



Kartlegging av grunnvarmepotensialet i Seljord

- Hydrogeologisk kartlegging av et infiltrasjonsmagasin.
Transient 3D modellering.

Ingrid Flatland Dyrud



Masteroppgave, 60 studiepoeng

I samarbeid med Tveiten Rådgivende Ingeniører AS





Tittel:	Kartlegging av grunnvarmepotensialet i Seljord - Hydrogeologisk kartlegging av et infiltrasjonsmagasin. Transient 3D modellering.
Nøkkelord:	Seljord, infiltrasjonsakvifer, grunnvarme, sedimentologi, FEflow, modellering.
Forfatter:	Ingrid Flatland Dyrud
Studentnr.:	022523
Fagkode:	4317
Oppgavetype:	Mastergradsoppgave
Studiepoeng:	60
Studium:	Master i natur-, helse- og miljøvern
Forside foto:	Alle foto er tatt av Ingrid Flatland Dyrud (2006 og 2007).



Forord

Seljord var en av de få norske bygdene som fikk tidlig en naturhistorisk beskrivelse. Hans Jacob Wille (1786), kapellan i Seljord, beskriver stedets jordarter slik:

Ligesom Luften og Veirligt efter Stederen og Beliggenheden ere meget forskellige, saa hard et sig og med Jord-Arten. Aarsagen hertil er de snevre Dale, som med Biergene udgiøre Præstegieldets Grund. Disse have altid en Bek eller Elv, som har dannet og formet dem, og ved aarlig at nedføre Jord og Gruss fra forskellige Steder, opfylder Dalene med de paa Biergene værende Jord Arter. Bøndernes Skove, som her ene findes i Biergene, og hvis store Rødder tiende til at sammenhilde Jorden, bliveaarlig udhuggede. I disse steile Bakker og Fielde kan da intet uden Stenene holde Jorden sammen, naar disse nu løsnes af Oversvømmelser efter en foregaaende Hede, da skeer Field- Skred i Mængde, som udriver store Jord-Strænkninger, ødelægger Gaarde, som ligge i Høiden og danner Høie Dale paa Slætterne. Denne Biergenes Formindskelse og Dalenes Forhøining sess ved at grave i Myrer og andre Eng-Bunde, hvor man finder Lag paa Lag og ofte en Alen under alt dete hele Træer med Rødder begravne. Ingen Under da, at man paa et og samme Sted kan finde saa forskellige Jord-Arter, og at mange deilige og frugtbare Dale blive til et Chaos, naar Gruus, Sand og store Kampestene blive dets øverste Lag.

Wille 1786 (siteret av Hansen 1984)

Dette prosjektet ble foreslått av Olav Lind hos Tveiten Rådgivende Ingeniører desember 2006.

Jeg vil takke alle som har støttet meg på ulike måter igjennom arbeidet. En stor takk til Harald Klempe, Høgskolen i Telemark, og Olav Lind for inspirerende veiledning og kunnskap. Seljord kommune, Vest Telemark Kraftlag, Høgskolen i Telemark, ENOVA og Tveiten Rådgivende Ingeniører har bidratt økonomisk og med hjelp til feltarbeidet. Uten deres bidrag kunne ikke prosjektet/masteroppgaven bli gjennomført. Georadaroppmålinger er gjort sammen med Halvor Angre, Seljord kommune. Takk for fine feltdager! Tveiten Rådgivende Ingeniører fortjener en stor takk som har stilt kontor til disposisjon. Ansatte på Tveiten har gitt meg motivasjon og råd når utfordringer og problemer har hopet seg opp. Takk til mastergradstudent Stine Sæter for svært godt samarbeid og lærerrike diskusjoner. En stor takk til Hans de Beer (NGU) og Panagiotis Dimakis (NVE) for stor hjelp til modelleringsarbeidet. Takk til Helge Skarphagen i NIVA, Kristi Midttømme i NGU, Sissel Tvedten i NVE og Einar Eckholdt i Miljøgeologi for inspirerende innspill. Takk til pappa og Kjersti Wike, Statens Vegvesen, for korrektur.

Tusen takk til samboeren min, Espen Høydahl, som har vært en enestående motivasjonskilde og har støttet meg gjennom hele utdanningen.

Ingrid Flatland Dyrud

Seljord, Januar 2008.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag

1	Innledning	5
1.1	Bakgrunn for oppgaven	6
1.2	Målsetting	7
1.3	Nytteverdi av oppgaven.....	8
2	Litteraturstudie om grunnvarmeuttak i løsmasser	9
2.1	Grunnvarme	9
2.1.1	Grunnforhold egnet til energibrønner.....	11
2.1.2	Temperatur og varmeledningsevne	12
2.1.3	Interaksjon mellom grunnvann og elvevann	13
2.2	Varmepumper og effekt.....	14
2.2.1	Grunnvannets kjemiske sammensetning	15
3	Områdebeskrivelse	16
3.1	Geografisk plassering	16
3.2	Beskrivelse av lokaliteten.....	17
3.2.1	Berggrunnsgeologi	17
3.2.2	Kvartærgeologi.....	17
3.2.3	Grunnvannsmagasinet i Seljord	21
3.2.4	Grunnvarme som energikilde i Seljord	22
4	Forsøksbeskrivelse og metoder	24
4.1	Anskaffelse av data.....	24
4.1.1	Tidligere arbeider i området.....	24
4.1.2	Transiente data	25
4.2	Grunnundersøkelser.....	25

4.2.1	Oppmåling	25
4.2.2	Georadar	25
4.2.3	Prosessering og fremstilling av GPR-data.	27
4.2.4	Flernivåundersøkelsesbrønner	28
4.2.5	Kornfordelingsanalyser	28
4.2.6	Hydraulisk ledningsevne (K)	29
4.3	Analyse av temperatur og vannregime	32
4.4	Utvikling av GIS system – 2D modellering	32
4.4.1	Databaser	33
4.4.2	Inndeling av sedimentfacies	33
4.4.3	2D geologisk modellering i ArcGIS.....	34
4.4.4	Strømningsanalyser i nedbørsfeltet	34
4.5	3D Grunnvannsmodellering	35
4.5.1	Grunnprinsipp for grunnvannsmodellering.....	35
4.5.2	Analyseverktøyet FEflow.....	38
4.5.3	Konseptuel modell og modelloppbygging	38
4.5.4	Kalibrering og verifisering	43
4.5.5	Følsomhetsanalyser	43
4.5.6	Simulering og analyser.....	44
4.6	Uttak av grunnvarme	44
4.6.1	Begrensninger i forhold til vannbalanse, senkning og strømning.....	44
4.6.2	Beregning av vannuttak Q.....	47
4.6.3	Beregning av effekt (kW).....	48
5	Resultat	50
5.1	Georadar	50
5.2	Flernivåundersøkelsesbrønner og kornfordelingsanalyser.....	51
5.3	Nedbør og lufttemperatur	56
5.4	Temperaturer	57

5.4.1	Grunnvann	57
5.4.2	Overflatevann	59
5.5	GIS – 2D geologiske og hydrologiske analyser	60
5.5.1	Inndeling av sedimentfacies	60
5.5.2	Sedimentologisk modell	62
5.5.3	Strømningsanalyse av nedbørsfeltet	63
5.6	3D Modellering.....	64
5.6.1	Konseptuell modell	64
5.6.2	Kalibrering og verifisering	66
5.6.3	Følsomhetsanalyse	67
5.6.4	Simuleringsresultater.....	68
5.7	Grunnvarmepotensialet i Seljord	75
5.7.1	Begrensinger for uttak	75
5.7.2	Potensialet for vannuttak	79
5.7.3	Grunnvarmepotensialet (kW).....	79
5.7.4	Kart over grunnvarmepotensialet	80
6	Diskusjon	81
6.1	Sammenstilling av resultat fra georadar, boringer og kornfordelingsanalyser.....	81
6.2	Grunnvannstemperatur	84
6.3	Grunnvannsmodellen	85
6.4	Strømningsmønster og interaksjon	86
6.5	Grunnvarmepotensialet i Seljord	87
6.6	Sammenfattende diskusjon - Egnethet i ulike områder	89
6.7	Videre undersøkelser	92
7	Konklusjon.....	93
8	Referanser.....	94
9	Vedlegg.....	105

Sammendrag

I denne masteroppgaven er det gjort hydrogeologiske undersøkelser i et grunnvannsmagasin i Seljord, Telemark. Formålet med undersøkelsene var å finne potensialet for uttak av grunnvarme. Det er foretatt georadarmålinger, boringer, og analyser av boreprøver. I ni undersøkelsesbrønner er det målt temperaturer og grunnvannsnivå på 5, 10 og 20 meter dyp. Målingene har blitt foretatt fra 3.mai til 23. november 2007. Registrering av fluktuasjoner i vassdraget rundt akviferen har blitt foretatt i samme periode.

Dataene har blitt brukt til å utvikle en sedimentologisk modell og til å bygge en tre dimensjonal grunnvannsmodell for simulering av grunnvannsstrømning og varmestrøm. Det er brukt finite element modellen FEflow 5.3. Det er gode samsvar mellom observerte og simulerte verdier. For vurdering av uttakspotensialet er det utarbeidd et transmissivitetkart og et temperatursenkingskart for 15 til 20 meter der temperaturen er stabil i området ved 7-9 °C. Resultatene viser at det er mulighet for store pumpekapasiteter, at det er optimale temperaturer for bruk av grunnvarme. Det er gjort et kart som viser grunnvarmepotensialet (kW) i ulike områder.

Summary

In this master thesis groundwater surveys in an aquifer in Seljord, Telemark, Norway have been done. The purpose of this work is to find the potential for utilization of ground heat from the aquifer. Field surveys have been ground penetrating radar, drillings and sediment analysis. Nine monitoring multilevel wells have been established and groundwater temperatures and heads from 5, 10 and 20 meter depth have been recorded. Temperatures and water level from surrounding rivers and lakes were also recorded.

To obtain this a sedimentological model and a 3D groundwater flow and heat flow model have been made. The finite element model FEflow 5.3 was used. There is a good correspondence between observed and simulated results. To evaluate the groundwater heat potential, there are made maps of transmissivity and possible temperature lowering and pumping capacity from depth of 15-20 meter, where the temperatures are stable at 7-9 °C. The results show possibilities for huge pump capacities and optimal groundwater temperatures for use of the groundwater heat. It is made a map that shows the potential of ground heat in different areas.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Grunnvarme er en miljøvennlig energikilde der en utnytter varme i fjell, jord eller fra grunnvannet. Energiuttaket vil blant annet avhenge av fjellets varmeledningsevne, grunnvannstrømning og temperatur i grunnen. Grunnvarme er i all hovedsak solenergi som er lagret i grunnen. Grunnvarme kan også være geotermisk varme (Hilmo et al. 1998).

I Norge utnyttes over 1 TWh varme årlig fra grunnen (Midttømme 2007). Til sammenligning hentes over 20 TWh i Sverige fra grunnvann og bergvarmeanlegg. Det finnes mange eksempler på at bruk av grunnvann er et godt og økonomisk lønnsomt energialternativ. Det finnes også flere eksempler på at utbygger har valgt panelovner som energialternativ for nye bygninger bygd på gode grunnvannsakviferer. Mangel på kunnskap og informasjon om grunnvann som energialternativ er den viktigste årsak til at dette energialternativet ikke blir vurdert i mange utbyggingsprosjekter (Midttømme 2007). Grunnvarme har et stort utnyttelsespotensial i Norge, men fra offentlig hold er det dårlig tilrettelagt for subsidiering (Skarphagen 2007). Viljen til utnytting hos fagmiljøene i Norge er til stede, men likevel blir energiressursen nedprioritert til fordel for andre energikilder, trolig på grunn av mangel på kunnskap. En forutsetning for økt bruk av grunnvarme og en utvikling av slike anlegg er at det utdannes fagfolk med geologisk bakgrunn og kunnskap på bruk av grunnvarme (Midttømme 2007).

Økt fokus på utslipp av klimagasser, bindene internasjonale klimaavtaler og stadig økning av energiforbruket må føre til større politisk vilje til å satse på miljøvennlige energikilder. Fra offentlig hold satses det betydelig på energifleksibilitet med vannbåren varme basert på bioenergi, varmepumper og spillvarme. Grunnvarme er en energikilde velegnet for varmepumpe. Stortinget har vedtatt å styrke den norske energibalansen med 4 TWh vannbåren varme, basert på fornybare energikilder innen 2010. Målet er vedtatt ut fra ønsket om å styrke den norske energiforsyningen med flere energikilder, samt øke forsyningsikkerheten av energi gjennom å bygge ut vannbåren infrastruktur (Soria Moria 2005).

Den globale energisituasjonen, med CO₂-utslipp og klimaendringer gjør teknologi og metoder for å utnytte alternative energikilder til et uttalt satsingsområde både globalt og nasjonalt. Skal dette bli en realitet og få effekt, må det også tilrettelegges for bruk av slike energikilder lokalt.

I 1987 dimensjonerte Tveiten Rådgivende Ingeniører den første energibrønnen i Seljord (energibrønn og kjølingsbrønn for Seljord lysfabrikk). Siden den gang har de dimensjonert flere energibrønner som har vist seg å være en lønnsom investering. Grunnvannsmagasinet i Seljord har vist seg å være godt egnet for uttak av grunnvarme og er derfor interessant feltområde å bruke for et detaljert studie. Erfaringene fra området kan dras videre til andre grunnvannsmagasin i Norge. Kriteriene for valg av Seljord sentrum som forskningsområde var flere:

- Relativt stort nedbørsfelt.
- Grunnvannsmagasin med tett bosetting.
- Infiltrasjonsakvifer med innmatning fra Bygdaråi.
- Eventuell påvirkning av Sundsbarm kraftverk.
- Grove masser (glasifluviale og fluviale avsetninger) i et område som allerede er avsatt til næringsutvikling.
- Muligheter for å dra erfaringer fra egenskapene til akviferen i Seljord til andre grunnvannsmagasin i Vest- og Øst-Telemark.
- Økt utnyttning av lokale energikilder.

Tveiten Rådgivende Ingeniører ser en økende interesse for bruk av grunnvarme. I den sammenheng er det også viktig å undersøke konsekvenser av store uttak og hvor mye varme per tidsenhet som er aktuelt å ta ut fra akviferen (Lind 2007).

1.2 Målsetting

Målsettingen med oppgaven er å kartlegge grunnvarmepotensialet i Seljord sentrum.

Spesifikke målsettinger:

På grunnlag av grunnvannstand og grunnvannstemperaturer vil:

- Strømningsmønsteret og potensialgradienten nedover i grunnen beskrives.
- Temperaturgradient horisontalt og vertikalt i grunnen undersøkes.
- Interaksjon mellom Bygdaråi og akviferen verifiseres eller avkreftes.
- Interaksjon mellom Seljordsvatnet og akviferen verifiseres eller avkreftes.

Sedimentologiske undersøkelser vil beskrive:

- Kornfordeling, sorteringsgrad og hydrauliske ledningsevne.
- Sedimentasjonsmiljøet og faciesassosiasjoner.

Numerisk modellering vil vise:

- Vannbalanse.
- Effekter av vassdrag.
- Senking og strømningsmønster rundt pumpebrønner.
- Varmebevegelse gjennom akviferen og mot pumpebrønner.

1.3 Nytteverdi av oppgaven

I henhold til lokale og internasjonale energiplaner og avtaler må det tilrettelegges for økt kunnskap om miljøvennlige og lokale energikilder. En kartlegging av grunnvarmepotensialet er et eksempel på tiltak. Kartleggingen av grunnvarmepotensialet gir ikke bare spesifikk kunnskap om grunnvannsmagasinet i Seljord, men erfaringene kan brukes til å se potensialet i lignende infiltrasjonsakviferer. Det er lagt til rette for mest mulig detaljert kartlegging så konklusjonen blir gitt uten behov for mer detaljerte hydrologiske og geologiske undersøkelser. Flere tidligere kartlegginger i Norge, foretatt av NGU og NVE (Kalskin og Hilmo 1999; Midttømme, Hilmo & Kalskin 2000; Dagestad og Heidenstrøm 2000) har konkludert med behov for mer detaljkartlegging. Imidlertid har observasjonsperioden i Seljord vært for kort slik at temperatur og vannstand må registreres gjennom våren og sommeren 2008.

Det er en økende interesse for bruk av fornybare energikilder der varmepumper med grunnvann som energikilde vil bli et voksende marked (Lind 2007). Det er derfor spesielt viktig å se på langtidspåvirkning ved uttak og begrensinger, noe en matematisk modell vil kunne vise.

Prosjektområdet ligger i en del av Seljord sentrum som allerede er regulert til næringsutvikling. Ved å få gjennomført kartlegginga kan en ligge i forkant av en dialog med eventuelle interessenter som vurderer etablering i Seljord. Oppgaven er derfor ikke bare interessant i et energi- og miljøpolitisk perspektiv, men også næringspolitisk. Resultatene skal blant annet presenteres i kartform, slik at informasjonen skal være lettere tilgjengelig for energiplanleggingen i Seljord kommune.

2 Litteraturstudie om grunnvarmeuttak i løsmasser

Grunnvarme var et viktig forskningsfelt i NGU og NVE i tida 1998 til 2004. Det har de siste årene vært liten aktivitet på grunn av manglene statsoverføringer (Midttømme 2007). NGU og NVE sine undersøkelser i Elverum (Kalskin og Hilmo 1999), Alvdal (Midttømme et al. 1999; Heidenstrøm, Dimakis & Pedersen 2000), Voss (Dagestad og Heidenstrøm 2000) sto sentralt i planleggingen av feltarbeidet. Dette er undersøkelser over større områder og har dermed hatt et større omfang enn denne masteroppgaven, men de er ikke på like detaljert nivå. Seljord er et lite grunnvannsmagasin sammenlignet med europeiske og andre land, og derfor har norsk litteratur stått sentralt.

2.1 Grunnvarme

Grunnvarme er en fellesbetegnelse på uttak, tilbakeføring og lagring av termisk energi ved moderat temperatur lagret i bergrunn, grunnvann og jord. Energien kommer fra soloppvarming og geotermisk energi (Hilmo et al. 1998). Varmepumper gjør at grunnvarmen kan utnyttes til svært energieffektiv og miljøvennlig oppvarming av alle typer bygninger. Ved å bruke anlegget optimalt både til oppvarming og kjøling vil effekten bli enda større (SINTEF 2008).

Det finnes tre hovedtyper av systemer for utnyttelse av grunnvann (NGU & NVE 2000):

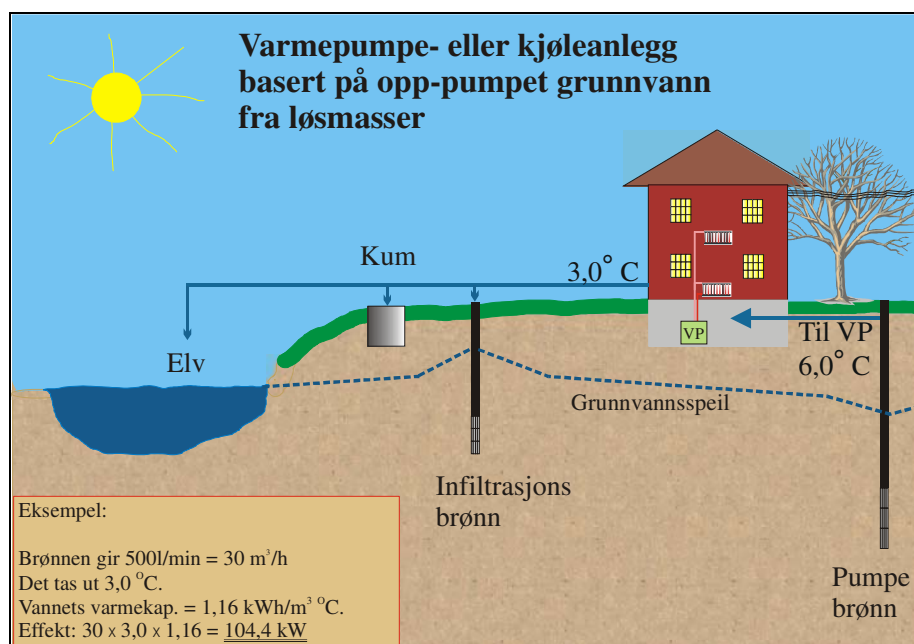
1. Forbruksbrønner, varmeuttak uten tilbakeføring / enkeltbrønn-system. Oppumping av grunnvann fra produksjonsbrønner og avløp til infiltrasjonsbrønner.
2. Resirkulasjonsbrønner, varmeuttak med tilbakeføring / flerbrønn-system. Oppumping og tilbakeføring av grunnvann i samme brønn (ved mindre vannmengder).
3. Indirekte varmeopptak (varmeopptak ved hjelp av kollektorer)

Forbruksbrønner og resirkulasjonsbrønner kalles også åpne løsninger eller direkte system, og systemer med indirekte varmeopptak kalles lukka løsning.

Lokaliteten for denne masteroppgaven er en løsmasseavsetning, og derfor blir bare løsning 1 og 2 beskrevet utfyllende. Indirekte varmeopptak er mer aktuelt for fjellbrønner.

Vannet i et grunnvannssystem må etter oppumping og overføringen av energi returneres til en overflateresipient eller en grunnvannsresipient. Den største returvannmengden forekommer i

løpet av de kaldeste vintermånedene, og grunnvannsresipienten må ha kapasitet til å ta i mot alt returvannet fra varmepumpen på dager med ekstreme værforhold. Høst og vår vil returvannmengden som produseres være betydelig mindre (Kalskin og Hilmo 1999). Metodene for å fjerne returvannet kalles åpent grunnvannssystem inn i enkeltbrønn-system og flerbrønn-system. Det kalles enkeltbrønn-system når en benytter seg av produksjonsbrønnen og fører returvannet ut i åpent vann, i avløpssystemet eller tilbake til grunnvannsmagasinet. Flerbrønn-system er når en benytter seg av flere brønner der noen fungerer som produksjonsbrønner og noen som infiltrasjonsbrønner etter utvinning av varme. Flerbrønn-system er en "sluttet" krets og en opprettholder det hydrauliske trykket i formasjonen og en får ingen betydelige miljøkonsekvenser som en kan risikere ved enkeltbrønn-system. Investeringskostnadene er i motsetning til langt høyere for et flerbrønn-system (NGU & NVE 2000). Figur 1 viser prinsippet for åpne løsninger.



Figur 1: Skisse over grunnvarmeanlegg der det er vist varmeuttak med tilbakeføring (infiltrasjonsbrønn) og varmeuttak uten tilbakeføring (elv og kum). En brønn som gir 500 liter/minuttet vil kunne gi en effekt på 104,4 kWh ved et varmeuttak på 3 °C (NGU & NVE 2000).

2.1.1 Grunnforhold egnet til energibrønner

En løsmasseavsetnings egnethet for energibrønner bestemmes av avsetningens mektighet, kontinuitet, stratigrafi, tekstur, transmissivitet, magasinkoeffisient og grunnvannsdannelse (Rueslåttén 1984). Størrelsen på fluktuasjoner i grunnvannstand er omvendt proporsjonal med jordas effektive porøsitet, der effektiv porøsitet er mål for hvor mye uttakbart vann avsetningen kan inneholde. Grunnvannsnivået i grovkorna sedimenter, med høy effektiv porøsitet, vil variere med kun få titals centimeter (Colleuille, Dimakis, & Wong 2004b). Analyse av markvannsdata viste at jorda ofte er ugjennomtrengelig i februar til april på grunn av tele. Raskest og størst infiltrasjon skjer på senvinteren ved teleløsning (Colleuille et al. 2004b; Colleuille og Gillebo 2002; Colleuille, Haugen, Udnæs & Møen 2001).

Brønndiameteren for grunnvannsbrønner er vanligvis 15 til 20 cm, og brønndybden varierer fra 10 til 40 meter. Vanlig vannuttak er 5 til 25 liter per sekund. Vannuttaket tilsvarer en varmeytelse for varmepumpen på ca. 90 til 450 kW per brønn hvis grunnvannet avkjøles 3 °C (SINTEF 2008).

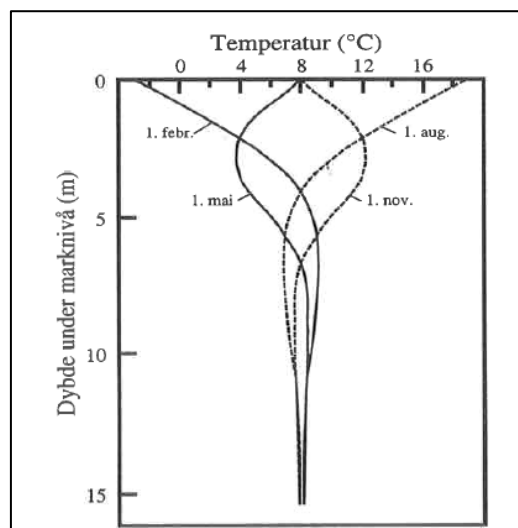
Brønn- og filterdimensjonering gjøres på grunnlag av detaljundersøkelser av grunnforholdene i nærheten til bygningen. Dette kan være med bakgrunn i georadar, sonderboring, prøvepumping eller resultater av kornfordelingsanalyser i de forskjellige nivåene i grunnvannets vertikalprofil. Ut ifra beregnet uttaksmengde kan en dimensjonere brønnen grovt etter tabell 1.

Tabell 1: Brønn og pumpedimensjoner ved uttak av grunnvann (Kalskin og Hilmo 1999).

Uttaksmengde (l/sek)	Rørdiameter (mm)	Pumpestørrelse (mm)
>15	φ225	φ200
5-15	φ175	φ150
1-5	φ125	φ100

2.1.2 Temperatur og varmeledningsevne

Varme strømmer fra høyere mot lavere temperatur. En varmestrøm vil derfor bevege seg oppover og nedover avhengig av temperaturgradienten. En kan dele jordskorpa inn i tre temperatursoner. En øvre sone der jordtemperaturen svinger med lufttemperaturen, en midlere sone der jordtemperaturen er lik eller litt over luftas årsmiddeltemperatur og holder seg konstant, og en nedre sone som er påvirket av varme fra jordas indre. Temperaturen fra øvre sone vil forplante seg mot dypet (Klempe 2000).



Figur 2: Grunnvannstemperatur som funksjon av dybde under marknivå i utvalgte måneder av året (empirisk formel) (Stene 1997).

Grunnvannstemperaturen er påvirket av lufttemperatur, snøoverdekning, sol-skygge effekter, vegetasjonsdekket, berggrunnens varmeledningsevne, det radioaktive innholdet i berggrunnen, jordskorpetykkelse, menneskelig aktivitet, historiske klimaendringer og grunnvannstrømning (Midttømme, Ramstad, Solli, Sjørdal & Elvebakk 2004). I Norge ligger grunnvannstemperaturen mellom 2-10 °C avhengig av beliggenhet i landet og akviferens dybde. Temperaturen nær overflaten påvirkes direkte av klima, men på dypere enn 10 meter (forutsetter et grunnvannmagasin) vil temperaturen være tilnærmet konstant hele året (figur 2) (Stene 1997). Grunnvannstemperaturen ligger som regel litt høyere enn årsmiddeltemperaturen på grunn av snøisolasjon. Grunnvannstemperatur danner en dobbel amplitude over året. Den doble amplituden avtar raskt ned mot dypet (Klempe 2000). Grunnvannstemperaturens maksimum og minimum er faseforskjøvet i forhold til lufttemperaturen. Mot dypet øker faseforskyvingen, og i grunnvannsonen er bølgehastigheten 1,5 m pr måned. Snørike vintre kan gi et høyere årsmiddeltemperatur i grunnvannet enn lufttemperaturens middel (Hilmo og Skarphagen 2001; Klempe 2000; Stene 1997; Rueslåttén 1984). Temperaturnivå kan bestemmes ved hjelp av formel 1 (Stene 1997).

Formel 1:

$$t_0 = t_m + 1 + 0,02 \cdot h$$

Der h er dybde under overflaten (m)

t_m er midlere årstemperatur – uteluft (°C)

Vanntemperatur og elektrisk ledningsevne har vist seg å være nyttig for å øke forståelsen for vannutveksling (Colleuille et al. 2004b). Varmeledningsevnen sier oss hvor godt mediene kan lede varme. Ulike medier leder varme ulikt. Varmeledningsevnen i løsmasser avhenger av porøsitet, mineralinnhold og vanninnhold. Vannmetta jord har størst ledningsevne. Tørr grus leder varme bedre enn tørr sand (Klempe 2000). I fjell er det berggrunnen og mineralenes egenskaper som styrer varmeledningsevnen og den termiske gradienten. Termisk gradient er bestemt ut i fra varmestrøm som så er bestemt ut i fra berggrunnens radioaktive innhold (Midtømme et al. 2004). Grunnvarme fra fjell blir ikke sett nærmere på i denne oppgaven.

2.1.3 Interaksjon mellom grunnvann og elvevann

Elveløpskarakteristikk, vannregimer, massetransport og vanntemperatur kontrollerer interaksjonen mellom elvevann og grunnvann (Colleuille, Dimakis, & Wong 2004a). Pumping kan påvirke grunnvannsakkviferens kapasitet, vannkvalitet og på biologiske forhold i området. Et større grunnvannsuttak vil ofte senke grunnvannsnivået i nærheten av brønnen. Påvirkningsgraden avhenger av jordtype, geologi, grunnvannsdannelse og uttaksmengde. Uttak kan påvirke andre brønners kapasitet, utløse setninger, endre vannstand og vannkvalitet (Colleuille et al. 2004a).

I de fleste elver vil grunnvann gi et vesentlig tilskudd til avrenningen, spesielt i lavvannsperioder. Ofte vil grunnvannsstrømningen være konsentrert til mindre områder på grunn av den geologiske situasjon, og i slike situasjoner vil soner i elva kunne ha lavere temperaturfluktuasjoner (gjennom både døgn og år) enn hva som ellers kunne forventes (Gaffield og Potter 1999). Mange elver vil på enkelte strekninger bidra til å mate grunnvannsmagasinet ved infiltrasjon gjennom elvebunnen. Denne prosessen er avhengig av vanntemperaturen. I USA er det målt en infiltrasjons økning på 20-30 % i den varmeste tiden på dagen. I et fjellvassdrag, også i USA, er det målt 30-40 % endring i infiltrasjonsgrad i løpet av døgnet som følge av temperaturendring. (Constantz 1998; Ronan, Prudic, Thodal, & Constantz 1998). Denne konduktive varmeoverføringen mellom vann og elvebunn er signifikant i grunne elver, og vil kunne føre til både avkjøling og oppvarming av elva avhengig av forholdene (Sinokrot og Stefan 1993). I Frankrike har undersøkelser vist at infiltrasjonsgraden kan variere med over 50 % mellom flomperioder og perioder med lav vannføring (Detay 1997; sitert av Colleuille et al. 2004a). Undersøkelser av interaksjonen mellom et grunnvannsmagasin og Glomma konkluderer med at regresjon og

interpolasjonsanalyser av vannstandsmålinger alene er ikke egnet til å karakterisere interaksjonen. Viktige punkter for å se på interaksjon er helningsgradient, endring av elvevannstand, tilsig og grunnvannsnivå (Colleuille et al. 2004a).

2.2 Varmepumper og effekt

Anslagsvis finnes det 800.000 grunnvarmebaserte varmepumper i verden. Halvparten er installert i USA, resten i Europa. Halvparten av installasjonene i Europa finnes i Sverige. Grunnvarmeanlegg med varmepumpe er vanlig i Sverige, Sveits, Østerrike, Tyskland og USA. I Norge ser en et økende antall installasjoner i boliger, større bygninger samt fjernvarme- og fjernkjølesystemer (SINTEF 2008).

Spesifikk anleggsinvestering (kr/kW installert varmeeffekt), ekvivalent driftstid, varmepumpeanleggets årsvarmefaktor og energipriser er faktorer som har høyest betydning for om en varmepumpeinstallasjon er vellykket og lønnsom (Stene 1997).

Effektfaktoren viser momentanverdien over hvor effektiv varmepumpen er. Effektfaktoren utregnes ved å ta forholdet mellom avgitt varmeeffekt P_k og tilført elektrisk effekt P_{el} . Årsvarmefaktoren (ϕ) er forholdet mellom total varmeleveranse Q_k (kWh) fra varmepumpen i fyringssesongen og totalt tilført elektrisk energi W_{el} (kWh) som må til for å drive varmepumpen. Begrepet årsenergifaktor brukes når en måler varmepumpas effekt over et år og tar også med kjøleeffekt. Temperaturløftet styrer effektfaktoren. Effektfaktoren avtar raskt med økende temperaturforskjell mellom varmeopptaksiden og varmeavgivelsessiden (Stene 1997).

2.2.1 Grunnvannets kjemiske sammensetning

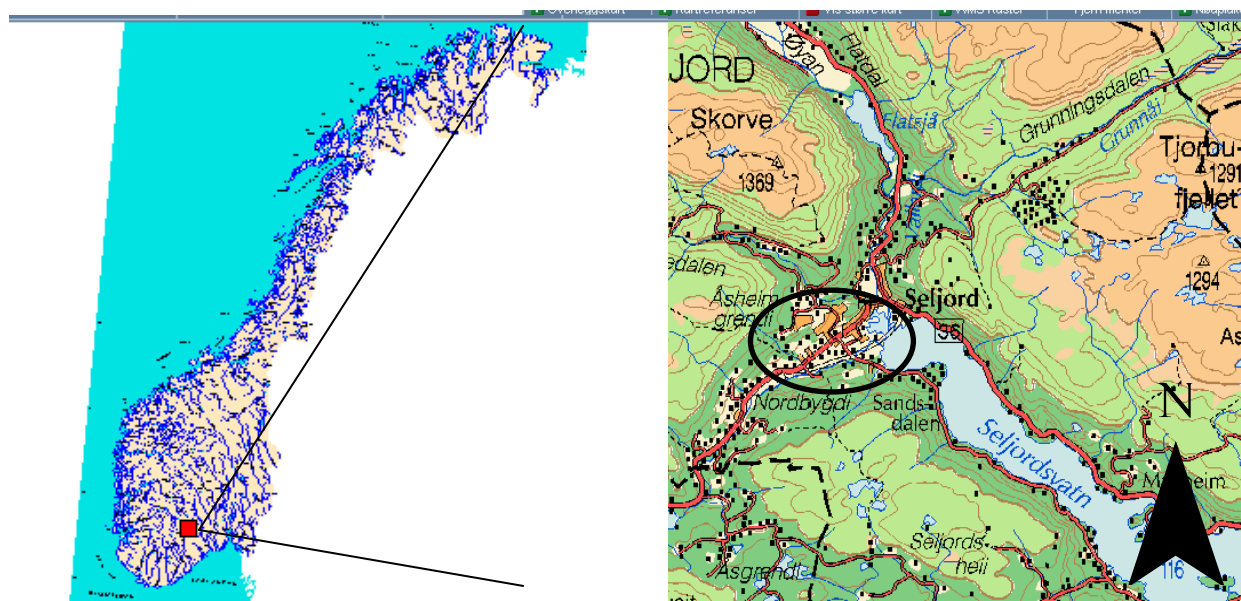
For vannets kjemiske sammensetning er det trolig to hovedvariabler som kontrollerer vannets kjemi, vannets ioneinnhold, pH og Eh (redokspotensialet og elektronaktivitet). Undersøkelser viser at hydrogeologi og hydrodynamikk er minst like viktig for grunnvannskjemien. Berggrunnens geokjemi og bergartens elementfordeling vil nødvendigvis ikke gjenspeile en grunnvannsprøve fra et borehull i bergarten (Banks et al. 2000).

I NGU rapport over Grunnvannsundersøkelser for energiuttak fra løsmasser ved Vefsn sykehus (Hilmo og Skarphagen 2001) beskrives vannets innhold av utfellbare ioner og vannets korrosive egenskaper som to geokjemiske forhold som er viktige for energiutnyttelsen. Problemer med kjemisk utfelling i varmepumpesystemer er knyttet til utfellingsproduktene karbonater, jern og mangan. Det kan spesielt oppstå problemer der hvor vannet går gjennom en fordampner eller varmeveksler (varmepumpe) og der brønner infiltrerer vannet tilbake til magasinet (Hilmo og Skarphagen 2001). Som en regel bør grunnvannet bare kjøres gjennom en varmeveksler slik at resten av anlegget ikke utsettes for unødvendig korrosjon (Lind 2007). Korrosjon av metallrør kan være elektrokjemisk eller bakteriell. Grunnvann med lav pH-verdi og høy alkalitet er spesielt ugunstig da dette viser at vannet har høy konsentrasjon av fri "aggressiv" CO₂, som hindrer karbonatfelling og øker løseligheten av metallioner. Vannets korroderende evne er også avhengig av løst oksygen, løst karbondioksid, løste salter og svovelsyre, samt strømningshastighet og temperaturforhold. Finpartikler i suspensjon i grunnvannet kan også skape problemer grunnet tilstopping av varmepumpesystemet (Hilmo og Skarphagen 2001).

