til bruddplan og slip-linjer på skjærsprekker og forkastningsplan. Kartlagte fotolineamenter ble også undersøkt. De aller fleste av disse faller sammen med utgående av sprekker, forkastninger eller skjærsoner. Diffuse lineamenter som representerer skifriighet og/eller bergartsgrenser ble utelatt fra det endelige lineamentkartet (figur 2.1). Den følgende

sekvens av deformasjon som post-daterer den devonske ekstensjonsdeformasjonen er oppsummert i tabell 2.1:

**Tabell 2.1. Kronologisk ordnet rekkefølge og betydning av post-devonsk sprø deformasjon i Sunnfjord-området. Basert på Braathen & Henriksen (1997).**

Brudd-populasjon	Type Bruddstruktur	Dynamisk Tolkning	Alder
1	Øst-vest sprø skyveforkastninger og assosierte revers-forkastninger.	N-S forkortning/kompresjon med overskyvning og folding.	Sen Devon eller tidlig Karbon
2	Konjugerte NØ-SV and NV-SØ sidelengsforkastninger og N-S normalforkastninger	N-S forkortning og Ø-V ekstensjon i samband med regional Ø-V folding.	Karbon-Perm
3	Øst-vest normalforkastninger	N-S ekstensjon	Sen Jura - tidlig Kritt

Spesielt er mesoskopiske bruddstrukturer tilhørende populasjon 2 overalt tilstede som subvertikale NV-SØ deksrale og NØ - SV sinistrale skjærsprekker/sidelengsforkastninger og N-S normalforkastninger. Systemet kan representere (hk0) brudd dannet som resultat av en regional Ø-V folding (Braathen & Henriksen 1997; Braathen 1998). Sprø deformasjonsstrukturer av populasjon 1 og 3 er mer lokalt utviklet i tilknytning til sine respektive første-ordens forkastninger.

Sprekker som har en uklar dynamiske rolle er overalt tilstede på makroskopisk og mesoskopisk nivå. På satellittbilder og flyfoto gjenkjennes disse som 1- 100 km lange lineamenter og mester-sprekker. Selv om disse kan grupperes i tre sett med asimutretninger NØ-SV, NV-SØ og N-S (figur 2.3 og 2.4) er den romlige fordelingen av sprekkene ikke homogen. Noen av sprekkene er ekstensjonssprekker, men hoveddelen av sprekkeplanene har ingen bevegelses-/kineamiske indikatorer. Sprekkesettene kan representere regionale tverrsprekker (cross fold joints) dannet samtidig med forkastningene i populasjon 2. De markerte N-S mester-sprekkene har en kompleks historie, og flere av disse er reaktivert som populasjon 2 normal-forkastninger. Bruddsonen som ligger nær testområdet ved Holmedal er trolig et eksempel på dette.

## 2.2 Kartlegging av bruddfrekvens og bruddorientering

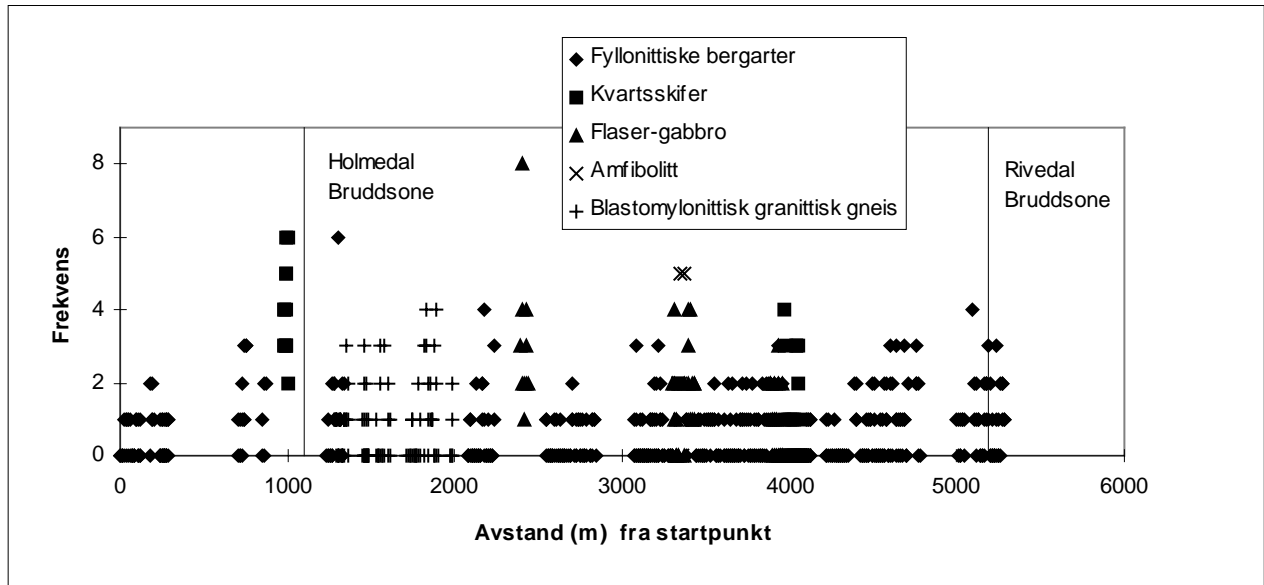
For å få informasjon om bruddfordelingen i og nær lineamenter ble det gått opp en rekke bruddfrekvensprofiler på tvers av markerte lineament (Braathen et al. 1997; Gabrielsen et al. 1997; Berg et al. 1997). Hvert bruddfrekvensprofil består av målestasjoner med 5 meters innbyrdes avstand. På hver målestasjon ble alle bruddplan innenfor en sirkel med diameter på 80 cm registrert. Bruddfrekvensen er definert som antall gjennomgående brudd som skjærer sirkelperiferien i to punkt. Ved denne målemetoden blir minimumslengden til et "tellende" brudd ca. 20 cm, mens de fleste tellende brudd vil være lengre enn 70-80 cm. Orienteringen til bruddplanene og eventuelle slip-linjer ble også målt.

Selv om det er en betydelig variasjon i bruddfrekvens, er et gjennomgående trekk en økning i bruddfrekvensen nærmere hovedlineamenter. Spesielt gjelder dette N-S lineamentene. Nær lineamentene er bruddene i det vesentlige parallelle med lineamentet. I større avstand (50 - 250 meter) dominerer brudd med skrå orientering i forhold til det nærmeste lineamentet. I de sentrale delene av et lineament er det ofte forkastningsbreksjer og/eller leirrikt forkastningsmel.

Figur 2.2 viser et 6 km langt bruddfrekvensprofil fra Holmedal-området. Profilet krysser to hovedlineament, henholdsvis Holmedal bruddsone og Rivedal bruddsone (figur 2.3). Fra profilet kan det skilles ut et bakgrunnnivå med en bruddfrekvens på 0-2 sp/m. Over bakgrunnsnivået, men også uavhengig av lineamentene, opptrer isolerte partier med forhøyede frekvenser fra 3-8 sp/m som viser at bruddannelsen også avhenger av bergartstype og tekstur. Disse områdene faller sammen med partier av kompetente bergarter som granittisk gneis og meta-gabbro i de ellers glimmerrike og fyllonittiske bergartene som dominerer profilet. Nær hovedlineamentene er bruddfrekvensene fra 3-8 sp/m uansett bergartstype.

Nær Holmedal bruddsone dominerer lineament-parallele N-S brudd, mens NØ-SV orienterte brudd dominerer i større avstand (figur 2.3). Disse forholdene er ikke så markerte for Rivedal bruddsone. En forklaring kan være at Holmedal bruddsone representerer en N-S sprekesverm/mester-sprekk reaktivert som en N-S normalforkastning (populasjon 2), mens Rivedal bruddsone ikke er reaktivert i tilsvarende grad.





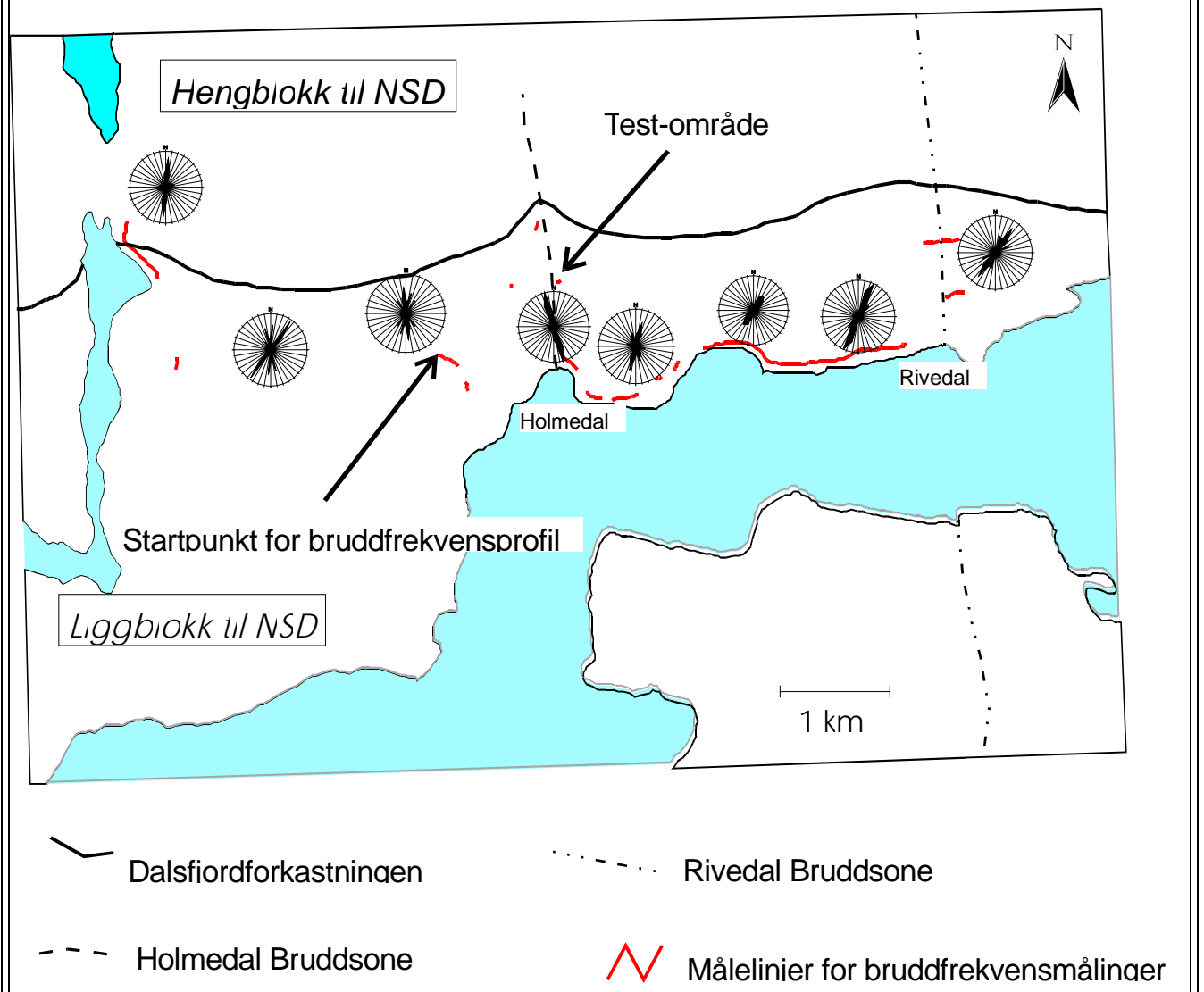
Figur. 2.2 Bruddfrekvensdiagram for Ø-V profil med startpunkt vest for Holmedal. Målingene er fra vertikale veiskjæringer, og avstandene er projiserte avstander fra målepunktene normalt de to parallelle bruddsonene.

### 2.3 Bergartstyper og brudd i testfeltet

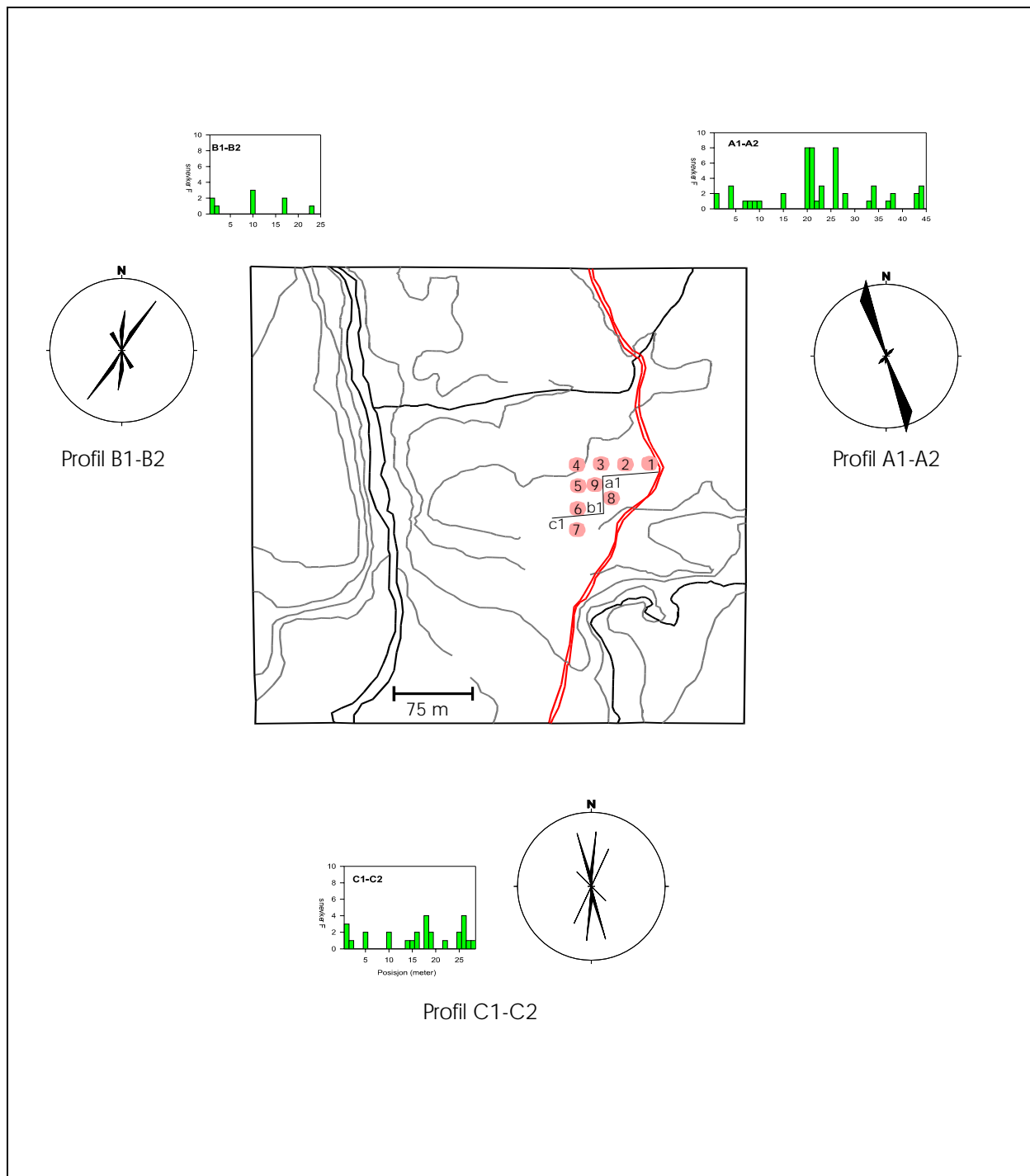
Testfeltet er dels lokalisert i et gammelt steinbrudd, der vertikale fjellskjæringer gir gode muligheter for observasjoner og strukturmålinger. Bergartene i steinbruddet er mørkegrønne amfibolitter, som lokalt viser utvikling til klorittskifre i soner med sterkere deformasjon. Midt i steinbruddet opptrer det i tillegg en sone med fyllonittiske bergarter som antas å representere sterkt deformerte granodioritter. Disse sterkt deformerte bergartene kan minne om og forveksles med glimmerskifre.

