

Fremtidens injeksjonsprosedyre
Clarion Hotell, Trondheim, 1. og 2. november 2021

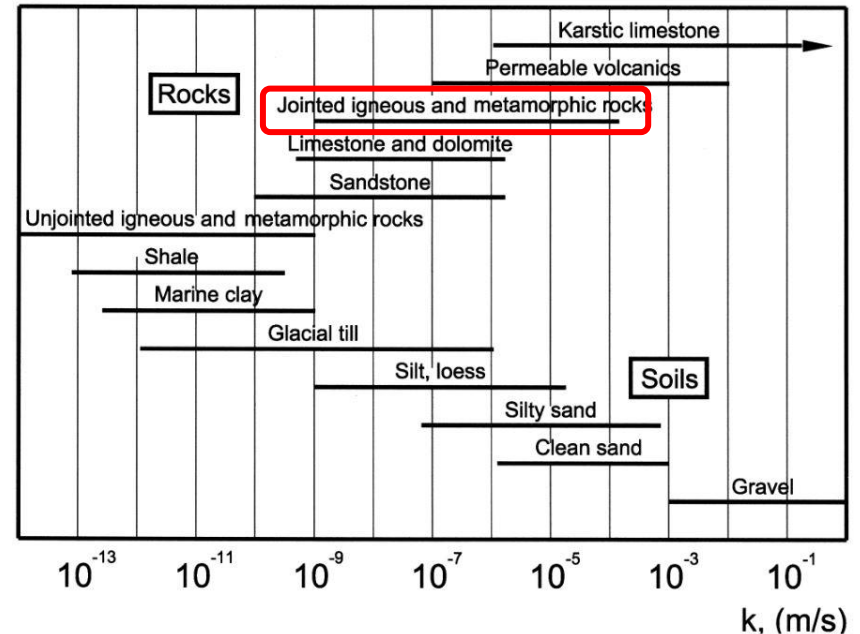
Skråblikk på gjennomføring av forinjeksjon i tunneler

Knut F. Garshol
K. Garshol Rock Engineering Ltd.



Hva vet vi sikkert?

- Konduktivitetskontrast langs borhull avgjør hvor injeksjonsmassen tar veien
 - ‘Minste motstands vei’
- Innjeksjonsmasse (og grunnvann) beveger seg i overveiende grad via kanaler
 - **IKKE** på åpne 2-D sprekkeplan
- Målt vannmengde fra et 25 m langt borhull (eller vanntap ved trykktesting av borhull)
 - Sier svært lite om sprekkestørrelser eller variasjon av kanal-konduktivitet langs borhullet



Hva vet vi sikkert? forts.

