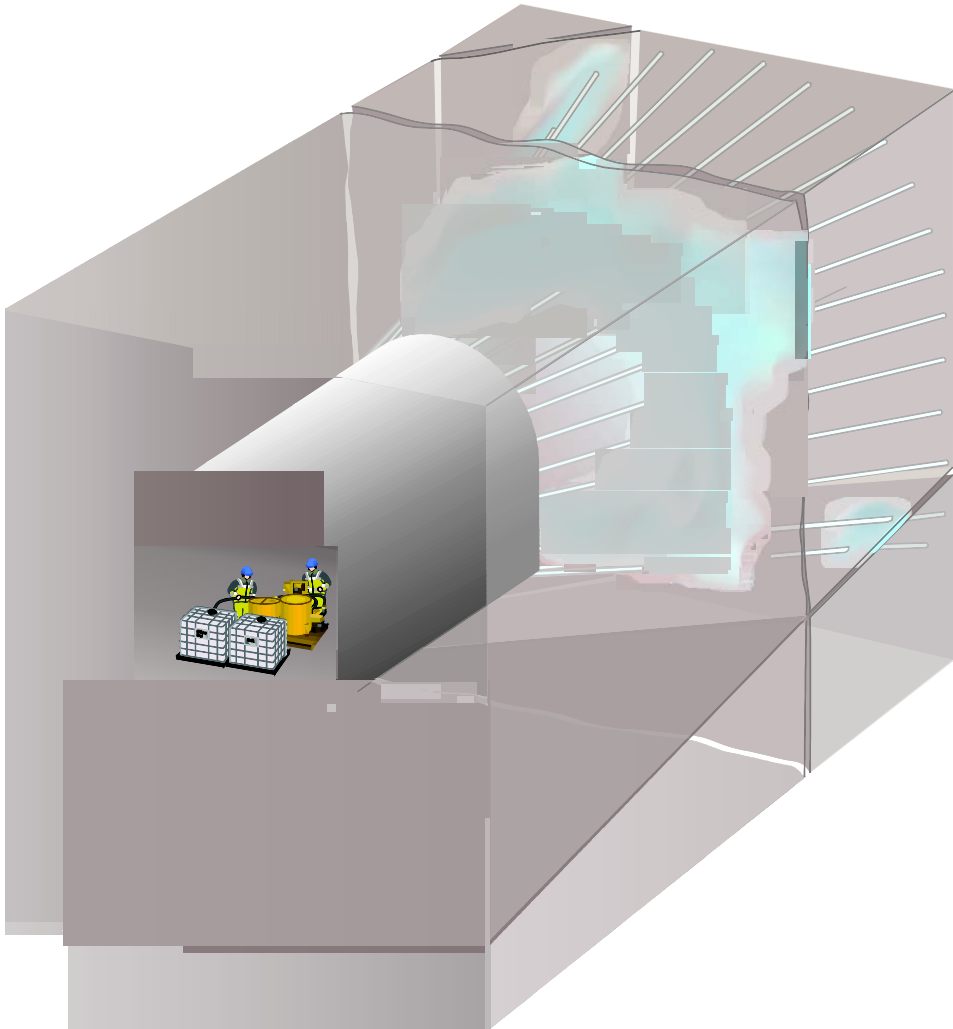


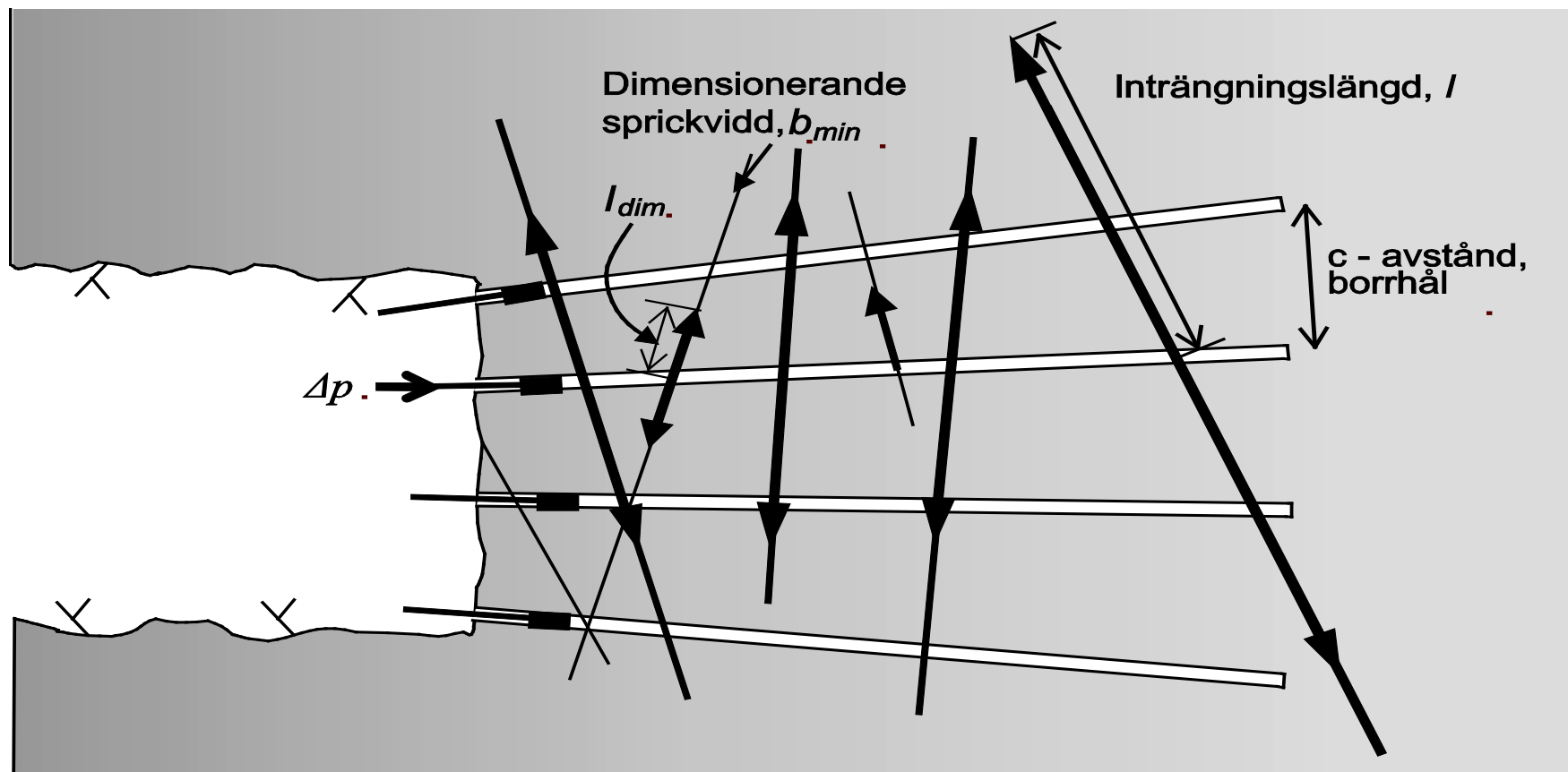
Silica sol som injekteringsmedel



- Teoretisk design
- Vart har man använt det i Scandinavien
 - Beständighet
 - Hur man injekterar
- Vad kan man förvänta sig?

