NVE

Implementering av EUs rammedirektiv for vannressurser

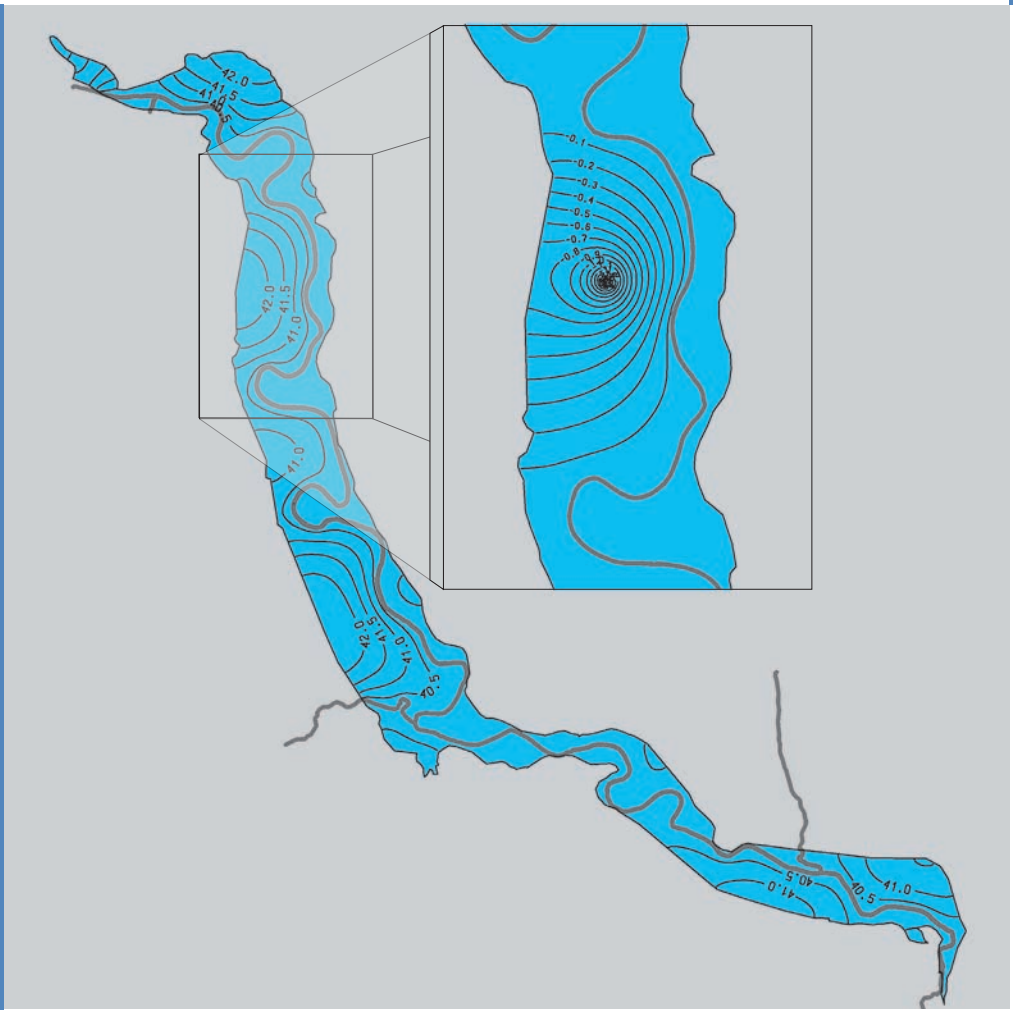
Del 1. Klimaendringer og magasineringsegenskaper for norske grunnvannsforekomster

Del 2. Brønner, grunnvannsuttak, influensområde og forsyningsområde

Panagiotis Dimakis

21
2007

RAPPORT



Implementering av EUs rammedirektiv for vannressurser

Del 1. Klimaendringer og magasineringsegenskaper for norske grunnvannsforekomster.

Del 2. Brønner, grunnvannsuttak, influensområde og forsyningsområde

Norges vassdrags- og energidirektorat
2007

Rapport nr. 21-2007

Implementering av EUs rammedirektiv for vannressurser

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfatter: Panagiotis Dimakis

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag:

Forsidefoto:

ISSN-nummer 1501-2832

ISBN-nummer 978-82-410-0654

Sammendrag: I denne rapporten belyser vi problemene knyttet til å definere uttaksgrenser for brønner i norske grunnvannsforekomter. Rapporten er delt i to deler. I den første delen har vi utført flere nummeriske simuleringer som viser at norske grunnvannsforekomter har en begrenset magasineringsevne og at de reagerer raskt på klimaendringer. I den andre delen ser vi på hvordan en brønn påvirker vannstanden og strømningsforholdene i en grunnvannsforekomst.

Emneord: Grunnvann, brønner, uttaksgrenser, klimaendringer, grunnvannsmodellering, simulering av grunnvann, influensområdet, forsyningsområdet, strømningslinjer,

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

November 2007

Innhold

1 Introduksjon 7

2 Tidsperspektiv og klimaendringer (del 1) 8

2.1 Stor norsk grunnvannsforekomst (4 km x 4 km) 8
2.2 Vanlig norsk grunnvannsforekomst (2 km x 2 km) 18
2.3 Effekt av gradienten i elvevannsstanden (2 km x 4 km) 22
2.4 Effekt av elveløpets geometri (2 km x 8 km) 24
2.5 Enkel simulering av grunnvannsforekomsten ”Numedal 2” 27

3 Brønner (del 2) 32

3.1 Influensområdet 33
3.2 Forsyningsområdet 35
3.2.1 Flere brønner 40
3.3 Brønneffekter og avvik fra simuleringsresultater 43

4 Oppsummering og konklusjoner 50

5 Referanser 53

Forord

I denne rapporten presenters en del av det faglige arbeidet som er utført i NVE knyttet til implementering av EUs rammedirektiv for vann. Grunnvann er en viktig del av direktivet og uttaksgrenser for brønner er et viktig aspekt av direktivets implementering. NVE har, for å bistå kommunene og vannregionene i dette arbeid, produsert flere veiledere og faglige rapporter.

Den første delen av rapporten er rettet mot problemstillinger knyttet til klimaendringer og magasineringsegenskaper for norske grunnvannsforekomster. Den andre delen handler om brønner, grunnvannsuttak, influensområder og forsyningsområder.

Oslo, november 2007

Morten Johnsrud
avdelingsdirektør

Hege Hisdal
seksjonssjef

Sammendrag

Norske grunnvannsforekomster er avlange med en bredde som i de fleste tilfellene er mindre enn 4 km og har en mektighet som sjelden er større enn 60m. Lengden kan variere betraktelig fra noen få kilometer til flere titals kilometer. Det er disse geometriske egenskapene som gir de norske grunnvannsforekomstene sine særegen karakter.

Flere numeriske simulering ble utført med typiske verdier for norske grunnvannsforekomster som har en begrenset evne til å magasinere vann fra nedbør og snøsmelting og dette gjenspeiles i resultatene. For forekomster med en bredde på 4 km kommer magasineringskapasiteten og grunnvannstanden til å variere avhengig av plasseringen av elven i dalen. Hvis elven er plassert omtrent i midten av dalen kommer magasineringskapasiteten og grunnvannstand til å være redusert. Men i områder hvor elven nærmer seg dalsidene øker både magasineringen og grunnvannstanden.

Stasjonære forhold (likevektstilstand) er oppnådd relativt rask i forhold til de store selvmatende grunnvannsforekomstene i Tyskland og Frankrike. Endringer i grunnvannsdannelse kan påvirke grunnvannstanden for opp til 40 år før den begynner å stabilisere seg. For gjennomsnittlige parameterverdier er en 15 til 20 års periode mer sannsynlig. Dette betyr at tørrere klimatiske forhold må påvirke grunnvannsforekomstene over flere år før vi får en signifikant endring i forekomsten magasineringstilstand. Signifikant endring i magasineringen betyr ikke nødvendigvis en stor endring i grunnvannstanden, men at grunnvannsforekomsten befinner seg i en annen likevektstilstand enn før. Likevektstilstand betyr i dette sammenheng at grunnvannsdannelsen er omtrent lik tilsiget fra grunnvannsforekomsten til vassdraget.

For høy hydraulisk ledningsevne og/eller stor mektighet (> 40m) kan likevektstiden oppnås etter kun noen få år. Slike forhold finner man i grunnvannsforekomster som brukes til vannforsyning. Disse forekomster reagerer rask på endringer av grunnvannsdannelsen men størrelsesorden på endringene er som regel liten.

Det er vanskelig å definere forholdet mellom klimaendringer og grunnvannsdannelse. Vi har hovedsakelig undersøkt situasjonen hvor den gjennomsnittlige årlige grunnvannsdannelsen er redusert fra 400mm/år til 200mm/år. Med andre ord ser vi på et scenario som antar tørrere klimaforhold. En slik scenario er ikke støttet fra eksisterende klimadata. De fleste klimaforskere prognoserer endringer i lengden av vekstsesongen og mer frekvente hendelser av ekstreme forhold (flom, tørke osv.). Dette sier lite om den årlige grunnvannsdannelsen kommer til å endre seg og hvor mye. Fordelingen av nedbør og snø over året kan endre seg i følge noen klimasimuleringer uten at dette vil nødvendigvis medføre store endringer i den årlige grunnvannsdannelsen.

Simuleringene viser at sensitiviteten til klimaendringer er betydelig redusert for forekomster med liten bredde. Det vil si at effekten ev redusert grunnvannsdannelse er mye mindre enn effekten en senking i vannstanden i elven vil påføre. De også viser at gårdsbrønner hvor vannstanden ligger kun 1-2m over brønnens bunn kan tørkes ut, spesielt om disse brønner er etablert langt fra elven.

Simuleringene med meandrerende elver og romlige endringer av elvens vannstand viser at elvens geometri er meget viktig for grunnvannstanden i forekomster med liten bredde. Romlige endringer av vannstand i elven vil også påvirke grunnvannstanden, men vil ha

liten effekt for magasinering av grunnvann. Numedalssimuleringene viser at meandrerende elver kan brukes til å dele opp norske forekomster i mindre enheter som for alle praktiske formål er hydraulisk isolert fra resten av forekomsten og kan analyseres separat.

Den andre delen av rapporten handler om uttaksbrønner og effektene disse har på grunnvannsforekomster. Simuleringene bruker antagelser som er typiske for norske grunnvannsforekomster og resultatene brukes til å definere brønnenes influensområde og forsyningsområde.

Influensområder er brukt til å bestemme avstanden som to brønner kan ligge fra hverandre og hvordan vannuttak fra disse brønnene kan påvirke hverandres uttaksmengde. Influensområder er som regel presentert som et kart som viser hvordan grunnvannspeilet/grunnvannstand endrer seg som et resultat av et brønnuttak. Slike kart viser en likevektstilstand og gir kun en oversikt av situasjonen. Analytiske likninger er ofte brukt for å løse praktiske problemer, men burde ikke brukes for norske forekomster siden antagelsene disse likninger bygger på ikke gjelder for norske forhold.

Forsyningsområder er brukt til å definere beskyttelsessoner for uttaksbrønner. Det kan være komplisert å definere et forsyningsområde for en brønn. De fleste grunnvannsmodellene har spesielle moduler som bruker strømningslinjer for å definere forsyningsområdet, men disse fungerer ikke alltid som forventet og leder ofte til underestimeringer. Simuleringer med flere brønner viser at hver brønn har sin egen forsyningsområde. Hvis formålet er å definere beskyttelsessoner burde man anvende en forurensningsmodell sammen med en grunnvannsmodell for å ta hensyn til dispersjonsprosesser.

Det er ikke lett å bruke grunnvannsmodeller til å bestemme uttaksgrenser for brønner på forhånd. Etter brønnen er etablert finnes det en rekke praktiske metoder som kan brukes til å definere brønnens kapasitet og å optimalisere brønnens uttak. Grunnvannsmodeller kontrollerer ikke uttaksverdiene man bruker i modellen og dermed er det brukeren som må kontrollere resultatene og bestemme om brønnene fungerer riktig eller ikke. Modellresultater er ofte beheftet av numeriske feil i nærhet av brønner noe som gjør det enda vaskeligere å vurdere resultatene. Nye metoder som reduserer de nummeriske feilene i nærhet av brønnene er i stadig utvikling. Disse metoder har en lang vei å gå før de er i stand til å gi pålitelige resultater. Grunnvannsmodeller med analyser om forsynings- og influensområde kan brukes til å finne ut hvor stort uttak kan forekomsten tolerer, slik §44 i Vannressursloven krever. Men det er noe annet å definere hvor mange brønner burde man etablere og sette grenser på uttaket for hver brønn slik at det samlede uttaket ligger innen forekomstens toleransegrenser. Konkrete uttaksgrenser for brønner må derfor defineres etter en brønn er etablert.

1 Introduksjon

Implementeringen av EUs rammedirektiv for vann og Vannressursloven har flere felles miljømål. En av disse er å begrense grunnvannsuttak til det som grunnvannsforekomsten kan tåle. For å definere slike uttaksgrenser må man se nærmere på brønnene og hvordan de påvirker grunnvannsforekomstene de befinner seg i, og prosessene som styrer grunnvannmagasineringen, det vil si klimaeffekter, forekomstenes dimensjoner, hydrauliske egenskaper, osv. Uttaksgrenser kan ikke settes før man kjenner størrelsen av tilgjengelige ressurser.

Vi har delt rapporten i to deler. Den første del skal handle om klimaendringer og magasineringsegenskaper for norske grunnvannsforekomster, mens i den andre delen skal vi se nærmere på brønner og hvordan de påvirker grunnvannsforekomstene.

De fleste norske grunnvannsforekomstene har en begrenset evne til å magasinere grunnvann pga. liten areal og liten magasineringskapasitet. Derfor betrakter vi dem som sensitive til klimaendringer og dårlig egnet til store grunnvannsuttak. At norske grunnvannsforekomster er sensitive er en viktig karakteristikk men i seg selv har kun en kvalitativ verdi. I denne rapporten kommer vi til å undersøke denne sensitiviteten videre og prøve å kvantifisere den.

Det finnes analytiske likninger som kan være behjelpelige i å belyse sensitiviteten av en grunnvannsforekomst. Men de fleste likningene av denne typen er rettet mot store forekomster med små hydraulisk gradienter og store nedbørfelter, og er dermed dårlige egnet for de små norske forekomster. Det er grunnen at slike likninger er lite brukt i Norge.

I denne rapporten kommer vi til å bruke modelleringsverktøy for å vurdere sensitiviteten. Nummeriske likninger dvs. modelleringsverktøy er bedre egnet til slike undersøkelser fordi de lar oss kontrollere måten grunnvannsforekomsten er påvirket av omverden. Tenkelige endringer i nedbørsmengder (klimaendringer), elveløpets geometri og vannstand, kan simuleres og effektene kan kvantifiseres. NVE har flere modelleringsverktøy for simulering av grunnvannforekomster. I denne rapporten bruker vi FEFLOW modellen (Diersch, 2005) til å utføre simuleringer som kan belyse måten norske grunnvannforekomster reagerer på klimaendringer og grunnvannsuttak og se nærmere på sine magasineringsegenskaper.

Den andre delen av rapporten er en introduksjon i grunnvannsbrønner og hvordan disse påvirker grunnvannsforekomstene de befinner seg i. Vi skal introdusere begrepet influensområdet av en brønn og gi noen eksempler på det og diskutere problemer knyttet til dens definisjon og hva bruker vi dette området til. Det samme skal vi gjøre for en brønns forsyningsområdet. Resten av rapporten er brukt til å diskutere vanskeligheter knyttet til analyser av brønner og hvorfor er det komplisert å definere uttaksgrenser for brønner.

2 Tidsperspektiv og klimaendringer (del 1)

Selvmatende forekomster er de som fornyer sine ressurser kun fra infiltrasjon av nedbør og snøsmelting. De fleste norske grunnvannsforekomstene er i hydraulisk kontakt med elver og/eller innsjøer og betraktes ikke som ”selvmattende” forekomster.

Disse forekomstene fornyer også hovedsakelig sine ressurser fra infiltrasjon av nedbør og snøsmelting, men periodevis kan de få et tilskudd fra elven eller innsjøen de er i hydraulisk kontakt med. Den viktigste egenskapen disse grunnvannsforekomstene har er at vannstanden i elven og/eller innsjøen kontrollerer grunnvannstanden i grunnvannsforekomsten. Det er kun slike grunnvannsforekomster vi simulerer i denne rapporten.

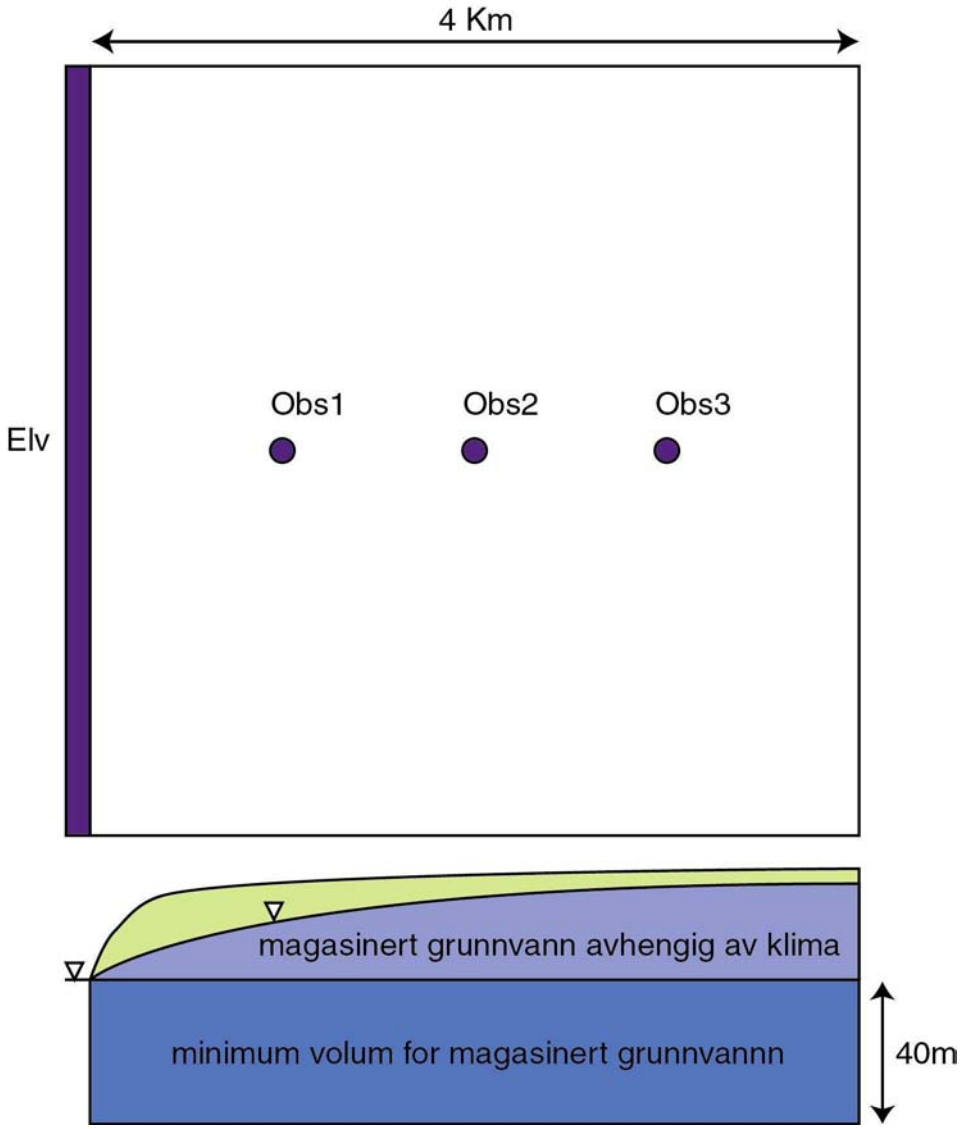
I flomperioder kan vannstanden i elvene øke betraktelig i løpet av en kort tidsperiode og som en konsekvens av dette må grunnvannstanden tilpasse seg vannstanden i elven. I alle tilfeller betyr dette at vann fra elven infiltreres til grunnvannsforekomsten. Mengden av vannet som infiltreres derimot kan variere mye fra forekomst til forekomst. En storflom kommer alltid til å påvirke slike forekomster men under normale forhold antar vi at flomperioder kommer til å ha kun korttids effekter. Dette er viktig fordi om man utelukker flomeffekter kan man betrakte disse forekomstene som selvmatende. Dvs. at magasinering av grunnvann i forekomsten styres kun fra infiltrasjon av nedbør og snøsmelting. En slik antagelse innebærer at vannstanden i elven behandles som konstant gjennom året (en slags gjennomsnittsverdi). Flomeffekter er knyttet til prosessene som inngår i interaksjon mellom overflatevann og grunnvann. Langtidseffekter fra flomhendelser krever i så fall en statistisk behandling av vannstandsendringer i flom perioder. Dette kan eventuelt bli tema for en senere rapport.

Antagelsen om selvmatende forhold innebærer også at en ikke tar hensyn til vann som eventuelt forsyner forekomsten fra de omkringliggende fjellområdene. Mange norske grunnvannsforekomster får betydelige mengder av vann via avrenning fra fjellsidene eller indirekte fra fjellets sprekkesystem (hydraulisk kommunikasjon mellom fjell-løsmasse grunnvannsforekomster). Colleuille et al.(2004) har påpekt hvor viktig dette vannet har vært for simuleringer av grunnvannsforekomsten i Rena, mens Dimakis et al. (2005) viser hvordan tilsig fra fjell kan påvirke strømningsforholdene. Selv om vi ikke skal ta hensyn til fjelltilsig i simuleringene vi kommer til å presentere, er det viktig å påpeke at for mange norske grunnvannsforekomter er innflytelse av fjelltilsig mye større enn flomeffekter.

2.1 Stor norsk grunnvannsforekomst (4 km x 4 km)

La oss først se på en relativt stor norsk grunnvannsforekomst. Vi antar at forekomsten ligger i en dal med en brede på 8 km og har en elv som renner i midten av dalen. Under idealiserte forhold kommer grunnvannet til å oppføre seg på en symmetrisk måte på begge sider av elven og dermed trenger vi å analysere kun halvdelen av forekomsten. Dybden til fjellet under elven er antatt til å være 40m som er også en typisk verdi for mange norske grunnvannsforekomster. Figur 1 viser den geometriske formen av den simulerte grunnvannsforekomsten. I tillegg vises et typisk vertikal profil av forekomsten i

figur 1. Volumet mellom bunnen av forekomsten og grunnvannspeilet definerer forekomstens magasin, og siden grunnvannspeilet endrer seg så kommer magasinvolumet til å endre seg også. Grunnvannsvolumet i forekomsten kan beregnes ved å gange magasinvolumet med porøsiteten eller effektiv porøsitet om man vil beregne utnyttbare ressurser.



