

Rapport nr.: 2005.010		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak ved hydraulisk trykking av borebrønner.			
Forfatter: Randi Kalskin Ramstad, Bernt Olav Hilmo, Helge Skarphagen		Oppdragsgiver: Norges forskningsråd, Bærum kommune og NGU	
Fylke: Akershus, Sør-Trøndelag		Kommune: Bærum og Trondheim	
Kartblad (M=1:250.000) Oslo, Trondheim		Kartbladnr. og navn (M:50.000) Asker, Trondheim	
Forekomstens navn og koordinater: Lade, Bryn og EAB		Antall sider: 214	Pris: 450
Feltarbeid utført: april 1999- mars 2004		Rapportdato: 14.02.05	Prosjektnr.: 277106
		Ansvarlig: <i>Jens S. Kverving</i>	
<p>Sammendrag:</p> <p>Nytt utstyr for hydraulisk trykking, en dobbeltmansjett av type FrakPak - AIP 410-550, er utviklet av Brønnteknologiutvikling AS. Utstyret er testet i laboratoriet og i felt ved Lade i Trondheim. Ved bygging av to pilotanlegg for grunnvarme ved Bryn og ved eiendommen til tidligere Energiselskapet Asker og Bærum (EAB) i Bærum kommune er det gjort omfattende undersøkelser knyttet til hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Grunnvarmeanleggene ved Bryn og EAB var tenkt basert på oppumpet grunnvann fra borebrønner i fjell der økt effekt hentes ut fra berggrunnen ved å pumpe, returnere og sirkulere vannet. Hensikten med undersøkelsene var å (1) teste og utvikle metodene for hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand, (2) dokumentere effekten av de forskjellige former for hydraulisk trykking, og (3) kartlegge de hydro- og berggrunnsgeologiske forholdenes egnethet for denne typen grunnvarmeanlegg. Foruten omfattende seksjonsvis stimulering av totalt 10 borehull med hydraulisk trykking med vann og -injeksjon av sand, har undersøkelsene blant annet bestått av testpumping, vannprøvetaking, geofysisk logging, måling av terrengendringer, strømnings- og bergspenningsmålinger, og termiske responstester. Videre er det gjort en effekttest og en teoretisk modellering av energipotensialet av anleggene.</p> <p>Resultatene fra pilotanlegget ved Bryn viser at borehullenes produksjonskapasitet øker betydelig som følge av både hydraulisk trykking med vann og -injeksjon av sand. Samtidig virker det å være større behov for sand som "propping agents" eller avstandsklosser i sprekker som har høyt mottrykk (i dette tilfellet høyere 40 bar) sammenlignet med sprekker med lavere mottrykk. Sandens kornstørrelse bør også tilpasses det aktuelle mottrykket, og injeksjon av grovere sand anbefales i sprekker med lavere mottrykk. Bergmassens styrke og -spenningsforhold avgjør vellykketheten av hydraulisk trykking med hensyn til gjenåpning av eksisterende, eller åpning av nye sprekker. Testpumping var i denne studien bedre egnet enn strømningsmålinger for å dokumentere endringer i borehullenes kapasitet og strømningsmønster. Borehullsinspeksjon gir verdifull informasjon om oppsprekningsforhold, mulige vannførende sprekker, grunnvannskvalitet, vanntemperatur og strålingsforhold, men endringer i borehullsveggen som følge av hydraulisk trykking er vanskelig å påvise. Effekttesten av grunnvarmeanlegget ved Bryn viste at infiltrasjonskapasiteten i senterborehullet, borehull 3, er altfor lav i forhold til forutsetningen i prosjektidéen, mens anlegget ved EAB kan driftes som planlagt. Sammenlignet med et konvensjonelt grunnvarmeanlegg med kollektorer vil pilotanlegget ved EAB ha god lønnsomhet. Ved de aktuelle økonomiske og geologiske forholdene kan anleggskostnadene, det vil si borekostnadene for et konvensjonelt lukket kollektoranlegg, reduseres med mer enn 50% ved å velge et anlegg basert på oppumpet grunnvann ved EAB der energiuttaket fra vann er høyere enn 105 MWh/år. Et årlig energiuttaket på 105 MWh forutsetter en strømningsrate på 14 m³/time, et gjennomsnittlig temperaturuttak på 2,1°C, og 3000 driftstimer. Lønnsomheten vil ytterligere forbedres hvis anlegget benyttes til både oppvarmings- og kjøleformål. Grunnvannskvaliteten ved alle undersøkelsesområdene er tilfredsstillende.</p>			
Emneord: Grunnvarme	Hydrogeologi	Hydraulisk trykking	
Geofysikk	Metodeutvikling	Injeksjon av sand i bergsprekker	
Testpumping	Termisk responstest	Fagrapport	

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	4
1.1	Prosjektidé	5
2	Bakgrunn, metode- og utstyrsbeskrivelse	6
2.1	Hydraulisk trykking	6
2.1.1	Hydraulisk trykking av vannbrønner i krystallinske berg - Tidligere studier	6
2.1.2	Hydraulisk trykking for utnyttelse av lav-geotermisk energi	10
2.1.3	Bergspenningenes betydning for sprekkeutbredelsesretningen	13
2.1.4	Bergspenningsmålinger	14
2.1.5	Bergarters mekaniske egenskaper	16
2.1.6	Hydraulisk trykking med vann - praktisk gjennomføring	18
2.1.7	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	19
2.1.8	Måling av vanntrykk og pakningstrykk	20
2.2	Utvikling av utstyr	21
2.2.1	Dobbeltmansjett - FrakPak - AIP 410-550	21
2.2.2	Høytrykkstank for injeksjonsmassen	22
2.2.3	Injeksjonsmansjett for senterborehull	22
2.2.4	Luftrykksblander	23
2.3	Geofysisk logging	24
2.3.1	Optisk televiewer	24
2.3.2	Temperatur, ledningsevne, og gammastråling (TCN-logg)	25
2.3.3	Strømningsmåler	25
2.4	Kapasitetstesting av borehull	26
2.4.1	Utstyr til testpumping	27
2.4.2	Varianter av testpumping; vanlig-, søyle- og seksjonspumping	28
2.4.3	Synke- og stigetester; Teori	29
2.4.4	Vannkapasitetsanslag	30
2.5	Vannkvalitet i grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann	31
2.6	Laboratoriemetoder	32
2.6.1	Vannanalyse	32
2.6.2	XRF-, XRD- og tynnslipsanalyser	34
2.7	Måling av terrengendringer	35
2.8	Termisk responstest	35
3	Undersøkelserområder	38
3.1	Lade - undersøkelser, geologi og borehullsfakta	38
3.2	Bryn - undersøkelser, geologi og borehullsfakta	40
3.3	EAB - undersøkelser, geologi og borehullsfakta	43
4	Utførte undersøkelser	46
4.1	Laboratorieforsøk - Blanding av fortykningsmiddel og vann	46
4.2	Lade	47
4.2.1	Testpumping, vannprøvetaking og geofysisk logging	47
4.2.2	Hydraulisk trykking	47
4.2.3	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	48
4.2.4	Måling av terrengendringer	48
4.3	Bryn	49
4.3.1	Boring og XRF-, XRD- og tynnslipsanalyser av borekaks	49
4.3.2	Testpumping, vannprøvetaking og geofysisk logging	49
4.3.3	Bergspenningsmålinger	50
4.3.4	Hydraulisk trykking med vann	50
4.3.5	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	52
4.3.6	Nivellering	54
4.3.7	Termisk responstest	55
4.3.8	Testkjøring av anlegget	55
4.4	EAB	57
4.4.1	Testpumping, vannprøvetaking, strømningsmålinger og geofysisk logging	57
4.4.2	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	58
4.4.3	Nivellering	59
4.4.4	Termisk responstest	60

4.4.5	Testkjøring av grunnvarmeanlegget	60
4.5	Modellering av energipotensialet	61
4.5.1	Presentasjon av programvare - FEFLOW og HFM	61
4.5.2	Sammenligning av FEFLOW- og HFM-programvaren ved Bryn	64
4.5.3	FEFLOW-modellering av energipotensialet ved Bryn og EAB	66
5	Resultater.....	70
5.1	Lade	70
5.1.1	Borehullenes vannkapasitet og grunnvannskvalitet	70
5.1.2	Optisk televier og TCN-logg av borehull 2	72
5.1.3	Hydraulisk trykking	72
5.1.4	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	73
5.1.5	Terrengendringer	74
5.2	Bryn	74
5.2.1	Boring og borekakssets mineralogi	74
5.2.2	Borehullenes vannkapasiteter	76
5.2.3	Endringer i borehullskapasiteten som følge av hydraulisk trykking	84
5.2.4	Stigekurver	88
5.2.5	Grunnvannskvalitet	89
5.2.6	Bergspenninger	92
5.2.7	Borehullenes beskaffenhet - oppsprekning, temperatur, ledningsevne og radioaktivitet	93
5.2.8	Identifisering av mulige nye vanninnslag i borehullene	100
5.2.9	Hydraulisk trykking med vann	103
5.2.10	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	111
5.2.11	Terrengendringer	112
5.2.12	Termisk respons i borehull 3	113
5.2.13	Effektuttak fra grunnvarmeanlegget	115
5.2.14	Anbefalte alternativer for bruk av borehullene ved Bryn	117
5.3	EAB	118
5.3.1	Borehullenes opprinnelige vannkapasitet og grunnvannskvalitet	118
5.3.2	Strømningsmålinger	120
5.3.3	Borehullenes beskaffenhet - oppsprekning, temperatur, ledningsevne og radioaktivitet	121
5.3.4	Identifisering av mulige nye vanninnslag i borehullene	124
5.3.5	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	126
5.3.6	Terrengendringer	128
5.3.7	Termisk respons i borehull 1	129
5.3.8	Effektuttak fra grunnvarmeanlegget	131
5.3.9	Endringer i borehullskapasiteten som følge av hydraulisk trykking	132
5.3.10	Anbefalt bruk av borehullene ved EAB	133
5.4	Modellert energipotensial	133
5.4.1	Sammenligning av FEFLOW og HFM ved Bryn	133
5.4.2	Modellert energipotensial ved Bryn og EAB	136
5.5	Trykknivåer ved hydraulisk trykking - sammenligning Bryn og EAB	140
5.6	Metodeevaluering	142
5.6.1	Dobbelpakning - FrakPak - AIP 410-550	142
5.6.2	Hydraulisk trykking med bare vann	143
5.6.3	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand	144
5.6.4	Erfaringer med optisk televier	145
6	Økonomi.....	147
6.1	En enkel økonomisk analyse	147
6.1.1	Anleggskostnader	148
6.1.2	Energiuttak fra grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann - anslag	148
6.1.3	Beregning av effektive borehullsmetre ved bruk av EED	150
6.1.4	Er grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann ved EAB lønnsomt?	152
6.1.5	Lønnsomt grunnvarmeanlegg ved Bryn? - Teoretiske betraktninger	153
6.1.6	Anleggskostnader ved forskjellig energiuttak ved Bryn og EAB	156
6.2	Energieffektivitet - energiuttak per meter borehull	156
7	Diskusjon.....	158
7.1	Kostnadsreduksjoner ved bruk av forbedret utstyr og metodikk	158
7.2	Hydraulisk trykking og geologiske forhold	158
7.3	Tilstrekkelig infiltrasjonskapasitet og fordelt sirkulasjon av grunnvann	159
7.3.1	Hydraulisk kommunikasjon - foretrukket borehullskonfigurasjon	159

7.3.2	Identifisering av vanninnslag	161
7.4	Behov for sand som "propping agents"?	161
7.5	Forslag til videre arbeid	163
8	Sammendrag og konklusjon	165
9	Referanser	167

1 Innledning

Prosjektet *Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak ved hydraulisk trykking av borebrønner i fjell* ble startet opp i november 1999. Hovedmålet var å utvikle utstyr og metodikk som reduserer borekostnadene for middels til store grunnvarmeanlegg i fjell med opptil 50%. Borekostnadene utgjør vanligvis mellom 30-40% for konvensjonelle grunnvarmeanlegg med U-rørskollektorer i vertikale borehull i fjell (Skarphagen et al., 1999). Prosjektet introduserte et alternativt konsept der energiuttaket baseres på oppumpet vann fra en permeabel berggrunn kunstig laget med hydraulisk trykking. Hydraulisk trykking fører til oppsplitting av berggrunnen, øker varmevekslerarealet mellom grunnvannet og berggrunnen, og dermed sannsynligvis større energiuttak per borehull. Konseptets mulige korttids-energiuttak, begrensninger og muligheter har blitt testet ut ved to pilotanlegg ved henholdsvis Bryn og ved den tidligere eiendommen til Energiselskapet Asker og Bærum, EAB. Begge anleggene er lokalisert i Bærum kommune utenfor Oslo. Resultatene fra korttidstestene vil danne grunnlaget for en permanent drift av pilotanleggene som i fremtiden sannsynligvis vil bli benyttet til både varme- og kjøleformål for nærliggende bygningsmasse.

Samarbeidspartnere i prosjektet, som har en total kostnadsramme på cirka 5 millioner kroner, har vært Norges geologiske undersøkelse (NGU), Brønnteknologiutvikling AS (BTU), Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet (NTNU), Energiselskapet Asker og Bærum (Viken Energinett), Norges forskningsråd, SINTEF Bygg og miljø, avd. for Berg og geoteknikk og Norsk brønnboreforening. Deltakere i prosjektgruppen har vært Espen Hiorth og Jan Håbrekke (BTU), Bjørge Brattli (NTNU), Arne Myrvang (SINTEF/NTNU), Lisbeth Alnæs (SINTEF), Kjell Køber (Energiselskapet Asker og Bærum AS), Bernt Olav Hilmo (prosjektleder 1999-2002), Helge Skarphagen og Randi Kalskin Ramstad (prosjektleder 2002-2004) (NGU). Kontaktperson i Eiendomsforvaltningen i Bærum kommune har vært Vidar Haugen.

I tillegg har følgende NGU-medarbeidere har deltatt i prosjektet:

Knut Ellingsen	Diverse feltarbeid
Harald Elvebakk	Borehullslogging
Leif Furuhaug	Diverse feltarbeid
Øystein Jæger	Diverse feltarbeid
Janusz Koziel	Feltarbeid, instrumentering og dataanalyse
Bjørn Larsen	Strukturgeologiske forundersøkelser
Kirsti Midttømme	Diverse feltarbeid
Frank Sivertsvik	Diverse feltarbeid
Arne Solli	Tolkning av optisk televieverlogg
Gaute Storrø	Diverse feltarbeid
Are Søreng	Diverse feltarbeid
Ola Sæther	Tolkning av vannkjemidata
Geir Viken	Diverse feltarbeid

Også takk til:

Even Brekke (student NTNU) for hjelp til diverse feltarbeid.

Jo Svenningsson Nordstrand (student NTNU) for hjelp til diverse feltarbeid og dataanalyse.

Tor Simon Pedersen (NVE) for hjelp til diverse feltarbeid og utlån av felt-pc.

Tormod Spangelo (student NTNU) for hjelp til modellering.

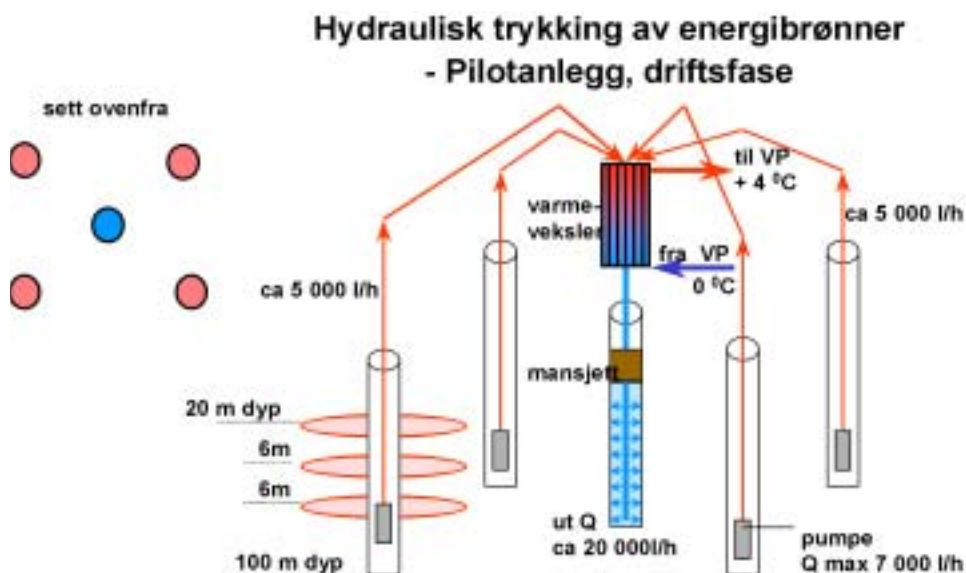
Brødrene Myhre AS for lån av diverse pumper og kabler, og oppboring av borehull ved Bryn

Båsum Boring AS for hjelp til diverse feltarbeid.

Geoenergi AS for hjelp til diverse feltarbeid.

1.1 Prosjektidé

Prosjektidéen introduserer et alternativt konsept for bruk av grunnvarme basert på oppumpet grunnvann fra krystallinsk berggrunn. Grunnvarmeanlegget består av fem borehull der senterborehullet er omkranset av fire satellittborehull (figur 1–1). Det var forventet at denne konfigurasjonen skulle sikre best mulig hydraulisk kommunikasjon og størst varmevekslerareal mellom borehullene. Prinsippet går ut på å pumpe opp grunnvann fra de fire satellittborehullene til varmeveksleren og varmepumpen hvor energiuttaket foregår, hvorpå det kalde returvannet føres tilbake til magasinet via senterborehullet. Vellykket infiltrasjon og sirkulasjon av grunnvann krever god hydraulisk kommunikasjon mellom borehullene. Siden de fleste borebrønner i fjell er beskjedne vanngivere, vil det være nødvendig med hydraulisk trykking i flere nivåer i hvert borehull. En oppsprukket og permeabel bergmasse vil fungere som en stor varmeveksler for det sirkulerende grunnvannet, og energiuttaket per boremeter vil sannsynligvis bli større for denne typen anlegg sammenlignet med konvensjonelle grunnvarmeanlegg med U-rørskollektorer i vertikale borehull der energiopptaket fra berggrunnen skjer via en sirkulerende vann-frostvæske blanding i en lukket kollektorslange.



Figur 1–1: Prinsippskisse av det spesielle grunnvarmeanlegget i fast fjell basert på oppumpet grunnvann (Skarphagen et al., 1999). Hovedpoenget er å føre vannet fra de fire satellittborehullene til varmeveksleren og varmepumpen hvor energiuttaket finner sted, hvorpå returvannet føres tilbake til magasinet via senterborehullet. Hydraulisk trykking i flere nivåer i hvert borehull øker den hydrauliske ledningsevnen og varmevekslerarealet i berggrunnen.

2 Bakgrunn, metode- og utstyrbeskrivelse

2.1 Hydraulisk trykking

Hydraulisk trykking av borehull i fjell er en teknikk som opprinnelig ble utviklet for å øke utvinningsgraden fra lavpermeable oljereservoarer i Texas i 1940-årene. I tillegg til å være metode for økt oljeutvinning, er hydraulisk trykking benyttet på tilsvarende måte som kapasitetsøkende tiltak for grunnvannsbrønner. Andre bruksområder for hydraulisk trykking er blant annet bergspenningsmålinger og oppsprekning av geotermiske reservoarer.

2.1.1 Hydraulisk trykking av vannbrønner i krystallinske berg - Tidligere studier

En omfattende studie som omhandler effekten av sprekkestimulering for å øke borehullskapasiteten i **Newfoundland i Kanada** er rapportert av Gale and MacLeod (1995). Utsrakt bruk av hydrogeologiske- og geofysiske undersøkelser ble utført før og etter hydraulisk stimulering i seks borehull i fast fjell med lav- til moderat kapasitet (< 5 liter/minutt). Borehullene hadde forskjellig geografisk og geologisk plassering. Seksjonsvis hydraulisk trykking i tre eller fire nivåer i hver brønn, der vanntrykket varierte fra 2-10 MPa (20-100 bar), førte til at borehullskapasiteten økte med 30-910%. En nærmere studie av trykk- og strømningskurvene plottet mot tid, avdekket en mulig sammenheng mellom trykk, strømningsrate og borehullskapasitet. Selv om det begrensede omfanget av data hindrer Gale and MacLeod (1995) i å trekke generelle konklusjoner, så det ut til at jo høyere injeksjonstrykk som trengs for å opprettholde maksimal strømningsrate, jo lavere ble den absolutte økningen i brønncapasiteten. Samtidig ser det ut til at store økninger i borehullskapasiteten samsvarer med stor tilbakestrømning av uklart vann mettet med sedimener ved utlufting av stimulert seksjon.

Basert på resultatene fra de seks borehullene ble det laget en oversikt over stimuleringspotensialet der borehullenes potensielle kapasitetsøkning er rangert som funksjon av bergartstype. Stimuleringspotensialet er sitert i tabell 2-1.

Tabell 2-1: Stimuleringspotensial for borehull i fast fjell (Gale and MacLeod, 1995).

Bergartstype	Stimuleringspotensial
Siltig sandstein	Veldig god
Sandstein-konglomerat	God
Skifer/siltstein/sandstein	God
Skifer	Moderat
Vulkansk	Moderat

Geofysisk inspeksjon av borehullene med bruk av TV-kamera, viste seg å gi essensiell veiledning ved valg av borehullsseksjoner for hydraulisk trykking og plassering av pakningene. TV-loggene viste imidlertid ingen tydelige endringer i sprekkeåpningene som ble laget ved hydraulisk trykking (Gale and MacLeod, 1995).

For å sjekke borehullenes langtidskapasitet etter hydraulisk trykking, ble det gjennomført en ny test av borehullskapasiteten i et av de seks borehullene åtte uker etter at den første

kapasitetstesten ble gjennomført etter stimuleringen. Selv om dette borehullet viste en mindre økning i borehullskapasiteten, er det etter denne studien forstøtt uklart om propping agents for å holde sprekkeåpningene åpne er nødvendig. Innledningsvis, i en gjennomgang av tidligere studier, hevder Gale og MacLeod (1995) at litteraturen ikke viser noen konsekvent erfaring vedrørende bruk av propping agents for å opprettholde borehullskapasiteten etter at borehullet har blitt stimulert. Forsøk på å etterligne olje- og gass industrien, der metoden er å bruke store mengder sand, har ikke gitt entydige resultater.

Fra tidligere studier referer Gale and MacLeod (1995) 30 til 60 minutter og 1000 liter til å være minimumstiden og -volumet som kreves for å spreke til å bre seg utover eller øke sprekeforbindelsene i berggrunnen. Videre, viser erfaringene at dobbeltpakning foretrekkes framfor bruk av enkeltpakning ved hydraulisk trykking i oppsprukket berggrunn.

12 lavkapasitetsborehull i krystallinsk grunnfjell i **Masvingoprovinsen, Zimbabwe**, ble stimulert med hydraulisk trykking ved bruk av enkeltpakning- eller dobbeltpakning (Herbert et al. , 1993). I 50% av tilfellene økte borehullskapasiteten i gjennomsnitt med 80% og varierte fra 10 til 240%. Som et enkeltstående forsøk, ble små mengder ensgradert 0,5 millimeter-sand blandet med injeksjonsvannet ved stimulering av et allerede observert vanninnslag ved 26 meter i borehullet ved Marabamba. Hydraulisk trykking med bare vann og bruk av dobbeltpakning, der vanntrykket nådde 25 bar, var utført i dette nivået på forhånd. Etter hydraulisk trykking med bare vann, hadde borehullskapasiteten økt med 23%, mens injeksjon av sand førte til en samlet økning på 3%. Med andre ord, injeksjon av sand førte til en reduksjon av borehullskapasiteten sammenlignet med resultatene fra hydraulisk trykking med bare vann.

Hydraulisk trykking med bare vann har blitt utført i mange lavkapasitetsborehull i forskjellig geologiske og -geohydrologiske områder i **Sør-Afrika** (Less og Anderson, 1993). Resultater fra Swartwaterområdet (10 borehull) indikerer at de vitenskapelig lokaliserte borehullene, plassert for å kunne skjære gjennom geologiske strukturer som forkastninger, kontakter eller lignende, har størst sannsynlighet for å få økt borehullskapasitet etter hydraulisk trykking. Ved tilfeldig utvalgelse av borehulllokaliseringen, responderte 47% (79 av 170) av alle borehullene som ble stimulert positivt.

Siden mange av de utvalgte borehullene var gamle og ingen informasjon var tilgjengelig, ble det rutinemessig utført geofysisk logging og testpumping for å supplere informasjonen som krevdes for å sikre så effektiv hydraulisk trykking som mulig. Less og Anderson (1993) rapporterer at forhåndsidentifisering av sprekker og sprekkesoner var viktig for plasseringen av pakningen(e). Tiden det tok å gjennomføre prosedyren med hydraulisk trykking i felt, inkludert testpumping før og etter, og fire plasseringer av pakningene, var ved bruk av nytt utstyr og rutinert personell begrenset til maksimalt 12 timer. Enheten for hydraulisk trykking kunne generere en effekt på 130 kW, og i henhold til ligning 2.1 er energiforbruket et produkt av strømningsrate og trykk (Less og Anderson, 1993).

$$\text{Energi (kW)} = \text{strømningsrate (l/s)} \times \text{trykk (MPa)} \quad [2.1]$$

Herrick (2000) presenter generelle erfaringer fra- og inntrykk knyttet til hydraulisk trykking blant vannbrønnsentreprenørene som jobber i de harde berggrunnsformasjonene i **USA**. Hydraulisk trykking med bruk av enkel- eller dobbeltpakning har for mange entreprenører redusert nødvendig boredyp. I de fleste tilfeller har borehullskapasiteten vært tilstrekkelig etter

å ha kombinert boring ned til 250 fot (76 meter) med hydraulisk trykking med vann. Avhengig av formasjon og utstyr, varierer vanntrykket fra 500 til 5000 psi (34,5 til 345 bar).

Etterspørselen etter hydraulisk trykking er vanligvis knyttet til lavkapasitets borehull, og tilgjengeligheten av en detaljert borehullslogg eller en nøyaktig beskrivelse av borehullets historie, særlig for gamle borehull, er til stor hjelp for å avgjøre om teknikken bør brukes eller ikke. Tilstrekkelig horisontal avstand fra andre borehull, vanligvis minimum 200 fot (61 meter), vurderes alltid ved utvelgelse av nye borehullslokaliteter for hydraulisk trykking i områder med hard berggrunn.

Banks og Robbins (2002) understreker at de beste riggene for hydraulisk trykking har et to-pumpesystem. Den ene pumpen har et høyt sprekkeinitieringstrykk, mens den andre pumpen har høy volumkapasitet og kan injisere store mengder vann for at sprekken skal utvide seg så langt som mulig. Videre vil hydraulisk trykking ved grunnere dyp enn 25-30 meter i borehullet innebærer en risiko for sprekkeinitiering til overflaten. Disse sprekkeene vil være sårbare for forurensning og bør unngås.

Baski Incorporation i USA er en kjent produsent av en mengde forskjellige pakninger, inkludert pakninger for hydraulisk trykking. I en korrespondanse vedrørende hydraulisk trykking og bruk av propping agents, sier Henry A. Baski (2001) i Baski Incorporation: "To the best of my knowledge, propping agent-fracturing technology in hard rock has not been developed".

Det Australske Vannressursdirektoratet ved Williamson og Wooley (1980) i Smith (1989) rapporterer om hydraulisk trykking i tre nye borehull. Borehullene var lokalisert ved, og referert som Young, Collinga og Temora, der berggrunnen består av henholdsvis granodioritt, skifer med kvartsårer, og fyllitt og kvartsitt. To faser med oppsprekning var planlagt: (1) Hydraulisk trykking med bare vann, fulgt opp med (2) en "Revert" (Johnson, organisk polymer borevæske) -sand behandling. Stimuleringen i hvert borehull var fokusert mot en seksjon på 4 eller 5 meter, lokalisert på dyp med eksisterende sprekker som på forhånd var identifisert ved bruk av borehulls TV.

I fase én, ved hydraulisk trykking med bare vann økte vanntrykket til 32 og 43 bar ved henholdsvis Young and Collinga, og borehullskapasiteten økte. Ved Temora var det praktisk talt ingenting som hendte, og Williamson og Wolley (1980) i Smith (1989) konkluderte med at trykket og strømmingen sannsynligvis ikke var høy nok. TV-inspeksjonen ved Young viste ingen synlige tegn til ny oppsprekning bortsett fra en liten avskalling fra borehullsveggen.

Fase to ved Young ble gjennomført på følgende måte: (a) 1800 liter 58-sekunders (Marsh funnel) Revert, (b) 1800 liter Revert og sand (114-sekunders, 25 gram/liter med sand), og (c) 1800 liter Revert. Nedbrytningskjemikalier ble pumpet inn sammen med Revert for å akselerere nedbrytningen. Tilsvarende fase to-prosedyrer ble utført ved Collinga og Temora, men der ble grovere sand benyttet.

Borehullskapasiteten ble redusert for alle borehullene som følge av fase to-behandlingen. Reduksjonen var sannsynligvis forårsaket av tilstopping som kan tilskrives sand eller Revert-nedbrytningsprodukter. Rask og alvorlig biologisk tilgroing ble observert ved Young og Collinga, men ikke ved Tamara, og dette kan ha vært en medvirkende årsak til den reduserte borehullskapasiteten. Kontinuerlig pumping under arbeidet med fase to, stimulering med Revert-sand blanding, var ikke mulige på grunn av for lav kapasitet. I stedet ble Revert-sand blandingen mikset og deretter pumpet inn i borehullsseksjonen, noe som kan ha forårsaket en ufullstendig fordeling av organisk polymer i Revert-sand blandingen.

Tilslutt anbefaler Williamson og Woolley (1980) i Smith (1989) at:

- 1) Kun hydraulisk trykking med bare vann bør benyttes, siden ingen forbedringer ble oppnådd ved bruk av en viskøs blanding med væske og sand.
- 2) Hvis propping agents brukes, bør kornene være relativt grove.
- 3) Hydraulisk trykking er mest effektive for brønner som yter mer enn 0,25 liter/sekund.

Rapporten med tittelen: “Manual of Hydraulic Fracturing for Well Stimulation and Geologic Studies”, laget for den Nasjonale brønnvannsforeningen i USA ved Smith (1989), gir et omfattende sammendrag av prosedyrer, utstyr og geologiske forhold knyttet til stimulering med hydraulisk trykking.

Smith (1989) hevder at behovet for propping agents i grunnvannsbransjen er omdiskutert. Suksess eller fiasko ved bruk av propping agents i mange situasjoner henger sannsynligvis sammen med mange forskjellige faktorer som: (a) De tektoniske strekkspenningene i berget og bergets strekkfasthet, (b) sprekkegeometri, (c) utvelgelse av riktig propping agent, (d) korrekt plassering av kornene med propping, og (e) vellykket utvikling av borehullet etter oppsprekking. Bruk av propping agents i grunnvannsindustrien varierer. Den generelle oppfatningen ser ut til å være at propping agents bare bør brukes der det er nødvendig, for eksempel i situasjoner der de induserte sprekke kommer til å lukke seg (Smith, 1989).

Valg av riktig størrelse, type og volum med propping agents ser ut til å være knyttet til eksperimentering. Harde sand- eller plastikkuler, så grove som mulig, for eksempel 30-50 mesh (0,6-0,3 millimeter), anbefales av entreprenørene innen grunnvannsindustrien. Sammenlignet med oljebransjen, anbefales det å bruke et mindre kvantum propping agents med større kornstørrelse. Propping agents kan injiseres ved å føre trykksatt væske inn i beholderen med propping agents slik at blandingen presses inn i sprekken foran væsken (figur 2-1). Transportvæsken for propping agents kan enten være fortykningsmiddel som organiske eller syntetiske polymerer sammen med et kjemisk nedbrytningsensym, eller rent vann.

I de fleste tilfeller er nødvendig vanntrykk for å rense, åpne eller å initiere sprekker rapportert til å være mellom 500 og 2000 psi (34,5 og 138 bar), mens 3000 psi (207 bar) er nødvendig i hard berggrunn eller dype brønner (Macaulay, 1987; Baski, 1987; Waltz, 1988; i Smith 1989).

Hydro-Frac Equipment Schematic

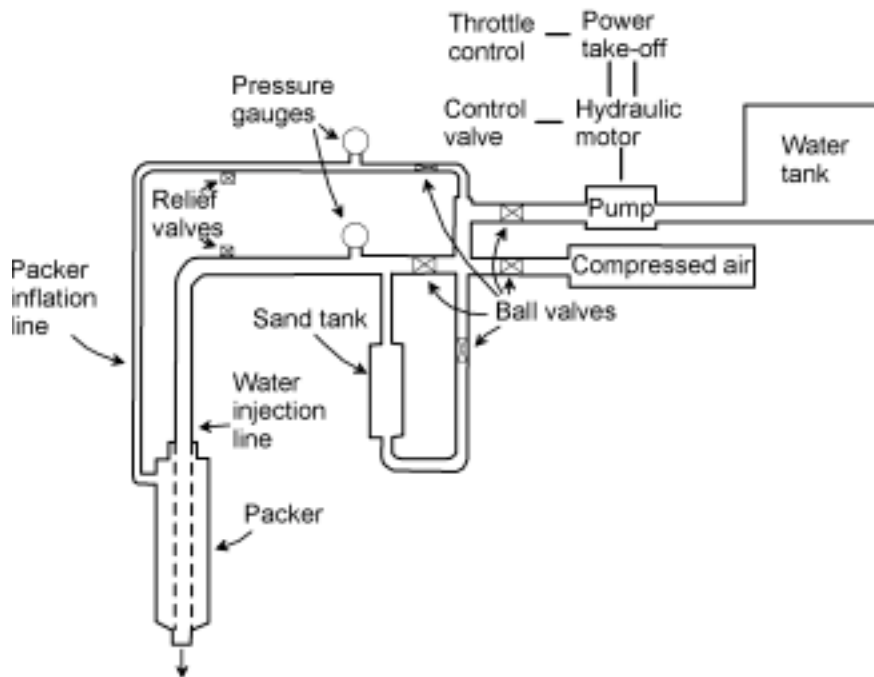


Figure 2–1: Oppsett for hydraulisk trykking og injeksjon av propping agents (Smith, 1989).

2.1.2 Hydraulisk trykking for utnyttelse av lav-geotermisk energi

Eksperimentelle studier knyttet til HYDROCK-konseptet er gjennomført i fast fjell (granitt) ved **Rixö i Sverige** (Larson et al., 1983; Sundquist og Wallroth, 1990). HYDROCK-konseptet beskriver et grunnvarmeanlegg i fast fjell der sirkulerende vann henter energi fra flere sprekkeplan kunstig laget med hydraulisk trykking (figur 2–2). Metoden krever at sprekkeplanene som forbinder infiltrasjons- og pumpeborehullene har god hydraulisk konduktivitet

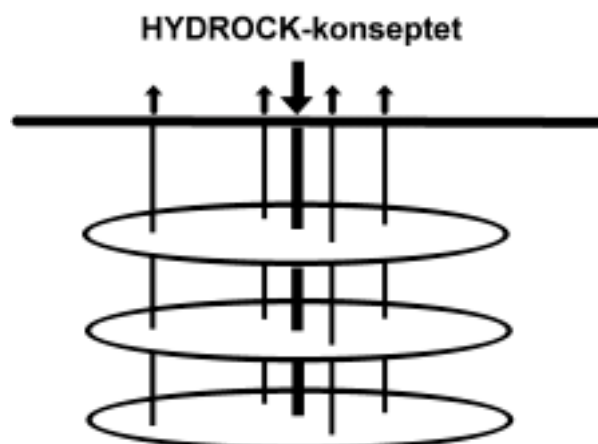


Figure 2–2: Hovedprinsippene i HYDROCK-konseptet (Larson et al., 1983).

Hydraulisk trykking i to uoppsprukkede sekskjoner ved 44,0 og 32,5 meters dyp i senterborehullet ble gjennomført ved Rixö. Hver av seksjonene var én meter. Trykknivåene nådde henholdsvis 10,5 og 22 MPa (104 og 220 bar) under trykkingen av de respektive borehullsseksjonene. Bruken av en foringsrørskutter i 44,0-nivået før hydraulisk trykking reduserte tydelig det nødvendige vanntrykket for å oppnå sprekkeinitiering og forårsaket en horisontal sprekk. Borehullskapasiteten økte fra 8,5 til 16,5 liter/minutt. En ujevn hydraulisk kommunikasjon ble observert i tre omkransende borehull, henholdsvis seks og ti meter fra senterborehullet, noe som kan tyde på en asymmetrisk sprekkeinitiering (Sundquist og Wallroth, 1990). Pumpekapasiteten på 55 liter/minutt forhindret en effektiv sprekkeutbredelse, og bare den nye sprekken ved 44,0 meter dyp var stor nok til å bli oppdaget med TV-logging av borehullet etter hydraulisk trykking.

Injeksjonstester ble utført i to trinn i de stimulerte seksjonene ved 44,0- og 32,5 meter. I trinn én, etter noen injeksjoner var strømmingen og trykket stabilt ved henholdsvis 0,92 liter/sekund og 2,2 til 2,5 MPa (22 til 25 bar). Injeksjonstestene ble gjenopptatt i trinn to der trykket økte til 18-22 MPa (180-220 bar), mens strømningsraten ble holdt konstant ved den samme strømningsraten på 0,92 liter/sekund. Den observerte trykkøkningen fra trinn én til trinn to kan kanskje forklares med de høye friksjonstapene i de nye sprekken. Permeabiliteten til de nye sprekken er beregnet til å være 30 ganger lavere enn den naturlige sprekken ved 66 meters dyp (Sundquist og Wallroth, 1990).

For videre studier anbefalte Sundquist og Wallroth (1990) at sprekker med høy hydraulisk ledningsevne og liten lekkasje kan dannes ved bruk av hydraulisk trykking og høye strømningsrater (>10 liter/sekund), og/eller ved å pumpe avstandsklosser inn i sprekken. Injeksjon av sand som avstandsklosser krever en væskeløsning med forholdsvis høy viskositet som kan holde sandkornene i suspensjon.

Hydraulisk- og eksplosiv oppsprekning ble utført i den svenske studien “Fracturing of a pilot plant for borehole heat storage in rock at **Luleå, Sweden**”, rapportert av Nordell et al. (1984). Pilotanlegget, i liten målestokk for varmelagring, består av 19 borehull som er 21 meter dype og er 52 millimeter i diameter. Borehullene er plassert i triangler med en innbyrdes avstand på 1,3 meter. Prosjektets hovedmål var å oppnå en varig økning av den hydrauliske konduktiviteten ved å utføre hydraulisk- og eksplosiv oppsprekning i bunnene av borehullene. Med en høy konduktivitet kan varmelageret driftes uten dyre borehullsinstallasjoner.

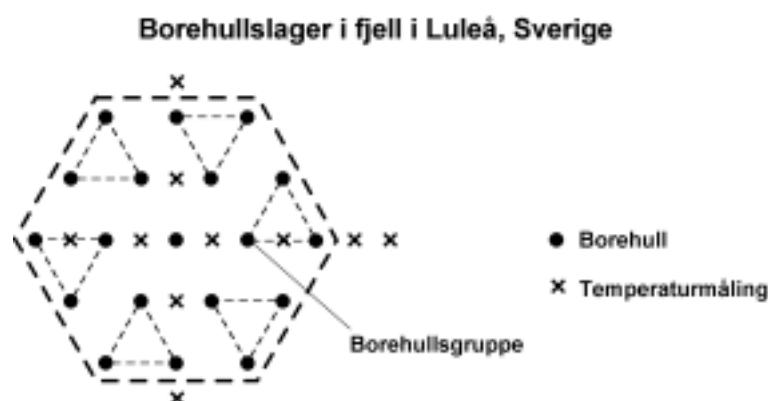


Figure 2-3: Innbyrdes plassering (1,3 meters) av de 19 borehullene i pilotanlegget varmelagring i Luleå, Sverige (Nordell et al., 1984).

I konklusjonen- og anbefalingsavsnittet rapporterer Nordell et al. (1984) at hydraulisk trykking ble utført i to trinn ved bruk av henholdsvis enkelt- og dobbeltpakning, og oppsprekning fant sted ved trykk mellom 60 og 120 bar. Mangel på shut-in trykk og et veldig jevnt oppsprekningstrykk indikerte at berggrunnen var i en spenningsløs tilstand. Disse resultatene samsvarer med den generelle antakelsen om at de øvre 50-20 meterne av berggrunnen i det tidligere isbelagte delen av nord-Sverige er trykkavlastet. Berggrunnens middelerdi for permeabilitet økte etter begge former for hydraulisk trykking, men ble redusert med en faktor på tre etter eksplosiv oppsprekking. Samtidig økte borehullenes middelerdi for permeabilitet etter hver oppsprekning. Til tross for økt permeabilitet, var ikke hydraulisk- og eksplosiv oppsprekning av testanlegget alene tilstrekkelig for å oppnå nødvendig hydraulisk konduktivitet for sirkulasjon av vann. Nordell et al. (1984) anbefalte bruk av propping agents, og særlig kvartssand, for å øke strømningskapasiteten i sprekkene.

Eliasson et al. (1988) oppsummerer alle former for stimulering som ble utført ved **Fjällbacka HDR**-anlegg (hot dry rock) i rapporten "Stimulation experiments with water and viscous fluid at the HDR geothermal research site in the Bohus granite, SW Sweden". Stimuleringen ble utført for å lage den høypermeable varmeveksleren som er nødvendig for HDR-produksjon. For å kartlegge sprekkutbredelsen, og for å finne en egnet lokalitet for den neste brønnen som skulle bores, ble bevegelsen av trykksatt væske overvåket med mikroseismisk påvisning av samtidige spenningsavlastningspulser.

Forsøk med hydraulisk trykking ved grunne boredyp mellom 50 og 190 meter i Fjb1 ble gjort for å teste ut dobbeltpakningen og tilhørende utstyr under realistiske forhold, og ble utført før gjennomføring av stimuleringsprogrammet for den dype delen av borehullet. Hydraulisk trykking ved 52-55 og 190-193 meter, i borehullsseksjoner der ingen eksisterende sprekker var påvist ved bruk av forskjellige loggemetoder på forhånd, førte til oppsprekking ved henholdsvis 15 og 20 MPa (150 og 200 bars) vanntrykk. Tilgjengelig pumpekapasitet var 10 liter/sekund.

Stimuleringsprogrammet i den dypere delen av borehull Fjb1, med forbruk av totalt 399 m³ væske, ble gjennomført i borehullsseksjonen mellom 447 og 478 meter som fem injeksjonssekvenser: (1) Initiell vanninjeksjon, (2-3) første og andre mini-oppsprekking, (4) hovedvanninjeksjon, og (5) hovedinjeksjon av propping agents i en viskøs løsning (Eliasson et al., 1988). De forskjellige injeksjonssekvensene ble utført for å sammenligne effektene og for å finne den mest effektive stimuleringsprosedyren. Hovedhensikten med å injisere 25 m³ av en viskøs blanding av vann, fortykningsmiddel og propping agents var å øke den gjenværende sprekkåpningen nær borehullet og på denne måten redusere trykktapene nær brønnen ved sirkulasjon. Blandingen med propping agent var laget av 0,2-0,4 millimeters kvartssand, vann, fortykningsmiddel (hydroxyethyl cellulose) og kjemisk nedbryterenzym (celluclast). Blandingen med propping agent ble injisert umiddelbart etter pumping av 200 m³ viskøs gel inn i formasjonen der pumperaten og trykknivået var henholdsvis 21 liter/sekund og 10,7-13,2 MPa (107-132 bar). Ved stimulering i den dypere delen av borehullet varierte pumperatene og det maksimale trykknivået fra henholdsvis 20-30 liter/sekund og 13-18 MPa (130-180 bar). Med et overtrykk på omlag 3 MPa (30 bar) ble borehullet ventilert 8 dager etter injeksjon av den viskøse blandingen med propping agents. Temperaturlogging etter stimuleringen indikerte to permeable soner, og hydrauliske tester viste at permeabiliteten hadde økt fra 10⁻¹⁷ m² (10 µD) til 10⁻¹⁴ m² (10 mD) for den største vannførende kanalen (Jupe et al., 1993; i Broch, 1994). Totalt ble det registrert 35 mikroseismiske hendelser relatert til injeksjonssekvens fire og fem, der den største seismiske aktiviteten forekom mot

slutten av stimuleringen, ved injeksjon av propping agents. Den mikroseismiske aktiviteten skapte en horisontal og plan struktur ved cirka 460 meters dyp, og denne informasjonen ble brukt til å lokalisere det andre 500-meters borehullet, Fjb3.

Fire separate stimuleringer i Fjb3, inkludert bruk av viskøse væsker, tilbakespyling, syrebehandling og 0,25-0,60 millimeters kvarts sand som propping agents (Sundquist et al., 1988), ble utført på et senere stadium i prosjektet der hensikten var å redusere reservoærens impedans. Kun mindre endringer for den hydrauliske ledningsevnen ble observert etter disse stimuleringene, men Skinfaktoren ble redusert fra +5 til -5. Senere ble det gjort en testkjøring av anlegget der vann ble sirkulert mellom borehull Fjb3 og Fjb1. Vann ble injisert i seksjonen mellom 449 og 480 meters dyp i borehull Fjb3 med en konstant injeksjonsrate på 1,83 liter/sekund. Total pumpetid var 846 timer og injeksjonstrykket var cirka 4,5 MPa (45 bar). En mindre økning i produksjonsraten ble registrert mot slutten av testperioden, og maksimal tilbakestrøm var 51% av injisert vann (Jupe et al., 1993; i Broch, 1994).

2.1.3 Bergspenningenes betydning for sprekkeutbredelsesretningen

Sprekkes utbredelse ved hydraulisk trykking er avhengig av spennings situasjonen i den omgivende bergmassen. I jomfrulig berg vil sprekker laget ved hydraulisk trykking være parallelle med største hovedspenning og normalt på minste hovedspenning. Samtidig vil vanntrykket som skal til for å lage en ny sprekk være summen av minste hovedspenning (σ_{\min}) og bergmassens strekkfasthet (σ_t). Geologiske strukturer som lagdeling og grad av folding vil også ha betydning for sprekkes retningsutbredelse.

Avsnittet er i hovedsak basert på Myrvang (1996).

Som utgangspunkt betraktes vanntrykkets influensområde rundt et vertikalt boret borehull der hovedspenningsmønsteret antas å være normalt på, og parallelt til borehullet (figur 2–4).

Vanntrykket mellom gummipakningene på dobbeltmansjetten induserer tangentialspenninger rundt borehullet. Oppsprekningstrykket eller det nødvendige vanntrykket P_c som må til for å initiere et strekkbrudd i borehullsveggen, er gitt av ligning 2.2

$$P_c = \sigma_{\theta\min} + \sigma_t \quad [2.2]$$

$$\sigma_{\theta\min} = 3\sigma_{H2} - \sigma_{H1} \quad [2.3]$$

ligning 2.3 inn i 2.2 gir:

$$P_c = 3\sigma_{H2} - \sigma_{H1} + \sigma_t \quad [2.4]$$

der $\sigma_{\theta\min}$ er minste tangentialspenning i borehullsveggen, σ_t er bergartens/-massens strekkfasthet, mens σ_{H1} og σ_{H2} er henholdsvis største og minste horisontale hovedspenning. I utgangspunktet vil alle bruddplanene i borehullets influensområde under de gitte forutsetningene være vertikale og parallelle σ_{H1} . Hvordan bruddet vil spre seg videre innover i bergmassen er avhengig av spenningsforholdene. Bruddet vil alltid søke å følge minste motstands vei, det vil si parallelt største hovedspenning og normalt på minste hovedspenning. I de tilfeller der den ene av de horisontale hovedspenningene σ_{H2} er minst, vil strekkbruddet spre seg vertikalt på samme måte som beskrevet for borehullets influensområde. I motsatt fall, der den vertikale hovedspenningen σ_v er minst, vil sprekken innen borehullets influensområde spre seg vertikalt, mens den utenfor borehullets influensområde vil vri seg, og etterhvert lage et horisontalt bruddplan normalt på minste hovedspenning, σ_v .

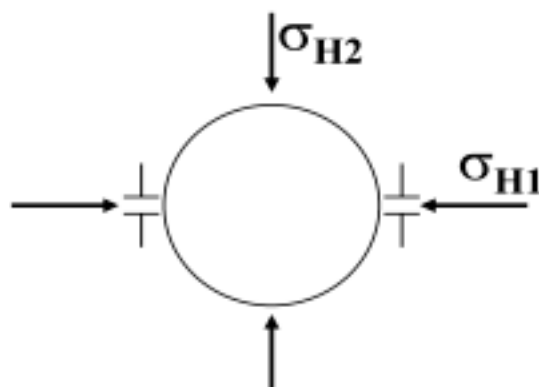


Figure 2–4: Et vertikalt borehull sett ovenfra. Hovedspenningenes betydning for sprekkutbredelsesretningen innen borehullets influensområde ved hydraulisk trykking. σ_{H1} og σ_{H2} angir henholdsvis største og minste horisontale hovedspenning. Utenfor borehullets influensområde vil bruddplanet spre seg parallelt største hovedspenning og normalt på minste hovedspenning.

2.1.4 Bergspenningsmålinger

Avsnittet er i hovedsak basert på Amadei og Stephansson (1997).

Hubbert og Willis (1957) i Amadei og Stephansson (1997) var de første til å hevde at sprekker laget ved hydraulisk trykking er orientert i forhold til bergmassens hovedspenningsretninger, og at den initierte sprekk er orientert vinkelrett på minste hovedspenning. Forståelsen av hydraulisk trykking og analyse av bergspenningsforholdene ble først dokumentert teoretisk og eksperimentelt av Haimson (1968) i Amadei og Stephansson (1997). Senere har metoden utviklet seg, og er en av de mest benyttede metodene for in-situ målinger av bergspenninger.

Måling av bergspenninger ved hydraulisk trykking ble i denne studien utført av SINTEF Bygg og miljø, avdeling for Berg og geoteknikk (Jóhannsson, 2001). Målingene gjennomføres i 1,3 m lange testseksjoner avgrenset av en dobbeltmansjett, og hensikten med splittetestene er å bestemme største og minste hovedspenning. I etterkant av målingene orienteres de nye sprekkenes.

Utgangspunktet for testprosedyren som SINTEF benytter for hydraulisk splitting er ISRM's (International Society for Rock Mechanics) (1987) anbefalinger Suggested Methods for Rock Stress Determination. Lukkettrykket eller instantaneous shut-in pressure, P_s , tolkes som minste hovedspenning (σ_{\min}) og bestemmes ut i fra diagram for trykk og flowrate som funksjon av tid (figur 2–5). Lukkettrykket finnes ved å trekke en linje tangentielt til trykk-tid kurven umiddelbart etter oppsprekning eller “shut-in”, og bestemmes til å være punktet der trykk-tid kurven divergerer fra tegnet tangent (figur 2–6). Forskjell mellom initielt oppsprekningstrykk (P_c) og gjenåpningstrykk (P_f) i andre og tredje syklus er et teoretisk mål på bergartens strekkfasthet (σ_t), det vil si:

$$\sigma_t = P_c - P_f \quad [2.5]$$

Antagelsen for ligning 2.5 er at sprekkene lukker seg fullstendig mellom hver syklus med hydraulisk trykking. Videre beskriver verdien for P_f trykknivået der den eksisterende sprekk, åpnet med hydraulisk trykking, begynner å åpne seg (Bredehoeft et al. (1976) i Amadei og Stephansson (1997)).

Når initiert sprekk har orientering tilnærmet parallelt borehullet, kan følgende formel (ligning 2.6) benyttes for å estimere største hovedspenning (Jóhannsson, 2001):

$$\sigma_{\max} = 3P_s - P_f - P_0 \quad [2.6]$$

Hvor

- σ_{\max} ~ største hovedspenning
- P_s ~ lukketrykk, "instantaneous shut-in pressure"
- P_f ~ gjenåpningstrykk
- P_0 ~ poretrykk

For de fleste norske fastlandsbergartene, som er harde og kompakte, kan poretrykket ofte neglisjeres.

En avtrykkspakning brukes for å orientere den minste og største spenningsretningen. Avtrykkspakningen senkes ned til testseksjonen og den nye sprekkene orienteres rett etter spenningsmålingene er avsluttet. Teoretisk sett kan de nye sprekke- og spenningsretningene finnes ved å filme borehullsveggen med optisk televiewer.

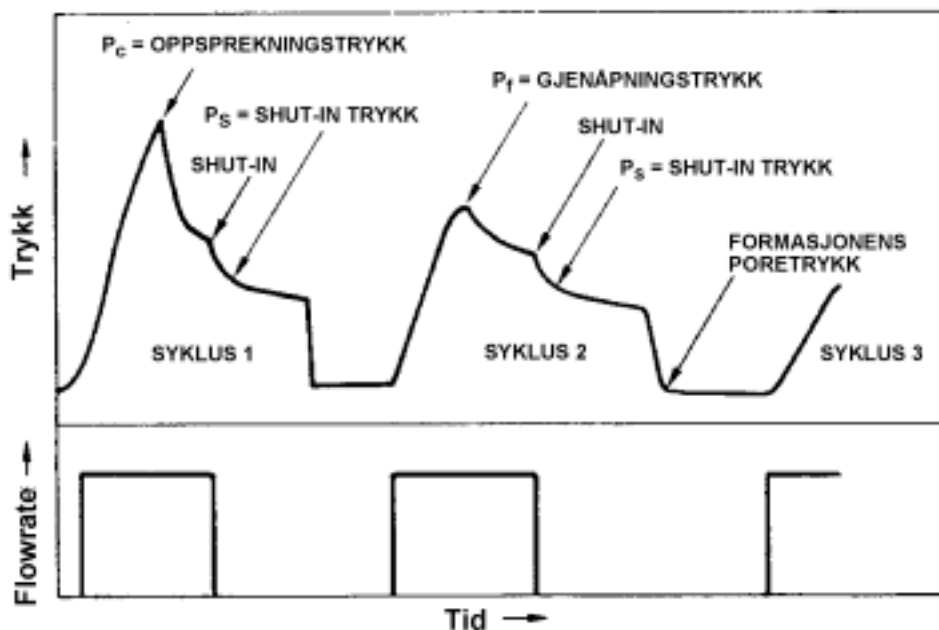


Figure 2-5: Idealisert trykk-tid diagram for hydraulisk trykking. Etter ISRM (1987).

Avlesning av shut-in trykket

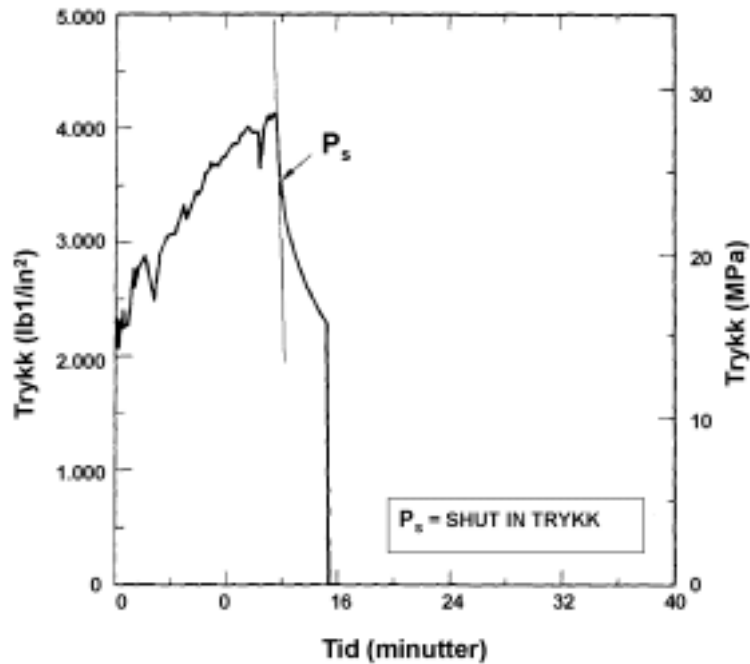


Figure 2-6: Bestemmelse av lukketrykket eller “shut-in” trykket (P_s), anbefalt av ISRM, gjøres ved å tegne en linje tangentielt til trykk-tid kurven umiddelbart etter oppsprekning, trykkavlastning eller “shut-in”. Lukketrykket fastettes til å være punktet der tegnet tangent avviker fra trykk-tid kurven. Illustrasjonen er hentet fra Aggson og Kim (1987) i Scheldt (2000).

2.1.5 Bergarters mekaniske egenskaper

Av bergartenes mekaniske egenskaper er det særlig bergartens strekkfasthet σ_t , jamfør ligning 2.4 og 2.5, som har betydning for hvor høye verdier oppsprekningstrykket P_c må være ved hydraulisk trykking. Ren strekkfasthet er omstendelig og arbeidskrevende å bestemme i laboratoriet, og blir i stedet angitt ved punktlastindeksen (I_s) som fremkommer ved en indusert strekktest (Hansen et al., 1998). Punktlastindeksen I_s er tilnærmet lik strekkfastheten σ_t (Myrvang, 1996):

$$I_s \sim \sigma_t \quad [2.7]$$

I følge Broch et al. (1971) i Myrvang (1996) kan punktlastindeksen I_s relateres til enakset trykkfasthet σ_c på følgende måte:

$$\sigma_c \sim 24 I_s \text{ (Broch et al., 1971)} \quad [2.8]$$

Resultatet av mange punktlastmålinger utført i Bergmekanikklaboratoriet viser at variasjonene er store og at middelveiene gir:

$$\sigma_c \sim 10 I_s \text{ (Myrvang, 1996)} \quad [2.9]$$

Videre er bergartenes deformasjonsegenskaper, elastisitetsmodul (E-modul) og Poissons tall (ν), to viktige mekaniske egenskaper. I bergmekanikklaboratoriet ved SINTEF måles E-modulen ved at bergartsprøven belastes med en kjent spenning, og sammenpressningen registreres. E-modul bestemmes av forholdet mellom spenning og tøyning ved en belastning på 20 bar. Verdien for E-modulen er et uttrykk for bergartens stivhet, desto høyere E-modul

desto stivere bergart (Hansen et al., 1998). Poissons tall eller tverrutvidelsestallet er forholdet mellom den laterale utvidelse og den aksiale sammenpressing av bergartsprøven ved en belastning på 20 MPa (Hansen et al., 1998). Et lineært forhold mellom spenning og tøyning (ϵ) uttrykkes ved hjelp av Hook's lov der E-modulen er proporsjonalitetsfaktoren (ligning 2.10) (Irgens, 1991).

$$\sigma = E\epsilon \quad [2.10]$$

Hook's lov innebærer at to områder som blir utsatt for samme kompresjon, men som har forskjellig verdi for E-modulen, får forskjellige spenningsverdier. Områder med høyest E-modul vil få de største spenningsverdiene (Myrvang, 1996). Figur 2–7, basert på data fra SINTEFs laboratorietester av bergartsprøver (Hansen et al. 1998), gir en oversikt over de viktigste bergartenes mekaniske egenskaper som trykkfasthet (σ_c), strekkfasthet (σ_t), E-modul og Poissons tall (ν) for utvalgte bergarter. De utvalgte bergartene kan relateres til de geologiske forholdene for prosjektets testlokaliteter ved Bryn (kvartsitt, kvartsittisk sandstein og sandstein) og EAB (kalkstein og leirskifer/leirstein) (henholdsvis avsnitt 3.2 og 3.3). Generelt vil prøvestykkenes volum påvirke testresultatene slik at laboratorieverdiene for de forskjellige bergartenes mekaniske egenskaper er gjerne høyere enn bergmassens virkelige verdier. Det gjelder både trykkfasthet og E-modul, og skyldes at bergmassen in-situ statistisk sett inneholder flere sprekker og svakhetsplan som vil nedsette styrke og stivhet (Myrvang, 1996).

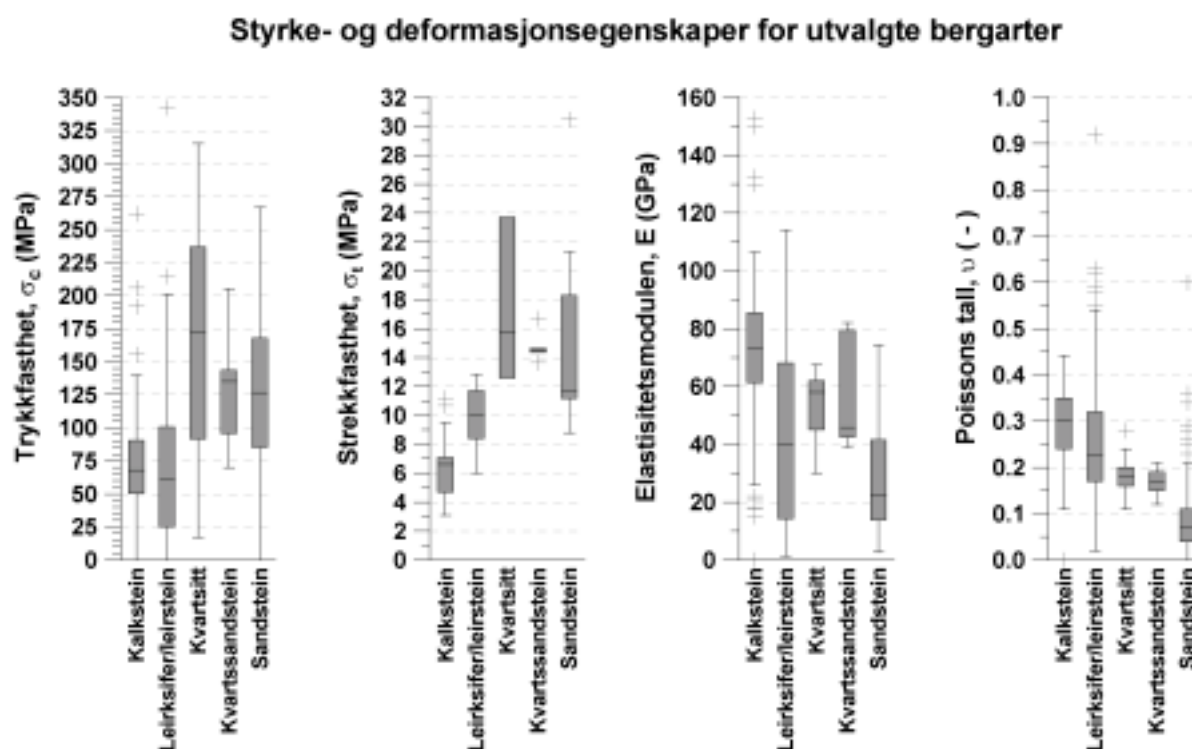


Figure 2–7: Bergartenes mekaniske egenskaper. Trykk- og strekkfasthet, E-modul og Poissons tall, for utvalgte bergarter relatert til de berggrunnsgeologiske forholdene for prosjektets pilotanlegg ved Bryn og EAB. Boksploottene viser maksimum, minimum, median, øvre og nedre kvartil av angitte verdier. Bearbeidet på grunnlag av data fra Hansen et al. (1998).

2.1.6 Hydraulisk trykking med vann - praktisk gjennomføring

I praksis forgår hydraulisk trykking ved at enten en enkeltmansjett eller en dobbeltmansjett plasseres på et bestemt nivå i et borehull. Mansjettene som består av slitesterk gummi trykkes enten mekanisk ved kompresjon eller ved fylling av et væskemedium, (vann eller olje) eller luft (figur 2–8). Deretter pumpes vann ned i borehullet og ut mellom mansjettene via et perforert stålrør, og trykket økes suksessivt helt til det dannes en sprekk eller opp til et trykknivå på 200-250 bar som er maksimalt arbeidstrykk for utstyret. Trykket opprettholdes til det oppnås et plutselig trykkfall, det vil si en sprekkedannelse, eller man velger å avslutte før trykkfall er oppnådd. I så tilfelle har bergmassen for stor styrke, og/eller den opptar for mye bergspenninger. Ved sprekkedannelse faller trykknivået fordi vannet strømmer ut i formasjonen, og sprekken utvider seg (figur 2–10). For å utvide sprekken ytterligere, økes pumperaten. Foruten dobbeltmansjett består utstyret i borehullet av tre meter lange stålrør som er skrudd sammen til litt ovenfor borehullets topp. En høytrykks vannslange fra tankbilen er montert på en T-kobling på stålrørets ende. Andre enden av T-koblingen består av en lufteventil (figur 2–9). Høykapasitets vannpumper sørger for tilstrekkelig vanntrykk.



Figure 2–8: En liten høytrykkspumpe for trykksetting med lettflytende olje av øvre og nedre pakning på dobbeltmansjett. I forgrunnen: To utganger for digital måling av trykk i pakningene.



Figure 2–9: Rørtopp for hydraulisk trykking påmontert vannslange fra tankbilen. Hydraulikkslange for måling av vanntrykk er montert under vannslangen.

Hydraulisk trykking med enkeltmansjett fører til at kun én sprekk blir laget i hele borehullskolonnen (søyletrykking), mens bruk av dobbeltmansjett gjør det mulig å sprekk opp fjellet i flere nivåer (seksjonsvis trykking). Ved bruk av dobbeltmansjett med separat trykksettingsmekanisme, kan søyletrykking utføres ved at kun øverste pakning trykkes. Det er vanlig prosedyre at hydraulisk trykking innen grunnvannsindustrien begynner på det dypeste nivået i borehullet med søyletrykking. Resten av borehullet seksjonstrykkes etter at første sprekk er initiert ved søyletrykking. På denne måten blir det initiert flest mulige

sprekker i hele borehullet, og man reduserer risikoen for å sette fast utstyret i borehullet. Hvis utstyret flyttes den motsatte veien, nedover i borehullet, er det større risiko for at løse bergfragmenter faller ned og kiles mellom dobbeltmansjetten og borehullsveggen.

2.1.7 *Hydraulisk trykking med injeksjon av sand*

I oljeindustrien er det vanlig å injisere såkalte propping agents eller små harde kuler, enten rundet kvartssand, peanutt skall, keramikk-kuler eller lignende. For at proppingkulene ikke skal falle til bunns før injeksjonen har startet, blir propping agents blandet i en viskøs væske og deretter injisert. Hensikten med propping agents er å holde sprekken åpne etter trykkavlastning. Kulene eller sandkornene fungerer da som avstandsklosser som holder bergflatene fra hverandre (figur 2–10). Behovet for propping agents eller injeksjon av sand er det samme innen grunnvannsforsyning, og det har vært gjort noen få rapporterte forsøk med injeksjon av sand uten særlig suksess. En grunn til dette kan være at utstyret tilgjengelig for hydraulisk trykking med injeksjon av sand av grunnvannsbrønner ikke har vært tilstrekkelig. Samtidig vil prosessen med injeksjon av sand være kompliserende sammenlignet med hydraulisk trykking med bare vann.

I praksis kan hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull i fast fjell foregå ved at det initieres en sprekk på ønsket nivå i borehullet med ordinær hydraulisk trykking med bare vann. Sprekken utvides ved at det pumpes inn vann med maksimal rate, og etter hvert bør det oppnås et forholdsvis lavt mottrykk. Et forholdsvis lavt mottrykk, anslagsvis lavere enn 100 bar ved en pumpe rate på 500 liter/minutt, sikrer at den viskøse blandingen med sand kan transporteres inn i sprekken uten at trykket stiger over anbefalt arbeidstrykk (cirka 250 bar) for utstyret. For at så mye som mulig av sanden skal være i suspensjon, overføres den ferdig hydratiserte viskøse blandingen til den 50-liters store høytrykkstanken like før injisering (avsnitt 2.2.2, figur 2–14). Viskositeten av blandingen har omtrent samme konsistens som saus. Noen dråper nedbrytningsenzym tilsettes blandingen før tanken lukkes.

Høytrykkstanken er koblet til vannslangen fra tankbilen, og ved vanlig hydraulisk trykking med bare vann, går vannet via en by-pass slange forbi tanken. Ved injeksjon av sandblanding åpnes ventilene slik at vannet ledes inn i høytrykkstanken og skyver blandingen ned i borehullet og inn i den åpne sprekk (figur 2–10). Ved bruk av maksimal pumpe rate vil tømningen av høytrykkstanken ta forholdsvis kort tid, og stimuleringen bør avsluttes raskt for å unngå at all sanden spyles for langt inn i sprekk. Samtidig er det viktig at det ikke blir liggende igjen for mye sand i borehullet mellom gummipakningene. Da kan utstyret lettere kile seg fast. For å få størst mulig effekt av sanden som avstandsklosser i sprekk, og dermed høyere vannkapasitet i borehullet, er det viktig at enkelte sandkorn sørger for at sprekkåpningen mot borehullsveggen er så stor som mulig. På denne måten sikres god kommunikasjon mellom vannførende sprekk og borehullet.

Hydraulisk trykking - prinsipp

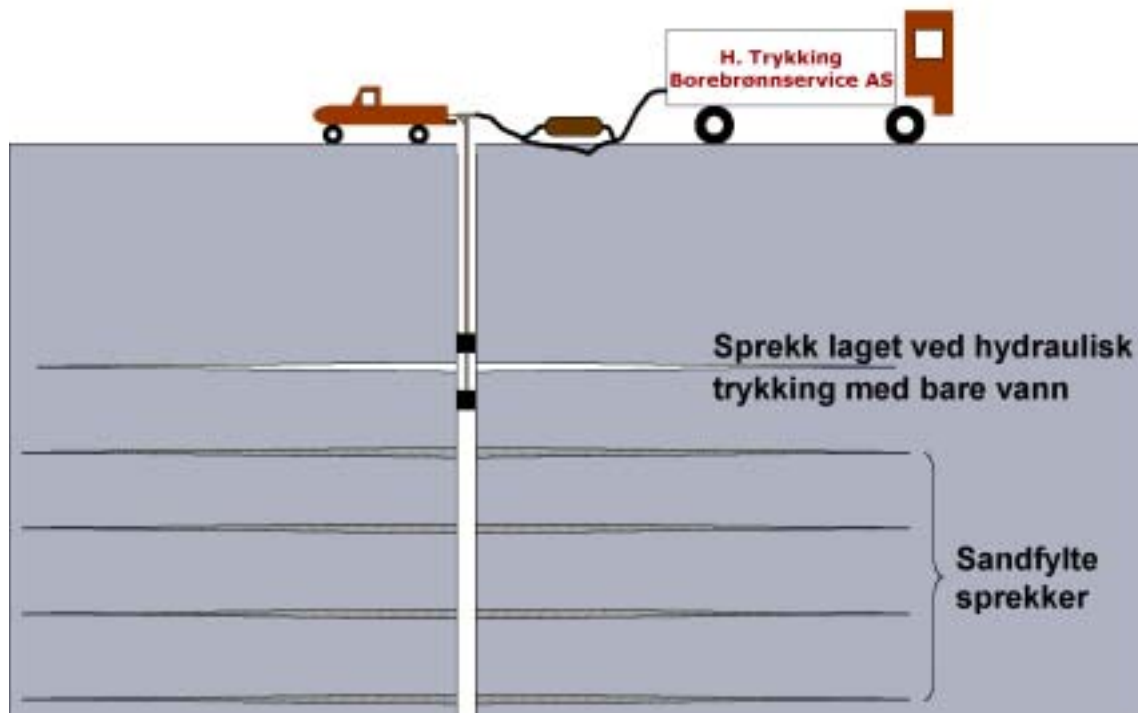


Figure 2–10: Prinsippskisse som viser hydraulisk trykking (HT) med bare vann, og hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

2.1.8 Måling av vanntrykk og pakningstrykk

Pakningstrykk og vanntrykk i borehullsseksjonen eller borehullssøylen måles og logges ved hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Trykksensorene, som måler trykkintervallet 0-500 bar, var koblet til (1) den lille høytrykkspumpen som trykksetter pakningselementene, og (2) stålrøret som var i direkte kontakt med vanntrykket i borehullsseksjonen eller borehullssøylen (figur 2–11 og figur 2–12). Signalene fra trykksensorene ble overført og tolket i en målebro. Alle dataene ble lagret i en datalogger som var koblet til målebroen. Lagrede data lastes ned på en bærbar pc.

Trykkmålinger ved hydraulisk trykking

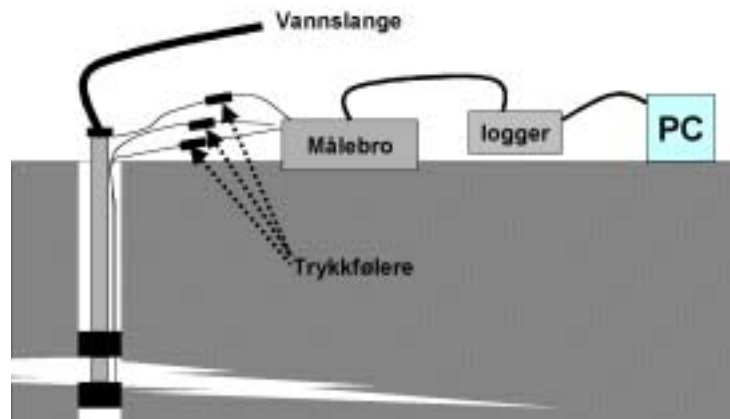


Figure 2–11: Prinsipp-skisse av digitalt måleroppsett for måling av pakningstrykk og vanntrykk i borehullsseksjonen ved hydraulisk trykking.



Figure 2–12: Venstre: Kyowa trykkløpere er tilkoblet en målebro som igjen er koblet til en datalogger. Data lastes ned fra loggeren via PC. Høyre: Trykkløper for måling av vann- og pakningstrykk.


2.2 Utvikling av utstyr

2.2.1 Dobbeltmansjett - FrakPak - AIP 410-550

Utstyr for hydraulisk trykking av borebrønner i fast fjell er utviklet av Brønnteknologiutvikling AS (BTU). Utstyret består av to væsketrykksekspanderende pakninger montert på et perforert stålrør, en såkalt dobbeltmansjett eller straddle packer. Pakningene er testet i laboratoriet til å tåle trykk på 300 bar, og er laget i aramidforsterket gummi. Etter uttesting i felt ved Lade (avsnitt 3.1 og 4.2.3) ble dobbeltmansjetten videreutviklet slik at hvert pakningselement kan trykkesett hver for seg. Noen tekniske data for FrakPak - AIP 410-550 er presentert nedenfor.

Tabell 2–2: Tekniske data for den væskeekspanderende dobbeltpakningen, FrakPak - AIP 410-550.

Tekniske data for FrakPak - AIP 410-550:	
Ytre diameter:	4 3/8" / 110 mm
Indre diameter:	2" / 50 mm
Maksimal ekspansjonsdiameter:	7" / 180 mm
Materiale element:	HNBR og aramid
Materiale mekaniske deler:	AISI 316
Arbeidstrykk:	250 bar
Test trykk:	300 bar
Sprengningstrykk:	500 bar
Antall ekspansjoner til 250 bar:	> 300 i 5,5" testrør
Antall trykkeoperasjoner i felt:	40-60 stk.



Figur 2–13: Dobbeltmansjett utviklet av Brønnteknologiutvikling AS.

Fortrinn sammenlignet med mansjetter som settes ved mekanisk kompresjon:

- Stor radiell ekspansjon (0,56"/14 mm). Går helt tilbake til utgangsdiameter ved trykkavlastning.
- Mange gjentatte ekspansjoner.
- Stor mekanisk holdekraft ved aksialbevegelse (130 tonn ved 300 bars ekspansjonstrykk).

2.2.2 Høytrykkstank for injeksjonsmassen

BTU har utviklet en høytrykkstank for lagring av injeksjonsmassen ved hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 2–14). Tanken, som tåler et trykk på 250 bar og har et volum på cirka 50 liter, er laget av et tykt stålrør påsveiset kuleformede ender. Hver ende består av to koblingspunkter for høytrykksslange. En by-pass slange forbi høytrykkstanken sørger for at oppsprekning av borehullsseksjonen kan finne sted før injeksjon av sand som beskrevet i avsnitt 2.1.7. Injeksjonsmassen fylles i et påfyllingshull på toppen av tanken, og tanken stenges ved at lokket skrues godt fast.



Figur 2–14: Høytrykkstank for lagring av injeksjonsmasse ved hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

2.2.3 Injeksjonsmansjett for senterborehull

Returvannet, som er tenkt å ha en infiltrasjonsrate på 20 000 liter/time, fra varmeveksleren ved pilotanlegget ved Bryn skal injiseres under relativt høyt trykk i senterborehullet. For å klare dette er det behov for en injeksjonsmansjett som sitter fast og tetter den øvre delen av borehullet. Konvensjonelle tettpakninger/injeksjonspakninger har ikke kapasitet til å tåle

slike langvarige trykkpåkjenninger, og en egnet mansjett er utviklet av BTU (figur 2–15, tabell 2–3). Injeksjonsmansjettens settes og spennes fast i samme operasjon.

Tabell 2–3: Tekniske data for injeksjonsmansjett.

Diameter		Styrkeparametre	
RIH ytre pakningsdiameter	130 mm	Settekraft	10 tonn
Ytre diameter slips	98 mm	Ankerkapasitet	40 tonn
Ytre diameter på pakning/slips i fastspent tilstand	140 mm	Diff. trykk	100 bar



Figur 2–15: Injeksjonsmansjett for retur av varmevekslet grunnvann i senterborehullet ved Bryn.

2.2.4 Luftrykksblander

Erfaringene fra Bryn (avsnitt 5.2.10) viste at en tilfredsstillende hydratisering av fortykningsmiddel (guar gum) og vann var en tidkrevende parameter i prosedyren for hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Som en del av metodeutviklingen, har derfor BTU utviklet en CPIM-blander (**C**ontinuous-**P**articulate-**I**ntensive **M**ixing) for å sikre en rask hydratisering av pulveret med fortykningsmiddel og vann. CPIM-blanderen, USA-patent 4,191,480, består av to siloer, en til vann og en til fortykningsmiddel (figur 2–16). Hver av siloene har et volum på cirka 10 liter. Systemet trykkes med luftrykk, og ved å trykke på en knapp, spyles vann og pulver gjennom en konisk spredeenhet slik at hvert pulverkorn fuktes med vann. Denne luftrykksfuktingen av hvert enkelt pulverkorn sikrer en fullstendig hydratisering i løpet av noen få sekunder. Blandingen spyles ned i et oppsamlingskar under utløpet. CPIM-blanderen har en strålediameter på 34 millimeter og en kapasitet på 7,5 liter/sekund.



Figur 2–16: Luftrykksblander for blanding- og rask hydratisering av fortykningsmiddel og vann.

2.3 Geofysisk logging

2.3.1 Optisk televiewer

Optisk televiewer (OPTV) er et geofysisk måleinstrument som tar videoopptak av borehullsveggen. Utstyret består av en cirka 2 meter lang sonde der videoenheten er innebygd i den ene enden (figur 2–17 og 2–18). Sonden sentreres i borehullet med sentreringsfjærer. Øvrig utstyr er stålvaier og pc, hvor videoopptakene logges (figur 2–19). Videoenheten består av videokamera, lysdioder, hyperbolsk speil, svart nål, gummikloss og glass (figur 2–20). Lysstråler utsendt fra lysdiodene treffer det hyperbolske speilet som igjen lyser opp borehullsveggen. Reflekterte bilder fra borehullsveggen sentreres i videokameraets linse og opptak gjøres.

Bildene fra optisk televiewer er orientert og har en oppløsning på 360 eller 720 dot per inches (dpi) (ca 1*1 millimeter), og brukes til sprekkeanalyse. Anbefalt loggehastighet med optisk televiewer er cirka 1 meter borehull per minutt.



Figure 2–17: Sonde med sentreringsfjærer for logging med optisk televiewer. Videoenhet til høyre.



Figure 2-18: Videoenhet for optisk televiwer.



Figure 2-19: Oppstilling av pc og stålvaier for logging med optisk televiwer.

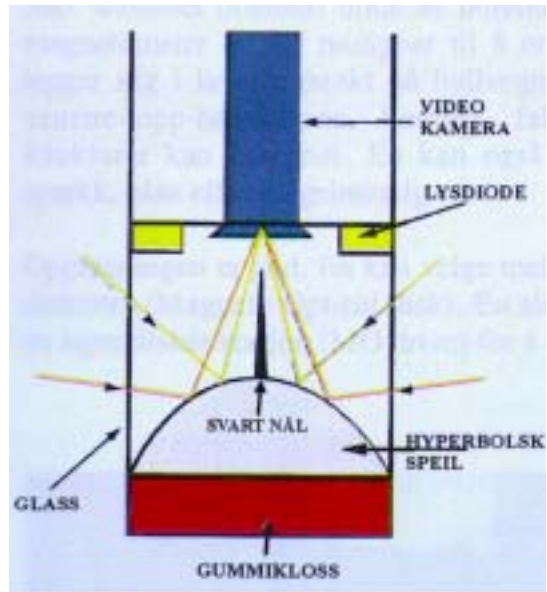


Figure 2-20: Prinsippskisse for måling med optisk televiwer.

2.3.2 Temperatur, ledningsevne, og gammastråling (TCN-logg)

Sammen med utstyr for optisk televiwer brukes en enhet for måling og logging av vannets temperatur og elektrisk ledningsevne, samt bergmassens totale naturlige gammastråling, en såkalt TCN-logger (T~temperature, C~conductivity og N~natural gamma). Tilsvarende som for optisk televiwer, består utstyret av en sonde med sentreringsfjærer der måleenheten befinner seg nederst på sonden. Måleenheten måler alle tre parametre, vannets temperatur, vannets ledningsevne og naturlig gammastråling, samtidig. Resultatet logges på pc på samme måte som for optisk televiwer, og man oppnår en kontinuerlig logg for hele borehullet. Anbefalt loggehastighet er cirka 3 meter borehull per minutt.

En kontinuerlig logg av vannets temperatur og elektrisk ledningsevne av vannet i borehullet er et nyttig verktøy til å identifisere mulige vannførende sprekker i borehullet. Vann som strømmer ut fra en vannførende sprekke i et borehull kan ha andre egenskaper i form av endret ionesammensetning og til en viss grad temperatur, sammenlignet med vannet i resten av borehullet. Videre gir temperaturmålinger for et borehull et bilde av den geotermiske gradienten i området. Endringer i den totale naturlige gammastrålingen indikerer endringer i bergmassens mineralogi, og er vanligvis forårsaket av endringer i berggrunnens kaliuminnhold. Kalium er et radioaktivt grunnstoff, og finnes blant annet i alkaliefeltspat (Elvebakk og Rønning, 2001). Resultatene fra måling av total naturlig gammastråling gjør det lettere å bestemme hvilke bergarter som opptrer i borehullet.

2.3.3 Strømningsmåler

Måling av vannstrømning i borehullet er mulig ved å bruke en strømningsmålerenhet. Denne enheten hører til i samme serien som optisk televiwer og TCN-logger. Utstyret består av en sonde med sentreringsfjærer der en propell registrerer vannstrøm langs borehullet i to retninger (figur 2-21 og 2-22). Propellens hastigheter registreres på pc. Innstrømmende vann i borehullet gir endringer i propellens turtall. Ved kontinuerlig logging opp og ned i borehullet

får propellen et turtall på grunn av loggehastigheten. Netto turtall (rpm) finnes ved å ta differansen mellom opp og ned (Elvebakk og Rønning, 2003). Strømningsmålinger i borehull kan i prinsippet gjøres på to måter, enten (1) ved kontinuerlige målinger der sonden føres opp og ned i borehullet ved konstant hastighet, eller (2) ved stasjonære målinger der sonden står stille i borehullet. Ved stasjonære målinger er det gunstig å plassere propellen like over og like under et sprekknivå. Små endringer i vannstrømningsmønsteret i borehull kan lettest påvises ved kontinuerlig måling fordi propellen allerede er i bevegelse induisert av opp- eller nedfiring i borehullet. Samtidig pumping av borehullet ved strømningsmåling, der pumpen må plasseres over sonden i borehullet, vil øke vannstrømmingen i de vannførende sprekke i borehullet, og det blir lettere påvise markante endringer i strømningsbildet.

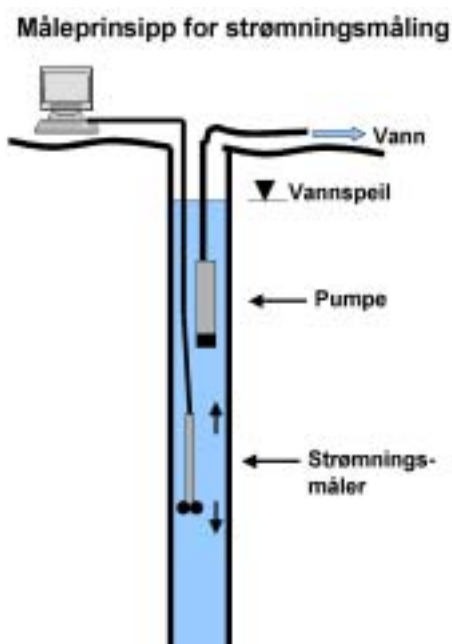


Figure 2–21: Måleprinsipp for påvisning av vanninnslag ved strømningsmåling i borehull (Elvebakk og Rønning, 2003).



Figure 2–22: Sonde for strømningsmåling (Elvebakk og Rønning, 2003).

2.4 Kapasitetstesting av borehull

Testpumping av borehull i fjell er en metode for å kvantifisere borehullets totale produksjonskapasitet, og har i noen tilfeller til hensikt å lokalisere eventuelle vannførende sprekker i berggrunnen (Storrø et al., 2002).

2.4.1 Utstyr til testpumping

Flere typer senkepumper har vært benyttet til testpumping i de forskjellige faser av prosjektet, og pumpekararakteristikken for de aktuelle pumpene er vist i figur 2–23. Som stigerør for senkepumpene ble det benyttet polyetylen-rør med indre diameter 32 mm.

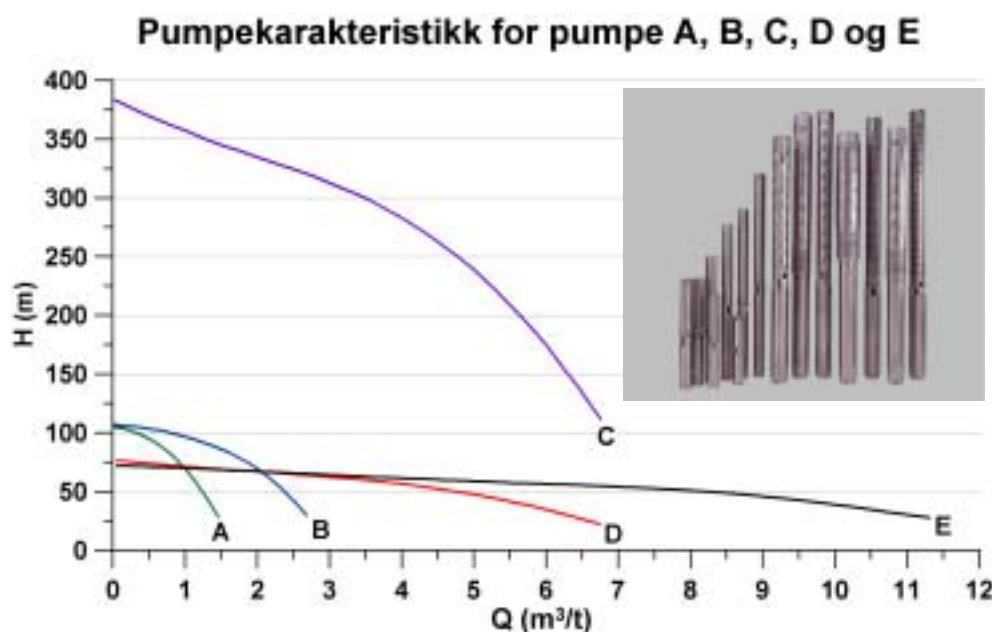


Figure 2–23: Pumpekarakteristikk for pumpe A, B, C, D og E som ble benyttet i studien (etter Grundfos, 2004).

Trykkløpere med forskjellig måleintervall benyttet for kontinuerlig registrering av endringer i grunnvannsstand på grunn av forstyrrelser forårsaket av testpumping og hydraulisk trykking er listet opp i tabell 2–4

Alle strømningsdata fra testpumpingen ble målt med en elektromagnetisk vannmengdemåler med måleområde 0,3–6,0 m³/time som ble koblet til utløpet av PE-røret (figur 2–24). Vannmengdedata og vannstandsdata ble lagret på en standard datalogger med 4–20 mA inngangssignal, med lagringsintervall på 8 eller 12 sekunder (figur 2–25).

Tabell 2–4: Variasjon i måleområde og bruk av trykksensorene.

Bruksområde for trykksensor	Måleområde (meter vannsøyle)			
	0-10	0-20	0-100	0-300
Måler endringer i grunnvannsnivået i pumpeborehullet. Trykksensoren er festet til pumpeutstyret rett over pumpen, og ble brukt i testpumpingen ved Lade og Bryn (figur 2–24).			x	
Måling av grunnvannsresponsen i omgivende borehull for borehull der hydraulisk trykking og testpumping ble utført. Benyttet ved Bryn og EAB.	x			
Måling av endringer i grunnvannsnivået i pumpeborehullene ved EAB. Oppsettet var det samme som for Lade og Bryn, beskrevet ovenfor.				x
Måling av grunnvannsnivåendringer over øvre pakning i pumpeborehullet ved søyle- og seksjonsvis testpumping ved Bryn.		x		



Figure 2–24: Trykkføler i pumpebrønn (venstre), og et flowmeter (høyre).



Figure 2–25: Datalogger brukt i studien (ETM Pacific, 2003).

2.4.2 Varianter av testpumping; vanlig-, søyle- og seksjonspumping

Det har vært benyttet forskjellige varianter testpumping i prosjektet. I testborehull ved Lade og pilotanlegget ved EAB ble det gjort vanlig testpumping. Med vanlig testpumping forstås her pumping av grunnvann fra borehull i fjell uten bruk av tettpakninger. Selve pumpeutstyret består av senkepumpe med strømtilførsel og stigerør.

Ved Bryn har det vært nødvendig med både såkalt søylepumping og seksjonspumping. Med søylepumping forstås her testpumping med bruk av én tettpakning som er plassert over pumpen. Gjennom tettpakningen går det et ventilasjonsrør som skaper atmosfæriske forhold i den delen av borehullet hvor pumping foregår. Tettemansjett trykkes ved hjelp av trykkluft. Ved bruk av tettpakning er det mulig å gjøre testpumping i deler av borehullet, og påvirkning fra store og åpne sprekkesoner kan ekskluderes fra testen. Selve pumpeutstyret består av senkepumpe med strømtilførsel, stigerør og tettemansjett med ventilasjonsrør.

