

RAPPORT

Rapport nr.: 99.016		ISSN 0800-3416		Gradering: Åpen	
Tittel: Holmedal brønnefelt, Sunnfjord: Langtids prøvepumping og tracertester					
Forfatter: Sylvi Gaut, Gaute Storrø, Helge Bjørnstad, Alvar Braathen			Oppdragsgiver: NGU og IFE		
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 brønnefelt 32V 2965 68095			Sidetall: 39		Pris: 120,-
Feltarbeid utført: Juni 1996		Rapportdato: 10. februar 1999		Prosjektnr.: 2685.00 og 2685.01	
Ansvarlig:					
<p>Sammendrag: Den krystalline og metamorfe 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 studier av lineament-tilknyttede bruddsystemer har en hydrogeologiske modeller blitt definert (Braathen & Gabrielsen 1998): <i>I lineamentenes ytre sone og i områder med generell oppsprekning (større avstand fra lineamenter) vil potensialet for grunnvannsstrøm være størst langs brudd som er subparallell med retningen for største bergspenning.</i></p> <p>Brønnefeltet ved Holmedal, nær Askvoll i Sunnfjord, i Sogn og Fjordane fylke, er plassert og utformet for å vurdere betydningen av bergspenninger for grunnvannsstrøm. Det består av ni brønner innenfor et hundre ganger hundre meter stort område.</p> <p>Hvis modellen er gyldig vil vannstrømmen være størst på sprekker i en østvestlig retning, parallell med største bergspenning. For å teste strømningsretningene av grunnvannet ble det i første fase foretatt pumping av hver enkelt brønn samtidig som senkningen i de andre brønnene ble fortløpende registret. En nærmere beskrivelse av disse resultatene, samt geologiske forhold i og rundt brønnefeltet, er gitt i Braathen et al. (1998; NGU Rapport 98.085). I andre fase, rapportert her, ble det utført en langtids prøvepumping i Holmedal brønnefelt parallell med fortløpende vannstandslogging av de andre brønnene, samt tracertester utført i samarbeid med Institutt for Energiteknikk (IFE).</p> <p>Arbeidene gir ingen entydig konklusjon for betydningen av bergspenningene i brønnefeltet. Ses området under ett, synes det som om det er høyere grunnvannstransport i en østvestlig retning. Dette framkommer både gjennom den naturlige grunnvannsgradienten og gjennom senkningstrakten ved langtidspumping. Denne retningen er parallell med foliasjonen og brudd langs denne, og subparallell med største bergspenning. Dette gir en klar indikasjon på at foliasjonsparallell og største spenningsakse-parallell brudd generelt sett har større konduktivitet enn brudd med en høy vinkel på retningen for største spenning. Lokale avvik i mønsteret kan enklest forklares ved vanntransport langs kartlagte bruddsoner, som dermed bryter det generelle mønsteret.</p>					
Emneord: Hydrogeologi		Grunnvann		Berggrunn	
Prøvepumping		Grunnvannsstrømning		Tracermetode	
Fagrapport					

INNHold

1.	INNLEDNING	5
1.1	Bakgrunn	5
1.2	Lokalisering og utforming av brønnfeltet	6
2.	LANGTIDS PRØVEPUMPING	9
2.1	Metodebeskrivelse.....	9
2.2	Teknisk utførelse av pumpetesten	10
2.3	Grunnvannstand før pumping.....	11
2.4	Resultater fra pumpetesten	11
2.4.1	Brønn 9	12
2.4.2	Brønn 1	13
2.4.3	Brønn 2.....	13
2.4.4	Brønn 3.....	13
2.4.5	Brønn 4.....	18
2.4.6	Brønn 5.....	18
2.4.7	Brønn 6.....	18
2.4.8	Brønn 7.....	18
2.4.9	Brønn 8.....	19
2.4.10	Oppsummering	19
2.4.11	Retningsbetinget konduktivitet	21
3.	VANNKVALITET.....	21
4.	TRACERTESTER	21
4.1	Tracer-konsentrasjoner og betydning for miljøet.....	21
4.2	Metodebeskrivelse.....	22
4.3	Gjennomføring og resultater	23
4.4	De ulike tracerne sett i forhold til hverandre	27
5.	TRACER OG VANNSTRØM MELLOM BRØNNENE	27
6.	DISKUSJON OG KONKLUSJON	28
6.1	Kommunikasjonen mellom brønnene	28
6.2	Nedbør og infiltrasjon	29
6.3	Tracernes egnethet	29
6.4	Påvirker bergspenningene vannstrømmen i brønnfeltet?.....	32
6.4.1	Den naturlige grunnvannsgradienten i brønnfeltet.....	33
6.4.2	Effekten av pumping på grunnvannspeilet	33
6.5	Konklusjon; bergspenningenes betydning for konduktivitet	34
6.6	Metodeutvikling og framtidige arbeider	34

7. REFERANSER	36
APPENDIX (Vannanalyser).....	38

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 oppsprekningen 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 betydningen av in-situ spenninger, og (5) vurdere den optimale plasseringen av borebrønner for uttak av grunnvann langs lineamentene.

Prosjektarbeidet har 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; Gabrielsen et al. 1997; Braathen & Gabrielsen 1998), og (iii) en vurdering av lineamentenes geologiske historie og betydning (Braathen & Henriksen 1997; Braathen 1998, 1999).

Den krystalline og metamorfe 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 studier av lineament-tilknyttede bruddsystemer har to hydrogeologiske modeller blitt definert (Braathen & Gabrielsen 1998):

- (i) I lineamentenes ytre sone og i områder med generell oppsprekning (større avstand fra lineamentet) vil vannstrøm hovedsakelig foregå langs sprekker som er parallelle med den største bergspenningen (beskrevet i Braathen et al. 1998 [NGU rapport 98.085] og denne rapporten).
- (ii) Det største potensialet for uttak av grunnvann vil være i lineamentenes marginalsone hvor det er høy bruddfrekvens og mindre leirmineral-innfylling/omvandling (beskrevet i Braathen et al. 1999; NGU rapport 99.017).

Disse modellene blir nå testet. I NGU rapport 98.085 (Braathen et al. 1998) ble foreløpige resultater fra det første konkrete hydrogeologiske forsøket i prosjektet, som vurderer betydningen av sprekkorienteringer og in-situ bergspenning i et avgrenset felt bestående av ni borebrønner rapportert. Brønnefelt er lokalisert til Holmedal, nær Askvoll i Sunnfjord, i Sogn og Fjordane fylke.

Brønnfeltet ved Holmedal er plassert og utformet for å vurdere den første modellen (i). Hvis denne modellen er gyldig vil vannstrøm på sprekker i en øst-vestlig retning, parallelt med største bergspenning, dominere innenfor brønnfeltet, mens det vil være mindre strømming i nord-syd retning. For å teste strømningsretningene av grunnvannet ble hver brønn pumpet for seg samtidig som senkningen i de andre brønnene ble fortløpende registret. Resultatet fra disse korttids pumpetestene var ikke entydige, men antyder at permeabiliteten på sprekker i berggrunnen er høyere i en øst-vestlig retning enn i en nord-syd retning. En nærmere beskrivelse av disse resultatene, samt geologiske forhold i og rundt brønnfeltet, er gitt i Braathen et al. (1998).

Denne rapporten beskriver langtids prøvepumping i Holmedal brønnfelt foretatt i brønn 9 parallelt med fortløpende vannstandslogging av de andre brønnene, samt tracertester foretatt i samarbeid med Institutt for Energiteknikk (IFE).

1.2 Lokalisering og utforming av brønnfeltet

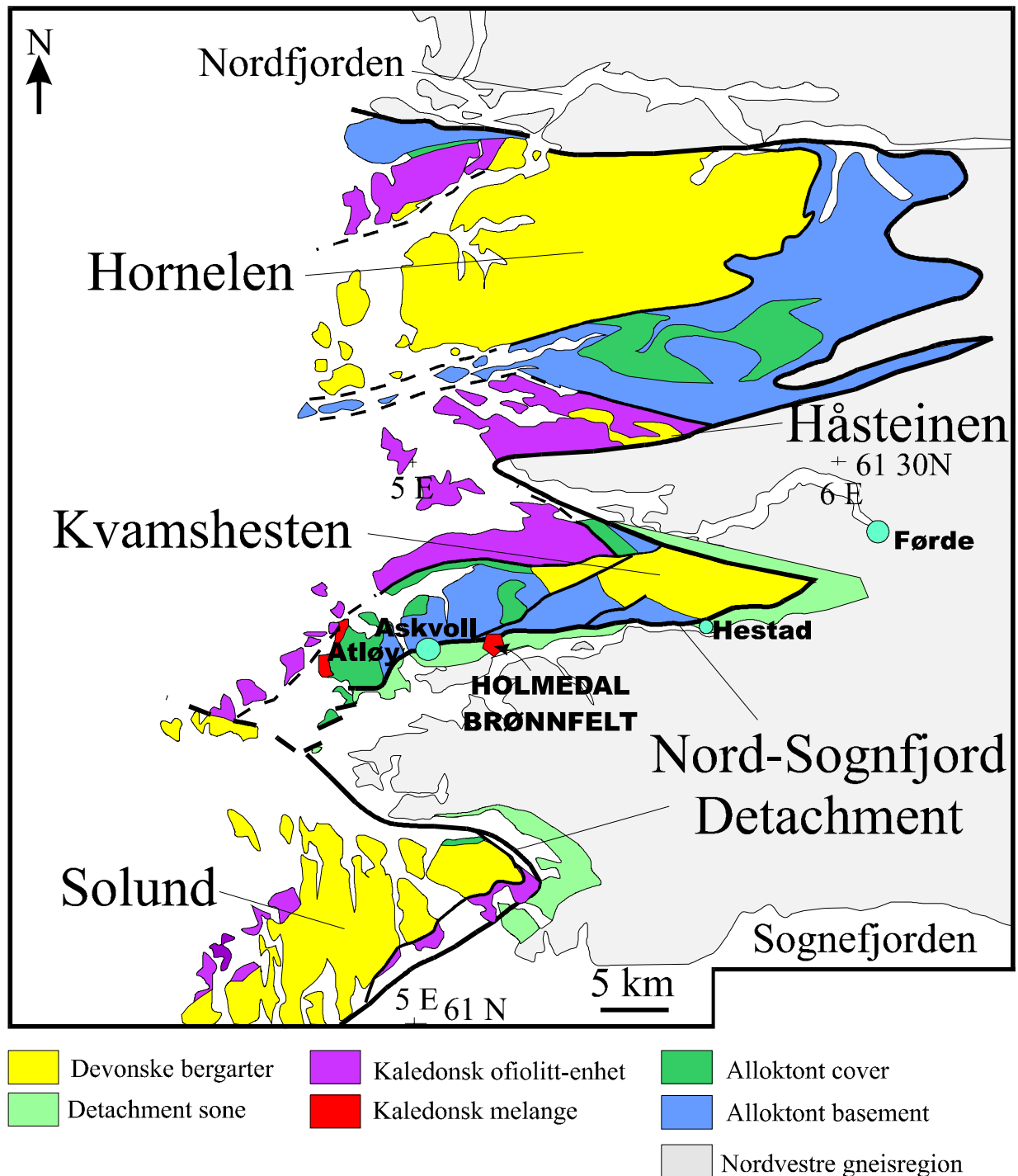
Et område øst av Askvoll, ved Holmedal (Fig. 1.1), ble valgt ut som egnet for et brønnfelt bestående av ni brønner. Valg av område ble basert på nødvendigheten av:

- (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.