Johan Funehag, Bitr. Professor LTU, specialist Tyréns

INJEKTERINGSDESIGN



*Kan vara bra att
förstå hur det
hänger ihop.*

*Eller om man vill
göra en teoretisk
design baserat på
inträngningslängd*

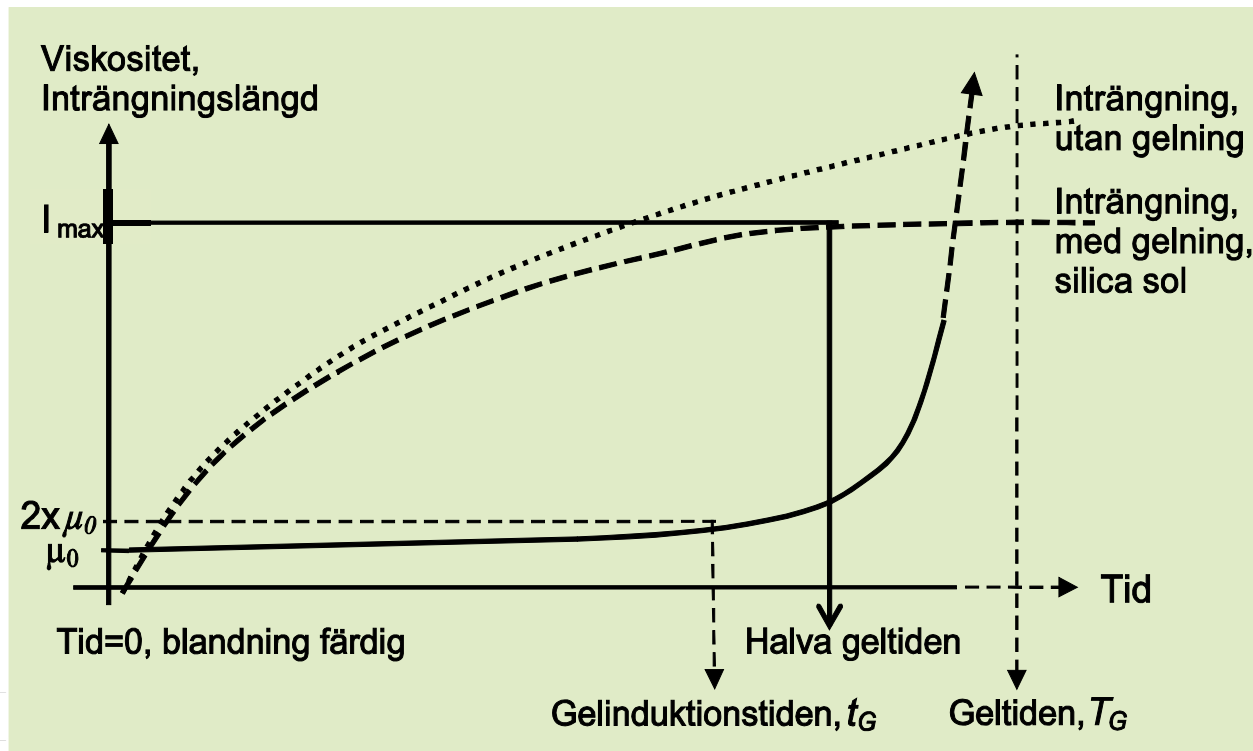
- BERGET: hydraulisk sprickvidd, b_{hyd}
- INJEKTERINGSMATERIAL: viskositet, μ , skjuvgräns, τ , geltid t_G
- TEKNIK: övertryck, Δp , injekteirngstid, t

INJEKTERING MED NEWTONVÄTSKA, SILICA SOL

t_G = Gelinduktionstid, den tid det tar för att viskositeten skall fördubblas i förhållande till den initiala viskositeten. [sec].

$$I_{\max, 2-D} = 0.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6 \mu_0}}$$

μ_0 = Initial viskositet, viskositet på blandningen direkt efter blandning. [Pas].



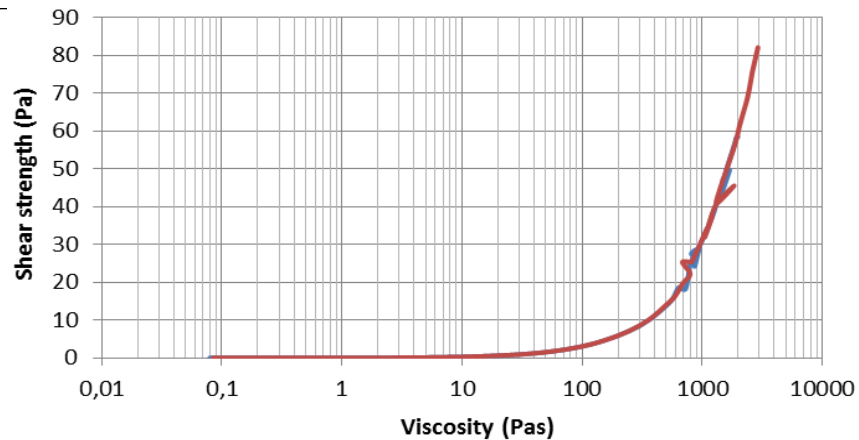
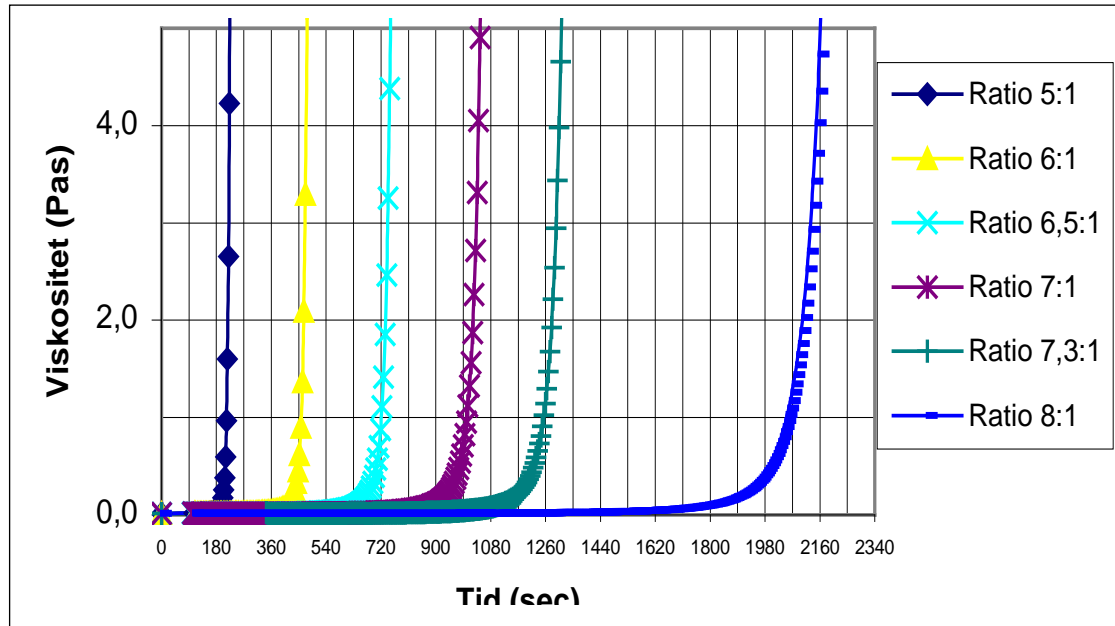
Gelinduktionstiden skall inte förväxlas med geltiden, T_G

Tumregel 1. Gelinduktionstiden är en tredjedel av geltiden!

