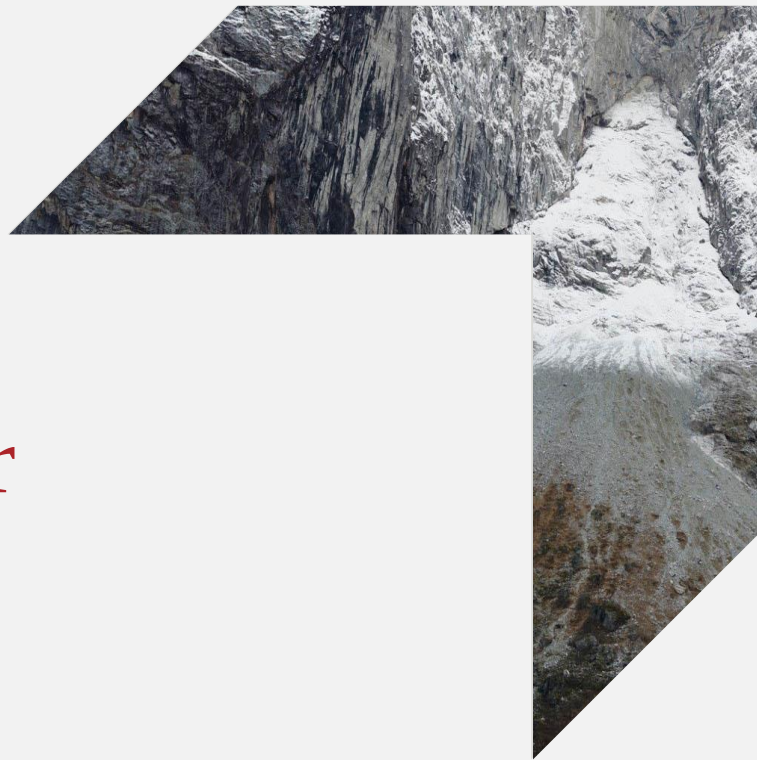




Geologiske vurderinger

Fremtidens injeksjonsprosedyre,
Trondheim 1. November 2021

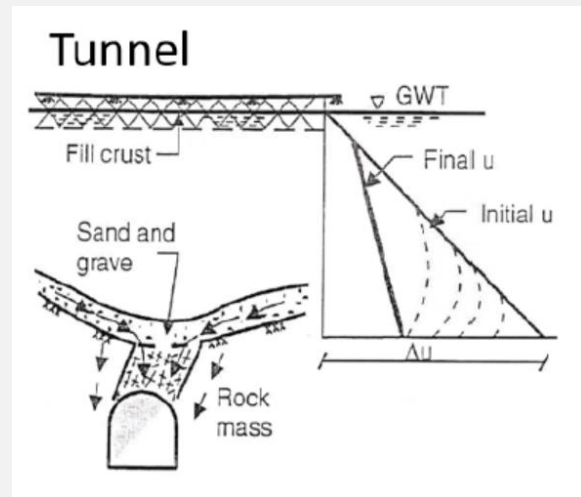
Kristin H. Holmøy / Kristian Kr. Dahl, NGI

Dagens agenda

- ↗ Tetthetskrav
- ↗ Geologiske parametere
- ↗ Hvordan tilpasse injeksjonen til de geologiske forholdene
- ↗ Noen eksempler / erfaringer
- ↗ Utfordringer / avsluttende kommentarer

Tetthetskrav

- Riktig tetthetskrav avhengig av:
 - Akseptkriterier / maksimal setning for bebyggelse
 - Skade på ytre miljø / flora / fauna
 - Skade på kulturminner / fundamentering av tre



(Ref: SVV Publikasjon 103)

- Beregne setninger for ulike poretrykks scenarier – forundersøkelser
 - Kartlegging dyprenner, løsmassetykkelser
 - Grunnundersøkelser løsmasser
 - Måling av poretrykk ved berg
 - Tolking av setningsegenskaper



Tetthetskrav (forts.)

➤ Krav til tetthet:

- Vanligst å stille krav til maksimum innlekkasje (l/min / 100 m)
- Viktig hvordan kontrakten stiller krav til tetthet
- Realistiske krav / for raske endringer i tetthetskrav
- Ofte strenge krav til tetthet i urbane strøk (eks. 3 l/min /100 m)
- Vurdering av behov for vanninfiltrasjon

➤ Oppfølging av oppnådd resultat

- Vannmålinger i tunnelen / installasjon av barrierer
- Klargjøring for vanninfiltrasjon før tunneldriving og injeksjon starter
- Program for oppfølging med poretrykksmåling ved berg, alarmnivåer og beredskap

➤ Økt samarbeid mellom geoteknikere, ingeniørgeologer og hydrogeologer

- I dag er resultater fra undersøkelser og fagrapporter adskilt ved prosjektering/planlegging



Geologiske parametere

- Hva har størst betydning for vannlekkasjer:
 - Strukturgeologi – åpne sprekker / kanaler
 - Bergartstype
 - Bergoverdekning / vanntrykk
 - Ruhet på sprekkeplan / kanaler
- Flere studier viser liten direkte sammenheng mellom Q-verdi og vannlekkasjer / injeksjonsforbruk
 - Størst vannlekkasje registrert ved Q-verdi mellom 0,6 og 15
 - Forkastningskjernen er som oftest tett ($Q\text{-verdi} < 0,1$)
 - Tett oppsprekking – $RQD/J_n < 2$ gir høyere injeksjonsforbruk (Bhasin et al. 2002)

Fare for store vannlekkasjer:

- Ofte i tilknytning til regionale forkastninger
- De vannførende sprekkesettene/svakhetssonene er ofte parallelle største hovedspenning
- Potensiale for de virkelig store vannlekkasjene med høyt vanntrykk ved økende overdekning
- Store vannlekkasjer ofte påtruffet i samband med bergartsgrenser / foldeakser

