

## HANDLEDNING FÖR INJEKTERING MED SILICA SOL – för tätning i hårt berg

Johan Funehag

# **HANDLEDNING FÖR INJEKTERING MED SILICA SOL**

**- för tätning i hårt berg**

**A guide for grouting with silica sol  
- sealing in hard rock**

Johan Funehag  
Tyréns AB  
Chalmers Tekniska Högskola



*Till minne av professor Gunnar Gustafson*

*Denna handledning har sin grund i och är ett resultat av en fantastisk persons drivkraft och förmåga att förstå problem. Gunnar Gustafson hade en entreprenörsanda av sällan skådat slag, vilket inneburit att vi kontinuerligt kunnat nå ut och tillämpa resultat av vår forskning.*

*Hans bortgång är en stor sorg för branschen men hans drivkraft skall länge finnas kvar i väggarna.*



## Förord

Injekteringsforskning har varit del av BeFos program under 30 år och utgör en viktig del av skandinaviskt bergbyggande. En väl utförd injektering är oftast ett billigare alternativ än inklädnad med tät lining. Ökade krav på små inläckage har medfört att kostnader för injektering ökar och blir svårare att beräkna. Den helt övervägande injekteringsinsatsen utförs i samband med berguttag. Injekteringen har en livslängd som påverkas av bergets grundvatten, eventuella spänningsrörelser och av material och utförande som använts. Flertalet av faktorerna kan påverkas och det finns krav på ökad förutsägbarhet och bättre ekonomi för injekteringsinsatser. Problem som att injekteringsmedlet inte hårdnar eller att det rinner tillbaka kan innebära erosion av medlet och kvalitetsförsämring av arbetet. Beständigheten är kopplad till grundvattentryck och skärmgeometri i injekteringsdesignen. Gränserna för hur tätt berget kan göras utan lining ökar stadigt. De senaste årens forskning har lett fram till ett nytt injekteringsmedel, silica sol, som rätt använt kan bidra till att öka kvaliteten på injekteringsinsatsen. Det introducerades som ett injekteringsmedel för hårt berg på den svenska marknaden år 2002 och har sedan dess använts i ett antal tunnlar. Injekteringsmedlet kan lämpa sig som ett komplement till traditionell cementinjektering där kraven på täthet i tunnlar är stränga. Föreliggande projekt är en handledning hur man bör injektera silica sol. Handledningen riktar sig till både entreprenörer och konsulter men även beställare. Syftet är att ge ett verktyg till branschen för design och utförande men även de problem som kan uppstå och åtgärder för detta. Handledningen sammanfattar den forskning som utförts inom detta ämne framförallt vid Chalmers tekniska högskola samt de projekt som högskolan deltagit i.

Referensgruppen som medverkat i projektet bestod av Gunnar Gustafson Chalmers, Bjarne Liljestränd, STRABAG, Magnus Zetterlund, Vattenfall, Kenneth Rosell, Trafikverket, Hans-Olov Hognestad, BASF, Inger Jansson, Eka och Mikael Hellsten BeFo.

Stockholm i december 2011

Mikael Hellsten

## Sammanfattning

Föreliggande rapport är en redogörelse av kunskapsläget vid dags datum i hur man bör injektera med silica sol i hårt berg. Den innefattar både resultatet av flera teoretiska studier samt erfarenheter från ett antal genomförda projekt där silica sol använts som injekteringsmedel. Rapporten kan ses som en handledning ämnad för beställare, konsulter och entreprenörer i hur man utför en silica sol injektering. Den beskriver projekteringstegen, utförandet samt hur styrning på plats görs. En del som tidigare inte rapporterats så ofta är de problem som kan uppstå vid en injektering och är i denna rapport framlyfta för att åskådliggöra vilka val entreprenören måste göra.

På senare tid har kraven på täthet vid tunnelbyggande skärpts väsentligt. De täthetskrav som ställs, ibland mindre än någon liter per minut och 100 meter tunnel, samt beställarens egna funktionskrav på dropp och dylikt har medfört att konventionell förinjektering med cementbaserade injekteringsmedel kan bli otillräcklig. Om en hydraulisk sprickvidd ner till ex 30  $\mu\text{m}$  måste tätas innebär detta att ett annat injekteringsmedel än cement behöver användas alternativt kompletteras.

Ett miljömässigt bra alternativt injekteringsmedel som klarar de högre täthetskraven jämfört med de traditionella cementbaserade injekteringsmedlen är kolloidalt kisel, dvs. silica sol. Silica sol är en kolloidal lösning av silikapartiklar i vatten. När silica sol blandas med exempelvis vanligt koksalt startar en reaktion och partiklarna bildar bindningar mellan sig. Silica sol har ett helt annat beteende jämfört med cement. Forskningen har, liksom för konventionell cementinjektering, visat att sprickvidden, injekteringstrycket och tiden har stor inverkan på injekteringsresultatet men för silica solen har dessutom geltiden stor betydelse för utförandet och resultatet. De praktiska fördelarna med silica sol, förutom inträngningsförmågan, är uppenbara när det kommer till att styra injekteringsmedlets geltid. Med silica sol kan geltiden styras och därmed injekteringstiden per hål från några minuter till flera timmar, om så är önskvärt.

Den styrbara och snabba viskositetstillväxten kopplas till inträngningslängden via den hydrauliska sprickvidden, injekteringsöverttryck och geltid på silica solen. Med vetskap om vilken minsta sprickvidd som behöver tätas för att klara inläckagekravet kan en härledbar injekteringsdesign upprättas där den använda injekteringstiden kan förutsägas.

För att injekteringen skall bli så effektiv som möjligt bör utrustning och genomförande anpassas. I de hittills genomförda projekten har en traditionell cementinjekteringsutrustning använts med framgång. De problem som observerats under en silica sol injektering beror på stora injekteringsvolym, återslag eller ytläckage. När sådana problem uppstår måste designen uppdateras. Denna handledning ger förslag till sådana uppdateringar, i huvudsak bestående av förändringar i tryck eller geltid.

*Nyckelord: Design, handledning, berg, tunnel, injektering, silica sol*

## Summary

This report is a summary of today's knowledge of how a grouting with silica sol should be done. It includes both results several theoretical studies and experiences from different tunnel projects where silica sol has been used. The report can be seen as a guide for clients, consultants and contractors of what a silica sol grouting means. It describes the design stages, execution and how the work can be directed and controlled at site. One part that has not earlier been so well reported is problems encountered during grouting. The problems are in this report highlighted to illustrate all the choices that the contractor has to do.

During the past decades the stipulations on the ingress of water to tunnels have been stricter. The stipulations set, sometimes less than a liter per minute and hundred meter of tunnel, together with the clients own demands on functionality for the allowed number of drips have made traditional cement grouting sometimes not adequate. For instance, if a hydraulic aperture of a fracture down to 30  $\mu\text{m}$  needs to be sealed to cope with stipulations, another grout than cement based needs to be used or complemented with.

An environmental sounding alternative that copes with the strict stipulations on water ingress is colloidal silica, i.e. silica sol. Silica sol is a colloidal mixture of silica particles in water. When silica sol is mixed with for instance ordinary table salt (NaCl) a reaction starts and bonding between the particles starts to develop. Silica sol behaves different from normal cement grouts. Research have shown, as well as for cement grouting, that the fracture aperture, the grouting pressure and grouting time play a certain role on the grouting result. Besides these factors, the gel time for silica sol have effect on both the execution and result. The practical advantages with silica sol, besides the superb penetrability, are obvious when it comes to controllable gel times, steerable penetration lengths and the time spent on grouting. The controllable gel time and the rapid viscosity increase are directly linked to the penetration lengths via hydraulic aperture, grouting pressure and gel time. Knowledge of the minimum fracture aperture that needs to be sealed, a derivable grouting design can be computed where the grouting time used is predictable.

To achieve an efficient grouting, the equipment and execution needs to be adopted. In the performed projects so far, traditional grouting equipment for cement based grouts have been used with success. The problem encountered consists of large grouted volumes, backflows or surface leakages. De fundamentals of these "problems" is that the proposed design cannot be kept and updates needs to be done. In this guide suggestions on how to update the design are proposed which basically consists of change of pressure and gel times.

*Keywords: Design, handbook, tunnel, hard rock, grouting, silica sol*



## Nomenklatur

Beskrivning	Beteckning	Enhet
Inträngningslängd	$I$	m
Inträngningslängd max	$I_{max}$	m
Inträngningslängd relativ	$I_D$	-
Skattad konduktivitet, oinjekterat	$K_0$	m/s
Skattad konduktivitet, injekterat	$K_{inj}$	m/s
Sektionslängd	$L$	m
Inflöde	$Q$	m <sup>3</sup> /s
Transmissivitet, oinjekterad	$T_0$	m <sup>2</sup> /s
Transmissivitet, injekterad	$T_{inj}$	m <sup>2</sup> /s
Sprickvidd	$b$	µm
Sprickvidd dimensionerande	$b_{dim}, b_{crit}$	µm
Hydraulisk sprickvidd	$b_{hyd}$	µm
Bergtäckning	$d$	m
Jordacceleration	$g$	m/s <sup>2</sup>
Inflöde innan injektering	$q$	m <sup>3</sup> /s, m
Tunnelradie	$r_t$	m
Borrhålsradie	$r_w$	m
Tid, dimensionslös	$t_D$	-
Tid, relativ injekteringstid	$t_0$	s
Geltid	$T_G$	min
Gelinduktionstid	$t_G$	s, min
Tjocklek på injekterad zon	$t$	m
Hydrauliskt gradient	$dh/dr$	-
Densitet berg	$\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>
Densitet vatten	$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>
Injekteringsövertryck	$\Delta p$	Pa
Grundvattentryck	$\Delta h$	Pa
Flytgräns injekteringsmedel	$\tau_0$	Pa
Skinfaktor	$\xi$	-
Viskositet, vatten	$\mu$	Pas
Initiell viskositet silica sol	$\mu_0$	Pas



## Innehållsförteckning

### Del I, Kolloidalt silika/Silica sol

1	Bakgrund	1
1.1	Syfte med denna handledning	2
2	Materialet	3
2.1	Vad är kolloidalt silika?	3
2.2	Tillgängliga produkter	4
2.3	Silica sol, inträngnings- och tätningsegenskaper	5
2.3.1	Några begrepp	6
2.3.2	Gelinduktionstid och inträngningslängd	7
2.4	Silica sol, övriga egenskaper	9

### Del II, Genomförande av en injektering

3	Genomförande av silica sol injektering	11
3.1	Nuvarande lämplig utrustning	11
3.2	Krav på manskap/organisation	13
3.3	Borrning och hållrengöring	13
3.4	Hydrauliska tester i injekteringshål	14
3.5	Satsvis injektering	15
3.5.1	Förberedelser	15
3.5.2	Blandning och utrustning	17
3.5.3	Injektering	18
3.5.4	Stoppkriterier	19
3.5.5	Kontroller av injekteringsmaterialet	20
3.5.6	Kontroller efter avslut av injekteringen	21
3.6	Kontroller av bergets täthet	22
3.7	Utveckling av blandningsförfarande och utrustning	23

4	Problem och åtgärder vid injekteringsarbetet	25
4.1	Bergets grundläggande inverkan på injekteringen	25
4.1.1	Möjliga orsaker till utspädning	25
4.1.2	Evakuering av luft och vatten ur borrhål	27
4.2	Utförande av injekteringen med hänsyn till observationerna.	28

### **Del III, Teori för projektering och design**

5	Grundläggande egenskaper och teorier	31
5.1	Allmänt	31
5.2	När är silica sol aktuellt	32
5.2.1	Översiktlig bedömning inför dimensionering	32
5.2.2	Bedömning av penetrationsförmågan	34
5.3	Sprickornas inverkan på designen	35
5.3.1	Minsta dimensionerande sprickvidd	35
5.3.2	Sprickorientering och skärmgeometri	38
6	Design av injektering med silica sol	40
6.1	Generellt	40
6.2	Silica sol och dess inträngning	41
6.2.1	Gelinduktionstid och inträngningslängd	41
6.2.2	Beräkning av volym för silica sol	42
6.3	Dimensionering	43
7	Referenser	49

### **Bilagor**

Bilaga A. En designuppgift





## 1 Bakgrund

På senare tid har kraven på täthet vid tunnelbyggande skärpts väsentligt. Bakom dessa krav ligger skärpta miljökrav, men också insikten om att en sänkt grundvattennivå kring tunnlar ofta medför marksättningar och som en följd av detta har skador på bebyggelse uppkommit. De täthetskrav som ställs, ibland mindre än någon liter per minut och 100 meter tunnel, samt att beställarens egna funktionskrav på dropp och dylikt har medfört att konventionell förinjektering med cementbaserade injekteringsmedel kan bli otillräcklig. En metod framtagen vid Chalmers tekniska högskola (Gustafson et al, 2004) visar hur en design för förinjektering kan tas fram som är förutsägbar gällande resultat och resursåtgång. Designen baseras på de hydrauliska sprickvidderna längs tunnelsträckningen samt att inläckagekravet till tunneln är bestämt. Genom att täta samtliga sprickor ner till en viss bestämd hydraulisk sprickvidd kan inläckagekravet nås. Om en hydraulisk sprickvidd ner till ex 30  $\mu\text{m}$  måste, bör man byta ut eller komplettera cementbaserade injekteringsmedel mot sådana som klarar högre ställda täthetskrav. Detta kan innebära att borrhål med ett större inflöde tätas med cement och borrhål med lägre inflöde tätas med det alternativa injekteringsmedlet. Vilka inflödesgränser som gäller är unikt för varje tunnel och beror bland annat av grundvattentrycket och sprickviddsfördelningen. Denna handledning kommer i huvudsak att behandla hur en injektering med silica sol bör göras och den grundläggande designen är utförd där valet har hamnat på att silica sol måste användas för att klara inläckagekravet.

Ett miljömässigt bättre alternativt injekteringsmedel som klarar de högre täthetskraven jämfört med de traditionella cementbaserade injekteringsmedlen är kolloidalt kisel, dvs. silica sol. Silica sol är en kolloidal lösning av silikapartiklar i vatten. När silica sol blandas med exempelvis vanligt koksalt startar en reaktion och partiklarna bildar bindningar mellan sig. Förhållandet mellan inblandningen av silikatpartiklar- och saltlösning styr hur snabbt silica sol gelar. Mekanismen hur gelningen och hur partiklarna binder till varandra är inte helt förstådd. Hur gelningen påverkar inträngningslängden i bergsprickor beskrivs i denna rapport.

Eftersom silica sol har ett helt annat beteende jämfört med cement bör injekteringsutförandet specifikt anpassas till silica sol. Forskningen har, liksom för konventionell cementinjektering, visat att sprickvidden, injekteringstrycket och tiden har stor inverkan på injekteringsresultatet men för silica solen har dessutom geltiden stor betydelse för utförandet och resultatet.

## 1.1 Syfte med denna handledning

Syftet med denna handledning är att beskriva de riktlinjer som finns i dagsläget med avseende på att utforma (designa), planera och utföra injektering med silica sol. Detta innefattar t.ex. vilka geltider och injekteringstryck som ska användas i förhållande till erforderlig inträngningslängd och sprickornas vidd. Vidare vilka krav på resurser och utrustning som bör ställas och hur man praktiskt utför en batchvis pumpning och injektering samt nödvändig utrustning för detta. Den innehåller även en beskrivning av hur en kontinuerlig pumpning kan utföras samt de centrala egenskaper som är nödvändiga att få kontroll på vid utförandet.

Vi kan förvänta oss att silica sol eller liknande medel kommer att användas i framtiden som komplement till cementinjektering. Det är därför nödvändigt att branschen följer de givna rekommendationer som har arbetats fram hittills och att erfarenheter skall utbytas från projekt till projekt.

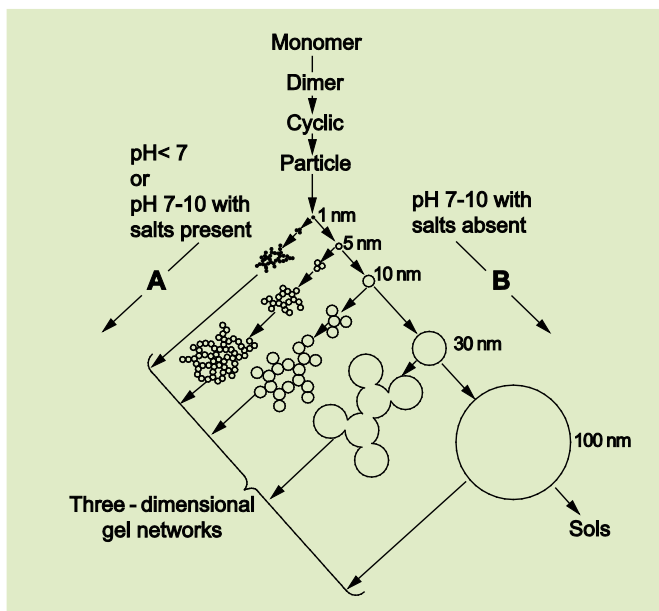
Kolloidalt silika har ännu inte provats vid stora flöden i kristallint berg vilket gör att denna del inte har behandlats här. Detta medför att handledningen gäller generellt för finsprickigt berg, här definierat som ett berg med hydrauliska sprickvidder mindre än ca 200 µm.

Handledningen är uppdelat i tre olika avsnitt. Del 1 beskrivning av silica sol, Del 2, utförandet och den sista Del 3, design och projektering. Olika delar lämpar sig för olika kategorier i ett projekt såsom beställare, entreprenör och projektör.

## 2 Materialet

### 2.1 Vad är kolloidalt silika?

Kolloidalt silika är samlingsnamnet för stabila lösningar av partiklar gjorda av amorf kiseloxid,  $\text{SiO}_{2\text{VI}}$ , som är dispergerade i vatten. Storleken på partiklarna kan vara upp till ca 500 nm. Silica sol är en delmängd av kolloidalt silika där partikelkoncentrationen och partikelstorleken har begränsats. En vanlig kiselkoncentration är ca 40 % (den största mängd som går att få som en stabil lösning) där partiklarna är cirka 20 nanometer i diameter. De är i vattenlösningen stabiliserade med hjälp av katjoner, ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Tillverkningen av silica sol utgår oftast från vattenglas genom spädning med vatten och syra eller bas. Lösningen passerar sedan en jonbytarmassa där natriumhalten sjunker drastiskt. I detta läge fås en kisel-syra sol bestående av monomera silikatjoner som modifieras vidare (bygger upp partiklar) till önskad produkt i en reaktor där pH, temperatur och tryck kan ändras. Hur processen eller polymerisationen, kan styras till önskvärd produkt beskrivs i Figur 2-1, nedan.



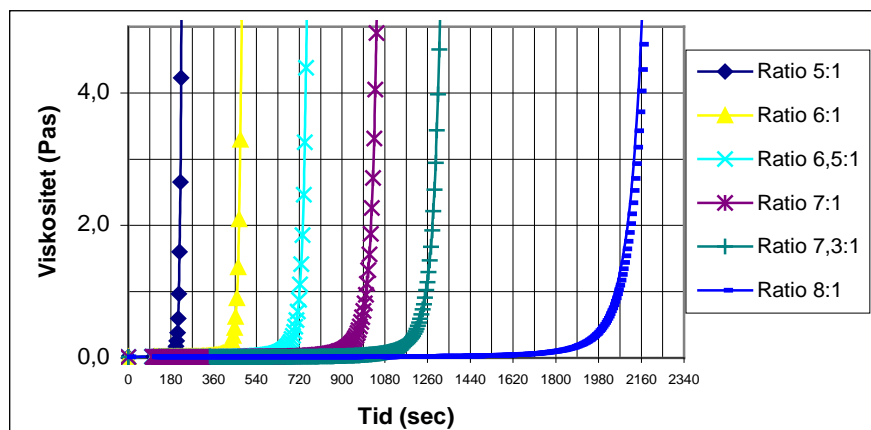
Figur 2-1. Polymerisation av silica sol. I en sur lösning eller med salt närvarande bildar partiklarna en gel (A). I en basisk lösning växer partiklarna i storlek men minskar i antal (B). Från Iler (1979).

En monomer molekyl,  $\text{SiO}_4^-$  tetraeder, börjar reagera och binds till andra molekyler och vi får en dimer, dvs. en molekyl med två likartade enheter. Ytterligare bindning ger en cyklisk kedja och resultatet blir en partikel. När väl partiklarna har bildats finns två vägar för att få den önskvärda produkten. Vid överskott av monomerer samt vid ett pH lägre än 7 eller vid ett pH mellan 7-10 där inga salter finns närvarande växer partiklarna i storlek. Om salter finns närvarande och vid ett pH mellan 7-10 kommer partiklarna att aggregera och bilda en gel. Denna sista process (A) används när vi använder det som ett injektionsmedel, vi tillsätter alltså en saltlösning. Mängden tillsatt saltlösning styr geltiden; ju mer salt som tillsätts desto kortare geltid. Utgångsprodukten kan bestämmas och med det menas enkelt uttryckt vilken storlek på partiklarna som är önskvärd. En mindre partikelstorlek ger högre specifik yta och är alltså mer reaktiv.



Vanligtvis används en partikelstorlek på 16-20 nm, där partikelstorleksfördelningen ("siktcurvan") varierar beroende på produkt. Att ha i beaktande är att silica solens naturliga tillstånd är i gelat tillstånd och de processer som görs för att hålla den i vätska styrda. Innebörden är att injekteringsmedlet har ett "bäst före datum" då egenskaperna är starkt avvikande från de ursprungliga. Bäst före datumet sätts av tillverkaren och skall alltid kontrolleras innan användning.

De praktiska fördelarna med silica sol, förutom inträngningsförmågan, är uppenbara när det kommer till att styra injekteringsmedlets geltid. Tekniken för konventionell injektering, alltså vilket tryck och injekteringsmedel man skall använda och hur stoppkriterierna är utformade har normalt baserats på tidigare erfarenhet. Vidare har tiden för en planerad injektering varit okänd. Med silica sol kan geltiden styras och därmed injekteringstiden per hål från några minuter till flera timmar, om så är önskvärt. Geltiden styr även inträngningslängden, så tillvida att en kort geltid ger kort inträngningslängd och vice versa. I vissa fall vill man begränsa inträngningslängden för att minimera bruksåtgång och spill vid t.ex. ytläckage och efterinjekteringssituationer. Figur 2-2 visar hur viskositetsutvecklingen ser ut vid olika blandningsförhållande (ratio) med saltlösningen. Till en början uppträder silica sol med en konstant låg viskositet (ca. 10 mPas, vatten=1 mPas). Efter en viss tid ökar viskositeten kraftigt och silica sol stelnar till en fast gel.



Figur 2-2. Viskositetsutvecklingen för en produkt av silica sol vid olika blandningsförhållanden (baserat på vikt) för saltlösningen vid en temperatur på 8°C.

## 2.2 Tillgängliga produkter

De kommersiella produkterna av Silica sol som är tillgängliga i Sverige är främst Meyco MP320 och Meyco MP320T. I ett tidigt skede i utvecklingen av silica sol fanns också Meyco MP320C, som är fri från biocider (antimögelmedel), samt silicasoler avsedda för forskningsändamål exempelvis "Eka Gel Exp 36" och "Cembinder U22" som är identisk med Meyco MP320C under ett annat namn.

Meyco MP320 är i dagsläget den vanligaste produkten och tillverkas i Sverige. MP320T tillverkas främst i Tyskland och skillnaden mellan dessa MP320 är att partikelhalten enbart är 30 % jämfört med den svenska 35-40 %. Numera finns även Meyco MP325 med en ännu lägre kiselhalt, 15%.

## 2.3 Silica sol, inträngnings- och tätningsegenskaper

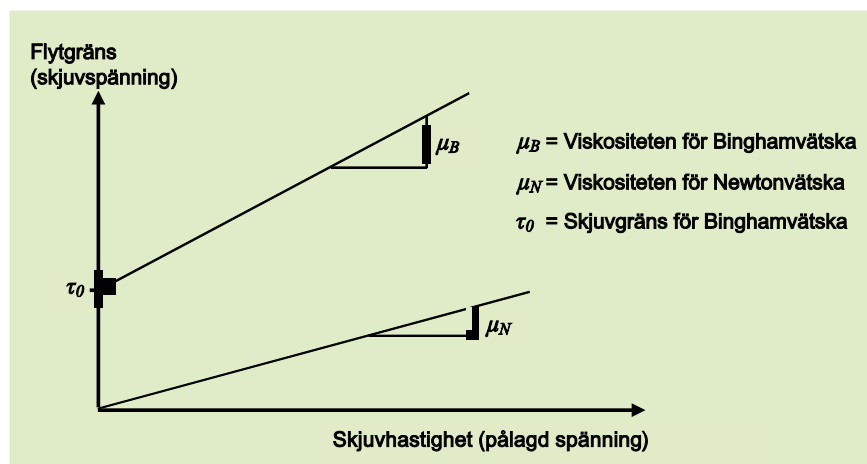
### Egenskaper hos silica sol som relaterar till injekteringen:

- Inträngningsförmåga i små spricköppningar
- Flytegenskaper/reologi, dvs viskositet och gellid
- Gelning
- Hållfasthet
- Tätheten/insitu permeabiliteten

Inträngningsförmågan beror till största delen på partikelstorleken. Då partiklarna för silica sol är små, 5-100 nm är inträngningsförmågan initialt god även i de minsta spricköppningarna. Den goda inträngningsförmågan minskar så fort partiklarna börjar bilda större nätverk i samband med gelningsprocessen. En konsekvens av detta är att injektering bör påbörjas omgående efter inblandning av saltlösningen, som startar gelningen, detta för att bibehålla den goda inträngningsförmågan.