Med seksjonspumping menes her testpumping med bruk av to tettestemansjetter, en over og en under pumpen. Avstanden mellom pakningene, 15 meter, utgjør seksjonen hvor testpumping foregår. På samme måte som ved søylepumping går det et ventilasjonsrør gjennom øverste pakning som sørger for atmosfæriske forhold i den seksjonen av borehullet som pumpes. Selve pumpeutstyret består av senkepumpe med strømtilførsel, stigerør og to tettestemansjetter der øvre mansjett er utstyrt med et ventilasjonsrør (figur 2–26).

Utstyr for seksjonsvis testpumping

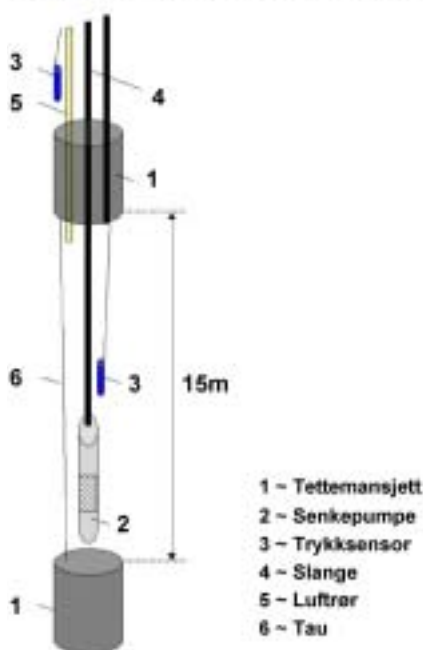


Figure 2–26: Utstyr for seksjonsvis testpumping.

2.4.3 Synke- og stigetester; Teori

Avsnittet er basert på Storrø et. al (2002).

Data som samles inn ved testpumping består av diagrammer som viser:

- Hvordan utpumpet vannmengde varierer som funksjon av tid.
- Hvordan vannstanden (trykknivået) i borehullet synker over tid som en følge av at vann pumpes ut av borehullet - senkekurve.
- Hvordan vannstanden i borehullet stiger etter at pumpingen er avsluttet - stigeurve.

Forløpet av disse synke- og stigeurve kan gi opplysninger om beliggenhet av vannførende sprekkesoner i borehullet. Kryssing av vannførende sprekkesoner i borehullet vil opptre som knekkpunkter på både synke- og stigeurve. Knekkpunktene fremkommer fordi i det vannstanden befinner seg på samme nivå som en vannførende sprekkesone, vil det ta lenger tid å tømme/fylle dette sprekkevolumet sammenlignet med en tett del av borehullet som har mindre volum. For å unngå feilkilder som støy fra ukontrollerte variasjoner i pumpens kapasitet og redusert pumpekapasitet ved økende løftehøyde, vil stigeurve være den sikreste kilden for å lokalisere knekkpunkter. Siden det ofte er vanskelig å lokalisere knekkpunkter på kurven der grunnvannstand er plottet som funksjon av tid, er det i stedet hensiktsmessig å

plotte en kurve som viser med hvilken hastighet grunnvannsstanden endrer seg over tid, eller såkalt synke- eller stigehastighet. Kurve for synke- eller stigehastighet er den deriverte av grunnvannsstand som funksjon av tid, og kan lett fremskaffes siden grunnvannsnivået måles i intervaller på 8 eller 12 sekunder.

Den maksimale korttids produksjonskapasitet for en borebrønn i fjell kan bestemmes ved at senkepumpen monteres i bunnen av borehullet, og borehullet pumpes tomt ved at vannstanden er senket helt ned til senkepumpens vanninntak. Pumpingen fortsetter, og siden vannstanden står i nivå med pumpeinntaket, vil pumpen slurpe inn tilgjengelige luft- og vannmengder - derav betegnelsen slurping. Mengde og rate utpumpet grunnvann i hele slurpeperioden måles ved hjelp av en vannmengdemåler, og den maksimale korttids produksjonskapasitet for borehullet bestemmes fra disse resultatene (avsnitt 2.4.4).

Dersom borehullet har større kapasitet enn senkepumpens maksimale kapasitet, vil det ikke være mulig å tømme borehullet med den aktuelle pumpen. Vannstanden i borehullet vil senkes på vanlig måte, men gradvis stabilisere seg i et nivå som defineres ut i fra likevekt mellom vanntilsiget i borehullet og pumpens maksimale kapasitet ved den gitte løftehøyden.

Fullt utbytte av denne type analyser fra testpumping oppnås kun der pumpene som brukes har tilstrekkelig kapasitet til å tømme hele borehullet. Det kan være et problem å fremskaffe egnet utstyr for høykapasitets borehull i fjell. Utstyret blir gjerne dyrt, tungt og uhåndterlig. Lengre tids pumping i *slurpemodus* er ikke bra for pumpen og bør unngås.

2.4.4 Vannkapasitetsanslag

Vannkapasiteten for de forskjellige seksjonene hvor det ble utført testpumping kan estimeres på flere måter. I denne studien er resultatene tolket på tre forskjellige måter som benevnes som (1) gjennomsnittlig pumperate, (2) stigeurve og (3) ekstrapolert pumperate. De tre metodene kan beskrives på følgende måte:

- 1) Gjennomsnittlig pumperate, Q_{snitt} . Utregningen forutsetter en fluktuerende pumperate. Det vil si at grunnvannsnivået i borehullet, borehullssøylen eller borehullsseksjonen er senket ned til pumpeinntaket, og pumpen trekker både vann og luft. Vannkapasiteten fra en testpumping som gir fluktuerende pumperate kan finnes ved å ta gjennomsnittet av alle verdiene innen tidsrommet med fluktuerende pumpeforløp. Denne verdien vil sannsynligvis være noe høy i forhold til reell kapasitet, da flukteringene har en tendens til å stabilisere seg på et noe lavere nivå over tid.
- 2) Stigeurve. Tilsvarende som for Q_{snitt} forutsetter også utregningen av vannkapasitet basert på stigeurve at grunnvannsnivået senkes helt ned til pumpeinntaket. Stigeurven fremkommer fra et stigende grunnvannsnivå etter avsluttet testpumping og plottes mot tid (avsnitt 2.4.3). I teorien skal stigeurven ha et lineært forløp. Vannkapasiteten beregnes ut fra likningen fra en lineær trendkurve som er tilpasset stigeurven. Den totale økningen i grunnvannsnivået, Δh , finnes fra stigeurven forløp, og dette tallet, samt likningen for trendkurven brukes for å regne ut start- og sluttidspunktet for grunnvannsnivåøkningen, det vil si tidsintervallet Δt for grunnvannøkningen. Δh benyttes også for å beregne volumet (V), av borehullet, borehullssøylen eller borehullsseksjonen. Vannkapasiteten, som her benevnes Q_{stige} , kan derfor beregnes på følgende måte:

$$Q_{stige} = \frac{V}{\Delta t} \quad [2.11]$$

Fullstendige stigekurver anses å være konservative anslag på borehullets totale produksjonskapasitet, Q . Q_{stige} er lavere enn Q fordi vannet må sige inn og fylle opp de drenerte sprekkene før borehullsseksjonen eller borehullssøylen er helt fylt. Fyllingen av borehullsseksjonen eller borehullssøylen tar derfor lenger tid enn om sprekkene hadde vært fylt opp på forhånd. Høyeste $\Delta h/\Delta t$ gir derfor mest korrekt Q_{stige} -verdi som et mål på Q .

- 3) Ekstrapolert pumperate. Pumperate går ut på å tolke pumperatens forløp utover avsluttet pumping. Dette er en metode som i likhet med de to foregående, forutsetter at grunnvannsnivået er senket helt ned til pumpeinntaket. Ved å ekstrapolere pumperaten utover avsluttet testpumping, kan man i de tilfellene hvor pumperaten følger et noenlunde jevnt forløp, få et godt bilde av vannkapasiteten. Siden grunnvannsnivået er senket helt ned til pumpeinntaket, vil vannkapasiteten her reflektere mengden innstrømmende vann i borehullet, borehullssøylen eller borehullsseksjonen. Siden pumperaten ofte er svakt synkende over tid, vil verdien for vannkapasiteten være forholdsvis konservativ. I dette studiet har man valgt å lese av en ekstrapolert verdi for pumperaten etter cirka 200 minutters pumpetid.

Ved avsluttet boring av et borehull er det vanlig at brønnborer utfører en såkalt blåsetest for å gi et førsteestimat av borehullets korttids produksjonskapasitet. Blåsetesten går ut på at borer blåser borehullet tomt for vann, og beregner produksjonskapasiteten basert på måling av vannets stige-hastighet i borehullet.

2.5 Vannkvalitet i grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann

Vannkvaliteten vil ha betydning for driften av grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann, og må undersøkes. Dette gjelder spesielt stoffer som kan gi utfellinger (jern, mangan og karbonater), igjenslamming og korrosjon.

Avsnittet er i stor grad basert på litteratur fra Lindblad-Påsse (1986) og Andersson (1992) i Kalskin (1998). Det er tre geokjemiske forhold som er viktige for grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann:

- Vannets innhold av utfellbare elementer,
- vannets innhold av elementer som kan danne belegg på metalliske flater, og
- vannets innhold av korrosive elementer.

Problemer knyttet til utfelling er spesielt stort der hvor vannet som benyttes i en varmeveksler (varmepumpe) skal infiltreres tilbake til magasinet. Tilbakeføring av vann er vanlig og ønskelig for å opprettholde grunnvannsmagasinet kapasitet.

For å bedømme risiko for kjemiske utfellinger og korrosjon bør undersøkelser av vannkvalitet ha like høy prioritet som hydrogeologiske undersøkelser ved anleggning av grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann. Strengte grenseverdier for jern og andre elementer/forbindelser er av mindre interesse siden store vannuttak kan endre vannkvaliteten, og mikroorganismer kan forårsake problemer under svært forskjellige forhold. Allikevel er det gjort på forsøk på en generell klassifisering av grunnvannets innhold av lett utfellbare elementer relatert til risiko for utfelling og korrosjon.

- Gustafsson (1983) oppgir 0,3 mg Fe/l og 100 mg Ca/l som grenseverdier for jern og kalsium. Erfaringer fra bruk av grunnvann til vannforsyning viser at et kalsiuminnhold over 35 mg/l forårsaker problemer med utfelling i kjeler, varmeelement et cetera.
- I en generell klassifisering av vann i forhold til utfelling og korrosjon er konsentrasjonen av jern- og mangan anbefalt å være lavere enn henholdsvis 1 mg/l og 0,5 mg/l (Lindblad-Påsse, 1986).

Problemer med kjemisk utfelling i varmepumpesystem er hovedsakelig knyttet til karbonatutfellinger og jern- og manganutfellinger. Utfelling av andre forbindelser som kalsiumsulfat (CaSO_4), bariumsulfat (BaSO_4), silikautfellinger og utfelling av svovelforbindelser kan forekomme. Kalkutfellinger (kalsiumkarbonat, CaCO_3) kan inntreffe rundt borehull hvis grunnvannet har høy karbonathardhet. Jern- og manganutfellinger består i hovedsak av tungløselige jern- og manganhydroksider, og er et stadig økende problem ved store grunnvannsuttak. Jern- og manganhydroksider dannes ved endrede redoksbedingungen eller bakteriell virksomhet. Bakterievirksomhet kan føre til utfelling i både pumpebrønner og infiltrasjonsanlegg, mens kjemisk utfelling på grunn av forandringer i redokspotensialet som regel bare finner sted i infiltrasjonsanlegg. Løseligheten av jern i vann er svært avhengig av Eh- og pH-forholdene, der små endringer vil ha merkbar effekt. Jernbakterienes betydning for jernutfellinger er stor på grunn av bakterienes katalyserende virkning. Generelt kan jernutfellinger og andre kjemiske utfellinger behandles med sterke syrer tilsatt stabilisatorer (sitronsyre/eddiksyre) (Lindblad-Påsse, 1986).

Korrosjon av metallrør kan være elektrokjemisk eller bakteriell. Videre kan kjemisk nedbrytning av beskyttende oksydasjonslag gi opphav til korrosjon. Korrosjon kan oppstå alle steder hvor det finnes korrosivt metall, for eksempel brønnfilter, brønnens rør- og pumpedeler, ventiler og koplinger, i varmevekslere og i fordampere. I denne sammenhengen kan pH-verdien forårsake sur- og basisk korrosjon, og griper inn i kjemiske likevekter av betydning for korrosjon og dannelse av korrosjonsbeskyttende belegg. Vannets korroderende evne er også avhengig av innhold av løst oksygen, løst karbondioksyd, temperaturforhold, strømningshastighet, løste salter og svovelsyre.

Infiltrasjonsborehullet i et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann bør designes for rutinemessig tilbakespyling av partikulær tilstopping. Redusert infiltrasjonskapasitet på grunn av tilstopping av finpartikulært materiale i suspensjon kan oppdages med kontinuerlig trykkovervåkning av det sirkulerende vannet.

2.6 Laboratoriemetoder

2.6.1 Vannanalyse

Avsnittet er i hovedsak basert på NGU-Lab (2002b). NGU-Lab tilbyr en standard analysepakke som dekker de fleste fysikalske og uorganiske parametere som bør analyseres for undersøkelse av grunnvann til drikkevannsformål. Prøvematerialet for en standard vannanalyse ved NGU-Lab består av en råvannsprøve (0,5 liter) til analyse av pH, elektrisk ledningsevne, alkalitet, turbiditet og fargetall, en filtrert (0,45 μm papirfilter) 100 ml prøve til anionanalyser, og en 100 ml filtrert og surgjort prøve (tilsatt 0,5 ml ultraren 65% saltpetersyre) til kationanalyser (figur 2–27). Vannprøvene merkes godt, og oppbevares kaldt før analyse.

Informasjon om nedre bestemmelsesgrense, analyseusikkerhet og måleprosedyre i forhold til Norsk Standard for alle de forskjellige parameterne som analyseres fremgår av tabell 2–5 og 2–6.



Figure 2–27: Vannprøve.

Tabell 2–5: Nedre bestemmelsesgrense og analyseusikkerhet for analyserte kationer.

Element	Nedre bestemmelsesgrense (ppb)	Analyseusikkerhet (± %)	Element	Nedre bestemmelsesgrense (ppb)	Analyseusikkerhet (± %)
Si	20	10	V	5	5
Al	20	10	Mo	10	10
Fe	10	5	Cd	5	20
Ti	5	5	Cr	10	10
Mg	50	5	Ba	2	5
Ca	20	5	Sr	1	5
Na	50	10	Zr	5	10
K	500	20	Ag	10	10
Mn	1	5	B	20	10
P	100	5	Be	1	5
Cu	5	5	Li	5	20
Zn	2	5	Sc	1	5
Pb	50	20	Ce	50	20
Ni	20	5	La	10	10
Co	10	5	Y	1	5

Tabell 2-6: Måleområde, nedre bestemmelsesgrense, analyseusikkerheter og prosedyrer i forhold til Norsk Standard (NS) for analyserte anioner, ledningsevne, pH, t-alkalitet, fargetall og turbiditet.

Parameter	Måleområde	Nedre bestemmelsesgrense	Analyseusikkerhet (\pm % rel)	Prosedyre (NS-nummer)
F ⁻	-	0,05 mg/l	± 10 % rel	-
Cl ⁻	-	0,1 mg/l	± 10 % rel	
NO ₂ ⁻	-	0,05 mg/l	± 10 % rel	
Br ⁻	-	0,1 mg/l	± 10 % rel	
NO ₃ ⁻	-	0,05 mg/l	± 10 % rel	
PO ₄ ³⁻	-	0,2 mg/l	± 10 % rel	
SO ₄ ²⁻	-	0,1 mg/l	± 10 % rel	
Ledn.evne	0,04-0,2	0,07 mS/m	± 3 % rel	NS-ISO 7888
"	>0,2	"	± 1 % rel	
pH	-	-	0,05 pH-enheter	NS 4720
t-alkalitet	0,04-0,2	0,04 mmol/l	$\pm 0,04$ mol/l	NGU-SD 3.7B (følger tidligere NS 4754)
"	0,2-2,0	"	$\pm 4,0$ %rel	
"	>2,0	"	$\pm 1,0$ %rel	
fargetall	-	1,4	$\pm 7,5$ %rel	Tilsvarende tidligere NS 4787 (1988)
turbiditet	0,05-1,0	0,05 FTU	$\pm 0,04$ FTU	NS 4723
"	1,0-10	"	$\pm 0,4$ FTU	
"	10-100	"	$\pm 4,0$ FTU	
"	100-1000	"	± 40 FTU	

2.6.2 XRF-, XRD- og tynnslipsanalyser

Avsnittet er i hovedsak basert på NGU-Lab (1999a og 1999b). Røntgenfluorescensspektrometri (XRF) er en metode for kvantifisering av grunnstoffer i samfengt prøve. XRF kan benyttes til å bestemme innhold av både hovedelementer (> cirka 0,5%) og sporelementer (< cirka 0,5%). Prinsippet for analysemetoden er at røntgenstråling med høy energi sendes inn på en prøve som fører til at elementene sender ut karakteristisk fluorescensstråling som er karakteristisk for hvert enkelt element. Gitte bølgelengder vil være karakteristiske for gitte elementer. De aktuelle bølgelengdene separeres ut ved vinkelavhengig refleksjon via en passende krystall, før påfølgende registrering med detektor. XRF er best egnet for elementer med atomnummer >9. For analyse av hovedelementene (isoformert/smeltet prøve) SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃¹, TiO₂, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, MnO og P₂O₅ trengs minimum 3 gram prøvemengde, mens en prøvemengde på minimum 7 gram behøves for analyse av sporelementer (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Sc, As, Mo, W, Ag, Cd, Sn, Sb, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd, Yb, Pb, U, Th, S, Cl og F). Analysene av S, Cl og F er å betrakte som semikvantitative.

Røntgendiffraksjon XRD, er en viktig analysemetode for identifikasjon av mineraler. Prinsipielt baseres analysemetoden på at refleksjon av en monokromatisk røntgenstråle som sendes inn på en krystallflate er avhengig av krystallenes gitterstruktur. I praksis sendes strålen på prøven med varierende innfallsvinkel, og reflekser registreres ved korresponderende utfallsvinkler. Vinklene korresponderer med gitteravstander relatert til ulike plansett og registreres i form av et diffraktogram. Således vil et hvert mineral gi opphav til et helt unikt mønster, som et fingeravtrykk for dette mineralet. Identifisering gjøres ved at

1. Total Fe rapporteres som Fe₂O₃.

diffraktogrammene for ukjente prøver sammenlignes med mønstre for kjente mineraler. Mønstre for kjente mineraler hentes ut fra en database. I prinsippet vil arealene under toppene i et diffraktogram være proporsjonale med konsentrasjonen av mineralet som gir opphav til den aktuelle toppen. I praksis kan det ofte være en del effekter, for eksempel linjeoverlapp, matriseeffekter, uegnede referansematerialer, med mer, som kompliserer en slik kvantifisering. Til XRD analyse benytter NGU-Lab et PC-styrt instrument som har programmerbar optikk og programvarebasert identifisering.

Petrografiske analyser av bergarter kan gjøres ved bruk av tynnslip. Tynnslip lages ved å sementere bergartsmaterial i en kapsel ved bruk av et tokomponent lim kalt EPOFIX-harpiks, og deretter dele inn prøven i 0,30 mikrometer tynne skiver. Hvert minerals karakteristiske måte å bryte lyset på i elektronmikroskop utnyttes til identifisering.

2.7 Måling av terrengendringer

Det er uvisst om hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand kan forårsake skadelige endringer i terrengoverflaten. Store endringer i terrengoverflaten kan i verste fall føre til setningsskader på bygninger i nærområdet. For å dokumentere eventuelle endringer er det gjort målinger av terrengoverflaten, hovedsakelig med nivellerkikkert, før og etter stimulering. Siden vann pumpes inn under høyt trykk i bergmassen, vil en terrengheving av nærområdet i teorien være en sannsynlig konsekvens av stimuleringen. Terrenghevingen vil være gitt av høydeforskjellen Δh målt før og etter stimulering mot et fastpunkt utenfor antatt influensområde for hydraulisk trykking (figur 2–28). Målenøyaktigheten for nivelleringskikkert antas å være ca 1 millimeter.

Nivellering av terrengendringer - prinsipp

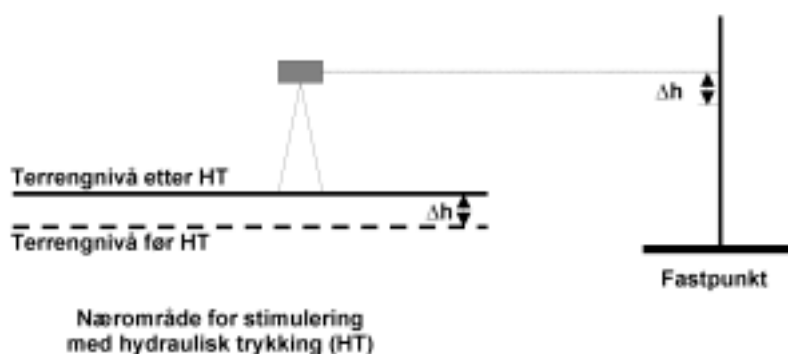


Figure 2–28: Prinsipp for måling av terrengendringer med nivellerkikkert.

2.8 Termisk responstest

En termisk responstest måler effektiv in-situ verdi for varmeledningsevne og termisk motstand som er viktige parametre ved dimensjonering av større grunnvarmeanlegg. Den effektive in-situ verdien for varmeledningsevne er i hovedsak en sum av berggrunnens varmeledningsevne (konduksjon) og grunnvannsstrømning (konveksjon).

Målingen foregår ved at varmeelementer varmer opp kollektorvæsken som sirkulerer i en lukket kollektorsløyfe i borehullet (figur 2–29). De termiske egenskapene til borehullets omgivende berggrunn finnes ved å måle kollektorvæskens middeltemperatur over tid. Testens varighet bør være minimum 60 timer, og 72 timer anbefales (Gehlin, 1998). Høy termisk respons, eller rask temperaturøkning i borehullet tyder på liten energiabsorpsjon i omgivende berggrunn, og den effektive in-situ verdien for varmeledningsevnen er lav. I motsatt fall, liten termisk respons eller langsom temperaturøkning tyder på høy energiabsorpsjon i omgivende berggrunn, og verdien for borehullets totale effektbidrag er høy. Den termiske motstanden R_b mellom væsken og borehullsveggen angir temperaturforskjellen mellom væsketemperaturen i kollektoren og temperaturen på borehullsveggen ved den spesifikke varmetransportraten (Gehlin, 2002).

De største feilkildene knyttet til termisk responstest er varmelekkasjer, variabel elektrisk spenning, fastsettelse av uforstyrret temperatur i grunnen, grunnvannsstrømning og thermosiphoneffekt (Gehlin, 2002).

I en studie av bergartenes varmeledningsevne på kartblad Bekkestua (figur 2–30 og 2–31), er ringerikssandsteinen ved Bryn og knollekalken ved EAB målt til å ha en median varmeledningsevne på henholdsvis 3,3 og 2,7 W/m,K (Midttømme et al., 2000).

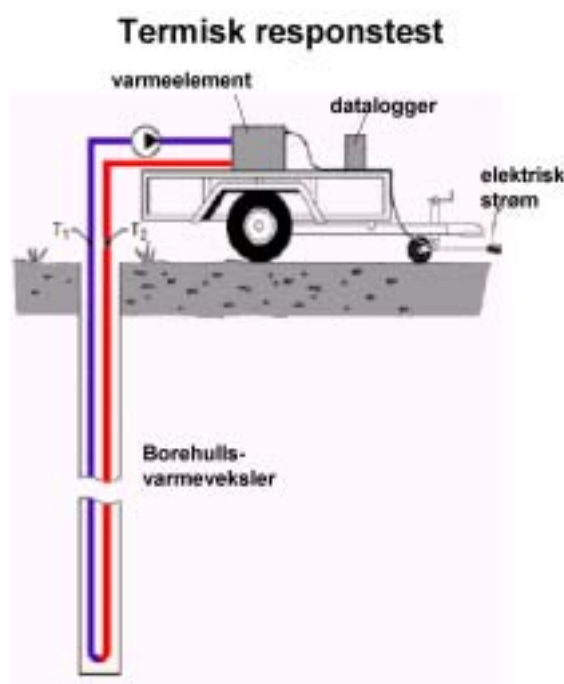


Figure 2–29: Prinsippkisse av termisk responstester (Gehlin, 2002).

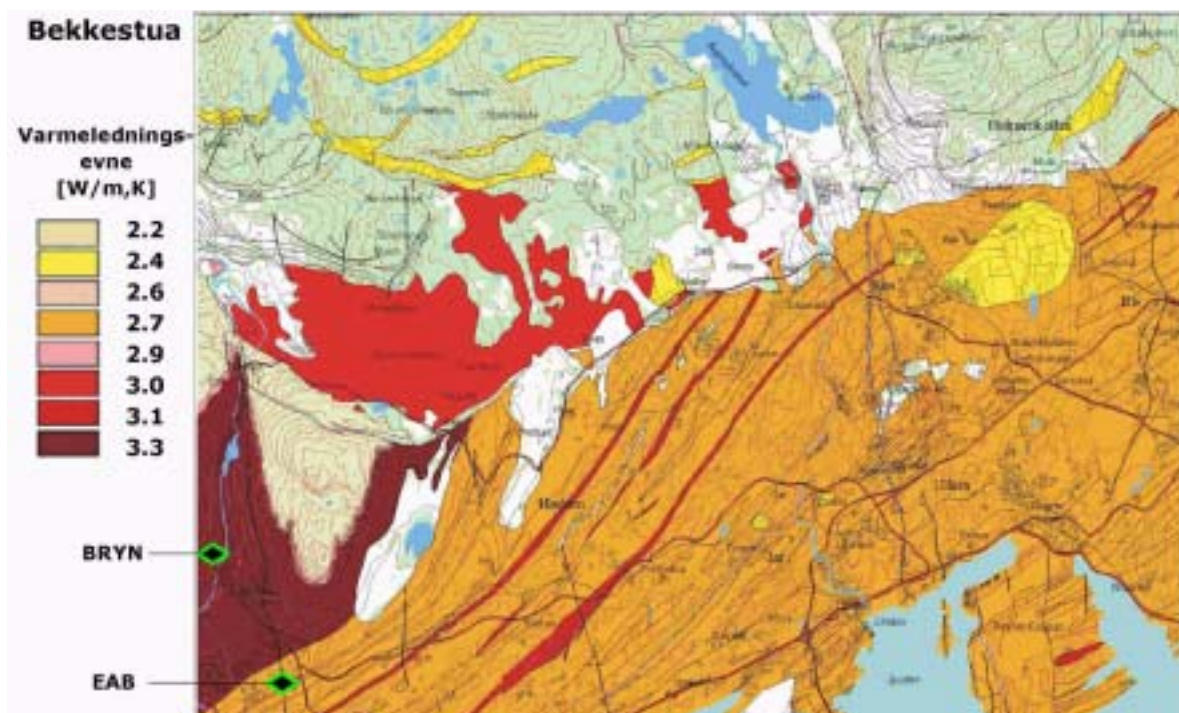


Figure 2–30: Bergartenes varmeledningsevne på kartblad Bekkestua, Bærum kommune (Midttømme et al., 2000).

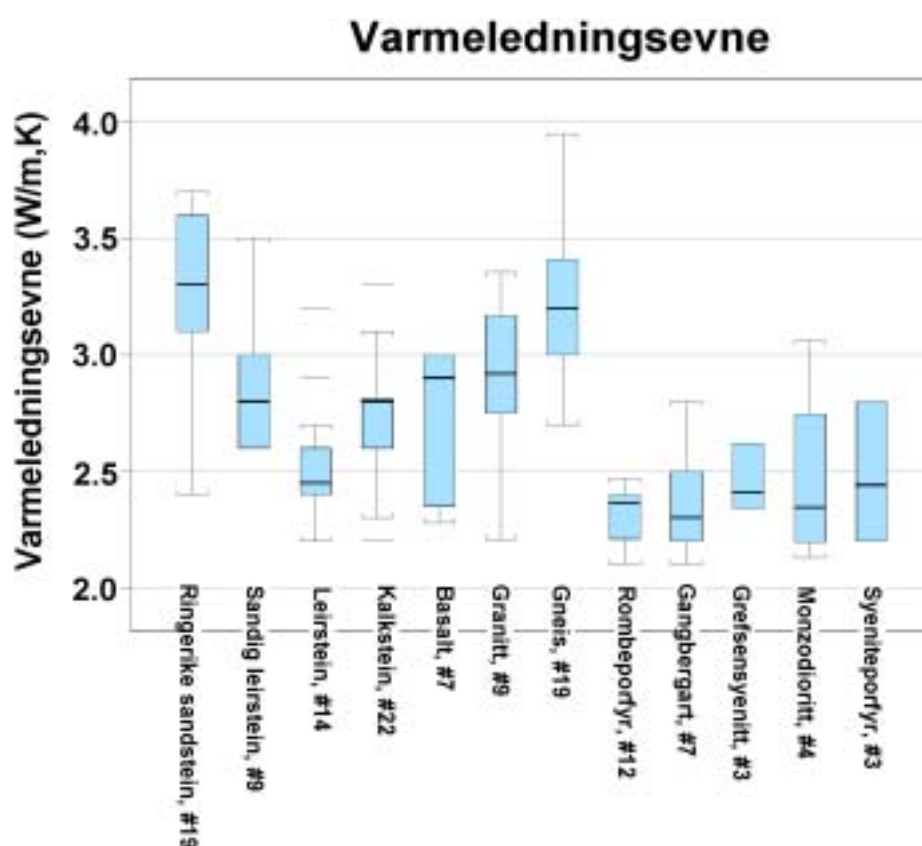


Figure 2–31: Resultater av varmeledningsevne målinger av bergartsprøver hovedsakelig fra Asker og Bærum kommune presentert som boksplott (modifisert etter Midttømme et al., 2004).

3 Undersøkelsesområder

Undersøkelsesområdene innen prosjektet var lokalisert til Lade i Trondheim, og Bryn og EAB i Bærum. Forhåndsuttesting av utstyr og metodikk for seksjonsvis hydraulisk trykking i krystallinsk berggrunn foregikk på NGUs eiendom ved Lade i Trondheim, mens de to pilotanleggene ble lokalisert til Bryn og EAB henholdsvis 15 og 13 kilometer vest for Oslo (figur 3–1). Hensikten med pilotanleggene var å demonstrere den spesielle formen for grunnvarmeanlegg der sirkulerende grunnvann henter energi fra store og kunstig lagde sprekkeplan i krystallinsk berggrunn. Pilotanleggene ble lokalisert i Bærum kommune i tråd med ønskene fra Energiselskapet Asker og Bærum, en av de største økonomiske bidragsyterne i prosjektet. Den nøyaktige lokaliseringen av anleggene ble gjort i samråd med Eiendomsavdelingen i Bærum kommune, som vil overta anleggene og alle dets installasjoner vederlagsfritt når forskningsaktivitetene er avsluttet.



Figure 3–1: Lokalisering av undersøkelsesområdene innen prosjektet, Lade, Bryn og EAB.

3.1 Lade - undersøkelser, geologi og borehullsfakta

I en tidlig fase av prosjektet var det viktig å teste nyutviklet utstyr for hydraulisk trykking (dobbeltmansjett, avsnitt 2.2.1), og finne gode arbeidsmetoder. Dette arbeidet foregikk i to testborehull i fjell utenfor Norges geologiske undersøkelses (NGU) hovedkontor ved Lade i Trondheim (figur 3–1). Det ene borehullet, borehull 1 (skrått) ble boret i 1991, mens borehull 2 (vertikalt) ble boret i 2000. Her er det blitt utført:

- Testpumping før og etter hydraulisk trykking.

- Vannanalyser.
- Logging med demonstrasjonsutstyr for optisk televiwer før og etter hydraulisk trykking.
- Logging med optisk televiwer og TCN av borehull 2 før hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Hydraulisk trykking med vann.
- Forsøk med hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Nivellering av overflatepunkter i sammenheng med hydraulisk trykking.

Mot dypet etterfølges grønnsteinslaget ved Lade av Tronhjemitt, noe som forklarer den økende mengden kvarts i de dypere delene av borehullene. En lineær sprekkeseone i nærheten av borehullene har et strøk på 230° og fall 79° (Banks, 1991). Borehull 1 er 80 meter dypt og har et fall på 64° mot sprekkeseonen, mens borehull 2 er boret vertikalt ned til 100 meters dyp. Avstanden mellom borehullene er cirka 20 meter. Et profil av borehull 1 er vist i figur 3–2. Hovedvanninnslaget i borehull 1 er lokalisert ved 39–40 løpemeter, mens grunnvannsnivået varierer mellom 23–24 løpemeter fra borehulllets topp. (Med betegnelsen løpemeter forstås her borehulllets dybde målt i meter langs borehullet med borehulllets topp som referansenivå.) To mindre vannførende sprekkeseoner opptrer ved 33,5 og 60–61 løpemeter. Bergspenningsmålinger utført i forbindelse med bygging av et undergrunnsrenseanlegg i nærheten, viste at minste hovedspenning varierer fra 3,2–3,3 MPa (muntlig informasjon fra Ægir Jóhannsson, SINTEF).

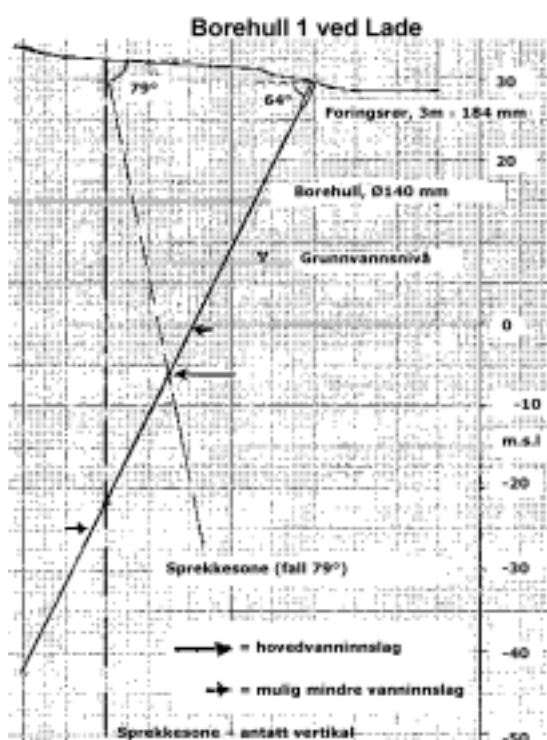


Figure 3–2: Profil av borehull 1 ved Lade (Banks, 1991).

3.2 Bryn - undersøkelser, geologi og borehullsfakta

Bryn skole i Bærum kommune ble valgt til å være lokalitet for det første pilotanlegget i dette prosjektet (figur 3–1). Utførte undersøkelser ved Bryn skole som kan oppsummeres slik:

- Strukturgeologiske forundersøkelser.
- XRF, XRD og tynnslipsanalyser av borekaks.
- Testpumping og vannprøvetaking av borehullene før og etter hydraulisk trykking med bare vann, og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Bergspenningsmålinger.
- Geofysisk logging med optisk televiewer og TCN-logg før og etter hydraulisk trykking med bare vann, samt etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- To omganger med hydraulisk trykking. Først hydraulisk trykking med bare vann, deretter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Nivellering knyttet til alle former for hydraulisk trykking.
- Termisk responstest.
- Testkjøring av grunnvarmeanlegget.
- Modellering av energipotensialet.

De strukturgeologiske observasjoner er basert på data fra Larsen (2001).

Berggrunnen ved Bryn skole består av en lavmetamorf sandstein fra ringerikegruppen som opprinnelig stammer fra den geologiske perioden sen-Silur (figur 3–4). Ringerikesandstein er en generisk betegnelse på flere lokaliteter med sandsteinslignende bergarter på Østlandet fra denne geologiske perioden. Mer nøyaktig er ringerikesandsteinen ved Bryn skole en del av Kolsåsformasjonen (figur 3–5). Ved Bryn kan ringerikssandsteinen karakteriseres som en massiv og kvartsrik sandstein, tett og godt komprimert med relativt lav matriks porøsitet. Bergarten er komponert av benker med varierende tykkelse av 20-50 centimeter, og benkene er atskilt med tynne lag, 1-2 centimeter tykke, med skifer. Tykkelsen av Kolsåsformasjonen, som har en antiklinal form, er beregnet til å være omtrent 350 meter ved Bryn skole. Sandsteinsbenkene har lav oppsprekningstetthet. De få sprekkene som er tilstedeværende er alle veldig glatte, plane, tette og sannsynligvis fylt med veldig tynne lag med kvarts. Sprekkene karakteriseres til å ha strekkopphav. Strøk og fall av lagdelingen er 6/13, eller strøk 6° fra nord, og fall 13° mot øst. Fire sprekkeretninger er observert i området, og strøk og fall forholdene er som følger: (1) 175/73, (2) 184/35, (3) 100/73 and (4) 303/87. I tillegg til den lavmetamorfe sandsteinen, er det muligheter for å treffe eruptive ganger i borehullene.

Etter strukturgeologiske undersøkelser ble tre av borehullene ved Bryn skole i Bærum plassert parallelt med strøkretningen for lagdelingen og sprekkeretning 184/35, mens de to siste ble plassert normalt på, slik som vist i figur 3–3. Avstanden fra senterborehullet til satellittborehullene er 13 meter, mens avstanden mellom satellittborehullene er cirka 17 meter. Boringene av de fem borehullene, som alle er 5½" (140 mm) i diameter og 100 meter dype, ble utført i november 2000.

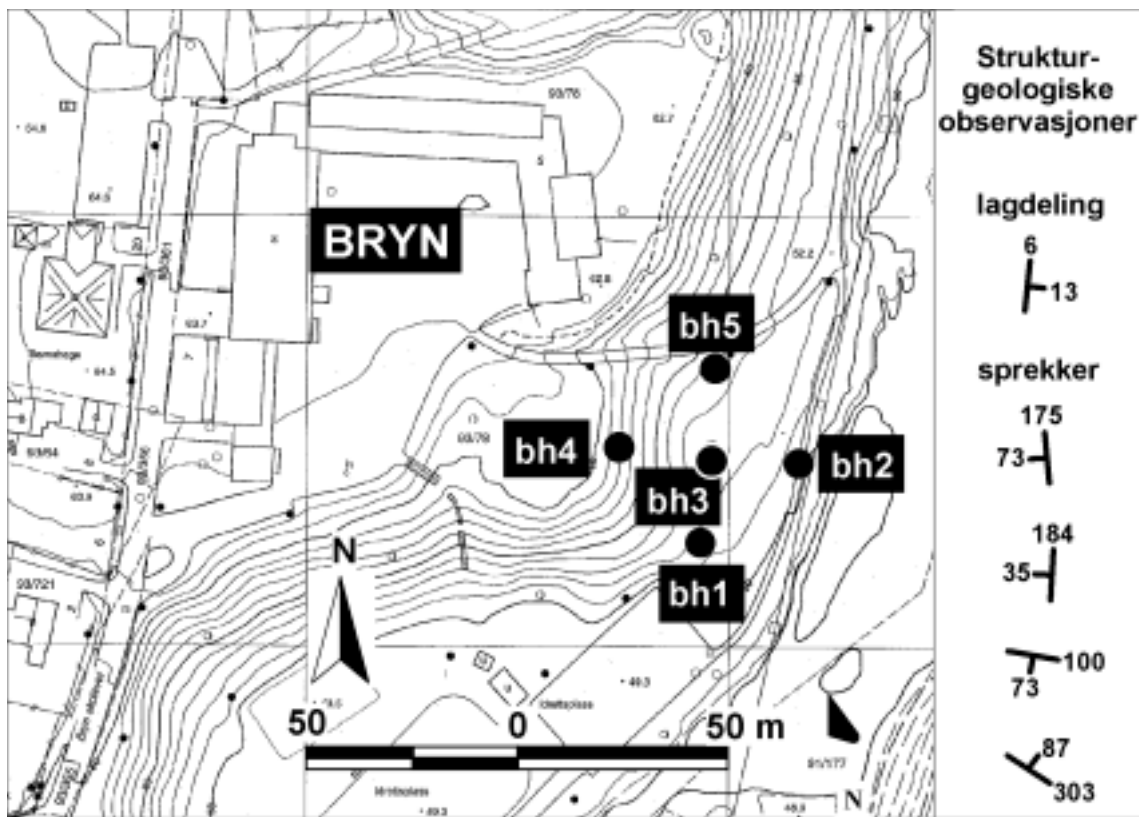


Figure 3–3: Pilotanlegget ved Bryn barneskole i Bærum kommune.

Plassering av Bryn- og EAB-borehullene i en stratigrafisk lagrekke

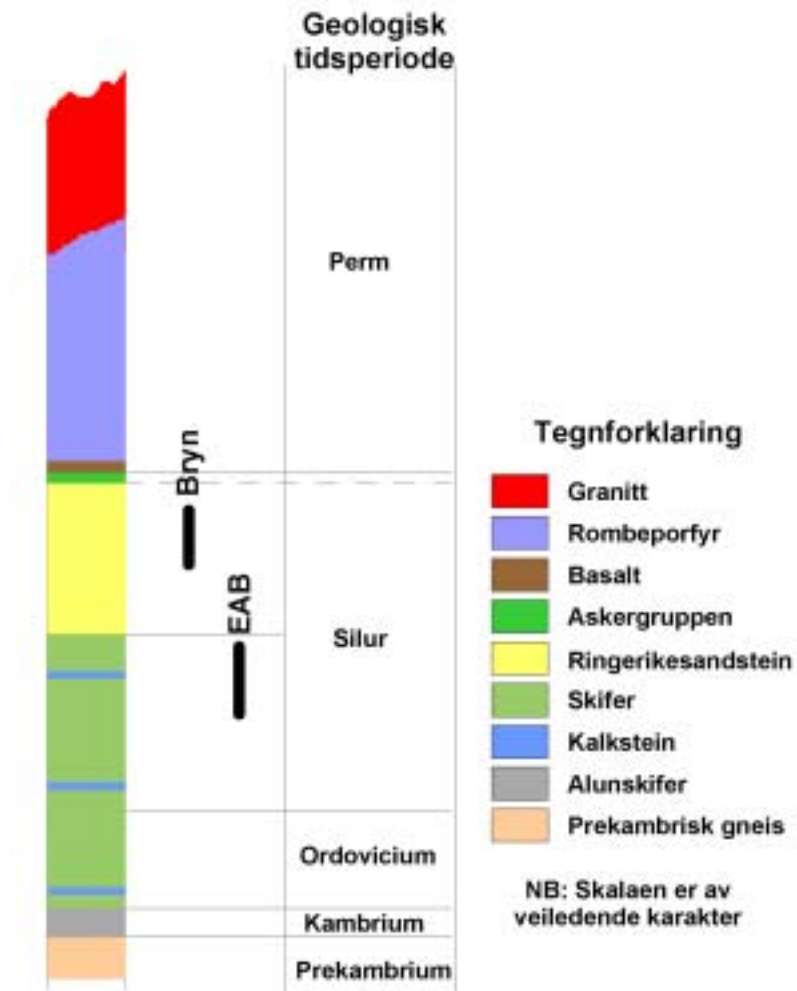


Figure 3–4: Stratigrafisk plassering av borehullene ved Bryn og EAB (basert på Midttømme et al., 2004). Tykkelsen av ringerikesandsteinen er antatt å være 350 ved Bryn (Larsen, 2001).

Forenklet geologisk kart for Asker og Bærum

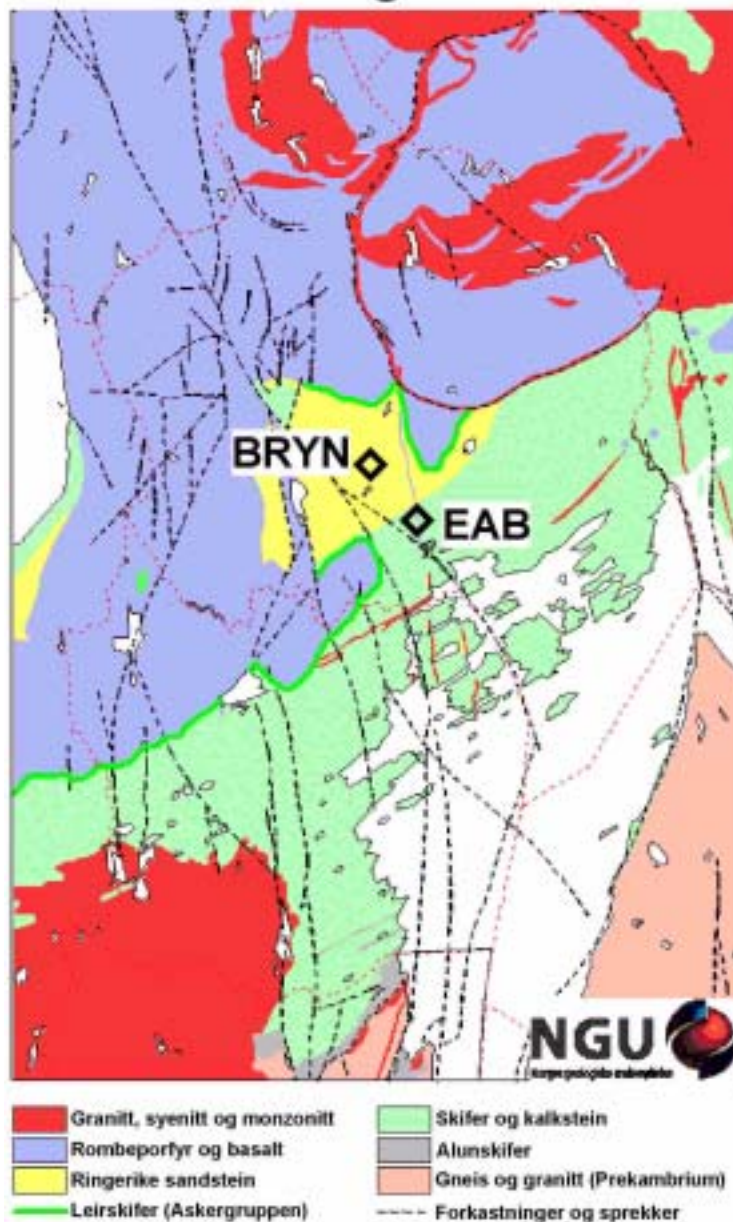


Figure 3-5: Geologisk lokalisering av pilotanleggene ved Bryn og EAB (basert på Midttømme et al., 2004).

3.3 EAB - undersøkelser, geologi og borehullsfakta

Eiendommen ved Brynsveien 88A, som tidligere tilhørte Energiselskapet Asker og Bærum og refereres som EAB, ble valgt ut til å være lokalitet for pilotanlegg nummer to. Uavhengig av prosjektet, ble det i 1999 gjort en termisk responstest av et 150 meters borehull (borehull 1) på eiendommen.

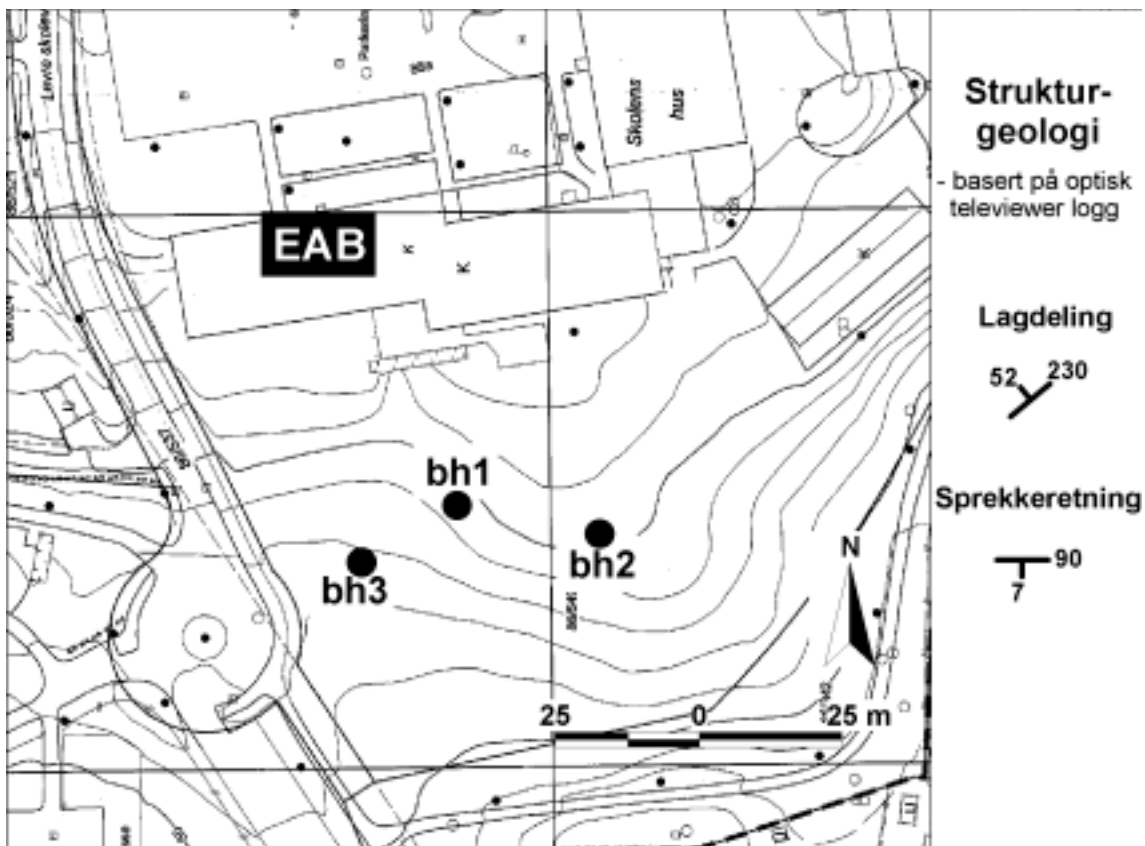


Figure 3–6: Plassering og navnsetting av borehullene ved pilotanlegget ved EAB.

Utførte undersøkelser ved EAB:

- Testpumping og vannprøvetaking av borehullene før hydraulisk trykking med injeksjon av sand
- Strømningsmålinger kombinert med pumping før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Geofysisk logging med optisk televiewer og TCN-logg før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Nivellering av terrengnivået samtidig med hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Termisk responstest.
- Testkjøring av grunnvarmeanlegget.
- Modellering av energipotensialet til grunnvarmeanlegget.

De geologiske forholdene ved EAB er i hovedsak basert på tolkningen av bildene fra optisk televiewer av borehull 1 og gammalogg for samme borehull (Midttømme et al., 2004). Berggrunnen ved EAB består i hovedsak av knollekalk, en skifer med klumper av kalkstein (figur 3–7). Knollekalken tilhører nedre del av Steinsfjordformasjonen og øvre del av Malmøyformasjonen. Knollekalken avbrytes av en sone med ren kalkstein ved 29-37 meters

dyp. Sonen med ren kalkstein tilhører Malmøykalken og er en del av Malmøyformasjonen. Ved 45 meter går berggrunnen fra knollekalk til en svært mørk ensformig skifer uten nevneverdig lagdeling. Denne skiferen svarer til Skinnerbuktfformasjonen, og kan inneholde graptolitter. Tre kalkbenker, med tykkelse på noen desimeter, opptrer ved 59, 70 og 75 meters dyp.

Pilotanlegg nummer to ved EAB består av tre borehull. To nye borehull (borehull 2 og 3) ble boret på hver sin side av borehull 1 (figur 3–6). I en driftsfase av grunnvarmeanlegget vil satellittene, borehull 2 og 3, brukes til pumping av grunnvann, mens borehull 1 i senter brukes til infiltrasjon. Borehull 1-3 er henholdsvis 150, 91 og 88 meter dype. Avstanden fra borehull 1 til borehull 3 er 16 meter, mens avstanden til borehull 2 er 20 meter. Avstanden til borehull 3 skulle også vært 20 meter, men måtte flyttes for på et senere tidspunkt å unngå å måtte krysse en underjordisk høyspentkabel med grøft. Videre, for å være helt sikker på å unngå skader på grunnmur som følge av hydraulisk trykking, valgte man å plassere borehull 2 og 3 lenger unna kontorbygget. Antatt grunnvannsbevegelse er fra nordvest til sørøst.

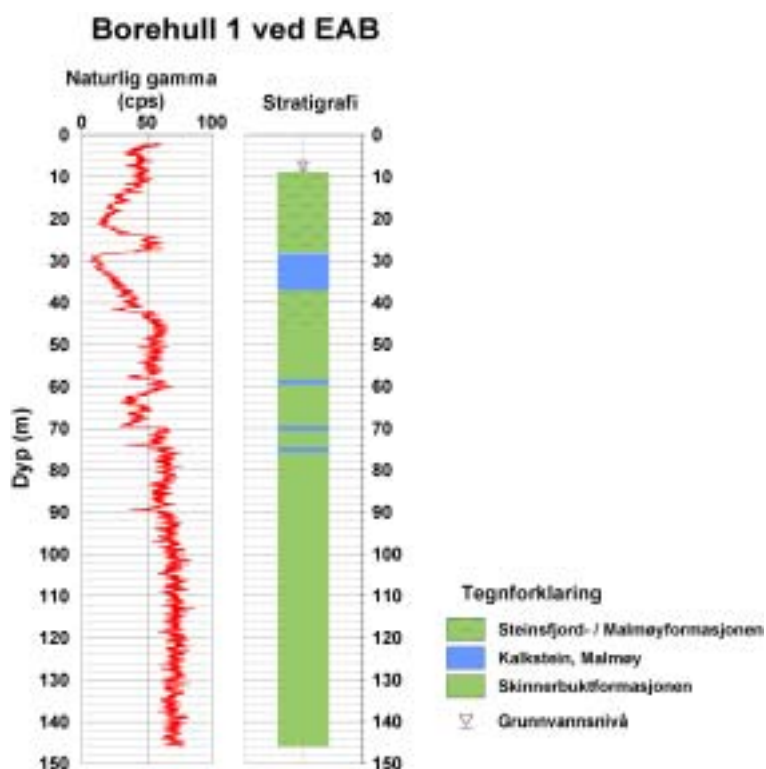


Figure 3–7: Stratigrafisk lagdeling for borehull 1 ved EAB, basert på Midttømme et al. (2004).

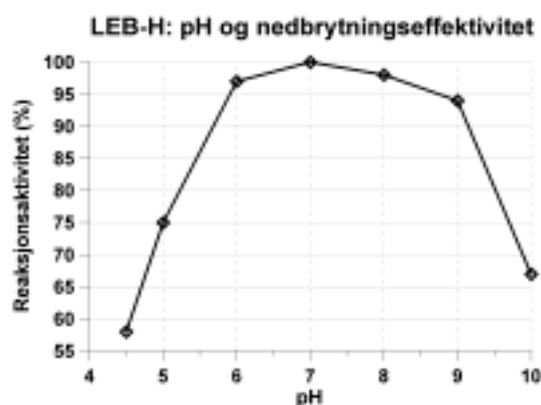
4 Utførte undersøkelser

4.1 Laboratorieforsøk - Blanding av fortykningsmiddel og vann

For å undersøke hydratiseringsraten til fortykningsmiddelet guar gum har det blitt gjort laboratorieforsøk med blanding av forskjellige konsentrasjoner av guar gum og vann. Effekten av tilsats av nedbrytningsenzymet LEB-H ble undersøkt samtidig. Testen ble utført ved Institutt for geologi og bergteknikkens laboratorier ved NTNU. En nøyaktig karakteristikk av guar gums opptreden i vann vil være nødvendig for å få til effektive blandeprosesser med vann, guar gum, sand og nedbrytningsenzym i felt. Det ble utført fire forsøk der blandingenes viskositet ble målt over tid. Alle forsøkene inneholder 1 liter vann, og kan oppsummeres slik:

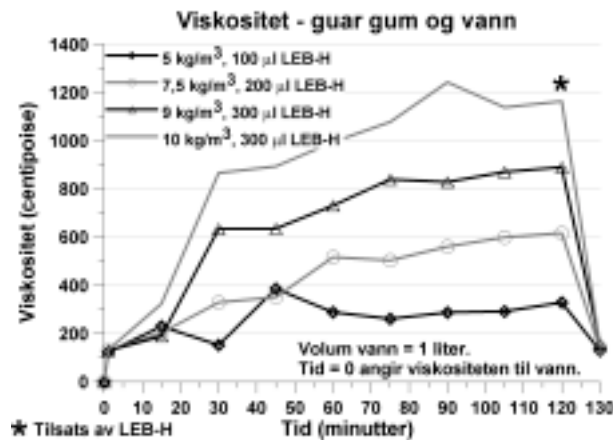
- 5 kg/m³ guar gum, tilsats av 100 ml LEB-H etter 120 minutter,
- 7,5 kg/m³ guar gum, tilsats av 200 ml LEB-H etter 120 minutter,
- 9 kg/m³ guar gum, tilsats av 300 ml LEB-H etter 120 minutter, og
- 10 kg/m³ guar gum, tilsats av 100 ml LEB-H etter 120 minutter.

I følge produsenten er LEB-H meget godt egnet for nedbrytning av væsker med pH-verdier mellom 6 og 9 (figur 4–1).



Figur 4–1: Nedbrytningsenzymet LEB-Hs pH-avhengighet for effektiv nedbrytning (Rantec Corporation, 2000).

Viskositeten til forskjellige blandinger med fortykningsmidlet guar gum og vann er vist i figur 4–2. En dobling av mengden guar gum-pulver gir om lag en firedobling i viskositet. Tilsats av nedbrytningsenzymet LEB-H etter 120 minutter gir en umiddelbar reduksjon av viskositeten for alle forsøkene. Samtidig gir en økning i mengden tilsatt LEB-H en synlig effekt i form av raskere reduksjon av viskositeten. Den momentane nedbrytningen eller viskositetsreduksjonen, tyder på den tilsatte mengden LEB-H er overkant av det som er nødvendig for å få en tilfredsstillende nedbrytning av blandingen med guar gum og vann.



Figur 4-2: Resultater fra laboratorieforsøk med fortykningsmiddelet guar gum, nedbrytningsenzymet LEB-H og vann.

4.2 Lade

4.2.1 Testpumping, vannprøvetaking og geofysisk logging

For å dokumentere effekten av hydraulisk trykking ble det utført testpumping før og etter hydraulisk trykking i borehull 1 ved Lade. Før hydraulisk trykking i borehull 1 ble pumpe A plassert ved 73 løpemeter fra borehullets topp, mens pumpe B ble plassert ved 53 løpemeter etter hydraulisk trykking. Strømningsraten og vannstandsendringer i pumpebrønnen ble målt. Det ble utført testpumping av borehull 2 før hydraulisk trykking med injeksjon av sand der pumpe B ble plassert ved 80 meters dyp. Strømningsraten og vannstandsendringer i pumpebrønnen ble målt. Prøver for standard vannanalyse ved NGU-Lab ble tatt ved pumping av borehull 1 før og etter hydraulisk trykking.

Utstyr for borehullsinspeksjon med optisk televiewer og TCN-logg ble brukt i borehull 2 ved Lade. Borehull 1 ble inspisert med en BIPS fra Raax Co Ltd (Japan), som er en annen type optisk televiewer enn den som ble benyttet i borehull 2.

4.2.2 Hydraulisk trykking

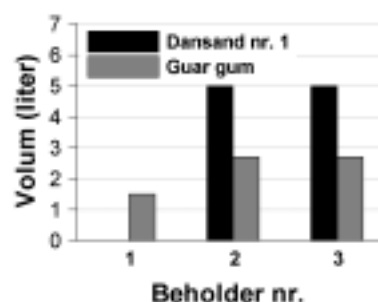
Nyutviklet dobbeltmansjett, FrakPak - AIP 410-550, ble testet med hydraulisk trykking i borehull 1 ved NGU. Avstanden mellom mansjettene var cirka fire meter. På dette tidspunktet var mansjettene koblet slik at øvre og nedre mansjett ble trykksatt samtidig. Nedfiring av utstyret til ønsket dyp i borehullet ble gjort ved hjelp av en Hafo 2000 borerigg (figur 4-3). Stålrør med Ø5/4" ble montert fra dobbeltmansjettens topp og opp til toppen av borehullet. Her ble det festet en T-kobling med ventiler hvorpå vannslangen til trykkebilen er montert. Trykkebilens pumpe rate var 330 liter/time. Hydraulisk trykking ble utført for hver åttende meter, det vil si i seksjonene 75-71, 67-63, 59-55, 51-47, 43-39 og 35-31 løpemeter under borehullets topp.

4.2.3 Hydraulisk trykking med injeksjon av sand

Hydraulisk trykking med injeksjon av sand ble forsøkt i borehull 2 ved Lade. Utstyret ble rigget opp for stimulering av seksjonen 84,6-86,6 meter under topp rør. Injeksjon av tre beholdere á 180 liter av en blanding av fortykningsmiddelet guar gum, nedbrytningsenzym LEB-H, kvartssand og vann var planlagt injisert i dette nivået etter hydraulisk trykking med bare vann. Blandingsforhold er gitt av figur 4-4. Ytterligere spesifisering av sandtypene er gitt i avsnitt 4.3.5. Utstyret for hydraulisk trykking var identisk med utstyret som ble benyttet ved hydraulisk trykking med bare vann av borehull 1. I tillegg var blander, beholder og injeksjonspumpe, samt aggregat innleid (figur 4-5 og 4-6). Maksimalt arbeidstrykk for injeksjonspumpen var 170 bar, og pumperaten ble regulert i forhold arbeidstrykk.



Figur 4-3: Nedfiring av dobbeltmansjett i borehull 1 ved Lade ved bruk av Hafo borerigg



Figur 4-4: Blandingsforholdene for injeksjonsmassen i beholder 1, 2 og 3 ved Lade.



Figur 4-5: Aggregat og container med blander, beholder og injeksjonspumpe.



Figur 4-6: Blander, beholder og injeksjonspumpe

4.2.4 Måling av terrengendringer

For å oppdage endringer i terrengoverflaten på grunn av hydraulisk trykking i borehull 1, ble det nivellert med vanlig nivellerkikkert og totalstasjon i nærområdet til borehull 1. Måleresultatene vil gi et svar på hvilke av de to metodene som egner seg best til formålet. Totalt ble det gjort fem målinger med hver metode.

4.3 Bryn

4.3.1 Boring og XRF-, XRD- og tynnslipsanalyser av borekaks

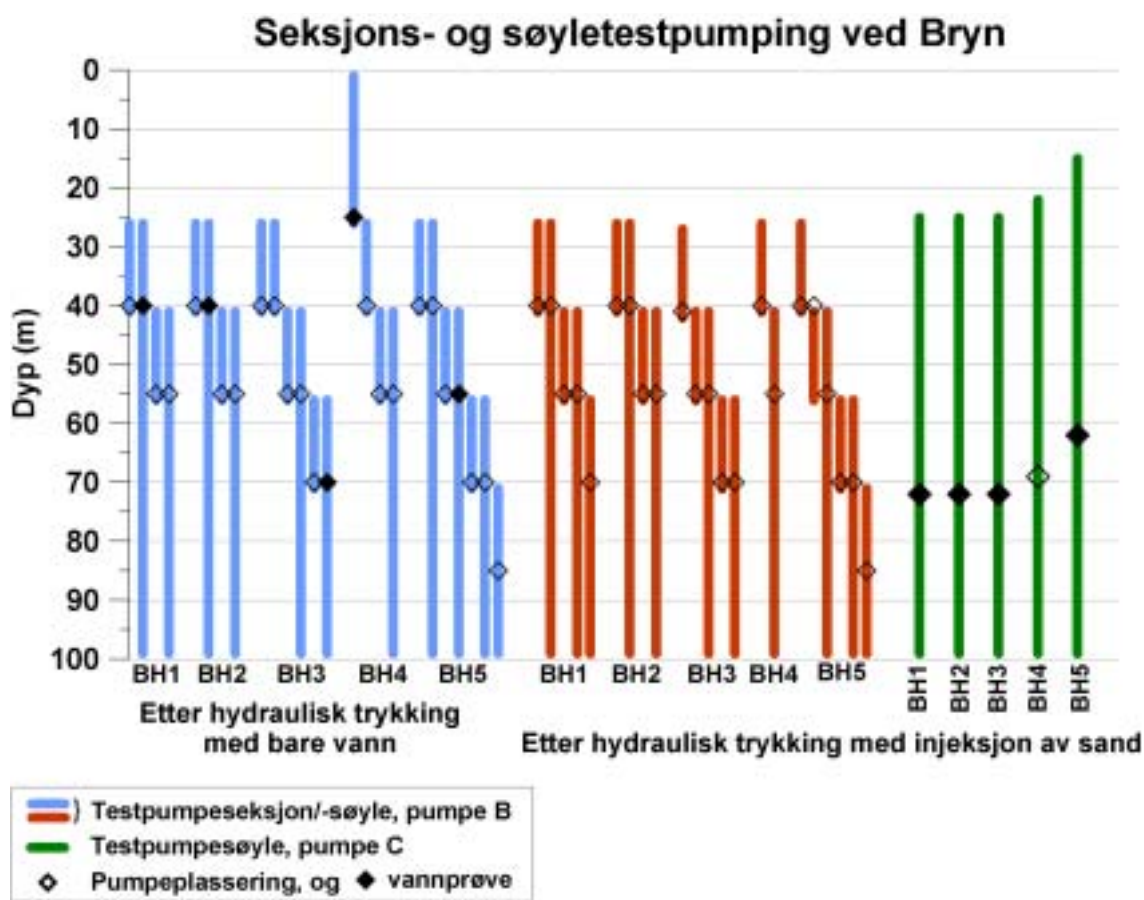
Boringen av de fem borehullene ved Bryn ble utført i november 2000 av Brødre Myhre AS og i samarbeid med Norsk brønnboreforening (avsnitt 3.2). I henhold til vanlig prosedyre ble det etter avsluttet boring utført en blåsetest for å gi et førsteestimat av borehullenes korttidsproduksjonskapasitet. Det ble tatt borekaksprøver for hver niende meter i tre av borehullene, og borekaksprøver fra borehull 3 ved 18, 63 og 99 meters dyp ble analysert med XRD, XRF og tynnslip. I tillegg ble det laget et tynnslip av en bergartsprøve fra nærområdet. Resultatene fra disse analysene vil gi et bilde av borelokalitetens mineralogiske sammensetning både mot dypet og på overflaten.

4.3.2 Testpumping, vannprøvetaking og geofysisk logging

Vanlig testpumping med pumpe B ble forsøkt i borehull 1 ved Bryn før hydraulisk trykking. Liten senkning av grunnvannsnivået viste at borehullets kapasitet var langt høyere enn pumpens. I stedet ble det utført søylepumping for søylen 15-100 meter i borehull 1, 2, 3, og 5, mens søyle 20-100 meter ble testpumpet i borehull 4. Det ble tatt vannprøver for standard vannanalyse ved NGU-Lab fra alle borehullene. Etter hydraulisk trykking med bare vann og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand, ble det utført seksjonspumping og søylepumping, slik som beskrevet i avsnitt 2.4.2, i borehullene ved Bryn der pumpe B ble benyttet. I tillegg ble pumpe C benyttet for ytterligere søylepumping etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Vanninntaket for pumpe C var ved 72, 69 og 62 meter under topp rør for henholdsvis borehull 1-3, 4 og 5. Figur 4–7 viser omfanget, pumpetype og karakteren av testpumpingen, samt fra hvilken seksjon/søyle hvor det er tatt vannprøve for standard analyse ved NGU-Lab.

Det er gjennomført omfattende geofysiske undersøkelser i borehullene ved Bryn før og etter hydraulisk trykking med bare vann, og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Borehullsinspeksjonene, som ble utført før testpumpingen, kan oppsummeres på følgende måte:

- Videoopptak av borehullsveggene med optisk televiewer.
- Måling av vannets temperatur og elektriske ledningsevne, og total gammastråling fra borehullsveggen.



Figur 4-7: Omfanget av seksjons- og søylepumping utført etter hydraulisk trykking med bare vann og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand i de fem borehullene ved Bryn.

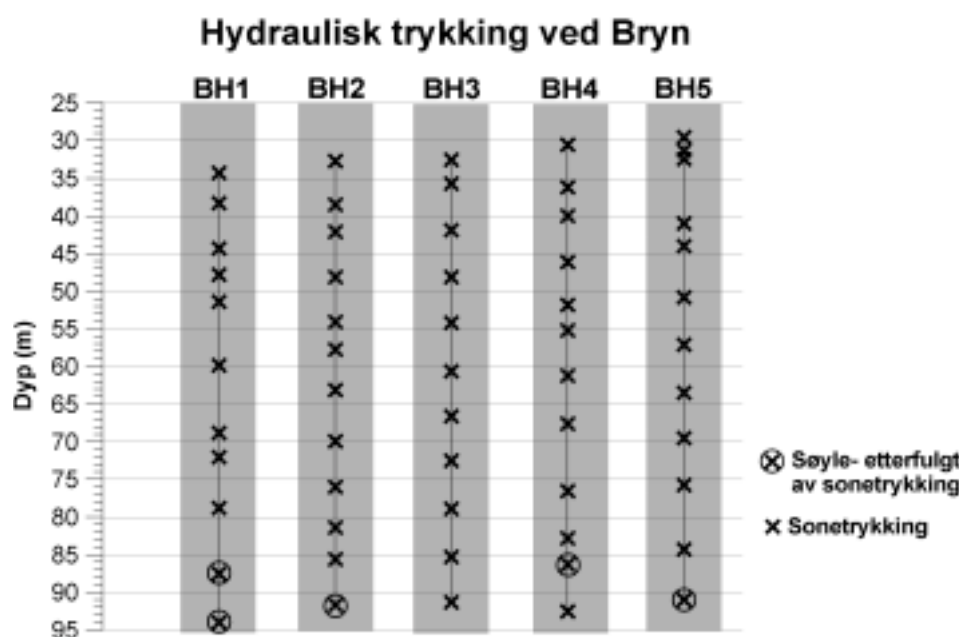
4.3.3 Bergspenningsmålinger

SINTEF Bygg og miljø, avdeling for Berg og geoteknikk har i samarbeid med G. Meyer Borebrønnservice AS utført bergspenningsmålinger ved bruk av hydrauliske trykking (avsnitt 2.1.4) i fem seksjoner i borehull 4 ved Bryn. Hensikten med målingene var å orientere og bestemme største og minste hovedspenning. Dobbeltpakningen FrakPak - AIP 441-550 ble brukt i målingene, og avstanden mellom pakningene var 1,3 meter. Testseksjonene ble valgt ut etter å ha studert resultatene fra optisk televiewer og ble lokalisert til henholdsvis 97, 93, 88, 75 og 65 meters dyp. I etterkant av målingene ble borehullsveggen filmet med optisk televiewer for å finne spenningsretningene.

4.3.4 Hydraulisk trykking med vann

Hydraulisk trykking for å øke sprekkeflatene i berget mellom borehullene, ble utført i 11-13 seksjoner i hvert borehull i nivået mellom cirka 30 og 95 meter under topp rør. Totalt er det gjort 63 stimuleringer i de fem borehullene ved Bryn. Søyletrykking i borehullets nederste del ble gjort helt til første sprekke var initiert. Etter dette gikk man over til vanlig seksjonstrykking der både øvre og nedre pakning er trykksatt under stimuleringen. Figur 4-8 gir en oversikt over hvilke nivå i borehullene som er stimulert med henholdsvis søyle- og seksjonstrykking.

FrakPak - AIP 410-550 (avsnitt 2.2.1) med separat trykksetting av pakningene ble benyttet for hydraulisk trykking med vann ved Bryn. Avstanden mellom gummipakningene var 3 meter. To vannpumper med en kapasitet på cirka 300 liter/minutt hver ble benyttet, og maksimal ytelse var anslagsvis 500 liter/minutt. Måling av vann- og pakningstrykk ble utført for alle borehullene unntatt borehull 3. Hydraulisk trykking i borehull 3 ble gjort som en test før resten av de andre borehullene, og utstyr for logging av trykk ble ikke benyttet. I stedet ble trykknivåene fra analogt manometer notert manuelt. Trykkløpere for måling av endringer i grunnvannsstanden (avsnitt 2.4.1) var plassert i de omkringliggende borehullene ved hydraulisk trykking. På grunn av periodevis for liten tilgang til trykkløpere ble det ikke målt endringer i grunnvannsnivået i alle omkringliggende borehull samtidig. Tabell 4–1 gir en oversikt over omfanget av måling av grunnvannsnivåendringer.



Figur 4–8: Oversikt over hvilke nivåer i borehullene ved Bryn som ble stimulert med hydraulisk trykking. Hver seksjon er 3 meter, og midtpunktet i hver seksjon er markert med et symbol.

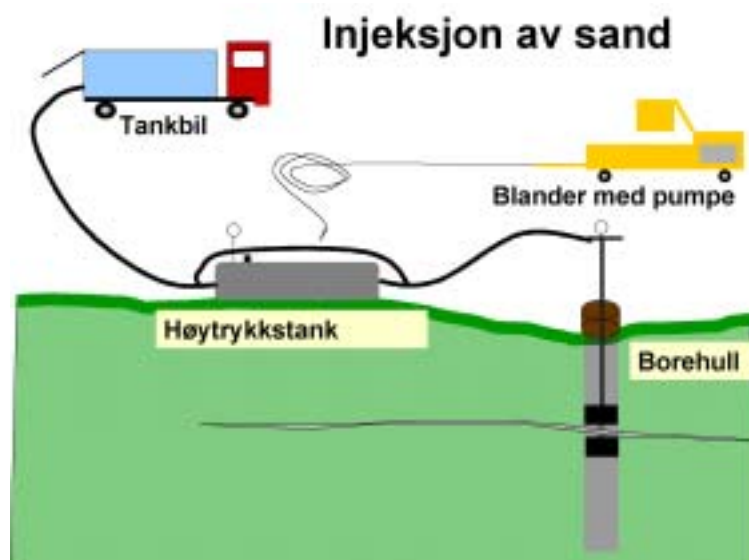
Tabell 4–1: Måling av grunnvannsnivå (markert med x) i omkringliggende borehull ved hydraulisk trykking med bare vann (HT) ved Bryn.

	BH1	BH2	BH3	BH4	BH5
BH1	HT	x	x	x	
BH2	x	HT	x	x	
BH3	x	x	HT	x	
BH4	x		x	HT	x
BH5	x		x	x	HT

4.3.5 Hydraulisk trykking med injeksjon av sand

For å øke borehullenes kapasitet ytterligere ble det gjort hydraulisk trykking med injeksjon av kvartssand i enkelte utvalgte seksjoner. Foruten utstyr identisk med det som ble benyttet ved hydraulisk trykking med bare vann ved Bryn, bestod nødvendig tillegg utstyr av en høytrykkstank og en blandemaskin for blanding av injeksjonsmasse bestående av fortykningsmiddel, vann og sand (figur 4–9). Blandemaskinen var utstyrt med en pumpeenhet som kunne transportere blandingen over i høytrykkstanken. Utstyrsoppsettet var som beskrevet i avsnitt 2.1.7. Totalt ble det injisert sand i 19 seksjoner fordelt på de fem borehullene ved Bryn (figur 4–11). Disse seksjonene var tre meter lange, og ble valgt ut med bakgrunn i resultatene fra hydraulisk trykking med bare vann og i henhold til indikert maksimalt mottrykk og tilhørende maksimal strømningsrate (avsnitt 2.1.7). Avhengig av trykkforløpet ved injeksjon av sand, ble en eller to tanker med sandblanding injisert i hver seksjon. Vanntrykk og pakningstrykk ble målt og logget for alle borehullene unntatt borehull 4 hvor datalogger ikke fungerte.

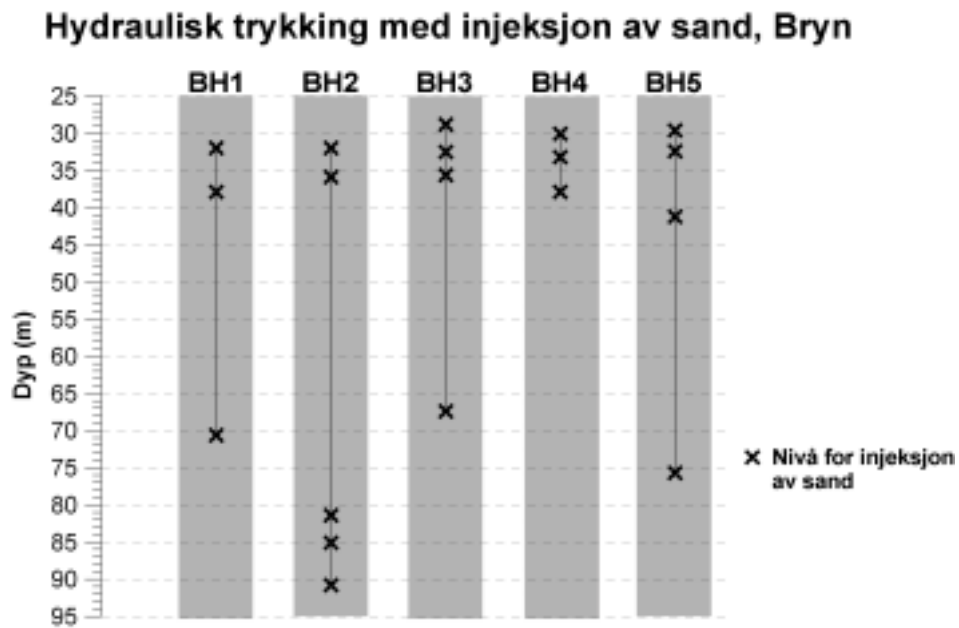
To forskjellige kornstørrelser av naturlig kvartssand ble benyttet. De to fraksjonene kalles Dansand #1 og #2, og har en kornstørrelse på henholdsvis 0,40-0,90 mm og 0,63-1,40 mm. Sanden som markedsføres som filtersand, har gått gjennom en produksjonsprosess som består av skrubbing, vannsortering, tørking og sikting. På Mohs hardhetsskala har kvartssanden en verdi på 7, mens SiO_2 -innholdet er mellom 97-99%. Sandens egenvekt i tørr tilstand er 1,4-1,6 g/cm^3 . Blandingen av de to sandfraksjonene og mengden sand som ble injisert i sprekkeflaten var avhengig av sprekkeflatens mottrykk. Sprekker med lavt mottrykk fikk en større andel grov sand enn sprekker med høyere mottrykk. Den nøyaktige blandingen av sand og fortykningsmiddel for hver borehullsseksjon fremgår av figur 4–12. For hver blanding ble det brukt 50-60 liter vann og cirka 10 milliliter nedbrytningsenzym (LEB-H).



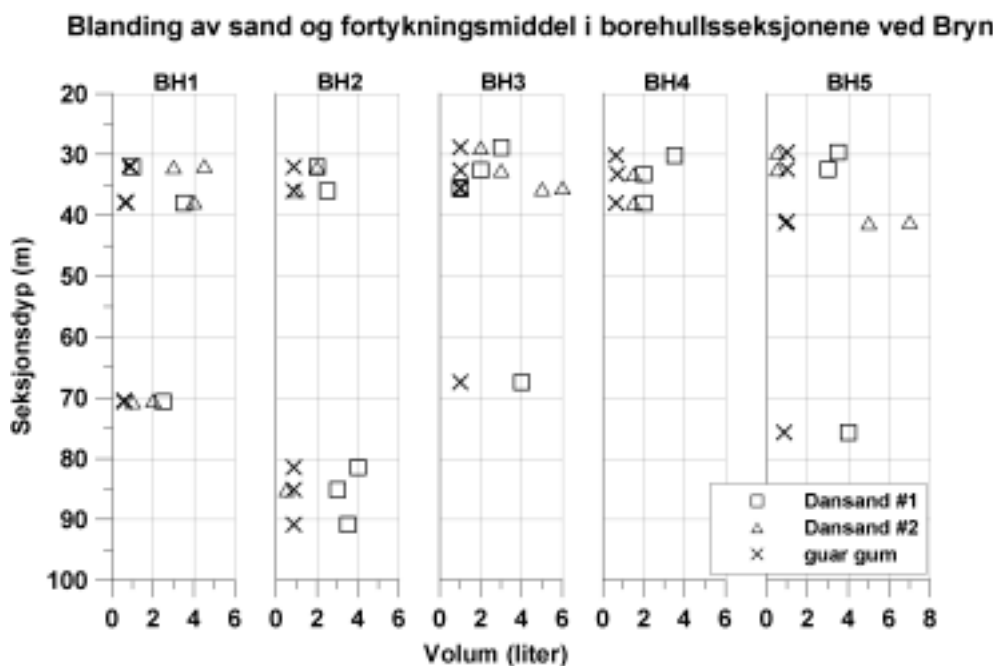
Figur 4–9: Utstyrsoppstilling for hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved Bryn.



Figur 4–10: Pusspumpe med blander- og pumpeenhet.



Figur 4–11: Nivåer for injeksjon av sandkorn i sprekker ved Bryn. Avmerket punkt indikerer seksjonens midtpunkt, og hver seksjon er 3 meter. Hver seksjon ble valgt ut på bakgrunn av resultatene fra hydraulisk trykking med bare vann.



Figur 4–12: Innhold av de to sandfraksjonene, Dansand nr. 1 og 2, og fortykningsmiddelet guar gum injisert i de enkelte seksjonene i borehull 1, 2, 3, 4 og 5 ved Bryn.

4.3.6 Nivellering

Nivellering ble gjennomført under begge operasjonene med hydraulisk trykking ved Bryn. Nivelleringen ble gjort mot fire punkter innen brønnfeltet. De fire punktene var enten trær eller lyktestolpe, og en tommestokk ble festet ved hvert punkt for avlesning. Utenfor brønnfeltet og antatt influensområde for hydraulisk trykking, ble det satt opp et referansepunkt. Det ble målt en nullpunktreferanse før stimuleringen med hydraulisk trykking startet, og øvrige målinger ble gjennomført regelmessig i forhold til hydraulisk trykking i hvert borehull. En endelig nivellering ble foretatt etter at arbeidet med hydraulisk trykking var avsluttet. Figur 4–13 gir en oversikt over nivelleringspunktene innen brønnfeltet og fastpunktet.



Figur 4–13: En oversikt over nivelleringspunktene innen brønnfeltet og referansepunktet. Referansepunktet, vist på bildet til høyre, er vendt 180° i forhold til bildet til venstre.

4.3.7 Termisk responstest

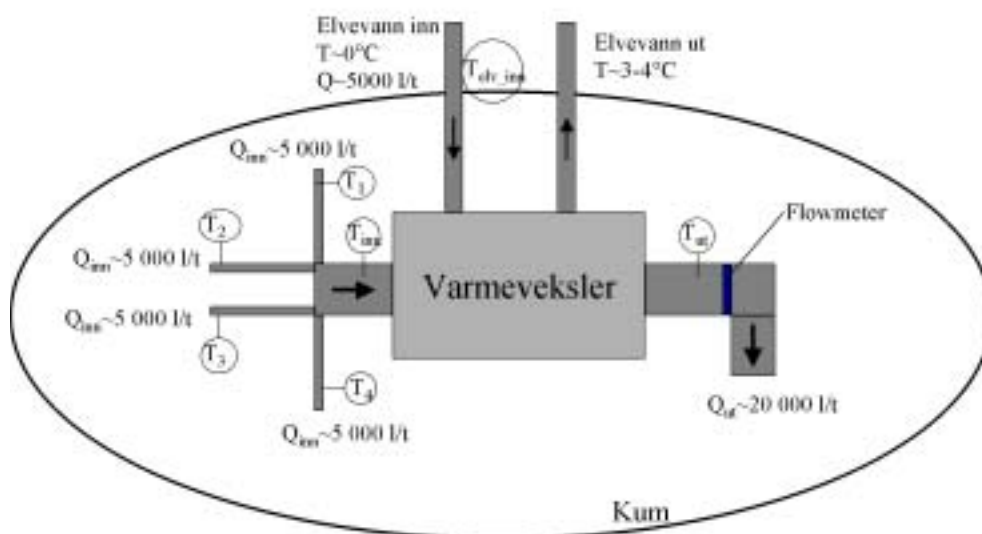
Termisk responstest er gjort i borehull 3 ved Bryn. Etter å ha målt den effektive in-situ verdien for bergets varmeledningsevne rundt borehullet, fortsatte målingen med samtidig pumping fra borehull 2 som befinner seg vest for testborehullet. Denne forlengede termiske responstesten vil gi informasjon om hvordan de termiske forholdene i borehull 3 påvirkes av en induisert grunnvannsbevegelse. Pumpe D med en pumperate på cirka 5000 liter/time ble brukt i borehull 2. Verdi for uforstyrret temperatur i borehullet ble funnet fra logg for vannets temperatur (figur 5–41).

4.3.8 Testkjøring av anlegget

Mulig effektuttak fra grunnvarmeanlegget ved Bryn ble testet ved å varmeveksle kaldt ellevann mot oppumpet grunnvann. Testen foregikk i tidsrommet 11.-29. april 2003. Pumpe D ble brukt til å pumpe kaldt vann fra elva Lomma, og denne pumpen har en pumperate på cirka 5000 liter/time (figur 2–23). Ellevannet ble varmevekslet med oppumpet grunnvann fra borehull 1, 2, 4 og 5 ved Bryn. Ingen seksjonering med mansjetter gjorde at pumpene trakk vann fra hele vannsøylen i borehullene, den store sprekkesonen inkludert. Utstrømmende grunnvann ble returnert til brønnfeltet via borehull 3. Ved bruk av spesialdesignet injeksjonsmansjett (avsnitt 2.2.3), plassert ved 15 meter, ble vannet returnert under den store sprekkesonen som ble identifisert under boring og ved borehullsinspeksjon (avsnitt 5.2.1). Førsøket ble gjennomført i perioden fra den 11. til den 29. april i 2003, og hovedmålet var å finne:

- Mulig korttids effektuttak fra grunnvarmeanlegget, og finne ut om elvekjøling av det sirkulerende grunnvannet kan spores som en temperaturreduksjon på det oppumpede vannet.
 - Infiltrasjonskapasiteten til borehull 3, og oppdage eventuell trykkoppbygging over tid.
- Korttids effektuttak fra grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann, kan finnes ved å måle temperaturen og mengden av inn- og utstrømmende grunnvann fra varmeveksleren (figur 4–14 til 4–16). For øvrig ble temperaturen på grunnvannet fra hvert av borehullene, temperaturen på innstrømmende ellevann og temperaturen i loggeren målt. Alle målte data ble lagret i en datalogger med 12 kanaler der en GSM-modul muliggjør fjernovervåking. Trykknivået i det lukkede systemet med sirkulerende grunnvann ble overvåket med et analogt manometer (figur 4–15). Alt utstyr og det fysiske oppsettet av effekttesten ble organisert i en VVS-kum omkring toppen av borehull 3 (figur 4–14 til 4–16).

Uttesting av grunnvarmeanlegg, Bryn – instrumentering



Figur 4–14: Instrumentering av grunnvarmeanlegget ved Bryn. Alle enhetene er samlet i kum rundt borehull 3. Forventede strømningsrater og temperaturer er angitt.



Figur 4–15: Venstre: Strømningsmåler og varmeveksler i VVS-kummen rundt toppen av borehull 3 ved Bryn. Høyre: Samlerør for oppumpet grunnvann fra satellittborehullene. Systemets trykk overvåkes ved hjelp av et analogt manometer, og temperatursensorene er festet med isolasjon og bånd.



Figur 4–16: Venstre: Loggeskap med en datalogger plassert i kummen over borehull 3 ved Bryn. En GSM-modul gjør at anlegget kan fjernovervåkes. Høyre: Kontrollpanelet for grunnvarmeanlegget ved Bryn inneholder motorvern for pumpene og flomvern for kummen.

4.4 EAB

4.4.1 Testpumping, vannprøvetaking, strømningsmålinger og geofysisk logging

Vanlig testpumping med pumpe C ble forsøkt i alle borehullene ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Pumpedyb var henholdsvis 67,3, 66,3 og 71,5 for borehull 1, 2 og 3. Sen og liten senkning av grunnvannsnivået i borehull 1 og 2 viste at borehullenes kapasitet er større enn pumpens, og et reelt tall for borehullenes kapasitet ble ikke oppnådd. Testpumping i borehull 3 var vellykket, og borehullets kapasitet var 5200 liter/time. Det ble tatt vannprøver for standard vannanalyse ved NGU-Lab fra alle borehullene. Borehullenes høye kapasitet gjorde det vanskelig å dokumentere effekten av hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved hjelp av vanlig testpumping (avsnitt 2.4.3). I stedet, og som en del av metodeutviklingen, ble det forsøkt å lokalisere og kvantifisere grunnvannsstrømningen inn i borehullene med strømningsmåling utført med samtidig pumping.

Kontinuerlige strømningsmålinger ble utført i borehullsintervallene 25-145, 25-87 og 25-83 meter for henholdsvis borehull 1, 2 og 3 ved EAB før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Pumpe D var plassert ved 20 meters dyp og pumpet med en rate på 5000 liter/time.

Tilsvarende som for Bryn er det gjennomført omfattende geofysiske undersøkelser i borehullene ved EAB før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Følgende målinger er utført:

- Videoopptak av borehullsveggene med optisk televiewer.
- Måling av vannets temperatur- og elektriske ledningsevne, og total gammastråling fra borehullsveggen.