Bergarter og vannlekkasjer:

- ↗ Stive bergarter med gjennomsettende sprekker
 - Dypbergarter og gangbergarter (f.eks. syenitt/syenittganger)
- ↗ Sterke bergarter / høy E-modul
- ↗ Karbonat bergarter (karst)
- ↗ Oppløsning av kalkspat spiller en viktig rolle
- ↗ Dagberg (forvitringssonen)
- ↗ Ofte moderate lekkasjer, men mange sprekker i:
 - Skifer og glimmerrike bergarter (f. eks. glimmerskifer/fyllitt)

Verdt å merke seg om bergarter og vann/injeksjon (Klüver, 2000)

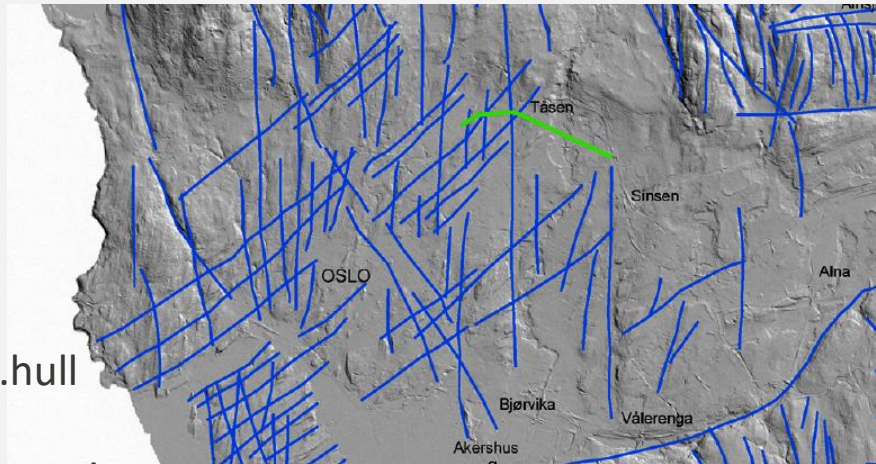
Berginjeksjon. Intern rapport nr. 2151 (SVV)

- **A)** Bergmasse med åpne sprekker uten vesentlig sprekkebelegg (sandsteiner, kvartsitter, samt Oslofeltets lavabergarter mv.).
- **B)** Bergmasse med sprekker belagt med sprekkefylling, og som har typisk tendens til kanaldannelse (prekambriske gneiser og andre tilsvarende metamorfe bergarter). Bergmassen utgjør hoveddelen av norsk berggrunn.
- **C)** Tette plastiske bergarter med høy grad av sprekkefylling og opptreden av små kanaler på sprekker (metamorfe sedimenter som leirskifre, fyllitter og glimmer-skifre samt grunnsteiner, grønnskifre mv.).
- **D)** Forskjellige bergmasser med tektonisk påvirkning eller karstfenomener som har ført til ekstrem åpen oppsprekking eller åpne rom i berget (bergmasse i sentrale og nordøstlige deler av Sør-Norge, kalkstein i Nord-Norge mv.).

Geologiske parametere og undersøkelser

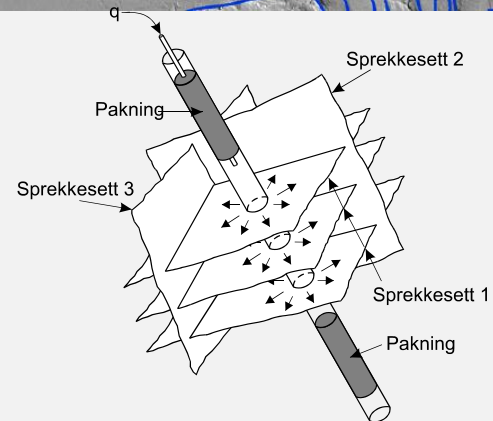
➤ Undersøkelser før driving

- Lineaments studie
- Grundig geologisk kartlegging
- Refraksjonsseismikk / resistivitetsmålinger
- Kjerneboring og Lugeon-målinger
- Optisk televiewer og geofysiske målinger i b.hull