Strömningsegenskaperna, reologin, beskriver flytegenskaperna för en vätska, i detta fall injekteringsmedlet. Silica sol beter sig som en så kallad Newtonvätska under stora delar av strömningsförloppet och för en Newtonvätska är viskositeten den enda materialparameter som beskriver vätskans flytegenskaper. Som jämförelse kan nämnas att ett cementbaserat injekteringsmedel vanligtvis beskrivs som en Binghamvätska.

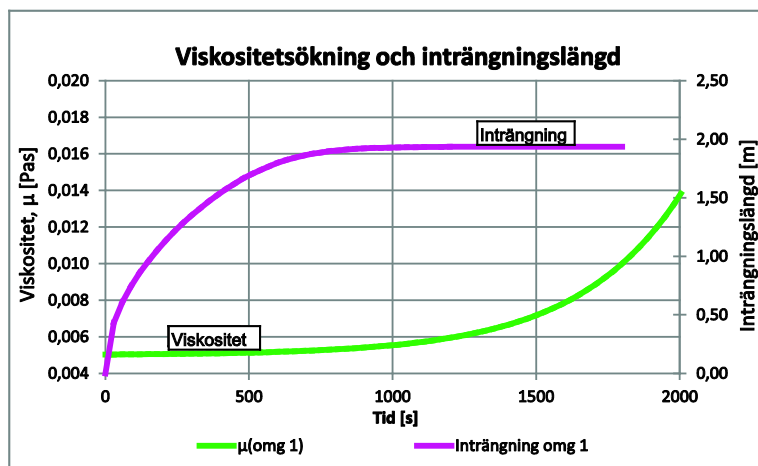
Så snart gelningen har startat kommer medlet mer att få egenskaper som en Binghamvätska, dvs med materialparametrarna viskositet och flytgräns. Den exakta gränsen mellan en Newtonvätska och Binghamvätska är svår att bestämma och är i grund och botten en definitionsfråga. Praktiskt sett så är det inte av stor vikt. I Figur 2-3 nedan illustreras skillnaden mellan en Binghamvätska och en Newtonvätska.



Figur 2-3. Schematiskt diagram för att illustrera en Newton- och Binghamvätska samt dess reologiska skillnad.

Skillnaden mellan en Newtonsk vätska av typen silica sol och en Binghamvätska av typen cementbruk är att en newtonsk vätska kommer direkt i rörelse vid pålagd skjuvkraft. För en binghamvätska måste den pålagda skjuvhastighet vara större än brukets egen skjuvspänning, kallad flyt-

gräns. På samma sätt gäller att, när väl skjuvkraften blir mindre än flytgränsen kommer materialet till ett stopp. För en Newtonvätska kommer materialet alltid att röra på sig så länge skjuvspänningen verkar på vätskan. Lutningen på kurvan, i Figur 2-3, är viskositeten. Ett material med hög viskositet flyter trögare eller långsammare än en vätska med lägre viskositet vid samma pålagda skjuvhastighet. För en gelände vätska är det de mobiliserade skjuvspänningarna längs inträngningslängden som balanseras av det pålagda trycket. Till slut kommer skjuvspänningarna längs inträngningslängden att vara i jämvikt med trycket och vätskan slutar sin rörelse. Utseendet på en sådan inträngningskurva visas i Figur 2-4, nedan.



Figur 2-4. Inträngningen av silica sol mot tiden. I figuren är även den aktuella viskositetsstillväxten inritad

Som figuren visar så är inträngningshastigheten snabb i början och allteftersom inträngningslängden blir längre saktar hastigheten ner. Till slut är de mobiliserade skjuvspänningarna (en produkt av både inträngningslängd och viskositetsstillväxt) så pass höga att inträngningen stannar av. Således kan inträngningslängden styras med hjälp av pålagt tryck och vald viskositetsutveckling; en snabb gelning ger kortare inträngningslängd och vice versa. Det är detta förhållande som tas till fasta vid dimensioneringen av en injektering och till stora delar behandlas i denna handledning.

### Några begrepp

*Geltid,  $T_G$*  = Den tid från det att silica sol och saltlösningen är blandad till dess att den är gelad. Blandningen bedöms som gelad då en kopp fylld med blandningen kan vändas 90 grader utan att vätskan flödar. Enhet minuter.

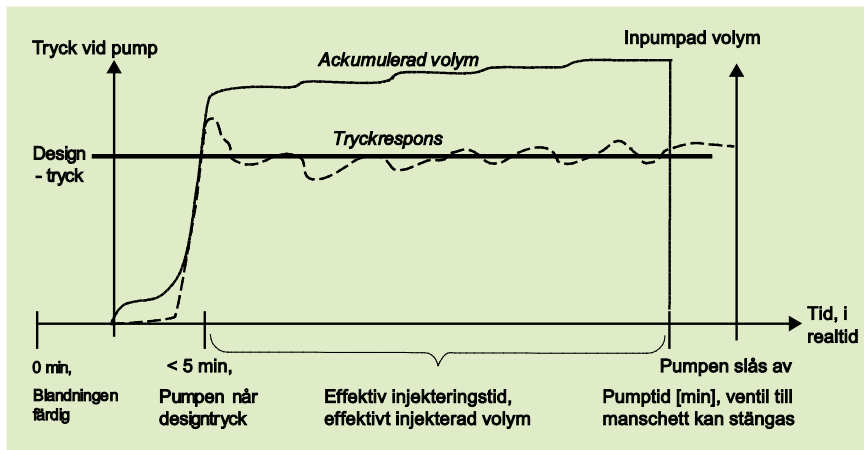
*Initial viskositet,  $\mu_0$*  = viskositet på blandningen direkt efter blandning. Denna bestäms med reometer och har enhet Pas.

*Gelinduktionstid,  $t_G$*  = Den tid det tar för att viskositeten skall fördubblas i förhållande till den initiala viskositeten.

*Tryck,  $p$  och övertryck,  $\Delta p$*  = trycket vid injekteringspumpen är lika med det pålagda övertrycket + grundventrycket.

*Injekteringstid* = Den tid trycket ligger på vid manschett och tills pumpen slås av och manschetten stängs.

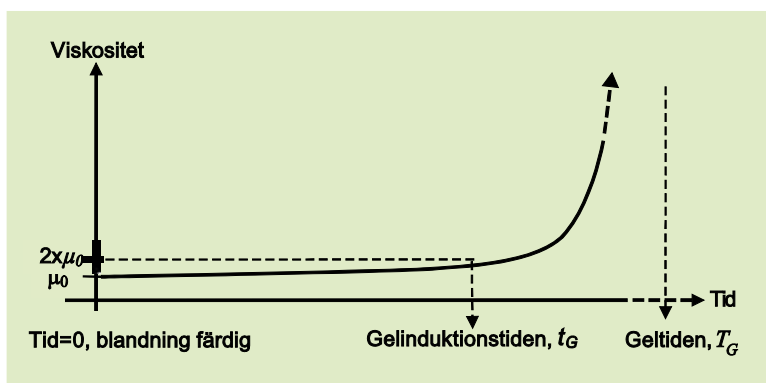
*Effektiv injekteringstid* = Den effektiva injekteringstiden startar när manschetten är öppen, och designtrycket uppnått, och varar den tid som designtrycket hålls. För definitioner, se Figur 2-5, nedan.



Figur 2-5. Illustration över injekteringstiden generellt och speciellt effektiv injekteringstid och pumptid.

### 2.3.1 Gelinduktionstid och inträngningslängd

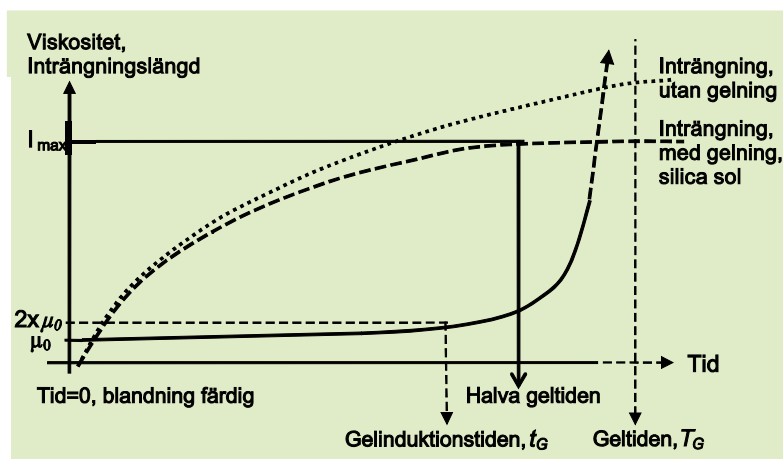
Hur geltid, gelinduktionstid samt viskositet förhåller sig i tiden visas i Figur 2-6 nedan.



Figur 2-6. Schematisk skiss över begreppen gelinduktionstid och geltid.

Inträngningen i en spricka kopplas till viskositetskurvan vilket visar att inträngningen når ett nästan maximum långt innan geltiden är uppnådd (Figur 2-7).

Figur 2-7. Inträngningen i förhållande till viskositeten. Den heldragna linjen är viskositetskurvan för en silica sol. Den streckade linjen motsvarar inträngningen för silica sol och som jämförelse visas den punktstreckade linjen vilket motsvarar en icke gelande silica sol (konstant låg viskositet).



I laboratoriet har många försök utförts för att bestämma hur inträngningen av gelande vätska sker. Som en tumregel kan sägas att den maximalt möjliga inträngningen,  $I_{max}$  nås vid halva geltiden,  $T_G$ . Vätskan är vid detta läge fortfarande mycket lättflytande. Om ingen gelningen hade skett hade inträngningen fortsatt i det oändliga, så länge det pådrivande trycket varit aktivt. Viskositeten styr enbart inträngningshastigheten; en lågviskös vätska har kort inträngning och vice versa. Gelningen tillför ett synbart stopp på inträngningen samt en hållfasthetsökning. Tiden som trycket måste vara aktivt, utöver halva geltiden, beror på de hydrogeologiska förhållandena, som hydrauliska gradienten och vilken risk det finns för erosion av injekteringsmedlet. Vid djupt belägna tunnlår, ca 150-500 m är risken större för erosion och injekteringstiden bör vara längre än halva geltiden, medan i grunt belägna tunnlår, <100 och om den hydrauliska gradienten är låg är risken mindre för erosion och injekteringstiden kan sättas kortare, dvs halva geltiden.

Den maximala inträngningslängden för tvådimensionellt flöde(2-D) med silica sol,  $I_{max, 2-D}$ , beräknas med (Gustafson och Funehag, 2008a och 2008b)

$$I_{max, 2-D} = 0.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} \quad (2-1)$$

där  $b$  är den hydrauliska sprickvidden,  $\Delta p$  är pålagt övertryck,  $t_G$  är gelinduktionstiden och  $\mu_0$  är den initiala viskositeten hos silica sol. Gelinduktionstiden är den tid det tar för den initiala viskositeten att fördubblas. Efter gelinduktionstiden är viskositetstillväxten snabb, och inträngningsförmågan minskar drastiskt. En tumregel är att gelinduktionstiden är 1/3 av geltiden, /Funehag, 2007/. Gelinduktionstiden skall inte förväxlas med geltiden.

Hållfastheten på silica sol kan generellt bestämmas av partikelstorlek (specifik yta), storleksfördelning och partikelhalt. Samma egenskaper styr också geltiden på silica sol. I all enkelhet kan sägas att hållfastheten blir högre för en produkt med högre partikelhalt. Man kan dock tänka sig att en högre hållfasthet för en produkt med lägre partikelhalt fås om man

kompenaserar detta med att ha en bredare partikelfördelning, dvs blandning av partikelstorlek. Dessa tankesätt har dock inte helt kunnat verifieras via litteraturstudier, dels p.g.a. av brist på information om materialegenskaperna och dels på att flera produkter inte har jämförts mot varandra vid en och samma studie.

Insitupermeabiliteten beskriver hur genomsläppligt injekteringsmedlet är i sig självt. Självklart bör tätheten vara lägre än den önskvärda genomsläppligheten på själva bergmassan som skall tätas. Silica sol har egenskapen att binda upp det vatten som finns i lösningens nätverk. Indirekta tester utförda på materialet Eka gel Exp 36 visar på en hydraulisk konduktivitet,  $K$ , på ca  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  m/s (Butron et al, 2007). Den testade produkten hade en medelpartikelstorlek på 16 nm med en viktsandel på 35 %.

## 2.4 Silica sol, övriga egenskaper

Andra aspekter, förutom rent injekteringsmässiga egenskaper, som kan vara av vikt för hur injekteringen av silica sol bör göras är:

- **Mekaniska**

En silica sol har generellt sett en låg mekanisk hållfasthet jämfört med exempelvis cement. Studier (Axelsson, 2009) visar att direkt efter gelning nås en skjuvhållfasthet på 60-80 Pa. Därefter växer hållfastheten till snabbt. Under de 6 månader som skjuvhållfastheten mättes hade inte tillväxten avtagit. Ungefärliga värden på uppmätta skjuvhållfastheter efter 6 månaders åldring (Butron et.al 2007 och Axelsson, 2006), är ca 45-60 kPa. Dessa värden gäller för provkroppar som enbart består av silica sol.

Det finns studier (bland annat Yonekura 1997, Persoff et.al 1999) där olika sandsorter har injekterats med silica sol och får helt andra hållfastheter efter 6 månader, uppemot ca 500 kPa.

- **Krympning, syneres**

Det som tidigare är känt, se exempelvis Andersson (1998), är att silikater och då framförallt vattenglas uppvisade en stor krympning. Att notera är att silica sol inte är vattenglas eftersom andelen bas ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) är avsevärt mindre samt att den består av partiklar och inte silikatkedjor. Silica sol krymper vid torra förhållanden. Vid en relativ luftfuktighet på 98 % är krympningen mycket liten eller obefintlig och vid 100% RH eller i direkt kontakt med vatten finns ingen krympning (baserat på långtidstester, >6 år vid Eka Chemicals i Bohus). Efter uttorkning och krympning kan silica solen inte återgå till en gelfas utan den krympta kroppen kommer att spricka sönder om vatten tillförs. Däremot finns observationer bland annat under ett laborationstest utfört på Chalmers att flödet genom en silica sol kärna kan minska och helt upphöra efter en viss tid. Detta kan tyda på en viss svällningseffekt men gäller då för provkroppar som inte torkat.

- **Beständighet**

Beständigheten är en fråga som fortfarande inte är besvarad fullt ut. Teoretiska studier på avdelningen för Geologi och Geoteknik, Chalmers tekniska högskola (ännu ej publicerat material) visar att silica sol är beständigt så länge kolloidalt SiO<sub>2</sub> finns närvarande i grundvattnet. Detta gäller i stort sett i allt vatten i kristallint berg förutom i smältvatten, exempelvis i fjällkedjan. I Japan anses silica sol beständigt och är det enda injektionsmedel utöver cementbaserade som är tillåtet att användas vid tätning av tunnlar. Professor Yonekura har publicerat flera artiklar inom detta område där (Yonekura 1997) är en referensartikel. Det skall påpekas att forskning görs inom detta område för att förstå de mekaniska nedbrytningsmekanismerna för injektionsmedel.

- **Miljö- och hälsoaspekter**

Inga påvisbara negativa hälsoeffekter har rapporterats. Att beakta är dock att silica sol är något basiskt (pH 9-10) och kan irritera hud och ögon vid kontakt.

Användandet av kolloidala partiklar har ökat i samhället. Det är vanligt i färger, drycker, smink etc. och de långsiktiga miljöeffekterna av detta användande är ännu inte utrett men misstankar finns om att det kan grumla vattendrag.

- **Förvaring och hållbarhet**

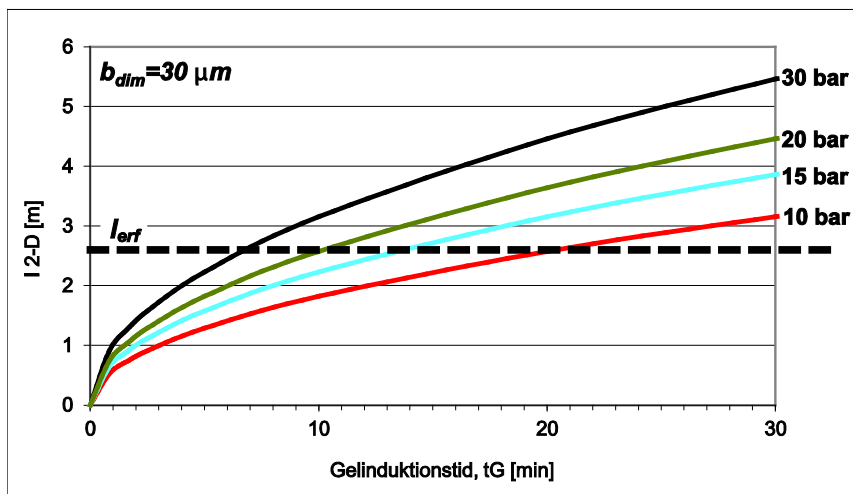
Silica sol innehåller också vatten vilket gör att det inte får frysa eller utsättas för stora temperaturväxlingar. Rekommendationen är att förvaringstemperaturen skall vara mellan + 5 till + 35 grader Celsius. Högre temperaturer kan påskynda mikrobiologtillväxten samt försämra långtidsstabiliteten. Vid normala förvaringstemperaturer är långtidsstabiliteten garanterad till åtminstone 18 månader för Meyco MP320 och MP320T. Efter längre förvaring bör viskositeten och den specifika ytan kontrolleras, vilket för det mesta kan utföras av leverantören.

- **Exempel på krav på uppgifter om materialet som kan ställas i en bygghandling**

- Kiselhalt
- Partikelstorlek, specifik yta
- Hållfasthet vid gelning
- Hållfasthet efter en viss tid efter avslut av injektering
- Vilken typ av accelerator, NaCl eller CaCl samt koncentration

### 3 Genomförande av silica sol injektering

Genomförandet föregås av en utformning (design) eller projektering av en injektering. I designen föreslås geometrier på injekteringsskärm, vilka injekteringsmedel som skall användas, vilka tryck och tider som är lämpliga som utgångspunkt samt vilka kontroller som behöver göras för att kunna säkerställa resultatet. Utrustningen anges indirekt i form av en kravspecifikation som erhålls genom att veta vilka tryck och tider som kommer att vara nödvändiga. I Bilaga A visas ett exempel på en injekteringsdesign vilket knyter an till kommande kapitel om genomförandet. Essensen av en sådan design sammanfattas i ett så kallat designfönster, se Figur 3-1.



Figur 3-1. Inträngningslängder för dimensionerande hydraulisk sprickvidd, 30  $\mu m$  som funktion av injekteringsövertryck och gelinduktionstid. Den erforderliga inträngningslängden på 2,63 m är inritad som en horisontellt streckad linje.

I Figur 3-1 åskådliggörs att vid olika val av tryck och tid (gelinduktionstid) så erhålls olika inträngningslängder i en hydraulisk sprickvidd på 30  $\mu m$ . Inträngningslängderna styr valet av hålavstånd, c- avstånd mellan borrhålen i skärmen och gelinduktionstiden styr hur länge varje borrhål måste pumpas. Vidare väljs tryck för att inte riskera att lyfta berget eller få uppspräckning samt för stor åtgång av injekteringsmedel. Samtidigt får inte trycket vara för lågt eftersom detta skulle ge långa injekteringstider för att nå tillräcklig inträngningslängd.

#### 3.1 Nuvarande lämplig utrustning

I dagsläget fungerar samtliga mobila utrustningar framtagna för cementinjektering även för silica sol. Man bör beakta att silica sol inte har någon "smörjande" effekt som cement kan ha på utrustningen. En rutinmässig översyn av pumparna och övrig utrustning måste därför utföras mer regelbundet än vid cementinjektering.

Silica sol för injektering kommer som två vätskelösningar, en med silica sol och en med saltlösning. De levereras vanligtvis i 1 m<sup>3</sup> tankar av plast med stålbur men mindre kärl finns. Båda lösningarna pumpas över till injekteringsutrustningen med fatpumpar. Dessa skall vara kraftfulla, minst 30 l/min (gärna med en flödesmätare) för att förhindra att tillblandningen



inte blir en ”flaskhals”. Det finns två alternativ för invägning av silica sol. Silica solen kan vägas upp i agitatorn eller direkt i omröraren. Förutsättningen är att det i båda fallen finns ett mätsystem för antingen volym eller vikt. Agitatorn mäter vikten relativt noggrant för stora satser, mer än 50 l. Vid mindre satser bör noggrannheten kontrolleras och felet bör inte överstiga 5%.



*Figur 3-2. 1m<sup>3</sup> behållare med silica sol och saltlösning från ett projekt i en av Telias tunnlar.*

Vågssystemet på omröraren består oftast av enbart en lastcell och är till för att visa om det finns eller inte finns material i omröraren. Noggrannheten är alltså inte tillräcklig för automatiserad receptinvägning. Omröraren kan kompletteras med totalt tre lastceller som då också kan kompensera för att utrustningen inte helt står horisontellt. Om fatpumparna har en mer exakt flödesmätare kan fatpumparna användas för att pumpa upp rätt mängd till omröraren. På lite mer avancerade fatpumpar kan de ställas att alltid pumpa en viss mängd vid påslag för att sedan stängas av. Dessa elektroniska styranordningar, på och av switchar, finns redan monterade på nyare injekteringsutrustningar. Rätt mängd saltlösning kan pumpas på samma sätt, med fatpumpar eller via en våg. Att tänka på är att mängden saltlösning vanligtvis är 1/4 till 1/5 av mängden silica sol vilket gör att området med god mätnoggrannhet är lägre än för själva silica solen. Saltlösningen kan också vägas in via de oftast separata tillsatsanordningarna som främst används för olika tillsatsmedel till cement. En automatiserad dosering och blandning är att föredra för att spara tid vid blandning.

### Summering av utrustningslista:

- Injekteringspump, krav på kapacitet, 50 l/min, 100 bar, variation på tryck max 1 bar. Flödesmätning och loggning i realtid krävs.
- Flödesmätare som kan mäta små flöden < 0,1 l/min noggrant. Det minsta flödet som skall mätas bör kopplas till den dimensionerande sprickvidden som skall tätas. Se vidare Del III, Teori för projektering och design. Genom att mäta flödet kan också pumpen stängas av om flödet blir mindre än det angivna flödet och på så sätt spara tid vid injekteringen. I dagsläget är dock flödesmätarna tillgängliga på injekteringsutrustningen alldeles för grova. De mäter mycket dåligt redan under 4-6 l/min.
- Blandningskärl, uppvärmningskärl
- Vågssystem, invägning av salt och silica
- Fatpumpar, kraftfulla, >30 l/min, automatiserade som stänger vid rätt vikt silica alternativt med flödesmätare



Figur 3-3. Exempel på injekteringsriggar, fotot till vänster från forskningsanläggningen på Äspö, fotot till höger från ett projekt i Telias tunnlar.

### 3.2 Krav på manskap/organisation

Vid ett "standardutförande" krävs två personer på injekteringsriggen, en som ansvarar för injekteringsmaterial och blandning och en som ansvarar för pumpning och övrig utrustning. Ytterligare en person kan vara nödvändig framme vid stoff beroende på avstånd mellan injekteringsutrustning och stoff samt antalet injekteringshål. Det är en förutsättning för en "lyckad" injektering att manskapet har den utbildning och/eller den erfarenhet av injekteringsmedlet och dess blandningsförfarande och specifika egenskaper som krävs. Om detta saknas behövs kunnig personal på plats vid uppstarten av injekteringen för att vara med och ta fram recept, visa förfarandet och kunna svara på frågor.

### 3.3 Borrning och hållrengöring

Borrningen av hål för silica sol injektering görs på konventionellt sätt, dvs samtliga borrhål för den aktuella skärmen borrar upp enligt borrarplan, normalt med samma dimensioner och utrustning som vid cementinjektering.

Silica sol kräver inte någon ytterligare hållrengöring jämfört med vad som normalt krävs vid cementinjektering; spolning med högt tryck.

Vid små inflöden i borrhålen, där också silica sol är mest användbart, bör borrhålen tömmas på vatten innan injektering. Det förväntade är att åtgången kommer att vara liten vilket gör att vattnet i borrhålen kan späda ut silica solen. Vid större flöden trycks vattnet, eller den utspädda silica solen ut i sprickorna och efterföljande injekterade volym har en förväntad gelning. Vid små inflöden i borrhålen och framförallt nedåtlutande hål bör dessa hål avluftas och det görs exempelvis med vakuumpump som är kopplad till hålet innan injekteringen påbörjas, se beskrivning i avsnitt 4.1.2.

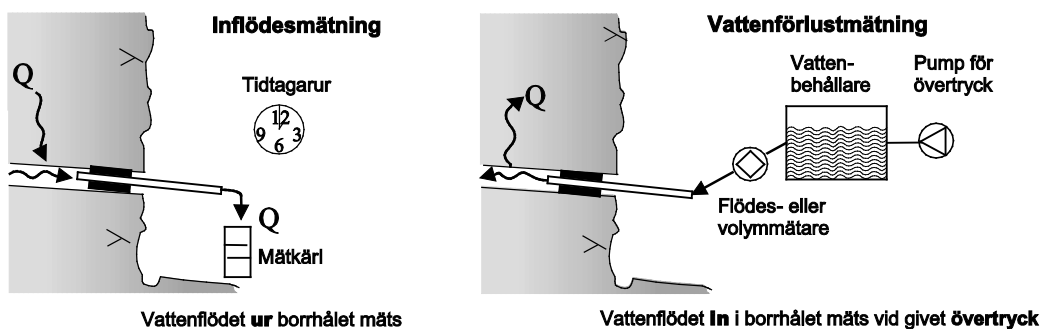


Figur 3-4. Vakuumpump från ett tätningsprojekt i Telias tunnlar.