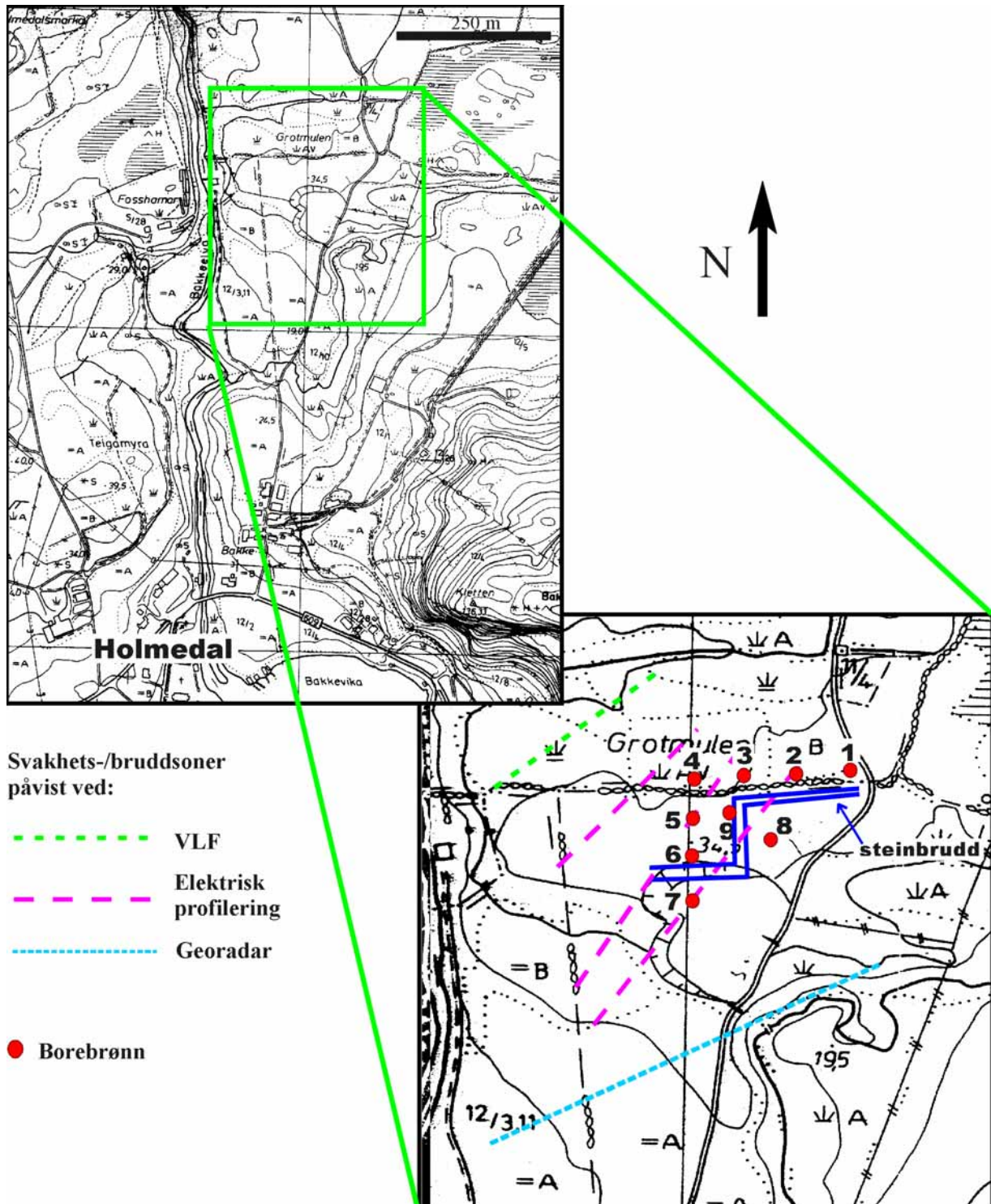
Brønnfeltet i Holmedal er lokalisert til en lav knaus i et bredt dalføre. Nærliggende områder benyttes til produksjon av for, mens området rett rundt selve feltet består av beitemark. Et mindre steinbrudd har en gunstig plassering med tanke på blotninger, men utgjør også en risiko for et økt antall overflatenære, åpne sprekker fra spregningsarbeider 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 Fig. 1.2. 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 ca 40 cm over bakken, og brønnene ble deretter avstengt med et lokk. De fleste brønnene (1 - 8) er boret til 50 meters dyp, mens senterbrønnen (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. I forkant av boringene ble det foretatt geofysiske målinger i form av georadar, VLF og elektrisk profilering (Elvebakk & Lauritsen 1997), for om mulig å identifisere overdekkete sprekkesoner i berggrunnen.



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



Figur 1.2 Utforming av - og topografi ved brønnfeltet i Holmedal, lokalisert på økonomisk kart med 1 meter høydekoter. Brønnene er nummerert 1 til 9. Tolkningen av de geofysiske undersøkelsene (Elvebakk & Lauritsen 1997), med linjer som antyder svakhets-/bruddsoner i berggrunnen, er vist.

2. LANGTIDS PRØVEPUMPING

2.1 Metodebeskrivelse

Hovedkomponentene i den tekniske utrustningen som ble benyttet i tilknytning til kapasitetstesting var tilsvarende den som ble benyttet ved korttidstestene i oktober 1997 (Braathen et al. 1998):

- 1 4'' senkpumpe med kapasitet ca 1000 l/time (~0,3 l/s) ved 75 m løftehøyde
- 2 Vannstandssensorer (trykkfølere)
- 3 Vannmengdemåler
- 4 Datalogger

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

Det ble benyttet 6 vannstandssensorer av merket Drück, type PTX 164 og to av merket ELPRO type HOTBOX BA2S. To av sondene av merket Drück hadde måleområde henholdsvis 0-75 m og 0-20 m. De resterende sondene hadde måleområde 0-10 m. Dataoppløsningen for sensorene av merket Drück er 0,04 % av totalt måleområdet, hvilket for 0-10 m sensorene gir en oppløsning på 4 mm. Alle brønnene utenom brønn 7 fikk installert trykksensor.

For å få en kontinuerlig kontroll med vannmengden som ble pumpet ut av brønn 9 under pumpetesten ble det benyttet en vannmengdemåler av merket Endress & Hauser, type Promag 33AT15. Måleområdet ble først stilt til 0-0.2 l/s, men senere endret til 0-0.3 l/s. Repeterbarheten er oppgitt til 0.1 % av måleverdi.

Analogsignalene (4-20 mA) fra vannmengdemåleren og vannstandssensorene av typen Drück 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 sensorene kobles direkte inn i et kontaktpanel på utsiden av bilen. Trykksensorene av typen ELPRO lagrer de analoge signalene (4-20 mA) på en egen loggerenhet knyttet til den enkelte sensoren. Fra de ulike dataloggerene overføres de innsamlede data til PC, for videre prosessering i regneark, og lagring.

Vannstandssensorene tilknyttet målebilen får strømforsyning fra 12V batteri i målebilen, mens ELPRO-loggerne har egne batterier. Sensorene er derfor upåvirket av eventuelle uregelmessigheter i strømleveransen fra strømaggregatet.

Under pumpetesten ble det i starten valgt en datalagringsfrekvens (tidsoppløsning) i dataloggerne på 8 sekunder da dette er den hyppigste frekvensen som kan velges for ELPRO-loggerne. For å redusere datamengden ble frekvensen stilt om til 15 minutter etter at den raskeste delen av vannstandssenkningen var avsluttet. For loggeren på målebilen er datalagringsfrekvensen i tillegg en del ganger endret tilbake til 8 sekunder i perioder der pumpekapasiteten er økt.

2.2 Teknisk utførelse av pumpetesten

Senkumpå ble plassert i brønn 9 på ca 76 m dyp sett fra toppen av brønnen: En vannstandssensor med måleområde 0-75 m ble plassert rett over pumpa på ca 75,20 m dyp. De øvrige vannstandssensorene ble, utfra en vurdering av forventet vannstandsending, plassert i et passende nivå i de omkringliggende brønnene som vist i Tabell 2.1. Tabellen viser måleområde (meter vannsøyle over sonde) i tillegg til installasjonsdyp.

Tabell 2.1 Tabellen viser plassering av vannstandssensor/trykksensor i den enkelte brønn i brønnfeltet. I tillegg til installasjonsdyp vises sonde type og måleområde.

Brønn nummer	Sonde type	Måleområde (m)	Sondeplassering målt fra brønntopp (m)
1	Drück	0-10	10
2	ELPRO	0-10	10
3	Drück	0-10	10
4	Drück	0-10	10
5	Drück	0-10	10
6	ELPRO	0-10	10
7	Ingen sonde		
8	Drück	0-20	20
9	Drück	0-75	75,20

Vannmengdemåler og kran ble installert på vannslangen fra brønn 9. Pumpetesten ble startet ved å pumpe med full kapasitet (800-1000 l/t) på pumpa for å få en rask senkning av vannstanden i brønnen. Etter ca 1/2 time ble kapasiteten senket til 200-250 l/t og etter ytterligere 20 minutter til ca 70 l/t. Dessverre gikk strømaggregatet tomt for diesel i løpet av natten, slik at forsøket måtte startes på nytt dagen etter. Jevnt over steg vannstanden i brønnen i løpet av nettene og pumpekapasiteten ble derfor økt til drøyt 800 l/t i en periode på ca én time om morgenen for at vannstanden igjen skulle senkes i brønnen. Deretter ble utpumpet vannmengde holdt på i overkant av 100 l/t.

Årsaken til at det var vanskelig å holde stabil kapasitet var antagelig krankonstruksjonen som viste seg å være formet slik at partikler i vannet tettet til kranåpningne etter hvert.

2.3 Grunnvannstand før pumping

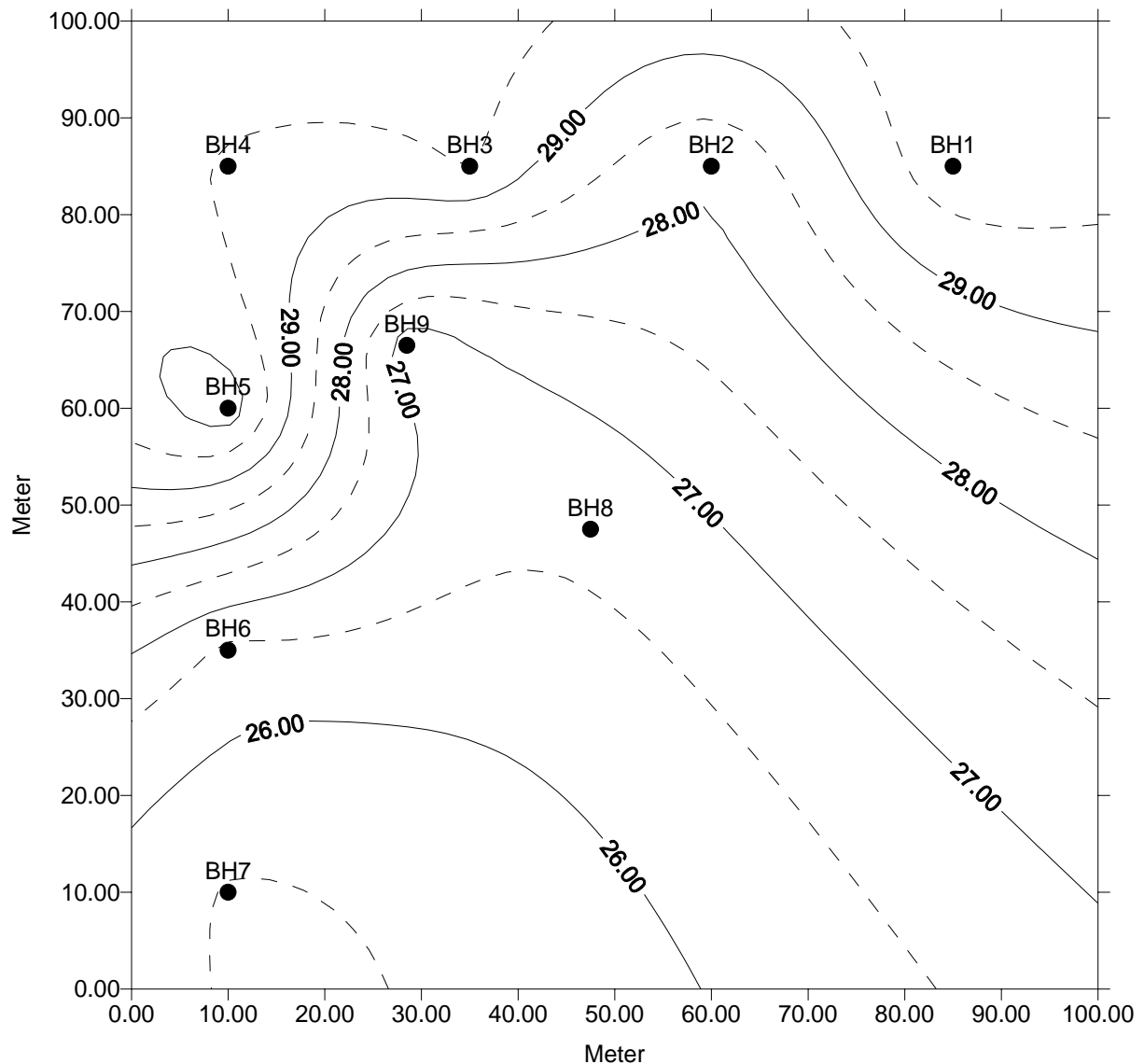
Grunnvann i fjell viser ikke nødvendigvis et veldefinert grunnvannsspeil med lineær sammenheng mellom ulike observasjonspunkter. Vannstanden i de enkelte brønnene kan være definert av trykknivået i separate sprekkesystem som ikke har direkte hydraulisk kontakt. Fig. 2.1 viser et kotekart for grunnvannstand i de ulike brønn før testpumping startet. Kartet gir et relativt dekkende bilde av naturlig grunnvannstand i området. Strømningsbildet er tilsvarende det som ble konstruert utfra vannstandsmålinger observert før korttidstesten i oktober 1997 (Fig. 4.1 i Braathen et al. 1998), det vil si en grunnvannsgradient rettet syd, sydøst og sydvest.

2.4 Resultater fra pumpe testen

Toppen av alle brønnrørene ble nivellert inn i oktober 1997, for å klargjøre i detalj høydeforskjellen mellom brønnen. Dette var viktig for studier av endringer i grunnvannsspeilet. Nivellementet ble ikke knyttet opp mot et fastpunkt med kjent høyde over havet. Som referansenivå er det antatt ut fra økonomisk kartverk, at brønntopp brønn 4 ligger på 30 m.o.h. Alle grafiske presentasjoner er gitt med referanse til toppen av denne brønnen (Tabell 2.2).

Tabell 2.2. 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



Figur 2.1 Grunnvannskotekart for brønnene 1-9. Kotekartet er tegnet med bakgrunn i vannstandsmålinger 12.06.1998. Alle kotehøyder er gitt i meter over havet. Kartet viser en grunnvannsgradient med retning syd, sydøst og sydvest.