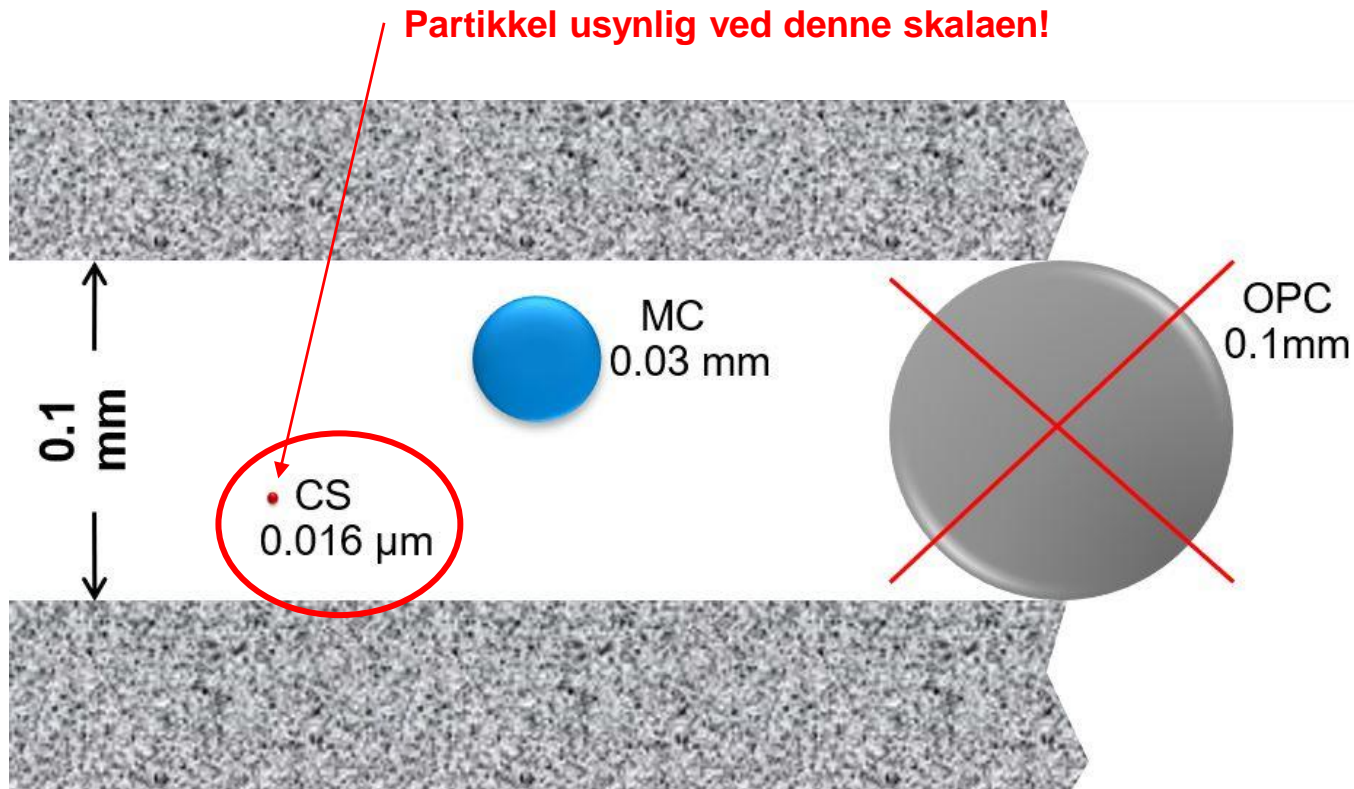
- For oppnåelse av spesifisert tetthet etter injeksjon
 - Må en **minimumsmengde** injeksjonsmasse plasseres i bergmassen der den kan gjøre nytte
 - Krever bruk av **høyt nok pumpe-trykk**
- Maksimalt pumpetrykk må begrenses (**Stoppkriterium**)
 - For å unngå unødvendig **omfang** (areal og volum) av jekking (permanent utvidelse av sprekker og kanaler)
- Maksimal mengde per hull **må spesifiseres** (**Stoppkriterium**)
 - Masse som spres for langt utenfor tunnelkontur har liten eller ingen innvirkning på tetthetsresultatet
 - Mengdestopp **uavhengig** av trykk (ved maksimum 1 L/min)

Hva vet vi sikkert? forts.

- Hydraulisk jekking av bergmassen skjer ved pumpetrykk $>$ minste hovedspenning
 - Kan åpne og utvide svakheter orientert normalt denne spenningen
 - Oppfattes oftest som negativt. Bergmassen påføres en 'skade'
 - 'Skade' kan begrenses ved å kontrollere **mengde** injeksjonsmasse under høyt trykk. **Stoppkriterium**
 - **Mengdekontrollert** hydraulisk jekking kan være gunstig (lite bergvolum som påtvinges lokal jekking). **Stoppkriterium**
 - La hullet 'hvile' et par timer etter stor inngang og ikke oppnådd trykk?
 - Vanskelig å se hensikten
 - Påstand: Bortkastet tid og sement

Inntrengning av sement avhengig av:

- Sprekke- og kanalvidde i bergmassen. Finstoff på sprekkenene?
- Maksimal kornstørrelse for sementen (d_{95})



Inntrengning av sement avhengig av: forts.

