

Gunhild Viljugrein Stølen

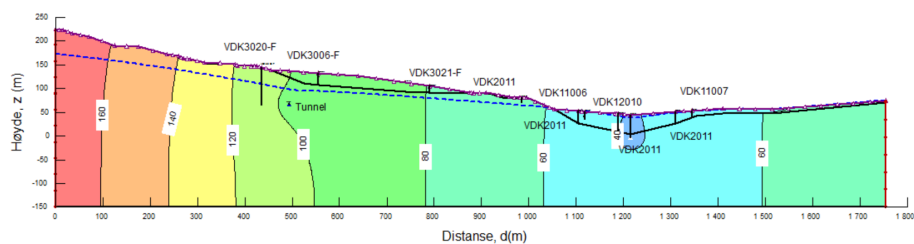
# Modellering av grunnvannsstrømning i SEEP/W ved tunneldriving

Masteroppgave i MTTEKGEO

Veileder: Roger Olsson

Medveileder: Jenny Langford

Juni 2022





Gunhild Viljugrein Stølen

# **Modellering av grunnvannsstrømning i SEEP/W ved tunneldriving**

Masteroppgave i MTTEKGEO  
Veileder: Roger Olsson  
Medveileder: Jenny Langford  
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden



# Sammen drag

For at et tunnelprosjekt skal være vellykket forutsetter det at ytre miljø ikke blir påvirket i nevneverdig grad av tunneldrivingen (SVV, 2003). Grunnvann som siver inn i tunnelen kan redusere poretrykket og grunnvannsnivået over store arealer, noe som blant annet kan føre til setninger i overliggende løsmasser. Det må derfor stilles krav til maksimal innlekkasjemengde. Tettekravet forutsetter en pålitelig predikasjon av poretrykksreduksjonen for ulike innlekkasjerater. Dagens metode baserer seg på erfaringer fra tidligere tunnelprosjekter (SVV, 2003), men en alternativ tilnærming kan være å utføre numerisk grunnvannsmodellering. Hovedhensikten med den utførte modelleringen i SEEP/W har vært å vurdere muligheter, begrensninger og usikkerheter for en slik modell. Modellering av Drammenstunnelen viste at det var nødvendig med tilgang til omfattende felt- og grunnundersøkelser i en kombinasjon med tolkning for å konseptualisere modellen. En rekke antakelser og forenklinger ble innført, men dette ført også til økt usikkerhet. Modelleringen viste at en for høy hydraulisk konduktivitet i bergmassen førte til en overestimert mengde vann som infiltrerte inn i domenet, mens en for lav hydraulisk konduktivitet ga urealistisk stor trykkløydereduksjon ved tunnelinnlekkasje. I tillegg til den hydrauliske konduktiviteten vil nøyaktighetene på beregningene avhenge av hvordan grensebetingelsene i modellen gir realistiske poretrykks- og innstrømningsnivåer sammenlignet med målt poretrykk og beregnet avrenning fra feltområdet. Beregningseksempelen viste at en definert konstant innlekkasje til tunnel førte til en ”pumpeeffekt” når grunnvannsnivået sank under tunnelkonturen. Dette kunne gi urealistiske store poretrykksreduksjoner. En konstant innlekkasjemengde førte til at den hydrauliske gradienten ble konstant som følge av Darcys lov. Av den grunn ble domenestørrelsen en viktig usikkerhetsfaktor ved modelleringen. I realiteten vil innlekkasjen til tunnel avhenge av tilgjengelig grunnvann, den hydrauliske konduktiviteten og om det er en energiforskjell til å drive strømmingen (Brattli, 2018). Så lenge tunnelen ligger under grunnvannsnivået, inngangsparameterne er nøyaktige og konseptualiseringen er realistisk i forhold til erfaringstallene, kan numerisk modellering benyttes for å gi en helhetlig vurdering av de ulike parameterne ved stasjonær eller transient strømming.

# Abstract

The success of a tunnel project depends, among other things, on how much the tunnel affects the external environment. Because of groundwater seepage into the tunnel, the pore pressure and groundwater level can be reduced over large areas, potentially leading to settlements in the overlying soil. A maximum inflow rate needs to be defined to limit the possible consequences. To address this, a reliable prediction of the pore pressure reduction for different leakage rates is necessary. Today's method is based on experience from previous tunnel excavation projects (SVV, 2003). An alternative approach may be to use numerical modelling. The main purpose with the performed modelling in SEEP/W has been to address opportunities, limitations and uncertainties. The case study in Drammen showed that it was necessary with access to extensive field- and ground investigation in combination with a comprehensive interpretation to conceptualize the field area. As a result, several assumptions and simplifications was taken, which in turn could increase the uncertainty. The calculations showed that a too high hydraulic conductivity in the rock mass led to an unrealistically high seepage into the domain. A too low value resulted in an unrealistic pressure head reduction around the tunnel due to leakage. The accuracy of the calculations is dependent on the accuracy of the hydraulic conductivity and how well the boundary conditions in the model adapts to the measured pore pressure and the calculated runoff in the field area. Because of how the tunnel was defined in the model, the simplified case showed that a "pumping-effect" occurred when the groundwater table was reduced under the tunnel contour. As a result, the pore pressure could be reduced to an unrealistically high degree. Due to Darcy's law and the defined constant tunnel leakage, the hydraulic gradient became constant which made the domain size an important uncertainty factor when modelling. In reality, the tunnel leakage depends on available groundwater, the hydraulic conductivity and whether there is an energy difference that runs the groundwater flow (Brattli, 2018). Groundwater modelling can be addressed to provide a comprehensive assessment of the various parameters for stationary or transient flow, as long as the tunnel is under the groundwater level, the input parameters are accurate and the conceptualisation is realistic in comparison with the empirical figures.

# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i emnet TGB4945 Ingeniørgeologi, masteroppgave vår 2022, ved institutt for Geologi og Petroleum ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Faget belønnes med 30 studiepoeng og er en del av hovedprofilen Ingeniørgeologi og Bergmekanikk.

På oppdrag fra Norges Geotekniske Institutt (NGI) var det ønskelig å vurdere om numerisk modellering kan benyttes som en alternativ metode til å predikere poretryksreduksjon som følge av tunnelinnlekkasje. Dagens metode bygger i all hovedsak på erfaringer. Denne problemstillingen hørtes ut som en relevant og fremtidsrettet oppgave, som hørtes spennende å fordype seg i. Masterprosjektet har vært en lærerik prosess som har bidratt til økt forståelse av grunnvannsstrømning og hvilke parametere som av betydning ved modellering.

Det er flere som skal takkes i forbindelse med denne masteroppgaven. Jeg vil først rette en stor takk til mine veiledere. Tusen takk til hovedveileder Roger Olsson ved NTNU og NGI for gode tilbakemeldinger, veiledning og diskusjoner gjennom hele prosessen. Tusen takk til medveileder Jenny Langford ved NGI for hennes store faglige kompetanse om temaet og gode diskusjoner. Jeg vil i tillegg takke Asplan Viak for lån av kontorplass det siste året og for et godt arbeidsmiljø. Tusen takk til resten av klassen for at jeg har blitt kjent med dere og for gode diskusjoner underveis. Til slutt vil jeg takke min samboer og familie for god støtte, motivasjon og distraksjon når det trengtes.

Trondheim, 25.06.2022.

*Gunhild V. Stølen*

Gunhild Viljugrein Stølen

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Forord</b>	<b>III</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn for oppgaven . . . . .	1
1.2 Formål og avgrensning . . . . .	2
1.3 Oppgavens oppbygning . . . . .	3
<b>2 Bakgrunn for modellering av innlekkasje i tunnel</b>	<b>4</b>
2.1 Konsekvenser av innlekkasje til tunnel . . . . .	4
2.2 Innlekkasjekrav . . . . .	8
2.3 Tiltak for å begrense innlekkasje til tunnel . . . . .	10
2.4 Hensikt med grunnvannssmodellering . . . . .	10
<b>3 Teori</b>	<b>12</b>
3.1 Hydrogeologiske prinsipper . . . . .	12
3.1.1 Det hydrogeologiske kretsløpet og vannbalanse . . . . .	12
3.1.2 Grunnvann og akvifer . . . . .	14
3.1.3 Nydannelse av grunnvann . . . . .	19
3.1.4 Hydraulisk konduktivitet i løsmasser og berg . . . . .	20
3.2 Grunnvannsstrømning og strømningsligninger . . . . .	23
3.2.1 Grunnvannsstrømning i mettet sone . . . . .	23
3.2.2 Grunnvannsstrømning i umettet sone . . . . .	25
3.2.3 Darcys lov . . . . .	27
3.3 Grunnvannssmodellering . . . . .	30



3.3.1	Modellering av grunnvannsstrømning . . . . .	30
3.3.2	Endelig element metoden . . . . .	31
3.3.3	Kontinuum og diskontinuum modell . . . . .	34
3.3.4	Stasjonær og transient modellering . . . . .	35
3.3.5	Geometri . . . . .	36
3.3.6	Diskretisering . . . . .	37
3.3.7	Materialegenskaper . . . . .	39
3.3.8	Grensebetingelser . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Metode for modellering med SEEP/W</b>	<b>45</b>
4.1	SEEP/W . . . . .	45
4.2	Generell fremgangsmåte . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Beregningseksempel</b>	<b>49</b>
5.1	Hensikt . . . . .	49
5.2	Metode for sensitivitetsanalyse . . . . .	50
5.3	Inngangsparametre . . . . .	51
5.4	Resultat og diskusjon av resultat . . . . .	53
5.4.1	Initielle forhold . . . . .	53
5.4.2	Trykkhøyde ved ulike innlekkasjemengder . . . . .	54
5.4.3	Innstrømning av vann i modellen ved grensene . . . . .	56
5.4.4	Nedbør . . . . .	57
5.4.5	Domenestørrelse . . . . .	60
5.4.6	Uten morene . . . . .	62
5.4.7	Ulik hydraulisk konduktivitet . . . . .	64
5.4.8	Transient strømning . . . . .	68
5.5	Diskusjon av de største usikkerhetene ved beregningseksempellet . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Drammenstunnelen</b>	<b>72</b>
6.1	Områdebeskrivelse . . . . .	72
6.1.1	Datagrunnlag . . . . .	72
6.1.2	Løsmasser . . . . .	75
6.1.3	Berg . . . . .	77
6.1.4	Nedbør og avrenning . . . . .	79
6.1.5	Grunnvannsstrømning og ekvipotensialkart . . . . .	80
6.1.6	Satt innlekkasjekrav i Kobbervikdalen . . . . .	83

6.2	Metode for oppsetting og validering av modell . . . . .	84
6.3	Bestemmelse av inngangsparametre til modellert snitt i SEEP/W . . . . .	85
6.3.1	Valg av snitt . . . . .	85
6.3.2	Stratigrafisk lagdeling og dybde . . . . .	86
6.3.3	Hydraulisk konduktivitet . . . . .	87
6.3.4	Avrenningsareal . . . . .	89
6.3.5	Fastsettelse av grensebetingelser . . . . .	90
6.4	Resultat og validering av initiell modell . . . . .	92
6.4.1	Vurdering av infiltrasjon fra grenebetingelser i modellen . . . . .	92
6.4.2	Verifisering av trykkpotensial . . . . .	94
6.5	Resultat og diskusjon av modell med innlekkasje til tunnel . . . . .	96
6.5.1	Trykkpotensial . . . . .	96
6.5.2	Med og uten morene . . . . .	97
6.5.3	Influensavstand . . . . .	98
6.5.4	Inn- og utstrømningsmengder . . . . .	99
6.6	Diskusjon av de største usikkerhetene med modellering av snitt i Kobbervikdalen . .	102
<b>7</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>106</b>
	<b>Referanseliste</b>	<b>110</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>I</b>
A	Vedlegg A - Beregnede figurer for beregningseksempelen . . . . .	I
B	Vedlegg B - Detaljert kart og høydeprofil over tunnelstrekningen Drammen - Kobbervikdalen . . . . .	X
C	Vedlegg C - Detaljert kart over alle borpunkt i Kobbervikdalen . . . . .	XII
D	Vedlegg D - Liste over relevante borepunkt . . . . .	XIV
E	Vedlegg E - Data fra potensialmålere/grunnvannsmålere i Kobbervikdalen . . . . .	XVI

# Symbolliste

Listen beskriver flere symboler som senere vil bli brukt i teksten.

$\Delta M$	Endring i magasinert vann
$\gamma_w$	Tyngdetetthet vann [kN/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Dynamisk viskositet [Pa*s]
$\nabla h$	Gradient hydraulisk potensial
$\nu$	Kinetisk viskositet [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Tetthet væske [kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Volumetrisk vanninnhold [%]
$A$	Innstrømningsareal, tverrsnittareal [m]
$d$	Distanse i modellen, Karakteristisk porediameter [mm, m]
$dh$	Endring i trykkpotensial [m]
$dl$	Horisontal avstand mellom to punkt [m]
$E$	Evapotranspirasjon [mm]
$g$	Tyngdeakselerasjonen [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Hydraulisk potensial [m]
$h_p$	Trykkpotensial/trykkehøyde [m]
$i$	Hydraulisk gradient [-]
$K$	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
$k$	Permeabilitet [m <sup>2</sup> ]
$k_i$	Permeabilitet inisert sone [m/s]

---

$l$	Lengde tunnel [m]
$M$	Elementmatrise
$m_w$	Helning vanninnholdscurve [-]
$n$	Porøsitet [%]
$P$	Nedbør [mm/døgn, måned, år], Trykk [kPa]
$Q$	Avrenning, innlekkasjemengde til tunnel, massestrøm [m <sup>3</sup> , l/s]
$q$	"Darcy-hastighet" $q = Q/A$ [m/s]
$R$	Reynolds tall [-]
$r$	Radius tunnel [m]
$r_e$	Ekvivalent radius tunnel [m]
$S_s$	Spesifikk magasinkoeffisient [-]
$T$	Mengde innlekkasje i tunnel [l/s]
$t$	Tid [s, h, år], tykkelse injeksjonssone [m]
$u$	Poretrykk [kPa]
$u_a$	Lufttrykk i porene [kPa]
$v$	Gjennomsnittlig hastighet væske [m/s]
$W_c$	Prosentvis vanninnhold [-]
$z$	Høyde over en datum linje, kote [m]

# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn for oppgaven

Erfaringer har vist at utbygging av tunneler medfører risiko for påvirkning på ytre miljø (SVV, 2003). En vanlig konsekvens er at vann som lekker inn i tunnelen kan føre til at poretrykket over og til siden for tunnelen blir redusert. Det kan da oppstå setninger i overliggende lavpermeable masser som leire. Sårbart naturmiljø kan også bli påvirket negativt dersom grunnvannsnivået blir redusert som følge av poretrykksreduksjonen. Erfaringer fra forskningsprosjektet ”*Miljø og samfunnstjenlige tunneler*” har vist at influensområdet til poretrykksreduksjonen på grunn av tunnelinnlekkasje kan strekke seg flere hundre meter til hver side for tunnelen (SVV, 2003). Størrelsen på influensområdet og mulige konsekvensene av en innlekkasje til tunnel må derfor bli tatt høyde for ved prosjektering av tunnelen. Som et tiltak settes det ofte strenge krav til maksimal vannmengde inn i tunnelen. I dagens praksis settes disse kravene som regel på bakgrunn av erfaringer fra en rekke tunnelprosjekter. Denne masteroppgaven skal se på en alternativ tilnærming ved numerisk modellering for å estimere poretrykksreduksjon som følge av innlekkasje. Hensikten er å vurdere muligheter, begrensninger og usikkerheter med numerisk modellering av grunnvannsstrømning ved tunnelinnlekkasje i SEEP/W 2D.

Numerisk modellering av grunnvannsstrømning er en metode som matematisk beskriver de fysiske grunnvannsforholdene. Slike modeller vil som regel bestå av et sett med differensialligninger som beskriver strømmingen numerisk. For å beskrive strømmingen matematisk må det lages en forenklet modell av berggrunnen og løsmassene. Det må da gjøres en rekke antagelser og forenklinger av de komplekse geologiske og hydrologiske forholdene. Inhomogeniteter og geometriske uregelmessigheter må blant annet ofte sees bort i fra. I tillegg

kan det være store variasjoner i nedbør, avrenning og grunnvannspotensial som må bli tatt høyde for som inndata i det numeriske programmet. For å oppnå et realistisk beregningsresultat kreves det gode inngangsdata av tilstrekkelig kvalitet, samt at brukeren av det numeriske programmet har nok kunnskap og erfaringer til å lage en konseptualisering av de faktiske forholdene. Påliteligheten til predikasjonene vil i stor grad avhenge av hvor bra modellen samsvarer med feltsituasjonen.

## 1.2 Formål og avgrensning

Denne masteroppgaven har som formål å undersøke om numerisk modellering med programmet SEEP/W 2D kan benyttes til å beregne poretrykksreduksjonen som følger av innlekkasje i tunnel. Hovedhensikten vil være å vurdere muligheter, begrensninger og usikkerheter en slik modell gir og om resultatene blir realistiske. Ved å utføre en parameterstudie på en forenklet modell kan det bli undersøkt hvilke parametere som påvirker analysen mest. Ved hjelp av et enkelt beregningseksempel skal effekten av en endring på ulike parametere slik som nedbør, domestørrelse, morene og ulik hydraulisk konduktivitet bli studert for å se på hvilke parametre som er viktigst ved modellering. I tillegg skal det undersøkes om grunnvannsmodellering ved et reelt problem gir realistisk resultater. Området som skal modelleres er en strekning langs Drammenstunnelen ved Kobbervikdalen, Drammen, i forbindelse med utbyggingen av Vestfoldbanen. Både for beregningseksempelen og tilfellet med Drammenstunnelen blir ikke de potensielle konsekvensene av poretrykksreduksjonen som følge av tunnelinnlekkasjen gått videre inn på.

Numerisk modellering vil sjeldent gi et helt nøyaktig bilde av virkeligheten, da de fysiske forholdene må forenkles for å kunne bli beskrevet matematisk. I de påfølgende modellene blir det antatt at materialet i de ulike geologiske mediumene er homogene, noe de sjeldent er i virkeligheten. I bergmassen vil grunnvannsstrømningen som regel foregå i sprekker og inhomogeniteter. Dette vil bli sett bort i fra med beregninger i SEEP/W, ettersom bergmassen blir betraktet som et kontinuum med en satt gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet. Hvordan den enkelte sprekk påvirker grunnvannsstrømningen blir ikke vurdert.

I tillegg til å forenkle materialeegenskapene må også ofte geometrien og de hydrologiske forholdene forenkles. I SEEP/W vil de fleste geometriske elementene bli lagt inn med rette linjer mellom punkt for å gjøre beregningene mindre krevende for datamaskinen. En for komplisert geometri vil gjøre at beregningene tar unødvendig lang tid. De hydrologiske forholdene vil også variere stort i løpet av året, noe som gjør at inngangsparameterne varierer. Av den grunn må det bli tatt valg av brukeren av programmet for hvilke verdier som skal benyttes. For å oppnå et godt resultat vil det

være nødvendig med gode valg av inngangsparametere.

### 1.3 Oppgavens oppbygning

Videre følger 7 hovedkapitler med hver sine underkapitler som har til hensikt å belyse usikkerhetene med numerisk modellering. Oppgaven er videre bygd opp som følger:

- Kapittel 2 er et bakgrunnskapittel som tar for seg noe av det som ble gjort i prosjektoppgaven «Konsekvensene av grunnvannssenkning og redusert poretrykk som følge av innlekkasje til tunnel» (Stølen, 2021). Kapitlet oppsummerer kort de mulige konsekvensene ved innlekkasje til tunnel.
- Videre følger en teoridel som har til hensikt å gi en forståelse angående hva som er de drivende faktorene for grunnvannsstrømning og hvordan dette kan bli brukt i det numeriske programmet SEEP/W. Viktige numeriske prinsipper blir så gjennomgått, samt inngangsparametere for beregningen.
- I metoddelen blir det numeriske programmet SEEP/W presentert, samt en generell fremgangsmåte for å benytte programmet.
- Beregningseksempelet i kapittel 5 kan bidra til å gi økt forståelse over parametrene benyttet i programmet, samt avdekke de største usikkerhetene og svakhetene med modellering i SEEP/W.
- Deretter blir et eksempel fra tunnelprosjektet Drammen - Kobbervikdalen modellert. Kapitlet starter med en områdebeskrivelse og metodedel som videre benyttes til å bestemme inngangsparametrene i modellen. Resultatet av modellen blir så gjennomgått og de største usikkerhetene blir diskutert.
- Til slutt vil en konklusjon oppsummere de største usikkerhetene med numerisk modellering.

## Kapittel 2

# Bakgrunn for modellering av innlekkasje i tunnel

### 2.1 Konsekvenser av innlekkasje til tunnel

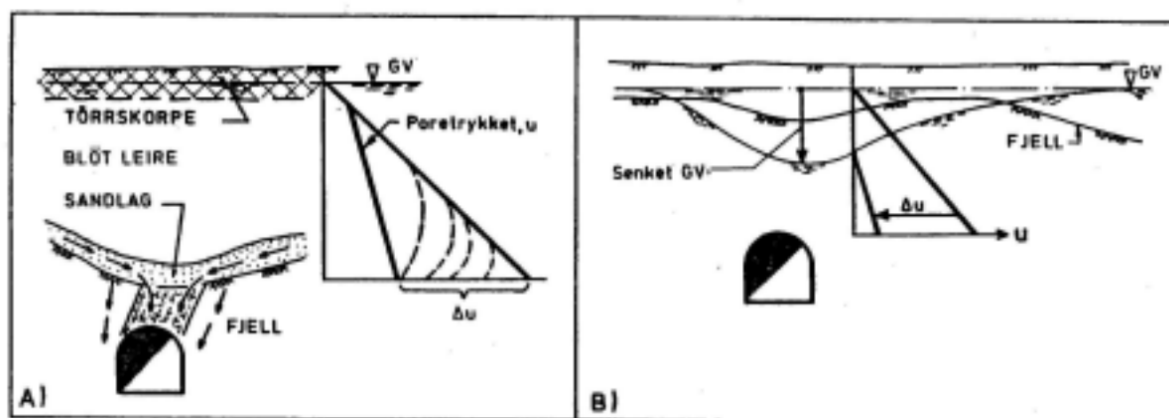
For at et tunnelprosjekt skal bli helt vellykket innebærer det blant annet at innlekkasje av grunnvann ikke påvirker ytre miljø i nevneverdig grad. Grunnvann som lekker inn i tunnel medfører at vann drenerer gjennom sprekke i berget og gjennom overliggende løsmasser slik at grunnvannsstrømningen blir endret til andre retninger og intensiteter enn før (Cuisiat og Skurtveit, 2003). Dette kan blant annet føre til en endring av poretrykket og/eller grunnvannstanden i grunnen (Karlsruud, 2002). Som følge av innlekkasje i tunnel kan noen av konsekvensene nevnt under oppstå (Karlsruud, 2000):

- Redusert poretrykk ved innlekkasje kan føre til setninger i leirholdige masser, som igjen kan føre til skade på bygninger og annen infrastruktur på overflaten.
- Endret grunnvannsnivå og -strømning vil kunne føre til alvorlige påvirkning på ytre miljø med blant annet uttørking av sårbar natur, endret kjemisk likevekt og skade på faunaen.
- Redusert stabilitet i bergmassen.
- Kostbar og tidkrevende injeksjon (både for- og etterinjeksjon)
- Ugunstige arbeidsforhold
- Mer utfordrende å estimere kostnader på grunn av usikkerheten av hvor og hvor mye grunnvann som kan lekke inn.



Av de overnevnte konsekvensene er det redusert poretrykk som det vil bli lagt fokus på i denne masteroppgaven.

Når en tunnel drives i fjell med løsmasser over vil vann kunne lekke inn i tunnelen via sprekker og svakhetssoner i berget, se figur 2.1 (SVV, 2003). Som følger vil poretrykket og eventuelt grunnvannsstanden i løsmassen bli redusert over og til siden for tunnelen. Poretrykksreduksjonen  $\Delta u$  vil kunne øke effektivspenningene, noe som i sin tur kan føre til setninger. Dersom de overliggende løsmassene har en relativ lav permeabilitet og stor tykkelse vil det ta tid før reduksjonen av poretrykket går oppover i avsetninger. Det vil derfor ofte ta tid før poretrykket har utlignet seg og massene blir konsolidert. Konsekvensene på ytre miljø som følge av innlekkasje til tunnel vil derfor ofte merkes etter at tunnelprosjektet er ferdig. Over tid vil poretrykksreduksjonen og setningene kunne skade bygninger og konstruksjoner, noe som kan være et stort problem i tettbygde strøk (Brattli, 2015). Hvor stort setningspotensialet er, avhenger av materialeegenskapene og forkonsolideringstrykket til leiren. Størst potensiale for setninger er det i normalkonsoliderte leiravsetninger under marin grense og i torv (SVV, 2003).



**Figur 2.1:** Virkningen av tunnelanlegg på poretrykk og grunnvannsstand. Hentet fra SVV, 2003.

For i størst mulig grad å forstå og begrense konsekvensene vil det være av stor betydning å kunne estimere innlekkasje av grunnvann til tunnel. Erfaringer og numeriske modeller vil kunne være nyttig for å fortutsi strømmingen slik at nødvendige tiltak kan bli iverksatt for å begrense innlekkasjen og for å spare ekstra kostnader, tid og skader. I tillegg kan erfaringer og modelleringer gi en indikasjon på hvor mye poretrykket blir redusert ved en gitt innlekkasjemengde. Innlekkasjen til tunnel  $Q$  kan estimeres uten tetttiltak etter følgende formel (SVV, 2003);

$$Q = \frac{2\pi Khl}{\ln \frac{2h}{r} - 1} \quad (2.1)$$

der

$K$  = hydrauliske konduktiviteten,

$h$  = hydrauliske potensialet til grunnvannet over tunnelnivå,

$r$  = radius av tunnelen,

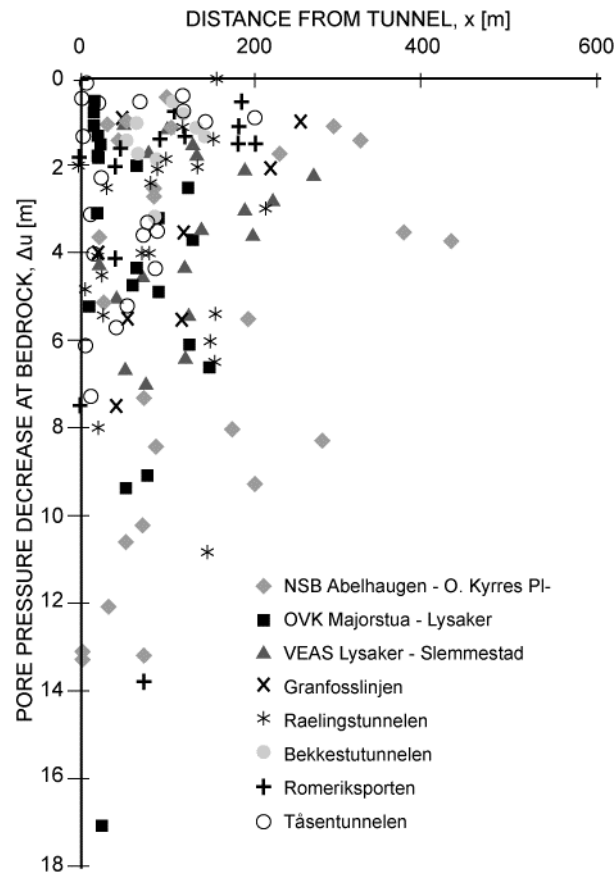
$l$  = lengden av tunnelen.

Det hydrauliske potensialet vil være det totale energinivå på vannet, mens den hydrauliske konduktiviteten sier noe om det geologiske materialets evne til å bli gjennomstrømmet av en væske. Den hydrauliske konduktiviteten vil være den vanskeligste parameteren å definere, da den varierer stort regionalt og lokalt avhengig av de geologiske forholdene. I tillegg vil dybden på tunnelen under grunnvannsnivå påvirke mengden vann som lekker inn. Dette gjør at nivået på grunnvannet og dermed vanntrykket er viktig å bestemme (Norconsult, 2018b). De andre parametrene i ligningen vil ikke variere i like stor grad.

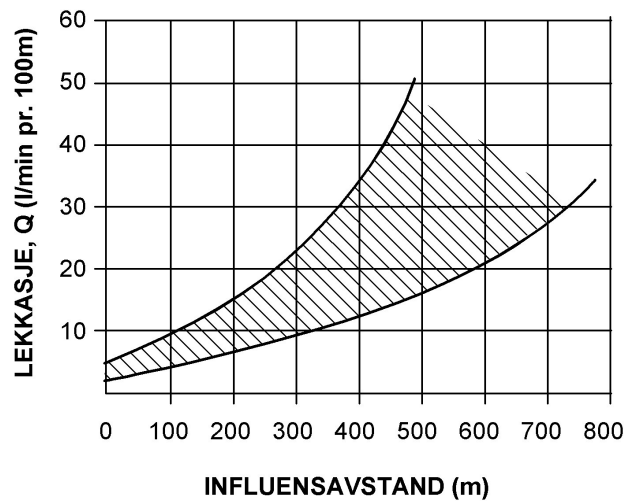
Forskningsprosjektet "Miljø og samfunnstjenlige tunneler" har samlet erfaringsdata fra en rekke tunnelprosjekter i Norge. En av konklusjonene fra prosjektet er at influensområdet fra en tunnelinnlekkasje kan strekke seg flere hundre meter til hver side for tunneltraseen, se figur 2.2. Influensområdet er definert som områdene som blir påvirket av innlekkasjen til tunnel. Figur 2.2 illustrerer at det er en klar sammenheng mellom avstand til tunnel og poretryksreduksjon (SVV, 2003). Poretryksreduksjonen vil være størst nærmest tunnelen, før den avtar ut mot sidene. Variasjonen i figuren skyldes trolig de store variasjonene i hydrogeologiske forhold og målemetodene som er benyttet. Selv med usikkerhetene i figuren antydes det at reduksjonen i poretrykk er tilnærmet lineær på omtrent 2m pr. 100m avstand fra tunnelen.

Influensområdet vil blant annet bli påvirket av innlekkasjemengde, drenerende lag og dybden på tunnelen. Figur 2.3 illustrerer sammenhengen mellom lekkasjemengde og influensavstand. For en liten innlekkasje vil følgelig influensavstanden være mindre enn for en stor innlekkasje. En innlekkasje på 5 l/min/100m vil typisk påvirke maksimalt 100 - 200m. Derimot vil en stor innlekkasje på 20 l/min/100m kunne føre til at områder på over 600 m på hver side av tunneltraseen blir påvirket. Dersom det er drenerende masser i overgangen mellom leir og bergmassen, vil en innlekkasje i tunnel påvirke større områder enn dersom leiren kun ligger på berg. Trykket blir da fordelt lengre ut til siden, men reduseres nødvendigvis ikke like mye. Dette gjelder også for dyptliggende tunneler der en innlekkasje forventes å gi større influensområde, men ikke nødvendigvis at grunnvannsnivået blir mer redusert (Norconsult, 2018b). Effekten av lekkasjen vil fordele seg over et større område, noe som ofte fører til at grunnvannsnivået blir mindre redusert for dype tunneler i forhold til grunne.

Konsekvensene av en innlekkasje i tunnel vil variere lokalt og regionalt og avhenger av mengden tilgjengelig vann, løsmassenes mektighet og grunnens egenskaper til å slippe vann igjennom



**Figur 2.2:** Målt poretrykksreduksjon ved fjell, i relasjon til avstand fra tunnel for tunnel i Osloområdet (SVV, 2003).



**Figur 2.3:** Typisk influensavstand for ulike innlekkasjemengder, hentet fra SVV, 2003.

(SVV, 2020). Det er ikke nødvendigvis selve størrelsen på innlekkasjen som er av betydning, men konsekvensene det medfører. Selv relativt små innlekkasjemengder kan gi store konsekvenser på overflaten, og motsatt kan store innlekkasje gi relative moderate konsekvenser. Lokasjoner der nydannelsen av grunnvann er stor eller der grunnvannsmagasiner er store, vil være mindre sårbare for en innlekkasje enn i områder der tilsiget er lavt og mektigheten er liten (Olofsson et al. 2001). Variasjoner i den hydrauliske konduktiviteten i grunnen gjør det utfordrende å modellere og forutsi hvilke områder og i hvilken grad et området blir påvirket av innlekkasje i tunnel. Konsekvensene av redusert poretrykk og grunnvannsnivå på ytre miljø vil tilslutt avhenge av setningspotensialet og naturens tålegrense.

## 2.2 Innlekkasjekrav

For tunnelprosjekter er det vanlig å sette tettekrav for å begrense de mulige konsekvensene innlekkasje skaper. Kravene blir satt på bakgrunn av en tverrfaglig vurdering av de hydrogeologiske forholdene, naturmiljøet, setningspotensialet og risikoen og konsekvensene av en mulig påvirkning fra tunnelprosjektet (Langford, 2019). Tettekravet vil som regel være en maksimal innlekkasjemengde som kan måles ved såkalte målesterskler i tunnelen. På grunn av store hydrogeologiske variasjoner langs tunneltraseen og de mulige konsekvensene vil innlekkasjekravet ofte variere langs med tunneltraseen.

Basert på erfaringer fra en rekke tunnelprosjekter i Norge fram til 2003 har forskningsprosjektet ”Miljø og samfunnstjenlige tunneler” foreslått metode for å bestemme innlekkasjekrav, se figur 2.4 (SVV, 2003). Figuren viser innlekkasjemålinger  $Q$  (l/min pr. 100m) i tunnel plottet mot den målte poretrykksreduksjonen  $\Delta u$  (m) i overgangen mellom leire og berg. Den store spredningen i datane skyldes lokale hydrogeologiske forhold. Det kan likevel bli markert et karakteristisk område som kan brukes til å fastsette innlekkasjekrav. Kravet må da ta hensyn til det reduserte poretrykket ved økt avstand til tunnelen.

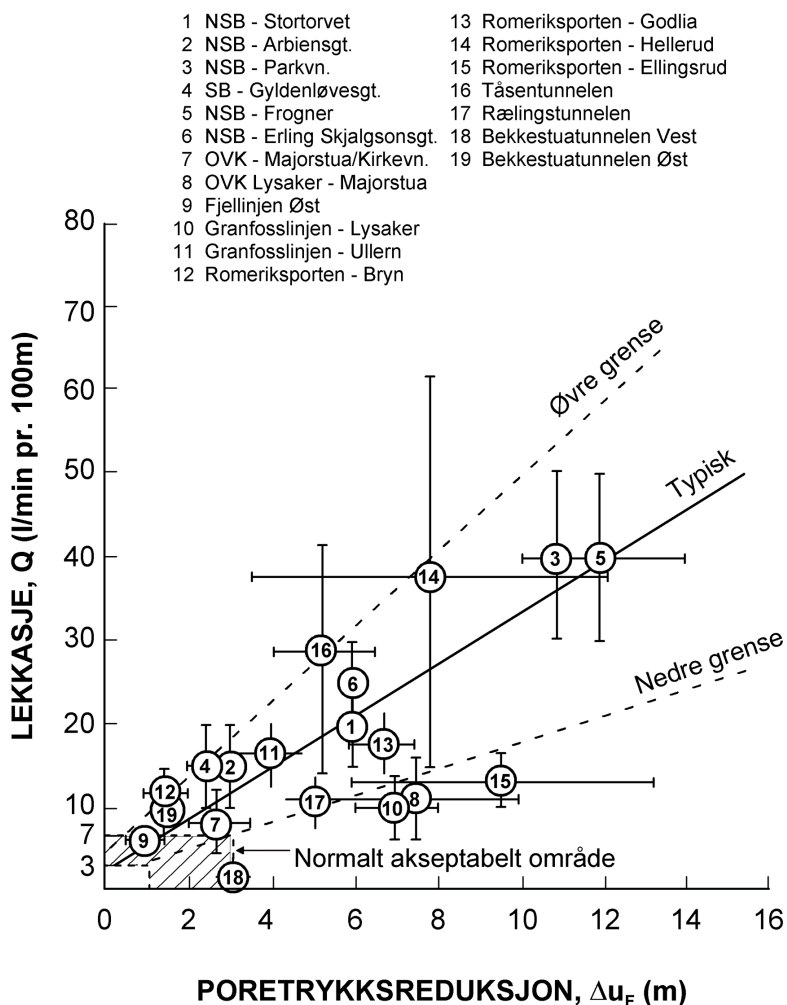
Det generelle innlekkasjekravet har blitt satt til å ligge innenfor (SVV, 2003):

$$Q = (3 \rightarrow 7) \text{ l/min pr. } 100 \text{ m tunnel}$$

Der konsekvensene av en innlekkasje er potensielt store, vil ofte innlekkasjekravet settes enda strengere:

$$Q < (2 \rightarrow 4) \text{ l/min pr. } 100 \text{ m tunnel}$$

I praksis vil et så strengt krav innebære at det er nesten ingen synlige drypp eller rennende lekkasje i tunnelen. Et så strengt krav har som formål å forhindre at poretrykket blir påvirket i nevneverdig grad.



**Figur 2.4:** Tettekrav til tunnel, hentet fra SVV publikasjon 103 (SVV, 2003).

Innlekkasjekrav kan også settes på bakgrunn av påvirkning på sårbare naturmiljø. Kveldsvik et al. 2002 har foreslått en metode som klassifiserer den mulige effekten på naturmiljø basert på den prosentvise lekkasjeandelen av den årlige gjennomsnittlige avrenningen i nedslagsfeltet.

- Lekkasje < 10% av avrenningen: ingen til liten effekt
- Lekkasje 10-20% av avrenningen: medium effekt
- Lekkasje > 20% av avrenningen: stor effekt

Det er anbefalt at innlekkasjen i tunnel bør maksimalt være 20% av den årlige avrenningen for et område. Under 10% vil gi liten sannsynlighet for at naturmiljøet opplever en negativ effekt.

## 2.3 Tiltak for å begrense innlekkasje til tunnel

Tetting av tunnel vil være med på å redusere mengden vann som lekker inn, noe som vil redusere de mulige negative konsekvensene på ytre miljø. I Norge gjøres dette tradisjonelt med systematisk forinjeksjon der sement injiseres inn i bergmassen rundt tunnelen under høyt trykk (SVV, 2006). Dersom tilstrekkelig tetthet ikke oppnås på denne måten kan det planlegges for vanntett betongutføring på utsatt strekninger langs tunnelen eller det kan benyttes midlertidig vanninfiltrasjon for å kompensere for vanntapet. Omfanget av tettetiltakene blir tatt på bakgrunn av de geologiske forholdene og tettekravene for hvert enkelt tunnelprosjekt. Kravet kan blir endret underveis dersom det oppdages spesielt utsatte forhold.

Selv med injeksjon vil ikke den hydrauliske konduktiviteten rundt tunnelen bli redusert til 0 m/s. Noe vann vil fortsatt kunne lekke inn i tunnelen. For en homogen, isotrop, porøs bergmasse med injeksjon, kan innlekkasjen  $Q$  bli beregnet fra følgende formel (Karlsruud, 2000):

$$Q = \pi k_i h \frac{2}{\ln\left(\frac{r_e+t}{r_e}\right)} \quad (2.2)$$

hvor

$k_i$  = permeabiliteten til den injisert sonen,

$h$  = dybden under grunnvannstanden,

$r_e$  = ekvivalent radius av tunnel,

$t$  = antatt tykkelse av injeksjonssonen.

Formel 2.2 antar at poretrykket forblir upåvirket i ytterkant av den injiserte sonen. I tillegg antas det at permeabiliteten  $k_i$  er minst en faktor på ca. 10 lavere enn det som er vurdert utenfor den injiserte sonen.

## 2.4 Hensikt med grunnvannssmodellering

Matematiske modeller har blitt brukt til å representere grunnvannsstrømning siden slutten av 1800-tallet (Wang og Anderson, 1982). Hensikten er å fange opp de mest relevante trekkene med grunnvannsstrømningen og poretrykksforandringene. I tillegg er hensikten å gi en representativ forenklet versjon av virkeligheten som senere kan benyttes til å predikere konsekvensene av en foreslått handling (Wang og Anderson, 1982; Anderson og Woessner, 1992). Ofte vil det være ønskelig å forutsi hvordan et gitt problem vil være i fremtiden, for så å studere effekten av potensielle tiltak. Dette kan videre benyttes for å gi økt forståelse angående de fysiske prosessene, samt gjør det lettere å ta veloverveide valg i beslutningssituasjoner.

Hvor god en modell er, vil i stor grad avhenge av inngangsparameterne. Dårlig kvalitet på inngangsparametrene, vil kunne gi unøyaktig og feil resultat. Ofte kan det være utfordrende både økonomisk og praktisk å få tak i nok inngangsdata til modellen (Singhal og Gupta, 2010). Likevel kan selv modeller med mangelfull data til en viss grad benyttes for å identifisere kritiske områder som trenger mer undersøkelse. Hensikten er at resultatet av modelleringen kan være representativ i forhold til virkeligheten. Det viktigste med modellering er ikke nødvendigvis at modellen er kvantitativ rett, men at det kan trekkes noen slutninger og tolkninger fra modellen (Geoslope international, Ltd, 2021). Blant annet kan kritiske parametere og lokasjoner bli avdekket, slik at disse kan bli undersøkt videre. Modellering vil derfor kunne bidra med bedre benyttelse av ressurser i et prosjekt.

Noe av hensikten med modellering er å undersøke hvordan konsekvensene av et gitt problem avhenger av omgivelsene rundt. Ved å gjennomføre en sensitivitetsanalyse kan samspillet mellom de ulike prosessene bli studert slik at kritiske parametere kan bli avdekket (Geoslope international, Ltd, 2021). Dette kan gjøres ved å holde en variabel konstant for så å studere den mulige påfølgende effekten på de andre parametrene.

Å bygge en grunnvannsmodell krever at hydrogeologien for det aktuelle området tolkes og forenkles til en konseptuell modell (Munier et al. 2003). For å realisere modellen benyttes blant annet data fra felttester, observasjoner, tabellverdier og ekspertvurderinger basert på erfaringer (Gustafson, 2009). Dataene blir så behandlet og analysert for videre å bli benyttet til de ulike inngangsparameterne i modellen. Undersøkelsene og målingene i felt må da være representative og av tilstrekkelig kvalitet for at modellen skal bli av god kvalitet. Det kan være både kostbart, vanskelig og tidkrevende og skaffe relevant og nok inngangsdata (Gustafson, 2009).

Grunnvannsmodellering kan utføres når tunneler skal prosjekteres for å undersøke poretrykksreduksjonen som følge av en gitt innlekkasje. Om mulig, bør resultatene sees i sammenheng med erfaringstall fra lignende anlegg og prosjekter for å verifisere resultatene (Cuisiat og Skurtveit, 2003). Kvaliteten på modellen avhenger av hvor godt den tilnærmer seg virkeligheten og hvor nøyaktige inngangsparametrene er. Videre vil modellering av en mulig innlekkasje i tunnel bli gjort i det numeriske programmet SEEP/W fra Geostudio™.

# Kapittel 3

## Teori

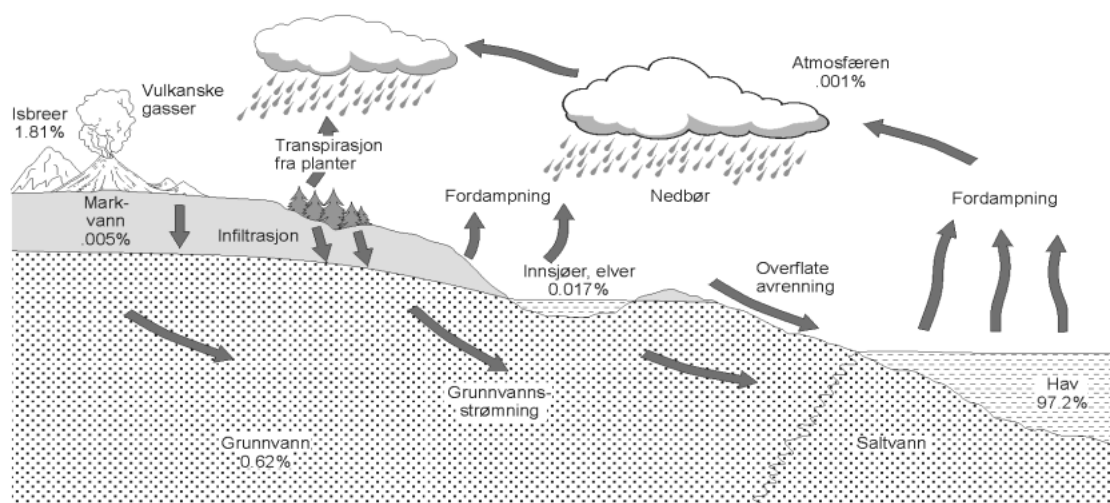
Ved numerisk modellering vil det være nødvendig å gjøre antagelser og avgrensninger for å forenkle de komplekse grunnforholdene og hydrogeologiske forholdene. Det vil av den grunn være nødvendig med en teoretisk forståelse av hvordan de hydrogeologiske forholdene spiller inn ved modellering og hvordan en innlekkasje i tunnel påvirker vannbalansen i et område. I tillegg vil det være nødvendig med en forståelse av hvordan vannet strømmer i grunnen og hvordan dette kan beregnes numerisk i for eksempelvis SEEP/W.

### 3.1 Hydrogeologiske prinsipper

#### 3.1.1 Det hydrogeologiske kretsløpet og vannbalanse

Hvordan vannet på jorden transporteres og lagres kan beskrives kvalitativt med det hydrologiske kretsløpet (Brattli, 2018). En illustrasjon av kretsløpet er illustrert i figur 3.1. Figuren illustrerer hvordan vann fordamper fra havet opp i atmosfæren, for så å regne eller snø ned igjen som nedbør over land. Noe av nedbøren vil drenere mot havet som overflateavrenning, noe vil fordampe, mens en del av vannet infiltrerer ned i grunnen. Av vannet som infiltrerer vil noe bli tatt opp av planter ved transpirasjon, noe bli bundet midlertidig til sedimentene, mens noe vil infiltrere helt ned til grunnvannsspeilet og bidrar til grunnvannsdannelse. I det hydrologiske kretsløpet vil noe vann lagres midlertidig i blant annet innsjøer og elver, bli bundet opp av is og/eller magasineres som jordfuktighet i grunnen (SVV, 2003). For hele det hydrologiske kretsløpet vil alle vannmengder være bevart. Mengden vann som til en hver tid er magasinert innenfor et gitt område vil da være gitt etter følgende vannbalanseligning (Brattli, 2018):





**Figur 3.1:** Det hydrologiske kretsløpet - kvalitativ forståelse av vannfordelingen på jorda (Brattli, 2018).

$$\pm \Delta M = P - E - Q \quad (3.1)$$

der

$\Delta M$  = Endring i magasinert vann

$P$  = Nedbør (mm/døgn, måned, år)

$E$  = Evapotranspirasjon (mm)

$Q$  = Avrenning ( $m^3$ , l/s)

Ligning 3.1 viser at mengden magasinert vann innenfor et reservoar er gitt som innstrømningen fra nedbør subtrahert med evapotranspirasjonen og avrenningen fra det samme reservoaret. Evapotranspirasjonen er delt opp til både å bestå av fordampningen fra vann og mark og transpirasjonen fra planter (Brattli, 2018). Avrenningen er også delt opp til å bestå av både overflateavrenning og grunnvannsavrenning både inn og ut av det definerte området. Ettersom parameterene i ligning 3.1 er både tidsavhengige og områdeavhengige, vil det være av stor betydning at parameterne blir beregnet for samme tidsrom og område. Hvor mye som er magasinert innenfor et område vil være med på å styre grunnvannspotensialet.

Selv små innlekkasjemengder for en tunnel under grunnvannsnivå vil kunne endre likevekten på grunnvannsforkomsten. Mengden magasinert vann vil som følge av innlekkasjen kunne bli redusert. Dersom den totale vannmengden for et gitt området blir mindre vil det kunne føre til at poretrykket reduseres og at grunnvannsnivået kan synke. Innlekkasjemengden til tunnelen  $T$  (l/s)

må da trekkes fra den generelle vannbalanseligningen, ligning 3.1:

$$\Delta M = P - E - Q - T \quad (3.2)$$

Ligning 3.2 viser at mengden magasinert vann blir redusert når nedbøren, evapotranspirasjonen og innlekkasjen til tunnel er større enn tilførselen av vann. Ofte vil det kun være i enkelte deler av året eller enkelte år at vannbalansen blir kritisk påvirket (Brattli, 2018). Dette gjelder spesielt i varme og tørre somre da det kan være lengre perioder med lite nedbør og høy evapotranspirasjon. I disse periodene vil en større prosentandel av avrenningen gå til innlekkasje. Dette kan skape negative konsekvenser på ytre miljø dersom mengden magasinert vann er liten slik at poretrykket reduseres kraftig. Er derimot vanntilførselen og nydannelsen av grunnvann stor, vil en innlekkasje i tunnel påvirke omgivelsene mindre (Grepstad, 2002). I tillegg avhenger påvirkningen av hvor mye som kan lagres i porene i grunnen og hvordan den hydrauliske konduktiviteten påvirker strømmingen (Brattli, 2018).

Når tunnelen ligger under lavpermeable avsetninger som leire, vil det kun være små mengder vann som infiltrerer gjennom avsetningen. De underliggende løsmassene eller berggrunnen vil da oppføre seg som en lukket akvifer (Division, 1972). En innlekkasje i tunnel vil kunne føre til at poretrykket senkes i akviferen fordi lite tilsig kommer ovenifra. At poretrykket blir mindre kan i sin tur føre til økte effektivspenninger med påfølgende setninger i den overliggende leiren.

I grovere løsmasser med stor mektighet vil mye vann kunne være magasinert i de store porene (Fetter, 2001). For bergmassen vil det meste av vannet bli lagret i sprekene og diskontinuitetene. At mer vann lagres i det geologiske mediumet gjør at en innlekkasje ikke påvirker like mye. På den andre siden vil varige store grunnvannskilder, slik som innsjøer, elver og store myrområder kunne gi et stort potensial for innlekkasje (SVV, 2020). Konsekvensene på ytre miljø vil avhenge av hvordan påvirkningen fra lekkasjen er i forhold til de naturlige variasjonene.

Det kan være utfordrende å estimere de ulike parameterne i vannbalanseligningen. Den største usikkerheten vil være å definere hvor mye av nedbøren som infiltrerer ned i grunnen og hvor mye som bidrar til grunnvannsdannelse. Digitale hjelpemidler slik som karttjenesten NEVINA fra Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) kan benyttes til å estimere noen av parameterene, slik som nedbørsfelt og avrenningsområde. Fysiske forsøk slik som evapotranspirasjonskar og nedbørsmålere kan også brukes for innsamling av data.

### 3.1.2 Grunnvann og akvifer

Grunnvann er definert som det fritt bevegelige vannet under grunnvannsspeilet i den mettede sonen i grunnen (Emdal et al. 2018). I den mettede sonen vil alle åpne sprekker og porerom være

fylt av vann. Motsatt vil porene i den umettede sonen bestå av en kombinasjon med luft, gass og vann. Vannet som befinner seg i den umettede sonen som er over grunnvannsspeilet kalles markvann. Grunnvannsspeilet eller grunnvannsnivået representerer skillet mellom den umettede og mettede sonen i en åpen akvifer. Dette nivået vil variere regionalt og lokalt avhengig av de hydrologiske og geologiske forholdene.

Grunnvannsspeilet er definert som overflaten der det relative poretrykket er lik 0 og dermed lik atmosfæretrykket (NGF, 1982). Ved boring av en brønn ned i en formasjon, vil det nivået vannet stiger til representerer grunnvannsspeilet eller trykkehøyden  $h_p$ . Fra grunnvannsspeilet og nedover mot dypet stiger trykket vanligvis hydrostatisk, se figur 3.2. Det hydrostatiske vanntrykket er gitt som;

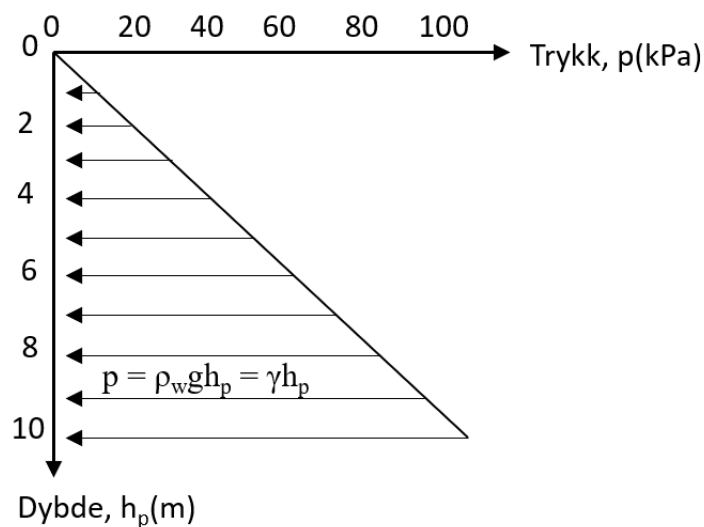
$$u = \gamma_w * z \quad (3.3)$$

der

$\gamma_w$  [ $kN/m^3$ ] = tyngdetettheten til vann på omtrent  $9,81 kN/m^3$

$u$  = Poretrykk [kPa]

$z$  = Nivå (kote) for et punkt regnet fra et valgt nullnivå ( $z = 0$ ) [m].

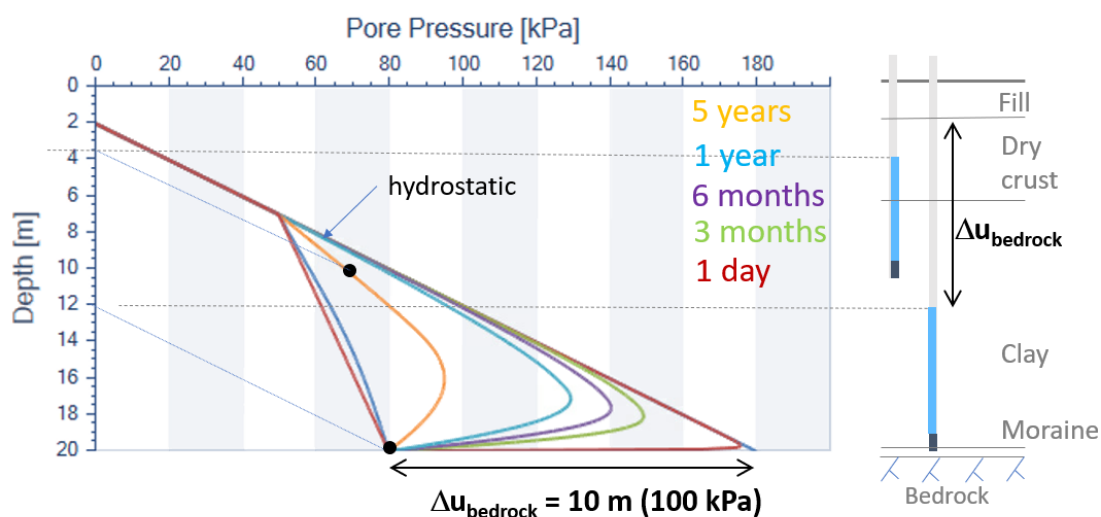


**Figur 3.2:** Hydrostatisk poretrykksfordeling

Poretrykket  $u$  er trykket til væsken eller gassen i porene i grunnen (Hendriks, 2010). Trykket blir som regel sett i forhold til atmosfæretrykket som nullpunkt og regnes derfor ofte ikke som absolutt. Poretrykket måles vanligvis i løsmassene. Grunnen er at porene i løsmassene ofte har god kontakt med hverandre, slik at poretrykksmålingene i disse avsetningene vil kunne gi et representativt bilde av området (SVV, 2001). Poretrykket kan måles med piezometermålinger i borehull (SVV,

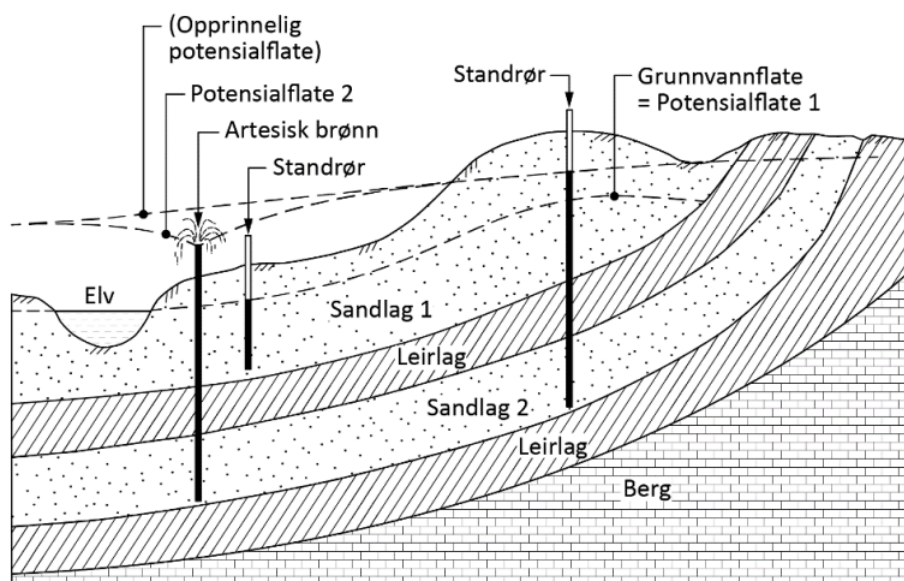
2020). I berg vil trykknivået ofte variere fra sprekk til sprekk, samt at det ikke alltid finnes en grunnvannstrøm i bergmassen.

Poretrykket bør studeres på ulike lokasjoner og dyp, samt over en lengre periode på opp til et år (SVV, 2003). Resultatet fra målingene kan da brukes som inngangsparametere i de numeriske modellene. I tillegg kan målingene benyttes til å sammenligne hvordan en mulig innlekkasje påvirker poretrykket (Stølen, 2021). Figur 3.3 viser hvordan poretrykket som følge av en innlekkasje i en bergtunnel under leire reduseres fra det hydrostatiske (Holmøy et al. 2019). Figuren viser at det tar relativ lang tid før poretrykksendringen utvikler seg. Den transiente tilstanden kan da vare i opptil flere år før poretrykksutviklingen blir stasjonær.



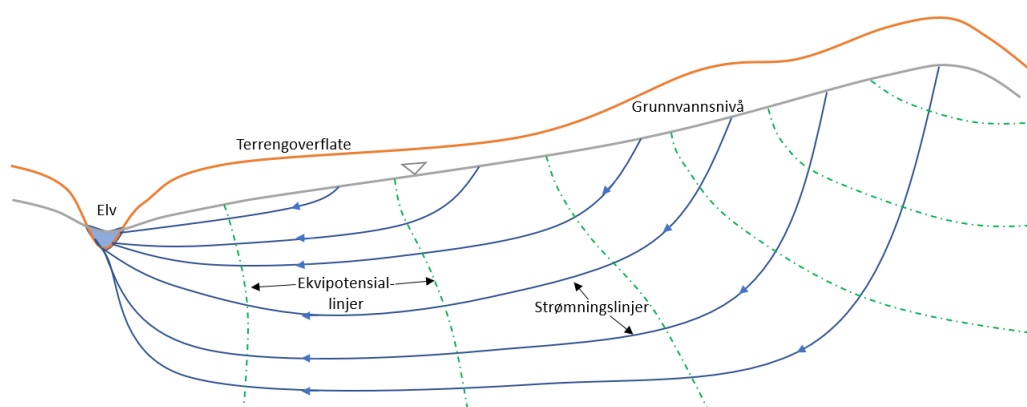
**Figur 3.3:** Illustrasjon av poretrykksutvikling over tid ved reduksjon av poretrykket (Holmøy et al. 2019).

I hydrogeologien skiller det mellom åpne og lukkede akviferer. En akvifer er definert som "En naturlig formasjon mettet med vann som har en tilstrekkelig god hydraulisk konduktivitet, som generelt er over  $10^{-6} \text{ m/s}$ " (Singhal og Gupta, 2010). For en åpen akvifer vil grunnvannet være i direkte kontakt med atmosfæren. Dette gjør at poretrykket er lik atmosfæretrykket ved grunnvannsspeilet. Når massene har en høy permeabilitet og grunnvannet kan strømme fritt vil poretrykket  $u$  [kPa] tilsvare det hydrostatiske trykket (Gundersen, 2020). Poretrykket vil ved hydrostatisk trykk øke lineært med dybden  $z$ , se ligning 3.3. For en lukket akvifer vil grunnvannet være skilt fra atmosfæren med tette lag (akvitard) over og under slik at grunnvannet står under trykk, se figur 3.4 (SVV, 2010). Figuren illustrer hvordan de tette leirlagene gjør at det ikke er noen hydraulisk forbindelse mellom overflatevann og akviferen under. Dette gjør at poretrykket ofte er høyere enn det hydrostatiske trykket i disse områdene.