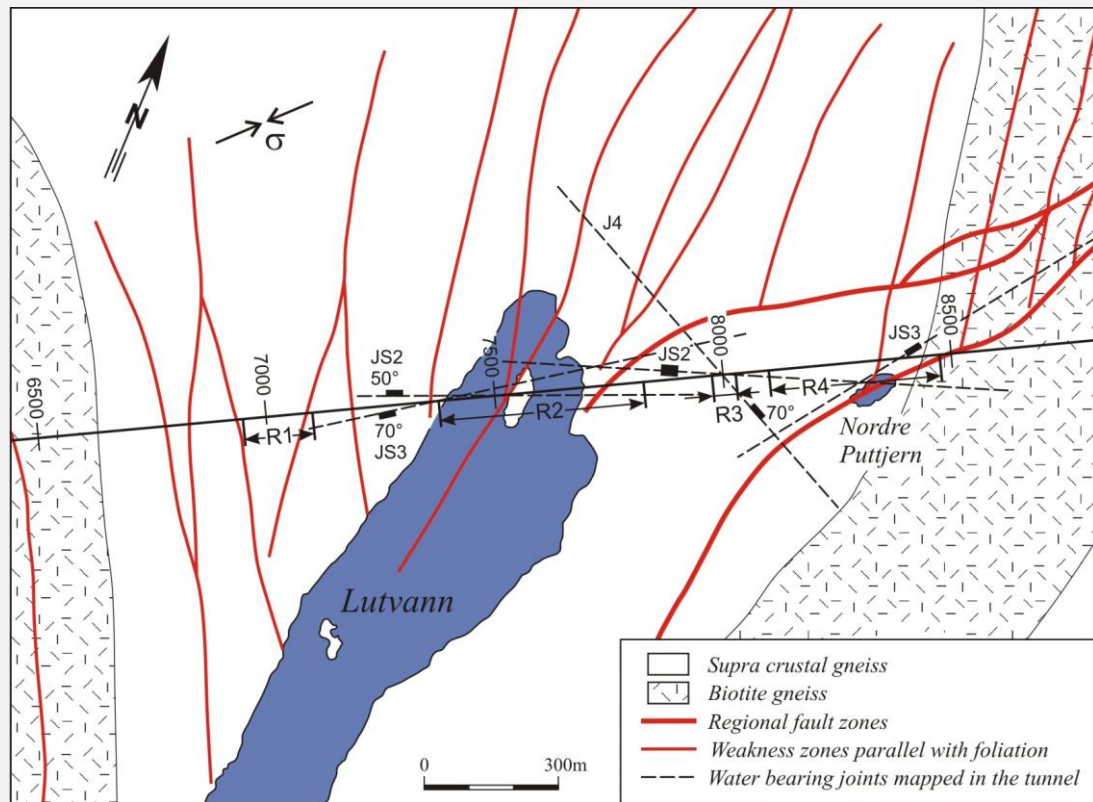


➤ Geologisk kartlegging/undersøkelser i tunnelen

- Sonderboring /MWD-data
- Optiske televiewer / Lugeon målinger kan gi nyttig informasjon
- Seismikk fra stoffen (mellomhullsseismikk)
- Lite undersøkelser i tunnelen før injeksjon