Tumregel 2. Inträngningen avstannar vid halva geltiden.

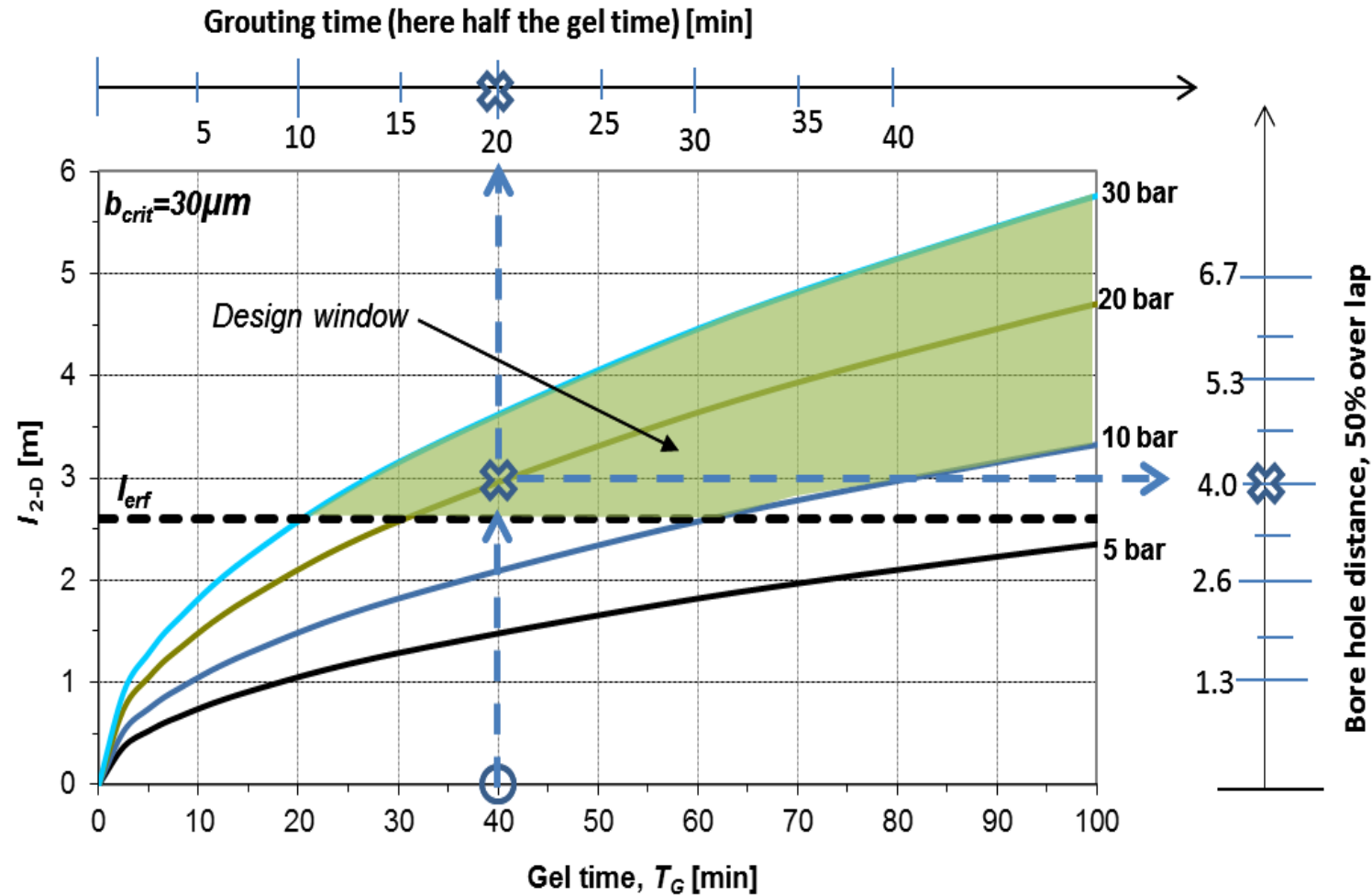
Det är inte att den når gelpunkt som får den att stanna utan att inträngningen är så pass lång att den står i balans mot vattentrycket

SILICA SOL



- Silica sol, MP320. Har 40% silica partiklar, resten vatten.
- Gelas genom tillsats av en saltlösning, vanligast NaCl, vanligt koksalt med 10% lösning.
- Ju mer saltlösning som tillsätts desto snabbare gelning, från 10 min till flera timmar är möjligt
- Mycket temperaturkänslig, Halverad temperatur ger dubblerad geltid!
- Snabb initiell härdning, 60 Pa vid geltid
- Känslig för uttorkning
- Ph Neutralt

SILICA SOL, KONCEPT FÖR DESIGN



Funehag, J, (2012): Guide to grouting with silica sol- for sealing in hard rock. BeFo report 106. Stiftelsen bergteknisk forskning, Stockholm.

NÄR KAN/BÖR VI ANVÄNDA SILICA SOL

Flöde	Tryck		Transmissivitet	Apertur
[l/min]	[MPa]	[bar]	[m ² /s]	mikro meter
1	1	10	1,67E-07	64
1	0,3	3	5,56E-07	96
1,5	0,3	3	8,33E-07	110
0,5	0,3	3	2,78E-07	76
0,02	1	10	3,33E-09	17
0,02	0,3	3	1,11E-08	26
0,03	0,3	3	1,67E-08	30
0,01	0,3	3	5,56E-09	21
0,01	1	10	1,67E-09	14

När kraven på täthet i tunneln är höga ger detta ofta att även små sprickor måste tätas

⇒ Injekteringsmedel med god inträngningsförmåga

⇒ Kompletterar cementinjekteringen

⇒ Vid större djup blir sprickvidderna mindre pga bergspänningarna

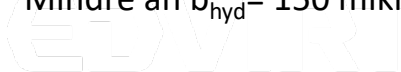
Ex. Sjökulen tunnlarna

Uppgift- alla borrhål som vara "täta" skulle injekteras med silica sol.

