

# SPRÄNGNINGENS INVERKAN PÅ INJEKTERING



Tyréns AB, Nitro Consult AB, Hjalmsängen AB

**UPPDRAG TYRÉNS** 921 815, Sprängningens inverkan på injektering

Titel på rapport: Sprängningens inverkan på injektering

Status: Slutversion

**MEDVERKANDE**

Beställare: Forskningsuppdrag finansierat av SBUF och STS

Kontaktperson: Tommy Ellison (SBUF) och Birgitta Olofsson (STS)

Konsult: Johan Funehag, Thomas Janson och Rasmus Trygg (Tyréns AB),  
Mathias Jern (Nitro Consult AB), Victoria Svahn (Hjälmsängen AB)

Uppdragsansvarig: Johan Funehag, Tyrens AB

Kvalitetsgranskare: Referensgrupp

Uppdragsansvarig

---

Johan Funehag

---

## FÖRORD

Injektering är en del i tunnelbyggandet, och syftet är att förhindra att grundvatten rinner in i tunneln vilket påverkar den omgivande miljön negativt. Detta gör injektering till det kanske allra viktigaste momentet sett ur ett miljöperspektiv. Forskning och utveckling i detta ämne har pågått under lång tid i Sverige på universitet, högskolor och institut, oftast med starkt engagemang från branschen via entreprenörer och tunnelägare. Trots att utvecklingen tagit stora kliv framåt står injekteringen för en stor del av den totala tiden och kostnaden för ett tunnelprojekt, och så kanske det måste vara, men tekniken kan utvecklas ytterligare.

Denna rapport belyser ett viktigt ämne gällande den kravställda väntetiden efter att injekteringen är utförd tills dess att borrhning och sprängning får utföras. Väntetiden utgör en kostnad för beställaren och tar tid från övrig produktion för entreprenören. Under lång tid har denna "väntetid" varit utan diskussion och debatt. Denna rapport som kan ses som en förstudie utan att gå in på djupa detaljer, och tar upp de olika påkänningar som injekteringsmedlet utsätts för under denna tid. Med kunskap om krafterna och dess möjliga storlek kan injekteringsmedlet beskrivas på ett delvis nytt sätt, för att kunna belysa de påverkande krafternas betydelse för tunnelns täthet.

I projektet har flera företag samt Luleå Tekniska Universitet medverkat med expertis. Både laborietester och fälttester har utförts med hjälp från respektive företag. En referensgrupp med representanter från tunnelägare, konsulter och entreprenörer har följt projektet och lämnat goda råd.

Projektgruppen tackar Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Sven Tyréns Stiftelse (STS) för det ekonomiska stöd som gjort detta projekt möjligt.

## SAMMANFATTNING

Förståelsen för de krafter som påverkar en injekterad bergmassa är väsentligt för att kunna bedöma väntetiden efter injektering. Vanliga väntetider under produktion idag är allt från 3 timmar till uppemot 12 timmar och baserat i huvudsak på subjektiva resonemang. Projektets mål är att förstå och öka kunskap av de krafter som påverkar injekteringen och därmed minimera väntetiden. Efter en erfarenhetsgenomgång utvecklades en konceptuell modell av sprängningens inverkan på injekteringsmedel i bergmassan. Där sprängningens detonation ger töjningar i bergmassan som överförs till injekteringsmedlet.

Ett antal laborationsförsök har utvecklats och utförts för att bestämma injekteringsmedlets skjuvmodul och skjuvhållfasthet och därmed analysera vilka skjuvspänningar i injekteringsmedlet som ska motstå sprängningens detonation. Avslutningsvis gjordes ett fältförsök för att visa hur borrning, vattenspolning och sprängning påverkar en injekterad bergmassa direkt efter injekteringsutförandet.

Resultaten från det specifika fältförsöket indikerar att påverkan från sprängning och borrning, en meter från ett injekterat hål, är minimal på injekteringen. Vattentrycket från borrningen och de hydrauliska testerna kan emellertid påverka injekteringen i närliggande borrhål om de står i kontakt med varande via vattenförande sprickor, vilket tydligt observerades av ett hål av totalt fem.

Slutligen kan projektet konstatera att den framtagna konceptuella modellen och resultaten från de olika försöken kan användas för att bestämma injekteringsmedlens väntetid specifikt, dvs:

- Borrning och sprängning av borrhål behöver inte kopplas till en viss allmän "väntetid" eller härdningstid för injekteringsmedlet. Injekteringsmedlet bör karakteriseras med avseende på skjuvmodul i enlighet med resultaten som presenterats
- Vibrationerna från sprängningen påverkar inte injekteringsresultaten 1 m från detonationen. Detta påvisades för laddning med en specifik laddning som liknar konturhål.
- Att borra kontrollhål och utföra hydrauliska tester direkt efter avslutad injektering kan vara riskabelt, särskilt mellan borrhål med hydraulisk kontakt.

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING.....</b>	<b>86</b>
1.1	PROBLEMBESKRIVNING.....	86
1.2	MÅL OCH SYFTE .....	86
1.3	AVGRÄNSNING .....	87
1.4	GENOMFÖRANDE .....	97
1.5	ORGANISATION .....	97
<b>2</b>	<b>LITTERATURSTUDIE.....</b>	<b>119</b>
2.1	BERGMASSAN.....	1412
2.2	HÅLLFASTHETSTILLVÄXT CEMENTPASTA.....	1413
2.2.1	ALLMÄNT .....	1413
2.2.2	REOLOGISKA EGENSKAPER OCH TIDIG HÅLLFASTHETSTILLVÄXT .....	16
2.2.3	PÅVERKANDE KRAFTER.....	19
2.3	BORNING.....	20
2.4	SPRÄNGNINGENS PÅVERKAN I NÄROMRÅDET .....	20
2.4.1	PÅVERKANDE KRAFTER - TÖJNING OCH SKJUVNINGSVINKEL I BERG .....	21
2.4.2	VIBRATIONSNIVÅER .....	22
2.5	VÄNTETIDEN EFTER INJEKTERING .....	23
<b>3</b>	<b>METOD .....</b>	<b>23</b>
3.1	KONCEPTUELL MODELL.....	23
3.2	TÖJNINGAR FRÅN SPRÄNGNING .....	25
3.3	LABORATIONSMOMENT .....	26
3.3.1	REOLOGI - FLYTGRÄNS FÖR INJEKTERINGSMEDEL .....	26
3.3.2	TRIAXIALFÖRSÖK - HÅLLFASTHETTILLVÄXT FÖR CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDEL.....	28
3.3.1	URSPOLNINGSFÖRSÖK .....	29
3.4	DEMONSTRATIONSFÖRSÖK I FÄLT .....	30
<b>4</b>	<b>RESULTAT OCH ANALYS .....</b>	<b>3132</b>
4.1	TÖJNINGAR FRÅN SPRÄNGNING .....	3132
4.2	RESULTAT REOMETER.....	34
4.2.1	RESULTAT PLATTA-PLATTA .....	34
4.2.2	RESULTAT KONA-PLATTA .....	35
4.2.3	RESULTAT SAMMANSTÄLLNING .....	36
4.3	RESULTAT TRIAXIALFÖRSÖK .....	36
4.4	URSPOLNINGSFÖRSÖK .....	40
4.5	FÄLTFÖRSÖK VIBRATIONSMÄTNINGAR.....	42

4.6	FÄLTFÖRSÖK HYDRAULISKA TESTER .....	<del>43</del> <b>44</b>
4.7	FÄLTFÖRSÖK INJEKTERING.....	<b>44</b>
4.7.1	SAMMANSTÄLLNING HYDRAULISKA TESTER FÖRE OCH EFTER SPRÄNGNING 45	
4.7.2	ÖVRIGA OBSERVATIONER .....	46
5	DISKUSSION OCH SLUTSATSER .....	<b>47</b>
5.1	DISKUSSION.....	<b>47</b>
5.1.1	SKJUVMODUL INJEKTERINGSMEDEL.....	47
5.1.2	PÅ FRÅGAN OM SPRÄNGNINGEN PÅVERKAT INJEKTERINGEN.....	<del>48</del> <b>50</b>
5.1.3	FRÅGAN OM VATTENINJEKTION PÅVERKAR INJEKTERINGSMEDELET .....	50
5.2	SLUTSATSER OCH VIDARE UNDERSÖKNINGAR.....	<del>50</del> <b>51</b>
6	REFERENSER.....	<del>52</del> <b>53</b>

**BILAGOR**

Bilaga 2	Labrapport - Reologi
Bilaga 3	Labrapport - Triaxialförsök
Bilaga 4	Fältrapport - Injektering
Bilaga 5	Fältrapport - Urspolning
Bilaga 6	Fältrapport - Vibrationer från sprängning



## 1 INLEDNING

För en effektiv tunneldrift ska kunskap, teknologi och säkerhet samspela för högsta möjliga samhällsnytta. En specifik samhällsnytta vid tunnelbyggnation skulle exempelvis kunna utgöras av kostnadseffektivitet och hög produktivitet som kan erhållas genom snabbare framdrift. Framdriften styrs av produktionsmetoder som tunneln byggs med och såväl planerade som oplanerade väntetider (stillestånd) som kan uppkomma i processen. Framdriften kan delas in i drivningscykler som är mer eller mindre optimerade beroende på kunskap och planering. En del av cykeln som är godtycklig, enligt författarna av denna rapport, är den väntetid som sätts mellan att injekteringen är utförd och att borrhningen för salvhål och/eller sprängning kan utföras. I infrastrukturprojekt ställs krav på injekteringsmedlets uppnådda hållfasthet och eller tid innan borrhning får påbörjas. Denna rapport är en förstudie i att försöka koppla en mätbar parameter till sprängkraftens storlek. Det ska dock poängteras att det sällan redovisas hur dessa kunskapsmässigt kopplas samman.

Föreliggande projekt ger sig i kast med drivningscykelns väntetid som i stor grad är oklar i sin definition men påverkar tidsåtgången betydligt. Det är en del av cykeln som i hög utsträckning kan effektiviseras men än så länge varit godtycklig och lämnats utanför kunskapsinhämtningen. En djupare förståelse av väntetidens betydelse för injektering möjliggör ett säkrare faktaunderlag för beslut om tidskritiska åtgärder i produktionen.

För att gå vidare i denna fråga krävs en förståelse kring syftet med injektering och en belysning av de ingående delarna i byggmetoden att injektera-borra-spränga, hur de sammankopplas och är beroende av varandra.

### 1.1 PROBLEMBESKRIVNING

En förståelse av externa krafter från borrhning, renspolning av borrhål och sprängning i en injekterad bergmassa är nödvändig för att kunna förklara och kunna resonera kring faktorer som påverkar behovet av väntetid efter injektering. Idag är det brukligt att låta injekteringsmedlet härda tillräckligt länge innan efterföljande arbeten kan påbörjas. Vanliga väntetider är allt från 3 timmar till uppemot 12 timmar. Det inses att denna tid måste kunna tydliggöras i hur den förhåller sig till injekteringsmedlets egenskaper samt erforderlig motståndskraft. Först efter att sådan kunskap inhämtats möjliggörs väl underbyggda beslut om framdriften i bergarbetena. Samtidigt kan optimeringen i kombinationen av valt injekteringsmedel, teknik och risker beaktas.

Projektet ska ge en konceptuell förståelse av externa krafter som påverkar injekteringsfunktionen. Som en viktig del i denna förståelse beskrivs de ingående processerna som påverkar injekteringsmedlets egenskaper och motståndskraft. En fördjupad förståelse möjliggör att resonemang kan föras kring riktvärden på medlets motståndskraft innan efterföljande arbeten kan påbörjas.

### 1.2 MÅL OCH SYFTE

Föreliggande projektet är en förstudie för att hitta ramverket kring vilka och vilken typ av externa krafter som påverkar injekteringsmedlet. Det övergripande syftet är att belysa frågeställningar kring begreppet "väntetid" efter injektering. Projektet har följande delmål:

- Beskriva de externa krafter som påverkar nyligen injekterat bruk från borra-sprängmetoden. Exempel på krafter är skjuvkraft, erosionskraft och tryckkraft.
- Redogöra för vilka av brukets egenskaper som kan kopplas till ovanstående externa krafter.

Projektets ingående delar stödjer samhällets mål att effektivisera byggprocessen och utveckla hållbara lösningar.

### 1.3 AVGRÄNSNING

Projektet behandlar enbart förinjektering med cementbruk i hårt kristallint berg med borra-sprängmetoden. Projektet tar inte upp andra aspekter av väntetid såsom arbetscykler och frågor som berör arbetsmiljö eller annan eventuell störande verksamhet.



#### 1.4 GENOMFÖRANDE

Projektet genomförs av en arbetsgrupp med bakgrund inom olika expertisområden; injektering, hydrogeologi, sprängning, injekteringsmedlets egenskaper samt geoteknisk och bergteknisk materialkunskap. Målet med respektive expertisområde är att identifiera och beskriva de påverkande krafterna och koppla processerna till dessa. Projektet genomförs i följande moment:

##### Litteraturstudie

Fortsättningsvis inhämtas kunskap från litteratur och tidigare projekt med syfte att förklara och öka förståelsen för dagens satta krav på väntetid. Litteraturen fokuserar på följande delar:

- a) Vibrationer och krafter,
- b) hydraulisk gradient och erosion,
- c) hållfasthet på injekteringsmedel,
- d) krav på bruk i bygghandlingar.

##### Konceptuell studie

Projektet inleds med en konceptuell studie med följande förväntade resultat:

- a) Identifikation av påverkande krafter från borrhning, vibrationer och stötar från borrhåll,
- b) storlek och typ av flödeskrafter i en pricka från borrhållspolning och
- c) sprängningens påverkan på injekteringsmedel, påverkande krafter samt storleken på de krafter som erhålls från sprängning (tolkning av krafter från vibrationer och eventuell gasinträngning).

##### Laborationsmoment

Fokus i laboratoriearbetena var att ta fram hållfasthetsrelaterade parametrar och att demonstrera hur krafter påverkar injekteringsmedlet. Följande undersökande arbetsmoment planerades:

- a) Vattenflödets påverkan på injekteringsmedlet (från exempelvis borrhållspolning).
- b) Injekteringsmedlets reologiska egenskaper och skjuvhållfasthet i det flytande tillståndet.
- c) Injekteringsmedlets hållfasthetstillväxt med tiden.

##### Fältmoment

Inom ramen för projektet genomfördes fältmoment med syfte att visa hur sprängningen påverkar injekterade sprickor i bergmassan. Via hydrauliska tester, före respektive efter sprängning, samt vibrationsmätningar verifieras detta.

#### 1.5 ORGANISATION

I projektgruppen ingår följande personer med huvudsakliga ansvarsområden:

- Johan Funehag (Tyréns AB), Projektledare. Hydrogeologi och vattenkrafter
- Mathias Jern (Nitro Consult AB), Sprängningsprocesser och geologiska material
- Rasmus Trygg (Tyréns AB), Jordmekanik och laborationsanalyser
- Thomas Janson (Tyréns AB), Injekteringsprocesser och bergmekanik

- Victoria Svahn (Hjälmsängen AB), Jordmekanik och sprängningsprocesser

I referensgruppen ingår följande personer:

- Ulf Håkansson, Skanska
- Magnus Zetterlund, Norconsult
- Staffan Swedenborg, Golder Associates AB (tidigare NCC)
- Carl Larsson, Trafikverket
- Urban Åkesson, Trafikverket
- Christian Butron, Trafikverket
- Tommy Ellison, Besab AB

Projektet är finansierat av Svenska byggbranschens utvecklingsfond (SBUF) och Sven Tyréns Stiftelse (STS).

Laborationsförsöken med triaxial-celler utfördes på PM Labtek AB:s geotekniska laboratorium i Gottskär, Kungsbacka. Laboratorietekniker var Peter Hedborg, PM Labtek AB, med lång erfarenhet av avancerade försök på jordmaterial. Rasmus Trygg assisterade i laboratoriearbetet vid merparten av tillfällena. Vid några av tillfällena deltog även Magnus Salmi eller Tony Axelsson vid förberedelser och utförande av fallkonsförsök. Utrustning för fälttester, samt cementsäckar till injekteringsmedlet, tillhandahölls av Tyréns AB. Utrustning för triaxialförsök och fallkonsförsök samt all annan kringutrustning tillhandahölls av PM Labtek AB.

Laborationstesterna med reometern utfördes på dels Chalmers tekniska högskola samt vid Luleå tekniska Universitet. Försöken utfördes mestadels av Pramod Surendran med överseende av Johan Funehag.

Rörförsöken utfördes på GMA:s anläggning i Sunne av Thomas Janson och Johan Funehag. Hjälp samt i ordningställande av försöken gjordes av Tommie Hilmersson, GMA.

Demonstrationsförsöket gjordes i Bohus bergsprängnings AB:s bergtäkts utanför Hedekas. Bohus bergsprängning bistod med borrning, el och vatten för testerna samt sprängmedel. Injekteringsutrustning tillhandahölls av AB Besab. Utförandet av försöket gjordes av Johan Funehag, Thomas Janson, Caroline Lundell, Aron Niklasson från Tyréns samt Mathias Jern, Rikard Österlund, Martin Broberg från Nitro Consult.

## 2 LITTERATURSTUDIE

Litteraturstudien syftar till att beskriva den befintliga kunskapen om de krafter som påverkar ett injekteringsmedel, hållfastheten av cementbruk i ohärdat tillstånd samt hur krafterna från en sprängning kan beskrivas. Det ohärdade tillståndet definieras i denna rapport som yngre än 5 timmar.

Tunneldrivningscykeln genererar krafter i följande arbetsmoment:

- borrar av borrhål (salvhål och injekteringshål inklusive kompletterande injekteringshål),
- borrhålsspolning,
- efterföljande eventuella vattenförlustmätning,
- sprängning (genererar sprickor och efterföljande gasexpansion).

De resonemang som använts för att avgränsa och ge en första inblick i hur krafterna från drivningscykeln kan påverka injekteringsmedlet följer nedan. De processer och krafter som kan påverka ett färskt injekteringsmedel efter att injekteringen ägt rum är i ordningsföljd:

- 1) Vibrationer från borrar av närliggande borrhål, dessa kan vara från kompletterande injekteringshål eller salvhål.

Vibrationerna som erhålls kan beskrivas som en tryck- (P-våg) respektive skjuvvåg (S-våg) och är en följd av att borrkronan slår mot berget. Dessa vibrationers storlek beskrivs av frekvens och amplitud. Frekvensen, med vilken borrkronan slår, antas vara i storleksordningen 2-10 Hz, alltså 2-10 slag i sekunden. Processen ger upphov till en stötvåg och/eller en tryckvåg, som genereras från borrkronan in i berget som transporteras vidare in i bergmassan. När denna våg träffar sprickor eller kaviteter byter vågen riktning samtidigt som en skjuvvåg genereras. De vibrationskrafter som genereras vid borrar och som skulle kunna överföras via bergmassan antas vara förhållandevis liten. Detta eftersom vibrationskraften från borrar avtar snabbt i bergmassan.

- 2) Borrhålsspolning med kraftigt vattenflöde i ett närliggande borrhål.

Borrhålsspolningen görs med högt vattenflöde och tryck ut från borrstangen, uppskattningsvis av storleksordningen 50 l/min och 20 bar. Borrhålet utgör inte en instängd volym utan vattnet pressas tillbaka ut genom borrhålet. Då det finns ett visst motstånd för vattnet att rinna förbi borrkronan skulle detta kunna generera ett visst tryck i borrhålet framför borrkronan. Det är således detta tryck som skulle kunna trycka/spola bort injekteringsmedlet i sprickan.

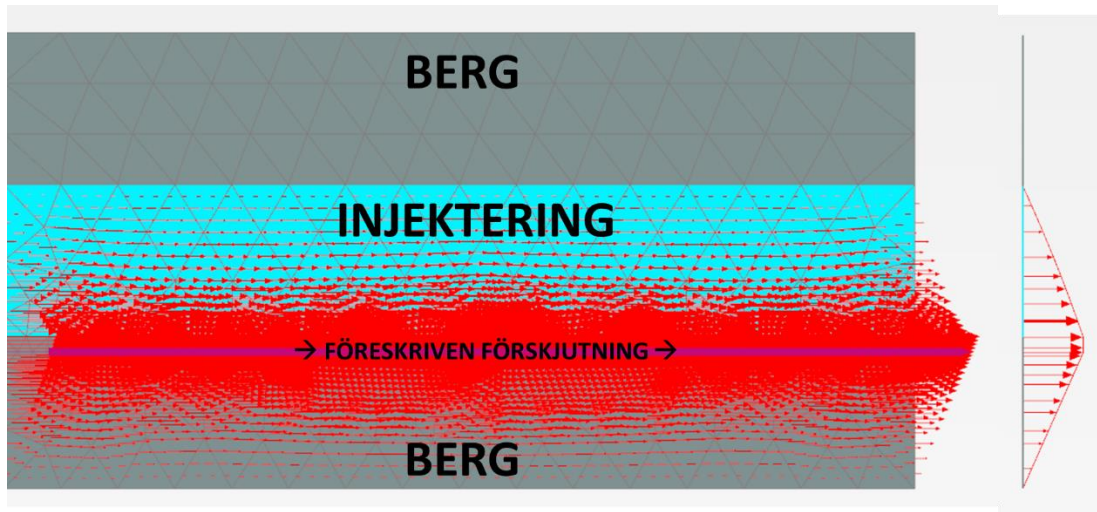
Förhållandet mellan borrkronans diameter och borrhålsdiameter är i storleksordningen någon/några millimeter. Den injekterade sprickans vidd är vanligtvis ca 0,1-0,3 mm, alltså en tiondel mindre i storlek. Det instängda trycket är lågt i förhållande till det möjliga pålagda trycket då flödet är det som ger upphov till trycket. Det påverkande tryck i den injekterade sprickan blir då 2-5 bar. Vattenflödet från borrhålsspolningen kan erodera injekteringsmedlet i sprickan beroende på vattentryck och injekterad längd.

- 3) Kraften från sprängning av tunnelsalva (vågutbredning som skapar sprickor i berget)

Det som är utgångspunkt i denna studie gällande sprängkrafter är att detonationen ger vibration vilket genererar en skjuvvåg. Skjuvvågen kan omräknas till en skjuvkraft som skapar sprickor lokalt runt salvborrhålet samt utsätter redan befintliga sprickor för skjuvtöjningar.

Från enkel mekanik vet man att ju styvare ett material är, dvs ju högre elasticitetsmodul materialet har, desto mindre deformation kan material utsättas för innan det går till brott. Ett material med dessa egenskaper tål således mindre deformation innan det går till brott. Detta projekt ifrågasätter om det alltid är önskvärt att definiera en väntetid efter vilken sprängning ska ske (efter en viss tids härdning av injekteringsmedlet) eller skulle det bara mer rimligt att spränga inom ett visst tidsintervall efter att injektering är utförd då injekteringsmedlet fortfarande är flödande och elastiskt. Tankegången illustreras i nedanstående figurer (Figur 2-1 och 2-2).

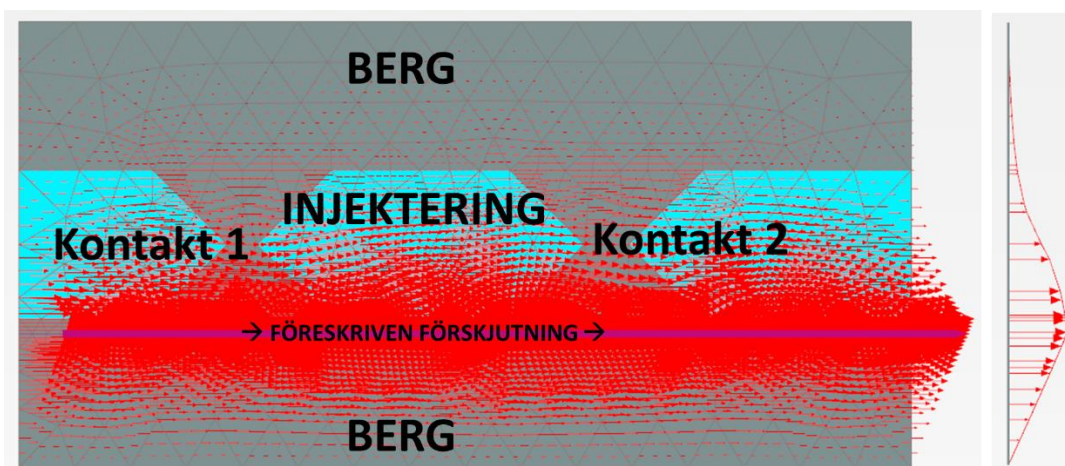
Figur 2-1 illustrerar resultat från en förenklad statisk FEM-analys tänkt att representera en nyligen injekterad spricka, med "oändlig utbredning" i sprickplanet, som utsätts för en ensidig förskjutning längs med planet. Då styvheten i det modellerade injekteringsmedlet är låg fortplantas inte rörelsen mellan de två bergvolymerna.



**Figur 2-1.** Rörelse i x-led över en nyligen injekterad spricka som utsätts för enkelsidig förskjutning. De röda pilarna representeras av rörelsevektorer. Ju längre röd pil och fler till antal visar läget på rörelsen.

För en spricka utan kontaktytor (figur 2-1) visas en rörelse längs bruket i ena sprickhalvan. Frågeställningen blir således hur denna rörelse/deformation är kopplad till injekteringsmedlets hållfasthetsegenskaper för att eventuellt ge upphov till ett brott.

I Figur 2-2 redovisas motsvarande scenario som ovan men med kontaktpunkter mellan de två bergvolymerna. I detta fall fortplantar sig en del av deformationen förbi den injekterade sprickan över till motstående bergvolym.



**Figur 2-2.** Rörelse i x-led över en nyligen injekterad spricka med två kontaktpunkter som utsätts för enkelsidig förskjutning.

Vid en spricka utan kontaktpunkter fylld med injekteringsmedel kommer skjuvrörelsen inte att fortplanta sig till ovanliggande bergmassa. Om sprickan har kontaktpunkter erhålls en förskjutning i ovanliggande bergmassa. Således kan man tänka sig att det mest påfrestande scenariot blir en spricka utan kontaktpunkter där skjuvtöjningen i injekteringsmedlet blir som störst.

#### 4) Gasexpansionen av spränggaser som loss håller berget

Förutom vibrationer kan injekteringsmedlet påverkas av att spränggaserna strömmar ut i det omgivande spricksystemet. Vid detonation uppstår ett högt gastryck mot borrhålsväggen, detta gastryck kan uppskattas via ekvationen vilket gäller för ett fulladdat hål:

$$p_b = \frac{\rho_0 \cdot VOD^2}{8}$$

där:

$p_b$  = borrhålstrycket (Pa)

$\rho_0$  = densiteten hos sprängmedlet ( $\text{kg/m}^3$ )

VOD = detonationshastigheten (m/s)

Ett fulladdat borrhål laddat med ett sprängämne med densiteten  $1000 \text{ kg/m}^3$  och VOD =  $5000 \text{ m/s}$  får följaktligen ett beräknat borrhålstryck på  $3,1 \text{ GPa}$ .

Frikopplade laddningar innebär att borrhålet inte är fulladdat då gäller sambandet, se exempelvis Yang och Jern (2018):

$$p_b = P_c \left( \frac{r_c}{r_b} \right)^{2n}$$

där:

$p_b$  = trycket vid borrhålsväggen,

$r_b$  = borrhålsradien

$p_c$  = trycket vid laddradien,

$r_c$  = radien på laddsträngen

$n = 3$  = konstant (Landay & Stanyukovich, 1945)

För en strängladdning på  $0,35 \text{ kg/m}$  (vilket ungefär motsvarar en konturladdning vid "försiktig sprängning") innebär detta en laddradie på  $1,05 \text{ cm}$ . Antas en borrhålsdiameter på  $48 \text{ mm}$  fås då ett borrhålstryck på  $20 \text{ MPa}$ . Detta tryck kommer dock att sjunka snabbt när fragmenteringsprocessen startar.

Borrhålstrycket ger upphov till den chockvåg som i sin tur genererar vibrationer i bergmassan, i nästa steg skapas dock sprickor kring borrhålet, gas strömmar ut i sprickor runt borrhålet och gastrycket sjunker. Hastigheten på gas-strömningen är ca  $5-10\%$  av p-vågs hastigheten (Williamson and Armstrong, 1986).

När gasen trycks ut ur hålet kommer den att strömma ut i alla sprickor inklusive injekterade i alla riktningar. Gastrycket avtar dock snabbt med avståndet. Finns det inte någon fri yta som berget kan brytas mot kan gas strömma ut långa sträckor i bergmassan (uppemot  $20 \text{ m}$ , se McKenzie (1999)). Men om gasen istället når fram till en fri yta och strömmar ut i atmosfären kommer gastrycket att i princip försvinna momentant. Avståndet mellan det laddade borrhålet och en fri bergyta (exempelvis närliggande borrhål) är normalt ca  $0,8 \text{ m}$  för konturhålen. Det är därför osannolikt att det i den andra riktningen (in mot bergmassan) förekomma höga gastryck längre in i bergmassan än  $0,8 \text{ m}$ .

Följaktligen kan man anta gastryck på några MPa i sprickor i bergmassan ut till ca  $0,8 \text{ m}$  men sannolikt inte på större avstånd. Påverkan på injekteringsmedlet i sprickor bör följaktligen vara på ungefär samma avstånd.

I föreliggande kapitel redovisas den litteraturstudie som vilar på en genomgång av påverkande krafter på ett injekteringsmedel vid tunneldrivning.

## 2.1 BERGMASSAN

Bergmassan i Sverige utgörs huvudsakligen av kristallina bergarter med enskilda sprickor och sprick-/krosszoner och oftast innehållande vatten. De bergmekaniska egenskaperna för intakt berg och enskilda sprickor kan bestämmas genom tester och undersökningar. I Tabell 2-1 redovisas en sammanställning av några värden på typiska bergmekaniska egenskaper för intakt berg och enskilda sprickor i Sverige.

*Tabell 2-1. Typiska bergmekaniska egenskaper, för intakt berg och enskilda sprickor, i Sverige*

Bergmekaniska egenskaper	
Intakt berg	
Tryckhållfasthet (MPa)	100 - 300 i bergarter med hög hållfasthet 50 - 100 i bergarter med sämre hållfasthet
Deformationsmodul (GPa)	40 - 100 Vanligaste 60 - 80
Poisson's tal (-)	0,15 - 0,30 Antas normalt till 0,25
Enskilda sprickor	
Friktionsvinkel (°)	30 - 40 ofylld jämn sprickyta, för råa sprickor ökar de med ca 5-10
Kohesion (MPa)	50 - 200 ofylld jämn sprickyta, för råa sprickor ökar de med ca 200 - 300
Normalstyvhet (GPa/m)	300 - 700
Skjuvstyvhet (GPa/m)	10 - 40

Då bergmassan är uppbyggd av både intakta bergblock och enskilda sprickor samt sprick-/krosszoner blir egenskaperna för bergmassan mer komplex och svåra att bestämma. Därför används oftast empiriska erfarenhetsmetoder för att uppskatta bergmassans egenskaper. Osäkerhetsintervallet och spridningen i egenskaperna blir därmed ofta stor. I Tabell 2-2 följer några erfarenhetsvärden på bergmekaniska egenskaper för bergmassan.

*Tabell 2-2. Typiska bergmekaniska egenskaper för bergmassan, i Sverige*

Bergmekaniska egenskaper	
Bergmassa	
Tryckhållfasthet (MPa)	0,5 - 20
Deformationsmodul (GPa)	10 - 40
Poisson's tal (-)	0,25

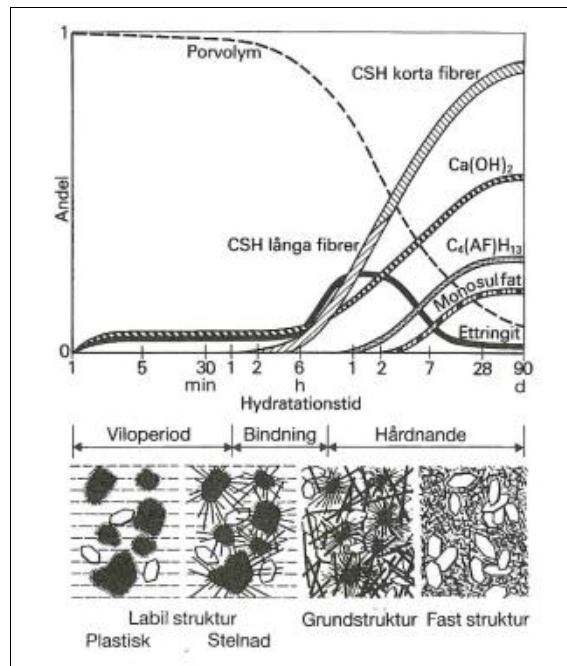
## 2.2 HÅLLFASTHETSTILLVÄXT CEMENTPASTA

Denna litteratutgenomgång innefattar cementpastans hållfasthetstillväxt. Cementbaserade injekteringsmedel är det vanligaste förekommande injekteringsmedlet i Sverige. För cementpasta allmänt och ett cementbaserat injekteringsmedel är skillnaden främst vct-talet. Cementpasta kan ha lägre vct vilket innebär en mer styv blandning av cement och vatten med högre densitet och högre viskositet.

### 2.2.1 ALLMÄNT

Cementpastans hållfasthet och dess tillväxt, dvs hydratationsförloppet, är komplicerad och beskrivs allmänt i exempelvis Betonghandboken (Svensk Byggtjänst), där bland annat hydratationsförloppet är illustrerat enligt Figur 2-3.



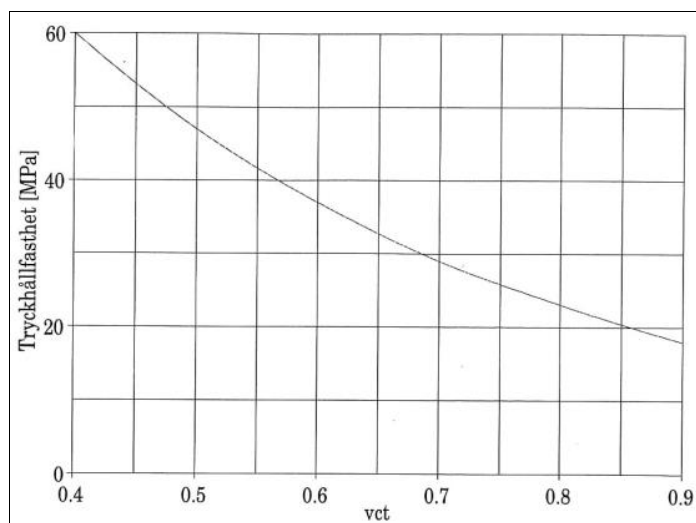


**Figur 2-3.** Hydratationsförloppet för cementpasta enligt Betonghandboken (Svensk Byggtjänst)

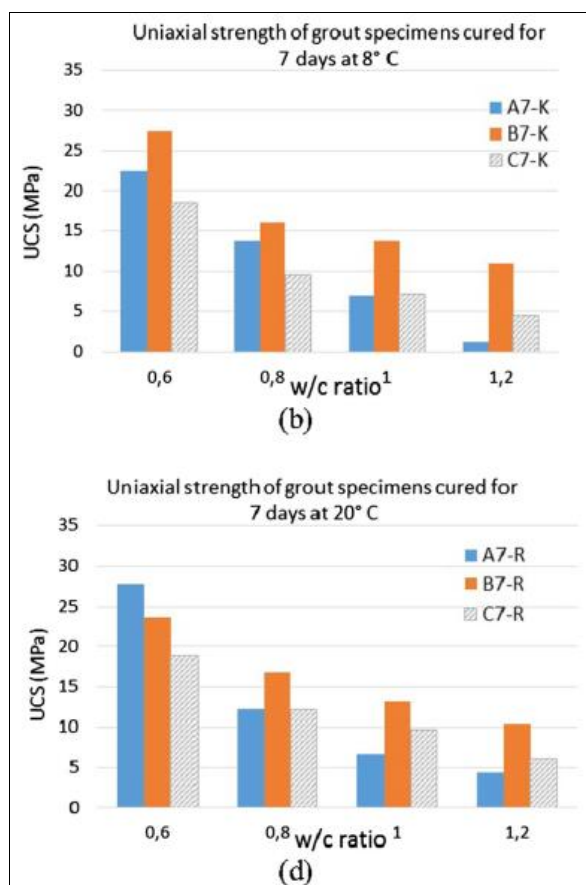
Förenklat indelas hydratationsförloppet i två faser; gelningsfasen och hårdnandefasen. Vid gelningen binds cementpartiklarna svagt till varandra. Under denna fas kan bindningarna brytas ner vid någon typ av störning, dvs blandningen har en labil struktur enligt figur 2-3. Efter en tid binds partiklarna allt starkare till varandra, dvs hårdnandefasen påbörjas, och blandningen får en stabil struktur som klarar störningar. En fast struktur fås, men någon slutlig hållfasthet finns egentligen inte, då förloppet aldrig helt avstannar, därför måste hållfastheten definieras med en tidsperiod, exempelvis efter 7 eller 28 dygn.

Inom litteraturen för cementpasta finns mycket underlag om hållfasthet och fokus är främst efter en viss härdningstid skett, ungefär efter ca 6 timmars härdningstid eller mer.

Hållfastheten beror på ett antal faktorer, varav de mest betydelsefulla är cementtyp, tillsatser, vattencemental (vct) och temperatur. I Figur 2-4 och 2-5 illustras hur vct-talet påverkar hållfastheten för cementpasta respektive cementbaserat injekteringsmedel.



**Figur 2-4.** Allmänt samband mellan vct och tryckhållfastheten (28 dygn) för cementpasta (Hansson 1994).



**Figur 2-5.** Hållfasthetsprovning på olika cementbaserade injekteringsmedel (A, B och C) med olika vct (0,6 till 1,2) (w/c-ratio på engelska) och temperaturerna 8 och 20 grader (Bohlooli et al, 2018).

I litteraturen finns data om hållfastheten i olika typer av cementpasta såsom betong, sprutbetong och injutningsbruk för bult. Exempel på sådana uppgifter framgår i Tabell 2-3 nedan.

**Tabell 2-3.** Exempel på hållfasthetsdata på betong (efter 7 till 28 dygn), sprutbetong och injutningsbruk för bult.

Produkt	Tryckhållfasthet	E-modul	Skjuvmodul	Skjuvhållfasthet
Betong	11,5 till 57 MPa	27 till 39 GPa	-	-
Sprutbetong	30 MPa	16 GPa	-	2,0 MPa
Bultbruk	20 MPa	-	9 GPa	-

För det praktiska arbetet finns det vissa rekommendationer när sprutbetongen och injutningsbruket har tillräcklig hållfasthet för att kunna tillgodoräknas, dvs kunna påföras externa krafter. För sprutbetong är rekommendationen mellan 1 och 4 MPa och för injutningsbruk mellan 1 och 1,6 MPa.

### 2.2.2 REOLOGISKA EGENSKAPER OCH TIDIG HÅLLFASTHETSTILLVÄXT

För cementbaserade injekteringsmedel beskrivs blandningen inledningsvis som en Bingham vätska, dvs med strömningsegenskaperna viskositet och flytgräns. Viskositeten (inre friktion) beskriver hur trögflytande vätskan är och flytgränsen, vätskans skjuvhållfasthet (partikelattraktionen). Dessa två egenskaper för en cementblandning kan bestämmas med reometer. Håkansson, (1993) gjorde ett pionjärarbete gällande injekteringsmedels (cementbaserade) reologiska egenskaper där det fastslogs att flytgräns och viskositet är kritiska parametrars som måste bestämmas för att kunna



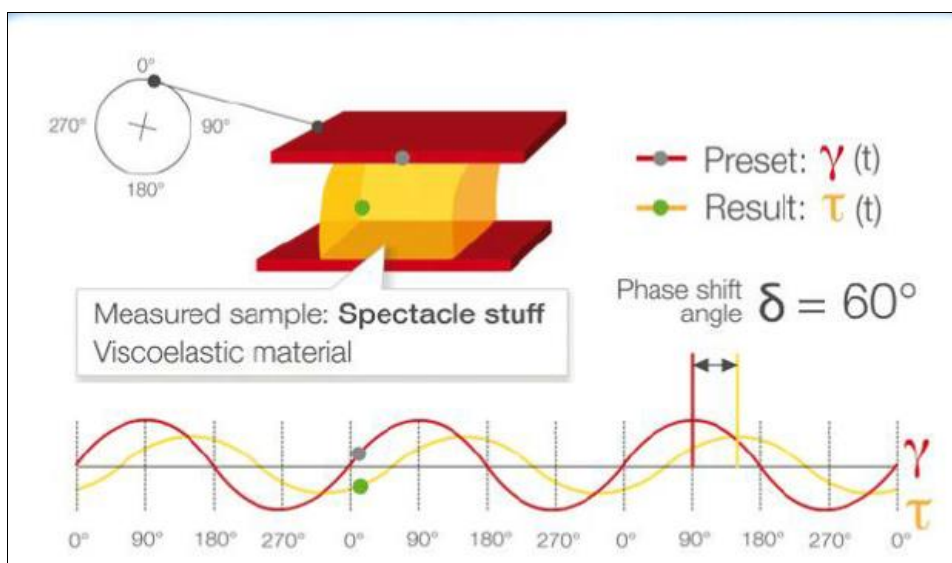
förutspå/beräkna injekteringsmedlets spridning i berget. I litteraturen finns det otaliga artiklar och rapporter gällande reologiska egenskaper på cementbaserade injekteringsmedel. På senare tid har även försök gjorts för att finna en enhetlig metod för hur egenskaperna skall mätas (Håkansson et.al, 2018) samt ett utförligt arbete gällande metodutveckling av utrustning för mätning (Schamu, 2019).

