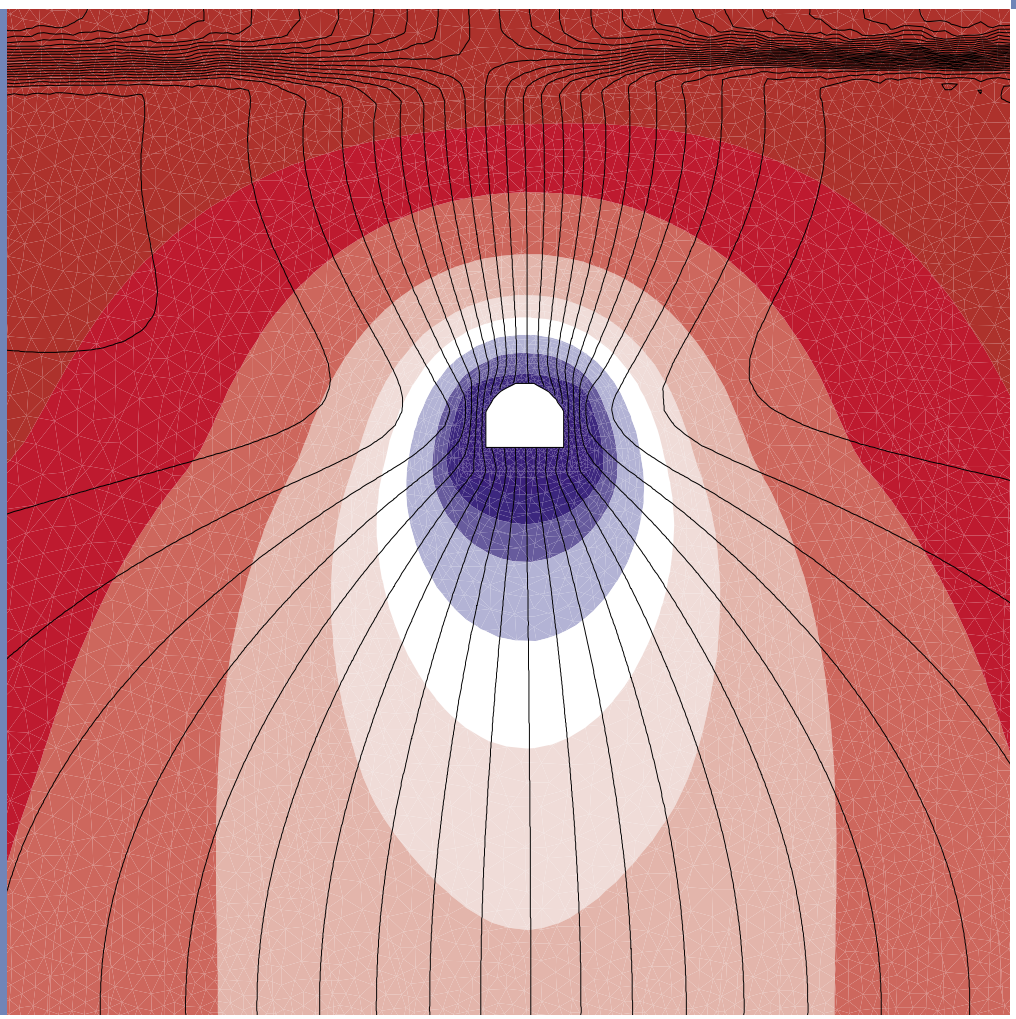
Grunnvannsanalyse ved to utvalgte strekninger langs Jong-Asker tunnelen

Panagiotis Dimakis

4
2005

RAPPORT



Grunnvannsanalyse ved to utvalgte strekninger langs Jong-Asker tunnelen

Norges vassdrags- og energidirektorat
2005

Rapport nr 4 - 05

Grunnvannsanalyse ved to utvalgte trekninger langs Jong-Asker tunnelen

Oppdragsgiver: Jernbaneverket

Redaktør:

Forfatter: Panagiotis Dimakis

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag:

Forsidefoto: Figur 28. Strømningslinjer og hydraulisk head for Jansløkka prof.

ISSN 1501-2832

ISBN 82-410-0536-9

Sammendrag: Formålet med dette arbeidet var å teste Feflows evne til å analysere effekt av tunnelbygging for grunnvannsforhold. To profiler langs Lysaker- Sandvika tunnelen ble valgt av Jernbaneverket som testprofiler for å simulere tunnellekkasjer med ulik tetting og tilsvarende grunnvannssenkning. Alle inputdata ble levert av Jernbaneverket og konsulent Nick Barton.

Resultatene av simuleringer viser at en lekkasjebegrensning til 8 l/min/100 m tunnel er akseptabel for begge profiler. For testprofilet ved Furubakken er det estimert ut fra resultatene fra simuleringer av lekkasjer med median permeabilitet, at påvirkningsområdet strekker seg fra ca. 90 til 270 m, og fra ca. 125 til 350 m i testprofilet ved Jansløkka skole.

Emneord: Tunnel, grunnvann, modell, Feflow

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

Innhold

Forord **4**

Sammendrag **5**

1 Innledning **6**

2 Grunnvannsdata **6**

2.1 Rapporten fra Norconsult 6

2.1.1 Furubakken 9

2.1.2 Jansløkka skole 10

2.2 Rapporten fra Nick Barton & Associates 10

2.2.1 Lugeon forsøk 10

2.2.2 Permeabilitet 11

3 Grunnvannssanalyse **13**

3.1 Profil ved Furubakken 13

3.1.1 Randbetingelser 15

3.1.2 Resultater 15

3.1.3 Nummerisk instabilitet. 20

3.2 Profil ved Jansløkka skole 23

3.2.1 Randbetingelser 24

3.2.2 Resultater 24

3.2.3 Numerisk instabilitet 30

4 Konklusjoner **30**

Referanser **31**

Forord

NVE har i flere år jobbet med forskning og utvikling av metoder og verktøy som kan brukes til å gjennomføre analyser av grunnvann i fjell. En viktig andel av forskningen ble rettet mot tunnellekkasjer pga. problemene ved Romeriksport tunnelen. Utvikling av egen sprekkemodell SSG og innkjøpet at det kommersielle modelleringsverktøyet FEFLOW har styrket NVEs kompetanse til å analysere grunnvannstrømningen i konkrete sprekkesystemer.

Dette prosjektet er et viktig ledd for den videre forskningen på dette området, siden den gir oss anledning til å bruke FEFLOW modellen med de beste mulige data innsamlet for Jong-Asker tunnelen. At modellen FEFLOW eventuelt kan brukes for analyser av lekkasjer og estimering av grunnvannsenking som også dekker Jernbaneverkets behov, er et stort bonus for vårt arbeid.

Prosjektet viste seg å være meget utfordrende ikke minst fordi datagrunnlaget var mye mer begrenset enn forutsett. Modellens full potensial ble aldri realisert siden konkrete data for bestemte sprekksett ikke kunne fåes ut av Lugeon testene som ble utført.

Etter en omfattende behandling av alle Lugeon dataene samt korrelasjoner til Q-verdier målt og utført av Barton (2004), hadde vi det beste mulige settet med inputsdata til disposisjon for en grunnvannsanalyse.

Vi utnyttet de eksisterende dataene i sitt maksimum, i tillegg til vår betydelige erfaring og kompetanse innen grunnvannsmodellering til å oppnå de best mulige analyseresultatene som kunne oppnås med FEFLOW. Resultatene er avhengige av hypoteser og hydrogeologisk tolkning av forholdene i profilområder som Norconsult har basert seg på, og som vi er ikke nødvendigvis enige i.

I rapporten finner man en beskrivelse av hovedresultatene som ble oppnådd, mens et stort antall analyser som ble utført for å belyse problemer knyttet til nummeriske instabiliteter, konvergeringsproblemer og interpolasjonseffekter er diskutert uten detaljert beskrivelse.

Oslo, februar 2005

Svein Taksdal
Fungerende avdelingsdirektør

Sverre Husebye
Seksjonssjef

Sammendrag

Formålet med dette arbeidet var å teste modelleringsverktøyet FEFLOWs evne til å analysere grunnvannsforholdene i fjell ved tunnelutbygging i to profiler langs Jong-Asker traseen. De to profilene skulle velges av Jernbaneverket og skulle videre tilsvare profiler som Norconsult analyserte i 2000 for samme traseen. Alle nødvendige inputdata skulle gjøres tilgjengelig av Jernbaneverket, og konsulenten Nick Barton skulle gi best mulig informasjon om bergartenes hydrauliske egenskaper basert på analyser av Lugeon testene og Q-verdier.

Mulighetene i FEFLOW analyseverktøy kunne i dette arbeidet ikke brukes fullstendig pga manglende detaljinformasjon om sprekkesettene. Effekten av tunnelutbygging på grunnvannssenking ble derfor analysert ved å behandle fjell som et porøst media. Informasjon om dybdeavhengig permeabilitet og porøsitet ble imidlertid implementert i modellen.

Resultatene av simuleringer viser at en lekkasjebegrensing til 8 l/min/100 m tunnel er akseptabel for begge profiler. For testprofilet ved Furubakken er det estimert, ut fra resultatene fra simuleringer av lekkasjer med median permeabilitet, at påvirkningsområdet strekker seg fra ca. 90 til 270 m, og fra ca. 125 til 350 m i testprofilet ved Jansløkka skole.

Påvirkningsområdet for Furubakken forventes ikke til å bli mye større selv for større lekkasjer, fordi simuleringene viser at lekkasjene hovedsakelig skal mates med grunnvann fra fjellsiden. For Jansløkka skole er påvirkningsområdet ubestemt fra simuleringene. For større lekkasjer kommer påvirkningsområdet til å bli større enn profilens lengde.

Hovedresultatene fra simuleringene er oppsummert i tabell 4 side 15 for Furubakken og tabell 5 side 24 for Jansløkka skole.

Større grunnvannssenkning forekommer ved lavere permeabilitetsverdier i både bergsmassene og løsmassene. Det er derfor viktig å implementere pålitelig variasjonsbredde av permeabilitetsverdier i modellen. Angitte ekstreme verdier for permeabiliteten skapte i tillegg numeriske problemer, og vanskeliggjorde dermed tolkningen av resultatene.

Kvaliteten til resultatene som presenteres her, avhenger først og fremst av kvaliteten på dataene som er brukt for å bygge modellen. For å skaffe seg best mulig informasjon om de hydrogeologiske forholdene, er det derfor viktig at man ved slike analyser foretar de nødvendige forundersøkelser (kartlegging av sprekkesystemet, mektighet og egenskaper til løsmasser, lokalisering av kilder, måling av grunnvannstand, geofysiske undersøkelser osv.).

FEFLOW viste seg å være et meget pålitelig og fleksibelt verktøy for analyser av tunnellekkasjer. Implementering av kompliserte forhold ved tunnel geometri, tettingssone, geologiske formasjoner, dybde avhengig permeabilitet og porøsitet og randbetingelser skapte noen numeriske problemer til å begynne med. Disse ble fort løst på en tilfredsstillende måte ved å benytte vår egen kompetanse innen numerisk modellering for å identifisere problemenes art og FEFLOWs fleksibilitet som tillater oss å foreta justeringer i FEFLOWs algoritmer. Mulighetene for implementering av sprekker, og 3D analyser ble ikke benyttet ved denne anledningen. Dermed er FEFLOWs fullpotensial som et verktøy for analyser av tunnellekkasjer ennå ikke nådd.

1 Innledning

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har fått i oppdrag fra Jernbaneverket (JBV) om å utføre en grunnvannsanalyse av to profiler langs Jong-Asker tunnelen. Profilene ble analysert av Norconsult i 2000 ved bruk av Modflow, som er et kommersielt analyseverktøy for analyser av grunnvann i porøse media. NVE har flere analyseverktøy, blant dem Modflow og Feflow. Feflow er i stand til å simulere sprekker, og er dermed i utgangspunktet i bedre stand til å utføre analyser i fjell.

For å kunne sammenligne resultatene fra Feflow med de fra Modflow, fikk vi ikke all tilgjengelig hydrogeologisk informasjon. Kun rapporter og informasjon samlet inn før 2000 ble brukt, som tilsvarer informasjonen som var tilgjengelig for Norconsult. For å simulere sprekker krever Feflow ytterligere informasjon om sprekkenes hydrauliske og geometriske egenskaper. Vi antok at slik informasjon var tilgjengelig i 1999 siden Lugeon forsøk ble utført på flere borehuller langs traseen av tunnelen. Nick Barton skulle foreta en analyse av bergmassenes hydrauliske egenskaper for å skaffe parameterverdier for sprekkene i profilene.

2 Grunnvannsdata

Datagrunnlaget som ble brukt i analysene er innhentet fra to dokumenter. Fagrapporten utarbeidet av Norconsult for Jernbaneverket med tittel ”Detaljplan Jong-Asker (Km 15,924-23,640) Tetting i tunnel” og rapporten fra Nick Barton & Associates med tittel ”JBV Jong-Asker Inngangsdatagrunnlag (fjelldel) for uavhengig modellering av grunnvannsenking ved to utvalgte strekninger 19,5-19,8 km og 21,9-22,2”.