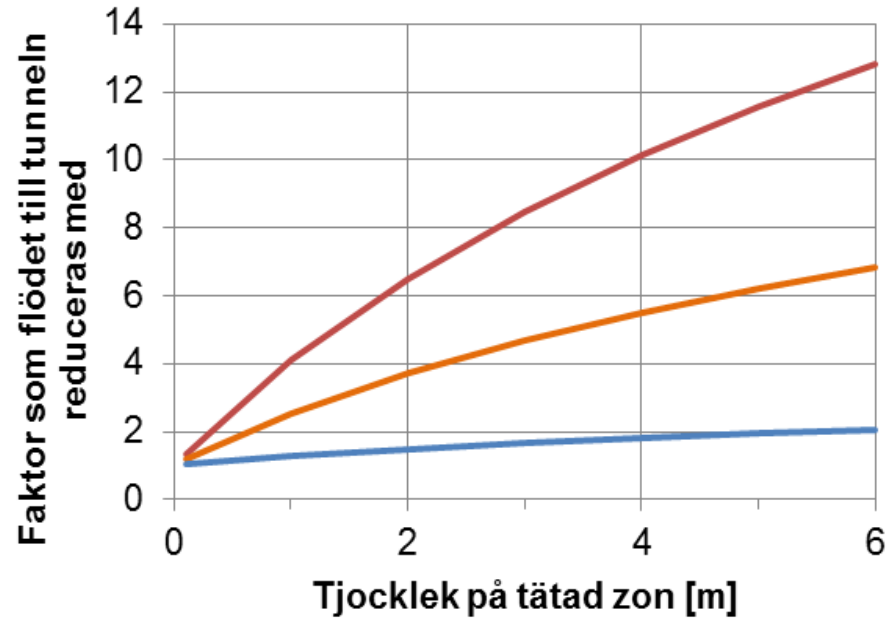
E:s tolkning av "tät"- ca 2 l/min. Detta motsvarar en hydraulisk sprickvidd på ca 110 mikrometer.

Ex TASS (400 m vattentryck)

Mindre än $b_{hyd} = 150$ mikrometer=silica sol

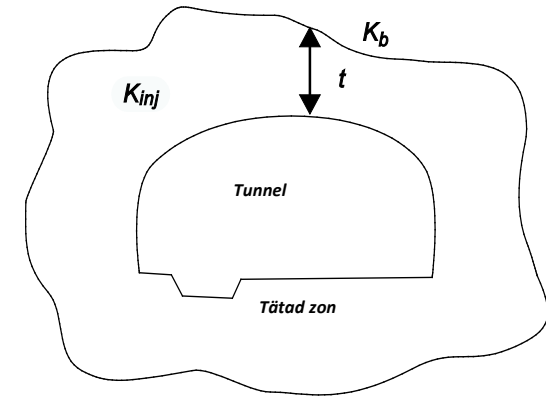


INJEKTERING – VAD KAN UPPNÅS?

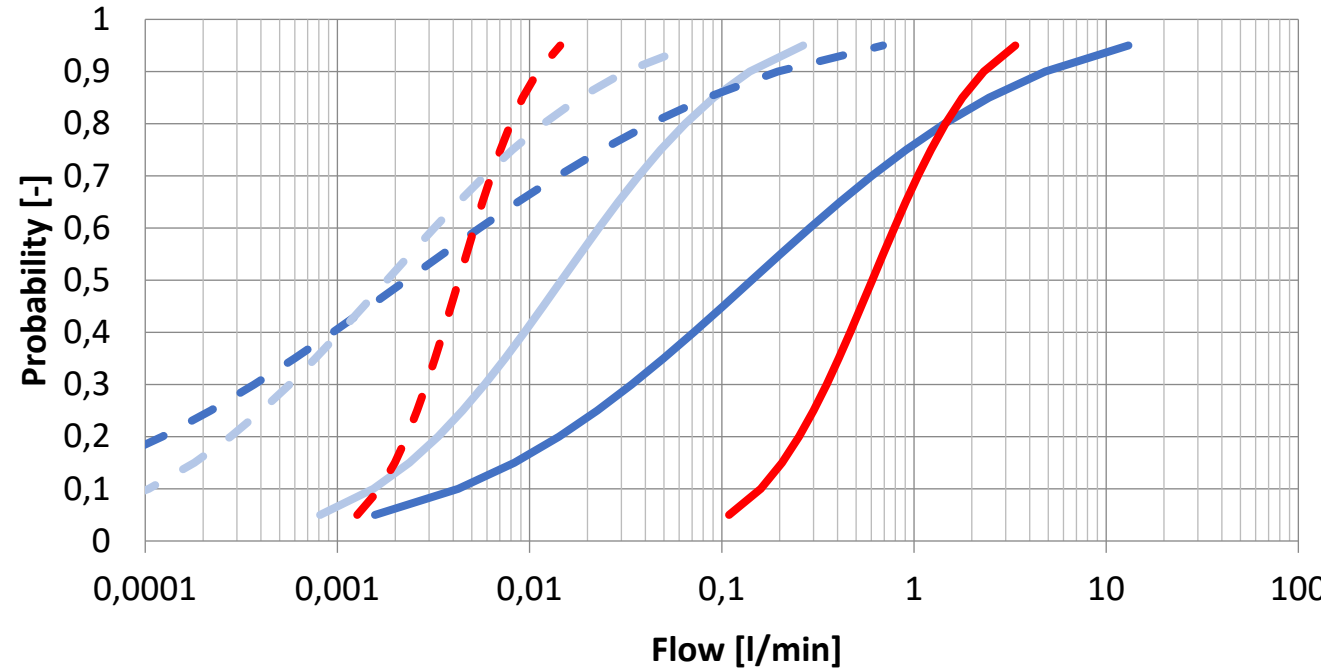


- *En tjock och hyfsat tät zon eller,*
- *Smalare och mycket tät zon*

— Faktor 100
— Faktor 50
— faktor 10



VAD KAN UPPNÅS, TÄTAD ZON, K_f ?



— TASS Before, fan3 — Törnskog Before — DT2 before
- - TASS, After, Fan3 - - Törnskog After - - DT2 After

en omgång cement, en omgång silica sol samt kontrollhål

Injekteringsmetodik

Förinjektering med 4 olika blandningar

- 3 cementbaserade (bl1, bl2, bl3)
- 1 silica sol (bl4)
- Kravställan på egenskaper

Blandning 4, Silica sol

Blandning ska innehålla kolloidal silica (kisellösning) och accelerator (saltlösning). Halten SiO_2 i kisellösningen ska vara minst 35% och halten Na_2O ska understiga 0,5%.

Blandning 1: Normalt injekteringsbruk

- $B_{\text{kritisk}} < 90-120 \mu\text{m}$
- $B_{\text{min}} < 40-50 \mu\text{m}$
- Flytgräns 0,5-5 Pa
- Viskositet 10-30 mPas

Blandning 2: Alternativt injekteringsbruk, för tätning av finsprickig bergmassa

- $B_{\text{kritisk}} < 70-90 \mu\text{m}$
- $B_{\text{min}} < 20-40 \mu\text{m}$
- Flytgräns 0,1-3 Pa
- Viskositet 5-30 mPas

Blandning 3: Alternativt injekteringsbruk, för tätning av sprickor med stor vidd

- $B_{\text{kritisk}} < 180 \mu\text{m}$
- Flytgräns $> 6 \text{ Pa}$
- Viskositet $> 30 \text{ mPas}$

Hållfasthet för cementbaserat injekteringsmedel ska vara $\geq 0,1 \text{ kPa}$ inom 5 tim efter blandning.