En vätska bestående av partiklar kan beskrivas som ett viskoplastiskt material. Detta innebär att en del av materialet beskrivs som viskös då spänningen på materialet överstiger flytgränsen, alltså materialet flyter. Med en lägre spänningen än flytgränsen beskrivs materialet som ett plastiskt fast material. För ett fast elastiskt material som följer Hooke's lag är modulen (E,G) förhållandet mellan pålagd spänning och deformation. För ett rent elastiskt material sker spänning och töjning helt i fas. För ett visköst (viskoelastiskt) material finns det en fäsförskjutning mellan spänning och töjning. Spänning och töjning för viskoelastiska material kan beskrivas enligt:

- Töjning,  $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t)$
- Spänning,  $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$

där  $\omega = 2\pi f$  och  $f$  frekvens för oscillering,  $t$  är tiden,  $\delta$  är fäsförskjutning.

Skjuvmodulen,  $G$ , för en vätska bestäms av förhållandet mellan pålagd skjuvspänning och motsvarande skjuvtöjning. Det är oftast enklast att bestämma skjuvmodulen för vätskor genom mätning av skjuvhastighet,  $\dot{\gamma}$  (Gamma prick). Då de flesta utrustningar för reologi använder roterande verktyg där hastigheten genom vinkelförändring kan mätas. Verktygen anpassas geometriskt så villkor såsom laminär strömning, konstant skjuvning över hela provet, inget slip etc infrias. Olika utformningar på verktygen och olika typer av reologiapparater lämpar sig olika väl för framtagande av reologiska egenskaper. Verktyget med utformningen som en kona och en platta ger exempelvis lika töjning över hela provet. Samtidigt så försätts konan med oscillerande rörelser med olika vinkelhastighet för att erhålla en spänning som påverkar bindningarna mellan partiklarna minimalt samt under en dynamisk belastning. Med en kona som rör sig parallellt mot en platta som är fast ger detta upphov till en skjuvrörelse i provet. Motståndet mot rörelse mäts i konan vilket omvandlas till en skjuvspänning genom vetskaps om vinkelförändring, hastighet och geometri. Med en oscillerande rörelse som innebär att provet rör sig både framåt och bakåt gentemot plattan innebär detta att två olika skjuvmoduler erhålls. En modul,  $G'$  ( $G$  prim) kallas inom reologin för "storage modulus" och innebär att energi lagras i materialet och är främst den elastiska delen som representeras. Den andra modulen i materialet som erhålls kallas  $G''$  ( $G$  bis) eller "loss modulus" där energin går förlorad och är främst den viskösa delen. I viskoelastiska vätskor finns alltid en fäsförskjutning mellan skjuvhastighet och skjuvspänning eller under ett oscillerande test vid en pålagd skjuvhastighet erhålls responsen via en uppmätt skjuvspänning vilket uppträder efter en viss fäsförskjutning. Ett exempel på hur detta kan se ut visas i Figur 2-6. För ett fast material finns ingen fäsförskjutning (0 grader).



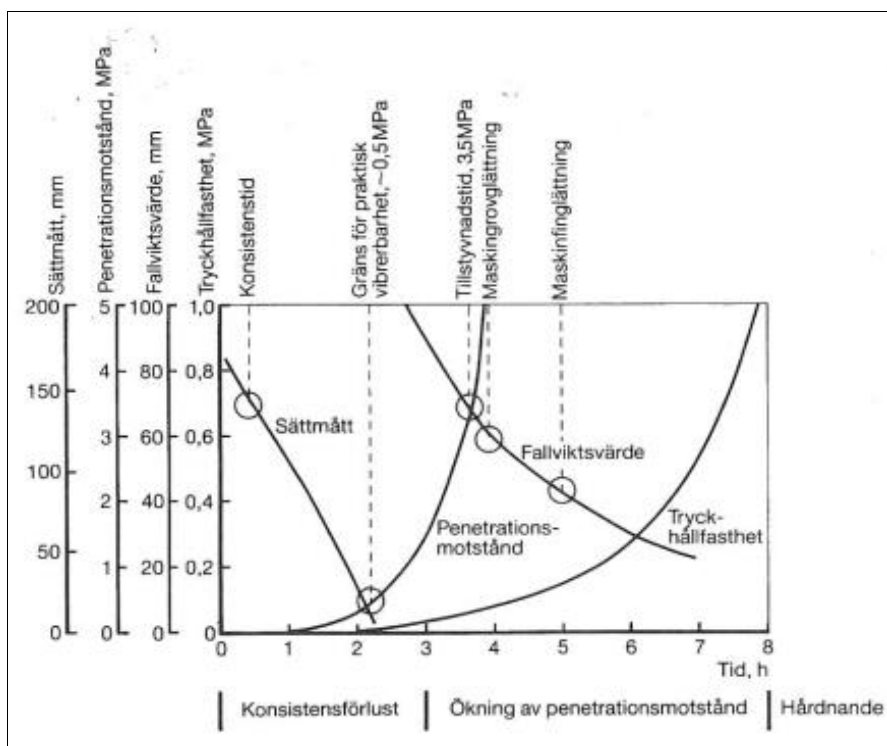
**Figur 2-6.** Fäsförskjutning i viskoelastiska vätskor där responsen från skjuvspänningen,  $\tau$ , kommer efter att skuvningen,  $\gamma$ , startat. Referens: Basics of Rheology- Anton Paar Wiki.

Efter den viskoelastiska fasen för vätskan påbörjas en gelningsfas, dvs partiklarna binds till varandra. Vartefter partiklarna binds till varandra påbörjas hårdnadsförloppet, se Figur 2-3. Denna punkt benämns som Bindetid, dvs den tid som åtgår för att en viss blandning av cement och vatten skall erhålla en viss grad av styvhet, och mäts med en nål i en Vicat-apparat (SS 13 42 31, SS-EN 196-3).

I Betonghandboken beskrivs tillstyvnadsförlopp för en cementpasta i faser:

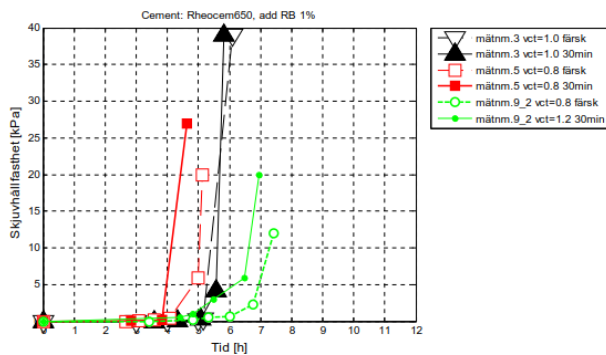
- Fas 1 konsistensändring ("konsistensförlust")
- Fas 2 tillstyvnadsfasen som kan observeras genom inträngning/penetrationsmotståndet
- Fas 3 hållfasthetsutveckling

I Figur 2-7 nedan illustreras samband mellan tillstyvnadsfaserna och tidig hållfasthet samt lämpliga mätmetoder och -värden som finns för de olika faserna och tidsintervallerna.

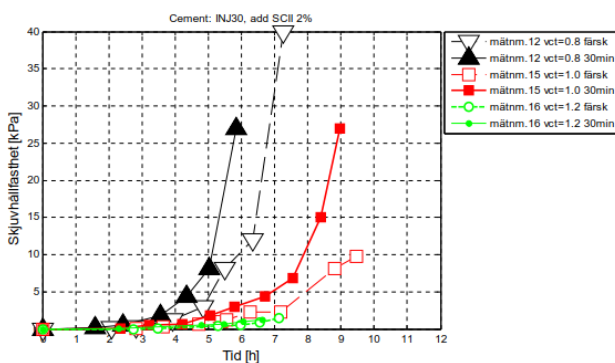


**Figur 2-7.** Tillstyvnadsfaserna och tidig hållfasthet för cementpasta samt lämpliga mätmetoder och mätvärden

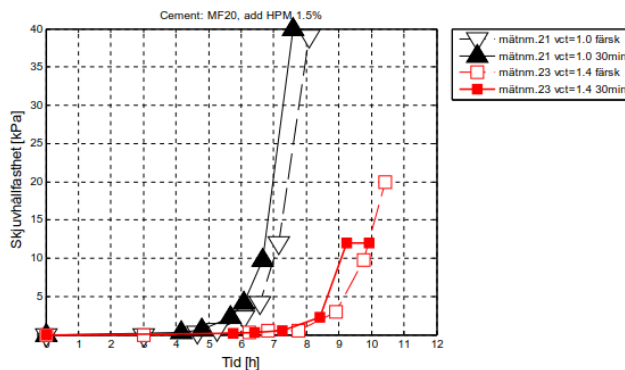
För cementbaserade injekteringsmedel mäts oftast hållfasthetstillväxten med fallkon. Denna mätning kan starta vid en hållfasthet på ungefär 0,1 kPa och pågå upp till ca 250 kPa. I Figur 2-8 nedan visas exempel på fallkonsprovingar av olika cementbaserade injekteringsmedel.



Figur 8: Skjuvhållfasthetsutveckling av bruk baserade på Rheocem650. Mätningar 3, 5 och 9\_2



Figur 9: Skjuvhållfasthetsutveckling av bruk baserade på INJ30. Mätningar 12, 15 och 16.



Figur 10: Skjuvhållfasthetsutveckling av bruk baserade på MF20. Mätningar 21 och 23.

**Figur 2-8. Exempel på hållfasthetstillväxt oss cementbaserade injekteringsmedel med olika vct.**

### 2.2.3 PÅVERKANDE KRAFTER

I Betonghandboken beskrivs att hållfasthetstillväxten för cementapastor påverkas av belastning i tidig ålder, den mest känsliga tidsperioden är 3 – 7 timmar efter blandning, då skador uppstår i form av sprickor i den tillstyvnade cementpastan men vanligtvis reduceras skadorna med tiden genom självläkning.

Vidare anges att vibrationer kan inverka på den färskas cementpastans hållfasthetsegenskaper men att resultaten från undersökningar är inte helt entydiga. För bedömning av vibrationspåverkan används vanligen svängningshastigheten. Hastigheter uppemot 20 - 25 mm/s har inte visat någon ogynnsam

Sprängningens inverkan på injektering

effekt, men cementpastan påverkas olika beroende på dess konsistens. Undersökningar med hastigheten 36 mm/s gav ingen påverkan av hållfastheten vid sättmättet 100 mm men däremot vid sättmättet 190 mm. Generellt gäller att så länge cementpastan är vibrationsbar har vibrationer ingen ogynnsamma inverkan. Då hårdnaden av pastan påbörjas finns en kritisk fas där svängningsrörelserna kan påverka hållfasthetstillväxten. För cementpasta anges att denna kritiska fas ligger mellan 3 till 14 timmar men direkta försök visar på en kortare period vid omkring 4 timmar.

De reologiska egenskaperna på ett cementbaserat injekteringsmedel kan påverkas med vibration (Håkansson, 1993). I allmänhet blir injekteringsmedlet mer lättflytande under påverkan från en kontinuerlig vibration. En förklaring är att vibrationer minskar attraktionen mellan partiklarna.

Vid laborationsförsök har det studerats hur tillstyvnadsprocessen av cementbaserade injekteringsmedel påverkas av vibrationer (Bäuml & Sundqvist, 2013). Ett cementbaserat injekteringsmedel blandades och en delmängd av blandningen sattes i en skakapparat (som används vid siktning av jordmaterial) och den kvarvarande delmängden av blandningen fick bli ostörd. Tillstyvnaden mättes på de båda delblandningen. Resultatet var att tillstyvnadstiden förlängs för den störda blandningen men den slutliga skjuvhållfastheten blir lika för båda blandningarna.

### 2.3 BORRNING

De eventuellt påverkande faktorerna kopplade till borrning, vibrationer och borrhållspolning, antas bara påverkas vid en längre och sammanhållande kontakt med injekteringsmedlet. Detta sker sannolikt enbart då borrkronans front är i samma läge som för den injekterade sprickan.

Spolförsök, med borrhög, direkt mot ett skikt av injekteringsmedel, har genomförts som en mindre fältstudie (Johansson 1997). Syftet med försöken var att undersöka vilken skjuvhållfasthet det cementbaserade injekteringsmedlet ska uppnå för att kunna stå emot en borrhögspolvattentryck under två minuter. Vid försöken fylldes en kvadratisk låda men ca 10 mm tjockt skikt av injekteringsmedel och ett plexiglaslock fästes på. Den kvadratiske lådan med glaslocket fick sedan stå ostört tills injekteringsmedlet uppnådde vissa skjuvhållfastheter, en blandningskaka av injekteringsmedlet erhöles. Då en bestämd skjuvhållfasthet hade uppnått fästes ett foderrör genom glaslocket och direkt mot blandningskakan. Genom foderröret utfördes sedan vattenspolning med en borrhög. Spolningen pågick i 2 minuter med ett tryck upp till 17 Bar (1,7 MPa) och kakan studerades okulärt. I slutsatserna beskrivs olika brottutseende på blandningskakan beroende på dessa skjuvhållfasthet. Vid en skjuvhållfasthet på 10-12 kPa sönderföll kakan i "korn för korn" därefter sker sönderfallet i "klumpar" för att vid skjuvhållfastheter över 25-28 kPa kunna helt bibehållas fullständigt. Rekommendationen av spolförsöken vara att borrning efter injektering skulle påbörjas då injekteringsmedlets skjuvhållfasthet hade uppnått minst 12 kPa.

### 2.4 SPRÄNGNINGENS PÅVERKAN I NÄROMRÅDET

Syftet med sprängningen är att loss hålla berget och den tillförda kraften måste följaktligen vara tillräckligt stor för att både kunna skapa sprickor kring borrhålet och förflytta berget så att det kan lastas/skjutas ut. Inom en zon runt borrhålet fås en direkt fragmentering kallad sprängskadezon. Utanför skadezonen kommer sprängkrafterna att avklinga med ökat avstånd. Fokus i föreliggande projekt är att studera hur stora påverkanskrafterna är utanför den direkta skadezonen, där injekteringsmedlet har funktionen att förhindra vattengenomströmning.

Sprängningsprocessen fungerar genom att sprängmedlet vid detonation under hög hastighet (ca 5000 m/s) omvandlas från fast fas till gasfas. Omvandlingen skapar ett högt tryck på borrhållsväggen (från ca 4 GPa för ett fulladdat hål ner till under 0,05 GPa för ett konturhål där laddningen är frikopplad, se Cunningham (2006)) vilket i sin tur ger upphov till en chockvåg som radiellt sprider sig ut i bergmassan. Chockvågen genererar tryck- och skjuvvågor som skapar en töjning i bergmassan vilken är orsaken till sprickbildning i hålets närområde då materialets hållfasthet överskrids. I detonationsprocessens andra steg expanderar de genererade gaserna som till volymen är av storleksordningen 1 m<sup>3</sup> gas per liter sprängämne (vid standard tryck och temperatur). Spränggasen hjälper till genom att trycka ut den fragmenterade bergmassan till en så kallad salvhög. Till viss del kommer gasen även att penetrera den kvarstående bergmassan och ger då upphov till expansion av redan existerande sprickor. Huvuddelen av gasexpansionen kommer dock att ske i rörelseriktningen hos den fragmenterade bergmassan, dvs i riktning mot tunneln.

Då injekteringsmedlet har helt andra mekaniska egenskaper än bergmassan uppstår frågan om injekteringsmedlet kommer att påverkas på större avstånd från laddningen än vad bergmassan gör.

Visserligen har injekteringsmedlet en många gånger lägre hållfasthet än bergmassan men tøjningsegenskaperna är också annorlunda varför frågan blir högst relevant att utreda.

För att kunna utreda dessa frågeställningar krävs att man kan hitta gemensamma beröringspunkter, dvs att man kan beräkna krafterna från sprängning på ett sätt som gör det möjligt att storleksbestämma vilken effekt sprängningen har på injekteringsmedlet. Eftersom injekteringsmedlets hållfasthet främst definieras i termer av skjuvhållfasthet måste sprängningens påverkan kunna definieras i termer av skjuvningsvinkel (även benämnd skjuvtøjning) och skjuvspänning.

#### 2.4.1 PÅVERKANDE KRAFTER - TÖJNING OCH SKJUVNINGSVINKEL I BERG

Tøjning och spänning är knappast parametrar som normalt används vid beräkning av påverkan i en bergmassa vid sprängning. Även om det är okontroversiellt att påstå att dessa parametrar egentligen är de som är viktigast om man ska bedöma sprickbildning kring ett borrhål är det istället parametrarna svängningshastighet, acceleration och förskjutning som används. Orsaken till detta är att påverkan från sprängning normalt mäts med geofon eller accelerometer och det är då de parametrar som kan mätas. Att bestämma tøjning eller skjuvningsvinkel blir då betydligt mer komplicerat.

Så länge man håller sig till svängningshastighet (alternativt förskjutning eller acceleration) finns det ett flertal analytiska metoder för att bestämma hur svängningshastigheten avtar kring ett (eller flera) detonerande borrhål. När denna parameter sedan ska räknas om till tøjning eller skjuvningsvinkel uppstår dock problem. Hade problemet enbart varit 1D hade sambanden varit enkla och skrivs då:

$$\varepsilon = \frac{PPV_v}{v_p} \quad (2:1)$$

Där:

$\varepsilon$  = tøjningen  
 $PPV_v$  = maximal svängningshastighet (P-våg)  
 $v_p$  = utbredningshastighet (P-våg)

och

$$\gamma = \frac{PPV_s}{v_s} \quad (2:2)$$

där :

$\gamma$  = skjuvningsvinkeln  
 $PPV_s$  = maximal svängninghastighet (S-våg)  
 $v_s$  = utbredningshastighet (S-våg)

I tre dimensioner, 3D, låter denna övning sig dock inte riktigt göras. Yang & Roy (2013) skriver: "Blast vibration is essentially strain/stress wave propagation in rock or structures in the vicinity of a blast. However, blast vibration has always been quantified in terms of peak particle velocities (PPV) or accelerations (PPA), and a meaningful relationship between blast vibration and strain/stress has not been established."

Det är dock fullt möjligt att ansätta en maximal skjuvningsvinkel för en tredimensionell betraktelse. Detta innebär en viss överskattning men ger ändå en möjlig till en ungefärlig bedömning.

För det tredimensionella fallet definieras tøjningstensorn enligt nedan:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2:3)$$

Det kan visas att ett koordinatsystem ( $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ ) finns där tøjningstensorn som transformeras till:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{pmatrix} \quad (2:4)$$

Den maximala skjuvtöjningen kan då beräknas enligt:

$$\gamma_{max} = \left| \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2} \right| \quad (2:5)$$

Normalen till det maximala skjuvplanet är då i 45° vinkel mot riktningarna för  $\epsilon_1$  och  $\epsilon_3$  (dvs Poisson's tal är lika med 0,5).

Maximal töjning i  $\epsilon_1$  är då  $\frac{PPV}{v_p}$

Minimal töjning i  $\epsilon_3 = -\epsilon_1$

Maximal skjuvtöjning blir då  $(\epsilon_1 - \epsilon_3)/2 = 2\epsilon_1/2 = \epsilon_1 = PPV/v_p$ .

Detta innebär följaktligen att:

$$\epsilon_1 = \frac{PPV}{v_p} \geq \gamma_{max} \quad (2:6)$$

Utgår man från detta samband kan man beräkna en skjuvtöjning utifrån beräknade eller uppmätta vibrationsnivåer.

#### 2.4.2 VIBRATIONSNIVÅER

Normalt prognostiseras vibrationer via den sk Skallagsformeln. Konstanterna A och B bestäms då oftast antingen genom provsprängning eller så görs antaganden avseende "erfarenhetsvärden".

$$v = A \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^B \quad (\text{Skallagsformeln}) \quad (2:7)$$

där:

R = avstånd mellan sprängplats och objekt [m]

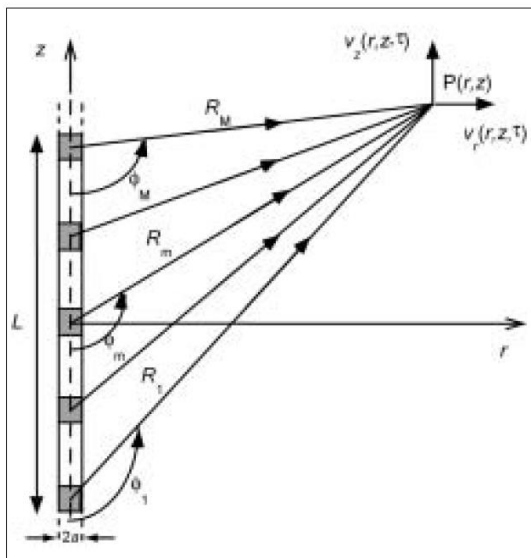
Q = maximal samverkande laddning [kg]

v = svängningshastighet (vibration) [mm/s]

A och B är specifika platskonstanter som beror på bergartsförhållanden och avstånd

Skallagsformeln fungerar oftast bra men eftersom laddningen Q anges som en punktladdning (det finns bara ett avstånd till laddningen) uppstår problem om man vill räkna på vibrationer nära laddningen eftersom laddningen ligger utdragen i ett borrhål.

Det finns ett antal analytiska modeller för att räkna på detta, exempelvis Holmberg och Persson (1979), Blair och Minchinton (1996) och Yang (2010). Gemensamt för dessa modeller är att man istället för att använda en punktladdning delar upp laddningen i många element som sedan summeras (se Figur 2-9). Alla tre modellerna ovan har skallagformeln som en del i beräkningsmodellen.



**Figur 2-9.** Genom att dela upp laddningen i många delar kan man beräkna vibrationsnivåer även nära själva laddningen där en punktladdning inte fungerar.

I detta fall har den analytiska modellen framtagen av Blair och Minchinton (1996) använts. Blair och Minchinton utgår från beräkningar av Heelan (1953) men anpassar dessa till att använda vibrationer (och skullagsformeln) i stället för det mycket svårbestämda borrhålstryck som Heelan utgick ifrån. Blair och Minchintons modell finns integrerad i programvaran BDA (Blast Design Assistant, Orica Ltd) då under namnet "HelFire".

## 2.5 VÄNTETIDEN EFTER INJEKTERING

Bäumli & Sundqvist (2013) inventerade de olika väntetiderna som vanligtvis används vid injekteringsprojekt. Inventeringen gav att normalt nyttjas en väntetid på 3 till 6 timmar, men upp till 12 timmar kunde förekomma. Ett annat kriterium som användes istället för en generell väntetid var den uppnådda hållfasthetstillväxten. Kriteriet för uppnådd hållfasthet varierade mellan 0,5 till 2 kPa. Ett ytterligt kriterium eller resonemang var att själva salvbörningen, men inte ombörning av injekteringshål, kan påbörjas direkt efter avslut vid kontinuerlig förinjektering med överlapp på minst 5 m. Resonemanget baserades på att den föregående injekterings-skärmen har tidigare injekterat, och uppnått den slutliga hållfastheten, i den aktuella bergmassan som ska borras.

## 3 METOD

Metodiken består utifrån en enklare konceptuell modell påvisa vilken del som är den mest central för att påvisa injekteringsmedlets nödvändiga hållfasthet under drivningscykeln. De olika parametrarna i den konceptuella modellen skall sedan bestämmas och slutligen kunna demonstreras i ett fälttest.

### 3.1 KONCEPTUELL MODELL

Borra-sprängmetoden innefattar följande moment som innebär påverkan/kraftpåkning i bergvolymen: utförd injektering, borring av salvhål, vattenspolning av borrhål, explosion av borrhålsladdning samt efterföljande gasexpansion, återigen borring av injekteringshål samt vattenspolning av de samma och slutligen ny injektering.

Givet beskrivningen av hur de olika krafterna påverkar injekteringen är sprängningen den del som är svårast att klargöra. En utgångspunkt i projektet har varit att injekterings syfte inte har någon förstärkande verkan och därmed inte begränsar spränggasernas utbredning. Sprängningen skall generera sprickor och gaserna loss hålla berget. Det är tryck- och skjuvvågorna som skapar nya sprickor och öppnar upp befintliga sprickor inom skadezonen. De krafter som detta innebär är stora och injektering varken kan eller ska förhindra dessa.

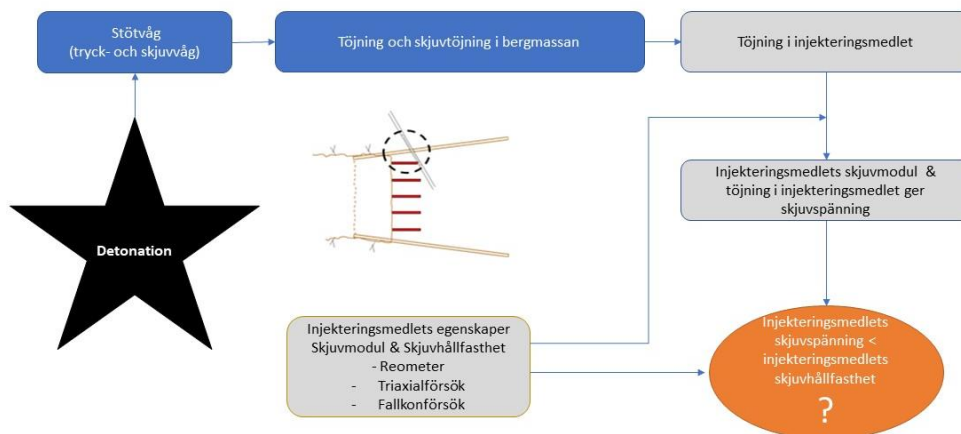
Vibrationen från sprängningen ger upphov till töjning i bergmassan, utanför skadezonen, vilket genererar en skjuvspänning. Beroende på bergmassans respektive injekteringsmedlets styvhet blir spänningen olika i materialen. Fortsatt resonemang gäller under förutsättning att berget inte spricker utanför skadezonen

Nedan presenteras en stegvis modell över angreppssättet för att analysera sprängningens påverkan på injekteringsmedlet.

- 1) Detonation sker.
- 2) Stötvåg genereras i bergmassan
- 3) Bergmassan utsätts för deformation.
  - a. Deformationen av bergmassan beror på avståndet från laddningen. Längre från detonationen ger mindre deformation.
  - b. Denna studie tittar på avstånden 1 m från närmaste detonation. 1 m har valts som kritiskt avstånd då konturhålen i laddplanen sällan laddas mycket samt så är sticket (avståndet mellan borrhålsbotten och teoretisk tunnelkontur) från injekteringshålen ca 5 m. En skadezon från sprängningen uppstår nästan alltid. Teoretiskt kan den vara upp till 40 cm. Att studera sprängningens påverkan på avstånd kortare än 40 cm anses i denna studie ej rimligt då injekteringen inte syftar till att täta skadezonen. Med injekteringshål som placeras närmare eller i skadezonen, exempelvis i sulan på tunneln kan påverkas av sprängningen men denna detalj ingår ej i studien. Generellt är studien baserat på ett avstånd, 1 m från ett detonationshål.
- 4) Tryck- och skjuvvåg ger upphov till normaltöjning och skjuvtöjning i berget. Dessa analyseras utifrån ett förenklat endimensionellt fall, vilket överskattar krafternas storlek. Den maximala töjningen uppträder i 45 graders vinkel.
- 5) Töjningen från berget antas fullständigt överföras till injekteringsmedlet.
- 6) Med töjningarna från detonationen och injekteringsmedlets skjuvmodul beräknas påverkande skjuvspänningen på injekteringsmedlet.
- 7) Injekteringsmedlets skjuvmodul och skjuvhållfasthet kan bestämmas via laborationer. Valet av laborationsmetod styrs av det tidsspänn som är relevant för sprängning efter injektering, dvs ett tidsspänn på upp till 7 timmar. Vid detta tidsspänn antas injekteringsmedlet ha ett mer flödande till duktilt beteende. Detta ger följande bestämningar av egenskaperna:
  - a. Skjuvmodulen kan bestämmas med hjälp av modifierade triaxialförsök och reometer tester med oscillerande plattor.
  - b. Skjuvhållfastheten och flytgräns bestäms av tester med hjälp av reometer, modifierade triaxialförsök och fallkonförsök.
- 8) Slutligen jämförs brukets skjuvhållfasthet med beräknad skjuvspänning i injekteringsmedlet från detonationen.

De ingående momenten i den konceptuella modellen illustreras i Figur 3.1.





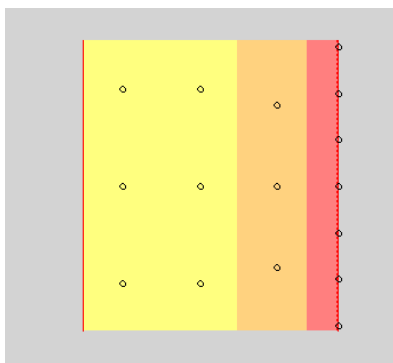
**Figur 3.1.** Illustration av den konceptuella modellen för sprängningens inverkan på injekteringen.

I figuren ovan illustreras att stötvågen och de uppkomna töjningarna i bergmassan bestäms genom litteraturstudie och beräkningar. Injekteringsmedlets hållfasthetsegenskaper i flytande fas inhämtas via laborationstester. Att de teoretiska framräknade töjningarna är lägre än injekteringsmedlet jämförs slutligen. I samband med fälttestet skall samtliga moment verifieras i ett demonstrationsförsök.

### 3.2 TÖJNINGAR FRÅN SPRÄNGNING

För att göra någon form av rimlighetsuppskattning har en beräkning utförts avseende vilken skjuvtöjning man kan förvänta sig i zonen där injekteringen skulle kunna påverkas, dvs i zonen utanför den direkta sprängskadezonen. Enligt AMA Anläggning 17 är den tillåtna skadezonen normalt 40 cm utanför tunnelkonturen.

En beräkning med Blair och Minchintons analytiska modell användes. Maximala vibrationsnivån beräknades utifrån en del av en tunnelsalva där konturhål, hjälparhål och två salvrader ingår enligt Figur 3-2. Salvhålen laddas med 9,9 kg per hål, hjälparhålen med 5 kg per hål och konturhålen med 2,1 kg per hål. Konturhålen har detonerats med 9 ms fördröjning och tiden bakåt är 42 ms (fördröjningstiderna torde dock spela mindre roll på dessa små avstånd). I figuren är hålen 6 m djupa.



**Figur 3-2.** Uppställning enligt den analytiska modellen, där konturraden är längst till höger och de två salvraderna längst till vänster.

Vibrationsnivån har beräknats med skallagsformeln (ekvation 3:1) och denna har sedan testats i det fältförsök som gjordes för projektet (se Bilaga 6 Fältrapport-Vibrationer från sprängning):

$$v = 2100 \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{q}}\right)^{-1,7} \quad (3:1)$$

### 3.3 LABORATIONSMOMENT

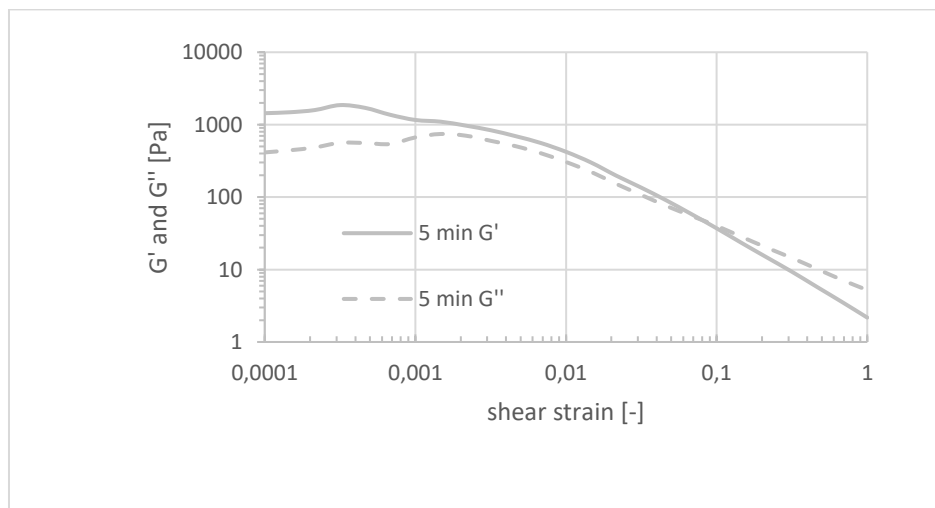
De laborationsmoment som utförts inom ramen för projektet syftar till att visa hur externa krafter påverkar injekteringsmedlet och hur injekteringsmedlets hållfasthetsegenskaper varierar med tiden. Följande moment har utförts:

- Injekteringsmedlets skjuvmotstånd bestäms med hjälp av reologi (flytgräns). Laborationsmomentet undersöker om det är möjligt att erhålla värden på skjuvhållfastheten för ett flödande material under hela injekteringsförloppet.
- Triaxialförsök på färskt injekteringsmedel ger skjuvhållfastheten vid en given tidpunkt.
- Urspolningsförsök för att visualisera borrhålspolning och dess påverkan på injekteringsmedlet.

#### 3.3.1 REOLOGI - FLYTGRÄNS FÖR INJEKTERINGSMEDEL

Föreliggande arbete ämnar komplettera kunskapen om den tidiga hållfastheten för injekteringsmedel. Med tidig hållfasthet innebär här tidsrymden från att det cementbaserade blandningen blandas och upp till 5 timmar totalt tillstyvnadstid. Den parameter som skall belysas är skjuvmodulen vilken är känd från geotekniska tillämpningar. I Bilaga 2, "Labrapport-Reologi", återfinns en mer detaljerad beskrivning av metodiken, resultaten och analysen av dessa tester.

Figur 3-3 visar ett laborationsförsök i detta projekt på ett cementbaserad blandning. Figuren visar på övergången från ett elastiskt flöde med bindningar mellan partiklarna till ett inhomogent flöde där partiklar och vätska skiljs åt och sker här vid ca 10% töjning för en 5 minuter gammal blandning. Tolkningen av detta är att blandningen beter sig viskoelastiskt över ett stort område med töjningar (från 0,0001 till 0,1).



**Figur 3-3.** Illustration från laborationstester över hur  $G'$  och  $G''$  förändras allteftersom pålagd skjuvning blir större för en blandning som är 5 minuter gammalt.

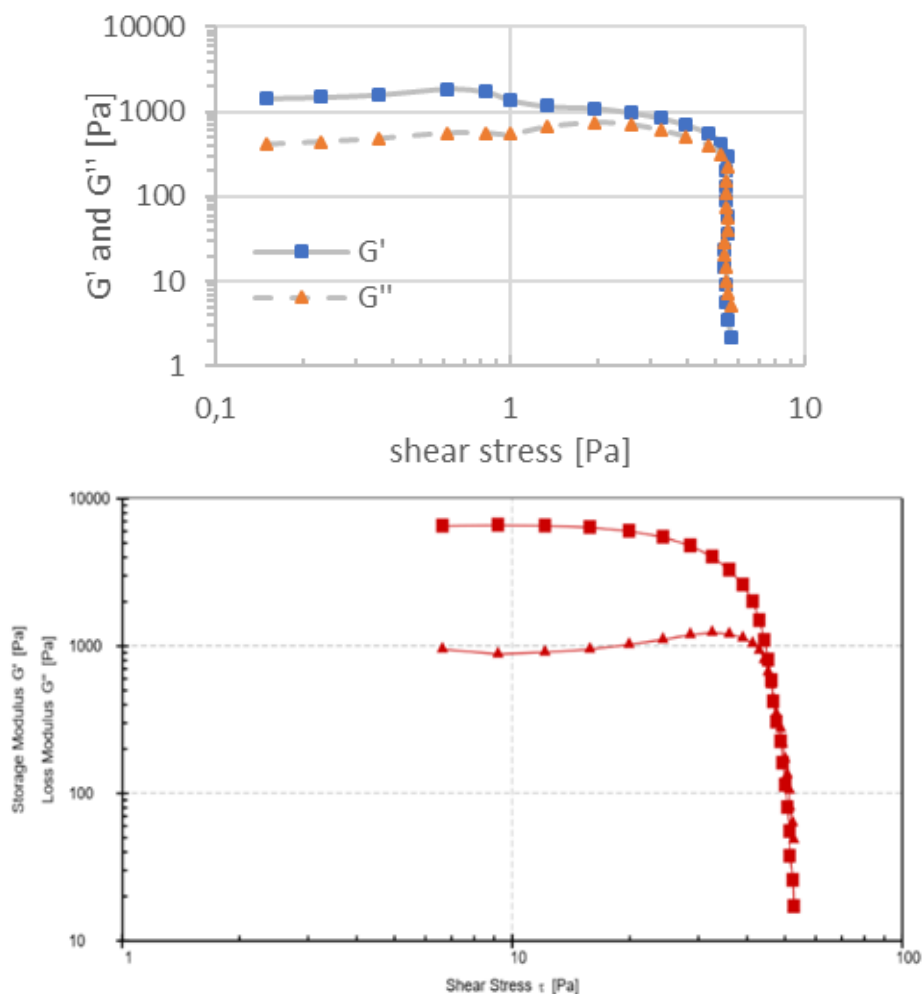
En vätska bestående av partiklar och vatten har oftast minst två egenskaper. Vid en skjuvhastighet lägre än ett visst värde beter sig vätskan som viskoelastiskt. Det är således den viskösa delen av vätskan som betraktas. Vid en högre skjuvhastighet beter sig vätskan som ett viskoplastiskt material där det är främst partiklarnas egenskaper som dominerar egenskapen.

$G'$  representeras av den viskoelastiska delen av provet och kan enkelt beskrivas av den fasta delen i materialet.  $G''$  representeras av den rena viskösa delen av provet och enkelt uttryckt beskriver den

flödande delen av provet. Den viskösa delen är ett mått på den inre friktionen mellan partiklar och molekyler och ger upphov till värmeutveckling och således en energiförlust. Den elastiska delen består i att bindningar i de interna strukturerna/partiklar dras ut men utan att de går sönder.

För viskoelastiska vätskor där  $G'' > G'$  innebär att det inte finns några starka bindningar mellan partiklarna/molekylerna.

För att urskilja/karakterisera vätskans egenskaper bör de olika regionerna av viskösa del respektive plastisk del betraktas. I nedanstående diagram (Figur 3-4) visas hur två olika blandningar beter sig; Cementbaserad blandning och silica sol. Cementblandningen testades vid 5 minuter efter blandning och silica solen (med 20 minuters geltid), 5 minuter efter geltid hade uppnåtts.



**Figur 3-4.** Ex på skjuvmoduler för två olika injekteringsblandningar; ovan 5 minuter gammal cementblandning, nedre, silica sol 5 minuter efter geltid.

Från figuren kan följande utläsas. Den elastiska skjuvmodulen (storage modulus)  $G'$  är högre än den plastiska skjuvmodulen (loss modulus)  $G''$  samt kurvorna är parallella med varandra vilket innebär att materialen har starka elastiska bindningar och kan beskrivas som viskoelastiska vätskor upp till skjuvspänningar på 5 Pa för cementblandningen efter 5 minuter härdningstid och 50 Pa för silica solen vid 5 minuter efter geltid (geltiden var här 20 minuter). Vid skjuvspänningar över de nämnda kommer materialet att flyta.

Blandningar av injekteringscement INJ30 med vatten motsvarande ett vct på 0,8 samt med och utan tillsatser testades. Utrustning för mixning av cement användes en matberedare; Philips med ett varvtal på 10 000 rpm. Kontroll av blandningen gjordes med hjälp av att mäta densitet via våg och känd volym

och mäta flödestiden via Marshkon. Reometern är en Anton Paar MCR302 med möjlighet till vridmoment mellan 1 nNm och 200mNm och vinkelhastighet mellan  $10^{-9}$  rad/s till 314 rad/s. De två testuppställningarna i reometern som använts var kona-platta (CP-25) med ett "amplitude sweep" samt oscillerande.

Ett amplitude sweep genomfördes som första test för att karakterisera vid vilka skjuvhastigheter materialet beter sig flytande, materialets elastiska del, samt att undersöka vid vilken deformation materialet går "sönder". När detta är fastställt görs en körning med kontrollerad skjuvhastighet med oscillerande kona över det elastiska området för att bestämma skjuvmodulerna.

För injekteringsmedlets andra egenskaper valdes att beskriva blandningen med hjälp av fältmetoderna: densitet med "mudbalance", flödesegenskaperna med "marschkon" och flytgräns och viskositet med yieldstick. Egenskaperna på blandningen som användes under fälttestet (se vidare i Bilaga 4, "Fältrapport-Injektering", visas i Tabell 3-1 och ger en fingervisning av egenskaperna för cementblandningen.

**Tabell 3-1. Uppmätta egenskaper på cementblandningen**

	Förprovning	Injektering
Mudbalance [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,51	1,6
Marshkon [sec]	37	38
Yield stick [Pa]; [mPas]	2; 20 mPas	2; 22 mPas

### 3.3.2 TRIAXIALFÖRSÖK - HÅLLFASTHETTILLVÄXT FÖR CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDEL

Syftet med testprogrammet för triaxialförsöken och de metoder som utvecklats är att undersöka hur injekteringsmedlets hållfasthets- och deformationsegenskaper utvecklas i ett tidigt skede. Detta för att tydliggöra spännings-töjningssamband hos materialet då det belastas vid olika tidpunkter i härdningsprocessen.

För ökad kännedom om injekteringsmedlets egenskaper under härdningsprocessen utfördes en uppsättning tester i laboratorium, omfattande:

- Utvärdering av hållfasthets-/deformationssamband genom odränerad skjuvning i triaxialapparat.
- Mätning av viskositet med marshkon.
- Densitetsmätning med mudbalance.
- Mätning av flytgräns med yieldstick.
- Hållfasthetsbestämning med fallkonsförsök.
- Kontroll av tillstyvnad genom kopptest.