Figur 1. Geometrisk form av simuleringen 4 km x 4 km

I figur 1 har vi delt magasinvolumet i 2 deler. Den nederste delen betrakter vi som et minimum for forekomsten og grensen på 40m samsvarer elvens vannstand. Dette utgjør en teoretisk grense for simuleringen siden enhver simulering av forekomsten uten grunnvannsdannelse fra nedbør vil gi en stasjonær løsning som skal ligge på denne grensen. En grunnvannsforekomst i naturlig tilstand (uten brønner) kan ikke få en grunnvannstand under denne grensen. Magasinvolumet over denne grensen er avhengig av klimaforholdene, som er en annen måte å si at den er avhengig av den naturlige grunnvannsdannelsen for forekomsten. Man kan alltid separere de 2 magasinvolumene

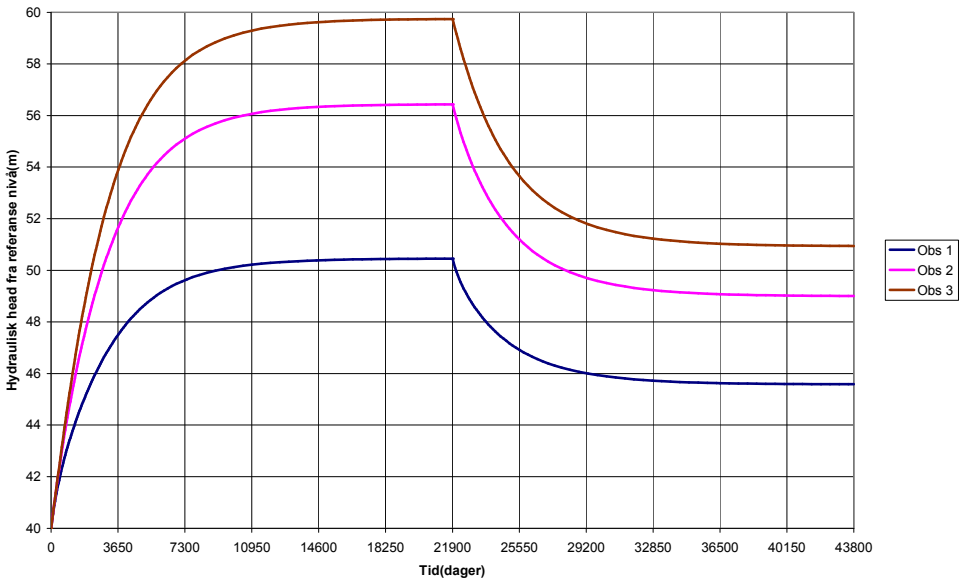
ved å bruke vannstanden i elven som referansenivå. Da får man alltid en del som er avhengig av elevens vannstand (som er i konstant endring) og den øverste delen som er den selvmatende delen og er avhengig av nedbør, snøsmelting, evapotranspirasjon, og den umettede sonen eller kort sagt den naturlige grunnvannsdannelsen. Det er den selvmatende delen som vi skal konsentrere oss om i denne rapporten.

Løsmassene som danner forekomsten er som regel karakterisert som glasiofluviale avsetninger. Det finnes vanligvis en bunnmorene i kontaktsone med det underliggende fjellet, men ellers kan sammensetningen av løsmassene variere betraktelig fra sted til sted pga. det dynamiske avsetningsmiljøet som skapte disse løsmassene. Kartlegging av løsmassene og sine hydrauliske egenskaper er en krevende oppgave og dessuten den viktigste oppgaven for å bygge opp en grunnvannsmodell.

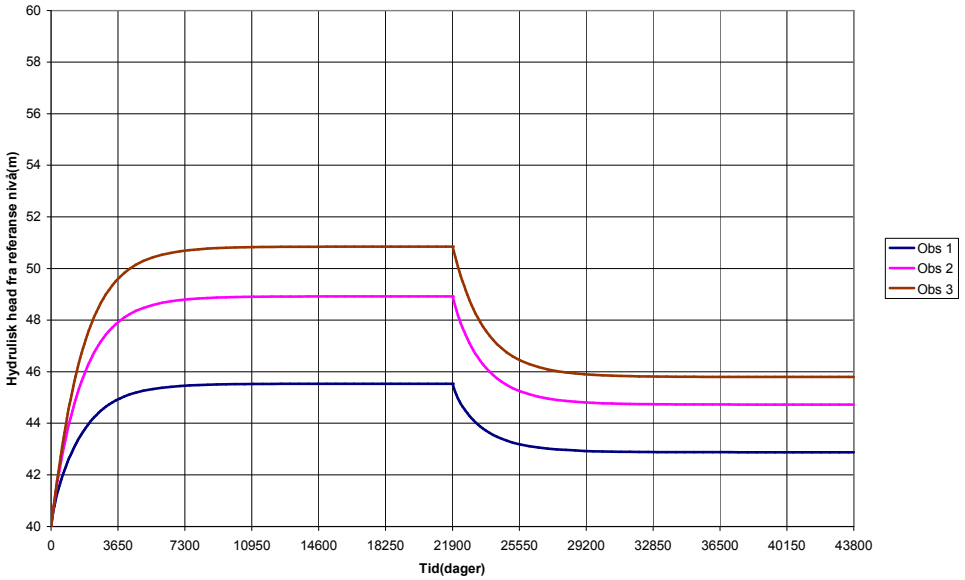
I vår tenkelige grunnvannsforekomst antar vi at løsmassene er homogene med en porøsitet lik 0,2 og en varierende hydraulisk ledningsevne lik 0,0001 m/s, deretter 0,0002 m/s og 0,0003 m/s. Den umettede sonen er antatt å være mektig nok til å ikke hindre grunnvannsmagasineringen. Resultatene vises i figur 2 hvor Obs1, Obs2, og Obs3 representerer grunnvannstanden 1000m, 2000m, og 3000m fra elven tilsvarende. Figurene 2A, 2B og 2C tilsvarer de 3 hydrauliske ledningsevnene.

Simuleringene starter fra en initial situasjon hvor grunnvannstanden i forekomsten er på sitt minimum. Dette minimum bestemmes ut fra vannstanden i elven. Alle vannstandsmålinger er tatt fra referanse nivå som er bunnen av løsmassene. I så fall er vannstanden i elven 40m og initial grunnvannstand i forekomsten er også 40 m. En konstant grunnvanndannelse på 400mm/år er innført. Forekomsten begynner å danne den selvmatende delen av magasinet. Etter 60 år (21900 dager) endrer vi grunnvannsdannelse til 200 mm/år og simulerer endringene for en 60 års periode til (21900 dager til eller 43800 dager totalt).

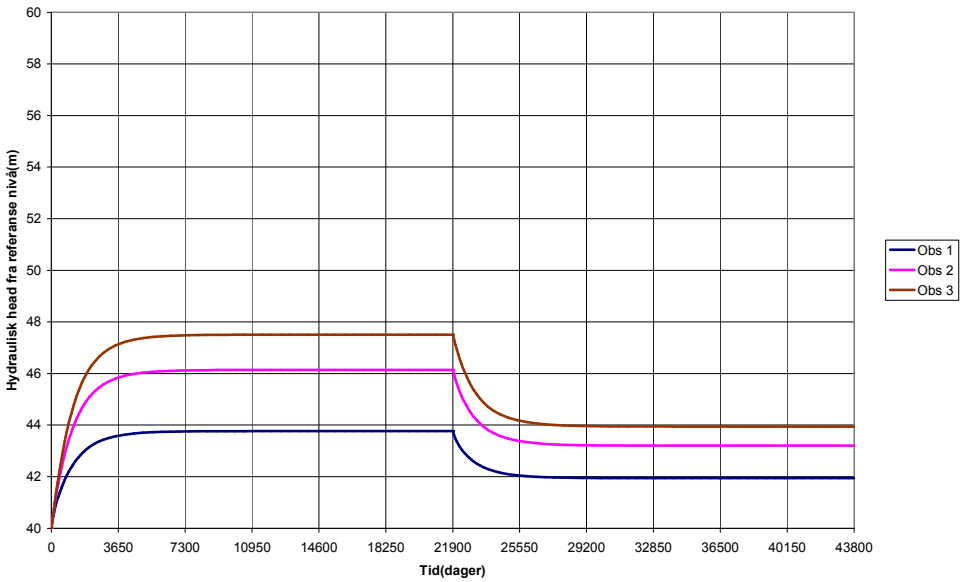
Hydraulisk ledningsevne styrer flere forhold i forekomsten. Mengden av vann som kan magasineres minsker med økende ledningsevne. Tiden det tar for å nå maksimum magasinering minsker også med økende ledningsevne. Disse resultatene er ikke overraskende siden magasineringen og oppnåelse av likevektstilstand er avhengig av grunnvannets hastighet i forekomsten.


Hydraulisk head fra referanse nivå(m)
60
58
56
54
52
50
48
46
44
42
40
0
3650
7300
10950
14600
18250
21900
25550
29200
32850
36500
40150
43800
Tid(dager)
Obs 1
Obs 2
Obs 3

A

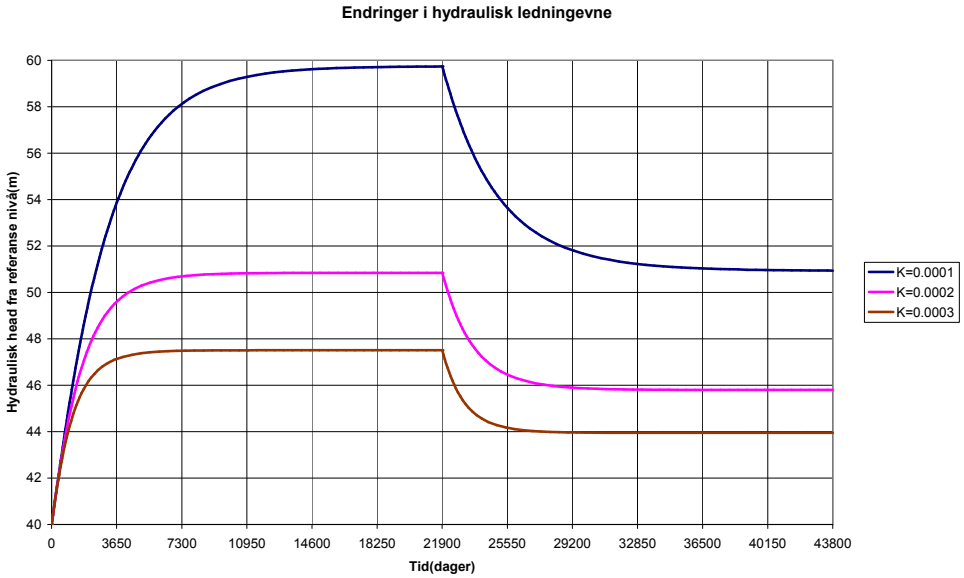

Hydrulisk head fra referanse nivå(m)
60
58
56
54
52
50
48
46
44
42
40
0
3650
7300
10950
14600
18250
21900
25550
29200
32850
36500
40150
43800
Tid(dager)
Obs 1
Obs 2
Obs 3

B

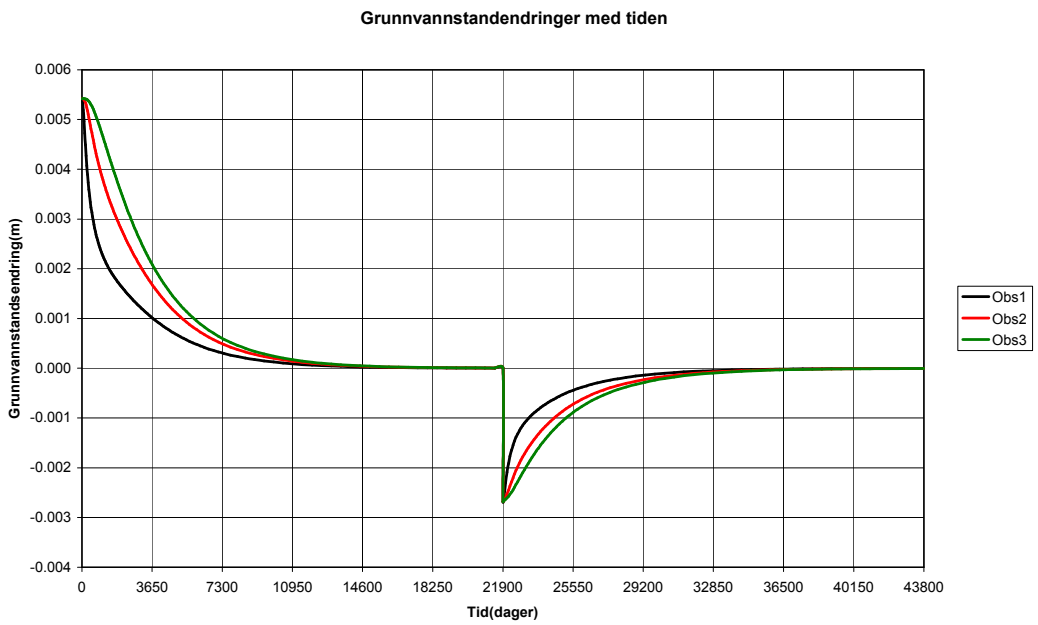


C

Figur 2. Grunnvannsstanden ved punkt Obs1, Ob2 og Obs3 (1000 m, 2000 m, og 3000 m fra elven tilsvarende) for en hydraulisk ledningsevne lik A. 0,0001m/s B. 0,0002m/s og C. 0,0003m/s. (Obs1 er den nederste linjen, mens Obs3 er den øverste)

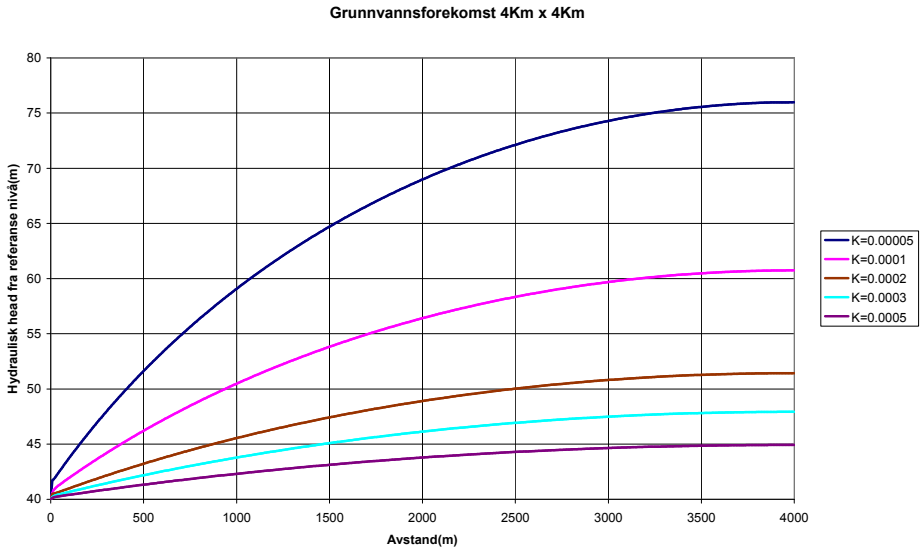


Figur 3. Grunnvannstanden for punkt Obs3 (3000 m fra elven) for tre forskjellige verdier av hydraulisk ledningsevne med 400 mm/år grunnvannsdannelse. (0,0001 øverst linje, 0,0003 nederst)



Figur 4. Endringshastighet av grunnvannstand i forhold til tiden for K=0,0001m/s. Estimatene dh/dt for observasjonspunktene Obs1, Obs2 og Obs3.

En tilnærmet likevekts tilstand er oppnådd etter 10 til 40 år. Den største andelen av endringene finner sted i de første 5 til 20 år. Det er viktig å merke at grunnvannstanden endrer seg meget langsomt. Figur 4 viser hvor fort disse endringene finner sted for punkt Obs1, Obs2 og Obs3. I begynnelse får vi en endring på ca. 0,542 cm/døgn som er lik for alle observasjonspunktene. Etter 10 år har endringene falt til ca. 0,1 cm/døgn for Obs1, til ca. 0,17 cm/døgn for Obs2 og til ca. 0,2 cm/døgn for Obs3. Endringene blir aldri null i løpet av hele simuleringsperioden. Dette betyr at grunnvannstanden ikke har oppnådd en 100 % likevekts tilstand verken før eller etter vi fikk endre grunnvannsdannelsen.

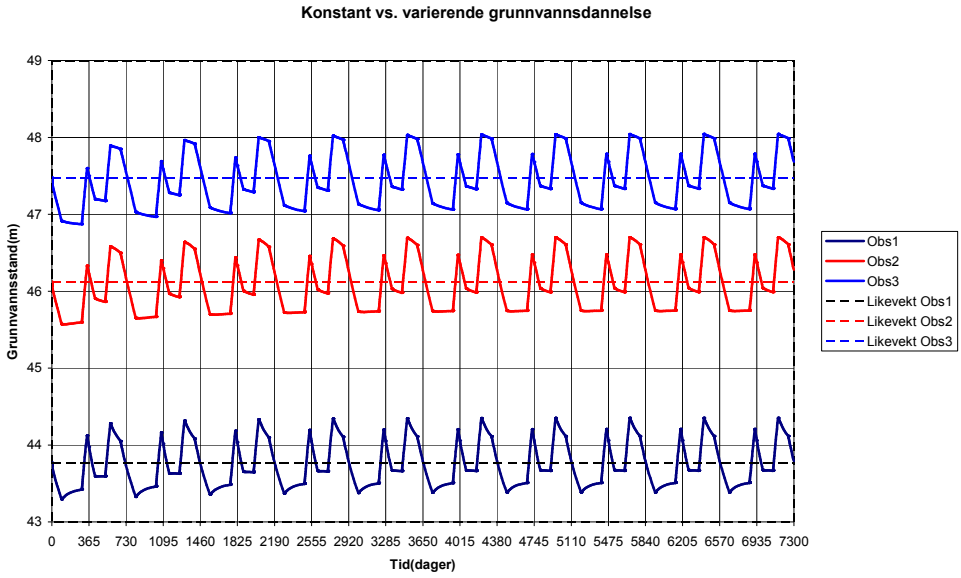


Figur 5. Naturlig grunnvannspeilet for forskjellige verdier av hydraulisk ledningsevne.

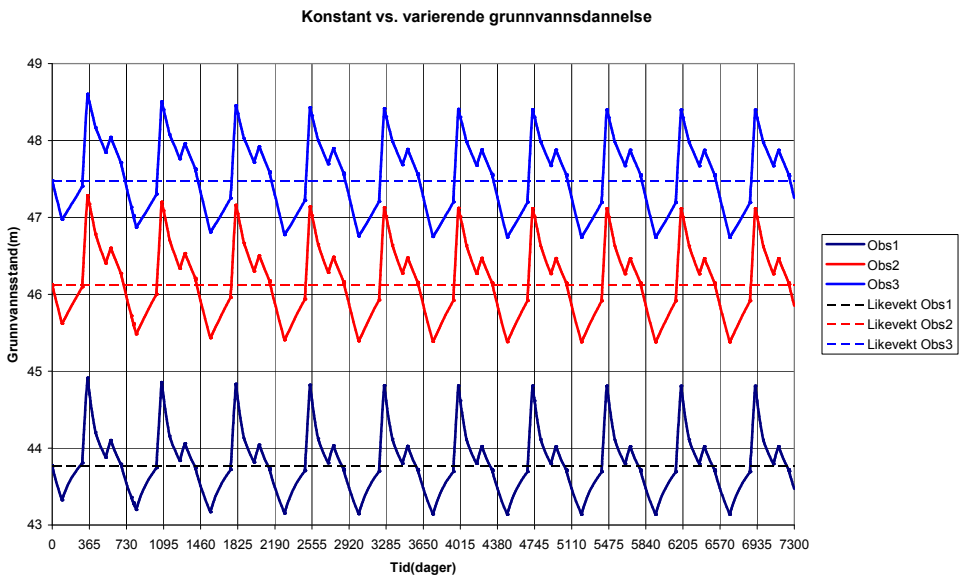
Magasineringen som en funksjon av hydraulisk ledningsevne er best observert i figur 5. Kurvene viser likevekts grunnvannstand i forekomsten for bestemte verdier av hydraulisk ledningsevne. Lave hydraulisk ledningsevne verdier (deretter K-verdier) gir en likevekts grunnvannstandsprofil som krever en stor umettet sone. Figur 5 viser at for K=0,0001m/s må løsmassene ha en mektighet større enn 60 m i området med avstand større enn ca. 3000 m fra elven, ellers kommer grunnvannspeilet til å treffe overflaten i dette området. Områder hvor grunnvannspeilet ligger nær overflaten (mindre enn 1 m) er mer utsatt til evapotranspirasjon og er naturlig egnet til utvikling av myr/våtmark. Utsatte områder ligger i nærhet av dalsidene som er også utsatt til avrenning av vann fra dalens fjellsider. Når grunnvannstanden ligger nær overflatenivå kommer grunnvannsdannelse fra nedbør (og avrenning fra fjellsidene) ikke til å fungere på et normalt vis. Fordelingen av nedbør og grunnvannsdannelse i slike områder kan være komplisert. Det er grunnen at drenering av slike områder ofte påvirker mye større områder enn opprinelig antatt. Resultatet er avhengig av grunnvannsdannelsen som i dette tilfellet er lik 400 mm/år. For 200mm/år må løsmassene ha en mektighet større enn ca. 51 m.

En enkel måte å tenke på en likevektsløsning er at grunnvannsdannelse og tilsig fra forekomsten til vassdraget er tilnærmet like store eller er i likevekt. I så fall en reduksjon av grunnvannsdannelse fra 400mm/år til 200mm/år krever at forekomsten må tømme magasinet fra 60m til 51m for å ivareta likevekten. Dette utømming kan ta 5 til 20 år. En annen måte å utrykke dette på er å si at om klimaendringer eller endre lokale årsaker endrer grunnvannsdannelsen fra 400mm/år til 200mm/år da kommer grunnvannstanden til å falle og det skal ta 5 til 20 år før den begynner å stabilisere seg igjen.

Det er viktig å forstå at man også kan betrakte en stasjonær eller likevekts løsning som en slags langtids gjennomsnittlig løsning for de angitte antagelser i simuleringen. Man må være forsiktig i måten man bruker slike løsninger på. Løsningene i figur 4 antar en jevnt fordelt grunnvannsdannelse lik 400mm/år eller 1,096mm/døgn. I virkeligheten vil grunnvannsdannelse ikke være jevnt fordelt over året og vil variere fra år til år. Men om en 40 års årlig gjennomsnitts grunnvannsdannelse er lik 400mm, kan man forvente at likevektsløsningen gir en slags gjennomsnittlig grunnvannstand.

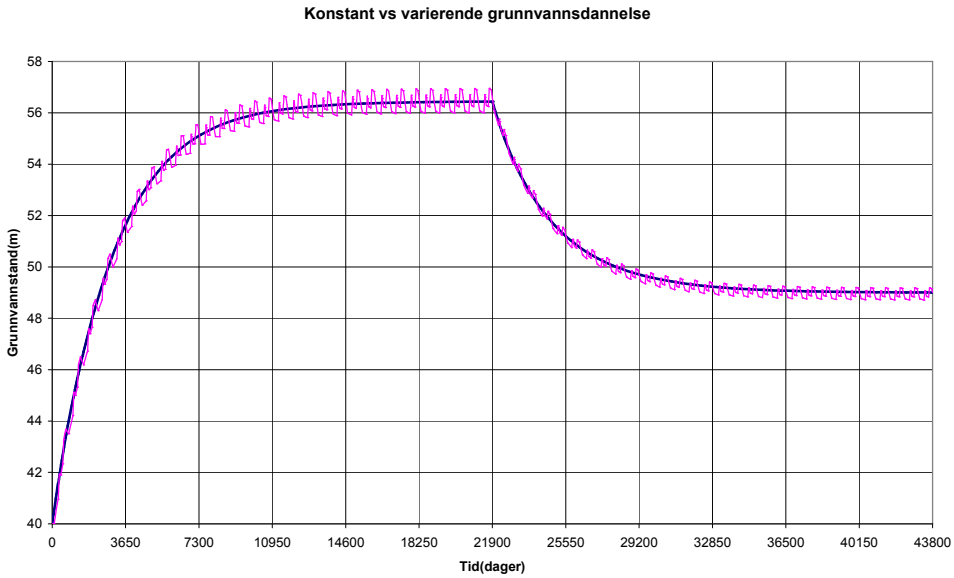


A

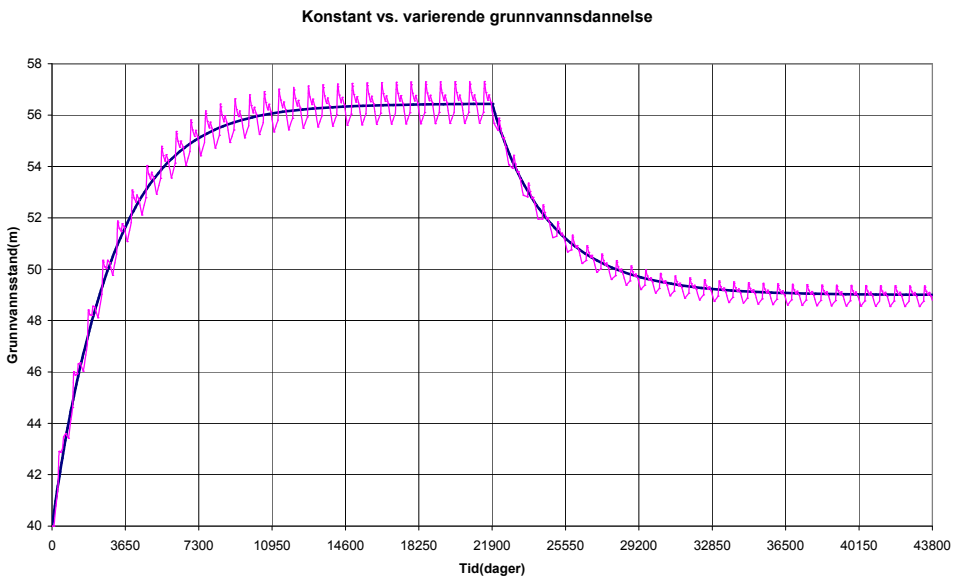


B

Figur 6. Sammenligning av konstant likevektsløsning og simuleringer med varierende årlig grunnvannsdannelse. Forklaring i teksten. A. To forskjellige grunnvannsdannelses foredelinger som er begge lik 400 mm/år. B. En grunnvannsdannelses foredeling lik 600 mm/år mens den andre er lik 200 mm/år.