**Figur 3.4:** Eksempel på to adskilte grunnvannsnivåer, hvorav en representerer artesiske trykk Division, 1972.

I det øvre sandlaget kan det observeres at trykknivået er lavere enn for de artesiske brønnene. Grunnvannsspeilet vil for slike åpne akviferer vanligvis følge topografiske overflateformer (Tollan, 2021). Ofte ligger nivået bare noen få meter under terrengoverflaten. Under åser og rygger vil grunnvannsnivået gjerne ligge litt dypere, mens i forsenkninger og dalbunner ligger det gjerne nærmere overflaten, se figur 3.5. Noen steder kommer grunnvannet frem på overflaten ved kildeutspring, myrer, innsjøer, elver eller i havet. Når vannet transporteres mot havet vil det naturlig drenere mot et utløp som er avgrenset fra andre dreneringsområder. Dreneringsområdet til grunnvannet vil ikke nødvendigvis være det samme som for overflatedreneringen, men ofte er det likevel det (Brattli, 2018).



**Figur 3.5:** Illustrasjon av grunnvannsstrømning

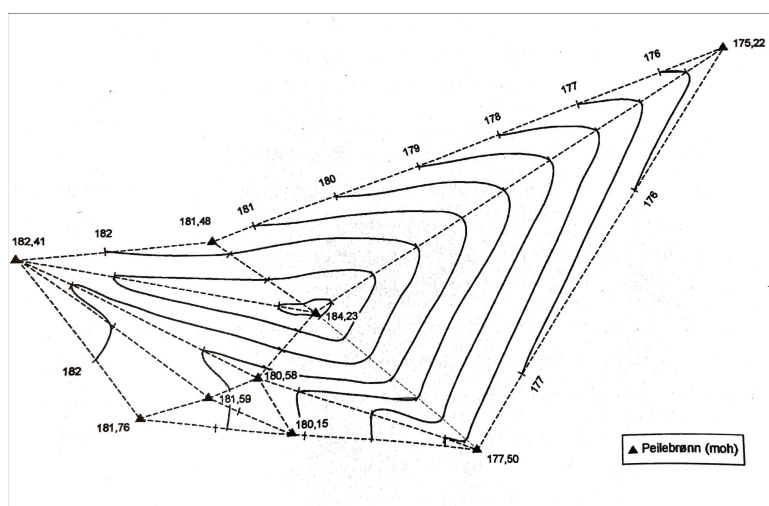
På grunn av tettere lag i grunnen kan det være flere grunnvannsspeil (SVV, 2003). Hengende grunnvann kan ligge over tette lag eller det kan være både åpne og lukkede akviferer med hvert sitt potensialnivå, se figur 3.4. Når poretrykket i grunnen måles vil det derfor være vesentlig å måle poretrykket i samme akvifer. Det øvre grunnvannsspeilet vil som regel være matet fra lokal overflateinfiltrasjon. Dypere liggende grunnvannsspeilet vil derimot ofte være matet med grunnvann fra nærliggende reservoarer og blir dermed styrt av mer regionale forhold. Begrepet grunnvannspotensial vil videre bli benyttet som en samlebetegnelse for grunnvannsstanden i de grovere løsmassene, trykknivået i leiren og sprekkevantrykket i bergmassen.

Trykknivået på grunnvannet kan bli illustrert med et ekvipotensialkart, se figur 3.6. For en åpen akvifer vil ekvipotensialkartet vise grunnvannsspeilet, mens for en lukket akvifer viser den trykkflaten. Trykkpotensialet for hver linje/kote vil være det samme langs hele linjen (NGU, 2021). Strømningslinjene for en vannpartikkel vil da stå normalt på ekvipotensiallinjene ved isotrope forhold. Ved hjelp av et ekvipotensialkart kan den hydrauliske gradienten  $i$  bli funnet. Denne parameteren sier noe om helningen på grunnvannsspeilet og hvordan grunnvannet strømmer (Brattli, 2018). Minustegnet i ligning 3.4 kommer av at vannet alltid strømmer mot et avtagende hydraulisk potensial.

$$i = -\frac{h_1 - h_2}{l_1 - l_2} = -\frac{dh}{dl} \quad (3.4)$$

der

$h_1 - h_2 = dh =$  hhv. høyeste trykkpotensial for et valgt punkt subtrahert med minste trykkpotensial  
 $l_1 - l_2 = dl =$  Horisontal avstand mellom høyeste og minste trykkpotensial (m).



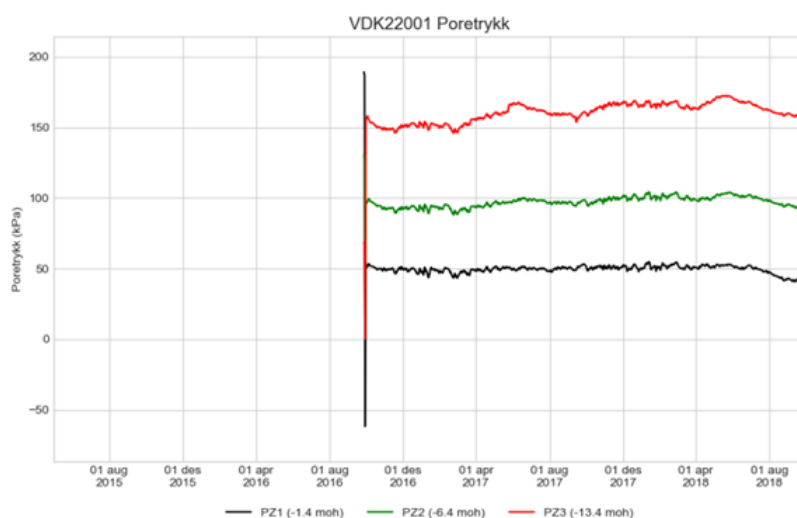
**Figur 3.6:** Figur over opptegnet ekvipotensialkart (Brattli, 2018).

### 3.1.3 Nydannelse av grunnvann

Hvor mye en gitt innlekkasje i tunnel påvirker det omkringliggende grunnvannspotensialet avhenger av nydannelsen og tilsiget av grunnvann og av egenskapene til akviferen.

Den vanligste årsakten til at grunnvannspotensialet varierer i løpet av et år er på grunn av klimatiske variasjoner (Brattli, 2018). De klimatiske variasjonene påvirker blant annet mengden nedbør, evapotranspirasjonen og om grunnen er fryst eller ikke. Av den grunn vil derfor grunnvannspotensialet fluktuerer i takt med årstidsvariasjonene.

Figur 3.7 illustrerer hvordan poretrykket i en undersøkelsesbrønn varierer i løpet av lengre periode for ulike undersøkelsesdyp. Både lokale og regionale variasjoner kan da observeres. Blant annet vil det for måler PZ3 være topper som repeteres i mai/juni både 2017 og 2018, noe som tyder på årstidsfluktasjoner. Ved å måle poretrykket over en lengre tidsperiode vil målingene kunne bli tillagt en større betydning (NGF, 1982). Dette gjelder spesielt dersom målingene blir supplert med nedbørsopplysninger og om mulig lokale avløps- og tilløpsforhold.



**Figur 3.7:** Poretrykksvariasjoner i løpet av en lengre periode for ulike målerdyp i leire. Hentet fra Norconsult, 2018b.

Fordampningen vil som regel være størst i sommerhalvåret da temperaturen er høy og planteveksten stor (Brattli, 2018). Dette gjør at nydannelsen av grunnvann ofte er mindre på denne tiden av året, noe som igjen påvirker den naturlige variasjonen i grunnvannsstanden. Mye nedbør, snøsmelting og liten plantevekt vil på den andre siden føre til en stor nydannelse av grunnvann. Typisk vil mellom 2 - 50 % av nedbøren føre til nydannelse av grunnvann (SVV, 2003).

Mengden nedbør på en gitt lokasjon vil variere både regionalt og lokalt avhengig av vindforhold, topografi og klima (Dannevig og Harstveit, 2021). I tørre innlandsstrøk kan det typisk komme 300mm, mens mot fjellene kan det stedvis komme over 3000 mm per år. For de viktigste jordbruksstrøkene vil det derimot være vanlig med 500 til 1000 mm i gjennomsnittlig årsnedbør, men på grunn av fjellene ligger gjennomsnittsnedbøren for Norge på rundt 1400 mm pr. år. Generelt regner det mest om høsten og minst på våren og ettervinteren.

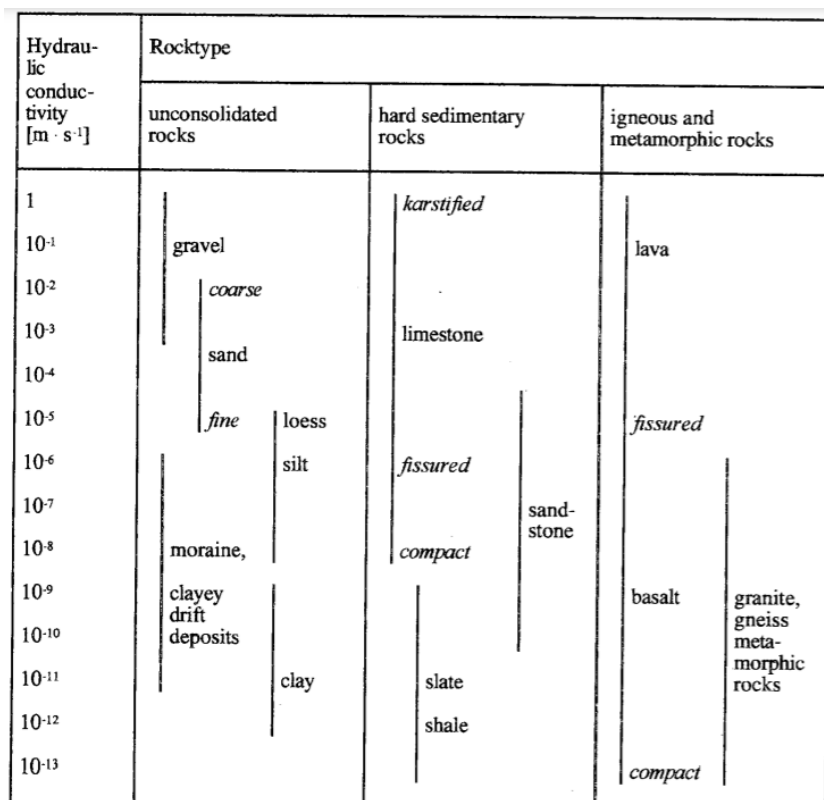
Hvor mye av avrenningen som faktisk infiltrerer vil avhenge av infiltrasjonskapasiteten. Infiltrasjonskapasiteten blir blant annet påvirket av jordartstype, mektighet, permeabilitet og markfuktigheten (Norconsult, 2018b). Blant annet kan tette flater eller uoppsprukket berg føre til økt overflateavrenning, noe som i sin tur fører til mindre infiltrasjon ned i grunnen. Menneskelig aktivitet ved for eksempel bebyggelse og asfaltering vil da kunne føre til mindre nydannelse av grunnvann. Motsatt vil infiltrasjonskapasitet og dermed nydannelsen av grunnvann være høy der løsmassemektheten er liten, med løs jord, lav jordfuktighet og et porøst topplag (Brattli, 2018). Dersom det er lavpermeable lag i grunnen vil det kunne forsinke infiltrasjonshastigheten betydelig og gi en høyere overflateavrenning.

Infiltrasjonsevnen vil i stor grad være knyttet til permeabiliteten i løsmassene. Permeabiliteten  $k$  sier kun noe om jordarten eller bergmassens strømningsegenskaper, altså hvor lett en gass eller væske kan trenge gjennom et porøst medium (Nilsen, 2016; Brattli, 2018). Permeabiliteten er en funksjon av størrelsene til porene i jordarten. Dette vil variere for ulike strømningsmedier og avhenger blant annet av porøsiteten, kornformen og størrelsen og de åpne strømningsveiene. Ofte vil permeabiliteten og dermed infiltrasjonskapasiteten være høy for grovkornige avsetninger som elv- og breelavsetninger, noe morene og strandavsetninger. Motsatt vil infiltrasjonskapasiteten ofte være lav for mer finkornige løsmasser slik som leire, silt og morene med mye finstoff. Det samme vil gjelde for de fleste bergmatrikser der den hydrauliske konduktiviteten kan være rundt  $10^{-5}$  til  $10^{-12}$  m/s, avhengende av type bergart (Louis, 1972).

### 3.1.4 Hydraulisk konduktivitet i løsmasser og berg

Hydraulisk konduktivitet er et mål på hvor lett en væske kan strømme gjennom et geologisk medium (NGU, 2021). Konduktiviteten avhenger både av permeabiliteten til det geologisk mediumet og av væskens egenskaper, se ligning 3.5. Spesielt for løsmasser vil den hydrauliske konduktiviteten være nært knyttet til permeabiliteten, mens den for bergmassen vil den i stor grad avhenge av sprekkeene på grunn av at konduktiviteten i selve bergmatriksen ofte er så lav. Ofte vil tette løsmasser slik som marin leire og kompakt morene ha en lav hydraulisk konduktivitet, mens fluviale avsetninger som sand og grus har en høyere konduktivitet, se figur





**Figur 3.8:** Variasjon i hydraulisk konduktivitet for ulike løsmassetyper, samt sedimentære og krystalline bergartstyper (Struckmeier og Margat, 1995).

3.5 (SVV, 2020). Generelt vil en høy hydraulisk konduktivitet indikerer at materialet er permeabelt med en tilstrekkelig porediameter eller sprekkeåpninger. Motsatt vil lave verdier indikere lavpermeable masser og/eller et lavt vanninnhold. Sammenhengen mellom hydraulisk konduktivitet  $K$  og permeabiliteten  $k$  er gitt som (Fetter, 2001):

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} = k \frac{\gamma}{\nu} \quad [m/s] \quad (3.5)$$

der

$k$  = permeabilitet [ $m^2$ ]

$\rho$  = Væskedensitet [ $kg/m^3$ ] (998  $kg/m^3$  for vann ved 20°C )

$g$  = Tyngdeakselerasjonen på 9,81  $m/s^2$

$\mu$  = Dynamiske viskositeten til væsken [ $Pa \cdot s$ ] (for vann ved 10°C :  $1,3 \cdot 10^{-6} MPa \cdot s$ )

$\nu$  = kinematisk viskositet (=  $\mu/\rho$ , for vann ved 10°C :  $1,3 \cdot 10^{-6} m^2/s$ )

$\gamma$  = spesifikk tyngde ( $N/M^3$ )

Væskeegenskapene vil påvirke den hydrauliske konduktiviteten. Gjennom samme geologiske materiale vil seige væsker strømme saktere enn tyntflyende væsker (Brattli, 2018). Temperaturen vil påvirke både densiteten og viskositeten til væsken, men for vanlige temperaturer vil det ha liten betydning. Temperaturen må likevel bli tatt høyde for når det blir gjort tester i laboratoriet slik at strømningsraten ikke blir overvurdert.

Både for løsmasser og berg vil den hydrauliske konduktiviteten vanligvis variere i de ulike retningene på grunn av inhomogeniteter. Heterogenitetene kommer som oftest av at geologiske prosesser virker med ulik hastighet og styrke til forskjellig tid (Gustafson, 2009). Blant annet kan det føre til varierende tykkelse på mektigheten, ulike lagdelinger med finere/grovere lag eller ulik facis (Brattli, 2018). Slike inhomogeniteter vil ofte være hydraulisk ledende lag. Dersom den hydrauliske konduktiviteten er høyere enn lagene rundt, vil det være med på å drenere vann fra store områder, slik at poretrykket innenfor dette arealet blir påvirket (Baardvik et al. 2016). Influensområdet fra tunnelinnlekkasjen kan typisk bli større på grunn av slike ledende lag. Et slikt lag kan være løst pakket morene i overgangssonen til berg. Selv i mektige leirer kan det være grovere lag av sand og grus som øker permeabiliteten og dermed den hydrauliske konduktiviteten (Baardvik et al. 2016).

Den hydrauliske konduktiviteten for bergmasser vil derimot i stor grad være knyttet til sprekkene og diskontinuiteten i bergmassen (Brattli, 2018). I en bergmasse kan væsken strømme på to måter; enten gjennom diskontinuiteter som gjennomskjærer bergmassen eller gjennom porene i bergmatriksen (Singhal og Gupta, 2010). Generelt er permeabiliteten til selve bergmatriksen svært lav, noe som gjør at grunnvannsstrømningen som regel foregår i diskontinuitetene. Det finnes noen unntak der sprekkene er fylt med leire eller annen utfelling som tetter igjen sprekkene (Gustafson, 2009). I andre tilfeller kan bergmassen være svært porøs, slik som sandstein med lav konsolideringsgrad, noe som gjør at vannet både strømmer gjennom bergmatriksen og gjennom sprekkene.

I all hovedsak vil størrelsen på den hydrauliske konduktiviteten i berg avhenge av sprekkfrekvensen, sprekkorienteringen, sprekkebredden og sprekkarakteren, samt hvor godt sprekkene er knyttet sammen (Singhal og Gupta, 2010). Sprekker i bergmassen er sprødeformasjoner som enten kan bli dannet ved høye eller lave spenninger, kjemiske prosesser, forvitring og/eller temperaturendringer (SVV, 2001). Antall sprekker, lengden på sprekkene og dets egenskaper vil avhenge av bergartens egenskaper, samt hva den har blitt utsatt for tidligere. Av den grunn vil eldre bergarter som har blitt utsatt for flere perioder med sprekkedannelse, ofte ha en høyere hydraulisk konduktivitet enn yngre bergmasser. I de områdene som har mange sprekker, slik som forkastningssoner og knusningssoner, er det vanlig at den hydrauliske

konduktiviteten er høy (Dagestad et al. 2003). Dette er ikke nødvendigvis fordi at sprekkene er mer åpne enn andre steder, men fordi høyere oppsprekkingsfrekvens øker sannsynligheten for at sprekkene er godt koblet sammen. Der sprekkene er godt koblet sammen vil en innlekkasje i tunnel kunne føre til senkning av grunnvannsstanden på relativt store avstander fra tunnelen (Norconsult, 2018b). Studier viser at sprekker som er parallelt med største hovedspenning ofte er åpne og leder mer vann enn sprekker som er vinkelrett på, typiske tensjonssprekker (Dagestad et al. 2003).

En vanlig metode for å beregne den hydrauliske konduktiviteten i en bergmasse er ved hjelp av vanntapsmålinger (Lugeontester) in-situ (Nilsen, 2016). En slik test går ut på å avgrense en sone i et borehull, for så pumpe vann inn under et spesifisert trykk. Det resulterende trykket blir så registrert når vannstrømmen har nådd en kvasi-stabil tilstand. Testen gjentas ved ulike trykknivå på flere lokasjoner i borehullet. Resultatene vil være punktmålinger og må derfor interpoleres for å anta en gjennomsnittlig konduktivitet for hele bergmassen. Ettersom vanntapsmålinger kan teste prøven i uforstyrret in-situ materiale, vil metoden være ganske nøyaktig. Ulempen er at metoden både er kostbar og tidkrevende. Det vil også være nokså tilfeldig hvilke sprekker som blir påtruffet nedover mot dypet. I tillegg til vanntapsmålinger kan også kalibreringsanalyser, pumpetester, strømningsmålinger og/eller televiwer-logging benyttes i felt (Gustafson, 2009). Fra undersøkelsene må dataene og resultatene så tolkes. Resultatene fra testene gir informasjon om bergmassens hydrauliske konduktivitet, inkludert bergmatriksen og diskontinuiteter på den aktuelle lokasjonen. I tillegg kan resultatene brukes til å gi en indikasjon på hvor mye vann som kan forventes å lekke inn i tunnelen, samt om det er åpne eller lukkede trykkforhold i akviferen (Norconsult, 2018b). Fra pumpetestene kan vanngiverevnen bli funnet. Denne testen gir da et målt på hvor mye vann som maksimalt kan strømme inn i brønnen (Norconsult, 2018b).

## **3.2 Grunnvannsstrømning og strømningsligninger**

### **3.2.1 Grunnvannsstrømning i mettet sone**

I mettet sone vil grunnvannsstrømning i all hovedsak avhenge av gravitasjonsenergien. Ettersom porene er fullstendig mettet med vann, vil den hydrauliske konduktiviteten være relativt konstant (Geoslope international, Ltd, 2021). Strømningen i den mettede sonen avhenger kun av de ulike formasjonenes evne til å lede vann (den hydrauliske konduktiviteten) og av energiforskjeller. Som ligningen for den hydrauliske gradienten viser, (ligning 3.4) vil det være gravitasjonsenergi som er den drivende faktoren for strømningen (Brattli, 2018). Grunnvannspeilets helning og

gjennomtrengeligheten til løsmassene og bergmassen vil da være de viktigste faktorene som påvirker mengden vann og retningen.

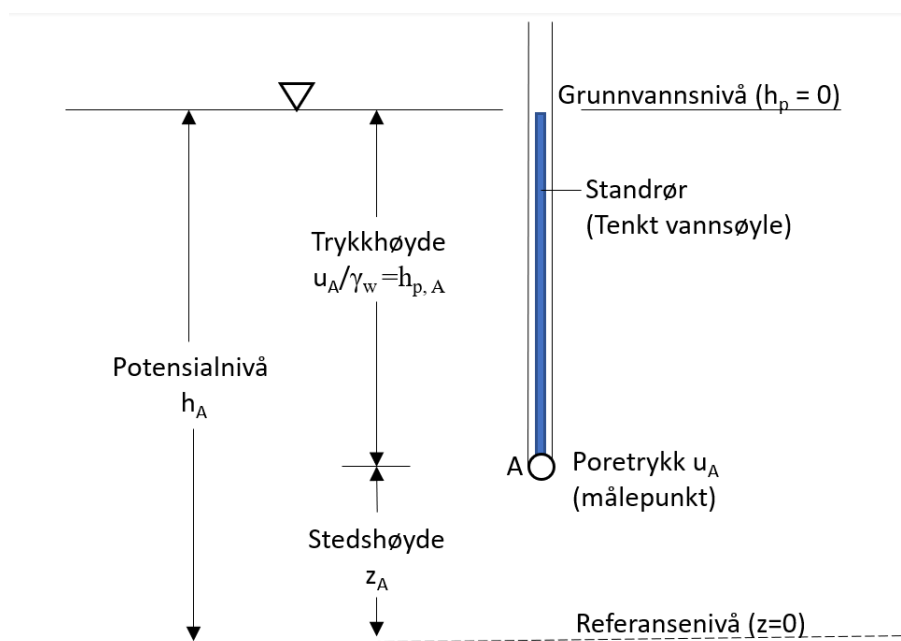
Generelt vil vann kun strømme når det er energiforskjeller, og da alltid fra områder med et høyt trykspotensial til områder med et lavere potensial (Brattli, 2018). Trykspotensialet  $h$  til vannet avhenger av poretrykket  $u$  (kPa) og høyden over et gitt referansenivå  $z$  (m), se ligning 3.6 og figur 3.9. Ligningen kommer fra å studere den totale mekaniske energien pr. tyngdeenhet (Bernullis ligning), for så å anta at bevegelsesenergien for grunnvannsstrømningen er lik 0 fordi strømmingen er svært langsom.

$$h = z + \frac{u}{\rho g} = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (3.6)$$

Når væsken er i ro vil poretrykket  $u$  være lik  $\rho * g * h_p$ . Trykspotensialet  $h_p$  er høyden over et gitt referansenivå som vannet vil stige til i et borehull. Innsatt i ligning 3.6 vil det hydrauliske potensialet være gitt som summen av stedshøyden  $z$  og trykkehøyden  $h_p$ :

$$h = z + h_p \quad (3.7)$$

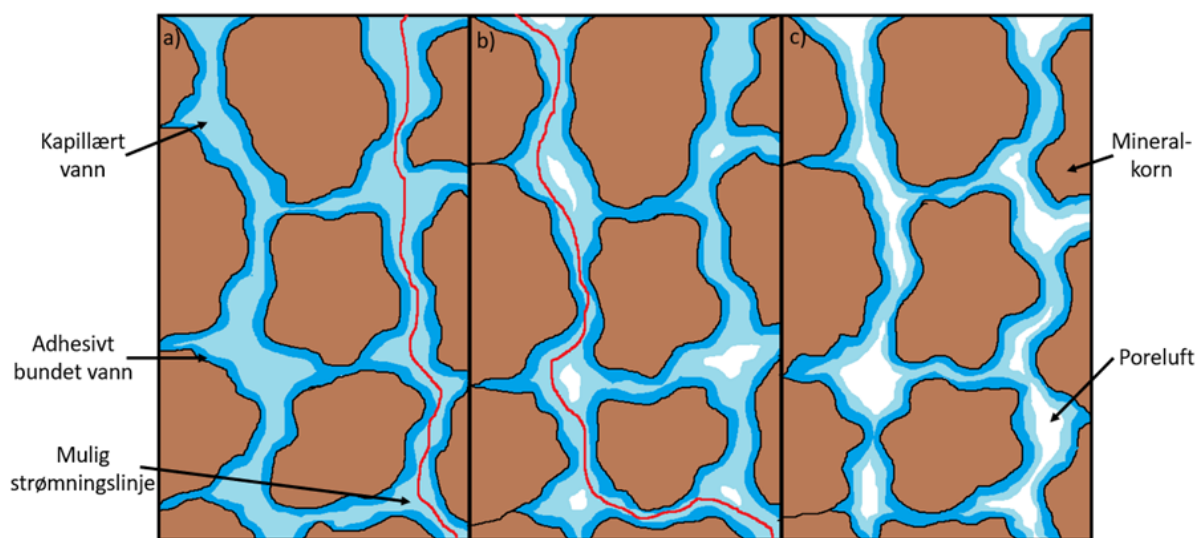
Sammenhengen mellom trykkehøyde  $h_p$  og poretrykket  $u$  er gitt som  $\frac{u}{\rho g}$ , der  $\rho$  er tettheten til vann og  $g$  tyngdeakselerasjon. Trykkehøyden vil da være  $9,807 \text{ kN/m}^3$  mindre enn poretrykket.



**Figur 3.9:** Illustrasjon av potensialnivå, trykkehøyde og stedshøyde i et målepunkt

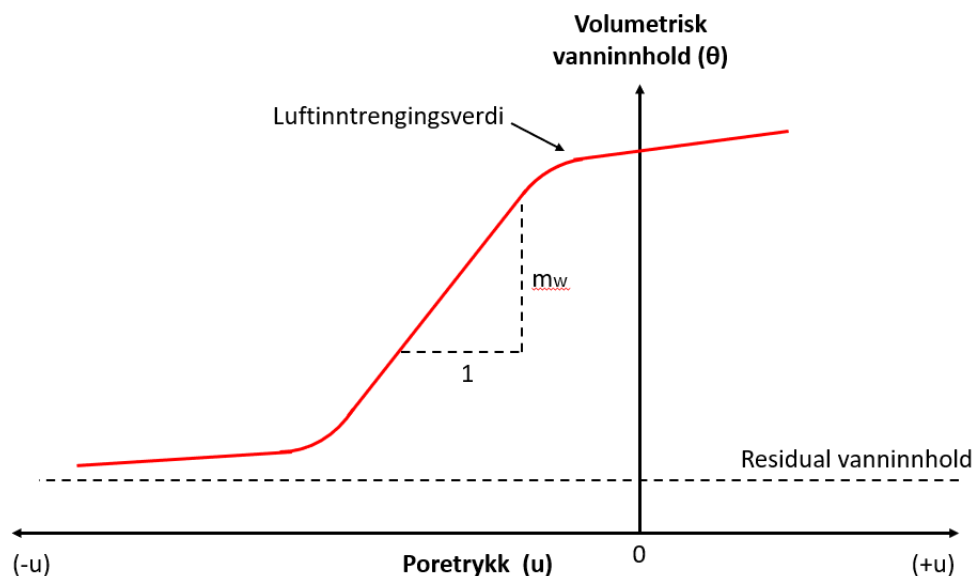
### 3.2.2 Grunnvannsstrømning i umettet sone

Vannstrømning i umettet sone vil være annerledes enn for strømning i mettet sone på grunn av at porene i umettet sone inneholder luft (Fetter, 2001). Et negativt poretrykk og overflatespenninger på kornene gjør at vannet stiger kapillært over grunnvannsspeilet. Desto høyere opp, desto mer luft vil det være i porene. Mer luft i porene vil følgelig gjøre det vanskeligere for vannet å strømme gjennom akviferen (Geoslope international, Ltd, 2021), se figur 3.10. Suget som oppstår gjør at trykkpotensialet i den umettede sonen blir negativt. Den drivende faktoren for grunnvannsstrømning i umettet sone vil da avhenge av forholdet mellom gravitasjonsenergien og det negative trykkpotensialet. Om det er tyngdekraften eller trykkpotensialet som dominerer for umettet sone vil avhenger av vanninnholdet (Brattli, 2018).



**Figur 3.10:** Illustrasjon av strømning mellom mineralkorn i a) Mettet sone, b) Delevis mettet sone og c) nesten umettet sone

Figur 3.10 illustrer hvordan en potensiell strømningslinje mellom mineralkorn vil endre seg ved økende mengde luft. En slik strømningslinje følger som regel minste motstands vei der vannmolekylene taper minst energi (Geoslope international, Ltd, 2021). I en fullstendig mettet prøve vil en strømningslinje gå korteste og raskeste vei gjennom formasjonen. Med mer luft i formasjonen vil vannmolekylene ta andre strømningsveier, noe som gjør at energi blir tapt på veien og den hydrauliske konduktiviteten reduseres. I en prøve nesten uten fritt vann vil det derfor være begrensede strømningsveier, noe som gjør at den hydrauliske konduktiviteten blir lav. Mengdeforholdet mellom luft og vann kan bli representert ved en volumetrisk vanninnholdsfunksjon (Geoslope international, Ltd, 2021), se figur 3.11. Funksjonen illustrerer



**Figur 3.11:** Den volumetriske vanninnholdsfunksjonen. Illustrasjon av hvordan det volumetriske vanninnholdet synker med synkende poretrykk.

hvordan poretrykket reduseres når vanninnholdet går ned. Selv med et svakt negativt poretrykk vil det på grunn av kapillære krefter være et høyt volumetrisk vanninnhold. Dersom poretrykket reduseres videre vil vanninnholdet gradvis gå ned, noe som gjør at det ved luftinntreningsverdien begynner å trenge luft inn i formasjonen og det blir en knekk på kurven. Denne verdien korresponderer med størrelsen på den negative poretrykket når de største porene begynner å drenes fritt. Størrelsen på luftinntreningsverdien avhenger da av kornfordelingen og porestørrelsen til de ulike materialene. Videre vil vann gradvis dreneres ut og bli erstattet med luft helt til residualvanninnholdet nås. Drenasjen avhenger av gravitasjonskreftene og om kompresjon av kornskjellettet presser vann ut fra porene. Ved residualvannivået vil det frie vannet ikke lenger være kontinuerlig. Vann kan likevel være adhesivt bundet til mineral Kornene, noe som gjør at noe vann gjenstår i prøven. Helningen  $m_w$  på vanninnholdskurven vil avhenge av kornfordelingen og kornstørrelsen (Geoslope international, Ltd, 2021). For velgradert materiale vil ofte kurven være svært bratt. Mer ensgradert materiale med liten porestørrelse, slik som leire og silt, har ofte en kurve som er slakere. Det er viktig å være klar over at den volumetriske vanninnholdsfunksjon er volumetrisk og ikke gravimetrisk.

Normalt betyr et stort vanninnhold at materialet har en stor porøsitet (Emdal et al. 2018). Dersom materialet blir utsatt for drenasje eller kompresjon vil det ha stor mulighet for volumminskning ved at kornene blir plassert tettere når vannet blir drenert bort. Som følger vil

en materialprøve som er tatt opp dypt ofte ha et lavere vanninnholdet enn grunnere prøver. Grunnen er at materialet ofte er mer sammenpresset som gir et mindre porevolumet, lavere vanninnhold og større kontaktrykk mellom kornene. Siden vanninnholdet i et materiale avhenger mye av porøsiteten og kornfordelingen vil det variere fra materiale til materiale (SVV, 2010). Vanlig vanninnhold i noen utvalgte masser kan studeres i tabell 3.1:

**Tabell 3.1:** Vanlig vanninnhold i forskjellige masser hentet fra SVV, 2010.

Materiale	Vann i volumprosent	
	Drenert	Udrenert/Neddykket
Sand/grus	2-7	25-40
Silt	10-25	35-40
Bløt leire	30-70	30-70
Torv	60-70	70-95

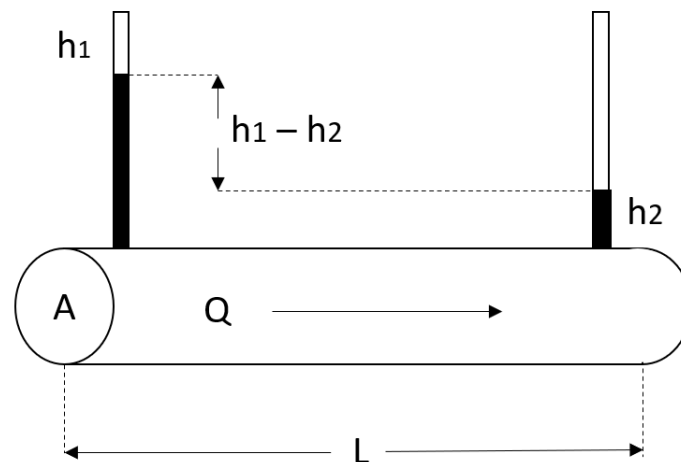
Den hydrauliske konduktiviteten i umettet sone vil være en funksjon av det volumetriske vanninnholdet i sonen (Geoslope international, Ltd, 2021). Indirekte vil det også si at den hydrauliske konduktiviteten er en funksjon av det negative poretrykket i formasjonen. Når trykket reduseres vil derfor den hydrauliske konduktiviteten gå ned. Dersom den hydrauliske konduktiviteten plottes mot poretrykket vil den fundamentale formen til kurven være tilnærmet lik som den volumetriske vanninnholdsfunksjonen. Dersom trykket i den umettede sonen reduseres, vil den hydrauliske konduktiviteten gå ned.

### 3.2.3 Darcys lov

I 1856 utførte den franske ingeniøren Henry Darcy forsøk der vannets bevegelse gjennom en sandsøyle ble studert, se figur 3.12 (Singhal og Gupta, 2010). Resultatene fra forsøkene ledet til Darcy's lov. Gjennom sylindere fant Darcy ut at det gjennomstrømmende vannvolumet pr. tidsenhet,  $Q$ , var direkte proporsjonal med tverrsnittarealet  $A$  og trykktapet  $dh$  og at dette var omvendt proporsjonalt med lengden vannet strømmet  $dl$ . Darcy's lov kan skrives som:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} = -K A i \quad (3.8)$$

der  $K$  = Den hydrauliske konduktiviteten. Forsøkene var i begynnelsen kun utledet for mettet strømning, men senere forskning har også vist at ligningen kan benyttes for umettet strømning, se Richards, 1931. Den eneste forskjellen er at den hydrauliske konduktiviteten ikke er konstant for umettet strømning, men varierer indirekte som en funksjon av poretrykket. For å indikere at strømmingen går mot et avtagende potensial vil fortegnet bli satt som negativt. Ligning 3.8



**Figur 3.12:** Illustrasjon av vannstrømning gjennom en sylinder, som Darcy's lov tar utgangspunkt i. Fritt etter Brattli, 2018.

vil gjelde for laminær strømning i et porøst medium. Eksperimenter har indikert at Darcy's lov er gyldig helt opp til et Reynold's tall  $R$  på mellom 1 og 10 (Todd og Mays, 2005). Større enn dette vil strømmingen være turbulent. For grunnvannstrømning i porøse medier vil Reynold's-tallet vanligvis være under 1, noe som gjør at Darcy's lov er godt egnet til beregning av strømningsraten i grunnen. Det er noen unntak der den hydrauliske gradienten er stor eller i berg med store hulerom slik som karst formasjoner. Reynold's tall er gitt som:

$$R = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (3.9)$$

der

$\rho$  = Væskens tetthet ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  = Gjennomsnittlige hastigheten på væsken ( $\text{m/s}$ )

$d$  = Karakteristisk porediameter, vanligst brukes  $d_{50}$  ( $\text{m}$ )

$\mu$  = Dynamisk viskositet ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

$\nu$  = Kinetisk viskositet ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Ved å dividere begge sider av ligning 3.8 med areal, kan den generelle Darcy ligningen formuleres som;

$$q = -K * \frac{dh}{dl} \quad (3.10)$$

der  $q$  representerer "Darcy-hastigheten", som er en tilsynelatende hastighet definert som  $q = Q/A$ . Ligning 3.10 gjelder for endimensjonal grunnvannsstrømning i et homogent, porøst og isotropt materiale (Brattli, 2018). Dette indikerer at både den hydrauliske konduktiviteten og



strømningsraten er konstant i alle retninger. I realiteten er strømmingen tredimensjonal og ligning 3.10 kan dekomponeres i en x-, y- og z-retning slik at den gjelder for tre dimensjoner, se ligning 3.11 (Brattli, 2018). Den deriverte blir da partiellderivert fordi ligningen er en funksjon av alle de tre romkoordinatene.

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.11)$$

Ligning 3.11 kan skrives kortere som  $\hat{q} = -K\nabla h$  (Wang og Anderson, 1982). Ved å relatere hastighetsvektoren  $\hat{q}$  med gradienten til potensialet oppsummerer denne ligningen mye av den grunnleggende fysikken ved grunnvannsstrømning.

På bakgrunn av massebevaringsprinsippet kan kontinuitetsligningen for et gitt system kombineres med Darcys lov til ligning 3.12. Kontinuitetsligningen antar innenfor et gitt system at vannmengden er bevart. Ligningen illustrerer at summen av strømningsendringer i x-, y- og z-retning pluss/minus ekstra strømning inn eller ut av domenet er lik endring i det volumetriske vanninnhold som en funksjon av tiden (Geoslope international, Ltd, 2021). Dersom vann forsvinner eller blir tilført i domenet, vil det gjøre at mengden magasinert vann blir endret og dermed at poretrykket endres.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.12)$$

der

$h$  er det hydrauliske potensialet (m),

$K_x, K_y, K_z$  er den hydrauliske konduktiviteten i henholdsvis x, y og z- retning (m/s),

$Q$  er massestrøm inn eller ut av området ved grensene av domenet ( $\text{m}^3/\text{S}$ , l/s)

$\theta$  er det volumetriske vanninnholdet (-),

$t$  er tiden

I SEEP/W antar programmet at dreneringen av porene kun er avhengig av poretrykket og ikke av at kornskjelletet presses sammen (Geoslope international, Ltd, 2021). Denne antagelsen fører til at endringen i magasinert vann kan relateres til endringen i poretrykket ved følgende formel:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (3.13)$$

der  $m_w$  er helningen på den volumetriske vanninnholdskurven, se figur 3.11. Videre kan ligning 3.13 skrives om med å innsette ligningen for det hydrauliske potensialet, ligning 3.6.

$$\partial \theta = m_w \gamma_w \partial (h - z) \quad (3.14)$$

Ved å innsette ligning 3.14 inn i ligning 3.12 og anta at høyden er konstant med tiden slik at  $\partial z/\partial t = 0$ , vil den styrende differensialligningen som SEEP/W tar utgangspunkt i, være gitt som;

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.15)$$

Det er denne ligningen som blir benyttet for å regne ut poretrykket eller vannstrømningen ved hver node i programmet.

Under stasjonær strømning vil mengden vann som siver inn og ut av et element være det samme uavhengig av tiden (Singhal og Gupta, 2010). Det gjør at høyere siden av ligning 3.15 blir satt lik 0. For et todimensjonalt system, blir som regel komponenten ( $K_z \frac{\partial h}{\partial z}$ ) også satt lik 0. Ligning 3.12 kan da forenkles til følgende ligning for 2D og stasjonær strømning:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + Q = 0 \quad (3.16)$$

### 3.3 Grunnvannsmodellering

#### 3.3.1 Modellering av grunnvannsstrømning

Modellering vil generelt være en iterativ prosess, der modellen gradvis blir forbedret og validert for hvert steg (Elger et al. 2013). Ofte blir en enkel modell satt opp i utgangspunktet, for så å bli videreutviklet og mer komplisert i videre steg. Det er for eksempel anbefalt å starte med en enkel stasjonær modell når transient strømning skal analyseres. På den måten vil det være mulig å se hvordan resultatet av modellen etter en uendelig lang tid ender opp til slutt. I tillegg kan grensebetingelsene endres seg med tiden og av den grunn kan de ikke nødvendigvis bestemmes i starten av analysen. I andre komplekse tilfeller vil det ofte være lurt å starte med en homogen modell for så i steg skifte materiale og/eller øke kompleksiteten på geometrien til domenet. Grunnen til å ta det stegvis er for å sikre at de spesifiserte grensebetingelsene og materialegenskapene gir mening. Om mulig bør modellen valideres og sammenlignes med erfaringstall for å studere om de forespeilede resultatene er nøyaktig nok i forhold til det som er nødvendig.

For å lykkes med modellering vil det være vesentlig med en god forståelse over hva som skal modelleres og hvilken angrepsmåte som skal til for å løse problemet (Gustafson, 2009). Brukere av numeriske programmer bør derfor ha en generell forståelse og kunnskapsbase over det forespeilede resultatet, for å sikre at det blir realistisk og utført korrekt (Geoslope international, Ltd, 2021). Som regel vil det geologiske mediumet være svært komplekst og ikke-isotrop, slik at de faktiske grunnforholdene må forenkles i den numeriske modellen. Brukeren av programmet bør derfor ha kjennskap til egenskapene, geometrien og lokasjonen til de geologiske mediumet. I

tillegg vil grensene i modellen være av stor betydning å definere korrekt for å gi et realistisk modelleringsresultat. Det finnes mange forskjellige måter å gjøre forenklinger på og avhengig av hvilken fremgangsmåte som velges vil det derfor kunne bli ulike tolkninger. For å forenkle problemstillingen kan det være gunstig å utelate noen av komponentene. I mange tilfeller kan det ved korrekt bruk av randvilkår oppnå mye av det samme og av den grunn trenger ikke nødvendigvis alle de fysiske komponentene å være med.

Ved modellering kan det være knyttet flere usikkerheter til inngangsdataene og også om programmet har feil eller mangler (Anderson og Woessner, 1992). Feil materialparametere kan blant annet komme av måten materialet ble hentet på, hvordan det ble testet og nøyaktigheten på laboratoriet. I tillegg kan boreavvik, feil koordinater, feil på utstyret og feil kalibrering føre til at inngangsparameterne blir feil. Dersom inngangsparametrene er usikre, vil det føre til en stor usikkerhet i beregningsresultatet. Usikkerheter med programmet omhandler blant annet at store modeller og liten diskretisering gjør at det kan bli begrensninger i beregningskapasiteten. I tillegg kan kompatibiliteten ikke bli opprettholdt, samt at modellen ikke itererer mot en løsning. Desto større og mer komplisert modellen er, vil det øke sannsynlighet for at det kan bli feil i modellen (Gustafson, 2009).

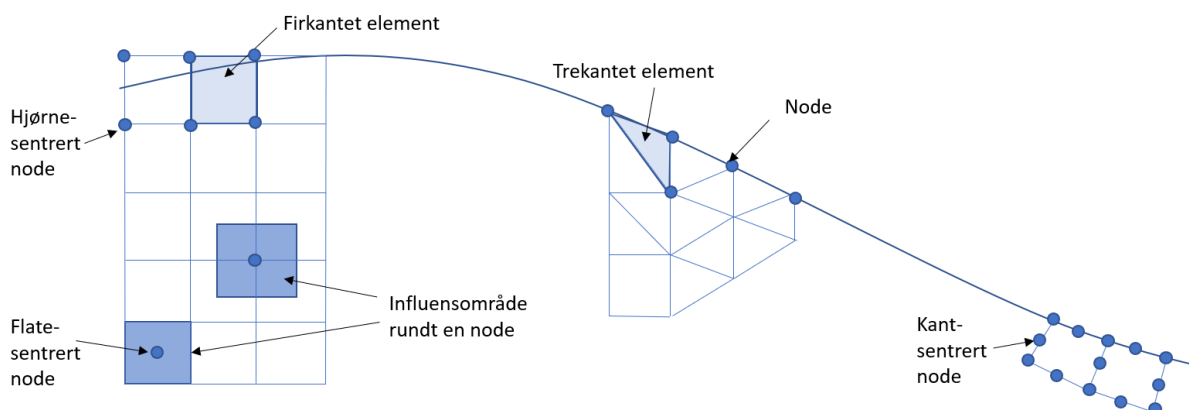
### 3.3.2 Endelig element metoden

”*Finite element method*” (FEM) eller på norsk ”*endelig element metoden*” er en numerisk tilnærming som går ut på å dele et komplisert system inn i enkle elementer av geometriske former med kjente og forståtte egenskaper (Bell og Meyer, 2021). Hensikten er å beskrive matematisk de fysiske prosessene som skjer innenfor et område og for å forutsi ukjente variabler (Wang og Anderson, 1982). Dette innebærer ofte differensialligninger. I SEEP/W er det denne metoden som benyttes.

Endelig elementmetoden benytter partialdifferensialligninger (Partial differential equation (PDE)) til å matematisk beskrive det som skjer i hvert element (Geoslope international, Ltd, 2021; Wang og Anderson, 1982). Ligningene som blir brukt avhenger av fysikken på problemet som skal løses og bygger som regel på prinsippet om massebevarelse innenfor elementvolumet. Ligningene blir formulert for hvert enkelt element ved å bruke en enkelt funksjon til å approksimere løsningen til det enkelte elementet. Dette vil gi en omtrentlig beskrivelse av fysikken med et sett med enkle lineære (men noen ganger ikke-lineære) ligninger. Ved å kombinere bidragene fra alle elementene satt sammen, resulterer det i et stort matriseligningssystem som det numeriske programmet kan løse. Løsningen på ligningene vil være avhengig av variabelene som er en funksjon av rom (og tid ved transient strømning) og er begrenset av de spesifiserte grensebetingelsene innenfor domenet. Innenfor hydrogeologien vil som regel domenet være et

spesifisert volum av et geologisk materiale som har kjente og definerte egenskaper. Hver celle blir gitt egenskaper slik som hydraulisk konduktivitet (Gustafson, 2009). På bakgrunn av antagelsene om massebalanse kan blant annet vannmetningen, vannstrømningen og trykket i hver celle beregnes.

Et av hovedelementene ved endelig elementmetoden er nodene. Nodene er som regel plassert i hjørnene på elementene, altså i kryssningspunktene mellom rutenettlinjen, se figur 3.13 (Wang og Anderson, 1982). De kan også plasseres langs kantene eller i midten av elementet, noe som ofte benyttes for høyere ordens elementanalyse, slik som spenningsanalyser. I SEEP/W er det vanligste at nodene er plassert i hjørnene på hvert element eller langs kantene (Geoslope international, Ltd, 2021). Når nodene kun er plassert i hjørnene vil programmet løse en enkel lineær ligning mellom de to nodene.



**Figur 3.13:** Eksempel på oppdeling av elementer og nodekonfigurasjoner

Nodene har flere oppgaver i domenet og er representert med dotter i gitteret til modellen. Alle de små elementene som blir formet mellom nodene vil tilsammen utgjøre gitteret (meshet) til domenet. På bakgrunn av koordinatene til nodene og hvor de er plassert i gitteret, kan geometrien til hvert element bli definert. Det vanligste er at disse elementene har en kvadratisk eller trekantet form. Nodene benyttes også til å koble elementene sammen, noe som er med på å sikre kompatibilitet (Geoslope international, Ltd, 2021). Kompatibilitet sikres ved at det er felles noder mellom hvert element.

Det er ved nodene at ligningen for generelle endelig elementmetodeligningen løses, se ligning 3.17 (Pinder, 2002). Nodene benytter da koeffisientene fra alle elementene som deler samme node for å løse den ukjente ligning ved noden. Influensområde noden henter informasjon fra, avhenger av plasseringen av noden i gitteret. Ligningen blir altså løst ved noden, men henter

materialelegenskaper fra det omkringliggende området. Antall ukjente/frihetsgrader vil være med på å bestemme antall ligninger som løses ved noden. Ved modellering av grunnvannsstrømning vil det som regel være kun en ukjent; enten det hydrauliske potensialet eller poretrykket. Det vil da kun være en ligning ved hver node. Antallet endelige elementligninger i domenet vil da være lik antall noder brukt til å definere gitteret i modellen. Den deriverte av den primære ukjente med hensyn på tiden vil da være lik gradienten. Den generelle endelige element ligningen kan skrives som (Geoslope international, Ltd, 2021):

$$[M]\{h\} = \{Q\} \quad (3.17)$$

der

$[M]$  er matrisen til elementmaterialet, som inkluderer materialelegenskapene og volumet

$\{h\}$  er det hydrauliske potensialet ved noden

$\{Q\}$  er massestrømmen ved noden

For beregningene i SEEP/W er det enten massestrømmen  $\{Q\}$  eller det hydrauliske potensialet  $\{h\}$  som det løses for. Det vil si at dersom  $\{Q\}$  er spesifisert vil  $\{h\}$  være den parameteren som blir utregnet. Ved grunnvannsstrømningsanalyser er den primære ukjente den hydrauliske potensialet  $h$  (Geoslope international, Ltd, 2021). Det er viktig å huske på at det hydrauliske potensialet består av et trykkpotensial og en høydekomponent, se ligning 3.7. Programmet regner ut den ukjente relativt til et spesifisert trykkpotensial eller massestrøm, som f.eks er satt ved grensebetingelsene. Dette gjør at grensebetingelsene blir svært viktig ved modellering.

Når den primære ukjente har blitt løst, kan denne videre benyttes til å løse sekundære variabler. Et eksempel på sekundær variabel kan blant annet være den hydrauliske gradienten til elementet. De sekundære parameterne blir gjerne brukt til det visuelle i modellen, slik som konturkart.

Elementmatrisen vil kunne inneholde materialelegenskaper som kan være en funksjon av løsning (Wang og Anderson, 1982). En vanlig numerisk prosedyre for å håndtere ikke-linearitet går ut på å løse gjentatte ganger de endelige elementligningene for så å oppdatere materialelegenskapene basert på løsningene av den forrige iterasjonen. Løsningen konvergerer når løsningen er innenfor en spesifisert trykkehøydeforskjell eller at maksimal antall iterasjoner er nådd. I SEEP/W kan begge disse spesifiseres, men foreslåtte verdier er en maksimal trykkehøydeforskjell fra forrige løsning på 0,005 m og maksimalt 500 iterasjoner. Er løsningen innenfor dette går programmet videre til neste node for å løse elementligningen der.

### 3.3.3 Kontinuum og diskontinuum modell

Ved endelig elementmetoden vil den hydrogeologiske modellen være delt opp av celler med gitte egenskaper. Dersom alle cellene har de samme egenskapene kalles det et ekvivalent kontinuum, mens dersom cellene har ulike egenskaper kalles det et diskontinuum. Vannstrømning i berg kan videre modelleres på tre måter (SVV, 2003).

- Ved kontinuum analyse,
- Diskontinuum analyse
- Eller en kombinasjon av kontinuum og diskontinuum-analyse.

Ved kontinuum analyse modelleres berggrunnen som et ekvivalent porøst medium. Det vil si at strømmingen i berggrunnen forenkles til å strømme slik som for et porøst medium, og ikke avhengig av diskontinuitetene i bergmassen. Det er da antatt at sprekkeene er fordelt tilfeldig innenfor mediumet og av den grunn trengs derfor ikke de karakteristiske egenskapene til den enkelt sprekk. Det vil for kontinuum analyse bli brukt en gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet for hele den oppsprukkede bergmassen (SVV, 2001). En kombinasjon av bergmatrisken og sprekkeene vil da bli vurdert sammen for å bestemme den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten for volumet (Hassani et al. 2015). Det er denne metoden som også brukes for løsmasser. Kontinuum modellering brukes gjerne for regionale modeller der større områder blir analysert. I tillegg benyttes metoden der det ikke er nok bakgrunnsdata til å simulere strømmingen for den enkelte sprekk. Inngangsdataene som blir benyttet til kontinuum analyse vil derfor ofte være enklere enn ved diskontinuum analyse, noe som gjør at det trengs mindre beregningskapasitet i programmet.

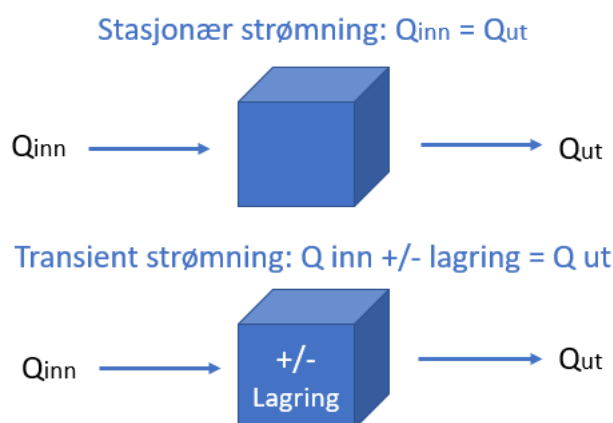
Ved diskontinuum analyse modelleres berggrunnen som et oppsprukket medium. For denne typen analyse blir selve bergmassen sett på som ikke-permeabel, noe som indikerer at grunnvannsstrømningen foregår langs enkeltsprekker og forkastninger (SVV, 2001). En god analyse krever da at den hydrauliske konduktiviteten til den enkelte sprekk eller statistiske egenskaper til sprekkesettene er kjent, slik som lengde og retning. De store sprekkeene blir så satt i system, der de mindre sprekkeene som er antatt å ha en lav permeabilitet blir utelatt for å gjøre utregningen håndterbare (Gustafson, 2009). Fordelen med en diskontinuum modell er at betydningen til en sprekk/sprekkesett i forhold til grunnvannssenkning og lekkasje kommer tydelig frem. I tillegg tar modellen hensyn til heterogeniteter i bergmassen. Ulempen er at det krever gode og nok inngangsdata. En diskontinuum analyse vil derfor være mer egnet for undersøkelser av lokale forhold, der effekten av enkeltsprekker kommer tydeligere frem.

Modellering av grunnvannsstrømning i berg vil som regel være en kompleks prosess, da

grunnvannssenkning som regel varierer innenfor store områder og er av lokal karakter. Av den grunn brukes ofte en kombinasjon av den regionale kontinuum-modellen og den diskrete sprekkemodellen for lokale problemsoner (SVV, 2003). Dette kan blant annet gjøres ved å gi cellene egenskaper etter en stokastisk simulering, slik som Monte-Carlo simulering, noe som kalles et stokastisk kontinuum. Monte Carlo-metoden er en teknikk som ofte benytter tilfeldige tall for å estimere en løsning på et numerisk matematisk problem (Grøn, 2017). Monte Carlo simulering benyttes ofte også for diskrete sprekkemodeller for å tildele modellen egenskaper. For at mediet skal bli vurdert som statistisk representativt, må volumet være tilstrekkelig stort og større enn den gjennomsnittlige sprekkeavstanden.

### 3.3.4 Stasjonær og transient modellering

Ved grunnvannsmodellering skilles det mellom stasjonær og transient strømning. Forskjellen er at den transiente strømningen er tidsavhengig, noe den stasjonære ikke er. At strømningen er tidsavhengig vil si at enten intensiteten eller retningen på grunnvannsstrømningen forandres med tiden (Hendriks, 2010). Ved transient modellering vil ikke strømningen være i likevekt. Noe vann vil da enten lagres eller dreneres ut fra systemet, se figur 3.14. Etter en gitt tid vil derimot strømningen stabilisere seg mot en ny likevekt og stasjonær tilstand oppnås. Med stasjonær strømning vil like mye vann strømme inn i domenet som det som dreneres ut av systemet slik at massebalansen opprettholdes. I tillegg vil størrelsen og retning på grunnvannsstrømningen være konstant, samt at det ikke trengs å ta høyde for tidsaspektet. Beregninger ved stasjonær strømning vil derfor være en del lettere enn for transient strømning. De stasjonære ligningene kan utledes fra Darcy's lov for både åpen og lukkede akviferer (Brattli, 2018).



**Figur 3.14:** Massebalanse ved stasjonær og transient strømning

En mulig innlekkasje i tunnel vil kunne føre til at den eksisterende likevekten for

grunnvannssystemet blir forstyrret slik at strømmingen ansees som transient. Vannet som lekker inn i tunnelen vil i sin tur føre til at poretrykket reduseres og at en senkningstrakt blir etablert rundt tunnelen (Brattli, 2018). Strømmingen ansees som transient så lenge senkningstrakten utvikler seg. Etter en gitt tid vil det oppstå en likevekt eller tilnærmet likevekt mellom nydannelse av grunnvann, grunnvannstilsig og innlekkasjemengden til tunnelen. Grunnvannstrykket i akviferen vil da stabilisere seg ved at massebalansen opprettholdes. Når dette skjer vil senkningstrakten være fullt utviklet og strømmingen regnes som stasjonær. De ytre grensene av senkningstrakten vil definere tunnelens influensområde.

Hvor fort senkningstrakten utvikler seg ved transient strømming vil avhenge av magasinkoeffisientens størrelse. Magasinkoeffisienten er definert som *"Mengden vann som kan avgis eller magasineres i en akvifer pr. enhetsareal når grunnvannsnivået eller trykkflaten endres en enhet"* (Brattli, 2018). En stor magasinkoeffisient indikerer at mye vann kan lagres i magasinet. Mer vann i et grunnvannsmagasin kan gjøre at en innlekkasje til tunnel påvirker mindre omgivelsene rundt enn om magasinkoeffisienten hadde vært mindre. For noen akviferer vil det ta svært lang tid før en likevekt oppnås, hvis den i det hele tatt oppnås. Som oftest vil senkningstrakten utvikle seg raskere i en lukket akvifer enn i en åpen akvifer som har en større magasinkoeffisient. Over tunnelen vil senkningstrakten være størst, før den avtar ut mot sidene.

Både transient og stasjonær grunnvannsstrømming kan modelleres i SEEP/W. Den stasjonære strømmingen vil da være etter uendelig lang tid. Ved transient strømming må tidssteg og de hendelsene som styrer forløpet bli definert (Gustafson, 2009). I tillegg må startparameterne for den hydrogeologiske modellen bli definert.

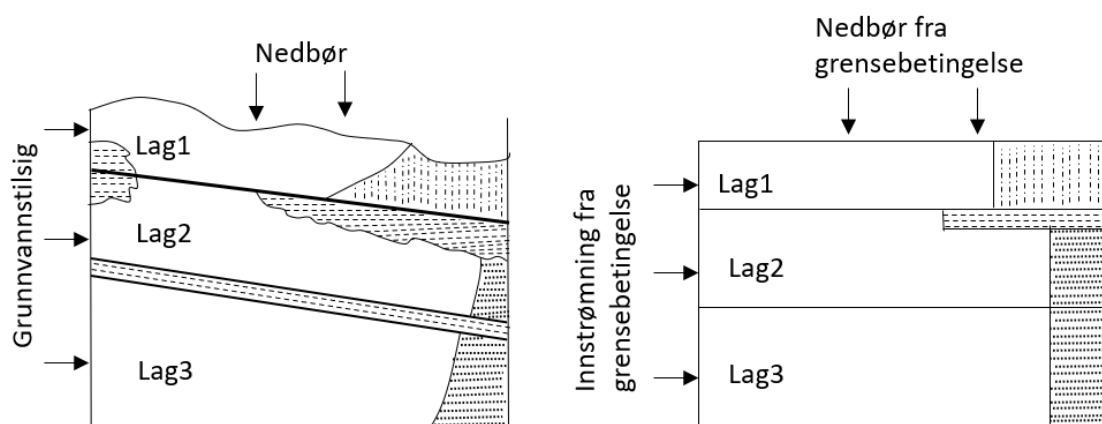
### 3.3.5 Geometri

For å definere geometrien i SEEP/W benyttes polygoner og punkter. Hver geologiske formasjon vil ofte være en egen region, der regionen er et lukket polygon. I hvert hjørne i polygonet vil det være definert et punkt med en gitt koordinat. Ved hjelp av punkter kan domenet deles inn i biter som muliggjør analyse på enkeltdelene før alt blir satt sammen til en helhet (Geoslope international, Ltd, 2021). Det er ingen restriksjoner på antall punkter, men generelt bør modellen være så enkel som mulig. Selv med forenklinger, bør formene ved modellering helst se naturlig ut. Skarpe kanter kan skape utfordringer for det numeriske programmet. For å unngå dette problemet kan det bli satt opp flere punkter for å myke ut kantene. Tipset med flere punkter kan også brukes til å kontrollere nodedigitteret bedre. De fleste punktene vil være satt ved hjørnene av regionene, men det kan også være punkter innenfor. I SEEP/W vil det alltid være plassert en node i gitteret der det er et punkt. Hver region vil være begrenset til kun bestå av et materiale, en type diskretisering,



en elementorden og en integrasjonsorden.