Foliasjonen i bergartene faller 20 - 50° mot nord og er definert av parallelt orientert amfibol, kloritt, glimmer og stedvis små kvartsårer. Bruddfrekvenser i testområdet ble målt i større detalj ved å telle opp alle brudd som skar 1 meter lange samplingsintervall langs horisontale målelinjer (figur 2.4). Bruddenes asimut er plottet i rosedigram (figur 2.5a) mens bruddplanenes romlige orientering går fram av den stereografiske polprojeksjonen til bruddplanene (figur 2.5b). Typiske orienteringer i brønnefeltet er steile NNW-SSØ orienterte brudd, underordnet steile NNØ-SSV strykende brudd. Antall teoretiske skjæringer mellom bruddplanene kan beregnes på grunnlag av den stereografiske planprojeksjonen til bruddplanene (figur 2.5c og 2.5d). Skjæringer mellom bruddplanene definerer to hovedgrupper: gruppe 1 som stuper bratt mot ØNØ, og gruppe 2 som stuper ca. 50° mot NNW.

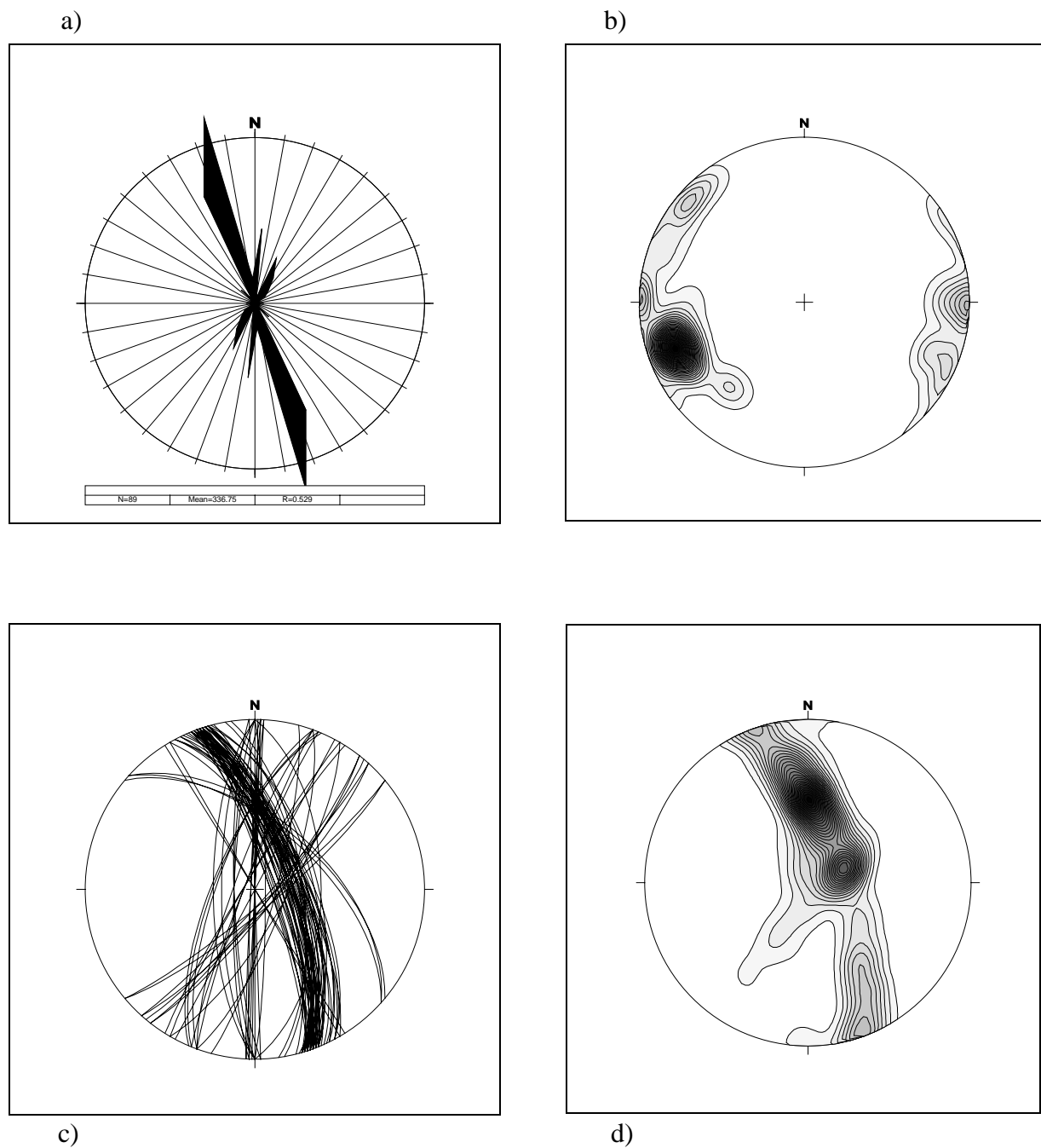
### Lokaliseringskart og rosediagram med sprekkemålinger fra Holmedal-området



Figur 2.3. Rosediagram som viser strøkretning for bruddplan langs bruddfrekvensprofilen i området ved Holmedal. De fleste bruddflatene er steile (70-90° fall).



Figur 2.4. Kart over testområdet med borehullene 1-9 og målelinjer for bruddfrekvensmålinger. Bruddfrekvenser og orientering av bruddplan er vist i figurene utenfor kartrammen. Linjene a1, b1 og c1 tilsvarer henholdsvis profilene A1-A2, B1-B2 og C1-C2.



Figur 2.5. a) Rosediagram som viser asimuth til bruddplan ( $N = 89$ ) i testområde., b) Konturert stereo-projeksjon (nedre halvkule) av polene til bruddplanene, c) stereografisk projeksjon av bruddplanene, d) konturert plott av poler til skjæringslinjene mellom bruddplanene (i alt 3914 skjæringslinjer).

### 3. METODEBESKRIVELSE

#### 3.1 Tekniske spesifikasjoner

Hovedkomponentene i den tekniske utrustningen som ble benyttet i tilknytning til kapasitetstesting var:

- 1 4'' senkpumpe med kapasitet ca 1800 l/time (0.5 l/s) ved 50 m løftehøyde
- 2 Vannstands-sensorer (trykkfølere)
- 3 Vannmengdemåler
- 4 Datalogger

Senkpumpe og vannstands-sensor er vist i figur 3.1 mens figur 3.2 viser montering av vannmengdemåleren.

Området lå ugunstig plassert m.h.t. tilgang på nettstrøm så det ble valgt å benytte et bensindrevet aggregat som strømkilde for senkpumpe og måleutrustning.

Det ble benyttet vannstands-sensorer av merket Drück, type PTX 164. Det ble samlet anvendt 7 sensorer; én stk. med måleområde 0-100 m, én med måleområde 0-75 m, én med måleområde 0-20 m og 4 med måleområde 0-10 m. Dataoppløsningen for sensorene er 0.04 % av totalt måleområdet, hvilket for 0-10 m sensorene gir en oppløsning på 4 mm. De ulike sensorer ble plassert i forskjellige borhull i de enkelte måleoppsett og dataoppløsning i de enkelte tilfeller er derfor anført i vannstandsgrafene i figurene 4.2-4.11.

For å få en kontinuerlig kontroll med vannmengden som ble pumpet ut av borhullene under de enkelte kapasitetstester ble det benyttet en vannmengdemåler av merket Endress & Hauser, type Promag 33AT15 (figur 3.2). Målerområdet ble stilt til 0-0.8 l/s og repetisjonen er oppgitt til 0.1 % av måleverdi. P.g.a. feilinnstilling av måleområdet ble utpumpet vannmengde ikke registrert ved den første kapasitetstesten (BH6).

Analogsignalene (4-20 mA) fra vannmengde- og vannstandsmålerne ble lagret på en datalogger av merket Grant, type Squirrel 1207. Av praktiske hensyn har NGU laget en loggerutrustning som er fast montert i en varebil, hvor de ulike sensorer kobles direkte inn i et kontaktpanel på utsiden av bilen. Fra dataloggeren overføres de innsamlede data via RS232-inngang til PC, for videre prosessering i regneark og lagring.

Vannstands-sensorene får strømforsyning fra 12V batteri i målebilen. Sensorene er derfor upåvirket av eventuelle uregelmessigheter i strømleveransen fra strømaggregatet.

*Figur 3.1.*



*Figur 3.1.  
Senkepumpe (4'') og  
elektronisk vannstandssensor  
ved siden av brønn 6.*



*Figur 3.2.  
Bildet viser den elektroniske  
vannmengdemåleren på  
utløpsslangen fra brønnen  
under pumping*



I dataloggeren kan datalagringsfrekvensen defineres fritt i området 1 sekund til 24 timer. Under kapasitetstestene ble det valgt en datalagringsfrekvens (tidsopløsning) på 5 sekunder. For å redusere datamengden ble frekvensen stilt om til 3-10 minutter etter at den raskeste delen av vannstandsstigningen var avsluttet.

### **3.2 Teknisk utførelse av pumpetestene og stigningstestene**

Senk-pumpa ble for alle pumpetestene plassert fra 48-49 m dyp sett fra toppen av borhullet. En vannstands-sensor med måleområde 0-75 m ble plassert 1-2 m under pumpa, ved bunnen av borhullet. De øvrige vannstands-sensorer ble, utfra en vurdering av forventet vannstands- endring, plassert i et passende nivå i de omkringliggende borhullene.

Det ble pumpet med full kapasitet på pumpa, hvilket i praksis tilsvarte 2340-2700 l/time (0.65-0.75 l/s) ved starten av pumpingen (2-4 m løftehøyde), gradvis avtagende til 1800 l/time (0.5 l/s) ved slutten av pumpingen (50 m løftehøyde). Utpumpet vannmengde er dokumentert i detalj i figurene 4.2 til 4.11. Når vannstanden var senket 50 m, dvs. ned til pumpa, ble pumpa stoppet og vannstanden fikk stige fritt ca 1 m. Det ble så gjennomført en ny kort pumping for å senke vannstanden ned til pumpa. Denne veksling mellom pumpestart og pumpestopp ble repetert slik at vannspeilet ble holdt på mellom 49 m og 50 m dyp gjennom ca én time. Startingen/stopningen kommer fram som «sagtakker» i vannstandskurvene (eks. BH9 i figur 4.10). Etter denne én-times-perioden med senket vannstand ble pumpingen avsluttet og naturlig vannstandsstigning ble overvåket.

Tilsvarende pumpetester og stigningstester for beregning av kapasitet er utført av NGU i Hvaler-prosjektet (Banks et al. 1991).

### **3.3 Kapasitetsberegninger**

Diameter for de enkelte borhull er 5.5'' hvilket gir et brutto brønnvolum på 14.9 l/m. Senk-pumpe med strømkabel og vannslange samt sensorkabel gir et fratrekk på 0.7 l/m slik at netto brønnvolum er 14.2 l/m.

Netto tilstrømming til brønnene under senketesten er beregnet som differansen mellom utpumpet vannmengde og vannvolum i selve borhullet. Som et eksempel er utpumpet vannmengde fra BH2, beregnet utfra vannføringskurven, 757 l. Opprinnelig vannsøyle i borhullet er 45.8 m = 650 l. Netto tilstrømming til brønnen er da 107 l gjennom en pumpe-tid på 1339 s, d.v.s. tilstrømningskapasiteten under senketesten var 288 l/time.

Netto tilstrømming til brønnene under stigetesten er beregnet som stige­hastighet (m/t) multiplisert med netto brønnvolum (l/m).

## **4. RESULTATER PRØVEPUMPING**

### **4.1 Grunnvannstand før pumping**

Figur 4.1 viser et kotekart for grunnvannstand i de ulike borhull før testpumping startet. Kartet synes å gi et relativt dekkende bilde av naturlig grunnvannstand i området. Korttidstesting viser at flere av brønnene (BH1, 4, 5 og 7) har et meget begrenset vanntil­sig og vannstanden i disse kan fortsatt være noe forstyrret p.g.a. blåsing med trykkluft under boringen. BH7 er ikke tatt med ved fremstilling av kotekartet idet denne viser en meget lav vannstand (-36 m) som helt klart er påvirket av boreoperasjonene.

Grunnvann i fjell viser ikke nødvendigvis et veldefinert grunnvannspeil med lineær sammenheng mellom ulike observasjonspunkter. Vannstanden i de enkelte borhull kan være definert av trykknivået i separate sprekkesystemer som ikke har direkte hydraulisk kontakt. Kotekartet i figur 4.1 indikerer et relativt konsistent trykkbilde med et grunnvannsspeil som ligger 3-6 m under referansenivået og med gradient rettet S, SØ og SV av størrelsesorden 6 % (6 cm/m).