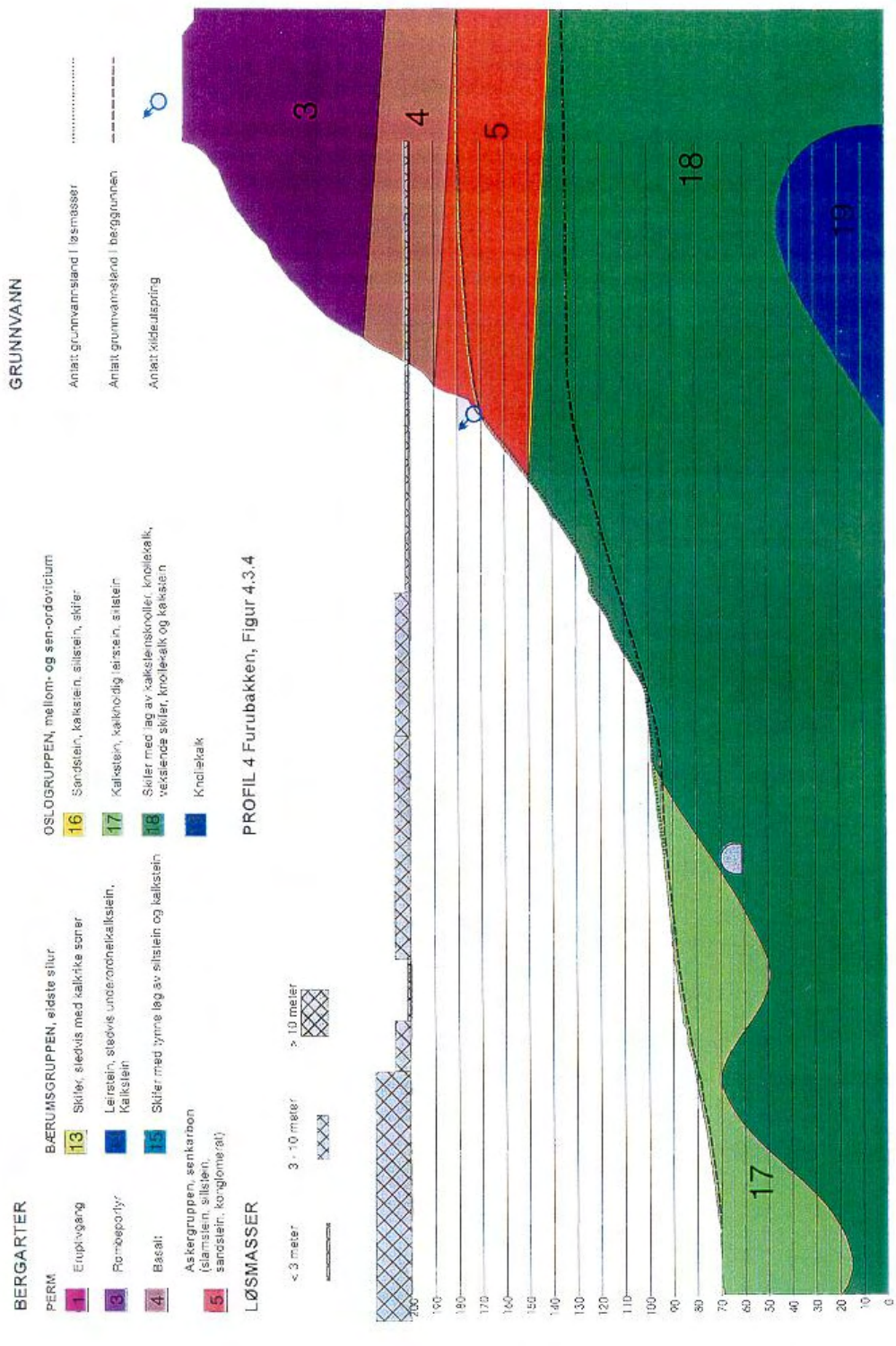
2.1 Rapporten fra Norconsult

Rapporten ble utarbeidet i 2000 og omhandler de tettestrategiske mål som er satt for parsellen Jong-Asker i Jernbaneverkets Skøyen-Asker dobbeltsporprosjekt. Geologisk, hydrologisk og hydrogeologisk informasjon for tunnelens påvirkningsområde er angitt.

De geologiske dataene som er presentert er hovedsakelig basert på NGUs kartlegging med tilleggsdata fra borehull som ble etablert langs tunneltraseen. De hydrologiske dataene er basert på NVEs isohydatkart og DNMIs nedbør- og fordampningsdata, og ble brukt til en enkel vannbalanse analyse. De hydrogeologiske dataene som er presentert er begrenset til grunnvannstandsmålinger i observasjonsbrønner som ble etablert i området. Målingene dekker ca. en halvårsperiode på slutten av 1999. Hydraulisk ledningsevne (permeabilitet) er ofte tilordnet de bergarttypene som er diskutert i rapporten. Løsmassene er ikke beskrevet i detalj til tross for at disse er mest påvirket av en potensiell grunnvannssenking. En kvartærgeologisk beskrivelse er inkludert i rapporten, men mektigheten og hydraulisk ledningsevne til løsmassene er ikke angitt. Løsmassenes beskrivelse inkluderer normal/vanlig grunnvannstand, sedimentologisk beskrivelse (for eksempel siltig leire) og en antatt mektighetsvariasjon (for eksempel 3-10 m).

Rapporten bruker et klassifiseringssystem basert på 3 klasser for å synliggjøre farene som lekkasjene kan medføre.

- Klasse 1 – moderat krav til innlekkasjer 8 - 16 l/min/100m
- Klasse 2 – strengt krav til innlekkasjer 4 – 8 l/min/100m
- Klasse 3 – meget strengt krav til innlekkasjer < 4 l/min/100m



Figur 1. Profil 4 Furubakken i Norconsults rapport.

Figur 2. Profil 5 Jansløkka skole i Norconsults rapport.

Tunneltraseen er delt i 10 strekninger/områder, og hvert av disse er behandlet/beskrevet separat. Hydrogeologiske forhold er diskutert for 6 av disse strekninger. For hver strekning er det produsert en geologisk profil omtrent normal for traseens retning. Profilene skal brukes til å analysere de stedlige hydrogeologske forholdene. Analyseresultatene er ikke inkludert i rapporten.

For 2 av disse profilene kommer vi å utføre en grunnvannsanalyse på nytt. Det gjelder de følgende profiler:

- Profil 4 – ”Furubakken” ca. km 19,4 – 19,6 (figur 1)
- Profil 5 – ”Jansløkka skole” ca. km 22 (figur 2)

I profilene er bergartene tydelig markert med farge og nummer. Høydeskalaen på venstre side av profilene antas å være høyde over havet. Horisontal skala derimot eksisterer ikke. Vi antar dermed at den horisontale skalaen er lik den vertikale. Vi har ingen måte å bekrefte denne antagelsen på siden beliggenheten av profilene ikke er markert i rapporten. Løsmassene er ikke satt direkte inn i profilene, men er definert som grove mektigheter i et kolonnediagram som ligger øverst på profilene. Måten løsmassene er presentert på i profilene gjør geologien i profilene uklar. Vi antar at den øverste grenselinjen i profilene viser topografien i området, og ikke grensen mellom bergmassene og løsmassene. Dvs. at løsmassene burde plasseres under denne linjen og at bergartenes øverste grenser burde flyttes tilsvarende ned. Dette skaper en viktig feilkilde i analysene, siden mektigheten av løsmassene er beheftet av usikkerheter. I profil 5 er morenene differensiert fra de andre løsmassene. Løsmassene er ikke differensiert videre i andre sedimentologiske enheter. Det er uklart om dette innebærer at de tilhører samme sedimentologisk type eller ikke. Forskjellige sedimentologiske typer er nevnt i teksten, men ikke vist på profilene. Antatt grunnvannstand i berggrunnen og i løsmassene vises også på profilene. Disse linjene er basert på observasjoner, erfaring og tolkning av grunnvannforholdene.

2.1.1 Furubakken

Profilen er plassert i et område med stor topografisk variasjon som er typisk for en dalside. I dette tilfellet viser profilen skråningen av Skaugumåsen. Flere vannkilder er observert på foten av Skaugumåsen og en tolkning av hvordan disse kildene mates med grunnvann er presentert i profilen. For å forene observasjoner som viser at grunnvannstanden i fjellet ligger mye lavere enn kildenes topografisk høyde, er det innført 2 atskillige grunnvannhorisonter i fjellet. En som ligger høyere enn kildene (formasjon 5) og mater dem, og en lavere (liggende grunnvannshorisont) i formasjon 18. Til tross for denne tolkningen finnes det ikke noe informasjon som forklarer hvordan en slik hydraulisk isolering mellom de to formasjonene har funnet sted.
Grunnvannstanden for løsmassene som er angitt i profilen er også interessant. Profilen viser at grunnvannstanden i løsmassene holder seg noen få meter under bakkenivå hele veien opp til en høyde på 170 m på skråningen. Den eneste måten en slik grunnvannstand kan opprettholdes i en slik bratt skråning er om løsmassene mates kontinuerlig med grunnvann fra fjell. Med andre ord, tolkningen som er innført for å forklare om kildene har som konsekvens at de høytliggende løsmassene har en vel etablert grunnvannstand. Denne tolkningen er meget viktig som vi skal se i analyse delen av rapporten. Hvis formasjon 5 og 18 er hydraulisk isolert fra hverandre, betyr det også at grunnvannshorisonten i formasjon 5 er isolert av påvirkninger av lekkasjer i tunnelen og at kildene og grunnvannstanden i de høyliggende løsmassene heller ikke vil bli påvirket.

2.1.2 Jansløkka skole

Profilen ved Jansløkka skole (figur 2) ser meget enkel ut til å begynne med. Man observerer kun formasjon 17 i hele profilen, og en eruptiv gang (formasjon 1) som er parallell til traseen, og dens beliggenhet er noe usikker. Det er uklart om spørsmålene i profilen betyr at hele beliggenheten (avstand fra tunnelen) er usikker eller kun topp- og bunngrensene av eruptivgangen. To vertikale sprekkesoner er tegnet i profilen. En er plassert rett over tunneltraseen, og den andre er 10 til 15 meter til venstre for tunnelen. Disse nevnt i rapporten som soner som kan være av betydning i grunnvannsanalysen. De øverste 10-20 m av formasjon 17 er mer oppsprukket enn de dypereliggende, noe som også vises på vanntapsmålingene i kjerneborhull som ble etablert i området. Det er foreslått (Norconsult) å bruke verdier for hydraulisk ledningsevne som er 4 ganger større enn normalt for de øverste 20 m (dvs. $5 \cdot 10^{-7}$ m/s og $2 \cdot 10^{-6}$m/s tilsvarende). Løsmassene er forholdsvis jevnt fordelt over profilens lengde med mektigheter over 10 m (stedlig 17- 20 m?). Moreneavsetninger er plassert rett over tunneltraseen som selvfølgelig er den mest ugunstige plassering som kan oppstå for slike sensitive sedimenter.

2.2 Rapporten fra Nick Barton & Associates

I Bartons rapport finner man en meget grundig gjennomgang av dataene som ble samlet inn gjennom Lugeon forsøkene i kjerneborehull K5 og K6 (profil 4 og 5) og Q-metode evaluering av fjellmassenes vannføringskarakteristikk.

Rapporten er omfattende, og alle resultatene som er presentert kan ikke lett oppsummeres. Vi begrenser oss dermed til de resultatene som er viktig for profilenes grunnvannsanalyse.

2.2.1 Lugeon forsøk

Tolkningen av Lugeon forsøkene er basert på Snow (1968) med noen forenklinger og forbedringer fra Barton et al. (2003). Teorien er presentert i rapporten på en lettfattelig måte. Den viktigste delen av teorien for den videre grunnvannsanalysen, er at Snow antar at bergmassen er karakterisert av et mer eller mindre kubisk sprekkesystem. En annen måte å uttrykke Snows antagelse på er at man kan bygge opp et tilsvarende kubisk sprekkesystem for bergmassen som har de samme hydrauliske egenskapene. Snows antagelse kan visualiseres i figur 3 som er hentet fra Bartons rapport.

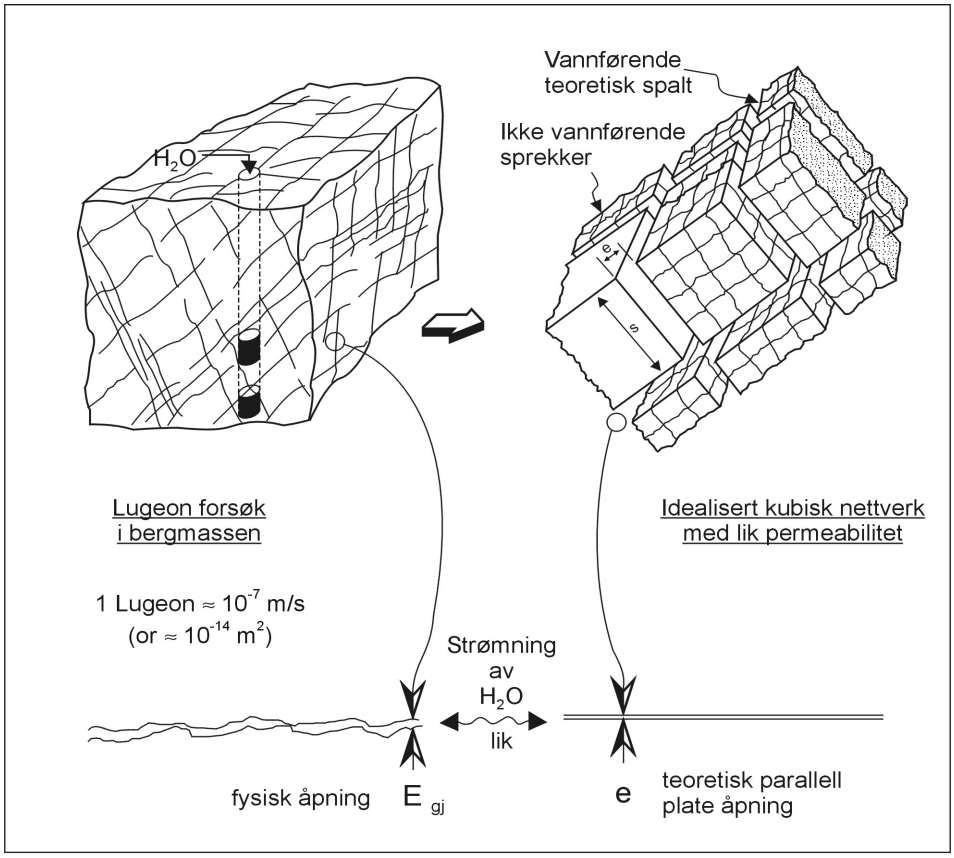
Konsekvensene av en slik antagelse er at Lugeon forsøkene karakteriserer bergmassenes hydrauliske egenskaper på en helhetlig måte. De tre sprekkesettene som danner Snows teoretisk kubiske sprekkesystem har permeabiliteten lik tallet man får fra Lugeon forsøket. Man kan ikke differensiere mellom de forskjellige eksisterende sprekkesettene.