3 Områdebeskrivelse

3.1 Geografisk plassering

Prosjektet er lokalisert i Seljord, Seljord kommune i Telemark (figur 3). Seljord er et handelssted i Vest Telemark regionen og har derfor stor næringsvirksomhet. Deler av sentrumsområde som er avsatt til næringsutvikling, er ikke bygd ut, og kommende utbygging kan derfor nyte godt av et kartlagt potensial for grunnvarme.



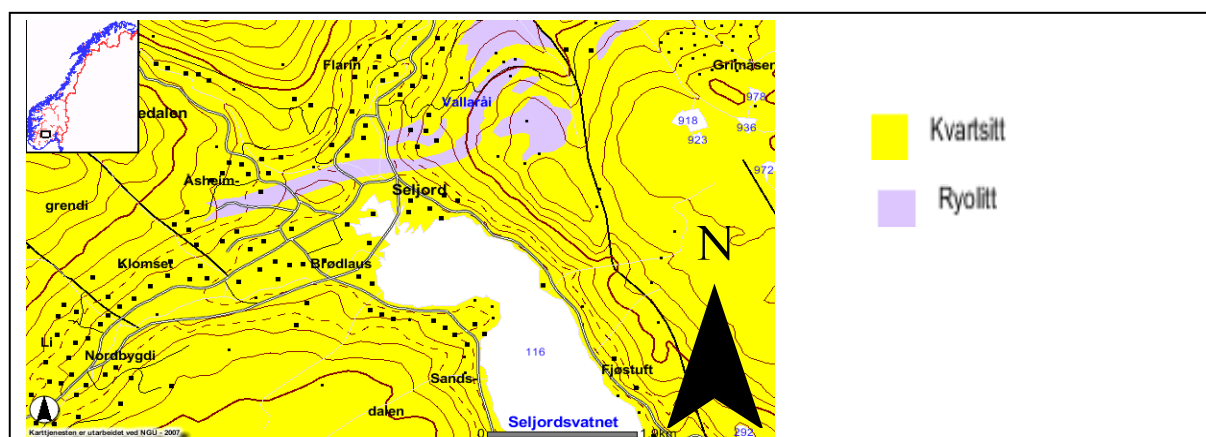
Figur 3: Kartet til venstre viser Seljord markert med rød firkant, Kartet til høyre viser beliggenheten til Seljord (inringet) i nordenden av Seljordsvatnet (utarbeidet fra Statkart 2004).

På grunnlag av økonomi og behov for mest mulig konkret kunnskap om Seljordakviferens egenskaper er denne masteroppgaven avgrenset til å gjelde området Moen-Dyrskuplassen.

3.2 Beskrivelse av lokaliteten

3.2.1 Berggrunnsgeologi

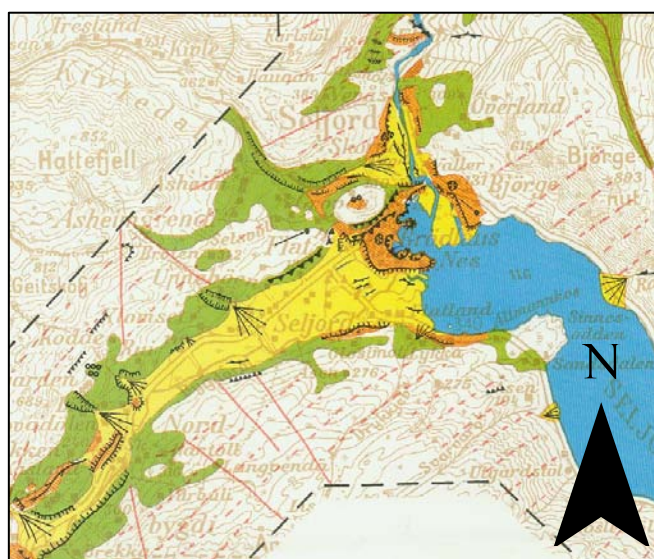
Berggrunnen i sørlige deler av kommunen er i hovedsak prega av kvartsitt som vist på figur 4 med gul farge. Det er innslag av ryolitt nord for Seljord sentrum, markert med grå farge på figur 4. Ryolitt er en dag- og gangbergart som er dannet ved at størkning av flytende magma (Garmo 2003). Kvartsitt kan bestå av opptil 96-99% kvarts. I tillegg kan mineralene glimmer, jernoksid og feltspat forekomme. Varmeledningsevnen i kvarts er 7,7 W/m·K. Dette er en god varmeledningsevne, og en kan hente ut relativt mye varme fra hver boremeter og dermed redusere kostnadene ved boring i fjell (Elvebakk, Midttømme & Skarphagen 2002). Kvartsitten i Telemark er ofte lagdelt. Kvartsitt har blitt til ved omdanning (metamorfose) av kvartsrik sand (Garmo 2003).



Figur 4: Berggrunnen i området (NGU 2007).

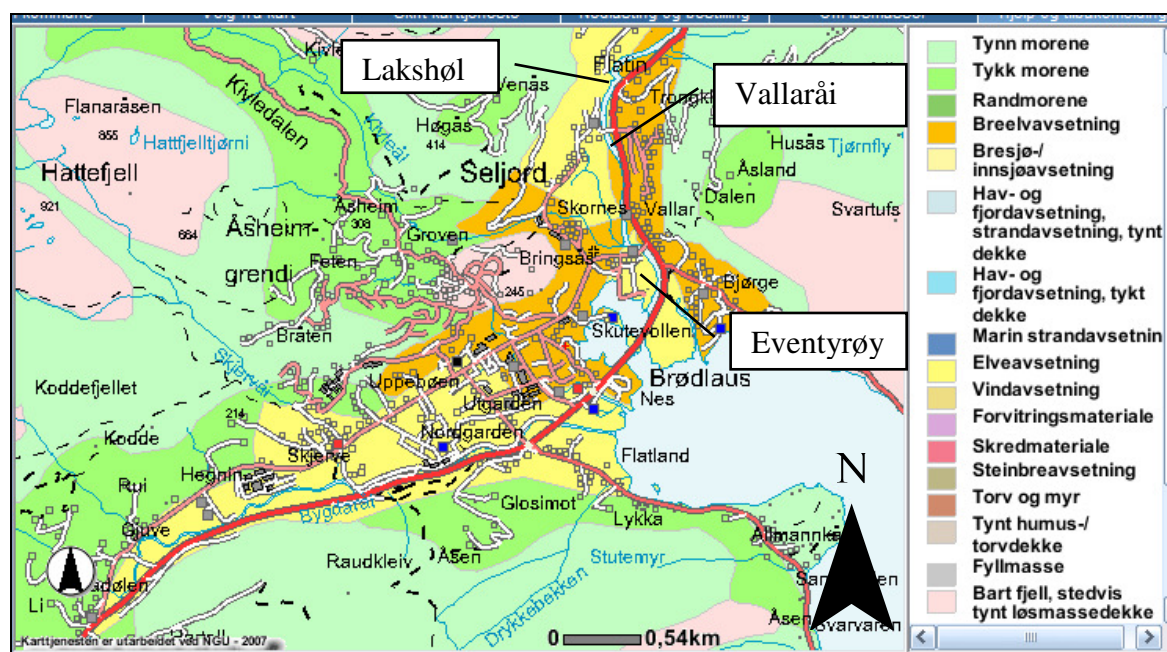
3.2.2 Kwartærgeologi

I nordenden av Seljordsvatnet møtes tre dalførere: Flatdalsdalen med elva Vallaråi (og her kommer også Grunnåi inn), Kivledalen med Kivleåi kommer ned ved Prestegarden (nordvest) og Bygdardalen med Bygdaråi som kommer fra sørvest. Alle disse elvene har gjennom tiden lagt opp store mengder



Figur 5: Utsnitt av Jansens (1982b) kvartærgeologiske og geomorfologiske kart (1:50000).

fluvialt materiale før de renner ut i Seljordsvatnet. Utsnitt av kvartærgeologisk og geomorfologisk kart over Lifjell (Jansen 1982b) viser at glasifluviale avsetninger finnes på Moen, Brøløs samt rester langs dalsidene (figur 5). Jansen kommenterer kartleggingen som grov der tolkningene har primært blitt gjort ved hjelp av flyfoto (Jansen 2007). Utstrekningen til glasifluviale avsetninger strekker seg lengre vestover (til Uppebøen) i NGUs kvartærgeologiske kart (NGU 2007) (figur 6).



Figur 6: NGUs kvartærgeologisk kart over Seljord (NGU 2007).

Langs Vallaråi (Fra Lakshøl til Eventyrøy)

Beskrivelsen til Lande (1950) viser at avsetningene i området Lakshøl til Eventyrøy (figur 6) markerer en stans for isbreen som kom fra Flatdal og at breen la opp en endemorene her. Det er sannsynlig at mye av endemorenen er erodert og transportert vekk av elver. Eventuelle dødisgroper framfor brefronten, som vi fortsatt har ved Nesøya og Skutevollen, har i så fall blitt erodert bort i senere tid av elvas utgravninger. Lande beskriver tydelige renner på sørsida av Kivleåi, noe som kan tyde på stor lateral smeltevannføring i Kivleåi. Lande nevner også i et senere avsnitt at lateralrenna som han fant nord for Prestegarden, må tyde på at Kivledalen var isfritt ved danninga av endemoreneryggen. Han begrunner dette med at isen har hatt et mindre næringsområde der enn i hoveddalføret og at den ville kunne dra seg raskere tilbake. Breen har nok ligget i Flatdalsdalføret i lang tid siden denne breen hadde størst næringsområdet og er erodert den dypeste dalen (Lande 1950). Viss det har vært et overløp

fra Møsvatn til Åmotsdal i tidligere tider har det vært et svært stort næringsområde for denne breen (Lind 2007).

I forbindelse med planlegging av ny drikkevannsbrønn til Seljord vannverk ble det i 2006 foretatt georadarundersøkelser på Eventyrøy. Georadarprofilene viste penetrasjonsdyp på opptil 35 meter i et delta (Eckholdt 2006).

Bygdardalen og Bygdaråi

Bygdaråi (i sitt nedre løp) har blitt tvinga over på sørsida av dalen grunnet sideelver som har kommet ned fra nordvest (bilde 1). Dalføret er bredest i sørenden av dalen. Dalen er preget av fluviale avsetninger i dalbunnen med morenejord i lisidene. Lande tolker isavsmeltingen i Bygdardalen slik: ” Isbreen som kom ned Bygdardalen må den siste tid hatt lite næringsområde. Den aller største delen av isen som kom ned fra



Bilde1: Elvesletta ved Dyrskuplassen. Bygdaråi er tegnet inn som en blå linje. Foto: Dyrud 2006.

nordvest har naturlig nok blitt dirigert (under siste delen av nedsmeltingen) ned mot Kviteseid gjennom de djupe dalene der Dalaåi og Morgedalsåi renner. Etter hvert som snøgrensa steg har så breen i Bygdardalen fått redusert sitt næringsområde så raskt og har smelta ned så fort at en del av breen ble liggende att i dalen der breen var tykkest, samtidig som resten av breen drog seg raskt tilbake”.

Seljord sentrum (Brøløs)

Seljord sentrum ligger i dag på et område der breer har møtes og breelver har bygd opp glasifluviale avsetninger. Disse avsetningene ved Seljord sentrum har sitt høyeste nivå på ca. 125 moh. (Jansen 1982a). På Brøløs ser en flere steder med iskontaktskråninger både i breelvmateriale og i morene. Iskontaktskråninger opptrer ofte sammen med dødisgroper som en også har flere av i området (Jansen 1982a). Det er vanskelig å se lagdeling i

løsavsetningene. Siden grunnvannsspeilet står høyt er det ikke etablert masseuttak i løsmassene (Lind 2007). Kartet til Jansen (1982b) viser at Skutevollen er avmerket som en kame avsetning. Samme kart viser også skille på markoverflaten mellom glasifluviale avsetninger og fluviale avsetninger. Skillet markerer Jansen som nedskjæring av elv eller breelv. Ute i felt er det lett å se denne nedskjæringen som en linje fra Arnestadbygget og posten til bensinstasjonen Shell der gradienten mellom de to avsetningene jevnes ut.

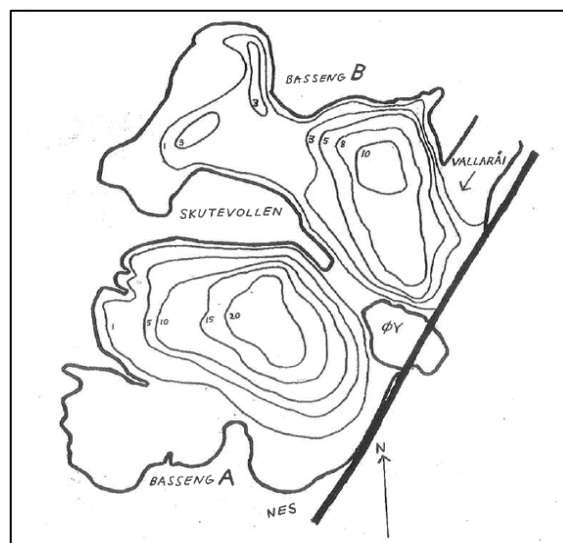
Lind tolker avsetningene i sentrum som en sammenheng med glasifluviale avsetninger fra Flatdalsbreen. Avsetningen kan ha bygd opp en stort delta som er sammenhengende fra Lakshøl til likeunder Glosimot / vegkrysset til Garvik. Senere nedskjæringer og erosjon grunnet Bygdaråi og elver fra nordvest (Ubydalen-Hattefjell) gjør at de glasifluviale avsetningene er fjernet, men det ligger trolig rester under de fluviale avsetningene (Klempe 2007).

Seljordsvatnet

De glasiale og glasifluviale avsetningene ved sørenden av Seljordsvatnet viser at det har vært isbreer i sterk nedsmelting, og isen har hatt en rask tilbakegang (Lande 1950). Innimellom har avsmeltingen stoppet opp på grunn av svingninger i klima og vi finner store avsetninger som for eksempel ved Herremoen i Bø og på Brøløs.

Lande (1950) tolker Seljordsvatnet som et typisk traufoma breerodert område på grunnlag av dybdemålinger som er gjort i Seljordsvatnet.

Lande (1950) beskriver at Seljordsvatnet er et basseng som tok til der tre større isstrømmer møtes og dette forsterket erosjonen fra møtepunktet og utover. Det er dannet flere israddeltaer ved Seljordsvatnet (Jansen 1982). Brandrud, Johansen, Mjelde & Tjomsland (1991) foretok konsekvensvurdering av ny vegtrase rundt Seljord sentrum vedrørende strømforhold, vannkvalitet og tilgroing. Undersøkellesområdet var da utenfor Skutevollen og Nesbukti og ved utløpet av Vallaråi. Dybden i det sørvestlige hovedbassenget er 21 meter

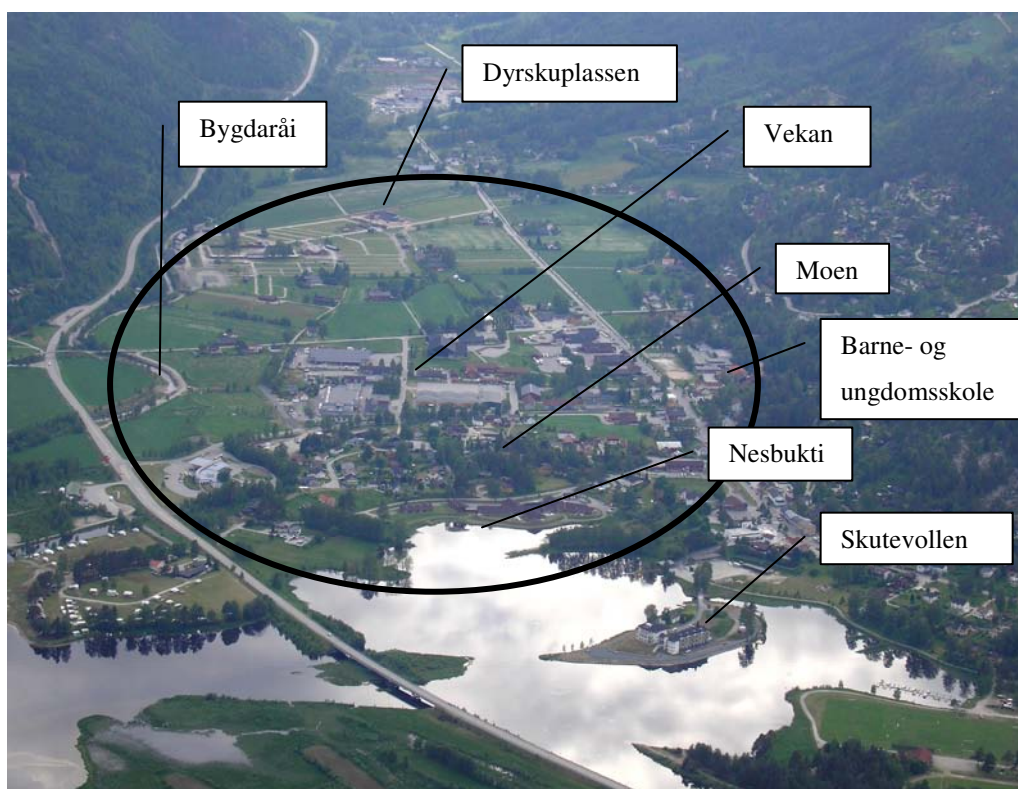


Figur 7: Dybdekart for Skutevollenbassengene, nord i Seljordsvatnet, ved utløpet av Vallaråi. Merk forskjell i koteintervaller (oppført i meter) i basseng A og B (Brandrud et al. 1991).

med grunne bukter innenfor og en grunnterskel utenfor. Det minste (øst for Skutevollen) er mer todelt, med en dyphøl på 10 meter ytterst (inntil Vallarelvvas strømløp) og en større, men grunnere indre del (figur 7).

3.2.3 Grunnvannsmagasinet i Seljord

Det aktuelle grunnvannsmagasinet er et åpent infiltrasjonsmagasin (bilde 2). Lokaliteten består av glasifluviale og fluviale avsetninger (Jansen 1982). I Seljord er det elve- og breelvavsetninger med stor mektighet som gir bra med vann, jf. eksisterende vannverk og energibrønner (Lind 2007). Grunnvannet har generelt god kvalitet og lavt innhold av ioner (Ragnhildstveit og Klempe 1991). Seljordsvatnet avgrensner akviferen mot sørøst. Seljordsvatnet er 14 km langt, har et maksimalt dyp på 110 m og ligger 116,9 moh. Nedbørsfeltet er beregnet til 687,3 km² (Lande 1950; Brandrud et al. 1991). Skutevollenbassengene er spesielt interessant med hensyn til interaksjonen mellom disse og akviferen (Lind 2007).

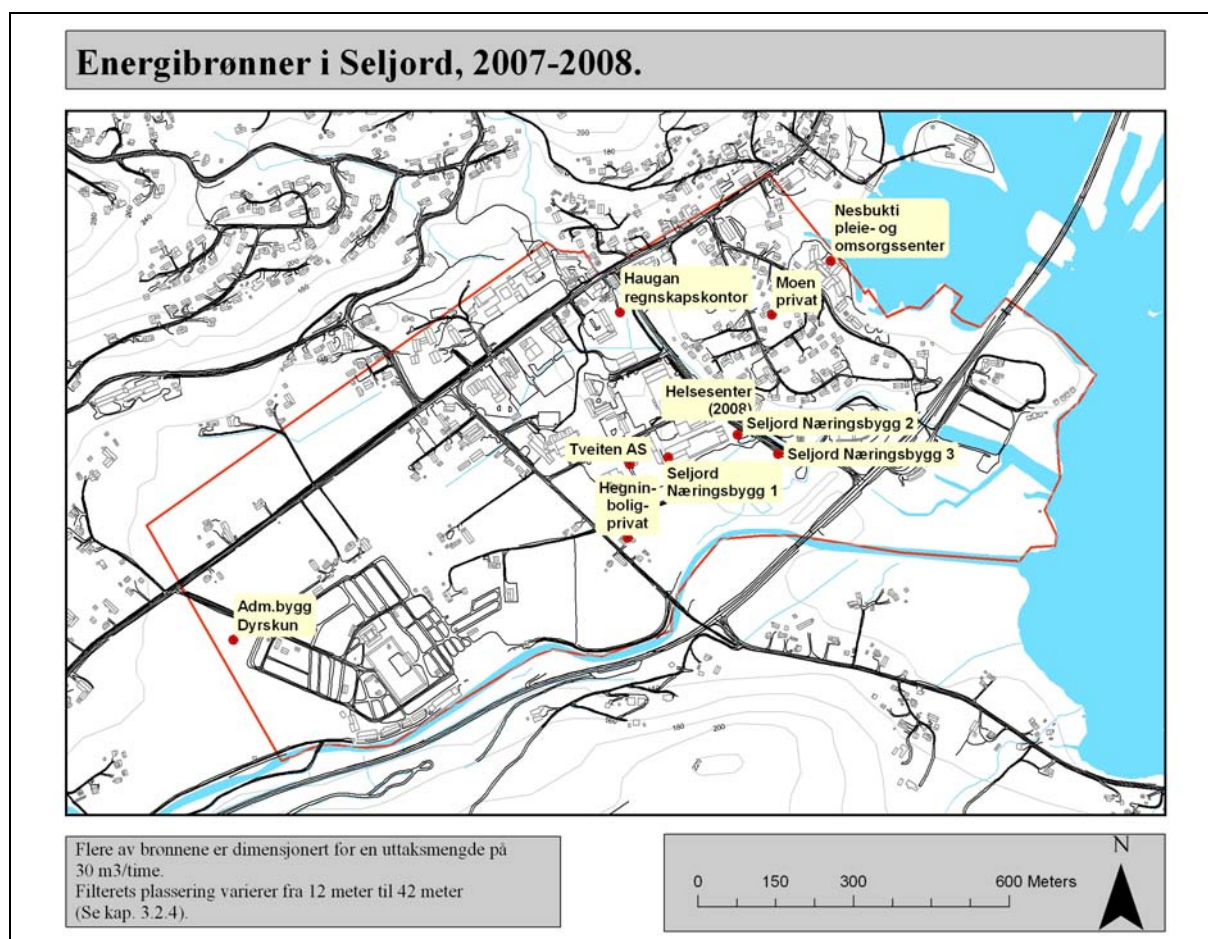


Bilde 2: Bildet viser Seljord og feltområdet er innringet i svart. Seljordsvatnet vises i forgrunn. (Foto: Dyrud 2007).

3.2.4 Grunnvarme som energikilde i Seljord

I Seljord kommune bor det i underkant av 3000 innbyggere. Seljord er et handelssentrum for Vest Telemark regionen og det er stor næringsaktivitet i forhold til innbyggertallet (Lind 2007). Energibruken i Seljord kommune har de siste årene ligget på 70 GWh/år til sluttbruker der elektrisiteten utgjør 50 GWh. I tillegg kommer tap i distribusjonsnett og i overliggende nett (Vest Telemark Kraftlag 2006).

Seljord kommune ønsker å påvirke energibruken i en bærekraftig retning med større bruk av lokale energikilder og lokal verdiskaping. Kartlegging av potensialet for uttak av grunnvann til varmepumper er et ledd i en langsiktig plan for videre utbygginger og mulighet for energifleksibilitet (Lind 2007). Dagens energibrønner vises i figur 8.



Figur 8: Energibrønner i Seljord i 2007, inkludert ny energibrønn ved helseneteret. Seljord næringsbygg 1 er ute av drift. Brønnen på Moen er boret, men er ikke koblet opp mot noen bygg forløpig.

Den første energibrønnen i Seljord ble til da Seljord lysfabrikk kontaktet Ingeniør Tveiten AS (Tveiten Rådgivende Ingeniører AS) i 1987 i forbindelse med behov for kjølingsbrønn. I 1987 ble det boret en 10 meters dyp brønn. Det viste seg å være finere og siltige masser etter 10

meters dyp. Det ble gjort forundersøkelser med blant annet sonderboring til 32 meters dyp på stedet, der boringen indikerte sandige masser (Lind 2007).

I forbindelse med utbygging av lokalene til Tveiten Rådgivende Ingeniører ble det boret en brønn på 10 meters dybde i 1999 som brukes i dag til oppvarming og kjøling (Lind 2007).

I 2002 stod Nesbukti pleie og omsorgssenter ferdig. Byggmassen var på over 2000 m². En stor prosent av byggets oppvarmingsbehov skulle bli dekket av grunnvarme. Brønnen er 41 meter dyp, og grunnvannet har høyere temperatur enn forventet, noe som har resultert i en kortere inntjeningstid på anlegget. Det har imidlertid vært en del tekniske problemer med anlegget (Lind 2007).

Haugan Regnskapskontor investerte i en energibrønn i 2005. Brønnen er boret til 30 meters dyp og har fungert svært godt (Lind 2007).

Seljord Næringsbygg (tomta til tidligere Seljord lysfabrikk) blir hovedsaklig oppvarmet av grunnvarme. Her er det to brønner på 26 og 18 meter. Det har vært problemer med anlegget på grunn av jern i vannet(Lind 2007).

Administrasjonsbygget til Dyrskun Arrangement stod ferdig høsten 2007. Erfaringer fra energibrønner og grunnforhold i Seljord førte til satsing på grunnvarme (Lind 2007). Borehullet er 16 meter dypt.

Høsten 2007 ble to energibrønner boret på Moen og ved Hegnin. Begge brønnene er private og formålet er oppvarming til bolighus.

I 2008 skal et nytt helsesenter stå ferdig i Seljord. Kommunestyret vedtok i 2006 at bygningen skulle bli oppvarmet med bruk av grunnvarme. Høsten 2007 ble det boret en 18 meter dyp brønn.

4 Forsøksbeskrivelse og metoder

4.1 Anskaffelse av data

I kartleggingsprosjekter er behovet for nye undersøkelser avhengig av mengde og kvaliteten på eksisterende data. Gode eksisterende data vil minimere tidsramma for feltarbeid og minske kostnadene. Det ble derfor jobbet grundig med å få en oversikt over utførte undersøkelser før prosjektskissen ble satt opp. Med eksisterende data menes tidligere kvartærgeologiske og hydrologiske undersøkelser, målte verdier av nedbør og vannstand. Kartgrunnlaget er på 1:50000 og 1:5000 FKB, Felles kartdata Base vedlikeholdt av Statens kartverk. Kartgrunnlaget og innmålte punkter er stedfestet i UTM kartprojeksjon (EUREF89). Digitale kart stilles til disposisjon fra Seljord kommune.

4.1.1 Tidligere arbeider i området

Før dette prosjektet ble startet er disse arbeidene utført, som har vært relevante for denne oppgaven:

- Kvartærgeologisk kartlegginger i Seljord kommune (Lande 1950; Jansen 1982).
- Undersøkelser av grunnvannsmuligheter/ drikkevannforsyninger i Seljord (Ragnhildstveit og Klempe 1991; Eckholdt 2006).
- Sonderboring i forbindelse med forundersøkelser av kjølingsbrønn for Seljord Lysfabrikk (Lind 1987).
- Sedimentologiske analyser fra boring av energibrønner (Lind 2003).
- Undersøkelser av grunnforholdene ved utfylling ved prosjektert bru over Seljordsvatnet (Straumnes 1991).
- Konsekvensvurdering av fylling med hensyn til strømforhold, vannutskifting, vannkvalitet og tilgroing ved Nesbukti (utløpet av Vallaråi) (Brandrud et al. 1991).

4.1.2 *Transiente data*

Følgende transiente data har vært tilgjengelig for oppgaven:

- Vannstanddata fra Vallaråi (Skagerak energi).
- Vannstanddata fra Seljordsvatnet (ved Sinnesodden) og utløpet av Seljordsvatnet (Skagerak energi).
- Temperaturdata fra Vallaråi fra 1980 tallet (Skagerak energi).
- Avrenningsverdier fra Regine (REGINE 2005).
- Nedbørsmålinger på Lønnestad, Seljord (DNMI 2007).

4.2 *Grunnundersøkelser*

4.2.1 *Oppmåling*

GPS-målingene er gjort med en Topcon LagacyE.

Mottakere: Topcon LagacyE

Antenner: Topcon LegAnt

Målebok: PSION WB m/GEODOS programvare, versjon: 11.74.09

Nøyaktighet: Generelt 10mm + 1,5 ppm av avstand base-rover

Innmålte punkter er stedfestet i UTM kartprojeksjon (EUREF89).

Koordinatregistreringene er foretatt av Bjørn Arild Hagen, avdelingsingeniør i Seljord kommune, og undertegnede den 25. mars, 18. april og 5. juni 2007.

4.2.2 *Georadar*

Georadar (GPR) er en elektromagnetisk metode for å avdekke strukturer i sedimentene som kan indikere forekomst av grove løsmasser, kompakte masser, fast fjell, finstoffrike sedimenter og grunnvann med forhøyet elektrisk ledningsevne. En georadar består av to antenner som sender og mottar elektromagnetiske bølger med frekvenser mellom 10 og 1000 MHz og en datamaskin som tolker innkomne signaler. Når en sender elektromagnetiske bølger ned i bakken, vil disse bli reflektert tilbake når energien i bølgen når ei grenseflate mellom to materiale som har ulike dielektriske (isolerende) egenskaper (figur 9). På denne måten kan en indikere for eksempel en grenseflate mellom to lag med ulik kornstørrelse.

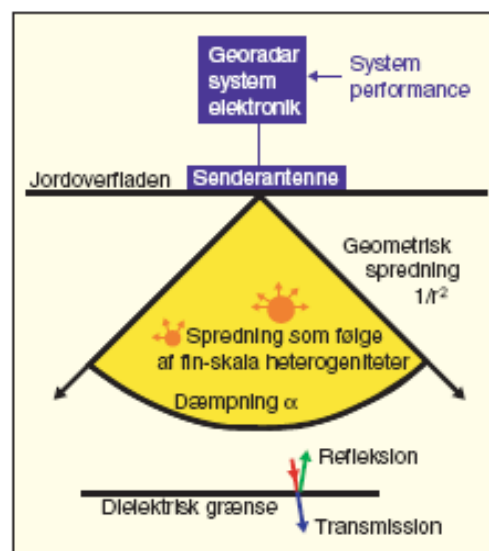
Dielektrisitetetskonstanten er avhengig av vanninnhold som videre avhenger av porestørrelsen i de ulike lagene (Dagestad, Tønnesen & de Beer 2006). Vannets ioneinnhold har også stor påvirkning på signalene apparatet mottar (Eckholdt 2007). Datamaskinen som er mottaker, måler spenninga i de reflekterte bølgene og tolker dataene. Koziel, Lauritsen, Mauring, Rønning & Tønnesen (1995) betegner egenskapene ved georadar slik: På grunn av georadarens høye frekvenser (lave bølgelengde) har metoden langt bedre oppløsningsevne enn andre geofysiske metoder, og den gir dermed detaljinformasjon som ingen annen metode kan gi.

Imidlertid er georadarens største svakhet den begrensede dybderekkevidden, at den ikke måler materialparameter direkte og at det kreves erfaren tolker (Koziel et al. 1995).

Det har ikke blitt kjørt georadar i feltområdet før, men ut ifra tidligere boringer av energibrønner antar en at løsmassenes mektighet er relativt stor. Det ble lagt opp et rutenett over feltområde, men det ble også supplert med georadarprofil ettersom nye og interessante sedimentologiske konturer dukket opp. Det ble også lagt vekt på å kjøre georadar i områder der undersøkelsesbrønner skulle plasseres for å verifisere og lette den sedimentologiske tolkningen.

Georadaren som er brukt i dette prosjektet, er levert av Sensors and Software, Canada, og er av typen pulseEKKO 100 (bilde 3). Georadarmålingene er tatt langsetter dalen (VØ) og på tvers av dalen (NS). Feltarbeidet ble foretatt to uker i mars og en dag i april på frossen mark (bilde 3).

Det var høyt prioritert å finne grense til fjell, og derfor ble en antenne på 50 MHz og en 1000 volts sender brukt. Ved å bruke en 50 MHz-antenne får en størst



Figur 9: Skisse over hvordan signaler sendes ned i jorden og fenomener som reduserer georadarsignalets energi (Reynhold 1997).



Bilde 3: Georadaroppmåling ved Seljord Næringsbygg.
Foto: Dyrud 2007.

penetrasjon, mens en antennefrekvens på 100 MHz gir større vertikal oppløsning (Midtømme og Elvebakk 2003). Det ble foretatt to meter antenneavstand samtidig med 0,5 m steppvis registrering.

Koordinatene ble målt opp med GPS (Topcon LagcyE). Målefrekvensen varierte avhengig av helningsvariasjon og objekter i terrenget.

Radarbølgenes gjennomsnittlige vertikale hastighet ble satt til 0,06 m/ns. Hastigheten er bestemt ut i fra tidligere feltefaringer og ved at vi forventer at jordartene består av metta og sandige masser (Klempe 2007). Grunnvannstanden i området varierer mellom 1 og 5 meter. Dybden på reflektorer i marksonen (tørrsone ned til grunnvannsspeil) kan derfor være noe mer enn det dybdeskalaen viser i opptakene. Således kan bruk av kun en hastighet for hele profilet vise feil dybde til fjell i deler av profilet (Midtømme et al. 2003).

4.2.3 Prosessering og fremstilling av GPR-data.

Georadarprofilene ble lagt inn i WinEkko 1.0 softwareprogram. Programmet støtter Sensor & Software, pulseEKKO 100. Under prosessering ble det lagt til topografifiler for å få frem reel helning. Helningsgrad på overflata er en viktig opplysning for tolkningen siden det er påvist breelavsetninger i området. Etter at topografien ble lagt til, ble kvaliteten på bildene svekket siden dypereflektorer mistet intensiteten. Dette er et problem som oppstår i forskjellige GPR prosessering og fremvisningsprogram (Eckholdt 2007; Klempe 2007). For å likevel få frem topografikorrigerede bilder med dypereflektorer ble gain constant (500) valgt som forsterker. Gain constant ble foretrukket fremfor andre selekteringsinnstillinger siden disse gav liten merkbar forskjell. Gain constant på 500 forsterker signalene likt, uansett dybde.

Det kreves lang erfaring for å tolke georadarprofiler, og derfor ble tolkningen foretatt med grundig veiledning fra Harald Klempe. Einar Eckholdt fra Miljøgeologi AS har gitt supplerende innspill.

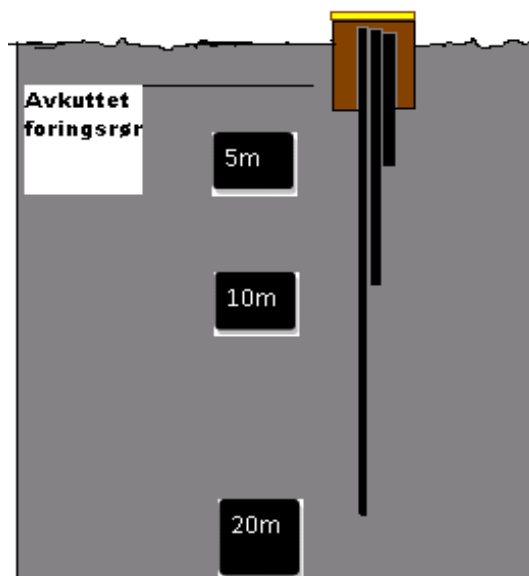
4.2.4 Flernivåundersøkelsesbrønner

Gravemeldingstjenesten, Geomatikk, og Vest Telemark Kraftlag foretok kabelpåvisninger før prøveboring. Noen brønner ble flyttet fra utgangspunktet på grunn av nærhet til kabler.

Porsgrunn brønnboring AS fikk oppdraget om boring ettersom dette firmaet var billigst under anbudsrunderen og i tillegg kunne firmaet starte arbeidet i april. Firmaet bruker en Nemek beltegående borerigg og Odex borkrone.

Ni flernivåundersøkelsesbrønner ble etablert i tidsrommet 23.april til 4.mai 2007. Flernivå brønner var foretrukket for å få frem temperaturgradienter og grunnvannspotensialet nedover i grunnen.

