DOKUMENT

11 1998

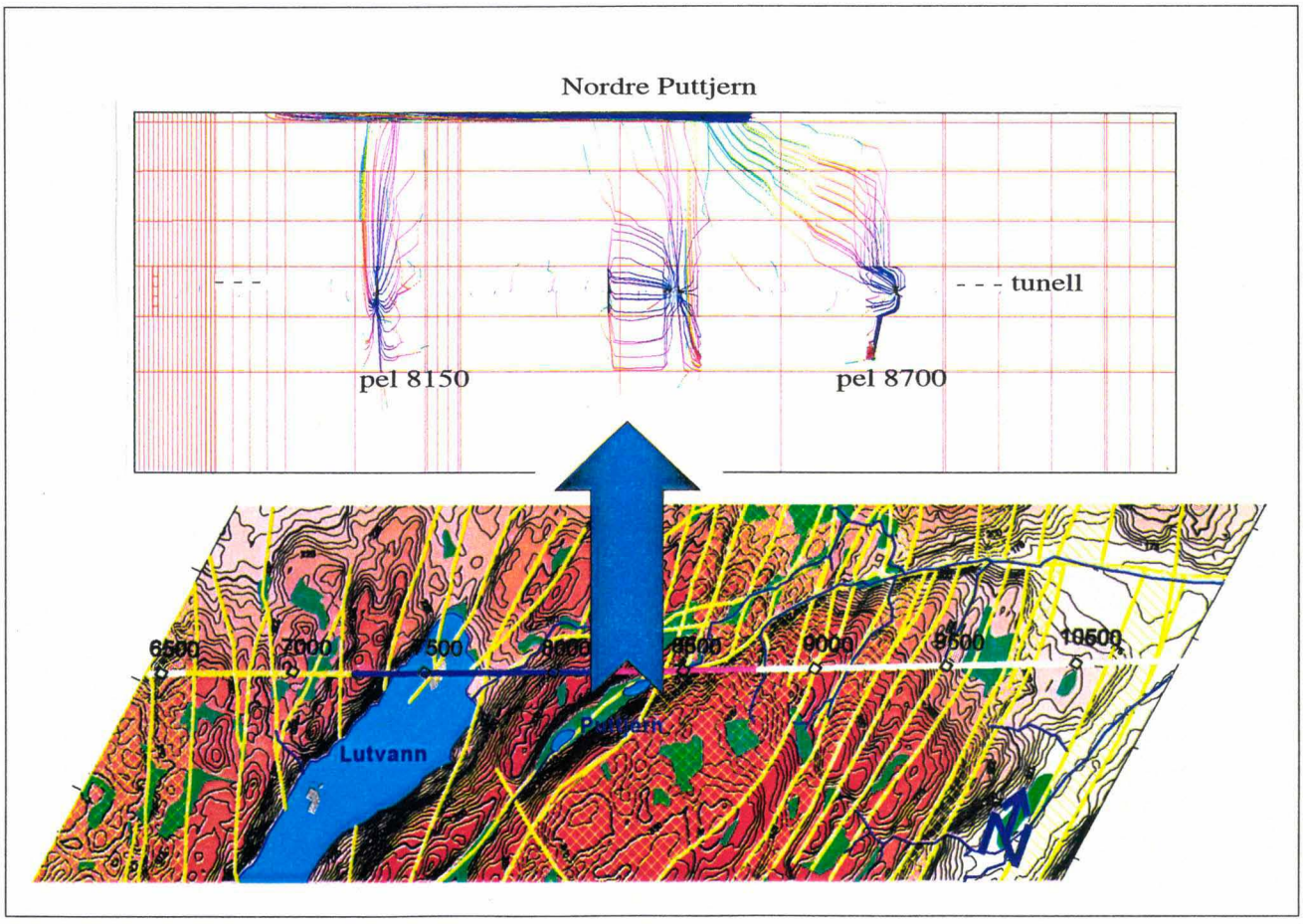
Norges vassdrags- og energidirektorat

NVE

Nils-Otto Kitterød
Hervé Colleuille
Tor Simon Pedersen
Elin Langsholt
Panagiotis Dimakis

Vanntransport i oppsprukket fjell

Numeriske simuleringer av vannlekkasjer i Romeriksporten



TITTEL Vanntransport i oppsprukket fjell Numeriske simuleringer av vannlekkasjer i Romeriksporten	*DOKUMENT* 11-1998
SAKSBEHANDLER Nils-Otto Kitterød, Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Elin Langsholt og Panagiotis Dimakis	DATO 28. september 1998 RAPPORTEN ER åpen
OPPDRAGSGIVER	OPPLAG 100

SAMMENDRAG

Med dette arbeidet har NVE tatt i bruk ny teknologi for å bygge opp simuleringsverktøy som forvaltningen kan benytte for å evaluere hydrologiske konsekvenser av tekniske inngrep i fast fjell. Mest aktuelle anvendelser er tunell arbeider, men samme metode kan også brukes til vannforsyning fra fast fjell og varmepumpeanlegg. Første ledd i dette arbeidet er presentert i denne rapporten, hvor hovedhensikten har vært å simulere grunnvannstrøm i Puttjernsonen og hvilke endringer som har inntruffet som følge av Romeriksporten. I denne rapporten er det fokusert på hovedtrekkene i strømningsbildet. De kalibrerte parametrene er ment som utgangspunkt for videre studier. Det regionale strømningsbildet samt effekt av heterogene sprekkesoner er to aktuelle prosjekter.

ABSTRACT

The construction of the railway tunnel Romeriksporten has caused hydrological problems near densely populated areas in Oslo. The problems are due to drainage of surface waters and wetland areas through bedrock fractures. The bedrock in the area is highly fractured and thus water leakage is concentrated in narrow zones. The main purpose of this project is to simulate the main features of two flow conditions (natural flow before the tunnel, and the flow field after the tunell was constructed) by calibrating parameters in the flow equation. The main flow features simulated in the model include the observed water balancy, the general character of the groudwater pressure, and the travel time of the groundwater from the surface to the tunnel via the bedrock fractures. The fracture zones are represented in the model as homogeneous objects. The intention is to use these results to simulate the regional flow over a larger area. Also, the calibrated parameters can, in a second project be used to simulate expected heterogeneity in the fracture zones. Ultimately, numerical experiments can be run to evaluate the effect of water infiltration, which is a potential solution for maintening the water balance of the Puttdalen catchment.

This project uses the computer simulation technology FRONTSIM which is based on the Front Tracking method. Although FRONTSIM was originally developed for the oil industry, its use in a hydrologic context proves promising, where flow in fractured rock is the main challenge. Adaptating the pre and post processing package, GRIDSIM, to meet hydrological demands however requires further development.

EMNEORD
Grunnvann i oppsprukket fjell, strømningssimuleringer, front tracking, Romeriksporten, Puttjern.

ANSVARLIG UNDERSKRIFT

Kjell Repp
avdelingsdirektør

Forord

Bruken av numeriske modeller innen grunnvann har over de siste tyve årene fått stor utbredelse og har i mange tilfeller vært et nyttig redskap ved konsekvensvurderinger. Validerte modeller er også verdifull støtte når beslutninger skal tas. På tross av at modelleringer i de fleste tilfeller gjør grove forenklinger av komplekse geologiske forhold kan slike modeller bidra til å vise effekten av inngrep. Det er i hovedsak innen grunnvann i løsmasser man har brukt slike simuleringer, men i våre naboland er dette verktøyet blitt tatt i bruk i risikovurderinger ved lagring av atomavfall i fjellhaller. I Norge er numerisk simulering for dette formålet blitt aktualisert gjennom Romeriksporten.

Modellering av grunnvannsbevegelse i oppsprukket fjell er i startfasen i Norge. På tross av betydelig utnyttelse av grunnvann fra fjellbrønner og utstrakt tunellbygging, hvor grunnvann kan være et problem, har det i liten grad vært gjort forsøk på slik modellering. Hovedgrunnen er geologiens komplekse natur, da særskilt heterogenitet, dvs. at strømningsveienes utbredelse i fjellsprekkene er lite entydige hva angår retning og kapasitet. Den geologiske og hydrologiske kunnskapen burde være tilstede i det norske fagmiljøet, likeså innen de andre fagdisiplinene som kreves for å beskrive denne type strømningsforhold. Det finnes også norskutviklet simuleringskode som er robust nok til å takle regneoperasjoner som denne problematikken innebærer. NVE har sett det som en viktig oppgave å lede an i dette arbeidet. Ikke minst fordi vi trenger redskaper som dette i vår vannforvaltning.

Denne rapporten presenterer simuleringer gjort med sterkt forenklede beskrivelser av geologiske forhold. Videre finnes det lite informasjon om førsituasjonen hva angår områdets hydrologi. Resultatene fra simuleringene må derfor ses i lys av dette. Vi vil arbeide videre med å gjøre simuleringene mer realistiske i forhold til den naturen de skal beskrive, og dermed modellering mer pålitelig som beslutningsverktøy. En viktig del av dette vil være samarbeid med andre institusjoner som kan komplettere oss på ulike fagområder.

Sjefingeniør Øystein Aars har gjennomlest denne rapporten og vi vil benytte denne anledningen til å takke ham for hans viktige bidrag.

Oslo, 28. september 1998

Tor Simon Pedersen
prosjektleder

Innhold

Sammendrag /Abstract 2

Forord 3

1. Introduksjon 5

2. Numerisk metode
   2.1. Front tracking 8
   2.2. Heterogenitet 10

3. Datagrunnlag
   3.1. Sprekkekart 11
   3.2. Vannbalanse 13
   3.3. Sporstoff-forsøk 18

4. Simulering
   4.1. Kalibrering 20
   4.2. Modelloppsett 20
   4.3. Gridding 20
   4.4. Grensebetingelser 23
   4.5. Trykkbetingelser 23
   4.6. Fluksbetingelser 24
   4.7. Permeabilitet 24

5. Resultat
   5.1. Naturlige strømningsforhold 25
   5.2. Strømningsforhold med tunell 27
   5.3. Strømningsforhold med infiltrasjon av vann fra tunellen 30

6. Diskusjon og forslag til videre arbeid 37

7. Oppsummering og konklusjon 39

8. Referanser 40

9. Vedlegg 42

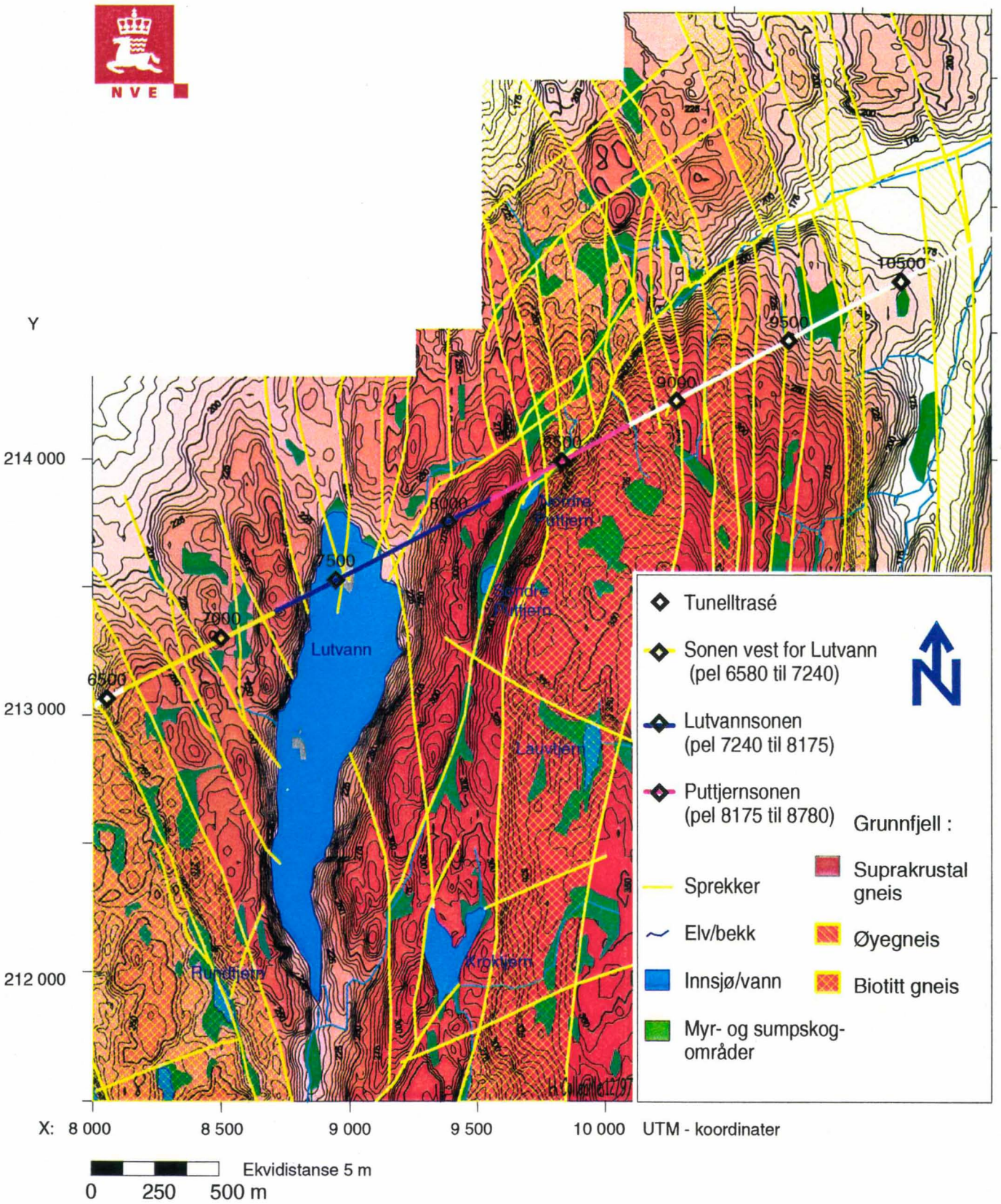
1. Introduksjon

Bakgrunnen for dette prosjektet var de hydrologiske problemene som oppstod i Østmarka som følge av tunellarbeidene i Romeriksporten. Disse problemene er belyst i et stort antall rapporter (Snilsberg og Kværner, 1997; Heimli, 1998; Jensen et al., 1998; Jensen, 1998; Magnell, 1998; NSB-Gardermobanen AS, 1998; Rudolph-Lund og Jensen, 1998; Snilsberg et al., 1998; Snilsberg, 1998; Aars Ø., 1998). Hensikten med dette prosjektet er å simulere strømningsforholdene i Puttjernsonen. Utgangspunktet for simuleringene er den kunnskapen som er etablert om de hydrologiske og geologiske forholdene i det aktuelle området. Resultatene fra simuleringene av Puttjernsonen kan senere integreres i en større regional modell som dekker hele det berørte området. Med god beskrivelse av geometri, materialegenskaper og mest mulig riktige grensebetingelser kan slike numeriske simuleringer benyttes for å evaluere effekten av tekniske tiltak.

Erfaringen med numerisk simulering av vanntransport i oppsprukket fjell er relativt begrenset i Norge. Til dette prosjektet har NVE tatt i bruk numerisk teknologi basert på 'front tracking' (Bratvedt et al., 1994). Metoden er anvendt på grunnvannsproblemer tidligere (Bratvedt et al., 1992), men er fortsatt relativt ukjent i det norske hydrologiske miljøet. Front tracking er utviklet med tanke på flerfasestrøm og er spesielt designet for å beregne migrasjon av vann-, olje- og gassfronter i forbindelse med reservoarsimulering for oljeindustrien. Metoden er utviklet og implementert i to programmoduler (FRONTSIM og GRIDSIM) av det norske firmaet *Technical Software Consultants* som i dag er en del av *Schlumberger-GeoQuest*. I FRONTSIM er fronttrackingalgoritmene implementert, mens GRIDSIM er et 3D visualiseringsverktøy med innebygde muligheter for interaktiv redigering. En viktig bihensikt med vårt prosjekt er å vinne erfaring med disse programpakkene. En kort beskrivelse av fronttracking er tatt med nedenfor.

Foreløpig har vi kun simulert vannets strømning. Væskebevegelsen er m.a.o. begrenset til én fase. Vi har derfor ikke sett på alle mulighetene som ligger i FRONTSIM. Innledningsvis kan vi likevel slå fast at de matematiske strømningslikningene løses meget effektivt. Dette gjør det mulig å operere med et stort antall elementer i griddet (10^5) uten at tidsforbruket blir uforholdsmessig stort. Dermed kan de høypermeable sonene (sprekkene) diskretiseres med stor oppløsning. Et viktig siktemål med dette arbeidet er å evaluere hvilken innvirkning komplisert geometri har på den numeriske løsningen av strømningsfeltet, og hvor stor oppløsning det er hensiktsmessig å arbeide med.