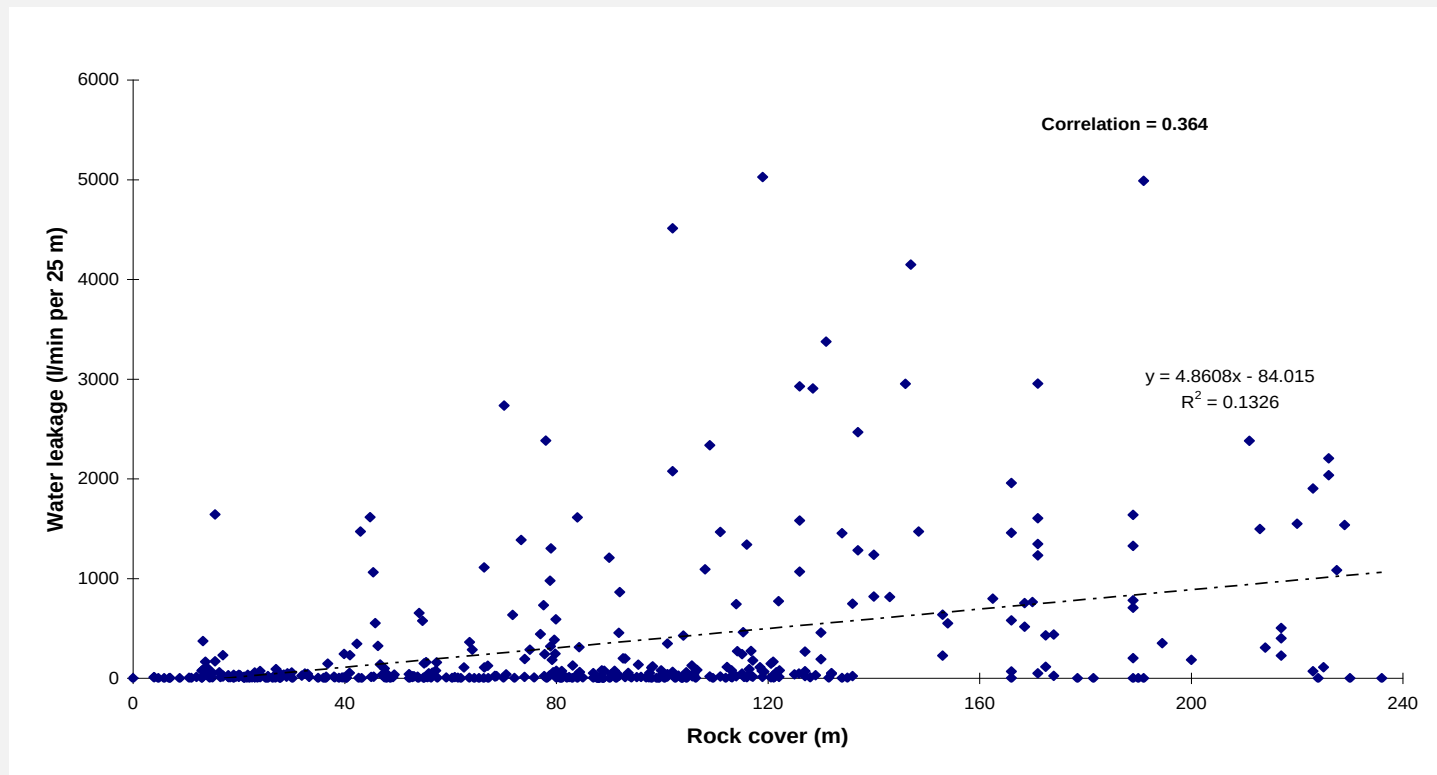


Størst vannlekkasje i sprekker subparallelt største hovedspenning



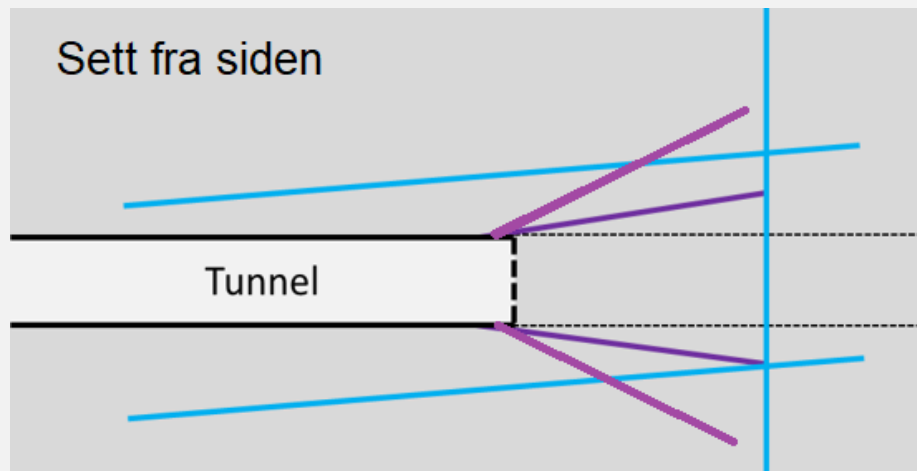
Vannlekkasjer minker ofte ved økende bergoverdekning

Men det stemmer ikke alltid!



Tilpasse injeksjonen til de geologiske forholdene

- Utforming av injeksjonsskjerm må tilpasses og justeres underveis
- Tilpasse retningen på injeksjonshullene slik at de skjærer sprekkeene som skal injiseres
- Forskjellige sementtyper har forskjellig inntrengning

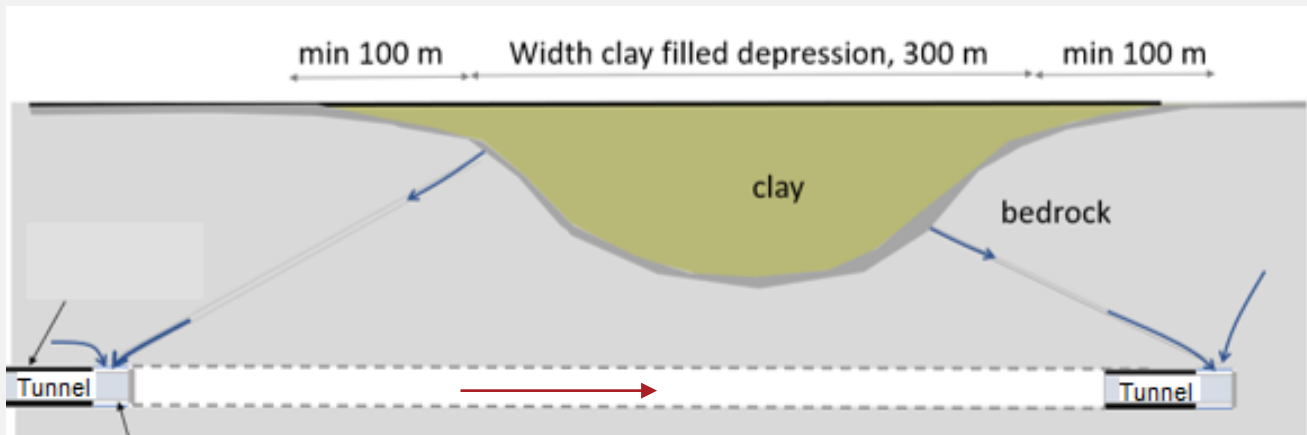


Tilpasse injeksjonen til de geologiske forholdene (forts.)

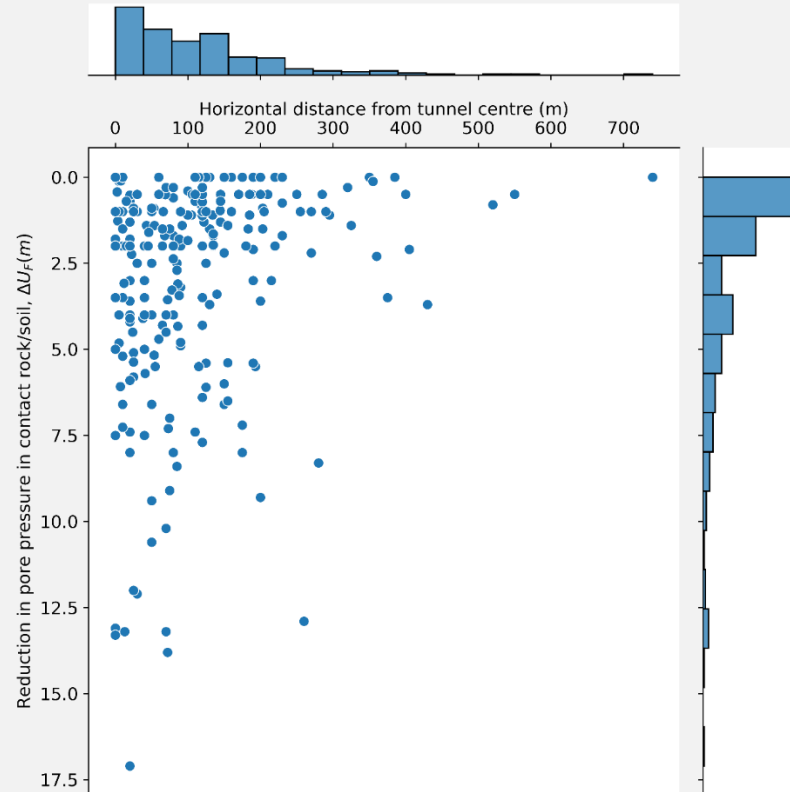
- Ved åpne og få sprekker – færre borhull nødvendig
 - Høyt trykk og vannstrømning – utfordring å få overtrykk og herding
- Ved spredte lekkasjer (mindre åpne sprekker) - tettere boring
- Samspill mellom sementtype og geologi er viktig for å oppnå riktig inntrengning
 - Tidlig herdig med akselerator for å unngå å tette langt utenfor tunnelen
- Viktig å ta seg tid til å utføre testing for å optimalisere injeksjonsopplegget
- Endring/forbedring underveis – om det ikke blir tett nok