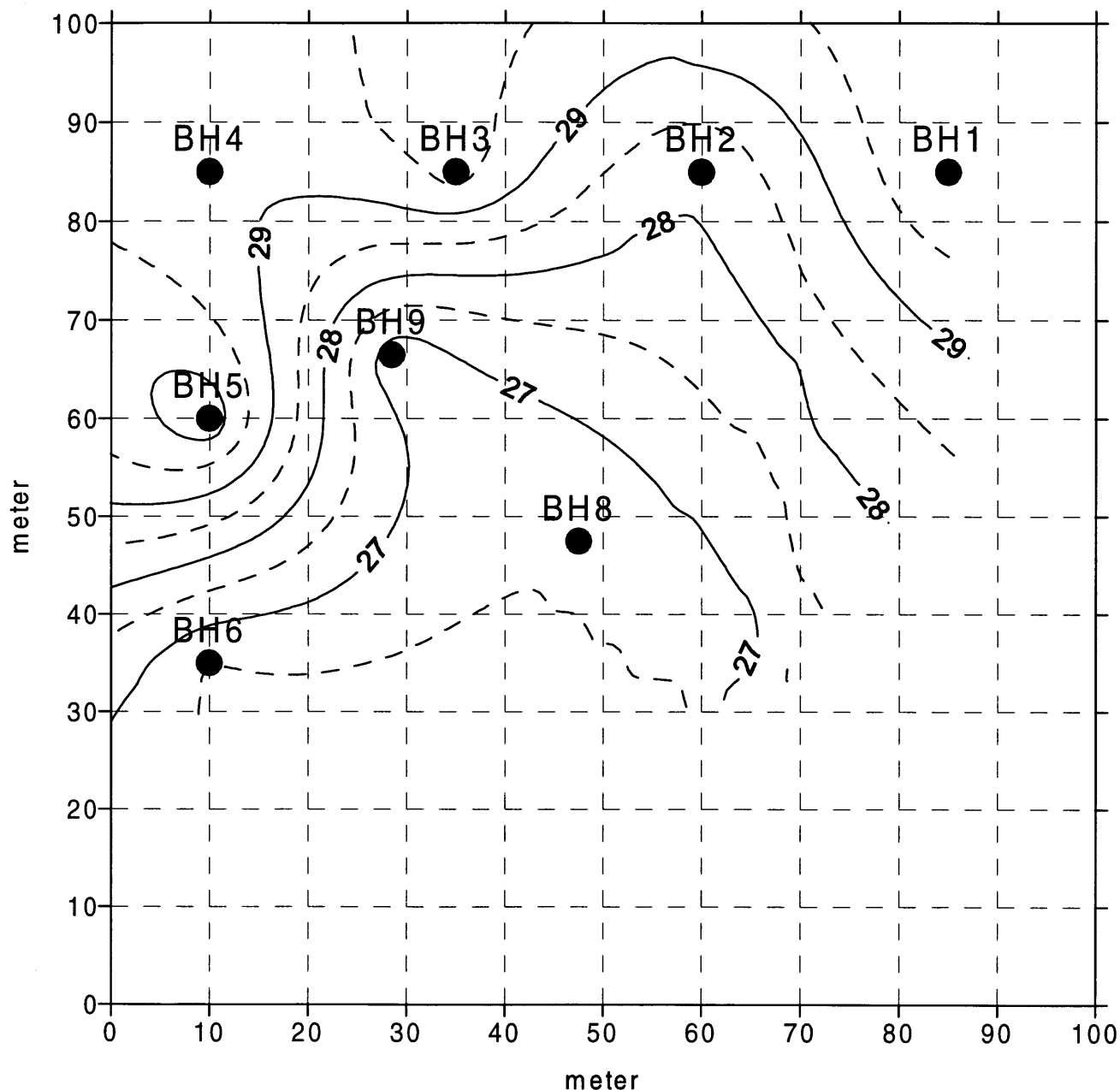
Kapasitetstesting utfra stige­data viser at BH6 og BH8, og tildels BH 3 og BH9, har en betydelig høyere vanngiverevne enn de øvrige brønner (tabell 5.1). Testene viser også at det er kun disse fire brønnene som viser klar hydraulisk kommunikasjon. Det kan derfor være grunnlag for å anta at disse brønnene kommuniserer gjennom et delvis åpent, litt dypere­liggende, sprekkesystem. Dette kan være årsaken til at trykknivået i BH6, BH8 og BH9 er lavere (-6 m) enn i de øvrige brønner (ca - 3 m). Kotekartet i figur 4.1 kan i så fall gi et noe for­tegn­et bilde i forhold til det virkelige trykkmønsteret i undersøkelsesområdet.

### **4.2 Resultater fra pumpetestene**

I det følgende presenteres resultatene fra korttidstesting av brønnene i brønnfeltet. Resultatene presenteres i den rekkefølge som brønnene ble testet. Tabell 4.1 viser datoene testene ble foretatt. Brønn 7 ble ikke testet da det ikke var tid til dette. I tillegg til korttidstestene er naturlige svingninger i grunnvannsnivået registrert i perioder uten pumping (25-26.oktober og 31.oktober-12.november). En oppsummering av hovedresultatene er gitt i avsnitt 4.2.13

**Tabell 4.1. Tabellen viser hvilke datoer i oktober 1997 de forskjellige korttidstestene ble utført.**

Brønn nummer	6	2	4	1	8	5	3	9
Dato	22-23	23-24	24-25	26-27	27-28	28-29	29-30	30-31



*Figur 4.1. Grunnvannskotekart for borhull BH1-BH9. Kotekartet er tegnet med bakgrunn i vannstandsmålinger 21.10. 1997. Alle kotehøyder er gitt i meter over havet. Kartet viser en hovedgradient for grunnvannsspeilet av størrelsesorden 6% (6 cm/m) med retning mot syd, sydøst og sydvest.*

Toppen av alle brønnrørene ble nivellert inn, men nivellelementet ble ikke knyttet opp mot et fastpunkt med kjent høyde over havet. Som referansenivå er det antatt ut fra økonomisk kartverk at brønntopp borehull 4 (BH4) ligger på 30 m.o.h. Alle grafiske presentasjoner er gitt med referanse til topp av BH4 (tabell 4.2).

**Tabell 4.2. Tabellen viser nivellement og høyde over havet av brønntoppen med borehull 4 som nullnivå. I tillegg er avstanden av topp rør over bakken målt.**

Brønn nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nivellement	0,68	0,36	0,34	0	2,62	1,17	-3,66	-2,04	2,29
Høyde over havet (m.o.h.)	30,68	30,36	30,34	30,0	32,62	31,17	26,34	27,96	32,29
Topp rør over bakken (m)	0,44	0,41	0,39	0,43	0,40	0,45	0,40	0,42	0,43

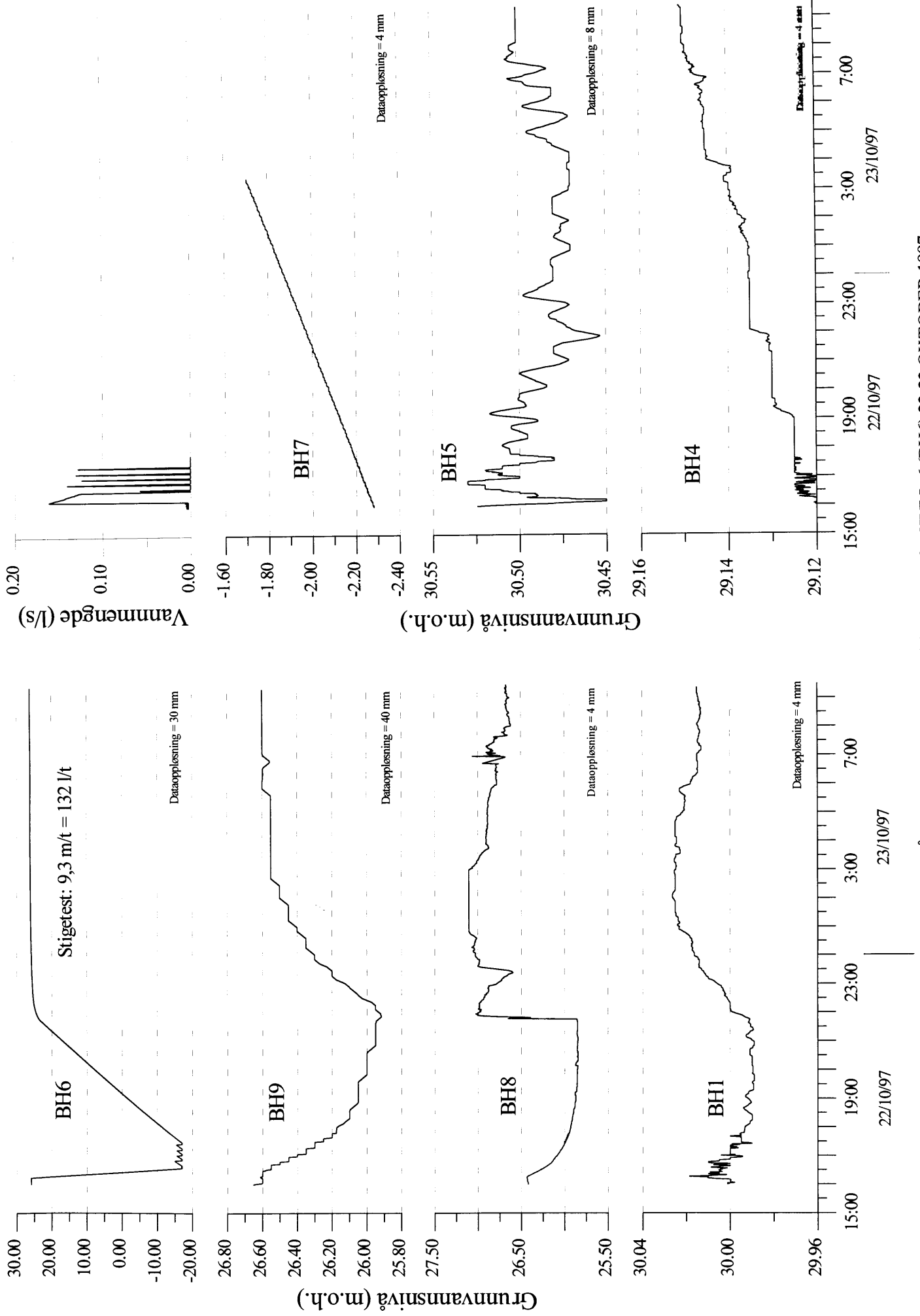
#### 4.2.1 Korttidstesting av borhull 6

Vannstandsendingene i de ulike borhullene under pumping av BH6 er vist i figur 4.2. Endringene i BH2 og BH3 ble ikke overvåket. BH6 viser et tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp under testpumpingen. Et markert knekkpunkt oppstår idet vannstanden når opp til ca 25 m.o.h., hvilket indikerer at vanntilførselen i all hovedsak skjer gjennom overflatenære sprekker ned til omtrent dette nivået. En svak, eksponentiell kurving av stigedataene viser imidlertid også ett visst vannbidrag fra sprekker jevn fordelt nedover langs borhullet. Kapasiteten beregnet utfra stigedata er 132 l/time, noe som må betegnes som høy vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

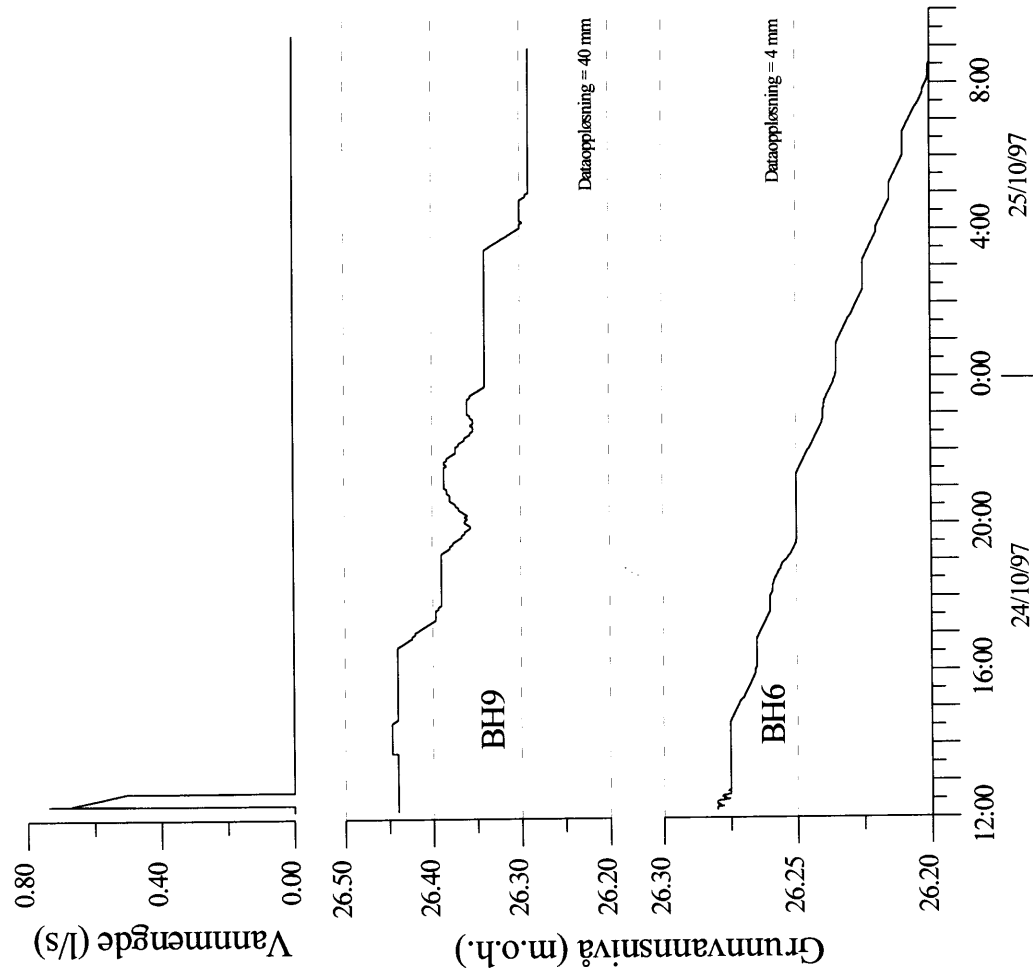
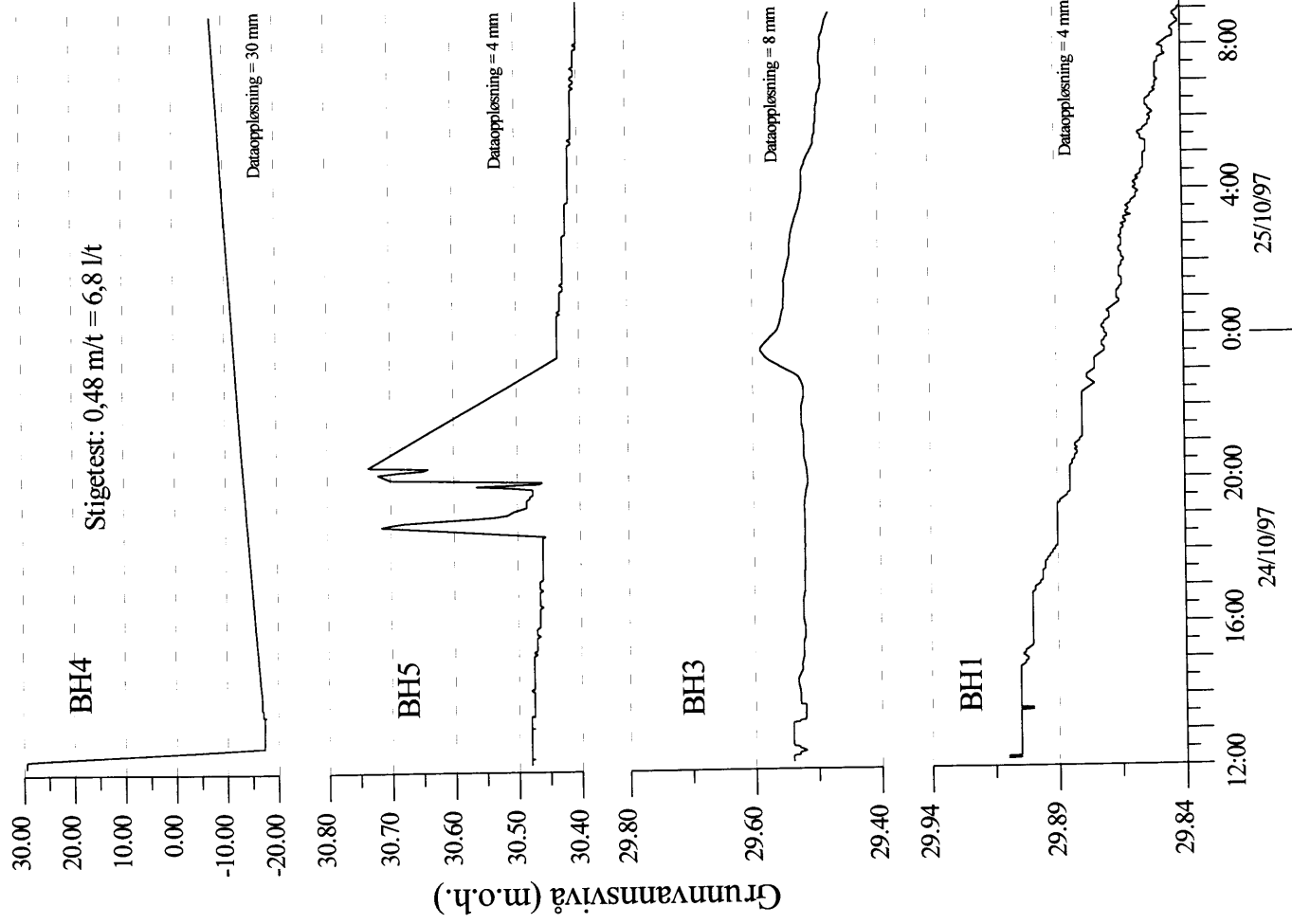
Pumpingen i BH6 ga en klar trykkrespons i BH8 og BH9, i form av en vannstandssenkning på h.h.v. 0,6 m og 0,7 m. For begge brønnene begynte vannstanden å stige igjen samtidig med at oppfyllingen i BH6 ble avsluttet. Dette indikerer at kommunikasjonen i hovedsak skjer gjennom overflatenære sprekkesystemer. I BH8 observeres en momentan oppfylling, mens stigningen i BH9 tar ca 5 timer.