Det er nødvendig at numeriske modeller er en forenkling av de faktiske feltforholdene (Geoslope international, Ltd, 2021). Geometrien til problemet må derfor forenkles for å forhindre at modellen blir så kompleks at det blir vanskelig å forutsi og oppnå resultater. Forenklingen av modellen innebærer som regel å forenkle den komplekse stratigrafien. Ofte vil det derfor bli trukket rette linjer, samt at mindre geologiske lag og diskontinuiteter blir fjernet fra domenet, se figur 3.15. Hensikten er å oppnå et resultat som er forståelig. En kompleks geometri vil ikke nødvendigvis gi en mer nøyaktig løsning, men kan i noen tilfeller føre til numeriske vanskeligheter som skjuler den ekte løsningen (Geoslope international, Ltd, 2021). Modellen bør derfor forenkles og designes for å svare på spesifikke spørsmål satt av brukeren. Det vil være nødvendig å kun ta med parametre i beregningene som er av betydning. Dersom en kompleks modell skal modelleres vil det ofte være lurt å starte med en enkel modell, for så i steg gjøre den gradvis mer kompleks.



**Figur 3.15:** Konseptualisering og forenkling av et tenkt problem

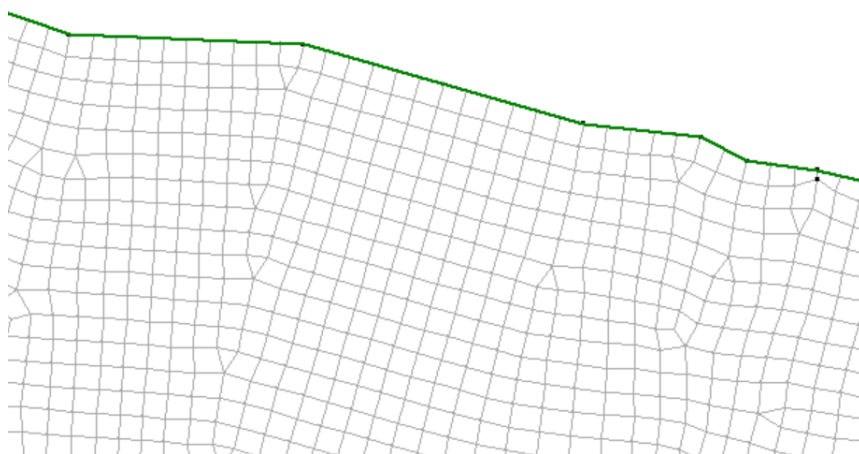
En viktig del ved fastsetting av geometrien er å definere grensene, altså hvor modellen starter og slutter. Ideelt sett bør grensene være satt så lang unna hovedmodellområdet slik at grensene ikke påvirker resultatet. Ved grunnvannsmodellering vil det si at det ofte er lurt å sette disse grensene ved vannskiller (Wang og Anderson, 1982). Der innlekkasjekonsekvensene av tunneldriving skal undersøkes, bør grensene bli satt utenfor influensområdet til tunnelen. Dersom dette ikke er mulig, bør grensebetingelsene tilpasses så de faktiske strømningsforholdene blir representert.

### 3.3.6 Diskretisering

Løsningen ved endelig elementmetoden baserer seg på diskretiseringsprinsippet, altså hvordan de endelige elementene blir fordelt i domenet. I SEEP/W blir disse elementene fordelt automatisk

innenfor den definerte geometrien ved en fordelingsalgoritme (Geoslope international, Ltd, 2021). Brukeren kan likevel endre på størrelsen på elementene eller velge linjer/grenser der inndelingen skal ha en annen størrelse enn resten av domenet. Enkeltelementer kan ikke bli definert av brukeren, men type fordeling kan bli valgt. Valg av elementstørrelse avhenger av kapasiteten på datamaskinene som blir brukt, slik at tidsbruken på beregningene ikke tar for lang tid. Elementstørrelsen bør ikke være for lav. Når brukeren av programmer endrer på elementstørrelsen langs regioner eller linjer, vil det være viktig at kompatibiliteten blir opprettholdt. At kompatibiliteten blir opprettholdt vil si at det er noder som knytter alle elementene sammen.

I SEEP/W benyttes som regel kvadratiske elementer eller triangulære elementer der nodene er plassert i hjørnene på elementene. Et eksempel på et slikt gitter kan bli studert i figur 3.16. Elementene har blitt automatisk satt opp i SEEP/W med en elementstørrelse på ca 5 m. Formen på elementene er tilpasset terrengoverflaten. Programmet foretrekker kvadratiske elementer og det vil om mulig være flest kvadrater. En optimal størrelse på elementene varierer fra problem til problem (Geoslope international, Ltd, 2021). Som følger, vil et gitter for et gitt problem avhenge av erfaringene og kreativiteten til brukeren av programmet. Det er likevel anbefalt å starte med så få elementer som mulig i starten for så å gjøre elementene mindre etter behov, helst under 1000 elementer. I tillegg bør også være mulig å skille elementene fra hverandre når man ser på domenet i en 100% zoomfaktor. For mange elementer vil føre til unødvendige lang beregningstid for problemet, samt at det kan bli vanskeligere å tolke resultatene.



**Figur 3.16:** Diskretisering med både firkanter og trekkanter

For transient analyse vil både størrelsen på elementene og størrelsen på tidsstegene ha betydning for om beregningene blir realistiske (Geoslope international, Ltd, 2021). Tidsstegene bør være av

så stor størrelse at en imaginær vannpartikkel flytter seg en betydelig avstand i forhold til elementstørrelsen. Samtidig bør ikke elementstørrelsen være så stor at partikkelen hopper over flere elementer. Bestemmelsen av tidssteg vil derfor henge sammen med elementstørrelsen. Desto større elementet er, desto større tidssteg kreves. For lite tidssteg vil kunne gi urealistiske beregninger av poretrykket.

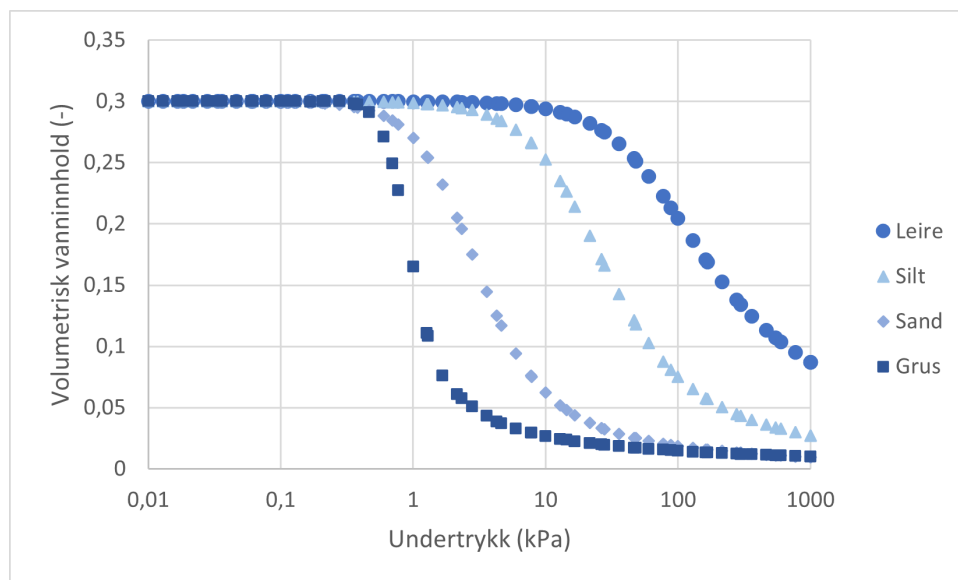
### 3.3.7 Materialelegenskaper

Materialelegenskapene i SEEP/W bør optimaliseres for at løsningen av endelig elementligningene blir så effektive og realistiske som mulig (Geoslope international, Ltd, 2021). I SEEP/W kan det velges mellom 4 ulike materialmodeller:

- Ingen (brukt for deler som er fjernet fra analysen)
- Mettet/umettet modell
- Kun mettet modell
- Grensesnittmodell

Den kun mettede strømningsmodellen antar at en region er fullstendig mettet med vann til en hver tid. En fullstendig mettet formasjon vil da ha en konstant hydraulisk konduktivitet. Ved å benytte denne modellen kan det enkelt bli gitt et raskt overslag over materialelegenskapene for en region.

Der grunnvannsstrømningen foregår i både umettet og mettet sone er det anbefalt at et grovt estimat av den volumetriske vanninnholdskurven og den hydrauliske konduktivitetsfunksjonen vil være bedre enn å anta at den hydrauliske konduktiviteten er konstant (Geoslope international, Ltd, 2021). En slik modell vil ta hensyn til luften som trenger inn og at den hydrauliske konduktiviteten går ned som følge av mer luft i domenet, se kapittel 3.2.2. I SEEP/W kan disse funksjonene bli estimert forholdsvis enkelt ved kornfordelingsanalyse eller ødometertester i laboratorium. Dersom materialelegenskapene ikke er kjent kan kurven bli estimert på bakgrunn av erfaringer fra litteraturen, enten fra kornfordelingskurver eller fra volumetrisk datapunktfunksjoner. Disse kurvene kan så tilpasses til det aktuelle problemet avhengig av feltundersøkelsene. I SEEP/W ligger det forslag om kurver basert på erfaringer fra ulike materialer. En slik funksjon kan for ulike eksempelmaterialer med et mettet vanninnhold på 0,3 bli studert i figur 3.17. Figuren illustrerer hvordan vanninnholdet går ned ved et økende matrikspotensial/undertrykk. Matrikspotensialet er definert som forskjellen mellom lufttrykket i porene  $u_a$  og vanntrykket i porene  $u_w$  (Chiorean, 2017), med andre ord et undertrykk eller et sug. Kurvene vil variere avhenger av hvordan kornfordelingen og porøsiteten til materialet er (Geoslope international, Ltd, 2021). Sand har ofte en ensgradert fordeling. Dette gjør at når luft

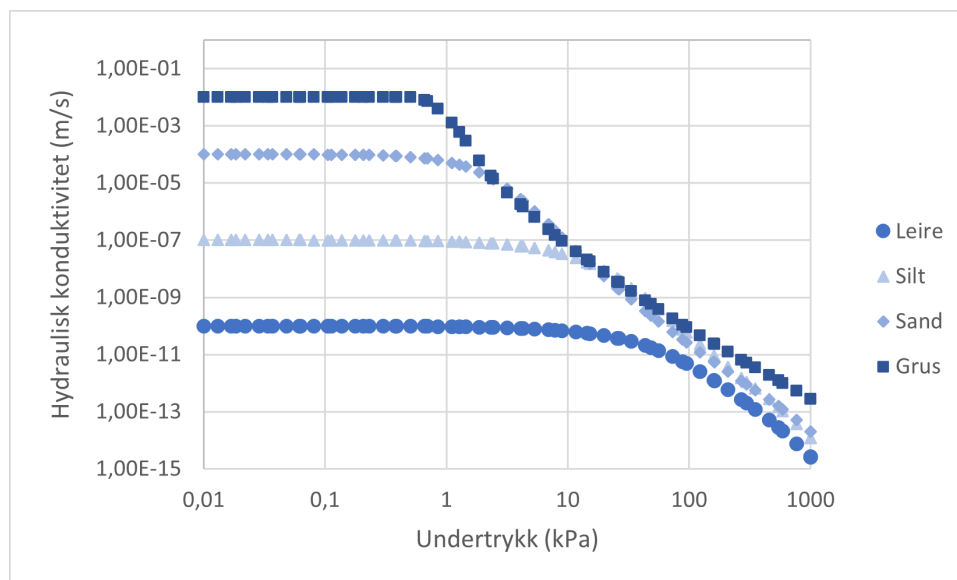


**Figur 3.17:** Volumetrisk vanninnholdskurve for noen utvalgte eksempelmaterialer i SEEP/W med et mettet vanninnhold lik 0,3.

først trenger inn, vil porene tømmes raskt slik at kurven blir bratt. For leire derimot vil den lille porestørrelsen og den høye kompressibiliteten gjør at kurven blir relativt slak.

Den hydrauliske konduktivitetsfunksjonen som trengs for umettet sone oppnås på bakgrunn av flere estimeringsmetoder. Estimeringsmetodene bruker enten kornfordelingskurver eller en målt volumetrisk vanninnholdsfunksjon og den mettede hydrauliske konduktiviteten (Geoslope international, Ltd, 2021). Når den hydrauliske konduktiviteten blir definert på bakgrunn av vanninnholdsfunksjonen benyttes det i SEEP/W enten estimeringsmetoden til Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) eller Fredlund-Xing-Huang (Fredlund og Xing, 1994). Mer detaljert beskrivelse av metodene og hvordan de fungerer i SEEP/W kan leses mer om i Geoslope international, Ltd, 2021. Begge metodene krever en kjennskap til den mettede hydrauliske konduktiviteten  $k$  (m/s), i tillegg krever Van Genuchten metoden et estimat på residualvanninnholdet. Dersom materialene har følgende hydraulisk konduktivitet (lest av omtrentlig middelerdi på graf 2.1 s 40 i Brattli, 2018);  $K_{leire} = 10^{-10}$  m/s,  $K_{silt} = 10^{-7}$  m/s,  $K_{sand} = 10^{-4}$  m/s,  $K_{grus} = 10^{-2}$  m/s vil kurvene med Fredlund-Xing-Huang estimeringsmetoden bli som i figur 3.18.

I SEEP/W er det mulig å legge inn en anisotropifaktor. Denne faktoren representerer forholdet mellom den hydrauliske konduktiviteten i hhv. x- og y-retning (Geoslope international, Ltd, 2021). Den hydrauliske konduktiviteten i x-retning er den som blir regnet ut fra den hydrauliske funksjonen, mens den hydrauliske konduktiviteten i y-retning blir regnet ut på bakgrunn av



**Figur 3.18:** Hydraulisk konduktivitetskurve basert på eksempelmateriale i SEEP/W med en mettet vanninnhold på 0,3.

anisotropifaktoren. Dersom det er anisotropi vil ikke strømningslinjene være vinkelrett på ekvipotensiallinjene. Anisotropi målt i felt vil mest sannsynlig bli representert i lag, der resultatet vil ligne mye på når det er homogene forhold (Geoslope international, Ltd, 2021). Etersom anisotrope forhold er vanskelig å tolke, er det antatt at grunnen som modelleres videre en isotrop.

Grensesnittmodellen gjør at det er mulig å tegne en materialmodell til en linje og gi den linjen en tykkelse (Geoslope international, Ltd, 2021). Ved grunnvannsstrømningsanalyse kan en slik modell benyttes for å simulere et tynt injeksjonslag eller et dreneringsrør. Den hydrauliske konduktivitet må da bli definert både normalt og tangensielt på linjen.

### 3.3.8 Grensebetingelser

Å etablere en numerisk grunnvannsmodell er kun mulig dersom de hydrogeologiske forholdene kan avgrenses og grensebetingelsene kan estimeres (SVV, 2003). Randvilkårene vil ha stor betydning på sluttresultatet, da resultatet av den numeriske modellen blir påvirket av mengden vann som strømmer inn og ut over grensene. Påvirkningen vil både gjelde for ytre randvilkår mot andre formasjoner og også indre randvilkår mellom kontaktsonen mellom berg, løsmasser og tunnel (Gustafson, 2009). Grensebetingelsene som blir satt i hydrologiske modeller må da tilpasses de lokale hydrogeologiske forholdene. For enhver modell må grensebetingelsene bli satt på bakgrunn av de geologiske egenskapene, forkastningene, sprekken, tunnelens geometri og de hydrologiske og hydrogeologiske forholdene i området (Hassani et al. 2015).

Løsningen av numeriske problemer er direkte knyttet til grensebetingelsene (Geoslope international, Ltd, 2021). Det er grensebetingelsene som er den drivende faktoren, da det er ved disse det hydrauliske potensialet eller mengden vann som strømmer inn og ut av systemet blir satt. Forskjellen i hydraulisk potensial er det som driver grunnvannsstrømningen. Løsningen av det numeriske problemet vil da være hvordan det resterende domenet reagerer på grensebetingelsene. Ved stasjonær strømning må derfor minst en node ha blitt gitt et spesifisert hydraulisk potensial slik at videre utregning ved nodene kan ta utgangspunkt i dette.

I SEEP/W grensebetingelsene kun være gitt som et hydraulisk potensial  $H$  eller en massestrøm  $Q$ , men disse kan bli påført på forskjellige måter (Geoslope international, Ltd, 2021). Massestrømmen kan f.eks komme fra en gitt gradient, for så å bli omregnet til en massestrøm i programmet. Det er viktig å huske på at hvis det hydrauliske potensialet blir spesifisert, vil det være massestrømmen som blir den ukjente i programmet. Der verken  $h$  eller  $Q$  er spesifisert ved en node, betyr det at det strømning inn og strømning ut fra noden er den samme eller lik 0.

Av relevans for videre modellering er følgende grensebetingelser av interesse:

- Konstant hydraulisk potensial på sidene av domenet
- En fluks grense på tunnelkonturen
- En ikke-strømnings grense på bunnen av modellen
- En dreneringsgrense på terrengoverflaten.

Et konstant hydraulisk potensial vil si at grunnvannsnivået holdes konstant ved grensene. Implisitt vil det si at vann som forvinner ut av domenet ved f.eks en tunnellekkasje, vil bli tilført ved grensene for å opprettholde nivået. Ved å velge et konstant hydraulisk potensial på for eksempel 100 m ved grensene på et 102 meter høyt domene, vil det si at vannivået holdes konstant 100 meter over den definerte nullinjen og 2 meter under terrengoverflaten. At det hydrauliske potensialet  $h$  er konstant vil si at summen av stedshøyden  $z$  og trykkehøyden  $h_p$  er konstant, se ligning 3.7. Selv om vanntrykket øker med dypet, vil likevel det hydrauliske potensialet være konstant. Når grensebetingelsen er en spesifiserte  $h$ , blir det referert til som type en eller *Dirichlet* grensebetingelse (Singhal og Gupta, 2010). Det hydrauliske potensialet kan f.eks være et konstant vannnivå i et nærliggende tjern.

Når grensebetingelsen er en massestrøm eller fluks  $Q$  blir det referert til som type to eller *Neumann* grensebetingelse. En slik fluks grensebetingelse kan f.eks være nedbør. En hvis mengde vann vil da være spesifisert til å strømme normalt på over grensen. Mengden som strømmer vil være uniform, noe som vil si at den totale mengden som strømmer inn er lik

strømningshastigheten  $q$  ganger lengden av elementkanten. I SEEP/W vil vannstrømning inn i domenet være definert som positivt, mens strømning ut vil være negativt.

En annen type grensebetingelser er kilder eller dren, kalt type tre grensebetingelse (Geoslope international, Ltd, 2021). En kilde kan for eksempel være en injeksjonsbrønn, mens et dren kan være en tunnel. Grensebetingelsene representerer en strømning inn eller ut av systemet. Forskjellen er at denne typen grensebetingelser brukes inne i domenet, mens fluksgrensebetingelsene og det hydrauliske potensialbetingelsene brukes på randene av domenet.

For å representere innlekkasje i tunnel i de følgende modeller kan type tre grensebetingelsen benyttes. Det blir da definert et punkt i modellen som representerer tunnelen, der grensebetingelsen så blir påført. Grensebetingelsen på punktet representerer antall liter vann som lekker inn i tunnelen per meter for hele konturen. Ved å definere en konstant innlekkasje kan resultatene sammenlignes med målinger i felt, siden det er denne parameteren er den enkleste å måle. Resultatene kan så brukes til å sammenligne poretrykksreduksjonen i forhold til erfaringsdata. Alternativt til å definere en konstant innlekkasje kan ha vært å tegne opp geometrien til tunnelen der poretrykket er lik 0kPa, for så å sette en injeksjonsskjerm med en gitt hydraulisk konduktivitet rundt åpningen. Det antas da at alt vannet som strømmer inn kan bli ledet vekk, slik at trykk ikke bygger seg opp. Ved å sette opp tunnellinnlekkasjen på denne måten vil innlekkasjen i tunnelen bli redusert etter hvert som porevannstrykket overliggende tunnelen går ned. Dette ble ikke undersøkt videre da det er vanskelig i praksis å undersøke den hydrauliske konduktiviteten til injeksjonsskjermen.

Dersom ikke en grensene er blitt definert, antar SEEP/W at det ikke skjer noen grunnvannsstrømning ved den aktuelle grensen. Denne ikke-strømnings-grensebetingelsen benyttes ofte i bunnen av domenet. I tillegg kan den benyttes ved topografiske veilskiller og elver/bekkeløp. Selv om ingen fysiske barrierer eksisterer, vil et topografisk veiskille ha samme effekt som en impermeabel grense for vannskillet (Singhal og Gupta, 2010). Dette fordi ingen strømning vil krysser grensen, men strømme motsatt vei. Dette impliserer at for en vertikal ikke strømmende grense vil strømmingen i x-retning være lik 0 m/s. Implisitt vil det si at fluksen over grensen er lik 0 ( $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$ ).

På terrengoverflaten og toppen av domenet blir det ofte bli benyttet en drenasjegrensebetingelse. Denne grensebetingelsen blir brukt for å lokalisere de nodene som har et poretrykk over 0 kPa. Trykket kan ved disse aldri bli positivt, noe som vil si at vann må drenere bort dersom trykket overstiger dette nivået. For at programmet skal forstå dette vil trykkehøyden  $h_p$  bli satt lik stedshøyden  $z$ . Trykket vil da være lik 0 ved disse nodene.

I SEEP/W må potensielle flater som vann kan lekke ut fra bli kryssset av på som en egen grensebetingelse. Der vann lekker ut vil poretrykket være lik 0 kPa. Poretrykket på en slik grense vil ikke nødvendigvis være 0 kPa over alt, ettersom grunnvannsnivået noen steder ikke når opp til terrengoverflaten. Som følge vil programmet på slutten av hver iterasjon sjekke om den potensielle utstrømningsflaten følger de riktige kriteriene. Når første iterasjon er gjennomført og det hydrauliske potensialet er blitt regnet ut for alle nodene langs den potensielle innstrømningsflaten, vil SEEP/W sjekke om det er noen noder som har et positivt trykk. Det er ikke alle steder positivt trykk bør være lov, f.eks hellende overflateterrang. Programmet retter så for dette slik at overflødig vann renner av som overflateavrenning når denne grensebetingelsen blir brukt. Dersom den ikke blir brukt vil vann bygge seg opp på overflaten. Når en grense ikke er definert i SEEP/W antar programmet at fluksen  $Q = 0$ . Det vil si at verken noe vann kan eller vil strømme inn eller ut av domenet på denne lokasjonen. For at vannet skal få lov til å forlate domenet, forandrer SEEP/W grensen slik at det hydrauliske potensialet  $H$  vil være lik  $z$ -koordinaten slik at trykket blir lik 0. Etter siste iterasjon sjekker programmet om fluksen ut av domenet er positivt. Dersom den er det, forandrer SEEP/W grensen tilbake til den originale  $H$ -typen, for så å repetere analysen på nytt. Prosedyren blir så gjentatt for alle nodene slik at nodene enten har et trykk lik 0kPa, eller en fluks lik 0. Dette blir gjentatt for alle tidssteg i en transient analyse. Fluksen trenger nødvendigvis ikke bli satt lik 0 i programmet, da det kan være infiltrasjon eller evapotranspirasjon, men ofte blir det antatt at den er lik 0.

I SEEP/W må grensebetingelsene bli påført direkte på en geometri, enten et punkt, linje eller en region (Geoslope international, Ltd, 2021). Grensebetingelsene kan ikke påføres på et element eller en node. På den måten blir ikke nodegitteret påvirket ved å endre materialeegenskapene til domenet. Noen ganger vil det være lett å definere grensebetingelsene, mens andre ganger må grensebetingelsene bli funnet gjennom en iterativ prosess siden grensebetingelsene i seg selv er en del av løsningen. Spesielt der grensebetingelsene endres med tiden kan være vanskelig å modellere.



## **Kapittel 4**

# **Metode for modellering med SEEP/W**

### **4.1 SEEP/W**

GeoStudio international Ltd™ har utviklet det numeriske programmet SEEP/W. SEEP/W simulerer matematisk vannstrømningen gjennom et geologisk medium (Geoslope international, Ltd, 2021). Videre blir GeoStudio 2019 R2 (SEEP/W definition) benyttet. Strømningen blir kalkulert på bakgrunn av den hydrauliske konduktiviteten og det volumetriske vanninnholdet som en funksjon av poretrykket (Geoslope international, Ltd, 2021). SEEP/W er en kraftig kalkulator som numerisk regner ut vannfluksen eller trykkpotensiale i hver celle. Programmet bygger på endelig elementmetoden, der hele domenet blir delt opp i celler i et gridnett (Colleuille et al. 2004). Hvor stor disse cellene er kan i stor grad bli bestemt av brukeren etter ønske, men blir automatisk satt opp i SEEP/W.

Modellene i SEEP/W vil være konseptuelle modeller av virkeligheten som er numerisk forenklet for å representere den komplekse virkeligheten. Selv om det gjøres en rekke forenklinger, vil det fortsatt være nødvendig at modellen kan reprodusere systemets oppførsel for et realistisk resultat (Colleuille et al. 2004). Modellene bygger da på brukeren sin tolkning og oppfatning av de hydrologiske og geologiske forholdene (Colleuille et al. 2004). Resultatet vil da avhenge av brukerens forståelse av hvordan beregningene blir påvirket av de ulike inngangsparameterne og hvordan brukeren tolker de påfølgende resultatene.

Uavhengig av dimensjon benytter SEEP/W endelig element metoden og de samme

formelene (Geoslope international, Ltd, 2021). Konstruksjon av elementmatriser vil da innebære numerisk integrasjon over volumet av elementer. For elementer som ikke er tredimensjonale krever dette et areal og en ut av planet tykkelse. Ved beregninger i 2D vil standard elementtykkelse bli satt lik en enhetslengde (1,0). Variasjoner vinkelrett på snittene blir da ikke sett på.

Beregningene i SEEP/W bygger på kombinasjonen av massebevarelse og Darcys lov for både umettet og mettet strømming. For beregninger i SEEP/W 2D kan den generelle ligningen, som bygger på kombinasjonen av disse, skrives som følgende:

$$\frac{\delta}{\delta x} (K_x \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (K_y \frac{\delta h}{\delta y}) = \rho_w S_s \frac{\delta h}{\delta t} \quad (4.1)$$

Der

$K_x$  og  $K_y$  = Hydraulisk konduktivitet i henholdsvis x og y retning

$h$  = Hydraulisk potensial

$\rho_w$  = Tetthet vann

$S_s$  = spesifikk magasinkoeffisient

$t$  = Tid

For modellering med SEEP/W antas det at grunnforholdene er homogene og isotrope (SVV, 2001). Det vil si at berggrunnen og løsmassene blir sett på som et kontinuum, der sprekker, lagdeling og andre inhomogeniteter blir sett bort i fra. Hvert materiale får da tildelt en gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet som er lik i alle retninger. Ved å anta dette kan ligning 4.1 skrives om til:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = \rho_w S_s \frac{\delta h}{\delta t} \quad (4.2)$$

## 4.2 Generell fremgangsmåte

Følgende prosedyre blir benyttet for å modellere den endrede grunnvannsstrømmingen som følge av innlekkasje i tunnel med endelig element metoden i SEEP/W 2D (Geoslope international, Ltd, 2021; Colleuille et al. 2004):

- Definere problemstillingen.
- Utvikle en konseptuell modell.
- Produser og bygge opp den numeriske modellen;
  - Valg av geometri og diskretisering.
  - Valg av materialparametere, grensebetingelser og poretrykk.

- Bestemme strømningsanalyse; Transient eller stasjonær strømming.
- Verifisere og kalibrer den foreløbige modellen før tunnelinnlekkasjen.
- Simulere effekten av mulige innlekkasjemengder til tunnel.
- Utføre følsomhetsanalyse av enkelte parametere.
- Analyser og presenter resultatene.

Parameteranalysen går ut på å variere enkelte parametere mens de andre holdes konstant slik at effekten av den enkelte parameter kan bli studert. Det kan da studeres hvordan de ulike variablene er knyttet sammen slik at årsak - forløp/effektforholdet kan studeres (Elger et al. 2013). Nøyaktigheten til modellen kan også studeres ved å studere sammenhengen mellom designvariablene og ytelsesvariablene. Designvariablene vil være de variabelene som brukeren kan velge, slik som dimensjon og hydraulisk konduktivitet, mens ytelsesvariablene er de variablene som avhenger av designvariablene, slik som strømningshastigheten.

Materialeegenskapene kan bli definert på bakgrunn av felt- og laboratoriumsmålinger eller på bakgrunn av empiriske metoder og erfaringer.

I en tidelig fase i prosjektet kan det være lurt å starte med et estimat av materialeegenskapene. Dette vil hjelpe til med å øke forståelsen av strømmingen i problemet og for å undersøke om modellen har blitt satt opp riktig (Geoslope international, Ltd, 2021). Vanligvis vil en slik estimering være mer enn bra nok for å bestemme viktigheten av de varierende egenskapene i situasjonen som blir modellert.

Ved å først gjøre en tilnærming kan viktige egenskaper og parametere bli avdekket, slik at tid og penger kan bli brukt på å estimere de viktigste parameterne.

Området som senere skal modelleres blir så diskretisert inn i et trekantet og firkantet nodenettverk med elementstørrelse på 5 m. Statistikken over nodene brukt i modellen vil ikke bli nevnt i videre detalj.

Resultatet av modelleringen kan presenteres på ulike måter, der konturplott ofte blir benyttet. Når SEEP/W simulerer en gitt hendelse vil den løse elementmatrisen for en hver node. Når dataene skal presenteres vil det bli tatt et gjennomsnitt fra resultatene av hver node slik at grafer og konturplott kan tegnes opp (Geoslope international, Ltd, 2021). Dersom det er store forskjeller fra node til node, vil dette kunne gi urealistiske verdier. I de aller fleste tilfeller vil konturplottene være realistiske. Konturplottene vil da være del opp i ulike seksjoner. Størrelsen på intervallene blir satt opp automatisk i SEEP/W, men kan bli endret av brukeren etter ønske. Blant annet kan det hydrauliske potensialet  $h$ , poretrykket  $u$  eller  $XX$  bli plottet i konturplottene. Når *Total head*

konturplottet studeres vil det tilvare ekvipotensiallinjene.

I tillegg til konturplott er det innebygd flere funksjoner i SEEP/W til hjelp for å presentere resultatet. Blant annet kan strømningslinjene fra valgte lokasjoner bli presentert. Disse vil da være vinkelrett på ekvipotensiallinjene. I SEEP/W kan grunnvannsnivået bli presentert ved å legge inn en isolinje på et poretrykk på 0kPa. Under denne linjen vil poretrykket være positivt, over vil det være negativt. Selv om poretrykket er negativt i den umettede sonen, kan det fortsatt være grunnvannsstrømning der. Vektorene kan da benyttes til å indikere strømmingen i denne sonen. Disse vil kunne vise retningen og hastigheten på en vannpartikkel i domenet (Geoslope international, Ltd, 2021). De lengste vektorene vil da indikere den raskeste strømmingen, mens de mindre vektorene vil blir sett i forhold til den største. Siden det kan være strømning i den umettede sonene, er det viktig å være klar over at poretrykkslinjen ikke er en strømningslinje, men kun en linje som viser trykket.

# Kapittel 5

## Beregningseksempel

### 5.1 Hensikt

Hensikten med det forenklede beregningseksempel er å studere hvilke parametere som ved numerisk grunnvannsmodellering har innvirkning på poretrykket når vann lekker inn i en tenkt tunnel. Beregningseksempellet består av tre lag: leire, morene og berg. Poretrykket i bunnen av leiren i overgangen til morene/fjell er viktig å studere fordi en poretrykksreduksjon i dette laget kan være en medvirkende årsak til setninger i leiren over (Emdal et al. 2018). Parameterstudiet vil være med på å belyse de mest usikre parameterene ved modellering i SEEP/W. Følgende endringer av inngangsparametere har blitt studert;

- Ulike innlekkasjemengder til tunnel
- Med og uten nedbør
- Ulike domenestørrelser
- Med og uten morene mellom leirlaget og bergmassen
- Ulike hydrauliske konduktiviteter på bergmassen

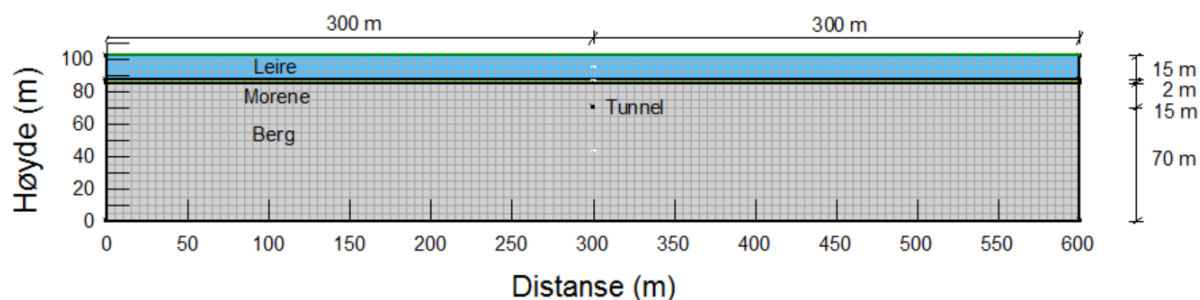
Hensikten med beregningseksempellet er også å studere om resultatene av modelleringen er realistiske forhold til erfaringsdata fra forskningsprosjektet ”Miljø og samfunnstjenlige tunneler” (SVV, 2003).

## 5.2 Metode for sensitivitetsanalyse

Den numeriske modelleringen følger den generelle metoden beskrevet i kapittel 4.2. For å undersøke effekten av de ulike parametrene ble følgende fremgangsmåte utført.

1. Geometrien, materialeegenskapene, grensebetingelsene og diskretiseringen ble først bestemt for det 600 m x 102 m store domenet.
2. Modellen ble så kjørt for å undersøke at de initielle betingelsene stemte.
3. Et punkt ble deretter lagt til midt i modellen ved  $d = 300$  m og  $z = 70$  m for å representere innlekkasjen i tunnelen. Det ble definert følgende fluks-grensebetingelser på punktet;  $Q = 3, 5, 10$  og  $20$  l/min/100m. For hver endring i grensebetingelsene ble poretrykket for stasjonære forhold lest av rett over og til siden for tunnelen i overgangen mellom leire og morene/fjell. I tillegg ble mengden vann som infiltrerte inn fra sidene i domenet studert.
4. Videre ble effekten av nedbør undersøkt ved å legge til nedbør som en grensebetingelse på overflaten. Punkt 3 ble så gjentatt.
5. Hvordan poretrykket ble påvirket av ulike domenestørrelser ble så studert ved å endre lengden på domenet til hhv.  $d = 400, 600, 800$  og  $1600$  m. Tunnelen var lokalisert midt i domenet.
6. Morenelaget ble deretter erstattet med berg i modellen, før punkt 3 og 4 ble gjentatt for det 600 m store domenet.
7. Den hydrauliske konduktiviteten til bergmassen ble så endret til først  $K = 10^{-6} m/s$  og så  $K = 10^{-8} m/s$  for å studere effekten på poretrykket og mengden vann som strømmet inn fra sidene.
8. Punkt 3 og 4 ble til slutt gjentatt, men for transiente forhold. Det ble valgt en eksponentiell utvikling med 10 tidssteg, der det første steget var etter 1 døgn og det siste var etter 100 døgn.

Figurer fra rapport nr. 103 i forskningsprosjektet «Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø» oppgir poretrykksreduksjonen i bunnen av leiren som et trykkehøydetap (m) og ikke som et poretrykk (kPa) (SVV, 2003). Resultatet fra modelleringer av beregningseksempelet vil derfor bli oppgitt som en trykkehøyde, se ligning 3.7.



**Figur 5.1:** Geometrien til modelldomenet til beregningseksempelet med 5 m mesh

### 5.3 Inngangsparametre

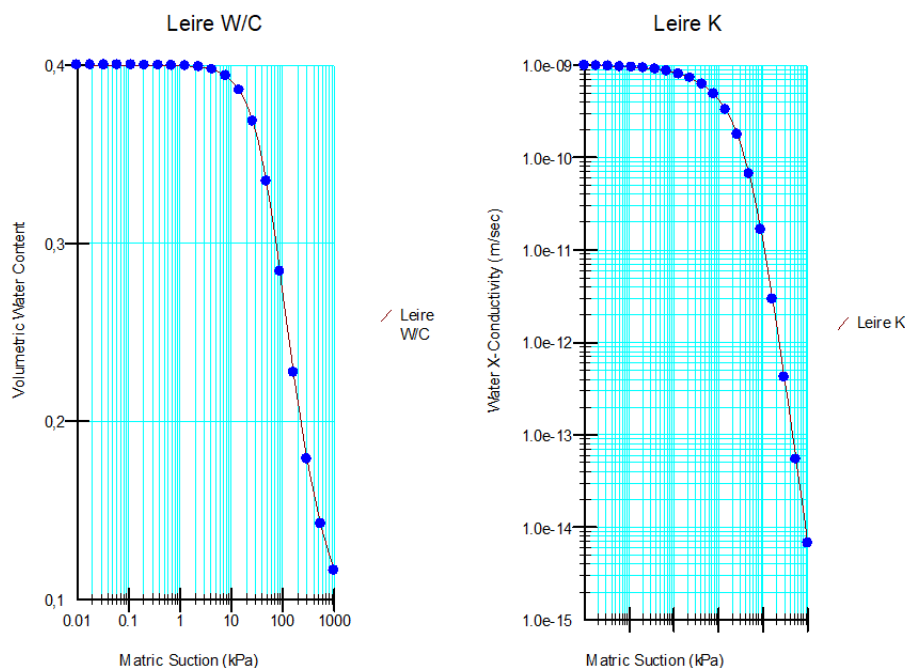
Den stratigrafiske lagdelingen til beregningseksempelet bygger på et typisk setningsutsatt området, se figur 5.1. Det mulige setningutsatte området konseptualisert i modellen bygger på en større eller mindre mektighet med leire over bergmassen, der et grovere lag med morene ligger mellom leiren og bergmassen. For beregningseksempelet er mektigheten til morenelaget og leirlaget satt til hhv. 2 m og 15 m, mens mektigheten til bergmassen har blitt satt til 85 m. I utgangspunktet har domenestørrelsen blitt satt til å være 600 m i x-retning og tilsammen 102 m i z-retning. Innlekkasjen i tunnelen blir representert som et punkt lokalisert midt i domenet i x-retning og 70 m over den definerte nullinjen, altså 32 m under terrengoverflaten.

De valgte materialparametrene er oppsummert i tabell 5.1. Initielt vil grunnvannsnivået stå et par meter under terrengoverflaten i leiren. Grunnvannsstrømningen vil da foregå både i den umettede og mettede delen av avsetningen. Den hydrauliske konduktiviteten vil derfor være en funksjon av hvor vannmettet porene er, se kapittel 3.1.4. Det har av den grunn blitt satt opp et grovt anslag for en vanninnholdsfunksjon og en hydraulisk funksjon, se figur 5.2. Residualvanninnholdet for konduktivitetfunksjonene har blitt satt lik 0,05. Ettersom det ikke er mulig å velge eksempelfunksjoner for morene og bergmassen har det blitt antatt en konstant hydraulisk konduktivitet for disse. Det vil si at det er antatt at disse mektighetene er fullstendig vannmettet for videre modellering.

**Tabell 5.1:** Materialelegenskaper benyttet til beregningseksempelet

	Hydraulisk konduktivitet $k$ [m/s]	Kompressibilitet $m_v$ [-]	Vanninnhold $W_e$	Materialmodell
<b>Leire</b>	$1 * 10^{-9}$	$1 * 10^{-5}$	0,4	Mettet/umettet
<b>Morene</b>	$1 * 10^{-6}$	$1 * 10^{-7}$	0,3	Mettet
<b>Berg</b>	$1 * 10^{-7}$	0	0,001	Mettet

Følgende grensebetingelser ble brukt i beregningseksempelet.



**Figur 5.2:** Vanninnholdsfunksjon og hydraulisk konduktivitetsfunksjon til leire

- Konstant hydraulisk potensial lik 100 m på grensene til høyere og venstre i modellen.
- En fluksgrense på tunnelkonturen som representerer innlekkasjen
- Nedbør ble representert som en fluksgrense på terrengoverflaten.
- På bunnen av modellen ble det ikke satt en grense. Dette tilsvarte en ikke-strømningsgrense, som impliserer at verken noe vann siver inn eller ut av domenet gjennom denne grensen.

De ytre grensebetingelsene av doment til høyere og venstre i figur 5.1 har blitt gitt en konstant hydraulisk potensial lik 100 m. At det hydrauliske potensialet er lik 100 m, vil si at grunnvannsnivået ligger i dette tilfellet to meter under terrengoverflaten og 100 m over den definerte nullinjen. Det hydrauliske potensialet vil være konstant på sidene, noe som impliserer at tilstrekkelig vann infiltrerer inn på sidene for å opprettholde vannivået for tunnelinnlekkasjen.

Innlekkasjen i tunnelen har blitt definert som et punkt med ulike fluks-grensebetingelser. De ulike fluksmengende representerer innlekkasjemengden i tunnelen og kan studeres i tabell 5.2. I SEEP/W er det ikke mulig å legge inn innlekkasjemengden som l/min/100 m og den må derfor skrives om til  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Minustegnet indikerer at strømmingen går ut av domenet.

I SEEP/W kan nedbør bli definert som en vannfluks-grensebetingelse på overflaten. Leiren har ikke større kapasitet til å ta opp mer nedbør enn den mettede hydrauliske konduktiviteten til leiren (K



**Tabell 5.2:** Innlekkasjemengder Q

Q	Innsatt Q i programmet
3 l/min/100m	$-5,00 * 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
5 l/min/100m	$-8,33 * 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
10 l/min/100m	$-1,67 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
20 l/min/100m	$-3,33 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

=  $1 * 10^{-9}$  m/s) og av den grunn settes nedbørsfluksen lik  $1 * 10^{-9}$  m/s (Geoslope international, Ltd, 2021). En så lav infiltrasjon tilsvarer 31,5 mm/år. Dersom det er antas at 20% av avrenningen går til infiltrasjon, tilsvarer det en årlig avrenning på 157,5 mm/år. Om det videre antas at at omtrent 50% av nedbøren går til avrenning, vil det si at nedbørsfluksen kan tilsvare en nedbør på 315 mm/år. Til sammenligning er den gjennomsnittlige årlige nedbøren i Norge 1400 mm/år, mens for jordbruksstrøkene er det vanligere med 500 til 1000 mm/år (Dannevig og Harstveit, 2021). Når grensebetingelse med nedbør blir benyttet i SEEP/W krysses det av på ”*Potential seepage face review*”, som vil si at vann som ikke trenger ned i grunnen vil renne av som overflateavrenning. Dersom dette ikke hadde blitt krysset av på vil vann bygge seg opp på overflaten, noe som vil kunne gi et høyere vanntrykk enn det som er realistisk.

Diskretiseringen av domenet har blitt satt til en størrelse på de globale elementene på tilnærmet 5 m. Elementnettet ble satt opp automatisk i SEEP/W og kan studeres i figur 5.1. Det ble benyttet firkanter og trekanten til å sette opp nodenettet, men for beregningseksemplet ble de fleste elementene firkantede med en elementstørrelse på 5 m. For det 600 m x 102 m stort domenet ble det tilsammen 2 662 noder og 2 520 elementer i modellen.

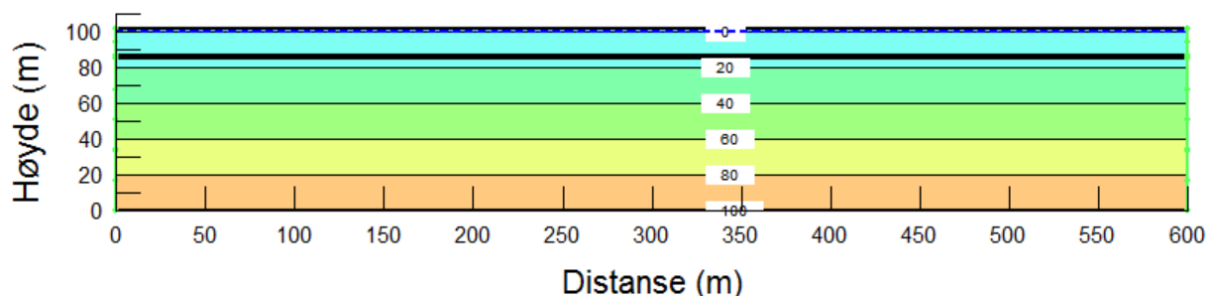
Dersom annet ikke er nevnt, benyttes det forhåndsinnstilte parametere i SEEP/W. Det generelle utgangspunktet for alle modellene er et 600 m stort domene, med morene, uten nedbør og en hydraulisk konduktivitet på bergmassen på  $1 * 10^{-7}$  m/s.

## 5.4 Resultat og diskusjon av resultat

### 5.4.1 Initielle forhold

Trykkehøyden målt i bunnen av leirlaget kan for initielle forhold studeres i figur 5.3. Figuren illustrerer den initielle tilstanden til beregningseksemplet før innlekkasje i tunnelen. Den blå stiplede linjen er plottet for en trykkehøyde på 0 m og representerer grunnvannsnivået. Det definerte konstante hydrauliske potensialet gjør som ventet at grunnvannsnivået ligger 2 meter

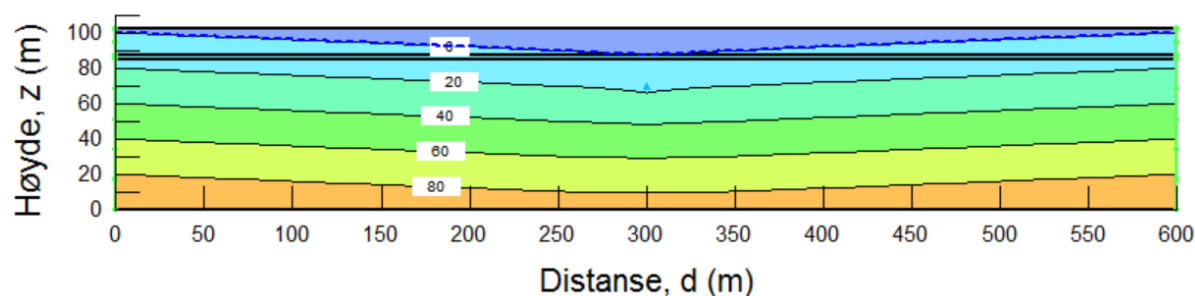
under terrengoverflaten. Det kan videre observeres at trykket øker hydrostatisk mot dypet.



**Figur 5.3:** Konturplott av trykkhøyden (m) før innlekkasjen blir definert.

#### 5.4.2 Trykkhøyde ved ulike innlekkasjemengder

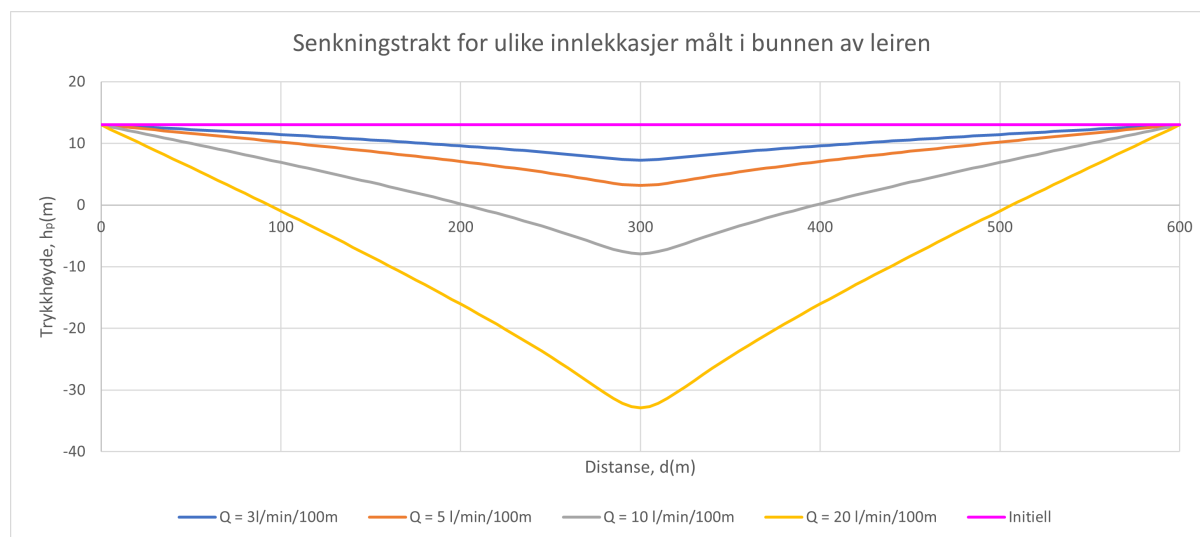
Figur 5.4 viser hvordan en innlekkasje på 5 l/min/100m reduserer trykkhøyden forhold til den initielle tilstanden i figur 5.3 ved stasjonære forhold. Figuren viser hvordan grunnvannsnivået, representert ved den blå isolinjen, blir redusert nesten til bunnen av leirlaget. Trykkhøyden blir da redusert med 12,3 m rett over tunnelen i bunnen av leirlaget. Merk at i realiteten vil det kunne ta flere år før denne likevekten oppnås, se figur 2.2 i kapittel 2.1 (SVV, 2003). I vedlegg A.1 kan trykkhøyden for ulike innlekkasjer studeres.



**Figur 5.4:** Konturfigur over trykkhøyden  $h_p$  ved en innlekkasje på 5 l/min/100m.

Beregningene viser at en større innlekkasjemengde fører til en større reduksjon i trykkhøyden over og tilsiden for tunnelen, se figur 5.5. For stasjonære forhold illustrerer figuren senkningstrakten som oppstår som følge av innlekkasje til tunnelen. Trykkhøyden  $h_p$  har blitt lest av i overgangen mellom morene og leire fra tunnelen og ut til begge sidene av domenet. Ved initielle forhold ligger trykkhøyden på konstant 13 m som følge av de fastsatte grensebetingelsene. Når vann så lekker inn i tunnelen blir trykknivået rundt tunnelen redusert. Det kan observeres at den største trykkhøydesenkningen er rett over tunnelen før den tilnærmet

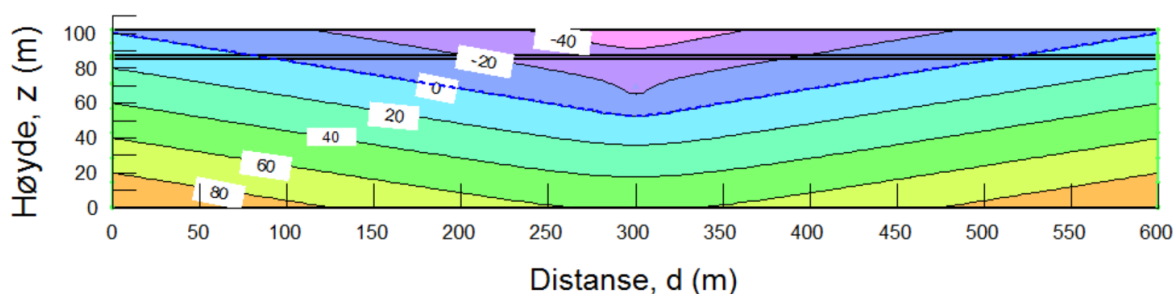
lineært stiger ut mot kantene av modellen. Merk at modellen er satt opp som et symmetrisk problem, der trykkhøyden reduseres like mye på hver side av tunnelen som er plassert ved  $d = 300$  m.



**Figur 5.5:** Trykkehøyden målt i leirlaget over tunnelen før og etter ulike innlekkasjer

For beregningseksemplet viser figur 5.5 at trykkehøyden  $h_p$  blir urealistisk for store innlekkasjer. Trykkehøyden i bunnen av leirlaget vil ikke kunne bli redusert med mer enn 13 m og vil i realiteten alltid være positiv. Dette fordi innlekkasjen naturlig vil stoppe opp når trykkehøyden blir 0 m. Når trykkehøyden når dette nivået har grunnvannsnivået sunket ned til tunnelkonturen slik at det ikke er mer vann som kan lekke inn i tunnelen. Slik som innlekkasjen er definert i SEEP/W vil ikke innlekkasjen til tunnel stoppe opp når grunnvannsnivået reduseres til tunnelkonturen, men fortsette på en konstant rate. Som følge av innlekkasjen vil poretrykket fra tunneldypet over tid blitt redusert helt opp til overflaten, noe som skaper et kraftig negativt sug på overflaten.

Beregningseksemplet viser at grunnvannsnivået synker under tunnelkonturen for innlekkasjene på 10 og 20 l/min/100m. Dette kan blant annet studeres i figur 5.6. Årsaken er på grunn av de fastsatte grensebetingelsene, der innlekkasjemengden  $Q$  er satt som konstant. Den definerte konstante innlekkasjemengden vil få tunnelpunktet til å virke som en "pumpe". Vann vil bli trukket ut fra sidene og under tunnelen for å opprettholde mengden vann som blir trukket ut av modellen. For større innlekkasjer vil dette være med på å skape et stort sug og et negativt trykk rundt tunnelen. Negative verdier der trykkehøyden blir redusert under 0 m kan derfor sees bort i fra. Selv om trykkehøydemålingene ikke kan fysisk bli redusert med mer enn 13 m for det gjeldende eksemplet er de likevel tatt med for å illustrerer effekten av de ulike innlekkasjemengdene i modellen.



**Figur 5.6:** Konturkart over trykkehøyden  $h_p$  når innlekkasjen er 20 l/min/100m. Merk at grunnvannsnivået synker under tunnelkonturen og gir urealistiske resultater

Det kan observeres fra figur 5.5 at senkningstrakten er tilnærmet lineær fra bunnen av modellen og ut til kantene for de ulike innlekkasjemengdene. Helningen på kurvene er gitt fra den hydrauliske gradienten  $i$  fra Darcys lov, ligning 3.8, som er gitt som  $Q = K * A * i$ . Når det kun er en variasjon i innlekkasjemengde  $Q$  som blir studert, vil den hydrauliske konduktiviteten  $K$  og innstrømstrømningsarealet  $A$  være konstant. Som følger vil innlekkasjemengden  $Q$  være en funksjon av den hydrauliske gradienten  $i$ . Både figur 5.5 og tabell 5.3 viser at en dobling av  $Q$  fører til en dobling av  $i$ . Ligning 3.4 viser at den hydrauliske gradienten er gitt som  $i = -dh/dl$ . Ettersom avstanden fra tunnelen ut til kanten av domenet  $dl$  er satt som konstant, vil den hydrauliske gradienten  $i$  være proporsjonal med endringen i trykkehøyden  $dh$ . Som følger vil også innlekkasjemengden  $Q$  være proporsjonal med endringen i trykkehøyde.

**Tabell 5.3:** Avleste og beregnede parametere fra SEEP/W rett over tunnelen i overgangen mellom leire og morene for ulike innlekkasjemengder.

Innlekkasje $Q$	Avlest trykkehøyde $h_p$	Endring i trykkehøyde $dh_p$	Hydraulisk gradient $i$
3 l/min/100m	5,6 m	7,4 m	0,02
5 l/min/100m	0,7 m	12,3 m	0,04
10 l/min/100m	-11,5 m*	24,5 m*	0,08
20 l/min/100m	-36,0 m*	49,0 m*	0,16

\*=Maksimal trykkehøyde overskredet

### 5.4.3 Innstrømning av vann i modellen ved grensene

For stasjonære forhold vil det på grunn av massebevaringsprinsippet strømme like mye vann inn i modellen som det som lekker ut til tunnelen. Vannet vil strømme inn fra sidene i modellen på grunn av det konstante hydrauliske potensialet på 100 m definert på grensene. For at dette nivået skal være opprettholdt ved innlekkasje til tunnel må derfor vann strømme inn. Dersom

innlekkasjemengdene på hhv. 3, 5, 10 og 20 l/min/100m blir gjort om til mm/år vil hhv. 7884, 13140, 26280 og 52559 mm/år totalt infiltrere inn i domenet uavhengig av hva den hydrauliske konduktiviteten er. Dette vil tilsvare en infiltrasjon fra sidene som mye høyere enn det som er forventet av nedbør og avrenning for Norge (Dannevig og Harstveit, 2021).

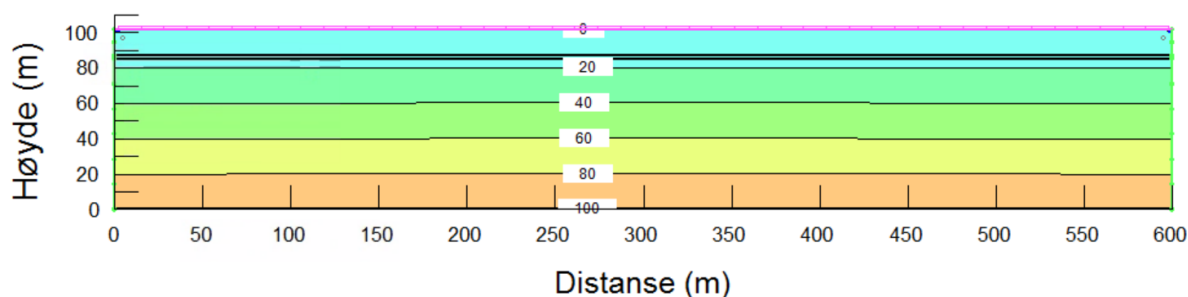
Selv om den totale vannmengden fra sidene er konstant, vil ikke nødvendigvis like mye vann strømme inn fra hvert stratigrafisk lag. Tabell 5.4 oppsummerer hvilke lag vannet strømmer inn fra slik at den totale vannbalansen blir opprettholdt ved de ulike innlekkasjemengdene. Hvilket lag vannet strømmer inn i, avhenger av den hydrauliske konduktiviteten til det geologiske mediumet og innstrømningsarealet, se Darcys lov ligning 3.8,  $Q = K * A * i$  (Brattli, 2018). Den lave hydrauliske konduktiviteten til leiren på  $10^{-9}$  m/s gjør at tilnærmet 0% strømmer inn i leiren. Derimot vil nesten 20% strømme inn i morenelaget på grunn av den høyere hydrauliske konduktiviteten på  $10^{-6}$  m/s. Selv om bergmassen har en lavere hydraulisk konduktivitet enn morenen ( $10^{-7}$  m/s) vil over 80% av vannet infiltrere inn gjennom berglaget. Årsaken er at bergmassen er 85 m tykk mot det 2 meter tykke morenelaget. Innstrømningsarealet blir da mye større for bergmassen. Selv med økende innlekkasjemengde viser beregninger at den prosentvise infiltrasjonsmengden vil være lik for de ulike stratigrafiske lagene.

**Tabell 5.4:** Tabell over beregnede infiltrasjonsmengder gjennom ulike geologiske lag ved innlekkasje til tunnel på  $Q = 3, 5, 10$  og  $20$  l/min/100m.

Stratigrafisk lag	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 3$ l/min/100m [l/min/100m]	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 5$ l/min/100m [l/min/100m]	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 10$ l/min/100m [l/min/100m]	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 20$ l/min/100m [l/min/100m]	Prosentvis infiltrering
Leire	0,00	0,00	0,00	0,01	0,0 %
Morene	0,57	0,95	1,90	3,80	19,0 %
Berg	2,43	4,05	8,09	16,19	80,9 %
Totalt	3,00	5,00	10,00	20,00	100,0 %

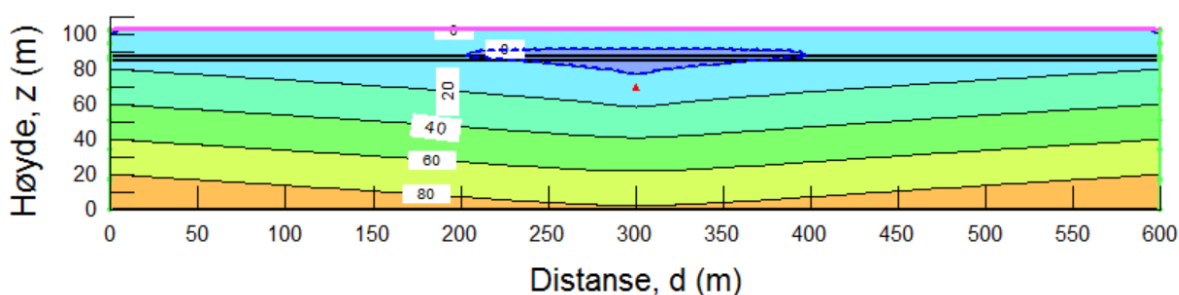
#### 5.4.4 Nedbør

Nedbør kan bli lagt til i domenet ved å legge til en vannfluks som grensebetingelse på overflaten. Som følge av nedbøren vil grunnvannsnivået stige opp til terrengoverflaten på beregningseksempelet, se figur 5.7. Dette fordi leiren har for lav hydraulisk konduktivitet til at mer enn  $10^{-9}$  m/s kan infiltrere ned i leiren. Grunnvannivået er blitt beregnet til å ligge opp mot terrengoverflaten, utenom på sidene der den konstante grensebetingelsen gjør at nivået ligger 2 meter under overflaten. Fra overflaten og nedover, utenom på kantene, vil vanntrykket stige hydrostatisk mot dypet ved initielle forhold.