Siden Lugeon tallene er basert på et teoretisk kubisk sprekkesystem må man betrakte dem som en slags gjennomsnittsverdi for hele bergmassen som er uavhengig av retningene til sprekkesystemet. Dessuten antar metoden en homogen vannføring i sprekkesystemet.

Hvis man bruker Lugeons tall for å karakterisere fjellets permeabilitet i en grunnvannsanalyse må man opprettholde antagelsene som er brukt i Lugeons teori i analysemetodene for å opprettholde riktig vannbalanse. Dette utelukker bruk av aktuelle sprekker i analysen med mindre disse er antatt å være kubiske til hverandre og ha den samme permeabilitet (dvs. et kubisk hydraulisk homogent sprekkesystem).

Selv om man ikke tar hensyn til teorien som Lugeon forsøkene baserer seg på, kan man ikke differensiere mellom de forskjellige sprekkesettene siden kun en parameterverdi er

gitt for en bestemt dybde. Hvis man ikke klarer å differensiere mellom de forskjellige sprekkesett kommer sprekkene i Feflow til å oppføre seg akkurat slik porøse media elementer oppfører seg, og dermed er bruk av sprekkeelementer unødvendig for analysene.



Figur 3. Visualisering av Snows antagelse (fra Barton 2004)

2.2.2 Permeabilitet

Det siste kapitelet i Bartons rapport er det viktigste for våre analyseresultater siden det handler om en oppsummering av alle resultater i rapporten, og anbefalinger om hvordan disse burde brukes i grunnvannsanalyser rettet mot grunnvannssenking.

Lugeon forsøkene og Q_{H_2O} som ble innført av Barton for å beskrive fjellets hydraulisk kvalitet viser at permeabiliteten reduseres med dybden. For å ta hensyn til dybdevariasjoner og statistiske variasjoner i Lugeon forsøkene, har Barton produsert 2 tabeller med permeabilitetestimater. Tabellene viser median (mest frekvent), gjennomsnitt, maksimum og minimum permeabilitetsverdier for 3 dybder. Tabellene gir permeabilitetsverdier for formasjon 17. Barton argumenterer at tunnelen stort sett er i formasjon 17 i tunnelstrekningene som tilvarer profilene, og at 17 er den viktigste formasjonen. Man må imidlertid påpeke at formasjon 18 i Furubakken kommer til å spille en viktig rolle også pga. den store hydrauliske gradienten i området. Vi antar følgende: Tabell 1 betegnet Furubakken gir permeabilitetsverdier for formasjon 17 og 18 mens tabell 2 for Jansløkka skole gir verdier for formasjon 17 i de tilsvarende profilene.

En parameter som ofte overestimeres i grunnvannsanalyser av fjell er porøsiteten. Porøsiteten viser hvor mye vann fjellet kan magasinere og ofte ser man verdier mellom 1 % og 5 % brukt i slike analyser. I dag er det vanlig å anta en verdi på 1 % som gjennomsnittsverdi for porøsiteten i fjell i Norge. Etter muntlig kommunikasjon med

Barton ble vi enige om å bruke hans erfaringsdata som etter analyser er presentert i rapporten og viser at porøsiteten reduseres med dybden. Bartons resultater er oppsummert i tabell 3, som viser porøsitetsverdier med dybden. Man ser at porøsiteten minsker 5 ganger i de første 5 meter og er 10 ganger mindre etter 10 meter.

Tabell 1. Permeabilitetsestimater ved Furubakken

Dybde (m)	K median Lugeon	m/s	K gjennomsnitt Lugeon	m/s	K maksimum Lugeon	m/s	K minimum Lugeon	m/s
10	29	$2{,}9\cdot10^{-6}$	18	$1{,}8\cdot10^{-6}$	2050	$2{,}05\cdot10^{-4}$	0,9	$8{,}6\cdot10^{-8}$
50	2,0	$2{,}0\cdot10^{-7}$	1,2	$1{,}2\cdot10^{-7}$	140	$1{,}4\cdot10^{-5}$	0,05	$5{,}0\cdot10^{-9}$
100	0,6	$6{,}2\cdot10^{-8}$	0,4	$3{,}8\cdot10^{-8}$	44	$4{,}4\cdot10^{-6}$	0,01	$1{,}0\cdot10^{-9}$

Tabell 2. Permeabilitetsestimater ved Jansløkka skole

Dybde (m)	K median Lugeon	m/s	K gjennomsnitt Lugeon	m/s	K maksimum Lugeon	m/s	K minimum Lugeon	m/s
10	130	$1{,}3\cdot10^{-5}$	35	$3{,}5\cdot10^{-6}$	860	$8{,}6\cdot10^{-5}$	1,3	$1{,}3\cdot10^{-7}$
50	9,0	$9{,}0\cdot10^{-7}$	2,4	$2{,}4\cdot10^{-7}$	59	$5{,}9\cdot10^{-6}$	0,09	$9{,}0\cdot10^{-9}$
100	2,8	$2{,}8\cdot10^{-7}$	0,7	$7{,}4\cdot10^{-8}$	19	$1{,}9\cdot10^{-6}$	0,02	$2{,}0\cdot10^{-9}$

Tabell 3. Porøsitets endringer med dybden

Dybde (m)	Porøsitet (%)
0 - 5	1,0 - 0,2
5 - 10	0,2 - 0,1
10 - 20	0,1 - 0,04
20 - 60	0,04 - 0,02

3 Grunnvannssanalyse

Grunnvannsanalyser er vanligvis utført i 3 steg. Det første steget er å definere analyseområdets geometri. Dette utføres normalt gjennom en digitaliseringsprosses av et kart. I vårt tilfelle måtte vi digitalisere de to profilene fra Norconsults rapport, nemlig figur 1 og 2. Geometrien brukes videre til å bygge opp et numerisk grid.

Det andre steget er å definere de stedlige hydrauliske parametere for hvert element i gridet. I vårt tilfelle betyr det at dataene fra tabellene 1, 2 og 3 må brukes til å definere permeabiliteten og porøsiteten i hvert element i gridet.

Det siste steget er å løse det numeriske likningssystemet som dannes gjennom arbeidet fra steg 1 og 2 og å analysere resultatene til å løse problemstillingen.

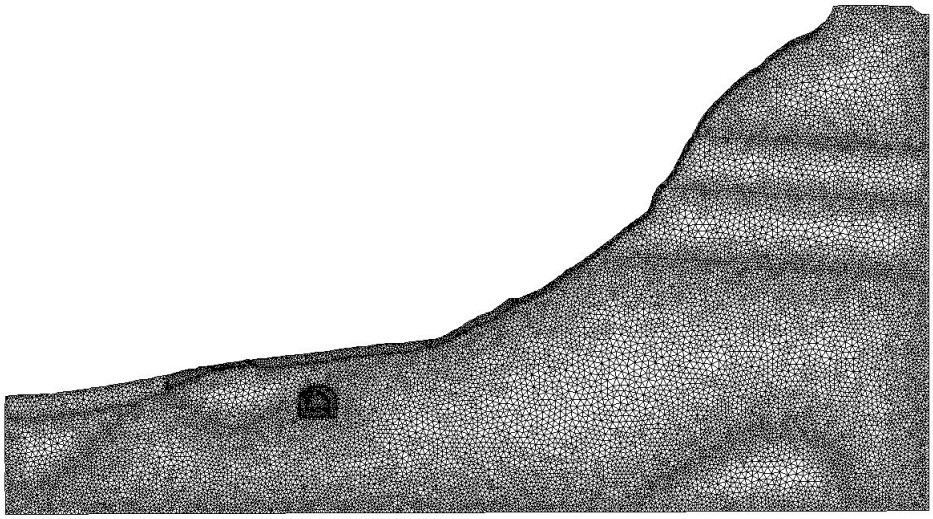
Alle tre steg viste seg å være problematiske for våre 2 profiler og spesielt for Furubakken profilen. Problemene i det første steget var knyttet til profilenes mangel på løsmasser. Siden løsmassene ikke var direkte definert i profilene, ble det nødvendig å digitalisere profilene ved å bruke prøve og feile metoden. Dvs. at vi først digitaliserte profilene i figur 1 og 2, og deretter omformaterte filene i et format som kunne editeres for å sette inn løsmassene. Prosessen med editering/omformatering foregikk flere ganger helt til vi oppnådde en tilfredsstillende representasjon av løsmassene i profilen.

Problemene i det andre steget var knyttet til metodikken som burde brukes til å innføre dybdeavhengig parameterverdier.

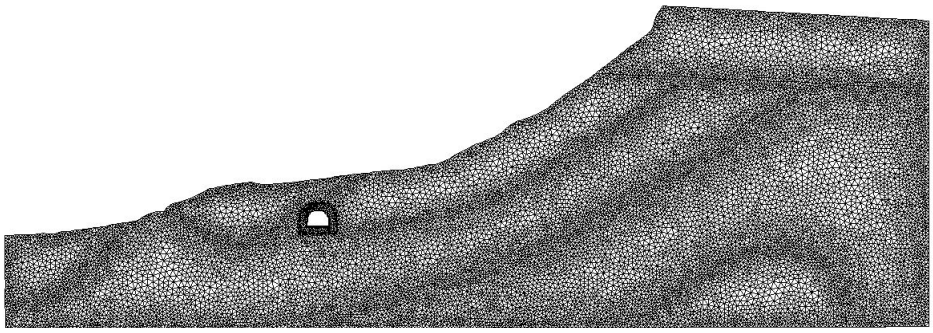
Problemene i det siste steget var de viktigste og vanskeligste å løse. I begge profiler antar vi at grunnvannsspeilet er åpent. Det betyr at det numeriske likningssystemet som må løses ikke lenger er lineært, og ikke kan løses på en direkte måte. Man må benytte seg av en iterativ løsningsalgoritme som ikke alltid klarer å konvergere mot en stabil løsning.

3.1 Profil ved Furubakken

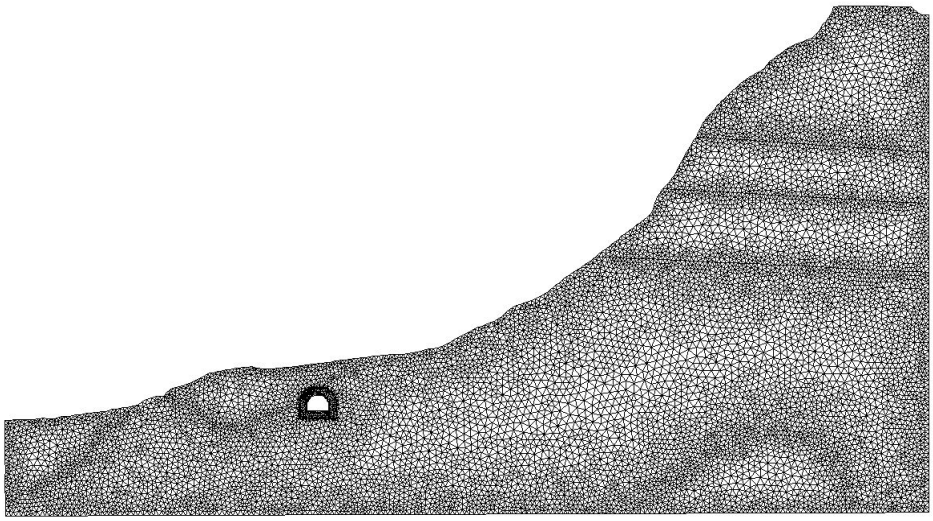
Den digitaliserte geometrien av bergartene og løsmassene ble brukt til å generere flere forskjellige endelige elements grid tilpasset profilen. Et slikt grid vises på figur 4. Metoden som ble brukt for å generere trekantelementene i gridet lager en finere trekantoppdeling i nærheten av formasjonsgrenser noe som gjør formasjonsgrensene mer synlige. Tunnelen har de samme dimensjoner som er brukt i Norconsults rapport. I tillegg har vi definert en ca. 6 meters tettingssone. Flere andre grid ble generert og brukt i analysen, noen av disse er presentert i figurene 5 og 6.



Figur 4. Endelig elements grid for profilen ved Furubakken. Tunnelen og tetthetssonen er definert.



Figur 5. Endelig elements grid for profilen ved Furubakken som mangler løsmassene og formasjoner 3 og 4. Tunnelen er antatt åpen. Formasjon 18 er delt i lag med forskjellige dybder.



Figur 6. Endelig elements grid for profilen ved Furubakken som mangler løsmassene. Tunnelen er antatt åpen.