A



B

Figur 7. Sammenligning av simuleringer med konstant og varierende årlig grunnvannsdannelse.

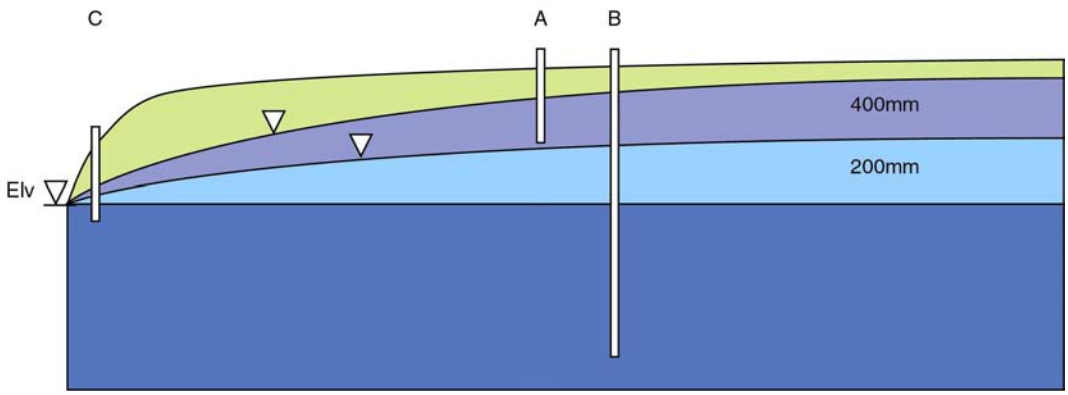
Noen eksempler på dette vises i figur 6 og 7. I figur 6 ser vi likevekts løsninger for Obs1, Obs2, og Obs3 som stiplete linjer når K=0,0003m/s og grunnvannsdannelse er 400mm/år. I figur 6A har vi definert 2 forskjellige årlige distribusjoner for grunnvannsdannelsen slik at begge har en total årlig grunnvannsdannelse lik 400mm. FEFLOW kjører disse distribusjonene i sirkulær modus som betyr at den repeterer de to distribusjonene etter hverandre igjen og igjen helt til simuleringsperioden er ferdig som i dette tilfellet er 20 år (7300 dager). Den varierende grunnvannsdannelse produserer varierende grunnvannstandsverdier for observasjonspunktene som stabiliserer seg etter hvert.

I figur 6B definerte vi 2 årlige distribusjoner for grunnvannsdannelsen hvor den første har en total årlig grunnvanndannelse lik 600mm mens den andre har 200mm. Likevektløsning ser ut til å være en slags gjennomsnitt for de varierende kurvene*. Store endringer i grunnvannsdannelse fra år til år vil ikke påvirke resultatene.

I figur 7 kan man sammenligne simuleringsresultatene for konstant grunnvannsdannelse og varierende grunnvannsdannelse. I figur 7A bruker vi distribusjonen av grunnvanndannelse brukt i figur 6A og estimerer grunnvannstanden for observasjonspunkt Obs2 når K=0,0001m/s. I figur 7B vises de samme resultatene som i 7A men distribusjonen for figur 6B er brukt som varierende grunnvannsdannelse. Etter 21900 dager bruker vi de samme distribusjoner, men grunnvannsdannelse er halvert. I

* Teoretisk sett burde likevektsløsningen være et gjennomsnitt for den varierende grunnvannsdannelse simuleringen. Men nummeriske feil vil alltid produsere et avvik mellom de to løsningene. For figur 6A er det nummeriske avviket ca. 0,13m mellom gjennomsnittet for den varierende løsningen og likevektsløsningen, som er for liten til å være synlig i figuren. En slik avvik kan teoretisk sett reduseres ved å bruke mindre tidssteg i simuleringene, men dette vil også øke tiden det tar for å kjøre simuleringen.

begge tilfeller observerer man at grunnvannstanden estimert med konstant grunnvannsdannelse gir en bra gjennomsnittlig grunnvannstand for punkt Obs2.



Figur 8. Skisse av en grunnvannsforekomst med likevektsløsninger for 400 mm/år og 200 mm/år. Forklaring i teksten.

Simuleringsresultatene er skissert i figur 8 som viser likevektløsninger for 400 mm/år og 200 mm/år. Figuren skal hjelpe oss å oppsummere og påpeke noen viktige konklusjoner man kan dra ut av resultatene. Flere brønner er tegnet i figuren. Vi starter med å se nærmere på brønn A. Denne brønnen er representativ for en vanlig gårdsbrønn. Som regel har slike gårdsbrønner en dybde mindre enn 12m. Da brønnen ble etablert var den gjennomsnittlige årlige grunnvannsdannelsen på ca. 400mm og brønnens dybde var tilstrekkelig for å garantere at brønnen hadde en tilfredsstillende vannproduksjon. La oss nå anta at klimaendringer reduserer grunnvannsdannelsen til 200mm/år. I en slik situasjon kommer man til å merke at vannstanden faller for hvert år i brønnen og etter 5 til 20 år (avhengig av K-verdi) kommer brønnen til å bli tørr. Vannstanden skal stabilisere seg ved likevektsløsningen for 200mm/år som ligger under brønnens bunn. Brønn B derimot er dyp nok til å fortsette å produsere vann til tross for klimaendringene. Denne brønnen kommer til å bli påvirket av klimaendringene også. Vannstanden i brønn B kommer til å falle like mye som i brønn A, som vil gjøre det vanskeligere for pumpen å produsere like mye vann som før. Men brønn B kan ikke tørke ut og er mer pålitelig enn brønn A.

Gårdsbrønner som er etablert i nærheten av elven -- lik brønn C i figur 8 -- er tilsynelatende upåvirket av klimaendringer. Forskjellen mellom likevektsløsningen for 400mm/år og 200mm/år er liten det nærmere man kommer til elven og endringer av grunnvannstanden er ikke merkbare. I mange tilfeller har brønnen en tilstrekelig dybde som garanterer at brønnen ikke vil tørke ut. Som ulemper ved slike brønner kan man nevne at brønnens vannstand er påvirket av vannstanden i elven og at de er utsatt for flom skader. Flomverk, terskler, og reguleringer i vassdraget vil som regel påvirke vannstanden i slike brønner.

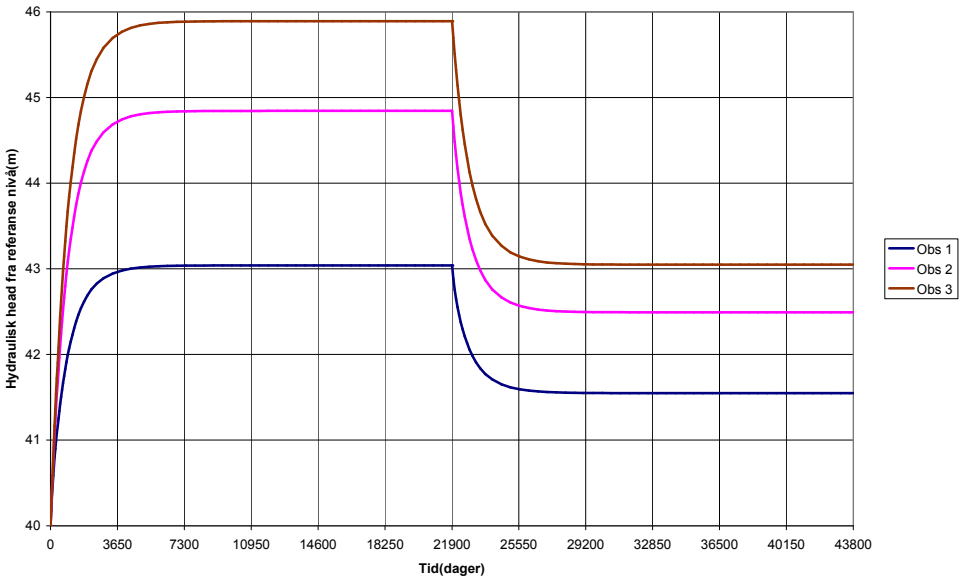
Det er ikke uvanlig å finne gårdsbrønner som har en dybde mellom 2 og 6m. Slike brønner kan bli påvirket av klimaendringer til og med om de ligger i nærheten av elv eller innsjø.

Simuleringsresultatene viser hvor viktig det er å dimensjonere en brønns dybde riktig. Mange gårdsbrønner er ikke dimensjonert riktig fordi de ble etablert basert på lokal tradisjon og praktiske betraktninger. Eksisterende gårdsbrønner burde kontrolleres for å bestemme om de har en tilstrekelig dimensjonering og i tilfelle de ikke har det burde eierne informeres om brønnens tilstand. NVE erfarer at mange gårdsbrønner i Norge er dårlig dimensjonert. Varsling om grunnvannstørke (lav grunnvannsstand) kan hjelpe bønner ved å igangsette beredskapsplaner for å bekjempe vannmangelen, men på langsikt burde man erstatte problematiske brønner med riktig dimensjonert brønner. Dette kan være ressurskrevende siden de fleste norske forekomstene ikke er kartlagt og dermed kan man ikke vurdere en optimal dimensjonering for brønnene.

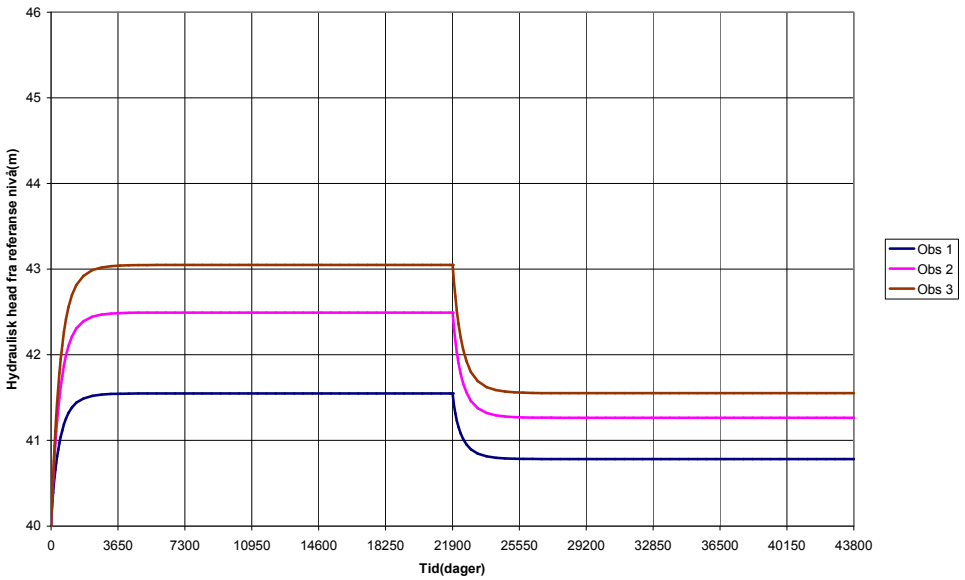
2.2 Vanlig norsk grunnvannsforekomst (2 km x 2 km)

For å se nærmere på påvirkningen av grunnvannsforekomstens arealstørrelse ble den samme analysen utført på en forekomst med dimensjoner 2 km x 2 km. Observasjonspunktene Obs1, Obs2 og Obs3 er satt på 500m, 1000m og 1500m tilsvarende. Figurene 9, 10, 11 og 12 viser de tilsvarende resultatene for denne forekomsten.

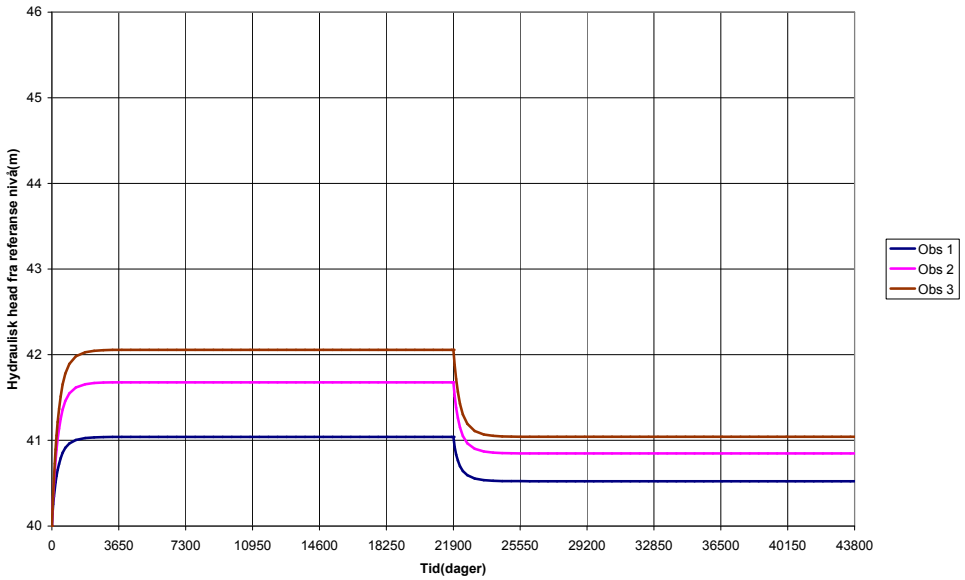
Endringene i grunnvannstanden og magasinering er åpenbart mindre enn i forrige analysen. Likevekts tilstand er oppnådd etter 5 til 20 år. Mindre areal betyr mindre avstander som grunnvann må strømme over som innebærer at man observerer raskere tidsendringer i forekomsten. Resultatene er ikke en forkortet versjon av den 4x4 km^2 forekomsten men er spesifikke til forekomstens størrelse. Hvis man sammenligner grunnvannstanden 1000 m fra elven, for en K-verdi 0,0001 m/s og grunnvannsdannelse 400 mm/år, får man 51 m for den 4x4 km^2 forekomsten mens det er mindre enn 45 m for den 2x2 km^2 forekomsten. Reduserer man arealstørrelsen ytterliggere får man enda mindre magasinering og grunnvannstand.



A



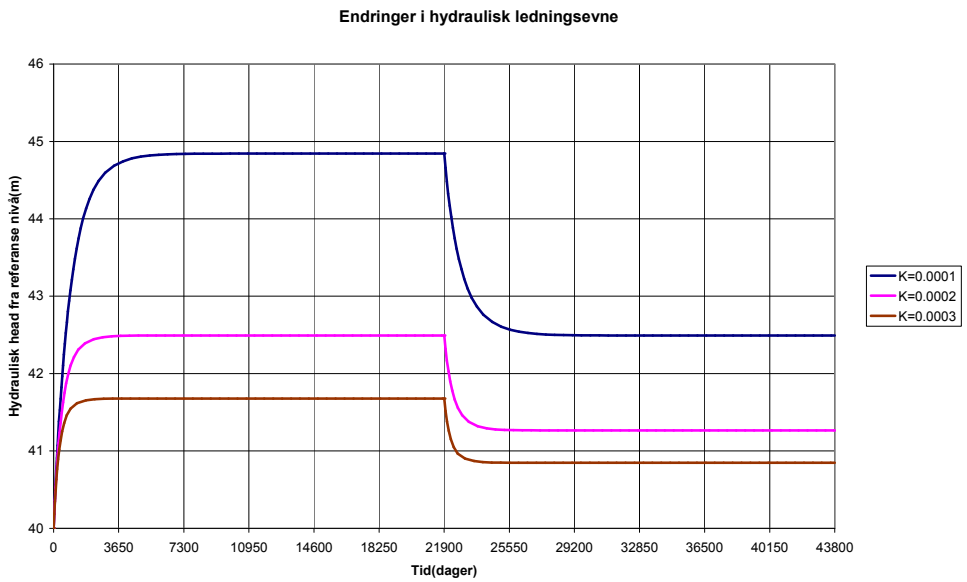
B



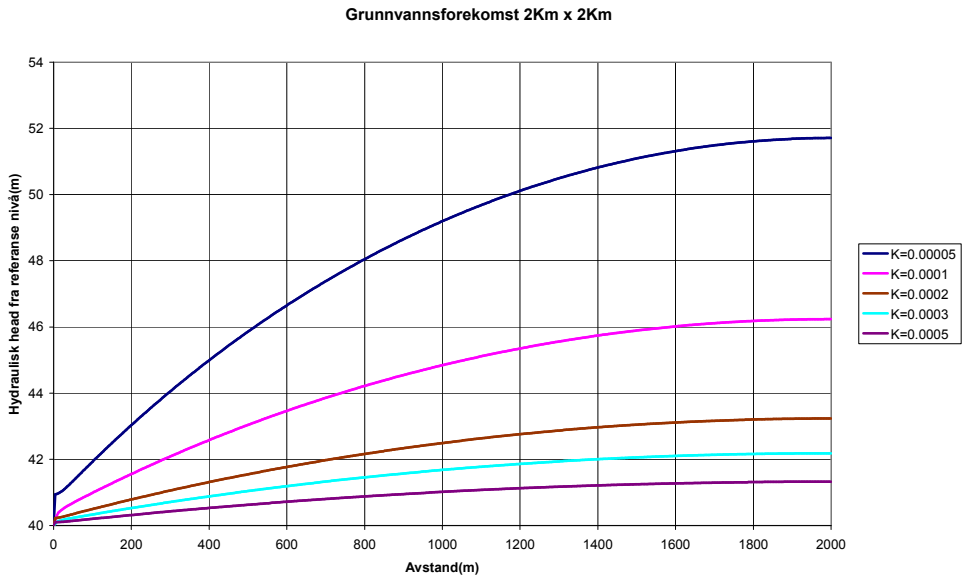
C

Figur 9. Grunnvannsstanden ved punkt Obs1, Ob2 og Obs3 (500 m, 1000 m, og 1500 m fra elven tilsvarende) for en hydraulisk ledningsevne lik A. 0,0001m/s B. 0,0002m/s og C. 0,0003m/s. (Obs1 er den nederste linjen, mens Obs3 er den øverste)

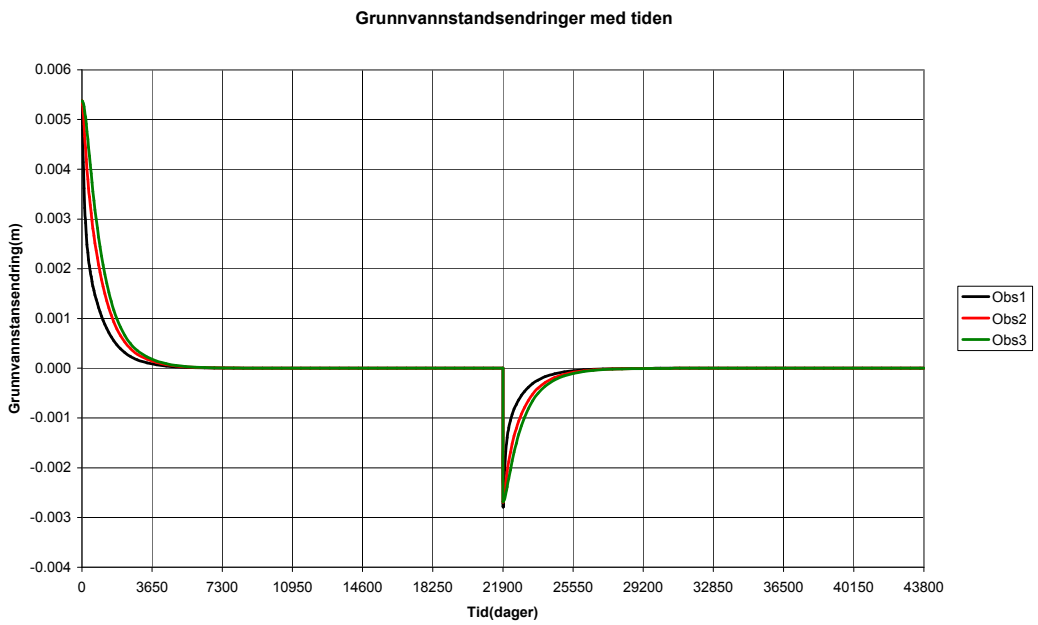
Sensitiviteten til klimaendringer er betydelig redusert. Forekomsten har liten magasineringskapasitet og endringene ved redusert grunnvannsdannelse er tilvarende liten. For høye K-verdier er sensitiviteten enda mindre. For en K-verdi lik 0,0003m/s ser man i figur 9C at maksimum grunnvannsstanden er litt over 42m, kun 2 m over elv vannstand. Minimums volum for forekomsten er $160 \cdot 10^6 m^3$ mens simuleringen for K=0,0003m/s gir oss en total volum lik $166 \cdot 10^6 m^3$. Når man reduserer grunnvannsdannelse til 200mm/år får man en total volum lik $163{,}3 \cdot 10^6 m^3$.



Figur 10. Grunnvannstanden for punkt Obs2 (1000 m fra elven) for tre forskjellige verdier av hydraulisk ledningsevne. (0,0001 øverst linje, 0,0003 nederst)



Figur 11. Naturlig grunnvannspeilet for forskjellige verdier av hydraulisk ledningsevne med 400 mm/år grunnvannsdannelse



Figur 12. Endringshastighet av grunnvannstand i forhold til tiden for K=0,0001m/s. Estimatene dh/dt for observasjonspunktene ved Obs1, Obs2 og Obs3.

Dette er meget interessant fordi den setter grenser på grunnvannsuttak. Med en effektiv porøsitet på 10% får vi ca. 330000m^3 av grunnvannet magasinert i den klima avhengig delen av forekomsten. Et redusert grunnvannsdannelse lik 200mm/år gir en total årlig grunnvannsdannelse lik 800000m^3 som er større enn det som forekomsten kan magasinere. Et grunnvannuttak på 1000m^3/døgn tilsvarer et årlig uttak lik 365000m^3 som i forhold til grunnvannsdannelse ikke skaper noe problem, men likevel er større enn det som er magasinert i forekomsten. Man kan ikke se bort fra at i perioder uten nedbør kommer brønnen til å bruke grunnvann som er magasinert i minimums delen av magasinet. Dette innebærer at tilsig av vann fra elven til forekomsten er sannsynlig i tørre perioder. Enkle vannbalanse betraktninger er ikke pålitelige nok for å bestemme uttaksgrenser i en slik situasjon. Brønner som periodevis kan fungere som infiltrasjonsbrønner ligger på grenseområdet i forhold til hvordan uttaksgrenser burde bestemmes.