Også i BH1 og BH5 observeres en svakt synkende grunnvannstand (h.h.v. 2 og 5 cm) i det tidsrommet hvor vannstanden i BH6 er senket. Endringen er for liten til at den med sikkerhet kan tolkes som et resultat av pumpingen i BH6 og kan skyldes naturlige svingninger.

Verken BH7 eller BH4 ser ut til å være påvirket av pumpingen i BH 6.



FIGUR 4.2. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 6 (BH6) 22-23 OKTOBER 1997



FIGUR 4.4. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 4 (Bh4) 24-25. OKTOBER 1997



#### 4.2.2 Korttidstesting av borhull 2

Vannstandsendingene i de ulike borhullene er vist i figur 4.3. Endringene i BH6 og BH7 ble ikke overvåket. BH2 viser et tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp under testpumpingen, hvilket indikerer at vanntilførselen i all hovedsak skjer gjennom overflatenære sprekker. En eksponentiell kurving av stigedataene observeres fra ca 20 m.o.h. og opp, hvilket indikerer at de viktigste vannførende sprekker ligger innen dette området. Kapasiteten beregnet utfra stigedata er 54 l/time, noe som må betegnes som middels vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

Pumpingen i BH2 gir ingen entydig trykkrespons i de øvrige borhull. Det observeres en senkning på 0.1 m i BH9 som kan være relatert til pumpingen.

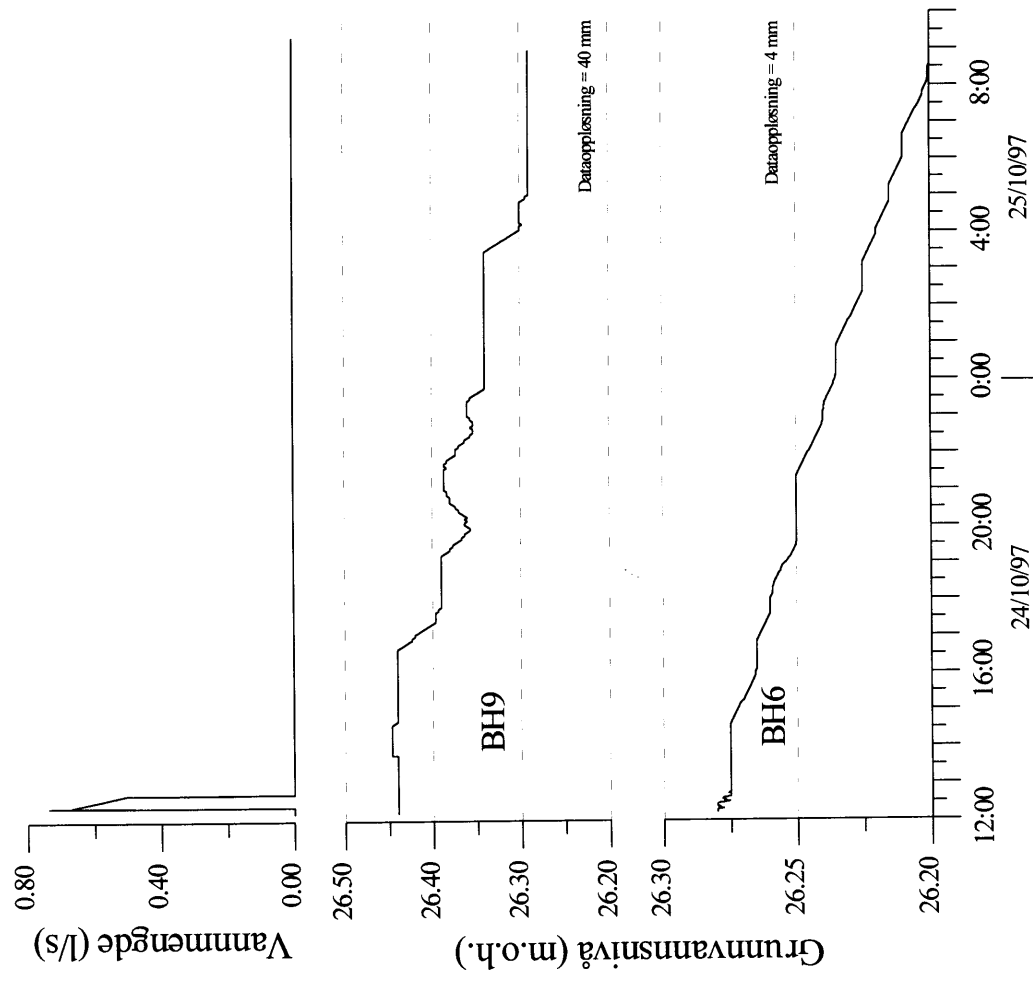
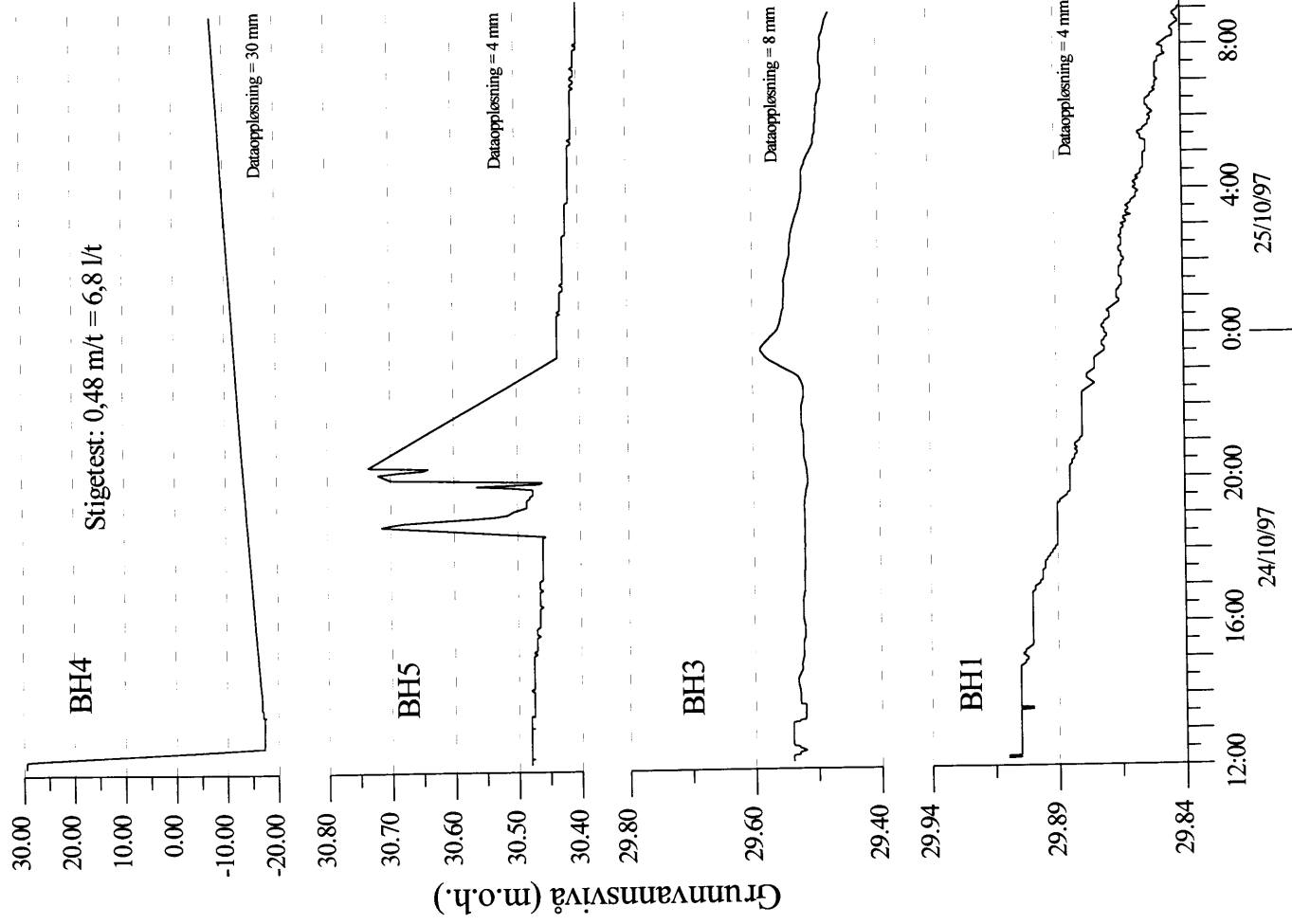
#### 4.2.3 Korttidstesting av borhull 4

Vannstandsendingen i de ulike borhull er vist i figur 4.4. Endringene i BH2, BH7 og BH8 ble ikke overvåket. BH4 viser et tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp under testpumpingen. En meget svak eksponentiell kurving av stigedataene observeres, hvilket indikerer noe vanntilførsel fra sprekker jevnt fordelt langs borhullet. Stigehastigheten var meget lav slik at vannspeilet lå på ca -7,5 m.o.h. 19 timer etter avsluttet pumping. Kapasiteten beregnet utfra stigedata er 6,8 l/time, noe som må betegnes som lav vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

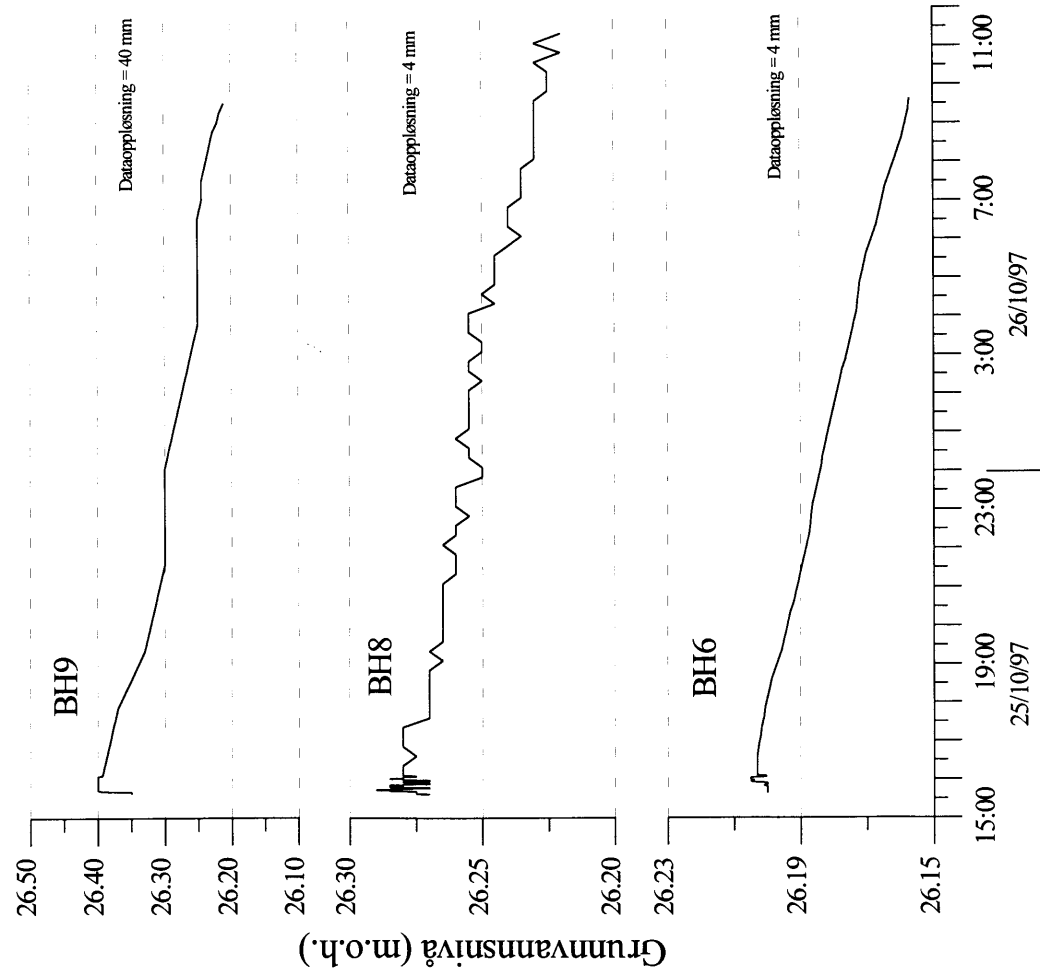
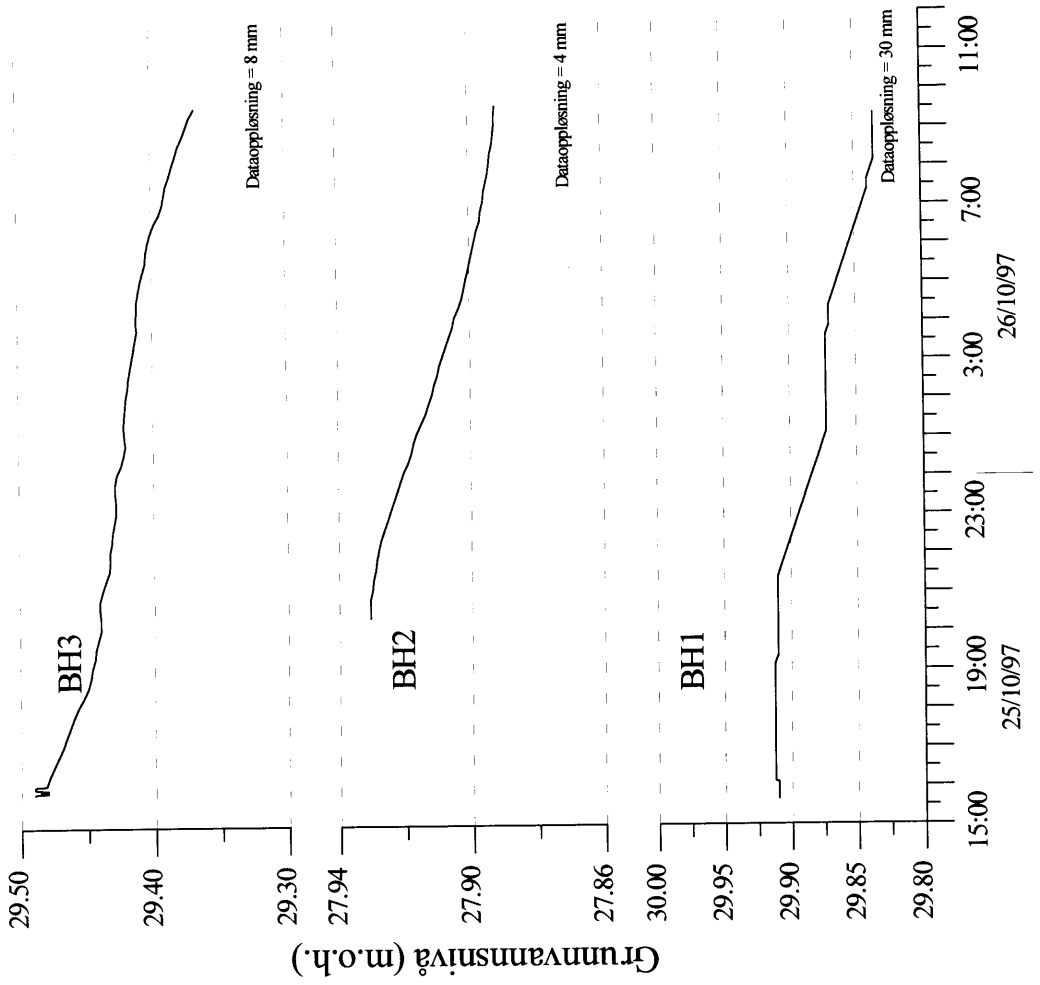
Pumpingen i BH4 gir ingen entydig trykkrespons i noen av de øvrige borhullene.