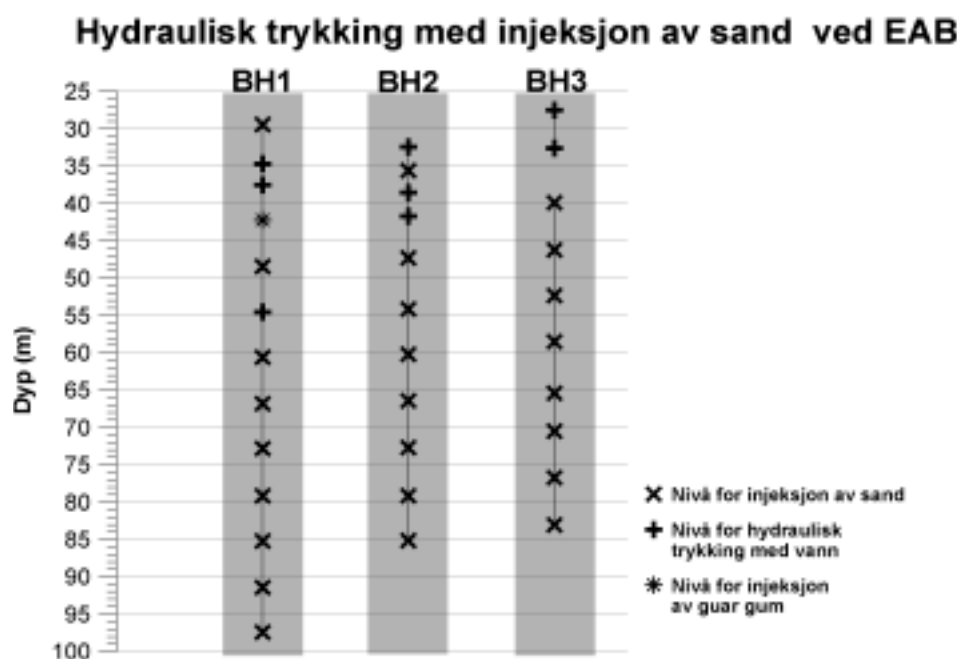
4.4.2 Hydraulisk trykking med injeksjon av sand

Ved EAB ble hydraulisk trykking med injeksjon av sand gjort i én og samme operasjon. Foruten pusspumpa, var utstyret som ble benyttet ved EAB identisk med det som ble benyttet ved Bryn. Forsøket med å bruke lufttrykksblanderen (avsnitt 2.2.4) for å blande fortykningsmiddel og vann var ikke vellykket, og ble i stedet blandet ved hjelp av en industridrill med miksestav. Det ble først blandet et konsentrat av vann og fortykningsmiddel, som etter å ha hydratisert en tid, ble fortynnet til riktig tykkelse (figur 4–17). Den ferdige blandingen med vann, fortykningsmiddel og sand ble fylt på høytrykkstanken. Påfylling av noen få dråper med nedbrytningsenzym på høytrykkstanken ble gjort umiddelbart før trykksetting og injeksjon.

En oversikt over de tilfeldig utvalgte og tre meter lange borehullsseksjonene stimulert med hydraulisk trykking med injeksjon av sand går frem av figur 4–18. Totalt ble det injisert sand i 25 seksjoner fordelt på de tre borehullene ved EAB. I tillegg var det 9 seksjoner hvor det kun ble utført hydraulisk trykking med vann. Videre ble en blanding av vann og fortykningsmiddel forsøkt injisert i en seksjon. Vanntrykk og pakningstrykk ble målt og logget for alle borehullene. Tilsvarende som for Bryn, ble to forskjellige kornstørrelser av kvartssand benyttet. Den nøyaktige blandingen av sand og fortykningsmiddel fremgår av figur 4–19. For hver blanding ble det brukt cirka 50 liter vann og cirka 10 milliliter nedbrytningsenzym (LEB-H).



Figur 4–17: Blanding av vann, guar gum og sand. Påfylling av injeksjonsblanding på høytrykkstanken er vist i høyre i bakkant.



Figur 4-18: Nivåer for hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehullene ved EAB.



Figur 4-19: Innhold av de to sandfraksjonene, Dansand 1 og 2, og fortykningsmiddelet guar gum injisert i de enkelte seksjonene i borehull 1, 2 og 3 ved EAB.

4.4.3 Nivellering

På tilsvarende måte som ved Bryn ble det gjennomført nivellering med Leica nivellerkikkert før, under og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved EAB. Nivelleringen ble gjort

mot fire målepunkter, henholdsvis mot toppen av borehullenes foringsrør og mot et fastmerke utenfor trykkingens influensområde. Nivellerstang ble benyttet i målingene (figur 4–20).



Figur 4–20: Oppsett av nivellerkikkert og måling med nivellerstang.

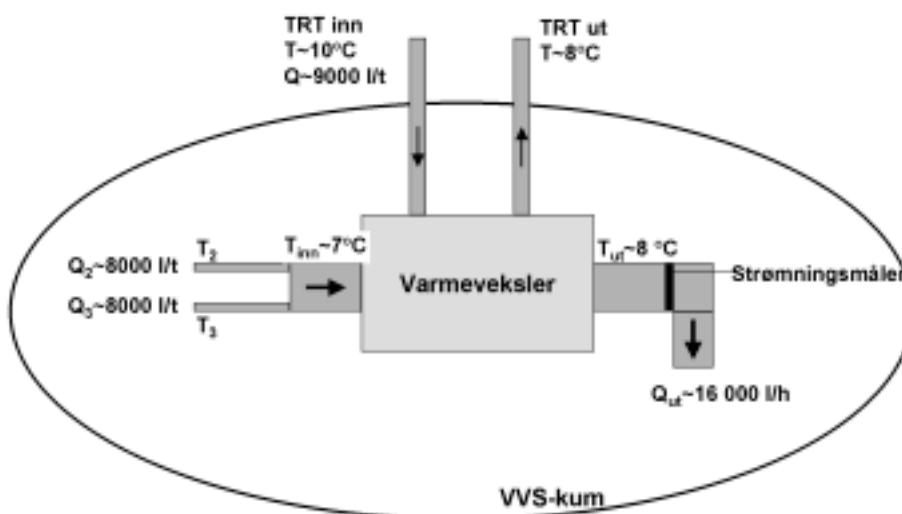
4.4.4 Termisk responstest

På tilsvarende måte som ved Bryn er det gjort en termisk responstest av borehull 1 ved EAB. For å se hvordan grunnvannsbevegelsen påvirker resultatene fra målingene ble det, etter å ha målt verdien for bergets effektive in-situ varmeledningsevne, pumpet (pumpe D) grunnvann fra borehull 3 vest-sørvest for testborehullet. Verdien av uforstyrret temperatur i grunnen, benyttet i beregningene av verdien for bergets effektive in-situ varmeledningsevne, er hentet fra temperaturloggen (figur 5–68).

4.4.5 Testkjøring av grunnvarmeanlegget

Det mulige korttids effektuttaket fra grunnvarmeanlegget ved EAB ble testet ved å koble til utstyret for termisk responstesting til varmeveksleren i VVS-kummen rundt toppen av borehull 1. Oppvarmet vann fra den termiske responstesteren ble varmevekslet med oppumpet grunnvann fra borehull 2 og 3. Pumpe E var installert i hvert av pumpeborehullene (borehull 2 og 3) på 85 meters dyp, og pumpekapasiteten var 8000 liter/time ved 51 meters løftehøyde (figur 2–23). Utstrømmende grunnvann fra varmeveksleren ble returnert tilbake til grunnvannsmagasinet via borehull 1. Den spesialdesignede injeksjonsmansjetten (avsnitt 2.2.3), opprinnelig laget for borehull 3 ved Bryn, var plassert på 15 meters dyp. Tilsvarende til utstyrsoppsettet og testkjøringen ved Bryn (avsnitt 4.3.8, figur 4–21), ble en 17 dagers lang testperiode gjennomført i desember 2003/januar 2004. Risikoen for tilstopping i sirkulasjonssystemet ble testet ut med en lengre sirkulasjonstest etter å ha avsluttet effekttesten av anlegget. Etter å ha slått av varmetilførselen fra den termiske responstesteren fortsatte pumpingen i borehull 2 og 3 og infiltrasjon i borehull 1. Sirkulasjonstesten ble avsluttet den 24. mars, etter 97 dager med kontinuerlig pumping.

Effekttest av grunnvarmeanlegget ved EAB - Instrumentering



Figur 4–21: Instrumentering av grunnvarmeanlegget ved EAB. Alle enheter er samlet i en VVS-kum rundt toppen av borehull 1. Forventede strømningsrater og temperaturer på grunnvannet og kollektorvæsken fra termisk responstesteren (TRT) er angitt.



Figur 4–22: Varmeveksleren i VVS-kummen rundt toppen av borehull 1 ved EAB. Det innstrømmende grunnvannet fra borehull 2 og 3 er samlet med en T-kobling og koblet til varmeveksleren. Utstrømmende vann reinjiseres til grunnvannsmagasinet via borehull 1 (på bildet). Inn- og utkolektorene fra termisk responstester skal kobles til de to øverste utgangene, med gul kappe, på varmeveksleren. Systemtrykket overvåkes med et analogt manometer.

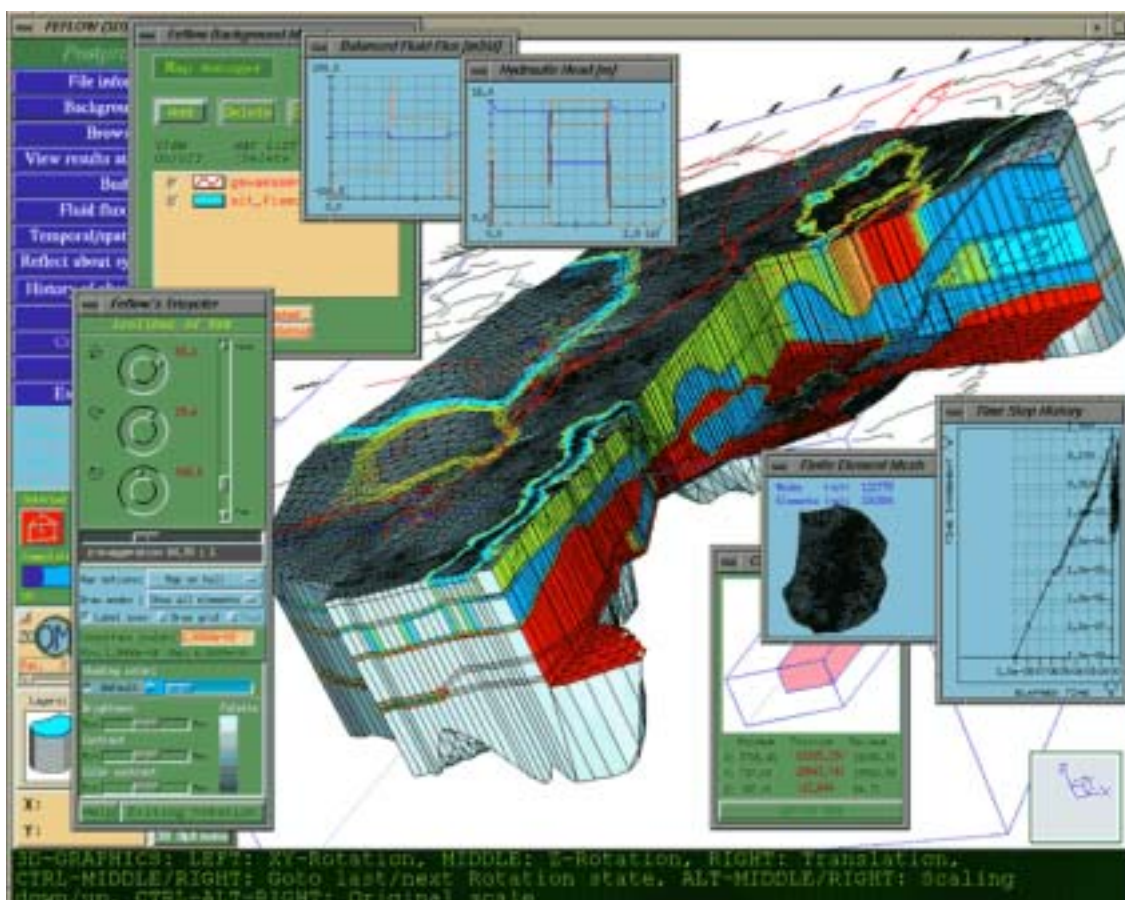
4.5 Modellering av energipotensialet

4.5.1 Presentasjon av programvare - FEFLOW og HFM

Avsnittet er hovedsakelig basert på Spangelo (2002). FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) er en programvarepakke basert på endelig element metoden for

datamodellering av mettet og umettet grunnvannsstrømning med forurensningstransport, varmetransport og saltvannsintrusjon (Waterloo Hydrogeologic, 2004). FEFLOW ble opprinnelig laget for modelleringsproblemer i porøse medium, men sprekkeelementer kan legges inn i den siste versjonen av programmet, v5.0 (figur 4–24). FEFLOW har et godt definert grafisk brukergrensesnitt (figur 4–23). Bakgrunnsinformasjon for undersøkelsesområdet, for eksempel forskjellige kart, punkt-, linje- og flateinformasjon, kan lastes ned som datafiler eller kan plottes manuelt og deretter interpoleres. Et mesh, eller et nett av beregningspunkter, genereres automatisk i det avmerkede undersøkelsesområdet. Et finere nett bør genereres manuelt rundt nøkkelpunkter slik at beregningene blir så nøyaktig som mulig, samtidig som unødvendig tidsbruk på irrelevante beregninger unngås. En tredimensjonal modell kan lages ved å dele grunnen inn i forskjellige lag, og lagene kan ha forskjellig form og størrelse. Fysiske egenskaper, grensebetingelser og formler tillegges manuelt til de forskjellige delene av modellen. Modelleringen kan stoppes når som helst under beregningene, og resultatene kan visualiseres og både under og etter avsluttet modelleringsperiode.

Den største ulempen med FEFLOW er kompleksiteten som gjør at programmet blir tidkrevende å lære. Som all annen form for modellering avgjør kvaliteten på inndataene kvaliteten på utdataene. Inndataene i en FEFLOW-modell kan være veldig nøyaktige og detaljerte. Slike data er imidlertid sjelden tilgjengelige, og modellen må gjøres så bra som mulig med de inngangsparameterne som finnes.



Figur 4–23: Visualiseringsverktøyene i FEFLOW er mange (Waterloo Hydrogeologic, 2004).



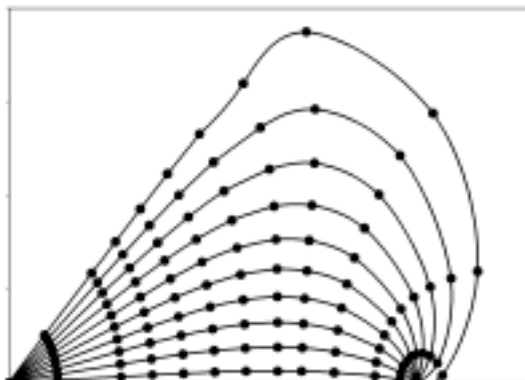
Figur 4–24: Eksempel på inntegning av sprekkeelementer i FEFLOW. De svarte linjene representerer sprekkekanaler, mens det svarte arealet er sprekkeplan (Spangelo, 2002).

HFM eller Hydraulic Fracture Model er laget for modellering av sesongbasert energilagring i et HYDROCK-anlegg, og er utviklet av Hellström ved Lunds tekniske høyskole. HYDROCK-konseptet er tidligere beskrevet i avsnitt 2.1.2 (figur 2–2), og resultater fra tidligere modelleringer med HFM-programvaren er presentert i Hellström og Larson (2001).

Sammenlignet med FEFLOW er HFM en relativt enkel Fortrankode hvor all inndata, kun tall, er listet opp på en spesiell måte i en inndatafil. Berggrunnen deles inn i horisontale lag der varmekapasiteten og varmeledningsevnen må spesifiseres. Sprekkeplanene i modellen betraktes som horisontale og skiveformet, og er definert av inndata som dyp og radius. Sprekkenes permeabilitet er et relativt tall gitt av fordelingen av de sirkulerende vannet i systemet på hver enkelt sprekkeflate.

Resultatene fra en HFM-modellering presenteres som en numerisk liste i en utdatafil. Bare resultatene etter en viss periode, angitt som inndata, genereres i utdatafilen. Symmetrisk modellering av HYDROCK-anlegget, bestående av for eksempel fire satellittborehull, gjør det mulig å begrense beregningene til å omfatte kun et åttendedelssegment for hvert sprekkeplan. Generering av begrensede datamengder gjør at utdatafilen fremstår som ryddig. De fysiske resultatene fra modelleringen er temperaturen på det utstrømmende vannet fra anlegget, temperaturen i de horisontale berggrunnslagene, og temperaturen i sprekkeplanene. Temperaturen i berggrunnen er beregnet i punkter langs grunnvannets strømningslinje i sprekkeplanet (figur 4–25).

Strømningslinjer i et sprekkeplan



Figur 4–25: Strømningslinjer i et åttendedelssegment av den sirkulære sprekkeplanet med et senterborehull og fire satellittborehull. Beregnede temperaturverdier er gitt i punktene langs strømningslinjen (modifisert etter Spangelo, 2002).

HFM er utelukkende basert på HYDROCK-konseptet og har ikke så mange sofistikerte muligheter som FEFLOW. Alle anlegg betraktes som symmetriske, og avstanden mellom senter- og satellittborehullene er gitt som gjennomsnittlig avstand. Sprekkeflatene anses å være fullstendige, og følgelig også den hydrauliske kommunikasjonen. I tilfellene der det i virkeligheten ikke finnes hydraulisk kommunikasjon mellom senter- og satellittborehullene på et visst dyp og sprekkenivå, vil modellens varmevekslerareal være større enn det burde ha vært. Alle berggrunns lag og sprekkeplan betraktes som horisontale, og ingen regional grunnvannstrømning utenfor anlegget kan legges inn i modellen.

4.5.2 Sammenligning av FEFLOW- og HFM-programvaren ved Bryn

De to programvarene FEFLOW og Hydraulic Fracture Model (HFM) ble sammenlignet i et semesterprosjekt av Spangelo (2002), som refereres i etterfølgende avsnitt hvis ikke annet er oppgitt. Hovedmålet med studien var å finne programvaren som er best egnet for modellering av energipotensialet til grunnvarmeanleggene ved Bryn og EAB.

Fem sammenlignbare modelleringscase for grunnvarmeanlegget ved Bryn ble satt opp for sammenligning av de to forskjellige programvarene FEFLOW og HFM (tabell 4–4). Grunnvarmeanlegget ved Bryn var utformet med utgangspunkt i HYDROCK-konseptet (figur 2–2). En parameterstudie ble gjennomført for å oppdage forskjeller mellom programvarene. Case 1 var mest realistisk og kunne sammenlignes med case 3 og 4. Hensikten med den urealistisk høye temperaturgradienten i case 2 og 5 var å øke temperaturavviket mellom casene med varierende og lik strømningsfordeling mellom sprekkeplanene. Alle inngangsparametre ble beregnet fra tilgjengelig informasjon, eller basert på en estimert verdi hvis tilgjengelig informasjon viste seg å være ufullstendig. Felles og individuelle inngangsparametre i FEFLOW og HFM, brukt i de fem modelleringscasene, er presentert i henholdsvis tabell 4–2 og 4–3. Ved å se bort fra borehullenes overflate kan det totale overflatearealet for sprekkeplanene representere anleggets varmevekslerareal. Varmevekslerarealet er en nøkkelparameter for energipotensialet til grunnvarmeanlegget og bør implementeres med en så realistisk verdi som mulig. Resultatene fra hydraulisk trykking med bare vann ved Bryn og oppnådd hydraulisk kommunikasjon mellom satellittborehullene

og borehull 3 (avsnitt 5.2.9) viste at sprekkeplanene later til å være asymmetriske i alle tre dimensjoner. Siden symmetriske sprekkeplan måtte implementeres i HFM, ble dette også gjort i FEFLOW (figur 4–26). Antall horisontale sprekkeplan kan finnes ved å betrakte den hydrauliske kommunikasjonen mellom senterborehullet og et satellittborehull som et fjerdedels sprekkeplan. Ved å dividere summen av kvartiler på fire, ble antall sprekkeplan beregnet til seks. Sprekkeplanene er lokalisert i henhold til hvor den hydrauliske kommunikasjonen befinner seg i borehull 3, nemlig ved 32, 40, 44, 60, 72 og 84 meters dyp. Strømningsfordelingen i HFM-modellen er implementert som relative verdier og vurdert med bakgrunn i endringer i grunnvannsnivået i borehull 3 (avsnitt 5.2.9) forårsaket av hydraulisk trykking i satellittborehullene. Strømningsandelen i hvert sprekkeplan ble funnet ved å dividere endringen i grunnvannsnivået innen et visst nivå, på den totale endringen i grunnvannsnivået for hele borehull 3. I FEFLOW benyttes sprekkeåpning som inngangsparameter i stedet for strømningsfordeling. Sprekkeåpningen i FEFLOW ble imidlertid beregnet med utgangspunkt strømningsfordelingen og HFM-modelleringen der sprekkeåpningen ble satt til å være 2 millimeter.

Tabell 4–2: Felles inngangsparametre for FEFLOW og HFM brukt i modelleringscasene for grunnvarmeanlegget ved Bryn (Spangelo, 2002).

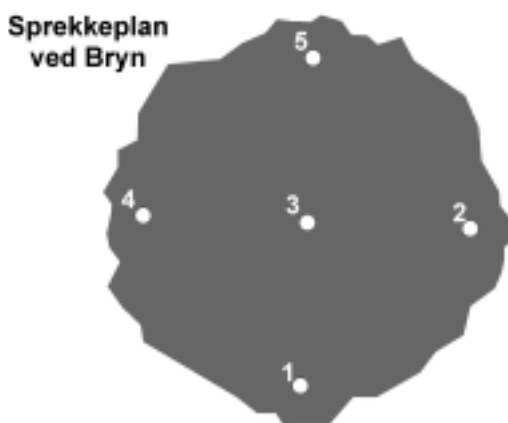
Felles inngangsparametre for FEFLOW og HFM	Verdi
Anlegget:	
Antall satellittborehull:	4 (borehull 1, 2, 4 og 5)
Avstand fra senterborehullet (borehull 3) til satellittborehullene:	12,5 meter
Borehullsdyp:	100 meter
Sprekkeplanenes radius:	15 meter
Driftsperiode:	7 måneder
Strømningsrate i satellittborehullene:	$Q_{\text{senter}}/4$
Temperatur på reinjisert vann i senterborehullet, T_i :	1°C
Vannets tetthet:	1000 kg/m ³
Termiske data:	
Berggrunnens varmeledningsevne:	3,3 W/(m,K) Midttømme et al., 2000)
Berggrunnens varmekapasitet:	0,85 kWh/(m ³ K)
Overflatetemperatur	6,0°C (Stene, 1997)

Tabell 4–3: Individuelle inngangsparametre for FEFLOW og HFM brukt i modelleringscasene for grunnvarmeanlegget ved Bryn (Spangelo, 2002).

Individuelle inngangsparametre	Verdi
HFM parametre:	
Varmeledningsmotstand mellom berggrunn og væske:	0,3 (Km ² /W)
Sprekkeåpning (konstant verdi):	2 millimeter
Strømningsfordeling blant sprekkeplanene, sprekkedyp (meter) - strømningsandel:	32-0,22, 40-0,21, 44-0,13, 60-0,04, 72-0,32 og 84-0,09
FEFLOW parametre:	
Strømningslikninger:	Darcy's lov og Hagen Poiseuille
Termisk fluks når termisk gradient er 13,5 W/km,K):	0,0446 W/m ²
Termisk fluks når termisk gradient er 100 W/km,K):	0,33 W/m ²
Sprekkeåpning, sprekkedyp (meter) - sprekkeåpning (millimeter):	32-1,6, 40-2,5, 44-1,2, 60-1,8, 72-2,2 og 84-2,2
Totalt sprekkeareal for de seks sprekkeflatene:	4776 m ²

Tabell 4–4: Modelleringscasene ved Bryn (Spangelo, 2002).

Case #	Beskrivelse
1	Strømningsraten i senterborehullet er 20000 liter/time. Vertikal temperaturgradient er 13,5 K/km, og varierende strømningsfordeling mellom sprekkplanen.
2	Tilsvarende som case 1, men vertikal temperaturgradient er 100 K/km.
3	Tilsvarende som case1, men strømningsrate i senterborehullet er 5000 liter/time.
4	Tilsvarende som case 1, men har lik strømningsfordeling blant sprekkplanene.
5	Tilsvarende som case 2, men har lik strømningsfordeling blant sprekkplanene.



Figur 4–26: Sprekkeplanenes utstrekning i FEFLOW-modelleringen av grunnvarmeanlegget ved Bryn.

4.5.3 FEFLOW-modellering av energipotensialet ved Bryn og EAB

En mer nøyaktig modellering av energipotensialet av grunnvarmeanlegget ved Bryn ble utført som en del av Spangelo's (2003) hovedoppgave ved sivilingeniørstudiet ved NTNU. Den delen av avsnittet som omhandler Bryn er basert på Spangelo (2003) hvis ikke annet er oppgitt. FEFLOW ble valgt som modelleringsverktøy på bakgrunn av resultatene fra sammenligningen av de to programvarene (avsnitt 5.4.1). Fem forskjellige modelleringscase ble kjørt for grunnvarmeanlegget ved Bryn. De viktigste inngangsparameterne, i tillegg til eller forskjellig fra oppstillingen av felles og individuelle inngangsparametre angående anlegget og de termiske egenskapene benyttet i sammenligningen av FEFLOW og HFM (tabell 4–2 og 4–3, avsnitt 4.5.2), er presentert i tabell 4–5. Sammenlignet med FEFLOW-modelleringen i avsnitt 4.5.2, disse modelleringene:

- Benyttet samme sprekkfordeling, sprekkedyp og sprekkåpning,
- hadde et finere nett omkring sprekkplanene, og
- betraktet injeksjonsborehullet og satellittborehullene som vertikale og søyleformede sprekk-elementer i stedet for som kilde og sluk.

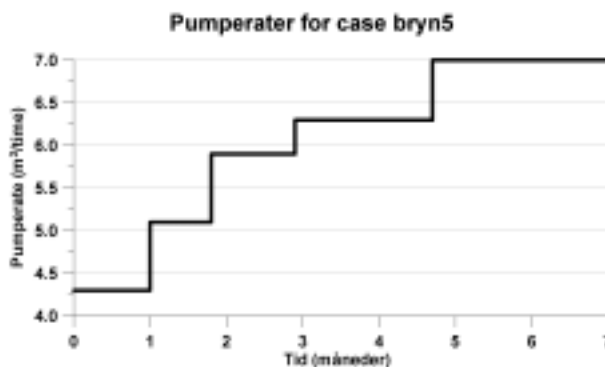
Injeksjon av vann, $T_i = 1^\circ\text{C}$, i senterborehullet og strømningsfordelingen i sprekkplanene, vil føre til en nedkjøling i den omgivende berggrunnen for hvert sprekkplan. Nedkjølingens utbredelse er viktig for å få en bedre forståelse av mekanismene som påvirker energipotensialet til et grunnvarmeanlegg basert på sirkulasjon av grunnvann. Nøyaktige verdier fra nedkjølingsprosessen ble fremskaffet ved å øke tettheten av beregningspunkter

rundt sprekkeflatene. Et finmasket nett av beregningspunkter ble lagt til rundt borehullene i det horisontale planet, og ekstra horisontale lag med innbyrdes kort avstand ble lagt til i den vertikale retningen. Totalt bestod modellen av 44 horisontale lag. Fordelingen av, eller mengden av injisert eller produsert vann fra et spesielt sprekkeplan kan ikke beregnes hvis injeksjons- og produksjonsborehullene betraktes som kilde og sluk på overflaten. I stedet kan et kontinuerlig borehull som går gjennom alle lagene i modellen modelleres ved å betrakte borehullene som vertikale sprekkeelement. Injeksjon og produksjon av grunnvann ble satt som grenseverdier i enkelte punkter. Grenseverdien for de fire produksjons- eller satellittborehullene, der pumpene er plassert i bunnen, ble satt i det dypeste sprekkeplanet. Temperaturen på produsert grunnvann ble avlest i grenseverdipunktene. Grenseverdien for injeksjonsborehullet, der injeksjonsmansjetten var plassert på 15 meters dyp, ble satt til å være på overflaten. Ved å sette grensebetingelsen som beskrevet, ble varmeoverføringen mellom den omgivende berggrunnen for injeksjonsborehullet og det injiserte grunnvannet tatt med i beregningen. Siden vannet pumpes opp gjennom polyetylenrør, ble det ikke tatt hensyn til varmeoverføringen mellom omgivende berggrunn for satellittborehullene og grunnvannet. Injeksjonstemperaturen, $T_i = 1^\circ\text{C}$, ble satt som grensebetingelse ved injeksjonspunktet.

Siden grunnvannets strømningsrate i grunnvarmeanlegget ved Bryn var usikker, ble modelleringscasene kjørt med strømningsrater som varierte fra 3,5 til 20 m³/time (tabell 4–5). For å oppnå en relativ stabil effektytelse, ble ett av casene, bryn5, modellert med varierende strømningsrate (figur 4–27).

Tabell 4–5: De viktigste inngangsparameterne, ikke tatt med i tabell 4–2 og 4–3, som ble brukt i FEFLOW-modelleringen av energipotensialet til grunnvarmeanlegget ved Bryn (Spangelo, 2003).

Beskrivelse av inngangsparameter	Verdi
Borehullsdyp	94 meter
Borehullsradius	7 centimeter
Formelverk for strømning	Hagen-Poiseuille
Termisk gradient	13,5 W/(kmK)
Varmestrøm fra grunnen	44,55 mW/m ²
Hydraulisk konduktivitet i berggrunnen (Driscoll, 1989)	10 ⁻⁹ m/s
Varmekapasitet til vann	4,18 kJ/(kgK)
Strømningsrater i modelleringscasene bryn1-5:	henholdsvis 3,5, 7, 13, 20 og varierende (figur 4–27) m ³ /time.

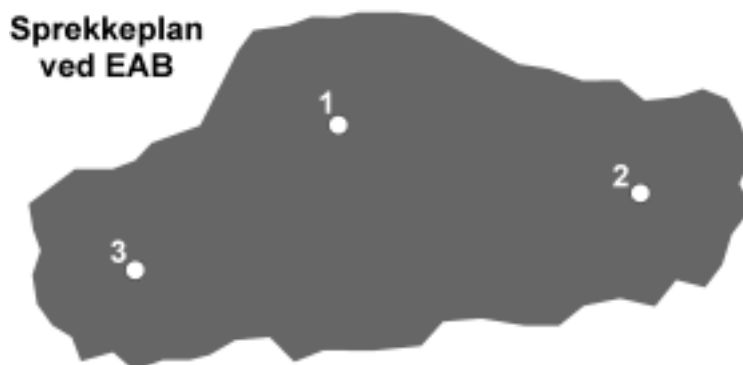


Figur 4–27: Pumperatene brukt i modelleringen av bryn5 (Spangelo, 2003).

FEFLOW-modelleringen av energipotensialet for grunnvarmeanlegget ved EAB ble gjennomført på tilsvarende måte som modelleringen av anlegget ved Bryn. De viktigste inngangsparameterne er gitt i tabell 4–6. De fem sprekkeplanene i modellen er beregnet med bakgrunn i observert hydraulisk kommunikasjon, representert ved grunnvannsnivåendringer i borehull 1 som et resultat av hydraulisk trykking i borehull 2 og 3 (figur 5–74 og 5–75). Tilsvarende som ved Bryn, ble den hydrauliske kommunikasjonen mellom et spesifikt nivå i satellittborehullene og borehull 1 antatt å utgjøre et kvart sprekkeplan, og de 21 nivåene med hydraulisk kommunikasjon kan betraktes som fem horisontale sprekkeplan (figur 4–28). Ved å dele alle registrerte nivå med hydraulisk kommunikasjon til borehull 1 inn i fem grupper, ble sprekkeplanfordelingen bestemt med utgangspunkt i middelveien for hver gruppe (tabell 4–6). Et forsøk på å bestemme strømningsfordelingen og sprekkeplanåpningene fra endringene i grunnvannsnivå forårsaket av hydraulisk trykking var ikke vellykket. Resultatene fra grunnvannsnivåmålingene var upålitelige fordi (1) hydraulisk trykking i de fleste av de øvre borehullsseksjonene gjorde at borehull 1 flommet over, (2) mengden vann som ble pumpet i hver stimulering varierte, og (3) siden grunnvannsnivået hadde en stigende trend ved hydraulisk trykking av borehullene, resulterte de første stimuleringene i hvert borehull i en urealistisk høy respons sammenlignet med stimuleringen av de gjenværende borehullsseksjonene. I stedet for å bruke resultatene fra grunnvannsnivåmålingene, kan den høye oppsprekningsgraden oppnådd ved hydraulisk trykking av borehullene ved EAB indikere at størrelsen på sprekkeplanenes åpninger er relativt lik. I henhold til dette ble sprekkeåpningene antatt å være to millimeter (tabell 4–6). En nøyaktig modellering av temperaturutviklingen rundt sprekkeplanene ble ivaretatt ved øke antallet beregningspunkter, representert ved 37 horisontale lag i den vertikale retningen. Sirkulasjonstesten av grunnvarmeanlegget ved EAB viste at strømningsraten stabiliserte seg omkring $14 \text{ m}^3/\text{time}$ (figur 5–79), og ble satt til 10, 14 og $20 \text{ m}^3/\text{time}$ for henholdsvis modelleringsscener eab1-3.

Tabell 4–6: Inngangsparametre brukt i FEFLOW-modelleringen av grunnvarmeanlegget ved EAB.

Inngangsparametre	Verdi
Anlegget	
Antall satellittborehull:	2 (borehull 2 og 3)
Avstand fra senter- (borehull 1) til satellittborehullene	
Borehull 1 - borehull 2:	20 meter
Borehull 1 - borehull 3:	16 meter
Borehullsdyp:	90 meter
Borehullsradius:	7 centimeter
Driftsperiode:	7 måneder
Strømningsrate i satellittborehullene:	$Q_{\text{senter}}/2$
Temperaturen på injisert vann i senterborehullet, T_i :	1°C
Strømningsrater, modelleringcase eab1-3:	henholdsvis 10, 14 og 20 m ³ /time
Termiske data	
Berggrunnens varmeledningsevne:	2,7 W/(m,K) (Midttømme et al., 2000)
Berggrunnens varmekapasitet:	2,3 MJ/m ³ ,K
Termisk gradient:	1,1°C/100 m (Midttømme et al., 2004)
Varmestrøm fra dypet:	44,55 mW/m ²
Overflatetemperatur:	6°C (Stene, 1997)
FEFLOW-data	
Strømningslikning:	Hagen-Poiseuille
Horisontale sprekkeplan á 2 millimeter; Dyp (m):	32, 42, 53, 66 og 79
Sprekkeplanenes totale areal:	3475 m ²
Hydrauliske konduktivitet i berggrunnen:	10 ⁻⁹ m/s (Driscoll, 1989)
Vannets varmekapasitet:	4,18 kJ/(kgK)
Vannets tetthet:	1000 kg/m ³



Figur 4–28: Sprekkeplanenes utstrekning i FEFLOW-modelleringen av grunnvarmeanlegget ved EAB.

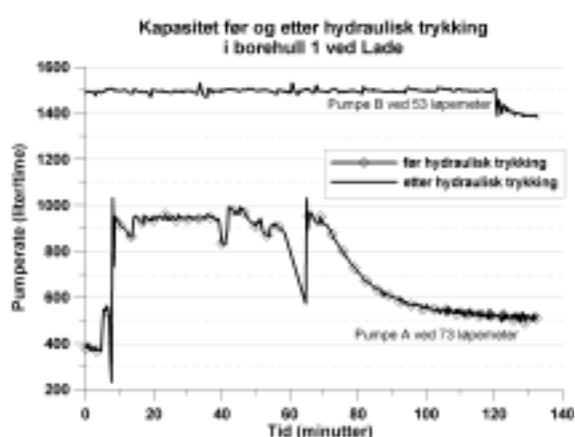
5 Resultater

5.1 Lade

5.1.1 Borehullenes vannkapasitet og grunnvannskvalitet

Resultater fra testpumping i borehull 1 ved Lade (figur 5–1) viser at pumperatene stabiliserer seg på henholdsvis 500 før, og 1400 liter/time etter hydraulisk trykking med bare vann. Siden det ble oppnådd en fullstendig senkning av grunnvannsnivået ned til pumpeinntaket både før- og etter hydraulisk trykking med bare vann, kan resultatene til en viss grad betraktes som sammenlignbare selv om to forskjellige pumper ble benyttet ved forskjellige dyp. Siden pumpen som ble brukt i testpumpingen etter hydraulisk trykking med bare vann var plassert på grunnere dyp enn ved tilsvarende test før hydraulisk trykking, forventes en større reell økning i borehullets kapasitet enn den som ble målt. I forhold til pumpekaraktistikkene var de målte borehullskapasitetene betydelig lavere enn angitt strømningsrate ved den aktuelle løftehøyden (figur 2–23).

Som eneste verktøy, ble stigedata fra testpumping brukt til å identifisere vanninnslag i de øverste 54 meterne av borehull 1 ved Lade. Mulige vanninnslag er påvist ved 38-40 og muligens ved 34-35 løpemeter (figur 5–2). Disse observasjonene samsvarer relativt bra med Banks (1991), som rapporterer en stor og et mindre vanninnslag ved henholdsvis 39-40 og ved 33,5 meter, og resultatene fra hydraulisk trykking med bare vann. Det lave trykknivået observert under hydraulisk trykking med bare vann i seksjonene ved 31-35, 39-43, 63-67 og 71-76 løpemeter i borehull 1 ved Lade antydnet at det i disse nivåene var oppsprukket på forhånd (figur 5–6). Det forekom ingen oppsprekning i de to borehullseksjonene 55-59 og 47-51. Borehullets kapasitetsøkning fra 500 til 1400 liter/time kan forklares med at de allerede åpne sprekken ble spylt rene. Eventuell vanninnstrømning i borehullseksjon ved 63-67 og 71-76 løpemeter ble ikke undersøkt.



Figur 5–1: Resultater fra testpumping i borehull 1 ved Lade før og etter hydraulisk trykking med bare vann.

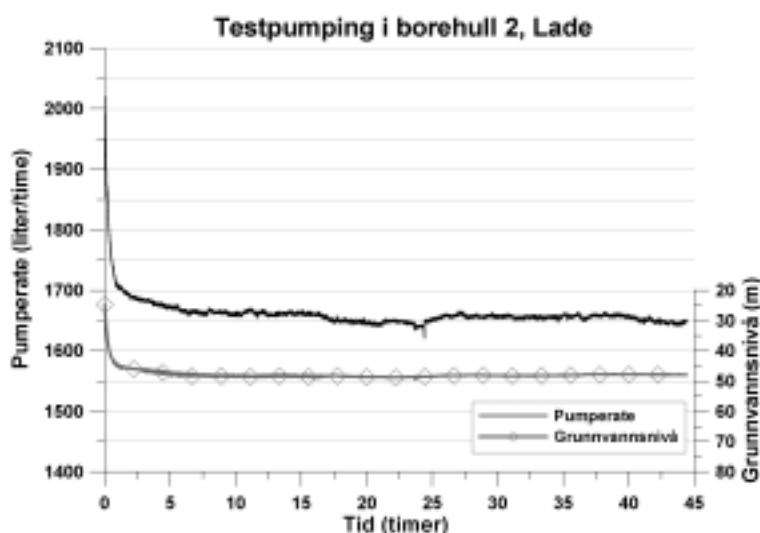


Figur 5–2: Stigekurver fra pumpe tester utført i borehull 1 ved Lade før og etter hydraulisk trykking med bare vann.

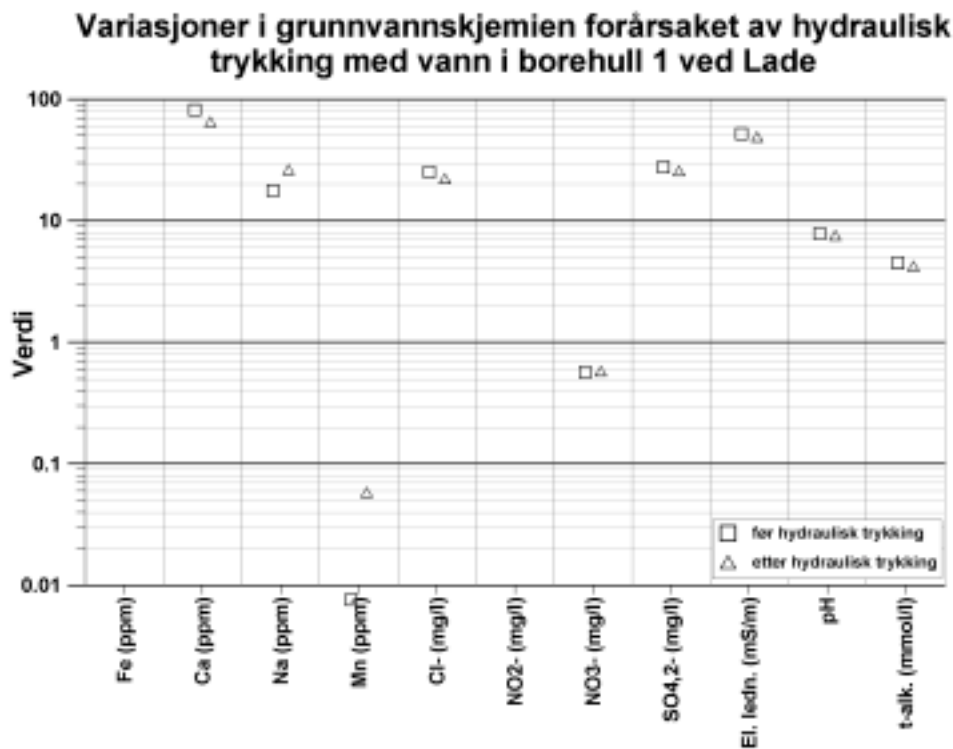
Resultatene fra testpumping og vannstandsmålinger i borehull 2 (figur 5–3) viser at pumperaten stabiliserte seg på 1650 liter/time. Grunnvannsnivået sank raskt fra de

opprinnelige 25 meter etter pumpestart, og stabiliserte seg ved 48 meters dyp. En fullstendig avsenkning ned til pumpeinntaket (slurpepumping) ble ikke oppnådd.

Kun mindre endringer i grunnvannets sammensetning observeres før og etter hydraulisk trykking med bare vann i borehull 1 ved Lade (figur 5–4). pH-verdien var 7,87 og 7,65 henholdsvis før og etter hydraulisk trykking. Grunnvannet var relativt hardt, og kan karakteriseres som kalsium-bikarbonat type (Banks, 1991).



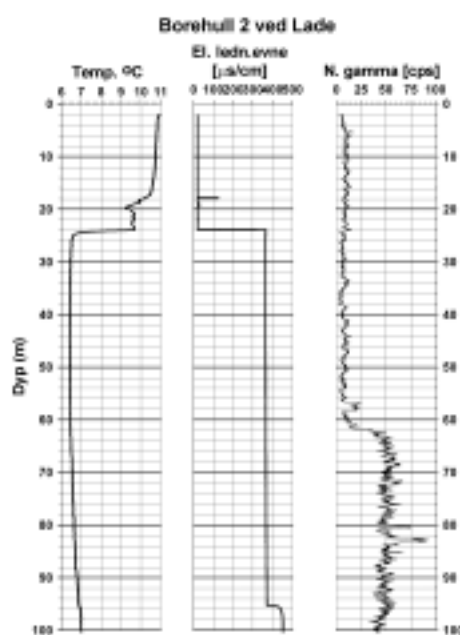
Figur 5–3: Kurver som viser pumpeforløp og senkning av grunnvannsnivå ved testpumping i borehull 2 på Lade.



Figur 5–4: Resultater fra standard vannanalyse fra vannprøver i borehull 1 ved Lade før og etter hydraulisk trykking med bare vann.

5.1.2 Optisk televiewer og TCN-logg av borehull 2

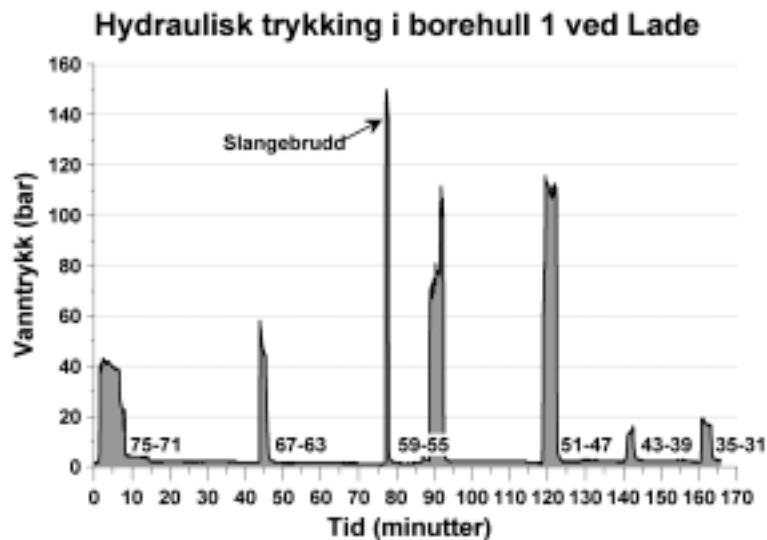
Borehullsinspeksjon av borehull 1 ved Lade med optisk televiewer før og etter hydraulisk trykking foregikk med forskjellige typer demonstrasjonsutstyr, og det var i ettertid ikke mulig å kjøre loggene samtidig slik at sammenligning og identifisering av eventuelle endringer i borehullsveggen kunne gjøres. TCN-logg for borehull 2 (figur 5-5) viser at grunnvannsspeilet befinner seg ved 24 meters dyp. En markert endring i vannets elektriske ledningsevne og delvis vannets temperatur opptrer ved 95 meter. Bilder fra optisk televiewer bekrefter et åpent hull i borehullsveggen i dette nivået. Bergartsgrensen mellom grønnstein i den øvre delen av borehullet etterfulgt av trondhemitt opptrer ved 62 meter der gammastrålingen øker fra cirka 15 til 55 cps (counts per second). Sprekkestereogram og frekvenshistogram fra borehull 2 ved Lade er vedlagt i databilag 2, mens borehullsavviket er vist i databilag 3.



Figur 5-5: Vannets temperatur- og elektriske ledningsevne, og naturlig gammastråling i borehull 2 ved Lade.

5.1.3 Hydraulisk trykking

Resultat fra hydraulisk trykking av de seks seksjonene i borehull 1 ved Lade er vist i figur 5-6. Seksjonene 75-71, 67-63, 43-39 og 35-31 løpemetere har maksimalt vanntrykk lavere enn 60 bar og indikerer gjenåpning/spyling av eksisterende sprekker. På grunn av høyt trykk (150 bar) inntraff et slangebrudd ved hydraulisk trykking av borehullsseksjonen ved 59-55 løpemetere, noe som førte til at videre stimulering av samme og påfølgende borehullsseksjon (51-47 løpemetere) foregikk ved lavere vanntrykk. Mangel på markert trykkfall tyder på at ingen nye sprekker er dannet i seksjonene ved 59-55 og 51-47 løpemetere.



Figur 5-6: Trykk-tid diagram fra hydraulisk trykking i borehull 1 ved Lade.

5.1.4 Hydraulisk trykking med injeksjon av sand

Det observeres en jevn trykkoppbygging ved injeksjon av beholder 1 og 2 etter første runde med hydraulisk trykking med bare vann (figur 5-7). Den gjennomsnittlige pumperaten for beholder 1 og 2 er henholdsvis 26 og 20 liter/minutt. Ved påfølgende hydraulisk trykking med vann, for å spyle sandblandingen inn i sprekkeformasjonen, måtte vanntrykket økes til nesten 100 bar. Injeksjon av beholder 3 har tilsvarende forløp som beholder 1 og 2, men pumperaten er ytterligere redusert til 7 liter/minutt. Neste trinn i prosedyren, som ikke er vist i figur 5-7, var innspyling av sanden ved hydraulisk trykking med vann. Under denne stimuleringen forsvant vanntrykket og pakningstrykket og et pakningselement var sannsynligvis ødelagt. Utstyret ble forsøkt løftet opp fra borehullet, men kilte seg fullstendig fast på vei opp. Gjentatte forsøk for å berge utstyret var ikke vellykket, og dobbeltpakning og mange meter vannrør står igjen i borehullet.



Figur 5-7: Trykk-tid diagram for hydraulisk trykking med vann og injeksjon av sand i borehull 2 ved Lade. Beholder med sandblanding nummer 1, 2 og 3 ble injisert ved de angitte tidspunkt.

5.1.5 Terrengendringer

Måling av nivåendringer viste seg å være mest nøyaktig med bruk av vanlig nivelleringskikkert. Oppmåling med totalstasjon (landmåling) ga ikke tilfredsstillende resultater. Største forskjell i terrengets nivå i forhold til et fastpunkt før og etter hydraulisk trykking med vann ved Lade var 2,0 mm (tabell 5–1). Det betyr at terrenget på det meste har løftet seg 2,0 mm. Andre målinger viser en nivåendring på 1,4, 1,0, 0,8 og 0,5 mm.

Det er uvisst hvor reelle disse resultatene er. En maksimumsendring på 2,0 mm såvidt lite at det sannsynligvis kan betegnes som målefeil. På den andre siden verifiserer alle målingene en liten heving av terrenget. De målte terrengendringene kan mest sannsynlig betraktes som målefeil siden det beskjedne trykknivået som ble brukt ved hydraulisk trykking kun førte til spyling av eksisterende sprekker.

Tabell 5–1: Resultater fra nivellering før og etter hydraulisk trykking (HT) med bare vann i borehull 1 ved Lade.

	Fastpunkt	pkt. 1	pkt. 2	pkt. 3	pkt. 4	pkt. 5
Nivellement før HT (m)	3,40950	2,25100	0,71300	2,69020	0,96610	3,65700
Nivellement etter HT (m)	3,30350	2,14700	0,60800	2,58500	0,86150	3,55150
avvik (mm)	106,0	104,0	105,0	105,2	104,6	105,5
Relativ forskjell (mm) (Fastpkt.- pkt. X)	0,00	2,00	1,00	0,80	1,40	0,50

5.2 Bryn

5.2.1 Boring og borekakssets mineralogi

Enkelte intrusive ganger, sannsynligvis diabas (figur 5–38), ble påtruffet under boringene. Blåsetester utført etter avsluttet boring ved Bryn viste at borehullenes vannkapasitet var 1500, >10000, 5000, >10000 og 8000 liter/time for henholdsvis borehull 1, 2, 3, 4 og 5. De store vannmengdene stammer fra en tilsynelatende horisontal eksfoliasjonssprekk påtruffet 12-13 meter under terrengoverflaten for borehull 1, 2, 3 og 5, og ved 17 meters dyp for borehull 4. Sprekken ble senere identifisert ved borehullsinspeksjon. Maksimalt borehullsavvik er mindre enn 10 meter for alle borehullene, og har varierende retning (Databilag 3).

En oppsummering av XRD- og XRF-resultatene fra borehull 3 ved 18, 66 og 99 meters dyp, presentert i henholdsvis tabell 5–2 og tabell 5–3, er basert på NGU-Lab (2001c). Tolkningen av analysene er gjort av Nordstrand (2001). Berggrunnen ved Bryn består hovedsakelig av mineralene kvarts, muskovitt, amfibol, kloritt, plagioklas, kaliefeltspat og kalsitt. Innholdet av kvarts er lavest ved 18 meters dyp (tabell 5–2).

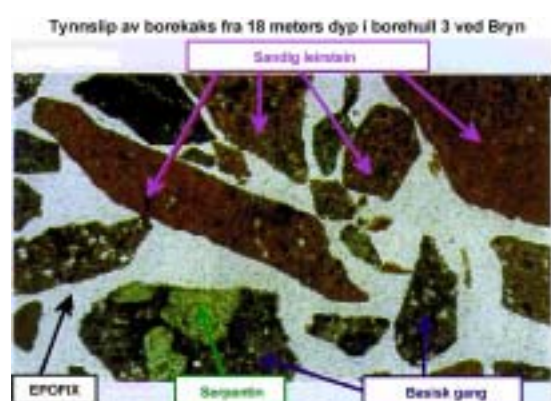
En sammenligning av tynnslip laget av borekaks ved 18, 66 og 99 meters dyp i borehull 3 med tynnslip laget av bergartsprøver fra nærområdet ved Bryn, viser at borekaket inneholder andre mineralkomponenter enn bare ringerikessandstein (figur 5–8 til 5–11). Den basiske intrusjonen som forekommer i tynnslip fra borekaket består hovedsakelig av finkornet epidot, karbonat, serpentin og kloritt. Ringerikessandsteinens hovedbestanddeler er kvarts (40-50%) og plagioklas (30-50%), i tillegg ble små mengder amfibol og epidot ble identifisert (figur 5–11) (Nordstrand, 2001).

Tabell 5-2: Mineralsammensetningen (%) av berggrunnen ved Bryn tolket fra XRD-resultater (Nordstrand, 2001).

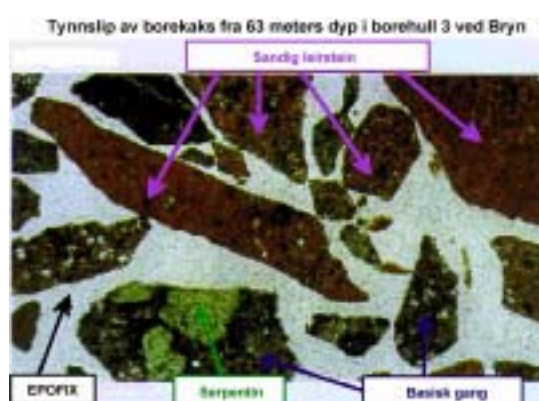
Mineral	18 meters dyp (%)	63 meters dyp (%)	99 meters dyp (%)
Kvarts	18,1	30,0	26,3
Muskovitt	23,1	26,0	28,4
Amfibol	21,6	15,5	13,6
Kloritt	17,8	2,0	5,5
Plagioklas	11,3	12,5	13,9
K-feltspat	6,7	14,0	12,3
Kalsitt	1,4	-	-
SUM	100,0	100,0	100,0

Tabell 5-3: Sammensetning av mineralkomponenter (%) av berggrunnen ved Bryn tolket fra XRF-resultater (Nordstrand, 2001).

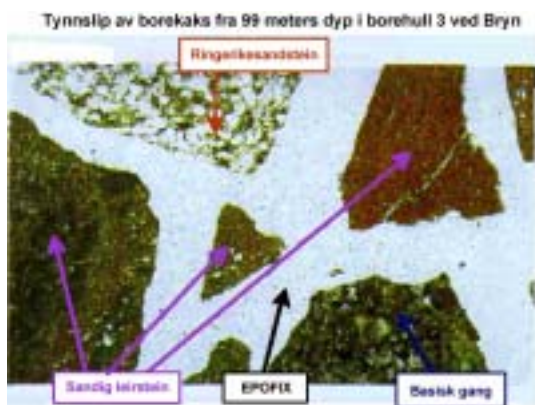
Mineral komponent	18 meters dyp (%)	63 meters dyp (%)	99 meters dyp (%)
SiO ₂	51,66	55,75	55,94
Al ₂ O ₂	13,55	15,38	14,95
Fe ₂ O ₃	8,65	7,08	7,13
TiO ₃	1,95	0,72	1,07
MgO	8,11	5,93	5,95
CaO	8,53	8,23	8,34
Na ₂ O	1,36	1,32	4,45
K ₂ O	2,21	3,59	3,02
MnO	0,12	0,10	0,10
P ₂ O ₅	0,35	0,19	0,24
Ignition loss	2,34	0,84	0,96
SUM	98,83	99,12	99,15



Figur 5-8: Tynnslip laget av borekaks fra 18 meter i borehull 3 ved Bryn (Nordstrand, 2001).



Figur 5-9: Tynnslip laget av borekaks fra 63 meter i borehull 3 ved Bryn (Nordstrand, 2001).



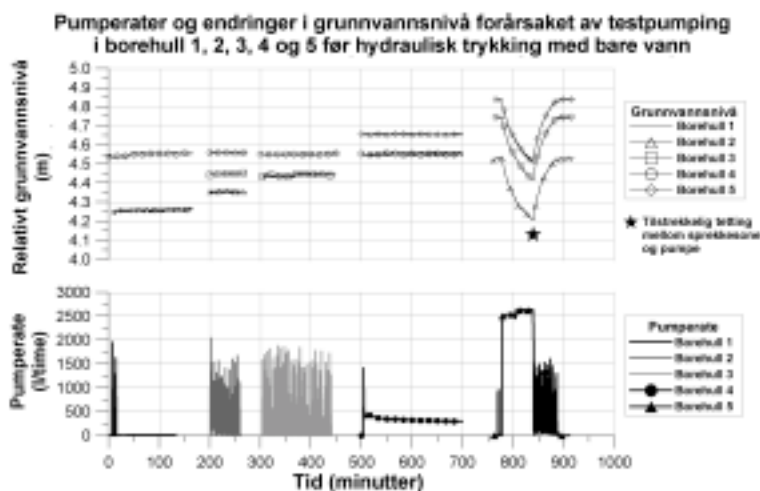
Figur 5–10: Tynnslip laget av borekaks fra 99 meters dyp i borehull 3 ved Bryn (Nordstrand, 2001).



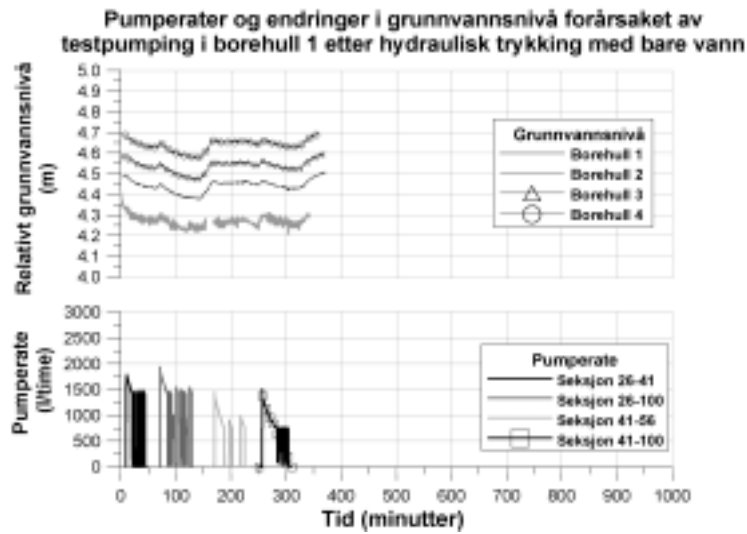
Figur 5–11: Tynnslip laget av bergartsprøve av ringerikesandstein ved Bryn (Nordstrand, 2001).

5.2.2 Borehullenes vannkapasiteter

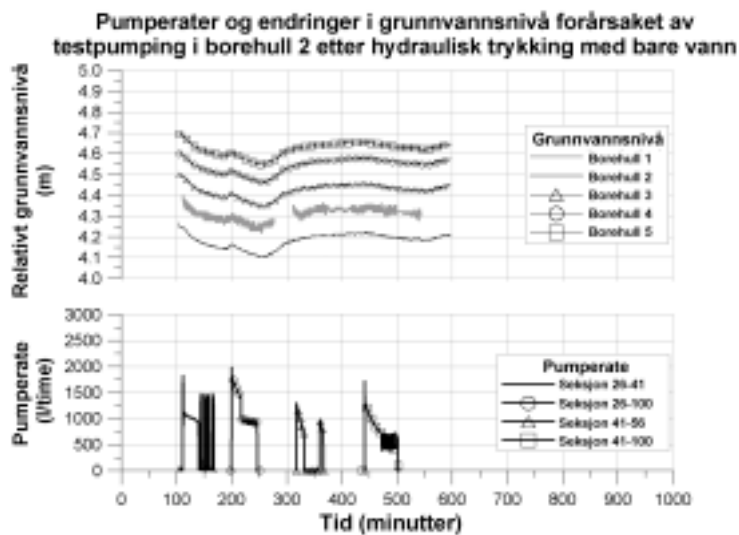
Resultatene fra de forskjellige former for testpumping for alle borehullene ved Bryn før og etter hydraulisk trykking med vann og injeksjon av sand er vist i figur 5–12 til 5–23. Fremstillingen viser pumpeforløp og pumperate, og endringer i grunnvannsstanden i omkringliggende borehull for borehullet der testpumping foregikk. De forskjellige pumpeforløpene viser at borehullenes kapasitet varierer veldig. Figur 5–12 viser pumpeforløpet ved søyletestpumping i borehull 1-5 før stimulering med hydraulisk trykking. I borehull 1 og 4 oppnås en stabil pumperate, mens pumperaten i borehull 2, 3 og 5 fluktuierer. Tilsvarende pumpeforløp kan sees for en rekke av de andre testpumpingene. En fluktuierende pumperate er som oftest et resultat av at grunnvannsnivået er senket til pumpeinntaket der pumpen suger både vann og luft.



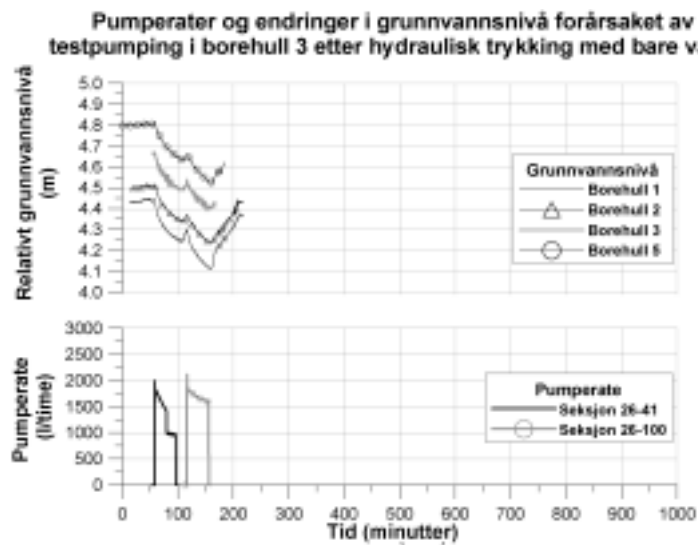
Figur 5–12: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av søyletestpumping i borehull 1, 2, 3, 4 og 5 ved Bryn før hydraulisk trykking med bare vann.



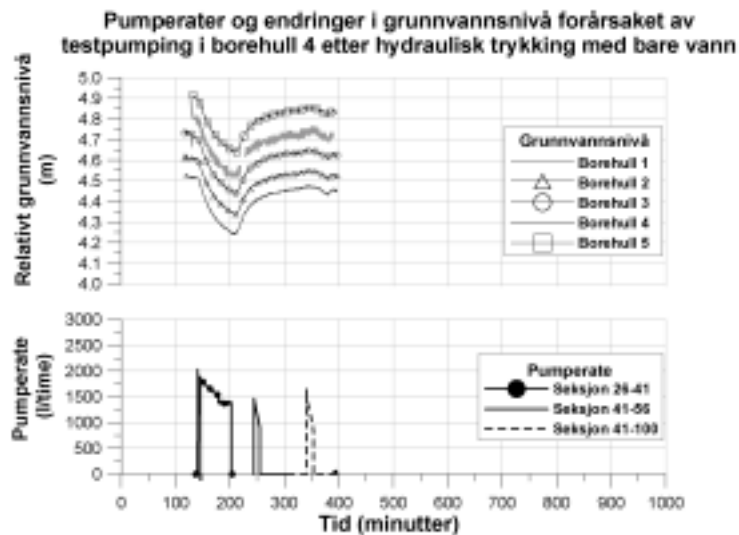
Figur 5-13: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 1 ved Bryn etter hydraulisk trykking med bare vann.



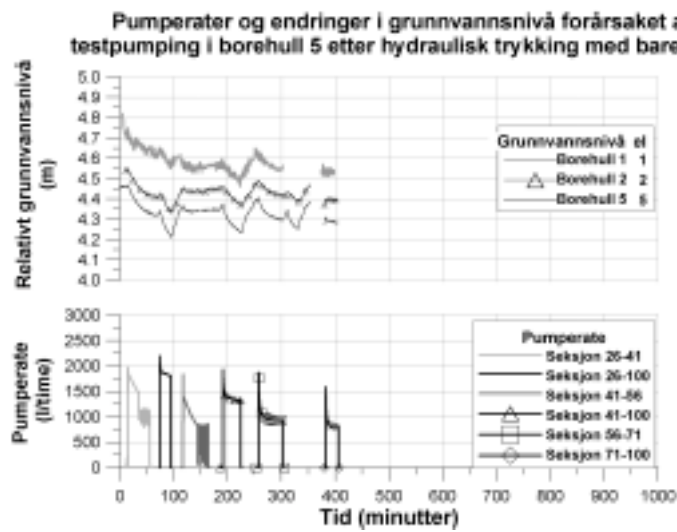
Figur 5-14: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 2 ved Bryn etter hydraulisk trykking med bare vann.



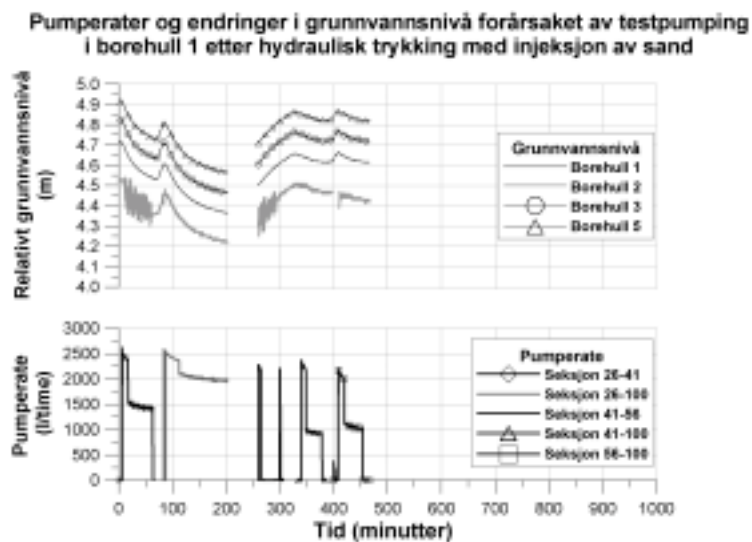
Figur 5–15: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 3 ved Bryn etter hydraulisk trykking med bare vann.



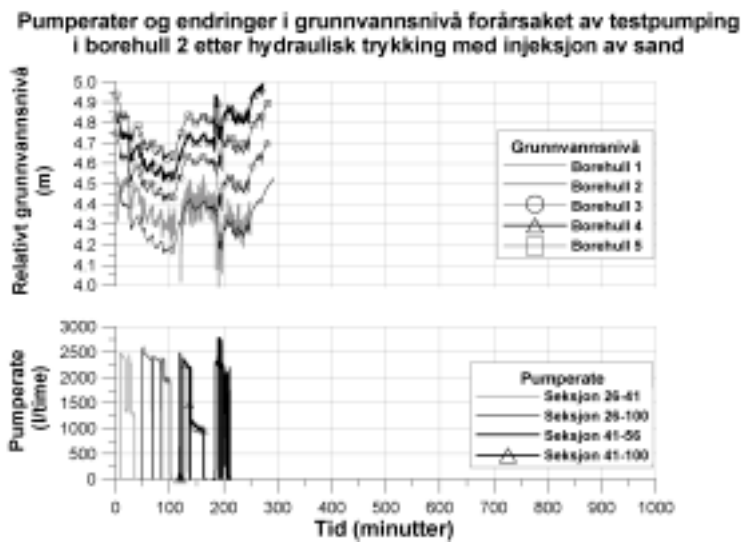
Figur 5–16: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 4 ved Bryn etter hydraulisk trykking med bare vann.



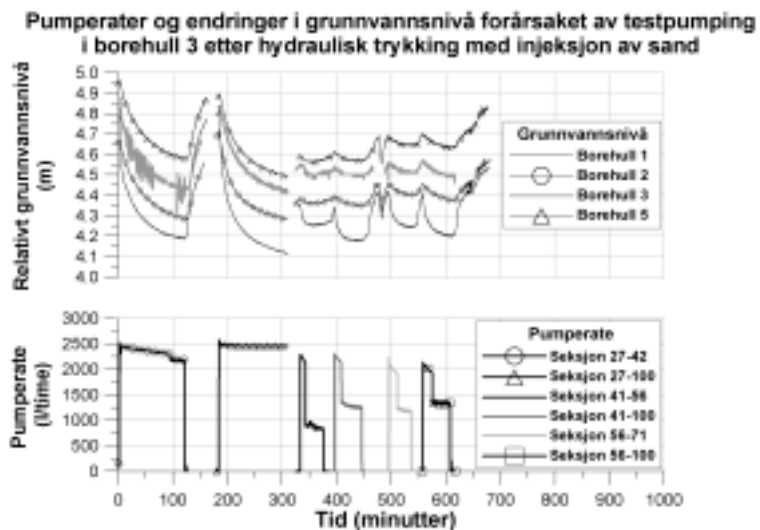
Figur 5–17: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 5 ved Bryn etter hydraulisk trykking med bare vann.



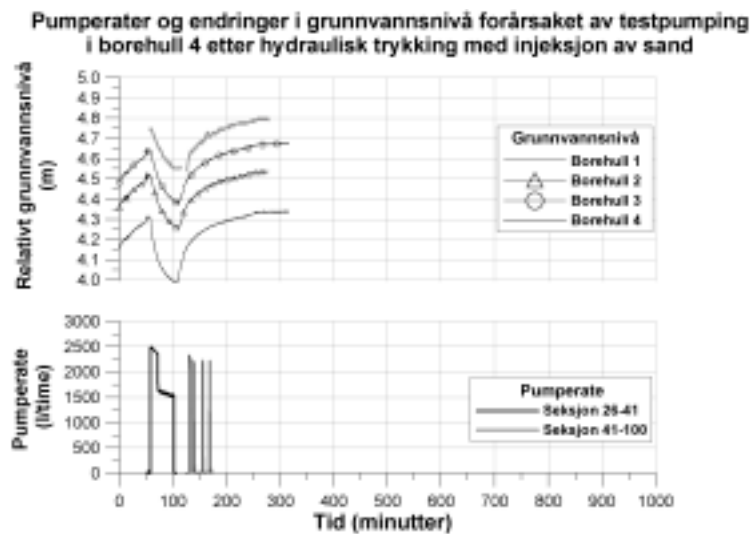
Figur 5–18: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 1 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



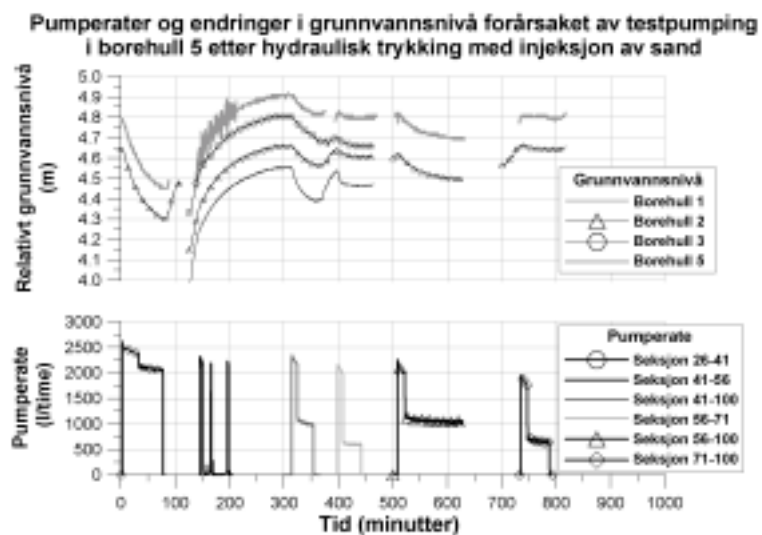
Figur 5–19: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 2 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



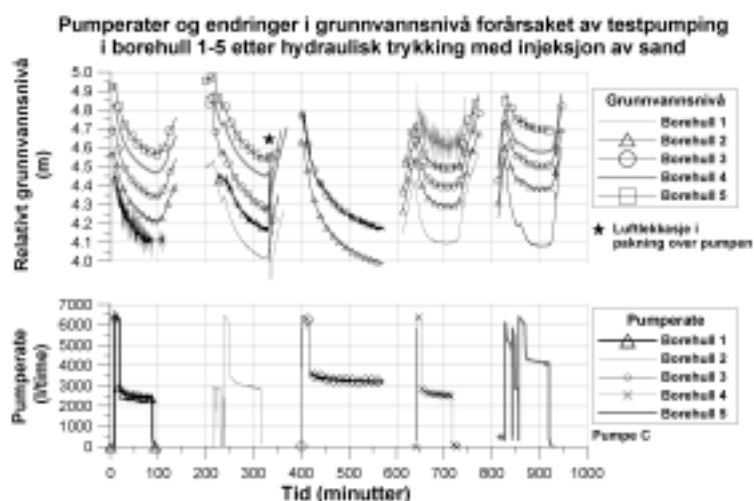
Figur 5–20: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 3 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 5–21: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 4 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 5–22: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av seksjonsvis testpumping i borehull 5 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



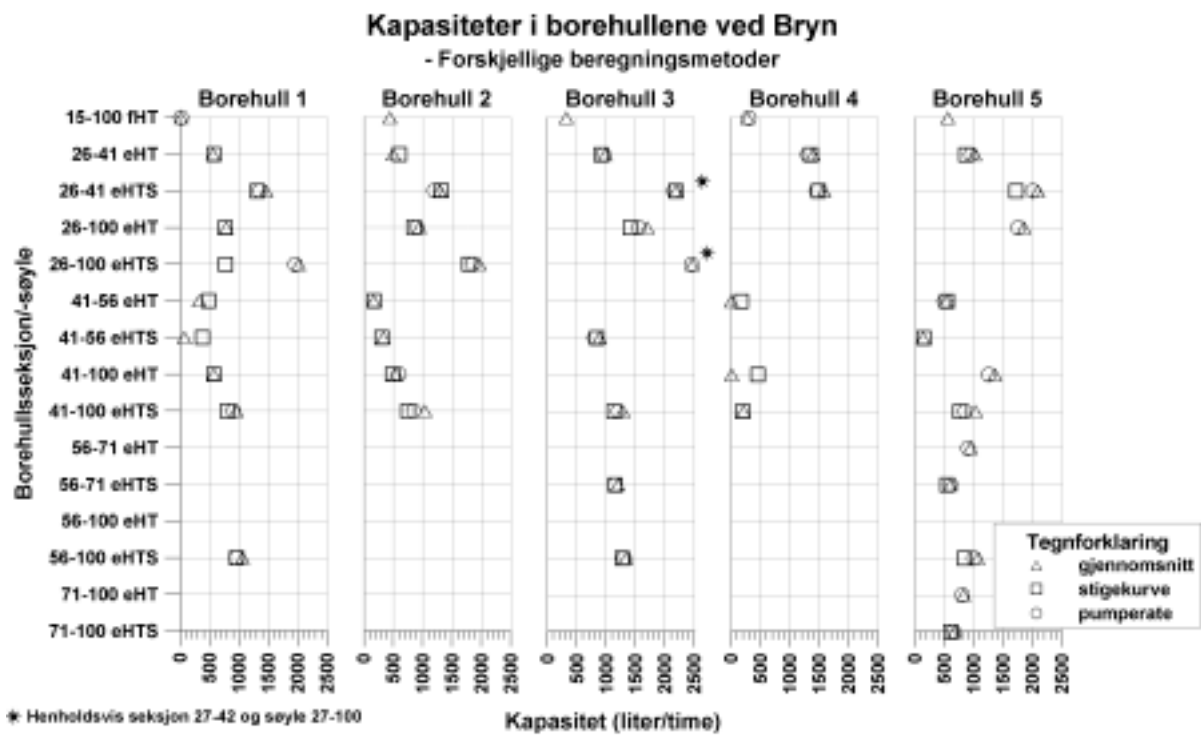
Figur 5–23: Pumperater og grunnvannsnivåendringer forårsaket av søyletestpumping i borehull 1, 2, 3, 4 og 5 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

I de fleste tilfellene følger grunnvannsnivåene i omkringliggende borehull et parallelt og nærmest identisk forløp under testpumpingen (figur 5–12 til 5–23). Unntaket er borehull 1 hvor det observeres større endringer i grunnvannsnivået under (a) seksjonspumping i borehull 3 og 5 etter hydraulisk trykking med vann, (b) seksjonspumping i borehull 3, 4 og deler av borehull 5 (seksjon 26-41, 41-100 og 56-71) etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand, og (c) ved testpumping med pumpe C i borehull 2, 4 og 5 etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

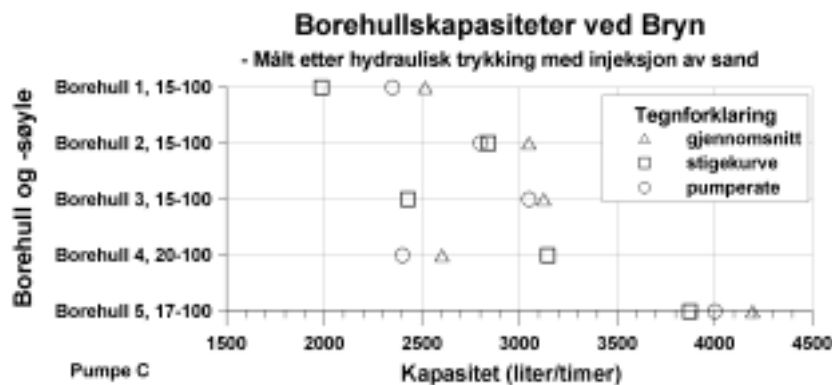
Vannkapasiteten for de forskjellige testpumpeseksjonene (figur 4–7), beregnet på tre forskjellige måter (avsnitt 2.4.4), er vist i figur 5–24. Betengelsene “fHT”, “eHT” og “eHTS” i diagrammene betyr henholdsvis “før hydraulisk trykking med bare vann”, “etter hydraulisk trykking med bare vann” og “etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand”. På tilsvarende måte er resultatene fra søyletestpumpingen med pumpe C etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand vist i figur 5–25.

Effekten av stimulering med hydraulisk trykking i form av økt vannkapasitet kan vises med en sammenstilling av utvalgte og sammenlignbare resultater fra testpumpingen ved Bryn (figur 5–26). All pumpingen er gjort med pumpe B. Resultatene som er brukt i sammenstillingen, basert på ekstrapolert verdi for pumperaten eller gjennomsnittlig pumpe rate, er hentet fra seksjonsvis testpumping i:

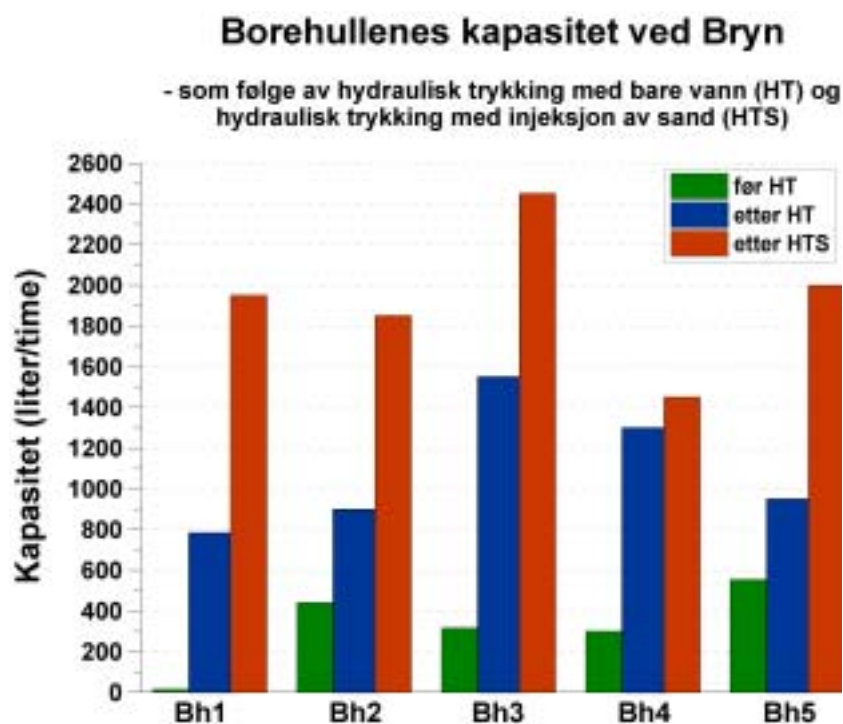
- Seksjon 15-100 for borehull 1-5 før hydraulisk trykking med bare vann,
- seksjon 26-100 for borehull 1, 2 og 3, og seksjon 26-41 for borehull 4 og 5 etter hydraulisk trykking med bare vann, og
- seksjon 26-100 for borehull 1, 2 og 3, og seksjon 26-41 for borehull 4 og 5 etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 5-24: Seksjons- og søylekapaciteter i borehullene ved Bryn, beregnet på tre forskjellige måter.



Figur 5-25: Borehullskapaciteter ved Bryn, beregnet på tre forskjellige måter. Dataene er hentet fra testpumping med pumpe C etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 5–26: Utvalgte og sammenlignbare resultater fra seksjons- og søyletestpumping gjennomført ved Bryn.

5.2.3 Endringer i borehullskapasiteten som følge av hydraulisk trykking

Figur 5–24 viser at kapasiteten har økt for de fleste borehullene og borehullsseksjonene som følge av hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand. En betydelig økning i borehullskapasiteten kan sees for alle borehullene i seksjon 26-41 og delvis i søyle 26-100. Siden et fullstendig sett med resultater fra søyle 26-100 ikke var tilgjengelig for borehull 4 og 5, ble resultatene fra seksjon 26-41 benyttet i sammenligningen av borehullenes kapasitetsendringer i figur 5–26. I forhold til resultatene fra borehull 1, 2 og 3 (figur 5–24) ville sannsynligvis borehull 4 og 5 hatt høyere kapasitet i sammenligningen (figur 5–26) hvis søyle 26-100 hadde blitt testet både før- og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

Hvilke deler av borehullene med best effekt av injeksjon av sand dypere enn 41 meter ble delvis avdekket med seksjonsvis testpumping før- og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 5–24). De viktigste funnene kan oppsummeres på følgende måte:

Borehull 1

Sammenfallende med resultatene fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand var kapasiteten for seksjon 41-56 i borehull 1, beregnet fra gjennomsnittlig pumperate og stigedata, tilnærmet uforandret. Kapasiteten i borehullssøyle 41-100 hadde økt. Hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1 ble utført i seksjon 32,0, 37,9 og 70,6, der bare 70,6-seksjonen er den eneste som kan ha påvirket kapasiteten i søyle 41-100.

Borehull 2

Selv om det ikke ble gjennomført hydraulisk trykking med injeksjon av sand innen seksjon 41-56 i borehull 2, observeres en liten økning i seksjonens kapasitet. Den lille økningen kan bare relateres til påvirkning fra hydraulisk trykking i omgivende borehull, eller betegnes som måleunøyaktighet. Samsvarende med hydraulisk trykking og injeksjon av sand i seksjonene 81,4, 85,1 og 90,8 observeres en større kapasitetesøkning for borehullssøyle 41-100.

Borehull 3

Ingen sammenlignbare resultater fra testpumpingen var tilgjengelig for den dypere delen av borehull 3.

Borehull 4

Den lave kapasiteten for søyle 41-100 i borehull 4 etter hydraulisk trykking med bare vann så ut til å være ytterligere redusert etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

Kapasitetsanslagene fra gjennomsnittlig pumperate og stigedata ved så lave pumperater (figur 5-16 og 5-21) bør kun ansees som veiledende verdier. Tatt i betraktning av at dypeste nivå for hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 4 var ved 37,9 meters dyp, er det sannsynlig at de hydrogeologiske forholdene i søyle 41-100 i borehull 4 er upåvirket av stimuleringen.

Borehull 5

Seksjon 41-56, 56-71, søyle 41-100 og 71-100 hadde lavere kapasitet etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand enn før. Borehullsseksjoner med injeksjon av sand dypere enn 41 meter var ved 41,2 og 75,7 meter. Vanntrykket før injeksjon av sand i 75,7-seksjonen stabiliserte seg ved omlag 70, og cirka 100 bar etter injeksjonen, mens trykknivået var 30-40 bar ved injeksjon av sand i seksjonen ved 41,2 meters dyp (figur 5-56). Det lave trykknivået ved injeksjon av sand i 41,2-seksjonen antyder en relativt åpen sprekk. Den målte kapasitetsreduksjonen for søyle 41-100, og økningen i seksjon 26-41 etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand, tyder på at det nevnte åpne sprekkenivået sannsynligvis ble inkludert i testpumpingen av seksjon 26-41. Det åpne sprekkenivået kan også befinne seg på grunnere dyp enn 41 meter. I tillegg kan enkelte unøyaktigheter i dybdeangivelsen relateres til nedsenkingen av utstyret for testpumping og hydraulisk trykking (avsnitt 5.6.3) i borehullet. En mindre endring i vannets temperatur- og elektriske ledningsevne ble observert ved 39 meters dyp (figur 5-43) etter hydraulisk trykking med bare vann og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Denne endringen representerer sannsynligvis en gjenåpning av sprekken forårsaket av hydraulisk trykking av seksjon 41,2. Den observerte kapasitetsreduksjonen ved større dyp enn 41 meter i borehull 5 viser at injeksjon av sand i 75,7-seksjonen var ineffektiv.

Tabell 5–4: Tidspunkt for forskjellige arbeidsoperasjoner relatert til geofysisk logging, hydraulisk trykking og test-pumping ved Bryn.

Dato	Arbeidsoperasjon
5.-6.12.2000	Geofysisk logging med optisk televiewer og TCN.
17.12.2000	Hydraulisk trykking med bare vann i borehull 3.
Totalt fire dager i perioden 15.-28.05.2001	Hydraulisk trykking med bare vann i borehull 1, 2, 4 og 5.
15.-16.06.2001	Geofysisk logging med optisk televiewer og TCN.
26.-29.06.2001	Seksjonsvis- og søyletestpumping av alle borehullene.
22.-25.10.2001	Hydraulisk trykking med injeksjon av sand i alle borehullene.
11.-12.11.2001	Geofysisk logging med optisk televiewer og TCN.
30.11.-07.12.2001	Seksjonsvis- og søyletestpumping av alle borehullene.

Seksjonsvis- og søyletestpumping ble utført omtrent en måned etter begge former for hydraulisk trykking (tabell 5–4). Bortsett fra borehull 3 ble hydraulisk trykking med bare vann og testpumping etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand gjort innenfor sju måneder. Ved å anta at injeksjon av sand i seksjonen ved 75,7 meters dyp var ineffektiv (se argumentasjon over), er den delen av borehull 5 som er dypere enn 41 meter kun vært påvirket av hydraulisk trykking med bare vann. På bakgrunn av dette kan kanskje den observerte kapasitetsreduksjonen i den dypere delen av borehull 5 forklares som en langtidseffekt av hydraulisk trykking med bare vann. De initierte- eller gjenåpnede sprekkekanaler kan til en viss grad ha lukket seg på grunn av bergspenningene i området. Dette er en kjent effekt av hydraulisk trykking med bare vann i litteraturen (Smith, 1989, og Gale and MacLeod, 1995). Den forholdsvis høye graden av oppsprekning som ble oppnådd ved hydraulisk trykking med bare vann av borehull 5, sammenlignet med resultatene fra de andre borehullene ved Bryn, kan ha forsterket den observerte kapasitetsreduksjonen. Fem av åtte trykk-tid forløp fra hydraulisk trykking med bare vann ved større dyp enn 41 meter i borehull 5 ble tolket til å være en initiering- eller gjenåpning av sprekker (figur 5–44 og 5–48). Blant disse, fire store- og en middels stor sprekke.

En grafisk fremstilling av kapasitetsøkningen i borehullene ved Bryn, relatert til hydraulisk trykking med bare vann, og tilhørende medianverdier for stabilt trykknivå etter sprekkeinitiering for sprekker tolket som store (figur 5–44) er presentert i figur 5–27. Den kvantitative kapasitetsøkningen gitt som liter/time viser at hydraulisk trykking med bare vann hadde best effekt i borehull 3, mens borehull 1 hadde den høyeste prosentvise kapasitetsøkningen på 5127%. Den store prosentvise økningen forklares med borehullets opprinnelige lave kapasitet. I store trekk viser den prosentvise- og kvantitative kapasitetsøkningen samme trend da borehull 1, 3 og 4 har høyest kapasitetsøkning, mens borehull 2 og 5 har minst økning. Borehull 1 og 4 har de laveste medianverdiene for stabilt trykknivå for sprekker tolket som store, mens tilsvarende verdier for borehull 2 og 5 er høyest. Med bakgrunn i det begrensede datamaterialet fra hydraulisk trykking med bare vann i Newfoundland, Kanada, hevdet Gale og MacLeod (1995) at det synes som at jo høyere injeksjonstrykk som kreves for å opprettholde maksimal strømningsrate, jo mindre økning i borehullskapasiteten. I denne sammenhengen vil injeksjonstrykket som kreves for å opprettholde maksimal strømningsrate tilsvare stabilt trykknivå. Til tross for et begrenset

datagrunnlag fra hydraulisk trykking med bare vann i borehullene ved Bryn, og bortsett fra borehull 3, samsvarer allikevel Gale og MacLeods (1995) observasjoner med resultatene fra Bryn. Borehull 3 oppnådde høy kapasitetsøkning til tross for relativt høy medianverdi for stabilt trykknivå. Trykkdataene fra hydraulisk trykking med bare vann i borehull 3 ved Bryn ble avlest manuelt (tabell 5–11), mens de ble målt digitalt i resten av borehullene (figur 5–45 til 5–48). Observasjoner i felt avslørte at analogt manometer viste cirka 20 bar høyere trykk enn de digitale trykkmålingene (avsnitt 5.2.9). Korrigert for dette, det vil si en reduksjon av medianverdien for stabilt trykknivå med cirka 20 bar for borehull 3, gjør at også observasjonene for borehull 3 samsvarer med Gale og MacLeods (1995) observasjoner.



Figur 5–27: Kapasitetsøkning etter hydraulisk trykking med bare vann og medianverdier for stabilt trykknivå for sprekker tolket som store.

Gale og MacLeod (1995) hevder også at store kapasitetsøkninger synes å henge sammen med mye backflow av uklart og sedimentholdig vann når overtrykket i borehullsseksjonene ventileres til atmosfæretrykk etter stimulering. En tilsvarende trend kan bare sees for borehull 1 og 4 ved Bryn, som har stor kapasitetsøkning, der fire observasjoner med farget backflow i hvert av borehullene relateres til gjenåpning eller initiering av sprekk. Tre av sprekkene i borehull 1 og 4 med farget backflow ble tolket som store (figur 5–44 og 5–49). De mest avvikende resultatene i forhold til Gale og MacLeod (1995), som nesten tyder på det motsatte, kan sees for borehull 3 og 5. Borehull 3 hadde størst kapasitetsøkning, mens borehull 5 hadde minst kapasitetsøkning. I borehull 3 var det kun to observasjoner av farget backflow relatert til gjenåpning eller initiering av sprekker tolket som store, mens tilsvarende tall for borehull 5 var fire. For borehull 2, med en relativt moderat kapasitetsøkning, ble farget backflow fra en stor- og to middels store sprekker ble observert etter hydraulisk trykking med bare vann (figur 5–49).