3.1.1 Randbetingelser

De viktigste randbetingelsene som er brukt i analysene er de konstante hydrauliske potensialene (head) som er brukt til å definere en konstant grunnvannstand på de vertikale sidene av profilen. I Furubakken på høyre side av profilen antar vi en verdi på 184 m som nesten tilsvarer grunnvannstanden som vises på figur 1. På venstre side har vi brukt en konstant verdi på 69 m. Disse verdiene skaper en konstant hydraulisk gradient i profilen, som får grunnvannet til å bevege seg fra høyre mot venstre side av profilen. Pga. topografien burde en slik gradient eksistere også i naturen. En slik gradient er så stor at grunnvannsspeilet kommer til å treffe skråningen og danne vannkilder på skråningen. Situasjonen tilsvarer det man observerer i området. Disse betingelsene implementerer ikke Norconsults tolkning av grunnvannsforholdene i profilen som ble presentert i §2.1.1. Randbetingelsene produserer kun en grunnvannsstand i profilen som ligger i formasjon 5, mens den lavereliggende grunnvannstanden i formasjon 18 forsvinner totalt. Norconsults tolkning er sikkert den riktige for profilen, men kan ikke implementeres uten konkrete målinger.

Flere andre randbetingelser som er brukt i analysene diskuteres i avsnittet om numeriske instabiliteter.

Et annet problem vi må ta hensyn til, er mengden av grunnvann som beveger seg i normal retning mot profilens plan. Slike fluks er meget vanskelige å beregne størrelsen på uten å foreta en 3D vurdering av de hydrogeologiske forholdene i området. De bratte skråningene og den store hydrauliske gradienten i profilen kommer til å være de dominerende elementene i analysene, og dermed burde ikke innflytelser fra normal fluks være av stor betydning. Områdene til venstre for tunnelen er utsatt for normalfluks innflytelser som kan ha stor betydning med tanken på tunnelens influensområde.

3.1.2 Resultater

For å bruke de dybdeavhengige permeabilitetsverdiene som vi fikk fra Barton er vi nødt til å analysere 4 forsjellige tilstander av profilen. Man får 4 forskjellige løsninger avhengig av hvilket parametersett som er brukt i analysene. De viktigste resultatene er oppsummert i tabell 4. Den første raden i tabellen gir oss lekkasjer som tilsvarer en situasjon uten tetting i tunnelen. De andre radene viser situasjoner hvor vi prøver å begrense lekkasjene til 4, 8 og 16 l/min/100m med tetting. K_{tett} gir den tilsvarende permeabilitetsverdi som må brukes for tettingssonen/skjermen rund tunnelen som er antatt å være ca. 6m tykk.

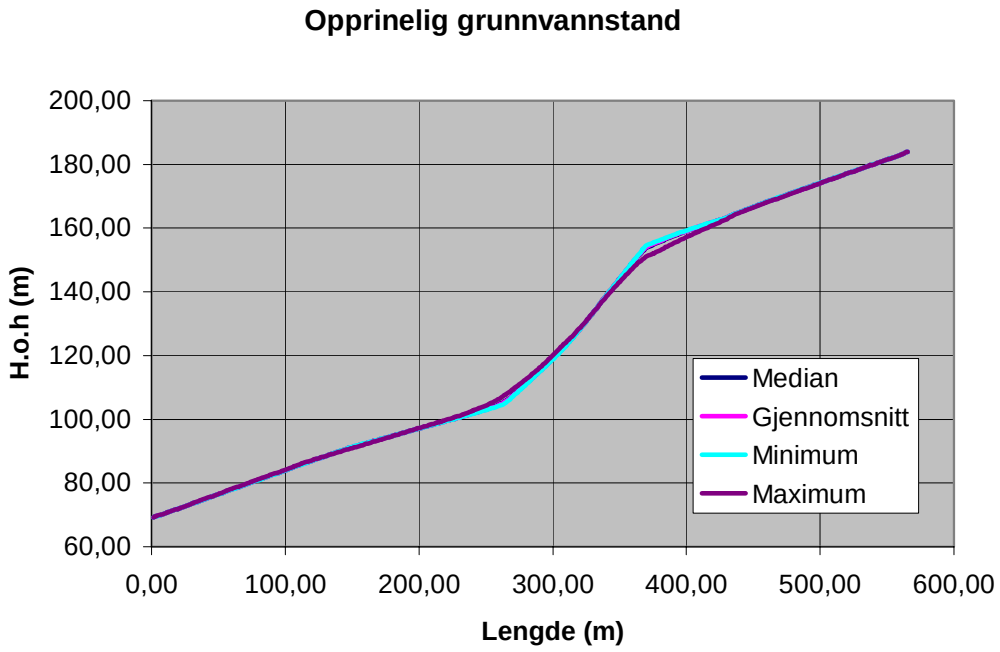
Tabell 4. Analyseresultater som viser lekkasjer og tilsvarende tettingspermeabilitet. Lekkasjer er angitt i l/min/100m.

	Median	Gjennomsnitt	Maksimum	Minimum
Lekkasjer	696,04	438,75	20881,60	21,39
uten tett.				
K_{tett}	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$
Lekkasjer	4,03	4,02	3,97	3,89
K_{tett}	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{-9}$
Lekkasjer	7,71	7,78	8,13	7,92
K_{tett}	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Lekkasjer	15,97	16,04	16,04	16,04

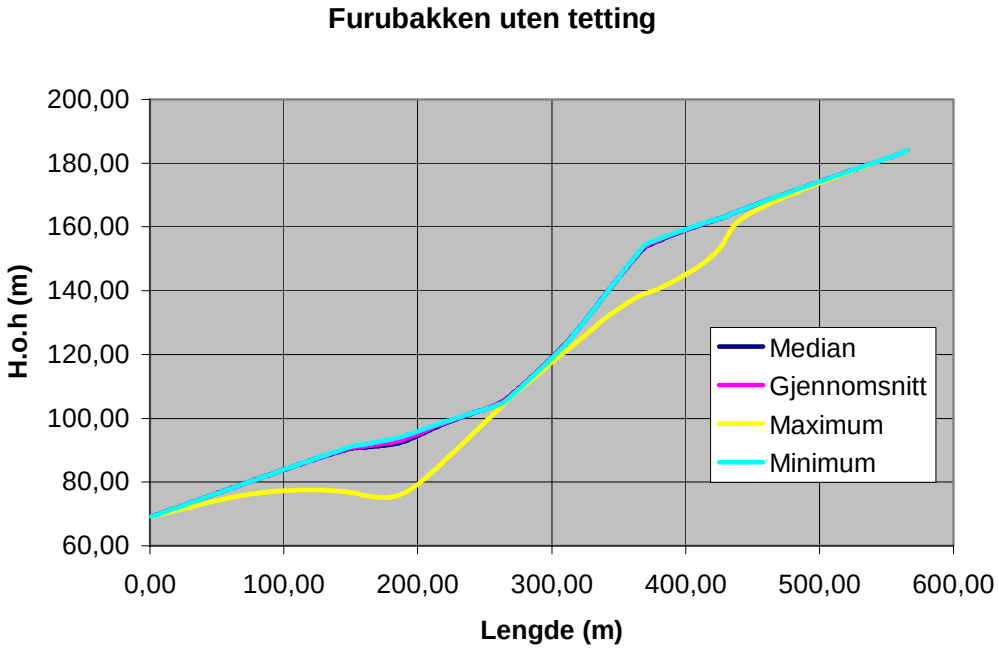
Figur 7 viser opprinnelig grunnvannstand langs profilen. En av konsekvensene ved å bruke permeabilitetsverdier av typen median, gjennomsnitt, maksimum minimum er at den opprinnelige grunnvannstanden langs profilen også må estimeres og den varierer avhengig av hvilke parameterverdier vi bruker. Variasjonen er ikke stor mellom de forskjellige grunnvannsspeilene. For maksimums parameterverdier er grunnvannstanden nesten 2 – 3 m lavere enn for de andre parameterverdier noe som antyder at de vannkildene kan ikke dannes om formasjon 18 har høye permeabilitetsverdier.

Figur 8 viser grunnvannstanden langs profilen i en situasjon uten tetting. Det samme vises også i figur 9 i form av grunnvannssenking som beregnes ved å ta differansen mellom estimert grunnvannstand og opprinnelig grunnvannstand. For maksimums permeabilitetsverdier synker grunnvannstanden nesten helt ned til tunnelen og influensområdet er fra 0 – 450 m. Hvis profilens venstre side er en naturlig grense for profilen, dvs. en elv, eller annen type hydraulisk grense er influensområdet det som vises i figur 9. Hvis profilen kan utvides/forlenges på venstre side er analyseresultatene ikke konkluderende. De andre permeabilitetsverdiene viser et influensområde mellom 100-270m. For medianverdier blir løsmassene rett over tunnelen tørket ut. For minimumsverdier er resultatene nesten akseptable.

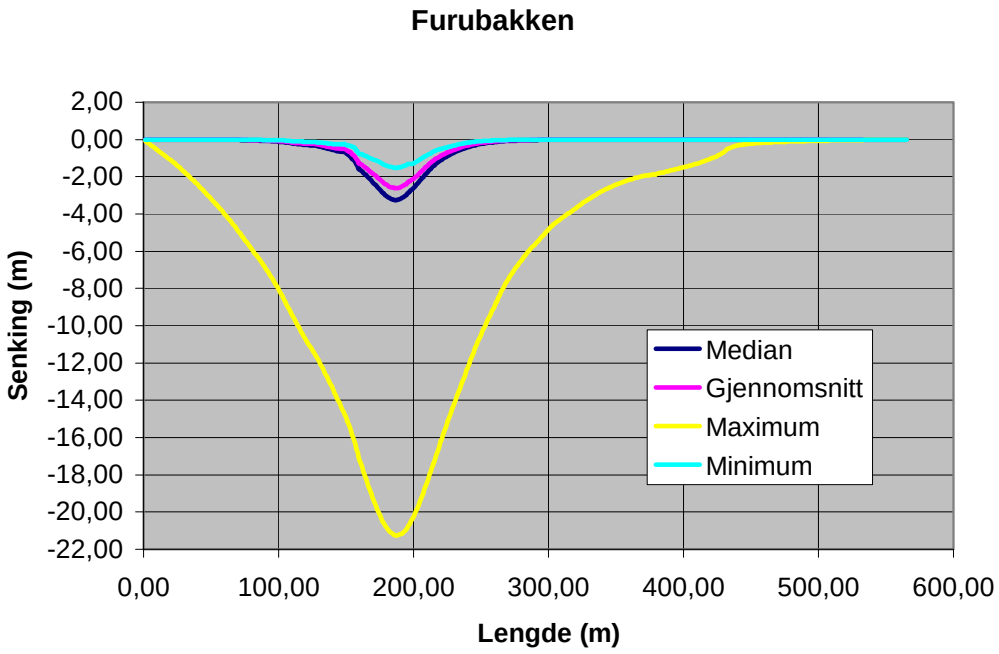
Resultatene i figurene 10, 11, 12 og 14 viser grunnvannssenking med lekkasjer 4, 8 og 16 l/min/100m for hvert parametersett. I alle tilfeller observerer man at grunnvannstanden synker noe over tunnelområdet men merkelig nok grunnvannstanden øker lengre opp på skråningen. Figurene viser også at grunnvannstandsendringene med økende lekkasjer ikke er spesielt store.
Man kan forklare disse resultater hvis man ser tilbake til våre randbetingelser og konsekvensene de har. Ved å implementere randbetingelser som skaper en høy hydraulisk gradient i profilen, øker man transporten av grunnvann fra formasjon 5 til tunnelområdet som blir mindre sensitiv til lekkasjeendringer. Den høye gradienten transporterer så mye vann til tunnelområdet at grunnvannet ikke har noe sted å strømme til. Når grunnvannstrømningen ”bremses” i tunnelområdet må grunnvannstanden øke for å kompensere for energiendringene.



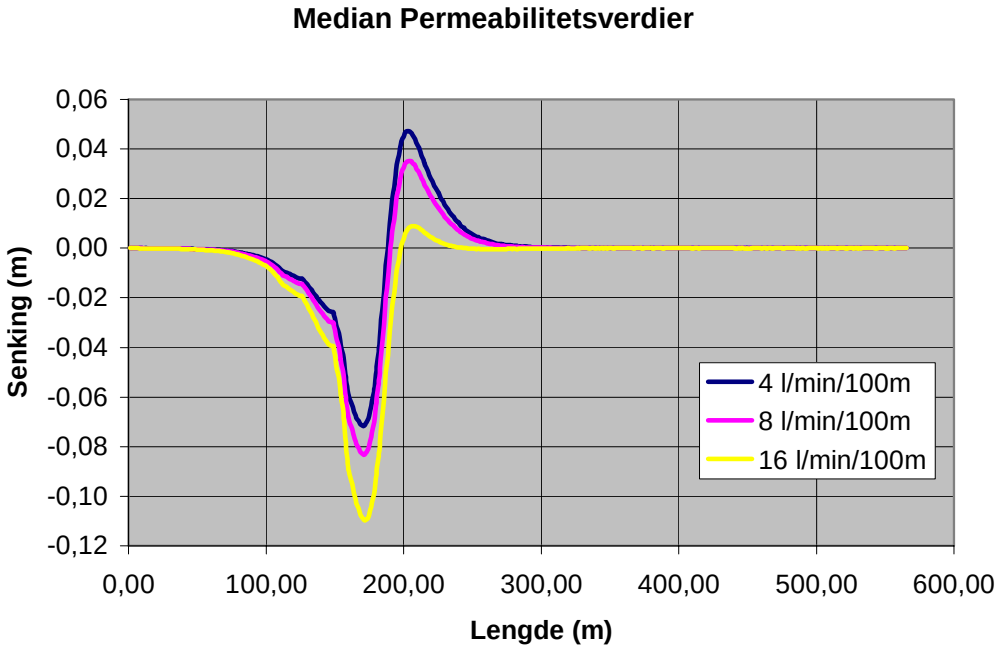
Figur 7. Opprinnelig tilstand av grunnvannstanden langs profilen. Resultatene varierer med permeabilitetsverdiene.