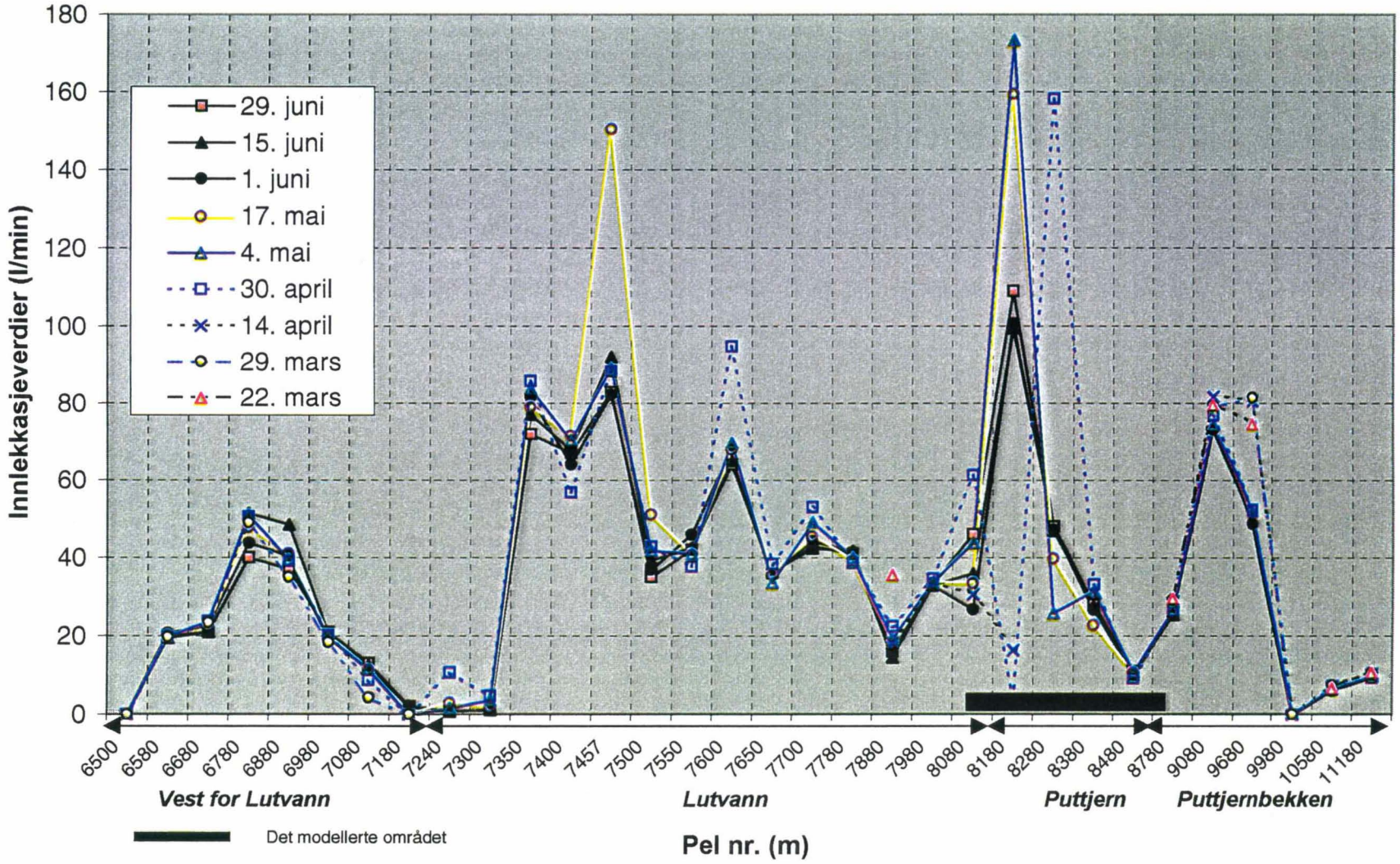
På bakgrunn av NSB-Gardermobanens sprekkekart, flybilder (Foto: Fjellanger Widerøe AS) og topografiske kart har NVE laget et regionalt sprekkekart over området ved Lutvann (fig. 1). I tillegg til sprekkegeometrien utgjør estimater for vannbalansen, lekkasjemålinger i tunellen (fig. 2), og vurderinger av grunnvannsforholdene viktige input-data til simuleringene. Det er også gjennomført et svært viktig sporstoff-forsøk som viser vannets oppholdstid fra bunnen av Nordre Puttjern og ned i tunellen (Pedersen, 1997). Disse dataene blir summarisk beskrevet i denne rapporten.



Figur 1.

Regionalt sprekkekart over Østmarka ved Lutvann

Kartgrunnlag:
Økonomisk kartverk i målestokk 1 : 5000,
Oslos vegetasjonskart i målestokk 1 : 10000, NSB-GMBs sprekkekart,
og flybilder (Foto: Fjellanger Widerøe AS, Dekning 11692, 07-1994)



Figur 2. NVEs lekkasjemålinger i Romeriksporten (1998)

I dette prosjektet har vi behandlet hver enkelt sprekkesone som et homogent objekt. Dette er en grov forenkling av virkeligheten. Vanntransport i oppsprukket fjell skjer langs foretrukne strømningsveier. Ofte blir dette karakterisert som kanalstrømning. Dette fenomenet er meget godt dokumentert gjennom internasjonal forskning (Tsang and Neretnieks, 1998), og er også observert gjennom et sporstoff-forsøk i Romeriksporten (Pedersen, 1997). Slike foretrukne strømningsveier er det ikke mulig å simulere uten at det blir tatt tilstrekkelig hensyn til heterogeniteten i de hydrauliske egenskapene i sprekkesonene. I vår rapport er hver sprekkesone behandlet som et homogent porøst medium. Effekten av kanalisering blir dermed kamuflert. Vi har likevel valgt å publisere resultatene av disse numeriske eksperimentene hvor sprekkesonene er "homogenisert", fordi de illustrerer hovedbildet i strømningsbevegelsen av vann fra overflaten og inn i tunellen. Detaljer i strømningsbildet som f.eks. effekten av vanninjeksjon i sprekkesonene, kan vi derimot ikke si noe om før heterogeniteten er inkludert. For å skille helt entydig mellom injeksjon av tetningsmidler i bergarten og vanninjeksjon blir det siste kalt *vanninfiltrasjon* isteden for *vanninjeksjon* i denne rapporten. Vanninfiltrasjon er foreslått som et tiltak for å nå NVEs konsesjonskrav m.h.t. avrenning fra overflatevannene. Av den grunn har vi også skissert hvordan heterogenitet kan inkluderes i videre simuleringsarbeider ved å benytte kjente stokastiske simuleringsmetoder.

Et langsiktig mål med slike strømningssimuleringer er å utvikle generelle metoder for å utnytte geologisk og hydrologisk informasjon (forkastningsgeometri, permeabilitet, vannbalanse og sporstofforsøk) for å lage konsistente strømningssimuleringer av væske i fast fjell. På den måten kan NVE utarbeide et generelt verktøy som kan benyttes for å evaluere hydrologiske effekter av planlagte tekniske inngrep i fast fjell.

2. Numerisk metode

I dette avsnittet kommenteres noen viktige trekk ved front tracking[1]. I tillegg tar vi med et avsnitt om hvordan heterogeniteten i de høypermeable sprekkesonene kan inkluderes i simuleringene.

2.1. Front tracking

Begrepet front tracking kan introduseres ved å se på de fysiske forholdene i et olje- og gassreservoar, nemlig hvordan grensene mellom gass, olje og vann beveger seg som følge av produksjon. Slike fronter kan enten være skarpe eller diffuse. Uansett vil slike fronter vanligvis opptre på en skala som er mindre enn det numeriske griddet som benyttes for å beskrive de fysiske forholdene i reservoaret. Med konvensjonelle numeriske metoder må slike fronter tilordnes det eksisterende griddet og man får en utsmøring av grenseflatene. Dette fenomenet kalles vanligvis numerisk dispersjon eller diffusjon (se f.eks. Kinzelbach, 1986 side 265). Hovedidéen med front tracking er å behandle disse frontene som egne beregningsmessige objekter i første rekke for å kontrollere numerisk dispersjon (Bratvedt et al, 1994). Nærliggende hydrologiske analogier til gass/olje/vannfronter er transport av forurensning og infiltrasjon av nedbør.

Et annet sentralt poeng ved front tracking er at metningen beregnes langs strømningslinjene. Det innebærer at beregningene kan forenkles til en serie med 1-dimensjonale problem. Likningene som beskriver trykket (P_i) og metningen (S_i) for fase i utgjør et koblet system. I

[1] Et godt norsk ord for "front tracking" kunne vært "front (for)følging", men siden front tracking er et innarbeidet internasjonalt begrep benytter vi den engelske betegnelsen i det følgende.

programmet FRONTSIM (som er en implementering av metoden front tracking) oppdateres metningen etter at trykket er beregnet. I numeriske termer kalles denne prosedyren Implicit Pressure, Explicit Saturation, IMPES (Bratvedt et al, 1994).

I Østmarka har Romeriksporten ført til at områder som tidligere var vannmettet er blitt umettet - i det minste i en overgangsperiode. Muligheten for å beregne metningsfrontene er derfor interessant i denne sammenhengen. Foreløpig har vi kun sett på én fase, nemlig vannets bevegelse. Det innebærer at vi kun har benyttet en begrenset del av de mulighetene som ligger i FRONTSIM og egentlig ikke har tatt i bruk det som er spesielt for front tracking. Det er likevel nyttig å se hva som ligger av muligheter med front tracking i hydrologisk sammenheng. Det følgende er en kort gjennomgang av de matematiske formuleringene i front tracking basert på Bratvedt et al. (1994). Likhetene med konvensjonelle formuleringer i hydrologi blir påpekt spesielt.

Darcy hastigheten v_i for fase i kan uttrykkes ved Darcys lov:

$$(1) \qquad v_i = -\frac{k_i}{\mu_i}\left\{\frac{\partial P_i}{\partial x} - \rho_i g \frac{\partial z}{\partial x}\right\}$$

hvor permeabiliteten k $[l^2]$ avhenger både av materialegenskapene til den geologiske formasjonen og metningsgraden til væskefasen i. Viskositeten til væskefasen μ_i $[m/l/t]$ og fase tettheten ρ_i $[m/l^3]$ kan være trykkavhengig (m betegner massen, l lengden, og t tiden). Kompressibiliteten for vann er imidlertid meget liten, og i dette tilfellet kan vi se bort fra trykkavhengige endringer i disse parametrene. Det kapillære trykket P_c deles vanligvis opp i to: P_w er trykket i den fuktende fasen (w), og P_o er trykket i ikke fuktende fase (o); $P_c=P_o-P_w$. I denne sammenhengen neglisjeres det kapillære trykket slik at $P=P_o=P_w$. Enheten på trykket er $[m/l.t^2]$. Tyngdens akselerasjon er angitt med g $[l/t^2]$, mens x og z angir h.h.v. horisontal og vertikal retning.

Massebalansen for fase i kan skrives:

$$(2) \qquad -\frac{\partial}{\partial x}(\rho_i v_i) + \Gamma_i = \frac{\partial}{\partial t}(n\rho_i S_i)$$

hvor n er porøsiteten, S er metningsgraden, mens Γ angir en sluk/kilde term. Med *sluk* menes i denne sammenhengen at det forsvinner vann, mens en *kilde* generer vann. I elementer hvor det genereres vann blir divergensen av fluksfeltet F ($div\ F$) positiv mens i slukelementer blir divergensen negativ. I alle andre elementer skal divergensen være lik null for at massebalansen skal være oppfylt.

Kombineres (1) og (2) ovenfor kun med hensyn til vannfasen får vi:

$$(3) \qquad \frac{\partial}{\partial t}(n\rho\ S\ ) - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{k}{\mu}\rho\ \frac{\partial}{\partial x}\{P - \rho\ gz\}\right] = -\Gamma$$

som er en form for Richards likning, mye brukt i hydrologisk sammenheng for å beregne vannets strømning i umettet sone. I Richards likning uttrykkes ofte permeabiliteten som en parameterisert funksjon av metningsgraden (f.eks. Mualem - van Genuchten relasjonen).

Dersom både væsken og det faste stoffet er inkompressibelt (n og ρ konstante), kan (3) skrives:

$$(4) \qquad n\rho \frac{\partial}{\partial t}(S) - \rho \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{k\,\rho\,g}{\mu}\frac{\partial}{\partial x}\left\{\frac{P}{\rho\,g} - z\right\}\right] = -\Gamma$$

Hvis vi forenkler ytterligere ved kun å se på mettet strøm (d.v.s $\partial S/\partial t=0$) kan (4) skrives:

$$(5) \qquad \frac{\partial}{\partial x}\left[K\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right] = \frac{\Gamma}{\rho}$$

hvor $K = k\rho g/\mu$ $[l/t]$ og kalles hydraulisk ledningsevne, mens $\varphi = P/\rho g - z$ $[l]$ kalles hydraulisk "head". Fordi vi bare ser på mettet strøm og neglisjerer kompressibiliteten beskriver (5) et stasjonært strømningsforhold. I hydrologisk sammenheng kan Γ f.eks. beskrive nedbør og fordampningsprosesser. I slike tilfeller kan det være hensiktsmessig å se på Γ som en tidsavhengig parameter $\Gamma=\Gamma(t)$. Selvom (5) er en enkel likning å løse rent numerisk, består den største utfordringen i å beskrive den romlige variasjonen av K.

Etter at trykklikningen og fasehastighetene er beregnet lokalt for et tidsskritt, viser Bratvedt et al. (1994) hvordan metningslikningen kan løses som et begrenset sett med initialverdiproblemer (Riemann problem). Teori fra "dimensional splitting" benyttes for å utlede hvordan metningslikningen kan løses som et 1-dimensjonalt problem dersom hastighetsfeltet er i 2 eller 3 dimensjoner. Dette betyr at frontene beregnes langs strømningslinjene, noe som forenkler den numeriske prosedyren betraktelig. I fronttrackingalgoritmen er det en indre iterasjon for hvert tidsskritt for hver front som beregnes. Dette tilsvarer det som gjøres ved konvensjonell løsning av Richards likning når umettet hydraulisk ledningsevne oppdateres ved iterasjoner innenfor hvert tidsskritt. Det er også utviklet metoder for å begrense antall fronter som beregnes slik at kun de signifikante frontene tas med. Dette øker den numeriske kapasiteten ytterligere og resultatet er en meget rask algoritme hvor problemet med numerisk dispersjon er brakt under kontroll.

I hydrologisk sammenheng har det hittil vært vanlig å neglisjere gassfasen. D.v.s. at luften i umettet sone betraktes som passiv, uten innvirkning på vannfluksen. Dette er i de fleste tilfeller en rimelig antagelse. I FRONTSIM kan denne antagelsen tilnærmes ved å la gassfasen være uendelig mobil i forhold til vann. Muligheten til å regne luft- og vannfluks samtidig er imidlertid interessant i forurensningssammenheng, spesielt i tilfeller hvor mikrobiologisk aktivitet inne i den geologiske formasjonen er viktig i opprensningen.

2.2. Heterogenitet

I denne rapporten legger vi vekt på å forenkle geologien. Dette innebærer at hver sprekkesone er representert slik at parametrene i strømningslikningene (permeabilitet og porøsitet) er gitt ved en enkel funksjon $f(z)$ eller en konstant verdi k. Vi vet derimot at sprekkesonene i aller høyeste grad er heterogene. Parametrene i strømningslikningene varierer sterkt fra punkt til punkt. Det er derfor ikke rimelig å forvente realistiske simuleringer før slike romlige variasjoner er tatt med i beregningene. Problemet er imidlertid at heterogeniteten er ukjent. Ved hjelp av kjente statistiske metoder er det imidlertid mulig å generere syntetisk heterogenitet som er geologisk sannsynlig. Selv om dette ikke er tatt med i våre simuleringer foreløpig, skisser vi her kort hvordan slik syntetisk heterogenitet kan inkluderes i simuleringene på et senere tidspunkt.

I dette prosjektet har vi kalibrert strømningsparametrene i hver enkelt sprekkesone slik at resultatene av simuleringene stemmer best mulig med observasjonene. Det er imidlertid stor variasjon i observasjonsmaterialet, og det er derfor prinsipielt umulig å tilpasse alle observasjonene ved hjelp av en enkelt verdi k eller en enkelt funksjon $f(z)$ for hver enkelt sprekkesone. La oss derfor anta at parameteren W i en vilkårlig sprekkesone kan avvike med en viss tilfeldighet fra den kalibrerte funksjonen (eller verdien hvis $f(z)=k$):

$$(6) \qquad Y(u,z) = W(u,z) - f(u,z)$$

hvor u angir en posisjon på overflaten (f.eks. i UTM koordinater) og z en posisjon i dypet. Y er altså en stokastisk variabel i rommet angitt som differansen av en gitt parameter W (med ukjent verdi) fra en kjent funksjon f. Permeabiliteten er den strømningsparameteren (W) som vi forventer varierer mest. Det er derfor rimelig å fokusere mest på denne parameteren i det følgende. Flere studier viser at permeabiliteten ofte kan beskrives som en lognormal fordeling (se. f.eks. Tsang and Neretnieks, 1998). Dette forenkler den matematiske beskrivelsen, fordi en normalfordelt variabel $X=lnY$ er fullstendig beskrevet ved hjelp av følgende statistiske momenter: forventningen $E\{X\}$, variansen $Var\{X\}$ og kovariansen $Cov\{X,X'\}$. Forventningen er gitt ved de kalibrerte parametrene i strømningslikningen, mens verdier for variansen og kovariansen må tilpasses.

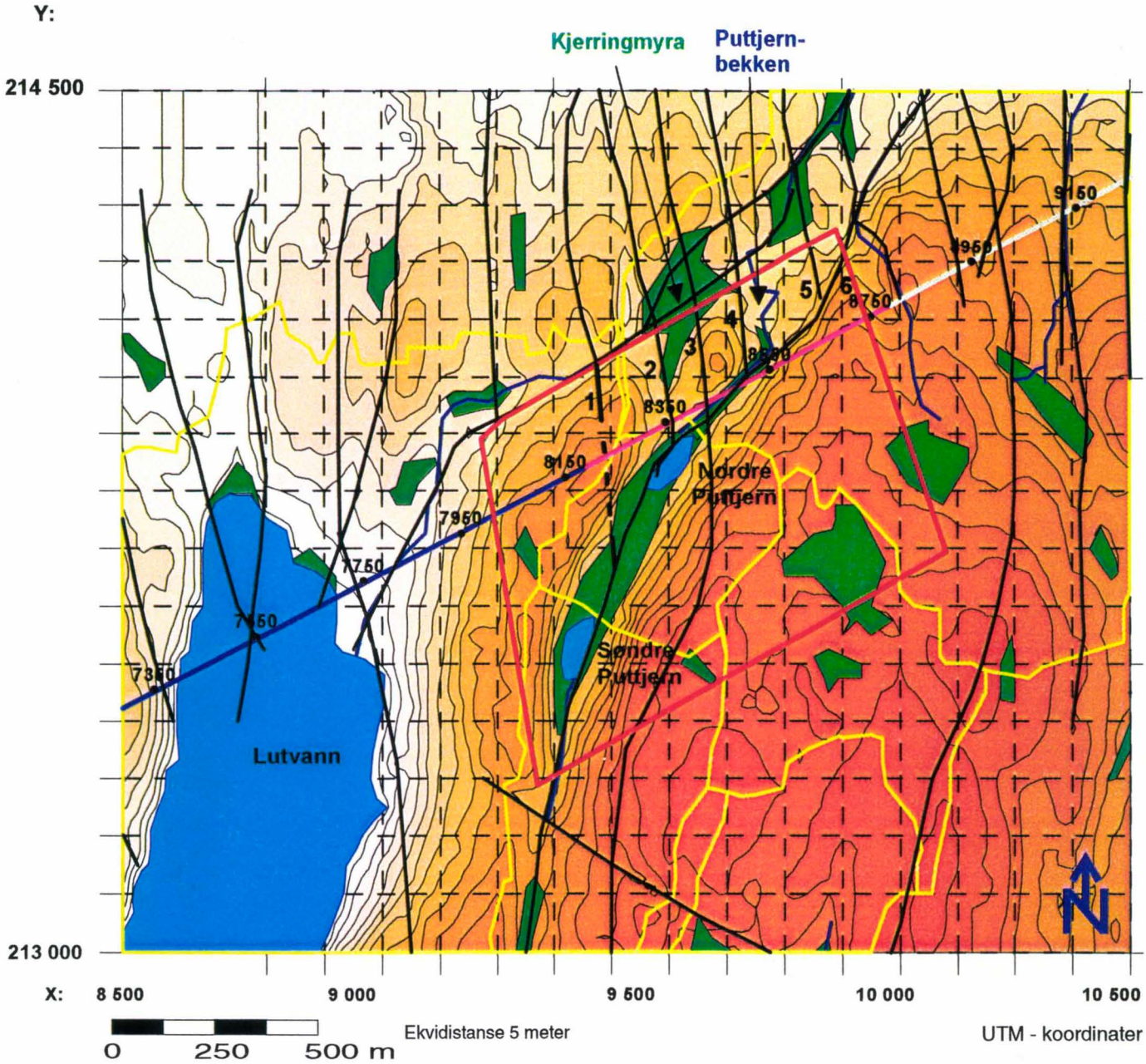
Den romlige korrelasjonsstrukturen beskrives ved hjelp av kovariansfunksjonen. Hvis vi beskriver variasjonen i permeabiliteten innenfor en sprekkesone er det rimelig å anta at kovariansen er stor dersom permeabiliteten måles i to posisjoner som ligger nær hverandre, mens den vil avta når avstanden øker. Sagt med andre ord vil sannsynligheten for at man måler permeabiliteten i samme foretrukne strømningsvei øke dersom man måler i to posisjoner som ligger nær hverandre. Tilsvarende minker sannsynligheten dersom man måler i to posisjoner langt fra hverandre. Det samme er tilfelle om man måler i et område som ikke er så vannførende. Utfordringen er å generere data som tilfredstiller slike statistiske definisjoner og som samtidig er geologisk realistiske. Som sagt er heterogenitet i sprekkesonene ikke lagt inn i våre simuleringer foreløpig, men det vil være en interessant oppfølging ved senere simuleringer.