1970
Bara silica sol får användas i Japan

1975
Mycket användning i USA och Japan för jordinjektering

1980 talet.
Japan visar på att silica sol är beständigt

1990 talet.
fortsätter

2002 Exjobb-
hårt berg,
Sverige,
Axelsson,
Nilsson

2002-04
Hallandsås,
täthet och
minsta
sprickavidd

2004
Äspö,
Inträngnings-
längd, 2-D

2004
Törnskogs-
tunneln,
sprickzon

2004-2005
Butron och
Axelsson,
Mekaniska tester

2006-2007
Trollhätte-
tunneln,
Nygårds-
tunneln

2009
Sjökullen-
tunnlarna

2009-2012
TASS-
tunneln,
Äspö

2010
Efter-
injektering,
Teliatunnel

2011
Äspö, KBS3H
samt
betongplugg

2011-12
ONKALO,
Posiva
Finland

2011
Funehag,
Handbok, BeFo,
injektering med
silica sol

2012-2014
FoU,
Läckande
borrhål

2017
Ridåinjektering,
Lunda, Förbifart
Stockholm

2018
Hylte,
damminjektering

TrV och Posiva Projekt 2010 och framåt

- **Tunnelbanan Akalla-Barkarby**, ingår i PM Injektering, permanent injektering. Ramböll var ansvarig. En väl utförd TB med detaljer hur det skall användas. Inget har ännu påkallat användning.
- **Förbifart Stockholm**, silica sol finns med i TB. Vet ej om det ännu använts.
- **Efterinjektering** i Lundbytunneln, 2013, TrV.
- **Ridåinjektering, tpl Hjulsta** TrV, 2016-2017. Användandet kopplades till vattenförlust.
- **Västlänken, TB. Korsvägen - Haga och Gullberget**, silica sol accepterat som permanent injektering (visst djup och inläckagekrav). Både som komplement i IK3-skärmar samt för ridåinjektering.
- **Onkalo, Posiva**, 420 m djup, väldigt små läckage. Efterinjektering 2020. Nytt koncept (basdesign) för efterinjektering håller på att tas fram.

ON THE STABILITY AND BEHAVIOUR OF SILICA GELS

Christian Sögaard

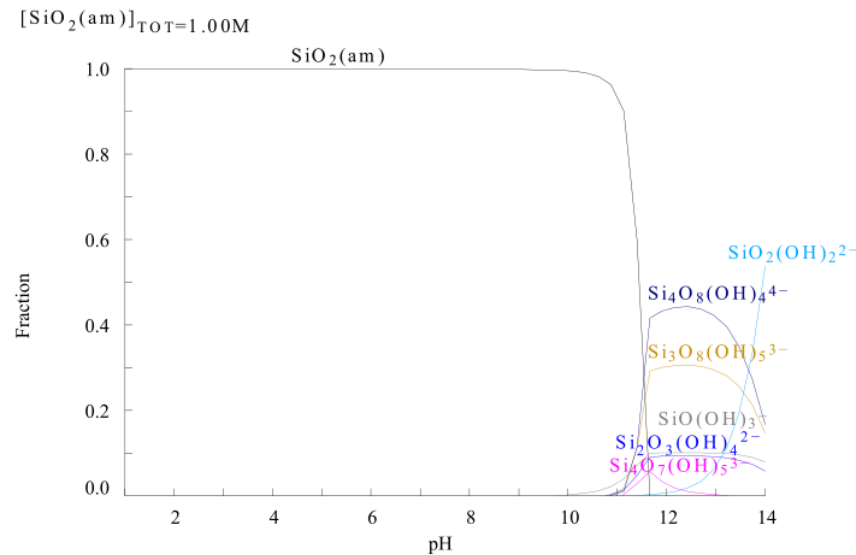
Department of Chemistry and Molecular Biology



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

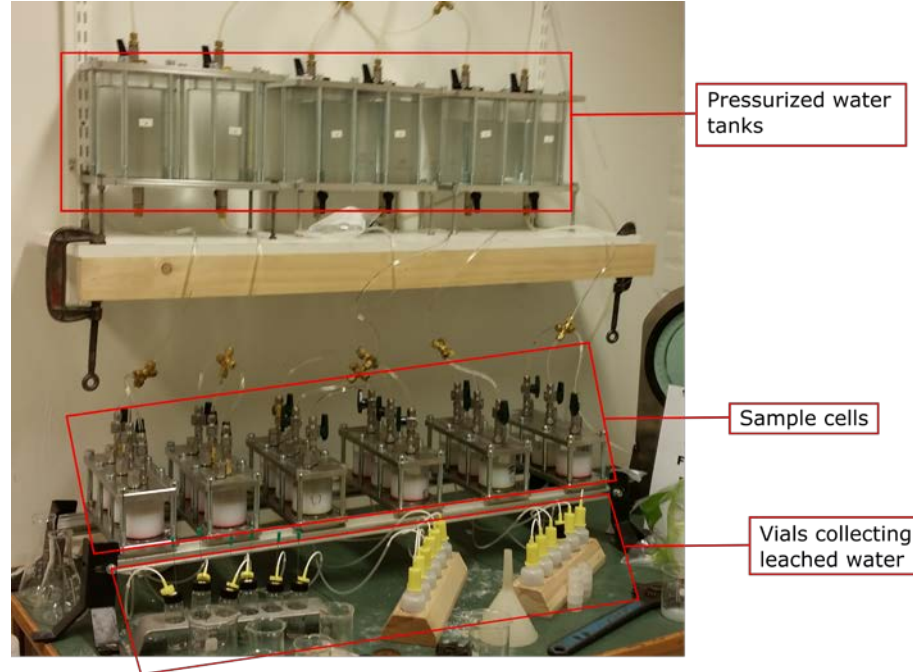
Problem?

- What is the expected lifetime of a silica gel?
 - Surrounding environment
 - Sol properties
 - Accelerator
- What goes on in the gel as it ages?
 - Ions
 - Silica dissolution - pH



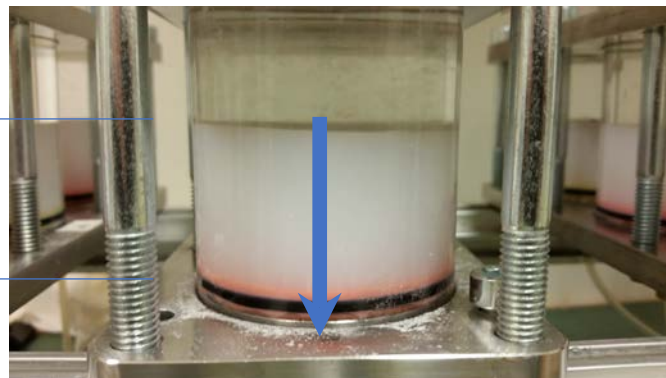
Equipment design

Gradient
30 m/m!