- Viskositet (styrt av v/s-tallet og tilsetningsstoffer)
 - Oftest målt som Marsh Cone tid i sekunder

Marsh Funnel Viscometer



American practice: Time for 1 quart to run out
Water takes 26 seconds

European Practice: Time for 1 litre to run out
Water takes 28 seconds

Based on 1 quart:

$$\mu = \rho(t - 25)$$

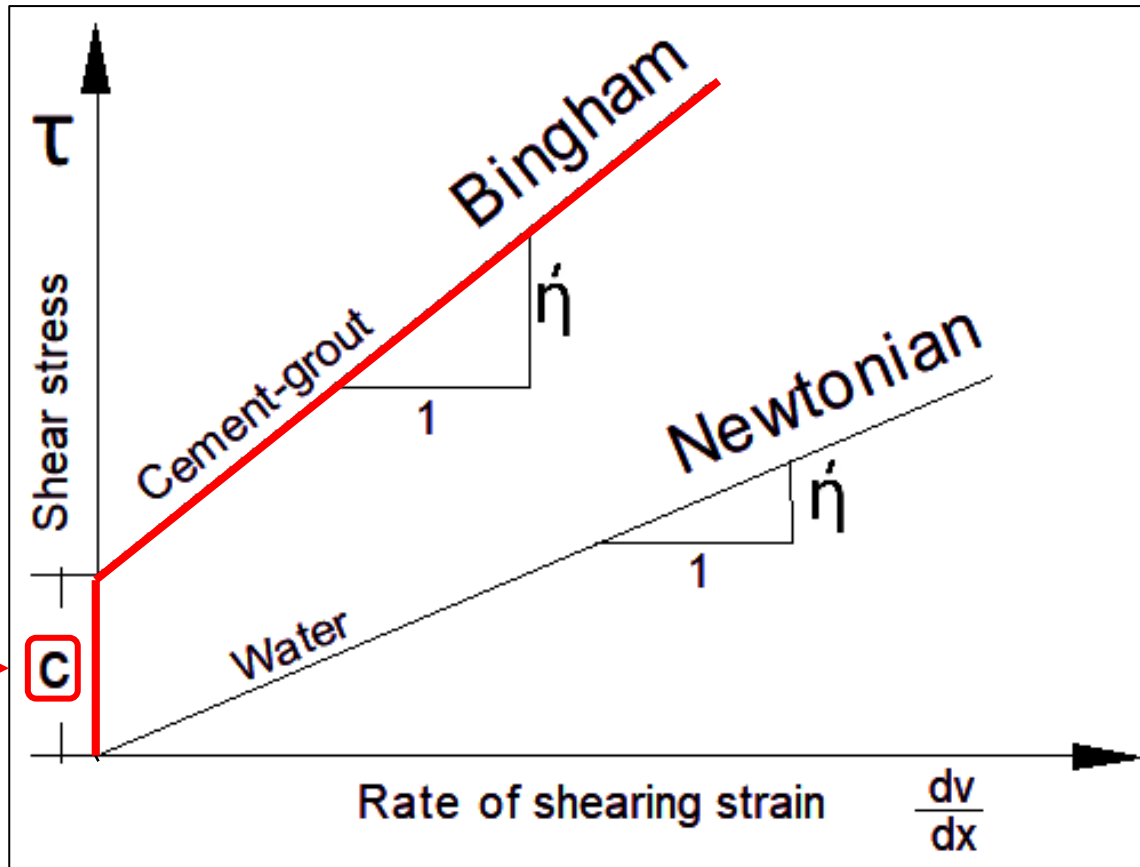
μ = viscosity in centipoise

ρ = density in g/cm^3

t = quart funnel time in seconds

Inntrengning av sement avhengig av: forts.

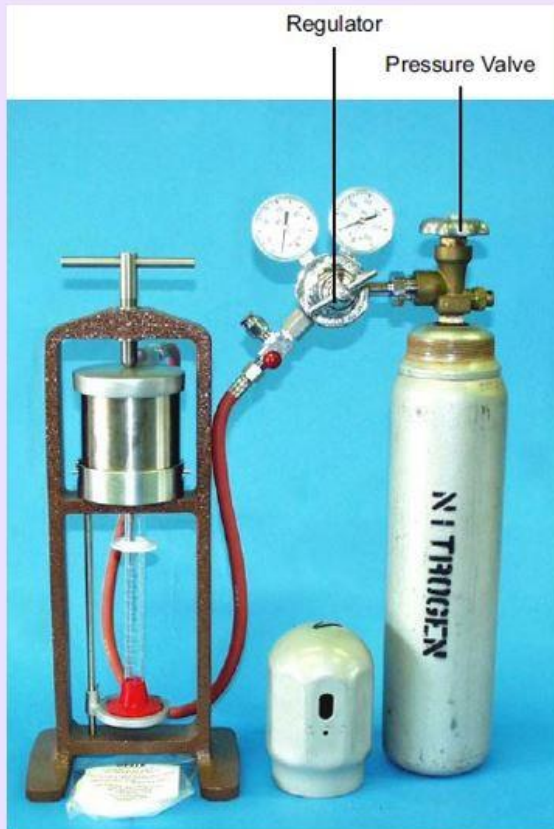
- Blandingens kohesjon (Bingham's lov)
 - Nødvendig skjærpåkjenning for å starte flytning