3. Datagrunnlag

For helhetens skyld tar vi med en summarisk beskrivelse av de viktigste dataene; sprekkegeometrien, vannbalansen og de viktigste resultatene fra et sporstofforsøk. Til slutt skisseres hvordan disse dataene benyttes i kalibreringsprosedyren.

3.1. Sprekkekart

Bergartene i vårt modellområde (fig. 1 og 3) er en del av det sydøstnorske grunnfjellsområde dannet under den sveko-norvegiske fjellkjede foldingen. Det antas at bergartene i området er ca. 1 milliard år gamle. Som vi ser av kartene på fig. 1 og 3 er det mulig å skille ut to hovedretninger på svakhetssonene og forkastningene. Den mest dominerende retningen er nord-sør, men det er også forkastninger i østvestlig retning. I Perm (280 millioner år siden) ble området utsatt for tensjon. Dette knyttes til dannelsen av Oslograben like vest for det aktuelle området.



Tunelltrasé

Lutvannsonen (pel 7240 til 8175)

Puttjernsonen (pel 8175 til 8780)

Elv/bekk

Innsjø/vann

Myr- og sumpskog-områder

Nedbørfeltgrenser

1 Sprekker

Kartgrunnlag:
Økonomisk kartverk i målestokk 1 : 5000;
og Oslos vegetasjonskart i målestokk 1 : 10000;
NSB-GMBs sprekkekart;
og flybilder (Foto: Fjellanger Widerøe AS, Dekning 11692, 07-1994)

Figur 3

Kart over det modellerte området

Dette har reaktivert svakhetssoner og forkastninger som ble dannet under den sveko-norvegiske fjellkjedefolding. Oslograben er orientert nord-sør. Dette indikerer en kraftig tensjon i østvestlig retning i de tilgrensende bergartene. Dette kan ha ført til størst åpning av sprekker og svakhetssoner med utstrekning nord-sør, mens forkastningene i østvestlig retning kan ha blitt utsatt for sidelengs bevegelser (strike-slip bevegelse). Den siste geologiske hendelsen av betydning for permeabiliteten skjedde da den store skandinaviske innlandsisen smeltet for ca. 10 000 år siden. Den påfølgende landhevningen endrer permeabiliteten ved å åpne gamle sprekker og svakhetssoner. Dagens landhevning i Østmarka er estimert til ca. 4 mm pr. år (Sørensen et al., 1997).

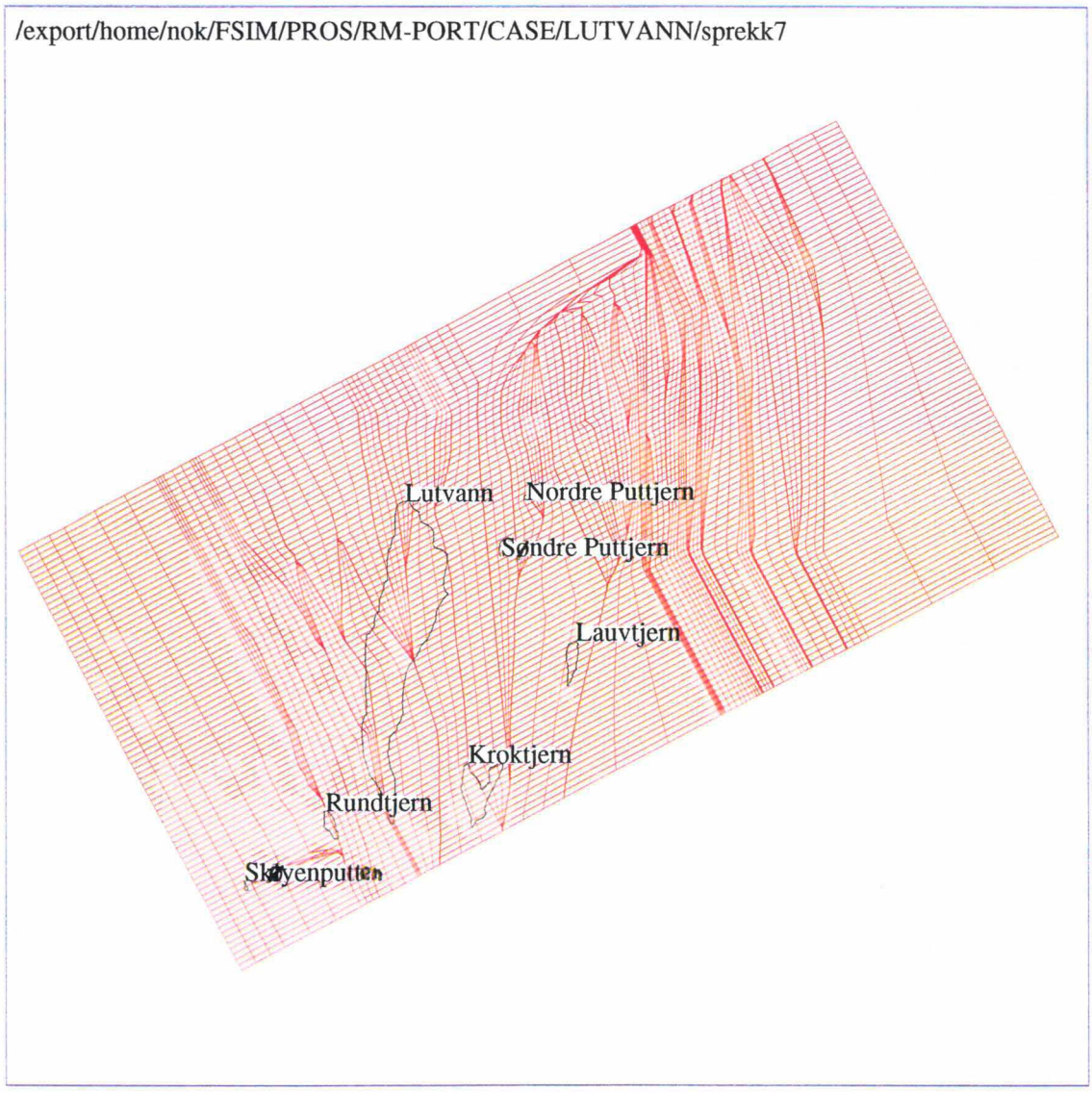
Obervasjoner av den regionale grunnvannstanden tyder på at nord-sørforkastningene i store trekk er mer permeable enn øst-vestforkastningene (NSB-Gardermobanen AS, 1998, sammendrag side 7). I Puttjernsonen derimot er øst-vestforkastningen mest vannførende (NSB-Gardermobanens ekspertgruppe 07.07.98 pers. med.). I tillegg til nord-sørforkastningene som automatisk blir inkludert i den regionale strømningsmodellen (fig. 4), har vi manuelt lagt inn øst-vestforkastningen i vår modell av Puttjernsonen ved hjelp av såkalte lokale gridd (fig. 5).

Sprekkekartleggingen vist i fig. 1 og 3 er basert på NSB-Gardermobanens sprekkekart, flybilder og topografiske kart. I tillegg er logget informasjon fra tunelldrivingen (NSB – Gardermobanen AS, 1997) sammenstilt for en del av Puttjernsonen (fig. 6). Denne figuren viser at de fleste sprekkesonene skjærer tunellen med et fall på ca. 75-85°. Noen skjærer tunellen med et fall på ca. 60° (bl.a. hovedforkastningen med retning øst-vest), mens andre er tilnærmet horisontale. De horisontale sprekkene er antagelig underrepresentert fordi de er relativt vanskelige å oppdage under tunelldrivingen (NSB-Gardermobanens ekspertgruppe 28.08.98 pers. med.). Denne figuren illustrerer hvor komplisert sprekkegeometrien er i dette området. Så vidt vi vet er det ikke avsluttet noen sammenfattende analyse av litologi (bergartstype), sprekkegeometri (strøk, fall og sprekkeåpning) og innlekkasjeverdier, noe som utvilsomt hadde vært nyttig. I den griddede modellen vi arbeider med er samtlige forkastninger lagt inn med vertikalt fall. Dette er en nødvendig forenkling for å gjøre griddingen praktisk håndterbar. En gridding av forkastningene slik de fremstår i fig. 6 ville ført til et uforholdsmessig komplisert gridd basert på nåværende teknologi og ressurser.

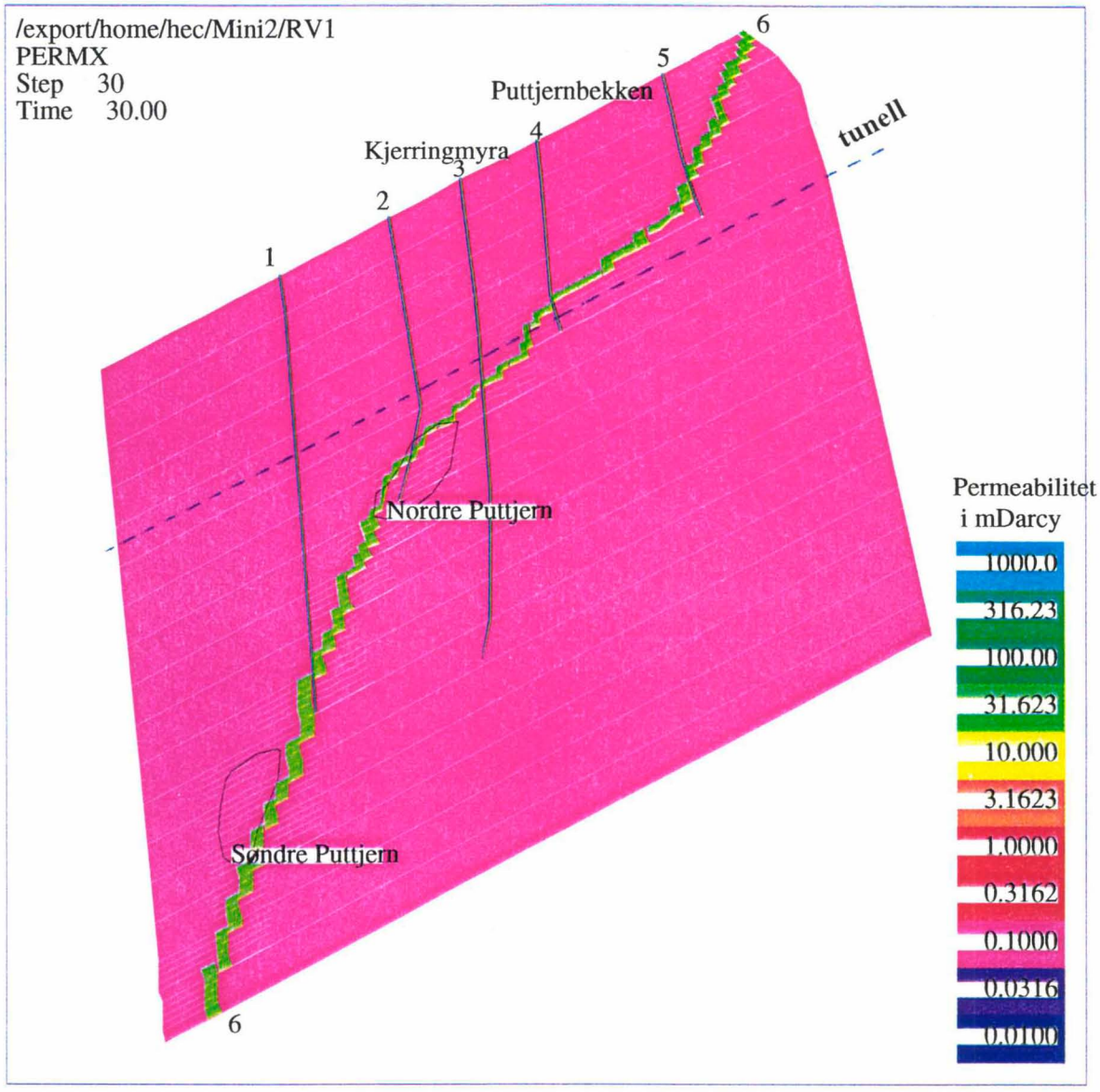
I det følgende skiller vi ikke mellom forkastninger, sprekkesoner eller svakhetssoner. Det som er viktig i vår sammenheng er permeabiliteten i disse sonene, og vi kaller derfor alle disse sonene med høy permeabilitet for sprekkesoner. For at en sprekkesone skal bli karakterisert som en forkastning må det ha skjedd en forskyvning. Dette er ikke alltid like lett å påvise i praksis.

3.2. Vannbalanse

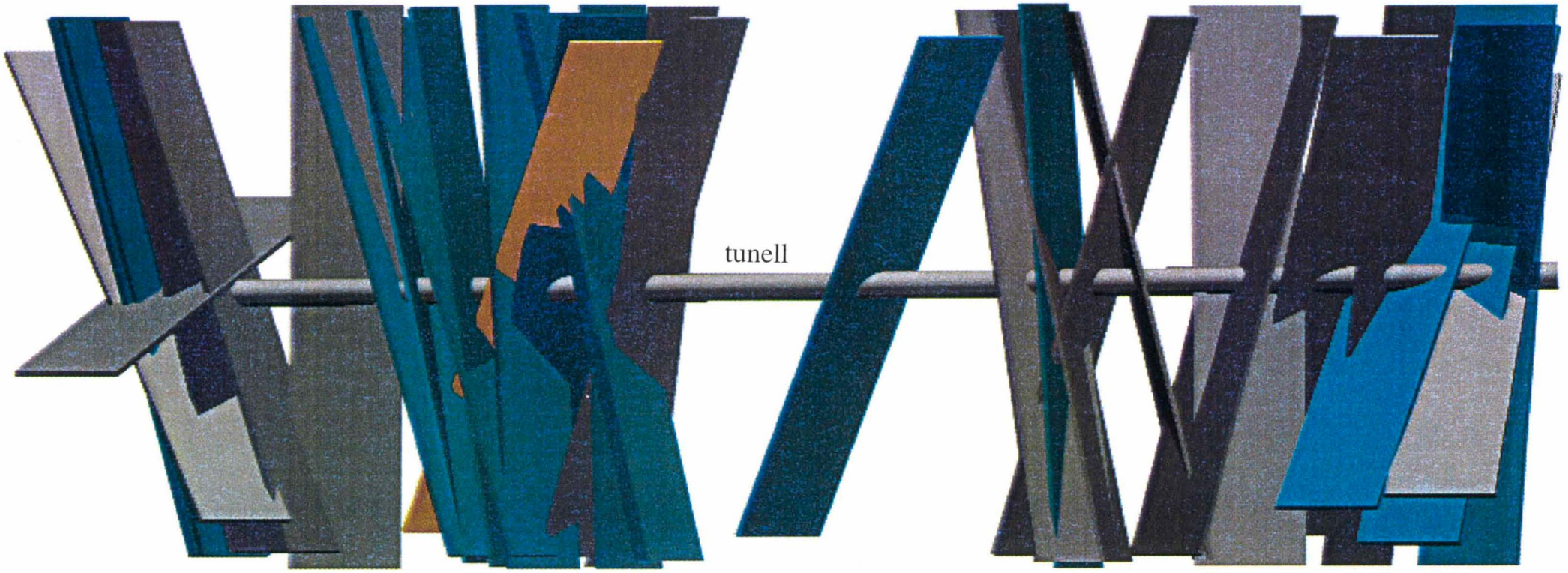
Omfattende registreringer er gjennomført for å kartlegge vannbalansen i Østmarka (NSB-Gardermobanen AS, 1998). Det mest relevante for vår lokale modell gjelder området kalt Puttjern/Puttdalen (pr. 8180-8780) samt Puttjernbekken (pr. 8780-11180). I dette området er det registrert en grunnvannssenkning på opptil 50 m (NSB-Gardemobanen AS, 1998, sammendrag side 8). I januar 1998 var største grunnvannsenkningen ca. 32 meter (Snilsberg, 1998). Kartet på figur 7 indikerer hvor stor vannstandsenkning var i det aktuelle området den 16. januar 1998. Det rapporteres at tettetiltakene har hatt god effekt, men at grunnvannet ikke er tilbake på opprinnelig nivå til tross for at sommeren har vært preget av mye nedbør og lave temperaturer.



Figur 4. Kart over den regionale modellen.
Modellen er konstruert på grunnlag av sprekkekartleggingen vist i fig 1.
Totalt er den regionale modellen på 98987 elementer (7 lag).



Figur 5. Sprekkesoner i den lokale modellen. De 6 viktigste sprekkesonene i den lokale modellen er avmerket. Legg merke til hvordan øst-vestforkastningen skaper forbindelse mellom nord-sørsprekkesonene.