### 3.4 Hydrauliska tester i injekteringshål

I designen för silica sol fås vanligtvis kriterier för när det ur teknisk synpunkt är befogat att använda silica sol. Vidare kan blandningsförhållande samt batchvolym erhållas vilka är baserade på resultat från hydrauliska tester i injekteringshålen. Därför bör hydrauliska tester i injekteringshålen göras innan injekteringen startar.

Vanligtvis förekommer två typer av hydrauliska tester, traditionella vattenförlustmätningar och inflödesmätningar av borrhålen, se Figur 3-5 nedan.



Figur 3-5. Illustration över en inflödesmätning respektive vattenförlustmätning med tillhörande utrustning för mätning.

Med vattenförlustmätning menas att vatten trycks/injekteras i borrhålet genom manschett vid ett bestämt övertryck, 2-4 bar under en bestämd tid, 1-3 min. Vattenflödet läses av under den sista minuten och när trycket stabiliserats. Med inflödesmätningar menas att flödet ur borrhålet mäts; det som naturligt rinner i borrhålet. Normalt krävs det att det finns en stabil grundvattennivå, om minst 40 m vattenpelare för att testerna skall kunna göras snabbt och effektivt. Upplösningen av resultatet av testerna bestäms av hur länge man kan mäta, från några droppar under 10 minuter eller ett stort flöde på 10 sekunder. Båda eller någon av endera testerna skall göras, dessutom skall grundvattentrycket mätas i samband med testerna.

Hydrauliska tester bör utföras i samtliga borrhål i en injekteringsskärm. Om det primära syftet är att beskriva bergets egenskaper och anpassa injekteringsdesignen skall samtliga borrhål testas ett i taget med de andra borrhålen stängda. För en injekteringsdesign baserad på hål för hål är hydrauliska tester en självklarhet. En vanlig missuppfattning är att hydrauliska tester görs primärt för att finna borrhål som har samband och med denna information kunna utföra injekteringen effektivare. En ökad effektivitet, i varje fall med silica sol, med detta förfarande är ifrågasatt och åtgärderna kan istället sättas in under injekteringen istället, se avsnitt 3.5.3.

Eftersom flödet blir litet då silica sol använts skall mätutrustningen vara anpassad för detta. Konventionell utrustning för vattenförlustmätning är inte det. Exempel på mätnoggrannhet med anpassad utrustning är ca 0,002 l/min, som motsvarar  $K = 4 \times 10^{-10}$  m/s i mätgräns. Motsvarande noggrannhet för konventionell utrustning är i bästa fall ca 0,1 l/min, som motsvarar  $K = 2 \times 10^{-8}$  m/s i mätgräns.

## 3.5 Satsvis injektering

### 3.5.1 Förberedelser

Varje recept förprovas för att kontrollera geltiden med aktuell blandningsutrustning och temperatur. Förprovningen kan utföras i laboratoriet där även viskositetskurvorna och de specifika kvalitetsmåten tas fram; initiell viskositet, gelinduktionstid samt geltid. Förprovningen i fält blir då enklare eftersom recepten kontrolleras mot enbart geltiden.

I tabellen (Tabell 3-1) visas exempel på geltider för olika blandningsförhållande kallat "ratio" mellan silica sol och salt vid en temperatur på 10 grader. Densiteten är antagen till 1,2 kg/liter för silica sol och 1 kg/liter för saltlösningen. Blandningsförhållandet anges i både volym- och viktsprocent.

Tabell 3-1. Exempel på geltider,  $T_G$ , för olika blandningsförhållanden för en temperatur på  $10^\circ\text{C}$ . Tabellen visar storleken på en sats mätt som antingen i vikt eller i volym.

Ratio			Viktmängder			
Vikratio	Volymratio	$T_G$ ( $10^\circ\text{C}$ )	kg sol	kg salt-lösning	per kg sol	kg salt-lösning
4:1	3,3:1	22,5 min	100	25	1	0,25
4.5:1	3,75:1	30 min	102,6	22,8	1	0,22
5:1	4,2:1	38 min	105	21	1	0,2

Ratio			Volymmängder			
Vikratio	Volymratio	$T_G$ ( $10^\circ\text{C}$ )	liter sol	liter salt-lösning	per liter sol	liter salt-lösning
4:1	3,3:1	22,5 min	83,3	25	1	0,3
4.5:1	3,75:1	30 min	85,5	22,8	1	0,27
5:1	4,2:1	38 min	87,5	21	1	0,24

Den två sista kolumnerna kan användas som utgångspunkt för att multiplicera upp sin storlek efter vald satsstorlek.

Geltiden är starkt beroende av temperaturen. Som en tumregel ger en halverad temperatur ( $^\circ\text{C}$ ) dubblad geltid. Med ovanstående blandningsförhållande (vikratios) kan nedanstående tabell erhållas som visar hur geltiden varierar beroende på temperatur (Tabell 3-2). Observera att temperaturen som blandningsförhållandet skall upprättas för är temperaturen i berget och det är också den som bestämmer pumptiden. Om det är en högre temperatur i den omgivande luften än i själva blandningen så kommer silica solen snabbt att ta bergets omgivande temperatur vid själva injekteringen av de små bergsprickorna.

Tabell 3-2. Exempel på hur geltiderna,  $T_G$  kan variera beroende på temperatur för de olika blandningsförhållandena visat i tabell 3-1.

Vikratio 5:1		Vikratio 4,5:1		Vikratio 4:1	
Temp $[\text{C}]$	Geltid, $T_G$ [min]	Temp $[\text{C}]$	Geltid, $T_G$ [min]	Temp $[\text{C}]$	Geltid, $T_G$ [min]
5	43	5	35	5	27,5
10	38	10	30	10	22,5
15	33	15	25	15	17,5
20	28	20	20	20	12,5
25	23	25	15	25	7,5

### 3.5.2 Blandning och utrustning

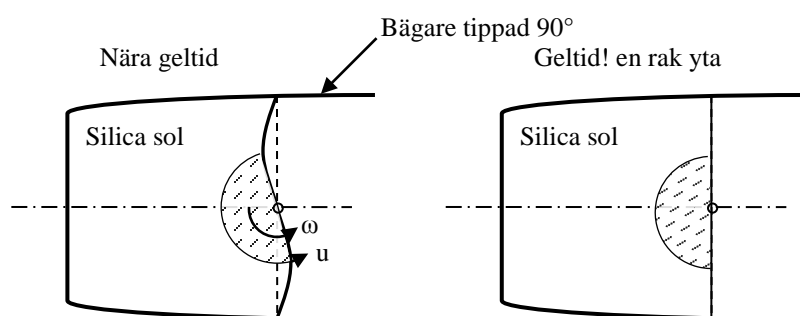
Det hittills vanligaste blandningssättet i flera projekt har varit s.k. satsvis eller batchvis injektering. Satsvis injektering innebär att en föreskriven mängd silica sol blandas för injektering av ett injekteringshål och därefter pumpas hela eller delar av satsen in i hålet. Den föreskrivna mängden som skall blandas för en sats beror vanligtvis på resultat från de hydrauliska testerna, se avsnitt 6.2.2 som inledande uppskattning, samt volym i slangar och injekteringshål. En normalstor sats är ca 200-250 kg.

Först när denna börjar ta slut blandas nästa sats. Kvarstående mängd får inte användas till nästa injekteringshål p.g.a. gelningen, se vidare kap 3.6, Utveckling av blandningsförfarande och utrustning.

Satsvis blandning möjliggör en enkel styrning av geltiden. Blandningen av silica sol och salt görs i omröraren på en konventionell injekteringsplattform. Blandningen av silica sol och saltlösning görs med fördel så nära pumpen som möjligt, lämpligast i omröraren vilket minskar antalet komponenter som måste rengöras.

Silica solen vägs upp direkt i ett blandningskärl samtidigt som saltlösningen vägs upp i en tillsatstank. När silica solen är uppvägd tillsätts saltlösningen automatiskt samtidigt som omröraren är igång. När saltet är tillsatt får omröraren gå i 20-30 sekunder, beroende på effekten av omröraren. Efter att denna tid har gått startar gelningsprocessen för blandningen. Ett kopprov, dvs mugg eller liknade, från blandningen tas omedelbart efter omrörningen för att kontrollera geltiden.

Pumpen startas och slangarna fylls med medlet och injekteringen kan starta. Under injekteringen omrörs blandningen i omröraren. Kopprovet märks och kontrolleras regelbundet tills gelning har konstateras (stabil blandning när koppen tippas 90-grader), se Figur 3-6 nedan.



Figur 3-6. Illustration över kopprovet för bestämning av geltid.

Vid uppnådd geltid skall en rak yta erhållas, men inte nödvändigtvis helt lodrät (beroende på vilken mugg som används kan provet släppa från ytan). Ytterligare tips för att se om provet har gelat är att man känner med fingertoppen på provets yta. Kan man se ett fingeravtryck på provytan utan att det klibbar på fingrarna ger detta ytterligare indikation om att geltiden är uppnådd.

### 3.5.3 Injektering

Exempel på arbetsgång vid silicasolinjektering visas nedan.

- 1) Utsättning av borrhål.
- 2) Borrning av injekteringsskärm.
- 3) Eventuell kontroll av ansättning, riktning samt rakhetsmätning.
- 4) Samtliga borrhål rensolas från borrhax, eventuellt kan vattenförlustmätning utföras samtidigt om utrustning finns och om möjligt identifiera sambandshål.
- 5) Manschettering. Manschetten monteras 1-1,5 meter in i borrhålet.
- 6) Hydrauliska tester: Naturligt inflöde, även dropp, mäts i samtliga borrhål, i de hål där inläckaget är exempelvis >2 l/min skall även grundvattentryck mätas.
  - a) Resultat av testerna kan utvärderas innan val av blandning görs, b.l.a. bestäms batchvolymerna per hål. Detta kan göras på plats.
  - b) Resultatet används för uppdatera utförandet till nästa skärm samt utvärdera resultatet.
- 7) Injekteringen startar i de lägst belägna injekteringshålen och flyttas i sicksack upp i skärmen vartefter injekteringen pågår.
- 8) Blandning, enligt blandningsförfarande avsnitt 3.5.
- 9) Slangar fylls med blandningen – slang kopplas till stängd manschett.
- 10) Designtrycket skall uppnås så fort som möjligt och kan styras med flödet, d.v.s. maxflöde initialt.
- 11) Injekteringen pågår till dess injekteringstiden är uppnådd, blandning, tryck och flöde kontrolleras regelbundet. Vid eventuella oväntade observationer kan åtgärder vidtas enligt avsnitt 4. Vid upptäckt av sambandshål, se nedan.
- 12) När injekteringstiden är uppnådd avslutas injekteringen. Kvarvarande blandning pumpas till spillbehållare och utrustningen inkl slangar spolas ren.
- 13) Ny blandning blandas och förfarandet upprepas till dess de sista injekteringshålen med silica sol är avslutade.
- 14) Väntetid efter injektering i avslutad skärm innan manschetter demonteras vid:
  - silica sol: minst 3 timmar för ytligt belägna tunnlarna men är projektspecifikt och bör hanteras som en del i hela bergguttagscykeln.
- 15) Protokollförda resultat från injekteringen sammanställs.
- 16) Pluggning och/eller ytinjektering (0 – 1,5 m in i hålet) av samtliga borrhål med cementbruk/silica sol. Detta görs om läckande borrhål upptäcks.

#### Sambandshål

Om det under pågående injektering upptäcks att injekteringsmedel flödar ut ur ett eller flera andra borrhål kallas dessa sambandshål. För att kunna

upptäcka sambandshål är det lämpligt att manschetterna i de förmodade sambandshålen hålls öppna under injekteringen. När ett sambandshål upptäcks skall det pågående hålet injekteras enligt design (stoppkriterierna nedan). För sambandshålen finns två alternativ; 1) stänga manschetten för att senare rensa ur, eller 2) låta det flöda tills pågående injekteringshål är färdigt för att senare injektera sambandshålen.

#### **För steg 1, stängda manschetter**

- 1) Samtliga manschetter till sambandshålen stängs. Detta är lämpligt när flera hål har samband.
- 2) När det pågående injekteringshålet är färdiginjekterat, rensas samtliga sambandshål.
- 3) Gående nerifrån och sick-sack uppåt injekteras sambandshålen enligt design.
- 4) Om ytterligare sambandshål noteras skall dessa också behandlas som sådana.
- 5) De andra kvarvarande borrhålen injekteras sedan normalt.

#### **För steg 2, manschetter tillåts flöda**

- 1) Sambandshålen hålls öppna och tillåts flöda tills det pågående injekteringshålet är färdigt. Detta är lämpligt om det är enbart några få sambandshål eller att flödena av injekteringsmedel ur dessa är små.
- 2) Sambandshålen injekteras sedan nerifrån och sick-sack uppåt enligt design.
- 3) Om ytterligare sambandshål noteras skall de också behandlas som sådana.

#### **3.5.4 Stoppkriterier**

De stoppkriterier som gäller för silica sol är främst tidskriteriet. När halva geltiden är uppnådd sker ingen mer inträngning, d.v.s. maximala inträngningslängden är uppnådd, men trycket måste hållas till dess en nödvändig skjuvhållfasthet uppnåtts på gelen. Nödvändig skjuvhållfasthet beror på hur stor risken är för erosion, ju större desto längre injekteringstid. Enkelt uttryckt är risken för erosion större för djupt belägna tunnlar >100 m och mindre för grunt belägna. Risken för erosion minskas av ett stort överlapp mellan injekteringsskärmar och/eller injektering av s.k. stuffhål.

I nedanstående lista är stoppkriterierna punktade i kronologisk ordning, alltså den första punkten skall eftersträvas men om det inte fungerar kan nästa punkt fungera som stoppkriterie. Vid volymskriterie, X nedan, bör den inpumpade volymen anpassas till förväntad volym vid injekteringen, se avsnitt 6.2.3 Inledningsvis kan inpumpad volym sättas till 1,5 till 2 ggr den förväntade injekteringsvolymen men justeras sedan efter resultat. Maximal volym är den största accepterade volymen och bör anpassas mot risken för att nå ytan eller närliggande anläggningar men även acceptabel tid att försöka få ett borrhål tätt.



- 1) Injekteringen fortgår till fullgjord tid vid givet designtryck
- 2) När en batch är slut blandas en ny och även denna måste pumpas till fullgjord tid.
- 3) Vid en total inpumpad volym på X liter blandas en snabbare sats (motsvarande ca halva geltiden mot den tidigare) och pumpas även den minst 2/3 av geltiden. Geltider kortare än 10 minuter blir svårhanterliga och rekommenderas inte.
- 4) Vid total volym om mer än X liter avbryts injekteringen med silica sol och borrhålet injekteras avslutande med cement.
- 5) Vid täta borrhål och stillastående kolv (rörelse mindre än 1 mm/min) kan pumpningen avbrytas.

### 3.5.5 Kontroller av injekteringsmaterialen

- 4 Vi en normal satsvis pumpning kan geltiden enkelt kontrolleras genom kopprover som en löpande provtagning. I de första skärmarna tas ett kopprov på varje blandad sats. När en repeterbarhet uppnåtts kan provningen glesas ut till enbart var tredje till femte sats. Kontrollerna under injektering av silica solen samt utrustning visas i tabell 3-3 nedan.

*Tabell 3-3. Egenskaper på silica solen som kontrolleras i fält samt utrustning för kontroll.*

Egenskap	Utrustning
Geltid	Engångsmugg av plast
temperatur	termometer

Temperaturen mäts enkelt direkt i omröraren och används som en dokumentation för att eventuellt påvisa förändrade geltider under arbetets gång, speciellt viktigt är det när nya leveranser av silica sol sker och vid temperaturväxlingar i vädret; morgon och kväll samt över året. Hur provningen kan se ut visas nedan.

*Figur 3-7. Bild över förprovingen i fält. Bilderna är från ett försök i Hallandsås*



Utöver temperaturen på silica solen skall även temperaturen i berget mätas, exempelvis av uttrinnande vatten från borrhål. Bergtemperaturen kan skilja sig, speciellt vid påslaget av tunneln jämfört med en bit längre in i tunneln.

Vid nya leveranser kan man av tillverkaren kräva en mer utförlig analys av silica solen, såsom koncentrationen av bas ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), specifika ytan, viskositeten samt kiselkoncentrationen.

### 3.5.6 Kontroller efter avslut av injekteringen

Silica sol som injekteringsmaterial i hårt berg är fortfarande relativt nytt och långtidserfarenheten av detta material är liten. De första injekteringsförsöken i Sverige utfördes så sent som 2002 (Axelsson och Nilsson, 2002). Pga kunskapen om silica sol är relativt ny är det viktigt att väl dokumentera observationerna. Observationerna kan sedan sammanställas och föras vidare för en uppföljning av beställaren..

Observationer och noteringar som kan ge ytterligare lärdomar och utveckling är av följande art

I borrhålen efter injektering	Förutsättningarna
Gelad plugg	Torra borrhål
Rinnande eller trycks pluggen ut	Grundvattentryck, geltider
Läcker borrhålen	Läckaget innan injektering och även efter

Nedan följer en kort beskrivning av observationerna

- Har silica solen gelat i borrhålen, eller inte

Ibland har det noterats att borrhålspluggen "farit ut" då manschetten har tagits bort. Orsakerna är inte helt utredda men beror av en mängd faktorer såsom tätt håll från början (innestängd luft som trycker ut pluggen), utspädning av silica solen vilket sänker hållfastheten (en annan sorts pumpning kanske krävs). Borrhålet hade inte pumpats tillräcklig lång tid kanske beroende på ytläckage eller sambandshål etc.

Ett hål som visar en fullt utbildad plugg efter utsprängning visas nedan.

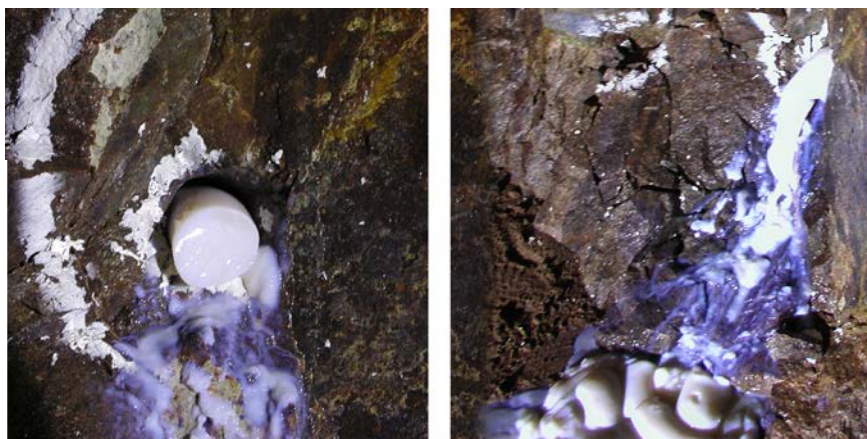


Figur 3-8. En bra silica sol plugg i ett borrhål. Bild från Hallandsås.

- Läckande borrhål

Borrhålet läcker trots att det injekterats. Notering bör göras om läckaget kommer ytligt eller om det droppar från själva borrhålspluggen. En åtgärd kan vara att sätta manschetten mer ytligt eller plugga hålet med lämpligt injekteringsmedel av typen styvt cementbruk eller polyurethane samt injekteringsteknik. En mycket viktig sak i detta sammanhang är följande. Att silica sol har valts som injekteringsmedel beror främst på små läckage och därmed små sprickvidder. Detta gör att det är svårt att uppnå en fullständig tätning eftersom inträngningslängden är mer begränsad i de ännu mindre sprickorna än vad designen vill nå. Resultatet kan bli att vissa borrhål läcker, men de skall läcka mindre än de gjorde innan injektering. Läger man till kanalflöden till bilden av vad som kan åstadkommas blir det än mer svårt att visa på att en tätning kan erhållas. Vissa kanaler kommer bli tätade med injekteringen men vissa kanaler har inte träffats av borrhålen och har därmed inte kunnat tätas. Notera dock att ett läckande borrhål omedelbart inte betyder att sprickan inte tätats. En bild som illustrerar ett läckande borrhål samt att pluggen håller på att komma ut visas i Figur 3-9.

*Figur 3-9. Bild på en mindre lyckad injektering av ett borrhål. Silica sol pluggen håller på att fara ut ur borrhålet samt till höger så har hela pluggen farit ut som korvar och lagt sig på backen. Bild tagen från Törnskogstunneln.*



### 3.6 Kontroller av bergets täthet

Efter utförd injektering kan täthetsresultatet kontrolleras genom att borra kontrollhål. Hydrauliska tester i injekteringshål och i kontrollhål jämförs. Om värdet, exempelvis det specifika flödet  $Q/dh$  av de hydrauliska testerna i kontrollhål är lägre än värdet i injekteringshål har injekteringen haft effekt. Storleken av effekten skall sättas i relation till önskvärt resultat, oftast mätt som ett inläckage per meter tunnel. Eftersom skaleffekter samt genomförandet av de hydrauliska testerna har stor påverkan kan ett inflöde i ett borrhål inte direkt jämföras med det önskvärda inflödet till tunneln. En rekommendation är att jämföra vilken hydraulisk sprickvidd, se Bilaga A, som skulle tätas för att klara inläckagekravet och sedan använda medianvärdet av det specifika flödet för samtliga kontrollhål. Medianvärdet kan sedan räknas om som en hydraulisk sprickvidd som sedan jämförs med sprickvidden för det otätade berget (flödet i injekteringsborrhålen). Den täthetsfaktor man sedan kan utvärdera bör åt-

minstone hamna i storleksordningen 50 eller mer för att säga att injekteringen är lyckad (jämför med ekvationen för beräkning av inläckaget till en tunnel i avsnitt 5.2.1). Observera att kontrollhålen enbart ger en bedömning av hur väl injekteringen lyckats.

Uppföljning. Om inläckaget till tunneln mäts i mätvallar bör flödet mätas under en länge tidsrymd, flera år eller mer. Om en droppkartering görs för att exempelvis sätta dräneringsmattor, bör även droppkaraktäriseringen utföras flera gånger under en längre tidsrymd. Mätvallsresultat tillsammans med droppkarteringsdata utgör en god grund för bedömning av beständigheten hos ett injekteringsmaterial. Dock är det viktigt att droppkarteringen görs på ett systematiskt sätt med tidsangivelser, och att samtliga dropp karteras över en bestämd sträcka.

### 3.7 Utveckling av blandningsförfarande och utrustning

Potentialen för att få en tidseffektiv injektering med silica sol är stor. Den styrbara och kontrollerbara geltiden är en utveckling som är mycket positiv ur ett materialperspektiv. Spillet som fås vid satsvis injektering är idag nödvändig men kan mycket väl minimeras. Att koppla åtgång mot vattenförlust kan vara en första väg att nå mindre spill.

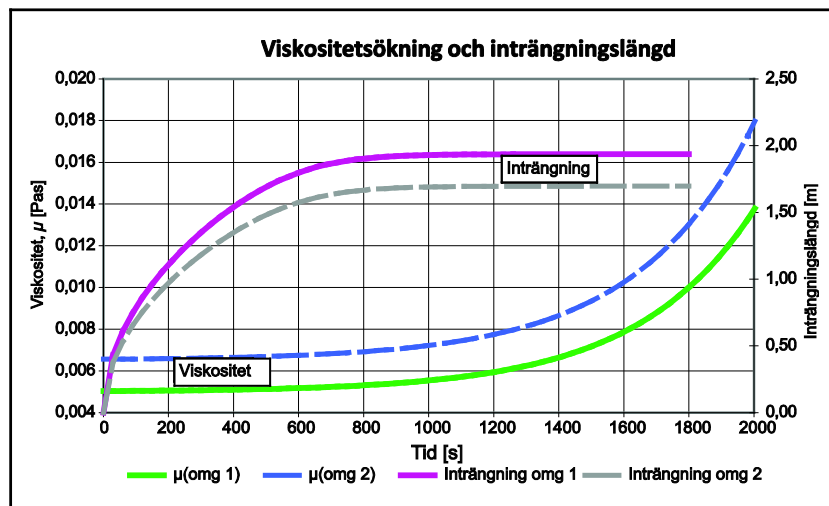
Den stora utvecklingspotentialen är att frånga de traditionella kolv pumparna mot exempelvis kugghjulspumpar eller flera parallellkopplade kolv pumpar (likt en högtryckstvätt) som kan ge stabila flöden och stabila tryck.

En förutsättning är dock att styrbara geltider behålls och det möjliggörs idag av att två pumpar kan parallellkopplas där den ena pumpar silica sol medan den andra pumpar saltlösningen. Båda pumparna jobbar med samma tryck och är försedda med backventiler. Blandningen görs vid manschettmunstycket med en inbyggd spiral eller med en mekanisk omrörare (det är osäkert om det senare finns på marknaden). För att få den styrbara geltiden kan pumpen för saltlösning monteras med en reglerventil som ger liten mängd saltlösning i början av injekteringen och sedan successivt ökande (eller reglera saltstyrkan). Regleringen på en sådan pump bör simulera den önskvärda viskositetskurvan.