**Figur 5.7:** Beregnet trykkehøyde for initielle forhold med nedbør ved stasjonær strømning.

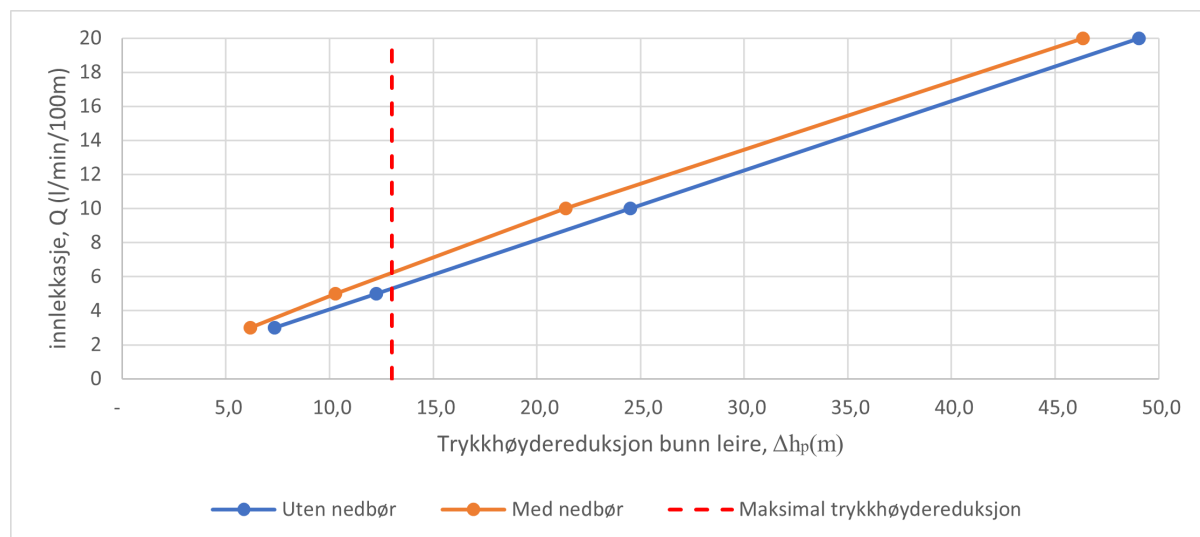
Resultat fra modelleringen ved ulike innlekkasjemengder viser at grunnvannsnivået ved overflaten blir opprettholdt uavhengig av innlekkasjen når det er nedbør. Dette stemmer også med teoretiske betraktninger og målinger fra tidligere tunnelanlegg (SVV, 2003). Den lave hydrauliske konduktiviteten til leiren gjør at nedbør bidrar til at leirformasjonen hele tiden er mettet og at grunnvannsnivået står ved terrengoverflaten. På nedsiden av leiravsetningen vil vannet strømme inn i lagene med høyere hydraulisk konduktivitet og bidra til å balansere ut innlekkasjen til tunnel. Figur 5.8 viser hvordan trykkehøyden blir opprettholdt på terrengoverflaten ved en innlekkasje på 10 l/min/100m ved nedbør, men at det på grunn av "pumpe-effekten" og den lave hydrauliske konduktiviteten til leiren blir et sug i bunnen av avsetningen. Det vil da bli en negativ trykkehøyde på oversiden av tunnelen, men på grunn av infiltrasjon fra nedbør vil ikke det negative trykket gå helt opp til overflaten. Det vil da oppstå en likevekt mellom infiltrasjon fra overflaten, innstrømmende vannmengde fra sidene av domenet og vann som lekker inn i tunnelen.



**Figur 5.8:** Beregnet trykkehøyde for en innlekkasje på 10 l/min/100m med nedbør. Merk området med det negative trykket på oversiden av tunnelen.

Figur 5.9 illustrerer hvordan trykkehøyden målt i bunnen av leirlaget blir redusert som følge av innlekkasje til tunnel både med og uten nedbør. Trykkehøyden har da blitt lest av rett over

tunnelen ( $d = 300\text{m}$ ) i bunnen av leirlaget for stasjonær strømning. Selv om trykkehøydereduksjoner over 13 meter gir urealistiske resultater, er de likevel tatt med i figuren for å illustrere hvordan trykkehøyden tilnærmet lineært reduseres ved økende innlekkasjemengder. Dette gjelder både med og uten nedbør.



**Figur 5.9:** Poretryksreduksjonen for ulike innlekkasjemengder med og uten nedbør

Figur 5.9 viser også at trykkehøyden rett over tunnelen i bunnen av leirlaget ikke blir redusert med mer enn 1-3 meter når nedbør blir lagt til som grensebetingelse på terrengoverflaten. Den påførte vannfluksen, som tilsvarer en infiltrasjon på  $31,5 \text{ mm/år}$ , vil være den maksimale mengden vann som kan trenge inn i den lavpermeable leiren til enhver tid. Vannet vil infiltrere ned gjennom leiren over hele domenet, noe som bidrar til at poretrykket ikke blir like mye redusert. Forskjellen med og uten nedbør er likevel relativt liten. En mulig årsak er fordi den lave hydrauliske konduktiviteten til leiren gjør at kun små mengder vann infiltrerer igjennom. Opprettholdelse av trykkehøyden vil derfor i stor grad avhenge innstrømningen fra siden i lagene med høyere hydraulisk konduktivitet.

Nedbør vil påvirke mengden vann som infiltrer inn gjennom sidene av domenet slik at vannbalansen er bevart for stasjonære forhold. Tabell 5.5 oppsummerer mengden vann som strømmer inn gjennom de ulike stratigrafiske lagene som følge av ulike innlekkasjer til tunnel med nedbør. Det kan observeres at vann vil sive ut fra leirlaget (negativ vannmengde) slik at trykspotensialet ikke overstiger de definerte grensebetingelsene. Lengre ned i domenet vil derimot morenen og bergmassen få tilført vann for å opprettholde det hydrauliske potensialet. Sammenlignet med tabell 5.4 vil nedbør i domenet følgelig gjøre at mindre vann infiltrerer inn gjennom de stratigrafiske lagene fra sidene. Den totale mengden vann inn i domenet vil derfor

fordele seg annerledes. Spesielt mengden vann som infiltrerer inn gjennom morenelaget blir omtrent halvvert når det er nedbør i domenet (avhengig av innlekkasjemengden). Det kan også observeres at desto større innlekkasjen er, desto mer vann fra nedbøren vil infiltrere ned til tunnelen. Økt innlekkasje skaper en høyere negativ trykkehøyde, noe som gjør at mer av nedbøren med et høyere trykspotensial kan infiltrere ned i avsetningen.

**Tabell 5.5:** Tabell over beregnede infiltrasjonsmengder gjennom ulike geologiske lag ved innlekkasje til tunnel på  $Q = 3, 5, 10$  og  $20$  l/min/100m med nedbør.

Stratigrafisk lag	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 3$ l/min/100m [l/min/100m]	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 5$ l/min/100m [l/min/100m]	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 10$ l/min/100m [l/min/100m]	Infiltrert vann ved innlekkasje på $Q = 20$ l/min/100m [l/min/100m]
Leire	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01
Morene	0,39	0,71	1,60	3,69
Berg	1,53	2,75	6,03	13,81
Nedbør	1,10	1,56	2,39	2,51
Totalt	3,00	5,00	10,00	20,00

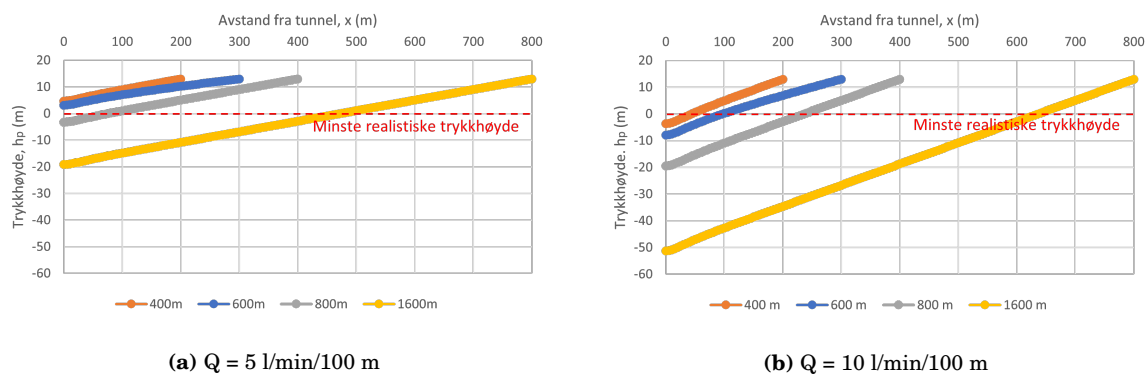
### 5.4.5 Domenestørrelse

For å undersøke hvordan domenestørrelsen påvirke trykkehøyden har det blitt valgt å studere 4 forskjellige størrelse for en innlekkasje på 5 og 10 l/min/100m, se figur 5.10. Trykkehøyden har blitt lest av i bunnen av leiren rett over tunnelen og ut til kanten av modellen. Ved å kun endre størrelsen på domenet i x-retning, vil innstrømningsarealet  $A$  og den hydrauliske konduktiviteten  $K$  fortsatt være konstant for en gitt innlekkasje, se Darcys lov  $Q = K * A * i$ . Ettersom innlekkasjen  $Q$  er satt som konstant, vil det for en gitt innlekkasje være en konstant hydraulisk gradient  $i$ . Dette stemmer også med observasjoner fra figur 5.10 som viser at den hydrauliske gradienten  $i$  er konstant uavhengig av domenestørrelsen.

Den hydrauliske gradienten er gitt som  $i = dh/dl$  (Brattli, 2018). For at  $i$  skal være konstant når domenestørrelsen  $dl$  øker, vil derfor reduksjonen i trykkehøyde  $dh$  øke tilsvarende mye. En økning av domenestørrelsen vil av den grunn føre til et høyere trykktap enn ved mindre domenestørrelser. Avstanden fra tunnelen til kantene av modellen vil derfor være en viktig faktor ved modellering av grunnvannsstrømning. Merk at trykkehøyde under 0 m vil gi urealistiske resultater. Figur 5.10a og figur 5.10b illustrerer også som beskrevet i kapittel 5.4.2, at gradienten til kurvene doubler seg med en dobling av innlekkasjemengde.

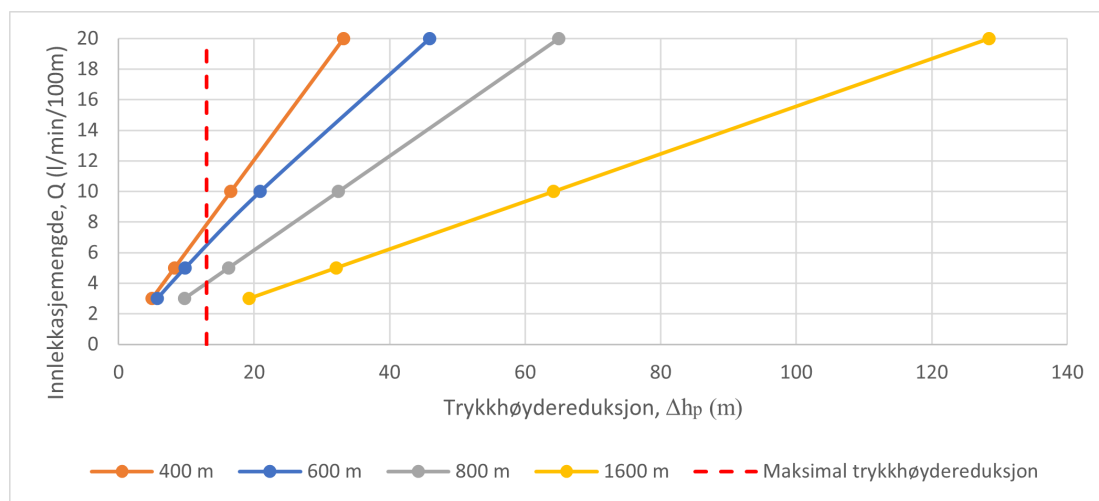
Effekten på trykkehøyden ved ulike innlekkasjemengder kan også studeres i figur 5.11.





**Figur 5.10:** Variasjon i senkningstrakt i en retning som følge av ulikt domenestørrelse for  $Q = 3$  og  $5$  l/min/100m for stasjonære forhold. Trykkehøyden vil i realiteten ikke synke mer enn minste realistiske trykkehøyde på 0 m.

Trykkehøyden har blitt lest av rett over tunnelen i overgangen mellom leire og morene for stasjonære forhold. Det kan observeres at en større domenestørrelse og en høyere innlekkasje vil føre til en betydelig trykkehøydereduksjon i bunnen av leiren for stasjonære forhold. En dobling av domenestørrelsen  $dl$  vil gi en dobling av trykkehøydetapet  $dh$  for en gitt innlekkasje. Merk at alle beregninger som gir et trykkehøydetap over 13 m vil være urealistisk på bakgrunn av at tunnelen pumpes tørr over dette nivået. Figurene er likevel tatt med for å illustrere hvordan domenestørrelsen påvirker beregningene i SEEP/W.



**Figur 5.11:** Trykkehøydereduksjonen  $\Delta h_p$  vs. Innlekkasjemengde  $Q$  for ulike domenestørrelser

For å undersøke om trykkehøydereduksjonen for en gitt innlekkasje er realistisk i forhold til erfaringsdata kan figur 5.10a sammenlignes med figur 2.2 (SVV, 2003). Fra figur 5.10a har trykkehøyden blitt lest av for hver 50 m i en avstand fra tunnelen for de 4 ulike domenestørrelsene

når innlekkasjen er 5 l/min/100m. Målingene har blitt lest av i bunnen av leirlaget og kun trykkehøydereduksjoner under 13 m har blitt tatt med, se figur 5.12. Figuren illustrerer hvordan domenestørrelsen påvirker trykkehøydereduksjonen og hvordan dette er i forhold til erfaringsdataene. Det kan observeres at en for stor domenestørrelse vil gi urealistisk store trykkehøydereduksjoner i forhold til erfaringsdataene for beregningseksempelet. I dette tilfellet vil en domenestørrelse på 400 eller 600 m gi et mer realistisk bilde på trykkehøydereduksjonen. Erfaringer fra publikasjon 103 viste at det var forventet med en trykkehøydereduksjon på omtrent 2 m per 100 m avstand fra tunnelen (SVV, 2003). En domenestørrelse på 600 m, tilsvarende 300 m fra tunnelen og ut til kanten, vil kunne gi en trykkehøydereduksjon på 6 m rett over tunnelen i følge Karlsrud. Fra beregningseksempelet vil den samme domenestørrelsen gi en trykkehøydereduksjon på omtrent 10 m for en innlekkasje på 5 l/min/100m. Trykkehøydereduksjonen blir derfor noe overestimert i modellen i forhold til erfaringsdataene.

#### 5.4.6 Uten morene

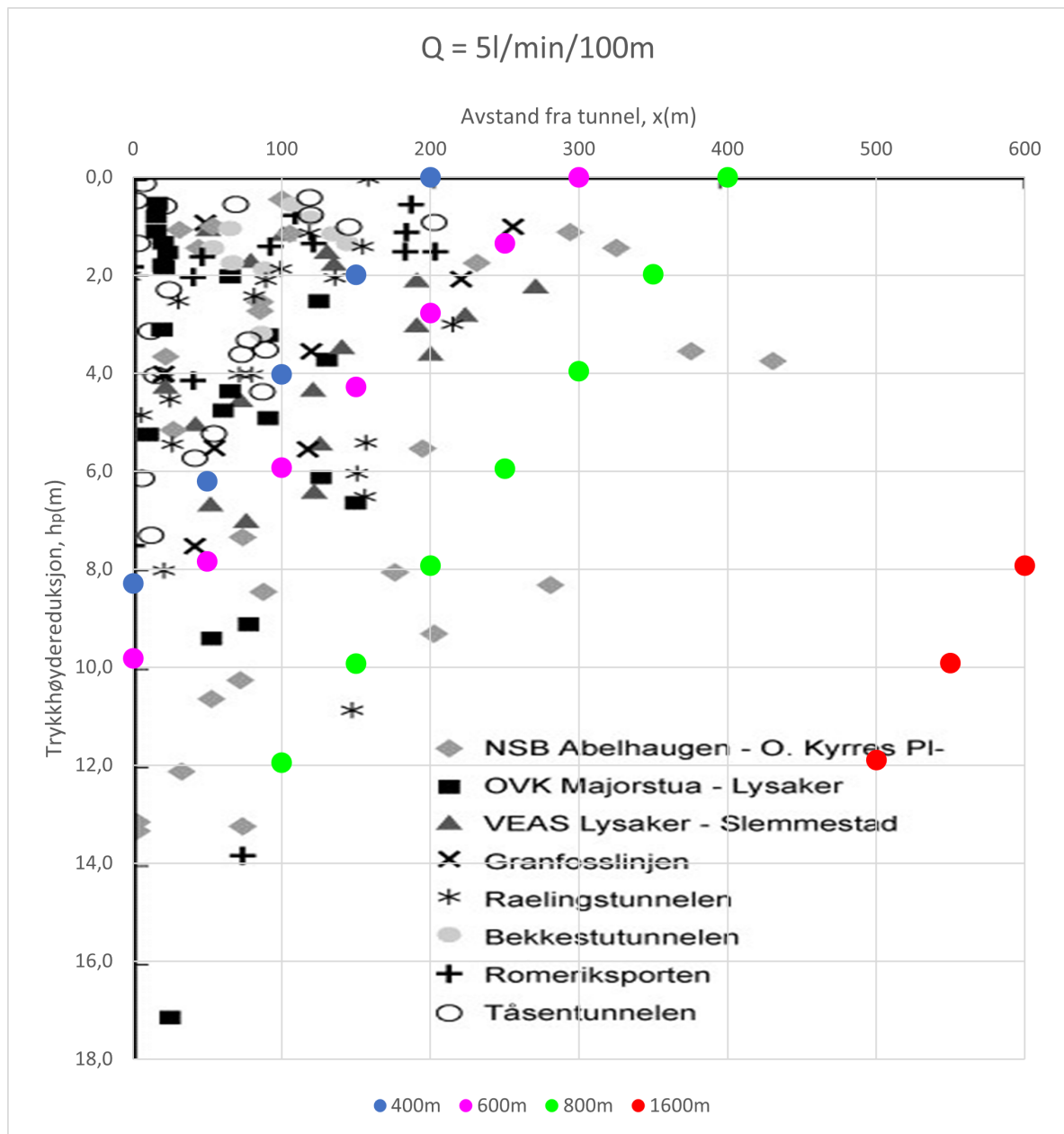
For å studere hvordan morenelaget påvirker beregningene har morenelaget blitt erstattet av berg i domenet. Effekten av morenelaget på trykkehøyden rett over tunnelen i bunnen av leirlaget kan studeres både med og uten nedbør i tabell 5.6. Det kan observeres at uten morene vil trykkehøyden bli mer redusert enn om det er morene i domenet. Grunnen er at den høyere hydrauliske konduktiviteten til morenelaget gjør at vann raskere strømmer til tunnelen, noe som gjør at trykkehøyden blir mindre redusert når det er morene i domenet (SVV, 2020). Beregninger av trykkehøyden uten nedbør, viser at trykkehøyden reduseres med 28% når morenelaget er fjernet fra domenet uavhengig av innlekkasjemengde. Merk at en trykkehøydereduksjon på over 13 m vil gi urealistiske resultater og derfor ikke være relevant. Dette gjelder for de fleste innlekkasjene utenom der  $Q = 3$  l/min/100 m.

**Tabell 5.6:** Trykkehøydereduksjon med og uten nedbør og morene

Morene	Trykkehøydereduksjon ved innlekkasje på $Q = 3$ l/min/100m [m]		Trykkehøydereduksjon ved innlekkasje på $Q = 5$ l/min/100m [m]		Trykkehøydereduksjon ved innlekkasje på $Q = 10$ l/min/100m [m]		Trykkehøydereduksjon ved innlekkasje på $Q = 20$ l/min/100 m	
	Uten nedbør	Med nedbør	Uten nedbør	Med nedbør	Uten nedbør	Med nedbør	Uten nedbør	Med nedbør
Uten	9,4	8,3	15,7*	13,4*	31,3*	28,0*	62,7*	60,4*
Med	7,4	6,8	12,3	10,9	24,5*	22,0*	49,0*	47,0*

\* = Maksimal trykkehøydereduksjon overskredet

Dersom morenelaget blir fjernet fra domenet vil det påvirke hvilket stratigrafisk lag vannet infiltrerer inn gjennom. Tabell 5.7 oppsummerer den vannmengden som skal til for at massebalansen skal bli opprettholdt ved innlekkasje i tunnel når det er stasjonære forhold uten



**Figur 5.12:** Figur over beregnet trykkehøydereduksjon mot avstand ved stasjonære forhold som følge av innlekkasje til tunnel sammenlignet med erfaringsdata fra SVV, 2003. Trykkehøydereduksjonen er lest av i bunnen av leiren for hver 50 m ved en innlekkasje på  $Q = 5 \text{ l/min/100m}$  for ulike domenestørrelser.

morene i domenet. Tabellen viser at 99,9% av vannet som infiltrerer inn fra sidene, kommer inn gjennom bergmassen. Dette kommer trolig av at leiren har en hydraulisk konduktivitet på en faktor på  $10^{-2} \text{ m/s}$  lavere enn bergmassen, samt at bergmassen har et større innfiltreringsareal, se Darcys lov. Sammenlignet med tabell 5.4 vil derfor det meste av vannet som infiltrerte inn

gjennom morenen, infiltrere inn i bergmassen når morenelaget ble fjernet fra domenet.

**Tabell 5.7:** Tabell over total innsiving fra kantene i domenet uten morenelaget for ulike innlekkasjemengder.

	Innsiving ved $Q = 3 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 5 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 10 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 20 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Prosent av totalt tilført vannmengde
Leire	0,00	0,01	0,01	0,02	0,1 %
Berg	3,00	4,99	9,99	19,98	99,9 %
Totalt	3,00	5,00	10,00	20,00	100,0 %

### 5.4.7 Ulik hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen vil påvirke hvilket stratigrafisk lag vannet strømmer inn i domenet fra. Tabell 5.8 oppsummerer hvordan den totale vannmengden som infiltrerer inn i domenet fordeler seg for tre forskjellige hydrauliske konduktiviteter på bergmassen ved stasjonære forhold. Som kapittel 5.4.3 viste, er den prosentvise innfiltreringen fra sidene uavhengige av innlekkasjemengde når det ikke er nedbør i domenet. Innstrømningsmengden blir påvirket av den hydrauliske konduktiviteten i hvert lag, se Darcys lov  $Q = -K * A * i$  (Brattli, 2018). Leire har som nevnt en lav mettet hydraulisk konduktivitet på  $10^{-9}$  m/s. Dette gjør at så lenge den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen er høyere, vil tilnærmet 0% strømme inn via leirlaget.

**Tabell 5.8:** Innsivingsmengde fra sidene i domenet i de ulike stratigrafiske lagene ved ulik hydraulisk konduktivitet i bergmassen. Merk at total innlekkasje fra sidene er lik innlekkasjemengden i tunnelen for hver hydraulisk konduktivitet.

Hydraulisk konduktivitet bergmasse [m/s]	Stratigrafisk lag	Innsiving ved $Q = 3 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 5 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 10 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 20 \text{ l/min/100m}$ [l/min/100m]	Prosentvis total innsiving
$10^{-6}$	Leire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0 %
	Morene	0,07	0,11	0,23	0,46	2,3 %
	Berg	2,93	4,88	9,77	19,54	97,7 %
$10^{-7}$	Leire	0,00	0,00	0,00	0,01	0,0 %
	Morene	0,57	0,95	1,90	3,80	19,0 %
	Berg	2,43	4,05	8,09	16,19	80,9 %
$10^{-8}$	Leire	0,01	0,01	0,02	0,03	0,2 %
	Morene	2,09	3,49	6,98	13,97	69,7 %
	Berg	0,90	1,50	3,00	6,00	30,2 %

Både for morene og bergmassen vil innstrømningsfordelingen avhenge av innstrømningsarealet  $A$  og den hydrauliske konduktiviteten  $K$  til bergmassen. Etersom morenelaget har en tykkelse på 2

m og bergmassen har en tykkelse på 85 m, totalt 87 m, består henholdsvis 2,3% og 97,7% av modellen av morene og bergmasse. Ved lik hydraulisk konduktivitet på  $10^{-6}$  m/s og ingen innstrømning i leiren, vil derfor 2,3% strømme inn i morenlaget, og 97,7% inn via bergmassen. Dette bekreftes i tabell 5.8. Et større areal vil derfor kunne gi en større total innsivingen enn i mindre lag når de andre parameterne er konstante. Er den hydrauliske konduktiviteten lav i bergmassen ( $K = 10^{-8}$  m/s) vil det meste av vannet infiltrere inn gjennom morenen (ca 70%). Motsatt vil en høyere hydraulisk konduktivitet ( $K = 10^{-6}$  m/s) på bergmassen gjøre at mer vann infiltrerer inn i bergmassen (ca 98%).

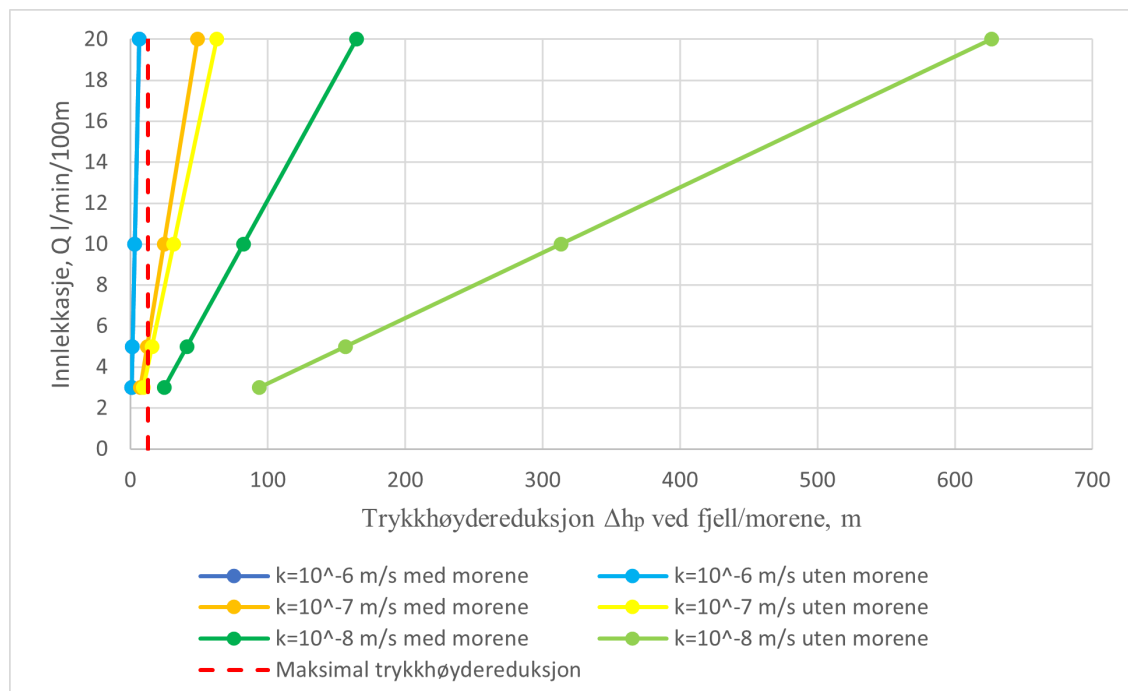
Når morenelaget blir fjernet fra domenet, oppsummerer tabell 5.9 hvilket lag vannet strømmer inn i for ulike hydrauliske konduktiviteter i bergmassen. Uavhengig om det er morene eller ikke i den stratigrafiske lagdelingen vil strømmingen i leiren være tilnærmet lik 0 l/min/100 m på grunn av den lave hydrauliske konduktiviteten. Uten morene i domenet vil derfor nært 100% av vannet som lekker inn i tunnelen bli erstattet med vann som strømmer inn i bergmassen.

**Tabell 5.9:** Innlekkasjemengdene fra sidene i domenet i leire og berg (uten morene) ved ulik hydraulisk konduktivitet i bergmassen. Merk at total innlekkasje fra sidene er lik innlekkasjemengden i tunnelen for hver hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Stratigrafisk lag	Innsiving ved $Q = 3$ l/min/100m [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 5$ l/min/100m [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 10$ l/min/100m [l/min/100m]	Innsiving ved $Q = 20$ l/min/100m [l/min/100m]	Prosentvis total innsiving
$10^{-6}$	Leire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0 %
	Berg	3,00	5,00	10,00	20,00	100,0 %
$10^{-7}$	Leire	0,00	0,01	0,01	0,02	0,1 %
	Berg	3,00	4,99	9,99	19,98	99,9 %
$10^{-8}$	Leire	0,03	0,05	0,08	0,11	0,5 %
	Berg	2,97	4,95	9,92	19,89	99,5 %

Som en konsekvens av de ulike hydrauliske konduktivitetene i bergmassen, vil trykkehøyden bli redusert forskjellig av innlekkasjen til tunnel. Figur 5.13 oppsummerer hvordan trykkehøyden blir redusert ved økende innlekkasje for ulike hydrauliske konduktiviteter, både med og uten morene. Målingene har blitt lest av rett over tunnelen i bunnen av leirlaget. Det kan tydelig observeres at en lav hydraulisk konduktivitet på  $10^{-8}$  m/s gir den største reduksjonen i trykkehøyde over tunnelen, mens den høyeste hydrauliske konduktiviteten på  $10^{-6}$  m/s vil gi den minste reduksjonen. Lave hydrauliske konduktiviteter vil være spesielt utsatt for "pumpe-effekten" beskrevet i kapittel 5.4.2. Ved at mindre vann strømmer, vil det føre til at trykkehøydereduksjonen som oppstår som følge av innlekkasjen blir større for lave hydrauliske konduktiviteter. Figur 5.13 viser det store negative trykket som oppstår som gir ekstremt urealistiske verdier. Trykkehøydereduksjon over 13 m kan sees bort i bra, men resultatene er likevel tatt med i figur

5.13 og tabell 5.10 for å illustrere usikkerhetene i programmet. Ettersom de fleste av målingene er urimelig, illustrerer det viktigheten av å velge rett hydraulisk konduktivitet.



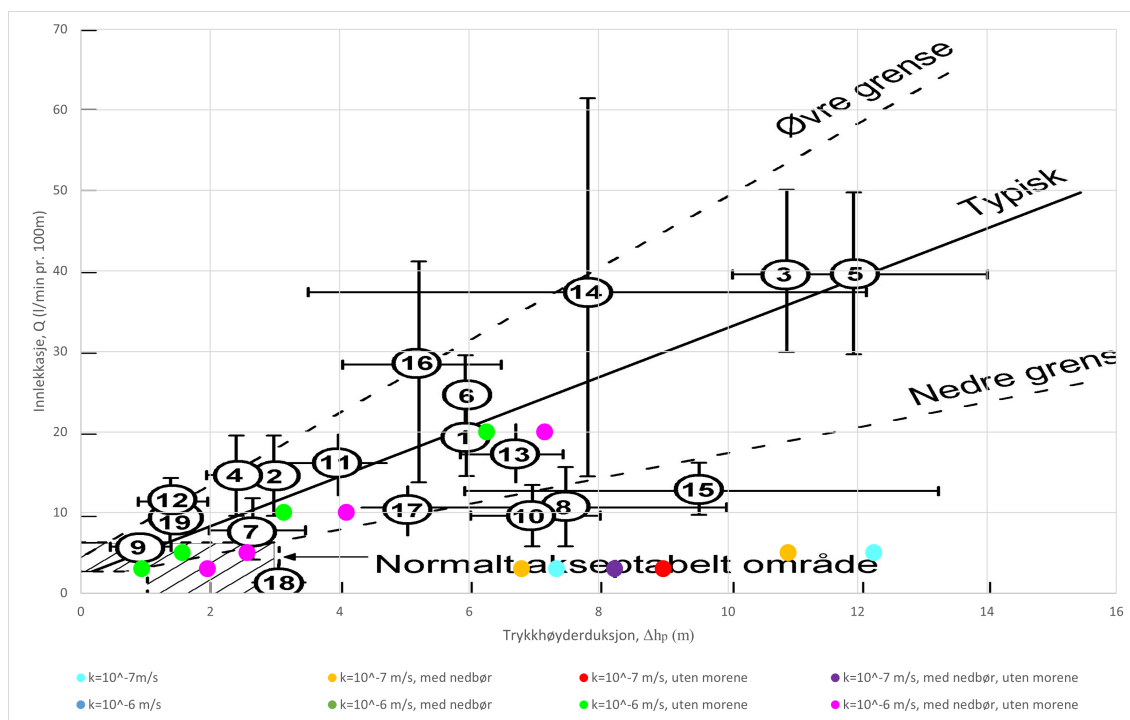
**Figur 5.13:** Forskjellen i poretrykksreduksjon  $\Delta u$  (m) ved fjell/morene for ulike hydrauliske konduktiviteter i fjell og med eller uten morene.

Figur 5.13 illustrer også at morenelaget påvirker trykkløstreduksjonen i stor grad for lave hydrauliske konduktiviteter. For en hydraulisk konduktivitet på  $10^{-8}$  m/s i bergmassen vil trykkløstreduksjonen reduseres med 281% når morenelaget fjernes fra domenet, se tabell 5.10. Når morenelaget er tilstede i domenet vil den høyere konduktiviteten til morenen sørge for at trykkløstreduksjonen ikke reduseres like mye, da mer vann blir tilført fra sidene. Derimot vil det for en høyere hydrauliske konduktivitet være mindre forskjell på om det er morene eller ikke i domenet. Når den hydrauliske konduktiviteten er lik i bergmassen som i morenelaget, vil det følgelig ikke være noen forskjell med og uten morene.

**Tabell 5.10:** Tabell over den prosentvise større trykkløstreduksjonen uten morene enn med for ulike hydrauliske konduktiviteter. Merk at prosenten vil være uavhengig av innlekkasjemengde.

Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Prosentvis større trykkløstreduksjon uten morene enn med
$10^{-6}$	0 %
$10^{-7}$	28 %
$10^{-8}$	281 %

For stasjonære forhold kan trykkehøydereduksjonen rett over tunnelen som følge av ulike hydraulisk konduktivitet, nedbør og morene sammenlignes med erfaringsdata fra SVV, 2003, se figur 5.14. Målingene er lest av i bunnen av leirlaget rett over tunnelen. Dersom annet ikke er oppgitt er det antatt at domenet består av et lag med morene og ikke noe nedbør. Figuren illustrerer at målingene som har en hydraulisk konduktivitet i bergmassen lavere enn  $10^{-6}$  m/s får en høyere reduksjon i trykkehøyden enn det som er normalt i forhold til erfaringsdataene. Dette gjelder både med og uten morene, samt med og uten nedbør. Merk at resultatene med og uten morene for denne verdien gir omtrent samme resultat og derfor ikke skilles fra hverandre på figuren. Trykkehøydereduksjonen for målinger der den hydrauliske konduktiviteten er  $10^{-8}$  m/s er ikke tatt med i figuren, ettersom alle innlekkasjemengdene gir en trykkehøydereduksjon på over 13 m. Figuren 5.14 viser også at trykkehøyden generelt blir litt mindre redusert med nedbør enn uten.



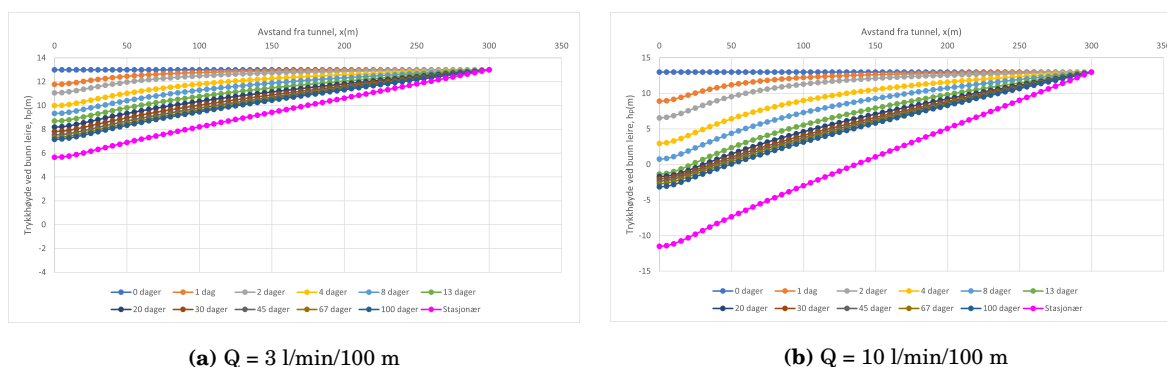
**Figur 5.14:** Sammenheng mellom lekkasje og poretrykksreduksjon ved fjell rett over tunnelanlegg, med erfaringsdata fra SVV, 2003 og resultat fra beregningseksempelen ( $x = 0$ ) for det 600 m store domenet og stasjonære forhold.

Selv om målingene for høye hydrauliske konduktiviteter ligger innenfor det som er vanlig fra erfaringsdataene, konkluderes det likevel ikke med at en større hydraulisk konduktivitet på bergmassen gir et mer realistisk beregningsresultater i forhold til erfaringsdataene. Dette kommer av at en gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet på  $10^{-6}$  m/s i bergmassen er

forholdvis høyt, noe som kan føre til store urealistiske vannmengder inn i domenet. En lav hydraulisk konduktivitet på bergmassen vil i realiteten gjøre at innlekkasjen stopper opp før og de ekstreme negative poretrykksverdiene vil trolig ikke oppstå.

### 5.4.8 Transient strømning

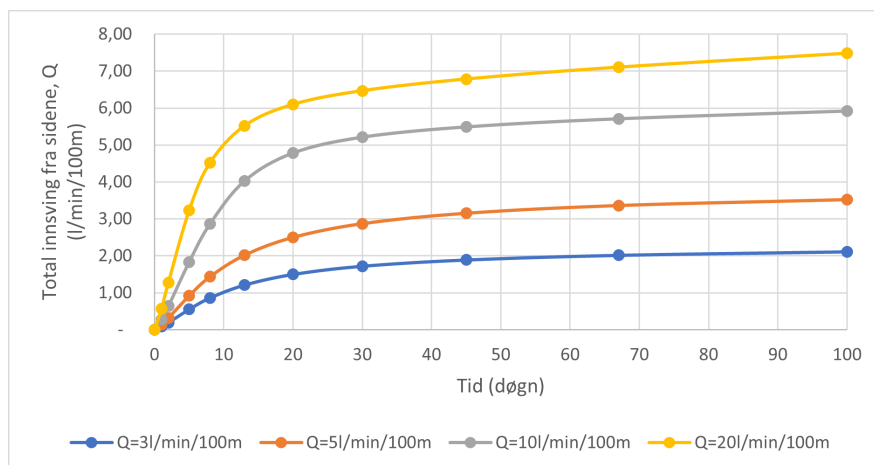
For transient strømning vil trykkehøyden over og til siden for tunnelen gradevis gå ned ettersom vann lekker inn i tunnelen. Figur 5.15 illustrer en slik senkningstrakt over 100 dager for  $Q = 3$  og  $10$  l/min/100 m der poretrykket i bunnen av leirlaget har blitt lest av i en avstand fra tunnelen. De transiente tidsstegene er delt opp eksponentielt med 10 steg, der de minste tidsstegene er rett etter innlekkasjen har begynt. Det kan observeres at trykkehøyden reduseres mest i starten, før den gradevis stabiliserer seg mot en stasjonær tilstand og en ny likevekt oppnås. For større innlekkasjer vil det ta lengre tid før likevekten oppnås. Merk at trykkehøyden hele tiden er positiv for  $Q = 3$  l/min/100m, mens for  $Q = 10$  l/min/100m vil trykkehøyden bli negativ etter 8 dager. Negative trykkehøyder kan sees bort i fra.



**Figur 5.15:** Senkningstrakt fra tunnelen og ut til sidene av domenet målt i bunnen av leirlaget for transiente forhold ved  $Q = 3$  l/min/100m og  $Q = 10$  l/min/100 m

Ettersom det tar tid før innlekkasjen i tunnel påvirker sidene av modellen, vil vannmengdene som infiltrerer inn fra kantene variere med tiden. Figur 5.16 illustrerer hvordan den totale vannmengden som infiltrerer inn fra kantene av domenet varierer for ulike innlekkasjemengder. Rett etter at innlekkasjen til tunnel har begynt vil relativt lite vann infiltrere inn fra sidene. Etter omtrent 30 dager vil infiltreringen stabilisere seg mot en mer lineær økning. Etter 100 dager vil omtrent 70% av vannet som lekker inn i tunnelen bli erstattet med vann fra sidene for en innlekkasje på 3 og 5 l/min/100m. For innlekkasjer på 10 og 20 l/min/100m vil det etter 100 dager infiltrere inn hhv. ca 60% og 40% av den totale vannmengden fra sidene. Det vil som ventet derfor ta lengre tid at stasjonære forhold oppnås for større innlekkasjer.





**Figur 5.16:** Total vanninnsivningsmengde fra begge sidene i domenet ved transiente forhold

## 5.5 Diskusjon av de største usikkerhetene ved beregningseksempelet

Modellering av grunnvannsstrømning ved tunnellinnlekkasje vil føre til flere usikkerheter. Det har blant annet blitt vist at trykkehøyden og mengden vann som infiltrerer inn i domenet blir påvirket i ulik grad dersom enkelte parametere blir endret og de andre holdes konstant. Videre følger en oppsummerende diskusjon av de faktorene som påvirker beregningsresultatene mest.

At innlekkasjen i tunnelen settes som konstant i programmet vil kunne føre til en stor usikkerhet i beregningsresultatene. I realiteten vil ikke innlekkasjen være konstant, men påvirkes av grunnvannet som er tilgjengelig, den hydrauliske konduktiviteten i grunnen og om det er en energiforskjell til å driver strømmingen (Brattli, 2018). Når grunnvannsnivået blir redusert til tunneldypet vil derfor innlekkasjen fra grunnvann naturlig stoppe opp. Slik tunnellinnlekkasjen har blitt definert i SEEP/W vil ikke innlekkasjen stoppe, men virke som en "pumpe" som trekker vannet ut fra områdene rundt. Dette vil i sin tur kunne være med på å skape et sug rundt tunnelen og et kraftig redusert poretrykk. Spesielt for store innlekkasjer og lave hydrauliske konduktiviteter vil det kunne bli et stort negativt poretrykk. For at trykkehøyden skal holde seg positivt for beregningseksempelet vil derfor ikke trykkehøyden kunne bli redusert med mer enn 13 m. Alle trykkehøydereduksjoner over 13 m vil derfor gi urealistiske resultater. I beregningene er de likevel tatt med for å illustrere usikkerhetene med programmet og hvordan SEEP/W beregner resultatene. For små innlekkasjer der poretrykket ikke blir redusert like mye, kan resultatene av beregningene likevel gi en realistisk indikasjon på hvordan poretrykket blir påvirket av en tunnellinnlekkasje.

Definisjonen av en konstant innlekkasje fører til at størrelsen på domenet blir en av de viktigste usikkerhetene ved modellering i SEEP/W. For en gitt innlekkasje vil den hydrauliske gradienten  $i$  være lik uavhengig av størrelsen på domenet når de andre parametrene holdes konstant, se Darcys lov. Trykkehøydereduksjonen vil derfor bli større for en økende domenestørrelse og økt avstand fra tunnelen  $dl$ . Størrelsen på trykkehøydereduksjonen  $dh$  vil være gitt som  $dh = i * dl$ .

I tillegg til domenestørrelsen vil den hydrauliske konduktiviteten til bergmassen være en svært viktig usikkerhetsfaktor ved modellering med de gitte grensebetingelsene. Resultatet fra modelleringene viste at en lav hydraulisk konduktivitet på  $10^{-8}$  m/s i bergmassen førte til et stort negativt trykkehøyde og urealistiske resultater. I realiteten vil en slik hydraulisk konduktivitet føre til at innlekkasjen raskt stopper opp når trykkehøyden blir redusert som følge av tunnelinnlekkasjen. Motsatt vil en høyere hydraulisk konduktivitet på  $10^{-6}$  m/s føre til en mindre trykkehøydereduksjon fordi vannet lettere strømmer inn i domenet. En så høy hydraulisk konduktivitet for bergmassen vil ikke alltid være like realistisk, utenom når bergmassen er svært oppsprukket eller har en høy permeabilitet. Dersom det er tilfellet med en så høy hydraulisk konduktivitet for bergmassen i virkeligheten, må nok vann være tilgjengelig for strømming slik at trykkehøyden ikke skal bli mer redusert. Verdien på den hydrauliske konduktiviteten vil derfor være en viktig faktor i modellering av grunnvannsstrømming med tanke på beregning av trykkehøyde.

Fra modelleringen av beregningseksempelet ble det vist at effekten av nedbør i domenet ikke påvirket poretrykket i særlig stor grad. Den definerte nedbøren på  $10^{-9}$  m/s (31,5 mm/år), var satt såpass lavt at trykkehøyden kun ble redusert med omtrent 2 m dersom nedbør ble lagt til som grensebetingelse i domenet (avhengig av innlekkasjemengden). På grunn av den lave hydrauliske konduktiviteten til leiren, vil det meste av vannet som strømmet inn i domenet, strømme inn via grensene. Dette gjør at trykknivået ikke blir påvirket i like stor grad av nedbøren. Nedbør lagt til som grensebetingelse førte likevel til at mindre vann infiltrerte inn fra sidene slik at vannmengdene inn i domenet ble fordelt mer naturlig.

At det hydrauliske potensialet på sidene er konstant, førte til at vann strømmet inn fra sidene i domenet for å opprettholde grunnvannsnivået. En høyere innlekkasje i tunnelen ga derfor en større innstrømming fra sidene i domenet. I realiteten vil mengden vann som kom inn fra sidene avhenge av klimaet og av de hydrogeologiske forholdene (Gustafson, 2009). I løpet av et år kan det derfor være store variasjoner, men dette ble ikke tatt hensyn til i modelleringen.

Usikkerheten knyttet til effekten av morenelaget for beregningseksempelet avhengte av den hydrauliske konduktiviteten til bergmassen forhold til morenen og leiren. Dersom den hydrauliske konduktiviteten til bergmassen var svært lav ( $10^{-8}$  m/s) forhold til morenelaget ( $10^{-6}$

m/s), ville mesteparten av vannstrømningen foregå i morenen (ca. 70%). Dersom morenelaget så ble fjernet fra domenet ville trykkehøyden i bunnen av leirlaget bli redusert med hele 281%, så lenge den urealistiske store trykkehøydereduksjonen ikke ble sett bort i fra. Ved så lave hydrauliske konduktiviteter har morenelaget en svært viktig betydning. Motsatt ville en høyere hydraulisk konduktivitet føre til at forskjellen med og uten morene i domenet ble mindre.

For bergmassen og for morenelaget er den hydrauliske konduktiviteten blitt definert som konstant og fullstendig vannmettet. Resultatet av modelleringen fra beregningseksempelet viser derimot at grunnvannsnivået synker under tunneldypet for store innlekkasjer, noe som ikke er realistisk. At grunnvannsnivået synker gjør at formasjonene ikke er fullstendig vannmettet lengre og den hydrauliske konduktiviteten vil variere som en funksjon av vanninnholdet. I SEEP/W er det ikke mulig å velge empiriske funksjoner for disse geologiske lagene. For leirlaget har det blitt gitt en grovt tilpasset funksjon på bakgrunn av empiriske data for strømning i den umettede og mettede sonen. Når resultatene fra beregningseksempelet skal valideres har det blitt antatt at den hydrauliske konduktiviteten i bunnen av leirlaget er konstant. Dette stemmer nødvendigvis ikke.

Resultatene fra modelleringen med transiente forhold ga relativt realistiske resultater så lenge trykkehøyden ikke var redusert med mer enn 13 m. Beregninger av trykkehøyden med tiden, viste som forventet at det ville ta tid før senkningstrakten utviklet seg. For større innlekkasjer tok det lengre tid enn for mindre. Dette gjaldt også for mengden vann som infiltrerte inn fra sidene.

Dersom resultatene fra beregningseksempelet ble sammenlignet med erfaringsdata fra rapport 103 ble trykkehøydereduksjonen beregnet til å være større enn det som kan forventes for en gitt innlekkasje (SVV, 2003). En høyere hydraulisk konduktivitet på bergmassen gjorde at målingene var innenfor det normale området, både med og uten nedbør og morene. En lavere hydraulisk konduktivitet førte derimot til at trykkehøydereduksjonen var utenfor det normale. Dette gjaldt spesielt når morenelaget ble fjernet fra domenet. Sammenligning av trykkehøydereduksjonen og influensavstand viste også at de beregnede resultatene overestimerte influensavstanden. Det er flere årsaker til at erfaringstallene ikke stemte helt overens med de beregnede resultatene. Hovedgrunnen var trolig slik innlekkasjen i tunnel var definert, men også antagelser og forenklinger gjort i modellen kan ha gjort at beregningene ikke stemmer helt overens med erfaringene. Naturlig vil innlekkasjen stoppe opp når grunnvannsnivået synker under tunneldypet, men i modellen virket tunnelen som en pumpe. Det beregnede trykkehøydetapet ble derfor unaturlig høyt. I tillegg vil det være store variasjoner i de hydrogeologiske forholdene som ikke ble tatt hensyn til i modellen.

# Kapittel 6

## Drammenstunnelen

### 6.1 Områdebeskrivelse

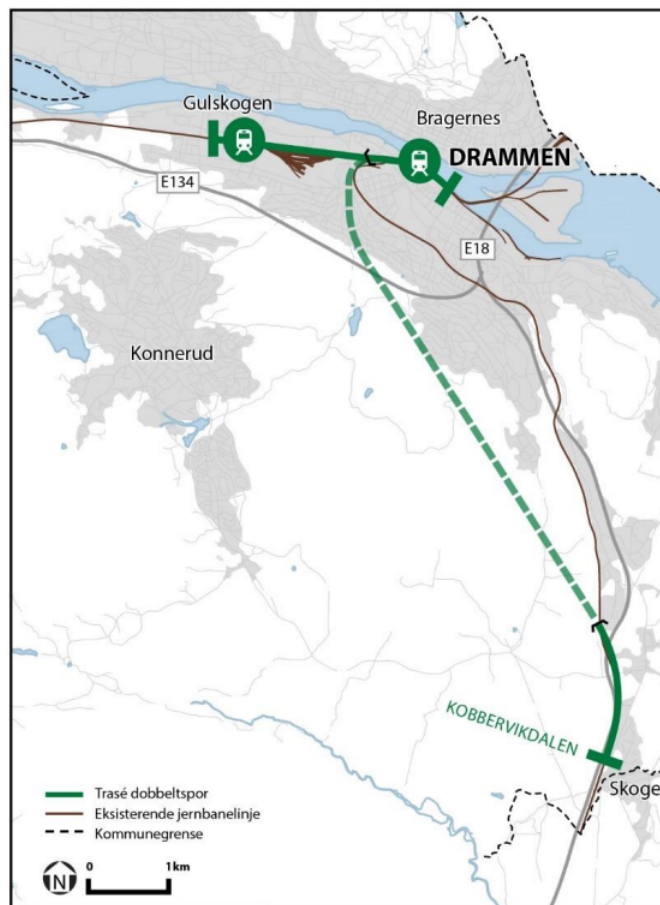
Mellom Drammen i nord og Kobbervikdalen i sør skal det drives en 7 km lang dobbelsportunnel i forbindelse med utbyggingen av Vestfoldbanen, se figur 6.1 (Norconsult, 2018a). Omtrent 6 km av tunnelen passerer gjennom berg, mens resterende del går gjennom løsmasser eller betongkulvert. I tillegg består tunnelsystemet av tre evakuerings tunneler og to tverrslag. Det vil bli modellert et snitt med SEEP/W 2D for å vurdere påvirkninger på poretrykket i nærliggende leire ved ulike innlekkasjer til hovedtunnelen.

#### 6.1.1 Datagrunnlag

I forbindelse med utbyggingen av Drammen-Kobbervikdalen har Norconsult på oppdrag fra Bane NOR utarbeidet flere rapporter i forbindelse med hovedentreprisen UDK 01. UDK01 innbefatter selve hovedtunnelen med tverrslag, evakuerings tunneler og dagsonen i Skoger. Rapportene har i stor grad blitt benyttet for å bestemme relevante inngangsparametere i modellen. Det har blitt tatt utgangspunkt i følgende tre rapporter;

- *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, Fagrapport hydrogeologi UDK 01,*
- *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, datarapport geoteknikk UDK 01,*
- *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, Fagrapport ingeniørgeologi UDK 01.*

Rapportene gir en utfyllende beskrivelse av utførte undersøkelser langs traseen, grunnforholdene, en ingeniørgeologisk vurdering og en tolkning av hydrogeologien og miljøhensyn.

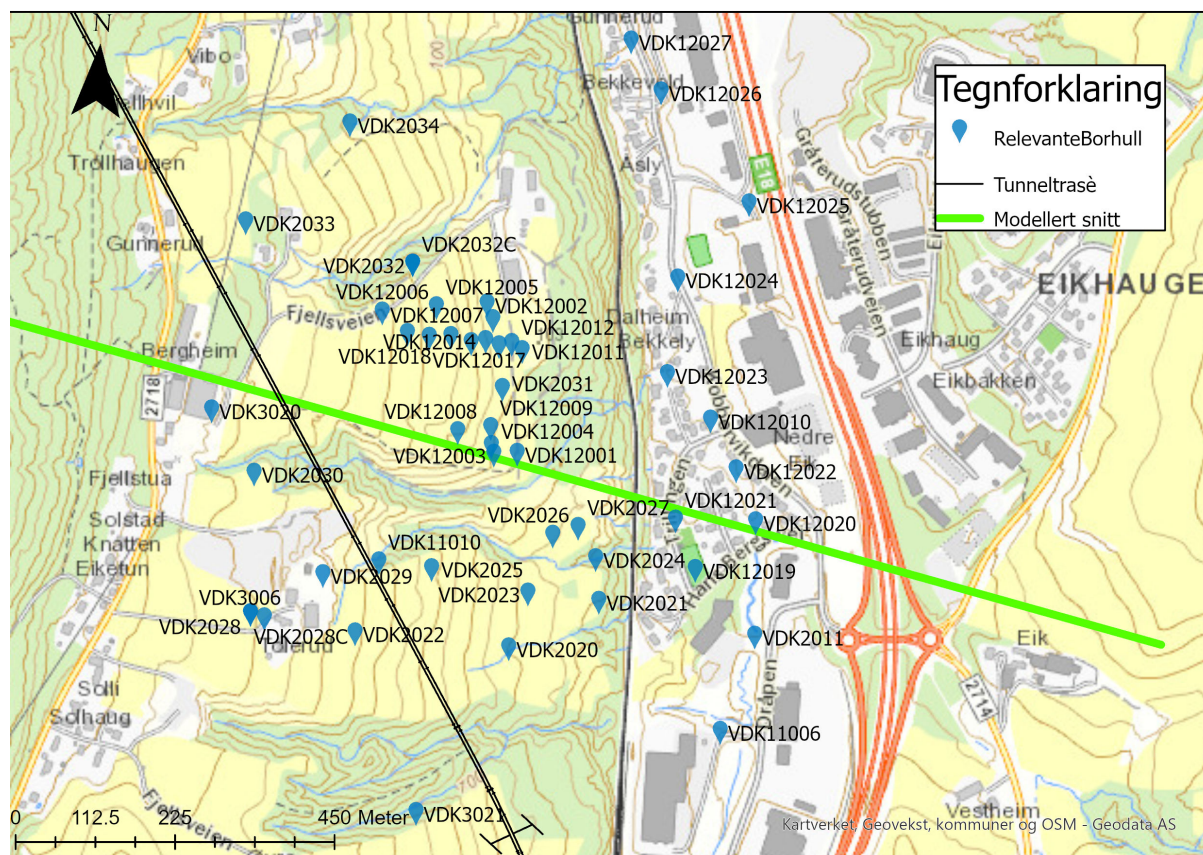


**Figur 6.1:** Oversiktskart over den prosjekterte tunnelen mellom Drammen og Kobbervikdalen, hentet fra Norconsult, 2018b.

I forbindelse med prosjekteringen har det blitt gjennomført grunnundersøkelser. Det er Norconsult AS som har planlagt omfang og lokasjon på de ulike felt- og laboratorieundersøkelsene, mens det er Norges Geotekniske Institutt (NGI) som har utført undersøkelsene. Det har blant annet blitt utført geotekniske grunnundersøkelser, kjerne- og brønnboringer og poretrykksmålinger (Norconsult, 2018a). Plassering på relevante borehull kan studeres i figur 6.2. og mer detaljert i vedlegg E.1.

I tillegg til de overnevnte rapportene har følgende kartgrunnlag blitt benyttet som bakgrunnsmateriale:

- *Berggrunn - nasjonal berggrunnsdatabase*, NGU karttjenester web (NGU, 2022a)
- *Løsmasser - nasjonal Løsmassedatabase*, NGU karttjenester web (NGU, 2022b)
- *Hoydedata.no*, Statens Kartverk kartjeneste web (Kartverket, 2022)



**Figur 6.2:** Oversiktskart over alle relevante borhull, utenom VDK2002 og VDK11007 lengre sør og VDK27018 lengre nord. Grønn linje viser plassering av modellert snitt.

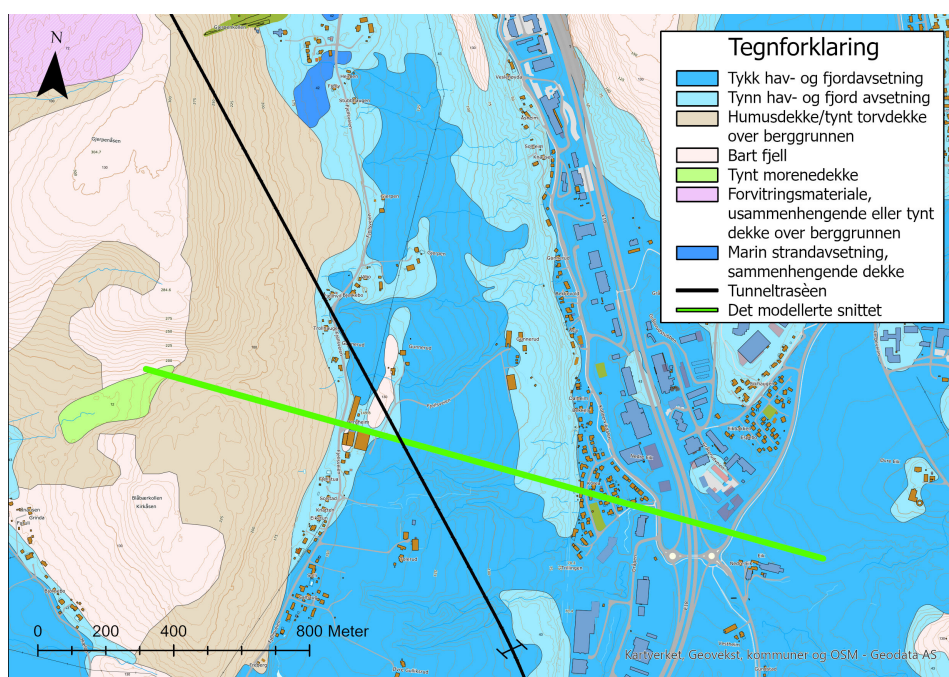
- *NEVINA Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse*, NVE karttjenester web (NVE, 2022).

De overnevnte karttjenestene bruker i all hovedsak koordinatsystem WGS 1984 UTM Zone 33N. Derimot har resultatene fra grunnundersøkelsene brukt koordinatsystem EUREF 89 NTM sone 10 og høydesystem NN2000. Lokasjon på tunneltraséen og borepunktene har videre blitt plottet inn i ArcGis Pro. Kartutsnittene fra ArcGis pro vil være gitt i koordinatsystem WGS 1984 UTM Zone 33N.

Undertegnende har også gjennomført en befaring til området i og rundt Kobbervikdalen den 18.04.2022. Observasjoner gjort på stedet ble videre brukt til tolkning av løsmassedybde og type avsetning, samt til å få et generelt inntrykk av lokasjon.