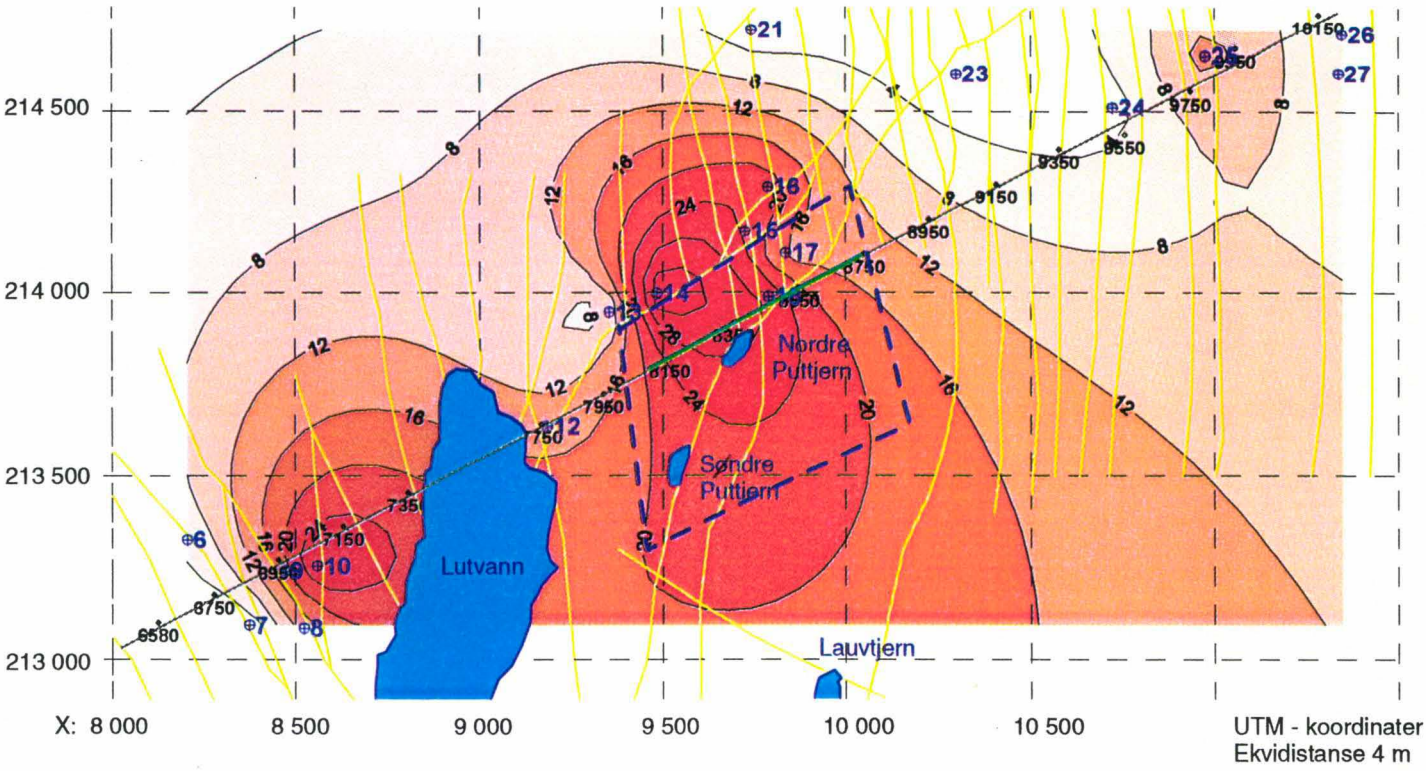


Pr. 8300
Sør-vest

Pr. 8800
Nord-øst

100 m

Figur 6: 3D-representasjon av sprekkegeometrien i en del av Puttjernsonen
Sterkt vannførende sprekker er avmerket med blått. Forkastningen øst/vest er avmerket i brunt.
Grunnlag: NSB/SRG logget informasjon fra tunellboring
og innlekkasjeverdier pr sonderboringsomgang i Puttjernsonen (sept./des.1996)



Grunnvannsnivå i meter fra topp rør

Innsjø/vann

Fjellbrønner

Sprekker

Tunelltrasé

Puttjernsonen

Figur 7

Grunnvannsnivå i rørbrønner den 16. januar 1998.
Kilder: Grunnvannsnivåmålinger fra Jordforsk.

Før grunnvannet i fjellmassene og løsmassene rundt Puttjernene er fylt opp vil netto utstrømning av Puttjernene være større enn netto innstrømning. Overføringen av vann fra Kroktjern til Søndre Puttjern fortsetter etter behov. I våre simuleringer har vi foreløpig ikke inkludert denne tilleggskilden som ligger i vannoverføring fra Kroktjern til Søndre Puttjern.

Lekkasjevannet i tunellen er målt med ujevne mellomrom. Måling registrert 29.06.98 gav 193 l/min i Puttjernsonen (fig. 2). NVEs konsesjonskrav for denne sonen er 100 l/min. Rapporten dokumenterer også den sterke reduksjon i lekkasjeverdier fra maks. ca. 700 l/min til ca. 170 l/min som følge av injeksjon bl. a. med kjemiske tettemidler. Lekkasjene økte imidlertid noe under vårsmeltningen (NSB-Gardermobanen AS, vedlegg 3, fig. 4). Lekkasjeverdier målt i Romeriksporten fra pel 8080 til pel 8780 våren 1998 benyttes som grunnlag for å kalibrere modellen (det finnes ikke pålitelige data før mars 1998). Total lekkasje for denne strekningen var ca. 250 l/min i april 1998, dvs. ca. 360 m^3/dag (fig. 2).

NSB-Gardermobanen skriver at "Øst for Lutvann og i Puttjernsonen er poretrykket i tunellen nå i begynnelsen av juni *(1998 vår anm.)* 16 til 16.5 bar. Naturlig vanntrykk basert på vannstandsobservasjonene i brønn 14 nord for tunellen *(fig. 7 vår anm.)*, er i størrelsesorden 17 bar" (NSB-Gardermobanen AS 1998, vedlegg 3 side 9). Det er imidlertid verdt å merke seg at disse poretrykksmålingene varierer sterkt. Det vises også til målinger som ligger hele 8.5 bar lavere enn hydrostatisk trykk. Dette illustrerer godt de store problemene man har med trykkmålinger i et heterogent oppsprukket fjell.

3.3. Sporstoff-forsøk

NVE (Pedersen, 1997) gjennomførte et sporstofforsøk den 28.08.1997 som påviste at transporttiden fra bunnen av Nordre Puttjern til tunellen var mindre enn 5 timer (fig. 8). Vertikal avstand fra Puttjern til tunellen er ca. 190 m. Denne informasjonen er svært viktig når strømningslikningene skal kalibreres. Dette forsøket skjedde før de viktigste tettetiltakene ble gjort og illustrer derfor godt hvor store permeabiliteter man må forvente i dette området. De planlagte vanninfiltrasjonsanleggene skal etter det vi har fått opplyst, plasseres utenfor sonen hvor det er gjort tettinjeksjon rundt tunellen. Dette forsøket er derfor svært relevant når infiltrasjonsløsningen skal vurderes.

4. Simulering

Hensikten med dette simuleringsarbeidet er å reprodusere de viktigste trekkene i strømningsforholdene ved to ulike tilstander, nemlig strømningsforholdene før og etter at tunellen ble bygget. De ulike elementene i strømningsproblemet (Puttjernene, Puttjernbekken og tunellen) endrer karakter fra innstrømningsområder til utstrømningsområder avhengig av hvilken tilstand vi ser på. Dette kompliserer selvsagt kalibreringsprosedyren, og det er viktig at frihetsgraden i strømningsproblemet ikke reduseres mer enn det som er strengt tatt nødvendig. Hvis vi f.eks. legger gitt fluks som grensebetingelser i innsjøene vil man aldri registrere utstrømning i disse områdene.

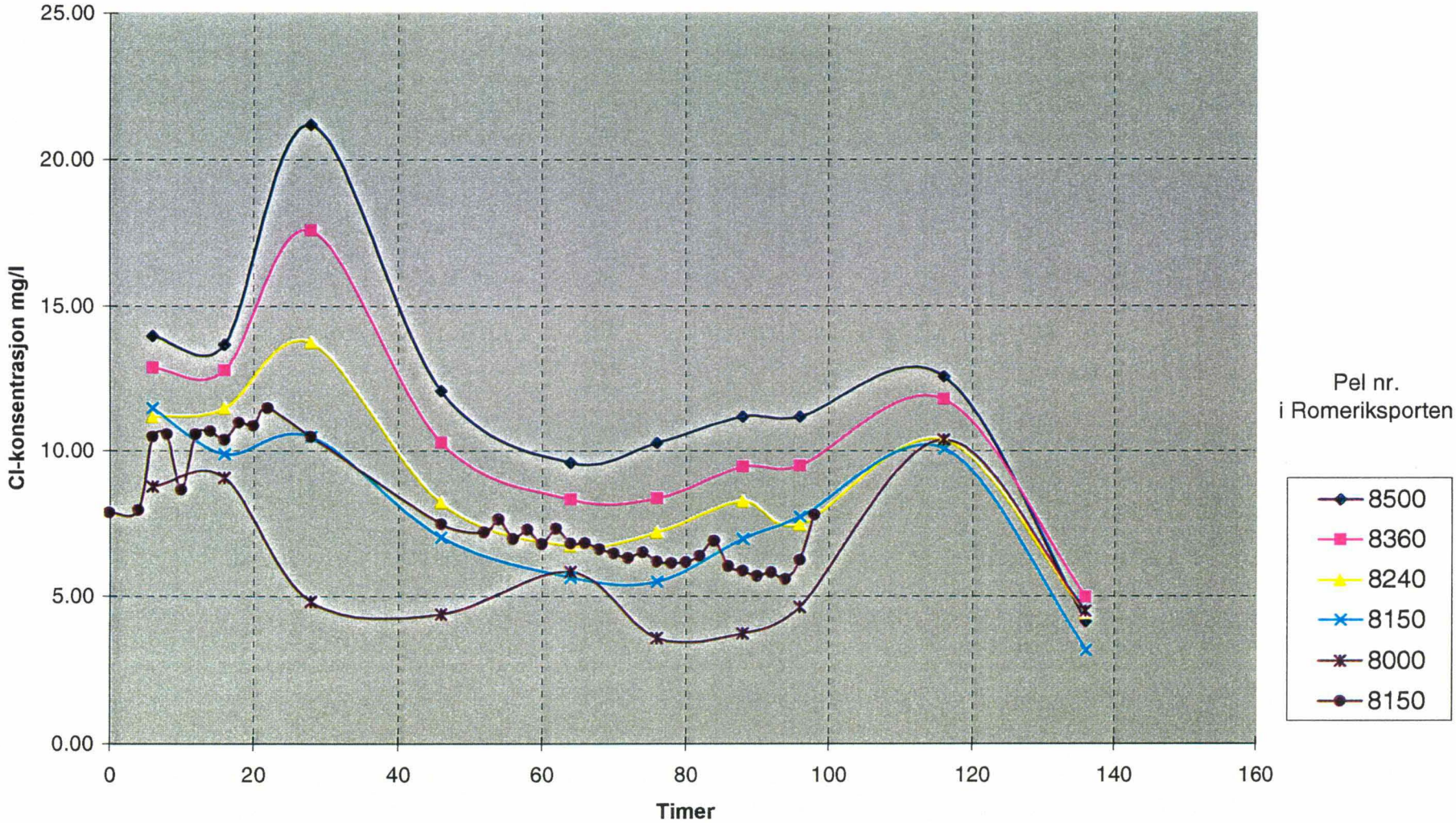


Fig. 8. Kloridkonsentrasjon målt i vannprøver tatt i tunellen ved ulike lokaliteter nedstrøms pel 8500. Tilsettingen av sporstoff ble utført i tidsrommet 15:15 - 17:00 den 28.08.97 i Nordre Puttjern.

4.1. Kalibrering

I praktisk simulering vil de matematiske likningene som beskriver væskestrømningen i en geologisk formasjon alltid være sterkt underbestemt. Dette skyldes at naturlige geologiske formasjoner er meget heterogene. Kalibrering betyr i denne sammenheng å finne et parametersett som reproduserer de mest relevante observasjonene. Samtidig er det viktig at parametrene gjenspeiler de geologiske forholdene på en mest mulig realistisk måte. De viktigste hydrologiske observasjonene er:

- Vannbalansen, inklusive vannlekkasjen inn i tunellen;
- Grunnvannstrykk. Det finnes kvantitative observasjoner i utvalgte posisjoner etter tunellbyggingen, men bare kvalitative vurderinger av forholdene før tunellbyggingen;
- Et sporstoff-forsøk som gir transporttiden fra Nordre Puttjern og inn i tunellen.

Disse observasjonene skal altså reproduseres ved å kalibrere permeabilitet og porøsitet.

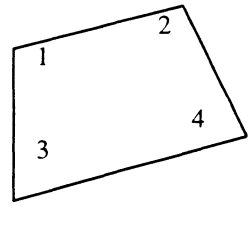
4.2. Modelloppsett

I vår modell av Puttjernsonen (fig.3) forekommer 5 sprekkesoner med retning nord-sør (nr. 1, 2, 3, 4 ,5) og en sprekkesone med retning øst-vest (nr. 6). Øst-vestforkastningen utgjør Puttdalen. Vi antar at den regionale vannfluksen i fjellsprekkene er av liten betydning i forhold til fluksen mellom overflaten og tunellen. Dette er rimelig å anta fordi de naturlige hydrauliske gradientene blir bestemt av topografien, og disse gradientene er relativt små i forhold til gradientene mellom overflaten og tunellen. Vi mener derfor det er forsvarlig å avgrense området slik det framgår av fig. 3, og at fluksen langs randen i dypet kan settes lik null. Området inneholder hele nedbørfeltet til Nordre Puttjern, samt mindre deler av nedbørfeltene til Søndre Puttjern, Puttjernbekken og Lutvann. Overflaten av modellen utgjør et areal på 0,472 km^2 (fig. 9 og 10).

4.3. Gridding[2]

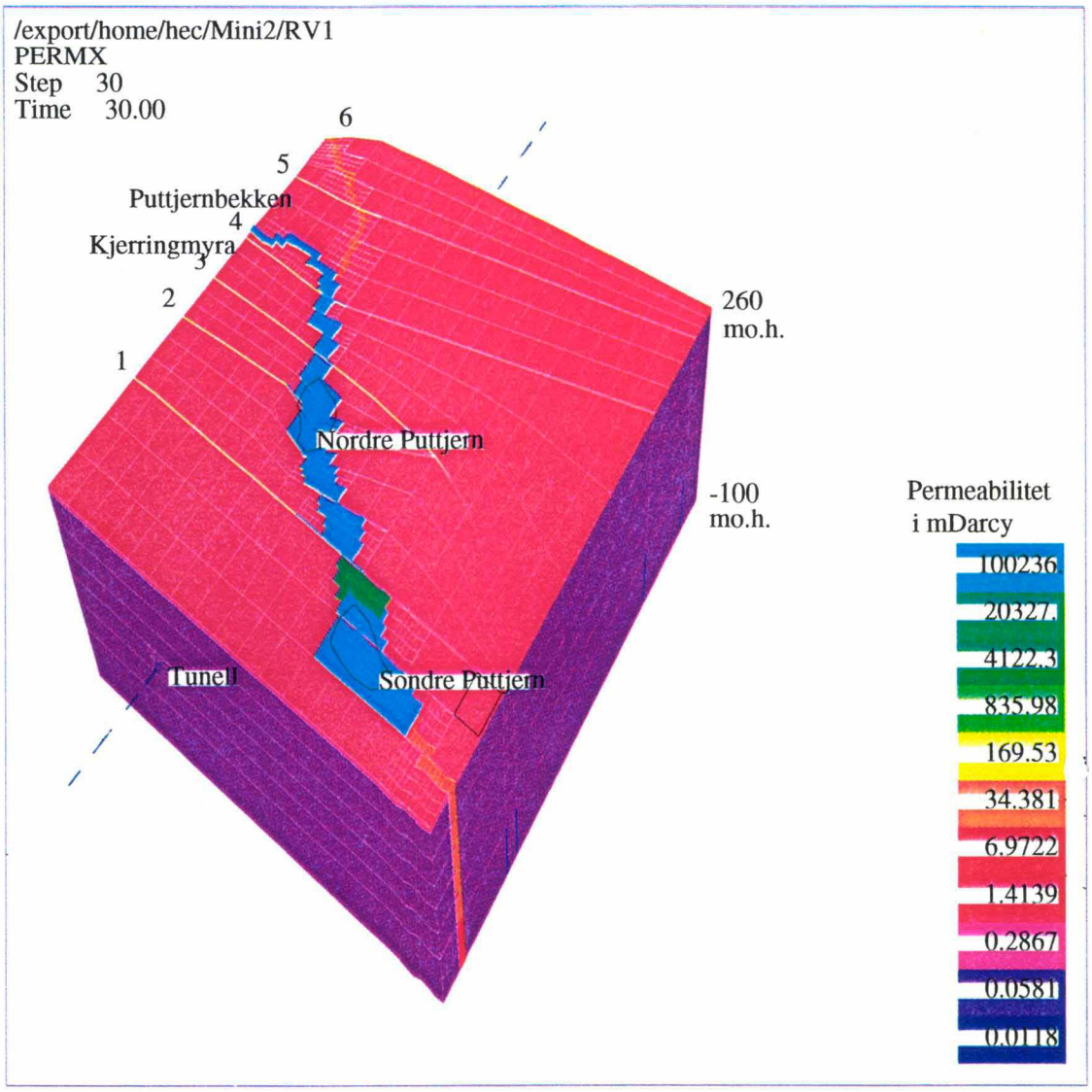
I dette oppsettet utgjør det globale griddet 17×23×7 antall elementer i h.h.v. x-,y- og z-retning, d.v.s. 2737 elementer til sammen. Med det lokale griddet som er lagt inn i sprekkesone øst/vest, i tunellen og Puttjernbekken, består griddet av totalt 11017 elementer. I modellen er y-aksen lagt langs sprekkene som går nord-sør, x-aksen går langs tunellen, mens z-akse er vertikal høyde (m o.h.). Tabell 1 angir UTM-koordinater for de fire hjørnepunktene av modellen. Området tilsvarer i grove trekk hele Puttjernsonen. I NSB-Gardermobanens tunellkoordinater dekker modellen området fra pel 8010 til 8740 (fig.7), d.v.s. ca. 730 m av tunellen.