2.4.1 Brønn 9

Pumpetesten ble foretatt i brønn 9 og man kan se en klar senkning av vannstanden i brønnen ved økt pumpekapasitet (Fig. 2.2). Likeledes stiger vannstanden i brønnen om natten fordi kapasiteten avtar noe. Vannstanden i brønnen ble 14. juni senket med ca 15 m (til ca 12 m.o.h.) deretter ble pumpekapasiteten ved hjelp av krana, senket fra ca 800 l/t til ca 70 l/t. I løpet av natten steg vannstanden i brønnen i tillegg til at aggregatet stoppet rundt kl. 06.00 fordi det gikk tomt for diesel. Vannstanden i brønnen ble 15. juni senket med 20 m (til ca 6 m.o.h.) og kapasiteten ble deretter holdt på i overkant av 100 l/t. Det var nødvendig å justere kapasiteten ved å skru på krana, da kapasiteten sank noe over tid. Denne prosedyren ble fulgt frem til 20. juni, men med en større senkning av vannstanden i brønnen. Henholdsvis ca 40 m

den 16-18. juni og ca 55 m den 19 og 20. juni. I perioden 21. juni fra ca kl. 13.00 til 23. juni ca kl. 14.00 var slangen fra brønn 9 løs under kapasitetsmåleren slik at pumpa pumpet med maksimal kapasitet og vannet fra brønnen rant stort sett tilbake i brønnen igjen. Etter at slangen igjen er koblet sammen ble kapasiteten holdt relativt stabilt på ca 100 l/t og vannstanden i brønnen steg og sank alt ettersom kapasiteten avtok etter økte. Pumpetesten ble avsluttet 25. juni. Dessverre var loggerenheten i målebilen avskrudd fra 25-26. juni, slik at stigningen i brønnen ikke ble logget.

2.4.2 Brønn 1

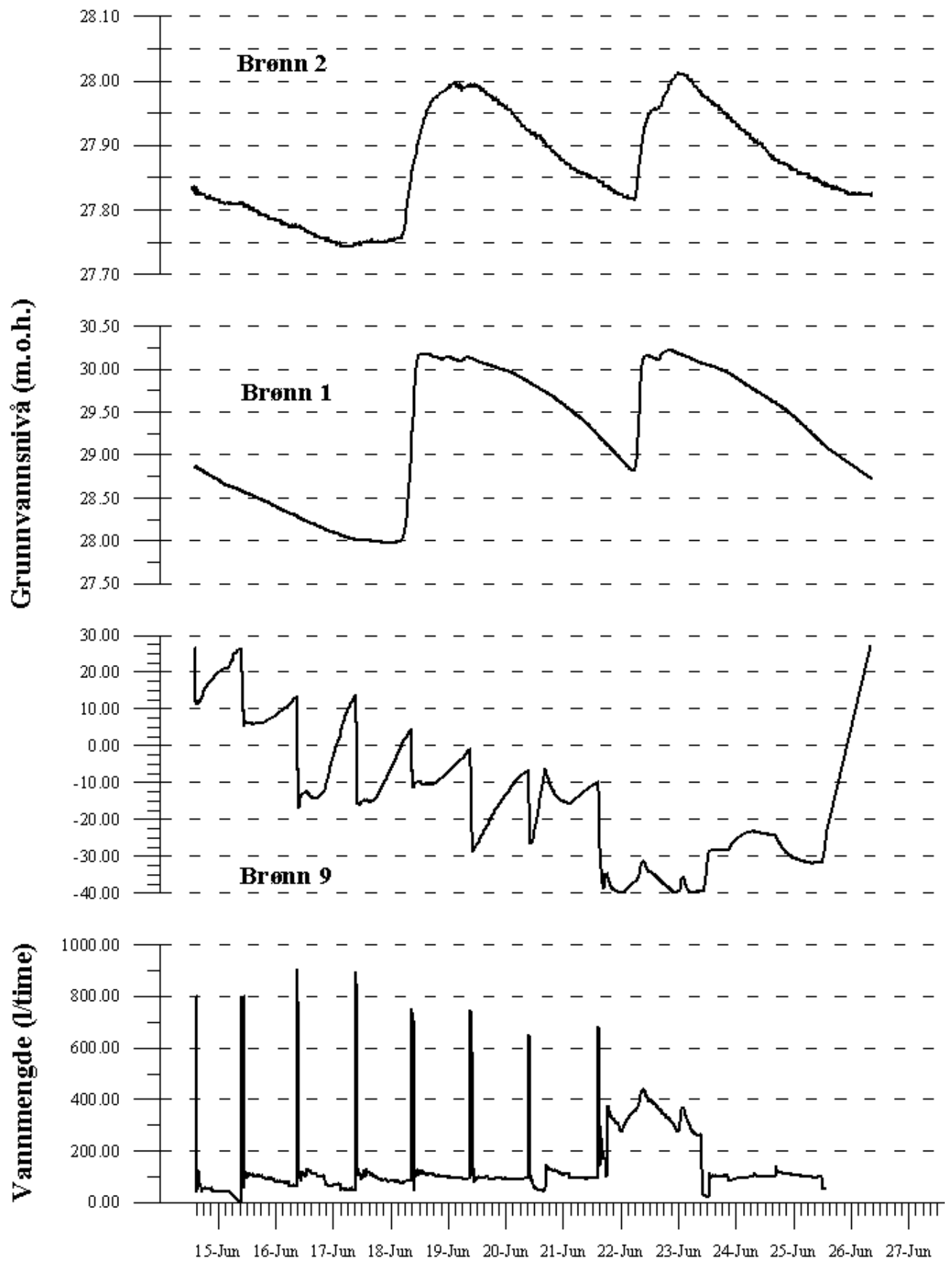
Vannstanden i brønn 1 avtar i den første perioden (14-17. juni) av pumpetesten (Fig. 2.2). Dette er trolig en naturlig senkning av grunnvannsspeilet spesielt fordi vannstandssenkningen avtar den 17. juni da det begynner å regne. Likeledes skyldes de to økningene i vannstanden 18 og 22. juni regnvær. Det ser ikke ut til at pumpingen i brønn 9 påvirker vannstanden i brønn 1 i form av markert vannstandssenkning, men vannstandskurven har enkelte ørsmå "knekkpunkt" som faller sammen med økt pumpekapasitet i brønn 9. Disse endringene overpreges i begynnelsen av pumpeperioden av naturlige vannstandsendringer som skyldes lite/mye nedbør. Når pumpetesten avsluttes, fortsetter vannstanden i brønn 1 å synke. Dette støtter opp om den tidligere tolkningen om at det ikke er kommunikasjon mellom brønnene 1 og 9.

2.4.3 Brønn 2

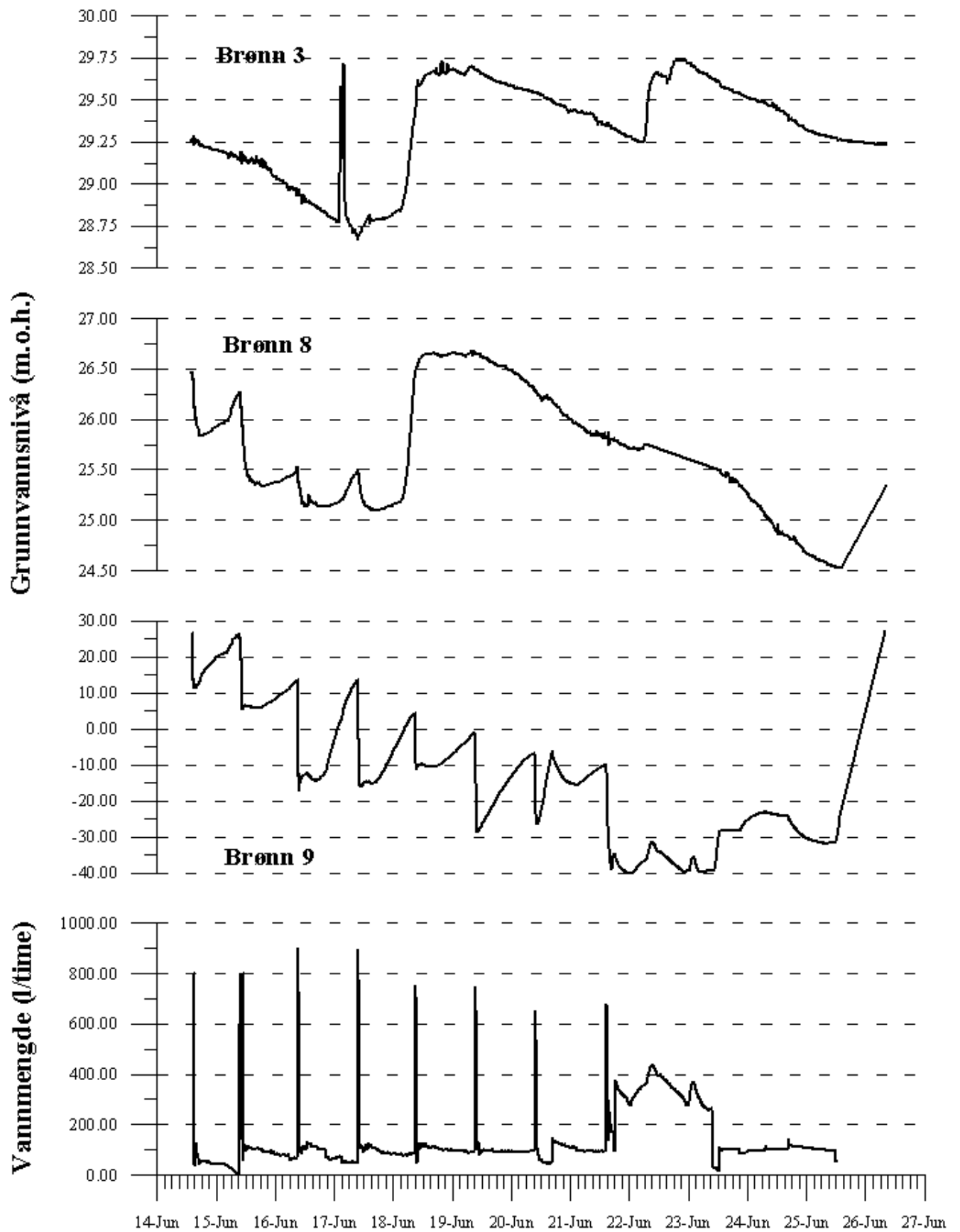
Vannstanden i brønn 2 følger et tilsvarende forløp som i brønn 1 (Fig. 2.2), men det ser ut til at denne brønnen er noe mer påvirket av pumpingen i brønn 9. Dette kommer frem som mer markerte endringer i kurveforløpet ved økt pumping i brønn 9, enn det som kan observeres i brønn 1. Ved pumpetestens slutt flater senkningen i brønnen seg ut, noe som trolig kan sees i sammenheng med at pumpen er stoppet i brønn 9.

2.4.4 Brønn 3

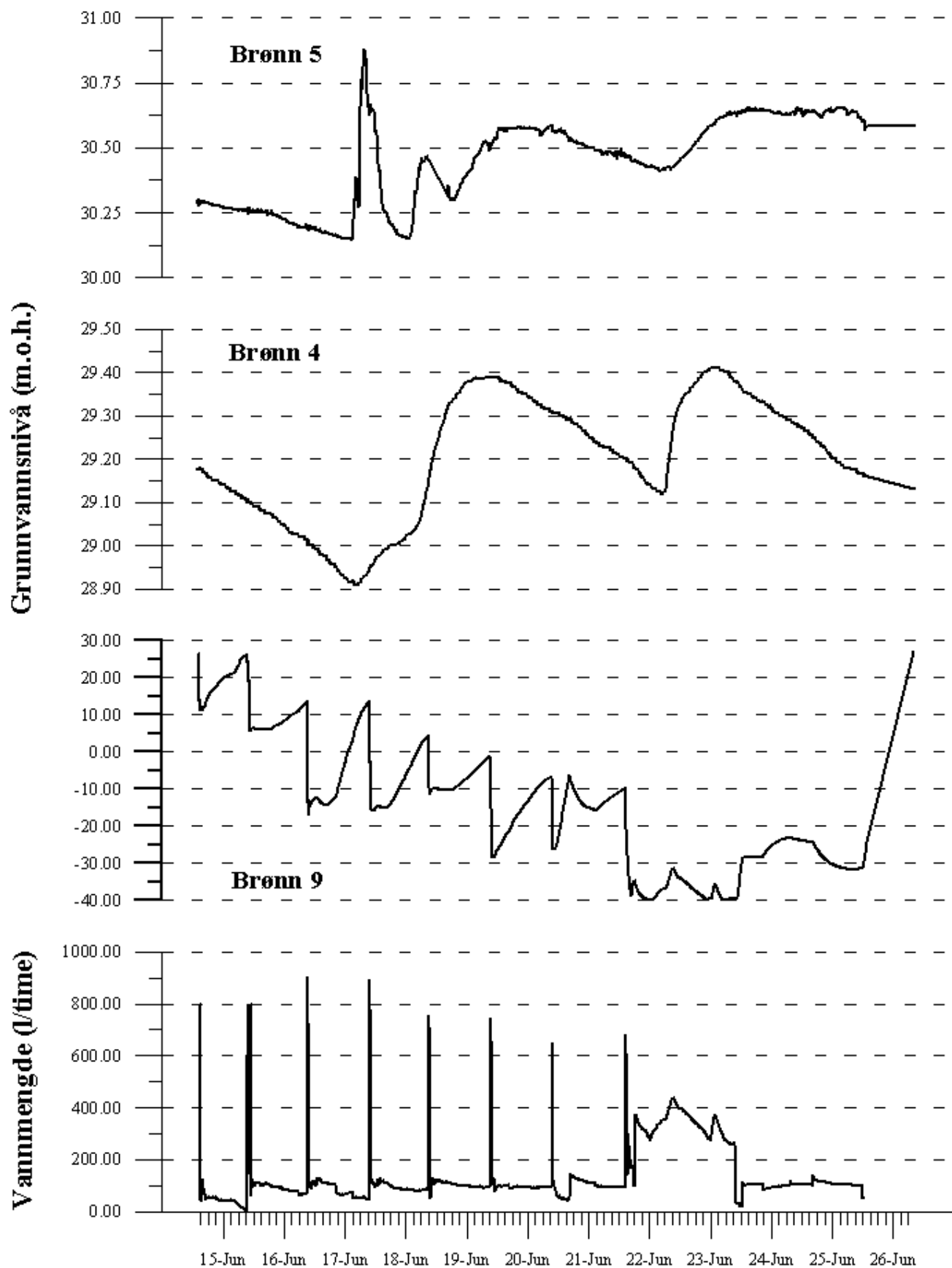
Vannstanden i brønn 3 (Fig. 2.3) er også sterkere påvirket av naturlige fluktuasjoner forårsaket av endringer i nedbør, enn av pumpingen i brønn 9. Man kan likevel se en klar sammenheng mellom vannstandsending og pumping. Endringene gir seg stort sett utslag i markerte "skjelvinger" på vannstandskurven. Skjelvingene er sammenfallende med økt pumpekapasitet i brønn 9. Toppen som kan observeres på kurven natt til 17. juni skyldes trolig en feil på loggeren.