### 6.1.2 Løsmasser

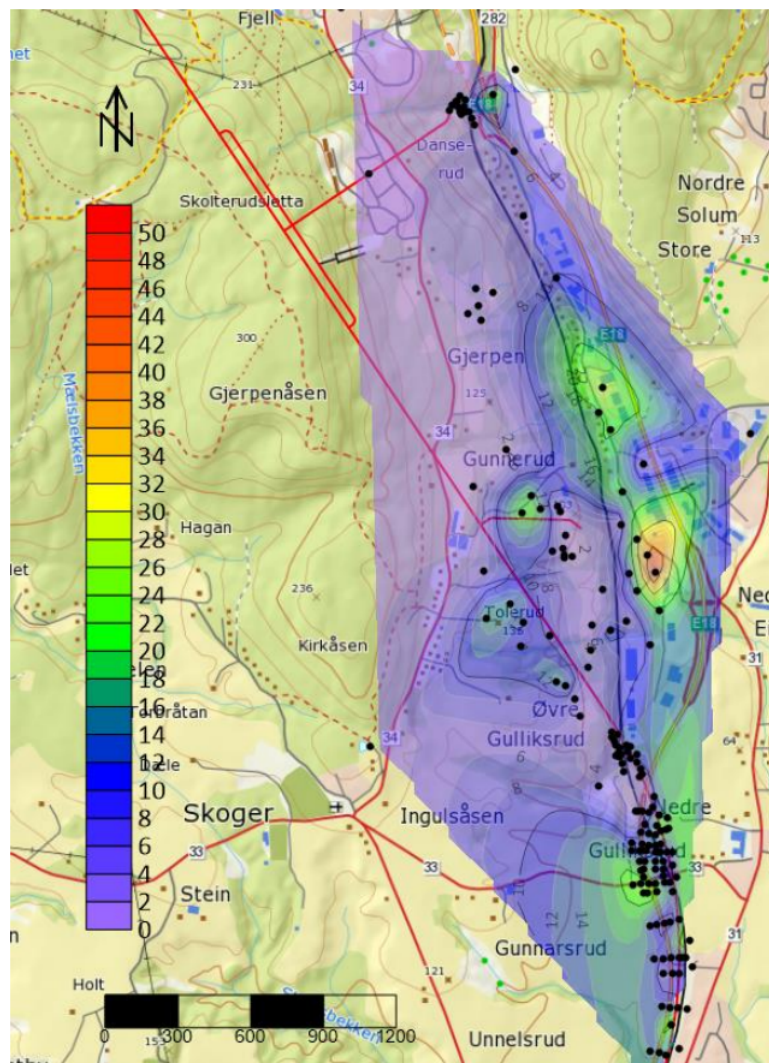
Fra NGU sitt løsmassekartet, figur 6.3, kan det observeres at områdene øst for tunneltraseen i all hovedsak består av varierende mektighet med hav- og fjordavsetninger. De marine avsetningene varierer i mektighet. Noen steder er mektigheten fra 0,5m til flere ti-talls meter i et sammenhengende dekke, mens andre områder er preget av mindre mektighet på under 0,5 meter med hyppige fjellblotninger (NGU, 2022b). Dette bekreftes også med feltobservasjoner og fra borelogger. De marine avsetningene har trolig blitt avsatt i Kvartær-tiden da isbreene trakk seg tilbake (Norconsult, 2018b). Tilbaketrekningen førte trolig til at et tynt morenedekke ble avsatt i bunnen av dalen oppå berggrunnen før havet trengte inn og avsatte marine avsetninger oppå. Vest for tunneltrasen mot Kirkåsen er det berg i dagen med et humusdekke eller tynt torvdekke på 0,2 - 0,5 m tykkelse (NGU, 2022b).



**Figur 6.3:** Kvartærgeologisk kart over Kobbervikdalen

Totalsonderinger og observasjoner i felt bekreftet at mektighetene på de marine avsetningene varierende, se figur 6.4. Over tunneløpet på østsiden av Kirkåsen viste totalsonderinger at det kan være opp til 20 m leire (Norconsult, 2018c). I disse avsetningene har nyere tids erosjon ført til at raviner har skjært seg ned i de mektige avsetningene. Mektigheten på leirsetningene avtar så mot en bergterskel på oversiden av dem eksisterende Vestfoldbanen. Området rundt bergterskelen består av en liten mektighet med marine avsetninger og hyppige fjellblotninger som skråner bratt ned mot bunnen av Kobbervikdalen. I modellen ble dette området satt som berg i dagen. På

nedsiden av jernbanelinjen viste de gjennomførte totalsonderingene stedvis leirmektighet på over 50 m. På bakgrunn av borehullsmålinger har Norconsult AS interpolert borehullsdataene for å lage et tolket kart over mulig størrelse og utbredelse på leirmektighetene, se figur 6.4.



**Figur 6.4:** Resultat og tolkning av totalsondering av mektighetene til leire (i meter) over Kobbervikdalen. De svarte prikkene viser borepunkter, mens den røde linjen er tunneltraseen. Figur hentet fra Norconsult, 2018b.

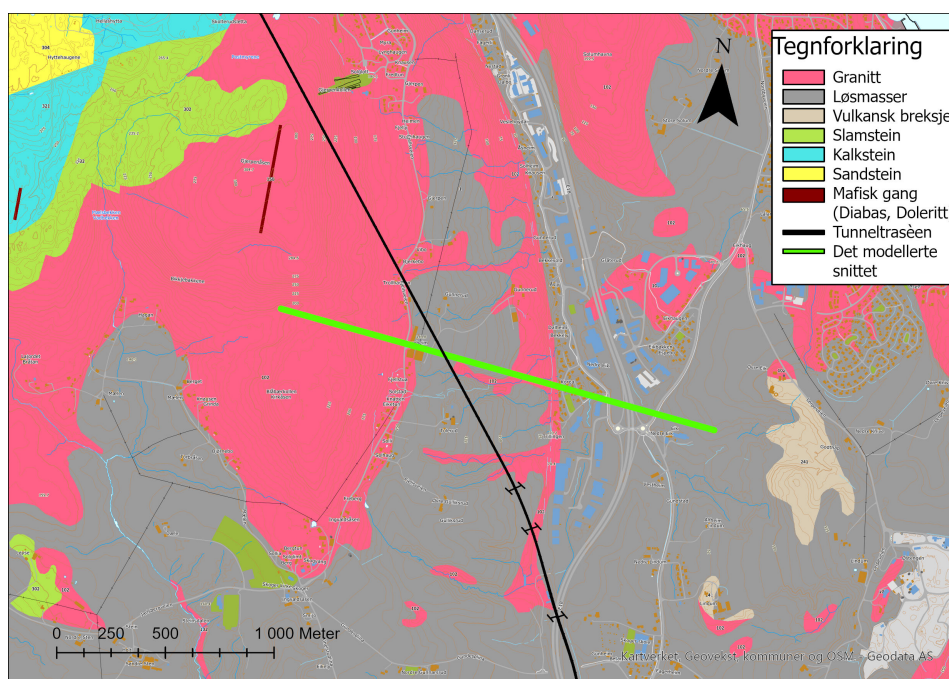
Resultat fra sonderboringene viste også at det på enkelt lokasjoner i Kobbervikdalen var det blitt observert friksjonsmasser i overgangen mellom leire og berg. Verken de hydrogeologiske eller geotekniske rapportene indikerte hva slags materiale som lå mellom leiren og bergmassen. Materialet blir videre tolket til å være et løst pakket morenelag, men kan alternativt være dypforvitret fjellgrunn eller fluviale sand og grusavsetninger. I borpunkt VDK27018, lokalisert nedenfor tverrslag Danserud, har det blant annet blitt målt 14 m leire over berg uten grovere



masser i mellom (Norconsult, 2018b). Et tilsvarende borepunkt litt lengre unna mot nord viste 27 m med leire, men at det er 8 m grovere masser over berg.

### 6.1.3 Berg

Fra figur 6.5 kan det observeres at berggrunnen rundt Kobbervikdalen i stor grad består av Drammensgranitt. Størsteparten av Drammenstunnelen passerer gjennom granitten, utenom en strekning i nord med rombeporfyr og en strekning med kalkholdig slamstein og hornfels (NGU, 2022a). Figur 6.5 illustrer også at helt øst er det et område med brekksje. Drammen og Kobbervikdalen er en del av den geologiske provinsen Oslofeltet. Feltet er preget av kalkrike leiresteiner fra da området var dekket med hav fra Kambro-Silur (400-600 mill. år siden), i tillegg til magmatiske bergarter fra Karbon-Perm (250-350 mill. år siden) (Ramberg et al. 2006). I Karbon-Perm ble det dannet en kontinental rift rundt Osloområdet, som førte til magmatisk og vulkansk aktivitet. Noe av lavaen størknet i dypet og ble til granitt, mens noe fløt utover til rombeporfyr. I tillegg ble kalderaer dannet. Fordelingen av de ulike bergartene avhenger blant annet av den magmatiske aktiviteten, forkastningene og foldninger, samt motstandsdyktigheten til de sedimentære bergartene mot smelten.



**Figur 6.5:** Berggrunnskart over Kobbervikdalen

Drammensgranitten er en grov- til middelskornet krystallin bergart kjent for sin rødlige farge (Norconsult, 2018c). Granitten består i all hovedsak av feltspatene plagioklas og kalifeltspat, i

tillegg til minst 20% kvarts (NGU, 2015). Det kan også være andre mineraler slik som biotitt og muskovitt. På grunn av det høye kvartsinnholdet er de derfor ofte harde og massive. Ingengiørgeologiske undersøkelser gjennomført av Norconsult viste at Drammensgranitten var av moderat til god kvalitet, men at det kunne opptre enkelte diabasganger (Norconsult, 2018c).

I forbindelse med prosjekteringen av Vestfoldbanen har det blitt gjennomført kjerneboringer og vannaptsmålinger. Hensikten var å få informasjon om oppsprekkingen i bergmassene, den hydrauliske konduktiviteten og vannføringen i sprekker ved bergartsgrenser og svakhetssoner (Norconsult, 2018b). Det har blitt boret tre fjellbrønner i Kobbervikdalen; VDK3006-F, VDK3020-F og VDK3021-F. Resultatet fra kjerneboringene viste at bergarten på lokasjonene stemte overens med berggrunnskartet i figur 6.5 og besto i stor grad av Drammensgranitt med noe leire over. Et unntak var i brønn VDK3006-F der det ble funnet noe mer kalkholdige bergarter over Drammensgranitten enn forventet. Tolkningen av kjerneboringene kan studeres i tabell Norconsult, 2018c og i mer detalj i vedlegg E.2:

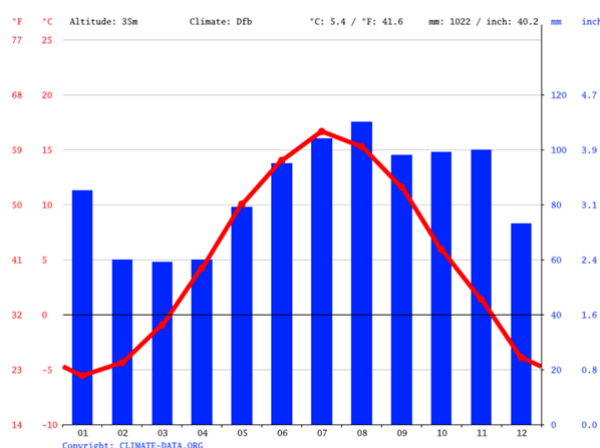
**Tabell 6.1:** Tolkning av litologien fra Norconsult, 2018c for VDK3006-F, VDK3020-F og VDK3021-F som antas relevant for det modellerte snittet.

<b>VDK3006-F</b>	<b>VDK3020-F</b>	<b>VDK3021-F</b>
0-2 m: Sandig, leirig jord 2-15 m: Tørrskorpeleire, tørr og fast 15-25 m: Bløt leire 25 m: Tynt gruslag 25-32 m: Berg; hard, grå, kalkrik bergart. 32-80 m: Drammensgranitt, vekselvis lys og mørk rød. Sleppe med leire ved 75-76 m dyp.	0-1m: Toppjord 1-85 m: Drammensgranitt	0-15 m: Leire 15-110 m: Drammensgranitt. Vannførende sleppe på 109 m.

Kjerneprøver viste også at drammensgranitten var av generelt god bergkvalitet med liten oppsprekking og lite vannførende sprekker. Det ble registrert to dominerende sprekkeretninger i hhv. NNØ-SSV og NV-SØ retning med steilt falt, samt horisontal oppsprekking. Sprekkene var relativt regelmessig i et terningformet sprekke mønster med en gjennomsnittlig sprekkeintensitet på 3-10 sprekker/m<sup>3</sup> (Norconsult, 2018c). Sprekkene var plane til bølgete. I dagen ble det registrert at sprekkeoverflatene var svakt forvitret med lite sprekkeinnfylling. Noen steder kunne det være en oppkonsentrasjon av sprekker som dannet svakhetssoner som gjennomsatt bergmassen.

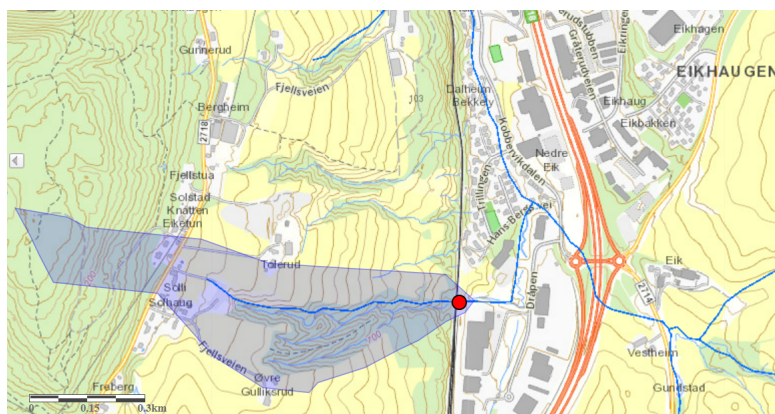
### 6.1.4 Nedbør og avrenning

Drammen har et kaldt og temperert klima med en gjennomsnittlig temperatur på 5,4 °C (Climate-data.org, 2022). I perioden 1991-2021 regnet det i gjennomsnitt 1022 mm. Nedbør og temperaturgraf for Drammens kan studeres i figur 6.6. Det kan observeres at minste gjennomsnittlig nedbør er i mars med 59 mm og mest nedbør i august med gjennomsnittlig 110 mm. Nydannelsen av grunnvann vil variere i løpet av året som følge av klimaet og fører til at det hydrauliske potensialet også varierer noe. Om våren når det er mye snøsmelting vil som regel potensialnivået øke, mens tørre og varme somre med høy evapotranspirasjon vil gi redusert nivå.



**Figur 6.6:** Gjennomsnittlig nedbør og temperaturgraf fra Drammen (fra 1991-2021). Hentet fra Climate-data.org, 2022.

Fra *NEVINA Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse* kan nedbørsareal, nedbørsmengde og årlig avrenning bli funnet for en enkel ravine i Kobbervikdalen (NVE, 2022). Det var ikke mulig i NEVINA å studere bekkene i ravinedalen ved det modellerte snittet. Derimot, var det mulig å studere den antatt representative ravinedalen like sør ved Øvre Gulliksrud. Nedbørsarealet til ravinebekken ble beregnet til å være 0.26 km<sup>2</sup>, se figur 6.7. Fra 1961 - 1990 ble den gjennomsnittlige middelavrenning lest av til å være 503.19 mm/år, tilsvarende 15,9 l/s/km<sup>2</sup>. Nedbøren i denne tidsperioden var noe lavere enn fra Climate-data.org, 2022. Nedbørsmengden beregnet i NEVINA tilsvarte 913,2 mm/år, der hhv. 419,0 mm og 492,2 mm regnet på sommeren og vinteren. Dersom nedbøren sammenlignes med avrenningen på 503 mm/år, vil det si at 55,1 % av den årlige nedbøren gikk til avrenning i perioden. Resterende 44,9 % gikk til evapotranspirasjon og overflateavrenning.



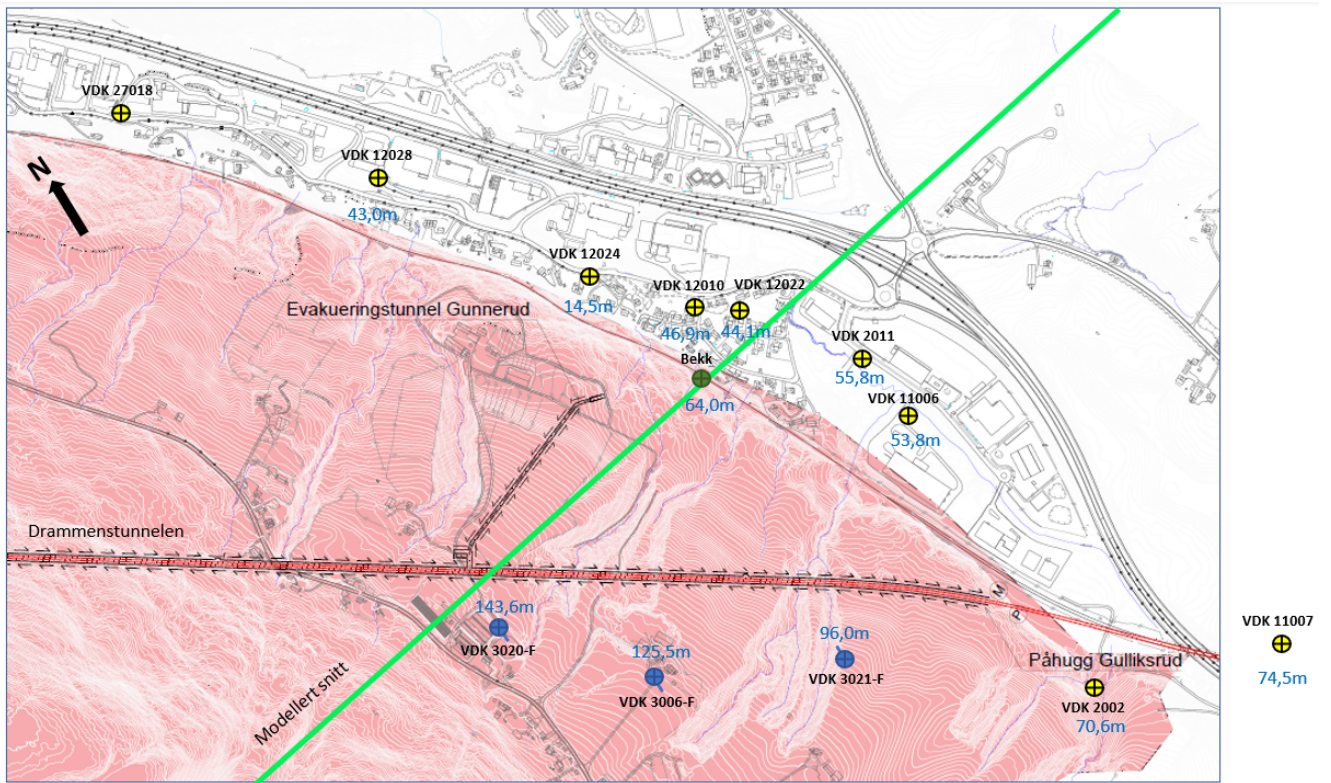
Figur 6.7: Avrenningsarealet for Ravinen ved Øvre Gulliksrud

### 6.1.5 Grunnvannsstrømning og ekvipotensialkart

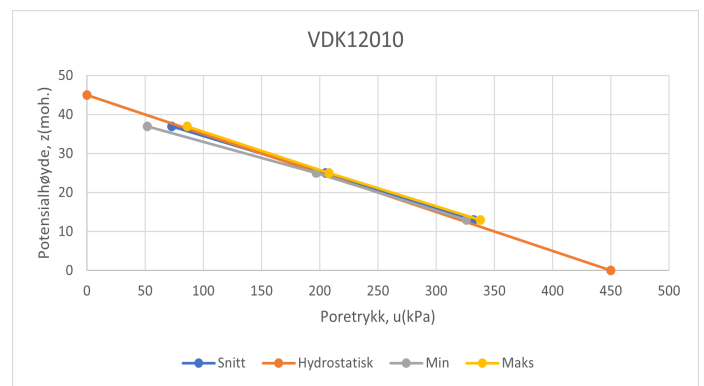
Ved å studere poretrykk- og grunnvannsnivåmålinger i Kobbervikdalen vil det gi en økt forståelse angående den lokale grunnvannsstrømningen. Figur 6.8 viser lokasjoner på relevante brønner der poretrykket eller grunnvannsnivået har blitt målt i forbindelse med prosjektering av Vestfoldbanen (Norconsult, 2018b). Gule brønner indikerer løsmassebrønner der piezometermålere har blitt installert i opp til tre forskjellige dyp. Blå brønner indikerer fjellbrønner der grunnvannsnivået har blitt peilet. Det grønne punktet indikerer en bekk med antatt grunnvannsnivå i dagen. På grunn av den lavere hydrauliske konduktiviteten i den nedre leirmektigheten vil vann trolig strømme ut i dagen via bergmassen på oversiden. Kildefremspringet bekreftes også i felt.

Grunnvanns- og piezometermålingene i Kobbervikdalen viser hvordan trykkpotensialet varierer i løpet av en lengre eller kortere tidsperiode. Et eksempel på en slik piezometermåling kan studeres i figur 6.9a. Målingene har blitt utført på tre forskjellige dyp og viser variasjoner i løpet av perioden. Av den grunn har maksimal, minimal og gjennomsnittlig verdi blitt lest av for kurvene. Ekstreme verdier på starten eller slutten av målingene er ikke tatt med. Måledataene for relevante borhull er presentert i vedlegg E.2 og vedlegg E.3. Resultatet av målingen viser at poretrykket varierer både med årstidsvariasjoner og med hvor dypt de er plassert. Ved å måle potensialnivå for de ulike dybdene vil det i de fleste tilfellene kunne antas at trykket stiger hydrostatisk mot dypet, se figur 6.9b og vedlegg E.2.

Det er noen poretrykksmålinger som avviker fra den hydrostatiske poretrykksøkningen. Fra fjellterskelen rett på oversiden av dagens Vestfoldbane og ned til bunnen av dalen har poretrykket blitt målt til å være artesisk (Norconsult, 2018b). Ved enkelte målepunkter (VDK2011, VDK12010, VDK12022) er overtrykket i bunnen av leiren blitt målt til opp mot 9 m



**Figur 6.8:** Brønner med tolket gjennomsnittlig poretrykk- og grunnvannsnivå. Lokasjon på løsmassebrønner (gule) og fjellbrønner (rød) der poretrykk og grunnvannsnivå har blitt målt. Grønn sirkel er bekk der grunnvannsnivået antas å stå i dagen. Lysegrønn linje er lokasjonen på det modellerte snittet. Modifisert etter Norconsult, 2018b.



**(a)** Potensialnivåkurver for VDK12010 for ulike måledyp, **(b)** Avlest min, maks og snittverdi fra potensialkurven sammenlignet med det hydrostatiske trykket

**Figur 6.9:** Potensialnivåkurve og figur over potensialnivå mot dypet for borhull VDK12010

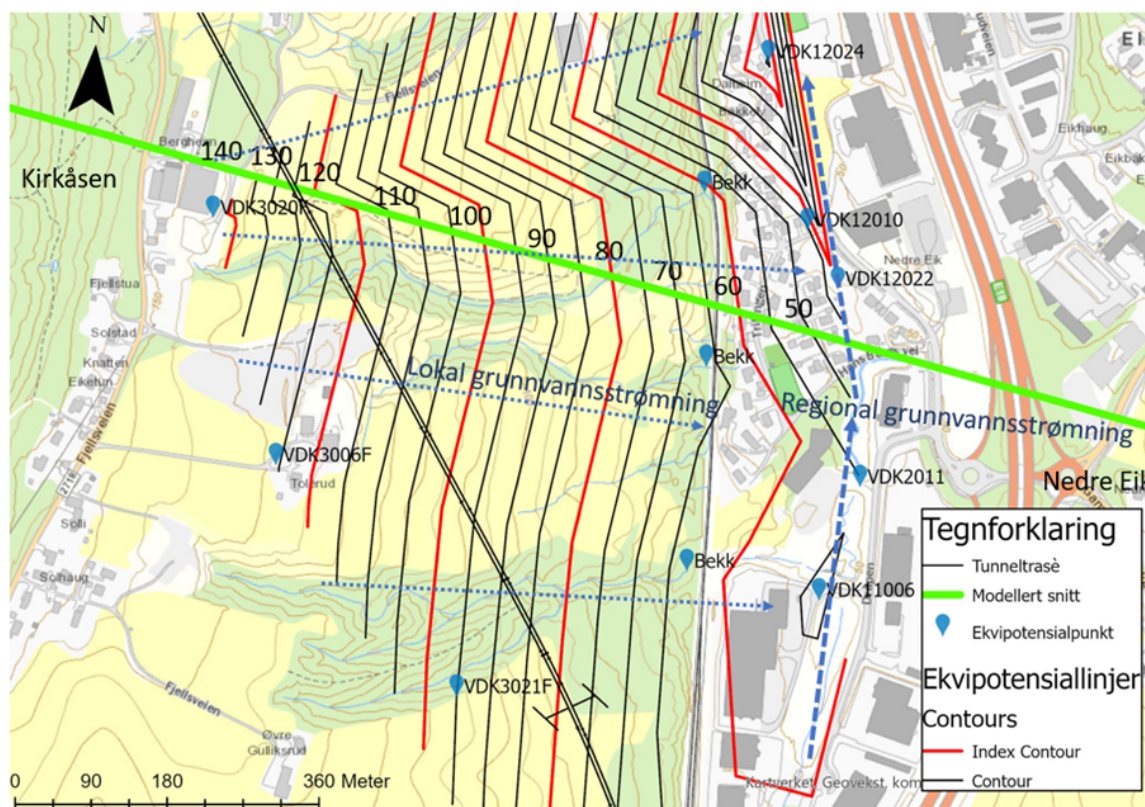
høyere enn for de grunnere delene av avsetningene. Overtrykket kommer trolig av at vannet som strømmer ned fra Kirkåsen blir presset ned på grunn av de lavpermeable leirmektighetene i bunnen av Kobbervikdalen. Dette fører til et artesisk trykk.

Poretrykksmålingene i leiren samsvarer med variasjoner i vanntrykk i bergmassen. Kun en liten grunnvannssenkning i berg kan dermed medføre en poretrykksreduksjon i leiravsetningen. Setningspotensialet vil derfor kunne være stort dersom en innlekkasje i tunnel fører til at poretrykket synker i bergmassen med overliggende leire.

Målingen som var utført dypest i leiravsetningen ble så benyttet til å tegne opp et ekvipotensialkart, ettersom det var dypet i overgangen mellom leire og fjell som var av mest interesse å modellere med tanke på setninger. Ekvipotensialkartet ble tegnet opp i ArcGis Pro med den gjennomsnittlige poretrykks-/grunnvannsverdien, se figur 6.10. Mellom målingene har det kun blitt tegnet opp rette linjer. Det er viktig å være klar over at kartet ikke tar høyde for terrengvariasjonene og forsenkninger.

Figur 6.10 viser ekvipotensiallinjene mellom poretrykksmålingene. Den lokale og regionale grunnvannsstrømningen har blitt tolket på bakgrunn av ekvipotensiallinjene. Vest i Kobbervikdalen viste grunnvannsmålinger i fjellbrønn VDK3020-F at grunnvannsnivået sto nesten ved terrengnivå ved kote 144 (Norconsult, 2018b). Videre østover sank trykket nedover til kote 44 ved poretrykksmåler VDK 12022 i bunnen av dalen. Den lokale strømningen vil derfor trolig gå på tvers av Kobbervikdalen fra Kirkåsen i vest og ned i bunnen av dalen i østlig retning. Lokalt vil strømningen stort sett følge terrenget, som igjen er styrt av svakhetssoner, bergartsgrenser og lagdeling (Brattli, 2018). Motsatt side av dalen var det ikke gjennomført poretrykksmålinger, men det antas at vannet strømmer fra sørvest mot nordøst. Den østre delen er derfor ikke tatt med på ekvipotensialkartet. Vannet fra begge sidene vil så samle seg i bunnen av dalen før det følger den regionale strømningen videre nordover mot Drammensfjorden.

Fra kapittel 3.1.4 ble det vist at sprekkene som har strøketretning parallelt med største hovedspenning ofte vil være de som leder mest vann (Holmøy og Nilsen, 2013). Målinger som har blitt utført av bergspenninger i området og orientering av gangbergarter gjør at det kan forventes at mest vann strømmer i sprekkene med orientering N-S til NØ-SV (Norconsult, 2018c). I tillegg kan det forventes at en del vann vil strømme i ravedalene som går gjennom leiren på nedsiden av Fjellsveien, ettersom ravinene trolig ligger i svakhetssoner.



**Figur 6.10:** Ekvipotensialkart rundt det modellerte snittet. Ekvipotensiallinjene er for hver 5. meter, mens indeksskonturen er for hver 20. meter

### 6.1.6 Satt innlekkasjekrav i Kobbervikdalen

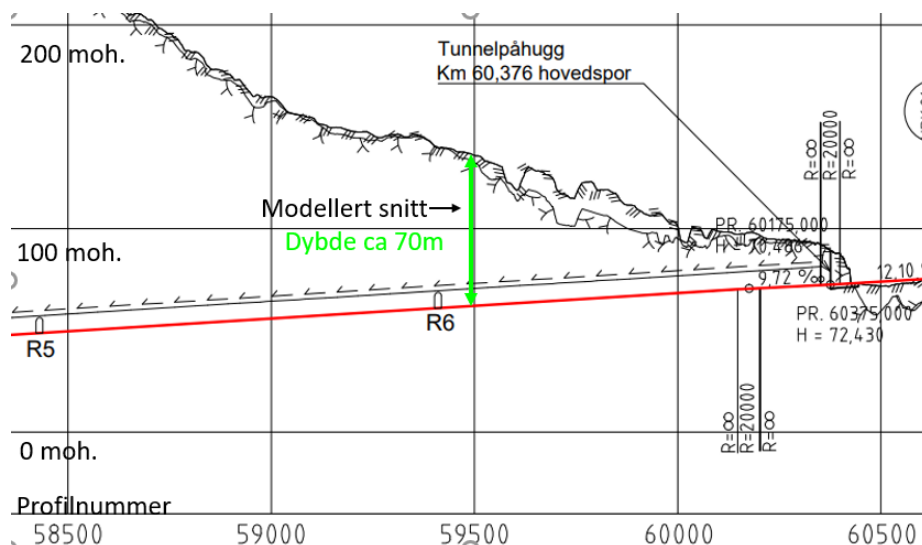
Som følge av de potensielle konsekvensene poretrykksreduksjon og grunnvannssenkning kan gi, har det ved prosjektering av tunnelen blitt satt ulike innlekkasjekrav langs tunneløpet fra Drammen til Kobbervikdalen. Kravene har blitt satt etter vurdering av setningsømfintligheten til områdene og sårbarheten til naturmiljø og friluftsliv (Norconsult, 2018b). I Kobbervikdalen er innlekkasjekravet i tunnelen satt til 3 l/min/100m. For resterende del av tunnelen varierer tettekravet fra 3, 5, 10 og 20 l/min/100m. Det strenge kravet for siste del av tunnelen har blitt satt på bakgrunn av at områdene nedstrøms tunnelen er setningsømfintlige og på bakgrunn av sårbarheten for en endring til vannforekomsten og naturverdiene i ravinedalen. For å oppnå tettekravene, har det blitt antatt at det er behov for omfattende, systematisk injeksjon (Norconsult, 2018c).

## 6.2 Metode for oppsetting og validering av modell

Modellering av Drammenstunnelen i SEEP/W 2D bygger også på den generelle fremgangsmåten beskrevet i kapittel 4.2. Det har blitt valgt å benytte kontinuum modellering på bakgrunn av at det er den raskeste og enkleste modelleringsmetoden. Videre følger fremgangsmåten på hvordan modellen ble satt opp og bestemmelse av inngangsparameterne til modellen. I tillegg nevnes hvilke parametere som blir undersøkt videre.

1. Egnert modelleringssnitt ble først bestemt for Kobbervikdalen.
2. På bakgrunn av høydedata, sonderboringer, kjent litteratur og tolkninger ble videre den stratigrafiske lagdelingen bestemt. Diskretiseringen ble satt opp automatisk i SEEP/W med en elementstørrelse med firkanter og trekkanter på 5m .
3. Den hydrauliske konduktiviteten ble bestemt på bakgrunn av kjent litteratur og undersøkelser gjennomført av Norconsult i forbindelse med prosjektet. Den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten ble valgt.
4. Et ekvipotensialkart ble tegnet opp på bakgrunn av grunnvanns- og poretrykksmålninger fra dalen. Kartet ble videre benyttet til å bestemme trykknivået langs snittet.
5. Via en iterativ prosess ble grensebetingelsene bestemt og validert, slik at den initielle modellen hadde et trykknivå som samsvarte mest mulig med målingene i felt.
6. Mengden vann som strømmet inn over grensene ved initielle forhold ble deretter sammenlignet med antatt avrenning for området for å validere den initielle modellen.
7. Et punkt ble deretter lagt til i modellen for å representere tunnelen. Fra figur 6.11 ble dybde der tunneltrassen krysset snittet estimert til å være omtrent 70 m. Grensebetingelsene til punktet ble videre satt som en konstant fluks, der vannmengden ut av domenet ble satt som konstant 3, 5, 10 eller 20 l/min/100m. For hver endring i innlekkasjemengde ble poretrykket for stasjonære forhold lest av i bunnen av leiravsetningen rett over tunnelen og i bunnen av leiren i Kobbervikdalen. I tillegg ble poretrykket lest av undersøkelsesbrønnene langs med det modellerte snittet.
8. Trykknivået ble så sammenlignet med erfaringsdata.
9. Mengden vann som strømmet inn fra sidene for hver innlekkasje ble også studert.
10. Videre ble punkt 5,6, 7 og 8 gjentatt der den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen var blitt satt som den maksimale verdien målt i området.
11. Tilslutt ble effekten av morenelaget undersøkt ved å fjerne dette laget fra domenet.





Figur 6.11: Dybde på tunnel under terrengoverflaten, modifisert etter Norconsult, 2018b.

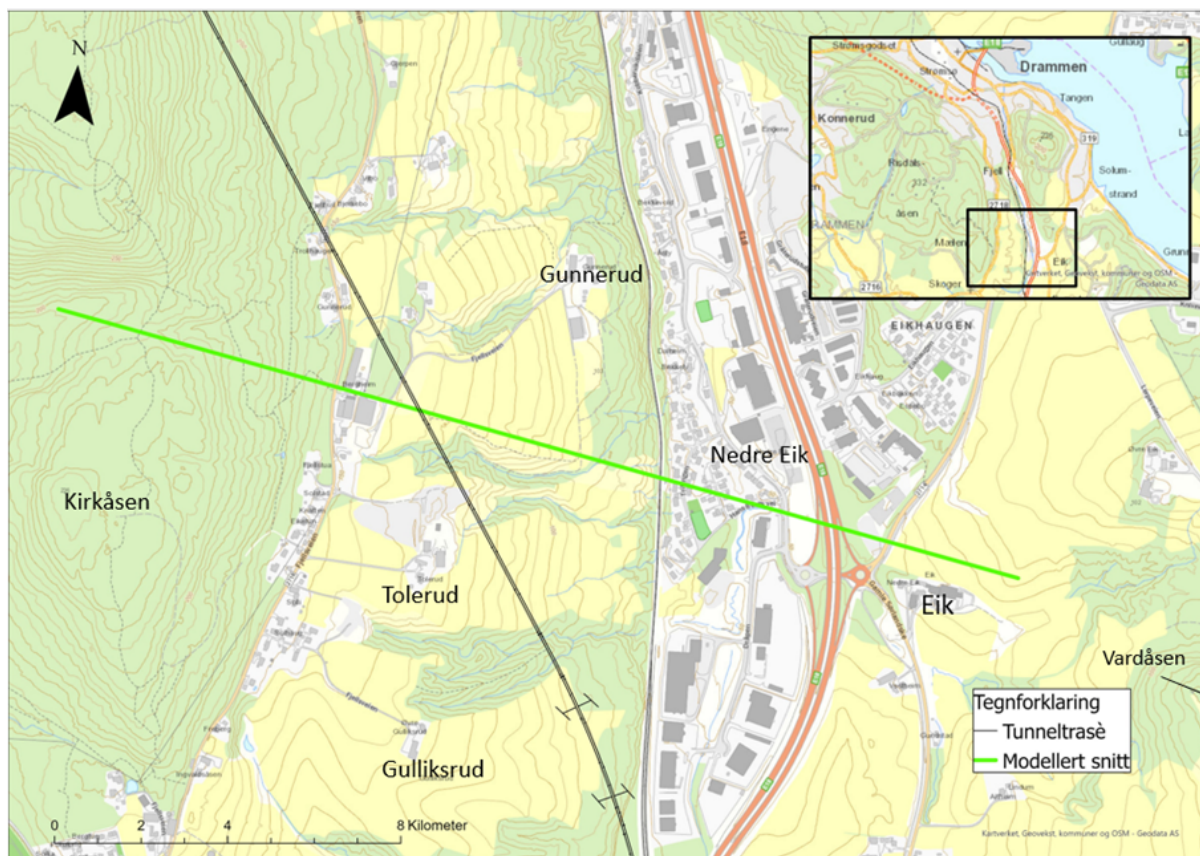
### 6.3 Bestemmelse av inngangsparametre til modellert snitt i SEEP/W

For å numerisk å kunne representere de geologiske og hydrologiske forholdene i felt må tolkninger og vurderinger bli gjort på bakgrunn av observasjoner, undersøkelser i felt og digitale karttjenester. Grunnvannsmagasinet geometri, geologi og hydrauliske parametre vil være viktige egenskaper til grunnvannsmagasinet og må derfor, i den grad det er mulig, bli estimert så bra som mulig.

#### 6.3.1 Valg av snitt

For å utvikle den konseptuelle modellen over Kobbervikdalen ble først et egnet snitt valgt. Mot påhugget av tunnelen i Kobbervikdalen passerer tunneltraseen under mektigheter av leire. En mulig vanninnlekkasje i tunnel vil i dette område kunne føre til setninger i leiravsetningene nedstrøms tunnelen. For å undersøke hvordan en mulig innlekkasje påvirker poretrykket har det blitt valgt å modellere et snitt for dette området. Lokasjonen på snittet ble valgt etter der det var antatt at setningspotensialet var størst og der snittet passerte flest undersøkelsesboringer, se figur 6.2. Sonderingene fra Norconsult, 2018a viste at det kunne være opp til 50 meter leire på enkelte lokasjoner. Av den grunn var det derfor ønskelig å modellere et snitt for å undersøke om tunnelinnlekkasjen ville påvirke disse leirforekomstene. Snittet ble lagt omtrent der leirmektigheten ble målt på sitt tykkeste. Lokasjonen på snittet ble i den grad det var mulig lagt parallelt med den antatte lokale grunnvannsstrømningen på stedet. Den endelige lokasjonen på snittet er fra Kirkåsen i vest, over jordet mellom Tolerud og Gunnerud, ned til bunnen av

Kobbervikdalen og opp igjen til nedre Eik, se figur 6.12. Det modellerte snittet er lokalisert i omtrent Ø/SØ retning. På den aktuelle lokasjonen ligger tunnelen omtrent 70 meter under terrengoverflaten.

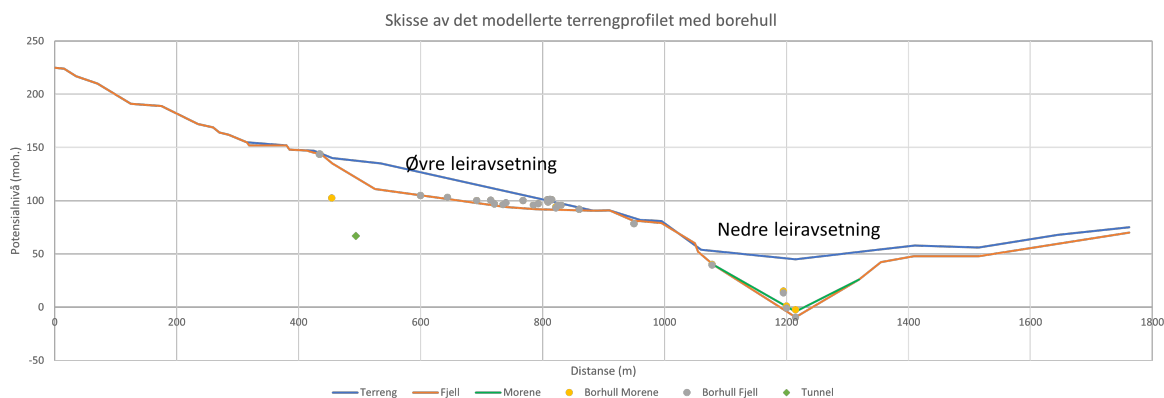


**Figur 6.12:** Oversiktskart over Kobbervikdalen med det modellerte snittet.

### 6.3.2 Stratigrafisk lagdeling og dybde

Ved lokasjonen på det valgte snittet kunne høyden på terrengoverflaten bli plottet mot avstand med hjelp av *Hoydedata.no*. Målingene ble lest av for hver meter bortover, noe som resulterte i nesten 1500 punkter. For å ikke gjøre geometrien til terrengoverflaten for kompleks ble dataene forenklet til omtrent 15 punkter. Mellom punktene ble det trukket rette linjer, se figur 6.13.

Dybden til fjell ble så antatt på bakgrunn av sonderboringer (Norconsult, 2018b), NGU sitt løsmassekart (NGU, 2022b) og bergrunnskart (NGU, 2022a) og observasjoner gjort i felt. Data og observasjoner ble så brukt til å interpolere målingene fra 3D til 2D snittet. Sonderboringene utført i forbindelse med prosjekteringen av tunnelen indikerte når dybden til fjell ble nådd og ble plottet inn som et punkt (Norconsult, 2018b). På bakgrunn av målingene og en tolkning kunne



**Figur 6.13:** Det modellerte snittet med tolket dybde til fjell og morene basert på dybdemålinger fra undersøkelsesboringer fra Norconsult, 2018b.

dybden til fjell bli antatt, se figur 6.13. Borepunkter nærmest snittet ble vektlagt mest. Noen av borhullene som lå langt unna ble derfor sett bort i fra, da interpolering av dybden til fjell ga en størrelse på leirmektigheten som ikke samsvarte med det som ble observert i felt ved snittet. Feltekartlegging viste også at det var noen flere fjellblotninger enn det som var markert på NGU sitt løsmassekart. Dette gjorde at det ble antatt at domenet besto av to leiravsetninger med en fjellterskel i mellom. Fjellterskelen var lokalisert på oversiden av dagens Vestfoldbane. Leirmektighetene på oversiden av dagens Vestfoldbane defineres videre som øvre leiravsetningen, mens leirmektigheten på nedsiden defineres videre som nedre leiravsetning, se figur 6.13.

Øst i snittet var det ikke blitt utført sonderboringer, så tolkningen østover er svært usikker. Det ble observert fjell i dagen like nordøst for snittet på oversiden av nedre Eik, noe som indikerte at dyprennen avtok i mektighet mot øst og at de største mektighetene lå i bunnen av dalen. I bunnen av dalen ble det også tolket til å være et morenelag som avtok mot sidene av dalen. I øvre leiravsetningen, ble det antatt at det ikke var et sammenhengende dekke med morene.

For å hindre at de ytre grensene til modellen påvirket modelleringsresultatet ble dybden på modellen satt til å være omtrent 100 meter dypere enn den dypeste leiravsetningen. I tillegg ble grensene vest for tunnelen satt til å være over 400 m vest for tunnelen, ved grunnvannsskille ved Kirkåsen.

### 6.3.3 Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliske konduktiviteten brukt til de ulike materialene i modellen ble estimert på bakgrunn av kjent litteratur og erfaringer og data fra undersøkelser gjort i forbindelse med fagrapportene Norconsult, 2018b og Norconsult, 2018a fra Vestfoldbanen. I modellen er det antatt

tre forskjellige materialer; leire, morene og berggrunnen under. Det har blitt valgt å ikke modellere den kalkrike grå bergarten som ble observert i fjellbrønn VDK3006 (se vedlegg E.2), da den er antatt å være av lokal liten utbredelse. Den hydrauliske konduktiviteten benyttet i den numeriske modellen for de ulike materialene er vist i tabell 6.2.

**Tabell 6.2:** Antatte hydrauliske konduktiviteter for de geologiske materialene i Kobbervikdalen

Geologisk lag	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Leire	$1 * 10^{-9}$
Morene	$1 * 10^{-6}$
Granitt	$1,2 * 10^{-7}$

Den hydrauliske konduktiviteten for leiren i Kobbervikdalen har ikke blitt målt og har derfor blitt estimert på bakgrunn av empiriske data. Fra figur 3.8 i kapittel 3.1.4 kan det observeres at den hydrauliske konduktiviteten til leire varierer fra  $10^{-9}$  til  $10^{-12}$  m/s (Struckmeier og Margat, 1995). I tillegg ble det vist fra Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013 at den hydrauliske konduktiviteten for vanlige norske leirer ligger mellom  $5 * 10^{-8}$  til  $5 * 10^{-9}$  m/s (snitt på  $1,77 * 10^{-9}$ , der en standardavvik var på  $\pm 1,14$ ). På bakgrunn av verdien fra kjent litteratur velges en mettet hydraulisk konduktivitet på  $1,0 * 10^{-9}$  m/s. Siden leiren ligger i både mettet og umettet sone, ble en hydraulisk konduktivitetsfunksjon bestemt basert på en volumetrisk vanninnholdsfunksjonen. Disse funksjonene har blitt antatt å være lik de som ble benyttet i det forenklede beregningseksempellet, se kapittel 5.3. Selv om kurvene kun er et grovt anslag, kan det likevel antas at konduktiviteten blir mer realistisk enn om den var satt som konstant i den umettede sonen (Geoslope international, Ltd, 2021).

Morene er et materiale som varierer stort i hydraulisk konduktivitet, både avhengig av hvor tett det er pakket og av kornfordelingen. Den hydrauliske konduktiviteten for morene har blitt lest av figur 3.8 til å være  $10^{-6}$  til  $10^{-12}$  m/s (Struckmeier og Margat, 1995). Den mest konservative verdien på  $10^{-6}$  m/s har da blitt valgt. Både for granitten og morenelaget ble det antatt at strømmingen hele tiden var mettet slik at den hydraulisk konduktivitet kunne antas som konstant. Dette var ikke tilfellet for granitten, men det var ikke mulig å legge inn en vanninnholdsfunksjon inn i SEEP/W.

I modellen ble Drammensgranitten forenklet til å være et kontinuum og en gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet ble antatt for hele bergmassen. Norconsult AS har beregnet både den gjennomsnittlige og maksimale hydrauliske konduktiviteten for Drammensgranitten i forbindelse med prosjekteringen av Vestfoldbanen Norconsult, 2018b. Beregningene ble utført på bakgrunn av statistikk fra utførte vanntapsmålinger. Disse testene målte vanntapet i flere borhull ved ulike dybder. Målingene vil derfor kun være punktmålinger som har blitt brukt til å representere hele

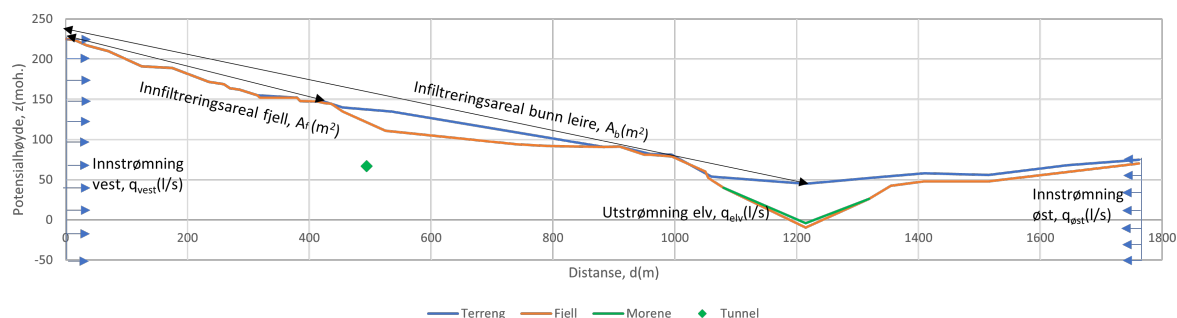
bergmassen. Fra vanntapsmålingene ble den gjennomsnittlige hydrauliske konduktivitet til Drammensgranitten beregnet til å være  $1,2 \cdot 10^{-7}$  m/s, med en maksimal verdi på  $1,7 \cdot 10^{-6}$  m/s (kan også være noe høyere). I fjellbrønn VDK3006-F ble det fra pumpetest beregnet en hydraulisk konduktivitet på  $1,5 \cdot 10^{-7}$  m/s som stemmer bra med det beregnede gjennomsnittet (Norconsult, 2018b).

### 6.3.4 Avrenningsareal

Observasjoner gjort i felt og NGU sitt kvartærgeologisk kart, figur 6.3, viste at overflaten ved det modellerte snittet i stor grad besto av leire eller berg i dagen som skrånet nedover mot øst. Både leire og berg ansees som lavpermeable masser, men leiren har en vesentlig lavere hydraulisk konduktivitet enn bergmassen. Nydannelsen av grunnvann i Kobbervikdalen vil derfor stort sett foregå i de høyereliggende områdene ved Kirkåsen, der berggrunnen ikke er dekket av leire. Vannet vil da infiltrere inn gjennom sprekke i bergmassen. En mindre mengde vann vil i tillegg infiltrere inn gjennom leiren. Etersom tunnelen ligger vest i det modellerte snittet har kun områdene vest for dalbunnen i Kobbervikdalen blitt studert.

Selv om det meste av grunnvannssdannelsen langs med snittet er antatt å foregå i bergmassen, blir likevel forskjellige infiltrasjonsarealer studert, se figur 6.14.

1. Infiltrasjonsareal  $A_b$ : Dersom det forventes at nedbøren infiltrerer langs hele snittet, fra kanten av modellen i vest til bunnen av Kobbervikdalen ( $d = 0-1215$  m). Det er da antatt like mye infiltrasjon i både leiravsetningen og bergmassen.
2. Infiltrasjonsareal  $A_f$ : Nedbøren kun infiltrerer inn i bergmassen vest i snittet fram til øvre leiravsetningen begynner ( $d = 0-385$  m).



**Figur 6.14:** Figur over to forskjellige innstrømningsarealer, samt innstrømning i vest og øst og utstrømning representert ved punkter

De to innstrømningsarealene kan bli studert i figur 6.14. Arealene av områdene langs en

enhetsmeter langs med snittet er beregnet til å være  $A_f = 396m^2$  og  $A_b = 1239m^2$ . Infiltrasjonsarealene kan videre benyttes til å regne ut den forventede avrenningen og grunnvannsdannelsen for området. Dersom den beregnede avrenningen på 503 mm/år multipliseres med arealene for de to tilfellene, blir den totale avrenningen for snittet:

$$Total\ avrenning\ fjell = 396m^2 * \frac{503}{1000 * 365 * 24 * 3600} m/s = 6,32 * 10^{-6} m^3/s$$

$$Total\ avrenning\ bunn\ leire = 1239m^2 * \frac{503}{1000 * 365 * 24 * 3600} m/s = 1,98 * 10^{-6} m^3/s$$

Dette tilsvarer hhv.  $6,32 * 10^{-3}$  l/s og  $1,98 * 10^{-2}$  l/s. Norconsult As skrev i *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, Fagrapport hydrogeologi UDK 01* at de forventet at omtrent 20% av avrenningen skulle gå til nydannelse av grunnvann. Nydannelsen av grunnvann vil da tilsammen være omtrent 100 mm/år, tilsvarende  $3,95 * 10^{-3}$  l/s og  $1,26 * 10^{-3}$  l/s for hhv. bunn leire og fjell.

### 6.3.5 Fastsettelse av grensebetingelser

På bakgrunn av ekvipotensialkartet, figur 6.10, kan den tredimensjonale grunnvannstrømningen bli antatt inn i 2D snittet. Grensebetingelsene i modellen ble da tilpasset for at trykknivået skulle stemme overens med målingene i felt. Følgende grensebetingelser ble benyttet i modellen;

- Et konstant hydraulisk potensial på begge sidene av modellen
- En fluksgrense på punktet som representerte tunnelen og en fluksgrense på punktet som representert dreneringskanalen (elva) i bunnen av nedre leiravsetning.
- En ikke strømningsgrense i bunnen av modellen
- En potensiell drenasjegrrens på terrengoverflaten, der vann med trykkehøyde over 0 m rant av som overflateavrenning.

Det konstante hydrauliske potensialet på sidene og dreneringskanalen i bunnen av nedre leiravsetning ble estimert gjennom et iterativ prosess for fire forskjellige tilfeller, se tabell 6.3. Målet var at potensialnivået ved undersøkelsesbrønnene i modellen skulle være så likt som mulig de faktiske målte forholdene. Først ble grensebetingelsene estimert for tilfellet der den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten på granitten var lik  $1,2 * 10^{-7}$  m/s. Deretter ble det samme utført når konduktiviteten ble endret til  $1,7 * 10^{-6}$  m/s. Dette ble så gjentatt både med og uten morene.

Tabell 6.3 viser at det ikke ble valgt forskjellige grensebetingelsene med og uten morene. Dette tyder på at trykkehøyden ble lite påvirket av morenelaget uavhengig av de to forskjellige hydrauliske konduktivitene.

**Tabell 6.3:** Grensebetingelsene øst og vest i domenet, samt punktet som representerer utstrømningen fra elven i bunnen av dalen.

Hydraulisk konduktivitet granitt (m/s)	Morene	Konstant hydraulisk potensial vest (m)	Konstant hydraulisk potensial vest (m)	Utstrømning elv ( $m^3$ )
$1,2 * 10^{-7}$	Med	173	75	$-3,29 * 10^{-6}$
	Uten	173	75	$-3,29 * 10^{-6}$
$1,7 * 10^{-6}$	Med	170	75	$-4,35 * 10^{-5}$
	Uten	170	75	$-4,35 * 10^{-5}$

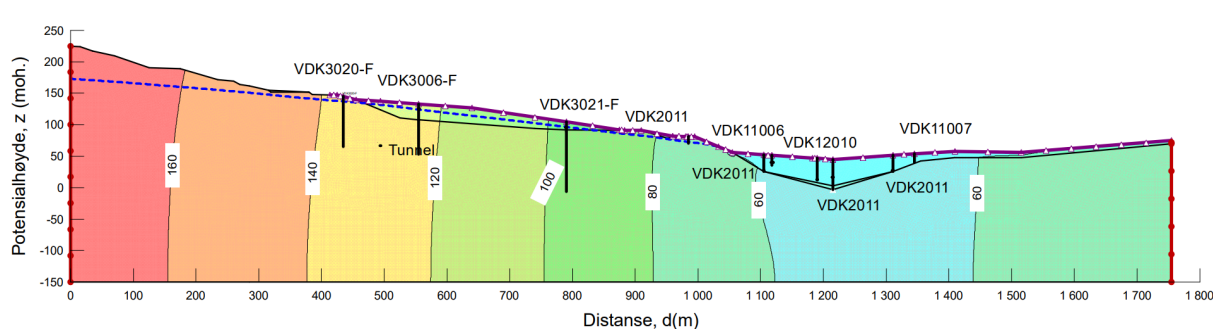
Grensebetingelsene måtte derimot tilpasses den hydrauliske konduktiviteten til granitten. I kapittel 5.4.7 ble det vist at både trykkehøyden og innlekkasjemengdene fra sidene ble påvirket av en endring i den hydrauliske konduktivitetene. Av den grunn måtte grensebetingelsene på sidene og dremskanalen tilpasses slik at trykkehøyden beregnet i modellen stemte overens med potensialmålingene i undersøkelsesbrønnene.

Det hydrauliske potensialet øst i modellen ble satt konstant lik 75 m uavhengig av den hydrauliske konduktiviteten. Nivået tilsvarte da at grunnvannsnivået var oppe ved terrengoverflaten. Denne antagelsen vil være noe usikkert ettersom det ikke var poretrykkmålinger øst for dalbunnen. Antagelsen om at grunnvannsnivået står i dagen ved den aktuelle grensen ble tatt på bakgrunn av at modellen ble utvidet i østlig retning til vannskillet ved Vardåsen. Ved en større modell ble effekten av ulike grensebetingelser vurdert. Utenom når nivået ble satt veldig lavt, resulterte modelleringen i at grunnvannsnivået var tilnærmet ved terrengnivå ved den opprinnelige lokasjonen for de ulike potensialene som ble undersøkt. I realiteten vil trolig grunnvannsnivået ligge litt under terrengoverflaten. For å spare beregningskapasitet er ikke hele den valgte modellen til Vardåsen tatt med i sluttmodellen.

Det ble også forsøkt å legge inn nedbør som en grensebetningelse i domenet. Dette ble sett bort i fra, da poretrykkmålingene i leiravsetningene ga resultater som ikke samsvarte med det som ble målt i felt. Nedbør ble derfor ikke tatt med i beregningseksemplene.

## 6.4 Resultat og validering av initiell modell

Figur 6.15 viser hvordan de satte grensebetingelsene gjør at det hydrauliske potensialet er konstant 173 m vest i domenet, før den gradvis reduseres mot bunnen av domenet som følge av at vann lekker ut på overflaten og via dreneringskanalen i bunnen av nedre leiravsetning. I øst er potensialnivået satt som konstant 75 m før det gradevis reduseres mot vest og bunnen av dalen. Figur 6.15 viser også lokasjoner på interpolerte poretrykksmålere/grunnvannsnivåmålere i felt.



**Figur 6.15:** Figur over hvordan det hydrauliske potensiale reduseres fra kantene i domenet til bunnen av leiravsetningen i modellen

### 6.4.1 Vurdering av infiltrasjon fra grenebetingelser i modellen

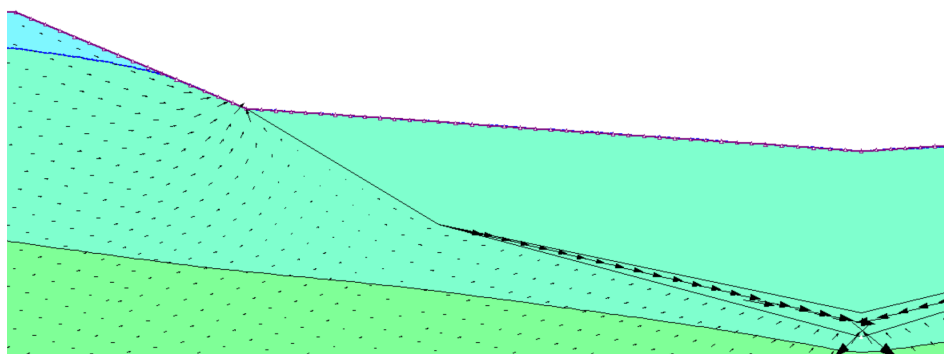
Tabell 6.4 oppsummerer den vannmengden som strømmer inn eller ut av modellen ved initiale forhold. Vannmengdene inn og ut domenet er oppsummert både med den gjennomsnittlig og den maksimal hydrauliske konduktivitet, med og uten morene. På grunn av det konstante hydrauliske potensialet og stasjonære vil det ikke være forskjell på mengden vann som strømmer inn og ut av domenet. Det vil si at vannbalansen blir opprettholdt. Av vannet som kommer inn i domenet vil alt strømme inn fra grensene, da nedbør ikke er tatt med i beregningene. Vannet som strømmer ut av domenet vil før tunnelinnlekkasjen enten sive ut via overflateavrenning eller via utstrømning fra dreneringskanalen i bunnen av nedre leiravsetning. Merk at resultatet fra modelleringen viser at vann strømmer ut på overflaten i all hovedsak mellom øvre og nedre leiravsetning eller ved dreneringskanalen, se figur 6.16. Dette stemmer bra med observasjoner gjort i felt, der grunnvannsoppkomme ble observert rett ovenfor dagens Vestfoldbane. Beregningene i tabell 6.4 viser at omtrent 70% av vannet som renner ut av domenet drenerer ut via dreneringskanalen som representerer elva, mens resterende 30% renner av som overflateavrenning. Av vannet som kommer inn i domenet, vil litt over 70% infiltrere inn vest i domenet, mens litt under 30% infiltrerer inn fra øst ved initiale forhold.

