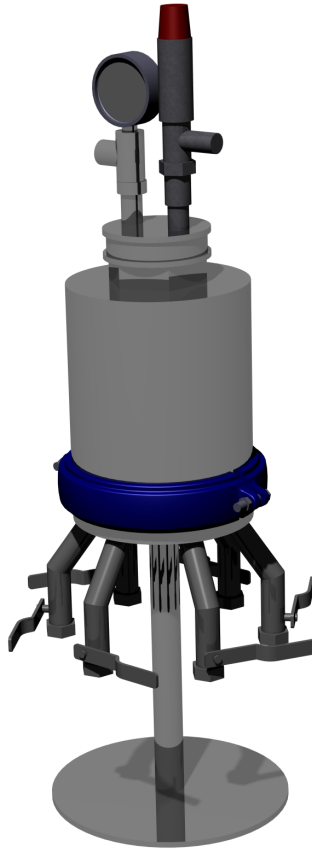




CHALMERS



Filterpress för provning av injekteringsbruk

Utvärdering av ny provningsutrustning för mätning av penetrationsförmåga hos cementbaserat injekteringsbruk

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

MARTINA LÖVGREN
IDA WÄSTERÄNG

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete ACEX20-19-34
Göteborg, Sverige 2019

EXAMENSARBETE ACEX20-19-34

Filterpress för provning av injekteringsbruk

Utvärdering av ny provningsutrustning för mätning av penetrationsförmåga hos
cementbaserat injekteringsbruk

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

MARTINA LÖVGREN

IDA WÄSTERÄNG

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2019

Filterpress för provning av injekteringsbruk

Utvärdering av ny provningsutrustning för mätning av penetrationsförmåga hos cementbaserat injekteringsbruk

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

MARTINA LÖVGREN

IDA WÄSTERÄNG

© MARTINA LÖVGREN, IDA WÄSTERÄNG, 2019

Examensarbete ACEX20-19-34

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2019

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Principiell bild av Sikapressen. Författarnas egen bild.

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2019

Filterpress för provning av injekteringsbruk

Utvärdering av ny provningsutrustning för mätning av penetrationsförmåga hos cementbaserat injekteringsbruk

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

MARTINA LÖVGREN

IDA WÄSTERÄNG

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och geoteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Vid byggande av till exempel tunnlar eller dammar i berg är det viktigt att skapa en vattentät skärm runt den tilltänkta tunnelprofilen eller dammen så att det inte uppstår sänkning av grundvattennivån efter bergguttaget. I Sverige är injektering med ett cementbaserat bruk den vanligaste metoden för att förhindra att grundvattensänkning uppstår.

För att säkerställa att bruket har de egenskaper som krävs för att täta sprickorna testas bruket innan tätning av skärmen påbörjas. För bestämning av brukets penetrationsförmåga används olika typer av mätutrustning, som filterpump och filterpress. Dessa provningsenheter är försedda med filter som avser motsvara bredden på de sprickor som ska tätas.

I samband med examensarbetet har en ny filterpress tillverkats av Sika, ett specialkemikalieföretag verksamma inom bygg och industri. I och med växande krav på provning av injekteringsbruk med filterpress fanns ett behov för Sika att utveckla sin egen provningsutrustning.

Syftet med detta arbete är att utvärdera den nya filterpressens möjlighet till tidseffektivare tester samt dess funktion och tillförlitlighet. Den nya filterpressen testades parallellt med en referensfilterpress, som hade en annan utformning, samt en filterpump. De tester som genomförts har innefattat olika recept på bruk, tillsatsmedel och filter med maskvidder från 45 µm till 120 µm.

Resultat från provningarna sammanställdes i tabeller och diagram för att åskådliggöra likheter och skillnader. Jämförelsen visar att provningsenheterna ger samma resultat och att inga systematiska avvikelser förekommer. Utifrån resultaten identifierades vissa mindre variationer mellan enheterna, dessa analyseras i rapporten. Baserat på resultaten i rapporten anses filterpressen fylla sin funktion som provningsenhet för mätning av penetrationsförmåga hos cementbaserat injekteringsbruk. Därmed anses den kunna ersätta den nuvarande filterpressen.

Nyckelord: Injektering, Filterpress, Cementbaserat injekteringsbruk, Penetrationsförmåga, Filterpump

Penetrability meter for testing of grout

Evaluation of new equipment for determination of the penetrability using cement-based grout

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

MARTINA LÖVGREN

IDA WÄSTERÄNG

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Geology and Geotechnics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

When tunnels or dams are constructed in rock, it is important to create a waterproof fan around the tunnel or dam, to avoid lowering of the groundwater level. Variations like these can cause damages to both buildings and the surrounding environment. Grouting with a cement-based grout is the most common used method in Sweden, to prevent these types of damages when building in hard rock.

To ensure that the properties of the grout are sufficient to seal the fractures, the grout is tested prior to use at the construction site. To determine the penetrability of the grout, different types of equipment is available, such as a filter pump and a penetrability meter. The devices have different filters with a mesh of woven steel wires, intended to represent different fracture sizes.

At the start of this bachelor thesis a new penetrability meter was produced by Sika, a company that is developing chemicals used in the construction and industry market. The need for development is based on the increased requirements of testing grout with a penetrability meter.

The purpose of this thesis is to evaluate the possibility to perform more time-efficient tests, as well as evaluate the reliability and function of the new penetrability meter. The new device is tested in parallel to a reference device with a different design as well as a filter pump. Tests have been performed with different mixtures of grout, additives and with different mesh sizes ranging from 45 μm to 120 μm .

The results from the tests are presented to illustrate similarities and differences. The comparison shows that the units provide similar results and no significant deviations are present, although minor deviations occur which will be analyzed in the thesis. Based on this result, the new penetrability meter is concluded to function as intended.

Key words: Grouting, Penetrability meter, Cement-based grout, Penetrability, Filter pump

Innehåll

1	INTRODUKTION	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	4
1.3	Avgränsningar	4
2	TEORETISK BAKGRUND	5
2.1	Bergets hydrogeologi	5
2.2	Bergets hydrauliska egenskaper	6
2.3	Hydrauliska testmetoder	8
2.4	Det cementbaserade injekteringsbrukets egenskaper	10
2.5	Metoder för designval	13
2.6	Krav och stoppvillkor för injektering	13
2.7	Särskilda problem	14
3	UTVÄRDERADE MÄTENHETER	16
3.1	Referenspressen	16
3.2	Sikapressen	18
3.3	Filterpump	22
4	METOD	23
4.1	Blandning av bruk	23
4.2	Provning med filterpress	23
4.3	Provning med filterpump	24
4.4	Provning av brukets egenskaper	24
4.5	Testserier	25
5	RESULTAT	26
5.1	Testserie 1	26
5.2	Testserie 2	30
5.3	Testserie 3	32
5.4	Testserie 4	36
6	DISKUSSION	38
6.1	Utformningens påverkan	38
6.2	Inverkan av separation	39

6.3	Jämförelse av behållarnas utformning	39
6.4	Tiden avgörande för provningsresultat	39
6.5	Jämförelse mellan filterpressarna	40
6.6	Utvärdering av Sikapressen	43
7	REKOMMENDATIONER	46
8	SLUTSATS	48
9	REFERENSER	49
10	BILAGOR	52
10.1	Bilaga A	52
10.2	Bilaga B	53

Förord

Detta examensarbete utfördes under våren 2019 som en avslutande del av högskoleingenjörsutbildningen inom Samhällsbyggnadsteknik, Chalmers tekniska högskola. Arbetet utfördes i samarbete med avdelningen för vattentätning hos Sika Sverige AB, Stockholm, Sverige.

Vi vill tillägna ett stort tack till vår handledare på Sika, Pernilla Amsköld, som har delat med sig av många goda råd utifrån sin kunskap och erfarenhet. Vi vill även tacka för att vi har fått nyttja Sikas betonglaboratorium för att kunna utföra provningar under projektet.

Ett särskilt tack riktas även till vår handledare Johan Thörn, forskare på avdelningen för Geologi och geoteknik vid Chalmers tekniska högskola, som har bidragit med kunskap och vägledning genom hela arbetet.

Martina Lövgren & Ida Wästeräng
Göteborg, maj 2019

Beteckningar

Latinska beteckningar

A	Area [m ²]
b	Sprickvidd [m]
b_{hyd}	Hydraulisk sprickvidd [m]
b_{krit}	Kritisk sprickvidd [m]
b_{min}	Minsta sprickvidd [m]
C_c	Kanalkonduktans [m ³ /s]
d_b	Borrhålets diameter [m]
g	Tyngdaccelerationen [m/s ²]
h	Vattentryck [m]
h_t	Djupet under grundvattenytan [m]
K	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
K_f	Hydraulisk konduktivitet i en spricka [m/s]
L_t	Tunnelns längd [m]
L_b	Borrhålets längd [m]
$L_{b,sektion}$	Längd av vald sektion i borrhål [m]
Q	Flöde [m ³ /s]
$Q_{b,in}$	Borrhålets inflöde [m ³ /s]
$Q_{b,ut}$	Borrhålets utflöde [m ³ /s]
Q_c	Kanalflöde [m ³ /s]
Q_t	Inläckage till tunnel [m ³ /s]
q_f	Flödet i en spricka [m ³ /s]
r_t	Tunnelns radie [m]
r_b	Borrhålets radie [m]
T	Transmissivitet [m ² /s]

Grekiska beteckningar

Δh	Grundvattennivåskillnad [m]
$\Delta h_{\bar{o}}$	Vattenövertryck [m]
Δl	Längddifferens [m]
ΔS	Lutningen på avsänkningen i ett halvlogaritmiskt diagram [m]
ξ	Skinfaktor [-]
μ_w	Viskositeten för vatten [Pa*s]
ρ	Densiteten [kg/m ³]

Matematiska beteckningar

$-\frac{dh}{dl}$	Flödesgradient [-]
------------------	--------------------

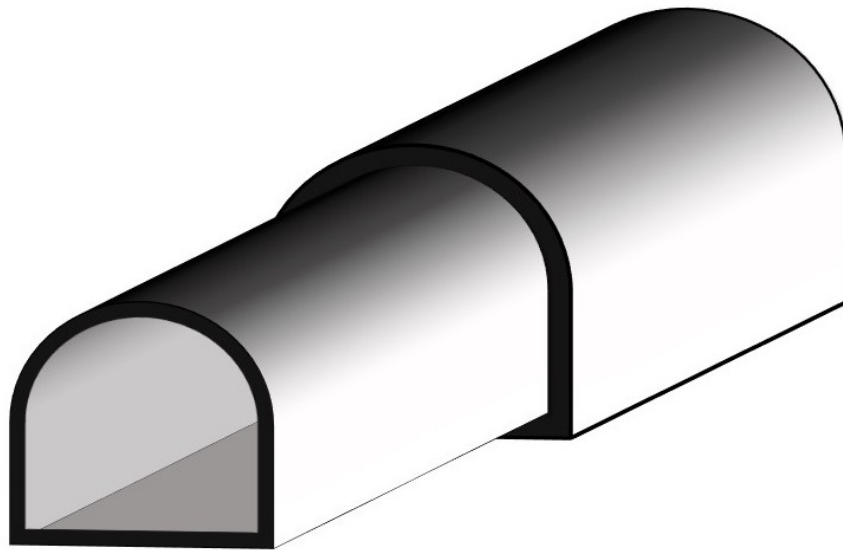
1 Introduktion

I detta inledande kapitel presenteras den ämnesmässiga bakgrunden och det bakomliggande behovet som ligger till grund för examensarbetet. Även viktiga avgränsningar för arbetet redovisas.

1.1 Bakgrund

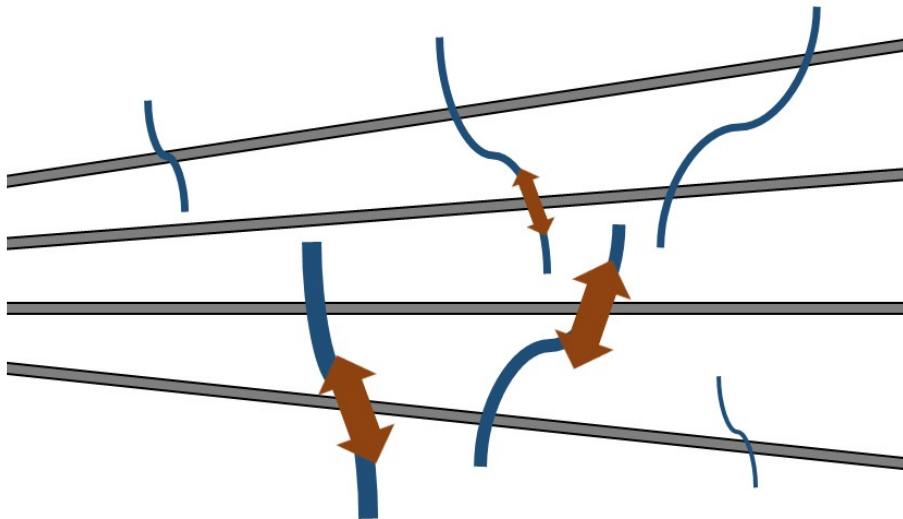
Grundvattenrelaterade problem är vanligt förekommande vid byggande i berg. Förändring i grundvattennivå påverkar både konstruktionen som sådan och i vissa fall omkringliggande bebyggelse, exempelvis om jorden är sättningsbenägen eller om grundläggningen är känslig. De problem som uppstår orsakas av bland annat dålig kvalitet på berget och vattenförande zoner (Eriksson & Stille, 2005). Om det förekommer lerlager ovan berget och det dräneras alltför mycket, så att en portryckssänkning inträffar, finns det risk för sättningar. Detta inträffade bland annat vid byggandet av Stockholms tunnelbana. Vid tunnelbygge beror tunnelns riktning genom berget på den omgivande bebyggelsen och därmed kan tunneln behöva korsa ett stort antal sprickzoner (Andréasson, 2015).

I Sverige är injektering av cementbaserat bruk den vanligaste metoden som används för att förhindra problem orsakade av förändrat vattentryck. Med tekniken skapas en vattentät skärm runt exempelvis en tunnel, se figur 1.1. Detta görs genom att de vattenförande sprickorna tätas, så att vattenflödet genom dem minskar och på så sätt reduceras risken för problem relaterade till inläckage av vatten (Eriksson & Stille, 2005). Utvecklingen av tekniken tog fart i Sverige på 1970-talet, i samband med att Stockholms tunnelbanesystem byggdes ut, och allt sedan dess har det bedrivits forskning kring ämnet. Studier har utförts för att öka förståelsen för injektering och de ingående mekanismerna som inverkar på injekteringsresultatet. Studierna har bland annat omfattat grundläggande förståelse för flöde i sprickor (Gustafson, 2009) och bruksegenskapernas betydelse (Draganović, 2009) samt möjligheterna att påverka dem (Eklund, 2006). Därefter har modeller utformats i syfte att kunna tillämpas för simulering och styrning av förloppen, enligt exempelvis Gustafson (2009) och Håkansson, Draganović, och Funehag (2019). Detta har lett till en betydande kompetensutveckling, men trots det kvarstår många frågetecken och det finns utrymme för att optimera tekniken (Eriksson & Stille, 2005).



Figur 1.1: Principen över vattentät skärm som skapas runt tunneln med injektering. Författarnas egen bild.

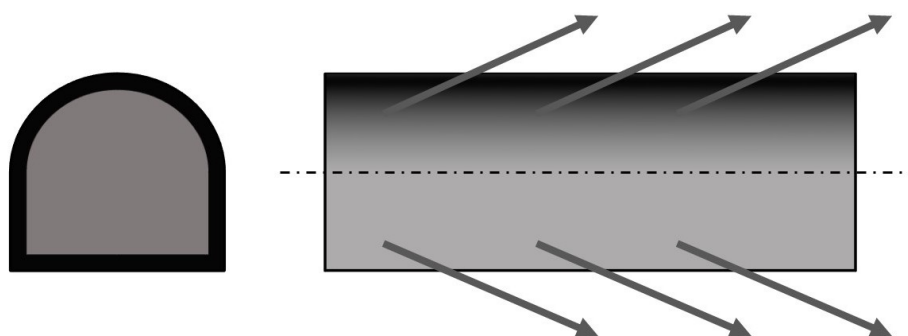
Injektering kan utföras både före och efter sprängning, så kallad för- och efterinjektering. Detta sker genom att hål borras in till bergets spricksystem. Ett cementbaserat injekteringsbruk pumpas in i hålen, som därmed också tränger in i de korsande sprickorna och på detta sätt tätas spricksystemet, se figur 1.2 (Besab, u.å.).



Figur 1.2: Redovisar borrhål med korsande sprickor i olika storlekar. Pilarna redogör principiellt för injekteringsbrukets spridning i sprickorna. Författarnas egen bild.

Borrhålen görs med ett visst överlapp för att säkerställa en vattentät skärm, se figur 1.3. Inläckage kan, förutom att påverka den omkringliggande bebyggelsen, få konsekvenser för tunnelmiljön. Ett stort inflöde av vatten till tunneln kan leda till översvämning och isbildning under vintertid, bland annat i form av hängande istappar från taket (Spross, 2011). Dessutom kan korrosionsbenägna material riskera att ta skada på platser där vattnet har en hög kloridhalt (Eklund, 2006). Som alternativ till injektering kan tätning av berg ske genom betonginklädnad. Metoden är en kombinerad tätnings- och

stabiliseringsmetod och används vanligtvis då berget är av sämre kvalitet. I Sverige är urberget generellt sett av god kvalitet och denna metod används därför sällan här (Trafikverket, 2000).



Figur 1.3: Tunnelns skärm i tvärsnitt samt hur borrhålen överlappar varandra för att säkerställa en tät skärm. Författarnas egen bild.

Utöver cementbaserade injekteringsbruk, kan injektering även ske med kemiska hartser, så kallad keminjektering, exempelvis polyuretan. Användning av dessa material bör dock ske med försiktighet, då de generellt har en sämre inverkan på miljön jämfört med cementbaserade bruk (Besab, u.å.). Det finns dock kem-injekteringsbruk som är baserade på Silica Sol, ett naturligt, icke-miljöskadligt material med fördelen att partiklarna är mycket små, vilket möjliggör en god inträngning även i mycket fina sprickor (Axelsson, 2009).

En del i injektering är provning av injekteringsbruket, som anpassas efter önskade egenskaper beroende på antagna förutsättningar och provtagningar av berget. Genom berghållskartering, geofysiska mätmetoder och borrhålsundersökningar kan en uppfattning skapas om hur sprickbildningen i berget ser ut. Sprickornas vidder, längder och vattenföring utvärderas och redovisas med en statistisk fördelning över stora och små vattenförande sprickor. Utifrån detta bestäms vilka egenskaper för injekteringsbruket som behöver prioriteras (Gustafson, 2009).