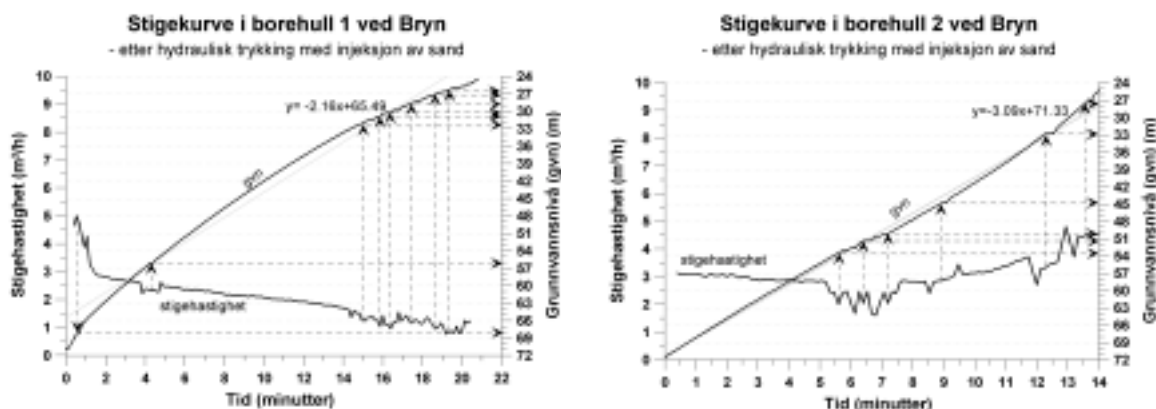
Svakheten ved metoden, seksjonvis- og søyletestpumping som et mål på sammenlignbare borehullskapasiteter etter hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand, kan relateres til flere forhold. Kun testpumping der samme type pumpe har

vært plassert på samme dyp, det vil si samme løftehøyde, betraktes som helt sammenlignbare. Forskjellig plassering av pumpen vil føre til at det måles forskjellige kapasiteter på grunn av endret løftehøyde og friksjonstap i tynne vannførende sprekker. Små lekkasjer mellom tettpakningen og borehullsveggen og tilhørende høyere kapasitet kan ha forekommet under seksjons- og søyletestpumpingen. Mindre unøyaktigheter kan også være knyttet til dybdeangivelsen for utstyret som har vært benyttet til alle former for undersøkelser, utført som separate arbeidsoperasjoner (avsnitt 5.2.8).

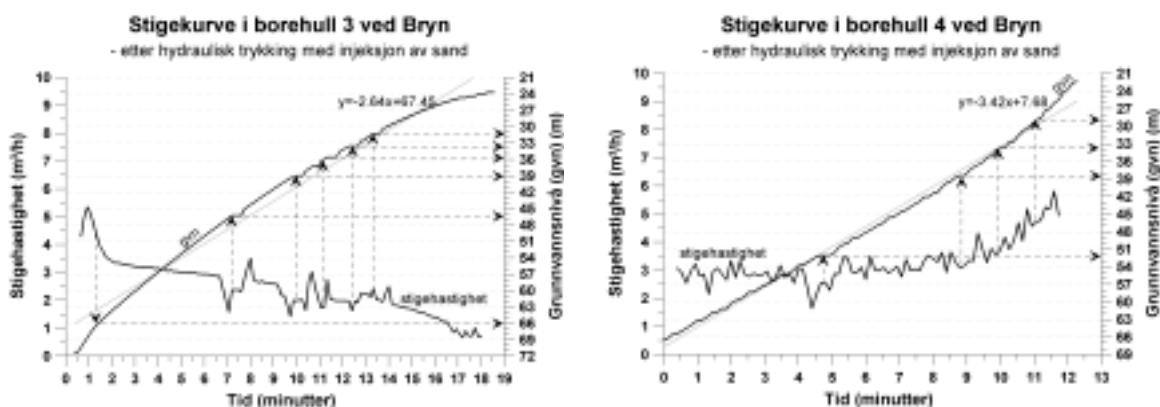
5.2.4 Stigekurver

Stigekurver, som viser grunnvannsnivået i borehullet etter avsluttet pumping, er utformet av data fra testpumping i borehullene ved Bryn. Grunnvannets stige-hastigheter er også angitt. Utflating av stigekurvene, og minimumsverdier for grunnvannets stige-hastighet kan representere større vanninnslag i borehullet, og er merket med piler. Figur 5–28 til 5–30 viser stigekurver etter testpumping med pumpe C i alle borehullene ved Bryn. Stigekurver fra seksjonsvis testpumping med pumpe B utført etter hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand er samlet i databilag 1.

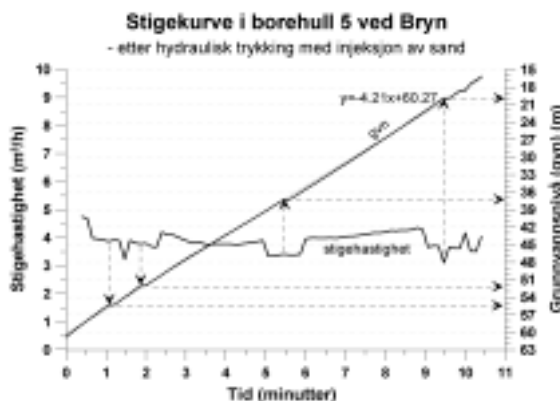
Synkekurvene fra testpumpingen ved Bryn er ikke tatt med på grunn av dårlig samsvarende resulater med stigekurvene. Synkekurvenes reduserte kvalitet var sannsynligvis forårsaket av: 1) Forstyrrelser skapt av ukontrollerte variasjoner i pumperaten, og 2) redusert pumpekapasitet med økende løftehøyde (avsnitt 2.4.3).



Figur 5–28: Stigekurve for borehull 1 og 2 ved Bryn. Mulige vanninnslag er markert.



Figur 5–29: Stigekurve for borehull 3 og 4 ved Bryn. Mulige vanninnslag er markert.



Figur 5–30: Stigekurve for borehull 5 ved Bryn. Mulige vanninnslag er markert.

5.2.5 Grunnvannskvalitet

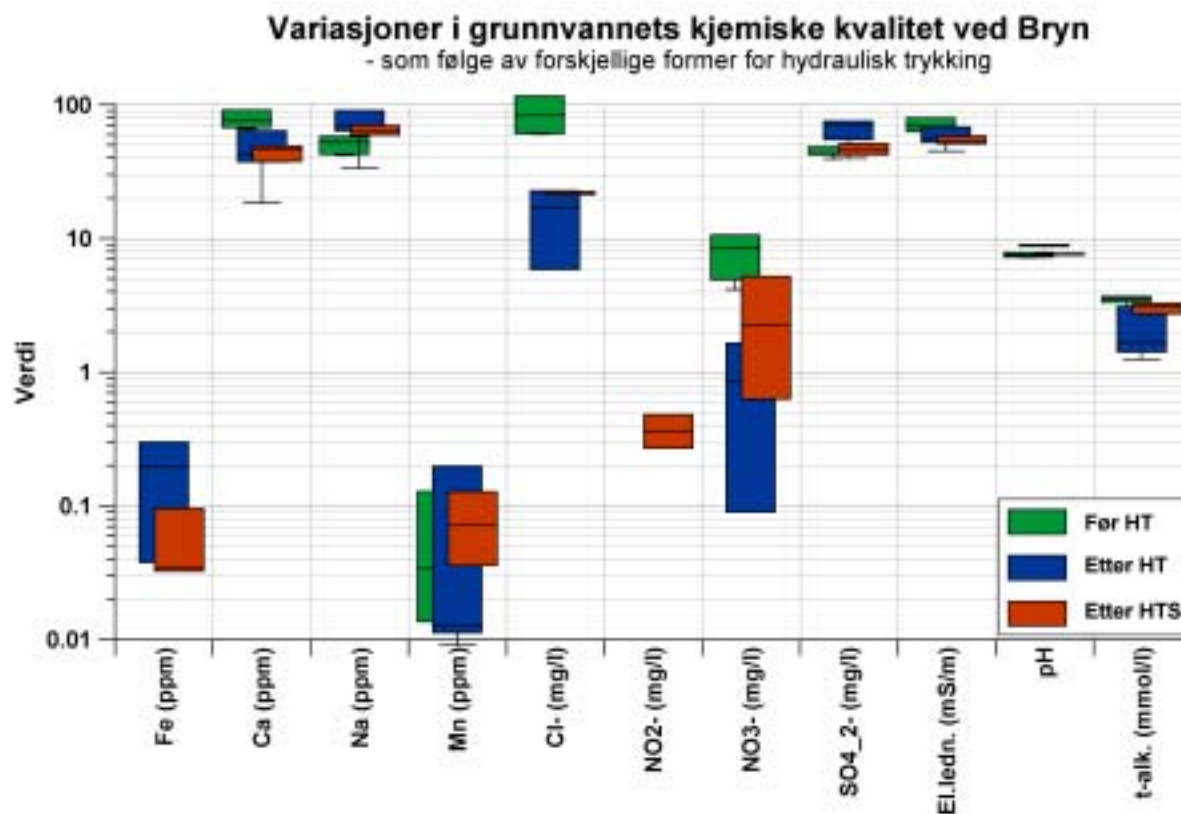
Figur 5–31 gir en boksplottpresentasjon av utvalgte resultater fra vannanalysene utført på grunnvannsprøvene samlet inn under testpumpingen ved Bryn (figur 4–7). Analyseverdiene er hentet fra NGU-Lab (2001a, 2001b og 2002a). Grunnvannet i borehullene ved Bryn karakteriseres som kalsiumrikt med forholdsvis høye verdier av løst natrium og klorid.

De største endringene for noen av parameterne observeres etter hydraulisk trykking med bare vann der verdiene for klor og NO_3^- var betydelig redusert. Mindre reduksjoner ble registrert for kalsium og total alkalitet, mens verdiene for natrium og sulfat økte litt. Jern ble også introdusert i vannet. Bortsett fra for borehull 4 er pH-verdien vesentlig høyere etter hydraulisk trykking med vann sammenlignet med de to andre målingene (figur 5–32). Siden vannprøven i borehull 4 ble tatt fra de øverste 26 meterne av borehullet, er det sannsynlig at prøven bestod av vann fra den åpne sprekkesonen ved 17 meter. Tilsvarende vannprøver fra de andre borehullene ble samlet inn under testpumpingen med pumpe B i den dypere delen av borehullene (figur 4–7), der vannet, sammenlignet med innstrømmende vann fra den åpne sprekkesonen ved 17 meter i borehull 4, er relativt stillestående. Frengstad (2002) viste at det er en tydelig sammenheng mellom grunnvannets økende median pH-verdi og økende borehulldyp. Det samme mønsteret sees for natrium, mens medianverdiene for NO_3^-

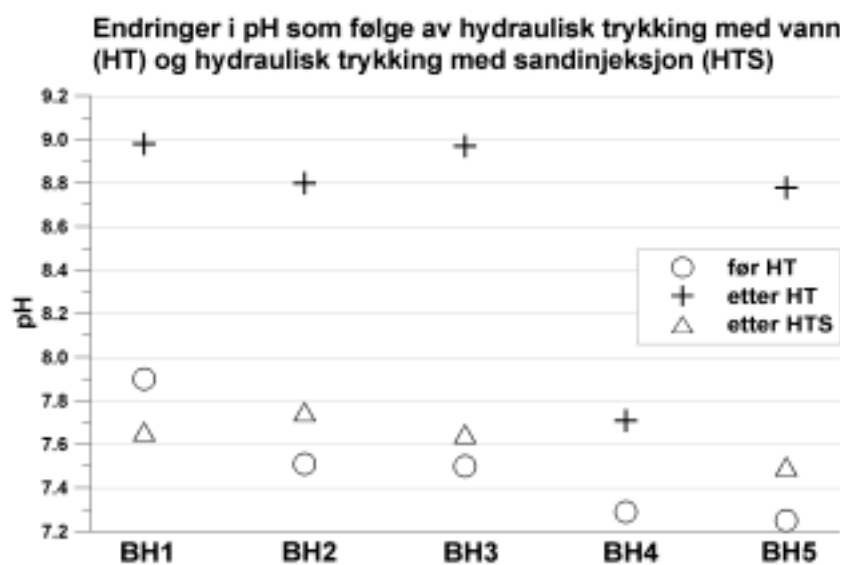
konsentrasjonene ser ut til å avta med økende borehullsdyp. I tillegg forventes det at vann fra en stor sprekk med høy kapasitet har lavere ioneinnhold sammenlignet med vann fra mange mindre sprekker der kontakflate mellom vann og berggrunn er større. Den høye pH-verdien etter hydraulisk trykking med bare vann sammen med lavere kalsiumkonsentrasjon og lavere verdi for total alkalitet kan tyde på en interaksjon mellom vann og berggrunn der bikarbonat er mettet. Den reduserte konsentrasjonen av klor kan være et resultat av fortykning i forbindelse med injeksjon av vann, eller forårsaket av pumping av gammelt vann som er upåvirket av kvartære avsetninger. Den siste forklaringen støtter også den økende sulfatverdien. Introduksjon av jern kan være et resultat av mer reduserende grunnvannsforhold.

Økningen av NO_2^- og NO_3^- etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand kan være et resultat av injeksjon av fortykningsmiddelet guar gum som en del av den viskøse sandblandningen. pH-verdien, total alkalinitet og sulfat går tilbake til sitt opprinnelige nivå, klor-, kalsium-, jern- og mangankonsentrasjonene forblir stabile, mens en liten økning kan sees for natriuminnholdet. Disse observasjonene tyder på at vannet har kortere oppholdstid og lavere elektrisk ledningsevne, og samsvarer med at vann pumpes fra de største vannførende sprekke i den øvre delen av borehullssøylen (figur 5–24). Selv om pumpe C var plassert ved 62 til 72 meters dyp, så er denne pumpen mye sterkere enn pumpe B (figur 2–23) og vil i større grad klare å trekke på vann fra de store vanninnslagene i den øvre delen av borehullssøylen, men under tettpakningen som stengte av den naturlige sprekkesonen.

Grunnvannskvaliteten i borehullene ved Bryn anses som tilfredsstillende for grunnvarmeanlegg med direkte bruk av oppumpet grunnvann. Grenseverdiene fra avsnitt 2.5 ble ikke overskredet. Men maksimumskonsentrasjonene for jern og mangan på henholdsvis 0,3 og 0,2 mg/l (figur 5–31) kan øke i driftsmodus og forårsake driftsproblemer med tilstopping av varmeveksleren, sprekkplan og pumpeinstallasjoner. I tillegg er konsentrasjonen av kalsium noe høy, og det anbefales et hensiktsmessig overvåkningsprogram av grunnvannskvaliteten.



Figur 5-31: Utvalgte resultater fra grunnvannsanalysene innsamlet ved testpumping ved Bryn (basert på data fra NGU-Lab, 2001a, 2001b og 2002a).



Figur 5-32: pH-verdier før og etter hydraulisk trykking med bare vann (HT), og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS).

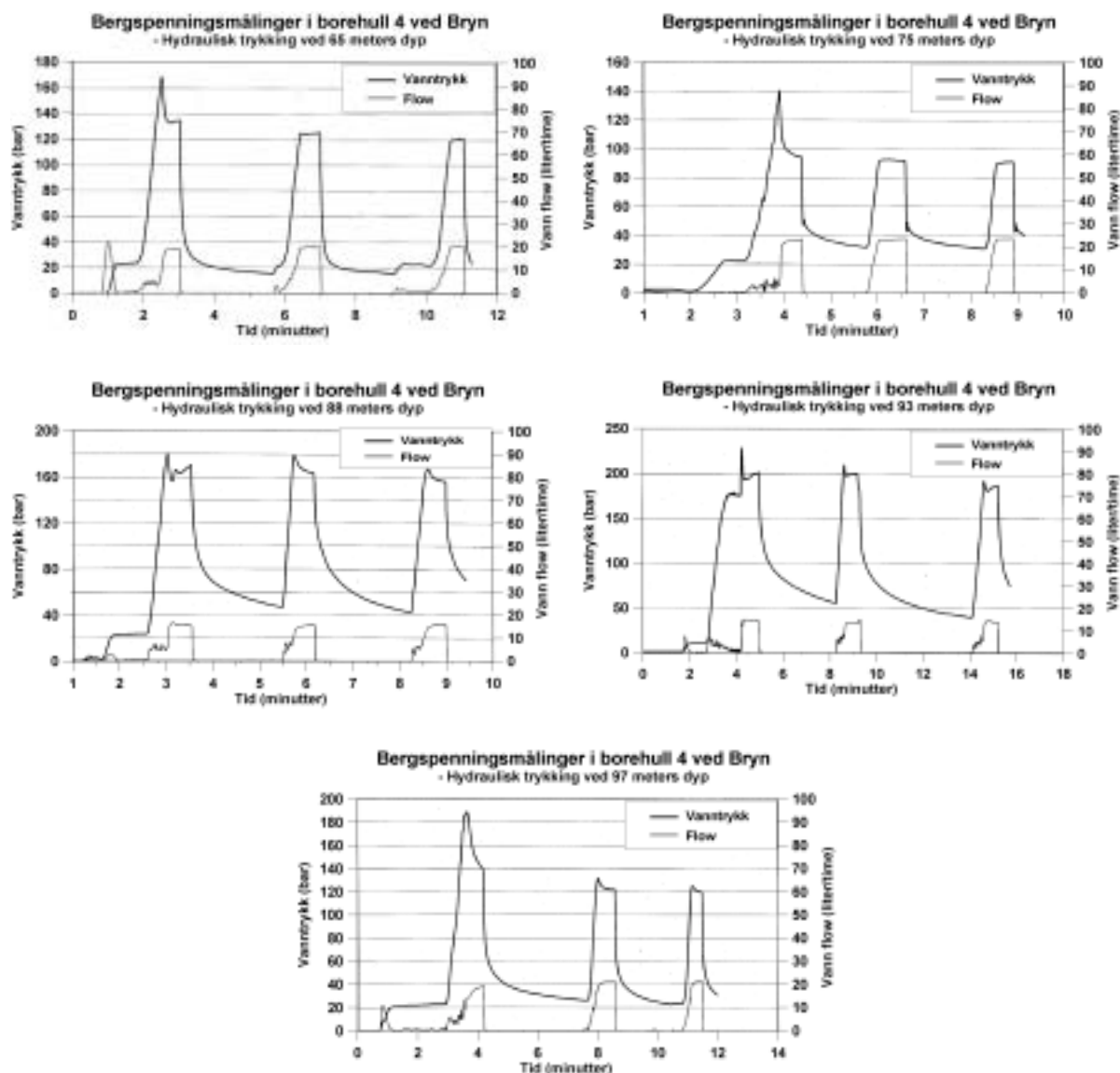
5.2.6 Bergspenninger

Avsnittet er i hovedsak basert på Jóhannsson (2001).

Alle de fem splittetestene for måling av bergspenninger utført i borehull 4 anses som vellykkede. En markert oppsprekning ble registrert for alle testseksjonene i første syklus, mens det er en like klar jekking av den initierte sprekken(e) i påfølgende sykluser (figur 5–33). Testene viser at oppsprekningstrykket i første testsyklus varierer fra 140-228 bar, mens gjenåpningstrykket er mellom 33-129 bar. Lukketrykket, som er et mål på verdien av minste hovedspenning, varierer mellom 46-167 bar. Verdien for minste hovedspenning befinner seg derfor mellom 4,5-16,5 MPa. Den teoretiske verdien for bergartenes strekkfastet, beregnet som differansen mellom initielt oppsprekningstrykk og gjenåpningstrykk i andre og tredje syklus, er i størrelsesorden 7-11 MPa. Alle resultatene fra bergspenningsmålingene med hydraulisk trykking er samlet i tabell 5–5. Bilder tatt med optisk televiewer for å orientere de nye sprekkeene ga ingen resultat. Ved å sammenligne bilder tatt før og etter spenningsmålingene var det umulig å oppdage endringer i borehullsveggen. Ut fra tidligere erfaringer er det mulig at største horisontale spenning er orientert parallelt det dominerende, vertikale sprekkesystemet i området (Jóhannsson, 2001)

Tabell 5–5: Bergspenninger fra hydrauliske splittetester ved Bryn (Jóhannsson, 2001).

Borehulls- dyp (m)	Oppsprek- ningstrykk P_c (bar)	Gjenåpningstrykk P_f (bar)		Lukketrykk P_s (bar)			Anslått største hovedspenning (MPa)
		2. syklus	3. syklus	1. syklus	2. syklus	3. syklus	
97	188	82	76	92	67	65	15
93	228	129	125	167	144	136	32
88	180	108	110	127	123	107	25
75	140	33	35	49	47	46	11
65	168	55	54	60	72	53	13



Figur 5–33: Vanntrykk og vannstrømning plottet mot tid. En markert oppsplitting av intakt bergmasse finner sted i første syklus. I syklus to og tre vises en like klar jekking av den initierte sprekken(e) (Jóhannsson, 2001).

5.2.7 Borehullenes beskaffenhet - oppsprekning, temperatur, ledningsevne og radioaktivitet

Borehullsinspeksjon og sprekkekartlegging ved bruk av optisk televiwer muliggjorde en strategisk plassering av dobbeltmansjetten ved hydraulisk trykking. Endringer i borehullsveggen som følge av hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand kan i enkelte tilfeller registreres, for eksempel i borehull 2 ved om lag 82 meters dyp (figur 5–34). Bildeutsnittene fra borehull 2 er hentet fra borehullslogg tatt henholdsvis før og etter hydraulisk trykking med vann, og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Sprekke ved 82,2 meters dyp er tydelig mer åpen etter hydraulisk trykking med både vann og sand. Sprekkeroser fra borehull 1-5 (figur 5–35), laget ut i fra optisk televiwer og sprekkeregistreringer i borehullsveggene, viser at hovedsprekkeretningen i Brynområdet er omtrent nord-sør. Hovedsprekkeretningens fallvinkelen varierer mellom 40-

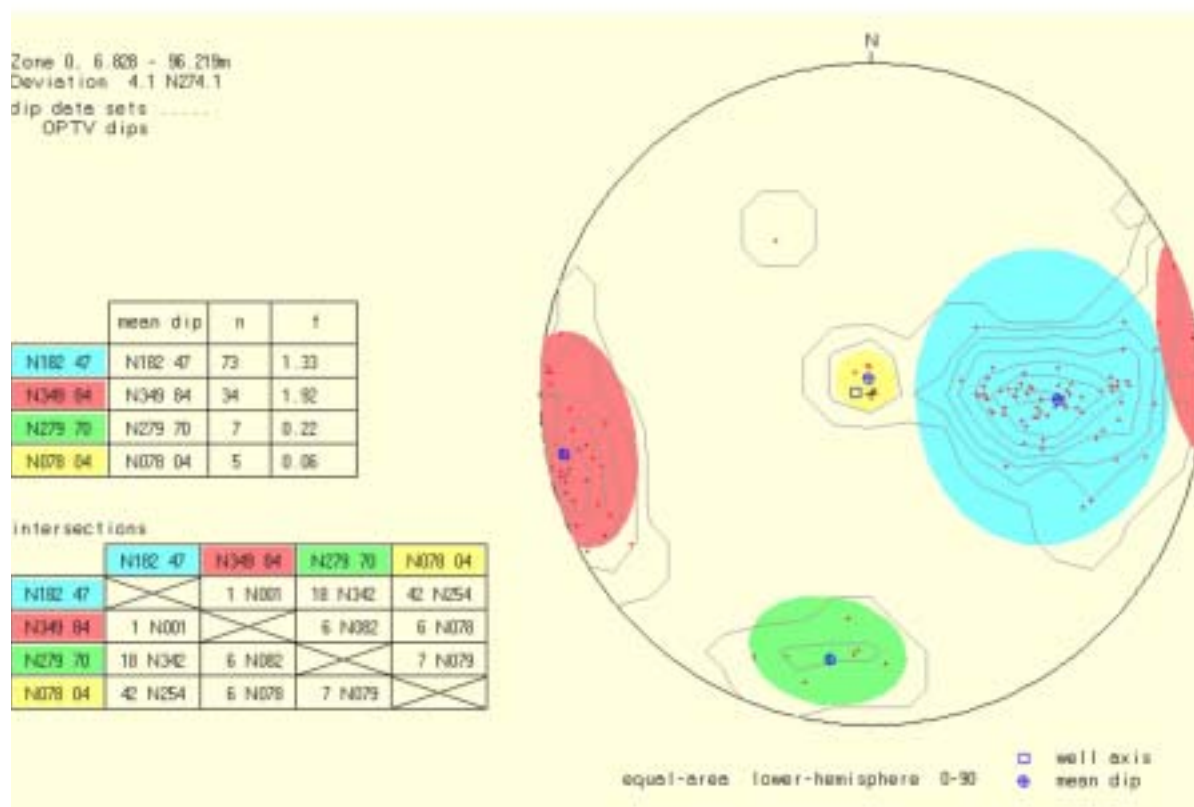
60° mot vest med et gjennomsnitt på 47°. Et eksempel på et sprekestereogram og tilhørende sprekefrekvenshistogram, basert på en analyse av optisk televieverlogg fra borehull 1, er presentert i henholdsvis figur 5–36 og 5–37. Tilsvarende stereogram og histogram for de andre borehullene ved Bryn er samlet i Databilag 2. Den øverste tabellen til venstre for stereogrammet (figur 5–36) gir en oversikt over middelveien for strøketretningen og fallvinkelen, antall sprekeobservasjoner og middelveien for borehullets spreketetthet for hvert sprekesystem. Den nederste tabellen presenterer middelveien for strøk- og fallretningen for skjæringslinjen mellom to midlere sprekeplan. De forskjellige fargene i tilhørende sprekefrekvenshistogram (5–37) samsvarer med de identifiserte sprekesystemene i stereogrammet. Hver sprekeobservasjon er tegnet inn som piler med den aktuelle fallvinkelen i den venstre delen av diagrammet, og pilens hale indikerer sprekkens fallretning der nord er definert opp. Sprekefrekvenshistogrammene i midten av figuren presenterer spreketettheten som antall sprekker per borehullsmeter for det aktuelle sprekesystemet innen den aktuelle sonen. Borehullet er delt inn i flere soner som er indikert med svarte horisontale linjer. Tallet over frekvenshistogrammene angir middelveien for sprekesonens strøketretning og fallvinkel, mens linjen under angir spreketettheten for hele borehullet. Kolonnen til høyre presenterer borehullsavviket fra lodd der pilens hale angir avvikets fallretning.



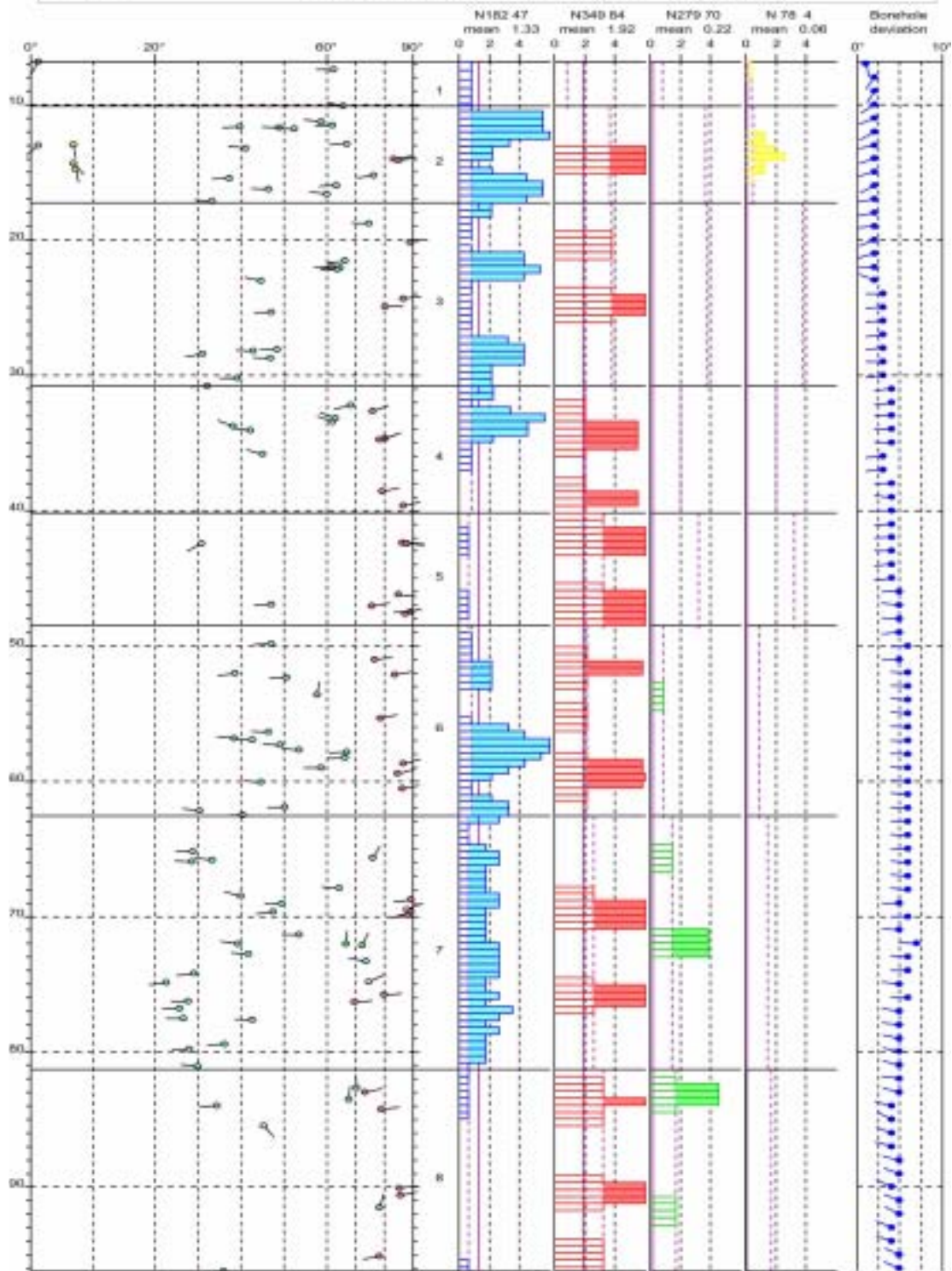
Figur 5–34: Bildene, tatt med optisk televiever, viser et utsnitt av borehull 2 før hydraulisk trykking (venstre), etter hydraulisk trykking med bare vann (midten) og etter hydraulisk trykking med vann iblandet fortykningsmiddel og kvartssand (høyre). Sprekk 82,2 meter under topp rør er tydelig mer åpen etter hydraulisk trykking med både vann og -sand.



Figur 5–35: Sprekkeroser fra borehull 1-5 ved Bryn. Fallvinkelen for hovedsprekeretningen varierer mellom 40-60° mot vest.

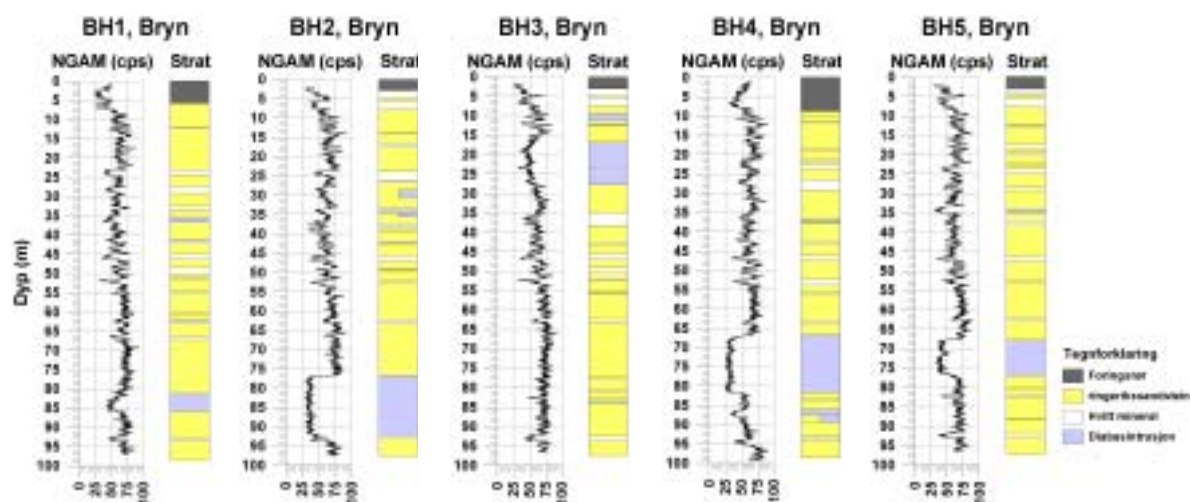


Figur 5-36: Sprekkestereogram for borehull 1. Angitte farger representer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekeanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 5-37).



Figur 5-37: Frekvenshistogram for borehull 1 ved Bryn. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med tilhørende stereogram (figur 5-36).

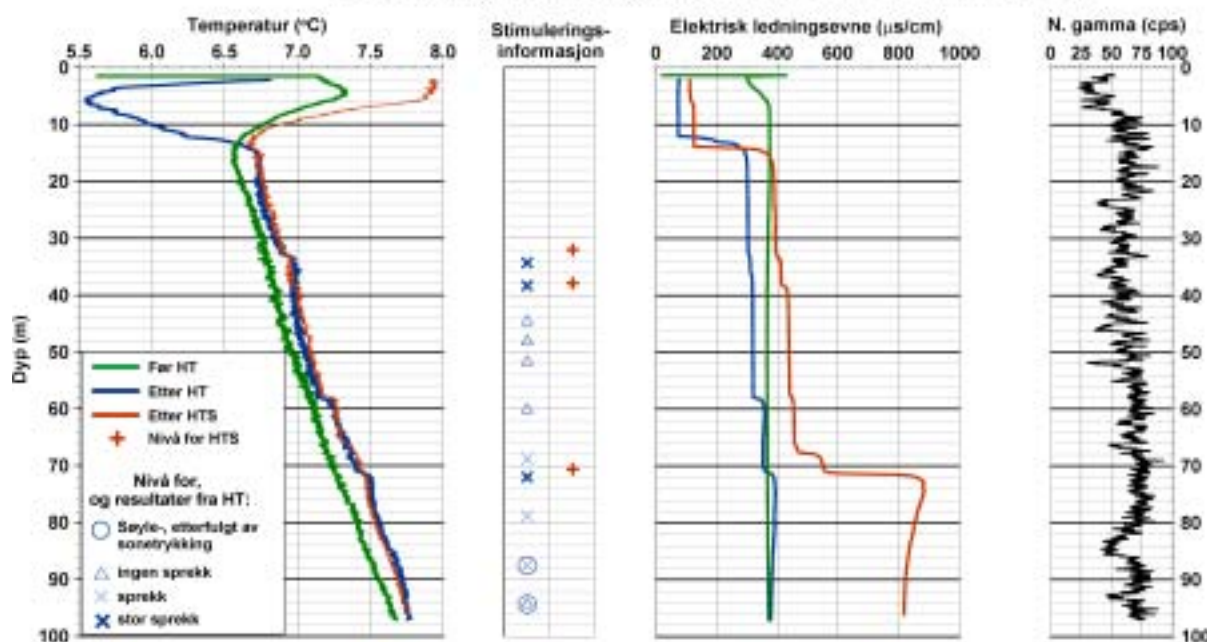
Med basis i videoopptakene fra borehullene og logg for naturlig gammastråling, er det laget en grov oversikt over bergartenes lagrekkefølge (figur 5–38). Tre stratigrafiske enheter skiller seg ut: (1) sandstein med vekslende lys og mørk lagdeling (ringerikssandstein), (2) en homogen enhet dominert av et hvitt mineral med lavere gammastråling enn sandsteinen, sannsynligvis kvarts, og (3) en diabas intrusjon. Diabas intrusjonen har et lavere strålingsnivå enn de omkringliggende enheter, og kan beskrives som en mørk grå og homogen bergart. Diabas intrusjoner er vanlig forekommende i området.



Figur 5–38: En forenklet oversikt over den stratigrafiske lagrekkefølgen i borehull 1-5 ved Bryn.

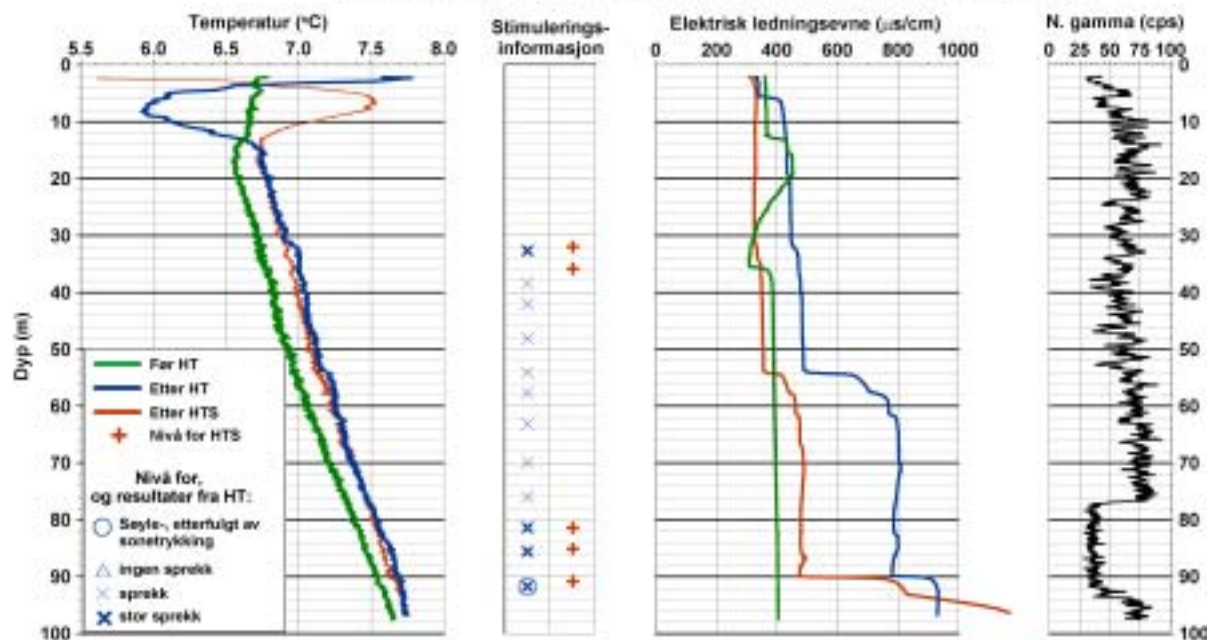
Temperatur- og elektriske ledningsevnelogg av vannet i borehull 1 til 5 ved Bryn, målt før og etter hydraulisk trykking med bare vann og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand, er presentert sammen med logg for naturlig gammastråling og nivåer for- og resultater av de forskjellige former for hydraulisk trykking i figur 5–39 til 5–43. Uforstyrret grunnvannsnivå var ved 0-1 meters dyp for borehull 1, 2, 3 og 5, og ved cirka 5 meter i borehull 4. Den naturlige og horisontale sprekkesonen ved 12-13 meters dyp i borehull 1, 2, 3 og 5, og ved 17 meters dyp i borehull 4, gir tydelige utslag på både temperatur og ledningsevneloggene. Loggingen ble utført til forskjellig tid på året og temperaturen i de øvre 15-20 meterne av borehullet er tydelig påvirket av årstidsvariasjoner i lufttemperaturen. Endringer i vannets temperatur og/eller elektriske ledningsevne forårsaket av hydraulisk trykking med bare vann eller hydraulisk trykking med injeksjon av sand, tyder på at nye eller eksisterende sprekker er dannet eller gjenåpnet innenfor noen av de stimulerte seksjonene.

TCN-logger og stimuleringsinformasjon for borehull 1 ved Bryn



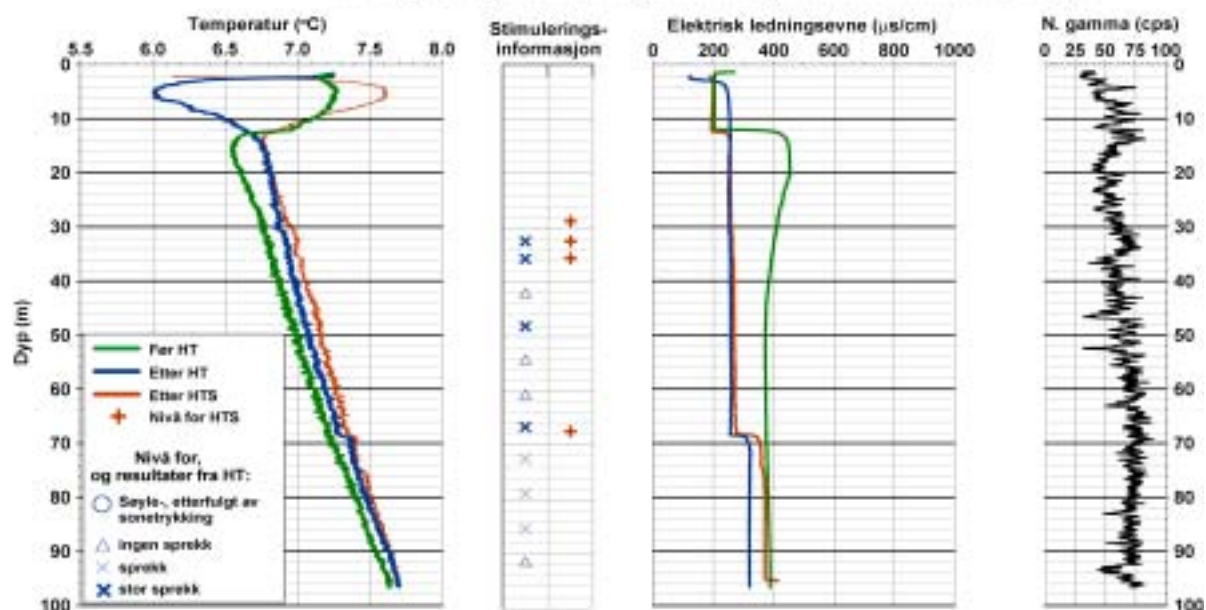
Figur 5–39: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med bare vann (HT) og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 1 ved Bryn.

TCN-logger og stimuleringsinformasjon for borehull 2 ved Bryn



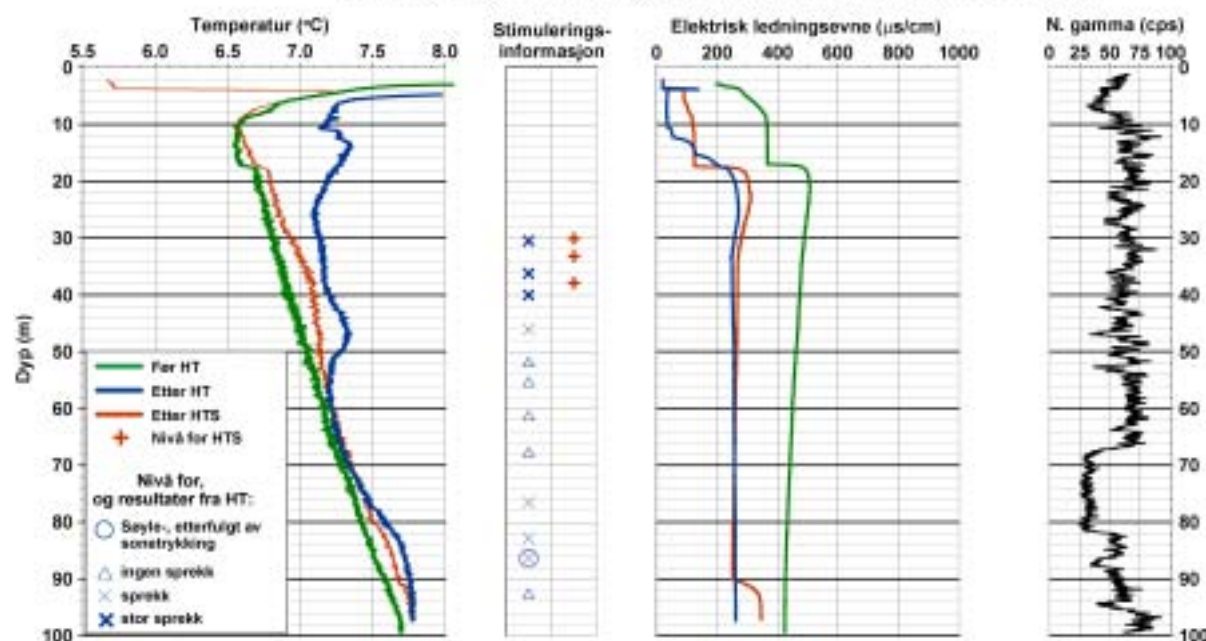
Figur 5–40: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med bare vann (HT) og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 2 ved Bryn.

TCN-logger og stimuleringsinformasjon for borehull 3 ved Bryn

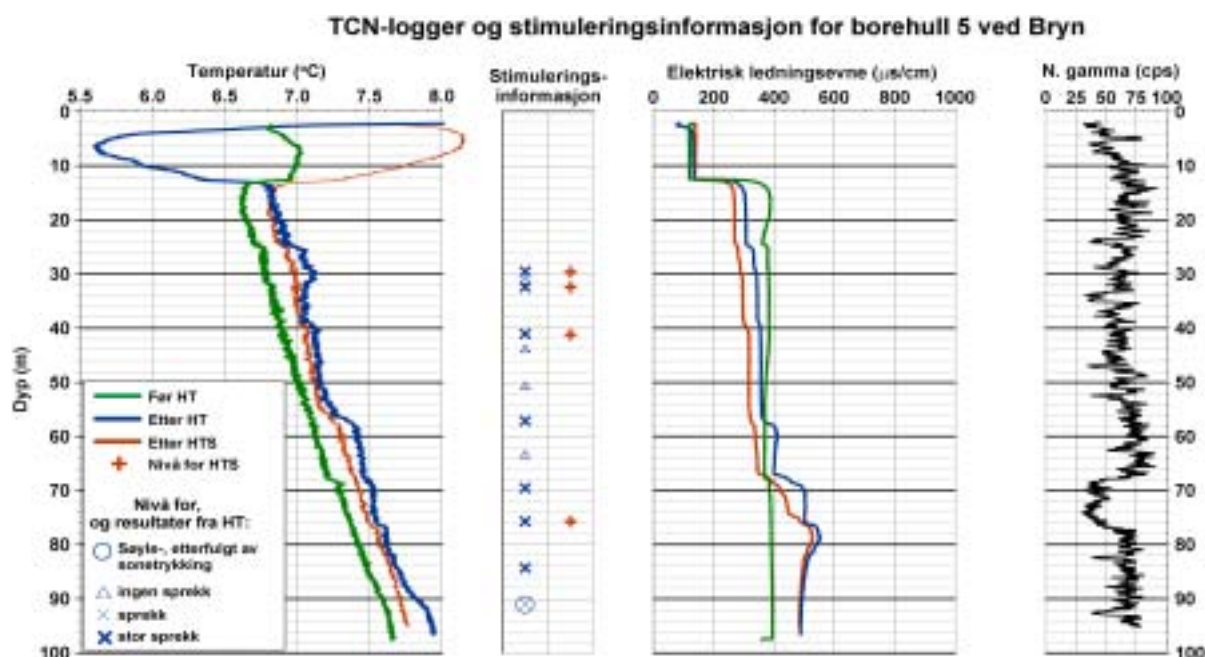


Figur 5-41: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med bare vann (HT) og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 3 ved Bryn.

TCN-logger og stimuleringsinformasjon for borehull 4 ved Bryn



Figur 5-42: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med bare vann (HT) og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 4 ved Bryn.



Figur 5–43: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med bare vann (HT) og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 5 ved Bryn.

5.2.8 Identifisering av mulige nye vanninnslag i borehullene

Et forsøk på å identifisere nye vanninnslag i borehullene ved Bryn har blitt gjort for å verifisere effektiviteten av hydraulisk trykking. I denne sammenhengen betraktes en ny- eller gjenåpnet og vannførende sprekk som en bekreftelse på en vellykket stimulering med hydraulisk trykking i den aktuelle borehullsseksjonen. Identifisering av mulige nye vanninnslag i borehullene ved Bryn er gjennomført med utgangspunkt i figur 5–39 til 5–43 som viser logg for vannets temperatur- og elektriske ledningsevne sammen med nivå for-, og resultat fra de forskjellige former for hydraulisk trykking. Fysiske endringer i vannets temperatur- og ledningsevneegenskaper opptrer som ujevnheter eller knekk på kurven. De største endringene kan sees på ledningsevneloggen, ofte verifisert av mindre endringer i temperaturen. Bortsett fra uregelmessighetene ved 36 og 68 meters dyp i henholdsvis borehull 2 og 5, er de kjemiske forholdene i borehullene før hydraulisk trykking, her representert ved kurvene som viser elektrisk ledningsevne, konstante ved større dyp enn 25 meter. Tilsvarende til ledningsevneloggene og bortsett fra en mindre uregelmessighet ved 68 meters dyp i borehull 5, viser temperaturdataene en jevn økning mot dypet. Temperaturgradienten er $13,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Alle knekkpunktene på temperatur- og elektriske ledningsevneloggen, målt etter hydraulisk trykking med bare vann og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand, representerer en økning i måleverdien.

Generelt sett vil innstrømmende grunnvann ofte ha de samme fysiske og kjemiske egenskapene som vannet i borehullet forøvrig, og slike vanninnslag vil ikke være synlige på loggen for borehullsvannets temperatur- og ledningsevne. Stigedata (figur 5–28 til 5–30) fra testpumping med pumpe C etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand er sammenlignet med resultatene fra den geofysiske loggingen og nivåer stimulert med hydraulisk trykking (figur 5–39 til 5–43). Urealistisk mange vanninnslag er markert på enkelte av stigekurvene,

og resultatene fra stigedataene må betraktes som usikre. Små variasjoner og usikkerheter knyttet til dybdeangivelsen må tas hensyn til i sammenligningen av alle dataene, innsamlet på seks forskjellige tidspunkt. Innsamling av benyttede data er knyttet til følgende aktiviteter: (1) hydraulisk trykking med bare vann, og (2) hydraulisk trykking med injeksjon av sand, (3-5) måling av vannets temperatur- og elektriske ledningsevne, utført før- og etter hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand, og (6) testpumping med innsamling av stigedata. I tillegg ble det oppdaget unøyaktigheter i dybdeangivelsen til senke- og løfteutstyret som ble brukt i arbeidet med hydraulisk trykking (punkt 1 og 2) (avsnitt 5.6.3). Mulige nye vanninnslag i borehull 1 til 5, forårsaket av hydraulisk trykking, er identifisert ved hjelp av alle tilgjengelige data og presentert i henholdsvis tabell 5–6 til 5–10. Med forkortelsene **HT** og **HTS** menes henholdsvis *hydraulisk trykking med bare vann* og *hydraulisk trykking med injeksjon av sand*.

Tabell 5–6: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 1 ved Bryn.

Når	Data	Observasjon	Diskusjon
etter HT	el. ledn. & temp.	To uregelmessigheter er identifisert på logg for elektrisk ledningsevne ved 58 og 71 meter, og et mindre avvik på temperaturgradienten kan sees ved 34 meter.	Hendelsene ved 71 og 34 meter kan relateres til hydraulisk trykking av henholdsvis seksjon 72,0 og 34,3 (figur 5–39) der oppsprekningen er tolket som stor. Det høye trykknivået (160-200 bar, figur 5–45) ved stimulering av seksjon 59,8 ble ansett å være for høyt til å representere en oppsprekning, og hendelsen ved 58 meter kan neppe relateres til stimuleringen.
etter HTS	el. ledn. & temp.	Hendelse ved 58 meter.	Hendelsen var også synlig etter hydraulisk trykking med bare vann.
etter HTS	el. ledn.	Knekk på kurven er observert ved 33, 38, 68 og 71 meters dyp.	Tre av hendelsene kan relateres til injeksjon av sand i borehullsseksjonene ved 32,0, 37,9 og 70,6 meter. En betydelig økning i ledningsevnen ved 71 meter, fra omlag 550 til 900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ antyder en betydelig innstrømning av ionerikt vann. Hendelsen ved 68 meter kan ikke relateres til injeksjon av sand, men til hydraulisk trykking med bare vann i seksjon 68,8. Denne hendelsen var imidlertid ikke synlig etter hydraulisk trykking med bare vann.
etter HTS	stige	Stigekurve: 56 og 32-27 meter.	Av disse observasjonene verifiseres delvis mulige vanninnslag ved 32-27 av logg for vannets temperatur og elektriske ledningsevne. Mulige vanninnslag ved 55 og 56 meter kan muligens knyttes til tidligere observasjoner ved 58 meter.

Tabell 5–7: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 2 ved Bryn.

Når	Data	Observasjon	Diskusjon
før HT		Normalverdien for vannets	elektriske ledningsevne i borehull 2 angir en uregelmessighet ved 36 meter.
etter HT	el. ledn.	To betydelige hendelser ved 54 og 90 meter, og fem mindre ved 32, 58, 62, 63, 71 og 83-86 meter.	Endringene i verdiene for vannets ledningsevne samsvarer med resultatene fra hydraulisk trykking med vann der oppsprekningen er tolket som middels- eller stor i seksjonene ved 32,7, 54,1, 57,7, 63,1, 69,9, 81,4 og 85,6 (figur 5–40). Sprekken dannet ved stimulering av 81,4-seksjonen finnes også igjen på optisk televiewer logg ved 82,2 meters dyp både etter hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 5–34). Hydraulisk trykking med bare vann av 91,7-nivået som søyle, etterfulgt av seksjonstrykking, resulterte i gjenåpning eller initiering av en stor sprekk (figur 5–40). Avstanden mellom denne borehullsseksjonen og nivået hvor den elektriske ledningsevnen øker fra 750 til 950 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ved 90 meter er egentlig for stor til å kunne relateres til hverandre. Små unøyaktigheter i dybdeangivelsen kan ha forekommet, og det er ikke urealistisk at den nye vannførende sprekken er forårsaket av hydraulisk trykking med bare vann.
etter HT	Temp	Hendelser ved 32 og 54 meter.	Hendelsene ved 32 og 54 meter observeres også på temperaturloggen.
etter HTS	el. ledn.	Uregelmessigheter på ledningsevneloggen ved 35, 54, 58, 62, 67, 86, 90 og 93 meter. Hendelsene ved 54, 58, 62 og 90 meter var også tilstede på tilsvarende logg etter hydraulisk trykking med bare vann.	De knapt synlige endringene i vannets elektriske ledningsevne ved 35 og 86 meter, og økningen fra omlag 500 til 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ved 90 meters dyp kan knyttes til hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehullsseksjonene 35,9, 85,1 og 90,8. Endringen i ledningsevnen ved 35 meter kan også betraktes som en normalverdi. En betydelig økning i elektrisk ledningsevne, som ikke er knyttet til injeksjon av sand, kan sees ved 93 meter. En høyere konsentrasjon av finpartikler i suspensjon mot borehullets bunn (100 meter) kan gi høye ledningsevneverdier. Samme fenomen ble observert ved borehullsinspeksjon av borehullene ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 5–68 til 5–70). Uregelmessigheten ved 67 meter kan ikke relateres til hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
etter HTS	stige	Stigeurve: 54, 50-52, 45, 33 og 28 meter.	Observasjonen ved 54 meter, og delvis ved 33 meter, ble verifisert av temperatur- og ledningsevneloggen. Antydte vanninnslag ved 50-52, 45 og 28 meter kan ikke knyttes til noen form for hydraulisk trykking.

Tabell 5–8: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 3 ved Bryn.

Når	Data	Observasjon	Diskusjon
etter HT og HTS	el. ledn. & temp.	En uregelmessighet ble oppdaget ved 68 meter.	Uregelmessigheten ved 68 meter er sannsynligvis knyttet til hydraulisk trykking med bare vann i seksjon 66,6 der oppsprekningen ble tolket som stor (figur 5–41), og til injeksjon av sand i seksjon 67,4.
etter HTS	stige	Stigeurve: 86, 46, 39, 36, 34 og 31 meter.	Av disse observasjonene verifiseres delvis mulig vanninnslag ved 66 meter av temperatur- og ledningsevnelogg. Angitte vanninnslag ved (46,) 36, 34 og 31 kan relateres til hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand i seksjoner ved henholdsvis (48,1) 35,7, 35,6 og 32,5. Antydte vanninnslag ved 39 meter kan ikke knyttes til noen form for hydraulisk trykking.

Tabell 5–9: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 4 ved Bryn.

Når	Data	Observasjon	Diskusjon
etter HT	Temp.	Temperaturloggen har et ujevnt forløp, og avvik fra naturlig gradient kan sees ved 38, 51, 77 og 83 meter.	Forutsatt unøyaktig dybdeangivelse, kan temperaturavviket ved cirka 38 meter knyttes til hydraulisk trykking med bare vann i seksjon 36,2 eller 40,0. Oppsprekking (figur 5–42) forårsaket av hydraulisk trykking med bare vann i seksjon 76,5 og 82,8 samsvarer med observerte temperaturavvik ved henholdsvis 77 og 83 meter. Selv om trykknivået (180 bar, figur 5–47) ved hydraulisk trykking med bare vann i 51,8-seksjonen ble tolket til å være for høyt til å kunne representere en oppsprekking, så tyder den avvikende temperaturgradienten ved 51 meter på det motsatte, nemlig at en mindre vannførende sprekk ble gjenåpnet eller dannet i dette nivået.
etter HTS	el. ledn. & temp.	Observert hendelse ved 90 og 38 meter på henholdsvis ledningsevne- og temperaturloggen.	Hendelsen ved 90 meter kan neppe relateres til noen form for hydraulisk trykking. Det beskjedne temperaturavviket kan knyttes til hydraulisk trykking med bare vann og/eller hydraulisk trykking med injeksjon av sand i henholdsvis seksjon 36,2 og 37,9.
etter HTS	stige	Stigekurve: 52, 39, 34 og 29 meter.	Fra disse observasjonene verifiseres angitte vanninnslag ved 52 og 39 meter av temperaturloggen. Angitte vanninnslag ved 34 og 29 meter kan muligens knyttes til hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand i henholdsvis seksjon 33,2 og 30,5 og/eller 30,1.

Tabell 5–10: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 5 ved Bryn.

Når	Data	Observasjon	Diskusjon
før HT	el. ledn. & temp.	Normalverdien for vannets temperatur- og elektriske ledningsevne i borehull 5 endrer seg ved 68 meter.	
etter HT	el. ledn. & temp.	Endringer på ledningsevneloggen kan sees ved 39, 57, 67, 69 og 76 meter, mens avvik på temperaturloggen opptrer ved 29, 32, 39 og 92 meter.	Endringene ved 29, 32, 57, 69, 76 og 92 meter samsvarer med resultatene fra hydraulisk trykking med bare vann der sprekker ble gjenåpnet eller initiert i henholdsvis borehullsseksjon 29,5, 32,4, 57,1, 69,5, 75,7 og 91,0 (figur 5–43). Ved å anta en unøyaktig dybdeangivelse så kan muligens ledningsevne- og temperaturavviket ved 39 meter relateres til hydraulisk trykking med bare vann i seksjon 41,0. Den naturlige endringen ved 68 meter kan kanskje gjenkjennes ved 67 meter etter hydraulisk trykking med bare vann.
etter HTS	el. ledn.	Uregelmessigheter på ledningsevneloggen registreres ved 39, 57, 67 og 74-76 meter	Alle uregelmessighetene er allerede identifisert på temperatur- og ledningsevneloggen målt etter hydraulisk trykking med bare vann. Bortsett fra en eventuell tidligere sammenheng mellom hydraulisk trykking med bare vann, kan uregelmessighetene ved 39 og 74-76 meter relateres til hydraulisk trykking med injeksjon av sand i henholdsvis seksjon 41,2 og 75,7. Det kreves en unøyaktighet på minimum 0,7 meter for at det skal være en sammenheng mellom 39-hendelsen og stimulering i 41,2-seksjonen.
etter HTS	stige	Stigekurve: 55, 52, 37 og 20 meter.	Ingen av de angitte vanninnslagene fra stigekurven verifiseres av tilhørende endringer på temperatur og ledningsevneloggen. Angitt vanninnslag ved 52 meter kan kanskje relateres til hydraulisk trykking med bare vann i 50,8-seksjonen. Vanninnslaget ved 55 meter kan kanskje knyttes til hydraulisk trykking med bare vann i 57,1-seksjonen. Det er usikkert hvorvidt angitt vanninnslag ved 37 meter kan knyttes til noen form for hydraulisk trykking. Vanninnslaget ved 20 meter ikke kan knyttes til noen form for hydraulisk trykking.

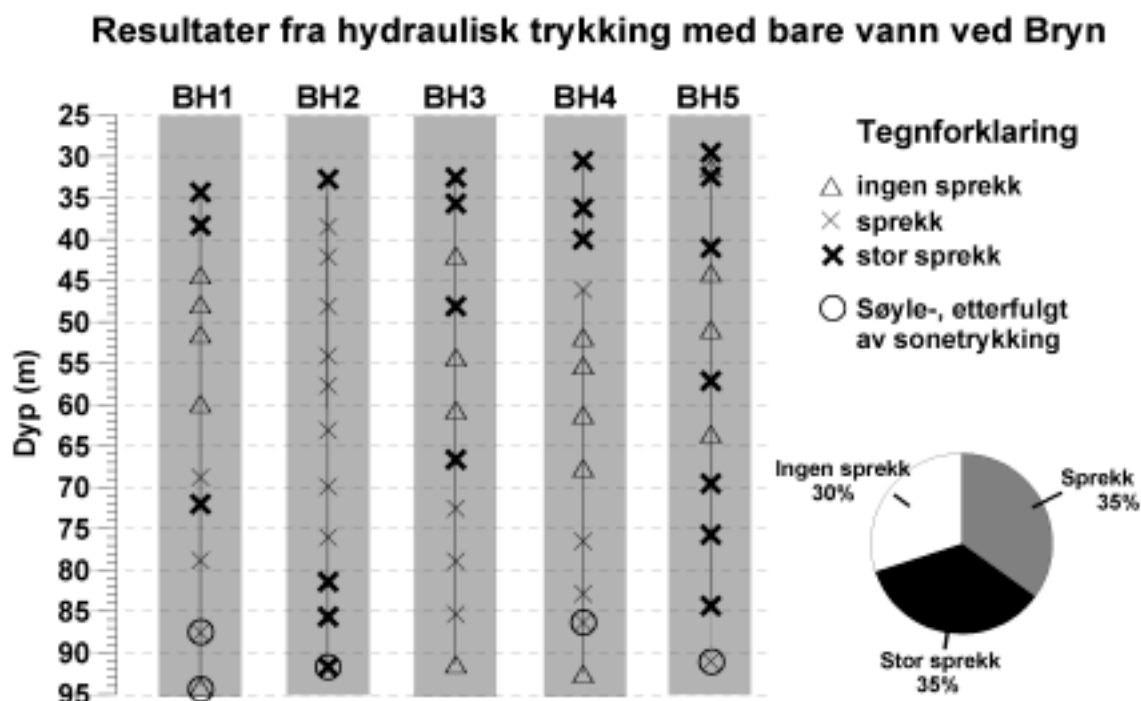
5.2.9 Hydraulisk trykking med vann

Av totalt 63 stimuleringer med hydraulisk trykking med vann ble 44 trykk-tid forløp (70%) tolket som initiering av nye sprekker eller gjenåpning av eksisterende sprekker (figur 5–44). En høyere oppsprekningsgrad var forventet. Trykk-tid diagrammer for nesten alle stimuleringene i borehull 1, 2, 4 og 5 er vist i figur 5–45 til 5–48. Tydelige trykkfall representerer en oppsprekking i bergmassen. Manuelt avleste vanntrykk fra hydraulisk trykking med vann i borehull 3 og søyle 91,0 i borehull 5 er samlet i tabell 5–11. I følge

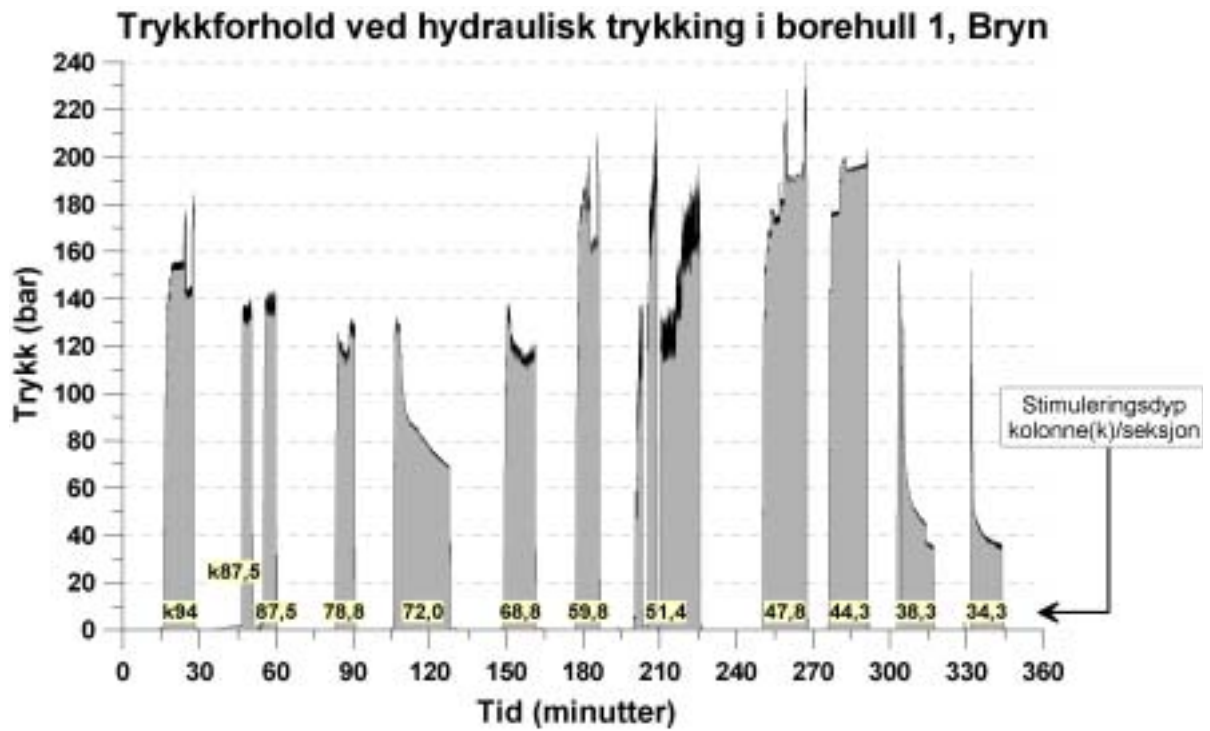
observasjoner i felt, viste det analoge manometeret cirka 20 bar høyere trykk enn de digitale trykkmålingene. Dette er ikke korrigert for, og må tas hensyn til i dataanalysen.

Videre er det gjort en grov beregning av hvilke vannvolum som ble benyttet ved hydraulisk trykking i hver av borehullsseksjonene/-søylene. Beregningene er gjort på grunnlag av feltnotater, pumperater, lengde av stimuleringen og trykknivåer. Resultatene, sammen med en oversikt over mengde og farge på backflow, er vist i figur 5–49. Mengde backflow, eller returstrømning av vann fra borehullsseksjonene/-søylene ved trykkavlastning, er visuelt observert og registrert for de fleste stimuleringene.

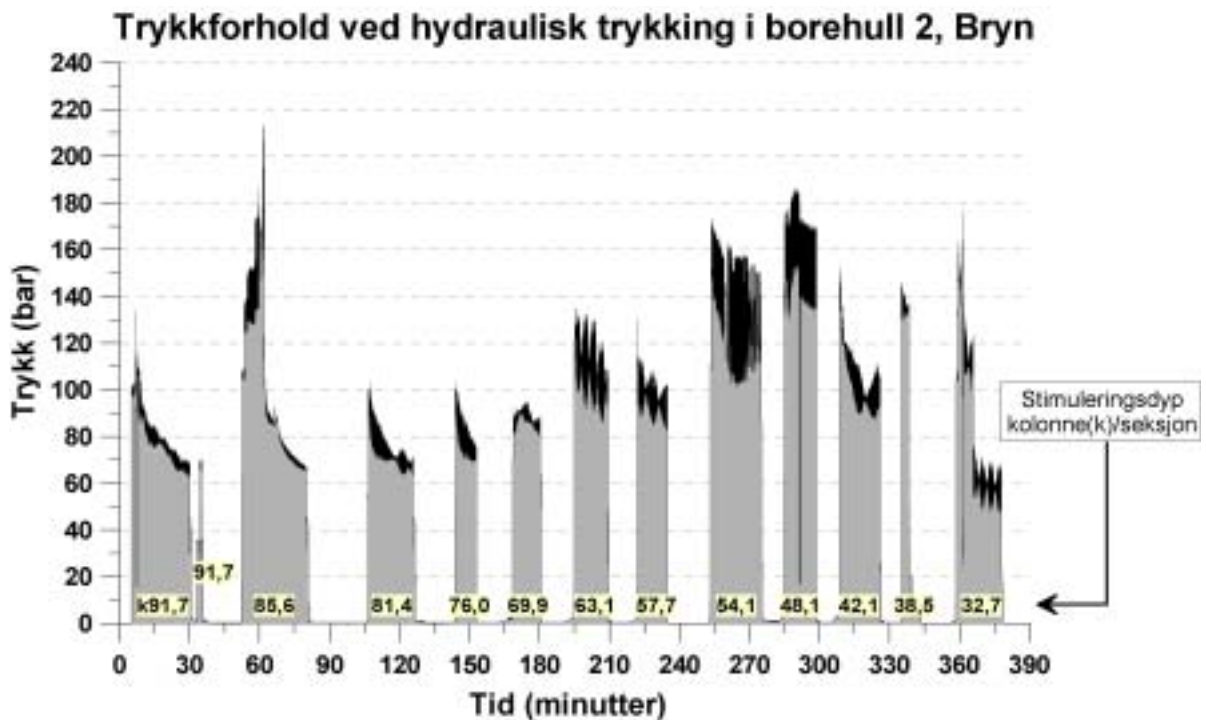
Totalt 19 observasjoner av farget backflow er registrert i figur 5–49, og tre av disse observasjonene var av klart vann uten innhold av sedimenter. Mengden backflow ble karakterisert som stor for 15 av de 16 resterende observasjonene. Backflowfargen, som gir et bilde av grunnvannskjemien og/eller er farget av sedimenter fra sprekkoverflatene, varierte fra grå i de fleste tilfellene til gråbrun, brun og blågrå. Ved å sammenligne backflowresultatene med lokaliseringen av de 22 borehullsseksjonene hvor hydraulisk trykking med bare vann ble tolket som gjenåpning eller dannelse av en stor sprekk i borehullene ved Bryn (figur 5–44), viser det seg at 12 av disse store sprekke ble observert med farget backflow. De gjenværende fire observasjonene av farget backflow var tolket til å representere gjenåpning eller dannelse av middels store sprekker. To av de tre observasjonene med klar backflow var relatert til borehullsseksjoner uten sprekkinitiering. Den tredje observasjonen av store mengder klart vann i retur fra en sprekk fant sted etter hydraulisk trykking med bare vann ved 91,7 meters dyp i diabasdelen av borehull 2 (figur 5–38 og 5–40).



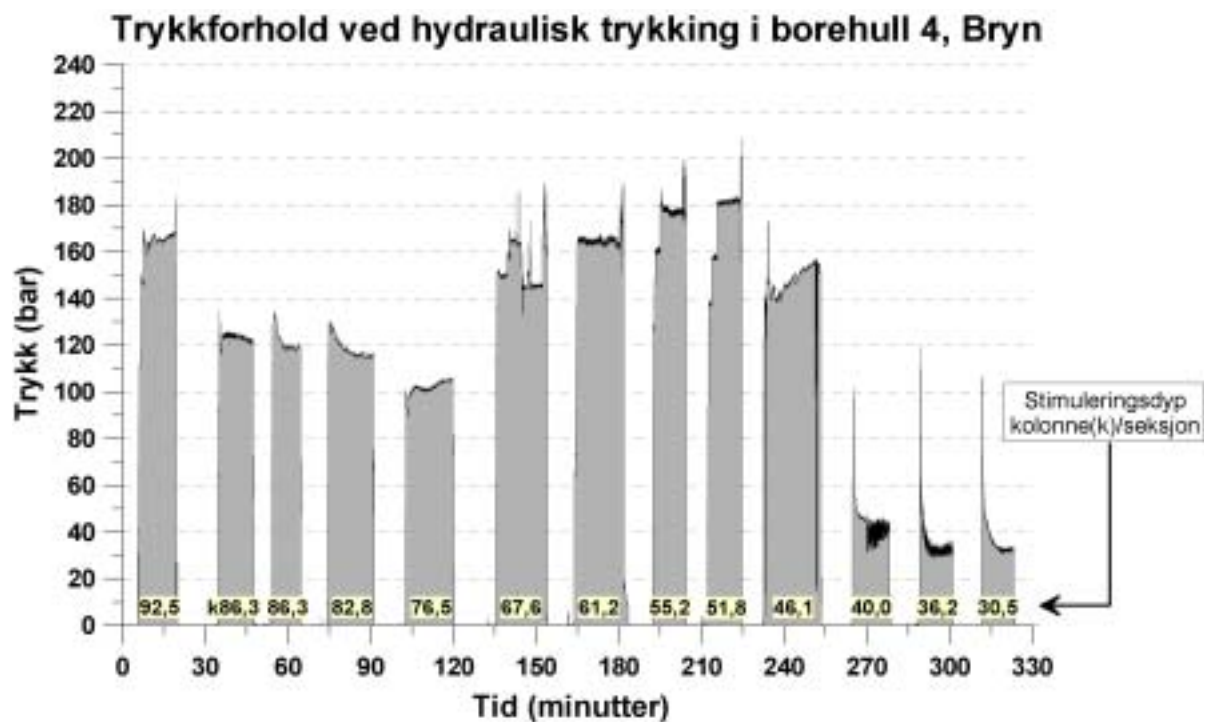
Figur 5–44: Resultater fra hydraulisk trykking med bare vann i 63 borehullsseksjoner eller -søylene i borehull 1, 2, 3, 4 og 5 ved Bryn.



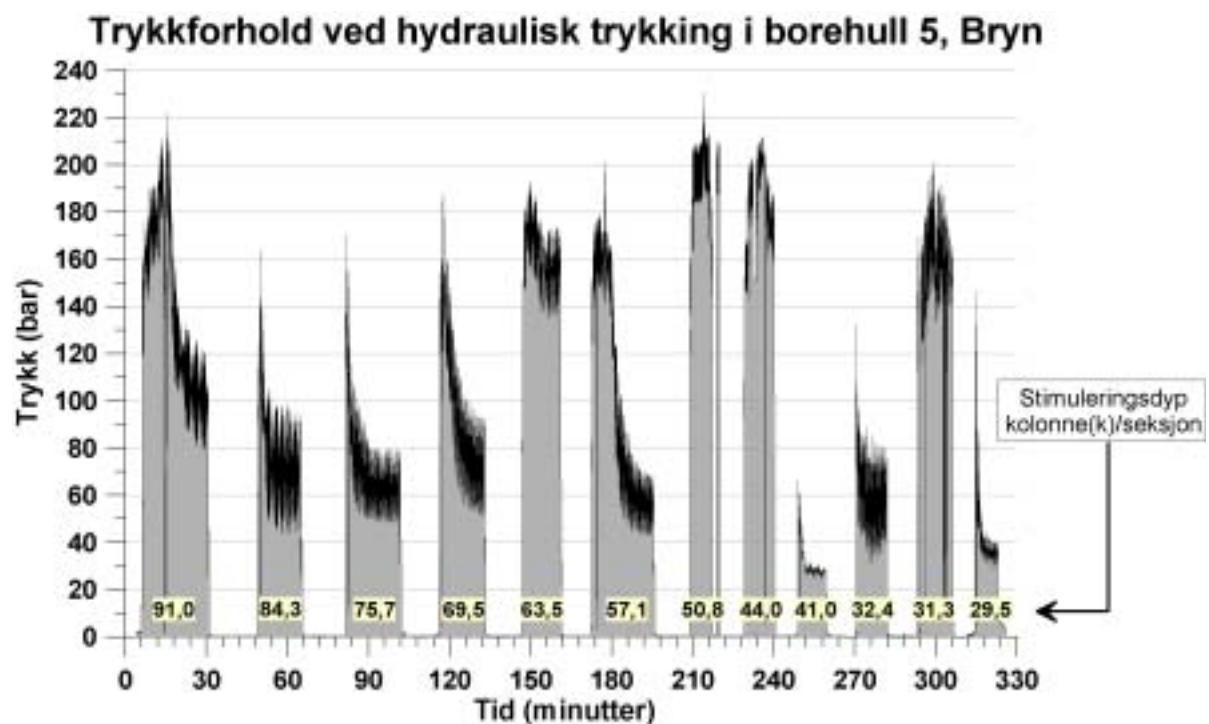
Figur 5-45: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med bare vann i borehull 1 ved Bryn.



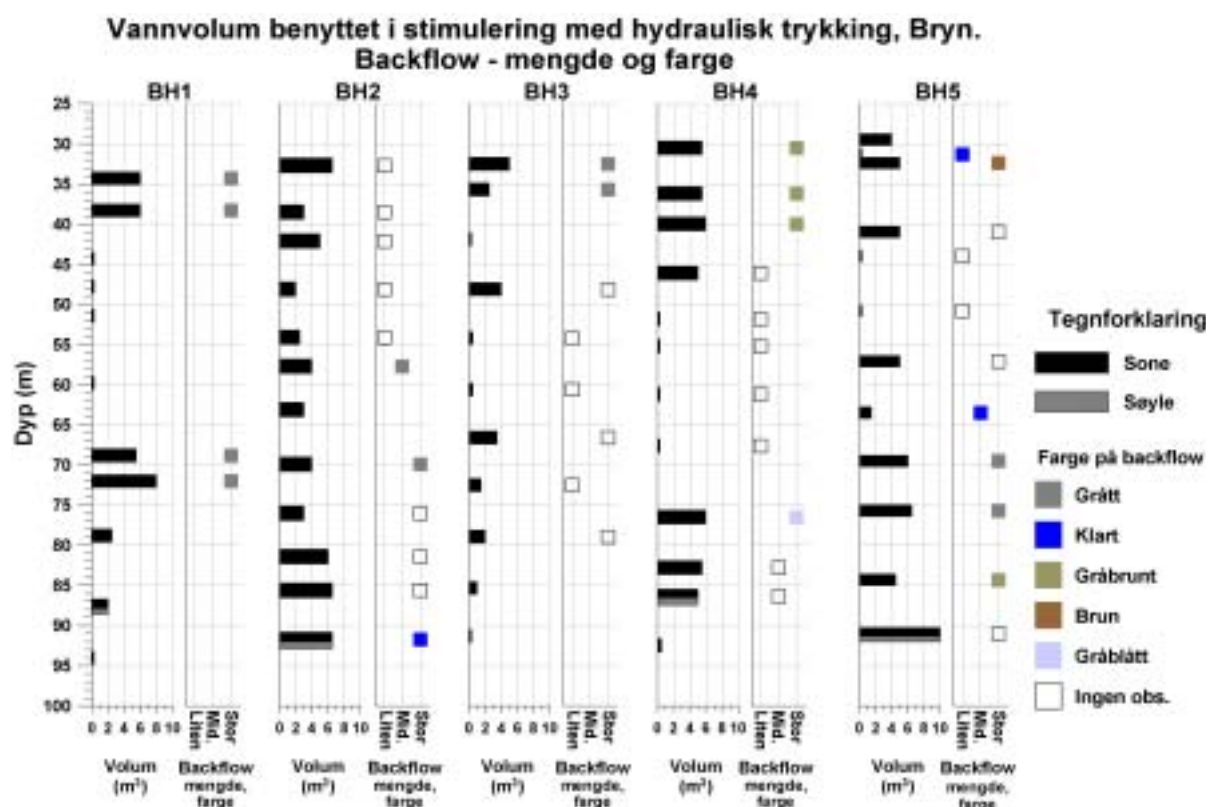
Figur 5-46: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med bare vann i borehull 2 ved Bryn.



Figur 5-47: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med bare vann i borehull 4 ved Bryn.



Figur 5-48: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med bare vann i borehull 5 ved Bryn.



Figur 5-49: Det er gjort en grov beregning av vannvolum benyttet ved stimulering med hydraulisk trykking med vann i hver borehullsseksjon eller -søyle. Mengden backflow og dens farge er også angitt der dette er registrert.

Tabell 5-11: Største og minste manuelt observerte vanntrykk ved hydraulisk trykking med vann i borehull 3 og dypeste nivå i borehull 5 ved Bryn. I følge feltobservasjoner er de manuelt avleste trykkverdiene fra analogt manometer cirka 20 bar høyere enn de digitalt målte trykkverdiene.

Borehull nr.	Nivå (m)	P _{maks} (bar)	P _{min} (bar)
3	91,3	205	-
3	85,3	210	160
3	78,9	180	150
3	72,5	190	-
3	66,6	175	95
3	60,6	210	-
3	54,2	220	-
3	48,1	205	70
3	41,9	200 (250)	-
3	35,7	160	40
3	32,5	140	40
5	91,0 (søyle)	200	110

Endringer i grunnvannsnivået i omkringliggende borehull som følge av hydraulisk trykking i et av de andre borehullene er vist i figur 5-50 til 5-54. Tilhørende trykk-tid diagrammer fra hydraulisk trykking med bare vann er også tegnet inn i figurene. Grunnvannet

stiger og synker tilnærmet parallelt i borehullene. Borehull 1 og tildels borehull 3 ser ut til å respondere mer på hydrauliske trykking enn de andre borehullene, særlig til hydraulisk trykking i borehull 3, 4 og 5. Et sammendrag av de viktigste observasjonene i figur 5–50 til 5–54 er samlet i tabell 5–12.

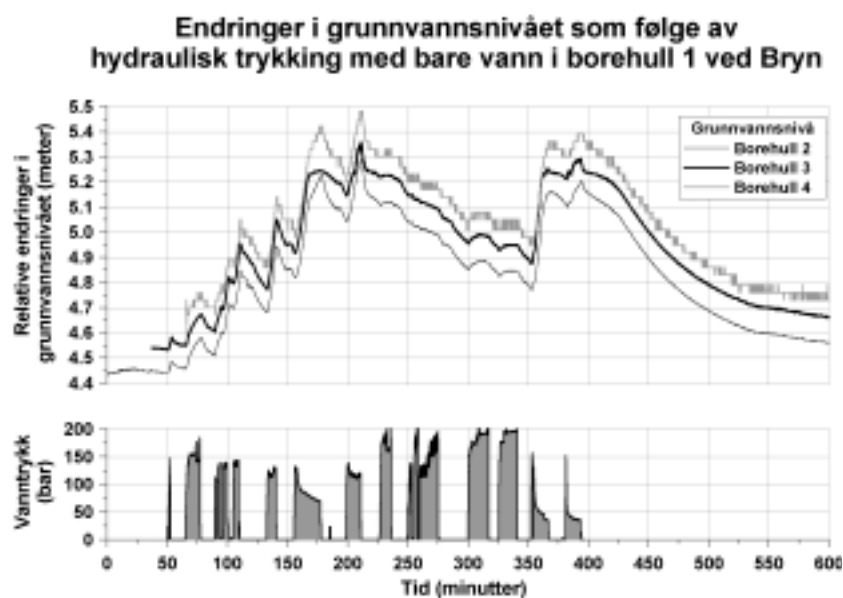
Tabell 5–12: Sammendrag av grunnvannsnivåendringer i omkringliggende borehull forårsaket av hydraulisk trykking i et av de andre borehullene.

Hydraulisk trykking med bare vann i:	Observasjoner av endret grunnvannsnivå i omkringliggende borehull
Borehull 1	Tilnærmet identiske grunnvannsnivåendringer i borehull 2, 3 og 4.
Borehull 2	Borehull 1 viser større respons sammenlignet med borehull 3 og 4.
Borehull 3	Store grunnvannsfluktuasjoner i borehull 1, mindre i borehull 4 og tilnærmet ingen fluktuasjoner i borehull 2
Borehull 4	Mer eller mindre parallelle grunnvannsnivåendringer, men endringene i borehull 1 er noe større sammenlignet med borehull 3 og 5.
Borehull 5	Parallell respons i borehull 1 og 3. Borehull 4 viser mindre respons, særlig til hydraulisk i den dypere delen av borehull 5.

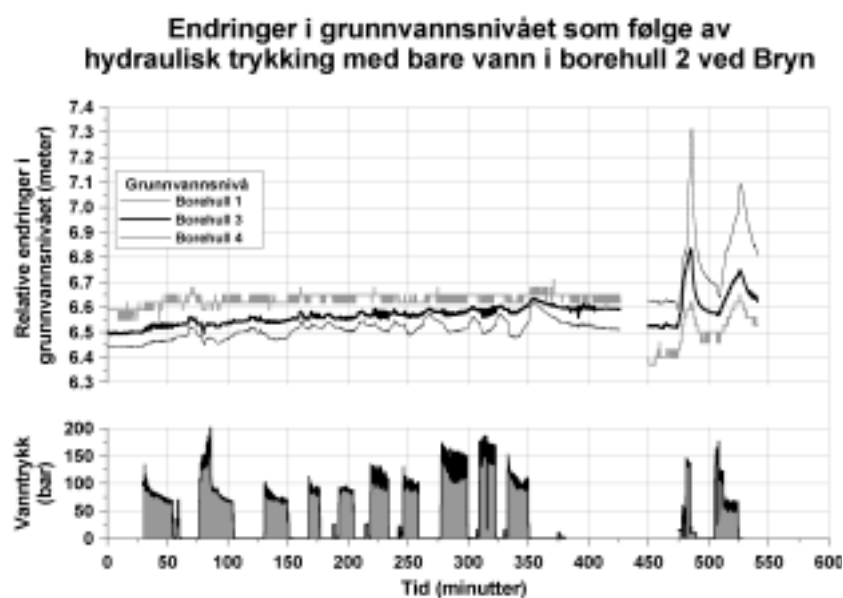
Den forhøyede hydraulisk responsen mot borehull 1 ble også observert ved testpumping (avsnitt 5.2.2). Grunnvannets parallelle oppførsel er sannsynligvis knyttet til den store og dominerende sprekkesonen som gjennomsetter alle borehullene ved Bryn (avsnitt 5.2.1). Når det ble oppnådd kommunikasjon mellom borehullet for hydraulisk trykking eller borehullet for testpumping med et av de omgivende borehullene, forplantet den hydrauliske responsen seg via sprekkesonen og til de andre borehullene. På grunn av de relativt lave strømningsratene sammenlignet med strømningsratene brukt ved hydraulisk trykking, observeres den største graden av parallelitet for grunnvannsnivåendringene ved testpumping.

Hovedsprekkeretningen i Brynområdet er tilnærmet nord-sør, mens to mindre sprekkeretninger er rapportert til å være i nordøst-sørvest og sørøst-nordvest retningen (figur 5–35). De betydelige grunnvannsnivåendringene målt i borehull 1 og 3 ved hydraulisk trykking i den dypere delen av borehull 5 (figur 5–54), der borehull 1, 3 og 5 er plassert på en linje cirka 6° fra nord (figur 3–3), bekreftet en sprekkedannelse eller -gjenåpning parallelt hovedsprekkeretningen. Samme trend ble observert for borehull 1 som responderte på hydraulisk trykking i borehull 3 (figur 5–52), men ingen ekstraordinær respons ble registrert i borehull 3 ved hydraulisk trykking i borehull 1 (figur 5–50). Beklageligvis ble ikke grunnvannsnivået i borehull 5 overvåket ved hydraulisk trykking av borehull 1 og 3. To store sprekker i den øvre delen av borehull 5, 29,5- og 32,4-seksjonen ble åpnet ved hydraulisk trykking uten å forårsake en tilsvarende hydraulisk respons som tilsvarende oppsprekning i den dypere delen av borehull 5 forårsaket (figur 5–54). Den endrede responsen i borehull 1, 3 og 4 kan muligens relateres til åpningen av et horisontalt sprekkelplan i stedet for et vertikalt sprekkelplan. På dette nivået kan horisontale sprekkelplan initieres eller gjenåpnes siden overdekningstrykket er redusert og/eller fordi en eksisterende horisontal sprekk gjenåpnes. Ved å anta at det dannes vertikale sprekkelplan som gjennomskjærer borehull 1 og 3 ved hydraulisk trykking av den dypere delen av borehull 5, vil dannelsen av en horisontal og skiveformet sprekketråbredelse forventes å skape en mer jevnt fordelt hydraulisk respons i de omkringliggende borehullene.

Den hydrauliske responsen i borehull 1 til hydraulisk trykking i borehull 2 og 4 kan muligens relateres til de mindre sprekkeretningene i henholdsvis nordøst-sørvest- og sørøst-nordvest retning (figur 5–35). Selv om oppsprekningen med hydraulisk trykking i borehull 2 var vellykket, ble det oppnådd en uventet lav hydraulisk respons i de omgivende borehullene. Mangel på hydraulisk respons indikerer at sprekkeene er orientert utenfor de andre borehullene. Sprekkeutbredelsen til de tre dypeste seksjoner i borehull 2 kan ha fulgt orientering til diabasintrusjonen (figur 5–38).

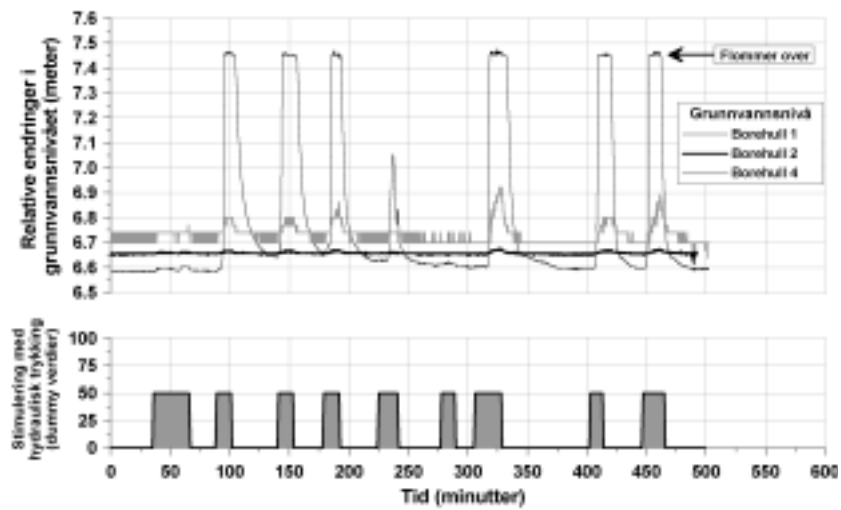


Figur 5–50: Grunnvannsnivåendringer i borehull 2, 3 og 4 som følge av hydraulisk trykking med vann i borehull 1 ved Bryn.