Vid skjuvning i en triaxialcell kan omgivande spänningar som verkar på injekteringsmedlet kontrolleras. Försöket ger värden på materialets odränerade skjuvhållfasthet samt en deformationskurva fram till brott, vid en viss tidpunkt i härdningsprocessen. Detta är ett förstörande test varför det bara har getts möjlighet att utföra en gång per provkropp. Den utrustning som användes för triaxialförsöken anpassades och utvecklades successivt under projektets gång. Fälttesterna mudbalance, marshkon och yield stick samt kopptest utfördes för att möjliggöra en jämförelse med mer konventionella mätmetoder.

För att knyta resultaten från triaxialförsöken, som vart och ett endast representerar en punktmätning av hållfasthets- och deformationsegenskaperna för respektive prov, till en hållfasthetsutveckling över tid, utfördes parallellt en serie fallkonsförsök. Intervallen med vilka dessa utfördes anpassades successivt efter varje försökstillfälle.

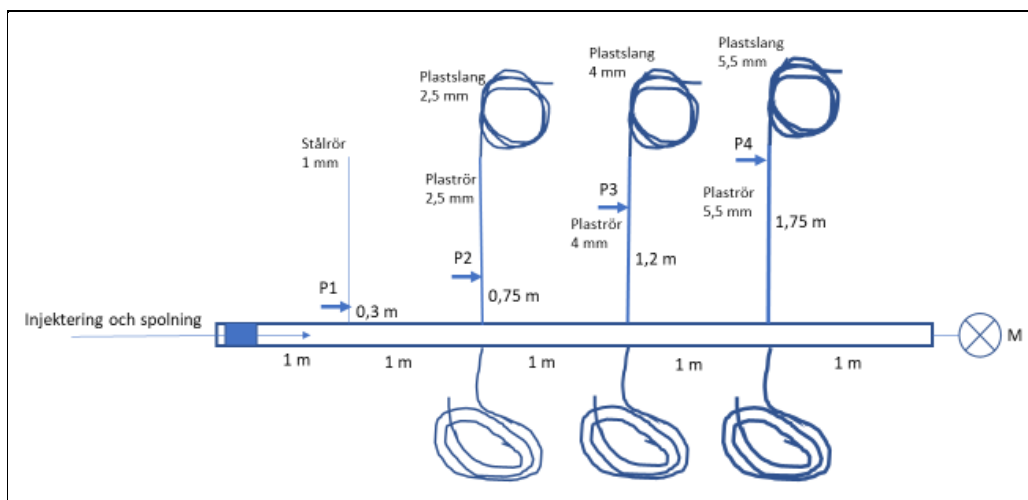
Laborieprocedur och utrustning beskrivs ingående i Bilaga 3, "Labrapport- Triaxialförsök". Nedanstående recept för injekteringsmedlet användes vid samtliga försök, såväl vid metodutveckling som vid skjuvning i triaxialcell. Cement INJ30, 2,25 kg och vatten 1,8 liter, vilket leder till ett vct på 0,8. Säck nr 1 - förpackning öppnad i januari 2018, användes för tester utförda 2018 och Säck nr 2 - förpackning öppnad i februari 2019, användes för tester som utfördes i februari 2019.

Arbetsproceduren i laboratoriet kan grovt delas in i nedanstående steg.

- Förberedelser, såsom inventering av utrustning och iordningställande av arbetsyta
- Blandning av injekteringsmedel
- Fälttester i form av marschkon, mudbalance och yieldstick
- Förberedelse av provpolymer inför fallkonsförsök och kopptest
- Provberedning för triaxialförsök, såsom preparering av membran, gjutform och tryckbehållare
- Löpande testning och dokumentation av odränerad skjuvhållfasthet genom fallkonsförsök
- Skjuvning i triaxialapparat

### 3.3.1 URSPOLNINGSFÖRSÖK

Urspolningsförsök av injekteringsmedel i injekterade rör har utförts efter ca en timmes väntetid på ett konventionellt cementbaserade injekteringsmedel, dvs INJ30 med vct 0,8. Försöken gjordes i en testuppställning som bestod av ett långt stålrör som kopplats ihop med plastslangar och rör av olika dimensioner, se Figur 3-5.



**Figur 3-5.** Testuppställning. principskiss

Försöken utfördes enligt följande steg:

- Först injekterades plastslangarna och rören via stålröret för att efterlikna en borrhälsinjektering.
- Efter en viss väntetid, ca en timme, rensades stålröret på injekteringsmedel
- Omedelbart efter rensningen utfördes vattenspolning genom en löst monterad injekteringsmanschett i stålröret för att kunna mäta och observera urspolning av injekteringsmedlet i plastslangarna och rören. Med den lösa manchetten kan en borrhålsspolning efterliknas.

Beskrivning av försöken redovisas mer i detalj i Bilaga 5; "Fältrapport-Urspolning".

### 3.4 DEMONSTRATIONSFÖRSÖK I FÄLT

Inom ramen för projektet utfördes ett mindre demonstrationsförsök i fält med syftet att visa hur en sprängning kan påverka injekteringen. Vidare var syftet att i en begränsad utformning undersöka vilka resurser som krävs för att i detalj kunna utföra ett fältförsök i större skala.

Fältförsöket bestod i följande delar:

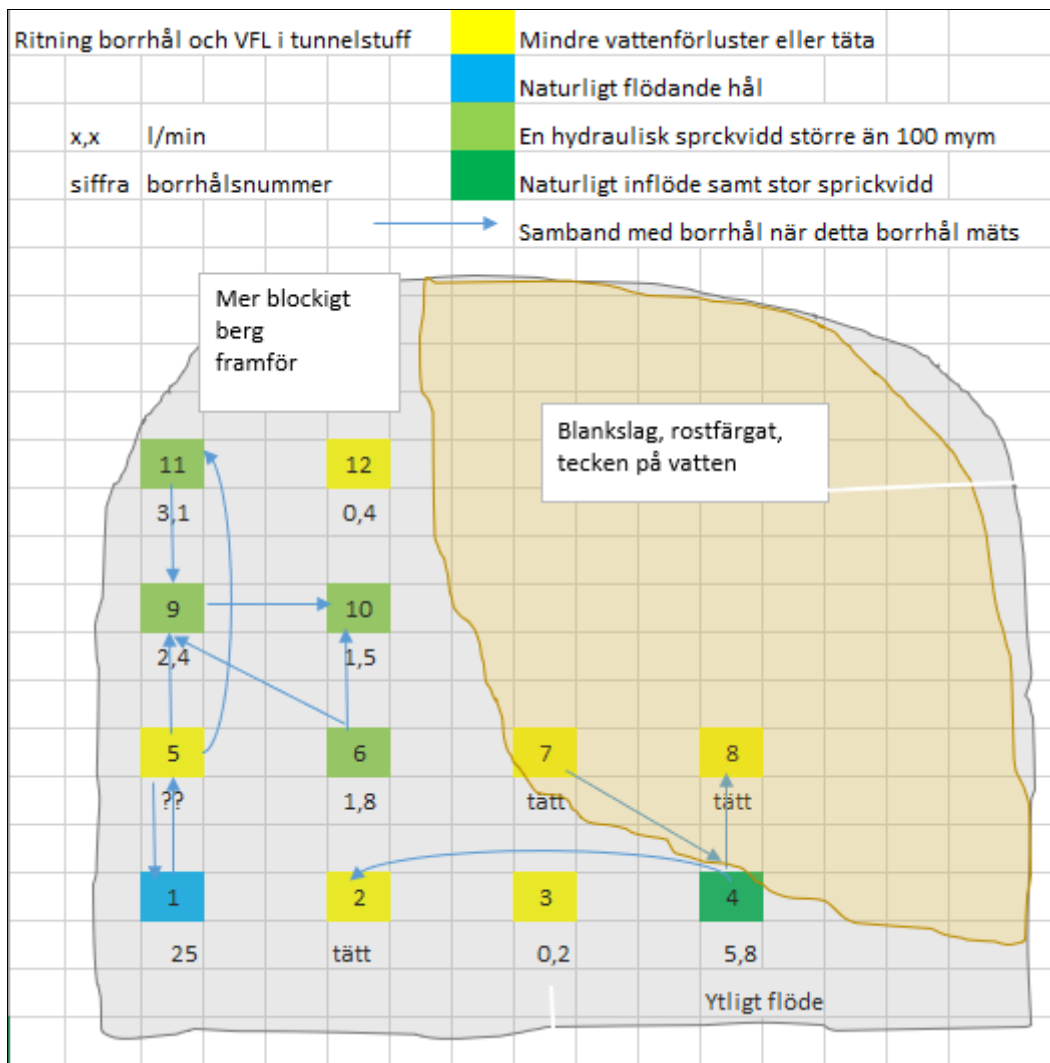
- Vibrationsmätningar vid borrning av borrhål och sprängning (Bilaga 6).
- Hydrauliska tester före och efter injektering samt efter sprängning (Bilaga 4).
- Injektering (Bilaga 4).

Geologin är bedömd genom okulär besiktning av tunneln. Bergarten är granitisk/gnejsig med tydliga sprickplan subparallellt med tunneln med ett sprickavstånd på ca 0,3-0,5 m. Utöver de parallella sprickorna finns nästan vinkelräta strukturer och är brant stupande med ett avstånd på ca 1-2 m. Vid högra och övre delen av tunnelstuff syntes ett tydligt sprickplan vinkelrätt tunneln. Detta sprickplan täcktes av mer uppsprucket berg i vänstra delen av stuffen (se bild i Bilaga 4). Sprickplanet var rostfärgat vilket tyder på vattentransport. Det är också detta plan som injekteringshålen främst inriktades att träffa.

Fältförsöket gjordes enligt följande steg:

1. Borra 12 st injekteringsborrhål, motsvarande salvhål; 4 m långa, borrade med 1 m c-avstånd mitt i stuffen.
  - a. Mät borrvibrationer i tre dimensioner
2. Utför vattenförlustmätningar i alla borrhål
  - a. Utför tryckuppbyggnadstest i lämpliga borrhål med tillräcklig hög vattenförlust
3. Val av borrhål för injektering eller sprängning, med kriterier enligt
  - a. Hydraulisk sprickvidd  $>100 \mu\text{m}$
  - b. Hydrauliskt samband med närliggande borrhål
  - c. Flödesdimension  $\geq$  radiellt (2D)
4. Injektering enligt design baserat på inträngningslängd och tid, cementbaserat injekteringsmedel,  $v_{ct}=0,8$ , 15 min inj-tid vid 10 bar.
5. Utför vattenförlustmätning i oinjekterade borrhål, de hål som hade konnektion med det injekterade borrhålet, totalt 5 stycken.
  - a. Kontroll att tätheten är förbättrad
6. Sprängning i valt borrhål, borrhål nr 9 efter 3 timmars härdning
  - a. Mätning av vibrationer från sprängning
7. Kontroll av injekterade borrhål och utför vattenförlustmätning i oinjekterade borrhål
  - a. Kontroll om tätheten är förändrad i de injekterade hålen genom synlig injekteringsplugg och/eller läckage genom injekteringsplugg.
  - b. Vattenförlustmätningen görs i det sprängda hålet då övriga hål i närområdet är injekterade

I Figur 3-6 visas en layout på tunnelfronten med de 12 borrhålen som ingick i försöket.



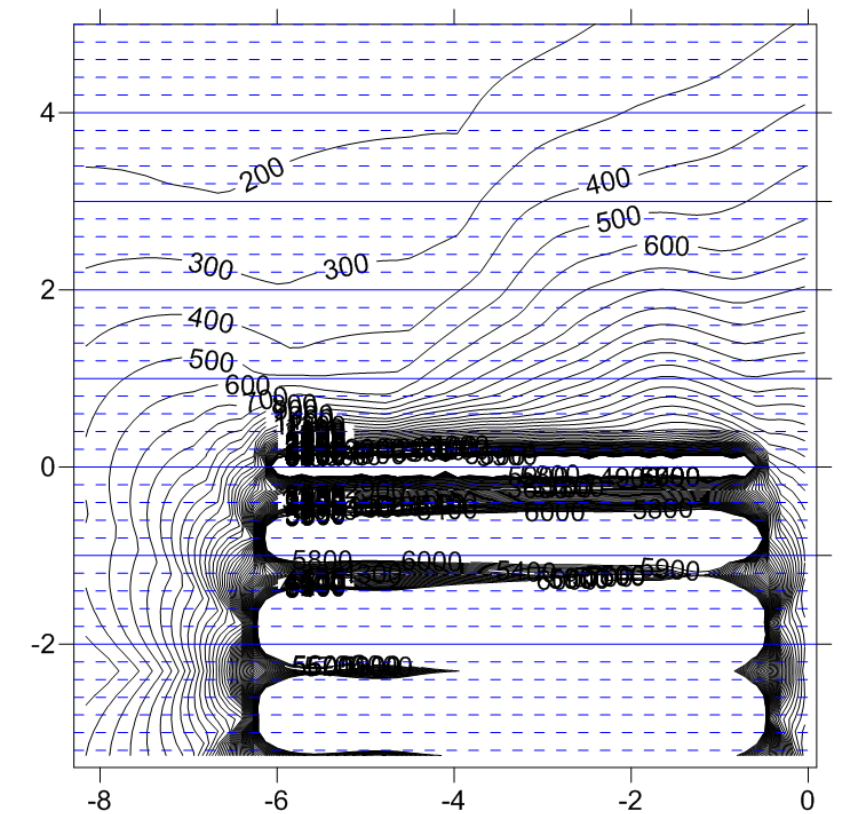
Figur 3-6. Figur över borrhålslayout med tillhörande resultat från vattenförlustmätningen innan injektering/sprängning.

## 4 RESULTAT OCH ANALYS

I följande kapitel redovisas sammanfattande resultat från beräkningar av töjningar från sprängning, laborationsförsök av reologi med reometer och hållfasthetstillväxt med triaxialförsök, urspolningsförsök från testuppställning samt resultat och observationer från demonstrationsförsöket i fält. Mer detaljerade redovisningar av resultat och observationer från laborationsförsök, urspolningsförsök och demonstrationsförsök finns i tillhörande bilagor.

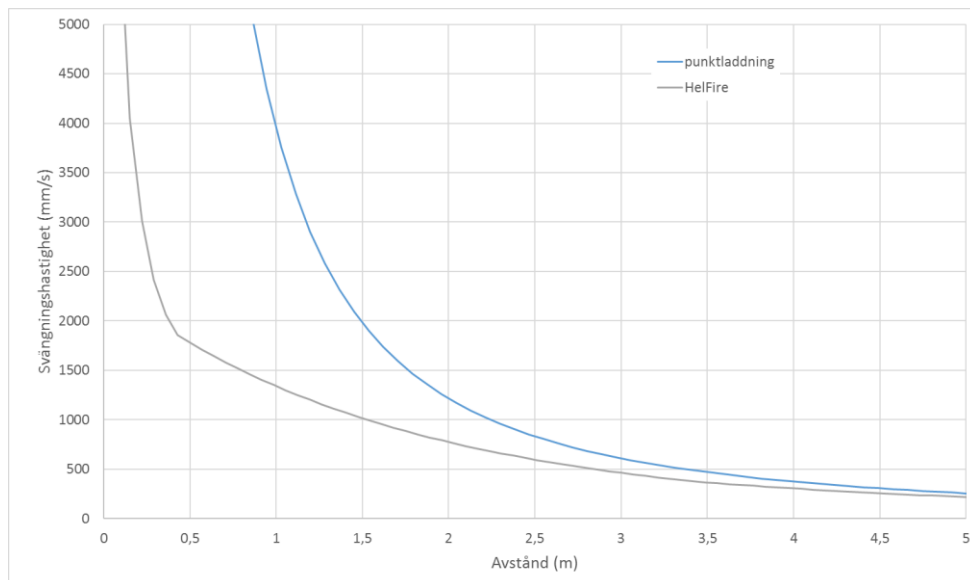
### 4.1 TÖJNINGAR FRÅN SPRÄNGNING

Nedan redovisas resultat från den beräkningsmetodik som redovisades i avsnitt 2.4.1 och 2.4.2. Beräkningarna utgår från en "normal" tunnelsalva vilken beskrivs i avsnitt 3.1. Antagna vibrationsnivåer har också jämförts med uppmätta vibrationsnivåer vid provsprängning, se avsnitt 4.5. Resultatet av beräkningen ses nedan i Figur 4-1 och Figur 4-2.



**Figur 4-1.** Beräknad svängningshastighet (mm/s) kring en tunnelsalva. "0" på y axeln representerar konturlinjen och negativa värden är inne i själva tunnelsalvan, modellen visar 4 laddningar: 2 st strosshål samt hjälparhål och konturhål.

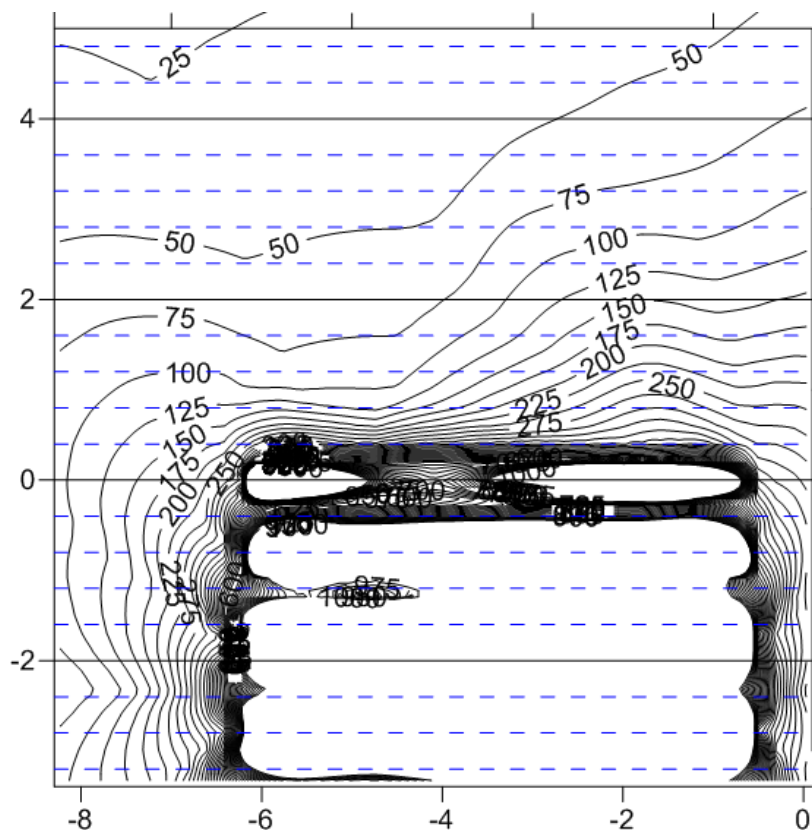
Drar vi en linje från -2 (på x-axeln i Figur 4-1) och uppåt (från konturhålet, 0 på y-axeln) får vi en vibrationskurva enligt Figur 4-2, nedan. I figuren har även en jämförelse mot en ren punktladdningsberäkning gjorts, noteras kan att punktladdningsberäkningen ger en kraftig överskattning av vibrationerna på avstånd kortare än ca 2-2,5 m.



**Figur 4-2.** Den grå linjen representerar en linje från Figur 4-1 (från konturhålet och uppåt vid -2 på x-axeln), den blå linjen visar resultat från en ren punktladdningsberäkning (ekvation 2:7).

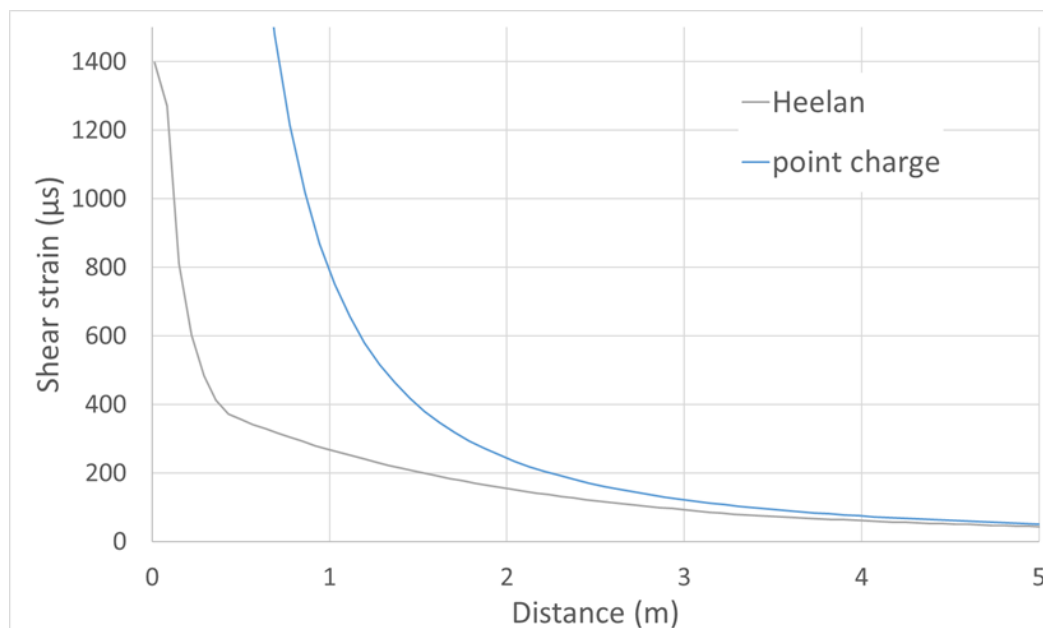


Beräkningen av skjuvtöjningen görs enligt kapitel 2.4.1 och i Figur 4-3, enligt nedan, redovisas de erhållna resultaten.



**Figur 4-3.** Beräknad skjuvtöjning ( $\mu$ -strain) kring en tunnelsalva, "0" på y axeln representerar konturen, figuren visar 4 laddningar: 2 st strosshål samt hjälparhål och konturhål.

På samma sätt som tidigare studeras töjningen från konturhålet (-2, på x-axeln och 0 på y-axeln i Figur 4-3) erhålls en töjningskurva baserat på vibrationerna. Resultatet visas i Figur 4-4.



**Figur 4-4.** Skjuvtöjningen längs en linje från konturhålet och uppåt (i Figur 4-3) vid -2 (på x-axeln).

Från figuren (4-4) ses att töjningen är ca 300 eller 800  $\mu$ -strain på 1 m avstånd från konturhålet, beroende på analysmodell.

## 4.2 RESULTAT REOMETER

Resultaten är uppdelade med olika testuppsättningar. Uppsättningarna har två olika syften:

1. bestämma skjuvmodul med testuppsättning kona-platta
2. följa härdningsförloppet med testuppsättning platta-platta.

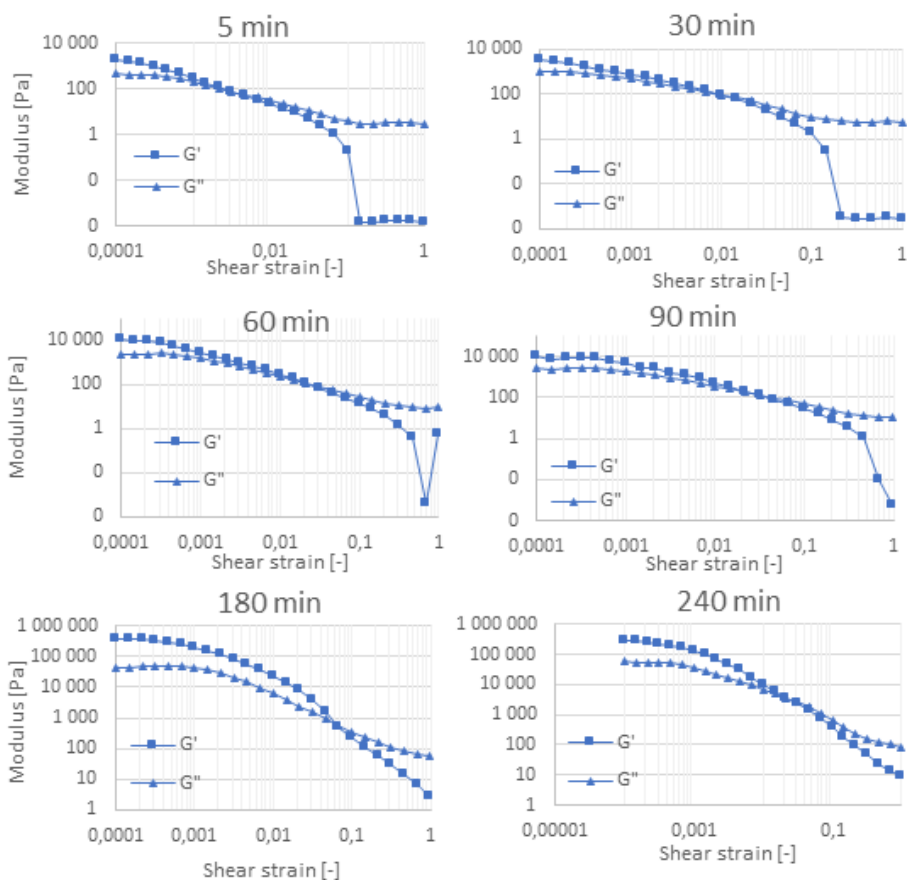
Till detta är de utförda "amplitude sweep" som tidigare beskrivets till för att bestämma ett giltigt område för de olika skjuvhastigheterna. För utförligare beskrivning av testerna samt diagram över förändringarna av skjuvmodul mot töjning hänvisas till Bilaga 2, "Labrapport-Reologi".

Testuppställningen med platta-platta kunde utfördes upp till 240 minuters härdningstid, dvs 4 timmar efter blandning. Testuppställningen med kona-platta där skjuvmodulerna är mer noggrant utvärderades med konstant spänningen över materialet utfördes under en kortare tid. Detta då den snabba oscillerande rörelser och hög skjuvspänning förstör ytan på utrustningen då cementblandningen börjar styvna till.

För platta-platta redovisas vid vilken skjuvtöjning som blandningen går från ett fast elastiskt material till flytande ( $G'=G''$ ). I samma test kan den elastiska skjuvmodulen,  $G'$  utvärderas.

### 4.2.1 RESULTAT PLATTA-PLATTA

I nedanstående figurer (Figur 4-5) visas hur cementblandningens skjuvmodul ändras med tiden pga tillstyvnad. Testuppsättningen är *platta-platta*. Denna uppsättning ger ingen homogen skjuvbild över hela provet vilket gör att absolutvärden på skjuvmodul inte kan ges. Däremot ger den en uppfattning av storleken samt hur tillväxten sker. Syftet är att beskriva vid vilken töjning som blandningen går från en solitt/geltillstånd till flytande tillstånd. Då blandningen flyter bedöms här som att blandningen gått till brott. Kopplas denna tolkningen till sprängning innebär det att töjningen från sprängningen inte ska ge upphov till en flytande blandning. Provet som testades var ett och samma prov hela tiden, dvs blandningen har utsatts för brottspänningar under flera gånger fram till dess att de 240 minuterna har löpt ut.



**Figur 4-5.** Diagram över hur skjuvmodulen ändras under tillstyvnadstiden upp till 240 minuter (4 timmar).

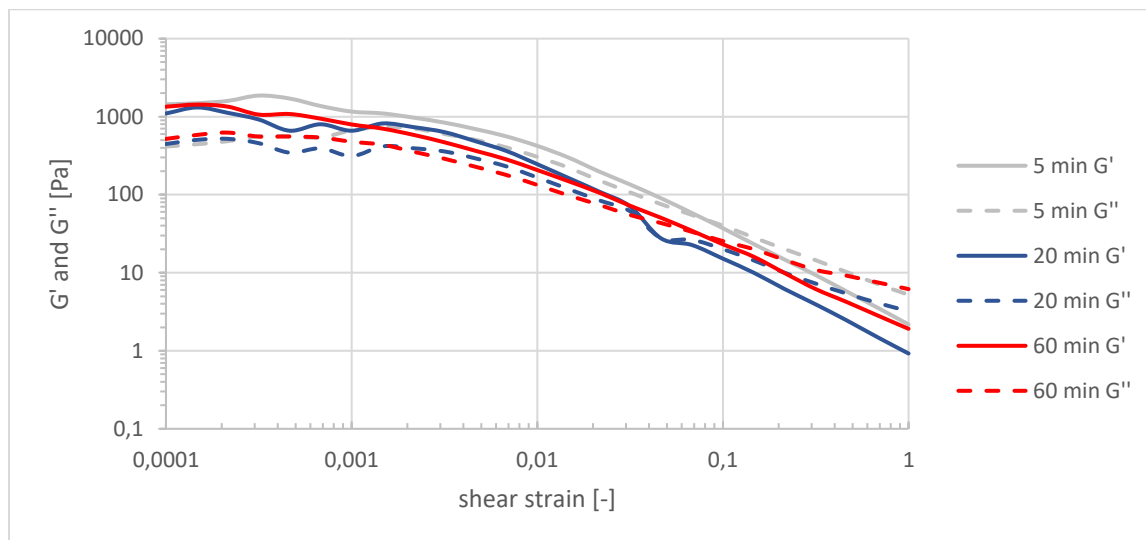
Figur 4-5 visar vid vilken skjuvtöjning som blandningen går från ett fast elastiskt material till flytande ( $G'=G''$ ). För ett 5 minuter prov sker detta vid en töjning på 0,003 (eller 0,3%), för 30 och 60 minuter fås erhålls en töjning på 0,01, för 90 minuter fås 0,03, för 180 minuter fås 0,07 och vid det sista på 240 minuter fås 0,02.

Vi ser också att skjuvmodulen vid en skjuvtöjning på 0,001 (0,1%), växer den elastiska skjuvmodulen från ca 0,3 kPa (300 Pa) vid 5 minuter till 100 kPa (10 000) vid 240 minuter.

#### 4.2.2 RESULTAT KONA-PLATTA

Kona-platta uppställningen visar att skjuvmodulen,  $G'$  är relativt konstant för töjningar mellan 0,01 och 0,1%. Vid större töjningar sjunker skjuvmodulen men det är små variationer för tillstyvnadstider upp till 60 minuter. Vid töjningar då blandningen går från elastiskt till plastiskt material,  $G'=G''$  är i stort sett den samma, ca 30 - 50 Pa medan töjningarna som krävs varierar, från 0,1 (för 5 minuters blandningen) till 0,03 (för 60 minuters blandningen).

Testerna med kona-platta har gett en likadan skjuvbild över hela provet, se Figur 4-6. Provet är ett nytt prov från samma blandning vid de olika tidpunkterna.



**Figur 4-6.** Skjuvmodulen mot skjuvtöjningen för olika tider på blandningen med kona-platta uppställning.

Figur 4-6 visar att skjuvmodulen,  $G'$  är ca 1000 Pa för tider om 5 till 60 min sedan blandningen gjordes. Skjuvmodulen är ca 30 till 50 Pa då blandningen övergår till flytande och töjningarna då detta sker är mellan 0,1 (för 5 minuters blandningen) till 0,03 (för 60 minuters blandningen).

#### 4.2.3 RESULTAT SAMMANSTÄLLNING

Resultaten från de reologiska testerna är sammanställda i Tabell 4-1 nedan.

**Tabell 4-1.** Sammanställning av värden på skjuvmoduler och töjningar för de två olika testuppställningarna. Med "brott" medan när skjuvmodulerna  $G'=G''$  och blandningen övergår från elastiskt till plastiskt.

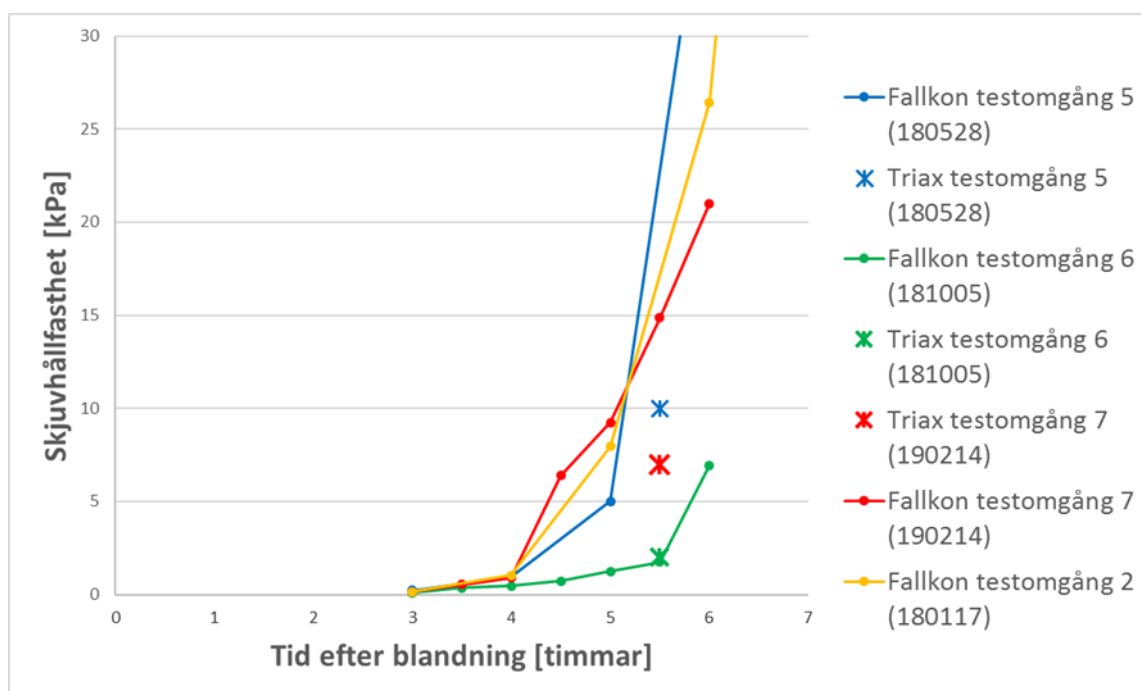
Tid sedan blandning gjorts [min]	Platta-platta		Kona-platta	
	Töjning [-]	Skjuvmodul vid 0,1% töjning	Medel Skjuvmodul vid töjning 0,01 - 0,1%	Skjuvmodul/töjning vid "brott"
5	0,003	300 Pa	1300 Pa	40 Pa/10%
30	0,01	740 Pa	1000 Pa	33 Pa/7%
60	0,01	3000 Pa	900 Pa	50 Pa/3%
90	0,03	4500 Pa		
180	0,07	200 000 Pa		
240	0,02	130 000 Pa		

#### 4.3 RESULTAT TRIAXIALFÖRSÖK

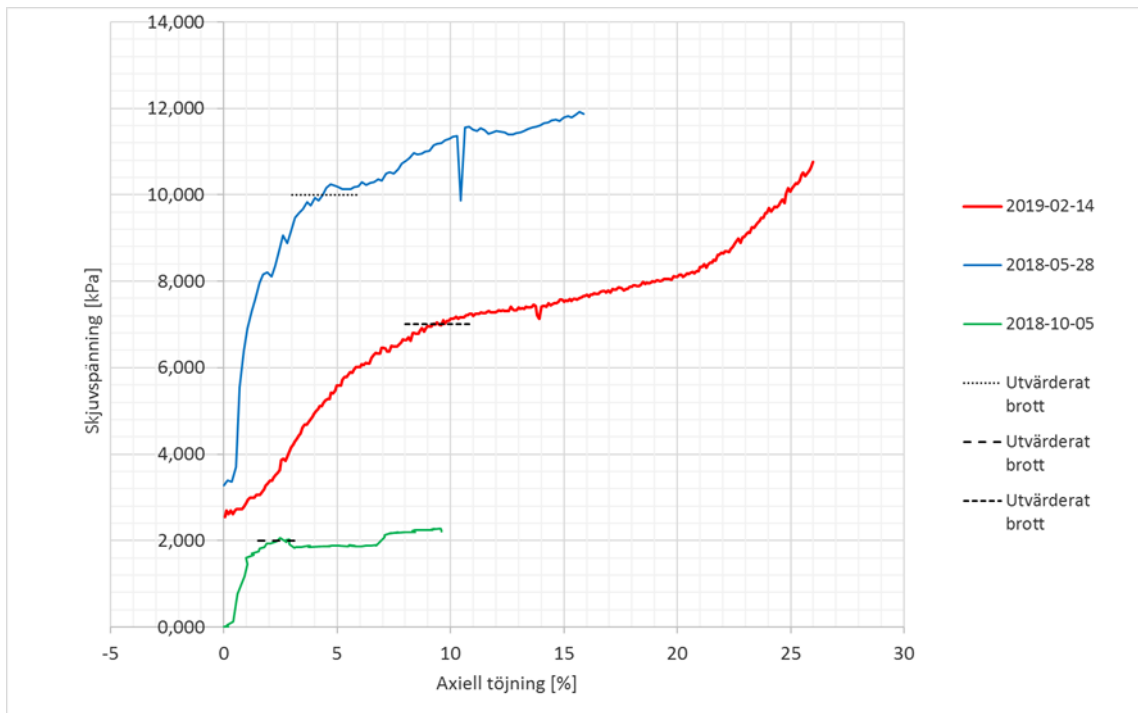
Nedan presenteras resultat från laborieförsöken med triaxialcellen. Tabell 4-2 visar resultaten av de fältmässiga testerna samt Figur 4-7 och 4-8 för utvärderad odränerad skjuvhållfasthet respektive spännings-töjningskurvor. Skjuvningen utfördes med axiell kompression.

Tabell 4-2. Samlade resultat från fälttester.

Testmetod	Testtillfälle	Avläsning	Enhet
Marshkon	2018-05-28	36,6	s
	2018-10-05	35,1	
	2019-02-14	36,3	
Mud balance	2018-05-28	1,57	kg/dm <sup>3</sup>
	2018-10-05	1,57	
	2019-02-14	1,54	
Yield stick	2018-05-28	1,6	Pa
	2018-10-05	1,6	
	2019-02-14	3,8	



Figur 4-7. Samlade resultat avseende odränerad skjuvhållfasthet från fallkonsförsök och triax, tillsammans med axiell töjning vid bedömt brott i triaxialförsöken.

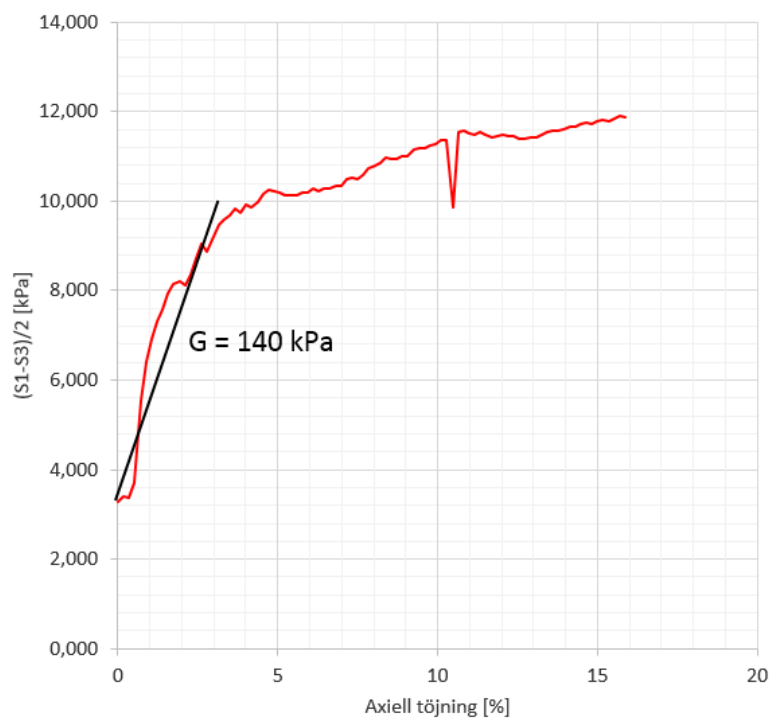


**Figur 4-8.** Diagram med spännings-töjningskurvor från triaxialförsök utförda 5,5 timme efter blandning av cementpastan

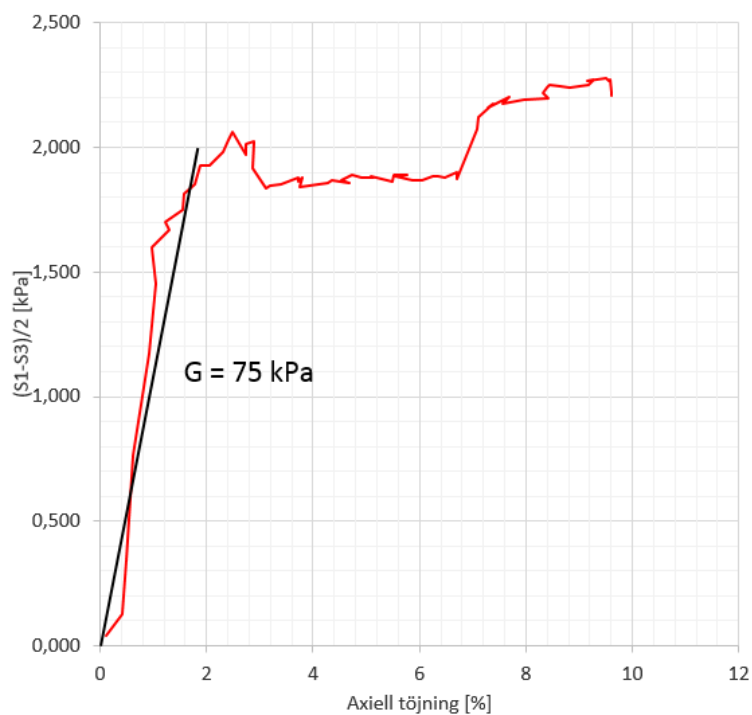
Utifrån deformationskurvorna i Figur 4-8 har ungefärliga värden på blandningens skjuvmodul beräknats. Detta har gjorts genom att en tangent till kurvan, uttryckt med hjälp av en elasticitetsmodul (Young’s modul), definierats och värden på poissons tal uppskattats. Därtill har förenklingen gjorts att blandningens deformationsbeteende kan beskrivas någorlunda korrekt genom ett linjärelastiskt samband fram till bedömt brott. Skjuvmodulen beräknades med ekvation 4:1.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{4:1}$$

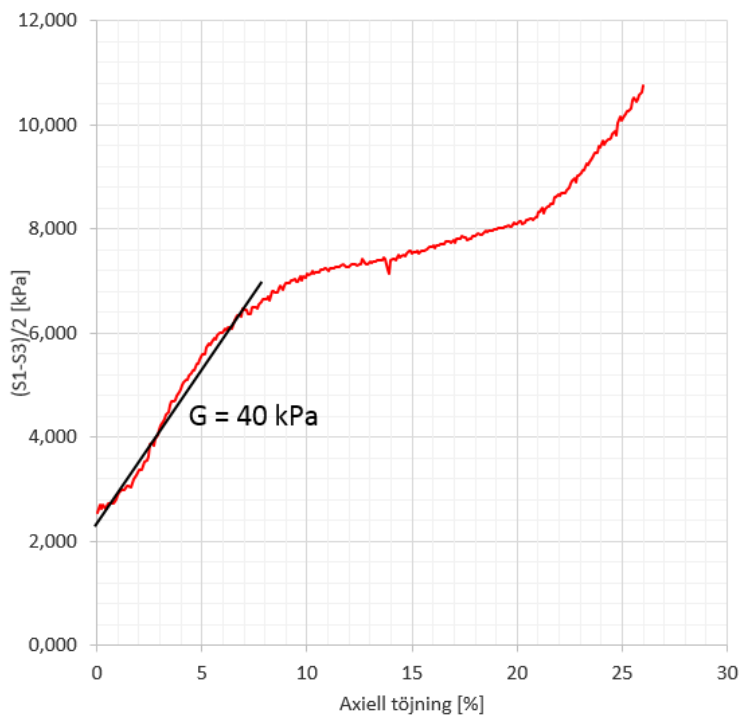
I beräkningen antogs poissons tal till 0,495, vilket motsvarar att materialet i princip är inkompressibelt och inte ändrar volym under försöket. För jämförelse kan sägas att om poissons tal istället ansätts till exempelvis 0,25 blir beräknad skjuvmodul ca 20 % högre. Detta skulle motsvara ett scenario där provkroppen minskar i volym vid belastning, till exempel som följd av att det förekommer luft- eller gasbubblor i blandningen. Uppskattad sekantlinje och beräknade skjuvmoduler för testomgång 5 till 7 visas tillsammans med deformationskurvor i figur 4-9 till 4-11.