Hver brønn ble utstyrt med 3 stk 25mm PE rør på 5, 10 og 20 meters dyp. I enden av hver brønn står et 90 cm langt PE filter med 0,1 mm slisseåpning (figur 10).



Figur 10: Figuren viser hvordan flernivå undersøkelsesbrønner ser ut etter foringsrøret er fjernet.

4.2.5 Kornfordelingsanalyser

Kornfordelingsdata er bearbejdet sammen med andre data fra feltområdet. En kan ikke se på kornfordelingsdata ukritisk og isolert siden kornfordelingskurven er et resultat av samspillet av flere faktorer, ikke bare avsetningsmiljøet. Provenans, kildeområdets forvitringstiljø og transporteringsmekanismer fram til avsetningsområdet har innvirkning på kornstørrelsene og tekstur (Bjørlykke 2001). Prøvemethodikken i felt er avgjørende for kornfordeling, sortering og vurdering av representativiteten for en prøve. Tre plastbøtter samlet oppspylt materiale fra boringene. Bøttene ble satt til sides og finstoffet fikk synke før det ble tatt en til to kilos prøver av materialet for hver meter.

Dybden på hver sedimentprøve nedover i bakken er unøyaktig målt. Brønnboringfirmaet brukte foringsrør med tre meter lengde som mål på hvilke dybde sedimentprøvene ble hentet opp i fra.

Sedimentprøvene ble satt inn i tørkeskap (105 °C) og noen prøver i tørkerom (med elektrisk varmeovn). Et stort utvalg av prøvene ble siktet i 20 minutter med maskeåpning etter

Wentworth's skala (8, 4, 2, 1, 0,5, 0,250, 0,125 og 0,063 mm). Det er totalt analysert 111 prøver. Fem prøver ble "brent" på grunn av høyt silt innhold kombinert med sterk varme. Vektprosent ble regnet kumulativt for hver fraksjon og ført inn i excel regneark for å få digital fremvisning av semilogaritmiske kurver. Ut ifra kurvene fant en dominerende kornstørrelse etter vektprosent og sorteringsgrad, S_o (d_{60}/d_{10}). $S_o < 5$ karakteriseres som godt sortert og $S_o > 6$ er dårlig sortert (Colleuille et al. 2004b). Bratte kurver indikerer godt sortert materiell, mens slake kurver som skjærer flere dekaner indikerer dårlig sortering. Bimodale kurver med svært dårlig sortering kan tyde på at prøvene skjærer ulike avsetningsmiljø. Forsøk på å dele en bimodal kornfordelingsprøve i to avskilte prøver kan være vanskelig (Klempe 2007). Det er i så fall en mer hensiktsmessig løsning å bruke en d_{20} verdi ved beregning av hydraulisk ledningsevne (K-verdi) (Eckholdt 2007). Siden denne kartleggingen skal vise akviferens egenskaper for uttak av grunnvann, beholdes likevel d_{10} i beregning av K- verdi.

Grunnvannsmagasinet tekstur kan bestemmes gjennom tolkning av kornfordelingskurver. Det er her brukt SOSI standard generell objektkatalog versjon 4.0 for klassifisering av kornsammensetningen (etter prosentvis mengde) (Statens kartverk 2006). SOSI standard-generell objektkatalog versjon 4.0 bruker en modifisert versjon av Wentworth kornstørrelsesfraksjon.

4.2.6 Hydraulisk ledningsevne (K)

Kornfordelingsresultatene brukes til å beregne avsetningenes hydrauliske ledningsevne (K). Hydraulisk ledningsevne (K) er Darcys proporsjonalitetsfaktor og forteller hvor fort vannet strømmer gjennom et porøst materiale. K defineres som væskens spesifikke vannføring (m/s) ved en gradient lik 1.

Hydraulisk ledningsevne (K) i mettet sone avhenger av løsmassenes sammensetning, struktur og væskens egenskaper. Tette masser som silt og leire har lave K-verdier (tabell 2), mens grovere og sorterte masser har høyere.

Tabell 2: Representative verdier i løsmasser (m/s)(Fetter 2001)

Kornstørrelse	K (m/s)
Godt sortert grus	10^{-4} - 10^{-2}
Godt sortert sand	10^{-5} - 10^{-3}
Siltig sand, fin sand	10^{-7} - 10^{-5}
Silt, sandig silt	10^{-8} - 10^{-6}
Leir	10^{-11} - 10^{-8}

Beregning av hydraulisk ledningsevne (K) for sandige sedimenter kan estimeres med ulike formler, der formlene Hazen (sitert av Fetter 2001), Gustafson (Andersson, Andersson & Gustafson 1984), Beyer & Schweiger (sitert av Aschenbrenner, Richter & Richter 1992) og Kozeny-Carman (sitert av Fransson og Norden 1996) er mye brukt.

I 1894 framsatte Hazen en empirisk permeabilitetsformel etter en rekke forsøk i filtersand (Fetter 2001). Hazen kan brukes til å estimere hydraulisk ledningsevne på godt sorterte masser ($d_{60}/d_{10} \leq 5$). I Hazens formel er viskositet med i konstanten (Fetter 2001) (formel 2 og formel 3).

Formel 2:

$$K = 0,01157 \cdot d_{10}^2$$

$$\frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 5$$

Formel 2 gjelder kun ved

Der K = Hydraulisk ledningsevne (m/s)

d_{60} = Korndiameter (mm) ved 60 %

d_{10} = Korndiameter (mm) ved 10 %

Hazen tar ikke hensyn til pakkingsgrad, som kan ha stor innvirkning på permeabiliteten (Helgestad 2005). Fetter (2001) og Helgestad (2005) beskriver imidlertid en metode for å bruke Hazen hvis kriteriet $d_{60}/d_{10} \leq 5$ overstiges.

Gustafson fant fram til en empirisk formel for et estimat av den hydrauliske ledningsevnen (Andersson et al. 1984). Forsøket ble gjort på et stort antall pumpeprøver og sikteanalyser på nordiske sedimenter. Gustafson har tatt utgangspunkt i Hazens beregningsmetode. Det som skiller formlene er den omfattende beregningen av formelens konstant ut fra funksjonen $E(U)$. Funksjonen $E(U)$ er bestemt ut ifra kornfordelingsanalyser på en rekke jordprøver og prøvepumping i tilsvarende masser, $E(U)$ og erstatter Hazens konstant 0,01157 (Andersson et al. 1984) (formel 3).

Formel 3:

$$K = E(U) \cdot d_{10}^2$$

Der

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$E(U) = 10,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{e^3}{1 + e} \cdot \frac{1}{g^2 \cdot (U)}$$

$$e = 0,8 \left(\frac{1}{2 \ln U} - \frac{1}{U^2 - 1} \right)$$

$$g(U) = \frac{1,30}{\log(U)} \cdot \frac{U^2 - 1}{U^{1,8}}$$

Gustafsons metode (1984) bygger på skandinaviske kvartære overflatesedimenter, slik at estimater av hydraulisk ledningsevne fra denne metoden er å foretrekke for sedimentene i Seljord. I tillegg viste prøvene lav sortertingsgrad, og Gustafsons metode kunne brukes for store deler av utvalget. Der sorteringsgraden var lav ($So < 5$), ble resultatet fra Gustafson sammenlignet med Hazens metode. Akkurat som en må se på kornfordelingsdata kritisk, må en se kritisk på resultatene av hydraulisk ledningsevne for de ulike metodene. Det er ingen metode som gir et fasitsvar og derfor er det interessant å sammenligne resultatet fra ulike metoder (de Beer 2007). Der kravene for de ulike metodene var tilfredstilt, ble det tatt et gjennomsnitt av Gustafson og Hazen. I prøver med d_{10} lavere enn 0,06 mm ble en litteraturverdi fra Fetter (2001) brukt.

4.3 Analyse av temperatur og vannregime

Det ble kjøpt inn 27 nye loggere til prosjektet fra Schlumberger Water Services®. Loggerne kom ferdig kalibrert fra Nederland. Loggerne er av typen MiniDiver med en diameter på 22 mm. Schlumberger Water Services Divers er spesialdesignet for å måle temperaturer og vanntrykk i grunn- og overflatevann. Loggerne har varierende oppløsning og nøyaktighet, avhengig av trykknivået loggeren er tilpasset. Loggerne med 10 meters trykkehøyde har en oppløsning på 0,25 cm H₂O, 20 meters trykkehøyde har en oppløsning på 0,4 cmH₂O, og 50 meters trykkehøyde har en oppløsning for 1 cmH₂O. Loggeren inneholder en press sensor for måling av vannivå, temperatur sensor og et non volatile minne for å lagre målingene og batteriet. Den kan bli programmert i ulike intervall, og i dette tilfellet er den programmert til å måle hver tredje time.

Baro Diveren måler atmosfæriske trykkvariasjoner, og disse målingene må senere brukes til å kalibrere vannstands nivåene. Baro Diveren brukes også til å måle lufttemperatur.

Logger Data Manager (LDM) software blir brukt til å programmere og avlese loggerne.

I undersøkelsesbrønnene er det plassert 23 loggere på 5, 10 og 20 meters dyp. Det er også plassert loggere i Bydaråi, i Seljordsvatnet, en i Tussejuvbekken og en i Vallaråi (senere flyttet til Nesbukti og Seljordsvatnet).

4.4 Utvikling av GIS system – 2D modellering

Kommersielle GIS programmer (Geografiske Informasjons Systemer) opererer i 2D og 3D, der 3D funksjoner har ofte store begrensninger (Klempe 2004). Klempe (2004) beskriver en mulig løsning på problemet med å behandle 3D informasjon i 2D GIS. Cools, Meyes, Woldeamlak, Batelaan & de Smedt (2006) beskriver hydrogeologisk klassifisering og GIS forvaltning av borehulsdata. Begge artiklene danner grunnlaget for sammenstillingen av georadar og boredataene fra Seljord. Målet er å organisere dataene til å representere utvalgte verdier i rommet og dele sedimentasjonsmiljøet i faciesassosisjoner. Programvaren som blir brukt er ESRI ArcGIS 9.2 og ESRI ArcView 3.3. Koordinatene og høydeverdiene (x,y,z) er hentet fra UTM 1:50000 og oppmålte punkter våren 2007.

4.4.1 Databaser

Data fra tidligere undersøkelser og syv etablerte energibrønner, georadarprofiler (GPR) og boredata fra 9 undersøkelsesbrønner danner grunnlaget for oppbygging av en database. Grensene mellom de ulike lagene i georadarprofilene kan etableres i databasen ved hjelp av teknikker for dynamisk segmentering (Klempe 2004). Dataene systematiseres for å lage logiske relasjoner og spørringer mellom egenskapene og opplysninger. Sand og grus er splittet opp i fin, mellom og grov siden disse typene gir stor forskjell i permeabilitet og opptrer i spesifikke sedimentære miljøer (Klempe 2004). Silttypene er samlet som en gruppe siden permeabilitet er lav og mindre interessant for brønnplassering.

Databaseprogrammet som brukes er Microsoft Access Database 2007.

4.4.2 Inndeling av sedimentfacies

Prinsippet med å lage en konseptuell modell med faciesassosiasjoner (hydrogeologiske samhörigheter) er å illustrere en metode for å konvertere kaoset i naturen i et system som kan bli testet signifikant og modellert matematisk (Anderson 1989).

Faciesassosiasjoner er i dette tilfellet definert til å være homogene lag, men med anisotropisk grense siden dette gir hydrogeologisk hensikt når en skal modellere. De ulike faciesene må beskrive horisontale trender i hydraulisk konduktivitet (Anderson 1989). Innenfor hver enkelt faciesassosiasjon er det delt inn i lithofacies. Lithofacies er en avsetningstype med karakteristiske kornstørrelsesegenskaper, tekstur og sedimentærestrukturer. Egenskapene avhenger av sedimentasjonsmiljøet når avsetningene ble dannet. De enkelte lithofacies er satt sammen i faciesassosiasjoner etter hvilke lithofacies som er i nær sammenheng feltmessig og dannelsesmessig. Sammensetningen av lithofacies i en faciesassosiasjon skal bestemme vannledningsevnen, porøsiteten, homogeniteten og isotropien i en akvifer (Klempe 1988).

Lithofacies i feltområdet er fordelt på grov, middels eller fin fraksjon av en kornstørrelse. Årsaken til dette er at forskjellige silt, sand eller grusfraksjoner er å oppdrive i spesifikt sedimentære miljø (Klempe 2004). Klingbeil, Kleineidam, Aspiron, Aigner & Teutsch (1999) fant forskjell i hydraulisk konduktivitet mellom fem ulike gruslithofacies og samtidig som de fant samme permeabilitet i fem sandlithofacies.

Resultatene fra database søkene, Klempes dr. avhandling om Eika grunnvannsmagasinet i nabokommunen (Klempe 1988), Klempe (2004), Anderson (1989) og Miall (1978) danner grunnlaget for inndeling av faciesassosiasjoner og lithofacies i Seljord.

4.4.3 2D geologisk modellering i ArcGIS

Databasen ble brukt til å dele sedimentologien inn i facies og lithofacies. Resultatene fra spørringene gav egenskapstabeller (med z-koordinater) for hver facies og lithofacies. De ulike faciesassosiasjonenes utbredelse framstilles ved interpolering i ArcGIS. Interpoleringsmetoden Inverse Distance Weighted (IDW) ble foretrukket. Denne metoden antar at hver punkt har en lokal influens som minker med avstanden fra punktet. Metoden er god siden små avstander vil fremheve kortfrekvente variasjoner. En anvender en vektfaktor på avstanden til interpolerte punkter (Booth 2000). Toppnivået på et nytt lag får egenskap som z-koordinat så akviferegenskapene kan vises i 3D-modeller for å representere virkeligheten. Det blir da mulig å legge flere forskjellige z-verdier i hvert punkt (x,y koordinat). Dette er ikke mulig i flere kommersielle digitale terrengmodeller (DEM) (Klempe 2004). I ArcGIS interpoleres facies og lithofacies data kun innenfor observerte verdier. Dette gir en mer presis tolkning av lagdeling (unngår ekstrapolering). Lagdelingen blir importert til den tre-dimensjonale grunnvannsmodellen (FEflow).

4.4.4 Strømningsanalyser i nedbørsfeltet

Med strømningsanalyse beskrives vannets avrenning på en terrengoverflate med bakgrunn i helningsretningen i denne overflata. I virkeligheten vil det i tillegg til helningsretning være andre parametere som vil virke inn på avrenning. Dette kan være bart fjell, løsmasser, forkastninger, grotter, vegetasjon (Devik, Svaland, Østtveit, Uhnger & Valen 2007). Disse parametere blir ikke diskutert dette prosjektet. Analysene ble gjort ved hjelp av en terrengmodell av typen TIN (Triangular Irregular Network). TIN modellen danner kontinuerlige, ikke-overlappende triangler med lineær interpolasjon mellom tre punkt. Det dannes et plan mellom høydepunktene, og en kan beregne alle slags høyder i trianguleringen ved å bruke gjennomsnittlige knuteverdier fra triangler som ligger i nærheten (Devik et al. 2007; Johnston & McCoy 2002). Målestokk 1:50000 viste seg å være mest gunstig siden dette

er et relativt stort feltområde. Tynning for å fjerne tette punkter i forhold til ekvidistansen er derfor ikke nødvendig.

TIN modellen blir brukt videre som grunndata for å bygge opp et grid over området. Grid er et kvadratisk rutenett som danner grunnlaget for overflateanalysene. Grid har samme konstruksjon som raster-celler med lik størrelse på hver celle i hele gridet. Ved å lage et grid ut ifra et TIN gjøres det interpolasjon mellom nodepunktene fra TIN som gir verdier til hver celle i gridet. Nøyaktigheten på grunnlagsdatane (punkttetthet) og cellestørrelse bestemmer hvor detaljert gridet blir. Cellestørrelsen er den minste enheten i gridet og angir her geometrisk oppløsning (Devik et al. 2007; Johnston & McCoy 2002).

Analysen *flow direction* (strømningsretning) tar utgangspunkt i de åtte cellene rundt en celle og bestemmer ut i fra disse verdiene i hvilken av de åtte retningene vannet stømmer. Analysen *flow accumulation* (strømningsansamling) beregner hvor vannet samler seg og hvor det er tørrere områder. Nedbørsfeltet beregnes i analysen *watersheds*. Del nedbørsfelt i denne sammenheng er at det blir laget mange mindre nedbørsfelt inne i det store gridet som er hele nedbørsfeltet (Devik et al. 2007; Johnston & McCoy 2002).

4.5 3D Grunnvannsmodellering

Målsettingen med å utarbeide en grunnvannsmodell er å øke forståelsen for de komplekse hydrogeologiske forholdene i Seljord og kvantifisere vannbalansen i området. Med hjelp av et simulert strømningsmønster skal områder som er godt egnet og mindre godt egnet for grunnvarmeanlegg kunne vises.

4.5.1 Grunnprinsipp for grunnvannsmodellering

Til å modellere grunnvann blir det brukt matematiske modeller der differensialligninger representerer strømninger av grunnvann i akviferen. Differensialligningene blir løst med numeriske teknikker. Det finnes flere numeriske teknikker, men endelig differanse- og endelig elementmodell er de mest brukte. En forskjell på disse metodene er at endelig differansmodellen bruker kvadratiske ruter for å fordele differensialligninger i rommet, mens elementmodellen bruker triangulære element. Ulike måter å løse differensialligninger gir ulike

måter å representere egenskapene til akviferen (Langeland og Moe 2003; Anderson og Woessner 2002; Anderson og Wang 1982).

Differensialligningen blir satt opp i et grid som dekker akviferen. Ligningene i hver rute presenterer det spesifikke forhold i et punkt. Punktet ligger i skjæringspunktet mellom rutene (nettsentret) eller midten av hver rute (blokkentret) (Langeland og Moe 2003; Anderson og Wang 1982). Numeriske og iterative metoder løser ligninga som gir en potensialhøyde (head) i hver rute. På denne måten blir head eller grunnvannshøyda romlig beregnet i akviferen. Differensialligningen kalles strømningsligningen (formel 7) og er satt sammen av vannbalanseligningen (formel 4) og Darcys lov (formel 5) (Anderson og Woessner 2002)

Vannbalanseligning for en homogen og isotrop akvifer (kontinuitetsligninga):

Formel 4:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R$$

Volum av vann inn (x,y,z retning) = Volum av vann ut ± endring av lagret mengde vann kontrollvolumet.

Der ∂_q x,y,z = spesifikk vannføring i x, y og z retning

S = spesifikk magasinkoeffisient

H = piezometrisk head (åpen akvifer= høyde på vannspeilet)

t = tid

R= infiltrasjon eller uttak av vann med ± fortegn

Vannbalanseligningen kan ikke brukes alene siden q er vanskelig å måle direkte. Ved å uttrykke Darcys lov ved spesifikk vannføring (formel 5) og kombinere den med kontinuitetsligninga (formel 4) kan en beregne strømningsligninga for tre dimensjoner (formel 6). Darcys lov om væskestrøm i porøst media (formel 5):

Formel 5:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} dx$$

Der K = hydraulisk ledningsevne

$\partial h/\partial x$ = potensialgradienten i x retning

Darcys lov om væskestrøm (formel 5) substituert inn i vannbalanseligningen gir følgende formel for en anisotrop akvifer (formel 6):

Formel 6:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = \epsilon_s + \frac{\partial h}{\partial t} + R$$

Teorien om varmestrøm er beskrevet av Anderson (2005), Domenico og Schwartz (1998) (formel 7).

Formel 7:

$$\frac{K_e}{\rho c} \nabla^2 T - \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \nabla \cdot (T q) = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Der T = temperatur

t = tid

ρ_w = tetthet for væske

c_w = spesifikk varme for væske

ρ = tetthet for det metta porøse mediet

c = spesifikk varme for det metta porøse mediet

q = spesifikk vannføring

k_e = effektiv varmeledningsevne

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{Laplaces ligning})$$

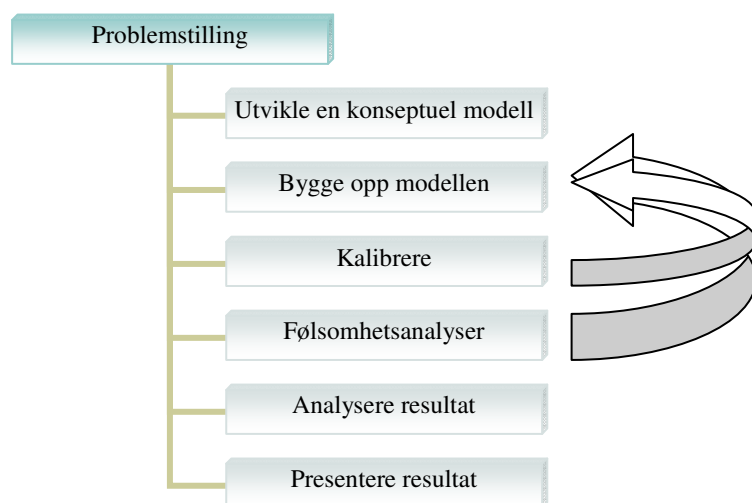
4.5.2 Analyseverktøyet FEflow

Modellen som er laget i Seljord er bygd opp med FEflow® 5.3 (WASY, 1979-2005). FEflow er best egnet til å løse problemstillingen siden modellen kan innbefatte varmemestrøm. Programvaren er blant annet egnet til å modellere dynamisk grunnvannsstrømning, tetthetsstrømning, varmemestrømning, strømning i sprekksystemer og strømning i umettet sone (Dagestad et al. 2006). FEflow er basert på en endelig elementmetode for å beregne grunnvannsstrømning. Metoden er karakterisert ved at den konseptuelle hydrogeologiske modellen er et gridnett bygd opp av fleksible triangulære celler, og som benyttes i varierende tetthet i modellen. Metoden er derfor spesielt godt egnet til variable terrengforhold eller romlige variasjoner i sedimentologiske egenskaper. Grunnvannshøyde og vanngjennomstrømning blir beregnet for hver enkelt celle (Diersch 2005).

Modellering er et tilnæringsbilde av virkeligheten og kan derfor aldri bli helt nøyaktig (Klempe 2007). Kvaliteten på dataene og mengdene av data som settes inn avgjør resultatet som kommer ut. FEflow har et høyt brukergrensesnitt og er et komplisert verktøy å sette seg inn i. FEflow håndterer store datamengder lett, og dette er årsaken til at systemet er komplisert oppbygd (Spangelo 2003).

4.5.3 Konseptuel modell og modelloppbygging

Modellering er en lang prosess der det er viktig å følge prosedyrer for å få et resultat som kan best tilnærme seg virkeligheten (Sonnenborg og Henriksen 2005). Prosedyrene beskrives i figur 11 og blir nærmere presentert i de påfølgende kapitlene.



Figur 11: Modellprosedyrer. Kalibreringen og følsomhetsanalysen gir svar på om oppbyggingen av modellen må endres (utarbeidet etter Sonnenborg og Henriksen 2005).

Informasjonen om geologi og hydrologi er umulig å simulere i detalj i et komplekst naturlig system, og derfor må dataene forenkles. Modellen må imidlertid tilnærme seg den hydrogeologiske kompleksiteten gjennom kalibrering, slik at modellen kan reprodusere systemets oppførsel (Heidenstrøm et. al 2000). I startfasen ble det utviklet en stasjonær strømningsmodell av undersøkelsesområdet. Nedbørverdien ble satt til 50 % av årsgjennomsnittet for 2006 (1031,4 mm) (DNMI 2007). Avrenningsdata fra NVE (REGINE 2005) ble brukt til å sette en fluks grense mot nord. Grense mot Bygdaråi og Seljordsvatnet ble sett som Dirichlet grense med konstante høydeverdier. Modellen er i første omgang delt opp i fire lag og fem flater som representerer skille mellom jordartene. Fjell / berggrunn er den dypeste flaten. På grunn av manglende informasjon om sprekksystemer i fjell er dette ikke tatt med i modellen. Sammenlignet med grove glasifluviale og fluviale avsetninger i dalen vil fjell gi en veldig lav vannføringsevne og derfor vurderes berggrunnen som tett.

Oppbyggingen av en virkelighetsnær transient strømningsmodell og varmemodell blir beskrevet utfyllende i følgende kapitler:

Grid – rutenett

I en numerisk modell er undersøkelsesområdet presentert som elementer i et gridnett der størrelsen på elementet påvirker nøyaktigheten og oppløsningen. I hvert element beregner programvaren ut grunnvannshøyde og vannfluks. Modellen er bygd opp av 6910 noder og 10652 elementer. Gridnettet er grovere dess lengre avstanden er fra undersøkelsesbrønnene.

Grensebetingelser

Grensebetingelse er en matematisk spesifisering av trykk eller fluks i en grunnvannsmodell. Modeller er følsomme for grensebetingelser, og årsaken til feil i datamodeller ligger ofte her (Colleuille et al. 2004c). En velger naturlige hydrogeologiske grenser for å definere modellområdet. Med dette menes hydrauliske grenser mellom grunnvann til elver, innsjø, bekker (Bygdaråi, Tussejubekken og Seljordsvatnet) og geohydrologiske grenser med ulik permeabilitet (forskjellige avsetningsmiljø, fjell, sprekker). Følgende grensetyper beskrives ut ifra Anderson og Woessner (2002) og Klempe (2000), og vises i figur 12. Figur 13 viser hvordan transiente data blir tatt inn i FEflow.

Type 1: Dirichlet grense

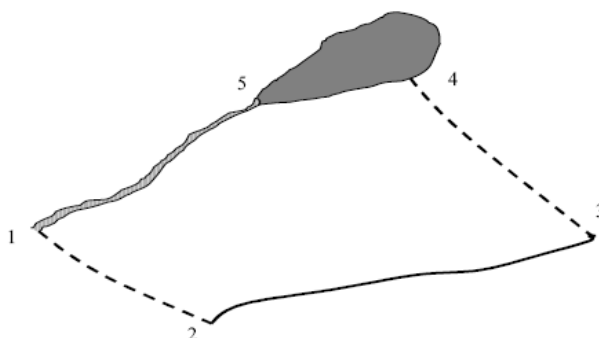
Grense med kjent potensialhøyde. Eksempel: Innsjø, elv, en kilde, et grunnvannskille eller ei ekvipotensiallinje

Type 2: Neumann grense

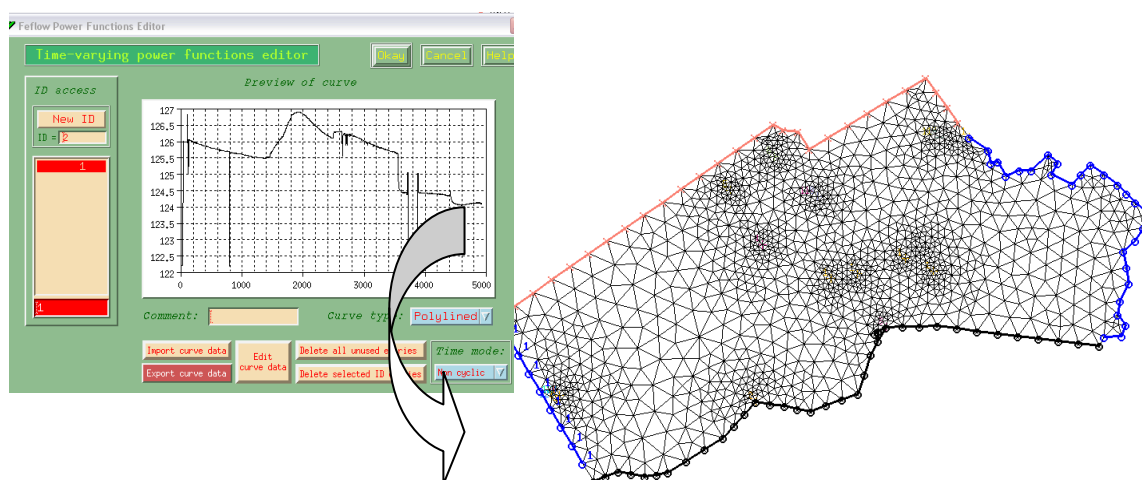
Grense med kjent flux. Fluxen er uttrykt med Darcys lov: $q = K \cdot i$. Flux grense er akviferens avgrensning mot et nedbørsfelt eller mot brønner.

Type 3: Cauchy grense eller Mixed boundary conditions

Denne typen er en kombinasjon av type 1 og type 2. Cauchy grense brukes ofte i vassdrag med semipermeabel bunn.



Figur 12: Illustrasjon av forskjellige typer grensebetingelser i et grunnvannsmagasin. 1-2: Strømlinje (type2: flux), 2-3:Grunnvannskille (type2: flux), 3-4: Strømlinje (type2: flux), 4-5: sjø (type1: spesifisert trykknivå) og 5-1: vannløp (type3) (Sonnenborg og Henriksen 2005).



Figur 13: Figuren viser type 2 grense plassert som grensebetingelse mot nord. Type 3 er plassert langs Bygdaråi. Type 1 grense er plassert mot langs Seljordsvatnet. Type 1 er også plassert vest i modellen siden det er målt grunnvannsnivå her. De transiente dataene leses inn som funksjonsverdier.

FEflow løser transient modellering ved å importere databaser. Databasene inneholder tidsintervall (dager) og verdier for de ulike grensebetingelsene.

Modellens yttergrense mot vest er gitt av Bygdaråi, der Bygdaråi har ett jevnt fall på ca.125 moh. ved Nordbygdi til 116,9 moh. ved Seljordsvatnet. Bygdaråi er grensetype 3 siden det foregår inn- og utstrømning fra elva. Bygdaråi er en typisk flomelv, og interaksjonen med grunnvannet avhenger av flom og tørkeperioder. Temperatur og vannstandsmålinger kan indikere permeabilitetsgraden i bunnsedimentene (Klempe 2007).

Grense mot vest ved Dyrskuplassen er satt til type 1 grense siden det finnes en brønn med transiente målinger ved modellgrensen.

Modellgrensen mot nordøst simuleres med fluksbetingelser. Mellom Nesbukti og Brøløs ble det satt lik fluksgrense som på nordøst siden av feltområdet. Det er liten kjennskap til mektighet og berggrunn i området. Langs fluksgrensen er det naturlig infiltrasjon gjennom terrengoverflaten (nedbør, snø, tilsig). Fluksen angis i meter/døgn. Det er ikke målt direkte nedbør og avrenning i feltområdet, og derfor blir en gjennomsnittsverdi gjennom året basert på klimadata fra REGINE (2005). Punktdataene viser avrenning på 280 mm/året i Seljord (REGINE 2005). Konkrete nedbørsdata fra måleinstrumentet ved Lønnestad (DNMI 2007) er vanskelig å bruke siden vi ikke har tall på evapotranspirasjon.

Grense mot øst er plassert likt med vassdragsgrensen i området Nes - Nesbukti. Grunnvannet strømmer mot Seljordsvatnet og Seljordsvatnet styrer derfor vannstanden i akviferen. Det ble ved hjelp av loggere som målte vannstand, forsøkt å se på interaksjonen mellom akvifer og Seljordsvatnet. Loggerne forsvant sommeren 2007. Boringer viser at topplaget på land like ved Seljordsvatnet har en hydraulisk ledningsevne på 10^{-6} m/s. Det er derfor valgt en grensetype 1. Asfalterte områder i sentrum har avrenning i grøfter og noen steder i kummer. Der det er avrenning til kummer skulle infiltrasjonen fra overflate være satt lik null. Sannsynligvis hadde dette gitt lite effekt på resultatet av simuleringene (Colleuille 2004c). Det er sett bort i fra dette i Seljord siden det er et lite tettsted der avrenning hovedsakelig skjer til grøfter.

Lagdeling

Løsmasseavsetningen i Seljord består av forskjellige geologiske lag med varierende utbredelse horisontalt og vertikalt. Økonomiske begrensinger er årsaken til en gjennomsnitts boringsdybde på 20 meter i brønnene. Georadarprofilene viste ingen klar grense til fjell. Det er boret to steder til 42 og 32 meter i feltområdet. Mektigheten på akviferen er derfor satt til 45 meter med unntak av området ved Seljord barne- og ungdomskole. Det ble boret til fjell på 11 og 19 meter og mektigheten er her satt til disse verdiene. Seljord barne- og ungdomskole ligger i ytterkanten av feltområdet. En stor utfordring i modellen er å få lagdeling og grensebetingelsene så representative for virkeligheten som mulig. Utviklingen av et GIS system (Kap. 4.4) med interpolering av faciesassosiasjoner gav egenskapstabeller for de ulike lagene. Tabellene ble importert i FEflow. I FEflow er lagene delt inn i lag og skiver (slice). Skivene danner toppflaten og bunnflaten for et lag.

En fil som representerer terrengnivået i strømningsmodellen er gjort ved geografiske data fra Seljord kommune. Terrenghøyden blir derfor skive 1. I modelleringen tas det hensyn til umetta sone i skive 1 og lag 1.

Bunnen av det dypeste laget danner akviferbunn. Akviferbunn er vanskelig å bestemme siden GPR-profilene ikke danner noen grense mot fjell, og det er kun to boringer i utkanten av feltområdet som har indikert grense til fjell.

Avsetningskanalene bak Seljord barneskole danner starten på en kanal med usikkert utløp. Da det ble boret ved Seljord barneskole, kom et kompakt, mørkfarget lag med dårlig sortering de første meterne. Dette er en faciesassosiasjon som bare opptrer her, trolig morene. Dette topplaget har liten betydning for en energibrønn siden filteret må plasseres dypere enn de seks til ni første meterne og er derfor blitt nedprioritert sammenlignet med de andre mer mektige faciesassosiasjonene.

Innsetting av parametere

Innenfor hvert lag skal det legges inn egenskaper for ledningsevnen. Bouwer (1978) viser med vektning hvordan en beregner K-verdier vertikalt i anisotropiske lag. I prosjektet er det tatt kornfordelingsanalyser for hver meter i tre brønner og annenhver meter i seks brønner. Den symmetriske prøvetakingen gjør at K-verdier beregnes med aritmetisk gjennomsnitt innenfor hvert lag. Mangel på informasjon i noen lag kan også gjøre vektning uegnet.

Siden det er boret til 20 meters dyp må K -verdier i dypere nivå antas, med unntak av Granvin. Dette gjøres på grunnlag av kornfordelingsprøver på 10-20 meters dyp og trenden som disse viser. Dette medfører stor usikkerhet rundt simuleringer og uttaksscenarioer dypere enn 20 meter. Sedimentasjonsmiljøet gjør at partikler som blir avsatt blir liggende i foretrukket orientering (lagdeling). Den vertikale hydrauliske ledningsevnen er mindre enn i horisontal retning i anisotropiske miljø. Anisotropigraden for grove materialer er på ca. 10, derfor er K_z lik $K_x/10$ (Colleuille et al. 2004c).

4.5.4 Kalibrering og verifisering

Kalibrering utføres for å finne et parametersett som reproducerer observasjoner best mulig. Kalibrering av modellen gikk ut på å reprodusere et sett med akviferparametere og grensebetingelser for å tilpasse simulering med observert vannstand og temperatur. Effektiv nedbør, elvevannsnivået, magasinkoeffisienten og hydraulisk ledningsevne er viktige parametere som styrer modellen (Colleuille et al. 2004c). Gradienten (moh.) til Bygdaråi kan være feil på ulike steder og er en parameter som justeres. Effektiv nedbør (tilsig og infiltrasjon) er funksjon av månedlig nedbør, men kan variere innenfor tidsperioden og kan justeres. Hydraulisk ledningsevne og anisotropigrad kan også endres siden boreprøvene kan være misvisende. Vannstandmålingene er fra 3. mai til 23. november 2007. Kalibreringen ble utført manuelt.

Verifisering betyr å kontrollere om modellen virkelig etterligner et naturlig system. Dette gjøres ved å sjekke hvor godt modellen reproducerer de observerte grunnvannsnivåene med andre data enn hva som ble brukt i kalibreringen. Det finnes ikke sammenlignbare data fra området, og verifisering må gjøres i ettertid når nye data er registrert.

4.5.5 Følsomhetsanalyser

Følsomhetsanalyser går ut på å undersøke hvor mye en kan endre parametrene i modellen før resultatet endres. Følsomhetsanalyser kan foretas manuelt ved å minke eller øke parametrene gradvis. Det analyseres på betydningen av de forskjellige grensebetingelsene som avrenning og elvenivå (moh.), Bygdaråis bunnsedimenter og hydraulisk ledningsevne i ulike lag.