Oppfølging underveis

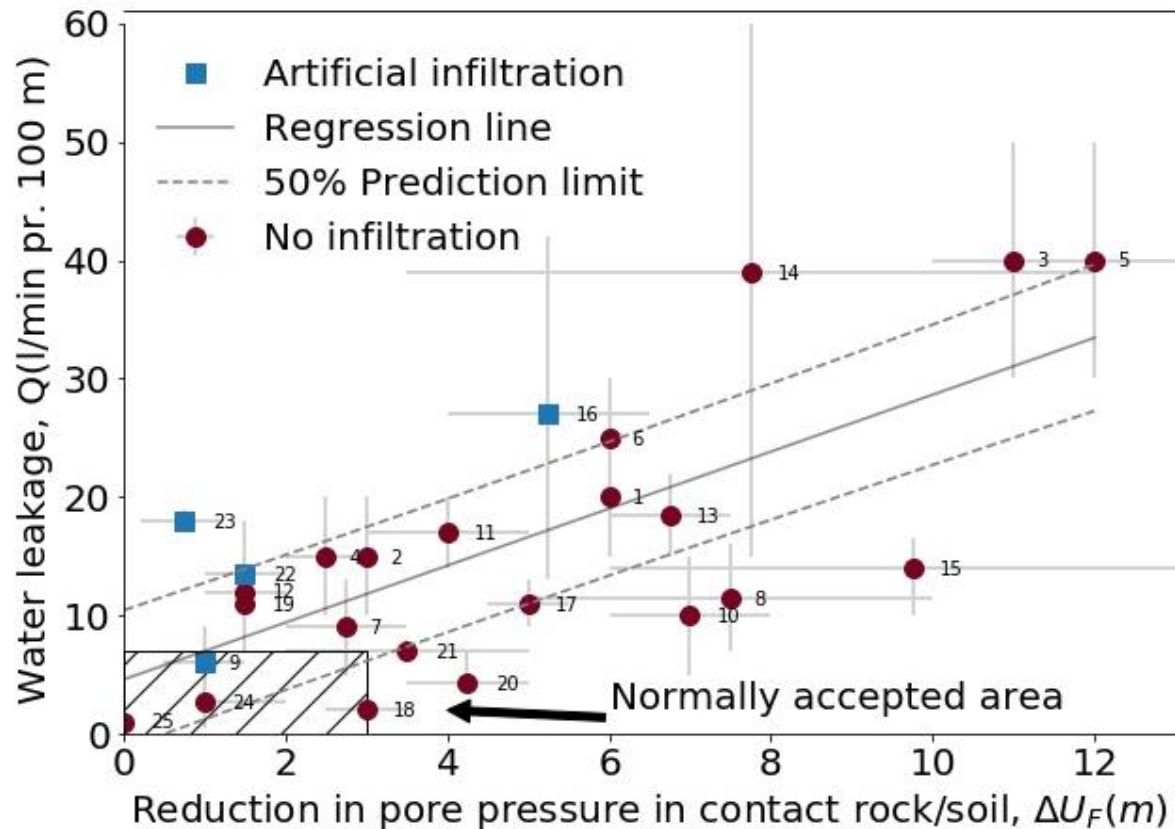
- Oppfølgingsprogram avhengig av krav til tetthet
 - Piezometere installert i løsmasser like over bergoverflaten
 - Kontrollboring etter injeksjon
 - Vannmålinger i seksjoner – betaling for å lage barrierer
- Nye tunneler nært eksisterende tunneler
 - Poretrykkssenking har ofte allerede skjedd
 - Nye tunneler må ha enda strengere krav