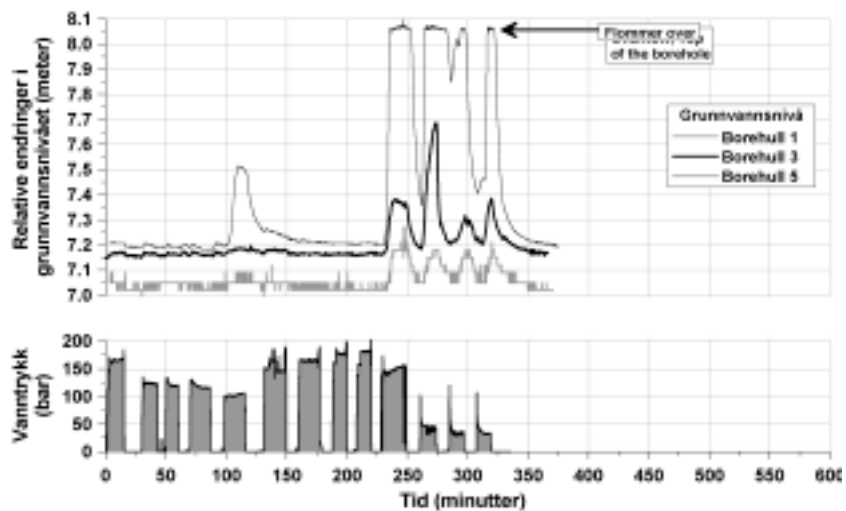
Figur 5–51: Grunnvannsnivåendringer i borehull 1, 3 og 4 som følge av hydraulisk trykking med vann i borehull 2 ved Bryn.

Endringer i grunnvannsnivået som følge av hydraulisk trykking med bare vann i borehull 3 ved Bryn



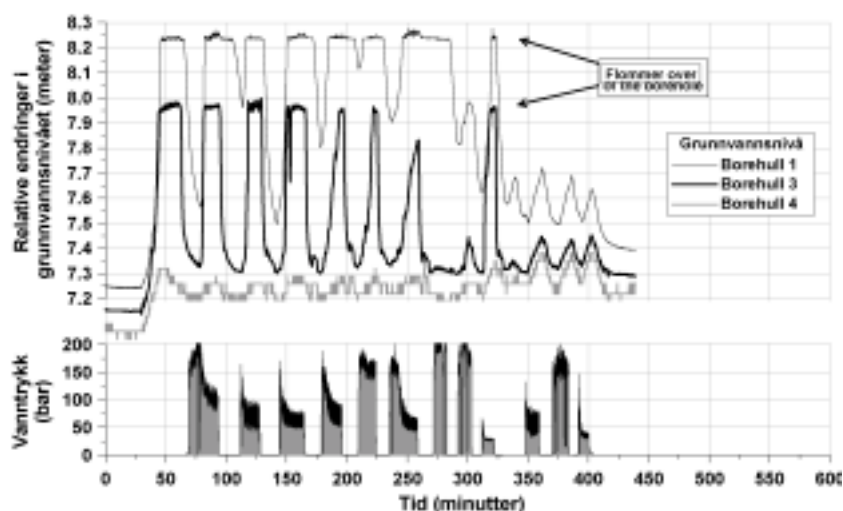
Figur 5–52: Grunnvannsnivåendringer i borehull 1, 2 og 4 som følge av hydraulisk trykking med vann i borehull 3 ved Bryn.

Endringer i grunnvannsnivået som følge av hydraulisk trykking med bare vann i borehull 4 ved Bryn



Figur 5–53: Grunnvannsnivåendringer i borehull 1, 3 og 5 som følge av hydraulisk trykking med vann i borehull 4 ved Bryn.

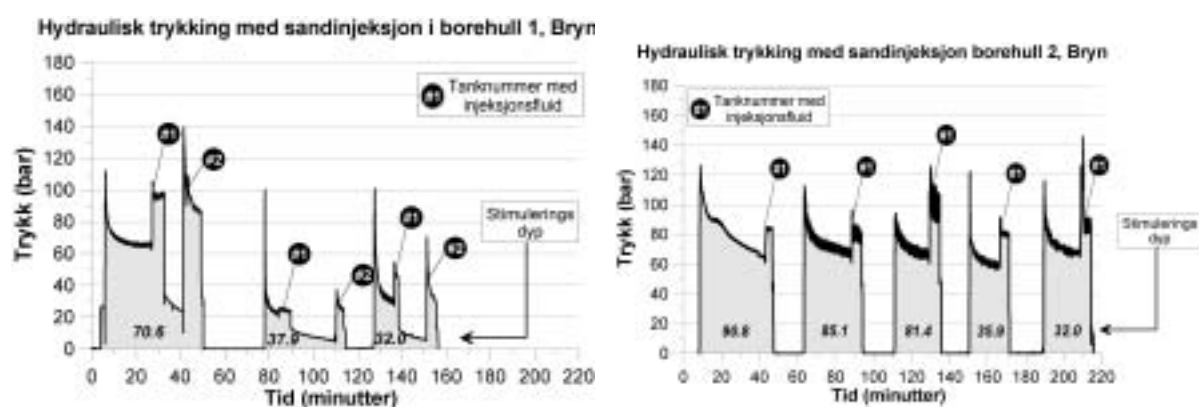
Endringer i grunnvannsnivået som følge av hydraulisk trykking med bare vann i borehull 5 ved Bryn



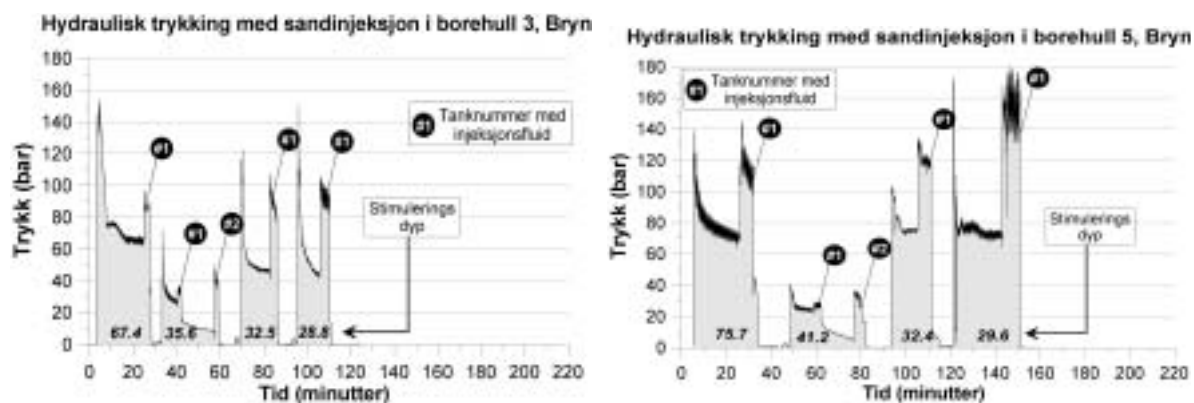
Figur 5-54: Grunnvannsnivåendringer i borehull 1, 3 og 4 som følge av hydraulisk trykking med vann i borehull 5 ved Bryn.

5.2.10 Hydraulisk trykking med injeksjon av sand

Trykk-tid diagrammer fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1, 2, 3 og 5 er presentert i figur 5-55 og 5-56. Tilsvarende trykknivåer fra borehull 4, som måtte registreres manuelt fra de digitale målingene fordi dataloggeren ikke fungerte, er vist i tabell 5-13. Injeksjon av sand mot slutten av hver stimuleringscyklus, markert med nummeret til beholderen med injeksjonsfluid, fører til en trykkoppbygging for de fleste seksjonene. Figur 5-57 viser en sammenstilling av mottrykket, eller vanntrykket i borehullsseksjonen umiddelbart før injeksjon av sand. I borehull 4 er mottrykket 20-35 bar for alle seksjonene (tabell 5-13).



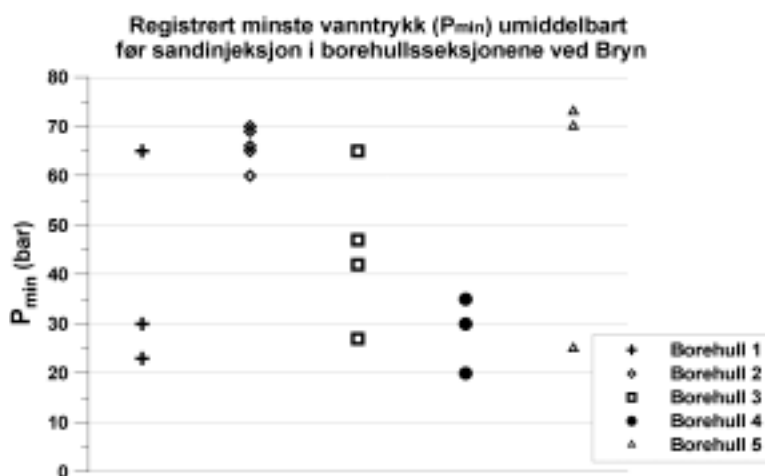
Figur 5-55: Trykk-tid forløp ved hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1 og 2 ved Bryn.



Figur 5–56: Trykk-tid forløp ved hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 3 og 5 ved Bryn.

Tabell 5–13: Tilsvarende vanntrykk fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 4 ved Bryn, manuelt registrert fra de digitale målingene.

Seksjon	P _{gjenåpning} (bar)	P _{min} før inj. (bar)	P _{max} etter inj. (bar)
37,9	-	35	70
33,2	-	20	65
30,1	80	30	85



Figur 5–57: Mottrykket i borehullsseksjonene ved Bryn umiddelbart før injeksjon av sand.

5.2.11 Terrengendringer

Nivellering før og etter hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved Bryn viser en maksimal endring i terrengnivået på 1,0 mm i forhold til fastpunkt (tabell 5–14 og 5–15). Største måleavvik for punkter innenfor influensområdet for hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon med sand er $\pm 1,0$ mm. Siden ingen trend kan leses fra måleavvikene, og de fleste målingene bekrefter et stabilt terrengnivå, er det sannsynlig at nivåendringene på beskjedne $\pm 1,0$ mm kan karakteriseres som målefeil.

Tabell 5–14: Nivellering før og etter hydraulisk trykking med bare vann i borehull 2, 3, 4 og 5 ved Bryn.

	Fastpunkt	pkt. 1	pkt. 2	pkt. 3
Borehull 2, nivellement før HT (m)	0,319	2,640	0,129	-
Borehull 2, nivellement etter HT (m)	0,320	2,641	0,129	-
Borehull 2, relativ forskjell (mm)	1,0	1,0	0,0	-
Borehull 3, nivellement før HT (m)	0,215	0,595	0,871	0,8535
Borehull 3, nivellement etter HT (m)	0,215	0,595	0,871	0,853
Borehull 3, relativ forskjell (mm)	0,0	0,0	0,0	-0,5
Borehull 4, nivellement før HT (m)	0,335	0,146	1,875	-
Borehull 4, nivellement etter HT (m)	0,335	0,146	1,875	-
Borehull 4, relativ forskjell (mm)	0,0	0,0	0,0	
Borehull 5, nivellement før HT (m)	0,388	0,199	1,450	-
Borehull 5, nivellement etter HT (m)	0,388	0,199	1,450	-
Borehull 5, relativ forskjell (mm)	0,0	0,0	0,0	

Tabell 5–15: Nivellering før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1, 2, 3 og 5 ved Bryn.

	Fastpunkt	pkt. 1	pkt. 2	pkt. 3
Borehull 1, nivellement før HTS (m)	0,590	0,560	0,968	1,810
Borehull 1, nivellement etter HTS (m)	0,590	0,560	0,968	1,810
Borehull 1, relativ forskjell (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0
Borehull 2, nivellement før HTS (m)	0,590	0,560	0,968	0,449
Borehull 2, nivellement etter HTS (m)	0,590	0,559	0,967	0,448
Borehull 2, relativ forskjell (mm)	0,0	-1,0	-1,0	-1,0
Borehull 3, nivellement før HTS (m)	0,590	0,560	0,967	0,448
Borehull 3, nivellement etter HTS (m)	0,590	0,560	0,967	0,448
Borehull 3, relativ forskjell (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0
Borehull 5, nivellement før HTS (m)	0,590	0,559	0,967	0,448
Borehull 5, nivellement etter HTS (m)	0,590	0,559	0,967	0,448
Borehull 5, relativ forskjell (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0

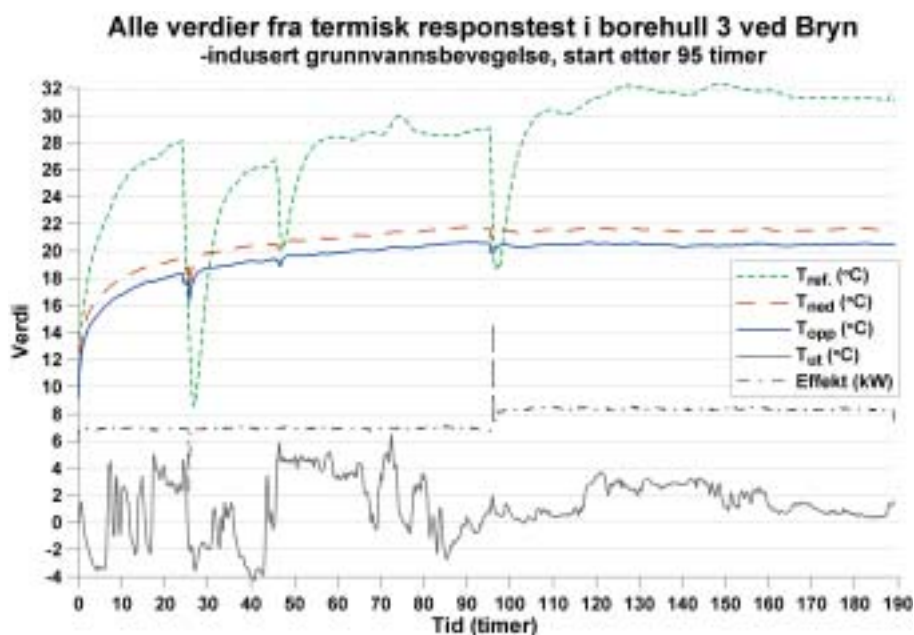
5.2.12 Termisk respons i borehull 3

Den effektive in-situ verdien for berggrunnens varmeledningsevne i naturlig tilstand, uten industert grunnvannsbevegelse i borehull 3 ved Bryn, er beregnet til å være 3,2 W/m,K, mens borehullsmotstanden, R_b er 0,06 K/(W/m) (figur 5–58 og 5–59). I en studie av bergartenes varmeledningsevne i Bærum, på kartblad Bekkestua (figur 2–30 og 2–31), er ringerikssandsteinen ved Bryn målt til å ha en median varmeledningsevneverdi på 3,3 W/m,K (Midttømme et al., 2000). Variasjoner innen øvre og nedre kvartil for de målte varmeledningsevneverdiene i denne studien, som gjenspeiler avvik i bergartens egenskaper innsamlet fra forskjellige lokaliteter, ligger innen intervallet 3,1 til 3,6 W/m,K (figur 2–30).

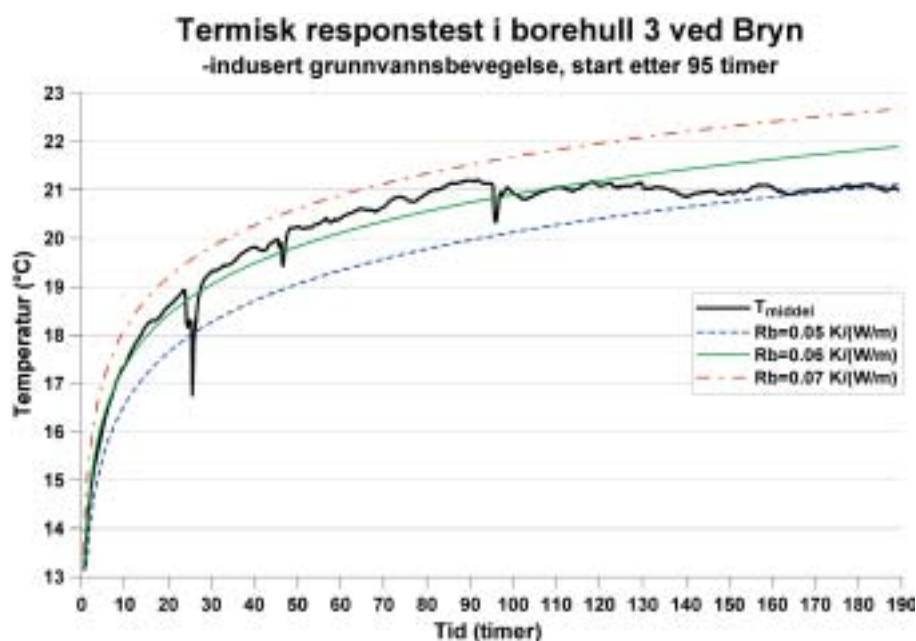
Den høye kapasiteten i borehull 3, inklusive den naturlige sprekkesonen ved 12-13 meters dyp (avsnitt 5.2.1) sammen med kapasitetsøkningen etter stimulering med hydraulisk trykking (figur 5–26), gjør det naturlig å anta en betydelig grunnvannstrømning gjennom

borehullet. På denne bakgrunnen var det forventet at den naturlige grunnvannsstrømningen i området vil påvirke den termiske responsen i borehullet og bli kvantifisert av den effektive in-situ verdien for berggrunnens varmeledningsevne. I henhold til det registrerte negative avviket på 0,1 W/m,K mellom den effektive in-situ verdien for berggrunnens varmeledningsevne og medianverdien for den laboratoriemålte varmeledningsevnen for ringerikesandstein, er bidraget fra den naturlige grunnvannsstrømmen og den virkelige verdien for berggrunnens varmeledningsevne lavere enn forventet. Ved å anta et bidrag på 0,2 W/m,K fra grunnvannsstrømningen, må varmeledningsevnen for ringerikesandsteinen ved Bryn være 2,9 W/m,K, som er i den nederste delen av intervallet for målte laboratorieverdier (figur 2–30). Verdien for borehullsmotstanden, $R_b = 0,06 \text{ K/(W/m)}$, er som forventet.

Oppstart av pumping i naboborehullet, borehull 2, etter 95 timer gir en induisert grunnvannsstrømning i brønnfeltet som tydelig reduserer verdien av T_{middel} (figur 5–59). Lavere termisk respons, reduksjon av T_{middel} , tyder på at mer energi tas opp i berggrunnen og den effektive in-situ verdien for berggrunnens varmeledningsevne øker. Effektbidraget fra induisert grunnvannsstrømning kan kvantifiseres ved å gjennomføre en ny termisk responstest i borehull 3. Forutsetningen er at borehullet har stabilisert seg på naturlig nivå, og at pumpingen i borehull 2 startes samtidig eller før selve testen. Den økte effektverdien etter 95 timer er en følge av at strømtilførselen til pumpen i borehull 2 tas med (figur 5–58).



Figur 5–58: Alle verdier fra termisk responstest i borehull 3 ved Bryn.



Figur 5–59: Matching av forsøkets gjennomsnittstemperatur (T_{middel}) med typekurver for borehullsmotstanden, R_b .

5.2.13 Effektuttak fra grunnvarmeanlegget

De viktigste resultatene fra testkjøringen i grunnvarmeanlegget ved Bryn er vist i figur 5–60. En betydelig trykkoppbygging på 6,8 bar i sirkulasjonssystemet resulterte i en strømningsrate på $3,5 \text{ m}^3/\text{time}$, basert på to pumper. Med et temperaturuttak på $4,5\text{--}5^\circ\text{C}$ tas det ut en effekt på cirka 19 kW de 2,5 første dagene av testkjøringen av pilotanlegget. Disse resultatene ble brukt som inngangsparametere for modelleringen av energiuttaket ved Bryn (tabell 4–5) (Spangelo, 2003). Siden viktige parametre som temperatur og strømningsraten til kuldebæreren (elven) ble forstyrret, er den gjenværende delen av testkjøringen å betrakte som mislykket:

- På grunn av omslag til varmt vårvær øker temperaturen på innstrømmende elvevann betydelig fra den 13. april 2003. Dette fører igjen til en mindre temperaturforskjell mellom elvevann ($T_{\text{elv_inn}}$) og grunnvann ($T_{\text{inn_vvx}}$), og lavere effektuttak. Solskinn på dagen og relativt kalde netter fører til at det observeres store døgnvariasjoner på elvevannets temperatur.
- Fra 17. april 2003 registreres en markert økende temperaturforskjell mellom innstrømmende elvevann ($T_{\text{elv_inn}}$) og utstrømmende grunnvann fra varmeveksleren ($T_{\text{ut_vvx}}$). En mulig forklaring kan være at strømningsraten for elvevann er redusert fordi pumpeinntaket delvis er tettet igjen av rask fra vårfloppen.

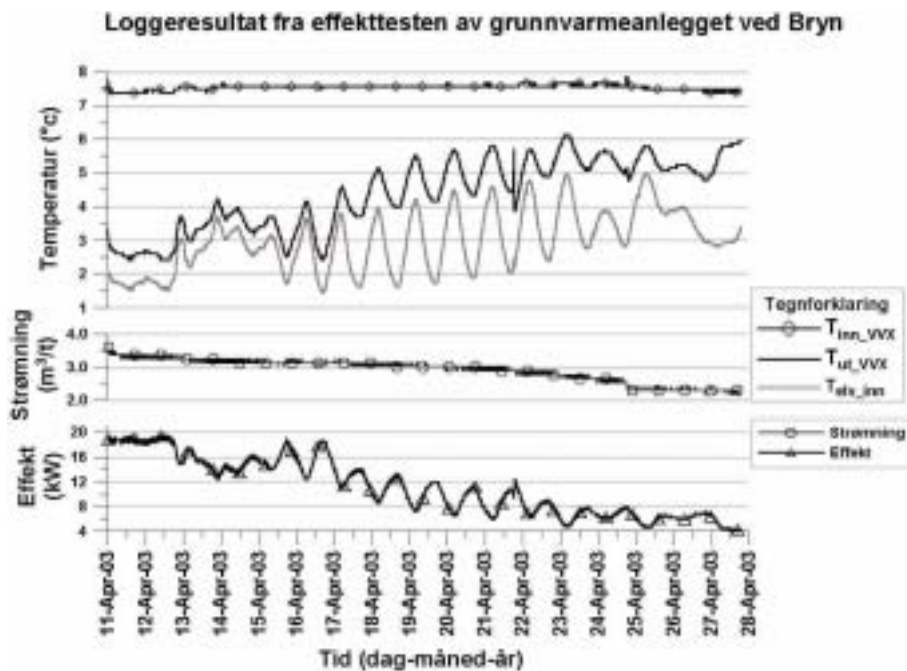
Temperaturen på oppumpet grunnvann ($T_{\text{inn_vvx}}$) holdt seg stabil rundt $7,5^\circ\text{C}$ under hele forsøket.

Prosjektidéen forutsetter en pumpe- og infiltrasjonsrate på $20 \text{ m}^3/\text{time}$, der satelittborehullene, borehull 1, 2, 4 og 5, brukes som pumpebrønner, mens borehull 3 brukes til infiltrasjon (figur 1–1). Ingen seksjonering med mansjetter gjør at pumpene trekker fra hele vannsøylen under hele testkjøringen, inklusive den meget vannførende sprekkesonen, og

oppumpede vannmengder fra borehullene skulle være rikelige i forhold til pumperaten på 20 m³/time angitt i prosjektidéen. Hovedproblemet ved Bryn er at en trykkmotstand, som hemmer både pumpe- og infiltrasjonskapasiteten, bygger seg opp i infiltrasjonborehullet, borehull 3. I starten av testen kunne trykkmotstanden ha skyldtes luft i systemet, og problemet ville ha forsvunnet etter hvert. I stedet fortsatte trykkmotstanden å øke, og da testen ble avsluttet var pumpe- og infiltrasjonsraten cirka 2,5 m³/time. Den lave sirkulasjonsraten gjør at borehullene ved Bryn bør utnyttes på en annen måte til grunnvarme (avsnitt 5.2.14).

Mulige forklaringer på den lave infiltrasjonsraten:

- Resultater fra testpumping med pumpe C viser at kapasiteten til borehull 3 er cirka 3,0 m³/time. Denne pumpen har litt større ytelse enn pumpen som ble brukt i testkjøringen, pumpe D (figur 2–23). En tilsvarende testpumping på samme nivå i borehull 3 med pumpe D ville vært mer tidkrevende, men gitt samme kapasitet til slutt. Forutsatt like trykkforhold vil det være like vanskelig å infiltrere vann som å pumpe det opp. Det vil si at reduksjon av infiltrasjonsraten fra 3,5 til 2,5 m³/time ved en trykkmotstand på 7,5 bar etter 17 dagers testkjøring samsvarer brukbart med resultatet fra testpumpingen.
- Løste partikler i det sirkulerende grunnvannet kan ha forårsaket tilstopping av sprekkekanalene.
- Selv om systemet var laget for å unngå innblanding av oksygen i vannet, kan små mengder oksygen ha blitt med under pumping av oksygentrikt vann fra den naturlige sprekkesonen ved 12-13 meter. Blandet med dypere og mer anoksisk grunnvann kan disse små oksygenmengdene ha vært nok til å forårsake utfelling av jern- og muligens manganforbindelser. Grunnvannskvaliteten var tilsynelatende tilfredsstillende (avsnitt 5.2.5), men innhold av jern og mangan i vannet kan muligens ha vært nok til å forårsake problemer under de aktuelle forholdene. Den økende trykkmotstanden og den reduserte infiltrasjonsraten under testkjøringen av anlegget, støtter teorien om at en kontinuerlig prosess med utfelling og tilstopping kan ha funnet sted.



Figur 5–60: Utvalgte data fra testkjøringen av grunnvarmeanlegget ved Bryn.

5.2.14 Anbefalte alternativer for bruk av borehullene ved Bryn

Testkjøring av grunnvarmeanlegget ved Bryn (avsnitt 5.2.13) viste at infiltrasjonskapasiteten til borehull 3, på kun 2,5-3,5 m³/time, var den begrensende faktoren for en tilfredsstillende drift av anlegget. Prosjektidéen forutsetter en pumpe- og infiltrasjonsrate på 20 m³/time, og den største forutsetningen for anvendelse av konseptet med sirkulasjon av grunnvann er borte. Forskjellige alternativer for bruk av borehullene ved Bryn til grunnvarme er vurdert:

- En alternativ måte å utnytte de store vannmengdene som er tilgjengelig ved Bryn når sprekkesonen tas med, er å benytte alle borehullene som pumpebrønner. Returvannet fra varmepumpen eller varmeveksleren må da føres i offentlig avløp eller slippes ut i elva Lomma. Grunnvannsuttak større enn 5 m³/time er konsesjonspliktig hos Norges vassdrags- og energidirektorat. Ved å bruke alle borehullene som pumpebrønner med installert pumpe, pumpe D, vil den totale kapasiteten for anlegget være 25 m³/time. Et temperaturuttak på 4°C ($\Delta T = 4 \text{ °C}$) gir en effekt på 116 kW. Dette driftsalternativet forutsetter at grunnvannstanden ikke senkes betydelig som følge av det store vannuttaket. Enda større effektgevinster kan nyttegjøres ved bruk av anlegget til kjøling sommerstid.
- En alternativ sirkulasjon av vannet i anlegget kan gjøres ved å benytte den store sprekkesonen 13 meter under terrengoverflaten til infiltrasjon. Anlegget kan brukes som planlagt, men for å unngå termisk kortslutning av vannet som infiltreres i sprekkesonen i borehull 3 må sprekkesonen stenges av i pumpeborehullene. Anleggets strømningsrate anslås til cirka 10 m³/time, men må bestemmes etter en lengre uttesting av anlegget i driftsmodus.

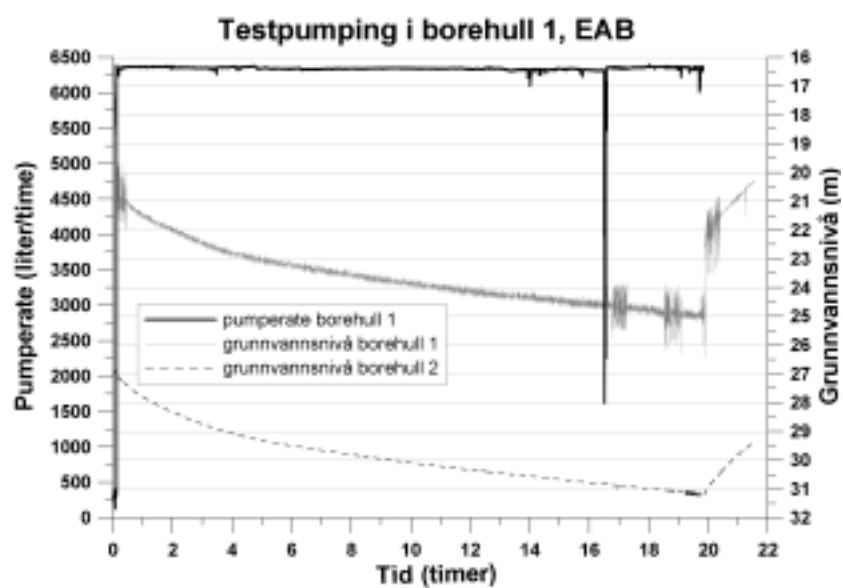
- Borehullene ved Bryn kan utnyttes som et konvensjonelt grunnvarmeanlegg med kollektorslanger ved å erstatte pumpene med enkle U-rørskollektorer i borehullene. Hvis ønskelig, kan anlegget utvides med flere borehull. På generelt grunnlag vil anlegget ved Bryn oppnå best lønnsomhet hvis det benyttes til varme- og kjøleformål.

5.3 EAB

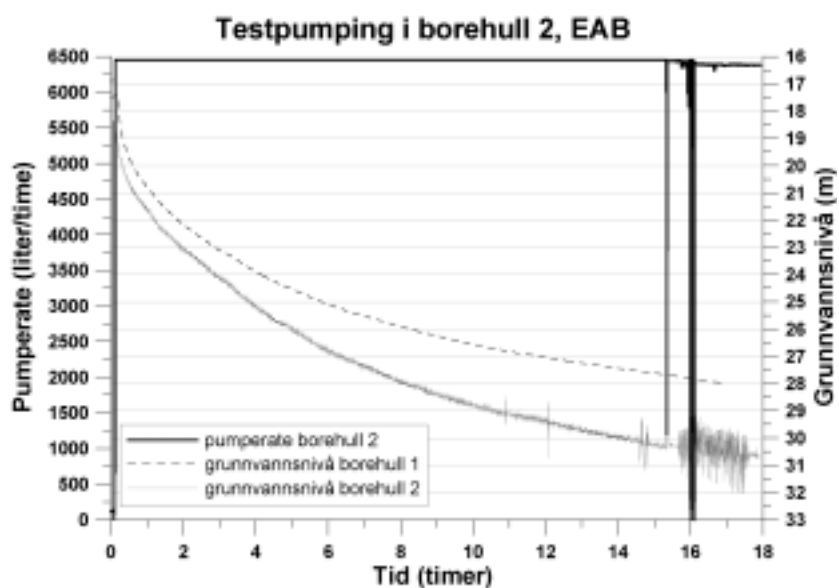
5.3.1 Borehullenes opprinnelige vannkapasitet og grunnvannskvalitet

Resultater fra testpumpingen for borehull 1, 2 og 3 ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand er vist i henholdsvis figur 5–61, 5–62 og 5–63. Plutselige fall i pumperaten er forårsaket av stopp- og startavbrudd. Til tross for at testpumpingen foregikk i over 18 timer, ble ikke grunnvannsnivået senket ned til pumpeinntaket som var 68,3 og 66,3 meter under terreng for henholdsvis borehull 1 og 2. Kapasiteten til borehull 1 og 2 var større enn pumpens, >6300 liter/time. Senkekurven fra pumping borehull 1 og 2 har ingen markerte knekk, mens stigekurven etter avsluttet pumping i borehull 1 øker umiddelbart fra 25 til 22 meter og følger en jevn stigning videre. Hendelsen representerer sannsynligvis et større vanninnslag ved 22 meter i borehull 1. I borehull 3 ble grunnvannsnivået senket helt ned til pumpeinntaket, og kapasiteten stabiliserte seg på 5200 l/time. Senkeraten i borehull 3 er ujevn, men har et raskere forløp fra cirka 28 meters dyp. Etter avsluttet pumping stiger grunnvannsnivået i borehull 3 umiddelbart til 25 meter under terreng. Markerte knekk på synke- og stigekurven ved henholdsvis 28 og 25 meters dyp i borehull 3 kan representere større vanninnslag. Naturlig grunnvannsnivå ble ikke gjenopnådd etter hver testpumping, slik at testpumpings rekkefølge, borehull 3, 2 og 1, sannsynligvis har påvirket den relative endringen i grunnvannsnivået. Ved pumping i borehull 1 senkes grunnvannet i borehull 1 og 2 med samme hastighet (figur 5–61). Tilsvarende pumping i borehull 2 viser at grunnvannet i borehull 1 og 2 har et tilnærmet parallellt forløp, men at grunnvannet pumpebrønnen senkes noe raskere enn i borehull 1 (figur 5–62). Ved pumping i borehull 3 viser grunnvannsnivået i borehull 1 tilnærmet samme forløp som ved pumping i borehull 1 og 2.

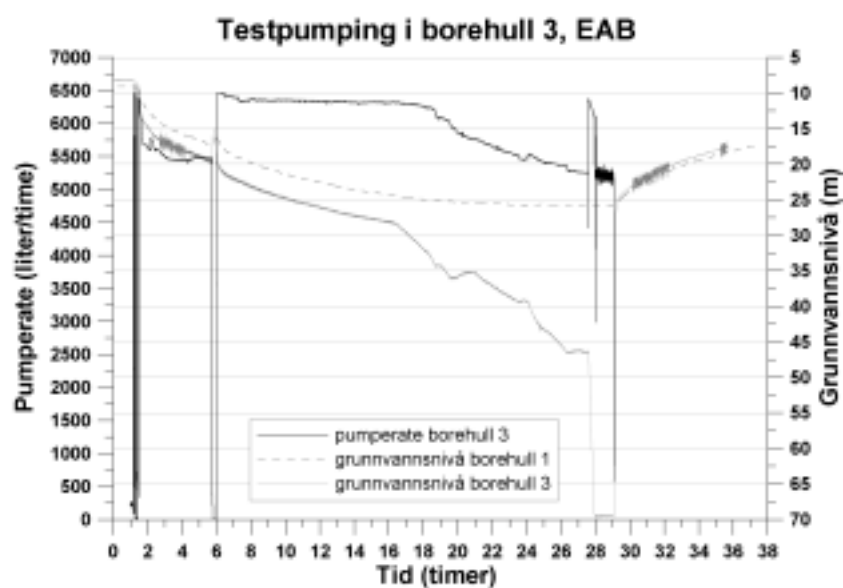
Resultatene fra vannprøvetaking av borehullene ved EAB før hydraulisk trykking (figur 5–64) viser at vannkvaliteten i de tre borehullene har tilnærmet samme gode kvalitet. pH-verdiene er 7,71, 7,78 og 7,77 for henholdsvis borehull 1, 2 og 3 (NGU-Lab, 2002b). Grunnvannskvaliteten i borehullene ved EAB vurderes til å være tilfredsstillende for grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann. Grenseverdiene i avsnitt 2.5 overskrides ikke. Grunnvannskvaliteten kan endre seg i driftsmodus, og et hensiktsmessig overvåkningsprogram av grunnvannskvaliteten bør gjennomføres. På samme måte som tilsvarende resultater fra Lade, er grunnvannet relativt hardt og kan karakteriseres som kalsium-bikarbonat type.



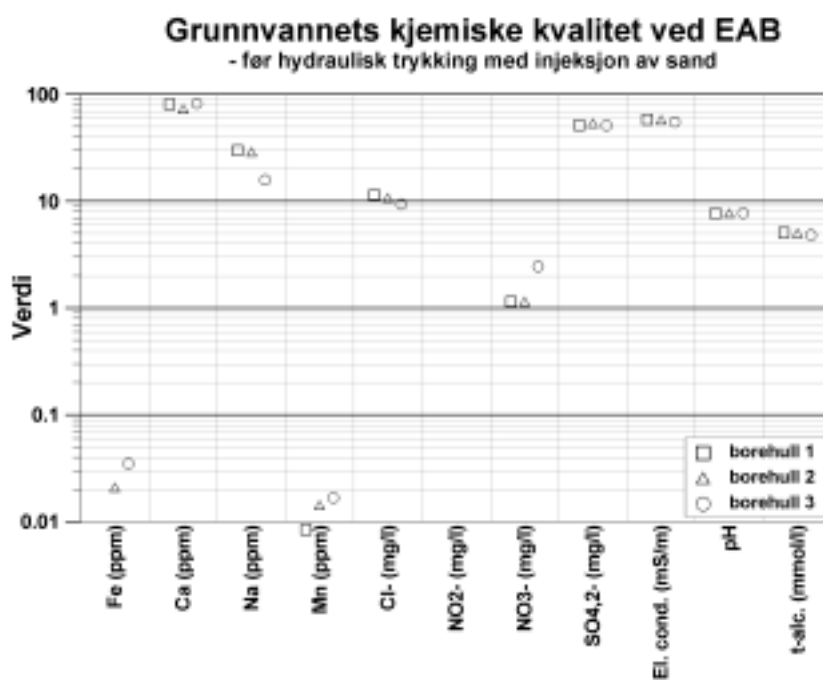
Figur 5-61: Pumperate og endringer i grunnvannsnivå forårsaket av testpumping i borehull 1 ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 5-62: Pumperate og endringer i grunnvannsnivå forårsaket av testpumping i borehull 2 ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 5–63: Pumperate og endringer i grunnvannsnivå forårsaket av testpumping i borehull 3 ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

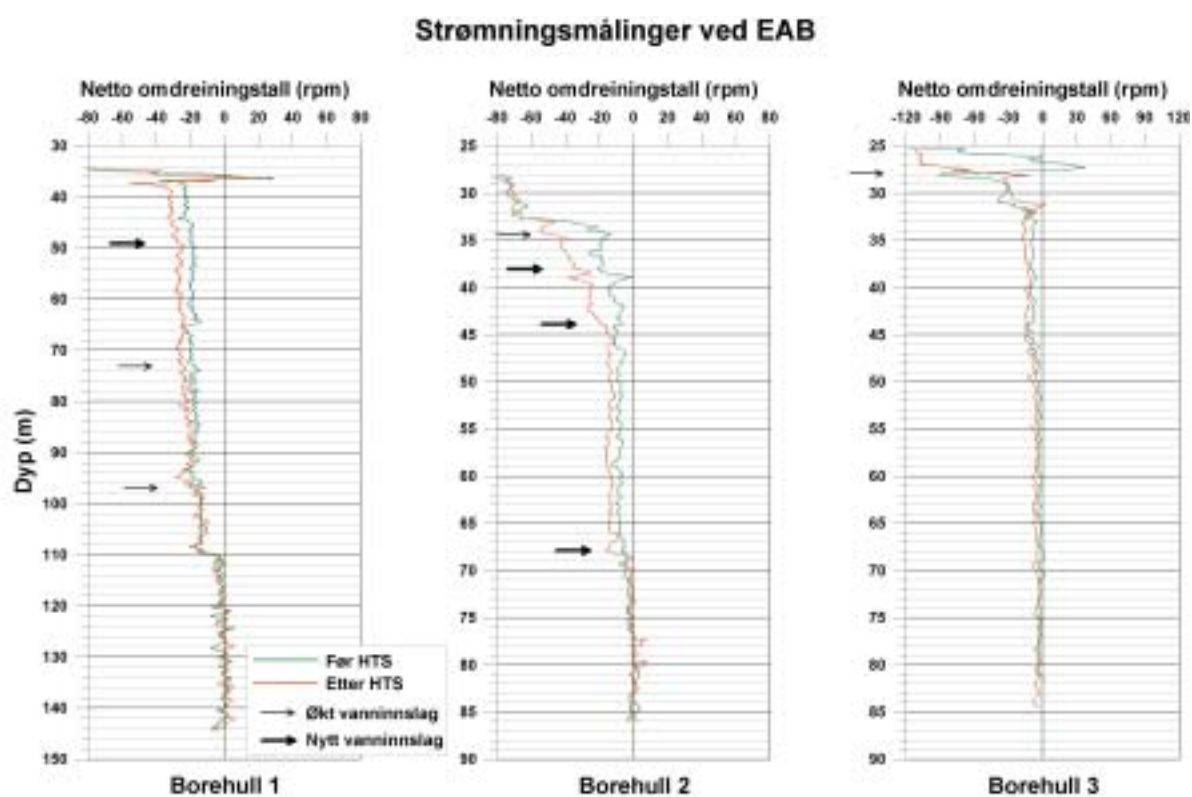


Figur 5–64: Grunnvannets kjemiske kvalitet for utvalgte parametre i borehull 1, 2 og 3 ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand (basert på NGU-Lab, 2002b).

5.3.2 Strømningsmålinger

Logger for kontinuerlig strømningsmålinger i borehullene ved EAB, utført før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand, er vist i figur 5–65. Tydelige vanninnslag, endring i strømningsmålerens omdreiningstall, opptrer ved 110, 37 og 34 meter i borehull 1, mens tre

svært små vanninnslag kan tolkes ved 97 og 73 meter. Innstrømningen er størst ved 37 og 34 meter. Kun ubetydelige endringer i strømningsmønsteret kan tolkes som følge av hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1. Vanninnstrømningen ved 97 og 73 meter har økt noe, mens innstrømningen ved 49 meter er ny. I borehull 2 er strømningsmønsteret forandret. Fire mer eller mindre nye vanninnslag opptrer ved cirka 68, 43-44, 36-38 og 35 meter. Hovedvanninnslaget ved 33 meters dyp, og flere betydelige vanninnslag i intervallet 28-33 meter, er mindre påvirket av hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Hovedvanninnslagene i borehull 3 er ved 32 og 28 meters dyp. Vanninnslaget ved 32 meter ser ut til å være upåvirket av hydraulisk trykking med injeksjon av sand, mens vannmengdene har økt ved 28 meters dyp. I borehullet forøvrig er det ikke mulig å påvise endringer i strømningsforholdene som følge av stimulering med hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

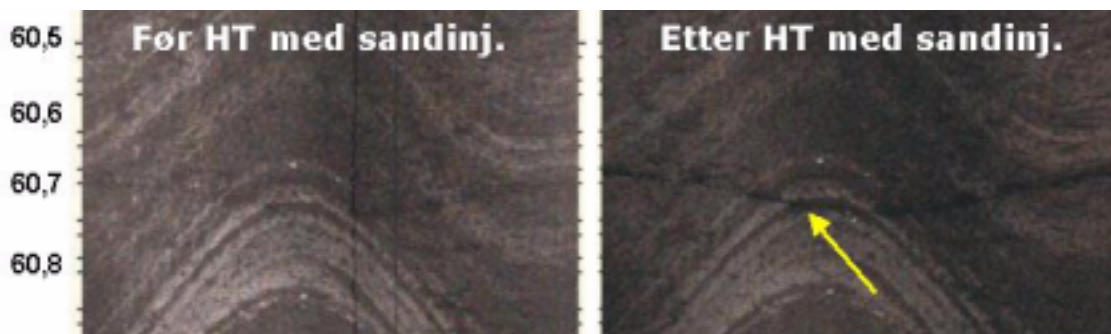


Figur 5–65: Logger for kontinuerlig strømningsmålinger i borehull 1, 2 og 3 ved EAB før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS).

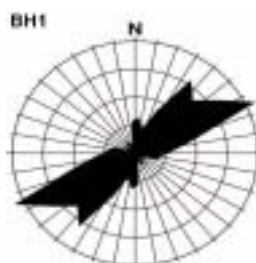
5.3.3 Borehullenes beskaffenhet - oppsprekning, temperatur, ledningsevne og radioaktivitet

Borehullsinspeksjon med optisk televiewer og logging av vannets temperatur og ledningsevne, og naturlig gammastråling gir god informasjon om eventuelle vannførende sprekker og sprekkesituasjonen i nærområdet. Endringer i borehullsveggen som følge av hydraulisk trykking med injeksjon av sand kan i enkelte tilfeller registreres med bilder fra optisk televiewer (figur 5–66). Sprekk ved 60,7 meter i borehull 2 ved EAB er tydelig mer åpen etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Optisk televiewer ble brukt til å kartlegge borehullenes oppsprekning. Sprekkerosen fra borehull 1 (figur 5–67) viser at

hovedsprekkeretningen er tilnærmet nordøst-sørvest og parallell lagdelingen. Gjennomsnittlig fall er 52° mot nordvest. Sprekkestereogram for borehull 1 ved EAB og tilhørende frekvenshistogram er vist i databilag 2, mens borehullsavviket er gitt i databilag 3. Logger for vannets temperatur og elektrisk ledningsevne for borehull 1, 2 og 3 er presentert sammen med logg for naturlig gammastråling og nivåer før- og resultat av hydraulisk trykking med injeksjon av sand i figur 5–68 til 5–70. Opptakene før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand er gjort henholdsvis tidlig september og midten av november to dager etter avsluttet termisk respons test i borehull 1. Temperaturen i alle borehullene er påvirket av årstidsvariasjoner de øverste 20 meterne, mens temperaturen i borehull 1 også er påvirket av gjenværende varme fra termisk responstest. Uforstyrret grunnvannsnivå finnes mellom 8 til 12 meters dyp for borehull 1, 2 og 3 ved EAB. Nye eller større hendelser i borehull 1 finnes ved 34,5, 51, 94, 110 og 114 meter, i borehull 2 ved 35, 39 og 44 meter, og i borehull 3 ved 28, 39, 64 og 78 meter. Bortsett fra temperaturloggene for borehull 1 og temperaturforløpet de øverste 20 meterne, har loggene for vannets temperatur og -elektriske ledningsevne noenlunde samme forløp før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Minimumstemperaturen, 7,5°C, i borehull 1 finnes mellom 110-120 meters dyp. Herifra følger temperaturen en naturlig gradient mot dypet. Temperaturen i borehull 2 og 3 har tilsvarende forløp, men minimumstemperaturen er cirka 7,2°C.

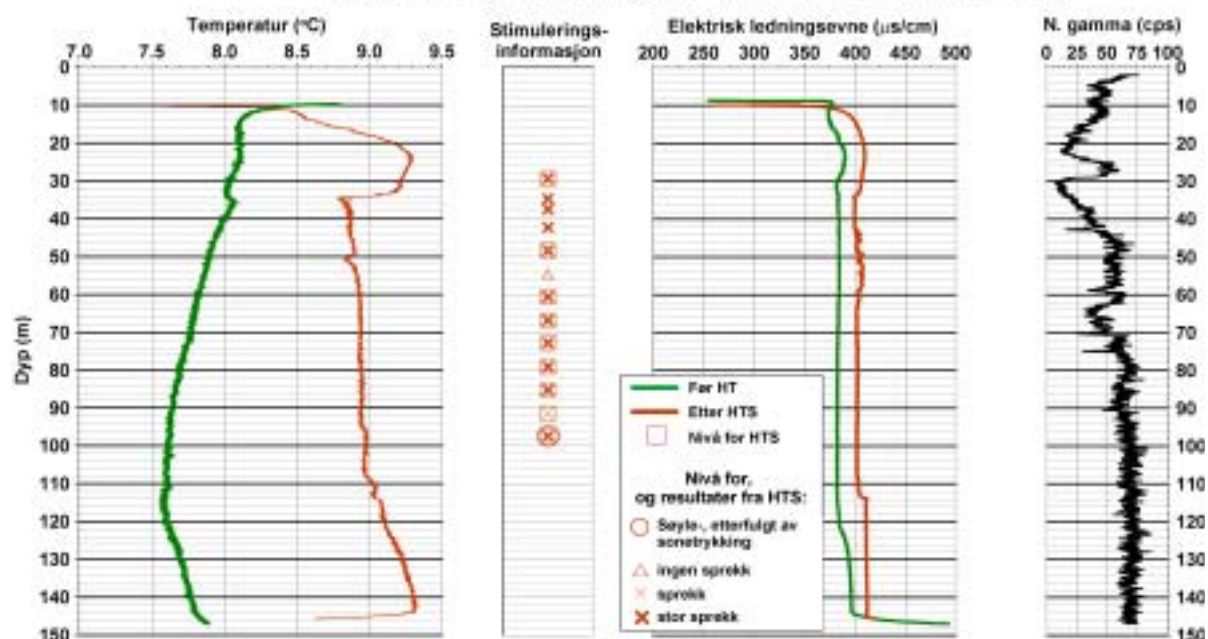


Figur 5–66: Bildene viser et utsnitt av borehull 2 ved EAB før (venstre) og etter (høyre) hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Sprekk 60,7 meter under topp rør er tydelig mer åpen etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



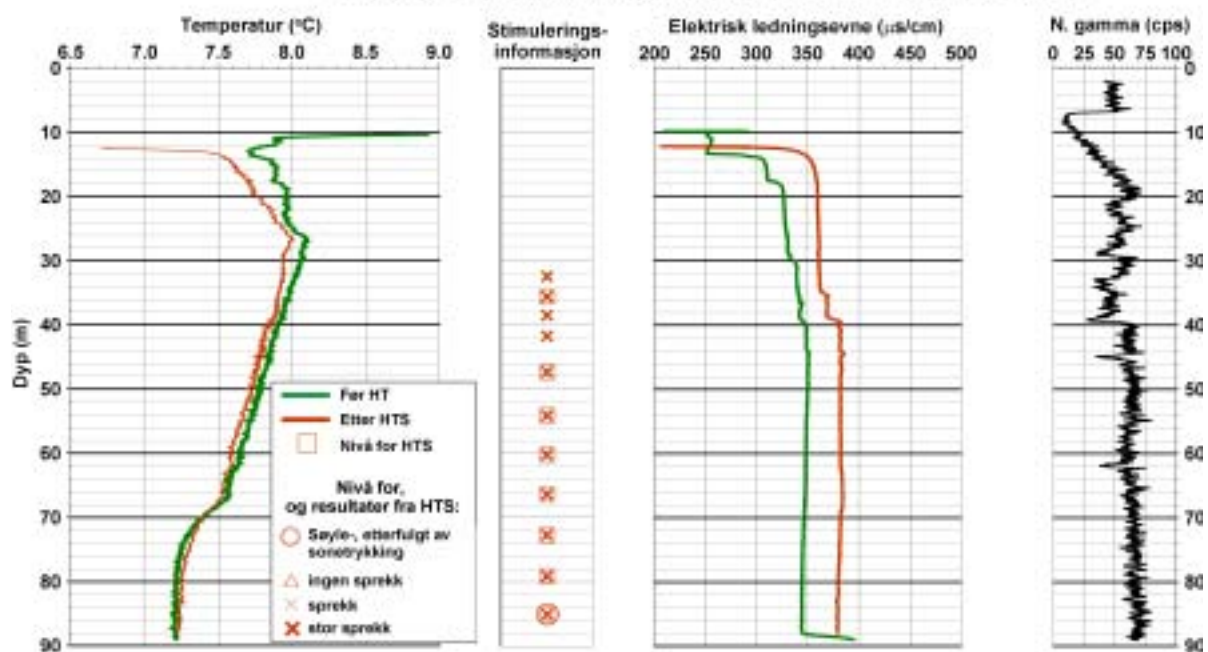
Figur 5–67: Sprekkerose fra borehull 1 ved EAB før hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Gjennomsnittlig fallvinkel er 52° mot nordvest.

TCN-logger og stimuleringsinformasjon for borehull 1 ved EAB

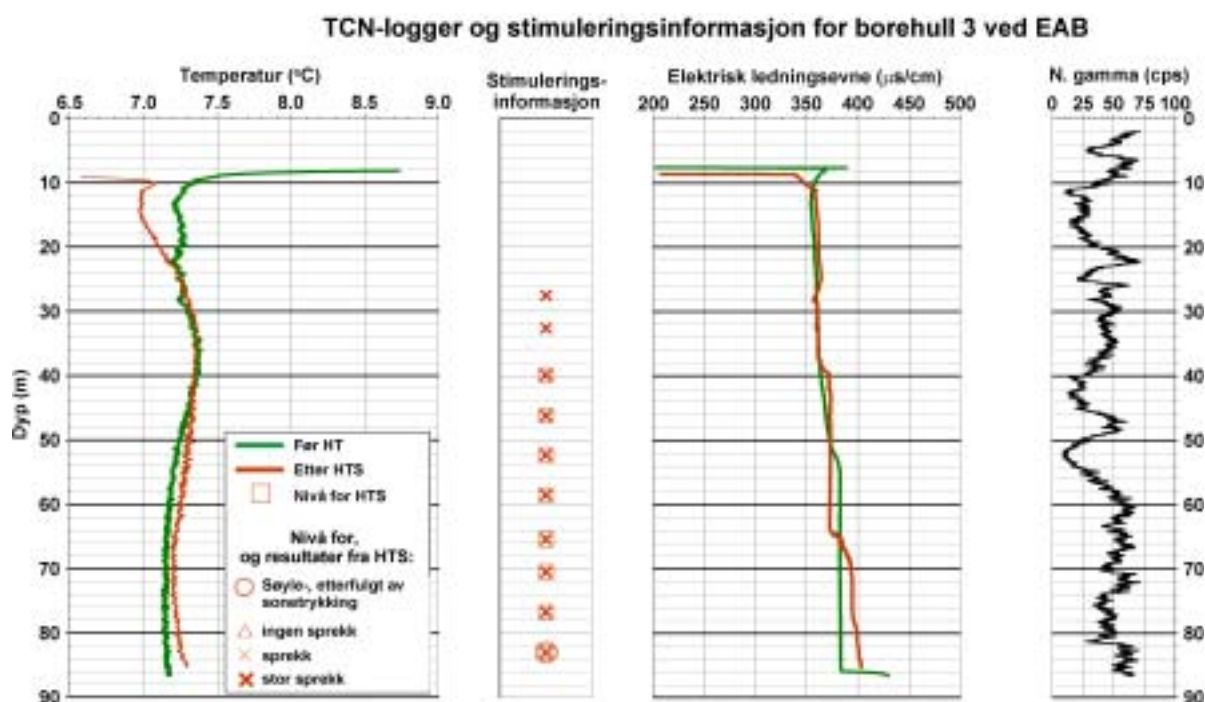


Figur 5–68: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 1 ved EAB.

TCN-logger og stimuleringsinformasjon for borehull 2 ved EAB



Figur 5–69: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 2 ved EAB.



Figur 5–70: Temperatur- og elektrisk ledningsevnelogg sammenlignet med nivåer for- og resultater fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand (HTS) i borehull 3 ved EAB.

5.3.4 Identifisering av mulige nye vanninnslag i borehullene

På samme måte som ved Bryn, er det gjort et forsøk på å identifisere nye vanninnslag i borehullene ved EAB for å verifisere effektiviteten av hydraulisk trykking. Identifisering av mulige nye vanninnslag i borehullene ved Bryn er gjennomført med utgangspunkt i strømningsmålinger (figur 5–65) og diagrammer som viser logg for vannets temperatur- og elektriske ledningsevne sammen med nivå for-, og resultat fra de forskjellige former for hydraulisk trykking (figur 5–68 til 5–70). Naturlige uregelmessigheter på temperatur- eller elektrisk ledningsevnelogg før hydraulisk trykking med injeksjon av sand, og dypere enn 25 meter finnes ved 35 (borehull 1, figur 5–68), ved 30, 39, 67, 88 (borehull 2, figur 5–69) og ved 28 og 55 (borehull 3, figur 5–70) meters dyp. Små variasjoner og usikkerheter knyttet til dybdeangivelsen må tas hensyn til i sammenligningen av data fra borehullsinspeksjon hentet fra fem forskjellige arbeidsoperasjoner: (1) Hydraulisk trykking med vann og injeksjon av sand, (2-5) strømningsmålinger, og logg for vannets temperatur- og elektrisk ledningsevne, begge utført før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Tilsvarende som ved Bryn, ved bruk av alle tilgjengelige data, er mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking med injeksjon av sand identifisert og presentert i tabell 5–16 til 5–18.

Tabell 5–16: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 1 ved EAB.

Data	Observasjon	Diskusjon
strømning, el. ledn. & temp.	Kun ubetydelige endringer i strømningsmønsteret ved 49, 73 og 97 meter ble observert som følge av hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Den største innstrømningen av vann ble registrert ved 34, 37 og 110 meter. Nye endringer, eller økt temperatur og ledningsevne kan sees ved 34,5, 51, 94, 110 og 114 meter.	De små endringene i strømningsmønsteret ved cirka 49, 73 og 97 meter kan relateres til hydraulisk trykking med vann og -injeksjon av sand i henholdsvis borehullsseksjon 48,4, 72,8 og 97,4. Det lave trykknivået observert ved hydraulisk trykking med bare vann i borehullsseksjonene ved 34,7 og 37,5 meter på henholdsvis 10 og 25-35 bar (figur 5–71), indikerer at to allerede åpne sprekkesystemer ble påtruffet, og effekten av hydraulisk trykking var sannsynligvis minimal. I henhold til resultatene fra strømningsmålingene, er sprekken innen 34,7- og 37,5-seksjonene borehullets hovedvanninnslag. Temperaturendringen ved 34 meter var større etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand sammenlignet med opprinnelig tilstand. Bilder fra optisk televiwer bekreftet tilstedeværelsen av en bergartsgrense ved 37 meter, der bergarten skifter fra ren kalkstein til knollekalk (figur 3–7). Det er ikke kjent hvordan temperaturendringene ved 51 og 94 meter kan relateres til hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Hvis det forutsettes en unøyaktig dybdeangivelse, kan endringene knyttes til hydraulisk trykking ved henholdsvis 48,4 og 91,4 meter. Nye hendelser på temperatur- og ledningsevneloggen ved 110 og 114 meter kan eventuelt knyttes til søyletrykking i 97,4-nivået. Strømningsmålingene antydte en vannførende sprekk ved 110 meter både før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

Tabell 5–17: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking i borehull 2 ved EAB.

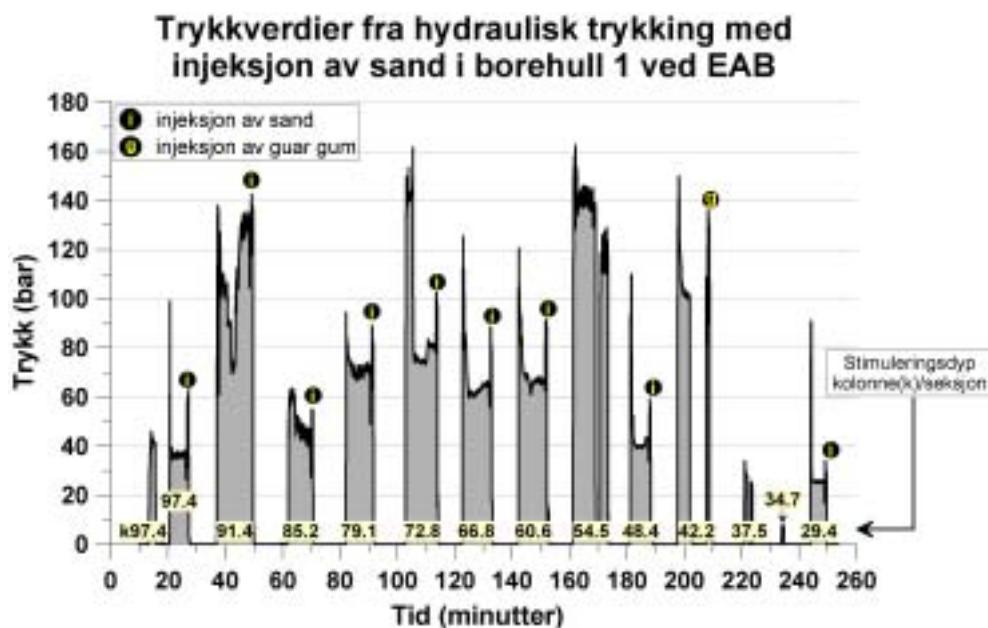
Data	Observasjon	Diskusjon
strømning, el. ledn. & temp	Strømningsmønsteret i borehull 2 ble endret ved introduksjon av fire mer eller mindre nye vanninnslag ved 35, 36-38, 43-44 og 68 meter. Hovedvanninnslaget ved 33, og flere betydelige vanninnslag i intervallet 28-33 meter ser ut til å være upåvirket av hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Nye eller forsterkede uregelmessigheter på temperatur og ledningsevneloggen ble registrert ved 35, 39 og 44 meter.	De nye vanninnslagene ved cirka 35, 36-38, 43-44 og 68 meter på strømningsloggen kan relateres til hydraulisk trykking med vann og -injeksjon av sand i henholdsvis borehullsseksjon 35,6, 38,5, 41,7 og 66,4. Mindre uregelmessigheter ble observert på ledningsevne- og temperaturloggen ved henholdsvis 39 og 67 meter både før og etter hydraulisk trykking. Ved å anta små unøyaktigheter i dybdeangivelsen, kan uregelmessighetene sannsynligvis samsvare med vanninnslagene ved cirka 38 og 68 meter, og således også den hydrauliske trykkingen. Tilstedeværelsen av disse uregelmessighetene, som beskriver den naturlige tilstanden, indikerer at to mindre men sannsynligvis allerede eksisterende vanninnslag fikk forbedret kapasitet som følge av hydraulisk trykking. Det relativt lave trykknivået ved stimulering av seksjon 66,4 og 38,5 (figur 5–72), som har et (gjen)åpningstrykk på henholdsvis 100 og 65 bar, kan tyde på at disse nivåene også representerer allerede eksisterende og åpne sprekker. Uregelmessigheten ved 35 meter på ledningsevneloggen kan relateres til hydraulisk trykking med injeksjon av sand i seksjonen ved 35,6 meter. Den nye hendelsen på ledningsevneloggen ved 44 meter kan, forutsatt unøyaktig dybdeangivelse, knyttes til hydraulisk trykking i nivået 41,7.

Tabell 5–18: Mulige nye vanninnslag forårsaket av hydraulisk trykking borehull 3 ved EAB.

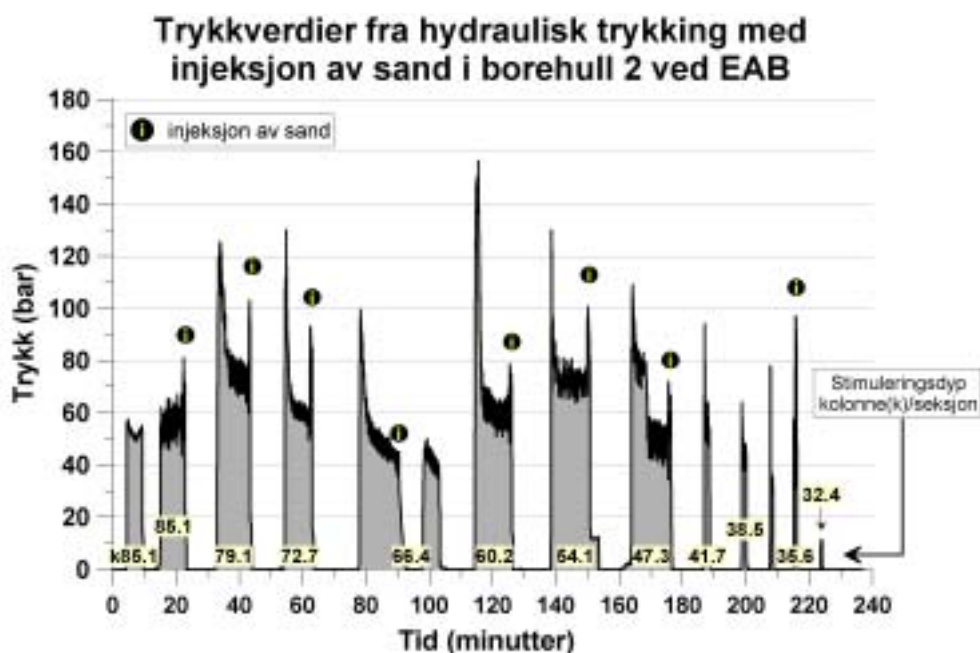
Data	Observasjon	Diskusjon
strømning, el. ledn. & temp	Hovedvanninnslagene opptrer ved 32 og 28 meter. Vanninnslaget ved 32 meter ser ut til å være upåvirket av hydraulisk trykking med bare vann, mens mengden innstrømmende vann ved 28 meter har økt.	Hydraulisk trykking med bare vann ble gjort i borehullsseksjonene ved 27,5 og 32,6 meter. Det lave trykknivået ved hydraulisk trykking av 27,5-seksjonen på cirka 10 bar (figur 5–73), tyder på en fullstendig åpen og allerede eksisterende sprekk. Resultater fra stømnings-, og delvis temperaturmålingene fra før hydraulisk trykking, bekrefter tilstedeværelsen av store vanninnslag i 27,5-nivået. (Gjen)åpningstrykket for seksjon 32,6 var drøyt 100 bar, men falt umiddelbart til 40 bar (figur 5–73). Det opprinnelige strømningsmønsteret i borehull 3 indikerer en delvis åpen og vannførende sprekk i 32,6-seksjonen (figur 5–65). Selv om strømningsmønsteret ser ut til å være uendret som følge av hydraulisk trykking, og tilsvarende for temperatur- og ledningsevneloggen, var det sannsynligvis nødvendig med et relativt høyt (gjen)åpningstrykk for å spyle vekk materiale som delvis tettet sprekken. Alle observerte uregelmessigheter på ledningsevneloggen kan relateres til hydraulisk trykking av henholdsvis borehullsseksjon 27,5, 39,9, 65,4 og 76,7. Injeksjon av sand ble utført i alle seksjonene bortsett fra 27,5-seksjonen.
	Nye uregelmessigheter på ledningsevneloggen ble oppdaget ved 28, 39, 64 og 78 meter.	

5.3.5 Hydraulisk trykking med injeksjon av sand

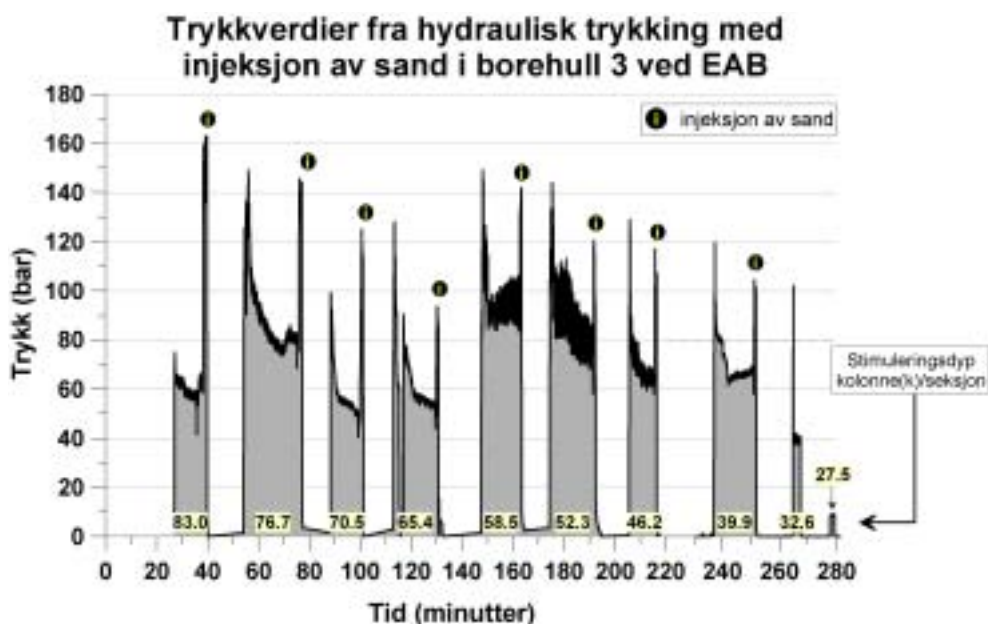
Det ble injisert sand i 25 seksjoner fordelt på de tre borehullene ved EAB. Resultatene av hydraulisk trykking med injeksjon av sand i form av trykk-tid diagram er vist i figur 5–71 til 5–73. Basert på erfaringer ved Bryn ble injeksjon av sand vurdert til å være unødvendig i seksjoner hvor stabilt mottrykk var lavere enn cirka 40 bar ved maksimal strømningsrate, og her er det kun utført hydraulisk trykking med bare vann. Av totalt 37 stimuleringer ble 36 trykk-tid forløp, eller 97%, tolket som åpning eller gjenåpning av sprekker.



Figur 5–71: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1 ved EAB.



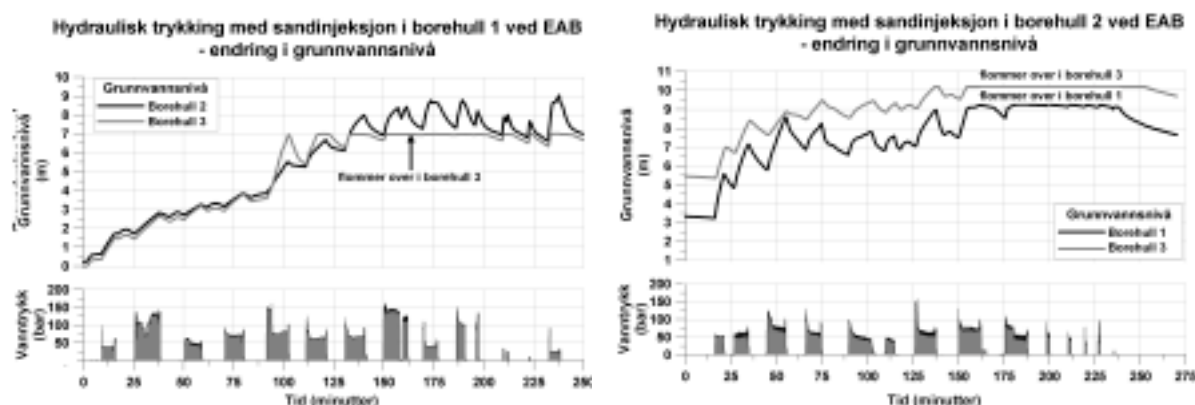
Figur 5-72: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 2 ved EAB.



Figur 5-73: Trykk-tidforløp fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 3 ved EAB.

Endringer i grunnvannsnivået i omkringliggende borehull som følge av hydraulisk trykking i et av de andre borehullene er vist i figur 5-74 og 5-75. Tilhørende trykk-tid diagrammer fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand er også tegnet inn i figurene. Grunnvannet stiger og synker tilnærmet parallelt i borehullene, og tilsvarende som for Bryn, kan den parallelle responsen knyttes til de store hovedvanninnslagene på 25-35 meters dyp i borehull 1, 2 og 3 ved EAB (figur 5-65). Borehull 1 viste tidvis større respons på hydrauliske

trykking med injeksjon av sand enn borehull 2 og 3. Siden borehull 1 er plassert i midten (figur 3–6), kan sannsynligvis den noe høyere hydraulisk responsen forklares med kortere avstand til hydraulisk trykking i enten borehull 2 eller 3. Ved hydraulisk trykking i borehull 1 følger grunnvannet i borehull 2 og 3 et tilnærmet identisk forløp, men større respons i borehull 3 kan sees etter cirka 100 minutter. Målingene er forstyrret av at vannet til tider flommer over i borehull 1 og 3. Kurvene for nivåendringer i borehull 1 og 2, som følge av hydraulisk trykking i borehull 3, er delt i to fordi stimuleringen er gjort over to dager.



Figur 5–74: Grunnvannsnivåendringer i borehull 2 og 3 (venstre), og borehull 1 og 3 (høyre) forårsaket hydraulisk trykking henholdsvis i borehull 1 og 2.



Figur 5–75: Grunnvannsnivåendringer i borehull 1 og 2 forårsaket hydraulisk trykking i borehull 3.

5.3.6 Terrengendringer

Nivellering før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1, 2 og 3 ved EAB viser en maksimal endring i terrengnivået på +2,0 mm i forhold til fastpunkt (tabell 5–19). Endringen indikerer at terrenget innenfor influensområdet for hydraulisk trykking med injeksjon av sand har hevet seg med 2,0 mm. Flere interne nivåendringer på +1,0 mm innad i influensområdet støtter teorien om at deler av terrenget innen influensområdet kan ha løftet seg. Alle endringene er imidlertid så beskjedne at det er vanskelig å fastslå om resultatene skyldes virkelige terrengendringer eller om de er målefeil.

Tabell 5–19: Nivellering før og etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 1 og 3 ved EAB.

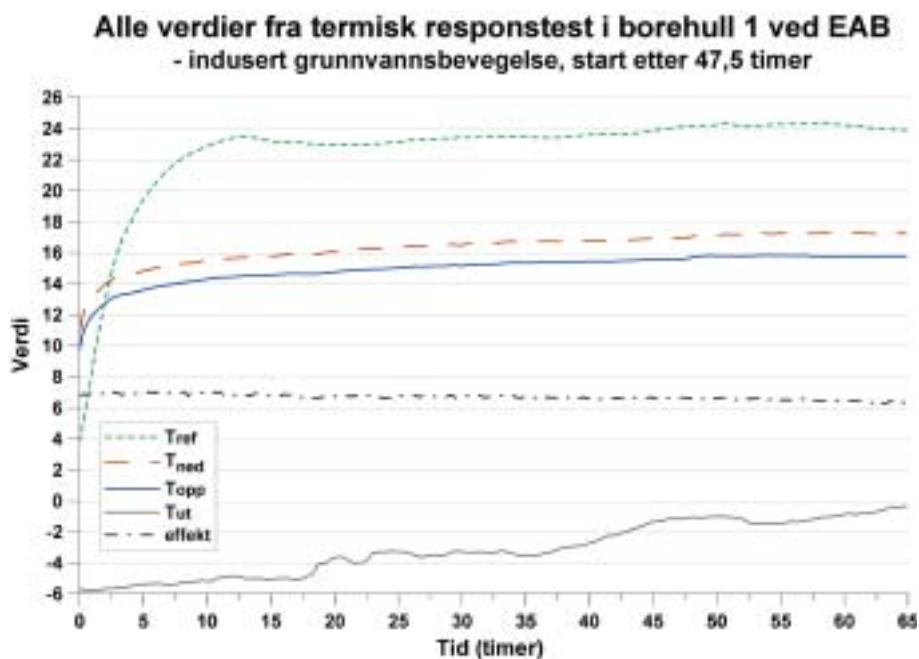
	Fastpunkt	pkt. 1	pkt. 2	pkt. 3
Borehull 1, nivellement før HTS (m)	3,956	2,404	0,371	2,4695
Borehull 1, nivellement etter HTS (m)	3,958	2,405	0,371	2,4705
Borehull 1, relativ forskjell (mm)	2,0	1,0	0,0	1,0
Borehull 3, nivellement før HTS (m)	3,753	2,199	-	-
Borehull 3, nivellement etter HTS (m)	3,753	2,200	-	-
Borehull 3, relativ forskjell (mm)	0,0	1,0	-	-

5.3.7 Termisk respons i borehull 1

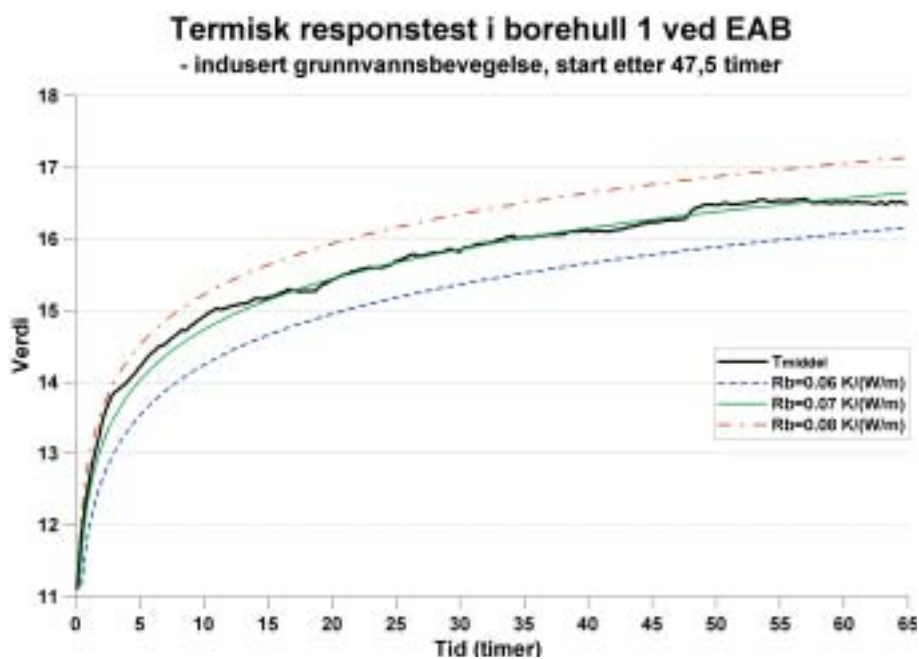
Den effektive in-situ verdien for berggrunnens varmeledningsevne i naturlig tilstand, uten induisert grunnvannsbevegelse i borehull 1 ved EAB, er beregnet til å være 3,8 W/m,K, mens borehullsmotstanden, R_b , er 0,07 K/(W/m) (figur 5–76 og 5–77). I en studie av bergartenes varmeledningsevne i Bærum, på kartblad Bekkestua (figur 2–30 og 2–31), er knollekalken ved EAB målt til å ha en median varmeledningsevne på 2,7 W/m,K (Midttømme et al., 2000). Det vil si at borehullet faktisk bidrar med 1,1 W/m,K høyere enn bergartens varmeledningsevne alene. Tilsvarende som for ringerikssandsteinen ved Bryn, er bergartsprøvene for varmeledningsevne hentet fra andre lokaliteter enn EAB slik at den virkelige verdien for berggrunnens varmeledningsevne omkring borehull 1 ved EAB kan avvike fra den målte laboratorieverdien på 2,7 W/m,K. Det hellende terrenget, borehullets høye vannnivå og den høye oppsprekningsgraden fra hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved EAB kan tyde på en betydelig grunnvannsstrømning i området. I tillegg til berggrunnens varmeledningsevne på 2,7 W/m,K, er det sannsynlig at de ekstra 1,1 W/m,K av den effektive in-situ verdien for berggrunnens varmeledningsevne kan tilskrives strømmende grunnvann gjennom testborehullet. Verdien for borehullsmotstanden, R_b , på 0,07 K/(W/m) ligger innen normalområdet for U-rørskollektorer.

Oppstart av pumping i naboborehullet, borehull 3, etter 47,5 timer forstyrrer grunnvannsbevegelsen i brønnfeltet og fører til en liten økning av verdien T_{middel} (figur 5–77). Høyere termisk respons, økning av T_{middel} , tyder på at mindre energi tas opp i berggrunnen og verdien for den effektive in-situ varmeledningsevnen reduseres. En mulig forklaring på den økte termiske responsen i borehull 1 kan være at pumpingen i borehull 3 gjør at den naturlige grunnvannsstrømningen reduseres. Dette forutsetter at grunnvannet i området strømmer fra vest-sørvest til øst-nordøst. Borehull 1 er plassert 16 meter øst-nordøst for borehull 3 (figur 3–6). En alternativ forklaring kan være at pumpingen i borehull 2 trekker på vann fra de store vannførende sprekkene ved 25-35 meters dyp, og at vanntapet i denne delen av borehullet gjør at varmere vann fra den dypere delen av borehull 1 stiger opp langs kollektorslangen. Varmere vann i større deler av borehull 1 vil øke T_{middel} . Reduksjonen i berggrunnens effektive in-situ varmeledningsverdi, forårsaket av pumping i borehull 3 med påfølgende forstyrrelse av grunnvannsbevegelsen innad i brønnfeltet, kan kvantifiseres ved å gjennomføre en ny termisk responstest i borehull 1. Tilsvarende som for Bryn (avsnitt 5.2.12) forutsettes det at borehullet har stabilisert seg på naturlig temperaturnivå, og at pumpingen i borehull 3 startes samtidig eller før selve testen.

Under idéelle forhold burde den termisk responstesten i borehull 1 vart i minimum 65 timer i stedet for 47,5 timer før pumpingen i naboborehullet startet (Gehlin, 2002).



Figur 5-76: Alle verdier fra termisk responstest i borehull 1 ved EAB.



Figur 5-77: Matching av forsøkets gjennomsnittstemperatur (T_{middel}) med typekurver for borehullsmotstanden, R_b .

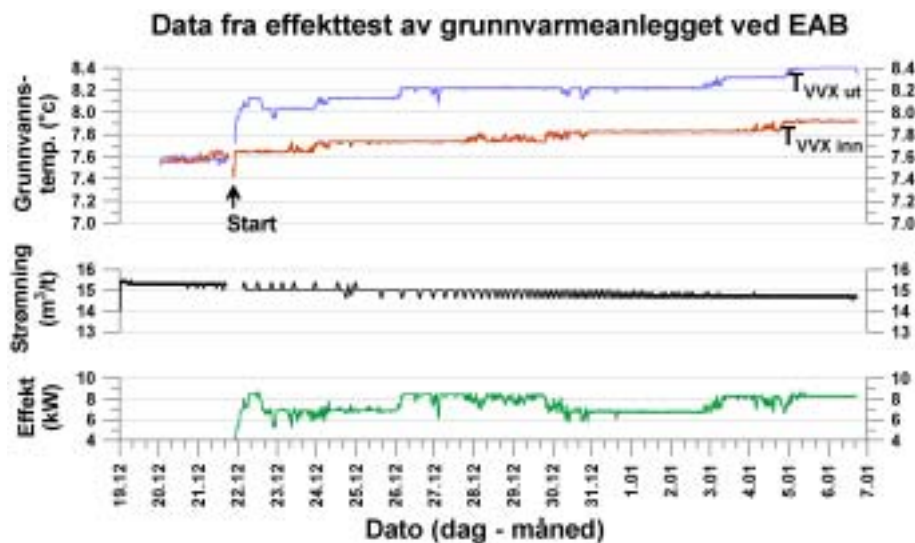
5.3.8 Effektuttak fra grunnvarmeanlegget

Resultater fra den 17 dager lange testkjøringen av grunnvarmeanlegget ved EAB er presentert i figur 5–78. Enkelte temperatur- og strømningsdata fra sirkulasjon av grunnvann i anlegget før testkjøringen er tatt med i diagrammet. Sirkulasjonsraten (pumpe- og infiltrasjonsraten), heretter kalt strømningsrate, var cirka $15,4 \text{ m}^3/\text{time}$ i begynnelsen av testkjøringen (figur 5–78). Siden pumpene i borehull 2 og 3 hadde samme strømtilførsel som det energikrevende utstyret for termisk respons test, ble strømningsraten redusert til $15 \text{ m}^3/\text{time}$ ved oppstart av effekttesten. Strømningsraten var noe avtagende, men stabiliserte seg på cirka $14,4 \text{ m}^3/\text{time}$ mot slutten av testkjøringen (figur 5–79).

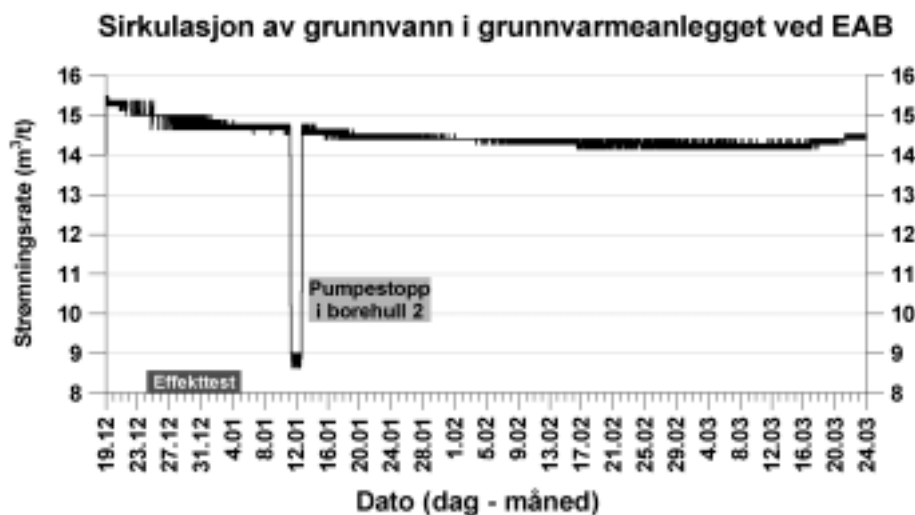
Selv om temperaturforskjellen mellom det inn- og utstrømmende grunnvannet fra varmeveksleren ($T_{\text{inn_vvx}}$ og $T_{\text{ut_vvx}}$, figur 5–78) var relativt konstant gjennom hele testperioden, kan enkelte variasjoner observeres på kurven som viser effektuttaket fra vann (Effekt). Effektuttaket fra vann ble beregnet med utgangspunkt i ligning 6.3, og målte verdier for strømningsrate og temperaturforskjellen mellom inn- og utstrømmende grunnvann fra varmeveksleren. Det beregnede effektuttaket fra vann var hele tiden lavere enn den konstante effekttilførselen på 10 kW fra den termiske responstesteren. Mulige årsaker til at 1,5-3 kW blir borte i systemet kan være:

- Temperaturtap i varmeoverføringene, det vil si varmeoverføring fra varmeelementene i termisk responstester til kollektorvæsken og varmeveksling mellom kollektorvæsken og strømmende grunnvann.
- Nøyaktigheten av temperaturmålingene på inn- og utstrømmende grunnvann i varmeveksleren. Feilkilder kan være selve temperatursensorenes nøyaktighet, og påvirkning fra omgivelsestemperaturen. Siden et tykt isolerende lag med snø dekket installasjonene i kummen rundt borehull 1, betraktes påvirkningen fra utelufttemperaturen på omgivelsestemperaturen i kummen til å være minimal. Allikevel kan de små temperaturforskjellene som ble målt i testen være følsomme for alle mulige feilkilder.

Pumpestopp i borehull 2 rundt 12. januar førte til at strømningsraten i grunnvarmeanlegget ved EAB ble redusert til cirka $9 \text{ m}^3/\text{time}$ (figur 5–79). Det er ikke kjent hvorfor pumpet stanset under testkjøringen.



Figur 5-78: Resultater fra effekttesten av grunnvarmeanlegget ved EAB.



Figur 5-79: Strømningsraten stabiliserte seg på vel 14 m³/time i løpet av den tre måneder lange testkjøringen av grunnvarmeanlegget ved EAB.

5.3.9 Endringer i borehullskapisiteten som følge av hydraulisk trykking

Tilsvarende testpumping som utført ved Bryn, for å dokumentere effekten av hydraulisk trykking med injeksjon av sand, ble ikke gjennomført ved EAB på grunn av borehullenes naturlige høye kapasitet (avsnitt 4.4.1). Selv om dokumentasjonen mangler, er det sannsynlig at hydraulisk trykking med injeksjon av sand i flere seksjoner i hvert av borehullene ved EAB har forårsaket en samlet kapasitetsøkning. Dette utsagnet kan sannsynliggjøres ved følgende argumentasjonsrekke:

- En betydelig kapasitetsøkning ble oppnådd ved Bryn som en følge av hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 5-26). Til forskjell fra EAB hadde borehullene ved Bryn, ved ekskludering av sprekkesonen 13 meter under terrengoverflaten, i utgangspunktet liten kapasitet (<560 liter/time).

- Sammenlignet med Bryn var graden av oppsprekning oppnådd med hydraulisk trykking høyere ved EAB. Ved Bryn ble 70% av trykk-tid forløpene fra hydraulisk trykking med vann tolket som gjenåpning- eller initiering av sprekker (avsnitt 5.2.9). Tilsvarende tall for EAB var 97% (avsnitt 5.3.5). På grunn av det generelt lavere trykknivået ved EAB (figur 5–92), 94,6% av de gjenåpnede- eller initierte sprekke ble tolket som store, mens tilsvarende tall for Bryn var 35% (figur 5–44).
- Etter 97 døgn med sammenhengende pumping fra borehull 2 og 3, og infiltrasjon i borehull 1 ved EAB, var sirkulasjonsraten (pumping og infiltrasjon) stabil på vel 14 m³/time etter å ha vært omkring 15 m³/time ved oppstart (figur 5–79). En midlertidig stopp av pumpen i borehull 2 førte til en kapasitetsreduksjon til cirka 9 m³/time som vil være omkring pumpens maksimale kapasitet under de aktuelle forholdene i borehull 3 (figur 2–23). Kapasiteten for borehull 3 var 5200 liter/time før hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- På grunn av den naturlige høye kapasiteten til borehullene ved EAB er det lite trolig at hydraulisk trykking med injeksjon av sand har forårsaket en like stor relativ- eller prosentvis kapasitetesøkning som ved Bryn. Allikevel, sammenlignet med Bryn, burde den vellykkede stimuleringen med hydraulisk trykking og injeksjon av sand i form av høyere oppsprekningsgrad og injeksjon av sand i flere seksjoner, gi en økning av borehullskapasiteten, i kvantitet kanskje større enn ved Bryn.

5.3.10 Anbefalt bruk av borehullene ved EAB

De tilfredsstillende resultatene fra den tre måneder lange sirkulasjonstesten av grunnvarmeanlegget ved EAB der strømningsraten stabiliserte seg på cirka 14 m³/time, bekreftet at anlegget kan settes i drift i henhold til opprinnelige planer (avsnitt 3.3). Avhengig av det gjennomsnittlige temperaturuttaket i driftsperioden var verdiene for det FEFLOW-modellerte energiuttaket for kun oppvarming 92, 102 og 110 MWh/år (figur 5–90). Et kontorbygg med både varme- og kjølebehov er aktuell bruker av energien ved EAB. Anleggets videre utforming vil bli avgjort av de rette myndigheter i Bærum kommune.

5.4 Modellert energipotensial

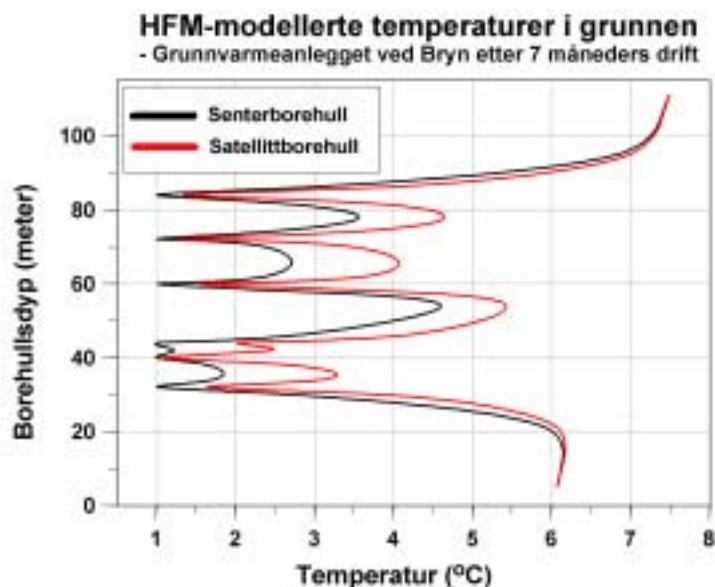
5.4.1 Sammenligning av FEFLOW og HFM ved Bryn

Avsnittet er hovedsakelig basert på Spangelo (2002).