4.5.6 Simulering og analyser

Oppgavens problemstilling går også inn på begrensninger ved uttak. Av den grunn må influensområder til brønner langs elva undersøkes. Ved store uttak av grunnvann kan strømningsforholdene endres langs elvesletta. Dette kan føre til inndraging av kaldt elvevann på vinterstid som er en begrensende faktor for uttak. Det kan også gi kortere oppholdstid på vannet i akviferen. Vannets oppholdstid påvirker den naturlige grunnvannsfornyelsen (Colleuille et al. 2004b).

Grunnvannsmodellen brukes til å simulere strømningsmønster med og uten grunnvannsuttak, ulike uttaksmengder og influensområder. Modellen brukes også til å simulere endringer av temperatur ved grunnvannsuttak. Interaksjon mellom elva og akviferen undersøkes ved å sette X antall brønner i nærhet til elva (etter en linje) og simulere for hver ny brønninnsetting. Flere av dagens energibrønner i Seljord er dimensjonert til et uttak på 30 m³/t og derfor blir denne brønnstørrelsen brukt.

4.6 Uttak av grunnvarme

4.6.1 Begrensninger i forhold til vannbalanse, senkning og strømning

Vannbalanse

Vannbalansen for et nedbørfelt kan beregnes etter formel 8. Nedbør og avrenning kan måles, mens evapotranspirasjonen er vanskelig å måle. I Sør-Norge antas det en evapotranspirasjon på ca. 100 mm pr. år i høyereliggende strøk til 400 mm pr. år i lavereliggende strøk (Veslegard 1991). Det er vanskelig å utføre en vannbalanseberegning i Seljord siden det mangler kvantitative data om magasinert vann og grunnvannsdannelse. Grunnvannsmodellen i FEflow er derfor brukt til å beregne vannbalansen. Ved å ikke ta ut mer enn naturlig grunnvannsavrenning forstyrrer en strømningsmønsteret minst mulig (Klempe 2007).

Formel 8:

$$P = Q + E \pm \Delta M$$

Der P = nedbør

Q = avrenning

E = evatranspirasjon

ΔM = magasinert vann

Transmissivitet og senkning

Transmissivitetskoeffisienten (T) viser sammenheng mellom hydraulisk ledningsevne og akviferens mektighet. Transmissiviteten uttrykker hele akviferens strømningssegenskaper og kan oppfattes som summen av hydraulisk ledningsevne i hvert lag (Rueslåttén og Veslegard 1991). T verdien er definert som vannføring gjennom 1 meter bredt tverrsnitt i hele akviferens mektighet under en gradient lik 1 (Klempe 2000). Transmissiviteten kan brukes til å beregne senkning i akviferen ved vannuttak og vise områder med god hydraulisk ledningsevne.

T verdien regnes slik (formel 9):

Formel 9:

$$T = KM \text{ (m}^2\text{/s)}$$

Der K = hydraulisk ledningsevne (m/s)

M = mektighet på vannførende lag (m)

Darcys lov kan derfor uttrykkes (formel 10):

Formel 10:

$$Q = TiB$$

I en åpen akvifer utnyttes akviferen opptil grunnvannsnivået. Transmissiviteten minker når nivået synker. Ved beregning av senkning forutsettes stasjonære forhold. Dupuits antagelse (horisontal strøm) blir brukt selv om det ikke helt stemmer inntil brønnen (Andersson et al. 1984). T verdier dypere enn 20 meter er ukjent. Stabile temperaturer oppnås på 20 meters dyp (Stene 1997). Det er derfor regnet en senkning på brønner med filterdybde på 15-20 meter. Senkningen beregnes for de ni undersøkelsesbrønnene med dette utgangspunktet. Vannuttaket settes til 720 m³/d. Ved økt strømningsrate for en brønn der senkningen er avgjørende for dimensjoneringen, vil en fordobling av brønnradius ha liten effekt, snaut 10 % (Rueslåttén og

Veslegard 1991). Thiems åpne formel tar hensyn til endring av transmissivitet som følge av senkningen i en åpen akvifer (formel 11) (Andersson et al. 1984). Ved store uttak bør det tas hensyn til forandring i transmissiviteten som følge av senkningen (Rueslåttén og Veslegard 1991).

Formel 11:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T_{\text{dim}}} * \ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) + \frac{\left(\ln\frac{R_0}{r_w}\right)^2 Q^2}{8h_0 \pi^2 T_{\text{dim}}^2}$$

Der s_w = senkningen i brønnen i forhold til statisk grunnvannsnivå (m)

Q = pumpekapasitet (m³/s)

r_w = brønnens utvendige radius (m)

R_0 = brønnens influenssradius

h_0 = hydraulisk potensial

Der R_0 er ukjent settes verdien til 1000 som influenssradius (Andersson et al. 1984; Veslegard og Rueslåttén 1991). En innledende kontroll av senkning i en brønn kan uttrykkes med formel 12 (Rueslåttén og Veslegard 1991).

Formel 12:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T_{\text{dim}}} * \ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right)$$

Turbulent strømning

Darcys lov forutsetter laminær strømning, ublandbar, isotermisk strømning og ingen elektrokinetiske effekter (Rueslåttén og Veslegard 1991). Turbulent strømning er en avgrensende faktor for pumpekapasiteten (Andersson et al. 1984). Kravet til laminær strømning uttrykkes med Reynholds tall i formel 13 (dimensjonsløs):

Formel 13:

$$R = \frac{\rho v_{\alpha} d}{\mu}$$

Der ρ = vannets densitet (kg/m³)

μ = vannets viskositet (Pa/ s)

v_a = bruttohastighet (Q/A)

d = karakteristisk porediameter / effektiv porediameter (der d_{50} er mye brukt)

Det er laminær strømning for $R < 1-10$ og turbulent strømning for $R > 10$. Turbulent strømning gir større strømningstap, kan føre til utvasking og ødelegge filteret. Problemet skjer hovedsakelig nær brønner og dette gjør at senkinga S_w må begrenses (Rueslåttén og Veslegard 1991). Temaet blir ikke videre gått inn på i oppgaven.

4.6.2 Beregning av vannuttak Q

Potensialet for vannuttak avhenger av strømningsforhold (interaksjon), transmissivitet, senkning og influensområde til hver enkelt brønn. Brønnens egenskaper vil påvirke uttaket. Beregning av potensialet for vannuttak i en akvifer er løst på ulike måter ved tidligere kartlegginger av grunnvarmepotensiale i Norge. Kalskin og Hilmo (1999) delte løsmassene i Elverum i tre klasser etter vurdering av løsmassenes vanngiverevne. Tykkelsen på vannmagasinet og vanngjennomgangen ble satt som kriterier. Ut ifra erfaringer kunne en anta ulike vannuttak Q og deretter beregne effekt kW (4 klasser). Heidenstrøm et. al (2000) satte grunnlaget for vannuttak på bakgrunn av pumpekapasitet i sandspisser på ulike dybder (Dimakis 2007). Dagestad og Heidenstrøm (2000) utviklet et kart over grunnvarmepotensialet på Voss ved å kombinere estimert pumpekapasitet i enkeltbrønner ut fra simulerte uttaksscenarioer. Potensialkartet fra Voss kan ikke benyttes til å estimere energiuttak fra hver enkeltbrønn.

Det er simulert ulike uttaksscenarioer i Seljord for å undersøke simulerte senkninger og finne begrensinger ved ulike vannuttak. Grensebetingelsene i modellen styrte senkningen og vannuttak ble derfor beregnet matematisk. I Seljord er målet å finne potensialet for et uttak av grunnvann til grunnvarme formål. I denne sammenheng må det sies at et eksakt potensial kan kun beregnes med langvarig pumpeforsøk (Tvedten 2007). Potensial er her et anslag ut ifra feltregistreringer og gitte forutsetninger. Beregningene bygger på antagelser og må tolkes som en innledende beregning, derfor kan maksimalt vannuttak uttrykkes med formel 14. Siden det

er en åpen akvifer er transmissiviteten (T) på 15-20 meter dyp beregnet. Maksimal senkning ble satt ulikt avhengig av gjennomsnitts grunnvannsstand (høstperioden) på stedet.

4.6.3 Beregning av effekt (kW)

Effektuttaket bestemmes av pumperaten, spesifikke varmekapasitet og temperaturdifferansen (formel 14), derfor er grunnvannsmengde og grunnvannstemperatur de viktigste faktorene (Stene 1997). Effekten blir målt i kilowatt (kW).

Formel 14:

$$\text{Effekt} = C_p * Q * \Delta T$$

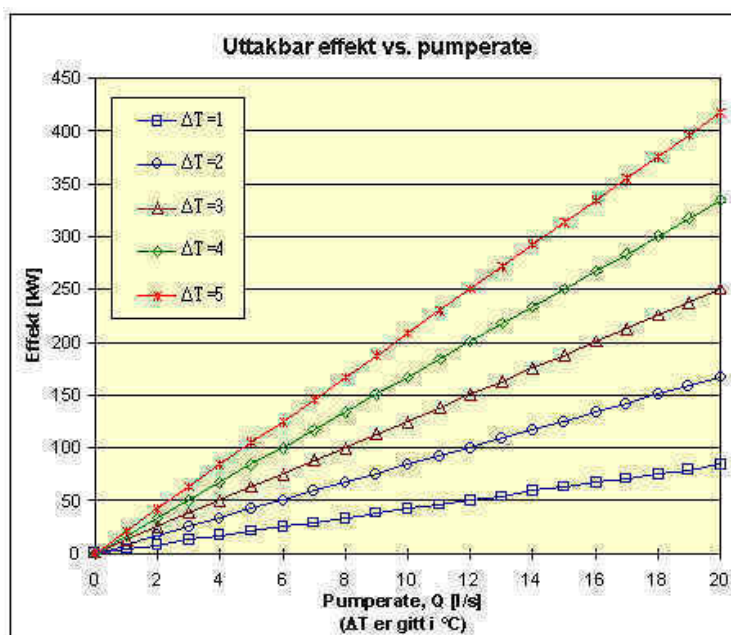
Der, C_p = vannets spesifikke varmekapasitet = 1,16 kWh/m³ °C

Q = uttatt mengde grunnvann pr tidsenhet (m³/h)

$\Delta T = T_{\text{inn}} - T_{\text{ut}}$, temperaturforskjell mellom grunnvann inn og ut fra varmepumpa °C

Mulig effektuttak plottet mot pumperate og temperaturdifferanse fra grunnvann beregnet fra formel 14 vises i figur 14.

Beregningene forutsetter brønner med filter plassert på 15-20 meter dyp. Det finnes mye kvalitets data fra dette dypet som gjør at resultatene blir mer sikre. Det kan være større potensial for uttak på dypere nivå, men det finnes for lite boredata til å anslå dette. Ved kommunehuset ligger de beste massene på 10 til 15 meter. Det er stabile temperaturer i akviferen på 15 til 20 meters dybde, derfor er denne dybden likevel prioritert for å beregne grunnvarmepotensialet.

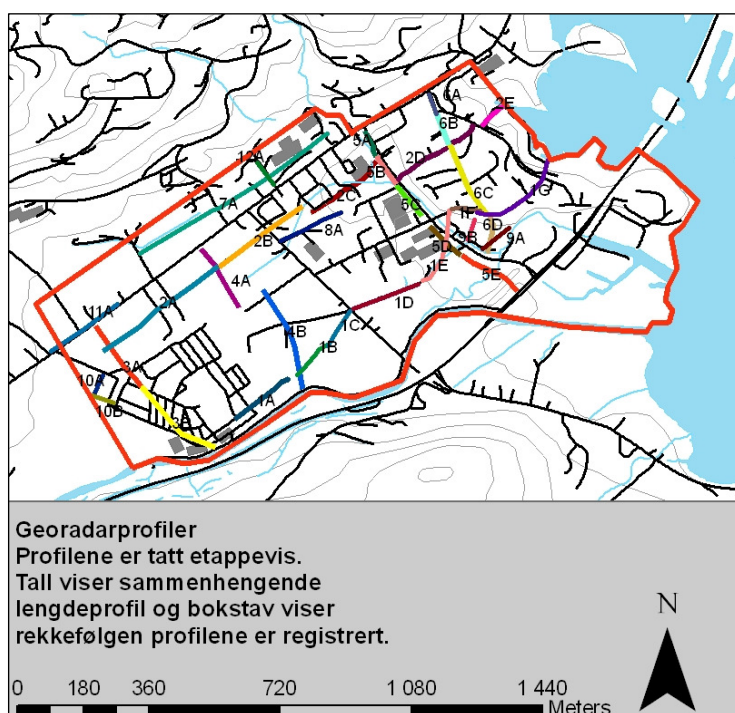


Figur 14: Mulig effektuttak (kW) fra grunnvann som funksjon av pumperate og temperatursenking (NGU & NVE 2000; Andersson et al. 1984).

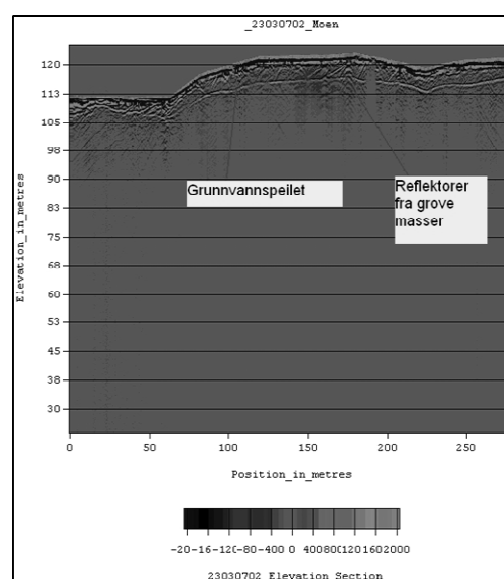
5 Resultat

5.1 Georadar

Totalt er det gått 6000 meter (ca. 2100 m NS, 3600 m VØ og totalt 300 m med korte profiler over tomter) med georadar i Seljord (figur 15). Profilene vises til i vedlegg 2. Resultatene ble sammenlignet med erfaringene fra boring og sonderboring. Antennefrekvens på 50 Hz og 1000V gav dypest refleksjon på grunn av størst gjennomtrengning, men de første meterne under bakken fikk dårligere oppløsning som ga svake konturer. Rådataene i Sensor & Software opptaksprogram viste signaler lengre mot dypet enn resultatene i bearbeidingsprogrammet WinEkkoPro 1.0 (1999). GPR-profilene ble også svakere etter at de ble korrigert for topografi. Samlet kvalitet på GPR-profilene er gode, men det er ingen markert reflektor som viser grense til fjell og dermed er det ingen konkret dybde på akviferen som ligger til grunn (Eckholdt 2007). På Moen var det klar reflektor som viste grunnvannspeilet på 7-8 meter (figur 16) og dette medfører at signalene brytes. Dypere er det trolig grove masser (Eckholdt 2007).



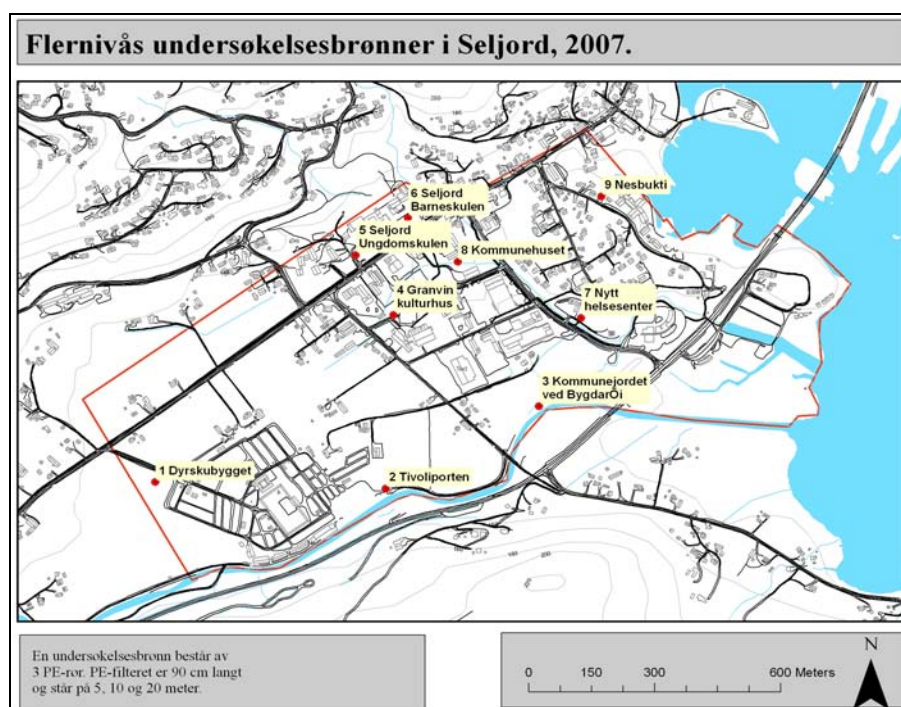
Figur 15: Kart over georadarprofiler. Nummer viser hvilke profiler som er satt sammen som et GPR-profil, mens bokstaver viser retningen og rekkefølgen som profilene er målt i. Feltområdet er markert rødt.



Figur 16: Grunnvannspeilet vises i en klar reflektor på 7-8 meters dybde.

5.2 Flernivåundersøkelingsbrønner og kornfordelingsanalyser

Det er boret 174 meter fordelt på ni undersøkelingsbrønner. Syv brønner er boret til 20 meters dybde, en på 11 meter på grunn av fjell og en brønn på 27 meter (forsøk om å komme gjennom masser med finsand på Granvin). Likevel er dybden på noen av filterene på andre nivå. Årsaken til dette er trykket som presset PE-rørene og filterene opp da foringsrøret ble fjernet (Brubakken 2007). Ønsket filterdybde ble ikke oppnådd på alle brønnene. Figur 17 viser brønnenes plassering i Seljord. Tabell 3 gir en oversikt over undersøkelingsbrønnene. Brønnen ved Granvin tettet seg og det ble forsøkt med oppspyling uten å lykkes. Det ble derfor boret (juni 2007) et nytt PE-rør til 10 meters dyp. Det ble også i ettertid boret en brønn ned til 11 meter ved det nye administrasjonsbygget på Dyrsakuplassen fordi filteret stod høyere enn grunnvannsspeilet. Boreprøvene fra brønnene 1, 2, 3, 4, 7 og 9 viste 20 meter med sand- og grus. Filterene er plassert etter dybde (5, 10 og 20 meter) og nødvendigvis ikke i masser med best vanngiverevne. Samlet sett er det gode hydrauliske ledningsevner (K) i feltområdet. I tabell 4, 5 og 6 vises en oversikt over median kornstørrelse og hydraulisk ledningsevne. Kornfordelingsanalyser av alle boreprøver ligger i vedlegg 5. Det er påvist høy variasjon av sorteringsgrad, ledningsevne og kornstørrelser innenfor hver brønn. Flere kornfordelingsanalyser viser dårlig sorterte masser med bimodale kurver. Det ble registrert utfelt jern i vannet på 8 meter dybde ved boring på Granvin og på 9 meter dybde ved helsesentertomta.



Figur 17: Flernivåundersøkelingsbrønner i Seljord. Brønnene ble boret i april og mai 2007.

Tabell 3: Boringer av flernivås undersøkelsesbrønner i feltområdet.

ID brønn	Brønn	Høyde foringsrør (moh.)	Dybde forings- rør	Dybde filter (m)			Koordinat	Koordinat	Antall kornfordelings- analyser
				X	Y		X	Y	
1	Dyrskubygget prøvebrønn	132.40	20m	3.66	10.68	15.6	478132.91	6593284.38	12
2	Tivoliporten	126.07	20m	4.75	9.64	19.5	478681.62	6593268.35	15
3	Kommunejordet ved Bygdaråi	121.17	20m	5.23	8.08	-	479046.47	6593475.53	10
4	Granvin kulturhus	122.12	27m	2.8	3.6	9.5	478700.34	6593704.89	13
				tett	tett				
5	Seljord Ungdomskule	121.51	11m	4.72	9.25	fjell	478610.37	6593855.43	5
6	Seljord Barneskule	124.06	20m	5.68	9.54	19.8	478734.34	6593948.72	8
7	Nytt helsesenter	120.58	20m	4	9.6	14.6	479147.19	6593697.37	12
8	Kommunehuset	119.92	20m	4.72	9.4	19.5	478853.66	6593838.51	10
9	Nesbukti	120.77	20m	4.8	9.69	19.7	479195.84	6594003.19	10

Det vises heretter til brønn og brønn ID i oppgaven.

Tabell 4: Median kornstørrelse (d50) og hydraulisk ledningsevne for undersøkelsesbrønner ved administrasjonsbygget til Dyrskun, Tivoliporten, "kommunejordet" ved Bygdaråi og Granvin Kulturhus.

Brønn ID		1 Dyrskubygget prøvebrønn		2 Tivoliporten		3 Kommunejordet ved Bygdaråi		4 Granvin kulturhus	
Brønn navn		131.4		126.07		121.17		122.12	
Moh.		131.4		126.07		121.17		122.12	
Topp prøvenivå (moh.)	Bunn prøvenivå (moh.)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)
130.40	129.40								
129.40	128.40	fingrus	6.70E-04						
128.40	127.40	"	6.32E-05						
127.40	126.40	"	2.55E-04						
126.40	125.40	"	4.57E-04						
125.40	124.40	"	5.35E-03						
124.40	123.40	"	6.70E-04						
123.40	122.40	"	1.39E-03	fingrus	1.35E-03				
122.40	121.40	"	1.46E-03	"	5.62E-02				
121.40	120.40	"	2.87E-03	"					
120.40	119.40	"	2.74E-03	"					
119.40	118.40	grovsand	1.30E-03	"				Mellom grus	3.00E-04
118.40	117.40	"	2.48E-04	"	1.29E-03	Mellom grus	7.53E-02		
117.40	116.40	fingrus	5.45E-05	grovsand	4.07E-04			fingrus	2.00E-04
116.40	115.4	prøve ødelagt	0.00E+00	"	1.16E-03	fingrus	7.63E-04	"	
115.4	114.40	prøve ødelagt		fingrus	1.36E-03	"		grovsand	2.02E-04
114.4	113.40	prøve ødelagt		mellomgrus	2.45E-04	"	2.22E-04	grovsand	
113.4	112.40			grovsand	1.17E-04	"		grovsand	1.15E-04
112.4	111.40			fingrus	5.81E-04	"	1.38E-04	grovsand	
111.4	110.40			grovsand	2.26E-04	"		finsand	1.42E-04
110.4	109.40			fingrus	1.95E-04	"	4.75E-05	"	
109.4	108.40			"	1.16E-03	"		"	1.00E-05
108.40	107.40			"	2.33E-03	"		"	
107.40	106.40			grovsand	1.12E-04	"		"	1.00E-05
106.40	105.40					"	6.95E-05	"	1.39E-04
105.40	104.40					"		"	1.68E-04
104.40	103.40					finsand	1.00E-07	"	1.00E-05
103.40	102.40							"	
102.40	101.40					grovsand	1.00E-07	"	1.00E-07
101.40	100.40							"	
100.40	99.40							"	4.71E-04
99.40	98.40							"	
98.40	97.40							"	4.63E-05

Tabell 5: Median kornstørrelse (d50) og hydraulisk ledningsevne for undersøkelsesbrønner ved Seljord ungdomskole, barneskole, tomte til det nye helsesenteret og kommunehuset.

Brønn ID Brønn navn		5 Ungdomskole		6 Barneskole		7 Nytt helsesenter		8 Kommunehuset	
Moh.		121.51		124.06		120.58		119.92	
Topp prøvenivå (moh.)	Bunn prøvenivå (moh.)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)
130.40	129.40								
129.40	128.40								
128.40	127.40								
127.40	126.40								
126.40	125.40								
125.40	124.40								
124.40	123.40								
123.40	122.40								
122.40	121.40								
121.40	120.40								
120.40	119.40								
119.40	118.40			finsand	1.00E-05				
118.40	117.40					fingrus	2.66E-05		
117.40	116.40	fingrus	4.71E-04	mellomsilt	1.00E-07	"			
116.40	115.40	"		grovsilt	1.00E-06	grovsand	2.19E-04	fingrus	7.87E-05
115.40	114.40	"	2.23E-03			"		"	
114.40	113.40	"				"	5.97E-04	mellomsand	2.65E-04
113.40	112.40	"	4.63E-05	fingrus	1.00E-03	"			
112.40	111.40	"	2.84E-05	"		"	1.11E-04	fingrus	8.83E-04
111.40	110.40	finsand	1.00E-05	"	3.15E-04	"			
110.40	109.40	fjell	0.00E+00	"		"	2.64E-03	finsand	1.00E-05
109.40	108.40			"	1.89E-04	"		finsand	
108.40	107.40			"		"	8.61E-04	finsand	1.00E-05
107.40	106.40			grovsand	0.00E+00	"	8.96E-04	finsand	
106.40	105.40			fjell	1.57E-04	mellomsand	1.53E-04	finsand	6.23E-05
105.40	104.40			fjell	0.00E+00	grovsand	4.07E-04	finsand	
104.40	103.40					"	1.40E-04	grovsilt	1.00E-06
103.40	102.40					"	6.79E-04	grovsilt	1.00E-06
102.40	101.40					"		grovsilt	1.00E-06
101.40	100.40					mellomsand	3.40E-04	grovsilt	
100.40	99.40							grovsilt	1.00E-04
99.40	98.40								
98.40	97.40								

Tabell 6: Median kornstørrelse (d50) og hydraulisk ledningsevne for undersøkelsesbrønnen ved Nesbukti, energibrønnen til Dyrkun og Seljord Næringsbygg.

Brønn ID	9		10		11		12		13		
Brønn navn	Nesbukti		Dyrskubygget energibrønn		Seljord næringsbygg 1		Seljord næringsbygg 2		Seljord næringsbygg 3		
Moh.	120.77		131.56		120.19		120		118.8		
Topp prøveni vå (moh.)	Bunn prøveni vå (moh.)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Median kornstørrelse d50	Hydraulisk ledningsevne (m/s)
130.40	129.40										
129.40	128.40										
128.40	127.40										
127.40	126.40										
126.40	125.40			fingrus	3.76E-05						
125.40	124.40			mellomsand	5.11E-05						
124.40	123.40			mellomgrus	3.94E-05						
123.40	122.40			fingrus	3.94E-05						
122.40	121.40			mellomgrus	2.52E-04			?			
121.40	120.40			fingrus	1.87E-03			?		?	
120.40	119.40			"	4.49E-03	Mellom sand	1.00E-05	?		?	
119.40	118.40			"	4.34E-04	"		?		?	
118.40	117.40	grovsand	1.00E-06	"	8.15E-04	"		?		?	
117.40	116.40	finsand	2.02E-04	mellomgrus	3.99E-04	"		?		?	
116.40	115.4	finsand		fingrus	2.52E-04	"		?		?	
115.4	114.40	grovsand	1.14E-03	fingrus	7.63E-05	"		?		Mellom sand	5.12E-04
114.4	113.40			mellomgrus	8.52E-04	"		?		"	
113.4	112.40	fingrus	5.48E-04			"		?		"	
112.4	111.40					"		?		"	
111.4	110.40	mellomgrus	1.41E-03			"		?		"	
110.4	109.40					"	1.00E-05	?		"	
109.4	108.40	mellomgrus	3.01E-02			"		?		"	
108.40	107.40					"		?		"	
107.40	106.40	mellomgrus	1.09E-04			"		?		"	4.61E-04
106.40	105.40					"		?		Mellom sand	
105.40	104.40	grovsand	2.24E-04			"		Mellom sand	1.98E-04	"	
104.40	103.40					"		"		"	6.22E-04
103.40	102.40	fingrus	9.71E-03			"		"	6.88E-04		
102.40	101.40					"		"			
101.40	100.40	mellomgrus	4.70E-02			"		"	1.03E-03		
100.40	99.40					"		"	8.87E-04		
99.40	98.40					"		"	1.04E-03		
98.40	97.40										

5.3 Nedbør og lufttemperatur

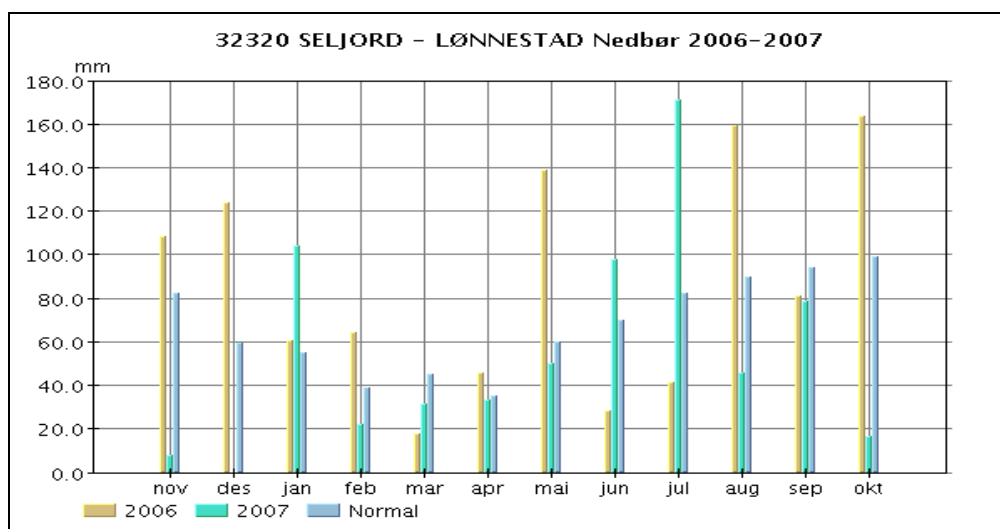
Nedbørsverdier er hentet fra meteorologisk institutts klimadata, eKlima (DNMI 2007).

Lønnestad målestasjon ligger ca. tre kilometer fra feltområdet og måler bare nedbør (mm).

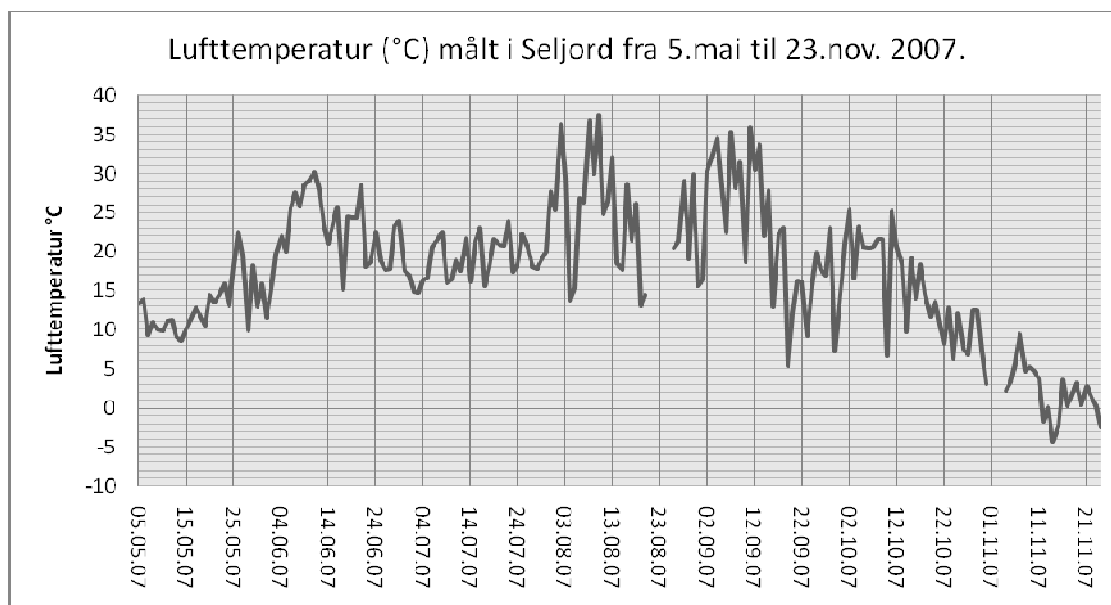
Nedbøren blir målt en gang i døgnet. Snø tines før vannmengden måles (DNMI 2007).

Nedbørsdataene fra 2007 viser store svingninger i fra normalen og variasjon sammenlignet med 2006 (figur 18). Januar 2007 er det registrert 103,9 mm nedbør mot 60,6 i 2006 (normal 55 mm). Målinger fra februar, mars, april og mai viser at nedbørsmengden var litt under normalen. Nedbørsmengden i juni (98,0 mm) og juli (171,1 mm) var langt over normalen (70,0 mm og 82,0 mm) og låg over målingene fra 2006 (28,0 mm og 41,3 mm). I august (45,6 mm) og september (78,5 mm) 2007 er det målt mindre nedbør enn normalen (90,0 mm og 94,0 mm) og 2006 målingene (158,9 mm og 81,0 mm). Det finnes kun målinger av grunnvannsnivåer og grunnvannstemperaturer fra 2007 og disse dataene kan kun samsvares med målte nedbørsverdier i samme periode på grunn av store avvik med normaldataene (Klempe 2007).

Baro Driveren (Schlumberger Water Services®) målte atmosfæretrykk og lufttemperatur ved jordoverflaten. Siden måleinstrumentet hang på innsiden av et foringsrør (over bakkenivå) ved undersøkelsesbrønnen ved helsesenteret, har dette trolig forstyrret målingene. Foringsrøret vil hindre luftsirkulasjon. Dataene kan derfor ikke sammenlignes med grunnvannstemperaturer. Lønnestad målestasjon registrerer bare nedbør og nærmeste klimastasjon ligger i Kviteseid. Lufttemperaturene som er målt hver dag klokken 13.00 fra 5.mai til 23.november vises i figur 19.



Figur 18: Sammenlagt månedsnedbør på Lønnestad, Seljord, gjennom 2006 og 2007. Nedbørsverdiene er sammenlignet med normalen. Da dataene ble bestilt var ikke målingene for november oppdatert (DNMI 2007).

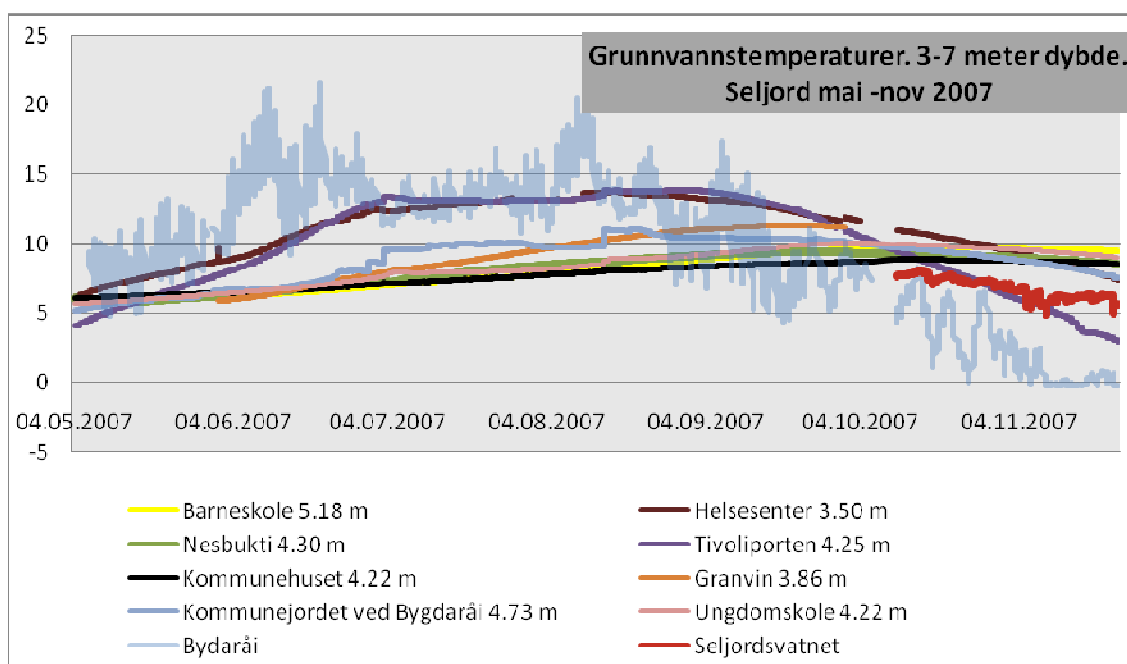


Figur 19: Variasjon i lufttemperatur fra mai til november 2007.