Sammenheng mellom observert poretrykkssenking og horisontal avstand fra tunnel

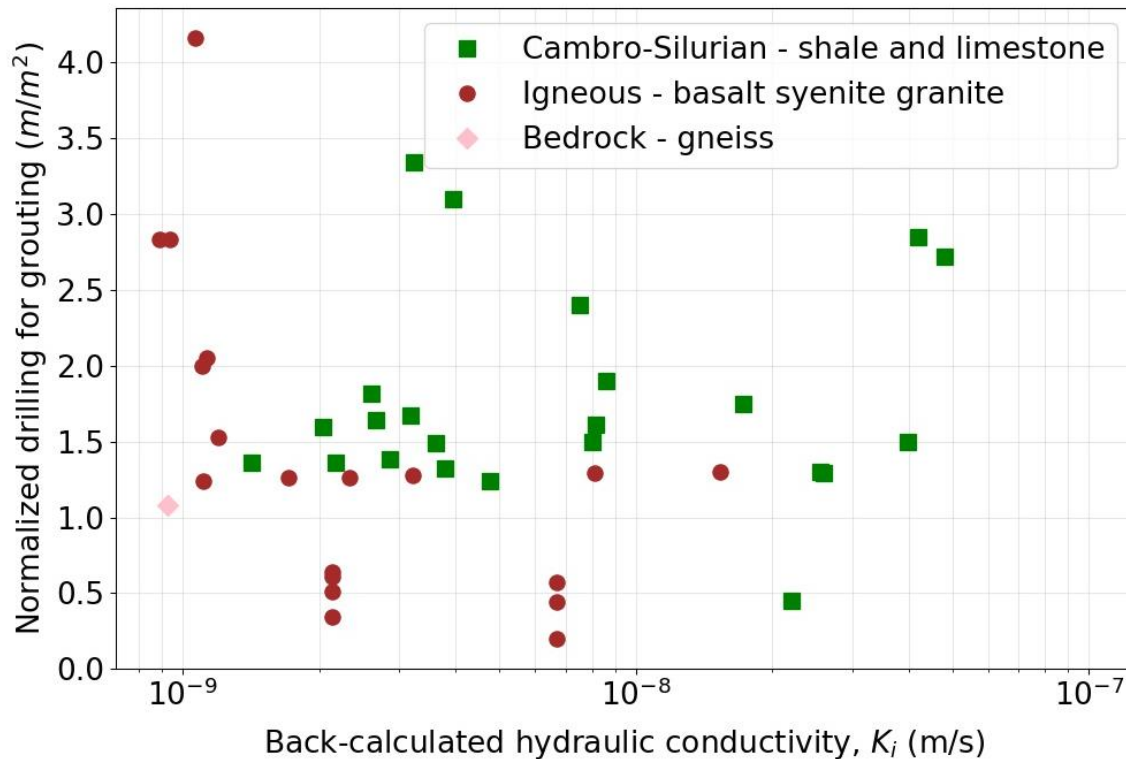


Sammenheng: poretrykkssenkning og innlekkasje

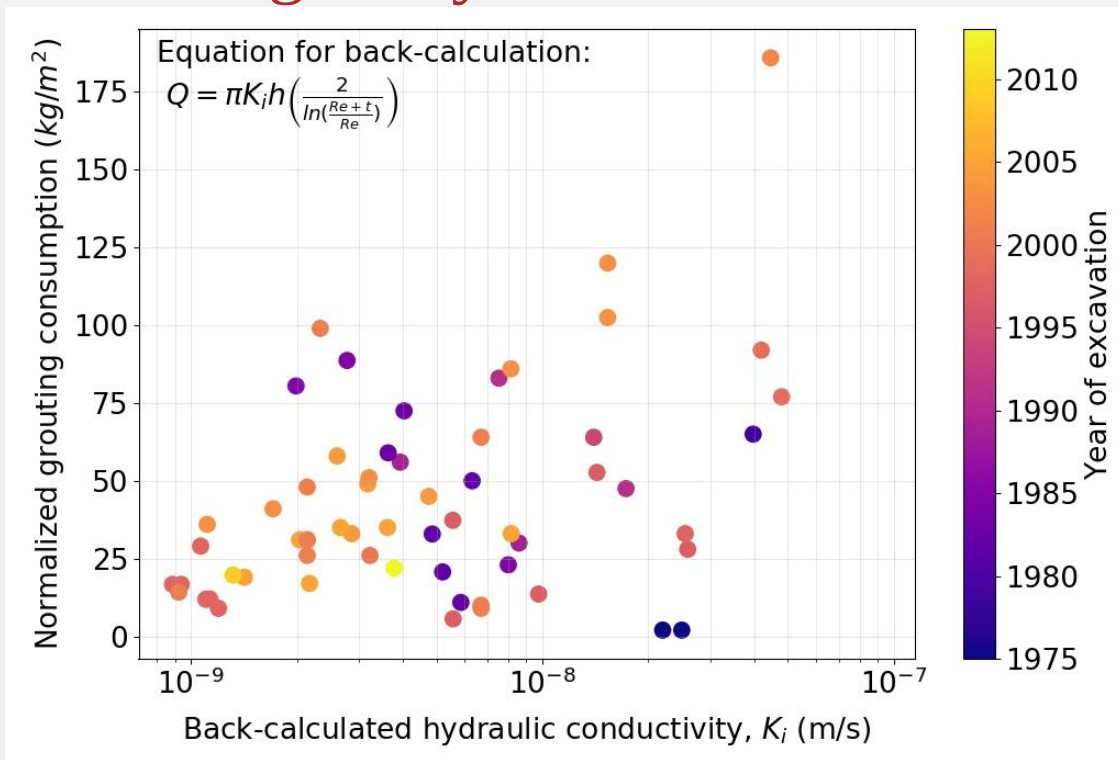


- 1: NSB - Stortinget stasjon (1975)
- 2: NSB - Arbiensgt. (1979)
- 3: NSB - Parkvn. (1979)
- 4: NSB - Gyldenløvesgt. (1979)
- 5: NSB - Frogner (1979)
- 6: NSB - Erling Skjalgssonsgt. (1979)
- 7: OVK Majorstua- Kirkeveien (1977)
- 8: OVK Lysaker-Majorstua (1982)
- 9: Fjellinjen Øst (1989)
- 10: Granfoss, Lysaker (1991)
- 11: Granfoss, Ullern (1991)
- 12: Romeriksporten, Bryn (1997)
- 13: Romeriksporten, Godlia (1997)
- 14: Romeriksporten, Hellerud (1997)
- 15: Romeriksporten, Ellingsrud (1997)
- 16: Tåsentunnelen (1998)
- 17: Rælingstunnelen (1997)
- 18: Bekkestutunnelen, Gjønnnes (1994)
- 19: Bekkestutunnelen, Egne hjem (1994)
- 20: Lørentunnelen (2013)
- 21: T-baneringen Ullevål-Nydalen (2002)
- 22: Fjellinjen Vest (1989)
- 23: Nye Nationaltheatret st. (1997)
- 24: Bærumstunnelen Lysaker-Sandvika (2009)
- 25: NSB - National. - Skøyen (etterinj.) (1979)

Sammenheng mellom normalisert injeksjonsboring og tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet (bergartstyper)