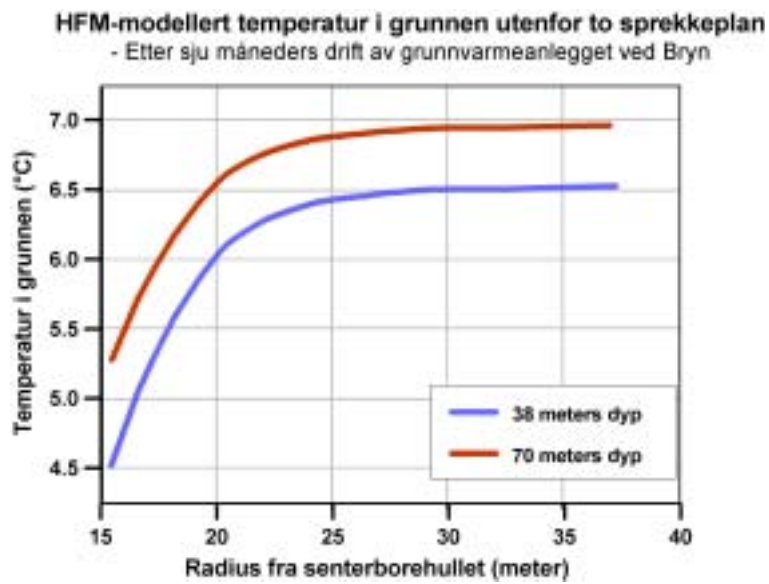
Figur 5–80 til 5–82 oppsummerer resultatene fra modellering av grunnvarmeanlegget ved Bryn med programvaren HFM. Etter sju måneders drift påvirkes temperaturen i berggrunnen i senterborehullet og satellittborehullet fra 20 til 100 meters dyp, henholdsvis 12 og 16 meter fra den grunneste og dypeste sprekkeplanet (figur 5–80). Nedkjølingen er størst rundt sprekkeplanene ved 32, 40, 60, 72 og 84 meters dyp. Berggrunnens temperatur etter sju måneders drift, modellert med HFM og utenfor rekkevidden til sprekkeplanene med betydelig nedkjøling ved 38 og 70 meters dyp, viser at effektuttaket i grunnvarmeanlegget påvirker berggrunnstemperaturen opp til 30 meter fra senterborehullet (figur 5–81).

Temperaturforskjellen mellom de to kurvene ved henholdsvis 38- og 70 meters dyp holder seg konstant på grunn av områdets temperaturgradient. Temperaturen på produsert vann fra

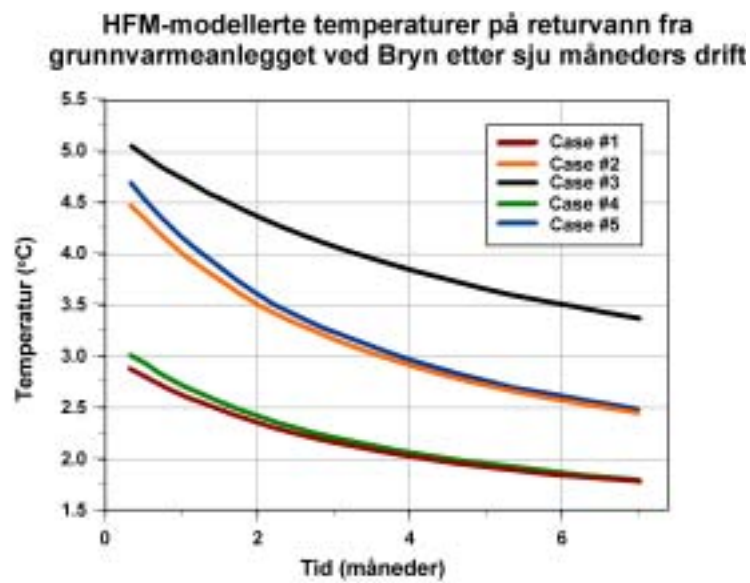
grunnvarmeanlegget i løpet av sju måneders drift modellert i HFM (figur 5–82) viser at modelleringcasene med lik strømningsfordeling (case 4 og 5, tabell 4–4) oppnår høyere temperatur enn case med ulik strømningsfordeling (case 1 og 2). Temperaturforskjellene reduseres over tid. Case 3 hadde lavere strømningsrate enn de andre casene, og oppnådde høyere temperatur på produsert vann. En sammenligning av temperaturene på produsert vann fra grunnvarmeanlegget etter sju måneders drift, modellert med FEFLOW og HFM, er vist i figur 5–83. Temperaturen er tilnærmet lik for de fem casene. Bortsett fra case 3, er temperaturene modellert i HFM noe høyere enn de tilsvarende verdiene modellert i FEFLOW. De to programvarene ga forskjellig resultat ved modellering av lik- og ulik strømningsfordeling, henholdsvis case 1 og 4, 2 og 5 (tabell 4–4). I FEFLOW ble høyeste temperatur oppnådd for modelleringcasene med lik strømningsfordeling, mens det motsatte var tilfelle for HFM-modelleringene. Case 3 ble modellert med en strømningsrate på 5000 liter/time, mens de øvrige modelleringcasene hadde en strømningsrate på 20000 liter/time (tabell 4–4). I FEFLOW er strømningsraten i sprekken beregnet fra størrelsen på sprekkeåpningen og angitt pumperate. Redusert pumperate og lik størrelse på sprekkeåpningen burde føre til redusert strømning og høyere oppholdstid for vannet i sprekken. Videre burde lengre oppholdstid føre til større varmeveksling mellom vannet og berggrunnen og følgelig høyere temperatur på det utstrømmende vannet. Resultatene viser at det motsatte var tilfelle i case 3 og indikerer at det sannsynligvis ikke er noen korrelasjon mellom strømningsraten og pumperaten i HFM.



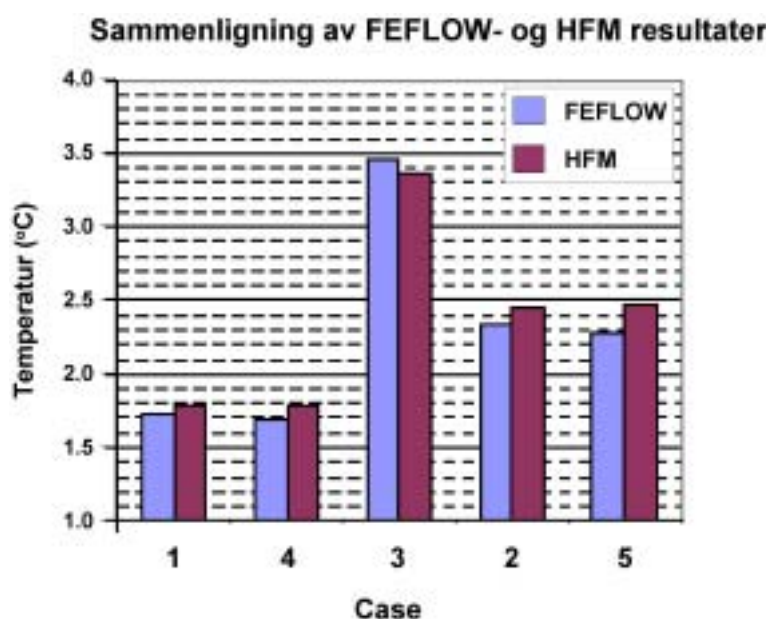
Figur 5–80: HFM-modellerte temperaturer i grunnen ved senterborehullet og satellittborehullene i grunnvarmeanlegget ved Bryn etter sju måneders drift (modifisert etter Spangelo, 2002).



Figur 5–81: HFM-modellerte temperaturer i grunnen utenfor to sprekkeplan ved henholdsvis 38 og 70 meters dyp etter sju måneders drift av grunnvarmeanlegget ved Bryn (modifisert etter Spangelo, 2002).



Figur 5–82: HFM-modellerte temperaturer på produsert vann fra grunnvarmeanlegget ved Bryn i løpet av sju måneders drift (modifisert etter Spangelo, 2002).



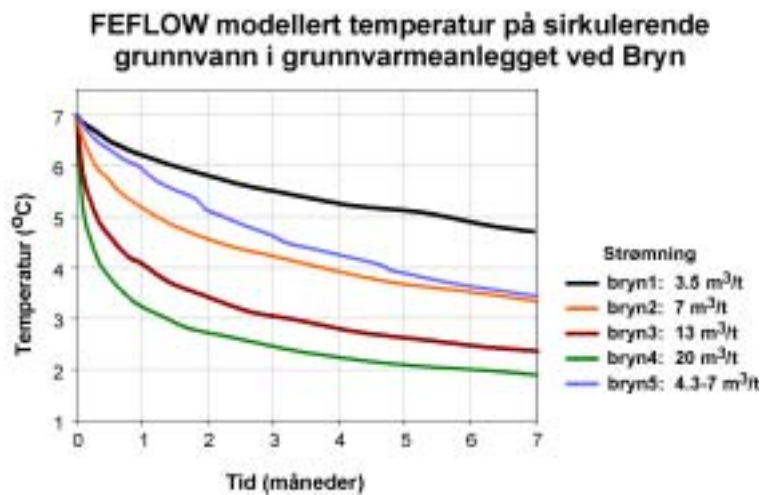
Figur 5–83: Sammenligning av temperaturen på produsert vann fra grunnvarmeanlegget ved Bryn etter sju måneders drift, modellert med FEFLOW og HFM (modifisert etter Spangelo, 2002).

5.4.2 Modellert energipotensial ved Bryn og EAB

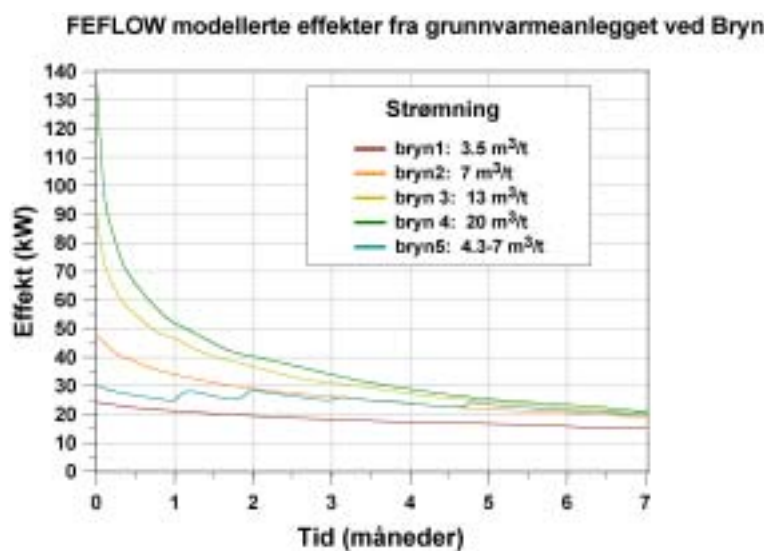
Resultatene fra FEFLOW-modelleringen av energipotensialet ved Bryn er basert på Spangelo (2003), mens resultatene fra EAB er basert på egne FEFLOW-modelleringer.

Utgangstemperaturen på oppumpet grunnvann fra satellittborehullene ved Bryn (borehull 1, 2, 4 og 5) var cirka 7°C for de fem modelleringscasene med forskjellig strømningsrater (bryn1-5, tabell 4–5). Temperaturen faller raskt i begynnelsen av driftsperioden, og temperaturfallet er størst for modelleringscasene med høyest strømningsrate (figur 5–84). Bortsett fra case 5 som har varierende strømningsrate (figur 4–27), får temperaturen et tilnærmet lineært forløp for case 1-4 etter to måneders drift. Etter sju måneders drift er temperaturen på oppumpet grunnvann henholdsvis 4,7, 3,4, 2,4, 1,9 og 3,5°C for case bryn1 til 5. Modellert effektuttak fra grunnvarmeanlegget ved Bryn varierer for de forskjellige casene med forskjellig strømningsrate (figur 5–85). Høyest effekt, men også det bratteste effekt-fallet i begynnelsen av modelleringsperioden, oppnås for casene med høyest strømningsrate. Modelleringscasene med strømningsrate på 3,5 og 4,3-7 m³/time oppnår det jevneste effektuttaket på 15-30 kW gjennom hele driftsperioden. Alle casene, bortsett fra bryn1 med en strømningsrate på 3,5 m³/time, ser ut til å stabilisere seg med et effektuttak på 20 kW etter sju måneders drift. Energiuttaket fra grunnvarmeanlegget ved Bryn etter endt driftsperiode er 94, 135, 169, 188 og 126 MWh for henholdsvis case bryn1 til 5 (figur 5–86).

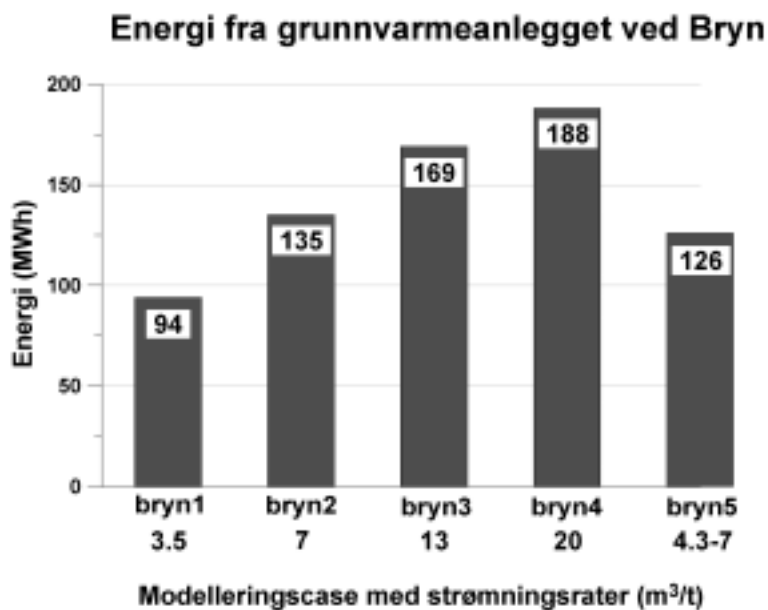
FEFLOW-modellert effekt fra grunnvarmeanlegget ved Bryn øker med strømningsraten fordi større mengder kaldt vann varmeveksler med berget. Dette gir en større temperaturdifferanse mellom vannet og berget, som igjen gir økt varmeovergang og større effekt. Etter sju måneders drift er temperaturen på returvannet injisert i borehull 3 ved Bryn lavere for modelleringene med høy strømningsrate enn for modelleringene med lavere strømningsrate. Høy strømningsrate gir en raskere nedkjøling av berget og effekten synker tilsvarende hurtig (Spangelo, 2003).



Figur 5–84: Modellert temperatur på sirkulerende grunnvann med forskjellige strømningsrater (bryn1-5) i en sju måneders driftsperiode for grunnvarmeanlegget ved Bryn (modifisert etter Spangelo, 2003).



Figur 5–85: Mulig effektuttak fra grunnvarmeanlegget ved Bryn som funksjon av tid og forskjellige strømningsrater (bryn1-5) (modifisert etter Spangelo, 2003).



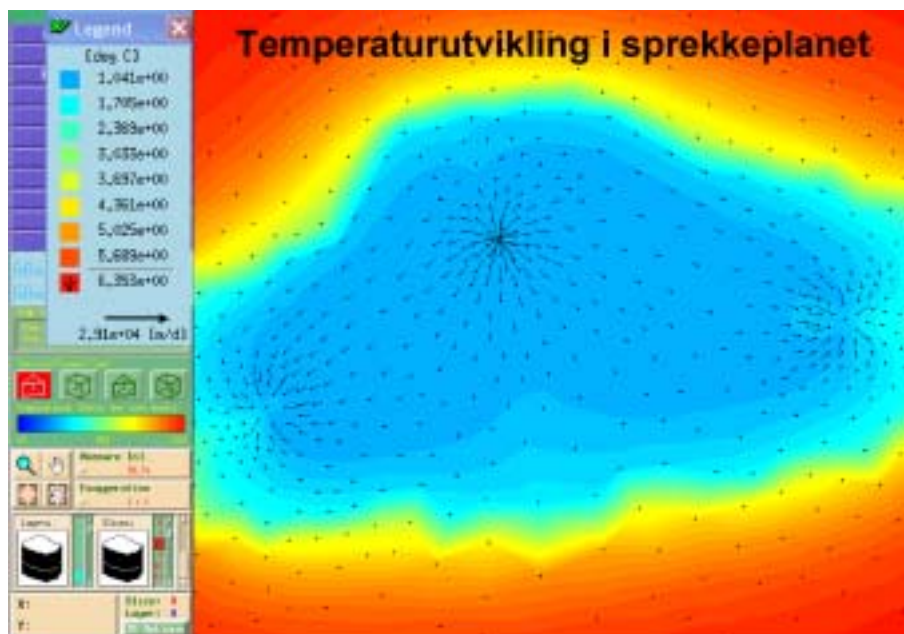
Figur 5–86: FELFLOW-modellerte energiuttak fra grunnvarmeanlegget ved Bryn etter sju måneders drift med fem forskjellige strømningsrater (modifisert etter Spangelo, 2003).

Modelleringsresultatene fra EAB viser utgangstemperaturen på oppumpet grunnvann fra satellittborehullene (borehull 2 og 3) var nesten 7°C for modelleringscasene eab1 til 3 (tabell 4–6). Tilsvarende som for Bryn-modelleringen, faller temperaturen raskt i begynnelsen av driftsperioden og fallet er størst for casene med høyest strømningsrate (figur 5–88). Etter to måneders drift faller temperaturen sakte mot minimumstempleturene ved slutten av driftsperioden. Etter sju måneders drift er temperaturen på oppumpet grunnvann henholdsvis 2,1, 1,8 og 1,6°C for eab1, 2 og 3. Temperaturreduksjonen er konsentrert innen sprekkeplanet (figur 5–87). Modellert effektuttak fra grunnvarmeanlegget ved EAB varierer for de forskjellige modelleringscasene med forskjellig strømningsrate (figur 5–89). Høyest effekt, men også brattest effektfall i begynnelsen av driftsperioden, oppnås for casene med høyest strømningsrate. Mot slutten av driftsperioden er effektuttaket omlag 14 kW for alle casene. Mulig energiuttak fra grunnvarmeanlegget etter avsluttet driftsperiode er 92, 102 og 110 MWh for henholdsvis case eab1, 2 og 3 (figur 5–90).

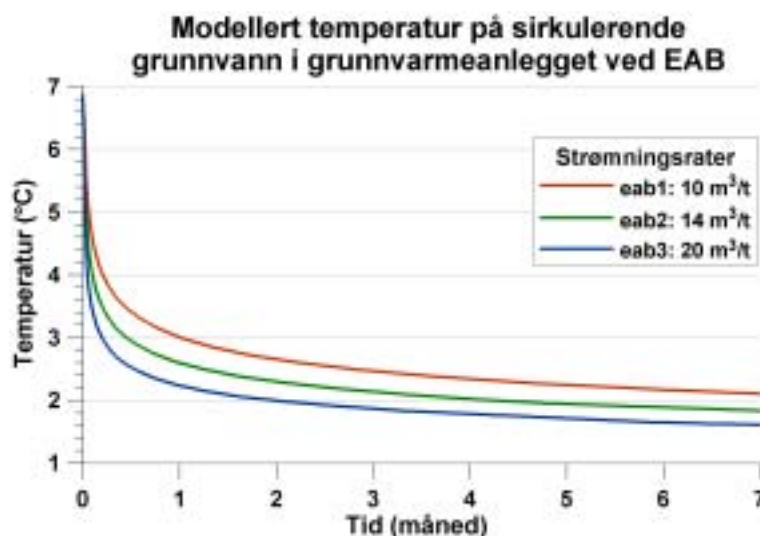
Resultatene fra FEFLOW-modelleringen av grunnvarmeanlegget ved EAB viser de samme trendene som tilsvarende resultater fra Bryn. I tillegg, ved å sammenligne resultatene fra Bryn og EAB, ser det ut som om modellering av Bryn-casene oppnår høyere energiverdier sammenlignet med modelleringscasene ved EAB. De nøyaktige tallene for case bryn4 og eab3, der begge casene har en strømningsrate på 20 m³/time, var henholdsvis 188 og 110 MWh. Dette betyr at energiuttaket i eab 3 er 59% av energiuttaket i bryn4. Tabell 4–3 og 4–6 viser at det totale sprekkeplanarealet ved Bryn og EAB var henholdsvis cirka 4776 og 3475 m², det vil si at det totale sprekkeplanarealet ved EAB utgjør 73% av det totale sprekkeplanarealet ved Bryn. Den mindre andelen uttatt energi ved EAB skyldes sannsynligvis at (1) sprekkeplanarealet ved EAB er mindre, og (2) bergartens varmeledningsevne er lavere ved EAB enn Bryn. Figur 5–87 viser at berggrunnens temperaturreduksjon i stor grad begrenser seg innenfor sprekkeflatens utstrekning. Disse

resultatene indikerer at de to viktigste faktorene for energiuttaket i grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann er det totale varmevekslerarealet og berggrunnens varmeledningsevne.

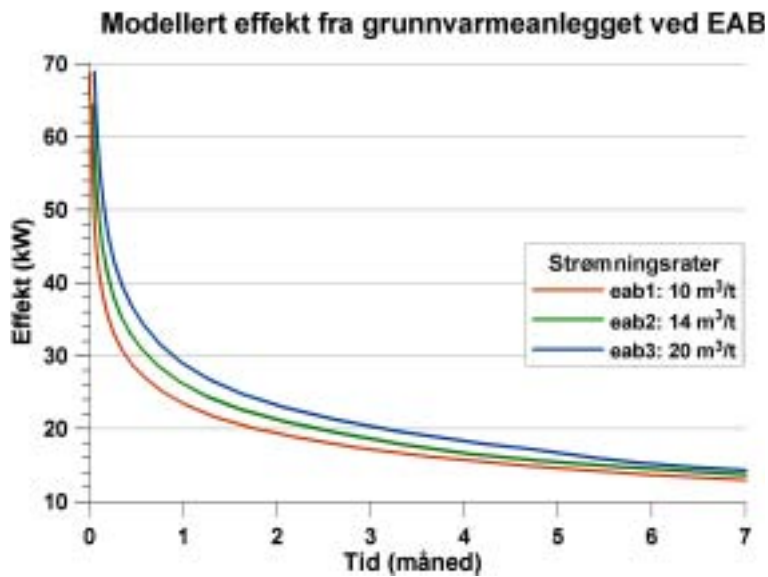
Tatt i betraktning at grunnvarmeanlegget ved Bryn og EAB ble modellert for en driftsperiode på sju måneder, er det enkelte usikkerheter knyttet til gyldigheten av FEFLOW-resultatene over flere år.



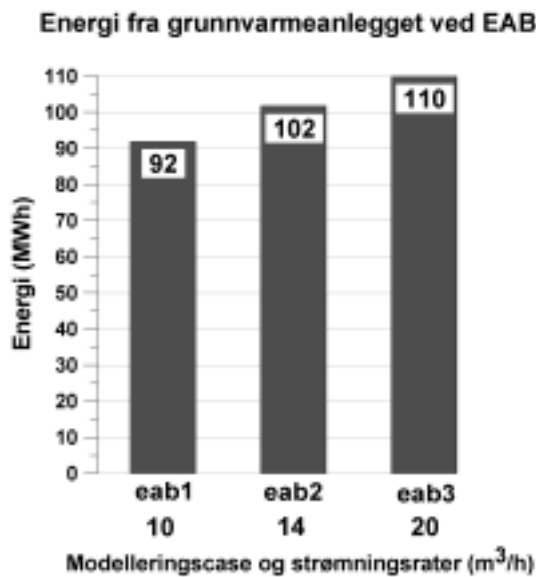
Figur 5–87: Temperaturreduksjonen er konsentrert innen sprekkeplanet ved EAB.



Figur 5–88: Modellert temperatur på sirkulerende grunnvann med forskjellige strømningsrater (eab1, 2 og 3) i en sju måneders driftsperiode for grunnvarmeanlegget ved EAB.



Figur 5–89: Mulig effektuttak fra grunnvarmeanlegget ved EAB som funksjon av tid og forskjellige strømningsrater under driftsperioden.



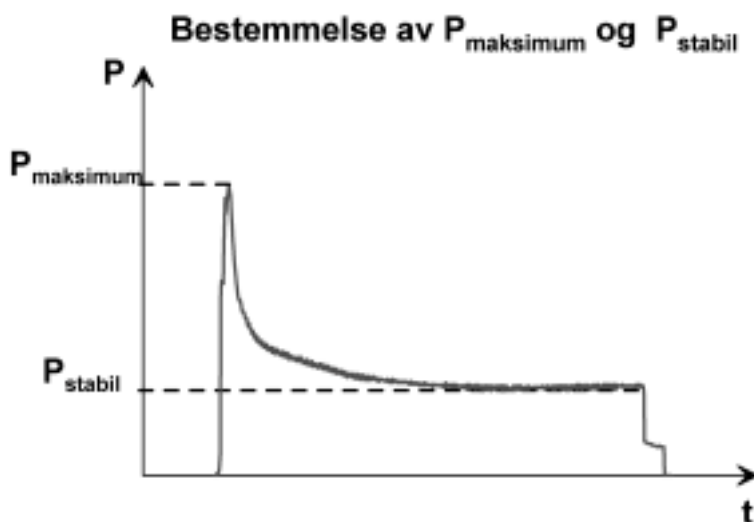
Figur 5–90: Modellert energiuttak fra grunnvarmeanlegget ved EAB etter sju måneders drift med tre forskjellige strømningsrater.

5.5 Trykknivåer ved hydraulisk trykking - sammenligning Bryn og EAB

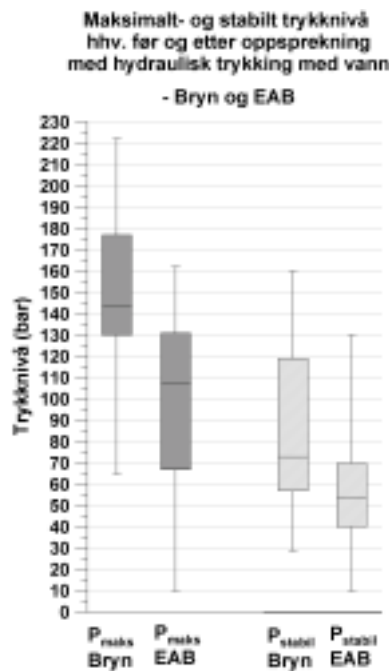
Hydraulisk trykking med vann ved Bryn resulterte i at 70% (44 av 63) av stimuleringene er tolket til å representere initiering eller gjenåpning av sprekker. Tilsvarende tall for EAB er 97% (36 av 37).

Verdiene for maksimalt- og stabilt trykknivå, hentet fra trykk-tid diagrammer og feltnotater, henholdsvis før og etter oppsprekning ved Bryn og EAB er fremstilt som boksplokk i figur 5–92. Plottene viser maksimum, minimum, median, øvre og nedre kvartil av

angitte trykknivåer. Maksimalt trykknivå er i denne sammenhengen definert som høyeste trykknivå umiddelbart før oppsprekning (figur 5–91). “Stabilt trykknivå” betegner det forholdsvis stabile trykket etter oppsprekning, målt like før avsluttet stimulering. Ofte er “stabilt trykknivå” identisk med målt minimumstrykk bortsett fra i de tilfeller der det bygger seg opp et trykk i sprekkesystemet. Medianverdien for maksimumstrykket før oppsprekning er 144 og 107 bar ved henholdsvis Bryn og EAB, mens medianverdien for stabilt trykknivå etter oppsprekning er henholdsvis 73 og 53,5 bar. Maksimalt trykknivå før oppsprekning kan også betraktes som oppsprekningstrykket (ligning 2.2). Macaulay (1987), Baski (1987) og Waltz (1988) i Smith (1989) rapporterer at vanntrykket som kreves for å åpne, vaske og å danne sprekker er mellom 500 til 2000 psi (34,5 til 138 bar) i de fleste tilfellene, mens 3000 psi (207 bar) er nødvendig i områder med hard berggrunn og dype borehull. I følge disse verdiene ligger oppsprekningstrykket ved Bryn over gjennomsnittsverdiene og representerer hard berggrunn, mens oppsprekningstrykksverdiene fra EAB er innenfor gjennomsnittet. Splittetrykkverdiene rapportert av Gale and MacLeod (1995) (avsnitt 2.1.1) varierte fra 2 til 10 MPa (20 til 100 bar), og var betydelig lavere enn tilsvarende verdier fra Bryn. De svenske studiene (avsnitt 2.1.2) (Sundquist og Wallroth, 1990; Nordell et al., 1984; og Eliason et al., 1988) rapporterte om trykknivåer på henholdsvis 10,5 og 22 MPa (105 og 220 bar), 60 til 120 bar og 15 og 20 MPa (150 og 200 bar). Verdiene fra de svenske studiene stemmer bedre overens med de observerte oppsprekningstrykkene ved Bryn og EAB, og kan muligens forklares med noenlunde like bergspennings- og geologiske forhold. Basert på erfaring blant vannbrønnentreprenørene i USA, refererte Herrick (2000) at oppsprekningstrykkene varierer fra 500 til 5000 psi (34,5 til 345 bar) avhengig av formasjon og utstyr.



Figur 5–91: Bestemmelse av $P_{maksimum}$ og P_{stabil} fra trykk-tid kurven fra hydraulisk trykking med bare vann.



Figur 5–92: En boksploTTframstilling av maksimumstrykket før oppsprekning og stabilt trykknivå etter oppsprekning med bare vann.

5.6 Metodeevaluering

Avsnittet oppsummerer erfaringene, og gir en vurdering av utstyret og metodene som ble brukt i studien.

5.6.1 Dobbelpakning - FrakPak - AIP 410-550

Utstyret for hydraulisk trykking har fungert fint gjennom hele studiet bortsett fra i to, eller muligens tre tilfeller der pakningselementet har sviktet. Det første problemet med utstyret fant sted ved den første utprøvingen av egnet metodikk for hydraulisk trykking med injeksjon av sand i et testborehull ved Lade (avsnitt 5.1.4). Siden utstyret satte seg fast i borehullet, er det ikke kjent hvilken del av utstyret som ble ødelagt. Et plutselig fall i pakningstrykket indikerte at et av pakningselementene, koblingene eller trykkslangen sviktet. Hvis det var en av pakningselementene som var ødelagt ville det vært nyttig å studert det ødelagte elementet for en ytterligere forbedring av dobbelpakningen. Injeksjon av den viskøse sandblandingen, med en relativt høy konsentrasjon av sand, kan ha økt slitasjen på utstyret. På dette tidspunktet var pakningselementene på dobbeltmansjetten trykksatt samtidig gjennom samme trykktilførselsslange. Utstyret hadde da vært trykksatt cirka 10 ganger før det ble ødelagt.

Nytt og forbedret utstyr for hydraulisk trykking ble laget til feltforsøkene på Bryn. Forbedringen innebar separat trykksetting av pakningselementene. Separat trykksetting gjør det mulig å utføre hydraulisk trykking i søyle, og til å spyle vekk løse steinbiter fra borehullsseksjonen hvis det er mistanke om at utstyret sitter fast.

Det nederste pakningselementet på dobbelpakningen revnet ved hydraulisk trykking i borehull 2 ved Bryn. Revnen (figur 5–93) kan sees på den øvre delen av pakningen, i

overgangen mellom gummibelagt vev og stålkanten. Pakningselementet hadde vært trykksatt 41 ganger før det revnet. Arbeidsoperasjonen med å erstatte et ødelagt pakningselement med et nytt kan gjøres i underkant av to timer. Det ødelagte pakningselementet løsnes og fjernes. Gjengene fettes og det nye pakningselementet monteres. Det ødelagte pakningselementet returneres til BTU som fjerner gammel gummibelagt vev og setter på ny. Siden stålet brukes på nytt, vil utgiftene til “nytt” pakningselement begrense seg til selve gummi og arbeidstimene som brukes til å sette den på.

En liten rift ved den øvre kanten i overgangen mellom stål og gummi på det nedre pakningselementet, tilsvarende som i tilfellet med det ødelagte pakningselementet ved Bryn, ble oppdaget etter hydraulisk trykking av borehull 2 ved EAB (figur 5–93).

Pakningselementet hadde vært trykksatt 56 ganger før riften ble oppdaget.

Ved studiets avslutning har øvre pakningselement vært trykksatt cirka 124 ganger uten tekniske problemer.



Figur 5–93: Revnet nedre pakningselement fra hydraulisk trykking med bare vann i borehull 2 ved Bryn (venstre), og en rift på nedre pakningselementet fra hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 2 ved EAB (høyre).

5.6.2 *Hydraulisk trykking med bare vann*

Den første praktiske erfaringen med hydraulisk trykking i denne studien var ved testing av den nyutviklede dobbeltpakningen ved Lade. Resten av utstyret som ble brukt i forsøket var laget for annen bruk, men kunne brukes etter mindre tilpasninger (avsnitt 4.2.2). Hydraulisk trykking med bare vann i seks seksjoner i borehull 1 ved Lade, inkludert reparasjon av sprengt høytrykkslange, ble utført i løpet av en lang arbeidsdag. Ønskede verdier for maksimalt vanntrykk ble ikke nådd på grunn av uegnet høytrykksutstyr.

Utstyret i borehullet kan lett kile seg fast ved hydraulisk trykking, og det er veldig viktig å ta nødvendige forhåndsregler for å unngå unødvendige feil og dyre tap. Tapet av utstyret i borehull 2 ved Lade etter forsøket med hydraulisk trykking med injeksjon av sand (avsnitt 5.1.4) demonstrerte viktigheten av å ha rutinert personell og hensiktsmessig utstyr for å unngå å sette fast. Årsaken til at utstyret satte seg fast i borehullet ved Lade var sannsynligvis fordi trykktilførselsslengene var utilstrekkelig festet til vannrørene. Den dårlige festingen av trykktilførselsslengene gjorde det vanskelig å trekke etter slangene like mye som resten av utstyret ble løftet i borehullet. Etter å ha løftet utstyret noen få meter ble sannsynligvis de løse

slangeendene hengende mellom pakningselementene og borehullsveggen, klumpet seg sammen og utstyret satte seg fullstendig fast.

G. Meyer Borebrønnservice, et firma som har sin ekspertise innen hydraulisk trykking, ble leid inn som entrepenør for å gjøre hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved Bryn og EAB. Bortsett fra dobbeltmansjetten (avsnitt 2.2.1) og høytrykkstanken (avsnitt 2.2.2), sørget entrepenøren for nødvendig tilleggsutstyr som tankbil med høytrykksutstyr, vannrør og en vinsj. Sammenlinget med forsøket ved Lade var entrepenørens utstyr og oppsett mer strømlinjeformet, robust og bedre tilpasset formålet.

5.6.3 *Hydraulisk trykking med injeksjon av sand*

I tillegg til utstyr for hydraulisk trykking, foregikk hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehull 2 ved Lade ved bruk av innleid injeksjonspumpe, vanligvis benyttet til tetting av bergrom, og tilhørende diesellaggrat (avsnitt 4.2.3). Injeksjonspumpen hadde for lav pumperate under de gjeldene trykkforholdene og var ikke egnet for injeksjon av den tykke blandingen med sand, fortykningsmiddel, vann og enzym. Den lave pumperaten førte til at arbeidet tok lang tid, og med økende fare for at sanden ville bunnfelle mellom pakningsmodulene i borehullsseksjonen.

Høytrykkstanken (avsnitt 2.2.2) for midlertidig lagring av injeksjonsmasse (sand, fortykningsmiddel, vann og enzym) ble utviklet og laget før hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved Bryn. Til forskjell fra Lade vil den nye injeksjonsprosedyren (avsnitt 2.1.7), innebære at injeksjonsmassen føres ut i sprekken(e) ved at vann under høyt trykk spyles gjennom høytrykkstanken og presser injeksjonsmassen foran seg. Erfaringene fra Bryn og EAB viste at dette var en enkel, effektiv og sikker injeksjonsmåte.

Ved Bryn og EAB ble forskjellige metoder utprøvd for blanding av- og fylling av høytrykkstanken med injeksjonsmasse. Ved Bryn ble en pusspumpe bestående av en blande- og pumpebeholder benyttet, mens det ved EAB ble foretatt manuell blanding av injeksjonsmassen med stavmikser og drill etterfulgt av manuell påfylling av høytrykkstanken fra kar. Ingen av metodene benyttet ved Bryn og EAB for blanding av- og fylling av høytrykkstanken med injeksjonsmasse er effektive nok med tanke på kommersiell utnyttelse. Fordeler og ulemper knyttet til metodene, basert på erfaringer ved Bryn og EAB, er som følger:

- Pusspumpen som ble benyttet ved Bryn består av en pumpedel slik at injeksjonsmassen kan pumpes til høytrykkstanken. Den viskøse injeksjonsmassen gjør imidlertid at pumpingen går for tregt, og mye av sanden bunnfeller og blir liggende igjen i pumpebeholderen. Det dannes veldig lett klumper ved blanding av fortykningsmiddel og vann i blandedelen av pusspumpen. Søling er også et problem, særlig i begynnelsen av blandingen før fortykningsmiddelet har hydratisert. Kun ett blandekar gjorde at arbeidets progresjon av og til ble forsinket av at injeksjonsmassen ikke var ferdig blandet.
- Miksing av fortykningsmiddel og vann til en tykk blanding, gjerne i flere kar samtidig, som etterhvert ble spedd ut til passe viskositet og tilsats av ønsket mengde sand viste seg å fungere fint ved EAB. Unødige tidsavbrekk ble unngått ved at rikelige mengder ferdig blandet injeksjonsmasse til enhver tid var tilgjengelig og klar for injeksjon.

Sammenlignet med Bryn var manuell påfylling av høytrykkstanken raskere enn pumping ved bruk av pusspumpen. Tilsatt sand holdt seg godt i suspensjon ved at injeksjonsmassen ble mikset umiddelbart før tilsats i høytrykkstanken.

I det videre arbeidet ved utvikling av mer strømlinjeformet og automatisert utstyr for hydraulisk trykking med injeksjon av sand er det viktig å tilfredsstille følgende momenter:

- Erfaringene fra Bryn og EAB viser at selve injeksjonen av sand ser ut til å fungere mest effektivt ved bruk av kraftige pumper og høytrykksutstyr der vann under høyt trykk brukes som pressflate mot injeksjonsmassen. På forhånd er borehullsseksjonen oppsprukket med hydraulisk trykking med vann der vannet føres forbi høytrykkstanken i en by-pass slange. Umiddelbart etter oppsprekningen, mens sprekken ennå er åpen, injiseres injeksjonsmassen.
- God miksing, uten klumper, av fortykningsmiddelet guar gum og vann oppnås ved å blande forholdsvis mye fortykningsmiddel og lite vann. Siden hydratiseringstiden er cirka 15 minutter vil blandingen tykne etterhvert og må spees med vann. For å sikre progresjon i arbeidet gjør hydratiseringstiden at flere råblandinger av vann og guar gum bør lages kontinuerlig og være ferdige til enhver tid.
- Tilsats av ønsket mengde sand i forskjellige fraksjoner ved samtidig miksing gjøres umiddelbart før den ferdige injeksjonsmassen fylles i høytrykkstanken.
- Høytrykkstanken bør være utformet for hurtig påfylling av injeksjonsmasse, og lukkemekanismen bør være enkel og rask. Etter påfylling av injeksjonsmasse bør passe mengde nedbrytningsenzym tilsettes.

For å dokumentere effekten av forskjellige former for hydraulisk trykking ved Bryn ble hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand utført som to separate arbeidsoperasjoner. Det ble injisert sand i de største sprekkenes som var åpnet i forrige arbeidsoperasjon ved hydraulisk trykking med bare vann. Sannsynligvis på grunn av unøyaktig dybdeangivelse på senkeutstyret til entreprenøren viste det seg at det var et problem å finne igjen de bestemte sprekkenivåene ved hydraulisk trykking med injeksjon av sand. I noen få tilfeller ble ikke sprekkenivået funnet igjen, mens flere forsøk måtte til for å finne igjen andre sprekkenivåer. For de fleste sprekkenivåene gikk det greit å finne igjen ønsket sprekkenivå. Ved å utføre hydraulisk trykking med vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand i samme arbeidsoperasjon, slik som ved EAB, løses dette problemet.

Et forsøk på bruke en lufttrykksblander for å mikse vann og fortykningsmiddel (avsnitt 2.2.4 og 4.4.2) ved EAB ble mislykket på grunn av urutinert personell og tidsnød. Lufttrykksblanderer fungerte fint i laboratoriet, men noen få tilpasninger er sannsynligvis nødvendig for å unngå søling og glatt underlag. På grunn av lufttrykket tømmer mikseren med en høy rate som forårsaker betydelig søling. Sølebeskyttelse kan lages ved å montere en slange til mikserens utløp, og ved å føre slangen i et lukket kar. Flere råblandinger av hydratisert vann og fortykningsmiddel kan gjøres klare til bruk ved å bruke flere kar samtidig for midlertidig lagring.

5.6.4 Erfaringer med optisk televiewer

Det var forventet at en strategisk plassering av dobbeltpakningen i borehullene ved Bryn, omkring diskontinuiteter som mineralfylte sprekker eller bergartsgrenser identifisert med

optisk televiewer (avsnitt 4.3.4), ville gitt en høyere oppsprekningsgrad enn den tilfeldige utvelgelsen av borehullsseksjoner ved EAB (avsnitt 4.4.2). Ingen åpenbare forskjeller mellom de to utvelgelsesmetodene av borehullsseksjoner for hydraulisk trykking kan finnes fra det begrensede antall resultater fra Bryn og EAB. Tilfeldig utvelgelse av borehullsseksjoner var minst tidkrevende av de to metodene. Gale and MacLeod (1995) hadde god nytte av geofysisk logging av borehullene med bruk av TV-kamera for å velge ut hvilke borehullsseksjoner som burde stimuleres og plasseringen av dobbeltmansjetten. Men, på samme måte som erfart med TV-loggene fra Bryn og EAB, var det vanskelig å få øye på tydelige endringer i borehullsveggen forårsaket av hydraulisk trykking. Ved Bryn og EAB ble kun noen få synlige endringer i borehullsveggen funnet ved å sammenligne optisk televieweropptak fra før og etter stimulering med hydraulisk trykking. Dette var også inntrykket fra bergspenningsmålingene ved Bryn der forsøket med å orientere de initerte sprekkenes ved bruk av optisk televiewer ikke førte frem (avsnitt 5.2.6). De relativt høye horisontale bergspenningene som ble målt kan være en årsak til at de nye sprekkenes lukkes igjen ved trykkavlastning.

Bruk av optisk televiewer for borehullsinspeksjon var hensiktsmessig for å identifisere geologiske parametre som grad av oppsprekning, sprekke mønster, bergartstype, store sprekkeåpninger, mineraliserte sprekker og så videre.

6 Økonomi

Det har blitt gjennomført en økonomisk analyse som sammenligner den spesielle typen grunnvarmeanlegg, demonstrert som pilotanlegg ved Bryn og EAB, med konvensjonelle grunnvarmeanlegg med kollektorslanger. Med fokus på borekostnader, og ved å variere de forskjellige anleggskostnadene var hovedhensikten med analysen å finne lønnsomheten og den økonomiske følsomheten til et grunnvarmeanlegg i fast fjell basert på oppumpet grunnvann kontra et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger.

6.1 En enkel økonomisk analyse

Hovedelementene i den økonomiske analysen:

- 1) Oppsett av to likninger (avsnitt 6.1.1) som beskriver de viktigste anleggskostnadene for et grunnvarmeanlegg i fast fjell basert på henholdsvis oppumpet grunnvann og kollektorslanger. Anleggskostnadene for et kollektoranlegg består av borekostnader, mens utgifter for hydraulisk trykking er inkludert i tillegg til borekostnadene i anleggskostnadene for grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann. Borekostnadene inkluderer utgifter til boring i fast fjell og løsmasser. Ekstrautgifter til setting av foringsrør er nødvendig ved boring i løsmasser.
- 2) Den økonomiske analysen er basert på beregnede-, eller FEFLOW-modellerte energiuttak fra grunnvarmeanlegget ved EAB. Selv om grunnvarmeanlegget ved Bryn ikke kan driftes på en tilfredsstillende måte i forhold til det som var forutsatt (avsnitt 5.2.14), er det gjort noen teoretiske beregninger ved å bruke resultatene fra FEFLOW-modelleringen. De respektive energimengdene ble benyttet som inngangsparametre i Earth Energy Designer (EED) (Hellström og Sanner, 2000), en modelleringsprogramvare for design av kollektorslangeanlegg. EED-modelleringen returnerte effektive borehullsmetre og tilhørende antall borehull nødvendig for å produsere angitte energimengder i et kollektorslangeanlegg som en teoretisk erstatning for grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann under de gitte geologiske forholdene. Med betegnelsen effektive borehullsmetre menes antall borehullsmeter fylt med et ledende materiale. I henhold til norsk praksis, brukes vann som fyllmateriale mellom kollektorslangen og borehullsveggen. For enkelthetsskyld ble begge typer grunnvarmeanlegg, grunnvann og kollektorslange, konstruert for kun oppvarmingsformål.
- 3) Siste del av analysen omhandlet lønnsomhetsberegninger. Anleggskostnadene for grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann og kollektorslangeanlegget ble beregnet og sammenlignet med utgangspunkt i EED-modellerte verdier for effektive borehullsmetre og henholdsvis ligning 6.1 og 6.2. Disse resultatene vil angi lønnsomheten for grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann ved EAB, og de teoretiske verdiene for Bryn, kontra det konvensjonelle kollektorslangealternativet.

6.1.1 Anleggskostnader

Ligning 6.1 og 6.2 uttrykker de viktigste anleggskostnadene for henholdsvis et grunnvarmeanlegg i fast fjell med kollektorslanger og et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann. En detaljert oppsummering av borehulls- og utgiftsvariablene er presentert i tabell 6–1. Alle utgiftsvariablene er i norske kroner (NOK) der merverdiavgift (MVA) er inkludert. Sammenhengen mellom borekostnadene K og L ble satt til å være: $L(K)=2K+100$, og enhetsverdien M for hydraulisk trykking med injeksjon av sand varierte med 10000, 20000 og 30000 NOK/borehull.

$$B = yK + zL \quad [6.1]$$

$$A = yK + zL + \left(\frac{y+z}{n}\right)M \quad [6.2]$$

Tabell 6–1: Beskrivelse av variable i ligning 6.1 og 6.2.

Borehullsvariable	Utgiftsvariable
y = borehullsmeter i fast fjell [m]	B = anleggskostnader for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger [NOK]
z = borehullsmeter i løsmasser (med foringsrør) [m]	A = anleggskostnader for et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann [NOK]
n = borehullsdyp [m] i grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann	K = borekostnader i fast fjell [NOK/m]
	L = borekostnader i løsmasser med setting av foringsrør [NOK/m]
	M = enhetskostnad for hydraulisk trykking med injeksjon av sand i ett borehull. Enhetskostnaden består av hydraulisk trykking med injeksjon av sand i 10 borehullsseksjoner med en tidsbruk på 13 arbeidstimer. Innholdet i enhetskostnaden er basert på erfaringer fra EAB.

6.1.2 Energiuttak fra grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann - anslag

I tillegg til de FEFLOW-modellerte energimengdene, kan den målte sirkulasjonsraten på 14 m³/time (figur 5–79) brukes til å finne realistiske energiuttak fra grunnvarmeanlegget ved EAB. Metoden som brukes til å bestemme energiuttaket fra grunnvarmeanlegg, basert på sirkulasjonsrate, tar utgangspunkt i den lineære sammenhengen mellom potensielt effektuttak fra vann ved forskjellige strømningsrater og temperaturuttak (ligning 6.3) (Andersson et al., 1982). En grafisk presentasjon av ligning 6.3 kan sees i figur 6–1.

$$Effekt = C_{H_2O} \times Q \times \Delta T \quad [6.3]$$

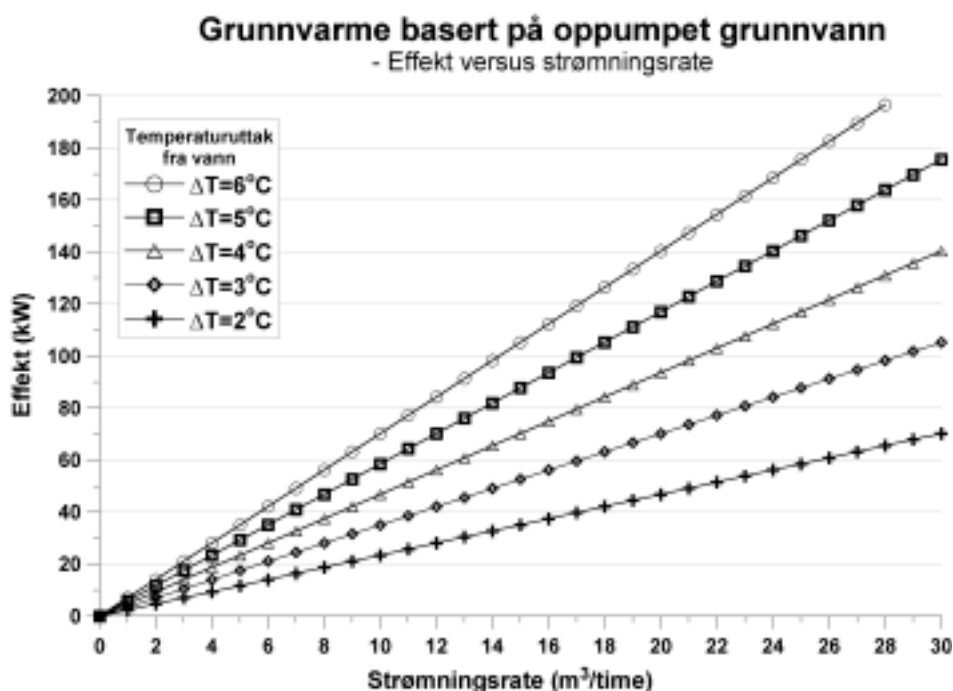
Hvor:

Effekt er gitt i kW,

C_{H_2O} er den spesifikke varmekapasiteten til vann [kWh/m³°C],

Q er strømningsraten [m³/time], og

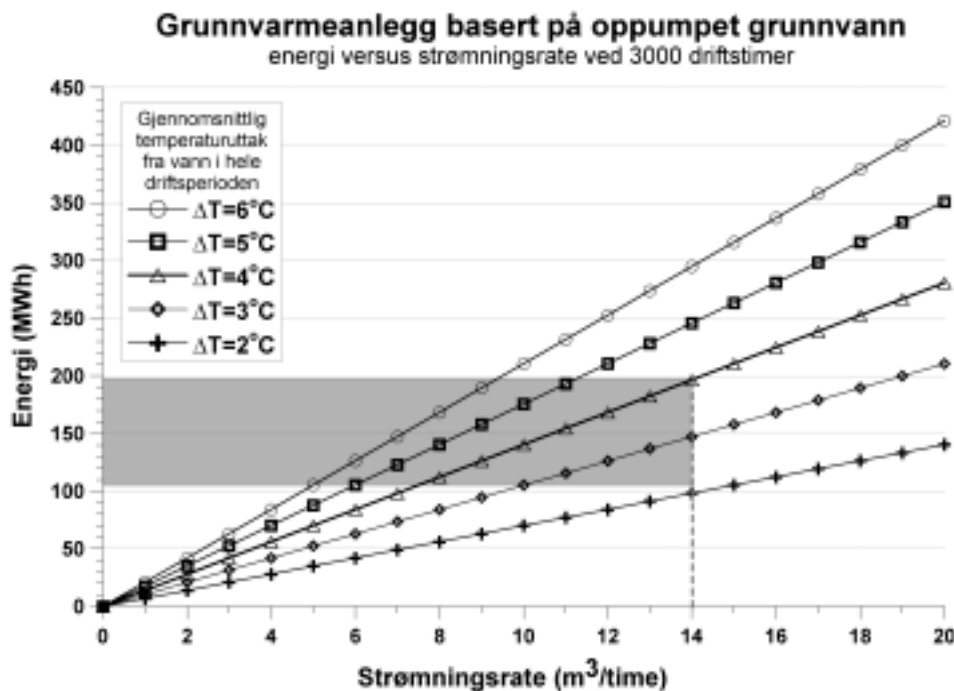
ΔT er temperaturforskjellen mellom inn- og utstrømmende vann, $\Delta T = T_{inn} - T_{ut}$ [°C].



Figur 6-1: Effekttuttak fra vann ved forskjellige strømningsrater og temperaturforskjeller (basert på Andersson et al., 1982).

I tillegg til sirkulasjonsraten på $14 \text{ m}^3/\text{time}$, kreves et tall på antall driftstimer per år for å kunne gi et anslag over hvilke energimengder som kan hentes fra vannet i grunnvarmeanlegget ved EAB. Antall driftstimer per år for grunnvarmeanlegget ved EAB ble satt til å være 3000, som ansees å være et rimelig anslag for varmepumpeanlegg i Oslo klimaet (Stene, 1997), og tilnærmet lik antall driftstimer benyttet i EED-modelleringen. Det gjennomsnittlige temperaturuttaket gjennom driftsperioden varierte mellom $2,1$ og 4°C (tabell 6-3) for de EED-modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslange som en teoretisk erstatning for anlegget basert på oppumpet grunnvann ved EAB. Ved å gange effektverdien med antall driftstimer per år for anlegget, og ved å lese av kurven for det aktuelle temperaturuttaket, ble det årlige energiuttaket fra grunnvarmeanlegget ved EAB, basert på den målte sirkulasjonsraten, anslått til å være mellom 105,3 og 197 MWh (figur 6-2).

Energiuttaket fra grunnvarmeanlegget ved EAB ble, etter en driftsperiode på sju måneder, modellert i FEFLOW til å være 92, 102 og 110 MWh for modelleringscasene eab1, 2 og 3 (figure 5-90). Tilsvarende tall for Bryn var 94, 135, 169, 188 og 126 MWh for henholdsvis modelleringscase bryn1-5 (figure 5-86).



Figur 6-2: Innen det grå området: Anslått årlig energiuttak fra grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann ved EAB.

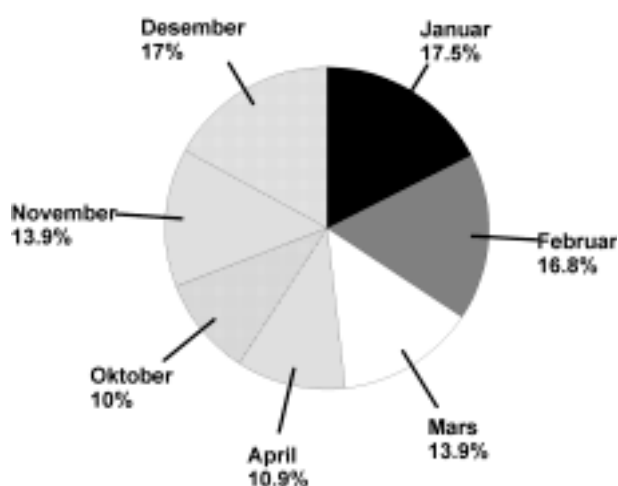
6.1.3 Beregning av effektive borehullsmetre ved bruk av EED

EED-modellering av grunnvarmeanleggene med kollektorslanger, som i teorien erstatter anlegget ved EAB og Bryn, ble utført for å beregne det totale antall effektive borehullsmetre nødvendig for å kunne yte tilsvarende energimengder som angitt i avsnitt 6.1.2. I henhold til varmepumpens årsvarmefaktor (SPF) på 3, må de estimerte energiuttakene fra grunnvann ganges med en faktor på 3/2 (tabell 6-3). For enkelthetsskyld ble anleggene modellert for kun oppvarmingsformål der borehullene ble konfigurert på linje. Det varierende antall borehull hadde en innbyrdes avstand på 20 meter. En oppstilling av de viktigste inngangsparameterne for EED-modelleringen er presentert i tabell 6-2. Grunnlasten i EED gjenspeiler anleggets årlige varmekonsum og fordeles mellom hver enkelt måned i fyringssesongen (figur 6-3). Tilnærmet likt FEFLOW-modelleringen av mulig energiuttak fra grunnvarmeanleggene, ble driftstiden for de EED-modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslanger satt til å være sju måneder. Beregning av effektive borehullsmetre ble gjort med utgangspunkt i minimumstemperaturen på kollektorvæsken etter 25 års drift av grunnvarmeanlegget med kollektorslange, og kollektorstemperaturens variasjon over året. Som et kriterium ble minimumstemperaturen på kollektorvæsken satt til å være -4°C , og temperaturforløpet skulle være tilnærmet likt figur 6-4 for alle modelleringscasene. Resultatene fra EED-modelleringen av kollektorslangeanleggene som en teoretisk erstatning for grunnvannssystemene ved EAB og Bryn er presentert sammen med borehullsdetaljene brukt i beregningen av anleggskostnadene (henholdsvis tabell 6-3 og 6-5).

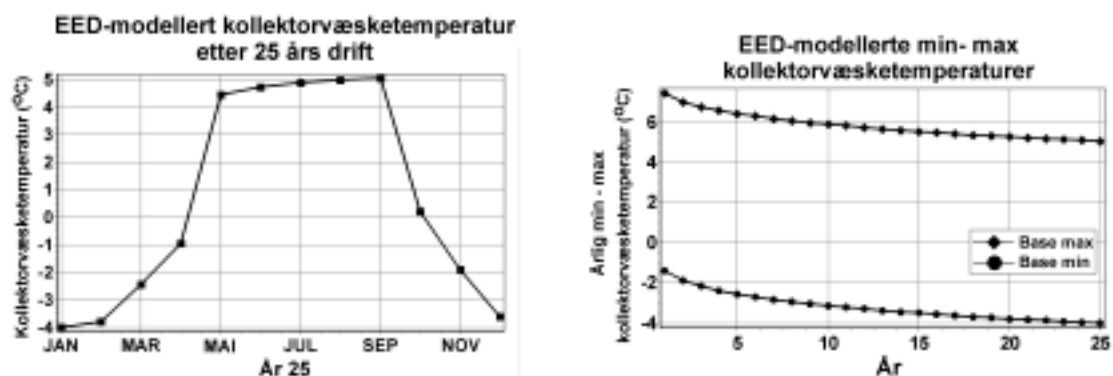
Tabell 6–2: Inngangsparametre brukt i EED-modelleringen av grunnvarmeanleggene med kollektorslanger som en teoretisk erstatning for grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann ved EAB og Bryn.

Inngangsparameter	Verdi	Inngangsparameter	Verdi
Temperatur på overflaten	6 °C	U-kollektor: polyetylen DN40 PN10	
Borehullsavstand	20 m	U-kollektor; ytre diameter	0,040mm
Borhullskonfigurasjon	linje	U-kollektor; veggtykkelse	0,0037mm
Borehulldiameter	139,7mm	U-kollektor; Varmeledningsevne	0,42
Volumetrisk strømningsrate	0,002 m ³ /s	U-kollektor; Innbyrdes avstand	0,07 m
Geotermisk varmestrøm	0,0446 W/m ²	U-kollektor; Varmeledningsevne på fyllmateriale (vann)	0,6 W/m,K
Bergets varmeledningsevne, EAB	2,7 W/m,K	Varmebærevæske	etanol
Bergets varmeledningsevne, Bryn	3,3 W/m,K	Modelleringsperiode	25 år
Volumetrisk varmekapasitet, EAB	2,3 MJ/m ³ ,K	Første driftsmåned	september
Volumetrisk varmekapasitet, Bryn	2,1 MJ/m ³ ,K	Varmepumpens årsvarmefaktor (SPF)	3
Kontaktmotstand. utvendig kollektor/berggrunn	0,0	Grunnlast	figur 6–3 (sju måneder)
		Topplast	0

Grunnlastfordeling i EED



Figur 6–3: Fordeling av grunnlast brukt i EED-modelleringen.



Figur 6–4: EED-modellerte temperaturer på kollektorvæsken.

6.1.4 Er grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann ved EAB lønnsomt?

Hovedspørsmålet i denne studien dreier seg om å finne lønnsomheten til grunnvarmeanlegg i fast fjell som er basert på oppumpet grunnvann (figur 2–1) sammenlignet med konvensjonelle grunnvarmeanlegg med kollektorslanger.

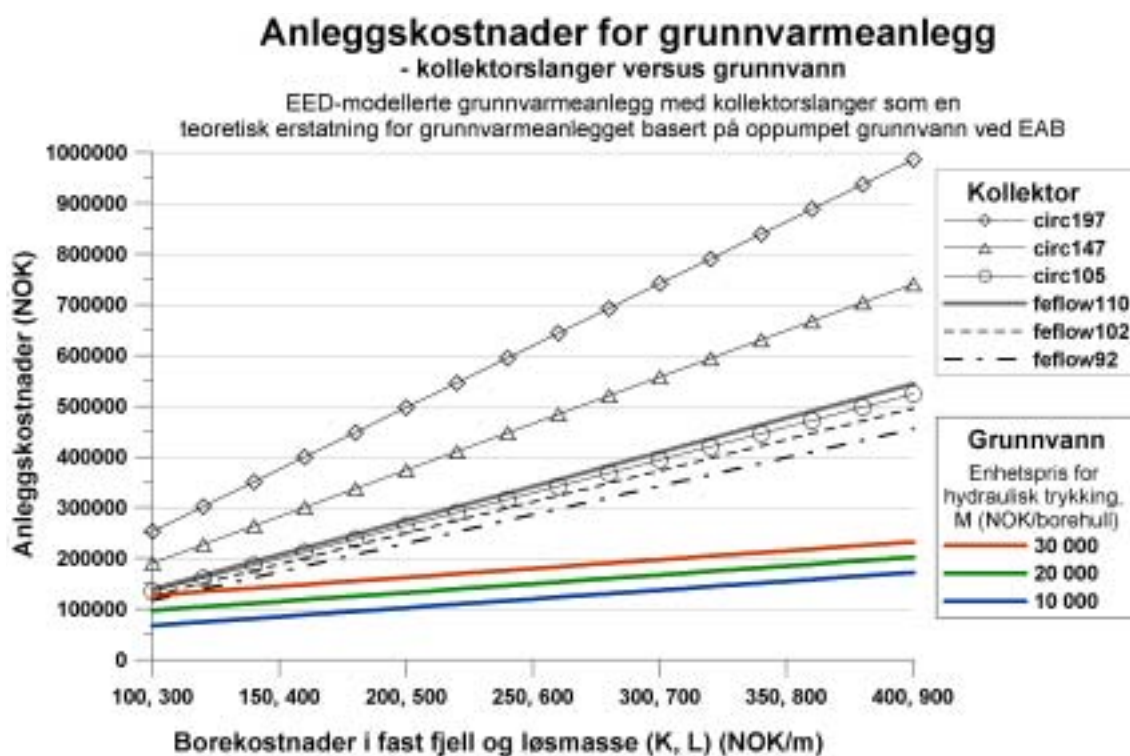
Antall effektive borehullsmetre, modellert i EED, tilhørende energiuttak og andre relevante variable brukt i den økonomiske analysen (ligning 6.1 og 6.2) er oppsummert i tabell 6–3 og 6–4. I likhet med antall borehull, varierte borehullsdypet mellom 177 og 198 meter. Geologiske forhold som grunnvannsnivå og løsmasseoverdekning ble tatt hensyn til for alle modellerte- og beregnede case ved EAB. Variasjonene i anleggskostnadene for grunnvarmeanlegget ved EAB og de EED-modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslanger, som en teoretisk erstatning for grunnvarmeanlegget ved EAB, kan sees i figur 6–5. De økonomiske besparelsene ved å velge et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann til fordel for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger ved EAB for forskjellige anleggskostnader er vist i figur 6–6. Under de aktuelle økonomiske forholdene (tabell 6–4) kan anleggskostnadene, borekostnader for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger, forventes å reduseres med over 50% for grunnvarmeanlegget ved EAB når energiuttaket fra vann er mer enn 105 MWh.

Tabell 6–3: Borehullsdetaljer brukt i den økonomiske analysen av de modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslanger som i teorien erstatter grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann ved EAB.

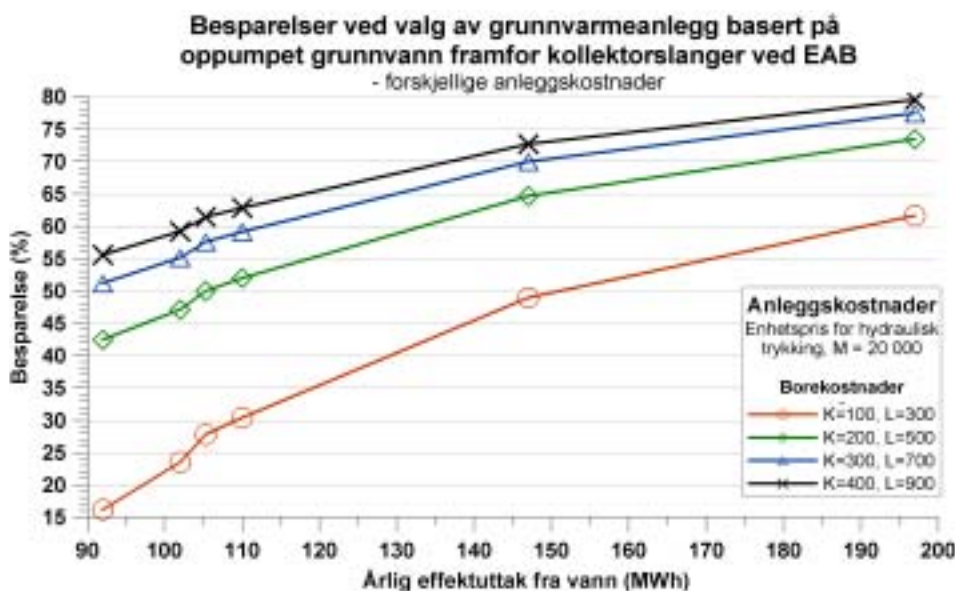
Parameter	Modellerte grunnvarmeanlegg med kollektorslanger som erstatter grunnvarmeanlegget, basert på oppumpet grunnvann, ved EAB					
	sirk197	sirk147	sirk105	feflow110	feflow102	feflow92
Energi fra vann (MWh)	197	147	105	110	102	92
Energi fra varmpumpe (MWh)	295	221	158	165	153	138
Effektive borehullsmetre (m)	2239	1675	1186	1236	1132	1031
Antall borehull	13	10	7	7	6	6
Effektivt borehullsdyp (m)	172	168	169	177	189	172
Grunnvannsnivå (m)	9	9	9	9	9	9
Totalt borehullsdyp (m)	181	177	178	186	198	181
Totalt antall boremeter, y+z (m)	2356	1765	1249	1299	1186	1085
Totalt antall boremeter i løsmasser, z (m)	87	69	48	48	42	42
Totalt antall boremeter i fast fjell, y (m)	2269	1696	1201	1251	1144	1043
Temperaturuttak (°C)	4	3	2,1			

Tabell 6–4: Borehullsdetaljer og reelle anleggskostnader for grunnvarmeanlegget ved EAB.

Parameter	EAB	Parameter	Reelle kostnader
Totalt antall boremeter (y+z)	329	K, kostnader ved boring i fast fjell (kr/m)	200
Totalt antall boremeter i løsmasser, z (m)	21	L, kostnader ved boring i løsmasser (foringsrør) (kr/m)	500
Totalt antall boremeter i fast fjell, y (m)	308	M, enhetskostnad for hydraulisk trykking med injeksjon av sand (kr/borehull)	20000
Borehullsdyp (m)	~110		



Figur 6-5: Anleggskostnader for de EED-modellerte grunnvarmeanleggene ved EAB. Forskjellige kostnadsalternativer ved valg av kollektorslanger eller oppumpet grunnvann.



Figur 6-6: Besparelser ved valg av grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann ved EAB framfor grunnvarmeanlegg med kollektorslanger ved ulike anleggskostnader.

6.1.5 Lønnsomt grunnvarmeanlegg ved Bryn? - Teoretiske betraktninger

På grunn av de utilfredsstillende resultatene fra testkjøringen av pilotanlegget ved Bryn (avsnitt 5.2.13), er de økonomiske betraktningene i dette avsnittet kun tatt med av hypotetiske

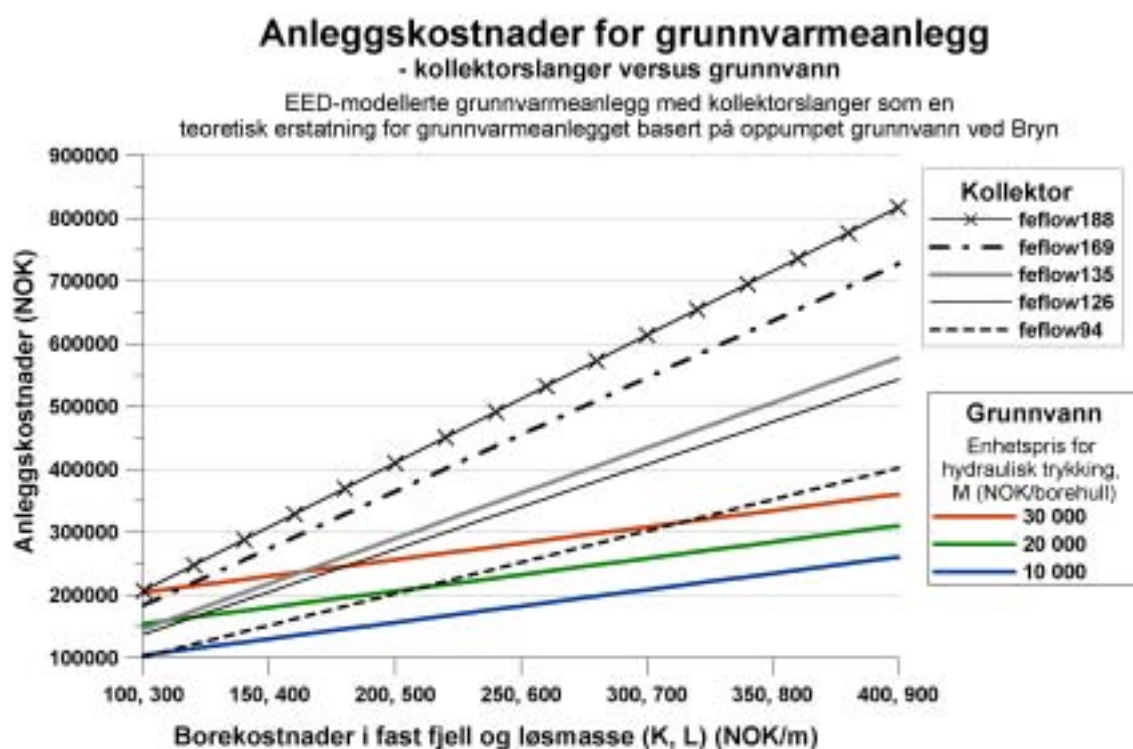
årsaker. Som grunnlag for beregningene forutsettes det at anlegget driftes i henhold til de opprinnelige planene (figur 1–1). Antall effektive borehullsmetre, modellert i EED, tilhørende energiuttak og andre relevante variable brukt i den økonomiske analysen (ligning 6.1 og 6.2) er oppsummert i tabell 6–5 og 6–6. I likhet med antall borehull, varierte borehullsdypet mellom 163 og 177 meter. Geologiske forhold som grunnvannsnivå og løsmasseoverdekning ble tatt hensyn til for alle modellerte- og beregnede case ved Bryn. Variasjonene i anleggskostnadene for grunnvarmeanlegget ved Bryn og de EED-modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslanger, som en teoretisk erstatning for grunnvarmeanlegget ved Bryn, kan sees i figur 6–7. De økonomiske besparelsene ved å velge et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann til fordel for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger ved Bryn for forskjellige anleggskostnader er vist i figur 6–8. Under de aktuelle økonomiske forholdene (tabell 6–6) kan anleggskostnadene, borekostnader for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger, forventes å reduseres med over 50% for grunnvarmeanlegget ved Bryn når energiuttaket fra vann er mer enn 188 MWh.

Tabell 6–5: Borehulldetaljer brukt i den økonomiske analysen av de modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslanger som i teorien erstatter grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann ved Bryn.

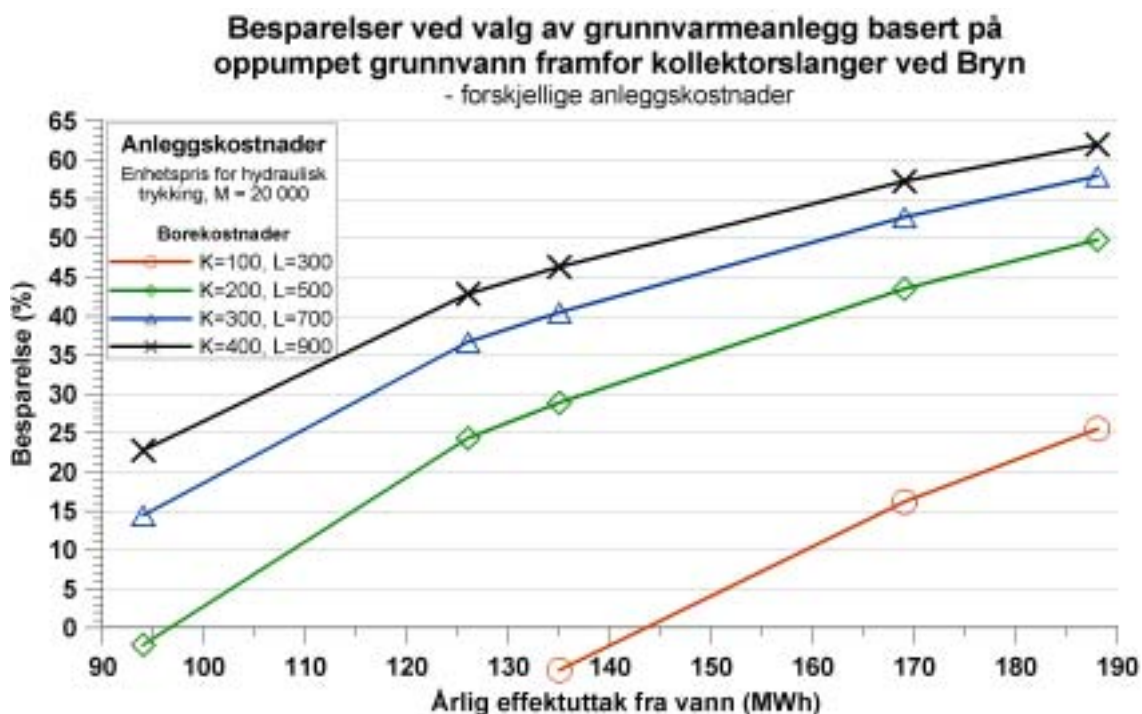
Parameter	Modellerte grunnvarmeanlegg med kollektorslanger som erstatter grunnvarmeanlegget, basert på oppumpet grunnvann, ved Bryn				
	feflow94	feflow135	feflow169	feflow188	feflow126
Energi fra vann (MWh)	94	135	169	188	126
Energi fra varmepumpe (MWh)	141	203	254	282	189
Effektive borehullsmeter (m)	977	1407	1770	1987	1320
Antall borehull	6	8	10	12	8
Effektivt borehullsdyp (m)	163	176	177	166	165
Grunnvannsnivå (m)	1	1	1	1	1
Totalt borehullsdyp (m)	164	177	178	167	166
Totalt antall boremeter, y+z (m)	983	1415	1780	1999	1328
Totalt antall boremeter i løsmasser, z (m)	18	24	30	36	24
Totalt antall boremeter i fast fjell, y (m)	965	1391	1750	1963	1304

Tabell 6–6: Borehulldetaljer og reelle anleggskostnader for grunnvarmeanlegget ved Bryn.

Parameter	Bryn	Parameter	Reelle kostnader
Totalt antall boremeter (y+z)	500	K, kostnader ved boring i fast fjell (kr/m)	200
Totalt antall boremeter i løsmasser, z (m)	21	L, kostnader ved boring i løsmasser (foringsrør) (kr/m)	500
Totalt antall boremeter i fast fjell, y (m)	479	M, enhetskostnad for hydraulisk trykking med injeksjon av sand (kr/borehull)	20000
Borehullsdyp (m)	100		



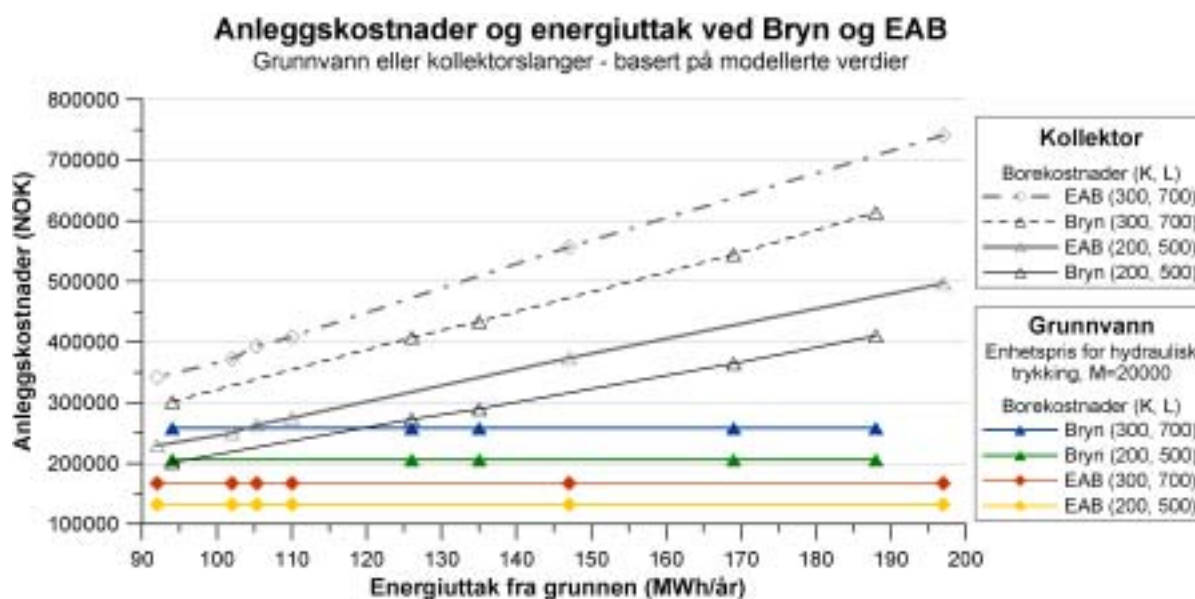
Figur 6-7: Anleggskostnader for de EED-modellerte grunnvarmeanleggene ved Bryn. Forskjellige kostnadsalternativer ved valg av kollektorslanger eller oppumpet grunnvann.



Figur 6-8: Besparelser ved valg av grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann ved Bryn framfor grunnvarmeanlegg med kollektorslanger ved ulike anleggskostnader.

6.1.6 Anleggskostnader ved forskjellig energiuttak ved Bryn og EAB

Energiuttaket fra grunnen og utvalgte anleggskostnader for de to grunnvarmeanleggstypene ved EAB og Bryn (figur 6–9) viser at pilotanlegget ved EAB oppnår best lønnsomhet. Generelt sett vil lønnsomheten til grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann kontra anlegg med kollektorslanger øke med økende borekostnader. De virkelige besparelsene knyttet til valg av grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann til fordel for kollektorslangeanlegg ved EAB kan bare kvantifiseres ved en fullskaladrift av anlegget. De beregnede besparelsene bør betraktes som veiledende verdier. En tilsvarende fremgangsmåte der anlegget bygges for varme- og kjøleformål, vil sannsynligvis øke lønnsomheten for grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann ved EAB ytterligere.



Figur 6–9: Energiuttak fra grunnen og utvalgte anleggskostnader for grunnvarmeanleggene ved Bryn og EAB. Forskjellige kostnadsalternativer ved valg av enten kollektorslangeanlegg eller anlegg basert på oppumpet grunnvann.

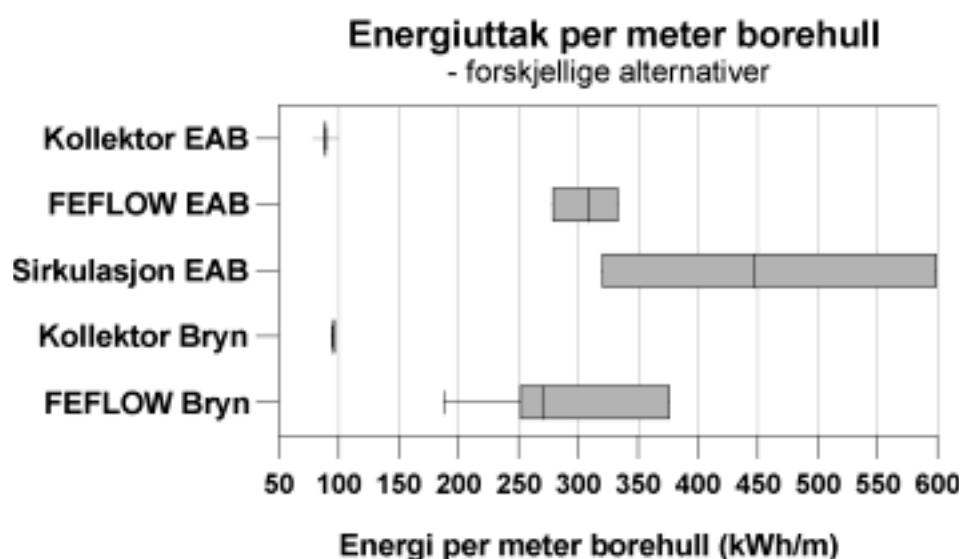
6.2 Energieffektivitet - energiuttak per meter borehull

En enkel sammenligning av energiuttaket per meter borehull kan gjøres for de forskjellige anleggsalternativene som ble brukt i lønnsomhetsbetraktningene (avsnitt 6.1.4 og 6.1.5). Beregning av energiuttaket per meter borehull som et mål på energieffektiviteten tar utgangspunkt i energiuttaket fra de EED-modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslange ved EAB og Bryn, FEFLOW-modellerte energiuttak ved EAB og Bryn, og verdiene for energiuttaket beregnet fra en sirkulasjonsrate på $14 \text{ m}^3/\text{time}$ og et gjennomsnittlig temperaturuttak på 2,1, 3 og 4°C ved EAB (figur 6–2). Energieffektiviteten beregnes ved å dividere energiuttaket med det totale antall boremeter for de respektive anleggsalternativene. De EED-modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslange hadde lavest energieffektivitet, cirka $90 \text{ kWh}/\text{meter}$ ved EAB og $95 \text{ kWh}/\text{meter}$ ved Bryn, mens medianverdien for de FEFLOW-modellerte grunnvarmeanleggene basert på oppumpet grunnvann ved EAB var $309 \text{ kWh}/\text{meter}$ og $270 \text{ kWh}/\text{meter}$ ved Bryn (figur 6–10). Den

høyeste energieffektiviteten ble oppnådd for grunnvarmeanlegget ved EAB hvor energiuttaket ble beregnet med utgangspunkt i sirkulasjonsrate og temperaturuttak. Energieffektiviteten varierte fra 320 til 600 kWh/meter i samsvar med tilhørende temperaturuttak.

Den høye energieffektiviteten uttrykt som energiuttak per meter borehull for det grunnvannsbaserte grunnvarmeanlegget ved EAB, beregnet med utgangspunkt i sirkulasjonsraten, kan forklares med at det sirkulerende vannet henter energi fra et stort bergvolum utenfor borehullene. For de modellerte grunnvarmeanleggene med kollektorslange, der det antas at varmeledning er den største mekanismen for varmetransport og at borehullene ikke påvirker hverandre, hentes energien fra et begrenset bergvolum innenfor en radius på maksimum 10 meter fra hvert borehull.

Det at berggrunnen ved Bryn har høyere varmeledningsevne (tabell 6-2) er sannsynligvis årsaken til at grunnvarmeanleggene med kollektorslanger ved Bryn har høyere energieffektivitet enn EAB.



Figur 6-10: Energiuttak per meter borehull. En sammenligning av forskjellige alternativer.

7 Diskusjon

7.1 Kostnadsreduksjoner ved bruk av forbedret utstyr og metodikk

En økonomisk analyse av pilotanleggene ved Bryn og EAB ble gjort for å finne lønnsomheten til grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann fremfor grunnvarmeanlegg med U-rørskollektorer i vertikale borehull. Siden pilotanlegget ved Bryn ikke lot seg drifte på en tilfredsstillende måte, ble den økonomiske analysen utført kun av hypotetiske årsaker. De økonomiske beregningene ble basert på de aktuelle anleggskostnadene og utført i henhold til de opprinnelige planene for anlegget ved Bryn. Resultatene viste at anleggskostnadene, det vil si borekostnadene for et kollektoranlegg, kan reduseres med mer enn 50% hvis energiuttaket fra pilotanlegget ved Bryn hadde vært høyere enn 188 MWh. Tilsvarende tall for anlegget ved EAB, der testkjøringen av anlegget var vellykket, var 105 MWh. Ennå høyere årlig energiuttak og/eller høyere borekostnader vil ytterligere øke lønnsomheten for grunnvannsalternativet kontra et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger. De virkelige besparelsene ved valg av et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann i stedet for et anlegg med kollektorslanger kan bare kvantifiseres ved en fullskala drift av anlegget, og de beregnede verdiene bør betraktes som anslag.

En videre utvikling og forbedring av utstyret for hydraulisk trykking med injeksjon av sand er nødvendig for å effektivisere og redusere kostnadene ytterligere.

7.2 Hydraulisk trykking og geologiske forhold

Oppsprekkningsstrykket og stabilt trykk etter hydraulisk trykking var høyere ved Bryn sammenlignet med EAB (avsnitt 5.5, figur 5–92). Den høyere oppsprekningsgraden (97%) og det relativt lavere trykknivået ved EAB sammenlignet med Bryn, kan sannsynligvis forklares med forskjellige bergspennings- og bergartsstyrkeforhold ved de to geologiske lokalitetene.

Bergspenningsmålingene som ble utført ved Bryn viste at minste hovedspenning varierte fra 4,5 til 16,5 MPa (45–165 bar). Bergartens (ringerikesandstein) strekkfasthet ble anslått til å være 7–11 MPa (70–100 bar) (Jóhannsson, 2001). De relativt høye bergspenningene ved Bryn ble også verifisert av at gjenåpningstrykket var over 100 bar for de fleste borehullsseksjonene som ble stimulert med hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 5–55 til 5–56).

Ifølge ligning 2.4 vil størrelsen på oppsprekkningsstrykket ved hydraulisk trykking, under de gitte forholdene (avsnitt 2.1.3), øke med økende verdi for de horisontale spenningene og bergartens strekkfasthet. Datasettene for de kvartsittiske- og sandsteinsbergartene, og kalksteins- og leirskifer/leirsteinbergartene i figur 2–7 kan i teorien representere bergartene ved henholdsvis Bryn og EAB. Strekkfastheten er betydelig høyere for de kvartsittiske- og sandsteinsbergartene enn for kalkstein og leirskifer/leirstein. I henhold til dette (figur 2–7) anses strekkfastheten i berggrunnen ved Bryn til å være høyere enn ved EAB.

Initierte eller gjenåpnede sprekker forårsaket av hydraulisk trykking vil ha sin maksimale utstrekning i alle retninger når vannet strømmer inn i formasjonen. Når vannpumpene slås av og vanntrykket reduseres, vil sprekken søke å falle tilbake til sin opprinnelige likevektstilstand som kan relateres til bergspenningene i området. Selv om en permanent

sprekkeåpning kan dannes ved at sprekkelatene forskyves i forhold til hverandre i lukkeprosessen (Smith, 1989), er det sannsynlig at borehullskapasiteten reduseres som en langtidseffekt av hydraulisk trykking med bare vann (også nevnt i avsnitt 5.2.3). På grunn av mulige forskyvninger av de åpne sprekkene er det sannsynlig at borehullskapasiteten forblir høyere enn den opprinnelig borehullskapasiteten målt før hydraulisk trykking med bare vann.

En høyere oppsprekningsgrad kunne sannsynligvis vært oppnådd ved Bryn hvis utstyret for hydraulisk trykking hadde vært laget for å tåle og håndtere høyere trykknivå enn det nødvendige oppsprekkningsstrykket ved Bryn (avsnitt 7.5).

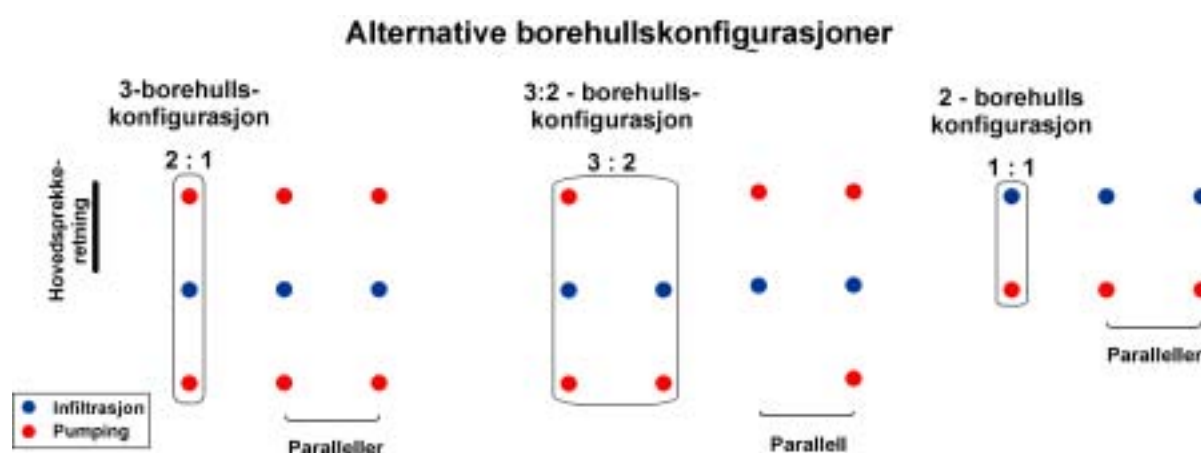
7.3 Tilstrekkelig infiltrasjonskapasitet og fordelt sirkulasjon av grunnvann

7.3.1 Hydraulisk kommunikasjon - foretrukket borehullskonfigurasjon

Usikkerheter angående sprekkutbredelsesretningen i en tidlig fase av studien var årsaken til at 5-borehullskonfigurasjonen, bestående av 4 satellittborehull og ett senterborehull, ble valgt ved Bryn (figur 2–1 og 3–3). Denne konfigurasjonen ble valgt for å sikre den best mulige forbindelsen mellom de gjenåpnede- og/eller initierte sprekkene, og på denne måten oppnå best mulig hydraulisk kommunikasjon og størst sprekkflateareal mellom borehullene.