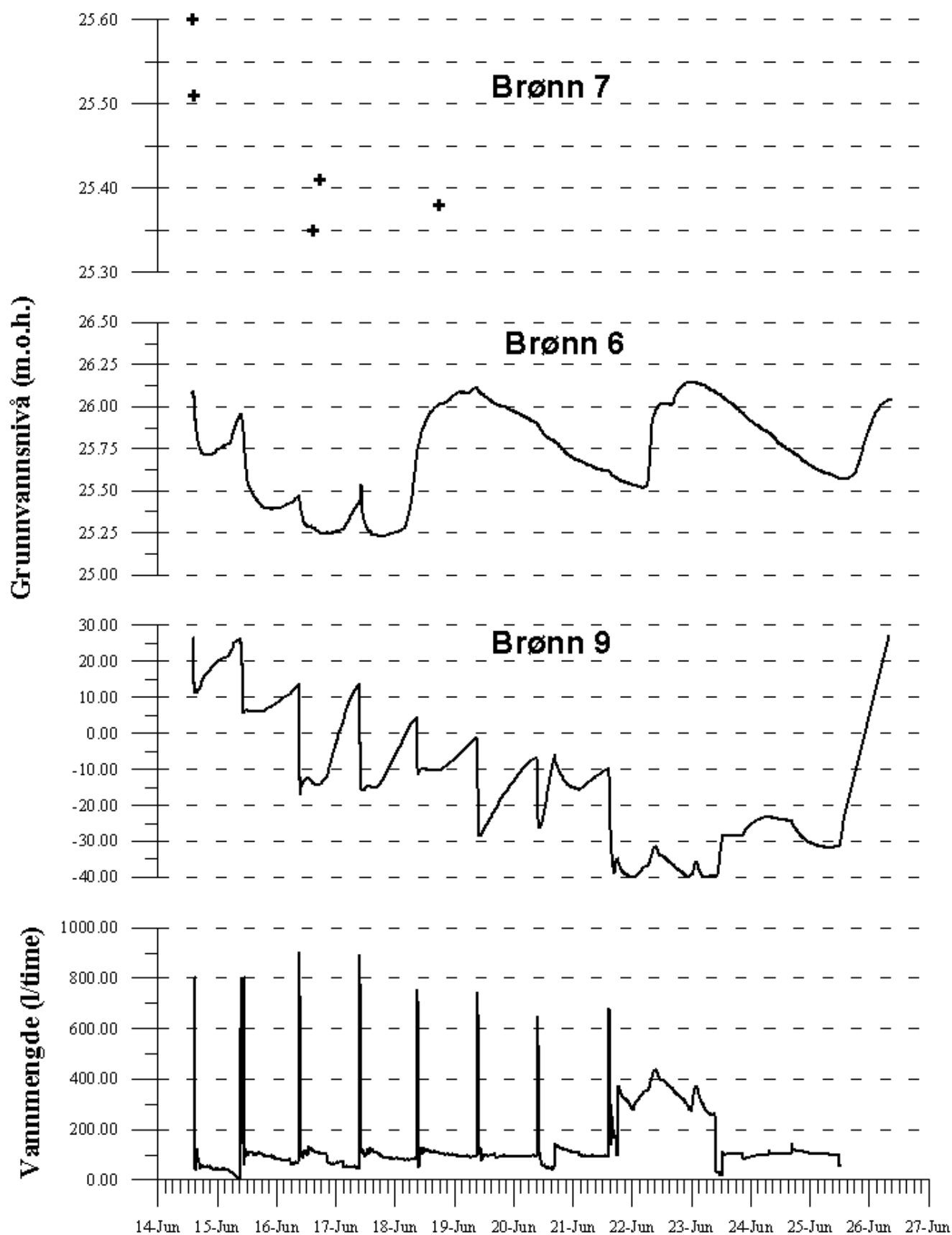
Figur 2.2 Figuren viser vannstandsendringene i brønnene 1, 2 og 9 og vannmengden som pumpes ut av brønn 9.



Figur 2.3 Figuren viser vannstandsendringene i brønnene 3, 8 og 9 og vannmengden som pumpes fra brønn 9.



Figur 2.4 Figuren viser vannstandsendringene i brønnene 4, 5 og 9 og vannmengden som pumpes ut fra brønn 9.



Figur 2.5 Figuren viser vannstandsendringene i brønnene 6, 7 og 9 og vannmengden som pumpes ut av brønn 9.

Brønn 4

Ut fra korttidstestene utført i oktober 1997 (Braathen et al. 1998) forventes det at vannstanden i brønn 4 skal være upåvirket av pumping i brønn 9. Bortsett fra noen ørsmå skjelvninger som korresponderer med markert økt pumpekapasitet de tre første dagene av testen (Fig. 2.4), ser det ut til at vannstanden i brønn 4 ikke påvirkes av pumpingen. Vannstanden fortsetter blant annet å synke i brønnen etter at pumpetesten er avsluttet og trolig viser vannstandskurven tilnærmet naturlige vannstandsendringer i perioden.

2.4.6 Brønn 5

Brønn 5 ser ut til å stå i en svak hydraulisk kontakt med brønn 9 (Fig. 2.4). Dette kommer frem ved markerte "skjelvinger" på vannstandskurven ved økning i pumpekapasiteten. I tillegg antydes det små knekkpunkt på kurven først i pumpeperioden. Vannstandskurven for brønn 5 skiller seg fra vannstandskurvene for de andre brønnene da vannstanden ikke synker fra 23. juni. En mulig tolkning kan være at kommunikasjonen med brønn 9 er så liten at tilførslen av vann til brønnen er større enn eller oppveier det som strømmer til brønn 9.

18. juni ble det oppdaget at trykksonden i brønnen ikke virket pga. fukt. Dette er årsaken til manglende data den 18. juni. I tillegg er det sannsynlig at målingene alt f.o.m. 17. juni er påvirket av fukt i sonden da en så markert vannstandsstigning ikke er sannsynlig ut fra endringen i de tidligere omtalte brønnene.

2.4.7 Brønn 6

Fig. 2.5 viser en klar kommunikasjon mellom brønnene 6 og 9. Spesielt i perioden 14-17. juni oppstår det markert senkning i vannstanden i brønn 6 ved økt pumpekapasitet i brønn 9. Under regnværet 18. juni oppnår man ingen markert endring i vannstanden, men senkningen i brønnen stopper gradvis opp og etterfølges av en langsom stigning. Senere i perioden observeres små knekkpunkt på kurven ved økt pumpekapasitet i brønn 9. Ved avsluttet pumpe-test stiger vannstanden igjen i brønn 6 og dette tyder på at senkningen i perioden 23-25. juni skyldes pumping i brønn 9 og ikke naturlig senkning av vannstanden.

2.4.8 Brønn 7

Det ble ikke installert noen trykksonde i brønn 7 siden brønnen ble anslått å være tilnærmet tørr under korttidspumping (Braathen et al. 1998). Det ble derfor kun gjort noen få manuelle målinger i brønnen (Fig. 2.5), noe som utelukker vurderinger av vannstandsendringer i brønnen som følge av langtids pumpingen.

2.4.9 Brønn 8

Vannstandskurven for brønn 8 viser en klar kommunikasjon mellom brønnene 8 og 9 (Fig. 2.3). Fra 14-17. juni følger vannstandsendingene i brønn 8 samme forløp som i brønn 9. Senere i pumpeperioden observeres små knekkpunkt og/eller små skjelvninger på grafen ved økt pumpekapasitet i brønn 9. Vannstandsstigningen etter at pumpetesten ble avsluttet støtter opp om at senkningen i brønnen etter 23. juni skyldes pumping i brønn 9 og ikke naturlig senkning av grunnvannsstanden.

Manglende vannstandsmålinger i en periode fra 21-23. juni skyldes at trykksonden i brønn 8 hadde løsnet og glidd så langt ned i brønnen at vannsøylen over trykksonden ble mer enn 20 m., dvs. utenfor observasjonsområdet til sonden. Dette ble rettet da trykksonden ble hevet på formiddagen 23. juni.

2.4.10 Oppsummering

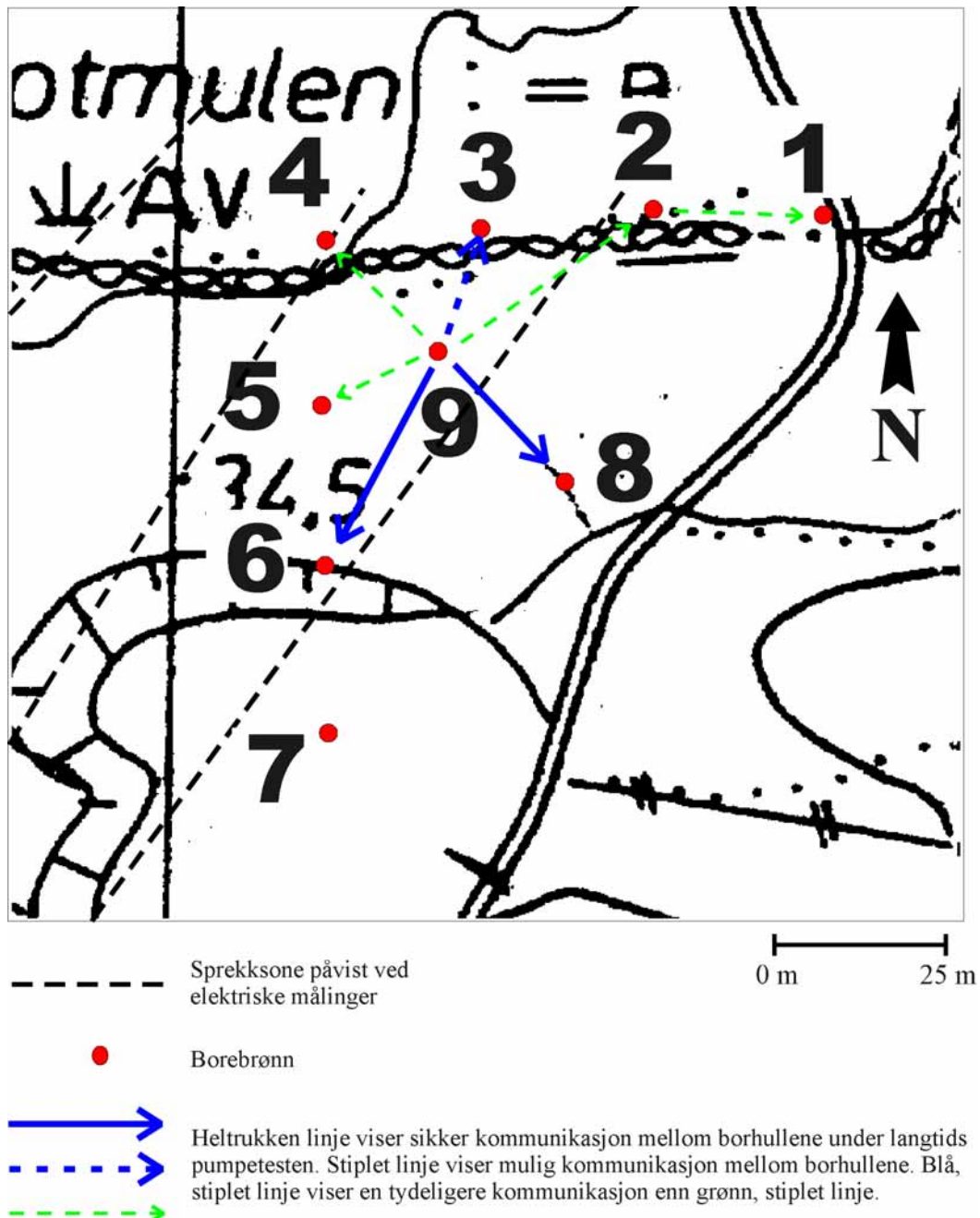
Langtids pumpetesten i brønn 9 ser ut til å bekrefte observasjonene fra korttidstestene i oktober 1997 (Braathen et al. 1998) der det ble påvist en klar hydraulisk kontakt mellom brønnene 6, 8 og 9 (Fig. 2.6). I tillegg ser det ut til at det eksisterer en noe svakere hydraulisk kontakt mellom brønnene 3 og 9, indikert ved markerte skjelvninger på vannstandskurven. For brønnene 2 og 5 registreres det i tillegg til ørsmå skjelvninger som korresponderer med økt pumpekapasitet i brønn 9, også små knekkpunkt på vannstandskurvene. Den hydrauliske kontakten er derimot svak. Vannstandskurven for brønn 4 viser små skjelvninger, men ingen knekkpunkt. Skjelvingene kan skyldes en svak kommunikasjon med brønn 9, men dette er usikkert. Ved avslutning av pumpetesten fortsetter vannstanden å synke i brønnen og kurveforløpet viser trolig tilnærmet naturlige vannstandsendinger i brønnen. Det ser heller ikke ut til at det er noen direkte kommunikasjon/kontakt mellom brønnene 1 og 9, men antydningen til reaksjon i perioden 14-17. juni kan skyldes en mulig kommunikasjon mellom brønnene 1 og 2 som antydnet ved korttidstestene.