Det er interessant å påpeke at kurvene i figur 12 har den samme startverdien både ved tidspunkt 0 og 21900 (60 år) som de tilsvarende kurvene for den 4x4 km^2 simuleringen. Også viktig å påpeke at 100 % likevekt er oppnådd etter 7890 dager (ca. 21,6 år) fra simuleringens starttid. Likevekt etter endringen av grunnvannsdannelse implementert ved 21900 dager (60 år) ble oppnådd etter 29100 dager (79,7 år). Dvs. 7200 dager (ca. 19,7 år) etter grunnvanndannelsen ble endret fra 400mm/dag til 200mm/dag.

Klassisk hydrogeologi definerer forholdet mellom forekomstens transmissivitet T og lagringsevne S som forekomstens hydraulisk diffusivitet α som gir en numerisk verdi til forekomstens reaksjonsevne. Simuleringene vi har utført hittil har en diffusivitets verdi som kan estimeres per definisjon av

$$\alpha = \frac{T}{S} = \frac{K \cdot B}{n_e} = \frac{0{,}0001 \cdot 40}{0{,}2} = 0{,}02\,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$$

Vi skal komme tilbake til diffusivitet i forbindelse med brønners innflytelsessoner.

Resultatene fra simuleringene gir en antydning på hva man burde forvente av norske grunnvannsforekomster siden de fleste av dem pleier å ha en ”halv” bredde mindre en 4 km. Norske grunnvannsforekomster pleier å være avlange uten stor bredde, og er atskillig mer kompliserte enn de idealiserte forekomstene som hittil er simulert.

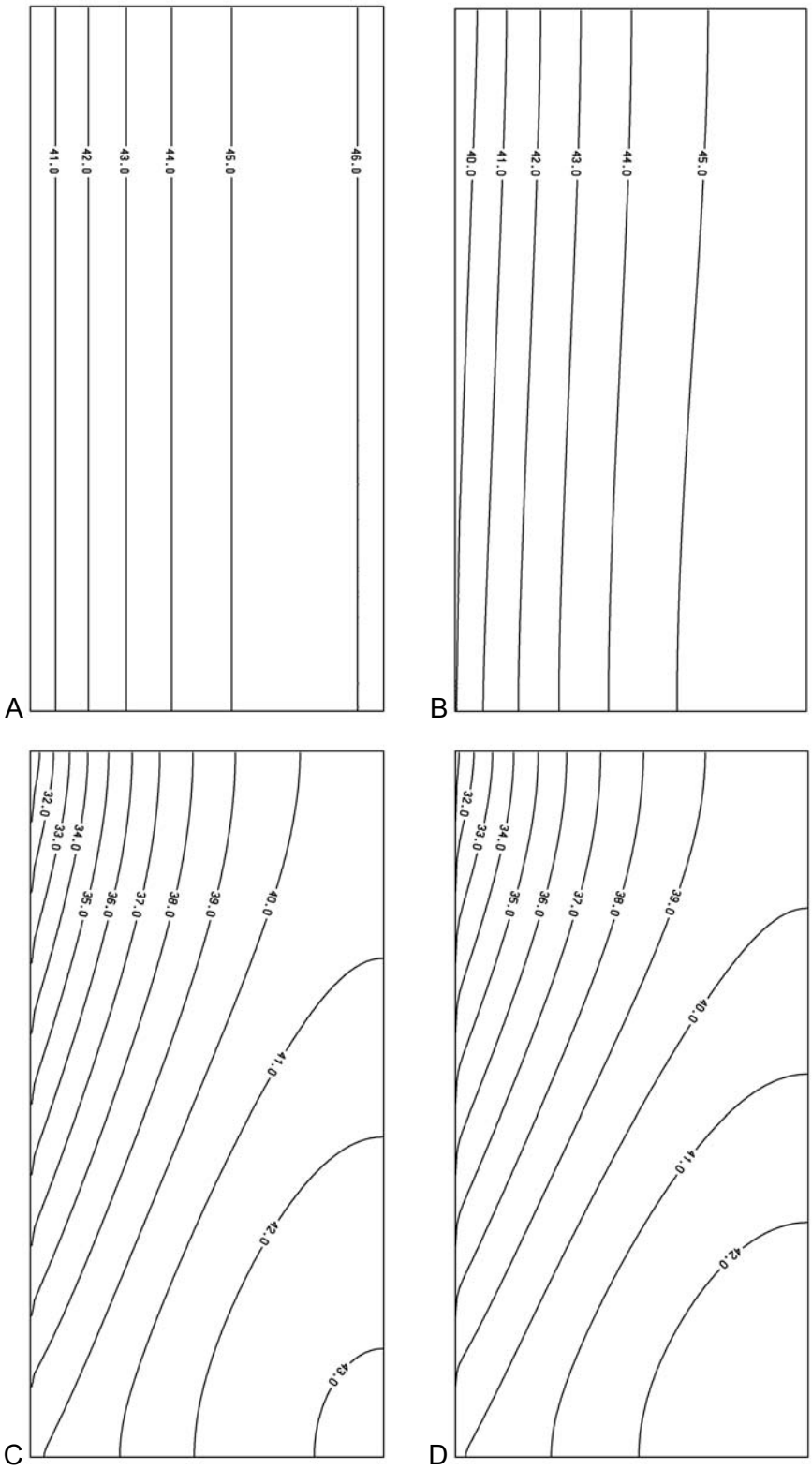
Gårdsbrønner er mindre utsatt til klimaendringer i forekomster med lite areal. De fleste brønnene burde tolerere et fall av grunnvannsstanden på noen få meter. Man må alltid ta hensyn til høyde forskjellen mellom grunnvannstanden og overflaten. En 6m dyp brønn i et området hvor grunnvannstanden ligger omtrent 2m under bakkenivå er mindre utsatt for klimaendringer enn om grunnvannstanden ligger 4m under bakkenivå.

2.3 Effekt av gradienten i elvevannsstanden (2 km x 4 km)

For å se på effekten en parameter har i simuleringene må de andre parameterne holdes homogene og konstante. Her kommer vi til å endre noen av de andre parameterne og se hvordan disse endringene påvirker simuleringsresultatene. I figur 13 har vi en rektangulær grunnvannsforekomst med dimensjoner 2km x 4km. Figur 13A viser likevektsforholdene for 400mm/år grunnvannsdannelse og når vannstanden i elven holdes konstant på 40m. Ellers har forekomsten en K-verdi lik 0,0001m/s og en mektighet på 40m. Resultatene er identiske med de simuleringene fra 2x2 km^2 forekomsten. Lengden av forekomsten påvirker ikke resultatene. La oss nå innføre mer realistiske betingelser for elven. I figur 13B antar vi at vannstanden i elven faller lineart 1m (fra 40m nederst til 39m øverst) mens i figur 13C og 13D faller det 10 m (fra 40m nederst til 30m øverst).

Figur 13B viser at til og med en liten endring i elvens vannstand vil endre strømningsforholdene i forekomsten. For en konstant og isotrop K-verdi er strømningen normal til grunnvannstands kotelinjer. I figur 13A er strømningen normal til elven, mens i figur 13B observerer man et liten avvik mot lavere vannstand i elven. Grunnvannstanden endrer seg ikke dramatisk. På det nederste del av forekomsten – hvor vannstanden i elven er ca. 40m – er grunnvannstanden noe lavere enn i figur 13A. På det øverste del – hvor vannstanden i elven er 39m – er grunnvannstanden relativt til vannstanden i eleven høyere enn i figur 13A (ca. 6.7m mot ca. 6.2m). Det magasinert volumet har ikke endret seg betraktelig heller fra $354{,}8 \cdot 10^6$ m^3 for 13A til $351{,}1 \cdot 10^6$ m^3 for 13B. Dette skyldes mektigheten av grunnvannsforekomsten.

Bunnen av forekomsten er antatt å ligge på et horisontalt plan med referansenivå 0 m. Dvs. at forekomsten har en mektighet 40m på den nederste delen av forekomsten og 39m på den øverste delen av forekomsten. Siden grunnvannstanden i figurene er også målt fra referansenivå, samsvarer denne mektigheten av forekomsten på målestedet.
Figurene 13C og 13D viser resultater når vannstanden i eleven faller 10m fra 40m (nederst) til 30m (øverst). Det er en ekstrem situasjon men interessant fordi den tydeliggjør effekten av vannstandsendringer.



Figur 13. Simuleringsresultater for en 2 km x 4 km grunnvannsforekomst. A. konstant vannstand i elven, B. 1m fall i elevens vannstand C. 10m fall i elvens vannstand, D. 10 m fall i elvens vannstand mens forekomstens mektighet holdes konstant på 40m.

Forskjellen mellom de to, ligger i måten bunnen av forekomsten er implementert. I figur 13C er bunnen horisontal på referansenivå 0.0m. I figur 13D ligger bunnen på et skråplan slik at den ligger på 0.0m på den nederste delen av forekomsten og -10.0m på den øverste delen. Grunnvannstanden er noe høyere i 13C enn i 13D men ikke betydelig høyere. Magasineringen fra den andre siden begynner å avvike mellom de 2 simuleringene.

Estimert total volum for 13C er $319{,}2 \cdot 10^6$ m^3 mens for 13D $354{,}6 \cdot 10^6$ m^3, et betydelig avvik men lett å forstå pga. de forskjellige mektigheter mellom de 2 simuleringene. Det er interessant at magasineringen for 13A og 13D har så liten avvik. Det tyder på at endringer i mektigheten styrer magasineringen mye mer enn endringer i vannstanden i elven.

Vannstanden i elven er behandlet i simuleringene som en langtidsgjennomsnittsverdi. De stedlige endringene i vannstanden har to effekter på forekomstens magasinering. De påvirker det vi har referert til hittil som minimums magasineringssone siden elvens vannstand brukes som referanse nivå for estimeringen av denne sonen, og de påvirker den klima avhengige magasineringssonen siden de endrer strømningsmønsteret i forekomsten. Det første nevnt vil ha en reduserende effekt på magasineringen mens det siste nevnt vil øke magasineringen. Vassdragstiltakk har en direkte effekt på elvens vannstand og dermed vil påvirke grunnvannstanden i forekomsten. En terskel for eksempel vil øke minimums magasin og redusere selvmattende sonen.

NVE har tidligere overvåket grunnvannstandsendringer som skyldes vassdragstiltak men formålet med overvåkingen var rettet mot å identifisere skadelige endringer i grunnvannspeilet. Effekten på strømningsforhold og magasinering ble ikke undersøkt. Disse forekomstene var ikke tilstrekelig undersøkt for å utføre strømningsanalyse og estimering av magasinvolum. Man kan foreta disse undersøkelsene i dag og utføre analysene om det er nødvendig.

2.4 Effekt av elveløpets geometri (2 km x 8 km)

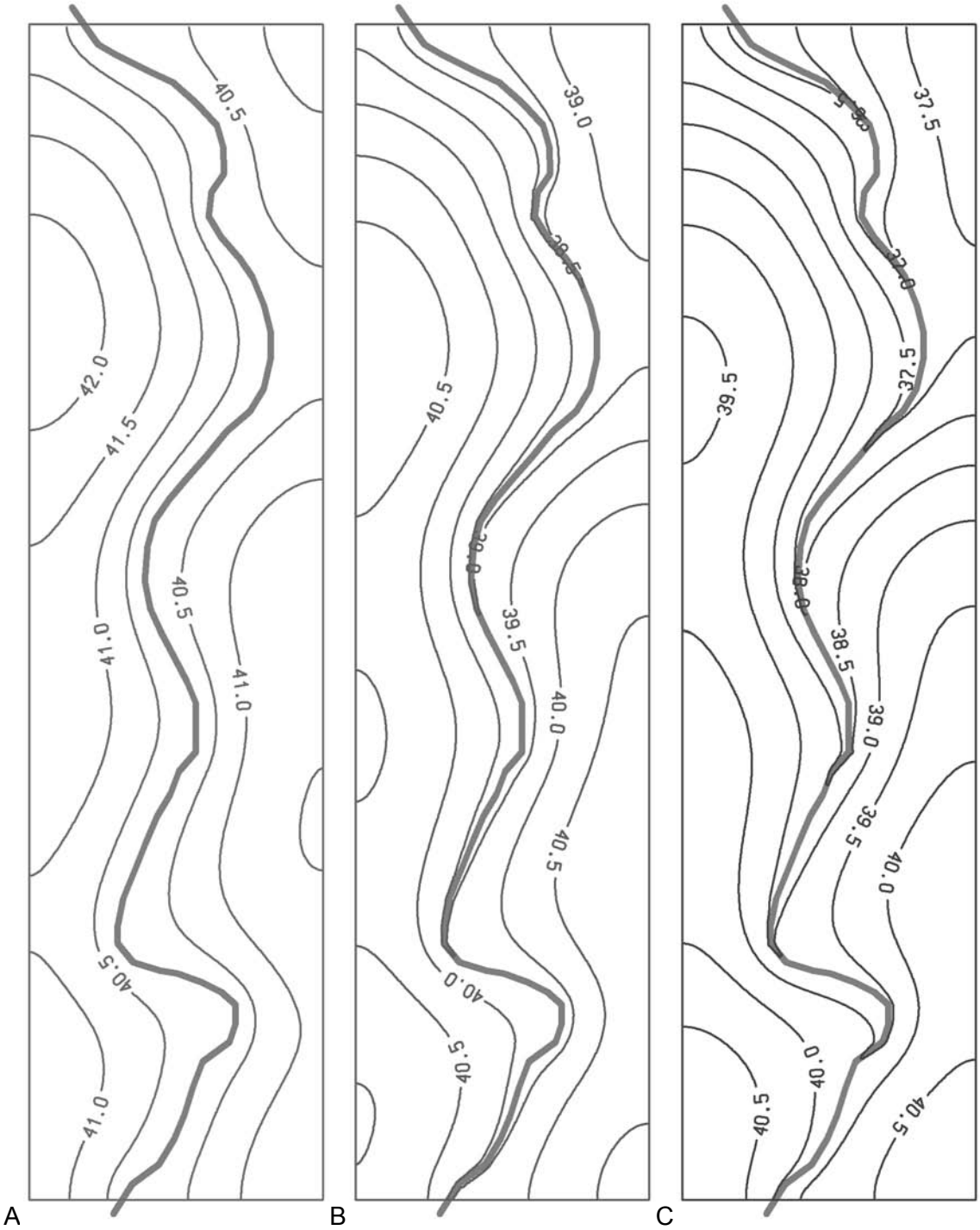
Neste steget i en mer realistisk simulering er å bygge opp en modell av en norsk dal. La oss anta en norsk dal med en lengde 8km og en bredde på 2km. En meandrerende elv strømmer gjennom dalen. Grunnvannsforekomsten har en mektighet 40m, K-verdi 0,0001m/s og 400mm/år grunnvannsdannelse. Likevektsresultatene vises i figur 14 hvor fra venstre til høyre vises (A) simulering med konstant vannstand i eleven (40m), (B) vannstanden i elven faller 2m, og (C) vannstanden faller 4m.

Generelt sett varierer grunnvannstanden på den samme måten som ble observert i forrige simuleringer. Høyeste grunnvannstand er observert for simulering A, minsker for B og minsker ytterligere for C. Akkurat som før kan man observere at endringene er ikke store, dvs. i forhold til den nærmeste vannstanden i elven. Grunnvannstands kotelinjer er subparallelle til elven i alle 3 simuleringene, og er ikke symmetriske i forhold til elven.

En meandrerende elv har ikke en slik effekt på store grunnvannsforekomster. I figur 15 simulerer vi en forekomst som er 12 km i bredden men ellers er helt lik simuleringen vist i figur 14A. Kotelinjene i figur 15 er parallelle til elvens hovedretning og effektene av elvens meandrering er jevnt ut. Grunnvannspeilet ivaretar en grov symmetri på begge sider av elven.

Norske forekomster er smale og dermed er sterkt påvirket av elvens geometri som vist i figur 14. Dette er en viktig kjennetegn for norske forekomster som øker forekomstens

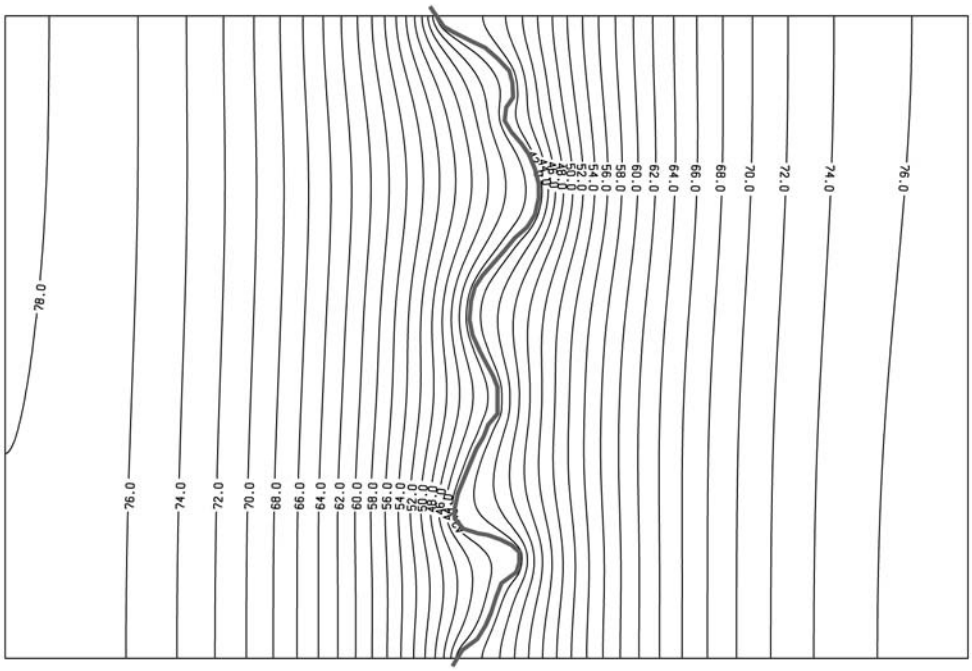
kompleksitet. Uttrykk som ”avstand fra elven” har ikke en klar mening for slike forekomster og vanlige regler for plassering av overvåkingsstasjoner er ikke gjeldende. NVE har tidligere plassert mange stasjoner i slike forekomster men nytteverdien av de innsamlede dataene pga. elvens meandrering er uklar.



Figur 14. Simuleringsresultater for en 2 km x 8 km grunnvannsforekomst. A. konstant vannstand i elven 40m. B. Vannstand i elven faller 2 m. C. Vannstand i elven faller 4 m.

Strømningsforholdene er kompliserte i slike forekomster ikke minst fordi i noen strekninger får elven vann fra grunnvannsforekomsten mens i andre strekninger det er elven som matter grunnvannsforekomsten.

Simuleringene inkluderer ikke brønner og dermed kan man med sikkerhet si at elven utgjør en hydraulisk barriere. Dette betyr at elven deler forekomsten i 2 forekomster – en på hver side av elven – som ikke påvirker hverandre. Fordelingen av grunnvannsdannelsen er ulik på de to forekomstene fordi de har ulike arealer og ulike geometrisk former. Med mindre elveløpet er linear og befinner seg omtrent i midten av dalen kommer grunnvannstanden til å fordele seg usymmetrisk på de to sidene av elven. Dette betyr at man kan ikke foreta en grunnvannsanalyse på den ene siden av dalen og forvente at resultatene kan brukes på den andre siden av elven også.



Figur 15. Simuleringsresultater for en 12 km x 8 km grunnvannsforekomst.

Bunnen i alle simuleringer i figur 14 ligger på horisontal plan med referansenivå 0.0m og dermed forventer man at magasineringen skal variere betraktelig i de tre simuleringene. Magasineringen for de tre simuleringene er $651{,}1 \cdot 10^6$ m^3, $634{,}3 \cdot 10^6$ m^3 og $617{,}6 \cdot 10^6$ m^3 tilsvarende.

Det er interessant å påpeke at for simulering 14A er minimums magasinering lik $640 \cdot 10^6$ m^3 (som er 2 km x 8 km x 40m) og dermed kun $11{,}1 \cdot 10^6$ m^3 skyldes grunnvanndannelse fra nedbør og snø som er kun 1,7 % av det totale volumet. For 14B og 14C kan vi beregne et minimums magasin lik $623 \cdot 10^6$ m^3 og $606 \cdot 10^6$ m^3 tilsvarende som betyr at grunnvannsdannelse påvirker kun 1,8 % og 1,9 % tilvarende av de totale ressursene. I dette tilfellet påvirker grunnvannsdannelse alle 3 simuleringene på omtrent samme måte.

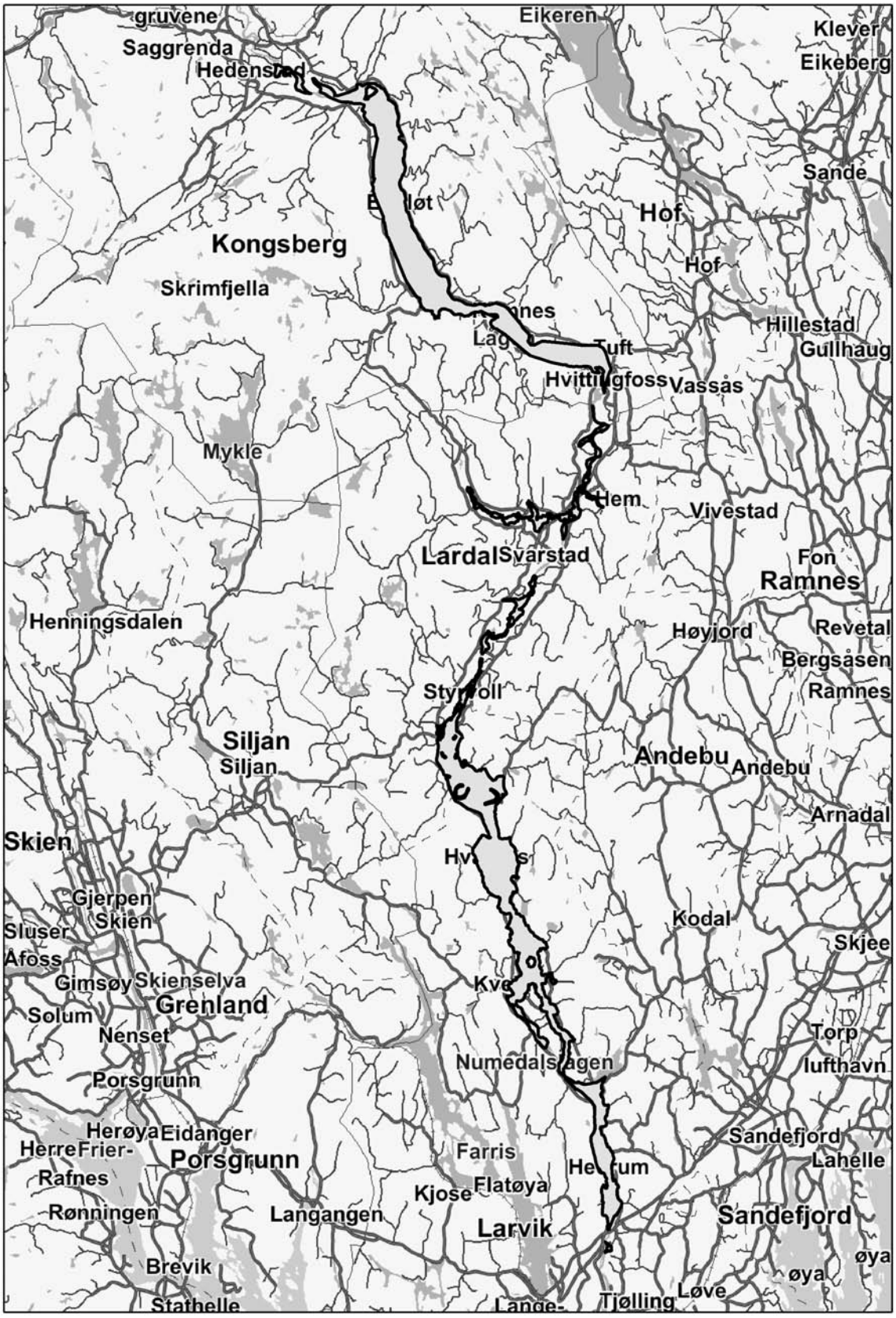
2.5 Enkel simulering av grunnvannsforekomsten ”Numedal 2”

En enda mer realistisk simulering kan oppnås ved å bruke tilgjengelige data fra implementering av EUs direktiv. Ca. 700 grunnvannsforekomster er definert i rammene av EUs direktiv og i de fleste tilfellene har man kun et begrenset datagrunnlag for disse. Grunnvannsforekomsten ”Numedal 2” ble valgt ut (figur 16) fordi den har mange ”typisk norsk” egenskaper. Forekomsten har et areal litt over 60 km^2 og inneholder flere polygoner (minst 8) som man kan se i figur 16. Grunnvannsdannelse varierer fra 650 mm/år i de nordligste områdene til 440 mm/år i de sørligste områdene (fra Beldring et al., 2002) med et gjennomsnitt for hele forekomsten lik 540 mm/år som ble beregnet av NVEs KartUlf program. Siden forekomsten er delt opp i flere polygoner burde man kanskje beregne gjennomsnittlig grunnvannsdannelse for hver polygon spesielt siden variasjonen av grunnvannsdannelse er så stor fra nord til syd.