Tabell 6.4 viser også at når den hydrauliske konduktiviteten øker, vil mer vann infiltrere inn fra



**Tabell 6.4:** Innstrømning og utstrømningsmengder i domenet før innlekkasjen i tunnel

Hydraulisk konduktivitet granitt (m/s)	Morene	Utstrømning dreneringskanal		Overflateavrenning		Innstrømning vest		Innstrømning øst	
		(l/s)	Prosent av utstrømning	(l/s)	Prosent av utstrømning	(l/s)	Prosent av innstrømning	(l/s)	Prosent av innstrømning
$1,2 * 10^{-7}$	Med	$-3,29 * 10^{-3}$	71 %	$-1,34 * 10^{-3}$	29 %	$3,37 * 10^{-3}$	73 %	$1,26 * 10^{-3}$	27 %
	Uten	$-3,29 * 10^{-3}$	70 %	$-1,42 * 10^{-3}$	30 %	$3,38 * 10^{-3}$	72 %	$1,32 * 10^{-3}$	28 %
$1,7 * 10^{-6}$	Med	$-4,35 * 10^{-2}$	69 %	$-1,97 * 10^{-2}$	31 %	$4,58 * 10^{-2}$	72 %	$1,74 * 10^{-2}$	28 %
	Uten	$-4,35 * 10^{-2}$	69 %	$-1,96 * 10^{-2}$	31 %	$4,58 * 10^{-2}$	73 %	$1,73 * 10^{-2}$	27 %

**Figur 6.16:** Figur med vektorpiler som indikerer hvor grunnvannet strømmer for initielle forhold. Merk at grunnvannet strømmer ut før leiravsetningen eller via drenskanalen.

siden. Det er kun den hydrauliske konduktiviteten som blir endret, og av den grunn vil innstrømningsarealet  $A$  og den hydrauliske gradienten  $i$  være den samme. Fra Darcys lov,  $Q = K * A * i$ , følger det at når den hydrauliske konduktivitet  $K$  øker, vil innlekkasjemengden  $Q$  øke tilsvarende mye hvis gradienten skal opprettholdes. Av den grunn vil den prosentvise inn- og utstrømningsmengden være den samme uavhengig av hva den hydrauliske konduktiviteten er. Det kan også observeres at den prosentvise innstrømningen med og uten morene er tilnærmet lik.

For å undersøke om mengden vann som strømmer inn i modellen fra vest er realistisk, kan vannmengden sammenlignes med forventet avrenning og grunnvannstilsig for infiltrasjonsområdene. Forventet total avrenning ble beregnet i kapittel 6.3.4 til å være hhv.  $6,32 * 10^{-3}$  l/s for avrenningsarealet bestående av kun fjell og  $1,98 * 10^{-3}$  l/s for avrenningsarealet bestående av både fjell og leire. For tilfellet der den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten til bergmassen ble benyttet, kan det observeres i tabell 6.5 at vannmengden som strømmer inn i domenet fra vest tilsvarer 17% av den antatte avrenningen til området. Dette stemmer godt med antagelsen om at 20% av avrenning går til grunnvannsdannelse. Vannmengden inn i domenet vil derimot være for stor dersom infiltreringsarealet til bunnen av leiren ble benyttet. Dersom den maksimale hydrauliske konduktiviteten ble satt for granitten vil vannmengden inn i domenet være en god del større enn den forventede avrenningen til området. Dette fordi en høyere

hydraulisk konduktivitet gjør at mer vann strømmer inn i domenet for å opprettholde trykknivået ved grensene. Som følger ble den prosentvise innstrømningen i domenet for stor i forhold til den antatte avrenningen. Oppsummert var det kun tilfellet der innstrømningsarealet til fjell og der den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten ble benyttet som ga realistiske vannmengder inn i domenet.

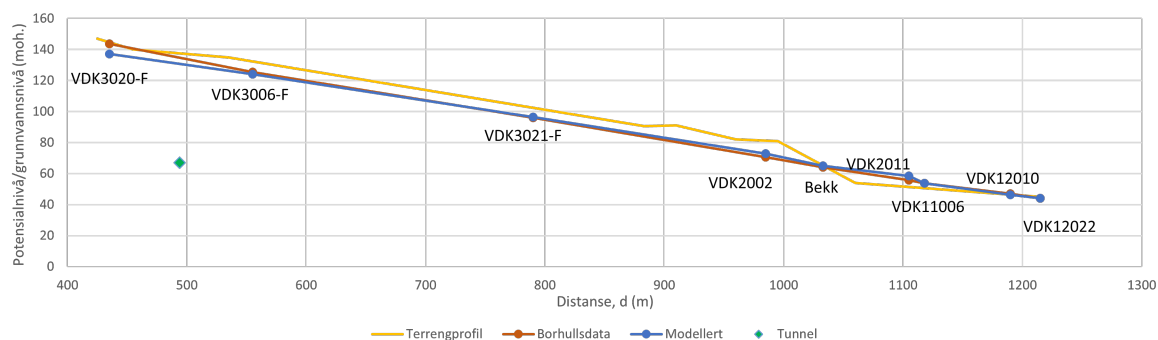
**Tabell 6.5:** Sammenligning av innstrømning av vann fra kanten vest i domenet med den naturlige avrenningen for samme område.

Hydraulisk konduktivitet granitt (m/s)	Innsivings-område	Innsiving vest (l/s)	Antatt avrenning (l/s)	Prosent av avrenning
$1,2 * 10^{-7}$	Kun fjell	$3,37 * 10^{-3}$	$1,98 * 10^{-2}$	17 %
	Bunn leire	$3,37 * 10^{-3}$	$6,32 * 10^{-3}$	53 %
$1,7 * 10^{-6}$	Kun fjell	$4,58 * 10^{-2}$	$1,98 * 10^{-2}$	232 %
	Bunn leire	$4,58 * 10^{-2}$	$6,32 * 10^{-3}$	724 %

#### 6.4.2 Verifisering av trykktensial

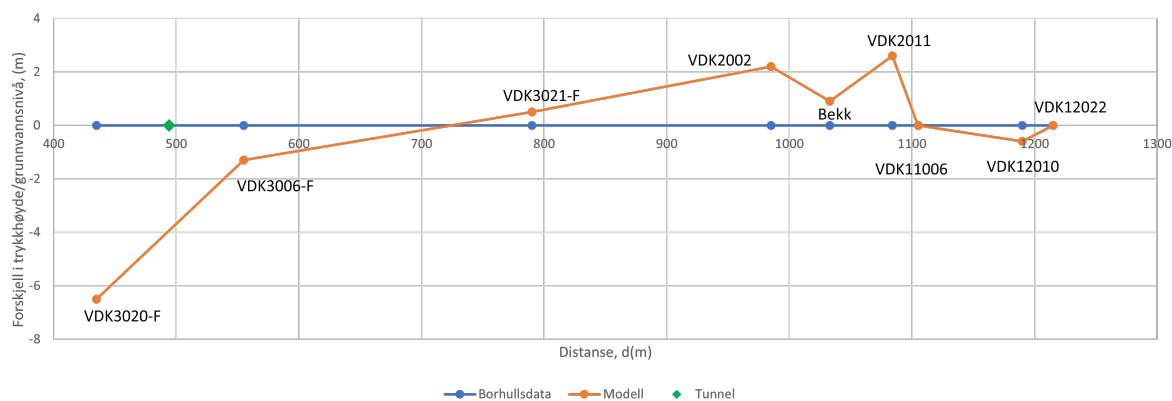
Poretrykket som blir beregnet i modellen kan sammenlignes med poretrykket målt i felt, se figur 6.17. Målingene i felt ble plottet inn i det modellerte snittet på bakgrunn av avlesning fra ekvipotensialkartet, figur 6.10. Piezometermålingene kan kun brukes til å verifisere modellen, og kan derfor ikke bli lagt direkte inn i modellen som grensebetingelse. Grensebetingelsene i modellen ble satt gjennom en iterativ prosess for at trykkehøyden og grunnvannsnivået skal ligne mest mulig på de faktiske målingene. Figur 6.17 viser likhetene mellom beregnet og målt poretrykk. Det er spesielt satt fokus på at trykket i bunnen av nedre leiravsetning ligner mest mulig de faktiske målingene, da dette er et kritisk område med tanke på setninger og skade på bebyggelse. Figur 6.17 viser at den modellerte trykkehøyden kan være representativ for de faktiske forholdene. Blant annet viser både modellen og observasjoner i felt at vann vil strømme ut i dagen på oversiden av dagens Vestfoldbane. På nedsiden av Vestfoldbanen bekrefter beregningene også overtrykket som ble målt i enkelte brønner.

I figur 6.18 kan beregnet poretrykk sammenlignes i mer detalj med det målte poretrykket fra piezometermålingene. Det beregnede poretrykket er en del mindre enn de faktiske forholdene i starten, før det ut mot oversiden av dagens Vestfoldbane ved  $d = 1000$  er noe over. På denne lokasjonen strømmer grunnvann frem i dagen og trykkehøyden er 0 m. Dette stemmer bra med de beregnede resultatene. Videre nedenfor dagens Vestfoldbane litt før  $d = 1100$  m spriker



**Figur 6.17:** Målt og modellert trykk i brønnene sett i forhold til terreng før tunneldrivingen

poetrykkmålingene noe fra de faktiske målingene. Det kan være flere årsaker til dette. Blant annet kan borepunkt VDK2011 ha blitt interpolert inn på feil lokasjon. Figur 6.4 viste at leirmektighetene varierte stort i mektighet ut fra der snittet er plassert. Det er ikke nødvendigvis at alle målingene er representative i snittet. I tillegg har ekvipotensialkartet kun trukket rette linjer mellom borepunktene, noe som gjør at terrengformasjoner ikke er tatt hensyn til. Målingene mot d = 1200 m er mer representative, da de ligger nærmere det modellerte snittet.



**Figur 6.18:** Forskjellen mellom målt og beregnet poetrykk før tunneldrivingen.

## 6.5 Resultat og diskusjon av modell med innlekkasje til tunnel

### 6.5.1 Trykkpotensial

Tunnelen i Kobbervikdalen har blitt definert på samme måte som for beregningseksempelet i kapittel 5. Tunnelen ble lagt til som et punkt med en påført fluksgrænsebetingelse som trakk vann ut av domenet med en konstant rate. Innlekkasjen fører derfor til at det omkringliggende trykket blir redusert. Over tid vil det reduserte trykket stabilisere seg oppover i avsetningen før en ny likevekt ved stasjonær strømming blir nådd. Desto større innlekkasjen er, desto mer vil trykket bli redusert.

Tabell 6.6 oppsummerer hvor mye trykkehøyden reduseres i bunnen av leirlaget overliggende tunnelen og i bunnen av leirlaget ved nedre leiravsetning. Målingene er lest av for de to tilfellene der den gjennomsnittlige og maksimale hydrauliske konduktiviteten på granitten ble benyttet. Det kan observeres at den største trykkehøydereduksjonen som forventet skjer rett over tunnelen, mens 720 meter lengre borte i bunnen av Kobbervikdalen ikke har blitt redusert like mye. Ved det aktuelle snittet er det antatt at tunnelen ligger på 70 m dybde, noe som vil si at selv med den største innlekkasjen vil det være over 30 meter ved vann over tunnellopet. ”Pumpe-effekten” beskrevet i 5.4.2 vil derfor være unngått. Dette gjelder uavhengig av de testede hydrauliske konduktiviteten.

**Tabell 6.6:** Trykkehøydereduksjonen  $\Delta h_p$  som følge av ulike innlekkasjer lest av i bunnen av leirlaget rett over tunnelen og i bunnen av leiravsetningen i Kobbervikdalen for to ulike hydrauliske konduktiviteter på bergmassen.

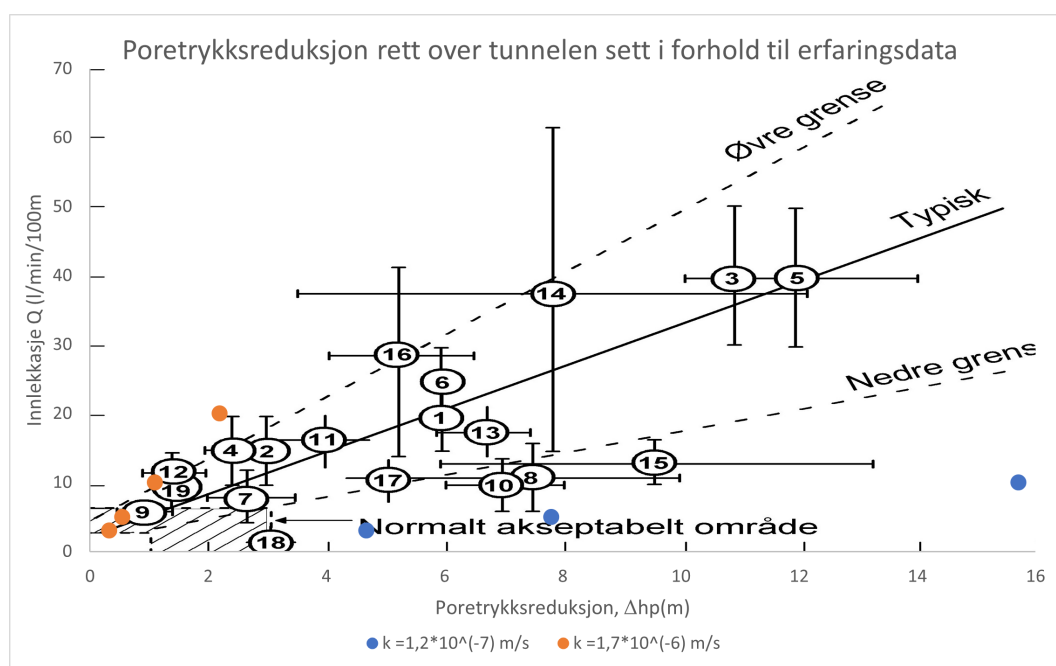
Innlekkasje Q (l/min/100m)	Trykkehøydereduksjon $\Delta h_p$ rett over tunnelen bunn leire (m)		Trykkehøydereduksjon $\Delta h_p$ bunn nedre leiravsetning (m)	
	K = $1,2 * 10^{-7}$ m/s	K = $1,7 * 10^{-6}$ m/s	K = $1,2 * 10^{-7}$ m/s	K = $1,7 * 10^{-6}$ m/s
3	4,7	0,3	0,7	0,0
5	7,8	0,5	1,1	0,1
10	15,7	1,1	2,4	0,2
20	31,6	2,2	5,2	0,3

Som en følge av innlekkasjen vil trykkehøyden i leiren over tunnelen og nedstrøm for tunnelen bli redusert. Dette kan potensielt føre til setninger. Mektigheten på den øvre leiravsetningen er antatt å være omtrent 14 meter rett over tunnelen. For innlekkasjer på 10 og 20 l/min/100m vil grunnvannsstanden rett over tunnelen synke slik at grunnvannsstanden ligger i bergmassen og

under leiravsetningen. For den nedre leiravsetningene vil ikke poretrykket bli like mye redusert og setningspotensialet blir derfor mindre. Når trykkehøyden reduseres 1-3 meter i bergmassen, vil det normalt ikke bli setninger på mer enn noen få cm (SVV, 2003).

Tabell 6.6 viser også at størrelsen på trykkehøydereduksjonen avhenger av den hydrauliske konduktiviteten. Som beregningseksempelet viste ble trykkehøyden mindre redusert ved en høyere hydraulisk konduktivitet. Grunnen til dette var på grunn av at høyere hydraulisk konduktivitet gjorde at mer vann lettere strømmet inn i domenet. Mer vann fra sidene vil erstatte vannet i tunnelen, slik at nedstrøms tunneltraseen i modellen ikke blir påvirket i like stor grad. Av den grunn vil det derfor bli mindre effekt på trykkehøyden ved innlekkasjer i modellen når det er høye hydrauliske konduktiviteter.

Figur 6.19 illustrerer hvordan trykkehøydereduksjonen rett over tunnelen er i forhold til erfaringsdataene. Den maksimale hydrauliske konduktiviteten gir en trykkehøydereduksjon som er i øvre sjiktet av det normale, mens den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten vil motsatt gi en trykkehøydereduksjon som er en del lavere enn erfaringstallene.



Figur 6.19: Trykkehøydereduksjonen rett over tunnelen sett i forhold til erfaringstall fra SVV, 2003.

### 6.5.2 Med og uten morene

Som nevnt over kan det observeres at det er liten forskjell på poretrykksreduksjonen dersom morenelaget ble fjernet fra domenet. Tabell 6.7 viser trykkehøydereduksjonen i nedre leiravsetning

for ulike innlekkasjemengder. Det kan observeres at det ikke er noen forskjell på trykkehøydereduksjonen med og uten morene. At det ikke var noen forskjell ble også bekreftet i tabell 6.4 i kapittel 6.4.1 som viste liten forskjell i innlekkasjemengdene dersom morenelaget ble fjernet fra domenet. En mulig årsak til at morenelaget ikke påvirker poretrykket og innlekkasjemengden i særlig stor grad er fordi morenelaget har en relativ liten utbredelse i både bredde og lengderetning. Dersom morenelaget hadde vært satt som sammenhengende opp gjennom begge leiravsetningene hadde trolig påvirkningen vært større, da en høyere hydraulisk konduktivitet fører mer vann inn i modellen. I tillegg var det ikke så stor forskjell på den hydrauliske konduktiviteten på granitten ( $1,2 \cdot 10^{-7}$  m/s) og morenelaget ( $1 \cdot 10^{-6}$  m/s).

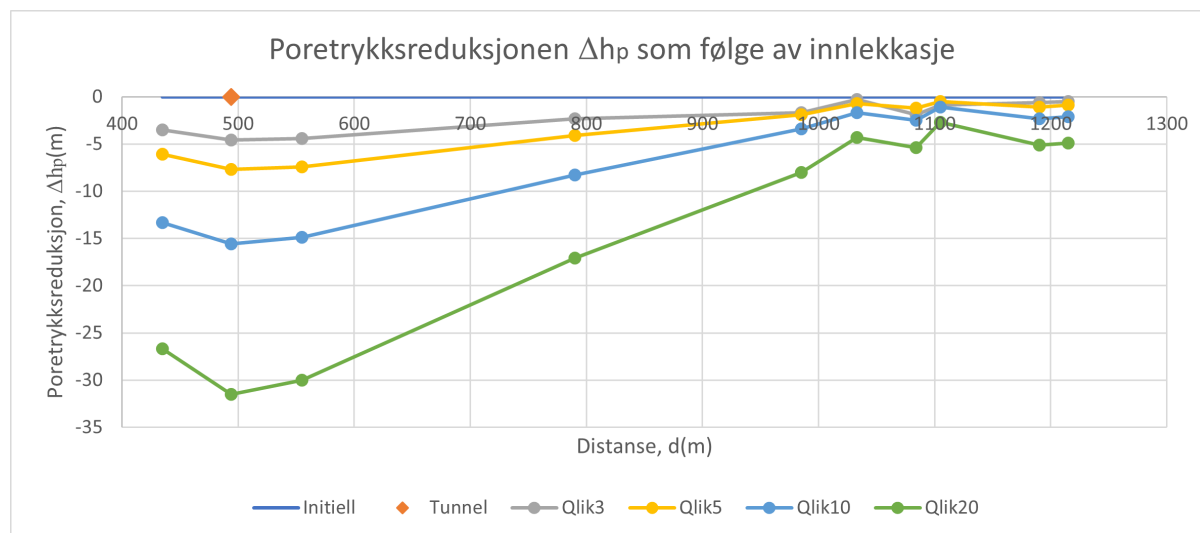
**Tabell 6.7:** Trykkehøydereduksjon  $\Delta h_p$  med og uten morene lest av i bunnen av nedre leiravsetning.

Innlekkasje Q (l/min/100m)	Trykkehøydereduksjon (m) ved $k = 1,2 \cdot 10^{-7}$ m/s		Trykkehøydereduksjon (m) ved $k = 1,7 \cdot 10^{-6}$ m/s	
	Med morene	Uten morene	Med morene	Uten morene
3	0,7	0,7	0,0	0,0
5	1,1	1,1	0,1	0,1
10	2,4	2,4	0,2	0,2
20	5,2	5,2	0,3	0,3

### 6.5.3 Influensavstand

Trykkehøydereduksjonen sett i forhold til avstand fra tunnel kan studeres i figur 6.20. Tunnelen ligger ved omtrent  $d = 500$  m i det modellerte snittet. Som følge av at ulike mengder vann infiltrerer inn i tunnelen, vil trykkehøyden bli redusert både øst og vest for tunneltraseen. Det kan observeres at trykkehøydereduksjonen blir tilnærmet lineært mindre mot øst helt bort til omtrent ved dagens Vestfoldbane der vann strømmer ut i dagen (ved  $d = 1035$ ). Dette tilsvarer et influensområde er på omtrent 600 m. Vannet som lekker inn i tunnelen vil gjøre at mindre vann renner nedstrøms tunnelen. Som en konsekvens vil nedre leiravsetning bli mindre matet med grunnvann og trykkehøyden vil reduseres i avsetningen som følge av innlekkasjen. Dette gir et økt influensområde. Den konstante dreneasje kanalen som representerer elva i bunnen av Kobbervikdalen, bidrar også til å redusere trykknivået ved den konstante utstrømningen. Kurvene i figur 6.20 vil derfor slake ut. Dersom kurvene hadde fortsatt videre mot øst, ville tilsig fra den østlige delen av domenet bidra til at kurven slaker ut mot 0 m. Eppersom det ikke er noen poretrykksmålere den østre delen av Kobbervikdalen, er dette ikke tatt med i figuren.

Trykkehøydereduksjonen mot avstand kan også sammenlignes med erfaringsdata fra SVV, 2003,



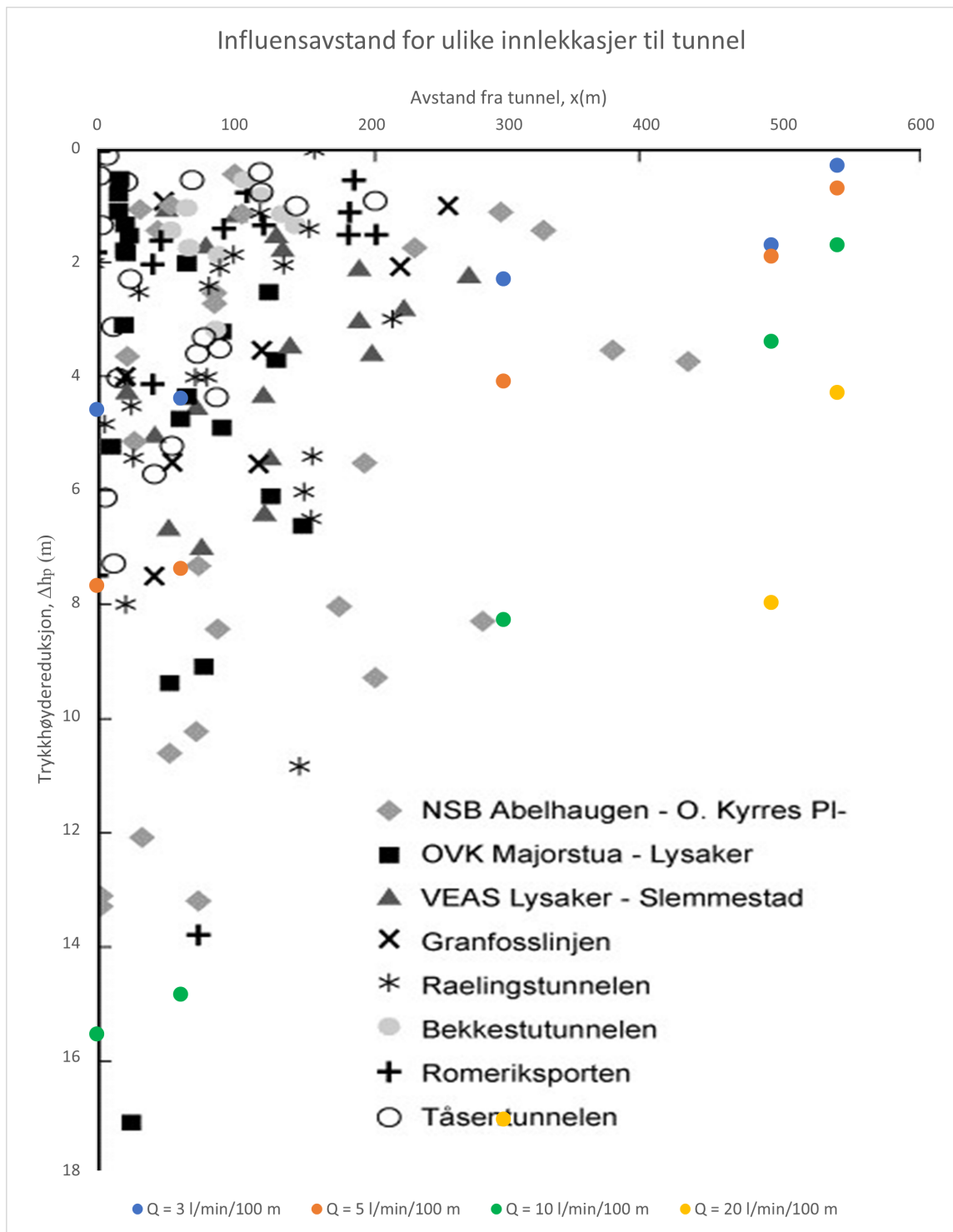
**Figur 6.20:** Trykkehødereduksjonen for 4 ulike innlekkasjemengder sett ut i fra initielle forhold

se figur 6.21. Det kan observeres at innlekkasje på 3 og 5 l/min/100 m ligger i nedresjiktet for det som er vanlig. En større innlekkasje på 10 og 20 l/min/ 100 m vil derimot ligge utenfor erfaringsdataene. Uavhengig av innlekkasjemengde kan det observeres at kurven slaker ut mot en influensavstand på omtrent 600 m. I kapittel 5.4.2 ble det vist at den hydrauliske gradienten  $i$  er proporsjonal med innlekkasjemengden  $Q$  som følge av Darcys lov når innstrømningsarealet  $A$  og den hydrauliske konduktiviteten  $K$  er likt. Dette gjør at når innlekkasjen øker, vil den hydrauliske gradienten øke, noe som fører til at influensavstanden i SEEP/W blir omtrent likt uavhengig av innlekkasjemengde.

I kapittel 2.1 figur 2.3 ble det vist at en innlekkasje på 5 l/min/100 m typisk hadde en influensavstand på maksimalt 100-200m, mens en stor innlekkasje på 20 l/min/100m påvirket opp mot 600 m. Influensavstanden i modellen er derfor større enn det som kan forventes. Dette skyldes til dels grensebetingelsene satt i modellen, og dels det hellende terrenget som kutter noe av grunnvannsstrømningen ved innlekkasje.

#### 6.5.4 Inn- og utstrømningsmengder

Som følge av ulike innlekkasjemengder til tunnel vil vannstrømningen inn og ut av domenet bli endret. Tabell 6.8 viser at når mer vann lekker ut av domenet vil den totale vannmengden inn og ut av domenet bli større. I tillegg vil den prosentvise fordelingen endre seg. Fra at omtrent 71% av vannet strømmer ut av domenet ved initielle forhold og 29% til overflateavrenning, vil det ved en innlekkasje på 20l/min/100m være 47% av vannet som renner ut via dreiskanalen og kun 6% som renner av som overflatevann. Resterende vannmengde vil gå til innlekkasje. Overflateavrenningen



**Figur 6.21:** Poretrykksreduksjonen som følge av ulike innlekkasjemengder med avstand fra tunnelen, sett i forhold til erfaringsdata fra SVV, 2003.



vil da bli betydelig redusert, noe som i sin tur kan skape konsekvenser på ytre miljø. Dette gjelder når den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten ble benyttet for granitten.

**Tabell 6.8:** Prosentvis innlekkasje inn og ut av domenet for ulike innlekkasjemengder med den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten på bergmassen.

Q	Utstrømning			Innstrømning		Total vannmengde inn/ut (l/s)
	Prosent til tunnelinnlekkasje	Prosent til dremskanal	Prosent til overflateavrenning	Prosent inn fra vest	Prosent inn fra øst	
Initiell	0 %	-71 %	-29 %	73 %	27 %	$\pm 4,63 * 10^{-3}$
3	-10 %	-66 %	-24 %	74 %	26 %	$\pm 4,98 * 10^{-3}$
5	-16 %	-63 %	-21 %	75 %	25 %	$\pm 5,22 * 10^{-3}$
10	-29 %	-57 %	-15 %	77 %	23 %	$\pm 5,81 * 10^{-3}$
20	-47 %	-47 %	-6 %	79 %	21 %	$\pm 7,03 * 10^{-3}$

Tabell 6.8 viser også hvordan innstrømningen til domenet blir påvirket av forskjellige tunnelinnlekkasjer. Etersom tunnelen ligger i den vestlige delen av modellsnittet vil mer vann strømme inn fra vest for å opprettholde det konstante hydrauliske potensialet på sidene. Dette gjør at den prosentvise fordelingen av vann inn fra sidene vil endre seg ved økende innlekkasje. I vest vil prosentvis mer vann strømme inn i domenet ved økende innlekkasje, mens i øst vil prosenten reduseres tilvarende mye.

Når den hydrauliske konduktiviteten på bergmassen ble økt fra den gjennomsnittlige verdien til den maksimale verdien ble det vist i kapittel 6.4.1 at mengden vann inn og ut av domenet økte betraktelig. Som følger vil den prosentvise fordelingen av vannmengdene bli annerledes, se tabell 6.9. En innlekkasje til tunnel på 20 l/min/100 m vil for den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten føre til at omtrent 47% av den totale vannmengden ut av domenet går til tunnelinnlekkasje, mens for den maksimale konduktiviteten tilsvarer det kun omtrent 5 % av den totale vannmengden. En høyere hydraulisk konduktivitet i modellen vil ved de satte grensebetingelsene derfor kunne føre til mindre endringer på poretrykket enn ved en lavere hydraulisk konduktivitet. Det kan observeres at den prosentvise innstrømningsmengdene vest og øst i domenet nesten ikke blir påvirket av tunnelinnlekkasjene når den maksimale hydrauliske konduktiviteten blir benyttet.

**Tabell 6.9:** Prosentvis innlekkasje inn og ut av domenet for ulike innlekkasjemengder med den gjennomsnittlige maksimale hydrauliske konduktiviteten på bergmassen.

Q	Utstrømning			Innstrømning		Total vannmengde inn/ut (l/s)
	Prosent til tunnelinnlekkasje	Prosent til drengkanal	Prosent til overflateavrenning	Prosent inn fra vest	Prosent inn fra øst	
Initiell	0 %	-69 %	-31 %	72 %	28 %	$\pm 6,32 * 10^{-2}$
3	-1 %	-68 %	-31 %	73 %	27 %	$\pm 6,35 * 10^{-2}$
5	-1 %	-68 %	-30 %	73 %	27 %	$\pm 6,38 * 10^{-2}$
10	-3 %	-68 %	-30 %	73 %	27 %	$\pm 6,44 * 10^{-2}$
20	-5 %	-66 %	-29 %	73 %	27 %	$\pm 6,56 * 10^{-2}$

## 6.6 Diskusjon av de største usikkerhetene med modellering av snitt i Kobbervikdalen

Riktig definerings av den hydrauliske konduktiviteten er som for beregningseksempelen en av de største usikkerhetsfaktorene ved modellering av grunnvannssenkningen i Kobbervikdalen. Den hydrauliske konduktiviteten og det konstante hydrauliske potensialet på grensene av modellen hadde stor innvirkning på mengden vann som strømmet inn i domenet. Som følge av grensebetingelsene vil vann strømme inn i domenet for å opprettholde det hydrauliske potensialet på sidene. En høyere hydraulisk konduktivitet i bergmassen førte da til at mer vann strømmet inn i domenet for at trykknivået skulle bli opprettholdt. Når den maksimale hydrauliske konduktiviteten ble benyttet for granitten i Kobbervikdalen ble vannmengdene inn i modellen unaturlig stor i forhold til den forventede avrenningen til området. Ble derimot den gjennomsnittlige verdien benyttet ble vannmengdene mer realistiske. Dette forutsatte at infiltreringen av nedbør kun skjedde i bergmassen og ikke i leiravsetningene med en lavere hydraulisk konduktivitet.

Ved at mer vann strømmet inn i domenet med en høyere hydraulisk konduktivitet, ble poretrykket mindre påvirket av en tunnelinnlekkasje. Mer vann gjorde at en mindre prosentandel av den totale vannmengden gikk til tunnelinnlekkasje. Slik modellen er satt opp i SEEP/W vil derfor en høyere hydraulisk konduktivitet i bergmassen trolig gjøre at de beregnede konsekvensene av en tunnelinnlekkasje blir mindre. Dette ble også vist når trykkehøydereduksjonen over tunnelen ble sammenlignet med erfaringsdata. En høy hydraulisk konduktivitet gjorde at trykkehøydereduksjonen lå innenfor det som var vanlig fra erfaringsstall, se figur 6.19, mens en lavere gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet ga en høyere trykkehøydereduksjon enn det erfaringsdataene tilsa. Det er noe usikker hvor representativ denne tolkningen er, da den høye hydrauliske konduktiviteten førte til urealistiske store

vannmengder inn i domene.

En av de største usikkerhetene ved å modellere et snitt fra et gitt område er å representere de faktiske grunn- og poretrykksforholdene korrekt i modellen. Både geometri og materialparamtere må da konseptualiseres inn i modellen. Ved hjelp av *Hoydedata.no* kunne overflateformen enkelt tegnes opp for snittet ved Kobbervikdalen, men lagdelingen mot dypet var noe mer usikkerhet. Lagdelingen ble antatt på bakgrunn av tolkninger fra sonderboringer og erfaringer fra feltobservasjoner. Disse tolkningene kan være noe usikre, da blant annet store steiner kunne bli tolket som fjell. I tillegg måtte boringene i 3D-profilen interpoleres inn i 2D-snittet. De nærmeste målingene ble da vektlagt mest.

Resultatet av beregningene viste at morenelaget hadde lite innvirkning på beregningsresultatet. Grunnen til dette var trolig på grunn av at utbredelsen på morenelaget ikke var satt større. Av den grunn vil ikke utbredelsen på morenelaget være den største usikkerheten med modellering av snittet fra Kobbervikdalen.

En stor usikkerhet fra modellering av det aktuelle snittet er om de satte grensebetingelsene i modellen stemmer overens med de faktiske poretrykksmålingene i felt. Ettersom dataene fra poretrykksmålerne varierte både som følge av årstidsfluktasjoner, lokale variasjoner og dybden på målerne, ble det valgt en gjennomsnittlig verdi for den dypeste måleren. Denne verdien ble så interpolert inn i 2D snittet. Nødvendigvis vil ikke alle målingene være interpolert korrekt inn i 2D - snittet. Ettersom grunnvannsstrømning i realiteten er et tredimensjonalt problem, kan det være utfordrende å korrelere alle punktene inn i snittet. All grunnvannsstrømning vil ikke nødvendigvis strømme langs med snittet, men sive ut på skrått eller tvers. Dette ble ikke tatt høyde for i modellen og er en av svakhetene ved grunnvannsmodellering i 2D.

Det kan også være flere usikkerheter med selve målingene og tolkningene av piezometermålingene. Blant annet vil det være en usikkerhet om alle målingene er representativ og om den gjennomsnittlige verdien er korrekt å bruke, da ikke alle målingene ble lest av over en lengre tidsperiode (NGF, 1982). I tillegg hadde noen av poretrykksmålingene store fluktasjoner, mens andre ikke hadde det. Ekstreme verdier på start og slutten av poretrykksmålingene ble heller ikke tatt med. På bakgrunn av tolket gjennomsnittlig potensialhøyde fra piezometermålingene ble ekvipotensialkartet tegnet opp. Mellom punktene ble det tegnet opp rette linjer, noe som gjorde at lokal påvirkning fra terrengformasjonene, slik som forsenkninger og ravinedalene, ikke ble tatt hensyn til. Ekvipotensialkartet var ikke tegnet opp øst i modellen, da det ikke var gjennomført poretrykksmålinger i felt i området. Dette førte til en svært usikker tolkning av poretrykket og dermed fastsettingen av grensebetingelsene øst i domenet. Hvor godt poretrykksmålingene ble representert i modellen med de satte grensebetingelsene er derfor

avgjørende for å få ned usikkerheten i modellen.

Når den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten ble benyttet for granitten og et avrenningsareal kun bestående av fjell, viste beregninger at mengden vann som strømmet inn i domenet fra vest var nokså realistisk i forhold til forventet avrenning for området. Likevel er det knyttet flere usikkerheter til mengden vann som strømmer inn i domenet. En usikkerhet kan blant annet være at avrenningsområdet ikke stemmer. Det ble antatt at alt vannet infiltrerte inn i bergmassen, men i realiteten vil også en mindre del kunne infiltrere inn i leiravsetningene. Nedbør- og evapotranspirasjonsvariasjoner gjennom året vil også gjøre at tilsiget av grunnvann vil kunne variere. Antagelsen fra Norconsult om at 20% av avrenningen går til grunnvann, kan også være noe usikkert (Norconsult, 2018b).

Det kan være knyttet noen usikkerheter til fastsettelse av den hydrauliske konduktiviteten. Konduktiviteten for bergmassen ble bestemt på bakgrunn av statistikk fra utførte vanntapsmålinger (Norconsult, 2018b). Slike tester vil kun gi punktmålinger, noe som gjør at de utførte målingene ikke alltid er representative for hele bergmassen. De lokale forholdene med sprekker og svakhetsoner som ble påtruffet mot dypet vil avgjøre hvor representative datene er. Som følger kan det være stor spredning i resultatet og derfor noe usikkert hvilke konklusjoner som kan trekkes fra disse testene (Gustafson, 2009). For leiravsetningene og morenen var ikke den hydrauliske konduktiviteten blitt funnet i prosjekteringen av tunnelen. Konduktiviteten måtte derfor bestemmes på bakgrunn av erfaringer og kjent litteratur. Det er ikke gitt at den hydrauliske konduktivitetesfunksjonen og den valgte verdien for morenen stemmer med de faktiske forholdene, noe som er med på å skape en stor usikkerhet i beregningene. Blant annet kan det øverste laget i leiren bestå av tørrskorpa som kan ha en høyere hydraulisk konduktivitet enn den underliggende leiren (SVV, 2010). Dette ble ikke skilt på i modellen, men påvirker trolig resultatet i mindre grad. For alle materialene benyttet i modellen er det antatt at homogent og isotropt materiale. I realiteten vil konduktiviteten kunne variere i ulike retninger og intensiteter i rommet, men dette ble ikke tatt høyde for i modellen.

De overnevnte usikkerhetene er i stor grad knyttet til brukeren av SEEP/W om å tolke målinger riktig og gjøre korrekte antagelser for å konseptualisere virkeligheten inn i modellen. Dette avhenger i stor grad av erfaringen og kunnskapen til brukeren. For at resultatene av modelleringen skal bli så nøyaktige som mulig bør derfor modelleringen starte enkelt, for så å øke kompleksiteten stegvis. Dette for å undersøke at geometri, materialeegenskaper og grensebetingelser er korrekt. I tillegg vil en enkelt modell skape forståelse av de teknikkene som benyttes, samt gi en økt kunnskap om hvordan resultatene skal tolkes.

SEEP/W bygger på antagelsen om Darcys lov i hele domenet. Denne antagelsen stemmer

nødvendigvis ikke med de faktiske forholdene. For eksempel turbulent grunnvannsstrømning eller høye hydrauliske gradienter vil kunne gjøre at parametrene målt i felt ikke nødvendigvis stemmer med Darcys lov (Geoslope international, Ltd, 2021). Programmet tar i tillegg ikke høyde for evapotranspirasjonen og fordampningen i de øvre lagene av umettet sone. I tillegg tar det ikke høyde for temperatur- og volumendringer. Siden det blir gjort forenklinger slik som stasjonær strømning, og homogen og isotrop bergmasse, vil ofte resultatene bli over eller underestimert i forhold til erfaringdata.

## Kapittel 7

# Konklusjon

Det har blitt vist at det er knyttet flere usikkerheter til numerisk modellering av grunnvannsstrømning ved innlekkasje i tunnel. Dette er dels på grunn av den store variasjonen til de ulike parameterne, og dels på grunn av at parameterne er vanskelig å kvantifisere. For å sette opp modellen kreves gode og representative inngangsparametere for å få et realistisk og pålitelig resultat. Det kreves en del erfaring og gode tolkninger for å gjøre om et 3D-problemet til et 2D problem, ettersom det benyttet programmet er i 2D.

Både for beregningseksempelet og modelleringen av Drammenstunnelen ble innlekkasjen i tunnel representert som en dreiskanale ut av domenet i SEEP/W 2D. Punktet som representerte tunnelen ble gitt en konstant fluksgrensebetingelse, der grunnvannet strømmet ut av domenet ved en konstant rate uavhengig av grunnvannsnivået. Selv når grunnvannsnivået i modellen sank under tunnelkonturen, ble vann "pumpet" bort til tunnelen for å opprettholde fluksen. Som en konsekvens blir poretrykket redusert urealistisk mye når innlekkasjen var stor. Resultatet av beregningene førte i enkelte tilfeller til at trykkehøyden ble kraftig negativ og måtte sees bort i fra når innlekkasjen var stor. Små innlekkasjer ga derimot mer realistiske verdier på trykkehøyden, så lenge grunnvannsnivået lå over tunnelkonturen.

De viktigste usikkerhetsfaktorene ved modellering av grunnvannsstrømning for forutbestemt innlekkasje til tunnel er:

1. Den hydrauliske konduktiviteten til materialene.
2. Geometri, domenestørrelse og strukturgeologiske forhold.
3. Hvordan det målte poretrykket og dets variasjoner med tiden ble representert av grensebetingelsene i modellen.

4. Om innstrømningen av vann inn i domenet var naturlig i forhold til den naturlig avrenningen til området.

Både for beregningseksempellet og for modelleringen av Drammenstunnelen viser beregningene at de største usikkerhetene er knyttet til bestemmelse av den hydrauliske konduktiviteten. Dersom den hydrauliske konduktiviteten ble satt for høyt, ville mengden vann som strømmet inn i domenet via grensene være urealistisk stor. Om den hydrauliske konduktiviteten er for lav, blir trykket som følge av tunnelinnlekkasjen redusert urealistisk mye i forhold til erfaringsdata fra SVV, 2003. Den urealistiske store trykkehøydereduksjonen kom av "pumpeeffekten" som oppsto som følge av måten tunnelinnlekkasjen var definert. I realiteten ville likevekten trolig ha blitt nådd før, slik at trykket ikke reduseres like mye. Pumpeeffekten avhengte derfor mye av den hydrauliske konduktiviteten til de satte materialene og mengden tilgjengelig vann.

Hovedgrunnen til at den hydrauliske konduktiviteten er så viktig er fordi programmet bygger på antagelsen om Darcys lov,  $Q = K * A * i$ , der  $K$  er den hydrauliske konduktiviteten,  $A$  er innstrømningsarealet, og  $i$  er den hydrauliske gradienten. Nøyaktigheten på de kvantitative predikasjonene vil være direkte knyttet til nøyaktigheten av den spesifiserte hydrauliske konduktiviteten for hvert av de stratigrafiske lagene i modellen. Det må da benyttes en gjennomsnittsverdi for den hydrauliske konduktiviteten til hvert lag på bakgrunn av vanntapsmålinger. Materialene i modellen blir satt som et kontinuum-materiale, men i realiteten vil det være stor spredning avhengig av de lokale og regionale forholdene.

Modellene er en konseptualisering av virkeligheten, der både geometri, lagdeling og materialeegenskaper er forenklet for å representere problemet matematisk. Det var derfor knyttet noen usikkerheter til når geometri og lagdeling i modellen skulle settes opp med riktige materialparametre. Det blir ofte antatt rette linjer på terrenget og homogent og istropt materiale. For beregningseksempellet ble det vist at store hydraulisk ledende lag, slik som morenelaget, hadde stor innvirkning dersom de omkringliggende lagene hadde en lavere hydraulisk konduktivitet. Dersom utbredelsen var liten, slik som for det antatte morenelaget i Kobbervikdalen, var effekten av morenelaget lite merkbart.

I beregningseksempellet ble det blant annet vist hvordan størrelsen på domenet hadde stor innflytelse på beregningsresultatet dersom kantene av domenet ble satt for nærme tunnelen. En større domenestørrelse  $dl$ , førte til at trykket  $dh$  ble mer redusert. Dette fordi den hydrauliske gradienten  $i$  i Darcys lov, definert som  $i = dh/dl$ , var konstant når  $Q$ ,  $A$  og  $K$  var lik. Beregningene viste også at innlekkasjemengden  $Q$  var proporsjonal med den hydrauliske gradienten når innstrømningsarealet og den hydrauliske konduktiviteten var lik. Dette gjorde at en økt innlekkasje ga en høyere hydraulisk gradient og dermed en større reduksjon av trykkehøyde. Det

ble vist for Drammenstunnelen at influensområdet var tilnærmet det samme uavhengig av innlekkasjemengden.

For at modellene skal være representativ i forhold til virkeligheten er det av stor nødvendighet å måle poretrykket tilstrekkelig mange steder slik at et ekvipotensialkart kan benyttes til å fastsette grensebetingelsene i modellen. Hvor godt grensebetingelsene i modellen var tilpasset de faktiske forholdene er av stor betydning for resultatet. Både antatt avrenning, grunnvannsnivå og poretrykksnivå er parametere som kan være utfordrende å fastsette en verdi for. Fluktuasjoner gjennom året både på nedbør og evapotranspirasjon gjør at parameterne i virkeligheten varierer mye. For modelleringen i SEEP/W har kun en middelvei blitt benyttet til utregningene av antatt potensialnivå.

Både for beregningseksempelen og Drammenstunnelen ble grensebetingelsene på kanten av domenet valgt som et konstant hydraulisk potensial. Vann strømmet da inn fra sidene for å opprettholde det konstante trykknivået når vann enten rant ut av domenet via overflateavrenning, dreiskanaler eller tunnelinnlekkasjer. Inn i domenet strømmet vann inn fra kantene for å opprettholde det hydrauliske potensialet eller ble lagt til som en nedbørgrensebetingelse på overflaten. Ved stasjonære forhold var vannbalansen opprettholdt for domenet. Det konstante hydrauliske potensial på kantene ble valgt etter en iterativ tilpassningsprosess slik at beregnet poretrykk tilsvarte i størst mulig grad det målte poretrykket.

Mengden vann som strømmet inn i domenet kunne sammenlignes med erfaringsdata for å verifisere om vannmengdene var realistiske. Når innstrømningsmengdene vest i domenet ved Drammenstunnelen ble sammenlignet med estimert avrenning for området, viste beregningene at innstrømningsmengden kunne være realistisk når den gjennomsnittlige hydrauliske konduktiviteten og et infiltrasjonssareal bestående av kun fjell ble benyttet. Ble derimot den maksimale hydrauliske konduktiviteten benyttet, ble den beregnede innstrømningsmengden kraftig overvurdert da mer vann strømmet inn i domenet for å opprettholde trykknivået.

Selv om modellering av grunnvannsstrømningen i SEEP/W innehar flere usikkerheter, vil likevel modelleringen kunne benyttes for å vurdere konsekvenser av en tunnelinnlekkasje med tanke på poretrykksreduksjon for ulike innlekkasjerater. Resultatene fra studiet er ment for å vise trender ved ulike kombinasjoner og innbyrdes betydning mellom hovedparametere over tid ved stasjonær strømning. I tillegg kan resultatene benyttes for å avdekke sårbare og kritiske områder som krever mer undersøkelser og oppfølging med poretrykksmålere. Dersom numerisk modellering skal benyttes kreves det likevel nok og god nok inngangsdata for at resultatet skal bli representativt. Spesielt viktig er nøyaktigheten på den hydrauliske konduktiviteten og nok poretrykksmålere for



---

å kunne sette opp realistiske grensebetingelsene. Numerisk modellering blir ofte ikke brukt på grunn av utfordringene med å kvantifisere disse parametrene, men kan benyttes der det er praktisk mulig å innhente de nødvendige dataene. For at resultatet av modelleringen skal bli så nøyaktig og effektiv som mulig, bør det også stilles krav til at den som modellerer har tilstrekkelig kunnskap og erfaring til å ta valg og gjøre tolkninger for å konseptualisere og verifisere modellen.

# Referanseliste

- Anderson, M. P. og Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*. Academic press, inc.
- Bell, K. og Meyer, R. W. (jul. 2021). *Elementmetoden*. Store Norske Leksikon (SNL), Lest 04.02.2022. URL: <https://snl.no/elementmetoden>.
- Brattli, B. (2015). *Ingeniørgeologi Løsmasser*. 2. utg. Pensumhefte. Akademika.
- Brattli, B. (2018). *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. 3. utg. Pensumhefte. NTNU Trondheim, Institutt for geovitenskap og petroleum. Akademika.
- Baardvik, G., Engen, A., Kalsnes, B., Karlsrud, K., Lande, E. J., Langford, J., Simonsen, A., Tvedt, G. og Veslegard, G. (mar. 2016). *Begrensning av skader som følge av grunnarbeider - sluttrapport*. BegrensSkade. Oslo.
- Chiorean, V.-F. (2017). «Determination of Matric Suction and Saturation Degree for Unsaturated Soils, Comparative Study - Numerical Method versus Analytical Method». I: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Climate-data.org (2022). *Klima Drammen (Norge)*. Lest: 08.06.2022. URL: <https://no.climate-data.org/europa/norge/buskerud/drammen-9882/#climate-graph>.
- Colleuille, H., Pedersen, T. S., Dimakis, P. og Frengstad, B. (2004). *Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark*. Rapport nr. 2. Materiale og feltmålinger - Miljøbasert vannføring. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- Cuisiat, F. og Skurtveit, E. (mar. 2003). «Prediction of leakage into Lunner tunnel based on discrete fracture flow models». I: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*. Norges Geotekniske Institutt(NGI).
- Dagestad, A., Hansen, L. og Braathen, A. (2003). *Hydrauliske egenskaper i løsmasser og fjell sett i sammenheng med EU-dirketivet for deponering av avfall*. 2003.016. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). Trondheim.
- Dannevig, P. og Harstveit, K. (mar. 2021). *Klima i Norge*. Store Norske Leksikon (SNL), Lest 08.03.2022. URL: [https://snl.no/klima\\_i\\_Norge#:~:](https://snl.no/klima_i_Norge#:~:)

text=Fra%5C%20500%5C%20til%5C%201000%5C%20millimeter,p%5C%C3%5C%A5%5C%20ettervinteren%5C%20og%5C%20om%5C%20v%5C%C3%5C%A5ren..

Division, J. (1972). *Ground Water And Wells: A Reference Book For The Water-Well Industry*. Saint Paul, Minnesota, USA: Universal Oil Products Co.

Elger, D. F., LeBret, B. A., Crowe, C. T. og Roberson, J. A. (2013). *Engineering Fluid Mechanics. International Student Version*. 11. utg. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd., s. 477–509.

Emdal, A., Janbu, N., Hjeldnes, E., Grande, L., Nordal, S. og Faggruppera for geoteknikk, N. (2018). *Introduksjon til geoteknikk*. Pensumhefte i emnet TBA 4100 Geoteknikk og geologi. Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Trondheim.

Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4. utg. Prentice-Hall, inc., s. 598.

Fredlund, D. og Xing, A. (1994). «Equations for the soil-water characteristic curve». I: *Canadian Geotechnical Journal* 31.4, s. 521–532. DOI: 10.1139/t94-061.

Geoslope international, Ltd (2021). *Heat and Mass Transfer Modeling with GeoStudio*. Seequent.

Grepstad, G. K. (2002). «The water balance- definition and monitoring». I: Publication 12 : Water Control. Norsk forening for fjellsprenningsteknikk - NFF, s. 21–26.

Grøn, Ø. (jan. 2017). *Monte Carlo-metode*. Store Norske Leksikon (SNL), Lest 02.02.2022. URL: [https://snl.no/Monte\\_Carlo-metode](https://snl.no/Monte_Carlo-metode).

Gundersen, N. (2020). *Poretrykk*. Lest: 21.09.2021. Store Norske Leksikon (SNL). URL: <https://snl.no/poretrykk>.

Gustafson, G. (okt. 2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Göteborg: Fälth og Hässler.

Hassani, A. N., Katibeh, H. og Farhadian, H. (2015). *Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions*.

Hendriks, M. R. (2010). *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford University Press, s. 352.

Holmøy, K. H. og Nilsen, B. (feb. 2013). «Significance of Geological Parameters for Predicting Water Inflow in Hard Rock Tunnels». I: *Rock mechanics and rock engineering* 47, s. 853–868. DOI: 10.1007/s00603-013-0384-9.

Holmøy, K. H., Langford, J., Hansen, T. F., Holter, K. G., Karlsrud, K. og (NGI), N. G. I. (2019). «Utfordringer med vann i undergrunnsprosjekter i urbane områder - er det mulig å unngå setningskader?» I: *Fjellsprenningsdagen 2019*.

Karlsrud, K. (2000). *Metodikk for bestemmelse av setningspotensial og lekkasjekrav i urbane områder*. Fjellsprenningskonferansen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen 23-24. November, s. 24.1-24.19. Norsk jord- og fjellteknisk forbund. Oslo.

- Karlsruud, K. (2002). «Control of water leakage when tunneling under urban areas in the Oslo region». I: Publication 12 : Water Control. Norsk forening for fjellsprenningsteknikk - NFF, s. 27–33.
- Karlsruud, K. og Hernandez-Martinez, F. G. (okt. 2013). «Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples». I: *Canadian Geotechnical Journal*. Norges geotekniske institutt (NGI).
- Kartverket (2022). *Hoydedata.no*. Lest: 09.05.2022. URL: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/>.
- Kveldsvik, V., Erikstad, L., Holm, T. og Enander, L. (2002). «9. Planning of a 25 km long water supply tunnel in an enviromentally sensitive area». I: *Norwegian tunneling society, Publication no. 12*.
- Langford, J. (mar. 2019). *Tettekrav til tunneler og byggegropor - Geoteknikk, setningsfare*. NBG Årsmøte og Vårsleppet 2019. Norges geotekniske institutt (NGI).
- Louis, C. (1972). «Rock Hydraulics». I: *Rock Mechanics*. Vienna: Springer Vienna, s. 299–387. ISBN: 978-3-7091-4109-0. DOI: 10.1007/978-3-7091-4109-0\_16. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4109-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4109-0_16).
- Munier, R., Stenberg, L., Stanfors, R., Milnes, A. G., Hermanson, J. og Triumph, C.-A. (2003). *Geological Site Descriptive Model. A strategy for the model development during site investigations*. SKB-R-03-07. Sweden.
- NGF (1982). *Veiledning for måling av grunnvannsstand og poretrykk*. Norges geotekniske forening (NGF), melding nr. 6.
- NGU (2015). *Granitt*. Lest: 11.05.2022. URL: <https://www.ngu.no/emne/granitt>.
- NGU (2021). *Ordbok*. Lest: 16.09.2021. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). URL: <https://www.ngu.no/side/ordbok#s>.
- NGU (2022a). *Berggrunn - nasjonal berggrunnsdatabase*. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), Lest 19.04.2022. URL: [https://geo.ngu.no/kart/berggrunn\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/).
- NGU (2022b). *Løsmasser - nasjonal Løsmassedatabase*. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), Lest 19.04.2022. URL: [https://geo.ngu.no/kart/losmasse\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/).
- Nilsen, B. (aug. 2016). *Ingeniørgeologi Løsmasser*. 2. utg. Pensumhefte. Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Institutt for geologi og bergteknikk. Trondheim: Akademika.
- Norconsult (okt. 2018a). *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, datarapport geoteknikk UDK 01. UDK 01 Bergtunnel og dagsone Skoger*. Bane Nor.
- Norconsult (okt. 2018b). *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, Fagrapport hydrogeologi UDK 01. UDK 01 Bergtunnel og dagsone Skoger*. Fagrapport hydrogeologi UDK 01. Bane Nor.

- Norconsult (okt. 2018c). *Vestfoldbanen Drammen - Kobbervikdalen, Fagrapport ingeniørgeologi UDK 01. UDK 01 Bergtunnel og dagsone Skoger*. Fagrapport ingeniørgeologi UDK 01. Bane Nor.
- NVE (2022). *NEVINA Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse*. Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) Lest: 27.04.2022. URL: <http://nevina.nve.no/>.
- Olofsson, B., Gunnar, J., Knutsson, G. og Thunvik, R. (2001). «Groundwater in hard rock – a literature review». I: *The Royal Institute of Technology, KTH*, s. 115–191.
- Pinder, G. F. (2002). *Groundwater modeling. Using Geographical Information Systems*. University of Vermont. John Wiley and Sons, Inc.
- Ramberg, I. B., Bryhni, I. og Nøttvedt, A. (2006). *Landet blir til - Norges geologi*. Trondheim. Norsk Geologisk Forening (NGF).
- Richards, L. A. (1931). *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Bd. 1. Physics, s. 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.
- Singhal, B. og Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2. utg. Springer.
- Struckmeier, W. F. og Margat, J. (1995). *Hydrogeological Maps, A Guide and a Standard Legend*. Bd. 17. International association of Hydrogeologist, s. 18.
- Stølen, G. V. (2021). «Konsekvensene av grunnvannssenkning og redusert poretrykk som følge av innlekkasje til tunnel». Prosjektoppgave. Ph.d.-avh. Trondheim, Norge: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU, Insitutt for geovitenskap og petroleum.
- SVV (2001). «Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø - Statusrapport 2001». I: *Miljø og samfunnstjenlige tunneler*. Statens Vegvesen - vegdirektoratet.
- SVV (okt. 2003). «Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø». I: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler Publikasjon nr. 103*. Statens Vegvesen - vegdirektoratet.
- SVV (2006). *Vegtunneler - Håndbok 021*. Statens vegvesen.
- SVV (jun. 2010). *Geoteknikk i vegbygging, veiledning, Håndbok 016*. Oslo: Statens vegvesen, Vegdirektoratet - Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen, s. 206–231.
- SVV (2020). *Tunnelveiledning. Håndbok V520 - veiledning*.
- Todd, D. K. og Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. 3. utg. John Wiley and Sons, Inc.
- Tollan, A. (jul. 2021). *Grunnvann*. Store Norske Leksikon (SNL), Lest 13.05.2022. URL: <https://snl.no/grunnvann>.
- Van Genuchten, M. (sep. 1980). «A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1». I: *Soil Science Society of America Journal* 44. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Wang, H. F. og Anderson, M. P. (1982). *Introduction to groundwater modeling. Finite difference and finite element methods*. W. H. Freeman and company.

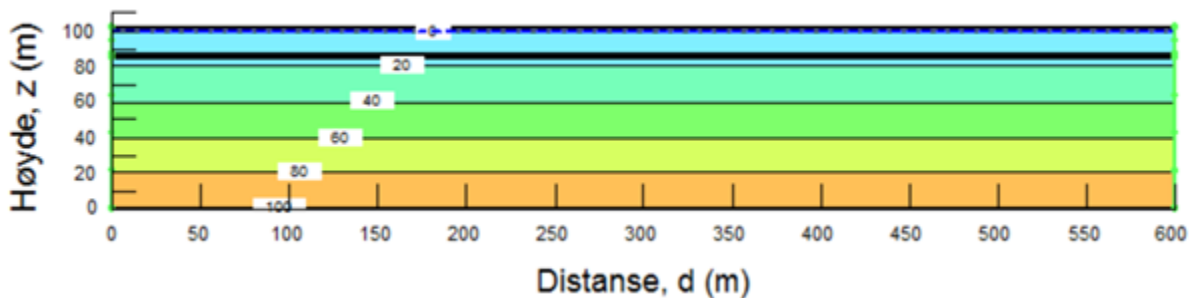
## A Vedlegg A - Beregnede figurer for beregningseksempellet

Vedlagt følger beregnede figurer for beregningseksempellet. Det har blitt tatt utgangspunkt i modellen der den hydrauliske konduktiviteten på bergmassen er  $1 * 10^{-7} \text{ m/s}$ , uten nedbør og med morene. Følgende modeller følger så:

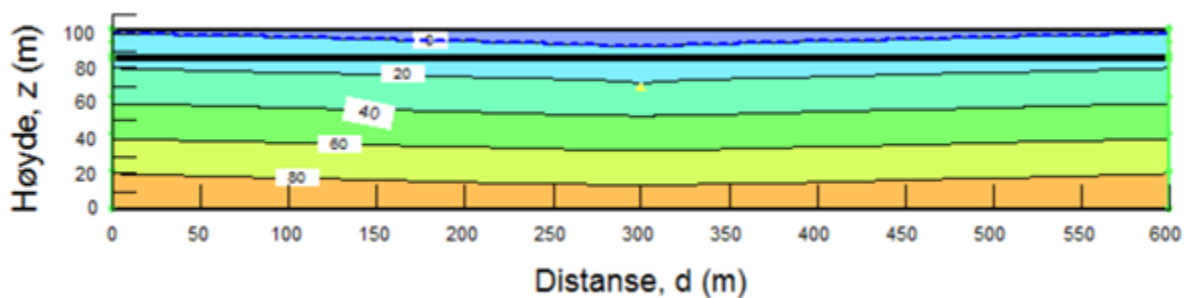
- Med nedbør
- Uten morene
- $K_{Bergmasse} = 1 * 10^{-6} \text{ m/s}$
- $K_{Bergmasse} = 1 * 10^{-8} \text{ m/s}$

Modeller med nedbør og uten morene er ikke tatt med for de ulike hydrauliske konduktivitene i vedlegget.