En viktig egenskap för injekteringsbruket är dess penetrationsförmåga i sprickorna (Draganović, 2009). Detta utvärderas vanligen genom prov med hjälp av filterpress alternativt filterpump. Det finns ännu ingen standard för hur mätningen ska gå till eller vilken metod som ska användas i Sverige (Stille, 2015). Tekniken är dock högaktuell då flertalet stora projekt, där injektering kommer att utföras, kommer att pågå under de närmaste åren. Förbifart Stockholm och Västlänken är exempel på två projekt som kommer att pågå under ett antal år i Sveriges två största städer, där det är av intresse att tidsoptimera alla ingående processer utan att kompromissa med kvaliteten på arbetet (Sika, 2018). Ett specialkemikalieföretag som arbetar med den typen av utveckling är Sika. Med en lång historia av innovationstradition utvecklar och tillverkar företaget produkter för bland annat tätning, limning, förstärkning och skydd, med vilka de är verksamma inom byggsektorn och industrin (Sika, 2016). Vad gäller vattentätning finns höga krav som måste uppfyllas och därför läggs fokus på att effektivisera systemen. Målet är att kunna reducera tidsåtgången och samtidigt uppfylla kraven (Stille, 2015).

I samband med detta arbete har en ny typ av filterpress utvecklats av Sika, med syfte att förbättra och effektivisera provningsprocessen för utvärdering av penetrations-

förmågan hos cementbaserat injekteringsbruk. Sika har sedan tidigare lånat in två olika filterpressar för sina projekt, varav den ena var den första på marknaden. Med båda dessa fick filtret bytas ut mellan varje provning, medan den nya möjliggör testning för flera sprickvidder samtidigt, vilket innebär en betydande tidsbesparing. I och med den nya filterpressens utformning behöver den utvärderas och jämföras med andra provningsenheter för att säkerställa att den kan ersätta nuvarande filterpress och ge tillförlitliga resultat. Den behöver även granskas med avseende på aspekter såsom användarvänlighet och förbättrad effektivitet.

1.2 Syfte

För att möta de ökade kraven i branschen på provning av injekteringsbruk med filterpress har en ny provningsutrustning utvecklats i syfte att ersätta befintlig utrustning. I examensarbetet utvärderas den nya filterpressen med avseende på funktion och resultat för att säkerställa dess tillförlitlighet. Genom provning undersöks filterpressen och resultat jämförs med befintlig utrustning för provning av cementbaserat injekteringsbruk.

1.3 Avgränsningar

Det finns flera olika typer av bruk, men cementbaserat injekteringsbruk är det mest beprövade och oftast förekommande vid byggande i berg i Sverige. Det är den typ av bruk som utvärderas med hjälp av filterpress och av den anledningen kommer arbetet endast att behandla detta.

För cementbaserat injekteringsbruk testas en rad olika egenskaper, bland annat reologiska- och tidsberoende egenskaper, men arbetet berör främst penetrationsförmågan, vilket är det som filterpressen testas för.

De mätserier som gjorts är tillräckliga för att kunna bedöma om den nya filterpressen ger giltiga mätvärden. Framtagning av mätserier i större skala i syfte att få statistiskt säkerställda resultat har därför legat utanför detta arbetes omfattning.

2 Teoretisk bakgrund

I den teoretiska bakgrunden presenteras en del av den forskning som har gjorts inom området injektering i hårt berg. Den syftar till att ge en ökad förståelse för ämnet och därigenom också den problematik som tätning av berg innebär.

2.1 Bergets hydrogeologi

När egenskapskrav för ett injekteringsbruk ska tas fram krävs information om sprickorna i berget som ska tätas. Egenskapskraven beror på fördelningen av små och stora sprickor, med vilken frekvens de förekommer och dess längder. Sprickornas egenskaper beror till stor del på bergets art och kvalitet, som i sin tur beror på den geologiska historien. Så med information om bergets ursprung kan sprickornas förutsättningar klargöras och därmed kan ett recept för bruk med rätt egenskaper för aktuella förhållanden tas fram (Gustafson, 2009).

2.1.1 Bergarter

Sprickorna i ett berg är ett resultat av bergets geologiska historia och utifrån den kan viktiga slutsatser dras för bergets kvalitet. Ju äldre berget är desto fler händelser, som kan ge upphov till sprickbildning, kan ha påverkat bergmassan. Till exempel är en betydande händelse bildandet av bergskedjor, men även händelser såsom glaciation, avlastning och erodering av bergskedjor påverkar (Gustafson, 2009). Bergarter delas in i tre huvudgrupper med avseende på deras bildningssätt; magmatiska-, sedimentära- och metamorfa bergarter (Naturhistoriska riksmuseet (NRM), 2017).

De magmatiska bergarterna uppkommer ur en stelrande smälta, där de olika ingående mineralen kristalliseras under avsvalningsprocessen. Om processen sker på stora djup går den långsamt och bildar en grovkornig djupbergart, som till exempel granit. Till följd av att smältan har en lägre densitet än den redan stelnade bergarten vandrar den uppåt och intruderar berget ovanför. Då avsvalnningen sker på ytan fås en vulkanisk ytbergart, exempelvis basalt (Gustafson, 2009). Diabas är ett exempel på när kristallationsprocessen har skett i sprickor och gångar i ett berg och kallas naturligt för gångbergarter. Tiden avsvalningsprocessen tar samt vid vilket tryck och temperatur detta sker varierar med djupet, varför platsen för bildandet av bergarten har stor inverkan på dess egenskaper. De mineral som stelnar vid låg temperatur tenderar att ha en högre halt av kisel och benämns som felsiska, medan kiselfattiga mineral benämns som mafiska (Andréasson, 2015). Felsiska bergarter kan sägas vara spröda, innebärande att de har en högre elasticitetsmodul och lägre hållfasthet än de mafiska bergarterna (Gustafson, 2009). Vidare innebär detta att de lätt spricker upp, vilket också medför att de generellt sett har en högre konduktivitet. De mafiska bergarterna har en lägre elasticitetsmodul och till följd av detta spricker de inte upp lika lätt. Den kemiska stabiliteten är sämre för de mafiska bergarterna än de felsiska, vilket medför att de i större utsträckning vittras. Detta leder till att sprickorna i de mafiska bergarterna i större utsträckning fylls med vittringsmaterial, vilket gör att de får en lägre konduktivitet (Florén, 2015).

Bildningen av sedimentära bergarter sker ofta på havsbotten genom kompaktering av löst sediment. Genom naturliga processer som kemisk- och mekanisk vittring samt erosion från is, vatten och vind frigörs partiklar från berggrunden. I sedimentet kapslas

även rester av djur och växter in och bevaras som fossil. Med tiden pressas det lösa sedimentet ihop och cementeras samman till en fast bergart. Beroende på vilken mineral bergarten är bildad ur fås olika hydrogeologiska egenskaper. Exempel på sedimentära bergarter är sandsten, lerskiffer och kalksten (NRM, 2019).

Metamorfa bergarter bildas då berg utsätts för högt tryck och/eller höga temperaturer. Processen ger olika slutresultat och mekaniska egenskaper beroende på bergets ursprungliga sammansättning (Gustafson, 2009). Sedimentära bergarter som genomgår metamorfos blir starkare och mindre benägna att spricka (Andréasson, 2015). Ett exempel på en sådan bergart är marmor, som bildas ur kalksten (NRM, 2019). Metamorfa bergarter med ursprung i en magmatisk bergart blir istället svagare och kan få en folierad struktur. Foliationen utgör svaghetsplan i vilka sprickor lätt uppstår (Florén, 2015). Skiktningen ger också upphov till anisotropi, det vill säga olika fysikaliska egenskaper i olika riktningar (Gustafson, 2009).

2.1.2 Bergkvalitet

Förutom kunskap om de bergarter som förekommer på platsen krävs kännedom om bergets sprickor och sprickzoner. Hållfastheten hos bergarterna motsvarar inte hållfastheten hos berget, utan ger istället en bild av det mekaniska beteendet. Sprickor och sprickzoner identifieras med hjälp av geologisk kartering och bergets egenskaper bestäms istället med hjälp av tester på plats, exempelvis borrhål. Även bergets historia är av vikt då detta bland annat kan visa på vilken typ av berg som förekommer i området och om det förekommer lera. Bergets historia kan innefatta information om landhöjningen och hur berget har utsatts för deformation (Andréasson, 2015).

I och med att placering av tunnel ofta är låst till vägens- eller järnvägens riktning går det inte alltid att undvika zoner med svåra förhållanden, exempelvis krossat eller sprucket berg. Enligt flera i branschen, bland annat Bergh och Ekström (2007) samt Funehag (2008), är det fördelaktigt att stora sprickor går vinkelrätt tunnelns riktning, medan Andréasson (2015) argumenterar för att tunnelns sträckning bör gå parallellt med stora sprickor.

2.2 Bergets hydrauliska egenskaper

Vid val av injekteringsmetod för hårt kristallint berg är en uppskattning av inläckage till tunneln en viktig parameter att utvärdera. Grundvattenflödet sker i bergets sprickor, således önskas hitta ett sätt att beskriva det flöde som överensstämmer tillräckligt med verkligheten, men ändå ger en rimlig mängd beräkningar (Stille & Eriksson, 2005). En stor del av problematiken ligger i att bergets egenskaper varierar vida mellan olika punkter. För en exakt kartläggning av ett bergs hydrauliska egenskaper innebär detta en iteration av en mängd beräkningar, vilket skulle kräva enorma mängder tid och resurser. Istället har det tagits fram ett flertal förenklade modeller med tillräcklig noggrannhet som används för att beskriva flödet i sprickorna, beroende på typ och skala. Bergets hydrauliska egenskaper bestäms med hydrauliska tester (Gustafson, 2009).

Genom att anta ett laminärt flöde i sprickorna, vilket gäller för de flesta naturliga fall, fås ett linjärt samband med ekvation (1). Hastigheten Q/A är proportionerlig mot den hydrauliska konduktiviteten K multiplicerat med den hydrauliska gradienten dh/dl (Gustafson, 2009). Formeln kallas Darcys lag och är grunden till de flesta

flödesformler som används i geohydrologiska sammanhang, varför det är viktigt att känna till vad formeln bygger på för antaganden. Tillämpning av formeln kan ge användbara resultat även då antaganden inte gäller för det specifika fallet (Stille & Eriksson, 2005).

$$\frac{Q}{A} = K * \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

Det finns flera olika sätt att uppskatta inläckage till en tunnel, beroende på val av geometriska utgångspunkter samt om hänsyn tas till skinfaktorn, ξ , som är en korrigeringsfaktor för skillnader mellan verkliga och teoretiska förutsättningar (Stille & Eriksson, 2005). Värdet på korrigeringsfaktorn varierar stort beroende på de aktuella förhållandena (Doverfelt, 2015), men rekommenderat riktvärde är 2,5. För en tunnel på stort djup kan en uppskattning av inläckage till tunneln med hänsyn till skinfaktor uttryckas i ekvation (2). Där L_t är tunnelns längd och r_t dess radie. Djupet under grundvattenytan vilken tunneln är förlagd på betecknas med h_t . (Stille & Eriksson, 2005).

$$Q_t = \frac{2\pi * K * h_t * L_t}{\ln\left(\frac{2 * h_t}{r_t}\right) + \xi} \quad (2)$$

Bergets hydrauliska egenskaper går att beskriva på flera olika sätt; som ett homogent kontinuum, ett plant nätverk eller som ett kanalnätverk i sprickplanen (Gustafson, 2009).

2.2.1 Kontinuum-modell (3D)

För berg med någorlunda homogena egenskaper, som hållfasthet och konduktivitet, kan det vara rimligt att använda kontinuum-modellen för att beskriva de hydrauliska egenskaperna. Vilka egenskaper berget har beror på mineralsammansättning och uppkomst. I modellen ansätts ett effektivvärde för varje egenskap som gäller i alla punkter och riktningar. Vid användande av den här modellen kan grundvattenströmningen beskrivas med vanliga differentialekvationer med analytiska lösningar, vilket är anledningen till att denna modell oftast antas även om berget inte är homogent, speciellt vid utvärdering av hydrauliska tester (Gustafson, 2009).

För att göra modellen mer realistisk kan stokastiskt kontinuum appliceras. Bergmassan delas in i regelbundna delvolymmer där varje del tilldelas effektivvärden utifrån delvolymens ingående egenskaper. En svårighet med den här modellen är att avgöra hur indelningen ska ske samt hur modellerna ska relateras till de punkter i bergsvolymen med kända egenskaper (Gustafson, 2009).

2.2.2 Nätverk i ett plan (2D)

I verkligheten strömmar grundvattnet i ett nätverk av sprickor, som i stort sett är tvådimensionella. De utgörs i princip helt av plana strukturer vilket medför att grundvattnet måste flöda i sprickans plan. Flödet i en spricka kan med utgångspunkt i Darcy's lag uttryckas med ekvation (3), där flödet q_f är lika med den hydrauliska gradienten multiplicerat med transmissiviteten T (Gustafson, 2009).

$$q_f = -\frac{dh}{dl} * T \quad (3)$$

Med ett effektivvärde för sprickvidden b och transmissiviteten kan ett samband för sprickans hydrauliska konduktivitet K_f skrivas enligt ekvation (4) (Gustafson, 2009).

$$K_f = \frac{T}{b} \quad (4)$$

2.2.3 Kanalflöden (1D)

Grundvattnet färdas i bergmassans spricksystem, men i och med sprickviddernas variation är inte alla sprickor vattenförande. Grundvattnet kan därmed antas bara flöda i öppna kanaler. Till exempel kan öppna kanaler bildas då två sprickplan skär varandra. Flödet i en kanal Q_c kan beskrivas som i ekvation (5). Där C_c är kanalens konduktans, Δh är skillnad i grundvattennivå och Δl är flödeslängden (Gustafson, 2009).

$$Q_c = C_c * \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (5)$$

2.3 Hydrauliska testmetoder

Syftet med hydrauliska mätningar är att analysera bergets egenskaper. Information om dessa används sedan som grund för utformning av injekteringsmetod. För injektering är det av intresse att undersöka sprickornas vattentryck och konduktivitet. De metoder som främst används för att undersöka dessa egenskaper är tryckuppbyggnadstest, inflöde av vatten i borrhål och vattenförlustmätningar (Stille & Eriksson, 2005).

2.3.1 Tryckuppbyggnadstest

För att utvärdera transmissiviteten och grundvattentrycket görs ett tryckuppbyggnadstest. För att erhålla ett värde på vattentrycket registreras först trycket då vattnet rinner fritt ur ett borrhål. Därefter stängs en manschett och tryckhöjningen mäts som funktion av tiden. När hålet har stabiliserats kan vattentrycket noteras (Stille & Eriksson, 2005).

Det kan vara problematiskt att utvärdera transmissivitetsvärdet med traditionella vattenförlustmätningar då det kräver stationära förhållanden, det vill säga ett konstant flöde. För att uppnå ett konstant flöde skulle inpumpning av vatten behöva ske under lång tid, om det alls skulle vara möjligt att uppnå. Genom att utvärdera transmissiviteten utifrån värden på tryck mot tid, ett så kallat transient test, kringgås problemet (Stille & Eriksson, 2005). Utifrån värdena kan sedan transmissiviteten beräknas med Jacobs metod enligt ekvation (6) (Carlsson & Gustafson, 1997). Där $Q_{b,ut}$ är det fritt rinnande flödet ut ur borrhålet och Δs är lutningen som fås då tryckåterhämtning plottas mot tiden i ett halvlogaritmiskt diagram (Stille & Eriksson, 2005).

$$T = \frac{0,183 * Q_{b,ut}}{\Delta s} \quad (6)$$

2.3.2 Inflöde i borrhål

För att uppskatta bergets konduktivitet kan flödet av vatten i ett borrhål mätas. Det som normalt utvärderas med en enkel flödesmätning i ett borrhål är bergets konduktivitet, sprickornas vidd och en prognos av inflödet till färdig tunnel (Stille & Eriksson, 2005).

För att erhålla ett värde på bergets konduktivitet nyttjas Darcy's lag och antagande om kontinuumförhållanden, enligt ekvation (7), där $Q_{b,in}$ är inflödet i borrhålet, h är vattentrycket, r_b beskriver borrhålets radie och L_b representerar borrhålslängden. Ekvationen gäller för flöde i poröst material, i de fall konduktiviteten ska utvärderas för en enskild spricka fås ett annat flöde (Stille & Eriksson, 2005).

$$K = \frac{Q_{b,in} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_b}\right)}{2\pi \cdot h \cdot L_b} \approx \frac{Q_{b,in}}{h \cdot L_b} \quad (7)$$

Den individuella vidden för sprickorna kan uppskattas med ekvation (8). Dock skiljer sig den faktiska fysiska vidden, som varierar mellan olika punkter i sprickan, från den hydrauliska vidden b_{hyd} . Där μ_w är viskositeten för vatten, ρ är densiteten och g representerar tyngdaccelerationen (Stille & Eriksson, 2005).

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{\frac{Q_{b,in} \cdot 12 \cdot \mu_w}{h \cdot \rho \cdot g}} \quad (8)$$

En uppskattning av inflöde till färdigställd tunnel kan erhållas baserad på informationen om flödet i ett borrhål. Den kan även beräknas med exempelvis ekvation (2) för givna förutsättningar, i de fall då konduktiviteten för bergmassan är känd (Stille & Eriksson, 2005).

2.3.3 Vattenförlustmätning

En vattenförlustmätning kan liknas vid en injektering, men med vatten istället för bruk, och kan ge information om konduktivitet eller ett Lugeonvärde för berget. Målet med testet är att uppnå ett stabilt flöde vid ett specifikt tryck. Det finns dock begränsningar med vattenförlustmätning, bland annat visar den inte alltid ett korrekt samband till åtgången av bruk. Trots detta är det ett av de vanligaste proven som görs (Stille & Eriksson, 2005).

Begreppet Lugeonvärde är ett välkänt begrepp inom berginjektering och är därför vanligt att använda vid internationella redovisningar av vattenförlustmätningar. Värdet ger en uppskattning av bergets transmissivitet och definieras som flödet i liter per minut och bormeter vid övertrycket 1 MPa. Lugeonvärdet förväntas motsvara en konduktivitet på cirka $1,6 \cdot 10^{-7}$ m/s (Stille & Eriksson, 2005).

För en uppskattning av bergets konduktivitet kan ekvation (9) användas, vilken är härledd ur Thiems brunnsekvation (Stille & Eriksson, 2005). Thiems brunnsekvation utgår från stationära förhållanden som, trots att de är sällsynta i verkligheten, ger tillräckligt bra värden för flödet, Q (Carlsson & Gustafson, 1997; Stille & Eriksson, 2005). Värdet på K är approximativt och överskattat i och med antagandet om

stationära förhållanden. I ekvationen representerar $\Delta h_{\bar{o}}$ övertrycket, $L_{b,sektion}$ längden av den valda sektionen och d_b borrhålets diameter. (Stille & Eriksson, 2005).

$$K = \frac{Q}{2\pi\Delta h_{\bar{o}}*L_{b,sektion}} \left(1 + \ln \left(\frac{L_{b,sektion}}{d_b} \right) \right) \quad (9)$$

2.4 Det cementbaserade injekteringsbrukets egenskaper

Det cementbaserade bruket som används för injektering innehåller vatten, cement och eventuella tillsatser. Beroende på önskade egenskaper tillsätts olika tillsatsmedel, varav det vanligaste är flytmedel som bland annat minskar brukets viskositet. Detta är ofta fördelaktigt för att uppnå en tillräcklig bruksspridning i sprickor (Stille & Eriksson, 2005). Cement är ett väl beprövat material med kända egenskaper, låg kostnad (Eklund, 2006) och med en begränsad miljöpåverkan, vilket är anledningen till att det är det vanligaste förekommande injekteringsmedlet idag (Stille & Eriksson, 2005). Det pågår ett arbete med att ytterligare minska miljöpåverkan vid tillverkningen av cement, exempelvis genom att ersätta en del av cementen med restprodukter från tillverkningen av stål. På så sätt minskas koldioxidutsläppen (Swerock, 2019).