Punkt	X (øst-koord.)	Y (nord-koord.)
1	9 400.449	213 945.70
2	10 020.460	214 274.67
3	9 462.818	213 297.98
4	10 200.202	213 689.23

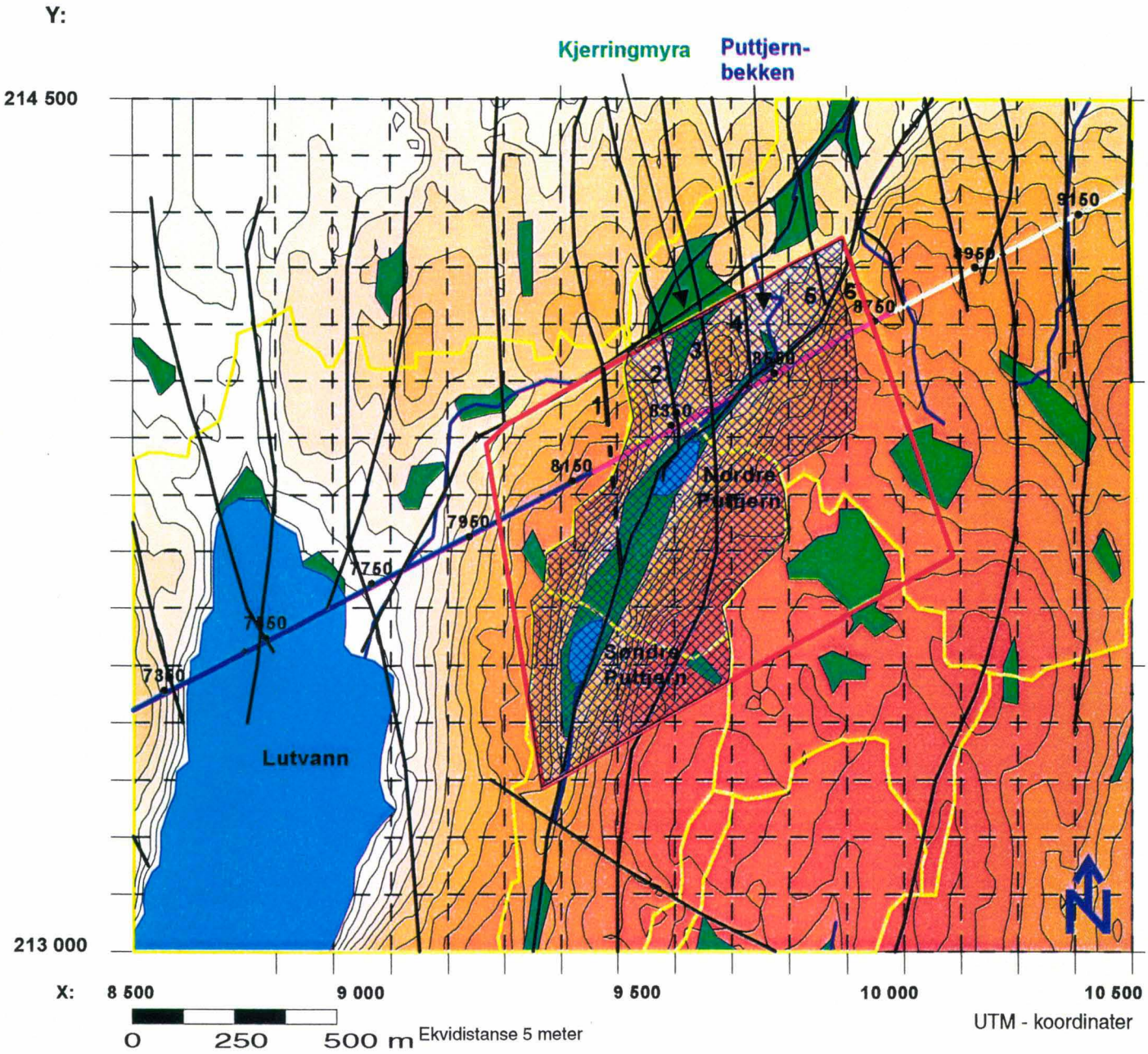


Tabell 1. UTM-koordinater for de fire hjørnepunktene i vårt oppsett

[2] Med gridding menes oppdeling av et kontinuerlig volum (eller område) til et sett med elementer. I denne sammenheng tilsvarer altså hvert element et større eller mindre bergartsvolum.



Figur 9. 3D plott av den lokale modellen med permeabilitet oppgitt i mDarcy. 1 Darcy = 9,87 10^{-9} cm^2; 1 mDarcy tilsvarer ca. 8,48 10^{-9} m/s.



Tunelltrasé	Innsjø/vann
Lutvannsonen (pel 7240 til 8175)	Myr- og sumpskog-områder
Puttjernsonen (pel 8175 til 8780)	Tilsigsområdet
Elv/bekk	Nedbørfeltgrenser
	Sprekker

Kartgrunnlag:
Økonomisk kartverk i målestokk 1 : 5000;
og Oslos vegetasjonskart i målestokk 1 : 10000;
NSB-GMBs sprekkekart;
og flybilder (Foto: Fjellanger Widerøe AS, Dekning 11692, 07-1994)

Figur 10
Tilsigsområdet i det modellerte området

Vi har valgt å simulere trykkforholdene gjennom et horisontalt tverrsnitt i terrenget fordi vi ser bort fra strømning i umettet sone. Dessuten gjør dette kalibreringen enklere. Tykkelsen til det permeable topplaget er satt til 10 meter. Denne tykkelsen tilsvarer omtrent den gjennomsnittlige mektigheten av løsmassene i bunnen av Puttjerndalen (Snilsberg og Kværner, 1997). Utstrømningsområdene Puttjernbekken og Kjerringmyra ligger ca. 260 m o.h. (fig. 9). Der er det derfor valgt å sette referansehøyde på 260 m. I dette oppsettet er det 7 lag med ulike mektigheter (tabell 2).

	Dybde (mo.h.)	
Lag 1	260-250	Topplaget
Lag 2	250-200	
Lag 3	200-150	
Lag 4	150-105	
Lag 5	105-55	Tunellsåle –75 mo.h.
Lag 6	55-0	
Lag 7	0- -100	d.v.s. 100 m u. havet

Tabell 2. Dybdedata.

4.4. Grensebetingelser

Alle strømningsproblem av den typen vi står overfor i Romeriksporten er sensitive til grensebetingelsene. I de tilfellene hvor tilstanden langs grenseflatene er usikre, bør det være stor avstand fra grenseflatene og inn til de områdene som er viktigst å simulere. I vårt tilfelle er områdene mellom innsjøene og tunellen av størst interesse, mens grensebetingelsene (trykk eller fluks) på de flatene som skjærer sprekkeplanene er meget vanskelige å anslå. Disse grenseflatene bør derfor plasseres et stykke unna tunellen. For å evaluere sensitiviteten i det mest interessante området bør grensebetingelsene endres innenfor rimelige intervaller. Slike sensitivitetsanalyser faller utenfor siktemålet med denne rapporten og vil ikke bli diskutert nærmere. En slik analyse bør imidlertid gjennomføres før man anvender resultatene i praksis. Rent matematisk representerer store vannlekkasjer inn i tunellen en fordel i kalibrerings-prosedyren fordi dette endrer de naturlige strømningsforholdene i feltet. Vi har med andre ord to uavhengige grensebetingelser som vi kan teste simuleringene mot. Det innebærer at de viktigste observasjonene bør bli reprodusert med ulike grensebetingelser (med og uten tunell) men med samme parametersett. Slike kalibrerte parametre gjenspeiler gjennomsnittsverdier av de fysiske forholdene for det bergartsvolumet de beskriver.

4.5. Trykkbetingelser

I simuleringene er Puttjernbekken og Kjerringmyra angitt med konstante trykkbetingelser, slik at de kan fungere både som kilder (positiv divergens) og som sluk (negativ divergens). Vi antar at grunnvannsnivået ved utløpet av dette feltet har vært nær overflaten. Dette tilsvarer Kjerringmyra/Puttjernbekken som ligger ca. 260 m o.h.. Grensebetingelsen settes her lik 1 bar. Før tunellen kom antar vi videre at grunnvannet har stått i dagen både ved Nordre og Søndre Puttjern og at denne grunnvannstanden representerer grunnvannstrykket i fjellet. Denne antakelsen vil bli kommentert nærmere i diskusjonen nedenfor. Nordre Puttjern ligger på ca. 264 m o.h. (1,40 bar), mens Søndre Puttjern ligger på 265,5 m o.h. (1,55 bar). Vi tar ut-gangspunkt i et trykkfall i grunnvannet ved Nordre Puttjern på ca. 4 m, og ved Kjerringmyra-

/Puttjernbekken på ca. 40 m. Dette tilsvarer situasjonen som ble rapportert til NVE for vinteren/vår 1998. I tunellen legges også en fast trykkbetingelse på 1.0 bar (atmosfærisk trykk). Effekten av vanninfiltrasjon simuleres til slutt ved å legge inn enkle trykkbetingelser i infiltrasjonspunktene rundt tunellen.

4.6. Fluksbetingelser

Naturlig infiltrasjon av vann gjennom terrengoverflaten ved nedbør og snøsmelting simuleres ved å legge inn fluksbetingelser på overflaten bare i de områdene som forsyner Puttjernbekken og Kjerringmyra i modellen (nedbørfelt til Nordre Puttjern, Søndre Puttjern og Puttjernbekken). Størrelsen på dette arealet er 0.277 km^2 (fig. 10). I modellen har vi brukt en effektiv infiltrasjon på 1.3 mm/dag[3]. Total fluks over dette området er derfor satt lik 360 m^3/dag.

4.7. Permeabilitet

Den viktigste parameteren i vårt strømningsproblem er permeabiliteten i sprekkesonene. Det er viktig å være klar over at det som kalibreres er forholdet mellom infiltrasjon og permeabilitet. I vårt tilfelle holdes infiltrasjonen konstant mens permeabiliteten varieres. Det foreligger ikke noen direkte målinger av permeabiliteten og vi antar derfor isotrope forhold i sprekkesonene, d.v.s. Kx = Ky = Kz. Siden tunellen utgjør den viktigste grensebetingelsen i dette strømningsproblemet, og permeabiliteten i sprekkesonen bestemmer hvordan trykket forplantes i feltet, har vi startet kalibreringen med tunellen som et aktivt element. Dernest kalibreres permeabiliteten i løsmassene i topplaget, som er viktig for de naturlige strømningsforholdene av vann fra Puttjernene og Kjerringmyrområdet. Siden strømningslinjene fra Puttjernene og inn i tunellen står tilnærmet vinkelrett på strømningslinjene i løsmassene fra Puttjernene og ut i Puttjernbekken og Kjerringmyrområdet, vil kalibreringen av disse to strømningsforholdene være tilnærmet uavhengige. For å reprodusere det observerte trykkforholdet i Nordre- og Søndre Puttjern før tunellen ble drevet, er det nødvendig å legge inn ulike permeabilitesverdier i løsmassene mellom disse tjernene. I følge Jordforsk (Snilsberg og Kværner, 1997) er det en fjellterskel mellom Søndre- og Nordre Puttjern myrmassene kun er 1-2 m dype. Denne terskelen er lagt inn i vår modell ved å senke permeabiliteten i et begrenset området nord for Søndre Puttjern.

5. Resultat

I dette avsnittet presenterer vi resultatene av kalibreringen. Vi har som nevnt ovenfor, konsentrert oss om storskalaeffekter i strømningsbildet. Det innebærer at geologien er betydelig forenklet. I praksis betyr dette at hver sprekkesone betraktes som et homogent objekt. For å vise hvilke numeriske eksperimenter vi kan utføre, har vi også tatt med noen eksempler på effekten av vanninfiltrasjon. Slike tiltak påvirker imidlertid strømningsforholdene på en mye mindre skala, noe som krever høyere oppløsning i modellen og mer detaljert informasjon. Disse forbeholdene blir understreket i de avsnittene hvor effekten av vanninfiltrasjon presenteres.

---

[3] NVEs isohydatkart for periode 1930-1960 (NVE, 1987) indikerer en årslig middelavrenning på 13 l/s/km^2. I Grytafeltet litt lenger nord, er gjennomsnittlig avrenning målt til 16.4 l/s/km^2.

5.1. Naturlige strømningsforhold

Den opprinnelige situasjonen, før tunellen ble drevet, er beregnet for stasjonær strømning med konstant trykk i utstrømningsområdene (Puttjernbekken og Kjerringmyra) og med effektiv nedbør som fluksbetingelse langs overflaten. Simulert vannføring i Puttjernbekken er 357.60 m^3/dag, mens fluksen til Kjerringmyra er 2.40 m^3/dag. D.v.s. at det er mindre enn 1 % av den totale avrenningen som strømmer til Kjerringmyra gjennom sprekkesonene. Dette resultatet er rimelig i forhold til det vi har av kvalitative observasjoner. Overflateavrenningen fra Puttjernene fungerer ikke som hovedkilden for Kjerringmyra. Det er det lokale nedbørfeltet som forsyner dette myrområdet. Figur 11 illustrerer strømningsforholdene under naturlige forhold. Mesteparten av strømningslinjene går gjennom løsmassene i Puttdalen og ut i Puttjernbekken, men noen få går også gjennom sprekkesonene 2 og 3 fra Nordre Puttjern til Kjerringmyra. De viktigste resultatene framgår av tab.3-5.

	Kotehøyde (m o.h.)	Hydrostatisk trykk (m v.s.)	Hydrostatisk trykk (bar)
Kjerringmyra/Puttjernbekken:	260.0	0.0	1.00
Puttjern Nordre	264.0	4.0	1.40
Søndre Puttjern	265.5	5.5	1.55

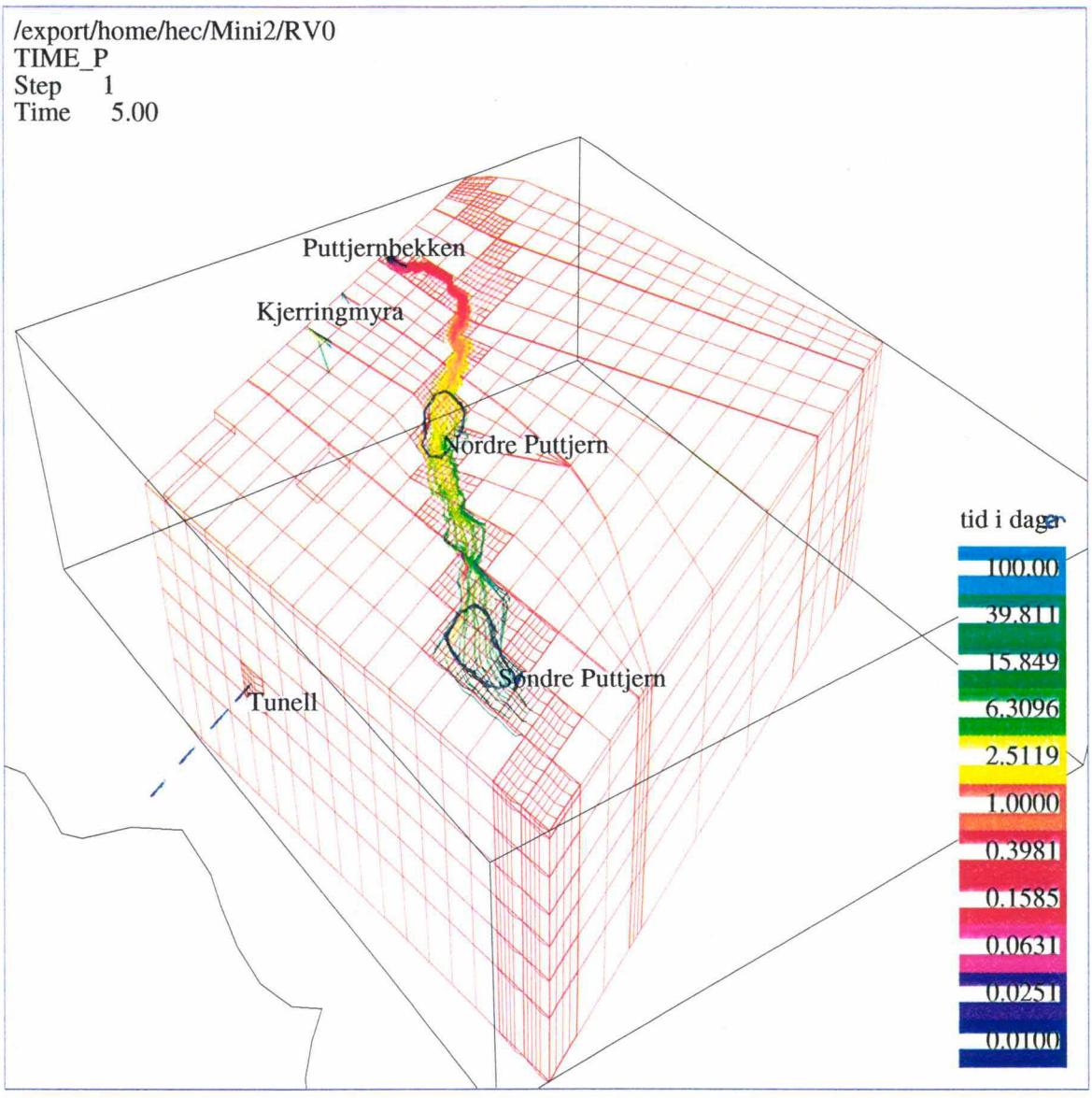
Tabell 3.Trykkforhold på overflaten ved naturlig avrenning (gjennomsnittlig årlig nedbør) ved den opprinnelige situasjonen før tunellen ble drevet. 10 m vann søyle (v.s.) tilsvarer ca. 1 bar.

	Permeabiliteter (m/s)	Bredde (m)
Sprekksoner 1,2,3,4,5 nord-sør	$1.25\ 10^{-6}$	2
Sprekkesone 6 øst-vest	$0.25\ 10^{-6}$	ca. 10
Løsmasser	$8.50\ 10^{-4}$	
Løsmasser i terskelen	$0.68\ 10^{-4}$	
Fast fjell i topplaget	$1.00\ 10^{-8}$	
Fast fjell i mellomlagene	$1.00\ 10^{-9}$	
Fast fjell i bunnlaget	$1.00\ 10^{-10}$	

Tabell 4. Kalibrerte permeabiliter oppgitt som hydraulisk ledningsevne.

	Fluksen (m^3/dag)
Totalt vanninfiltrasjon gj. overflaten	360.00
Vannføring i Puttjernbekken	-357.60
Fluksen i Kjerringmyra	-2.40
Innlekkasjer i tunellen	0.00

Tabell 5. Vannbalanse i feltet under naturlige forhold før tunellen ble bygd. Negativ fluks betyr at det er en netto innstrømning av vann i de elementene som representerer Puttjernbekken og Kjerringmyra. Disse elementene opptrer altså som sluk i modellen.



Figur 11. Strømningsforholdene under naturlige forhold. Strømningslinjene indikerer vannets transporttid i dager til Puttjernbekken/Kjerringmyra ved en porøsitet på 1%.

5.2. Strømningsforhold med tunell

Når tunellen introduseres får man en forandring i trykkforholdet og strømning av vann fra tilsigsområdet til tunellen gjennom sprekkene. På bakrunn av vannstandsmålinger i Puttjernene og fjellbrønner vinteren 97/98 antas det at vannstanden i Nordre Puttjern er ca. 4 meter lavere enn ved den opprinnelige situasjonen, og at den største senkningen i Kjerringmyraområdet er ca. 40 m.

Total lekkasje i tunellen er simulert til 371.2 m^3/dag. Vannføringen i Puttjernbekken er redusert fra 357.60 til 28.8 m^3/dag som er ca. 8 % av normal vannføring. Dette stemmer bra med observasjonene. Øvre deler av Puttjernbekken var tørr vinteren 97/98. Kjerringmyra fungerer som en kilde og forsyner tunellen med 40.0 m^3/dag. Dette fører til at vannstanden i Kjerringmyrområdet senkes med ca. 40 m. Ut fra fig. 12 kan vi tydelig se at en del vann fortsatt strømmer i Puttjernbekken, mens Kjerringsmyra fungerer som et innstrømningsområde til tunellen.