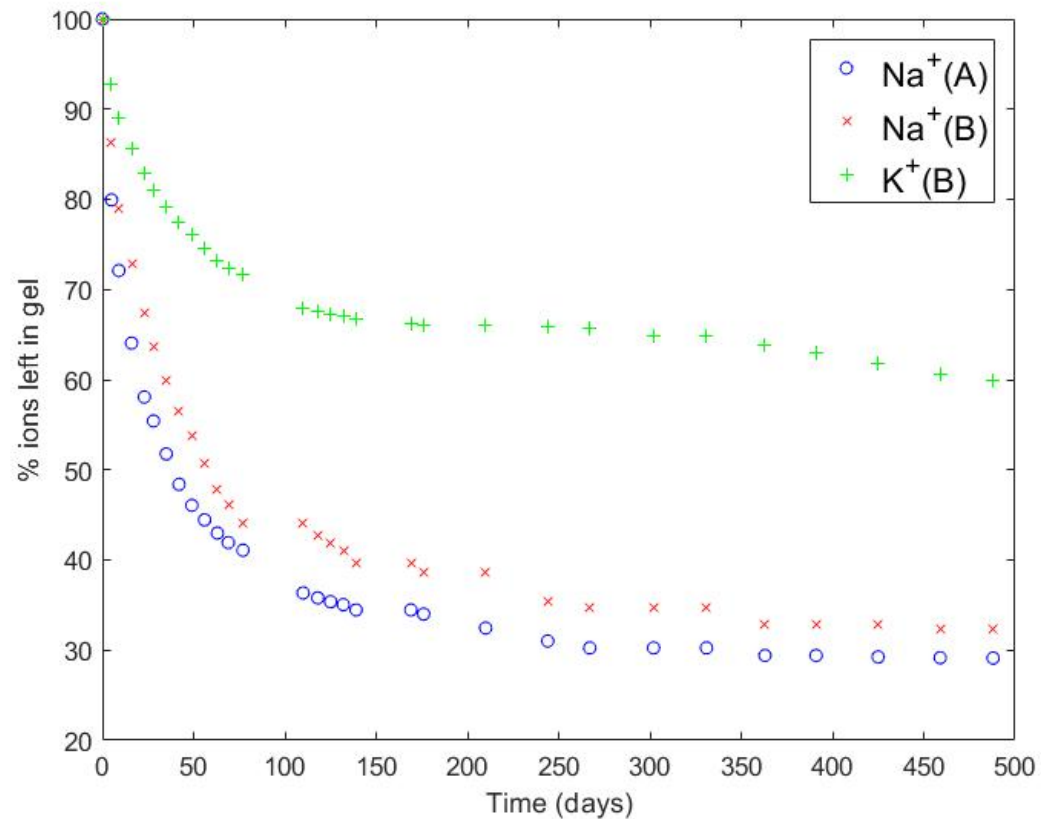
$P=9,8 \text{ kPa}$ (1 mvp)

$h=0,03 \text{ m}$



Sample	Accelerator	Ion content of test water (mM)	pH of test water	Test duration (days)
A	NaCl	None	6-7	488
B	KCl	None	6-7	488
C	NaCl	Na: ~10	12	221
D	KCl	Na: ~10	12	221
E	KCl	Na ⁺ : 86 Ca ²⁺ : 34 Mg ²⁺ : 5 Si ⁴⁺ : 0.18	8-9	221
F	KCl	Na ⁺ : ~108 Ca ²⁺ : 34 Mg ²⁺ : 5 Si ⁴⁺ : 0.18	12	221

Ion leaching

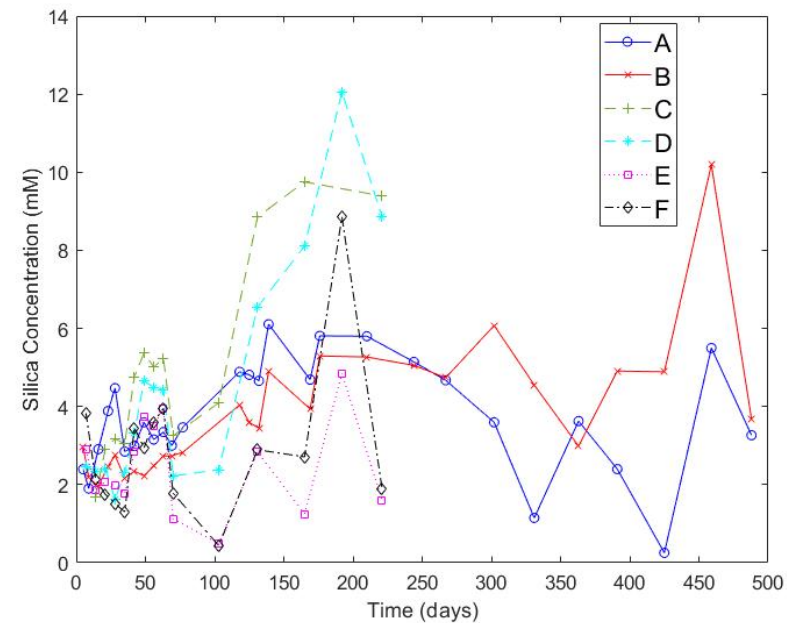
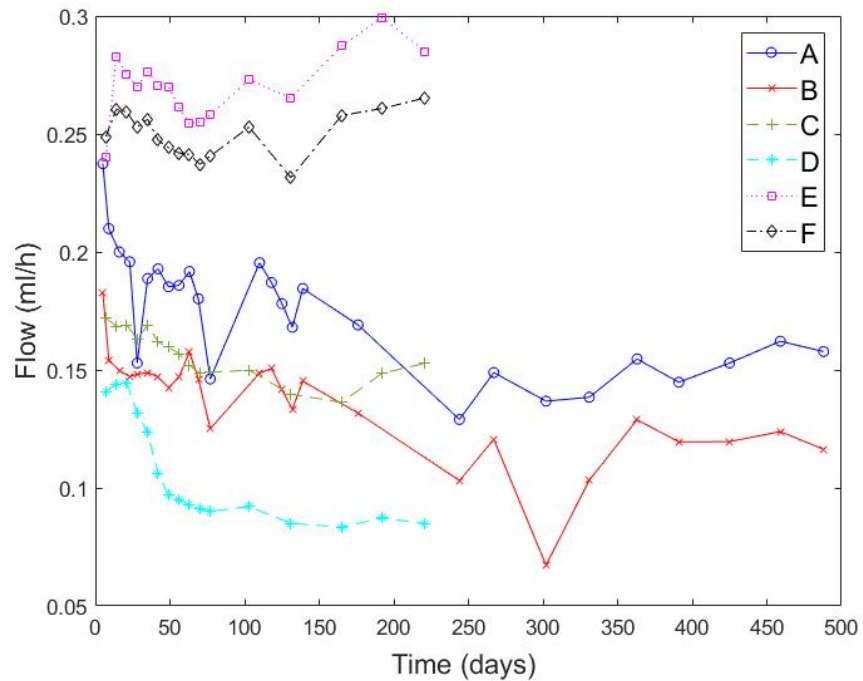


- Sodium accelerator leaves gel to higher extent than potassium

Flow and silica dissolution

Setup	A	B	C	D	E	F
Average pH	9.89 ± 0.01	9.94 ± 0.05	10.27 ± 0.01	10.02 ± 0.12	7.97 ± 0.15	8.24 ± 0.31
Average Flow (mL/day)	4.16 ± 0.60	3.24 ± 0.52	3.75 ± 0.25	2.53 ± 0.53	6.49 ± 0.34	6.00 ± 0.23
Average Silicon concentration (mM)	3.77 ± 1.39	3.93 ± 1.68	5.12 ± 2.53	4.55 ± 2.24	2.45 ± 1.16	2.87 ± 1.88

Sample	Accelerator	Ion content of test water (mM)	pH of test water	Test duration (days)
A	NaCl	None	6-7	488
B	KCl	None	6-7	488
C	NaCl	Na: ~10	12	221
D	KCl	Na: ~10	12	221
E	KCl	Na ⁺ : 86 Ca ²⁺ : 34 Mg ²⁺ : 5 Si ⁴⁺ : 0.18	8-9	221
F	KCl	Na ⁺ : ~108 Ca ²⁺ : 34 Mg ²⁺ : 5 Si ⁴⁺ : 0.18	12	221