Inntrengning av sement avhengig av: forts.

- Trykkstabilitet

Pressure Stability



API Recommended Practice 13B-1 (1990):
400 ml grout sample subjected to 6.9 bar
pressure until all water is expelled.

V_w : Volume of expelled filtrate

V_0 : Volume of original sample

t : Time in minutes

K_{pf} : Pressure filtration coefficient

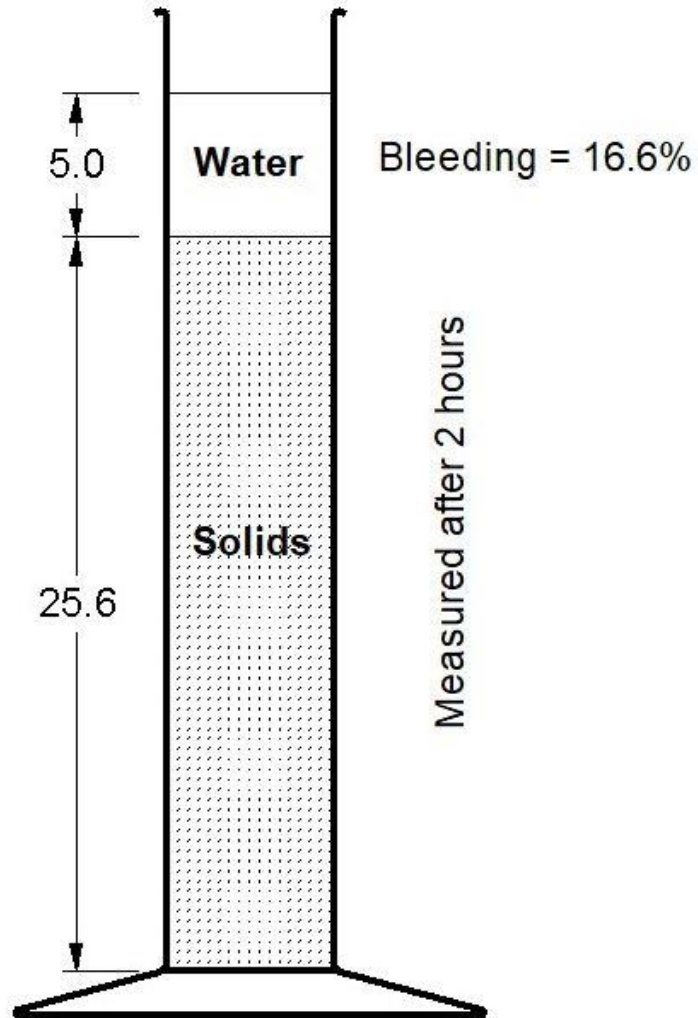
$$K_{pf} = V_w / (V_0 * (t)^{1/2})$$

$K_{pf} \sim 1.0$ and higher: Bleeding grouts

$K_{pf} < 0.1$: Stable grouts

Inntrengning av sement avhengig av: forts.

- Separasjon (bleeding)



Målsetning:

Nær null separasjon,
samtidig med
Lav viskositet (< 35 s)

Inntrengning av sement avhengig av: forts.

- Settingtid og herdetid for å
 - Unngå ventetid etter injeksjon
 - Også ved store sprekker og høyt vanntrykk
 - Unngå gjengroing under pumping
- Inntrengning for **Colloidal Silica (CS)**:
 - Tilgjengelig **tid** for inntrengning/spredning
 - Geltid av CS-blanding
 - Viskositet praktisk talt som vann
 - Partikkelstørrelsen har **ingen** praktisk betydning

Verdi av en stuff-time (STV)

Nesten uteglemt når opplegg for forinjeksjon fastlegges!