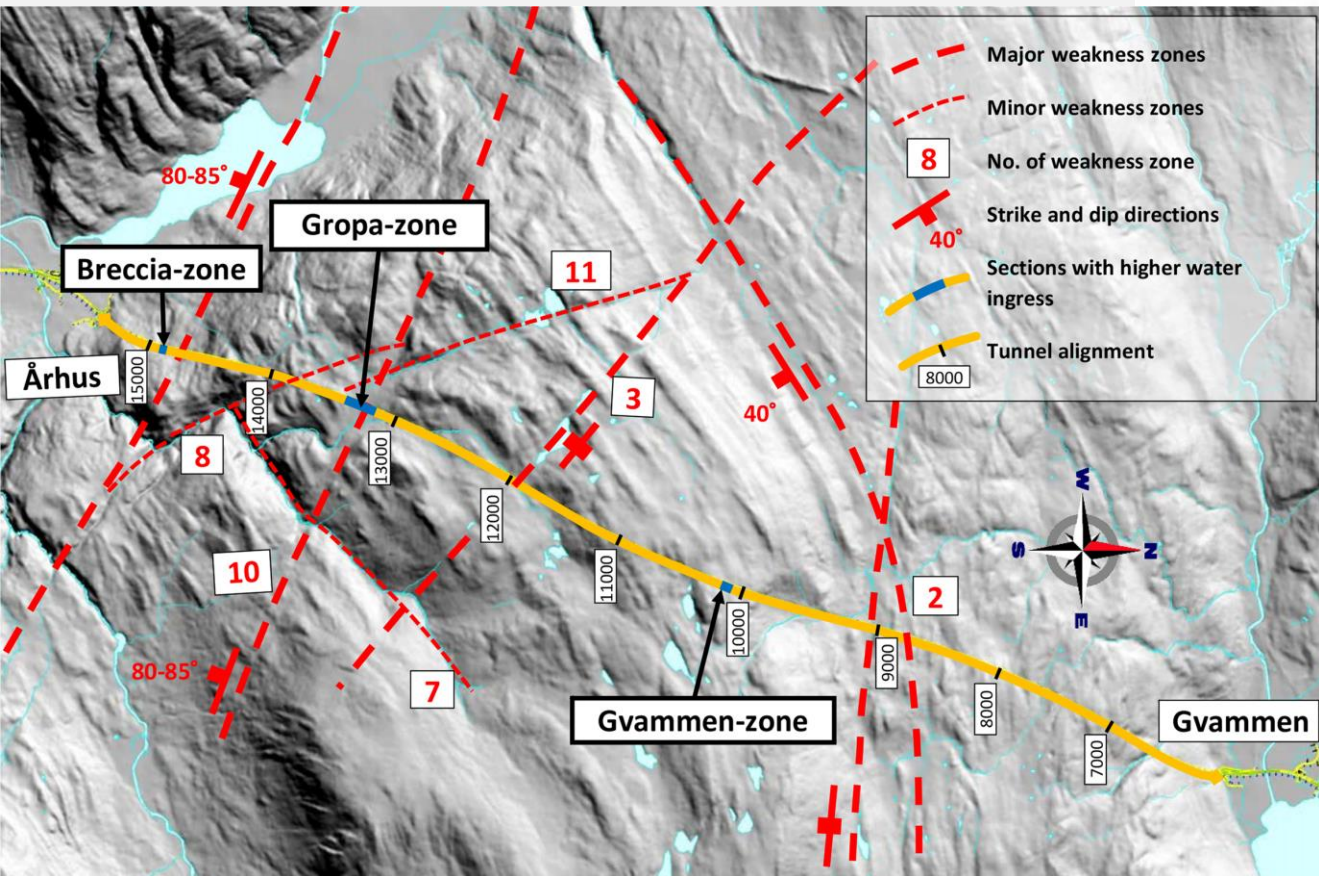
Sammenheng mellom normalisert injeksjonsforbruk og tilbakeberegnet hydraulisk konduktivitet (over tid)



(Ref: Holmøy et al. Fjellsprenningskonferansen 2019)

Mælefjell vegtunnel

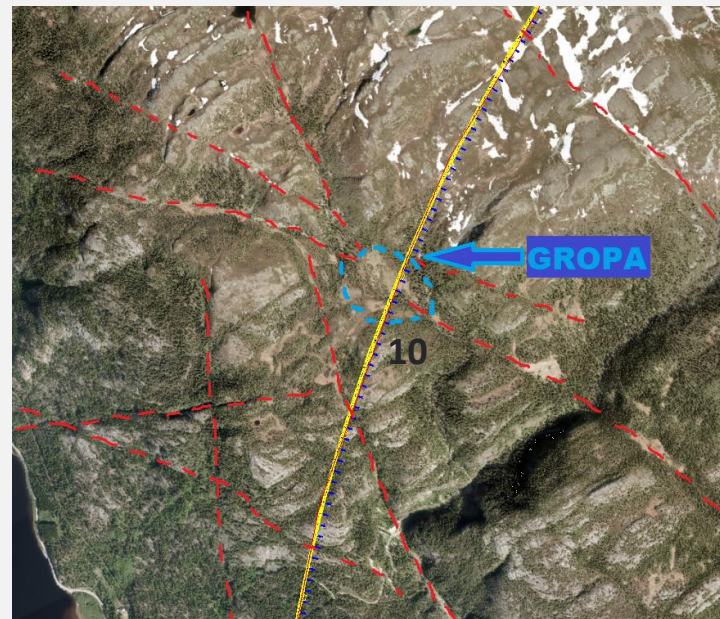
- Telemark fylke – 9,5 km lang vegtunnel – åpning desember -19
- Kvartsitt – høy trykkfasthet og sprø bergart
- Ekstremt høye vannlekkasjer (>1000 l/min i borehull)
- Høyt vanntrykk (75 bar) – utfordring å oppnå tilstrekkelig overtrykk
- Vannlekkasjer tydelig sammenheng med strukturgeologi
- Vannlekkasjer ofte registrert i overgang mellom kvartsitt og gabbrointrusjoner
- Høy bergoverdekning (opptil 1190 m)