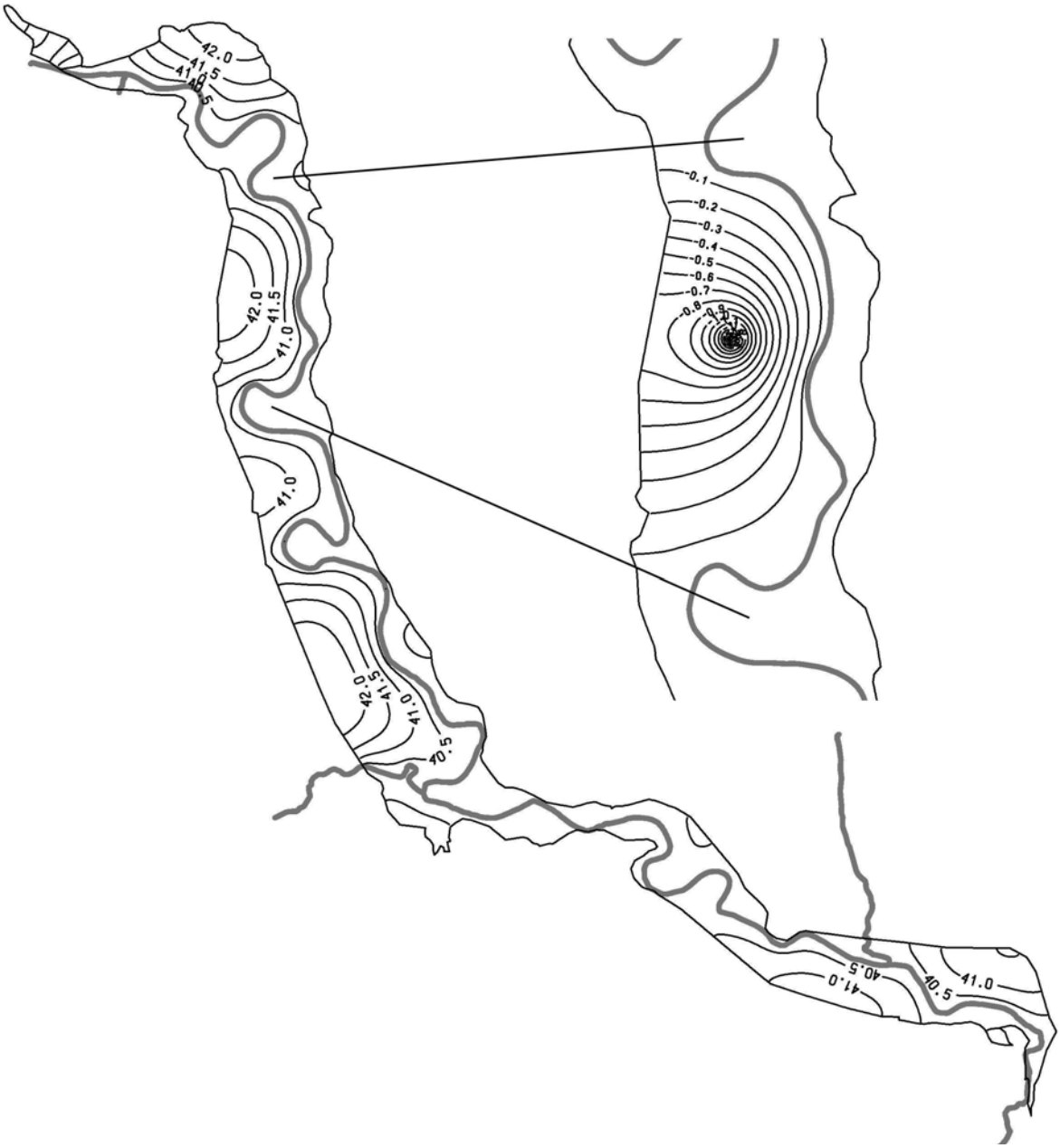
Man kan også observere noen hulrom i figuren som ser ut til å representere gamle elveløp. De er muligens fjernet fordi de er overdekket av leiere (!?) På det bredeste er forekomsten i overkanten av 2 km og på det trangeste mindre enn 200 m, og har en totallengde på ca. 50 km. Om man skal simulere grunnvannsforholdene i grunnvannsforekomsten Numedal 2 må man simulere hver polygon for seg. De er tross alt atskilte enheter uten hydraulisk kommunikasjon mellom dem. Man er nødd i så fall til å spørre hvorfor er ikke disse enhetene definert som fullstendige grunnvannsforekomster eller hvorfor er det hensiktsmessig å definere en grunnvannsforekomst som har flere atskilte enheter.

Vi skal simulere kun et polygon og for dette formålet ble den nordligste polygonen valgt ut. Ingen hydrogeologisk informasjon er tilgjengelig for forekomsten ved siden av at det betraktes som en viktig drikkevannskilde og dermed ble den inkludert i EUs direktivet. Ved siden av polygonenes geometrisk form er man nødd til å anta alle de andre parametere. Vi velger å bruke parameterverdier typiske for norske forekomster. En mektighet på 40m og en K-verdi lik 0,0001m/s er antatt. For den nordligste polygonen en gjennomsnittsverdi for grunnvannsdannelse lik 550 mm/år ser ut til å være mer passende. Elvens geometri kjenner vi fra kartet men ikke vannstanden. La oss anta som en begynnelse en konstant vannstand på 40m, ikke minst for at resultatene kan være sammenlignbare med foregående simuleringsresultater.

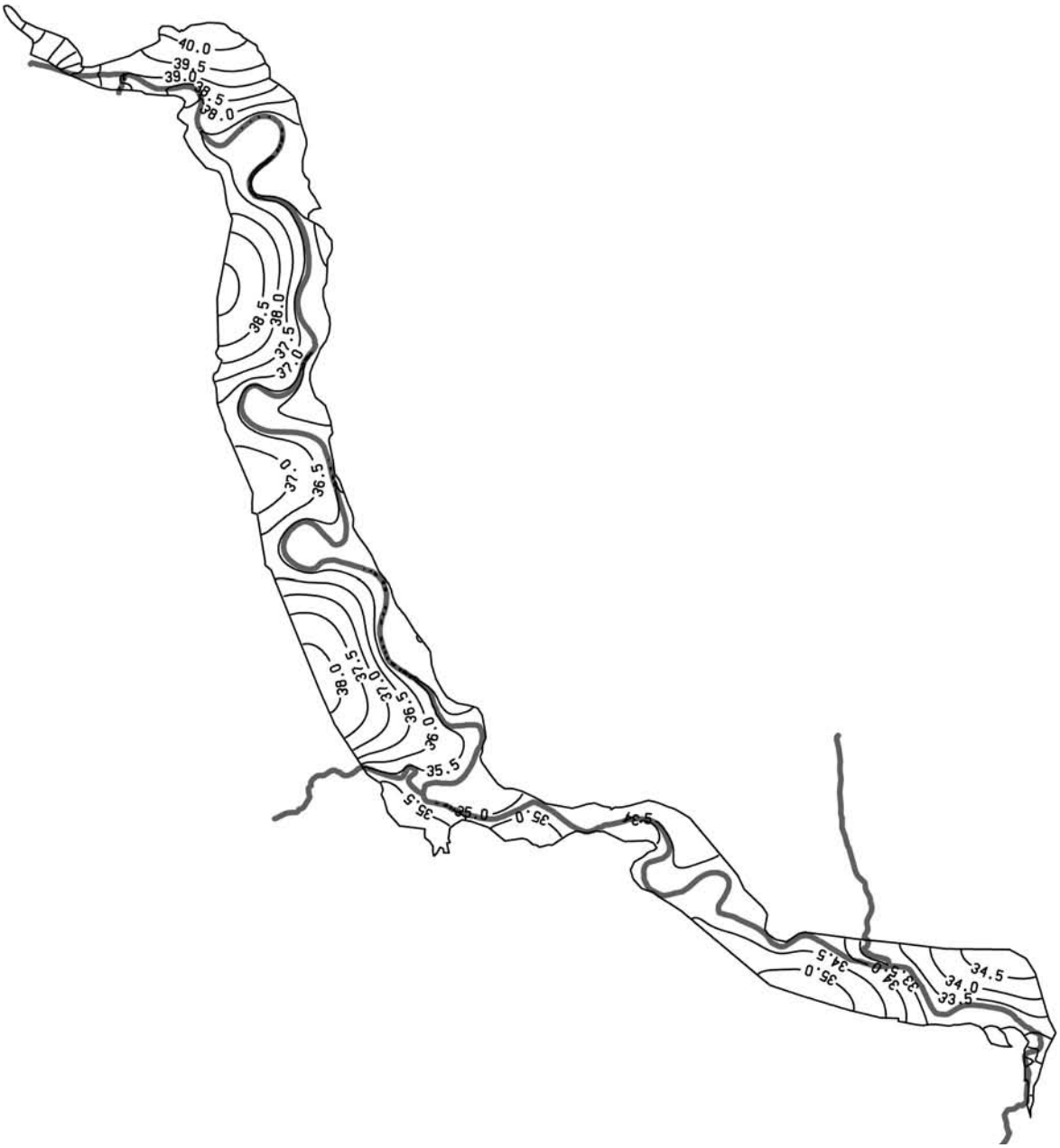
Resultatene vises i figur 17 og de gjenspeiler resultatene fra tidligere simuleringer. Grunnvannspeilet får verdier som er litt over 42.0 m som passer bra med forekomstens bredde. Elvens meandrerende form har en interessant effekt som vi har ikke sett i tidligere simuleringer. Elven svinger så mye at den kan brukes til å dele opp forekomsten i mindre enheter. På høyre siden i figur 17 vises influensområdet av en brønn med uttak lik 1000m^3/døgn. Influensområdet er begrenset til en liten del av forekomsten hvor brønnen befinner seg i. Resten av forekomsten er ikke påvirket av brønnen noe som illustrerer at området rundt brønnen er tilstrekelig hydraulisk isolert fra resten av forekomsten til å skilles ut som en selvstendig enhet.



Figur 16. Beliggenhet av grunnvannsforekomst Numedal 2 slik den er definert i NVEs database for implementering av EUs rammedirektiv for vannressurser.



Figur 17. Simuleringsresultater for den nordligste enheten av Numedal 2. Vannstanden i Numedalslågen er antatt til å være konstant og lik 40m. Mektigheten av løsmassene er antatt å være 40m. På høyre siden ser vi influensområdet av en brønn med et uttak 1000m^3/døgn.



Figur 18. Simuleringsresultater for den nordligste enheten av Numedal 2. Vannstanden i Numedalslågen er antatt til å falle fra 40 til 30m på en ikke linear måte. Bunnen av forekomsten ligger på horisontalt plan på referanse nivå 0.0m

I figur 18 vises resultatene for den samme grunnvannsforekomsten men i dette tilfellet har vi endret vannstanden i elven. For å begynne med prøvde vi å innføre en linear fordeling av vannstanden fra 40m øverst til 30m nederst men pga elvens meandrering fungerte dette dårlig. I stedet har vi endret vannstanden fra 40m til 30 m men en ikke linear foredelingen ble brukt for å løse meandreringsproblemene (nedstrømsdeler fikk høyere vannstand enn oppstrømsdeler).

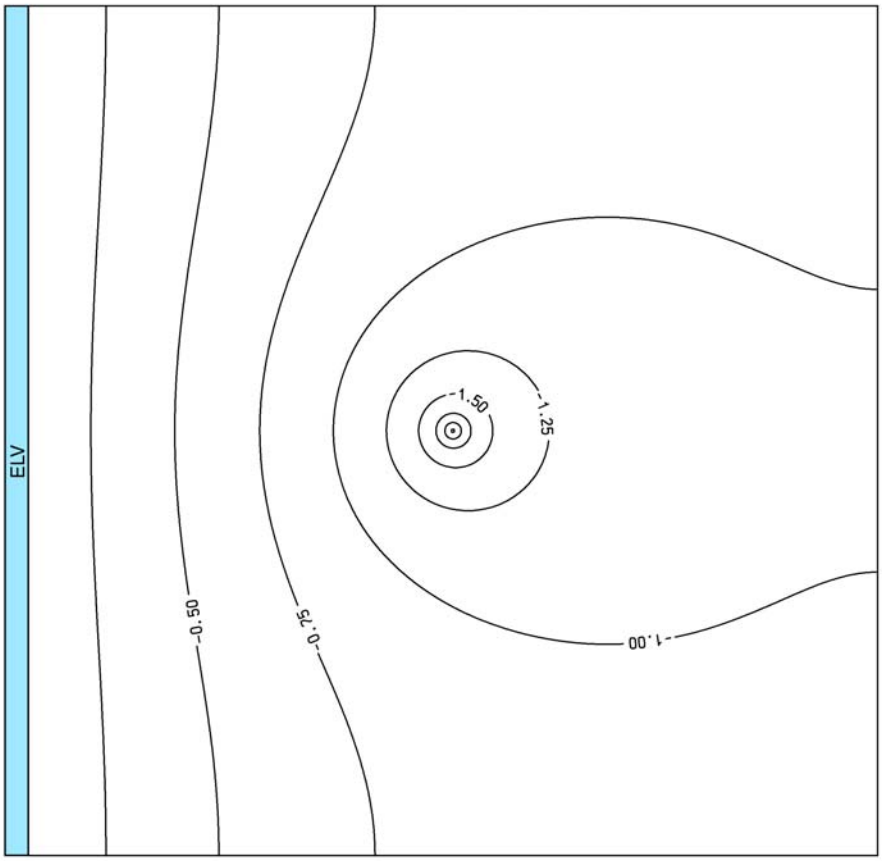
Grunnvannspeilet har tilpasset seg vannstanden i elven men ellers er resultatene det vi forventer å få. Igjen observerer vi at elven kan brukes til å dele opp forekomsten i mindre enheter.

Muligheten til å dele en grunnvannsforekomst i mindre enheter er viktig fordi om det er behov å analyse påvirkningene av en brønn for eksempel, man trenger ikke nødvendigvis foreta en analyse av hele forekomsten men man kan analysere kun den delen som brønnen befinner seg i.

3 Brønner (del 2)

Problemene som vi skal se nærmere på i dette kapitelet er knyttet til brønner. Brønner kan karakteriseres via sine dimensjoner (dybde, diameter, filterlengde osv.) men også ved å se på hvordan de påvirker og blir påvirket av grunnvannsforekomsten de er etablert i. I så fall snakker man om brønnens influensområde, forsyningsområde, kapasitet og uttaksgrense.

Hydrogeologisk tradisjon krever at man først karakteriserer en brønn i forhold til de geometriske dimensjonene den har. En brønn er ”perfect” om den er dyp nok til å nå bunnen av grunnvannsforekomsten og brønnens filter dekker hele den våte lengden av brønnen. Konseptet om en ”perfect” brønn stammer fra de første analytiske likningene som ble brukt for brønner hvor antagelsen om en ”perfect” brønn ble innført. De fleste brønner tilfredsstiller ikke antagelsene for ”perfect” brønner. Nyere likninger kan korrigere for dette, men det er mange hydrogeologer som bruker gamle (klassiske) likninger for ikke perfekte brønner også.



Figur 19. Influensområdet av en brønn med uttak 1000m^3/ døgn i en 4 km x 4 km forekomst med mektighet 40m og hydraulisk ledningsevne lik 0,0001m/s. Forekomsten er i hydraulisk kontakt med en elv på venstre randen av forekomsten med en konstant vannstand lik 40m.

3.1 Influensområdet

Det er utviklet flere likninger for å bestemme en brønns influensområdet. Figur 19 viser influensområdet av en brønn som ligger i midten av en 4km x 4km grunnvannsforekomst med en k-verdi lik 0,0001m/s en mektighet på 40m og en grunnvannsdannelse på 400mm/år med uttak 1000m^3/døgn. Figur 19 er et resultat fra en sammensetning av to likevektløsninger. En som gir oss grunnvannsspeilet i naturlig tilstand og en som gir oss grunnvannspeilet med brønn. Differanse mellom de to løsninger gir oss influensområdet. Som man observerer i figur 19 er hele forekomsten påvirket av uttaket.

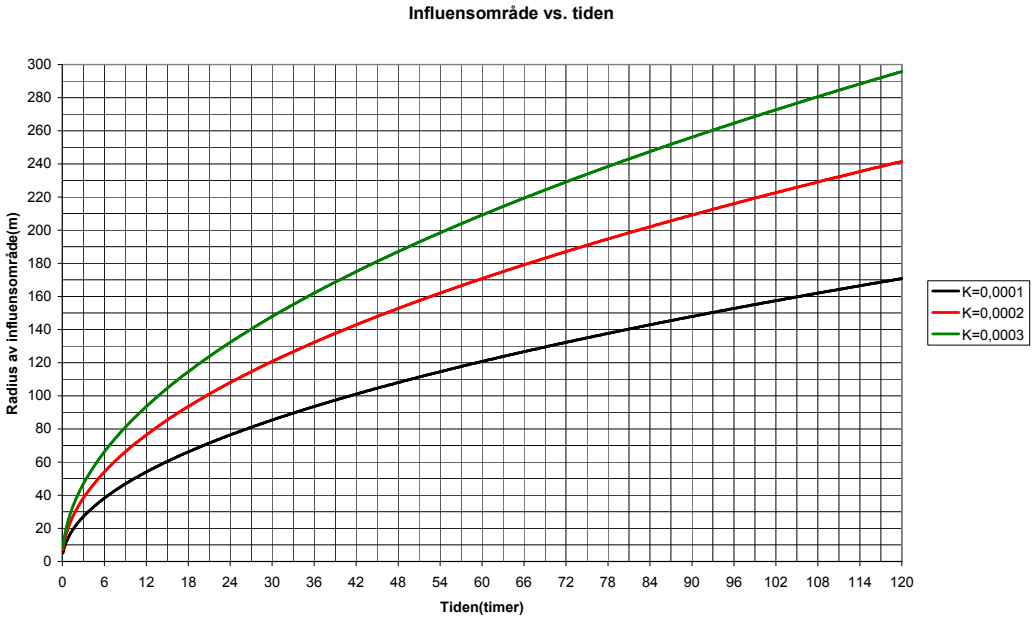
Influensområdet er viktig kun når man planlegger å etablere flere brønner i forekomsten. For å gi et eksempel på dette la oss anta at vi planlegger å etablere en brønn til i området vist i figur 19 med et like stor uttak som den gamle brønnen, og praktiske årsaker krever at den nye brønnen er så nær som mulig til den gamle brønnen. Hydrogeologer bruker superposisjonsprinsippet – selv om den ikke er alltid gjeldende – for å addere effektene av influensområder.

La oss illustrere dette med et eksempel. Vi vil gjerne etablere en brønn ca. 100m fra den brønnen som vises i figur 19. I starten er begge brønner inaktive og grunnvannstanden ligger på normalt nivå. Når den gamle brønnen aktiveres merker man at vannstanden i den nye brønnen begynner å falle og etter hvert stabiliserer seg ca. 2m fra normalt nivå. Det samme er observert når den nye brønnen er i bruk og den gamle er inaktiv. Når en brønn er aktiv kommer vannstanden i brønnen til å sinke betydelig. Vannstanden i brønnen er avhengig av mange parametere og vanskelig å estimere. La oss anta at vi har målt den og er lik 6m under normalt nivå. Når begge brønner er aktive kan man bruke superposisjonsprinssipet til å finne ut vannstanden i brønnene. Vannstanden skal synke til 6m pga brønnenes normal drift og ytterligere 2m pga. effektene fra den andre brønnen. Dvs. man skal få en total senking på 8m fra normalt nivå i hver brønn. Dette er en teoretisk estimat som har mist to problemer. Brønnene må fortsette å ta ut 1000m^3/døgn noe som er ikke sikkert siden uttaket er påvirket av vannstandsendringene i brønnene. Superposisjonsprissipet gjelder faktisk ikke for åpne grunnvannforekomster fordi likningene ikke er lineare slik de er for lukkede forekomster. Til tross for disse problemene antar man at de vil ha liten effekt på resultatene og dermed er superposisjonsprinssipet gjeldende og at man kan justere uttaket fra brønnene til å motvirke effektene fra vannstadsendringene. Det er mulig å redusere effektene brønnene har på hverandre ved å etablere en tidsplan for utpumpingen. Man kan for eksempel bruke de 2 brønnene slik at det dannes et minimalt influensområde. Basert på Jacobs brønnlikning kan man estimere at influensområdet utvider seg med tiden i forhold til likningen

$$R = 1{,}5\sqrt{\alpha \cdot t}$$

R = radius av influensområdet
α = hydraulisk diffusivitet (α =T/S)
t = tiden
I figur 20 har vi brukt Jacobs likningen for å estimere forholdet mellom influensområdet og tiden for 3 forskjellige K-verdier. Figuren viser at influensområdet utvider seg saktere med tiden.

For å beregne den hydrauliske diffusiviteten har vi i tillegg til K-verdier brukt en mektighet lik 60m og en porøsitet lik 0,2. Grunnen at vi har brukt en mektighet lik 60m som er den høyeste observert i forekomsten er for å overestimere forekomstens diffusivitet og få forekomten til å reagere rask på endringer. På denne måten er tidsestimatene fra Jacobs likning underestimert. Resultatene i figuren forteller oss at for K=0,0001m/s tar det 10 timer for influensområdet å utvide seg til en radius 50m fra brønnen. For 2 brønner som ligger 100m fra hverandre kan man dermed sette opp et tidsplan for utpumping slik at man pumper 10 timer fra den ene brønnen og deretter 10 timer fra den andre. En slik plan sikrer at intet influensområde kan utvikles i området. Grunnvannstanden vil selvfølgelig senke seg i forekomsten men endringene er spredd ut over et mye større området og har en betydelig mindre effekt på grunnvannstanden i nærhet av brønnene. Fra figur 20 kan man også se at en 3 timers tidsplan vil tillate brønnene å være 50m fra hverandre.



Figur 20. Jacobs likning for utvidelse av influensområdet med tiden for 3 forskjellige hydraulisk ledningsevne verdier. (Nederste kurve for K = 0,0001, øverste kurve for K = 0,0003)

I prinsippet kan man bruke Jacobs likning eller andre tilsvarende likninger som er i stand til å ta bedre hensyn til de aktuelle forholdene i forekomsten, for flere brønner. Jacobs likning tar ikke hensyn til uttaksmengde fordi det er forekomstens reaksjonsevne som er viktig. Men om man behøver å ta hensyn til flere andre forhold er det vanlig å utføre en SIMPLEX analyse for å optimalisere forholdet mellom uttaket fra brønnene og omfanget av influensområdet.