Beroende på förutsättningar i berget bestäms vilka egenskaper det cementbaserade bruket bör ha för att ett lyckat tätningresultat ska uppnås. För att testa brukets egenskaper och dess överensstämmelse med den tänkta utformningen utvärderas det utifrån en rad olika aspekter. Några av dessa är penetrationsförmåga och tidsberoende- och reologiska egenskaper (Stille & Eriksson, 2005).

2.4.1 Penetrationsförmåga vid tätning av sprickor

Penetrationsförmågan är förhållandet mellan sprickans öppning och storleken på cementkornen. Denna avgör hur väl ett bruk kan tränga in i en spricka och därmed minsta spricka som kan tätas. Längs med sprickan varierar dess vidd och de punkter som har den minsta vidden är de som är mest kritiska och viktigast att ta hänsyn till. Risken finns att partiklar flockuleras i dessa punkter och minskar flödet för att till slut hindra det helt. Ett minsta förhållande som bör finnas mellan öppningsvidd och kornstorlek är empiriskt funnet och anges ofta till 3. Cementkornens storlek har därmed en avgörande roll för inträngningen i sprickan, vilket under de senaste åren har lett till en utveckling av alternativa cementsorter att använda för injektering. Dessa cementsorter är mer finmalda och har då en mindre maximal kornstorlek, vilket möjliggör tätning av mindre sprickor. Med användandet av dessa uppkommer dock nya fenomen som måste tas hänsyn till, bland annat ställs högre krav på omrörning av bruket då det krävs att blandningen är väl dispergerad. Förhållandet mellan öppningsvidd och kornstorlek är också mer komplext för dessa cementsorter på grund av ökade interpartikulära krafter (Gustafson, 2009).

Utöver inverkan av cementkornens storlek påverkas brukets egenskaper av ytterligare parametrar. Dessa har sammanställts som: (Stille & Eriksson, 2005)

- Vattencementtalet (vct)
- Cementtyp
- Tillsatser

- Tryck
- Blandning – utrustning, tid och tillsättsordning
- Tid efter blandning

För injektering används ofta mikrocement, som är en finmald cement av särskilt passande klinkertyp. Denna är framtagen för att klara av krävande injekteringar. Med minskad kornstorlek i mikrocementen möjliggörs injektering i ännu finare sprickor, men med konsekvensen att partiklarna får en ökad elektrostatisk laddning (Cementa, 2019). Vid injektering kan detta leda till pluggbildning i sprickans öppning på grund av flockulering, vilket förhindrar brukets spridning i berget. Med tillsatts av dispergeringsmedel fås ett injekteringsbruk med förbättrad penetrationsförmåga, genom att medlets molekyler fäster på cementkornens yta och repellerar dem (Sika, 2015). Det dispergeringsmedel som använts i detta arbete är Sika iFlow-1.

Det finns flera sätt att testa ett bruks penetrationsförmåga. Svårigheten ligger i att hitta en anordning som på ett korrekt sätt representerar filteringsprocessen i en spricka. En anordning som är framtagen för detta syfte, men som fortfarande saknar en standardiserad provningsmetod, är filterpressen. Med hjälp av en tryckskillnad pressas bruket genom ett stålnät. Näten kommer i olika maskvidder, det vill säga med olika avstånd mellan trådarna. Tanken är att de olika näten ska representera olika sprickvidder. Det har diskuterats hur väl brukets penetrationsförmåga representeras av ett nät och jämförande tester har utförts med en spalt (Stille, 2015).

Baserat på tester av både spalt och nät har en generell modell för beskrivning av brukets penetrationsförmåga tagits fram. Parametrarna b_{\min} och b_{kritisk} beskriver brukets penetrationsförmåga och definierar ett intervall där filtrering av bruken sker. I en öppning med värde som understiger b_{\min} bildas en plugg direkt och inget bruk kan passera. Då värdet överstiger b_{kritisk} passerar bruket utan pluggbildning. För värden mellan de två definierade parametrarna kan en viss volym av bruk passera. Andra metoder som kan användas för utvärdering av penetrationsförmåga är filterpump, NES-metoden eller sandkolonnmätningar (Stille, 2015).

2.4.2 Tidsberoende egenskaper

Tiden är en viktig faktor som har en stor inverkan på brukets egenskaper. Direkt efter blandning inleds reaktioner mellan de ingående materialen i bruket, som slutligen kommer att resultera i en hård produkt. Brukets egenskaper kommer att ha förändrats från det att bruket har blandats till dess att injekteringen är klar. De faktorer som påverkar egenskapernas förändring starkast är cementtyp, specifik yta, vct, temperatur och tillsatser. Till följd av detta går det inte generellt att säga hur ett bruks egenskaper kommer att se ut, utan detta måste tas reda på genom mätning (Stille & Eriksson, 2005).

2.4.3 Reologiska egenskaper

Brukets flytförmåga skiljer sig från den hos vatten. Vatten klassas som en newtonisk vätska, vilket innebär att dess viskositet inte förändras över tid eller med hastighetsförändringar. Flytförmågan för ett cementbaserat bruk beskrivs vanligen genom dess reologiska egenskaper, där dessa främst karakteriseras av att en viss tryckgradient krävs för att bruket ska flyta samt att en viss övre fysikalisk gräns begränsar hur långt bruket kan flöda, givet ett visst tryck och en viss sprickvidd. Bruket

är också vad som kallas tixotropi vilket innebär att blandning är nödvändig för att bruket ska bibehålla sina flytegenskaper (Stille & Eriksson, 2005). I och med dessa egenskaper klassas bruket som en Binghamvätska (Pumpportalen, 2019) och strömnings-egenskaper, såsom flytgräns och viskositet, kan beskrivas med Bingham-modellen (Eklund, 2006).

För att kunna styra brukets reologiska egenskaper och därmed också erhålla en bättre spridningsförmåga i bergets spricksystem kan dispergeringsmedel tillsättas. På så sätt regleras flytgränsspänningen och viskositeten så att en specifik reologi erhålls (Sika, 2012).

2.4.4 Separation och krympning

Till följd av brukets tixotropiska egenskaper kan det noteras en minskning av volymen om blandningen tillåts stå orörd under en viss tid. Orsaken bakom minskningen är separation eller krympning. Separation uppkommer som en konsekvens av att cementpartiklarna sedimenteras och av att provet konsolideras. Beroende på mängden vatten i provet kan krympning ske, vilket innebär att vatten binds i hydrationsen (Stille & Eriksson, 2005).

Separation och krympning är två välkända fenomen som är väl studerade, dock i sammanhang närmast anslutna till betonggjutning. Vad effekten av dessa blir för injektering är därför mindre känt. Enligt allmän uppfattning kan det innebära att en spalt i sprickan lämnas otätad i vilken vatten kan flöda fritt och därmed erhålls ett något sämre tätningsresultat (Stille & Eriksson, 2005).

I vissa fall rekommenderas att separationsstabila bruk bör användas. Separationsstabila bruk definieras som bruk som efter 2 timmar uppvisar en separation på maximalt 5% enligt ISRM, International Society for Rock Mechanics, och 2% enligt svensk standard. Förfarandet av denna mätning är dock framtagen för betongindustrin vilket gör att den bör tillämpas med viss skepsis i injekteringssammanhang (Stille & Eriksson, 2005).

2.4.5 Hållfasthetstillväxt och bindetid

Ytterligare en aspekt som utvärderas för bruket är hållfasthet. Härdningen och hållfasthetstillväxtens karaktär är en förutsättning för att bruket ska kunna användas som tätningsmedel. Vanligen anses hållfasthetstillväxt utgöras av två faser. Gelningsfasen inträder först varvid det mellan partiklarna skapas en svag bindning. I den andra fasen inleds härdning då hydrationsprodukterna kommer i kontakt. När bruket fortfarande befinner sig i gelningsfasen är det känsligt för störningar i form av exempelvis borring eller sprängning. Kännedom om hållfasthetstillväxtens tidsförlopp är därför avgörande för att ett bra injekteringsresultat ska kunna erhållas. Med kunskap om bindetidsutvecklingen kan en tid bestämmas för när arbeten som riskerar att orsaka störningar tidigast får påbörjas. De mest betydelsefulla faktorerna som påverkar tidsförloppet av hållfasthetstillväxten anses vara cementtyp, accelererande tillsatsmedel, retarderande typer av flytmedel, vct och temperatur. För att definiera hållfasthetstillväxten används vanligen begreppet bindetid, som beskriver den tidpunkt då härdnandefasen inleds (Eriksson & Stille, 2005). Genom att tillsätta en bindetidsaccelerator kan bindetiden anpassas utan att filtrerings-egenskaperna för

bruket kompromissas (Sika, 2012). Den accelerator som främst använts i detta arbete är Sika iAcc-1.

2.5 Metoder för designval

Injektering som metod har använts i många år, men trots det uppstår ofta problem. Detta beror dels på svårigheterna att förutse ett bergs karaktär och dels på att kraven gällande täthet har ökat (Eriksson & Stille, 2005). För att åstadkomma en strukturerad metod för injektering tillämpas den så kallade observationsmetoden. Den används när det är svårt att förutse förutsättningarna i ett berg och den omkringliggande marken. Metoden innebär att ett designförslag för injektering tas fram grundad på de mest sannolika förutsättningarna. Ofta förekommer variationer i bergets egenskaper, därför tas även kompletterande designförslag fram för avvikande förhållanden. Under projektets gång observeras parametrar, vilka antingen verifierar designvalet eller motiverar till justering. Metoden är antagen som europeisk standard för geoteknisk design och finns med i Euro Code. Den har främst använts för design av stabiliserande åtgärder i berg, men är också passande att använda för injektering trots att den ännu inte är definierad för detta ändamål (Fransson, Gustafson, Hernqvist och Kvartsberg, 2012).

Det finns även andra metoder som används vid tätning av tunnlar. Dessa kan bland annat vara att planen för injektering designas utifrån erfarenhet från liknande projekt eller att det tas fram en färdig plan för injekteringen innan byggandet påbörjas baserat på beräkningar (Kvartsberg, 2013).

2.6 Krav och stoppvillkor för injektering

När injektering används som tätningsmetod ansätts krav och stoppkriterier för injekteringen. Krav ansätts så att tillräcklig tätning ska uppnås och brukar vanligen anges som en gräns för maximalt inflöde av vatten, L/min, per 100 meter tunnel. Stoppkriterier kan vara i olika form, exempelvis tryck- eller flödesvillkor. Dessa bestäms med utgångspunkt i bergmassans egenskaper och utifrån ett givet bruk. Förutom tekniska krav på tätning finns en ekonomisk vinst i att inte injektera mer än nödvändigt (Eriksson & Stille, 2005).

När ett på förhand bestämt flöde varit konstant under en given tid kan injekteringen avslutas, detta är då ett flödesvillkor. Detta villkor styr till stor del hur lång tid injekteringen tar och till viss del hur stor volym som injekteras. Tryckvillkor ansätts som ett specifikt tryck som ska hållas under en viss tid. Tryckvillkoret påverkar injekteringsförloppet, men kan även påverka bergets spricksystem. Högt injekteringstryck kan leda till att fina sprickor vidgas och därmed görs injekterbara, samtidigt som risken för inducering av nya sprickor ökar och därmed också risken för en försämring av bergets hållfasthet. Fenomenet som leder till spricksystemets förändring i berget till följd av högt injekteringstryck är känt som jacking. Vid injektering i större sprickor kan bruket spridas längre än nödvändigt, då kan en gräns sättas för mängden bruk som injekteras (Eriksson & Stille, 2005).

Injekteringstrycket är en grundläggande parameter som används för att fastställa stoppkriterier. Hastigheten av brukets spridning beror på det effektiva injekteringstrycket; injekteringstrycket minus grundvattentrycket. Injekteringen är klar då brukets spridning i den minsta spricka som behöver tätas har uppnått ett visst målvärde eller då

spridningen i den största sprickan som behöver tätas når ett visst maximumvärde. Målvärdet är relaterat till det maximala avståndet mellan borrhålen och bör ansättas på ett sådant sätt att inget hål för vattenflöde kan uppstå mellan två injekterade hål. Värdena som bestäms kan sedan översättas till ett maximalt godtagbart flöde av inläckage eller till en maximal volym injekterat bruk (Stille, 2015).

2.7 Särskilda problem

Vid design av injektering i berg måste det undersökas vilka förutsättningar som finns och vilka risker som föreligger. Det finns ett flertal fenomen som behöver beaktas och som kan inverka negativt på slutresultatet om de inte tas hänsyn till i dimensioneringen. Till exempel kan ett sämre tätningsresultat eller ett utdraget injekteringsförlopp erhållas. Några av dessa fenomen är fingering, jacking, erosion av bruk eller fyllnadsmaterial i sprickor. Dessa måste tas hänsyn till och följas upp under injekteringsgången (Stille, 2015).

2.7.1 Fingering på grund av brukets egenskaper

En förutsättning för att en injektering ska bli lyckad är att viskositeten hos bruket övergår viskositeten hos det vatten som ska trängas undan. Om denna förutsättning inte är uppfylld kommer bruket inte klara av att ha en tät front mot vattnet. Detta leder till att små kanaler, likt fingrar, kan bildas i bruket som vattnet flödar genom, därav namnet. Om skillnaden i viskositet mellan materialen är tillräckligt hög föreligger ingen risk för fingering, även om förändring av sprickans vidd skulle ske (Stille, 2015).

Efter avslutad injektering lättas trycket från borrhålet. Minskningen av tryck är en långsam process och det kan ta timmar innan överskottstrycket skapat under injekteringen försvinner helt. Under tiden som trycket långsamt sjunker är det viktigt att bruket hinner bygga upp en hållfasthet. När trycket har minskat så att grundvattentrycket är högre kommer fenomenet med fingering att inträffa om inte brukets hållfasthetstillväxt har varit tillräcklig (Stille, 2015).

2.7.2 Jacking till följd av högt injekteringstryck

För att bruket ska kunna spridas i sprickorna måste trycket med vilken injektering sker överstiga grundvattentrycket. Ett högre injekteringstryck sprider bruket med en högre hastighet, men kan också leda till en förändring i bergets inre spänningar, vilket kan resultera i vidgning av sprickorna. Detta ger som konsekvens ett injekteringsförlopp med okontrollerad spridning av bruk, svårigheter att upprätthålla rätt tryck och begränsad tätning av sprickor, detta fenomen benämns jacking. Det finns rekommenderade värden för maximalt injekteringstryck, bland annat av Weaver (1991), där viktiga faktorer är bergets kvalitet och djupet där injekteringen ska ske (Stille, 2015).

2.7.3 Erosion av bruk

Erosion av injekteringsbruk kan inträffa både under injektering och efter att den är avslutad. Injektering i flödande vatten leder alltid till en ökad risk av att injekteringsbruket eroderar innan det har härdat. Flödet av vatten är koncentrerat vid injekteringsbrukets front där en skjuvspänning uppstår på brukets frontyta. Om

spänningen överskrider brukets hållfasthet kommer erosion av bruket att inledas genom att partiklar av bruket transporteras bort med vattnet. Vid höga Reynolds tal och ett icke laminärt vattenflöde ökar risken för erosion av bruket (Stille, 2015).

Vid injektering av tunnlar kan ett överlapp av de tätade skärmarna eliminera risken för erosion av bruk under tiden injektering pågår. En annan viktig faktor som påverkar risken är ordningen för hur injekteringen utförs. Erosion av fyllnadsmaterial är också en risk att ta hänsyn till. Vatten som flödar i naturliga sprickor kan resultera i erosion av lera och silt (Stille, 2015).

Efter att injektering är avslutad, men innan bruket har härdat, kan en invärtes erosion av bruket ske, detta till följd av flödande vatten i otätade sprickor. Sprickornas storlek och vidd kan variera stort i längdriktningen och detta innebär en begränsning av minsta öppningsvidd som är möjlig att täta. Vidare innebär det att finare sprickor lämnas otätade vilket möjliggör fri passage för vattnets flöde, vilket orsakar en invärtes erosion av bruket. För tunnlar belagda på större djup med stora gradienter kan denna typ av erosion vara ett problem. Längre överlapp av de tätade skärmarna och tjockare injekteringsbruk kan vara nödvändigt. Snabbhärdande injekteringsbruk kan också reducera de negativa effekterna (Stille, 2015). Idag finns att tillgå accelerator, ett tillsatsmedel med syfte att påskynda härdningsprocessen och med detta reduceras risker av den här typen (Stille, 2015).

2.7.4 Pluggbildning

Ett ytterligare fenomen att ha i åtanke vid dimensionering av injektering är förhållandet mellan de ingående partiklarnas maximala kornstorlek i bruket och sprickornas öppningsvidd. För ett cementbaserat bruk bör den maximala kornstorleken inte vara större än en tredjedel av sprickans öppningsvidd för att undvika pluggbildning i öppningen som förhindrar inträngning i sprickan. Detta gör att sprickan förblir otätad och fri för vatten att flöda genom. Numer finns dock mer finmalda alternativ till de klassiska cementsorterna, som tillsammans med flyttillsatser möjliggör tätning av finare sprickor (Stille, 2015).

3 Utvärderade måtenheter

I fortsättningen av denna rapport benämns den ursprungliga filterpressen som referenspressen och den nya versionen som Sikapressen.

Sikapressen har utformats med tanken att avhjälpa de problem som finns med referenspressen, som företaget använder sig av idag. Några av problemen med den äldre versionen är att den står instabilt, det går endast att genomföra prov för en filterstorlek åt gången samt att den är svår att rengöra. Referenspressen började användas 2016 i och med byggstarten av Förbifart Stockholm, ett projekt där en stor del av vägsträckan kommer att gå i tunnel.

3.1 Referenspressen

Vid utvecklingen av Sikapressen har fokus legat på att åtgärda de brister avseende effektivitet och användarvänlighet som finns med referenspressen. En brist som har identifierats är att den är svår att rengöra, vilket dels beror på att öppningen till behållaren är för liten och dels att den inte är delbar. Då även små rester av bruk kan ha en stor inverkan på resultaten krävs en mycket noggrann rengöring mellan varje provning. Ett annat problem är att filtren ibland skjuter, det vill säga glider ur position i filterhållaren, och allt bruk trycks ut genom ventilen och provet måste därmed göras om. Detta är ett tidsödande problem som kräver att vissa av förberedelserna måste göras om, till exempel måste filtret bytas ut och mer bruk måste eventuellt tillsättas till behållaren. Det går dessutom bara att förbereda test för en filterstorlek åt gången. För en blandning testas normalt fem till sex stycken olika filterstorlekar, vilket gör att det tar längre tid att utföra provet då det krävs en viss tid för byte av filter. En viss problematik fås också av att bruket börjar sedimentera i tanken innan testet hinner genomföras. Detta är ett problem då botten av tanken är konformad och det bruk som används för provningen tappas längst ner i tanken där sedimentet samlas. Konsekvenser av detta kan bli missvisande resultat då sedimentet kan inverka på det testade brukets egenskaper. Referenspressen får även försämrade ergonomiska förutsättningar då dess design gör att den står instabilt och dessutom är ventilen för bruket placerad rakt under behållaren vilket ger en sämre arbetsmiljö, se figur 9.1.