I forhold til korttidstestene har det vist seg at lenger pumpeperiode også har forårsaket knekkpunkt og økt senkning i noen av brønnene, i tillegg til raske svingninger i vannstanden.

For samtlige av brønnene der det er foretatt vannstandsmålinger, overskygges effekten av de høye vannuttakene i brønn 9 av tilsig av nedbørsvann. Dette bekrefter at brønnene får tilført vann fra overflatenære sprekker. De aller fleste brønnloggene viser også slepper/løse partier i de øverste 15 meterne.

Skjelvingene eller de små og raske svingningene i vannstandskurvene som oppstår ved økt pumpekapasitet i brønn 9, kan skyldes trykkavlastninger som oppstår i bergmassivet når vann pumpes ut fra ett brønnpunkt. Trykkavlastningen 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. Siden det i brønnene (unntatt brønn 7) enten observeres en klar vannstandssenkning eller små skjelvninger, indikerer det at brønnene i brønnfeltet står i en hydraulisk kontakt med hverandre, selv om variasjonen er stor.



Figur 2.6 Strømningsretninger i brønnfeltet observert under langtids pumpetesten i brønn 9. Det er foretatt observasjon av vannstanden i alle brønner unntatt brønn 7.

2.4.11

Retningsbetinget konduktivitet

Kommunikasjonsretninger både nordøst-sydvest, nordvest-sydøst og nesten øst-vest, som ble påvist gjennom korttids pumpe-testene i oktober 1997, bekreftes av langtids pumpe-testen.

3. VANNKVALITET

Det ble under pumpe-testen tatt én vannprøve fra brønn 9 for analyse ved NGU-lab. Vannkvaliteten er vist i databilag 1. Vannprøven kan ikke si noe endelig om brønnvannets stabile kvalitet, men vil gi en indikasjon på om vannet er egnet til drikkevann eller ikke.

Sammenliknet med Drikkevannsforskriften (Sosial- og helsedepartementet 1995) har grunnvannet for høy turbiditet og fargetall. Dette skyldes høyst sannsynlig kort pumpe-tid før prøven ble tatt. Total alkalitet er også noe høy og dette skyldes trolig et noe høyt innhold av natrium. Innholdet av jern, mangan og natrium ligger over veiledende verdi, men ikke over største tillatte konsentrasjon. Grunnvannet fra brønn 9 må totalt sett regnes å ha brukbar drikkevannskvalitet.

4. TRACERTESTER

Det ble i samarbeid med Institutt for Energiteknikk (IFE) utført tracer-tester i brønnene 3, 6 og 8 samtidig med at langtids pumpe-testen pågikk. Tracer-testene ble utført i perioden 15-18. juni.

4.1 Tracer-konsentrasjoner og betydning for miljøet

Med en tracer menes et vannløslig sporstoff som er lett å måle, som ikke blir absorbert på mineraler, og som opptrer i varierende konsentrasjoner i naturen. Tracere blir derfor bl.a. benyttet i studier av naturlige transportprosesser som strømming av grunnvann. I sammenheng med dette arbeidet ble tracere benyttet for å studere kommunikasjonen mellom ulike grunnvannsbrønner. En tracer kan enten være en ikke-radioaktiv (*inaktiv*) eller en radioaktiv kjemisk forbindelse (*aktiv*). Fordelen med bruk av aktive tracere kan deles i to punkter. For det første er disse tracerne svært lette å detektere slik at en kan benytte svært lave konsentrasjoner. Disse lave konsentrasjonene fører til, for det andre, at likevektene som vanligvis må betraktes som pseudo-likevekter i et naturlig aquatisk system, ikke forandres. Med andre ord blir systemet ikke forstyrret ved bruk av en aktiv tracer, i motsetning til bruken av inaktive tracere, hvor det må benyttes langt høyere konsentrasjoner på grunn av dårligere deteksjonsmetoder.

Det foreligger svært spesifiserte krav både til bruken og til brukeren for å få lov til å benytte radioaktive tracere i studier av naturlige systemer. Det må bl.a. foreligge tillatelse fra Statens strålevern før et slikt eksperiment kan settes i gang. Radioaktivitet måles i Becquerel (Bq). En radioaktiv isotop har en ustabil atomkjerne, dvs. at forholdet mellom protonene og nøytronene ikke er stabilt. Kjernen ønsker derfor å forvandle seg mot større stabilitet. Dette gjør den ved at en av overskuddsnukleonene (nøytron eller proton) i kjernen sender ut en såkalt β -partikkel. Vi sier at kjernen desintegrerer; den bryter ned til en ny (ikke-radioaktiv) form. En (1) desintegrasjon pr. sekund er pr. definisjon 1 Bq. Når vi måler radioaktivitet, vil våre detektorer ikke ha en målereffektivitet på 100%. Tallet vi leser av kan være i tellinger (impulser) pr. minutt (CPM) eller pr. sekund (CPS). Fordi vi bare er interessert i relative verdier i forsøkene, har vi valgt å bruke CPM på ordinataksen i figurene 4.1 og 4.2 i stedet for å regne alt over til Bq.

Tabell 4.1 angir mengdene med inaktive og aktive tracere (^3H og ^{36}Cl) som ble benyttet. Som et eksempel på de meget lave konsentrasjonene av aktive tracere som ble benyttet, kan det nevnes at dersom man skal oppnå en årsstråledose må man innta 1 mSv. Omregnet i Bq tilsvarer dette 55 MBq med tritiert vann, HTO. Hvis man fikk all radioaktiviteten som ble benyttet i samtlige forsøk ufortynnet i seg, så ville ikke dette overskride denne dosen. Det kan også i denne sammenhengen nevnes at dersom noe levende, mennesker eller dyr, allikevel skulle få i seg noe av radioaktiviteten, er den biologiske halveringstiden ca. 10 dager for HTO. Dette betyr at det i løpet av tre måneder bare er ca en promille igjen av de radioaktive isotopene.

Etter at forsøkene var avsluttet ble det tatt vannprøver både fra avløpsbekken og ved dennes utløp ved strandkanten. Målingene viste at det ikke var sporbare mengder radioaktivitet tilbake i vannprøvene.

4.2 Metodebeskrivelse

Til tracertestene ble det benyttet en injeksjonsslange (innvendig dimensjon 6 mm) som ble senket ned i brønnen til nivå 15,2 m under topp rør. På toppen av injeksjonsslangen ble det festet en trakt. Det ble benyttet en stoppeklokke for å måle tiden (t) etter injisering. Saltene som ble benyttet som tracere ble løst i en passelig mengde destillert vann.

Før hver injisering ble det tatt to vannprøver for analyse på bakgrunnsverdiene av tracerne i brønnvannet. Etter injisering av tracere ble beholder og slange skylt etter med 2 liter vann fra brønn 9 eller 2 liter destillert vann. Stoppeklokken ble startet etter injisering av tracer og før etterskylling med vann. Pumpekapasiteten i brønn 9 ble forsøkt holdt på ca 110 l/t under forsøkene. Ved vannprøvetaking for analyse på laboratoriet ved IFE, ble det tatt én prøve (1/4

liter) hvert femte minutt i seks timer. Tabell 4.1 viser hvilke tracertester som ble utført i de forskjellige brønnene.

Tabell 4.1 Tabellen viser hvilke tracere som ble injisert i hvilke brønner og hvilken målemetode som er benyttet. D₂O = deuterium (tungtvann)

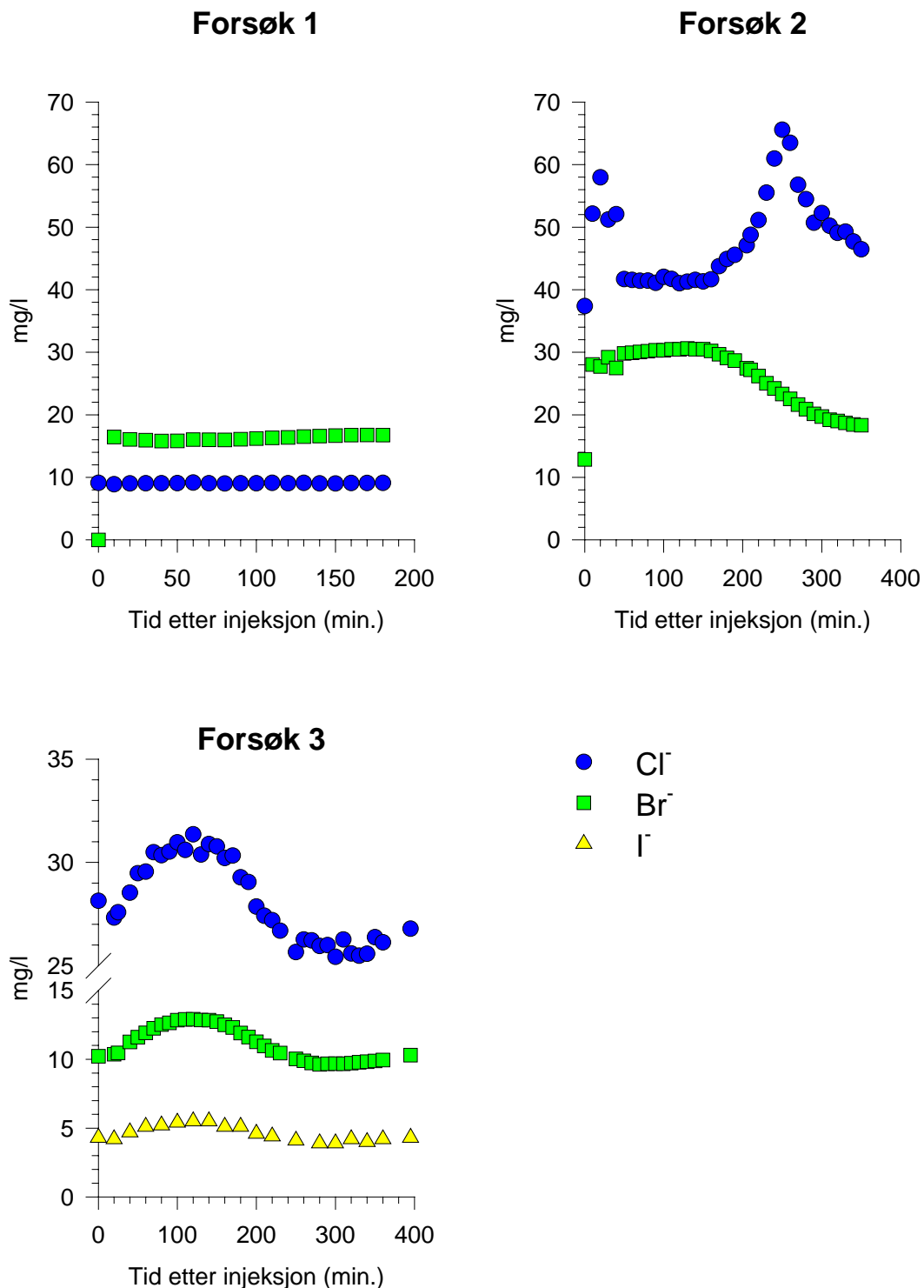
Tracertes t nr.	Dato	Injisert i brønn	Type tracer/mengde	Målemetode
Salt test A	15. juni	8	250 g NaBr	Målt ledningsevne i felt
Salt test B	16. juni	8	500 g NaCl	Målt ledningsevne i felt
1	16. juni	8	500 g NaCl, 300 g NaBr, 200 g NaI, én dose ³ H (1,2MBq) og én dose ³⁶ Cl	Vannprøver tatt i felt
2	17. juni	6	500 g NaCl, 300 g NaBr, 200 g NaI, 200 g D ₂ O, én dose ³ H (1,2MBq) og én dose ³⁶ Cl	Vannprøver tatt i felt
3	18. juni	3	300 g NaCl, 200 g NaBr, 200 g NaI, 300 g D ₂ O	Vannprøver tatt i felt

Resultatene fra tracertestene vil kunne si noe om hvor raskt vannet strømmer fra de ulike observasjonsbrønnene 3, 6 og 8 frem til brønn 9 ved en gitt pumpekapasitet. I tilfeller hvor man ikke får noen økning i innholdet av de ulike tracerne i brønnvannet tyder dette på at det ikke er noen direkte kommunikasjon mellom observasjonsbrønnen og pumpebrønnen. Problemet med tracertestene er at man ikke vet den nøyaktige tiden et sporstoff (tracer) vil bruke og man risikerer derfor å gå glipp av første ankomsten av sporstoffet fordi det kan ta kortere eller lengre tid enn forventet. "Sikre" resultater får man kun i de tilfellene der traceren når pumpebrønnen innenfor det tidsrommet man prøvetar/analyserer. Dersom man ikke ser noe resultat, kan dette bety at det ikke er noen kommunikasjon, eller at traceren bruker kortere eller lengre tid enn antatt.