#### 4.2.4 Naturlige vannstandsendinger 25-26.oktober

På grunn av tekniske problemer (frosset avløpsslange) ble det ikke utført testpumping den 25-26.oktober. Gjennom dette døgnet ble naturlig vannstandsending registrert og resultatene er vist i figur 4.5. Det ble ikke gjort observasjoner i BH4, BH5 og BH7. Grunnvannstanden sank jevnt i hele feltet. Størst senkning ble observert i BH9 (17 cm pr. 17 timer) og minst i BH6 og BH8 (4-5 cm pr. 17 timer). Senkningen er relatert til endring i værforholdene idet det fram til 25. oktober var rikelig med snø/sludd-byger og stor infiltrasjon, mens det fra og med 25. oktober var meget kaldt (-5 til -10 °C) og frost på bakken.



FIGUR 4.4. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 4 (Bh4) 24-25. OKTOBER 1997



FIGUR 4.5. NATURLIGE VANNSTANDESDRINGER 25-26.OKTOBER 1997

#### 4.2.5 Korttidstesting av borhull 1

Vannstandsendringen i de ulike borhullene er vist i figur 4.6. Endringene i BH4, BH5 og BH7 ble ikke overvåket. BH1 viser et tilnærmet lineært senkningsforløp under testpumpingen, mens stigedataene har en eksponentiell kurving. Dette indikerer vanntilførsel fra sprekker jevnt fordelt langs borhullet. Stigehastigheten var lav slik at vannspeilet lå ca 19 m (11 m.o.h) under opprinnelig vannstand 21 timer etter avsluttet pumping. Kapasiteten beregnet utfra stigedata er 23 l/time, noe som må betegnes som middels vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

Pumpingen i BH1 gir ingen entydig trykkrespons i de øvrige borhull. I BH3 observeres en markert stigning i vannstanden parallelt med pumpingen i BH1, hvilket skyldes tilførsel av vann fra avløpsledningen fra pumpa. Dette kan også være tilfelle i BH2. Ellers registreres en jevnt synkende vannstand i alle brønner.

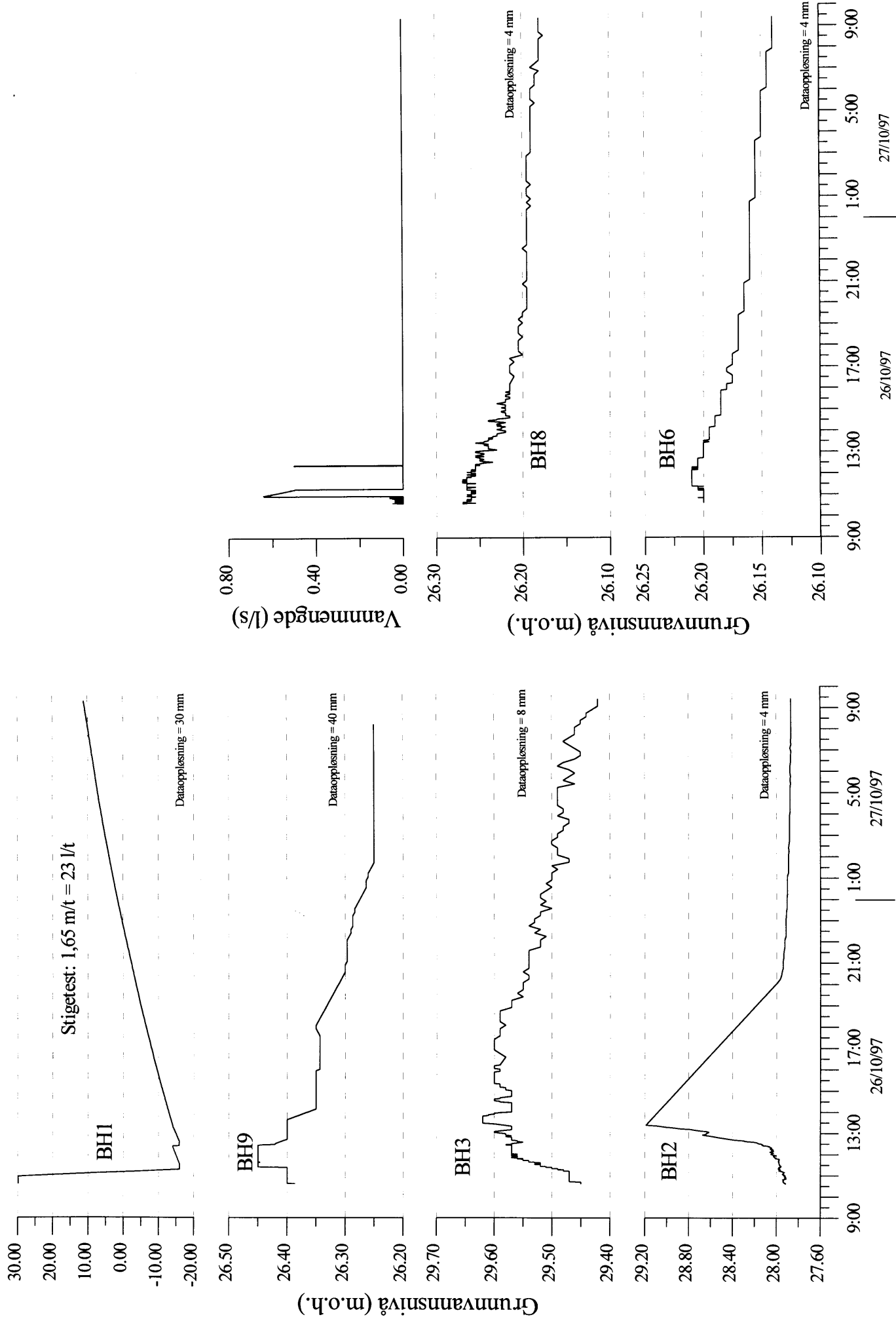
#### 4.2.6 Korttidstesting av borhull 8

Vannstandsendringen i de ulike borhull under pumping av BH8 er vist i figur 4.7. Aksene for grunnvannsnivå i BH8 og vannmengde er forstørret noe i forhold til de resterende kurvene. Endringene i BH4, BH5 og BH7 ble ikke overvåket.

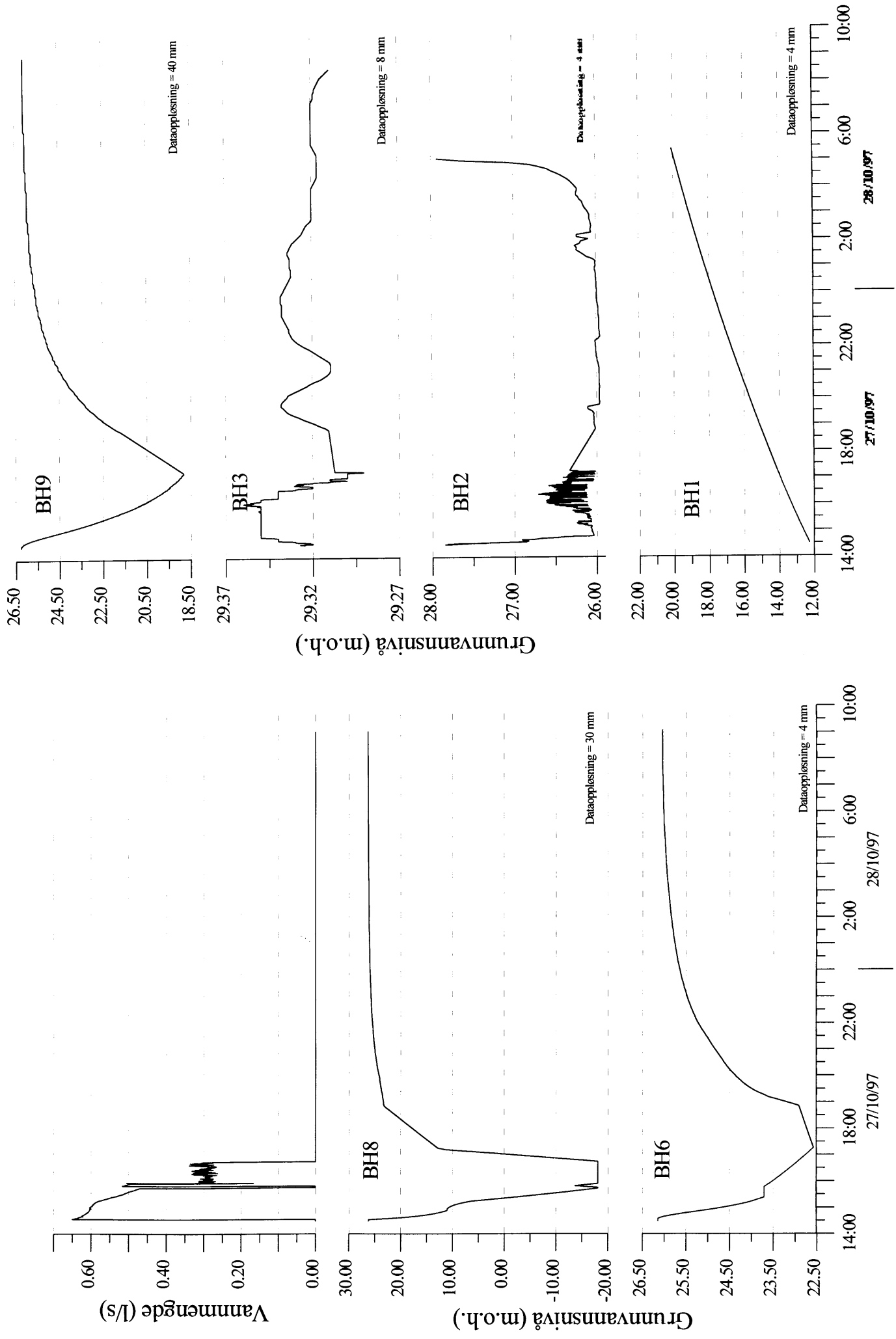
BH8 viser et senknings- og stigningsforløp som avviker klart fra alle de øvrige borhullene. Senkningen er svakt eksponentiell ned til ca 11 m.o.h. hvor et markert knekkpunkt fremkommer. Fra ca 7,5 m.o.h. og ned til ca -18,5 m.o.h. er senkningen lineær. Tilsvarende er stigningen lineær fra -18,5 m.o.h. til ca 11 m.o.h., hvor et svakt (11 m.o.h) og et markert (13 m.o.h.) knekkpunkt fremkommer. Stigningen er igjen lineær til ca 23 m.o.h., hvor et nytt knekkpunkt opptrer. Forløpet er typisk for et borhull hvor vanntilførselen i hovedsak kommer fra lokale sprekkesoner. I BH8 opptrer derfor en hovedsprekkesone i nivå 13-11 m.o.h. sammen med overflateoppsprekking i nivå ned til ca 23 m.o.h. Dette tilsvarer de 4-5 øverste metrene av borhullet.

Kapasiteten beregnet utfra stigedata fra nivå -18,5 m.o.h. til 13 m.o.h. og fra nivå 13 m.o.h. til 23 m.o.h. er h.h.v. 860 l/time og 94 l/time, noe som må betegnes som meget høy vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige borhullene. Denne vanngiverevnen er også høy sammenlignet med andre borhull i regionen, som har et gjennomsnitt på ca 500 l/t.

Pumpingen i BH8 gir en meget klar trykkrespons i BH6 og BH9, i form av en vannstandssenkning på h.h.v. 3.5 m og 7.5 m. For begge brønnene begynner vannstanden å stige samtidig med vannstandsstigningen i BH8. Dette indikerer god kommunikasjon gjennom



FIGUR 4.6. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 1 (BH1) 26-27. OKTOBER 1997



FIGUR 4.7. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 8 (BH8) 27-28. OKTOBER 1997

dypereliggende sprekker. I BH6 observeres også knekkpunkter som i tid er sammenfallende med knekkpunktene i BH8.

I BH3 observeres først en svak stigning og deretter en synkende grunnvannstand (5 cm) i det tidsrommet hvor vannstanden i BH8 er senket. Dette skyldes antagelig at utløpet fra BH8 lå rett ved BH3. Resultatet indikerer derfor at BH3 får vann tilført blant annet fra overflatenære sprekker.

BH1, som har lav kapasitet og lav stigehastighet, viser fortsatt en markert stigning i grunnvannstanden som følge av pumpingen den 26.10.97.