Figur 9.1: Referenspressen. Författarnas egen bild.

3.2 Sikapressen

I en filterpress används finmaskiga metallfilter som en representation för bergsprickors öppningsvidder. Filtrens maskvidder som vanligen är av intresse att undersöka är; 45, 63, 75, 90, 100 och 120 μm . Till skillnad från referenspressen finns det i Sikapressen möjlighet att förbereda provning för dessa sex vanligaste filterstorlekar, se figur 9.2.



Figur 9.2: Skillnader mellan filterpressarnas design och antal ventiler. Författarnas egen bild.

Att ha möjlighet att utföra prover på penetrationsförmåga på plats för projektet är fördelaktigt då brukets egenskaper varierar kraftigt med de rådande förhållandena. Parametrar såsom temperatur, typ av blandare och tid mellan blandning och injektering har stor påverkan på brukets beteende. Sikapressen är därför utformad så att den ska kunna transporteras mellan olika platser på ett bra sätt. Den är delbar i fler delar än referenspressen dels för att underlätta hantering, men även för att underlätta rengöring, se bilaga A.

Sikapressen består av en cylinderformad behållare, som med hjälp av en klämkoppling med gummitätning monteras ovanpå en bottendel varifrån det går sex stycken rör, se figur 9.3. Dessa är monterade med en vinkel på 60° från horisontalplanet dels för att synliggöra ventilerna, på så sätt görs filterpressen mer ergonomisk att arbeta med, och dels för att det ska finnas plats för sex stycken mätglas. För att säkerställa att provets förutsättningar är riktiga har rörens kant höjts upp för att eventuellt sediment inte ska inverka på provets resultat. På rören monteras kulventiler som låses fast med excenterlås. Nederst på ventilerna skruvas filterhållaren på, vari filter med olika maskvidder placeras.



Figur 9.3: Insida bottendel av behållare. Hålet i mitten är kvar från tidigare designversion och utgör numer ingen funktion mer än för stödbenets låsning. Författarnas egen bild.

Till sist monteras ovan delen av filterpressen, också med excenterlås, varpå tryckmätare, säkerhetsventil inställd på 2 bar och avtappningsventil för justering av drifttryck är placerade, figur 9.4. Det är viktigt att mätutrustningen är helt tät då provet drivs av tryckskillnaden.



Figur 9.4: Sikapressen. Författarnas egen bild.

3.2.1 Modifikationer som gjorts under testfasen

För att ytterligare öka användarvänligheten av Sikapressen har vissa modifikationer gjorts efter att den tagits i bruk. Exempelvis har låsningen för ovandelen av filterpressens behållare fått en förlängd hävarm för att underlätta låsning. En annan modifikation som gjorts är byte av kulventiler i rören vid filterhållarna. Allt eftersom provning av bruk fortgick blev det allt svårare att öppna och stänga dem. Detta berodde förmodligen på kvarvarande rester av cementbruk i ventilerna. Kulventilerna byttes därför ut till en variant med längre hävarm, se figur 9.5. Det krävs dock fortfarande en mycket noggrann rengöring av ventilerna mellan användningarna för att förhindra att problemet uppstår.



Figur 9.5: Före och efter byte av kulventiler. Författarnas egen bild.

För referenspressen var ett problem att filtren ibland gled ur position vilket ledde till att provet fick göras om. För att minska risken för detta blåstrades filterhållarna för Sikapressen, se figur 9.6, i syfte att öka friktionen mellan filter och filterhållare.



Figur 9.6: Före och efter blåstring av filterhållare. Författarnas egen bild.

3.3 Filterpump

Med en filterpump kan en enkel kontroll göras över en förväntad penetrationsförmåga för ett bruk. Filterpumpen är utformad som en avlång cylinder i vilken bruk sugts upp genom ett filter, se figur 10.1. Filtret är placerat i änden där bruket sugts upp och har en specifik maskvidd vald beroende på förväntad penetrationsförmåga. Bruket sugts upp lugnt och konstant under cirka 15 sekunder eller tills dess att pumpen är full. Därefter registreras volymen bruk som har sugits upp i pumpen. Full inträngning i sprickan anses fås om 300 ml bruk passerar filtret. Detta är en förhållandevis liten volym jämfört med filterpressen där full inträngning förväntas vid den maximala volymen om 1000 ml. Fördelar med filterpumpen är att det vakuum som gör att bruket sugts upp i pumpen skapas genom att dra i handtaget, se figur 10.1. Det behövs därmed ingen kompressor eller ström för provet. Detta gör filterpumpen till en enkel provningsmetod som ofta används för kontinuerliga kontroller av bruket under projektets gång (Eriksson & Stille, 2005). Detta kan dock leda till att trycket varierar mellan de olika provningarna (Draganović, 2007). En annan nackdel med filterpumpen är att rengöring endast görs genom att vatten sugts upp i den. Det går därmed visuellt inte att se om den är ordentligt rengjord eller om det finns några kvarvarande rester av bruk i den.



Figur 10.1: Filterpump. Författarnas egen bild.

4 Metod

För att jämföra de olika enheterna har 11 olika provningar genomförts. Samma bruk och filtertyp har testats för Sikapressen, referenspressen och filterpumpen. Filtren är anpassade för engångsanvändning och byts ut efter avslutat prov. Resultaten har noterats för att sedan analyseras och utvärderas. Blandningen och provningen av bruk 1-10 genomfördes tillsammans med representanter från Sika i samband med att de utförde tester för nya infraprojekt samt testade nya typer av tillsatsmedel och cement. Provning 11 genomfördes av oss själva i syfte att ge ett större underlag till jämförelsen mellan de olika provningsenheterna.

4.1 Blandning av bruk

Proverna utfördes i en rumstemperatur på 20° C. En mängd vatten, med temperaturen 15°C, mättes upp enligt recept i en ren behållare. Cement tillsattes under en minut under blandning med en lågvarvig omrörare. Vct var 0,8 för samtliga bruk som innefattades i testerna.

Därefter tillsattes tillsatsmedel i de fall det var aktuellt. I de fall både dispergeringsmedel och bindetidsaccelerator ingick tillsattes dispergeringsmedel först och efter 30 sekunder tillsattes accelerator. Injekterings-bruket dispergerades sedan under två minuter med en dispergeringsutrustning av sorten DESOI PowerMIX AKM-70. Brukens sammansättning presenteras i detalj i resultatet för att underlätta jämförelser.

Provet påbörjades direkt efter avslutad dispergering, då injekteringsbrukets filteregenskaper är starkt beroende av tiden mellan blandning och provning. Tester utfördes för referenspressen, filterpumpen och Sikapressen samtidigt, detta för att förutsättningarna för de tre proverna skulle vara så lika som möjligt. I och med att cementblandningarna är tixotropiska ändras flytgränsen efter avslutad dispergering. Även densitet, viskositet och vattenseparation förändras. Resultaten noterades och presenteras i tabeller.

4.2 Provning med filterpress

Efter att filterpressen var monterad kunde provningsprocessen påbörjas. Trycket i behållaren kan varieras och ligger vanligen strax över 1 bar. För proven som genomfördes i samband med arbetet användes trycket 1,1-1,2 bar.

Metod för provning med Sikapressen:

- Bruk tillsattes behållaren
- Ovandelen låstes fast
- Filterpressen trycksattes med hjälp av kompressor
- Mätglas med maxvolymen 1000 ml placerades under ventilerna

Därefter påbörjades provet.

- Ventilen för den minsta filterstorleken öppnades och bruk pressades ut i mätglaset
- Ventilen stängdes igen och trycket justerades åter till 1,1-1,2 bar

- Ventilen för nästa filterstorlek öppnades och proceduren upprepades för alla filterstorlekar som testades
- Volymen bruk som trycktes ut ur respektive filterstorlek lästes av på respektive mätglas och noterades

Det är viktigt med noggrann rengöring av all utrustning mellan provtagningarna. Vid rengöring öppnades kulventilerna och ovandelen av filterpressen kopplades loss. Insidan av filterpressen sköljdes rent med vatten, liksom samtliga filterhållare. Innan nästa provning kunde genomföras torkades insidan för att vattnet från rengöringen inte skulle påverka bruket i nästa provning.

Provningen för referenspressen utfördes på samma sätt med skillnaden att filterhållarna fick bytas mellan varje prov.

4.3 Provning med filterpump

Vid användandet av filterpumpen är det viktigt att dra med ett jämnt tryck under hela mätningen för att få ett bra resultat. Det är också av vikt att dra med samma tryck under samtliga provningar, för att de olika resultaten inte ska baseras på olika tryck. Filterpumpen används för en filterstorlek åt gången.

Vid provning fästes ett filter i filterhållaren som sedan skruvades på filterpumpens ände. Änden med filtret sänktes ned i en behållare med bruk. Genom att dra i handtaget tills det tog stopp, sögs bruket upp i pumpen. Bruket trycktes sedan ut i mätglas och volymen bruk som hade passerat filtret lästes av.

4.4 Provning av brukets egenskaper

Brukets färskas egenskaper; flytgräns, viskositet, densitet och vattenseparation, mättes på en del av bruket parallellt som genomförandet av testserierna fortgick. Dessa tester genomfördes av medarbetare på Sika. Flytgräns och viskositet mättes med hjälp av en reometer och densiteten genom mud-balance, en typ av balansvåg. Vattenseparationen för de olika bruken mättes efter 2 timmar i 500 ml mätglas.

En reometer av typen Brookfield LVDV2T användes för att mäta brukets viskositet och flytgräns. Utifrån brukets reologiska egenskaper valdes en spindel, som är en roterande axel. Viskositeten är proportionell mot spindelns roterande hastighet, som är relaterat till spindelns storlek och form. Spindelns monterades på reometern och sänktes ned i en bägare med det bruk som skulle testas. Därefter startades provet och värdet för brukets viskositet och flytgräns visades i tabell när testet var klart (Brookfield, u.å.).

För att bestämma brukets densitet användes mud balance. Den består av en graderad stång där det i ena änden sitter en behållare med lock som har en viss volym. Denna fylldes med bruk. På stången finns ett vattenpass och en vikt justerbar i stångens längdriktning. Denna förflyttades tills dess att vattenpasset visade att den var horisontell. Densiteten avlästes på den graderade stången vid viktens placering (Stille & Vuorinen, 2010) (Humboldt, 2019).

4.5 Testserier

I den första testserien provades fyra stycken bruk för ett större tunnelprojekt i Stockholm. I blandning 1 testades bruket utan något tillsatsmedel, se tabell 11.1. Blandning 2 och 3 testades med dispergeringsmedel respektive bindetidsaccelerator. I blandning 4 tillsattes båda typer av tillsatsmedel. Bruken baserades på cementtypen Injektering 30, Inj30, som är en typ av finmald cement som är framtagen för just injektering. 95 % av materialet har en kornstorlek på mindre än 30 μm , (Cementa, u.å.). För samtliga tester utfördes provning av enheterna parallellt med varandra för att bruksåldern för respektive filterstorlek skulle vara densamma.

Tabell 11.1: Sammansättning för testserie 1.

Testserie 1				
Blandning	1	2	3	4
Cement	Inj30	Inj30	Inj30	Inj30
Dispergeringsmedel		x		x
Accelerator			x	x

För blandning 5 och 6 gjordes tester med syfte att testa en ny typ av accelerator. Den testades med och utan dispergeringsmedel, tabell 11.2.

Tabell 11.2: Sammansättning för testserie 2.

Testserie 2		
Blandning	5	6
Cement	Inj30	Inj30
Dispergeringsmedel		x
Accelerator	x	x

För bruk 7 till 10 testades två andra typer av cement för att utvärdera om detta inverkar på resultatskillnaden mellan de två filterpressarna. Dessa bruk testades inte för någon accelerator, utan endast med och utan dispergeringsmedel, tabell 11.3. Vid dessa provningar noterades det redan vid blandning av bruken att de skiljde sig från de bruk som baserats på Injektering 30.

Tabell 11.3: Sammansättning för testserie 3.

Testserie 3				
Blandning	7	8	9	10
Cement	cement 1	cement 1	cement 2	cement 2
Dispergeringsmedel		x		x
Accelerator				

Bruk 11 testades med syfte att få jämförbara resultat till bruk 2, som har samma bruksammansättning, tabell 11.4.

Tabell 11.4: Sammansättning för testserie 4.

Testserie 4	
Blandning	11
Cement	Inj30
Dispergeringsmedel	x
Accelerator	

5 Resultat

Provningarna genomfördes under våren 2019 i Sikas betonglaboratorium i Stockholm. De resultat som erhöles under provningarna presenteras i tabeller och diagram i detta kapitel.

Då filterpumpen, för en viss filterstorlek, släppte igenom en så liten mängd bruk att den inte var avläsbar i mätglaset, testades inte alltid den filterstorleken för de övriga provningsenheterna. Enligt empiri beror detta på att även de andra enheterna kommer släppa igenom en omätbar volym bruk i de fall filterpumpen gör det. Bruket anses då ha en för dålig penetrationsförmåga för den filterstorleken. Gränsen för när det var möjligt att läsa av mängden bruk låg vid cirka 10 ml.

I de fall en filterpress släppte igenom maximal mängd bruk för en viss filterstorlek, testades inte den mätenheten för några större maskvidder. Detta eftersom de också skulle släppa igenom maximal mängd bruk. Filterpumpen testades dock för samtliga filterstorlekar.

5.1 Testserie 1

I den första testserien genomfördes provning av fyra olika bruk, samtliga baserade på Injektering 30. För bruk 1 tillsattes inga tillsatsmedel, utan bruket bestod endast av cement och vatten. I tabell 12.1 redovisas brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden. Enligt denna ligger vattenseparationen på 4 %, vilket är inom det intervall som anses acceptabelt för ett injekteringsbruk.

Tabell 12.1: Sammansättning, egenskaper och gränsvärden för bruk 1.

Bruk 1									
Brukssammansättning		Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet
Cement	Vct	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet
Inj30	0,8	< 45 µm	≤ 90 µm	< 63 µm	≤ 90 µm	37,6 mPa*s	5,1 Pa	4%	1620 kg/m ³

Som kan ses i tabell 12.2 testades bruket i filterpressarna för filterstorlekarna från 63 µm till 90 µm. Filterpumpen släppte igenom en mycket liten mängd bruk för maskvidd 45 µm och därför testades inte de andra mätenheterna för den vidden. Inga tester genomfördes heller för filterstorlekarna 100 µm och 120 µm då maximal volym passerat bruk, 1000 ml, uppnåddes redan vid filterstorleken 90 µm.

Tabell 12.2: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 1						
Filterstorlek [µm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		5	300	1000		
Sikapress [ml]		10	350	1000		
Filterpump [ml]	5	35	270	300	300	300

I diagram 12.1 visas sambandet mellan de tre olika mätenheterna för bruk 1. Resultatet presenteras som procentandel passerat bruk för respektive mätenhet. Från diagrammet observeras att filterpressarnas resultat följer varandra väl.

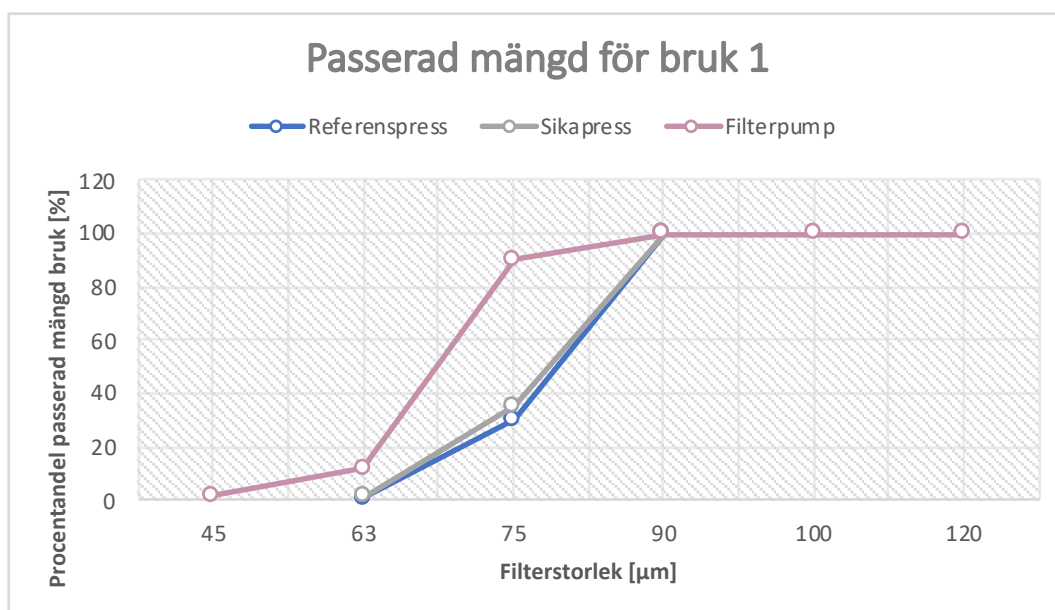


Diagram 12.1: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

För bruk 2 var viskositeten och flytgränsen avsevärt lägre än för bruk 1, se tabell 12.3. Det beror på tillsats av dispergeringsmedel, Sika iFlow-1, som minskar den interna friktionen i vätskan och därmed ändras brukets reologiska egenskaper. Detta är önskvärt då ett mer lättflytande bruk möjliggör en bättre bruksspridning i sprickor. Mängden tillsatsmedel presenteras i bwoc, vilket står för by weight of cement och innebär att mängden tillsatsmedel uppmäts i viktprocent av mängden cement i blandningen.

Tabell 12.3: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden för bruk 1.

Bruk 2										
Bruksammansättning			Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet
Cement	Vct	Dispergeringsmedel	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet
Inj30	0,8	0,3 % bwoc	< 45 µm	≤ 75 µm	< 63 µm	≤ 90 µm	8,6 mPa*s	0,7 Pa	4%	1600 kg/m ³

Samtliga tre provningsenheter uppvisade en bättre penetrationsförmåga, det vill säga en ökad volym bruk passerade filtren, efter tillsats av dispergeringsmedel, se tabell 12.4. Att enheterna släppte igenom en större mängd bruk tyder på bättre inträngning i fina sprickor för bruk 2.