4.3 Gjennomføring og resultater

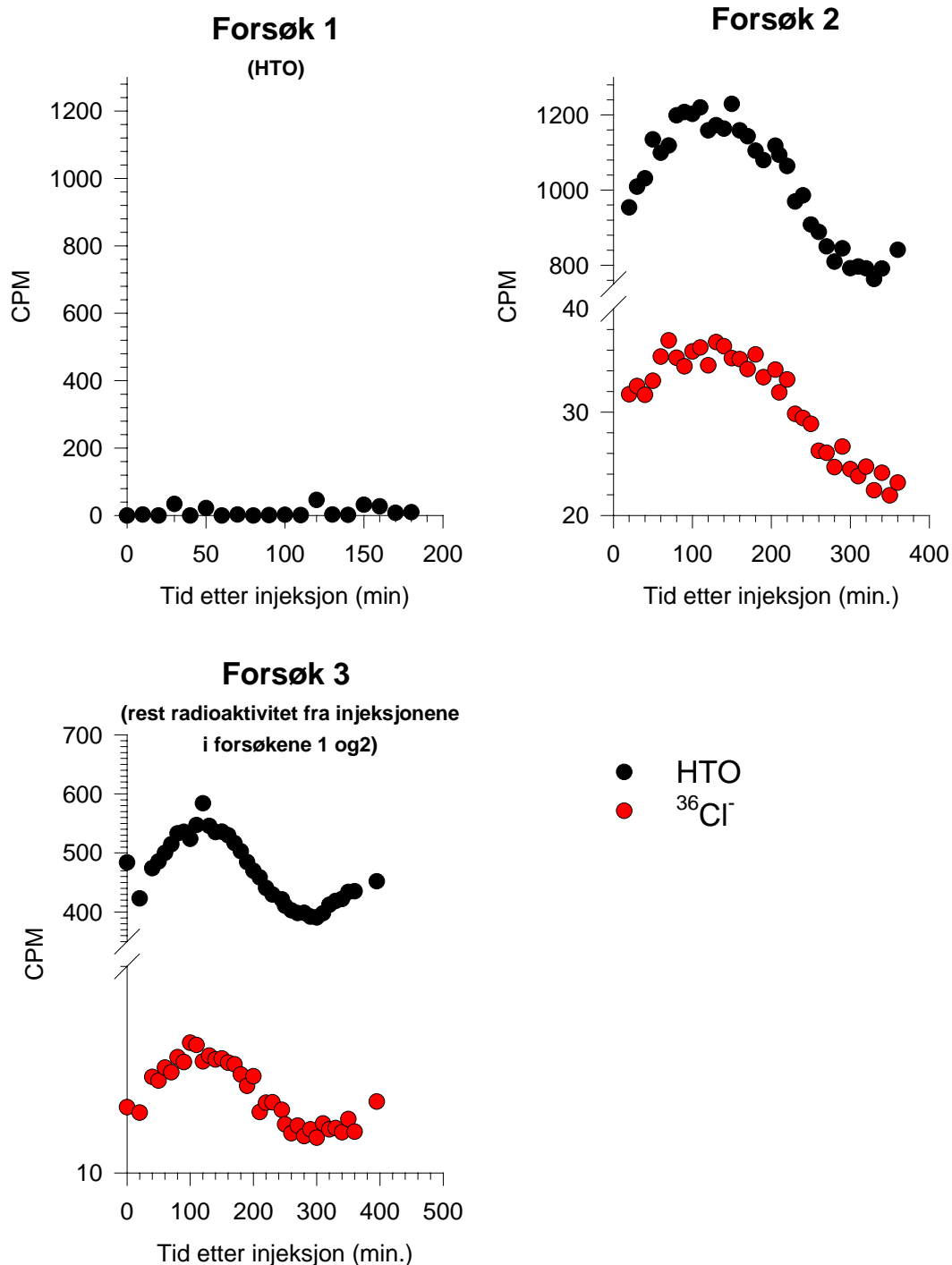
Salttestene A og B ble gjennomført for å få en oversikt over responstiden før man benyttet radioaktive tracere. Forsøkene ble gjennomført ved å tilsette henholdsvis 250 g NaBr og 500 g NaCl i brønn 8 for deretter å måle ledningsevnen på vannet fra brønn 9. Grunnet stor fortykning var endringene i ledningsevne svært liten. Det ble likevel konkludert i felt med at

Inaktive tracere (Cl^- , Br^- og I^-)



Figur 4.1 Analyseresultater fra tracerforsøkene 1-3 med bruk av de inaktive (ikke-radioaktive) tracerne klorid (Cl^-), bromid (Br^-) og jodid (I^-). Forsøk 1 ble gjort med injisering i brønn 8, forsøk 2 med injisering i brønn 6 og forsøk 3 med injisering i brønn 3. Det er ikke analysert på jodid i forsøkene 1 og 2.

Aktive tracere (HTO og $^{36}\text{Cl}^-$)



Figur 4.2 Analyseresultater fra tracerforsøkene med bruk av radioaktive tracere (Tritium (H_1O) og ^{36}Cl). Forsøk 1 ble gjort med injisering i brønn 8 og forsøk 2 ble gjort med injisering i brønn 6. I forsøk 3 ble det ikke injisert noe radioaktivt stoff. I stedet ble restradioaktiviteten i brønnvannet fra brønn 9 målt.

man kunne forvente en responstid på mellom én og to timer. Skulle man få bedre resultater måtte man ha injisert mye større mengder salt.

Testene der det, i tillegg til natriumsalter med klorid, bromid og jodid, ble benyttet aktive tracere ble gjennomført 16 og 17. juni, mens én test med kun natriumsalter og tungtvann ble utført 18. juni. Analyseresultatene for de inaktive og aktive tracerne er vist i henholdsvis Fig. 4.1 og Fig. 4.2. Det er av økonomiske grunner ikke analysert på jodid i forsøkene 1 og 2. I forsøkene 2 og 3 ble det benyttet tungtvann (D_2O). Dessverre ble det dosert for lite tracer i forhold til bakgrunnsverdien, slik at forsøket ikke ga noen resultater.

Ved injisering i brønn 8 (forsøk 1) får man nesten helt horisontale analysekurver (dvs. ingen respons) både ved bruk av inaktive og aktive tracere. Dette tyder på at det ikke er noen direkte kommunikasjon mellom brønnene 8 og 9. Alternativt kan det skyldes fortykning av traceren på grunn av store vannmengder i brønn 8. I følge borloggen er injiseringen foretatt på samme dyp som en sleppe der den totale vannmengden inn i brønnen ved boring ble målt til 650 l/time. Bakgrunnsverdien for bromid i grunnvannet er satt til 0 da den egentlige verdien ligger under deteksjonsgrensen. $^{36}Cl^-$ er heller ikke presentert da disse verdiene også ligger under måleapparatets deteksjonsgrense.

I forsøk 2 ble det injisert i brønn 6. Her viser analyseresultatene for klorid to topper. Én etter ca 30 minutter og én noe større etter ca 250 minutter. Den første toppen korresponderer med en tydelig umiddelbar økning i innholdet av bromid som er forårsaket av injiseringen. Den andre toppen kan skyldes at vannet fra brønn 6 benytter flere enn én strømningsvei frem til brønn 9. Toppen kan også skyldes at det under forsøket begynte å regne. Brønnefeltet ligger relativt nær sjøen og nedbøren (med klorid?) kan derfor være forklaringen på at man får to topper når det gjelder klorid. For bromid ser man som forventet at konsentrasjonen avtar ned mot bakgrunnsverdien etter en tid. Når det gjelder 3H og $^{36}Cl^-$ viser begge kurvene hver sin topp som følger hverandre. Den maksimale verdien ser ut til å komme etter ca 130 minutter mens første ankomsten av sporstoffene kommer etter ca 20 minutter.

Forsøk 3 ble utført kun med inaktive tracere. I tillegg til natriumsaltene ble det også benyttet tungtvann (D_2O) og det er analysert på restradioaktiviteten fra forsøkene 1 og 2. Klorid, bromid og jodid viser hver sin topp (Fig. 4.1) med maksimumskonsentrasjon etter ca 130 minutter. Best utslag fåes for klorid og bromid. Det ser ut til at førsteankomsten for tracerene ligger mellom 30 og 40 minutter. Når det gjelder restradioaktiviteten, ligger denne trolig under bakgrunnsverdien. Årsaken til at man får samme forløpet som for de inaktive tracerne kan skyldes at traceren har fordelt seg jevnt i akviferen, men at regnværet så mobiliserer stoffet.

4.4 De ulike tracerne sett i forhold til hverandre

Ut fra tracertestene som er utført, synes det som om de inaktive tracerne klorid og bromid gir sterkeste utslag. De gir også omtrent de samme resultatene på responstid. Tungtvann kan man ikke si noe om da fortynningen var for stor.

For de aktive tracerne ^3H og ^{36}Cl er resultatet omtrent det samme som for de inaktive tracerene når det gjelder første ankomst. Observasjon av maksimalkonsentrasjon ser derimot ikke ut til å nødvendigvis korrespondere med resultatene fra de inaktive tracerene.

Tracerforsøkene viser ingen vesentlige forskjeller mellom tracerne. Det ser ut til at samtlige sporbare tracere har oppført seg konservativt og derfor har fulgt vannfasen godt. Det skal legges til at oppholdstiden i akviferen er svært kort, noe som gir stor usikkerhet når det gjelder tracernes oppførsel sett i forhold til hverandre.

For saltforsøk med måling av ledningsevne ble det i felt konkludert med at mengden salt måtte økes betraktelig (500 mg i forsøkene) for å få noen vesentlig endring av ledningsevnen i brønnvannet. Ut fra tracerforsøk 1 kan denne konklusjonen til en viss grad være feilaktig, da forsøk 1 ikke gir noen resultater verken med inaktive eller aktive tracere. Årsaken til at man ikke fikk noe godt resultat ved bruk av ledningsevne målinger kan derfor skyldes at saltet ikke nådde brønn 9.

5. TRACER OG VANNSTRØM MELLOM BRØNNENE

Tracerforsøk 1 med injisering i brønn 8 tyder på at det tilsynelatende ikke eksisterer noen kommunikasjon mellom brønnene 8 og 9, i motsetning til pumpe-testresultatet. Dette er vanskelig å forklare da kurveforløpet for vannstandsendingene i de to brønnene er svært like hverandre de første dagene av pumpe-testen. Brønn 8 har en mye større kapasitet enn de andre brønnene i brønnfeltet og får derfor sannsynligvis tilført vann fra sprekker som ikke kommuniserer med de andre brønnene i feltet. En mulig årsak kan derfor være at traceren ikke har kommet inn i sprekker som kommuniserer med brønn 9, men har tatt en annen strømningsvei. Det kan også tenkes at traceren fra brønn 8 har beveget seg via en annen brønn før den når brønn 9. I så tilfelle har prøvetiden vært for kort til å få med gjennombruddskurven.

Både tracerforsøk 2 og pumpe-testen i brønn 9 viser en klar kommunikasjon mellom brønnene 6 og 9. Tracerforsøket indikerer at med en pumpekapasitet på ca 110 l/t når vannet fra brønn 6 fram til brønn 9 etter 20-30 minutter. Dette viser god kommunikasjon og støttes opp av de umiddelbare vannstandsendingene man får i brønn 6 ved økt pumpekapasitet i brønn 9.

For brønn 3 bekrefter tracerforsøk 3 at det er en kommunikasjon mellom denne brønnen og brønn 9. Det ser ut til vannet når brønn 9 i løpet av 30-40 minutter. Tracerforsøket indikerer en rask kommunikasjon mellom de to brønnene, noen som tilsynelatende strider med den langsomme responsen/vannstandsendingen i brønn 3 under pumpe testen.

6. DISKUSJON OG KONKLUSJON

6.1 Kommunikasjonen mellom brønnene

Ut fra tracertesten og pumpe testen ser det ut til å være tre former for kommunikasjon mellom brønnene:

- Hurtig, direkte respons
- Langsom direkte og indirekte respons
- Ingen kommunikasjon

Hurtig, direkte respons observeres mellom brønnen 6, 8 og 9. Dette er vist ved klare sammenfall mellom pumping i brønn 9 og endring i vannstand i brønnene. For brønn 6 observeres i tillegg førsteankomsten ved bruk av tracere etter 20-30 minutter. Dette tyder på at det mellom brønnene går minst én relativt åpen sprekk med høy konduktivitet.

Tracerforsøk 3 tyder på at det også mellom brønnene 3 og 9 finnes én eller flere sprekker med relativt høy konduktivitet da førsteankomsten ble registrert etter 30-40 minutter. Pumpe testen viser derimot ikke en like god kommunikasjon. Den mest nærliggende forklaringen er at brønn 3 trekker vann fra områder utenfor brønnfeltet. Dvs. at vann som trekkes fra brønn 3 mot brønn 9 raskt kompenseres, og grunnvannsspeilet forblir tilnærmet stabilt.

Endringene i vannstand i brønnene 2 og 5 ved pumping i brønn 9 er små, men det observeres både skjelvninger og særlig i brønn 2 små knekkpunkt som korresponderer med økt vannuttak i brønn 9. Kommunikasjonene mellom brønnene 2 og 9, og 5 og 9, foregår trolig gjennom mindre åpne sprekker og i hvert fall til brønn 2 er transportveien lengre. Dette fører til en langsommere transport av vann. Det antydes små knekkpunkt på vannstandskurven til brønn 1. Disse kan være forårsaket av pumpingen i brønn 9, men kommunikasjonen mellom brønnene er tolkes i så tilfelle til å skje indirekte via brønn 2.