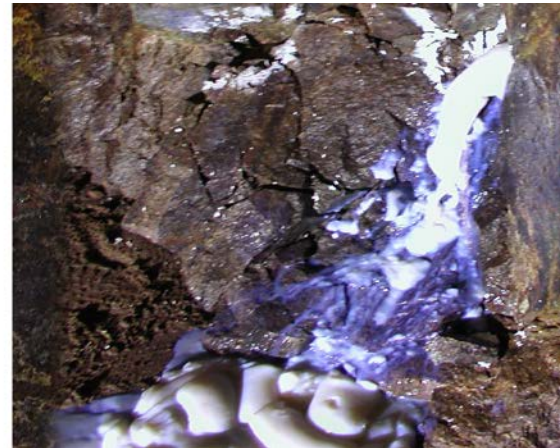


End of the tunnel - Final conclusions

- Silica gels are stable up to hundreds of years even in very corrosive environments
- The total lifetime of gels are dependent on a number of factors such as flow rate, accelerator used, and silica dissolution
- The choice of accelerator and ion composition in groundwater will affect the total lifetime
- Anions have been shown to affect the surface charge and thereby aggregation of silica nanoparticles – Effect on strength build-up?



Silica sol möjliga problem och åtgärder



Kan se ut så här ibland?

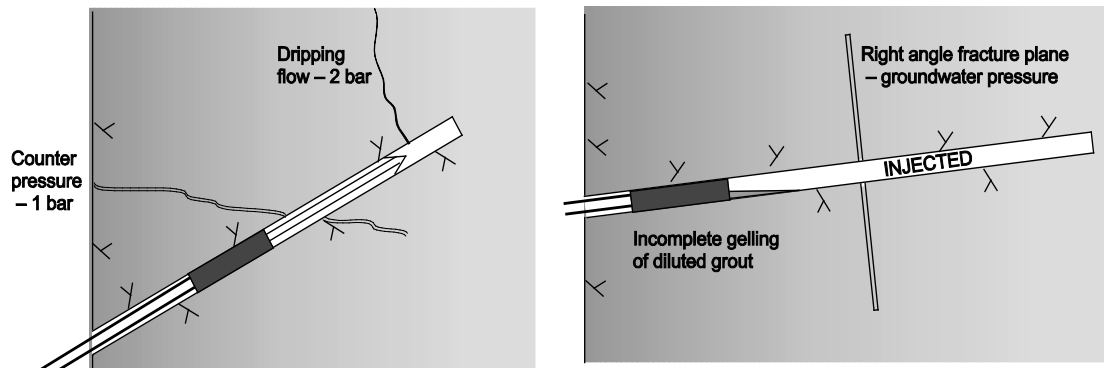
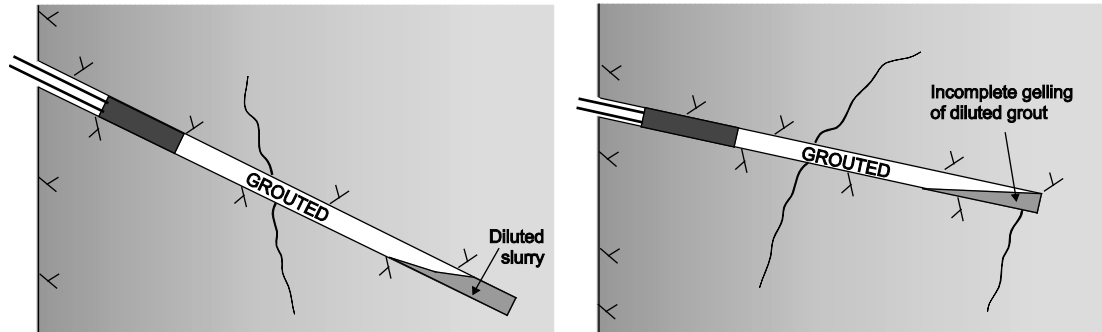
Korvar på backen
Silica sol rinner ut

Varför?



.....men också så här. Perfekt resultat efter
utsprängning

Silica sol möjliga problem och åtgärder



Vi använder silica sol i **"täta" borrhål** -> stänger in luft

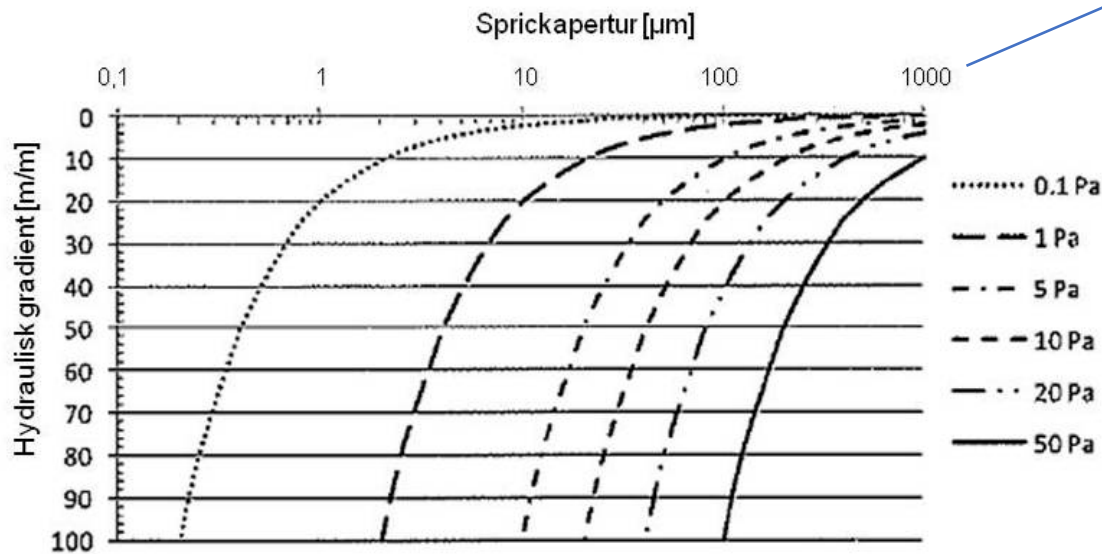
En liten injekterad volym är lätt påverkad av **utspädning** – får bort vattnet

Silica solen blir **uttorkad** vid utkanten av borrhålet; ja men så länge det finns vatten i berget så stannar uttorkningen av

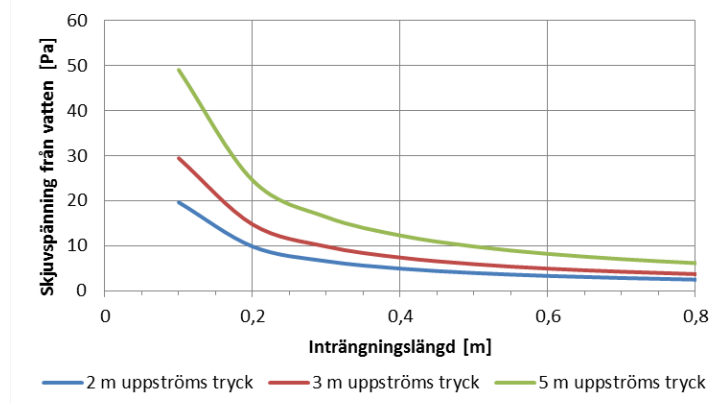
Silica solen **"härddar"** inte och **rinner ut** när man plockar manschett. Ovanstående gäller men även hög hydraulisk gradient med erosion som följd.