Tabell 12.4: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 2						
Filterstorlek [µm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		40	550	1000		
Sikapress [ml]	10	100	550	1000		
Filterpump [ml]	4	40	300	300	300	300

För bruk 2, diagram 12.2, syns liknande skillnader mellan pressarna som för bruk 1, där Sikapressen påvisade en bättre penetrationsförmåga för de finmaskiga filtren. För filterstorlek 75 µm och större följer testvärden för filterpressarna varandra väl. Skillnaderna som beror på tillsats av dispergeringsmedel ses i diagrammet bli procentuellt större för filterpressarna än för filterpumpen.

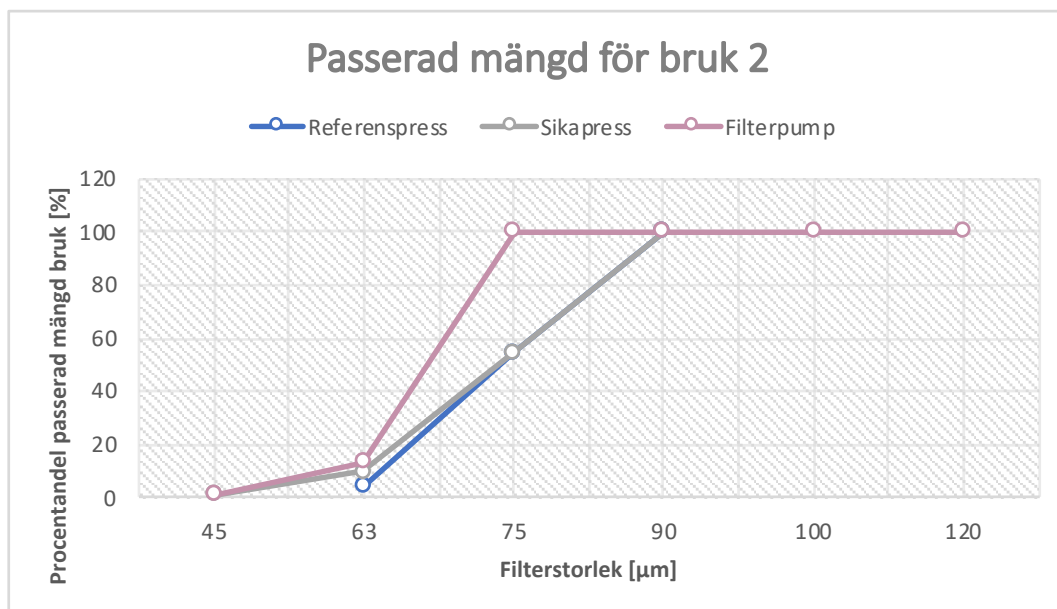


Diagram 12.2: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

För bruk 3, tabell 12.5, tillsattes en bindetidsaccelerator, Sika iAcc-1, som reglerar brukets bindetid. Tillsats av bindetidsaccelerator påskyndar hållfasthetstillväxten för bruket och detta utfördes för att testa ytterligare en brukssammansättning avseende skillnad mellan provningsenheterna. Vattenseparationen för provet var låg.

Tabell 12.5: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden för bruk 1.

Bruk 3											
Brukssammansättning			Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet	
Cement	Vct	Accelerator	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet	
Inj30	0,8	4 % bwoc	< 45 µm	≤ 75 µm	< 63 µm	≤ 90 µm	66,1 mPa*s	5,3 Pa	0%	1610 kg/m ³	

En viss sänkning i passerad volym bruk för de finare maskvidderna kan ses, tabell 12.6, jämfört med bruk 2, vilket kan bero på en snabbare hållfasthetstillväxt. Mängden passerat bruk för de större vidderna är nästintill identisk med bruk 2.

Tabell 12.6: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 3						
Filterstorlek [µm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		40	570	1000		
Sikapress [ml]		10	550	1000		
Filterpump [ml]	3	25	300	300	300	300

Sambandet mellan procentandelen genomsläppt bruk för respektive provningsenhet redovisas i diagram 12.3.

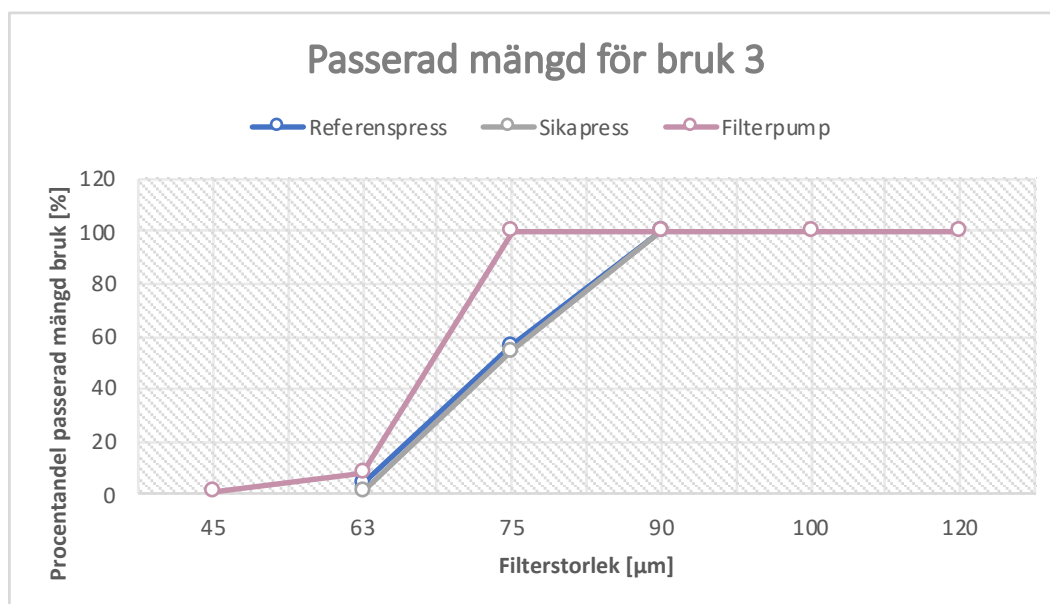


Diagram 12.3: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

För bruk 4, tabell 12.7, tillsattes både dispergeringsmedel och bindetidsaccelerator.

Tabell 12.7: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden för bruk 1.

Bruk 4											
Brukssammansättning				Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet
Cement	Vct	Dispergeringsmedel	Accelerator	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet
Inj30	0,8	0,3 % bwoc	4 % bwoc	< 45 μm	$\leq 75 \mu\text{m}$	< 63 μm	$\leq 90 \mu\text{m}$	8,8 mPa*s	2 Pa	0%	1600 kg/m ³

I och med tillsats av de båda tillsatsmedlen för bruk 4 erhöles vid provning en snabbare hållfasthetstillväxt, utan att penetrationsförmågan av bruket kompromissades, tabell 12.8. För bruk 4 syntes en tydlig ökning i mängden passerat bruk, jämfört med de tidigare bruken i testserien, se bilaga B. Bruk 4 visade på bättre penetrationsförmåga än bruk 2, trots att de tillsattes en lika stor mängd dispergeringsmedel, hade lika låg viskositet och trots att bruk 4 innehöll bindetidsaccelerator. I projekt är det praxis att använda båda typer av tillsatsmedel i kombination med varandra, då bindetidsacceleratoren, i teorin, försämrar penetrationsförmågan medan dispergeringsmedel förbättrar den.

Tabell 12.8: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 4						
Filterstorlek [μm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		80	680	1000		
Sikapress [ml]		100	600	1000		
Filterpump [ml]	3	35	300	300	300	300

De båda pressarna ger snarlika resultat för bruket, diagram 12.4, referenspressen visar dock på en något bättre penetrationsförmåga.

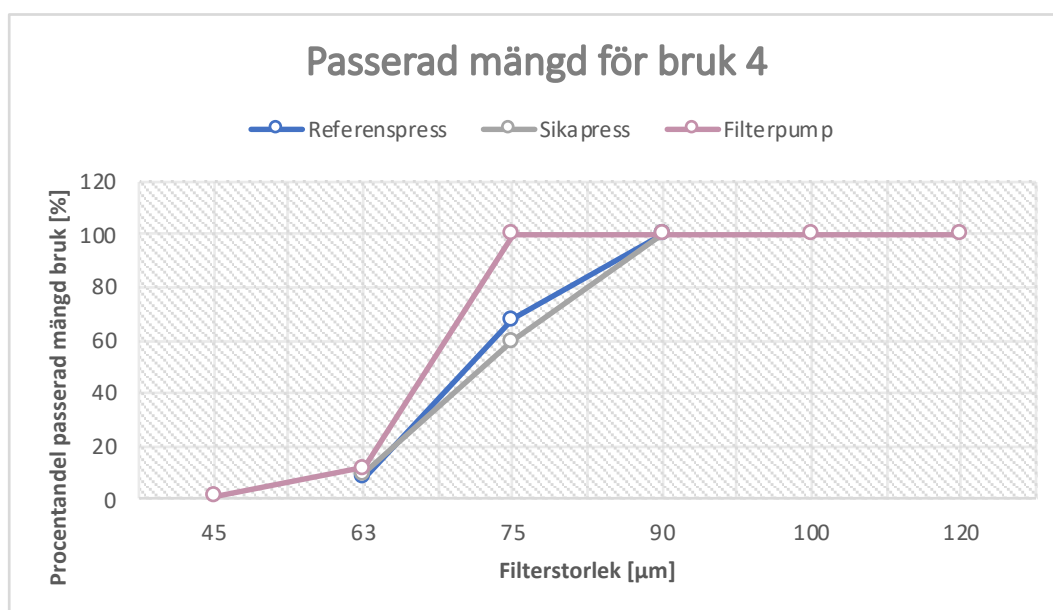


Diagram 12.4: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

5.2 Testserie 2

Provnings 5 och 6 syftar till att testa en annan accelerator för att se vad den har för inverkan på bruksegenskaperna. Sammansättningen för bruk 5 redovisas i tabell 12.9.

Tabell 12.9: Brukets sammansättning.

Bruk 5		
Brukssammansättning		
Cement	Vct	Accelerator
Inj30	0,8	4 % bwoc

Vid genomförandet av testserie 2 användes inte filterpumpen, tabell 12.10.

Tabell 12.10: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provnings 5						
Filterstorlek [µm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		40	600	1000		
Sikapress [ml]		50	570	1000		

Jämfört med bruk 3, som hade identisk sammansättning, men med en annan accelerator, är förhållandet mellan Sikapressen och referenspressen snarlika. För bruk 3 släppte Sikapressen igenom 96,5 % av den mängd referenspressen släppte igenom och för bruk 5 var den siffran 95 %, se tabell 12.6 och 12.10. Det skiljer alltså endast 1,5 procentenheter mellan brukens resultat.

Likheterna mellan bruk 3 och 5, diagram 12.3 och 12.5, syns också i deras motsvarande diagram.

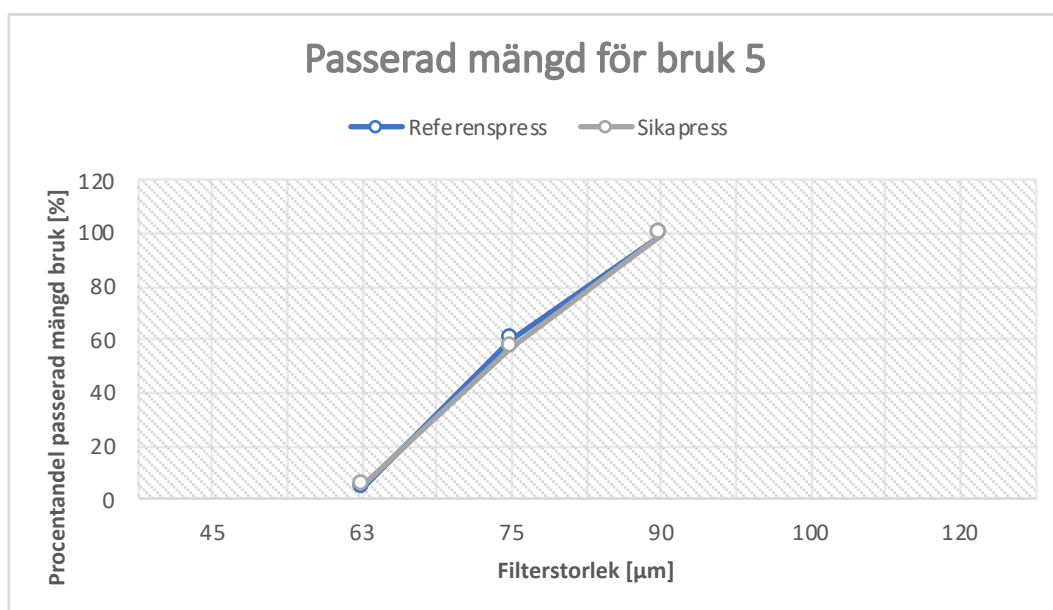


Diagram 12.5: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

Vid nästa provning tillsattes både dispergeringsmedel och samma typ av accelerator som för bruk 5, tabell 12.11. Bruket hade därmed samma sammansättning som bruk 4, men en annan accelerator.

Tabell 12.11: Brukets sammansättning.

Bruk 6			
Bruksammansättning			
Cement	Vct	Dispergeringsmedel	Accelerator
Inj30	0,8	0,3 % bwoc	4 % bwoc

Bruket testades för de båda pressarna, tabell 12.12, och resultaten var identiska med de för bruk 4, undantaget Sikapressen som uppvisade ett något lägre värde för vidd 75 µm, bruk 4.

Tabell 12.12: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 6						
Filterstorlek [µm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		80	680	1000		
Sikapress [ml]		100	650	1000		

Tillsats av dispergeringsmedel gav en tydlig förbättring av penetrationsförmågan jämfört med bruk 5, diagram 12.5 och 12.6.

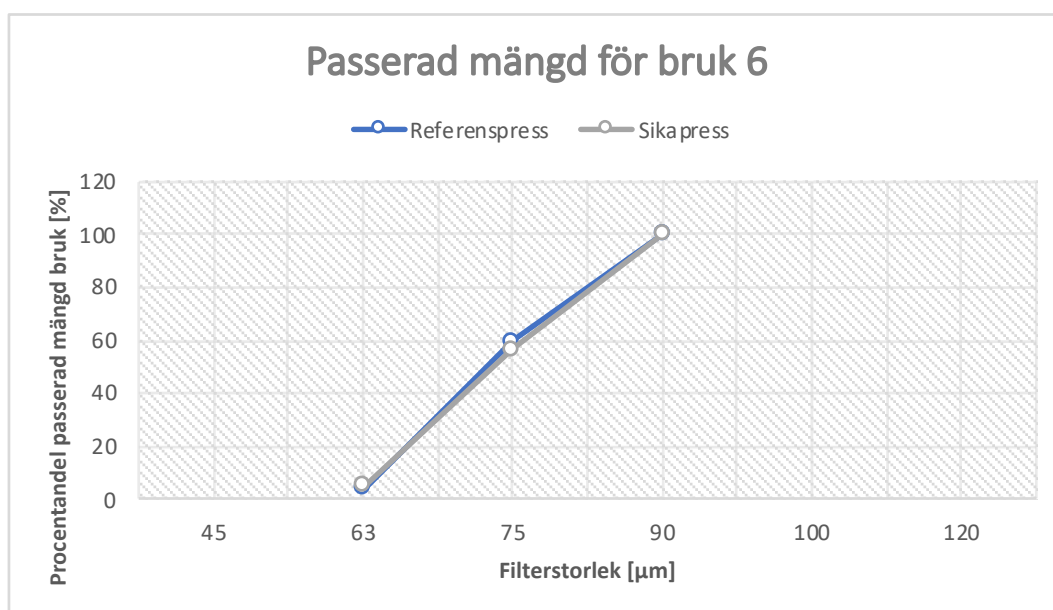


Diagram 12.6: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

5.3 Testserie 3

Den tredje seriens test skedde med bruk baserade på andra cementsorter, här benämnda cement 1 och cement 2, avsedda för användning i injekteringsbruk. Information om cementsorternas siktkurvor och sammansättningar har inte erhållits i detta arbete.

För det första provet uppmättes en vattenseparation på 10 %, tabell 12.13, vilket är högt jämfört med ISRMs rekommendation på maximalt 5 % separation. Det ska dock noteras att rekommendationen är för betong. Det finns ännu inga riktlinjer för injekteringsbruk och därför används ISRMs rekommendationer.

Tabell 12.13: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden.

Bruk 7									
Bruksammansättning		Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet
Cement	Vct	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet
cement 1	0,8	<45 µm	<100 µm	<63 µm	>120 µm	33,5 mPa*s	2,5 Pa	10%	1600 kg/m ³

En separation på 10 % i en spricka med en diameter på 100 mikrometer, skulle innebära en springa på endast 10 mikrometer för vatten att flöda genom, vilket inte orsakar några större problem. En stor separation kan dock tyda på att det är någon sorts problem med bruket, exempelvis att det är instabilt.

Vid provning av bruk 7 ses att en avsevärt lägre volym bruk passerade de olika filterstorlekarna, tabell 12.14, jämfört med bruk baserade på Injektering 30-cement. Detta tyder på att cement 1 gav ett bruk med sämre penetrationsförmåga.

Tabell 12.14: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 7						
Filterstorlek [μm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		10	70	210	440	780
Sikapress [ml]		10	50	250	450	750
Filterpump [ml]	3	20	50	220	300	300

Sambandet mellan de olika mätutrustningarna var liknande de som redovisats för Injektering 30-bruken, även om penetrationsförmågan för bruket skiljde sig avsevärt mot brukerna i testserie 1 och 2, bilaga B. Liksom tidigare bruk släppte filterpumpen igenom en högre andel bruk än de båda pressarna, diagram 12.7.

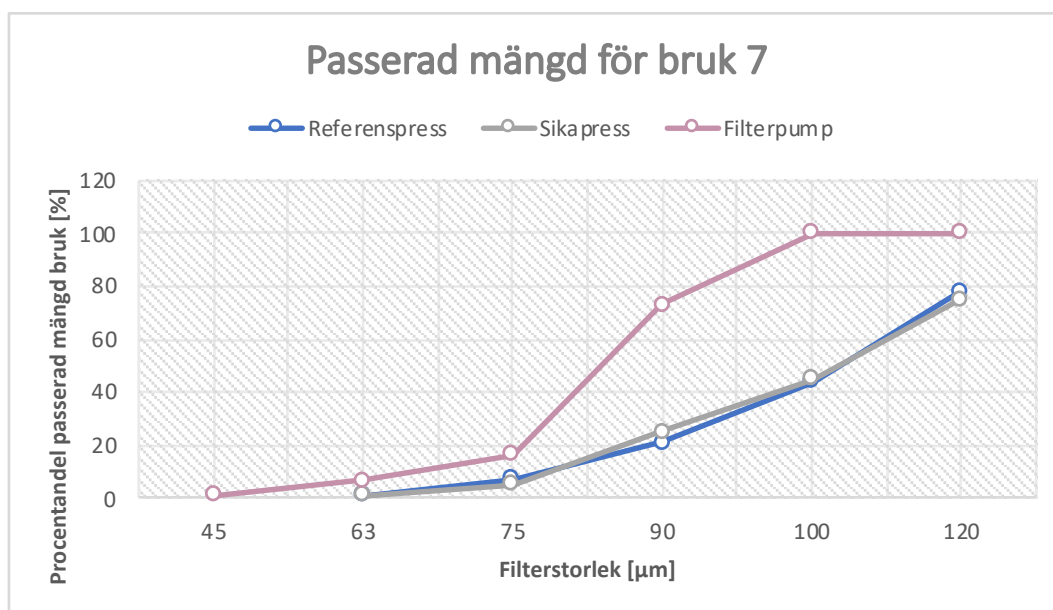


Diagram 12.7: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

Enligt diagram 12.7 uppnådde bruket aldrig maximal penetrationsförmåga, vilket tyder på att bruket inte var lämpligt för injektering. Det kan eventuellt användas för grövre sprickor eller håligheter i det fall det har andra fördelar gentemot Injektering 30, såsom bättre hållfasthetstillväxt eller en lägre kostnad.