**Figur 4-9.** Deformationskurva och utvärderad skjuvmodul för testomgång 5 (2018-05-28).



**Figur 4-10.** Deformationskurva och utvärderad skjuvmodul från testomgång 6 (2018-10-05).



**Figur 4-11.** Deformationskurva och utvärderad skjuvmodul från testomgång 7 (2019-02-14).

Av ovanstående diagram i Figur 4-9 till 4-11 framgår att storleken på skjuvmodulen, vid beräkning enligt ovan beskrivna princip, varierade väsentligt mellan de tre försökstillfällena. Skjuvmodulen i testomgång 7 (2019-02-14), som visade på lägst värden, uppgick till ca 30 % av den i testomgång 5 (2018-10-05).

Cementblandningen som användes vid testomgång 5 och 6 kom från Säck nr 1 som öppnades i januari 2018. Säcken hade dock förvarats i en försluten hink från det att säcken öppnades, med undantag för de tillfällen då mindre mängder cement togs för användning i metodutvecklingen. Vid jämförelse av resultat från fallkonsförsök som utförts på blandningar från denna säck tycks hållfasthetsutvecklingen ske allt långsammare under de första 5 timmarna med ökande ålder på säcken. Efter att 5 timmar härdning passerat är inte trenden lika tydlig, men fallkonsförsöken som utfördes ca nio månader efter att säcken öppnades (testomgång 7) visar klart lägst hållfasthetsvärden.

Vid testomgång 7 (2019-02-14) användes en ny säck med cement, Säck nr 2, som öppnades vid försökstillfället i februari 2019, direkt innan blandningen gjordes. Fallkonsförsöken från denna testomgång visade högst hållfasthetsutveckling av de hittills utförda, upp till ca 5 timmar härdning. Efter 5 timmar är trenden dock att hållfasthetsutvecklingen minskar och istället understiger den som observerades vid testomgång 5 och 6 (2018-05-28 respektive 2018-10-05).

#### 4.4 URSPOLNINGSFÖRSÖK

Stålröret och rören injekterades med ett cementbaserat injekteringsmedel (INJ30 med vct 0,8). Efter ca 1 timme monterades injekteringsmanschetten i stålröret bort och stålröret tömdes på injekteringsmedlet. Därefter utfördes urspolningsförsöket med löst monterad manschett i stålröret.

Två separata urspolningsförsök med injekterade slangar och rör genomfördes, se Bilaga 5, "Fältrapport-Urspolning". Ett antal parametrar observerades vid urspolningen såsom:

- Pålagt spolvattenflöde och -tryck från pump
- Trycket på manometer i änden av spolröret
- Trycket i stålrör och plastslangar



- Urspolningsförloppet i plastslangarna

Tabell 4-3 redovisas observationer som erhöles vid urspolningsförsöken.

**Tabell 4-3. Observationer från urspolningsförsöken.**

<b>Försök 1</b>	
Observation	Notering
Flöde pump	15,5 – 18 l/min
Tryck pump	Ca 1 Bar
Trycket på manometer i änden av spolröret	0,5 – 1 Bar
Slang 5,5 mm	Urspolning och 0,5 Bar i logger
Slang 4 mm	Urspolning och 0,15-0,5 Bar i logger
Slang 2,5 mm	Urspolning vid ca 1 minut och 0,25 Bar i logger
Slang 1 mm	Urspolning och 0,4 Bar (efter ca 46 sekunder) i logger
<b>Försök 2</b>	
Observation	Notering
Flöde pump	Ca 20 l/min
Tryck pump	Ca 2-4 Bar
Trycket på manometer i änden av spolröret	Ca 1 Bar med diameter på packern på ca 58 mm
Slang 5,5 mm	Urspolning (saknar tryckmätning)
Slang 4 mm	Urspolning (saknar tryckmätning)
Slang 2,5 mm	Urspolning (saknar tryckmätning)
Slang 1 mm	Urspolning och 3,7 Bar (max) därefter sjunker trycket ner till ca 0,5 Bar i logger

Urspolningen skedde snabbt, dvs inom någon eller några minuter, i de injekterade slangarna/rören, se exempel i Figur 4-12.



**Figur 4-12.** Urspolning av injektionsblandning efter ca 2 minuters spolning.

Analyser av spolvattenkraften och de mothållande krafterna i de injekterade slangarna/rören gjordes. De mothållande krafterna fås från injektionsmedlets egenskaper och injekterad längd i slangarna, se Bilaga 5. Analyserna bekräftade att en urspolning skulle ske med aktuella förutsättningar.

#### 4.5 FÄLTFÖRSÖK VIBRATIONSMÄTNINGAR

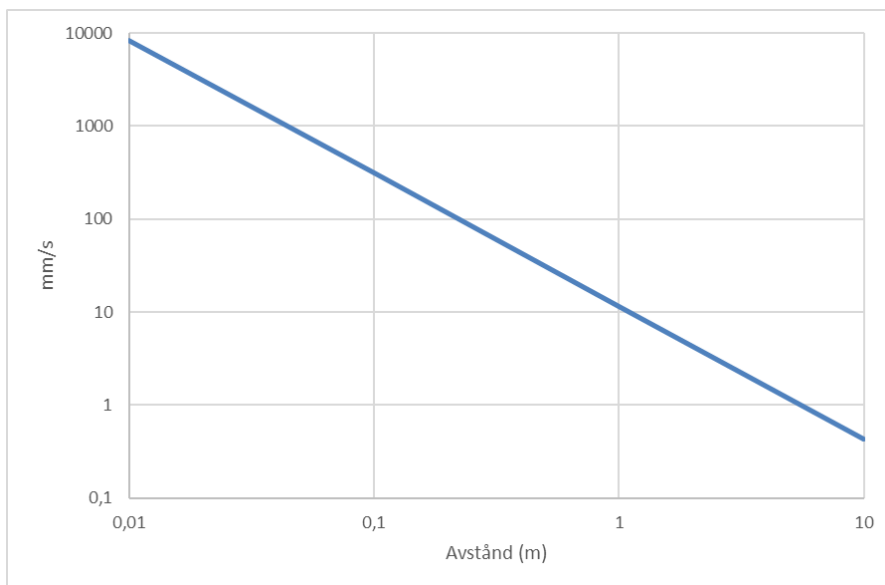
Vibrationsmätningar utfördes vid borrning av de borrhål som borrades för demoförsöket. Syftet med detta var att kunna göra en bedömning av den påverkan som borrningen innebär i bergmassan innan sprängning utförs vid tunneldrivning. Mätningar utfördes med tre triaxiella givare under hela tiden borrningarna utfördes.

Genom att känna till avstånd mellan givare och påslagspunkt för borrhålet och anta en konstant borrarjunktionshastighet ner till 4 m djup (längd på borrhål) gick det sedan att bestämma avståndet mellan givaren och det registrerade mätvärdet, mätningarna redovisas utförligare i Bilaga 6.

Resultatet av mätningarna gav resultatet:

$$v = 11,5 \cdot r^{-1,4}$$

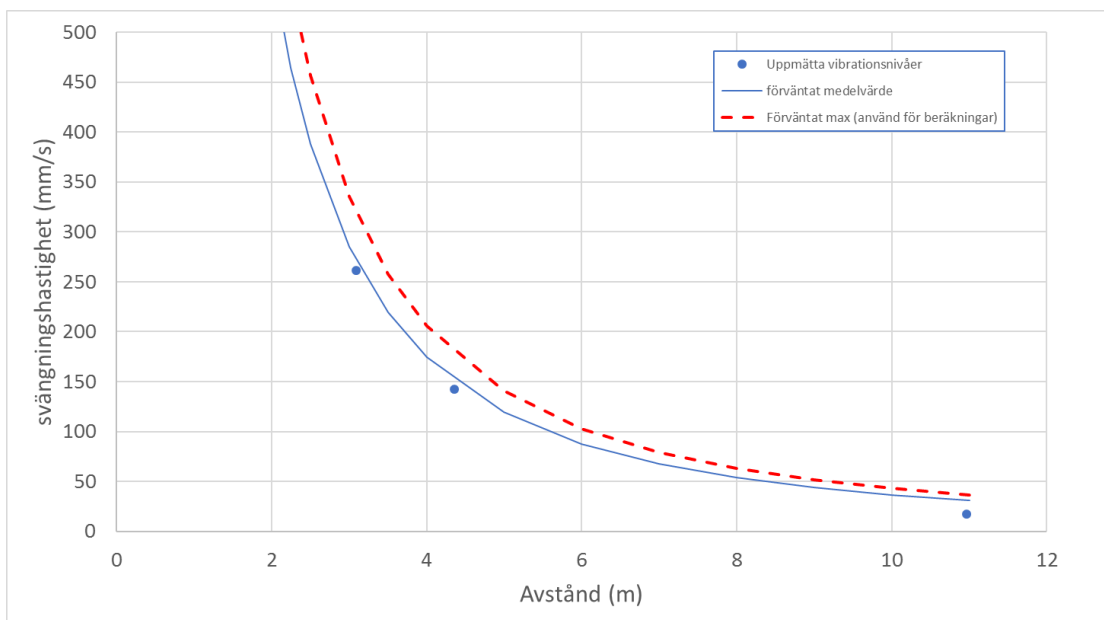
Där  $v$  är maximal vibrationshastighet (komponentmax) och  $r$  är avstånd mellan givare och borkkrona, resultatet kan också ses i Figur 4-13.



**Figur 4-13.** Resultat från mätning av borrhingsvibrationer.

Vid försöken sprängdes ett hål, syftet med detta var att simulera ett kontursprängningshål, hålet sköts som ett bomskott dvs utan att flytta något berg. Hålet var 4 m djupt och laddades med kontursprängämne för att efterlikna vibrationerna från sprängning i en tunnelkontur.

Mätning skedde i tre punkter, dels rakt ovanför hålet (ca 1,4 m) dels till höger om hålet (ca 3,4 m), dels längre ut i tunneln ca 6 m från stoffen. Resultatet av mätningen (komponentmax från de tre mätpunkterna) ses i figur 4-14. Resultatet mellan den antagna vibrationsnivå som användes vid beräkningarna (streckad linje i Figur 4-14) och uppmätta resultat vid provsprängningen visar att resultaten är mycket samstämmiga.



**Figur 4-14.** Uppmätta data plottas mot den prognos som gjordes. De beräkningar som utförts i rapporten bygger på den streckade röda linjen.

#### 4.6 FÄLTFÖRSÖK HYDRAULISKA TESTER

Samtliga borrhål vattenförlustmättes och tryckuppbyggnadstestades efter borrhning, se Tabell 4-4. I två av borrhålen kunde ytläckage noteras (borrhål 4 och 5) samt ett lokalt inrasat (borrhål nr 5). I borrhål

nr 5 gjordes upprepade försök att rensa och montera manschett men inget resultat från vattenförlustmätningen kunde erhållas.

**Tabell 4-4. Resultat av hydrauliska mätningar efter borrning.**

Borrhål nr]	Övre sektion [m]	Nedre sektion [m]	Flöde [m]	Tryck [m]	Transmissivitet [m]	Hydraulisk vidd [m]
1	1	4	24,49	1,7	1,88E-05	310
2	1	4	0,015	3,00	6,41E-09	22
3	1	4	0,194	2,90	8,73E-08	52
4	1	4	0,112 (ytläckage)	3,00	4,88E-08	43
5	1	4	Ytläckage	-	-	-
6	1	4	1,806	2,7	8,72E-07	111
4	0,8	4	0,154 (ytläckage)	2,5	8,02E-08	50
4	0,5	4	5,769 (ytläckage)	2,5	3,01E-06	168
7	1	4	0,020	3	8,54E-09	24
8	1	4	0,015	3	6,41E-09	22
9	1	4	2,284	2,9	1,03E-06	118
10	1	4	1,498	2,7	7,23E-07	105
11	1	4	3,113	2,7	1,50E-06	134
12	1	4	0,421	2,9	1,89E-07	67

Av de 12 borrhålen valdes fyra borrhål ut för att utföra fältförsöket nämligen borrhål 6, 9, 10 och 11. Kriterierna för urvalet var enligt avsnitt 3.4; hydraulisk sprickvidd >100 µm, samband mellan borrhålen samt radiellt flöde. Borrhål nr 5 var också intressant som kontrollhål eftersom den konnekterade med flera av de utvalda borrhålen, men ingen utvärdering av vattenförlustmätning kunde göras på grund av ytläckage. Borrhål nr 9 valdes ut som "spränghål". I Figur 3-6, avsnitt 3.4, visas hur borrhålen är placerade i förhållande till varandra samt vilka som uppvisade hydraulisk kontakt.

Inför injekteringen gjordes en ytterligare vattenförlustmätning i de utvalda borrhålen.

#### 4.7 FÄLTFÖRSÖK INJEKTERING

Förprovningsmedlet gjordes med en blandning av två säckar cement (INJ30) på 40 kg och 32 kg vatten, dvs vct 0,8. Samma recept användes därefter under injekteringen av borrhålen. Resultaten från förprovningsmedlet redovisas i Tabell 4-5.

**Tabell 4-5. Uppmätta egenskaper på blandningen.**

	Förprovning	Löpande provning
Mudbalance [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,51	1,6
Marshkon [sec]	37	38
Yield stick [Pa]; [mPas]	2; 20 mPas	2; 22 mPas

Injektering eller hålfyllnad gjordes i samtliga borrhål utom borrhål nr 9 (spränghålet). Injekteringen eller hålfyllnaden startade i de tätare borrhålen och de längst ifrån det aktuella spränghålet (nr 9). Resultaten från injekterade borrhål, med volym större än hålfyllnad, återfinns i Tabell 4-6.

Tabell 4-6. Injekteringsdata.

BORRHÅL [NR]	START KLOCKSLAG	UPPNÅTT SLUTTRYCK [BAR]	INJEKERAD VOLYM* [LITER]	STOPPAT KLOCKSLAG	KOMMENTARER
UTVALDA BORRHÅL					
5	13:18:34	10,4	11,1	13:33:05	Ytläckage ca 0,5 m ovanför i hål nr 5
6	13:34:39	11,2	8,7	13:50:00	-
10	13:52:28	10,3	7,6	14:07:09	-
11	14:09:20	10,2	11,7	14:23:52	-
ÖVRIGA BORRHÅL					
1	12:52:33	10	73,8	13:15:15	Åtgång 2 batcher
4	14:30:58	10	131	15:03:27	Ytläckage; läckaget minskar under tiden injektering pågår
7	09:19:40	9,3	0,5	09:32:31	Injektering ytliga delen, 0,5-1 m

\*volym efter halfyllnad.

Borrhål nr 7 injekterades också dagen före med blandningen från förprovnigen.

Injekteringen av samtliga borrhål utvalda ansågs lyckad; tryck och tid kunde hållas, trots att ytläckage uppträdde i vissa hål, och de uppmätta egenskaperna på blandningarna var inom accepterade gränserna.

Efter ca 3 timmars väntetid utfördes sprängningen i borrhål nr 9, se avsnitt 4.5.

#### 4.7.1 SAMMANSTÄLLNING HYDRAULISKA TESTER FÖRE OCH EFTER SPRÄNGNING

På frågeställningen om sprängningen kan påverka injekteringen negativt avser svar erhållas från de hydrauliska testerna i borrhål nr 9 samt visuell kontroll av cementpluggar i injekterad borrhål. Opåverkad injektering uppfylls om det hydrauliska testet i borrhål nr 9 visar på samma eller mindre vattenförlust efter att sprängning utförts och om inga samband fås i hålen med tidigare konnektion (borrhål nr 5,6,10 och 11). I Tabell 4-7 visas sammanställningen från de hydrauliska testerna före och efter sprängning.

**Tabell 4-7. Resultat från vattenförlustmätningarna före injektering, injektering och till observationer och vattenförlustmätningar efter sprängning.**

Bh	Flöde före injektering [l/min]		Injektering [liter]	Flöde efter injektering [l/min]	Flöde efter sprängning [liter]
	Första omgång	Andra omgång			
5	Ytläckage	-	11,1	Tät plugg	Inledningsvis tät plugg. Därefter urspolning/ erosion?
6	1,5	1,77	8,7	Tät plugg	Tät plugg
9	2,4	2,47	Spränghål	1,667	1,875
10	1,5	1,48	7,6	Tät plugg	Tät plugg
11	3,1	-	11,7	Ej noterat flöde*	Ej noterat flöde*

\*i borrhål 11 kopplades en observations slang på den kvarsittande injekteringsmanschetten, med öppen kran. Detta syftade till att kunna observera i fall injekteringsmedlet trycktes ut och upp i slangarna under sprängningen.

Visuella observationer i de fyra borrhål (nr 5, 6, 10 och 11), som uppvisade hydraulisk kontakt med spränghålet före sprängning, är visuellt opåverkade av sprängning, dvs opåverkad tät plugg.

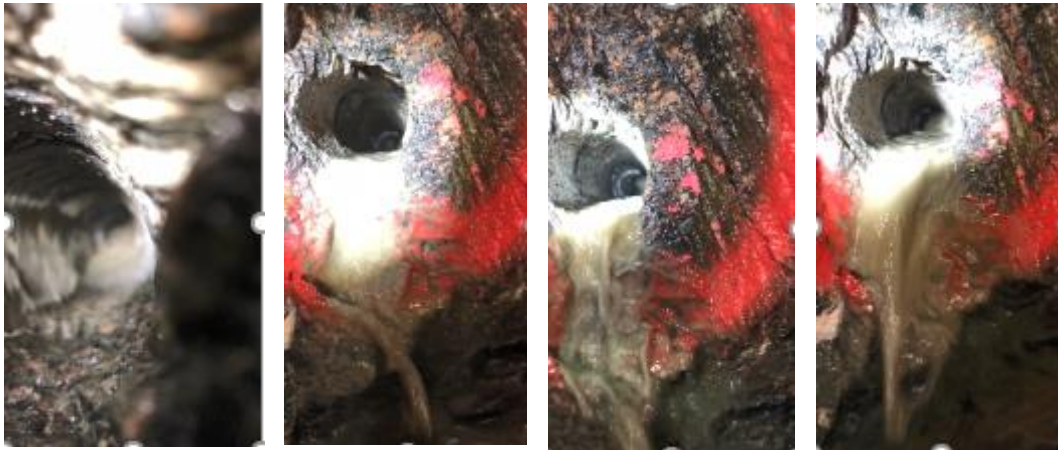
I borrhål 9, dvs spränghålet, kan en tätning av omkringliggande bergmassa framträda. Vattenförlusten i spränghålet efter injektering av de omkringliggande borrhålen var 1,7 l/min. Detta tillsammans med att synliga täta cementpluggar i injekterade borrhål och de injekterade volymen vittnar om att bergmassan blivit tätare och injekteringen var lyckad. De fyra injekterade borrhålen som hade en hydraulisk kontakt med spränghålet före injektering kan beskrivas enligt följande:

- Borrhål nr 6 uppvisade också en tredimensionell flödeskaraktär vilket möjliggör god tätning. Vattenförlusten i spränghålet var ca 2,4-2,5 l/min vid 3 Bars övertryck före injektering.
- I de fyra borrhål (nr 5, 6 och 10) som uppvisade hydraulisk kontakt med spränghålet (nr 9) är opåverkade av sprängning.
- I slangen i borrhål nr 11, också med hydraulisk kontakt med spränghålet, kunde inget injekteringsmedel eller vatten noteras efter sprängning.

Under vattenförlustmätningen av spränghålet kunde inledningsvis inget flöde ur de injekterade borrhålen noteras. Efter några minuter noterades i borrhål nr 5 ett mindre flöde som vartefter ökades, se övriga observationer avsnitt 4.7.2.

#### 4.7.2 ÖVRIGA OBSERVATIONER

Vid vattenförlustmätningen av spränghålet (nr 9), efter sprängning, noterades till en början att borrhål nr 5 var tät. Efter någon till några minuter kunde ett vattenflöde mellan injekteringspluggen och borrhålsvägg noteras. Flödet i hålet följdes under ca 2-4 minuter med ett sakteliga ökande flöde samtidigt som flödet för vattenförlustmätningen ökade. Vattnet gick från att vara gråbrun till klar färg. Detta kan vara tecken på erosion, antingen av själva injekteringspluggen eller av cementet i sprickorna. Se Figur 4-15 nedan:



**Figur 4-15.** Bilder tagna från borrhål nr 5 då vattenförlustmätning utförs i språnghålet (nr 9), efter sprängning. I borrhålet kan injekteringspluggen skönjas ca 1 m in i borrhålet. Det först flödet noteras ca 2 minuter efter att vattenförlustmätningen startades i hål 9. Flödet uppkommer mellan injekteringspluggen och borrhållsväggen. Bildsekvenserna är tagna med följande tider efter notering om läckage för bilderna från vänster; 20 sekunder, 40 sekunder, 51 sekunder och 1 minut 50 sekunder.

Kontroll av injekteringsmedlets härdning i borrhål gjordes i borrhål nr 1 och 10, en timme efter injektering avslutats. Ventilkransen öppnades och manschetten plockades ur hålet. I båda hålen noterades inget återflöde eller läckage efter demonteringen. Borrhål nr 1 hade en stor vattenförlust före injektering (24,5 l/min vid 1,7 bar) och ett naturligt utflöde ur borrhål om 2 l/min. Injekterad volym var närmare 74 liter och avbröts enligt design (10 bar, 15 min).

Under injekteringen av borrhål nr 4 syntes ett tydligt ytläckage i den rostfärgade sprickplanet som går vinkelrätt tunneln. Injekteringen fortgick enligt injekteringsdesign med gradvis avtagande av storleken på ytläckaget tills det upphörde. Injekterad volym uppgick till 131 liter.

Samtliga observationer vittnar om att tillstyvnadstiden var tillräcklig under dessa förutsättningar. Hållfastheten efter 1 timmes tillstyvning kunde inte mätas med fallkonapparaten då blandningen fortfarande var blaskig i provkopporna. Flytgränsen mätt med Yieldstick var ca 8 Pa efter en timme och efter tre timmar ca 14 Pa.

## 5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

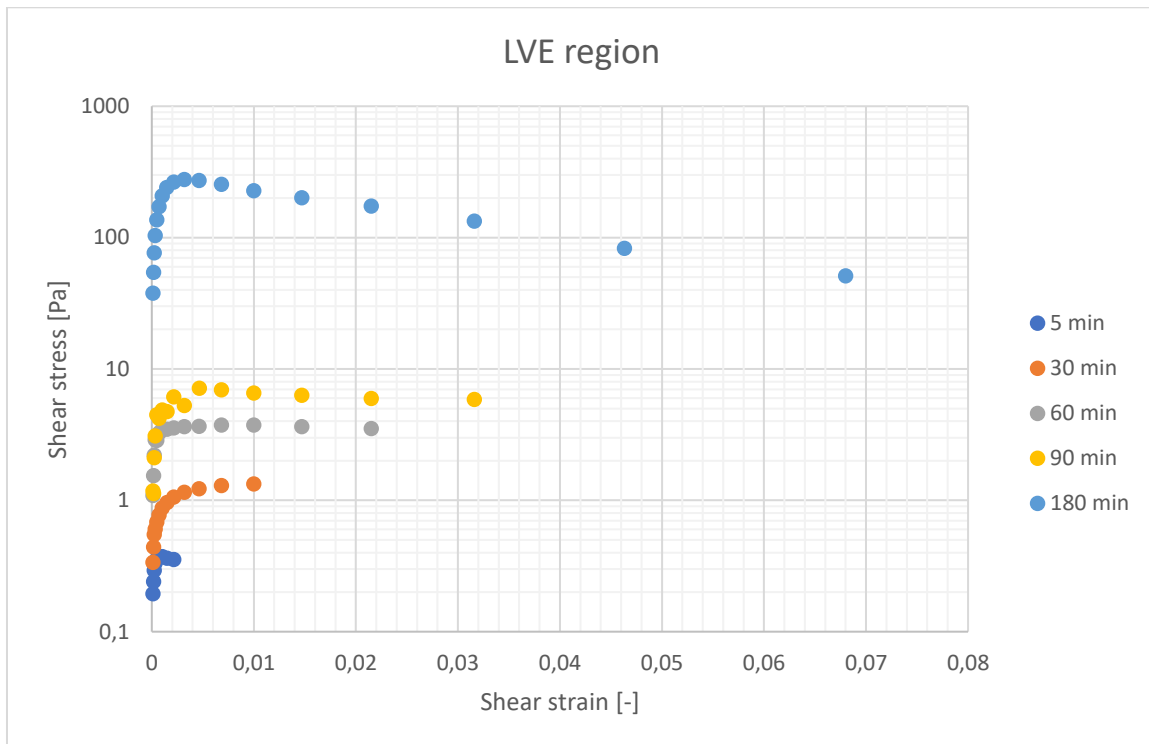
I nedanstående kapitel beskrivs hur sprängkraften och vattenspolningen kan tolkas till nedbrytande krafter och således hur krav på injekteringsmedlets hållfasthet ska ställas för att motstå en eventuell nedbrytning. För beskrivning hur dessa egenskaper/processer hänger ihop se figur 3.1 (Konceptuell figur i metodkapitlet).

### 5.1 DISKUSSION

#### 5.1.1 SKJUVMODUL INJEKTERINGSMEDEL

I Figur 5-1 visas skjuvspänningen och skjuvtöjningen för den del av det reologiska testet som uppvisar gel/fasta materialets egenskaper plottade för olika tillstyvningstider. Detta innebär att om materialet varit ett Bingham material så betyder det att vid en visst skjuvtöjning uppstår ett flöde vilket då oftast kallas flyt- eller skjuvgräns. Det är när detta flöde uppträder i materialet/vätskan som ett "brott" sker.

För testerna upp till 180/240 minuter användas platta-platta och oscillerande "amplitude sweep". En cementbaserad blandning blandades och placerades mellan plattorna. Testet kördes med ett och samma blandning vid olika tidpunkter, från 5 min och i varierande steg upp till 180 min. Den specifika blandningen blir stort under testet vilket gör att det kan vara att en ännu snabbare tillstyvningstillväxt om en ny och exakt lika blandning användes för varje tidsintervall. Vidare kan en påverkan på resultat finnas då platta-platta användes, där skjuvspänningen inte är helt jämt fördelad över provytan.



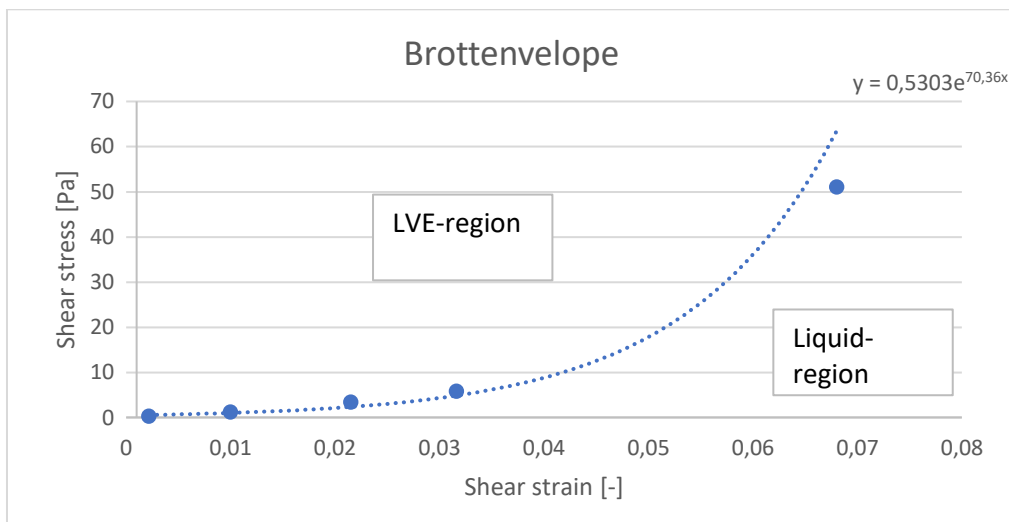
**Figur 5-1.** Skjuvspänning i den cementbaserade blandningen vid olika tillstyvnadstider.

Vid 5 minuters testet är skjuvspänningen 0,35 Pa vid en töjning på 0,002. Vid större töjningar börjar blandningen flyta. För 30 min är samma parametrar; 1,3 Pa och 0,01. För 60 min; 3,5 Pa och 0,02. För 90 min; 5,9 Pa och 0,03. För 180 min, 51,1 Pa och 0,07.

### 5.1.2 PÅ FRÅGAN OM SPRÄNGNINGEN PÅVERKAT INJEKTERINGEN

Från fältförsöket observerades att borrhålen var täta efter sprängningen. Den töjning som sprängningen gav upphov till är maximalt i häraden 0,001. Ett brott i ett duktilt material är kopplat till flytgränsen. Alltså brottet när materialet utsätts för en sådan töjning att det går från en gel till ett flödande material. Kopplingen mellan dessa är skjuvhållfastheten och skjuvtöjningen. Värdena för när skjuvspänning, skjuvtöjning och de olika tidsintervallen precis börjar flyta visas i Figur 5-2. Den erhållna kurvan (här ett polynom) visar på vid vilka töjningar som blandningen övergår från viskoelastiskt till flytande material.



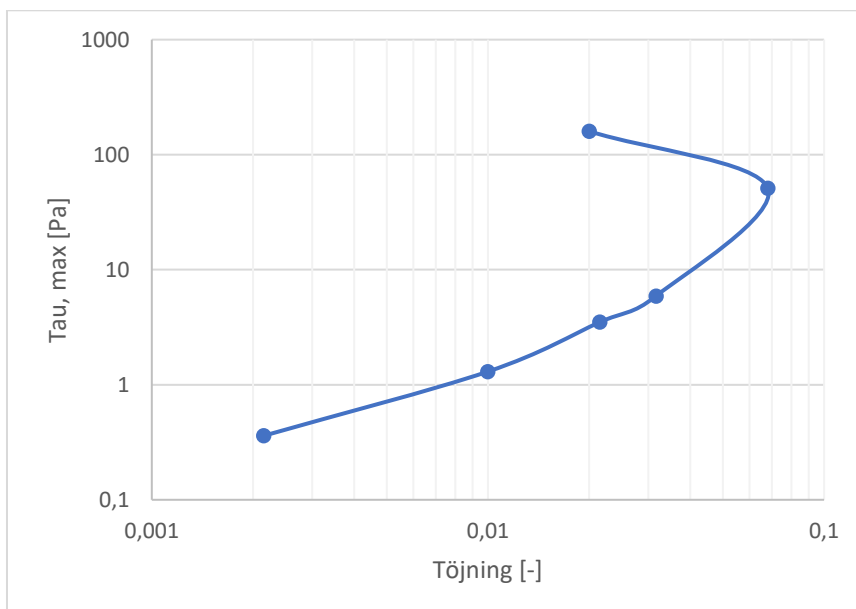


**Figur 5-2.** Diagram över skjuvpänningar och tillhörande skjuvtöjningar när blandningen går till brott (blir flytande). LVE-region=Liquid viscoelastic-region eller viskoelastiskt område.

Vid hög hållfasthet krävs en hög töjning för att materialet skall bli flytande och "brott" sker. Figuren ovan visar hur detta förhållande är för de olika testade tillstyvnadstiderna (5 min, 30 min, 60 min, 90 min och 180 min). Vid högre töjningar eller lägre hållfastheter än kurvan blir materialet flytande, vi befinner oss då i "liquid region". Vid små töjningar eller höga hållfastheter är vi i "Gel/solid -region" och materialet håller.

Diagrammet och den passade kurvan kan användas för att räkna ut vilken skjuvhållfasthet blandningen måste ha för att klara en viss töjning. Exempelvis med en hållfasthet på 10 Pa (efter någon timmes tillstyvnadstid) måste töjningen vara mer än 4% för att blandningen skall börja flyta.

För ett material som går från flytande till sprött material med ett mellanläge med duktilt borde töjningarna ge upphov till brott vid olika spänningar. I nedanstående diagram är den maximala uppnådda skjuvpänningen vid aktuell töjning under försöken med reometer (Figur 5-3).



**Figur 5-3.** Diagram över maximala uppmätta skjuvpänningar vid aktuell töjning.

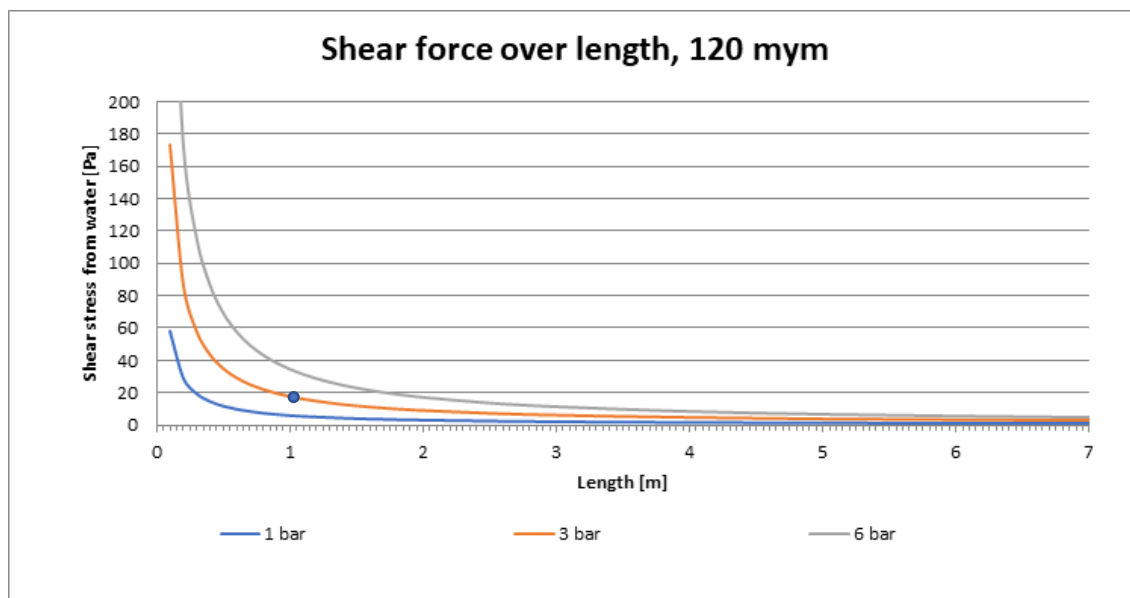
Den provkropp med kortast härdningstid är den med lägst spänning/töjning (här 5 min). Med ökande härdningstid ökar spännings/töjningsförhållandet upp till 180 min. Töjningen vid brott minskar sedan

för härdningstiden 240 min. Figuren visar att vid en och samma töjning kan spänningen i materialet uppgå till olika värden. För punkten 160 Pa;0,02 är detta för en härdningstid på 240 minuter. Om orsaken är att cementet börjar stelna beroende på andra sorters bindningar istället för de initiala gelbildande bindningar vet vi inte. Det är dock känt att materialet blir starkare och mer sprött med tiden. Det är projektets önskan att kunna följa förloppet under längre tid än det här angivna men ställer stora krav på utrustning.

Enligt figur 5-2 kommer inte den uppskattade töjningen från sprängningen i konturhålet, ca en meter från det injekterade borrhålet, inte påverka det använda injekteringsmedlet. Sammantaget så är töjningarna i fältförsöket alldeles för små för att kunna påverka injekteringsmaterialet vid aktuell tidpunkt, laddningskoncentration och avstånd.

### 5.1.3 FRÅGAN OM VATTENINJEKTION PÅVERKAR INJEKTERINGSMEDLET

Vid vattenförlustmätningen i salvhålet uppvisade 4 av 5 borrhål en täthet efter injekteringen och oförändrade täta cementpluggar i borrhålen. Före injekteringen kommunicerade borrhålen hydraulisk. Borrhål nr 5 var från tät efter sprängningen. Efter någon till några minuter kunde ett vattenflöde mellan cementpluggen och borrhålsväggen när borrhål 9 (spränghålet) vattenförlustmättes. Flödet som noterades ökade allt eftersom. Vattenförlustmätning i borrhål nr 9 (spränghålet) utfördes vid 3 bars övertryck (30 mvp) och var placerat ca 1 m från borrhål 5. Sprickorna/sprickan som var av störst intresse var nästan vinkelrätt tunneln och borrhålen. Detta ger att den maximala hydrauliska gradienten mellan borrhål nr 5 och 9 var 30 m/m. Den hydrauliska sprickvidden som kunde beräknas för borrhål 9 var ca 120 µm och uppvisade klart samband med borrhål 5. Den kraft som uppträder i kontakten mellan injekteringsmedlet och vatten visas i Figur 5-4 nedan. Med ett vattentryck på 3 bar i en 120 µm sprickvidd på 1 m inträngningslängd är "vattenkraften" ca 17 Pa. Denna kraft är högre eller lika med den uppskattade flytgräns via yieldstick som bruket hade vid 3 timmar. Således kan vattenkraften ha orsakat erosion av injekteringsmedlet i sprickan vilket gav ett inflödet i borrhål 5.



**Figur 5-4.** Diagram över kraften mellan bruk och vatten (Funehag, 2014). Punkten vid 1 m och 17 Pa visar på den vattenkraft som vattenförlustmätningen ger upphov till under fältförsöket.

Den spänning då ett material börjar flyta och som mäts med hjälp av reometer i detta projekt överstiger avsevärt den flytgräns som mättes med yieldstick och som behövs för att motstå den eroderande kraften (17 Pa). Från reometerförsöken fås en spänning på 278 Pa och med Yield stick en flytgräns mellan 12-18 Pa, efter ca 3 timmar Yieldstick har visats att den stämmer överens med den traditionella mätningen av flytgräns, se Axelsson, 2006. Vidare visades hur erosions uppstår vid en pådrivande vattenfront i Funehag, 2014 där flytgränsen är en faktor som påverkar fenomenet.

## 5.2 SLUTSATSER OCH VIDARE UNDERSÖKNINGAR

Trots mer behov av forskning kan följande delar summeras; Vibrationerna från sprängningen orsakar ingen påverkan på injekteringsmedlet 1 m ifrån detonationen, efter en väntetid på ca 3 timmar med

Sprängningens inverkan på injektering

aktuellt injekteringsmedel. Vidare är vibrationerna från borrningen så pass små så dessa inte heller påverka injekteringsmedlet. Att försätta vatten under tryck i ett borrhål som har direkt kontakt med en injekterad spricka kan orsaka erosion av injekteringsmedlet.

Rekommendationer för effektivare drivningscykel:

- Borra salva och spränga denna behöver inte kopplas till väntetiden på injekteringsmedlet så vitt dess hållfasthetsegenskaper enligt denna rapport är klargjorda
- Vibrationerna från sprängningen påverkar inte injekteringsmedlet 1 m från detonation
- Att borra kontrollhål och vattenförlustmäta i dessa direkt efter injektering kan vara vanskligt, speciellt mellan sambandshål där den hydrauliska gradienten kan bli hög.
- Att optimera drivningscykeln med koppling till hydrauliska gradienter, injekteringsmedlets egenskaper och design kan ge en snabbare framdrift.
  - o Övriga krav/önskemål på injekteringen som till exempel fyllda borrhål är inte med taget i denna rapport. Det kan finnas andra krav som kan påverka drivningscykeln utöver väntetiden för sprängning.