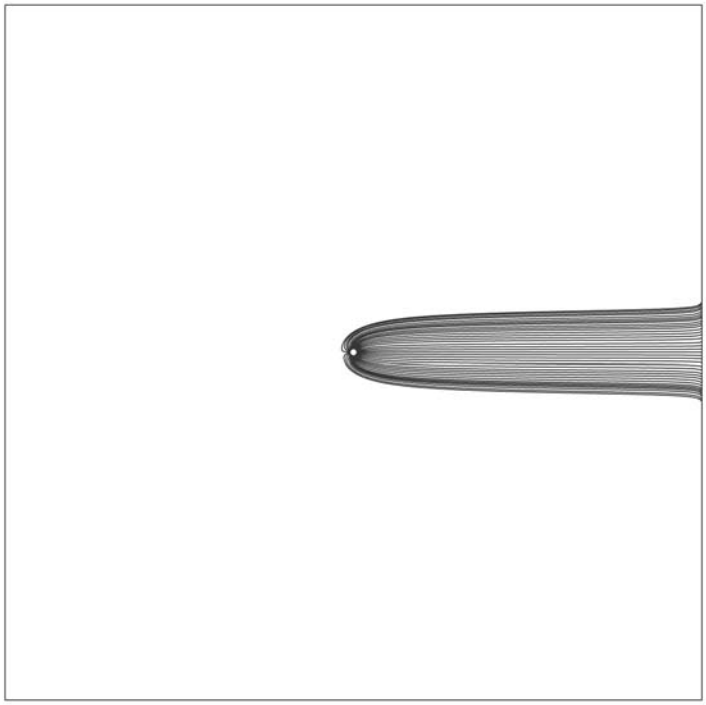
Det er viktig å forstå at influensområdet har ikke noe å gjøre med forsyningsområdet som vi skal snakke om i neste paragraf. Brønner som er nær hverandre tar ikke vann fra hverandre men gjør det vanskeligere å få en optimal produksjon fra pumpene, som må jobbe hardere for å få grunnvannet som pga påvirkningene ligger på et lavere nivå enn før.

Influens- og forsyningsområder er ofte betraktet som like fordi i antagelsene som ligger i utviklingen av de klassiske brønnlikningene – Jacob likningen, Theis likningen, osv – er de to områdene faktisk like. I virkeligheten er slike antagelser sjelden gjeldende.

3.2 Forsyningsområdet

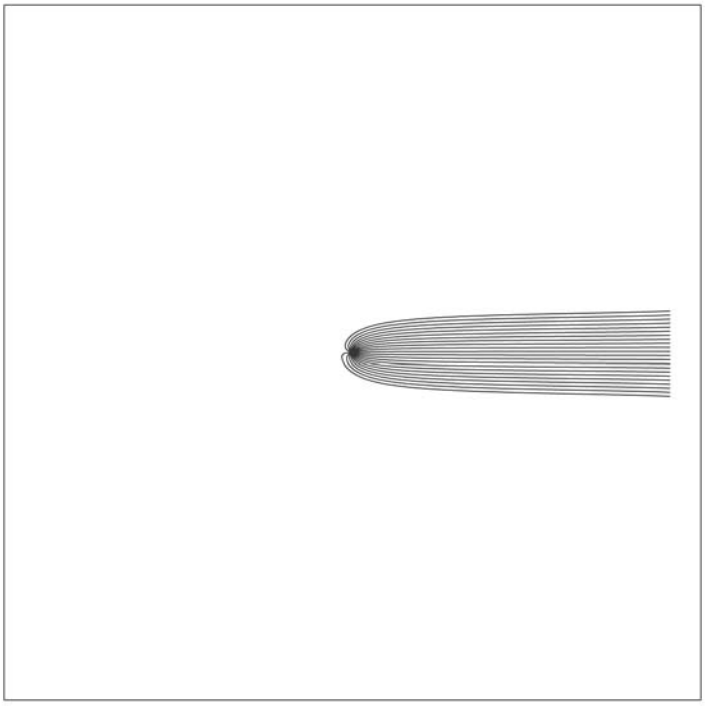
I influensområdet er man opptatt av hvordan grunnvannspeilet endrer seg pga. et brønnuttak, mens i forsyningsområdet er man opptatt av hvor vannet kommer fra som pumpes ut av brønnen. I figur 21 ser vi forsyningsområdet til brønnen fra figur 19. Tre forskjellige måter å beregne forsyningsområdet på er presentert i figuren. Forsyningsområdet er definert ved å bruke strømningslinjer. Strømningslinjer er definert ved å bruke grunnvannsmodellen til å definere grunnvannets hastighetsfelt. For hvert element i gridet beregnes retningen og størrelsen av grunnvannets hastighet. Hastighetsfeltet er brukt i en karakteristisk linje algoritme for å definere strømningslinjer. FEFLOW bruker en 4. ordens Runge-Kutta algoritme på hastighetsfeltet for å definere en strømningslinje. Man velger et startpunkt (eller sluttpunkt) for strømningslinjen og algoritmen beregner seg frem til hele linjen. FEFLOW har 3 måter å definere startpunkter (eller sluttpunkter) for strømningslinjer. Man kan velge enkelte punkter, man kan velge en brønn, eller man kan velge en linear segment (egentlig en polyline). Når man velger en brønn må man angi antall punkter og en radius. FEFLOW fordeler de antall punktene på en sirkel med den angitte radiusen og disse punktene brukes videre som sluttpunkter for Runge-Kutta algoritmen. For det lineare segmentet kreves kun definisjon av segmentet og antall punkter som skal fordeles over segmentet. FEFLOW som bruker den endelige elementsmetoden for å løse grunnvannslikningene estimerer en konstant hastighet for hvert trekantselement i det nummeriske gridet. Dette produserte hakete strømningslinjer og skapte numerisk dispersjon for simuleringer av forurensingstransport. Fra ca. 1995 ble utjevningsalgoritmer implementert i de fleste kommersielle grunnvannsmodellene som bruker den endelige elementsmetoden (FEFLOW inkludert) for å få en ”kontinuerlig” hastighetsfelt. Dette har økt kvaliteten av strømningslinjer som modellene kan produsere betraktelig.

Hvis man må angi en definisjon av forsyningsområdet da må man definere det som forekomstens området, areal eller sone på ytregrensen hvor alle punktene har som egenskap at om de brukes som startpunkter for strømningslinjene, vil strømningslinjene komme frem til brønnen. Det som er viktig for definisjonen av et forsyningsområde er ikke selve strømningslinjene men sine startpunkter. I en selvmattende grunnvannsforekomst burde alle startpunkter ligger på forekomstens øverste grense (som for de fleste norske forekomster er egentlig grunnvannspeilet) og brukes til å definere et nedbørareal. For en grunnvannsforekomst som er matet fra en elv må forsyningsområdet inkludere en del av kontaktsonen mellom forekomsten og elven. Får forekomsten vann fra fjellsidene eller en annen grunnvannsforekomst den er i hydraulisk kontakt med må forsyningsområdet inkludere disse kontaktsoner/arealer. Det eneste som man kan si med sikkerhet er at forsyningsområdet befinner seg på forekomstens tre dimensjonale ytregrenser (øverstegrense/grunnvannspeilet, bunnen, sidene).



A

B

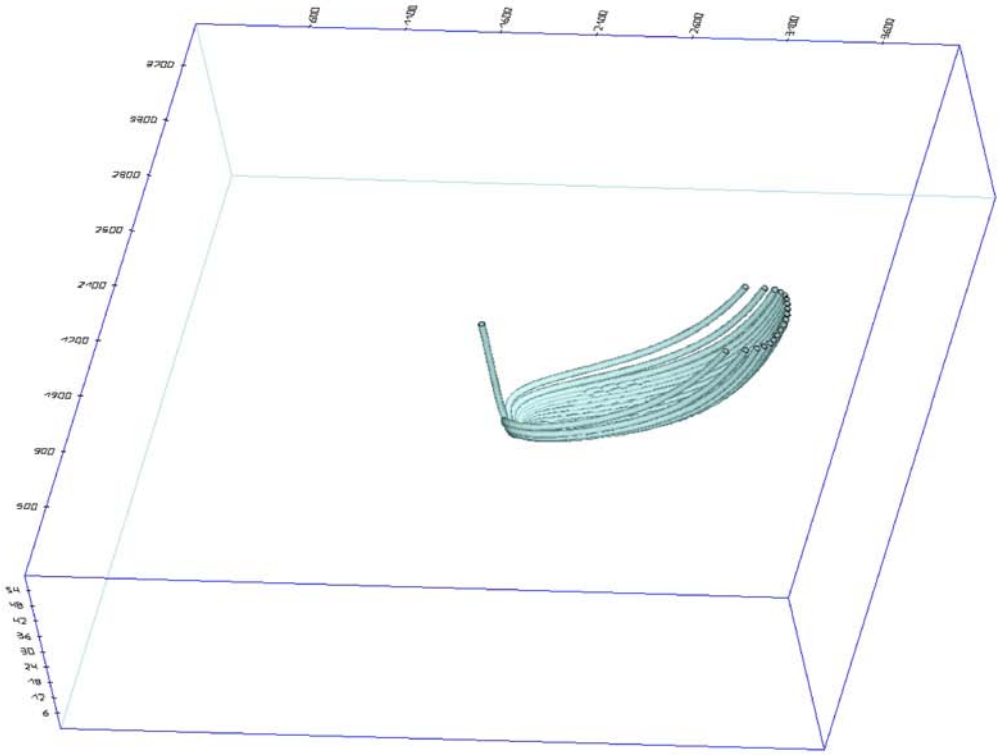


C

Figur 21. Forsyningsområdet av en brønn med uttak 1000m^3/ døgn i en 4 km x 4 km forekomst med mektighet 40m og hydraulisk ledningsevne lik 0,0001m/s. Forekomsten er i hydraulisk kontakt med en elv på venstre randen av forekomsten med en konstant vannstand lik 40m. A. To dimensjonal, B. Tre dimensjonal i forhold til brønnen, C. Tre dimensjonal i forhold til lineart segment.

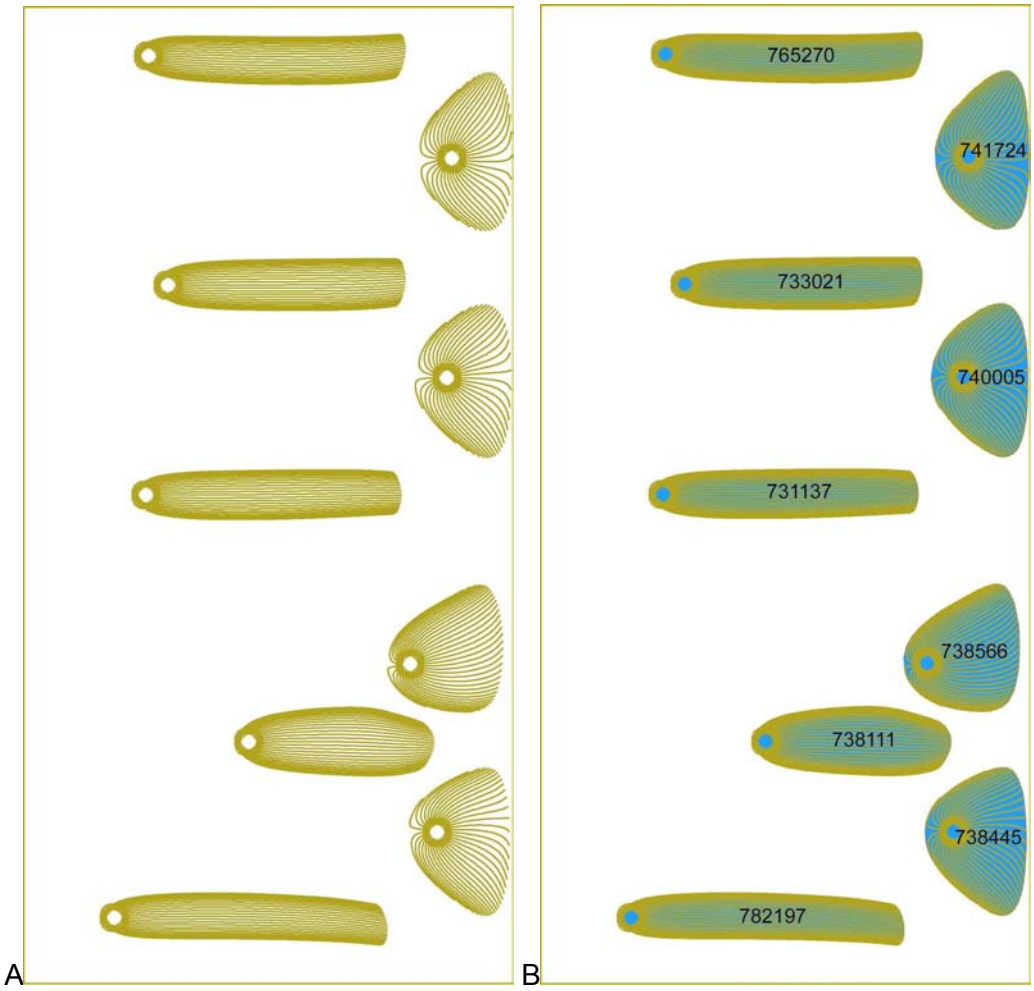
Figur 21A viser strømningslinjer definert fra brønnen i en 2 dimensjonal likevektsløsning. I to dimensjoner er strømning begrenset til XY planet og er kun horisontal. Strømningslinjene definert fra sluttpunktene ved brønnen starter alle sammen fra forekomstens sidegrense. Horisontale strømningslinjer kan ikke starte verken fra overflategrensen heller bunnen av forekomsten, fordi disse grensene ikke er definert i en to dimensjonal grunnvannsmodell. Figuren viser dermed at forsyningsområdet er en liten kontakt sone på høyre sidegrensen av forekomsten. Til tross for det er det vanlig praksis å bruke slike strømningslinjeresultater for å definere et forsyningsområde som inkluderer hele overflatearealet som indikeres av strømningslinjene, spesielt om man vet at den simulerte forekomsten er selvmattende. Problemet er i slike tilfeller er at den indikerte forsyningssonen på sidegrensen er fiktiv. Man må være forsiktig ved å bruke to dimensjonale modeller for slike beregninger. Figur 21B viser strømningslinjer som slutter ved brønnen (akkurat som i figur 21A) men starter omtrent halvveis mellom brønnen og forekomstens høyere sidegrense. I dette tilfellet har vi en 3 dimensjonal simulering og strømningslinjer starter fra forekoms1tens øverste grense nemlig grunnvannspeilet. En tre dimensjonal presentasjon av disse strømningslinjene er vist i figur 22. Det er ofte at man bruker en slik 3D brønnbasert strømningsanalyse for å definere forsyningsområdet men det er dessverre en feil måte å gjøre det på. Grunnen til dette er at startpunktene burde være fordel over en sfære rundt brønnen for å kunne definere forsyningsområdet, men siden de ligger på en sirkel på et horisontalt plan, fanger man ikke alle strømningslinjer som kommer til brønnen.

Et eksempel som illustrerer dette problemet er strømningslinjene i figur 21C. Et lineart segment er definert i nærhet av forekomstens høyre rand på grunnvannspeilets nivå. Strømningslinjene fra segmentet når brønnen til tross for at segmentet ligger utenfor området definert i figur 21B.

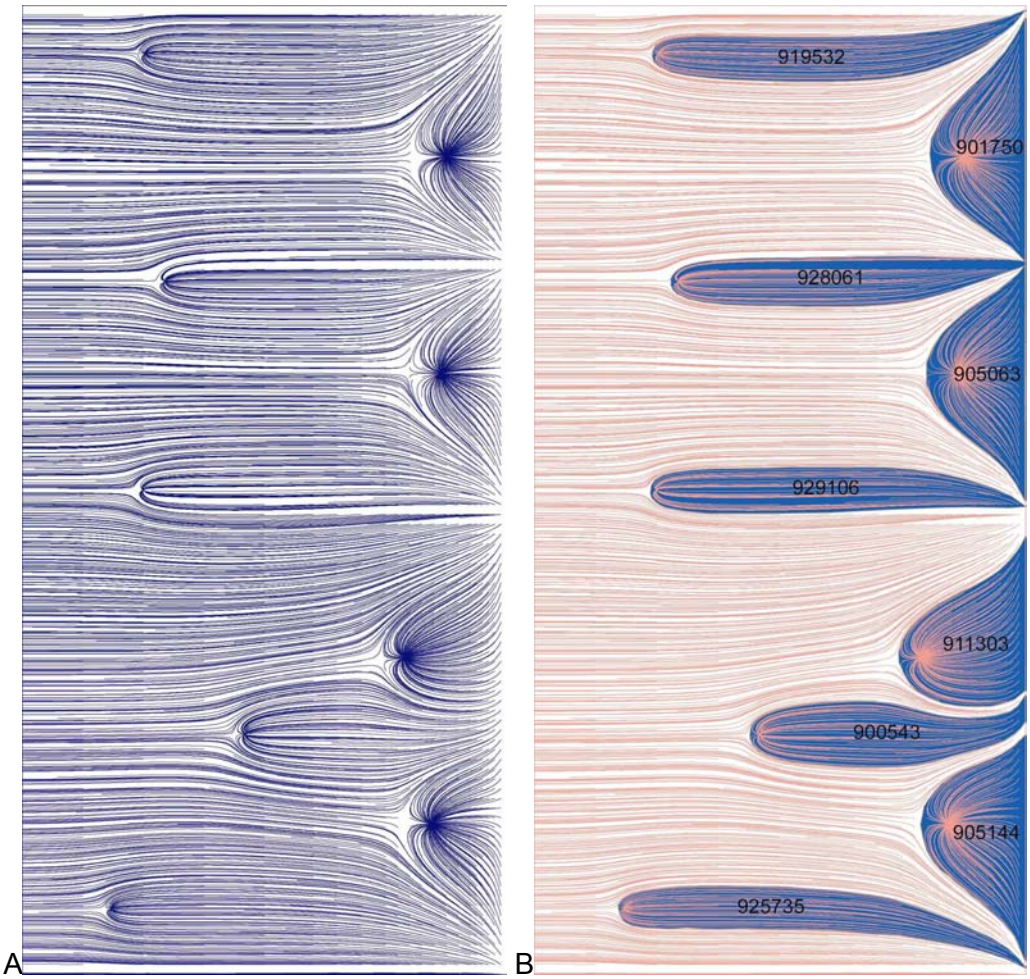


Figur 22. Tre dimensjonal presentasjon av strømningslinjer som tilsvarer den to dimensjonale presentasjonen vist i figur 21B.

Forsyningsområdet brukes til å sette beskyttelsessoner for en brønn som brukes til drikkevannsforsyning. Strømningslinjer er ikke nødvendigvis den beste måte å definere en slik sone til tross for at det er vannlig praksis å bruke dem for et slik formål. Det er mulig for forurensninger som ligger utenfor denne sonen å komme frem til brønnen via dispersjonsprosesser. En transport modell for forurensninger burde i så fall knyttes til en grunnvannsmodell for å definere beskyttelsessoner.



Figur 23. Forsyningsområder for mange brønner ved bruk av brønnbaserte strømningslinjer. A. Strømningslinjer definert for hver brønn (FEFLOWs brønnmetode). B. Forsyningsområdet definert fra strømningslinjene for hver brønn med tilhørende areal.



Figur 24. Forsyningsområder for mange brønner ved bruk av strømningslinjer definert via lineare segmenter. A. Strømningslinjer definert med FEFLOWs segmentmetode. B. Forsyningsområdet for hver brønn definert fra strømningslinjene med tilhørende areal.

3.2.1 Flere brønner

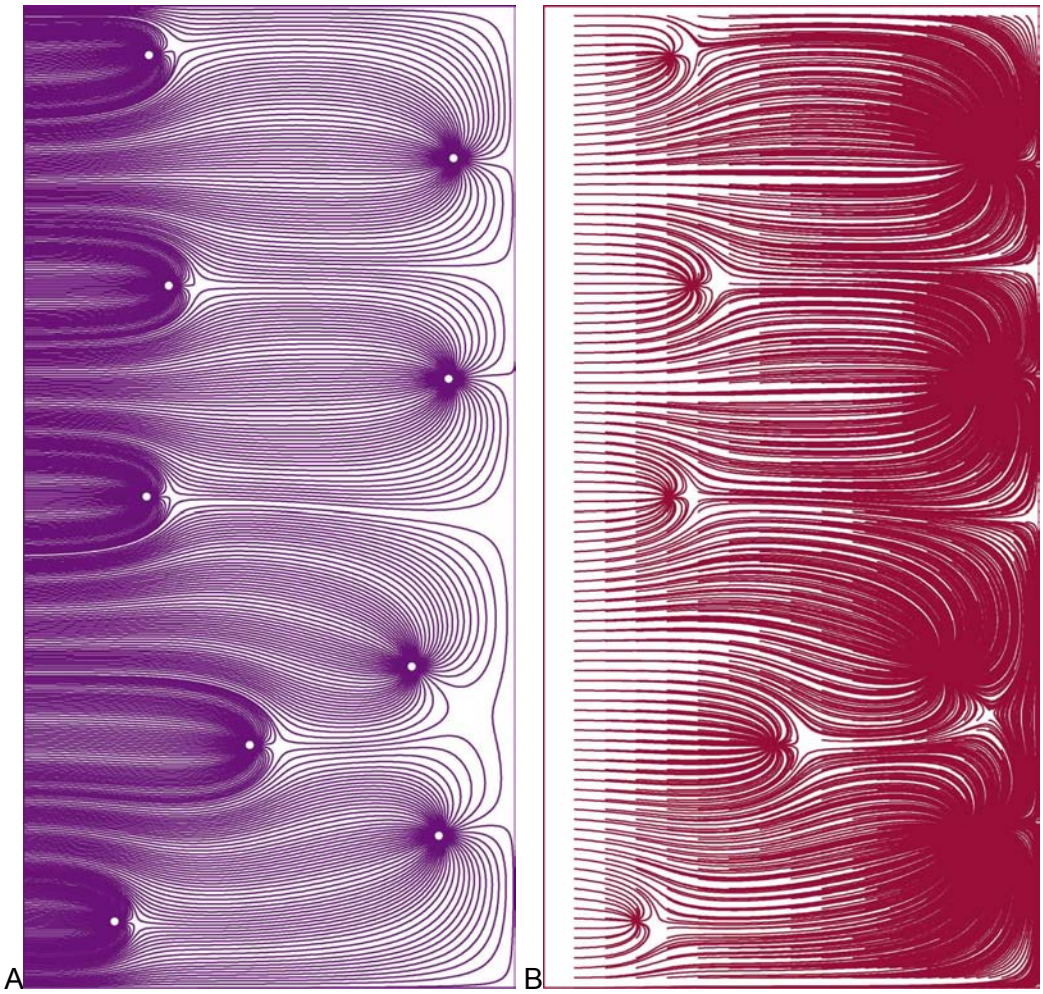
Det er viktig å ta et eksempel hvor flere brønner er etablert i samme grunnvannsforekomst for å observere effekten brønnene har på hverandre.

I figur 23 vises en forekomst med dimensjoner 4 km x 8 km, mektighet 40m, K-verdi 0,0001m/s og grunnvannsdannelse 400mm/år. I forekomsten har vi definert 9 brønner som tar ut 1000m^3/døgn hver. I figur 23A har vi definert strømningslinjer i forhold til brønnene. Hvis disse strømningslinjene definerer forsyningsområdet for hver brønn da burde arealet til hvert forsyningsområde ganget med grunnvannsdannelse gir oss brønnens uttak. Dvs. man burde ha en vannbalanse mellom forsyningsområdet og uttaket fra brønnen. Det er lett å beregne at forsyningsområdet burde ha et areal lik (1000·365):0,4= 912500m^2. I figur 23B har vi definert polygoner for hvert brønns forsyningsområde basert på resultatene i figur 23A og ser at vi har en betydelig undervurdering av arealet for alle brønnene (14 % - 20 % mindre)

I figur 24 vises den samme grunnvannsforekomsten med de 9 brønnene men vi har benyttet lineare segmenter for å definere strømningslinjene. I figur 24A ble 20 lineare

segmenter med 100 punkter hver, brukt for å danne et bilde av totalt 2000 strømningslinjer. Deretter har vi prøvd å definere forsyningsområdet for hver brønn basert på resultatene fra figur 24A i figur 24B. Det var vanskelig å få nøyaktige grenser på forsyningsområdene med denne metoden, men som resultatene i figur 24B viser er disse estimatene nærmere til det forventede arealet. Feilene er i alle fall mindre enn de vi fikk ved bruk av brønnbasert strømningslinjer (fra 1,1 % til -1,8 %)

Det er også viktig å påpeke måten strømningsforholdene tilpasser seg påvirkningene fra flere brønner. Forsyningsområdet er avlangt for brønner som er nær elven og øker i bredden når brønnen er plassert nærmere forekomstens høyre rand. Man kan også merke at strømningslinjene har endret retning i vise steder i forekomsten for å kunne etablere forsyningssoner i områder som er ekstra belastet.