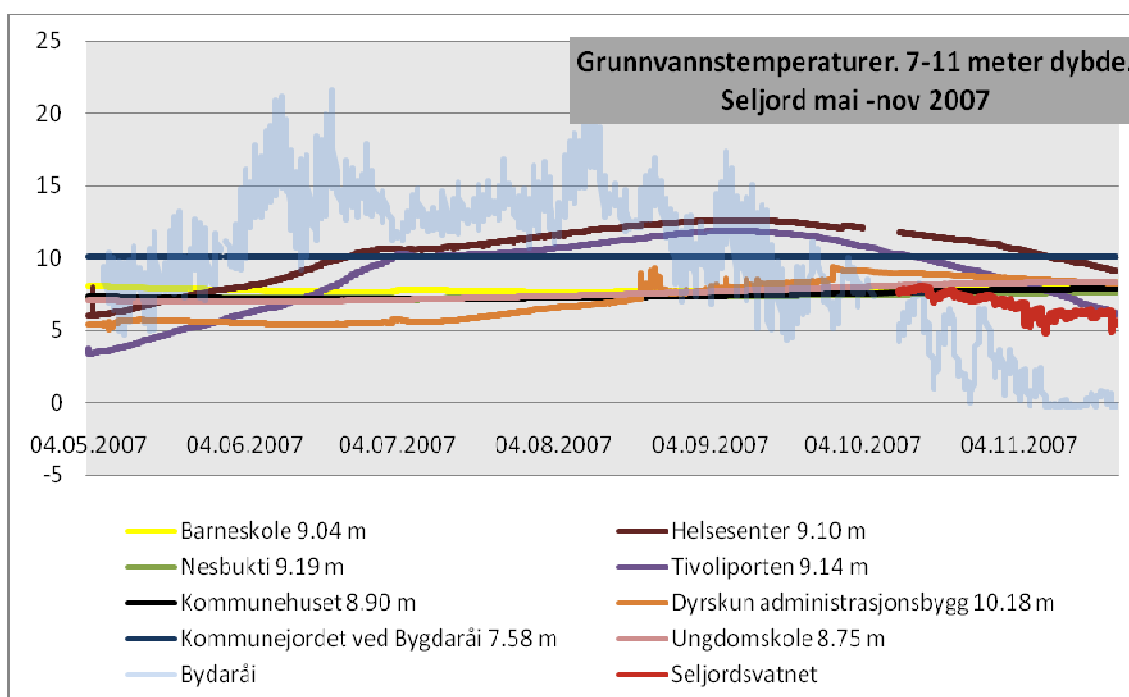
5.4 Temperaturer

5.4.1 Grunnvann

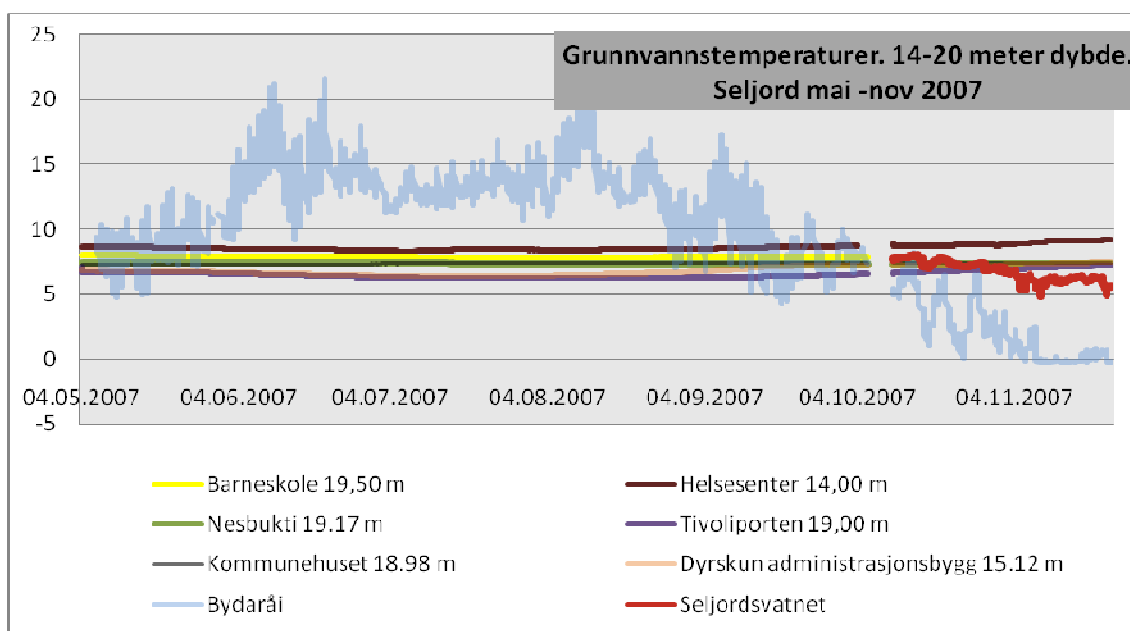
Til å være i innlandsklima viser loggerne generelt høye grunnvannstemperaturer. Det er også stor variasjon innenfor feltområdet. Innenfor feltområde, men på likt dyp (15-20 meter) viser loggerne temperaturer fra 6,5 til 8,5 °C på grunnvannet. Stabile temperaturer oppnås på ca 15-20 meters dybde i brønner som ligger nær Bygdaråi. Brønner med lengre avstand fra elva har stabile temperaturer fra 15 meters dybde. Temperaturer målt på 3-7, 7-11 og 14-20 meters dyp vises i figur 20, 21 og 22. Loggerne er plassert innenfor disse intervallene. Plasseringa av brønnene er vist i figur 17 side 50. Avstanden til vassdrag og filterdybde har stor betydning for temperaturutviklinga i hver brønn.



Figur 20: Grunnvannstemperaturer målt i åtte brønner med 90 cm filter plassert mellom 3 og 6 meter. Temperaturmålinger er tatt hver tredje time. Opptak og avlesing av loggere er vist som gap i grafen. Brønnens beliggenhet og dybde på logger vises i tegnforklaringen. Grunnvannstemperaturene er sammenlignet med temperatur -trenden i Bygdaråi og Seljordsvatnet.



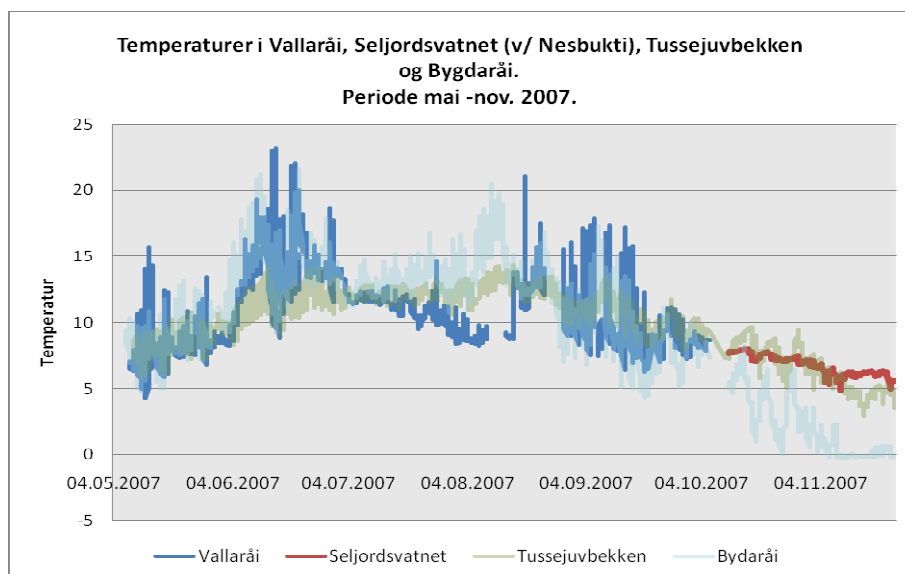
Figur 21: Grunnvannstemperaturer målt i åtte brønner med 90 cm filter plassert mellom 7 og 11 meter. Temperaturmålinger er tatt hver tredje time. Opptak og avlesing av loggere er vist som gap i grafen. Brønnens beliggenhet og dybde på logger vises i tegnforklaringen. Grunnvannstemperaturene er sammenlignet med temperatur -trenden i Bygdaråi og Seljordsvatnet.



Figur 22: Grunnvannstemperaturer målt i seks brønner med 90 cm filter plassert mellom 14 og 20 meter. Temperaturmålinger er tatt hver tredje time. Opptak og avlesing av loggere er vist som gap i grafen. Brønnens beliggenhet og dybde på logger vises i tegnforklaringen. Grunnvannstemperaturene er sammenlignet med temperatur-trenden i Bydaråi og Seljordsvatnet.

5.4.2 Overflatevann

Temperaturer i Bydaråi, i Vallaråi, i Tussejuvbekken og i Seljordsvatnet vises i figur 23. Loggerne i Seljordsvatnet forsvann og det ble satt ut en logger på 0,5 meters dyp ved Nesbukti i oktober. Loggeren i Vallaråi har perioder ligget tørr på grunn av stor variasjon i vannføring.



Figur 23: Temperaturer målt i Vallaråi, Seljordsvatnet, Tussejuvbekken og Bydaråi.

5.5 GIS – 2D geologiske og hydrologiske analyser

5.5.1 Inndeling av sedimentfacies

Inndeling av sedimentfacies i Seljord sentrum er basert på spørringer i egenskapsdatabasen (kap.4.4.1). Databasen inneholder data fra overflatekartlegging, brønnboring (energibrønner og undersøkelsesbrønner), georadarundersøkelser og kornfordelingsanalyser.


Boringene, kornfordelingsanalysene og GPR-profilene viser at løsmassene i Seljord kan deles inn i fire faciesassosiasjoner:

- Glasifluviale deltaavsetninger bestående av skråstilte lag.
- Fluviale avsetninger bestående av horisontale lag og lommer med vekslende kornstørrelse.
- Glasifluvial kanal og/eller subakvatisk vifte.
- Endemorene.

Det er identifisert to avsetninger som kan være fra endemorener. Boringen viste kontakt med kompakte og usorterte masser på 20 meters dyp under administrasjonsbygget på Dyrskuplassen (1). Dette kan være en endemorene eller det kan være godt pakket materiale fra ras under oppbyggingen av deltaet (Eckholdt 2007; Klempe 2007). Det er uvisst hvor dypt dette laget er. Boreprøvene ble brent på grunn av høyt siltinnhold. I modelleringsprogrammet FEflow blir dette laget, på 20 meters dyp, satt som en akviferbunn siden boreprøvene viste siltige og kompakte masser. De ni øverste meterne ved Seljord barneskole (6) er trolig morene (Klempe 2007). Dette laget er uaktuelt for filterplassering og på grunn av begrensende antall lag i 3D modellen er denne facies utelatt i lagdelingen (kap 5.6.1).

Dødisgropene ved Skutevollen er utenfor feltområdet. Fordelingene av faciesassosiasjonene og tilhørende egenskaper vises i tabell 7.

Tabell 7: Oversikt over ulike faciesassosiasjoner og tilhørende egenskaper.

Facies-assosiasjon	Lithofacies	Facies-kode	Sedimentære strukturer	Korn-strørresle	GPR	Farge	Tolkning
1.Morene	Massiv. Ulike kornfraksjoner. Middels til hard pakking. GPR signal brytes.	Dmm	Strukturløs blanding av ulike fraksjoner.	So>14 Blokk stein, grus, sand, silt.	GPR signal brytes.	Mørk	Endemorene. Grense mellom to akviferer.
	Løse. Ulike korn-fraksjoner. Middels pakking. GPR: bankeformet.	Dms	Linser og diskontinuerlige lag.	Blokk stein, grus, sand, silt.	Banker	Mørk	Utsmeltningsmorene. Bunmorene.
2.Glasifluvial delta-avsetning	Fin grus, middels grus, grov sand, middels sand,		Delta (avsatt i vann).	Stein, grus, sand.	Skrålag		Avsatt i perioder med høyere vannføring.
	Grov sand, middels sand, finsand, grovsilt, middels silt, finsilt.		Delta (avsatt i vann).	Sand, silt.	Skrålag	Lys	Avsatt i perioder med lavere vannføring. Proksimalkant.
3.Fluvial avsetning	Fin sand, grus plane lag.	Sh	Plane sammenhengende lag		Banker /usammenhengende konturer		Sediment strøm
	Middels sand-grov sand, plane lag	Shg	Matriksbåren grus i blant		Banker /usammenhengende konturer		Sediment strøm
	Silt, fin sand, grov sand, evt. grusig, plane lag	Sg			Banker /usammenhengende konturer		Sediment strøm
4.Subglasial kanal eller subakvatisk vifte	Grovgrus, middels grus, fin grus, grov sand, middels sand (stein).	St	Storskala traue kryssjiktning	Stein, grus, sand.	Konturene viser en ryggform.  En klar reflektor vises pga. grunnvannspeilet.		Subglasial kanal /subakvatisk vifte

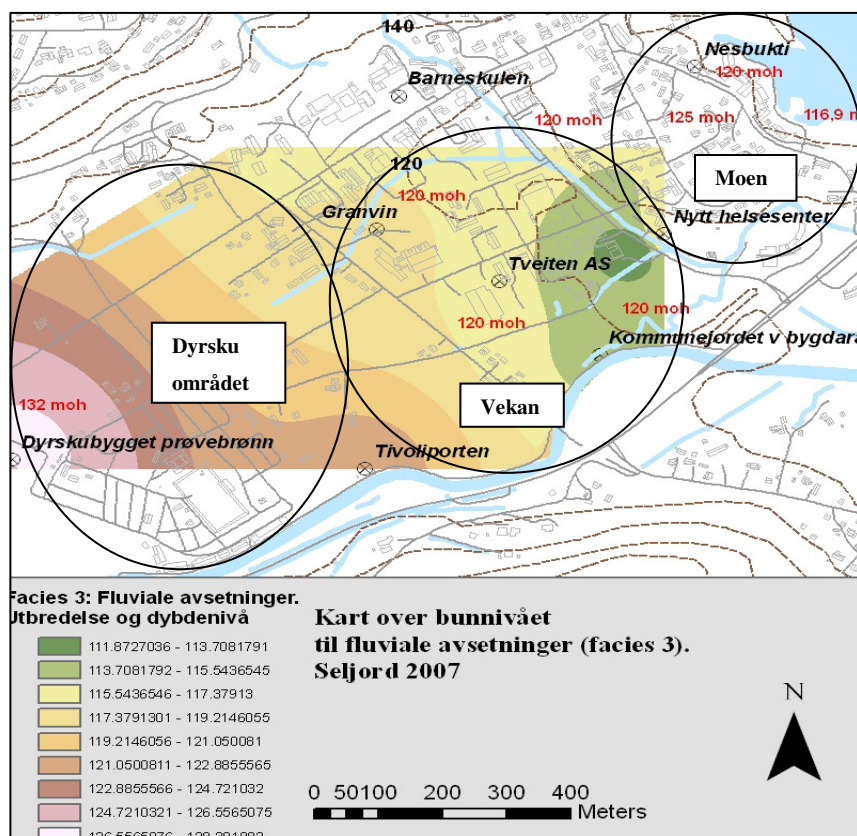
5.5.2 Sedimentologisk modell

De ulike faciesassosiasjonenes utbredelse og dybder er beregnet ut ifra interpolering med metoden IDW. Figur 24 viser et eksempel på den grafiske fremstillingen i ArcGIS. Eksemplet viser at bunnivået på fluviale avsetninger, facies 3, ligger seks meter under overflaten ved Dyrskuplassen og at de samme avsetningene ligger ni meter under overflaten ved Seljord Næringsbygg. Tilhørende lithofacies har varierende utbredelse langs Bygdaråi.

Utbredelsen til den subakvatiske vifta eller subglasiale kanalen (faciesassosiasjon 4) strekker seg fra området nord for Seljord barneskole til Moen.

Morene (faciesassosiasjon 1) er ikke interpolert i ArcGIS siden det er stor usikkerhet rundt denne faciesassosiasjonen.

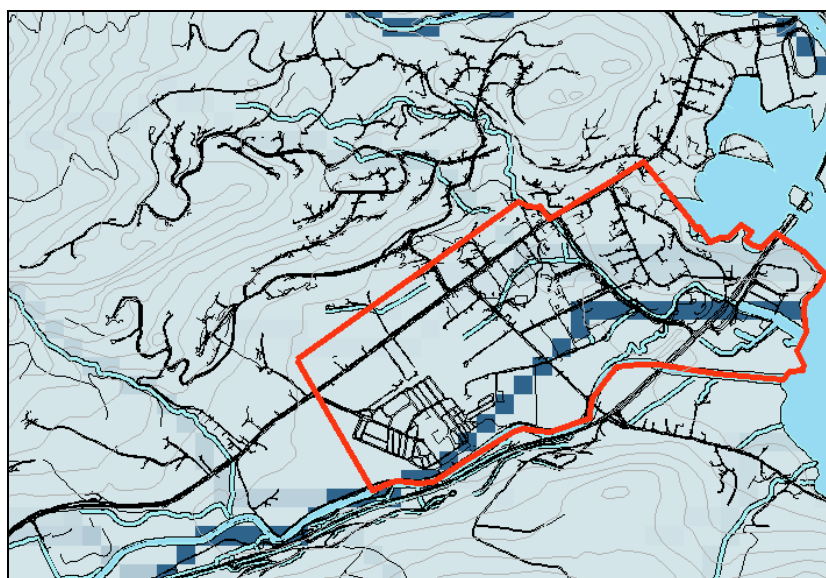
Glasifluviale deltaavsetninger (faciesassosiasjon 2) har sin utbredelse mellom Dyrskuplassen og Vekan. Tilhørende lithofacies: fin grus, middels grus, grov sand og middels sand finnes på Dyrskun og området vest for Vekan. Lithofacies: Grov sand, middels sand, finsand, grovsilt, middels silt og finsilt har størst utbredelse i Vekan området. Dette er et typisk bilde av et prograderende delta.



Figur 24: Sedimentologisk modell som viser utbredelse og dybde av fluviale avsetningers bunnivå (facies 3).

5.5.3 Strømningsanalyse av nedbørsfeltet

Nedbørsfeltet avsnøres mot Brunkeberg og øverst i Ordal. Nedbøren vil tas fort opp i Bygdaråi. ”Småbekker” rennende mot Bygdaråi og Tussejubekken vil ta opp mye av nedbøren fra nord- og sørliggende dalsider. Det er derfor mindre overflateavrenning fra dalsidene til akviferen siden det meste av nedbøren vil renne mot elva og bekkene. Dette betyr at vannføringa i Bygdaråi og Tussejubekken vil variere mye i store nedbørsperioder. Figur 25 viser hvor avrenning fra overflaten samles, og de mørkeste cellene viser at de mottar en avrenning fra 113 719 drenerende celler med et areal på 65x65 meter. De mørke blå cellene markerer Bygdaråis vannføring. Med en gjennomsnitt nedbørsmengde på 2,9 mm pr. dag vil dette gi en vannføring på ca. 170 000 m³/d i Bygdaråi ved Dyrskuplassen. Svak blå farge ligger over Tussejubekken som har drenering fra 317 celler (grid) som gir en vannføring i bekken på 3964 m³/d. Dette er et urealistisk tall. Årsaken er at bekkens vannføring svinger svært mye gjennom året og at bekken har et lite nedbørsfelt og dermed blir det feil å bruke gjennomsnittverdier for nedbør.



Figur 25: Strømningsanalysen viser at av nedbøren drenerer raskt til Tussejubekken (”mellomblå”) og Bygdaråi (mørk blå) og gir dermed mindre overflateavrenning til selve akviferen.

5.6 3D Modelling

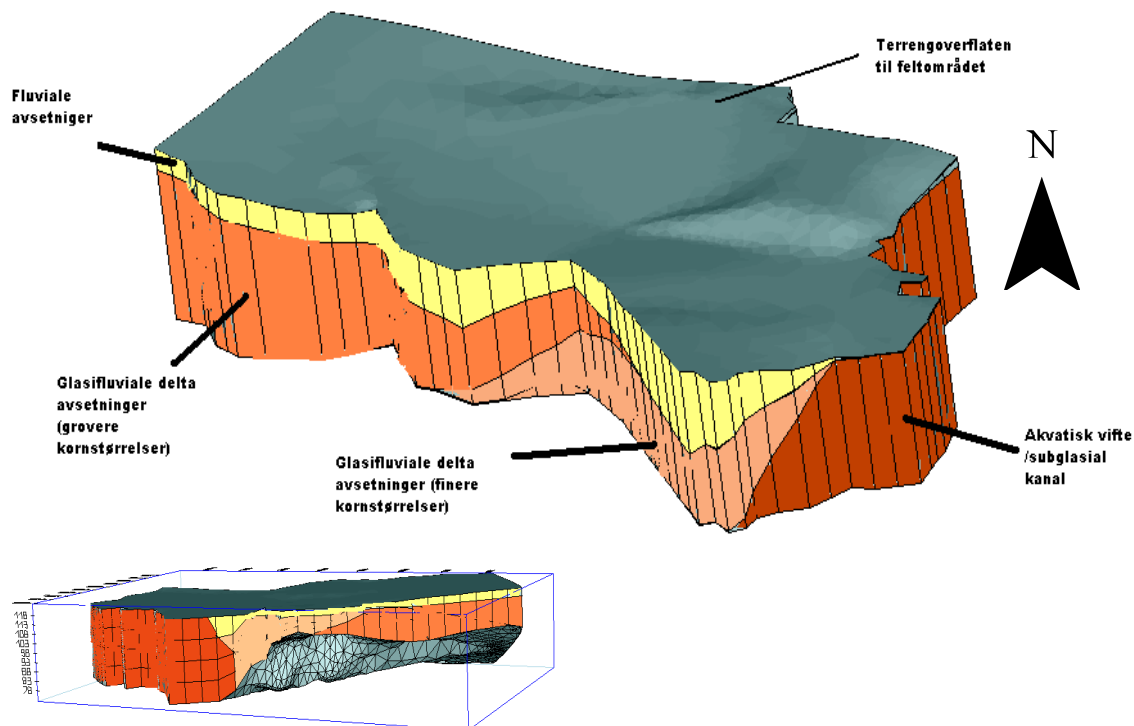
5.6.1 Konseptuell modell

Dybde og utbredelse for ulike facies er beregnet ut ifra spørringer i Access og interpolering i ArcGIS. Det er i tillegg gjort en manuell vurdering av borprofilene og GPR-profilene. Resultatene over dybde og utbredelse for ulike faciesassosiasjoner (Kap. 5.5.2) blir importert til FEflow. Feltområdet er delt inn i fire lag (layer) og med fem flater (slices). Det er stor usikkerhet om det er endemorene ved Dyrskun. Endemorene er derfor ikke satt inn som eget lag, men satt som akviferbunn ved Dyrskun og tatt hensyn til i form av lav hydraulisk ledningsevne. Høydene på markoverflaten, slice 1, er interpolert med utgangspunkt i høydekoter fra statens kartverk (1:5000, ekvidistanse 5 meter) og oppmålte høyder.

Egenskapene for de ulike lag og flater vises i tabell 8. I figur 26 vises en grafisk fremstilling av lagene.

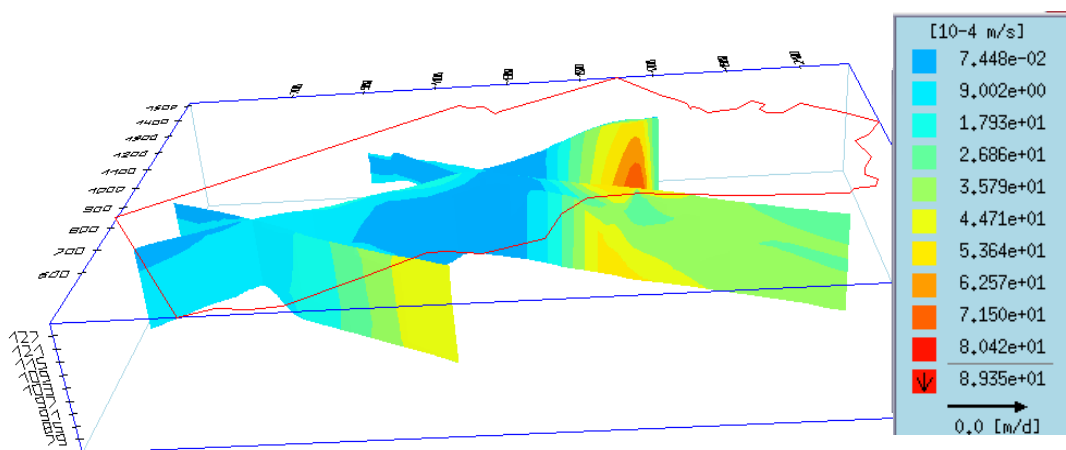
Tabell 8: Resultatet viser egenskapene til lag og flater i FEflow.

Lag /layer	Flate/ slice
1 Fluviale avsetninger	Toppflate fluviale avsetninger
2 Glasifluviale avsetninger – delta grovt	Toppflate glasifluviale avsetninger / bunnflate fluviale avsetninger
3 Akvatisk vifte-subglasial kanal	Toppflate akvatisk vifte-subglasial kanal / bunnflate glasifluviale avsetninger
4 Glasifluviale deltaavsetninger – finere materiale	Toppflate - glasifluviale avsetninger – finere materiale / bunnflate akvatisk vifte-subglasial kanal
5	Akviferbunn



Figur 26: Grafisk fremstilling av lagdelingen. Innrammet bilde viser mindre mektighet på akviferens nordside der rutenettet er simulert dybde til fjell på bakgrunn av boringene.

Hydraulisk ledningsevne forandrer seg i vertikal og horisontal retning, og lag for lag. Akviferen er derfor inhomogen og anisotrop. Figur 27 viser endringen i tre vertikale og horisontale snitt.

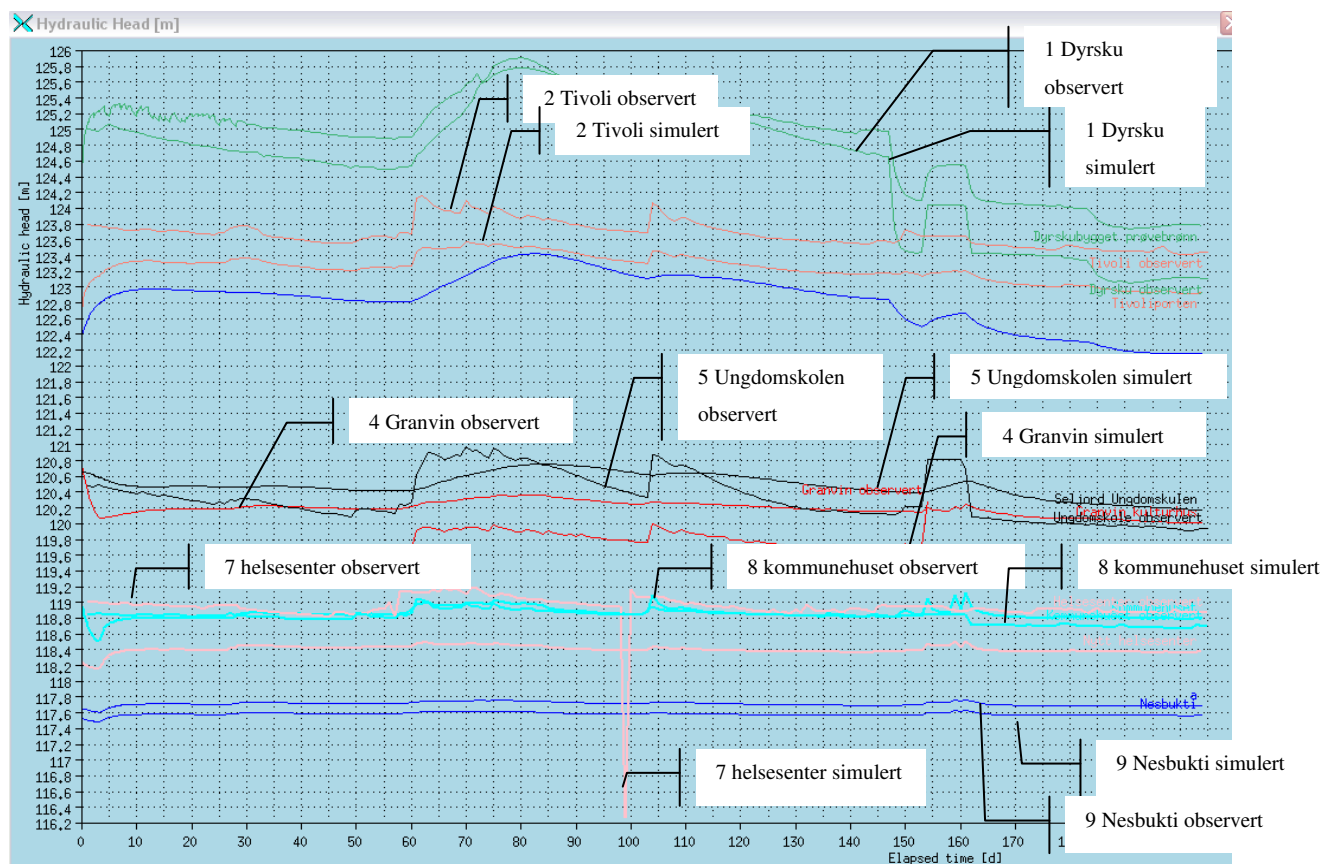


Figur 27: Tre utsnitt i akviferen som viser hydraulisk ledningsevne (K). Feltområdet er markert med rødt.

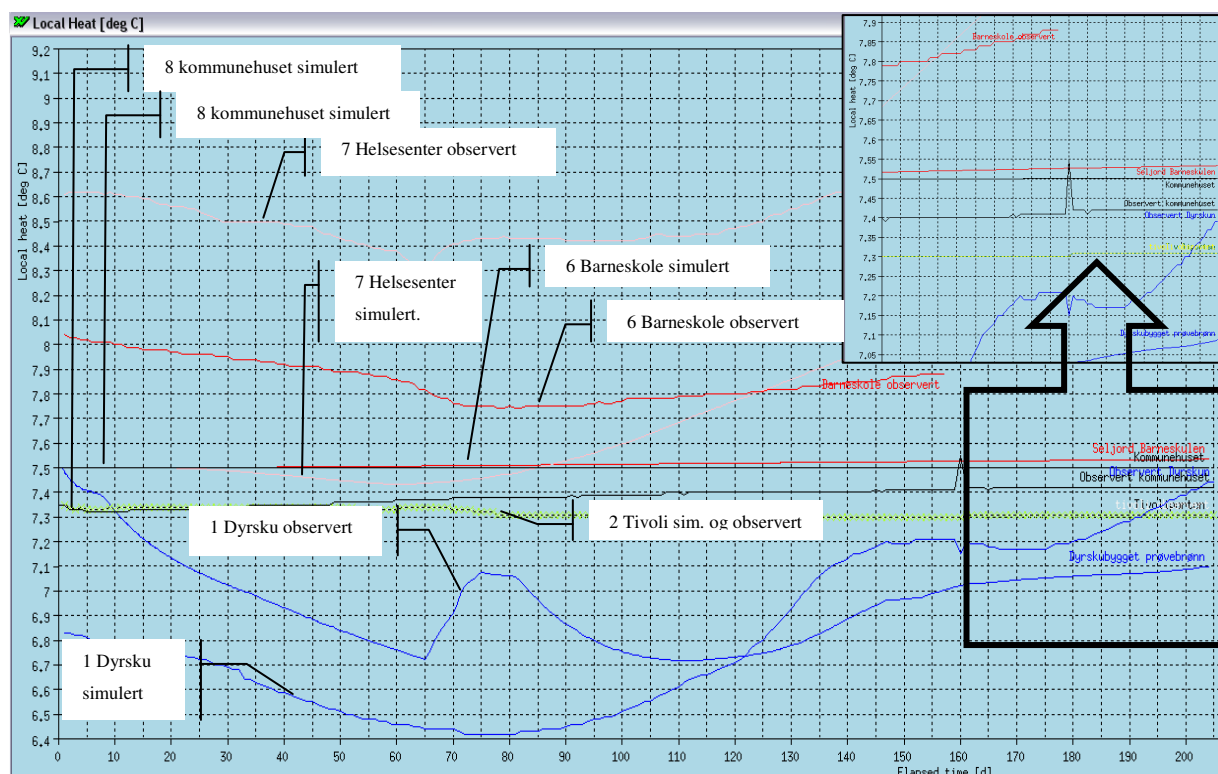
5.6.2 Kalibrering og verifisering

Avviket mellom observerte og simulerte grunnvannsnivåer på 5 til 10 meters dyp (ungdomskolen på 11 meters dyp) vises i figur 28. Maksimalt avvik er på 0,5 meter, mens gjennomsnittet ligger på 35 cm. Kalibrering av varmemodellen viser avvik mellom observerte grunnvannstemperaturer og simulerte fra 0 til 0,5 °C (figur 29). Dette er en bra og godkjent overensstemmelse. Det viste seg at grensebetingelsene langs elva hadde større innflytelse på grunnvannsnivåene enn hva nedbørsverdiene hadde. Ved å bytte type 2 grense med type 1 grense på nordsiden av akviferen og legge inn transiente grunnvannsnivåer, ble det bedre overensstemmelse med de observerte dataene. Årsaken er at det ble lagt inn en fast kontinuerlig avrenning, men i virkeligheten varierer avrenningen over tid. En antar at K-verdiene gir et godt estimat av virkeligheten, siden endring av K-verdier ga liten påvirkning på grunnvannsnivåene. Lagdeling og faciesinndeling innad i akviferen er derfor ikke endret.

Verifisering av modellen må gjøres i fremtiden. Det finnes ikke stasjonære eller transiente data fra tidligere.



Figur 28: Resultat av observerte og simulerte grunnvannsnivåer på 5-10 meters dyp etter kalibrering.



Figur 29: Resultat av observerte grunnvannstemperaturer på 15-20 meter og simulerte verdier etter kalibrering.

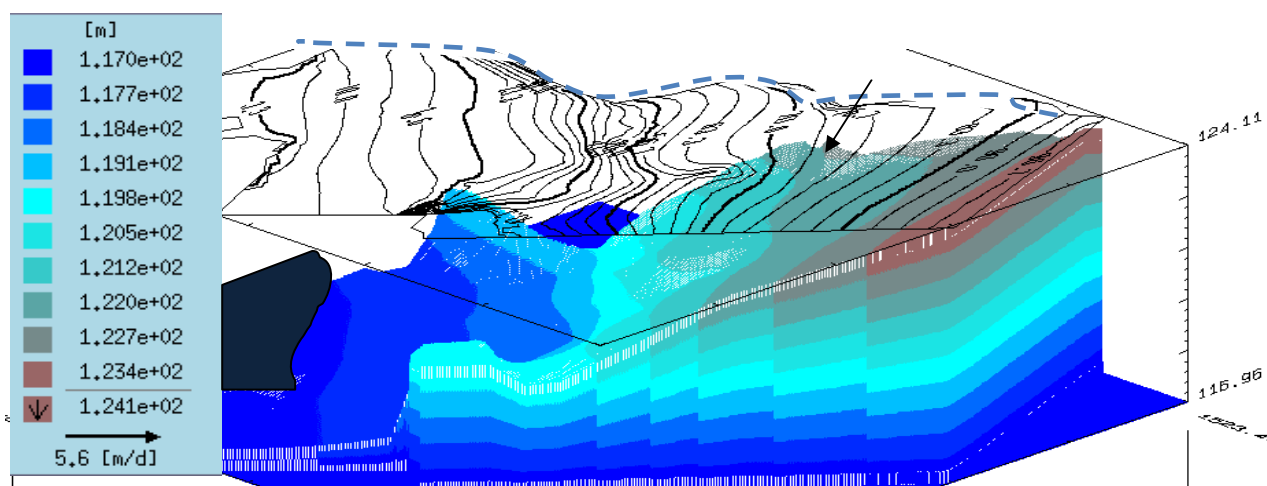
5.6.3 Følsomhetsanalyse

Følsomhetsanalysene er manuelt utprøvd. Vannstand i Bygdaråi er den mest følsomme parameteren. En endring av denne sammen med permeabilitetsverdi i elvebunn gir store utslag på interaksjonen mellom elva og akviferen. Endring av infiltrasjonsgraden fra elva påvirker grunnvannstemperaturen i deler av akviferen. Dette gjenspeiler at det er god kommunikasjon mellom Bygdaråi og akviferen. Modellen var veldig stabil for endring av K-verdier.