Det antas at det ikke er kommunikasjon mellom brønnene 4 og 9 selv om mulige skjelvninger kan observeres på vannstandskurven for brønn 4 i begynnelsen av pumpe testen. Da det kun ble foretatt få, manuelle målinger i brønn 7 er det umulig å si noe om eventuell kommunikasjon mellom denne brønnen og brønn 9. Det mest sannsynlige ut fra korttidstestene utført tidligere, er likevel at det ikke finnes noen kommunikasjon.

Av brønnene i feltet ser det ut til at kun brønn 8 får tilført vann i vesentlig grad fra området utenfor brønnfeltet. For de andre brønnene viser korttidstestene en mye lavere kapasitet og brønnene ser ut til å være sterkt påvirket av nedbør.

Skjelvingene, dvs. de raske svingningene i grunnvannsspeilet, er et spesielt fenomen som ikke er registret i tidligere tilsvarende studier, men ble bemerket av Braathen et al. (1998) under korttidspumping av brønnfeltet. De fremkommer antagelig her p.g.a. den høye oppløsningen og raske registreringen av data fra trykksensorene som har vært plassert i brønnene. Det systematiske mønsteret og reproduserbare hendelser utelukker at disse resultatene skyldes støy under dataregistrering.

I Figurene 6.1a og 6.1b er dataene fra de fire første døgnene blåst opp. På samme måte som under korttidstesten observeres en «skjelving» i vannstandsdataene i tilknytning til vannuttakstoppene. Effekten er helt åpenbar i brønnene 3 og 5, men også registrerbar i brønnene 1 og 4. Dette styrker, og gir kanskje den endelige dokumentasjon på, teorien om at «skjelvingene» har sitt opphav i spenningsavlastninger i bergmassivet under senkning av vannstanden/trykknivået i pumpebrønnen.

6.2 Nedbør og infiltrasjon

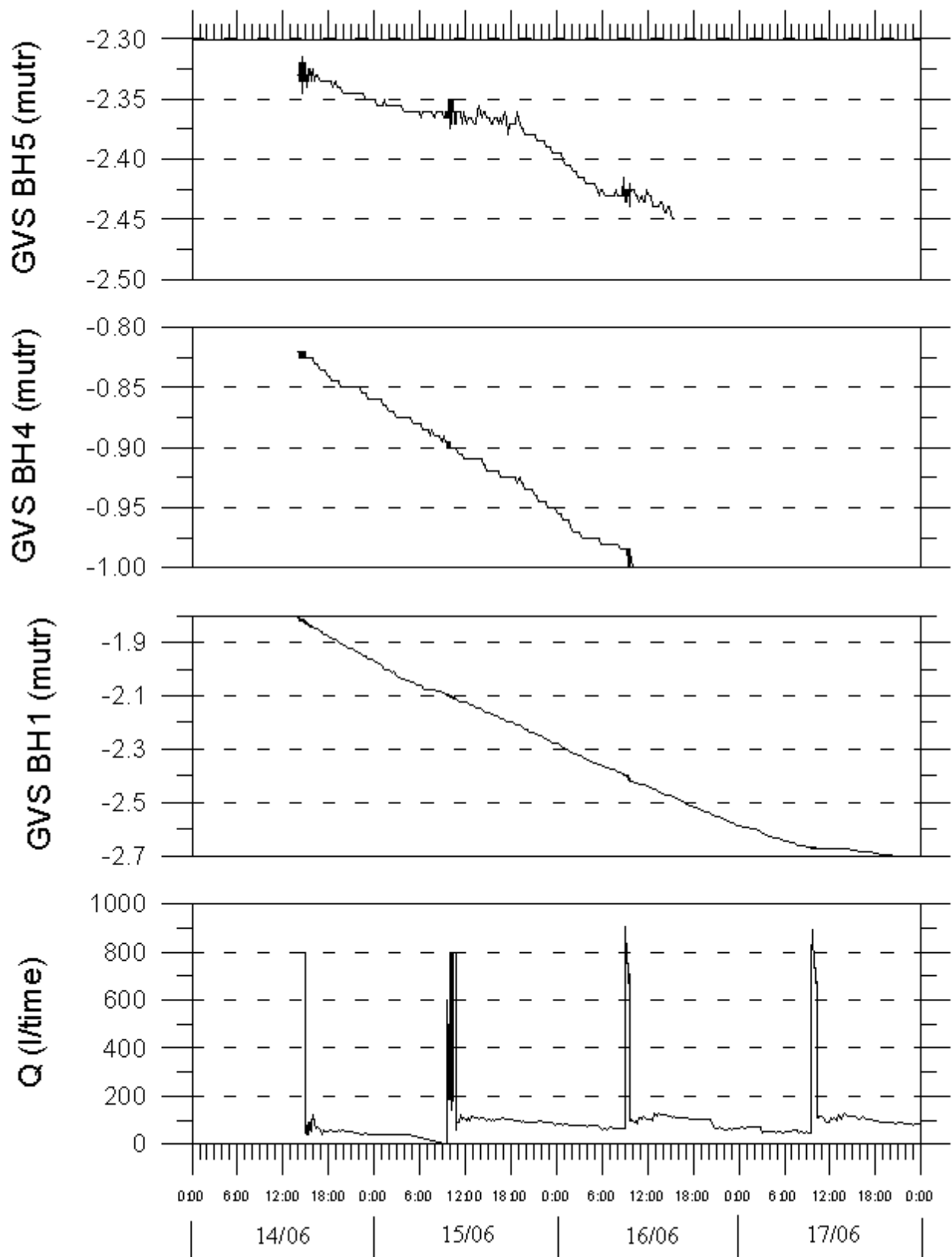
Vannstanden i brønnene i brønnfeltet blir sterkt påvirket av nedbør. Selv små mengder regn (17. juni) fører til stigning i vannstanden og store nedbørsmengder (rundt 20 mm/døgn) gir umiddelbar økning i vannstanden. Dette dokumenterer at brønnene får tilført vann fra overflatenære sprekker. De fleste brønnene (2, 3, 6, 7, 8 og 9) har også borlogger som viser løse lag eller slepper i de øverste 10-15 meterne av borhullet. Når nedbøren opphører avtar vannstanden raskt igjen, noe som vanskeliggjør en tolkning av hvor stor del av senkningen som skyldes pumping i brønn 9, og hvor stor del som skyldes at vann renner ut av brønnfeltet via sprekker.

6.3 Tracernes egnethet

Oppholdstiden i akviferen er svært kort, noe som vanskeliggjør en vurdering av egnethet til de forskjellige tracerne. Det ser ut til at samtlige sporbare tracerne har oppført seg konservativt og derfor har fulgt vannfasen godt. For de aktive tracerne ^3H og ^{36}Cl er resultatet omtrent det samme som for de inaktive tracerne når det gjelder første ankomst. Observasjon av maksimalkonsentrasjon ser derimot ikke ut til å korrespondere med resultatene fra de inaktive tracerne.

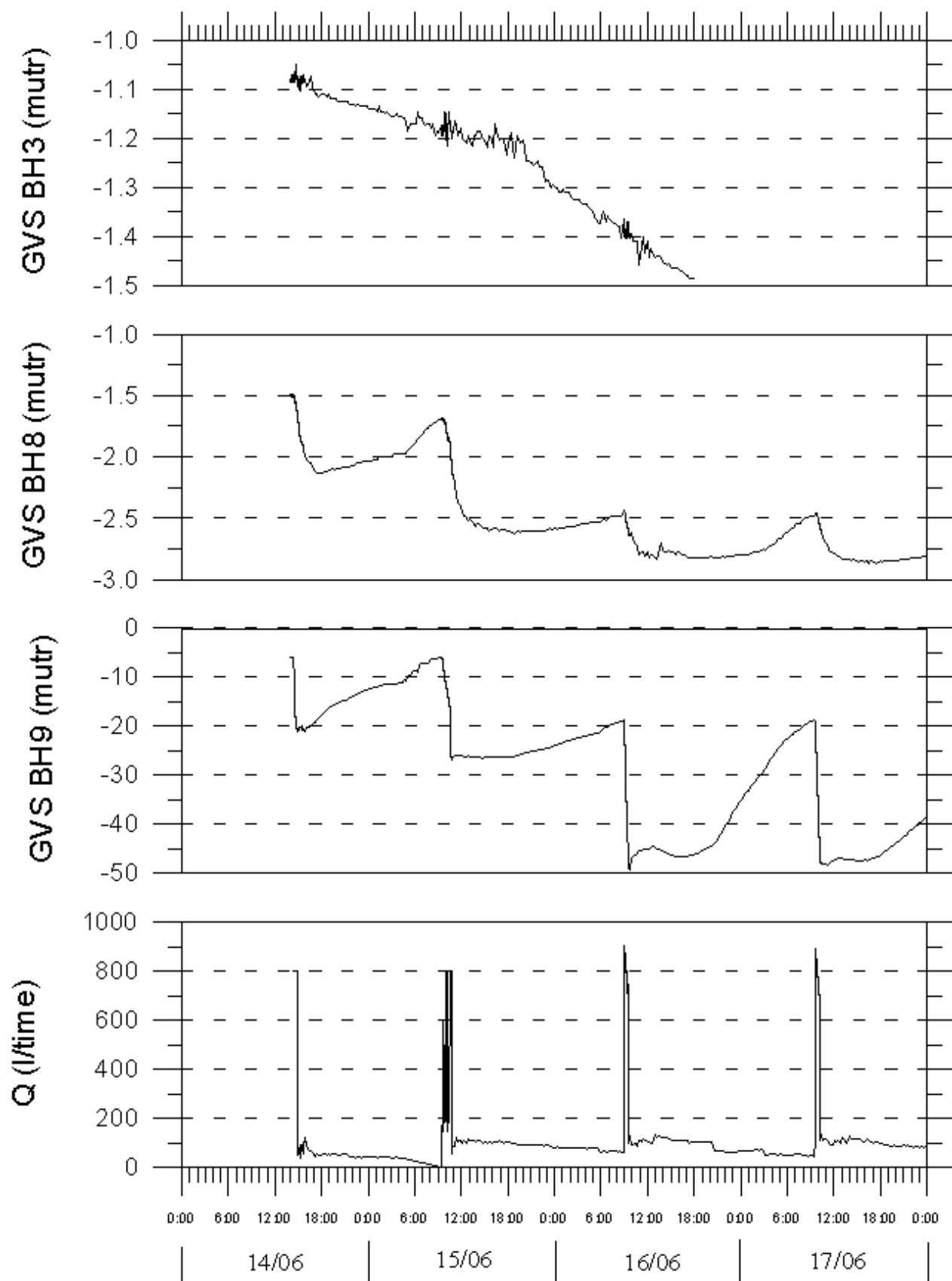
Rene saltforsøk med måling av ledningsevnen ser ut til å være mindre egnet da man må benytte store konsentrasjoner p.g.a. stor fortykning.

Fig. 6.1.a. Grafer som viser utdrag av endringer i grunnvannspeilet under pumping av brønn 9.
 Legg merke til svingningene i grunnvannspeilet i forbindelse med pumping.



GRAF03.GRF

Fig. 6.1.b. Grafer som viser utdrag av endringer i grunnvannsspeilet under pumping av brønn 9. Legg merke til svingningene i grunnvannsspeilet i forbindelse med pumping.



G RAF02.GRF

6.4 Påvirker bergspenningene vannstrømmen i brønnfeltet?

Holmedal brønnfelt er plassert ca 250-300 meter vest for et markant lineament. Oppsprekningen av berggrunnen er relativt moderat, og samsvarer til en plassering i lineamentets distale del eller i området for generell bakgrunnsoppsprekning (se Braathen & Gabrielsen 1998). I denne posisjonen, med relativt lav bruddfrekvens, antyder nevnte forfattere betydningen av bergspenningen, som her vil kunne påvirke enkeltbrudd i stede for bruddnettverk. Brønnfeltets plassering er således gunstig for å vurdere bergspenningenes mulige påvirkning av grunnvannsstrøminger.

I henhold til Makurat & Løset (1998), som underbygger sine resultater med laboratorie- og modell-baserte studier, er sprekkekonduktivitet kontrollert av følgende faktorer:

- (1) bergartens styrke - evne til å motstå (elastisk) deformasjon,
- (2) forholdet mellom normal spenning og styrken på bergarten - elastisiteten er avgjørende for sammenpressing og åpning av sprekker i forhold til minste og største bergspenning,
- (3) skjærdeformasjon langs sprekken - skjærdeformasjon langs sprekker gir økende konduktivitet,
- (4) forvitring av sprekkeoverflaten - vitringsprodukter reduserer konduktivitet,
- (5) sprekkeruhet - større ruhet gir større sprekkeåpning og potensiell konduktivitet.

I tilfellet Holmedal brønnfelt foreligger liten informasjon om faktorene 3-5. Mange av bruddene i området er skjærbrudd, som i mange tilfeller er mineralisert og/eller vitret. Glatte sprekker dominerer, men variasjonen er stor. Det er nærliggende å stille spørsmål ved om disse faktorene kan beskrives på en objektiv måte i felt; i avgrensede laboratorie-studier er dette mye enklere.

Bergspenningene i området ved brønnfeltet er etablert gjennom målinger ved hydraulisk splitting (Hansen 1996; Midtbø 1996a,b). For områder med lav topografisk gradient fremkommer en største spenningsakse i de øvre 25 meterne av jordskorpen med østvestlig orientering på ca. 7,5 MPa, og en nordsørlig minste spenningsakse på 3,8-4,5 MPa. Disse orienteringene er i samsvar med modellerte spenningsakser, basert på regionale data (Lindholm et al. 1995; Fejerskov et al. 1995).