Med skjuvmodul och spännings/töjningsförhållande för cementsuspensioner är nya sätt att beskriva hur injekteringsmedlet påverkas av spänningar. Med detta nya sätt att beskriva reologin väcks flera frågor kring krafter och brottmekanismer i flytande material såsom:

- Vad har ett material med viskoelastiska egenskaper för brottegenskaper? Ska denna region beaktas och beskrivas för sig?
- Ett material med linjärelastiska egenskaper? Påverkar alla töjningar inom detta område materialet?
- Vad sker när ett material blir flytande igen och töjningen avtar?
- Med den svängningshastighet som testats i reometern understiger de förmodade svängningarna vid detonation. Att utreda detta både teoretiskt och via laborationer är nödvändigt för att klargöra påkänningarna i fältmässiga förhållanden.

Fortsatta rekommenderade undersökningar är:

- Dynamiska tester med bender-element varit en central del i planeringen av projektets testprogrammet. Dessa tester utfördes dock inte i förstudien. Bender element är en sorts testutrustning som kan monteras i topp- och bottenstycket ovan och under provkroppen i triaxialapparaten. Försöket utförs därefter genom att en sinusvåg skickas genom provkroppen och avläses, av en sändare respektive en mottagare. Denna metod gör det möjligt att mäta den maximala skjuvmodulen ( $G_{max}$ ) hos en provkropp för att utvärdera materialets styvhet vid dynamisk last och vid mycket små töjningar.
- Att numeriskt studera dynamiken kring sprängning för att bli säkrare på aktuella töjningar.
- Ytterligare försök med längre härdningstider (längre än 240 min) i reometern behöver göras för att följa förloppet med spänning/töjning.
- Ett mer omfattande fältförsök/demonstrationsförsök behöver göras där samtliga ingående parametrar skall kunna klargöras/mätas under drivning.

## 6 REFERENSER

AMA Anläggning 17 (2017): Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten. AB Svensk Byggtjänst.

Axelsson, M. Gustafson, G.(2006). A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grout in field. Tunneling and Underground Space technology, Vol.21, pp 499-503. Elsevier.

Blar D & Minchinton A, 1996: On the damaged zone surrounding a single blasthole. Fragblast 5, rock fragmentation by blasting. pp 121 -130

Betonghandboken (Svensk Byggtjänst), Betonghandboken Material, utgåva 1997. Svensk Byggtjänst.

Bohloli, B. Omolo, L. Soldal, M. Wilkinson, H. Morgan, E.K. (2016): Laboratory study of mechanical and hydraulic properties of cement grouts. 8<sup>th</sup> Nordic Grouting Symposium, Oslo 2016.

Bäumli, M. Sundqvist, C. (2013): The effect of blast-induced vibrations on grout. Master Theises 2013:149. Div of GeoEngineering, Chalmers.

Cementa (2018): Technical data sheet Injektering 30. www.cementa.se. Tillgänglig: 2019-04-08.

Controls group (2019): <https://www.controls-group.com/eng/soil-mechanics-testing-equipment/bender-elements.php>. www.controls-group.com. Tillgänglig: 2019-04-11.

Cunningham c., 2006: Blasthole Pressure: What it really means and how we should use it. 32<sup>nd</sup> conf on explosives and blasting technique, ISEE, Grapevine TX.

Esping, Oskar (2017): <http://betong.se/2017/02/04/fraga-experten-bast-fore-datum/>. www.betong.se. Tillgänglig: 2019-04-08.

Hansson, P. (1994): Cementinjektering – Handbok i materialteknik för injekterare. Elforsk Rapport 94:12.

Hedborg, Peter (2018): Triax test på injekteringsbruk – Provberedning och test med triax utrustning. PM Labtek. Daterad 2018-04-13.

Heelan P A., 1953: Radiation from a cylindrical source of finite length, Geophysics 18. Pp 685-696.

Holmberg R., Persson P-A., 1979: Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage. In Tunneling'79. Proceedings of 2nd int symp on Tunneling, pp 2870-2883.

Håkansson, U. (1993): Rheology of fresh cement-based grouts. Div of Soil and rock mechanics. KTH.

Håkansson, U., Draganovics, A., Funehag, J. 2018. Standardiserad mätning för cementbaserade injekteringsmedels reologi. Bergmekanikdagen, 2019, Stockholm. Svenska Bergteknik föreningen. Sverige.

Johansson, H (1997): Spolvattenbeständighet hos cementbaserade injekteringsmedel. Examensarbete Avd Jord och bergmekanik. KTH.

Landau L D och Stanyukovich K P, 1945: Dokl Akad Nauk SSSR 46(9), p. 399.

McKenzie C K., A Review of the Influence of Gas Pressure on Block Stability During Rock Blasting. Explo´99 Kalgoorlie, WA, 7-11 November 1999. Sid 173-179.

Shamu, J., Håkansson, U. 2019. Rheology of cement grouts: on the critical shear rate and no-slip regime in couette geometry. Cement and concrete research.

Vicat-apparat (SS-EN 196-3), Svensk standard SS-EN 196-3:2005. Cement – Provning – Del 3: Bestämning av bindetid och volymsbeständighet.

Williamson S R och Armstrong M E., 1986: The Measurement of Explosive Product Gas Penetration, in Proceedings Large Open Pit Mining Conference, pp 147-152 (the Australian institute of mining and Metallurgy)

Yang, Ruilin & Scott Scovira, D. (2010). A Model For Near And Farfield Blast Vibration Based on Multiple Seed Waveforms and Transfer Funktions. *Blasting and Fragmentation*, 4(2), pp 91-116.

Yang R., & Ray K., 2013: A method to determine 3-D dynamic strain tensor based om displacement gradients from blast vibration and field test results. *Fragblast* 10, New Delhi, pp 341-348

Yang R och Jern M, 2019: Modeling VOD and Initiation Effects on Blast Vibration PPV Using Nonlinear Charge Weight Scaling and Variable Time-window for Charge elements. Proceedings of the 45 annual conference on explosives and blasting technique. January 27-30 Nashville Tennessee.

## Bilaga 2-laborationsrapport, reologi och skjuvmodul

### 1 INTRODUKTION

Reologi är kunskapen om materialegenskaper för vätskor. För injekteringsmedel av typen dispersioner används parametrarna viskositet och flytgräns. Viskositeten är ett mått för vätskan vilja att motstå flöde genom vätskans inre friktion. Flytgräns är den kraft som krävs för att försätta vätskan i rörelse. I detta projekt har studier utförts för att förstå om en vätska

#### 1.1 SYFTE

Syftet är att bestämma skjuvmodulen för cementbruk under en tid om ca 4 timmar efter blandning. Cementbruket skall ha samma egenskaper som det bruk som använts i övriga testerna vilket ger ett VCT på omkring 0,8. Metoden som skall användas är reometer med oscillerande teknik.

### 2 TEORI OCH METOD

#### 2.1 SKJUVMODUL

En vätska bestående av partiklar kan beskrivas som ett viskoplastiskt material. Detta innebär att en del av beskrivs som viskösa del då spänningen på materialet överstiger flytgränsen, alltså materialet flyter. Med en lägre spänningen än flytgränsen är materialet som ett plastiskt fast material.

Viskositeten är en förenkling av begreppet coefficient of viscosity vilken bestäms av förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvtöjning under konstant skjuvning. Viskositeten kan således enbart bestämmas som en materialkonstant för vätskor som uppför sig som newtonska och är således oberoende av skjuvhastigheten. För vätskor där förhållandet är beroende av skjuvhastigheten är det snarare en parameter som icke-newtonsk viskositet och måste således bestämmas vid tänkt applikationsområde. I dessa fall så utvärderas det oftast en skenbar viskositet.

För ett fast elastiskt material som följer Hooke's lag är modulen (E-,G-) förhållandet mellan pålagd spänning och deformation. För ett rent elastiskt material sker spänning och töjning helt i fas. För ett visköst (viskoelastiskt) material finns det en fasförskjutning mellan spänning och töjning. Spänning och töjning för viskoelastiska material kan beskrivas enligt:

Töjning,  $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t)$

Spänning,  $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$

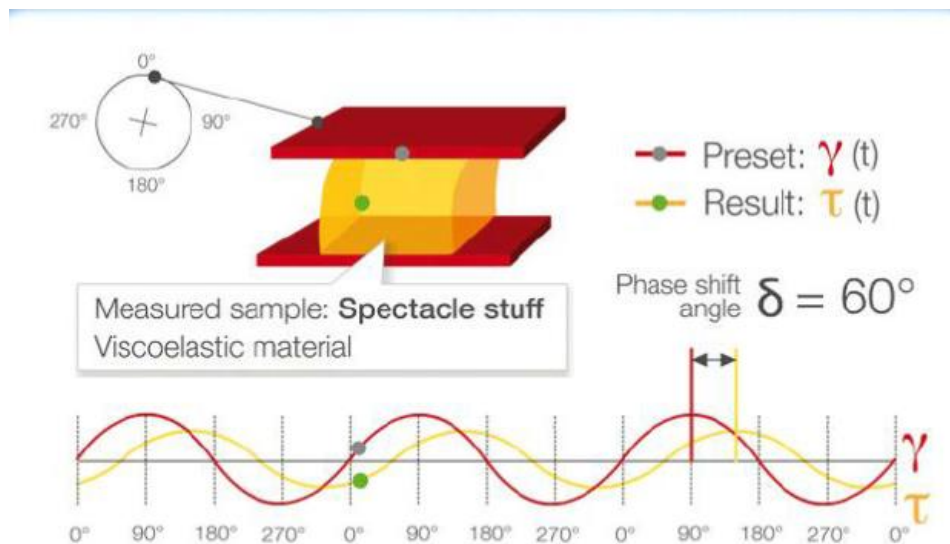
Där  $\omega = 2\pi f$  och  $f$  frekvensen för oscillerandringen,  $f$  är fasförskjutningen,  $t$  är tiden,  $\delta$  är fasförskjutningen.

Skjuvmodulen,  $G$  för en vätska bestäms av förhållandet mellan pålagd skjuvspänning och motsvarande skjuvtöjning. Det är oftast enklast att bestämma skjuvmodulen för vätskor genom mätning av skjuvhastighet,  $\dot{\gamma}$  (Gamma prick). Då de flesta utrustningar för reologi använder roterande verktyg där hastigheten genom vinkelförändring kan mätas. Verktygen anpassas geometriskt så villkor såsom laminär strömning, konstant skjuvning över hela provet, inget slip etc infrias. Olika utformningar på verktygen och olika typer av reologi apparater lämpar sig olika väl för framtagande av reologiska egenskaper. Verktyget med utformningen som en kona och en platta ger exempelvis lika töjning över hela provet. Samtidigt så försätts konan med

---

## Bilaga 2

oscillerande rörelser med olika vinkelhastighet för att erhålla en spänning som påverkar bindningarna mellan partiklarna minimalt samt under en dynamisk belastning. Med en kona som rör sig parallellt mot en platta som är fast ger detta upphov till en skjuvrörelse i provet. Motståndet mot rörelse mäts i konan vilket omvandlas till en skjuvspänning genom vetskap om vinkelförändring, hastighet och geometri. Med en oscillerande rörelse som innebär att provet rör sig både framåt och bakåt gentemot plattan innebär detta att två olika skjuvmoduler erhålls. En modul kallad  $G'$  ( $G$  prim).  $G'$  kallas inom reologin för "storage modulus" och innebär att energi lagras i materialet och är främst den elastiska delen som representeras. Den andra modulen i materialet som erhålls kallas  $G''$  ( $G$  bis) eller "loss modulus" där energin går förlorad och är främst den viskösa delen. I viskoelastiska vätskor finns alltid en fasförskjutning mellan skjuvhastighet och skjuvspänning eller under ett oscillerande test vid en pålagd skjuvhastighet erhålls responsen via en uppmätt skjuvspänning vilket uppträder efter en viss fasförskjutning. Ett exempel på hur detta kan se ut visas i figur 1. För ett fast material finns ingen fasförskjutning (0 grader).



Figur 1. Fasförskjutning i viskoelastiska vätskor där responsen från skjuvspänningen,  $\tau$ , kommer efter att skuvningen,  $\gamma$  startat. Referens: *Basics of Rheology- Anton Paar Wiki*.

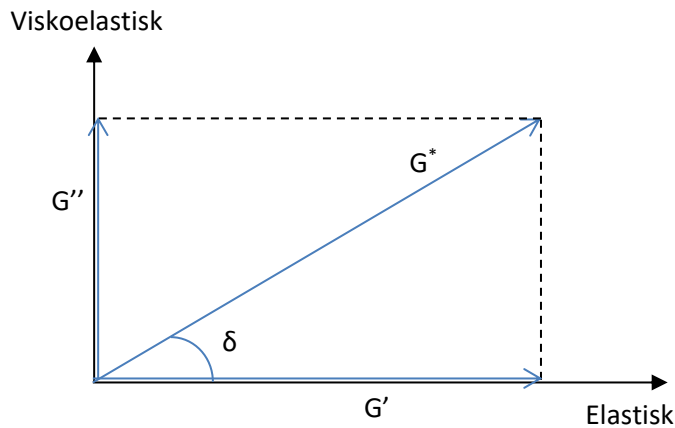
En vätska bestående av partiklar och vatten har oftast minst två egenskaper. Vid en skjuvhastighet lägre än ett visst värde beter sig vätskan som viskoelastiskt. Det är således den viskösa delen av vätskan som betraktas. Vid en högre skjuvhastighet beter den som ett viskoplastiskt material där det är främst partiklarnas egenskaper som dominerar egenskapen. För att erhålla en skjuvmodul för hela det testade området används definitionen complex shear modulus,  $G^*$  ( $G$  star). Denna erhålls enligt

$$G^* = \tau_A / \gamma_A$$

Där  $\tau_A$  skjuvspänning [Pa] erhållet från ett oscillerande test därav index a som är amplitud och  $\gamma_A$  är töjningen [-].

En beskrivning av "complex shear modulus" och dess delkomponenter, storage modules och loss modulus visas i figur 2.

## Bilaga 2



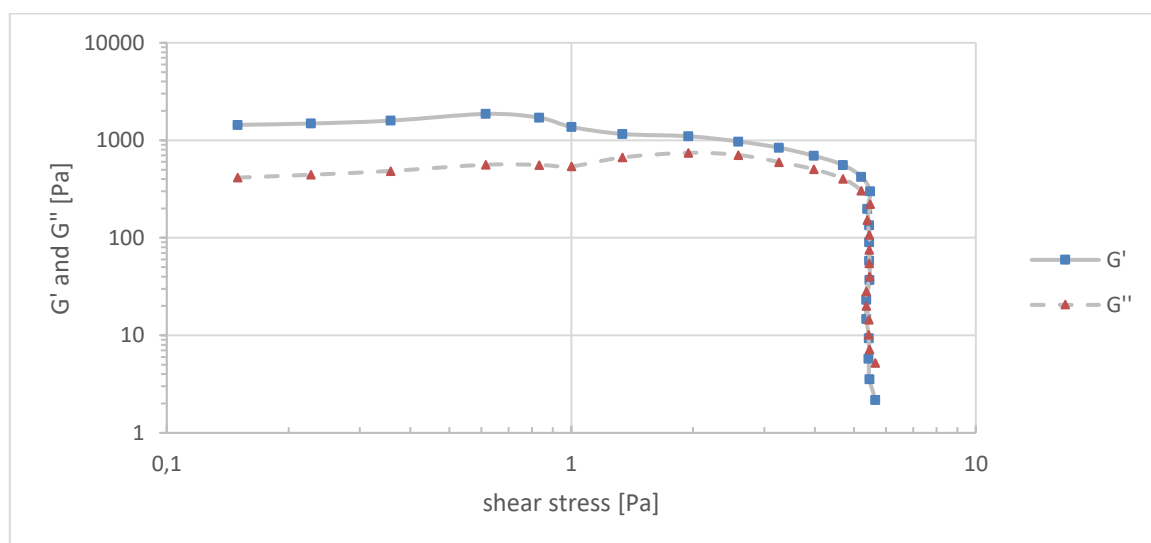
Figur 2. Schematisk skiss över complex modulus.

Den komplexa skjuvmodulen,  $G^*$  kan ses som en vektor med delkomponenterna storage modulus,  $G'$  och loss modulus,  $G''$  och  $\delta$ , fäsförskjutningen.  $G'$  representeras av den viskoelastiska delen av provet och kan enkelt beskrivas av den fasta delen i materialet.  $G''$  representeras av den rena viskösa delen av provet och enkelt uttryckt beskriver den flödande delen av provet.

Den viskösa delen är ett mått på den inre friktionen mellan partiklar och molekyler och ger upphov till värmeutveckling och således en energiförlust. Den elastiska delen består i att bindningar i de interna strukturerna/partiklar dras ut men utan att de går sönder.

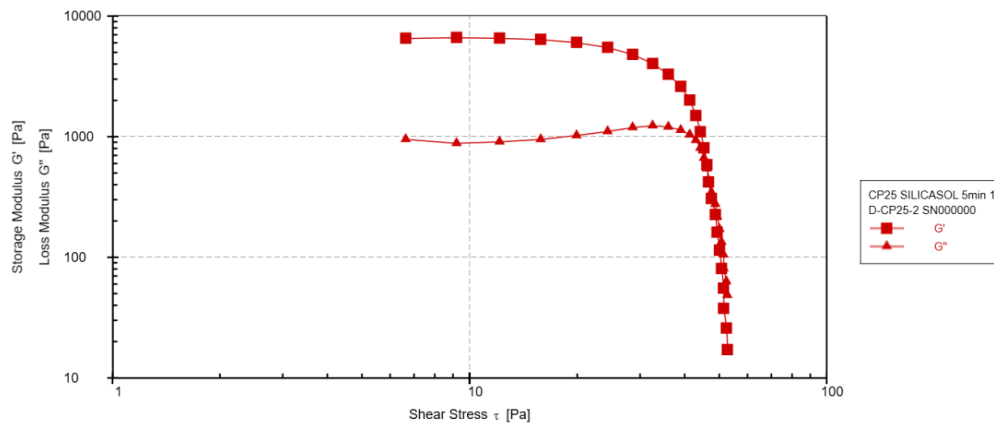
För viskoelastiska vätskor där  $G'' > G'$  innebär att det inte finns några starka bindningar mellan partiklarna/molekylerna.

För att urskilja/karakterisera vätskans egenskaper bör de olika regionerna av viskösa del respektive plastisk del betraktas. I nedanstående diagram (Figur 3) visas hur två olika vätskor beter sig; Cementbruk och silica sol. Cementbruket testades vid 5 minuter efter blandning och silica solen 5 minuter efter gellid.





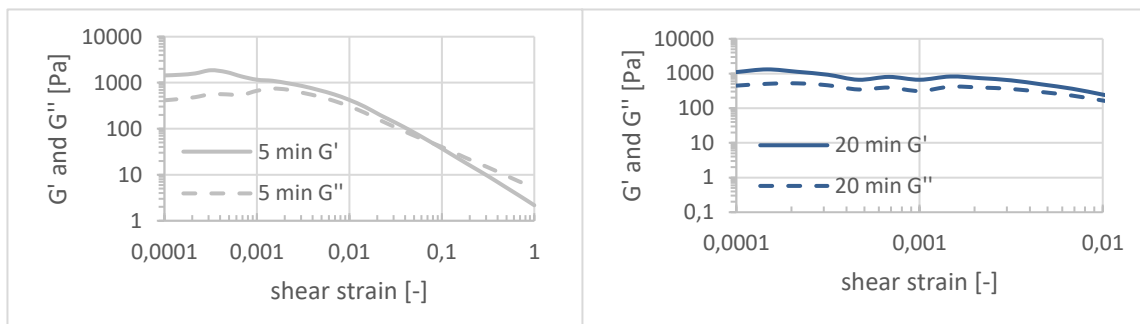
## Bilaga 2



Figur 3. Diagram över skjuvmodulen för två olika material, överst; cementbruk. Nederst; silica sol.

De två olika materialen i figur 3 uppvisar stor skillnad i skjuvmodul, den elastiska delen på silica sol uppvisar nästan 6 gånger högre elasticitet än den för cement. För de som känner till egenskaperna för dessa material kan säkert känna igen att silica solen känns mer "gummiaktig" vid gelning än efter någon timme för cement.

Elastiska och plastiska egenskaper bruk kan beskrivas med de två skjuvmodulerna. Ett exempel på hur förståelse och analys görs åskådliggörs i figur 4 nedan. Då  $G'$ , "storage modulus" är högre än  $G''$ , "loss modulus" betar sig materialet som en "enhet" med viskoelastiska egenskaper. Det är också denna del som materialet fungerar som förväntat, ett framträngande bruk i sprickan.



Figur 4. Illustration över hur  $G'$  och  $G''$  förändras allteftersom pålagd skjuvning blir större samt för vid två olika härdningstider för bruket.

Figur 4 visar att övergången från ett elastiskt flöde med bindningar mellan partiklarna till ett inhomogent flöde där partiklar och vätska skiljs åt sker vid ca 10% töjning för 5 minuter och mer än 1% för 20 minuter gammalt bruk. Det kan sägas att bruket betar sig viskoelastiskt över ett stort område med töjningar.

## 2.2 TESTUTFÖRANDE

Blandningar av injekteringscement, INJ30 med vatten motsvarande ett vct på 0,8 samt med och utan tillsatser testades. Utrustning för mixning av cement användes en matberedare, Philips med ett varvtal på 10 000 rpm. Kontroll av blandningen gjordes med hjälp av att mäta densitet via våg och känd volym och mäta flödestiden via Marshkon. Reometern är en Anton Paar MCR302 men möjlighet till vridmoment mellan 1nNm och 200mNm och vinkelhastighet mellan

## Bilaga 2

$10^{-9}$  rad/s till 314 rad/s. De två testuppställningarna i reometern som använts var kona-platta (CP-25) med ett "amplitude sweep" samt med oscillerande.

Ett amplitude sweep genomfördes som första test för att karakterisera vid vilka skjuvhastigheter materialet beter sig flytande, materialets elastiska del, samt att undersöka vilken vid vilken deformation materialet går "sönder". När detta är fastställt görs en körning med kontrollerad skjuvhastighet med oscillerande kona över det elastiska området för att bestämma skjuvmodulerna.

### 2.3 FÖRUTSÄTTNINGAR

#### 2.3.1 BLANDNINGAR, CEMENT

Förprovnings gjordes med 2 säckar cement, 40 kg och 32 kg vatten. Samma recept användes under injekteringen. Resultaten redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Uppmätta egenskaper på bruksblandningen

	Förprovning	Injektering
Mudbalance [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,51	1,6
Marshkon [sec]	37	38
Yield stick [Pa]; [mPas]	2; 20 mPas	2; 22 mPas

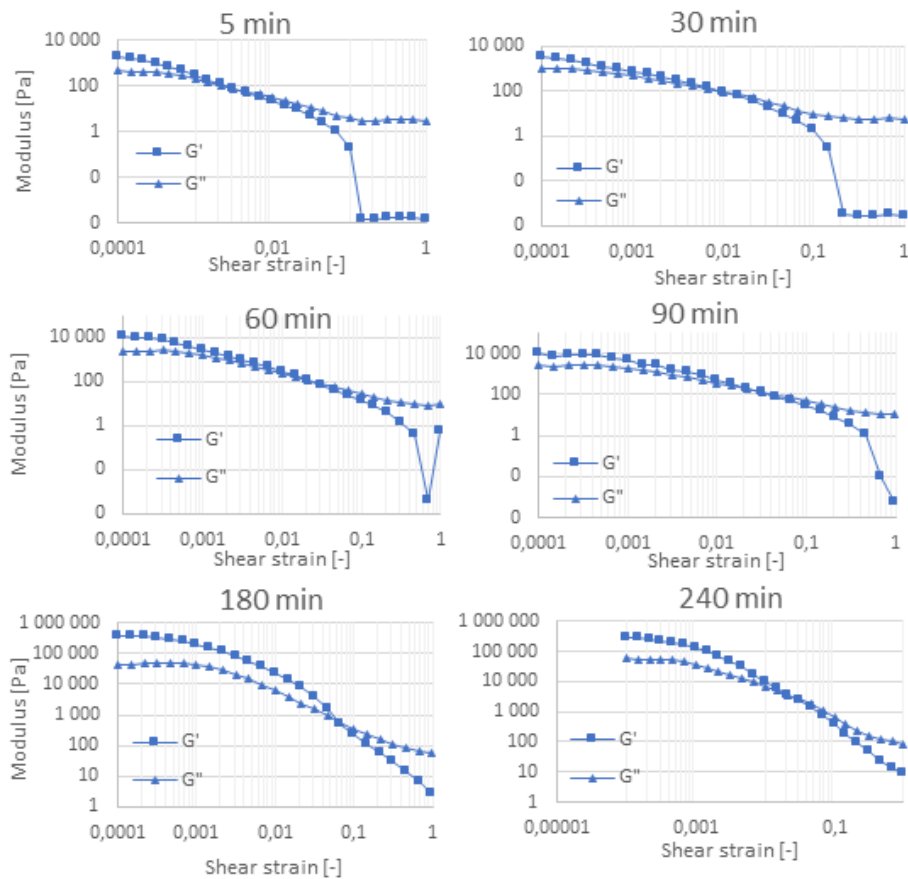
## 3 RESULTAT

Resultaten är uppdelade med olika testuppsättningar. Uppsättningarna har två olika syften; bestämma skjuvmodul med kona-platta samt följa härdningsförloppet med platta-platta. Till detta är de utförda amplitude sweep som tidigare beskrivits att bestämma ett giltigt område för de olika skjuvhastigheterna.

### 3.1 BRUKETS HÄRDNING OCH SKJUVMODUL

I nedanstående figurer visas hur brukets skjuvmodul ändras med tiden pga härdningen. Testuppsättningen är *platta-platta*. Med denna uppsättning ger det ingen en homogen skjuvbild över hela provet vilket gör att absolutvärden på skjuvmodul inte kan ges. Däremot ger det en uppfattning av storleken samt hur tillväxten sker. Syftet är att beskriva vid vilken töjning som bruket går från en solitt/geltillstånd till flytande tillstånd. Flytande betyder här ett brott. Krafterna från sprängningen skall då inte ge upphov till ett flytande material. Provet som testades var ett och samma prov hela tiden. Med detta så har bruket utsatts för brottspänningar under flera gånger fram till dess att de 240 minuterna har löpt ut.

## Bilaga 2



Figur 4. Diagram över hur skjuvmodulen ändras under härdningstiden upp till 4 timmar.

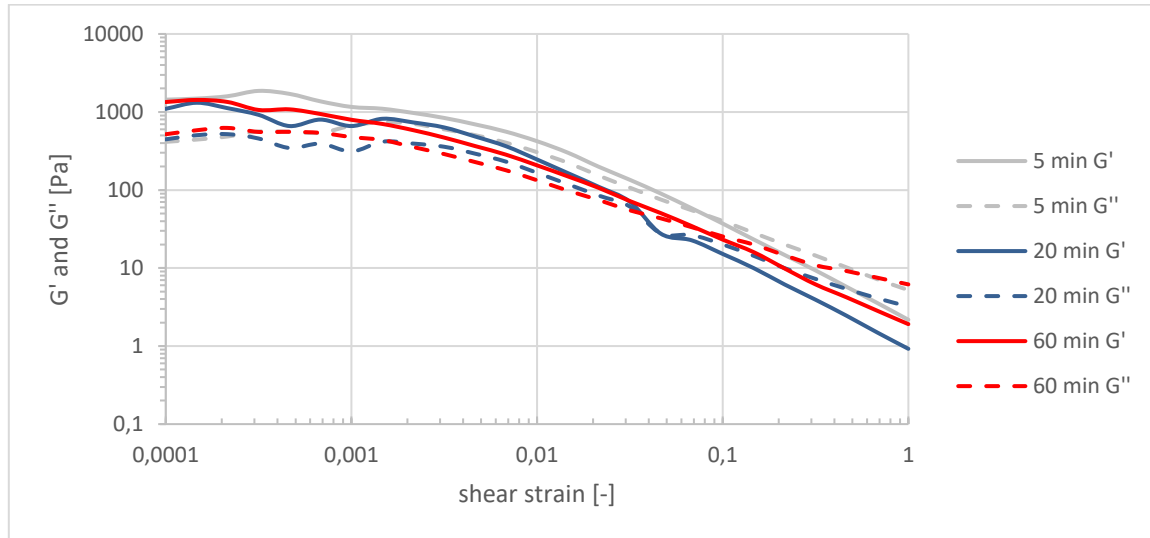
Figur 4 visar vid vilken skjuvtöjning som bruket går från ett fast elastiskt material till flytande ( $G'=G''$ ). För det 5 minuter gamla provet sker detta vid en töjning på 0,003, för 30 och 60 minuter= 0,01, för 90 minuter=0,03, för 180 minuter=0,07 och sist 240 minuter=0,02.

Vi ser också att skjuvmodulen vid en skjuvtöjning på 0,001 (0,1%), växer den elastiska skjuvmodulen från ca 0,3 kPa vid 5 minuter till 100 kPa vid 240 minuter.

### 3.2 SKJUVMODUL FÖR DE FÖRSTA 60 MIN EFTER BLANDNING

För dessa tester har kona-platta använts vilket ger en likadan skjuvbild över hela provet. Provet är ett nytt prov från samma blandning vid de olika tidpunkterna.

## Bilaga 2



Figur 6. Skjuvmodulen mot skjuvtöjningen för olika tider på bruksblandningen med kona-platta uppsättning.

Figur 6 visar att skjuvmodulen,  $G'$  är ca 1000 Pa för dessa tider på blandningen. Skjuvmodulen är ca 30-50 Pa då bruket övergår till flytande och töjningarna då detta sker är mellan 0,1 (för 5 minuters blandningen) till 0,03 (för 60 minuters blandningen).

Resultaten från reometern sammanställs i tabell 1 nedan.

**Tabell 1.** Sammanställning av värden på skjuvmoduler och töjningar för de två olika testuppställningarna. Med "brott" medan när skjuvmodulerna  $G' = G''$  och materialet övergår från elastiskt till plastiskt.

Tid sedan blandning [min]	Platta-platta		Kona-platta	
	Töjning [-]	Skjuvmodul vid 0,1% töjning	Medel Skjuvmodul vid töjning 0,01-0,1%	Skjuvmodul och töjning vid "brott"
5	0,003	300 Pa	1300 Pa	40 Pa/10%
20				
30	0,01	740 Pa	1000 Pa	33 Pa/7%
60	0,01	3000 Pa	900 Pa	50 Pa/3%
90	0,03	4500 Pa		
180	0,07	200 000 Pa		
240	0,02	130 000 Pa		

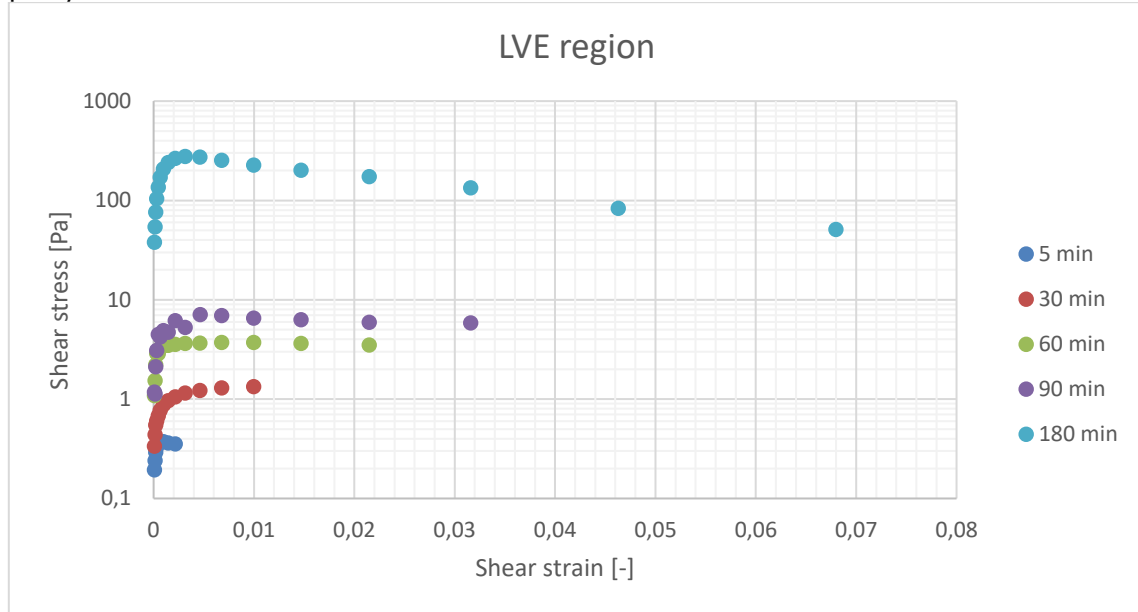
## 4 DISKUSSION

I Figur 7 visas skjuvspänningen och skjuvtöjningen för den del av testet som uppvisar gel/fasta materialets egenskaper plottade för de olika härdningstiderna. Detta innebär att om materialet varit ett Bingham material så betyder det att vid en visst skjuvtöjning uppstår ett flöde vilket då oftast kallas flyt- eller skjuvgräns. Det är när detta flöde uppträder i materialet som ett "brott" sker.

För dessa tester upp till 180/240 minuter användas platta-platta och oscillerande amplitude sweep. Ett prov tillreddes och monterades mellan plattorna. Testet kördes med ett och samma prov vid olika tidpunkter. Provet blir stort under testet vilket gör att det kan vara att

## Bilaga 2

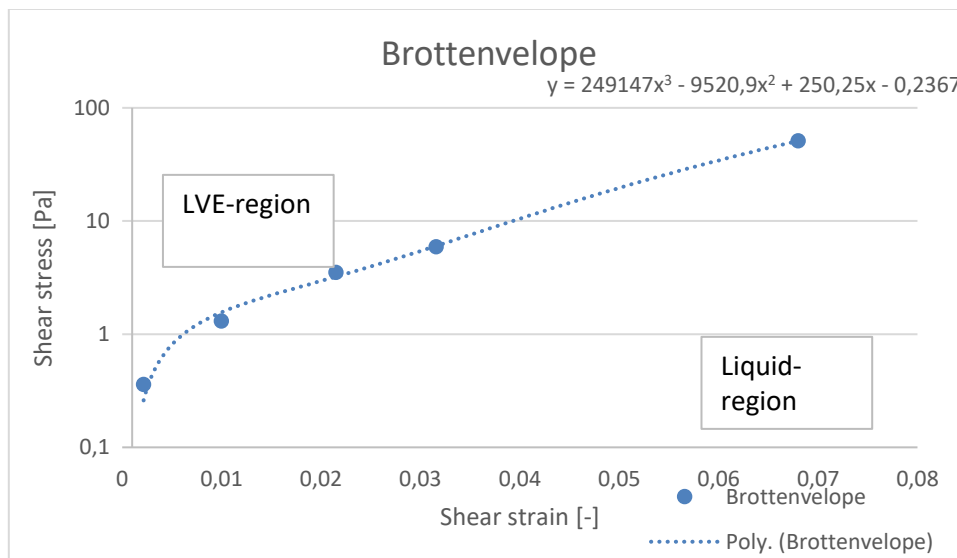
en ännu snabbare härdning kan vara förväntat om ett nytt prov användes för varje tidsintervall. Vidare användes platta-platta och skjuvspänningen är inte den samma över hela provytan.



Figur 7. Skjuvspänning i bruket vid olika härdningstider.

Vi ser att för 5 minuters testet är skjuvspänningen 0,35 Pa vid en töjning på 0,002. Vid större töjningar börjar provet flyta. För 30 min är samma parametrar; 1,3 Pa och 0,01. För 60 min; 3,5 Pa och 0,02. För 90 min; 5,9 Pa och 0,03. För 180 min, 51,1 Pa och 0,07.

Värdena för när skjuvspänning och skjuvtöjning och de olika tidsintervallen då precis när materialet börjar flyta visas i figur 8 nedan. Den erhållna kurvan (här ett polynom) visar på vid vilka töjningar som bruket övergår från viskoelastiskt till flytande material.



Figur 8. Diagram över skjuvspänningar och tillhörande skjuvtöjningar när bruket går till brott (blir flytande). LVE-region=Liquid viscoelastic-region eller viskoelastiskt område.

Diagrammet och den passade kurvan kan användas för att räkna ut vilken skjuvhållfasthet bruket måste ha för att klara en viss töjning. Ex med en hållfasthet på 10 Pa (efter någon timmes härdningstid) måste töjningen vara mer än 4% för att bruket skall börja flyta.

## Bilaga 3-Labrapport, triaxialförsök

### 1 INTRODUKTION

Laboratorieförsöken utfördes på PM Labtek AB:s geotekniska laboratorium i Gottskär, Kungsbacka. Laboratorietekniker var Peter Hedborg, VD och geotekniker på PM Labtek AB, med lång erfarenhet av avancerade försök på jordmaterial. Rasmus Trygg assisterade i laboratoriearbetet vid merparten av tillfällena. Vid några av tillfällena deltog även Magnus Salmi eller Tony Axelsson vid förberedelser och utförande av fallkonförsök. Utrustning för fälttester, samt cementsäckar till injekteringsmedlet, tillhandahölls av Tyréns AB. Utrustning för triaxialförsök och fallkonförsök samt allt annan kringutrustning tillhandahölls av PM Labtek AB.

Underlag till denna bilaga har huvudsakligen utgjorts av laboratorierapporten *Triax test på injekteringsbruk – Provberedning och test med triax utrustning*, skriven av Peter Hedborg (2018), samt av anteckningar och observationer som gjordes vid laboratorietillfällena.

#### 1.1 SYFTE

Syftet med testprogrammet och de metoder som utvecklats är att undersöka hur injekteringsmedlets hållfasthets- och deformationsegenskaper utvecklas i ett tidigt skede, för att tydliggöra spännings-töjningssamband hos materialet då det belastas vid olika tidpunkter i härdningsprocessen.

### 2 METOD

För ökad kännedom om injekteringsmedlets egenskaper under härdningsprocessen utfördes en uppsättning tester i laboratorium. Dessa tester omfattade:

- Utvärdering av hållfasthets-/deformationssamband genom odränerad skjuvning i triaxialapparat.
- Hållfasthetsbestämning med fallkonförsök.
- Densitetsmätning med s k mudbalance.
- Mätning av viskositet med s k marshkon.
- Mätning av flytgräns med s k yield stick.
- Kontroll av tillstyvnad genom s k kopptest.

Vid skjuvning i en triaxcell kan omgivande spänningar som verkar på injekteringsmedlet kontrolleras. Försöket ger värden på materialets odränerade skjuvhållfasthet samt en deformationskurva fram till brott, vid en viss tidpunkt i härdningsprocessen. Detta är ett förstörande test varför det bara har getts möjlighet att utföra en gång per provkropp.

Fälttesterna mudbalance, marshkon och yield stick samt kopptest utfördes för att möjliggöra en jämförelse med ett konventionellt testprogram, med standardmässigt utvärderade parametrar.

För att knyta resultaten från triaxialförsöken, som vart och ett endast representerar en ögonblicksbild av hållfasthets- och deformationsegenskaperna för respektive provvolym, till en hållfasthetsutveckling över tid, utfördes parallellt en serie fallkonförsök. Intervallen med vilka dessa utfördes anpassades successivt efter varje försökstillfälle.

#### 2.1 UTRUSTNING

##### 2.1.1 FÄLTMÄSSIGA PROVNINGSMETODER OCH FALLKONFÖRSÖK

Nedanstående standardiserade utrustning användes vid laboratorieförsöken:

- Marshkon för bestämning av viskositet
- Mudbalance för bestämning av densitet
- Yield stick för bestämning av flytgräns
- Fallkonapparat för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet

## Bilaga 3

### 2.1.2 TRIAXIALFÖRSÖK

Den utrustning som användes för triaxialförsöken anpassades och utvecklades successivt under projektets gång.

#### Metodutveckling

Nedan beskrivs några av utvecklingsstadierna och vissa av de delar som fick modifieras eller tillverkas för ändamålet.

I ett tidigt skede, testomgång 1, undersöktes om befintlig triaxialutrustning kunde anpassas för att möjliggöra gjutning av provkroppen direkt i triaxialcellen, istället för att efter gjutning vänta på att provkroppen härdade innan montering i tryckcell. Fördelen med att pumpa in injekteringsmedlet med membranet på plats i cellen, är att man redan i ett tidigt skede kan börja mäta förändringar i materialet, med antingen förstörande eller icke-förstörande metoder. En annan fördel är att eventuella störningseffekter, som kan resultera av förflyttning av provkroppen samt av montering, kan undvikas i högre grad. Målet med gjutningen av provkroppen var att skapa ett prov med standardmått och standardform, för provning i triaxialcellen. En cylindrisk volym med en diameter på 50 millimeter och en höjd på 100 millimeter eftersträvades. Gjutning i triaxialcellen kunde åstadkommas men proceduren bedömdes vara för omständig för att tillämpas vid samtliga försökstillfällen i förstudien.

I samband med det första försöket konstaterades att det var svårt att gjuta ett cylindriskt prov då provmembranet monterades direkt i triaxialcellen, utan någon form av omgivande stöttning. Orsaken till detta var i huvudsak en kombination av att injekteringsmedlet är mycket löst direkt efter blandning och att membranet inte är tillräckligt styvt för att säkerställa att provet blir likformigt över hela sin höjd (se Figur 1).