För bruk 8 användes samma cement som för bruk 7, men även dispergeringsmedel ingick i sammansättningen, tabell 12.15. Vattenseparationen var fortsatt hög.

Tabell 12.15: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden.

Bruk 8											
Bruksammansättning			Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet	
Cement	Vct	Dispergeringsmedel	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet	
cement 1	0,8	0,3 % bwoc	<45 μm	<100 μm	<63 μm	>120 μm	5,3 mPa*s	0,3 Pa	10%	1620 kg/m ³	

Vid tillsats av dispergeringsmedel för bruk 2 med Injektering 30 ökade penetrationsförmågan jämfört med bruk 1. Då dispergeringsmedel tillsattes cement 1 minskade istället mängden passerat bruk för samtliga provningsenheter, tabell 12.16. För filterstorlek 120 μm uppvisade Sikapressen en avsevärt högre mängd passerat bruk än referenspressen, att jämföra med bruk 7, tabell 12.14, där istället referenspressen släppte igenom en något större mängd. Den stora skillnaden kan bero på den höga

vattenseparationen. Provning av det största filtret genomförs alltid sist och blir därför mest påverkat av sedimentation. Då referenspressen släpper igenom det sedimenterade bruket först, kan detta leda till att bruket lättare flockuleras och därmed släpps en mindre mängd igenom. Sikapressen tar inte av det sedimenterade bruket tack vare de upphöjda rören till ventilerna.

Tabell 12.16: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 8						
Filterstorlek [μm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]		5	40	160	310	490
Sikapress [ml]			40	200	340	580
Filterpump [ml]	3	25	50	80	300	300

Skillnaden mellan pressarna är något större för bruk 8 jämfört med bruk 7, diagram 12.8 och 12.7. Generellt släppte Sikapressen igenom en större mängd bruk än referenspressen, diagram 12.8. För filterpumpen påverkade dispergeringsmedlet endast mängden passerat bruk för maskvidd 90 μm , som släppte igenom 64 % mindre bruk än för bruk 7.

I och med att siktkurvan för cementen är okänd kan skillnader i resultat bero på variationer i partikelstorlek. Exempelvis kan det i vissa prov förekomma en större mängd partiklar med stor kornstorlek, vilket påverkar filtreringsegenskaperna. Detta kan vara orsaken till skillnaden mellan pressarna och otydliga resultat efter tillsats av dispergeringsmedlet.

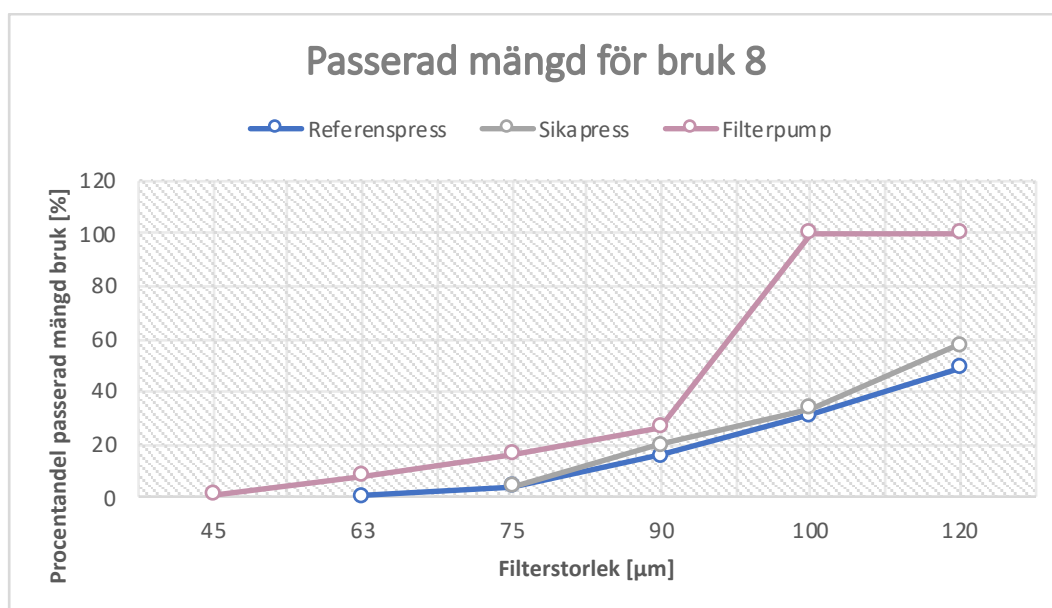


Diagram 12.8: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

För cement 2 var värdena avseende reologin högre jämfört med cement 1, tabell 12.17 och 12.15. Vattenseparationen låg på 1 %, tabell 12.17, vilket är i linje med test-serie 1, se bilaga B.

Tabell 12.17: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden.

Bruk 9									
Bruksammansättning		Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet
Cement	Vct	bmin	bkritisk	bmin	bkritisk	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet
cement 2	0,8	<45 μm	<120 μm	<75 μm	>120 μm	48,9 mPa*s	4,5 Pa	1%	1660 kg/m ³

Resultatet för provningen, tabell 12.18, visar, liksom provning 8, en avsevärt större mängd passerat bruk för Sikapressen än referenspressen för maskvidd 120 μm . För filterstorlek 100 μm släpper däremot referenspressen igenom en något större mängd.

Tabell 12.18: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 9						
Filterstorlek [μm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]			10	100	280	500
Sikapress [ml]			10	90	230	630
Filterpump [ml]	2	10	10	90	220	300

Sambandet mellan andelen passerat bruk redovisas i diagram 12.9. För filterstorlek 90 μm syns mindre skillnad mellan provningsmetoderna, filterpump och filterpress, jämfört med bruk 7, diagram 12.7. I diagram 12.9 ses även att filterpressarnas resultat för de större maskvidderna skiljer sig åt, vilket inte var fallet för bruk 7.

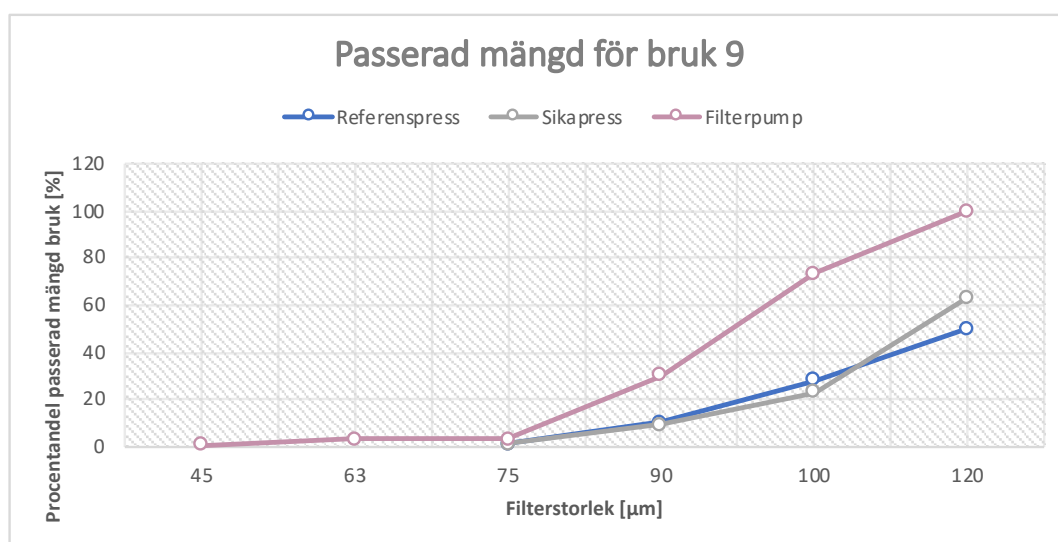


Diagram 12.9: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

Det sista bruket i testserie 3 baserades på samma cementtyp som bruk 9, cement 2. Även ett dispergeringsmedel ingick i brukets sammansättning, tabell 12.19. För de bruk där densitet har uppmätts konstaterades det att liknande värden har erhållits för samtliga prov, 1600-1660 kg/m^3 , se bilaga B.

Tabell 12.19: Brukets sammansättning, egenskaper och gränsvärden.

Bruk 10										
Bruksammansättning			Filterpump		Filterpress		Reologi		Vattenseparation	Densitet
Cement	Vct	Dispergeringsmedel	b _{min}	b _{kritisk}	b _{min}	b _{kritisk}	Viskositet	Flytgräns	Vattenseparation	Densitet
cement 2	0,8	0,3 % bwoc	< 45 μm	< 120 μm	< 75 μm	> 120 μm	4,8 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	0,1 Pa	1%	1600 kg/m^3

Bruk 10, tabell 12.20, uppvisade en avsevärt bättre penetrationsförmåga jämfört med bruk 9, vilket är i linje med teorin för tillsats av dispergeringsmedel. Största skillnaden mellan bruk 9 och 10 ses för filterstorlek 120 μm , bilaga B. För de mindre maskvidderna ledde tillsatsen av dispergeringsmedel till en minskning av passerat bruk för referenspressen, medan den ledde till en ökning för Sikapressen.

Tabell 12.20: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningsenheterna.

Provning 10						
Filterstorlek [μm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]			5	60	310	800
Sikapress [ml]			10	110	280	820
Filterpump [ml]	2	15	20	100	300	300

Trots de annorlunda egenskaper cement 1 och cement 2 uppvisade kan det ändå ses att filterpressarnas resultat generellt överensstämmer väl med varandra, diagram 12.10. Detta tyder på att Sikapressen ger giltiga resultat.

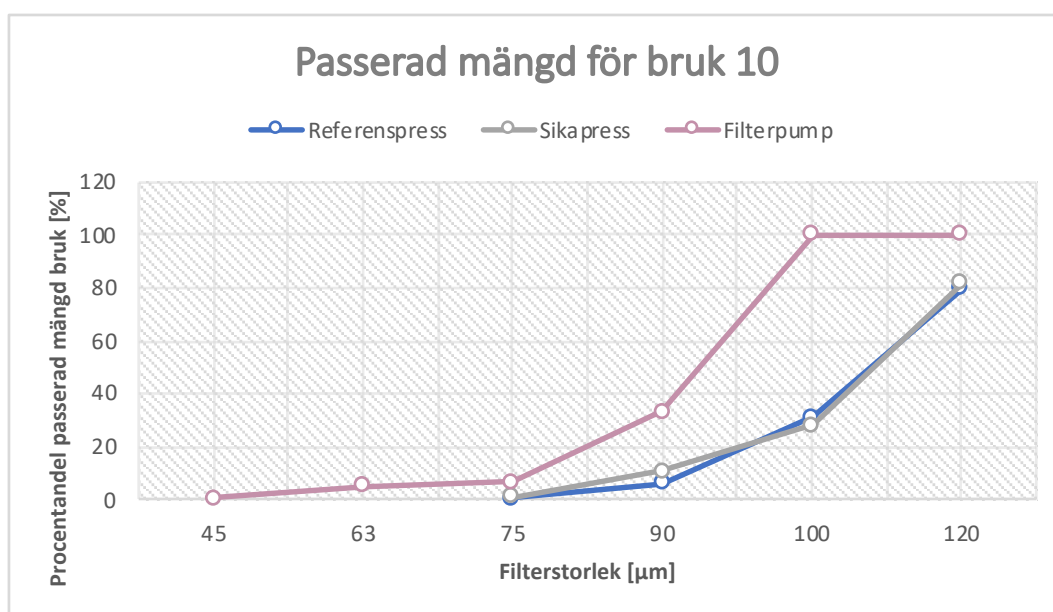


Diagram 12.10: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningsenhet.

5.4 Testserie 4

Då de första tre testserierna hade genomförts identifierades ett behov av kompletterande provningar. Därför genomfördes ytterligare en provning med reducerad omfattning. Där testades inte brukets alla egenskaper, utan fokus låg på att ge mer data till jämförelsen mellan de olika provningsenheterna. Bruksammansättningen, tabell 12.21, för bruk 11 är densamma som för bruk 3, vilket borde ge likartade resultat.

Tabell 12.21: Brukets sammansättning och egenskaper.

Bruk 11				
Bruksammansättning			Reologi	
Cement	Vct	Dispergeringsmedel	Viskositet	Flytgräns
Inj30	0,8	0,3 % bwoc	9,35 mPa*s	1,06 Pa

Filterpumpen testades endast för filterstorlek 100 μm , tabell 12.22, beroende på att bruket behövde testas inom en viss tid efter blandning för att ge giltiga resultat. Efter provningen med Sika- och referenspressen hade det gått för lång tid sedan bruket blandades och filterpumpen testades därför inte för de övriga filterstorlekarna. I sammanhanget räknas några minuter som lång tid. Det konstaterades att bruksprovning med flera moment är tidskritisk och behöver bemannas med en person per

provningseenhet. För bruk 3 hade samtliga enheter uppnått full penetrationsförmåga vid 90 μm , tabell 12.6. Dessa skillnader kan bero på vår bristande erfarenhet av att blanda och testa bruk.

Tabell 12.22: Volym bruk som uppmättes för respektive filter av de olika provningseenheterna.

Provning 11						
Filterstorlek [μm]	45	63	75	90	100	120
Referenspress [ml]	5	70	-	700	820	
Sikapress [ml]	2	80	340	720	1000	
Filterpump [ml]					280	

Värdet för filterpumpen, tabell 12.22, kan vara något missvisande då motståndet i pumpen minskade kraftigt i slutet av mätningen. Detta tyder på att undertrycket i pumpen hade försvunnit och att bruk därför inte längre sögs upp genom filtret. Den uppmätta mängden bruk för filterpumpen borde därför ha blivit något högre.

Referenspressen testades för maskvidd 75 μm tre gånger, men vid samtliga försök sköt filtret, vilket innebär att filtret glider ur position. Detta resulterade i att allt bruk trycktes ut ur filterpressen utan att något resultat erhöles. Orsaken till detta bedömdes vara att filterhållaren var sliten. Vi valde att gå vidare och testa resterande filterstorlekar istället så att bruket inte skulle hinna bli stillastående för länge och ge missvisande resultat.

För bruk 11 ses att andelen bruk för filterpumpen hamnade under värdet för Sikapressen, diagram 12.11, trots att den vid de tidigare åtta provningarna med filterpumpen släppt igenom en högre andel bruk än pressarna. Detta beror sannolikt på det minskade motståndet i slutet av provningen.

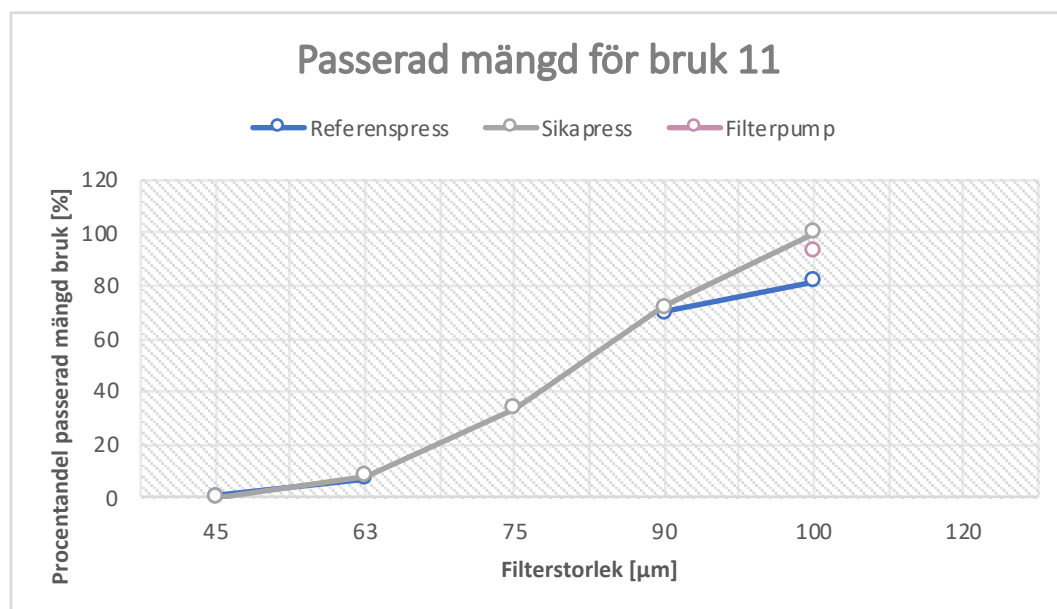


Diagram 12.11: Sambandet mellan procentandelen passerat bruk för respektive provningseenhet.

För bruk 11 noterades en större skillnad mellan filterpressarnas resultat. Liksom för prov 8 antas detta bero på sedimentation, som påverkar referenspressens resultat. För bruk 11 beror sedimentationen troligen på för lång förfluten tid mellan blandning och provning av det största filtret, som alltid testas sist.

6 Diskussion

Idag finns endast ett fåtal filterpressar i Sverige, vilka är tillverkade med olika utformning och av olika företag. Avsaknaden av standard för prov med filterpress gör att det inte finns någon information om hur väl filterpressarna stämmer överens med varandra. Den filterpress som har fungerat som referens i detta arbete, referenspressen, tillverkades 2016 och har använts i flera injekteringsprojekt med lyckat resultat. Av denna anledning anses den tillförlitlig att använda som referens.

I det här arbetet har en kortare studie genomförts och de resultat som erhållits tyder på att Sikapressen är lämplig för provning av injekteringsbruk. För att säkert kunna fastställa Sikapressens giltighet behöver fler tester göras, både fler jämförande tester mellan olika provningsenheter, såsom filterpress och filterpump, samt fler tester av den nya utformningen och funktionen för att få ett bredare underlag.

För framtida projekt är det önskvärt att standardisera metoden så att resultat av mätningar blir oberoende av vilket företag som genomför provningarna och vilken provningsutrustning som används. Detta är också viktigt för att åstadkomma en metod som är tillgänglig för fler i branschen och för att säkerställa en jämn nivå.