Silica sol möjliga problem och åtgärder

Erosion



sprickvidder och grundvattentryck ger krafter



kortaste inträngningslängder som krävs

$$\tau \geq \frac{\rho_w g b}{2} \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Minsta hållfasthet som krävs på bruket vid avslut av injekteringen

$$I_{ero, 2D} = 2xI_{grad, 2D} - L_{fingering}$$

Nödvändig inträngningslängd

Silica sol möjliga problem och åtgärder

Grouting step	Type of grout	Grouting technique	If the following is noted	Alternative technique
During grouting, Start position, borehole distance 3.3 m	Normal gel time (T_G) = 40 min	3 MPa/20 min	Does not reach the design pressure within 5 min	2.0 MPa/ T_G = 60 min/30 min
During grouting	Above	Above	Surface leakage => large volumes => unable to maintain the design pressure or time	Reduce the pressure, quicker gel time; 2.0 MPa/ T_G = 20 min/10 min
During grouting	Gel time reduced to 20 min	Alternative technique according to the above	Still large volumes and not full pressure	2.0 MPa/ T_G = 20 min/increase pumping time to 15 minutes NOTE: there is a risk that the borehole will be flushed out when the packer is opened.
Following completion of grouting into the hole with large volumes, see line above	According to the above	2.0 MPa/ T_G = 20 min/15 min	The borehole is flushed out when the packer is dismantled.	Inject again at 3 MPa/15 min
Following completion of grouting	Normal T_G = 40 min	3 MPa/20 min	The borehole is flushed out when the packer is dismantled.	Inject again T_G 30 min 3 MPa/20 min.

Styrkor och svagheter

Styrkor	Svagheter	Argument (referenser) i relation till svagheter
<p>Inträngningsförmåga – små sprickvidder</p> <p>Dimensionering baserat på tid och inträngning (samma som för cementbaserade injekteringsmaterial)</p> <p>Samma utrusning som för cementinjektering</p> <p>Hög initiell hållfasthet och snabb härdning</p> <p>Låg viskositet</p> <p>Lätt att blanda samt enkel rengöring</p>	<p>Urlakning (joner - salt, kisel)</p> <p>Uttorkning</p> <p>Höga pH (>12,5)</p> <p>Beständighet</p> <p>Låg sluthållfasthet</p>	<p>Urlakning. I kiselmättat vatten är utlakning av kisel liten (Sörgaard, 2020). Saltjonerna utlakas snabbt, 1-2 veckor beroende på hydraulisk gradient. Saltjonerna deltar inte i reaktionen (ingår ej i det fasta kisel nätverket) utan är bara en katalysator.</p> <p>Beständighet. Den förmodade förhöjda pH-plymen från tidigare cement och dess eventuella påverkan har testats i laboratorium. Negativ påverkan av förhöjt pH kunde inte tolkas.</p> <p>Uttorkning. Krympning kan uppgå till 70% av ursprunglig vikt om RH är lägre 98%. Vid 100% RH ingen krympning. Uttorkning från torr sida avstannar en bit in, troligtvis pga hydraulisk gradient från andra "blöta" sidan, Butron et al. (2009). Injektering görs där vatten kan rinna, mindre problem. Pluggning med cement används ofta.</p> <p>Generellt. Små läckage (droppar) är svåra att täta oavsett tätningsmaterial.</p> <p>Hög initell hållfasthet ger möjlighet att plocka manschett tidigt samt klara injektering i höga gradienter. Dimensionering i relation till hydraulisk gradient finns (Funehag, 2017).</p> <p>Låg sluthållfasthet. Hållfastheten är dock tillräcklig för att motstå vattentrycket.</p> <p>Låg viskositet. Ju lägre viskositet ju snabbare inträngningshastighet och med given tid ger detta längre inträngningslängd.</p> <p>Blandning. Det är två vätskor som skall blandas. Kan göras i omröraren.</p> <p>Ev gelat material kan enkelt spolat ut med vatten och tryck i slangar.</p>

Möjligheter och risker

Möjligheter	Risker	Förslag på åtgärder för att hantera risker
<p>Komplement till cementbaserade injekteringsmaterial</p> <p>Ökad möjlighet att hantera kontakt- och deformationszoner och öppna sprickor med små vidder (alt. sprickor/strukturer med sprickfyllnad)</p> <p>Reduktion av inflöde till tunnel</p>	<p>Urlakning / uttorkning – ökad genomsläpplighet</p> <p>Ovan användning av silica sol med risk för dåligt utförande och "ger upp"</p>	<p>Kontroll vattenkemi under injektering. Bestäm kiselhalt i bergsvatten.</p> <p>Följa upp grundvattennivåer/tryck (uttorkning)</p> <p>Uppföljning inflöde, ökat inflöde kan fås även av andra orsaker (piping, deformation, ökande grundvattennivåer), hanteras genom underhåll.</p> <p>Uttorkning. Plugga borrhålen med cement. Idag används ofta engångspacker (vilket motverkar uttorkning).</p> <p>Tillse kompetens på plats samt ordentlig genomgång om vad som skall göras. Observationer och hjälp på plats. Lars Värner (entreprenör) är en person med god erfarenhet av silica sol</p>

Referenser

- Funehag, J, 2012: Guide to grouting with silica sol- for sealing in hard rock. BeFo report 106. Stiftelsen bergteknisk forskning, Stockholm.
- Funehag, J, 2007. Grouting of Fractured Rock with Silica Sol Grouting design based on penetration length. Dissertation, PhD thesis. New series 2560. Division of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology.
- Funehag, J, Emmelin, A, 2010: Injekteringen av TASS-tunneln, Design, genomförande and resultat från förinjekteringen. SKB-rapport R-10-39. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Gustafson, G, Funehag, J, 2008a. Design of grouting with silica sol in hard rock - New methods for calculation of penetration length, Part I. Tunnelling and Underground Space Technology, 23 (2008) (1) pp 1-8.
- Gustafson, G, Funehag, J, 2008b. Design of grouting with silica sol in hard rock - New design criteria tested in the field, Part II. Tunnelling and Underground Space Technology, 23 (2008) (1) pp 9-17.
- Butron, C, Axelsson, M, Gustafson, G, 2009. Silica sol for rock grouting: laboratory testing of strength, fracture behavior and hydraulic conductivity. Tunneling and Underground Space technology. Vol 24, issue 6, pp 603-607. Elsevier.
- Funehag, J. 2017. Borrhål - hydraulisk gradient och erosion / Leaking boreholes- Hydraulic gradient and Erosion. Rock Engineering foundation, BeFo report nr 172. ISSN 1104-1773. Stockholm, Sweden.
- Sörngaard, C, 2020. From Silica Nano-Particles to Silica Gels and Beyond Salt Induced Aggregation of Silica Nano-Particles and the Stability of Resultant Gels, Thesis for the degree of doctor of philosophy in natural science, specializing in chemistry, ISBN: 978-91-7833-906-8. Gothenburg University, Department of Chemistry and Molecular Biology. Stema Specialtryck, Borås, Sweden.