Figur 1. Provmembran monterat i triaxialcellen under testomgång 1. (Hedborg, 2018)

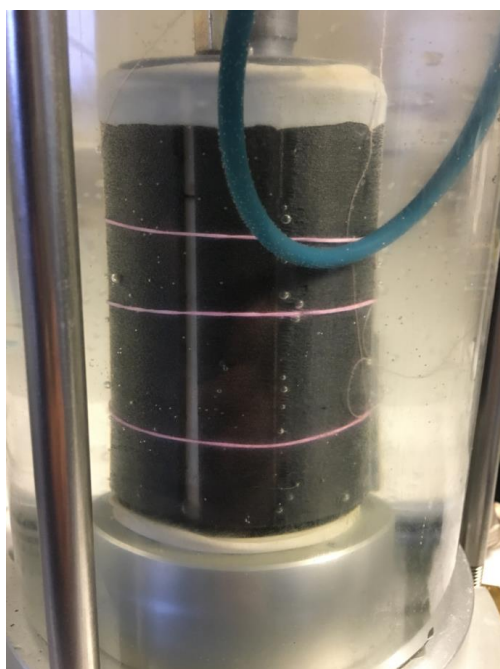
För att förbättra gjutningsprocessen inför testomgång 2 (2018-01-17) tillverkades en form av ett tvådelat rör med syfte att fungera som stöttning tills bruket hade härdat tillräckligt för att bära upp sin egen tyngd, utan uppenbar risk för störning. Röret tillverkades med hjälp av en 3D-skrivare.

För att hålla ihop formen då injekteringsmedlet pumpades in användes tre gummiband, som trädde runt de två rördelarna. Dessa avlägsnades sedan på plats i cellen, efter viss härdning, med hjälp av ett par förmonterade nylonlinor (fiskelinor) som löpte ut genom ett hål i toppdelen av triaxcellen. Vid gjutningen uppstod dock vissa problem. Gummibanden klarade inte av att hålla ihop gjutformen under inpumpning av bruket på grund av det ökade trycket. Detta medförde att provets mått och likformighet inte motsvarade de uppställda kraven. Membranet samt gjutformen och provkroppen efter skjuvbrott från testomgång 2 (2018-01-17) kan ses i Figur 2. I Figur 3 syns nylonlinorna samt hur gjutformen pressas isär vid inpumpning av injekteringsmedlet.

## Bilaga 3



Figur 2. T.v.: Efter montering av provmembran och halva gjutformen. Mitten: Fixering av formen med hjälp av gummiband. T.h.: Deformerad provkropp efter skjuvning i triaxialcell. (Foto: Hedborg 2018)



Figur 3. Provet vid pumpning av injekteringsbruk under testomgång 2 (2018-01-17). I fotot syns nylonlinorna (t.h. på gjutformen) samt hur de två rörhalvorna separeras något från varandra på grund av trycket inuti testmembranet.

Till testomgång 3 användes samma gjutform som i testomgång 2, men gummibanden byttes ut mot en mer avancerad låsanordning som tillverkades med hjälp av en 3D-skrivare. För att efter härdning kunna frigöra rörhalvorna från varandra användes sprintar och fjädrar som kunde utlösas vid valt tillfälle inuti tryckcellen. Den här låsanordningen fungerade relativt bra. Vid just detta tillfälle uppstod dock problem vid pumpningen då läckage av injekteringsmedel uppstod från en slang i utloppet. Detta medförde att provkvaliteten och provkroppens form inte blev optimal. I Figur 4 visas låsanordningen samt ett prov monterat i triaxialcellen tillsammans med resultatet i form av en provkropp. I mittenbilden syns även den blå inloppsslangen i botten av cellen, samt utloppsslangen som löper från toppstycket och därefter ut genom toppen av tryckcellen via en stäng- och öppningsbar ventil.



### Bilaga 3



Figur 4. T.v.: Låsanordning med sprintar och fjädrar. Mitten: Provkropp med form och låsanordning inuti triaxialcellen. T.h.: Provkropp efter gjutning. (Foto: Hedborg 2018)

Efter de tre första utvecklingsstegen hade ingen skjuvning utförts på prover som uppfyllde kraven på mått, form och kvalitet. Ett triaxialförsök hade utförts på provet från testomgång 2 (2018-01-17). Detta prov hade dock inte rätt proportioner. Dessutom visade sig belastningshastigheten var allt för låg med hänsyn till materialets hållfasthetsutveckling.

Till testomgång 4 förenklades låsanordningen återigen till att istället utgöras av fyra o-ringar av gummi. Dessa kunde likt gummibanderna träs av inuti cellen med hjälp av tunna nylonlinor. Denna gjutningsprocedur visade sig vara framgångsrik och resulterade i provkroppen som syns till höger i Figur 5.



Figur 5. T.v.: O-ringarna som omslöt gjutformen. (Foto: Hedborg 2018)

För att förenkla processen och för att producera testresultat lämnades dock metoden där gjutning utfördes inuti tryckcellen, tills vidare, efter testomgång 4. I de tre efterföljande försöken, testomgång 5-7 (2018-05-28 till 2019-02-14), utfördes istället gjutning utanför tryckcellen, varefter proverna fick härda innan montering och belastning. Val av tidpunkt då provet kunde flyttas gjordes genom en kvalitativ bedömning med stöd av resultat från hållfasthetsmätningar med fallkon. Denna metod bedömdes vara enklast och effektivast för provberedning inom ramarna för förstudien. Det är därmed denna sista gjutningsmetod som hädanefter beskrivs i rapporten och har legat till grund för de resultat som presenteras. Dock visas även fallkonförsöken från testomgång 2 (2018-01-17) i diagrammen då dessa utfördes enligt samma procedur som vid efterföljande omgångar.

### Övriga specialutvecklade komponenter och anpassningar

### Bilaga 3

I konventionella triaxialförsök på lera placeras först lerprovet på bottenstycket, varefter membran och toppstycke samt triaxialcell eftermonteras. Denna metod är av uppenbara skäl inte tillämplig på nyblandat injekteringsmedel i flytande tillstånd. Av denna anledning fick en axelkoppling tillverkas och monteras mellan belastningsanordningen i triaxcellen och toppstycket, ovan det inledningsvis tomma testmembranet, för att detta skulle kunna hållas uppe utan stöd från provkroppen. Denna komponent tillverkades av plast med hjälp av en 3D-skrivare och syns i figurerna ovan.

För att möjliggöra pumpning av injekteringsmedel in i triaxialcellen borrades hål i cellens över- och underdel, genom vilka utbytbara slangar kunde monteras.

De genomföringar som finns i ordinarie topp- och bottenstycken, vid konventionella triaxialförsök, är avsedda för mätning och kontroll av portryck och är kopplade till provkroppen via filterstenar, för separation av partiklar mellan prov och slangar/pumpar. Då injekteringsmedlet inte kan pumpas genom filterstenarna fick därför även topp- och bottenstyckena tillverkas i en anpassad version, av plast i en 3D-skrivare, där slangar för pumpning kunde ledas direkt in i testmembranet.

#### Testutrustning - triaxialförsök

Nedan listas den utrustning som användes i den slutliga proceduren, från vilken resultat presenteras längre fram i denna bilaga.

- Cylindriskt latexmembran för omslutning av provkropp
- Tvådelad hylsa av kolfiber, som utgjorde gjutform, för stöttning av membran
- Cirkulärt topp- och bottenstycke för gjutning av prov samt lastöverföring
- O-ringar av gummi för fixering av gjutform
- Slangar, kopplingar och kranar för pumpning av injekteringsmedel samt kontroll av flöde vid provberedning
- Cylindrisk tryckbehållare för överföring av injekteringsmedel till provkropp
- Kompressor och regulator
- Triaxialapparat för belastning av prov, samt mätning av spänningar och deformationer

#### 2.1.3 ÖVRIG UTRUSTNING

Nedan listas övrig utrustning som användes inför eller i samband med försökstillfällena.

- Tidtagarur för tidsbestämning av försöksmoment
- Plast- och stålbunkar för uppvägning av vatten och cementbruk
- Våg (0-2200 gram)
- Handhållen mixer med ballongvisp för grovblandning
- Blender för dispergering av injekteringsmedel
- Folieformar (ca 10 cl) för provberedning till fallkonförsök och kopptest
- Laboratorierock
- Skyddsglasögon
- Munnskydd
- Skyddsduk för arbetsyta
- 3D-skrivare för tillverkning av specialutrustning och förbrukningsdetaljer

#### 2.2 RECEPT

Nedanstående recept för injekteringsmedlet användes vid samtliga försök, såväl vid metodutveckling som vid skjuvning i triaxialcell.

Cementbruk Injektering 30	2,25 kg
Vatten	1,8 liter

Säck nr 1 - cementbruk Injektering 30 (förpackning öppnad i januari 2018) användes för tester utförda 2018 och Säck nr 2 - cementbruk Injektering 30 (förpackning öppnad i februari 2019) användes för tester som utfördes i februari 2019.

## Bilaga 3

### 2.3 LABORATORIEPROCEDUR

Proceduren som beskrivs nedan avser den slutliga procedur som tillämpades vid de tre sista försökstillfällena, testomgång 5-7 (2018-05-28 till 2019-02-14).

#### 2.3.1 FÖRBEREDELSE

- Inventering av utrustning.
- Iordningställande av försöksyta.

#### 2.3.2 BLANDNING

- Uppvägning av 1,44 kg vatten (80% av total mängd) i en behållare för blandning.
- Tillsats av 2,25 kg cementbruk Injektering 30.
- Successivt tillsättande av 2,25 kg cementbruk under samtidig blandning med handhållen mixer och ballongvisp.
- Tillsats av resterande 0,36 kg av vattenmängden (20%) under fortsatt blandning.
- Grovblandning fortgår sedan på samma sätt i 20 sekunder.
- Mixning av delmängder (ca 4 dl åt gången á 1 min och 20 sek) med blender, för dispergering av cementpartiklar.
- De färdigblandade delvolymerna hålls successivt ner i en ny behållare.
- Tidtagning startas och fortgår därefter under hela laboratorieprogrammet.

#### 2.3.3 FÄLTTESTER

Följande steg utfördes mellan ca 1-9 minuter efter start av tidtagning.

- Uppmätning av 1,5 liter injekteringsmedel till marshkon.
- Test utförs, resultat av tidtagning noteras.
- Testmängden återanvänds till mudbalance och yield stick.
- Resultat antecknas och injekteringsmedlet som använts återförs till ursprungsbehållare.

#### 2.3.4 FÖRBEREDELSE INFÖR FALLKONFÖRSÖK OCH KOPPTTEST

Följande steg utfördes mellan ca 9-12 minuter efter start av tidtagning.

- Därefter fördelas 1 liter av injekteringsmedlet i 10 st aluminiumformor för fallkonförsök (9 st aluminiumformor) och kopptest (1 st aluminiumform).
- Alla folieformor märks upp och ställs åt sidan för härdning.

#### 2.3.5 PROVBEREDNING FÖR TRIAXIALFÖRSÖK

Följande steg påbörjades ca 10 minuter efter start av tidtagning.

- Den volym som återstår efter fyllning av folieformor (ca 1 liter) förs över till tryckbehållare inför pumpning och gjutning av provkropp till triaxialförsöket.
- Provmembranet förbereds för gjutning genom att dess övre och undre ände träs över de cylindriska topp- och bottenstyckena. Det är via topp- och bottenstyckena som lasten förs över till provkroppen vid axiell kompression. Dessa är dessutom specialanpassade och försedda med genomföringar där slangar kan fästas, vilket möjliggör gjutning av provkroppen genom att injekteringsmedel pumpas från botten av tryckbehållaren och in i membranet.
- Membranet omsluts sedan av gjutformen, som fixeras med hjälp av o-ringar av gummi (ca 50 mm i diameter).
- Via en slang kopplas en kompressor med regulator till ovansidan av tryckbehållaren, som står på ett stativ bredvid det monterade membranet.
- Mellan tryckbehållaren och bottenstycket under provmembranet kopplas en slang för pumpning av injekteringsmedel.
- På toppstycket fästs till utloppsmynningen en ventil och en slang med avsevärt mindre innerdiameter än inloppsslangen i bottenstycket. Detta

### Bilaga 3

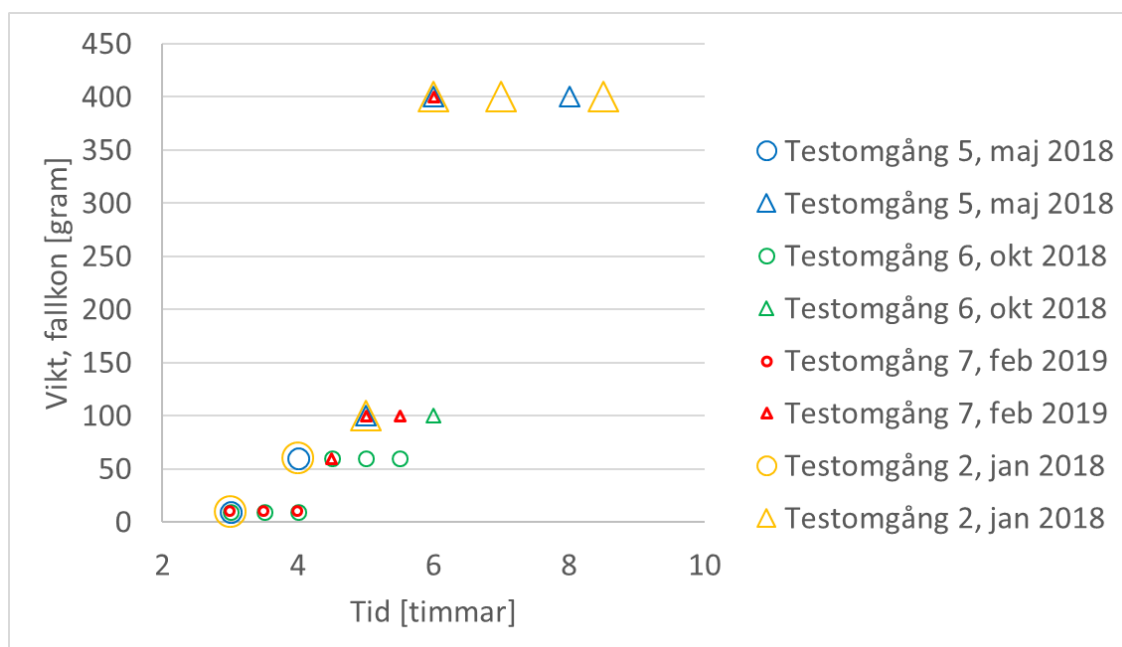
tillsammans med justering av tryck med regulatorn möjliggör att ett övertryck kan åstadkommas i provmembranet efter att detta fyllts från botten och upp. På så sätt säkerställs att provmembranet pressas mot skyddshöljets sidor, vilket resulterar i ett likformigt prov. Därtill minskar risken för kvarvarande luftfickor i provkroppen efter gjutning.

- Provmembranet fylls upp genom att behållaren med injekteringsmedel trycksätts samtidigt som ventilerna öppnas. Inledningsvis övervakas flödet genom att utloppsslangen förs ner i en vattenbehållare, vilket resulterar i en ström av bubblor som indikerar hur snabbt provmembranet fylls upp. Flödet som observeras är inte kvantifierbart, men ger en överblick över "hur snabbt" injekteringsmedlet fyller upp provvolymen.
- Fyllningsproceduren pågår under upprätthållet övertryck (ca 10 kPa) tills att en mindre volym injekteringsmedel droppat ut genom utloppsmynningen i toppstycket. Processen tar ca 10-15 min.
- Därefter stängs alla kranar och provet lämnas att härda.

#### 2.3.6 LÖPANDE TESTNING OCH DOKUMENTATION AV ODRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET GENOM FALLKONFÖRSÖK

Följande steg påbörjades ca 2 timmar efter start av tidtagning, då injekteringsmedlet innan denna tidpunkt är för löst för att värden ska kunna mätas.

- Fallkonförsöken påbörjades som tidigast 2 timmar efter start av tidtagning vid de tre försökstillfällena. Ingen avläsning kunde dock göras förrän efter 3 timmar.
- Intervallet med vilket avläsningarna gjordes utvecklades från det första till sista försökstillfället och landade slutligen i en avläsning var 30:e minut, under tidsperioden 3 till 6 timmar efter start av tidtagning.
- Under försöken antecknades vikt och vinkel på den fallkon som användes samt tidpunkt, konintryck och utvärderad odränerad skjuvhållfasthet för varje tillfälle. Se figur, där ringar och trianglar avser fallkon med 60° respektive 30° spetsvinkel.



Figur 6. Val av fallkon vid olika tidpunkter under de tre försökstillfällena.

#### 2.3.7 SKJUVNING I TRIAXIALAPPARAT

Följande steg påbörjades ca 5 timmar efter start av tidtagning.

- Vid samtliga tre provtillfällen flyttades och monterades proverna till triaxialapparaten efter ca 5 timmar, varefter belastning och skjuvning utfördes efter ca 5 tim och 30 min.

**Bilaga 3**

- Triaxialförsöken (testomgång 5-7) utfördes som odränerade försök med en belastningshastighet på 1% axiell töjning per minut\*, vilket är standardhastighet vid triaxialförsök på kalk-cement-förstärkt jord. Celltrycket i den omgivande vätskan uppgick till 10 kPa vid samtliga triaxialförsök.

\* I testomgång 2 (2018-01-17) utfördes belastning med hastigheten 0,01% per minut, vilket är standard vid försök på lera. Denna hastighet bedömdes dock vara för låg, med hänsyn till hållfasthetsutvecklingen i injekteringsmedlet och gav inga användbara resultat. Resultat från testomgång 2 redovisas därför inte.

## Bilaga 3

### 2.3.8 DYNAMISKA TESTER MED BENDER ELEMENT \*\*

\*\* - Denna metod har inte använts i förstudien, men bör inkluderas och utförs lämpligen kontinuerligt vid samtliga triaxialförsök från det att provet gjutits tills dess att det skjivas till brott.

I förstudien har icke-förstörande tester med så kallade bender element utgjort en central del av resonemanget när det kommit till utformning av testprogrammet. I början av projektet (hösten 2017) gjorde PM Labtek AB en beställning av denna utrustning men på grund av kraftiga förseningar har den i skrivande stund ännu inte levererats.

Bender element är en sorts testutrustning som monteras i topp- och bottenstycket ovan och under provkroppen. Försöket utförs därefter genom att en sinusvåg skickas genom provkroppen och avläses, av en sändare respektive en mottagare. Denna metod gör det möjligt att mäta den maximala skjuvmodulen ( $G_{max}$ ) hos en provkropp för att utvärdera materialets styvhet vid mycket små töjningar. De viktigaste orsakerna till att tester med bender element varit önskvärda i förstudien är:

- Det är ett dynamiskt försök där injekteringsmedlets deformationsegenskaper vid små töjningar kan studeras. Dessa egenskaper anses vara mest relevanta vid bedömning av det unga injekteringsmedlets respons då det utsätts för vibrationer.
- Ett icke-förstörande försök möjliggör fortlöpande tester under härdningsprocessen. Försöket kan avslutas på konventionellt sätt med belastning till brott vid önskad tidpunkt. Detta bedöms kunna bidra till att knyta injekteringsmedlets dynamiska egenskaper till en odränerad skjuvhållfasthet vid en viss tidpunkt.

I Figur 7 syns ett exempel där sändare och mottagare är monterade i topp- och bottenstyckena.

Denna utrustning bedöms kunna anpassas för ändamålet, så att bender elementen kan förmonteras i topp- och bottenstyckena och därefter användas vid önskat tillfälle under försöket.



Figur 7. Bender element - sändare och mottagare monterade i topp- och bottenstycke. (Controls group 2019)

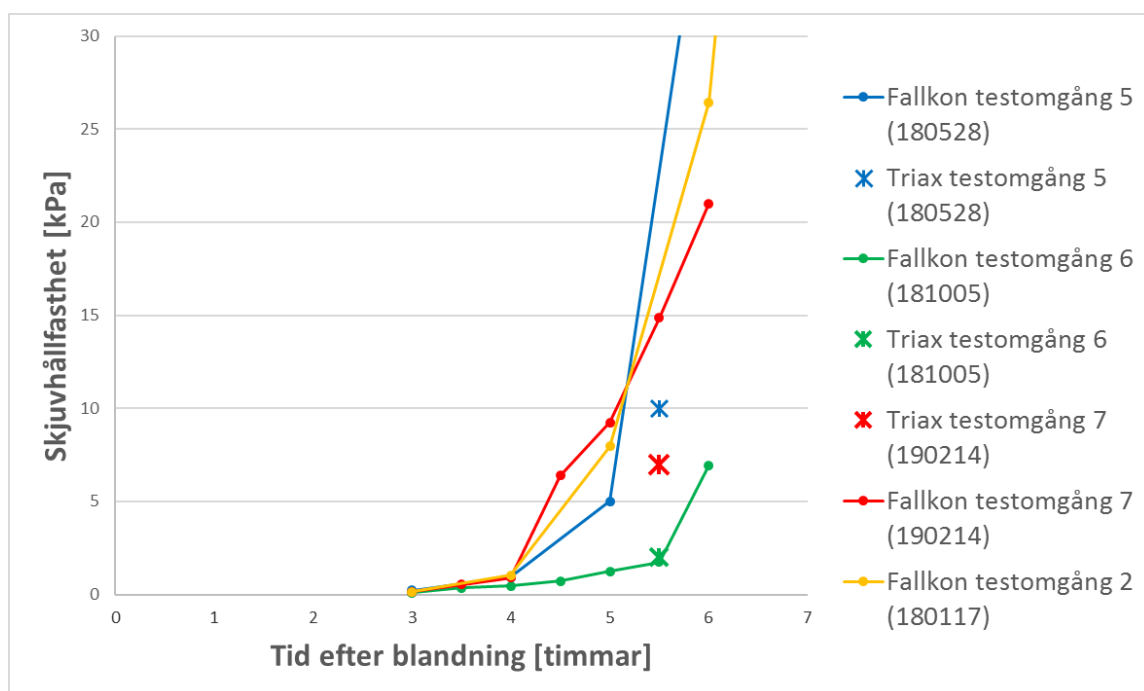
## Bilaga 3

## 3 RESULTAT

Nedan presenteras resultat från laboratorieförsöken. Se Tabell 1 för fälttester samt Figur 8 och Figur 9 för utvärderad odränerad skjuvhållfasthet respektive spännings-töjnings-kurvor vid skjuvning genom axiell kompression för de olika försökstillfällena.

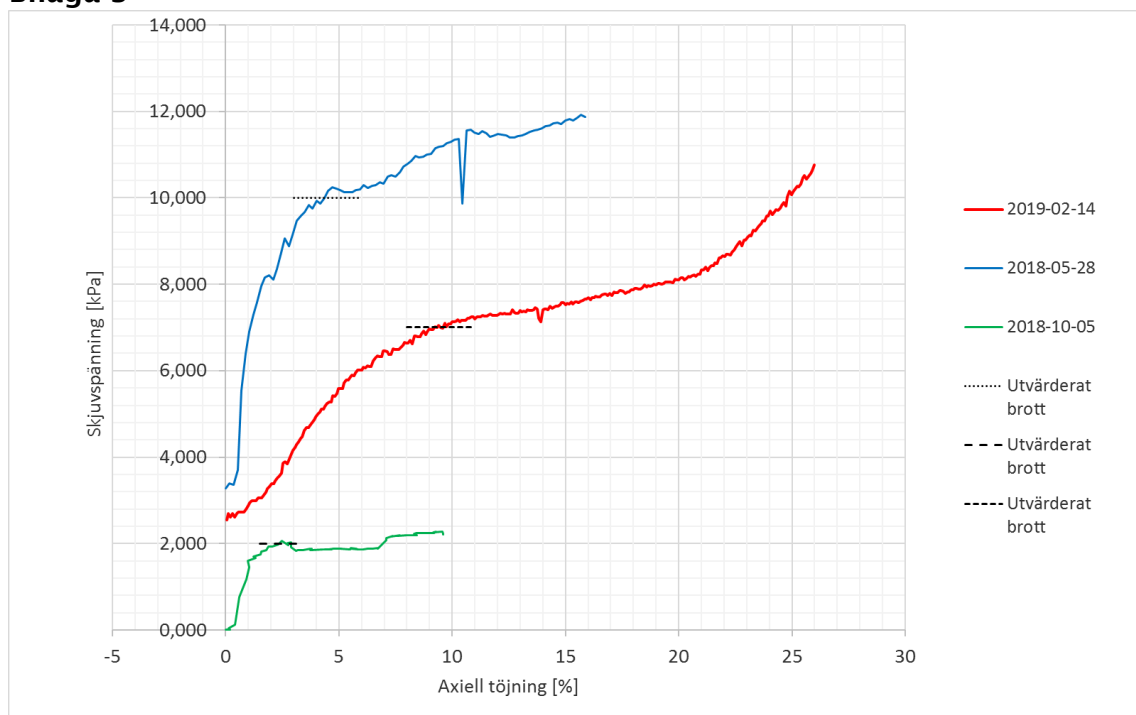
Tabell 1. Samlade resultat från fältmässiga provningsmetoder.

Testmetod	Testtillfälle	Avläsning	Enhet
Marshkon	2018-05-28	36,6	s
	2018-10-05	35,1	
	2019-02-14	36,3	
Mudbalance	2018-05-28	1,57	kg/dm <sup>3</sup>
	2018-10-05	1,57	
	2019-02-14	1,54	
Yield stick	2018-05-28	1,6	Pa
	2018-10-05	1,6	
	2019-02-14	3,8	



Figur 8. Samlade resultat avseende odränerad skjuvhållfasthet från fallkonförsök och triax, tillsammans med axiell töjning vid bedömt brott i triaxialförsöken.

## Bilaga 3



Figur 9. Diagram med spännings-töjningskurvor från triaxialförsök.

Utifrån deformationskurvorna ovan har ungefärliga värden på materialets skjuvmodul beräknats. Detta har gjorts genom att en tangent till kurvan, uttryckt med hjälp av en elasticitetsmodul (Young's modulus), definierats och värden på poissons tal uppskattats. Därtill har förenklingen gjorts att materialets deformationsbeteende kan beskrivas någorlunda korrekt genom ett linjärelastiskt samband fram till bedömt brott. Skjuvmodulen beräknades med ekvation 1.

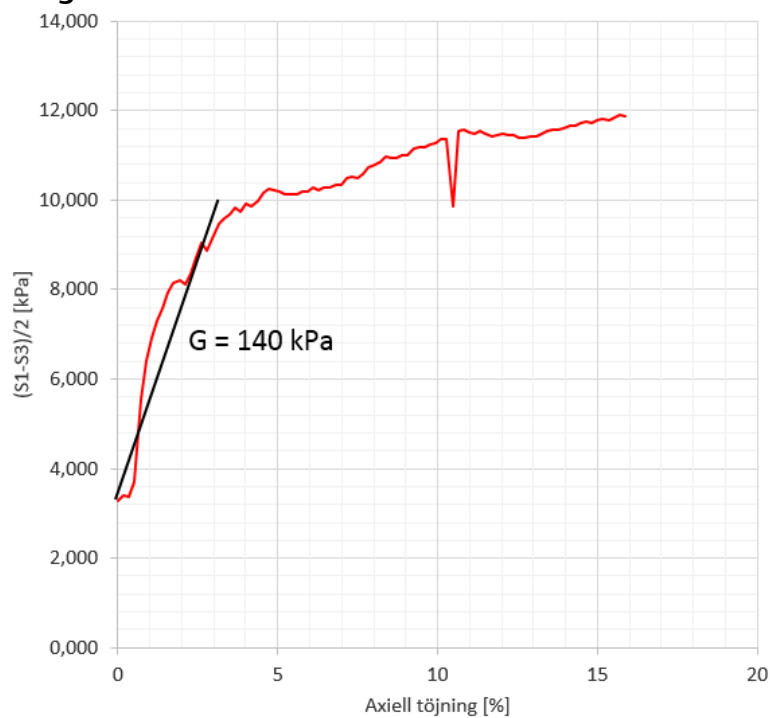
#### Ekvation 1

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

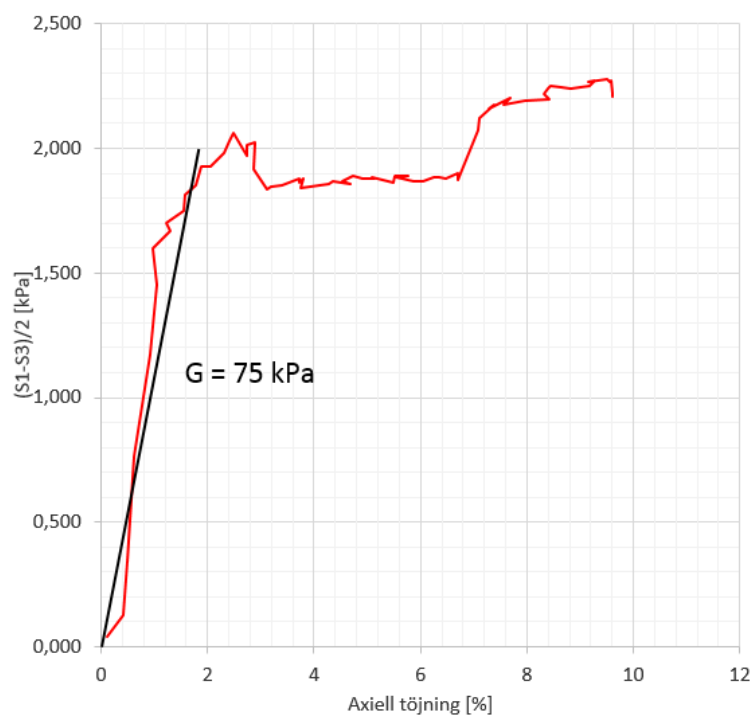
I beräkningen antogs att poissons tal är 0,495, vilket motsvarar att materialet i princip är inkompressibelt och inte ändrar volym under försöket. För jämförelse kan sägas att om poissons tal istället ansätts till exempelvis 0,25 blir beräknad skjuvmodul ca 20 % högre. Detta skulle motsvara ett scenario där provkroppen minskar i volym vid belastning, till exempel som följd av att det förekommer luft- eller gasbubblor i injekteringsmedlet. Uppskattad sekantlinje och beräknade skjuvmoduler för testomgång 5-7 (2018-05-28 till 2019-02-14) visas tillsammans med deformationskurvor i Figur 10 till Figur 12.



## Bilaga 3

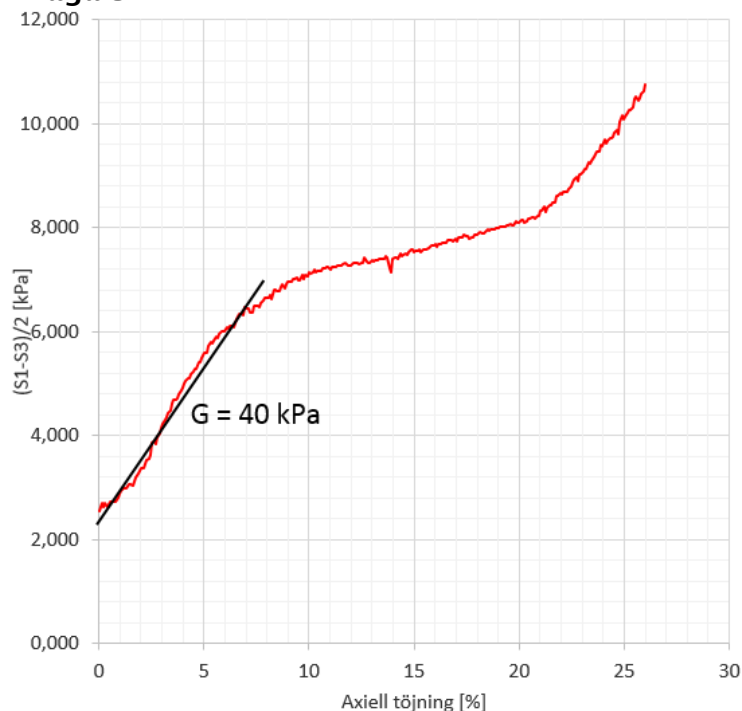


Figur 10. Deformationskurva och utvärderad skjuvmodul från testomgång 5 (2018-05-28).



Figur 11. Deformationskurva och utvärderad skjuvmodul från testomgång 6 (2018-10-05).

### Bilaga 3



Figur 12. Deformationskurva och utvärderad skjuvmodul från testomgång 7 (2019-02-14).

Av ovanstående diagram framgår att storleken på skjuvmodulen, vid beräkning enligt ovan beskrivna princip, varierade väsentligt mellan de tre försökstillfällena. Skjuvmodulen i testomgång 7 (2019-02-14), som gav lägst värden, uppgick till ca 30 % av den i testomgång 5 (2018-05-28).

## 4 VÄRDERING AV UNDERSÖKNING

Under testomgång 5 (2018-05-28), vilket var första tillfället med gjutning utanför triaxialcellen, gjorde övertrycket i provmembranet i inledningen av pumpningen att toppstycket trycktes ut ur membranet. Detta gjorde att en kaskad med injekteringsmedel läckte ut. Toppstycket kunde dock sättas tillbaka och provmembranet fyllas, varpå injekteringsmedel tilläts droppa ur utloppsslangen för att membranet skulle fyllas helt och luftbubblor tryckas ut. Detta ledde inte till någon fördröjning av monteringen i triaxialapparaten och ingen synbar störning kunde observeras i testresultatet.

Cementbruket som användes kom från Säck nr 1 som öppnades i januari 2018, ca fyra månader tidigare. Cementbruket hade dock förvarats i en förslutbar hink från det att säcken öppnades, med undantag för de tillfällen då mindre mängder cementbruk togs för användning i metodutvecklingen.

Under testomgång 6 (2018-10-05) fick ett mindre omtag göras vid blandningen av injekteringsmedlet, då den första (ca 4 dl) delmängden dispergerat injekteringsmedel fick återföras till den grovblandade volymen, för tillsats av de sista 20 % av vattenvolymen. Detta innebar dock ingen avvikelse i vct och fördröjningen var så pass kortvarig att det inte bedöms ha påverkat resultatet. Både utvärderad skjuvhållfasthet och skjuvmodul blev dock väsentligt lägre vid detta försök (se Figur 11) än vid föregående (se Figur 10). Resultatet från marshkonen visade också lägre värden.

Cementbruket som användes kom även vid detta försök från Säck nr 1 som öppnades i januari 2018, vid det laget ca nio månader tidigare. Detta utgör den tydligaste skillnaden mellan de två efterföljande försökstillfällena.

Vid jämförelse av resultat från fallkonförsök som utförts på injekteringsmedel från denna säck tycks hållfasthetsutvecklingen ske allt långsammare under de första 5 timmarna med ökande ålder på cementbruket. Efter att 5 timmar härdning passerat är inte trenden lika tydlig, men fallkonförsöken som utfördes ca nio månader efter att säcken öppnades visar klart lägst hållfasthetsvärden.

## Bilaga 3

Denna generella trend kan troligen härledas till att Injektering 30 är känsligare än vanligt cement, och att bland annat utvecklingen av hållfasthet snabbt försämras om det torra bruket utsätts för fukt, antingen via fuktig luft eller genom direktkontakt med vatten (Cementa, 2018). Cement är överlag ett hygroskopiskt material som tar upp fukt ur omgivningen, som det sedan reagerar med (Esping, 2017). Ovanstående tros ha föranlett att bruket reagerat negativt även på kortvarig exponering vid försökstillfällena, eller att hinken inte har varit tillräckligt tät.

Vid testomgång 7 (2019-02-14) användes en ny säck, Säck nr 2, som öppnades vid försökstillfället i februari 2019, direkt innan blandning. Fallkonförsöken från denna testomgång visade högst hållfasthetsutveckling av de hittills utförda, upp till ca 5 timmar härdning. Efter 5 timmar är trenden dock att hållfasthetsutvecklingen minskar och istället understiger den som observerades vid testomgång 5 och 6. Vid detta tillfälle saknades delar av utrustningen till fälttestet mudbalance. Densiteten kunde dock beräknas efter vägning av 1 liter injekteringsmedel på en av laboratoriets vågar.

Vid samtliga försökstillfällen observerades bubblor och separation av vatten i proverna som fördelats i folieformar. Uppkomsten av bubblor bedöms vara ett resultat av luftinblandning från grovblandning och dispergering samt av koldioxidbildning från den kemiska reaktionen mellan cementet och vattnet.

## 5 DISKUSSION

Nedan diskuteras osäkerheter knutna till resonemangen som förs och metoderna som beskrivs i denna bilaga.

### 5.1 UTRUSTNING

Den utrustning och procedur som användes vid gjutning av provkroppen i testomgång 5-7 var förenklad jämfört med tidigare omgångar, då gjutning skedde inuti triaxcellen. Den största bristen med den förenklade metoden bedöms vara att provkroppen troligen genomgår viss störning då den förflyttas och monteras när skjuvhållfastheten fortfarande är låg. Framgångsrik gjutning på plats inuti cellen bedöms innebära stora fördelar och är ett måste för att osäkerheter kring störningseffekter i provet ska kunna försummas vid tolkning av resultat.

### 5.2 RECEPT

Proportionerna i det recept som använts har mätts upp på ett likvärdigt sätt och har preparerats i en liknande volym för samtliga testomgångar. De osäkerheter som finns bedöms ligga i huruvida cementen har åldrats på ett sätt som väsentlig påverkar injekteringsmedlets egenskaper.

### 5.3 LABORATORIEPROCEDUR

Blandningsproceduren skedde enligt samma specifikation vid samtliga testomgångar. Då grovblandning och dispergering skedde i liten skala är det dock värt att vidare utreda hur väl denna procedur motsvarar den som utförs i större skala i fält, samt om denna medför några systematiska avvikelser som är väsentliga för slutresultatet.

Den belastningshastighet som valts för triaxialförsöken, 1 % axiell töjning per minut, kan inte ses som representativ för lastfallet som studeras, då de töjningar som uppstår vid en detonation är dynamiska och mycket kortvariga. Försöken som utförts med denna hastighet ger dock ändå en grov bild av hållfasthets- och deformationsegenskaper samt hur känsliga dessa är mot variationer, osäkerheter och avvikelser i den metodik som använts. För att resultat ska kunna knytas till relevanta lastfall bör dock triaxialförsöken kompletteras med dynamiska metoder.

I denna förstudie har alla triaxialförsök utförts efter 5 timmar och 30 min. Detta göra att trenden avseende utvecklingen av injekteringsmedlets hållfasthetsegenskaper över tid inte kan observeras annat än i resultatet från fallkonförsöken, samt att utvärderade skjuvmoduler bara ger en ögonblicksbild av materialets deformationsegenskaper.

## Bilaga 3

### 5.4 RESULTAT

Utifrån resultaten kan observeras att injekteringsmedlets beteende då det belastats i en triaxialcell har varierat avsevärt inom ramen för utförda försök. Utvärderad odränerad skjuvhållfasthet samt brotttöjning och skjuvmodul uppvisar alla stor spridning. Vid en jämförelse med utförda fallkonförsök framgår dock att en liknande variation observeras även här; de testomgångar som uppvisar högst hållfasthet vid skjuvning i triaxialapparat är desamma som ger de högsta hållfasthetsvärdena i fallkonförsöken efter 5 timmar och 30 minuters härdning. Detta kan vara en indikation på att en del av variationen i resultaten är knuten till procedurer eller omständigheter som både triaxial- och fallkonförsöken har gemensamt, det vill säga till exempel recept (eller snarare ingredienser) och blandningsprocedur. Här har troligen lagring av och ålder hos cementbruket spelat in.

### 5.5 VIDAREUTVECKLING AV METOD

För att relevanta testresultat konsekvent ska kunna produceras krävs vidareutveckling och förbättring av de metoder som beskrivs i denna bilaga. De viktigaste fokusområdena bedöms vara:

- Slutgiltig metod för gjutning av prov direkt i cell, med syfte att [1] minska risk för störning och [2] möjliggöra tester tidigt i härdningsprocessen.
- Framtagande av ett mer standardiserat program för kontroll av provkroppens kvalitet och geometri. Särskilt viktigt är säkerställande av god anliggning mellan provkropp och topp- respektive bottenstycke, då detta är en grundläggande förutsättning för att ta fram relevanta deformationskurvor.
- Framtagande av ett mer standardiserat program för kontroll av händelseförlopp och av injekteringsmedlets egenskaper under härdningen, till exempel med hänsyn till bildande av gasbubblor i provet, samt dess inverkan på deformationsegenskaperna. Detta kan eventuellt åstadkommas genom mer omfattande litteraturstudier eller genom mätning av vikt och volym samt analys av töjning i axiell och radiell riktning vid belastning i triaxialförsök. I denna förstudie har skjuvmoduler uppskattats med antagandet att materialet är vattenmättat och därmed inkompressibelt. Detta antagande är troligen felaktigt om gasutvecklingen i provkroppen är omfattande.
- Inkluderande av bender element i testprogrammet, då dessa bedöms bäst representera de lastfall som är relevanta för problemställningen.
- Påverkan på bruket vid cyklisk last till skjuvspänningar som understiger materialets hållfasthet, för att studera om täta "sprängcykler" kan bryta ner materialets egenskaper till brott även om mätbar odränerad skjuvhållfasthet i laboratorium aldrig uppnås.
- Noggrann lagring av cementbruk enligt tillverkarens rekommendationer. Säckar som har öppnats förvaras lämpligen i kontrollerat klimat där låg luftfuktighet kan säkerställas.
- Vidareutveckling av blandnings- och dispergeringsproceduren, för att än mer efterlikna den som utförs i fält.

Därtill kan nedanstående resonemang utredas närmare.