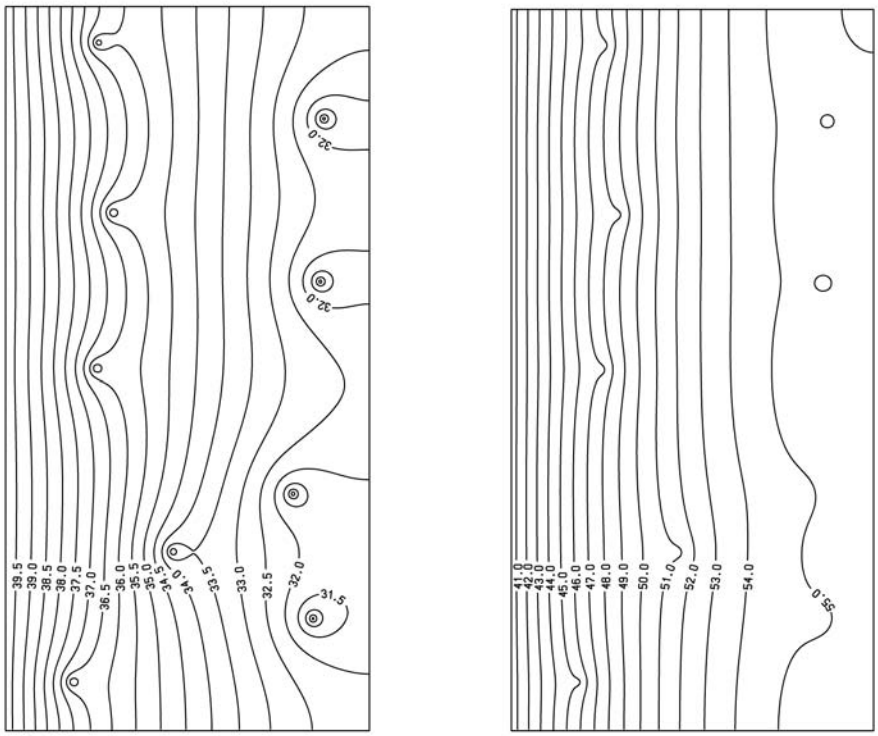
Figur 25. Forsyningsområdet for mange brønner ved bruk av brønnbaserte strømningslinjer når grunnvannsforekomsten får vann kun fra infiltrasjon fra elven.

La oss endre simuleringsforholdene slik at grunnvannsdannelse er satt på null og dermed tvinge alle brønnene til å få vann fra elven. Resultatene vises i figur 25 hvor A viser brønnbasert strømningslinjene mens B bruker lineare segmenter for å definere de strømningslinjene. I dette tilfellet observerer vi at brønnbaserte strømningslinjer gir en

mye klarere bilde av strømningsforholdene. Forsyningsområdet er ikke en ”sone” i en slik sitasjon med heller et segment av elveløpet som forsyner brønnen via infiltrasjon.

Brønnene som er plassert i nærhet av elven får en konkret segment av elven de får infiltrert vann fra, mens brønnene plassert langt fra elven er nødd til å få vann fra flere steder langs elven.

En viktig forskjell mellom forsyning fra nedbør og forsyning fra elven kan observeres ved å sammenligne strømningslinjene i figur 24A og 25A. I naturlig tilstand – upåvirket av brønner – kommer alle strømningslinjene til å være horisontale for å vise at grunnvannet strømmer fra høyre til venstre mot elven. I figur 24A ser vi at i flere områder har strømningslinjene fremdeles den samme retningen som de hadde i naturlig tilstand. Hastigheten er mindre pga påvirkningene fra uttakene men en betydelig mengde av grunnvann fortsetter å strømme mot elven på en mer eller mindre horisontal måte. Strømningsretningen ser ikke ut til å være påvirket av brønnene i området 0 til 300m fra elven. Dette er viktig fordi det viser at elven fortsetter å få vann fra grunnvannsforekomsten. Den får mindre vann enn før men likevel er prosessene som forsyner elven med grunnvann aktive. Mange biologiske prosesserer i vassdraget er avhengige av tilsiget fra grunnvannsforekomsten til elven. Tilsigsvannet hjelper med å opprettholde en høy temperatur i vannet om vinteren og dermed unngå at vassdraget fryser ned.



A B

Figur 26. Grunnvannspeilet for en grunnvannsforekomst med dimensjoner 4 km x 8 km, en mektighet 40 m, hydraulisk ledningsevne 0,0001m/s og konstant vannstand i elven som ligger på venstre randen lik 40m. A. Ingen grunnvannsdannelse, alt vann kommer fra elven. B. 400mm/år grunnvannsdannelse.

Biologer beskriver flere andre prosesser som er avhengig av grunnvannstilsig til elven men de fleste av dem ikke er kvantitetsfestet. Dvs. at man har ikke kvantitetsgrenser for biologiske prosesser. Slike grenser – når de blir tilgjengelige – må også bli tatt i betraktning når man setter uttaksgrenser for grunnvannsforekomsten.

Når det gjelder figur 25A merker man først og fremst at alle strømningslinjene starter fra elven og slutter i brønnene og at de dekker hele forekomsten. Hele forekomsten er brukt som infiltrasjonsanlegg. Det er viktig å bekrefte om simuleringsresultatene i figur 24 og 25 er basert på fornuftige antagelser. Dette kan bekreftes kun ved inspeksjon av grunnvannsstanden fra simuleringene. Grunnvannsspeilet vises i figur 26A og 26B for simuleringen uten grunnvannsdannelse og med 400mm grunnvannsdannelse tilsvarende. Resultatene ser fornuftige ut. Det viktigste er å bekrefte at grunnvannspeilet holder seg over bunnen av grunnvannsforekomsten og eventuelt ikke treffer overflaten. I tre dimensjonale simuleringer burde man ikke kun kontrollere grunnvannspeilet men også de hydrauliske head verdiene for hvert lag definert i simuleringen. Problemene oppstår som regel i brønnområder hvor de største endringene i hydraulisk head verdier finner sted. Det er ikke uvanlig at man får hydraulisk head verdier i brønnområder som ligger under bunnen av forekomsten, spesielt når man har definert store uttaksverdier for brønnene. Simuleringen konvergerer til tross for dette problemet men simuleringsresultatene er urealistiske og burde ikke aksepteres som riktige.

3.3 Brønneffekter og avvik fra simuleringsresultater

Ofte observerer man et stort avvik mellom simuleringsresultater og feltobservasjoner, spesielt når det gjelder uttaksmengder fra brønner. Det er flere grunner at en slik avvik oppstår og i dette kapitelet skal vi diskutere noen av dem.

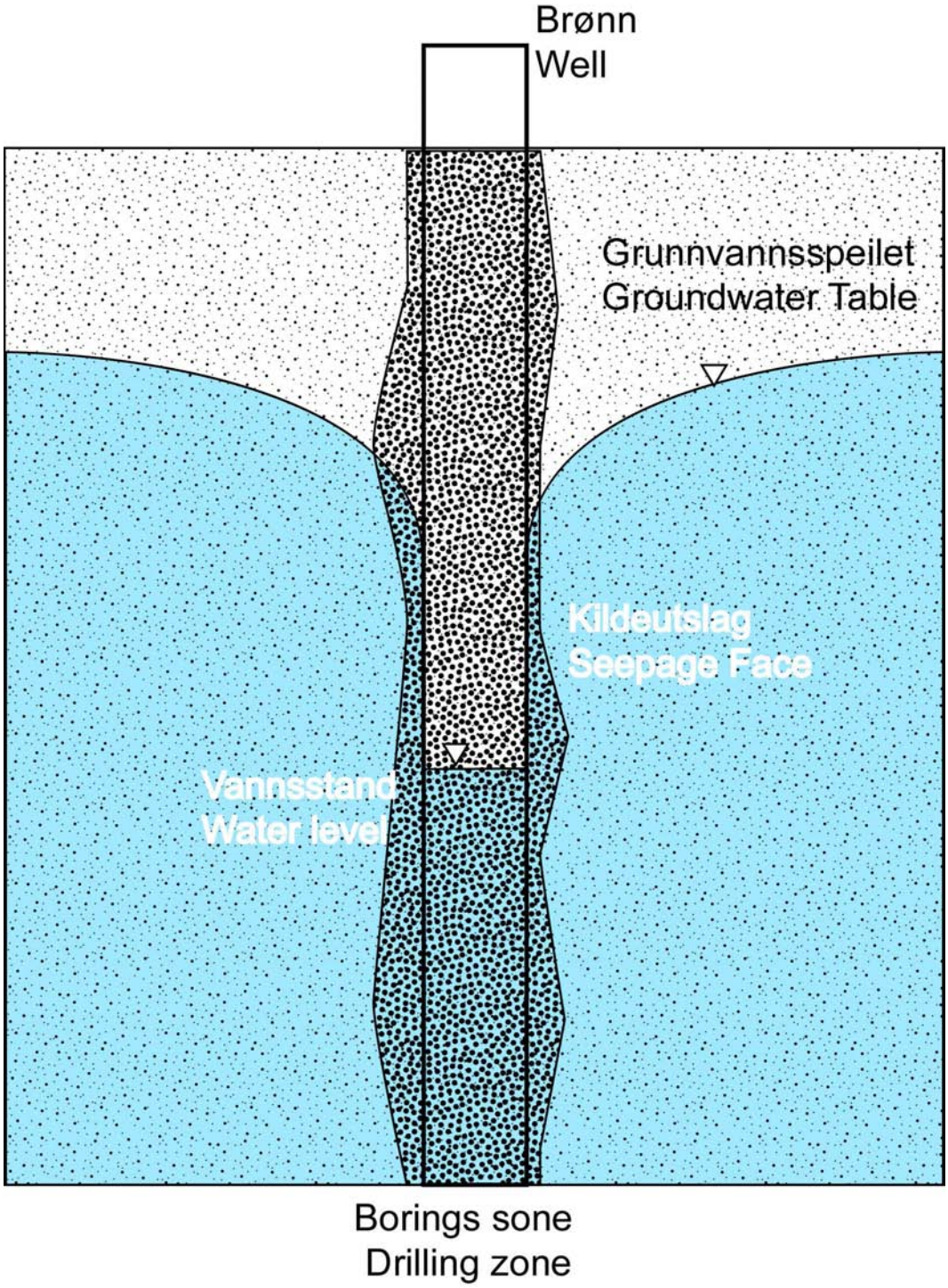
For de fleste grunnvannsmodellene er et uttak fra en brønn en ekstern påvirkning som brukeren av modellen må definere på forhånd. Modellen er i så fall ikke i stand til å prognosere et uttak fra en brønn. Når man for eksempel definerer et uttak på 1000m^3/ døgn fra en brønn i modellen, kommer ikke modellen til å kontrollere om den definerte uttaksstørrelsen er rimelig for forekomsten. Modellen vil prøve å løse problemet med de angitte inndata og klarer ofte å gi resultater som ser tilsynelatende riktige ut. Det gamle modellerings ordtakket – ”rubish in rubish out” (søppel inn, søppel ut) – fungerer dårlig for grunnvannsmodeller fordi ”søppel” resultater ser ofte meget fornuftige ut. Dette skyldes grunnvannslikningene som har et meget stabil og pen nummerisk oppførsel. Det er først når man begynner en detaljert undersøkelse av resultatene at man begynner å oppdage problemer. Det er dessverre slik at flere hydrogeologer, når de oppdager slike problemer, overser dem, fordi de tror at avvikene skyldes nummeriske problemer ved simuleringen. Å skille mellom hva skyldes numeriske problemer og hva skyldes dårlig inndata er åpenbart komplisert og krever erfaring og kunnskap av modellenes intern nummerisk oppsett.

Brønnenes geometri og form setter noen begrensninger i mengden av vann som man kan ta ut av dem. Figur 27 viser en skisse av en brønn hvor vi har tegnet inn noen relevante brønnegenskaper. Borings sone er borehullet som ble opprettet av boreriggen. I det hullet er satt inn et rør som går gjennom hele lengden av borehullet. Man kan dele røret i brønnrøret og filteret. Brønnrøret dekker som regel lengden fra overflate til dybden man treffer grunnvannspeilet, men i mange tilfeller er lengre enn det. Filteret er et rør med

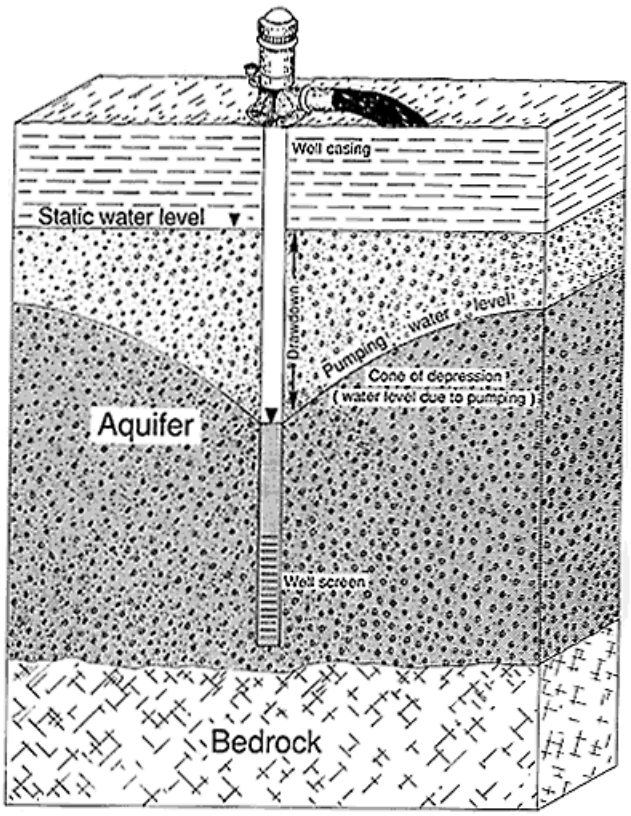
slisser som tillater grunnvann å strømme inn i røret. Slissene er spesielt konfigurert til å hindre løsmasser å komme inn i røret. Filteret burde dekke hele den våte lengen av brønnen – fra grunnvannspeilet til bunnen av borehullet – men i mange tilfeller betraktes dette som ikke nødvendig ikke mist for å redusere utgiftene. Borehullet er vanligvis noe større enn rørets diameter – som vises i figur 27 - og normalt fylles mellomrommet med graderte løsmasser. Løsmassene består som regel av grus/sand med en partikkelstørrelse noe større enn slissene i filteret som brukes i brønnen.

Når brønnen først er etablert pleier man å foreta flere høytrykks innpumpinger av vann for å konsolidere de graderte løsmassene rundt røret og filteret og deretter langtids utpumping av grunnvann for å rense brønnen fra løsmasser som har klart å fylle røret i etableringsfase.

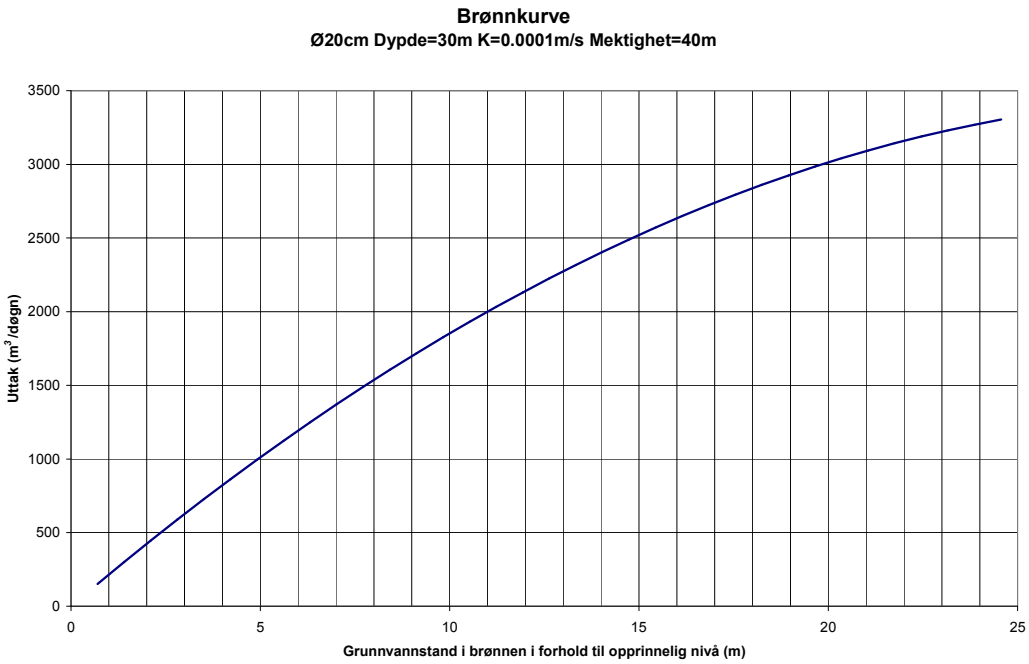
Når brønnen er tatt i bruk etableres det et influensområde i forekomsten ofte referert også som depresjonstrakten rundt brønnen som også vises i figur 27 og figur 28. Grunnvannspeilet får en senkning rundt brønnen, med et maksimums senkning observert ved brønnen. I figur 28 som er tatt fra en amerikansk internettside ser vi at depresjonstrakten treffer brønnen på et bestemt dybde og der observere man vannstanden i brønnen. Figur 28 viser en idealisert bilde av sammenhengen mellom depresjonskonen og vannstanden i brønnen. Et mer realistisk bilde er gitt i figur 27 hvor det dannes et kildeutslag som gir et avvik mellom vannstanden i brønnen og treffepunktet mellom depresjonstrakten og brønnen. En forutsetning for at skal dannes et kildeutslag er at filterrøret omfatter dette området også. Hvis filterøret er kort, som vist i figur 28, dannes det en stor vertikal hydraulisk gradient rundt brønnen som skaper en enda større avvik mellom grunnvannspeilet og vannstanden i brønnen og i tillegg begrenser uttaket fra brønnen.



Figur 27. Referanseskisse av en brønns geometriske og hydrogeologiske karakteristikker

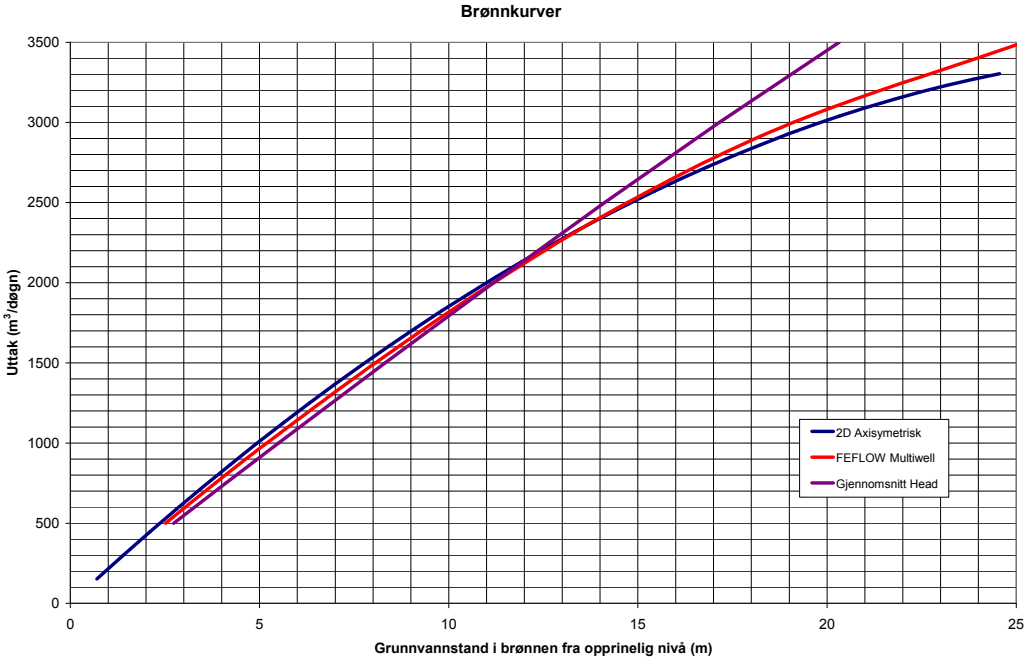


Figur 28. En tegning av en brønns viktigste hydrogeologiske egenskaper. (hentet fra internett, ukjent person)



Figur 29. Simulert brønnkurve fra FEFLOWs aksialsymmetrisk modul.

Det finnes mange hydrogeologiske metoder som kan brukes for å karakterisere en brønn. De fleste av dem prøver å lage brønnens karakteristiske kurve. Forskjellige forfattere referer til forskjellige kurver når de snakker om karakteristiske brønnkurver. En brønnkurve er basert på en likning som beskriver brønnen og dermed bruk av forskjellige likninger leder til forskjellige kurver. Her kommer vi til å bruke en brønnkurve som gir forholdet mellom uttak og likevekts vannstand i brønnen. En slik kurve er vanskelig å produsere med direkte målinger fordi det krever at man utfører flere langtids pumpeforsøk for å danne kurven.