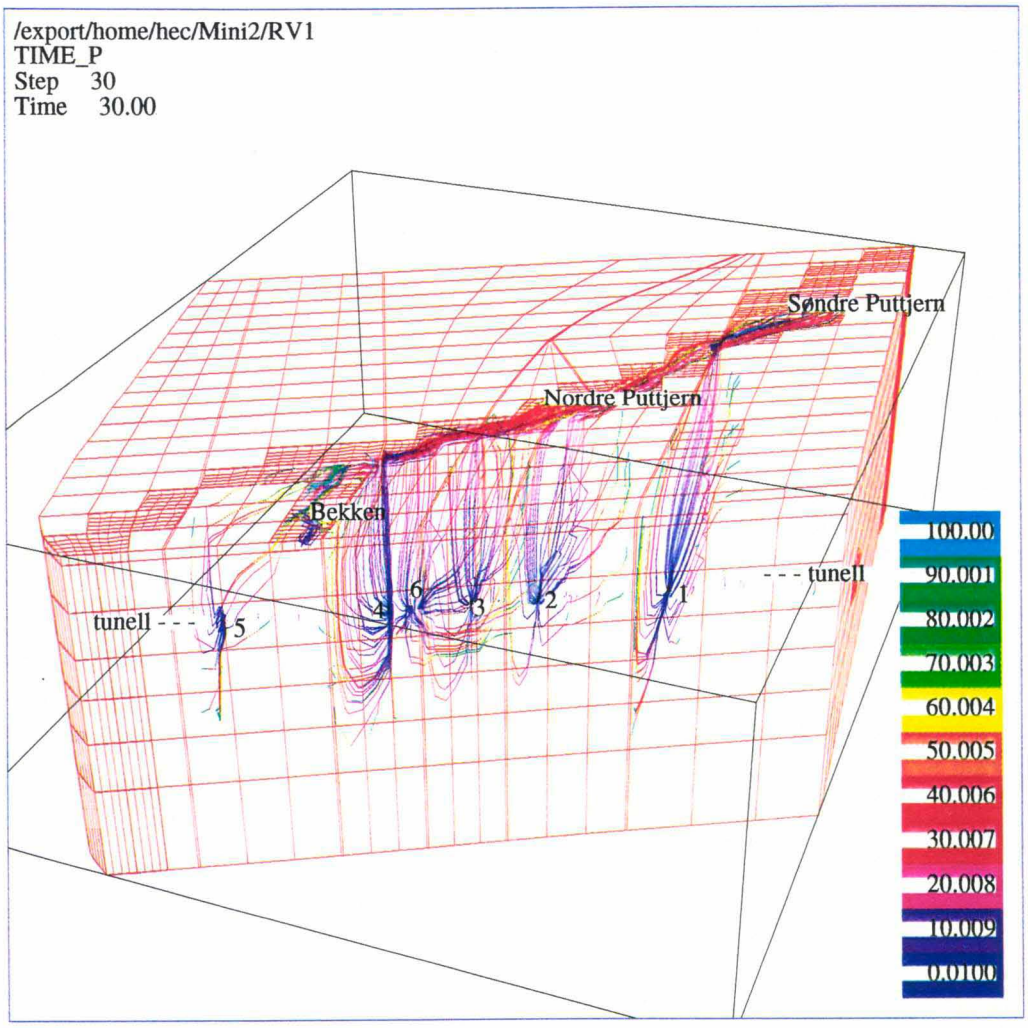
Bruk av sporstoff (tracer) i simuleringene gjør det mulig å visualisere vanntransporten over tid. På den måten kan vi se hvilke veier vannet tar fra Nordre Puttjern til tunellen og samtidig estimere vanntransporttid. Figur 13 viser at det første gjennombruddet av sporstoff registreres etter 4-5 dager, mens maksimum registreres etter 15 dager. Porøsiteten i sprekkesonene var i dette oppsettet satt lik 1 %. Fra et virkelig sporstoff-forsøk vet vi at oppholdstiden var adtskillig kortere. Det ble observert gjennombrudd etter bare 5 timer. Reduseres porøsiteten til 0.1 % blir gjennombrudd simulert til ca. 10 timer. Med de forenklingene vi har gjort med homogenitet i sprekkesonene, er dette i god overensstemmelse med observasjonene. De viktigste resultatene er oppsummert i tab. 6 og 7.

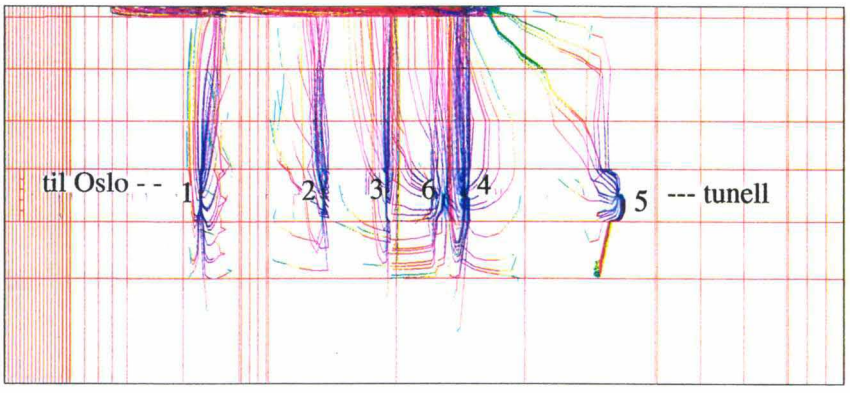
	Hydrostatisk trykk før tunell (bar)	Hydrostatisk trykk med tunell (bar)	Vannstandsendring (m)
Nordre Puttjern	1.40	1.0	- 4.0
Søndre Puttjern	1.55	1.12	- 4.3
Område nord for Nordre Puttjern	1.39	-0.03	- 14.2
Område nord for Søndre Puttjern	1.52	0.24	- 12.8
Ved Kjerringmyra	1.21	-2.88	- 40.9

Tabell 6. Trykkforhold på overflaten og vannstandsendringer etter tunellbygging.

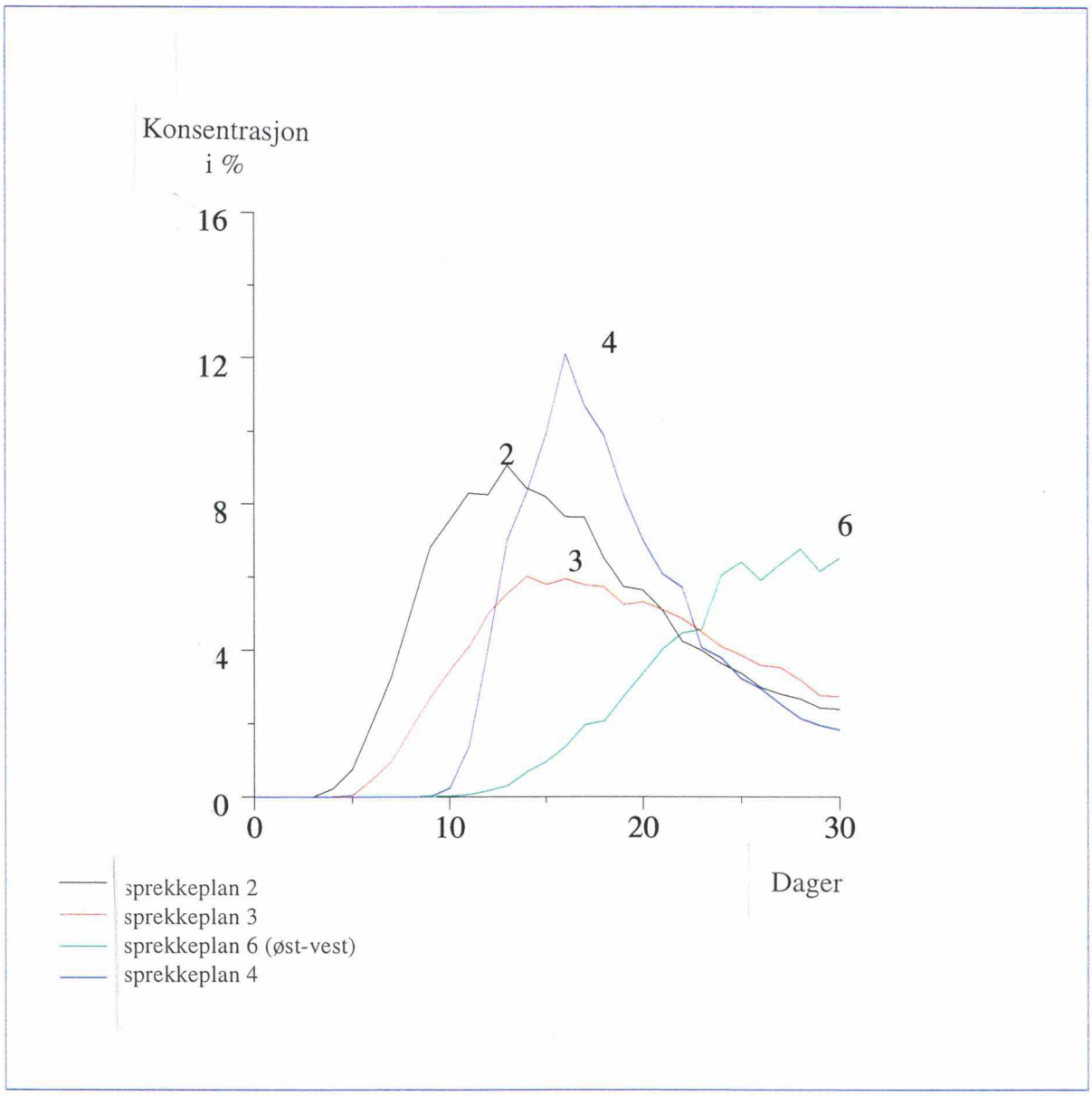
	Fluksen (m^3/dag)
Totalt vanninfiltrasjon gj. overflaten	360.0
Vannføring i Puttjernbekken	-28.8
Fluksen i Kjerringmyra (kilde)	40.0
Innlekkasjer i tunellen	-371.2

Tabell 7. Vannbalanse etter tunellbygging.





Figur 12. Strømningsforholdene etter tunellen ble bygget. Strømningslinjene indikerer vannets transporttid i dager til tunellen /Puttjernbekken ved en porøsitet på 1%.



Figur 13. Gjennombruddskurver i tunellen ved ulike sprekkeplan (for en porøsitet lik 1 %). Sporstoffet er tilsatt i Nordre Puttjern (konsentrasjonen er lik 1 (100%)).

5.3. Strømningsforhold med infiltrasjon av vann fra tunellen

I dette avsnittet tar vi kun med noen få eksempler for å illustrere hva som kan være interessant å simulere m.h.t. strømningsforholdene i Puttjernsonen. Som nevnt ovenfor vil infiltrasjon av vann skje på en skala hvor vi forventer at heterogenitetene i de hydrauliske egenskapene i sprekkesonen vil være av stor betydning. Vi kan derfor ikke trekke noen konklusjoner før denne heterogeniteten er tatt med i simuleringsoppsettene.

Hydrostatiske trykk tilsvarer vekten av en vannsøyle i forhold til et referansetrykk og kan oppgis i meter vannsøyle (m v.s.). Vi har valgt tre ulike injeksjonsnivåer i forhold til tunellen og to ulike injeksjonstrykk 3 og 6 bar over hydrostatisk trykk (tab. 8 og 9). Injeksjonsnivåene fremgår av fig. 14.

	Kote høyde (m)	Hydrostatisk trykk (m v.s)	Hydrostatisk trykk (bar)
Referanseshøyde	260.0	0.0	1.0
Infiltrasjon over tunell (+ 20 m)	105.0	155.0	15.5
Infiltrasjon på tunellnivå	85.0	175.0	17.5
Infiltrasjon under tunell (-20 m)	65.0	195.0	19.5

Tabell 8. Hydrostatisk trykkforhold i ulike nivåer .

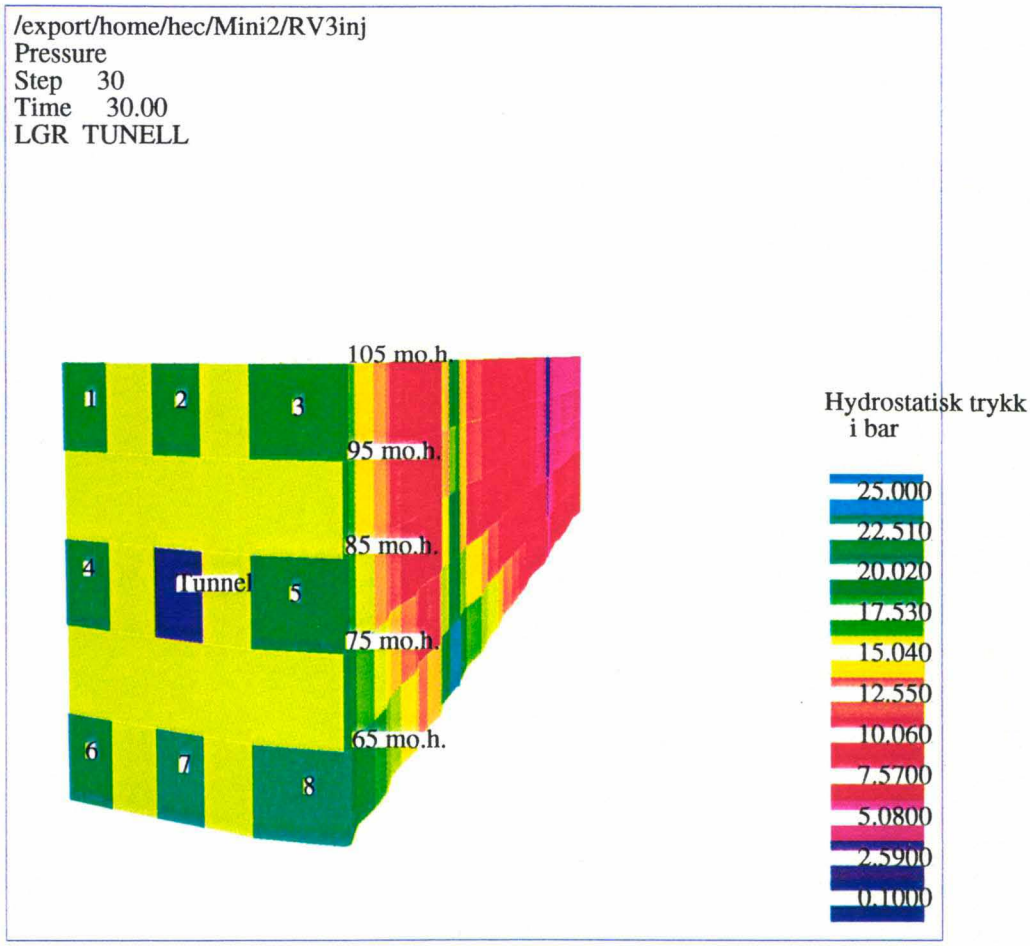
	3 bar overtrykk (bar)	6 bar overtrykk (bar)
Infiltrasjon over tunell (+ 20 m)	18.5	21.5
Infiltrasjon på tunellnivå	20.5	23.5
Infiltrasjon under tunell (-20 m)	22.5	25.5

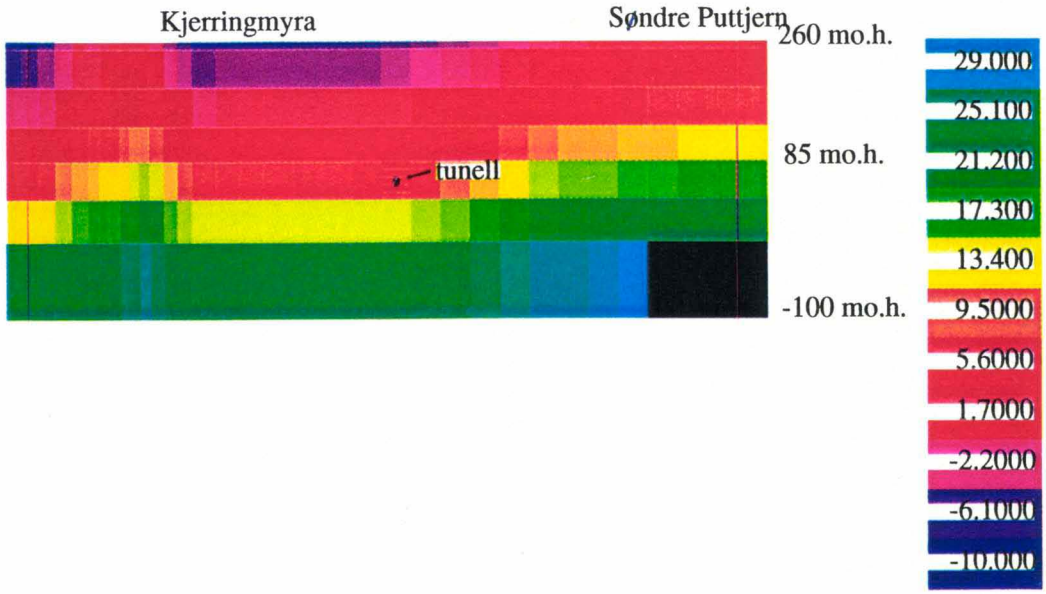
Tabell 9. Injeksjonstrykk i borehullene

5.3.1. Eksempel 1: Vanninfiltrasjon i sprekkesone nr 3

Infiltrasjon i sprekkesone nr. 3 er valgt som eksempel fordi denne ligger nærmest sprekkesone nr. 6. Sprekkesone 6 er viktig i dette strømningsproblemet fordi den skaper hydraulisk forbindelse mellom Puttjernene, nord-sør forkastningene og tunellen. Sprekkesone 3 er også interessant fordi den representerer grensen mellom to bergartstyper, nemlig biotittgneis og suprakrustal gneis (fig. 1).

Tre ulike infiltrasjonsoppsett er valgt i dette eksemplet. Med injeksjon i 4 hull injiseres vann i to nivåer (fig.14). To hull ca. 10-20 m over tunellhenget og to hull ca. 10-20 m under tunellsålen. Hullene er fordelt symmetrisk om diagonalaksen vinkelrett på tunellen (fig. 14). Injeksjon i 8 hull skjer i tre nivåer. I tillegg til injeksjon i posisjonene beskrevet ovenfor, injiseres det rett over tunellen, rett under og rett til siden i avstand 10-20 m fra tunellen. For å illustrere effekten av infiltrasjonstrykket har vi i det ene oppsettet økt trykket fra 3 til 6 bar. Resultatene fra de tre alternativene er vist i tab. 10 og 11, samt vedlegg 1 og 2.





Figur 14. Injeksjonsoppsett i tunellen

	Uten vanninfiltrasjon (m)	Alt. I: 3 bar i 4 hull (m)	Alt. II: 3 bar i 8 hull (m)	Alt. III: 6 bar i 8 hull (m)
Nordre Puttjern	- 4.0	-3.1	-2.9	-2.7
Søndre Puttjern	- 4.3	-3.5	-3.3	-3.1
Område nord for Nordre Puttjern	- 14.2	-12.5	-12.1	-11.7
Område nord for Søndre Puttjern	- 12.8	-11.8	-11.6	-11.3
Ved Kjerringmyra	- 40.9	-36.4	-35.4	-34.2

Tabell 10. Endringer i vannstandssenkningen som følge av vanninnfiltrasjon i sprekkesone nr. 3 (fig. 3). Størrelsen på de beregnede endringene er noe overestimert fordi infiltrasjonen er lagt inn som grensebetingelse i de samme elementene der trykket beregnes.