5.6.4 Simuleringsresultater

Strømningsgradient og grunnvannsnivå

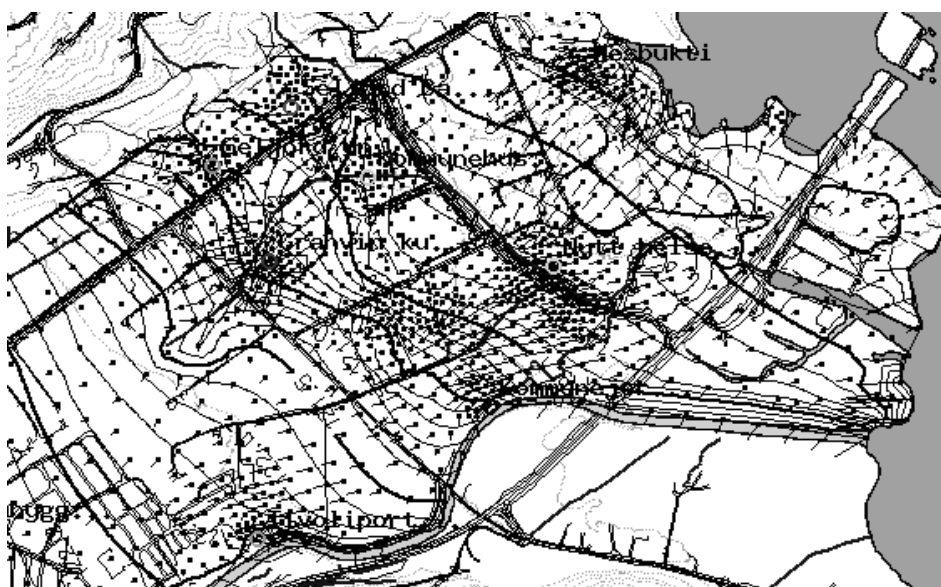
Interpolert ekvipotensialkart over grunnvannsnivå kan gi falske bilder av strømningsforholdene fordi det er en vertikal og horisontal strømningskomponent (Klempe 2007). Interpolert ekvipotensialkart alene er ikke egnet til å karakterisere interaksjon mellom elvevann og grunnvann. Modelleringsverktøy kan imidlertid øke verdiene til observasjonene og gjøre strømningsmønsteret mer realistisk (Colleuille et al. 2004c). De laveste grunnvannstandene er målt i observasjonsbrønn 9, Nesbukti, og høyeste vannstand i observasjonsbrønn 1, Dyrskubygget. Dette betyr at det er en strømningsgradient fra vest mot øst (figur 30). Feltområdet er et åpent infiltrasjonsmagasin med et høyt grunnvannsnivå. Figur 30 viser grunnvannspotensialene sett fra nord, og dermed kan en se at vannstanden nær Bygdaråi (stiplet strek) har et høyere potensial enn grunnvannspotensialet sentralt i akviferen. Måledata ligger i vedlegg 3.



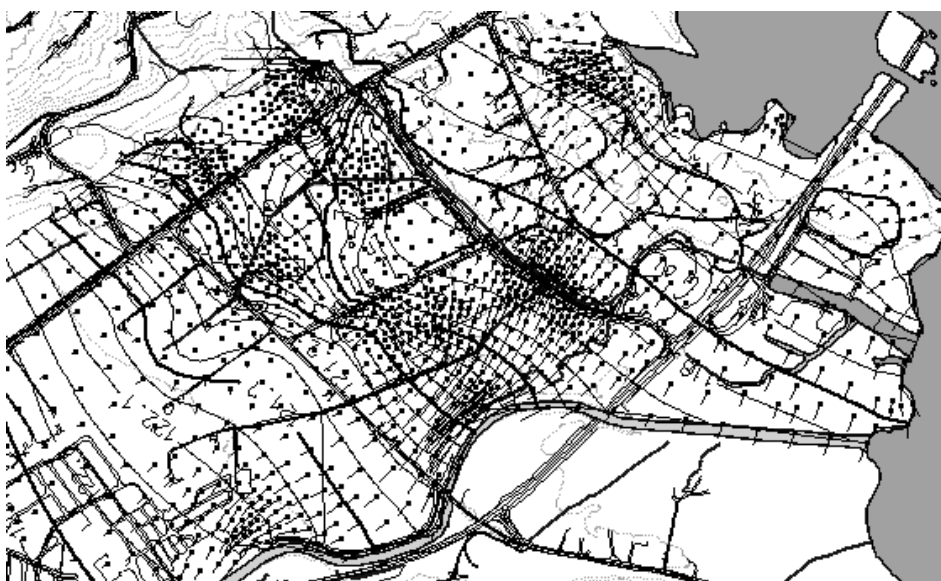
Figur 30: Simulerte grunnvannsnivåer med gradient fra vest mot øst, vist med koter og fargete sekvenser. En ser inn i modellen fra nord mot sør. Bygdaråi er stiplet på sørsiden av feltområde. Seljordsvatnet er inntegnet med mørk farge.

Interaksjon og endret strømningsmønster i dybden (uten pumping)

Resultatet fra simuleringen viser interaksjon mellom Bygdaråi og grunnvannet, spesielt godt vises dette ved strømningsmønsteret fra Bygdaråi mot Vekan og Moen. Undersøkellesbrønnene ved skoleområdet (5 og 6) og på Granvin (4) har ikke influensområdet sitt fra Bygdaråi. Strømningsmønsteret er simulert i FEflow og viser endring på ulike dybder i akviferen (figur 32 og 33). Dypere kan grunnvannsstrømmingene være like mye påvirket av strømninger fra dalens sørvestlige side (utenfor feltområde).



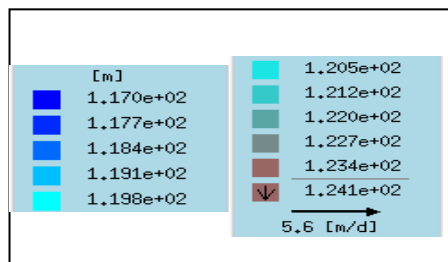
Figur 32: Strømningsmønster 0-5 meters dybde. Ekvipotensiallinjene viser bratte gradienter på Vekan området, der vannet strømmer mot Tussejubekken. Noen steder viser pilene matning fra Bygdaråi. Pillelengden representerer hastighet på vannet. Simulert høstsituasjon 2007 (tørrværsperiode).



Figur 33: Strømningsmønster på 15 - 20 meters dybde. Moen området blir matet fra Bygdaråi, sør og nordvestlige dalsider. Det er uvisst om matningen skjer fra elva på dette dypet. Pillelengden representerer hastighet på vannet. Simulert høstsituasjon 2007 (tørrværsperiode).

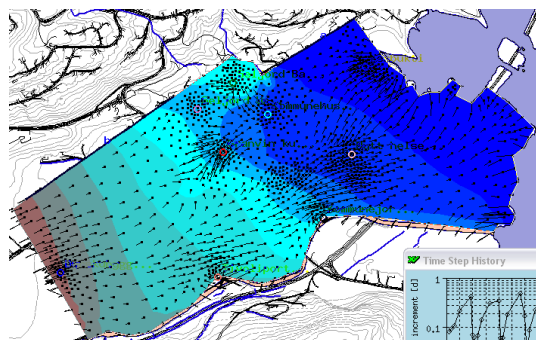
Fluktasjoner i grunnvannsnivå

Simulerte grunnvannsnivåer fra 3. mai til 24. nov. viser endring av grunnvannsnivå over tid. Simuleringene som vises figur 34-40 er tatt på overflaten og på ca. 20 meters dyp. Grunnvannsnivået er høyest om sommeren, men synker litt om høsten. Det er god overensstemmelse mellom simulerte og observerte verdier (figur 28 s.66).

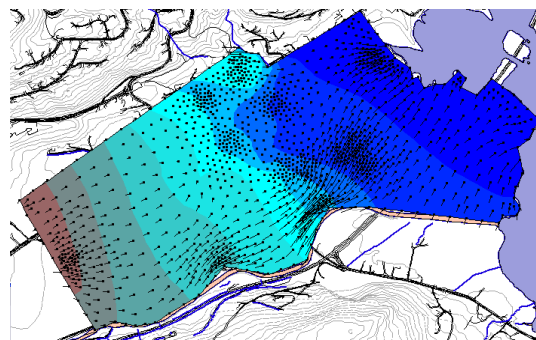


Figur 34: Tegnforklaring som angir moh. for figurene 35, 36, 37, 38, 39 og 40.

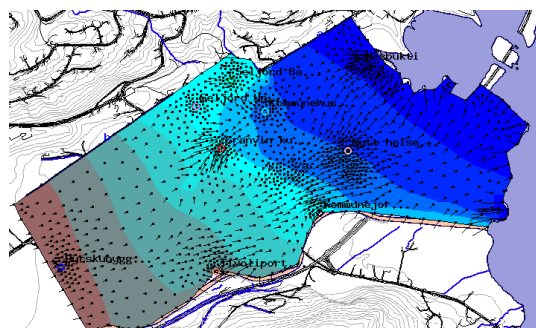
Simuleringene viser små variasjoner i grunnvannspotensial på ulike dyp



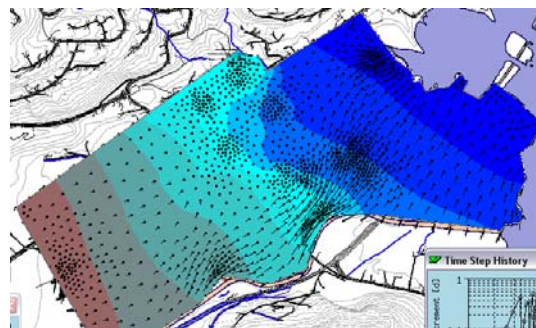
Figur 35: Grunnvannsnivået mai, der nivå er fremstilt med farger. Utsnittene representerer topplaget.



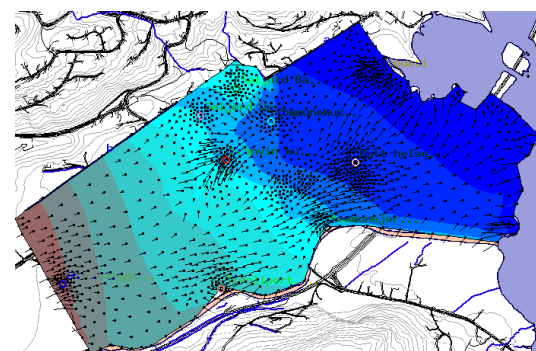
Figur 38: Grunnvannsnivået mai, der nivå er fremstilt med farger. Utsnittene representerer 15-20 meters dyp.



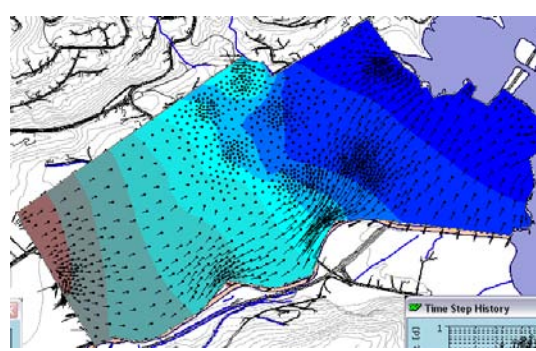
Figur 36: Grunnvannsnivået i august, der nivå er fremstilt med farger. Utsnittene representerer topplaget.



Figur 39: Grunnvannsnivået i august, der nivå er fremstilt med farger. Utsnittene representerer 15-20 meters dyp.



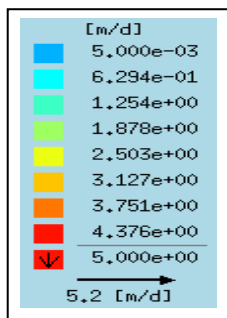
Figur 37: Grunnvannsnivået i november, der nivå er fremstilt med farger. Utsnittene representerer topplaget.



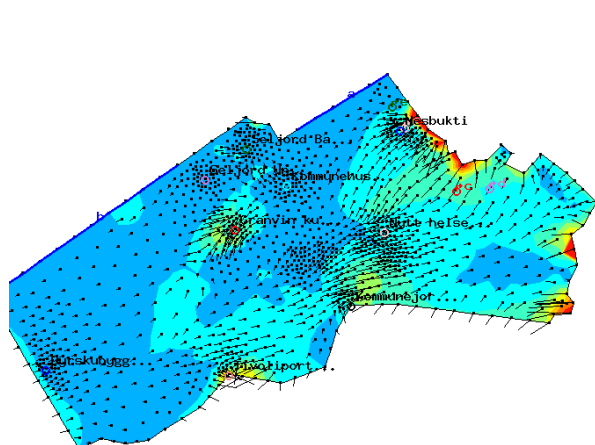
Figur 40: Grunnvannsnivået i november, der nivå er fremstilt med farger. Utsnittene representerer 15-20 meters dyp.

Strømningshastighet

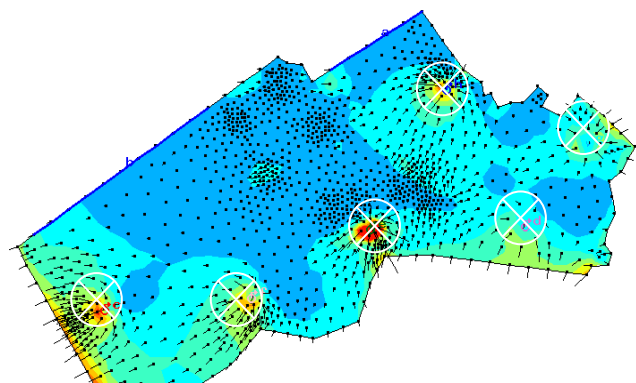
Strømningshastighet uten pumping i brønnene er vist i figur 42 og 43. Hastigheten er simulert i meter pr døgn. 0,005 m/d er dominerende hastighet. Langs Bygdaråi og ut mot Seljordsvatnet er hastigheten simulert til 1,25-1,87 m/d. I figur 44 og 45 viser simuleringen at hastigheten øker ved pumping. Tegnforklaringen (figur 41) gjelder for figur 42-45.



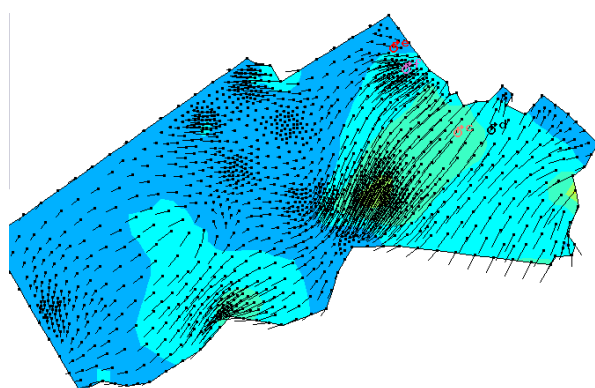
Figur 41: Simulerte hastigheter innenfor akviferen.



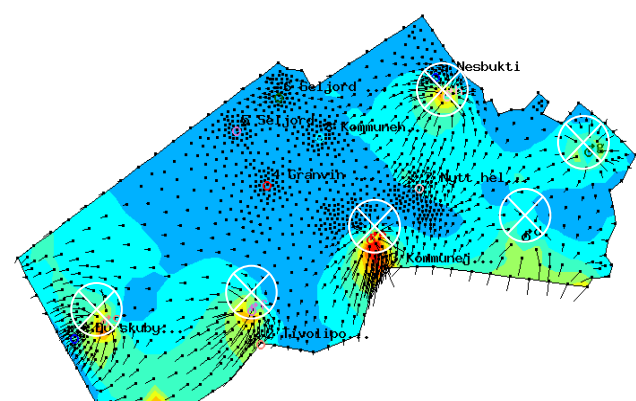
Figur 42: Hastigheten i topplaget (elveavsetninger) uten pumping.



Figur 44: Hastigheten i topplaget (elveavsetninger) med pumping. Et uttak på 3600 m³/d er simulert i hver brønn (innringet).



Figur 43: Hastigheten i på 20 meters dybde (breevavsetninger) uten pumping.



Figur 45: Hastigheten på 20 meters dybde med pumping. Et uttak på 3600 m³/d er simulert i hver brønn (innringet).

Temperatursimuleringer

Simulerte temperaturer, uten pumping, på 15-20 meters dybde er vist i figur 45 (sommer) og 46 (høst). Resultatet viser stabile temperaturer i nordliggende del av akviferen med god avstand fra elva, mens elvenære områder blir oppvarmet og avkjølt.

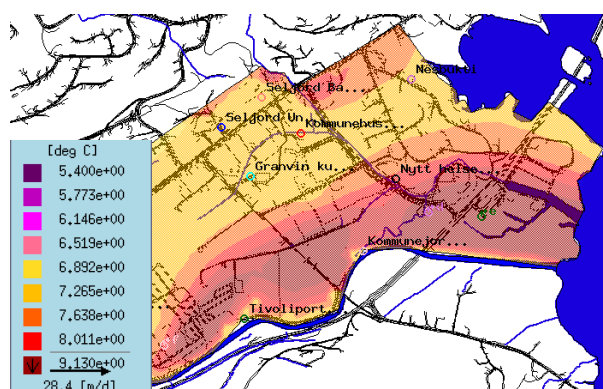
En simulering med pumping fra fem brønner, med et uttak på 720 m³/d i hver brønn, viste ingen endring i varmestrøm.

Ved å øke uttaksmengden til 3600 m³/d i hver brønn viste modellen forskjeller i varmestrøm sammenlignet med en situasjon uten pumping (figur 46 og 47).

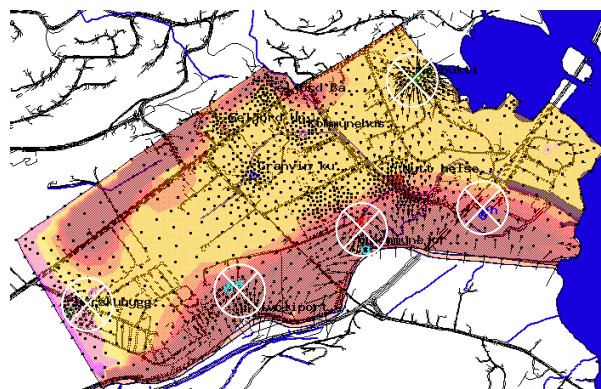
Det er urealistisk med et så stort total uttak av vann, men med dette uttaket ser en at Dyrs kubrønnen (lengst vest) kan trekke til seg kaldt vann på sommerstid og at brønnen ved Nesbukti trekker varmt vann om høsten. Simuleringen med pumping fra fem brønner viser ikke større inndragning av kaldt elvevann i brønnene enn simulering uten pumping.

Modellen brukte lang tid på å stabilisere temperaturen i starten. Bygdaråi viser raske og store endringer i temperatur (figur 48 og 49) og modellen brukte lang tid på utjevne disse svingningene.

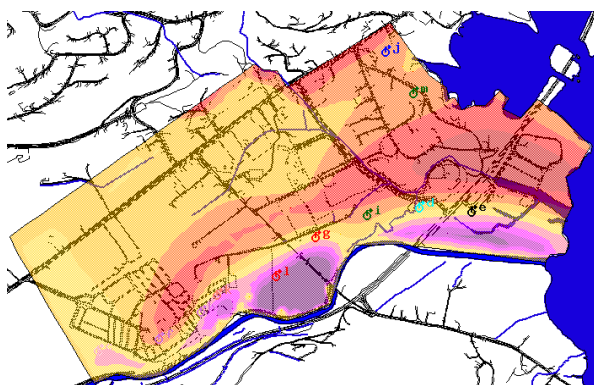
i



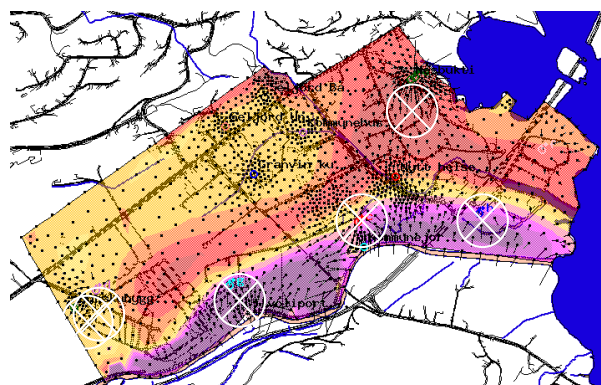
Figur 46: Temperaturer på 15-20 meters dyp i månedsskiftet august- september uten pumping.



Figur 48: Temperaturer på 15-20 meters dyp i månedsskiftet august- september med pumping. I hver brønn (innringet) er det simulert et uttak på 3600 m³/d for å se på temperaturforandring rundt brønnene. Strømningsretning vises med svarte piler.



Figur 47: Temperaturer på 15-20 meters dyp i oktober uten pumping.



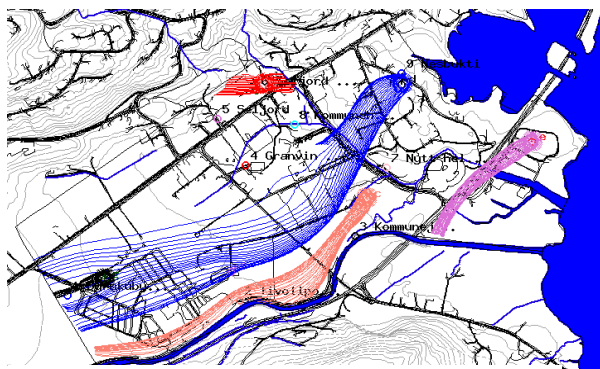
Figur 49: Temperaturer på 15-20 meters dyp i oktober med pumping. I hver brønn (innringet) er det simulert et uttak på 3600 m³/d for å se på temperaturforandring rundt brønnene. Strømningsretning vises med svarte piler.

Strømningsmønster og influensområde ved store vannuttak

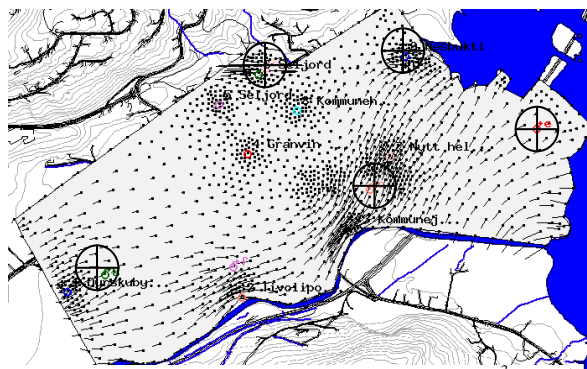
Metoden for å finne senkningen og influensområdet til energibrønner ble gjort ved å simulere x-antall brønners innvirkning på strømningsmønster og grunnvannsnivå. Pumpescenariet foregår over 260 dager (tilsvarende registreringsperioden).

Selv om influensområdet strekker seg utenfor feltområdet simuleres ikke dette i FEflow. Dette betyr at influenslinjene er lengre enn resultatet viser. Brønnenes influensområde kan også forandre seg over tid avhengig av endring i grunnvannsnivå. Dette er ikke tatt hensyn til under pumpescenariene. Observasjonspunkter i nærheten av grensebetingelser kan styres av de innsatte grenseverdier og dermed gi feil simuleringsresultat (Dimakis 2007). Dette vises i brønnen lengst vest, ved Dyrskun, som ligger like ved en grensebetingelse.

Ved uttak av $720 \text{ m}^3/\text{d}$ varierer brønnenes influensområde varierende fra sted til sted. Figur 50 viser influensområde til hver brønn med dette uttaket. Figur 51 viser at strømningsmønsteret endret seg bare ved barneskolen sammenlignet med det naturlige strømningsmønsteret (figur 33).

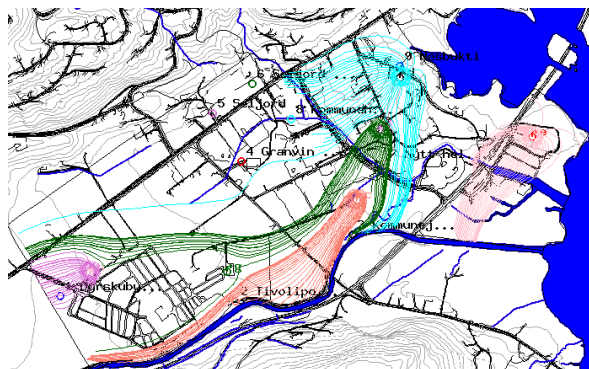


Figur 50: Influensområdet til brønner ved vannuttak på $720 \text{ m}^3/\text{d}$.

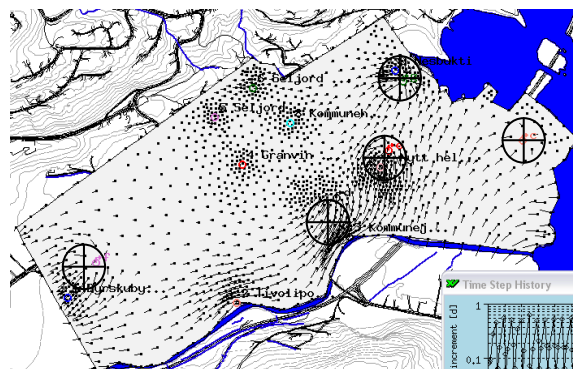


Figur 51: Strømningsmønster etter uttak på $3600 \text{ m}^3/\text{d}$ fordelt på fem brønner i akviferen. Brønnplassering vises med svart ring.

Ved å øke uttaket i hver brønn til $2160 \text{ m}^3/\text{d}$ (720×3) blir influensområdet større og flere brønner drar inn vann fra elva (figur 52 og 53). Resultatet viser at brønnene påvirker hverandres influensområder. Strømningsmønsteret har med dette uttaket forandret seg langs elva.

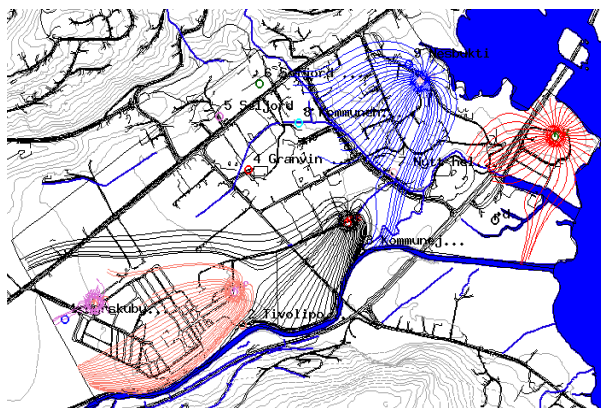


Figur 52: Influensområdet til brønner ved vannuttak på 2160 m³/d.

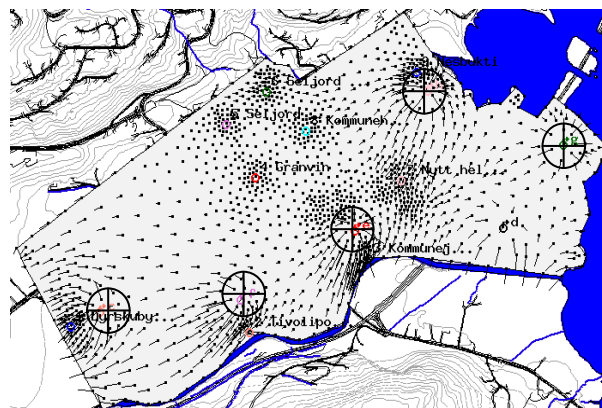


Figur 53: Strømningsmønster etter uttak på 10 800 m³/d fordelt på fem brønner i akviferen. Brønnplassering vises med svart ring.

Infiltrasjon fra Seljordsvatnet er en begrensende faktor siden temperaturen i innsjøen er lavere enn i grunnvannet om vinteren. Ved å øke vannuttaket i hver brønn til 3600 m³/d ser en at brønnene lengst øst trekker vann både fra akviferen og Seljordsvatnet (figur 54). Med dette uttaket øker influensområdet og det naturlige strømningsmønsteret endres langs Bygdaråi (figur 55).



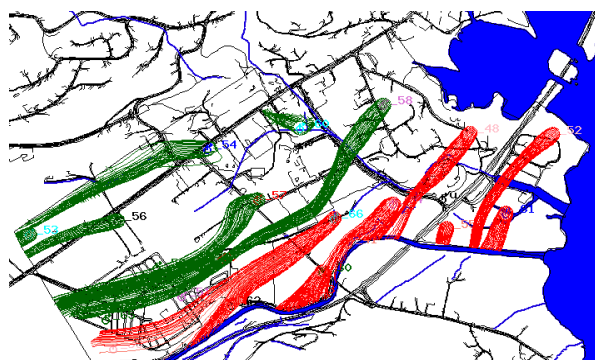
Figur 54: Influensområdet til brønner med vannuttak på 3600 m³/d hver.



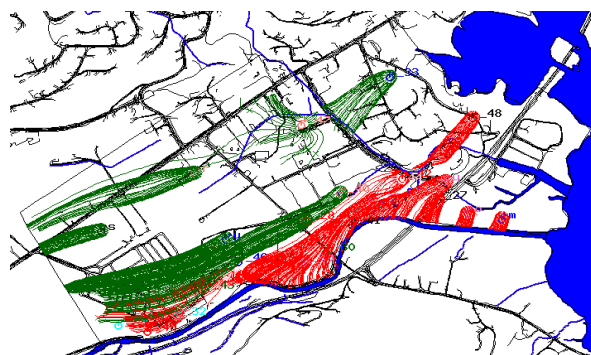
Figur 55: Strømningsmønster etter uttak på 18 000 m³/d fordelt på fem brønner i akviferen. Brønnplassering vises med svart ring.

Infiltrasjon fra Bygdaråi ved pumping

For å undersøke om energibrønner kan plasseres langs elva er det simulert flere brønner med uttak på $720\text{m}^3/\text{d}$ langs Bygdaråi. I dette tilfellet ble det simulert for hver brønn som ble satt inn i modellen. Figur 56 viser vannuttak der filteret er plassert på ca. 10 meters dybde og figur 57 viser uttak med filter plassert på ca. 20 meters dybde. Resultatene viser avtakende matning fra elva på 20 meters dyp. Brønner liggende lengst vest vil ha matning fra dalføret, mens brønner ved Moen og Vekan vil mates fra Bygdaråi eller sørliggende dalside. Det er stor usikkerhet om vannmassene på større dyp strømmet fra elva eller dalsiden fordi modellen er avgrenset langs Bygdaråi.



Figur 56: Brønners influens område ved filter plassert på 10 meters dyp. Brønner som har sitt influensområde fra Bygdaråi vises med rødt.



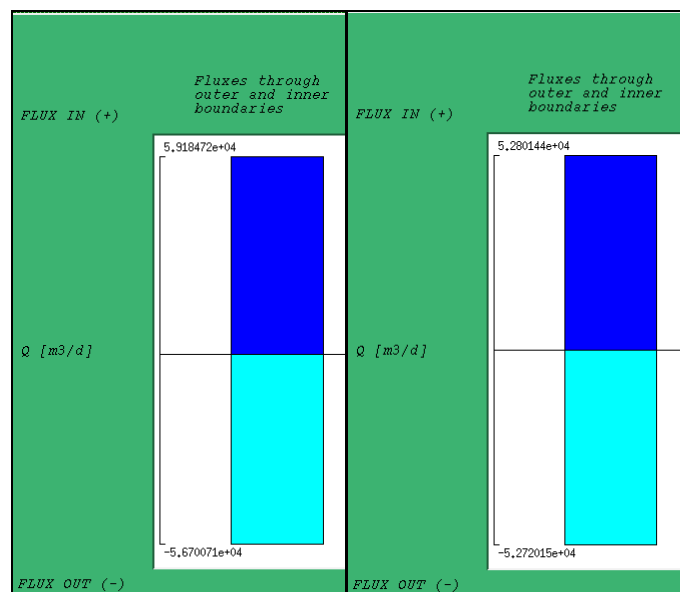
Figur 57: Brønners influens område ved filter plassert på 20 meters dyp. Brønner som har sitt influensområde fra Bygdaråi vises med rødt.

5.7 Grunnvarmepotensialet i Seljord

5.7.1 Begrensinger for uttak

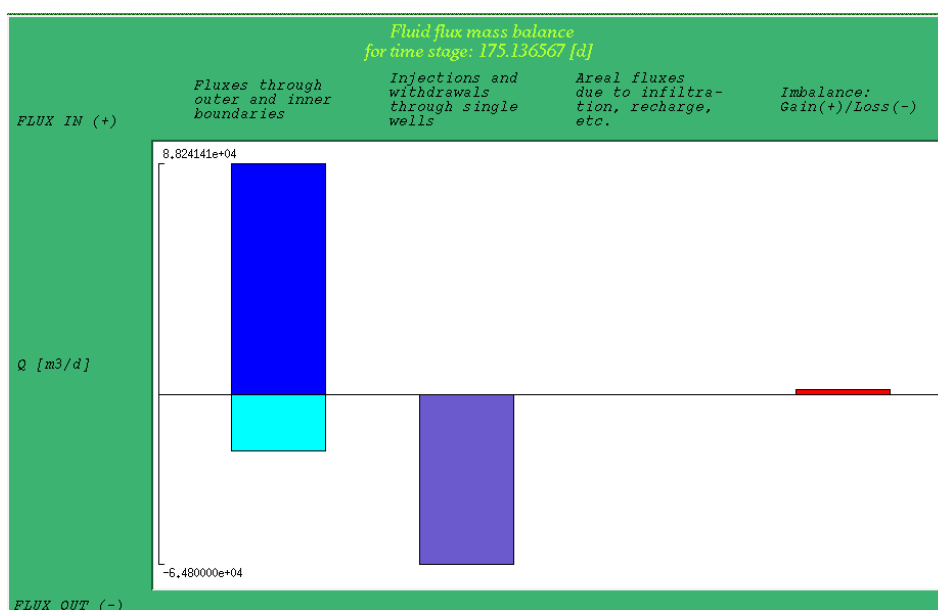
Vannbalanse

Under simulering av grunnvannsmodellen kan vannbalansen til enhver tid undersøkes i FEflow. Om sommeren (25.juli 2007) viser grunnvannsmodellen et vannvolum på $40\,060\,372\text{ m}^3$ (uten pumping). Sommeren 2007 var preget av mye nedbør og flomperioder. Modellen viste at innstrømmingen i akviferen var større enn avrenningen med et overskudd på $248\,400\text{ m}^3$ (figur 58). Høsten 2007 var det lite nedbør og loggerne viste at grunnvannsnivået var litt lavere enn hva som var målt noen måneder tidligere. Vannvolumet som er undersøkt en høstdag (3. okt. 2007) viste $39\,773\,556\text{ m}^3$ og et overskudd på 8130 m^3 (figur 58).



Figur 58: Figuren viser hvor mye vann som strømmer inn i akviferen og avrenningen fra akviferen. Til venstre vises en sommersituasjon og til høyre vises en høstsituasjon i 2007.

I 2008 forventes det at ni energibrønner er i drift i Seljord. En antar at hver brønn har en kapasitet på 720 m³/d som gir et samlet uttak på 6480 m³/d. For å undersøke vannbalansen i akviferen ved økt utnytting av grunnvarme simuleres det et uttak på det ti-dobbelte (64 800 m³/d). Figur 59 viser massebalansen simulert en høstdag (25. okt. 2007) etter to nedbørsfattige måneder (DNMI 2007). Tørrværs perioder kan minke uttakspotensialet siden tilsiget og infiltrasjonen til akviferen kan avta. Resultatet viser at innstrømningen er fortsatt større enn avrenning og vannuttak, med et overskudd på 2011 m³.



Figur 59: Figuren viser at innstrømningen til akviferen (88 240 m³) er større enn uttaket og avrenningen (86 230 m³).

Bygdaråi er ei elv der vannføring fluktuerer mye i flomperioder og tørkeperioder. De er vanskelig å estimere overflateavrenning/grunnvannsdannelse i bebygde områder på grunn av at en stor del av arealet er asfaltert, drenert og at det sannsynligvis er lekkasjer fra ledninger (Colleuille et al. 2000a). Ved å analysere strømningsmønsteret i nedbørsfeltet (Kap. 5.5.3) ble vannføringa i Bygdaråi grovt beregna til å være 170 000 m³/d. Ved å anta en infiltrasjonsgrad på 50 % (Lind 2007) fra Bygdaråi til akviferen (forutsetter pumping) vil dette gi en innstrømning på 85 000 m³/d fra elva.

Transmissivitet og senkning

Transmissivitetsverdier vises i tabell 9. Verdiene kan brukes til å beregne senkning ved ulike pumpekapasiteter. Transmissivitetskartet (figur 60) viser harmonisk middel av hydraulisk ledningsevne i alle lag multiplisert med mektigheten. Transmissivitetskartet viser hele akviferens strømningssegenskaper. Grove lag på toppen er tatt med i utregningen av T-verdier, selv om topplaget er ikke egnet for filterplassering. Det er gode, men varierende vannledningsevner i akviferen.

Tabell 9: Transmissivitet for filterplassering på 5-10, 10-15, 15-20 og 20-27 meter. Total transmissivitet er beregnet med vekta k-verdier og mektighet på 11 m (Ungdomskolen), 20 m (Barneskolen) og 45 meter.