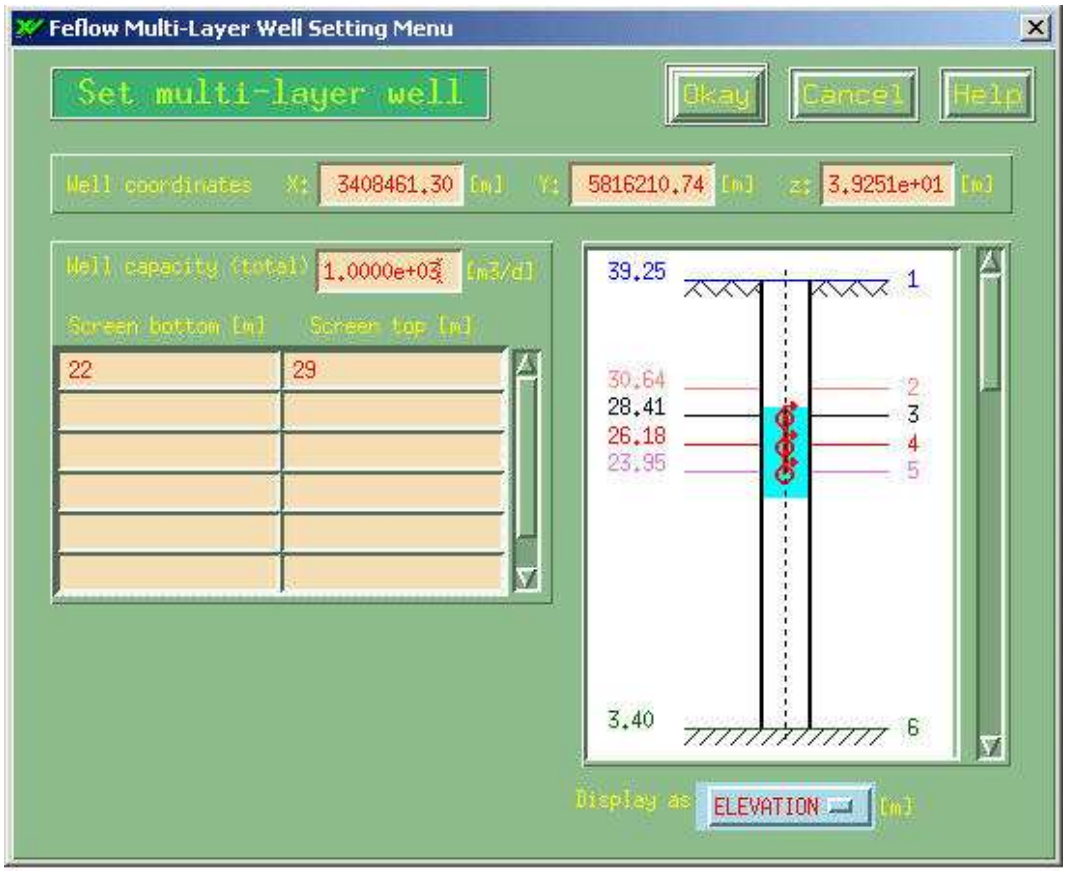
Figur 30. Teoretiske brønnkurver estimert av FEFLOW med forskjellige implementeringer av brønnbetingelsene

I figur 29 har vi laget en teoretisk brønnkurve for en brønn med diameter 20cm, og dybde 30m med filter i hele lengden. Forekomsten har en K-verdi lik 0,0001m/s og mektighet 40m. Brønnen stopper 10m over forekomstens bunn. Simuleringene er utført ved å bruke FEFLOWs aksialsymmetrisk modul som gir oss anledningen til å implementere et kildeutslag. Simuleringene kan ikke utføres på en ”naturlig” måte. Dvs. vi kan ikke definere et vannuttak og finne ut hvor mye er vannstanden i brønnen. I stedet må man definere en vannstand i brønnen, tilpasse kildeutslaget og deretter kjøre modellen for å estimere hvor mye er vannuttaket som tilvarer denne vannstanden. Den resulterende brønnkurven vises i figur 29 hvor vannstanden i brønnen ble endret med inkrementer på ca. 0.7m. Kurven i figur 29 har en typisk brønnkurve form for en åpen grunnvannsforekomst. Den begynner å flate seg ut for store vannstandssenkninger. Man kan observere at for å få et uttak på 1000 m^3/døgn må vannstanden senkes 5 m i forhold til den opprinnelige vannstanden. For 2000 m^3/døgn må vannstanden senkes til 11m og for 3000 m^3/døgn må det senkes til 20 m. Avhengig av pumpe type kan det kreves en minimum vannstand i brønnen som ligger fra 2 m til 6 m over bunnen av brønnen for at pumpen skal fungere riktig. La oss anta for eksempelts skyld at pumpen krever 6m og dermed må vannstanden i brønnen ikke falle mer enn 24m (siden brønnen er 30m lang). I

så fall kan man se fra brønnkurven at man kan ikke få et uttak større enn ca. 3300 m^3/døgn.

Problemet med slike kurver er at de er avhengig av at strømningsforholdene rundt brønnen ikke endrer seg. Brønnkurver fungerer best for en enslig brønn. Hvis det etableres en ny brønn i nærheten må man beregne brønnkurven på nytt for å ta hensyn til uttaket fra den nye brønnen. For å unngå kompliserte beregninger bruker man ofte en enkel linearisering av kurven. Med hensyn til figur 29 kan man for eksempel si at forholdet mellom uttak og vannstand i brønnen kan beskrives av 200 m^2/døgn som ofte refereres til – feilaktig – som brønnens transmissivitetsverdi eller som brønnens diffusivitet (pga. enhetene), men i virkeligheten betyr at en økning av uttaket på 200m^3/ døgn fører til en senkning av vannstanden lik 1 m. Dette kan gi oss et brukbart forhold mellom uttak og vannstand opp til 1600m^3/døgn i følge figur 29. Ofte dette uttaket og tilvarende grunnvannstanden i brønnen betegnes som kritisk uttak eller kritisk vannstand for brønnen. Men det finnes ikke en konkret måte å definere hva betegnelsen ”kritisk” referer til og dermed finnes det mange forskjellige definisjoner for det.

Man kan prøve å estimere brønnkurver basert på simuleringer med modelleringsverktøy men det oppstår problemer som man må ta hensyn til.

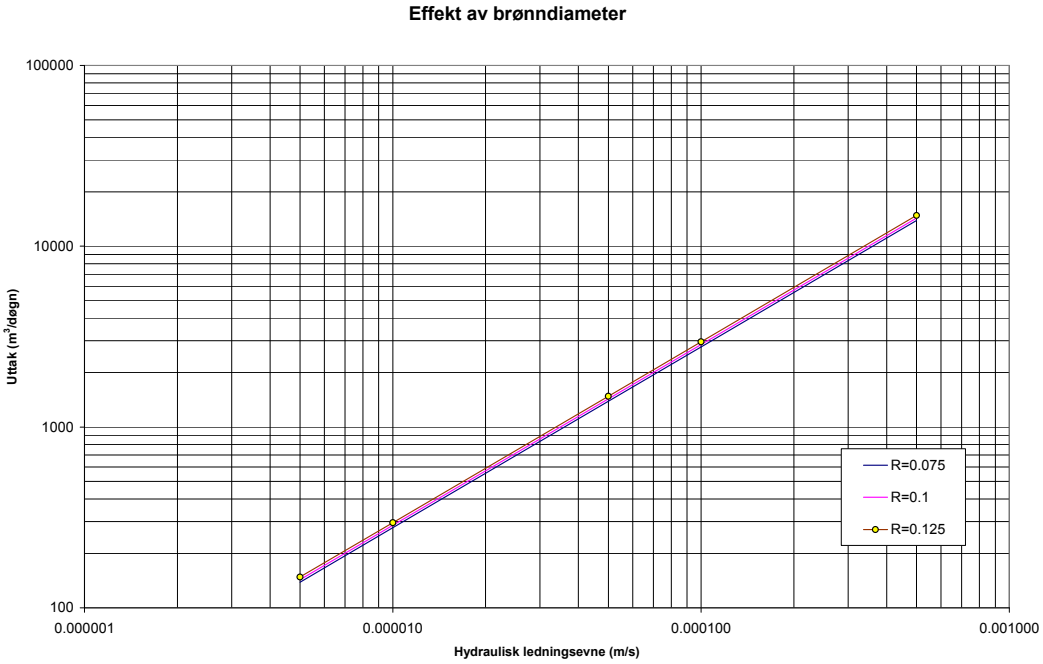


Figur 31. FEFLOWs ”Multi-layer” dialog vindu.

I FEFLOW kan man implementere brønner i en simulering på flere forskjellige måter. Det enkleste er å velge noder i det numeriske gridet som blir tilordnet et uttak av vann. Denne metoden simulerer en brønn som et punkt. I tre dimensjonale simuleringer kan

man fordele uttaket over flere noder som ligger på samme vertikal linje og på den måten innføre delvis brønnens geometri i simuleringen. Hvis man benytter en slik metode for å simulere en brønn, får man numeriske problemer med å definere vannstanden i brønnen.

De numeriske problemene er knyttet til det numeriske gridet rundt brønnen. Analytiske likninger gir asymptotiske løsninger i brønnområder som innebærer at de hydrauliske head verdiene går mot -∞. Numeriske løsninger prøver å etterligne de analytiske men det nummeriske gridet setter begrensninger som ikke tillatter asymptotiske løsninger. En finere/tettere nummerisk grid i brønnområdet vil føre til et lavere estimat av hydraulisk head verdi for brønnen. Dette gir oss upålitelige vannstandsestimater for brønnene. I 3D simuleringer kan man korrigere for numeriske problemer ved å ta en gjennomsnittlig hydraulisk head verdi for alle noder som ligger i brønnens vertikal linje uansett om alle nodene er definert som brønner eller ikke. En slik estimeringsprosess gir oss brønnkurven i figur 30 merket som ”Gjennomsnitts Head”. I figuren merker man at denne brønnkurven er relativt linear. FEFLOW har nylig (versjon 5.3) innført en ”multi-layer” betingelse for brønner som tilatter en bedre estimering av vannstanden i brønnen. Figur 31 viser FEFLOWs multi-layer vindu. De fleste elementer i figur 31 er selvforklarende. Vi skal diskutere brønnskissen på høyre siden av vinduet. Skissen viser at i brønnens vertikal linje finnes det totalt sett 6 noder med sine tilsvarende høyder fra referanse nivå. Ved å definere et filter fra 22 m til 29 m i tabellen på venstre siden blir det tilsvarende området markert på skissen. I tillegg finner programmet ut at det finnes 3 noder i det markerte området (nemlig node 3, 4 og 5) som får en brønnbetingelses merke (en sirkel med en pil til høyre). Brønnens uttakskapasitet er satt til 1000m^3/døgn (”Well capacity” i figuren) og fordeles på de tre markerte noder. Opp til dette punktet utfører FEFLOW automatisk det som før måtte gjøres manuelt.



Figur 32. Simulering av en 30m lang brønn i en grunnvannsforekomst som har en mektighet 40m. Vannstanden i brønnen holdes konstant til 20m og beregner uttaket for forskjellige verdier for hydraulisk ledningsevne og brønndiameter.

Det som er nytt er at FEFLOW knytter de 3 nodene sammen med lineære elementer som simulerer effekten av et rør. Effekten ev denne implementeringen vises i figur 30 hvor brønnkurven betegnet som ”FEFLOW multiwell” er presentert. MODFLOW og andre kommersielle grunnvannsmodeller har begynt å implementere en slik multi-layer brønn betingelse fordi den gir flere nummeriske gevinster.

Det er viktig å påpeke at både ”FEFLOW multiwell” kurven og Gjennomsnitts Head kurven i figur 30 bruker ikke brønnens diameter i estimeringsprosessen. Brønnkurven fra den 2D aksialsymmetriske simuleringen bruker en diameter på 20cm for brønnen. I virkeligheten vil diameteren på brønnen påvirke brønnens uttaksevne.

Vi har brukt den 2D aksialsymmetriske metoden til å simulere effekten av brønnens diameter og resultatene vises i figur 32. Forskjellen mellom kurvene er ikke stor. Diameteren ser ut til å øke uttaket på en nesten proporsjonal måte som er ikke uventet siden brønnens tilsigsareal øker proporsjonalt med diameteren. Dette blir bekreftet av resultatene som viser at uttaket øker med ca. 3,1 % fra 15 cm til 20 cm og med 6,7 % fra 15 cm til 25cm og at økingen er uavhengig av uttakstørrelse og hydraulisk ledningsevne. For en K-verdi lik 0,0005 m/s får man en økning i uttaket på ca. 435 m^3/døgn når diameteren øker fra 15 cm til 20 cm og til ca. 924 m^3/døgn når det øker til 25 cm. Det er interessant å nevne at små K-verdier gir uttak som er av en betydelig størrelse. For en K-verdi lik $5 \cdot 10^{-6}$ m/s får vi et uttak som varierer fra 139 til 148 m^3/døgn avhengig av brønndiameter som er i stand til å dekke drikkevannsbehovet til ca.700 personer (basert på EUs forbruksdefinisjon at 10m^3/ døgn tilfredsstiller behovet til 50 personer).

Det er vanligvis et avvik mellom en teoretisk brønnkurve og en basert på felttester. Den opprinnelig brønnhullet har en irregulær geometri og de graderte sedimentene som er satt i brønnhullet ved installasjonen av røret danner sjelden en perfekt sone rundt røret. Noen steder langs røret dannes det hulrom mens i andre steder fylles opp rommet mellom røret og borehullet med løsmasser fra brønnhullets sideveger som har rast inn. Disse problemene er vanlige ved installasjon av nye brønner og kan få brønnen til å få en brønnkurve som kan avvike betydelig fra en teoretisk brønnkurve. Man snakker ofte om en effektiv brønndiameter og en effektiv filterlengde, for å skille mellom brønnens geometri og måten den oppfører seg på. Effektive verdier for diameteren og filterlengde kan estimeres fra brønnloggings undersøkelser som er sjelden brukt i Norge for vannproduksjonsbrønner i løsmasser. Det er lett å forstå at det er umulig å lage 2 brønner som oppfører seg på helt den samme måten. Erfarne brønnborere er så rutinerte at de klarer å etablere brønner som er for alle praktiske formål er omtrent like.

4 Oppsummering og konklusjoner

I den første delen av denne rapporten har vi utført en teoretisk undersøkelse av påvirkningene av klimaendringer, grunnvannsuttak og magasineringsegenskaper for norske grunnvannsforekomster. Norske grunnvannsforekomster er avlange med en bredde som i de fleste tilfellene er mindre enn 4 km og har en mektighet som sjelden er større enn 60m. Lengden kan variere betraktelig fra noen få kilometer til flere titalls kilometer. Det er disse geometriske egenskapene som gir de norske grunnvannsforekomstene sin særegen karakter.

Flere numeriske simulering ble utført basert på antagelser for forekomstens bredde, lengde, hydraulisk ledningsevne, og mektighet som tilnærmer typiske verdier for norske grunnvannsforekomster. Norske grunnvannsforekomster har en begrenset evne til å magasinere vann fra nedbør og snøsmelting og dette gjenspeiles i simuleringsresultatene. Andre antagelser i simuleringene som burde nevnes er at vi bruker konstante verdier for vannstanden i elven og ikke ta hensyn til tilsig fra dalens fjellsider.

For forekomster med en bredde på 4 km kommer magasineringskapasiteten og grunnvannstanden til å variere avhengig av plasseringen av elven i dalen. Hvis elven er plassert omtrent i midten av dalen kommer magasineringskapasiteten og grunnvannstand – i forhold til vannstanden i elven – til å være redusert. Men i områder hvor elven nærmer seg dalsidene øker både magasineringen og grunnvannstanden. Grunnvannstand kan øke flere meter men magasineringen vil ikke nødvendigvis øke betraktelig i forhold til det totale volumet av magasinert vann i forekomsten.

Stasjonære forhold (likevektstilstand) er oppnådd relativt rask i forhold til de store selvmattende grunnvannsforekomstene i Tyskland og Frankrike. Endringer i grunnvannsdannelse kan påvirke grunnvannstanden opp til 40 år før den begynner å stabilisere seg. For gjennomsnittlige parameterverdier er en 15 til 20 års periode mer sannsynlig. Dette betyr at tørrere klimatiske forhold må påvirke grunnvannsforekomstene over flere år før vi får en signifikant endring i forekomsten magasineringstilstand. Signifikant endring i magasineringen betyr ikke nødvendigvis en stor endring i grunnvannstanden, men at grunnvannsforekomsten befinner seg i en annen likevektstilstand enn før. Likevektstilstand betyr i dette sammenheng at grunnvannsdannelsen er omtrent lik tilsiget fra grunnvannsforekomsten til vassdraget.

For høy hydraulisk ledningsevne og/eller stor mektighet (> 40m) kan likevektstiden oppnås etter kun noen få år. Slike forhold finner man i grunnvannsforekomster som brukes til vannforsyning. Disse forekomster reagerer rask på endringer av grunnvannsdannelsen men størrelsesorden på endringene er som regel liten.

Det er vanskelig å definere forholdet mellom klimaendringer og grunnvannsdannelse. Vi har hovedsakelig undersøkt situasjonen hvor den gjennomsnittlige årlige grunnvannsdannelsen er redusert fra 400mm/år til 200mm/år. Med andre ord ser vi på et scenario som antar tørrere klimaforhold. En slik scenario er ikke støttet fra eksisterende klimadata. De fleste klimaforskere prognoserer endringer i lengden av vekstsesongen og mer frekvente hendelser av ekstreme forhold (flom, tørke osv.). Dette sier lite om den årlige grunnvannsdannelsen kommer til å endre seg og hvor mye. Fordelingen av nedbør og snø over året kan endre seg i følge noen klimasimuleringer uten at dette vil nødvendigvis medføre store endringer i den årlige grunnvannsdannelsen.

Simuleringene viser at sensitiviteten til klimaendringer er betydelig redusert for forekomster med liten bredde. Det vil si at effekten ev redusert grunnvannsdannelse er mye mindre enn effekten en senking i vannstanden i elven vil påføre. De også viser at gårdsbrønner hvor vannstanden ligger kun 1-2m over brønnens bunn kan tørkes ut, spesielt om disse brønner er etablert langt fra elven.

Simuleringene med meandrerende elver og romlige endringer av elvens vannstand viser at elvens geometri er meget viktig for grunnvannstanden i forekomster med liten bredde. Romlige endringer av vannstand i elven vil også påvirke grunnvannstanden men vil ha

liten effekt for magasinering av grunnvann. Geometrien av elven og grunnvannsforekomsten fra Numedal ble brukt for å simulere realistiske forhold. Numedalssimuleringene viser at meandrerende elver kan brukes til å dele opp norske forekomster i mindre enheter som for alle praktiske formål er hydraulisk isolert fra resten av forekomsten og kan analyseres separat.

Den andre delen av rapporten handler om uttaksbrønner og effektene disse har på grunnvannsforekomster. Simuleringene bruker antagelser som er typiske for norske grunnvannsforekomster og resultatene brukes til å definere brønnenes influensområde og forsyningsområde.

Influensområder er brukt til å bestemme avstanden som to brønner kan ligge fra hverandre og hvordan vannuttak fra disse brønnene kan påvirke hverandres uttaksmengde. Influensområder er som regel presentert som et kart som viser hvordan grunnvannspeilet/grunnvannstand endrer seg som et resultat av et brønnuttak. Slike kart viser en likevektstilstand og gir kun en oversikt av situasjonen. Analytiske likninger er ofte brukt for å løse praktiske problemer, men burde ikke brukes for norske forekomster siden antagelsene disse likninger bygger på gjelder ikke for norske forhold.

Forsyningsområder er brukt til å definere beskytelsessoner for uttaksbrønner. Det kan være komplisert å definere et forsyningsområde for en brønn. De fleste grunnvannsmodellene har spesielle moduler som bruker strømningslinjer for å definere forsyningsområdet, men disse fungerer ikke alltid som forventet og leder ofte til underestimeringer. Simuleringer med flere brønner viser at hver brønn har sin egen forsyningsområde. Formen av forsyningsområde vil variere betraktelig fra brønn til brønn mens størrelsen er direkte knyttet til størrelsen av vannuttaket. Hvis formålet er å definere beskytelsessoner burde man anvende en forurensningsmodell samen med en grunnvannsmodell for å ta hensyn til dispersjonsprosesser.

Det er ikke lett å bruke grunnvannsmodeller til å bestemme uttaksgrenser for brønner på forhånd. Etter brønnen er etablert finnes det en rekke praktiske metoder som kan brukes til å definere brønnens kapasitet og å optimalisere brønnens uttak. Grunnvannsmodeller kontrollere ikke uttaksverdiene man bruker i modellen og dermed er det brukeren som må kontrollere resultatene og bestemme om brønnene fungerer riktig eller ikke. Modellresultater er ofte beheftet av numeriske feil i nærhet av brønner noe som gjør det enda vaskeligere å vurdere resultatene. Nye metoder som reduserer de nummeriske feilene i nærhet av brønnene er i stadig utvikling. Disse metoder har en lang vei å gå før de er i stand til å gi pålitelige resultater. Grunnvannsmodeller med analyser om forsynings- og influensområde kan brukes til å finne ut hvor stort uttak kan forekomsten tolerer, slik §44 i Vannressursloven krever. Men det er noe annet å definere hvor mange brønner burde man etablere og sette grenser på uttaket for hver brønn slik at det samlede uttaket ligger innen forekomstens toleransegrenser. Konkrete uttaksgrenser for brønner må derfor defineres etter en brønn er etablert.

5 Referanser

Beldring, S., Roald, L.A., Egen-Skaugen, T., Førland, E.J., (2006). Climate change impacts on hydrological processes in Norway 2071-2100 : based on RegClim and Rossby Centre RCAO regional climate model results. *NVE Rapport 5, 2006.*

Beldring, S., Roald, L.A., Voksø, A., (2002). Avrenningskart for Norge. Årsmiddelverdier for avrenning 1961-1990. *NVE Dokument 2, 2002.*

Berthling, I., (2003). Konferanse Vannlandet i 2050, Bergen 6.mai 2003. Vann, natur og samfunn i et endret klima. *NVE, 2003.*

Colleuille, H., Pedersen, T.S., Dimakis, P. og Frengstad, B., (2004). Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 2. Materiale og feltmålinger. *NVE rapportserie Miljøbasert vannføring Nr. 2-04.*

Colleuille, H., Pedersen, T.S., og Dimakis, P., (2004). Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 1. Formål og metoder. *NVE rapportserie Miljøbasert vannføring Nr. 1-04.*

Colleuille, H., Wong, W.K., Dimakis, P., (2004). Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 3. Grunnvannsmodellering. *NVE rapportserie Miljøbasert vannføring Nr. 3-04.*

Diersch, H.-J.G., (2005). FEFLOW Finite element subserface flow and transport simulation system. Reference Manual. WASY GmbH Intitute for Water Resources Planning and Systems Research. Berlin.

Dimakis, P., Colleuille, H., Wong, W.K., (2005). Pollution Impacts on Norwegian Groundwater Bodies. *NVE Rapport 3, 2005.*

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i Rapportserien i 2007

Nr. 1 Knut Hofstad: Vindkraftpotensialet utenfor norskekysten (offshore)

Nr. 2 Hervé Colleuille, Ingvill Stenseth: Nasjonalt overvåkingsnett for grunnvann og markvann Drift og formidling 2006. Status pr. februar 2007

Nr. 3 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarkedet, 4. kvartal 2006 (77 s.)

Nr. 4 Britt-Mari Langåsen, Anders E. Grønstvedt, Asle Tjeldflåt, Stig Haugen: Utnyttelse av det norske kraftnettet

Nr. 5 Anders Bjordal og Mads Johnsen: Stabilitet langs Namsen. Utbedring av gamle sikringstiltak (168 s.)

Nr. 6 Halvor Kr. Halvorsen (red): Tilsynsrapport for 2006. NVEs tilsyn (25 s.)

Nr. 7 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarkedet, 1. kvartal 2007 (74 s.)

Nr. 8 Hervé Colleuille, Lars Egil Haugen, Trude Øverlie: Vann i jord. Simulering av vann- og energibalansen på Kise markvannsstasjon, Hedmark (70 s.)

Nr. 9 Amir Messiha: Avbruddsstatistikk 2006 (76 s.)

Nr. 10 Anders Aarøe Mømb (red.): Årsrapport for utførte sikrings- og miljøtiltak i 2006. Beskrivelse av utførte anlegg 2006 (101 s.)

Nr. 11 Anders Bjordal, Knut Aune Hoseth, Jon-Håvar Haukland: Flom- og erosjonssikringstiltakene i Altaelva. Prosjektgruppens forslag til prioriteringer av vedlikehold og miljømessig oppgradering

Nr. 12 Edward Witczak, Mads Johnsen: Stjørdalselva, erosjon, stabilitet og sikring. Del 1 (327 s.), del 2 (238 s.)

Nr. 13 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarkedet, 2. kvartal 2007 (64 s.)

Nr. 14 Planlegging og etablering av små vannkraftverk (74 s.)

Nr. 15 Metoder for vurdering av miljøkonsekvenser ved energitiltak. Oppsummering av NVEs arbeid i 2006 (16 s.)

Nr. 16 En vegetasjonsøkologisk undersøkelse av fire rørgater på Vestlandet. (33 s.)

Nr. 17 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarknaden, 3. kvartal 2007 (60 s.)

Nr 18 Trude Øverlie, Hervé Colleuille, Lars Egil Haugen: Vann i jord. Simulering av vann- og energibalansen på Kvithamar markvannsstasjon, Nord-Trøndelag

Nr 19 Hervé Colleuille, Lars Egil Haugen, Trude Øverlie: Vann i jord. Simulering av vann- og energibalansen på Groset markvannsstasjon, Telemark (83 s.)

Nr 20 Hervé Colleuille, Lars Egil Haugen: Vann i jord. Simulering av vann- og energibalansen på Gardermoen, Akershus (81 s.)

Nr 21 Panagiotis Dimakis: Implementering av EUs rammedirektiv for vannressurser (55 s.)