Den biotitt-førende kvarts-feltpatiske skiferen ved brønnfeltet vil ha en moderat til lav bergartsstyrke. Dette antyder at sprekker vil påvirkes av spenningsfeltet. Bruddene som er registret i brønnfeltet kan deles i to hovedgrupper: (1) steile nord-syd til nordøst-sydvest enkeltbrudd og smale bruddsoner (se Braathen et al. 1998), og (2) øst-vest strykende, moderat nordlig fallende brudd langs den gjennomsettende foliasjonen i berggrunnen. Sistnevnte brudd er subparallele med retningen for største spenning, og vil i henhold til for eksempel Makurat & Løset (1998) derfor potensielt ha den høyeste konduktiviteten.

Ser vi en slik forhøyet konduktivitet, dvs. vannstrøm, langs en østvestlig retning i brønnfeltet? Det er nærliggende å se nærmere på to forhold:

6.4.1 Den naturlige grunnvannsgradienten i brønnfeltet

Som vist i Fig. 2.1, faller det naturlige grunnvannsspeilet i brønnfeltet i en syd, sydøst og sydvest retning. Siden området har minimal topografi, og dermed ingen naturlig hydraulisk gradient, er det høyst sannsynlig at dette skyldes konduktivitetsvariasjoner i brønnfeltet. Gradienten kan forklares på to måter; (a) det er en lekkasje ut av brønnfeltet nær/ved brønn 7, eller (b) konduktiviteten på brudd i brønnfeltet er høyere i øst-vest retning enn i nord-syd retning. Det siste forklares ved at god konduktivitet gir rask utjevning av gradienten i grunnvannsspeilet, dvs. bedre konduktivitet langs kotene enn vinkelrett på kotene. Siden brønn 7 gir minimalt med vann og ikke reagere på pumping i andre brønner, er det lite sannsynlig at det er en lekkasje ut av brønnfeltet her. Høyere konduktivitet på øst-vest brudd synes derfor å være den beste forklaringen.

6.4.2 Effekten av pumping på grunnvannsspeilet

Langtids pumpetesten og tracer studiene, samt resultatene fra korttidstesting av de enkelte brønnene (Braathen et al. 1998), underbygger et strømningsmønster i brønnfeltet i samsvar med Fig. 2.6. Det er rask kommunikasjon mellom brønnene 6, 8 og 9, langsom kommunikasjon mellom brønnene 3 og 9, og mulig meget svak kommunikasjon med de resterende brønnene, med unntak av brønn 7, som ikke gir respons. Den beste brønnen i feltet, brønn 8, trekker vann fra områder utenfor brønnfeltet, uten å kommunisere med ytterbrønnene 1 og 7. Vanntransporten foregår derfor mest sannsynlig inn mot denne brønnen innenfor sektoren nordøst til sydøst.

Den gode kommunikasjonene mellom brønnene 6, 8 og 9 vises også i den naturlige grunnvannsgradienten (Fig. 2.1), hvor disse brønnene har tilnærmet samme grunnvannsspeil. Dette kan muligens forklares med god kommunikasjon langs en nordøst-sydvest bruddsone, som er lokalisert til området i mellom brønnene. Gradienten er derimot høy mellom brønn 9 og brønnene 3 og 5. I denne posisjonen er det en markant avbøyning av gradienten, og kotene stryker lokalt nord-syd. Dette kan tyde på kommunikasjon langs et nordsør orientert brudd (eller bruddsone).

Strømningsmønsteret som fremkommer fra langtidspumpingen gir et meget interessant resultat (se Fig. 6.2), selv om konturering av endringer i grunnvannsspeilet for et brønnfelt i fjell forutsetter en relativt homogen, permeabel akvifer, noe som kun kan sies å være en grov tilnærming i dette tilfellet. Over tid utvikles en senkningstrakt med en øst-vest akse som stuper slakt mot øst. Dette kan forklares på to måter; (1) at grunnvannet beveger seg raskest inn mot pumpebrønnen i denne retningen enn i en nordsørlig retning, eller (2) at brønnene i nord og sør har større tilførsel av vann fra områder utenfor brønnfeltet. Pumpingene i

brønnefeltet tyder på at kun brønn 8 trekker større mengder vann fra områder utenfor brønnefelt. En nærliggende konklusjon er derfor at vanntransporten i brønnefeltet er raskest i østvestlig retning. Dette gir nok en indikasjon på økt konduktivitet subparallelt med største bergspenning.

6.5 Konklusjon; bergspenningenes betydning for konduktivitet

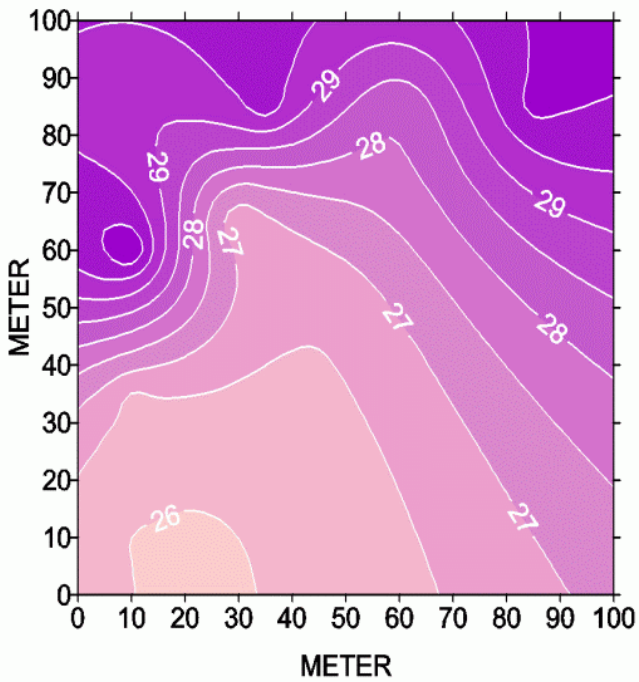
Som det framgår av diskusjonen over, er det ingen klare svar for betydningen av bergspenningene i brønnefeltet. Ses området under ett, synes det som om det er høyere grunnvannstransport i en østvestlig retning. Det framkommer både gjennom den naturlig grunnvannsgradienten og gjennom senkningstrakten ved langtidspumping. Denne retningen er parallelt med foliasjonen og brudd langs denne, og subparallelt med største bergspenning. Dette gir en klar indikasjon på at foliasjonsprallelle og største spenningsakse-parallelle brudd generelt sett har større konduktivitet enn brudd med en høy vinkel på retningen for største spenning. Lokale avvik i mønsteret kan enklest forklares ved vanntransport langs kartlagte bruddsoner, som dermed bryter det generelle mønsteret som er skissert over.

6.6 Metodeutvikling og framtidige arbeider

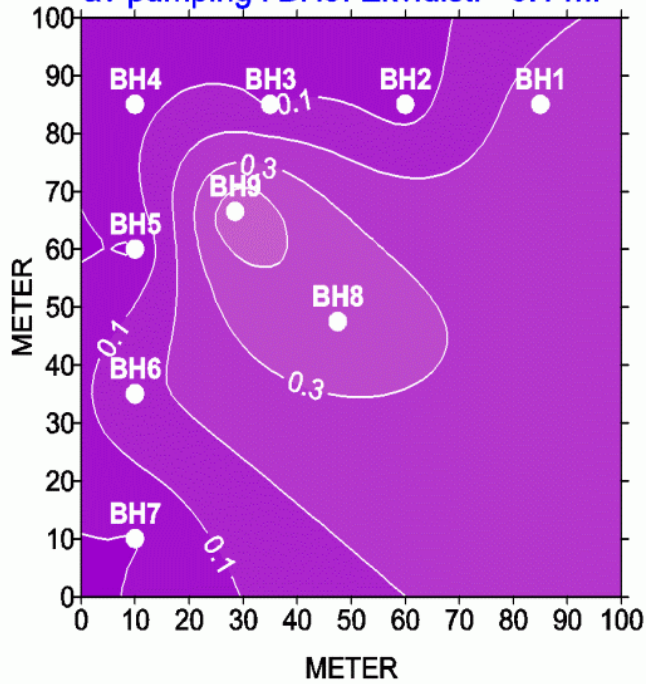
Dette er det første brønnefeltet i Norge, og har medført omfattende metode- og utstursutvikling. For å fremskaffe mer entydige resultater vil det være nødvendig å gjenta forsøket i ett eller to nye brønnefelt, gjerne i andre deler av landet og under andre geologiske forhold. Dette vil mer entydig kunne klargjøre om mønstrene som framkommer i Holmedal brønnefelt er av regional betydning, eller kun gjenspeiler lokale forhold i brønnefeltet.

Fig. 6.2. Tidsbilder som viser endringer i grunnvannsstanden ved pumping av grunnvann fra borhull 9 (BH9).

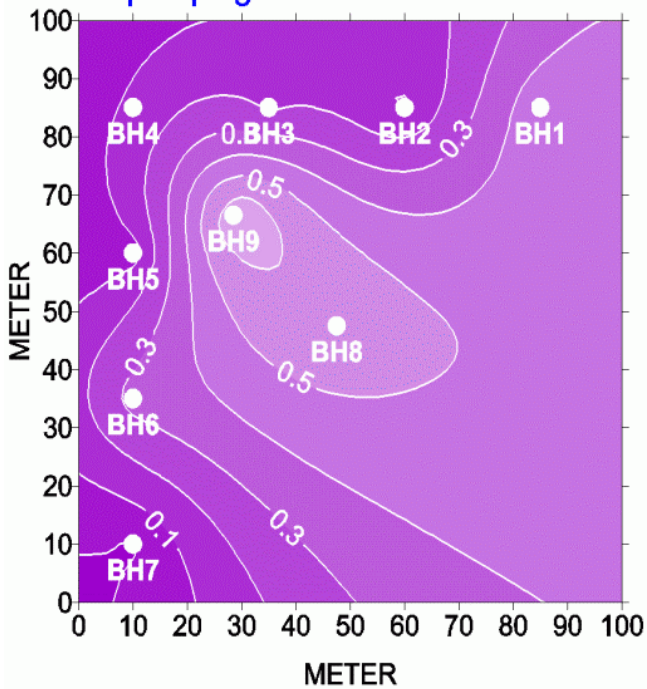
Grunnvannskotekart (moh) ved start av pumping fra BH9. Ekvidist. = 0.5 m.



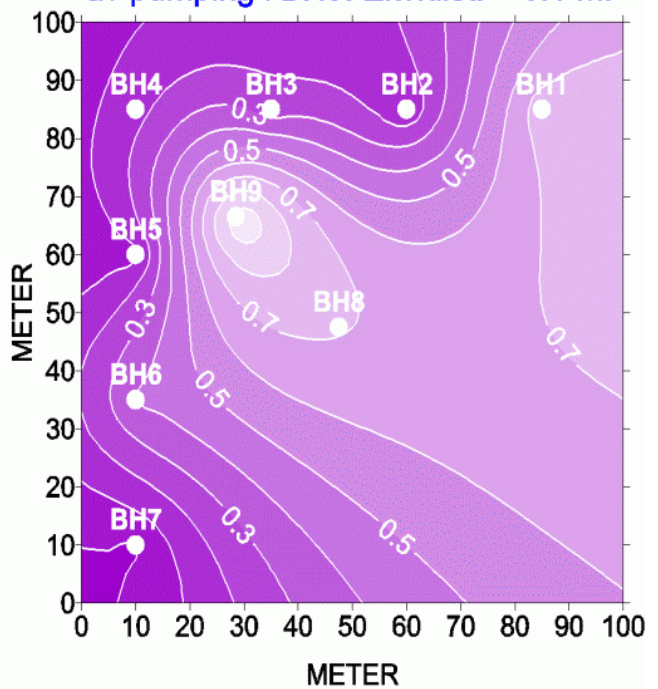
TIDSBILDE 1: Relativ senkning av grunnvannsspeil 20 timer etter start av pumping i BH9. Ekvidist.= 0.1 m.



TIDSBILDE 2: Relativ senkning av grunnvannsspeil 32 timer etter start av pumping i BH9. Ekvidist. = 0.1 m.



TIDSBILDE3: Relativ senkning av grunnvannsspeil 44 timer etter start av pumping i BH9. Ekvidist. = 0.1 m.



7. REFERANSER

- Braathen, A. & Henriksen, H. 1997: Post-devonian fracture systems in the Sunnfjord region, onshore Western Norway. NGU Bull. 433, 16-17.
- Braathen, A. 1998. Polyphase brittle faulting in the Sunnfjord region, western Norway; kinematics and timing. NGU Rapport 98.007, 42 p
- Braathen, A., 1999. Kinematics of polyphase brittle faulting in the Sunnfjord region, western Norway. Tectonophysics (i trykk).
- 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., & Gabrielsen, R.H., 1998. Lineament architecture and fracture distribution in metamorphic and sedimentary rocks, with application to Norway. NGU Rapport 98.047, 72 sider.
- Braathen, A., Gaut, S., Henriksen, H., Storrø, G. & Jæger, Ø., 1998: Holmedal brønnfelt, Sunnfjord: Geologiske undersøkelser og prøvepumping. NGU Rapport 98.085.
- 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.

- Makurat, A. & Løset, F. 1998. Modelling og evaluering av strømming i sprekker. Sammendrag til Fjellsprengningskonferansen, Oslo 26-27 november, s. 30.1-30.19. Norsk jord- og fjelltekniske forbund.
- 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. *Journal of Structural Geology* 16, 1385-1401.
- Sosial- og helsedepartementet, 1995: Forskrifter om vannforsyning og drikkevann m.m.