Best hydraulisk kommunikasjon ble oppnådd mellom borehull 1, 3 og 5 ved Bryn der en forhøyet respons i grunnvannsnivået ble observert under hydraulisk trykking med bare vann (avsnitt 5.2.9). Borehull 1, 3 og 5 ligger på en linje i tilnærmet nord-sør retning (figur 3–3) og parallelt hovedsprekkeretningen (figur 5–35). Hovedsprekkeretningen ved Bryn, som ble kartlagt ved strukturgeologiske forundersøkelser (avsnitt 3.2) og ved geofysisk borehullsinspeksjon (avsnitt 5.2.7), representerer sannsynligvis orienteringen av største hovedspenning (avsnitt 5.2.6). I følge grunnleggende teoretiske prinsipper om hydraulisk trykking og bergspenninger, vil sprekkutbredelsen til en initiert sprekk utenfor borehullets influensområde være parallell største hovedspenningsretning (avsnitt 2.1.3). Ved hydraulisk trykking er det sannsynlig at eksisterende, men kanskje mineralfylte sprekker gjenåpnes. Forutsatt samme bergspenningsforhold som ved dannelse, vil den eksisterende sprekk sannsynligvis ha samme orientering, som en tilsvarende initiert sprekk som kun er påvirket av bergspenningsforholdene. Den foretrukne oppsprekningsgraden og resulterende best hydraulisk kommunikasjon mellom borehullene parallelt hovedsprekkeretningen tyder på at en borehullskonfigurasjon bestående av tre borehull, to pumpeborehull og ett infiltrasjonsborehull plassert på en linje parallell med hovedsprekkeretningen, ville vært bedre egnet enn den eksisterende 5-borehullskonfigurasjonen. Ved større energibehov kan den foreslåtte 3-borehullskonfigurasjonen utvides med flere 3-borehull parallell (figur 7–1). Allikevel, med den relativt lave oppsprekningsgraden og den lave sirkulasjonsraten som ble oppnådd i effekt- og sirkulasjonstesten ved Bryn (avsnitt 5.2.13), ville driften av et tenkt grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann med 3-borehullskonfigurasjon også vært mislykket ved Bryn. Forsøket viste at infiltrasjonsraten i senterborehullet til grunnvarmeanlegget var den begrensende faktoren som forhindret en vellykket drift, og at infiltrasjonskapasiteten til borehullet er tilnærmet lik borehullskapasiteten funnet ved testpumping. På bakgrunn av disse resultatene ble grunnvarmeanlegget ved EAB designet

som 3-borehullskonfigurasjon. På grunn av praktiske tilpasninger ble ikke borehullene ved EAB plassert på en linje (avsnitt 3.3 og figur 3–6). Mangel på fjellblotninger i nærheten av det aktuelle området forhindret strukturgeologiske forundersøkelser, og hovedsprekkeretningen var ikke kjent før boring av borehullene. Senere avdekket en sprekkeanalyse av optisk televiewerlogg for borehull 1 ved EAB at hovedsprekkeretningen var i retning nordøst-sørvest (figur 5–67). Det betyr at borehullene 1 og 3 er plassert tilnærmet parallelt til hovedsprekkeretningen, men det var ingen ting i den hydrauliske kommunikasjonene mellom borehull 1 og 3 som skulle tilsi at det var en foretrukket sprekkeretning mellom de to borehullene. Vellykket hydraulisk trykking av borehullene ved EAB, tilsynelatende uavhengig av hovedsprekkeretningen, gjorde at grunnvarmeanlegget oppnådde en tilfredsstillende sirkulasjonsrate (figur 5–79). I henhold til resultatene fra Bryn, er det mulig at en ennå høyere sirkulasjonsrate kunne ha vært oppnådd ved EAB hvis borehullene hadde vært plassert på en linje parallelt hovedsprekkeretningen. Selv om sirkulasjonsraten i EAB-anlegget var tilfredsstillende, er det sannsynlig at infiltrasjonskapasiteten var noe lavere enn pumpekapasiteten. Under testkjøringen falt pumpen i borehull 2 ut, og det ble pumpet fra kun borehull 3 i de tre påfølgende døgn med en kapasitet på cirka $9 \text{ m}^3/\text{time}$ (figur 5–79). Tatt i betraktning at borehull 3 hadde lavest kapasitet før hydraulisk trykking med injeksjon av sand, ville den totale pumpekapasiteten til borehull 2 og 3 vært cirka $18 \text{ m}^3/\text{time}$. Disse observasjonene tyder på at selv en 3-borehullskonfigurasjon, der forholdet mellom antall pumpe- og infiltrasjonsborehull er 2:1, begrenser anleggets potensial. Konsekvensen av dette er at den idéelle borehullskonfigurasjonen, som sikrer de beste hydrauliske forholdene og den maksimale realative infiltrasjonskapasiteten, kanskje har et forhold mellom pumpe- og infiltrasjonsborehullet på 3:2 eller 1:1 (figur 7–1). Tilgang til store varmevekslerflater i berggrunnen som sikrer en tilfredsstillende varmeveksling mellom vannet og berggrunnen, kan oppnås ved å plassere flere parallelle konfigurasjoner ved siden av hverandre. Den eksakte borehullskonfigurasjonen bør sannsynligvis bestemmes ut i fra forventede geologiske forhold for det aktuelle anleggsområdet.



Figur 7–1: Alternative borehullskonfigurasjoner for grunnvarmeanlegg basert på sirkulerende grunnvann.

7.3.2 Identifisering av vanninnslag

Temperatur- og ledningsevneloggene er et nyttig verktøy for å identifisere vanninnslag i borehullene der det innstrømmende vannet har andre verdier for temperatur- og ledningsevne enn omgivende vann. Resultatene fra seksjons- og søyletestpumpig (figur 5–24) ved Bryn og strømningsmålingene ved EAB (figur 5–65) indikerer at disse vanninnslagene ikke nødvendigvis representerer store vannførende sprekker, men heller ubetydelige vanninnslag med hensyn til strømningsmengde. For eksempel i den dypere delen av borehull 4 (figur 5–24 og tabell 5–9) der temperaturloggen indikerer vanninnslag ved 51, 77 og 83 meter mens testpumpingen viser at denne delen av borehullet yter minimalt med vann. De synlige endringene i borehullsveggen ved 82,2 og 60,7 meters dyp i henholdsvis borehull 2 ved Bryn og EAB (figur 5–34 og 5–66) er ikke tilstede på temperatur- og ledningsevneloggen. Siden sprekke i disse nivåene er synlige, har de sannsynligvis også høy kapasitet. Selv om borehullene ved EAB hadde høyere kapasitet enn borehullene ved Bryn ble det observert færre endringer på temperatur- og ledningsevneloggene ved EAB sammenlignet med Bryn.

Til tross for vellykket oppsprekning (97%) med hydraulisk trykking og injeksjon av sand i borehullene ved EAB, kan bare noen få endringer i strømningsmønsteret identifiseres. De største endringene på strømningsloggen kan sees i borehull 2, mens mindre endringer kan tolkes i borehull 1 og 3. Alle hovedvanninnslagene befinner seg mellom 25 og 35 meter i alle borehullene. Siden hydraulisk trykking førte til en betydelig kapasitetsøkning ved Bryn (figur 5–26), der oppsprekningsgraden var lavere (70%), er det rimelig å anta et lignende hendelsesforløp for borehullene ved EAB (avsnitt 5.3.2). En mulig forklaring på hvorfor strømningsmønsteret i borehullene ved EAB ser ut til å være relativt upåvirket av hydraulisk trykking med injeksjon av sand kan være at de store, og sannsynligvis dominerende vannførende sprekke mellom 25 og 35 meter i borehullene skjuler de mindre vanninnslagene som befinner seg på et dypere nivå i borehullene. Denne effekten ble muligens forsterket ved at pumpen, pumpe D, var plassert over strømningsmåleren ved 20 meters dyp i borehullet, og ved å følge prinsippet om minste motstands vei, trekker på vann fra de store sprekkesystemene nærmest pumpen. På grunn av dette vil sannsynligvis den målte mengden av innstrømmende vann i nærheten av pumpen være forholdsmessig større sammenlignet med den målte mengden av innstrømmende vann fra andre deler av borehullet med større avstand til pumpen. Følgelig vil identifisering av nye vannførende sprekker i den dypere delen av borehullene kreve en betydelig innstrømning av vann. Det er kanskje urealistisk å anta at innstrømningen av vann fra de nye sprekke vil ha like stor vannkapasitet som hovedvanninnslagene mellom 25 og 35 meters dyp. Konsekvensen av dette er at strømningsmålingene kan ha vært relativt uhensiktsmessige for å identifisere nye og dypere vanninnslag i borehullene ved EAB. Denne argumentasjonen innebærer også at de nye vanninnslagene som er observert i borehull 2, og til en viss grad i borehull 1 og 3, har en betydelig kapasitet.

7.4 Behov for sand som "propping agents"?

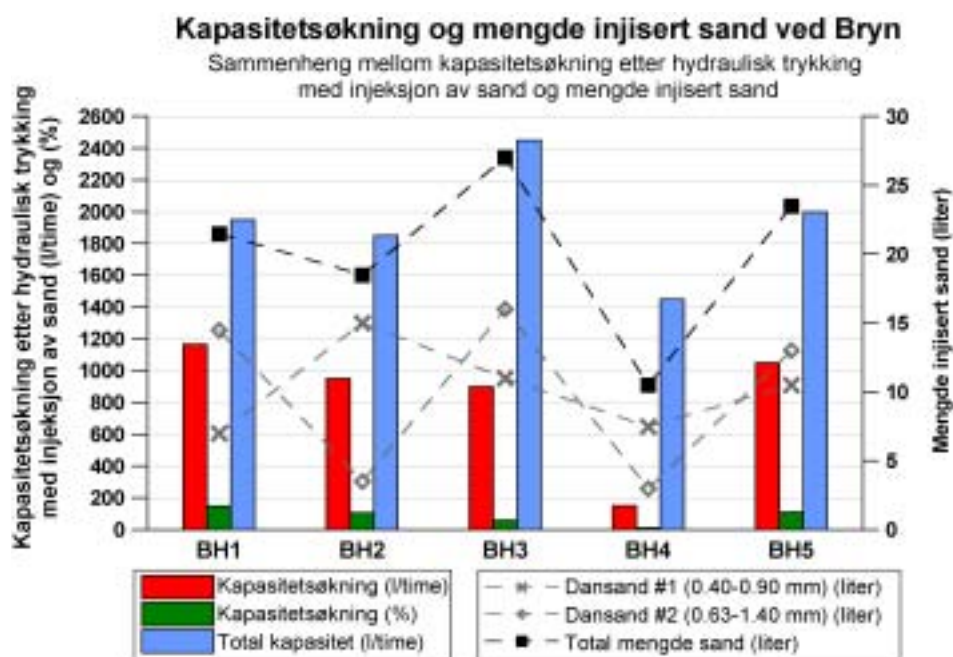
I denne studien ble den målte forbedringen av den søyle- og seksjonsvise borehullskapasiteten brukt som et mål på effekten av hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved Bryn. Alle borehullene ved Bryn oppnådde økt kapasitet (figur 5–

26) som et resultat av hydraulisk trykking med bare vann (figur 5–27) og av hydraulisk trykking med injeksjon av sand (figur 7–2). Eneste unntaket var borehull 4 der hydraulisk trykking med injeksjon av sand førte til en ubetydelig (12%) økning av kapasiteten. Verdier for mottrykket, eller den stabile minimumsverdien for vanntrykket observert manuelt før injeksjon av sand i de bestemte borehullsseksjonene i borehull 4, varierte fra 20 til 35 bar (tabell 5–13). Disse verdiene er lavere enn de fleste tilsvarende verdier fra de andre borehullene (figur 5–57). En mulig forklaring på sammenhengen mellom lavt mottrykk og den beskjedne kapasitetsøkningen i borehull 4 sammenlignet med de andre borehullene ved Bryn, kan relateres til behovet for sand som "propping agents" eller avstandsklosser i den enkelte sprekk. Sand som "propping agents" kan være mindre nødvendig i sprekker som har et stabilt og lavt mottrykk før injeksjon av sand sammenlignet med sprekker som har høyere mottrykk. En varig forbedring av borehullskapasiteten kan muligens oppnås ved å injisere sand i sprekker med høyere mottrykk, som i denne studien var cirka 40 bar, mens sprekker med lavere mottrykk kan betraktes som permanent åpne sprekker. Med henvisning til de relativt høyere mottrykkene ved Bryn, skapt av bergspennings- og bergstyrkeforholdene, vil det være større behov for sand som "propping agents" i de åpne sprekkene ved Bryn enn ved EAB.

Som en alternativ forklaring, kan muligens den lave kapasitetsøkningen i borehull 4 knyttes til den totale mengden sand som ble injisert i de tre stimulerte borehullsseksjonene. I følge figur 7–2 er den totale mengden sand injisert i borehull 4 betydelig lavere sammenlignet med de andre borehullene. Den prosentvise- og kvantitative kapasitetsøkningen viser samme trend og kapasitetsøkningen for borehull 1, 2, 3 og 5 var tilnærmevis lik der borehull 1 hadde den største økningen. Symbolene som viser total mengde injisert sand og volumet av injisert sand med størst kornstørrelse, Dansand 2, følger samme mønster og stemmer overens med den totale borehullskapasiteten etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

Kun Jupe et al. (1993; i Broch, 1994) rapporterer om en positiv effekt, i form av økt borehullskapasitet, som følge av et dypborehulls-stimuleringsprogram der en liten del av programmet involverte bruk av 0,2-0,4 millimeters kvartssand som "propping agents" (Eliasson et al., 1988). Herbert et al. (1993), ved bruk av 0,5 millimeters kvartssand som "propping agents", og Williamson og Woolley (1980) i Smith (1989) oppnådde redusert borehullskapasitet etter injeksjon av "propping agents". Sammenlignet med disse studiene kan bruken av grovere sand i borehullene ved Bryn, to fraksjoner av 0,40-0,90 og 0,63-1,40 millimeter, være årsaken til den betydelige kapasitetsøkningen. Det bør også legges merke til at injisert volum av den groveste sandfraksjonen viser en bedre korrelasjon med kapasitetsøkningen enn den minste kornstørrelsen (figur 7–2). Fra oljeindustrien bestemmes kornstørrelsen på "propping agents" ut i fra det såkalte *adgangskriteriet* som krever sprekkåpninger som er to til tre ganger større enn den største kornstørrelsen. De større partiklene, for eksempel 12/20 mesh (1,70-0,85 millimeter), gir høyere hydraulisk ledningsevne ved lavere spenningsnivå enn de mer vanlige mindre størrelsene som 20/40 mesh (0,85-0,43 millimeter) (Anderson et al. 1989; in Gidley et al., 1989). Smith (1989) rapporterer at entrepenører innen grunnvannsbransjen anbefaler bruk av så grov propping agent som mulig, for eksempel hard sand eller plastikkuler med størrelse 30/50 mesh (0,60-0,30 millimeter).

Det ikke kjent hvilken kapasitetsøkning som ville vært oppnådd hvis det hadde blitt utført hydraulisk trykking med bare vann to ganger i stedet for hydraulisk trykking med injeksjon av sand ved Bryn. To stimuleringscykluser med bare vann forventes også å gi en kapasitetsøkning sammenlignet med kun én stimulering. På samme måte som for én stimulering med hydraulisk trykking med bare vann, forventes det at borehullskapasiteten etter to stimuleringer med hydraulisk trykking med bare vann også reduseres som en langtidseffekt, mens injeksjon av sand som avstandsklosser forventes å gi en varig kapasitetsøkning.



Figur 7–2: Kapasitetsøkning og mengde injisert sand ved Bryn.

7.5 Forslag til videre arbeid

Utstyret som ble brukt til hydraulisk trykking i dette prosjektet var ikke i stand til å danne sprekker i borehullsseksjoner som krevde et oppsprekkningsstrykk på mer enn cirka 200 bar. Alt utstyret som ble benyttet var laget for et maksimalt arbeidstrykk på 250 bar. Ytterligere forbedring av utstyret er nødvendig for å oppnå en høyere oppsprekningsgrad i områder med høye bergspenninger og høy strekkfaststyrke. Det første målet bør være å utvikle lavkostnadsutstyr som kan håndtere et maksimalt arbeidstrykk på 350 bar.

Utstyrsforbedringen omfatter dobbeltmansjetten, vannrør og vannslanger, og høytrykks- og høykapasitetspumper.

Forbedret utstyr og prosedyre for blanding, påfylling og injeksjon av væske er nødvendig før kommersialisering av metoden med hydraulisk trykking med injeksjon av sand. Den optimale løsningen vil være å integrere blanderen (avsnitt 2.2.4) og høytrykkstanken (avsnitt 2.2.2) sammen med tankbilen for hydraulisk trykking. Blanding av fortykningsmiddel, vann

og sand bør automatiseres. Mer forskning kreves for å finne den optimale størrelsen og mengden av kvartssand som propping agent som bør brukes i ethvert tilfelle.

Videre forskning angående grunnvarmeanlegget basert på oppumpet grunnvann anbefales på det sterkeste. Viktige parametre som må optimaliseres er:

- Egnet borehullskonfigurasjonen i forskjellige geologiske områder,
- avstand mellom pumpeborehullet og infiltrasjonsborehullet, og
- sammenhengen mellom oppholdstiden for det sirkulerende grunnvannet og temperaturforløpet i driftsperiodene for henholdsvis varme- og kjøleformål.

I tillegg vil det være nødvendig med bedre økonomiske analyser for å demonstrere det økonomiske potensialet til grunnvannsbaserte grunnvarmeanlegg utnyttet til både varme- og kjøleformål.

Interessant og nyttig informasjon angående bruk av hydraulisk trykking til drikkevannsformål og grunnvarmeanlegg er:

- Effekten i form av økt borehullskapasitet av to stimuleringer med hydraulisk trykking med bare vann kontra hydraulisk trykking med injeksjon av sand.
- Langtidseffekten av henholdsvis en og to stimuleringer med hydraulisk trykking med bare vann, og langtidseffekten av hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

8 Sammendrag og konklusjon

- Betydelige besparelser kan oppnås ved å velge et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann ved EAB i stedet for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger. Ved de aktuelle økonomiske og geologiske forholdene kan anleggskostnadene, det vil si borekostnadene for et grunnvarmeanlegg med kollektorslanger, reduseres med mer enn 50% ved å velge et grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann ved EAB der energiuttaket fra vann er høyere enn 105 MWh/år.
- En sammenligning av resultatene fra hydraulisk trykking ved Bryn og EAB viste at nødvendig vanntrykk for å gjenåpne eller initiere sprekker varierte betydelig. Maksimumtrykkene ved Bryn var høyere enn ved EAB, og ved Bryn ble 70% (44 av 63) trykk-tid kurvene fra hydraulisk trykking tolket som gjenåpning eller initiering av sprekker, mens tilsvarende tall for EAB var 97% (36 av 37). Høye bergspenninger og bergartens høye strekkfaststyrke, målt in-situ, er sannsynligvis årsaken til den lavere oppsprekningsgraden ved Bryn. Sammenlignet med Bryn, har sannsynligvis knollekalken ved EAB lavere strekkfaststyrke. En fullstendig oppsprekning, enten en gjenåpning- eller en initiering av en sprekk, i alle nivåer som ble stimulert med hydraulisk trykking kunne muligens ha blitt oppnådd ved å bruke mer egnet utstyr. Dette innebærer at utstyret for hydraulisk trykking må tåle høyere trykk og at pumpene må ha høyere kapasitet for å overskride bergets spenninger og styrke i forskjellige geologiske områder.
- Hydraulisk trykking med bare vann og hydraulisk trykking med injeksjon av sand førte til en betydelig økning i borehullenes kapasitet ved Bryn. Omfattende stimulering i flere seksjoner i hvert borehull ble gjort. For å få til en varig forbedring av borehullenes kapasitet så det ut til å være mer behov for bruk av sand som propping agent i sprekker med høyt mottrykk, i denne studien høyere enn 40 bar, sammenlignet med sprekker med lavere mottrykk. Sandens kornstørrelse bør også tilpasses det aktuelle mottrykket, og injeksjon av grovere sand anbefales i sprekker med lavere mottrykk.
- Infiltrasjonsraten av vann en kritisk faktor for energiuttaket og en vellykket drift av grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann. Resultatene fra korttids sirkulasjonstestene utført ved Bryn og EAB viste at infiltrasjonsraten i borehull 3 ved Bryn (cirka 2500 liter/time) var for lav til å oppnå en tilfredsstillende drift av anlegget, mens infiltrasjonsraten i borehull 1 ved EAB (14000 liter/time) var tilstrekkelig. De store forskjellene i infiltrasjonsraten mellom Bryn og EAB var sannsynligvis knyttet til: (1) Store initielle forskjeller i borehullskapasiteten i borehullskapasiteten før hydraulisk trykking (<560 liter/time ved Bryn og >6300 liter/time ved EAB). Generelt har knollekalk eller kalkrike bergarter høy permeabilitet, mens kompakte sandsteinsbergarter har lav permeabilitet. (2) Hydraulisk trykking var mest vellykket ved EAB. (3) De høye bergspenningene ved Bryn, sammenlignet med EAB, vil øke tendensen til at sprekkenes lukkes, også sprekker med sand.
- Omfattende borehullsinspeksjoner med optisk televiewer, logging av borehullvannets temperatur og elektrisk ledningsevne, og gammastråling, skaffet til veie nyttige opplysninger om borehullenes opprinnelige tilstand og avdekket enkelte endringer forårsaket av forskjellige former for hydraulisk trykking. Allikevel avdekket ikke

inspeksjonene så mange av de aktuelle endringene som forventet på forhånd. Det var for eksempel vanskelig å oppdage nye- eller gjenåpnede sprekker på optisk televiewer logg, og det er sannsynligvis bare et begrenset antall av mulige vanninnslag i borehullene, forårsaket av hydraulisk trykking, som ble påvist på temperatur- og ledningsevneloggen. For å få best mulig effekt av hydraulisk trykking vil en tilfeldig plassering av dobbeltpakningen muligens være like hensiktsmessig som en strategisk plassering basert på inspeksjon med optisk televiewer.

- Endret strømningsmønster som følge av hydraulisk trykking med injeksjon av sand i borehullene ved EAB ble bare delvis oppdaget ved hjelp av strømningsmålinger. Store vannførende sprekker i den øvre delene av borehullene dominerer strømningsmønsteret og kan tenkes å skjule nye vanninnslag på dypere nivå i borehullene. Testpumping viste seg å være den mest hensiktsmessige metoden for å dokumentere effekten av forskjellige former for hydraulisk trykking. Valg av pumpe og dens plassering i borehullet er viktig for å få sammenlignbare resultater.
- FEFLOW-modelleringen av grunnvarmeanlegget ved Bryn og EAB understreket den viktige sammenhengen mellom tilgjengelig varmevekslerareal i berggrunnen, varmeledningsevne og energipotensialet.
- Kun beskjedne terrengendringer måles i forbindelse med hydraulisk trykking, og det er uvisst om resultatene skyldes måleunøyaktigheter eller om det er virkelige terrengendringer.
- Økt borehullskapasitet, forbedret, pålitelig og kostnadseffektive teknikker for hydraulisk trykking i krystallinsk berggrunn, vil sannsynligvis øke interessen for grunnvann som vannkilde for små til mellomstore vannverk.

9 Referanser

1. Aggson, J.R. and Kim, K. (1987): Technical Note - Analysis of hydraulic fracturing pressure histories: A comparison of five methods used to identify shut-in pressure. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Vol. 24, No 1 side 75-80, Pergamon Press, London.
2. Amadei, B., Stephansson, O., (1997): Rock Stress and its Measurements. Chapman & Hall, London. 490 sider.
3. Anderson, R.W., Cooke Jr, C.E. and Wendorff, C.L., (1989): Propping Agents and Fracture Conductivity. Chapter 6 in Recent Advances in Hydraulic Fracturing (Gidley et al., 1989), Monograph Volume 12, Henry L. Doherty series. Society of Petroleum Engineers. ISBN 1-55563-020-0, side 109-130.
4. Andersson, O., Johansson, I., Perers, J., (1982): Utnyttjande av överskottsvärme i grundvatten vid konstjord infiltration. Förstudie. Byggeforskningsrådet, Rapport R121:1982, 38 sider.
5. Andersson, O. (1992) Scaling and corrosion. Annex VI - Environmental and chemical aspects of thermal energy storage in aquifers. Swedish Council for Building Research. Document D12: 1992, 102 sider.
6. Banks, D. and Robins, N. (2002): An Introduction to Groundwater in Crystalline Bedrock. Geological Survey of Norway, 64 sider.
7. Banks, D. (1991): Boring og prøvepumping avhydrogeologiske testhull i en grønnstein akvifer- Østmarkneset, Tr.heim. App.: kapasitetstest av borehull i fast fjell. Geological Survey of Norway, NGU report 91.213, 107 sider.
8. Baski, H.A. (2001): Letter from Henry A. Baski to Randi Kalskin, 26th of March 2001, 1 side.
9. Baski, H. (1987): Hydrofracturing of water wells, Water Well Journal 41(6): side 34-35.
10. Bredehoeft, J.D. et al. (1976): Hydraulic fracturing to determine the regional in-situ stress, Piceance Basin, Colorado. Geol. Sco. Am. Bull., 87, side 250-58.
11. Brekke, E. (2003): Energiuttak fra fjell - Et studium av data fra termisk responstesting. Hovedoppgave ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for geologi og bergteknikk. 84 sider.
12. Broch, E. (1994): Hot Dry Rock. Report of the Evaluation of Swedish Research on Hot Dry Rock. NUTEK, Swedish National Board for Industrial and Technical Development. R 1994:57. 8 sider.
13. Broch, E., Franklin, J.A., Walton, G. (1971). Logging the mechanical character of Rock. Særtrykk av Inst. of Mining and Metall. Trans., 80A. 10 sider.
14. Driscoll, F. G., (1989): *Groundwater and wells, second edition*, publisert av Johnson

Filtration Systems Inc., St. Paul, Minnesota, ISBN: 096145601, 1089 sider.

15. Eliasson, T., Sundquist, U. and Wallroth, T. (1988): Stimulation experiments with water and viscous fluid at the HDR geothermal research site in the Bohus granite, SW Sweden. HDR geothermal energy project, Department of Geology, Chalmers University of Technology and University of Göteborg. Publ. Fj-6, 69 sider.
16. Elvebakk, H., Rønning, J.S. (2003): Strømningsmåling i borehull. Påvisning av vanninnslag. Posterpresentasjon ved det 12 seminar for hydrogeologi og geokjemi ved NGU. Abstract in NGU report 2003.015, side 61-62.
17. Elvebakk, H., Rønning, J.S. (2001): Borehullsinspeksjon. En utprøving og sammenligning av Optisk og Akustisk Televiewer. Norges geologiske undersøkelse, NGU-rapport, 2001.011, 42 sider.
18. ETM Pacific (2003): Produktdatablad for Hotbox datalogger BKT4, ElproLog. http://www.etmpacific.com.au/downloads/1-4_channel_data_loggers/hotbox_w.pdf
19. Frengstad (2002): Groundwater quality of crystalline bedrock aquifers in Norway. Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk, Dr. ing avhandling 2002:53, 389 sider.
20. Gale, J.E., and MacLeod, R. (1995): Canada-Newfoundland agreement respecting water resource management. Assessing the effectiveness of fracture stimulation for increasing well yield in Newfoundland. Government of Newfoundland and Labrador, Department of environment water resources division. Environment Canada. Environmental conservation strategies division. 48 sider.
21. Gehlin, S. (2002): Thermal Response Test. Method Development and Evaluation. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering. 2002: 39, 193 sider.
22. Gehlin, S. (1998): Thermal Response Test - In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock. Licenciate Thesis. Luleå Tekniska Universitet, Institution för Samhällsbyggnadsteknik, Avdelningen för Vattenteknik. 1998: 37, 73 sider.
23. Gidley, J.L., Holditch, S.A., Nierode, D.E and Veatch Jr, R.W. (1989): Recent Advances in Hydraulic Fracturing. Monograph Volume 12, Henry L. Doherty series, Society of Petroleum Engineers. ISBN 1-55563-020-0, 452 sider.
24. Grundfos (2004): WebCAPS internett basert konfigurasjons verktøy. <http://www.grundfos.com>.
25. Gustafsson, G. (1983): Brunnsystem för värmelagring och värmeutvinning i akviferer. Byggeforskningsrådet. Rapport R39:1983, 28 sider.
26. Haimson, B.C. (1968): Hydraulic Fracturing in poreous and nonporous rock and its potential for determining in situ stresses at great depth, unpublished PhD Thesis, University of Minnesota, 234 sider.

27. Hansen, S.E., Sørlokk, T. og Jóhannsson, Æ. (1998): Bergarters mekaniske egenskaper. SINTEF rapport. SINTEF, Bygg og miljøteknikk, Bergteknikk; STF22 A98034,.. 6 sider.
28. Hellström, G. and Larson, S.Å., (2001): Seasonal thermal energy storage - the HYDROCK-concept. Springer-Verlag Heidelberg. ISSN: 1435-9529. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 60, Number 2, side 145-156.
29. Hellström, G. and Sanner, B. (2000): EED - Earth Energy Designer, User manual, Version 2.0. Borehole heat exchangers. Electronic version on <http://www.buildingphysics.com/earth1.htm>, 43 sider.
30. Herbert, R., Talbot, J.C. and Buckley, D.K. (1993): A study of hydraulic fracturing used on low yielding boreholes in the crystalline basement rocks of Masvingo Province, Zimbabwe. Memoires of the XXIVth Congress international association of hydrogeologists, Oslo, Norway, 28th June - 2nd July 1993, side 698-716.
31. Herrick, D.W. (2000): Hard rock frack'n. Water well journal, July 2000, side 40-42.
32. Hubbert, K.M. and Willis, D.B. (1957): Mechanics of hydraulic fracturing. Petrol. Trans. AIME, T.P. 4597, 210, side 153-66.
33. Irgens, F. (1991): Fasthetslære. 4th. edition, Tapir forlag, 457 sider.
34. ISRM (1987): Suggested Methods for Rock Stress Determination. Method 2: Suggested Method for Rock Stress Determination Using the Hydraulic Fracturing Technique. Pergamon Press, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 24, Number 1, side 59-63.
35. Jóhannsson, Æ. (2001): Hydrauliske splittetester ved Bryn skole, Bærum. SINTEF bygg- og miljøteknikk, avdeling for Berg og geoteknikk. SINTEF rapport STF22F01126, 5 sider.
36. Jupe, A.J., Willis-Richards, J. and Nicholls, J.D. (1993): Review of HDR projects, ETSU G 164 - P1. CSM Associates Ltd, side 229-257. Vedlegg 3 i Broch (1994).
37. Kalskin, R. (1998): Kartlegging av potensialet for grunnvarmeuttak fra løsmasser i Elverum. Hovedoppgave ved Norges teknisk- naturvitenskapelig universitet, fakultet for geofag og petroleumsteknologi. 61 sider.
38. Kim, K. and Franklin (Coord.), ISRM Commission on Testing Methods (1987): Suggested Methods for Rock Stress Determination, Method 2, Suggested Method for Rock Stress Determination Using the Hydraulic Fracturing Technique. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 24, No 1, side 59-63, Pergamon Press, London.
39. Larsen, B. (2001): Bryn skole, Bærum. Strukturgeologiske observasjoner. Upublisert materiale, Norges geologiske undersøkelse. 3 sider.
40. Larson, S.Å., Fridh, B. and Haag, Ö. (1983): Hydrock - värmelager i berg.

Anläggning av värmeväxlarytor med hjälp av hydraulisk uppspräckning;
HYDROCK - metoden. Chalmers tekniska högskola/Göteborgs universitet,
Geologiska institutionen, Publ. B 222, 118 sider.

41. Less, C. and Anderson, N., (1993): Hydrofracture: State of the art in South Africa. Memoires of the XXIVth congress international association of hydrogeologists, Oslo, Norway, 28th June - 2nd July 1993, side 717-723.
42. Lindblad-Påsse, A. (1986): Järnutfällningsproblem i grunvattenvärmesystem. Byggforskningsrådet. Rapport R109:1986, 56 sider.
43. Macaulay, D. (1987): Hydro-fracturing the hard rock well, Ground Water Age 21(7): side 22-25, 28, 30.
44. Midttømme, K., Ramstad, R.K., Solli, A., Sjørdal, T. and Elvebakk, H. (2004): Grunnvarmekartlegging i Asker og Bærum. NGU-rapport, 2004.013, 44 sider.
45. Midttømme, K., Hilmo, B.O., Skarphagen, H. og Nissen, A. (2000): Kartlegging av energipotensialet i berggrunnen på kartblad Bekkestua, Bærum kommune: Varmeledningsevnen til bergarter. NGU-rapport, 2000.036, 105 sider.
46. Myrvang, A.M. (1996): Kompendium 1 Bergmekanikk. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk, Trondheim. 216 sider.
47. NGU-Lab (2002a): NGU, Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak v/Randi Kalskin. Prosjektnr. 277106. Analyserapport 2002.0032, Norges geologiske undersøkelse, 15 sider.
48. NGU-Lab (2002b): NGU, Grunnvarme fra fast fjell v/Randi Kalskin Ramstad. Prosjektnr. 277106. Analyserapport 2002.0405.
49. NGU-Lab (2001a): NGU, Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak ved hydraulisk trykking av borebrønner v/Randi Kalskin. Prosjektnr. 277106. Analyserapport 2001.0003, Norges geologiske undersøkelse, 15 sider.
50. NGU-Lab (2001b): NGU, Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak ved hydraulisk trykking av borebrønner v/Randi Kalskin. Prosjektnr. 277106. Analyserapport 2001.0268, Norges geologiske undersøkelse, 15 sider.
51. NGU Lab (2001c): Uttak av grunnvarme fra fjell -Hydraulisk trykking av brønner v/ B.O. Hilmo. Analyserapport 2001.0022, 7 sider.
52. NGU-Lab (1999a): XRF-analyser. Faktaark fra Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
53. NGU-Lab (1999b): XRD-analyser. Faktaark fra Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
54. Nordell, B., Bjarnholt, G., Stephansson, O. and Torikka, A. (1984): Fracturing of a pilot plant for borehole heat storage in rock at Luleå, Sweden. Swedish Council for

- Building Research; D25:1984, 39 sider.
55. Nordstrand, J.S. (2001): ENERGI BRØNNER I FJELL - Vurdering av forskjellige metoder for effektuttak ved et demonstrasjonsanlegg. Hovedoppgave ved institutt for geologi og bergteknikk, Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, 72 sider.
 56. Rantec Corporation (2000): LEB-H, High pH enzyme breaker. Datablad, Rantec Corporation, P.O. Box 729, Hwy 14 West, Ranchester, WY 82839, 2 sider.
 57. Scheldt, T. (2000): Methods of In-Situ Rock Stress Measurements with Emphasis on Hydraulic fracturing. Norwegian University of Science and Technology, Department of Geology and Mineral Resources Engineering. 22 sider.
 58. Smith, S.A. (1989): Manual of hydraulic fracturing for well stimulation and geologic studies. National Water Well Association, Dublin, Ohio, 66 sider.
 59. Skarphagen, H., Hilmo, B.O. og Håbrekke, J. (1999): Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak ved hydraulisk trykking av borebrønner. Prosjektbeskrivelse. Norges geologiske undersøkelse, 11 sider.
 60. Spangelo, T. (2003): Geotermisk energi fra fast fjell - en varmeteknisk analyse av grunne og dype anlegg. Hovedoppgave ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, Studieprogram energi og miljø, Institutt for energi- og prosesseteknikk. 84 sider.
 61. Spangelo, T. (2002): Grunnvarme fra fast fjell - en varmeteknisk analyse. Prosjektoppgave ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, Studieprogram energi og miljø, Institutt for energi- og prosesseteknikk. 51 sider.
 62. Stene, J. (1997): *Varmepumper: Grunnleggende varmepumpeteknikk*, SINTEF Energi, Klima- og Kuldeteknikk; STF84 A97302, SINTEF Energi, Klima- og Kuldeteknikk, Trondheim, 1997, 242 sider.
 63. Storrø, G., Elvebakk, H. og Rønning, J.S. (2002): Tunnelprosjektet: Hydraulisk testing av borehull i fjell i Gruvalia, Lunner kommune. Norges geologiske undersøkelse. NGU rapport 2002.051. 50 sider.
 64. Sundquist, U., Wallroth, T. (1990): Hydrock - energilager i berg. Sluttrapport för etapp 1 & 2. Chalmers tekniska högskola, Göteborgs universitet, Geologiska institutionen. Publ. B 349, 37 sider.
 65. Sundquist, U., Wallroth, T. and Eliasson, T. (1988): The Fjällbacka HDR geothermal energy research project: Reservoir characterisation and injection well stimulation. Chalmers University of Technology and University of Göteborg, department of Geology. Publ. Fj-9. 92 sider.
 66. Waltz, J.P. (1988): Hydro-frac basics, Ground Water Age 22(7): side 26-29.
 67. Waterloo Hydrogeologic, (2004): FEFLOW v5.0. Internet homepage. Web adress: <http://www.feflow.com/index.htm>.

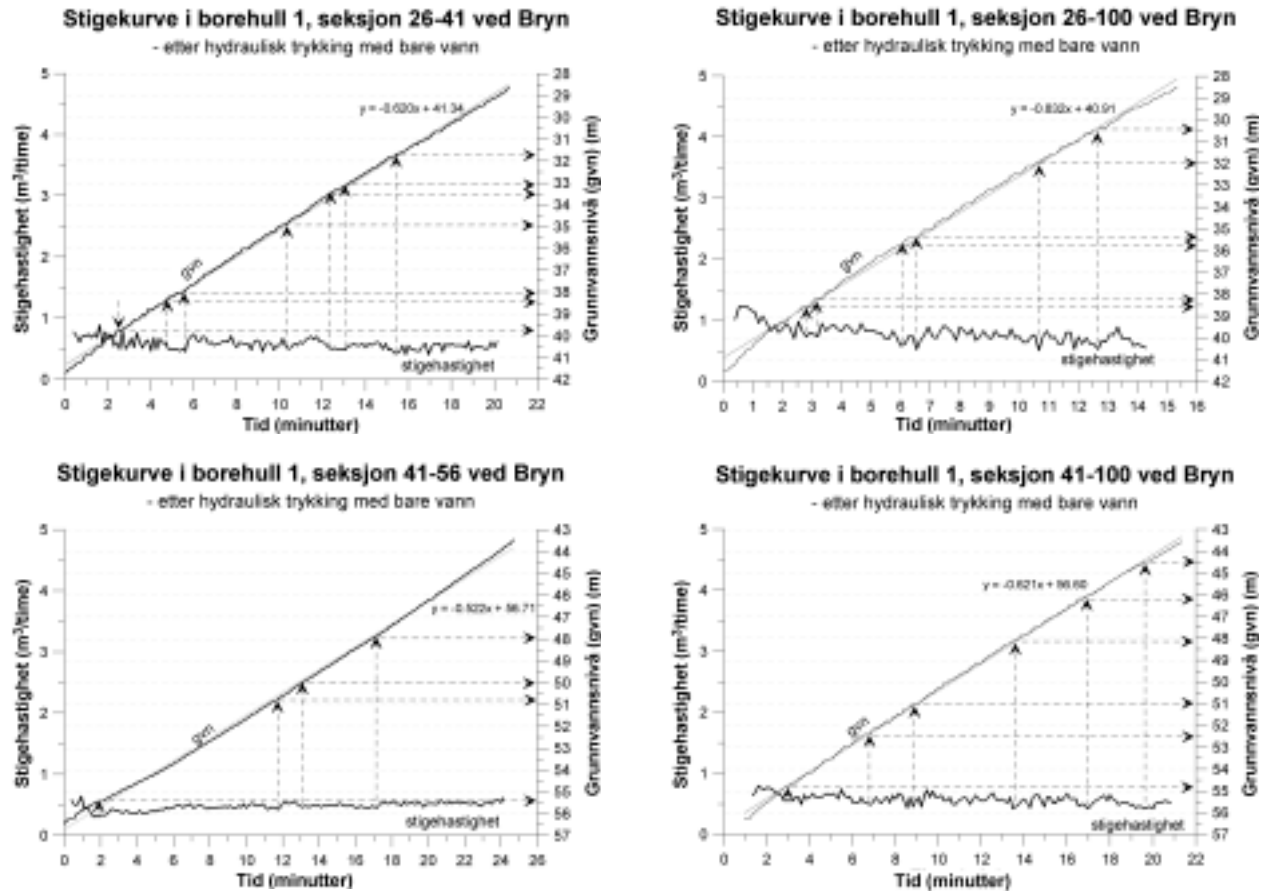
68. Williamson, W.H. and Woolley, D.R. (1980): Hydraulic fracturing to improve the yield of bores in fractured rock. Australian Water Resources Council Technical Paper No. 55, Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia.

DATABILAG

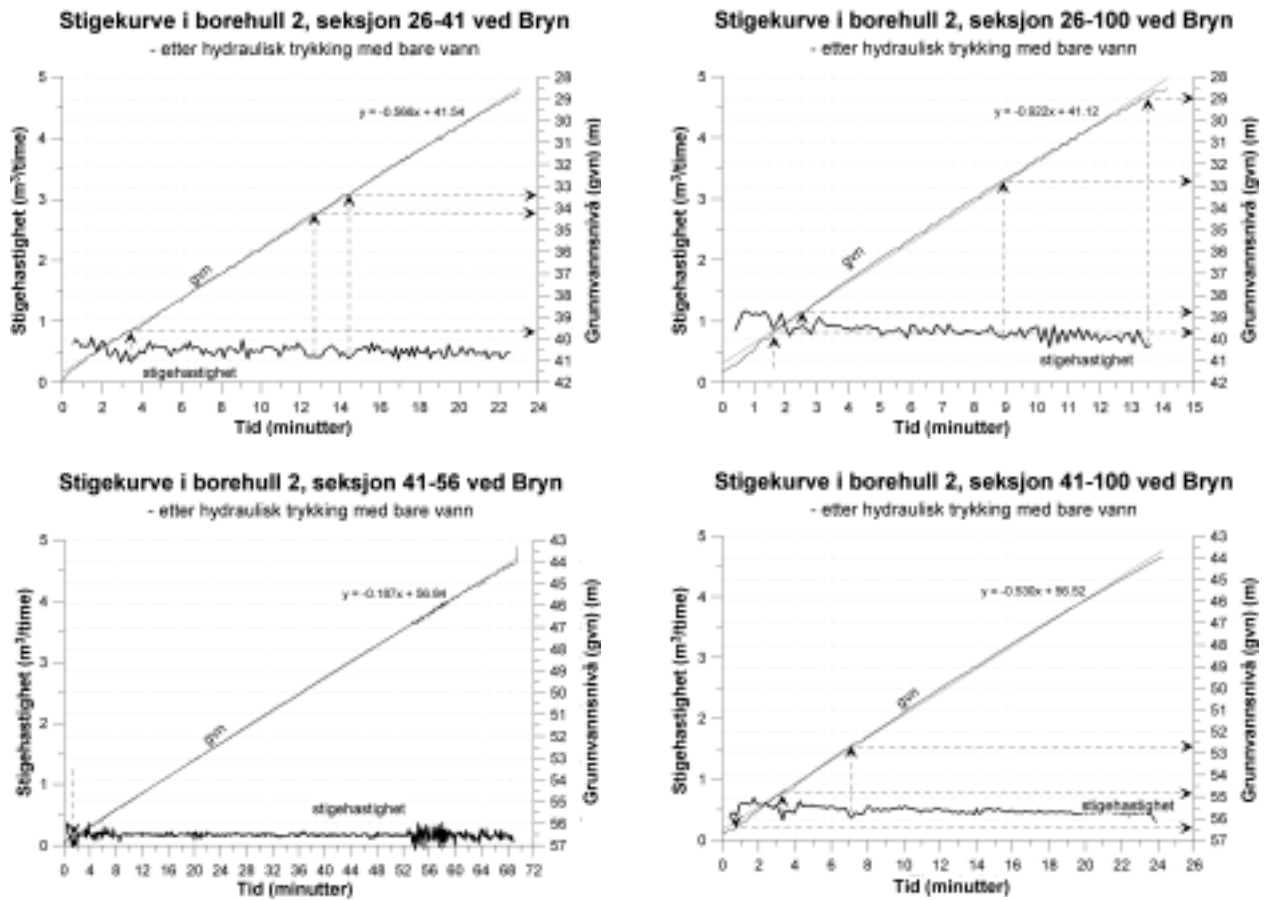
1 Stigekurver fra Bryn	1
1.1 Testpumping etter hydraulisk trykking med vann	1
1.2 Testpumping etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand	4
2 Borehullenes oppsprekning fra optisk televiewer	9
2.1 Sprekkestereogram	9
2.2 Frekvenshistogram	12
3 Borehullsavvik	18

1 Stigekurver fra Bryn

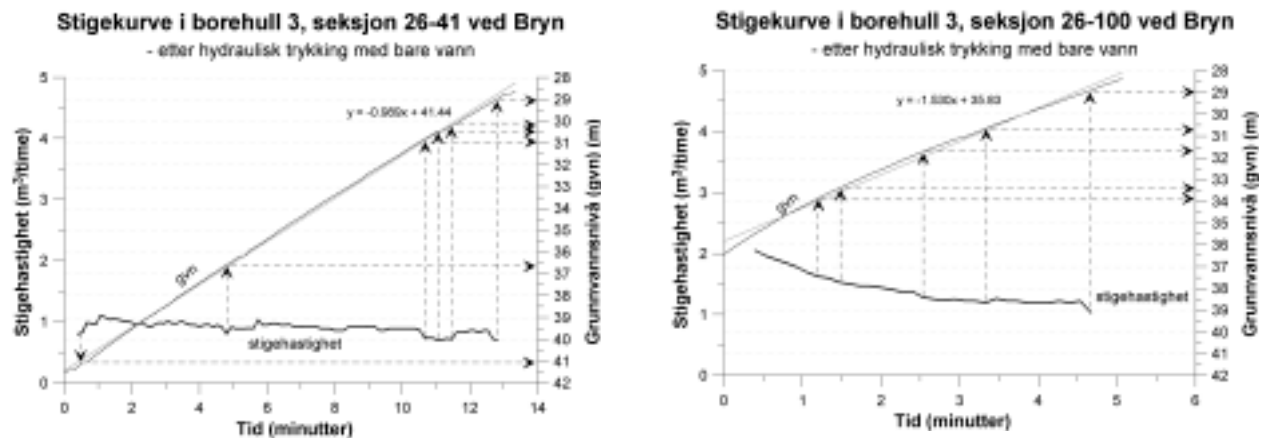
1.1 Testpumping etter hydraulisk trykking med vann



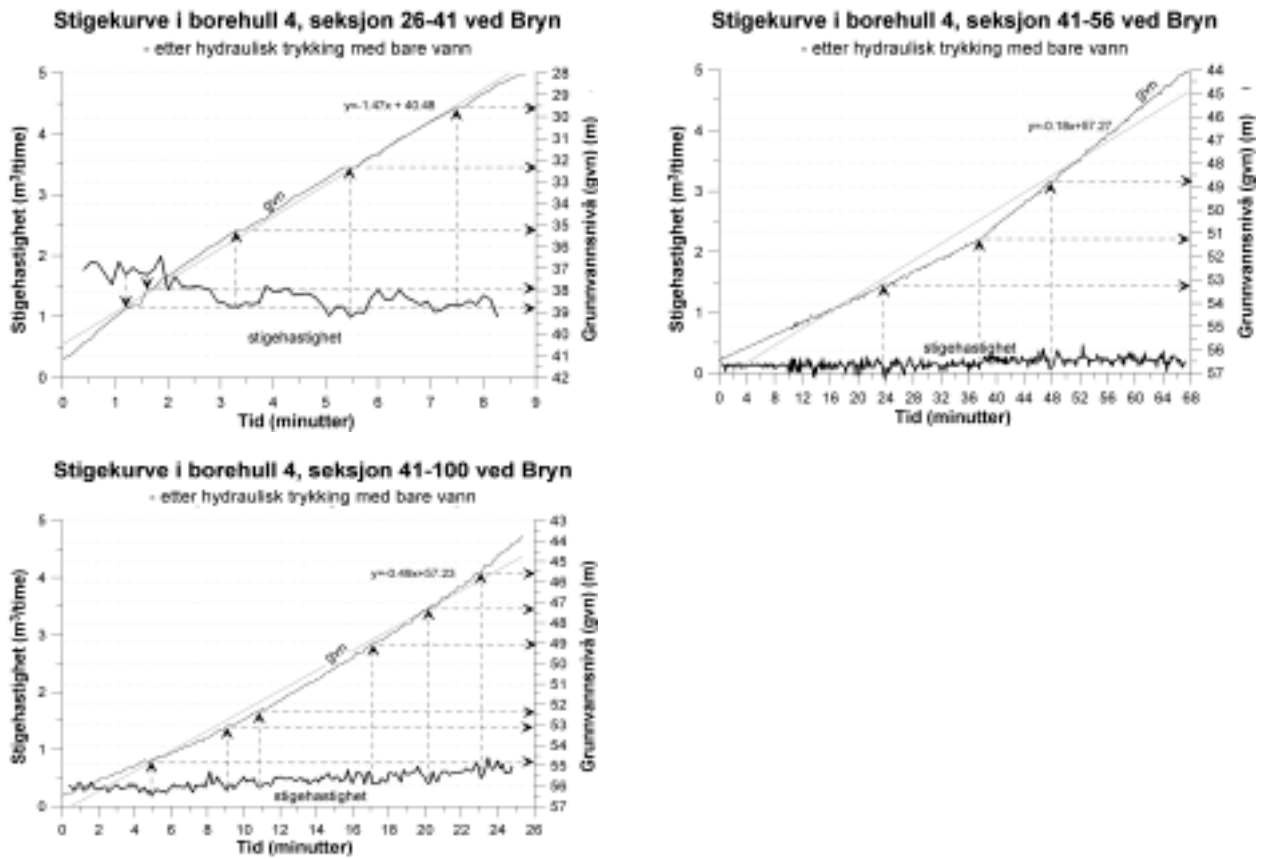
Figur 1. Stigekurver fra testpumping i borehull 1 ved Bryn etter hydraulisk trykking med vann.



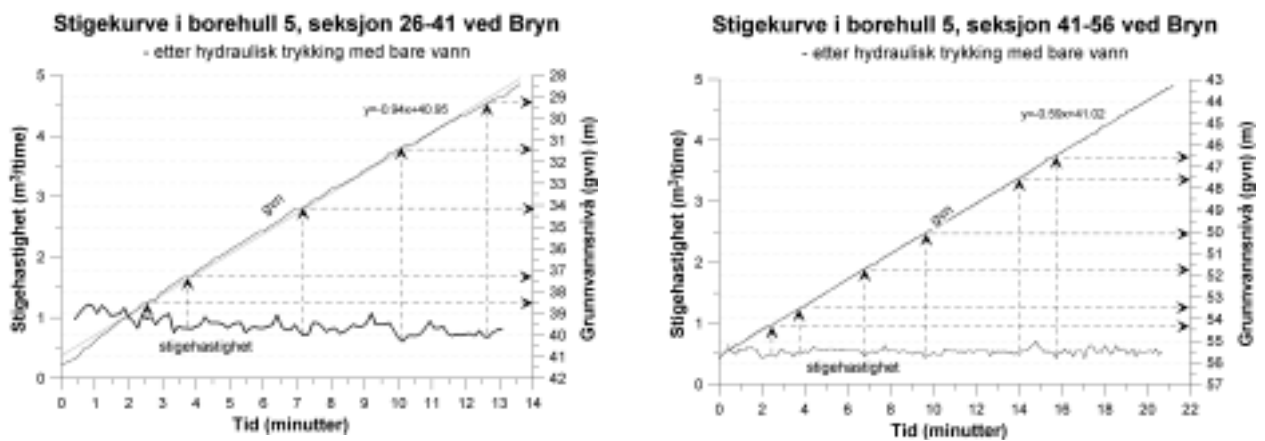
Figur 2. Stigekurver fra testpumping i borehull 2 ved Bryn etter hydraulisk trykking med vann.



Figur 3. Stigekurver fra testpumping i borehull 3 ved Bryn etter hydraulisk trykking med vann.

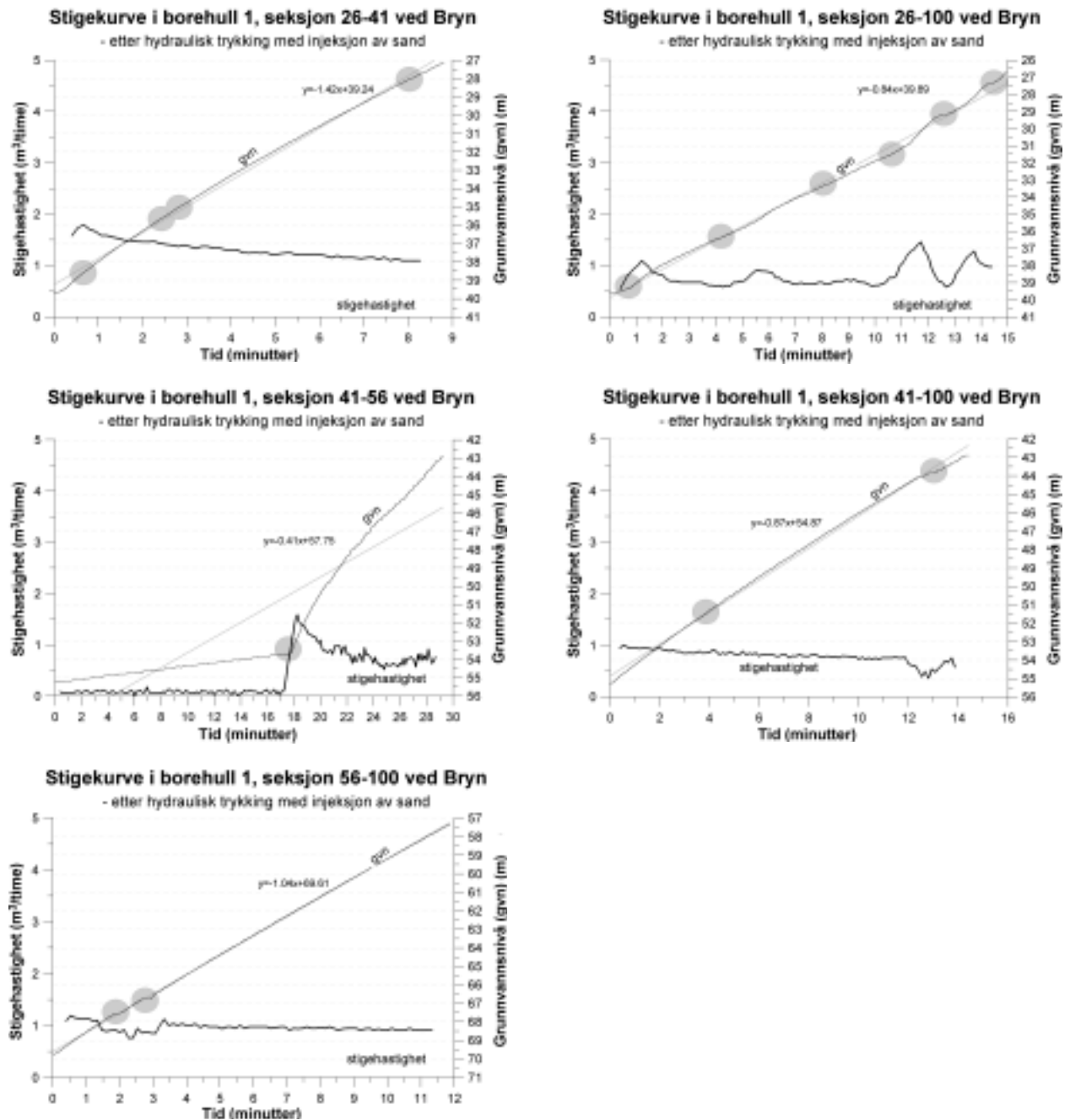


Figur 4. Stigekurver fra testpumping i borehull 4 ved Bryn etter hydraulisk trykking med vann.

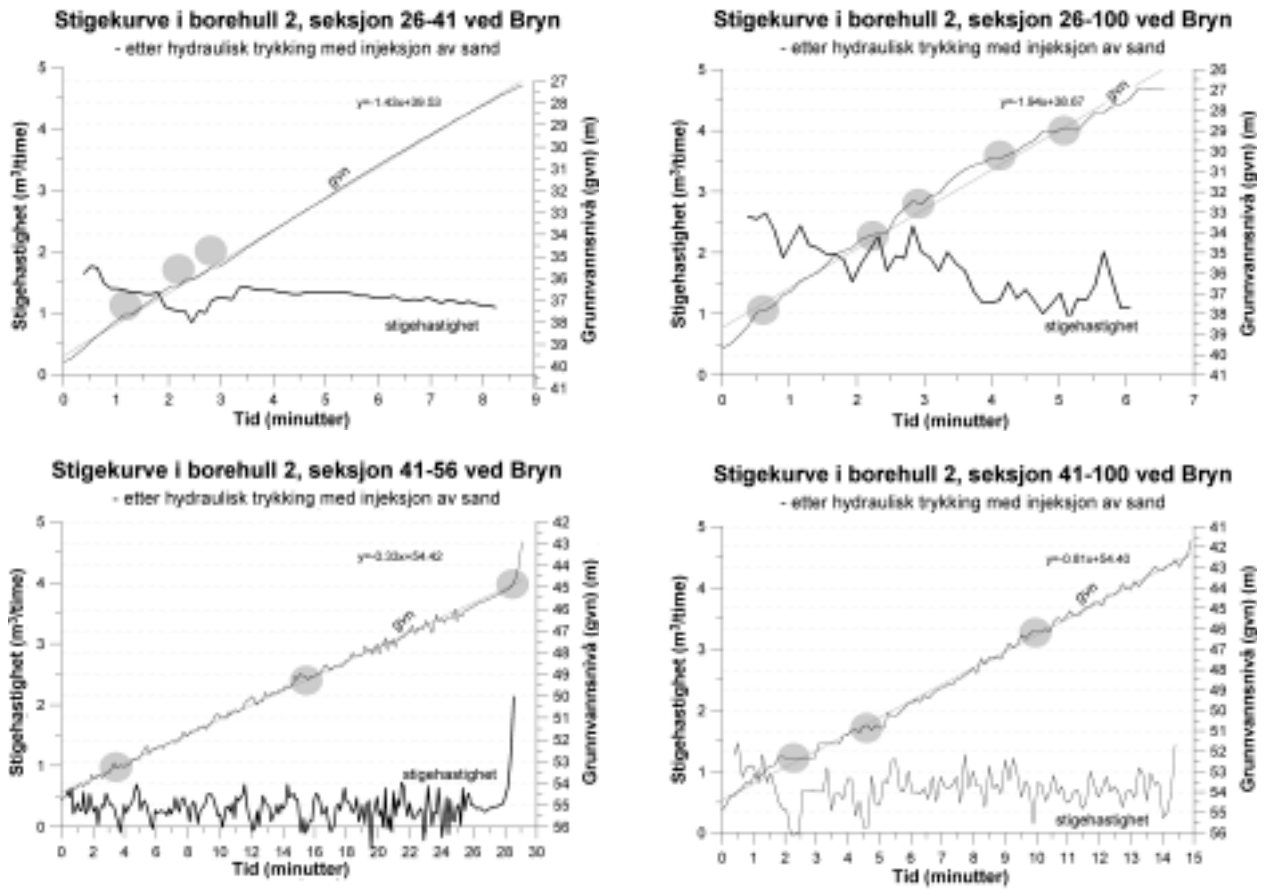


Figur 5. Stigekurver fra testpumping i borehull 5 ved Bryn etter hydraulisk trykking med vann.

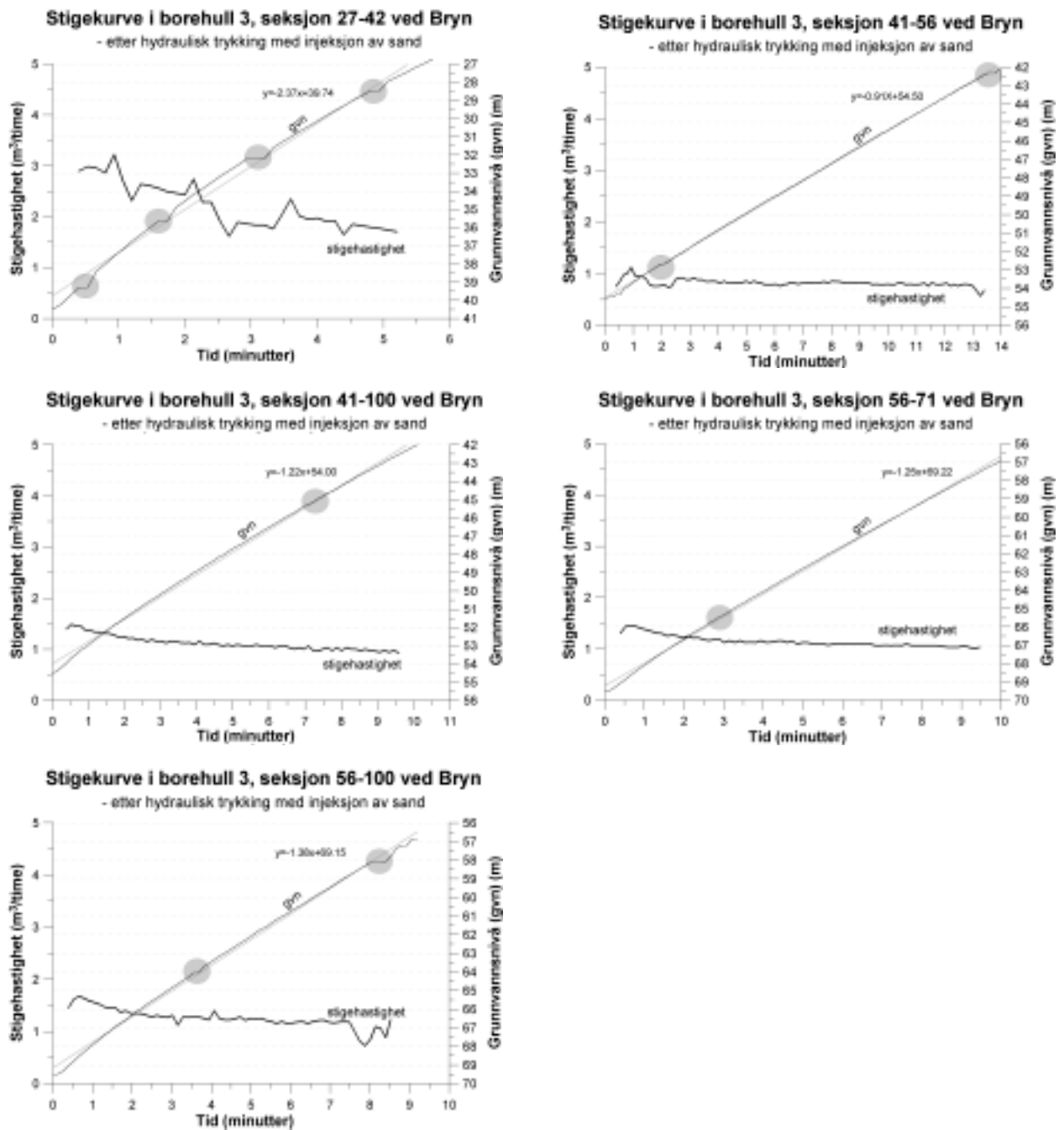
1.2 Testpumping etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand



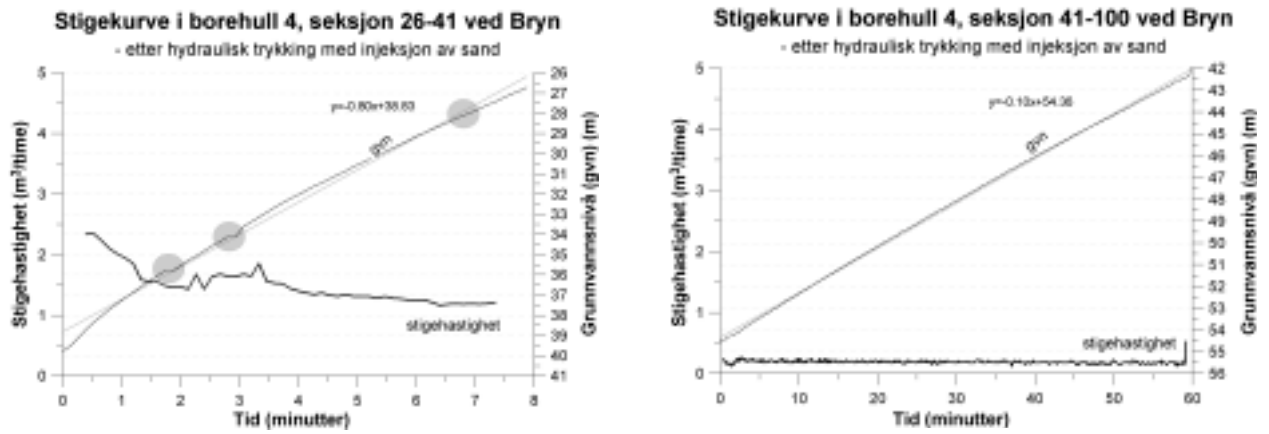
Figur 6. Stigekurver fra testpumping i borehull 1 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



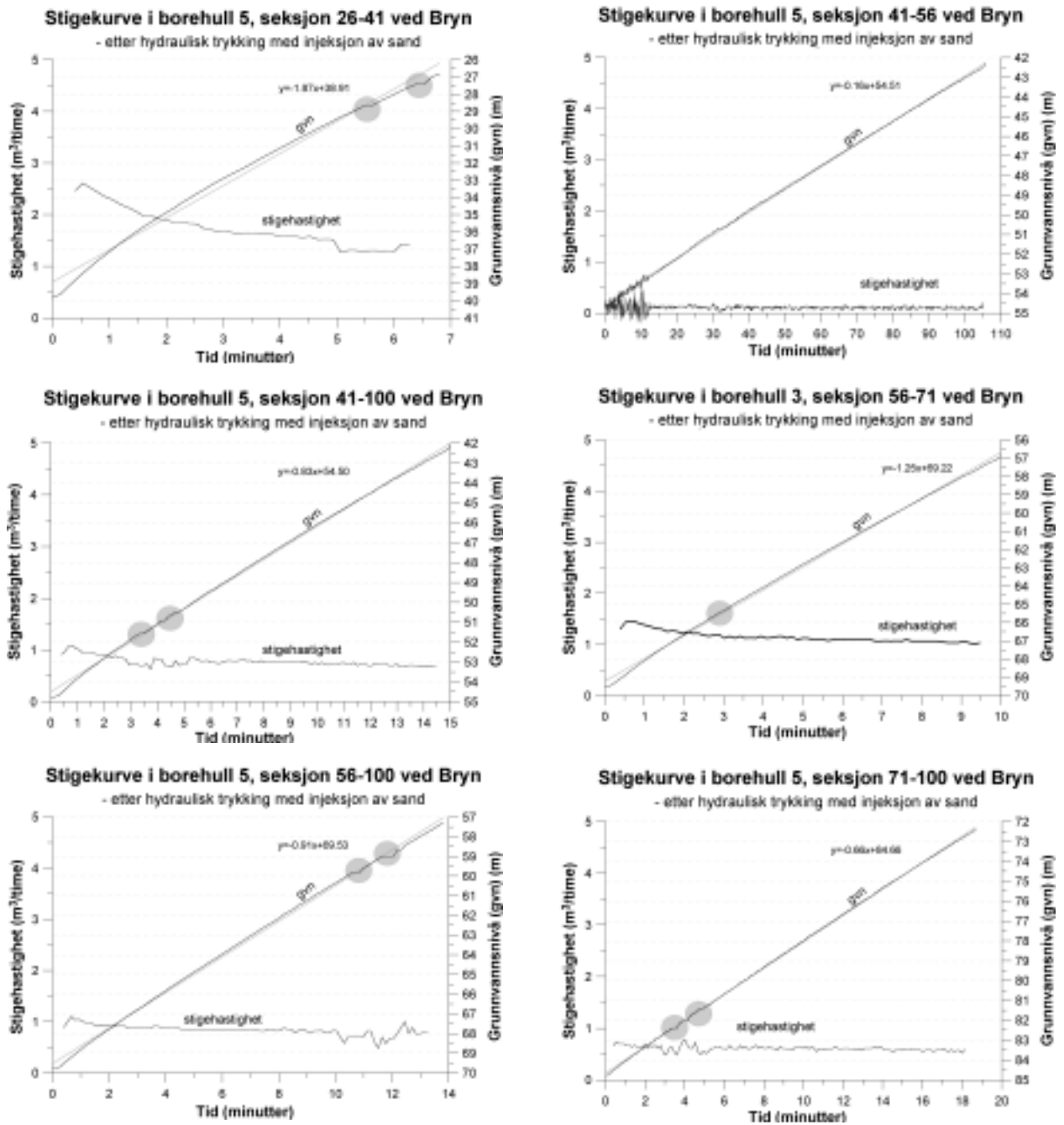
Figur 7. Stigekurver fra testpumping i borehull 2 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



Figur 8. Stigekurver fra testpumping i borehull 3 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



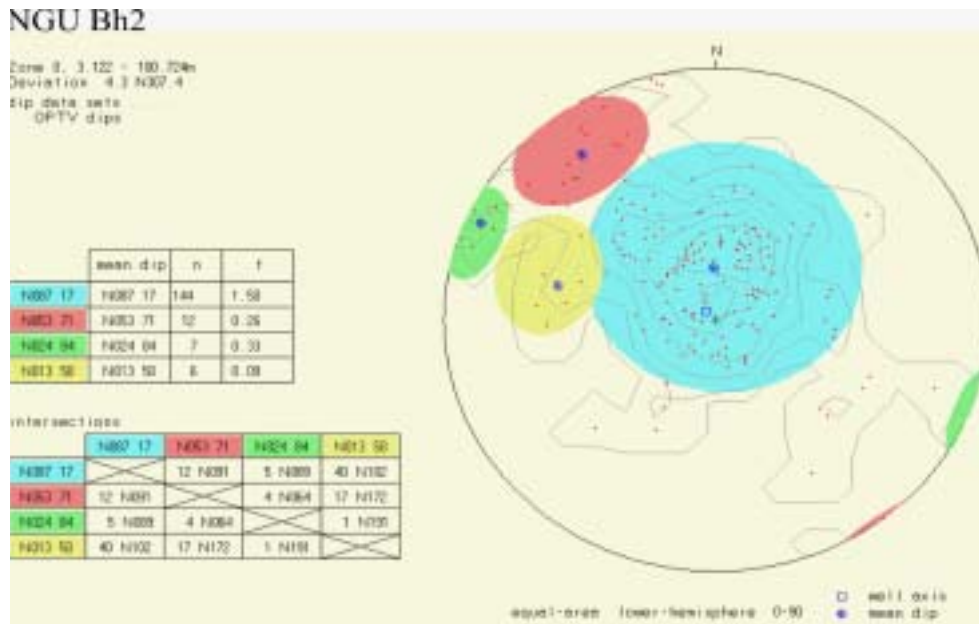
Figur 9. Stigekurver fra testpumping i borehull 4 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.



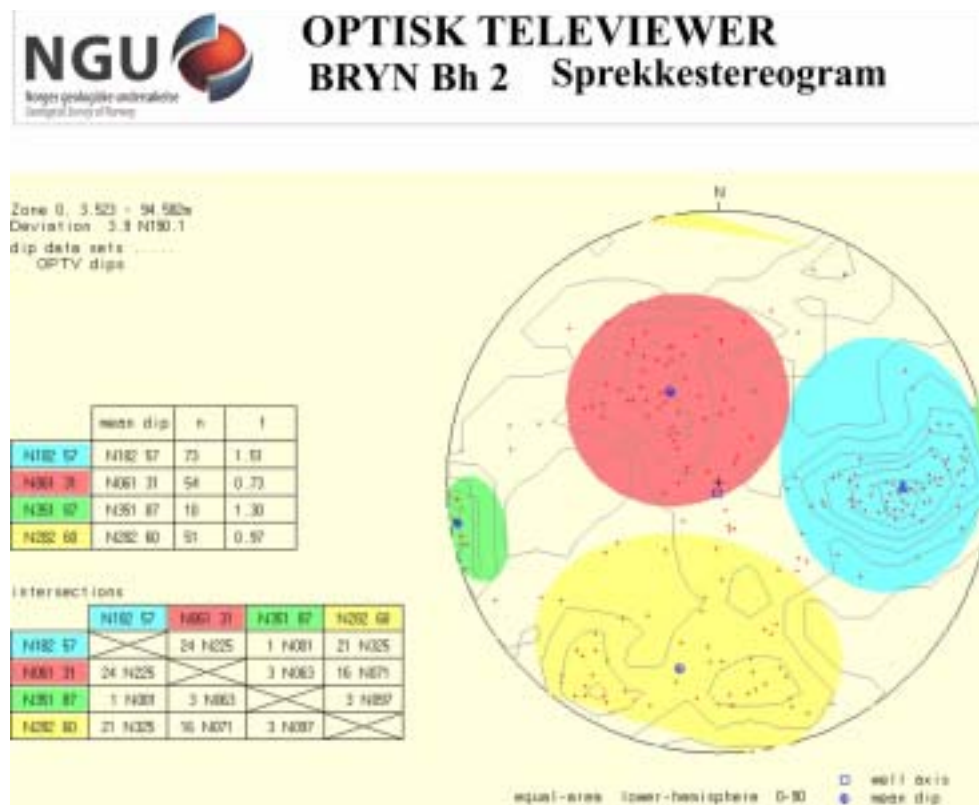
Figur 10. Stigekurver fra testpumping i borehull 5 ved Bryn etter hydraulisk trykking med injeksjon av sand.

2 Borehullenes oppsprekning fra optisk televiewer

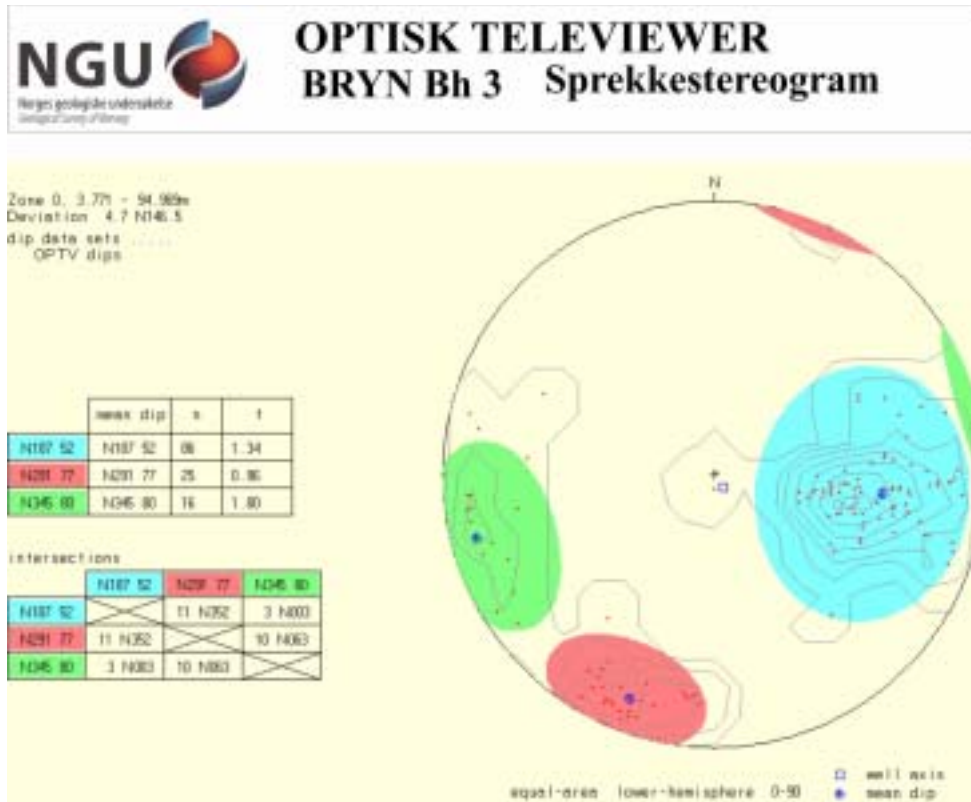
2.1 Sprekkestereogram



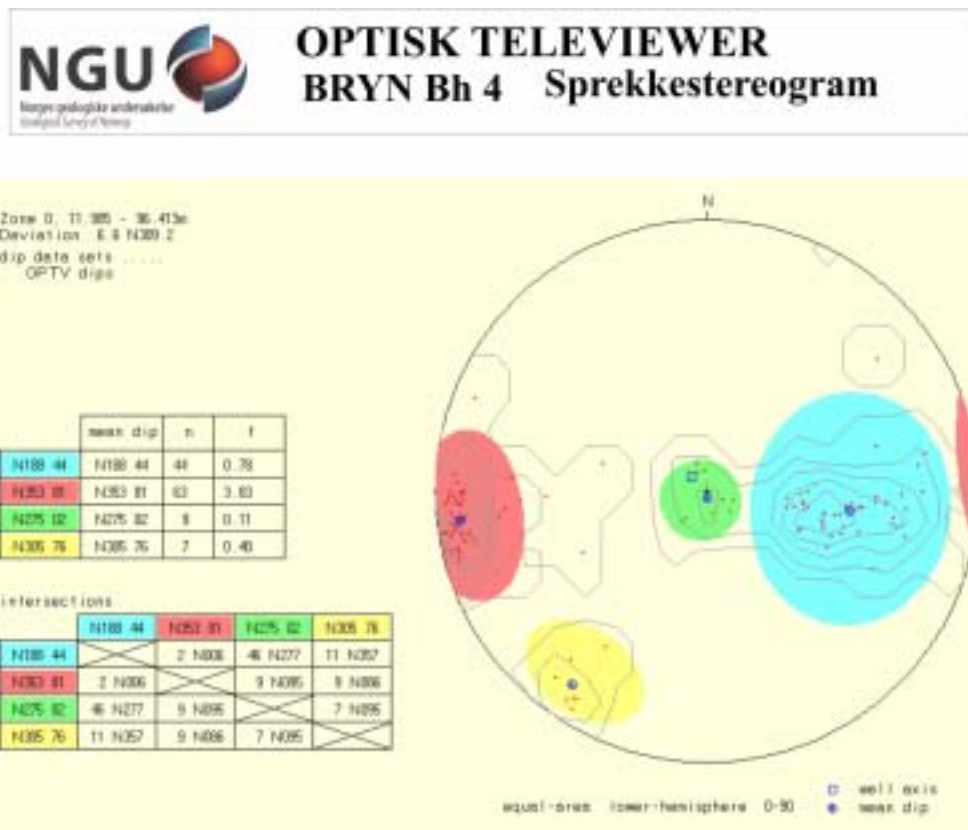
Figur 11. Sprekkestereogram for borehull 2 ved NGU Lade. Angitte farger representerer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekkereanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 17).



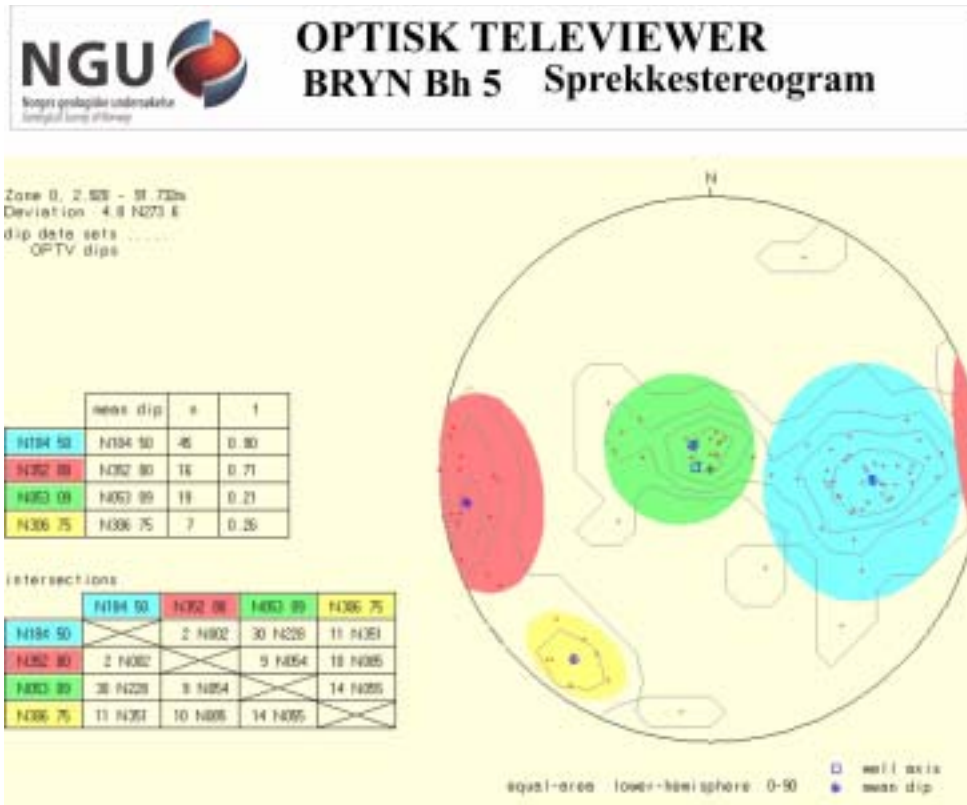
Figur 12. Sprekkestereogram for borehull 2 ved Bryn. Angitte farger representerer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekkereanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 18).



Figur 13. Sprekkestereogram for borehull 3 ved Bryn. Angitte farger representerer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekkeanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 19).

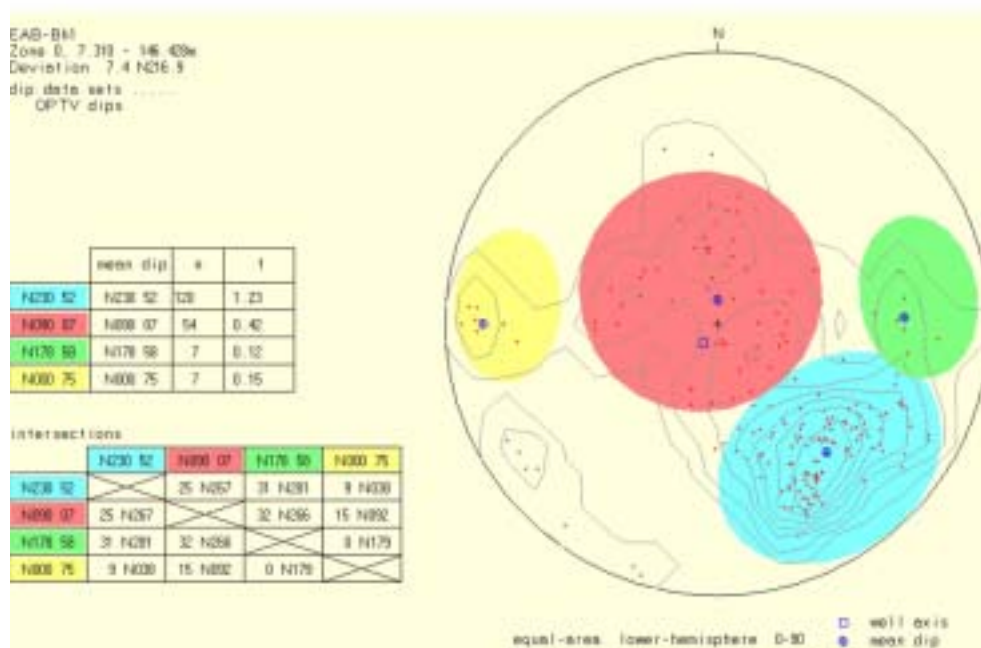


Figur 14. Sprekkestereogram for borehull 4 ved Bryn. Angitte farger representerer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekkeanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 20).



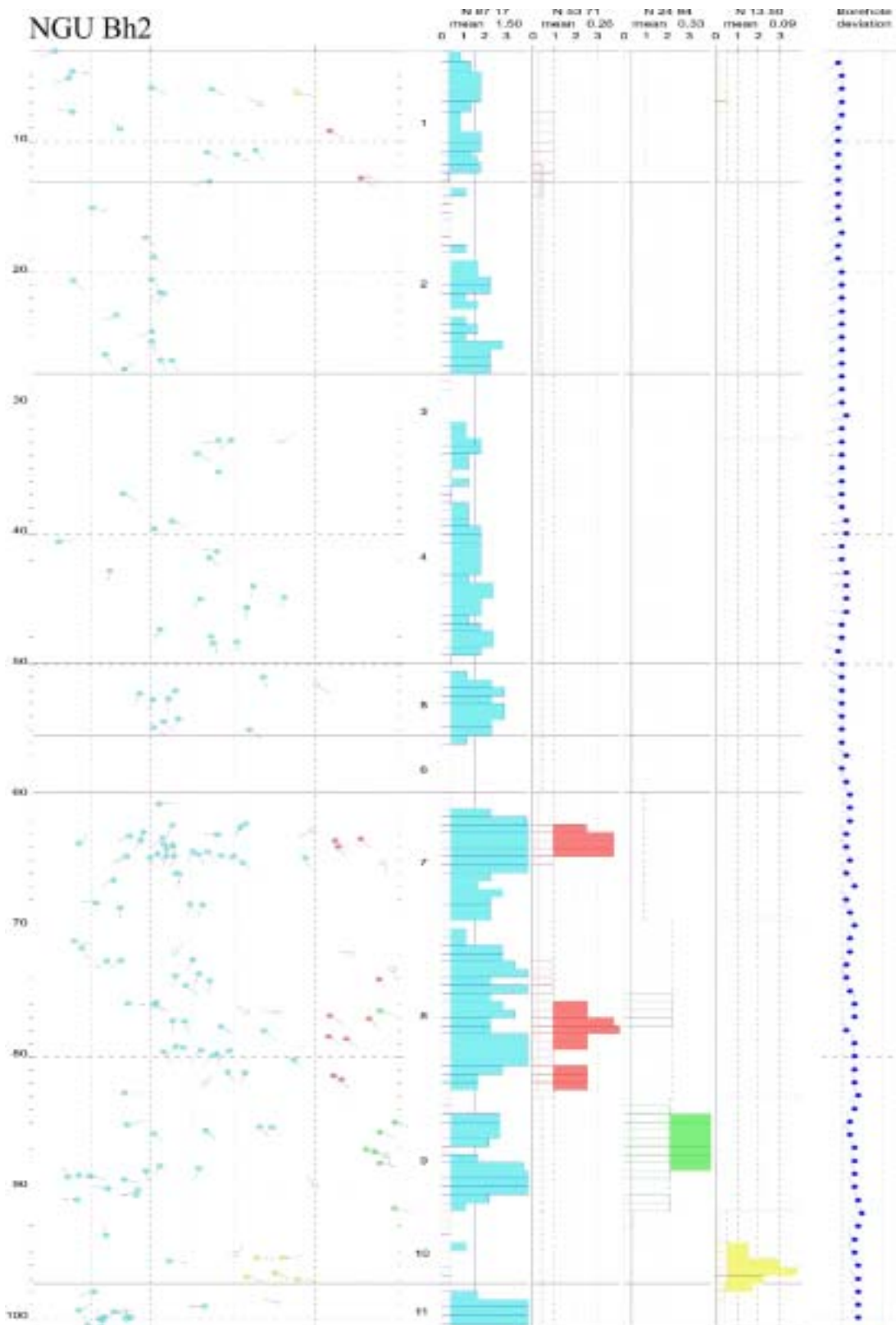
Figur 15. Sprekkestereogram for borehull 5 ved Bryn. Angitte farger representerer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekeanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 21).

EAB Bh 1

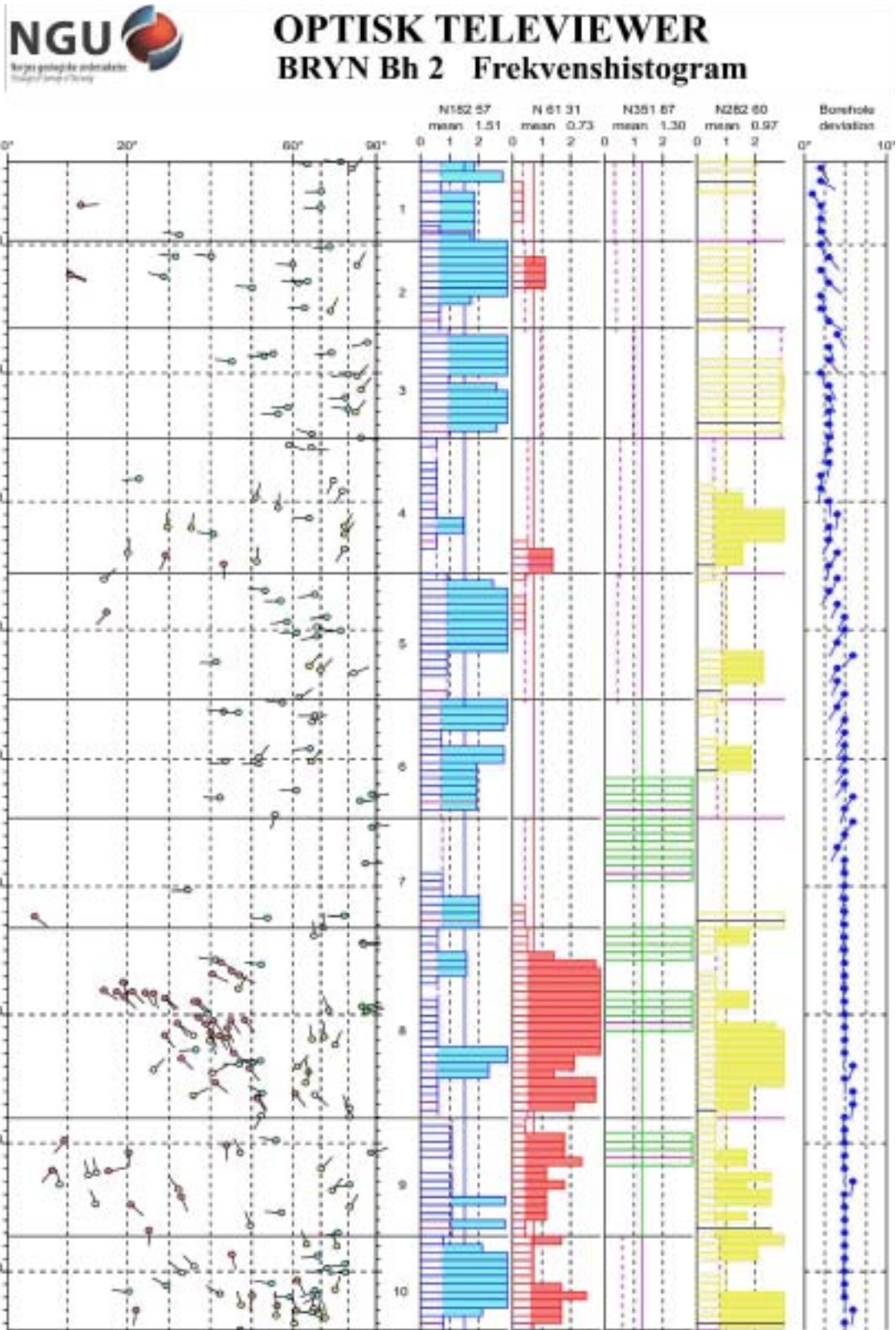


Figur 16. Sprekkestereogram for borehull 1 ved EAB. Angitte farger representerer hvert sitt sprekkesystem, og hører sammen med sprekeanalysen vist i frekvenshistogrammet (figur 22).