Att utföra jämförelser av spännings-töjningssamband hos intakt berg, bergmassa och nyblandat injekteringsmedel för att skapa en bättre uppfattning om huruvida injekteringsmedlet kan förväntas "gå till brott" (eller störas avsevärt) vid mindre töjningar än bergmassan. Medlet har en skjuvhållfasthet som är flera storleksordningar mindre än bergets. Detta gäller dock även för skjuvmodulen, vilket innebär att förhållandet mellan brottspänning och skjuvmodul för injekteringsmedlet respektive berget är relevant. Under förutsättning att bergmassan går till brott vid mindre skjuvtöjningar än det nyblandade injekteringsmedlet, bör följande princip gälla:

### Bilaga 3

- 1) Berget loss hålls i en zon vars utbredning är oberoende av injekteringsbrukets skick (då bruket inte kan förväntas hålla ihop bergmassan).

eller

- 2) Nya oinjekterade sprickor bildas, på vilka redan utförd injektering inte har någon effekt.

På avstånd som överstiger utbredningen hos ovanstående zoner förblir injekteringsbruket opåverkat (åtminstone gällande huruvida bruket har gått till brott eller inte) av vibrationerna från sprängningen.

## 6 REFERENSER

Cementa (2018): Technical data sheet Injektering 30. [www.cementa.se](http://www.cementa.se). Tillgänglig: 2019-04-08.

Controls group (2019): <https://www.controls-group.com/eng/soil-mechanics-testing-equipment/bender-elements.php>. [www.controls-group.com](http://www.controls-group.com). Tillgänglig: 2019-04-11.

Esping, Oskar (2017): <http://betong.se/2017/02/04/fraga-experten-bast-fore-datum/>. [www.betong.se](http://www.betong.se). Tillgänglig: 2019-04-08.

Hedborg, Peter (2018): Triax test på injekteringsbruk – Provberedning och test med triax utrustning. PM Labtek. Daterad 2018-04-13.

## Bilaga 4-Fältrapport, injektering och hydrauliska tester

### 1 INTRODUKTION

Fältförsöket utfördes i en bergtäkt utanför Hedekas i Bohuslän. Bergtäkten ägs och drivs av bergentreprenören Bohus Bergsprängning AB.

I bergtäkten har en tunnelnisch tidigare sprängts ur, med arean ca 40 m<sup>2</sup> och ca 20 m lång. I tunnelfronten (gaveln) kunde ett sprickplan skönjas vinkelrätt tunneln och flera sprickor parallellt med tunneln observeras. Bergarten bestod främst av gnejs och granit.

Fältförsöket utfördes under ca 2 veckor effektiv tid under november månad, 2018. Utrustning för vattenförlustmätningar tillhandahölls av Tyréns AB, injekteringsutrustning tillhandahölls av AB Besab. Borrning samt allt annan kringutrustning och material såsom el, lift, vatten tillhandahölls av Bohus Bergsprängning.

#### 1.1 SYFTE

Syftet med detta begränsade fältförsök är att undersöka om det går att observera en påverkan från sprängning, borr vibrationer, vattenförlustmätning på injekteringsmedlet direkt efter bergmassan injekterats.

Undersökningarna som användes för detta var de hydrauliska tester i borrhålen före och efter injektering och sprängning samt vibrationsmätningar vid borrning och sprängning.

### 2 METOD

Metodiken baseras på hydrauliska tester i borrhål, dvs vattenförlustmätningar och tryckuppbyggnadstest. Med given hydraulisk kontakt mellan borrhål samt en tillräcklig stor hydraulisk sprickvidd ökar chansen att sprickorna mellan aktuella borrhål blir tätad av cementbruk. Med tryckuppbyggnadstester kan också sprickornas flödesdimension tolkas.

Vid ett flöde som uppträder radiellt ökar det också chansen att sprickan mellan borrhålen blir tät av injektering. Flera borrhål, dvs minst två borrhål, ska uppvisa en ökad chans till att sprickan blir tätad mellan borrhålen samt att borrhålet som det ämnades att spränga i skall penetrera denna tätade spricka. Metodiken, med stegvist genomförande, är som följer

1. Borra borrhål
  - a. Mät borr vibrationer i tre dimensioner
2. Hydrauliska tester
  - a. Utför vattenförlustmätningar i alla borrhål
  - b. Utför tryckuppbyggnadstest i lämpliga borrhål med tillräcklig hög vattenförlust
3. Val av borrhål för injektering och sprängning, med önskemål enligt
  - a. Hydraulisk sprickvidd >100 µm
  - b. Hydrauliskt samband med närliggande borrhål
  - c. Flödesdimension >= radiellt
4. Injektering i valda borrhål
  - a. Design på inträngningslängd och viss tid för kända egenskaper på injekteringsbruket
  - b. Utförande injektering, observationer av tryck, flöde och egenskaper av injekteringsbruk
5. Hydrauliska tester i icke injekterade borrhål

## Bilaga 4

- a. Utför vattenförlustmätning
- b. Kontroll att tätheten är förbättrad mellan borrhålen och bergmassan
6. Sprängning i valt borrhål efter 3 timmars väntetid efter injektering
  - a. Mätning av vibrationer från sprängning
7. Hydrauliska tester i icke injekterade borrhål och det sprängda hålet
  - a. Utför vattenförlustmätning
  - b. Mätningen görs främst i det sprängda hålet då övriga i närområdet är injekterade
  - c. Kontroll av tätheten

### 2.1 VATTENFÖRLUSTMÄTNING OCH ÅTERHÄMTNINGSTEST

En vattenförlustmätning med enkelmanschett går till så som följer:

1. Manschett monteras i borrhålet.
2. Borrhålet fylls med vatten genom att trycka in vatten med ett tryck 0,5 Bar lägre än kommande övertrycket samtidigt som manschetten dras åt.
3. När borrhålet är fyllt ökas tryck till 3 Bar, dvs övertrycket, och när stabila flöden kan noteras påbörjas mätningarna.
4. Vattenflödet under testet mäts tre gånger. Det tolkade flödet för sektionen är medianvärdet av de tre vattenflödena som ansetts stabila.

Vattenförlustmätningen utgår från en volym intryckt vatten över en viss tid vilket resulterar i ett flöde. Volymen som mäts anpassas till en totaltid på ca 1 minut. Vid väldigt små flöden anpassas tiden till 2 minuter. Den undre mätgräns som i detta projekt kan detekteras är 0,01 l/min med en noggrannhet på 0,005 l/min. Mindre flöden kan detekteras men kräver då längre mättid. Det övre flödet är 30 l/min med en noggrannhet på 0,5 l/min.

Sektionstransmissiviteten är beräknad från Moye's formel enligt:

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

Där  $Q$  är det uppmätta flödet vid det pålagda övertrycket,  $dh$ , över sektionens längden  $dL$  och  $d$  är diametern på borrhålet. Det pålagda övertrycket är här satt till det totaltryck som används vid mätningen (3 Bar).

Från den utvärderade transmissiviteten tolkas den hydrauliska sprickvidden via "cubic law" som förutsätter planparallella sprickplan.

Återhämtningstestet görs genom att mätsektionen i borrhålet låtes flöda, i detta fall under vattenförlustmätningen vid 2-3 Bar övertryck, under en tidsrymd på ca 30 minuter. Vid mindre flöden krävs en längre tid och större flöden en kortare tid. Flödet/vattenförlusten mäts vid närmande av avslut av flödet, ca 2 minuter innan. När flödet mäts ska loggningen av trycket starta. Tiden för stängning av flödet (stänger manschett) registreras. Loggningen av trycket pågår lika länge som flödestiden. Utvärderingen förutsätter att flödet är radiellt och har ett oändligt "confined" flödesfält.

Trycksänkningen/avsänkningen,  $s$ , beskrivs av

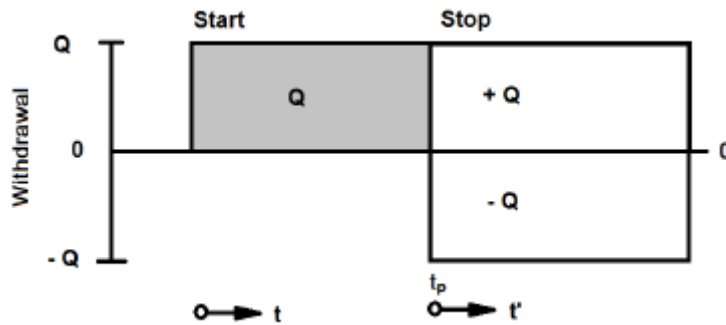
$$s = \frac{Q}{4 \ln T} \ln\left(\frac{4Tt_e}{r^2 S}\right)$$

## Bilaga 4

Där transmissiviteten,  $T$  bestäms av Moye's formel för ett radiellt steady-state test,  $r$  är borrhålsradien,  $S$  är storativity och utvärderas enligt Cooper-jacobs metod och den effektiva pumptiden,  $t_e$  beskrivs av:

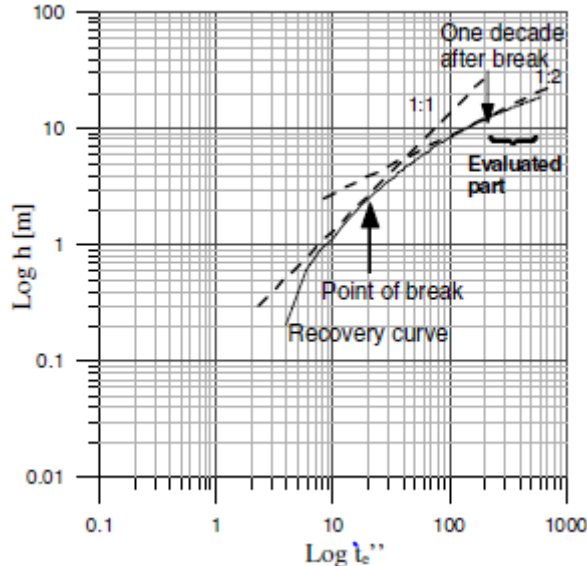
$$t_e = \frac{t' t_p}{t' + t_p}$$

Där  $t'$  är tiden för själva återhämtningen,  $t_p$ =tid då manschett/flödet stängs och således är  $t'=t-t_p$ . Tidsangivelserna är beskrivna i modellen nedan, figur 1, (från Carlsson och Gustafson, 1991).



Figur 1. Modell över ett återhämtningstest och dess tidsangivelser, från Carlsson och Gustafson, 1991.

Dimensionaliteten av flödet utvärderas genom att plotta tryckrespons mot den effektiva återhämtningstiden i en log-log plot. Lutningen på kurvan anger delen som kallas Well-bore storage, 1-D flöde samt, 2-D flöde se figur 2 nedan.



Figur 2. Diagram över återhämtningen för utvärdering av flödesdimensionen. Mindre än 1:1 innebär att vi har en "well bore storage", 1:1 innebär kanalflöde, 1:2 radiellt samt mer än 1:2 ett cylindriskt flöde enligt Carlsson och Gustafson, 1991. Figur från Funehag och Fransson, 2006.

## 2.2 TESTUTFÖRANDE

I vänstra del av tunneln borrades det 12 st borrhål. Fronten hade ett "blankslag" skevt vinkelrätt tunneln med rostfärgad yta. Till vänster och framför detta finns en mer kubiskt uppsprucken bergmassa. Antagligen går blankslaget in bakom dessa "kuber" varvid borrhålen koncentrerades till den vänstra och nedre delen av tunneln. En bild över fronten visas i Figur 3 nedan.





*Figur 3. Bild över tunnelfront. I höger av bilden syns "blankslaget" med rostfärgad avlagring. Till vänster syns det mer blockrika bergmassan samt det skiviga berget med sprickor parallellt med tunnelriktningen.*

De 12 borrhålen borrades 4 m långa med ett inbördes avstånd på ca 1 m. Under borrningen mättes borrvibrationen. För utförandet användes följande komponenter och utrustningar:

- Borrigg, Atlascopco Boomer
- Vattenförlustmätning, Tyréns utrustning av hydroforprincip med konstant tryck.
- Injekteringsutrustning, Atlas Copco Unigrout samt Logac, från AB Besab
- För löpande provning av injekteirngsmedel användes:
  - Mudbalance
  - Yieldstick
  - Marshkon
  - Fallkon (användes inte)
- Vibrationsmätare, 3 triaxiella givare (mp 4800, mp 10410 och mp 11580), Nitro Consult
- Skylift
- Elaggregat och vattenpump

## Bilaga 4

## 2.3 FÖRUTSÄTTNINGAR

## 2.3.1 BORRHÅLSLAYOUT OCH HYDRAULISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

Samtliga borrhål vattenförlustmättes. I två av borrhålen kunde ytläckage noteras (borrhål 4 och 5) samt ett lokalt inrasat (borrhål nr 5). I borrhål nr 5 gjordes upprepade försök att rensa och montera manschett men inget resultat kunde erhållas före injektering.

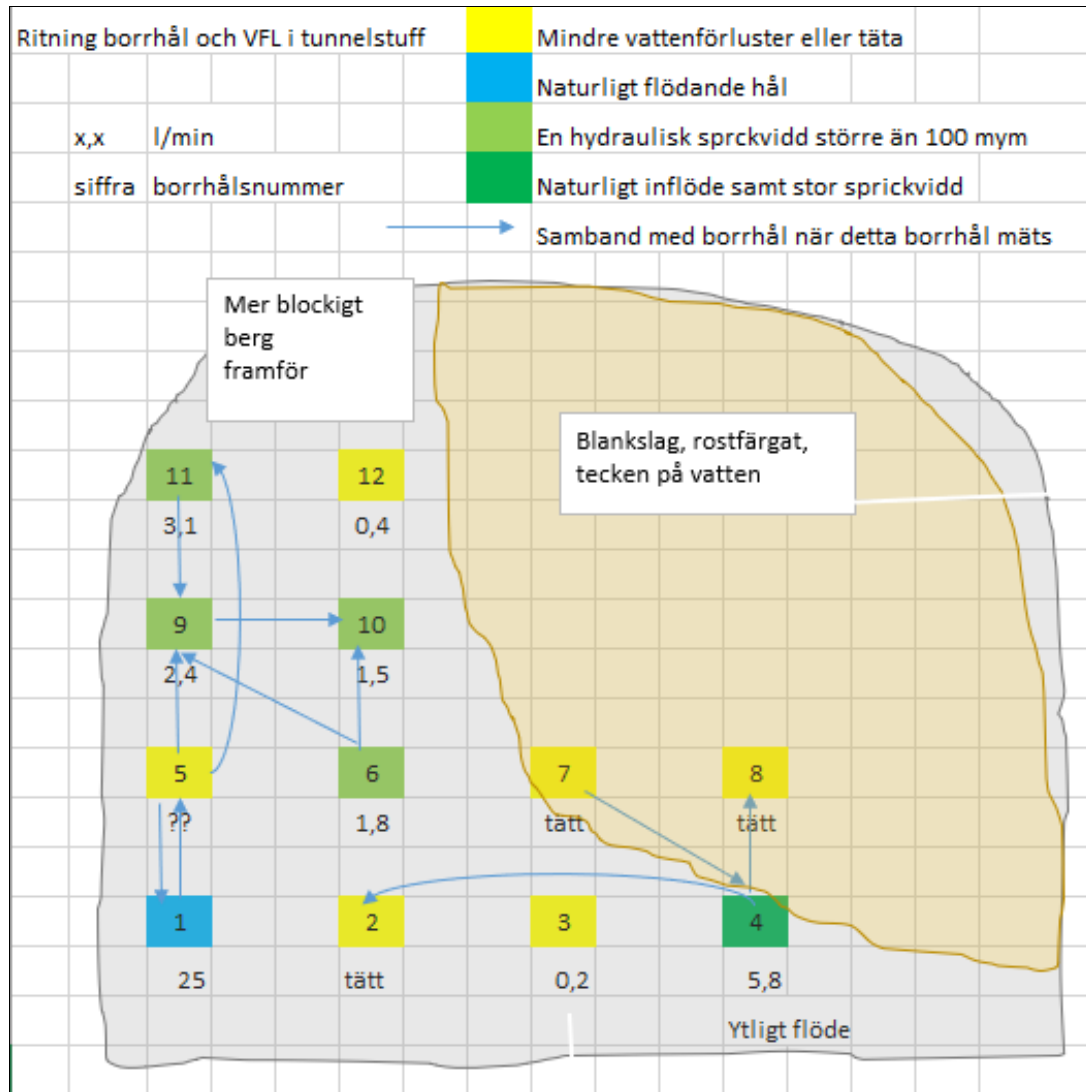
Tabell 1. Resultat av hydrauliska mätningar före injektering

Borrhål	Ovre sektion	Nedre sektion	Uppmätt flöde	Tryck	Transmissivitet	Hydraulisk sprickvidd
nr	m	m	[l/min]	[bar]	[m <sup>2</sup> /s]	[µm]
1	1	4	24,4898	1,7	1,88E-05	310
2	1	4	0,015	3,00	6,41E-09	22
3	1	4	0,194	2,90	8,73E-08	52
4	1	4	0,112	3,00	4,88E-08	43
5	1	4	Ytläckage	-	-	-
<b>6</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1,806</b>	<b>2,7</b>	<b>8,72E-07</b>	<b>111</b>
4	0,8	4	0,154	2,5	8,02E-08	50
4	0,5	4	5,769	2,5	3,01E-06	168
7	1	4	0,020	3	8,54E-09	24
8	1	4	0,015	3	6,41E-09	22
<b>9</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2,284</b>	<b>2,9</b>	<b>1,03E-06</b>	<b>118</b>
<b>10</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1,498</b>	<b>2,7</b>	<b>7,23E-07</b>	<b>105</b>
<b>11</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>3,113</b>	<b>2,7</b>	<b>1,50E-06</b>	<b>134</b>
12	1	4	0,421	2,9	1,89E-07	67

Av de 12 borrhålen valdes fyra borrhål ut för att utföra fältförsöket nämligen borrhål 6, 9, 10 och 11, se feta noteringar i tabell 1. Samtliga fyra borrhål hade en hydraulisk sprickvidd större än 80 µm. Borrhål nr 5 var också intressant som kontrollhål eftersom den konnekterade med flera andra intressanta borrhål men ingen utvärdering av vattenförlustmätning kunde göras.

En figur över hur borrhålen är placerade i förhållande till varandra samt vilka som uppvisade hydraulisk kontakt visas i Figur 4.

## Bilaga 4



Figur 4. Figur över borrhålslayout med tillhörande resultat från vattenförlustmätningen.

### 2.3.2 DIMENSIONERING, INJEKTERINGSDESIGN

Utgångsläget för injekteringsdesign var en robust injektering. Bruksblandningen skulle vara den som ofta har använts i laboratoriet; injekteringscement INJ30 med VCT=0,8 utan tillsatser. Inträngningslängden i den minsta sprickvidden, 100  $\mu\text{m}$ , ska vara minst två gånger borrhålsavståndet, här minst 2 m.

Injekteringsteknik var följande:

- Injekteringsövertryck 10 bar
- Injekteringstid, 15 min efter uppnått designtryck

Registrering av flöde och volym påbörjas efter att hålvolum uppnåtts.

### 2.3.3 BLANDNINGAR

Förprovnings gjordes med 2 säckar cement, 40 kg och 32 kg vatten. Samma recept användes därefter under injekteringen. Resultaten redovisas i tabell 2.

Tabell 2. Uppmätta egenskaper på bruksblandningen

	Förprovning	Löpande provning
Mudbalance [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,51	1,6
Marshkon [sec]	37	38
Yield stick [Pa]; [mPas]	2; 20 mPas	2; 22 mPas

## Bilaga 4

## 2.3.4 INJEKTERING

Injekteringen startade i täta borrhålen och de längst ifrån det aktuella spränghålet. Resultaten återfinns i tabell 3. Observera att klockslagen enligt Logac är en timme senare än verklig tid.

Tabell 3. Injekteringsdata

Borrhål	Start klockslag	Uppnått sluttryck [bar]	Injekterad Volym* [liter]	Stoppat klockslag	Kommentarer
7	09:19:40	9,3	0,5	09:32:31	Injekttering ytliga delen, 0,5-1 m
1	12:52:33	10	73,8	13:15:15	Åtgång 2 batcher
5	13:18:34	10,4	11,1	13:33:05	Ytläckage ca 0,5 m ovanför i hål nr 5
6	13:34:39	11,2	8,7	13:50:00	
10	13:52:28	10,3	7,6	14:07:09	
11	14:09:20	10,2	11,7	14:23:52	
4	14:30:58	10	131	15:03:27	Ytläckage; läckaget minskar under tiden injekttering pågår

\*detta är volym efter hålfyllnad.

Borrhål nr 7 injekterades också dagen före med blandningen från förprovnigen. Sektionen som injekterade vad den inre delen, från 1 m djup till borrhålsbotten (4 m). Åtgång bruk var 6 liter och injektteringstrycket var 8,8 Bar under 15 minuter. Efter att borrhålet var injekterat plockades manschett bort efter en timme. Borrhålsvolymen rann ut.

## 2.3.5 SPRÄNGNING

Efter 3 timmar sedan borrhål nr 11 injekterades, sprängdes borrhål nr 9. I detta borrhål utfördes vattenförlustmätning efter sprängning. Under vattenförlustmätningen i detta borrhål observerades och noterades eventuella flöden från närliggande borrhål. Observationen pågick ca 15-20 minuter.

## 3 RESULTAT

Resultaten består av hydrauliska mätningar i borrhålen runt det sprängda borrhålet samt övriga observationer av intresse

### 3.1 HYDRAULISKA TESTER FÖRE OCH EFTER SPRÄNGNING

Tabell 4. Resultat från vattenförlustmätningarna före injekttering, injekttering och till observationer och vattenförlustmätningar efter sprängning.

Bh	Flöde före inj. [l/min]		Flödes-dimension	Injekttering [Liter]	Flöde efter injekttering	Väntetid 3 tim	Flöde efter sprängning [l/min]
	Första omgång	Andra omgång					
5	Ytläckage			11,1	Injektteringsplugg synlig		Urspolning/ Erosion?
6	1,5	1,77	3-D	8,7	Injektteringsplugg tät		Tät plugg
9	2,4	2,47	Ej tolkningsbart	Spränghål	1,667	<i>spränghål</i>	1,875

## Bilaga 4

10	1,5	1,48	Ej tolkningsbart	7,6	Plugg tät	Tät plugg
11	3,1			11,7	Ej noterat flöde*	Tät plugg
12	0,42			Ej injekterad	Ej noterat flöde*	0,0265
1				73,8	Öppnar kl 14 Tätt men rörets ventilvolym rinner ut.	Tät plugg

\*i borrhål 11 och 12 kopplades slangar på injekteringsmanschetten. Dessa syftade till att kunna observera i fall injekteringsmedlet trycktes ut och upp i slangarna under sprängningen.

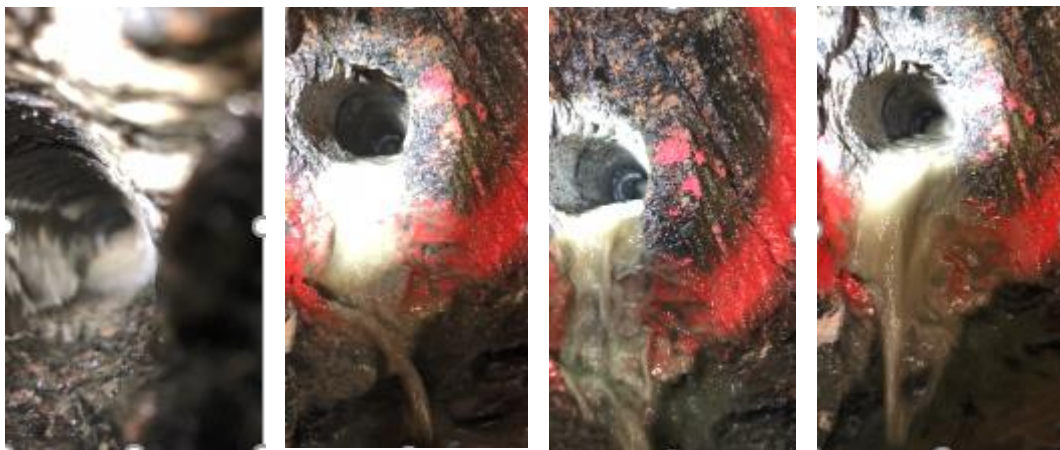
Borrhål 9 tillika "spränghålet" kan en tätning av omkringliggande bergmassa framträda. Vattenförlusten i spränghålet efter injektering av de omkringliggande borrhålen var 1,7 l/min. Detta tillsammans med att synliga injekteringspluggar och de injekterade volymen vittnar om att bergmassan bör ha blivit tätare och injekteringen var lyckad. De fyra injekterade borrhålen som hade en hydraulisk kontakt med spränghålet före injektering kan beskrivas enligt följande:

- Borrhål nr 6 uppvisade också en tredimensionell flödeskaraktär vilket möjliggör god tätning. Vattenförlusten i spränghålet var ca 2,4-2,5 l/min vid 3 Bars övertryck före injektering.
- I de fyra borrhål (nr 5, 6, 10 och 11) som uppvisade hydraulisk kontakt med spränghålet (nr 9) är åtminstone 3 borrhål opåverkade av sprängning.
- Slangarna i borrhål nr 11 kunde ingen cement eller vatten noteras efter sprängning.
- I borrhål 6 och 10 var pluggen tät.
- För borrhål 5 kunde en injekteringsplugg noteras.

Under vattenförlustmätningen av spränghålet kunde inte något flöde noteras i något av borrhålen förutom i borrhål nr 5, se övriga observationer nedan. Spränghålet uppvisar en högre vattenförlust efter sprängning än den var innan sprängning.

### 3.2 ÖVRIGA OBSERVATIONER OCH DISKUSSION

Vid vattenförlustmätningen av spränghålet noterades till en början att borrhål nr 5 var tät. Efter någon till några minuter kunde ett vattenflöde vid injekteringspluggen noteras. Flödet följdes under ca 2-4 minuter men ett sakteliga ökande flöde. Vattnet gick från att vara gråbrun till klar färg. Detta kan vara tecken på erosion, antingen av själva injekteringspluggen eller av cementet i sprickorna. Se bild nedan:



Figur 5. Bilder tagna från borrhål nr 5 då vattenförlustmätning utförs i spränghålet. I borrhålet kan injekteringspluggen skönjas ca 1 m in i borrhålet. Det först flödet noteras ca 2



## Bilaga 4

minuter efter att vattenförlustmätningen startades. Flödet uppkommer vid injekteringspluggen. Bildsekvenserna är tagna med följande tider för bilderna från vänster; 20 sekunder, 40 sekunder, 51 sekunder och 1 minut 50 sekunder.

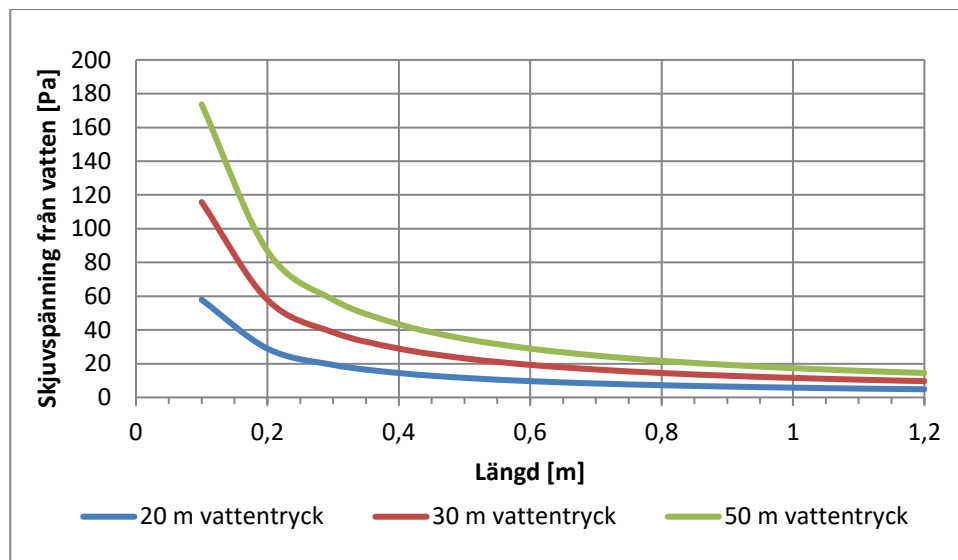
Kontroll av härdningen av cementet i borrhålet gjordes genom att lossa på manschett eller öppna ventilen efter en timme efter injektering av borrhålen. I borrhål 1 togs manschetten bort. Detta borrhål hade en stor vattenförlust före injektering (24,5 l/min, 1,7 bar) och ett naturligt utflöde ur borrhål om 2 l/min. Injekterad volym var närmare 74 liter och avbröts enligt design (10 bar, 15 min). Manschetten togs bort efter drygt en timme och borrhålet var tätt.

För borrhål 10 plockades manschetten bort och det syntes en injekteringsplugg samt den var tät.

Under injekteringen av borrhål nr 4 syntes ett tydligt ytläckage i den rostfärgade sprickplanet som går vinkelrätt tunneln. Injekteringen fortgick till design med gradvis avtagande av storleken på ytläckaget. Injekterad volym uppgick till 131 liter.

Samtliga observationer vittnar om att härdningstiden var tillräcklig under dessa förutsättningar. Hållfastheten efter 1 timmes härdning på bruket kunde inte mätas med fallkonapparaten då bruket fortfarande var för löst. Flytgränsen mätt med Yieldstick var ca 8 Pa efter en timme och efter tre timmar ca 14 Pa.

Vattenförlustmätningen i spränghålet som kan ha givit erosion i borrhål nr 5 är intressant. Borrhålsavståndet var 1 m och det fanns en tydlig hydraulisk kontakt mellan borrhål nr 5 och 9. Vattenförlustmätningen utfördes vid ett övertryck på 3 Bar, eller ca 30 meter vattenpelare. Den skjuvspänning som cementbruket påverkas av vattnet om spricklängden är 1 m uppgår till ca 17 Pa, se Figur 6 nedan. Vid tre timmar finns en mätning av flytgränsen på 14 Pa vilket är lägre än den påverkande skjuvspänning.



Figur 6. Diagram över skjuvspänning från vatten och spricklängd vid olika vattentryck.

## Bilaga 5- Fältrapport, Urspolningstester

### 1 INTRODUKTION

#### 1.1 SYFTET

Att med spolförsök undersöka hur vattenflöde från spolning i stålrör påverkar det cementbaserade injekteringsmedlet i injekterade slangar monterade längs stålröret.

#### 1.2 ALLMÄNT

Spolförsöken utfördes utomhus på GMA:s anläggning i Sunne den 20-21 sept 2018. Utförare av spolförsöken var Johan Funehag och Thomas Janson på Tyrens samt Tommie Hilmersson på GMA.

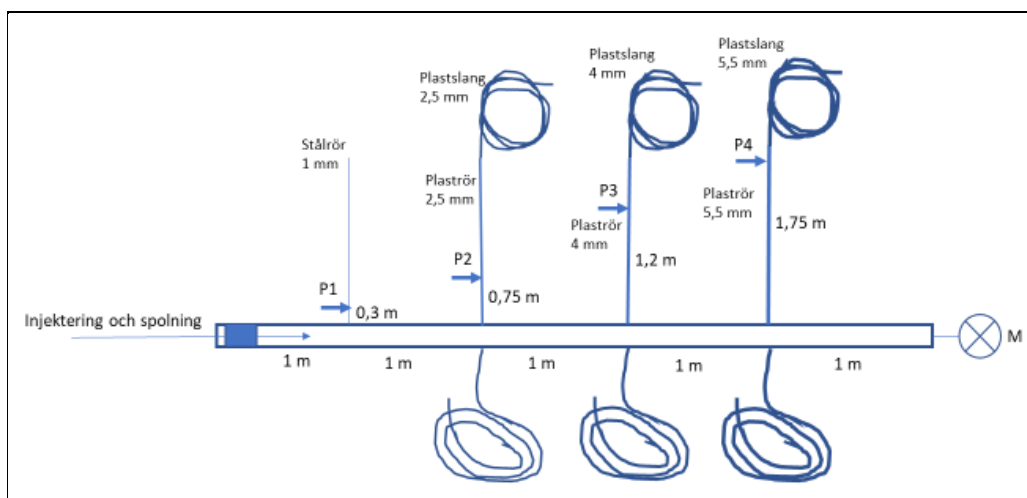
### 2 METOD

#### 2.1 TESTUPPSTÄLLNING:

Testen utförs i stålrör motsvarande borrhålsdimensionen där tunna slangar med olika dimension är påkopplade på röret, dvs:

- 5 meter långt stålrör med innerdiameter på ca 63 mm
- Tre plastslangar med innerdiametern, 2,5, 4 och 5,5 mm
- Tre korta plaströr med innerdiametern, 2,5, 4 och 5,5 mm
- Ett mindre stålrör med innerdiametern 1 mm. Plastslang med diametern på 1 mm eller mindre kunde inte erhållas.
- Fyra tryck-logger (P1 till P4)
- En manometer (M)

De kortare plaströren och plastslang placeras med avstånden 1, 2, 3 och 4 meter in i det stålröret enligt skiss i figur 2-1 och bild i figur 2-2.



**Figur 2-1** Testupställning. principskiss

Tryck-loggarna P1 till P4 är placerade så att injektionsfronten når tryckgivarna samtidigt och att lika tryck ska avläsas parallellt trots olika rördimensioner, dvs avståndet 0,3, 0,75, 1,2 och

## Bilaga 5

1,75 m från stålröret med dimensionerna 1, 2,5, 4 respektive 5,5 mm. I änden av stålröret placeras en manometer (M).

Plastslangarna utan inledande rör var markerade med på jämna avstånd för att kunna mäta injekteringens inträngning i respektive plastslang.



**Figur 2-2** Testuppställning. där sidan med tryckgivarna är hitom i bilden

Arbetsgång:

- Blandning av injekteringsmedel och kontroll av tekniska egenskaper.
- Stålröret fylls med injekteringsmedel, därefter läggs ett injekteringstryck på för att injektera slangarna ut från stålröret. Injekteringstrycken är högst begränsade jämfört med konventionell injektering. Diametrarna på slangarna är stora relativt sprickvidden i en bergmassa och en begränsad inträngningslängd är önskvärd då slanglängderna är begränsade.
- Under injekteringen observeras inträngningen i slangarna och trycken i manometern och tryck-loggarna.
- Väntetid ca 1–1,5 timme från avslutad injektering.
- Stålröret rensas på injekteringsmedel mekaniskt så att injekteringsmedlet behålls i slangarna men töms i stålröret.
- Stålröret spolas under ca 5 minuter med vatten.
- Observationer: spoltryck och -flöde, erosion/urspolning i rören, trycket i stålrörsänden (manometern) samt tryckförändringar i de kortare rören.

### 2.2 INJEKTERINGSBLANDNINGAR

Injekteringsblandningen bestod av Injekteringscement 30 och kranvatten med ett vct på 0,8. Mixning av blandningen pågick i ca 3 minuter, därefter gjordes egenskapsprovning av blandningen Blandningens egenskaper, dvs densitet, Marchkon tid, flytgräns mätes med Mud-



## Bilaga 5

balance, Marchkon och Yield Stick, se Figur 2-3. Dessutom fanns Fallkon på plats för att, om det var möjligt, mäta hållfasthetstillväxten.



**Figur 2-3** Använd mätutrustning för blandningen; Mud-balance, Marchkon och Yield Stick.

De önskvärda egenskaper och mätta egenskaper redovisas i tabell 2-1 nedan.

Tabell 2-1 Önskvärda tekniska egenskaper och uppmätta

Egenskap	Mätmetod	Önskvärt värde	Uppmätt värde, test 1	Uppmätt värde, test 2
Densitet (kg/dm <sup>3</sup> )	Mud balance	1,61	1,58	1,60
Marchkon tid (s)	Marchkon	36	38	35
Flytgräns (Pa)	Yield Stick	3	3	2
Hållfasthetstillväxt	Fallkon samt kopprov	-	Ej mätbar efter ca 1,5 timme	Ej mätbar efter ca 1 timme

### 3 RESULTAT

#### 3.1 INLEDANDE TEST VATTEN

Tre inledande test med vatten gjordes först. Detta för att kontrollera tryck och flöde vid pump samt tryck vid manometer.

I stålroret, med innerdiametern 63 mm, monterades en manschett/packer upp till en diameter på mellan ca 58 och 61 mm, dvs inte fullt uppspänd mot insida stålror, så att vatten kunde flöda ut stålroret, se figur 3-1.

## Bilaga 5



**Figur 3-1** Läckage ut från stålröret med ej fullt uppspänd manschett-pack.

Flödet från pumpen varierade mellan ca 10 och 30 l/min, varav de högre flödena endast kunde erhållas en kort stund på grund av kraftiga påverkan i testuppställningen. Förutom flöde vid manschett/packern konstaterades även läckage ut ur slangar.

De observerade trycket från pumpen var 1, 3 och 3 Bar och trycken som kunde avläsas på manometern var 0, 3 respektive 1 Bar. Diametern på packern uppskattades till ca 58, ca 61 respektive 61 mm.

### 3.2 TEST 1 MED INJEKTERINGSBLANDNING

#### *Injektering:*

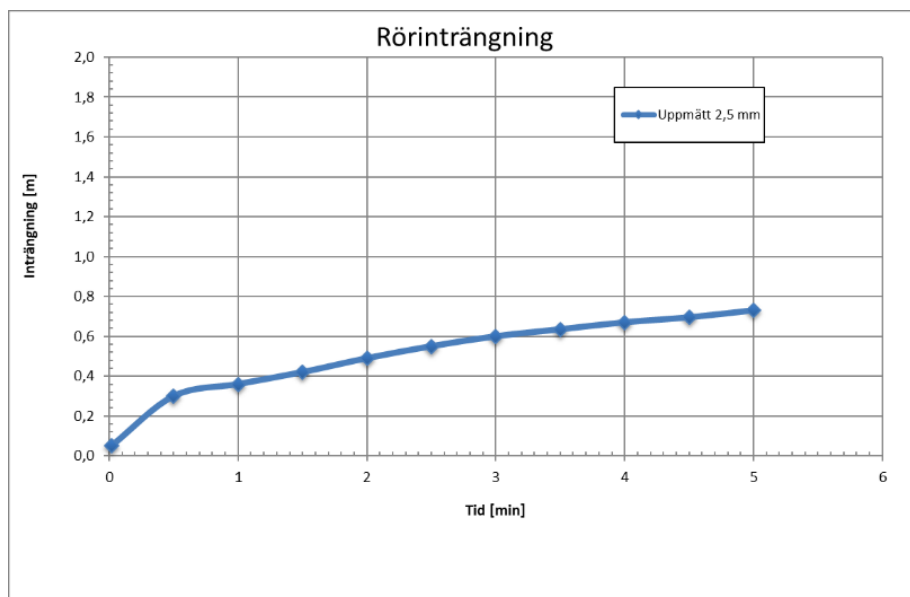
Före injektering i stålrör och slangar uppmättes injekteringsblandningens egenskaper, se tabell 4-1. Därför fylldes stålröret med ett övertryck på 0,5 m för att därefter injektera slangar med ett övertryck på ca 1,5 m under 2 minuter, se pågående inträngning i figur 3-2.



**Figur 3-2** Pågående inträngning

Pålagt tryck upphörde efter ca 2 minuter men inträngningen fortgick ytterligare ca 3 minuter. Observerade inträngningar i slang med diameter 2,5 mm redovisas i figur 3-3.

## Bilaga 5



**Figur 3-3** Inträngning vid test 1. Endast inträngning i slang med diameter 2,5 mm kunde kontinuerligt följas, slang 4 och 5,5 mm har slutinträngningen noteras.

Slutinträngningen noterades i 5,5 och 4 mm slang till 1,22 respektive 1,32 m (observera längre inträngning i 4 mm slangen jämfört med 5,5 mm slangen).

Därefter påbörjades väntetiden på ca 1 timme, men efter ca 40 minuter kunde en viss erosion observeras i 5,5 mm slangen på ca 5 cm, se figur 3-4.



**Figur 3-4** Observerad erosion efter ca 40 minuters väntetid i 5,5 mm slangen.

#### Urspolning:

Efter ca 1 timmes väntetid utfördes en mekanisk rensning av injekteringsmedlet i stålroret utan att påverka injekteringsmedlet i slangarna. Därefter placerades manschetten/packern löst i stålroret, så att spolvattnet kunde flöda ut stål se figur 3-1, och spolningen påbörjades. Följande noterades under spolningen:

Observation	Notering
-------------	----------

## Bilaga 5

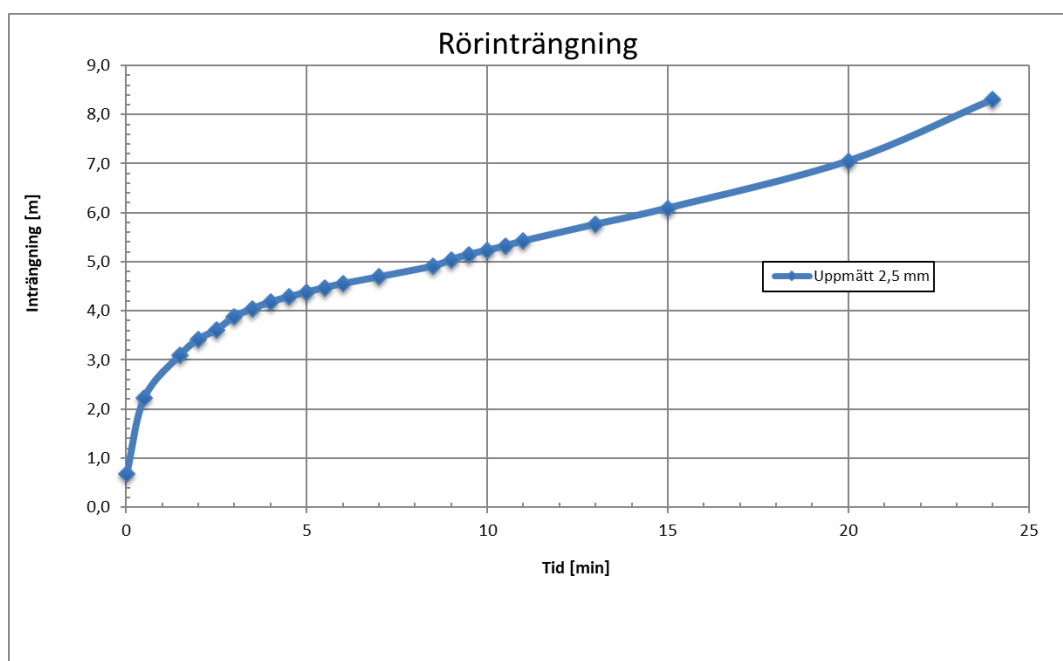
Flöde pump	15,5 – 18 l/min
Tryck pump	Ca 1 Bar
Tryck manometer i änden av spolröret	0,5 – 1 Bar
Slang 5,5 mm	Urspolning och 0,5 Bar i logger
Slang 4 mm	Urspolning och 0,15-0,5 Bar i logger
Slang 2,5 mm	Urspolning vid ca 1 minut och 0,25 Bar i logger
Slang 1 mm	Urspolning och 0,4 Bar (efter ca 46 sekunder) i logger

## 3.3 TEST 2 MED INJEKTERINGSBLANDNING

*Injekttering:*

Före injekttering i stålrör och slangar uppmättes injektteringsblandningens egenskaper, se tabell 3-1. Därför fylldes stålröret med ett övertryck på ca 0,5 m för att därefter injekttera slangar med ett övertryck på ca 1,6 m under 8 minuter. Då ingen observation erhöles i 1 mm röret höjdes övertrycket till ca 2,6 m under 11 minuter (totalt 19 minuter) för att höjas ytterligare till ca 3,2 m till avslut vid ca 24 minuter.