En mer nära framstående utvecklingspotential är en injektering med kontinuerlig sats. Med detta menas att istället för att hålla ut det överblivna materialet från tidigare injekteringsats så blandas den upp med en ny sats, se princip i Figur 3-10. Jämför också med Bilaga A. Detta är möjligt om satsen inte gelat och den kvarvarande mängden inte är för stor i förhållande till nästkommande sats. En uppmärksam injekterare kan styra detta förlopp men det kräver än så länge manuell invägning av mängderna. Används detta förfaringssätt är det lämpligt att tillåta geltider med en variation på 5 minuter (Designad geltid  $\pm 5$  min). Injekteringstiden sätts då alltid efter den längsta geltiden. I två projekt har detta testats, i Törnskogstunneln och i en efterinjektering i Göteborg (Funehag och Gustaf-

son, 2005 och Janson et.al 2010). Metoden framarbetades under gång där åtminstone 30 % av kvarvarande mängd kunde blandas ut med en ny. Högre andel än 40 % av den överblivna satsen bör inte användas då inträngningslängden direkt påverkas genom att viskositeten på den nya blandningen blir högre. För att säkerställa hur stor andel den överblivna satsen kan utgöra när den utblandas måste detta testas i laboratoriet.

Figur 3-10. Exempel på hur viskositet och inträngning påverkas av när en gammal sats blandas med en ny. Heldragen linje är en ny blandning och streckad är en gammal blandning inblandad med en ny vilket ger en något högre viskositet.



Vid kontinuerlig blandning måste extra uppmärksamhet läggas på blandningsförhållande och erhållna geltider. När den äldre blandningen blandas ut med en ny görs detta genom att öka saltmängden eller mängden silica sol i den tillkommande blandningen. Ett vanligt förekommande fall är att ett borrhål har injekterats med en längre geltid, säg 38 minuter medan nästkommande borrhål skall injekteras med en geltid på 30 min. Det ordinarie blandningsförhållandet är förinställt på 38 minuter och utan att ändra de förinställda parametrarna kan då nästa blandning utföras med en högre mängd saltlösningen, i detta fall ytterligare 2,2 kg. Om istället en längre geltid önskas blandas ytterligare silica sol. Tabellen nedan visar fyra exempel på en sådan blandning (Tabell 3-4). Detta gäller dock endast då satsen är nyblandad. Har blandningen börjat gela gäller rekommendationen att kassera och göra rent.

Tabell 3-4. Justering av blandningsförhållande.

Ordinarie Blandningsratio	Geltid	Sökt geltid	Förväntad ratio	Ratio i vikt för ordinarie blandning	
				105 kg sol	21 kg salt
5,0:1	38	30	4,5:1	-	+2,2 extra
5,0:1	38	22,5	4,0:1	-	+5 extra
4,0:1	30	30	4,5:1	+12,5 extra	-
4,0:1	30	38	5,0:1	+25 extra	-

## 4 Problem och åtgärder vid injekteringsarbetet

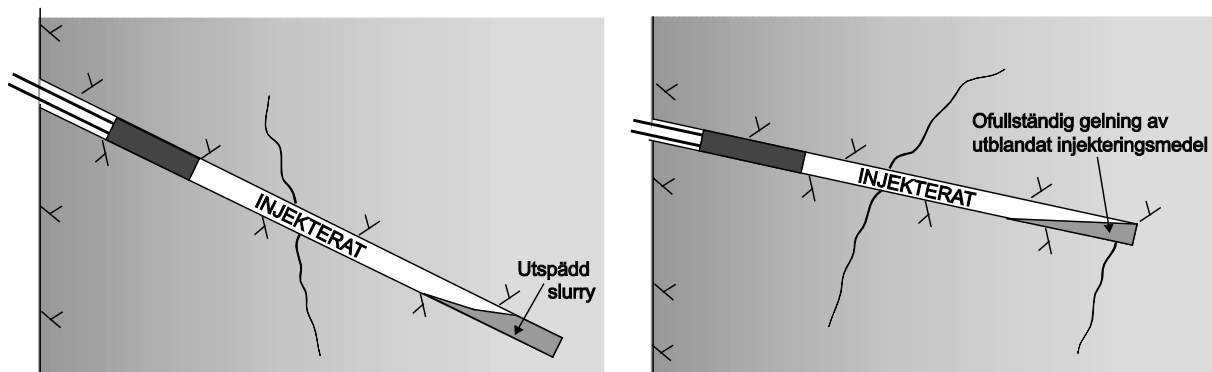
### 4.1 Bergets grundläggande inverkan på injekteringen

Vid injektering uppstår det ofta ett eller annat ”problem”. Problemets karaktär är kopplat till hur berget är beskaffat. Ett vanligt så kallat problem som ofta rapporteras från stuff är ytläckage eller återslag.

När silica sol används startar ofta ytläckaget som en mindre stråle av mjölkig vätska ut ur berget. Efter hand som trycket ökar, ökar mängden läckage men avtar när silica solen börjar gela. Rent praktiskt uppfattas detta som ett problem men teoretiskt påverkar det inte resultatet, dvs under förutsättning att trycket stiger och når designtryck. Om ett ytläckage ger stor bruksåtgång (stora volymer) bör injekteringstekniken justeras enbart om designtrycket inte nås eller om injekteringstiden inte nås innan en ny blandning får göras.

#### 4.1.1 Möjliga orsaker till utspädning

Problem som är kopplade till hur injekteringsskärmen är utformad är generellt att det står vatten i en del av hålen, de nedåtlutande borrhålen.

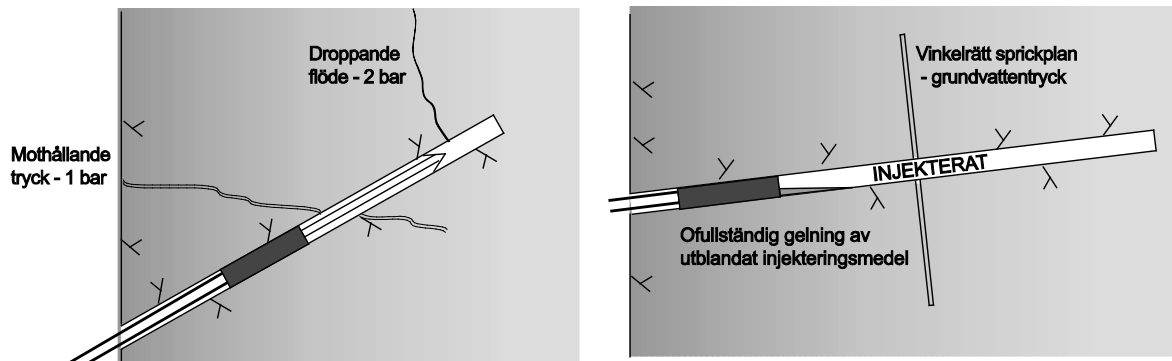


En del av silica solen blandas med det vatten som är kvar i borrhålet och blir till en ”gegga”. Den gelade silica solen som står i kontakt med geggan eroderar långsamt ner. Kvarvarande gelad sol i borrhålet får efter hand för liten kontaktyta mot berget och skjuvkrafterna blir därmed mindre än det påliggande trycket och resultatet blir att gelen glider ut. Visuellt verkar hålet först läcka ganska stora mängder vatten men så snart trycket sjunkit tillbaka avtar detta och flödet ställs in i jämvikt.

För att undvika detta problem är det viktigt att vattnet i borrhålet verkligen pumpas ut innan injekteringen startar.

*Figur 4-1. Nedåtriktade borrhål. Vänster bild visar ett borrhål där det finns vatten kvar. Vattnet blandas med silica solen till en icke härdande ”gegga”. Höger bild där kvarvarande vatten i borrhålet blockerar en spricka från att bli tätad.*

Ett annat problem som även kan förekomma på uppåtlutande hål är att silica solen inte gelar. Vänster bild i Figur 4-2 visar en orsak till detta.



Figur 4-2. Uppåtriktade borrhål. Vänster bild visar på problem med droppande borrhål i samband med lågt uppnått tryck vid pumpning. Höger bild ett injekterat borrhål med en mindre kil där gelning ej har skett pga utblandat injekteringsmedel. Annars är det en perfekt träff på vinkelrätt sprickplan med full inträngning.

Problematiken i den vänstra bilden i Figur 4-2 beror på ytliga sprickor som orsakar en trycksänkning i borrhålet. Det kan liknas med försök som gjordes i Äspös forskningstunnel TASS (Funehag och Emmelin, 2010). Innestängd luft och vatten pressades ut ur borrhålet under injektering genom en slang nedförd genom manschett. Tanken var att slangen skulle möjliggöra fullständig fyllning av borrhålet men resultatet blev istället att silica solen aldrig stelnade och kan bero på turbulent flöde (slangen genom manschetten stod i kontakt med atmosfärstryck) som gjorde en omblandning av silica sol och inrinnande vatten. På samma sätt kan det vara med en spricka som orsakar en tryckdifferens mellan borrhålet och tunneln. Enklaste lösningen på detta är att manschetten monteras längre in i hålet och därmed kommer förbi sprickan som släpper ut trycket. Alternativet är att sänka flödet och trycket för att långsammare fylla borrhålet och därefter återgå till designtryck.

Höger bild visar på att det, trots vakuumpumpning, finns inläckande vatten kvar även i uppåtriktade borrhål. Vattnet rinner in till borrhålet och vid injektering späder det ut silica solen. Generellt handlar detta dock om så små mängder att det ej påverkar resultatet. Ett sätt att förekomma problem med borrhål är att kategorisera borrhål utifrån förväntade problem. Borrhål som hamnar i kategorin med många åtgärder kan således utgöra bekymmer i form av att det kommer att ta extra tid och säkerligen större åtgång av bruk för att åtgärda dessa. I tabellen på nästa sida (Tabell 4-1) finns ett förslag som har testats för att förutsäga ”problemhål”. Dock skall det sägas att flera av åtgärderna redan görs ”per automatik” av entreprenören och tabellen skall mer ses som ett sätt att synliggöra de problem som injekteraren står inför.

Tabell 4-1. Förutsägelse av borrhål som kan orsaka problem för injekteraren.

**Steg 1. Kategoriseringar av injekteringsborrhål**

Kategori A (riktning)		Kategori B (Flöde)		Kategori C (annat)	
Nedåtlutande	A 1	< 2l/min	B 1	Ytläckage, lågt tryck	C1
Uppåtlutande	A 2	2-5 l/min	B 2	Annat	C2
		> 5 l/min	B 3		

**Steg 2. Förslag på åtgärder**

Benämning	Åtgärd
0)	Ingen, starta injektering
1)	Töm borrhål genom att öppna manschett
2)	Slangfyllning
3)	Vakuumpumpning
4)	Flytta in manschett
5)	Blanda och injektera en kortare styvare/geltid sats
6)	Blanda och injektera en kortare styvare/geltid sats, samt sänk trycket

**Steg 3. Kombinationer av kategori på hål samt åtgärder**

Kombination	Åtgärd	Kombination	Åtgärd	Kombination	Åtgärd
A1+B1	2 och 3	A2+B1	1 och 3	A1/A2+C1+B1	4
A1+B2	0, 2 samt 3	A2+B2	1	A1/A2+C1+B2	4 och 5
A1+B3	0 och 2	A2+B3	0	A1/A2+C1+B3	4, 5 och 6

**4.1.2 Evakuering av luft och vatten ur borrhål**

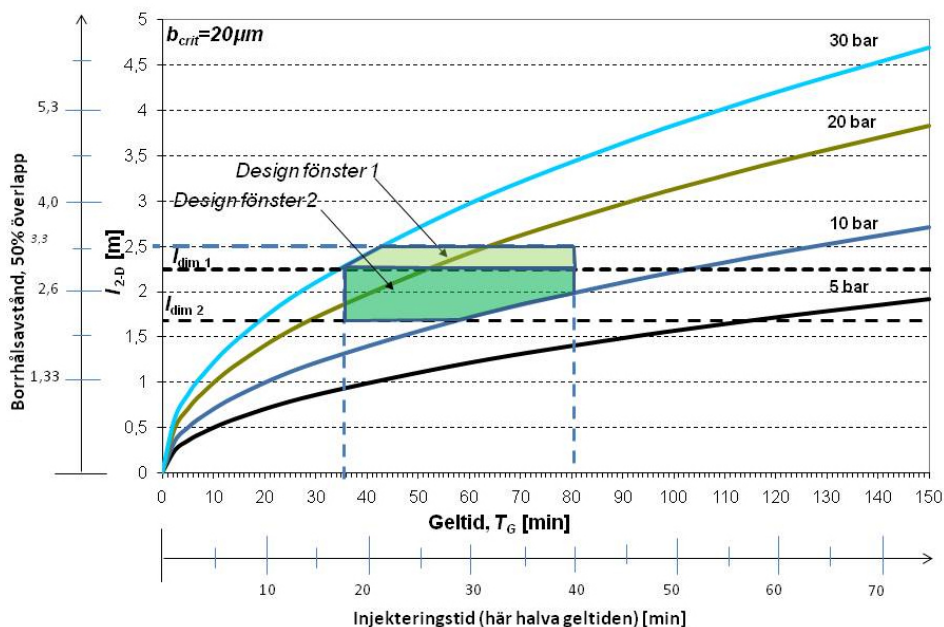
På senare tid har en nyutvecklad produkt, baserad på en vakuumpump, använts i ett antal projekt. Syftet är att få bort vatten och luft ur borrhålet innan injekteringen startar. Vinsten är att hålfyllnaden och att komma upp i injekteringstryck går fortare och samtidigt säkerställa att borrhålen blir helt fyllda av injekteringsmedel. Systemet består av två delar; en pump med en tank på 150 liter som skapar ett vakuum och ett ventilpaket som kopplas på manschetten. Ventilpaketet möjliggör att föra ner en slang till botten på borrhålet (nedåtlutande borrhål). Slangen står i kontakt med luften och gör så att vatten kan sugas ut genom manschetten till tanken. Först töms borrhålet på vatten, det tar ca 1-2 minuter för ett normalt injekteringshål, sedan dras slangen ur och borrhålet försätts under vakuum. Detta kan göras i ett antal borrhål framför kommande injekteringshål.



Dock så monteras inte ventilkassetten bort förrän strax innan injekteringen i aktuellt borrhål skall starta. Uppåtlutande borrhål behöver inte tömmas på vatten via vakuumslangen utan enbart försätts under vakuum. Vakuumsystemet har använts för flöden mindre än 2 l/min i borrhålet.

## 4.2 Utförande av injekteringen med hänsyn till observationerna.

Genom att upprätta flera designfönster, se avsnitt 6.3 samt Bilaga A, där dimensioneringskravet på inträngningslängd uppnås kan den mest lämpade injekteringstekniken för borrhålet eller skärmen appliceras för ett designfönster. Om den valda första injekteringstekniken inte är lämplig kan borrhålsavståndet minskas vilket ger ett nytt fönster för val av injekteringsteknik. Att borra tätare innebär inte alltid att den första skärmen skall borras med fler borrhål utan att den kompletteras med fler borrhål utifrån resultatet. I figuren nedan (Figur 4-3) visas exempel på hur två designfönster är upprättade där den tillhörande åtgärdstabellen (Tabell 4-1) baserat på hur ett antal observationer kan se ut.



Figur 4-3. Grund för en åtgärdstabell enligt Tabell 4-2 baserat på observationer. Dimensioneringskravet är en viss inträngningslängd i en spricka med en sprickvidd på 20 µm.

Tabell 4-2. Exempel på åtgärdstabell baserad på observationer under injekteringen.

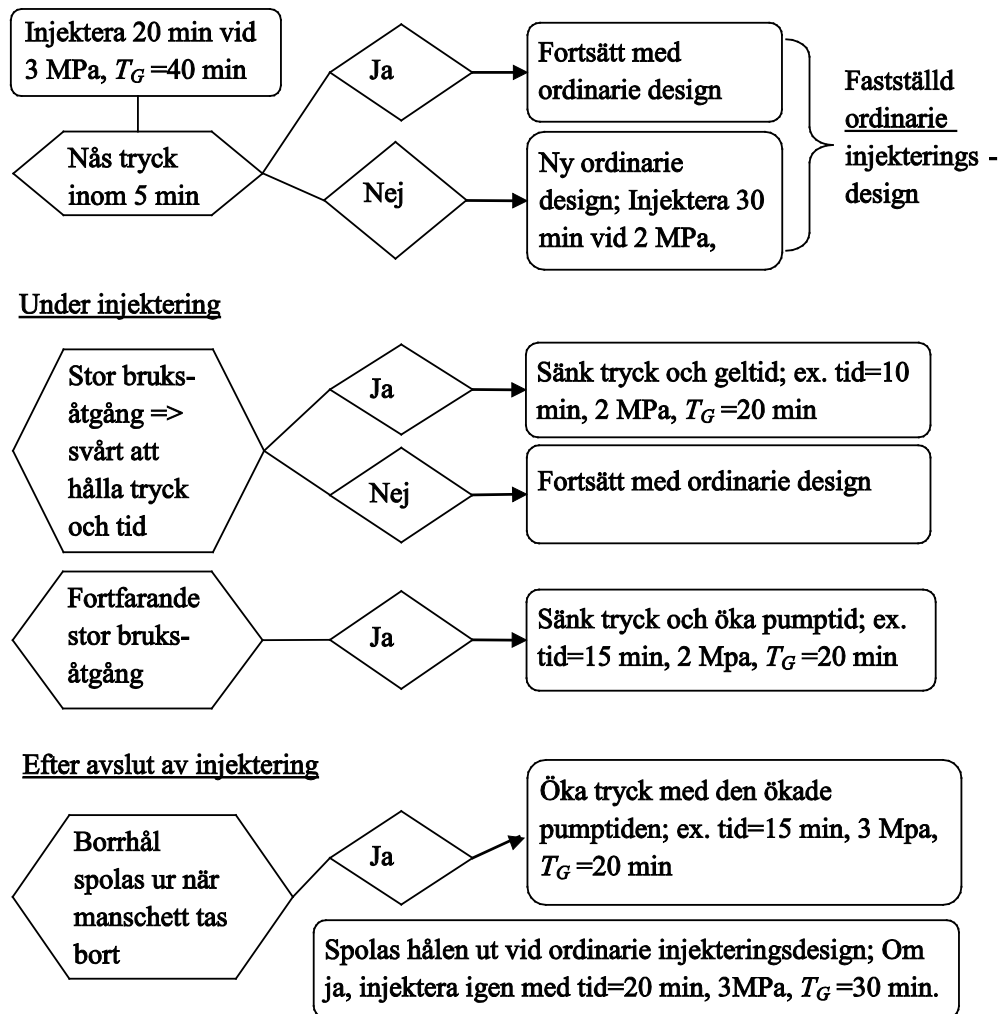
Steg i injekteringen	Brukstyp	Injekterings-teknik	Om följande observeras	Alternativ teknik
<b>Under injektering, Startläge, borrhålsavstånd 3,3 m</b>	Ordinarie Geltid ( $T_G$ )=40 min	3 MPa/20 min	Inte når designtryck inom 5 min	2,0 MPa/ $T_G$ =60 min/30 min
<b>Under injektering</b>	Ovan	Ovan	Ytläckage=> stora volymer=> kan ej hålla designtryck eller tid	Sänk tryck, snabbare geltid; 2,0 MPa/ $T_G$ =20 min/10 min
<b>Under injektering</b>	Sänkt geltid till 20 min	Alternativ teknik enligt ovan	Fortfarande stora volymer och inte fullt tryck	2,0 MPa/ $T_G$ =20 min/öka pumptid till 15 min OBS det finns risk för att borrhålet spolras ur när manschett öppnas.
<b>Efter avslutad injektering i hålet med stora volymer, se rad ovan</b>	Enligt ovan	2,0 MPa/ $T_G$ =20 min/15 min	Borrhålet spolras ur när manschett demonterats	Injektera igen vid 3 MPa/15 min
<b>Efter avslutad hålinjektering</b>	Ordinarie $T_G$ =40 min	3 MPa/20 min	Borrhålet spolras ur när manschett demonterats	Injektera igen $T_G$ 30 min 3 MPa/20 min.

Tabellen visar att styrningen enbart görs på tryck och tid. Det centrala är att trycket nås och kan hållas under den satta injekteringstiden. Således kan följande observationer och åtgärder sammanfattas till:

- **Uppnår ej designtryck**, åtgärden är att öka geltiden och sänka trycket
- **Uppnår ej designtid**, åtgärden är att sänka geltiden och öka trycket

Med ovanstående förslag på åtgärder kan designkriteriet på en viss in-trängningslängd i den kritiska sprickvidden alltid uppfyllas. I vissa fall ger detta oacceptabel åtgång av bruk och tar för lång tid. Ibland krävs att borrhålet pumpas klart (med nådd tid och tryck) utan att designkriteriet uppfyllts. Det är viktigt att på arbetsplatsen kommunicera att kriteriet inte nås, men ett aktivt val har utförts för att spara tid och bruk.

Ett tolkat flödesschema utifrån ovanstående "Observationstabell" kan se ut såsom följer (Figur 4-4). Ett sådant schema skall finnas till hands för själva injekteraren, på plats i injekteringsriggen.

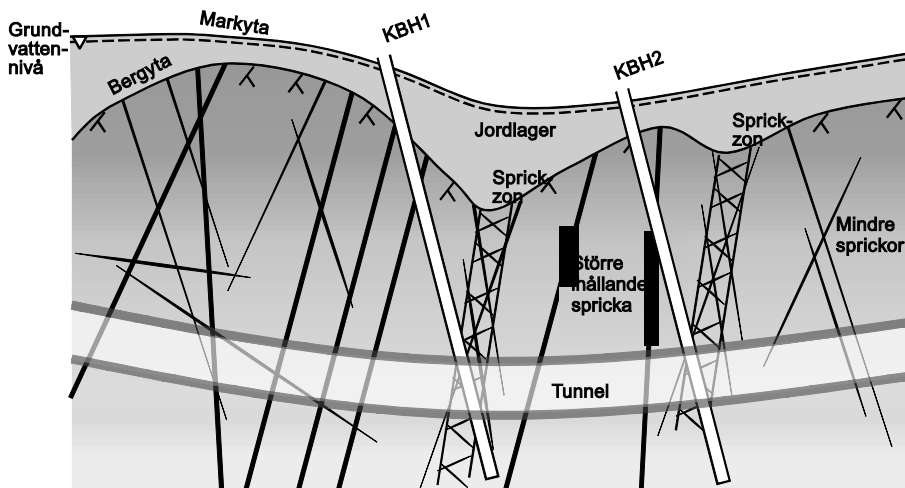


Figur 4-4. Ett principiellt flödesschema med förslag till åtgärder när stoppkriterierna tryck och tid ej kan uppnås.

## 5 Grundläggande egenskaper och teorier

### 5.1 Allmänt

Ur injekteringssynpunkt är bergets sprickstrukturer och dess olika egenskaper väsentlig information för att kunna få ett bra tätningsresultat. En enkel schematisk modell över en tunnel och ovanliggande berg visas i figuren nedan



Figur 5-1. En schematisk profil över tunnel, berg och ovanliggande jordlager med utritad grundvattennivå.

I denna skala visas enbart de större sprickstrukturerna eller sprickzonerna, som också är de man fokuserar på när olika injekteringsinsatser bestäms. Det är också oftast dessa som undersöks med hjälp av borrhål i kombination med hydrauliska tester. Från borrhålen kan även sprickintensitet och sprickornas egenskaper undersökas. Från de hydrauliska testerna och sprickinformationen kan bergmassans genomsläpplighet för vatten beräknas genom att utvärdera transmissiviteten,  $T$  och vidare uppskatta sprickornas hydrauliska aperturer. För en utförlig beskrivning om olika hydrauliska tester i borrhål och uppskattning av den hydrauliska konduktiviteten hänvisas till Gustafson, (2009). En injekteringsdesign kan gälla för olika delar av tunneln. I en del där förväntan är att inläckaget är stort pga en sprickzon eller i delar där tätare berg förväntas. Sammanfattat:

- 1) Giltig för borrhål i varje injekteringskärm. I detta fall kan valet av injekteringsmedel och injekteringsteknik styras av de hydrauliska testerna i hålen (vattenförlust eller naturligt inflöde). Grundantagande behövs då för hur inflödet ur hela borrhålet förhåller sig till den största sprickan. Genom att upprätta en design där inflödet i varje borrhål mäts kan den största hydrauliska sprickvidden från borrhålet beräknas. Det enklaste antagandet är att det totala inflödet till borrhålet kommer från endast en spricka.
- 2) Giltig för en prognosticerad del av tunneln, typberg/ bergklass, och då kan en eller flera skärmar injekteras efter en förutbestämd design.

## 5.2 När är silica sol aktuellt

Från förstudien och projekteringen bör det anges vilka injekteringskärmar/borrhål som skall injekteras med silica sol. Besluten kan fattas antingen generellt på delsträckor av tunneln eller i detalj för borrhål med vissa givna kriterier, exempelvis given vattenförlust eller inflöde.