	Uten vanninfiltrasjon (m^3/dag)	Alt. I: 3 bar i 4 hull (m^3/dag)	Alt. II: 3 bar i 8 hull (m^3/dag)	Alt. III: 6 bar i 8 hull (m^3/dag)
Vannføring i Puttjernbekken (sluk)	-28.8	-90.52	-103.0	-120.2
Fluksen i Kjerringmyra (kilde)	40.0	23.81	20.3	16.0
Lekkasjer ut fra nedbørfelt	-371.2	-293.3	-277.3	-255.7
Mengde av vanninfiltrasjon	0	178.9	239.4	294.0

Tabell 11. Vannbalansen etter tunellbyggingen med ulike infiltrasjonsalternativ. Negativ fluks betyr netto utstrømning av modellen (sluk). Kjerringmyra bidrar til innstrømning i tunellen og betegnes derfor som kilde. Lekkasje ut av nedbørfeltet er innlekkasje i tunellen minus den vannmengden som trengs til infiltrasjonsanlegget for å gi et overtrykk på h.h.v. 3 og 6 bar. Summen av de tre øverste linjene tilsvarer total infiltrasjon, d.v.s. 360 m^3/dag. Den beregnede effekten av infiltrasjon må kun betraktes som en indikasjon av hva vi forventer fordi forutsetningen om homogene sprekkesoner er for enkel i denne sammenhengen.

Med infiltrasjon på 3 bar fordelt på 4 hull (alternativ I i tab 10 og 11) reduseres vannlekkasjen ut av nedbørfeltet med 21 %. Med de forutsetningene vi har lagt inn i modellen gir dette en vannstandsheving på mindre enn 1 m i Nordre Puttjern. For å oppnå dette må ca. 180 m^3 vann infiltreres pr. dag. Vanninfiltrasjon med et overtrykk på 3 bar fordelt på 8 hull (alternativ II i tab. 10 og 11) fører til en reduksjon av lekkasjer ut av nedbørfeltet på ca. 25 %. Dette gir en forventet vannstandsheving i Nordre Puttjern på ca. 1 m, og krever en vanninfiltrasjon på ca. 240 m^3/dag. I alternativ III økes trykket til 6 bar, noe som reduserer lekkasjen ut av nedbørfeltet med ca. 30 %, men samtidig øker vannforbruket til ca. 300 m^3/dag.

For alternativ I (3 bar i 4 hull) kommer 27 % av vannlekkasjen i tunellen fra infiltrasjonsanlegget, for alternativ II (3 bar i 8 hull) tilsvarer infiltrasjonsvannet 40 %, mens for alternativ III (6 bar i 8 hull) er 48 % av lekkasjen infiltrasjonsvann. Det er også her grunn til å minne om at disse estimatene er basert på de forutsetningene vi har lagt inn i simuleringene. Med lavere permeabilitet (d.v.s. mer effektiv tetting) mellom tunellen og infiltrasjonspunktene vil disse lekkasjeverdier bli redusert.

Figur 15 viser fluksen mot overflaten i sprekkeplan nr. 3. Disse simuleringene indikerer at det infiltrerte vannet ikke vil finne veien opp til utstrømningsområder som Kjerringmyra eller komme i kontakt med Puttjernene. Vi kan imidlertid konstatere at en liten del av det naturlige grunnvannet (0.01 m^3/dag) presses ut i topplaget mellom Nordre Puttjern og Søndre Puttjern. Resultatene hviler som sagt på de forenklede forutsetningene som er gjort i disse simuleringene om homogene sprekkesoner og fluksbetingelser direkte på elementer som kan endre karakter fra innstrømningsområder til utstrømningsområder. Illustrasjoner av strømningsforholdene for vanninfiltrasjon med overtrykk på 3 bar i 8 hull er vist i fig. 16.

5.3.2. Eksempel 2: Tetting av sprekkesone nr. 2 og 4, og vanninfiltrasjon i sprekkesone 3

Hensikten med disse simuleringer er å vise innvirkningen av kommunikasjon mellom sprekkesonene. Sprekkesonene 2 og 4 med retning nord-sør (fig. 9) tettes rundt tunellen i det lokale griddet ved at permeabiliteten settes lik permeabilitet for fast fjell. Vanninfiltrasjonen skjer i 8 hull med overtrykk på 3 bar.

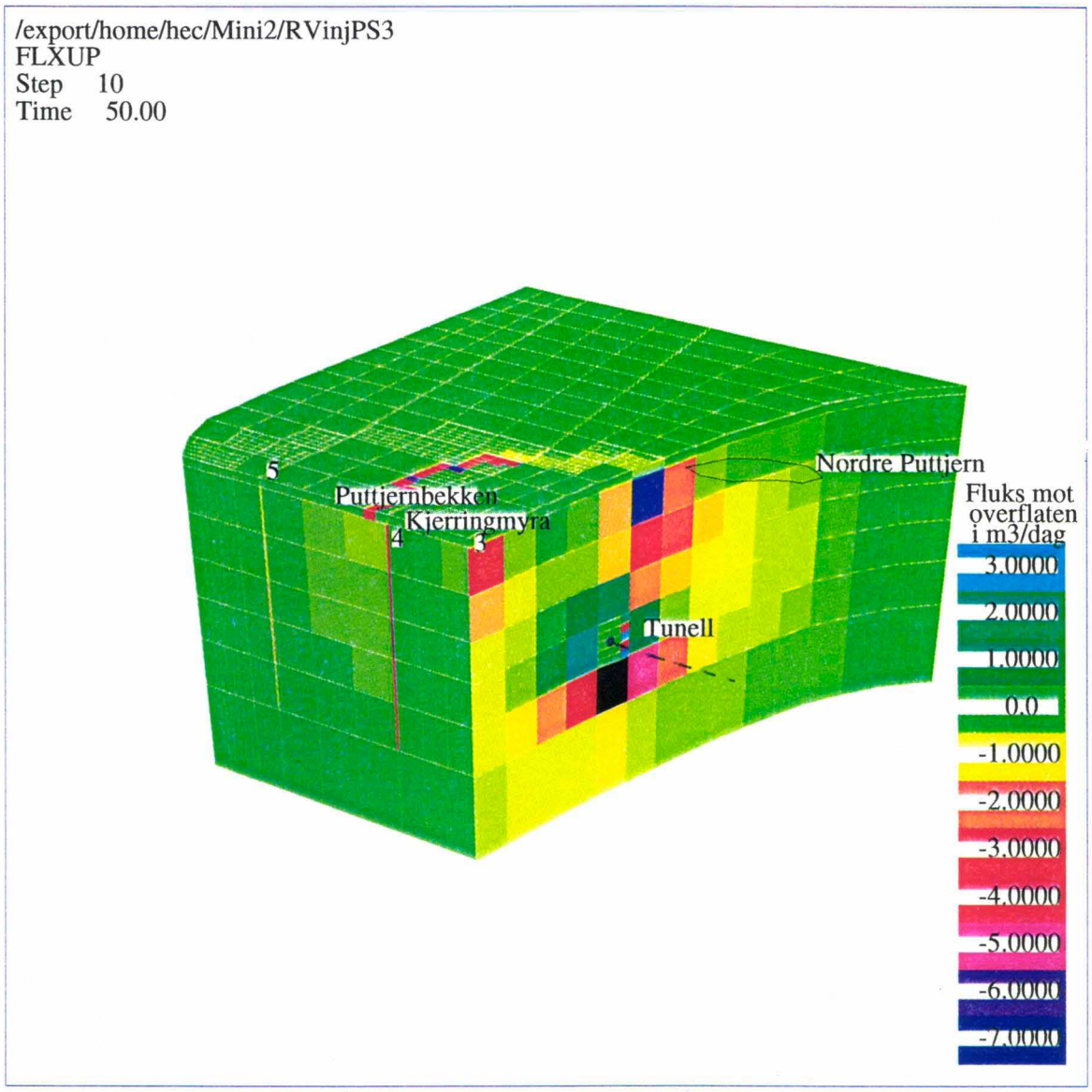
	Uten vanninn-filtrasjon og tetting (m)	Tetting i sprekk 2 og 4 (m)	Tetting i sprekk 2, 4 og infiltrasjon i sprekk 3 (m)
Nordre Puttjern	- 4.0	-3.0	-2.0
Søndre Puttjern	- 4.3	-3.3	-2.3
Område nord for Nordre Puttjern	- 14.2	-11.0	-8.8
Område nord for Søndre Puttjern	- 12.8	-11.6	-10.2
Ved Kjerringmyra	- 40.9	-27.2	-21.1

Tabell 12. Endringer i vannstandssenkningen som følge av tetting i sprekk 2 og 4, samt vanninnfiltrasjon i sprekkesone nr. 3.

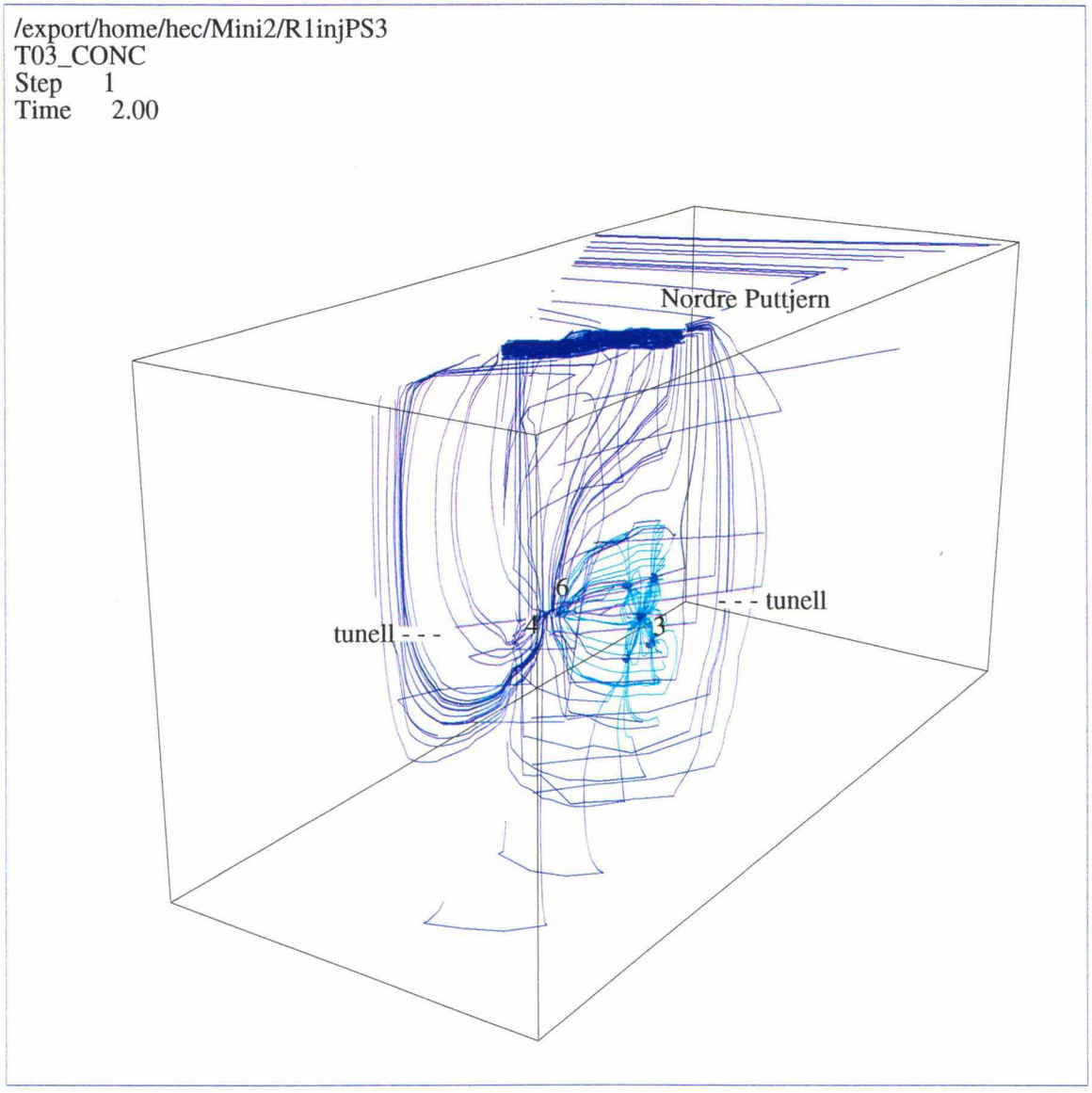
	Uten vanninn-filtrasjon og tetting (m^3/dag)	Tetting i sprekk 2 og 4 (m^3/dag)	Tetting i sprekk 2, 4 og infiltrasjon i sprekk 3 (m^3/dag)
Vannføring i Puttjernbekken	-28.8	-107.4	-183.5
Fluksen i Kjerringsmyra	40.0	26.7	7.6
Lekkasjer ut fra nedbørfelt	-371.2	-279.3	-184.0
Mengde av vanninfiltrasjon	0	0	217.0

Tabell 13. Vannbalansen etter tunellbyggingen og tetting i sprekk 2 og 4, samt vanninfiltrasjon i sprekkesone nr. 3. For mer utførlig forklaring se tabell 11.

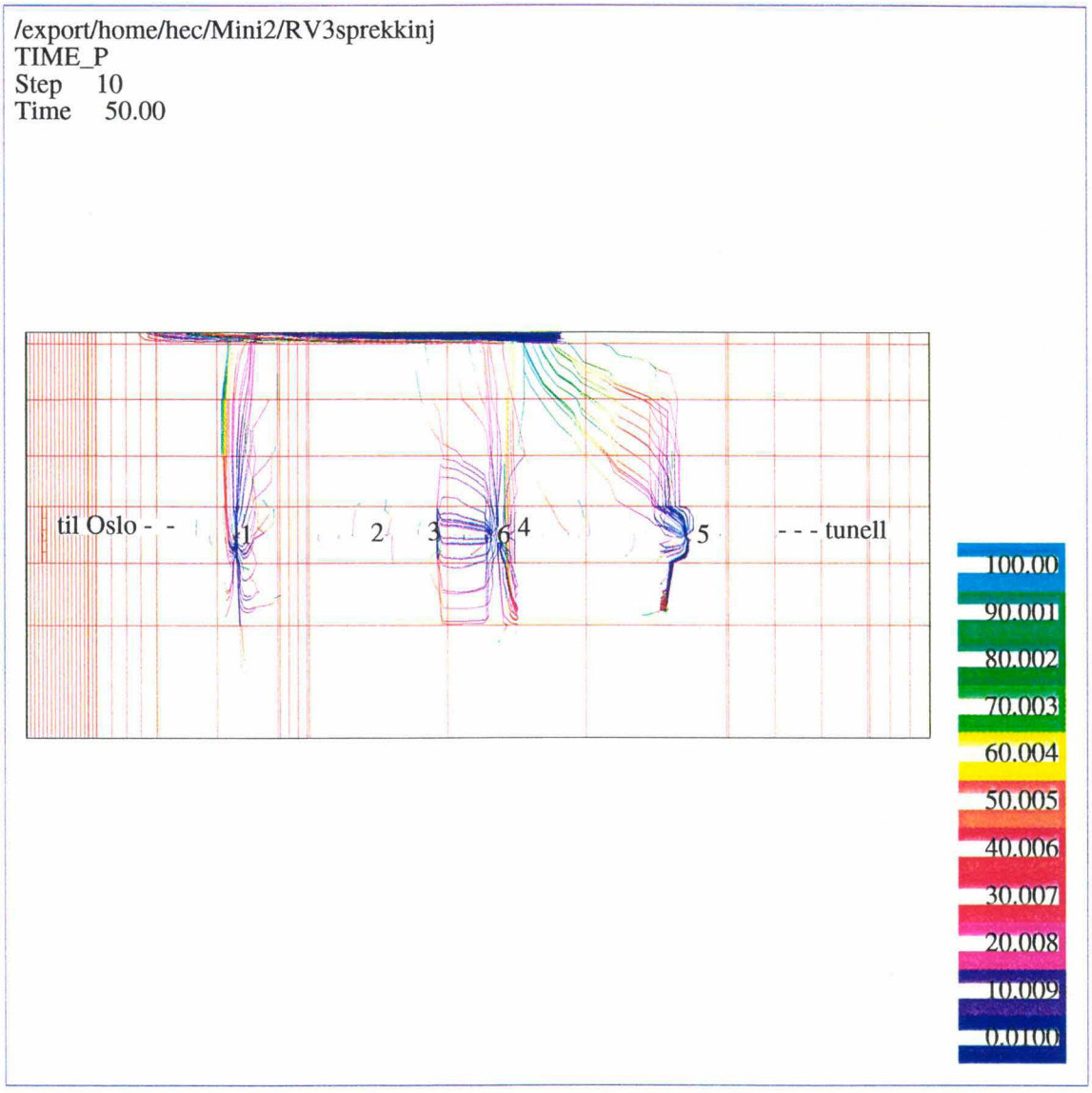
Med tetting av sprekkesone 2 og 4 reduseres netto lekkasje ut av nedbørfeltet fra 371.2 til 279.3 m^3/dag. Legg merke til at denne reduksjonen (ca. 24 %) tilsvarer omtrent det som er oppnådd med etablering av et infiltrasjonsanlegg i sprekkesone 3 med overtrykk på 3 bar. Tetting av to sprekkesoner rundt tunellen fører til at lekkasjer i de andre sprekkesoner øker betraktelig. Spesielt gjelder dette lekkasjer i sprekkesone 6 (øst-vest) som øker med 18.5 m^3/dag, d.v.s. med 32 % (vedlegg 1). Når man introduserer vanninfiltrasjon i sprekkesone 3 med 3 bar overtrykk på 8 hull, får man en betydelig reduksjon av lekkasjer ut fra nedbørfeltet (mer enn 50 %). Årsaken er selvsagt at antall vannførende soner er redusert p.g.a. tettingen. Strømningsforholdene er illustrert i fig. 17. De samme forbeholdene som ble trukket fram for eksempel 1 vedrørende effekten av infiltrasjonen, gjelder selvsagt også for dette eksemplet.



Figur 15. 3D-snitt langs sprekkesone 3 med fluksverdier mot overflaten i m^3/dag (positive verdier).



Figur 16. Strømningsforholdene med vanninfiltrasjon i sprekkesone 3. Vanninfiltrasjon med 3 bar overtrykk i 8 hull. Infiltrert vann er lyseblått.



Figur 17. Tetting av sprekkesone 2 og 4. Strømningsforholdene med vanninfiltrasjon i sprekkesone 3. Vannets transporttid til tunellen er angitt i dager (for en porøsitet lik 1%).