#### 4.2.7 Korttidstesting av borhull 5

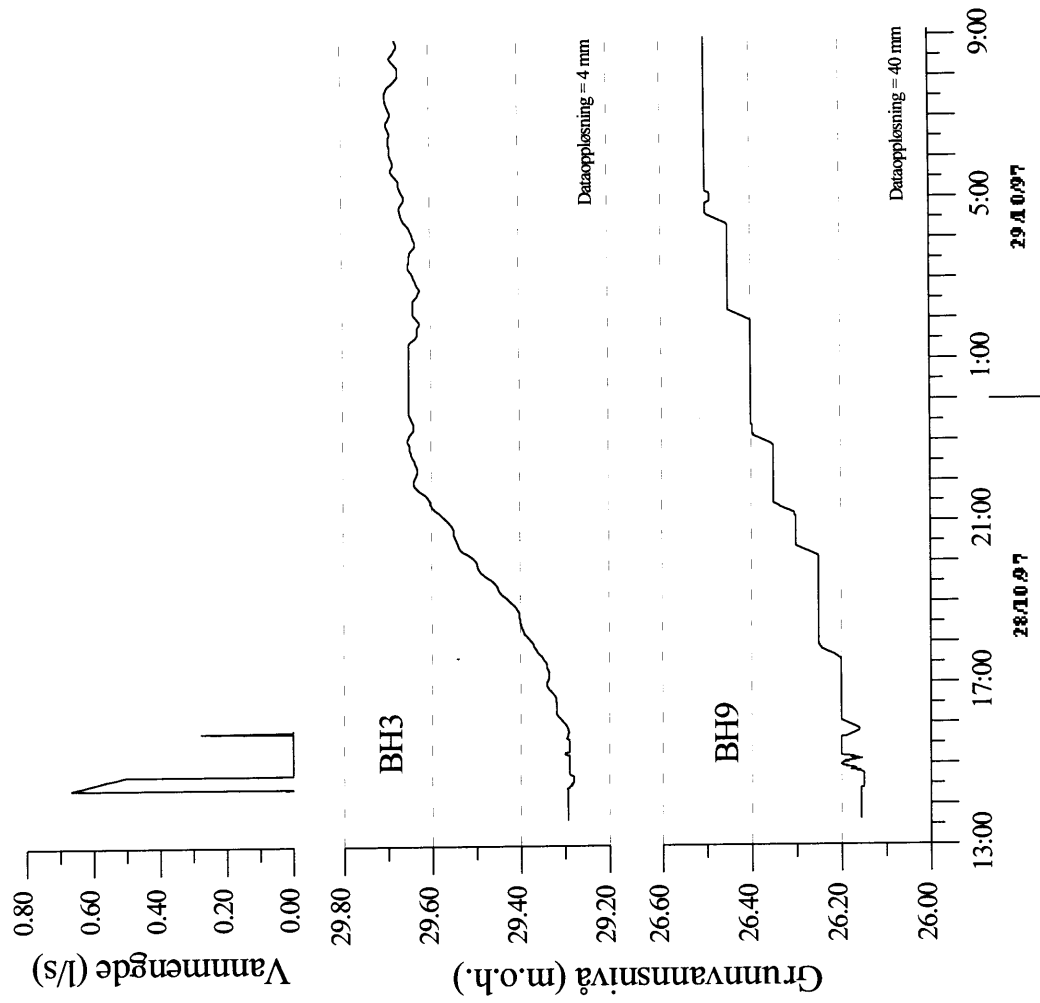
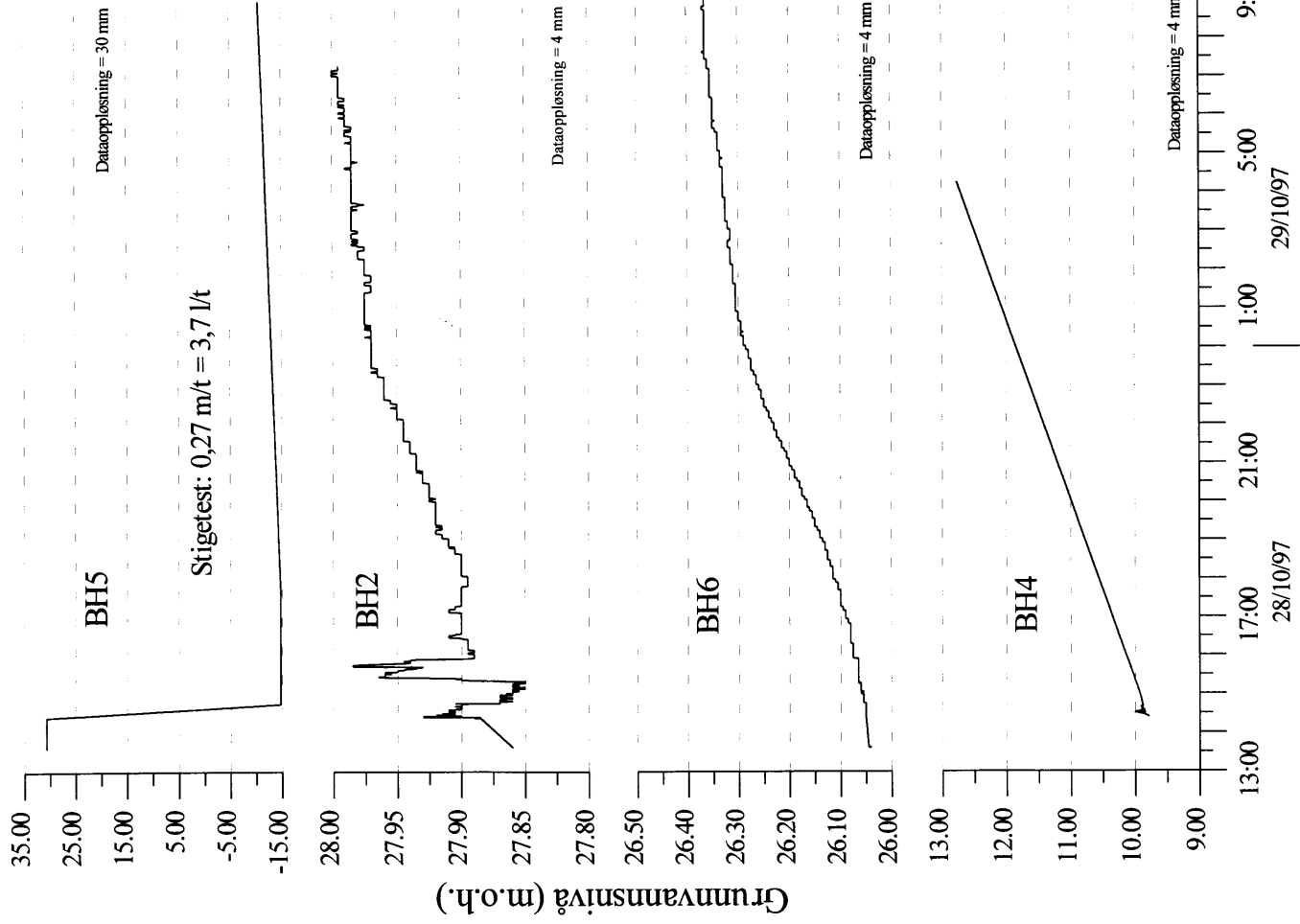
Vannstandsendingene i de ulike borhull er vist i figur 4.8. Endringene i BH1, BH7 og BH8 ble ikke overvåket. BH5 viser et tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp under testpumpingen. Stigehastigheten var meget lav slik at vannspeilet kun hadde steget 4 m 16 timer etter avsluttet pumping. Kapasiteten beregnet utfra stigedata er 3,7 l/time, noe som må betegnes som lav vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

Pumpingen i BH5 gir ingen entydig trykkrespons i de andre borhullene. Alle brønner viser en stigende vannstand (0.3-0.4 m pr 16 timer) som følge av omslag til mildvær, regn og snøsmelting natt til 28.oktober. I BH4 pågår fortsatt en markert stigning som følge av pumpingen den 24.oktober.

#### 4.2.8 Korttidstesting av borhull 3

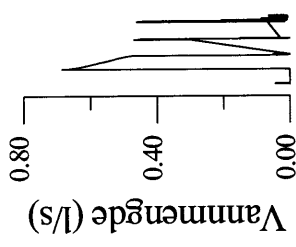
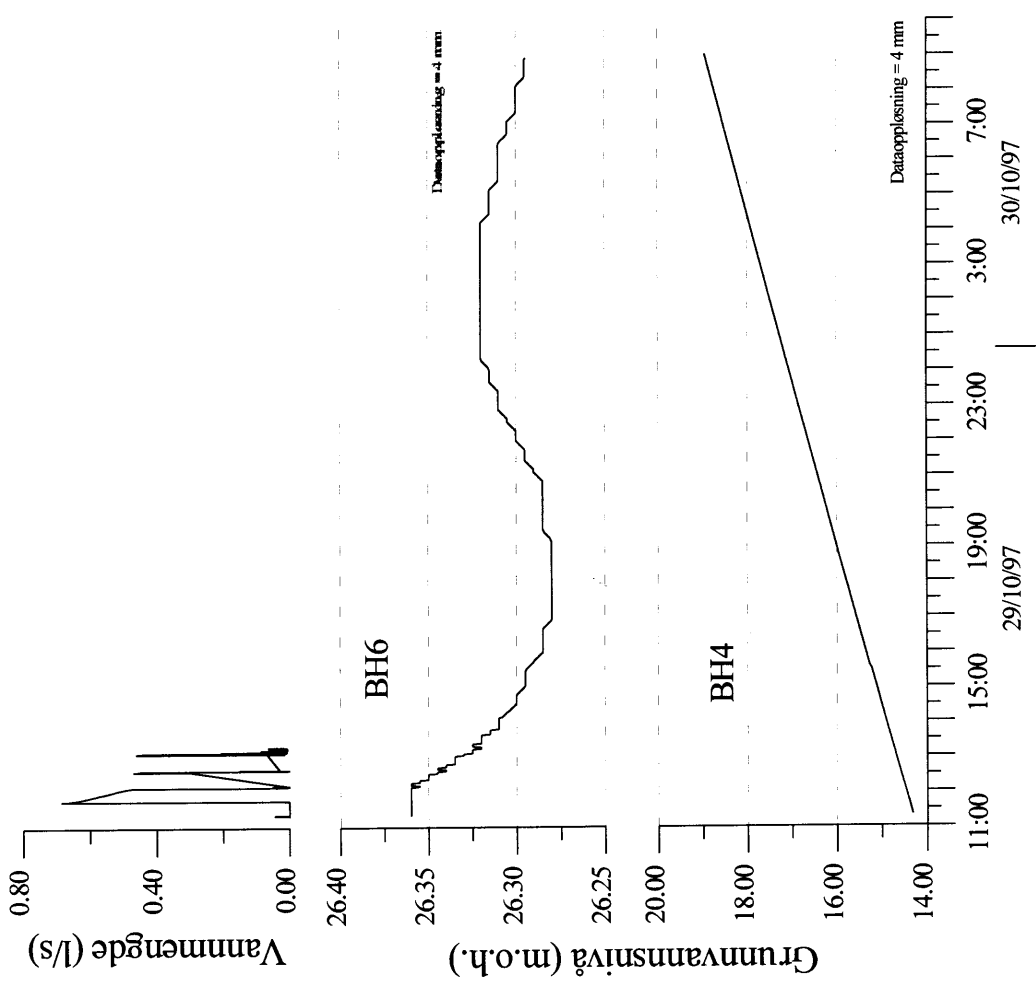
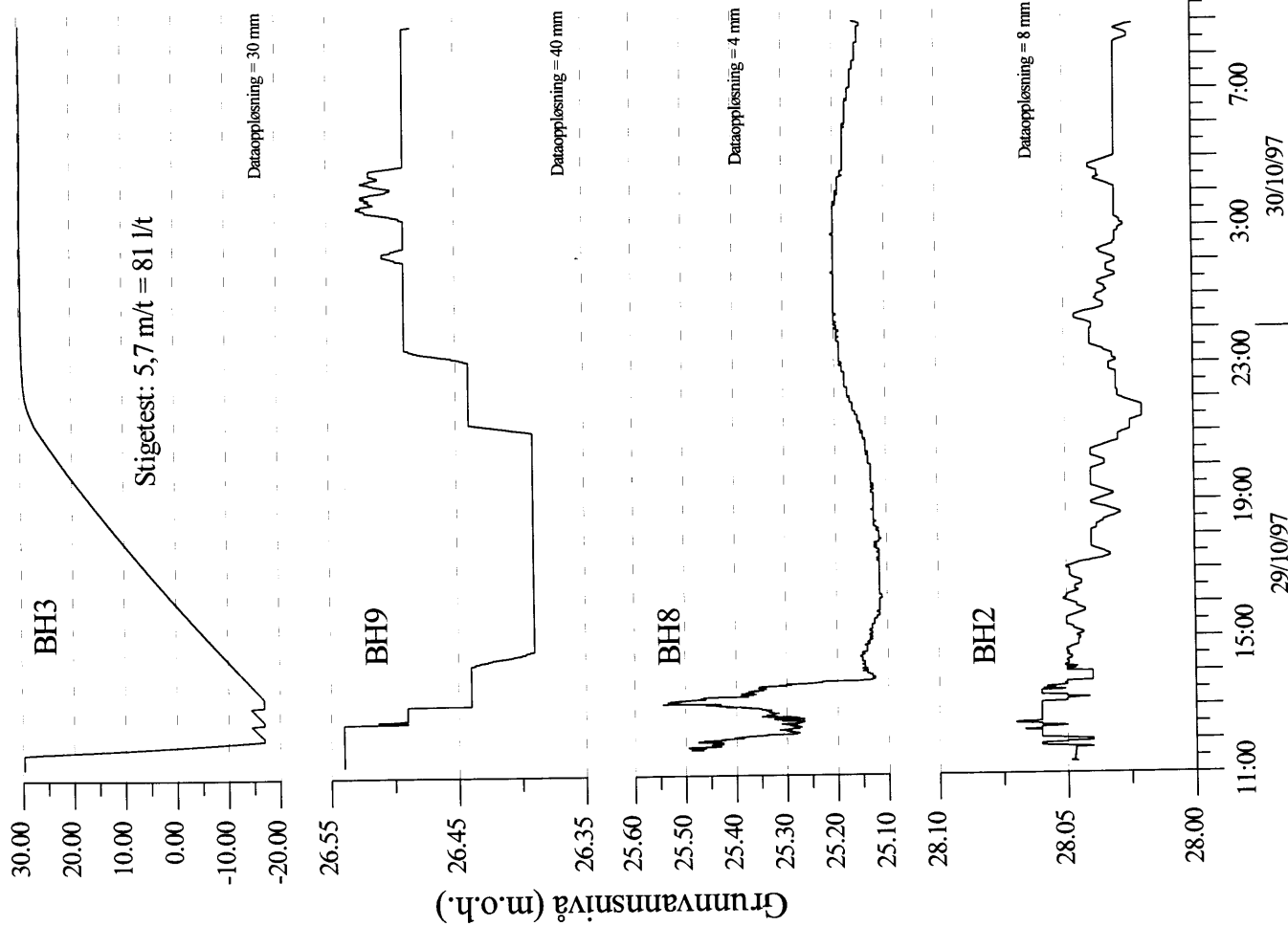
Vannstandsendingene i de ulike borhullene under pumping av BH3 er vist i figur 4.9. Endringene i BH1, BH5 og BH7 ble ikke overvåket. BH3 viser et tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp under testpumpingen, med et markert knekkpunkt idet vannstanden når opp til 27,5 m.o.h., hvilket indikerer at vanntilførselen i all hovedsak skjer gjennom overflatenære sprekker ned til ca dette nivået. En svak, eksponentiell kurving av stigedataene viser imidlertid også ett visst vannbidrag fra sprekker jevn fordelt nedover langs borhullet. Kapasiteten beregnet utfra stigedata er 81 l/time, noe som må betegnes som høy vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

Parallelt med pumpingen i BH3 observeres en senkning av vannstanden i BH6 og BH9 på h.h.v. 0.08 m og 0.15 m. For begge brønnene begynner vannstanden å stige igjen når vannstanden i BH3 er ca 27 m.o.h. Også i BH8 observeres et markert, men noe mer uryddig,



FIGUR 4.8. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STINGNINGSTEST I BORHULL 5 (BH5) 28-29. OKTOBER 1997





FIGUR 4.9. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 3 (BH3) 29-30. OKTOBER 1997

utslag (0.2 - 0.4 m). Utslagene i BH6, BH8 og BH9 er såvidt store og entydige at det tolkes som et resultat av pumpingen i BH3.

I BH4, som har lav kapasitet og stigehastighet, pågår fortsatt en markert stigning som følge av pumpingen den 24.oktober.