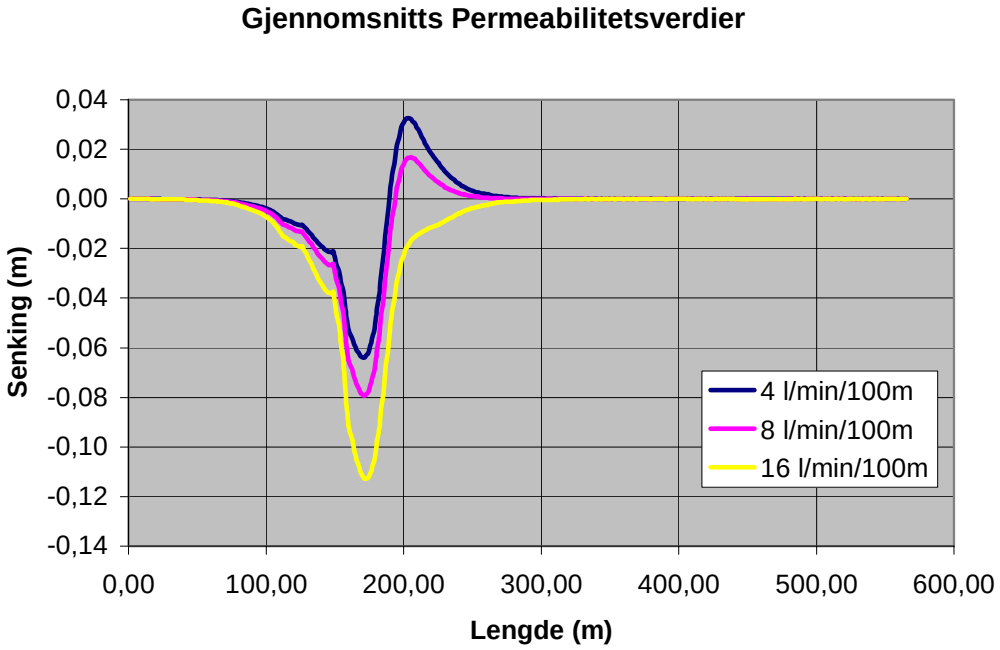
Figur 8. Analyseresultater for lekkasjer uten tetting i tunnelen. Grunnvannstanden langs profilen.



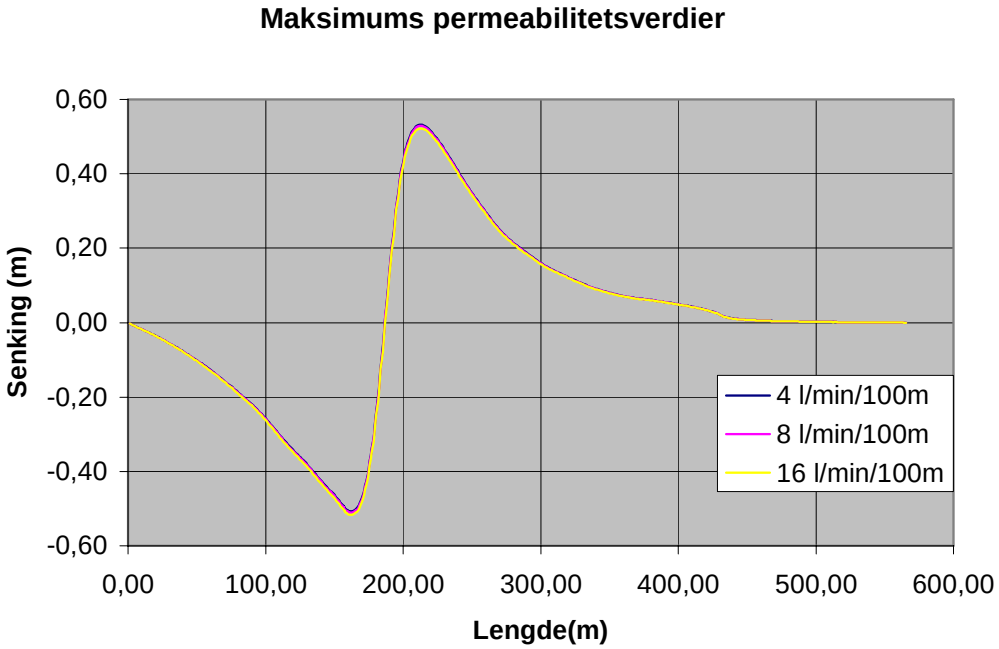
Figur 9. Analyseresultater for lekkasjer uten tetting i tunnelen. Avvik fra opprinnelig grunnvannstand (grunnvannssenking).



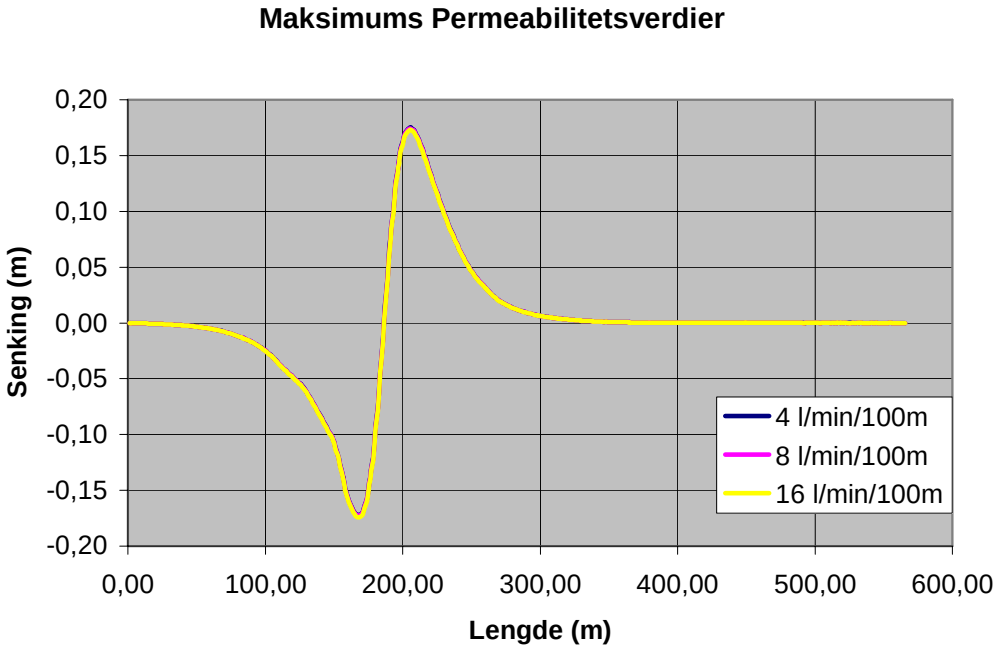
Figur 10. Analyseresultater med median permeabilitetsverdier. Avvik fra opprinnelig grunnvannstand (senking).



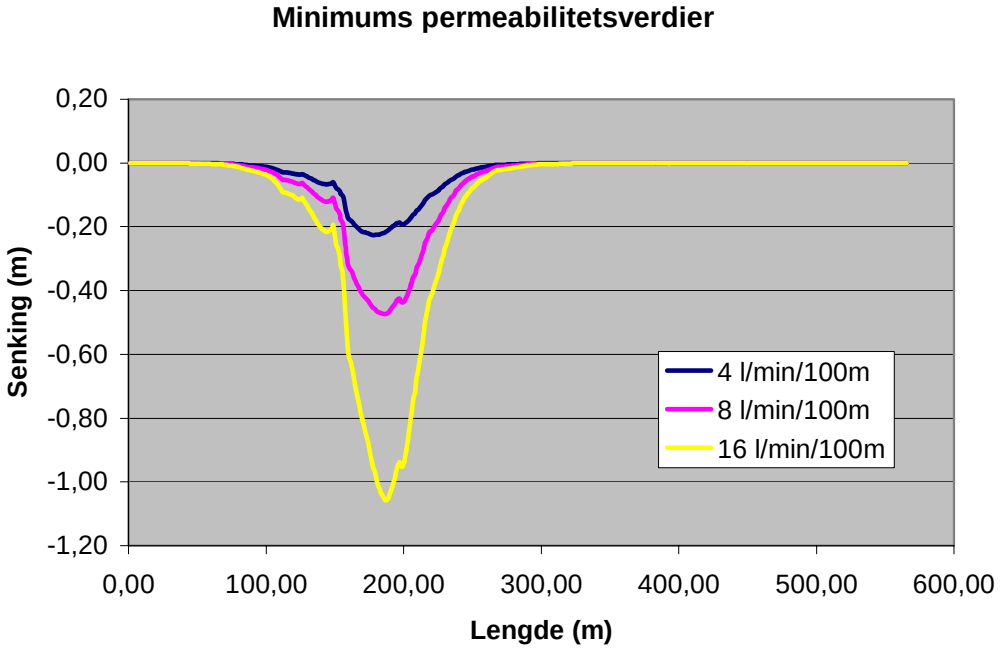
Figur 11. Analyseresultater med gjennomsnitts permeabilitetsverdier. Avvik fra opprinnelig grunnvannstanden (senking).



Figur 12. Analyseresultater med maksimums permeabilitetsverdier. Avvik fra opprinnelig grunnvannstand (grunnvannssenking).



Figur 13. Analyseresultater med maksimums permeabilitetsverdier og 10 ganger høyere permeabilitet i løsmassene. Avvik fra opprinnelig grunnvannstand (grunnvannssenking).



Figur 14. Analyseresultater med minimums permeabilitetsverdier. Avvik fra opprinnelig grunnvannstand (grunnvannssenking).

Slike bremseeffekter er vanligvis årsaken til økende grunnvannsstand i slike tilfeller, men som vi skal se i neste avsnitt har numerisk instabilitet også en del påvirkninger. Det er viktig å påpeke at slike effekter er typiske for vertikalprofiler. I naturen kan slike bremseeffekter finne sted lokalt, men de er dempet fordi grunnvannet som regel finner en utstrømningsvei. De største effektene ser vi i figur 12 for maksimum permeabilitetsverdier. Grunnvannstanden synker med 0,5 m, og bremseeffekten er like stor. Influensområdet er også stort. Stor permeabilitet gjør det enklere for gradienten å transportere større mengder av vann og bremseeffekten økes. Figur 13 viser det samme effekt når løsmassene er 10 ganger mer permeable enn normalt antatt. Man ser at effektene er dempet betydelig.

På mange måter er figur 14 den mest interessante. For lave permeabilitetsverdier, til og med små lekkasjer har større effekter enn forventet.

3.1.3 Nummerisk instabilitet.

De fleste analyseresultater for profilen ved Furubakken viser sterke påvirkninger fra numerisk instabilitet. Slike numeriske fenomener er typiske for profiler med store hydrauliske gradienter. En kjent årsak er knyttet til måten numeriske modeller løser ”tørt” element problemet. Når grunnvannstanden faller kommer noen elementer til å bli tørket ut. Numerisk sett burde disse elementene fjernes fra det numeriske likningssystemet fordi det mister sin singularitet og kan ikke lenger løses. Fjerning av slike elementer er uønskelig fordi det på et senere tidspunkt i simuleringene kan grunnvannsstanden øke og disse elementene kan bli ”våte” igjen.

En løsning på problemet er å definere en såkalt ”residual” mengde av vann til slike elementer. Dvs. at man setter en fiktiv mengde vann (noen få mm) i de tørre elementene. Likningssystemet blir noe tyngre å løse, men stort sett fungerer dette bra. Vannet som er tilsatt i de tørre elementene begynner å strømme når den hydrauliske gradienten er stor, og over flere tørre elementer begynner den å skape en ubalanse i beregningene. Det er

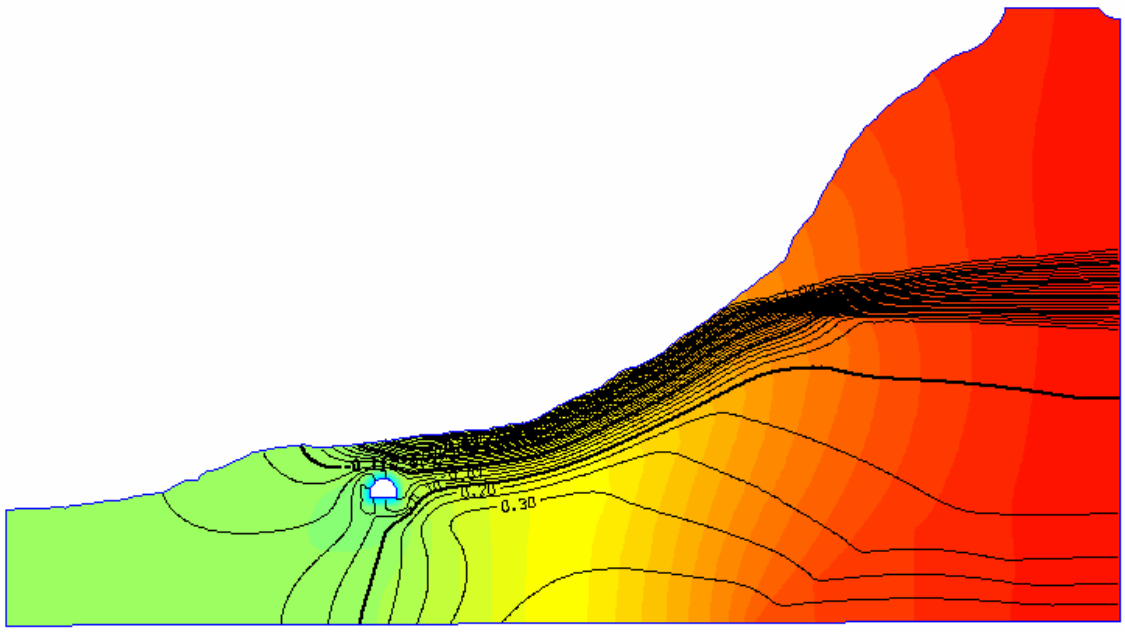
ikke særlig mye man kan gjøre for å løse dette problemet med mindre man fjerner manuelt de problematiske elementene.