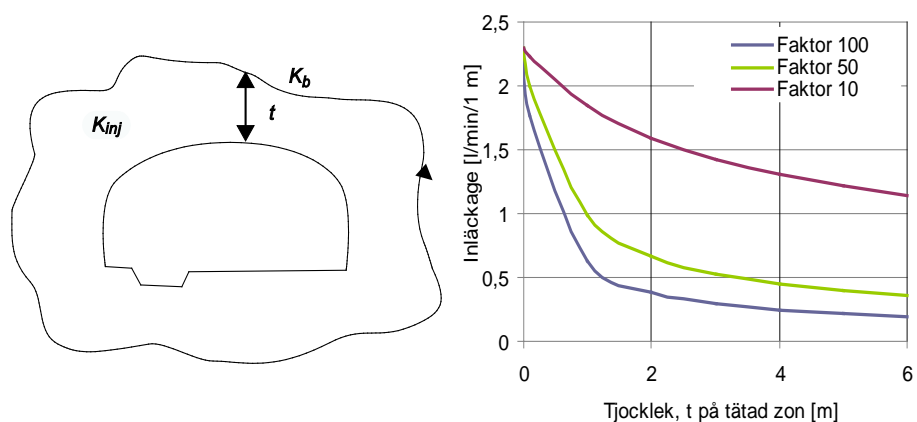
### 5.2.1 Översiktlig bedömning inför dimensionering

Genom att injektera berget med ett injekteringsmedel, som tränger in i bergets sprickor, erhålls en lägre konduktivitet i det injekterade området jämfört med bergets ursprungliga hydrauliska konduktivitet ( $K_b$ ). Konduktiviteten i det injekterade området benämns  $K_{inj}$  (m/s). Den zon med lägre konduktivitet benämns oftast som tätad zon och har en viss utbredning (eller tjocklek),  $t$ , se Figur 5-2.

Figur 5-2.

Vänster: Illustration av benämningarna  $K_{inj}$  (konduktivitet efter injektering) och  $K_b$  (bergets ursprungliga konduktivitet), runt en tunnel.

Höger; Visar förhållande mellan inläckaget per tunnelmeter och den tätade zonens tjocklek,  $t$ , baserat på ekv 3-1 och för olika förhållande mellan  $K_b$  och  $K_{inj}$  (faktor 10, 50 och 100). I exemplet gäller att  $H=50$  m,  $L=1$  m,  $r_t=4$  m och  $\zeta=5$ .



Med en uppskattning av bergmassans ursprungliga konduktivitet,  $K_b$ , och den injekterade zonens konduktivitet,  $K_{inj}$ , kan inläckaget efter injektering i en bergtunnel uppskattas med hjälp av sambandet (Gustafson, 2009):

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_b \cdot \Delta h \cdot L}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{r_t}\right) + \left(\frac{K_b}{K_{inj}} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi} \quad (5-1)$$

där  $q$  är tunnelinläckaget,  $\Delta h$  grundvattentrycket,  $L$  tunnellängd,  $r_t$  ekvivalent tunnelradie,  $t$  den injekterade zonens utbredning och  $\xi$  skinfaktorn. Inläckaget till en oinjekterad tunnel sätts  $K_{inj} = K_b$ .

Genom att bestämma ett inläckagekrav på  $q$  kan  $t$  och  $K_{inj}$  uppskattas med hjälp av ekvation 3-1.

En markant reduktion av inläckaget fås redan när utbredningen,  $t$ , är 2 till 3 m i tjocklek. Att ta hänsyn till den tätade zonens utbredning är en faktor som bör beaktas både vad gäller inträngningslängd av injekteringsmedel, planerad förstärkning såsom bultning samt borrhålsgeometrin, dvs hur

långt borrhålet sticker utanför tunnelkontur och överlapp mellan injekteringsskärmarna.

Vilken täthet, dvs  $K_{inj}$ , som kan uppnås i termer av hydraulisk konduktivitet i den injekterade zonen är inte entydigt. Den injekterade zonens hydrauliska konduktivitet kan ej mätas direkt i bergmassan, utan indirekta metoder får användas för att uppskatta den. Den mest lämpade och snabbaste mätmetoden är med hydrauliska tester i borrhål. Med analyser och de hydrauliska testerna kan prognoser göras huruvida det eftersträvade inläckaget mätt i mätvallar kan uppnås. En möjlighet är att upprätta provisoriska mätvallar under tunneldrivningen för att påvisa inläckaget i ett tidigare skede än i slutfasen av byggnationen.

Att uppnå en täthetsfaktor,  $K_b/K_{inj}$ , på mer än 50 är oftast önskvärt för att få en effektiv injektering. För att bedöma vilken täthet som kan uppnås med en viss injekteringsomfattning och injekteringsmedel har en viss erfarenhetssökning gjorts från utförda injekteringar. I det följande redovisas erfarenheter på vilken täthet som bedöms kunna erhållas vid injektering i uppsprucket hårt berg.

Bland förekommande kriterier för uppnådd täthet kan nämnas att i många undermarksprojekt är kriteriet för ominjektering, dvs ytterligare en injekteringsskärm vid samma tunnelfront, i storleksordningen  $3\text{-}5\cdot 10^{-8}$  m/s. Vidare är ett gränsvärde för att uppskatta uppnådd täthet kopplat till produktionsmässiga vattenförlustmätningar, där utrustningen oftast har en nedre mätgräns som motsvarar en konduktivitet på ca  $1\cdot 10^{-8}$  m/s (Dalmalm et al, 2000 och Persson et al, 2009). Detta innebär att lägre värden än motsvarande ca  $1\cdot 10^{-8}$  m/s ofta anges som ”täta hål”.

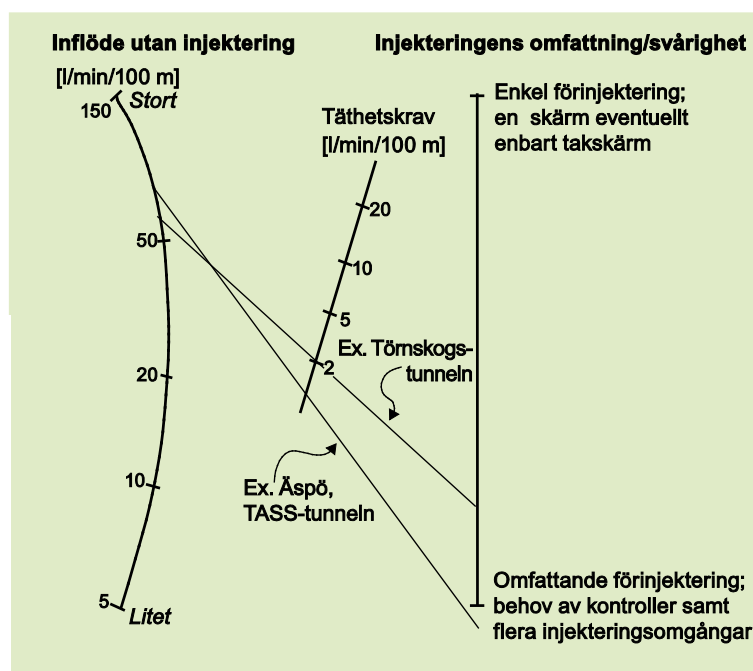
Baserat på erfarenheter från utförda injekteringar med cement i hårt uppsprucket berg, exempelvis (Stille och Andersson, 2008) och (Persson et al, 2009), är bedömningen att den hydrauliska konduktivitet, som normalt kan uppnås med cementinjektering är i storleksordningen  $10^{-8}$  m/s. Lägre konduktivitetsvärden, ca  $0,5\cdot 10^{-9}$  m/s, har rapporterats vid olika injekteringsförsök (Emmelin et al, 2004) och (Butron et al, 2008). Det bör noteras att de lägre värdena visar erfarenheterna från ett antal begränsade injekteringsskärmar under välplanerade försök.

För att uppnå en högre täthet så har det på senare år i Sverige gjorts försök med silica sol (Funehag, 2007), (Ellison, 2007) och (Butron et al, 2008). Dessa försök har utförts som ett antal begränsade injekteringsskärmar vid större tunnelprojekt. Injekteringsmetodiken vid de olika försöken har baserats på den erforderliga inträngningen hos silica solen.

Försöken med silica sol indikerar att en täthet med ytterligare en faktor på ca tio, i hydraulisk konduktivitet, kan uppnås jämfört med cementinjektering, dvs. en hydraulisk konduktivitet hos den injekterade zonen, på ca  $1\cdot 10^{-10}$  m/s. Ännu högre täthet med silica sol har uppnåtts i ett utvecklingsprojekt för SKB. Med två till tre injekteringsomgångar med silica sol uppnåddes en täthet på ca  $1\cdot 10^{-11}$  m/s (Funehag och Emmelin, 2010).

Planeringen och utförandet, dvs. handhavandet på plats, och övrig injekteringsteknik har också en stor betydelse för vilken täthet som kan uppnås. Vidare kan den lokala sprickstrukturen vara mer eller mindre gynnsam för att få ett bra injekteringsresultat.

Inför dimensioneringen behöver även en översiktlig bedömning göras om vilken injekteringsinsats som behövs. En grov bedömning av omfattning/svårighetsgrad visas i nedanstående diagram (Figur 5-3) (efter Bergman och Nord, 1982). Utgångspunkten är de ställda täthetskraven samt en uppfattning av inläckaget till den oinjekterade tunneln. Att nämnas bör att de i figuren angivna projekten bedömdes från början som svåra beträffande injekteringsinsatsen. Av denna anledning användes silica sol och de eftersträlvade täthetsmålen nåddes.



Figur 5-3 Diagram för bedömning av omfattningen av en injekteringsinsats utgående från bedömt inläckage till tunneln och ställda krav på tätheten (efter Bergman och Nord, 1982). I Figuren är två försök inritade, Försöket i Äspö i TASS-tunneln samt en 100 m sträcka i Törnskogstunneln.

### 5.2.2 Bedömning av penetrationsförmågan

Bedömningen av injekteringsmedlens penetrationsförmåga är inte entydig, varför vissa indirekta metoder används för att uppskatta den. De vanligaste metoderna görs i huvudsak på laboratorier och i någon typ av specialutrustning se Eriksson och Stille (2005) och Draganovic (2009). Kortfattat kan penetrationsförmågan grupperas i cementbaserade injekteringsmedel och icke-cementbaserade injekteringsmedel däribland silica sol.

Cementbaserade injekteringsmedel har pga dess partiklar en begränsad förmåga att penetrera en viss öppningsvidd. Försök har gjorts på laboratorier för att bestämma vilken kritisk vidd som cementbaserade injekteringsmedel har, se sammanställning av bland annat (Draganovic, 2009). Försöken resulterar oftast i en kritisk vidd, dvs där huvuddelen av injekteringsmedlen kan tränga in i en öppning på 50 till 100  $\mu m$ , beroende på bland annat cementsort, recept, blandning och försöksmetod.

Silica sol:s partiklar är som tidigare nämnts små, dvs ca en tusendel av cementpartiklarnas och några direkta laboratorieförsök har inte kunnat göras på motsvarande sätt som för cementbaserade medel. Via inläckagetester i flera projekt har en silica sol:s penetreringsförmåga bekräftats ner till hydrauliska sprickvidder av minst ca 10  $\mu\text{m}$  (Funehag, 2007).

Detta innebär att bedömningen av vilka sprickvidder som behöver penetreras för att uppnå täthetsmålen eller motsvarande är väsentligt för att besluta om vilken typ av injekteringsmedel som är önskvärt.

### 5.3 Sprickornas inverkan på designen

Från geologisk ytkartering och kärnkartering fås information om sprickors egenskaper, såsom längd, storlek och frekvens. Med en kärnkartering med tillhörande hydrauliska tester erhålls hydrauliska egenskaper om borrhålet och vid sektionsvisa hydrauliska tester även sprickornas transmissivitet. Vid tunneldrivningen påträffas också en mängd andra sprickor med olika längd, storlek, riktning samt vattenföringskapacitet. De sprickegenskaper som påverkar injekteringen är dess olika sprickvidd och sprickviddsfördelning, sprickfyllnad och hur sprickorna är förbundna med varandra. Vidare är både riktning och antal (sprickintensitet) viktiga parametrar ur injekteringssynpunkt.

Sprickors betydelse på designen kan kopplas i första hand till två delar, dels ner till vilken sprickvidd som behöver tätas och dels vilken skärmgeometri som är lämplig jämfört med sprickorientering.

#### 5.3.1 Minsta dimensionerande sprickvidd

Den minsta dimensionerande sprickvidden är central i designen då det är denna som bestämmer hur lång inträngningen måste bli för att klara inläckagekravet.

Sprickans förmåga att transportera vatten, dvs spricktransmissiviteten  $T$ , är proportionell mot kuben på sprickvidden, dvs en hydrauliska sprickvidd,  $b_{hyd}$ , fås med hjälp av spricktransmissiviteten:

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{\frac{12\mu \times T}{g \times \rho}} \quad (5-2)$$

där  $\mu$  är viskositeten,  $g$  är jordaccelerationen och  $\rho$  är vattnets densitet.



Med antagandet att det är en spricka som står för den huvudsakliga vattenföringen i en testsektion kan spricktransmissiviteten,  $T$ , bestämmas från inflödestesterna,  $Q$ , bestäms enligt:

$$T = \frac{Q}{2\pi \times \Delta h} \left[ 1 + \ln \left( \frac{L_t}{2r_w} \right) \right] = \frac{Q\rho_w g}{2\pi \times \Delta p} \left[ 1 + \ln \left( \frac{L_t}{2r_w} \right) \right] \quad (5-3)$$

Där  $\Delta h$  är grundvattentrycket, eller för vattenförlustmätningar är  $\Delta p$  pålagt övertryck,  $L_t$  sektionens längden,  $r_w$  borrhålsradien och  $\rho_w$  är vattnets densitet.

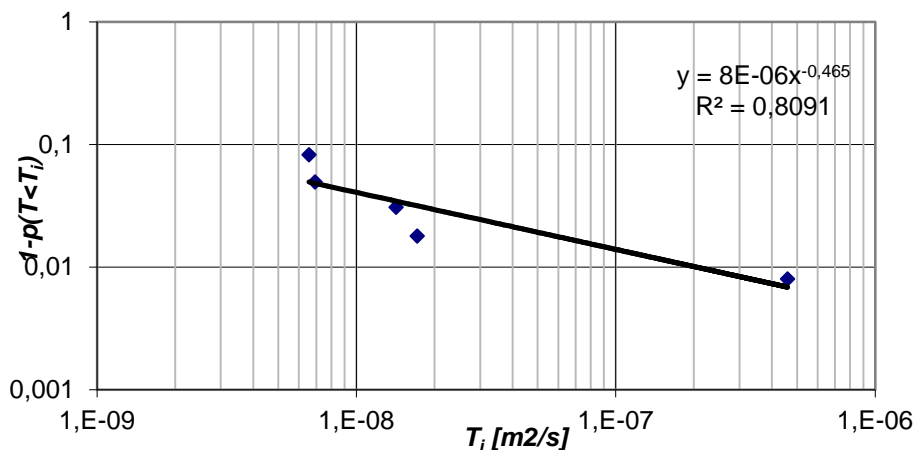
För korta tester, kort varaktighet, kan transmissiviteten,  $T$  sättas lika med den specifika kapaciteten ( $Q/dh$ ).

Om flera testsektioner med tillhörande sprickkartering har erhållits kan en fördelning av spricktransmissiviteten och sprickvidden göras. I bland annat Gustafson (2009) beskrivs hur dessa fördelningar kan upprättas. De enskilda spricktransmissiviteter längs borrhålet används som indata för att upprätta en paretofördelningen. En paretofördelning förutsätter att det finns ett fåtal sprickor med stor sprickvidd och många sprickor med liten sprickvidd (Gustafson och Fransson 2005). Genom nedanstående fördelningsekvation beräknas  $P(T < T_n)$ , d v s sannolikheten för att transmissiviteten,  $T$ , är mindre än sektionstransmissiviteten,  $T_n$ .

$$P(T < T_n) = 1 - \frac{(T_{max}/T_n)^k}{N + 1} \quad (5-4)$$

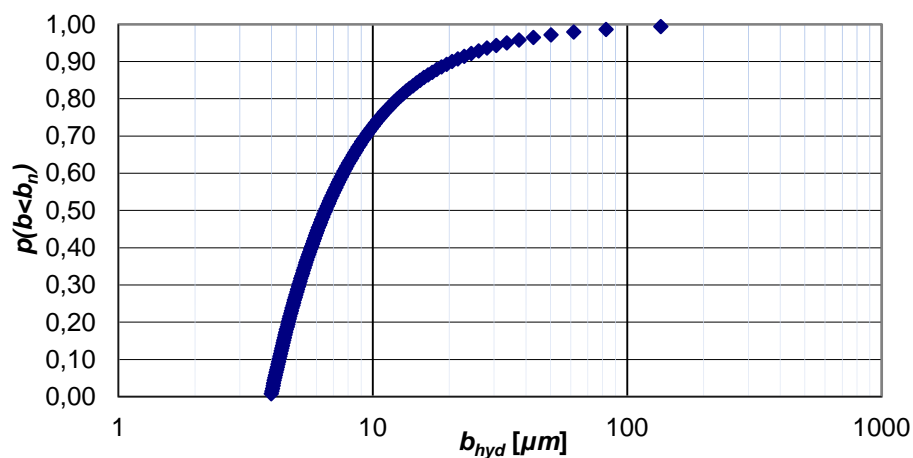
$n$  är antal sektionvisa transmissiviteter sorterade efter storlek och  $k$  är en konstant för paretofördelningen.  $N$  är det totala antalet sprickor för kärnborrhålet och  $T_{max}$  är transmissiviteten för den största sprickan.  $P(T < T_n)$ , alltså sannolikheten för att sektionstransmissiviteten är mindre än den totala transmissiviteten. Värdena som är framräknade plottas i ett diagram med  $\log(1 - P(T < T_n))$  mot  $\log(T_n)$ . Till dessa värden anpassas en linje vars lutning är konstanten  $k$ .

Metoden att använda paretofördelningen i injekteringsdesign finns beskriven (Gustafson et al. 2004). När fördelningen av transmissiviteter är framtagen kan denna direkt proportioneras i en fördelning av hydrauliska sprickvidder genom "cubic law". I nedanstående figur visas ett exempel på transmissivitetfördelning; paretofördelade spricktransmissiviter (Figur 5-4).



Figur 5-4. En upprättad paretofördelning av spricktransmissiviteter. Här visas ett exempel på ett kort kärnborrhål från Telias tunnel.

Fördelningen visar storleken på uppmätta sektionstransmissiviteter och den anpassade räta linjen är således paretofördelningen med ekvationen som visas i diagrammet; där konstanten, eller formfaktorn  $k=-0,465$ . Ekvationen används för att generera de sannolika hydrauliska sprickvidderna längs kärnborrhålet. Då problemet generellt är att det inte går att mäta enskilda sprickors flöden, dels för att testsektionerna inte är tillräckligt små samt att det inte går att noggrant mäta små inflöden behövs en sådan här fördelning. I nedanstående figur visas den genererade sprickviddsfördelningen (Figur 3-5).



Figur 5-5. Hydraulisk sprickviddsfördelning beräknad från paretofördelningen i Figur 5-4.

Figuren visar sannolikheten för att de hydrauliska sprickvidderna är större än ett visst värde; exempelvis sannolikheten att en spricka är mindre än  $100 \mu\text{m}$  är nästan 99 %.

Genom sprickviddsfördelningen beräknas vilken dimensionerade minsta sprickvidd,  $b_{\min}$ , som behöver tätas för att uppnå ett inläckagekrav. Varje sprickvidd i fördelningen ger ett individuellt enskilt inläckage till tunneln. Genom att dra ifrån varje enskild sprickas bidrag till inläckaget erhålls en minsta sprickvidd som behöver tätas. Sprickans enskilda bidrag görs via transmissiviteten (eller konduktiviteten  $K$ ),  $K_{inj}$  i inläckageformeln (ekv 5-1). Beroende på storleken på minsta dimensionerade sprickvidd kan

olika injekteringsmedel anpassas beroende på dess penetrationsförmåga. I nedanstående tabell visas exemplet från ovan där inläckaget till tunneln räknas med ekvation 5-1. Grundvattentrycket,  $H=35$  mvp, Längden,  $L=100$  m, ekvivalent tunnelradie,  $r_t=2,5$  m, tjocklek på tätad zon,  $t=7,5$  m.  $T_{tot}=2,4 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Tabell 5-1. Exempel på hur sprickviddsfördelningen används för att beräkna en dimensionerande sprickvidd.

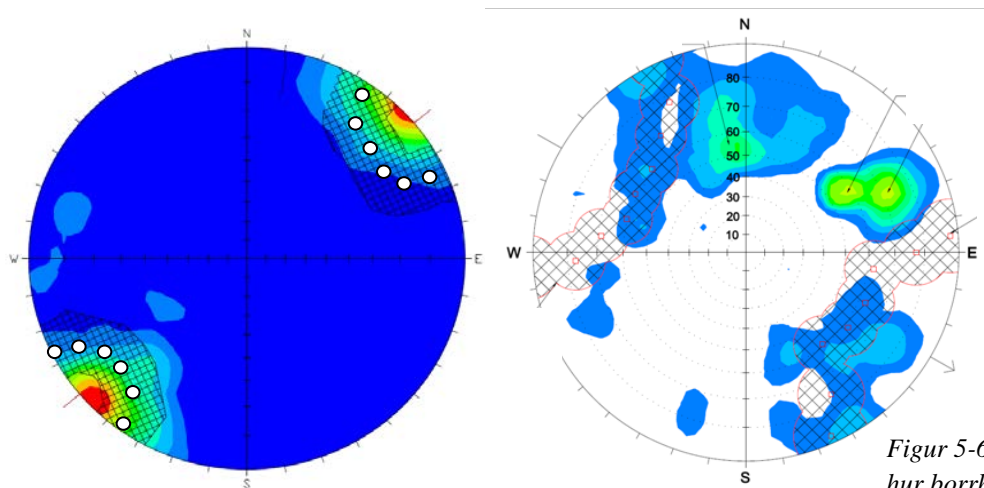
Minsta tätad spricka, $b_{min}$ [μm]	Beräknat inläckage, $q_{groud}$ [l/min·100 m]	$T_{groud}$ [m <sup>2</sup> /s]	Kommentar
Ingen	3,8	$2,4 \times 10^{-6}$	Utan injektering
136	2,9	$8,2 \times 10^{-7}$	Största spricka tätad
34	1,0	$1,3 \times 10^{-7}$	Kritisk sprickvidd

Som tabellen visar måste samtliga sprickor med en hydraulisk apertur ned till 34 μm tätas för att nå inläckagekravet på 1 l/min och 100 m tunnel. I och med detta angreppssätt fås en robust och ett härledbart designkrav.

### 5.3.2 Sprickorientering och skärmgeometri

I ett första skede fås sprickorienteringarna. Detta erhålls från geologiska karteringar från ytan eller från kärnborrhål. Att anpassa injekteringsskärmen helt och hållet till sprickriktningarna är svårt. Att riktningarna har betydelse för designen är dock tydligt samt att vid en normal förinjektering att samtliga sprickor inte träffas är också en del av analysen för att nå ett förutsägbart resultat av injekteringen. Även i detta läge kan en bedömning göras av behovet av efterinjektering.