#### 4.2.9 Korttidstesting av borhull 9

Vannstandsendingene i de ulike borhullene ved pumping i BH9 er vist i figur 4.10. Endringene i BH1, BH5 og BH7 ble ikke overvåket. BH9 viser et klart avvik i forhold til alle de øvrige brønner idet stigningskurven er klart eksponentiell uten markerte knekkpunkter. (Knekkpunktet som kan observeres skyldes at sonden og pumpa ble tatt opp av brønnen, hvorpå kun sonden ble senket ned igjen.) Den eksponentielle kurven indikerer at brønnen får tilførsel av vann fra sprekker jevnt fordelt langs borhullet. Den fysiske utformingen av BH9 er også spesiell idet denne er boret til 100 m's dyp. Selv om pumpa er plassert på 50 m's dyp så vil trykkavlastningen under pumpingen gi mulighet for en betydelig tilstrømming av vann også fra sprekker som ligger dypere enn 50 m. Dette forholdet kan være noe av årsaken til det utpregede eksponentielle stigeforløpet i brønnen.

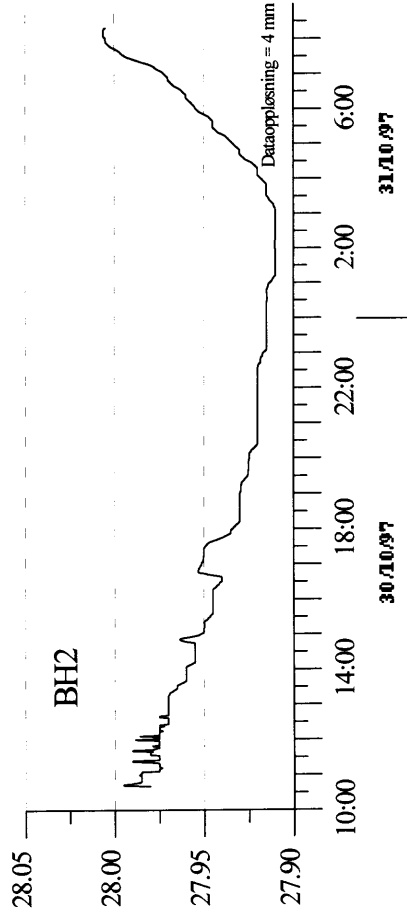
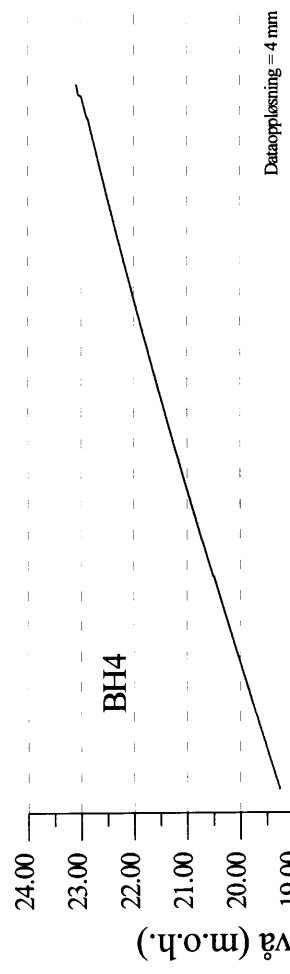
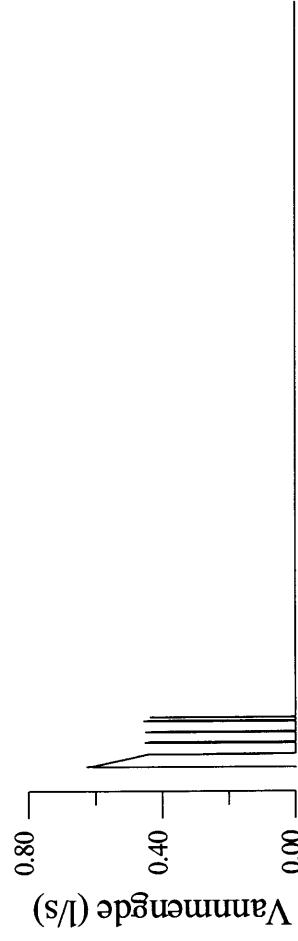
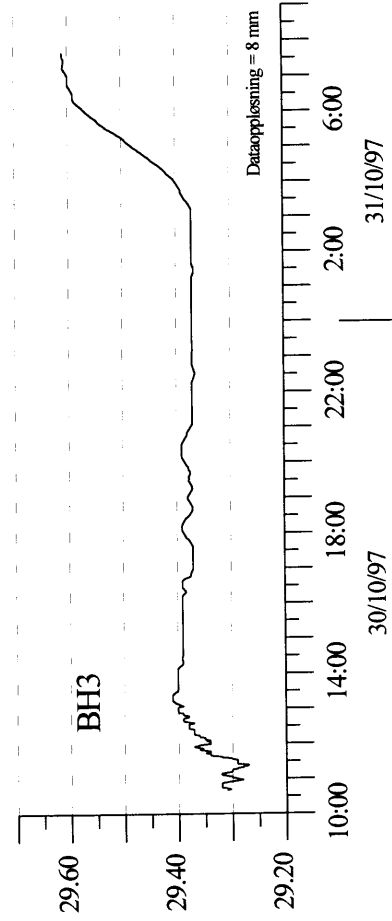
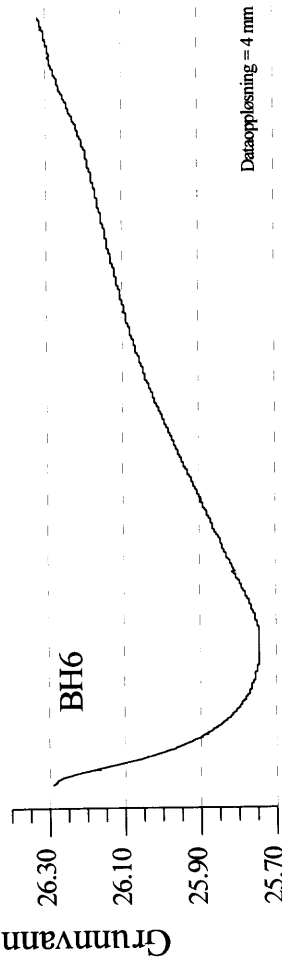
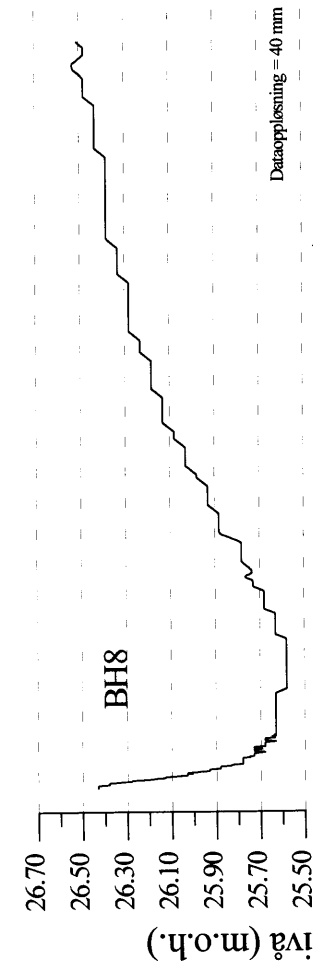
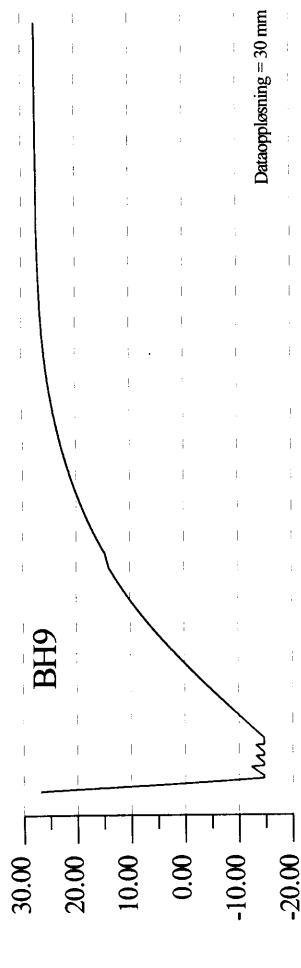
Midlere kapasiteten beregnet utfra stigedata fra -15 m.o.h. til 15 m.o.h. er 86 l/time, noe som må betegnes som høy vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

Pumpingen i BH9 gir en klar trykkrespons i BH6 og BH8, i form av en vannstandssenkning på h.h.v. 0,45 m og 0,9 m. For begge brønnene begynner vannstanden å stige ca 2,5 timer etter begynnende vannstandsstigning i BH9.

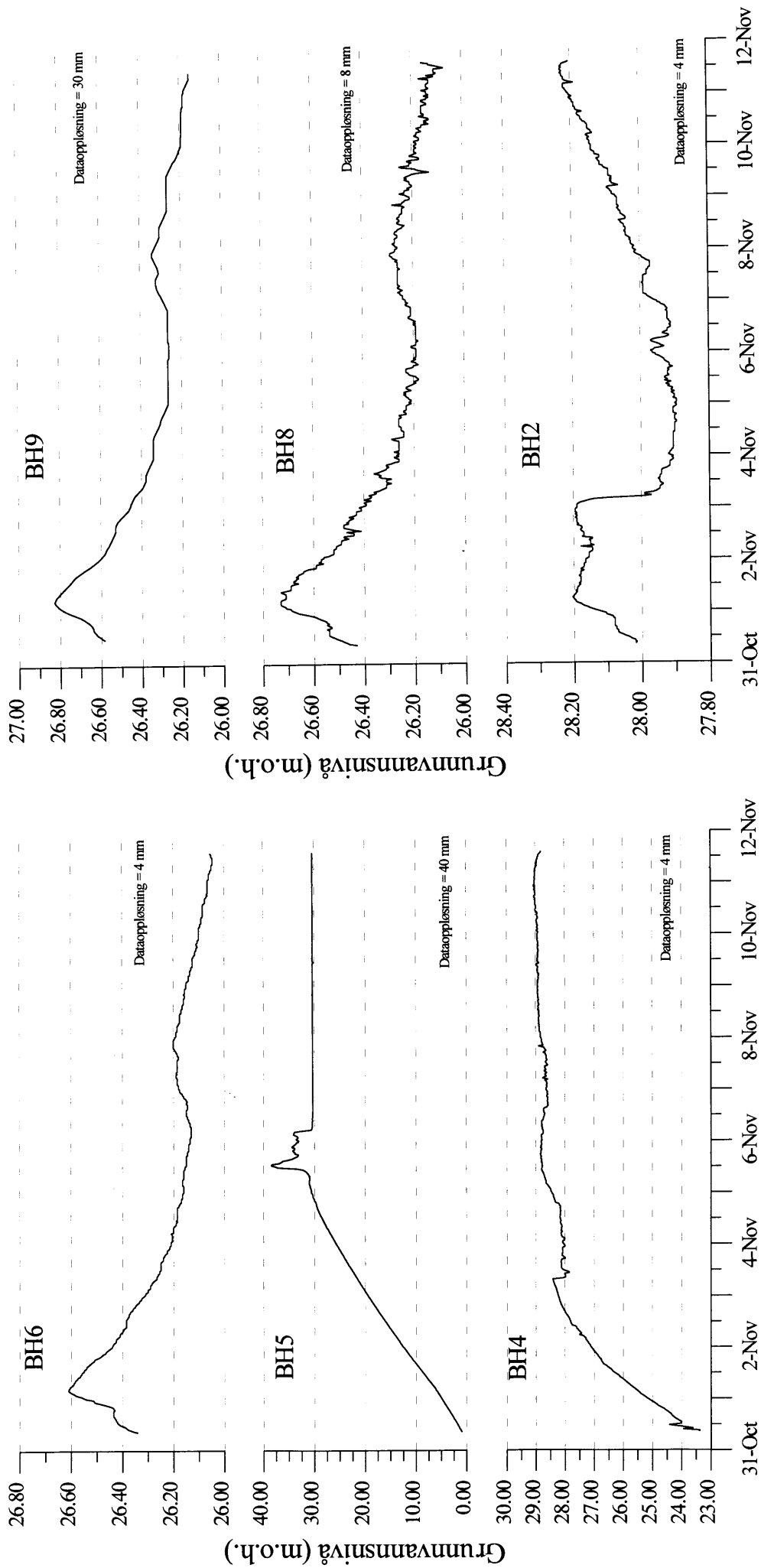
I BH4 pågår fortsatt en markert stigning som følge av pumpingen den 24. oktober.

#### 4.2.10 Naturlig vannstandsending 31. oktober-12. november

I foran angitte periode ble «naturlige» vannstandsendinger uten pumping registrert og resultatene er vist i figur 4.11. Det ble ikke gjort observasjoner i BH1, BH3 og BH7. Lavkapasitetshullene (BH 4 og BH5) er fortsatt påvirket av den tidligere pumpingen og viser en markert økning i grunnvannstanden gjennom første del av perioden. Høykapasitetshullene (BH6, BH8 og BH9) viser nær sagt identiske kurveforløp med stigende grunnvannstand (0.3 m) fram til 2. november 97 kl 08:00 og jevnt synkende vannstand i resten av perioden. Kurveforløpet er relatert til endring i værforholdene den 2.november, med omslag fra snø/sludd-byger og snøsmelting til kaldt vær og frost.



FIGUR 4.10. KORTTIDS PUMPETEST MED PÅFØLGENDE STIGNINGSTEST I BORHULL 9 (BH9) 30-31. OKTOBER



FIGUR 4.11. NATURLIGE VANNSTANSENDRINGER 31. OKTOBER TIL 12. NOVEMBER 1997.

BH2 viser delvis samme variasjonsmønster som høykapasitetshullene, men viser stigende vannstand i perioden 8-12. november.

#### 4.2.11 Borhull 7

Vannstanden i BH7 var, som en følge av boreoperasjonene, meget lav (-3,4 m.o.h.) på det tidspunkt hvor testpumpingene ble igangsatt. Vannstandsstigningen ble overvåket manuelt i perioden 21-27.oktober, og det ble målt en meget konstant stigning på 0,05 m/time.

Kapasiteten beregnet utfra stigedata er da 0,8 l/time, noe som må betegnes som meget lav vanngiverevne sett i relasjon til de øvrige brønnene.

## 5. DISKUSJON

### 5.1. Oppsummering

En oppsummering av resultatene fra kapasitetstestene er gitt i tabell 5.1. Alle brønnene må generelt sett sies å ha relativt lav kapasitet, med unntak av borhull 8. Utfra kapasitetene beregnet fra stigetestene kan følgende interne rangering av borhullene settes opp:

Meget høy kapasitet (>800 l/time):	BH8
Høy kapasitet (80 - 130 l/time):	BH3, BH6 og BH9
Middels kapasitet (20-50 l/time):	BH1 og BH2
Lav kapasitet (4-8 l/time):	BH4 og BH5
Meget lav kapasitet (<1 l/time):	BH7

I tabell 5.1 er det også angitt kapasitet beregnet utfra synketestene. Nærmere forklaring av beregningsmetoden er gitt i avsnitt 3.3. Som det fremgår gir synketestene 2-6 ganger høyere kapasitetsanslag enn stigetestene. Avviket er størst for borhull med middels stige kapasitet og minst for høykapasitetshullene. For lavkapasitetshullene er synkekapasiteten beregnet til null, men her vil usikkerheten i beregning av brønnvolum gjøre et prosentvis stort utslag.

Årsaken til at synketestene gir et betydelig høyere kapasitetsanslag enn stigetestene er ganske klart at borhullet får et betydelig vanntilskudd fra lokale, lukkede sprekkesystemer under senkningen. Dette tilskuddet vil prosentvis være størst for borhull med lav/middels kapasitet. Differansen mellom synke- og stige kapasitet gir et mål på omfanget/volumet av isolerte, vannførende sprekker (lokal sprekeporøsitet).