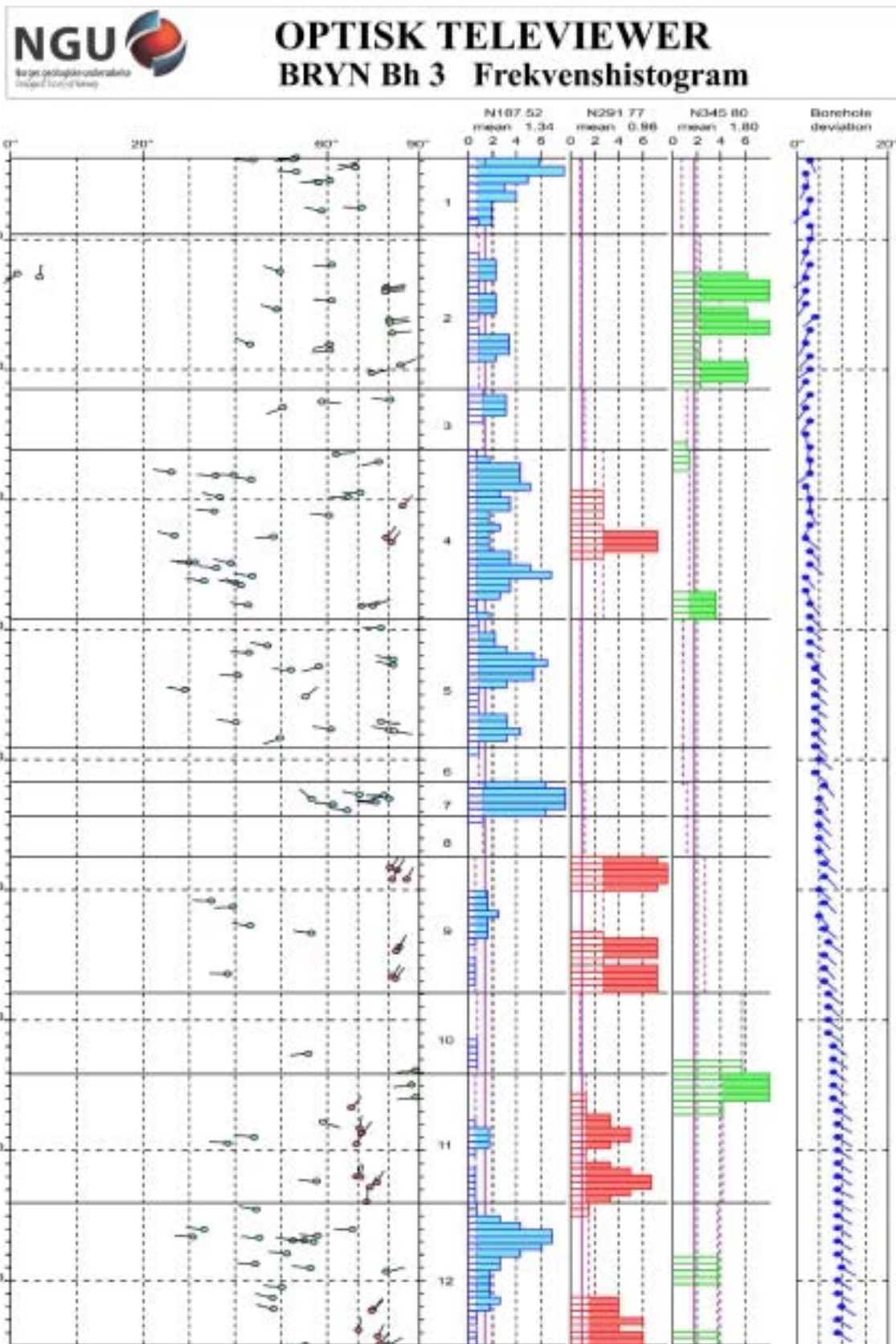
2.2 Frekvenshistogram



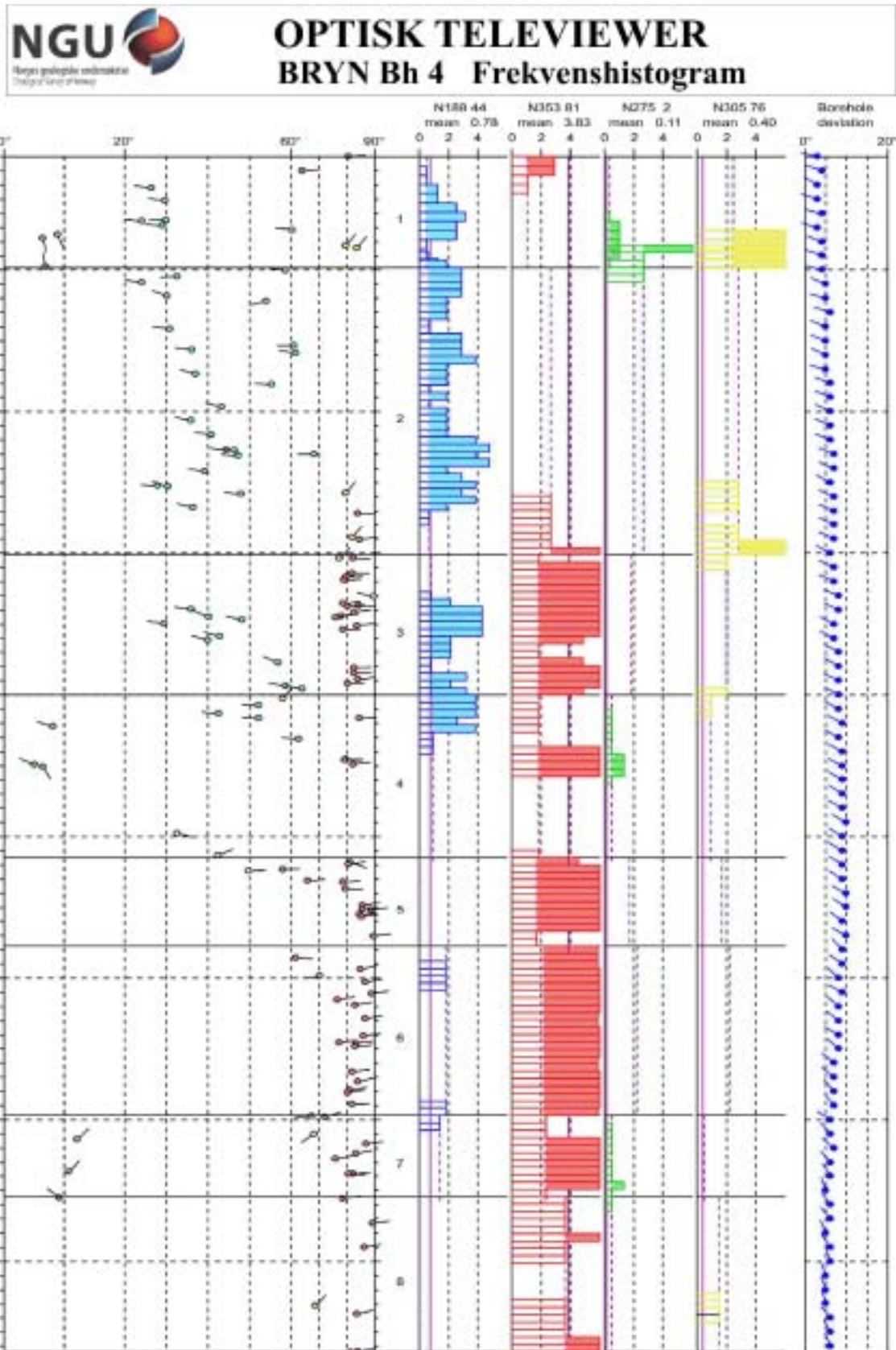
Figur 17. Frekvenshistogram for borehull 2 ved NGU Lade. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem og hører sammen med tilhørende sprekkestereogram (figur 11).



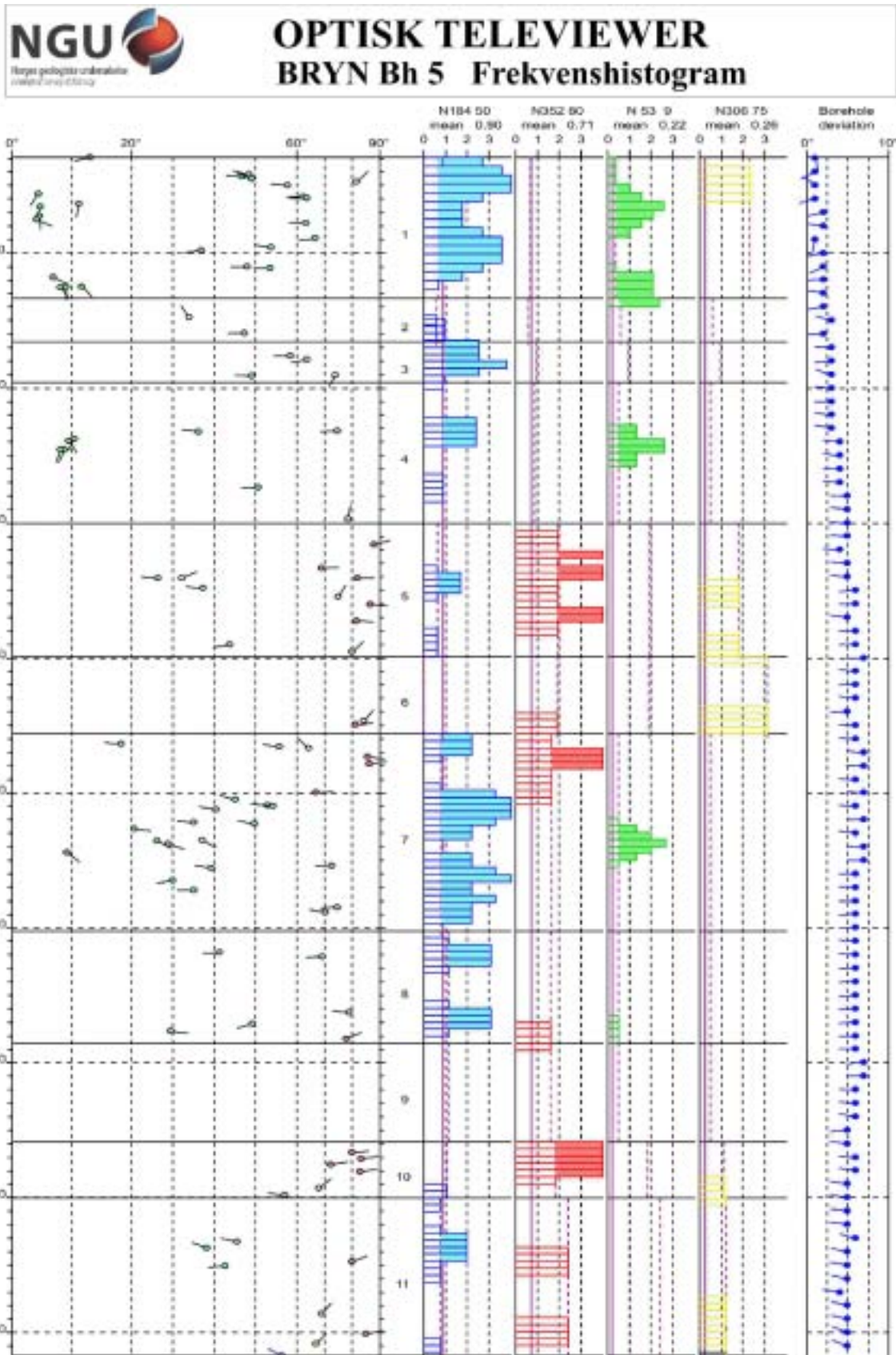
Figur 18. Frekvenshistogram for borehull 2 ved Bryn. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem og hører sammen med tilhørende sprekkestereogram (figur 11)..



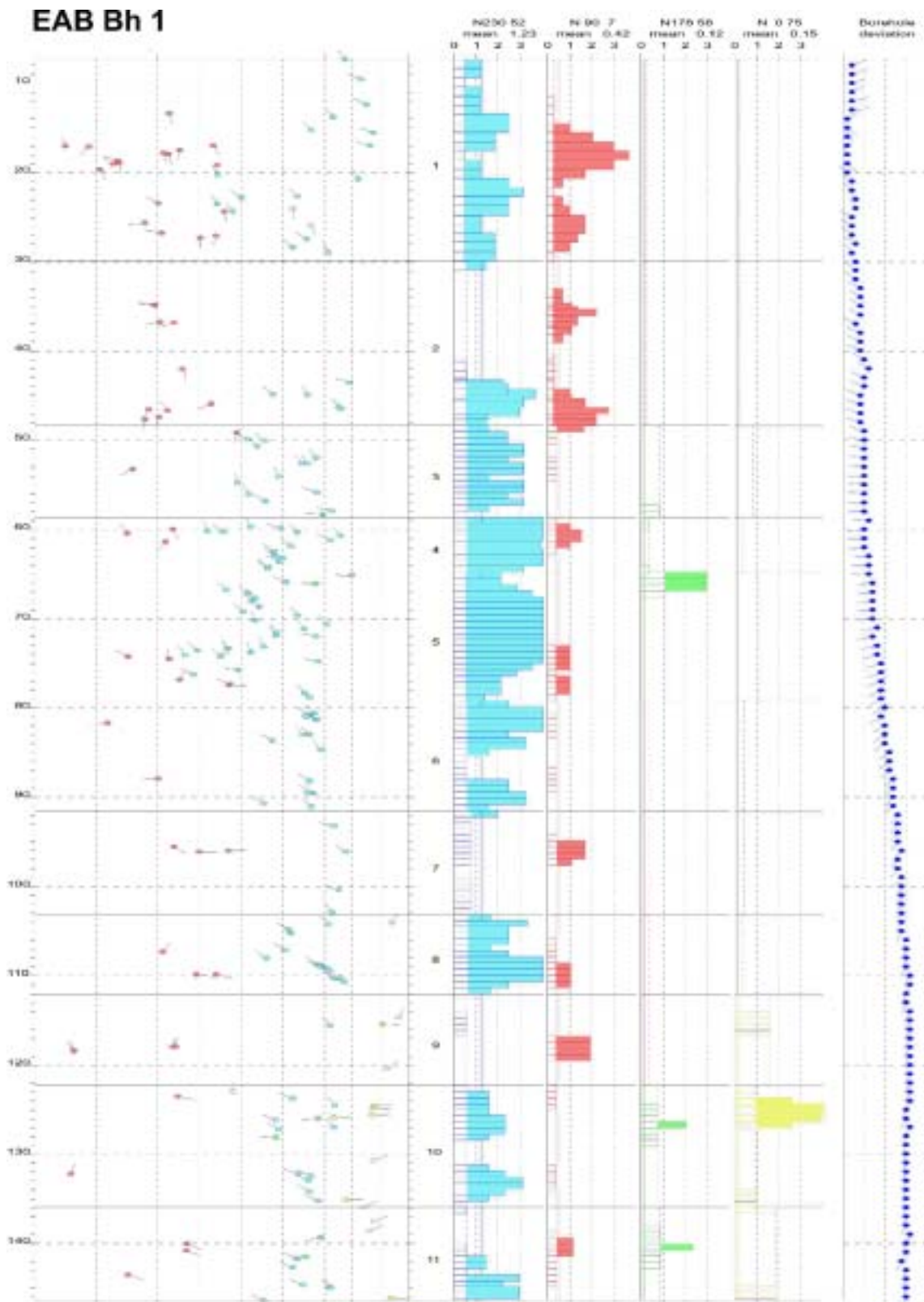
Figur 19. Frekvenshistogram for borehull 3 ved Bryn. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem og hører sammen med tilhørende sprekkestereogram (figur 13)..



Figur 20. Frekvenshistogram for borehull 4 ved Bryn. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem og hører sammen med tilhørende sprekkestereogram (figur 14).



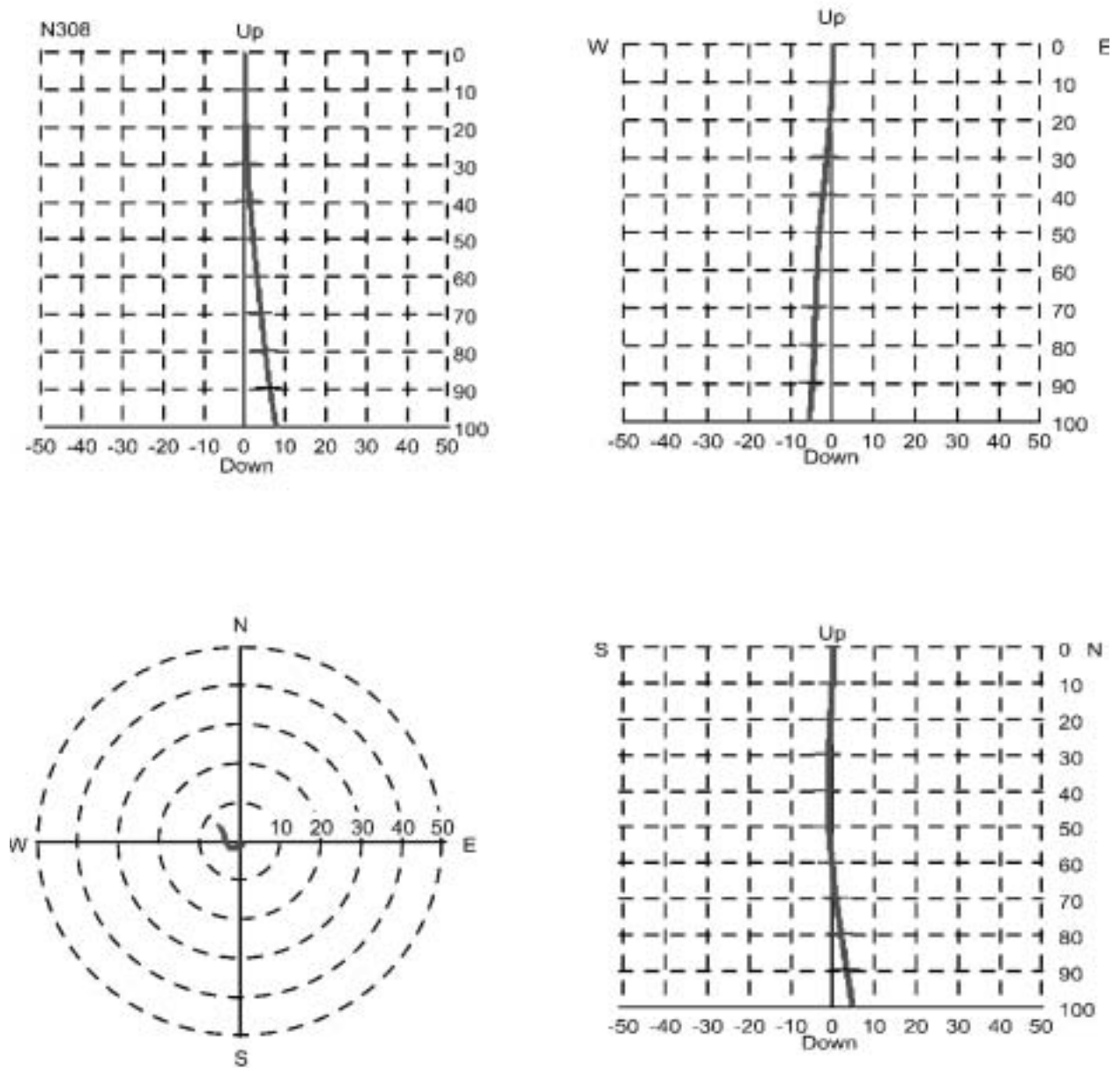
Figur 21. Frekvenshistogram for borehull 5 ved Bryn. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem og hører sammen med tilhørende sprekkestereogram (figur 15).



Figur 22. Frekvenshistogram for borehull 1 ved EAB. De forskjellige fargene angir hvert sitt sprekkesystem og hører sammen med tilhørende sprekkestereogram (figur 16).

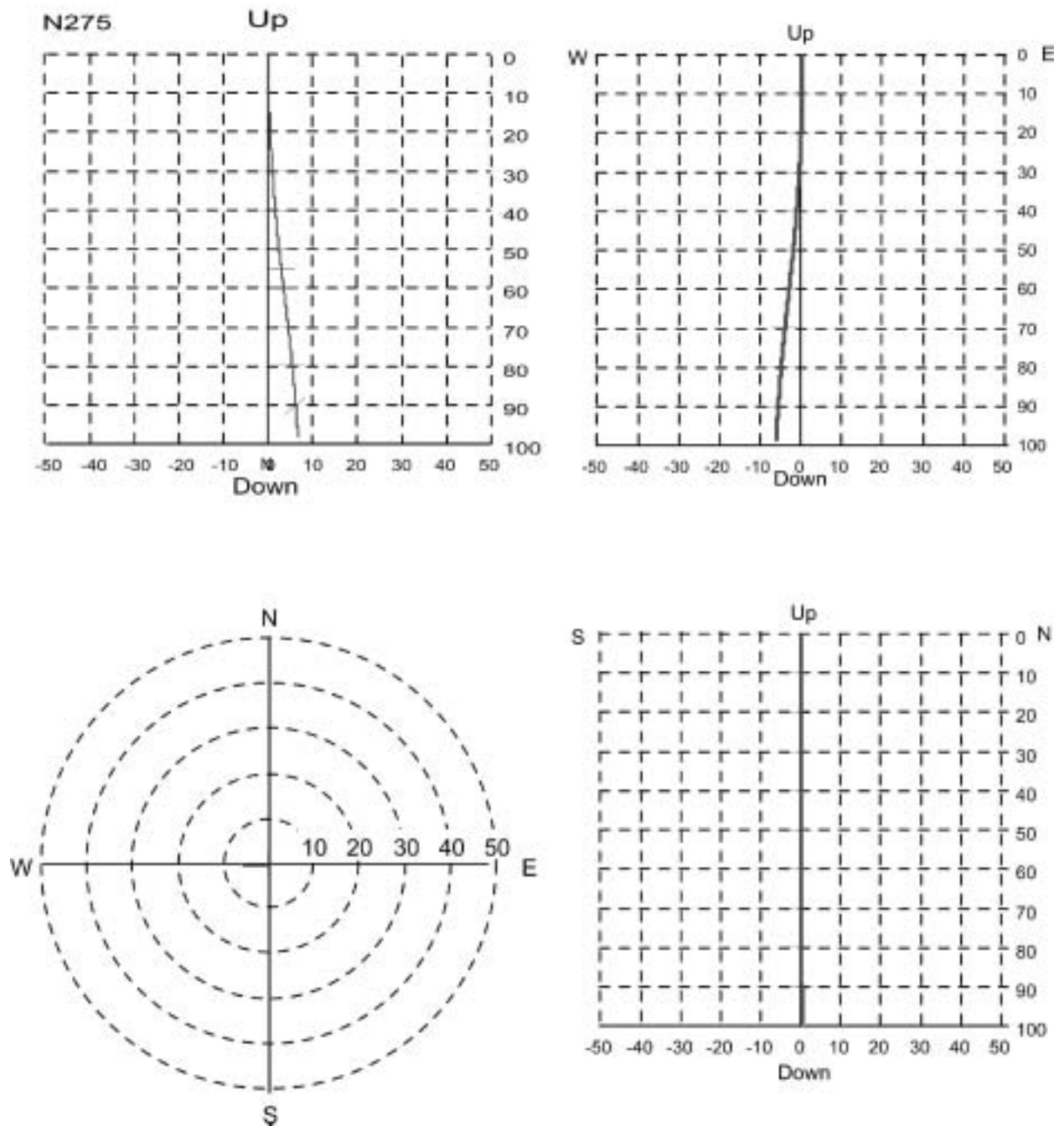
3 Borehullsavvik

Bh NGU2



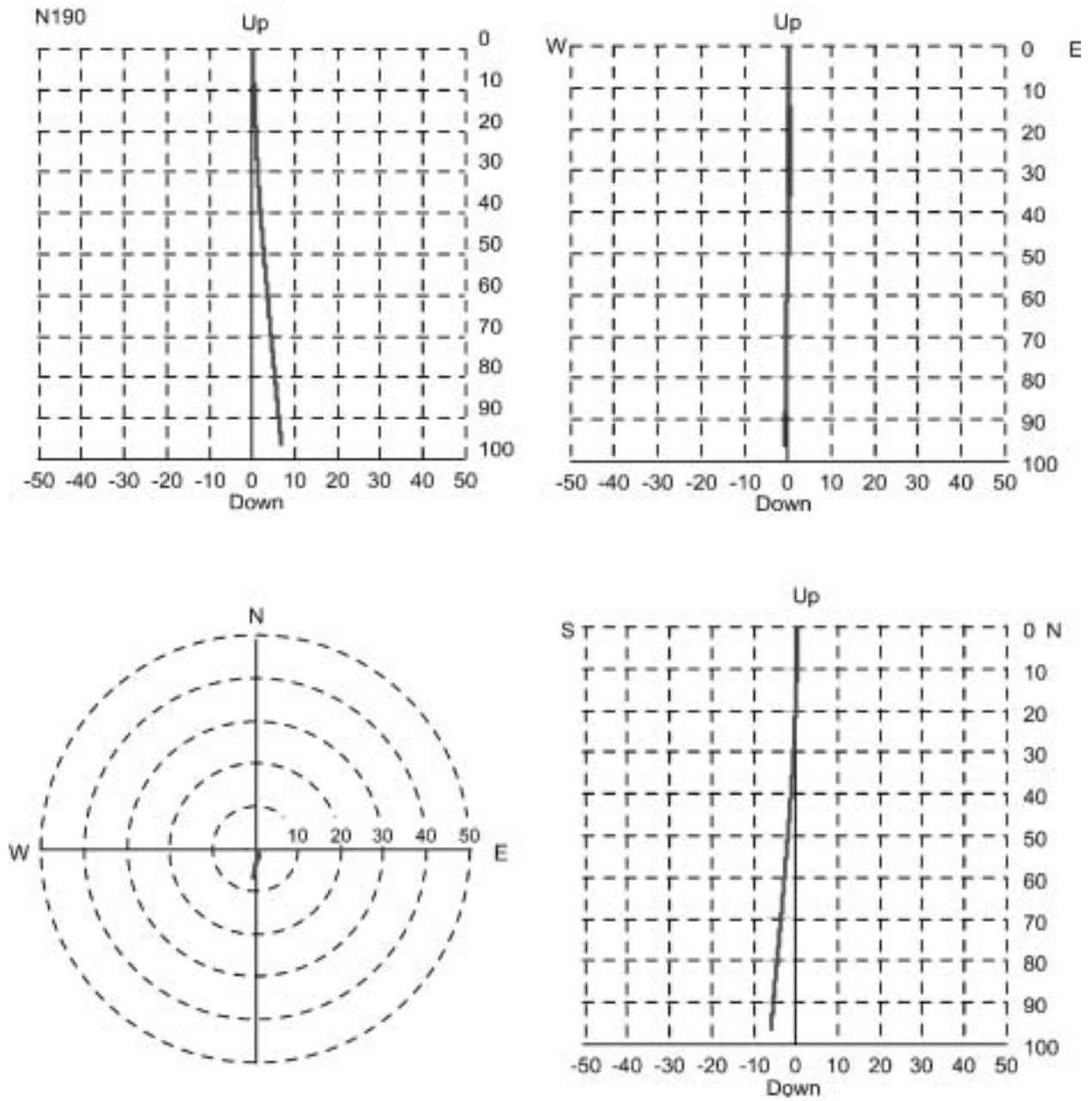
Figur 23. Borehullsavvik for borehull 2 ved NGU Lade.

Bryn Bh 1



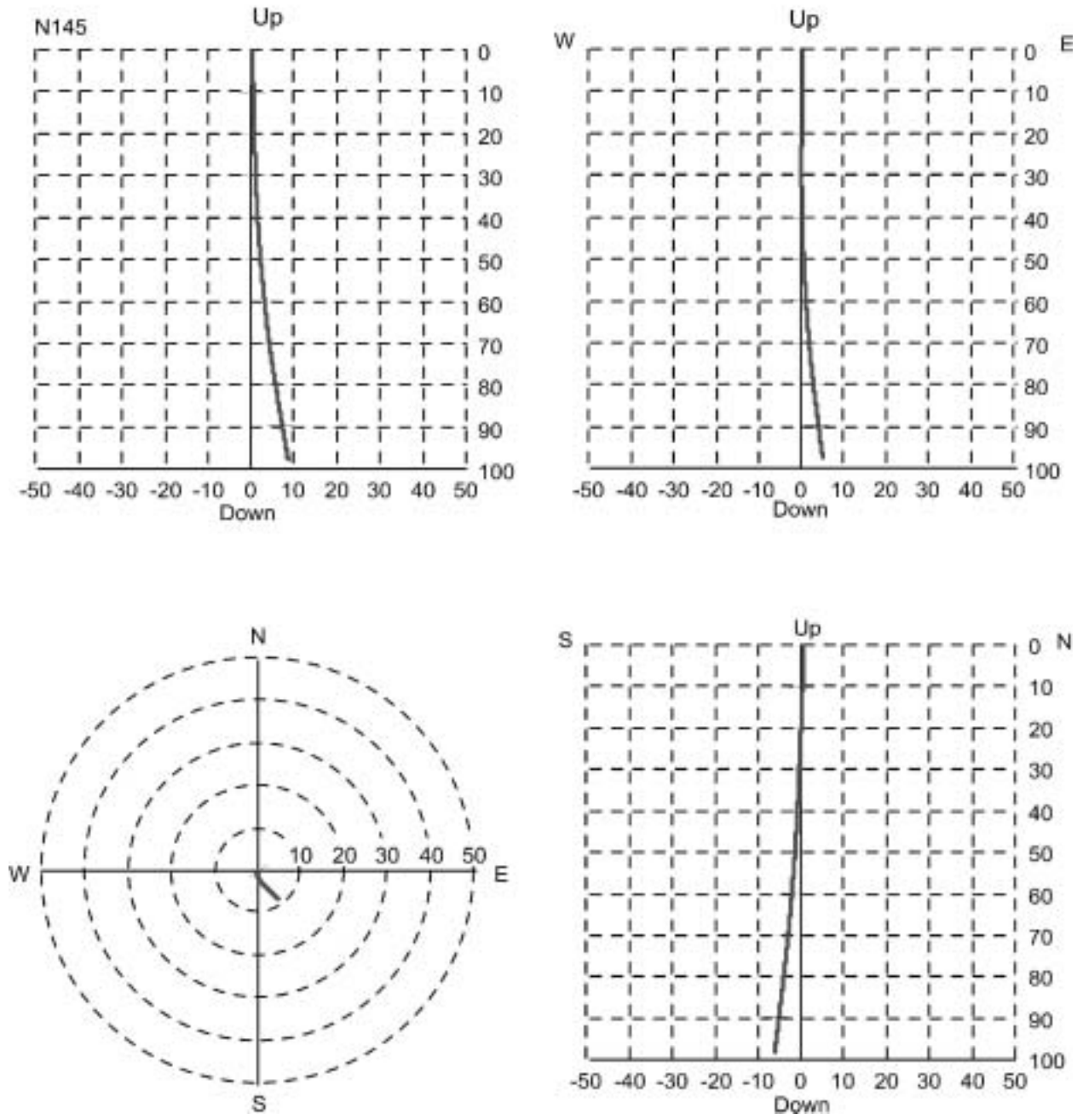
Figur 24. Borehullsavvik for borehull 1 ved Bryn.

Bryn Bh 2



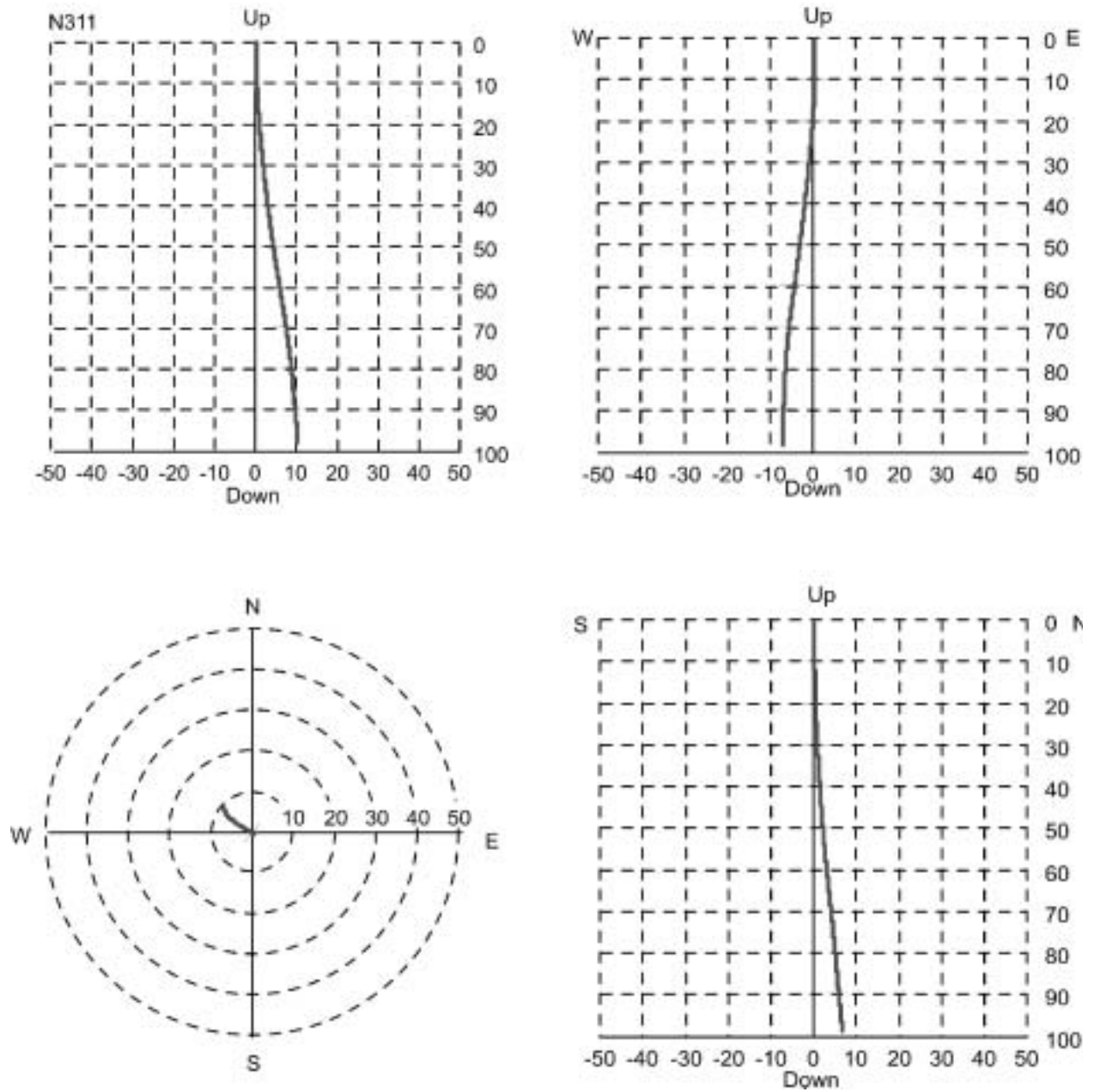
Figur 25. Borehullsavvik for borehull 2 ved Bryn.

Bryn Bh 3



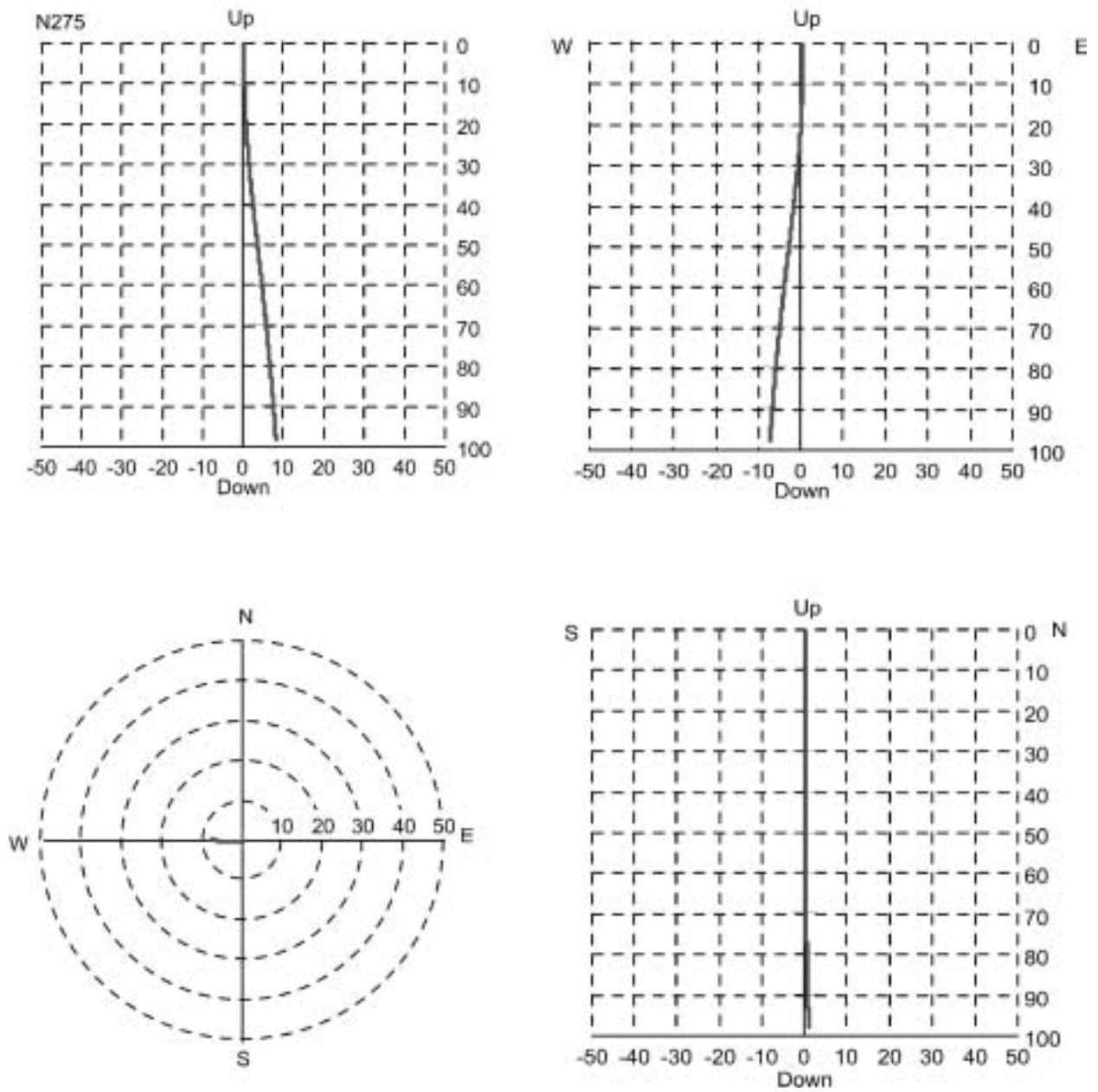
Figur 26. Borehullsavvik for borehull 3 ved Bryn.

Bryn Bh 4



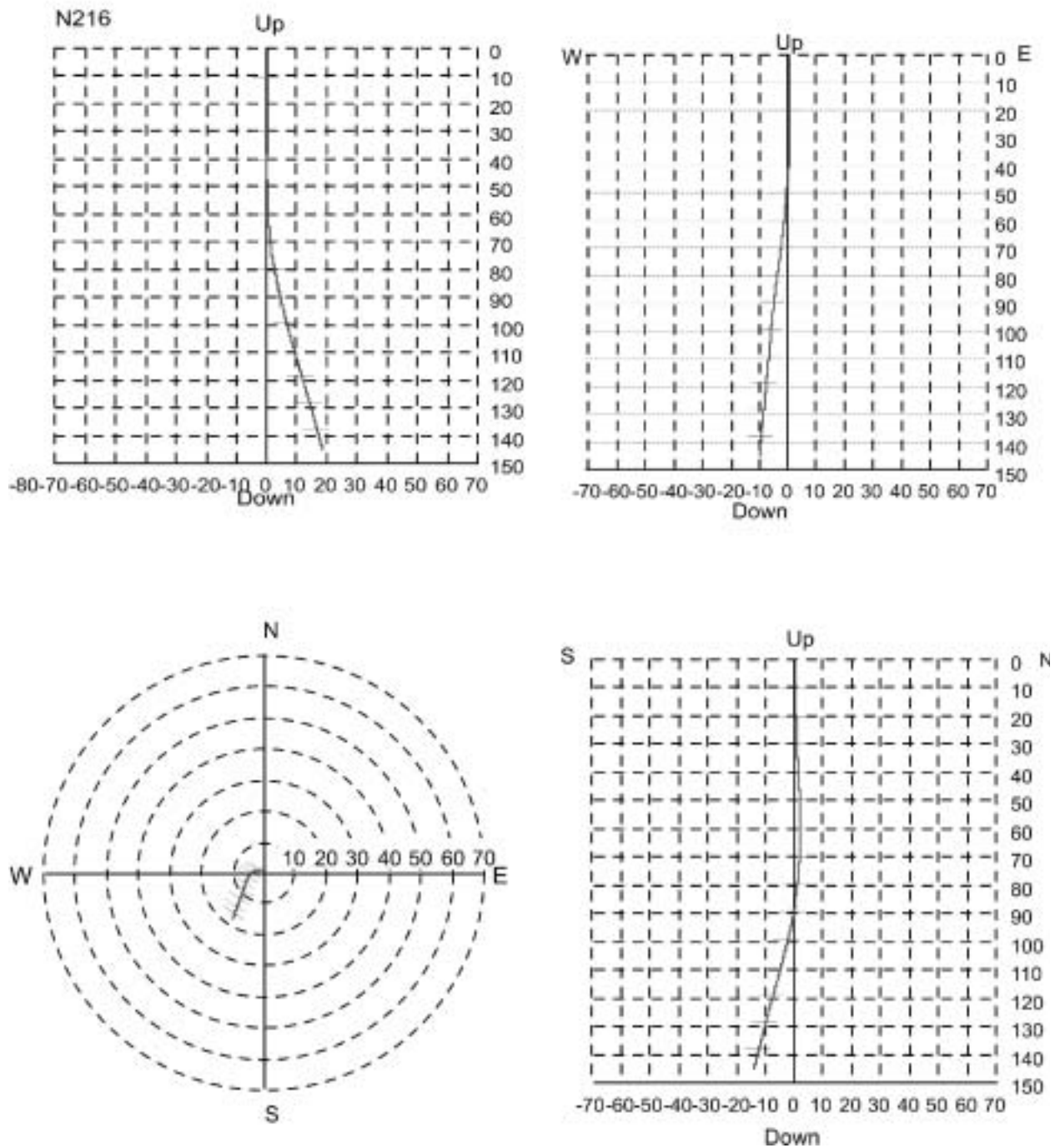
Figur 27. Borehullsavvik for borehull 4 ved Bryn.

Bryn Bh 5



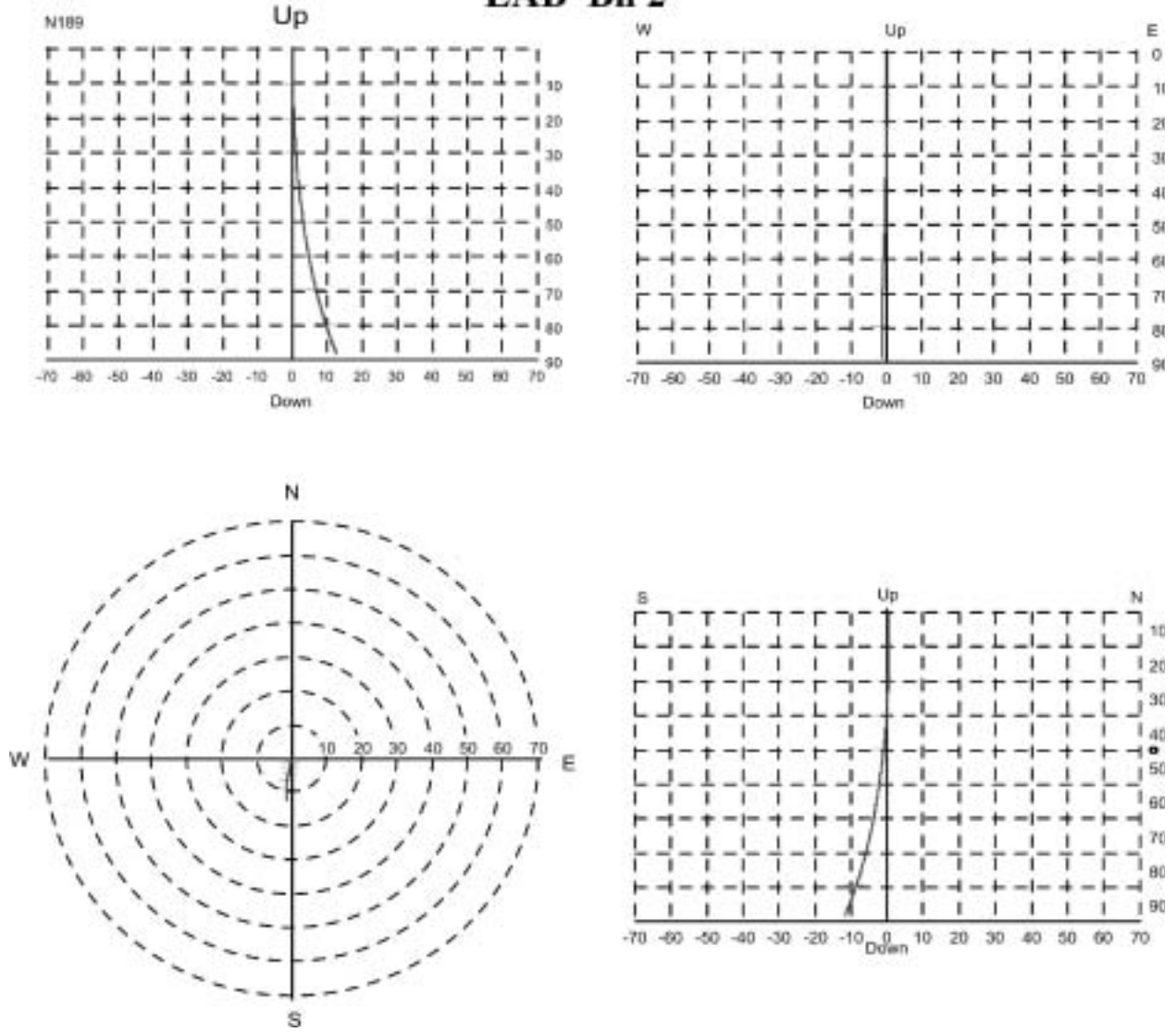
Figur 28. Borehullsavvik for borehull 5 ved Bryn.

EAB Bh 1



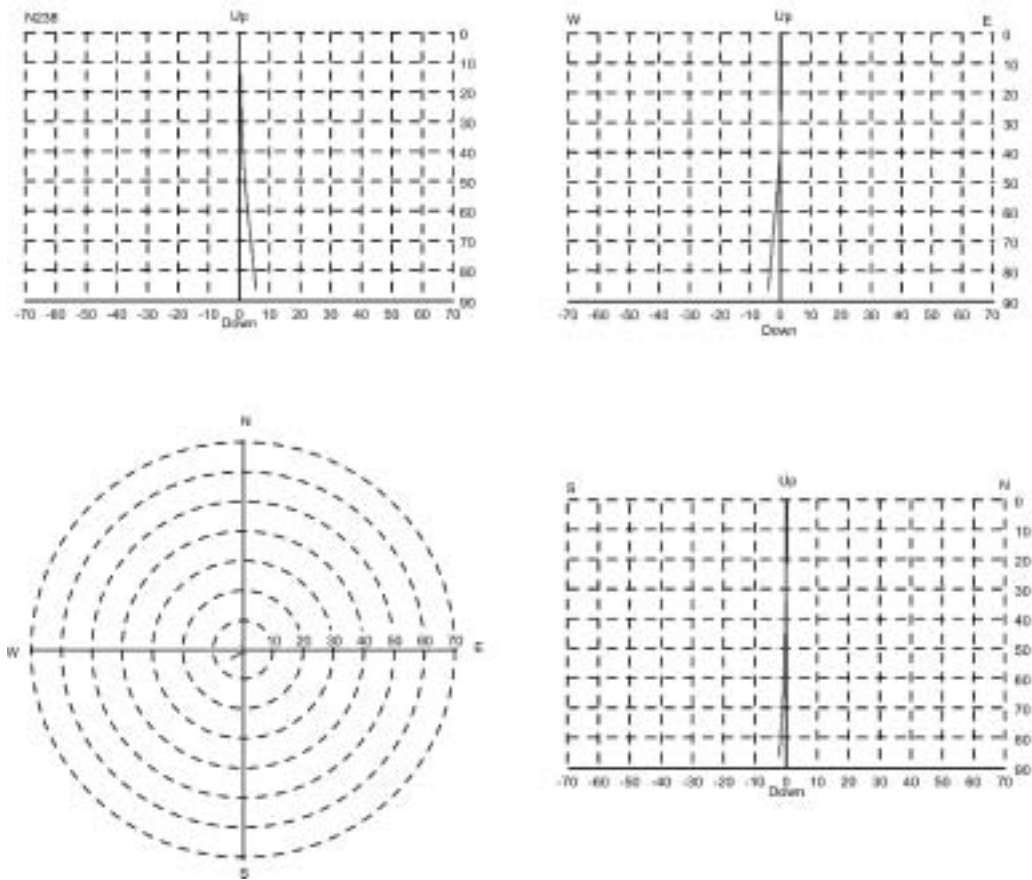
Figur 29. Borehullsavvik for borehull 1 ved EAB.

EAB Bh 2



Figur 30. Borehullsavvik for borehull 2 ved EAB.

EAB Bh 3



Figur 31. Borehullsavvik for borehull 3 ved EAB.

TEKSTBILAG

1. Prosjektbeskrivelse:

Grunnvarme fra fast fjell - økt energiuttak ved hydraulisk trykking av borebrønner



GRUNNVARME FRA FAST FJELL - ØKT ENERGIUTTAK VED HYDRAULISK TRYKKNING AV BOREBRØNNER

Prosjektbeskrivelse

Utarbeidet av Helge Skarphagen og Bernt Olav Hilmo, Norges geologiske undersøkelse
Jan Håbrekke, Brønnteknologiutvikling AS

INNHold

INNLEDNING	2
Formål	2
Bakgrunn	2
DAGENS PRAKSIS FOR UTTAK AV GRUNNVARME	2
GEOLOGIENS BETYDNING FOR UTTAK AV GRUNNVARME	3
HYDRAULISK TRYKKNING FOR ØKT ENERGIUTTAK	4
Metodebeskrivelse	4
Utredning av hvordan geologien innvirker på hydraulisk trykking	5
Utvikling og utprøving av utstyr og metodikk for hydraulisk trykking	5
Produktets fortrinn og potensiale	6
Bygging og uttesting av demonstrasjonsanlegg	6
Virkning av hydraulisk trykking på omgivelsene	7
Annet nødvendig utstyr	7
Dimensjonering av kollektor og sirkulasjonspumpe	7
Nytteverdi	8
Risikofaktorer (utstysutvikling)	8
Formidling fra prosjektet	9
Tidsplan med kostnader	10
Andre effekter av prosjektet	10
REGNEEKSEMPLER PÅ EFfEKT AV HYDRAULISK TRYKKNING	10
LITTERATUR	11

Vedlagte figurer:

- 1: Prinsippskisse som viser hydraulisk trykking av to borhull med bruk av «propping agents».
- 2: Prinsippskisse som viser hydraulisk trykking av flere borhull
- 3: Eksempel på kostnadsfordeling for et grunnvarmeanlegg.

INNLEDNING

Formål

Utvikle utstyr og metoder som gir reduserte kostnader for bergvarmebaserte varmepumpeanlegg. Hovedpoenget er gjennom spesielle teknikker innen hydraulisk trykking å lage større varmeveksleflater i fjellet som igjen gir muligheter for større energiuttak pr. brønn.

Bakgrunn

Økte strømpriser og stadig sterkere krav om *ren* energi nødvendiggjør økt satsing på fornybare energikilder. Energiuttak fra grunnen er en velkjent teknologi, men på grunn av lave strømpriser er ikke denne metoden til oppvarming så mye brukt her til lands som i våre naboland. I tillegg til rene oppvarmingsformål kan energi fra grunnen også benyttes til kjøleformål og forvarming/avkjøling av luften i ventilasjonsanlegg.

For rene kjøleformål rapporteres det om borhullsbaserte systemer som har energikostnader på 2-3 øre/kW og som til og med har lavere investeringskostnader enn konvensjonelle løsninger. Svenske Telia satser derfor på denne teknologien til å kjøle telefonsentralene sine.

Direkteveksling med grunntemperert væske i tilknytning til friskluftinntak er et fremtidig viktig enøktiltak. Markedet for en slik teknologi vil som følge av krav til godt inneklima kunne bli stort.

Metoden kan kort beskrives ved at grunnen brukes til forvarming av luften i perioder med minusgrader og til avkjøling av luften når innetemperaturen kommer over ønsket nivå. På denne måten sparer man energi som ellers ville blitt brukt på oppvarming/avkjøling. Systemløsningen er nå tatt i bruk flere steder i Sverige. (Andersson, O, 1996)

Fordelene med å hente energi fra undergrunnen er først og fremst at temperaturen er relativt stabil gjennom året. Dette medfører at varmepumpen som benyttes kan dimensjoneres for en stabil og relativt høy kollektortemperatur, noe som gir bedre driftsøkonomi og høy virkningsgrad, særlig ved lave utetemperaturer.

En annen fordel er at energikilden finns rett under bygningen, noe som begrenser kostnader til strømledninger og energitap ved overføring.

Økt bruk av grunnvarme til oppvarming/avkjøling, som står for ca. 60 -70 % av det alminnelige norske strømforbruket (unntatt industri), vil kunne frigjøre elektrisk kraft til andre bruksområder og til eksport.

DAGENS PRAKSIS FOR UTTAK AV GRUNNVARME

Opp-pumpet grunnvann er en god energibærer, men dessverre er det relativt ofte at varmevekslere og armatur tilstoppes av slam, samt kjemiske og bakteriologiske utfellinger. Korrosjon kan også være et problem. Dette har ført til problemer, særlig i små anlegg, og metoden har derfor kommet i et dårlig lys. Hydrogeologiske forundersøkelser og bruk av grunnvannskompetanse kunne i mange tilfeller begrenset disse problemene.

Det er i dag derfor vanlig å benytte et indirekte system med en lukket krets med helsveidde plastrør i brønnen for å unngå driftsforstyrrelser. Denne løsningen gir mindre pumpearbeid, men man får et temperaturtap som følge av termisk overgangsmotstand med litt dårligere effektfaktor på varmepumpen.

Den største ulempen med lukkede kollektorer er at grunnvannet i brønnen ikke blir skiftet ut raskt nok av den naturlige grunnvannsbevegelsen. Dette medfører at vannet fryser slik at energiuttaket fra strømmende vann forsvinner. Teknologisk skjer det en stor utvikling på dette området, både innen installasjonene i brønnen og innen brønnboring. Dette gjør at prisene på ferdige anlegg forventes redusert.

Årsaken til at trykking av energibrønner ikke har blitt utviklet til praktisk bruk antas skyldes at innsatsen til nå har blitt rettet mot elektrisitetsproduksjon i "hot dry rock anlegg" (NAVF/ NGU Geotermisk energi 1986). Dette har til nå vist for dårlig lønnsomhet, noe som hovedsakelig skyldes dyre dype borer og problemer med høyt innhold av løste salter som feller ut. Sesonglagring av varme har det også vært arbeidet mye med, spesielt i Sverige. Grunnvannsbevegelse gjennom lageret har vært uønsket og er derfor forsøkt stoppet med injeksjon.

Andre grunner for at forskning og utvikling på dette fagfeltet har vært og er noe laber kan være følgende:

- Grunnenergien er under et hvert hus, den er ikke et konkret produkt eller gjenstand som kan patenteres og selges, men et konsept. Det er derfor små økonomiske interesser knyttet til utvikling av slike løsninger.
- Brønnboring og hydraulisk trykking drives av relativt små firmaer som ikke har ressurser til utviklingsarbeid.
- Varmepumpeprodusentene har naturlig nok ikke så stor kompetanse på hydrogeologi og bergmekanikk. De har derfor heller ikke sett mulighetene som ligger i bruk av geologisk kunnskap til å redusere kostnadene knyttet til bergvarmekollektorer gjennom økt energiuttak pr. brønn.
- Brønntrykking var en lite kjent metode i da mye av energibrønn-utredningene ble utført frem til 1980 årene, og siden har det ikke vært arbeidet så meget med dette.
- I land der bebyggelsen i hovedsak ligger i flattliggende områder med liten grunnvannsbevegelse, har det naturlig nok ikke vært tradisjon for å tillegge grunnvannsbevegelsen særlig betydning for energiuttak fra grunnen. I tillegg skjer ofte vannforsyningen fra grunnvannsbrønner rett under bebyggelsen, noe som i flere land medfører krav til at energibrønnene skal være igjentettet, med f.eks. bentonitt.

GEOLOGIENS BETYDNING FOR UTTAK AV GRUNNVARME

Energipotensiålet til en fjellbrønn er først og fremst avhengig av bergets varmeledningsevne, grunnvannstemperaturen og mengden bevegelig grunnvann. I anlegg basert på energiuttak fra opp-pumpet grunnvann vil grunnvannskvaliteten også være av interesse. Det er spesielt stoffer som kan gi bakterievekst og igjenslamming (f.eks. humus, jern og mangan), stoffer som kan gi korrosjonsfare (høy CO₂-innhold og lav pH) og stoffer som kan felles ut (f.eks. karbonater) som gir driftsproblemer.

I brønner uten grunnvannssirkulasjon er varmeledningsevnen og dermed ytelsene til energiformål dominert av bergartens kvartsinnhold (kvarts er den dominerende varmeleder i bergartene). En

energibrønn boret i en kvartsitt har ofte ytelser på ca $7 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ som er meget bra, sammenliknet med en kalksten eller skifer som til vanlig yter ca $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$. I Strømstad, Sverige er det med 150-200 m dype brønner boret i granitt (uten trykking) vanlig å oppnå ytelser på 10-15kW uteffekt pr brønn beroende på vanntilgang og individuell plassering (Wikstrøm, 1995). Såvidt gode ytelser er i størrelsesorden det dobbelte av hva man kunne forvente å oppnå fra bergets varmeledningsevne alene, uten tilskudd fra grunnvannsbevegelse. Tilsvarende erfaringer er gjort mange steder i Osloområdet. (pers. meddelelse, Tom Svenningsen, Normann energiteknikk 1996).

Berggrunnen i fastlands-Norge består så og si utelukkende av krystalline bergarter hvor alt grunnvann er knyttet til sprekker og riss, ikke til porøsitet. Overflate-parallele sprekker i berget som er forårsaket av avlastning etter siste istid er av stor betydning for grunnvannsbevegelsen.

Grunnvannsbevegelsen er minst i flattliggende terreng og oppe på koller og høydedrag. I brattere terreng og på lokaliteter med tilhørende høyereliggende nedslagsfelt er hastighetene generelt større. Mange norske byer og tettsteder har en slik beliggenhet, det mest iøynefallende eksempelet er Oslo der store deler av bebyggelsen ligger på sidene i «Oslogryta».

NGU vil i løpet av 1999 avslutte et forskningsprosjekt innen utvikling av metodikk for kartlegging av grunnvarme fra fjell. Det vil bli utarbeidet et digitalt kart som viser energipotensialet i fjell i et område i Asker og Bærum. Resultatene fra dette prosjektet vil gi nyttig informasjon om i hvilke type geologiske forhold (bergartstype, bergtekniske forhold, grunnvannsbevegelse etc) som er mest aktuelt for bruk av hydraulisk trykking for økt energiuttak fra fjellbrønner.

HYDRAULISK TRYKKING FOR ØKT ENERGIUTTAK

Metodebeskrivelse

Energiuttaket fra borebrønner i fjell er som tidligere nevnt blant annet avhengig av grunnvannsstrømningen rundt kollektorene. En kostnadseffektiv løsning for å øke sirkulasjonen rundt kollektorene er å bore brønner med en viss avstand. Ved hjelp av en pumpe settes vannet i sirkulasjon mellom borhullene. Bare unntaksvis kan det forventes å være god nok hydraulisk kommunikasjon og stor nok sprekkeflate til å oppnå god varmeveksling mellom berg og vann med eksisterende naturlig oppsprekking. Løsningen blir da å lage store sprekkeplan i berget som vannet kan varmeveksle på ved hjelp av hydraulisk trykking. Fig. 1 viser en skisse av hydraulisk trykking av to brønner, mens fig. 2 viser en skisse av et pilotanlegg med fem brønner.

En betingelse for et vellykket anlegg er at tilførselen av "varmt" grunnvann rundt kollektorene i brønnen(e) blir tilstrekkelig stor til at man får ut de ønskede energimengdene. Det er svært sjeldent man kan ta ut så store vannmengder som det er snakk om fra en fjellboring uten at dette medfører større grunnvannssenkning, eller problemer med utslipp av det nedkjølte vannet. Derfor er grunnvarmeuttak fra fjellbrønner som tidligere nevnt basert på varmeveksling av en kjølevæske som sirkulerer i lukkede kollektorer i brønnen. Det idealiserte bildet som er vist i figur 1 med horisontale parallelle sprekkeplan er ikke en forutsetning for at konseptet skal virke. I prinsippet spiller det ingen rolle om det er kommunikasjon mellom brønnene overhode. Selv om mer eller mindre skrå sprekker, foliasjon osv. i alminnelighet vil påvirke oppsprekkingen, representerer de horisontale sprekkeplan den korteste veien mellom brønnene og er derfor nærmere en minimumsverdi for hva som kan forventes å få ut, heller enn et bilde for ideelle betingelser. Det viktigste er at permeabiliteten blir tilstrekkelig stor til at avsenkningen i pumpebrønnen ikke tørrelegger kollektoren eller at vannet ikke renner raskt nok unna i mottaksbrønnen.

Utredning av hvordan geologien innvirker på hydraulisk trykking

Innledningsvis vil det bli foretatt en vurdering av hvilke fjellforhold som er best egnet for hydraulisk trykking. Forskjellige bergarter har vidt forskjellige mekaniske egenskaper. Effekten av trykkingen vil være avhengig av berggrunnens plastiske egenskaper, naturlige oppsprekking og spenningsforhold. Dette vil bl.a. bli vurdert ut fra eksisterende litteratur på området og spesielt ut fra hvilken effekt hydraulisk trykking har på kapasiteten på borede fjellbrønner registrert i NGUs hydrogeologiske database. Erfaringer fra trykking av oljebrønner og opplysninger fra entreprenører som driver med trykking av borebrønner vil også danne grunnlaget for denne utredningen. NGU, i samarbeid med institutt for geologi og bergteknikk, NTNU vil være ansvarlig for denne utredningen.

Utvikling og utprøving av utstyr og metodikk for hydraulisk trykking

Før hele konseptet prøves ut i full skala, skal utstyr og metodikk utvikles og utprøves. Brønntechnologiutvikling AS vil stå for utvikling og uttesting av utstyr til hydraulisk trykking.

Dette foreslåtte utstyret for hydraulisk trykking av borebrønner består av to ekspanderende tetteelementer montert på et perforert stålrør i en avstand lik det intervallet en ønsker å trykke. Utstyret er koblet til overflaten med en høytrykkslange (1,5") eller sammenskrudde stålrør (2") hvor røret er koblet videre til et høytrykks pumpearrangement. Parallelt med hovedrøret går det to Ø 6mm rør for ekspansjon og kontroll av trykket i tetteelementene. I forbindelse med pumpearrangementet er det montert en høytrykks sluse for pumping av "propping agent" .

Utstyret kjøres i brønnen til ønsket dybde. Deretter ekspanderes nedre og øvre tetteelement gjennom de to 6mm rørene, og vann pumpes gjennom slange/rør og ut gjennom det perforerte røret mellom tetteelementene. Pumpetrykket økes til fjellet sprekker (70-250 bar), og pumperaten økes til maksimal rate slik at sprekken forplanter seg innover i fjellet. Trykk-/pumperate måles ved gjentatte pumpesekvenser. Oppnås høy pumperate ved lavt trykk i starten av pumpesekvensen indikerer dette at en har fått en åpen sprekk med god permeabilitet, og prosedyren kan gjentas i neste seksjon. Høyt starttrykk ved gjentatt pumping indikerer at sprekken går sammen etter trykking. Sprekken må da fylles med "propping agent" slik at den forblir åpen etter trykking. Pumpevæsken ledes da gjennom slusen som er fylt opp med "propping agent" og fører denne med seg ned gjennom røret, ut mellom tetteelementene og inn i sprekkssystemet. Pumpen kjøres på maksimal leveringsrate for å åpne sprekken mest mulig. Dette gjentas til sprekkssystemet holdes åpent. Alt fra klinkekuler og peanøttskall til rundslitt kvartsgrus (Ottawasand) har vært brukt som "propping agent". Bruk av propping agents er ennå ikke i alminnelig bruk til drikkevannsbrønner, men er beskrevet i internasjonal litteratur. Et viktig mål med denne delen av prosjektet er å finne fram til best egnet materiale og kornstørrelse på denne "proppingen", samt å utrede effekten den har på sprekkens vanngjennomgang.

Andre tiltak som bør utredes for å bedre den hydrauliske ledningsevnen på sprekkeplan er utvasking av leire avsatt i sprekken og sprengning i borhullet. Leirfylte sprekker er ofte et problem da den naturlige vannføringen på sprekkeplanene blokkeres. I forbindelse med trykkingen kan det derfor brukes en pumpe i tillegg med lavere trykk og større vannføring, eventuelt i kombinasjon med kjemikalier (sitronsyre, EDTA eller polyfosfater). Dette vil bidra til økt utvasking av leire fra sprekken. «Rengjorte» sprekker gir mindre friksjon, bedre varmeveksling og større varmeveksleareal. Det kan også forventes at anlegget i ettertid blir mindre sårbart for tilstopping av sprekkensystemene.

I høyfast berg uten naturlig oppsprekking vil trykket som må til for å danne sprekker kunne bli uforholdsmessig stort. Det er da tenkt benyttet rettede sprengladninger for å danne sprekkeplan som kan utvikles videre med hydraulisk trykking.

Produktets fortrinn og potensiale

Liknende metoder og utstyr er benyttet innen oljebransjen for åpning av reservoarer, men da med utstyrskostnader i størrelsesorden flere hundre tusen kroner - samt at selve elementene kun kan brukes en gang.

Det unike med BTUs tetteelementer er at de er laget i kevlarforsterket gummi som gjør at de kan brukes mange ganger (50-150) før utskifting. Elementene har stor ekspansjonsgrad slik at klaringen mellom brønnveggen og elementene ved inn- og utkjøring av brønnen er stor. Faren for fastkiling og tap av utstyret i brønnen eller kostbare fiskejobber blir dermed redusert til et minimum.

Potensialet for BTU er salg av komplette utstyrspakker for trykking av brønner og fylling med "propping agent" samt leveranser av slitasjedeler (tetteelementer). Våre høyekspansive tetteelementer er patentbeskyttet.

Med en reduksjon av kWh-prisen på ca. 10 øre (se regneeksempel, side 10) ved trykking av brønnene, anses denne energikilden som meget konkurransedyktig i forhold til andre energikilder for varmpumper. Potensialet burde derfor være meget stort både nasjonalt og internasjonalt for denne fornybare og ikke-forurensende energikilden.

Bygging og uttesting av demonstrasjonsanlegg

I samarbeid med aktuelle brukere og Asker og Bærum energi ENØK avd. har vi planlagt å bygge 2-3 demonstrasjonsanlegg. Et anlegg vil bli bygd for oppvarming av en større bygning basert på bruk av varmpumpe og et anlegg der grunnenergien brukes til forvarming/kjøling av inntaksluften til en bygning med sentralt friskluftsinntak (uten bruk av varmpumpe). Prosjekteringen av demonstrasjonsanleggene vil bli gjort på grunnlag av den innledende utviklingen og utprøving av utstyr og metodikk. Formålet med disse anleggene er:

- Videre uttesting av utviklede metoder og utstyr.
- Å dokumentere lønnsomhet ut fra økt energiuttak og merkostnader til bygging.
- Å anskueliggjøre flere bruksområder som til kjøleformål og i friskluftsanlegg.

Vi vil legge vekt på å plassere demonstrasjonsanleggene på steder med forskjellig berggrunn og hydrogeologiske forhold.

Plasseringen av brønnene og boredyp må bestemmes ut fra bergets spenningsfelt, sprekkeretninger og sprekketetthet. Hva som er det økonomisk optimale boredyp vil variere fra sted til sted, men generelt vil det sjelden være økonomisk lønnsomt å bore dypere enn 150 m. Den innbyrdes plasseringen av borehullene må i tillegg til geografiske hensyn, gjøres ut fra bergets oppsprekking og spenningsforhold (se figur 2). Noe av hensikten med demonstrasjonsanleggene er nettopp å gi oss sikrere dimensjoneringsgrunnlag til å bestemme optimal brønndybde og

brønnplassering for å kunne ta ut mest mulig energi under de gitte lokale geologiske- og topografiske forhold.

For å oppnå tilstrekkelig kommunikasjon er det sannsynligvis nødvendig å trykke alle borebrønnene. Dette kan gjøres ved å trykke en og en brønn samtidig som de andre stenges. Man overvåker da trykkoppbygging, trykkfall og slammengder i den brønnen som trykkes. Her er det et mangfold av muligheter som bør utprøves gjennom praktiske forsøk.

Virkning av hydraulisk trykking på omgivelsene

I og med at grunnvarmeanlegg vil bli bygd i nærheten av bygninger er det viktig å utrede faren for at trykkingen kan gi skader på grunnmurer. Ut fra eksisterende kunnskap om skalaeffekter og hydraulisk trykking av fjellbrønner til vannforsyning, regnes ikke dette som et stort problem, men det må dokumenteres og måles. Professor Dr.ing. Arne Myrvang, SINTEF Bergteknikk vil lede de bergmekanisk relaterte arbeidene.

Den hydrauliske trykkingen kan gi endringer i grunnvannsstand og i grunnvannets strømningsmønster, noe som igjen kan føre til kapasitetsendringer i nærliggende grunnvannsbrønner og endringer i energiuttaket i nærliggende energibrønner. Slike mulige endringer må derfor kunne dokumenteres.

Annet nødvendig utstyr

Behovet for å kunne dimensjonere energibidraget også for grunnvannsandelen samt inhomogeniteter i berggrunnens varmeledning har medført utvikling av utstyr for «**termisk respons testing**». (Eklöf og Gehlin, 1996). Fra grunnvarmebransjen regnes dette som et meget viktig redskap ved dimensjonering av større anlegg. I dette prosjektet vil termisk responstesting være et nyttig hjelpemiddel for å måle effekten av trykkingen. Mulig varmeuttak fra en brønn måles både før og etter trykking, og før og etter igangsetting av sirkulasjonen mellom brønnene.

I utviklingsfasen er det viktig å logge sprekke i brønnene. Det beste utstyret for å utføre sprekkeregistrering og bestemme orienteringen til sprekke er **akustisk telelogger**. Brønnene kan da logges med en hastighet på flere meter i minuttet. I stedet for lysbølger benyttes det lydbølger på liknende måte som et ekkolodd, bare med millimeters oppløsning. Grums i vannet som ofte gjør TV- opptak nesten håpløst er heller intet problem. Tolkningen av refleksene kan til og med diskriminere mellom sprekker som er åpne eller leirfylte.

Dimensjonering av kollektor og sirkulasjonspumpe

Selv om det meste av metode- og utstyrsutviklingen i prosjektet er tenkt rettet mot selve brønnen, er det viktig at prosjektet også vurderer andre aspekter som har betydning for det totale energiuttaket pr. borehull. Vi vil derfor se på dimensjonering av kollektorer og sirkulasjonspumper. Dagens dataprogram for dimensjonering av energibrønner tar lite eller intet hensyn til vannbevegelse, sprekkeorientering eller spenningfeltets orientering og størrelse (Banks & al.,1996).

For å opprettholde en høy virkningsgrad bør kollektorene være rikelig dimensjonert. Da har man også noe å gå på hvis det oppstår problemer med kjemisk/bakteriologiske utfellinger på kollektoroverflaten. Kobberrør med ribber(handelsvare fra Outokompu-Copper fås for ca 75 kr/m).har dobbelt så høy overflateeffekt (W/m^2) som standard slette rør. Kollektorutforming hvor den ene kollektorslangen blir erstattet med en dobbeltvegget slange, der det indre røret knyttes til pumpen for brønnsirkulasjonen er en annen mulig løsning som vil gi god varmeoverføring.

Eventuelle problemer med utfellinger, vil bli forsøkt løst ved å tilsette sitronsyre, fosforsyre eller klor i sirkulasjonsvannet. Utfellingsproduktene kan deretter pumpes ut med sirkulasjonspumpen.

Sirkulasjonspumpen bør være langsomtgående slik at slitasjen blir liten. En termostat som slår inn ved en gitt kollektortemperatur aktiviserer sirkulasjonspumpen for å begrense gangtiden, men stort sett er det mer lønnsomt å opprettholde høyest mulig kollektortemperatur. Da får varmpumpen bedre virkningsgrad, og bergvarmemagasinet homogeniseres. Elektronisk turtallsregulering styrt av kollektortemperaturen vil være det gunstigste både med hensyn på energiforbruk og slitasje.

Forskjellige aspekter vedrørende hydraulisk trykking og kommunikasjon mellom brønner er blitt drøftet med en av verdens mest erfarne «brønstrykkere» Cecil Less, Directorate of Geohydrology, Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria. Ut fra kunnskap ervervet som bergmekaniker i sydafrikansk gruveindustri og med 9 års erfaring med trykking av flere hundre drikkevannsbrønner, mener han at prosjektet burde kunne lykkes.

Nytteverdi

Økonomisk:Salg av utstyr/reservedeler. Utstyrekostnad pr. enhet ca. kr 50 000,-. Reservedeler pr. trykket brønn ca. kr 1000,-.

- Kort sikt:10 enheter og 150 brønner pr år. Total omsetning: kr 650 000,-.
- Mellomlang sikt: 50 enheter og 1000 brønner pr år: Total omsetning: kr 3 500 000,-.
- Lang sikt:200 enheter og 5000 brønner pr år: Total omsetning: 15 000 000,-.
- Miljømessig:Fornybar, ikke-forurensende energikilde til oppvarming og kjøling av bygningsmasse (lavtemperatur energi). Hvis denne teknikken fører til at det blir bygd 500 flere grunnvarmeanlegg hvert år vil dette gi et tilskudd av fornybar miljøvennlig energi i størrelsesorden 30-50 GWh pr. år.

Risikofaktorer (utstyrsutvikling)

- **Forskningsfasen:** Trykking av brønner for å øke produksjonen er en etablert teknologi i vannforsyning- og oljeindustrien. Risikofaktor anslås til 70% (andel av formasjonstyper hvor trykking ikke gir ønsket resultat er ukjent).
- **Utviklings- og produksjonsfasen:** BTU leverer i dag liknende tettelementer til oljeindustrien, slik at utfordringen ligger i å få ned produksjonsprisen. Dette kan oppnås ved materialvalg da temperaturkravene er redusert fra 120 til 20 grader. Risikofaktor anslås til 80%.
- **Kommersialiseringsfasen:** BTU har tilgang til et stort markedsapparat gjennom Maritime Well Service AS og Aker Maritime ASA. Risikofaktor anslås til 70% (prisreduksjon pr kWh ved trykking av brønnene vil være avgjørende).

Formidling fra prosjektet

Prosjektet er et bidrag til økt bruk av miljøvennlige fornybare energikilder. Det er derfor viktig at resultatene blir gjort kjent for alle som på en eller annen måte har befatning med planlegging og bruk av fornybare energikilder. Samtidig vil prosjektet ha stor interesse innen fagfelt som energiteknikk, bergteknikk og hydrogeologi. Resultatene fra prosjektet vil derfor bli formidlet i mange fora:

- Dr. ing avhandling. Denne vil dekke det meste av de faglige aspektene med prosjektet.
- Publisering i norske og internasjonale tidsskrift. Målgruppen her er fagfolk som arbeider med energiteknikk, bergteknikk eller hydrogeologi og spesielt med prosjektering og bygging av grunnvarmeanlegg.
- Veileder ENØK. Målgruppen er spesielt folk i offentlig forvaltning som arbeider med ENØK og fornybare energikilder.
- Informasjon til brønnborebransjen. Det er meget viktig at utvikling av ny teknologi innen hydraulisk trykking blir formidlet til brønnborebransjen og til entreprenører som driver med hydraulisk trykking, fordi det er disse som i første rekke skal anvende nyutviklet utstyr og metodikk.
- Pressemeldinger. Målgruppe: alle.
- Internett. De viktigste resultatene fra prosjektet vil bli presentert på NGUs internettside om grunnvarme.

Tidsplan med kostnader

Hovedaktiviteter	Tidsplan	Kostnad (i 1000 kr)
Utredning av hvordan geologien innvirker på hydraulisk trykking	November 1999-mars 2000	300
Utvikling av metodikk og utstyr	November 1999- mai 2001	1500
Utprøving av metodikk og prototyper i felt	April 2000- juni 2001	700
Bygging og uttesting av demonstrasjonsanlegg	Juli 2000-september 2001	1550
Vurdering av resultater og publisering/rapportering	Juli 2000- oktober 2002	1220
		5270

Andre effekter av prosjektet

Hydraulisk trykking er som tidligere nevnt hittil mest brukt for kapasitetsøkning av fjellbrønner til drikkevannsformål. Grunnvann er generelt bedre beskyttet og krever mindre behandling enn overflatevann. Likevel er grunnvann forholdsvis lite brukt som vannkilde her til lands (ca 14 %), men det er et uttalt mål å øke andelen grunnvann i vannforsyningen. Fjellbrønner brukes mest som vannkilde til enkelthusstander og hytter, men de blir også brukt ved små og mellomstore vannverk. Utvikling av teknikker som kan gi økte brønncapaciteter vil derfor være et viktig bidrag til å gjøre grunnvann mer aktuelt som vannkilde for mange vannverk. Det er derfor viktig at resultatene fra prosjektet blir bekjentgjort hos brønnborere og hydrogeologiske konsulenter.

Metoden kan også få anvendelse innen prosjektering og bygging av forskjellige typer fjellanlegg.

REGNEEKSEMPLER PÅ EFFEKT AV HYDRAULISK TRYKKING

For å anskueliggjøre hvilken effekt hydraulisk trykking kan ha på energimengder og kostnader pr. kWh har vi sammenlignet et grunnvarmeanlegg med to 100 m dype brønner i granitt (innbyrdes avstand på 20 m) med og uten trykking. Kostnadene til boringene ved konvensjonelle grunnvarmeanlegg for en enebolig utgjør omtrent 30 %, for større anlegg blir utgiftene til boringene relativt større. For kjøleformål basert på direkteveksling utgjør boreutgiftene den største enkeltposten (se fig. 3).

I de gitte eksemplene er det bare tatt med kostnader til selve varme-/kjøleopptaket og ikke til selve varmepumpen, el. installasjoner og eventuelle radiator-/gulvvarmesystem.

Uten hydraulisk trykking.

Mulig effekt: $2 \times 4 \text{ kW} = 8 \text{ kW}$ (vanlige verdier for energibrønner i granitt i Oslo-området).

Energiuttak pr. år: $8 \text{ kW} \times 3300 \text{ h} = \mathbf{26400 \text{ kWh}}$ (med 3300 driftstimer)

Årlige kapitalomkostninger: **5400 kr** (40 000 kr i borekost., 10 års avskrivning og 7 % rente).

Energipris: $5400 \text{ kr} : (3300 \text{ driftstimer} * 8 \text{ kW}) = \mathbf{0,20 \text{ kr /kWh}}$ (kun varmepumpedrift)

Med hydraulisk trykking

Mulig energiuttak pr år: **96300 kWh** (beregnet ut fra en termisk tapping på 3 °C av et bergvolum på 53 500 m³). Inkludert energi som tilføres varmepumpen fra kompressor og pumper blir energiuttaket anslagsvis **120 000 kWh** pr år.

Mulig effekt: 29,2 kW (ut fra 3300 driftstimer pr. år)

Årlige kapitalomkostninger: **9817 kr** (63 000 kr i invest.kost., 10 års avskrivning, 7 % rente og 1312 kr i drift av sirkulasjonspumpe).

Energipris: 9817 kr : 120 000 kWh = **0,08 kr /kWh** (kun varmepumpedrift)

Gjennomsnittlig energiforbruk til en norsk husholdning er 23 000 kWh, hvorav 10 000 - 15 000 kWh til oppvarming. Et energiuttak på 120 000 kWh er dermed normalt nok til å dekke oppvarmingsbehovet for opptil 10 husstander. Metoden egner seg derfor best til små boligfelt, skoler, offentlige bygg og blokker. Ved nybygging burde forholdene ligge til rette for at tre - åtte eneboliger i en gruppe deler samme energibrønnsystem.

Konklusjon

Grunnvarmeanlegg med hydraulisk trykking av brønner kan gi en kWh pris som ligger ca. **10 øre** under energiprisen for vanlige grunnvarmeanlegg basert på uttak fra borhull. Også for klimakjøling kan anlegg basert på hydraulisk trykkede energibrønner bli klart rimeligere enn konvensjonell kompressorkjøling.

LITTERATUR

Anderson, O., 1996: Kyl og varmelagring i berg och grundvatten. *Borrsvängen nr 3, 1996.*

Banks et. al 1996: Permeability and stress in crystalline rocks. *Terra Nova nr 8, 1996.*

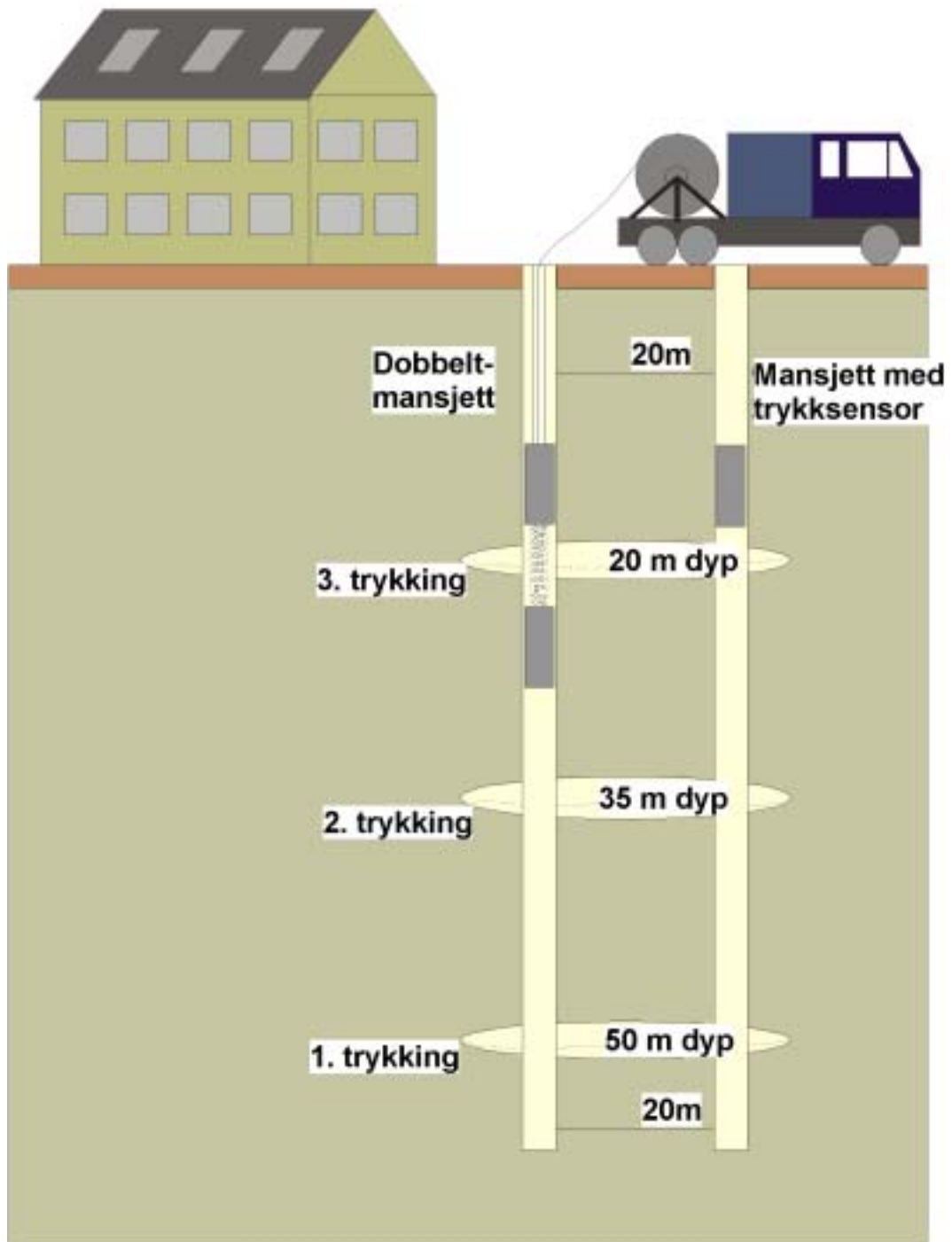
Gehlin, S. & Ekløf, C., 1996: Säkrare värmedata med termisk respons-test. *Borrsvängen nr 3, 1996.*

Murdoch, L. C., 1995: Forms and hydraulic fractures created during a field test in overconsolidated glacial drift. *Quarterly Journal of engineering Geology nr 28, 1995.*

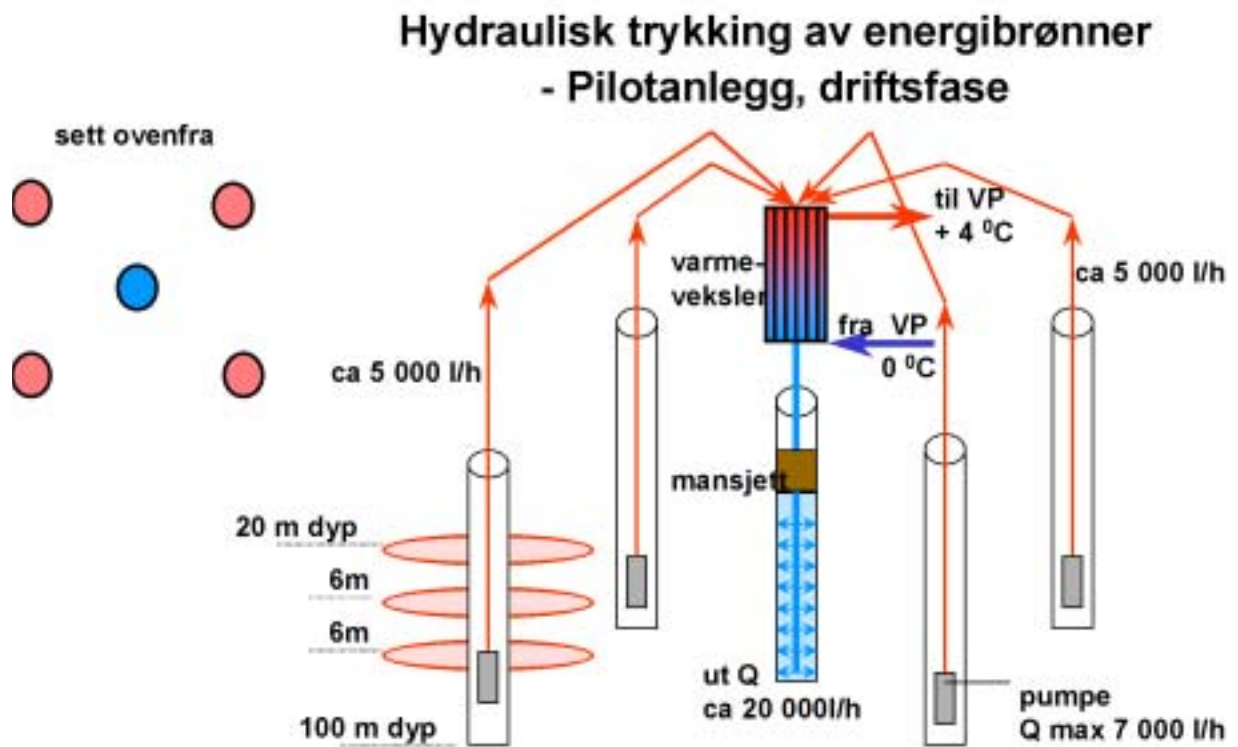
Norsk VVS nr 11, 1995: Ny teknologi for utnyttelse av grunnvarme.

Wikstrøm, H., 1995: Bergvarme i Strømstad. *Borrsvängen nr 1, 1995.*

Hydraulisk trykking av borebrønner



Figur 1. Skisse av hydraulisk trykking av to brønner.



Figur 2. Prinsippskisse av et pilotanlegg med fem brønner.