6. Diskusjon og forslag til videre arbeid

De hydrologiske forholdene ved Puttjernsonen var mangelfullt kartlagt før arbeidene med Romeriksporten tok til. Spesielt nyttig hadde det vært med trykkobservasjoner av grunnvannet i sprekkesonene, og hvordan dette grunnvannet kommuniserte med løsmassene i Puttdalen. Trykkforholdene er viktige fordi de viser i hvilken retning grunnvannet strømmer. Løsmassene i Puttdalen består dels av klastiske materialer (stein, grus og sand) og dels av organisk materiale (torv og myr). Tre ulike forhold mellom grunnvannstrykket i fjellet og løsmassene kan tenkes:

1. Permanent høyere grunnvannstrykk i fjellet i forhold til i løsmassene;
2. Permanent lavere grunnvannstrykk i fjellet i forhold til i løsmassene;
3. Trykkforholdene veksler mellom overtrykk og undertrykk i fjellet i forhold til løsmassene, avhengig av nedbør og temperatur.

Situasjon 1 er mest sannsynlig, fordi dette gir en enkel forklaring på hvorfor det er våtmark og tjern i Puttdalen. I dette tilfellet vil det under naturlige forhold alltid være en positiv hydraulisk gradient i retning fra fjellet og ut i løsmassene. Denne situasjonen er utgangspunktet for de simuleringene vi har gjort i denne rapporten.

Situasjon 2 tilsvarer et såkalt "hengende grunnvannssystem". I hengende system er det flere grunnvannpeil på ulike nivåer. I dette tilfellet vil grunnvannsspeilet i løsmassene være på et høyere nivå enn grunnvannsspeilet i fjellet. Dette forutsetter imidlertid at det er relativt tette lag mellom de ulike nivåene. Dersom Puttdalen hadde vært under marin grense (ca. 220 m), ville et hengende system vært sannsynlig, fordi marin leire kunne forhindret vanninfiltrasjon til berggrunnen. Tette lag kan imidlertid oppstå på andre måter, f.eks. ved komprimering av torv- og myrmateriale. Muligheten for et hengende system bør derfor ikke utelukkes helt. Dersom Puttdalen er et hengende system er det imidlertid vanskelig å forklare den raske dreneringen i området. Et hengende system kan bli drenert raskt dersom det blir punktert. Dette måtte i så fall ha skjedd ved store bevegelser i det tettende laget mens tunellarbeidene pågikk. Slike rystelser er det ikke rapportert om. Vi anser derfor situasjon 2 som svært usannsynlig og har derfor ikke gjort noe forsøk på å simulere dette tilfellet.

En annen mulig sammenheng er indikert i situasjon 3, nemlig at trykkforholdene kan variere gjennom året. Det er rimelig å anta at den dominerende fluksretning er fra fjellgrunnen og ut i løsmassene, mens det i tørre perioder vil være en fluks motsatt vei. Dette tilsvarer situasjon 3. Dersom netto utstrømning fra løsmassene er lav i tørre perioder, vil likevel ikke området bli drenerte nevneverdig. Lav fluks kan enten skyldes tette løsmasser eller at den naturlige permeabiliteten i sprekkene er relativt lav. Den naturlige permeabiliten i sprekkesonene har vært såpass lav at Puttdalen ikke er blitt drenert til lavereliggende områder i terrenget, enten til Lutvann i øst (fig.1) eller til Kjerringmyra i nord (fig. 3). Når dette ikke er skjedd skyldes det at forholdet mellom effektiv nedbør I og hydraulisk ledningsevne K har vært større enn den hydrauliske gradienten $d\varphi/dx$:

$$\frac{I}{K} > \frac{\partial \varphi}{\partial x} \tag{7}$$

Den hydrauliske gradienten mellom Puttdalen og tunellen er betydelig større enn gradienten mellom Puttdalen og naturlige dreneringsområder som f.eks. Kjerringmyra eller Lutvann.

Dersom den hydrauliske ledningsevne K i tillegg har økt betydelig som følge av tunell arbeidene, kan det hende at grunnvannstanden i Puttdalen i praksis er umulig å reversere. I forbindelse med kraftproduksjon hvor luftputekammer er anlagt i fast fjell, vet vi riktignok at grunnvannstrykket har latt seg bygge opp igjen etter lekkasjer. Dette har vært mulig ved hjelp av vanninfiltrasjon, såkalte "vann gardiner" (Broch og Kjørholt, 1994; og Kjørholt og Broch,1992). Disse erfaringene bygger imidlertid på områder hvor bergarten er adskillig mer homogen enn den vi har i Puttdalen.

I dette simuleringsarbeidet har vi sett bort fra forholdene i sprekkesonene i fjellkollene rundt Puttdalen og hvordan dette magasinet (eventuelt) bidrar til å opprettholde vanntilsiget mot dalbunnen i tørre perioder. Vi forutsetter at responsen i dette magasinet er meget rask og at lagringskapasiteten er neglisjerbar. I praksis innebærer dette at vi har antatt stasjonære strømningsforhold. Hvilken effekt vannmagasinet i fjellkollene har på tilsiget er imidlertid svært dårlig kjent, og det er derfor god grunn til å se nærmere på dette spørsmålet i videre studier.

Vi har også illustrert hvilke numeriske eksperiment som er interessante å gjøre i forbindelse med vanninfiltrasjon. For å kunne trekke noen konklusjoner av slike simuleringer kreves imidlertid mer detaljert informasjon om permeabiliteten. I praksis bør informasjon om permeabiliteten foreligge i samme skala som infiltrasjonen. Hvis f.eks. infiltrasjonen er planlagt i seksjoner på 10 - 20 m bør informasjon om permeabiliteten ha minst samme oppløsning. Ved å benytte kjente numeriske metoder kan syntetiske permeabilitetsfelt genereres med sannsynlig statistisk struktur. Hvor godt disse syntetiske feltene gjenspeiler virkeligheten kan bare verifiseres gjennom sporstofforsøk. Hvis vanninfiltrasjon blir realisert, vil et sporstofforsøk gi meget verdifull informasjon om romlig variasjon i strømningshastigheter og permeabiliteter. Den viktigste enkeltparameteren i alle slike simuleringer er likevel gjennomsnittsverdien i permeabiliteten sett over hele sprekkesonen. Denne gjennomsnittsverdien skal i teorien tilsvare de kalibrerte verdiene fra de homogene sprekkesonene. En verifikasjon av gjennomsnittet krever et nøye planlagt sporstofforsøk som dekker hele sprekkesonen.

I denne typen strømningsproblem spiller grensebetingelsene en meget viktig rolle. Det er derfor god grunn til å gjennomføre en systematisk sensitivitetsanalyse av disse grensebetingelsene. Spesielt gjelder dette grensen mot nord hvor strømningsforholdene i forkastningssonene er ukjente.

I dette prosjektet har vi antatt at bredden på sprekkesonene er kjent, at alle de viktigste sonene er representert i strømningsmodellen og at alle sonene står vertikalt i terrenget. I virkeligheten er ingen av disse forholdene absolutt kjente størrelser. I dette prosjektet har vi som nevnt, lagt vekt på hovedtrekkene i strømningsbildet. Dette betyr at det simulerte feltet er relativt stort i forhold til sprekkesonene og at hver enkelt sprekkesone er representert med relativt få elementer. Skal prosesser av lokal karakter simuleres på en troverdig måte, må en mer detaljert beskrivelse av sprekkesonene til. I den beskrivelsen hører også usikkerhetene med. For å simulere prosesser hvor også usikkerheten er inkludert, har NVE satt i gang et prosjekt med tittel "Grunnvann i fjell" i samarbeid med NGU. Målet er å utvikle en strømningsmodell for sprekker som kan hjelpe oss med å forstå hvordan kommunikasjonen mellom sprekkene og deres geometri virker på strømningsforholdene i sprekkesonene.

7. Oppsummering og konklusjon

Hovedhensikten med dette arbeidet har vært å simulere de viktigste trekkene i strømningsforholdene i Puttjernsonen. Vi har vist hvordan de naturlige trykkforholdene i grunnvannet kan reproduseres ved å kalibrere permeabiliteten i løsmassene i Puttdalen. Før tunellen ble anlagt var det rimelig å anta at permeabiliteten i sprekkesonene ikke spilte noen stor rolle for strømningsforholdene. Siden grunnvannstrykket ikke ble målt før tunellen ble anlagt, har vi basert oss på informasjon som kan leses direkte ut av topografiske kart. I dette arbeidet har vi derfor vært nødt til å anta at det er en direkte sammenheng mellom grunnvannstrykket i løsmassene og i fjellsprekkene. Denne antagelsen er diskutert nærmere i det foregående.

Etter at tunellen ble anlagt har vi bedre informasjon om grunnvannstrykket i berggrunnen og i løsmassene, vannføring i Puttjernbekken og innlekkasje i tunellen. Fra et sporstofforsøk har vi dessuten gode indikasjoner på strømningshastighetene fra Nordre Puttjern og ned i tunellen. Sporstofforsøket ble gjort før de viktigste tettetiltakene var gjennomført. Med de kalibrerte permeabilitetsverdiene (tab.4) blir hovedtrekkene i disse observasjonene meget godt reprodusert. Simuleringene styrker antagelsen om at øst-vest forkastningen er meget viktig i dette strømningsproblemet, fordi den skaper forbindelse mellom overflatevannene, nordsørforkastningene og tunellen.

Erfaringene med FRONTSIM og GRIDSIM så langt har vært meget positive. Programmene er spesielt laget med tanke på olje- og gassproduksjon og mangler derfor en del muligheter som hadde vært nyttige i hydrologisk sammenheng. Spesielt gjelder dette muligheten til å kunne spesifisere semipermeable grensebetingelser hvor fluksen blir beregnet avhengig av endringene i trykkforholdene. I vårt tilfelle gjelder dette særlig grensen mot nord, der fluksen i sprekkesonene burde beregnes avhengig av hvilken tilstand vi simuler. Spesifisert trykk eller gitt fluks (tett rand) kan bli for enkelt i slike tilfeller. Semipermeable grensebetingelser er en kombinasjon av trykk- og fluksbetingelser og blir ofte referert til som Cauchytypebetingelser. Som sagt er hovedinntrykket av FRONTSIM og GRIDSIM meget positivt, og vi regner med at disse programmene vil bli mye brukt for å simulere hydrologiske problem i tiden som kommer. Det er imidlertid hensiktsmessig å gjøre en del modifikasjoner av programvaren for at den skal bli mer tilgjengelig og tilpasset hydrologiske forhold.

8. Referanser

Bratvedt F., K. Bratvedt , C.F. Bucholtz, T. Gimse, L. Holden, H. Holden, N.H. Risebro, 1992. Front Tracing for Groundwater Simulations. Proceedings from CMWR, Denver, CO, Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 97-106.

Bratvedt F., K. Bratvedt , C.F. Bucholtz, T. Gimse, H. Holden, L. Holden, R. Olufsen, N.H. Risebro, 1994. Three-dimensional Reservoir Simulation Based on Front Tracing, Proceedings of NSOGR'92, Kluwer Academic Publishers, pp. 247-257.

Broch, E. and H. Kjørholt, 1994. Verification of Large-Scale Permeability Tests in Hard Rocks. Applied Hydrology, Jour. of the Intern, Assoc. of Hydrogeol. 2(3)-94, pp 9-16

Heimli P., 1998. NSB Gardermobanen A/S Romeriksporten Puttjernene Konsekvenser av vanninfiltrasjon fra tunellen. NOTEBY 45460-3. 18. mai. 1998

Jensen T.G., 1998. Modellering av vanninjeksjon i Lutvannsonen fra tunellnisje ved profil 7600. Norges geotekniske Institutt. Teknisk notat 1998-06-05.

Jensen T.G., Sørlie J.E., Kvedsvik. 1998. Forprosjekt: modellering av vanninjeksjon. Norges geotekniske Institutt. Teknisk notat 1998-02-09.

Kinzelbach, W. 1986. Groundwater Modelling, An Introduction with Sample Programs in BASIC. Developments in Water Science 25, Elsevier, ISBN 0-444-42582-9

Kjørholt, H and E. Broch, 1992. The Water Curtain - a Successfull Means of Preventing Gas Leakage from High-Pressure, Unlined Rock Caverns. Tunelling and Underground Space Technology, 7(2), pp 127-132

Magnell J.P., 1998. Romeriksporten. Overflatehydrologi. Status pr. juni 1998.08.25. Statkraft engineering. Rapport nr. SE 98/92.

Pedersen T., 1997. Sporstoff-forsøk Nordre Puttjern/Romeriksporten. Foreløpig rapport pr. 16.09.1997 fra NVE, Hydrologisk avdeling.

NSB – Gardermobanen AS, 1998. Romeriksporten. Status målinger, resultater og analyser m.h.p. vannbalansen og andre tiltak i Østmarka. 30.06.98.

NSB – Gardermobanen AS, 1997. Romeriksporten. Tunellkartlegging og sikring.

NVE, 1987. Avrenningskart over Norge 1:500.000 (periode 1930-1960).

Rudolph-Lund K. og Jensen T.G., 1998. Foreløpig/forenklet modellering av vanninjeksjon i Puttjernsonen fra tunellnisje ved profil 8360. Norges geotekniske Institutt. Teknisk notat 1998-04-24.

Snilsberg P., 1998. Vannbalanse Østmarka. Grunnvann i løsmasser og fjell. Jordforsk, statusrapport pr. 30.06.98.

Snilsberg P., Magnell J.P. og Grepstad G. K., 1998. Vannbalansen i Østmarka og lekkasjesituasjonen i Romeriksporten. Dagens situasjon og forventet utvikling. Notat for NSB Gardermobanen. 28.05.1998.

Snilsberg P. og Kværner J., 1997. Effekter av tunellbygging på myrene ved Nordre og Søndre Puttjern. Vurdering av drenasjepåvirkning og myrgeotekniske effekter. Jordforsk. Rapport 93/97.

Snilsberg P. og Kværner J., 1997. Kartlegging av fuktighetsforhold i myrene over Gardermobanen mellom Lutvann og Ellingsrud, Østmarka. Påvirkning fra tunelllekkasje. Jordforsk. Rapport 109/97.

Snilsberg P. og Kværner J., 1997. Kartlegging av fuktighetsforhold i myrene over Gardermobanen mellom Lutvann og Ellingsrud, Østmarka. Påvirkning fra tunelllekkasje. Jordforsk. Rapport 109/97.

Snilsberg P. og Kværner J., 1997. Kartlegging av fuktighetsforhold i myrene over Gardermobanen mellom Hellerud og Ellingsrud, Østmarka, oktober 1997. Påvirkning fra tunelllekkasje. Jordforsk. Rapport 119/97.

Sørensen R., Bakkelid S., Torp B., 1997. Landhevning i Norge. Nasjonalatlas for Norge. Statens kartverk.

Tsang, C.-F. and Neretnieks, I. 1998. Flow Channeling in Heterogeous Fractured Rocks. Rev. of Geophysics, 36(2) pp 275-298.

Aars Ø., 1998. "The Romerike Gate". A Railwaytunnel turning into a local Watergate. XX Nordic Hydrological Conference. Nordic Association for Hydrology. Helsinki 10-13 august 1998. Ed. Juha Kajander, vol. 1: 234-241.

9. Vedlegg

	1	2	3	6 (øst/vest)	4	5	Fast fjell	Total
Naturlig avrenning	0	0	0	0	0	0	0	0
Med tunell	72.73	65.73	54.17	58.26	67.96	30.39	21.96	371.2
Infiltrasjon i spr. 3 3 bar overtrykk i 4 hull	74.57	73.71	117.4	73.12	75.6	32.76	25.00	472.2
Infiltrasjon i spr. 3 3 bar overtrykk i 8 hull	74.96	75.34	153.9	76.19	77.19	33.15	25.98	516.72
Infiltrasjon i spr. 3 6 bar overtrykk i 8 hull	75.44	77.56	176.4	80.36	79.29	33.65	27.08	549.75
Tetting av spr. 2 og 4	76.09	0.14	61.08	76.75	0.81	38.79	25.64	279.3
Tetting av spr. 2 og 4 Infiltrasjon i spr. 3 3 bar overtrykk i 8 hull	78.5	0.15	153.5	96.01	0.94	41.65	30.33	401.12

Vedlegg 1.
Innlekkasjeverdier (m^3/dag) i sprekkeplansoner og fast fjell i tunellen for ulike strømningsforhold.

	Fluksen i Puttjernbekken	Fluksen i kjerringsmyra	Vanninfiltrasjon	Lekkasjer ut fra nedbørfeltet
Naturlig avrenning	-357.6	-2.4	0	0
Med tunell	-28.8	40	0	371.2
Infiltrasjon i spr. 3 3 bar overtrykk i 4 hull	-90.52	23.81	-178.91	293.29
Infiltrasjon i spr. 3 3 bar overtrykk i 8 hull	-102.98	20.3	-239.4	277.32
Infiltrasjon i spr. 3 6 bar overtrykk i 8 hull	-120.24	15.98	-294.01	255.74
Tetting av spr. 2 og 4	-107.39	26.68	0	279.29
Tetting av spr. 2 og 4 Infiltrasjon i spr. 3 3 bar overtrykk i 8 hull	-184.49	7.57	-217.04	184.08

Vedlegg 2.
Vannbalansen ved ulike strømningsforhold. Fluksen er angitt i m^3/dag.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energiverk (NVE)
Adresse: Postboks 5091 Majorstua, 0301 Oslo

I 1998 ER FØLGENDE DOKUMENT UTGITT:

Nr 1 Kristin Kolseth: Avkastning på kapitalen i sentral-, regional- og distribusjonsnettet (7 s.)

Nr 2 Eli Sæterdal: Punktbaserte marginale tap (29 s.)

Nr 3 Inger Sætrang(red): Oversikt over vedtak i tvistesaker. *Andre* halvår i 1997 (10 s.)

Nr 4 Ingebrigt Bævre: Vurdering av flom og isforhold i Surna (112.C) ved Bolme (13 s.)

Nr 5 Hallgeir Elvehøy: Samanlikning av massebalanse på Hardangerjøkulen og Folgefonna (26 s.)

Nr 6 Lars-Evan Pettersson: Flomforhold rundt Heddalsvatn (016.Z) (16 s.)

Nr 7 Inger Sætrang(red): Oversikt over vedtak i tvistesaker. *Første* halvår i 1998 (10 s.)

Nr 8 Beate Sæther: Strømningsanalyse og vurdering av sikringstiltak ved RiT-brua, Nidelva (123.A11) (10 s.)

Nr 9 Tharan Fergus: Alternativ erosjonssikring - metoder og litteratur (16 s.)

Nr 10 Begrenset

Nr 11 Nils-Otto Kitterød, Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Elin Langsholt,Panagiotis Dimakis Vanntransport i oppsprukket fjell - Numeriske simuleringer av vannlekkasjer i Romeriksporten (42 s.)