Observerade inträngningar i slang med diameter 2,5 mm redovisas i figur 3-5.



**Figur 3-5** Inträngning vid test 2. Endast inträngning i slang med diameter 2,5 mm kunde kontinuerligt följas, slang 4 och 5,5 mm har slutinträngningen noteras.

Slutinträngningen noterades i 5,5 mm slangen till 15,05 m (slutinträngningen i 4 mm slangen kunde inte noteras). Efter ca 23 min noterades injektteringsmedel ur 1 mm röret, se figur 3-6.

## Bilaga 5



**Figur 3-6** Injekteringsmedel ut från 1 mm röret, efter ca 23 minuter. Tryck-loggen indikerar på att injekteringsmedlet plugga igen under ca 20 minuter.

*Urspolning:*

Efter ca 1 timmes väntetid utfördes en mekanisk rensning av injekteringsmedel i stålröret utan att påverka injekteringsmedel i slangarna. Därefter placerades manschetten/packern löst i stålröret, så att spolvattnet kunde flöda ut stål se figur 3-7, och spolningen påbörjades. Följande noterades under spolningen:

Observation	Notering
Flöde pump	Ca 20 l/min
Tryck pump	Ca 2-4 Bar
Tryck manometer i änden av spolröret	Ca 1 Bar med diameter på packern på ca 58 mm
Slang 5,5 mm	Urspolning (saknar tryckmätning)
Slang 4 mm	Urspolning (saknar tryckmätning)
Slang 2,5 mm	Urspolning (saknar tryckmätning)
Slang 1 mm	Urspolning och 3,7 Bar (max) därefter sjunker trycket ner till ca 0,5 Bar i logger



## Bilaga 5



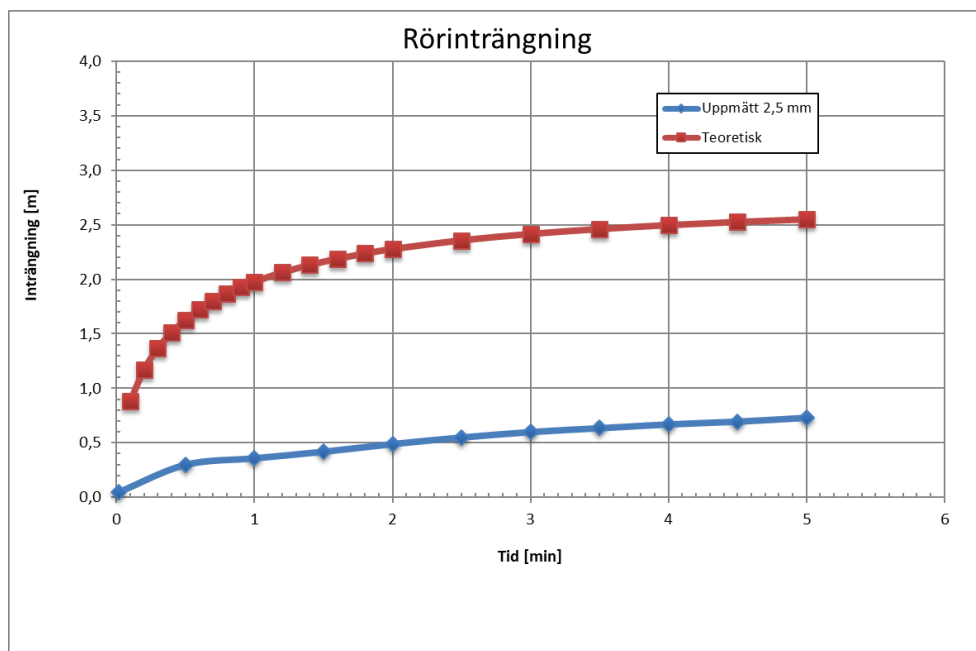
**Figur 3-7** Urspolning av injekteringsmedel i 5,5 mm slangen efter ca 2 minuters spolning.

## 4 ANALYS OCH DISKUSSION

### 4.1 ANALYS

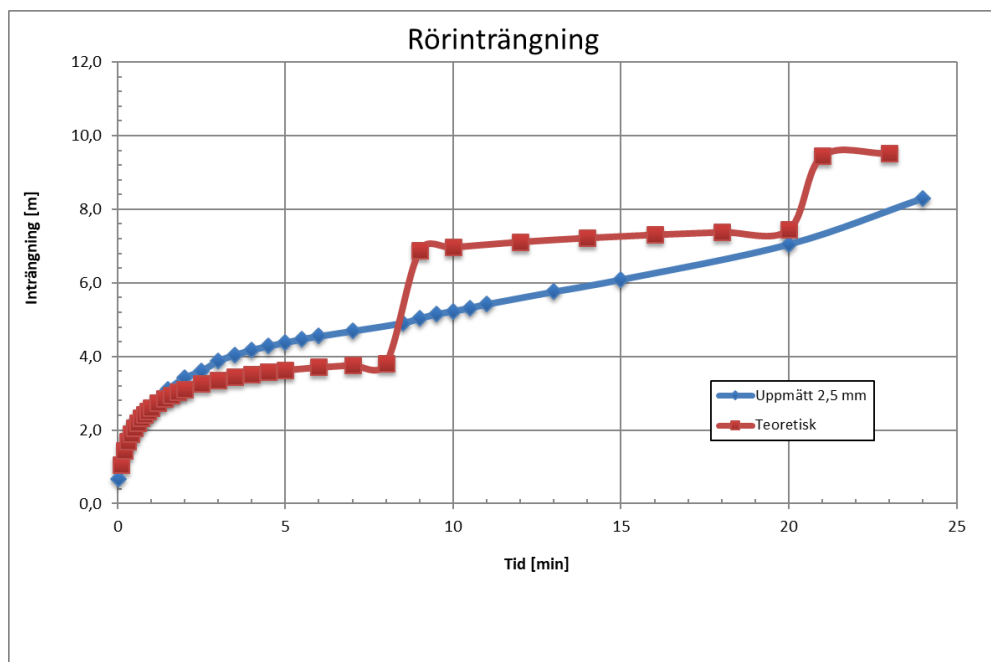
#### Injektering:

Den uppmätta inträngning i 2,5 mm plastslangen har jämförts med den teoretiska, se figur 4-1 för försök 1 och figur 4-2 för försök 2.



**Figur 4-1** Teoretisk och uppmätt inträngning vid test 1 för slang med diameter 2,5 mm.

## Bilaga 5



**Figur 4-2** Teoretisk och uppmätt inträngning vid test 2 för slang med diameter 2,5 mm.

Av resultatet i figur 4-1 mellan uppmätt och teoretiskt samt den omvända skillnaden i slutinträngning mellan slang 4 mm och 5,5 mm kan antas att injektering i slangarna påverkades vid test i slangarna har påverkats av yttre faktorer. Troligtvis av injekteringsmedlet, dvs inte tillräckligt bra blandat, eller tryck-flöde, som utfördes genom höjning av blandkärl.

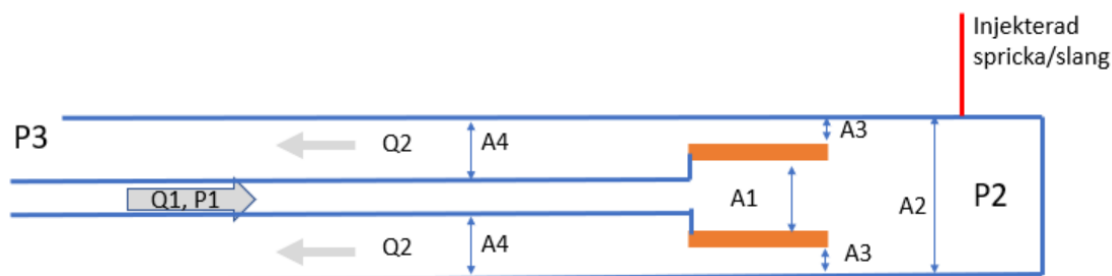
Injekteringen vid test 2 följer ett mer förväntat inträngningsförlopp för slangarna/rören 2,5, 4 och 5,5 mm. För rör 1 mm skett troligtvis en pluggning/igensättning, dvs inte tillräckligt bra blandat, som släppte vid tryckhöjningen.

Den mest troliga orsaken till problem med inträngning i slangarna/rören, speciellt för försök 1, var att injekteringsblandningen inte blev tillräckligt bra blandat.

*Nödvändig skjuvspänning vid urspolning:*

Så fort ett spolvattentryck skapas framför manschett/packern eller liknande (borrkronan) är risken hög för urspolning i utförd injekteringar.

Urspolning:



Erosion/urspolning av injekteringsmedel i sprickor sker inte om:

$$\tau > \frac{dh}{dx} \cdot \frac{b \cdot \rho_w \cdot g}{2}$$

## Bilaga 5

## Försök 1:

Om  $P_1 = P_2$  blir då  $dh/dx = 10 \text{ m}/0,75 \text{ m}$  och  $b = 1,5 \text{ mm}$  blir villkoret:

$$\tau > 100 \text{ Pa}$$

Dvs injekteringsbruket behövde ha en skjuvspänning över ca 100 Pa.

## Försök 2

Om  $P_1 = P_2$  blir då  $dh/dx = 30 \text{ m}/7 \text{ m}$  och  $b = 1,5 \text{ mm}$  blir villkoret:

$$\tau > 30 \text{ Pa}$$

Dvs injekteringsbruket behövde ha en skjuvspänning över ca 30 Pa.

I ovanstående antas att spolvattentryck  $P_1$  inte har reducerats, dvs  $P_2 = P_1$ . Frågan är om spoltryck framför manschett/packer ( $P_2$ ) har reducerats.

De förenklade/överslagsmässiga friktionsförluster som fås i figur ovan är:

- Sektionsförändring, ökande och minskande
- Mot glatt yta (stålröret)
- Mot packern
- Mot slang och rör från pump

Inledningsvis uppskattas Reynolds tal:

$$Re = U \cdot D / \nu$$

$$U = Q/A = (20/60000)/(0,025^2 \cdot \pi/4) = 0,68 \text{ m/s}$$

$$Re = 0,68 \cdot 0,025 / 1,3E-6 = 13077 \text{ dvs turbulent strömning}$$

Nedanstående indata och förutsättningar är hämtad från Cedervall & Larsen, 1981, "Hydraulik för väg- och vattenbyggare".

**Sektionsförändring, ökande:**

$$\text{En retardationsförlust fås: } h_a = k_a \cdot U^2 / 2g$$

Ut från packern

- $k_a = 0,71$
- $h_a = 0,0165 \text{ m}$

Spalt packern och rör:

- $k_a = 0,31$
- $h_a = 0,022 \text{ m}$



## Bilaga 5

**Sektionsförändring, minskande:**

En retardationsförlust fås:  $h_r = k_r \cdot U^2/2g$

In mellan packern och rör:

- $k_r = 0,45$
- $h_r = 0,010 \text{ m}$

**Mot glatt yta (stålröret):**

En friktionsförlusten fås:  $h_f = f \cdot (L/D) \cdot U^2/2g$

f fås med hjälp av  $k/D$  och  $Re$

$k/D$  är den relativa råheten

För "Gjutjärnsrör, asfalterade" är  $k$  mellan 0,3-2,0

Ovanstående ger ett  $f$  mellan ca 0,04 och 0,08, välj 0,065.

Yttre stålröret (4,5 m):

- $h_f = 0,107 \text{ m}$

**Mot packern (0,3 m):**

En friktionsförlusten fås:  $h_f = f \cdot (L/D) \cdot U^2/2g$

f fås med hjälp av  $k/D$  och  $Re$

$k/D$  är den relativa råheten

Gummi – asfalterat gjutjärnsrör:  $k=0,1-1,0$  eller rostiga järnrör  $k=0,5-3,0$

Ovanstående ger ett  $f$  mellan ca 0,045 och 0,065, välj 0,055.

- $h_f = 0,006 \text{ m}$

**I slang (15 m):**

## Bilaga 5

En friktionsförlusten fås:  $hf = f \cdot (L/D) \cdot U^2/2g$

f fås med hjälp av  $k/D$  och  $Re$

$k/D$  är den relativa råheten

Plastslang  $k=0,01$  (ca 5 m)

Ovanstående ger ett  $f$  på ca 0,03.

- $hf = 0,416$  m

### Total förlust:

**Summa:** Med ett spolvattentryck på mellan 10 och 30 m och turbulent flöde blir tryckförlusterna i slang fram till kammaren framför packern ca 0,4 m. Därefter blir tryckförlusterna ca 0,16 m fram till utflödet ur stålroret.

### 4.2 DISKUSSION OCH OSÄKERHETER

Med de använda slangarna/rören och flödena kan det konstateras att urspolning sker i de injekterade slangarna/rören. Det huvudsakliga spolvattentrycket fram till utrymmet framför packern varierar mellan 5 och 25 meter (0,5 och 2,5 Bar). Sektionsförändringarna, spalten mellan packern och stålroret och friktionsförluster fram till stålrorets utlopp påverkar vattentrycket litet (ca 0,16 m). Därmed överskrider spolvattenkraften injekteringsmedlet skjuvkraft och urspolning sker.

Följande brister och osäkerheter har identifierats:

- Testuppställningen hade svårt att klara större vattentryck och flöden på grund av dålig förankring, dvs testuppställning hade behövts förankras stumt.
- Huvuddelen av observationer, dvs tryck och flöden, inträngning och urspolning samt tryckgivare och manometer, utfördes manuellt och koll på samtliga observationer samtidigt kunde inte göras. Fler givare och resurser hade behövts.
- Slangarna och rören var "glatta" invändigt vilket verka inte påverka inträngningen av injekteringsbruk men frågan är om de påverka urspolningen.

## Bilaga 6-Fältrapport, vibrationsmätning

### 1 INTRODUKTION

Fältförsöket utfördes i Bohus bergsprängnings bergtäkt i Hedekas. I bergtäkten har en tunnelnisch tidigare sprängts ur, ca 20 m lång. I tunnelnischen (gaveln) kunde en sprickplan skönjas vinkelrätt tunneln samt flera sprickor parallellt med tunneln. Bergarten bestod främst av gnejs/granit.

Vibrationsmätning utfördes vid två moment, dels då borrhålen borrades (2018-10-11) för att bestämma hur stora vibrationerna själva borrhålen skapade, dels vid sprängförsöket (2018-11-15).

Borrning samt allt annan kring utrustning såsom el, vatten tillhandahölls av Bohus Bergsprängning.

#### 1.1 SYFTE

Syftet med mätningarna var:

1: Borringsvibrationer mättes för att kunna bedöma om vibrationerna från borrhålen skulle kunna påverka injekteringsbruk.

2: vibrationer från sprängningen mättes för att utifrån dessa kunna bestämma (verifiera) de krafter (skjuvtöjning) som skapas runt borrhålet i sprängögonblicket.

### 2 METOD

Vibrationer mättes med triaxiella geofoner (Sigicom system, givare V12 och logger Infra mini), vid båda försöken användes 3 geofoner. Samplingsfrekvensen har varit 4096 Hz vilket innebär att vibrationsfrekvenser upp till ca 500 Hz kan mätas.

#### 2.1 TESTUTFÖRANDE BORRINGSVIBRATIONER

I vänstra del av tunnelnischen borrades det 12 st borrhål. Borrning syns i figur 1 och de tre uppsatta givarna (A, B och C) ses i figur 2 tillsammans med numrering av borrhålen.

Vibrationsgivarna var sedan inställda på att registrera maximalt vibrationsvärde var 5:e sekund, genom att göra antagandet att borrhålen är konstant gick det sedan att beräkna avståndet mellan givaren och mätaren för varje registrerat värde. Dvs genom att veta avståndet mellan påslag på borrhålet och mätaren samt avståndet mellan botten på borrhålet (borrhålen borrades till 4m djup) och mätaren kan man anta avstånd för samtliga registrerade vibrationsvärden.

Några kurvförlopp (tid-svängningshastighet) spelades också in för att kunna titta på vibrationens egenskaper, dessa triggades dock manuellt.

Mätinstrumenten ställdes in så att toppvärdet var 5:e sekund registrerades. Borrhålen borrades till 4 m djup. Sammanlagt borrades 10 hål, resultatet från 1 mätare ses i figur x.3.



Figur 1, borrning av hå 9. Notera att 2 givare syns till vänster om bommen.



Figur 2 mätupställning, 3 triaxiella givare syns i bild (A (mp 4800), B (mp 10410) och C (mp 11580)). De platser där borrning utfördes har märkts ut med röd färg. Hålen som använts i analysen är 2 och 9 som är utmärkta i bilden.

## 2.2 TESTUTFÖRANDE SPRÄNGNINGSSVIBRATIONER

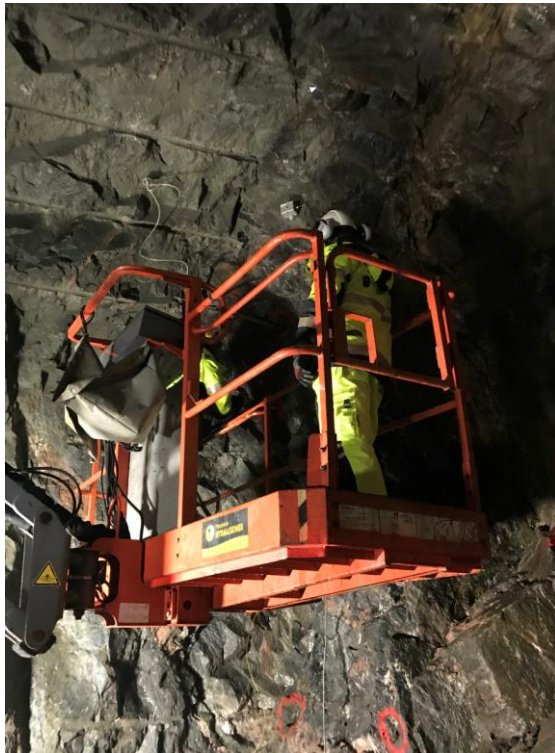
Vid försöken sprängdes ett hål, syftet med detta var att simulera ett kontursprängningshål, hålet sköts som ett bomskott dvs utan att flytta något berg. Hålet var 4 m djupt och laddades med 3 m Riogur 17 mm (0,3 kg/m) samt en bottenladdning på 170 g dynamitsprängämne. 1 m i hålet var oladdad. Masscentrum på laddningen låg följaktligen ca 2,7 m in i hålet.

## Bilaga 6

Vibrationsmätning utfördes i tre punkter, dels rakt ovanför hålet (ca 1,4 m) dels till höger om hålet (ca 3,4m), dels längre ut i tunneln ca 6 m från stoffen. Avståndet mellan mätpunkt och laddningens masscentrum ses tabell 1, tillsammans med övriga data för sprängningen.

Tabell 1. Data från provsprängningen.

275 mm bottenladdning (dynamit): 170 g			
3 m riogur 0,3 kg/m			
borrhålet är 4 m djupt			
Då ligger laddningens centrumpunkt 2,73 m från ytan			
mp		Prognos	Uppmätt
R (m)	Q (kg)	(mm/s)	(mm/s)
3,1	1,07	265	261
4,4	1,07	147	143
11	1,07	31	18



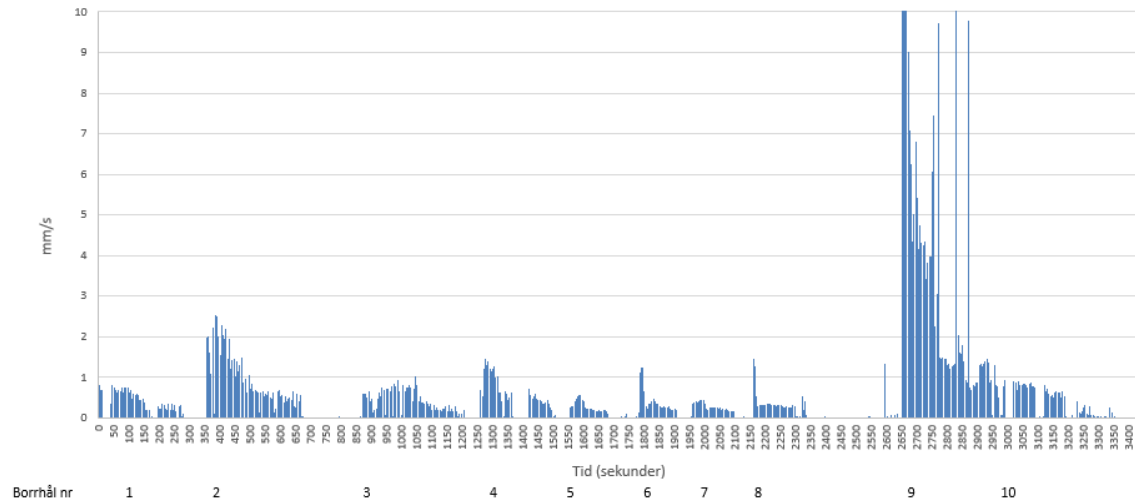
Figur 3, laddning av borrhålet.

## 3 RESULTAT

### 3.1 BORRNINGSVIBRATIONER

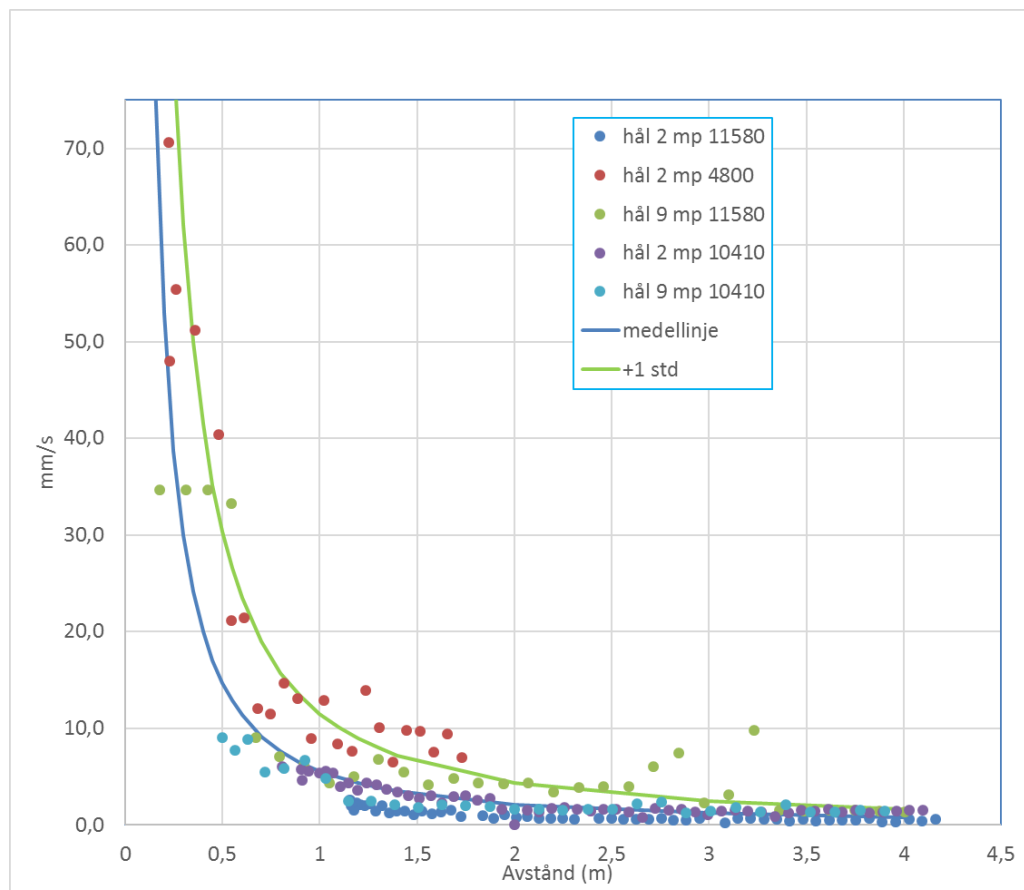
Genom att känna till avstånd mellan givare och påslagspunkt för borrhålet och anta en konstant borrsjunkningshastighet gick det sedan att bestämma avståndet mellan givaren och det registrerade mätvärdet (se figur 4). I diagrammet visas komponent max dvs högsta värdet i någon riktning.

## Bilaga 6



Figur 4 toppvärde var 5:e sekund (diagrammet är kapat, maxvärdet för hål 9 var 35 mm/s), mp 11580.

Eftersom vibrationerna avtar ganska snabbt med avståndet har användbara resultat i huvudsak erhållits för de mätningar som gett de högsta värdena (över 5 mm/s) vilket inneburit vid borrning av hålen 2 och 9. Resultat var 5:e sekund har plottats för hål 2 (alla 3 mätpunkter) samt hål 9 (2 mätpunkter) i figur 5.

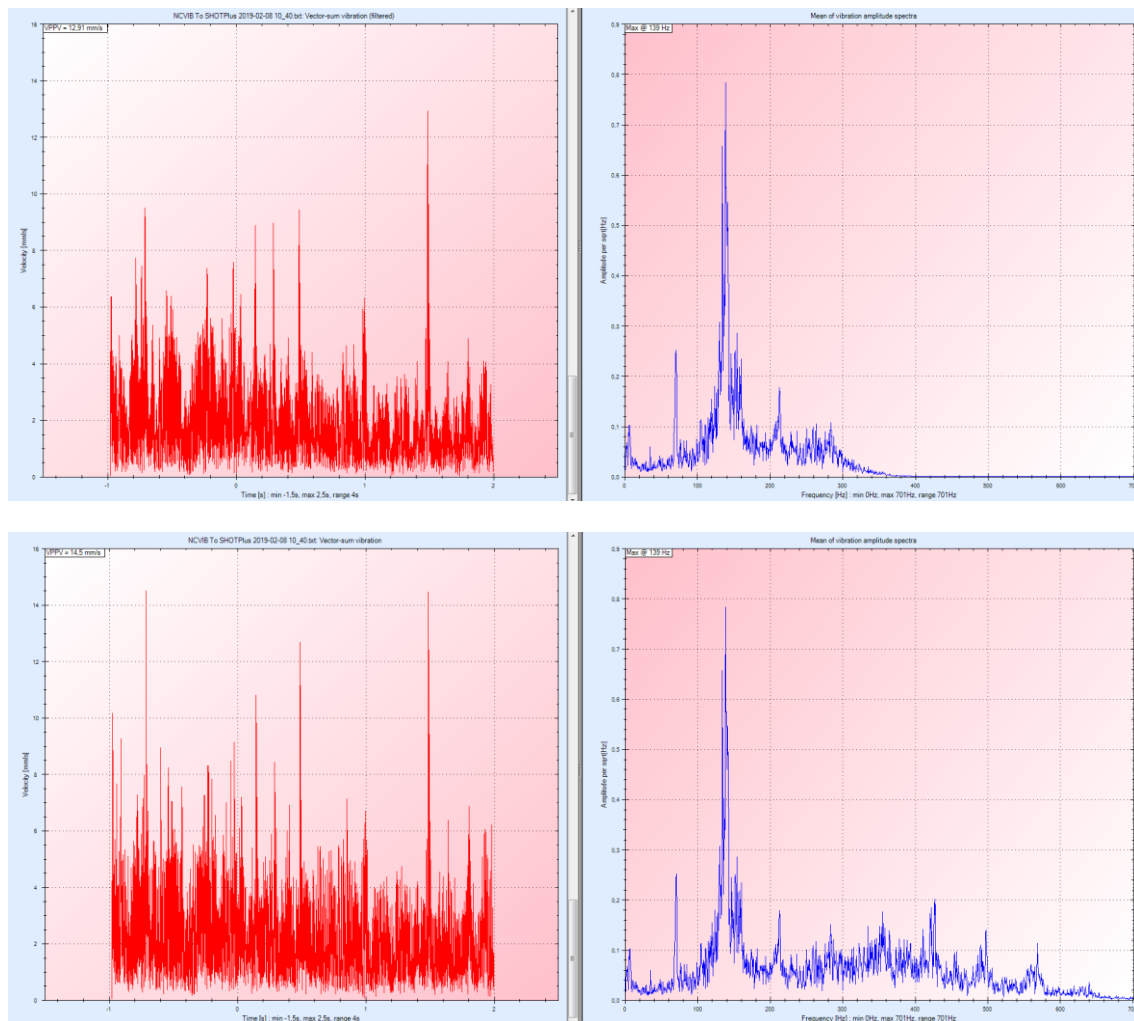




## Bilaga 6

Figur 5 försök till en avståndsberoende kurva för borr vibrationer, punkterna är tagna från de 5 mätningarna med bäst data (högst vibrationsnivåer). Trendlinjen i figuren följer de data som gav högst vibrationer. Den gröna linjen ligger 1 standardavvikelse upp.

Som kan ses i figur 6, var frekvenserna från borrningen mycket höga, dominerande frekvens ligger kring 150 Hz men som kan ses i figuren finn betydande delar av vibrationen hela vägen upp till vad vi kan mäta (kring 500 Hz), det är alltså osäkert om det finns ännu högre frekvenser eftersom vi inte kan mäta dessa.



Figur 6. Kurvförlopp (vektorsumma) för en 2 sekunders period. I figuren överst är kurvan filtrerad enligt SS 460 48 66 dvs använder signal 4-300 Hz, i figuren nedanför är signalen filtrerad vilket i praktiken ger signal upp till 500 Hz (samplingsfrekvens 4096 Hz). Noteras kan att toppvärdet skiljer sig med 12%. Samtliga toppvärdesmätningar (figur 4) är gjorda enligt SS 460 48 66.

Om vi jämför vibrationsmätningarna utförda enligt SS 460 48 66 (samma som i stapeldiagrammet figur 3), med mätningar utan vägning så är skillnaden ca 12 %, se figur 6.

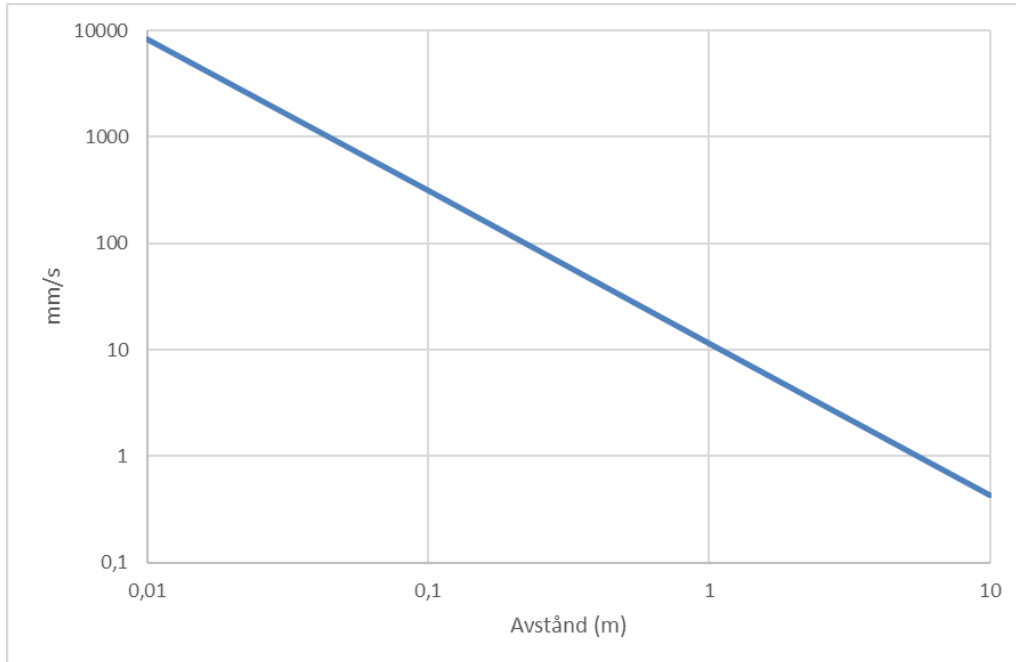
Det finns naturligtvis stora osäkerheter i mätningen, något lågt frekvensområde, vi har mätt komponentmax istället för vektorsumma, vi har spridning i mätningen och vi måste dessutom extrapolera ganska kraftigt för att komma upp i höga vibrationsnivåer, dock

## Bilaga 6

använder vi linjen +1 standardavvikelse i figur 5 får vi nedanstående prognos för borrning, denna prognos torde vara en någorlunda prognos för förväntade maximala vibrationer från borrning:

$$v = 11,5 \cdot r^{-1,4}$$

Vilket ger följande vibrationsnivåer beroende på avstånd (figur 7):



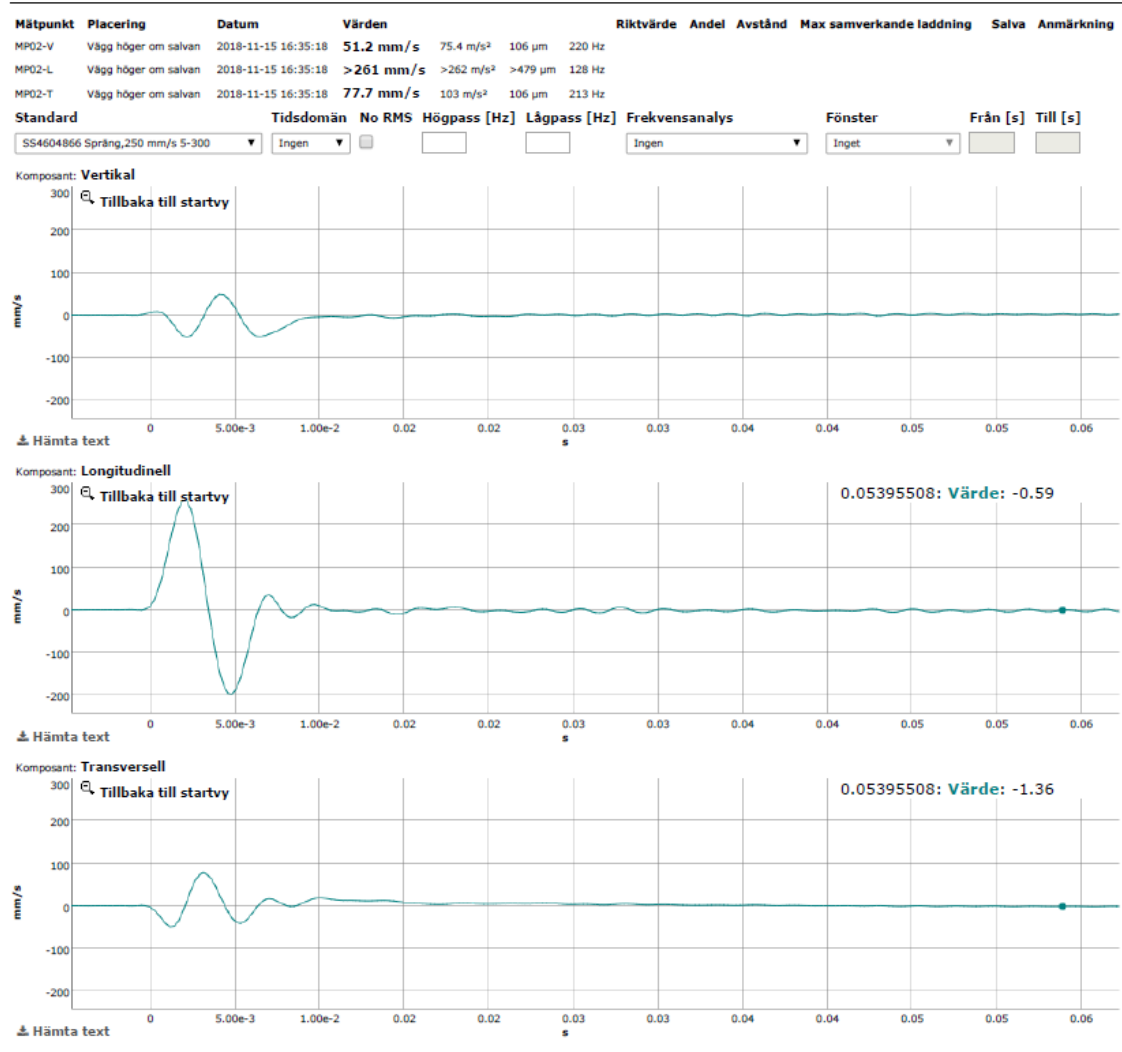
Figur 7. Resultatet visar att påverkan från borrhingsvibrationer är liten och att någon direkt påverkan från borrhningen knappas kan förekomma på avstånd över några cm.



## Bilaga 6

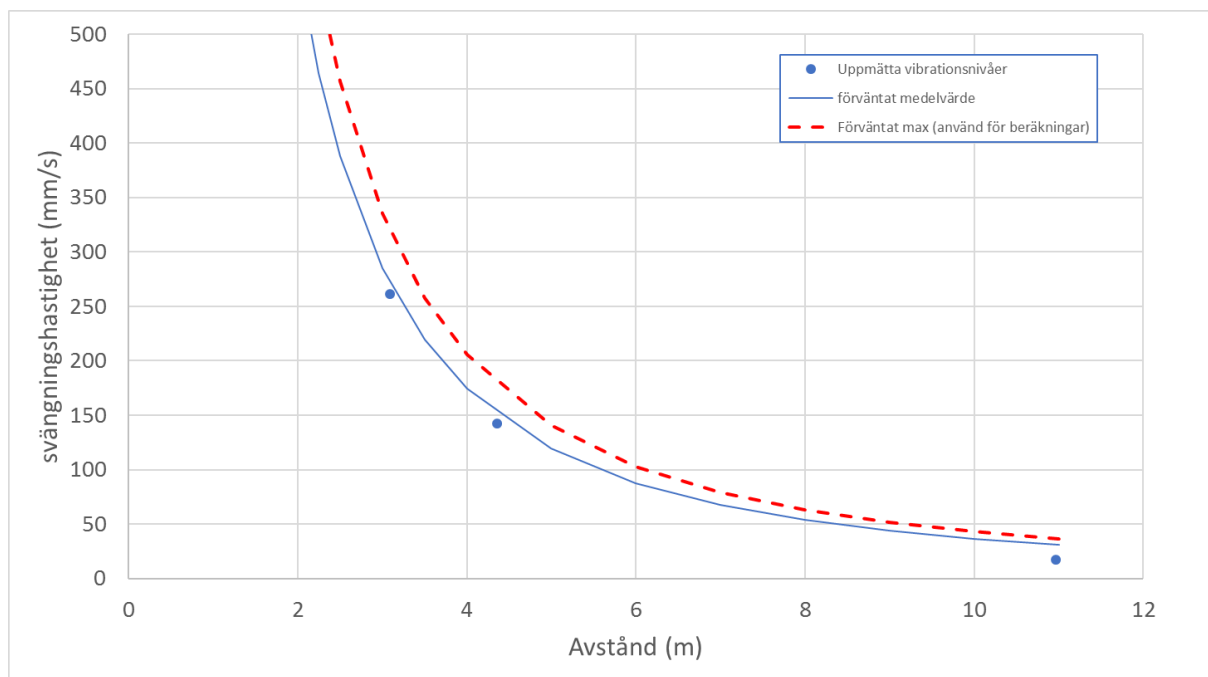
## 3.2 SPRÄNINGSVIBRATIONER

Sprängningsvibrationerna mättes i tre punkter, ett av de registrerade kurvförloppen (det högsta) kan ses i figur 8.



Figur 8. Exempel på kurvförlopp, visar den närmaste mätpunkten 3,1 m från laddningens masscentrum. Resultatet i longitudinell riktning (vinkelrät mot stuffen) visar på >261 mm/s pga att mätarens maxvärde är 250 mm/s. Då kurvförloppet ser bra ut finns det dock ingen anledning att misstro värdet 261 mm/s.

De tre uppmätta värdena har sedan plottats mot ett förväntat samband i figur 9. Noteras kan att uppmätta värden stämmer mycket väl mot förväntat värde, dvs det samband som använts för beräkning av skjuvtöjning (streckad linje i figur 9).



Figur 9 Uppmätta data plottas mot den prognos som gjordes. De beräkningar som utförts i rapporten bygger på den streckade röda linjen.