En manuell fjerning av de problematiske elementene endte opp med at vi til slutt måtte fjerne alle løsmassene fra likningssystemet. Fjerning av løsmassene uten å fjerne den hydrauliske kommunikasjonen kunne oppnås ved å implementere en ”Robin” eller 3. type randbetingelse. Denne randbetingelsen ble implementert slik at den skulle simulere den hydraulsike kommunikasjonen mellom fjellmassene og løsmassene.

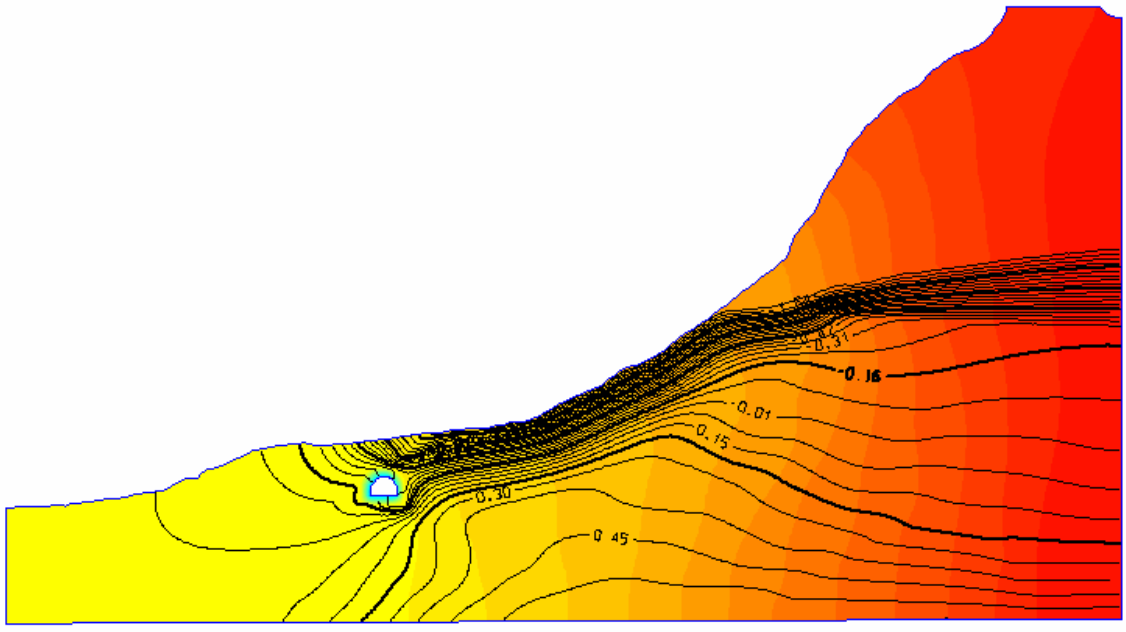
I figurene 15 og 16 vises analyseresultater hvor løsmassene er erstattet med en Robin betingelse. De aller fleste strømlinjene ligger i områdene med den høyeste permeabiliteten. Dette viser at en god del av grunnvannet brukes til å mate løsmassene. Det er kun få strømlinjer som starter fra løsmmassene og ender opp i tunnelveggene (lekkasjestrømninger). Det er den effekten vi har sett på i resultatene i forrige avnitt, hvor grunnvannstanden synker ved tunnelen men øker lenger til høyre i profilen.

Et annet numerisk problem er knyttet til implementeringen av dybdeavhengige permeabilitetsverdier. Det finnes flere måter å fordele disse verdiene på avhengig av hvilken interpoleringsfunksjon som brukes. Feflow er utstyrt med 3 slike funksjoner og hver funksjon har flere parametere for å variere resultatene på. Det viste seg at interpolasjonsmetoder som gir en ujevn fordeling av permeabilitetsverdier i profilen skaper numeriske problemer. Man kan forstå problemet om man visualiserer hva som skjer når to små naboområder i profilen har forskjellige permeabilitetsverdier. Når grunnvannet i et område treffer et annet område med lavere permeabilitet, prøver den å endre retning for å finne retningen med den minste motstanden. Hvis vi tenker nå på en situasjon hvor naboelementer har forskjellige parameterverdier, da blir det vanskelig for modellen til å konvergere mot en stabil løsning. Slike effekter er synlige i figur 16. I figur 15 ser man at alle strømlinjer er jevne og glatte, mens i figur 16 er strømlinjene ikke så glatte lenger. Elementgridet i figur 5 ble også testet som en alternativ løsning hvor formasjon 18 ble delt i tre lag og hvert lag fikk en gjennomsnitts permeabilitetsverdi tilvarende sin dybde. Stabiliteten økte noe. Problemet ble imidlertid ikke løst fordi all strømning foregikk i det øverste laget, noe som ikke var ønskelig.

For å unngå konvergeringsproblemer har vi brukt en kubisk Akima interpolaringfunksjon med 0,0 ”overshoot” og en 5 punkts begrensing. ”Overshoot” lik 0,0 betyr kun at interpolasjonen er tvunget til å være eksakt. En lineær interpolasjon var mindre effektiv med tanken på konvergeringsproblemene, men riktig fra et teoretisk synspunkt (endringer av hovedspenninger med dybden).



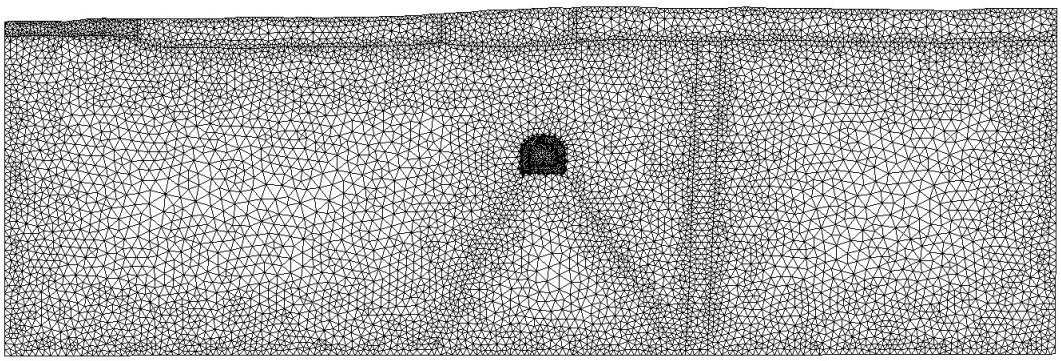
Figur 15. Strømlinjer og hydraulisk head for gjennomsnittspermeabilitetsverdier.



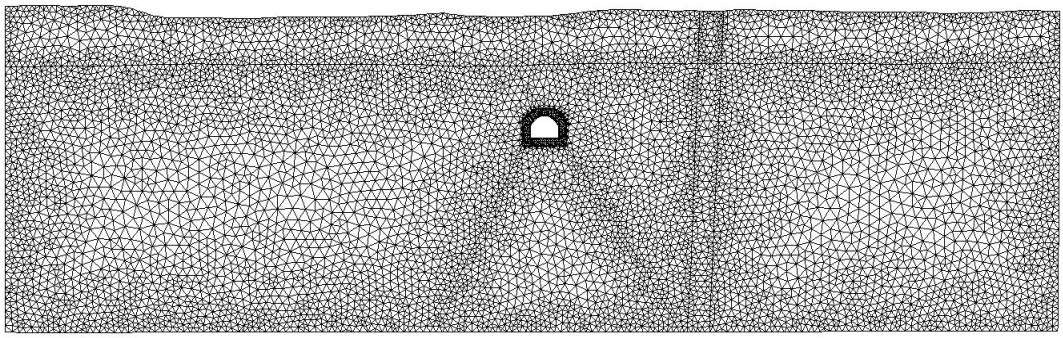
Figur 16. Strømlinjer og hydraulisk head for maksimumspermeabilitetsverdier.

3.2 Profil ved Jansløkka skole

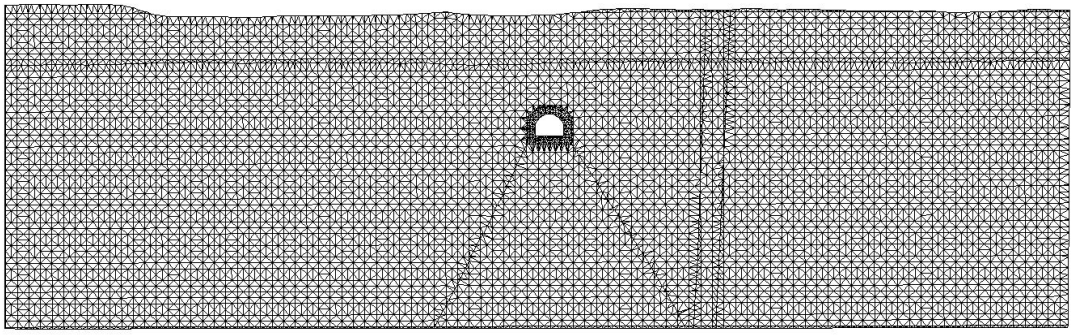
Tilsvarende som med den forrige profilen, har vi produsert flere forskjellige numeriske grid basert på geometrien av løsmassene og bergmassene i profilen ved Jansløkka skole. To slike grid vises i figur 17, 18 og 19.



Figur 17. Endelig element grid for Jansløkka skole profilen. Gridet viser løsmassene formasjon 17, eruptivgangen og tunnelen med tettingssone.



Figur 18. Endelig element grid for Jansløkka skole profilen. Løsmassene er fjernet og de øverste 20 m av formasjon 17 er definert som egen formasjon.



Figur 19. Endelig element grid for Jansløkka skole profilen. Løsmassene er fjernet og de øverste 20 m av formasjon 17 er definert som eget formasjon. Vertikale og horisontale sprekker er satt inn i 5 m avstand fra hverandre.

3.2.1 Randbetingelser

I følge Norconsults rapport varierer grunnvannsstanden mellom 2 m og 7 m i profilen. Slike variasjoner kan ikke forklares om profilen er hydraulisk isolert. Det er rimelig å anta at profilen ikke er hydraulisk isolert og at betydelige mengder av grunnvann strømmer i normal retning mot profilens plan. Slike strømninger kan vi ikke kompensere for uten å foreta en grunnvannsanalyse av hele området.

Siden vi ikke kan bruke de varierende grunnvannsmålingene fra Norconsult antar vi at en brukbar gjennomsnitts grunnvannstand for profilen er 5 m. Dette oppnås gjennom å sette konstant hydraulisk potensial på venstre og høyre side av profilen lik 142 m. En slik randbetingelse er ”farlig” for en analyse rettet mot senking av grunnvannsstand. I analyser hvor lekkasjene er store, vil en slik randbetingelse stabilisere løsningen, som om to innsjøer var plassert på venstre og høyre side av profilen med uendelig infiltrasjonskapasitet. Så lenge senkingstrakten ikke når profilens side, er resultatet relativt trygt.

Profilen var numerisk sett mye mer stabil en Furubakken profilen. Vi opplevde likevel noen numeriske problemer knyttet i simuleringer med stor hydraulisk gradient i nærheten av tunnelen. Problemene diskuteres i avsnittet om numeriske instabiliteter.

3.2.2 Resultater

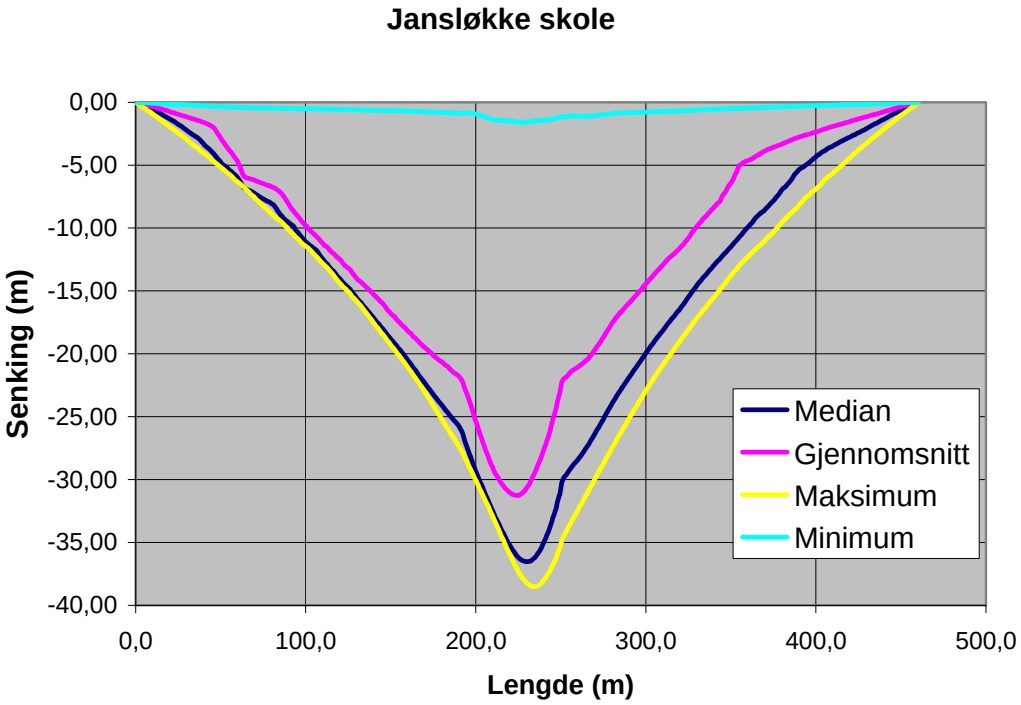
Vi bruker de dybdeavhengige permeabilitetsverdiene som vi fikk fra Barton og analyserer 4 forskjellige tilstander av profilen. De viktigste resultatene er oppsummert i tabell 5. Den første raden i tabellen viser lekkasjer som tilsvarer en situasjon uten tetting i tunnelen. De andre radene viser situasjoner hvor vi prøver å begrense lekkasjene til 4, 8 og 16 l/min/100m ved tetting. K_{tett} gir permeabilitetsverdien til tettingssonen som er antatt å være ca. 6m tykk rundt tunnelen.