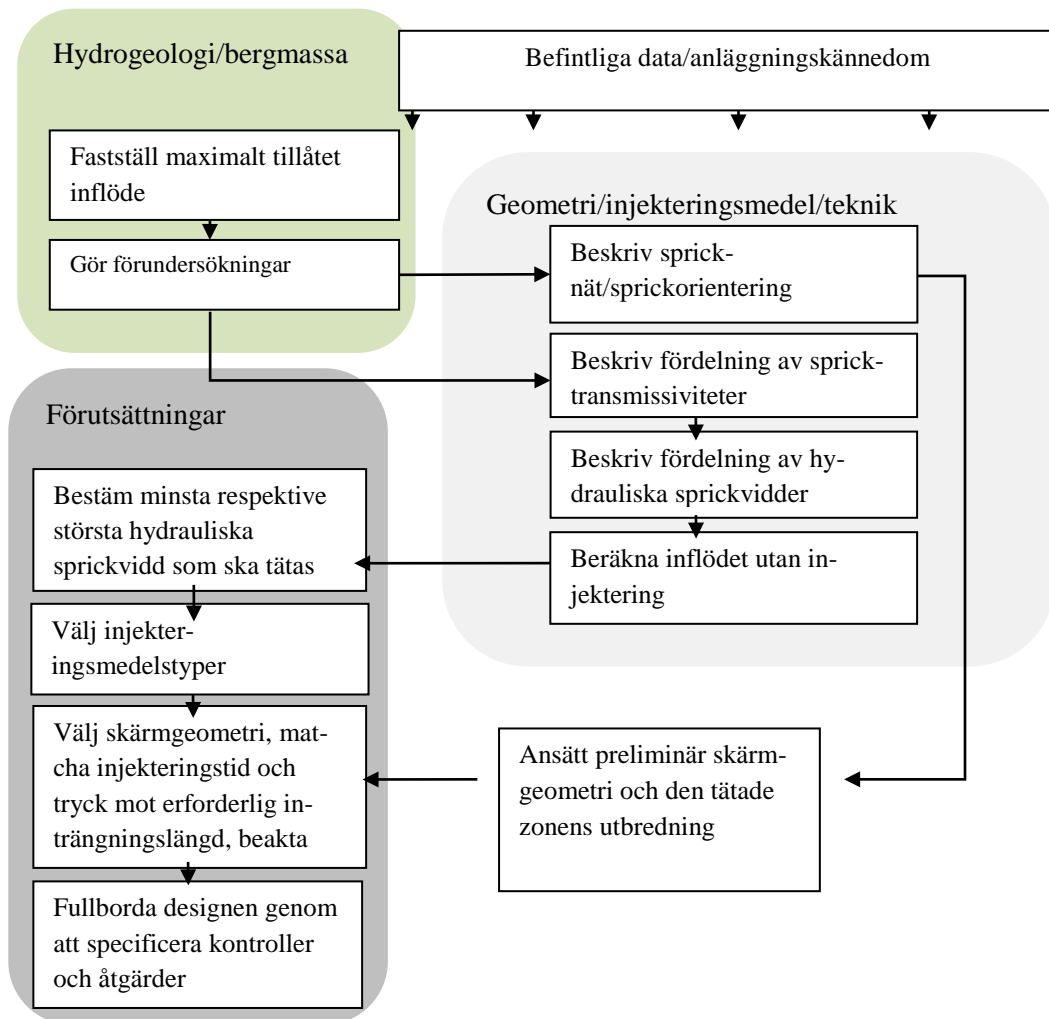
I följande visas ett resonemang på hur sprickriktningarna påverkar designen. Sprickdata som erhålls från den geologiska karteringen kan plottas i så kallade sprickrosor och i stereoplottar. Från dessa bilder kan dominerande sprickriktningar samt dess lutning utläsas. Med hjälp av denna redovisning kan sedan injekteringsskärmens geometri läggas på och justeras så att den träffar sprickor så optimalt som möjligt, se Figur 5-6. Den vänstra visar en typisk förinjektering (här från TASS-tunneln i Äspö) och den högra från en efterinjektering. Injekteringshålens riktningar är schematiskt markerade som ringar i vänstra figuren för att åskådliggöra principen. Borrhålet kan ses som en disk om borrhålet skärs vinkelrätt i riktningen. Till denna disk kan en normal ritas. Om normalen träffar sprickplanet vinkelrätt träffar även borrhålet planet vinkelrätt. Den initierade läsaren förstår att normalen till disken är densamma som borrhålsriktningen. Den yta som är markerad med raster motsvarar de sprickor som träffas av borrhål under en vinkel som avviker max 10 grader från rät vinkel. 10 grader används som ett antaget värde på felangivelserna både när det gäller inmätta sprickor och borrhålsavvikelse. Denna analys kan även användas för att förstå vilka plan som kan "läcka" efter utsprängningen av tunneln.



*Figur 5-6. Principfigur över hur borrhålsriktningar kan optimeras mot given sprickkartering. Den vänstra bilden från en förinjektering och den högra för en efterinjektering.*

## 6 Design av injektering med silica sol

Att upprätta en fullständig design av en injektering är både tidskrävande och kan uppfattas som svår. I nedanstående Figur 6-1 visas ett av de senaste använda schema som använts i ett större injekteringsprojekt, TASS-tunneln i Äspö (Funehag och Emmelin, 2010). Processen ses som en iterativ process när det kommer till skärmgeometrier där flera steg måste göras för att nå en något sånär optimerad injektering. Den slutliga designen när det gäller injekteringstekniken, tryck och tider görs på plats i tunneln.



Figur 6-1. Ett schema för att upprätta en injekteringsdesign (efter Funehag och Emmelin, 2010)

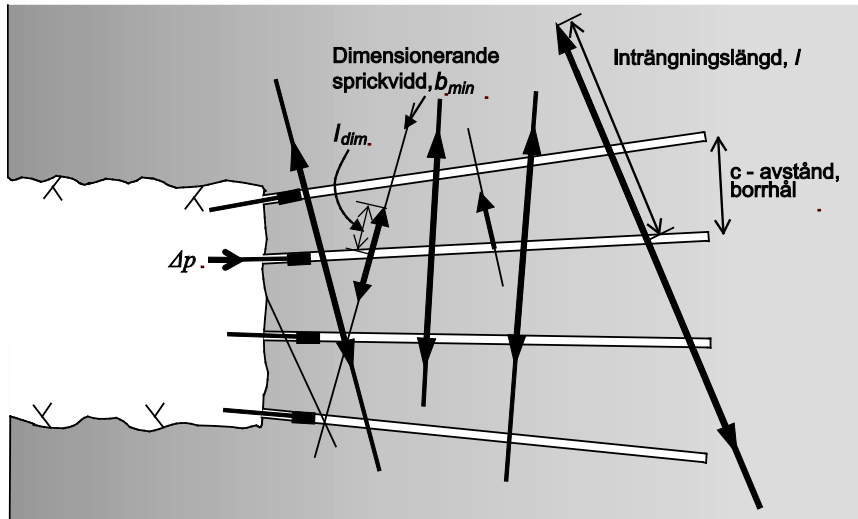
### 6.1 Generellt

Utifrån upprättad geohydrologisk prognos för berget fås information om vilket täthetskrav som är ställda på tunneln och vilka injekteringsmedel som bör vara mest lämpliga för tunneln. I figuren nedan har en schematisk bild ritats över injekteringsförloppet, vid en förinjektering. I denna visas också de grundläggande principerna bakom injekteringstekniken. En injekteringsdesign kan summeras till att innehålla följande tre fält;

**Berget-** sprickvidder, minsta erforderliga spricka som är nödvändig att täta för att klara inläckagemålet,

**Injekteringstekniken-** injekteringstryck och injekteringstid. Lämplig utrustning.

**Injekteringsmaterialet-** silica sol, initiell viskositet, viskositetstillväxt och geltid.



Figur 6-2. Modell över hur en injektering fungerar. Inträngning sker i samtliga sprickor som korsar borrhålet; längre i de större och kortare i de mindre. Dimensioneringen av inträngningslängden görs för den minsta dimensionerande sprickan.

Genom att beräkna en minsta inträngningslängd i den dimensionerade minsta sprickvidden som måste tätas kan en injekteringsdesign för utförandet tas fram. Enligt figuren ovan är de parametrar som behövs för en injekteringsdesign med silica sol, förutom injekteringsmedlets egenskaper; injekteringsövertrycket ( $\Delta p$ ), dimensionerande minsta sprickvidd ( $b_{min}$ ) och c-avstånd mellan borrhålen.

## 6.2 Silica sol och dess inträngning

Injekteringstryck samt injekterings- och geltid på injekteringsmedlet måste anpassas så att en tillräcklig inträngningslängd erhålls i den dimensionerande minsta sprickan. Anpassningen görs utifrån teoretiska samband där de reologiska egenskaperna är centrala.

### 6.2.1 Gelinduktionstid och inträngningslängd

Inträngningen i en spricka kopplas till viskositetskurvan vilket då ses som att inträngningen når nästan maximum långt innan geltiden är uppnådd. Den maximala inträngningslängden för 2-dimensionellt flöde med silica sol,  $I_{max, 2-D}$ , beräknas med (Gustafson och Funehag, 2008a och 2008b).

$$I_{max, 2-D} = 0.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} \quad (6-1)$$

där  $b$  är den hydrauliska sprickvidden,  $\Delta p$  är pålagt övertryck,  $t_G$  är gelinduktionstiden och  $\mu_0$  är den initiella viskositeten hos silica sol. Gelinduktionstiden är den tid det tar för den initiala viskositeten att fördubblas.

Efter gelinduktionstiden är viskositetstillväxten snabb, och inträngningsförmågan minskar drastiskt. En tumregel är att gelinduktionstiden är 1/3 av geltiden, (Funehag, 2007). Gelinduktionstiden skall inte förväxlas med geltiden. Se också avsnitt 2.3.2.

Vid djupt belägna tunnlar, ca 150-500 m är risken större för erosion och injekteringstiden bör vara längre än halva geltiden, medan i grunt belägna tunnlar, <100 och där gradienten är låg är risken mindre för erosion och injekteringstiden kan sättas kortare, dvs halva geltiden.

Injekteringsmedlet kan flöda dels i kanaler i sprickplanet, sk kanalflöde (1-D flöde) eller i hela sprickplanet sk radiellt flöde (2-D flöde). Vilket som inträffar beror på egenskaperna hos sprickan. Den radiella inträngningslängden är alltid mindre än kanalflödet så för dimensionering bör radiellt flöde förutsättas.

För många projekt behövs också sättas en maximal tillåten inträngningslängd. Exempelvis att inte påverka närliggande tunnlar, objekt eller att få injekteringsmaterialet upp till ytan. Det är i den största sprickvidden som inträngningslängden blir som längst. Detta bör utredas i projektet. Att notera är att en lång inträngningslängd även ger stora injekterade volymer vilket inte alltid är nödvändigt för en tillräckligt tät tunnel.

Den tid som trycket skall hållas för att förhindra erosion av injekteringsmedlet är direkt beroende av geltiden. Hållfasthetsutvecklingen på kolloidalt silika kan observeras via viskositetstillväxten. När viskositeten växer till växer även hållfastheten.

### 6.2.2 Beräkning av volym för silica sol

Ett samband för bedömningen av åtgången av silica sol har tagits fram. Sambandet har ännu inte verifierats i fält och skall därför användas med försiktighet, dvs en första approximation vid exempelvis uppskattning av batchvolymen per injekteringshål.

Sambandet baseras på inträngningslängden och resultat från vattenförlustmätningar i ett borrhål. Alla injekteringshål vattenförlustmäts vanligtvis innan injekteringen. Detta innebär att efter injekteringen av första injekteringshålet i skärmen kan vattenföringen i närliggande injekteringshål ha påverkats och resultaten från tidigare vattenförlustmätningar blir en osäkerhetskälla för volymsuppskattningar.

Den maximala injekteringsvolymen för ett sprickplan kan antas som:

$$V_{\max 2D} = \pi \cdot I_{\max}^2 \cdot b = 0,45^2 \pi \cdot b^3 \cdot \left(\frac{I_G}{b}\right)^2 = 0,64 \cdot b^3 \cdot \frac{\Delta p \cdot t_G}{\mu_0} \quad (6-2)$$

Där  $I_{\max}$  beräknas enligt ekvation 6-1.

Om flera sprickplan, som injekterats, finns längs injekteringshålet erhålls:

$$V_{\max 2D} = 0,64 \cdot \sum b^3 \cdot \frac{\Delta p \cdot t_G}{\mu_0} \quad (6-3)$$

där  $\sum b^3$  är summan av alla sprickvidder i kubik längs injekteringshålet.

Från en vattenförlustmätning erhålls ett flöde,  $Q_w$ , vid ett övertryck,  $\Delta p_w$ , och den specifika kapaciteten kan bestämmas enligt:

$$Q_w / dh = \frac{Q_w}{\Delta p_w / \rho_w g} \quad (6-4)$$

Med ekvation (5-2) och (5-3) samt antagandet att fler sprickplan injekteras längs ett injekteringshål fås:

$$\sum b^3 = \frac{12\mu_w}{\rho_w g} \cdot T = \frac{12\mu_w}{\rho_w g} \cdot \frac{Q_w}{2\pi \cdot dh} \cdot \left[ 1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right) \right] = \frac{Q_w \cdot \mu_w}{\Delta p_w} \cdot \frac{12}{2\pi} \cdot \left[ 1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right) \right] \quad (6-5)$$

Genom att kombinera ekvation (6-3) och (6-5) erhålls ett samband för volymen enligt:

$$V_{\max 2D} = 0,64 \cdot \frac{Q_w \cdot \mu_w}{\Delta p_w} \cdot \frac{12}{2\pi} \cdot \left[ 1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right) \right] \cdot \frac{\Delta p \cdot t_G}{\mu_0} = \frac{3,84}{\pi} \cdot \left[ 1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right) \right] \cdot \frac{\Delta p \cdot \mu_w}{\Delta p_w \cdot \mu_0} \cdot Q_w \cdot t_G \quad (6-6)$$

Anta att vid normal injektering att  $L/r_w \approx 625$  ger:

$$V_{\max 2D} = 8 \cdot \frac{\Delta p \cdot \mu_w}{\Delta p_w \cdot \mu_0} \cdot Q_w \cdot t_G \quad (6)$$

Ekvation 6-7 kan användas för bedömning av blandningsvolymen utgående från en vattenförlustmätning. Det är väldigt enkelt att lägga in detta i ett spreadsheetprogram för att få fram storleken på satserna. Detta kan användas vid satsvis injektering för att minimera spillet.

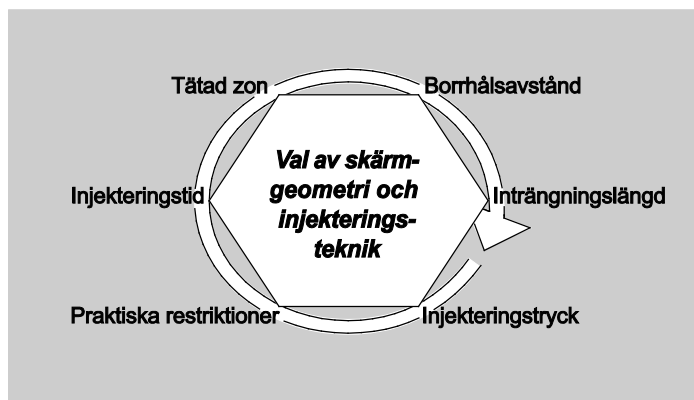
### 6.3 Dimensionering

Målet med dimensioneringen av en silica sol injektering är att ansätta värden på följande delar:

- Borrhålsgeometri
- Inträngningslängd
- Injekteringstryck
- Injekteringstid
- Övriga praktiska restriktioner

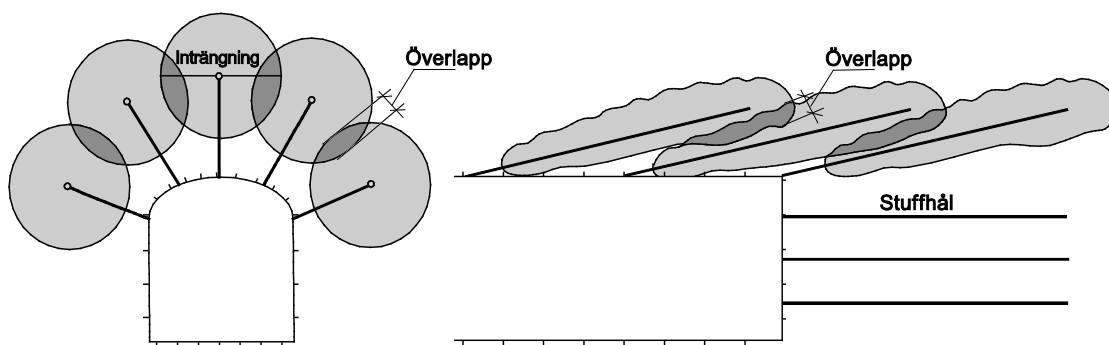


I bilaga A återfinns en dimensionering som följer designprocessen beskriven i avsnitt 6, Figur 6-1. De olika momenten är dock ingen stegvis process utan mer utav en iterativ process för att nå en dimensionerad injektering och kan sammanfattas i nedanstående figur.



Figur 6-3. Valet av skärmgeometri och injekteringsteknik görs bl.a. utifrån praktiska begränsningar.

Som en första approximation skall injekteringsskärmens geometri, dvs längd och hålvinklar, uppskattas. Vid normal tunneldrift sätts krav på antal bergguttar samt längder på uttagen. Detta påverkar injekteringshålens längd. I kritiska passager, exempelvis med låg bergtäckning, eller förmodade kraftigt flödande sprickzoner med sannolikt dålig bergkvalitet görs ofta bedömningar för kortare bergguttar, skonsammare sprängning och andra tekniska lösningar. I båda fallen ges det ett spann, eller exakta längder på injekteringsskärmarna. Överlappet mellan en och nästkommande injekteringsskärm blir normalt 4-6 m. I Figur 6-7 visas hur överlappet mellan injekteringshålen och överlappet mellan skärmar definieras.

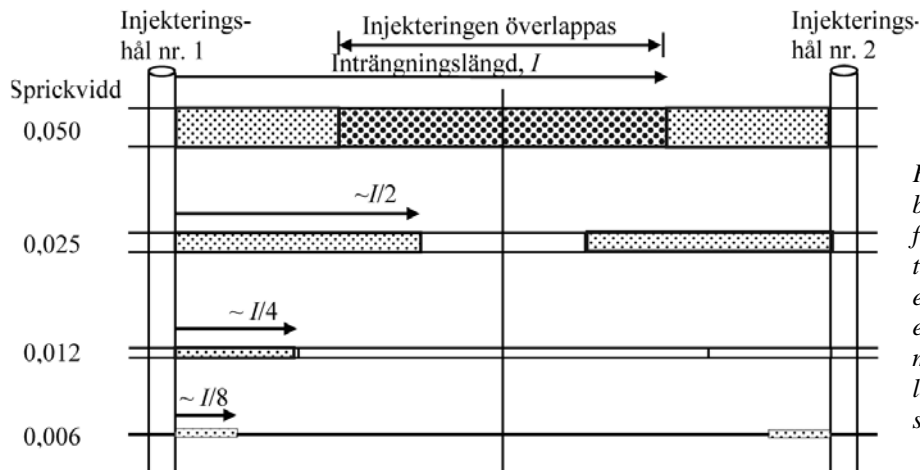


Figur 6-4. Definition av inträngning och överlapp, till vänster överlapp inom en skärm, till höger överlapp mellan två skärmar. I figuren visas också "stuffhål" för att säkerställa en "tät" stuff då ordinarie injekteringshål i skärmen inte kan ge nödvändig inträngningslängd.

Vid mer kritiska passager kan längre överlapp användas. Detta för att den tätade zonen även skall bli fullständig vid överlappen mellan skärmar. En särskild geometrisk studie kan vara erforderlig vid mer kritiska passager. Även andra faktorer kan påverka den injekterade zonen utbredning, såsom bultlängd, närliggande utrymmen, risken för erosion av injekteringsmedlet eller andra restriktioner.

Överlappet av injekteringsmedel mellan två injekteringsborrhål kan uppskattas. Överlappet skall kompensera för att sprickriktningar inte alltid går vinkelrätt mot borrhålet. Med överlapp av injekteringsmedel mellan två borrhål menas att inträngningen från det ena borrhålet överlappar in-

trängningen från det andra borrhålet. Detta illustreras i Figur 6-8 nedan. Dimensionering görs för att ett visst överlapp skall nås i den dimensionerande sprickvidden, i exemplet i figuren nedan är den 50 µm. Sålides har borrhålsavståndet en central betydelse vid dimensioneringen. Inträngningslängden blir hälften så lång i en hälften så stor spricka.



Figur 6-5. Schematisk bild över injekteringsförloppet och hur inträngningen sker vid ett överlapp på 50% i en sprickvidd på 0,050 mm. Inträngningslängderna är ej ritade skalenliga.

Den erforderliga eller dimensionerande inträngningslängden,  $I_{dim}$  räknas ut genom att sätta önskat överlapp (som ett decimaltal) samt att veta borrhålsavståndet,  $d$  med följande ekvation:

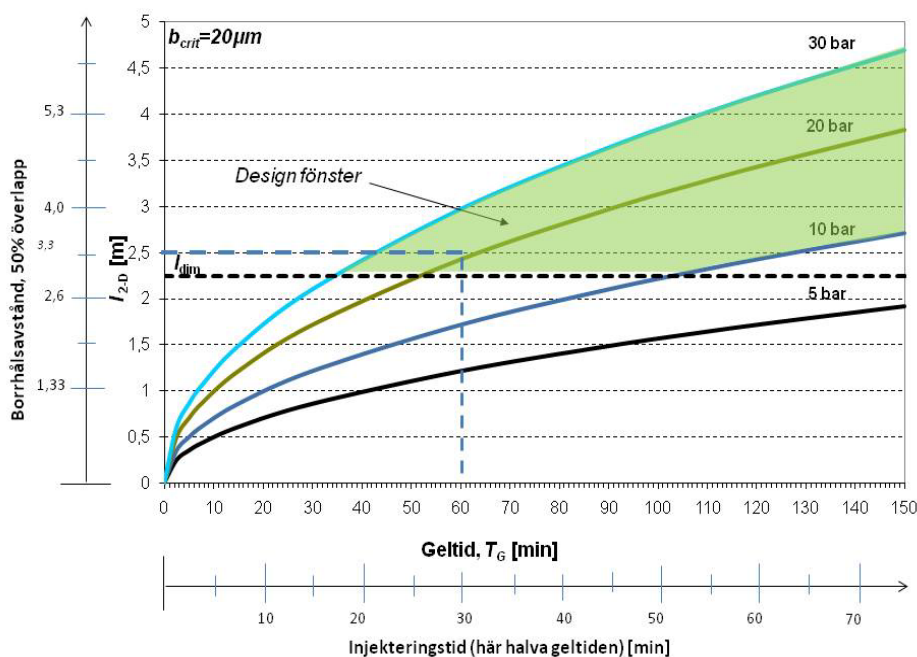
$$I = d/2 * \left(1 + \frac{OL}{2}\right)$$

Hur överlappet bidrar till den tätade zonen visas i figuren ovan (Figur 6-8). Det räcker inte med överlapp mellan borrhålen utan zonen måste vara intakt även mellan skärmarna. Med en geometrisk betraktelse kan överlappet mellan skärmarna också räknas ut och kontrolleras. Om överlappet mellan injekteringshålen rekommenderas att vara åtminstone 50% bör överlappet mellan skärmarna åtminstone vara 20%. Det mindre överlappet förklaras med att den potentiella vattenvägen är längre längs med en skärm jämfört mellan borrhålen och på så vis ger ett högt motstånd. Detta bör studeras närmare samt vad som är praktiskt möjligt, erfarenheten säger dock att ett överlapp mellan skärmarna på 4-5 m med ett stick på 5 m har fungerat. Vid djupt belägna tunnlar eller vid efterinjektering finns en risk för stora hydrauliska gradienter vilket ger upphov till risk för erosion. Även i fall där inträngningslängden är begränsad (ex små sprickvidder, korta injekteringstider, för låga tryck etc) ger inte den ordinarie skärmen en tät tunnelfront vilket även i dessa fall kan leda till risk för erosion. Att rekommendera är att en särskild studie för risken för erosion görs samt finna observationer under tunneldrivning för att påvisa att ingen risk eller mycket liten risk föreligger. För de grundläggande principerna bakom erosion av injekteringsmedel hänvisas till Axelsson (2009). Principerna följdes och applicerades på en tunnel i Äspö på 450 m djup och hänvisas till Funehag och Emmelin (2011).

Med ekvation 3-1 kan den injekterade zonen utbredning uppskattas, men med en tätad zon på ca 4-5 m åstadkoms oftast en tillräcklig utbredning på zonen för att nå en tillräckligt tät tunnel. Den tätade zonen kan bli föremål för design i kritiska passager eller vid optimering av skärmgeometrin där god kunskap finns om sprickorientering, se tidigare Figur 5-6.

För silica sol med inträngningslängder baserat på valet av tryck och injekteringstider kan ett sk ”designfönster” tas fram (Figur 6-9). Här är den dimensionerande minsta hydrauliska sprickvidden,  $b_{crit}$ , väldigt central. Utifrån den konceptuella bergmodellen, se avsnitt 5.1, kan denna sprickvidd tas fram och med detta menas att samtliga sprickvidder ner till minsta sprickvidden måste tätas för att nå kravet på inläckagekrav till tunneln. Det är alltså denna sprickvidd som inträngningslängden,  $I_{2-D}$  dimensioneras för på ett sådant sätt att valda  $I$  skall vara inom intervallet,  $I_{dim} < I < I_{max}$ .

Figur 6-6. Den maximala inträngningslängden,  $I_{2-D}$ , i en spricka med hydraulisk vidd  $20\ \mu\text{m}$ , som funktion av olika kombinationer av injekteringsövertryck och geltid (geltiden  $\approx 3 \cdot$  gelinduktionstid). (I figuren är  $20\ \mu\text{m}$  den dimensionerande sprickvidden och den teoretiskt erforderliga inträngningslängden är 2,25 m. Villkoret om inträngningslängd uppfylls för kombinationer av gelinduktionstid och tryck inom den grönmarkerade ytan, det så kallade designfönstret. På de yttre axlarna visas också jämförelsen mellan borrhålsavståndet och inträngningslängden och mellan geltiden och injekteringstiden



Från ovanstående typ av diagram kan ett antal kombinationer av tryck och injekteringstider tas fram. I figuren finns en streckad blå linje som visar att en injekteringstid på 30 minuter (60 minuters geltid) vid ett övertryck på 20 bar ger en inträngningslängd på 2,5 m i en sprickvidd på  $20\ \mu\text{m}$ . Med denna uppsättning av injekteringstryck och tid räcker ett borrhålsavstånd på 3,3 m. Man kan också minska injekteringstiden till 20 minuter men trycket måste då ökas. Således är borrhålsavståndet avhängigt inträngningslängden och kan bestämmas utifrån injekteringstryck och geltid för silica sol. I normalfallet bör inte borrhålsavståndet överstiga 4-5 m samtidigt som små borrhålsavstånd, mindre än 2 m, kan ge upphov till många sambandshål vilket i sin tur ger upphov till en mer tidskrävande injekteringsprocedur.

Om ett överlapp av injekteringsmedlet inte nås i den dimensionerade sprickvidden med en ensam injekteringsomgång finns lösningar med två eller till och med tre injekteringsomgångar. Detta kan leda till en mer optimerad injekteringsstrategi där andra omgången kan göras behovsprövad (baserad på ett antal observationer). En sådan strategi visas i Figur 6-8. Figuren visar att för första injekteringsomgången överlappas injekteringen i en spricka med aperturen 0,05 mm. I en spricka på halva vidden (0,025mm) fås ca halva inträngningen osv. För att lyckas täta även dessa sprickor krävs således ytterligare borrhål mellan första omgångens borrhål.