6.1 Utformningens påverkan

En av skillnaderna som finns mellan de filterpressar som har jämförts, är utformningen av behållarnas bottendelar. Referenspressens botten är konformad, medan Sikapressens botten är platt. För referenspressen innebär detta att sedimentet som bildas samlas i botten mot filtret. Detta får som konsekvens att en filterkaka av bruk lättare bildas och till följd av detta kan resultaten bli missvisande. För referenspressen uppstår emellanåt också problem med att filtren skjuter, det vill säga glider ur position i filterhållaren, och allt bruk trycks ut genom ventilen och provet måste göras om. Exakt vad detta beror på är inte fastställt, men en orsak kan vara att referenspressens ventilhandtag kan vridas med betydligt mindre motstånd än Sikapressens. Detta beror på att handtagen har slitits in och möjliggör en snabbare öppning av ventilerna. Därmed fås initialt en större tryckskillnad, som kan vara orsaken till att filtret glider iväg. En annan teori är att filterhållaren har slipats av stålfiltren, så att friktionen mellan filter och hållare blir låg. Detta i kombination med tryckskillnaden kan vara orsaken till att filtret glider ur position. För Sikapressen har problemet med filtren inte uppstått under provning och detta talar för teorin om att det kan ha med ventil- och friktionsskillnader att göra.

Trycket i filterpressarna ställs in manuellt för varje filter, vilket kan ge vissa variationer. Vid provning fick trycket kontrolleras noga och justeras då det ibland kunde sjunka lite precis efter ventilstängning. Dessa små variationer i tryck kan ha påverkat flödes hastigheten, men troligen har det inte någon betydande inverkan på resultaten.

Det bruk som passerar filtren samlas upp i mätglas av plast, som rymmer 1000 ml vardera. Vid provning hamnar en del av bruket på mätglasens sidor, vilket försvårar en exakt avläsning. Detta i kombination med att flera olika personer läser av mätglasen under provens gång kan påverka resultaten.

Det fastnar en del bruk i filterpressarnas behållare och det är därför viktigt att kunna rengöra behållarna väl. Referenspressens behållare går inte att plocka isär och dess

öppning är dessutom liten, vilket gör det svårt att rengöra noggrant. Detta, i kombination med att utloppet är placerat längst ned i botten, gör att rester från gamla provningar kan inverka på framtida testers resultat. Sikapressen går att plocka isär i flera delar, bland annat för att underlätta och möjliggöra en noggrann rengöring.

6.2 Inverkan av separation

Vid provningarna upplevdes det att separation inleddes kort efter att dispergeringen avslutades, främst för cement 1 och 2. Detta gjorde att det var viktigt att provningen skedde direkt efter avslutad beredning. I denna studie, där jämförelsen är den centrala, var det viktigt att provning med filterpumpen samt referens- och Sikapressen skedde samtidigt, i och med brukets starkt varierande egenskaper med tiden. I och med att provningsenheterna behövde testas parallellt för att ge rättvisande resultat i jämförandet, blev provningarna stressiga, vilket ökade risken för att misstag i någon form skulle ske. Detta är något som behöver åtgärdas i framtiden, exempelvis med större bemanning vid provning av flera mätutrustningar.

6.3 Jämförelse av behållarnas utformning

Då Sikapressens behållare har en ny utformning med upphöjda rör till ventilerna tas eventuellt sedimenterat bruk inte med i provningen, se figur 9.3. Detta för att ge alla filterstorlekar samma förutsättningar trots varierande bruksålder. Det är dock av vikt att Sikapressen identifierar bruk med otillräckliga penetrationsegenskaper, exempelvis på grund av ofullständig blandning. Under de provningar som genomfördes i samband med detta arbete erhöles flera bruk som inte uppfyllde de ställda kraven. Exempelvis hade cement 1 och 2 dålig penetrationsförmåga, något som syntes i resultaten för båda filterpressarna, trots de olika utformningarna. Vid en av provningarna gav också en ofullständig blandning av bruket tydliga utslag i resultaten för båda filterpressarna. Bruket kasserades och blandningen gjorde om. Dessa exempel talar för att den nya utformningen gör provningen mindre tidskrävande, men att den fortfarande identifierar dåliga bruk.

6.4 Tiden avgörande för provningsresultat

Vid provning är tidsaspekten viktig att ta hänsyn till. Bland annat är tiden under vilken materialen tillsätts avgörande för resultatets giltighet, liksom tillsatsordning, tiden för omrörning och under hur lång tid bruket dispergeras. Tiden mellan avslutad dispergering och provningens start är också kritisk för brukets egenskaper. Då injekteringsbruk är så känsligt underlättar vana vid denna typ av provning.

När vi utförde provningen av bruk 11 utgick vi från ett recept baserat på Injektering 30-cement och tillsats av dispergeringsmedel. Cement tillsattes med varierande intensitet, vilket resulterade i klumpar som tog tid att lösa upp och gjorde att tiden för omrörning blev för lång. Därefter tillsattes dispergeringsmedel till blandningen. Utifrån de reologiska mätningarna verkade bruket lovande, men vid test för penetrationsförmåga i provningsenheterna blev volymen passerat bruk endast en bråkdel av vad den vanligtvis blir och full inträngning uppfylldes inte för någon av filterstorlekarna. Bruket kasserades då inga värden av betydelse kunde erhållas från provet. Detta var förmodligen ett resultat av brist på rutin vid blandning; för lång omrörning och sannolikt kvarvarande klumpar i bruket.

Efter noggrann rengöring av alla provningsenheter och mätglas påbörjades ett nytt försök. Vi utgick från samma recept som tidigare, med skillnad att cement denna gång tillsattes snabbare och jämnare, vilket resulterade i ett bruk med bättre egenskaper. Tester utfördes därefter för alla filterstorlekar i filterpressarna, undantaget filterstorlek 75 μm för referenspressen. Trots tre stycken upprepade försök erhöles inget resultat då filtret sköt. Vi bestämde oss för att gå vidare för att hinna testa övriga filterstorlekar innan bruket blev oanvändbart. Vanligen är det lämpligt att ha en person per provningsenhet för att kunna köra testerna parallellt och undvika att det går för lång tid mellan blandning och test. Vi hade inte denna möjlighet, vilket troligen hade inverkan på resultatet.

De tester som har gjorts i samband med detta arbete har gett en bra bild av hur resultatet från de olika mätutrustningarna förhåller sig till varandra, men samtliga prov av Injektering 30 uppnådde maximal volym passerat bruk för de större maskvidderna. Detta gör att ytterligare provningar behöver göras för att se hur Sikapressen korrelerar med de andra enheterna vid provning för större sprickvidder. De provningar som genomförts med cement 1 och 2 ger en preliminär bild, men då cementtypen skiljde sig avsevärt från Injektering 30 behöver kompletterande tester utföras. Brukets sammansättning behöver då anpassas så att maximal volym inte uppnås för maskvidd 100 μm och 120 μm .

6.5 Jämförelse mellan filterpressarna

För testserie 1 och 2 överensstämmer resultaten från Sika- och referenspressen väl, diagram 13.1. I diagrammet framgår det tydligt att de avlästa resultaten för maskvidderna 63 μm och 75 μm överensstämmer, med några mindre avvikelser. För de större vidderna går det inte att utläsa något samband, då de uppnått maximal volym passerat bruk, även om dessa antas följa samma mönster som de mindre storlekarna.

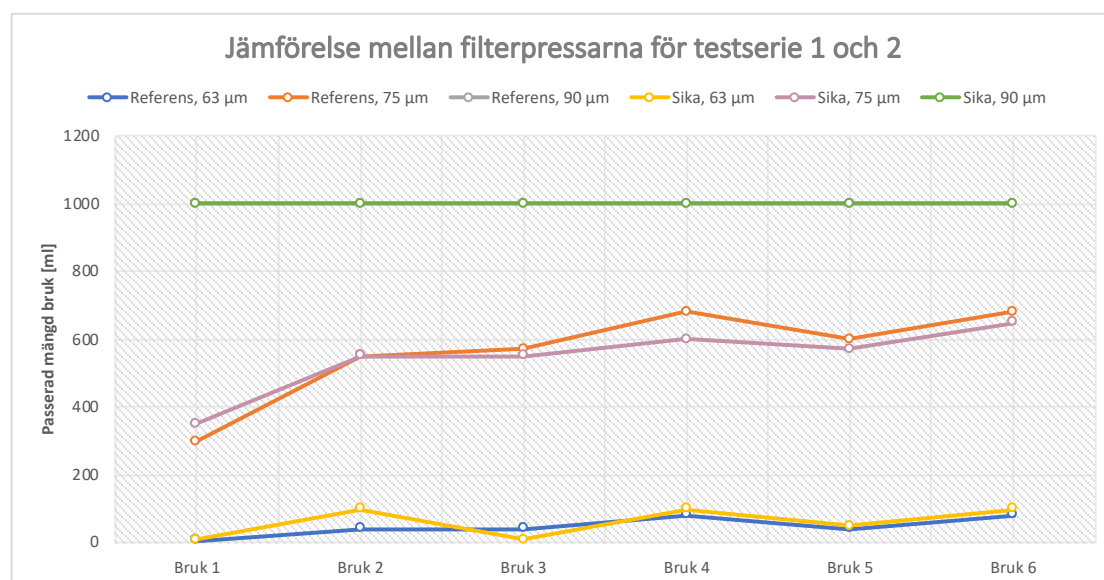


Diagram 13.1: Jämförelse mellan resultaten för Sikapressen och referenspressen för testserie 1 och 2.

För jämförelsen över testserie 3 syns det större skillnader mellan pressarna för filterstorlek 120 μm , diagram 13.2. Detta kan bero på att det eventuellt gick för lång tid mellan provningarna och att brukets egenskaper därför hann ändras. En annan orsak

skulle kunna vara varierande partikelstorlekar i cementen, som tidigare nämnts saknas information om dess siktkurva och sammansättning. Det kan också bero på avläsningsfel, men då 50 % av provningarna för filter 120 µm visade på större avvikelser behöver fler prover genomföras för att fastställa om det är en avvikelse mellan Sika- och referenspressen eller om det berodde på yttre faktorer.

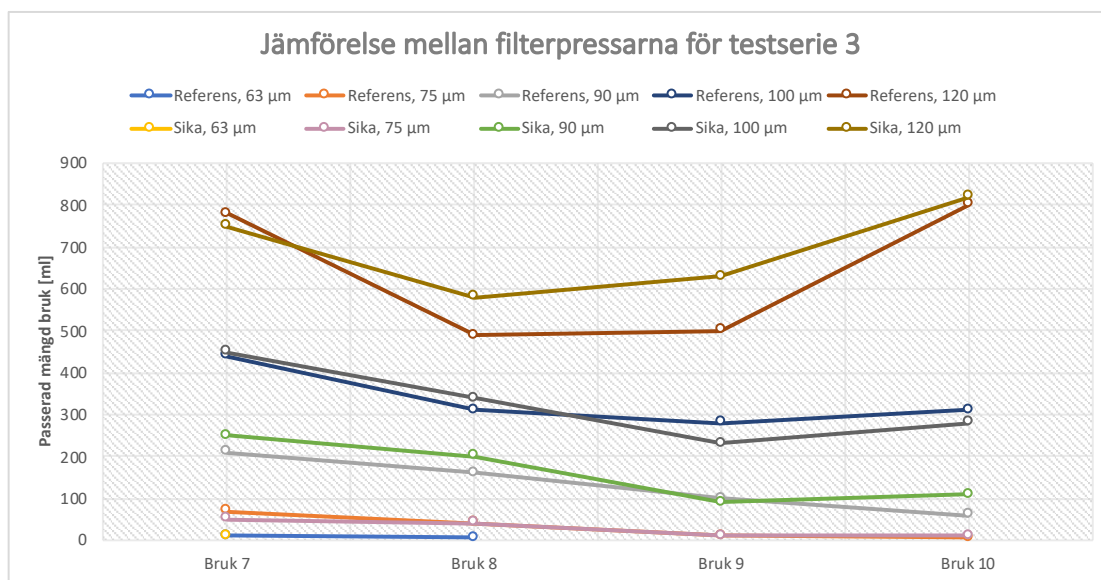


Diagram 13.2: Jämförelse mellan resultaten för Sikapressen och referenspressen för testserie 3.

I diagram 13.3 har mängden passerat bruk från filterpressarna korsplottats. Det syns tydligt i diagrammet att resultaten korresponderar och det finns ett tydligt linjärt samband. Utifrån detta går det att dra slutsatsen att Sikapressen går att använda istället för referenspressen. För de mindre filterstorlekarna ligger värdena för Sikapressen generellt lite högre än för referenspressen. För de större maskvidderna förekommer avvikelser, men inte övervägande åt något håll.

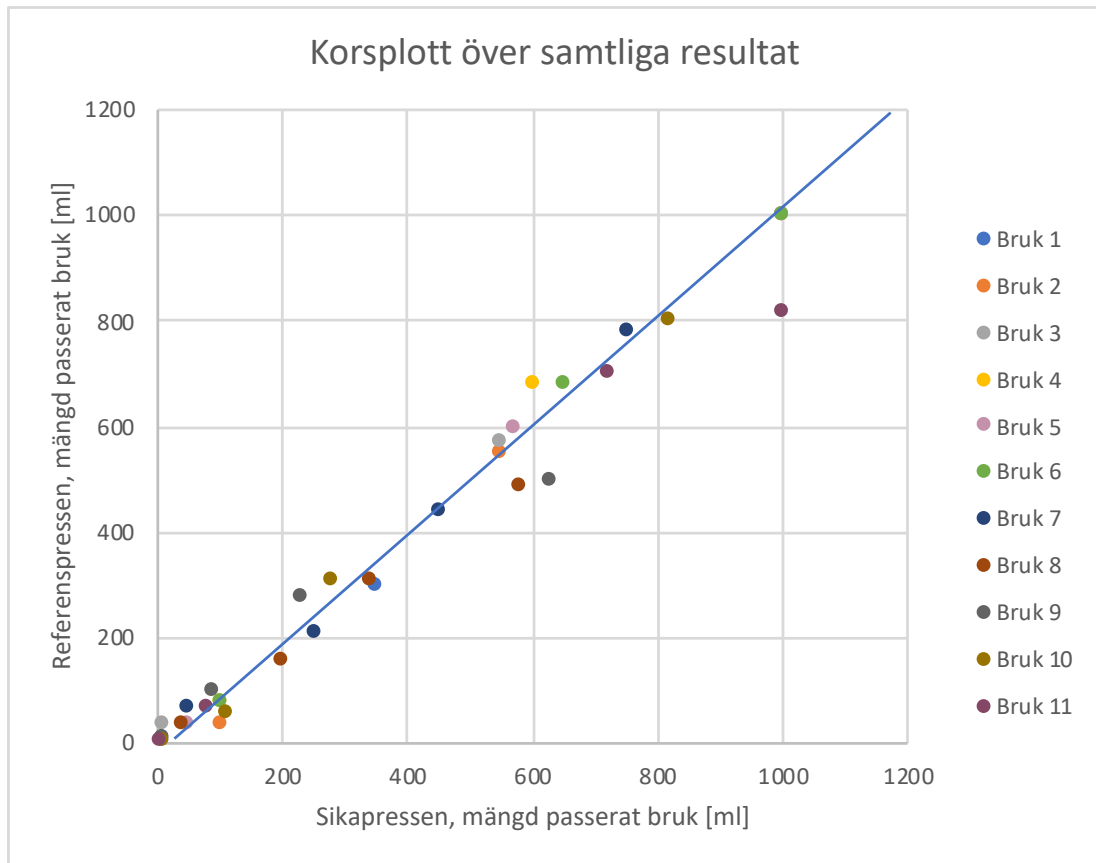


Diagram 13.3: Korsplott över mängden passerat bruk från filterpressarna.

Utifrån diagram 13.4 syns det att spridningen skiljer sig mellan Injektering 30 och de andra cementsorterna. För Injektering 30 släpper Sikapressen igenom mer bruk vid de mindre maskvidderna, jämfört med referenspressen. Vid de större maskvidderna är förhållandet mellan filterpressarna motsatt och referenspressen släpper igenom en större mängd bruk. Detta bekräftar Sikapersonalens uppfattning om hur filterpressarna förhåller sig till varandra.

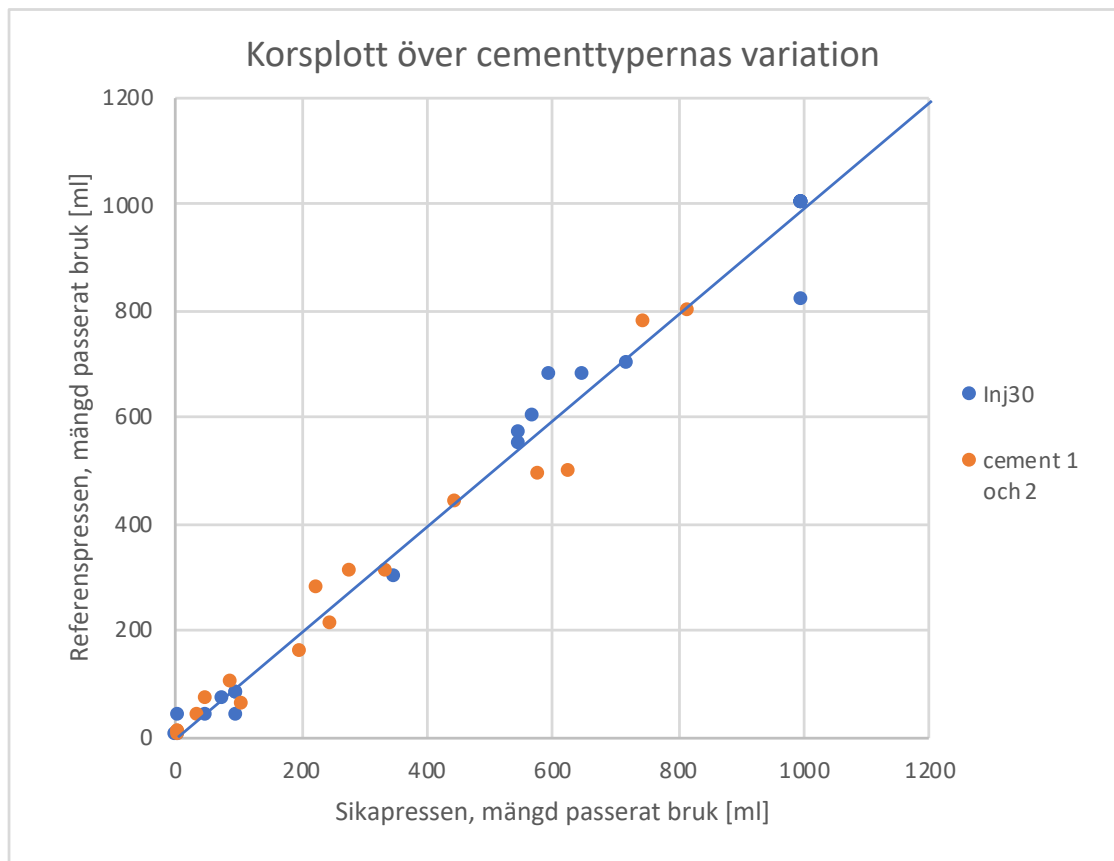


Diagram 13.4: Korsplott över mängden passerat bruk från filterpressarna.

För de andra cementsorterna syns en större spridning av resultaten, men inte övervägande åt något håll, diagram 13.4. Orsaken till skillnaderna mellan cementsorterna behöver utredas, förslagsvis med fler tester av andra typer av cement. Ett bruk som ger stora skillnader mellan pressarna kan förklaras av att bruket sedimenterar snabbt och att Sikapressen inte tar utav det sedimenterade bruket.