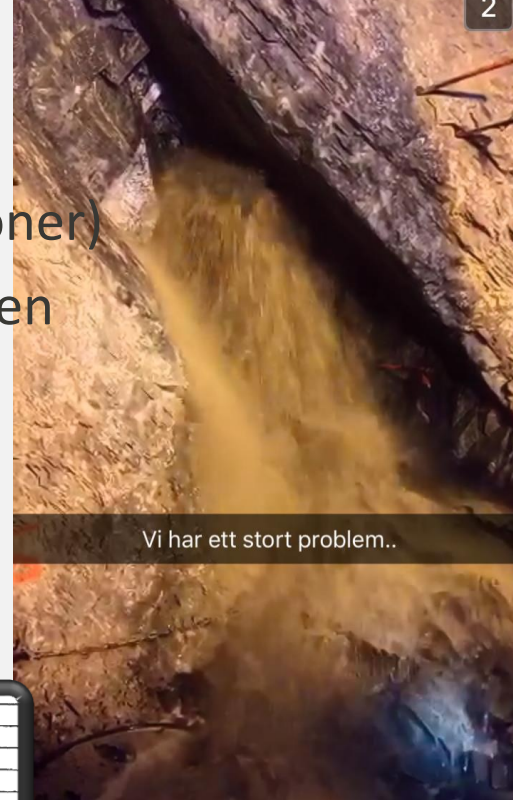
Gropa – utfordrende forkastningssone

- Flere forkastningssoner møtes i "Gropa"
- Forkastning nr. 10 er en skjær-forkastning
- Bergmassen er tett oppsprukket
- Tynne sprekker med brunfarget og leirinfisert sleppemateriale
- Kombinasjon av tynne leirfylte sprekker og høyt vanntrykk ga utfordringer

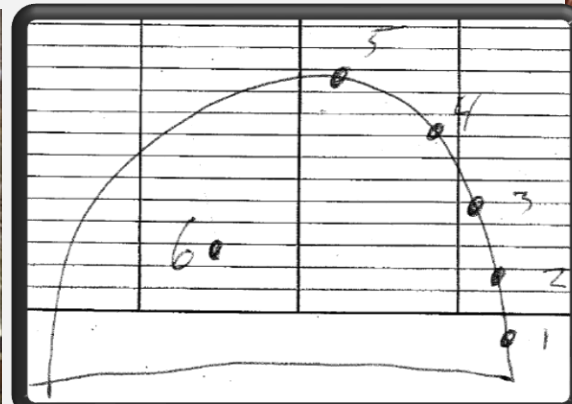


Gropa – utfordrende forkastningssone

- Synlig i terrenget (forsenkning, brun/oransje fargetoner)
- Bergmassen var rødlig, påvirket ca. 200 m av tunnelen
- Del av gabbrogang ble presset ut av vann og injeksjonsmasse
- Store vannlekkasjer og vanntrykk på ca. 50 bar
- Tilpasset injeksjon



Vi har ett stort problem..



Gropa – oppsummert

- Leirfylte og tynne sprekker
- Høyt vanntrykk (52 bar)
- Varierende vannlekkasjer
- 39 injeksjonsrunder
- 443 tonn industrisement
- 170 tonn mikro-sement
- 45 tonn ultrafin-sement
- Kolloidal silika ble testet



Oppsummering av konklusjoner/erfaringer fra Mælefjelltunnelen

- Den viktigste undersøkelsene er en grundig geologisk kartlegging
 - Orientering av sprekker og forkastningssoner er svært viktig
 - Karakterisering av forkastningssoner og sprekker er viktig (leire?)
- Om mulig, utfør spenningsmålinger
- Bergartstype og bergartsgrenser er viktig
- Høy bergoverdekning øker faren for de aller største vannlekkasjene – knyttet til regionale forkastningssoner
- Kolloidal silika fungerer best som supplement til mikrosegment som fintetting av de siste lekkasjene (lave trykk)

Utfordringer i forhold til geologiske data

- Det er behov for mer erfaringsdata for å forske/lære, men
 - Får ikke tak i detaljerte og nødvendige data
 - Geologisk kartlegging i tunnelen er mangelfull, utført etter injeksjon
- Vannmålinger i sonderhull/injeksjonshull mangler
- Seksjonsvise vannmålinger i tunnelen blir ikke utført i tilstrekkelig grad
- Viktig med betongbarrierer og V-overløp i grøft
- Vannlekkasjemålingene er utført over lange strekninger, men
 - Vannlekkasjer er ofte knyttet til geologiske strukturer
 - Behov for hyppigere og mer nøyaktige målinger
- Flere tunnelløp/tverrtunneler og byggegrop/forskjæringer gjør det komplisert å ha kontroll på vannlekkasjer



Avsluttende kommentarer

- Potensiale til å forbedre injeksjonsresultatet
 - Redusere medgått injeksjonsmasse og tid
- Ved å ta vare på erfaringsdata kan man:
 - Lage bedre prognoser for vannlekkasjer og tetteinnsats/injeksjonsmetode
 - Få bedre forståelse av hva akseptabel poretrykkssenkning er
 - Sammenhengen mellom poretrykkssenkning og innlekkasje til tunnelen
 - Maskinlæring og kunstig intelligens
- Felles hydrogeologirapport
- Forbedre oppfølging med poretrykksmåling ved berg, alarmnivåer og beredskap
- I fremtiden vil geologisk informasjon legges inn i 3D-modeller som deles



#påsikkergrunn

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT
NGI.NO