Det finns restriktioner eller rekommendationer gällande maximalt tillåtna tryck. Dessa grundar sig i risken för hydraulisk spräckning/"jacking" eller öppning av sprickor i berget. Huruvida det är ett problem eller en fördel diskuteras fortfarande. I vilket fall som helst måste alla ingående trycksatta komponenter klara givet tryck med en viss säkerhetsmarginal.

Geltiden vid given viskositet påverkar hur lång tid man bör injektera. Avbryter man injekteringen tidigt, då viskositeten fortfarande är låg, finns det risk för att vatten börjar fingra in i gelen (vatten tränger in i gelen likt fingrar). Det är av särskild stor vikt vid höga grundvattentryck. I Funehag (2007) finns en enkel beskrivning hur geltiden förhåller sig till injekteringstiden och den önskvärda inträngningslängden i sprickan. Använder man relationerna beskrivna i avsnitt 6.2 vid injekteringen förstår man att geltiden är en viktig faktor för en lyckad injektering. Som en utgångspunkt vid dimensionering kan nedanstående tabell följas. Värdena som anges är hämtade från designfönstret i Figur 6-9 ovan. Efter att värden erhållits för varje dimensioneringssteg kan sedan en optimering utföras.

Dimensioneringssteg	Uppskattning/Val	Ger info till	Kontroller
Minsta sprickvidd	20 $\mu$ m	Inträngningslängd	Tillåtet inläckage
Borrhålsavstånd	c- 3 m	Inträngningslängd	Nödändigt teoretiskt överlapp, träffa "rätt" sprickor
Nödändig inträngningslängd i minsta sprickvidden	0,75x c-avståndet=2,25 m för 50 % överlapp	Injekteringstryck och injekteringstid	Maximalt tillåtna injekteringstryck
Injekteringstryck	>2x grundvattentryck = 20 bar	Stoppkriterium	
Injekteringstid	Minst halva geltiden= 30 min	Geltid, stoppkriterium	Risk för erosion ger längre injekteringstid
Geltid	2x injekteringstiden= 60 min		Är den rimlig?
Stoppkriterium 1	Förutbestämd inj.tid vid konstant tryck= 30 min vid 20 bar		Välj typ observationer för ev. ändring av stoppkriterium
Stoppkriterium 2	En viss maximal volym	Förändring av kriteriet för <i>I</i> .	Dimensioneringen behöver göras om

## 7 Referenser

Andersson, H, 1998: Chemical Rock Grouting, an Experimental Study on Polyurethane Foams. Doctoral Thesis. Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Axelsson, M, 2006. Mechanical tests on a new non-cementitious grout, silica sol: A laboratory study of the material characteristics. *Tunneling and Underground Space Technology*, vol 21, pp 554-600. Elsevier.

Axelsson, M, 2009. Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock. Doktorsavhandling. Ny serie. 2915. Chalmers tekniska högskola.

Axelsson, M, Nilsson J, 2002. Sealing of narrow fractures in rock with use of silica sol. An introductory study on material characteristic and behavior as a grout. *Master thesis*. Chalmers university of technology, Division of Civil and Environmental Engineering, Publ B 494. Göteborg, Sweden

Bergman, S G A, Nord, G, 1982. Täta tunnlar lagom. BeFo nr 64:1/82. Stiftelsen bergteknisk forskning, Stockholm, Sweden.

Butron, C, Axelsson, M, Gustafson, G. 2007. Silica Sol for Rock Grouting- Tests on Mechanical properties. Chalmers university of technology, Division of Civil and Environmental Engineering, Report 2007:6. Göteborg, Sweden.

Butron, C, Gustafson, G, Funehag, J, 2008. Grouting in Nygård tunnel – Pre-grouting design for drip sealing and evaluation. Report 2008:2. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.

Dalmalm T, Eriksson M, Janson T, Brantberger M, Slunga A, Dehlin P, Stille H (2000): Injekteringsförsök vid Södra Länkens bergtunnlar. Rapport 3075, Avd för Jord- och Bergmekanik, KTH, Stockholm.

Draganovic, A, 2009. Bleeding and filtration of cement-based grout. Doctoral Thesis. Institutionen för Jord- och Bergmekanik, Kungliga tekniska högskolan. Stockholm.

Ellison, T, 2007. Erfarenheter av injektering med silika sol, Törnskogstunneln. BK 2007. Bergsprängningskommittens 52:a möte. Stockholm.

Emmelin A, Eriksson M, Fransson Å (2004): Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level, Äspö HRL. SKB R-04-58, SKB AB

Eriksson M, Stille, H (2005): Cementinjektering i hårt berg, Rapport K22 SveBeFo

Funehag, J, Gustafson, G, 2005. Grouting with silica sol in the Törnskogstunnel- Grouting design for silica sol in full production. Report 2005:12. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.

Funehag, J, 2007. Grouting of Fractured Rock with Silica Sol Grouting design based on penetration length. Dissertation, Doktorsavhandling. Ny serie 2560. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.

Funehag, J, Emmelin, A, 2010: Injekteringen av TASS-tunneln, Design, genomförande och resultat från förinjekteringen. SKB-rapport R-10-39. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Gustafson, G, Fransson Å, Funehag, J, Axelsson, M, 2004. Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. Väg- och vattenbyggaren 4, 2004.

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) s 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) s 9-17.

Gustafson, G, Fransson, Å, 2005. The use of the Pareto distribution for fracture transmissivity assessment. Hydrogeology Journal, 1435-0157.

Gustafson, G, 2009. Hydrogeologi för bergbyggare. T2:2009. Forskningsrådet Formas.

Iler, R K, 1979: The Chemistry of Silica. John Wiley & Sons, USA.

Janson, T, Funehag, J, Granberg, G, Jonsson, H, 2010. Underhållstättning av mediatunnel i Göteborg- design och utförande av efterinjektering. BeFo rapport 105. Stiftelsen bergteknisk forskning. Stockholm.

Persoff, P, Apps, J, Moridis, G, Whang, J M, 1999: Effect of Dilution and Contaminants on Sand Grouted with Colloidal Silica. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. Vol. 125. No. 6, June, pp. 461 - 469.

Persson K., Engström A., Gustafson G. (2009): Nyttan av vattenförlustmätningar av tätning av tunnlar. Bergmekanikdagen 2009.

Stille, B, Andersson, F, 2008. Injektering – tillämpning av injekteringsprocessen i fält. SveBeFo rapport 79. Stiftelsen bergteknisk forskning Stockholm.

Yonekura, R, 1997: The developing process and the new concepts of chemical grout in Japan. Grouting and Deep Mixing. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 1996, pp. 889-901.

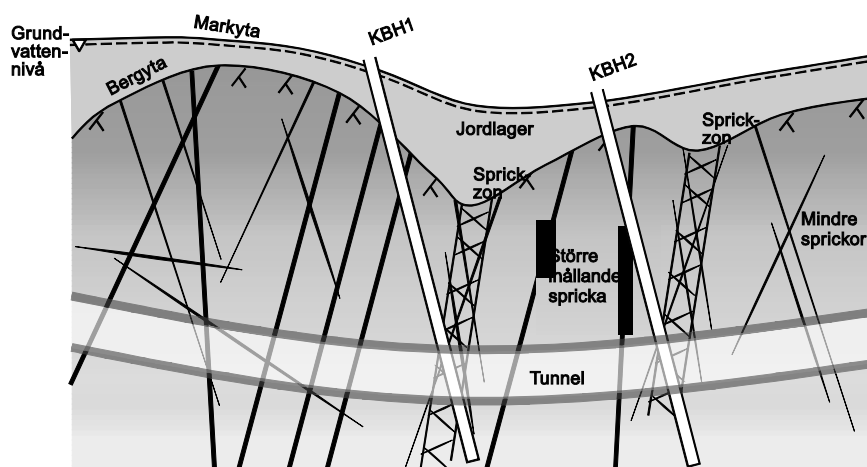
## Allmänt

En tunnel skall byggas i ett kristallint berg med ett ovanliggande jordlager bestående av lera och viss del friktionsmaterial. Grundvattenytan följer i det närmaste markytan. Längs tunnelsträckningen är det sannolikt att påträffa större sprickzoner med dålig bergkvalitet och kraftigt vattenförande strukturer.

Tillgänglig data

- Grundvattennivåer i sänkor
- Borrkärnor
- Sprickkartering
- Hydrauliska tester i kärnborrhålen
- Ingenjörsprognos med anläggning

Borrkärnorna är borrade från ytan i 60 graders vinkel för att träffa de förmodade sprickzonerna. Kärnorna når ner till under tänkt tunnelbotten, se schematisk figur nedan. Ytterligare kärnor finns borrade vid vardera tunnelpåslag.

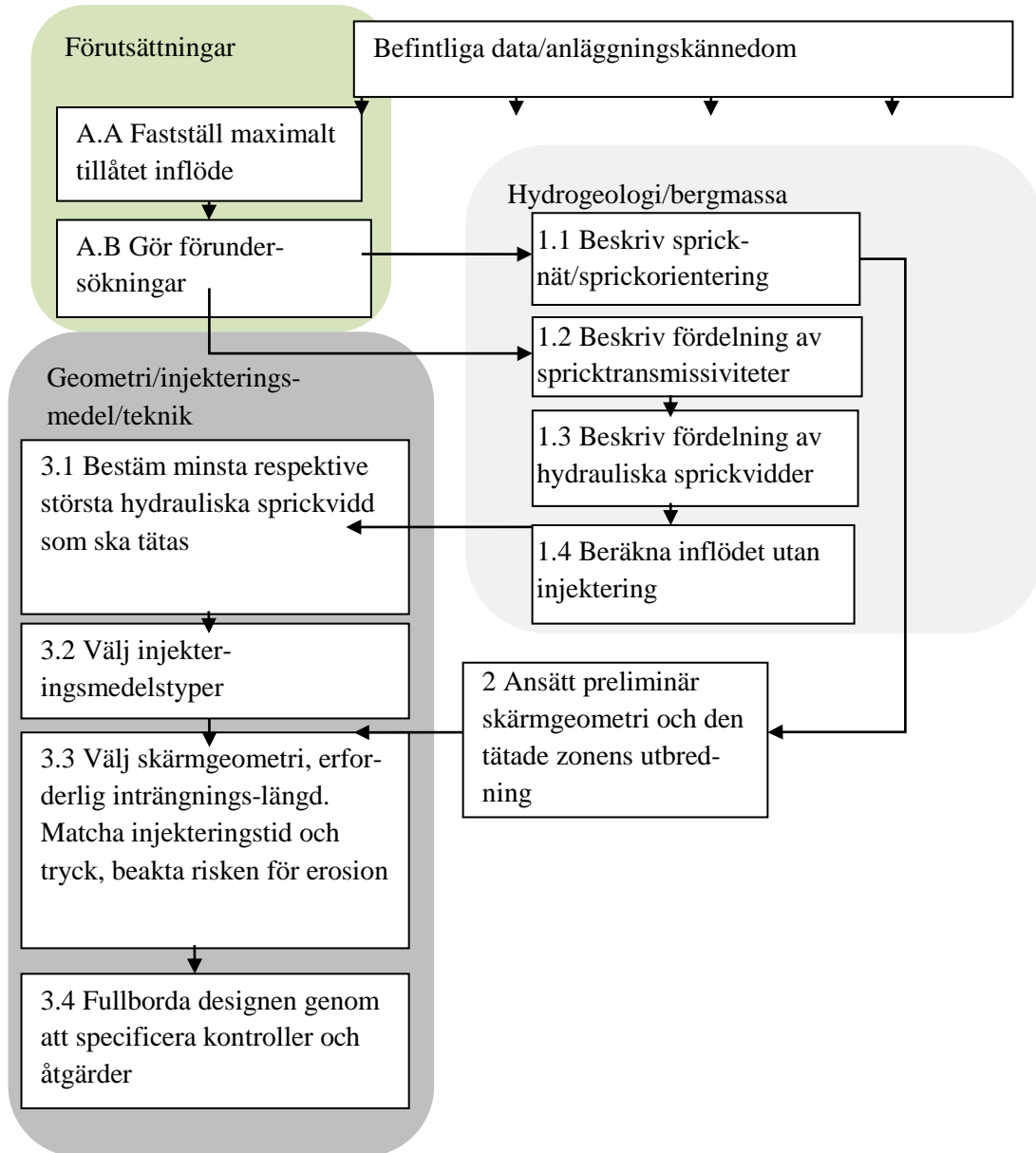


Figur 7-1. En schematisk profil över tunnel, berg och ovanliggande jordlager med utritad grundvattennivå.



## Design

Figuren nedan visar ett förslag på hur designprocessen ser ut. I följande avsnitt går varje moment igenom och resulterar i ett designvärde eller antagande.



### Uppgiften, punkt A.A och A.B

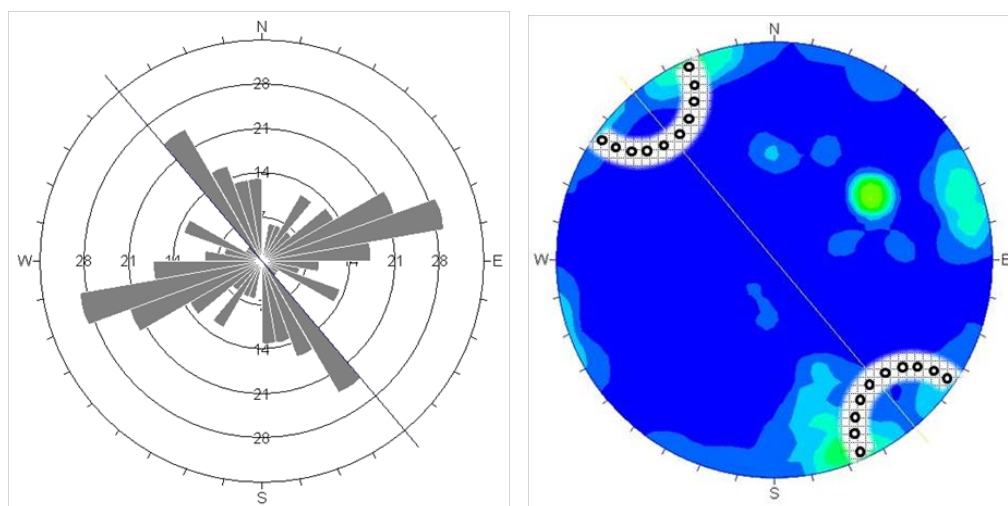
Utifrån given ingenjörsprogno skall en injekteringsdesign utformas. Injekteringen ska vara kontinuerlig och reducera inläckaget till max 1 l/min och 100m tunnel.

Förundersökningar är redan gjorda i ett tidigare skede. Tunneln har ett tvärsnitt på 76 m<sup>2</sup>. Bergtäckningen är 40 m och grundvattentrycket 35 m.

## Hydrogeologi/bergmassa

### Spricknät och sprickorientering punkt 1.1

I förundersökningsskedet erhålls sprickorienteringar både från ytkartering och från kärnkarteringen. Ingen av de karteringarna återspeglar sprickorientering för tunneln fullständigt men i designskedet får de erhållna sprickorienteringarna vara tillräckligt representativa, med vetskapen av att det kan vara annorlunda i tunneldrift. I nedanstående diagram (Figur 7-2) visas sprickorienteringarna som sprickros och stereonät. Sprickorna är mestadels brantstående och har två dominerande sprickset. Ett set, Set1, i riktning NNV-SSÖ samt ett, Set2, i nästan Ö-V riktning. Tunnelriktningen är 140 grader. Sprickset nr 1 går nästan parallellt med tunnelriktningen och stupningen är ganska flack, 60 grader. Sprickset nr 2 skär tunneln ganska vinkelrätt och har brant stupning.



Figur 7-2. Exempel på sprickros och stereonät. I stereonätet till höger åskådliggörs borrhålens orientering in en traditionell förinjektering (runda ringar i skrafferat område).

Borrhålen inritade i stereonätet i figur 3-1 har en längd på 20 m, stick på 5 m (14 grader) och är 20 till antalet. Borrhålen penetrerar sprickset nr 2 men inte alls sprickset nr 1. Med en traditionell förinjektering kommer detta sprickset att förbli otätat. Andra lösningar i form av efterinjektering kan bli aktuellt.

En sådan här ganska enkel analys av sprickriktningar och borrhålens träffbild kan ge en förväntansbild över vilka sprickplan som blir tätade respektive måste åtgärdas på annat sätt.

### Transmissivitetsfördelning, 1.2

För kärnborrhålen och kärnkarteringen erhålls antalet sprickor per meter (sprickfrekvens) samt en tolkning om sprickorna är öppna eller stängda. I kärnborrhålet har en vattenförlustmätning utförts vilket anger vattenförlusten, l/min vid ett visst övertryck, per borrhålssektion i m. Genom att koppla ihop sprickor och vattenförlust kan en bedömning av genomsläppligheten och således även inläckaget till tunneln bedömas.

Följande har antagits

- KBH1 representeras av den sämre bergkvaliteten längs tunnelsträckningen.
- Sprickorna längs kärnborrhålet antas vara 2-dimensionella och planparallella strukturer (de korsar inte varandra i närheten av borrhålet)
- De karterat öppna sprickorna ger ett bidrag till inläckaget till tunneln.
- Summan av de individuella inflödena är lika med hela borrhålets inflöde.

Transmissiviteten,  $T$ , kan beräknas enligt Moyes formel för ett sektionstest:

$$T = \frac{Q}{2\pi \times dh} \left( 1 + \ln \frac{L}{2 \times r_w} \right)$$

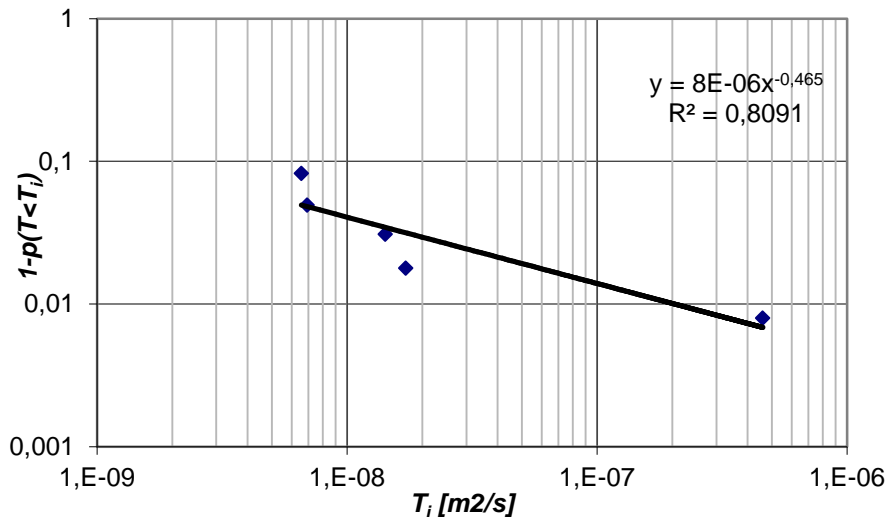
Där  $Q$  är uppmätt flöde,  $dh$  är använt övertryck,  $L$  är testad sektionlängd och  $r_w$  är borrhålsradien.

En typisk datasummering från kärnkarteringen och vattenförlustmätningen visas i följande tabell.

Sektionsnummer	Sektion borrhål		Uppmätt flöde		Antal öppna sprickor $n_i$	T enligt Moyes formel $[m^2/s]$
	Från [m]	Till [m]	Flöde, Q [l/min]	[m <sup>3</sup> /s]		
1	1,5	3	0,019	$3,2 \times 10^{-7}$	14	$6,9 \times 10^{-9}$
2	3	6	0,047	$7,8 \times 10^{-7}$	33	$1,7 \times 10^{-8}$
3	6	9	0,039	$6,5 \times 10^{-7}$	26	$1,4 \times 10^{-9}$
4	9	12	0,018	$3,0 \times 10^{-7}$	22	$6,6 \times 10^{-9}$
5	12	15	1,26	$2,1 \times 10^{-5}$	29	$4,6 \times 10^{-7}$
6	15	18	5,17	$8,6 \times 10^{-5}$	14	$1,9 \times 10^{-6}$

Vi ser från tabellen att det är relativt många öppna sprickor, 6-10 sprickor per meter men de uppmätta flödena är små. I detta exempel är grundvattnetrycket 35 mvp.

Utifrån transmissiviteterna ovan upprättas en fördelning kallad paretofördelning (Figur 7-3).

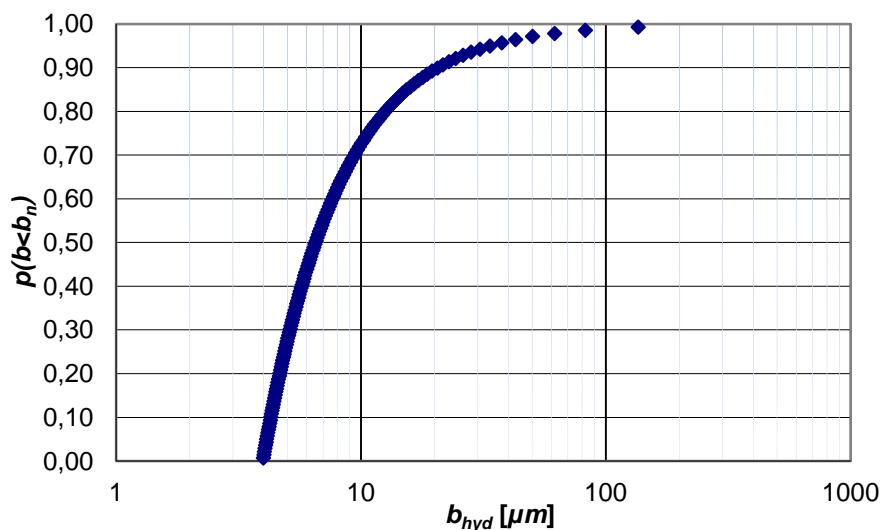


Figur 7-3. En upprättad paretofördelning för de uppmätta transmissiviteterna.

Över ett intervall från ca  $5 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s till  $5 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s följer transmissiviteterna en rät linje i ett log-log diagram.

### Sprickviddsfördelning 1,3

Sprickvidden är central i dimensioneringen av en injektering. Med vetenskap om vilka sprickvidder som finns kan en inträngningslängd beräknas och genom detta även utförandet bestämmas. Den bästa bedömningen av sprickvidder för injekteringsdimensionering är den hydrauliska sprickvidden. Kopplingen mellan transmissivitet och hydraulisk sprickvidd görs med "cubic law". Med den tidigare upprättade transmissivitetsfördelningen kan fördelningen generera en enskild transmissivitet för varje öppen spricka. Sedan beräknas en hydraulisk sprickvidd utifrån de enskilda transmissiviteterna (Figur 7-4).



Figur 7-4. Hydraulisk sprickviddsfördelning beräknad från paretofördelningen i figur 7-3.

Den hydrauliska sprickviddsfördelningen visar att sannolikheten att det finns en spricka som har en hydraulisk sprickvidd större än 100 μm är väldigt liten (0,2%). Den visar däremot att det finns många sprickor med små vidder.

### Inläckaget till oinjekterad tunnel 1,4

Inläckaget till tunneln per meter, (specifikt flöde)  $q$  utan injektering beräknas med (Gustafson, 2009):

$$q[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}] = \frac{2 \cdot \pi \cdot T_b / L \cdot H}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{r_t}\right) + \xi}$$

där  $\Delta h$  grundvattentrycket,  $L$  är sektionlängd för vilket transmissivite-  
ten,  $T_b$  är

beräknad för,  $H$  är djupet till tunneln från grundvattenytan,  $r_t$  ekvivalent  
tunnelradie, och  $\xi$  skinfaktorn.

Med följande data insatt i ekvationen fås inläckaget till

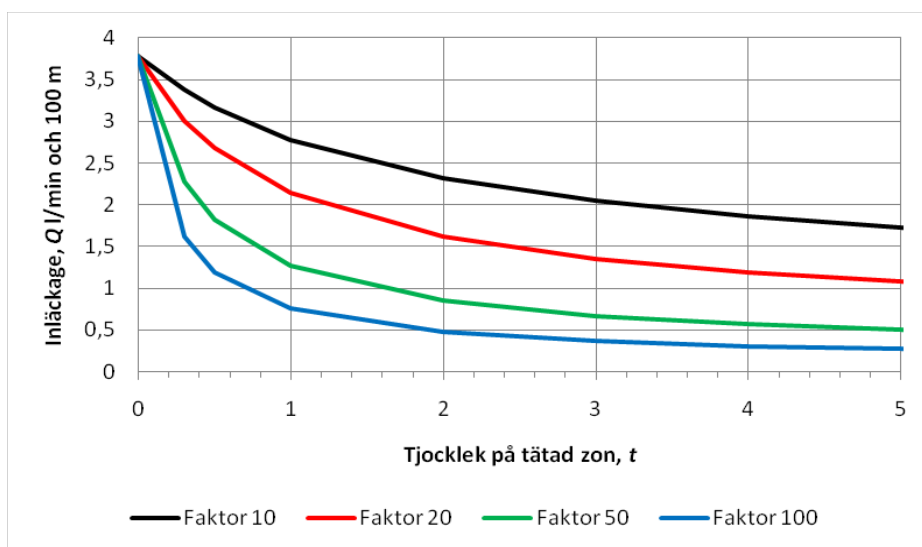
$T_b$ [m <sup>2</sup> /s]	$L$ [m]	$H$ [m]	$r_t$ [m]	$\xi$		$q$ oinjekte- rat [m <sup>3</sup> /s/m]	$Q$ för 100 m oinjekterad tunnel [l/min]
$2,4 \cdot 10^{-6}$	100	35	2,5	5	=>	$6,3 \cdot 10^{-7}$	3,8

## Preliminär skärmgeometri och tätad zon

För att kunna utföra en injekteringsdesign underlättar det om det finns fastställda ramar för hur injekteringen skall gå till. I normala infrastrukturtunnlar förutsätts oftast förinjektering med en hel skärm runt hela tunnelperiferin. Längden på borrhålen är anpassat mot antalet salvuttag och nödvändigt överlapp mellan skärmarna. I detta första steg sätts själva skärmgeometrin för en skärm som sedan får anpassas mot produktionscykeln. Som en första preliminär geometri för en skärm används följande:

- Längd på borrhålen= 20 m
- Antalet borrhål=15-25 stycken
- Stick 5 m

Sticket på borrhålen antas vara det samma som den tätade zonens utbredning runt tunneln. Att sticket också måste anpassas för att på bästa sätt träffa på de flödande sprickplanen visades i tidigare avsnitt. Inverkan av utbredning (tjocklek) och vilken åstadkommen täthetsfaktor på inläckaget till tunneln visas i figuren nedan.