Ved å sammenligne resultatene i tabell 5 med de fra den forrige profilen (tabell 4) merker man at tettingspermeabiliteten er mye lavere for denne profilen. Forskjellen skyldes sannsynligvis ulik fordeling av permeabilitetsverdier med dybden.

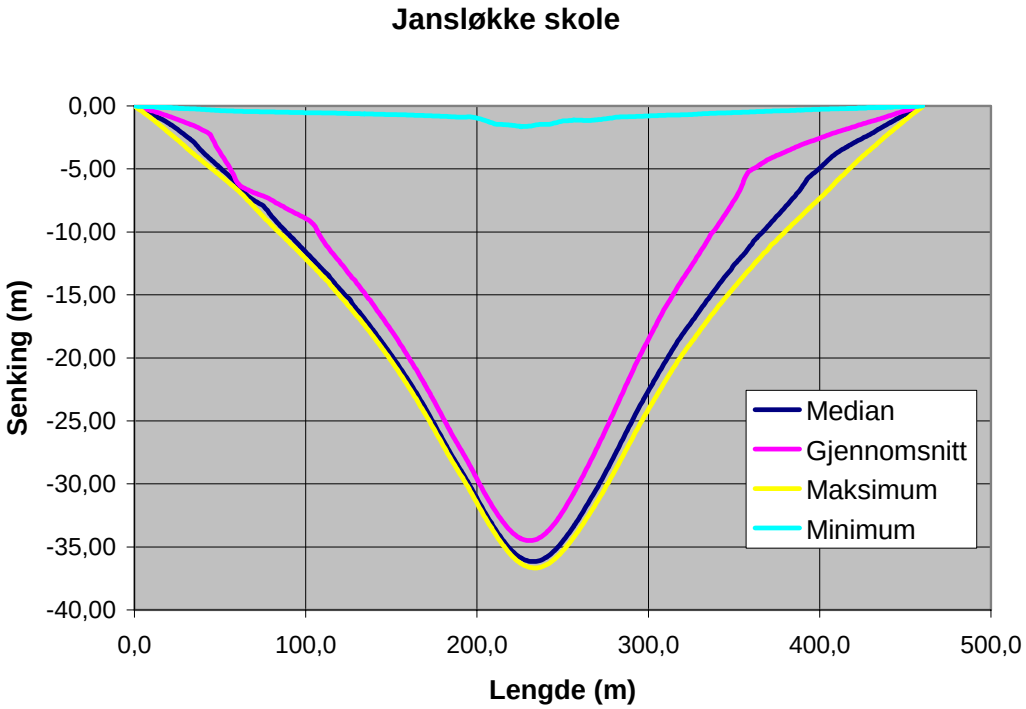
Tabell 5. Analyseresultater som viser lekkasjer og tilsvarende tettingspermeabilitet. Lekkasjer er angitt i l/min/100m

	Median	Gjennomsnitt	Maksimum	Minimum
Lekkasjer	817,43	246,25	5170,63	23,54
uten tett.				
K_{tett}	$1{,}0\cdot10^{-9}$	$1{,}1\cdot10^{-9}$	$1{,}0\cdot10^{-9}$	$1{,}3\cdot10^{-9}$
Lekkasjer	3,81	4,16	3,82	3,95
K_{tett}	$2{,}1\cdot10^{-9}$	$2{,}1\cdot10^{-9}$	$2{,}0\cdot10^{-9}$	$3{,}4\cdot10^{-9}$
Lekkasjer	7,99	7,85	7,64	8,13
K_{tett}	$4{,}3\cdot10^{-9}$	$4{,}4\cdot10^{-9}$	$4{,}3\cdot10^{-9}$	$1{,}2\cdot10^{-8}$
Lekkasjer	16,18	16,11	16,39	16,39

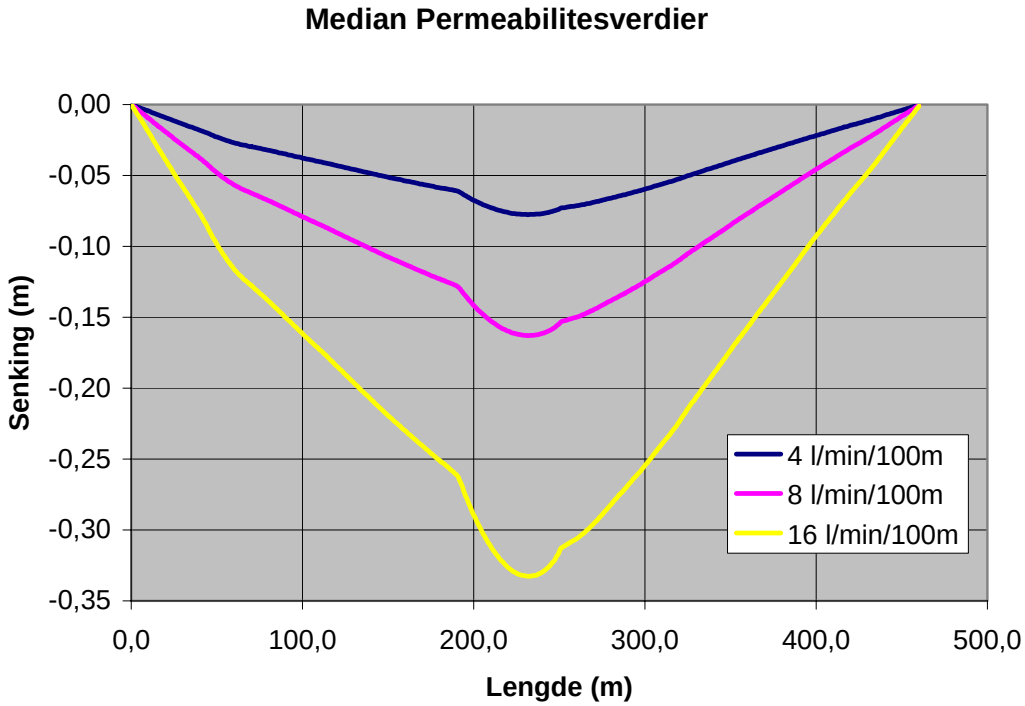
Figur 20 viser grunnvannstanden uten tetting i tunnelen. Minimumsverdier gir en senking på litt over 1,5 m over tunnelen. Dette kan betraktes som lite skadelig. De andre parameterverdiene gir store senkingstrakter over hele profilen. Van Genuchtens lov anvendes for å styre vannbalansen mellom den vannmettede og den umettede sonen. Ved å bruke Haverkamps lov oppnår vi omtrent de samme resultater (figur 21).



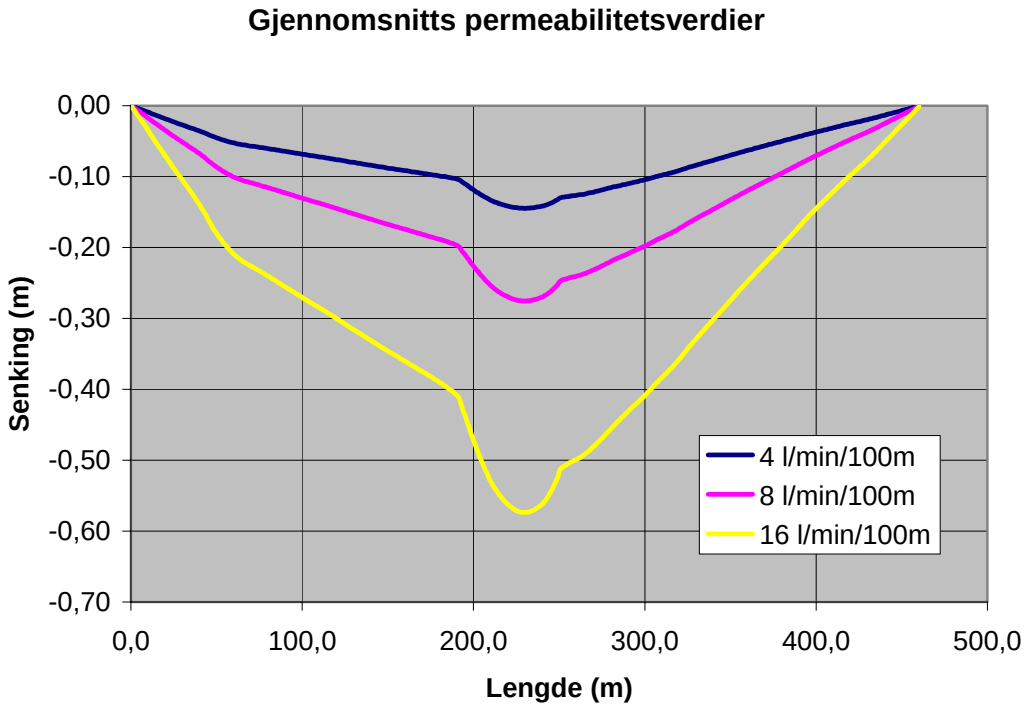
Figur 20. Jansløkka skole. Grunnvannsenking uten tetting i tunnelen.



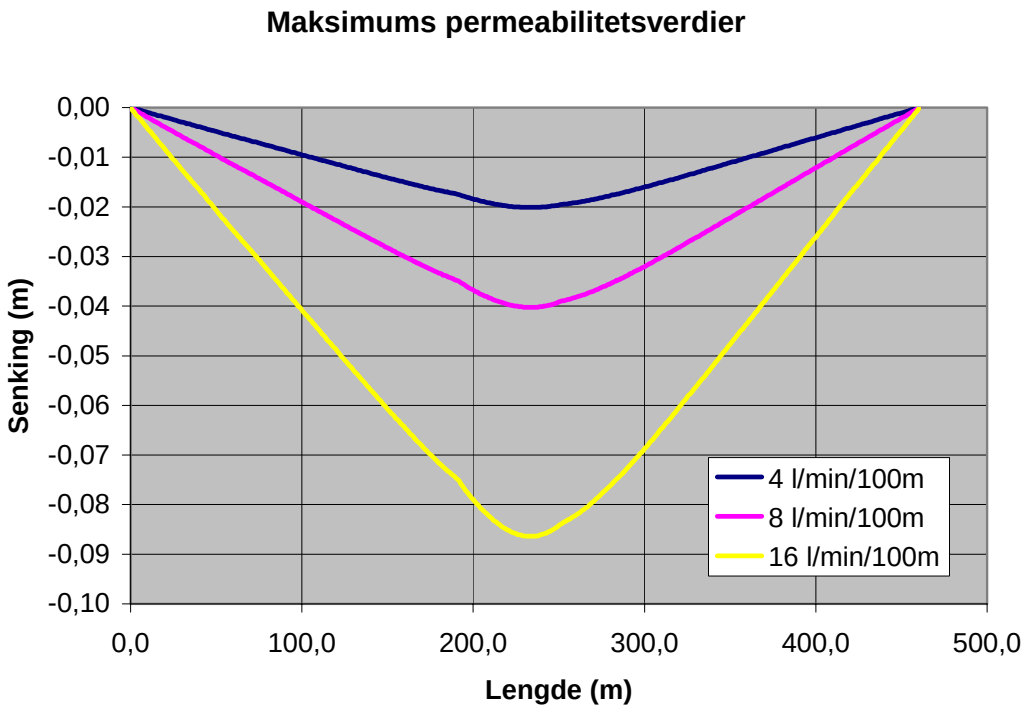
Figur 21. Jansløkka skole. Grunnvannsenking uten tetting i tunnelen. Løsning basert på Haverkamps lov isteden for Van Genuchtens som er vanlig i de fleste analyseverktøyene (blant dem Modflow).



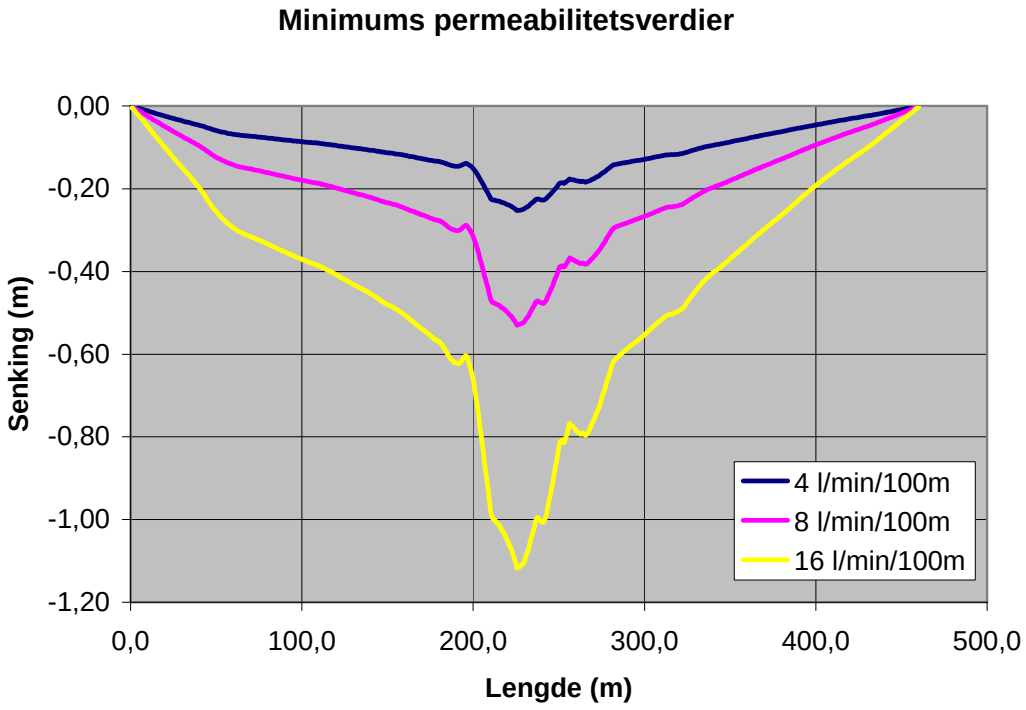
Figur 22. Jansløkka skole. Grunnvannsenking med median permeabilitetsverdier.