6.6 Utvärdering av Sikapressen

För att utvärdera Sikapressen har den jämförts med referenspressen och filterpumpen. Följande kapitel visar i procent hur mycket bruk Sikapressen släppte igenom jämfört med de andra mätenheterna. Tabellerna är uppdelade efter vilken cementsort som använts och presenterar de filterstorlekar där det har genomförts minst fyra provningar med mätenheterna. Den tar inte upp de filterstorlekar där den ena mätenheten uppnått maximal penetrationsförmåga, beroende på att värdet för den enheten då är konstant och värdet för den andra är föränderligt, resultaten anses då missvisande.

Tabell 13.1 visar i procent hur mycket bruk Sikapressen släppte igenom jämfört med referenspressen. Värdena har räknats ut genom att ta skillnaden i passerat bruk mellan Sika- och referenspressen och dela det värdet på referenspressens mängd. Siffrorna presenteras här i procent och visar differensen mellan pressarna. Sist i tabellen presenteras standardavvikelsen i procentenheter, där också medelvärde redovisas.

Tabell 13.1: Procentandel bruk som passerat Sikapressen i förhållande till referenspressen samt medelvärde och standardavvikelse.

Procentandel passerad mängd bruk för Sikapressen i förhållande till referenspressen, Injektoring 30									
Bråk	1	2	3	4	5	6	11	Medelvärde	Stdav
63 μm	100	150	-75	25	25	25	14	38	71
75 μm	17	0	-4	-12	-5	-4	-	-1	10

Procentandel passerad mängd bruk för Sikapressen i förhållande till referenspressen, cement 1 och 2						
Bråk	7	8	9	10	Medelvärde	Stdav
75 μm	-29	0	0	100	18	56
90 μm	19	25	-10	83	29	39
100 μm	2	10	-18	-10	-4	12
120 μm	-4	18	26	3	11	14

För samtliga cementtyper syns det att standardavvikelsen blir mindre för de större maskvidderna. Att den blir så hög för de mindre maskvidderna beror till stor del på att då pressarna släpper igenom en så liten mängd bruk att den inte går att mäta skrivs en låg siffra ner i labbprotokollet. Den siffran kan variera då den beror på hur stor mängden uppfattas vara och det är dessutom olika personer som gör bedömningen för olika prov. Exempelvis har mängden för bruk 1, maskvidd 63 μm , bedömts som 5 ml för referenspressen och som 10 ml för Sikapressen, bilaga B. Detta leder till en 100 % skillnad, tabell 13.1.

Det finns vissa svårigheter med att jämföra olika metoder, som också har olika förutsättningar. För provning med Sikapressen respektive filterpumpen används olika tryck och volym. I den jämförelse som gjorts mellan Sikapressen och filterpumpen, tabell 13.2, har hänsyn tagits till de olika referensvärden som används för de olika mätenheterna, där filterpumpens maximala volym är 300 ml medan den är 1000 ml för filterpressen. Tabellen visar därmed den procentuella skillnaden i passerat bruk för Sikapressen jämfört med filterpumpen.

Tabell 13.2: Procentandel bruk som passerat Sikapressen i förhållande till filterpumpen samt medelvärde och standardavvikelse.

Procentandel passerad mängd bruk för Sikapressen i förhållande till filterpumpen, Injektoring 30						
Bråk	1	2	3	4	Medelvärde	Stdav
63 μm	-11	-3	-7	-2	-6	4
75 μm	-55	-45	-45	-40	-46	6

Procentandel passerad mängd bruk för Sikapressen i förhållande till filterpumpen, cement 1 och 2						
Bråk	7	8	9	10	Medelvärde	Stdav
75 μm	-12	-13	-2	-6	-8	5
90 μm	-48	-7	-21	-22	-25	17
100 μm	-55	-66	-50	-72	-61	10
120 μm	-25	-42	-37	-18	-31	11

Utifrån tabellerna bekräftas att det finns ett samband mellan de olika mätmetoderna, då beräkningarna för både Injektoring 30 och de andra cementen visar på låga

standardavvikelser. Ur avseendet att filterpumpen ger mer osäkra resultat, på grund av instabila förutsättningar såsom ett varierande tryck, är Sikapressen mer tillförlitlig och ger mer trovärdiga resultat. Sikapressen ger också en bättre helhetsbild över brukets penetrationsförmåga då den har en större maxvolym än filterpumpen, som uppnår sin maxvolym tidigare under provningarna. Sikapressen används även med ett högre och jämnare tryck än filterpumpen.

För Injektering 30 når filterpumpen ofta maximal volym tidigare än Sikapressen och därför erhålls inte några värden som är jämförbara för de större maskvidderna. Det hade varit önskvärt att se hur de olika mätmetoderna korrelerar för de större filterstorlekarna för Injektering 30, som är ett av de vanligaste cementen vid injektering.

Då filterpumpen har använts länge inom branschen bedöms den vara tillräckligt korrekt för att användas till provning för att avgöra vilka maskvidder som behöver testas med filterpressen. Den är också lämplig för provning i fält, då receptet redan bedömts som tjänligt, och kan användas för fortlöpande provning av bruket under injekteringsprocessen. Detta då den är smidig att förflytta och lättanvänd. För samtliga tester redovisade i tabell 13.2 syns också att filterpumpen släpper igenom en större andel bruk, beräknat efter de olika maxvolymerna, vilket styrker dess lämplighet att avgöra vilka maskvidder som behöver testas. Det är noterbart att det för samtliga filterstorlekar fås en lägre standardavvikelse mellan Sikapressen och filterpumpen, jämfört med de två filterpressarna. Även detta bekräftar att filterpumpen fungerar som ett tillförlitligt komplement till Sikapressen.

Då Sikapressen tar hänsyn till brukens sedimentation bör även filterpumpen göra det, därför bör inte bruket vid botten av bägaren testas. Det är inte bekräftat i vilken grad filterpumpens placering i, eller dess vinkel mot, bägaren påverkar resultaten, men de faktorerna bedömer vi som försumbara.

7 Rekommendationer

Rekommendationer är baserade på analys av de resultat som erhållits och sammanställts i rapporten. De är listade utan inbördes ordning och bör reflekteras över som subjektiva förslag grundade på den kunskap som erhållits genom detta arbete.

Tack vare de serier provningar som gjorts har ett tydligt resultat för de båda filterpressarna erhållits, vilket visar på att det inte förekommer några systematiska avvikelser. Undersökningens resultat talar för Sikapressens tillförlitlighet, men kompletterande tester bör göras för att få en bra bild över de exakta procentuella skillnader som finns. Denna information hade kunnat vara värdefull att ha som en översiktlig tabell för att översätta värdena mellan filterpressarna.

För att kvantifiera den faktiska skillnaden krävs systematisk provning i stora serier, detta i form av kompletterande tester av bruk med varierande egenskaper, såsom vct och reologi.

Genom att kanterna på filterhållarna är blåstrade fås en större friktion och risken för att filtret glider iväg minskar. I den händelse att filtren, efter en tids användning av filterpressen, börjar glida ur position bör filterhållarna kontrolleras, de kan behöva blåstras igen.

Att placera filtren i filterhållarna kräver noggrannhet och är ett tidskrävande moment. Filtren är mycket känsliga för smuts från fingrar eller bruk från tidigare provningar. Andra metoder bör undersökas för att undvika felkällor och tidseffektivisera provningarna, exempelvis någon typ av hjälpmedel för att få ner filtret i filterhållaren, alternativt att filtret aldrig byts mellan provningarna utan hela ventilen byts mellan provningarna och rengörs med ultraljudstvätt.

För att minska tidspressen under provning kan omrörning i filterpressen vara aktuellt att överväga i och med brukets tixotropiska egenskaper.

För att undvika avläsningsfel från mätglaset bör en och samma person läsa av samtliga resultat. Vid de provningar som gjorts i samband med denna rapport har olika personer läst av mätglasen för de olika enheterna. För att ge ytterligare noggrannhet hade det varit fördelaktigt att istället väga mängden passerat bruk med våg för en större exakthet. På så sätt reduceras felkällor och provningen tidseffektiviseras ytterligare.

För att minska eventuella missvisande resultat på grund av tryckvariationer skulle en tryckregulator kunna installeras i filterpressen. Denna möjliggör för att ett precist och stabilt tryck lätt kan ställas in.

Vid transport förvaras idag både Sikapressen och referenspressen i lådor, se bilaga A. Dessa är både skrymmande och tunga och det krävs två personer för att lyfta dem, vilket gör det otympligt och negativt ur arbetsmiljösynpunkt. Någon form av transportvagn hade underlättat transportmomentet.

I dagsläget öppnas och stängs ventilerna med handkraft. Med ett byte till ett automatiserat system, med mekanisk öppning och stängning, exempelvis tryckluft,

skulle identiska förutsättningar för alla filterstorlekar och bruk fås, då tiden skulle vara konstant för samtliga provningar.

8 Slutsats

Ett antal slutsatser kan dras utifrån de erhållna resultaten i arbetet. Utifrån tabeller och diagram redovisade i resultatdelen ses det att värdena för Sikapressen och referenspressen följer varandra väl. Några mindre avvikelser har observerats. Sikapressen uppvisar en något bättre penetrationsförmåga för filterstorlek 63 μm . För de större filterstorlekarna; 75, 90, 100 och 120 μm förekommer inga systematiska avvikelser, de bedöms överensstämma väl. De skillnader som förekommer antas bero på de förbättringar som gjorts och därmed bedöms Sikapressens resultat vara mer rättvisande.

Tack vare att den går att plocka isär i fler delar underlättas rengöring, dessutom underlättas provning i och med att förberedelse för alla filterstorlekar kan göras innan provningen påbörjas, vilket också leder till en minskad risk för kontaminering av filtren. Genom dessa förbättringar bedöms Sikapressen mer användarvänlig än referenspressen, vilket var en del av syftet med utvecklingen av denna.

Den nya designen minskar också risken för felaktiga resultat. Det är lättare att avlägsna kvarvarande rester av bruk och den sedimenterade delen av bruket används inte vid provningen, detta tack vare att bruket inte tappas från botten av behållaren.

Filterpumpen bedöms fungera som ett tillförlitligt komplement till Sikapressen. Den är lämplig för provning i fält, då receptet redan bedömts som tjänligt av Sikapressen, och kan användas för fortlöpande provning av bruket på arbetsplatsen.

Utifrån de resultat som erhållits genom detta arbete anses Sikapressen kunna ersätta referenspressen och bör utan ytterligare modifieringar kunna tas i bruk.

9 Referenser

- Andersson, P., & Sellner, A. (2000). Tätning av bergtunnlar: Förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningssatser (-, 101). Vägverket. Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/svSE/10421/RelatedFiles/2000_101_tatning_av_bergtunnlar.pdf
- Andréasson, P-G. (2015). Geobiosfären: En introduktion. Lund: Studentlitteratur AB.
- Axelsson, M. (2009). Prevention of erosion of fresh grout in hard rock (Doktorsavhandling). Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Berg, Å. & Ekström, A-J. (2007). Efterinjektering i Hallandsåstunneln: Analys av data från efterinjektering med cement och silica sol i den oinklädda delen av tunneln (Examensarbete, Chalmers tekniska högskola, avdelningen för geologi och geoteknik). Hämtad från <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/72493.pdf>
- Besab. (u.å.). Bergstätning med injektering. Hämtad från <https://www.besab.se/produkter-tjanster/berg/injektering/>
- Brookfield. (u.å.). Brookfield Dial Viscometer [Manual]. Middleborough, USA: AMETEK Brookfield. Hämtad från <https://www.brookfieldengineering.com//media/ametekbrookfield/manuals/obsolete%20manuals/dial%20m85-150-p700.pdf?la=en>
- Carlsson, L., & Gustafson, G. (1997). Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Göteborg: Geologiska institutionen.
- Cementa. (u.å.). Injektering 30. Hämtad från <https://www.cementa.se/sv/injektering-30>
- Cementa. (u.å.). Så här tillverkas cement. Hämtad från <https://www.cementa.se/sv/tillverkning-av-cement>
- Draganović, A. (2009). Bleeding and filtration of cement-based grout (Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm). Hämtad från https://www.researchgate.net/publication/265033657_BLEEDING_AND_FILTRATION_OF_CEMENT-BASED_GROUT
- Draganović, A., Funehag, J., & Håkansson, U. (2019) Standardiserad mätning för cementbaserade injekteringsmedels reologi & Standardisering av mätningen av inträngningsförmåga av cementbruk. Svenska bergteknikföreningen. Hämtad från http://www.befoonline.org/UserFiles/Dokument/Bergdagarna_2019/Artiklar_BM_BT_2019/BM_2A_2B.pdf
- Eklund, D. (2006). Inträngningsförmåga hos cementbaserade injekteringsmedel (Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm). Hämtad från www.befoonline.org/UserFiles/Archive/62/73.pdf

- Encyclopedia. (2016). Bingham Fluid. Hämtad från <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/ingham-fluid>
- Florén, S. (2015). Grundvattenbildning i berg (Examensarbete, Lunds universitet, Geologiska institutionen). Hämtad från <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=5275866&fileId=5275868>
- Fransson, Å., Gustafson, G., Hernqvist, L. & Kvartsberg, S. (2012). A swedish grouting design concept: Decision method for hard rock tunneling (GSP, 228). Geotechnical special publication. Hämtad från <https://research.chalmers.se/publication/176238>
- Funehag, J. (2008). Injektering av TASS-tunneln: Delresultat t o m september 2008 (SKB rapport, R-08-123). SKB. Hämtad från https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/065/40065302.pdf?r=1&r=1
- Gustafson, G. (2009). Hydrogeologi för bergbyggare. Stockholm: Formas.
- Humboldt. (2019). Mud Balance. Hämtad från <https://www.humboldtmfg.com/mud-balance.html>
- Kvartsberg, S. (2013) On the use of engineering geological information in rock grouting design (Befo rapport, 125). Befo. Hämtad från http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/284/BeFo_report_125_skyddad.pdf
- Naturhistoriska riksmuseet. (2017). Bergarterna och bergartscykeln. Hämtad från <https://www.nrm.se/faktaomnaturenochrymden/geologi/bergarterochmalmer/bergarternaochbergartscykeln.1606.html>
- Pumpportalen. (2019). Vätskors viskositet och dess inverkan på pumpar: Definition av viskositet. Hämtad från <https://www.pumpportalen.se/pumphandboken/10-2-viskositet/>
- Sika. (2012). Sika iSystem. Hämtad från <https://swe.sika.com/content/sweden/main/sv/group/Nyheter/mall6.html>
- Sika. (2015). Injektering: Sika iSystem [Produktblad]. Stockholm: Sika. Hämtad från https://swe.sika.com/dms/getdocument.get/92e1fe37-b5f3-33c1-98af-c478ea95be7c/Sika%20iSystem%20A3_SE%20LOW%20RES.pdf
- Sika Sverige AB. (2016). Vi är Sika. Hämtad från https://swe.sika.com/dms/getdocument.get/313294bb-d96f-3a0d-b81d-525ff8c17d37/Vi%20%C3%A4r%20Sika_LOW%20RES.pdf
- Spross, J. (2011). Observationsmetodens tillämpning på inläckande grundvatten i bergtunnlar: Fallstudie: Norra länken i Stockholm (Examensarbete, Kungliga tekniska högskolan, avdelningen för jord- och bergmekanik). Hämtad från

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:464806/FULLTEXT01.pdf>

Stille, B. & Vuorinen, J. (2010). Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden (SBUF-projekt 12117). SBUF. Hämtad från <http://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/e78b8a43-6b41-4b21-8346-c03bb23dc517/FinalReport/SBUF%2012117%20Slutrapport%20Utv%C3%A4rdering%20av%20injekteringsbruks%20egenskaper%20%C3%B6ver%20tiden%20-%20slutgiltig%20.pdf>

Stille, H. (2015). Rock grouting: Theories and applications. Hämtad från <https://www.vulkanmedia.se/butik/bocker/naturvetenskap/rock-grouting-theories-and-applications-av-hakan-stille/>

Swerock. (2019). Peab och SSAB tar gemensamt steg mot klimatförbättrad betong. Hämtad från <https://swerock.se/om-oss/i-fokus/peab-och-ssab-tar-gemensamt-steg-mot-klimatforbatttrad-betong/>

10 Bilagor

10.1 Bilaga A



Bilaga A: Referenspressen och Sikapressen i delar. Författarnas egen bild.

10.2 Bilaga B

Bruksammansättning													
Testserie	1				2				3				4
Blandning	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Cement	Inj30	Inj30	Inj30	Inj30	Inj30	Inj30	cement 1	cement 1	cement 2	cement 2	Inj30		
Vct	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8		
Dispergeringsmedel [% bwoc]		0,3		0,3		0,3		0,3		0,3	0,3		
Accelerator [% bwoc]			4	4	4	4							
Densitet													
Densitet [kg/m ³]	1620	1600	1610	1600			1600	1620	1660	1600			
Volym bruk som passerar filtren													
Filterpump													
Filter 45 µm [ml]	5	4	3	3			3	3	2	2			
Filter 63 µm [ml]	35	40	25	35			20	25	10	15			
Filter 75 µm [ml]	270	300	300	300			50	50	10	20			
Filter 90 µm [ml]	300	300	300	300			220	80	90	100			
Filter 100 µm [ml]	300	300	300	300			300	300	220	300	280		
Filter 120 µm [ml]	300	300	300	300			300	300	300	300			
b _{min} [µm]	<45	<45	<45	<45			<45	<45	<45	<45			
b _{kritisk} [µm]	≤90	≤75	≤75	≤75			<100	<100	<120	<120			
Referenspress													
Filter 45 µm [ml]											5		
Filter 63 µm [ml]	5	40	40	80	40	80	10	5			70		
Filter 75 µm [ml]	300	550	570	680	600	680	70	40	10	5			
Filter 90 µm [ml]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	210	160	100	60	700		
Filter 100 µm [ml]							440	310	280	310	820		
Filter 120 µm [ml]							780	490	500	800			
b _{min} [µm]	<63	<63	<63	<63			<63	<63	<75	<75			
b _{kritisk} [µm]	≤90	≤90	≤90	≤90			>120	>120	>120	>120			
Sikapress													
Filter 45 µm [ml]		10									2		
Filter 63 µm [ml]	10	100	10	100	50	100	10				80		
Filter 75 µm [ml]	350	550	550	600	570	650	50	40	10	10	340		
Filter 90 µm [ml]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	250	200	90	110	720		
Filter 100 µm [ml]							450	340	230	280	1000		
Filter 120 µm [ml]							750	580	630	820			
b _{min} [µm]	<63	<63	<63	<63			<63	<63	<75	<75			
b _{kritisk} [µm]	≤90	≤90	≤90	≤90			>120	>120	>120	>120			
Reologi													
Viskositet [mPa*s]	37,6	8,6	66,1	8,8			33,5	5,3	48,9	4,8	9,35		
Flytgräns [Pa]	5,1	0,7	5,3	2			2,5	0,3	4,5	0,1	1,06		
Vattenseparation													
Vattenseparation [%]	4	4	0	0			10	10	1	1			

Bilaga B: Sammanställning över alla brukens egenskaper och resultat.