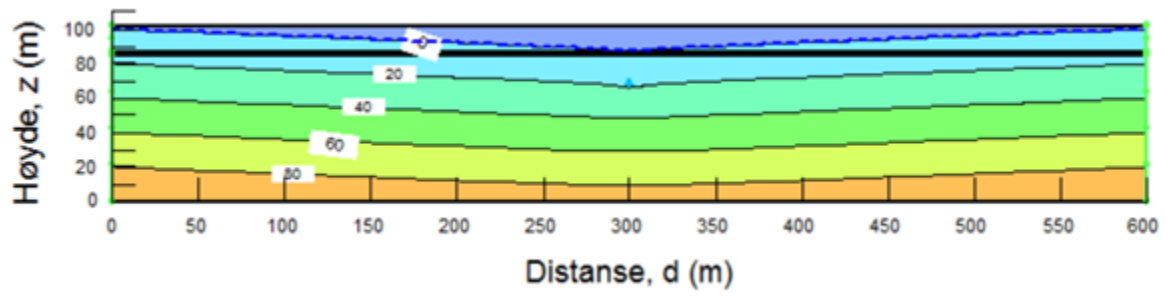
### A.1 Modell utgangspunkt



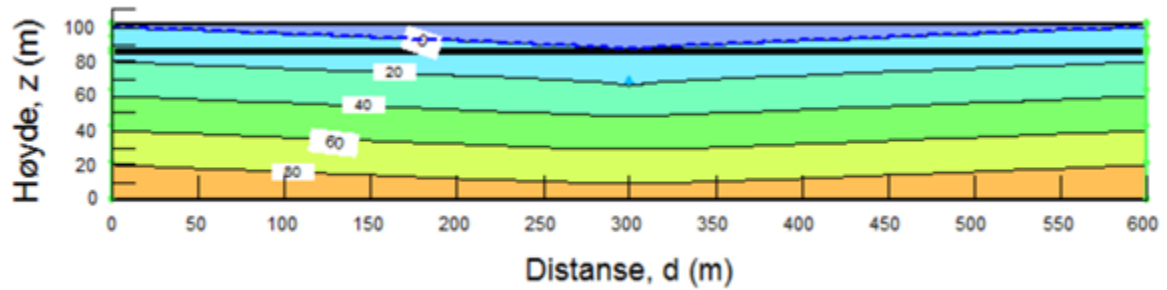
Figur 1: Initiell



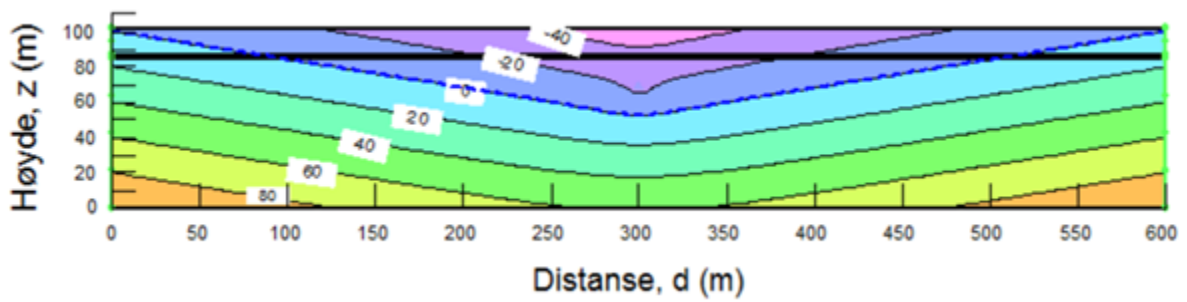
Figur 2:  $Q = 3 \text{ l/min/100m}$



Figur 3:  $Q = 5 \text{ l/min/100m}$

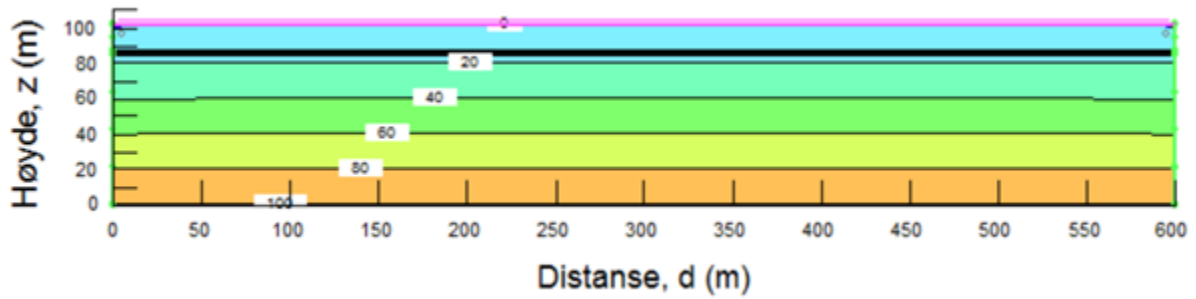


Figur 4:  $Q = q_0 \text{ l/min/100m}$

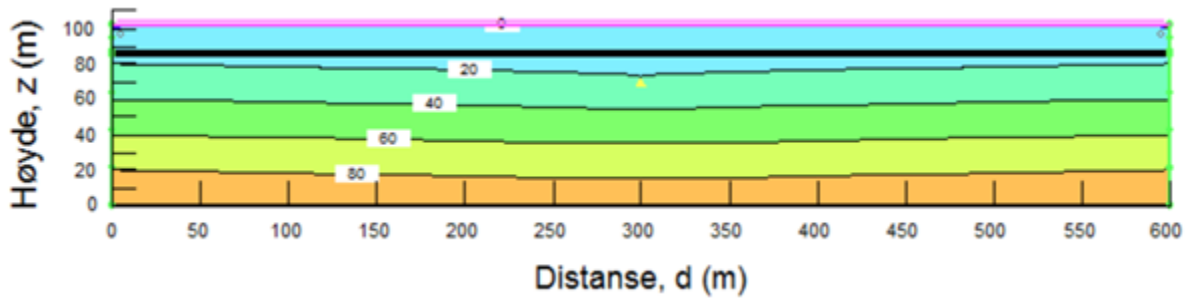


Figur 5:  $Q = 20 \text{ l/min/100m}$

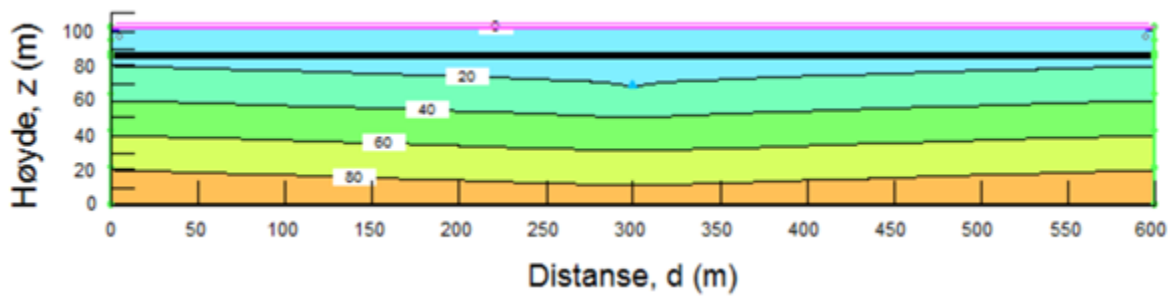
**A.2 Med nedbør**



**Figur 6:** Initiell med nedbør

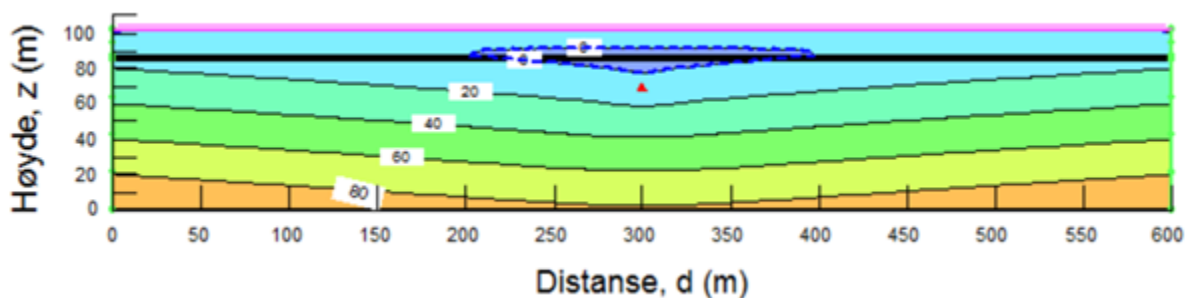


**Figur 7:**  $Q = 3 \text{ l/min/100m}$  med nedbør

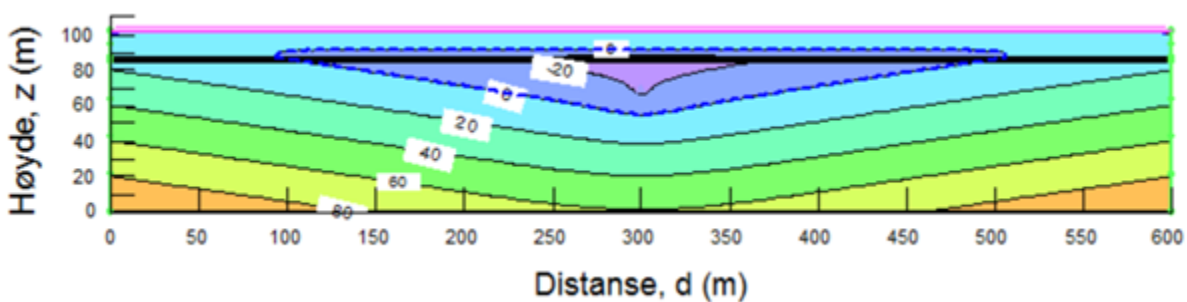


**Figur 8:**  $Q = 5 \text{ l/min/100m}$  med nedbør



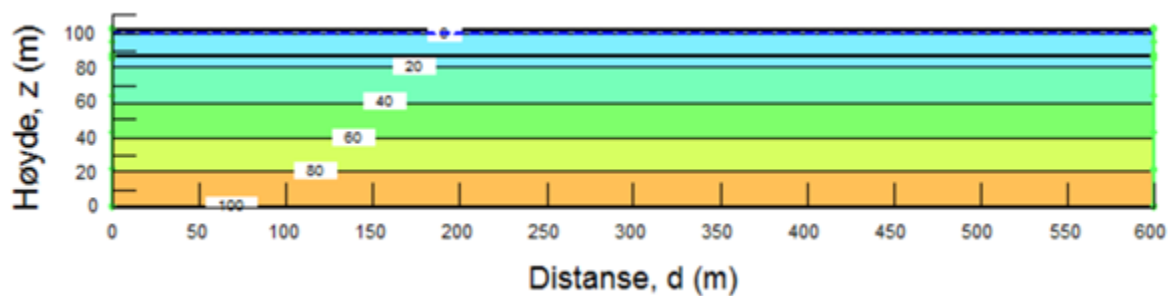


Figur 9:  $Q = 10 \text{ l/min/100m}$  med nedbør

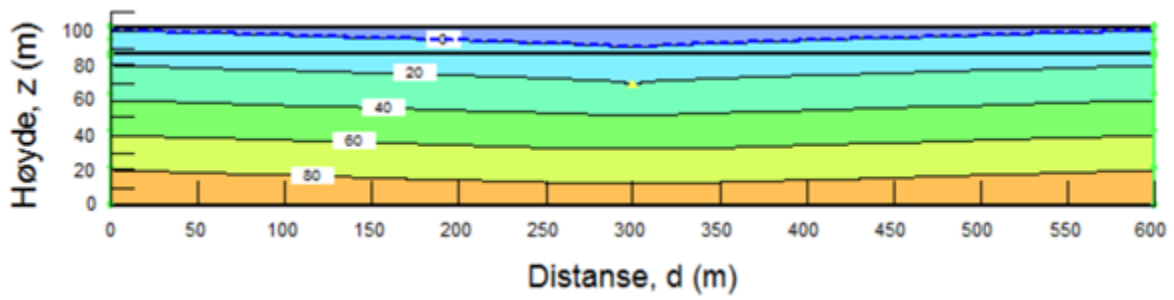


Figur 10:  $Q = 20 \text{ l/min/100m}$  med nedbør

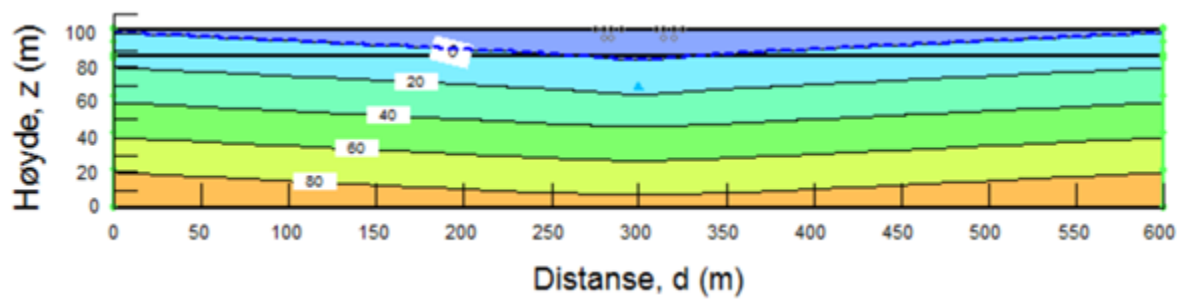
### A.3 Uten morene



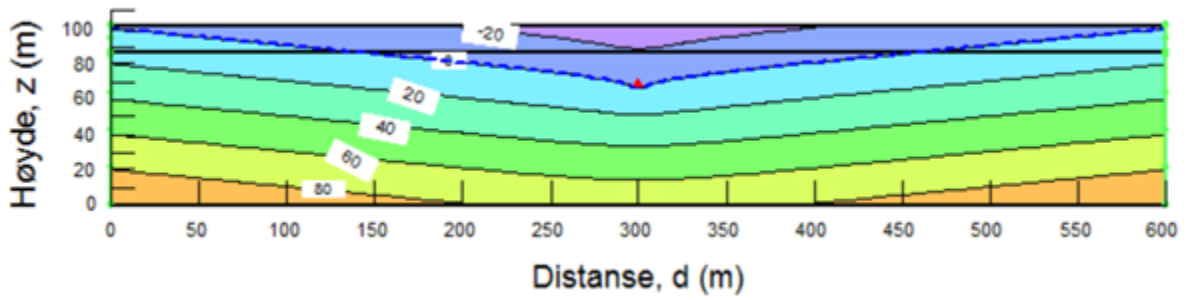
Figur 11: Initiell uten morene



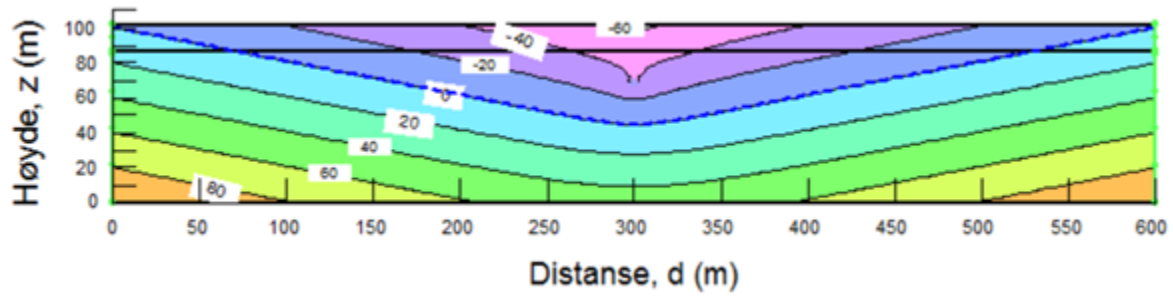
Figur 12:  $Q = 3 \text{ l/min/100m}$  uten morene



Figur 13:  $Q = 5 \text{ l/min/100m}$  uten morene

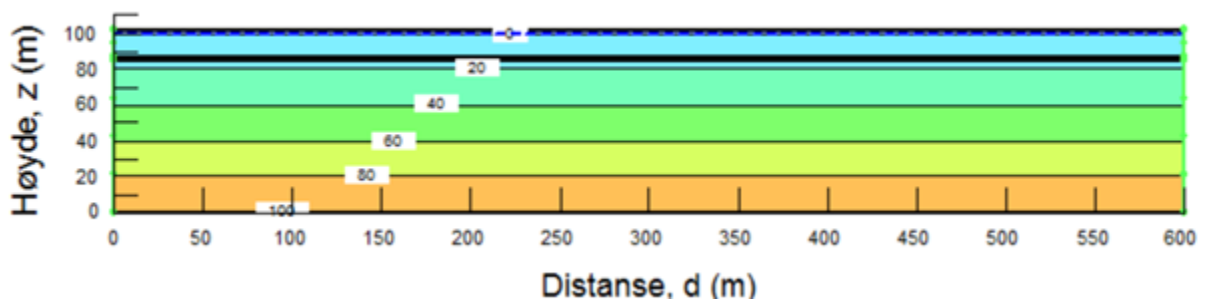


Figur 14:  $Q = 10 \text{ l/min/100m}$  uten morene

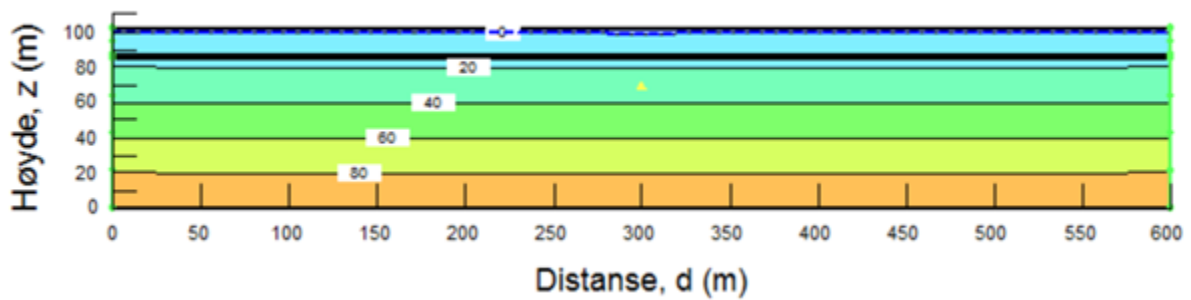


Figur 15:  $Q = 20$  l/min/100m uten morene

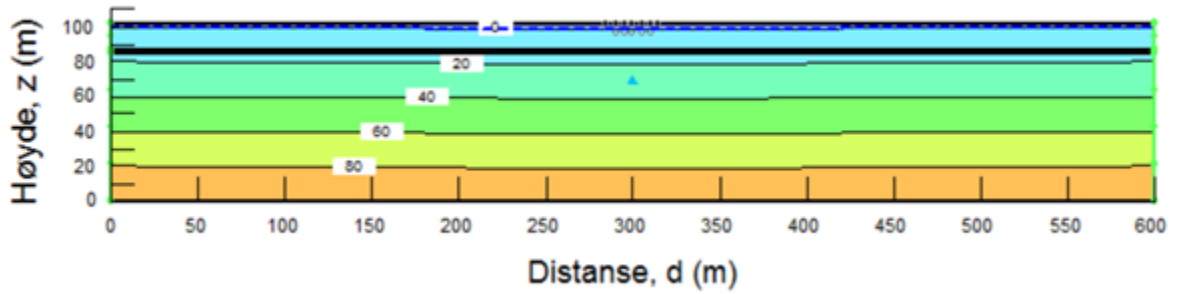
A.4 Hydraulisk konduktivitet bergmasse  $10^{-6}$  m/s



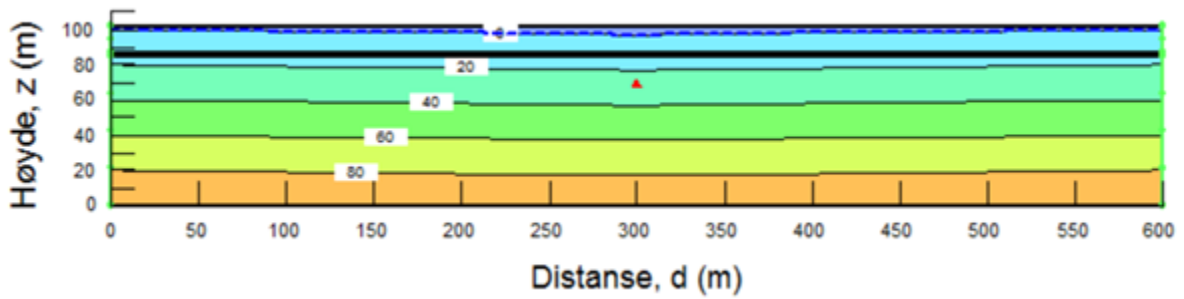
Figur 16: Initiell med  $K = 10^{-6}$  m/s



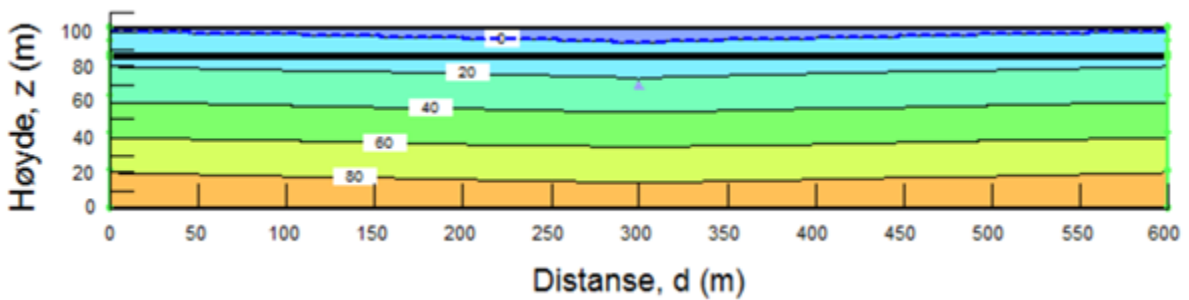
Figur 17:  $Q = 3$  l/min/100m med  $K = 10^{-6}$  m/s



**Figur 18:**  $Q = 5 \text{ l/min/100m}$  med  $K = 10^{-6} \text{ m/s}$

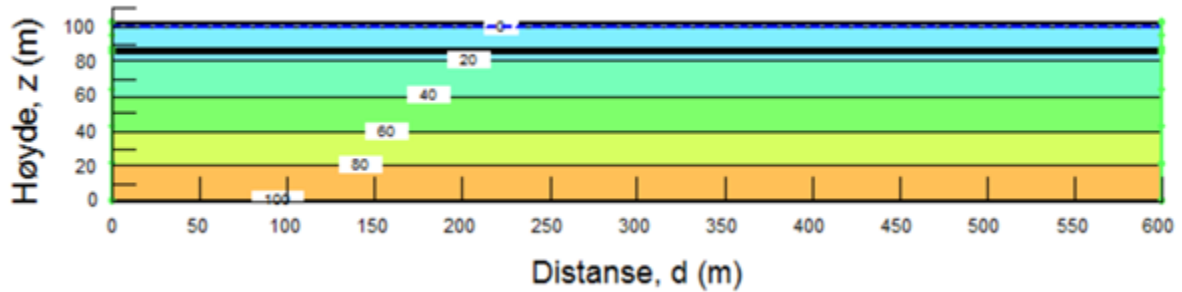


**Figur 19:**  $Q = 10 \text{ l/min/100m}$  med  $K = 10^{-6} \text{ m/s}$

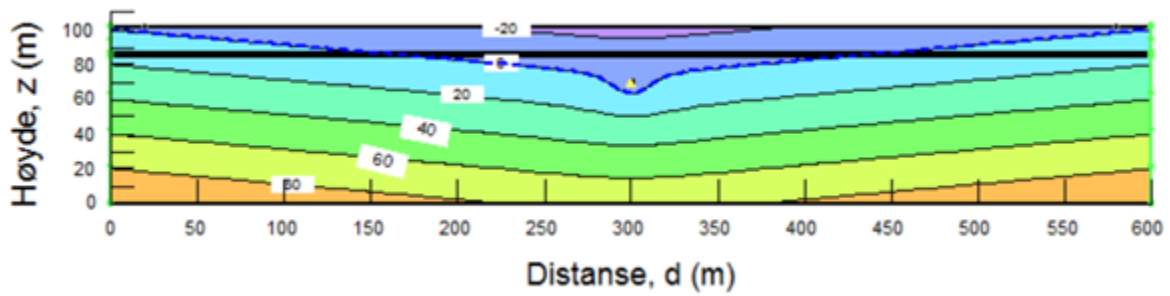


**Figur 20:**  $Q = 20 \text{ l/min/100m}$  med  $K = 10^{-6} \text{ m/s}$

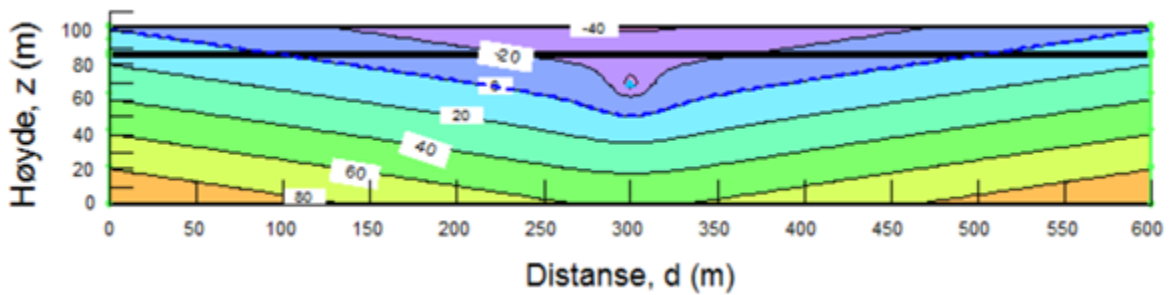
**A.5 Hydraulisk konduktivitet bergmasse  $10^{-8}$  m/s**



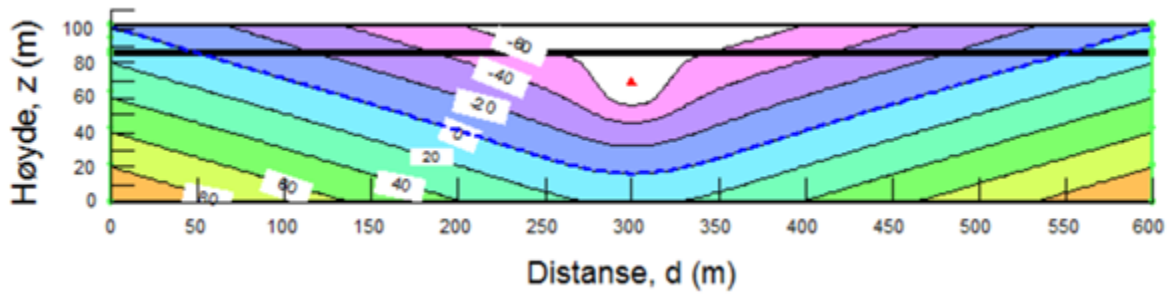
**Figur 21:** Initiell  $K = 10^{-8}$  m/s



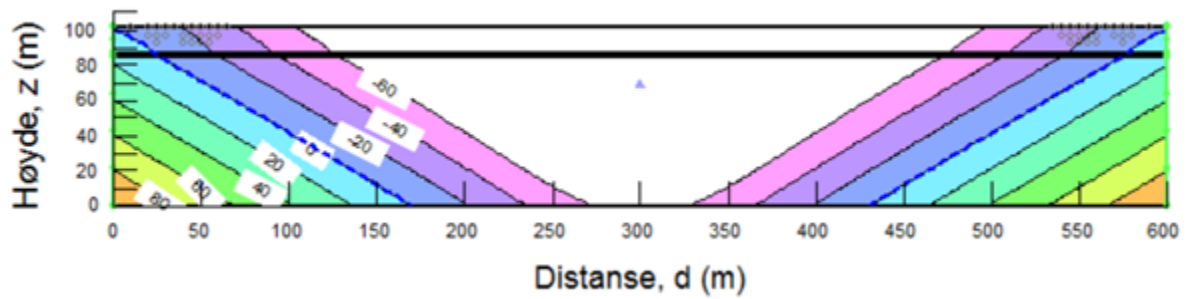
**Figur 22:**  $Q = 3$  l/min/100m med  $K = 10^{-8}$  m/s



**Figur 23:**  $Q = 5$  l/min/100m med  $K = 10^{-8}$  m/s

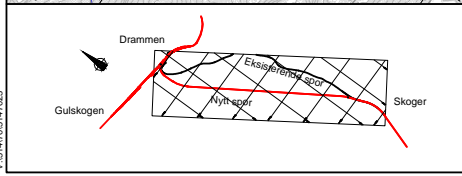
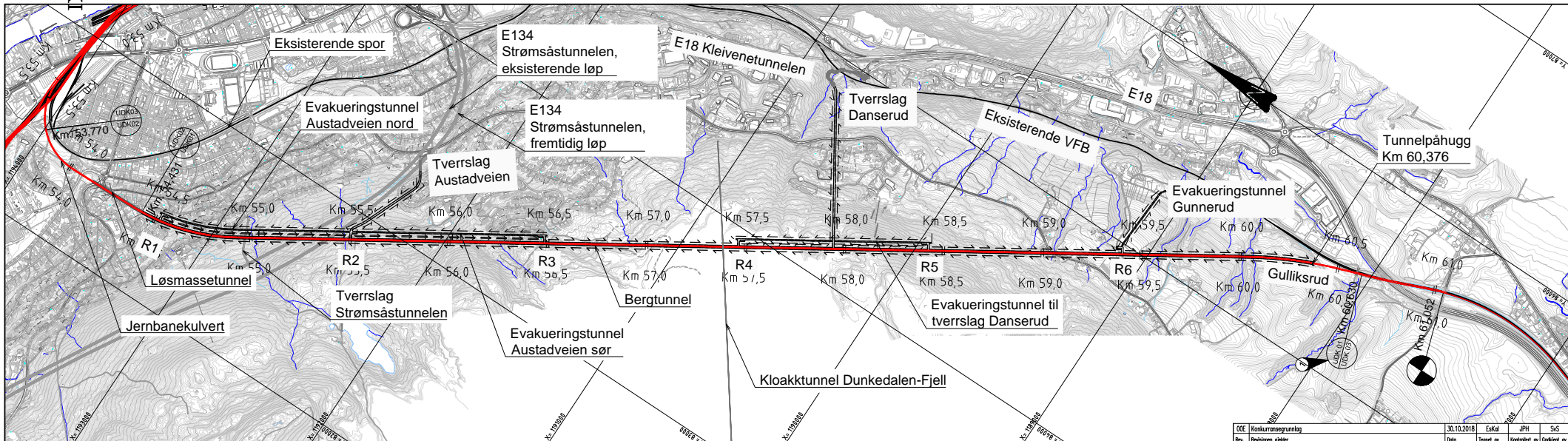
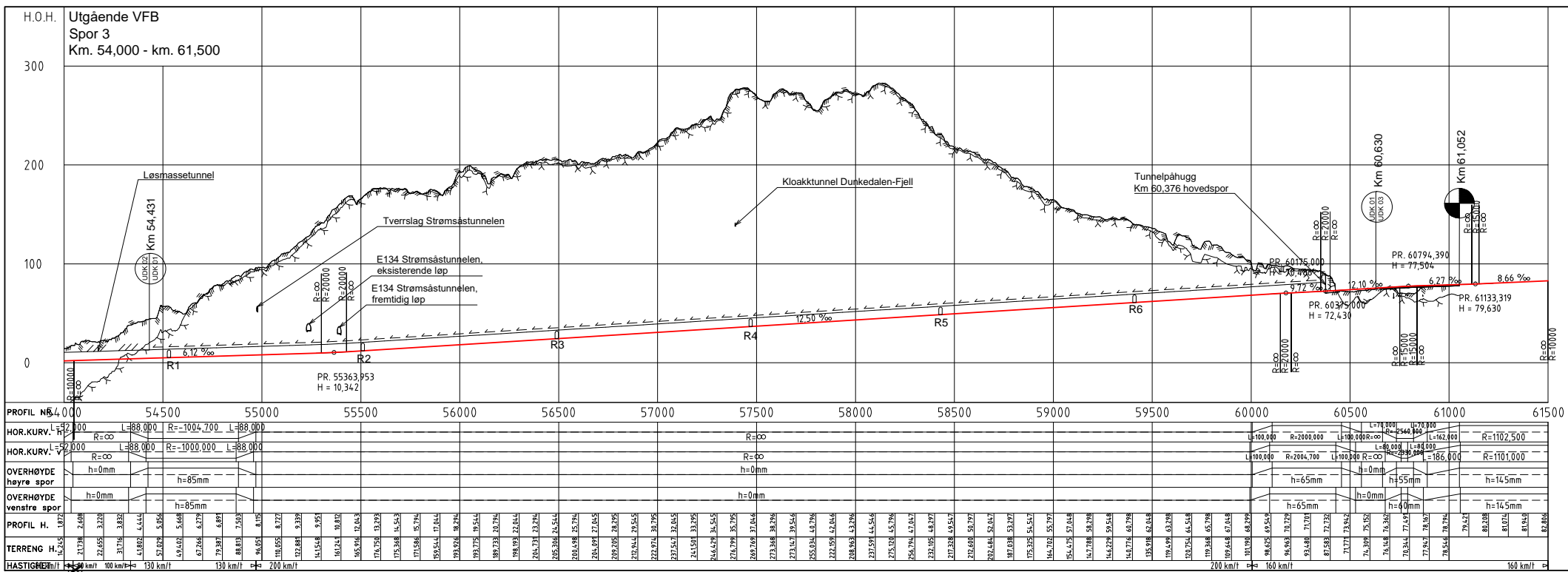


**Figur 24:**  $Q = 10 \text{ l/min/100m}$  med  $K = 10^{-8} \text{ m/s}$



**Figur 25:**  $Q = 20 \text{ l/min/100m}$  med  $K = 10^{-8} \text{ m/s}$

**B Vedlegg B - Detaljert kart og høydeprofil over tunnelstrekningen Drammen - Kobbervikdalen**



**TEGNFORKLARING:**

	Nytt spor		Sprengningsprofil		VFB: Vestfoldbanen
	Eksisterende spor		Eksisterende terreng		SB: Sorlandsbanen
	Jernbanekulvert		Bergprofil		Entreprisegrense
	Løsmassetunnel				Parsellgrense

**MERKNADER:**

1 Grensenytt UDK 01/UDK 03/UDK 05/UDK 06 ca. Km 60,630. UDK 01 bygger underbygning opp til formasjonsplan.

Se tegning UVB-01-F-16106 og UVB-01-F-16107 for flere detaljer om grensenytt i dagsonen.

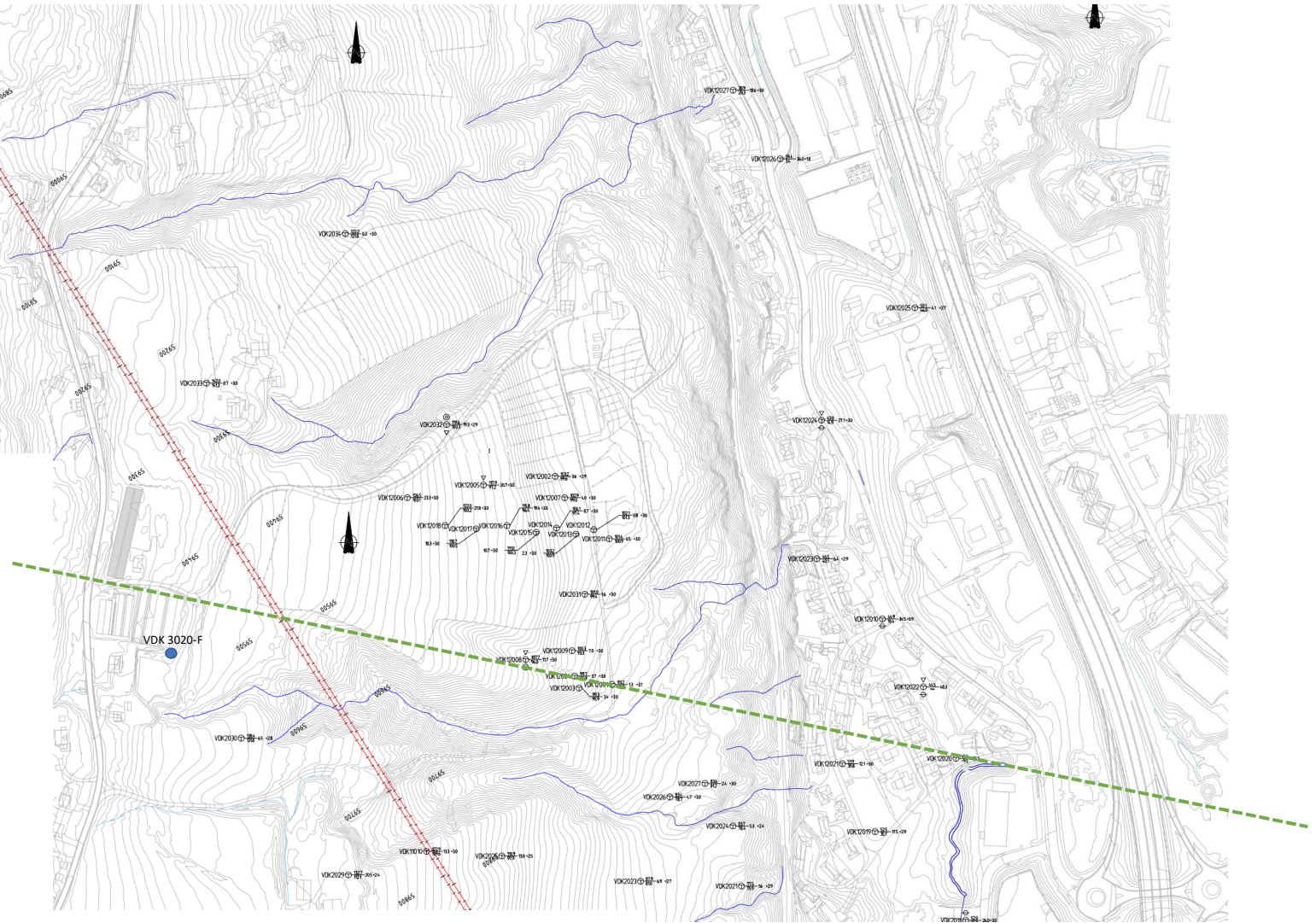
Kilde: Norge digitalt

Koordinatsystemer  
 Horisontalt: EUREF89/NTM Sone 10  
 Vertikalt: NN2000

00E	Konkurranseinnlegg	30.10.2018	EstKalk	UPH	SvS
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Tagget av	Kontrollert av	Godeknt av
Måstak: 1:10000					
Produkt:					
Prosjekt: 965101 Drammen - Kobbervikdalen					
Parsell: 01 Danvik - Skoger					
Tegningsnummer: UVB-01-B-16100					
Tegningsnummer: 00E					



**C Vedlegg C - Detaljert kart over alle borpunkt i  
Kobbervikdalen**



## D Vedlegg D - Liste over relevante borepunkt

### D.1 Liste over relevante borpunkt

**Tabell D.1:** Borpunktliste over alle relevante borpunkt, med koordinater, tolket tykkelse på morenelag, samt boret lengde i løsmasser og fjell. Modifisert etter Norconsult, 2018b.

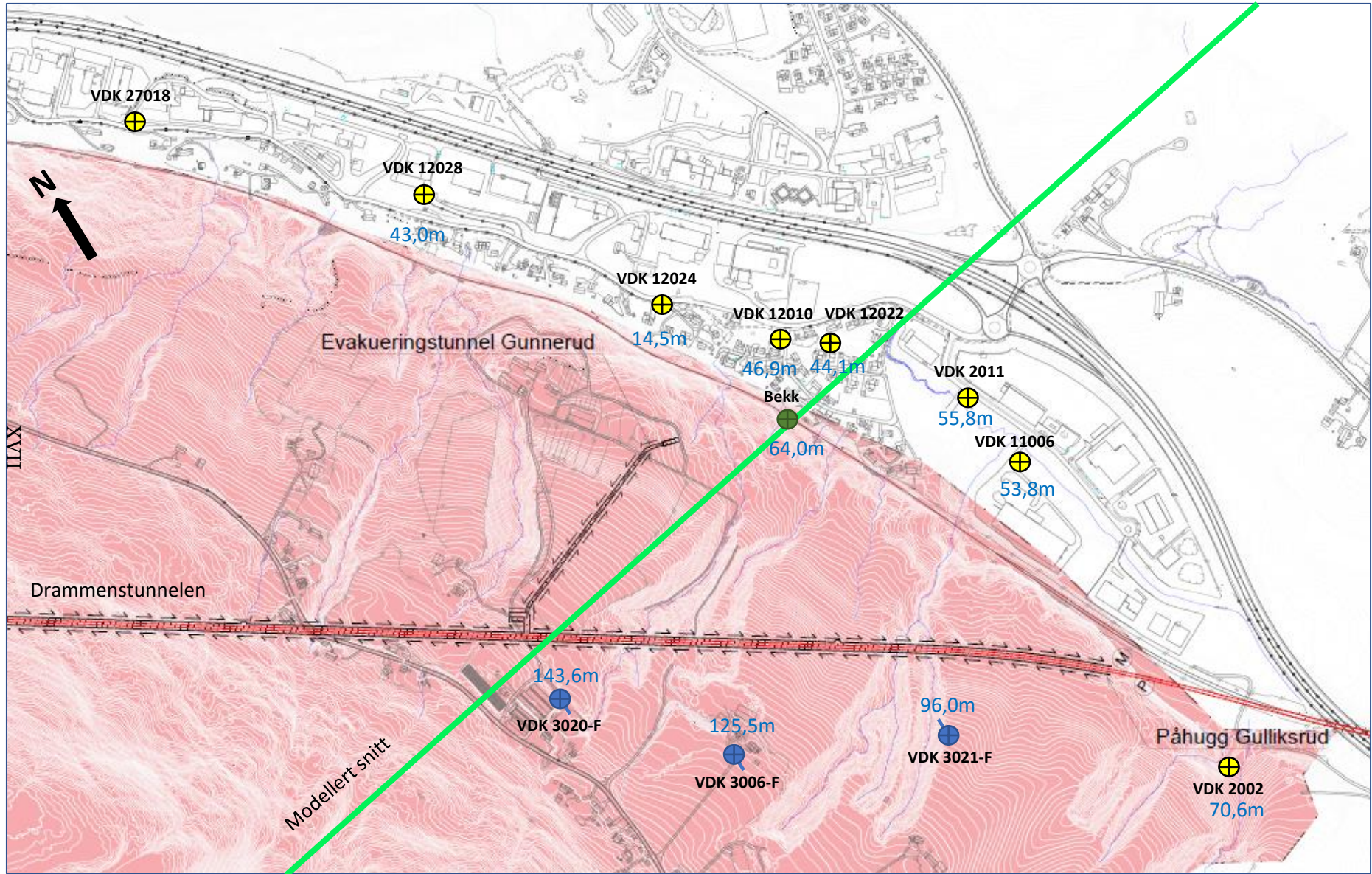
Borhull	X	Y	Z	Mulig morenelag	Løsmasse- tykkelse	Boret i fjell
VDK2002	1188022,09	85410,39	79,37	?	17,25	2,92
VDK2011	1188737,03	85677,73	51,96	-	26,02	2,98
VDK2020	1188697,11	85332,72	90,78	-	6,68	2,15
VDK2021	1188771,09	85455,02	77,50	0,50	1,63	2,88
VDK2022	1188703,49	85115,09	125,64	-	12,75	2,80
VDK2023	1188775,92	85354,50	87,92	0,50	6,93	2,70
VDK2024	1188830,76	85446,52	83,75	-	5,35	2,43
VDK2025	1188800,97	85216,68	110,90	-	12,95	2,55
VDK2026	1188859,58	85383,91	83,39	-	4,72	2,95
VDK2027	1188872,97	85418,83	83,55	-	2,38	3,03
VDK2028	1188720,44	84966,11	140,28	-	19,25	2,48
VDK2028C	1188720,44	84966,11	140,28		17,02	-
VDK2029	1188782,24	85064,24	132,66	-	20,52	2,38
VDK2030	1188918,05	84957,77	138,36	-	6,43	2,78
VDK2031	1189060,89	85299,03	101,05	?	1,65	2,98
VDK2032	1189227,15	85160,97	119,56	-	19,27	2,95
VDK2032C	1189227,15	85160,97	119,56		16,36	0,00
VDK2033	1189270,41	84922,01	142,04	-	0,70	3,02
VDK2034	1189417,96	85059,28	122,15	-	0,35	3,03
VDK3006	1188716,00	84986,00	140,00	-	25,00	60,00
VDK3020	1189003,00	84892,00	144,87	-	0,50	84,50
VDK3021	1188457,00	85218,00	117,15	-	15,00	95,00
VDK11006	1188600,02	85638,30	56,47	1,30	16,33	2,80
VDK11007	1187828,05	85663,00	85,18	-	18,48	2,95
VDK11010	1188805,55	85141,86	122,88	-	13,3	3,00
VDK12001	1188971,24	85326,09	93,23	-	1,27	3,05

VDK12002	1189177,99	85269,47	103,22	-	3,63	2,85
VDK12003	1188967,78	85293,28	99,31	-	3,42	3,00
VDK12004	1188979,62	85288,98	99,65	0,10	3,72	3,00
VDK12005	1189169,43	85198,41	117,92	-	20,73	3,00
VDK12006	1189156,83	85122,75	126,46	-	23,33	3,00
VDK12007	1189156,73	85279,11	102,93	-	3,97	3,03
VDK12008	1188996,00	85240,34	107,68	-	11,70	3,00
VDK12009	1189004,84	85286,37	100,34	1,20	7,03	3,00
VDK12010	1189036,45	85594,95	44,86	2,20	34,50	0,90
VDK12011	1189115,92	85323,28	101,42	-	0,50	3,00
VDK12012	1189124,95	85307,89	102,09	-	0,80	2,95
VDK12013	1189120,53	85290,24	103,22	-	2,28	3,03
VDK12014	1189126,62	85270,95	106,05	?	8,70	3,00
VDK12015	1189122,29	85250,76	111,01	-	10,75	3,00
VDK12016	1189129,01	85221,68	115,82	1,70	19,38	2,98
VDK12017	1189125,79	85191,30	118,74	-	18,27	3,00
VDK12018	1189129,09	85160,19	122,04	-	21,80	3,00
VDK12019	1188825,08	85587,69	52,53	-	17,48	2,96
VDK12020	1188897,85	85668,09	45,58	?	55,08	0,00
VDK12021	1188892,61	85555,20	51,89	0,30	12,10	3,02
VDK12022	1188968,94	85635,67	44,54	?	48,30	-
VDK12023	1189096,17	85529,98	46,46	-	6,40	2,92
VDK12024	1189231,48	85535,35	42,01	2,00	27,15	2,95
VDK12025	1189343,87	85628,47	50,07	0,20	4,10	2,72
VDK12026	1189492,68	85494,06	39,41	?	36,03	1,80
VDK12027	1189561,25	85447,03	38,88	-	18,60	3,00
VDK27018	1190123,49	85285,80	34,24	-	13,93	2,90

## **E Vedlegg E - Data fra potensialmålere/grunnvannsmålere i Kobbervikdalen**

### **E.1 Kart over borehull med potensialmålere/grunnvannsmålere**

Følgende figur viser et oversiktskart over Kobbervikdalen med poretrykksmålere og grunnvannsmålere, inkludert snittet og tunneltraseen. I tillegg er den gjennomsnittlige potensialnivå skrevet i blå skrift under og er hentet fra neste vedlegg. Gule sirkler er poretrykksmålere i løsmasser, mens blå sirkler er grunnvannsnivåmålere i fjellbrønner.



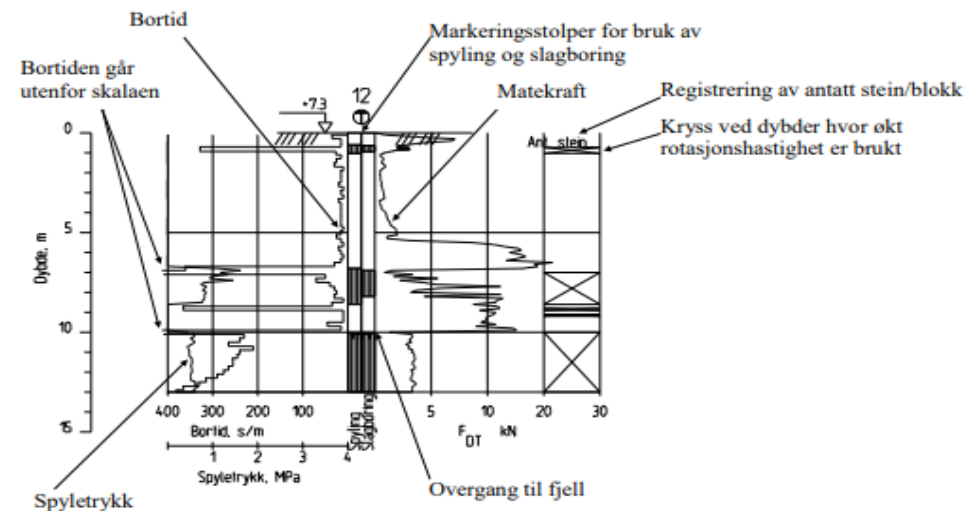
**E.2 Figurer fra poretrykksmålerne**

# Figurer fra potensialbrønner og fjellbrønner:

- Poretrykksmålinger mot <sup>XIX</sup> dypet sammenlignet med den hydrostatiske kurven
- Potensialhøydekurver for ulike måledybder
- Resultat fra totalsondering

## Prosedyre og presentasjon - totalsondering

Utstyr:	Ø 57 mm butt borekrone med tilbakeslagsventil. Ø 44 mm borestenger.
Som dreietrykksondering:	Konstant rotasjonshastighet 25 omdreininger/min. Nedpressingshastighet 3 m/min (20 sek/m).  Når normert nedtrengningshastighet ikke er mulig, økes rotasjonshastigheten til 75 omdreininger/min.
Som fjellkontrollboring:	Dersom nedtrengingen igjen stopper opp, går en over til prosedyre som for fjellkontroll. Dvs. at en først setter på spyling, hvorefter ny stopp i nedtrenging fører til at en også setter på slaghammer.  Med denne prosedyren kan det bores gjennom steiner og ned i fjell. Ved påvisning av fjell, bør det bores 2-3 meter ned i antatt fjell.
Presentasjon:	Skravur for vannspyling og slag i egne kolonner. Kurver for nedpressingskraft, boretid og spyletrykk. Kryss for markering av økt rotasjon.

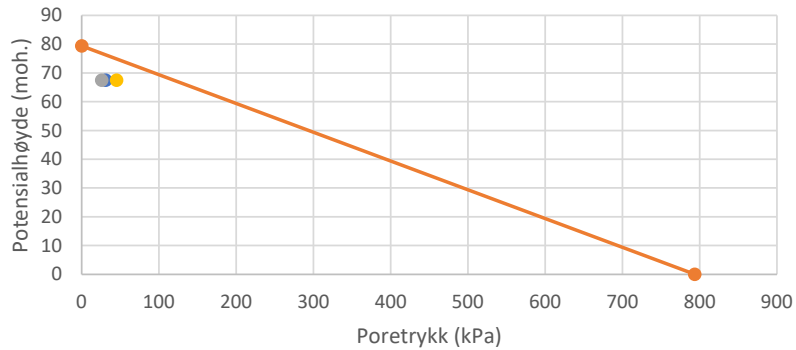




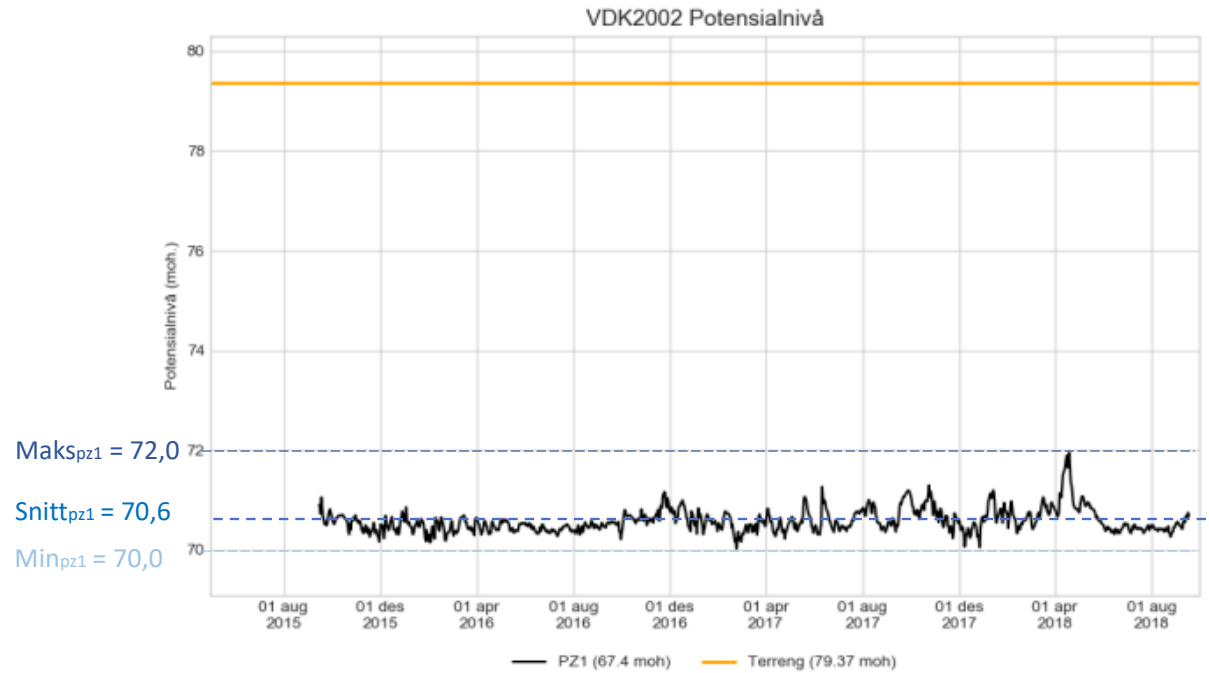
# VDK2002

XX

VDK2002




● Snitt ● Hydrostatisk ● Min ● Maks

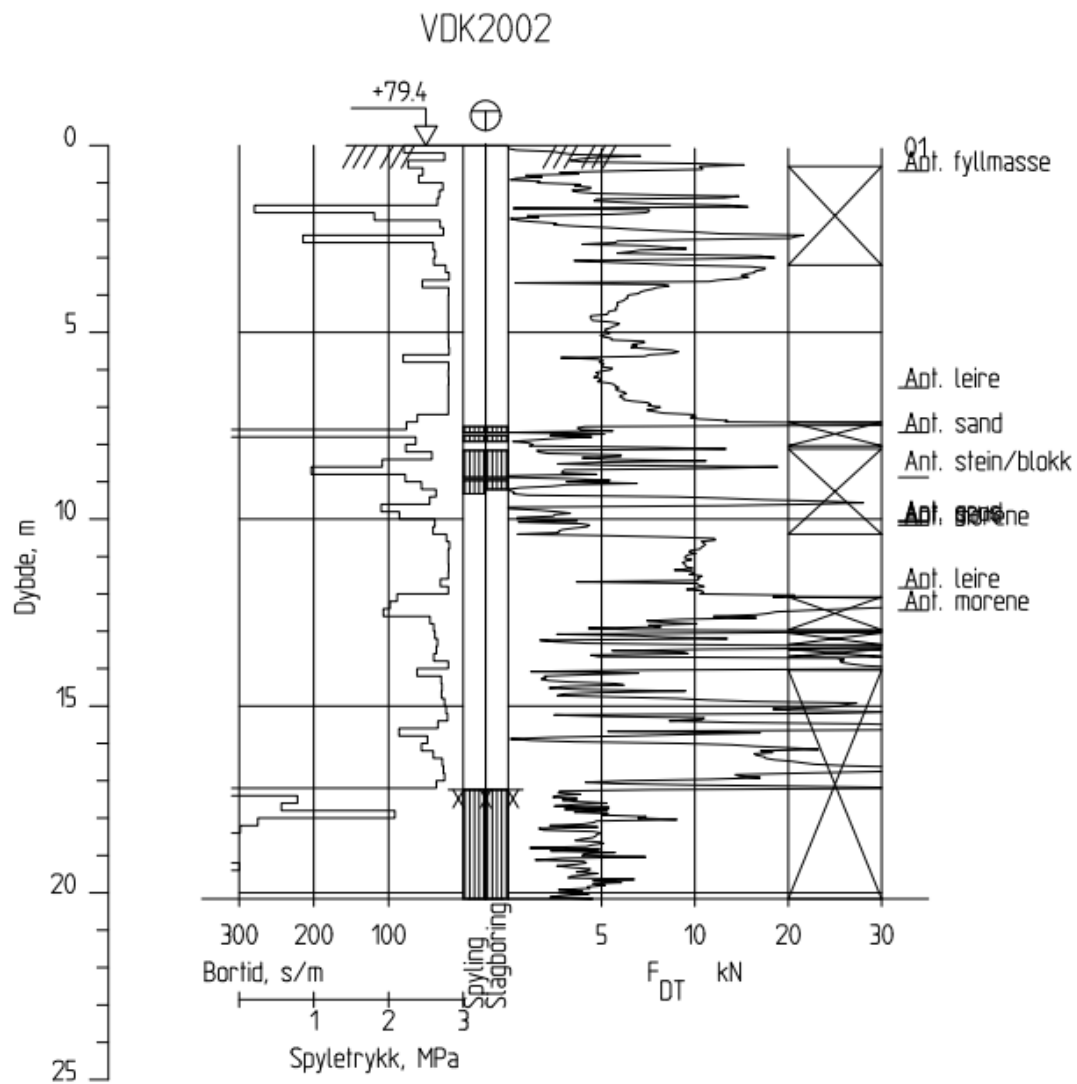


## IC Drammen Kobbervikdalen

### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: VDK2002  
 Terrengkote målere: 79.374 moh.  
 Dato for installasjon: 2015-09-15

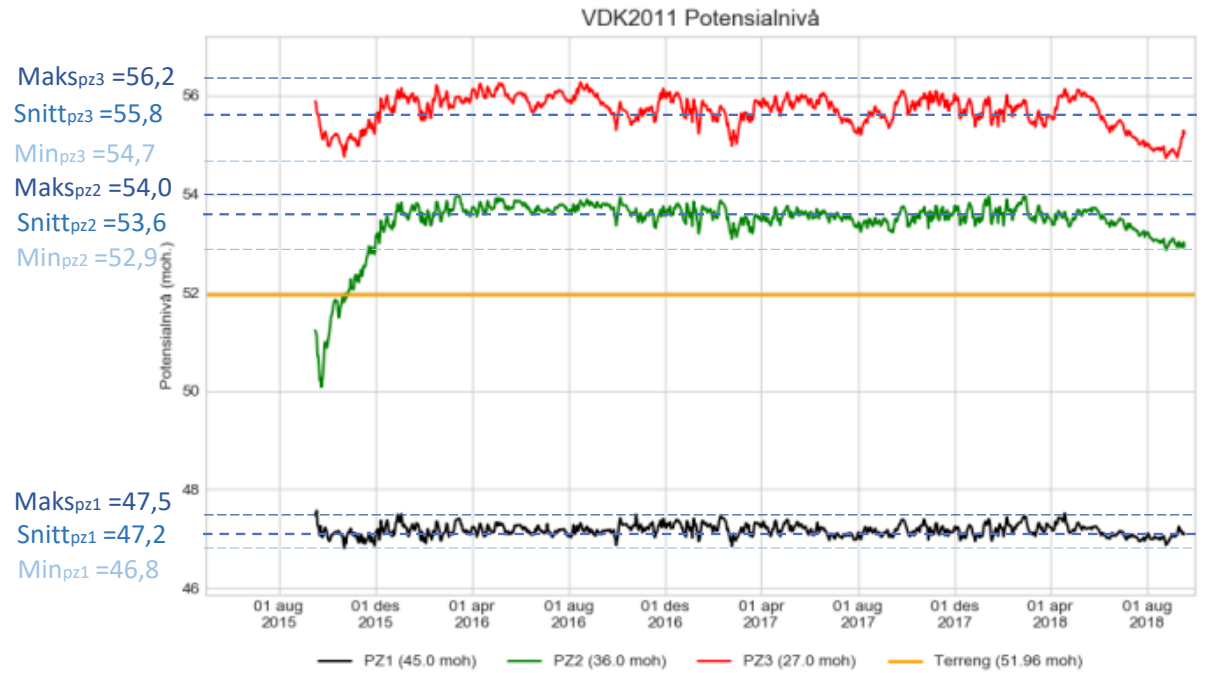
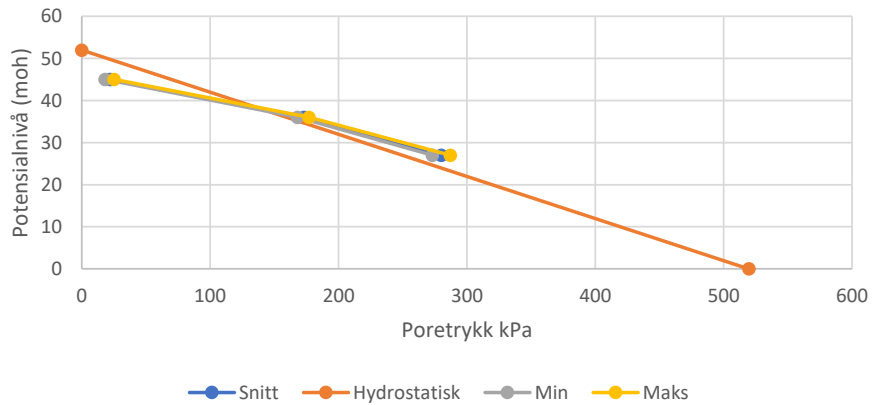
Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A5
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	



# VDK2011

IIXX

VDK2011




## IC Drammen Kobbervikdalen

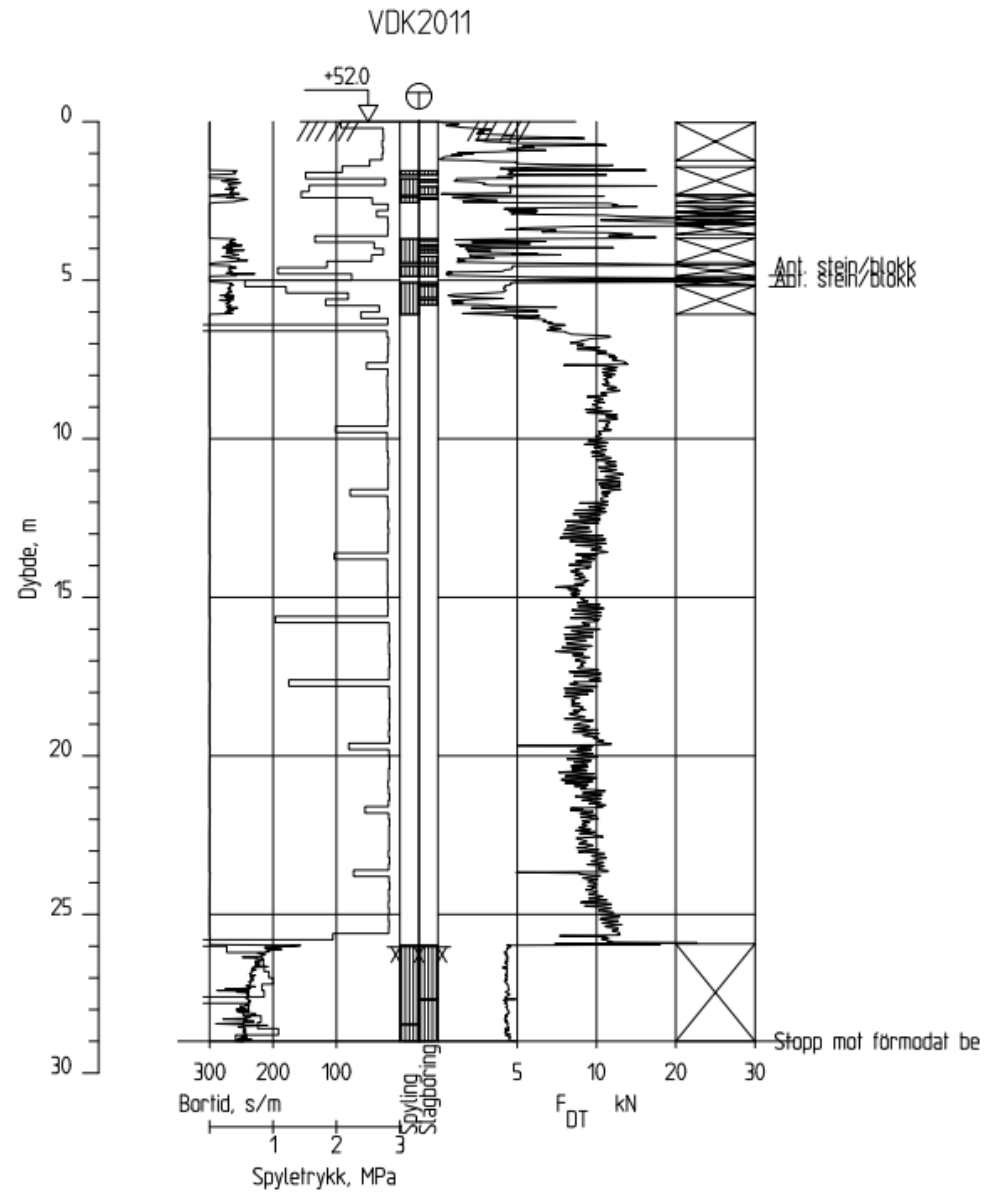
### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: VDK2011

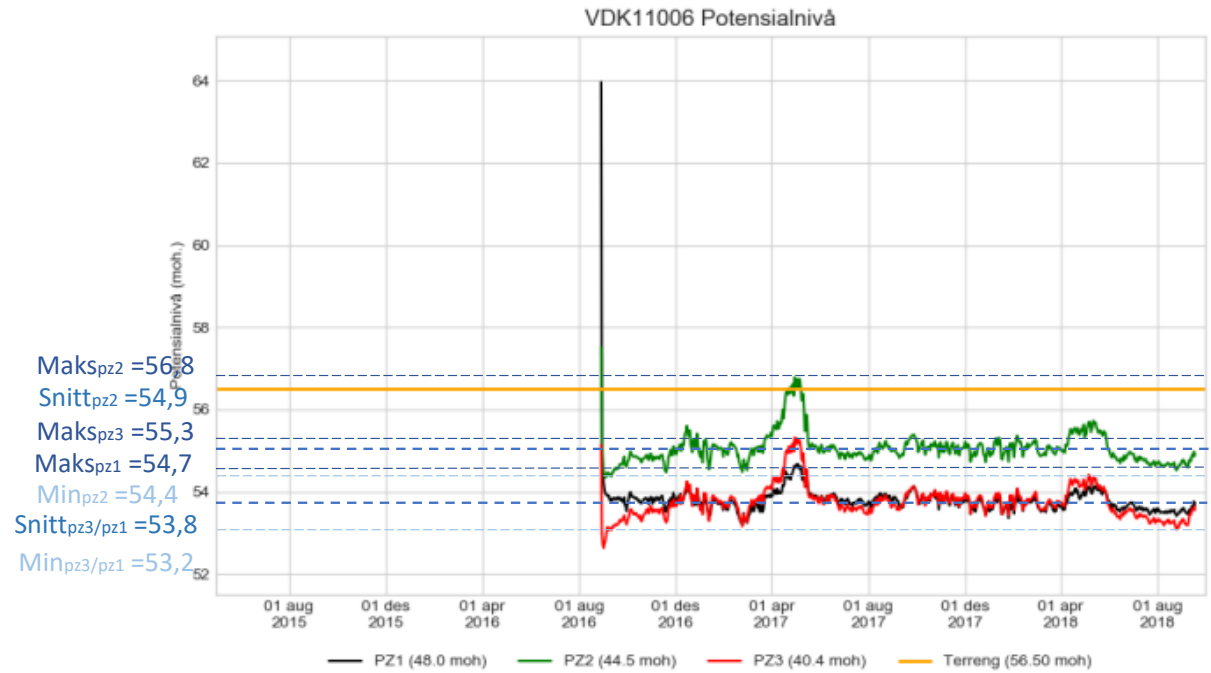
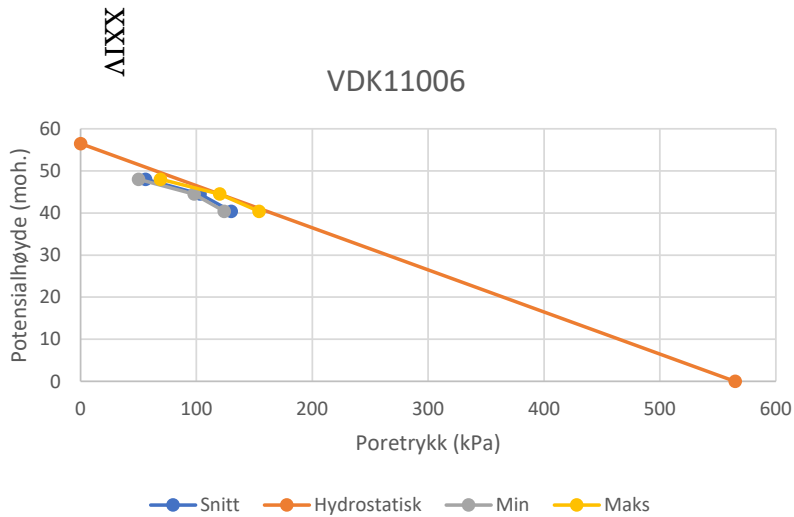
Terrengkote målere: 51.96 moh.