Figur 23. Grunnvannsenking med gjennomsnitts permeabilitetsverdier.



Figur 24. Grunnvannsenking med maksimums permeabilitetsverdier.



Figur 25. Grunnvannsenking med minimum permeabilitetsverdier.

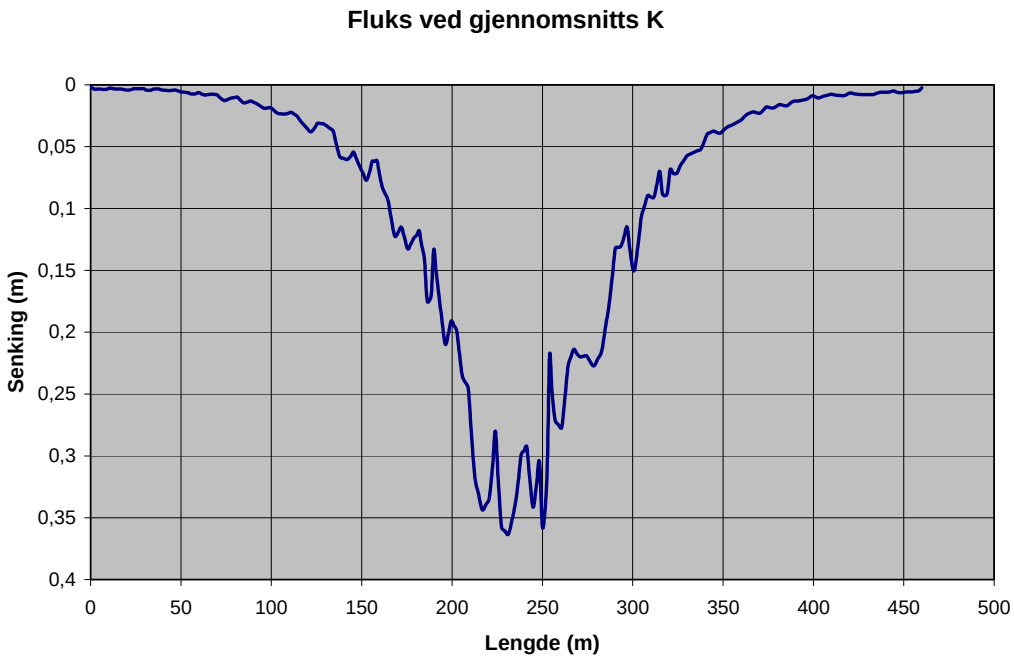
I Modflow brukes kun Van Genuchtens lov, derfor bruker vi den samme likningen i Feflow for å kunne sammenlikne resultatene. Fra en praktisk side er Haverkamps lov imidlertid bedre egnet til fjellområder. Ved å bruke Haverkamps lov oppnår vi en mer stabil løsning. Vannbalansen blir imidlertid mindre sensitiv. Uansett hvilken lov som brukes viser begge figurene store senkingstrakter.

Figurene 22 til 25 viser resultatene for hvert parametersett. Alle resultatene treffer profilens sider og dermed er påvirkningsområdet udefinerbar. Fra den andre siden er alle senkingene relativt små. Om disse er spredt over et større område enn profilens lengde, er ikke av så stor betydning. Det som er vanskeligere å bedømme er effekten av lekkasjer på grunnvannsnivåer langs tunnelen.

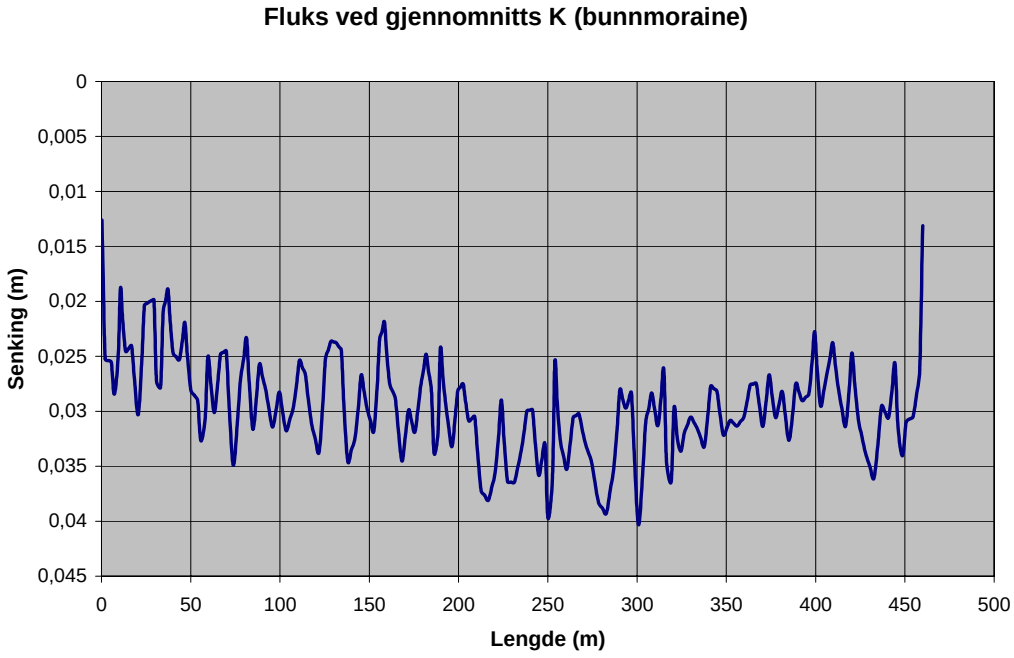
Det er viktig å nevne at strømningsforholdene er litt spesielle pga. randbetingelsene. Resultatene viser at lekkasjene i tunnelen kun kommer fra sonen rett over tunnelen (se også figur 28) i fjellet. Men når grunnvannstanden faller i morenen over tunnelen begynner grunnvann å strømme fra profilsidene mot morenen, pga. fastsatt randbetingelser.

For å undersøke dette problemet utførte vi en indirekte analyse hvor randbetingelsene på siden ble fjernet. Løsmassene ble erstattet med en tilsvarende Robin randbetingelse (se avsnitt 3.1.3) og vi analyserte hvor mye grunnvann som strømmer gjennom kontakten mellom løsmassene og fjell. Noen av resultatene vises i figur 26 og 27. Figur 26 viser grunnvannssenkning estimert fra mengden vann som infiltreres fra løsmassene til fjellet, med gjennomsnittsverdier for permeabiliteten og ca. 8 l/min/100m som lekkasje. Grunnvannssenkning er estimert ut fra fluksen, og en antagelse på 20 % porøsitet (grovt estimat). Grunnen at kurvene er så ujevne er at vi har målt fluksen fra hvert element på grensen mellom løsmassene og fjellet, og at størrelsen til disse elementene ikke er like. Likevel ser man at mesteparten av vannet infiltreres fra området rett over tunnelen og minsker fort med avstand fra tunnelen. Dette viser at grensebetingelsene som er implementert på sidene av profilen har stor effekt på resultatene, og man må være forsiktig ved tolkning av resultatene.

I figur 27 har vi videre antatt at det mellom løsmassene og fjellet finnes en bunnmorene. Figuren viser at lekkasjene fra tunnelen fordeles i så fall over hele profilen, men at grunnvannsenkingen er betydelig mindre.

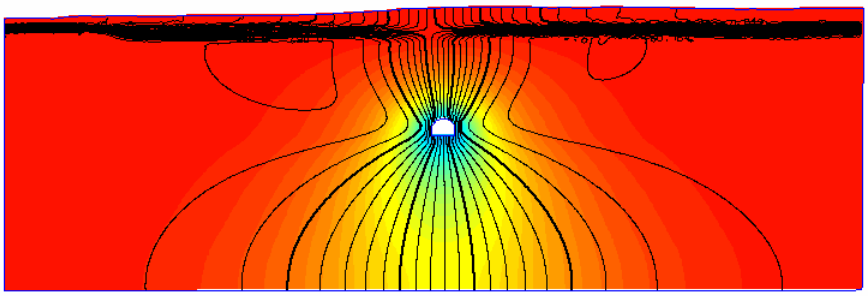


Figur 26. Grunnvannssenkning estimert fra grunnvannsstrømning gjennom kontakten løsmasser-fjell.



Figur 27. Grunnvannssenkning estimert fra grunnvannsstrømning gjennom kontakten løsmasser-fjell som er antatt å være noe tett pga bunnmorene.

Figur 28 viser strømningslinjer og hydrauliske head verdier fra profilen. De fleste lekkasjer stammer fra randbetingelser gjennom morenelaget.



Figur 28. Strømningslinjer og hydraulisk head for Jansløkke profilen

3.2.3 Numerisk instabilitet

De største problemene med instabilitet fikk vi når vi analyserte situasjoner uten tetting i tunnelen. Grunnvannssenkingen var så stor at den hydrauliske gradienten som ble dannet rundt tunnelen skapte tørre elementer. Dette er drøftet tidligere i avsnitt 3.1.3. Resultatene for median og gjennomsnittspermeabilitetsverdier var meget følsomme for numerisk instabilitet. Resultatene presentert i figurene 20 - 25 er de beste av en rekke utilfredsstillende resultater. Utilfredsstillende resultater er primært knyttet til konvergeringsproblemer og bruk av Van Genuchtens lov.

4 Konklusjoner

Analysene som ble utført med Feflow har ikke alltid gitt tilfredsstillende resultater. Siden analysene av Lugeon-testene (Barton, 2003) ikke gir hydrauliske egenskaper for bestemte sprekkesett var det umulig å bruke Feflows sprekkeelementene. Det var imidlertid mulig å implementere estimerte dybdeavhengige permeabilitetsdataene fra Barton (2003), noe som Norconsult ikke kunne gjøre med Feflow.

Vi karakteriserer noen av resultatene som ikke-tilfredsstillende hovedsakelig fordi de dybdeavhengige permeabilitetene har ført til store numeriske problemer i analysene. Det kreves ytterligere forskning for å skaffe en stabil numerisk prosedyre som kan analysere dybdeavhengige permeabiliteter. Prosedyrene må knyttes til andre prosesser som hovedspenningene og deformasjoner av sprekker med dybden.

Nytteverdien ved å bruke en median, gjennomsnitt, maksimum, minimum basert system for permeabiliteten, er vanskelig å bedømme. De angitte maksimums- og minimumsverdiene er ofte urealistiske. Dette skaper problemer for bruk av analyseverktøyene, men også for tolkningen av resultatene. De angitte parameterverdiene burde testes mot aktuelle grunnvannstandsmålinger for å øke analysenes troverdighet.

Resultatene viser at en lekkasjebegrensing til 8 l/min/100m tunnel er akseptabel for begge profiler.

I Furubakken burde man sette i gang ytterligere feltundersøkelser for å bestemme de egentlige hydrogeologiske forholdene mellom formasjon 5 og 18. Hvis kommunikasjonen

er slik vi har behandlet den i våre analyser, er det fare for at de eksisterende vannkildene tørkes ut ved store lekkasjer i tunnelen. Hvis formasjon 5 er hydraulisk isolert fra formasjon 18, vil kun områdene i nærheten av tunnelen bli påvirket. Vi estimerer at et område fra 90 – 270 m kan bli hovedsakelig påvirket av lekkasjer i tunnelen fordi vi betrakter resultater fra maksimumverdiene som urealistiske.

På Jansløkka skole er det miste påvirkningsområdet fra 125 – 350 m. Potensialet for påvikninger over større arealer er avhengig av hydrogeologiske forhold i et mye større areal en det som profilen omfatter.

Kvaliteten til resultatene som presenteres her, avhenger først og fremst av kvaliteten på dataene som er brukt for å bygge modellen. For å skaffe seg best mulig informasjon om det hydrogeologiske forholdet, er det derfor viktig at man ved slike analyser ikke neglisjerer forundersøkelser (kartlegging av sprekkesystemet, mektighet og egenskaper til løsmasser, lokalisering av kilder, måling av grunnvannstand, geofysiske undersøkelser etc…).

Referanser

Barton, N. 2003. Teoretisk og empirisk forståelse av forinjisering og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger. Miljø og Samfunnstjenlige Tunneler. Rapport Nr. 29, Statens vegvesen, 123 s.

Barton, N. & de Quadros, E. 2003. Improved understanding of high pressure pre-grouting effects for tunnels in jointed rock. Proc. of 10th ISRM Congress, South Africa, Vol. 1, 85-91.

Norconsult, 2000. Detaljplan Jong-Asker (KM 15, 924-23, 640) Fagrapport. Tetting I Tunnel. Jernbaneverket, Utbygging. 951030-70-4-003122/04A.

Snow, D.T. 1968. Rock fracture spacings, openings and porosities. J. of Soil Mech.and Found. Div., Proc. ASCE, SMI. 73-91.

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

Utgitt i Rapportserien i 2005

Nr. 1 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarkedet, 4. kvartal 2004 (70 s.)

Nr. 2 Hervé Colleuille, Tina Vestersager: Nasjonalt overvåkingsnett for grunnvann og markvann (Fysiske parameter). Driftrapport 2004. Status pr. januar 2005 (75 s.)

Nr. 3

Nr. 4 Panagiotis Dimakis:Grunnvannsanalyse ved to utvalgte strekninger langs Jong-Asker tunnelen (31 s.)