**Tabell 5.1. Kapasitet for de ulike brønner beregnet utfra korttidspumping ( ca én time) og måling av synkehastighet og stige hastighet.**

<b>Borhull nr</b>	<b>Kapasitet synketest (l/time)</b>	<b>Kapasitet stigetest (l/time)</b>	<b>Merknad</b>
1	119	23	EkspONENTIelt avtagende stigningsforløp
2	288	54	Tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp
3	297	81	Tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp
4	0	6.8	Tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp
5	0	3.7	Tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp
6	-	132	Tilnærmet lineært senknings- og stigningsforløp
7	-	0.8	Tilnærmet lineært stigningsforløp
8*	1519	860	Kapasitet nivå 11 m.o.h. til -18,5 m.o.h. Lineært stigningsforløp med knekkpunkter
8	1647	94	Kapasitet nivå 13 m.o.h. til 23 m.o.h. Lineært stigningsforløp med knekkpunkter
9	230	86	Kapasitet nivå -15 m.o.h. til 15 m.o.h. EkspONENTIelt avtagende stigningsforløp.

*\*Ved pumping i BH8 ble kapasiteten under pumpetesten i tillegg målt til 1000 l/t med kapasitetsmåler og ca 880 l/time ved to manuelle målinger i en 200 l plastdunk.*

Gjennom testpumpingen er det dokumentert en klar hydraulisk kontakt mellom de fire høykapasitetshullene, BH3, BH6, BH8 og BH9. Borhullene viser likevel klare forskjeller m.h.t. stigemønster. BH3 og BH6 viser et lineært stigningsforløp med markerte knekkpunkt på henholdsvis ca 2,5 m og ca 5,5 m bordyp, hvilket indikerer at vanntilførselen i hovedsak skjer fra overflatenære sprekker. BH8 viser et lineært stigningsforløp med markerte knekkpunkt på ca 14,5 m og ca 4,5 m bordyp. Dette indikerer vanntilførsel fra et hovedsprekkesystem på nivå 13-11 m.o.h. (12,5-14,5 m bordyp) samt vanntilførsel fra overflatenære sprekker. BH9 viser et eksponentielt avtagende stigningsforløp som indikerer vanntilførsel fra sprekker fordelt langs hele borhullet, også fra 50-100 m bordyp.

Borhullene med middels og lav kapasitet synes i stor grad «å leve sitt eget liv» med vanntilførsel fra sprekker fordelt langs hele borhullet. Dataene indikerer imidlertid små vannstandsendringer i form av små, raske svingninger også i disse hullene ved pumping i høykapasitetshullene. Forklaringen kan være en svak hydraulisk kontakt mellom pumpebrønnen og observasjonsbrønnen og at en reell vannstandssenkning ikke oppnåes fordi pumpetiden er for kort.

## 5.2. Trykkforplantninger

I flere tilfeller observeres små og raske svingninger i vannstanden i enkelte brønner, i tilknytning til testpumpingen. Eksempler ses i BH1 under pumping fra BH6 (figur 4.2), BH1 under pumping fra BH2 (figur 4.3), BH2 under pumping fra BH8 (figur 4.7) og BH2 og BH3 under pumping fra BH9 (figur 4.10). Dette kan skyldes støy, f.eks. ustabil spenning fra strømaggregat eller induserte strømsignaler, men tilsvarende tekniske oppsett er benyttet i flere andre sammenhenger uten at slike signaler er observert. Det antas derfor at dette er signaler som representerer reelle vannstandssvingninger. Forklaringen kan da være at den trykkavlastningen som oppstår i bergmassivet når vann pumpes ut fra ett brønnpunkt gir små bevegelser (kompresjoner) i omkringliggende sprekker, slik at vann vekselvis skvises ut av og trekkes inn i sprekker som har en svak hydraulisk kontakt med pumpebrønnen. Lengere pumpetid ville muligens gjort at man også i tilfellene med kun svak hydraulisk kontakt mellom pumpebrønn og observasjonsbrønn ville sett en større vannstandssenkning i observasjonsbrønnen.

Disse meget små svingningene registreres i første rekke i borhull med middels kapasitet (BH1 og BH2) under pumping fra borhull med høy kapasitet (BH6, BH8 og BH9).

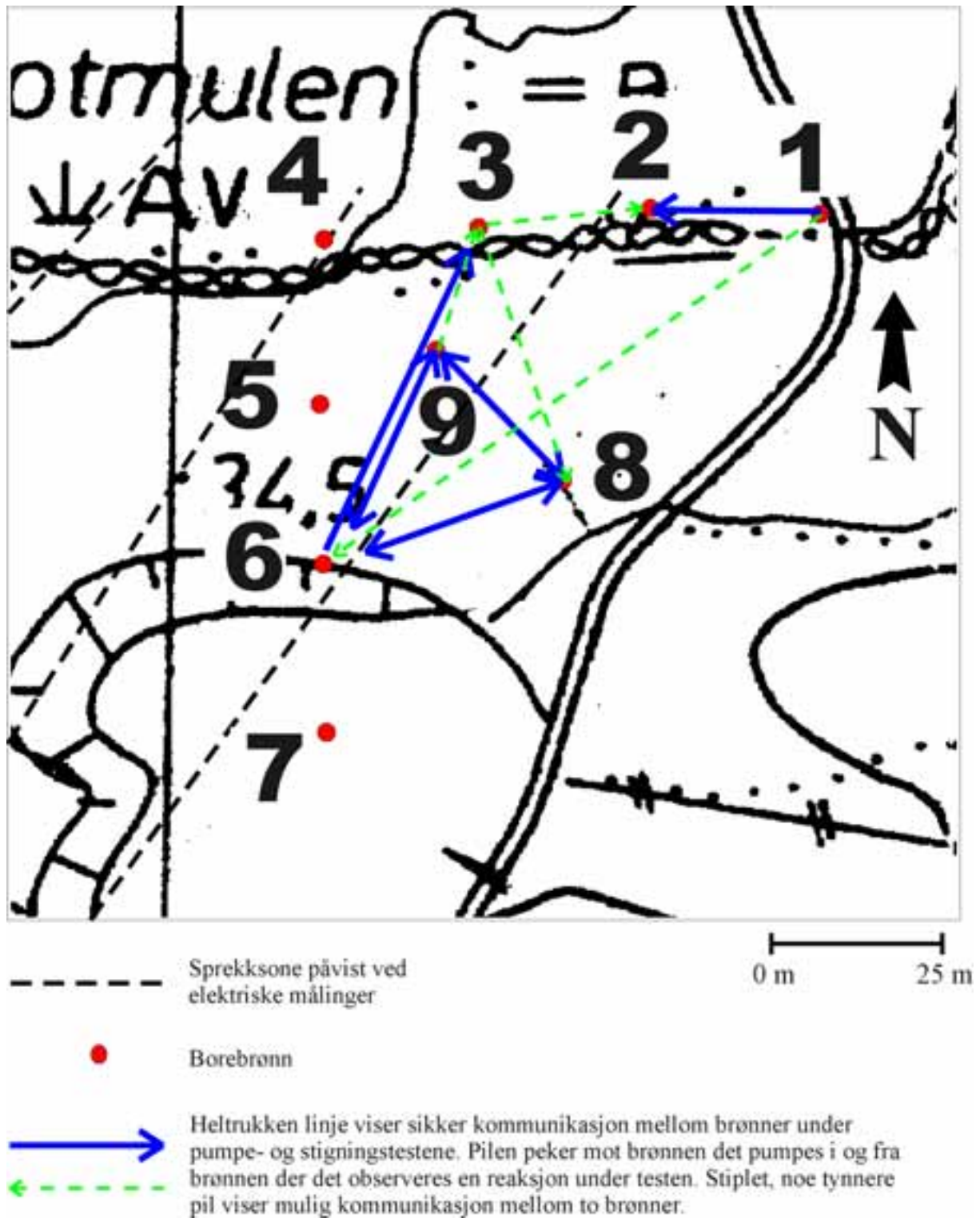
## 5.3. Retningsbetiget konduktivitet

Det er gjennom korttids pumpe-testene påvist en klar kommunikasjon mellom de fire mest sentrale borehullene i feltet (BH3, BH6, BH8 og BH9). Dette gir kommunikasjonsretinger både NØ-SV, NV-SØ og nesten Ø-V (figur 5.1). Kommunikasjonen mellom BH3 og BH 8 i NNV-SSØ retning er noe mer usikker da utpumpet vann fra BH8 ble sluppet ut ved BH3 og dermed virket inn på vannstandsendingen i BH3.

Ut fra pumpe-testene ser det ikke ut til at det er en enkelt hovedsprekk som fører vann. Det er heller ingen fremtredende kommunikasjonsretning langs NØ-SV lineamentene, som er påvist ved hjelp av geofysiske metoder, selv om vannbevegelse også skjer i denne retningen.

Ut fra modellen fremsatt i kapittel 1.6 skal grunnvannet i et brønnfeltet eller sprekkemagasin som ligger i den ytre sonen, dvs. mer enn ca. 100 meter unna større lineamenter, hovedsakelig foregå langs sprekker parallelle med den største bergspenningen. Det vil i Holmedal si i en øst-vestlig retning. Pumpe-testen viser at man har strømning innen sektoren NV-SØ til NØ-SV. Denne sektoren overlapper med antatt retningen for største horisontale spenning i brønnfeltet. Det er også verdt å bemerke at konduktiviteten vinkelrett største spenning, dvs. i N-S retning, ser ut til å være minimal. Dette er sammenfallende med Banks et al. (1996) sin konklusjon vedrørende spennings betydning for permeabilitet langs sprekkesystemer.

En foreløpig konklusjon er derfor at bergspenningene ved Holmedal brønnfelt påvirker sprekkepermeabiliteten.



Figur 5.1. Strømningsretninger i brønnfeltet observert under korttids pumpetester med påfølgende stigningstest. Alle brønner unntatt BH7 er testet.



#### **5.4. Videre undersøkelser**

For å underbygge ovennevnte konklusjon bør videre undersøkelser i brønnfeltet utføres i form av langtids prøvepumping i BH9. Denne brønnen er plassert sentralt i feltet og en langtidstest vil kunne si mer om kommunikasjonen mellom brønnene i feltet.

En langtids (10 dager?) pumpetest vil kunne gi et klarere bilde av permeabilitets-variasjoner, og vil dermed være et viktig fundament for numerisk modellering av strømningsene i brønnfeltet. Slike modeller vil kunne benyttes til å fastlegge klausuleringssoner rundt borebrønner. Sikre metoder for klausulering av fjellbrønner foreligger ikke i dag.

Undersøkelser utover langtids pumpetest vil kunne være tracettest og hydraulisk trykking av brønnene. Tracettester vil gi informasjon om oppholdstid og kommunikasjon mellom brønnene. Ved hydraulisk trykking vil man kunne oppnå større vannmengder i brønnen.

## 6. REFERANSER

- Andersen, T.B. & Jamtveit, B. 1990: Uplift of deep crust during orogenic extensional collapse: Model based on field studies in the Sogn-Sunnfjord region of W. Norway. *Tectonics* 9, 1097 - 1111.
- Banks, David, Lauritsen Torleif, Skarphagen Helge & Rohr-Torp, Erik, 1991: Hvaler-prosjekt - Grunnvann i fast fjell. Boring og kapasitetstesting av fire hull, ved Pulservik, Kirkeøy.
- Banks, D., Odling, N.E., Skarphagen, H. & Rohr-Torp, E. 1996. Permeability and stress in crystalline rocks. *Terra Nova*, 8, 223-235.
- Berg, S., Braathen, A., Gabrielsen, R.H., Lothe, A. and Henriksen, H., 1997. Lineaments and systematic fracture distribution in the Sunnfjord region, western Norway. Poster, TSGS-meeting, Stavanger, November 1997.
- Braathen, A. 1997: Post-devonske forkastningsystemer i Sunnfjord, Vest-Norge. Abstract, *Geonytt* 1-1997.
- Braathen, A. & Henriksen, H. 1997: Post-devonian fracture systems in the Sunnfjord region, onshore Western Norway. *NGU Bull.* 433, 16-17.
- Braathen, A., Gabrielsen, R.H. & Henriksen, H. 1997: Lineamenter, sprekkefordeling og grunnvann i krystalline bergarter i Sunnfjord. Det 7de seminar om Hydrogeologi og Miljøgeokjemi: 3-4.11.97. *NGU-rapport* 97.1150, s.11.
- Braathen, A. 1998. Polyphase brittle faulting in the Sunnfjord region, western Norway; kinematics and timing. *NGU Report.* 98.007, 42 p
- Braathen, A., Gabrielsen, R.H. and Henriksen H., under forberedelse. Lineament architecture and fracture distribution in metamorphic and sedimentary rocks, with application to Norway. *NGU Rap.* 98.047
- Bungum, H., Alsaker, A., Kvamme, L.B. & Hansen, R.A. 1991. Seismicity and seismotectonics of Norway and nearby continental shelf. *Journal of Geophysical Research* 96, 2249-2265.
- Eide, E.A., Torsvik, T.H., & Andersen, T.B. 1997: Absolute dating of brittle fault movements: Late Permian and late Jurassic extensional fault breccias in Western Norway. *Terra Nova* 9, 131-134.

- Elvebakk H. og Lauritsen, T., 1997: Geofysiske undersøkelser. Bruddsoner og grunnvann i Sunnfjord. NGU Rap. 97.050. 30 s.
- Fejerskov, M., Myrvang, A.M., Lindholm, C. & Bungum, H. 1995. In-situ rock stress pattern on the Norwegian continental shelf and mainland. In Fejerskov, M. & Myrvang, A.M. (eds.), *Proceeding from Workshop on rock stresses in the north Sea*, Trondheim, Norway, 13-14 February 1995.
- Gabrielsen, R.H., Braathen, A., E. Alsaker, L. Aamodt, S.S. Berg, H. Henriksen & A. Lothe, 1997. The architecture of lineaments. TSGS meeting, Stavanger, November 1997.
- Hansen, S.E. 1996: Spenningsmålinger ved hydraulisk splitting, Hestad og Atløy i Sogn og Fjordane. SINTEF Rap. STF22 F96090.
- Lindholm, C.D., Bungum, H., Bratli, R.K., Aadnøy, B.S., Dahl., N., Tørudbakken, B., & Atakan, K., 1995. Crustal stress in the northern North Sea as inferred from borehole breakouts and earthquake focal mechanisms. *Terra Nova* 7, 51-59.
- Midtbø, E., 1996a: Bergspenninger på Nordvestlandet. Prosjektoppgave, NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- Midtbø, E., 1996b: Sammenhengen mellom in-situ spenninger og grunnvannsstrøm i berg. Diplomogave, NTNU, Fakultetet for geofag og petroleumsteknologi.
- Osmundsen, P.T. & Andersen, T.B. 1994: Caledonian compressional and late-orogenic extensional deformation in the Staveneset area, Sunnfjord, Western Norway. *Journ. of struct. geol.* 16, 1385-1401.
- Ramberg, I.B., Gabrielsen R.R., Larsen B.T. & Solli, A. 1977: Analysis of Fracture Pattern in Southern Norway. *Geologie en Mijnbouw* 56 , 295-310
- Skjerlie, F. 1969: The Pre-Devonian rocks in the Askvoll-Gaular area and adjacent districts, Western Norway. NGU Bull. 258, 325-359.