Figur 7-5. Inläckaget till tunneln som funktion av tätade zonen tjocklek och åstadkommen täthetsfaktor.

Med täthetsfaktor menas förhållandet mellan den injekterade zonen genomsläpplighet och det omgivande berget ( $T_{tot}/T_{inj} > 1$ ). Inläckaget,  $q$ , beräknas för olika tjocklekar på den tätade zonen,  $t$  enligt följande (Gustafson, 2009):

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot T_b \cdot H / L}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{r_t}\right) + \left(\frac{T_b}{T_{inj}} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi}$$

Som figur 3-4 visar så räcker det med ett stick på 2 m och en täthetsfaktor på 50 för att klara inläckagekravet på 1 l/min och 100 m tunnel. Tidigare

analyser av borrhålsriktningen i förhållande till sprickriktningarna visade att ett stick på minst 5 m vore lämpligt. Ett kortare stick skulle medföra att färre plan träffas. Ett stick på 5 m och en täthetsfaktor på minst 50 skulle ge ett inläckage på ca 0,5 l/min. Vetskapen om att vi inte heller träffar ett av de dominerande sprickseten/sprickgrupperna gör att det preliminära valet på geometri behålls. Att beakta är att täthetsfaktorn inte är en dimensioneringsparameter utan ger en indikation om vad som kan uppnås

## Geometri, injekteringsmedel och teknik

### Minsta och största hydrauliska sprickvidd, 3,1

Med hjälp av den hydrauliska sprickviddsfördelningen i figur 3-3 kan en dimensionerande minsta sprickvidd bestämmas. Den dimensionerande sprickvidden skall överensstämma med inläckagekravet, dvs att samtliga sprickor ner till sprickvidd måste tätas.

Med antagandet att alla öppna sprickor är flödande kan således varje sprickas bidrag till inläckaget beräknas. För varje tätad spricka kan summan av bidragen från de ej tätade sprickorna beräknas enligt inläckageformeln ovan. Med ett sådant förfarande erhålls nedanstående (Tabell 7-1).

*Tabell 7-1. Beräknat inläckage för utan injektering, där största sprickvidden är tätad och vilken sprickvidd (dimensionerande sprickvidd) som måste tätas för att klara inläckagekravet.*

$b_{min}$ [μm]	Beräknat inläckage, $q_{grout}$ [l/min·100 m]	$T_{grout}$ [m <sup>2</sup> /s]	Kommentar
Ingen	3,8	$2,4 \times 10^{-6}$	Utan injektering
136	2,9	$8,2 \times 10^{-7}$	Största spricka tätad
34	1,0	$1,3 \times 10^{-7}$	Kritisk sprickvidd

Förhållandet mellan transmissiviteten för oinjekterat berg och tätad zon är i detta fall enbart en faktor 20.

Som tabellen visar måste samtliga sprickor med en hydraulisk apertur ned till 34 μm tätas för att nå inläckagekravet på 1 l/min och 100 m tunnel. Detta angreppssätt ger ett robust och ett härledbart designkrav.

#### Summering av designkrav:

- Dimensionerande sprickvidd är 34 μm.

- Största förmodade sprickvidd är 136  $\mu\text{m}$

### Injekteringsmedel, 3.2

Flödena som påträffats under kärnborrningen var små. De tolkade hydrauliska sprickvidderna som måste tätas går från 34 till 136  $\mu\text{m}$ .

Ett cementbruk innehåller partiklar och dess inträngningsförmåga begränsas av just partiklarna. Ett teoretiskt angrepps sett visar att partiklar kan tränga in i spalter som är  $3 \times d_{95}$  (maskvidden där 95% passerar vid en siktning). För vanliga cementbruk kan  $d_{95}$  vara i storleksordning 16-30  $\mu\text{m}$ . Detta motsvarar således spaltvidder på mellan ca 50-100  $\mu\text{m}$  vilket alltså är minsta vidd som bruket kan tränga in i och täta. Då strävan är att täta väldigt många och mindre sprickor väljs silica sol som det enda ordinarie injekteringsmedel.

Hydrauliska tester skall användas för att kontrollera om flödena kan vara större än de förväntade. Om större flöden påträffas skall dessa borrhål injekteras med cementbruk varvid cementbruk skall finnas tillgängligt på arbetsplatsen.

#### **Summering injekteringsmedel:**

- Silica sol som ordinarie injekteringsmedel
- Cementbruk vid större flöden och större tolkade hydrauliska sprickvidder

### Skärmgeometri och erforderlig inträngningslängd 3.3

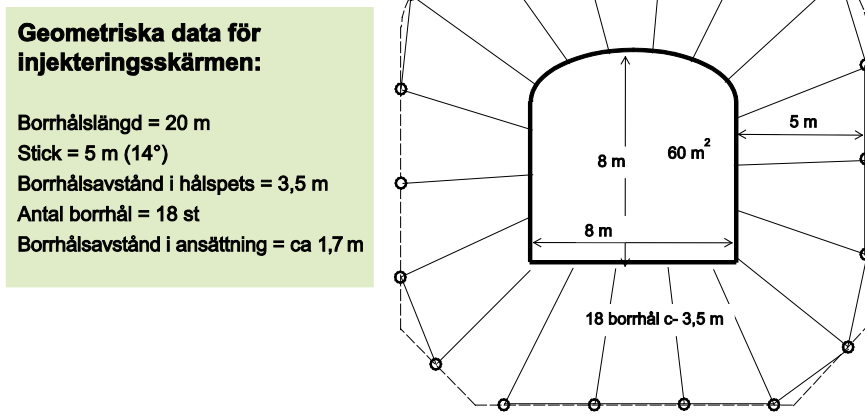
Att bestämma minsta erforderliga inträngningslängd är en iterativ process där man får utgå antingen från en given geometri (avståndet mellan borrhålen) eller en önskvärd inträngningslängd och sedan sätta borrhålsavståndet utifrån detta.

#### **Skärmgeometri**

I det nedanstående utgår vi från att skärmgeometrin är satt (Figur 7-6).

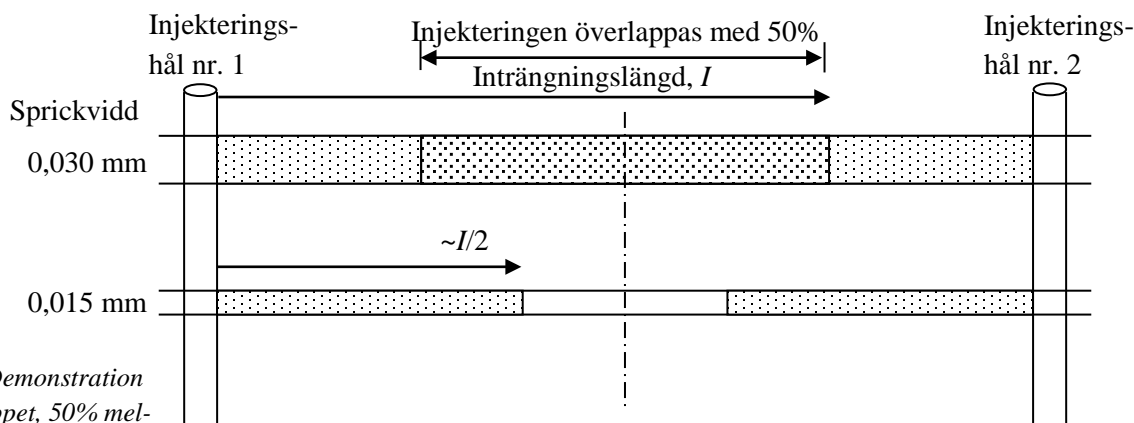


Figur 7-6. Skärmlayout sedd framifrån. Sticket är 5 m vilket ger 18 borrhål med ett hålspetsavstånd på 3,5 m



### Erforderlig inträngningslängd

Den erforderliga inträngningslängden i den dimensionerade sprickvidden bestäms av borrhålsavståndet i hålspets. Givet sprickarteringen och vetenskap om sprickornas undulerande utseende kommer inträngningen inte ske rätvinkligt mellan borrhålen. Som kompensation för detta görs kallat överlapp mellan borrhål. En rekommendation som använts i många injekteringsprojekt med silica sol är att använda 50% överlapp mellan borrhålen, se Figur 7-7.



Figur 7-7. Demonstration över överlappet, 50% mellan två borrhål i förhållande till sprickvidden.

Erforderlig inträngningslängd,  $I_{erf}$  kan beräknas enligt

$$I_{erf} = \frac{c}{2} + c \frac{OL/100}{2}$$

Där  $c$  är borrhålsavståndet i hålspets i m och  $OL$  är satt överlapp i %. Med ett avstånd på 3,5 m och ett överlapp på 50% blir  $I_{erf} = 2,6$  m.

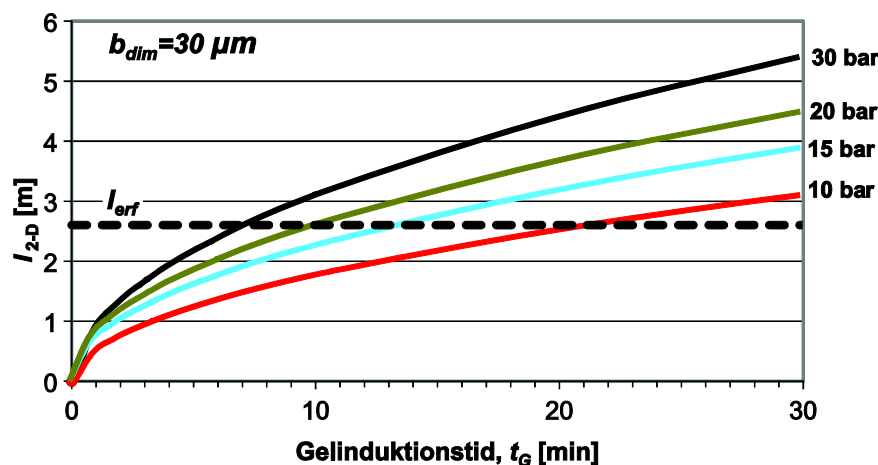
Inträngningslängden i dimensionerande sprickvidd styr hur skärmen kan utformas. Den maximala inträngningslängden för 2-dimensionellt flöde

med silica sol,  $I_{\max, 2-D}$ , beräknas med /Gustafson och Funehag, 2008a och 2008b/

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

där  $b$  är den hydrauliska sprickvidden och  $\Delta p$  är pålagt övertryck,  $t_G$  är gelinduktionstiden och  $\mu_0$  är den initiella viskositeten hos silica sol.

I nedanstående diagram visas inträngningslängden vid olika injektionsövertryck vid olika gelinduktionstider och erhållen inträngningslängd. I diagrammet finns den erforderliga inträngningslängden inritad.



Figur 7-8. Inträngningslängder för dimensionerande hydraulisk sprickvidd, 30  $\mu\text{m}$  som funktion av injektionsövertryck och gelinduktionstid. Den erforderliga inträngningslängden på 2,63 m är inritad som en horisontellt streckad linje.

Geltiden är 3 ggr gelinduktionstiden. För en gelinduktionstid på 10 min ger detta en geltid på 30 min. Inträngningslängden vid 10 bars övertryck är 1,8 m. Vid ett högre tryck, 20 bar, blir inträngningslängden 2,5 m. Vi ser att möjligheterna att kombinera tryck och tid är många.

#### **Erfoderlig inträngningslängd anpassad mot injekteringstid och borrhålsavstånd**

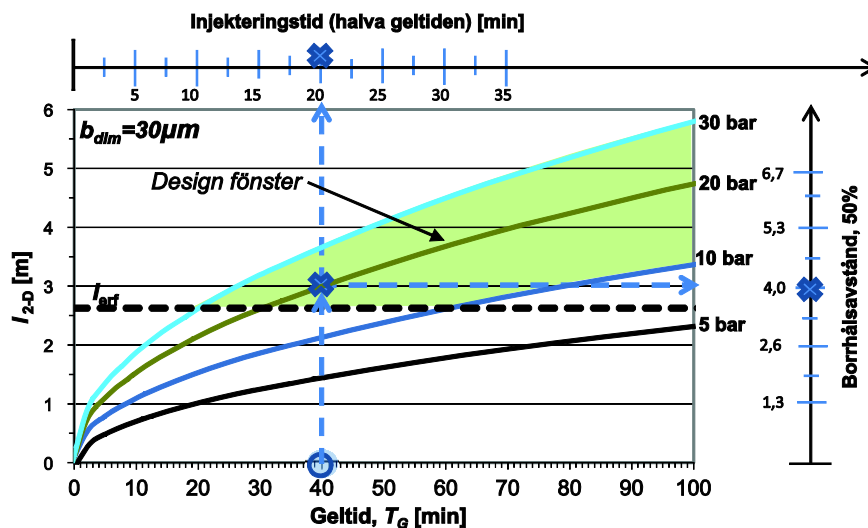
Hur lång injekteringstid som bör användas beror på förutsättningarna men den skall aldrig vara kortare än halva geltiden. Vid djupt förlagda tunnlar >100 m eller där det ger upphov till höga gradienter är risken för erosion stor. Vid dessa förutsättningar behövs noggrannare analyser avseende hydraulisk gradient och risk för erosion. Som ett överslag bör injekteringstiden för djupt förlagda tunnlar sättas till minst 2/3 av geltiden.

Anpassningen av injekteringstid och tryck bör göras utifrån erfarenhet samt möjliggöra för att uppdatera designen under den fortlöpande injekteringen. Nedan följer några anpassningsmöjligheter:

- Korta geltider <15 min kan ge svårigheter att hinna med både blandning och trycksätta slangar och själva injekteringen.
- Långa geltider >50 min ger långa injekteringstider med sannolikt stor åtgång av injekteringsmedel

- Injekteringstiden sätts till halva geltiden för grunt förlagda tunnlar, eftersom vi då har nått den snabbare tillväxten av viskositeten.
- Injekteringstiden sätts till minst 2/3 av geltiden för djupt förlagda tunnlar eller vid risk för erosion.
- Borrhålsavståndet bör anpassas beroende på vilken sprickvidd som måste tätas, längre avstånd kan användas vid större sprickvidder men bör inte överstiga 5 m.
- Borrhålsavståndet bör inte vara mindre än 2 m i en första omgång eftersom detta kan resultera i många sambandshål.
- Injekteringsövertrycket,  $\Delta p$  är omdebatterat. Som ett första riktvärde för att inte åstadkomma "jacking" bör det inte överstiga 3 ggr vikten av bergtäckningen – 2 ggr vattentrycket  
ligt  $\Delta p \leq 3\rho_b g d - 2p_w$

I nedanstående diagram kopplas minsta erforderliga inträngningslängd till borrhålsavstånd och injekteringstid (Figur 7-9).



Figur 7-9. Val av injekteringstid och tryck i relation till borrhålsavstånd.

Borrhålsavståndet var i detta exempel givet till 3,5 m vilket gav en minsta nödvändiga inträngningslängd,  $I_{erf}$  på 2,6 m. Största möjliga injekteringsövertryck,  $\Delta p$  för vårt exempel blir 2,4 MPa=24 bar. Används detta i diagrammet ovan ger detta grovt beräknat att injekteringstiden blir 20 minuter vid 20 bars övertryck och en geltid på 40 minuter. Inträngningslängden,  $I_{2-D}$ , blir då 3 m vilket är längre än den satta minsta inträngningslängden på 2,6 m. Detta skulle innebära att borrhålsavståndet i hålspets skulle kunna ökas till 4 m

#### Summering av designen så här långt:

Hålspetsavstånd	> 3,5 m < 4 m
Injekteringsövertryck	20 bar
Injekteringstid, vid uppnått designtryck	20 min
Geltid	40 min

## Slutlig design 3,4

Kontroller och efterföljande åtgärder för att uppnå de egenskaper som är fastställda är en viktig del i injekteringsprocessen. Kontrollerna innefattar: Kontroll av injekteringsmedlet samt kontroll av att inläckagekravet uppnås.

## Kontroll av injekteringsmedlet

Kontrollerna innefattar förprovning i laboratorium och i fält och dessutom löpande provning i fält.

Förprovning för framtagande av recept görs företrädevis i laboratorium med hjälp av en rotationsviskosimeter, en rheometer. Följande parametrar mäts:

Egenskap	Enhet
Viskositet, viskositetstillväxt	Pas (Pascalsekund)
Geltid	minuter

Viskositetstesterna skall kombineras med kopprover för geltiden. Med denna inledande studie kan recept tas fram.

Mätningarna bör utföras vid den temperatur som är aktuellt för kommande injektering (temperaturen i berget). Gelningen är starkt temperaturberoende. Som en enkel tumregel så halveras geltiden vid dubblad temperatur.

Oblandad silica sol åldras med tiden, en ca 2 månader gammal silica sol gelar något snabbare än en helt färsk.

I fält innan injektering påbörjats skall geltiden kontrolleras vid aktuell temperatur och storlek på blandning. Förfarandet är likt den löpande provningen nedan. Även kopprov skall tas för varje ny leverans för att säkerställa att medlet har efterfrågade egenskaper som redovisas från tillverkaren.

## Löpande kontroll av injekteringsmedlet

I fält skall kopprover tas regelbundet. När ett nytt recept skall användas bör ett kopprov tas på varje blandning tills åtminstone tre på varandra följande blandningar visar på en geltid som inte varierar mer än  $\pm 2,5$  min från förväntad geltid. Lyckas detta kan provningen glesas ut till var tredje till fjärde blandning.

Åtgärder för att nå önskat resultat är justering av mängd silica sol/saltlösning, kontroll av fatpumpar samt dess efterrinning och påverkan av lastcellerna beroende på om slangar är fyllda eller inte etc.

För de tre blandningarna gäller följande: Om den första blandningen visar sig under- eller överskrida geltiden behöver hålet ej spolats ur utan injekteringen kan tillgodoräknas. Nästkommande sats måste dock justeras för att nå önskad geltid. Om denna blandning är inom gränsen för godkänd geltid räcker det med ytterligare en sats för att få tre på varandra godkända blandningar.

Löpande provningen består av kontroll av geltid och temperatur enligt nedan.

Egenskap	Utrustning
Geltid	Engångsmugg av plast
Temperatur	Termometer

Under en injektering av en skärm blir det många muggar att hålla reda på. Varje mugg bör således märkas med borrhålsnummer och tidpunkt för blandning.

## Kontroll och åtgärder för inläckaget

Genomförande av en injektering i enlighet med de fastlagda geometrier, injekteringsteknik och injekteringsmedel som är resultatet av designarbetet skulle under ideala förhållanden åstadkomma eftersträvd täthet för tunneln. Berget är komplext och i stort sett omöjligt att beskriva fullständigt passande en injektering. Den upprättade designen hittills, baseras på informationen från förundersökningen och kallas därmed en basdesign. Möjligheter för att uppdatera basdesignen skall finnas med beskrivningen.

För att möjliggöra detta bör *hydrauliska tester* i injekteringsborrhålen utföras. Testerna kan visa om förväntade flöden och tolkade hydrauliska sprickvidder är inom gränserna för basdesignen. Om inte kan andra injekteringsmedel bli aktuella samt en bättre anpassad skärmgeometri och injekteringsteknik.

För att kontrollera att önskad täthet uppnåtts mellan borrhålen (att överlappet samt vald inträngningslängd fungerar) kan kontrollhål borras i en andra omgång sk. split-spacing förfarande. För ett givet tunnelparti med likande bergförhållanden kan kontroller genomföras i en begränsad omfattning. Utifrån detta kan basdesignen uppdateras och sedan gälla för framförvarande tunnelparti.

Ett mått som använts ganska frekvent i flera projekt med silica sol är att jämföra medianinflödet före injektering med medianinflödet efter första injekteringsomgången i kontrollhål. En sänkning av medianinflödet i paritet med önskad transmissivitetssänkning (faktor 50, 100 etc) bör ge en

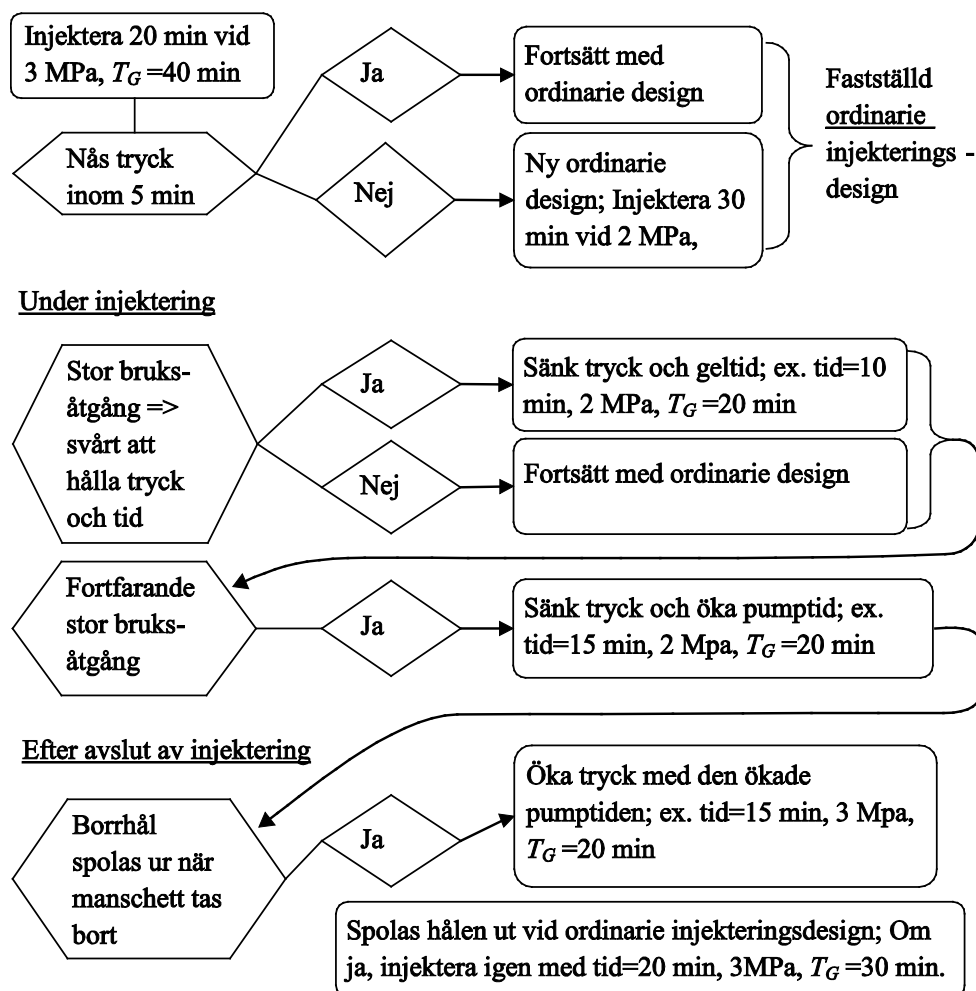
indikation på att upprättad design når eftersträvat resultat. Dock är det inläckaget till tunneln mätt i mätvall som bekräftar om resultatet är nått.

Det kan vara möjligt att upprätta temporära mätvallar under drivningen för att påvisa om injekteringen är tillräcklig eller inte.

Under själva injekteringen kan flera observationer leda till att basdesignen uppdateras. Styrningen görs alltid mot att nå tillräcklig inträngningslängd i den dimensionerande sprickvidden och således är följande observationer styrande:

- Uppnår ej designtryck, åtgärden är att öka geltiden och sänka trycket
- Uppnår ej designtid, åtgärden är att sänka geltiden och öka trycket

Med styrningen kan det i vissa fall ge oacceptabel åtgång av bruk samt tid. Upprättande av ett flödesschema som är tillgängligt för injekteringspersonalen är av stor vikt. Ett exempel visas nedan.



Figur 7-10.  
Ett principiellt flödesschema med förslag till åtgärder när stoppkriterierna tryck och tid ej kan uppnås.



Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org  
Besöksadress: Storgatan 19

kaigan tbk  
digital thinking

ISSN 1104-1773