- Tidsforbruk er viktigste kostnadsfaktor
- Ved strenge tetthetskrav ($< 10 \text{ L/min/100 m}$):
 - Bruk rutinemessig **2 omganger injeksjon** per ferdig skjerm
 - **Første** omgang $< 50\%$ av hullantall for **én** normal omgang
 - Rask oppfylling hvis trykk ikke oppnås (**mengdestopp**)
 - Unngår massetap til ikke-borede andre omgangs hull
 - (Sammenlignet med **én** normal omgang)
 - **Andre** omgang, også mindre enn halvparten så mange hull
 - Raskere utvikling av pumpetrykk i mange hull (**trykkstopp**)
 - Redusert kondukt.kontrast etter første omgang
 - Færre bormeter, redusert hullvolum, redusert sementmengde
 - Redusert risiko for ekstra injeksjonsomgang

Verdi av en stuff-time (STV)

Nesten uteglemt når opplegg for forinjeksjon fastlegges!

- Planlegg for å spare tid og oppnå best mulig resultat
 - Unngå ventetid for setting av injisert masse
 - Forutsetter test-program på forhånd
 - Det anbefales å bruke bare **mikrosegment**
 - **én** hovedresept +1-2 varianter for spesialtilfeller
 - Forenkler logistikk og prosedyrer. Sparer tid!
- Borridd beholdes på stuff til skjermen er ferdig
 - Første omgang injisert – Umiddelbar start boring andre omgang
- Håndtering av massetap tilbake til tunnelen (backflow)
 - Bruk styrt herding (akselerator på pakker)
 - Vær forberedt med tre-kiler (produsert på forhånd!) og stry
 - Hold PU og egnet utstyr i reserve

Viktige praktiske aspekter som må fastlegges

- Lengde av hullvifter (både for sondering og injeksjon)
- Lengde av **overlapp** vifter
- Valg av pakkertyper:
engangspakkere



- Alle pakkere åpne ved start injeksjon?
 - Etter mitt syn: **NEI!** Bortkastet komplikasjon, tapt tid
 - Ingen fordeler, spesielt ved flerhullsinjeksjon
- Styring av forløp på stoff:
 - Forutbestemt, fast prosedyre (Method Statement)?
 - Løpende endringer bestemt av injeksjonsbas/ingeniørgeolog på stoff?
- Trinnvis fortykning av masse for å oppnå mottrykk?
 - Unødvendig komplikasjon, ekstra tidsforbruk og kostnad

Anbefalt Strategi inklusive for-testing

- **Bruk 2 omganger injeksjon per skjerm**
 - Resept som tillater null venting mellom omganger
 - Borrhigg på stuff til skjermen er verifisert
 - Tredje omgang om nødvendig
- Injeksjonsmasse, helst mikrosegment
 - Lavest mulig viskositet (< 35 s), uten bleeding
- Verifiser valgt sement og resepter ved for-testing i lab.
 - Test flere vannreducerende tilsetninger og varier doseringen
 - Sjekk reaktivitet med alkali fri akselerator
 - Resept for **første** omgang: Lavt v/s-tall (0.7-0.8)
 - Resept **andre** omgang: Maks v/s-tall uten bleeding (typisk 1.0)
- Sammenlignet med satsing på **EN** injeksjonsomgang
 - Tid for boring og injeksjon redusert med 20-40%
 - Færre bormeter og redusert sementmengde

Hong Kong HATS2A (2010-2014) – 100% mikrosegment

- Tetthetskrav: 2.5 – 5.0 – 15.0 og 30 L/min/100 m
 - 20 km tunnel, 75 m og 160 m under havnivå
 - Boring foran stoff: 432 km
 - Injisert med 5500 tonn mikrosegment
Supplert med 1000 tonn kolloidal silika (CS)
- Strengeste krav **tilfredsstilt:**
 - 600 m tunnel < 2.5 L/min/100 m i vulkansk tuff



**Seksjoner med krav
< 5 L/min/100 m
(6400 m tunnel)**