Brønn	T for filter på 5-10 meter (m ² /s)	T for filter på 10-15 meter (m ² /s)	T for filter på 15-20 meter (m ² /s)	T for filter på 20-27 meter (m ² /s)	Total T, der mektigheten inkluderer hele akviferen (m ² /s)
Dyrskun(1)	1.87E-03	1.44E-03			6.42E-02
Tivoliporten (2)	4.76E-03	2.53E-03	4.75E-03		2.15E-01
Kommunehuset (8)	1.93E-03	1.81E-04	1.29E-04		3.91E-03
Granvin (4)	1.17E-03	6.42E-04	1.63E-03	6.59E-04	3.16E-02
Ungdomskole (5)	2.35E-03	2.89E-03			1.02E-02
Barneskole (6)	1.85E-05	3.29E-03	1.73E-03		1.34E-02
Kommunejordet (3)	1.87E-03	2.38E-04	1.16E-04		7.68E-02
Nesbukti (9)	5.17E-03	7.56E-02	1.40E-02		9.48E-02
Helsesenter (7)	1.77E-03	5.68E-03	1.96E-03		3.18E-01

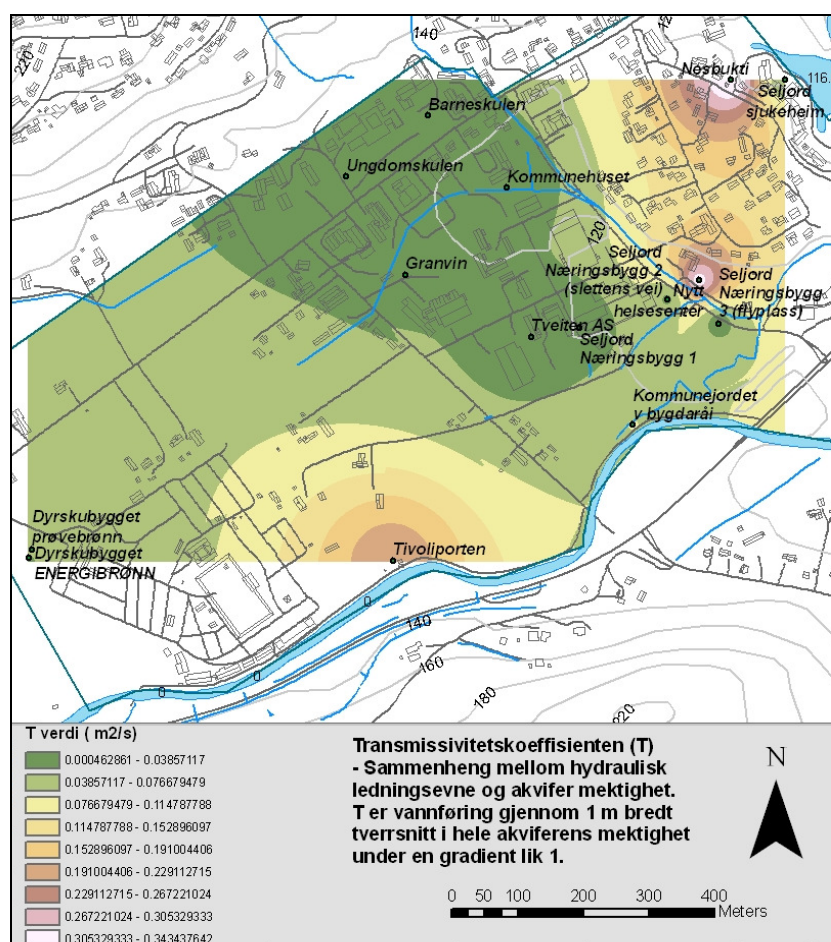
Grunnvannsmodellen var uegnet for å simulere senkning siden senkningsgraden styres av grensebetingelsene og det er vanskelig å sette observasjonsbrønner som måler senkningen i riktig område i forhold til pumpebrønnen (Dimakis 2007). Senkning og influensradius er

viktige begrensende faktorer og ble derfor beregnet etter Thiems stasjonære brønn formel 12 (Rueslåttén og Veslegard 1991).

Tabell 10 viser senkning ved uttak på 720 m³/d med et brønnfilter på 15-20 meter og brøndiameter på 168 mm. I vedlegg 4 ligger beregningsgrunnlaget for senkning.

Tabell 10: Senkning og dimensjonerende senkning ($S_w \times 1,5$) ved et vannuttak på 720 m³/d i brønner plassert på 15-20 meter dyp.

Brønnr.	Brønnavn	Vannuttak Q (m ³ /d)	Senkning S_w	Senkning S_{dim}
1	Dyrskun	720	10.8	16.2
2	Tivoli	720	3.3	4.9
3	Kommunejordet	720	>20	>20
4	Granvin	720	9.5	14.3
5	Ungdomskolen	720	0.0	0.0
6	Barneskole	720	9.0	13.5
7	Helsesenter	720	8.0	11.9
8	Kommunehuset	720	>20	>20
9	Nesbukti	720	1.1	1.7



Figur 60: Transmissivitetkart viser at de best egnede stedene for vannuttak er på Moen og i nærheten til Bygdaråi i forhold til masser med god vanngiverevne.

5.7.2 Potensialet for vannuttak

Potensialet for vannuttak vises i tabell 11. Det er beregnet et maksimalt vannuttak Q_{\max} og et vannuttak der det er tatt hensyn til dimensjonering Q_{\dim} . Ved beregning av Q_{\dim} er transmissiviteten T satt 20 % lavere enn i Q_{\max} på grunn av hensyn til konstruksjonsdetaljer (Andersson et al. 1984). Resultatet forutsetter brønner med filter plassert på 15-20 meter dyp og maksimal senkning (med hensyn til grunnvannsnivå). Beregningene av Q_{\max} og Q_{\dim} vises i vedlegg 4.

Det er bare tatt hensyn til T -verdier der filteret er ”plassert”, på den måten tas det hensyn til at T avtar når grunnvannsnivået senkes.

Tabell 11: Tabell over vannuttak (Q_{\max} og Q_{\dim}) og infiltrasjonsradius ved maksimal senkning i brønner plassert på 15-20 meter dyp.

Brønnr.	Brønnavn	Maks senkning (m)	Q_{\max} (m^3/d)	Q_{\dim} (m^3/d)	Infiltrasjonsradius $R_{100} Q_{\max}$ (m)	Infiltrasjonsradius $R_{100} Q_{\dim}$ (m)
1	Dyrskun	13	1082	866	165	148
2	Tivoli	12	3294	2635	289	258
3	Kommunejordet	13	87	70	47	42
4	Granvin	14	1319	1056	183	163
5	Ungdomskolen	0	0	0	0	0
6	Barneskole	11	1100	880	167	149
7	Helsesenter	13	1471	1177	193	172
8	Kommunehuset	14	104	83	51	46
9	Nesbukti	11	8904	7123	474	424

5.7.3 Grunnvarmepotensialet i Seljord

På grunnlag av beregna verdier for vannuttak (m^3/t), potensialet for temperaturuttak for de ulike stedene og spesifikk varmekapasitet er det beregnet grunnvarmepotensialer på ulike steder i akviferen (tabell 12). Tabell 12 viser ikke samlet kapasitet, men et potensialet uten å ta hensyn til omkringliggende brønner. Brønnene som står i akviferens utstrømningsområde vil tåle dette uttaket bedre enn brønner som ikke infiltreres fra Bygdaråi. Effekttuttaket er beregnet med hensyn til brønner med filter plassert på 15-20 meter dyp.

Grunnvarmepotensialet vil variere mellom årstider og fra år til år. Ved å anta at det beregna grunnvarmepotensialet (høstsituasjonen) representerer gjennomsnitt for et helt år vil effekten av energibrønner være svært stor (tabell 12). Det må bemerkes at senkningen er uforsvarlig høy, og at viss dette effekttuttaket er ønskelig må det anlegges et åpent flerbrønn-system (produksjonsbrønner og infiltrasjonsbrønner).

Tabell 12: Beregnet effektuttak i hver brønn beregnet ut ifra maksimalt senkning og Q_{dim} .

	Brønn	kW	kWh/år	MWh/år	GWh/år
1	Dyrskun	174	1524361	1524	1.5
2	Tivoli	471	4133676	4134	4.1
3	Kommunejordet	12	109632	110	0.1
4	Granvin	225	1971879	1972	2.0
5	Ungdomskolen	0	0	0	0
6	Barneskole	205	1803440	1803	1.8
7	Helsesenter	327	2871987	2872	2.9
8	Kommunehuset	17	155754	156	0.2
9	Nesbukti	1482	12985089	12985	13.0

5.7.4 Kart over grunnvarmepotensialet

Ved bruk av geografisk informasjonssystemer (GIS) og programvaren ArcGIS blir grunnlagsdataene presentert i kartform. Det er laget situasjonskart som bygger på modellerte og observerte data. Alle kartene som det blir referert til er lagt i vedlegg 1.

Kart over potensialet for vannuttak har blitt utviklet ved å interpolere resultatene fra beregnede Q_{max} og Q_{dim} verdier (tabell 11). Q_{max} er sjekket opp mot Reynholdstall og grensen for å unngå turbulens strømning gjennom filteret ligger på ca. 80 l/s (Klempe 2007), og derfor brukes verdier fra Q_{dim} kartet som viser potensialet for vannuttak.

Det er laget to kart som viser maksimalt temperaturuttak i området. Verdiene er beregnet ved å undersøke grunnvannstemperaturer og godta at returvannet fra varmepumpa ligger på 3 °C. Verdiene er beregnet ut ifra gjennomsnittlig grunnvannstemperaturer fra 3. mai til 30. august og 1. september til 23. november 2007 på 15-20 meter dyp. Det er lokale forskjeller på grunnvannstemperaturer i Seljord. Høye temperturer på grunnvannet gjør at en kan redusere pumpingen i fra brønnen og spare strøm (Lind 2007).

Kartet over grunnvarmepotensialet i Seljord viser områder som er bedre og mindre egnet for energibrønner. Kartet viser ikke potensialet for samlet utnyttning av grunnvarme. Hvis et grunnvarmeanlegg blir dimensjonert til et uttak som en brønn i tabell 12 viser, kan dette påvirke potensialet for de andre områdene. Dette kan bare undersøkes ved se på utviklingen i undersøkelsesbrønnene ettersom nye energibrønner blir satt i gang. Det er beregnet grunnvarmepotensialet for en høstsituasjon. Beregnede sommerverdier viser ubetydelig forskjell i effektuttak, og derfor er det ikke laget kart for ulike årstider.

6 Diskusjon

6.1 Sammenstilling av resultat fra georadar, boringer og kornfordelingsanalyser

Det vises til georadarprofilene i vedlegg 2 og kornfordelingsanalysene i vedlegg 5. Der profilene kommenteres som langsgående profil vil dette si retning vest mot øst, og tverrprofiler betyr nord mot sør. De vestligste områdene (Vekan til Dyrskuplassen) er i hovedsak preget av mektig deltastruktur med horisontale lag på toppen. Skrålagene har helning fra vest mot øst og har varierende helning langs dalen. Helningsgraden 20° dominerer. Vinklene som det vises til kan være maksimal vinkel eller mindre på grunn av vilkårlig retning på GPR-profilet. Både langsgående profil 1 og 2 har skrålag på 20° fra Dyrskun til kommunehuset (2C) og utenfor Seljord Næringsbygg (t.o.m. 1D). Skrålaget finner en fra 7 til 10 meter under bakken og konturene av skrålag kan påvises helt ned til 35 meter dyp. Med en helningsvinkel på 20° kan dette indikere at det er en sandfraksjon. Helningsvinkel på nærmere 45° kan indikere grus (Eckholdt 2007). Skrålagene er tydeligst lengst vest i feltområdet (langsgående profiler 1A, 1B, 1C,1D, 2A, 2B, 2C og 7A), men skrålagene forsvinner i perioder i tverrprofilene (5A og 5D) lengre øst. Med et utgangspunkt i en bre som trekker seg tilbake, kan det ofte gi mest vannføring på sidene av breen og dermed bli avsatt grove masser som gir høy reflektor ved GPR-registrering. Mens finere materiale bli avsatt i breens forkant. Dette fenomenet er velkjent i mange dalfører (Eckholdt 2007).

Horisontale sammenhengende konturerer i topplaget tolkes til å være fluviale avsetninger, men i tverrprofil 5 (A – E) blir konturene mer usammenhengende. Her har trolig vannmasser fra Bringsås og Bygdaråi erodert, skåret seg nye elveløp, flommet over datidens løp og/ eller hatt forgreinet elveløp. Dette har skapt avsetninger med høy variasjon i kornstørrelse og sorteringsgrad ned til 7-10 meter under dagens overflate.

I profil 3B ved Dyrskuplassen har Bygdaråi trolig endret elveløp og skapt omveltninger i de øverste lagene som gir bølgete konturer med usammenhengende reflektorer. De bølgete konturer brytes av spisse buer med dype forplantninger. Siden buene skjærer de usammenhengende lagene og danner dype forplantninger, er det trolig støy fra hus, kabler e.l. Ut ifra topografien i området kan det også være rasmateriale som elva senere har erodert i, men blokker ville ikke gitt så sterke forplantninger som disse profilene viser (Eckholdt 2007).

Da det ble boret undersøkelsesbrønn ved det nye administrasjonsbygget til Dyrskun arrangement, ble det registrert et kompakt og siltig lag på ca. 16 meter dybde. Profilene tatt rundt bygget viser et penetrasjonsdyp på ca. 20 meter. Prøvene som ble tatt dypere enn 16 meter var mørkere av farge enn i de overliggende massene, kompakte, og innholdt i mye silt. Fire prøver fra 16 til 21 meters dyp ble brent, og de forsteinet seg under tørking. Det er derfor vanskelig å bestemme kornsammensetning. Likevel kan en si at dette er et lag som skiller seg fra de andre prøvene i boringshullet. Med høy pakningsgrad og lav sorteringsgrad i et deltadominert avsetningsmiljø kan denne avsetningen tolkes som rasmateriale fra deltaoppbyggingen (Eckholdt 2007).

Langsgående profil 11A (233 meter) har en klar gjennomskjærende reflektor på fem meters dybde gjennom hele profilet. Dette er trolig grunnvannsspeilet siden reflektoren skjærer alle andre konturer og ligger på lik dybde. Reflektoren ser ut til å ligge i et skille mellom ulike avsetningsmiljø med horisontal lagdeling over og deltaavsetninger under (lengst vest i profilet). Et grunnvannsnivå på fem meter samsvarer med målt grunnvannsnivå på Dyrskuplassen, 300 meter lengre sør. Ionerikt vann kan være årsaken til at deltastrukturene forsvinner noen steder i profil 11A (Eckholdt 2007).

Profil 7 (624 meter) er eneste profil som er målt fra øst mot vest. Lengst vest i profil 7 kommer det en tydelig deltastruktur frem. Skrålagene har helning fra vest mot øst med en helning på 27° lengst vest i profilet. Helningen avtar til 20° lengre sør. Hundre meter lengre øst brytes deltastrukturen og penetrasjonen i dypet forsvinner, mens konturene av en rygg på 5-10 meters dybde kommer til syne. Ut ifra boredyp på 11 meter ved ungdomskolen kunne en anta at denne ryggen var fjell, men det er likevel ikke en klar fjell-reflektor (Eckholdt 2007). Det kan også være vanskelig å identifisere fjell med georadar på grunn av bunnmorene kan ligge over fjell (Klempe 2007). Det er trolig et skille mellom to ulike facies/sedimentasjonsmiljø som vises. Litt lengre øst er det to undersøkelsesbrønner der det er boret til fjell på 11 og 19 meter. Det er grunn til å tro at fjellet kan ligge høyt i området, og det kan være fjell som hindrer GPR-signalene å nå dypere. Prøver fra boringa ved barneskolen (6) viste et kompakt mørkt lag ned til 9 meters dyp (bakkenivå 124 moh.). GPR-signalene viser skille mellom to ulike kornstørrelseslag på 10 meter, og konturene viser en ryggform. Dypere enn 10 meter viser boreprøver sandige og grusige masser med dårlig sortering, mens inntrykket under boringen var svært godt sorterte masser og at vannet stod under trykk (Brubakken 2007). Brønnen ved ungdomskolen (5) var dominert av fingrus de første meterne, mens prøvene på 8 til 11 meter bestod av finere materialer (d_{50} = finsand).

Kornfordelingsanalysene viste bimodale kurver som kan tyde på at prøvene kommer fra ulike sedimentasjonsmiljø.

Profil 8 er målt ved Granvin (4) og er 200 meter langt. Det er boret en brønn på 27 meters dybde på georadarprofilen (etter 77 meter, fra vest i profilen). Profilen er preget av deltastruktur (10-15 meters tykkelse) med horisontale lag over (5 meters tykkelse). Skrålagene heller fra vest mot øst. Ved brønnboringspunktet er det kun signal til åtte meters dyp, mens det er dypere GPR-signaler før og etter. Kornfordelingsanalyser og observasjon under boring viste svært godt sortert fin sand. Fargen var lys grå og konsistensen var svært løs. Det ble boret til 27 meter for å komme gjennom laget, men det var ingen tegn til å nå et annet sedimentasjonsmiljø. En årsak til at GPR-signalene forsvinner kan være vann med høy ionekonsentrasjon. Utfelt jern i vannet ble påvist på 8 meters dybde under boringen.

På Brøløs og Moen kommer en sterk sammenhengende reflektor som skjærer andre konturer og lag. Reflektoren er et typisk bilde på grunnvannspeilet i grove masser (Eckholdt 2007). Det er boret en brønn på 41 meters dyp i grove masser ved Nesbukti pleie og omsorgssenter, østsiden av Moen (Lind 2007). Dagens topografi viser ryggformer bak Seljord barneskole og en forhøyning fra Seljord Hotell til Arnestadbygget og Moen (Klempe 2007). Dette området kan ha vært starten på en subglasial eller akvatisk vifte som i dag vises som Moen. Vannføring og breens beliggenhet har styrt plasseringen av Moen-avsetningen. Elveerosjon har trolig fjernet det sørligste partiet (Klempe 2007). I oktober 2007 ble det boret en energibrønn på Moen, der det ble boret i grove masser ned til 18 meter.

Siden georadarprofilene er tatt med flere hundremeters mellomrom, kan mektigheten på de ulike avsetningene variere mellom profilene.

6.2 Grunnvannstemperatur

På 15-20 meters dyp viser brønner stabile og relativt høye grunnvannstemperaturer, men nedsetting av flere energibrønner og pumping kan endre strømningsmønsteret og dra inn overflatevann. På vinterstid kan det kalde elvevannet senke grunnvannstemperaturen så mye at det ikke kan utnyttes til varmeformål. Av den grunn er det viktig at målingene fortsetter fram til våren 2008. Siden måleresultatet viser at Bygdaråi har en klar innvirkning på grunnvannsmagasinet i Seljord, er dette tatt hensyn til i modelleringen.

Grunnvannstemperaturene på ca. 10 meters dyp ved det nye helsesenteret (7), ved tivoliporten (2) og ved kommunejordet (3) følger samme trend som Bygdaråi i perioden (mai - november 2007). Disse brønnene har 2-5 °C høyere temperatur enn de andre brønnene, og dette har trolig en sammenheng med strømningsmønsteret og Bygdaråi. Tussejuvbekken påvirker temperaturen lite i topplagene. Helsesenterbrønnen (7) ligger like ved bekken, og på 4,5 meters dyp ser en ingen lik trend med temperatursvingningene i Tussejuvbekken. Det kan tyde på at Tussejuvbekken har lite permeable bunnsedimenter. Brønnen ved Dyrskun (1) viser stabile temperaturer på 15 meters dyp, men på 10 meters dyp svinger temperaturene. Varmetoppen ser likevel ut til å være i vinterhalvåret. Denne brønnen viste økt temperatur rundt 1. september og dette skyldtes trolig igangsettingen av energibrønnen til administrasjonsbygget på Dyrskun (20 meters avstand). Senkningen førte til inndraging av varmere vann fra høyere grunnvannspotensial. Etter slik tilførsel av varmere vann stabiliserte temperaturen seg raskt, og senkningen og senkningsradiusen synes å være liten. Ved Nesbukti (9) er det stabile temperaturer på 9 meters dyp. Dette kan tyde på liten interaksjon mellom Seljordsvatnet og akviferen, og at bunnen i bukta består av sedimenter med lav permeabilitet. Det må også bemerkes at energibrønnen til Nesbukti pleie og omsorgssenter (dimensjonert for uttak på 30 m³/t) som ligger ca. 100 meter ifra brønn 9, var i drift under måleperioden. Dette kan tyde på at senkningen og influensradiusen er lav, og dermed drar ikke brønnen inn vann fra Seljordsvatnet. De observerte temperaturene er i samsvar med simulert pumpeuttak ved Nesbukti. Simuleringen viste at brønnen drar først inn vann fra Seljordsvatnet når pumpeuttaket kommer over 3000 m³/d.

6.3 Grunnvannsmodellen

Formålet med en tre-dimensjonal grunnvannsmodell var å få kunnskap om strømningsmønster og begrensninger for uttak av grunnvarme. Kvaliteten til modellen avhenger først og fremst av kvaliteten på dataene som er brukt i oppbyggingen. Modellen simulerte grunnvannsnivå og temperaturer svært godt med små avvik fra observerte verdier.

Modelleringsprogrammet vil kunne tåle nedsetting av brønner med et uendelig stort uttak. Modellen vil vise et resultat, men resultatet er ikke i samsvar med akviferens sin vanngiverevne (Dimakis 2007). Modellen kan derfor ikke simulere potensialet for vannuttak eller grunnvarme, men er et godt hjelpemiddel til å beskrive egenskapene til en akvifer ved hjelp av strømningsmønster og simulering av interaksjon mellom grunnvann og elvevann. Kartlegging av strømningsmønsteret har vist at det skjer stor innmatning fra elva mot Vekan og Moen, og denne infiltrasjonen er svært viktig ved behov for stort vannuttak. Modellen viste også godt hvilke områder som var mest følsomme for store uttak, siden modellen kunne vise hvordan strømningsmønsteret endret seg ved pumping.

Modellen fungerte mindre godt for undersøkelse av begrensninger ved uttak. Det er en svakhet at pumpescenariene i modellen ikke kunne sammenlignes med observerte pumpeverdier. Modellen var uegnet til å simulere senkning, siden grensebetingelsene som ble satt i nærheten av observasjonsbrønnene og pumpebrønnen styrte senkningen. Influensområdet varierte avhengig av tettheten av elementer rundt brønnen.

Ved simulering av varmestrøm viser modellen variasjoner i grunnvannstemperatur fra dag til dag. Likevel måtte modellen kjøres gjennom mange dager før den klarte å utjevne og stabilisere temperaturen i akviferen. Når temperaturene hadde stabilisert seg klarte modellen ikke å vise at brønner drog inn kaldt eller varmt elvevann, selv med store uttak. Endringene som skjedde ved Dyrskun og Moen under pumping kan trolig forklares med at grensebetingelsene i nærheten styrer varmestrømmen til brønnene.

Modellens områdebegrensning viste seg å være en svakhet. Modellen burde dekket begge sider av Bygdaråi for å undersøke om strømningsmønsteret på 20 meters dyp strømmer fra elva eller den sørliggende dalsiden. Ved å ha strekt feltområdet og modellen lengre vestover i dalføret kunne en sett om elva matet akviferen også andre steder enn ved Vekan. En hadde også fått svar på om Dyrskuområdet også ble matet fra elva, men da lengre vest i dalen. Uttak av vann i infiltrasjonsområder er svært gunstig. Plassering av brønner i områder med lav

infiltrasjon, nydannelse av grunnvann og lang oppholdstid kan gi store begrensninger for uttak, og endre strømningsmønsteret slik at brønner nedstrøms blir påvirket.

Det finnes mye informasjon om løsmassenes struktur og egenskaper. For å få beskrevet interaksjon mellom elvevann og den underliggende akviferen enda mer tilfredsstillende kreves det mer informasjon om permeabiliteten i bunnsedimentene langs Bygdaråi. Modellen er godt egnet til å bruke videre når det finnes mer kunnskap om pumpekapasiteten i området. Ved igangsetting av nye grunnvarmebrønner kan influensen undersøkes ved hjelp av undersøkelsesbrønnene fra dette prosjektet.

6.4 Strømningsmønster og interaksjon

Vannstanden i Bygdaråi spiller en viktig rolle for måten grunnvannet beveger seg gjennom elvesletta ved Vekan-området. Om vannstanden i Bygdaråi ligger høyere enn grunnvannstanden i elvesletta, kommer vann fra Bygdaråi til å infiltreres i elvesletta. Tilsvarende vil Bygdaråi bli matet med grunnvann dersom grunnvannstanden ligger høyere enn vannstanden i Bygdaråi. Simulering av grunnvannsstrømning gav fine resultater av strømningsmønsteret. Men Bygdaråis innvirkning på akviferen er følsom siden små endringer i vannstand kan endre strømningsmønsteret og infiltrasjonsgraden i de vestligste områdene. Det er flere usikkerheter som gjør at observasjonene må benyttes med forsiktighet. Feil ved nivellering og målinger kan ha forekommet. Flere av PE-rørene står ikke på lik dybde, det betyr at filtrene ikke alltid står på 5, 10 og 20 meters dybde.

Filtrene til observasjonsbrønnene står i ulike dybder og sedimenter. De er nødvendigvis ikke plassert i dybden med best hydraulisk ledningsevne. Det kan være vanskelig å registrere raske lokale svingninger. Dette er det prøvd å ta hensyn til ved at loggerne registrerer hver tredje time.

Strømningsmønsteret fra jordoverflaten og ned til 10 meters dybde viser innmatning fra Bygdaråi til akviferen. På 10-20 meter dybde viser også modellen høy innmatning, men dette kan også påvirkes av strømningene på sørsiden av Bygdaråi (utenfor feltområdet). Strømningsmønsteret gir svar på at brønnen ved helsesenteret (7), med forholdsvis stor avstand, blir påvirket av Bygdaråi. Den simulerte strømningshastigheten er lav, men sammenlignet med beregninger modellen gjør av vannbalansen er utskiftingen av vann svært høy. Ved pumping endres strømningshastigheten inn til brønnene, men hastigheten avtar raskt

igjen utenfor brønnens nærmeste influensområde. Det er tatt boreprøver til 20 meters dybde i dette området. Grovere masser kan ligge dypere enn 20 meter og gi høyere strømningshastighet. Feltområdet er et åpent infiltrasjonsmagasin som viser stor innstrømning fra Bygdaråi. Modellen beregner en høy utskifting av vannmasser per dag (vannbalanse beregning). Det er av den grunn til å tro at hastigheten er større enn hva simuleringresultatene på nordsiden av feltområdet viste (0,005 m/d).

Grunnvannet ved barneskolen (6), ungdomskolen (5) og kommunehuset (8) viser stabile temperaturer alt på 9 meters dybde. Disse brønnene er helt upåvirket av Seljordsvatnet og Bygdaråi. Infiltrasjonen gjennom magasinoverflaten (nedbør, snøsmeltning) på nordsiden av feltområdet utgjør en mindre del av vanninfiltrasjonen i grunnvannsmagasinet. Denne infiltrasjonen er likevel viktig for vannbalansen og for brønner som blir plassert ved skoleområdet og på nordsiden av dalen.

6.5 Grunnvarmepotensialet i Seljord

Vannbalanse

Utregninger av vannbalansen som modellen gjør, viser at det er stor utskifting av vannmasser i akviferen. Dette kan forklares med at det er et åpent infiltrasjonsmagasin som mates av Bygdaråi i de sørøstligste delene av akviferen.

Nedbør er målt ved Lønnestad målestasjon som ligger ca. 3100 meter nordøst for feltområdet. Høydeforskjell mellom feltområdet og Lønnestad (ca. 40 meter) og lokale forhold gjør at nedbørsverdiene er trolig noe forskjellige. Georadarprofilene viste ingen klar fjellreflektor og mektigheten på akviferen er derfor usikker. Dybde på akviferen har stor betydning på vannbalansen som modelleringsprogrammet FEflow beregner. Målinger gjennom et helt år kunne ha vist et annet resultat av vannbalansen i de enkelte årstider, siden nedbøren som falt vinteren og våren 2007 kan påvirke grunnvannsnivået utover sommeren. Det er også mest interessant å se på vannbalansen om vinterhalvåret, siden det da er størst behov for oppvarming.

Matematisk beregning av senkning og transmissivitet

Topplaget i Seljord er svært komplekst oppbygd på grunn av skifte av elveløp. For å benytte mest mulig feltobservasjoner og registreringer er K-verdier vektet og plassert i de ulike lag. Likevel er den sedimentologiske modellen en forenkling av en kompleks sedimentologi. Den sedimentologiske modellen bygger på mange antagelser som svekker sikkerheten rundt resultatene og kan gjøre modellen mer følsom enn ønsket. Heidenstrøm et al. (2000) viser til erfaringer gjort av NGU som fant brønner som ga rikelig med vann og tørre brønner innenfor et område på 50x50 meter. Hydraulisk ledningsevne mellom boringene kan derfor variere mye, også i Seljord. Senkningsnivået til en brønn i produksjon kan derfor vise et annet resultat enn beregnet senkning.

Vannuttak

Problemstillingen rundt potensialet for vannuttak og derav mulig effektuttak har vært utfordrende å løse. Modellen kunne ikke brukes til å simulere et potensial for vannuttak. Et potensial for vannuttak vil ikke gi samme resultat som å beregne om en brønn kan gi ønsket behov. Kapasiteten til en brønn er begrenset av dimensjoneringen så vel som løsmassenes vanngiverevne. Resultatene som er gitt for vannuttak, er derfor beregnet ut ifra transmissivitetsverdier og brønnegenskaper i ni ulike punkt. Resultatene er ikke sammenlignet med observerte pumpeforsøk, og av den grunn må resultatet oppfattes som en veileder som viser egna og mindre egna områder for uttak.

Grunnvarmepotensialet

Den beregnede effekten fra et varmepumpeanlegg avhenger av pumperaten og temperaturdifferansen (Andersson et al. 1984). Temperaturene er gitt i tiden mai til november 2007. Temperaturer i vinterhalvåret er derfor ukjente og ikke simulert. Grunnvarmepotensialet er trolig litt større i vinterhalvåret siden grunnvannstemperaturene vil være litt høyere. Potensialet vil også variere fra år til år avhengig av vær og klima.

Grunnvarmekartene er brukervennlige siden publikum lett kan se egna steder og mindre egna steder for uttak. Resultatene bygger på interpoleringer mellom disse borepunktene. I virkeligheten kan derfor vannuttaket og grunnvarmepotensialet variere mer eller mindre mellom disse punktene.

Kjemiske målinger av grunnvannet ved borelokalitetene er ikke undersøkt på grunn av oppgavens begrensninger. Kjemiske data er spesielt viktig for driften av energibrønnen, varmeveksleren og varmepumpen og må sees i sammenheng med grunnvarmepotensialet. Høgskolen i Telemark startet kjemiske målinger av vannet i undersøkelsesbrønnene i desember 2007. Det skal gjøres flere prøveserier i 2008 (Klempe 2007).

6.6 Sammenfattende diskusjon - Egnethet i ulike områder

For å benytte mest mulig av alle felldataene fra området er de ulike deler av feltområdet diskutert. Dette er også et tiltak for å gjøre resultatene mer brukervennlig.

Temperaturdataene som er oppgitt gjelder kun i perioden mai – november 2007. Grunnvannskvaliteten er ikke vurdert, men denne må tas hensyn ved planlegging av nye brønner.

Moen- og Nesbuktiområdet

Ut ifra undersøkelser antar en at Moen- og Nesbuktiområdet består av en subglasial eller akvatisk vifte med grove masser. Den øvre delen består av sandige masser, mens grovheten øker nedover i grunnen. Mektigheten er usikker, men boringer på 42, 18 og 20 meters dybde har ikke indikert fjell. Moen ligger i utstrømningsområdet til akviferen og det vil derfor infiltreres nytt vann kontinuerlig. Med disse forutsetninger vil området tåle et stort uttak av grunnvann. En begrensende faktor er inndraging av vann fra Seljordvatnet ved Nesbukti. Driftserfaringer fra energibrønnen ved Nesbukti viser stabile temperaturer i grunnen. Simulering viser at en brønn plassert ved Nesbukti må opp i et uttak på 3000m³/d før brønnen trekker vann fra Seljordvatnet. Grunnvannsspeilet ligger fire meter under jordoverflaten ved Nesbukti, og nivået ligger på syv til åtte meter under bakken på toppflata av Moen. Det dype grunnvannsspeilet må tas hensyn til ved dimensjonering av brønner (trykk og senkning). Temperaturen på 14 meters dyp ved den nye helsesentertomta varierer fra 8,3 °C om sommeren til 9,1 °C i november. På 9 meters dyp fluktuerer grunnvannstemperaturen mye fra 6 °C til 12,5 °C. På østsiden av Moen ved Nesbukti ligger temperaturen stabilt på 7,3 °C på 20 meters dyp. På 9 meters dybde varierer temperaturen fra 7,1 °C til 7,6 °C. På østsiden av Moen bør filteret stå dypere enn 20 meter for å få stabilt trykk og for å sikre seg mot inndraging av vann fra Seljordvatnet. Ved å anlegge et åpent flerbrønn-system tas det hensyn

til den store senkningen siden vann blir infiltrert tilbake i grunnvannsmagasinet. Et åpent flerbrønn-system kan gi effekt opp mot 1500 kW i dette området.

Vekan

På Vekanområdet finner en et topplag med opptil 10 meter med grove masser (elveavsetning og grovt brelvdelta). Under disse massene finner en sandige masser, med innslag av silt ned til 20-27 meter som vil gi lavere vanngiverevne. Det er store variasjoner innenfor området. På Granvin var det grus og sand de første meterne etterfulgt av finsand til 27 meters dyp. Det var ingen tendens til grovere masser på dette dypet. Ved kommunehuset er det siltige masser på 20 meters dyp. Ved Haugan Regnskapskontor står det en energibrønn med filter plassert på 24-30 meters dybde. Brønnen gir rikelig med vann. Årsaken til den store forskjellen i massenes vanngiverevne er at filteret til energibrønnen står trolig i ukanten av Moenavsetningen, mens undersøkelsesbrønnene på Granvin og på kommunehuset står i distalkanten av et delta (grense mellom ulike faciesassosiasjoner). Ved eventuell nedsetting av energibrønn i dette området er det derfor høyst nødvendig å foreta ytterligere undersøkelser for å utrede de lokale variasjonene. Grunnvarmepotensialet kan variere svært mye innenfor området. Temperaturen ligger stabilt mellom 7 og 7,5 °C på både 9 og 19 meters dybde (0,1-0,2°C høyere på 9 meters dybde). Ut ifra simuleringene antar en at temperaturen i vannet som infiltreres fra Bygdaråi vil på grunn av oppholdstiden stabilisere seg mot grunnvannstemperaturene i området.

Seljord barne- og ungdomskole

Boringen ved Seljord barneskole viste en mektighet på 19 meter. Mektigheten ved ungdomskolen er 11 meter. Nydannelse av grunnvann skjer ved avrenning fra nordvest liggende dalside. Avrenning tas raskt opp i Tussejuvbekken. Ved barneskolen er det kompakte masser helt ned til 10 meters dyp. Fra 10 til 19 meters dyp viste boreprøvene grusige masser. En antar at vannet står under trykk på grunn av de kompakte overliggende massene. Ved ungdomskolen er det grus og sand, og det er ingen tendens til kompakte lag. Liten mektighet gjør at ungdomskolen er uaktuell for uttak. Likevel kan uttak av grunnvarme ved ungdomskolen gjøres gjennom tradisjonell kollektorslange uten oppumping av grunnvann, dermed dekke varmebehovet for en enkelthusholdning.

Barneskolen er egnet for mindre uttak på 880 m³/d som vil gi en effekt på 205 kW. Ved større uttak (>880 m³/d) må det prøvepumpes for å undersøke om det er en negativ hydrologisk grense til fjell, før området kan anbefales. Temperaturen varierer mellom 8 °C og 7,75 °C på 20 meters dybde og fra 8 °C til 7,65 °C på 9 meters dybde.