Dato for installasjon: 2015-09-15

Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A6
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	



# VDK11006




## IC Drammen Kobbervikdalen

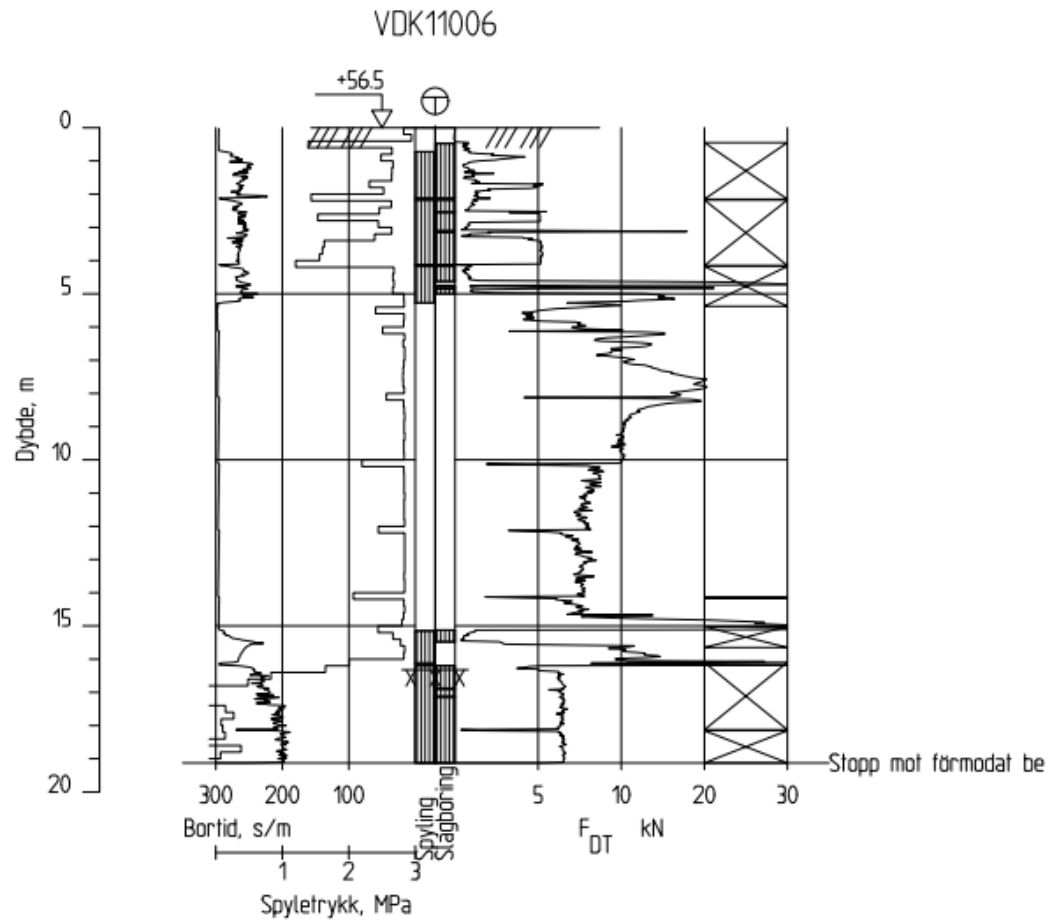
### Resultater fra elektriske poretrykkmålere (PVT)

Borhull: VDK11006

Terrengkote målere: 56.5 moh.

Dato for installasjon: 2016-08-24

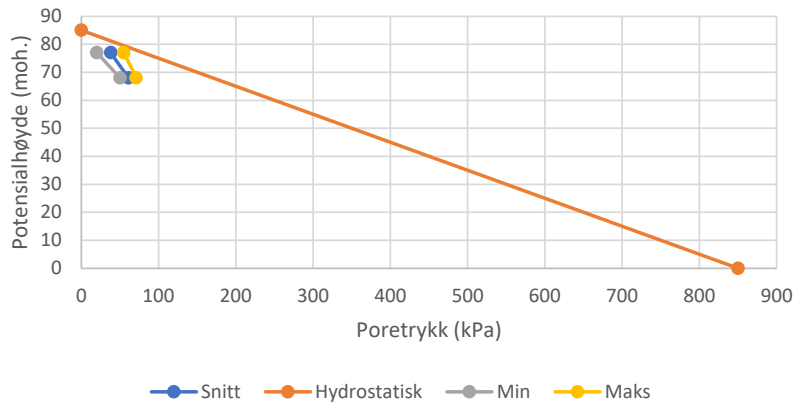
Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A8
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	



# VDK11007

I XXX

VDK11007



Maks<sub>pz1</sub> = 82,8

Snitt<sub>pz2</sub> = 81,1

Min<sub>pz1</sub> = 78,9

Maks<sub>pz2</sub> = 75,3

Snitt<sub>pz2</sub> = 74,5

Min<sub>pz2</sub> = 73,1

VDK11007 Potensialnivå




## IC Drammen Kobbervikdalen

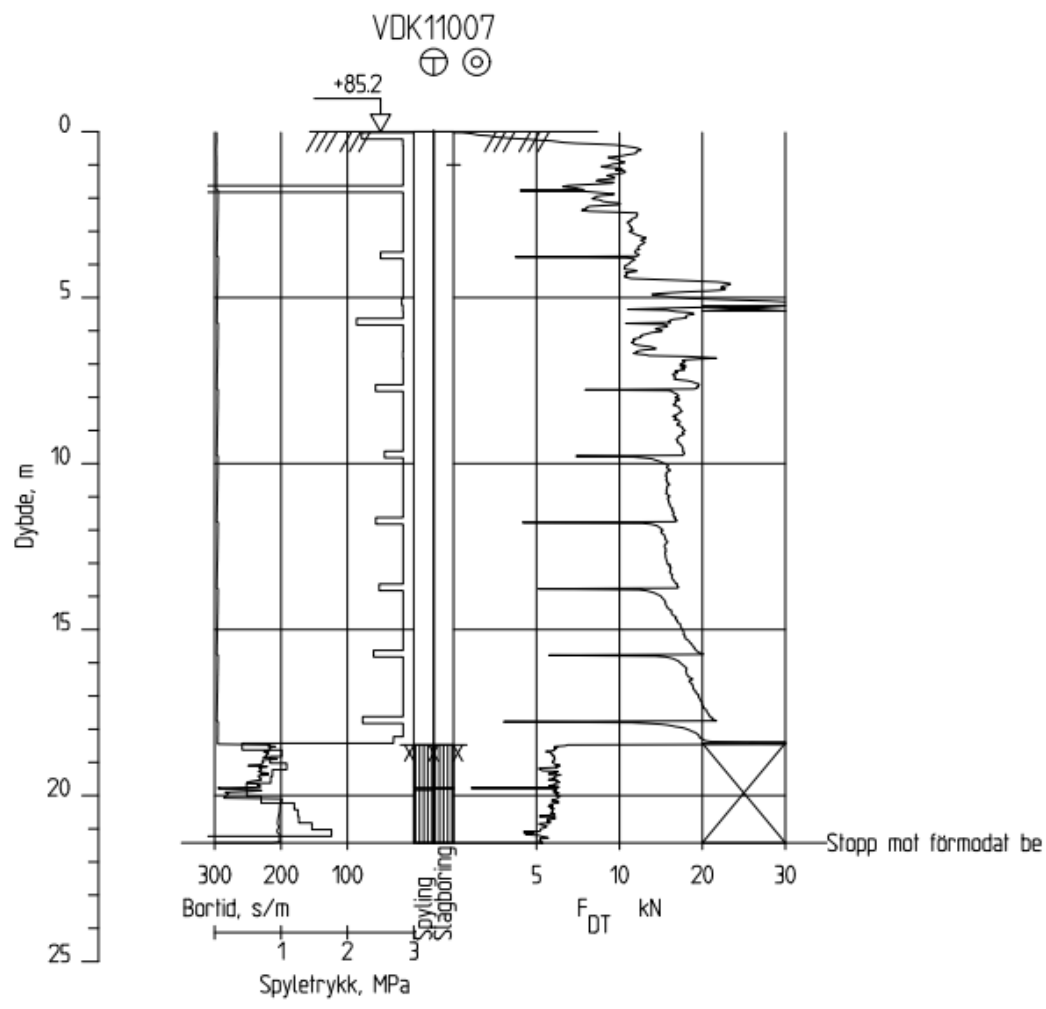
### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: VDK11007

Terrengkote målere: 85.0 moh.

Dato for installasjon: 2016-08-23

Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A9
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	





# VDK12010

Maks<sub>pz3</sub> = 47,2  
 Snitt<sub>pz3</sub> = 46,9  
 Min<sub>pz3</sub> = 46,2  
 Maks<sub>pz2</sub> = 46,1  
 Snitt<sub>pz2</sub> = 45,6  
 Maks<sub>pz1</sub> = 45,6  
 Min<sub>pz2</sub> = 45,1  
 Snitt<sub>pz1</sub> = 44,5

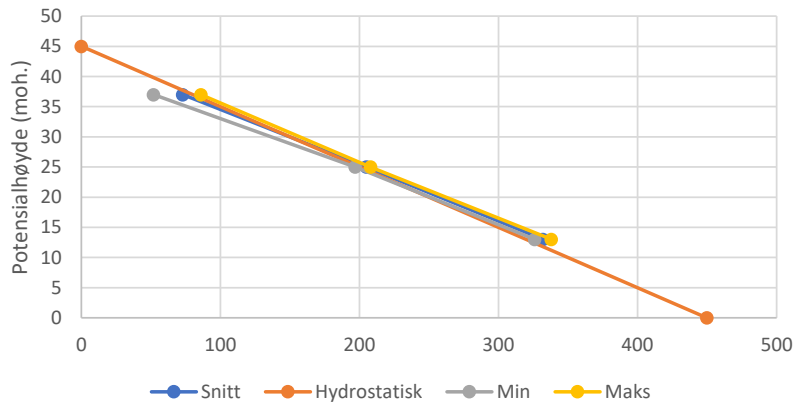
Min<sub>pz1</sub> = 42,3

VDK12010 Potensialnivå



XXXVIII


VDK12010

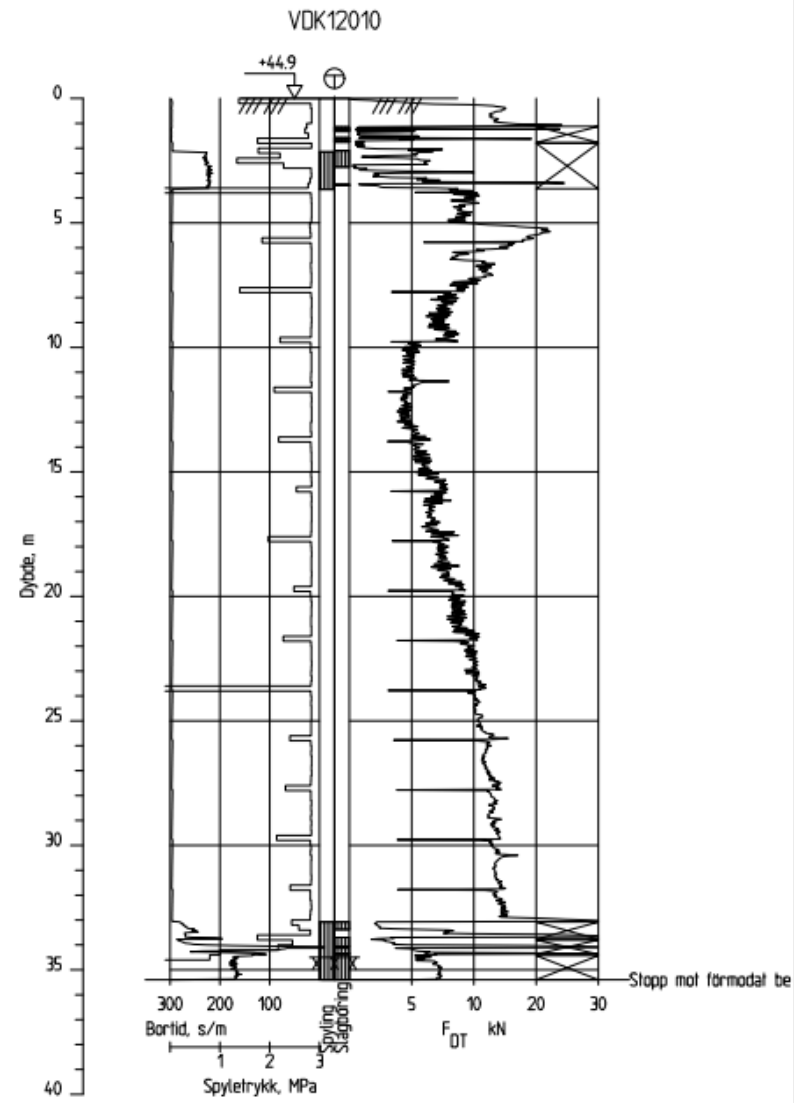


## IC Drammen Kobbervikdalen

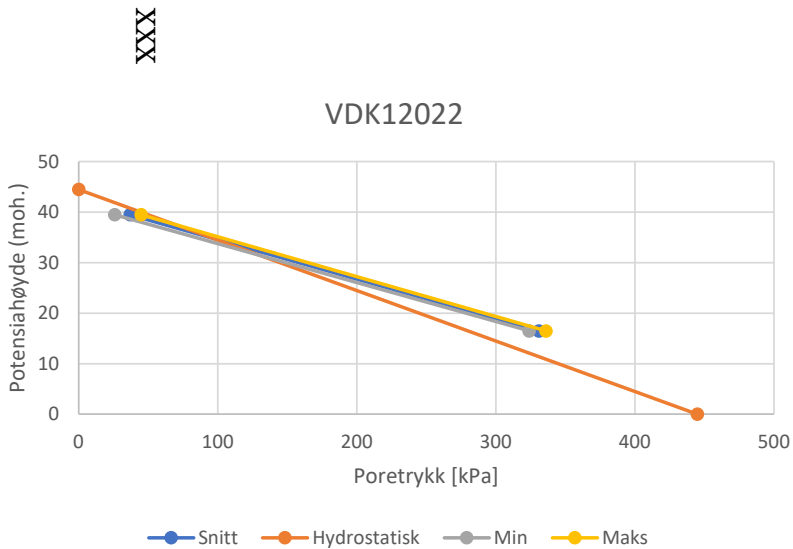
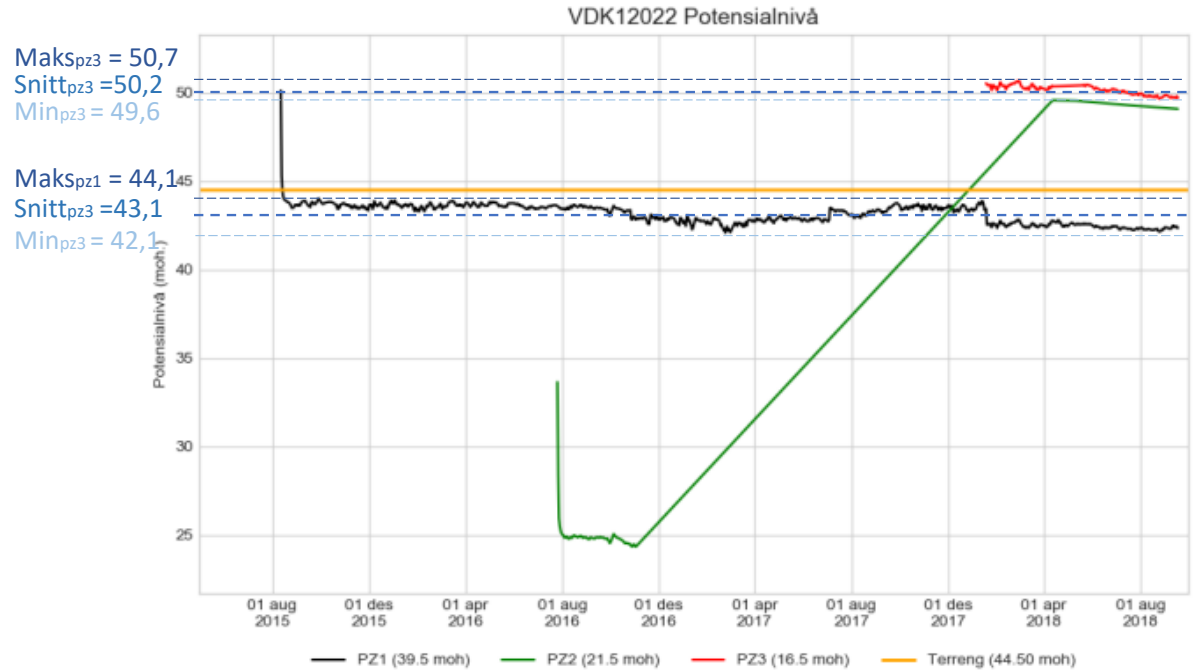
### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: VDK12010  
 Terrengkote målere: 45.0 moh.  
 Dato for installasjon: 2016-10-23

Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A10
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	




# VDK12022

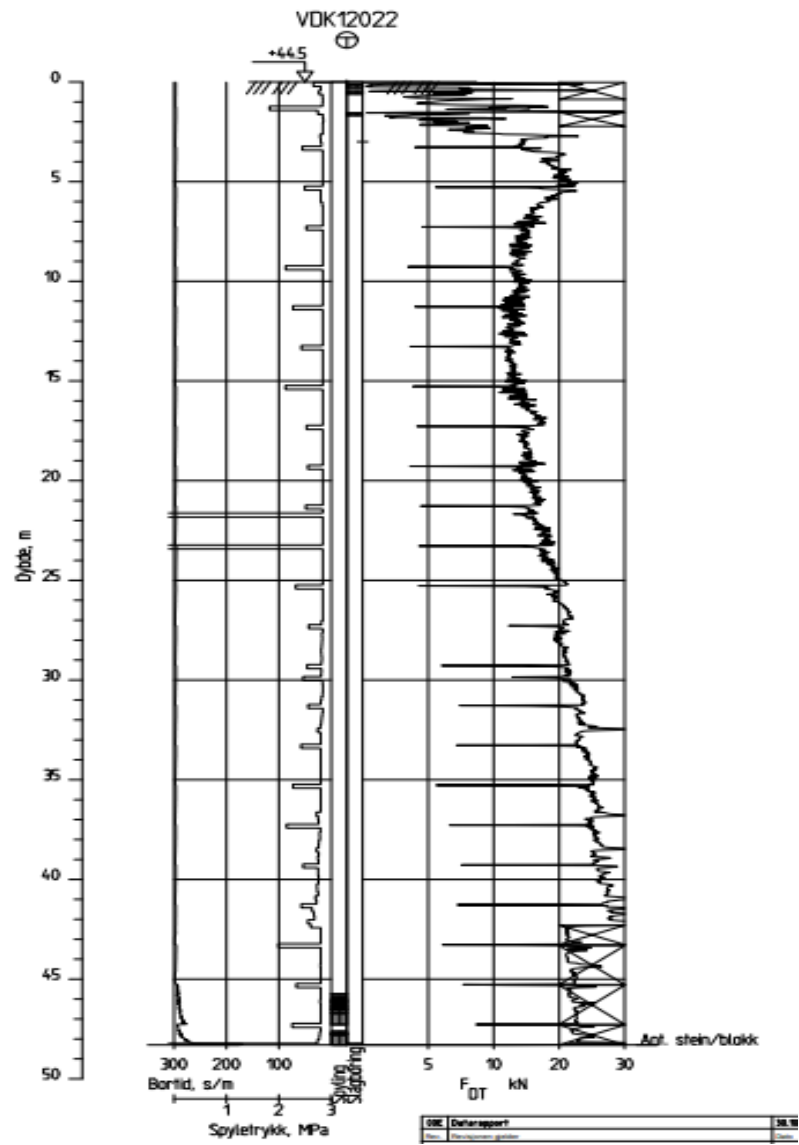


## IC Drammen Kobbervikdalen

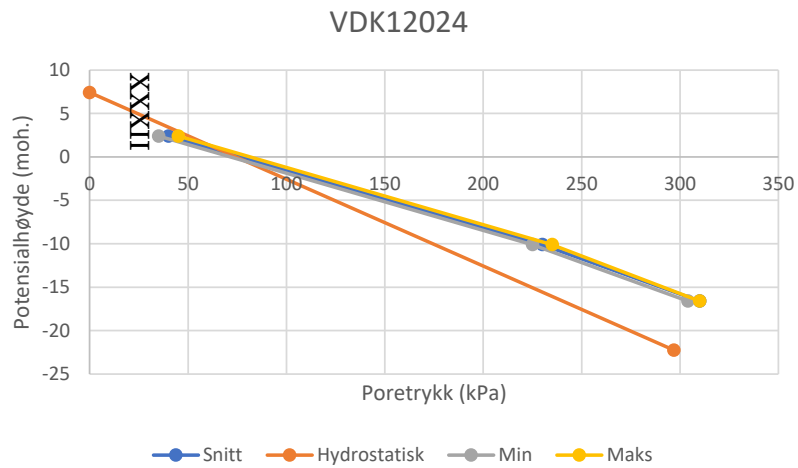
### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: VDK12022  
 Terrengkote målere: 44.5 moh.  
 Dato for installasjon: 2018-01-16

Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A11
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	

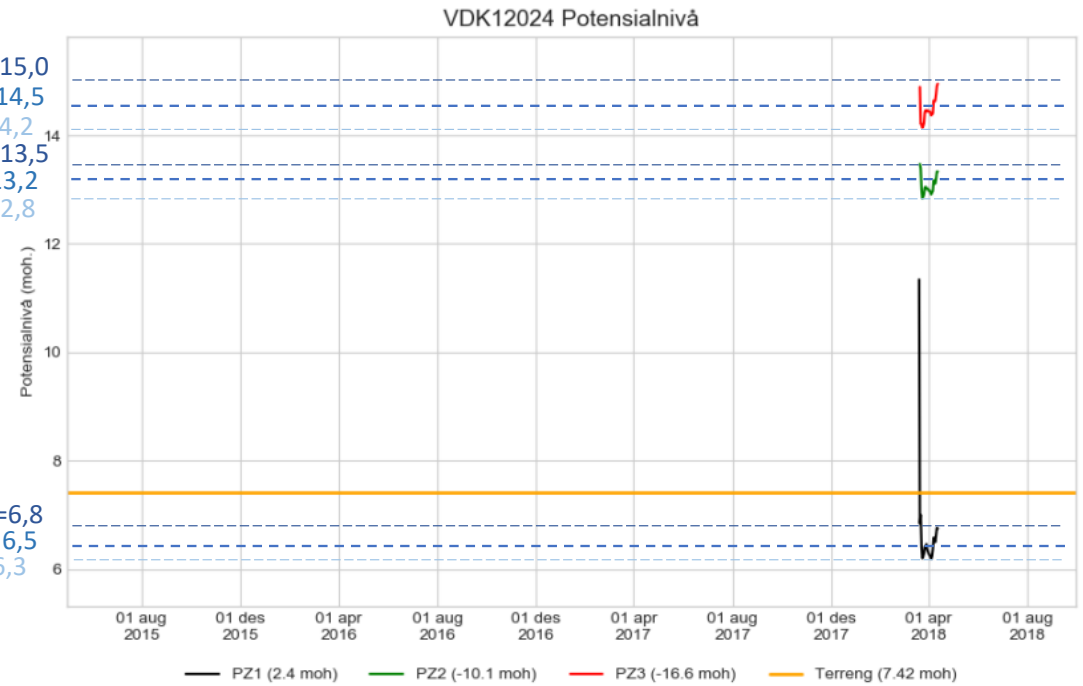


# VDK12024



Maks<sub>pz3</sub> = 15,0  
 Snitt<sub>pz3</sub> = 14,5  
 Min<sub>pz3</sub> = 14,2  
 Maks<sub>pz2</sub> = 13,5  
 Snitt<sub>pz2</sub> = 13,2  
 Min<sub>pz2</sub> = 12,8


Maks<sub>pz1</sub> = 6,8  
 Snitt<sub>pz1</sub> = 6,5  
 Min<sub>pz1</sub> = 6,3



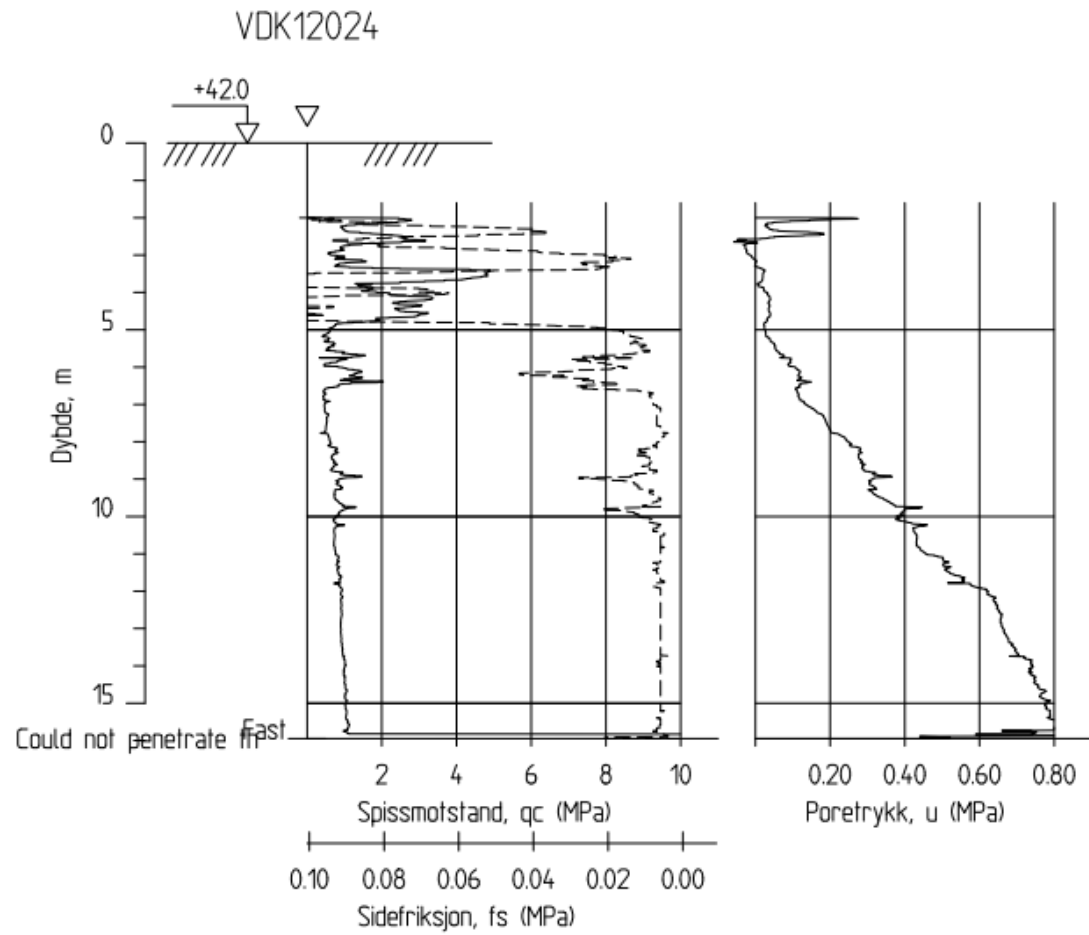
## IC Drammen Kobbervikdalen

### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

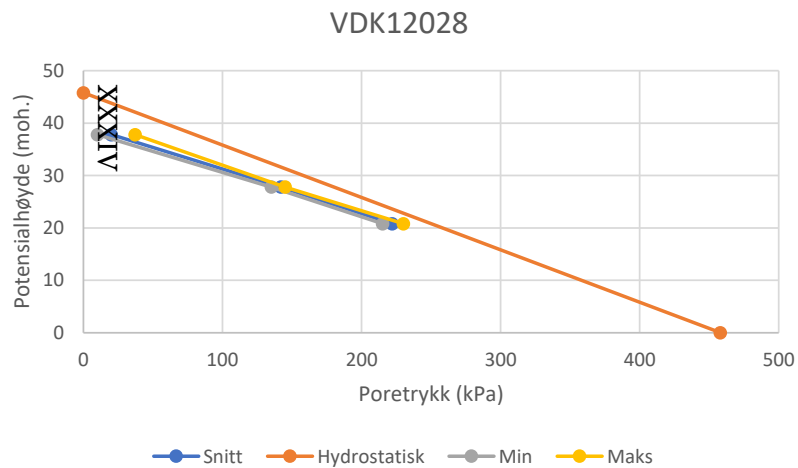
Borhull: VDK12024  
 Terrengkote målere: 7.424 moh.  
 Dato for installasjon: 2018-03-20

Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A12
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	

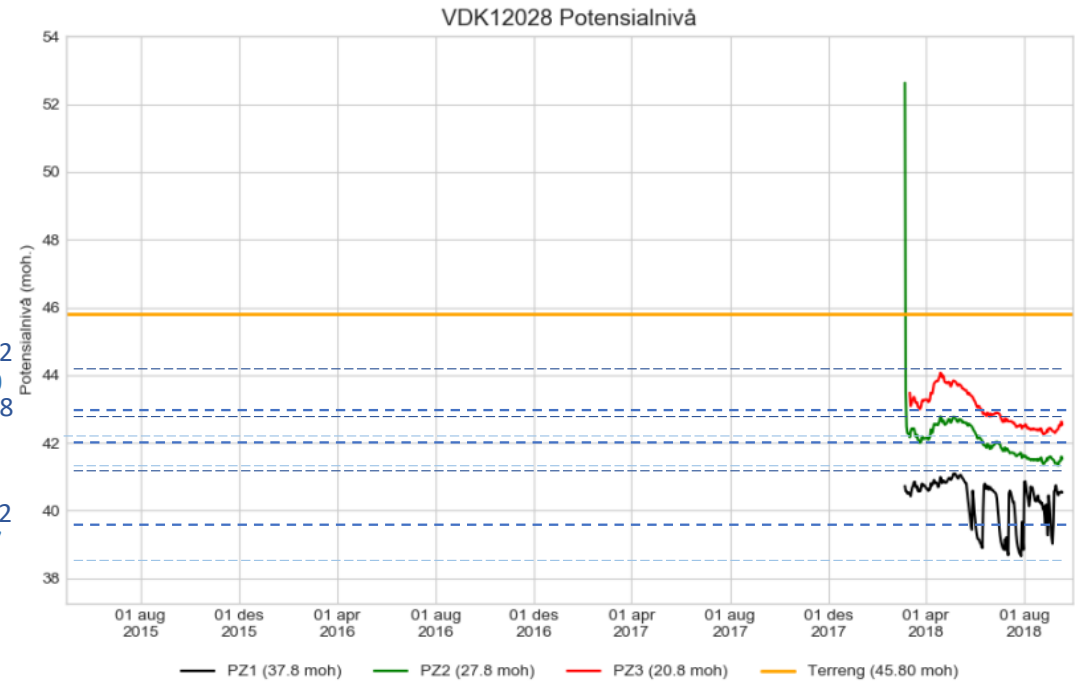
IIIXXX



# VDK12028




Maks<sub>pz3</sub> = 44,2  
 Snitt<sub>pz3</sub> = 43,0  
 Maks<sub>pz2</sub> = 42,8  
 Min<sub>pz3</sub> = 42,2  
 Snitt<sub>pz2</sub> = 42,0  
 Min<sub>pz2</sub> = 41,4  
 Maks<sub>pz1</sub> = 41,2  
 Snitt<sub>pz1</sub> = 39,7  
 Min<sub>pz1</sub> = 38,6



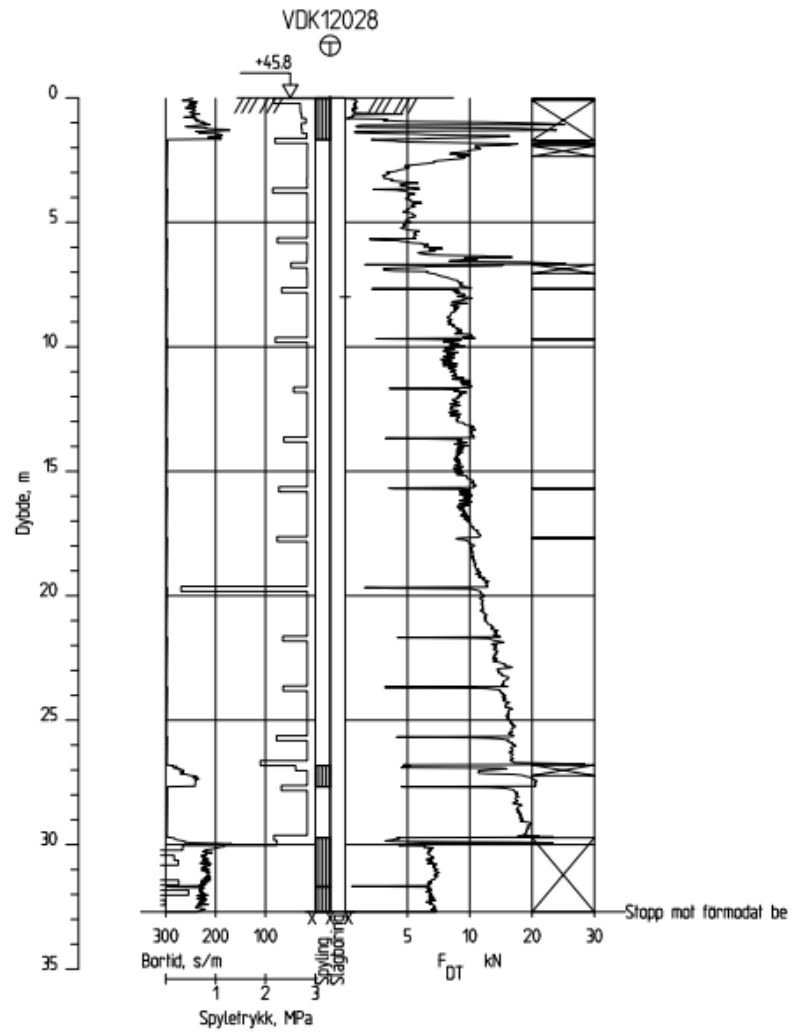
## IC Drammen Kobbervikdalen

### Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: VDK12028  
 Terrengkote målere: 45.8 moh.  
 Dato for installasjon: 2018-03-06

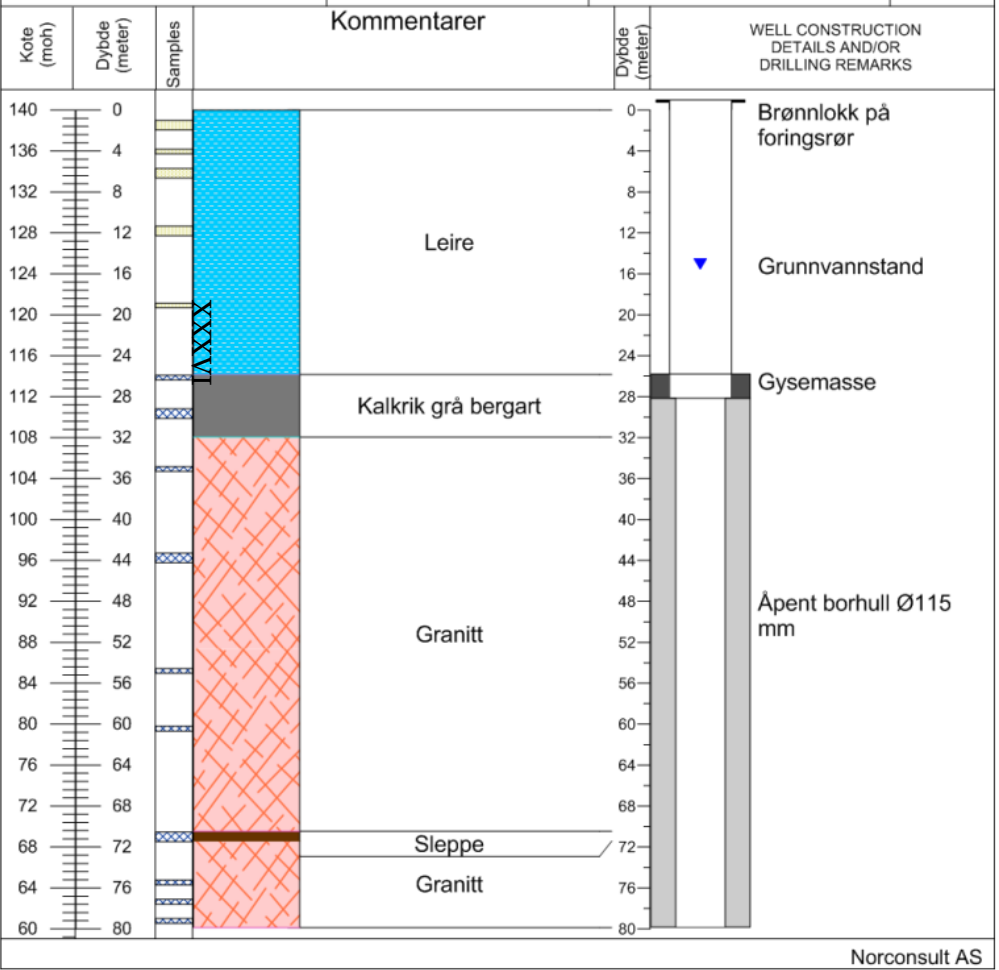
Rapportnr: 20160483-18-R	Figurnr: A13
Tegner: PDo	Dato: 2018-10-01
Kontrollert: SHd	
Godkjent: PDo	

XXXX



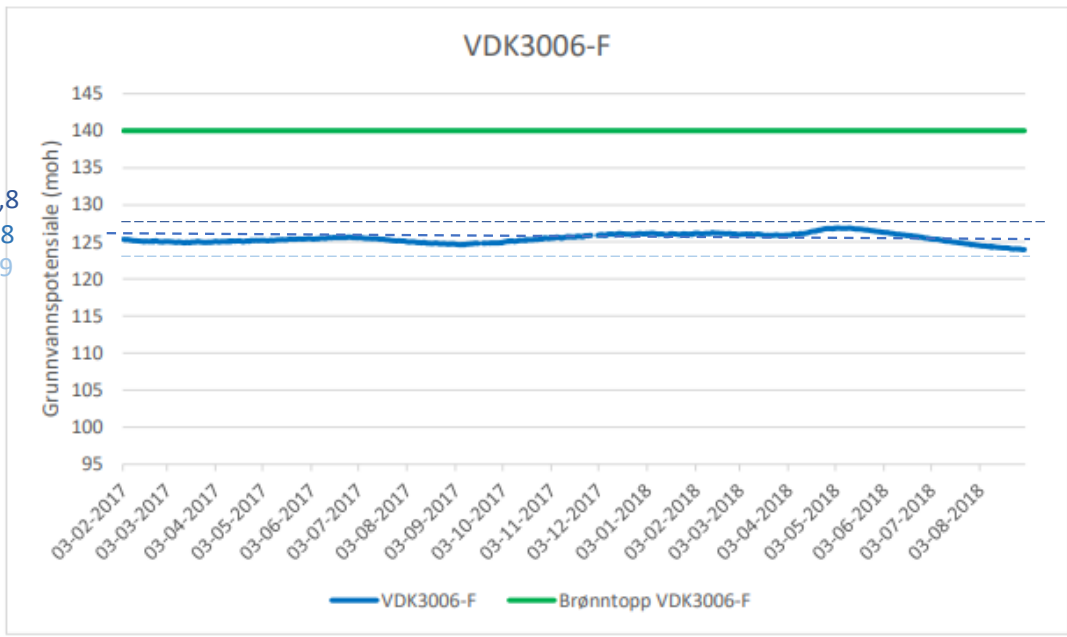


PROJECT: IC Drammen-Kobbervikdalen		Brønn: VDK3006	
DRILLING LOCATION: Fjellsveien 146, Drammen		GROUND SURFACE ELEVATION AND DATUM: NTM10 / NN2000 140 moh	
DRILLING CONTRACTOR: Båsum Boring		TOTAL DEPTH (m): 80	DATE FINISHED: 01.09.2015
DRILLING METHOD:		TOTAL LENGTH (m): 85	SCREEN INTERVAL (m.):
DRILLING EQUIPMENT: Odex		COORDINATES: N: 1188716 E: 84984	CASING: 140 m foringsrør
SAMPLING METHOD: Blåseprøver		LOGGED BY: Vibeke Brandvold	
VINKEL FRA VERTIKAL: 20	RETNING: N180Ø	RESPONSIBLE PROFESSIONAL:	REG. NO.

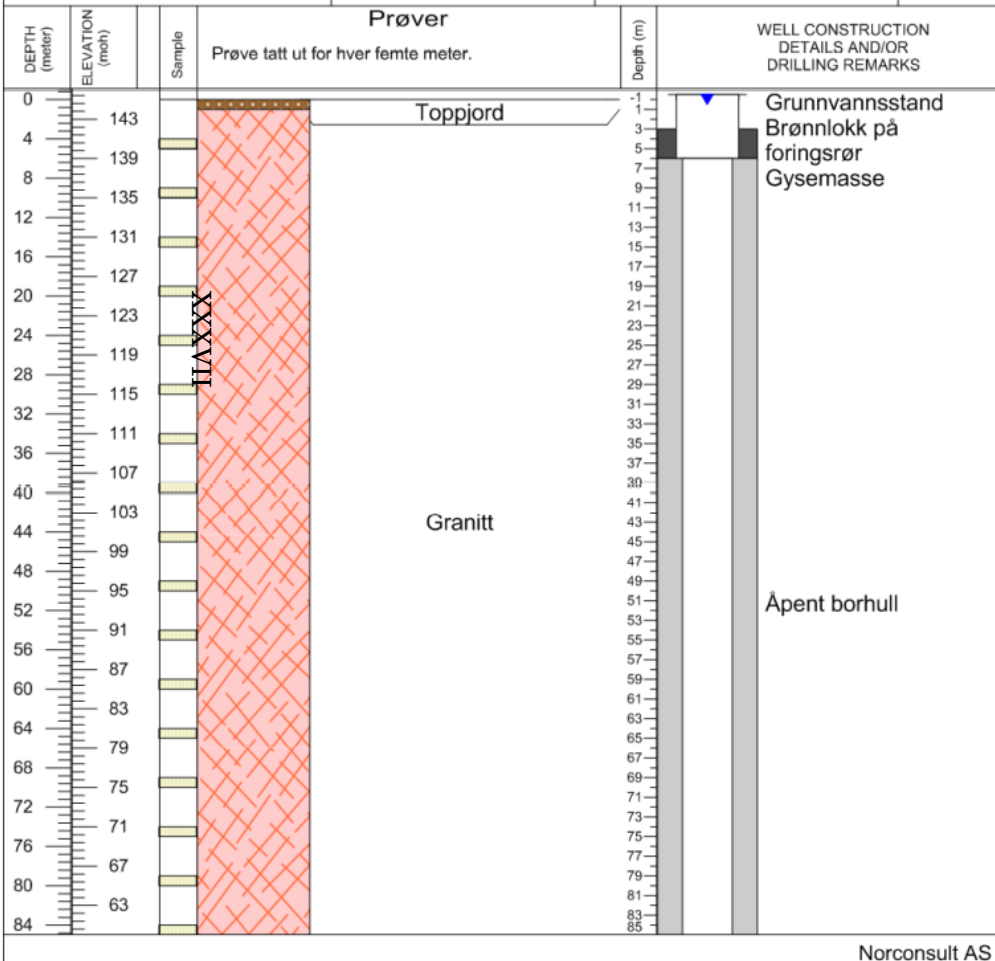


Maks= 126,8  
 Snitt =126,8  
 Min = 124,9

# VDK3006-F

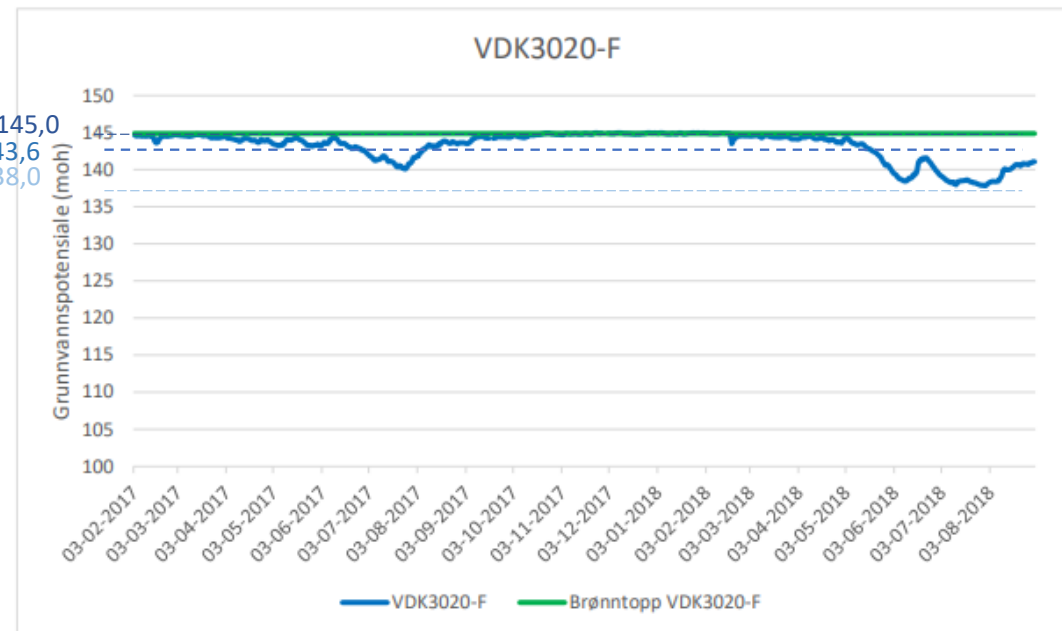


PROJECT: <b>IC Drammen-Kobbervikdalen</b>		<b>VDK3020</b>	
DRILLING LOCATION: <b>Fjellsveien 123</b>		KOORDINATSYSTEM OG KOTE BRØNNTOPP: <b>NTM10 / NN2000 144,87 moh</b>	
DRILLING CONTRACTOR: <b>Båsum Boring AS</b>		TOTAL DEPTH (m): <b>80</b>	DATE FINISHED: <b>2. des. 2016</b>
DRILLING METHOD:		TOTAL LENGTH (m): <b>85</b>	SCREEN
DRILLING EQUIPMENT: <b>Odex</b>		COORDINATES: N: <b>1189003</b> E: <b>84892</b>	CASING: <b>139 mm</b>
SAMPLING METHOD: <b>Blåseprøver</b>		LOGGED BY: <b>Vibeke Brandvold</b>	
VINKEL FRA VERTIKAL: <b>20</b> RETNING <b>Syd</b>		RESPONSIBLE PROFESSIONAL: REG. NO.	



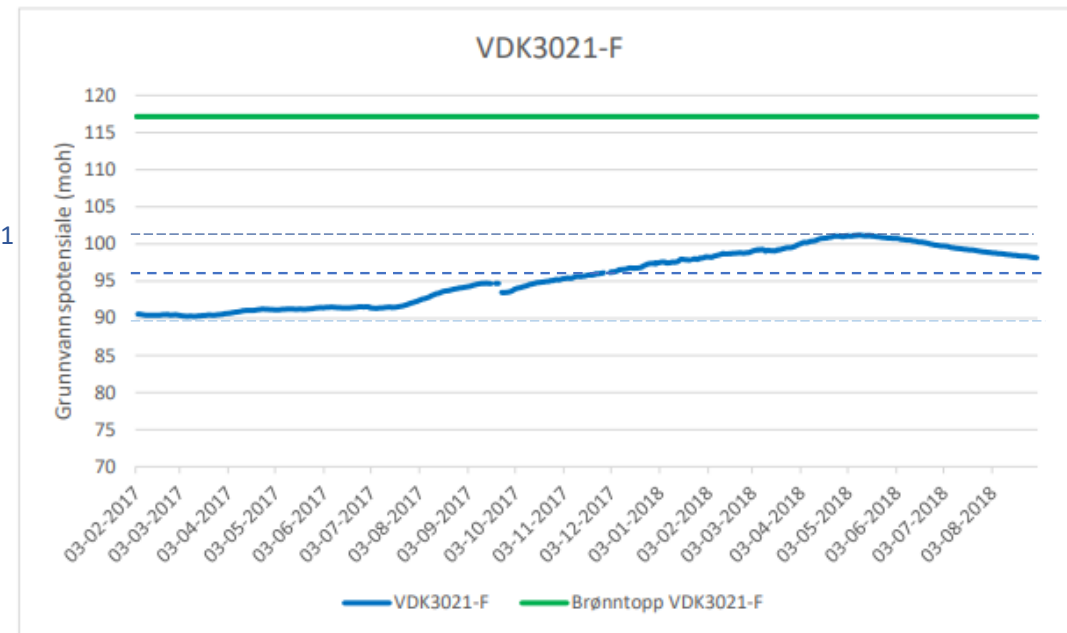
# VDK3020-F

Maks = 145,0  
Snitt = 143,6  
Min = 138,0



PROJECT:		IC Drammen-Kobbervikdalen		VDK3021	
DRILLING LOCATION:		Fjellsveien 155B		KOORDINATSYSTEM OG KOTE BRØNNTOPP: NTM10 / NN2000 117,15 moh	
DRILLING CONTRACTOR:		Båsum Boring AS		TOTAL DEPTH (m): 110	DATE FINISHED: 5. des. 2016
DRILLING METHOD:		TOTAL LENGTH (m): 110		SCREEN	
DRILLING EQUIPMENT:		Odex		COORDINATES: N: 1188457 E: 85218	CASING: 139 mm
SAMPLING METHOD:		Blåseprøver		LOGGED BY: Vibeke Brandvold	
VINKEL FRA VERTIKAL:		15		RETNING: Nord	RESPONSIBLE PROFESSIONAL:
				REG. NO.	
DEPTH (meter)	ELEVATION (moh)	Sample	Prøver	Depth (m)	WELL CONSTRUCTION DETAILS AND/OR DRILLING REMARKS
			Prøve tatt ut for hver femte meter.		
0	116			-1	Brønnlokk på foringsrør
5	112			3	Gysemasse
10	108			7	
15	104			9	
20	100			11	
25	96			13	
30	92			15	
35	88			17	
40	84			19	
45	80			21	
50	76			23	
55	72			25	
60	68			27	
65	64			29	
70	60			31	
75	56			33	
80	52			35	
85	48			37	
90	44			39	
95	40			41	
100	36			43	
105	32			45	
				47	
				49	
				51	
				53	
				55	
				57	
				59	
				61	
				63	
				65	
				67	
				69	
				71	
				73	
				75	
				77	
				79	
				81	
				83	
				85	
				87	
				89	
				91	
				93	
				95	
				97	
				99	
				101	
				103	
				105	

# VDK3021-F



Maks = 101  
Snitt=96  
Min = 90

### E.3 Oppsummerende tabell over poretrykk- og grunnvannsmålingene

**Tabell E.2:** Avlesning av relevante poretrykksmålere fra Norconsult, 2018b.

Borehull	Måler	Terreng (moh.)	Min (moh.)	Maks (moh.)	Snitt (moh.)
VDK12022	PZ1(39,5 moh.)	44,5	49,6	50,7	50,2
	PZ3(16,5 moh.)		42,1	44,1	43,1
VDK12010	PZ1(37,0 moh.)	45	42,3	45,6	44,5
	PZ2(25,0 moh.)		45,1	46,1	45,6
	PZ3(13,0 moh.)		46,2	47,4	46,9
VDK2011	PZ1 (45,0 moh.)	51,96	46,8	47,5	47,2
	PZ2 (36,0 moh.)		52,9	54	53,6
	PZ3 (27,0 moh.)		54,7	56,2	55,8
VDK11006	PZ1(48,0 moh.)	56,5	53,2	54,7	53,8
	PZ2(44,5 moh.)		54,4	56,8	54,9
	PZ3(40,4 moh.)		53,2	55,3	53,8
VDK2002	PZ1(67,4moh.)	79,37	70	72	70,6
VDK11007	PZ1(77,0 moh.)	85	78,9	82,8	81,1
	PZ2(68,0 moh.)		73,1	75,3	74,5
VDK12024	PZ1(2,4 moh.)	7,42	6,3	6,8	6,3
	PZ2(-10,1 moh.)		12,8	13,5	13,2
	PZ3(-16,6 moh.)		14,2	15	14,5
VDK12028	PZ1(48,0 moh.)	45,8	42,2	41,2	39,7
	PZ2(44,5 moh.)		41,4	42,8	42
	PZ3(40,4 moh.)		38,6	44,2	43
VDK3006-F		140	124,9	126,8	125,5
VDK3020-F		145	138	145	143,6
VDK3021-F		117	90	101	96