Dyrskuplassen til Vekan

Området fra Vekan til Dyrskuplassen består av et breelvdelta med elveavsetninger over. Breelvdeltaet består av grove masser som vil gi rikelig med vann. Mektigheten er usikker, men tolkes til å avta mot vest. Grunnvannsnivået ligger fra 3 til 5 meter under bakken. Området er likevel mindre egnet for store uttak sammenlignet med Moen på grunn av mindre mektighet og trolig mindre infiltrasjon fra Bygdaråi. Av den grunn passer området for få brønner. Simulering viste et endret strømningsmønster ved uttak på 1800 m³/d. Store uttak i dette området kan endre det naturlige strømningsmønsteret, og dermed påvirke brønner som ligger lengre sørøst i dalen. Ved igangsetting av energibrønner bør det tas hensyn til jordbruksaktiviteten. Det er liten infiltrasjon fra Bygdaråi i området, dermed kan vannuttak senke grunnvannsnivået. Temperaturer er målt ved administrasjonsbygget til Dyrskun. På 15 meters dyp ligger temperaturen mellom 7,5 °C til 6,5 °C. På 10 meters dyp varierer temperaturene fra 5,4 °C til 9 °C. Ved Dyrskun er grunnvarmepotensialet beregnet til 174 kW på grunn av kompakte masser på 16 meters dyp. Området har likevel et høyere grunnvarmepotensialet lengre øst (på grunnlag av GPR-profiler).

Områder i nærhet til Bygdaråi

Langs Bygdaråi er det betydelig veksling i sedimentenes lagdeling og kornstørrelser. En forklaring på dette kan være at elveløpet har flyttet på seg fordi elva har meandrert. Brønner i gamle elveløp kan ofte gi betydelige mengder. Området er ugunstig for plassering av energibrønner på grunn av temperaturene i grunnen vil fluktuere med elvevannets temperatur. Det anbefales ikke å sette brønner nærmere Bygdaråi enn 100 meter. Brønner med lengre avstand til elva drar likevel inn elvevann, men på grunn av vannets oppholdstid vil det skje en temperaturutjevning (Klempe 2007).

6.7 Videre undersøkelser

Det er spesielt viktig å fortsette målingene av grunnvannsnivå og grunnvannstemperatur gjennom vinteren. Det er størst behov for oppvarming om vinteren, og derfor er denne perioden viktig å undersøke. Simuleringene er gjort med hensyn til registrerte nedbørsverdier fra mai til november i 2007. Sommeren 2007 var fuktig og høsten var nedbørsfattig i Seljord (DNMI 2007) og derfor er det interessant å verifisere simuleringene med fremtidige målinger.

Når nye produksjonsbrønner blir etablert og satt i gang, er det viktig å observere grunnvannsnivå og grunnvannstemperatur i de anlagte undersøkelsesbrønnene. Måledata fra undersøkelsesbrønnene kan gi mer kunnskap om de hydrologiske forholdene. Observasjonene kan vise graden av influens ved pumping fra nye energibrønner, og gi grunnlag for beslutning om etablering av nye brønner.

Ettersom flere hydrogeologiske forhold blir kartlagt, bør grunnvannsmodellen utvikles videre. Modellen har vist svakheter ved simulering av pumpescenarier. Derfor bør det gjøres pumpeforsøk for å kvalitetssikre simuleringer i modellen. Lengre pumpeforsøk må gjøres før anlegging av større grunnvarmeanlegg.

7 Konklusjon

På grunnlag av hydrogeologiske undersøkelser er områdene med størst potensial for uttak av grunnvarme på Moen, sørliggende del av Vekanområdet samt mellom Vekan og Dyrskun. Moen og den sørliggende delen av Vekan ligger i akviferens utstrømningsområde og dette gjør området svært godt egnet for store vannuttak. Den nordliggende del av Vekanområdet er det også mulighet for uttak, men det er høyst nødvendig å foreta prøvepumping for å utrede potensialet på akkurat dette stedet. Områdene ved Seljord barne- og ungdomskole har et lavere grunnvarmepotensial på grunn av mindre mektighet. Det er løsmasser med god vanngiverevne langs Bygdaråi. På grunn av temperaturen i Bygdaråi anbefales det ikke å plassere brønner nærmere enn 100 meter fra elven.

Grunnvannsmodellen gav gode samsvar mellom observerte og simulerte verdier (kalibrering), men modellen viser stor følsomhet for endringer av vannstanden i Bygdaråi. Modellen viste svakheter ved simulering av ulike uttaksscenarioer. Resultatene må derfor brukes med forsiktighet. Dataene fra modellen må også tolkes kritisk siden det ikke finnes reelle pumpeforsøk som modellen kan sammenlignes med. Begrensninger for grunnvarmeuttak er infiltrasjon av kaldt elvevann fra Bygdaråi. Senkningsraten, influensområdet og muligheten for turbulent strømming avgjør hvor tett energibrønner kan settes. Det skal svært store uttak til (> 3000 m³/d) før brønner drar inn vann fra Seljordsvatnet.

Temperaturmålinger viser varierende og høye grunnvannstemperaturer, med de høyeste målinger registrert ved det nye helsesenteret. Stabile temperaturer oppnås på 15 til 20 meters dyp, der temperaturene ligger på 7 - 9 °C. Kjemiske målinger har ikke blitt tatt med i denne kartleggingen. Grunnvannskvaliteten har mye å si for driften av et grunnvarmeanlegg. Resultater av kjemiske målinger vil foreligge i 2008, foretatt av Høgskolen i Telemark.

Undersøkelsene og registreringene som er gjort, viser at dette området har et betydelig ubenyttet grunnvarmepotensiale. Grunnvarmeanlegg kan gi en effekt på 1500 kW, men effektuttaket varierer mye innenfor området. Dersom oppumpet grunnvann blir tilbakeført ved hjelp av infiltrasjonsbrønner vil beregnede grunnvarmepotensialer være realistisk.

Flere større næringsbygg i Seljord ligger i områder som er egnet for grunnvarmeuttak. Ved rehabilitering eller nybygg bør grunnvarmebasert oppvarming prioriteres. I større perspektiv kan flere mindre bygninger gå sammen om et felles varmeanlegg. På lengre sikt og med økte strømkostnader kan det være forsvarlig å bygge et større fjernvarmeanlegg.

8 Referanser

Anderson, M. P. (1989). Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 501-511.

Anderson, M. P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Ground Water*, 43(6), 951-968.

Anderson, M. P. & Wang, H. F. (1982). *Introduction to Groundwater Modeling; Finite Difference and Finite Element Methods*. San Francisco: W. H. Freeman

Anderson, M. P. & Woessner, W. W. (2002). *Applied groundwater modelling, Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego: Academic Press.

Andersson, A. C., Andersson, O. & Gustafson, G. (1984). *Brunnar. Undersøking - dimensjonering - borrhning – drift*. Rapport R42:1984. Stockholm: Byggforskningsrådet.

Aschenbrenner, F., Richter, G. M. & Richter, J. (1992). Modeling groundwater quality in an agriculturally used water catchment. *Environmental Geology*, 20, 43-55.

Banks, D., Frengstad, B., Skrede, A., Krog, J. R., Strand, T., Siewers, U. & Lind, B. (2000). Grunnvannskvalitet i fjell – betinget av berggrunnskjemi? *NGU Gråsteinen*, 6, 47-49.

Bjørlykke, K. (2001). *Sedimentologi og petroleumsgologi* (2.utg.). Oslo: Gyldendal forlag.

- Booth, B. (2000). *Using ArcGIS 3D Analyst. GIS by ESRI*. California: Environmental Systems Research Institute.
- Bouwer, H. (1978). *Groundwater hydrology*. Tokyo: Mc Graw Hill Kogakusha.
- Brandrud, T. E., Johansen, S. W., Mjelde, M. & Tjomsland, T. (1991). *Ny E-76 i Seljord. Konsekvensvurdering av ny vegtrase rundt Seljord sentrum vedrørende strømforhold, vannkvalitet og tilgroing*. Rapport 0-91111. Oslo: Norsk institutt for vannforskning (NIVA).
- Brubakken, E. (2007). *Porsgrunn Brønnboring. Eigil Brubakken pers.medd.*
- Colleuille, H., Dimakis, P. & Wong, W. K. (2004a). *Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedemark*. Rapport miljøbasert vannføring 1-2004 (002.Z). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- Colleuille, H., Dimakis, P. & Wong, W. K. (2004b). *Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedemark*. Rapport miljøbasert vannføring 2-2004 (002.Z). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- Colleuille, H., Dimakis, P. & Wong, W. K. (2004c). *Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedemark*. Rapport miljøbasert vannføring 3-2004 (002.Z). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- Colleuille, H., Haugen L. E., Udnæs, H. C. & Møen, K. (2001). *Infiltrasjonsprosesser i frossen jord på Gardermoen. Analyse av markvann-, grunnvann-, tele- og snøobservasjoner*. Rapport 8-2001. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Colleuille, H. & Gillebo, E. (2002). *Nasjonalt observasjonsnett for markvann. Etablering og vedlikehold av målestasjoner . Måleprosedyrer. Datautarbeiding og dataformidling*. Rapport 6-2002. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Constantz, J. (1998). Interaction between stream temperature, streamflow, and groundwater exchanges in Alpine streams. *Water Resources Research*, 34(7), 1609-1615.

Cools, J., Meyes, Y., Woldeamlak, S.T., Batelaan, O. & de Smedt, F. (2006). Large-scale GIS based hydrogeological modelling of Flanders: A tool for groundwater management. *Environmental Geology*, 50, 1201-1209.

Dagestad, A., Tønnesen, J. F. & de Beer, H. (2006). *Hydrogeologiske undersøkelser ved Raipas, Alta kommune*. Rapport 2005.078. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Danielsen, E., Halkjelsvik, A. B., Lauritsen, T. & Midttømme, K. (2003). *Bruk av grunnvann som energikilde for Oppdal Sentrum*. Rapport nr 2002.074. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

de Beer, H. (2007). *NGU, Trondheim. Hans de Beer pers.medd.*

Detay, M. (1997). *La gestion active des aquifers*. Paris: Masson ed.

Devik, A. K, Svaland, I. B., Østtveit, A., Uhnger, G. & Valen, L. (2007). *GIS PaleoHydrologi. Terrengmodellering og hydrologisk modellering av elveslette i Hellas*. Fagrapport. Høgskolen i Telemark. Institutt for natur-, helse- og miljøfag.

Diersch, H. J. G. (2005). *WASY Software FEFLOW 5.2. Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. User`s manual*. Berlin: WASY GmbH. Institute for Water Resources Planning and Systems Reseach.

Dimakis, P. (2007). *NVE, Oslo. Panagiotis Dimakis pers.medd.*

DNMI. (2007). *eKlima*. Oslo: Meteorologisk institutt. Lastet ned 03.03.07 og 01.12.07 fra: http://met.no/p_og_t/index.html.

Domenico, P. A. & Swartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. (2nd ed.). New York: John & Sons Inc.

Eckholdt, E. (2006). *Seljord vassverk – Georadarundersøkelser*. Oppdragsrapport 2.0828-003. Vestby: Miljøgeologi AS.

Eckholdt, E. (2007). *Miljøgeologi AS, Vestby. Einar Eckholdt pers.medd.*

Elvebakk, H., Midttømme, K. & Skarphagen, H. (2002). *Geologisk utredning av grunnvarmeanlegg på Hovdejordet, Bodø boligbyggerlag*. Rapport: 2002.061. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*, (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Fransson, Å. & Norden, C. (1996). *Hydraulisk konduktivitet och specifik yta vid vatten- och amnestransport i sand og grus*. Hovedfagsoppgave. Gøteborg: Chalmers Tekniska Høgskola, Geologiska Institutionen.

- Gaffield, S. J. & Potter, K. W. & Wang, L. (2005) Predicting the summer temperature of small streams in southwestern Wisconsin. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(1), 25-36.
- Garmo, T. (2003). *Norsk steinbok: Norske mineral og bergarter*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Hansen, S.K. (1984). *Kvartærgeologi og hydrogeologi i Flatdalsområdet, Seljord i Telemark: Bind 1. Hovedfagsoppgave*. Bergen: Universitetet i Bergen.
- Heidenstrøm, B. & Dagestad, A. (2000). *Kartlegging av potensialet for grunnvarmeuttak fra løsmasser i Voss*. Rapport 2000.109. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).
- Heidenstrøm, B., Dimakis, P. & Pedersen, T. S. (2000). *Grunnvarmepotensialet ved Alvdal sentrum*. Oppdragsrapport 5/2000. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- Helgestad, M.R. (2005). *Grunnvannsmoellanalyse for Hovemoen og Korgen akviferen*. Masteroppgave. Oslo: Universitetet i Oslo. Institutt for geofag.
- Hilmo, B. O. & Skarphagen, H. (2001). *Grunnvannsundersøkelser for energiuttak fra løsmassebrønner ved Vefsn sykehus, psykiatrisk avd.* Rapport 2001.098. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).
- Hilmo, B. O., Skarphagen, H. & Morland, G. (1998). *Grunnvarme- en energikilde for framtiden*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU). Lastet ned 29.08.07 fra: <http://www.ngu.no/aarsrapp98/rappnor.98/grunnv.htm>.

Jansen, I. J. (1982a). *Lifjellområdet-kvartærgeologisk og geomorfologisk oversikt*. Rapport 44. Oslo: Universitetet i Oslo, Kontaktutvalget for vassdragsreguleringer.

Jansen, I. J. (1982b). *Lifjellområdet. Kvartærgeologi og geomorfologi. 1:50000*. Prosjekt temakart, Telemark. Bø: Telemark Distriktshøyskole og Universitetet i Oslo.

Jansen, I. J. (2007). *Høgskolen i Telemark. Ivar Johan Jansen pers.medd.*

Johnston, K. & McCoy, J. (2002). *Using ArcGIS Spatial Analyst. GIS by ESRI*. California: Environmental Systems Research Institute.

Kalskin, R. & Hilmo, B. O. (1999). *Kartlegging av potensialet for grunnvarmeuttak fra løsmasser i Elverum*. Rapport 99.008. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Klempe, H. (1988). *Eika grunnvannsmagasin. Sedimentologi, hydrogeologi og praktisk anvendelse*. Dr.scient.avhandling. Ås: Norges landbrukshøyskole.

Klempe, H. (2000). *Grunnvannsressurser*. Bø: Høgskolen i Telemark. Avd. for allmenne fag.

Klempe, H. (2004). Identification of quaternary subsurface glacial deposits using 3D databases and GIS. *Norwegian Journal of Geography*, 58, 90-95.

Klempe, H. (2007). *Høgskolen i Telemark. Harald Klempe pers.medd.*

Klingbeil, R., Kleineidam, S., Aspron, U., Aigner, T. & Teutsch, G. (1999). Relating lithofacies to hydrofacies: Outcrop-based hydrogeological characterization of Quarternary gravel deposits. *Sedimentary Geology*, 129, 299-310.

Koziel, J., Lauritsen, T., Muring, E., Rønning, J. S. & Tønnesen, J. F. (1995). *Målinger med georadar. Teori, anvendelse, teknikker og eksempler på opptak*. Rapport 94.024. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Lande, G. (1950). *Kvartærgeologiske undersøkinger i Seljord og ved Bandakvatna*. Hovedfagsoppgave. Oslo: Universitetet i Oslo. Det mat.nat.fsk.sekretariat.

Langeland, K. & Moe, J.O. (2003). *Ny brønn ved Bø vassverk, Telemark – matematisk modell av akviferen og oversikt over akviferegenskaper og vasskvalitet*. Hovedfagsoppgave. Bø: Høgskolen i Telemark. Institutt for natur-, helse- og miljøfag.

Lind, O. (1987). *Lausmassebrønn – kjølebrønn – Seljord Industri A/S*. Oppdragsrapport. Seljord: Vidar Tveiten A/S.

Lind, O. (2003). *Sedimentologiske analyser fra boring av energibrønner ved Seljord Næringsbygg*. Oppdragsrapport. Seljord: Tveiten Rådgivende Ingeniører AS.

Lind, O. (2007). *Tveiten Rådgivende Ingeniører, Seljord. Olav Lind pers.medd.*

Miall, A. D. (1978). *Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits*. - In: Miall, A. D (ed.). *Fluvial Sediementology*. Canada: Canadian society of petroleum geologists.

Midttømme, K. (2007). *NGU, Trondheim. Kirsti Midttømme pers.medd.*

Midttømme, K. & Elvebakk, H. (2003). *Borehullbasert energilager ved Akershus Universitetssykehus - geologiske forundersøkelser*. Rapport: 2003.036. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Midttømme, K., Hilmo, B. O. & Kalskin R. (2000). *Kartlegging av grunnvarmepotensialet i løsmasser og berggrunn i Alvdal*. Rapport: 2000.063. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Midttømme, K., Ramstad, R. K., Solli, A., Sjørdal, T. & Elvebakk, H. (2004). *Grunnvarmekartlegging i Asker og Bærum*. Rapport 2004.013. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

NGU. (2007). *Kart på nett*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU). Lastet ned 10.01.2007 fra: <http://www.ngu.no/>.

NGU & NVE. (2000). *Grunnvarme - Energi fra fjell og løsmasser*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse og Norges vassdrags- og energidirektorat. Lastet ned 10.06.07 fra: <http://www.ngu.no/prosjekter/Grunnvarme/Gv1-1.htm>.

Ragnhildstveit, J. & Klempe, H. (1991). *Grunnvann i Seljord kommune. GIN prosjekt*. Rapport 91.078. Oslo: Norges geologiske undersøkelse (NGU).

REGINE. (2005). *Register over nedbørfelt i Norge (REGINE)*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Geodata AS. Lastet ned 09.03.07 fra: <http://arcus.nve.no/website/nve/viewer.htm>.

Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysical*, (4th ed.). USA: Wiley.

Ronan, A., Prudic, D. E., Thodal, C. E. & Constantz, J. (1998). Field study and simulation of diurnal temperature effects on infiltration and variably saturated flow beneath and ephemeral stream. *Water Resources Research*, 34, 2137-2153.

Rueslåtten, H. G. & Veslegard, G. (1991). *Grunnvannsbrønner i løsmasser: Dimensjonering og utforming*. - In: Moseid, T. (Red.), 1998. *Jordarter, grunnvann og grunnvannsbrønner*. Grimstad: Høgskolen i Agder.

Rueslåtten, H. G. (1984). *Jordartenes sammensetning og egenskaper*. - In: Moseid, T. (Red.), 1998. *Jordarter, grunnvann og grunnvannsbrønner*. Grimstad: Høgskolen i Agder.

Sinokrot, B. A. & Stefan, H. G. (1993). Stream temperature dynamics – measurements and modeling. *Water Resources Research*, 29, 2299-2312.

SINTEF. (2008). *Grunnvarmebaserte varmepumpesystemer for oppvarming og kjøling av bygninger*. SINTEF Energiforskning AS. Lastet ned 03.01.08 fra:
<http://www.energy.sintef.no/prosjekt/annex29/>.

Skarphagen, H. (2007). *NIVA, Oslo. Helge Skarphagen pers.medd.*

Sonnenborg, T. & Henriksen, T. (2005). *Håndbog i grundvandsmodellering*. Rapport 2005/80. København: Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljø- og Energiministeriet (GEUS).

Soria Moria. (2005). *Plattform for regjeringssamarbeidet mellom Arbeiderpartiet, Sosialistisk Venstreparti og Senterpartiet 2005-09*. Oslo: Departementenes servicesenter. Lastet ned 07.01.2007 fra:

<http://www.regjeringen.no/upload/kilde/smk/rap/2005/0001/ddd/pdfv/260512-regjeringsplattform.pdf>.

Spangelo, T. (2003). *Geotermisk energi fra fast fjell – en varmeteknisk analyse av grunne og dype anlegg*. Diplomoppgave. Trondheim: NTNU, Studieprogram energi og miljø. Institutt for energi og prosesssteknikk.

Statens kartverk (2006). *SOSI standard- generell objektkatalog versjon 4.0 for klassifisering av kornsammensetningen. Løsmassegeologi*. Statens kartverk. Lastet ned 01.05.07 fra:

<http://www.statkart.no/sosi/PDF/Losmasse.pdf>.

Statkart. (2004). *Statkart*, Statens kartverk. Lastet ned 15.11.07 fra: <http://www.statkart.no/>.

Stene, J. (1997). *Varmepumper: Byggingoppvarming* (3.utg). Trondheim: SINTEF Energi, Klima- og kuldeteknikk.

Straumnes, R. T. (1991). *E76/10 Omkjøring ved Seljord sentrum. Utfylling ved prosjektert bru over Seljordsvannet*. Rapport HD 910 A. Skien: Statens vegvesen.

Tvedten, S. (2007). *NVE, Oslo. Sissel Tvedten pers.medd.*

Veslegard, G. (1991). *Grunnvann i løsmasser*. - In: Moseid, T. (Red.), 1998. *Jordarter, grunnvann og grunnvannsbrønner*. Grimstad: Høgskolen i Agder.

Vest Telemark Kraftlag. (2007). *Energiutgreiing Seljord 2006*. Norsk Enøk og Energi AS og Vest Telemark Kraftlag AS. Rapport. Lastet ned 10.01.07 fra:

<http://www.vtk.no/omvtk/energiutgreiing/files/seljord%202006.pdf>.

Wille, H.J. (1786). *Beskrivelse over Sillejords præstegiæld i øvre Tellemarken i Norge*.

Kristiania: Gyldendals forlag.

9 Vedlegg

1. Kart:
 - Potensialet for vannuttak (Qdim).
 - Potensialet for temperatursenkning (to situasjonskart).
 - Grunnvarmepotensialet i Seljord.
2. Georadarprofiler (medfølgende DVD).
3. Måledata av grunnvannsnivåer og temperaturer (medfølgende DVD).
4. Beregning av senkning og vannuttak (medfølgende DVD).
5. Kornfordelingsanalyser (medfølgende DVD).
6. Grunnvannsmodellen i FEflow (medfølgende DVD).

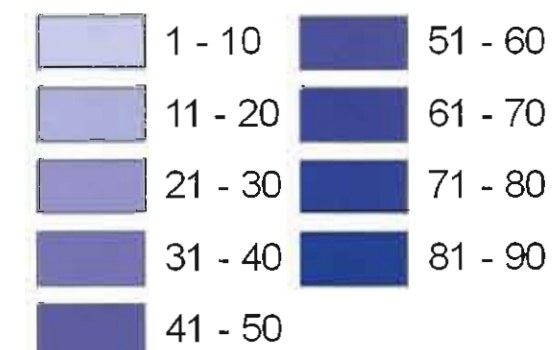
Utvinnbar vannmengde i Seljord - Høstsituasjon

Brønncapacitet $Q_{dim} = l/sek$



Simulert utvinnbar vannmengde i undersøkelsesområdet, Seljord. Høstsituasjon (2007).
Kapaciteten er beregnet ut ifra utvinnbar vannmengde i 20 meter dype brønner der filteret står på 15-20 meter med en brøndiameter på 168 mm.
Det er simulert max senkning. Det er tatt hensyn til målte grunnvannsnivå.
Vannmengden er beregnet med Q_{dim} der transmissiviteten er satt 20% lavere enn Q_{max} . Dette er for å kompensere for konstruksjonsdetaljer.
Brønner med registreringer av grunnvannstand og temperaturer vises med nummerering 1-9.

Brønncapacitet Q_{dim} (Liter per sekund).



— veg_
— vann



Potensialet for temperaturuttak i Seljord - Sommersituasjon.

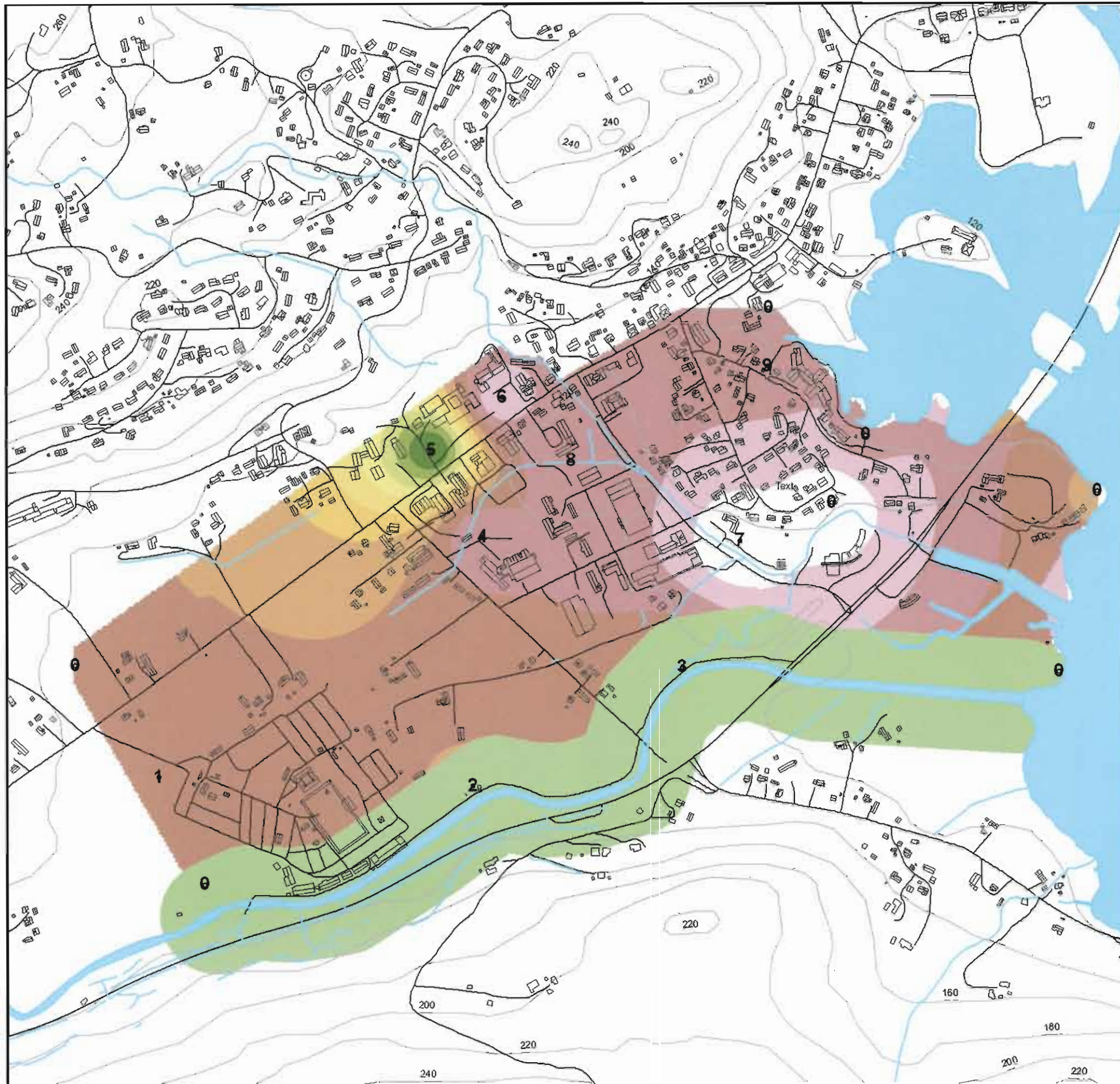
Δ Temperatur uttak (°C) med filter plassert på 15-20 meter dybde.

Potensialet for temperaturuttak, Δ temperatur (°C), ved 3 °C på vannet ut fra varmepumpa. Brønnfilter er plassert på 15-20 meter dybde.

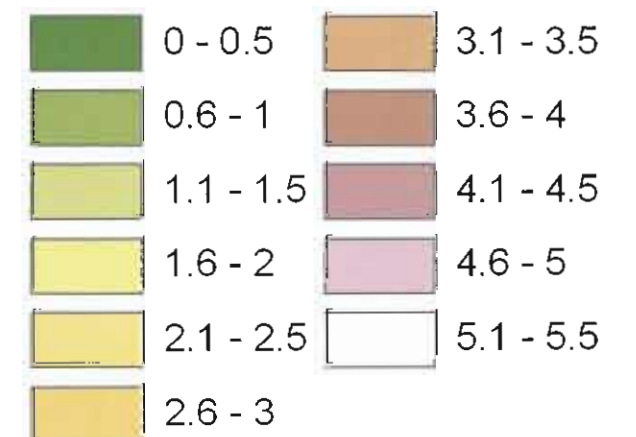
Resultatene er beregnet ut ifra observerte gjennomsnittstemperturer fra 3. mai til 30. august i 2007.

Det er satt en elvebuffer på 100 meter. Det er ikke gunstig å plassere brønner i dette området siden brønner vil trekke kaldt ellevann på vinterstid. På sommerstid kan elvenære områder gi høye temperaturer og et høyt effektuttak.

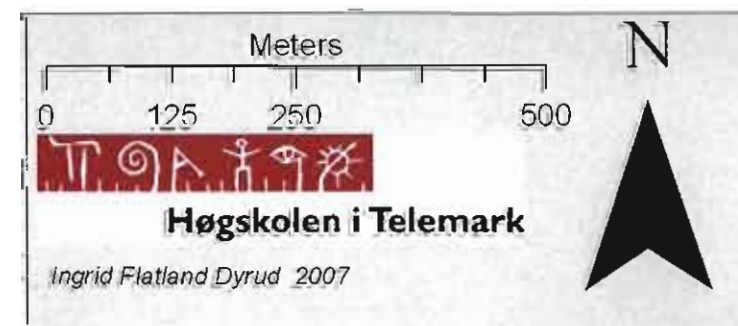
Brønner med registreringer av grunnvannstand og temperaturer vises med nummerering 1-9.



Δ Temperatur uttak °C

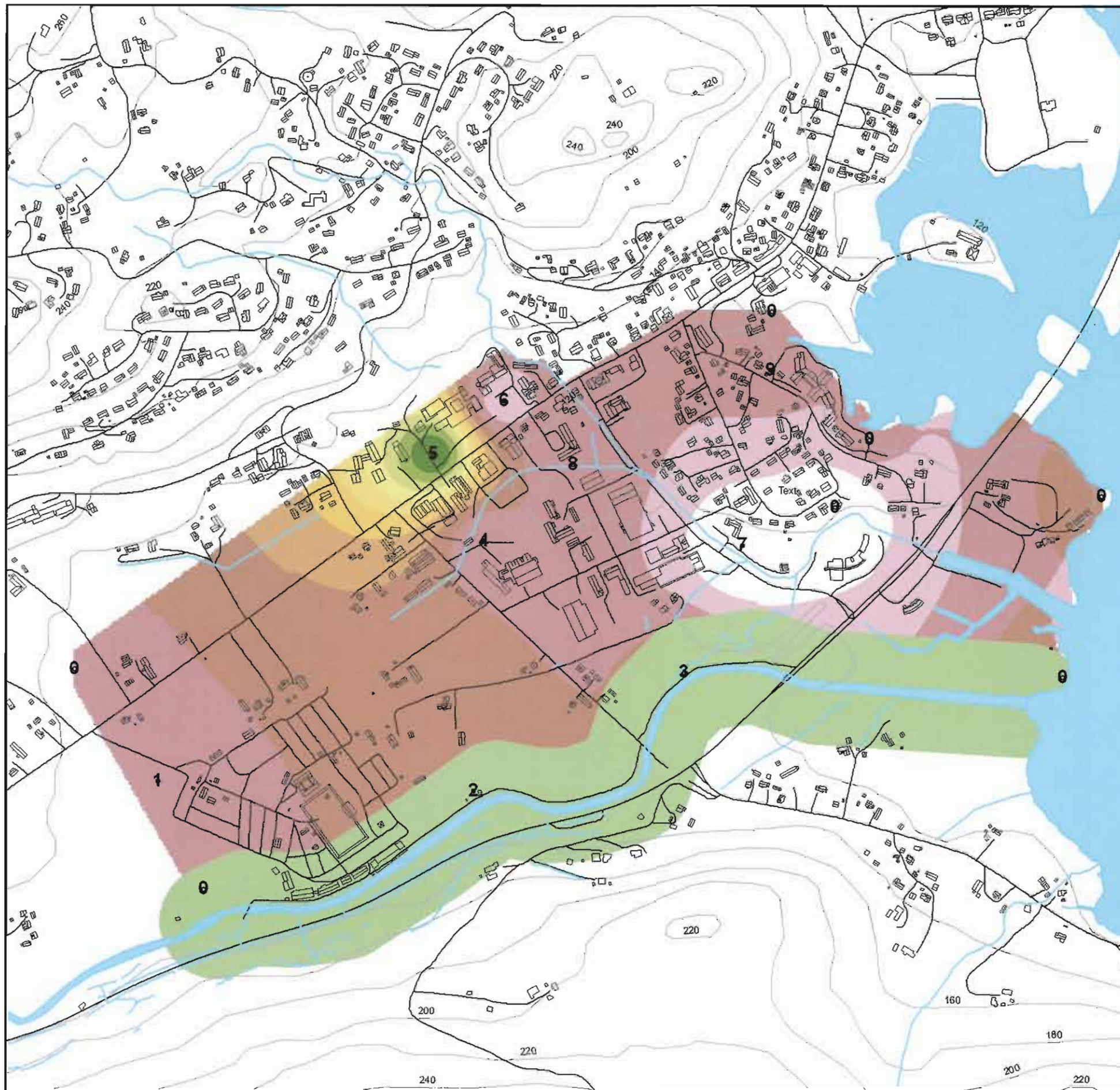


vann elvebuffer
veg_



Potensialet for temperaturuttak i Seljord - Høstsituasjon.

Δ Temperatur uttak ($^{\circ}\text{C}$) med filter plassert på 15-20 meter dybde.



Potensialet for temperaturuttak, Δ temperatur ($^{\circ}\text{C}$), ved 3°C på vannet ut fra varmepumpa. Brønnfilter er plassert på 15-20 meter dybde.

Resultatene er beregnet ut ifra observerte gjennomsnittstemperturer fra 1. september til 23. november i 2007.

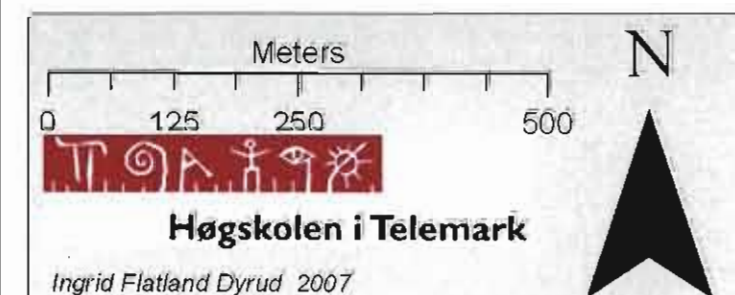
Det er satt en elvebuffer på 100 meter. Det er ikke gunstig å plassere brønner i dette området siden brønner vil trekke kaldt ellevann.

På sommerstid kan elvenære områder gi høye temperaturer, men temperaturene på vinterstid vil tilnærmet gi null effektuttak. Brønner med registreringer av grunnvannstand og temperaturer vises med nummerering 1-9.

Δ Temperatur uttak $^{\circ}\text{C}$

0 - 0.5	3.1 - 3.5
0.6 - 1	3.6 - 4
1.1 - 1.5	4.1 - 4.5
1.6 - 2	4.6 - 5
2.1 - 2.5	5.1 - 5.5
2.6 - 3	

vann elvebuffer
veg



Grunnvarmepotensialet i Seljord



Simulert bilde av grunnvarmepotensialet i undersøkelsesområdet i Seljord. Potensialet er beregnet ut ifra maksimal senkning og tilsvarende utvinnbar vannmengde i 20 meter dype brønner. Filteret er plassert mellom 15-20 meter dyp. Det er tatt hensyn til observerte grunnvannstemperaturer og dermed varierer temperatursenkningen innenfor området. Det er beregnet en elvebuffer på 100 meter for å unngå at kaldt elvevann siger inn i magasinet. På sommerstid kan elvenære områder gi høy effekt, men effekten på vinterstid vil tilnærmet være lik null. Brønner med registreringer av grunnvannstand og temperaturer vises med nummerering 1-9. Høstsituasjon (2007).

Effekt i kilowatt

0 - 25	401 - 500
26 - 50	501 - 600
51 - 75	601 - 700
76 - 100	701 - 800
101 - 200	801 - 900
201 - 300	901 - 1 000
301 - 400	>1000

Ved brønn 9 er det beregnet et grunnvarmepotensiale på 1482 kW med en maksimal senkning på 11 meter. Moen området settes likevel til >1000kW. Avhengig av hvor brønnen plasseres på Moen og størrelsen på uttaket vil brønnen dra inn vann fra Seljordsvatnet. For eksempel vil en brønn plassert ved Nesbukti få influensområdet sitt både fra akviferen og Seljordsvatnet ved vannuttak >3000 m³/d.

— vann ■ elvebuffer,
— veg_

